

中国工程科技论坛

# 内燃机节能减排技术发展战略

Neiranji Jieneng Jianpai Jishu Fazhan Zhanlue

高等教育出版社·北京

## 内容简介

本书是中国工程院“中国工程科技论坛”系列丛书之一。书中汇聚了我国内燃机和机械制造领域十余名专家、学者以内燃机节能减排为主题的最新学术研究成果报告,内容包括内燃机节能减排现状和存在问题、内燃机热效率提高潜力及途径、车用发动机节能技术路线、石油燃料及替代燃料燃烧技术、内燃机绿色制造、内燃机精密制造技术等。报告成果是内燃机领域众多专家学者研讨的结果,代表着相关领域的最高学术水平。

本书将为各高校、研究院所及企业技术研发中心的中、高级技术人员的学术研究提供导向参考作用,特别将有助于相关学科的博士、硕士研究生及本科生学术方向的选择与把握。知名专家展示的前沿学术研究成果将成为引领行业进步的源动力,为内燃机行业技术进步和转型升级发挥积极的推动作用。

## 图书在版编目(CIP)数据

内燃机节能减排技术发展战略 / 中国工程院编著.  
— 北京:高等教育出版社,2014.11  
中国工程科技论坛  
ISBN 978-7-04-041257-4

I. ①内… II. ①中… III. ①内燃机-节能-技术发展-发展战略-中国 IV. ①TK407

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第244038号

### 总策划 樊代明

策划编辑 王国祥 黄慧靖 责任编辑 黄慧靖 张冉  
封面设计 顾斌 责任印制

---

出版发行	高等教育出版社	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
社 址	北京市西城区德外大街4号		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
邮政编码	100120	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
印 刷			<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
开 本	787 mm × 1092 mm 1/16	版 次	2014年11月第1版
印 张		印 次	2014年11月第1次印刷
字 数	千字	定 价	60.00元
购书热线	010-58581118		
咨询电话	400-810-0598		

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 41257-00

# 编辑委员会

主 任：黄其励 倪维斗 苏万华

顾问委员(按姓氏笔画排序)：

林忠钦 金东寒 闻雪友 秦裕琨 徐大懋

翁史烈 郭孔辉 郭东明 蒋洪德

委 员(按姓氏笔画排序)：

王建昕 邢 敏 尧命发 刘福水 阳树毅

佟德辉 姚春德 贾 堤 黄 震 黄佐华

秘 书：裴毅强

# 目 录

## 第一部分 综述

综述 .....	3
----------	---

## 第二部分 致辞

提高能效 降低排放 重视替代燃料 促进产业发展 .....	谢克昌	9
-------------------------------	-----	---

## 第三部分 主题报告及报告人简介

内燃机工业节能减排的现状、问题和建议 .....	邢 敏	15
内燃机热效率潜力及提高途径探索 .....	尧命发	29
车用汽油机热效率潜力及提高途径探索 .....	刘敬平	44
柴油机热效率潜力及提高途径探索 .....	刘忠长	75
车用发动机节能路线 .....	李 康	106
内燃机石油燃料及替代燃料和基于燃料特性的燃烧技术 .....	黄 震	119
内燃机的绿色制造发展战略思考 .....	佟德辉	154
发动机精密制造 2 $\mu\text{m}$ 工程 .....	林忠钦	174

## 第四部分 论坛研究报告

提高我国内燃机节能减排技术创新能力的建议 .....	苏万华 倪维斗 秦裕琨 黄其励	199
----------------------------	-----------------	-----

附录 主要参会人员名单 .....	205
-------------------	-----

后记 .....	211
----------	-----

# 第一部分

## 综 述

## 综 述

2013年9月27日,第168场中国工程科技论坛“内燃机节能减排技术发展策略”在天津举行。本次论坛由中国工程院主办,中国工程院能源与矿业工程学部、天津大学、中国内燃机工业协会、中国内燃机学会联合承办。论坛就我国内燃机节能减排、热效率提升、技术创新、绿色制造以及石油燃料及替代展开高层次的研讨。

中国工程院副院长谢克昌院士与天津大学李家俊校长出席论坛并致辞。中国核工业集团公司核工业理化工程研究院科技委主任陈念念,中国石化股份公司总工程师曹湘洪,上海交通大学常务副校长林忠钦,哈尔滨工业大学秦裕琨,中国船舶重工集团第七〇三研究所闻雪友,天津大学叶声华、余贻鑫等中国工程院院士,中国工程院一局副巡视员杨丽,中国内燃机协会常务副会长、秘书长邢敏,中国内燃机学会副理事长、秘书长阳树毅,上海交通大学副校长黄震,潍柴动力股份有限公司副总裁佟德辉,中国一汽技术中心副总工程师李康,长安汽车工程研究院副院长、动力研究院院长詹樟松,广西玉柴机器股份有限公司工程研究院副院长林铁坚,中国船舶重工集团公司第七一一研究所副所长冯明志,绿能控股集团董事长张孔明以及来自企业和高校的技术人员、在校研究生200余人参加了论坛。大会主席、中国工程院院士、天津大学教授苏万华主持开幕式。邢敏、尧命发、李康、黄震、佟德辉、金隼等分别作了大会报告。

谢克昌院士在致辞中指出:能源是经济增长、社会发展的基本驱动力,能源安全是国民经济发展的命脉。内燃机是国民经济建设和国防安全中最关键的动力装备,在国民经济发展和国防安全中具有举足轻重的地位。加快推进内燃机工业节能减排,对于保障我国能源安全、保护生态环境和应对气候变化具有重大现实意义,也是贯彻落实十八大精神的重要战略举措。他表示希望与会院士专家围绕“内燃机节能减排、绿色制造、技术创新、热效率提升以及石油燃料及替代”的论坛主题,通过深入交流和研讨,为内燃机节能减排技术取得进一步突破做出贡献。

李家俊校长在致辞中介绍了天津大学与中国工程院合作的主要成果和天津大学内燃机专业的发展历程。他表示,天津市重工业的比重较大,内燃机工业是重工业的重要一环。希望来自内燃机领域的学术界、产业界和社会各界的专家学者围绕内燃机节能减排技术中的重大问题,深入交流研讨,推动创新成果工程

化、产业化,为天津的科学发展、建设“美丽天津”做出新的更大的贡献。

中国内燃机协会常务副会长、秘书长邢敏作了题为“内燃机工业节能减排的现状、问题和建议”的报告。报告结合内燃机工业节能减排的现状和问题,提出解决提升内燃机能效水平共性关键问题、降低内燃机产品从生产到终端使用全过程能源资源消耗、推动替代能源内燃机产品发展、完善内燃机产业相关政策法规四个方面的发展建议。

天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室主任尧命发教授作了题为“内燃机热效率潜力及提高途径探索”的报告。报告从内燃机热效率现状、国外关于内燃机热效率潜力探讨、国内外提高内燃机热效率创新研究进展出发,提出内燃机仍有很大的节能潜力,提高热效率、降低燃油消耗已成为新一轮内燃机技术国际竞赛的发展方向,是先进内燃机技术研究的重点。在内燃机结构不作大的变化条件下,内燃机有效热效率突破 60% 是内燃机节能技术发展的目标。我国要进一步营造有利于创新的氛围,通过政府政策支持和产学研合作,进一步提升创新能力,将创新技术转化为产业技术,尽快将我国内燃机产品达到国际内燃机节能产品的水平。

中国一汽技术中心副总工程师李康博士作了题为“车用发动机节能路线”的报告,报告从商用车节能的角度出发,对发动机节能技术、高效燃烧技术、氮氧化物排放控制、低温燃烧、排气能量回收、重型商用车使用工况、牵引车细分市场使用工况特征进行了分析,介绍了一汽整车节能技术路线。

上海交通大学副校长、动力机械与工程教育部重点实验室主任黄震教授作了题为“内燃机石油燃料及替代燃料和基于燃料特性的燃烧技术”的报告。报告对天然气、生物柴油、燃料乙醇、醇醚燃料、甲醇、二甲醚、煤制油等代用燃料的原料来料、工业制备、相关发动机研制及应用前景进行了深入分析,提出在我国石油对外依存度高达 58% 的严峻形势下,发展替代燃料对于保证我国能源安全的重要性。根据我国能源资源分布不均、地区差异明显的特点,要因地制宜,多元发展,对替代燃料要从全生命周期角度全面评价其能耗、环境等因素影响。

潍柴动力股份有限公司副总裁佟德辉博士作了题为“内燃机的绿色制造发展战略思考”的报告。从内燃机的绿色制造发展战略角度对内燃机制造和再制造过程进行了能耗、废砂、废气、废液排放的分析。报告指出,从综合数据来看,我国内燃机制造过程中消耗的能量是工业发达国家的 2 倍左右,铸造环节产生的废气是工业发达国家的 3 ~ 5 倍。要实现内燃机绿色制造,必须解决轻量化、热加工、机械加工、整机测试、再制造等各环节的关键技术。

上海交通大学金隼教授代表林忠钦院士作了题为“发动机精密制造 2  $\mu\text{m}$  工程”的报告。报告指出,发动机制造精度对产品服役性能具有至关重要影响。

“2  $\mu\text{m}$  工程”针对发动机自主开发的重大需求,探索微米级尺度下零件制造精度与产品使用性能之间映射规律的基础科学问题,掌握公差设计、工艺装备、精密测量、质量控制、生产线布局等核心技术,构建以“高精度、高效率、低成本”为特色的新一代发动机精密制造技术体系与方法,在汽车发动机产品开发中初步验证了研究的可行性和有效性。2  $\mu\text{m}$  工程通过具有国际先进水平的新一代发动机制造工艺和装备研发,提升大批量制造产品质量、降低制造成本。

在论坛报告交流过程中,会场气氛热烈,学术氛围浓郁。院士、专家们围绕主题,结合论坛报告积极踊跃发言、提问。对我国内燃机节能减排、技术创新战略与方向进行了深入交流和探讨。经过研讨,与会院士、专家对建立内燃机节能减排的基础研究、先进技术研究和产品开发的多层面协同创新机制达成了共识,并表示将积极为内燃机产业的发展贡献力量。

## 第二部分

致 辞

# 提高能效 降低排放 重视替代燃料 促进产业发展

谢克昌

中国工程院

各位院士、专家、同志们：

大家上午好！

由中国工程院主办的第 168 场中国工程科技论坛——“内燃机节能减排技术发展战略”，今天在天津隆重举办。受中国工程院周济院长委托，我谨代表中国工程院对本次论坛的成功召开表示热烈祝贺，对参加本次论坛的各位领导、院士、专家表示热烈的欢迎，对天津大学、中国内燃机工业协会、中国内燃机学会等承办单位的大力支持表示衷心的感谢！

能源是经济增长、社会发展的基本驱动力，是人类赖以生存的物质基础，能源安全是国民经济发展的命脉。党的十八大报告明确提出，要推动能源生产和消费革命，确保国家能源安全。内燃机是国民经济建设和国防安全中最关键的动力装备，在国民经济发展和国防安全中具有举足轻重的地位。2012 年，我国石油消费 4.76 亿 t，其中，进口 2.71 亿 t，对外依存度近 57%；2011 年，我国仅机动车就排放颗粒物 62.1 万 t，氮氧化合物 637.5 万 t，碳氢化合物 441.3 万 t。加快推进内燃机工业节能减排，对于保障我国能源安全、保护生态环境和应对气候变化具有重大现实意义，也是贯彻落实党的十八大精神的重要战略举措。

中国工程院是我国工程科技界最高荣誉性、咨询性学术机构，是国家工程科技思想库，组织院士开展战略咨询、学术引领、科技服务和人才培养是发挥思想库作用的重要途径。中国工程科技论坛自 2000 年创办以来，吸引了一大批院士、专家参加论坛进行学术交流。经过 10 多年的努力，该论坛已成为我国工程技术领域重要的交流平台，在引领我国工程技术发展方向，培养工程科技人才，服务国计民生建设等方面发挥了巨大作用。中国工程院与天津市较早地签署了院地战略合作协议，双方开展了大量紧密务实、卓有成效的合作，取得了一系列重要成果，并成功主办了“核能发展的再研究”等多场中国工程科技论坛。

近年来，天津市各项事业取得巨大成就，逐步建立了符合天津实际的科技创

新体系,促进了产业结构优化升级,正在走上创新驱动、内生增长的发展轨道。在全国深入开展党的群众路线教育实践活动之际,我们组织院士、专家再一次齐聚天津开展学术交流,既“接地气”,也“引方向”。今后,我院将进一步深化双方科技合作,为天津的科学发展、建设“美丽天津”做出新的更大的贡献。

2013年2月17日,国务院办公厅发布了《关于加强内燃机工业节能减排的意见》,对整个内燃机行业提出节能减排要求,对能耗及废弃物排放提出明确标准:到2015年,节能型内燃机产品要占到总保有量的60%,与2010年相比,燃油消耗率降低6%~10%,实现节约商品燃油2000万t;减少CO<sub>2</sub>排放6200万t,减少NO<sub>x</sub>排放10%,采用替代燃料节约商品燃油1500万t。该意见还对乘运车用发动机、各类汽油机和柴油机等重点领域提出具体任务,部署了六大重点工程,提出了5项政策措施。2013年9月10日国务院发布的《大气污染防治行动计划》中,提出“加强机动车环保管理”、“加快推进低速汽车升级换代”都与内燃机的节能减排密切相关。中国工程院非常重视我国内燃机工业的发展,先后开展了一系列以内燃机为对象的战略咨询项目研究和学术交流活动,为我国内燃机行业发展向国家提供了科学决策依据。中国工程院主办这次论坛将进一步为贯彻国家《关于加强内燃机工业节能减排的意见》和《大气污染防治行动计划》提供正能量。由著名学者史绍熙于1952年创建的天津大学内燃机专业,历经60余年的建设与发展,教学、科研硕果累累,培养人才成千上万,拥有我国内燃机行业唯一的国家重点实验室,在节能、清洁、智能化内燃机新技术、内燃机新能源的研发上具有很高水平。由天津大学和中国工程院能源与矿业工程学部及中国内燃机工业协会、中国内燃机学会共同承办的本次论坛以“内燃机节能减排、绿色制造、技术创新、热效率提升以及石油燃料与替代”为主题,采取“产、学、研、用”相结合的学术交流模式,拟在我国内燃机节能减排、技术创新战略与方向上进行深入交流和探讨,必将促进具有指导意义的提高内燃机热效率总体技术路线的形成,必将推动内燃机节能减排的基础研究、先进技术和产品研发的多层面协同创新,必将对压燃式内燃机高压燃油喷射系统和点燃式内燃机缸内直喷燃油系统的开发,内燃机高效增压系统、节能节材型小缸径多缸柴油机、替代燃料内燃机的应用以及船舶柴油机能量综合利用的示范工程产生重要的推进作用。

我本人对内燃机知之甚少,但对其燃料略知一二。近来我在考虑两个问题。一是内燃机新技术对大气污染治理的作用。有研究表明,机动车尾气的排放物是北京地区PM<sub>2.5</sub>的最大来源,占22%,此外还排放了全市58%的氮氧化物和40%的挥发性有机物。显然,油品质量是影响机动车尾气排放的重要因素。但这是在北京油品质量已升级至第五阶段后的数据。与使用油品质量差不多,但机动车保有量远比北京(520万辆)多的伦敦(700万辆)、纽约(800万辆)相比,

北京的 PM2.5 数值竟是后两者的 18 ~ 60 倍。除油品质量外,车用内燃机是否也是关键因素?显然是,因为内燃机尾气排放水平是内燃机技术水平的重要标志。苏万华院士团队发明的“高混合率燃烧技术”、根据“柴油机混合率与化学反应率协同控制理论”开发的相关工程化技术就是佐证。同时这也说明,内燃机燃烧学基础研究的至关重要性。

另一个问题是关于替代燃料的推广应用。我国石油的对外依存度已近 60%,从国家能源安全战略考虑,应高度重视甲醇燃料的推广。甲醇是低碳燃料,分子中只含 1 个 C 原子,而汽油分子是 6 ~ 11 个 C 原子,柴油分子是 12 ~ 16 个 C 原子,因此甲醇的  $\text{CO}_x$ 、 $\text{CH}_x$  排放少;甲醇分子中氧占 50%,而汽柴油分子中不含氧,因此,汽柴油排放的  $\text{NO}_x$  远多于甲醇。还有研究表明,使用 M85 以上甲醇燃料替代汽柴油,PM2.5 还可减少 72% ~ 83%。史绍熙院士早在 1980 年就在我国首先进行了柴油机燃用甲醇的研究,1988 年在 492Q 型汽油机上进行了燃用 M100 的研究并使热效率比原机大大提高。开发推广先进的汽油/甲醇双燃料点燃式内燃机、柴油/甲醇双燃料压燃式内燃机以及纯替代燃料内燃机必将大大促进替代燃料在我国的推广应用。上面这两个问题,也算是针对本次论坛主题的一个简短发言,仅供参考,请诸位专家批评指正。

希望各位院士、专家在论坛中充分交流,激发思想的火花,引领学术发展的方向。预祝本次工程科技论坛取得圆满成功!

## 第三部分

主题报告及报告人简介

# 内燃机工业节能减排的现状、问题和建议

邢 敏 等

中国内燃机工业协会

**摘要:**内燃机是国民经济建设和国防安全中最关键的动力装备,在国民经济发展和国防安全中具有举足轻重的地位。内燃机将燃料的化学能通过燃烧转化为动力,因此能源供应是内燃机的命脉。伴随着经济社会的迅猛发展过程中,由于人类过分追求发展所带来的满足和发展的速度而忽视或淡薄了其所带来的负面效应,导致气候变化恶劣,资源减少,给人类生活带来严重影响。

**关键词:**内燃机;节能减排;能源;资源减少;气候恶劣

“内燃机是交通运输、工程机械、农业机械、渔业船舶、国防装备的主导动力设备,内燃机工业是重要的基础产业。”<sup>①</sup>我国已成为世界内燃机制造大国。内燃机产品的广泛应用和制造产业的持续发展,对保障国家安全和国民经济健康运行至关重要。

内燃机使用量大、范围广、热效率高,是目前人类所能掌握的热效率最高的移动动力机械。内燃机发展面临节能、减排的巨大挑战。能源消耗方面,2012年,我国石油进口依存度达57%,而内燃机石油消耗约占全国总消耗量的2/3,是名副其实的用油大户;环保方面,内燃机废气污染占我国绝大多数城市非供暖季大气污染的50%以上,是城市最主要的大气污染源。“为保障能源安全,实现可持续发展,我国内燃机必须从传统产业跨入到高新技术产业,从资源消耗型向环保节约型转变。”

从能源发展趋势和国内外内燃机市场需求看:未来几十年,以化石能源为燃料的内燃机仍然是各种机械装备的主导动力;控制燃油消耗和二氧化碳排放及其他污染物排放已成为全球内燃机产业发展的重要趋势,成为全球内燃机产业应对气候变化、保障能源安全的国际共识,实现向能源节约型增长方式的转变已成为当务之急!

<sup>①</sup> 中华人民共和国国务院办公厅. 关于加强内燃机工业节能减排的意见. 2013.

## 一、中国内燃机工业现状

2012年内燃机工业总产值为3700亿元,产品产量为7700万台,总功率为15亿kW,已成为世界内燃机制造大国。截至2012年12月底,我国内燃机产品社会保有量为3亿台<sup>①</sup>。内燃机是各种机械产品的动力源。2012年,我国以乘用车、商用车为主导的车用动力占世界31%,工程机械(推土机、挖掘机、装载机、叉车等)占世界40%,农业机械(拖拉机、联合收获/收割机等)占世界47%,小型通用机占世界40%,摩托车占世界31%。我国成为内燃机制造大国后,通过深层次的改革和调整,已开始进入量的发展转向质的提升阶段。产业结构调整、产品更新换代取得进展。经过调整,企业优化资源配置产业集中度大大提高,同时,产业结构、市场结构、自主品牌均发生了实质性变化。

1) 全行业以国家出台实施的各类节能减排法规为目标,结合国外先进技术自主研发开发了一大批为汽车、摩托车、工程机械、农业机械、船舶、铁道内燃机车、内燃发电设备、石油钻机和国防装备等配套的新一代先进发动机产品。

2) 围绕节能减排,产品调整成果显著。进入21世纪后,内燃机行业进入自主创新发展时期,这是新产品和新技术开发方面最好的时期;以我为主、引进消化吸收再创新和集成创新正在成为内燃机工业技术创新的主流,以关键总成的技术进步、自主开发经营为主导形式。

在轿车发动机领域,技术开发以引进消化吸收再创新为主,轿车发动机领域的自主品牌产品占总量的30%,在商用车柴油机领域,已形成以我为主、集成创新的主导开发模式,根据整车比例,自主品牌柴油机市场份额已占国内市场的80%以上。

3) 中国内燃机工业在不断扩大市场规模的同时,加快了在技术和环保法规方面与国际接轨的进程。

4) 产学研结合的科技创新体系不断完善。全行业重点企业已建成基本覆盖内燃机工业主要行业 and 重点产品领域、布局合理的国家级工程(技术)研究中心和重点(工程)实验室。内燃机产业技术创新战略联盟,充分发挥科技进步引导作用。形成了以企业为中心、引导行业创新的主体力量,为继承相关科技资源,引导创新要素向企业聚集,支持企业提高自主创新能力,增强产业核心竞争力搭建平台。

5) 推进内燃机工业标准体系建设。内燃机行业现行技术标准共计324项,其中国家标准111项,行业标准213项,初步建立科学合理的内燃机标准体系,

<sup>①</sup> 中国内燃机工业协会. 2012年中国内燃机工业发展报告. 2013.

推动内燃机行业节能减排可持续发展<sup>①</sup>。我国企业拥有国家级技术中心的 15 家,占比 23%;拥有省级技术中心的 24 家,占比 37%;拥有市级技术中心的 8 家,占比 12%;拥有企业级技术中心的 14 家,占比 22%。

其中,拥有国家级技术中心的企业,66.67% 拥有国家级驰名商标,13.33% 拥有省级驰名商标;拥有省级技术中心的企业,33.33% 拥有国家级驰名商标,58.33% 拥有省级驰名商标;拥有市级技术中心的企业,12.5% 拥有国家级驰名商标,25% 拥有省级驰名商标,50% 拥有市级驰名商标<sup>②</sup>;企业拥有技术中心的情况与其品牌的影响力有一定的相关性,技术中心级别越高,技术投入越多,品牌影响力越大。

## 二、内燃机工业节能减排的现状

我国围绕节能减排,积极开展内燃机的各种基础研究和应用技术研究,促使内燃机技术达到了一个新的水平。高性能、低消耗、少污染的机型不断开发出来,投向市场。稀燃技术、快速燃烧系统、分层进气系统、隔热发动机、新型增压技术的研究逐步得到应用。新材料、代用燃料、高性能润滑油的研究也广泛开展,并取得了引人瞩目的成绩。新的设计思想、新的制造技术、先进的实验手段的产生和应用,使内燃机面目一新。特别是电子技术、信息技术在内燃机上的应用,将使得内燃机进入一个全新的时代。内燃机电控化使它的运行参数保持最佳值,使内燃机功率、消耗、排放得到了最佳平衡,使内燃机工业处在一个新技术发展高潮之中。

### 1. 满足国民经济需求

由于内燃机行业量大面广,决定了内燃机节能减排在我国节约资源能源、保护环境过程中的重要作用。

内燃机制造业是先进技术的载体,内燃机的节能减排是一个复杂系统工程,其实施将有利于推进相关制造业由资源密集型向技术密集型转变,促进产业结构调整,提高我国制造业总体国际竞争力。

### 2. 确保国家能源安全需要

内燃机将燃料的化学能通过燃烧转化为动力,因此能源供应是内燃机的命脉。石油资源是内燃机行业赖以生存和发展的基础,对内燃机行业发展起着举足轻重的作用。内燃机是我国石油消耗的最大主体,同时也是节能减排的最大主体。2012 年,我国消耗商品燃油 2.7 亿 t,其中汽油 7738 万 t,柴油 16 717 万 t,

① 中国内燃机工业协会. 2013 年中国内燃机协会工作总结. 2013.

② 中国内燃机工业协会. 内燃机及零部件行业排头兵企业的调查. 2013.

还有润滑油、燃料油,共占我国石油消费总量的 59.27%,超过全年进口石油总量。

### 3. 保护环境,应对气候变化

我国二氧化碳排放量已经跃居世界前列。2011年,全国机动车保有量达到约 2.08 亿辆。尾气排放已成为我国空气污染的主要来源,是造成灰霾、光化学烟雾污染的重要原因。中国 1/5 城市空气污染严重,机动车排放是主因。为减少空气污染、应对气候变化,各级政府重视节能减排。

2011年,全国机动车排放污染物 4607.9 万 t,比 2010 年增加 3.5%,其中,一氧化碳 3467.1 万 t,氮氧化物 637.5 万 t,碳氢化合物 441.3 万 t,颗粒物 62.1 万 t。汽车是污染物总量的主要贡献者,其排放的氮氧化物和颗粒物超过 90%,碳氢化合物和一氧化碳超过 70%。

2012年,按排放标准分类,全国汽车达到国Ⅳ及以上标准的汽车占汽车总保有量的 5.7%,达国Ⅲ标准的汽车占 48.0%,达国Ⅱ标准的汽车占 19.8%,达国Ⅰ标准的汽车占 17.0%,其余 9.5% 的汽车还达不到国Ⅰ标准。按环保标志分类,“绿标车”占 83.6%,高排放的“黄标车”仍占 16.4%。图 1 所示为 2012 年我国机动车污染物排放情况,图 2 所示为 2012 年我国分部门人均二氧化碳排放情况<sup>①</sup>。

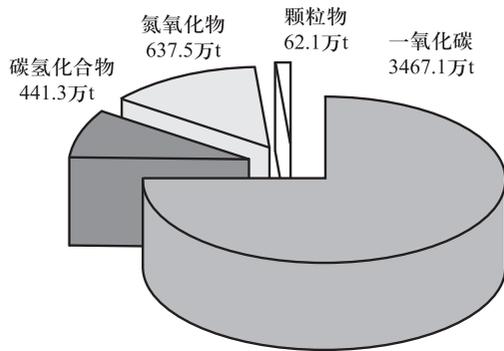


图 1 2012 年我国机动车污染物排放情况

### 4. 国家政策要求

国家法规政策:《中华人民共和国节约能源法》;国务院《“十一五”节能减排综合性工作方案》和《“十二五”节能减排综合性工作方案》;国家发展和改革委员会《节能中长期专项规划》;国务院《节能与新能源汽车产业发展规划(2012—

<sup>①</sup> 中华人民共和国环境保护部. 2012 年我国机动车污染物排放情况. 2013.

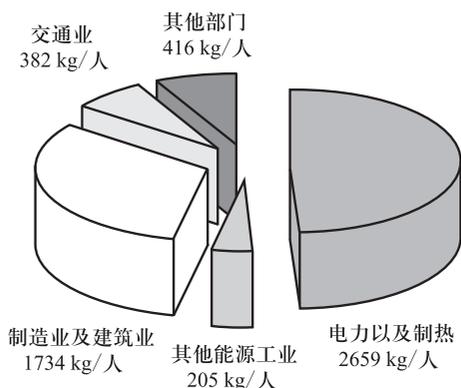


图2 2012年我国分部门人均二氧化碳排放情况

2020年)》;国务院办公厅《关于加强内燃机工业节能减排的意见》;工业和信息化部《中国内燃机工业“十二五”发展规划》;国务院《大气污染防治行动计划》。

《重点区域大气污染防治“十二五”规划》中关于开展非道路移动源污染防治中提到:推进非道路移动机械和船舶的排放控制。2013年,实施国家第Ⅲ阶段非道路移动机械排放标准和国家第Ⅰ阶段船用发动机排放标准。在《国家环境保护标准“十二五”规划》中,提出:

1) 以氮氧化物、颗粒物和挥发性有机污染物排放控制为重点,提高机动车新车排放控制要求,建立健全非道路机械、船舶、铁路机车排放标准,研究建立有毒有害污染物和温室气体排放控制标准的可行性;

2) 完善在用机动车、非道路机械排放标准和监督管理技术规范,研究建立重型柴油车、非道路移动机械车载测量排放标准,加强在用车和发动机符合性的监督管理;

3) 加强国际机动车排放技术法规协调,积极跟踪和参与机动车、非道路移动机械、燃油等技术法规制订,推进机动车排放标准与国际接轨。

### 三、内燃机工业节能减排的问题

当前我国内燃机产品的动力性、经济性、环保性等主要指标与国际先进水平差距较大,具有国际品牌和国际竞争力的制造企业较少,在用的道路车辆及工程机械、农业机械、船舶和固定机械配套动力,还存在一大批低水平、高耗能产品,面对我国当前严峻的节能减排形势,加快推进内燃机工业节能减排,提高内燃机燃油效率和减少二氧化碳排放,对于加快内燃机工业产业升级、保障我国能源安全和应对气候变化意义重大。

我国产品平均油耗和排放与国外相比有明显差距,当前我国内燃机产品节

能减排工作还存在着一些突出的问题,表现在以下几个方面。

### 1. 内燃机综合能效水平较低

我国内燃机产品综合能效与国际先进水平相差 10% ~ 20%, 车用汽油及燃油消耗相差 10% ~ 20%, 排放水平相差两个等级;非道路移动机械用多缸柴油机燃油消耗相差 10% ~ 15%, 排放水平相差三个等级;船用柴油机综合能效相差 5%, 排放水平相差两个等级。内燃机柴油机燃油消耗相差 30%, 排放水平相差三个等级。内燃机产品节能共性关键技术缺失,关键零部件基础薄弱,制约内燃机高效低排的高压共轨、增压、电子控制等相关技术完全依赖进口,核心技术受制于人,有效提高机械效率的低摩擦技术尚处于起步阶段。我国具有国际品牌和综合竞争实力的内燃机企业较少,具有国际知名度的潍柴动力股份有限公司也与美国康明斯公司存在较大差距。

### 2. 先进内燃机节能产品比例较低,高耗能落后产品还占有相当大的比例

在乘用车用汽油机方面,低燃油消耗的产品仅占市场保有量的 3% 左右。在商用车用柴油机方面,绝大部分产品未能采用高压燃油喷射系统、增压系统,只是燃油消耗率普遍偏高,轻型商用车用柴油机的这一问题尤为突出。在工程机械和农业机械用柴油机方面,90% 以上属于能耗高、排放高的“两高”产品,特别是支撑农业生产和市政工程建设单缸柴油机,因其高耗能、高排放和高耗材,已被列入我国产业结构限制类产品,然而由于缺少先进产品替代,只能依赖这些高耗能产品支撑。

### 3. 替代燃料内燃机产品发展正处于起步阶段

我国化石能源紧缺,难以支撑内燃机工业未来的可持续发展。实质性地开展内燃机燃用替代燃料的应用技术研发,为动力燃料多元化做好技术储备,抢占制高点,是具有现实和长远意义的战略举措。国内外开展内燃机燃用天然气、生物柴油和醇醚燃料的研究和应用工作已有数十年的历史,我国在这一领域处于起步阶段,除天然气(LPG、CNG)在乘用车、中重型商用车发动机得到规模应用外,其他替代燃料内燃机产品和应用基本属于空白,替代汽油和柴油的甲醇燃料发动机产品种类少、技术水平低,目前仅在乘用车和商用车上开展试点应用示范。生物柴油发动机尚处于探索阶段,替代柴油的液化天然气(LNG)发动机在中重型商用车上处于小规模应用,在船舶上正处于试制阶段。

### 4. 内燃机绿色制造和再制造基础薄弱,技术水平落后

在内燃机绿色制造方面,先进加工工艺和技术、降低制备过程能源消耗、提高材料利用率、生产自动化等方面与国外先进水平相比存在阶段性差距。与国际上相比,我国内燃机再制造产业属于初期发展阶段,目前仅在汽车、工程机械用发动机方面开展了初步工作,农业机械、固定动力装置、铁路机车和船用柴油

机等方面尚处于空白,同时超声波清洗、探伤、表面处理、光整等再制造特殊工艺技术基本处于缺失状态,内燃机产品回收环节缺乏管理规范。

#### 5. 内燃机产业政策有待进一步健全

内燃机节能减排技术标准体系不健全,燃油消耗量综合评价标准缺失。内燃机制造企业准入条件、抑制行业低水平投资盲目扩张的产业准入政策尚未出台。机动车及发动机环保形式核准制度、高耗能落后产品淘汰制度还需进一步完善。

#### 6. 核心技术创新研发能力上的差距

与国外企业相比,我国制造业在产品研发体系不完善,缺失产品核心技术创新研发这一环节,需要弥补。企业没有掌握产品核心技术研发,产品设计开发依靠合资外方或咨询公司提供的图纸,基本掌握生产制造装配工艺。

#### 7. 油耗排放高是由于缺乏节能减排核心技术

欧美制造商在日益严格的政府法规压力下,不得不努力开发节能减排核心技术,使内燃机的平均油耗和排放不断下降。国内企业在理解、掌握和发展内燃机产品节能减排核心技术方面同国外厂商有很大差距,使得国产内燃机的平均油耗和排放高于国外同类产品。国产内燃机的油耗和排放要达到国外水平,必须使国内制造商在理解、掌握和开发内燃机产品节能减排核心技术方面达到国外厂商的水平。

#### 8. 部分企业不重视研发节能减排核心技术

多年来,国内企业以较低的价格向国外购买(即外包设计)较旧的产品核心技术进行生产,或测绘仿制国外较旧的内燃机产品,就能满足国内较宽松的油耗排放法规。而自主研发产品节能减排核心技术要花更多的钱,并需承担一定风险。这种状况已持续很长时间,这种现象改变难度很大。

## 四、内燃机工业节能减排的发展趋势

从国际上来看,内燃机节能减排发展趋势呈以下几个显著特点。

1) 主要发达国家在积极开展新能源汽车的同时,仍把以化石能源为燃料的内燃机作为未来几十年各种机械装备的主导动力,是主要的投资产业。

2) 加大内燃机节能减排新技术和新产品的研发投入,提高内燃机产品全球市场竞争力。

3) 美国、欧盟、日本等发达国家和地区把控制内燃机燃油消耗和二氧化碳排放作为应对气候变化的重大举措。

美国在 2007 年年底通过新法案,在 2015 年前轿车平均燃油效率需提高 30%。欧盟也制定强制性法规,2012 年平均 CO<sub>2</sub> 排放为 130 g/km。我国轿车平均油耗达不到目前欧美油耗标准,即使是我国第三阶段油耗限值(草案)也大大

高于欧盟 2012 年的油耗限值,而欧盟在 2020 年和 2025 年油耗限值更为严格。

## 五、内燃机工业节能减排的发展建议

随着汽车、非道路移动机械和各种配套机械节能排放法规的实施,对内燃机的性能要求越来越高。内燃机整机和零部件产品市场竞争越来越激烈。我国内燃机企业积极贯彻国家节能减排方针战略,充分调动企业的社会责任心和科技、生产人员的积极性,在实施内燃机行业节能减排技术,提高产品的技术水平等方面取得了一定的成绩。

总体上,中国内燃机节能减排的技术开发成果能够及时应用于发动机和零部件产品,提升产品的技术性能水平,及时满足了法规升级和市场用户的需求。尤其是一批内燃机核心技术和关键技术自主开发的成果也能及时转化成产品,对内燃机节能产品的发展起到了积极的推动作用。

解决我国内燃机节能减排存在的主要问题,关键是要做好以下四个方面的任务,政府应做的事、企业应做的事与高校应做的事应重点突出、有分有合。

### 1. 着力解决提升内燃机能效水平共性关键问题

在汽油机方面,重点推广应用增压直喷技术,掌握燃烧和控制等核心技术,推动直喷燃油系统、增压器等关键零部件的开发。在柴油机方面,重点是推广应用电控高压燃油喷射系统、高效增压中冷系统、排气后处理系统,实现柴油及节能技术的产业化。在船用柴油机方面,重点推进动力系统余热回收利用技术,提高船舶柴油机能量的利用效率。力争到“十二五”末,使我国内燃机燃油消耗率总体水平比“十一五”末降低 6%~10%。

### 2. 着力降低内燃机产品从生产到终端使用全过程能源资源消耗

重点是抓好产品生产过程和使用过程的节能降耗,实现内燃机生产低能耗、节能节材的绿色制造。加快发展内燃机产品再制造,积极开展再制造技术研发,完善再制造工艺流程,建立健全失效产品回收、再制造、市场使用管理体系,培育一批内燃机再制造重点企业。

### 3. 着力推动替代能源内燃机产品发展

重点推广天然气单一燃料及双燃料燃烧技术在车船用发动机上的应用,汽油/甲醇燃料技术在乘用车用汽油机上的应用,以及柴油/甲醇燃烧技术在重载车用柴油机和双燃料技术在船用柴油机上的推广应用,解决燃料供应系统关键零部件系统的可靠性和耐腐蚀问题。

### 4. 着力完善政策法规

制定《内燃机产业准入管理条例》。出台内燃机制造企业准入条件,解决抑制产业低水平投资和盲目扩张重复建设的问题。制订淘汰落后产品制度,加大

对内燃机高耗能落后产品的淘汰力度。建立健全内燃机节能减排标准体系,制定内燃机节能产品技术标准、内燃机节能产品燃油消耗限值及其检测标准、替代燃料内燃机产品技术标准、内燃机再制造产品标准等。研究制订内燃机节能减排的激励和优惠政策。

中国内燃机发展应致力于节能减排,并不断提高产品附加值与国际竞争力。中国内燃机发展应致力于造就一个清洁、健康、安全、可持续发展的世界。中国内燃机发展应致力于满足中国和世界大多数人的需求。

国务院办公厅《关于加强内燃机工业节能减排的意见》中明确了节能减排的具体目标:到2015年,节能型内燃机产品占全社会内燃机产品保有量的60%,与2010年相比,内燃机燃油消耗率降低6%~10%,实现节约商品燃油2000万t,减少二氧化碳排放6200万t,减少氮氧化物排放10%,采用替代燃料节约商品燃油1500万t;培育一批汽车、工程机械用发动机等再制造重点企业;实现高效节能环保型内燃机主机及其零部件生产制造装备的国产化、大型化;建立内燃机产品节能减排政策法规和标准体系。

## 1. 重点领域和任务

### (1) 乘用车用发动机

汽油机方面,重点推广应用增压直喷技术,掌握燃烧和电子控制等核心技术,开发直喷燃油系统、增压器等关键零部件,鼓励2.0L以下排量特别是1.6L以下小排量汽油机采用增压和直喷技术,推广轻量化技术。柴油机方面,重点推动提高整机热效率,推广应用电控高压燃油喷射系统、高效增压中冷系统、排气后处理系统以及电子控制技术,鼓励发展乘用车用柴油机电控高压燃油喷射系统、高效增压中冷及排气后处理系统。

### (2) 轻微型车用柴油机

轻型商用车柴油机方面,重点推广应用高压共轨、电控单体泵等先进燃油喷射系统,加快增压技术的应用普及,掌握整车标定和匹配技术。微型车用柴油机方面,加快推广应用高压共轨燃油喷射系统、高效燃油滤清系统和增压系统,提高燃油经济性和可靠性。

### (3) 中重型商用车用柴油机

加快高效涡轮增压、余热利用、动力涡轮等技术应用。加强内燃机机械效率提高技术的研发和应用,重点开展低摩擦技术的开发应用,推进智能化、模块化部件的产业化应用,实现部件的合理配置和动力总成的优化匹配。

### (4) 非道路移动机械用柴油机

加强工程机械、农业机械、渔业船舶、排灌机械、发电机组等非道路移动机械用柴油机与配套装置之间的优化匹配,大力推广应用增压及增压中冷技术,推动

以高效节能多缸小缸径直喷柴油机替代单缸大缸径柴油机。

#### (5) 船用柴油机

重点推进船用中速柴油机电控燃油喷射系统、智能化控制技术、高压比增压器、柴油/天然气双燃料内燃机、废气再循环技术等先进设备和技术的应用,推进船用低速柴油机动力系统余热回收利用技术、低速低负荷工况下燃用重油技术、柴电混合动力系统先进技术、选择性催化还原系统的应用。

#### (6) 通用小型汽油机及摩托车用汽油机

重点开展二冲程汽油机多气流协调导向性高速扫气道等先进技术产业化应用研究,加快推广四冲程汽油机应用空燃比精确可控的电控技术,加强通用小型汽油机及摩托车用汽油机高效传动和动力匹配、性能优化和排气后处理技术的研发和应用。

#### (7) 关键部件产业化应用

重点开展电控燃油喷射系统关键技术的研发和产业化应用,加强和改善喷油器总成、电控执行器、轨压传感器、进油计量阀、电控单元生产的质量控制。提高增压器制造水平及其自主研发能力,掌握可变几何截面涡轮、可调多级增压、汽油机增压器、增压器轻量化等关键技术。

#### (8) 排气后处理装置

重点提升选择性催化还原器、颗粒捕集器、废气再循环系统、三元催化和氧化催化转化器、在线诊断系统、关键气体传感器的技术水平,加强排气后处理装置与整机的协调匹配,提高产品生产与使用的一致性和产品的可靠性、耐久性。

#### (9) 内燃机制造过程节能

重点推广薄壁铸造、精密铸锻、热处理及表面加工等绿色制造工艺,实现内燃机生产过程节能节材。鼓励企业在新产品开发和出厂试验环节使用具有高效能量回收功能的交流电力测功器,回收利用内燃机测试过程中产生的余热和电能。

#### (10) 替代燃料内燃机产品研发

鼓励替代燃料发动机与现有发动机制造体系兼容。积极发展柴油/天然气双燃料内燃机、生物柴油内燃机。开展汽油/甲醇双燃料点燃式内燃机、柴油/甲醇双燃料压燃式内燃机的应用试点工作。加强内燃机高效燃用替代燃料、有效控制非常规排放等基础研究,重点掌握耐醇燃料供应系统、天然气供应系统、点火及其电控系统等关键核心技术。开发适于内燃机应用替代燃料专用润滑油和排气后处理技术。

#### (11) 内燃机产品再制造

制定实施内燃机产品再制造推进计划,积极开展内燃机产品再制造关键共性技术研发,优选再制造技术路线,完善再制造工艺流程,支持采用表面修复等

关键技术,建立健全有利于旧件回收的市场体系,推广符合标准的内燃机再制造产品,鼓励对汽车、工程机械用发动机及其关键零部件开展再制造。

## 2. 重点工程

### (1) 压燃式内燃机高压燃油喷射系统示范工程

加快高压燃油喷射系统在车用柴油机上的推广应用,加强电子控制系统、高动态响应执行器和超高压运动偶件关键制造技术和工艺研发,开展先进制造工艺和加工装备技术改造。到 2015 年,新生产的车用柴油机全部应用高压燃油喷射系统,燃油消耗率比 2010 年降低 5%~8%。

### (2) 点燃式内燃机缸内直喷燃油系统示范工程

加快缸内直喷燃油系统在车用汽油机上的推广应用,重点推进缸内直喷汽油机燃烧系统及其高压喷油器总成等关键部件的生产制造,开展燃油喷射泵、电控喷油器等关键零部件制造工艺和加工设备技术改造。到 2015 年,30%~40% 新生产的车用汽油机产品应用缸内直喷燃油系统,燃油消耗率比 2010 年降低 8%~10%。

### (3) 内燃机高效增压系统应用示范工程

加快高效增压系统在内燃机上的推广应用,重点掌握汽油机废气涡轮增压器材料和制造工艺、轻型车用柴油机可变截面增压器生产制造技术和中重型车用柴油机复合增压匹配标定等技术。到 2015 年,多缸柴油机增压技术普及率达 90% 以上,高效增压技术在车用柴油机上的应用比例达 100%,在车用汽油机上的应用比例达 30% 以上。

### (4) 节能节材型小缸径多缸柴油机应用示范工程

推广应用小缸径多缸柴油机,重点研发缸径小于 80 mm 的多缸柴油机电控高压燃油喷射系统制造技术、微型车用燃油供应系统关键部件及排气后处理装置制造技术。到 2015 年,20% 以上新生产的多功能型(微型)乘用车配套使用小缸径多缸柴油机,替代高耗能大缸径单缸柴油机 50 万台。

### (5) 替代燃料内燃机应用示范工程

开展天然气单一燃料及天然气/柴油双燃料燃烧技术在车船用发动机上的推广应用,汽油/甲醇双燃料燃烧技术在乘用车用汽油机上的应用,柴油/甲醇双燃料燃烧技术在载重车、船舶、机车、固定柴油发电机组用重型柴油机上的应用,提高燃料供应系统关键零部件的耐腐蚀性和可靠性。到 2015 年,通过推广应用天然气单一燃料、双燃料及生物柴油内燃机,实现替代商品燃油 1000 万 t;通过推广应用甲醇燃料内燃机,实现替代商品燃油 500 万 t。

### (6) 船舶柴油机能量综合利用示范工程

重点推动大型集装箱船、散货船和油船推广应用船舶柴油机机内净化、排气

余热梯级利用及后处理技术,加强设备、系统优化组合和智能控制。到2015年,实现单船综合能效比2010年提高5%。

日前,国务院发布《大气污染防治行动计划》。这是当前和今后一个时期全国大气污染防治工作的行动指南。大气污染防治行动计划指出:

- 1) 加大综合治理力度,减少多污染物排放;
- 2) 调整优化产业结构,推动经济转型升级;
- 3) 加快企业技术改造,提高科技创新能力;
- 4) 加快调整能源结构,增加清洁能源供应;
- 5) 严格投资项目节能环保准入,提高准入门槛,优化产业空间布局,严格限制在生态脆弱或环境敏感地区建设“两高”行业项目;
- 6) 发挥市场机制作用,完善环境经济政策;
- 7) 健全法律法规体系,严格依法监督管理;
- 8) 建立区域协作机制,统筹区域环境治理;
- 9) 建立监测预警应急体系,制定完善并及时启动应急预案,妥善应对重污染天气;
- 10) 明确各方责任,动员全民参与,共同改善空气质量。

同时,为了紧密结合内燃机节能减排、加速推进基础件产业发展,我们应该关注以下几个问题:一是坚持科技创新;二是推进内燃机整机与基础件协同开发;三是坚持开发创新与技术改造相结合。

促使重视技术的关键手段是油耗排放法规,企业的任务是尽快、尽多地盈利,以便生存发展。政府和公众单纯用“提倡”、“鼓励”,是无法改变企业的任务和思维,使之重视研发节能减排核心技术。国外厂商其实也并不意味着大量投入研发节能减排核心技术。他们只是由于政府制定了严格的法规,才不得不投入研发,以满足对油耗排放的要求。我国政府也应当承担起维护国家能源安全和保护环境的责任,通过制定严格的油耗排放法规,要求生产厂家的产品在平均油耗和排放方面尽快与国际接轨。

有人提出如果油耗排放法规与国际接轨,自主企业没能力,要破产了。那么企业为什么长期忽视节能减排核心技术的创新研发?还想继续生产高油耗、高排放产品吗?有人提出内燃机技术已经很成熟了,我国企业已经掌握了,已无发展潜力。既然如此,为什么国产内燃机的油耗排放一直高于国外水平,不尽快赶上去呢?

企业是否自觉成为创新的主体是建设创新型国家的根本所在和关键之一。我国企业不愿成为创新主体是因从国外购买较旧产品技术进行生产就可满足现行国家法规,成本低。对产品油耗排放提出要与国际接轨的要求,才能把企业的

创新潜能激发出来,形成以市场为导向、产学研紧密结合的技术创新体系,培育和造就一批具有自主创新能力、拥有重要核心技术知识产权和著名品牌的跨国企业,以及中小企业集群。

内燃机目前虽然处于探索阶段,却拥有未来应用前景的关键技术:① 生物制造;② 绿色制造;③ 远程制造;④ 协同制造;⑤ 全球制造;⑥ 下一代制造生产模式。

制造数字化是内燃机制造信息化的基石,企业数字化包括产品设计数字化、管理数字化、制造装备数字化、生产过程数字化。

内燃机的高新技术创新与汇聚,基于更多学科知识和技术。信息技术、纳米技术、生物技术及智能技术创新的汇聚将给制造工程带来新的机会和挑战。未来 20 年内,信息、纳米、生物和智能技术将主导技术发展,将被应用到包括制造工程、化学工程、生物工程、能源工程、水处理工程、天空海洋工程、农业工程、环保工程等各个领域并影响人们的日常生活。

对内燃机工业节能减排的建议有以下四点:

1) 建议工业和信息化部会同财政部,从国家节能减排专项资金中拨付专项费用,实现内燃机节能减排关键基础零部件产业技术提升;

2) 建议国家行政管理部门和法规执行部门,严格执行技术法规,公开透明,奖惩分明,重视法规的科学性、严肃性和强制性;

3) 建议研究出台鼓励采用替代燃料的扶植政策和优惠政策,重视乘用车柴油化的问题;

4) 建议在国家组织实施的年度企业技术改造支持专项中,对替代燃料内燃机专用关键零部件制造企业给予项目支持。

推进内燃机节能减排工作,必须立足于我国能源安全、应对气候变化和提高内燃机产业竞争力的要求,以降低能源资源消耗、减少二氧化碳排放为主线,以降低燃油消耗为总体目标,发挥企业主体作用,重点突破,加快内燃机节能新技术研发和产业化推广,加快推进内燃机替代能源多元化应用,加快推动在制造产业发展。

(参加本文编写人员:北京理工大学刘福水教授、李向荣教授,留美学者杨嘉林教授,同济大学楼狄明教授,吉林大学李君教授,潍柴股份有限公司孙少军高工,广西玉柴机器股份有限公司林志强高工,昆明云内动力股份有限公司杨永忠教授级高工,重庆长安汽车股份有限公司詹樟松教授级高工,长城汽车股份有限公司高定伟高工,中国内燃机工业协会魏安力高工,上海内燃机研究所计维斌高工,天津内燃机研究所贾滨工程师。)

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院办公厅. 2013. 关于加强内燃机工业节能减排的意见[R].
- [2] 中华人民共和国国务院. 2013. 关于加快发展节能环保产业的意见[R].
- [3] 中华人民共和国国务院. 2013. 关于印发大气污染防治行动计划的通知[R].
- [4] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 2013. 关于油品质量升级价格政策有关意见的通知[R].
- [5] 中华人民共和国环境保护部. 2013. 关于发布国家环保标准《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第五阶段)》的公告[R].
- [6] 中国内燃机工业协会. 2013. 2012年中国内燃机工业发展报告[R].
- [7] 中国内燃机工业协会. 2013. 2013年中国内燃机协会工作总结[R].
- [8] 中国内燃机工业协会. 2013. 内燃机及零部件行业排头兵企业的调查[R].
- [9] 中华人民共和国环境保护部. 2013. 2012年我国机动车污染物排放情况[R].



**邢敏** 教授级高级工程师,国家科学技术奖评审专家,中国机械工业联合会专家委员会专家、中国机械工程学会常务理事。《设备与维修》杂志主编,《内燃机与配件》杂志总编辑,《机械制造手册》主编,组织编写《实用机床设计手册》。1978—1997年,在国家政府部门先后任处长、司长、局长;1997—2008年,在央企担任总经理、党委书记。历任中国机械工程学会第七届、第九届、第十届常务理事,并任中国机械工程学会设备与维修工程分会主任;中国机床工具信

息网络协会理事长;中国机械工业金属切削技术协会第六届、第七届理事长。在农业机械、重型机械、机床、工具、内燃机制造等领域工作多年,现任中国内燃机工业协会常务副会长兼秘书长。

# 内燃机热效率潜力及提高途径探索

尧命发 等

天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室

## 一、引言

内燃机是热效率最高、单位体积和单位重量功率最大(升功率可达140 kW/L)、应用最为广泛的动力装置,广泛应用于汽车、机车、轮船、农用机械(农用车)、工程机械及军用车辆等移动装置,全世界内燃机保有量已超过十几亿台。而且内燃机还具有燃料适应性好、成本低、可靠性高等特点。2009年美国科学院的国家能源报告指出:内燃机在未来几十年仍将在移动式动力装置中占有支配地位<sup>[1]</sup>。我国是世界上最大的内燃机制造国和消费国,2010年,我国内燃机产量达到7350万台(其中出口2300余万台),内燃机工业是国民经济和国防建设的重要基础制造业。

内燃机是工程学科最为活跃的领域之一。在过去30年,内燃机有害排放降低了100倍,正在向接近于零排放迈进。同时,内燃机性能也得到了明显提升,例如车用柴油机的有效热效率从35%提高到45%,升功率提高了3~4倍。目前世界内燃机在实现清洁燃烧、超低有害尾气排放的同时,节能和降低CO<sub>2</sub>排放成为内燃机领域新的研究重点、成为推动内燃机技术进步新的推动力。在全球节能减排、低碳经济的背景下,内燃机工业在不断满足日益严格的有害物排放法规的同时,各国、各地区又纷纷制定了CO<sub>2</sub>排放法规。图1为世界各国或地区制定的乘用车每公里CO<sub>2</sub>排放目标,从图中可以看到,无论是美国、欧洲,还是中国,其CO<sub>2</sub>排放都是朝着不断降低的方向迈进,其中通过不断提高内燃机热效率、燃用低碳或生物质燃料是满足CO<sub>2</sub>法规的重要途径。

目前,以提高热效率为目标的新一轮内燃机技术竞赛正成为国际上内燃机研究的热点,世界各国政府通过不同的计划提出了相应的内燃机热效率目标。例如,美国能源部在2005年的DEER会议上,给出了提高发动机热效率未来发展规划。报告中指出,用10~15年的时间,使商用柴油机有效热效率达到60%,轻型卡车、SUV等达到55%的目标<sup>[2]</sup>。进而在2009年,由美国能源部牵头,以占全美75%市场份额的四大重型卡车制造商为主,实施“超级卡车”项目。

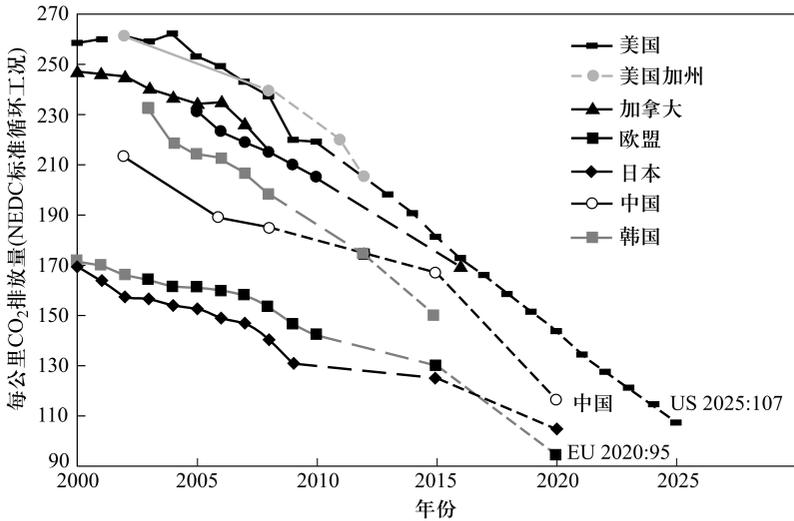


图1 世界各国或地区制定的乘用车每公里 CO<sub>2</sub> 排放目标

其主要目标之一是在 2015—2017 年间,使北美重型卡车实现优化后的示范运行,其发动机的有效热效率达到 55%<sup>[3]</sup>。2011 年,美国政府颁布轻型车 2017—2025 年温室气体排放和燃油经济性标准<sup>[4]</sup>,规定中的关键要素是到 2025 年平均新轻型车温室气体排放(等价二氧化碳)从 2016 年的 250 g/mi(注:1 mi≈1.609 km)减低至 163 g/mi,降低 35%;燃油经济性从 2016 年平均 34.1 mi/gal(注:1 gal≈3.785 L)提高到 49.6 mi/gal,提高 45%。2009 年,英国汽车委员会提出的目标是汽车发动机能源利用率达到 70%<sup>[5]</sup>。

图 2 是目前不同领域应用的内燃机的热效率现状。图中表明,小缸径的内燃机(主要应用于无人飞机、遥控模型、小型工程机械等领域)由于高散热损失、高扫气损失和低燃烧效率,其热效率相对较低;而大缸径的内燃机转速低、摩擦和传热损失小,因此热效率较高。而单缸直径达到 1 m 的船用内燃机热效率最高可达到 55% 左右。但是,对于所有的内燃机应用领域,用于乘用车、商用车、工程机械和农用机械的重型、中型和轻型内燃机约占 90%,其热效率如图中方框所标示的区域,其有效热效率对汽油机而言为 30%~35%,对柴油机而言轻型车用热效率略低(40%~42%),重型车用相对较高(42%~47%)。因此,这一区域的节能技术是内燃机研究的重点。本报告也以此范围内燃机为重点开展极限热效率讨论,并对提高热效率的技术途径进行探讨。同时,本报告最后也简单介绍了船用柴油机的发展现状及未来趋势。

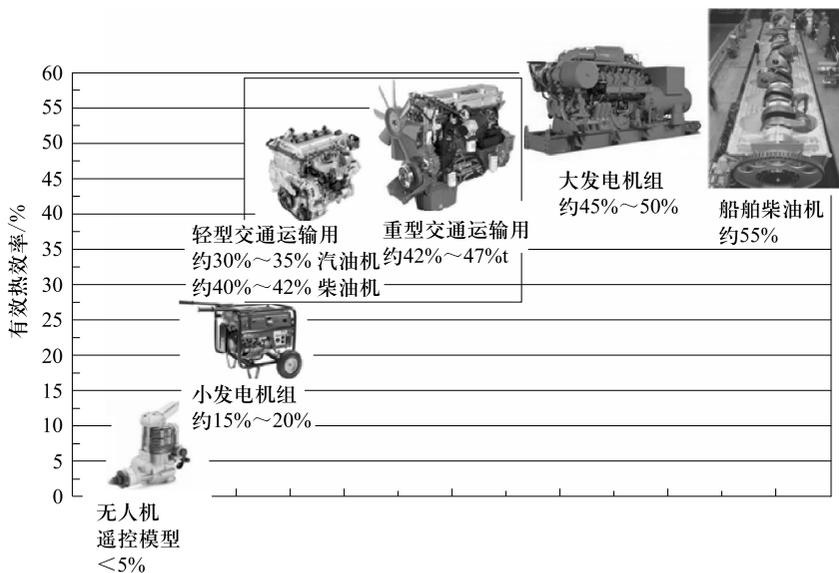


图 2 不同领域应用的内燃机的热效率现状<sup>[6]</sup>

## 二、国内外内燃机热效率潜力探讨

近年来,围绕内燃机极限热效率,国际上开展了广泛的探讨。美国橡树岭国家实验室在 2010 年举行了内燃机热效率论坛,探讨内燃机热效率极限。论坛邀请了美国汽车内燃机工业界和学术界 30 余位专家,包括美国圣地亚国家实验室、美国威斯康星大学、三大汽车公司、康明斯公司等,论坛讨论结果向美国能源部进行了报告。与会专家认为,内燃机热力循环过程包括化学反应和换气过程,是开口的工作循环,其工作过程向周围散热不是必需的。因此,内燃机热效率极限不受卡诺定理的限制,其理论热效率甚至可以超过卡诺循环热效率。然而对于实际发动机,由于不可逆损失(摩擦、燃烧不可逆损失等)、热功转换效率以及材料和成本制约,内燃机热效率远低于极限热效率<sup>[7]</sup>。

关于极限热效率,与会专家认为:目前乘用车柴油机最高有效热效率略高于 40%,意味着在理想条件下,有 40% 以上的燃料能量转化为曲轴输出功;由于非受控(非平衡)燃烧过程的不可逆损失,燃料 20%~25% 的焓不能转化为功而损失掉;最高有效热效率大于 60% 将是一个较长期的目标,这需要包括内燃机复合热力循环、先进的发动机结构设计等多种技术支持,而且相关研究工作应该从当前就开展实施;如果要得到更高的热效率,发动机需要做一系列根本性的改变,但是其极限有效热效率也很难超过 85%;未来发动机技术最重要的挑战是在保证或者提高发动机功率密度的同时提高发动机热效率。论坛专家认为,提

高内燃机热效率要求综合多种方法,如提高热功转换效率、减少对冷却液和环境的散热、余热能集中在排气中并得到利用以及提高余热能利用效率等措施。论坛专家也提出,内燃机要实现更高的热效率,要从以下几个方面技术取得进展:先进材料和润滑技术(高热负荷和可靠性)、先进低温燃烧技术、附件电气化及智能控制、发动机结构系统变革(如可变冲程)、高效涡轮技术、余热能利用技术等。另一方面,内燃机产品成本与经济上的可行性也是制约热效率的一个重要因素<sup>[7]</sup>。

为了实现更高的热效率,近年来,国内外研究人员从实验和模型上均进行了探索性研究。美国 Stanford 大学设计了一款压缩比高达 100 的装置,按照奥托循环计算得到的理论指示热效率极限是 70%,但实测的极限只达到 57%<sup>[8]</sup>。最近通过提高气体的比热容比来提高内燃机热效率被美国 Lawrence Livermore 国家实验室、加州大学伯克利分校、丰田汽车公司等机构广泛研究<sup>[9, 10]</sup>,而该思路在 1978 年 Laumann 和 Reynolds 申请的美国专利中被提出<sup>[11]</sup>。其燃烧过程是燃用氢气-氧气-氩气混合气,其中氢气与氧气燃烧只生成水,实现了有害物零排放;而用氩气替代空气中的氮气可以提高气体的比热容比。空气的比热容比理论值为 1.4,而氩气的比热容比可以达到 1.67。并且通过对废气冷凝水排出,其中的氩气再循环使用,构成一个封闭的氩气循环。从式(1)中可以看出,指示热效率  $\eta_i$  与发动机压缩比  $R_c$  和比热容比  $\gamma$  相关,提高比热容比  $\gamma$  可以在等压缩比条件下提高发动机热效率,从而在低燃烧压力条件下获得更高的热效率。

$$\eta_i = 1 - \frac{1}{R_c^{\gamma-1}} \quad (1)$$

图 3 是目前发动机与氢气-氧气-氩气发动机理论指示热效率的对比。图中表明,该发动机在低压缩比条件下即可以获得比传统内燃机更高的热效率,降低目前提高内燃机热效率导致的机械负荷增大的问题。

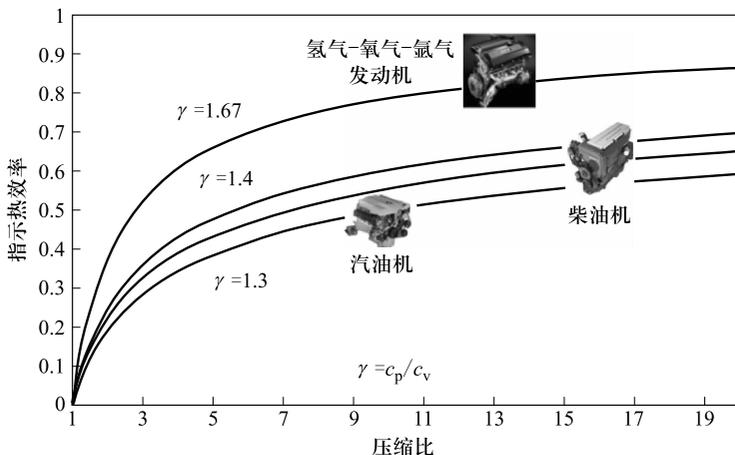


图 3 氢气-氧气-氩气发动机与传统内燃机理想热效率对比<sup>[12]</sup>

围绕内燃机极限热效率,本小组也从理论上进行了研讨,结合模拟计算结果得到了如下的初步结论:① 减少内燃机传热损失之后,节约的热量只有很小部分转化为有用功,其比例小于废气带走热量的比例,即试图通过减少传热损失只有少部分会转化为有用功,但可以提高排气温度,使余热集中在废气中,如图 4 所示;② 在绝热条件下,提高压缩比可以提高发动机指示热效率到 62%;但是若存在传热损失,随着压缩比升高,传热损失增大,高压压缩比下的热效率反而下降,因此若有传热损失(实际上必定存在传热损失),就存在一个最佳的压缩比,使热效率达到最高;尽管传热对于内燃机热力循环不是必需的,但是由于热负荷的限制传热不可避免,因此传热损失决定最佳压缩比的大小;相应的,可变压缩比可以根据不同负荷、转速下不同的传热损失调整发动机压缩比,从而提高循环工况的热效率;③ 高强度、精确控制的燃烧放热过程是提高内燃机热效率的重要途径,通过提高缸内爆发压力能够提高内燃机热功转换效率。图 5 所示为不同放热重心(CA50)和放热持续期(CA90 - CA10)对热效率的影响,较短的放热持续期和合适的 CA50 时刻可以显著提高热效率。计算分析也表明,提高增压(进气)压力也可以进一步提高内燃机热效率。

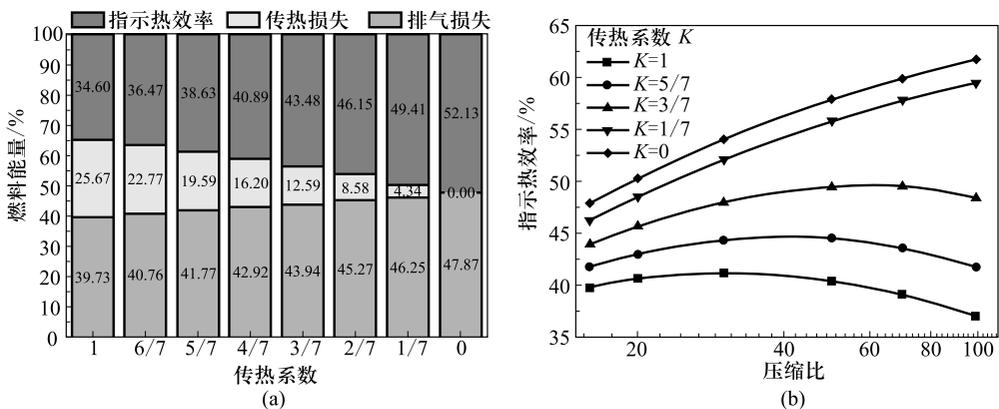


图 4 传热损失和压缩比对内燃机热效率影响

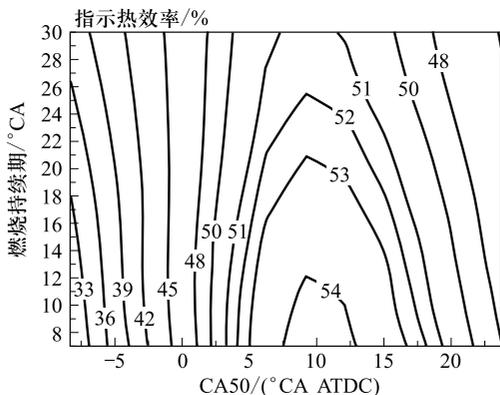


图 5 不同放热重心和放热持续期对内燃机热效率的影响

进一步的研究还表明,仅通过工作过程优化而不采取其他技术措施,内燃机热效率极限很难超过 60%。同时,提高内燃机热效率又受制于其他关键技术的进展,如材料、控制、零部件等。

### 三、国内外提高内燃机热效率创新研究进展

燃烧技术是降低有害排放、优化缸内热力循环、提高热效率的核心,20 世纪 90 年代末以来,以“均质压燃、低温燃烧”为代表的新一代内燃机燃烧理论与燃烧新技术的研究十分活跃,包括我国学者在内,世界范围内在内燃机高效清洁燃烧新技术的研究取得了重要进展,内燃机的热效率得到了进一步提高。

天津大学苏万华教授课题组提出了“高密度 - 低温燃烧”技术,其核心思想是:通过高喷射压力的多次喷油控制将燃油“均匀”地“播撒”在燃烧室空间,使混合气尽量均匀。通过 EGR 来降低燃烧温度,抑制  $\text{NO}_x$  排放。为了弥补采用 EGR 后燃烧过程中氧浓度的不足,采用串联布置的两级涡轮增压实现发动机高增压比,增加进入的空气量。但是高增压必然会带来压缩压力和燃烧爆发压力的增加,受发动机机械负荷和可靠性限制,缸内最大爆发压力必须控制在一个合理范围,通过进气门晚关技术降低进气门关闭时缸内的初始压力和温度,从而有效地降低了缸内最大爆发压力和燃烧温度,也使柴油机实现了可变的热力循环过程。上述这些技术既有混合率促进技术,也有抑制化学反应率技术,在智能化的电控单元协同控制下,实现了柴油机燃烧路径的可调可控,从而实现高效清洁燃烧。采用这一燃烧技术,柴油机最高指示热效率可以达到 53%,所报道的试验工况原始微粒和  $\text{NO}_x$  排放可以达到欧 VI 限值的要求<sup>[13]</sup>。

清华大学王建昕教授课题组提出了基于缸内直喷混合气制备,以混合气浓度分层、火花辅助点火和燃料改质的综合控制 HCCI 燃烧的新方法,开发了相应的火花点火辅助分层压燃 (ASSCI) 燃烧系统。该系统通过缸内二次喷射实现分层压燃控制着火,通过火花辅助均质压燃临界状态下着火稳定性以及燃料重整拓宽 HCCI 运行工况范围,提出了利用缸内直喷、可变配气以及节气门协同控制进行点燃 (SI) 与 HCCI 燃烧模式切换的控制策略。为了进一步拓宽 HCCI 运行工况范围,他们提出了内外 EGR 与增压协调控制拓展 HCCI 负荷范围的思路<sup>[14, 15]</sup>。多缸 HCCI 样机测试结果表明,在 HCCI 运行工况样机比传统汽油机的燃油经济性改善 15% 以上, $\text{NO}_x$  降低 90% 以上。

天津大学赵华教授课题组提出了基于废气驱动的高效低温燃烧汽油机 (ExDrive) 技术。其方案仍是采用进排气门全可变机构,并结合外部 EGR 和涡轮增压技术进一步扩展 HCCI 的运行工况范围。废气驱动的燃烧和负荷控制方案基本思路是:缸内残余废气同时起到了加热剂、稀释剂和容积填充剂三方面的

作用,既提供了混合气燃烧所需要的能量,也控制了发动机负荷和燃烧速度。但是当发动机负荷增大以后,内部残余废气的热量增加会造成缸内出现燃烧速度过快而产生爆震等不正常的燃烧现象。为此,通过引入冷却的外部废气再循环逐渐代替内部废气来填充缸内容积,拓宽均质压燃运行范围。这样既可以提高发动机负荷运转范围,又可以利用废气的稀释作用降低汽油发动机  $\text{NO}_x$  排放。在发动机全负荷工况采用基于废气控制的汽油机复合燃烧技术,即以内部废气再循环策略实现可控自燃燃烧为核心,辅以气门参数控制的火花点燃燃烧技术的复合燃烧技术,同时以外部废气再循环作为调整缸内废气状态的控制手段,实现了汽油机低温高效燃烧。在燃烧控制策略中,采用爆震闭环燃烧控制技术。通过残余废气的分层,在小负荷和热机怠速工况实现汽油机可控自燃燃烧。例如,转速为 1500 r/min、平均指示压力为 0.085 MPa 的工况,可控自燃燃烧的节油率达 17.21%;在转速为 2000 r/min、平均有效压力为 0.2 MPa 的工况,节油率达 13.71%, $\text{NO}_x$  减少 99%,NEDC 驾驶循环仿真节油效果为 15.6%。排放指标除 HC 之外, $\text{NO}_x$  和 CO 均小于欧IV限值<sup>[16]</sup>。

近年来,通过燃料特性优化来优化燃烧过程,进而提高内燃机热效率、降低有害排放也成为内燃机研究的热点之一。这主要是因为在内燃机新型高效清洁燃烧模式中,燃料特性参数是影响燃烧过程和有害排放的重要因素,燃料特性优化也是提高热效率的重要途径之一。瑞典 Lund 大学 Johansson 教授等人在柴油机中喷入汽油燃料,发现在上止点前附近喷入汽油燃料,通过 EGR 控制实现低温燃烧,其碳烟和  $\text{NO}_x$  排放远比柴油燃料低温燃烧时低,高效清洁低温燃烧最大负荷范围比柴油更高,而且燃用汽油燃料可节能 8.3%~16.6%,最高的指示热效率可以达到 57%<sup>[17]</sup>。他们将这一燃烧方式定义为 PPC (Partial Premixed Combustion) 燃烧方式。美国 Wisconsin 大学 Reitz 教授等人提出一种 RCCI (Reactivity Controlled Compression Ignition) 燃烧方式,即采用汽油/柴油双燃料方式,其中汽油燃料采用气道喷射,柴油采用高压共轨燃油系统缸内直喷,通过控制汽油、柴油比例、缸内柴油喷油策略、外部 EGR 率和进气门关闭时刻等实现混合燃料的燃烧过程控制,从而实现高效清洁燃烧。研究表明,该燃烧方式结合进气增压后最大平均有效压力可以达到 14.6 bar (1 bar =  $10^5$  Pa),原始碳烟和  $\text{NO}_x$  排放可以满足 US EPA 2010 的要求,指示热效率最高达到了 56%<sup>[18]</sup>。

上海交通大学黄震教授课题组提出了基于燃料设计控制燃烧过程的新方法。通过燃料设计、喷射策略及优化,进行放热与燃烧模式调制,实现了燃料实时设计与多燃烧模式协同控制, $\text{NO}_x$  与碳烟的排放大幅降低,发动机热效率提高,为实现高效超低排放发动机燃烧开辟了一条全新的途径<sup>[19]</sup>。天津大学姚春德教授课题组提出柴油/甲醇二元燃料燃烧模式,通过进气道喷射甲醇,缸内喷

射柴油实现最大有效热效率 46.6%。更重要的是目前该技术已经在国内多家重型汽车上示范运行,取得了很好的节油效果<sup>[20]</sup>。天津大学苏万华教授课题组在 20 世纪末开展了汽油/柴油双燃料燃烧模式研究工作,研究发现通过提高气道喷射汽油的比例可以大幅度降低碳烟和  $\text{NO}_x$  排放<sup>[21, 22]</sup>。天津大学针对双燃料进行了深入研究,近年来尧命发教授课题组又提出了柴油机全负荷运行工况高比例预混合复合燃烧模式(HPCC)概念。通过组合气道喷射和缸内直喷两种喷射方式,形成不同工况所需的燃料活性分层和混合气浓度分层,即基于混合气浓度分层与化学活性分层协同控制的燃烧过程。经过多年研究发现,气道喷射的燃料可以是高辛烷值燃料,也可以是高十六烷值燃料,但核心是易于汽化的低沸点燃料;与此相对应的缸内燃料应该是与气道喷射燃料着火特性相反的燃料,从而更好地实现混合气燃料活性控制;进而结合缸内直喷策略、增压、EGR、可变气门等技术实现所需的混合气浓度分布,最终获得在不同负荷下热效率最高的燃烧模式。例如在小负荷工况采用纯柴油适当早喷及大比例 EGR 的 HCCI 燃烧模式;在中小负荷工况采用柴油早喷使汽油与柴油在滞燃期内形成均质混合气,实现汽油/柴油双燃料的 HCCI 模式;而大负荷、满负荷工况实现以缸内柴油喷雾压燃形成的多点自燃作为着火点来点燃汽油均质混合气为特征的高比例汽油预混合多点点燃与部分柴油扩散燃烧相结合的燃烧模式。在一台四缸轻型车用柴油机应用汽柴油双燃料 HPCC 复合燃烧模式,试验结果表明  $\text{NO}_x$  排放满足欧 VI 法规,指示热效率 51%,与达到相同排放条件下柴油机相比,其综合节油率达到 10% 以上<sup>[23, 24]</sup>。

上述研究结果表明,在内燃机结构没有做大的变化条件下,通过燃烧技术的创新,其最高热效率绝对值提高了 9%,而相对值提高了 20%,图 6 是不同的燃烧新技术与传统内燃机热效率对比,表明了燃烧技术在提高内燃机热效率中仍有很大的潜力。

近年来,内燃机的余热能回收技术受到广泛关注,全球各大汽车、发动机制造商,高校和科研院所均开展了广泛研究。内燃机中通过废气和传热带走的能量损失占到总能量的 50% 以上,如何有效回收利用这部分能量是进一步提高内燃机热效率的潜力所在。国内外汽车废气利用技术的研究从热源上可分为利用高温热源(如废气)和低温热源(如冷却水、润滑油)回收技术;从用途上余热能利用可包括废气涡轮增压、采暖、废气再循环、温差发电、改良燃料、驱动空调制冷、动力涡轮及提高进气温度等方式。美国康明斯公司开发的利用 EGR 和排气废热的余热能利用系统表明发动机的热效率可提高约 8%<sup>[25]</sup>。天津大学舒歌群教授课题组提出利用循环冷却水进行热电温差发电与利用排气能量进行有机朗肯循环的联合循环系统,研究表明可使发动机热效率提高 12%<sup>[26]</sup>。

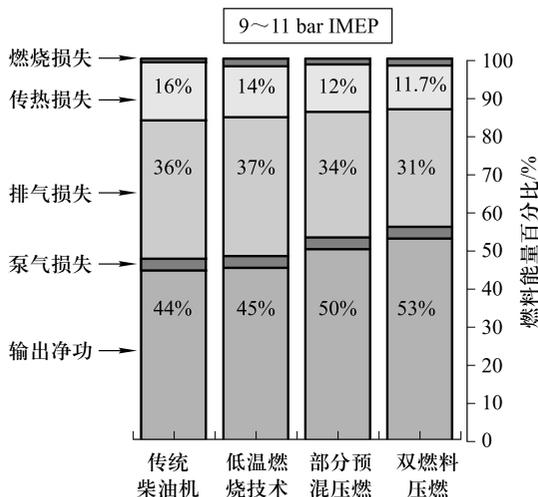


图 6 不同燃烧新技术与传统内燃机能量流对比<sup>[7]</sup>

#### 四、提高内燃机热效率技术发展方向和关键技术

现代内燃机已成为集燃烧技术、信息技术、智能控制、材料、先进设计以及先进制造等高新技术的集成载体。上述诸多先进技术的应用推动内燃机向更低的排放和更高的热效率不断迈进。未来的内燃技术发展方向主要包含以下几个方面：先进燃烧技术、先进智能控制技术、燃料技术、先进材料技术、排放控制技术、关键零部件技术、余热能利用，以及新型发动机结构与工艺等。

先进燃烧技术发展方向是超高压、高密度、高稀释、预混合、燃烧物理与燃烧化学协同控制的低温燃烧过程。超高压是指发动机具有高的爆发压力，从而提高发动机做功能力。高密度是指内燃机通过超高增压技术使进气密度显著提高，一方面可以提高爆发压力（并降低高爆发压力时缸内温度），另一方面可以提高升功率、实现高强化目标（提高机械效率）。高稀释是指通过高密度进气和一定比例的废气再循环对混合气进行稀释。高稀释带来的优势如下：首先过量空气的进入允许采用大比例的废气再循环而不降低参与燃烧的氧气量，并还可以提高工质的比热容比从而提高热效率；其次，即使为了提高做功能力而加大喷油量也不会明显提高燃烧温度，因为由空气和废气组成的高稀释进气条件抑制了燃烧温度提高；最后低温燃烧过程使燃烧温度避开碳烟和  $\text{NO}_x$  生成温度从而获得超低的排放。预混合是指通过废气稀释、喷射策略控制使内燃机在燃烧之前喷油结束，使燃油与空气得到充分混合，实现快速燃烧过程，从而减少燃烧过程不可逆损失。燃烧物理与燃烧化学协同控制是把混合率促进技术与抑制化学反应率技术进行协同控制，使内燃机在有限时间、有限空间内实现稳定的、可控

的高强化低温燃烧过程。

内燃机燃料多元化是未来的发展趋势,内燃机燃料技术的燃烧基础问题主要包括:燃料理化特性对燃烧过程不可逆损失的影响有待探明,从而合理构建燃料特性,降低燃烧不可逆损失,更好适应不同先进燃烧技术的需要;稀混合气着火极限拓展,即如何通过燃料特性改变拓展混合气稀燃极限,让内燃机在更低的局部当量比下、更低的局部温度下实现稳定燃烧,提高燃烧效率。基于燃料特性控制的燃烧技术是内燃机燃烧技术发展的重要方面,如基于燃料特性控制的RCCI、PPC等不同燃烧模式,燃料在线重整、实时诊断与控制等技术。当然对新燃料的合成、新生物燃料的制备也是燃料研究的重要方面,但是这些技术主要与生物和化工技术紧密相关,在此不作赘述。

先进材料技术是制约先进燃烧技术的瓶颈因素之一。严格意义来讲,应该是价格合理的先进材料。先进燃烧技术可以实现更高的热效率,但是这些先进燃烧技术要求内燃机承受更高的爆发压力和热负荷,而这些恰恰对材料的机械负荷和热特性提出苛刻要求。为了降低内燃机传热损失,需要内燃机材料具有低散热特性。为了进一步降低摩擦损失,需要更好的减摩材料与润滑技术。轻量化是提高燃油经济性最直接的方式,因此高可靠性的轻量化材料生产也是先进材料技术面临的挑战之一。最后也是最重要的一个就是材料的加工与成本,显然如果不考虑成本问题,单件内燃机生产所需各种特性需求都可以满足,但是考虑成本后诸多先进材料技术应用就受到限制。目前受种种条件限制,尚未有任何研究机构尝试构建一台应用多种先进材料技术的发动机,使其可满足很高热负荷和机械负荷要求,从而试验出现有技术水平下内燃机的极限热效率。

排放控制技术的发展一方面是要不断满足有可能更加严格的法规要求,但从排放控制技术和法规发展历史来看,排放控制技术始终都能满足法规的要求,这表明满足排放法规不是排放控制技术的关键。但是如果法规进一步加严,排放控制技术是否会遇到瓶颈则依赖于全球排放法规的严格程度。在满足不断严格排放法规的过程中,一方面内燃机越来越依赖复杂的后处理系统,增加了内燃机对其他资源的依赖及内燃机成本,如贵金属;另一方面,为了降低原始排放,大都以牺牲内燃机燃油经济性为代价(尤其是柴油机)。因此,未来排放控制技术的核心是进一步降低原始排放,简化对后处理器的依赖,并且在满足排放法规同时,提高内燃机的热效率。例如,通过先进燃烧技术降低缸内原始排放,可以减少或部分取消后处理器,但是先进燃烧通常是低燃烧温度、低 $\text{NO}_x$ 与碳烟排放、高的HC和CO排放,那么如何降低高的HC和CO排放、如何使低排温下后处理器有效工作等问题有待后处理器技术的突破。在提高热效率方面,如何减少控

制  $\text{NO}_x$  排放导致的热效率损失、如何降低排气背压减小换气损失等将成为排放控制技术的未来主要发展方向。

关键零部件技术的发展核心仍是内燃机两大主要系统,即空气系统和燃油喷射系统。相对于燃油系统,目前空气系统的优化有更大的节能潜力,空气系统主要包含的技术可以归纳为3个方面:① 多级涡轮增压组成的高增压系统,包含了优化多级涡轮增压器、提高单个涡轮增压器效率;② 复合 EGR 系统及优化,即根据不同运行工况需求调整高压 EGR 和低压 EGR 分配比例,降低泵气损失,从而提高热效率;③ 可变气门机构,它包含气门升程和气门时刻可变技术,从而获得最优的换气过程,降低泵气损失。目前在汽油机上可变气门定时已经成为普遍技术,但是在柴油机上还处于实验室研究阶段,而气门升程可变无论对汽油机还是柴油机其应用都很少。燃油系统针对柴油机主要是提高喷油压力( $>300$  MPa),灵活多次喷油技术;对于汽油机同样是需要提高 GDI 汽油机喷射压力和喷射次数,基于喷射为主导的 GDI 燃烧系统是汽油机 GDI 的发展方向。除了“油”、“气”两大系统之外,附件驱动电气化也是未来零部件发展方向之一,如电控风扇、电控水泵、机油泵等,通过采用电控技术,既能满足各个附件合理化、智能化的灵活控制过程,又能降低传统机械驱动带来的附件消耗功,从而提高热效率。

余热能利用技术发展首先应该是自身余热回收系统的不断完善过程。例如不同装置之间性能对比研究,如采用朗肯循环回收还是热电转换直接回收,或是动力涡轮来回收,还有待进一步研究。另外,对各种不同的余热能的协同利用技术,如冷却水、机油、EGR、排气等不同温度的发动机余热源的协同回收系统。最后,余热能的回收应该与缸内热力循环相耦合来联合控制获得最高的效率。

先进智能控制技术是实现内燃机高效清洁的关键技术,现代内燃机向“全可变”方向发展,包括燃烧边界条件灵活可变、适应燃料多元化的燃料灵活可变以及多能量系统管理等,先进智能化控制技术是实现“全可变”的关键。先进智能控制技术的发展包含传感技术、控制策略、执行机构以及智能化的热管理和能量管理等四个方面。未来控制技术的关键是不断提升传感器采集能力,传感技术包括对内燃机在线燃烧诊断、燃料特性在线诊断、排放控制 OBD 以及其他先进的传感器技术等。控制策略发展方向是发展基于模型的控制策略、实现闭环控制的燃烧控制策略以及瞬态工况的控制策略。例如,为了实现“精细化”的燃烧过程控制,需要在线的燃烧诊断技术精确控制燃烧相位,通过在线燃料诊断辨别出该循环喷入的燃料特性参数,进而有针对性地进行每个循环的燃烧排放控制。再如在瞬变工况下快速精确的瞬态控制策略,为了满足内燃机复杂的热管理和能量管理所提供的智能化控制技术等。而执行机构的要求是提高其响应速率、

提高控制精度,执行机构的响应能力和控制精度也是先进控制技术发展重要方面。

对于内燃机工艺与结构的改造也是提升内燃机热效率的关键技术之一。这方面的变革与设计方案很多,但是受到运转稳定性、可靠性和价格等因素的制约,新型内燃机结构目前基本上没有应用。但是,一些新型内燃机结构表现出较大的节油潜力,如可压缩比机构、可变冲程机构、滚动轴承替代滑动轴承,以及对现有冷却系统、润滑系统的优化等。在新结构方面比较有代表性是液压自由活塞机构、对置活塞发动机,它们共同的特征是取消了传统内燃机曲柄连杆机构运动方式。但需要注意的是,上述自由活塞机构早在 20 世纪 20 年代就已经被发明,也并非是一项新的技术。因此,对现有往复活塞运动内燃机的根本性变革还有待突破。

## 五、总结与建议

对本报告总结如下。

1) 内燃机仍有很大的节能潜力,提高热效率、降低燃油消耗已成为新一轮内燃机技术国际竞赛的发展方向,是先进内燃机技术研究的重点。

2) 在内燃机结构不做大的变化条件下,内燃机有效热效率<sup>①</sup>突破 60% 是内燃机节能技术发展的目标,取决于本报告所述的各项关键技术的突破。例如,先进材料和先进制造技术突破、使内燃机可以承受更高的爆发压力、提高余热能利用效率、降低摩擦损失、采用新型内燃机结构等。

3) 我国与国际同步开展了提高内燃机热效率技术原理的创新研究,并取得了一批有影响的创新成果。在国家产业升级、转变经济增长方式和建设创新型国家的推动下,我国需要进一步营造有利于创新的氛围,通过政府法规引导、政策支持和产学研合作,进一步提升创新能力,将创新技术转化为产业技术,尽快使我国内燃机产品达到国际内燃机节能产品的水平。

感谢天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室刘海峰副教授对论坛内容的整理工作。向在内燃机热效率潜力及提高途径探索专题讨论中给予帮助的国内外同行专家致以衷心的感谢(按姓氏拼音排序):加利福尼亚大学伯克利分校 Dibble Robert 教授,中国船舶重工集团第 711 研究所冯明志高工,广西大学黄豪

① 内燃机有效热效率:内燃机输出的有效功占燃料总能量的百分比,有效热效率 = 指示热效率 × 机械效率;

内燃机指示热效率:内燃机燃烧放热推动活塞所做的功占燃料总能量的百分比;

内燃机能源利用率:燃料燃烧放热在系统中得到应用的所有能量,如汽车发动机除驱动动力总成的有效功外,还包括空调、电等消耗的能量。

中教授, 一汽集团技术中心李康高工, 同济大学李理光教授, 中国北方发动机研究所李玉峰, 潍柴动力股份有限公司李云强博士, 广西玉柴机器股份有限公司林铁坚高工, 湖南大学刘敬平教授, 吉林大学刘忠长教授, 美国 Cummins 公司彭立新博士, 上海汽车集团股份有限公司技术中心平银生高工, 清华大学帅石金教授, 天津大学舒歌群教授, 美国 Ford 公司孙惠明博士, 天津大学卫海桥研究员, 东风汽车公司研究院吴新潮高工, 天津大学谢辉教授, 英国 Birmingham 大学徐宏明教授, 浙江大学俞小莉教授, 长安汽车英国研发中心张晓宇博士, 上海交通大学张玉银教授, 英国 Brunel 大学赵华教授, 天津大学郑尊清副研究员。

## 参考文献

- [1] National Academy of Sciences. Real prospects for energy efficiency in the United States [R]. Washington D C, 2009.
- [2] Fairbanks J. The 60 percent efficient diesel engine; probable, possible, or just a fantasy [C]//2005 Diesel Engine Emissions Reduction (DEER) Conference Presentations. Chicago, IL, August, 2005.
- [3] Ward J. DOE's super truck analysis[R]. SAE Government-Industry Meeting, January, 2013. Website: [http://www.sae.org/events/gim/presentations/2013/ward\\_jacob.pdf](http://www.sae.org/events/gim/presentations/2013/ward_jacob.pdf)
- [4] EPA/DOT SNOI for 2017 - 2025 light-duty vehicle standards[S]. 2011.
- [5] New Automotive Innovation and Growth Team (NAIGT). An independent report on the future of the automotive industry in the UK[R]. 2009.
- [6] Edwards K D, Wagner R M, Briggs T E, et al. Defining engine efficiency limits[C]//17th DEER Conference, Detroit, MI, 2011: 3 - 6.
- [7] Oak Ridge National Laboratory. Report on the transportation combustion engine efficiency [R]. 2010.
- [8] Roberts G, Ramakrishnan S. Combustion testing and analysis of an extreme states approach to low-irreversibility engines final report[R].
- [9] Killingsworth N, Rapp V, Flowers D, et al. Characteristics of knock in hydrogen-oxygen-argon SI engine[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, 2010.
- [10] Kuroki R, Kato A, Kamiyama E, et al. Study of high efficiency zero-emission argon circulated hydrogen engine[J]. Assessment, 2010, 2013: 6 - 11.
- [11] Laumann E A, Reynolds R K. Hydrogen-fueled engine: U. S. Patent 4,112,875 [P]. 1978 - 9 - 12.
- [12] Aceves S M. High efficiency, zero emission, low cost  $H_2 - O_2 - Ar$  engine [R]. FY09 Engineering Research and Technology Report.
- [13] Su W H, Yu W B. Effects of mixing and chemical parameters on thermal efficiency in a

- partly premixed combustion diesel engine with near-zero emissions [ J ]. *International Journal of Engine Research*, 2012, 13: 188 – 198.
- [ 14 ] Wang Z, Wang J X, Shuai S J, et al. Study of multimode combustion system with gasoline direct injection [ J ]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2007, 129 ( 4 ) : 1079 – 1087.
- [ 15 ] Wang Z, Wang J X, Shuai S J. New gasoline HCCI combustion system using two-stage direct injection and assisted spark ignition [ J ]. *Journal of Automobile Engineering*, 2006, 220 ( 3 ) : 367 – 378.
- [ 16 ] Zhang Y, Zhao H, Xie H, et al. Variable valve actuation enabled high efficiency gasoline engine [ J ]. *Journal of Automobile Engineering*, 2010, 224 ( 8 ) : 1081 – 1095.
- [ 17 ] Johansson B. Path to high efficiency gasoline engine [ C ]. *Directions in Engine-Efficiency and Emissions Reduction Conference*. 2010.
- [ 18 ] Reitz R D, Duraisamy G. Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition ( RCCI ) combustion in internal combustion engines [ EB/OL ]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2014.05.003>.
- [ 19 ] Lv X C, Han D, Huang Z. Fuel design and management for the control of advanced compression-ignition combustion modes. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2011, 37 ( 6 ) : 741 – 783.
- [ 20 ] 魏立江, 姚春德, 刘军恒, 等. 柴油/甲醇组合燃烧特性及道路试验研究 [ J ]. *工程热物理学报*, 2012, 33 ( 5 ) : 876 – 882.
- [ 21 ] 高海洋, 谢辉, 苏万华. 混合燃烧系统柴油喷射提前角对缸内压力的影响 [ J ]. *天津大学学报*, 1999, 32 ( 5 ) : 629 – 632.
- [ 22 ] 汪洋, 谢辉, 苏万华, 等. 柴油/汽油双燃料准均质燃烧过程及其降低有害排放物的潜力 [ J ]. *燃烧科学与技术*, 2002, 8 ( 6 ) : 538 – 542.
- [ 23 ] 尧命发, 马帅营, 童来会, 等. 燃烧参数对汽油/柴油双燃料 HPCC 性能和排放影响的试验 [ J ]. *内燃机学报*, 2012, 30 ( 4 ) : 289 – 295.
- [ 24 ] Tong L H, Liu H F, Zheng Z Q, et al. The design and optimized combination of combustion modes over full-load range in a multi-cylinder light-duty engine [ R ]. *SAE Technical Paper*, 2013.
- [ 25 ] Stanton D. High efficient clean combustion for supertruck [ C ] // *Proceedings of the 16th Directions in Engine Efficiency and Emissions Research ( DEER ) Conference*. 2010.
- [ 26 ] Liang Y, Shu G, Tian H, et al. Analysis of an electricity-cooling cogeneration system based on RC – ARS combined cycle aboard ship [ J ]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 76: 1053 – 1060.



**尧命发** 1989年在天津大学获热能与动力专业学士学位,1992年、1999年在天津大学获动力机械及工程硕士和博士学位。现为天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室主任、研究员。长期从事内燃机燃烧和排放控制、代用燃料燃烧和内燃机数值模拟研究工作,曾获国家杰出青年科学基金,入选科技部中青年科技创新领军人才,获全国优秀科技工作者等称号,兼任中国高等教育学会工程热物理专业委员会副理事长,中国内燃机学会燃烧节能净化分会副主任委员、《燃烧科学与技术》主编等职。

# 车用汽油机热效率潜力及提高途径探索

刘敬平 等

湖南大学先进动力总成技术研究中心

## 一、引言

内燃机发展至今已有 150 多年的历程。1860 年,比利时工程师艾蒂安·勒努瓦以蒸汽机为蓝本,制成了首台以天然气为燃料的燃气发动机,这也是世界上第一台实用的内燃机,不过其效率仅有 2%~3%。不久,奥拓对发动机进行改进,发动机热效率上升到 12%。再后来,鲁道夫·狄赛尔制成世界上首台柴油机,通过大幅提高压缩比,使热效率能够接近 27%<sup>[1]</sup>。现在,随着各种新技术的应用,内燃机各项性能指标取得了长足的进步,汽油机的热效率可达 30% 以上,柴油机的热效率可达 40% 以上<sup>[2]</sup>。长期以来,内燃机大量应用在交通运输、农业机械、工程机械等行业,成了当今世界上应用最广泛的动力机械,为推动社会进步和经济发展发挥了不可替代的作用。

近年来,以电动汽车、燃料电池汽车等为代表的新型动力技术得到世界各国政府以及汽车公司的高度重视。但是,国际汽车学术界和工业界清醒地认识到:汽车产业不可能发生类似电子信息产业的短期跨越式发展。作为电池电动汽车量产、普及的急先锋,日本日产汽车公司(Nissan Motor Company)在其绿色计划中预计到:到 2050 年,其生产的汽车一半以上仍然是传统内燃机汽车。因此,新能源汽车的普及将是一个漫长的过程,没有相当的数量,其节能减排的实际效果将会非常有限。在寻找新能源和可替代动力机械的同时,内燃机一如既往地受到广泛关注和重视。此外,2009 年美国科学院的国家能源报告也指出:内燃机在未来几十年仍将在移动式动力装置中占有支配地位<sup>[3]</sup>。因此,内燃机在近、中期仍是全球汽车的主流动力。在未来相当长的一段时间内,内燃机仍在汽车动力中占据统治地位。

我国现已跃升为全球内燃机第一制造大国和消费大国,2011 年内燃机产量突破 7700 万台,总功率突破 14 亿 kW,内燃机工业已成为国民经济和国防建设重要基础制造业<sup>[4]</sup>。同时,迫于能源危机和环境污染的压力,以及新能源动力的竞争压力,现代内燃机要不断通过技术革新,朝着节能、环保的方向发展,不断提

升热效率,才能在未来竞争中赢得一席之地。

## 二、车用汽油机的节能减排需求

进入新世纪以来,随着全球能源危机和环境污染的日益严重,世界各国对内燃机提出了“高效节能、清洁低排放”的要求,节能减排成为世界汽车工业发展的大趋势<sup>[5]</sup>。内燃机作为汽车、农用机械、工程机械等移动装置的动力源,是全球石油的主要消费对象。以中国为例,内燃机消耗的石油占我国石油总消费量的60%以上。因此,内燃机的节能是国家节能工作的主战场之一,开展内燃机的节能研究关系到国家的能源安全,意义极为重大。

20世纪70年代初,由于石油危机导致原油价格成倍上涨,引起对发动机燃油经济性的重视。20世纪70年代中期以来,美国、欧洲、日本等开始用法规 and 标准强制限制汽车的燃料消耗。由于发动机的燃料消耗越大,排放的温室气体CO<sub>2</sub>就越多,内燃机成为CO<sub>2</sub>的主要排放源之一。据2009年Ricardo的报告:到2007年,在人类活动导致的CO<sub>2</sub>排放中,以内燃机为主要动力的交通运输占25%。因此,提高内燃机热效率、节约燃油消耗是减少CO<sub>2</sub>排放的一个重要渠道,是全球经济和社会可持续发展的重要需求。正是基于这种考虑,世界各国纷纷制定了严格的CO<sub>2</sub>排放法规(即每公里CO<sub>2</sub>排放限值)及发展目标,如图1所示。从图中可以看到,欧洲、美国、加拿大、中国和日本在汽车燃油经济性或CO<sub>2</sub>排放上都制定了极其严格的法规,其CO<sub>2</sub>排放都是朝着不断降低的方向迈进。同时,我国出台了2015年全面实施第三阶段油耗法规来降低乘用车能耗<sup>[7]</sup>。由此,诸多举措正被实施用来降低整车燃油消耗。不断提高内燃机的热效率是满足车辆碳排放法规和目标最直接有效的途径。

由于以内燃机为动力的汽车排放对城市环境污染造成的影响,自20世纪60年代末和70年代初以来,美国、欧洲、印度和中国等国家纷纷制定强制性汽车排放法规和标准,以控制汽车排放物的影响,图2所示为以上国家推行的汽油车排放法规的各个时间段。近40年来,节能与减排已成为推动内燃机技术进步最重要的两个驱动力。随着排放法规的日趋严格,为了满足对内燃机燃烧过程排生成物的控制,往往是以牺牲内燃机热效率为代价的,于是出现了内燃机热效率发展历程的波动,如图3所示<sup>[8]</sup>。但是另一方面,由于内燃机有害排放和CO<sub>2</sub>排放都是燃油燃烧的副产物,节能本身就是减排,燃油消耗的降低直接意味着有害排放和CO<sub>2</sub>排放的减少。因此,提高内燃机热效率已经成为国际内燃机发展新的主要驱动力。

汽油机由于具有升功率大、重量轻、工作柔和、NVH性(噪声、振动、汽车的不平顺性)和微粒PM排放比柴油机好等多重优点,一直被广泛用于轻型车、轿

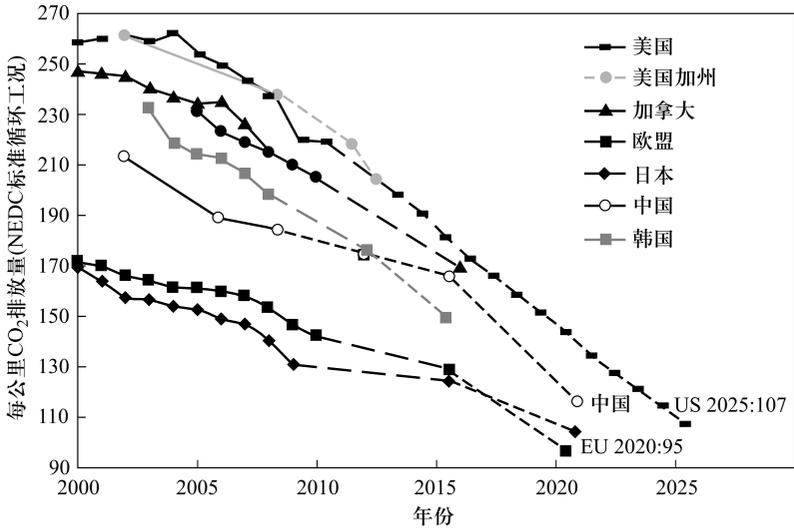


图1 世界各国或地区制定的乘用车每公里 CO<sub>2</sub> 排放目标<sup>[6]</sup>

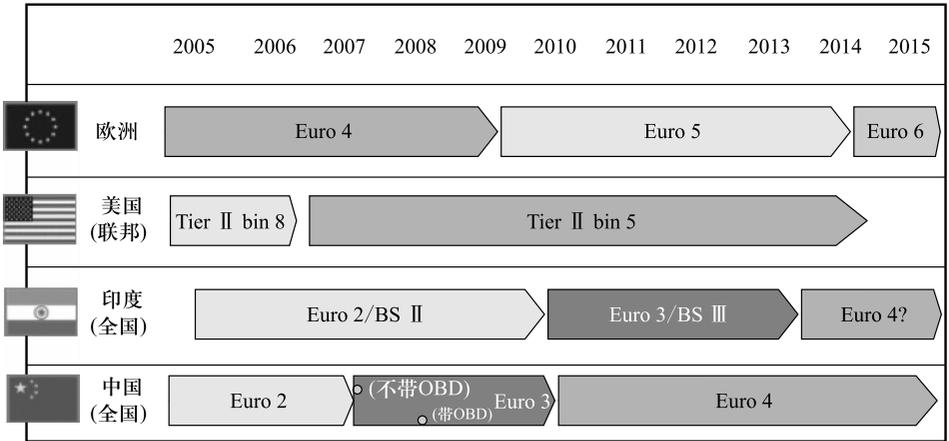


图2 世界各国推行的排放法规

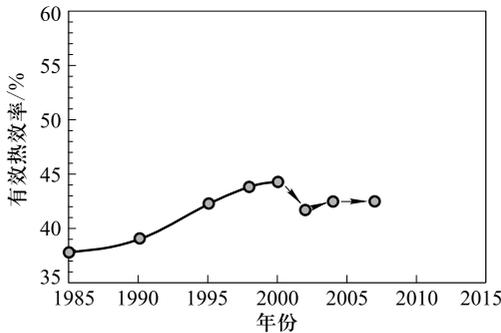


图3 内燃机热效率的历程 (Cummins 公司报告)

车和乘用车。因此,开展车用汽油机节能减排技术研究具有重要意义,既是汽油机技术发展的要求,也是国家乃至全球节能减排的需要。本报告对以汽油机为重点开展的提高热效率的技术途径进行了探讨,对我国汽油机近期、中期、长期发展提出了相关建议。

### 三、从整车能量流分析探讨车用汽油机节能技术路线

#### (一) 整车能量流特性分析

车用汽油机的热效率极限一直是广大内燃机工作者关心的问题。围绕这个问题,国内外许多学者开展了对整车(包括发动机)能量流的研究,通过分析燃油燃烧后各种形式能量流的分布,探讨影响整车能量利用效率的途径<sup>[9,10]</sup>。图4所示为一台中型汽油动力轿车依照典型道路循环行驶时的能量分布<sup>[11]</sup>。由图可见,传统汽油动力的燃料利用效率并不高。燃料燃烧释放的能量分为缸内做功和缸外流失两部分。其中,缸内膨胀做功只占40%左右,而缸外散失占60%左右。散失在缸外的能量主要包括排气能量损失与冷却液能量损失,这两部分能量没有得到利用而最终全部被排到大气中白白浪费。假设把这两部分能量回收利用,汽油机的能量利用效率将得到显著提高。由此可见,汽油机余热回收利用凸显了非常大的节能潜力!

分布在缸内做功的燃油能量仅占40%左右,这部分能量来源于油气压缩燃烧后膨胀而推动活塞做功,即指示功。指示功包括三部分:有效功、机械摩擦和泵气损失。其中,泵气损失功和机械摩擦功占燃油总能量16%左右;余下占燃油总能量24%的这部分能量才是发动机真正传给传动系统的输出功。由此可见,要提高汽油机的有效热效率,在指示功一定的情况下,应尽量减少泵气损失功和机械摩擦损失功。图4的意义在于为汽油车的节能技术路线指明了方向。

#### (二) 车用汽油机的节能技术路线

通过对汽油动力轿车依照典型道路循环行驶时的能量分布进行分析,可以总结出车用汽油机的节能技术路线分类,如图5所示。总的来说,改善车用汽油机的实际使用热效率的技术路线主要有3条,即:①提高汽油机的工作过程效率;②汽油机能量回收利用;③结合现代先进电子控制技术,实现对汽油机的智能化管理。下面将依次对这3条主要节能技术路线进行论述。

##### 1. 提高汽油机的工作过程效率

车用汽油机的工作过程效率由换气过程、缸内热功转换过程、运动件的机械摩擦损失(包括附件损失)共同决定<sup>[12]</sup>。换气过程对汽油机性能的影响是通过

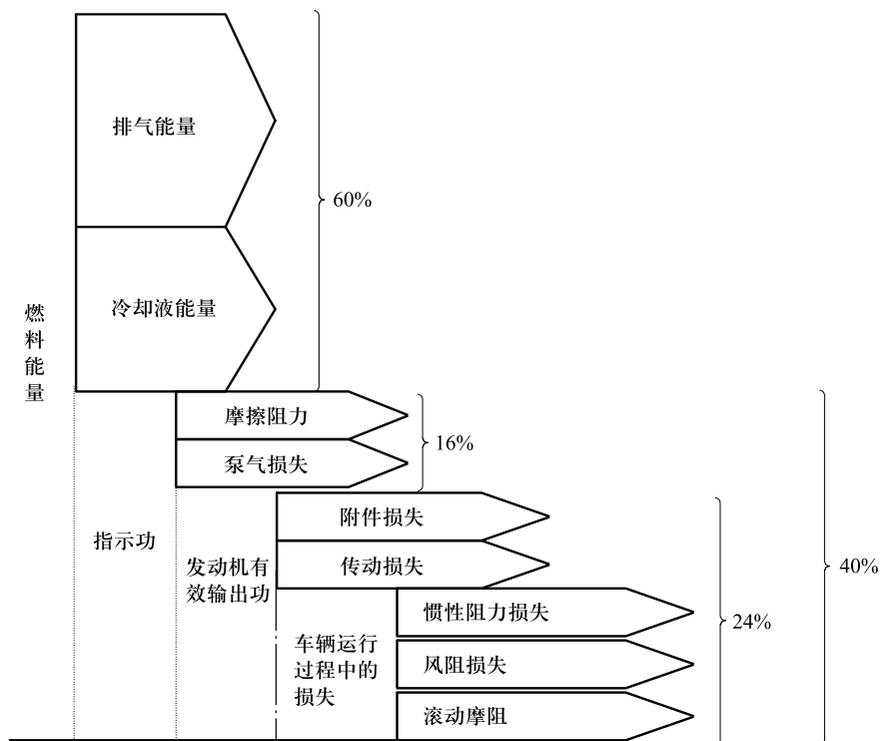


图 4 汽油动力轿车依照典型道路循环行驶时的能量分布<sup>[11]</sup>

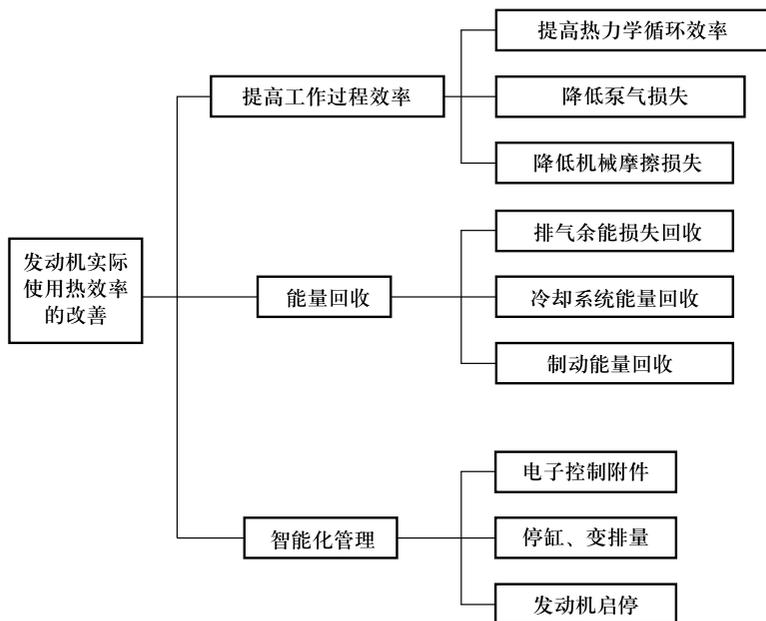


图 5 车用汽油动力的节能技术路线分类

新鲜充量的“量”以及换气过程的代价(泵气损失)来体现。而缸内热功转换过程的优劣,即混合气燃烧释放的热量转化为活塞指示功的“质”,是通过燃烧放热过程的相位以及燃烧过程的完善程度(燃烧效率)来体现。运动件的摩擦损失主要受转速影响,并随转速的增大而增大。附件损失通常很小,但不可避免。因此,提高汽油机的工作过程效率可以分别从提高缸内热功转换过程效率(热力学循环效率)、优化换气过程(降低泵气损失)、降低汽油机的机械摩擦损失等方面入手。

提高热力学循环效率的措施有很多,例如可以通过采用缸内直喷等手段提高压缩比、实现稀薄燃烧,提高汽油机工作过程多变指数以及燃烧效率;通过优化气阀定时以及点火正时提高汽油机指示热效率;采用可变压缩比技术增大汽油机的有效膨胀比等。由于车用汽油机大部分时间工作在部分负荷工况,受节气阀的节流影响,车用汽油机要消耗很大一部分泵气损失功。减少汽油机部分负荷下的泵气损失功,是提高车用汽油机使用工况下有效热效率的关键。这可以通过以下几种途径来实现:增压降排量、提高汽油机的实际使用负荷;采用汽油缸内直喷(取消节气阀)、EGR 技术、阿特金斯循环等技术来降低进气管的真空度(甚至取消节气阀);或者优化匹配废气涡轮增压器(如果匹配得足够好,甚至可能出现泵气功为正的情况)等。另外,由于车用汽油机的转速较柴油机更高,高转速下机械摩擦损失更大,因此摩擦损失所占的比重也比较明显。通过汽油机额定功率点的低转速化来降低机械摩擦损失,是提高汽油机工作过程效率的另一重要途径。

## 2. 汽油机能量回收利用

从图 4 所示的汽油动力轿车依照典型道路循环行驶时的能量分布图可知,车用汽油机有 60% 的燃油能量被排气和冷却水带走而白白浪费。通过回收这两部分废热能量,可以使车用汽油机的有效热效率得到显著提升。此外,车辆在行驶过程中特别是在城市道路工况下行驶时,经常会遇到启停、减速等工况,回收车辆(尤其是重卡、公交车等)的制动能量,同样可以使车用汽油机的能量利用效率得到较大提升。因此,开展排气能量、冷却水能量和车辆制动能量的回收利用,是提高车用汽油机的能量利用效率、减少 CO<sub>2</sub> 排放的一条重要技术路线。

## 3. 对汽油机进行智能化管理

结合现代先进电子控制技术,实现对汽油机的智能化管理,是提高车用汽油机使用状态下有效热效率的又一重要技术路线。主要包括采用电子控制附件、停缸变排量技术,对发动机的启停工况进行优化控制,对混合动力进行能量流合理管理和优化控制等。以停缸变排量技术为例,当车用汽油机工作在低负荷时,油耗率很高,这时如果采用停缸技术,在汽油机扭矩输出不变的前提下,使其他

工作的气缸负荷变大,这样可以使汽油机的工作点从“低热效率区”向“高热效率区”转移,从而达到节能的效果。

#### 四、车用汽油动力节能减排的关键技术

本部分内容从分析车用汽油机的各种损失入手,揭示各种损失与汽油机工作过程参数或设计参数之间的内在联系,在此基础上探讨降低或消除各种损失的关键技术,以及各种技术途径的节能潜力。

##### (一) 车用汽油机的各种损失

如图4所示,车用汽油机的热效率还相对较低,大部分的能量通过各种途径损失掉。车用汽油机的各种能量损失,是制约其热功转化过程效率的关键因素。车用汽油机工作过程中经历的损失有泵气损失、机械摩擦损失、传热损失(冷却损失)、排气损失、附件功耗损失等。图6为定转速下某款汽油机的热平衡随负荷的变化关系。由图可见,有效功和排气能量占燃油总能量的比例随负荷的增加而增大;泵气损失、机械摩擦损失、冷却损失和其他损失(主要包括辐射和不完全燃烧损失)占燃油总能量的比例随负荷的增加而减小。由此可见,车用汽油机在高负荷下具有更高的热效率。此外,改善车用汽油机的效率应该从降低排气损失、冷却损失、泵气损失及机械摩擦损失入手(辐射和不完全燃烧损失所占的比例非常小,影响甚微),使燃油能量更多地向有效功转移。

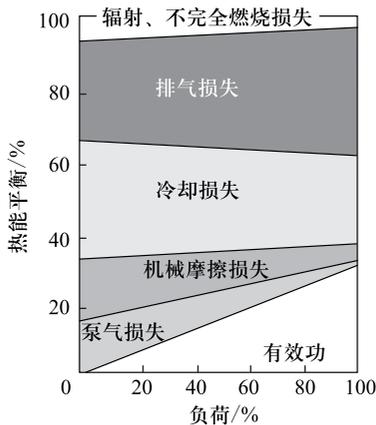


图6 车用汽油机定转速下的热平衡图

车用汽油机的有效热效率由指示热效率和机械效率共同决定,指示热效率和机械效率越高,车用汽油机的有效热效率也就越高。制约指示热效率的因素主要有汽油机的排气损失、缸内工作过程的热力学损失和泵气损失。减少这三

种损失,是提高车用汽油机指示热效率的有效途径。图 7 给出了以上各种损失与车用汽油机的工作参数或设计参数的关联。在本报告中,将影响或决定汽油机各种损失的参数(工作参数或设计参数等)定义为各种损失的“控制因素”。如图所示,排气损失的控制因素包括废气余能、气缸压缩比与膨胀比、工质比热比、燃烧周期和燃烧相位;热力学损失的控制因素包括气缸压缩比与膨胀比、工质比热容比、燃烧周期和燃烧相位;泵气损失的控制因素包括进、排气行程压力差。通过合理控制、匹配以上各种参数,有望减小汽油机的各种损失,改善其指示热效率。另外,制约车用汽油机机械效率的控制因素只有机械摩擦损失,这与发动机结构、摩擦副材料、发动机转速、缸内压力以及润滑等因素有关。

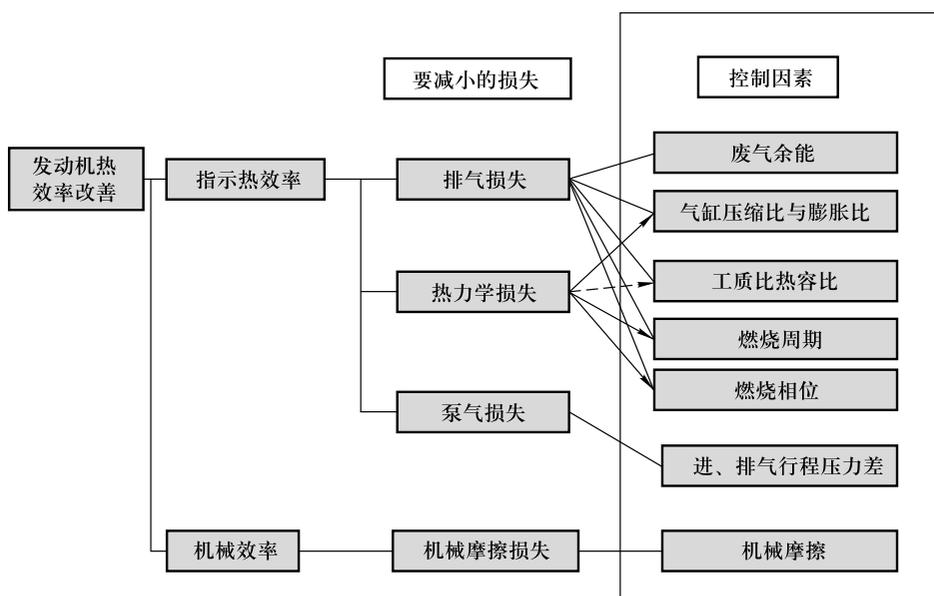


图 7 影响汽油机热效率的主要因素

## (二) 车用汽油机热效率改善途径

前面分析得出了“要减少的汽油机各种损失”与其相对应的“控制因素”之间的内在联系,接下来进一步追本溯源,推导出与各种“控制因素”相对应的“工作过程组织方式”,从理论层面上总结出车用汽油机有效热效率的改善途径。图 8 给出了与各种“控制因素”相对应的“工作过程组织方式”。例如,可以通过废气余能利用的方式来减少汽油机的废气能量损失,通过稀薄燃烧或阿特金斯(Atkinson)循环来控制进排气行程的压力差,通过降低摩擦损失幅度以及所占比重来控制机械摩擦等。

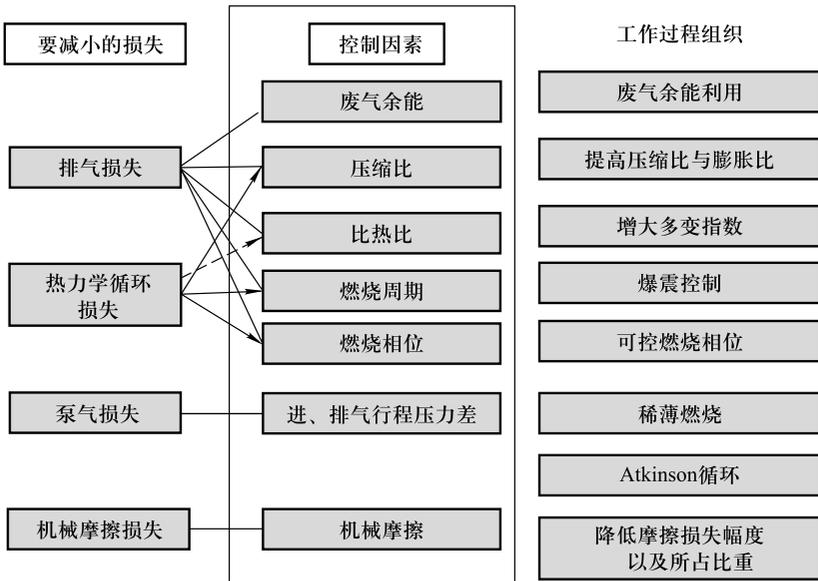


图8 汽油机效率改善——工作过程组织

图8从理论层面或汽油机工作过程组织方面揭示了减少车用汽油机各种损失、改善有效热效率的途径,但是还没有深入到具体的应用技术或实际开发的层面。因此,下一步工作就是如何由“理论依据”过渡到“实际应用技术”,即找到与各种“工作过程组织方式”相对应的解决方案——“应用层面的实施”。图9给出了改善汽油机热效率的应用层面的实施方式。例如,可以通过底循环技术

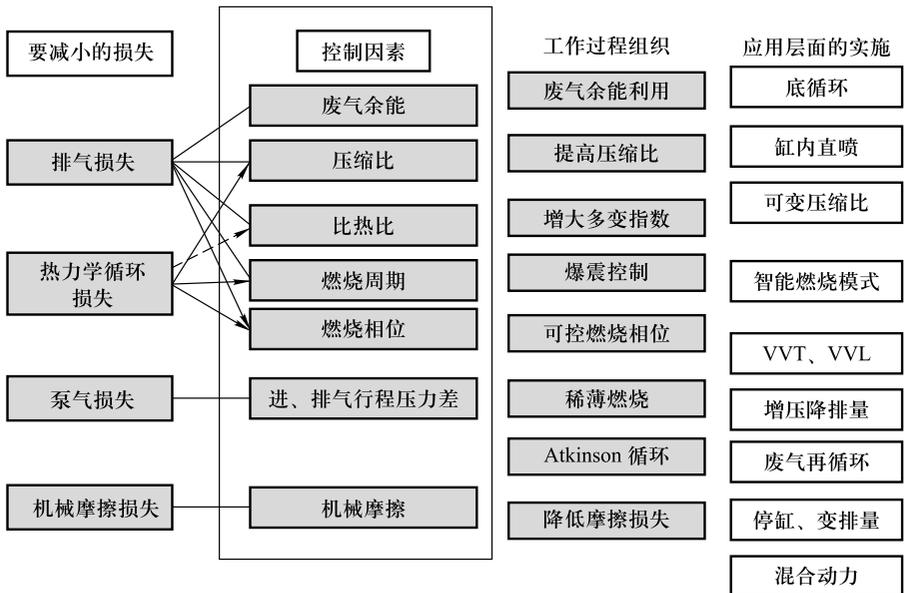


图9 汽油机效率改善——应用层面的实施

来回收汽油机的排气能量,实现汽油机废气余能的利用;可以采用汽油缸内直喷的方式来部分解决爆震限制汽油机压缩比提高的难题;可以通过可变压缩比技术来增大工作过程的多变指数;可以通过智能燃烧控制技术来实现对汽油机爆震的控制等等。值得一提的是,所有的汽油机效率改善技术都是某些控制手段的组合,而并不是某种单一技术就能实现的。

### (三) 车用汽油机热效率改善潜力分析

#### 1. 汽油机热效率改善潜力:提高压缩比

在推导、分析得出各种具体的车用汽油机热效率的改善途径后,进一步要关心的问题就是各种节能技术途径的改善潜力。下面将重点讨论几种典型的技术(或若干种技术的组合)对车用汽油机热效率的改善潜力。首先分析提高压缩比对汽油机热效率的改善潜力。根据汽油机理论循环热效率的计算公式(1)<sup>[1]</sup>:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{R_c^{\gamma-1}} \quad (1)$$

可以发现,指示热效率与压缩比和比热容比相关,提高压缩比显然可以增大汽油机的热效率。汽油机的燃烧过程近似为定容燃烧,等压缩比下其热效率高于柴油机的定压燃烧过程。但是实际上柴油机的热效率更高,这主要是因为柴油机压缩比较高的原因。因此,提高汽油机压缩比可以显著提高其热效率。此外,传统汽油机采用当量比为1的均质燃烧过程,其比热容比低于柴油机,同样使得其热效率较低,因此汽油机稀燃技术可以提高其比热容比,从而改善热效率,稀燃将在后续内容中介绍。

#### 2. 汽油机热效率改善潜力:降低泵气损失

如前所述,泵气损失是限制车用汽油机有效热效率的一个重要因素,减少泵气损失,可以使车用汽油机的有效热效率得到改善<sup>[13]</sup>。但是,泵气损失与发动机负荷密切相关。图10给出了2000 r/min时泵气损失对某款汽油机热效率和性能的影响<sup>[14]</sup>。图中可见,随着汽油机缸内净平均指示压力(NMEP)的增大(节气门开度相应增大),进气管压力近似呈线性增长。于是,泵气平均有效压力(PMEP)与指示平均有效压力(IMEP)的比值(PMEP/IMEP)一直单调下降;随着汽油机NMEP的增大,PMEP近似呈线性下降。当IMEP从1.5 bar增加到9 bar,PMEP大约从0.74 bar下降到0.21 bar。最后从实测的指示比油耗(ISFC)可以看到,当IMEP从1.5 bar变化到9 bar,ISFC从340 g/(kW·h)下降到225 g/(kW·h),下降率达到33.8%。设想PMEP下降到极限值0,ISFC将下降到相应的极限值220 g/(kW·h),下降率达到35.3%,由此可以看出减少(甚至

消除)泵气损失对汽油机的节能有巨大的潜力。

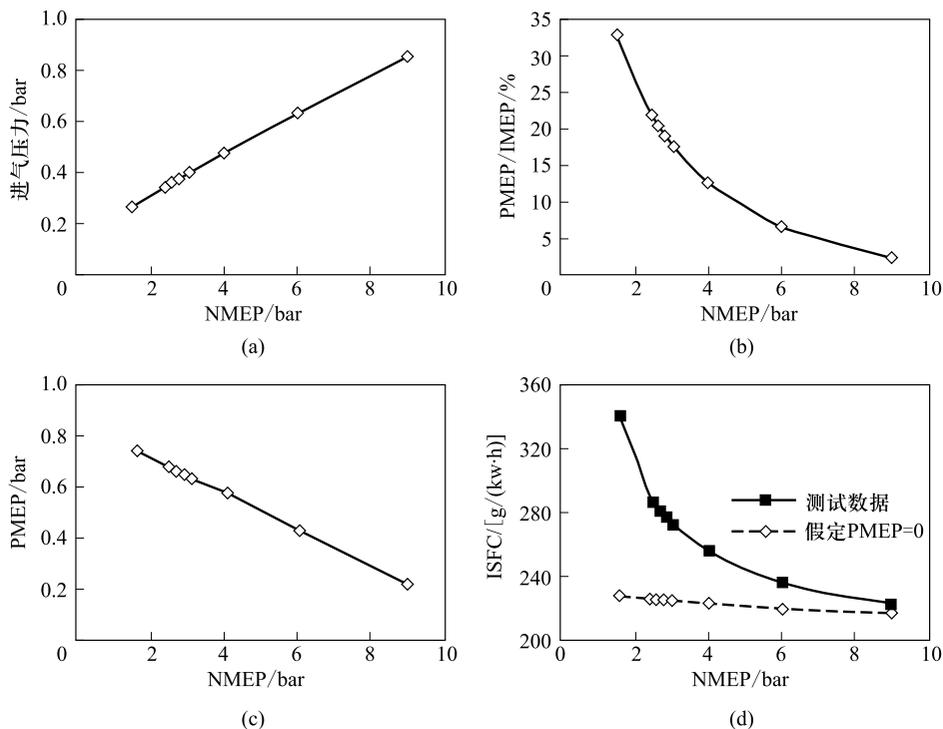


图 10 泵气损失对汽油机热效率和性能的影响 (2000 r/min) [14]

3. 汽油机热效率改善潜力:增压提高发动机使用负荷从而降低泵气损失与机械摩擦损失

增压、小型化技术最明显的优点就是通过减少汽油机排量来提高整车常用工况下发动机的平均有效压力,以降低泵气损失及机械摩擦损失所占的比重而使其工作点由低效率区向高效率区移动,并通过增压来保证在全负荷工况下整车的动力性不受太大影响。以上两个方面都有利于改善汽油机的热效率。图 11 给出了三种汽油机万有特性下的比油耗对比。由图可见,采用增压后汽油机的最低比油耗并没有得到改善,然而其比油耗区域发生了变化,即最低比油耗区域扩大,并且向低负荷区域(车用发动机的常用工况区)移动。在低负荷时增压小排量汽油机的比油耗会小于自然吸气大排量汽油机的比油耗。换言之,在低负荷下增压汽油机才展示出其节油效果。在扭矩相同的条件下,自然吸气式汽油机的比油耗为 400 g/(kW·h)时,此时增压汽油机的比油耗大约为 350 g/(kW·h),节油率达到 12.5%。这主要是因为,在低负荷下,自然吸气式大排量汽油机的节流损失,泵气损失较大,而此时增压小排量汽油机的泵气损失较小;同时由于增压汽油机排量较小,在扭矩相同的条件下,使用负荷(BMEP)更大,使汽油机工作在

较高效率的区域,由以上两个方面的原因而产生了节油效果。

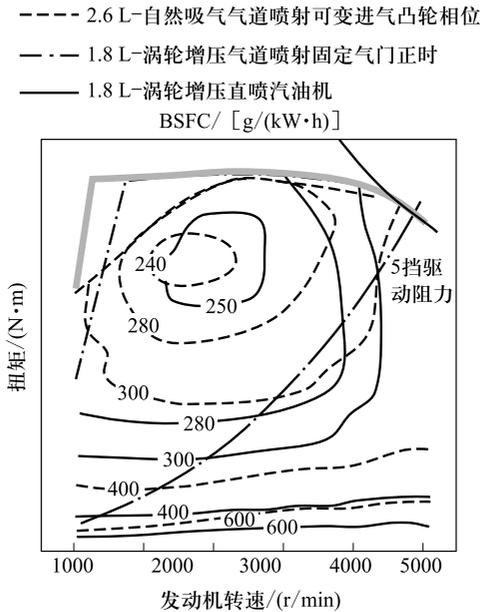


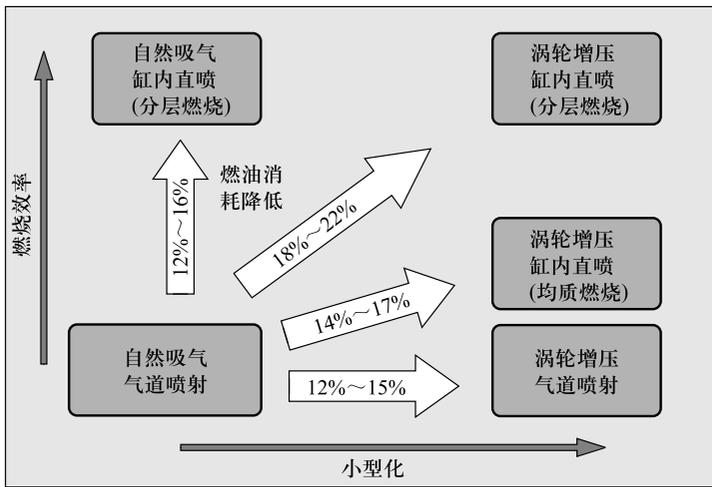
图 11 三种汽油机万有特性下的比油耗对比<sup>[15]</sup>

#### 4. 汽油机热效率改善潜力:缸内直喷与增压

虽然前面分析了提高压缩比对汽油机热效率的改善潜力,但是没有针对具体的技术途径进行分析。对于汽油机来说,提高压缩比最直接有效的办法就是采用缸内直喷。实际上,采用汽油缸内直喷技术后,不仅可以适当提高压缩比,还可以实现分层、稀薄燃烧,从而使燃烧效率提高;同时稀薄燃烧对应富余的空气量和较高的进气压力,而较高的进气压力又可减少部分负荷时的泵气损失。由此可见,采用直喷后可以从多方面来改善汽油机的热效率。图 12 为提高汽油机燃油经济性的主要措施。由图可见,在自然吸气式、气道喷射式汽油机的基础上采用直喷、分层燃烧后,热效率可以在原机基础上提高 12% ~ 16%;在增压降排汽油机上采用直喷、分层燃烧后,其热效率可以在原自然吸气、气道喷射的汽油机上提高 18% ~ 22%;而在自然吸气汽油机上采用直喷、均质燃烧后,其热效率也可以在原自然吸气、气道喷射的汽油机上提高 14% ~ 17%,由此可见直喷(或结合增压,或结合分层燃烧技术)对汽油机有着较大的节能潜力,直喷技术是汽油机发展的重要方向。

#### 5. 汽油机热效率改善潜力:均质压燃燃烧技术

众所周知,燃烧性能对汽油机的热效率有着举足轻重的影响。在现有的发动机技术中,均质压燃(HCCI)模式集成了稀燃、高压缩比、高比热容比、快速燃

图 12 提高汽油机燃油经济性的主要措施<sup>[15]</sup>

烧等多种先进技术,因此可以从多方面改善汽油机的热效率。但是,HCCI 燃烧模式也有一定的条件限制,或者说,只能在一定的发动机工况或工作条件下才能采用 HCCI 燃烧模式。图 13 给出了 HCCI 发动机的工作范围及面临的限制。可以看出,HCCI 燃烧模式只能在中低速和中低负荷正常工作,在有效工作负荷的上限,会出现爆震燃烧;在有效工作负荷的下限,会出现着火温度不足;在转速的上限,会出现反应时间不足而导致失火。

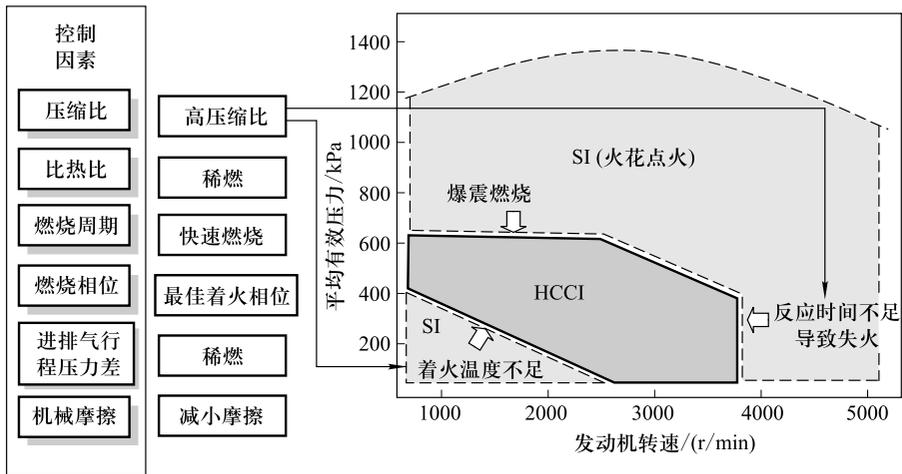


图 13 HCCI 发动机的工作范围及面临的限制

图 14 给出了原均质点燃式汽油机和分阶段采用 HCCI 燃烧模式后在转速为 1000 r/min 时的净指示比油耗的对比结果。由于净平均指示压力低于 350 kPa 时均质混合气只通过压缩不足以产生足够的点火能量(温度),以此第一阶段采

用准 HCCI(即类似于柴油机燃烧模式的缸内直喷、非均质压燃)模式;第二阶段为采用进气口加热技术的纯 HCCI 模式。从图中可以看到,采用纯 HCCI 燃烧模式有着非常大的节能潜力,尤其是在低负荷时,节能潜力更加明显,此时汽油机可以获得很高的热效率:采用第二阶段 HCCI 模式的指示比燃油消耗较原机相比最大可降低 45%。

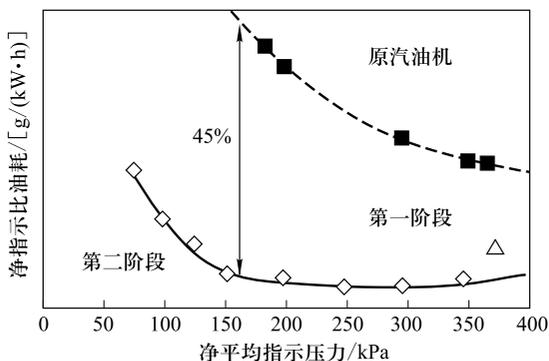


图 14 原汽油机和 HCCI 汽油机的净指示比油耗对比 (1000 r/min)

### 6. 汽油机效率改善潜力:排气余热回收

整车能量流分析和汽油机热平衡分析指出:汽油机排气带走了相当大一部分能量(大部分工况下排气能量占总燃油能量百分比在 30% 以上)。回收排气能量是改善汽油机热效率的有效途径。如何最大限度地回收利用排气能量是提高汽油机总能利用效率的关键。下面以常用的排气能量回收方法——朗肯蒸汽循环为例,分析排气能量回收对汽油机热效率的改善潜力。

图 15 为回收汽油机排气能量的朗肯循环示意图。将该循环耦合在一台自然吸气式汽油机上,以部分负荷下的常用工况(转速 2500 r/min,负荷 5 bar,排气

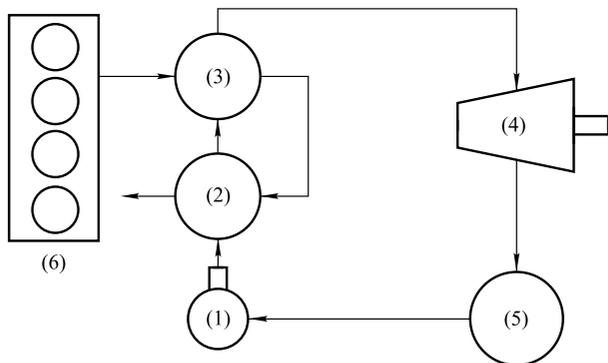


图 15 回收汽油机排气能量的朗肯循环示意图<sup>[16]</sup>

(1) 泵;(2) 蒸发器;(3) 过热器;(4) 膨胀器;(5) 冷凝器;(6) 内燃机

温度 550 °C) 为研究基准点, 计算得出的排气能量回收效率随朗肯蒸汽循环参数的变化关系如图 16 所示。由图可见, 在设计工况内朗肯蒸汽循环的排气能量回收效率介于 5% ~ 15% 之间。在高负荷工况下, 排气能量和有效功相差不大, 采用朗肯蒸汽循环后, 汽油机节油率可以达到 15%。在部分负荷下, 汽油机的有效功小于排气能量, 这时采用朗肯蒸汽循环回收排气能量后, 汽油机的节油效果将更明显。值得一提的是, 不同类型的底循环、不同的循环条件、不同的工质会使排气能量回收效率产生差异, 这里只是最常用的底循环方式之一。

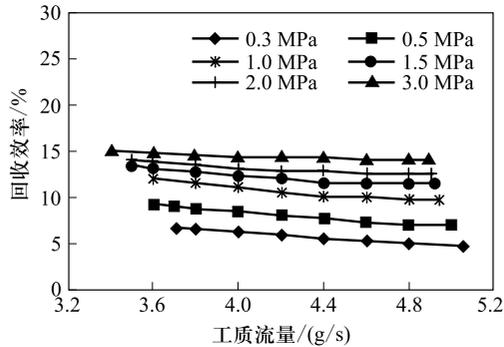


图 16 排气能量回收效率随工作压力的变化<sup>[16]</sup>

### 7. 汽油机热效率改善潜力: 冷却液能量回收

与排气能量回收一样, 冷却液能量回收也是改善汽油机热效率的有效途径之一。现在的问题是, 冷却液能量回收的潜力是多少? 下面从另一个角度——焓分析法来探讨这个问题。图 17 所示为某款自然吸气式汽油机的冷却液能量焓百分比 MAP 图(即冷却液能量中有效焓占燃料化学焓的百分比)。可以看到, 在低负荷区域, 焓百分比比较大; 随着负荷的增大, 焓百分比逐渐减小。也就是说, 在低负荷时, 冷却液能量有更大的回收潜力。理论上说冷却液的能量回收率最多可达相当于 9% 的燃油能量, 但是在实际回收利用过程中会受到回收系统的效率制约而大打折扣。

### 8. 混合动力: 刹车能量回收

通过混合动力来回收车辆的刹车能量, 是改善车用汽油机热效率的另一种有效方式。图 18 分别给出了欧洲道路循环工况和混合动力车辆回收的刹车能量, 实验车辆的发动机排量为 2 L。如图所示, 减速时刹车所舍弃的能量约占 (NEDC) 循环中必要能量的 18%; 通过采用混合动力可以回收大部分车辆的减速能量, 只有 5% 左右的能量通过发电损失、电池充电损失、电机驱动损失而被损失掉, 剩下的占 (NEDC) 循环中必要能量的 13% 的减速能量可以直接回收。因此, 混合动力汽车展现了较大的节能潜力。

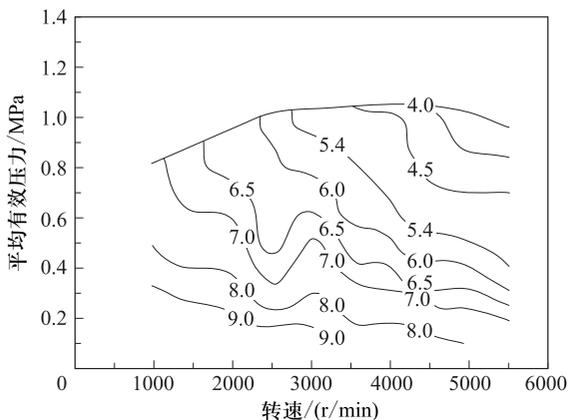


图 17 汽油机冷却液能量的焓百分比 MAP 图<sup>[17]</sup>

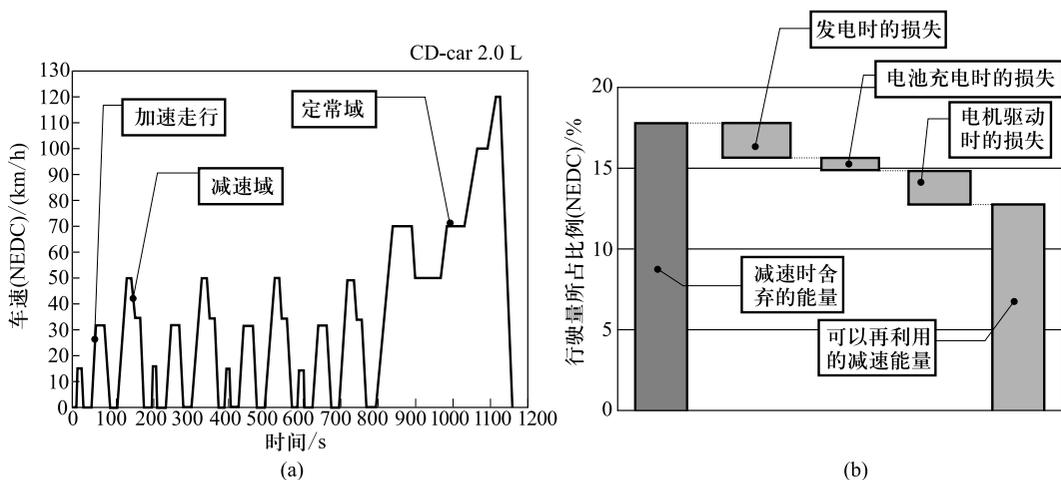


图 18 减速和刹车工况下的能量回收

### 9. 混合动力：内燃机的智能化使用

通过对混合动力进行智能化管理和使用，是改善车用汽油机热效率的另一种有效方式。换言之，良好的混合动力控制策略能产生明显的节油效果。图 19 给出了一款混合动力发动机油耗及电机输出要求（发动机转速为 1500 r/min）。可以看到，在低负荷区域，可以通过电机来降低混合动力的比油耗。其中，当负荷小于 1.8 bar 时为通过减速再生可覆盖的工作区域；当负荷介于 1.8 ~ 4 bar 时，可以让发动机在最高效率点发电，而让电机来驱动车辆行驶；当负荷大于 4 bar 时，发动机的比油耗开始下降到比较低的范围，这时为了满足动力性，可以直接由发动机来驱动。也就是说，在混合动力车辆上，只让发动机在高效率区域工作，由于避开了低效率的工作区域，这样就能节省一部分燃油，提高经济性能。

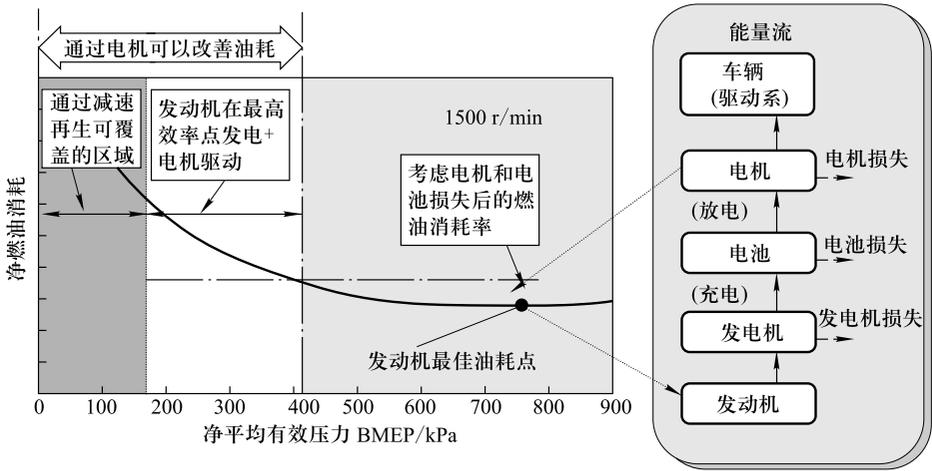


图 19 发动机油耗及电机输出要求

## 10. 汽油机节能减排各项主要技术路线的对比

图 20 为里卡多公司分析总结的近期各种先进汽油机技术对其性能(经济性、排放性、成本等)的影响。据图可见,发动机小型化(down sizing)对提升燃油效率、降低  $\text{CO}_2$  排放的影响尤为显著。未来汽油机的节能技术将聚焦在直喷或非直喷小型化和增压技术的研发和应用上。相比其他节能减排的路线,尤其是各种新能源动力路线,发动机小型化是目前进一步提高传统汽油机的功效和能耗比(而且提升空间很大)的最为现实的技术路线,它的成本低很多,更可能大规模应用。世界各大汽车厂商也在加大对发动机小型化的研发和应用。其中,在中国汽车市场占重要地位的大众公司正是发动机小型化的主要推动者,因此发动机小型化可能在中国市场上各种节能减排路线中最先大规模应用。

	特性						
	燃油效率	$\text{CO}_2$ 减少	$\text{NO}_x$ 减少	颗粒物减少	性能	包装	成本
+++ 很大的正面影响							
++ 正面影响							
+ 有限的正面影响 / 没有影响							
- 有限的负面影响							
-- 负面影响							
--- 很大的负面影响							
减小排量	++	++	-	-	-	+	+
热管理	+	+	/	+	+	-	--
增压	--	--	--	-	+++	--	--
停缸技术	++	++	/	+	+	-	--
均质直喷	+	+	+	-	+	-	--
分层直喷	++	++	--	--	+	--	---
稀燃 $\text{NO}_x$ 后处理	-	-	++	+	-	-	--
微粒捕集	-	-	/	+++	-	-	--

图 20 近期和未来各种节能技术的对汽油机性能的影响<sup>[6]</sup>

可变配气机构通过改变气门相位、定时和升程来减少低温时的 HC 排放以及高温时的  $\text{NO}_x$  排放,同时可提高低负荷时的燃料利用率和降低泵气损失,目前只应用于高端发动机。而单纯的可变气门定时技术已经得到了广泛的应用。

停缸技术(变排量技术)是指在发动机低负荷工况时,停止部分气缸的工作,而迫使工作的气缸处于较高的负荷,从而使发动机产生较高的热效率,对提升燃油效率、降低  $\text{CO}_2$  排放的影响也比较显著。但是该技术的适用工况范围有限。

当前增压汽油机的主要开发目标,是通过增压来减小排量,降低部分负荷时的油耗,同时减小发动机质量和体积,搭载方便。

稀薄燃烧可有效地改善低负荷时的汽油机热效率,增加点火能量,强化混合气的紊流,采用缸内直接喷射等使混合气分层从而使点火稳定,也防止了燃烧速度的降低;混合气稀薄,增大进气节流阀开度,可减少泵气损失。此外,较低的燃烧温度可使冷却散热损失减少,混合气的比热容比上升而使热效率得到进一步改善。稀薄燃烧系统耦合富氧  $\text{NO}_x$  催化转化器(Lean  $\text{NO}_x$ )可进一步控制  $\text{NO}_x$  排放,降低直接影响热效率的未燃产物的排出。因此,缸内直喷耦合三效催化器将是未来汽油机技术主导。

综上所述,未来汽油机节能技术应用的一个重要趋势是汽油直喷技术和涡轮增压或气门机构技术的协同,以期获得最佳的功效、能耗和成本的平衡。

以上详细讨论了车用汽油机的各种能量损失,得出其影响因素以及与汽油机设计或运行参数的关系,在此基础上分析了与各种损失对应的“控制因素”,总结出与各种能量损失相对应的改善和优化途径。最后,对比分析了各种节能技术途径的节能潜力,以及在汽油机上的应用前景。分析结论认为,“增压、小型化、缸内直喷”有很大的节能潜力,是未来汽油机的主要发展方向。

## 五、汽油机“增压、小型化、缸内直喷”技术挑战以及解决方案

通过增压小型化来提高内燃机的使用负荷,间接降低泵气损失与机械损失,使其工作在更高效率区,是车用内燃机节能、减排的最直接、有效的技术路线。里卡多的研究报告表明,通过汽油机小型化、增压技术,可以有效实现节能减排,以 Ford 2.0 L 汽油机为例,降低一半的排量,可以使  $\text{CO}_2$  的排量下降 25%<sup>[6]</sup>。但是汽油机增压后爆震倾向与热负荷都会升高,导致发动机的设计与运行参数朝不利于缸内热功转换效率的方向发展,如压缩比降低、点火推迟和混合气加浓等。增压、小型化、缸内直喷汽油机面临的技术挑战及其技术方案包括以下几个方面。

## (一) 增压器延迟影响加速性能

### 1. 涡轮机迟滞现象

废气涡轮增压器的主要缺点是瞬态工况下的增压延迟(turbo-lag)。迄今为止涉及的发动机与增压器的匹配讨论都是稳态工况,即当发动机与增压器的工作状态都达到稳定状态时的情况。但是,作为移动式装备的发动机通常都处于动态工况,废气涡轮增压器的气体流量、压力、温度都随整车运行工况的变化而变化,即涡轮增压器的工作状态、转速、流量、压比都在发生变化。最典型的例子是在发动机从怠速(整车驻车状态)起步加速的过程中,由于此时流过涡轮机的废气流量很低,涡轮机的转速很低、功率小,而产生的压气机压比流量很小。但整车加速是从驾驶员舒适性的角度出发,司机往往希望整车能快速起步,车速迅速达到目标,因而要求发动机迅速提供强劲的动力。但是由于发动机的动力与新鲜空气流量直接相关,而增压器能提供的空气流量又与其转速与压比直接相关。反过来,增压器转速与压比的提升又取决于发动机废气的流量与温度。就是说,在汽车整车的加速过程中,发动机与增压器互相依赖,又互相牵制,要较长的一段时间(3~5 s)涡轮增压器才能达到满负荷运行状态,这就是通常所说的增压器延迟。图 21 是某发动机加油门时,废气涡轮增压发动机和自然吸气发动机的扭矩响应时间的对比,可以看到,废气涡轮增压发动机明显有一段加速滞后时间,这便是涡轮迟滞时间。

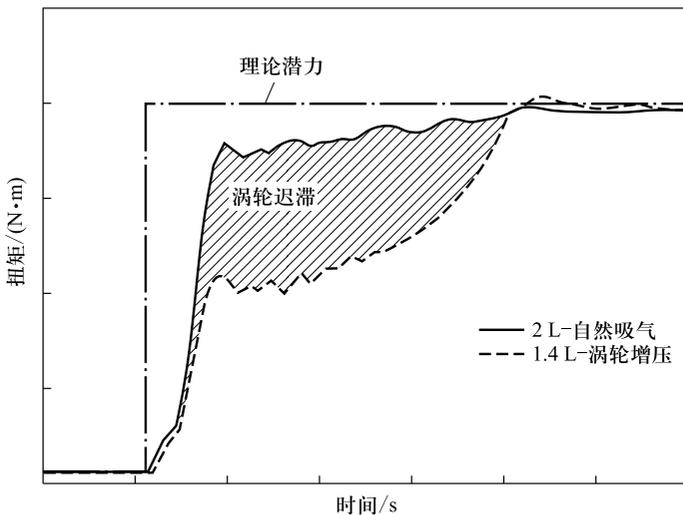


图 21 涡轮机迟滞现象<sup>[18]</sup>

从发动机本身和增压器结构方面进行改进,可以缩短发动机瞬态工况下的延迟时间,提高发动机的瞬态响应能力。一台发动机的瞬态响应能力上去之后,

必将使整车的低速启动和加速更加顺畅,改善整车的舒适性。

## 2. 涡轮增压迟滞的解决方案

改善废气涡轮增压器瞬态响应的措施有采用可变喷嘴截面涡轮(VNT)、两级涡轮增压系统、电机助力两级涡轮增压系统和机械与涡轮复合式增压系统等。

1) VNT 涡轮,这种喷嘴环截面可变的特性,可实现气流的工作过程在多条流量曲线之间变化,这样既可获得低转速时(较固定截面涡轮机)更高的增压度,又可避免在高速时的废气旁通。这种涡轮可以提高发动机低速时的扭矩,但对发动机的瞬态响应能力的改善受涡轮效率的制约。可变喷嘴截面涡轮的效率一般不高,通常其效率最高值设计在常用的 40%~60% 截面开度下,一般比固定截面式涡轮机低 5% 左右。

2) 两级涡轮增压系统,按工作压力区分为高压级增压器与低压级增压器,高压级采用较小的涡轮是为了在发动机低转速时产生足够的增压压力,来提升低转速时的发动机扭矩。随着发动机转速的上升,需要逐渐开大旁通阀让部分发动机废气旁通至低压级涡轮。当发动机转速高于一定值时,旁通阀全开,高压级增压器已基本不起作用,发动机的增压压力全部由低压级增压器提供。这种增压系统在一定程度上可以缓解涡轮迟滞现象,但不能完全消除;另外,很难对两级增压器大小进行匹配,以及对放气阀开度进行精确控制。

3) 电机助力两级涡轮增压系统,即在涡轮连接轴上加装一个高速电机,通过改变该电机的电能输入、输出端的极性,该电机可作为电动机或发电机使用,在增压器起步加速阶段,电动机提供的附加扭矩可使增压器加速而大大减少增压器延迟。但此项技术亟须突破的技术瓶颈在于助力电机的额定功率,主要问题是系统的电流过高。另外,涡轮温度过高也影响电机应用。

4) 机械与涡轮复合式增压系统,采用机械式+涡轮增压系统来改善涡轮增压延迟,是提高低转速扭矩和改善涡轮迟滞效应的最为常用方法。但是,机械式增压器的缺点是效率低,且需要加装增速器和离合器,增加了发动机在汽车机舱内布置与运行控制的难度。

图 22 是机械涡轮复合式增压系统在改善涡轮迟滞方面的效果曲线。从图中可以看出,加了机械增压器的发动机进气压力能在极短的时间内建立起来,这是机械增压器在起作用,这也一部分抵消了涡轮机的延迟效应。同理,发动机的转速也可以在极短的时间内得到提升。而只有涡轮增压器的发动机,从 1000 r/min 到 5000 r/min 速度建立的时间要比复合式增压系统发动机的时间多 4~5 s。

图 23 是采用不同增压方式时整车加速性的仿真结果对比图。从图中可以看出小涡轮机的加速性优于 VNT 涡轮机,但机械增压的加速性是最好的,但油耗率最高,因为机械增压器的动力直接来源于曲轴,可以很快便建立增压压力,

故响应性最佳。

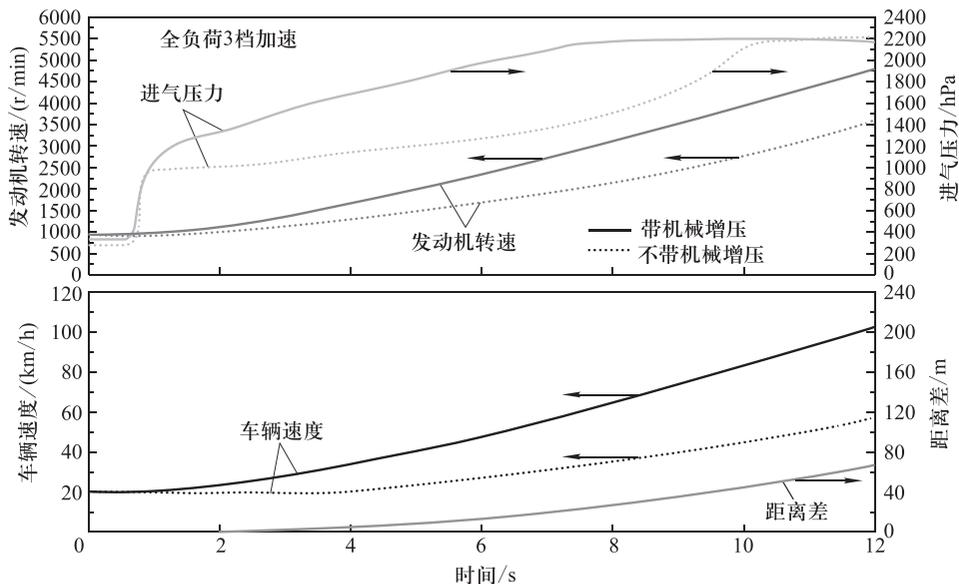


图 22 Super-Turbo (机械式 + 涡轮增压器) 改善加速性

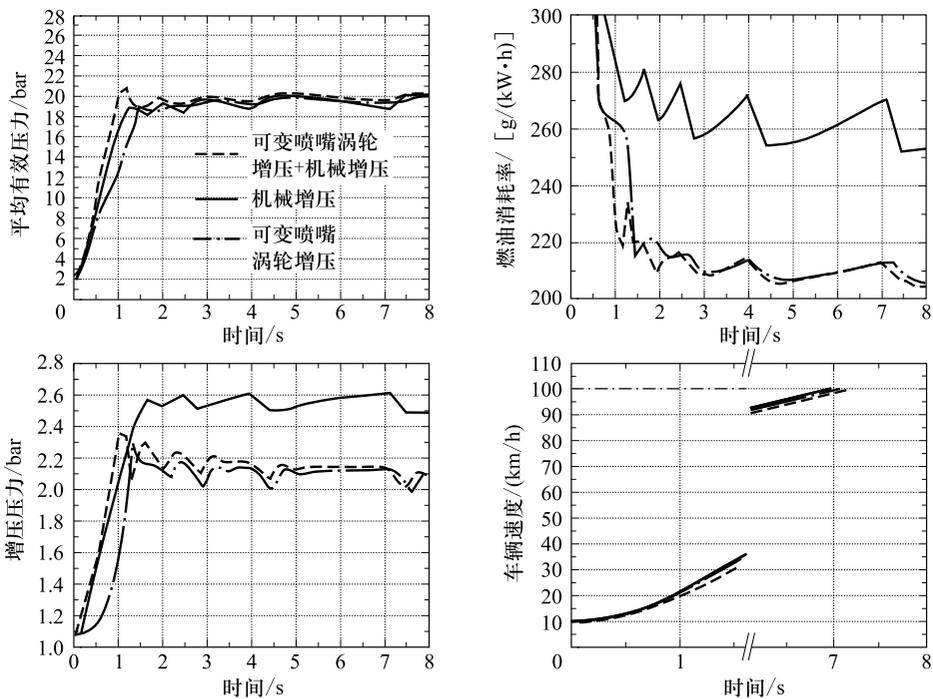


图 23 发动机采用不同增压方式时的整车加速性仿真结果对比

除了上述通过改变增压器的结构,还可以通过改变发动机和增压器本身的运行参数来减少涡轮机的迟滞效应。如对废气涡轮增压汽油机的配气相位进行

优化研究,在不同工况下,分析计算进、排气门开启角度,从而使废气涡轮增压汽油机性能得到提高。图 24 说明气阀定时对发动机废气涡轮迟滞效应的改善情况。

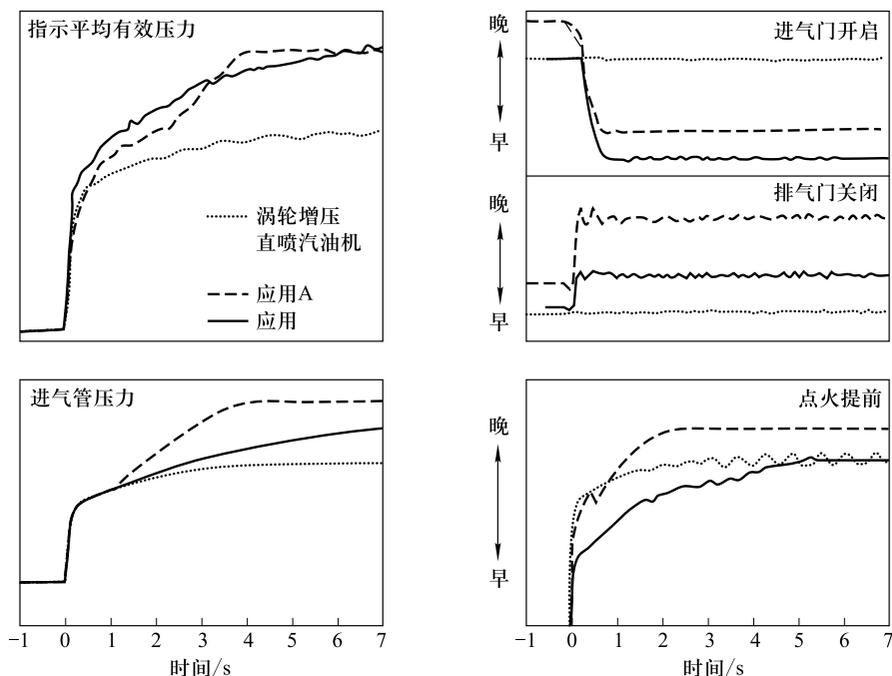


图 24 可变气阀定时改善加速性

## (二) 增压引起的爆震问题及解决方案

### 1. 增压引起的爆震和早燃问题

汽油机有一个比较大的问题,就是爆震。对于传统的汽油机,一般认为爆震起源于末端混合气自燃,导致混合气快速、大量地释放能量,导致局部高压。由于压力分布不均匀引起压力波动或冲击波在燃烧室中来回传播,而可能引起发动机共鸣。汽油机增压以后,由于混合气压缩始点压力、温度增高,以及燃烧室受热零件热负荷提高等原因,将促使爆震的发生。另一方面,汽油机增压后另一危害极大的非正常燃烧现象是早燃(pre-ignition)问题,该燃烧类似于爆震燃烧,即混合气快速燃烧,导致缸内压力迅速增大。但相对于传统爆震燃烧,其发现在火花塞点火之前,着火点不固定并且随机出现,缸内爆发压力远比传统的爆震燃烧大,其破坏力更大,所以又称超级爆震(super-knock)。关于早燃机理目前认识还不清楚,也是目前增压、小型化直喷汽油研究的难点和需要解决的关键瓶颈问题。

图 25 是发动机三个独立循环缸压曲线图,分别对应正常燃烧的缸压曲线、

轻微爆震缸压曲线和爆震缸压曲线。发动机正常燃烧时缸压曲线光滑,不会出现压力波动的痕迹;轻微爆震时发动机缸压曲线只会在燃烧过程中出现小幅度的缸压波动,波动振幅很小,不会出现尖峰;而当爆震发生时,会在燃烧过程中出现高频大幅压力波动,而且会出现明显的波尖,并且它的振幅随着时间而逐渐衰减。发动机在轻微爆震时,发动机功率略有增加;爆震时发动机缸内热功转换过程偏离最佳相位,从而导致功率下降,工作变得不稳定,转速下降,发动机有较大振动,冷却系统过热,使气缸体和气缸盖温度上升。

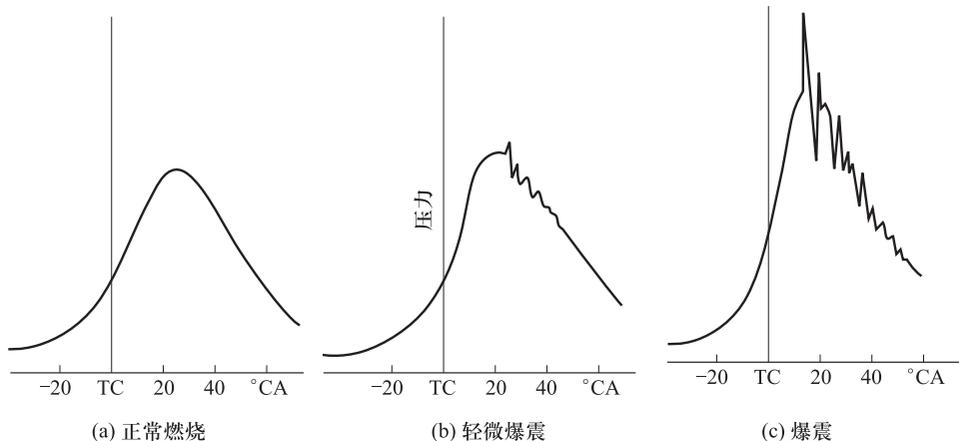


图 25 不同燃烧条件下缸内压力曲线

汽油机爆震和早燃产生的危害非常多。首先,发动机过热,气缸盖、活塞顶面的温度上升,导致轻合金气缸盖、活塞发生局部金属变软、融化烧损,这种过热是爆震带来的最大危害。其次,发动机热效率降低、输出扭矩下降,这是由于压力波冲击会破坏气缸壁面层流边界,从而使向气缸壁面的传热量大大增加,冷却损失增加,输出功率下降;燃烧室内部高温引起燃烧产物加速离解成  $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$  等,严重时也会析出碳粒,因而热效率下降。另外,发动机爆震和早燃时,零件的应力增加;同时,压力波冲击缸壁表面,使之不易形成油膜,导致机件加速磨损。

## 2. 爆震问题的解决方案

### (1) 燃烧过程优化

加速燃烧是抑制爆震的一种直接有效的方法。可以通过增强汽油机缸内气流的滚流比(或采用变滚流比技术)来加速燃烧、减少爆震倾向。图 26 所示为变滚流比技术对提高汽油机燃烧放热速率的影响示意图。可以看到,采用变滚流比技术后,汽油机的燃烧放热速率大大提高,燃烧速度加快,从而可以达到提高抗爆震能力。

### (2) 可变压缩比技术

为了充分发挥减小排量以提高增压汽油机燃油经济性的潜力,同时控制爆

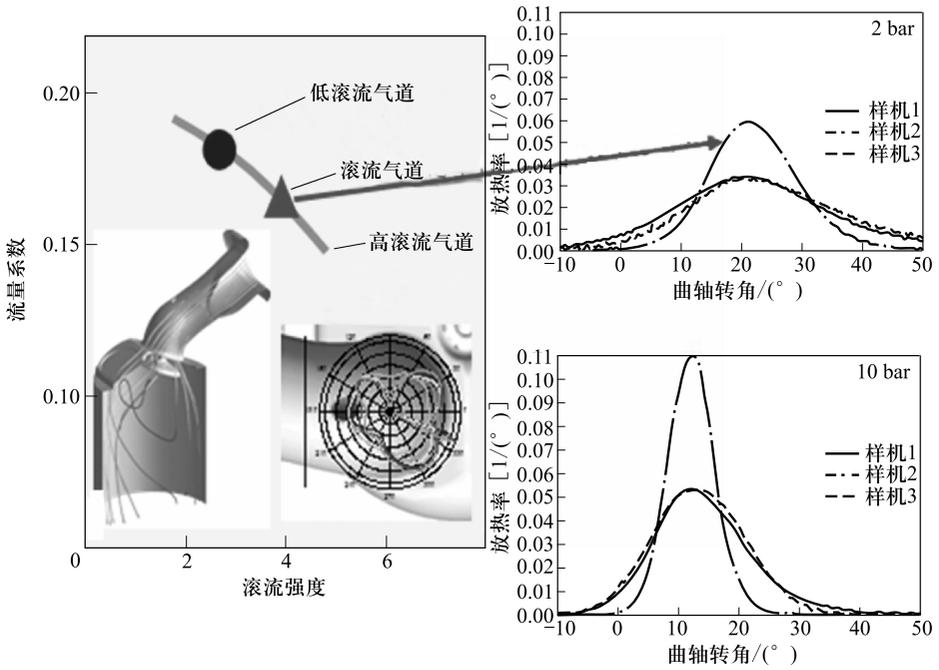


图 26 变滚流比技术提高抗爆震能力<sup>[15]</sup>

震,一种有效的解决方案是随着工况而改变压缩比。压缩压力高时容易发生爆震,这也是为什么一台自然吸气发动机要改造成增压发动机时一般要降低压缩比。通过一种特殊的机构,可以实现压缩比随工况变化而变化。当发动机爆震传感器传输的信号显示将要爆震时,可以通过控制系统传送减小压缩比的指令,这样便抑制了爆震。图 27 是爆震指数随压缩比变化的关系,可以看到,压缩比越大,爆震倾向是越大的。

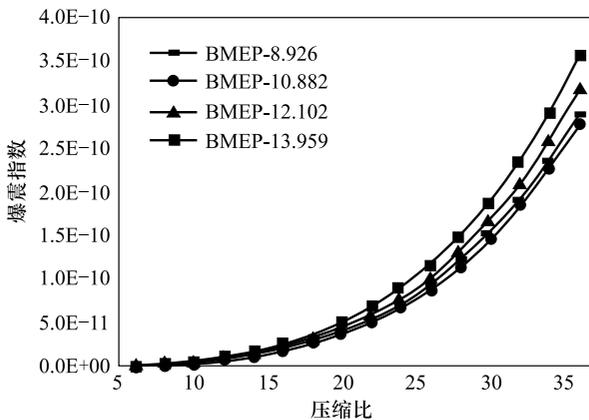


图 27 压缩比对爆震的影响<sup>[19]</sup>

但设计一套可变压缩比系统并不容易,国内外已经有很多可变压缩比的发明专利,但要么成本太高,要么缺少可靠性,总之,实用性较低。可变压缩比技术还需进一步提高和完善,才能在汽油机上使用。

### (3) 高辛烷值燃料

汽油辛烷值是汽油在稀混合气情况下抗爆性的表示单位,在数值上等于在规定的条件下与试样抗爆性相同时的标准燃料中所含异辛烷的体积百分数。不同化学结构的烃类,具有不同的抗爆震能力。异辛烷(2,2,4-三甲基戊烷)的抗爆性较好,辛烷值给定为100。正庚烷的抗爆性差,给定为0。汽油辛烷值的测定是以异辛烷和正庚烷为标准燃料。辛烷值越高,燃料的抗爆性能越好。

向汽油中添加一定的抗爆剂可以提高汽油的抗爆性能。金属类抗爆剂主要包括金属羰基化合物和碱金属有机物两大类;非金属类抗爆剂主要有醚、醇、酯类等;还有其他的一些抗爆剂,例如,由中国陕西华森高科技公司研制生产的HS汽油抗爆剂。由于金属类抗爆剂产生的颗粒物污染和对三元催化器的损害等问题,对其研究处于相对停滞阶段。各国对抗爆剂的研究重点放在了非金属类。

醇类燃料是内燃机很好的替代燃料,其一个明显的优点就是辛烷值较高。因此,在汽油中掺杂醇类燃料,可以有效提高燃料的辛烷值,抑制燃烧爆震的可能。表1是杂醇混合燃料的辛烷值,可以看出,汽油添加一定比例的杂醇提高了燃料的辛烷值,即增加了燃料的抗爆性能。

表1 杂醇混合燃料的辛烷值

批号	测试油样	MOR 值 (马达法)	批号	测试油样	MOR 值 (马达法)
	70#汽油(100%)	74		70#汽油(100%)	74.6
A	15% 甲醇 + 85% 汽油	78.8	B	15% 杂醇 + 85% 汽油	80
	30% 甲醇 + 70% 汽油	82.6		30% 杂醇 + 70% 汽油	83

### (三) 压缩比降低对汽油机部分负荷热效率的影响

#### 1. 压缩比降低对汽油机热效率的影响

如前所述,汽油机增压后爆震倾向与热负荷都会升高。为了减少爆震倾向、降低发动机热负荷,通常情况下增压汽油机要降低压缩比(与自然吸气式发动机相比)。压缩比降低对汽油机的热效率产生负面影响,使通过增压降排、提高汽油机使用负荷进而提高其热效率的效果大打折扣。也就是说,压缩比的降低,限

制了增压汽油机热效率的提升。图 28 所示为压缩比对汽油机部分负荷热效率的影响。图中显示了不同压缩比的汽油机在部分负荷下热效率的变化情况。提高增压汽油机的有效膨胀比,消除其压缩比减少带来的负面影响,是进一步提升增压汽油机热效率的一条有效途径。

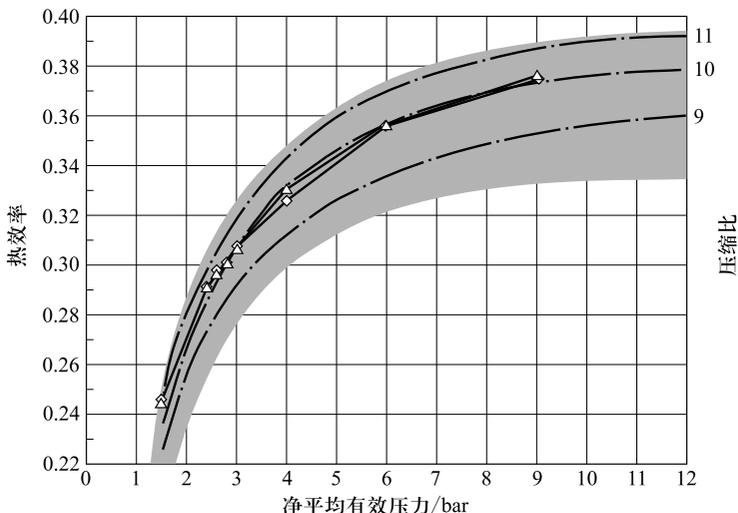


图 28 压缩比对汽油机部分负荷热效率的影响<sup>[15]</sup>

## 2. 解决方案

为了减少或消除压缩比降低对增压汽油机热效率的影响,针对增压汽油机的工作特点,总结出以下几种解决方案。

1) 采用较高的压缩比配合 EGR 技术。汽油机的爆震更容易出现在高负荷工况,因此在高负荷和全负荷时引入 EGR,可以有效抑制爆震。这样既避免了降低压缩比带来的负面影响,又避免了汽油机爆震的产生。

2) 采用变压缩比技术。前面已经介绍了可变压缩比技术,这是一种新颖的、有效抑制爆震产生、提高汽油机热效率的技术。采用变压缩比技术,可以在低负荷工况下(不易产生爆震)采用较高的压缩比,在高负荷工况下(容易产生爆震)采用较低的压缩比,这样就既避免了增压汽油机产生爆震,又保证了汽油机具有较高的热效率。

3) 借助 VVT 实现的 Atkinson 循环。Atkinson 循环是一种有效提高内燃机热效率的循环方式,它采用特殊的结构和方式,使发动机的膨胀比大于压缩比,从而具有更高的循环效率。在增压汽油机上实现 Atkinson 循环,可以消除降低压缩比给热效率带来的负面影响。

4) 此外,还可以采用汽油缸内直喷技术。汽油机缸内直喷技术可以采用更大的压缩比,减轻由于压缩比的降低导致的热效率下降。

#### (四) 机械与热负荷问题及解决方案

##### 1. 机械与热负荷问题

不论是用增加转速还是用提高平均有效压力的方法来提高内燃机的功率,都会增大零件承受的外力,增加通过燃烧室壁面的传热损失,即增大了内燃机的机械负荷和热负荷。零件设计时,必须使零件能够承受这些负荷,以确保内燃机工作的可靠性。

一般都用内燃机在最大爆发压力和最大往复惯性力作用下的各零件中的应力来标志机械负荷的大小。增压压力增大时,压缩终点压力和最大爆发压力都随着增大。故增压会导致发动机机械负荷的上升。

所谓内燃机的热负荷,一是指受热零件超过一定温度后工作能力降低,如材料强度下降,表面硬度减小,易于磨损,膨胀变形,破坏配合间隙,润滑油变质,工作性能恶化,甚至于过热而烧伤或熔化;二是指受热零件,如活塞、气缸盖和排气门等,由于几何形状复杂,各部分温度分布不均,从而引起很大的热应力。内燃机增压后,一般会降低排量,平均有效压力升高,发动机各部分的温度必然升高,这样使发动机的热负荷增大。

##### 2. 机械与热负荷问题的解决方案

###### (1) 冷却与润滑系统的设计优化

增压后发动机热负荷增加,传给润滑系的热量也相应增加,同时润滑油通过增压器润滑和冷却轴承后温度亦急剧增加,为了使机油不过热,有的增压发动机安装了机油散热器。

冷却系统由于热负荷的增加,有可能出现过热问题,那么就要考虑加大水泵、加大散热器的容积、提高风扇的转速来解决发动机的过热问题。

###### (2) 结构优化

增压发动机的进气量增加,空气滤清器的尺寸也应相应加大。空气滤清器的布置位置应使压气机的进气阻力尽可能小,同时避免靠近排气管、涡壳等具有强烈热辐射的部位,以减小对进气空气的加热。排气总管也要相应加大,以减小涡轮排气阻力。涡轮出口到排气总管之间的过渡应圆滑,并避免截面突然加大而引起涡流。

###### (3) 高强度材料

汽油机增压后热负荷增加,从而引起排气温度急剧升高。因此,必须采用抗高温的排气管与涡轮机叶轮材料,才能保证发动机的正常运行工作。当然,这也会在一定程度上增加发动机的成本。

## (五) 缸内直喷产生问题及解决方案

### 1. 缸内直喷出现的问题

#### (1) 机油稀释

由于汽油直接向气缸内喷射,加上增压导致的小缸径,增压直喷发动机喷射的汽油容易黏附在气缸壁上,这部分汽油不能燃烧的部分通过活塞与气缸间隙流入机油箱,稀释机油。所以,设计不好的直喷汽油机机油只能用很短时间便要更换,提高了成本,也容易损坏磨损件。

#### (2) 排放不达标

直喷汽油机一般与稀薄燃烧技术相结合。稀薄燃烧技术虽然能大幅度降低燃油消耗量和 $\text{NO}_x$ 的排放,但因为空气与燃料的比值远远大于当量空燃比,此时三效催化转化器的效率极低,不能高效还原HC和CO,使此两排放物的排放较高。

### 2. 解决方案

直喷汽油机的湿壁问题会导致机油稀释,燃油经济性下降及尾气排放增加。但通过喷雾、燃烧室及缸内流场三者合理匹配与优化可以大大减少燃油湿壁。此外,还可以采用多次喷射的方法,减少燃油碰壁。研究表明,采用两段喷射策略可以降低15%的碰壁量,混合气均匀程度基本不变;采用三段喷射可以降低27%的碰壁量,并可以明显改善混合气的浓度分布。

通过利用三效催化器NO吸附还原机理控制稀燃 $\text{NO}_x$ 排放,可以较大程度上降低排气中的NO浓度,并充分利用浓燃时的高浓度还原性气体CO,提高三效催化器对 $\text{NO}_x$ 的转化效率。此外,空燃比浓稀转换的比例、频率和浓燃空燃比与稀燃直喷汽油机有害气体排放及燃油经济性有很大关系。通过综合考虑 $\text{NO}_x$ 、HC和CO排放以及发动机的燃油消耗率,合理选取这些策略控制参数,可以将高空燃比稀燃条件下 $\text{NO}_x$ 的转化效率大大提高,使稀燃排放达到较低水平。

## 六、总结与建议

在未来很长一段时间内,内燃机仍将是汽车的主流动力,在我国经济社会发展中发挥不可替代的作用。汽油机在相当长时期内仍是乘用车的主要动力源。在全球能源紧缺、气候变化和环境污染的压力下,国际上竞相开展了以提高内燃机热效率为目标的技术创新,提高热效率、降低燃油消耗已成为新一轮内燃机技术国际竞赛的发展方向。在这种背景下,提高车用汽油机的热效率迫在眉睫。

增压、小型化和缸内直喷是未来汽油机的发展方向。在未来汽油机技术发展中,为进一步提高增压直喷汽油机的节能潜力,最大程度上提高汽油机的热效

率,缩小我国汽油机技术与国际先进水平的差距,主要可以从以下几点考虑。

1) 建立先进的直喷燃烧系统优化平台和数据库是开发缸内直喷汽油机技术的基础,是提升我国汽油机技术国际竞争力的当务之急。在借鉴国外先进的研发体系的基础上,以国外先进直喷汽油机数据库为基础,结合我国汽车企业自主开发特点及实际情况,搭建形成一个将产品设计、数字式仿真和试验对标等多个环节紧密关联、相互协同、开放集成的直喷汽油机优化技术平台及数据库支撑平台,面向整个汽车行业提供全流程的数据和标准体系支撑,实现资源共享,全面提升我国直喷汽油机的开发能力和创新水平。

2) 开发可提高燃油辛烷值的新型混合燃料,如醇类-汽油混合燃料。这样不仅可以提高增压汽油机的抗爆震能力,进而可以提高其压缩比、改善其热效率;还能在一定程度上缓解石油供应紧张的局面。同时,开展对快速燃烧机理以及高抗爆震能力的燃烧系统研究。如何扩大爆震极限、如何使发动机工作在爆震极限附近,是目前提高发动机效率极限的关键。

3) 开发先进增压器与增压系统,如可助力、可回收能量的电控辅助涡轮增压器(ECT)、动力涡轮、可变参数压气机等,改善增压汽油机的性能并实现与发动机的最佳性能匹配,提高整机热效率。研究、开发耐高温涡轮机叶轮材料与制造工艺,提高增压汽油机的抗热负荷的能力,提高汽油机的使用寿命和安全性。

4) 余热回收利用及热管理。回收内燃机排气能量和冷却水能量是提高内燃机总能利用效率的有效途径。其关键技术是如何在保证系统较低成本下提高废热能量回收效率,提高能量回收系统的实用性和安全性,使其能尽早地在汽车上应用。

## 参考文献

- [1] 周龙保. 内燃机学(第2版)[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [2] 刘敬平,付建勤,任承钦,等. 增压直喷汽油机热平衡和火用平衡试验对比研究[J]. 内燃机学报,2013,31(1):65-71.
- [3] National Academy of Sciences. Real prospects for energy efficiency in the United States [R]. Washington D C, 2009.
- [4] 邱玥. 我国内燃机制造总量跃居世界第一[EB/OL]. [2012-12-11]. [http://news.xinhuanet.com/energy/2012-12/11/c\\_124077203.htm](http://news.xinhuanet.com/energy/2012-12/11/c_124077203.htm).
- [5] 杨嘉林. 车用汽油机的潜力及高效汽油机的可行性[J]. 内燃机学报,2008,26(S):76-78.
- [6] [http://www.nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/cafe/Oct2010\\_Summary-Report](http://www.nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/cafe/Oct2010_Summary-Report).
- [7] 孙金凤. 第三阶段油耗限值2015年全面实行[EB/OL]. [2011-10-08]. [http://www.tianjinwe.com/rollnews/201011/t20101130\\_2665914.html](http://www.tianjinwe.com/rollnews/201011/t20101130_2665914.html).

- [8] Wayne Eckerle. Innovative approaches to improving engine efficiency [C]. 2007 Diesel Engine Emissions Reduction (DEER) Conference, 2007.
- [9] Yuksel F, Ceviz M A. Thermal balance of a four stroke SI engine operating on hydrogen as a supplementary fuel[J]. Energy, 2003, 28 (11):1069 - 1080.
- [10] Taymaz I. An experimental study of energy balance in low heat rejection diesel engine[J]. Energy, 2006, 31(2):364 - 371.
- [11] Xu Z, Liu J, Jianqin F U, et al. Analysis and comparison of typical exhaust gas energy recovery bottoming cycles[J]. Training, 2012: 09 - 05.
- [12] 刘敬平,付建勤,唐琦军,等. 自然吸气式汽油机热功转换效率影响因素的共性规律研究[J]. 燃烧科学与技术,2014,20(2):1 - 8.
- [13] 夏孝朗,刘敬平,唐琦军,等. 基于实测数据的汽油机无进气节流损失的节油潜力研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(12): 4707 - 4712.
- [14] Tang Q, Liu J, Zhan Z, et al. Influences on combustion characteristics and performances of EGR vs lean burn in a gasoline engine[R]. SAE Technical Paper, 2013.
- [15] 刘敬平. 发动机性能数值式开发技术[M]. 湖南大学(自编教材), 2014.
- [16] Liu J P, Fu J Q, Ren C Q, et al. Comparison and analysis of engine exhaust gas energy recovery potential through various bottom cycles[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50(1): 1219 - 1234.
- [17] Fu J, Liu J, Feng R, et al. Energy and exergy analysis on gasoline engine based on mapping characteristics experiment[J]. Applied Energy, 2013, 102: 622 - 630.
- [18] Xu X S, Liu J P, Wang Y, et al. A research of turbocharged gasoline transient response [C]//International Workshop of Automobile, Power and Energy Engineering. Wuhan, 2011.
- [19] 林承伯,刘敬平,唐琦军,等. 一种可变压缩比机构对汽油机性能的影响[J]. 内燃机工程, (待出版), 2014.



**刘敬平** 1962年出生,美籍华人,留英博士。现为湖南大学教授、博导,湖南大学先进动力总成技术研究中心主任、能源与动力工程系主任、汽车电子与控制教育部工程中心副主任。入选湖南省引进海外高层次人才“百人计划”、“教育部引进海外高层次文教专家”、“湖南省特聘专家”、“中国兵装集团特聘专家”等。

1982年和1984年先后在湖南大学获学士和硕士学位并留校,1988年赴英国曼彻斯特理工学院做访问学者,1990—1995年在英国国家工程实验室攻读博士学位。曾在德国FEV总部和FEV北美技术中心工作10余年,担任高级技术专家和发动机性能模拟部经理。长期从事内燃机性能数值式开发的研究。在国内外期刊和国际会议上发表学术论文80余篇,获得3项发明专利,10项软件著作权。美国汽车工程师协会(SAE)会员和美国机械工程师协会(ASME)会员,长期担任全球汽车工程师学会(SAE)的论文组稿及评审,曾多次担任SAE国际会议分会主席。目前担任《内燃机学报》与《内燃机工程》编委,中国节能、环保内燃机产业联盟专家委员会委员。

# 柴油机热效率潜力及提高途径探索

刘忠长 等

吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室

## 一、引言

内燃机在历经超过一个世纪的发展后,以其热效率高、可靠性强、经济性及移动性好、比质量低等优点,在交通运输、农业及工程机械和发电工业中得到了广泛应用,推动着社会经济和文明的迅速发展与不断进步<sup>[1,2]</sup>。

作为内燃机的主要动力能源——石油资源,随着经济的飞速发展而被过度开采,消耗量剧增。从1993年开始,我国已经成为石油净进口国。2012年,我国进口原油2.71亿t,对外依存度达到了56.4%,石油进口依存度一旦超过50%,那么国家就已经进入了能源预警期。从图1中可以看出,2009年我国的原油进口依存度已经突破警戒线50%。在世界范围内,已经多次出现的石油危机给汽车工业的发展敲响了警钟,迫使世界各汽车制造行业大力开发研制有关技术,以不断提高内燃机的经济性。为了强制降低内燃机油耗,世界许多国家甚至开始制定严格的能耗法规<sup>[3-5]</sup>。

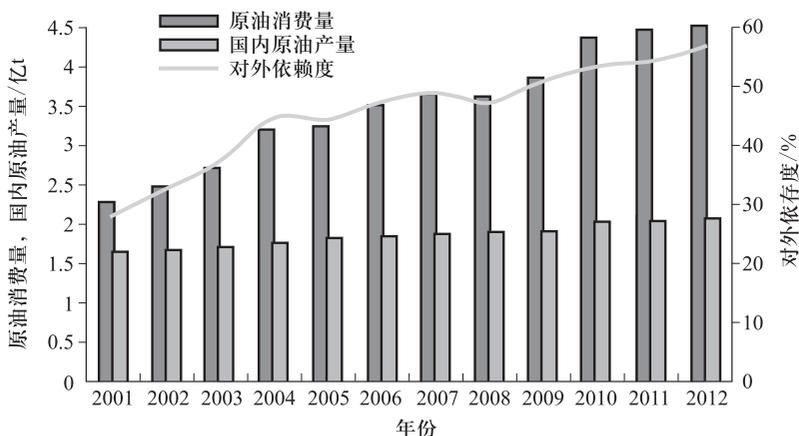


图1 中国原油产销与依存度变化趋势

2013年4月,夏威夷监测站的数据显示,大气CO<sub>2</sub>的浓度超过了400 ppm,上一次达到该数值是在几百万年前。工业革命之前,大气CO<sub>2</sub>浓度仅为280 ppm。两百多年间人类的工业化活动是CO<sub>2</sub>上升的主要原因,其不断快速的增加,将直接导致地球温度上升。从燃料燃烧对CO<sub>2</sub>排放的贡献分布图(图2)中可以发现,车辆交通运输的CO<sub>2</sub>排放比例占了22%,而有数据显示,在欧共体国家中机动车排放CO<sub>2</sub>贡献率已经达到30%。面对全球温室气体的快速增长,急需世界各国协同降低、控制CO<sub>2</sub>排放。从1997年由149个国家和地区的代表通过的《京都议定书》开始,虽然在节能减排这条路上存在着许多分歧和谈判,但是世界各国为改善全人类气候恶化问题,致力于降低CO<sub>2</sub>排放的意愿和决心非常强烈,大部分国家都按照各国国情制定了减排目标,如图3所示<sup>[3]</sup>。

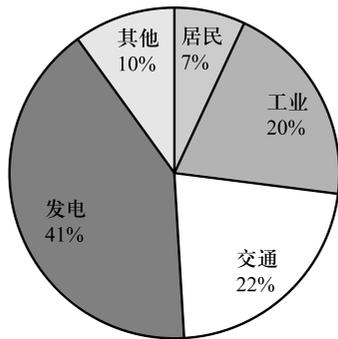


图2 燃料燃烧对CO<sub>2</sub>排放的贡献分布

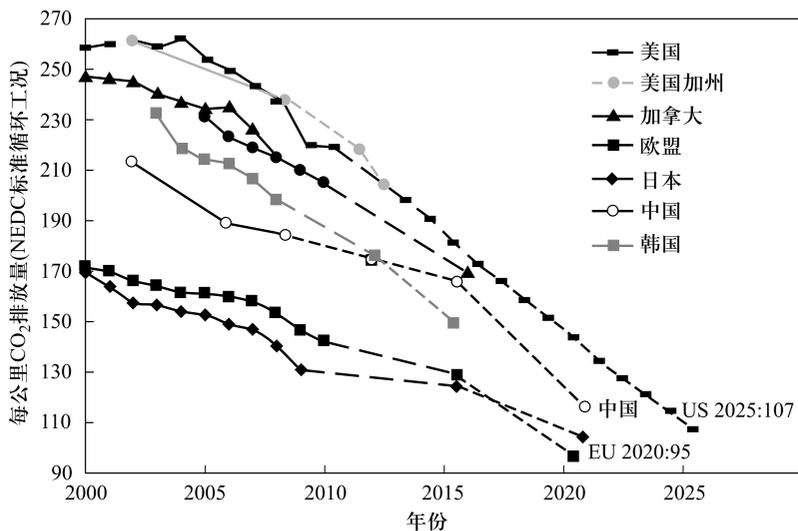


图3 各国乘用车减排目标

为了降低内燃机的 CO<sub>2</sub> 排放,世界各国掀起了以提高热效率为目标的研究热潮,世界各国政府提出了相应的热效率目标。例如,美国能源部提出商用柴油机有效热效率达到 60% 的目标;2011 年,美国政府与 13 个主要汽车制造商共同达成协议,要求 2017—2025 年间美国汽车燃油消耗降低 40%;2011 年 8 月,日本建议到 2020 年乘用车燃油消耗降低 24%;2009 年,英国汽车委员会提出的目标是汽车发动机能源利用率达到 70%<sup>[4]</sup>。

在我国,根据国务院办公厅发布的《关于加强内燃机工业节能减排的意见》<sup>[5]</sup>,到 2015 年,节能型内燃机产品占全社会内燃机产品保有量的 60%,与 2010 年相比,内燃机燃油消耗率降低 6%~10%,实现节约商品燃油 2000 万 t。而根据《节能与新能源车发展规划(2012—2020 年)》<sup>[6]</sup>,到 2015 年,当年生产的乘用车平均燃料消耗量降至 6.9 L/100km,节能型乘用车燃料消耗量降至 5.9 L/100km 以下,一切的法规和政策都明确指出提高内燃机的热效率是这一时期的核心任务。

## 二、车用柴油机节能减排的关键技术

近 20 年来,国外现代乘用车柴油机广泛采用了增压中冷、电控共轨燃油喷射、废气再循环、排气后处理等先进技术。在这些技术的耦合作用下,现代柴油机与 20 世纪 90 年代前的传统柴油机相比得到了飞速发展:一是现代柴油机的污染物排放大为减少,由于现代柴油机在减少污染物排放上取得的巨大进步,国际上将现代柴油机称为清洁柴油机(clean diesel)或绿色柴油机(green diesel);二是现代柴油机解决了噪声、振动以及小型化的问题,使得现代柴油机动力技术在大型商用车上的应用得到了大大的提升。现代柴油机技术使传统柴油机功率密度低、冒黑烟、噪声大和冷起动困难的缺点得以克服,并使节能环保的现代柴油动力乘用车作为未来乘用车发展趋势成为现实。

我国企业和研究单位在柴油动力的开发过程中,由于没有掌握如高效清洁燃烧技术、电控高压燃油喷射技术、柴油机电控管理技术、柴油机及整车标定等关键技术,只能花费高昂的代价以技术合作的方式向国外企业购买。而通过这种方式获得的技术存在很多问题:一方面,国外提供的技术往往不是最新技术,等到技术被消化时已经不具备先进性;另一方面,由于不掌握核心技术,使得引进的技术不具备继承性和成长性,行业产品陷入“落后—引进—再落后—再引进”的怪圈。因此,国内乘用车动力行业亟须加快柴油动力的创新发展,开发出具有自主知识产权的乘用车柴油机技术,缩短与国际先进水平的差距,以满足国民经济发展的需要。

针对我国车用柴油机技术发展现状以及未来广大的市场需求,我们亟须突

破以下技术难点包括清洁燃烧技术、电控燃油喷射技术及标定技术等清洁节能的现代柴油机先进技术,实现自主开发低油耗、低污染物放的高效清洁乘用车柴油机。鉴于国家节能环保的相关政策以及我国内燃机与国外的较大差距,且根据热效率计算公式,需要从减小柴油机的燃烧损失、传热损失、泵气损失、排气损失和降低摩擦损失及余能回收等方面采用先进技术实现柴油机热效率的提高,其主要的技术措施如图4所示。

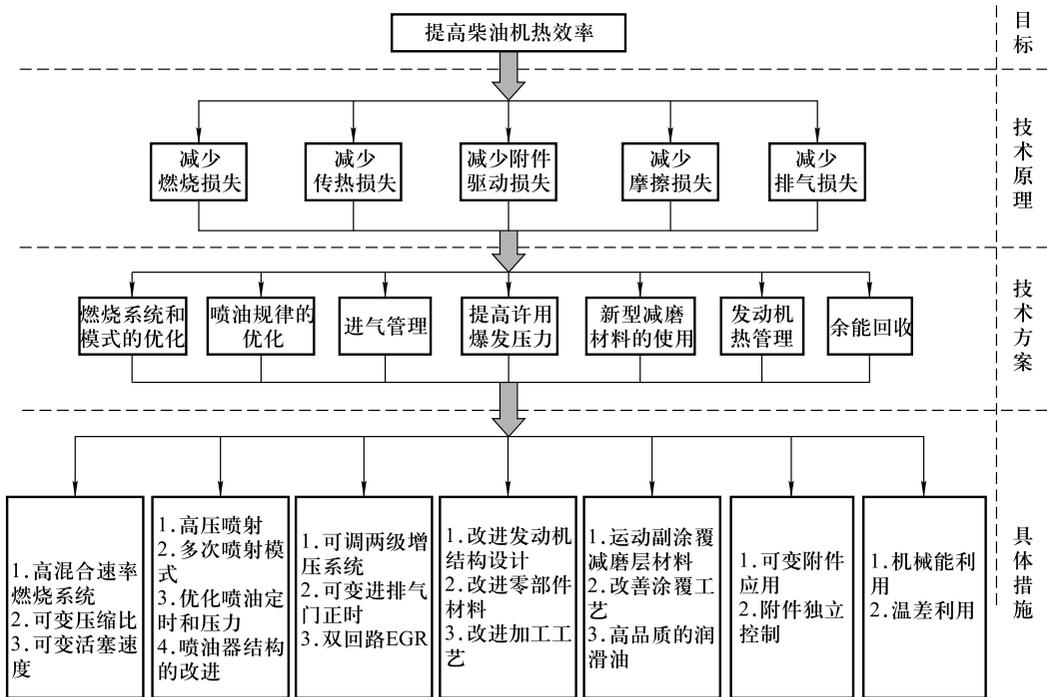


图4 提高柴油机热效率的技术措施

## (一) 燃烧优化技术

### 1. 燃烧优化的技术需求

燃烧优化技术对提高柴油机热效率的贡献在2~3个百分点左右,与其他技术比较并不是最大的,但燃烧优化技术是柴油机节能和排放控制技术的核心:燃烧过程优劣影响燃油消耗率和有害污染物排放水平;燃烧过程中的不可逆能量损失在向环境传递过程可能还要消耗有效功;燃烧的控制往往决定其他控制系统。

柴油机燃烧优化就是寻求获得有用功最大化及不可逆损失最小化的燃烧途径,即寻求一种优化的燃烧模式。当然,这种燃烧模式要保证有害物排放达到相应标准,并且也要保证发动机的可靠性要求。对于应用于汽车的柴油机而言,燃

烧优化技术还包含瞬变工况燃烧优化问题,即在瞬变工况下实现燃烧边界条件的协同控制,达到全工况的燃烧优化。

近十几年来,内燃机工作者在燃烧优化理论及控制技术领域做了大量研究工作,建立了多种节能减排的燃烧模式。图 5 所示为典型的节能减排燃烧模式。

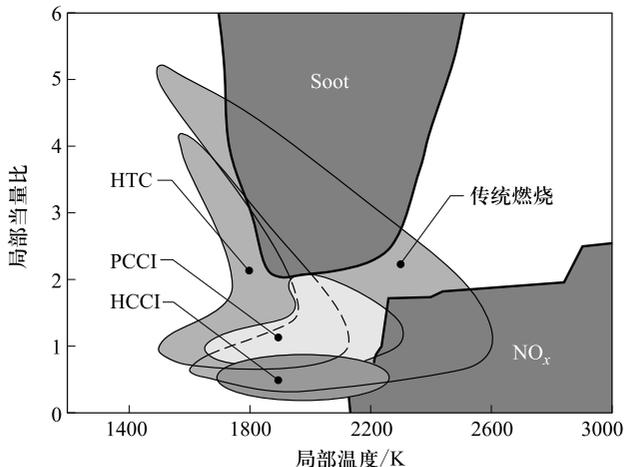


图 5 节能减排的新型燃烧模式

### (1) 均质压燃燃烧

均质压燃(HCCI)燃烧方式是一种综合了汽油机和柴油机燃烧特点,即形成均质混合气和压缩着火的燃烧方式。HCCI缸内均质混合气的制备方式分为缸内喷射和进气道喷射两种,前者包括缸内早期喷射、推迟喷油定时和分段喷射方式,后者包括喷雾热碰壁-进气加热、进气道喷射易蒸发燃料等。天津大学苏万华教授提出了运用多脉冲喷射实现HCCI燃烧的控制策略,并提出复合燃烧的经典控制策略,研究中提出通过调制多脉冲喷油规律可以有效地降低 $\text{NO}_x$ 以及Soot排放<sup>[9]</sup>。

由于HCCI燃烧由化学动力学主导,其着火时刻和燃烧速率对温度、压力和混合气的成分等参数相当敏感,因此很难在宽的转速和负荷下实现着火和燃烧速率的控制,造成运行范围狭窄。此外,HCCI燃烧方式还存在冷起动困难,HC和CO排放过高,过渡工况适应性差等缺点。这些都导致HCCI燃烧方式很难在近期达到实用化。

HCCI的主要优缺点归纳如下<sup>[10]</sup>。

优点:① HCCI的运行范围是在低温燃烧区空燃比很大,传热损失小,又在无烟处,辐射热损失也小,HCCI的燃烧期由化学反应动力学决定,不依靠混合速率,因此燃烧期很短接近Otto循环,故热效率较高;②  $\text{NO}_x$ 和碳烟排放很低,可

接近零排放;③可以应用各种替代燃料和混合燃料;④综合了汽油机(均质混合气)和柴油机(无节流损失)各自的优点;⑤可以应用低喷射压力的喷油系统和节约贵金属的消耗,从而降低成本。

缺点:①要在全工况范围内控制点火定时和燃烧率很困难;②要把 HCCI 向高负荷扩展十分困难,运转范围有限;③冷启动和瞬态响应特性不理想;④ HC 和 CO 排放高。在负荷较高、空燃比较小时,燃烧压力、温度很高、传热损失大,使 BSFC 增大。

由于先进的燃烧模式(主要是低温燃烧)难以运用在高负荷状态下,因此,目前出现了新型的混合燃烧模式,即在中小负荷运用新型燃烧模式,在高负荷采用传统柴油机燃烧模式,能够很好地解决低温燃烧负荷拓展的问题,但混合模式在不同负荷下的顺利过渡将成为以后主要研究的问题之一。

### (2) 部分预混合(PCCI)燃烧

PCCI 是通过提前喷射燃油,使油气在着火之前的预混来实现低温燃烧的一项新技术。PCCI 与均质燃烧 HCCI 在燃烧特性上并没有明显的区别,二者的放热率曲线非常相似,但是 PCCI 的喷油时刻相对滞后,可以减少“湿壁”和机油稀释,减少了碳氢化合物和 CO 排放,因而 PCCI 燃烧被认为是更实际、更理想的柴油机低温燃烧模式。在 PCCI 燃烧模式中,喷油始点提前,预混相对更充分,预混燃烧占主导地位,可以有效降低有害物排放和减小传热损失,提高热效率<sup>[11,12]</sup>。

Erik Doosje<sup>[13]</sup>采用两级增压(高压级为 VGT),高低压 EGR(实现 EGR 率 > 50%)、双排喷油器(每排 8 个孔,共 16 个孔)、降低压缩比及早喷等技术研究了 PCCI 和 CI 的混合燃烧模式。试验结果表明,当发动机负荷小于 B25 时采用以上技术能实现 PCCI 燃烧,能使发动机的 NO<sub>x</sub> 和 Soot 排放明显降低(但是 CO 和 HC 排放增加),但由于压缩比降低导致油耗增加。

### (3) 低温燃烧

柴油机低温燃烧(LTC),就是控制缸内燃烧温度低于 NO<sub>x</sub> 和碳烟的生成温度,从而大幅降低 NO<sub>x</sub> 和碳烟排放。研究表明,在低燃空当量比情况下,如果局部燃烧温度在 2200 K 以上,NO<sub>x</sub> 会大量生成;在当量比较高的情况下,由于燃烧处在富油区,氧含量极低,NO<sub>x</sub> 不会大量形成。此时如果燃烧温度超过一定限值,有可能生成大量碳烟。当量比为 2.0 ~ 4.0 的区域是传统柴油机预混燃烧区域,很容易生成大量碳烟。如果燃烧温度可以保持在低于 1650 K 的水平,无论当量比如何,燃烧都可以完全避开 NO<sub>x</sub> 和碳烟的主要生成区域,这种燃烧模式便是低温燃烧<sup>[14,15]</sup>。

LTC 的特点是在正常喷油时刻(或略早)喷油,采用大比例 EGR 率(>

50%) ,EGR 延长滞燃期并降低燃烧温度,并通过高的喷射压力加速燃油与空气混合,在滞燃期内形成预混合气,实现柴油机低温燃烧,降低了传热损失。由于滞燃期形成的预混合气较多,且高充量密度促进了燃烧过程的混合速率,因此,极大地缩短了燃烧持续期,提高了燃烧效率,从而提高了热效率<sup>[16,17]</sup>。

苏万华教授课题组采用两级增压、多脉冲喷射及 BUMP 燃烧室对高密度 - 低温燃烧理论进行了试验验证<sup>[18]</sup>,其试验结果如图 6 所示:综合考虑排放与热效率的折中及发动机最大爆发压力的限制,高密度 - 低温燃烧采用 18% 左右的氧体积分数和 60 kg/m<sup>3</sup> 左右的充量密度可实现高效低排放燃烧,实现三者较好的折中,指示热效率(高压循环)达到近 60%。

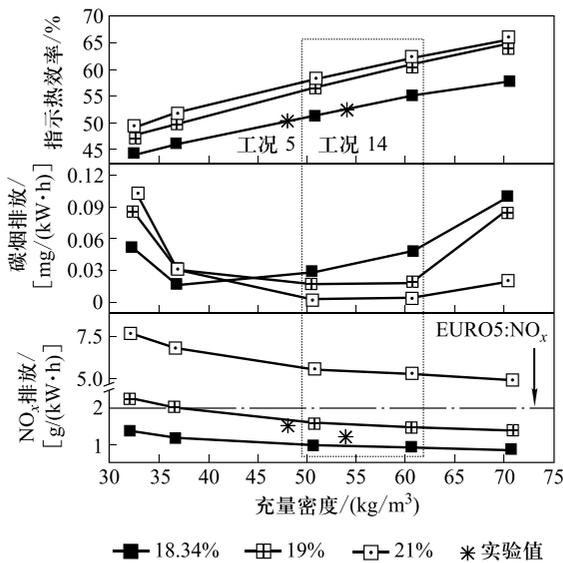


图 6 氧的体积分数和充量密度对热效率和排放的影响

于文斌等<sup>[19]</sup>提出的基于混合与化学反应的协同控制的混合燃烧控制策略,即在不同的工况采用不同的燃烧控制策略:在低负荷阶段,采用基于单次早喷以及高 EGR 率的预混燃烧策略;在中负荷阶段,采用基于多脉冲喷射、高 EGR 率、高增压以及推迟进气门关闭定时的预混燃烧策略;在高负荷以及全负荷,采用基于高增压以及推迟进气门晚关技术的高密度 - 低温燃烧。该混合燃烧控制策略有助于实现重载柴油机的高热效率以及超低排放。纵观这些新型燃烧模式,一般都只能在特定的工况范围内具有优势且主要集中在发动机的中小负荷范围,目前还没有一种燃烧模式能在发动机全工况范围内都能实现高效清洁燃烧,虽然这些燃烧模式没有被工业界完全接受,但其理论价值仍然存在。

柴油机进气(包括 EGR)及燃油喷射同属充量,各自定时、定量、定流态进入气缸,在特定的缸内热状态下交互作用、演化,形成燃烧、放热及做功。燃烧优化

就是利用进气与燃油喷射的交互作用实现理想的燃烧路径。未来 10 年,较为理想且被工业界接受的车用柴油机的燃烧模式是:基于热效率与有害物排放部分解耦的高压喷射与进气协同控制的燃烧模式。该燃烧模式的内涵包括:高稀释、预混、EGR 等元素并强调上止点附近集中放热。另外,车用柴油机排气后处理技术已是较成熟的产业化技术,可以承担一部分由燃烧生成的有害物转化。以欧 VI 排放标准为目标,后处理系统可承担  $3.1 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$  的  $\text{NO}_x$  和  $0.04 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$  微粒的转化。这样在寻求燃烧优化途径时,在此有害物排放限制内,可以尽可能地将燃烧相位提前(集中在上止点附近),实现可用功的最大化及不可逆损失最小化。如图 7 所示,车用柴油机热效率发展途径中曾出现一次热效率突然下降,这是为控制有害物排放  $\text{NO}_x$  而推迟燃烧相位所致。而后,由于 EGR 及后处理等技术的应用,燃烧相位又逐渐提前,热效率再次逐渐升高。

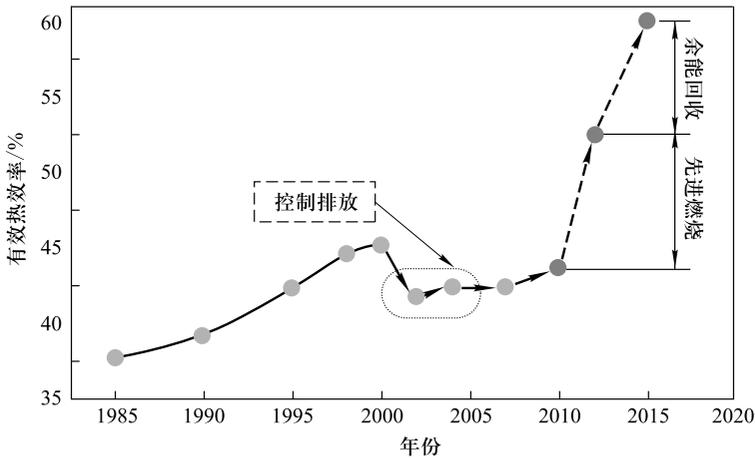


图 7 车用柴油机热效率发展历程

## 2. 燃烧优化技术的挑战和技术突破

实现车用柴油机高效率燃烧,即使在热效率与排放部分解耦条件下仍存在着严峻的技术挑战,需要发展新技术来解决这些问题。

### (1) 最大爆发压力的限制与突破

柴油机燃烧相位前移使燃烧放热集中在上止点附近可获得有用功最大化及不可逆损失最小化,即提高热效率。但是,燃烧相位前移以及之后所述的高密度充量必然导致燃烧最大爆发压力增加,即燃烧最大爆发压力限制了热效率的提高。为突破此限制,应对的技术有以下三项。

1) 提高柴油机许用最大爆发压力值。目前我国车用柴油机的许用最大爆发压力在  $160 \sim 180 \text{ bar}$  以下,通过改进柴油机结构设计可使许用最大爆发压力提高到  $220 \sim 240 \text{ bar}$ ,这样将为提高热效率提供发展空间。

2) 柴油机许用最大爆发压力确定后,充分利用这一极限爆发压力,组织燃烧过程中尽量使实际的爆发压力尽可能接近许用值,尤其在中小负荷下能大幅度提高热效率。

3) 保证上止点附近集中放热,采取措施使爆发压力在许用值内,如喷射规律控制、EGR 控制、VVA 控制、可变两级增压等技术应用均可在某程度上解决此问题。

## (2) 瞬变工况燃烧劣化与突破

车用柴油机实际使用中多为瞬变工况,瞬变工况按时间计超 50%。发动机在瞬变工况下进气与燃油喷射的响应不同,导致燃烧边界条件发生失衡,造成燃烧劣化。燃烧劣化的结果使有害物排放大幅度增加、燃油经济性明显下降。有数据表明,瞬变工况燃烧劣化可使燃油经济性劣化 4%,即瞬变燃烧优化潜力为 4%<sup>[20,22]</sup>。

为解决瞬变工况燃烧问题,应对的技术有:

1) 提高燃烧边界条件的响应,如采用两级增压提高进气响应;采用双回路 EGR 系统提高其响应;

2) 瞬变工况下采用燃烧边界条件协同控制,避免边界条件失衡;

3) 建立燃烧边界条件失衡状态下的燃烧优化机制,抑制瞬变燃烧劣化。

## (二) 燃油喷射技术

### 1. 燃油喷射技术的需求

燃油喷射系统是影响燃烧过程的关键因素,对柴油机的经济性、动力性和排放性能等都有重要影响。要改善柴油机缸内燃烧状况,对燃油喷射系统要求一方面要有理想的喷射速率特性,同时还要有理想的雾化特性,从而实现预混、燃烧放热率的控制<sup>[23-25]</sup>。

加速燃油和空气混合的主要方法之一,是使燃油喷雾颗粒进一步细化,以增大燃油与空气的接触表面并且缩短强化混合的时间。为此,近年来高压喷射技术在直喷式柴油机上得到了很快的应用。目前,产品柴油机的喷油压力已高达 200 ~ 260 MPa,喷孔已减小至 0.1 ~ 0.2 mm,雾滴粒径已小到 10  $\mu\text{m}$  左右。

提高喷射压力有助于改善油气混合质量,有效降低 PM 排放。高喷射压力是实现柴油机燃烧全过程油气混合、控制燃烧速度最基本的要素。喷油压力越高雾化效果越好,给喷油定时优化及 EGR 优化提供更多的空间,以保证热效率的提高与排放的控制。

喷油策略是影响发动机性能和排放的最重要因素,适当的喷油规律可以改善发动机的排放性能和经济性能。喷油策略主要包括:喷油压力、喷油正时、喷油次数及喷油规律等相关参数。

对直喷式柴油机而言,燃油喷射系统起着极其关键的作用,喷油过程组织的好坏直接影响混合气的形成过程及混合质量,进而影响燃烧过程的组织与燃烧效果,最终决定发动机的整体性能。为了保证直喷柴油机在动力性、经济性、排放与噪声等方面达到良好的性能指标,要求燃油喷射系统具备以下特性:

- 1) 足够高的平均有效喷射压力和喷射压力的灵活可控,乘用车柴油机喷射压力为 2000 bar,重型柴油机在 2600 bar 以上;
- 2) 根据运行工况灵活控制喷油定时和喷油量;
- 3) 根据运行工况灵活调节喷油速率,具有预喷射、多次喷射功能,预喷射、初始喷射速率低,主喷速率高,后喷停止速度快。

## 2. 喷射系统的挑战和技术突破

随着对发动机油耗和排放的要求越来越高,发动机的各项技术都在迅速升级,而柴油喷射技术无疑是最重要的。首先,为了降低燃烧噪声,要求 1~2 次的预喷射。为了使燃油燃烧更充分,在缸内降低有害物生成,以及使微粒捕集器再生,要求进行 1~2 次后喷射。为了使燃油雾化更好,就要增加喷孔数目,缩小喷孔直径,但这会导致喷油速率下降。为了保证足够的喷油速率,就要提高喷射压力或者采用组孔喷油器。而为了实现多次喷射,就要提高喷油系统的响应特性。上述苛刻的要求决定了未来燃油供给系统的大致发展方向,同时也面临诸多挑战,如图 8 所示。

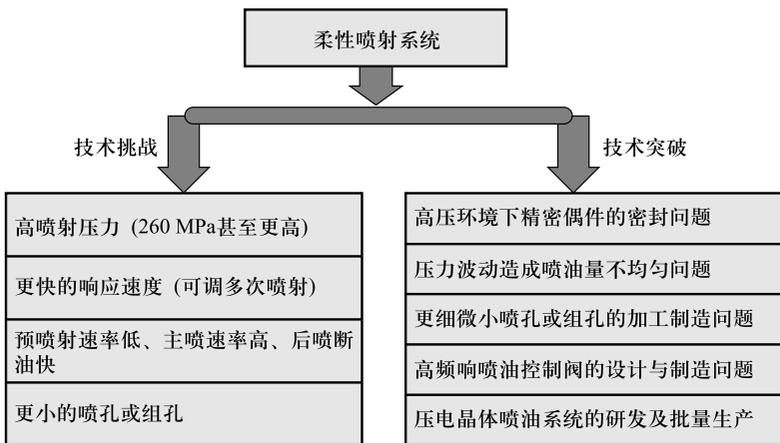


图 8 喷射系统的技术挑战与突破

## (三) 进气系统

### 1. 对进气系统的需求

柴油机进气系统的结构和流动性能的优劣将直接影响柴油机的动力性、经

济性和排放特性。而且,提高柴油机功率的关键之一是在换气过程中提高充量系数的同时降低进气系统的流动阻力。利用可调高压进气、VVT、VVA、可变涡流等技术,设计和匹配最佳的柴油机进气系统,就能在柴油机一定的转速范围内增加进气量,提高功率,改善扭矩特性,降低油耗率和烟度。基于进气系统优化提高热效率的主要技术原理,如图9所示,其中主要包括:可调增压系统、米勒循环系统(包括VVT/VVA)、可调EGR系统及可变进气涡流等技术。

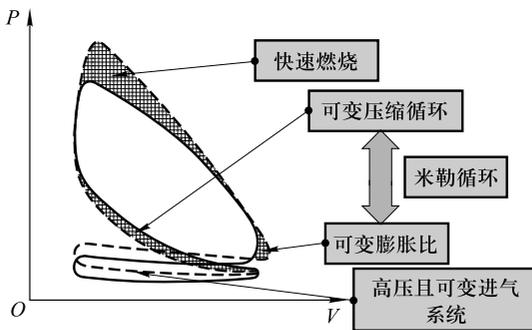


图9 进排气系统优化提高热效率的基本技术原理

其中,对涡轮增压器的需求及发展趋势:根据国内外汽车排放法规的执行情况,达到欧 I 标准,一般采用涡轮增压器;达到欧 II 标准,一般采用涡轮增压 + 中冷;达到欧 III 标准,一般采用 VGT + 中冷 + 高压共轨;达到欧 IV 标准一般采用 VGT + 中冷 + 高压共轨 + EGR 或者 DPF;如果达到欧 V 标准,上述技术一般要全部用上。因此,应该深入研究涡轮增压技术,同时解决两大问题:一是要有高效率、高压比、流量范围广、可靠性好、寿命长的涡轮增压器;二是要有能充分利用发动机排气能量,避免进排气干扰,增压器具有良好配合的涡轮系统。所以,随着增压技术的不断发展与涡轮增压器设计的日趋成熟,新型车用涡轮增压器将会朝着提高增压比、增加增压器效率、减少零部件、拓宽流量范围及小型电动化方向发展。图 10 为涡轮增压技术的发展趋势。目前,我国已经开始采用可变涡轮增压技术,其他技术还处于研发阶段<sup>[26]</sup>。

## 2. 挑战和技术突破

在柴油机上深入研究、运用两级增压技术及电控涡轮增压技术的同时,进一步研究、优化两级增压耦合 VVT、可变进气歧管及可变涡流技术协同控制进气循环,实现对发动机各个工况下进气过程的全面优化,为下一阶段燃油与空气的混合和燃烧奠定坚实的基础,从而提高发动机的性能。先进柴油机进气系统的挑战与技术突破见图 11。

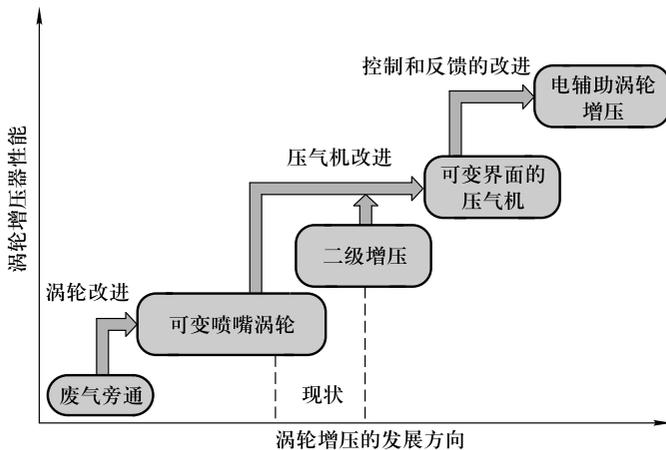


图 10 涡轮增压技术的发展趋势

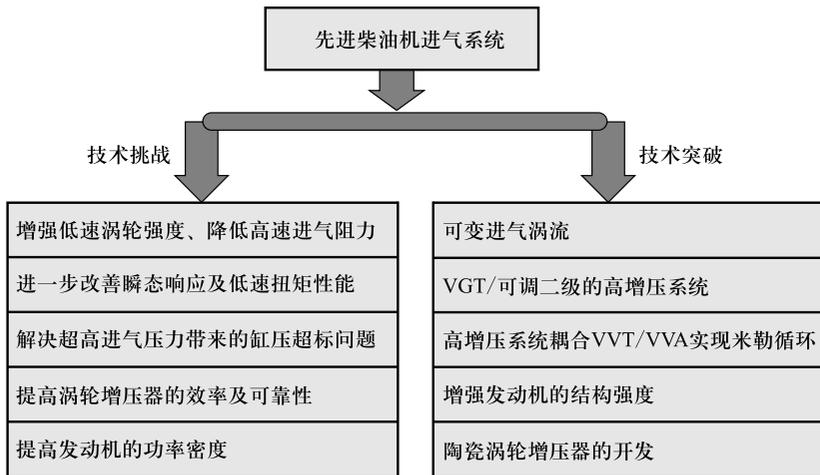


图 11 先进柴油机进气系统的挑战与突破

#### (四) 降低发动机的机械损失

##### 1. 降低发动机的机械损失的技术需求

发动机机械损失的优化能对降低燃油耗做出决定性的贡献。研究表明,在发动机工作中,消耗在机械损失的功率占指示功率的 10%~30%,这是个不可忽视的数字。降低发动机的机械损失是提高热效率的重要技术措施,若柴油机热效率目标为 50%,则柴油机的摩擦损失应降低 15%。

发动机主要的摩擦损失是活塞与气缸间的摩擦,以及轴承和各种附属装置造成的摩擦损失,机械损失的主要组成部分见图 12。利用降低发动机转速、选用新型材料、提高零部件的加工精度、涂层活塞、选用优质的润滑油及采用离合

风扇等技术降低发动机的机械损失,提高热效率具有广阔的前景。

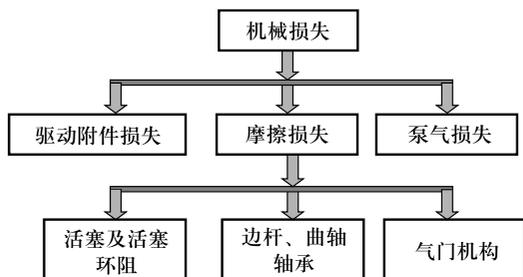


图 12 发动机机械损失的主要组成

## 2. 挑战与技术突破

### (1) 润滑系统

润滑系统中所有部件的相互作用与发动机的运转工况有关,因此发动机转速、机油温度、轴承间隙和各个部件的特性都是润滑系统设计关注的焦点。

对于未来的润滑系统来说,由于发动机的比功率更高,因此几乎对所有部件的要求都相应提高。此外,因为现在通常尺寸都偏大,特别是机油泵的工作能力,因此智能化可调节部件的必要性就凸现出来。应用可调式机油泵,根据运转工况来确定机油泵的供油量,从而将机油泵的驱动功率降低到最低程度,按润滑需求来调节机油泵的功率,其节油效果最大可达到 2% 左右。在高转速范围内,匹配合适的机油泵可降低摩擦功率,从而增加可用的有效功率。

### (2) 活塞设计

研究表明,活塞的重量随活塞直径的 3 次方增加。气缸直径增大,侧向导力随之增加,可是裙部表面也大致成比例增大,因此在活塞裙部上存在相似的平均表面压力。与此相反,活塞行程增大,在转速不变的情况下滑动速度相应增大,使得摩擦磨损增大。在较高的滑动速度下润滑油膜具有较好的承载性能,在一定程度上可补偿这种摩擦磨损的增大。此外,在较高的滑动速度下,混合摩擦的份额减少了,而这种混合摩擦在总的活塞裙部摩擦损失中最大可占 30%。但是,总的来说,在滑动速度增大的情况下,流体动力学损失也会增大。图 13 表示  $S/D = 1.0$  发动机的摩擦功率与短行程 ( $S/D = 0.8$ ) 及长行程 ( $S/D = 1.2$ ) 发动机的比较。在排量不变的情况下,摩擦损失随着  $S/D$  的增大而过度增大,而转速的影响很小。从活塞摩擦的角度来看,应该优先选择短行程发动机<sup>[27]</sup>。

在压缩上止点附近,曲柄连杆机构向压力侧的偏移能提高燃气压力的旋转推力和降低活塞的侧压力,并有利于增加润滑油膜的厚度,而流体动力学摩擦损失仅有微小的增加。若向压力侧偏移约行程的 11%,则在 2000 r/min 时活塞裙

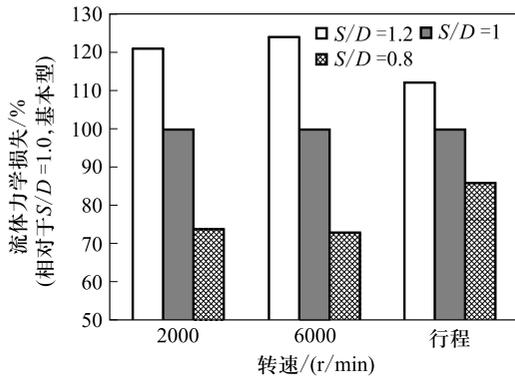


图 13 不同  $S/D$  比时摩擦损失比较

部的摩擦损失将降低约 2%。而且,较小的活塞侧压力能采用较短的裙部长度,可降低摩擦损失和活塞的重量。

裙部长度的缩短还能改善活塞裙部的承载性能。原则上,在相同的负荷和滑动速度下,磨削轮廓形状较小的鼓形度和椭圆度有利于提高润滑油膜的厚度,但是鼓形度和椭圆度的减小却提高了对气缸套圆度的要求。在考虑气缸套变形的情况下,优化润滑油膜的承载性能和摩擦损失是非常困难的,因为这必须在整个发动机运转范围内进行试验。这方面的模拟具有极大的优越性。

除了优化活塞轮廓形状之外,活塞销的偏移量和活塞的重心位置对降低摩擦损失也是十分重要的。首先,活塞销向压力侧的偏移是一种优化发动机声学性能的方法,同时由于延缓了活塞的摆动,从而减轻了在着火上止点附近活塞从背压侧转向压力侧时对气缸套的撞击。其优点在于向压力侧偏移的活塞所具有的良好声学性能并非是用提高流体力学损失换来的。

活塞中心线的偏移使活塞重心位置移动,从而产生了惯性力对活塞销轴线的力矩,该力矩对活塞的摆动起着主导作用。活塞重心位置的移动对摩擦损失产生了明显的影响,因此避免活塞重心位置移动是设计的一个目标。此外,由于这种摆动力矩,使上止点附近润滑油膜厚度的范围扩大,这预示着混合摩擦和磨损,而且随着活塞重心位移的增加,无论是活塞还是气缸套上的摩擦磨损都会增大。活塞和气缸套系统方面的节油效果可达到 1%~2%。活塞磨削轮廓形状的良好匹配在高转速区使摩擦损失明显降低,从而获得了较高的功率提升<sup>[28]</sup>。

### (3) 曲轴设计

除了活塞/气缸套系统之外,曲轴是对降低摩擦贡献最大的零件。若用滚动轴承替代滑动轴承,则可以获得巨大的降低摩擦潜力,最高能节油 5%。测量技术已证实,在 90℃ 机油温度下,这种降低摩擦的潜力可达约 55%,而且在机油温

度低的情况下,由于采用滚动轴承而获得的改善则更明显:35℃ 时达到 72%,60℃ 时仍超过 60%。同时,在所考察的情况下,由于采用滚动轴承,机油的体积流量降低了 40% 以上,同样对降低摩擦做出了贡献。曲轴和连杆采用滚动轴承,并匹配合适的机油泵,在 2000 r/min 的部分负荷运行工况点上,机油温度为 90℃ 时,发动机的摩擦功率降低了约 25%。

#### (4) 热管理减小摩擦

发动机热管理可以通过优化冷却系统来缩短发动机的预热时间,或提高部分负荷运转时的温度,从而减少发动机运转的摩擦。缩短发动机暖机运转时间的一种结构措施就是采用“分段式冷却”,即冷却水分段流经机体和气缸盖。当冷却水在机体和气缸盖中纵向流动的情况下,最简单的办法就是采用第二个蜡式节温器来节制机体中的冷却水流动。采用热管理及优化活塞组设计相配合预计最大降低 20% 的发动机摩擦,这相当于在行驶循环中的节油 6%<sup>[29]</sup>。

发动机的机械损失在总的燃烧能量中也占有较大的比重,因此降低发动机转速、选用新型材料、提高零部件的加工精度、涂层活塞、选用优质的润滑油及采用离合风扇等技术降低发动机的摩擦损失,提高热效率具有广阔的前景。降低发动机机械损失的技术挑战与突破见图 14 所示。

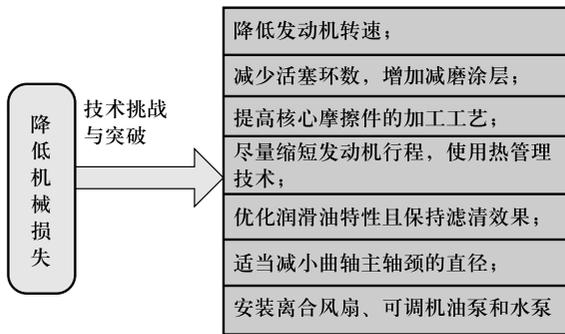


图 14 降低机械损失的技术挑战与突破

### (五) 发动机热管理系统

#### 1. 发动机热管理的需求

发动机的热管理通常指对整个发动机运行工况范围内的冷却水温度和机油温度进行主动控制,使其工作在最佳温度,从而获得更好的燃油经济性。发动机采用热管理之后,一方面能降低发动机在暖机过程中的热损失;同时,热管理系统能根据发动机的状态实时调节冷却液的流量,从而降低了水泵和油泵的驱动功;另外,发动机热管理能使发动机各摩擦部件具有最佳的配合间隙,保证润滑

油具有最佳的润滑性能,由此降低发动机的摩擦损失。因此,发动机热管理对提高发动机的热效率具有较大的潜力。

## 2. 发动机热管理技术的挑战与突破

发动机热管理技术被列为美国 21 世纪商用车计划的关键技术之一,对提高整车性能潜力巨大。发动机热管理系统的目标是提高燃料经济性,降低排放,增加功率输出和车辆载重能力,降低气动阻力损失和车辆维护费用,提高可靠性以及车辆对环境的适应能力。主要从以下方面实现:采用计算机芯片控制发动机温度,应用强迫对流和核态沸腾传热相结合的冷却机制,使用先进有效的传热介质,增加换热量,采用更加轻巧的高导热率材料制造的换热器,对发动机机舱底部空气流动进行管理,进行余热储存,优化散热器及风扇的设计和布置,废热循环及再利用等。

整个车辆热管理系统可以分成 3 个主要部分:动力系统和排气系统传热,发动机舱内空气流动,驾驶室内传热。高性能热管理系统必须协调这 3 个部分工作以满足车辆两大主要运行区域:车辆暖机和暖机后发动机的运行环境。一方面要迅速暖机,以减少冷启动过程中的排放和机械损失;另一方面要在发动机稳态工况(尤其是部分负荷)下维持高温来优化发动机热力特性,提高燃油经济性<sup>[30,31]</sup>。

热管理系统由各个部件和传热流体组成。部件包括:换热器、风扇、冷却液泵、压缩机、节温器、传感器、执行器和各种管道及套管;传热流体包括:大气、冷却液、机油、润滑油、废气、燃料、制冷剂等,如图 15。这些部件和流体必须协调工作以满足车辆散热和温度控制要求<sup>[32]</sup>。目前,汽车热管理系统的发展趋势主要有以下几个方面。

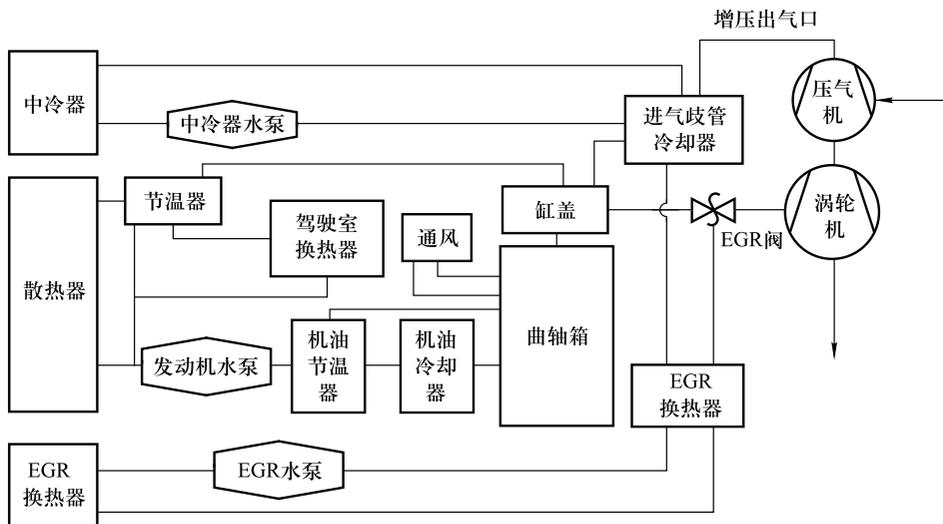


图 15 现代汽车热管理系统

### (1) 热管理系统控制智能化

随着计算机技术及发动机电控技术发展,采用电子驱动以及控制的冷却水泵、风扇、节温器等部件,可以通过传感器和计算机芯片根据实际的发动机温度控制运行,提供最佳的冷却介质流量,实现热管理系统控制智能化,提高了效率,进而直接提高了发动机的经济性。现在比较先进的热管理系统是一种由电控水泵、电控节温器和电动风扇组成的发动机冷却系统。其电控水泵由电机驱动,可以对冷却液流量进行独立控制;由于不用曲轴驱动,安装位置比较灵活,可以优化水泵水力特性设计,减少压力损失;减少了V带及齿轮对水泵轴承的循环侧向负载力,降低了驱动损失。电控节温器的控制系统由传感器、电机和控制模块组成,可以根据冷却液温度或者发动机部件温度来控制冷却液流量。电动风扇转速只有高速和低速两档。实验表明,这种系统可以节省燃油5%,降低HC排放10%<sup>[33]</sup>。

先进的柴油智能热管理系统包括:电动水泵、电子节温器、电风扇、低温散热器和冷凝器、EGR中冷器、水冷增压空气冷却器(WCCAC)和传输油冷却器(TOC)及其相应的辅助冷却装置等<sup>[33]</sup>。图16为这种先进热管理系统的结构图。

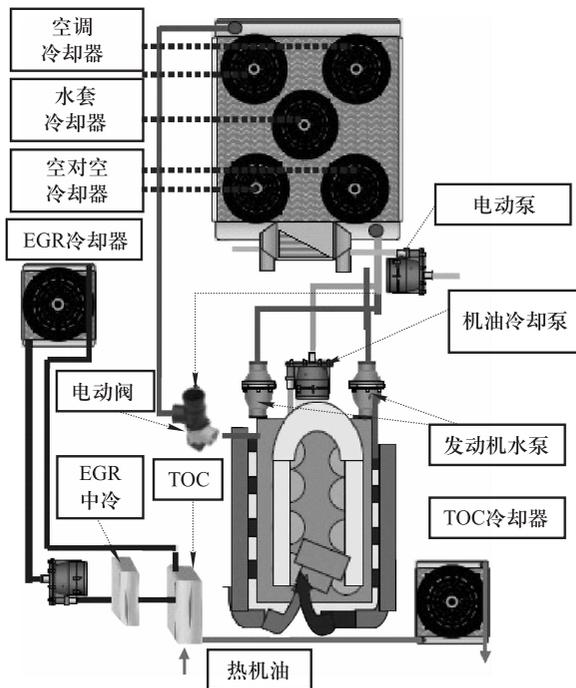


图 16 智能热管理系统结构图

这种先进的热管理系统不仅提高燃油经济性还提高了对发动机温度的控制

能力,增加了散热率效率,通过实验对比,它与传统热管理系统的燃油经济性对比优势非常明显,如图 17 所示。从图中我们可以看出尽管经济性增加的比率不同,但是在各个工况下都有所提高,所以这种热管理的优势是相当明显的。

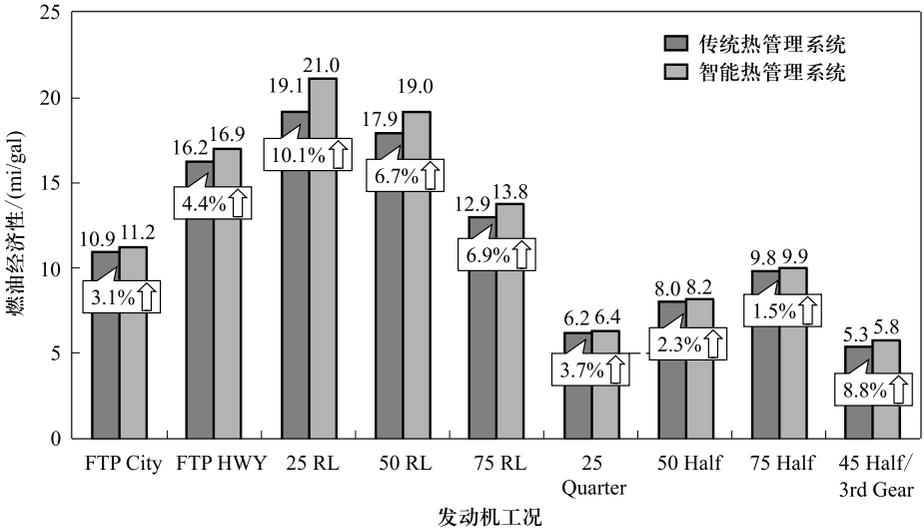


图 17 不同运行工况下智能热管理系统与传统热管理系统的经济性对比图

智能化热管理系统研发的关键技术是热管理系统与发动机运行的匹配技术以及系统优化控制策略的选择问题。系统仿真分析表明,热管理系统效率很大程度上依赖于系统优化控制策略,控制对象包括水泵转速、电控节温器阀门开度以及冷却风扇转速等。可以根据汽车发动机实际工作和试验情况,依据系统优化原则来制定智能化电控热管理系统控制策略,使发动机在不同工况下均工作在最佳温度范围,缩短暖机和驾驶舱升温时间。

## (2) 热管理系统结构优化

### a) 双回路分体式冷却水套

双回路分段式冷却被视作非常具有可行性的方案,即冷却液分段流经彼此隔开的机体和气缸盖,如图 18 所示。采用一个阀(最简单的办法就是采用蜡式节温器)能在暖机期间将发动机机体中的冷却液流动完全切断,以便尽可能将热量保留在气缸套中,并且按摩擦-温度特性曲线场来控制这个节温器,这样特别是在部分负荷运转工况时能保持较高的温度,像使用电动冷却液泵一样能提供更多的降低燃油消耗的潜力<sup>[34]</sup>。

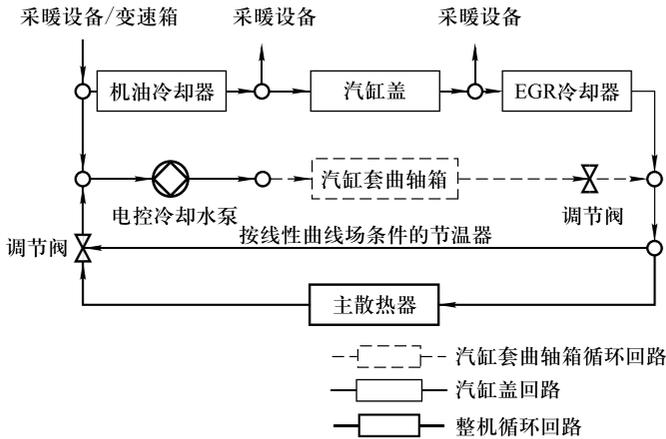


图 18 发动机热管理冷却液循环回路示意图

#### b) 应用温度设定

通过电控系统和温度传感器设定温度控制点,从而精确控制发动机金属和冷却液的温度。由于发动机工作时排气门前温度几乎最高,所以应用温度控制点时基于金属温度设定比基于冷却液温度设定更可靠。由于传统的冷却系统为保证汽车在任何工况下都能稳定工作,所以它是在极限工作情况的基础上考虑设计的,而在大多数时刻汽车并非极限运行情况,所以这将导致燃油消耗率增加,所以可以利用温度控制点使汽车在部分负荷工况下提高经济性。

#### c) 电动水泵

采用传统的机械式水泵存在着很大的弊端,因为机械式水泵是由发动机曲轴进行驱动的,只要车在运行中,无论是否需要冷却液,水泵一直在运转,这造成了很大的机械损失和传热损失,有时甚至产生冷却过度。研究表明,传统水泵的泵水量仅在 5% 的时间内正确。同时,由于机械水泵和节温器的传递效率低,常常使发动机不能在第一时间做出反应改变发动机热负荷,造成发动机不能在适宜的温度范围内工作。因此,近年来提出了电动水泵的概念,来改善发动机的冷却性能。它实现水泵和缸体的分离,泵的流量和通风装置都通过发动机的 ECU 来调节和控制,远离缸体这一热源后,水泵可以用塑料制成,既降低了成本又减轻了发动机的重量,达到了水泵的转速随水温的变化而变化,进一步降低传热损失和机械损失,降低油耗<sup>[33]</sup>。

#### d) 电子节温器

电子节温器示意图如图 19 所示,装有光学编码器的继电器同涡轮装置连接在一起,连有活塞的蜗杆装配在涡轮机构上,在默认状态下,冷却液可流向散热器,当温度降低时,温度传感器把这一信号传给 ECU,ECU 通过控制继电器使涡轮

轮蜗杆机构转动,同时带动活塞向上移动,如图所示,这样就打开了旁通阀关闭了通往散热器的通道,冷却液只能流回水泵,即进行小循环。

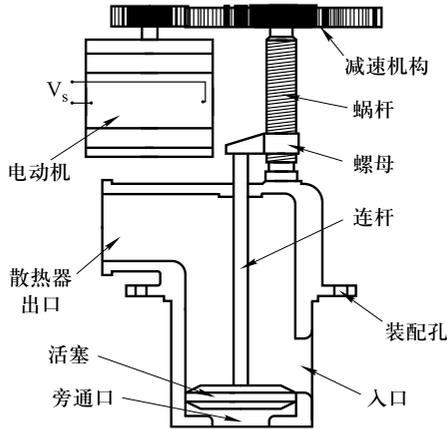


图 19 电子节温器工作原理图

相关实验表明,发动机燃油经济性的改善主要是由于电控节温器的作用,而不是电控水泵,因为电控节温器可以实现发动机暖机时冷却液“不流动”的控制策略,进而加快发动机暖机过程,缩短驾驶室升温时间,还可以降低水泵和风扇的功率消耗<sup>[33-35]</sup>。

#### e) 电动风扇

将机械风扇改成电动风扇的好处有很多,对于民用车来说,机械风扇可消耗 20 ~ 30 kW 的功率,对于某些军用车损失的功率就更大了,在热负荷大的时候采用机械风扇的发动机冷却系损失的功率可达 40 ~ 50 kW。虽然采用硅油离合器的风扇控制性要好一些,但是机械装置还是会引功率损失,功率损失虽然相对减小,但是在整个汽车的寿命中这些损失的功率加起来还是相当可观的。相比之下,电子系统就可以更精确的控制风扇,在发动机不需要冷却的条件下可迅速关闭风扇,节省了功率进而实现经济性的提高<sup>[36]</sup>。

采用电动风扇还有一个优点就是它可以用几个小的电动风扇代替一个大的机械风扇,这样做可以提高风扇的覆盖面,提高系统效率。但是,护风罩内的小风扇也将引起二次流动,同时流经每个小风扇的流体之间也相互干扰,这样也势必会影响冷却系的性能。所以采用多个小风扇的冷却系统仍然需要进行优化设计。

虽然发动机热管理技术对提高其热效率具有很大的潜力,但是要满足发动机对热管理系统的要求,必须进一步突破、升级相关技术(如冷却液的回路设计、可调油泵和水泵的优化设计等),如图 20 是发动机热管理技术的挑战与技术

突破。

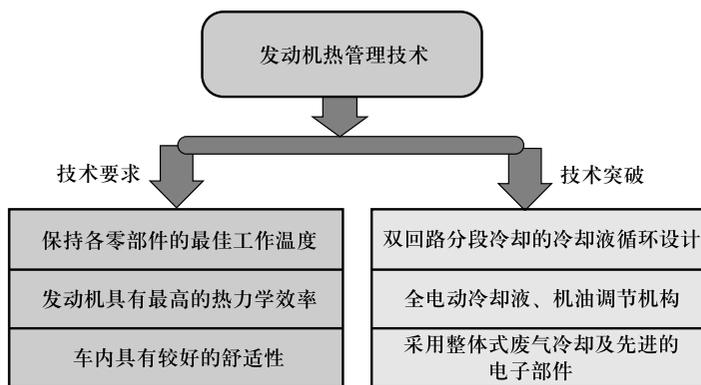


图 20 发动机热管理技术的挑战与技术突破

## (六) 余热能利用技术

### 1. 余热能利用的技术需求

相关研究表明,燃料转化为有效功的热当量占燃料燃烧发热量的 30% ~ 45% (柴油机)或 20% ~ 30% (汽油机),以废热形式排出车外的能量占燃烧总能量的 55% ~ 70% (柴油机)或 70% ~ 80% (汽油机)。汽车燃料燃烧所发出的能量只有三分之一左右被有效利用,大部分的能量损失则通过发动机的冷却水散热和高温排气排热带走。内燃机具有很高的废气排温,如果这部分余热能被充分利用,内燃机的热利用率将得到明显提高<sup>[37-39]</sup>。因此,利用有效的技术措施,将发动机散发出来的热量(冷却水、机油、排气等)有效地加以利用,从而有效地减少了发动机的传热损失和排气损失,大大增加了燃料的利用率,以此提高发动机的热效率,减少 CO<sub>2</sub> 的排放。

国内外汽车余热利用技术从热源来看,可以分为发动机冷却水余热、排气余热和润滑油余热三种;从用途上来看,有废气涡轮增压、制冷空调、涡轮发电、废热采暖、改良燃料等方式,但制冷空调、温差发电以及改良燃料等技术本身的制造成本很高而且余热利用率低。因此,就余热能利用技术近期推广使用而言,废气涡轮增压、废气涡轮发电、废热采暖以及有机朗肯循环余能回收技术具有更高的可行性。这其中废气涡轮增压技术运用最为广泛,而有机朗肯循环余能回收技术相对来说最具回收热能的潜质。本节主要针对乘用车小型柴油机和重型柴油机余热利用技术的选择和技术进行论述,其中不同余热能利用技术的优缺点和适应机型见表 1<sup>[40,41]</sup>。

表 1 几种典型的余热能利用技术

余热能利用技术	节能原理	优点	缺点	适用机型
涡轮增压器	利用废气中的部分能量来提高进气压力	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 运用广泛</li> <li>➤ 成本低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 能量利用率低</li> <li>➤ 难实现全工况良好匹配</li> </ul>	小型、重型
涡轮发电	利用发动机排气推动涡轮,多余的动能带动发电机发电	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 结构简单,安装方便</li> <li>➤ 舍弃废气旁通阀</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 会影响发动机性能</li> <li>➤ 涡轮回收废气能量有限</li> </ul>	小型、重型
采暖	利用废热供暖,减少空调系统消耗	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 降低空调功耗</li> <li>➤ 成本较低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 发热量大小受工况的限制</li> <li>➤ 仅冬季发挥作用</li> </ul>	小型、重型
朗肯循环余热回收	以废气热能驱动朗肯循环,从而实现低品热能向高品位能量的转化	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 废热利用率高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 车上安装布置困难</li> <li>➤ 增加整机重量</li> </ul>	重型
温差发电	利用废热温差产生塞贝克效应的热电现象发电	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 安装方便</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 热电转换效率较低</li> </ul>	小型、重型
改良燃料	废热加热燃料,使其在催化剂作用下分解出 $H_2$ 、CO 等可燃气体	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 提高燃料的燃烧热值</li> <li>➤ 减轻排放污染和积碳</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 只应用到改良甲醇</li> <li>➤ 能量利用率低</li> </ul>	小型、重型

## 2. 挑战和技术突破

现阶段的余能利用技术主要是涡轮增压技术,但该技术也只能利用废气余能,且利用不充分,因此进一步研究和运用新的余能回收技术(如典型的有机朗肯循环余热回收和斯特林循环余热回收技术),充分利用冷却水和机油的余热,实现余热的梯级回收利用,将是提高内燃机热效率最为有效的技术手段,未来取得 10%~20% 的能量利用效率的提高,完全是可能的。余能利用技术的技术要求和突破见图 21。

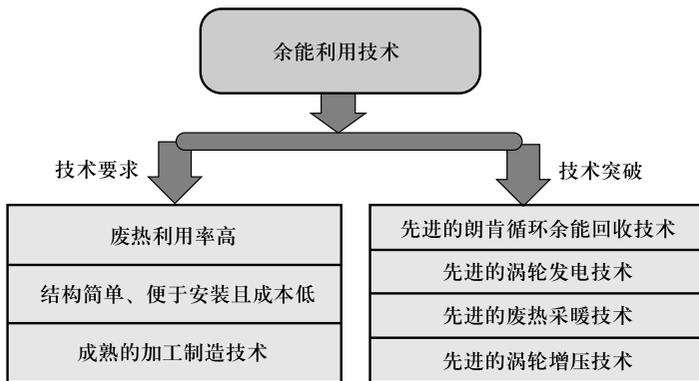


图 21 余能利用技术的技术要求与突破

### 三、船用柴油机节能减排的关键技术

柴油机因其功率范围大、效率高、能耗低、使用维修方便等优势,在民用船舶和中小型舰艇推进装置中占据着主导地位。目前,世界上的船舶有 95% 是以柴油机为动力的。因此,提高船用柴油机的热效率也是内燃机节能和降低 CO<sub>2</sub> 排放的关键。

#### (一) 船舶柴油机燃油消耗率水平及效率状况

20 世纪 70 年代末到 80 年代,各类节能型柴油机大量出现,各类柴油机均采用各种节能措施降低油耗率,努力提高柴油机的有效热效率。由于节能技术的普及,以及船用柴油机的工作和应用特点,船用柴油机的热效率水平也得到了很大程度的提高。目前船用柴油机的燃油消耗率(有效热效率)基本情况如下:

低速机(90 ~ 100 r/min):燃油消耗率 165 ~ 171 g/(kW·h),热效率 49% ~ 51% ;

中速机(750 ~ 1100 r/min):燃油消耗率 185 ~ 195 g/(kW·h),热效率 43% ~ 45% ;

高速机(1500 ~ 2400 r/min):燃油消耗率 200 ~ 220 g/(kW·h),热效率 38% ~ 42% 。

#### (二) 船舶柴油机应对高效节能及环保需求的技术措施

当今船用柴油机技术发展的五大趋势是大功率集成化、结构紧凑模块化、智能自动化、高效节能低排放以及安全可靠长寿命。节约能源、提高热效率及降低排放是推动船用柴油机技术发展的最主要驱动力。在这种需求之下,一些先进

的技术(包括已在车用柴油机上成功应用的技术)作为满足热效率及排放目标的技术手段,逐渐在船用柴油机上得到研究和应用。提高船用柴油机热效率的关键技术与车用柴油机类似,这里就不再赘述,本节只概括性地对船用柴油机节能技术进行阐述。

提高船用柴油机节能、环保性能最根本的方式是改善柴油机的燃料燃烧过程。世界先进船用柴油机厂商积极开展燃烧控制技术研究及应用,包括先进的涡轮增压技术、共轨燃油喷射技术、米勒循环技术、加水燃烧、EGR 技术等,通过增加气缸空气量、精确控制喷油时刻和喷油速率来控制燃烧过程,提高燃料的燃烧效率,从而实现节约燃油和降低排放的目标。

燃油喷射系统的性能对柴油机的燃烧过程有着重要的影响,改进燃油喷射系统是提高柴油机效率、节约燃油和降低排放的有效办法。理想的燃油喷射系统应具有如下性能:高喷油压力,且大小可根据工况需求灵活调整;精确而灵活地控制喷油定时和喷油量;喷油率的优化控制;与整机匹配灵活。具备以上柔性控制功能是燃油喷射系统发展的必然趋势。高压共轨燃油喷射系统正是顺应以上需求而诞生的。高压共轨燃油喷射系统能够精确、柔性地控制柴油机喷油量、喷油定时和喷射压力,在满足柴油机经济性、动力性和日益苛刻的排放法规的要求上有着广阔的前景。康明斯公司开发出型号为 QSK60、V 型、16 缸的环保发动机,该发动机所使用的 MCRS (Modula Common Rail Fuel System,模块化共轨燃油系统),能够按容积精确地控制喷油量。MCRS 使发动机在任何负荷或速度下都能保持持续的高压喷射,高喷油压力可以保证燃油雾化良好,提高了燃油的燃烧效率,大幅降低了废气的排放量,使其满足 Tier II 的排放标准。

先进的增压技术是提高船用柴油机功率输出、改善燃油经济性和排放的重要保证。随着对柴油机经济性的要求越来越高和 IMO 等国际组织的船用柴油机排放法规越来越严格,现有的一级涡轮增压技术已无法满足需求。因而,世界先进柴油机厂商近年来对涡轮增压技术进行了积极的改进和升级,以提高柴油机的性能。如 MAN 柴油机公司开发了 VTA (Variable Turbine Area) 涡轮增压技术,使得柴油机处在任何负荷和速度运行时,都能根据燃油的喷入量自动、持续、精确地匹配压缩空气的进入量,解决了传统涡轮增压器只能在事先设定的发动机负荷点实现最大效率的问题,大大提高了燃料燃烧的效率,节约了燃油。据测算,其燃油节约量为  $4 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。同时,针对一级涡轮增压能力不足、进气量低的问题,瓦锡兰和 MAN 柴油机公司都成功开发出两级涡轮增压器来增大压力,增加汽缸中的空气量,解决一级涡轮增压器压力不足的问题。该技术能大幅提高柴油机输出功率,同时降低燃油消耗和二氧化碳排放量。

米勒循环技术也是提高柴油机效率的重要技术,MAN B&W 公司在—台 32/44 CR 单缸试验柴油机上结合 Miller 循环和增压进行了外部 EGR 试验。试验结果表明,在 75% 负荷和额定转速条件下,采用 EGR 技术,可以使  $\text{NO}_x$  排放降低到  $1 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ,而通过提高增压压力和喷油压力,能使发动机的烟度排放和油耗维持在可以接受的合理范围。因此,MAN B&W 公司认为,通过结合两级相继增压系统和共轨系统,采用 EGR 技术能够使船用大功率柴油机的  $\text{NO}_x$  排放达到 IMO Tier III 水平,同时不会引起其他性能参数的恶化。

除从燃烧过程来提高发动机的效率外,集成的能源综合利用对改善发动机的燃油经济性也具有重要的作用。可以通过使用热电联供、联合余热循环 WHR、能量储存和混合动力或船舶推进能源综合利用系统,通过优化利用发动机的性能,提高效率 and 可靠性,降低成本,同时也达到降低排放的目的。

欧洲委员会从 2004 年开始就制定了“船舶超低排放燃烧的高效研发计划项目”(HERCULES - A、HERCULES - B、HERCULES - C)。这一计划的技术方向涵盖了先进燃烧概念、极限机械参数、极限热力参数、多级智能增压、智能控制、复合循环、内部减排及后处理、新型传感器、低摩擦技术、能量回收及复合“热”发动机等方面。图 22、图 23 所示即为 HERCULES 计划的技术方向和技术路线。

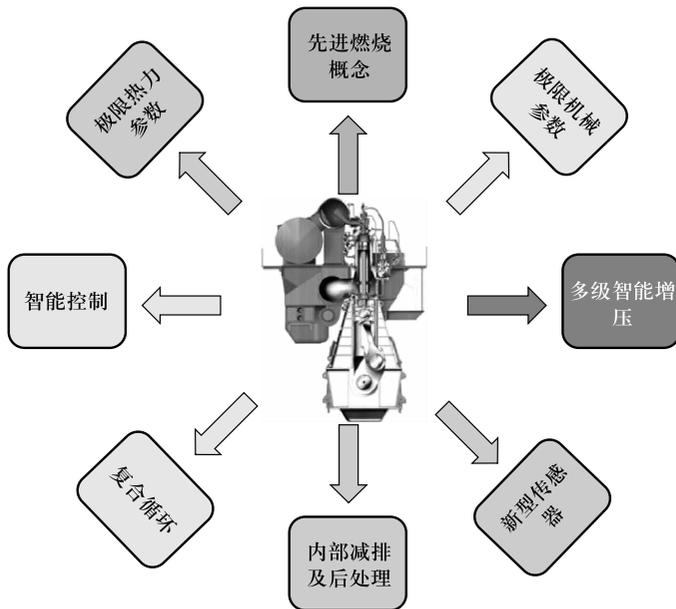


图 22 HERCULES 计划技术方向

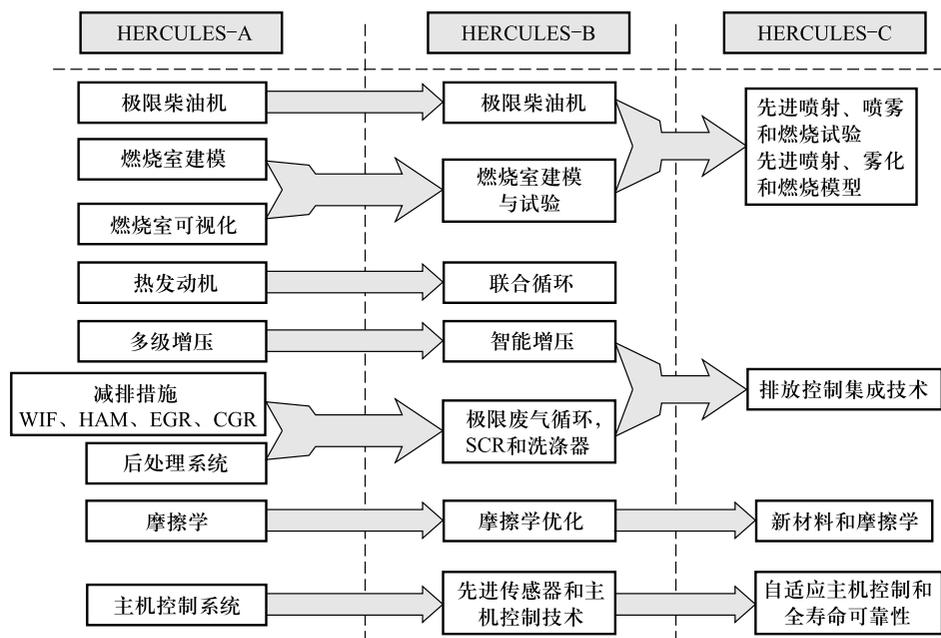


图 23 HERCULES 计划技术路线

在 HERCULES - A 阶段,到 2007 年达到了降低燃油消耗 1% 的目标(实际降低 1.4%), $\text{NO}_x$  降低 50% (目标为降低 20%),完成了 8000 h 的测试。

在 HERCULES - B 阶段,在极限参数方面到 2011 年 12 月最高燃烧压力达到了 20 MPa(二冲程)和 30 MPa(四冲程),多级增压压力达到 0.8 MPa,完成了样机的制造,通过采用高压锅炉复合系统整体动力系统试验效率提高 60%,活塞环和滑块的摩擦减少 25%,在废气减排方面也达到了预期的目标。

在 HERCULES - C 阶段重点研究方向为新概念燃烧、新材料及摩擦、燃油喷射系统建模及试验、近零排放发动机技术、智能控制及全生命周期可靠性。其主要目标包括进一步有效降低燃油消耗(在 2020 年相对 2010 年减少 5%)、接近零的有害排放(2020 年  $\text{NO}_x$  相对 IMO Tire I 降低 95%)、全生命周期保持高的性能。

### (三) 未来船舶柴油机(以中速机为例)极限参数条件下的探讨

限制船用柴油机热效率的两个重要参数是最大爆发压力和平均有效压力。目前,市场上产品中速机的平均有效压力  $P_e$  的范围为 25 ~ 28 bar,最大爆发压力  $P_{\max}$  为 230 bar 左右。为了探讨极限条件下船用柴油机的性能,开展了极限参数下相关的研究。

在德国内燃机研究协会(FVV)资助的中速柴油机高  $P_e$ 、 $P_{max}$  的研究项目中,将 32/40 机的缸径减小到 265 mm,使发动机  $P_e$  达到 40 bar、 $P_{max}$  达到 350 bar。

德国不伦瑞克工业大学的 Peter Eilts 研究了中速柴油机所能达到的最大  $P_e$ 。该研究是在  $P_e$  为 21.9 bar、缸径为 320 mm 的中速柴油机上进行的,目标是  $P_e$  达到 80 bar。Peter Eilts 重点研究了增压器效率、热负荷、燃烧等限定条件下,所能达到的极限  $P_e$  值。考虑到  $P_e$  提高对机械效率设计需求的不确定性,假设其不变。研究表明,使用原机增压器(效率为 60%)时,最大  $P_e$  仅能达到 35 bar;当增压器效率为 70%(高效增压器或两级增压),最大  $P_e$  能达到 60 bar;两者的涡前排温都急剧上升。增压压力和最高爆发压力与  $P_e$  的增加成正比,当  $P_e$  达到 80 bar 时,增压压力需要 15 ~ 16 bar,  $P_{max}$  要到 750 ~ 800 bar 以上,活塞温度要增加 200 °C,受热零部件热负荷显著增大,机械负荷明显增大。

对于  $P_e$  高达 80 bar 情况下得到了如下研究结论。

80 bar 的平均有效压力需要增压压力达到 15 bar 以上,这或许可以通过两级增压实现;最高爆发压力要高达 750 ~ 800 bar,这需要在设计和材料上要有重大突破,但这几乎是不可能实现的。如果增压器效率可达 80% 的话,油耗可以下降近 5%,但目前增压器效率只能达到 70% 左右,即便采用两级增压加中间冷却也实现不了;由于受热零部件热负荷显著增大,要求采取有效的冷却措施控制零部件的温升;燃油喷射压力需要远高于目前燃油系统所能达到的值,以改善燃烧和控制烟度排放。

对于极限条件下的研究目前已经引起了重视,但还需要深入开展相关研究,如全工况及非稳定工况条件下极限参数研究;高机械负荷和热负荷相关的新型设计、新材料研究方案;高增压系统和燃油喷射系统研究等为未来高效清洁船用柴油机的设计开发提供指导。

#### 四、总结

国际上普遍认为,内燃机仍是未来相当一段时期主要动力源,国际上开展了以提高内燃机热效率为目标的新一轮内燃机技术竞赛。我国也与国际同步开展了提高内燃机热效率技术原理的创新研究,并取得了一批有影响的创新成果。但是,提高内燃机热效率依赖于多项技术的突破,因此在继续对先进燃烧技术创新研究的同时,也需要加强对柴油机先进材料和先进制造技术、整机结构强度(提高柴油机最大爆发压力的极限)、关键零部件技术、减磨涂层、热管理以及余能回收利用等相关技术的研究和突破。对于车用柴油机以及船用中、高速机而言,力争在未来 5 ~ 10 年内使有效热效率达到 50% ~ 55% (见图 24),而对于船用低速柴油机而言,其热效率相对于车用柴油机的热效率高 3% ~ 5%。

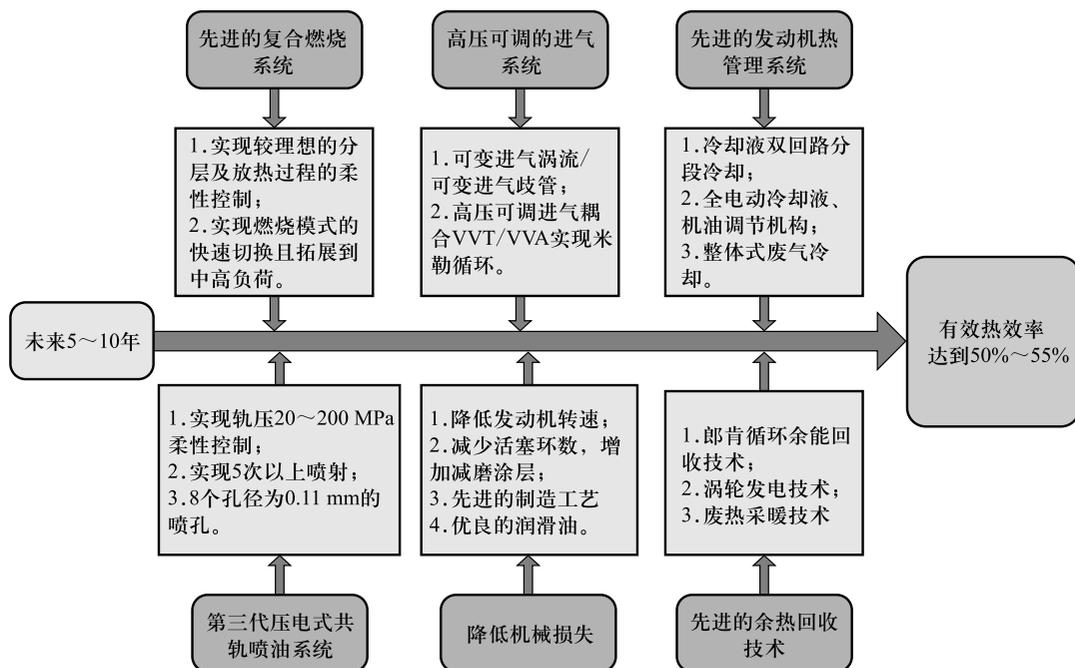


图 24 未来 5 ~ 10 年内燃机热效率的发展趋势

## 参考文献

- [1] 蒋德明,陈长佑,杨嘉林,等. 高等车用内燃机原理(上册)[M]. 陕西:西安交通大学出版社,2006.
- [2] 周龙保,刘忠长,高宗英. 内燃机学(第3版)[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- [3] Johnson T V. Diesel emission control in review[J]. SAE Transactions, 2001, 110(4): 128 - 144.
- [4] 丁华杰. 天时地利 美上半年成绩优于预期[EB/OL]. <http://auto.sohu.com/20120716/n348253335.shtml>.
- [5] 中华人民共和国国务院办公厅. 关于加强内燃机工业节能减排的意见[R]. 2013.
- [6] 中华人民共和国国务院办公厅. 节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年)[R]. 2012.
- [7] Ennio C, Christoph M, 程永陆. 减排——对涡轮增压的新挑战[J]. 国外内燃机,2010.
- [8] Edwards K D, Wagner R M, Briggs T E, et al. Defining engine efficiency limits[C]. 17th DEER Conference, Detroit, MI, October. 2011: 3 - 6.
- [9] 苏万华. 国家重点基础研究发展规划项目(“973”)课题“柴油喷雾强化混合过程及其对低温燃烧影响的研究”结题验收报告[R]. 2011.
- [10] Hyvönen J, Haraldsson G, Johansson B. Supercharging HCCI to extend the operating range in a multi-cylinder VCR - HCCI engine[J]. SAE Paper, 2003 (1): 3214.

- [11] Hardy W L, Reitz R D. A study of the effects of high EGR, high equivalence ratio, and mixing time on emissions levels in a heavy-duty diesel engine for PCCI combustion[J]. Analysis, 2006, 2014: 10 - 05.
- [12] Okude K, Mori K, Shiino S, et al. Premixed compression ignition (PCI) combustion for simultaneous reduction of  $\text{NO}_x$  and soot in diesel engine[J]. SAE Transactions, 2004, 113 (4): 1002 - 1013.
- [13] Doosje E, Willems F, Baert R, et al. Experimental study into a hybrid PCCL/CI concept for next-generation heavy-duty diesel engines[J]. Training, 2012: 12.
- [14] 汪洋, 谢辉, 苏万华, 等. 激光诱导荧光法研究柴油机新概念燃烧中的喷雾混合过程[J]. 燃烧科学与技术, 2002, 8(4): 338 - 341.
- [15] 赵昌普, 苏万华, 汪洋, 等. “Bump 燃烧室”内新概念稀扩散燃烧混合气形成机理的研究[J]. 燃烧科学与技术, 2004, 10(4): 327 - 335.
- [16] 苏万华, 林铁坚, 张晓宇, 等. MULINBUMP - HCCI 复合燃烧放热特征及其对排放和热效率的影响[J]. 内燃机学报, 2004, 22(3): 193 - 202.
- [17] Wanhua Su. The 3rd International Symposium on Clean and High-Efficiency Combustion in Engines. State Key Laboratory of Engines of Tianjin University, 2008.
- [18] 苏万华, 鹿盈盈, 于文斌, 等. 柴油机高密度 - 低温燃烧的数值模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2012, 16(3): 191 - 198.
- [19] 于文斌. 基于混合与化学反应协同作用的混合燃烧控制策略的研究[D]. 天津:天津大学, 2012.
- [20] 隋菱歌. 增压柴油机瞬态工况性能仿真及优化[D]. 吉林:吉林大学, 2012.
- [21] Rakopoulos C D, Dimaratos A M, Giakoumis E G, et al. Evaluation of the effect of engine, load and turbocharger parameters on transient emissions of diesel engine [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(9): 2381 - 2393.
- [22] 张龙平, 刘忠长, 田径, 等. 柴油机瞬变工况的动态响应及燃烧劣变分析[J]. 内燃机学报, 2014, 32(3): 104 - 110.
- [23] 田径, 刘忠长, 韩永强, 等. 喷油参数对车用发动机油气混合及燃烧的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(2): 370 - 375.
- [24] Tow T C, Pierpont A, Reitz R D. Reducing particulate and  $\text{NO}_x$  emissions by using multiple injections in a heavy duty DI diesel engine[J]. Evaluation, 1994: 10.
- [25] 田径, 刘忠长, 韩永强, 等. 基于 EGR 耦合多段喷射技术实现超低排放[J]. 内燃机学报, 2010, 28(3): 228 - 234.
- [26] 中国内燃机工业协会, 《中国内燃机工业年鉴》编委会. 中国内燃机工业年鉴[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2010.
- [27] Schwaderlapp M, Dohmen J, Haubner F, 等. 减少摩擦的节油设计措施(一)[J]. 国外内燃机, 2007, 39(1): 28 - 32.
- [28] Schwaderlapp M, Dohmen J, Haubner F, 等. 减少摩擦的节油设计措施(二)[J]. 国外

内燃机,2007, 39(2): 18 - 22.

- [29] Burke R, Brace C. The effects of engine thermal conditions on performance, emissions and fuel consumption [ C ]. SAE 2010 World Congress and Exhibition. University of Bath, 2010.
- [30] Bouchez M, Daniau E, Visez N, et al. Hydrocarbons heterogeneous pyrolysis: Experiments and modeling for scramjet thermal management [ C ]. International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, 2008: 15.
- [31] Kevin B, Matthew T. Integrated vehicle thermal management for advanced vehicle propulsion technologies [ J ]. SAE Paper, 2010(1): 836.
- [32] 于莹潇, 袁兆成, 田佳林, 等. 现代汽车热管理系统研究进展 [ J ]. 汽车技术, 2009 (8): 1 - 7.
- [33] Chalgren R D, Allen D J. Light duty diesel advanced thermal management [ J ]. Training, 2005: 11 - 19.
- [34] 孙新年, 郭新民. 装载机冷却系统控制装置设计与试验研究 [ J ]. 内燃机学报, 2008, 26(2): 188 - 191.
- [35] Wagner J R, Ghone M C, Dawson D W, et al. Coolant flow control strategies for automotive thermal management systems [ J ]. Training, 2002: 11 - 12.
- [36] Stephens T, Cross T. Fan and heat exchanger flow interactions [ J ]. SAE Transactions, 2005, 114(6): 2490 - 2507.
- [37] 冯黎明. 基于朗肯循环的发动机废热回收理论与试验研究 [ D ]. 天津: 天津大学, 2010.
- [38] Leising C J, Purohit G P, DeGrey S P, et al. Waste heat recovery in truck engines [ R ]. SAE Technical Paper, 1978.
- [39] Endo T, Kawajiri S, Kojima Y, et al. Study on maximizing exergy in automotive engines [ R ]. SAE Technical Paper, 2007.
- [40] Endo T, Kawajiri S, Kojima Y, et al. Study on maximizing exergy in automotive engines [ R ]. SAE Technical Paper, 2007.
- [41] Oomori H, Ogino S. Waste heat recovery of passenger car using a combination of Rankine bottoming cycle and evaporative engine cooling system [ J ]. Society of Automotive Engineers (SAE), 1993, 930880: 159 - 164.



**刘忠长** 1956 年出生, 博士。1982 年毕业于吉林工业大学内燃机专业, 获工学学士学位。1986 年毕业于吉林工业大学内燃机专业, 获工学硕士学位。1997 年毕业于吉林大学动力机械及工程专业, 获工学博士学位。现在吉林大学汽车学院任教, 教授, 动力机械及工程学科学术带头人, 汽车仿真与控制国家重点实验室创新团队责任教授。中国内燃机学会燃烧、节能与净化分会副主任。

# 车用发动机节能路线

李 康

中国第一汽车股份有限公司技术中心

## 一、油耗法规与政策

目前,世界上主要汽车大国都制定了严格的乘用车 CO<sub>2</sub> 排放国家法规(见图 1)。欧盟 2006 年 CO<sub>2</sub> 排放限值是 160 g/km,2012 年是 130 g/km,到 2020 年将降低到 95 g/km。美国 2006 年为 242 g/km,2016 年是 140 g/km,2020 年和 2025 年将分别降低到 113 g/km 和 89 g/km。日本 2006 年是 149 g/km,2015 年将实现 125 g/km,2020 年计划实现 105 g/km。我国从 2012 年开始导入第三阶段油耗法规,到 2015 年我国乘用车产品平均燃料消耗量降至 6.9 L/100km(即 CO<sub>2</sub> 排放水平为 161 g/km),到 2020 年第四阶段燃料消耗量限值预计将降至平均 5.0 L/100km(即 CO<sub>2</sub> 排放水平为 117 g/km)。

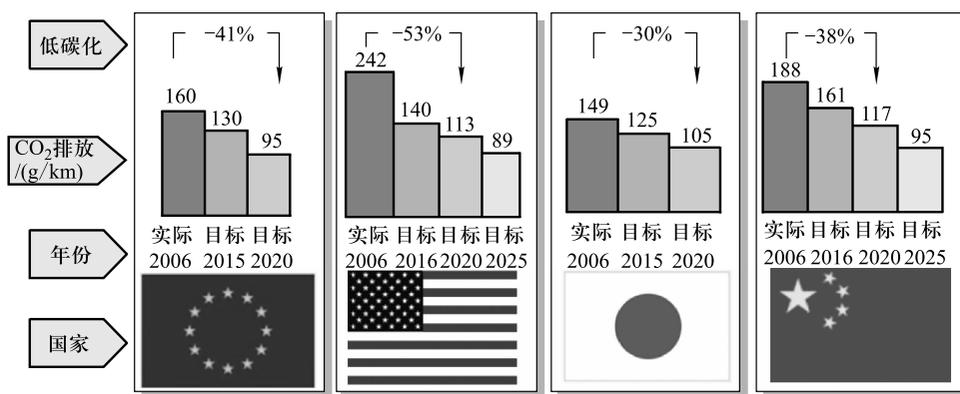


图 1 世界主要汽车大国乘用车 CO<sub>2</sub> 法规与中国燃油消耗量(折算 CO<sub>2</sub> 后)法规对比

2012 年 7 月,国务院印发了《节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020 年)》,以推进汽车企业新能源技术进步,缓解中国能源与环境压力。中国正在实施的是企业平均燃油消耗量限值,工业和信息化部、发展和改革委员会、商务部、海关总署、质检总局制定了《乘用车企业平均燃料消耗量核算办法》,进一步

完善汽车节能管理制度,实施乘用车企业平均燃料消耗量管理,以实现到 2015 年和 2020 年我国乘用车产品平均燃料消耗量分别降至 6.9 L/100km 和 5.0 L/100km 的目标。可以预测,到 2025 年,中国乘用车 CO<sub>2</sub> 排放水平将达到 95 g/km。

规划中,中国政府以纯电动车作为新能源汽车发展和汽车产业转型的主要战略取向,重点推进纯电动车和插电式混合动力汽车产业化,推广普及非插电式混合动力汽车、节能内燃机汽车。到 2015 年,纯电动车和插电式混合动力汽车累计产销量力争达到 50 万辆,纯电动模式续航里程达到 150 km,PHEV 纯电动模式续航里程将达到 50 km。到 2020 年,我国新能源汽车产业将实现规模化,纯电动车和插电式混合动力汽车生产能力达 200 万辆,累计产销量达到 500 万辆。规划中明确,到 2020 年汽车燃料经济性将显著改善,乘用车新车平均油耗降至 5.0 L/100km,节能型乘用车燃料消耗量降至 4.5 L/100km 以下。预计新能源汽车续航里程、动力电池技术水平与技术成本将得到显著改善。

2013 年 3 月,工业和信息化部等五部委联合下发了《乘用车企业平均燃料消耗量核算办法》。按此核算办法,对两类节能车辆采取鼓励政策:对于国内乘用车企业的 EV、燃料电池、纯电里程达 50 km 的 PHEV 轿车,燃油消耗按零计算,并将其以 5 倍数量计入基数;对于燃料消耗量小于 2.8 L/100km 车型,以 3 倍数量计入基数。

根据《乘用车燃料消耗量评价方法及指标》的规定,企业平均燃油消耗量(CAFC)计算如下:

$$CAFC = \left( \sum_i^N FC_i \times V_i \right) / \left( \sum_i^N V_i \right) \quad (1)$$

式中, $N$  表示车辆型号序号; $FC_i$  表示第  $i$  个车辆型号的车型燃料消耗量; $T_i$  表示第  $i$  个车型对应燃料消耗量目标值; $V_i$  表示第  $i$  个车辆型号的年产量。

企业平均燃料消耗量目标值( $T_{CAFC}$ )计算如下:

$$T_{CAFC} = \left( \sum_i^N T_i \times V_i \right) / \left( \sum_i^N V_i \right) \quad (2)$$

可结转额度 =  $(T_{CAFC} - CAFC) \times \sum_i^N V_i$ , 对于优于目标值的额度可结转至下一年使用,有效期为三年。

通过对《节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020 年)》的分析,可以注意到国家对企业整体油耗水平达标的严格要求,这将促使企业重视产品结构调整。而发展规划对于燃料电池、纯电动和纯电里程大于 50 km 的 PHEV,综合油耗实际值按“0”计算,并以 5 倍数量计入核算基数。对于综合工况油耗低于 2.8

L/100km 车型,应以 3 倍数量计入基数,这些政策的推出将有利于推动企业对新能源车型投入更大的研发力度,希望因此能够进一步推动新能源汽车产业化。

## 二、乘用车传统动力节能技术发展

2010 年,中国第一汽车股份有限公司(以下简称一汽)徐建一董事长宣布了对一汽品牌新的诠释:“品质”——承载责任、“技术”——创造优势、“创新”——引领未来。一汽品牌是我们一切工作的核心,只有做强品牌,才能使我们的产品在市场上占据一席之地。品牌内涵必须有核心技术做支撑,因此,在 2011 年提出了“蓝途”战略。

“蓝途”低碳战略分为近期、中期和长期目标,其制定原则是对标世界上比较严格的欧盟标准,同时以达到国标为目标,提出产品近期目标是 2014 年推出达到比三阶段油耗标准再降 8% (即 CO<sub>2</sub> 排放水平为 143 g/km)的“蓝途”内燃动力低碳汽车,中期目标是 2016 年推出提前达到下一阶段油耗标准的 HEV 和 PHEV“蓝途”混合动力低碳汽车,长期目标是 2017 年开发出达到国际水平(即 CO<sub>2</sub> 排放水平为 95 g/km)的技术原型,树立中国一汽“蓝途”汽车国际先进的品牌形象。

中国一汽“蓝途”低碳目标将通过 4 个重要领域的技术开发实现,包括内燃动力低碳技术、电动动力低碳技术、轻量化低碳技术和低阻力低碳技术(图 2)。



图 2 中国一汽“蓝途”低碳技术

2012年,一汽已经开发了第一代直喷增压燃烧系统,其热效率达到36%。现在正在开发第二代直喷增压燃烧系统,即到2015年热效率要达到38%。面向未来,一汽也在探索复合燃烧系统,即缸内喷射与气道喷射复合应用和低温燃烧技术。在过去几年的汽油机燃烧系统开发中,一汽创建了五维度定量控制燃烧技术,即用动态滚流强度、湍流动能强度、油束撞壁量、混合气均匀度、点火区域浓度5个参数来控制整个燃烧过程。同时,通过平台化,实现了燃烧系统的快速开发(图3)。

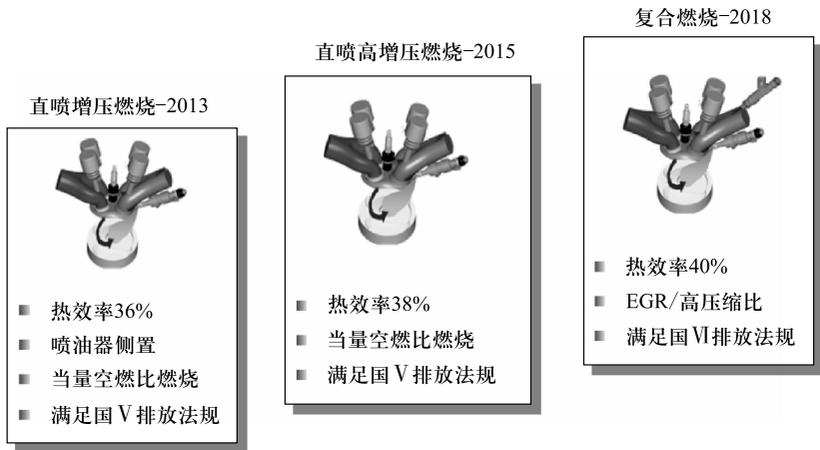


图3 热效率持续提高,满足燃烧技术换代要求

目前,产品实现的增压度达到1.8,升功率75 kW/L。到2015年,计划增压度达到2.3,升功率达到90 kW/L。为达成此目标需与供应商合作有针对性地开发高效专用增压技术。目前,整备质量1300 kg左右的A级车普遍采用1.6 L排量的发动机,其油耗约7 L/100km。而采用增压直喷的1 L排量发动机,在保证动力性与1.6 L发动机一样甚至更好的情况下,油耗可以达到5 L/100km。

气门管理技术对改善汽油机的油耗至关重要,是汽油机改进的重要措施之一,一汽也在开展相关技术开发。连续可变气门升程技术节油可以达到10%,同时可以实现发动机停缸功能。通过与高校和其他研究单位合作,一汽对低摩擦技术进行了深度开发。采用结构技术提高缸筒圆度,精密控制缸筒变形,使摩擦极大下降,同时漏气量、机油耗也极大降低。一汽将此项技术用在红旗系列发动机上,使机油消耗降低了30%,同时,活塞、活塞环、缸筒的摩擦功下降了6.5%。高效精益润滑技术,首先实现两级可变流量润滑,同时,通过对乘用车使用工况分析,提出“低速变量,高速限压”控制策略,实现数字化可变流量精益润滑技术。热管理也是实现节能低碳的重要技术领域,通过电控冷却系统部件(风扇、水泵、节温器等)的集成应用,实现分体冷却,加快暖机过程,进一步降低摩擦

功,减少驱动功耗。图4所示为低碳内燃动力技术路线图。

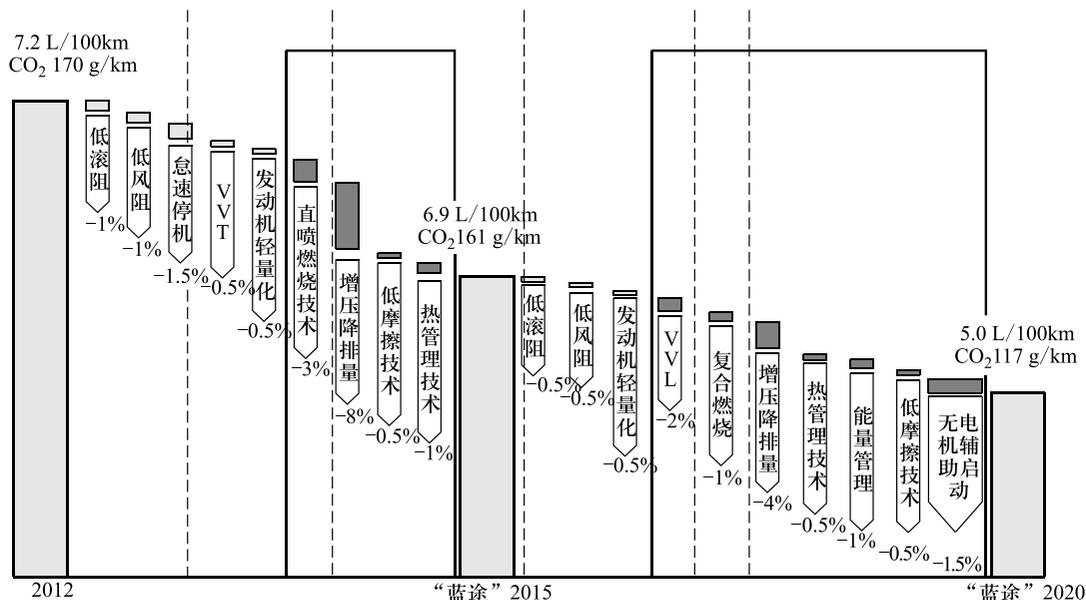


图4 低碳内燃动力技术路线图

一汽红旗 H7 高端行政级轿车在研发策划初期,瞄准了国内外先进技术,以达到传统动力节能的目的。匹配了 V6 3.0 L、2.5 L 和直列 4 缸 2.0T 增压发动机,采用了电控可变气门正时、电控可变进气、电控可变做功气缸数、低摩擦、怠速起停和智能热管理技术,提高了传统发动机效率,综合油耗达到了 7.2 L/100km,0 ~ 100 km/h 加速时间为 8.7 s,排放满足国 V 法规要求。

红旗 H7 优化了车身设计,采用 CFD 空气动力学分析技术,并结合实车风洞试验开发,保证了红旗 H7 具有较低的风阻。根据一汽风阻系数数据库,实测红旗 H7 车身风阻系数在高端车中处于较低的水平。在车身轻量化方面,红旗 H7 采用了激光拼焊、超高强度钢热成型等技术,降低了整车重量。例如,侧围加强板采用激光焊接技术,两侧减重 3.6 kg,红旗 H7 整备质量为 1800 kg,比目前市场同级别三厢车的统计平均值低 80 kg。

### 三、乘用车新能源动力节能技术发展

混合动力汽车按电驱动系统与内燃机的混合比例可分为弱混、中混和强混三种形式。混合度越高,节油效果越好。其中,强混合动力系统具有纯电动行驶功能,可实现插电化,并可支持未来的纯电动汽车技术,是优选的技术路线。

一汽混合动力选择的技术路线是:平行地开发汽油直喷增压(GDIT)、DCT 传统汽车动力技术和强混合动力汽车技术。这种强混合动力技术相比传统车节

油效果大于 30%，强混合动力技术是插电式混合动力汽车开发的基础。2020 年前，将同时生产传统汽车和混合动力汽车（包括 PHEV），预计传统汽车产量将大于混合动力汽车。根据一汽混合动力技术路线，采用单电机并联强度混合动力构型（见图 5），而发动机和 DCT 变速器等主要总成成为利用传统车总成，以降低整车成本。

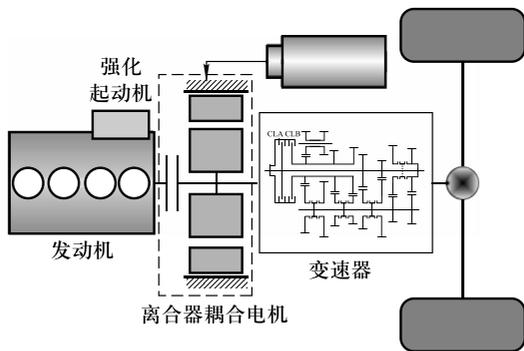


图 5 混合动力构型

根据混合动力特点，一汽进行了发动机性能专用化开发，进一步降低整车油耗。根据电机和发动机的特性，定义混合动力发动机的高效工作区域（图 6），采取如下改进措施：

- 1) 提高压缩比：10.3 → 11.3；
- 2) 提高滚流比：1.8 → 2.5；
- 3) 气门型线：包角、升程降低 10%；
- 4) 增压器：从新匹配增压器，使低速效率增加 10%。

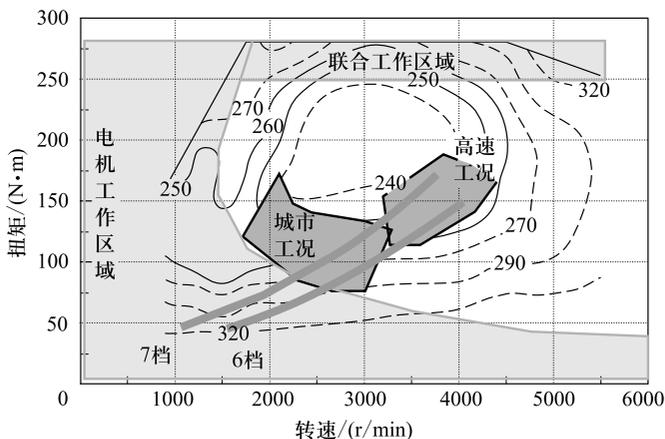
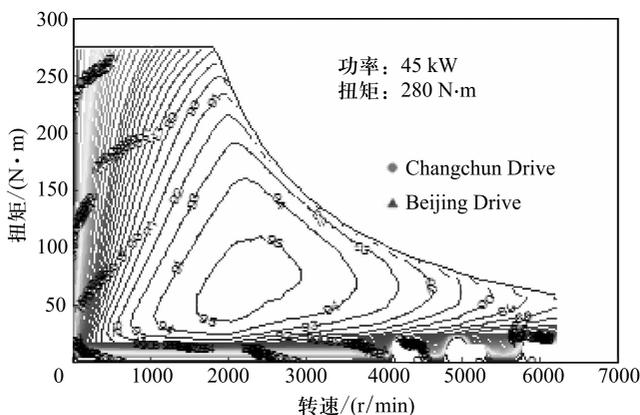


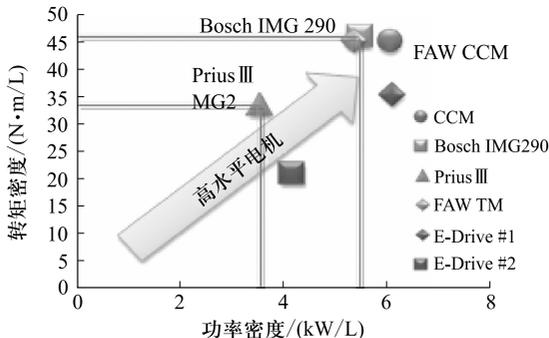
图 6 确定联合工作区域、发动机工作区域

根据混合动力发动机常用工作区,高效区域下移并扩大 3%,高效率区域覆盖混合动力整个使用区域。通过发动机性能专用化开发,可以降低整车油耗约 5%。

采用了高效电机,电机与离合器耦合电机模块(CCM)性能曲线见图 7。电机本体最高效率达到 96%,高效区宽广,更接近低速低负荷的中国道路实际情况。电机峰值功率 45 kW,功率密度达到国际同类电机领先水平;电机峰值扭矩 280 N·m,比扭矩达 44.5 N·m/L,相当于 3 L 汽油发动机扭矩水平。



(a)



(b)

图 7 电机与 CCM 性能曲线

驱动电机与离合器高度集成(CCM),实现了 6 种功能模式,包括发动机驱动、驱动充电、纯电动行驶、起动发动机、制动能量回收和电机与发动机联合驱动。

以红旗 H7 为例,采用强混合动力技术,综合油耗达到了 6.1 L/100km,但是与 5 L/100km 的目标仍有差距,因此开发插电式混合动力(PHEV)红旗 H7 成为必然的选择。

对于红旗 H7 有三个选择:第一是开发综合油耗  $\leq 2.8$  L/100km 的 PHEV(简称 P67);第二个目标就是开发纯电动里程  $\geq 50$  km 的 PHEV(简称 P50);第三个目标就是开发纯电动里程  $\geq 30$  km 的 PHEV(简称 P30)。按照《节能与新能

源汽车产业发展规划(2012—2020年)》的激励政策规定,对于综合油耗小于2.8 L/100km的车辆,在计算销量总基数时可以按实际销售的3倍计算。对于P50油耗按“0”计算,销量基数按5倍计算,对于P30油耗按实际值计算,销量基数按1倍计算。

根据一汽统计数据(见图8),中国用户日市区平均行驶里程30 km占80%。而乘用车油耗核算办法中,对油耗低于2.8 L/100km和纯电动里程>50 km的PHEV有激励政策。核算办法中,对于满足用户日行驶需求的P30方案无激励政策。

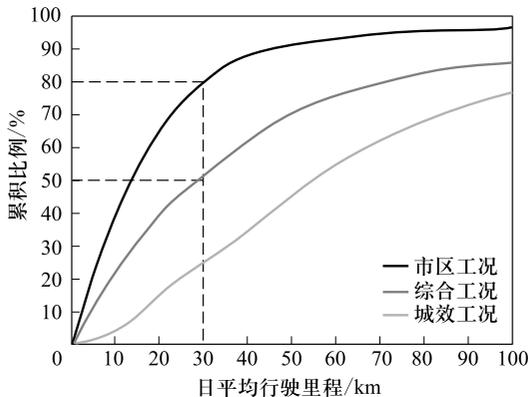


图8 中国用户日平均行驶里程统计(一汽数据)

从图9可以看出:仿真分析后,P50方案综合油耗为2.71 L/100km,而P67方案综合油耗为2.8 L/100km,红旗PHEV更容易达到纯电动里程“50 km”的油耗指标要求;而国家激励政策对P50的奖励力度大于P67方案,显然对于C级车,采用P50方案对企业更有利。

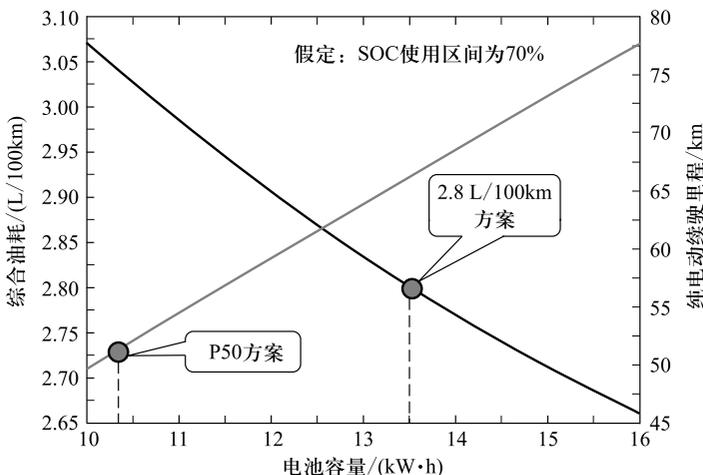


图9 电池容量与综合油耗/纯电动续航里程的关系

表 1 是 P30 与 P50 方案对比,P50 方案可实现油耗 3.1 L/100km,成本增加约 7.5 万元,P30 方案可实现油耗 3.6 L/100km,成本增加约 5.7 万元。

表 1 P30 与 P50 方案对比

项目	参数	红旗 H7 插电式混合动力		方案对比
		PHEV - 30 km (P30 方案)	PHEV - 50 km (P50 方案)	
整车参数	长 × 宽 × 高/(mm × mm × mm)	5095 × 1873 × 1485		—
	整备质量/kg	2000	2040	+2%
	发动机功率/扭矩/[kW/(N·m)]	145 / 280, 四缸增压直喷		—
总成参数	变速器速比/扭矩/(N <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup> )	4.22 ~ 0.735/380, 七档双离合器		—
	电机功率/扭矩/[kW/(N·m)]	45 / 280, 永磁同步		—
	电池容量/电压/(A·h/V)	25 / 325	37 / 325	+48%
整车性能	纯电动里程/km	>30	>50	+67%
	综合油耗 NEDC/(L/100km)	3.6	3.1	-14%
整车成本	成本增加/万元	5.7	7.5	+21%

从图 10 可以看出,随着节能技术成本的增加,油耗显著下降,同时车重也有所增加。以混合动力方案为基点,P30、P50 方案油耗分别降低 41%、49%,P50 成本对于 P30 增加值增加 21%。

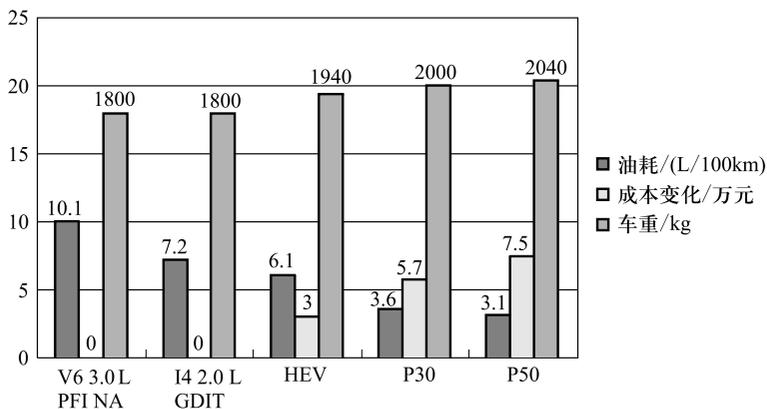


图 10 红旗 H7 节能技术分析

### 四、政策法规对技术选择的影响

一汽乘用车平台包括 A0、A、B 和 C 级车,车重从 985 ~ 1800 kg,根据我们的成本分析,其传统能源节油方案成本 A 级车增加 3000 ~ 5500 元左右,B 级车增加 6000 元左右,H7 为 C 级车的新平台,成本变化不大。传统车节能效果从 A0、A、B 和 C 级,其油耗分别为 4.2 L/100km、5.0 L/100km、6.0 L/100km 和 7.2 L/100km,而目前的油耗状态分别为 6.0 L/100km、6.9 L/100km、8.4 L/100km 和 10.1 L/100km。

上述 4 个平台采用新能源节油方案后,成本分别增加约 100 000 元,50 000 元,60 000 元和 75 000 元人民币。A0 采用纯电动,其油耗为 0 L/100km,纯电动里程为 160 km;A 和 B 级车采用 PHEV,其油耗为 2.8 L/100km,纯电动里程分别为 32 km 和 40 km;C 级车也将采用 PHEV,其油耗为 3.1 L/100km,其纯电动里程为 50 km。

从上面的分析,我们认为如果企业不采用新能源技术,以小型车油耗分摊大型车油耗,也可实现企业整体油耗达标。但小型车增加成本过多,不利于产品销售。如采用新能源技术,各平台车型分别达标,可降低小型车成本增加压力。

图 11 是按 P50 方案进行产品结构规划(按预测成本)的传统发动机、HEV 和 PHEV 比例分析。按预测技术与成本条件,满足油耗不大于 5 L/100km 且平均单车成本最低。最优比例为:HEV 为 0,ICE 为 91.9%,PHEV 为 8.1%;平均单车成本增加 6000 元左右。

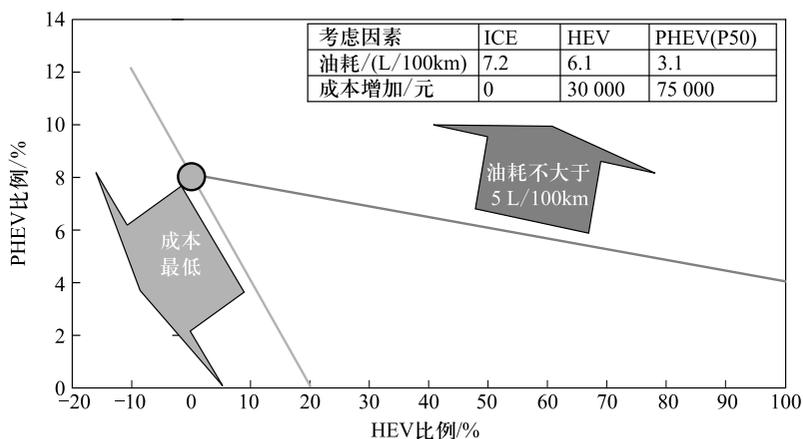


图 11 H7 传统发动机、HEV 和 PHEV (P50) 比例分析(按预测成本)

图 12 是按 P30 方案进行产品结构规划(按预测成本)的传统发动机、HEV 和 PHEV 比例分析。按预测技术与成本条件,满足油耗不大于 5 L/100km 且平

均单车成本最低。最优比例为:HEV 为 0,ICE 为 38.9%,PHEV 为 61.1%;平均单车成本增加 34 833 元。

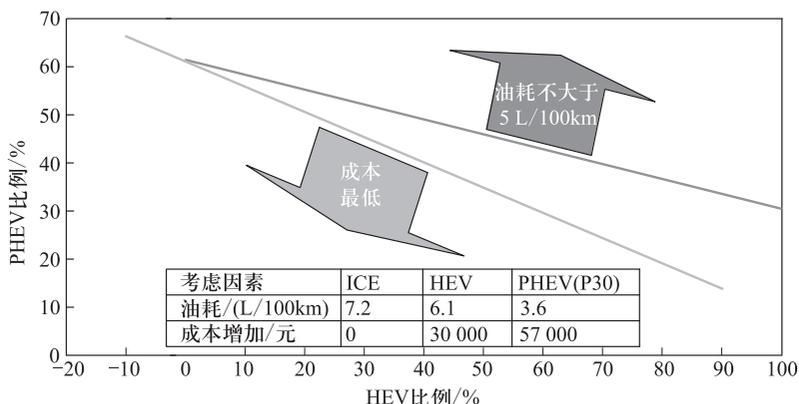


图 12 H7 传统发动机、HEV 和 PHEV (P30) 比例分析(按预测成本)

图 13 表示的是 H7 HEV 成本增加 1 万元的方案。假设 HEV 成本增加减少为 1 万元,满足油耗不大于 5 L/100km 且平均单车成本最低。最优比例为:HEV 为 56%,ICE 为 0,PHEV 为 44%;平均单车成本增加 30 680 元。

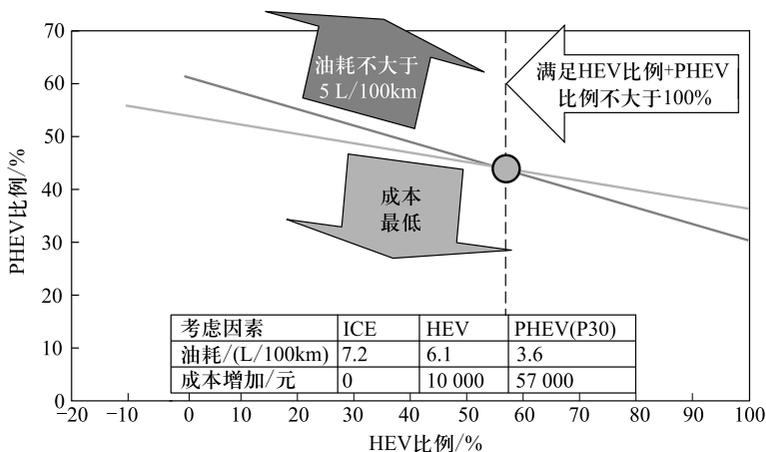


图 13 H7 传统发动机、HEV 和 PHEV (P30) 分析

图 14 是按基数奖励 5 倍政策方案。按预测技术与成本条件,满足油耗不大于 5 L/100km 且平均单车成本最低。最优比例为:HEV 为 0,ICE 为 91.9%,PHEV 为 8.1%;平均单车成本仅增加 4610 元。

综合上述,一汽实现四阶段油耗法规(即 5 L/100km)的 C 级车产品组合策略如下:① 从产品销售的角度看,企业无法依靠小车平衡 C 级车油耗,C 级车应自我达标;② C 级车达标应以传统内燃动力节能为主,但是,必须辅以一定比例

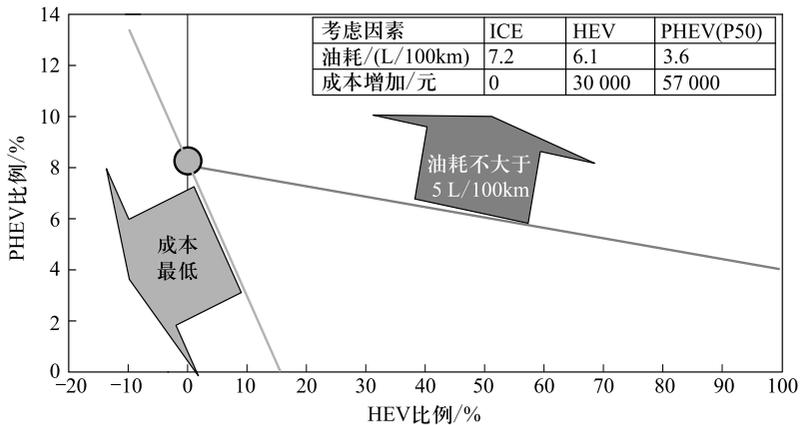


图 14 H7 传统发动机、HEV 和 PHEV (P30) 比例分析

PHEV;③ 企业实现四阶段油耗法规,有 P30、P50、P67 三种 PHEV 方案可选择;④ 根据油耗核算办法对 PHEV 的激励条款,选择 P50 客户购车价格高,企业销售困难;⑤ P30 方案也能满足低碳需求,客户购车价格低,但企业平均单车成本高,经营困难,P30 方案无法实现。

### 五、结论

- 1) 持续提高热效率是内燃机工业不懈的追求;
- 2) 技术选择需要考虑成本、市场接受程度等影响因素;
- 3) 内燃机节能技术的进步需要全行业的合作。



**李康** 1991年毕业于天津大学内燃机系,获博士学位,现任一汽集团技术中心副总工程师,研究员级高工,1997年受机械工业部委派赴美国福特公司进修,2003年取得美国项目管理学院职业项目管理证书。一直工作在产品研发一线,主要从事车用发动机产品研发项目,特别是性能设计与分析,完成各类课题、工作项目十几项。在发动机气道开发、热力学计算分析、流动计算分析、缸内燃烧过程等方面有所建树,研究成果已在一汽集团多款发动机产品的开发

与改进中得到应用。所负责的CA6DE系列中重型车用发动机,实现了从欧Ⅰ、欧Ⅱ、欧Ⅲ排放的持续升级。已有十几篇学术论文发表在《内燃机学报》等国家一级学术刊物上或在国际学术会议上宣读。2003年度被评为集团公司劳动模范,2004年获汽车工业协会科技人才奖,2007年获中国内燃机学会“史绍熙人才奖”。获得中国汽车工业科技进步奖二等奖2项、三等奖1项,吉林省科技进步一等奖1项。现任全国内燃机学会编辑委员会委员,中国汽车工程学会发动机分会副主任委员,全国内燃机学会燃烧节能净化分会副主任委员,全国内燃机学会汽油机煤气机分会副主任委员,受聘为中国汽车工程学会特聘专家和汽车工业协会专家委员会专家,吉林省高级专家。

# 内燃机石油燃料及替代燃料和基于燃料特性的燃烧技术

黄 震

上海交通大学

## 一、绪论

内燃动力被广泛应用于汽车、船舶、农业机械、工程机械和发电站等,在国民经济中发挥了重要的作用。内燃动力的能量转化形式通常是将液体或气体燃料与空气混合,在燃烧室中燃烧产生动力。常用的燃料是以汽油和柴油为代表的传统石油燃料,同时各种替代燃料,如天然气、生物燃料、醇醚类燃料等都不同程度用于内燃动力。由于目前内燃动力对传统石油燃料的占绝对主导的依赖性,使之面临着石油供应安全、大气环境保护和温室气体排放控制等重大挑战。

据国际能源署预测,未来 20 年间全球能源消费体系仍是以化石能源为主,其中石油消费比例到 2035 年仍维持在 24.7% ~ 27.4% 左右<sup>[1]</sup>。内燃动力消耗约 2/3 的石油资源。我国自 1993 年开始成为石油净进口国,石油对外依存度在 2009 年增至 51%,第一次突破了 50% 的国家能源安全警戒线。据统计,2012 年中国的石油产量为 2.1 亿 t,总消费达到 4.8 亿 t,对外进口石油 2.7 亿 t,原油对外依存度已达 57%。图 1 是 IEA 对世界主要石油和天然气消费国家和地区未来进口量进行的预测<sup>[2]</sup>,到 2035 年我国石油对外依存度将超过 80%。我国目前超过 40% 的原油进口主要来自于中东地区,17% 来自于前苏联地区,约 15% 来自于西非地区<sup>[3]</sup>。这些进口的原油除前苏联地区可大部分依靠管道输送外,其余绝大部分的原油均通过远洋油轮进行海上远距离输送。由于主要原油供应地和输送必经地区地缘政治情况复杂,这对我国的原油供应安全是很大挑战。

内燃动力使用的化石燃料的燃烧被认为是大气有害排放物  $\text{NO}_x$ 、PM2.5 等的主要贡献者,也是  $\text{CO}_2$  主要排放源之一。这些有害排放物会给人体健康带来危害。如 PM2.5,由于颗粒物粒径细小,在环境空气中持续的时间长,具有很强

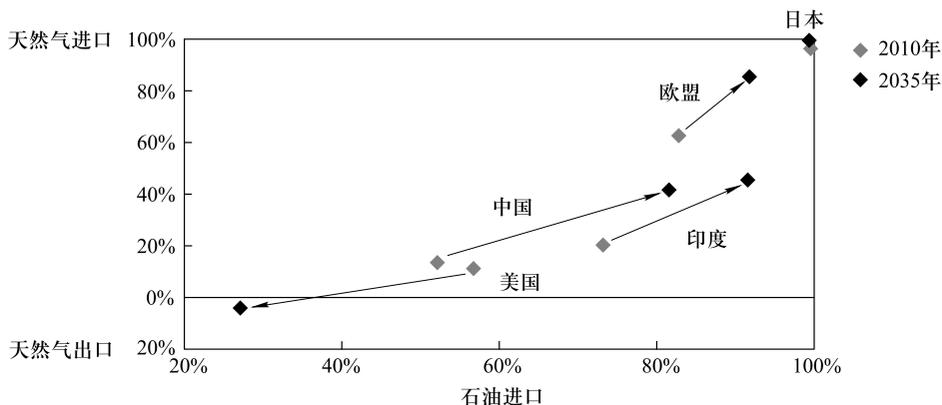
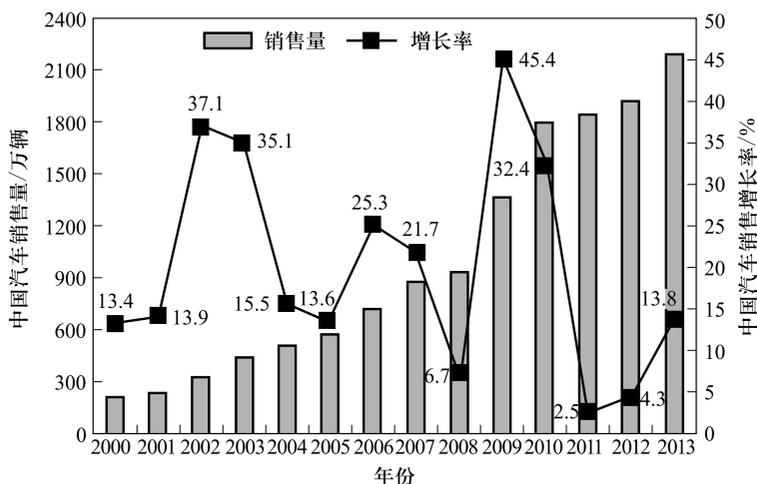


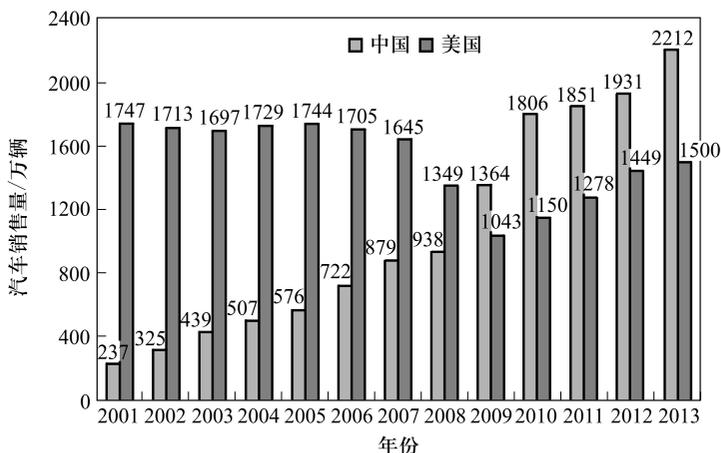
图1 几个典型国家和地区的石油和天然气进口量预测<sup>[2]</sup>

的吸附能力,表面吸附着有机碳和多种致癌物质,可以渗透进人体支气管和肺泡内,具有很强的沉积作用,可以穿透人体肺泡进入血液,引起哮喘、肺癌和心血管机能障碍等疾病,对空气质量和人体健康影响大,是造成雾霾天气的主要元凶。根据环境保护部发布的《2012年中国机动车污染防治年报》<sup>[4]</sup>,2011年,全国机动车排放污染物4607.9万t,其中氮氧化物637.5万t,颗粒物62.1万t,碳氢化合物441.2万t,一氧化碳3467.1万t。 $\text{CO}_2$ 被认为是引起全球变暖的重要温室气体,为控制温室气体排放,《联合国气候变化框架公约》要求缔约国做出相应的减排承诺。我国的 $\text{CO}_2$ 年排放量在2008年超过美国,成为 $\text{CO}_2$ 排放量第一大国。我国承诺到2020年单位GDP二氧化碳排放比2005年下降40%~45%。因此,内燃动力的节能减排显得尤为紧迫和重要。

另一方面,中国汽车市场发展迅速,私人汽车拥有量从1985年的28万辆增加到2012年的1亿辆。图2显示了我国汽车产量和销售量最近10年的发展状况。从图中可知,我国汽车销售量保持强劲增长,从2001年的237万辆增加到2009年的1364万辆,销量超过美国;2012年我国汽车产销分别为1927.18万辆和1930.64万辆,连续4年蝉联世界第一。如此庞大的汽车增长市场需要大量的石油资源作为依托,统计表明,2012年我国34.3%的石油资源用于交通运输行业<sup>[5]</sup>。根据预测,2020—2030年,我国汽车将会接近发达国家水平,如果人均汽车保有量按欧洲的一半计,即每千人300辆计算,总保有量将达4.5亿辆。若按每辆汽车年消耗燃油1t计算,共需要4.5亿t燃油。而我国未来石油产量将维持在2.0亿t,汽车用油存在巨大缺口。



(a) 中国汽车销量及增长率

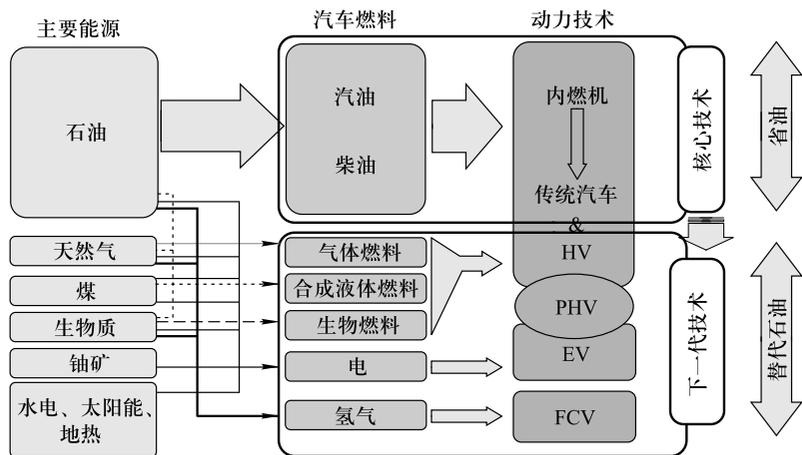


(b) 中国/美国汽车销量对比

图2 我国汽车发展状况<sup>[6]</sup>

## 二、石油燃料及替代燃料

为应对上述挑战,石油燃料的节能减排、替代燃料的开发利用和新型动力技术开发将是内燃动力的重要研发方向,如图3所示。对于传统石油燃料汽油和柴油,核心技术是发展内燃机节能减排技术;对于替代燃料包括气体燃料、生物燃料、煤基合成液体燃料、电力、氢等替代燃料等,关键是开发灵活燃料汽车技术、双燃料汽车技术、混合燃料汽车技术以及单一替代燃料技术,增大市场占有率,对石油燃料进行高效清洁替代;对新型动力技术,关键是研发纯电动汽车、混合动力汽车、燃料电池汽车等。

图3 内燃动力的重要研发方向<sup>[7]</sup>

### （一）传统汽柴油燃料

排放法规的日趋严厉推动了汽油和柴油品质的不断提高,主要标志是降低燃油中硫含量。燃料硫含量直接影响到内燃机污染物排放,如果燃料含硫量过高,现有各种主要发动机污染排放控制技术、特别是后处理技术就无法推广应用,硫会引起汽车排放后处理器中毒和减排效果快速恶化。由于前几年我国汽柴油含硫量迟迟未能达到国IV排放法规要求的50 ppm,使我国轻型汽油车排放的国IV标准和重型柴油车国IV标准在全国实施时间一拖再拖。最近我国已在汽柴油含硫量50 ppm基础上,进一步提出在2018年实施国V汽车排放法规时将进一步降至10 ppm,与国际接轨。目前,北京和上海已提前供应国V汽油和柴油。

汽车节能要求推动了汽油机向直喷、增压、小排量和高压压缩比方向发展,预计欧洲和美国市场2015年后新生产汽油车的一半以上将是直喷汽油机,中国将于2014年实施第三阶段燃油经济性标准,直喷技术在中国市场也得到了快速发展。不断强化的汽油机燃烧使国际上对汽油辛烷值(RON)要求有增高趋势,最近发布的第5版世界燃油规范<sup>[8]</sup>,基本宗旨明确由以降低汽车排放为主要目标(前四版)变为节能与降排并重,考虑到汽油机节能技术的需求,将汽油最低辛烷值(RON)由91提升到95。而我国最近制定的燃料标准降低汽油辛烷值1~2个单位,与国际上提高汽油辛烷值的发展趋势相违背,与汽油机先进技术的要求不相匹配。

### （二）天然气代用燃料

天然气,主要成分是甲烷,另有少量的乙烷、丙烷和丁烷。它主要存在于油

田、气田、煤层和页岩层。根据新一轮油气资源评价和全国油气资源动态评价(2010年),我国常规天然气地质资源量为52万亿 $\text{m}^3$ ,最终可采资源量约32万亿 $\text{m}^3$ <sup>[9]</sup>。截至2010年年底,累计探明地质储量9.13万亿 $\text{m}^3$ ,剩余技术可采储量3.78万亿 $\text{m}^3$ ,探明程度为17.5%<sup>[9]</sup>。总体上分析,我国天然气资源较为丰富,发展潜力较大,如图4所示<sup>[3]</sup>。2012年我国天然气产量为1072亿 $\text{m}^3$ ,消费量为1438亿 $\text{m}^3$ ,进口量为414亿 $\text{m}^3$ ,天然气进口51.7%是通过管道运输,48.3%是液化天然气<sup>[2]</sup>。其中管道运输中99.3%来自于土库曼斯坦,LNG主要来自于卡塔尔、澳大利亚、印度尼西亚及马来西亚<sup>[2]</sup>。

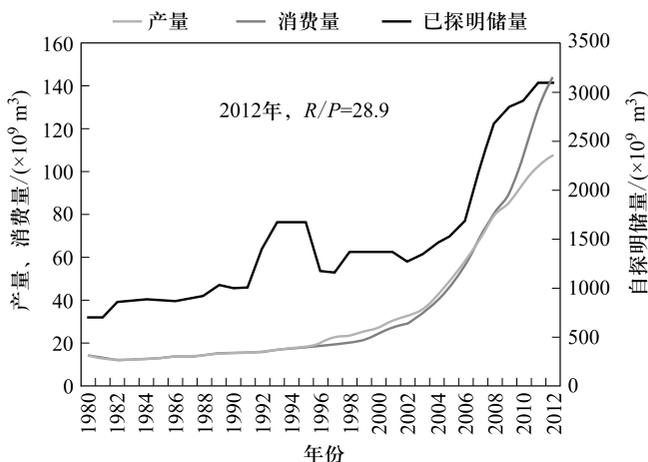


图4 我国天然气已探明储量、产量及消费量<sup>[3]</sup>

在过去的10多年中,美国的页岩气革命,大力推进全球天然气的开发与应用,美国2011年页岩气年产量已占全国天然气总产量的40%,年产页岩气量1412亿 $\text{m}^3$ ,美国页岩气产量已经远远超过我国现今所有类型天然气产量的总和。我国页岩气资源也比较丰富。2011年,国土资源部组织国内27家单位完成了我国首次页岩气资源潜力评价,认为在我国的5大区域富有页岩气资源。除了青藏区域外,页岩气的地质资源为134.42万亿 $\text{m}^3$ ,可采资源量为25万亿 $\text{m}^3$ ,初步证实我国页岩气具有较好的开发前景<sup>[10]</sup>。我国页岩气发展规划目标是2015年产量65亿 $\text{m}^3$ ,2020年产量600亿~1000亿 $\text{m}^3$ <sup>[11]</sup>。

截至2012年,全球约有1650万辆天然气汽车,2020年将超6500万辆。我国2012年天然气汽车新增47.3万辆,总保有量已达到157.7万辆,比2011年增长40%,其中LNG汽车超过7.1万辆。2012年来中国新增加气站446座,总量达到2784座,比上年增加19%,其中LNG加气站637座,占比22.8%<sup>[12]</sup>。

近年来天然气发动机技术发展迅速,欧洲汽车公司斯堪尼亚采用中等冷却EGR研发出欧VI排放标准天然气发动机;MAN公司为了达到欧VI标准在尾气后

处理技术上都采用了 EGR(废气再循环) + DOC(氧化催化器) + DPF(颗粒捕集器) + SCR(选择性催化还原)的集成装置;西港公司提出了两条欧 VI 标准技术路线:① 柴油引燃天然气技术,② 天然气直喷技术,两条路线都同时配备 DPF 和 SCR 的后处理系统;美国研究机构西南研究院也提出了稀燃配合 SCR 系统满足 US2010 法规要求。

### (三) 生物燃料

生物燃料是指由生物质制取的液体或气体燃料,是可再生能源开发利用的重要方向。就内燃动力而言,生物燃料主要包括燃料乙醇、生物柴油和生物质气体燃料等。生物燃料相比传统石油而言有如下显著优点:① 可再生性;② 具有碳中性的特性;③ 低 S、低 F、低灰分;④ 生物质资源分布广、产量大,转化方式多样。但同时也存在以下不足:① 原料成分复杂;② 能量密度较低;③ 收集成本高。生物燃料发展至今,主要历经了三大阶段<sup>[13]</sup>:第一代生物燃料主要来自于农作物,如甘蔗、玉米、棕榈、油菜、大豆等粮食作物,这类燃料主要的问题是与粮争地、与人争粮,可引发粮价上升等问题;第二代生物燃料是以能源作物、农业和森林的废弃物及城市垃圾等为来源,主要问题在于转化技术成本较高,原料收集处理较困难;第三代生物燃料是以微藻为原料制取的生物燃料,它具有培养周期短、产油效率高、油脂质量好、温室气体减排效果显著等优点<sup>[14]</sup>。

近年来,生物燃料的发展规模不断扩大。美国自 2006 年超越巴西后,成为全球第一大生物燃料产量大国,两个国家的总产量占了全球生物燃料总产量的 74.3%<sup>[15]</sup>。美国计划 2020 年使生物能源和生物质基产品达到能源消费总量的 25%。欧盟的可再生能源指令强制成员国的可再生能源消费比例需占到 20%,运输部门 2020 年可再生能源消费需占总部门能源消费的 10%,而且期望主要为生物燃料<sup>[16]</sup>。我国《生物质能发展“十二五”规划》中提出<sup>[17]</sup>“十二五”的发展目标,到 2015 年,生物燃料乙醇产量要达到 400 万 t,生物柴油和航空燃料达到 100 万 t,共计折标煤 5180 万 t。

#### 1. 生物柴油

目前,大多数的生物柴油是以大豆、油菜籽和花生等油料作物,麻风果、乌桕、油棕和黄连木等油料林木果实,工程微藻等油料水生作物的油脂,以及动物油脂、废餐饮油等为原料,在催化剂参与下,与甲醇或乙醇等醇类物质经过酯化反应生成脂肪酸甲(乙)酯,使其最终变为可供柴油机使用的液体燃料。生物柴油的主要优点包括良好的环保性、可再生、较好的安全性、良好的燃烧特性、与传统发动机能较好兼容等。近年来,西方国家加大对生物柴油的商业化投资力度,增大生物柴油投资规模。2011 年,全球生物柴油产量排名前三的国家是美国、

阿根廷和巴西<sup>[18]</sup>。欧洲是生物柴油使用最广泛的地区,份额已占到成品油市场的5%,主要原料为菜籽油<sup>[14]</sup>。美国生物柴油主要采用大豆油原料。当前生物柴油的主要应用掺混比为5%~20%,目前大多数国家使用低掺混比( $\leq 5\%$ )。我国生物柴油主要以菜籽油、棉籽油、乌柏油、黄连木油、茶油和地沟油为原料制备。但动、植物油脂的产量有限,目前的生产只能满足车用燃料的0.3%,而且大量用植物油脂生产生物柴油,势必会造成土地资源的紧张和农作物价格的上涨。

餐厨废油被认为是一种可废物利用的生物柴油原料。餐厨废油包括煎炸废油、泔水油和地沟油等源自于餐饮业的废油脂,成分主要是烹调用植物油和食品中动物油脂,化学组成主要为脂肪酸甘油酯。餐厨废油由于经过反复高温煎炸,不但会污染水体,散发臭气,还会造成食品安全问题。这种废油量大、相对纯净、便于收集且成本较低,是上等的生物柴油生产原料。研究表明<sup>[19]</sup>,餐厨废油的产生量约为餐厨垃圾产生量的10%~20%,不同经济水平和餐饮习惯的地区略有区别。2011年,我国食用油消费量达2515万t,废弃油脂约占20%~30%,因此约产生500万~750万t废油脂,如果这其中的400万t可用来生产生物柴油约360万t;而食用油及肉类等加工企业可排放动、植物油脂下脚料几百万吨也可用来生产生物柴油。

图5是利用我国废弃煎炸油生产生物柴油的生命周期能耗与温室气体排放分析。通过计算得出相比传统柴油,废煎炸油制生物柴油的生命周期石油消耗大幅降低,温室其他排放可以显著降低<sup>[20]</sup>。

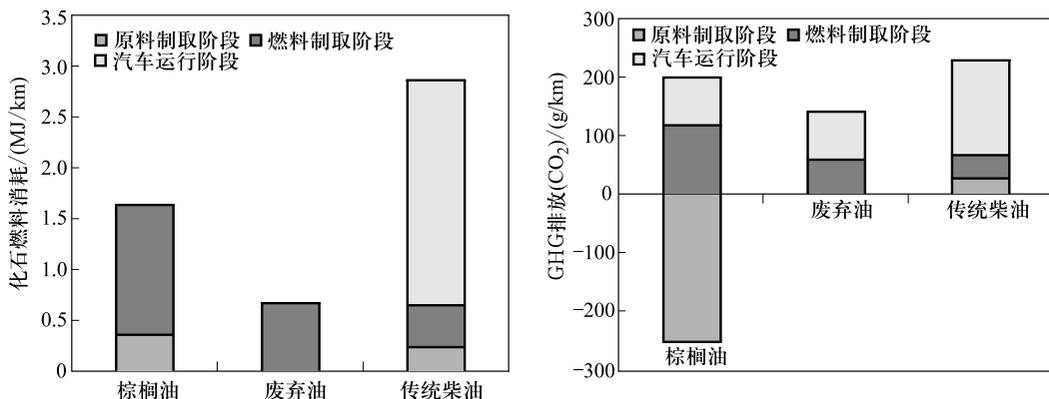


图5 废弃煎炸油生命周期能耗与温室气体排放分析

20世纪70年代末,因石油危机的出现,美国能源部就开始投入大量资金成立“水生物种项目”,研究利用微藻制取液态燃料(生物柴油)。进入21世纪后,全球许多研究者都开始关注如何有效利用微藻生产具有成本可比性的生物液体燃料。2009年12月,Duffy等在美国科学杂志撰文指出,微藻是唯一能够满足全

球交通运输所需的可再生生物柴油的制备原料。微藻生物质具有单位面积产油率高和藻类可吸收排放源的高浓  $\text{CO}_2$  的优点<sup>[21]</sup>。表 1 列出了几种常用作物年产量对比数据。可以看出,微藻生物质的年产量是大豆类作物的 23 ~ 70 倍左右,年产量是大豆类作物的 35 ~ 179 倍。图 6 展示了一个典型的利用微藻生产燃料及各种附加产品的综合生物炼厂,这种工艺又被誉为“可循环的绿色油田”。近期我国大力推进先进生物质能综合利用产业化示范,这其中就包括了微藻生物燃料多联产项目<sup>[17]</sup>。依托示范项目,在条件适合地区,利用工业废水及富含二氧化碳废气,采用先进养殖技术,建设含油微藻规模化养殖场,开展微藻生物燃料多联产示范。通过微藻生物燃料多联产,实现二氧化碳减排、工业污水处理与生物能源制备、生物基产品开发。

表 1 微藻与其他农作物产油量对比

作物	年产量/(t/hm <sup>2</sup> )	含油量/%	年产量/(t/hm <sup>2</sup> )
大豆	1.771 <sup>[22]</sup>	16.0% <sup>[23]</sup>	0.28
豆类	1.792 <sup>[5]</sup>	16.0% <sup>[22]</sup>	0.29
高油玉米 <sup>[21]</sup>	5.28	9.0%	0.48
玉米	5.747 <sup>[5]</sup>	6.6% <sup>[24]</sup>	0.38
蓖麻	1.005 <sup>[23]</sup>	66.5% <sup>[25]</sup>	0.67
菜油籽	1.827 <sup>[5]</sup>	41.9% <sup>[23]</sup>	0.77
麻疯树	5 <sup>[26]</sup>	44.1% <sup>[27]</sup>	2.20
油莎豆果 <sup>[21]</sup>	12	25.0%	3.00
棕榈树 <sup>[21]</sup>	7.4	50.0%	3.70
微藻	41.296 <sup>[28]</sup>	25.0% <sup>[28]</sup>	10.32
微藻	124.6 <sup>[28]</sup>	40.0% <sup>[28]</sup>	49.84

尽管生物柴油可以在不对发动机做较大调整下直接应用,但是由于生物柴油是饱和脂肪酸甲酯和不饱和脂肪酸甲酯组成的混合物,与柴油有显著的差别。因此生物柴油的大规模应用必然需要对发动机可靠性、燃烧与排放的优化、生产和使用生物柴油的经济性和二氧化碳排放等问题进行深入研究。在国内,对于生物柴油的发动机燃烧排放研究开始于 20 世纪 80 年代中期,何学良等人在试验过程中发现燃烧纯植物油容易出现活塞环卡死、燃烧室积炭等各种不良现象<sup>[29]</sup>;近年来上海交通大学黄震团队开展了大量的生物柴油以及生物燃料低温

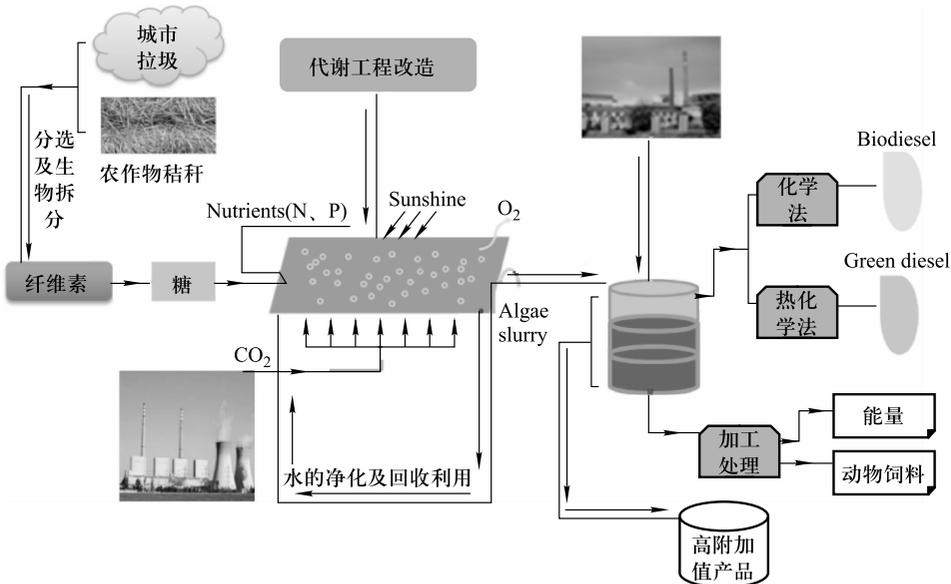


图6 微藻综合炼厂示意图

燃烧模式研究工作<sup>[30,31]</sup>, 阐明了生物燃料常规排放、非常规排放和颗粒物排放规律, 并且提出了优化生物燃料低温燃烧的燃料设计原则, 如图7、图8所示。同济大学楼狄明等<sup>[32]</sup>、李理光等研究了生物柴油发动机适应性相关问题以及生物柴油的喷雾规律<sup>[32]</sup>; 江苏大学袁银男等<sup>[34]</sup>对生物柴油燃油品质, 低温流动性能进行了探索; 北京理工大学葛蕴珊等开展了生物柴油发动机对大气环境污染贡献的评估, 取得较多成果<sup>[35]</sup>。但是, 随着排放法规的日趋严格要求, 包括PM和NO<sub>x</sub>在内的各种排放物需要进一步降低, 因此生物柴油应用到柴油机上仍然有一些关键性科学问题有待解决<sup>[36]</sup>。

## 2. 生物乙醇

生物乙醇是指通过微生物的发酵将各种生物质转化为燃料酒精。目前的工业化燃料乙醇大多是以粮食作物(如玉米、高粱、薯类等)为原料, 从长远来看, 这具有规模限制和不可持续性。以木质纤维素为原料的第二代生物燃料乙醇是决定未来生物乙醇能否大规模替代石油的关键。美国能源部预计纤维素乙醇近期有望取得重要突破, 而欧洲的一些研究机构认为大约在2015—2020年间可实现纤维素乙醇规模化生产。我国当前的燃料乙醇来源构成结构为: 玉米为50%, 薯类为23%, 高粱为13%, 糖类占11%左右。2007年我国颁布的《可再生能源中长期发展规划》<sup>[37]</sup>提出不再增加以粮食为原料的燃料乙醇生产能力, 合理利用非粮生物质原料生产燃料乙醇。我国生物质能发展“十二五”规划<sup>[17]</sup>指出大力发展非粮作物乙醇, 到2015年, 我国将建成甜高粱原料基地50万亩, 木

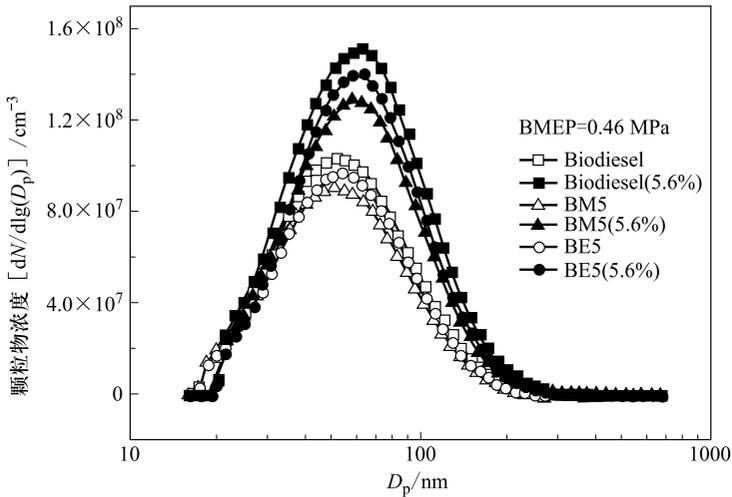


图7 生物燃料颗粒物粒径分布规律

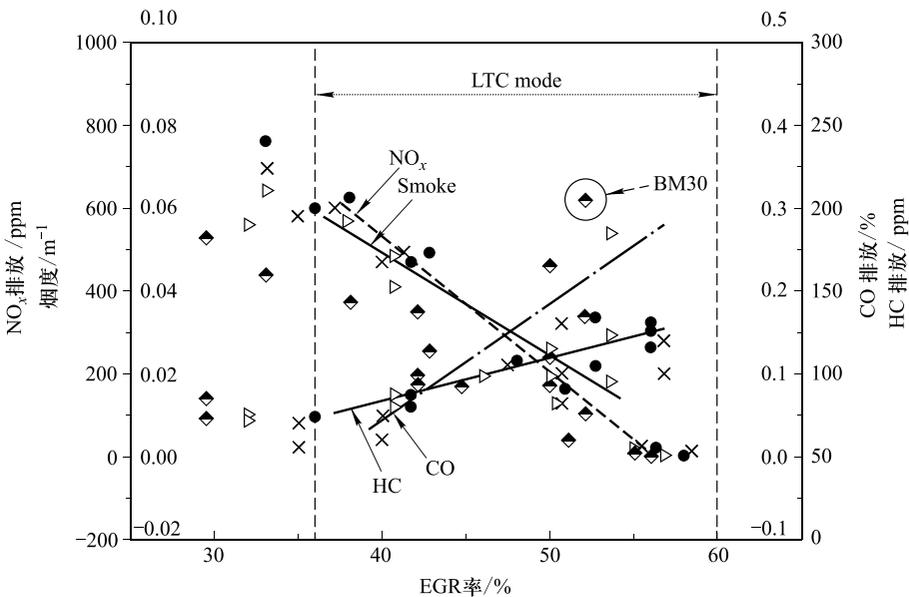


图8 生物燃料低温燃烧 trade-off 关系

薯等薯类作物原料基地 800 万亩。这些建成的燃料乙醇基地将为我国提供 350 万 t 标煤的替代乙醇。我国的甜高粱主要分布在北方的大部分区域,尤其是东三省及内蒙古等地,木薯主要分别在两广地区<sup>[38]</sup>。

生物乙醇可以单独或与汽油混配制成乙醇汽油用于汽车燃料。汽油掺乙醇有两个作用:一是乙醇辛烷值高达 115,可以用来改善汽油的抗爆性;二是乙醇含氧量高,可以改善燃烧,减少发动机内的碳沉淀和一氧化碳等不完全燃烧污染物排放。同体积的生物乙醇和汽油相比,燃烧热值低 30% 左右。如只掺入 10%

(E10), 由于热值减少不多, 不需要改造发动机就可以使用。目前, E10 汽油已在河南、安徽和东北三省全省封闭推广, 湖北、山东、河北、江苏等省中的 27 个城市作为试点推广。

#### (四) 醇醚燃料

醇醚燃料主要指甲醇和二甲醚。甲醇和二甲醚燃料目前国际上主要采用天然气为原料生产, 我国主要采用煤作为原料进行生产, 特别是对于不能作为动力煤直接燃烧的高硫、劣质煤, 可作为合成甲醇和二甲醚的原料, 进行清洁利用。煤或天然气先制成合成气, 然后进一步进行化学合成可以转化为甲醇或二甲醚。除了煤和天然气之外, 生物质也可气化生成合成气, 用来生产甲醇和二甲醚等替代燃料, 北欧一些国家主要通过生物质废弃物, 如造纸黑液, 制取醇醚燃料, 具有非常好的温室气体减排效果, 与常规柴油相比, 全生命周期温室气体排放可减少 95% 以上, 如图 9 所示<sup>[39]</sup>。美国诺贝尔奖获得者 G. A. Olah 在《跨越油气时代: 甲醇经济》<sup>[40]</sup>一书中阐述在未来可以使用可再生能源制氢与 CO<sub>2</sub> 重整联合制取液体燃料甲醇, 而二氧化碳的来源可以来自工业高浓度二氧化碳废气。二氧化碳加氢合成醇醚燃料, 从全生命周期看, 理论上是碳中性的, 在其生命周期内形成了封闭的碳循环链条。2009 年底, 三井化学大阪高石市年产 100 t 的利用 CO<sub>2</sub> 生产甲醇工厂建成, 原料 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub> 来自生产乙烯的废气。这条制取醇醚燃料也被国际上称为 Blue Fuel, 如图 10 所示<sup>[41]</sup>。

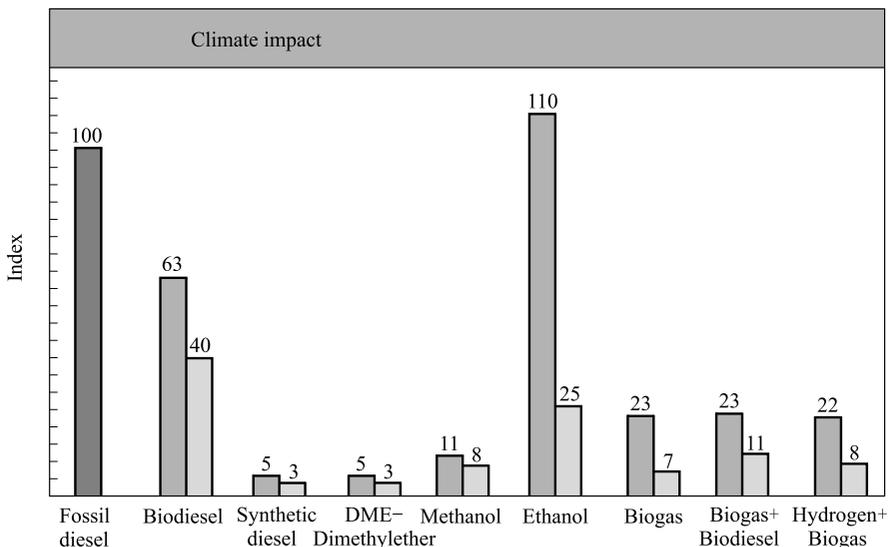
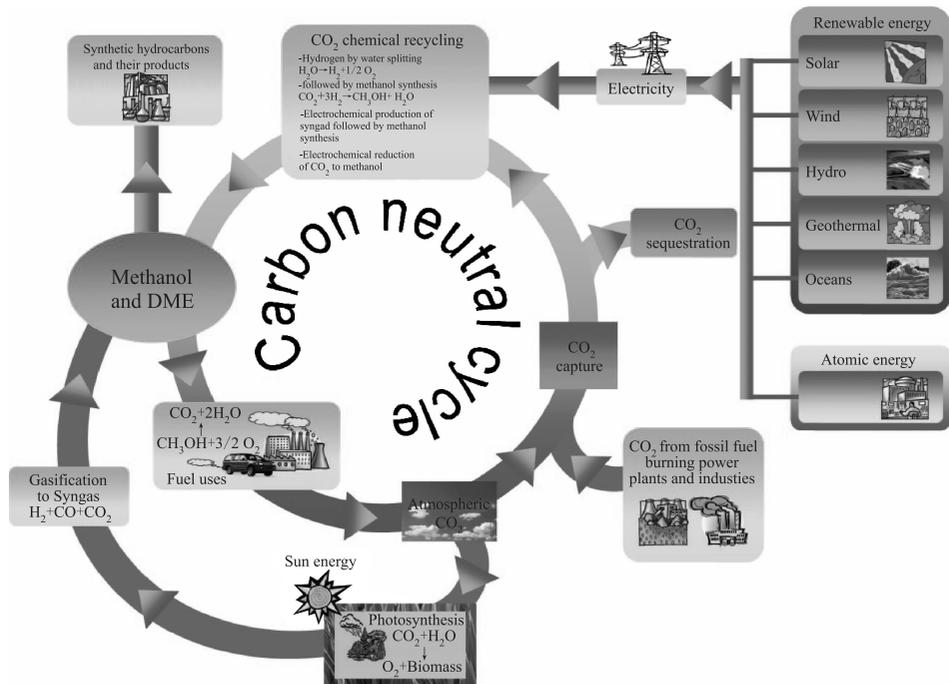


图 9 全生命周期温室气体排放<sup>[39]</sup>

图 10 醇醚燃料的碳中性循环<sup>[41]</sup>

## 1. 甲醇燃料

甲醇是结构最为简单的饱和一元醇,是一种无色、有酒精气味、易挥发的液体,是重要的化学工业基础原料和液体燃料。作为车用燃料,甲醇具有辛烷值高、调和性较好、含氧量高、水溶性强等特点,甲醇常温下呈液态、自燃温度比汽油高。实际使用过程中,根据甲醇与不同比例汽油按混合,可以形成多型号甲醇汽油,如 M15、M30、M85、M100 等,与不同比例柴油混合,也可形成甲醇柴油混合燃料。

20 世界 70 年代,第二次石油危机后,美国、德国、日本等国家曾较系统地开展低比例甲醇掺烧技术的研究,并进行了中等规模车队的技术验证和商业化示范运营。从 20 世纪 80 年代中期以后,美国福特汽车公司开展了 M85 和 M100 型甲醇燃料应用和灵活燃料汽车开发,据报道改装了 500 辆福特车,采用 M85 甲醇燃油,行驶总行程达 3380 万 km,取得了甲醇汽车改装生产和使用的经验。此外,福特公司还研制了灵活燃料汽车(FFV),共有近 6 万辆灵活燃料汽车投入到美国加州等市场。1993 年,日本汽车研究所开展大型公共汽车及载货车使用 M85、M100 燃料的试验研究,先后进行了 6 万 km 的道路试验,以检验发动机的耐久性、可靠性。1995 年美国能源部(DOE)投入 12 700 辆甲醇车试用 M85 燃料。20 世纪 90 年代中期,随着世界石油价格连续下降,由于甲醇燃料价格竞争力下降,甲醇加注站等配套设施不完善,以及甲醇的毒性和腐蚀性等问题,同时

可基于丰富的玉米等谷物生物转化得到可再生能源乙醇的规模应用等因素影响,美国等国家的甲醇燃料使用逐渐萎缩。

我国甲醇燃料技术研究起步较晚,近 10 多年发展速度较快,先后在甲醇燃料和甲醇燃料汽车的技术创新、标准体系、产品研发、技术验证和规模应用示范方面取得了重要进展。2009 年《车用燃料甲醇》和《车用甲醇汽油(M85)》两项国家标准颁布实施。在甲醇燃料的产品技术验证与示范推广方面,我国山西、陕西、浙江、河北、山东、江苏、上海等省市先后开展了甲醇燃料及整车产品的技术验证与示范推广工作。山西省是全国首先试验推广甲醇燃料省份。1997 年国家经贸委批准山西省实施国家甲醇燃料汽车示范工程,山西省投入 50 辆甲醇中巴汽车开展示范运营,累计行程达到 200 万 km。2003 年山西省开始在 4 个城市试点推广甲醇燃料,到 2004 年推广城市增加到 11 个。2007 年山西省甲醇燃料推广范围扩大到全省。截至 2012 年,山西全省建 14 个调配中心,800 余座甲醇汽油加注站,当中 17 个是高比例甲醇燃料加注站,全省实现年产能 150 万 t,销售甲醇燃料 80 万 t,改装车辆超过 3 万辆。

甲醇作为燃料在点燃式发动机上的应用有掺烧方法、纯烧方法、甲醇改质等多种方法。掺烧法就是混合燃料法,甲醇低比例与汽油混合掺烧,需对发动机的点火提前角和喷油量稍作调整。甲醇纯烧方式需要对发动机进行必要的改造。甲醇改质是利用发动机排气的余热将甲醇裂解成为  $H_2$  和  $CO$ ,然后再输往发动机燃烧。甲醇改质气的成分随发动机的排气温度而变化,对于复杂多变的道路工况而言,瞬态控制具有一定的难度。另外,甲醇的改质受到催化剂的诸多限制,而且成本较高,因此,还没有出现实际应用的范例。

甲醇的十六烷值低,压燃性差,因此甲醇用于压燃式发动机远较用于点燃式发动机困难。甲醇燃料应用到压燃式发动机上有甲醇柴油乳化法、双燃料喷射法等。甲醇柴油乳化是通过添加乳化剂的方式在机械力的作用下使甲醇以分散相的形式分散在柴油中,形成一种多相体系的油包水型溶液<sup>[42]</sup>,一同进入气缸燃烧的方式。使用甲醇柴油乳化液法一般可掺烧体积分数为 20% ~ 40% 的甲醇。双燃料喷射法是指在柴油机上分别安装两套喷油泵和喷油器,一套用于喷射甲醇燃料,另一套用于喷射引燃柴油。

甲醇燃料在车辆使用过程中主要有两大问题。其一是会产生甲醛等有毒物质,如何使车辆在使用过程中控制和降低非常规排放,尤其是醛类排放,是必须解决的技术难题。其二是材料相容性,燃用甲醇对常规橡胶密封材料溶胀性,对整机零部件,如喷油器、气门及气门座、活塞、活塞环等的可靠性有影响,对系统润滑也有影响,因此必须采取措施,解决材料相容性问题,提高发动机的可靠性和寿命。

针对甲醇燃料的特点和甲醇汽车的技术难点,上海华普汽车有限公司开发

了 M100 甲醇发动机,设置两个燃料箱。采用甲醇、汽油双燃料方案,启动时用汽油,待发动机工作温度上升至规定值,自动切换成使用甲醇工况。避免了甲醇低温启动困难的缺点,也避免了低温非常规排放处理的困难。同时甲醇和汽油分开两个通道输送,可以分别选择各自适用的金属材料和非金属密封材料,抗腐蚀、抗甲醇溶胀得到较好的解决。

天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室提出了甲醇/柴油组合燃烧方法<sup>[43]</sup>,喷嘴将甲醇喷入到柴油机进气道雾化后进入汽缸,在压缩冲程由喷入的柴油点燃,甲醇和柴油共同参与燃烧做功。先后在 485QDI 柴油机、4102 涡轮增压柴油机、30GF-3 柴油发电机组、490QDI 柴油机等多种机型上进行实验,使柴油机在同样功率输出条件下,甲醇替代柴油比例平均达到 30%。实验结果表明,采用组合燃烧后发动机和纯柴油燃烧发动机相比,尾气中  $\text{NO}_x$  和碳烟排放显著减少,消耗燃料的比能耗降低,组合燃烧用燃料的使用经济性优于原机;仅未燃碳氢和一氧化碳较原机有所增加。

## 2. 二甲醚燃料

二甲醚是一种无毒含氧燃料,常温常压下为气态,常温下可在 5 个大气压下液化,易于储存与运输。二甲醚具有良好的燃料性能,作为民用燃料可以替代 LPG,作为清洁车用燃料可以替代柴油。国家发展和改革委员会曾多次召开二甲醚产业发展座谈会,指出实施替代能源战略是抑制高油价影响的重要措施,二甲醚是具有良好发展前景的替代能源产品,是适合于我国能源结构的替代燃料。

二甲醚的生产成本,取决于二甲醚燃料制造工艺和生产规模,根据我国二甲醚生产厂提供的资料,以煤为原料,年产 20 万 t 级规模制取二甲醚,生产成本在 3000 元/t 以下。1 t 柴油和 1.48 t 二甲醚发热量相同,二甲醚在价格上具有较强的竞争力。二甲醚的持续充足供应、生产成本优势为二甲醚的应用奠定了坚实的基础。2009 年 6 月 17 日,工业和信息化部发布了《新能源汽车生产企业及产品准入管理规则》<sup>[44]</sup>,明确将二甲醚汽车列入新能源汽车行列。

二甲醚在发动机上的应用已有近 20 年的历史。20 世纪 90 年代中期,欧美一些大学和公司首先将二甲醚用做柴油机燃料<sup>[45, 46]</sup>,由于 DME 燃料的卓越性能,欧洲、日韩和俄罗斯等国家都看好二甲醚燃料的市场前景和环保效益,纷纷开展二甲醚燃料发动机与汽车的研发<sup>[47-50]</sup>。2008 年 9 月,欧洲启动项目投资总额约 2800 万欧元的生物二甲醚示范项目,通过气化纸浆黑液和二甲醚燃料合成步骤,生产二甲醚,为沃尔沃车队提供燃料,生物二甲醚项目将为未来的车用能源发展提供一个示范,并验证规模化生产可再生燃料的可能性。在日本,在北海道和新潟建了两个二甲醚示范工厂,开发了 10 多辆不同类型的二甲醚汽车进行试验运行,目前正在为产业化和商业运行做准备。

在国内,上海交通大学<sup>[51-54]</sup>、西安交通大学<sup>[55,56]</sup>、天津大学<sup>[57]</sup>、吉林大学<sup>[58]</sup>、华中科技大学<sup>[59]</sup>等均对二甲醚燃料进行了研究。上海交通大学的研究工作与国际同步,上海交通大学自1996年起先后承担了多项国家“863”项目、国家科技攻关项目和国家自然科学基金项目,对二甲醚燃料的喷射、雾化、混合、燃烧与排放机理、发动机部件磨损、材料相容性和可靠性进行了系统深入的研究<sup>[51-54]</sup>。2005年,上海交通大学研制了具有自主知识产权的国内第一辆达到国Ⅲ排放标准的二甲醚城市大客车产品样车,如图11所示,获得8项国家发明专利授权。2007年由上海交大、上海汽车工业(集团)公司、上海柴油机股份有限公司、上海华谊集团公司、新奥九环车用能源有限公司组成了产学研团队,进一步成功研制了10辆二甲醚城市公交车,2008年列入国家发展和改革委员会第166批《车辆生产企业及产品公告》,成为我国首款进入国家汽车产品公告的二甲醚汽车,并通过了中国国家认证认可监督管理委员会的3C认证,同时建成了国内第一座车用二甲醚加注站,制定了3项汽车行业标准、12项相关企业标准,相关研究成果已应用于国家标准“车用燃料用二甲醚”(GB/T 26605—2011),二甲醚纯度指标也被ISO TC-28 SC4国际标准采纳。2010年所研发的二甲醚城市客车在上海市147路公交线路上进行示范,完成了44.6万km的道路商业运行。这是国际上二甲醚汽车首次投入商业运营,结果表明,二甲醚汽车性能可靠、排放清洁、噪声低,与常规柴油车相比,PM<sub>2.5</sub>排放可降低95%,能满足城市公交对发动机各项指标的要求。同时在国家“863”项目的支持下,上海交通大学与上海柴油机股份有限公司已完成达到国Ⅳ和国Ⅴ排放标准的二甲醚发动机的研制。目前,上海交通大学联合西安交通大学、山东大学和潍坊柴油机集团正在开展满足国Ⅵ排放的二甲醚发动机的开发和研制工作。



图 11 上海的二甲醚城市公交车

西安交通大学从 1997 年起开展二甲醚发动机和汽车的研究,开发了二甲醚发动机和汽车满足欧Ⅲ排放标准,完成了二甲醚发动机深度 EGR 以及燃料温度等对发动机动力经济和排放的影响等一系列研究,与山东久泰能源集团合作,在国家“863”清洁汽车项目和临沂市地方政府的支持下,进行了小范围的 DME - 柴油混合燃料客车示范运营。

### (五) 煤制油

煤制油是指在一定的化学反应条件下,将 H/C 比为 0.18 左右、相对分子质量为 5000 的稠环芳烃为主要结构特征的固体煤转化为 H/C 比为 2 左右、相对分子质量为 100 ~ 200 的脂肪烃为主要结构特征的汽油、柴油。煤直接加氢合成油就是将煤在高温高压条件下,通过催化加氢直接液化合成液态烃类化合物,并脱除煤中氮、氧和硫等杂原子。煤间接液化合成油,即将煤首先气化成 CO 和 H<sub>2</sub>,通过水气变换反应转化为一定 H/C 比的合成气(CO + H<sub>2</sub>),再通过催化合成(F-T 合成等)转化为烃类化合物。

20 世纪 20 年代德国就开始研究煤的直接加氢液化技术。20 世纪 70 年代的两次石油危机使煤直接加氢液化技术得到重视,美国、德国、日本和前苏联等国家相继开发了多种工艺,完成了中试或工业性试验。我国有关单位在煤直接加氢液化方面也进行了大量的研究开发工作。2002 年 8 月,国家批准了我国首个也是世界上首个商业化的神华集团煤炭直接液化项目。2008 年底,神华煤直接液化百万吨级工业示范工程试车成功,使我国成为世界上唯一掌握百万吨级煤直接液化关键技术的国家。

20 世纪 40 年代,人们吸取高压合成氨和合成甲醇的成功经验后,开始研究煤的间接液化合成油。荷兰、南非、美国等均投入巨资开发天然气制取液态烃类化合物,产生多种合成转化新工艺。南非以本国丰富的煤炭资源为依托开发煤间接液化技术,并于 1955 年 Sasol 公司首先建厂进行工业化生产。但在 20 世纪 90 年代后面临新的选择。Sasol 公司正在将以煤为原料的间接液化浆态床工业装置改为以天然气为主要原料生产。中国科学院山西煤炭化学研究所一直致力于煤间接液化技术开发研究,已取得了重要进展。我国陕西、内蒙古等已建有多个煤间接液化工厂。

煤直接加氢液化合成油要求的煤种比较苛刻,必须是氢含量高和氧含量低的年轻煤,而且要求水分含量小,硫、氮等杂原子含量少,以及具有易磨碎等性能,极大地限制了煤种的选择。其反应温度高,反应压力大。煤间接液化合成油的关键技术是合成气转化反应,与直接液化相比,反应条件较为温和,典型反应条件为 250 ~ 350 °C, 310 ~ 510 MPa。合成汽油产品的辛烷值不低于 90,合成柴

油产品的十六烷值高达 75。但是煤间接液化反应是一个强放热反应,每生成一个 $-\text{CH}_2-$ 基团,就要失去一个水分子,因而在合成油的过程中能量损失较大。间接液化合成油的合成对煤种的适用性较强,也可以用其他含碳物质,如天然气、煤层气、页岩、植物等作为原料<sup>[60]</sup>。

关于煤直接液化油在发动机和汽车上的应用研究,神华集团等的研究表明,煤直接液化柴油与石油基柴油有很好的相容性,对十六烷值改进剂和润滑改进剂具有较好的感受性;燃用煤直接液化柴油的发动机具有与石化柴油机相同的动力性<sup>[61]</sup>。在国家“863”项目支持下,上海交通大学与神华集团合作率先在电控共轨柴油机上研究了煤直接液化柴油-石化柴油混合燃料的燃烧、性能和排放以及喷射控制参数、十六烷值改进剂、润滑改进剂和废气再循环率的影响,优选了燃料配方,十六烷值达到了 45 以上,为煤直接液化燃油在我国的大规模推广奠定了坚实基础。研究表明:柴油机在不做任何改动的情况下,燃用煤直接液化柴油或其与石化柴油的混合燃料可以达到原机功率水平,循环变动、 $\text{NO}_x$  排放与石化柴油相当,而碳烟排放要低于石化柴油<sup>[62-64]</sup>。在此基础上,2010 年 3 月至 2011 年 3 月,中国汽车技术研究中心、中国第一汽车集团公司与神化集团合作采用 4 辆轻型汽车以国 III 基准油和三个 DDCL 配方油为燃料,完成 80 000 km 汽车耐久性试验,验证了煤直接液化柴油的实用性。

关于煤间接液化油在发动机和汽车上的应用研究。同济大学对帕萨特柴油轿车燃用沪四柴油、煤间接液化柴油、体积混合比例分别为 10% 和 50% 的煤间接液化柴油-沪四柴油混合燃料的排放特性进行了试验研究。结果表明,与沪四柴油比较,该车燃用煤间接液化柴油-沪四柴油混合燃料后,其  $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{HC}$ 、 $\text{PM}$  排放均有不同程度的降低<sup>[65]</sup>。北京交通大学等在一台单缸直喷式柴油机上试验分析了燃用 F-T 柴油时的燃烧和排放。结果表明,与燃用 0 号柴油相比,燃油消耗率得到显著改善,可降低  $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}$  的排放,中低负荷时排气温度也降低<sup>[66]</sup>。

### 三、替代燃料区域应用研究

我国可用于发展车用替代能源的资源种类有煤炭、天然气、液化石油气、生物质能、太阳能、氢能、风能等,资源种类非常丰富。其中煤炭、天然气储量较大,煤炭已探明储量仅次于美国和俄罗斯;截至 2012 年,常规天然气已探明地质储量超过 10 万亿  $\text{m}^3$ 。生物质能、太阳能、风能的开发潜力巨大。

同时我国车用替代能源资源分布不均,地区差异明显。北方煤炭资源占全国探明总量的 90%,集中于山西、内蒙古、新疆、陕西、河南等地,南方仅占 10% 且集中于贵州、云南等较偏远地,经济发达的东部沿海地区储量只占全国总量的

7%。天然气主要分布在中西部盆地,包括西部的新疆塔里木盆地、吐哈盆地、准噶尔盆地和青海的柴达木盆地,中部的鄂尔多斯盆地和四川盆地以及东北华北的油田富集区,排名前三位的新疆、内蒙古和四川,天然气储量之和占全国总储量的60%以上。液化石油气产量较高的省区有辽宁、山东、黑龙江、新疆、河北等地,东南沿海发达地区能源高度依赖外部输入。生物质能分布也存在明显的地区差异,农作物秸秆主要分布在华北平原、长江中下游平原、东北平原等13个粮食主产省区,能源作物主要产区为西南、华南及东北地区,以云南、贵州、广西等地最为丰富。

使用层次分析法(AHP)对不同替代能源汽车方案进行分析。层次分析法的基本原理是确定希望达成的总目标,根据目标的性质及决定因素,将目标的实现分为不同的组成因素,构建准则因子;根据因素间的隶属关系和相互影响,对准则因子进行层次的划分并对不同层次因子进行隶属排列,形成一个多层次的分析结构模型;根据最低层各个因子即问题解决方案对最高层即总目标的重要性权重排列或优劣次序排列,选择最佳的解决方案。此处以替代能源汽车方案选择为目标构建层次分析模型,将资源特征、技术现状、经济发展、市场消费、公共政策作为对不同方案进行考察的主要参考因素。将天然气汽车、乙醇汽油和生物柴油汽车、煤基合成液体燃料汽车三种替代能源汽车设为最终方案。考虑各地实际情况,通过层次分析模型对全国31个省、自治区、直辖市替代能源汽车方案进行评价,得到量化的计算结果。对每种方案的权重进行比较,得到各地区最具优势的替代能源汽车方案。最后将全国各地区的替代能源汽车方案汇总得到全国替代能源汽车方案选择结果,如图12所示。整体来看,在我国石油对外依存度日益增加的现实情况下,发展替代燃料对于保证我国能源安全起到重要作用。由于我国天然气资源较为丰富,随着未来非常规天然气的开发和海外进口渠道的进一步开拓,天然气运输网络和基础设施的日趋完善,同时天然气替代燃料技术相对较成熟,我国天然气汽车具有很好市场发展前景,天然气汽车在能源缺乏的东南沿海地区,以及能源丰富的中西部盆地都有较大的发展优势。

煤基合成液体燃料汽车在煤炭资源丰富的地区,如山西、陕西、内蒙古、宁夏、新疆、河南等地,具有较好的经济和环境效益,适宜在这些地区进行规模发展,结合低碳排放煤化工技术发展,煤基醇醚燃料有望成为解决我国日益增长的车用燃料消费的重要而又现实途径。煤制油应成为我国车用燃料的战略储备。

生物质燃料原料多样以及低碳可再生,对减少化石能源的消耗以及温室气体排放具有重要作用。随着技术的不断发展,乙醇汽油、生物柴油汽车的发展前景更加广泛。在我国生物质能丰富的东北、西南地区以及粮食主产区的华北平原和长江中下游平原,利用能源作物和农作物秸秆发展生物液体燃料将会有效

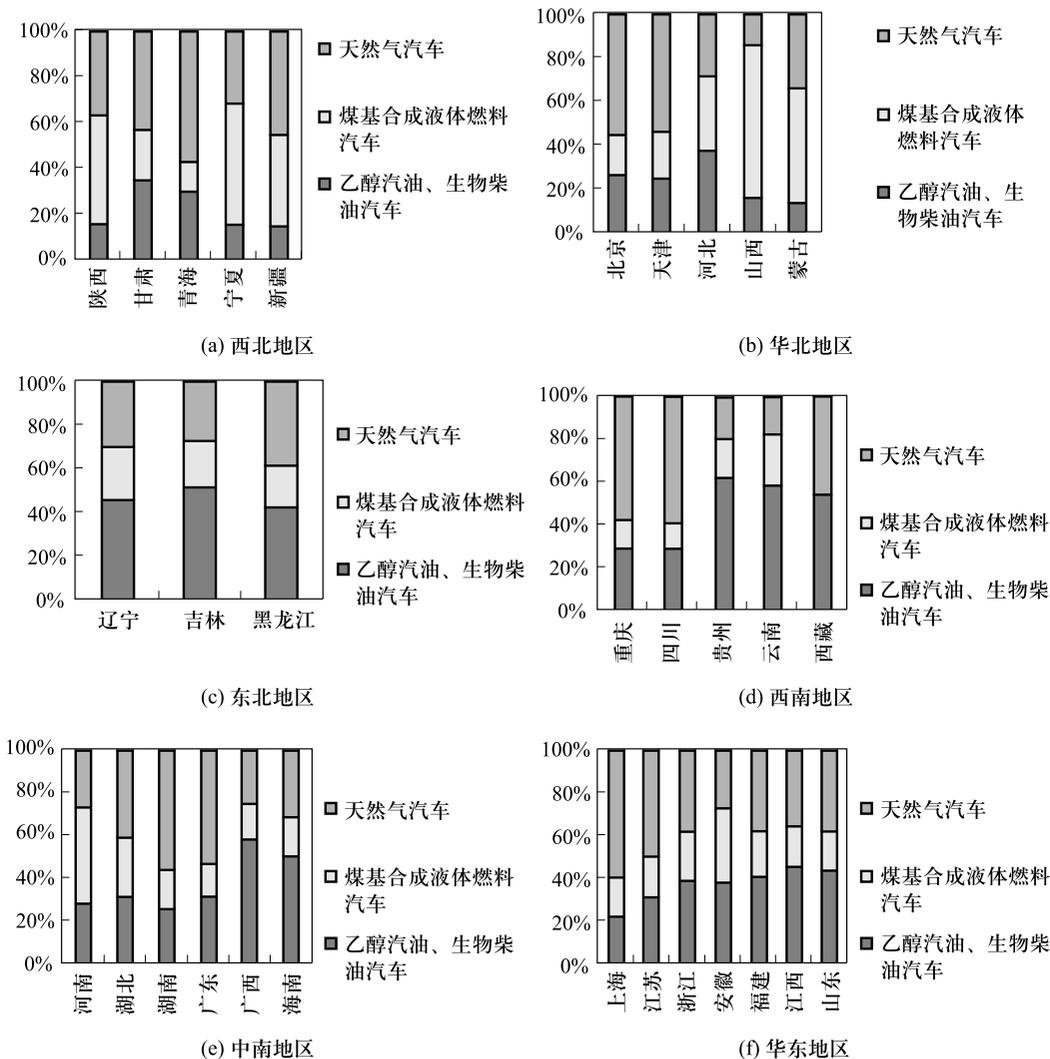


图 12 我国替代能源汽车选择方案 (数据不包含我国台湾省)

地减轻我国能源压力,废煎炸油制生物柴油与生物废弃物制乙醇应成为我国当前生物燃料发展的主要路线。

我国幅员辽阔,若单一发展生物质燃料,在相当程度会受到粮食供应、资源和土地的限制;若单一发展天然气替代,会受到资源量和经济性的限制;若单一发展煤基燃料,将受到环境、运输等因素的制约。我国资源分布不均,地区差异明显,因此我国汽车替代燃料应根据能源资源特点,因地制宜,多元发展。

#### 四、基于燃料特性的燃烧技术

由于发动机排放和燃油消耗法规的日趋严厉,基于燃料特性的燃烧技术近

年来越来越得到国内外内燃机学界的关注与重视,美国橡树岭国家实验室<sup>[67]</sup>、日本丰田汽车公司<sup>[68]</sup>等国外的研究机构,以及国内的上海交通大学<sup>[69,70]</sup>、天津大学<sup>[71]</sup>、清华大学<sup>[72]</sup>等研究机构相继开展了基于燃料特性的燃烧技术研究。

### (一) 基于燃料特性的均质充量压缩着火与燃烧的控制

燃料设计概念是一种基于燃料特性的燃烧新技术,其是指通过多种燃料优化组合,结合互溶、互混技术对燃料进行重新配方,从而改变燃料的成分或理化特性,促进缸内燃油混合气形成和着火控制,使发动机达到清洁燃烧,实现高效率、低排放的目的,如图 13 所示。燃料设计思想最早来自于上海交通大学黄震教授的“溶气燃油雾化与燃烧”技术的研究<sup>[73,74]</sup>。上海交通大学的研究团队长期开展了深入系统的燃料设计控制发动机燃烧的研究。

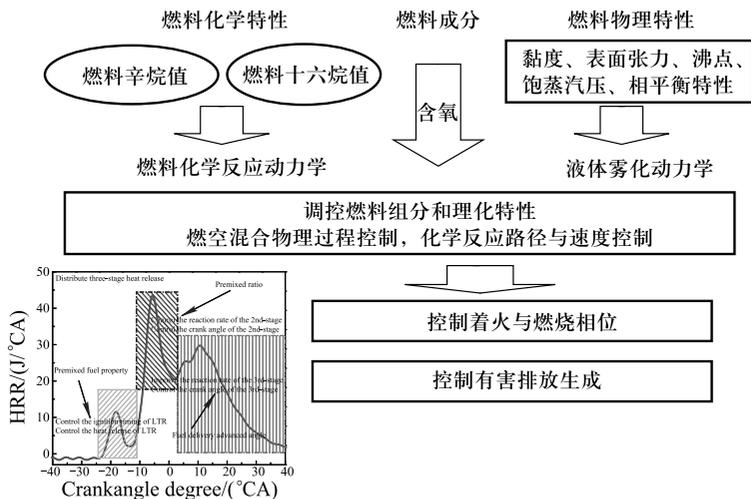


图 13 燃料设计理论与方法

针对具有典型意义的正庚烷和异辛烷两种基础燃料,上海交通大学的研究发现由于其具有不同的分子结构、化学反应机理、十六烷值/辛烷值,它们的氧化反应路径、基元反应速率显著不同,阐明了不同辛烷值的基础燃料的化学反应过程及其宏观表征。揭示了正是由于低温反应始点和反应强度的变化,在缸内活性基团和热氛围环境的作用下,直接控制了燃料高温着火时刻,如图 14 所示<sup>[69,70]</sup>。

进一步通过在两种基础燃料中分别加入合适的添加剂,从而改变化学反应路径、低温反应的时刻和放热量,影响负温度系数区间的持续时间、高温反应着火时刻和反应速率,最终控制整个反应过程。研究发现在正庚烷燃料中分别添加不同分子结构的惰性添加剂——甲醇、乙醇、异丙醇、甲基叔丁基醚(MTBE),甲醇添加剂消耗了正庚烷低温反应的大量活性基团,从而抑制了低温反应速率

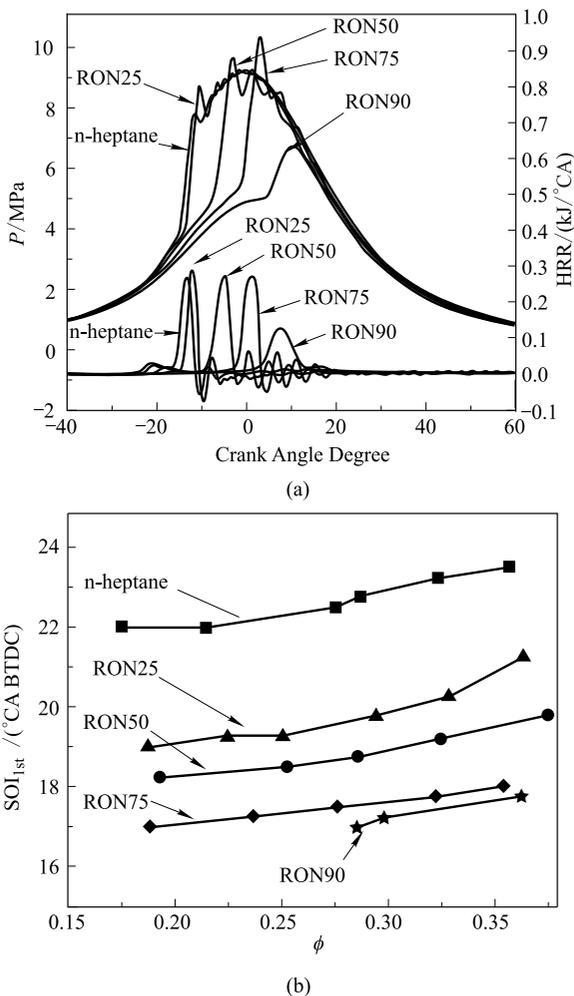


图 14 不同辛烷值的燃料对低温反应时刻和高温反应时刻的影响<sup>[69,70]</sup>

和强度,导致着火滞后、燃烧速率降低、HC、CO 排放增加;而在乙醇的作用下,适当程度的抑制低温反应,控制整个高温放热集中在上止点附近,从而得到较好的热效率和排放,如图 15 所示<sup>[75]</sup>。在高辛烷值燃料中添加一种活性添加剂——过氧化二叔丁基(DTBP),发现通过活性添加剂在低温过程中反应放出一定的热量和产生大量的活性基,在缸内燃烧室核心区域产生“活化热氛围”环境,缩短系统温度达到冷焰反应和热焰反应的化学时间尺度,提高了燃烧速率,显著地改善了高辛烷值燃料的燃烧效率<sup>[76]</sup>。

针对 HCCI 燃烧的着火时刻和燃烧速率难以控制、低负荷失火、高负荷爆震、运行范围窄等固有的缺陷,上海交通大学提出了一种基于燃料设计的均质充量压缩着火与燃烧控制新方法,通过对燃料理化特性的设计,实现对燃烧相位、放热分布和形态的调制。

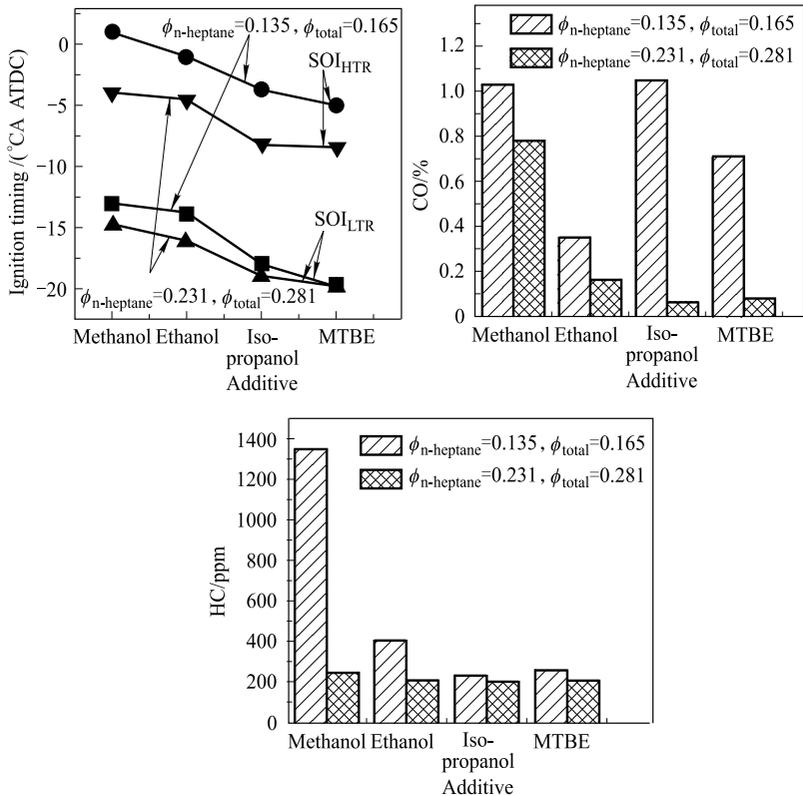


图 15 二元燃料对着火与排放生成的影响规律<sup>[75]</sup>

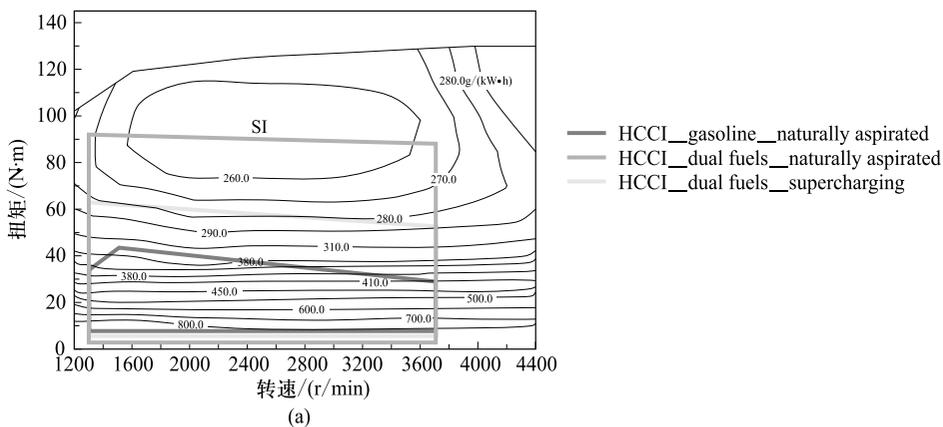
针对正庚烷/异辛烷和 DME/LPG 两种典型混合燃料,建立了上述二元混合燃料的化学反应机理与化学反应动力学模型,揭示二元燃料的化学反应历程,试验研究发现利用高十六烷值燃料易压燃的特性,高辛烷值燃料抗爆性好的特性,通过不同工况下对高十六烷值燃料/高辛烷值燃料喷射量及其比例调节,可改变冷焰阶段放热始点以及放热峰值高低,由此可以控制 NTC 区域范围,并进一步控制主燃烧阶段放热始点和放热量,有效改变燃料的均质充量压缩着火和燃烧相位,优化缸内最大压力出现时刻,达到了燃烧 HCCI 燃烧有效控制,排放降低,热效率提高的目的<sup>[77,78]</sup>。

研究中进一步发现,常规的燃料设计方法,都是事先把燃料成分配好,进入发动机燃烧。燃料一旦配好,混合燃料理化特性也就再也无法改变。这种固定配比混合燃料在本质上与传统的汽油燃料或者柴油燃料一样,往往无法在宽发动机运行范围下,适应由化学反应动力学控制发动机 HCCI 燃烧,更难以进行燃烧模式的调制,导致燃烧控制、负荷拓展、排放控制上顾此失彼。为此上海交通大学提出了为 Smart fuel(聪明燃料)技术,通过双燃料喷射,对燃料理化特性进行实时设计,对燃料喷射和混合气形成过程进行实时控制,实现对燃料着火和

燃烧相位调制。图 16 为在一台汽油机的进气道安装了两套喷油器,一个喷油器向发动机供高辛烷值燃料汽油,一个喷油器供高十六烷值燃料正庚烷,根据发动机的负荷与转速,实时控制两种燃料的喷射量,向发动机供给聪明燃料,取得了 HCCI 燃烧良好控制效果,使汽油机 HCCI 运行范围大幅有效扩展,低负荷拓展到怠速,高负荷与常规汽油 HCCI 燃烧相比,负荷增加了近一倍,如图 17 所示。同时显著降低了有效燃油消耗率,在小负荷与原汽油机相比油耗降低 32.8%,在中等负荷,油耗降低了 17.6%,提高了热效率,如图 18 所示,发动机  $\text{NO}_x$  和碳烟达到近零排放<sup>[79]</sup>。



图 16 汽油机双燃料喷射系统



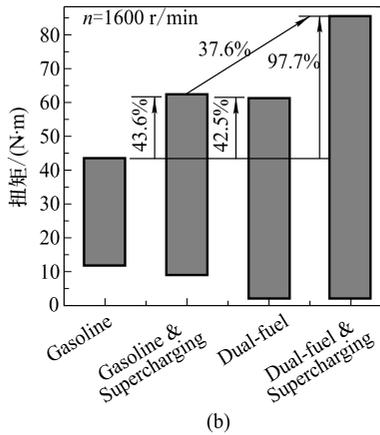


图 17 双燃料汽油机 HCCI 燃烧的负荷拓展

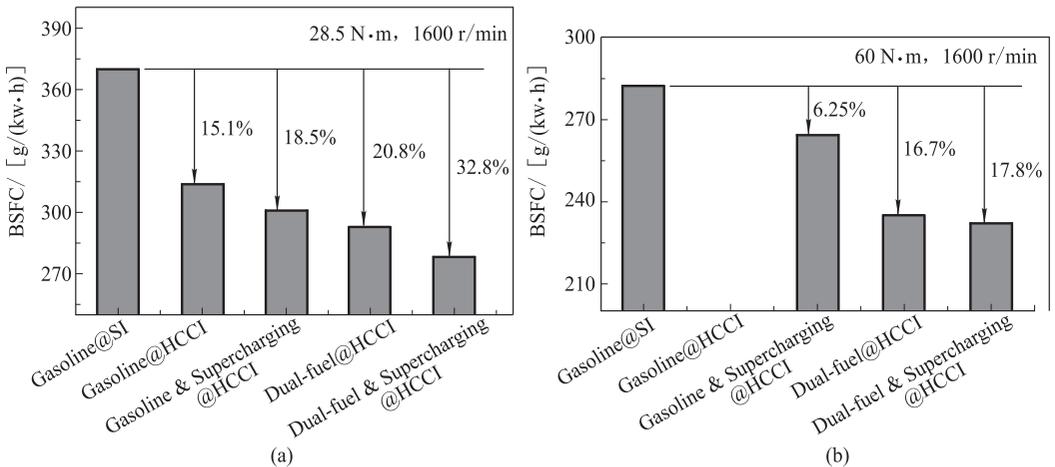


图 18 双燃料汽油机 HCCI 燃烧的油耗

为了进一步拓展负荷,上海交通大学通过气口喷射与缸内直接喷射相结合、并对直喷时刻进行调制,实现缸内燃料浓度的分层;通过气口喷射不同辛烷值基础燃料与缸内直接喷射正庚烷相结合,进行缸内混合气的组分分层;通过气口喷射的正庚烷发生的低温反应释放出的活性基团和热量,在缸内形成温度分层和活性基。实现了对分层复合燃烧的燃烧相位、放热分布和形态的调制,如图 19 所示。通过燃料设计与喷射管理彻底消除了 HCCI 燃烧在小负荷失火和大负荷爆震的弊病,实现了全燃烧历程和全工况范围下的燃烧相位的调制,使得原理样机在各个工况下排放大幅降低、热效率显著提高,发动机运行范围拓展到全负荷,全负荷范围内  $\text{NO}_x$  排放低于 40 ppm 排放水平,HC 和 CO 排放显著低于 HCCI 燃烧,同时发动机指示热效率高于原机直喷的水平<sup>[80]</sup>。

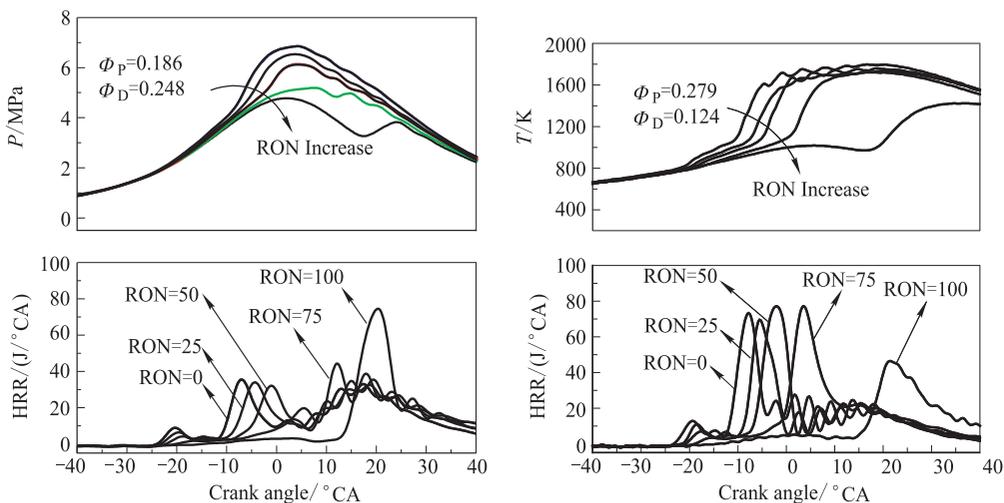


图 19 燃料实时设计对 HCCI 复合燃烧的燃烧相位、放热分布和形态的调制<sup>[80]</sup>

2010 年,威斯康星大学 Reitz 教授提出的 RCCI (Reactivity Controlled Compression Ignition) 和鸡尾酒燃料与上海交通大学研究同工异曲<sup>[81]</sup>。威斯康星大学 - 反应活性控制压缩着火 (RCCI) 是将拥有不同反应活性的燃料 (例如,汽油和柴油) 分别通过进气道喷射和缸内多次喷射方式喷入气缸,通过缸内混合实现当量比和充量反应活性分层。燃烧从高活性区域向低活性区域推进,有效地降低了压力升高率,在大负荷区域内实现 RCCI 燃烧。缸内分为三阶段放热,如图 20 所示,柴油或正庚烷产生的冷焰反应,正庚烷和异辛烷混合后产生的第一部分的能量释放,异辛烷或汽油产生的最终阶段的放热。因此改变燃油的比例可产生不同幅值的放热。RCCI 燃烧模式的  $\text{NO}_x$  和碳烟排放接近于零,且指示热效率得到显著提高。

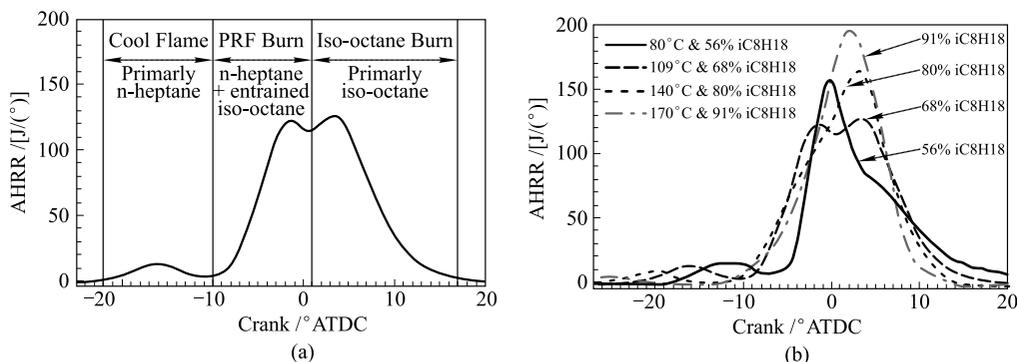


图 20 RCCI 燃烧模式的缸内放热过程<sup>[81]</sup>

基于改变燃料理化特性增强油气混合速率的思想,清华大学王建昕教授团

队提出了低辛烷值汽油多段预混压燃(MPCI)技术和汽油均质混合气柴油引燃(HCII)技术。研究发现挥发性好、易着火的低辛烷值汽油类燃料,通过多段预混压燃(MPCI)技术,实现了放热率可控的高效清洁燃烧模式,低辛烷值燃料的两阶段MPCI燃烧模式与柴油单次喷射模式相比,指示比油耗、NO<sub>x</sub>排放、Soot排放和CO排放以及最大压力升高率均有大幅度的降低<sup>[82]</sup>。通过HCII燃烧方法,兼取汽油易挥发和柴油易着火的优点,进气道喷射汽油形成均质混合气,缸内喷射柴油以快速燃烧,其油耗优于柴油机,更容易实现低温燃烧,获得超低碳烟排放和NO<sub>x</sub>排放<sup>[83]</sup>。

除了将汽油这种低十六烷值、高辛烷值、高挥发性燃料应用到柴油机新型燃烧系统研究中外,天津大学姚春德教授团队将甲醇应用到甲醇-柴油二元燃料燃烧系统中,除了低十六烷值高挥发性燃料固有特点外,甲醇为含氧燃料。这对于降低发动机碳烟及颗粒物排放具有很好的潜力。新型甲醇-柴油二元燃料燃烧系统具有以下优点:①没有燃料分层问题;②无添加剂、低成本;③热效率高、动力性好。使用甲醇-柴油二元燃料可以同时降低碳烟与氮氧化物,打破了碳烟与氮氧化物之间此消彼长的关系,并可以大幅降低颗粒物排放,如图21所示<sup>[84]</sup>。

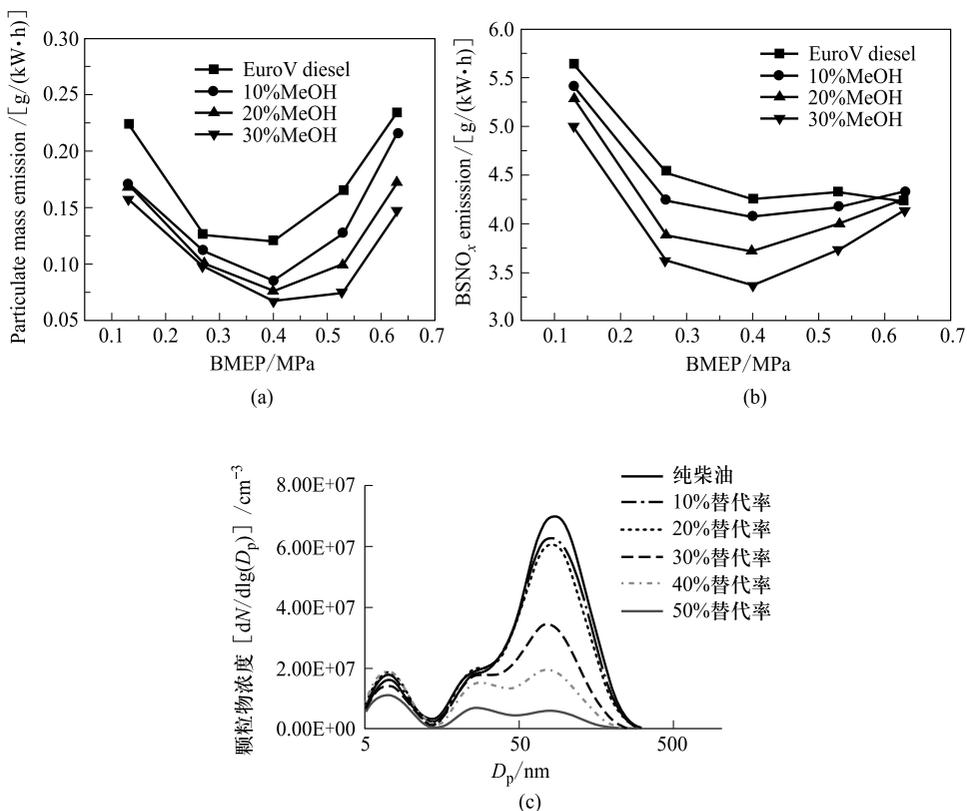


图 21 甲醇-柴油二元燃料燃烧系统的排放特性<sup>[84]</sup>

## (二) 基于燃料特性的发动机低温燃烧控制

柴油机低温燃烧由于能同时避开碳烟颗粒和  $\text{NO}_x$  生成区域,具有同时降低碳烟和  $\text{NO}_x$  这两种排放物的巨大潜力而备受关注<sup>[85]</sup>。如图 22 所示,柴油机如果燃烧温度可以保持在低于 1650 K 的水平,无论当量比如何,燃烧都可以完全避开  $\text{NO}_x$  和碳烟的主要生成区域。低温燃烧模式通常采取的措施是采用大比例 EGR,降低燃烧温度,从而减少  $\text{NO}_x$  的生成,同时避开碳烟生成区域。但过大 EGR 率,燃烧温度过低,会导致燃烧不完全、油耗恶化、HC 和 CO 排放增加。因此如何改善燃烧前的油气混合,减少局部燃油过浓的区域,降低燃空当量比,在中等 EGR 条件下,实现碳烟和  $\text{NO}_x$  同时大幅降低是国际内燃机界十分关注的研究课题。

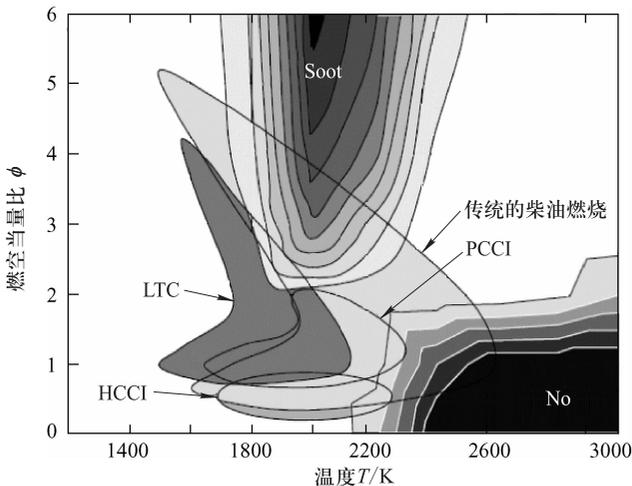


图 22 碳烟颗粒和  $\text{NO}_x$  在  $\phi - T$  图上的生成区域<sup>[85]</sup>

国内上海交通大学<sup>[86]</sup>、天津大学<sup>[87]</sup>等高校开展了相关研究。上海交通大学韩东根据燃料设计思想对传统柴油机使用的燃料进行重新设计<sup>[86]</sup>,将商用汽油和柴油燃料混合,其作用一是改善燃油雾化与油气混合,二是降低燃料的十六烷值,如图 23 所示,随着汽油掺混比例的增加,滞燃期逐渐延长,有效增加了缸内油气混合时间,减少了缸内局部富油区。对于柴油燃料,随着 EGR 率的提高(即进气氧浓度的降低)  $\text{NO}_x$  排放降低,碳烟排放升高,碳烟和  $\text{NO}_x$  排放呈现出明显的此消彼长关系。值得注意的是当 40% 的汽油掺混入柴油后,在试验 EGR 率的情况下,碳烟排放始终保持在了很低的水平,几乎为零,碳烟和  $\text{NO}_x$  排放得到了同时降低。通过改变燃料十六烷值,在中等 EGR 率下就能实现低温燃烧,

大幅降低  $\text{NO}_x$  和碳烟排放,解决  $\text{NO}_x$  和碳烟 trade-off 问题。天津大学的研究发现使用宽馏分柴油的低温燃烧模式能够显著降低碳烟排放物水平<sup>[87]</sup>。

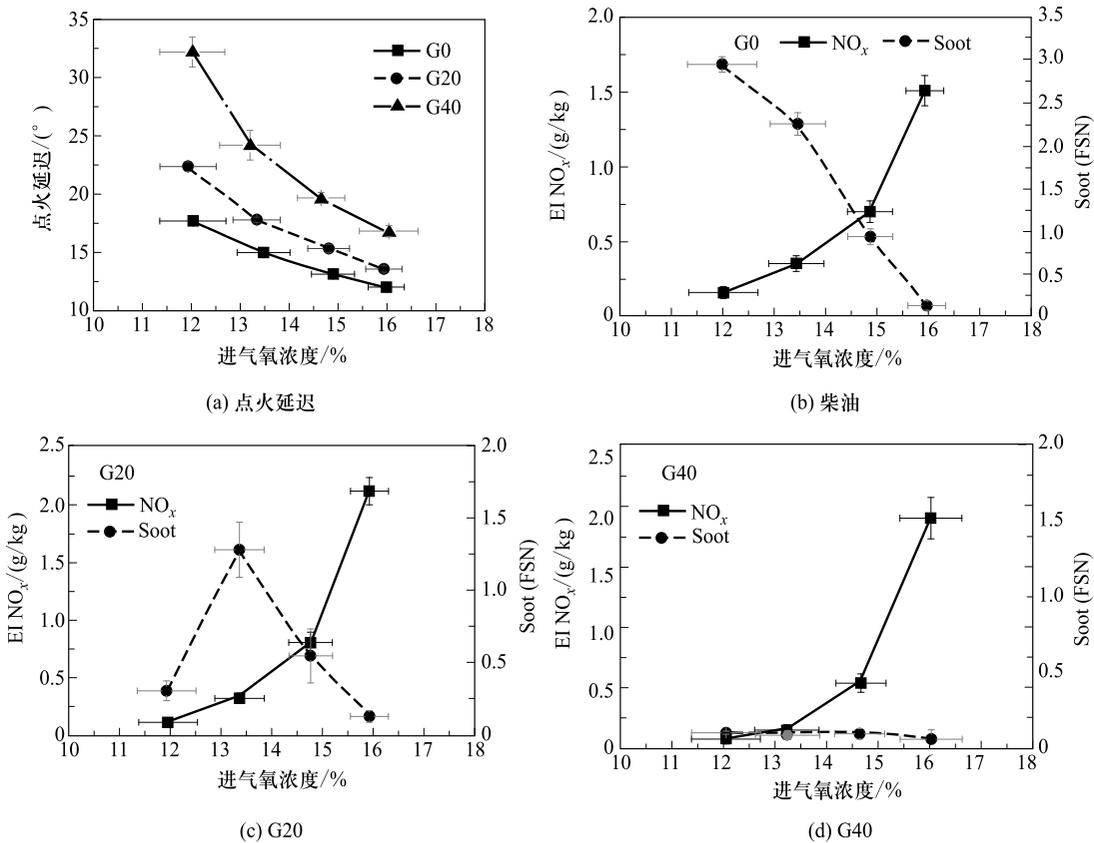


图 23 柴油与汽油掺混燃料的低温燃烧与排放特性<sup>[86]</sup>

上海交通大学朱浩月进一步基于燃料设计思想,将生物柴油和乙醇等含氧燃料应用到柴油机低温燃烧控制,研究发现燃料含氧量对低温燃烧排放控制有重要影响,如图 24 所示<sup>[88]</sup>。随着 EGR 率的提高(即进气氧浓度的降低),缸内局部燃烧温度降低,三种不同含氧量燃料的  $\text{NO}_x$  排放均呈现出逐渐降低的趋势,而三者的碳烟排放却有着明显的差异。随着 EGR 率的提高,0% 和 7% 含氧燃料的碳烟排放先升高后降低,7% 含氧燃料的碳烟排放峰值远低于 0% 含氧燃料。当燃料含氧量提高到 15% 后,碳烟排放始终保持在了很低的水平,消除了  $\text{NO}_x$  排放和碳烟排放间的此消彼长关系。研究中使用生物柴油-乙醇混合燃料在中等 EGR 率下实现了碳烟排放和  $\text{NO}_x$  排放的同时降低,将预混合低温燃烧模式的负荷上限拓展到了 0.82 MPa IMEP,且保持了碳烟排放低于 0.5 FSN,  $\text{NO}_x$  低于 1 g/kg 燃油。本研究还发现提高燃料含氧量不仅可以消除了碳烟排放与  $\text{NO}_x$  排放之间的此消彼长关系,还可以消除碳烟排放与燃烧效率之间的此消

彼长关系。

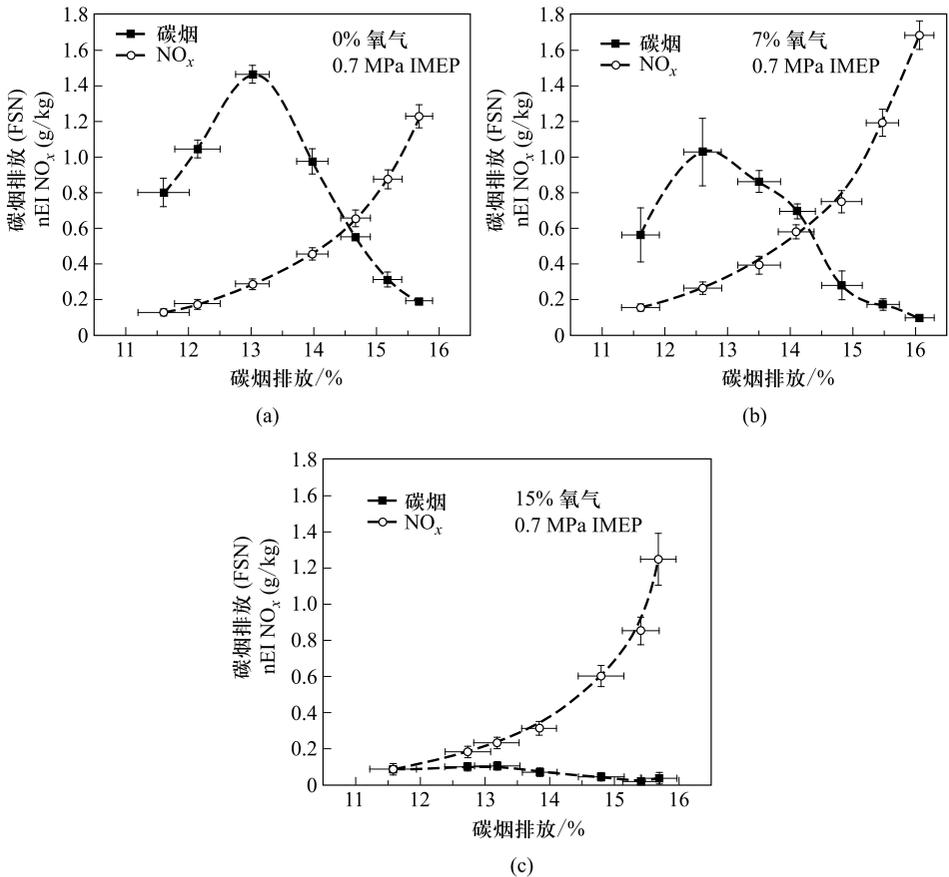


图 24 不同含氧量燃料的碳烟和  $\text{NO}_x$  排放<sup>[88]</sup>

基于燃料特性的燃烧技术近年来越来越得到内燃机学界的关注与重视,研究表明燃料设计技术显示了对发动机燃料雾化、油气混合、着火、燃烧相位与放热控制的巨大潜力,同时由于燃料喷射具有对发动机每一循环瞬态控制能力,为内燃机的高效清洁燃烧和未来发动机燃料多样化开辟了一条新的途径。

## 五、政策建议

1) 高度重视汽柴油油品质量对汽车节能减排的作用,油品标准必须与汽车排放法规同步。积极推进柴油轿车发展,发挥柴油动力高效节能作用。

2) 在我国石油对外依存度日益增加的现实下,建议政府高度重视石油替代燃料对于保证我国能源安全的重要作用,应从政策、法律法规与税收的方面进行宏观引导和调控,推进石油替代燃料与汽车的发展。

3) 尽快编制促进代用燃料汽车发展的政策和规划,我国汽车替代燃料应根

据各地能源资源特点,因地制宜,多元发展,大力促进碳中性燃料技术研发,积极发展与推广技术较成熟、减排效果显著的代用燃料,如天然气、废煎炸油制生物柴油、醇醚燃料等。

4) 高度重视燃料设计和新一代内燃机燃烧理论的发展,大力促进内燃机节能减排技术的研发与应用。

(感谢清华大学、天津大学、西安交通大学、吉林大学、同济大学等单位为本文提供了相关资料。)

## 参考文献

- [1] IEA. IEA key world energy statistics 2012 [EB/OL]. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/kwes.pdf>.
- [2] IEA. IEA World energy outlook 2013 [R]. Paris, France, 2013.
- [3] BP Statistical review of world energy 2013 [EB/OL]. [http://www.bp.com/content/dam/bp/excel/Statistical-Review/statistical\\_review-of-world-energy-2013-workbook.xlsx](http://www.bp.com/content/dam/bp/excel/Statistical-Review/statistical_review-of-world-energy-2013-workbook.xlsx).
- [4] 中华人民共和国环境保护部. 环境保护部 2011 年中国环境状况公报 [R]. 2012.
- [5] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2012 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [6] 中国汽车工业协会, 中国汽车工业协会统计信息网: <http://www.auto-stats.org.cn/>
- [7] Toyota Motor Corporation. Toyota's "Eco-Car" Strategy [R]. 2010.
- [8] Automobile Manufacturers Association (ACEA). The worldwide fuel charter committee European [EB/OL]. [http://www.jamabj.cn/eco/wwfc/pdf/WWFC\\_Sep2006\\_Brochure\\_Final.pdf](http://www.jamabj.cn/eco/wwfc/pdf/WWFC_Sep2006_Brochure_Final.pdf).
- [9] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 天然气发展“十二五”规划 [R]. 2012.
- [10] 中华人民共和国国土资源部. 全国页岩气资源潜力调查评价及有利区优选成果 [R]. 2012.
- [11] 中华人民共和国国土资源部. 页岩气发展规划(2011—2015 年) [R]. 2012.
- [12] 彭华锋. 加气站经营模式猜想 [J]. 中国石油石化, 2013(17): 46-47.
- [13] de Boer K, Moheimani N R, Borowitzka M A, et al. Extraction and conversion pathways for microalgae to biodiesel; a review focused on energy consumption [J]. Journal of Applied Phycology, 2012, 24(6): 1681-1698.
- [14] 高春芳, 余世实, 吴庆余. 微藻生物柴油的发展 [J]. 生物学通报, 2011(6): 1-5.
- [15] IEA. International energy statistics-total biofuels production [EB/OL]. [2013-06-26]. <http://www.iea.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=79&pid=81&aid=1&cid=regions&syid=2000&eyid=2011&unit=TBPD>.
- [16] 李霞. 东北亚区域能源安全与能源合作研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2012.
- [17] 中华人民共和国国家能源局. 国家能源局生物质能发展“十二五”规划 [R]. 2012.

- [18] IEA. International energy statistics-biodiesel production [EB/OL]. [2013 - 03 - 07]. <http://www.iea.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=79&pid=81&aid=1&cid=regions&syid=2000&eyid=2011&unit=TBPD>.
- [19] 任连海. 我国餐厨废油的产生现状、危害及资源化技术[J]. 北京工商大学学报(自然科学版), 2011(06): 11 - 14.
- [20] 许英武, 谢晓敏, 黄震, 等. 废煎炸油制生物柴油全生命周期分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 99 - 103.
- [21] Department of Energy. DOE National algal biofuels technology roadmap[R]. 2010.
- [22] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料 2010[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [23] 童牧, 周志刚. 新一代生物柴油原料——微藻[J]. 农业工程技术(新能源产业), 2009(5): 19 - 24.
- [24] 谷克仁, 于小宝. 玉米含油量及脂肪酸的分析[J]. 粮油食品科技, 2012(4): 21 - 22.
- [25] 王焕梅, 高永利. 我国蓖麻油生产现状及发展[J]. 润滑油, 1999(5): 12 - 16.
- [26] 欧训民. 中国道路交通部门能源消费和 GHG 排放全生命周期分析[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [27] Akminul Islam A K M, Primandari S R P, Yaakob Z, et al. The properties of jatropha curcas seed oil from seven different countries[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2013, 35(18): 1698 - 1703.
- [28] Tingting Z, Xiaomin X, Zhen H. The regional potential of microalgal biodiesel production in the open raceway ponds of China[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013.
- [29] 何学良, 李疏松. 内燃机燃烧学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [30] Zhu L, Zhang W G, Liu W, et al. Experimental study on particulate and NO<sub>x</sub> emissions of a diesel engine fueled with ultra low sulfur diesel, RME-diesel blends and PME-diesel blends[J]. Science of The Total Environment, 2010, 408(5): 1050 - 1058.
- [31] Zhu L, Zhang W G, Huang Z. Influence of biodiesel-methanol blends on the emissions in the low-temperature combustion of a direct-injection diesel engine using high levels of exhaust gas recirculation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2011, 225(8): 1044 - 1054.
- [32] 楼狄明, 沈航泉, 胡志远, 等. 基于不同原料生物柴油混合燃料的发动机性能研究[J]. 内燃机工程, 2011(1): 29 - 33.
- [33] 胡宗杰, 周映, 邓俊, 等. 生物柴油混合燃料对橡胶溶胀性和机械性能的影响[J]. 内燃机学报, 2010(4): 357 - 361.
- [34] 袁银南, 张恬, 梅德清, 等. 直喷式柴油机燃用生物柴油的燃烧特性研究[J]. 内燃机学报, 2007(1): 43 - 46.
- [35] He C, Ge Y, Tan J, et al. Characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons emissions of

diesel engine fueled with biodiesel and diesel[J]. Fuel, 2010, 89(8): 2040 – 2046.

- [36] 朱磊. 生物柴油发动机燃烧控制与排放特性试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [37] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展和改革委员会可再生能源中长期发展规划[R]. 2007.
- [38] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料 2008 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2009.
- [39] Volvo Interview: The technology exists-we need the fuels [EB/OL]. [http://www.chemrec.se/Interview\\_with\\_Volvo\\_about\\_biofuels.aspx](http://www.chemrec.se/Interview_with_Volvo_about_biofuels.aspx).
- [40] Olah G A, Goepfert A, Prakash G K S. 跨越油气时代: 甲醇经济[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [41] Olah G A, Goepfert A, Prakash G K S. Chemical recycling of carbon dioxide to methanol and dimethyl ether: from greenhouse gas to renewable, environmentally carbon neutral fuels and synthetic hydrocarbons[J]. The Journal of organic chemistry, 2008, 74(2): 487 – 498.
- [42] 冯国琳, 焦纬洲, 高璟, 等. 甲醇 – 柴油乳化燃料的研究进展[J]. 精细与专用化学品, 2012, 20(4): 50 – 53.
- [43] 姚春德, 段峰, 李云强, 等. 柴油/甲醇组合燃烧发动机的燃烧特性与排放[J]. 燃烧科学与技术, 2005, 11(3): 214 – 217.
- [44] 中华人民共和国工业和信息化部. 新能源汽车生产企业及产品准入管理规则[S]. 2009
- [45] Sorenson S C, Mikkelsen S E. Performance and emissions of a 0.273 liter direct injection diesel engine fuelled with neat dimethyl ether[J]. Evaluation, 1995, 2002: 10 – 21.
- [46] Fleisch T, McCarthy C, Basu A, et al. A new clean diesel technology: demonstration of ULEV emissions on a Navistar diesel engine fueled with dimethyl ether [J]. Training, 1995, 2013: 11 – 04.
- [47] Ofner H, Gill D W, Krotscheck C. Dimethyl ether as fuel for CI engines: A new technology and its environmental potential[J]. Significance, 1998, 1999: 05 – 01.
- [48] Gill D, Ofner H, Schwarz D, et al. The performance of a heavy duty diesel engine with a production feasible DME injection system[J]. SAE Technical Paper, 2001: 01 – 3629.
- [49] Goto S, Oguma M, Suzuki S. Research and development of a medium duty DME truck [J]. Development, 2005, 2014: 10 – 21.
- [50] Teng H, Regner G. Fuel injection strategy for reducing NO<sub>x</sub> emissions from heavy-duty diesel engines fueled with DME[J]. Training, 2006, 2014: 02 – 24.
- [51] 黄震, 乔信起, 童澄教. 低污染二甲醚燃料发动机燃烧方式研究[J]. 上海汽车, 1998(1): 2.
- [52] 张光德, 黄震, 乔信起, 等. 二甲醚燃料喷射过程的试验研究[J]. 内燃机学报,

2002, 20(5): 0395 - 0398.

- [53] 张光德,黄震,乔信起,等. 二甲醚发动机的燃烧与排放研究[J]. 汽车工程, 2003, 25(2): 124 - 127.
- [54] 黄震,乔信起,张武高,等. 二甲醚发动机与汽车研究[J]. 内燃机学报,2008, 26(S1): 115 - 125.
- [55] 王贺武,周龙保. 直喷式柴油机燃用二甲醚排放特性的研究[J]. 内燃机学报, 2000, 18(1): 7 - 10.
- [56] 董红义,周龙保,汪映,等. CA498 车用直喷式柴油机燃用甲醚二采用 EGR 降低  $\text{NO}_x$  排放的研究[J]. 内燃机工程, 2005, 26(2): 44 - 46.
- [57] 尧命发,许斯都. 直喷式柴油机燃用二甲基醚(DME)试验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2002, 8(3): 252 - 258.
- [58] 李君,朱昌吉,马光兴,等. 柴油机燃用二甲醚排放特性的研究[J]. 燃烧科学与技术, 2003, 9(3): 256 - 260.
- [59] 张煜盛,莫春兰,张辉亚,等. 二甲醚发动机燃烧特性的试验与数值模拟研究[J]. 内燃机学报, 2005(4): 336 - 342.
- [60] 谢克昌,李忠. 煤基燃料的制备与应用[J]. 化工学报, 2004(9): 1393 - 1399.
- [61] 胡云剑,金环年,李克健,等. 煤直接液化柴油的性质及发动机燃烧和排放[J]. 石油学报(石油加工), 2010(增刊): 246 - 252.
- [62] 王真,石玉林,乔信起,等. 共轨柴油机燃用煤直接液化柴油的燃烧与排放特性[J]. 内燃机学报, 2012(3): 201 - 206.
- [63] 王真. 煤直接液化柴油在发动机上的燃烧研究[D]. 上海:上海交通大学, 2011.
- [64] Zhuang J, Qiao X, Wang Z. Comparison of the combustion and exhaust emissions of a compression ignition engine fuelled with diesel from direct coal liquefaction and diesel blends[C]// Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D: Journal of Automobile Engineering. 2013, 227: 986 - 996.
- [65] 胡志远,程亮,谭丕强,等. 柴油轿车燃用煤基 F - T 合成油的排放特性[J]. 环境科学, 2012(11): 3733 - 3738.
- [66] 胡淮庆,张欣. 煤基合成柴油在汽车发动机上的应用[J]. 煤炭学报,2008(5): 588 - 591.
- [67] Szybist J P, Bunting B G. Cetane number and engine speed effects on diesel HCCI performance and emissions[J]. SAE transactions, 2005, 114(4): 1334 - 1346.
- [68] Kitano K, Nishiumi R, Tsukasaki Y, et al. Effects of fuel properties on premixed charge compression ignition combustion in a direct injection diesel engine[J]. Analysis, 2003, 1: 1825.
- [69] Lu X C, Chen W, Huang Z. A fundamental study on the control of the HCCI combustion and emissions by fuel design concept combined with controllable EGR. Part 1. The basic characteristics of HCCI combustion[J]. Fuel, 2005, 84(9): 1074 - 1083.

- [70] Lu XC, Chen W, Huang Z. A fundamental study on the control of the HCCI combustion and emissions by fuel design concept combined with controllable EGR. Part 2. Effect of operating conditions and EGR on HCCI combustion [J]. Fuel, 2005, 84(9): 1084 - 1092.
- [71] Yao M, Zhang B, Zheng Z, et al. Experimental study on the effects of EGR and octane number of PRF fuel on combustion and emission characteristics of HCCI engines [J]. Diesel Engine, 2005, 2013: 04 - 08.
- [72] Shen Y, Shuai S, Wang J, et al. Effects of gasoline fuel properties on engine performance [J]. System, 2008: 7 - 8.
- [73] Huang Z, Shao Y M, Shiga S, et al. The orifice flow pattern, pressure characteristics, and their effects on the atomization of fuel containing dissolved gas [J]. Journal of Atomization and Sprays, 1994, 4(2): 123 - 133.
- [74] Huang Z, Shao Y M, Shiga S, et al. Atomization behavior of fuel containing dissolved-gas [J]. Journal of Atomization and Sprays, 1994, 4(3): 253 - 262.
- [75] Lu X C, Ji L B, Zu L L, et al. Experimental study and chemical analysis of n-heptane homogeneous charge compression ignition combustion with port injection of reaction inhibitors [J]. Combustion and Flame, 2007, 149(3): 261 - 270.
- [76] Lu X C, Ji L B, Chen W, et al. Effect of additive on the heat release rate and emissions of HCCI combustion engines fueled with RON90 Fuels [J]. International Journal of Automotive Technology, 2007, 8(1): 1 - 7.
- [77] Hou Y C, Huang Z, Lu X C, et al. Fuel design real-time to control HCCI combustion [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(21): 2673 - 2680.
- [78] 黄震, 李德刚, 乔信起, 等. DME/LPG 燃料比例实时优化的 HCCI 燃烧控制新方法 [J]. 内燃机学报, 2006, 24(4): 289 - 294.
- [79] 李忠照. 基于 OKP 系统的双燃料均质压燃发动机试验研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [80] 马骏骏. 基于燃料设计与管理的 HCCI/DI 分层复合燃烧的试验研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [81] Splitter D, Kokjohn S, Rein K, et al. An optical investigation of ignition processes in fuel reactivity controlled PCCI combustion [J]. SAE International Journal of Engines, 2010, 3(1): 142 - 162.
- [82] 杨洪强, 帅石金, 王志, 等. 共轨压力对汽油多段预混压燃 (MPCI) 性能的影响 [C]. 中国工程热物理学会, 2012.
- [83] 王建昕, 蒋恒飞, 王燕军, 等. 汽油均质混合气柴油引燃 (HCII) 燃烧特性的研究 [J]. 内燃机学报, 2004, 22: 391 - 396.
- [84] 许汉君. 柴油/甲醇二元燃料燃烧反应动力学研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [85] Opat R, Ra Y, Gonzalez M A, et al. Investigation of mixing and temperature effects on

HC/CO emissions for highly dilute low temperature combustion in a light duty diesel engine [J]. Combustion, 2007, 2012: 12 - 04.

- [86] 韩东. 基于燃料设计的压燃式发动机低温预混合燃烧模式研究[D]. 上海:上海交通大学, 2012.
- [87] Feng H Q, Zheng Z Q, Yao M F, et al. Effects of exhaust gas recirculation on low temperature combustion using wide distillation range diesel[J]. Energy, 2013, 51: 291 - 296.
- [88] Zhu H Y, Bohac S V, Nakashima K, et al. Effect of fuel oxygen on the trade-offs between soot, NO<sub>x</sub> and combustion efficiency in premixed low-temperature diesel engine combustion [J]. Fuel, 2013, 112: 459 - 465.



**黄震** 1982年毕业于上海交通大学动力机械工程系,1988年获工学博士学位。现任上海交通大学副校长,教授、博士生导师、动力机械与工程教育部重点实验室主任、能源研究院院长。

多年从事发动机燃烧与排放控制、石油替代与新能源汽车及大气污染控制研究,先后主持和完成国家973重大基础研究课题、国家自然科学基金重点与面上项目、国家863项目、国家科技攻关项目和上海市重大、重点课题项目多项,获国家自然科学基金

二等奖1项、省部级科技奖励一等奖3项、二等奖2项,1998年获国务院颁发的国家级专家政府特殊津贴,1999年被聘为教育部第二批“长江学者奖励计划”特聘教授,2000年获国家杰出青年科学基金,入选国家百千万人才计划第一、二层次。

主要学术兼职有中国工程热物理学会副理事长,上海市内燃机学会理事长、上海市能源研究会理事长,国际二甲醚学会副主席,亚洲液体雾化化学会副主席、《能源前沿》国际期刊执行主编等。

# 内燃机的绿色制造发展战略思考

佟德辉 等

潍柴动力股份有限公司,山东大学

## 一、背景与需求

### (一) 我国制造业面临巨大资源、环境瓶颈问题

随着人类生活水平日益提高,满足其需求的产品也出现批量化、多样化,制造业越来越发达。但是,制造业在将资源转化为产品的过程中,以及在产品的使用和处理过程中,不仅消耗了大量的能源,而且排放了大量的废弃物。近年来,一些国家制造业的能源消耗数据如表 1 所示,从这些数据可以看出制造业的能耗比例高达全球能耗总量的 30% ~ 50%。

表 1 全世界及部分国家制造业能耗数据对比

国家(年份)	能耗总量/PJ	制造业能耗	
		总量/PJ	比例/%
韩国(2007)	7195.6	3936.7	54.7
美国(2006)	104 999.2	22 204.7	21.1
加拿大(2005)	8496.1	2526.2	29.7
日本(2003)	22 368.4	6770.0	30.3
英国(2006)	7100.8	1364.9	19.2
挪威(2007)	814.0	290.3	35.7
新西兰(2006)	499.2	149.2	29.9
世界总量(2006)	498 408.5	184 634.8	37.0

2005年,全国工业废气排放 268 988 亿  $m^3$ ,工业粉尘排放 911.2 万 t。2010年,污水排放量达到 652.1 亿 t,工业固体废物年产生量达 8.2 亿 t,综合利用率

约 46%。由此引发了严重的环境问题：

- 1) 环境中总悬浮颗粒物浓度普遍超标,雾霾天气严重;
- 2) 二氧化硫污染保持在较高水平;
- 3) 氮氧化物污染呈加重趋势;
- 4) 江河湖泊普遍遭受污染,全国 75% 的湖泊出现了不同程度的富营养化;
- 5) 90% 的城市水域污染严重。

目前我国所利用的能源主要是煤、石油、天然气等不可再生的一次性能源。而我国资源相对匮乏问题依然严重,许多重要的矿产资源人均占有量低于世界平均水平,如图 1 所示。再加上能源与矿产资源的巨大消耗,导致我国的矿产资源非常紧张,石油、天然气、铁矿石等仍需进口。

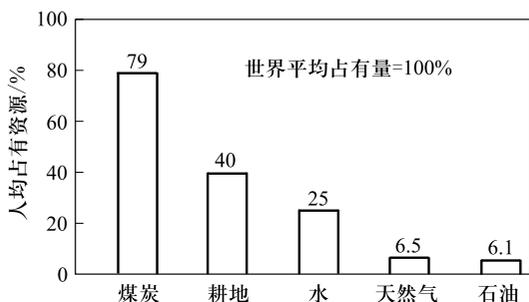


图 1 我国矿产资源人均占有量与世界平均占有量的关系

更为严重的是,目前我国能源利用率低,其中煤利用率不到 10%。据报道,我国 GDP 的 50% 来源于高能耗。我国每创造 1 美元产值所消耗的能源是美国的 4.3 倍,德国和法国的 7.7 倍,日本的 11.5 倍。我国传统的高投入、高消耗、高成本、低产出的经济增长方式亟待改变。

## (二) 内燃机制造与再制造过程及其能耗排放问题

作为典型的机械产品,内燃机制造过程包括零部件的铸造、锻压,机械加工,装配,检测等工序。其中,铸造和锻造属于高能耗工序。内燃机报废后,缸体、缸盖、曲轴等关键零部件剩余寿命较大,对其进行再制造能够在节约资源、能源的同时给企业带来非常大的经济效益和社会效益。

### 1. 内燃机制造过程的能耗

铸造是一个高耗能的生产过程。在我国铸造生产中,能源和材料的投入约占其产值的 55% ~ 70%。其耗能占机械工业总能耗的 23% ~ 62%,能源利用率为 15% ~ 25%。我国每吨铸件所需能源是工业发达国家的 2 ~ 3 倍。我国每生产 1 t 合格铸铁件能耗 500 ~ 700 kg 标煤,占生产成本的 15%,而日本每吨铸铁

件能耗仅占生产成本 4.3%。

在内燃机行业,日本锻造的平均能耗为每吨锻件 520 kg 标煤,而我国为每吨锻件 830 kg 标煤。

在制造业能源消耗总量中,机械加工过程中消耗的能源占了相当大的比例。在机械制造企业中机床设备费用约占总成本的 68%,机床运行电力能耗成本占年运营成本的 21%,如潍柴动力股份有限公司(简称潍柴)每年的机床耗电量可达 4000 kW·h。

内燃机出厂前需要进行整机测试,目前仍以热试为主,单以潍柴为例,每年用于内燃机热试消耗的柴油可达 1.5 万 t。

## 2. 内燃机制造过程的排放

国内铸造行业废砂排放为 1300 kg/t,废气排放为 1000 ~ 2000 m<sup>3</sup>/t,是发达国家的 3 ~ 5 倍。国内内燃机行业技术水平最高的潍柴动力股份有限公司,每年消耗切削液达 720 t,铸造废砂排放为 800 kg/t。

综上所述,可见国内内燃机制造过程的能耗排放水平较低,节能减排刻不容缓。

## 二、技术现状与问题

从内燃机产品全生命周期考虑,当前内燃机绿色制造的工作应重点关注轻量化技术、热加工技术、机械加工技术、整机测试技术、再制造关键技术,以实现制造过程的节能减排。

### (一) 轻量化技术

#### 1. 材料优化

##### (1) 现状与问题

内燃机低油耗、高功率密度的发展趋势对内燃机材料提出了全新的要求。高强度、轻质、耐磨、耐热的新型材料获得广泛的关注和应用。以内燃机主要零部件缸体缸盖为例,其材料的选用要求高强度和优良的热疲劳性能。铝合金、镁合金和蠕墨铸铁已经成为或正在成为下一代内燃机缸体缸盖新型材料。

铝合金是研究最早也是使用最成熟的缸体缸盖轻量化材料。铝合金具有优良的热疲劳性能和相对较低的密度(仅相当于灰铸铁的 1/3),但是其强度等方面存在不足。因此,铝合金更多的是作为汽油机或者中小型柴油机的缸体缸盖材料。由于铝合金之间存在很大的摩擦系数,铝合金活塞和铝合金缸体之间不能直接接触,通常需要镶嵌铸铁缸套或者使用等离子喷涂对气缸表面进行改性,以避免铝合金直接接触导致的摩擦。但这些工艺措施进一步提高了制造成本。

虽然铝合金相对较低的抗蠕变性能限制了其在重型柴油机上的应用,但是对于汽油机和中小型柴油机,铝合金依旧是很具有竞争力的缸体缸盖轻量化材料。目前乘用车市场上,铝合金缸体已经成为中高级车用发动机的主流。如何降低铸造铝合金本身的生产成本,提高其服役性能是这一发展方向的关键。铝合金零件在生产过程中容易吸气氧化,由此造成的以气孔(针孔)、缩松、氧化夹渣、热裂为代表的铸造缺陷是影响铸造零部件成品率和最终产品服役性能的重要因素。目前实际生产中为了避免这些铸造缺陷的产生,在除气、除渣等铸造工序中投入了大量的精力。这一定程度上增加了生产能耗,提高了生产成本。针对性的解决方法是:开发新的铝合金铸造工艺、熔体处理技术,进一步优化合金成分。

镁合金是近期研究最密集也是最有潜力的缸体缸盖轻量化材料。镁合金的密度只有铝合金的 $2/3$ ,而且其具有良好的减震性能,因此是十分合适的缸体缸盖替代材料。但是由于受到诸多问题的困扰,诸如抗蠕变性能差等,镁合金的应用更多地停留在概念阶段,或者以镁铝复合缸体(缸套及缸体的内芯部分为铝合金,外壁与基座为镁合金)的形式应用。近些年,在耐热镁合金材料上的进步使得使用镁合金制造发动机缸体成为可能。但是镁合金缸体的大规模商业应用还需要对材料性能做进一步测试,主要包括:静态机械性能、高周与低周疲劳性能、抗蠕变性能、耐腐蚀性能等。由于镁合金具有易燃、易氧化等问题,这对缸体缸盖铸造生产工艺提出了新挑战。例如,现在广泛使用的镁合金阻燃剂对环境造成诸多不利影响;镁合金遇油燃烧,遇水爆炸;大块的镁合金失控燃烧,需要用特殊灭火方法等。因此开发适用于镁合金大规模铸造生产的节能环保的工序具有紧迫性。

蠕墨铸铁是最有竞争力的中重型柴油机缸体缸盖材料。蠕墨铸铁在高温、高压及润滑不良的恶劣条件下具有良好的强度、导热性、耐磨性、耐蚀性和耐热疲劳性能,很好地满足了下一代中重型柴油发动机缸体缸盖等对材质的要求。通过优化结构设计,降低铸件尺寸可以使得内燃机缸体缸盖的重量显著降低,同时显著提高其服役性能。因此其在国际上已经成为现代柴油机缸体缸盖的首选材料,并且呈现出应用不断扩大的态势。奥迪 4.2 L V8 TDI 发动机使用蠕墨铸铁作为缸体和缸盖材料,其重量为 255 kg,比质量为 0.94 kW/kg;而相近排量的奔驰 4.0 L V8 CDI 发动机使用铝合金作为缸体缸盖材料,其重量为 259 kg,比质量为 0.88 kW/kg。由此可见,使用蠕墨铸铁在结构优化的基础上同样可以实现轻量化。蠕墨铸铁应用于内燃机缸体和缸盖时,球化率规定在 0% ~ 20% 的范围内,否则容易形成缩松、缩孔等铸造缺陷。但是目前这样狭窄的球化率范围,对我国的铸造业提出了较大的挑战。由于蠕墨铸铁生产工艺的复杂性,目前蠕墨铸铁缸体缸盖主要在欧洲和美国获得应用。我国内燃机生产企业最近也成功

试制了蠕墨铸铁内燃机缸体。但是在大规模应用之前,依然需要解决很多问题。蠕墨铸铁生产过程中对铁液纯净度的要求更为严格,因此需要在炉料的选择和熔炼工艺上做出适应性的调整;蠕墨铸铁稳定的蠕化工艺和相对应的铸造工艺都还需要进一步研究。

## (2) 建议

- 1) 完善铝合金、镁合金和蠕墨铸铁等高性能材料的制造技术。
- 2) 在结构优化基础上提升铸造工艺水平。

## 2. 结构优化

### (1) 现状与问题

内燃机的轻量化对于整车减重起着举足轻重的作用。在内燃机及车辆设计、制造和使用过程中,轻量化设计所带来的成本的降低、能源的节约和使用的便捷都是不言而喻的。立足于长期的可持续性发展,实现产品轻量化是衡量汽车工业技术成就的重要标志之一。目前内燃机轻量化的基本途径主要有两种,除了使用轻量化材料,便是结构优化。国外内燃机轻量化设计技术已经非常成熟,如丰田汽车。而国内设计开发相对依靠逆向工程和经验设计,开发出的产品往往较为笨重,产品结构优化潜力大。同时,用于发动机研发的自主 CAE 软件欠缺,CAE 应用相对较少。

## (2) 建议

- 1) 加强内燃机结构设计理论研究。
- 2) 加强发动机 CAE 技术体系建设。
- 3) 建立内燃机多学科协同设计平台。

## (二) 热加工技术

### 1. 内燃机热加工 CAD/CAE 分析与应用

#### (1) 现状与问题

内燃机的热加工工艺主要包括铸造和锻压。铸造是制造业的重要组成部分,也是内燃机零部件,如缸体、缸盖的主要生产方式。同时,由于铸造生产环节复杂,质量不易保证、废品率较高。铸件如果因质量问题导致报废而重复生产,会造成大量的资源和能源消耗。因此,提高铸件质量是节能减排的重要方式。研究表明,铸件的废品绝大多数是由于铸造工艺设计不合理造成的。虽然有铸造手册等一系列工具书作为参考,但是由于实际铸件的结构复杂性,其工艺设计往往需要烦琐的计算和大量的查表工作,使得铸造工艺设计效率和质量难以保证。计算机的应用为传统铸造业的改造提供了条件,以此发展起来的数值模拟及信息化技术是“十二五”铸造行业节能减排措施中“共性基础技术”之一。铸

造工艺计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助工程(CAE)技术的应用能够大幅度缩短产品开发周期,提高设计效率,提高产品质量。

CAD/CAE 已是铸造工艺设计的主要组成部分,在制造样机之前对各项指标进行模拟评估,可以达到不经实物试验即可进行优化设计。完整的服务于内燃机零部件的铸造工艺 CAD/CAE 分析平台,可以满足现代内燃机工业的发展需要,形成内燃机结构设计、材料设计、生产工艺参数、铸件缺陷、性能指标的全流程开发的并行工作。研究表明利用此技术可以将内燃机的开发周期缩短 40%, 试验次数的减少以及成品率、合格率的提高可节能约 30%。

高度集成的铸造工艺 CAD/CAE 及信息技术是国外大力发展和积极推行的“绿色-虚拟制造”技术。近年来,铸造工艺 CAD/CAE 及信息技术在我国已逐渐成熟并应用到内燃机产品设计过程中,主要用于对内燃机缸体、缸盖、曲轴箱等的铸造工艺参数实体设计,浇注系统、冒口的优化,缺陷区域、微观组织分布及力学性能的预测等方面。

但是,铸造工艺 CAD/CAE 的设计、模拟精度,部分功能限制以及计算效率低是限制其在内燃机设计和生产中广泛应用的主要瓶颈。铸造工艺 CAD 中的参数设计方法还处于半经验阶段,需要设计人员的主观判断确定参数取值。规范化的使用制度和专业化的人才队伍不够健全,难以与产品设计 CAD/CAE 并行工作。而铸造工艺 CAE 因数值计算中边界条件和理论模型的理想处理,使模拟预测结果与实际情况之间存在较大误差,同时形状、工艺复杂的内燃机铸件需要大规模计算(亿次)和多物理场的耦合,计算效率低,完成一次完整的模拟计算需要普通计算机工作站 100 h 左右(依据铸件大小改变)的计算,显然这种计算效率难以满足内燃机高效率设计的要求。微观组织形貌的精确模拟计算还停留在理论研究阶段,只能进行二维或者微米区域尺度的预测,这就使得内燃机微观组织形貌的定量预测未能得到应用。此外,内燃机设计和使用要求的提高需要高强度、低密度、高耐磨性的新材料的开发和设计。利用分子动力学模拟可以有效开展铸造合金微观层次的研究和设计,这包括:可以研究合金相在微量元素存在时的稳定性及其演化规律、亚稳相的结构及性能特点、合金相对冷却速度的敏感性等显著影响合金性能的材料微观机制。但是要进行相关的研究需要至少 100 万个原子的体系,需要依靠国家超级计算中心的计算能力。这种现状的存在使得分子动力学模拟在内燃机设计和生产过程中的应用受到了极大的限制。

虽然铸造工艺 CAD/CAE 技术已经初步达到服务于内燃机铸件设计和生产的目的,但是实际生产的因素是随机且复杂的,难以用数学公式直接描述,只有通过具有丰富经验的铸造工作者或专家的分析、推理才能确定。以人工智能型专家系统为代表的信息技术正是具有这一特点,使之能模仿铸造专家的思维方

式,对各种复杂情况进行诊断,在不确定的信息基础上得出正确的结论。但是专家系统需要海量数据库(如生产过程的材质、工艺参数、缺陷分布)的输入,仅靠某一个或几个厂家的生产数据库无法满足专家系统准确分析的需要。

综上所述,国内内燃机企业在热加工 CAD/CAE 方面,缺乏专用热加工 CAD 软件,没有规范化的使用制度,专业化的人才队伍不够健全,难以与产品设计 CAD/CAE 并行工作,材料的组织和性能预测研究相对薄弱。

## (2) 建议

- 1) 开发适合于内燃机热加工的专用 CAD 软件。
- 2) 完善工艺设计规范,与产品设计 CAD/CAE 并行工作。
- 3) 加强材料组织及性能预测研究。

## 2. 短流程铸造工艺

### (1) 现状与问题

铸造短流程最初是在钢材生产中形成的,其典型形式是电炉冶炼后的钢水直接进入连铸—连轧工序加工成钢的各种型材。这种典型的电炉—连铸—连轧短流程技术已经趋于成熟,对节能降耗起到了重要的作用,且提高了生产效率。

铸造短流程工艺是高炉冶炼出来的金属液经过相应的处理后,进行浇铸获取铸件,即金属液的流程为高炉—感应炉—浇铸铸件。短流程铸造工艺不但提高了生产效率,而且由于减少了凝固—重熔过程,极大地减少了熔化过程的能耗。例如,对于铸铁生产来说,短流程铸造工艺一般情况下升(保)温所需要的能耗为  $100 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{t}$ ,而一般工艺在电炉熔炼时,升温至  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$  并保温至浇注时耗电量为  $800 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{t}$ 。冲天炉的能耗折合成用电量与电炉基本相同,由此可见短流程铸造的节能降耗效果非常显著。正因为如此,短流程铸造成为国内外积极推进的绿色铸造方法。

我国的短流程铸造工艺已经得到了广泛的应用,覆盖了铝合金、铜合金、铸铁合金等。

铝合金的短流程铸造工艺已经成功地应用于活塞铸造生产中。例如,山东滨州渤海活塞股份有限公司传统铸造工艺的能耗是  $1500 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{t}$ ,采用短流程铸造工艺后能耗小于  $400 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{t}$ ,同时材料消耗也有较大的降低,取得了良好的经济效益。短流程铸造工艺也可以直接推广至其他铝铸件,如油泵油嘴的铸造生产中。

铸铁合金的短流程铸造工艺已经在灰铸铁、蠕墨铸铁和球墨铸铁等铸件的生产中得到了应用。铸件品种有灰铸铁的机床、箱体、内燃机机体;球墨铸铁的离心铸管、一般球铁件和风电用铸件等;蠕墨铸铁的耐热铸件、高铁铸件等。

在我国,铸铁合金的短流程铸造工艺仍然存在着一一定的争议,短流程铸造工

艺虽然能够节能降耗,但与现在常规的铸造工艺相比,高炉铁水有害元素、夹杂偏多,生产的铸件石墨形态粗大,或容易形成过冷石墨等问题,铸件品质不高。这些争议的存在与我国目前短流程工艺系统的现状以及对短流程铸造工艺全面的理论研究的欠缺是密不可分的。

2012年2月13日,工业和信息化部的2012年第6号公告,公布了认定的145家铸造用生铁企业,共计193座高炉,其容积在 $102 \sim 460 \text{ m}^3$ 。按照《铸造用生铁企业认定规范条件》规定,一般情况高炉容积须大于 $200 \text{ m}^3$ 。这样的规定保障了无论是生产效率、产品品质,还是能源利用率等都能在较高的水平上。在这193座高炉中,其中容积小于 $200 \text{ m}^3$ 的76座小高炉由于配套了短流程铸造工艺得以保留,也就是说我国所有的容积小于 $200 \text{ m}^3$ 小高炉全部用于了短流程铸造工艺。

目前国内的短流程铸造工艺,在电炉熔炼及其以后的工艺中相当一部分还是沿用常规工艺的技术和装备,所提供的金属液品质远远不能满足高品质内燃机缸体、缸盖、曲轴等的要求。

## (2) 建议

重点研究突破精炼技术、成分调控、液态处理技术。

铁水的净化技术。在保证高炉铁水质量稳定的基础上,深入研究适合于高炉铁水的净化技术,对高炉铁水进行精炼,去除杂质,获得适合内燃机铸件的合格铁水。

铁水成分精确调控技术。要开发适合高炉铁水成分精确调控技术,对高炉铁水进入电炉进行熔配时,进行成分的实时监控和准确调控。

铁水的液态处理技术。研究如孕育剂、孕育方式、蠕化剂、蠕化方式、球化剂和球化方式等技术。

## 3. 铸造过程余热利用

### (1) 现状与问题

目前我国90%的铸铁是用冲天炉熔炼生产的,这种状况仍将保持相当长的时间。铸造行业的余热利用主要集中在冲天炉上。冲天炉熔炼时排出大量的烟气,烟气中含有可燃性碳粒和可燃性气体,既造成环境污染,又浪费大量的热能。冲天炉熔炼时除38%~43%的有效热量用于熔炼外,烟气带走的热量为7%~16%,不完全燃烧热量(可燃性气体)为20%~25%,固体不完全燃烧热量为3%~5%。由此可见,冲天炉熔炼的余热利用潜力很大。目前我国冲天炉的余热利用绝大多数是利用密筋炉胆预热鼓风,热风温度为 $200^\circ\text{C}$ 左右,余热利用率低。近些年来,有部分企业使用长炉龄连续作业热风冲天炉,充分利用了废气的余热和可燃烧碳粒及可燃气体再燃烧的热量,使热风温度达 $600 \sim 800^\circ\text{C}$ ,冲天炉

铁水温度达  $1500 \sim 1550^{\circ}\text{C}$ , 熔化效率提高 45%。既达到节能、提高铁水质量的目的, 又实现了环保的要求。

同时, 电炉冷却水、高温铸件余热利用也是铸造行业余热利用热门技术。

## (2) 建议

### 1) 新技术冲天炉及炉气余热利用。

加快新型冲天炉的设计、研究, 推广应用, 包括外热水冷无炉衬长炉龄冲天炉、水冷无炉衬自然(冷风)长炉龄冲天炉、水冷薄炉衬两班制冲天炉。

环保除尘系统、加料炉后自动配料系统的应用, 都将推广冲天炉的新技术及科学设计, 使得冲天炉向大型化、低消耗、高技术含量、少污染、低成本方向发展。

信息技术、电子技术的应用将提高冲天炉熔炼质量及其稳定性, 降低生产成本, 是迈向集约化、清洁化、“绿色铸造”的重要发展方向。

### 2) 发展高效换热技术, 拓展余热应用领域, 如采暖、发电等。

利用热泵技术对铸造生产中的余热进行采暖和制冷; 利用自硬树脂砂再生机对树脂砂余热进行回收利用。

### 3) 有效利用凝固冷却余热, 直接对铸件进行淬火、正火及退火等热处理。

利用余热减少铸件残余应力。铸铁件在凝固冷却过程中, 因各部位冷却速度的差异, 没有同时相变和收缩而相互阻碍, 易产生铸造应力。最节能的措施是: 利用铸件余热退火, 减少铸件铸造残余应力的节能降耗。

利用铸造余热进行铸件等温淬火。普通成分铁液通过控制冷却, 利用铸造余热直接进行等温淬火, 配合孕育处理或孕育 + 微合金化处理, 使汽缸套毛坯铸件的硬度和冲击性能同时得到提高。

利用铸造余热对球墨铸铁进行正火处理工艺。我国的铸造厂生产高强度珠光体球墨铸铁, 大部分采用正火处理。所生产的珠光体球墨铸铁虽有比较稳定的力学性能和金相组织, 但工艺上则存在生产周期长、铸件氧化严重、变形大以及能耗高等问题。改用铸造余热处理的工艺, 可克服上述缺点, 显著降低生产成本。

## 4. 混合砂再生技术

### (1) 现状与问题

内燃机的铸造过程需要大量的黏土砂、树脂砂, 铸件浇注完成后铸造车间需要排放大量的含有树脂砂的黏土砂(简称混合砂)等固体废弃物, 这部分混合砂不能直接丢弃或者直接回收使用, 需要经过一定的再生处理后才能重复利用。国外发达国家, 尤其是日本, 每生产 1 t 合格铸件可排放  $0.22 \sim 0.35$  t 旧砂, 旧砂的回收利用率高达 90%。而我国每生产 1 t 合格铸件可产生约 1.2 t 旧砂, 每年都会有大量的旧砂排放, 造成了一定的环境污染和资源的巨大浪费。潍柴动力

的铸造车间每生产 1 t 合格铸件需排放 0.8 t 旧砂,回收利用率达到 60%,与国外相比还是有一定差距。

目前,我国的铸造旧砂再生技术已经得到了广泛的推广,对于树脂砂铸型来说,旧砂再生技术和成套再生设备已经较为成熟和完善;而对于黏土砂铸造来说,尤其是混合砂再生技术和成套再生装备还有待于进一步的开发和完善。因此,必须高度重视内燃机生产过程中混合砂再生技术的发展,混合砂再生技术的不断推广和完善是实现内燃机绿色制造的重要途径。

## (2) 建议

### 1) 混合砂高效焙烧技术研究。

混合砂再生处理的关键技术之一是有效去除掉黏土砂表面的惰性黏土膜。该技术所配套的再生设备和处理工艺能高效地剥离砂粒及其表面的惰性膜,要实现旧砂焙烧温度和焙烧时间的准确控制,实现高温焙烧和机械磋磨的有机结合。

### 2) 再生砂改性处理技术研究。

由于再生砂的耗酸值较高,所以在应用于树脂砂工艺前,需要对再生砂进行改性处理。针对冷芯盒工艺、覆膜砂工艺、热芯盒工艺等对再生砂的改性技术进行开发,以使再生砂的性能达到或超过新砂,以满足不同树脂砂的使用要求。

### 3) 再生过程中的废弃物处理技术研究。

废弃物处理技术是实现车间“无尘化”操作的重要技术,需要突破以下技术:粉尘回收处理技术、有机废气回收利用技术、余热利用技术、资源化利用技术。

### 4) 再生技术成套装备的研发。

再生成套装备的研发可以提高再生砂的生产效率和回收利用率,降低再生砂的再生成本,这是混合砂再生处理技术发展的关键环节。再生技术装备中关键设备需要不断研发和改善,如高效的焙烧加热炉、高效的机械再生装置、固废-粉尘的收集装置、余热回收利用装置等。

## 5. 节能节材锻造技术

### (1) 现状与问题

我国模锻行业每吨锻件的平均综合能耗为 0.83 t 标准煤,而日本仅为 0.52 t 标准煤。与发达国家相比,主要是由于众多企业仍采用煤、煤气进行坯料加热,中频感应加热在全国模锻件总产量中不足 30%。缺乏对锻造余热的充分利用,锻后余热处理尚不普及。另一方面,传统内燃机曲轴、连杆等关键零部件的制造流程较长,国内非调质钢等新材料的使用比例较低。

我国模锻行业的平均材料利用率约为 75% ~ 80%,而国外先进水平大于

84%。锻造工艺和预成形设计仍以经验为主,缺乏工艺和模具优化设计的理论和工具,缺乏对锻件的组织演变与均匀性控制理论的研究,锻件质量和成品率低,锻模平均寿命仅为国际先进水平的 1/2,甚至 1/3。

## (2) 建议

1) 发展高效加热、锻造余热利用理论与技术。

2) 发展非调质钢等新材料的精密成形技术,缩短内燃机曲轴、连杆、凸轮轴等关键零部件的制造流程。

3) 发展锻造预成形优化设计、工艺/模具智能设计理论与技术。

4) 发展锻件的组织/性能控制理论与技术。

5) 发展锻件近净成形设计技术、长寿命模具技术。

## (三) 机械加工技术

### 1. 机加工过程能耗与碳排放分析、优化

#### (1) 现状与问题

在制造业能源消耗总量中,机械加工过程中消耗的能源占了相当大的比例。在机械制造企业中机床设备费用约占总成本的 68%,机床运行电力能耗成本占年运营成本的 21%。就中国而言,机械加工系统更是量大面广,中国机床总量世界第一,约 800 万台。若按每台机床额定功率平均为 10 kW 来计算,则总功率约为 8000 万 kW,约是三峡电站总装机容量(2250 万 kW)的 3.5 倍。仅对潍柴进行估算,机床能耗高达 4000 万 kW·h/年,约是三峡电站两个小时发电量。可见,机床装备耗电总量惊人。

另一方面,大量统计表明机床能量利用率非常低下。金属切削加工的单位能耗为 66~82 MJ/kg,比锻造、铸造成型加工高 50% 以上,而金属切削机床整个运行过程中,只有约不足 15% 的能耗直接用于材料去除,机床运动系统、空调系统和切削液供给系统等其他能耗却占 85%。例如,美国麻省理工学院的 Gutowski 教授给出的一条自动机械加工线的加工能耗只有 14.8%,如图 2 所示。可见,机床节能的潜力是相当可观的。

因此,如何降低机械加工系统的能耗同时提高其能效是制造业亟待解决的问题。加州大学伯克利分校、麻省理工学院等对机械加工中的钻削、铣削以及磨削加工等制造过程建立了一系列相关模型,在此基础上对其产生的资源环境属性进行评价,预测、优化机械加工系统产生的废物流、能量消耗以及加工时间等。

相对于发达国家而言,我国开展绿色制造的研究相对较晚,对机床的能耗、排放问题缺乏重视和研究,研究相对滞后,缺乏零部件制造过程的工艺能耗分析和优化控制技术。

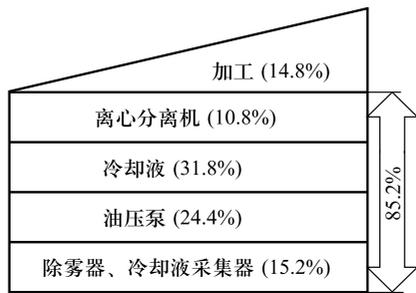


图2 Gutowski 教授研究成果——自动机械加工线的能耗 (美国 MIT)

## (2) 建议

### 1) 开展金属材料去除能量分析、切削比能耗研究。

结合内燃机零部件加工特点,研究金属材料去除能量模型和切削比能耗,建立典型产品及工艺的能耗数据库。

### 2) 开展制造过程中能量流、资源流和废物流分析。

从不同层次研究零部件生产过程中的能量、资源和废物,并将能量、资源与废物融合为量纲统一的碳排放定量分析模型,为进行绿色工艺技术评估奠定理论基础。

### 3) 开展制造周期多层次、多维度碳排放分析。

碳排放是绿色制造的综合指标,体现了制造过程对能源、资源消耗以及废物排放对环境的影响,较全面地反映制造过程对环境的影响。在零部件制造周期内,结合加工企业的综合运行过程,多层次分析制造过程的能耗与碳排放,并实施优化,最终形成“机床—生产单元—车间—企业”分级性的节能减排系统。

## 2. 环保型切削加工技术研究

### (1) 现状与问题

随着高速机床、加工中心的应用及金属切削加工技术的迅猛发展,切削速度、切削功率急剧提高,使得单位时间内金属切除量大量增加,而切削液的使用是在高效加工中保证切削效率和表面完整性的重要措施,但高速切削时,切削液实际上很难到达切削区,很难起到冷却作用。因此机床加工过程中切削液用量越来越大,其流量有时高达 80 ~ 100 L/min。目前,内燃机制造企业的机械加工普遍依靠浇注大量切削液的方法来辅助高速刀具进行加工。潍柴每年切削液的使用量为 720 t。由于生物降解性差,切削液会长期滞留于水和土壤中,污染湖泊、河流、海洋和地下水系统。同时,切削液的添加剂及使用过程中发生高温化学反应产生的挥发物会损害工人的健康。开发环境友好型切削液是在传统切削的基础上减少污染的重要途径。

如何减少切削液的使用,甚至不用切削液也是解决切削液污染问题的重要途径。其中干切削加工技术是一种加工过程中不用或微量使用切削液的加工技术,不仅环境污染小,而且可以省去与切削液有关的装置,简化生产系统,能大幅度降低产品生产成本,改善工人工作环境,同时形成的切屑干净清洁,便于回收处理。干切削已成为目前绿色制造工艺研究的一个热点,并已经在实际加工中得到了成功应用。

干切削技术对机床、刀具、涂层、加工工艺提出新的要求。机床方面,干切削对机床的隔热性能、排屑速度、洗尘效果、精度及刚度等提出了严格的要求。目前,干切削刀具的主要材料有超细颗粒硬质合金、聚晶金刚石、立方氮化硼、SiC晶须增韧陶瓷及纳米晶粒陶瓷等。涂层技术方面,TiN、TiAlN涂层技术远远不能满足市场需要,迫切要求开发硬度更高,耐磨性更好,防震、抗磨损能力强的综合涂层。

国外的刀具企业如山高、山特维克、瓦尔特等都有针对性地开发出了系列干切削刀具。国内在陶瓷刀具、自润滑刀具、MQL技术(微量润滑)、低温冷风切削研究方面有突出进展,但尚缺乏大规模应用。国内内燃机企业目前使用的刀具主要依赖进口,如山特维克、肯纳、伊斯卡、瓦尔特、玛帕等。国内内燃机行业机床、刀具、涂层等技术的系列化和产业化道路还有待发展。

## (2) 建议

- 1) 开发环境友好型生物降解切削液。
- 2) 发展切削液高效注入、MQL优化利用技术。
- 3) 发展干切削、准干切削刀具、工艺与装备。

## (四) 整机测试技术

### 1. 内燃机冷试技术

#### (1) 现状与问题

由于传统的发动机热试试验时间长、使用成本高、产生污染等不足,不满足发动机绿色制造的要求。目前,迅速朝着以冷试试验为主,冷试和热试相结合的方向发展,这是当今世界各国汽车发动机生产试验的一种新潮流和发展趋势。

冷试是一种对发动机装配质量进行综合检测的技术。冷试开始时,完成必要装配后的发动机进入检测工位,由冷试试验台上的驱动装置拖动飞轮进行运转,在不同检测阶段,通过安装在冷试试验台上的各种传感器采集相关信号,对信号进行处理后将其同标准模板进行对比和分析,进而对发动机装配质量进行判定。发动机冷试试验通常包含以下几个检测项目:扭矩检测、机油压力检测、正时检测、点火检测、进气真空度检测及排气压力检测等。不同的发动机生产厂

商其制定的冷试检测项目也会有所差别。

从 1993 年英国卢卡斯组装的第一台试验系统在德国科隆市的 KHD 发动机工厂运行以来,冷试技术发展迅速,国外许多著名的汽车发动机公司都在大力研究、开发和使用。如德国的 Siemens 公司,美国的 GM 公司、ABB 公司以及奥地利的 AVL 公司等,都在大力研究冷试技术、开发冷试检验设备,并且已经在生产实践中得到了逐步应用。目前国内仍然以热试检验为主,但先进的内燃机制造公司如一汽大众、潍柴动力逐渐开始使用冷试检验技术。以潍柴动力冷试的结果看,如表 2 所示,其节能及减少排放的效果十分显著。

表 2 潍柴动力热试与冷试每年(50 万台)能量消耗与排放比较

	消耗电量	消耗柴油	排放 CO <sub>2</sub>	排放 CO	排放 HC	排放 NO <sub>x</sub>	排放 PM
热试	-	1.5 万 t	4.7 万 t	150 t	50 t	350 t	5 t
冷试	6.8 万 kW·h	-	-	-	-	-	-

冷试技术目前面临一系列的问题,如冷试检验需要高精度的仪器和传感器采集发动机的运行参数;发动机零部件的加工质量、装配质量也有较高的精度,这对整机厂和零部件企业的相关加工、装配和生产管理提出了更高的要求,同时有利于促进发动机行业整体水平的提升;要求事先对该平台的发动机的相关参数通过大量的试验建立数据库,国外文献介绍至少要 10 000 台次发动机的测试参数作为基础数据,这就需要大量和细致的工作;在构建完整、真实的数据库的基础上,还要深入分析数据的分布规律,运用概率统计及故障映像等技术发现可能出现的发动机装配故障。

## (2) 建议

建立冷试技术规范,促进冷试技术推广应用。

鉴于发动机结构及性能不同,冷试测试项目及流程会有不同,应总结出各系列汽油机、柴油机、天然气机的共性规律,构建冷试测试技术规范 and 标准,并进一步形成相关国家标准。

## 2. 内燃机试验能量回馈技术

### (1) 现状与问题

内燃机中的工作过程特别是燃烧过程极其复杂,目前产品试验仍是定量分析的主要手段。内燃机的研究发展、新产品的的设计,以及产品的检验和质量考核,都依赖于试验方法。特别是新产品、重大改进、变型以及转厂生产的内燃机,应进行耐久运转试验,以考核零部件的可靠性、耐磨性及动力经济指标的稳定

性。因而内燃机试验是内燃机生产的重要环节。

内燃机在进行试验时必须要有可调节的负载,一般都用测功机作为负载,吸收内燃机的功率。目前应用的测功机主要是功率吸收型测功机,包括水力测功机、电涡流测功机、磁粉测功机和磁滞测功机等,这类测功机把被测机的功率转化为热能,使制动器发热,采用专门的冷却系统散热至环境,会造成大量的能量消耗及排放污染。

如果能把试验部分能量回送电网或充分利用,则节约的能量相当可观。但是内燃机试验时的转速是变化的,不可能在试验过程中发出恒定的频率电能。从能量转换的过程来考察,不仅要把机械能转变为电能,还要经过一套变流装置,把电能转换为与电网同步的工频交流电,输送给电网。而回收内燃机试验过程中的能量的前提,必须首先保证达到测试的要求,符合有关的测试规范和标准,这需要提供一套完整、系统的能量回收利用技术才能解决以上问题。

## (2) 建议

### 1) 发展可回馈电能的电力测功系统。

应采用功率传递型测功机,如直流电力测功机、永磁电力测功机、同步电力测功机和异步电力测功机等,根据上述测功机不同功能及特点,构建能量回馈型测功机的系统平台。并将测功机吸收来的功率通过整流和逆变环节,回馈给电网。

### 2) 加强内燃机试验过程余热回收技术的研究和应用。

开发采用能量梯级利用等其他技术,对内燃机试验过程余热回收利用有实际意义。

## (五) 再制造关键技术

### 1. 内燃机回收产品逆向物流体系

#### (1) 现状与问题

我国已成为世界内燃机制造大国。面对巨大的报废处理问题,为了节约能源、资源,减少环境污染,内燃机行业对开展再制造技术研究有强烈的需求。

2010年5月,国家发展和改革委员会、科技部等11部委联合下发《关于推进再制造产业发展的意见》,指导全国加快再制造产业发展,并将再制造产业作为国家新的经济增长点予以培育。2011年3月,国家发布《国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》,明确要求“推进再制造产业发展,开发应用再制造关键技术,推广循环经济典型模式”。开展再制造技术研究,符合国家中长期发展战略重大需求。

逆向物流是现代物流供应链中不可缺少的一部分。目前,对逆向物流的回

收模式研究主要集中在制造商回收方式、联合回收方式和第三方回收方式等。目前全球逆向回收物流市场的收益高达 200 亿美元。

国内目前对退役产品的逆向回收还没有足够的重视,据有关部门的调查统计显示,我国可回收利用而没有利用的再生资源的价值高达 300 多亿元,我国逆向回收物流的发展还处于起步阶段,还没有大规模的回收物流实践,企业运用回收物流的思想进行资源回收再利用的各个环节还没有链接起来。国内的内燃机企业,如潍柴初步实现了通过售后服务网络回收旧发动机,但与卡特、康明斯等国际企业相比还有不少差距。

除此之外,国内再制造企业普遍面临的政策性资金和税收问题。回收的产品无法获得增值税发票,增大了再制造企业的运营成本和风险。

## (2) 建议

- 1) 研究建立内燃机产品逆向物流体系。
- 2) 研究内燃机全生命周期的信息管理技术(正、逆向信息集成融合)。
- 3) 国家出台回收产品的税收等政策支持。

## 2. 面向再制造设计

### (1) 现状与问题

当前产品的设计是面向单一生命周期的,在产品的设计阶段仅对零部件的强度等进行校核。使用过程中对容易损坏的零部件进行更换,直到关键零部件损坏后进行报废。内燃机产品亦是如此。面对大量废旧产品造成的环境污染和原生资源短缺等严峻问题,再制造成为实现资源循环的重要途径。废旧产品的再制造性决定了产品能否进行再制造,而再制造性主要是在产品的设计阶段决定的。通过面向再制造的产品设计研究,能显著地提高产品再制造的效益,最大限度地挖掘废旧产品中所蕴含的财富,实现资源的可循环利用。

面向再制造的产品设计(Design for Remanufacturing)是指在产品设计阶段对产品的再制造性进行考虑,并提出再制造性指标和要求,使得产品在寿命末端时具有良好的再制造能力。

参照内燃机再制造全过程中各工艺步骤的要求,面向内燃机产品的再制造性设计包括:① 易于运输性,产品设计过程必须考虑末端产品的运输性,使得产品更经济、完好地运送到再制造工厂,保证废旧产品的质量和数量;② 易于拆解性,再制造的拆解不同于再循环,应尽量减少拆解过程中造成的零件损坏和提高拆解效率;③ 易于分类性,零件分类的效率,不但直接影响到再制造产品质量,而且可明显地降低再制造周期和费用;④ 易于清洗性,易于清洗的零件可以显著地提高再制造的经济性和环保性;⑤ 易于修复(升级)性,再制造费用依赖于零部件的再利用率,设计时要增加零部件的可靠性,采用科学的寿命设计,减少

材料和结构的腐蚀、磨损和断裂;采用易于替换的标准化零部件和可以改造的结构并预留模块接口,增加升级性;采用模块化设计,通过模块替换或者增加模块而升级再制造产品;⑥ 易于装配性,模块化设计和零部件的标准化设计也明显有利于再制造装配。

产品的再制造性设计是一个综合的系统过程,需要综合分析功能、经济、环境、材料、法规等多种因素,从而保证末端产品的再制造能力,以实现产品的最佳化回收。近年来,我国对产品再制造相关理论和再制造技术进行了积极的研究,并提出了面向再制造的一般设计方法,但是针对内燃机及其零部件进行的面向再制造的设计技术研究还较为鲜见。

## (2) 建议

### 1) 面向内燃机再制造设计方法研究和设计标准制定。

对于发动机中低附加值的零部件如易损件、标准件等,按照单一生命周期设计仅进行强度校核,使用过程中损坏后进行更换,更换下的零件进行材料回收。对于高附加值的零部件如缸体、缸盖、曲轴等,在产品的设计阶段就考虑其使用的回收再制造,进行多生命周期寿命设计与分配、易于拆卸性设计、易于清洗性设计、易于修复性设计等,提高产品的可再制造性。

### 2) 内燃机产品主动再制造设计。

基于内燃机产品的寿命评估与预测,研究产品性能状态在全生命周期的量化演变关系;基于产品服役行为、失效机理及其寿命演变规律,研究产品主动再制造时机临界点决策机制,建立面向产品的主动再制造时机决策系统。

## 3. 旧件清理技术

### (1) 现状与问题

再制造是指以废旧产品作为生产毛坯,通过专业化修复或升级改造的方法来使其质量特性不低于原有新品水平的制造过程。内燃机再制造一般经过回收(逆向物流)、拆解、清洗、检测、修复等多个阶段。其中,拆解和清理是内燃机再制造工程中的首要工序,实现内燃机无损拆解以及绿色清理是影响再制造产品质量和效益的重要因素。目前,国内内燃机再制造企业普遍使用高温焙烧、喷砂抛丸、化学清洗等高污染、高能耗的清理方法处理旧件。虽然,整个再制造行业在清理技术方面做出了一些探索和尝试,已采用的清洗技术有热能清洗、浸液清洗、压力清洗、超声清洗、电解清洗、化学清洗等。但是,传统清洗技术还存在很大的局限性:

1) 高温焙烧技术,工艺时间长,并且消耗大量的天然气,同时排放大量废气;

2) 喷砂抛丸技术,噪声大,同时造成严重粉尘污染危害工人健康;

- 3) 化学清洗采用的清洗液易产生环境污染;
- 4) 热能清洗技术适合清洗油脂类污垢,但效率较低,能耗较大;
- 5) 浸液清洗适用于小型件大批量清洗,浸液清洗时间长,废水、废气对环境污染较大;
- 6) 压力清洗能量消耗较小,但不适合清洗零件内部附着力较强的污垢;
- 7) 水射流清洗,用水量大,有时为了增加清洗效果采用部分碱或其他添加剂,增加了后续废水处理费用;
- 8) 电解清洗一般需辅助一些化学和物理清洗剂,废液处理困难;
- 9) 超声清洗技术清洁度高,清洗成本低,对环境污染小,不受清洗件表面形状的限制,易于自动控制,但超声清洗设备对质地较软、声吸收强的材料清洗效果差。

其中,超声清洗、水射流清洗、激光清洗等物理清洗是环保潜力最大的清洗方法。与西方发达国家的清理技术相比,较为环保的物理清洗国内市场份额仅占 30%。而西方发达国家中占清洗市场份额 80% 以上,美国已占到约 90%。足见物理清洗的环保优势。

## (2) 建议

发展以物理清洗为主的环保、复合清洗技术。

针对不同内燃机关键零部件,根据污染层特点,重点以超声清洗、水射流清洗、激光清洗、超临界 CO<sub>2</sub> 清洗、熔盐清洗等物理清洗方法为技术创新突破口,研究新型环保清洗剂材料和复合清洗装备,实现再制造清洗过程绿色、高效、自动化。

## 4. 无损检测、寿命评估及可再制造性评价

### (1) 现状与问题

对内燃机关键零部件进行无损检测,快速高效判断产品是否具有可再制造性,是顺利开展再制造工作的前提。但是,由于内燃机的报废原因、几何结构、失效规律、损伤程度等复杂多样,由此引发的回收产品损伤的不确定性和微小尺度损伤隐形损伤识别的困难是可再制造性评估亟待解决的问题。

针对内燃机关键零部件不同服役工况下的失效规律,采用常规检测手段与无损检测技术,对零部件表面状况以及宏观缺陷进行评价,依据材料学、力学、数学等寿命预测方法,对内燃机再制造毛坯进行剩余寿命预估,是解决可再制造性评价问题的重要途径。

目前国内外已有的无损检测技术主要有超声波检测、射线检测、涡流检测、磁粉检测以及渗透检测等五大常规方法。美国军队曾利用无损检测技术检验了 B-52H 型轰炸机 80% 以上的零部件,然后决定其是否可用或者修复后继续使用

用;而对于修复后以及用于替换旧件的新零部件则几乎 100% 地利用无损检测技术进行了质量检测和监控,保证了再制造飞机的高性能和高可靠性。

但综合看来,目前无损检测技术只能针对关键零部件检测宏观缺陷(大于 0.1~0.5 mm),难以对整机和总成部件进行故障诊断、微损伤定量检测以及剩余寿命评估,尤其是缺陷和损伤的定量表征及其与寿命演变规律的关系机制仍需得到深入研究。目前,工厂实践常用涡流/磁记忆综合检测、超声检测等手段配合工人经验对回收产品进行可再制造性评估,使得回收价格计算、剩余寿命估算精度较低,再制造厂家和旧件所有人的经济利益及风险无法保证。研究针对性高、适应性强、高效快速的检测技术和评估体系成为开展内燃机再制造亟须攻克的关键技术。

## (2) 建议

### 1) 开展损伤检测的定性、定量化技术研究。

研发多参量多信息融合的综合无损检测技术及设备,重点研究内部缺陷、隐性缺陷的定性、定量表征技术,实现内燃机关键零部件高可靠性、高效率的自动化检测。

### 2) 可再制造性评价体系研究。

建立故障、损伤与内燃机失效及其寿命演变规律之间的关系机制,研发内燃机再制造毛坯无损检测、剩余寿命评估综合技术体系,建立相应技术规范 and 行业标准,促进内燃机再制造产业化发展。

## 三、实施建议

### (一) 2020 年预期目标

根据目前绿色制造技术的发展现状及潜力,结合国内相关行业“十二五”发展规划的要求,进一步提出中国内燃机绿色制造 2020 年预期目标:

- 1) 结构设计、新材料使用,减重 5% 以上;
- 2) 全工艺过程节约材料 10% 以上;
- 3) 制造过程减少能耗和碳排放 20% 以上;
- 4) 实现整机质量再制造率 80% 以上。

### (二) 内燃机的绿色制造关键技术汇总

为实现上述目标,建议重点开展的关键技术如表 3 所示。

综上所述,着力降低内燃机制造过程能源、资源消耗,减少固、液、气排放,推行绿色制造是我国内燃机行业可持续发展的必由之路。深入开展和推进内燃机

制造过程节能减排工作,具有重要的现实意义、长远意义。

表 3 内燃机的绿色制造关键技术汇总

方向	领域	关键技术
轻量化	材料	轻量化高强材料
	优化设计	结构优化设计
热加工	铸造	热加工 CAD/CAE 平台短流程铸造工艺铸造过程余热利用混合砂再生技术
	锻造	高效节能锻压技术近净成形设计技术
机加工	机械加工	机械加工过程能耗与碳排放分析、优化、控制环保型切削加工技术
测试	整机测试	内燃机冷试技术内燃机试验能量回馈技术
再制造	回收与再制造	内燃机回收产品逆向物流体系面向再制造设计旧件清理技术无损检测、寿命评估及可再制造性评价



**佟德辉** 潍柴动力股份有限公司副总裁,研究员。在潍柴从事柴油机研发工作 28 年,负责产品规划,新产品开发、设计和质量管理工作。

# 发动机精密制造 $2\ \mu\text{m}$ 工程

林忠钦 等

上海交通大学机械与动力工程学院

## 一、综述

汽车工业涉及材料、化工、机械、电气和信息等众多领域,代表着一个国家的制造业水平。我国的汽车产销量连续4年位居全球第一,是名副其实的汽车制造大国。然而许多关键技术和装备仍然受制于人,换言之,我们还不是一个汽车强国。发动机是汽车的“心脏”,其质量优劣直接影响到车辆的燃油经济性、安全可靠、驾驶舒适性和排放清洁性。目前,国产发动机在设计、工艺、质量、性能等方面与国外有较大差距,仍需大量的基础性研究,以期真正掌握发动机的正向开发能力。

发动机制造精度对产品服役性能(燃油效率、振动噪声、可靠性等)具有至关重要影响,是汽车、航空等各类发动机开发关注的问题。我国发动机长期以来设计与制造脱节、基础研究与试验投入有限,尚未能系统地掌握关键尺寸公差与整机性能之间的影响机理,与国际同行差距集中体现在:

- 1) 公差、配合等关键工艺设计依赖经验,试错周期长,自主正向设计受到极大制约;
- 2) 严重依赖进口高精度加工装备,生产线重复引进,投资居高不下;
- 3) 批量制造产品性能波动大、过程废品率高。

面对激烈市场竞争,国际发动机行业新技术、新材料、新工艺发展迅速,制造精度加工、检测、控制已发展到微米级乃至更高,如何系统掌握制造精度—服役性能的影响关系、构建新一代发动机制造工艺开发与加工质量控制技术体系,不仅对于保障产品设计性能、降低制造成本、推动节能减排具有重要作用,并对促进制造装备国产化、降低进口依赖具有重要意义。

“ $2\ \mu\text{m}$  工程”由上海交通大学牵头,联合美国密西根大学、上汽通用五菱汽车股份有限公司等于2009年提出,旨在针对发动机自主开发的重大需求,探索微米级尺度下零件制造精度与产品使用性能之间映射规律的基础科学问题,掌握公差设计、工艺装备、精密测量、质量控制、生产线布局等核心技术,构建以“高精度、高效率、低成本”为特色的新一代发动机精密制造技术体系与方法,促进我

国汽车发动机及相关零部件产业的节能减排、绿色制造与可持续发展。

以微米级形貌在线测量为基础,“2 μm 工程”交叉集成了发动机、精密制造与测量、过程统计控制等多学科领域,得到了国内外科研院所和企业的广泛关注,其工程应用可预计的效益包括:

- 1) 提高过程控制能力:关键几何特征检测精度从“离线、单点”转变为“在线、扫描”,控制能力提高到 ± 1 μm 以内;
- 2) 改善发动机性能一致性:显著减少制造误差提高配合精度,提高油耗、功率等性能的一致性和可靠性;
- 3) 延长加工刀具寿命:通过制造过程在线检测与控制,优化装夹工具和刀具参数,显著延长刀具寿命;
- 4) 缩短新产品投放时间:数字化工艺设计与三维高分辨率加工形貌测量能显著减少新产品投产测试时间;
- 5) 降低资金投入和运营成本:降低废品率、刀具和能耗等制造成本,合理配置国产/进口机床降低投资运营成本。

## 二、研究内容

“2 μm 工程”的总体研究思路如图 1 所示,目标是制造精度与产品性能的系统优化,核心和难点在于如何准确描述在微米级尺度下的尺寸偏差 - 产品性能波动的映射规律。“2 μm 工程”的主要研究内容涉及产品设计、加工、装配、检测及控制等,包括三维尺寸链建模与误差分析、精度 - 性能影响关系建模与优化、零件表面微米级形貌检测与诊断、数字化工艺分析与加工参数优化、自主检测与加工装备开发等。下面将予以简要介绍。

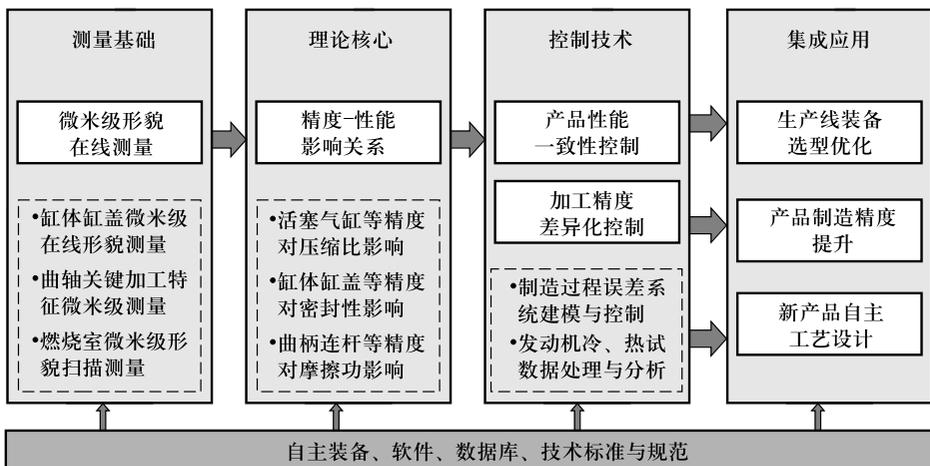


图 1 “2 μm 工程”总体研究思路

### (一) 三维尺寸链建模与误差分析

发动机的公差分析及分配都是基于传统的一维/二维尺寸链,对大量的几何公差信息缺乏有效的分析手段<sup>[1]</sup>。通过建立包括做功、配气等机构在四缸耦合情况下的整机三维尺寸链的静、动态模型,以及多学科复合的三维误差分析数字样机,为产品的公差设计奠定理论依据。

1) 在静态三维尺寸链中,曲柄-连杆-活塞等机构存在大量的形位公差和配合间隙,方向公差和轴孔配合的间隙所带来的杠杆效应会导致比传统尺寸链更加不利的累积效果<sup>[2]</sup>,需要科学的公差表示模型和传递模型来描述各种公差和配合情况,以指导产品的公差设计。这里采用适合三维公差表示的小位移旋量模型<sup>[3]</sup>,在三维空间精确表达做功机构和配气机构零部件的位置、方向和尺寸公差,及其相互之间的约束关系。然后由雅克比矩阵将其累积到封闭环<sup>[4]</sup>,可得到缸体燃烧室和气门间隙等重要设计参数的公差范围。做功机构的小位移旋量模型如图2所示;同时,为了验证模型的正确性和可靠性,应用三维尺寸链公差分析<sup>[5]</sup>,对上述机构仿真分析,所建立的三维装配偏差分析模型如图3所示。

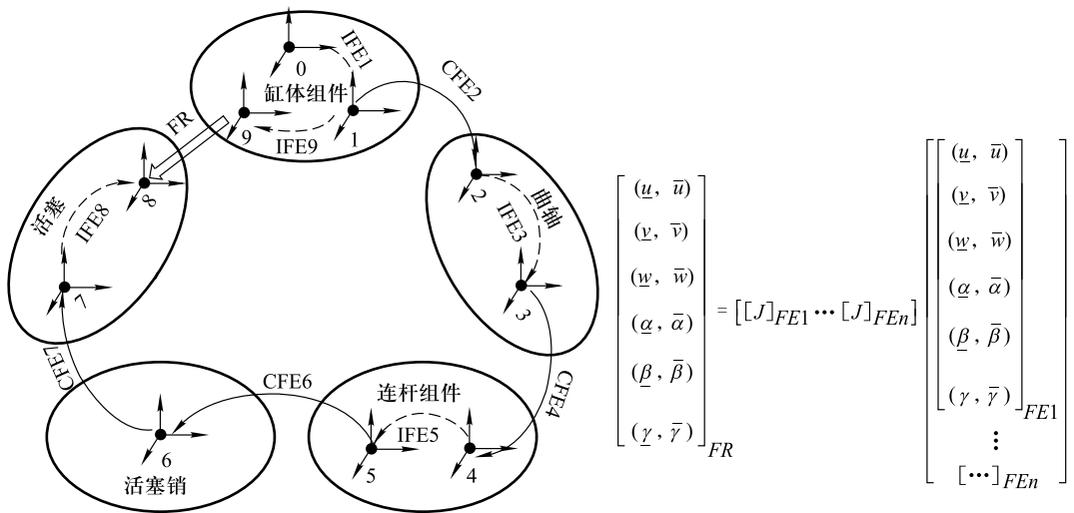


图2 小位移旋量模型

0:缸体底面及销孔;1:曲轴孔;2:曲轴大颈;3:曲轴小颈;4:连杆大端孔;5:连杆小端孔;6:活塞销;  
7:活塞销孔;8:活塞压缩高;9:缸体顶面

2) 进一步可根据做功、配气机构的几何运动特性及形位误差,构建活塞-缸孔、曲轴-轴承、凸轮轴-凸轮轴孔等运动副的公差配合对摩擦功的影响。

在尺寸链分析基础上建立发动机摩擦损失模型,如图4所示。通过仿真分析,可得出各摩擦副零件的轮廓、尺寸公差以及表面形貌等对摩擦损失的影响程

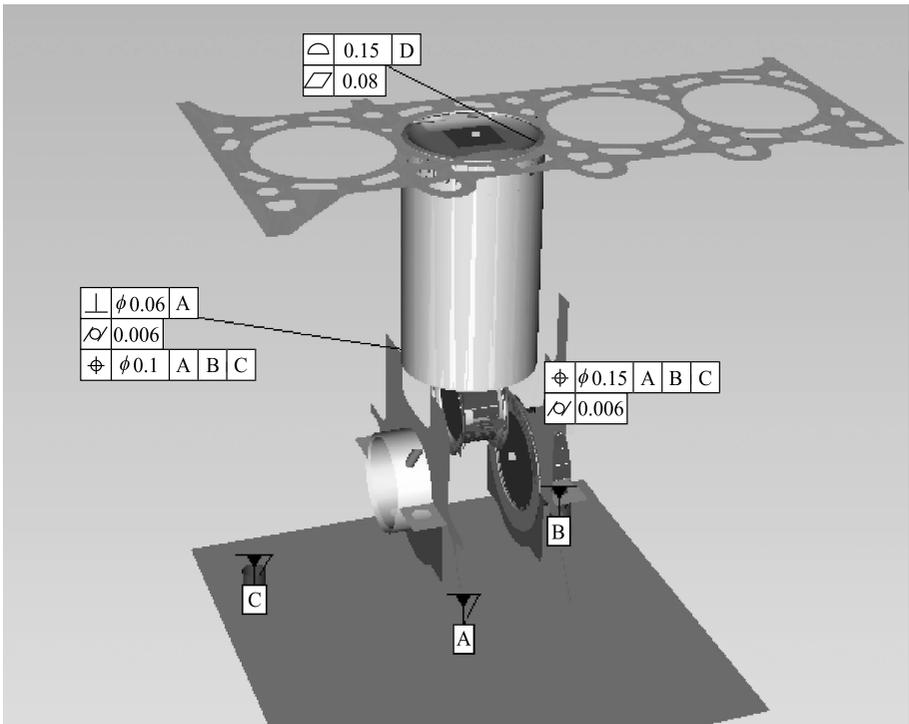


图3 三维尺寸链仿真分析模型

度,进而得到其贡献度及敏感度<sup>[6,7]</sup>。

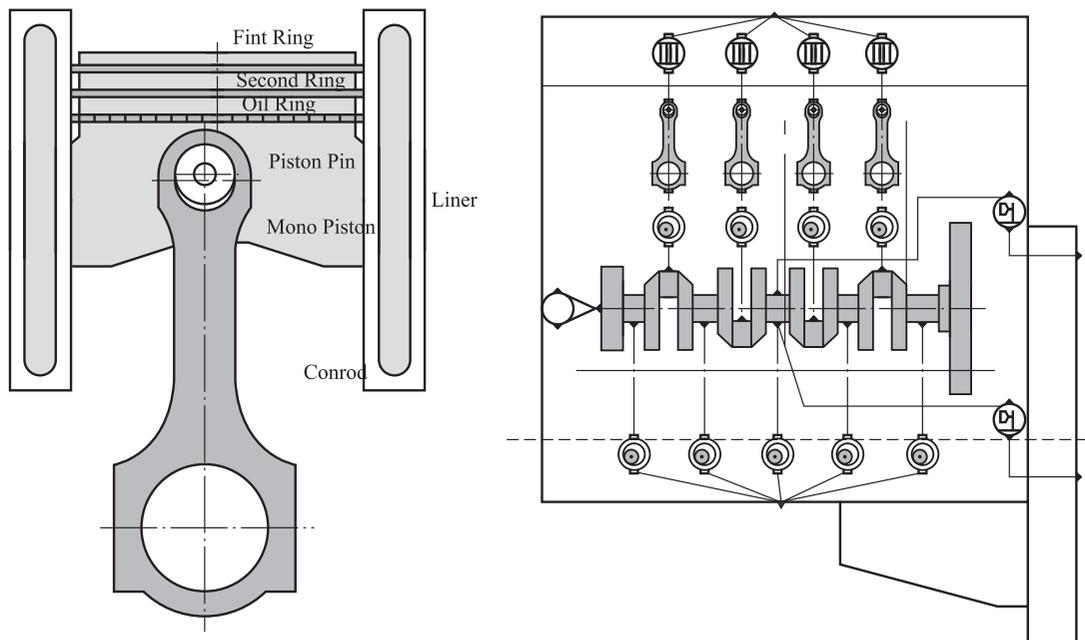
通过上述分析,可得到图纸上各零部件的所有公差信息对做功和配气机构的贡献度和敏感度,为公差优化提供科学的依据。

## (二) 精度 - 性能影响关系建模与优化

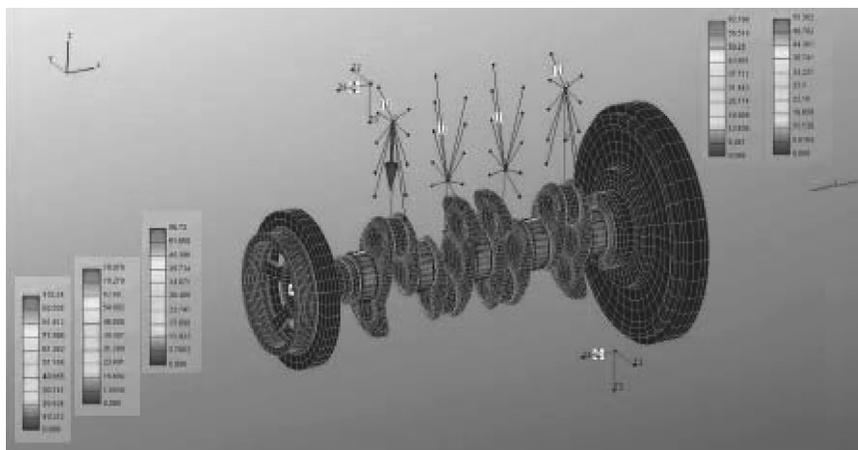
从设计 - 制造综合角度,研究关键尺寸精度对产品功率、油耗、排放等性能的影响,建立理论计算模型和开发测试装备,为精度与性能系统控制提供计算依据。

压缩比是直接影响发动机性能的重要参数<sup>[8,9]</sup>。压缩比减小将降低燃烧效率和增加废气损失,导致发动机的动力性和燃油经济性差;压缩比增大会引起混合气温度增加,对于汽油机来讲,在增加爆震倾向的同时还会增加  $\text{NO}_x$  排放<sup>[10-12]</sup>。

提高影响发动机压缩比的零部件的制造精度,对改善压缩比的一致性,具有重要的现实意义。因为相关尺寸的制造波动累计会带来较大范围内的压缩比变动,这种情况下发动机标定得到的点火角和进气门正时等值极有可能不再适用,造成同批次的发动机性能也存在很大差异,甚至部分发动机出现爆震。



(a) AVL EXCITE仿真模型



(b) 曲轴回转运动分析与摩擦功仿真

图4 发动机摩擦损失仿真

1) 定性分析压缩比的相关尺寸,建立了尺寸-压缩比影响关系数学模型。从发动机压缩比定义上分析,压缩比涉及曲轴、轴瓦、连杆、活塞、活塞销、缸体、缸盖、缸垫等8个零部件,相关尺寸多达25个。根据几何关系推导,建立一维的压缩比数学表达式,其中存在一个从曲轴中心到缸体上平面的闭环尺寸链,部分尺寸需由配合关系推导得出,如图5所示。对所有尺寸进行敏感性分析,仅挑出关键尺寸进行过严控制,以降低成本。关键尺寸包括:缸盖燃烧室容积、活塞燃烧室容积、曲轴回转半径、缸垫压缩后高度、连杆中心距、活塞压缩高、缸体上表面到曲轴孔中心距离。关键尺寸及其对压缩比的影响大小和比例如表1所示。

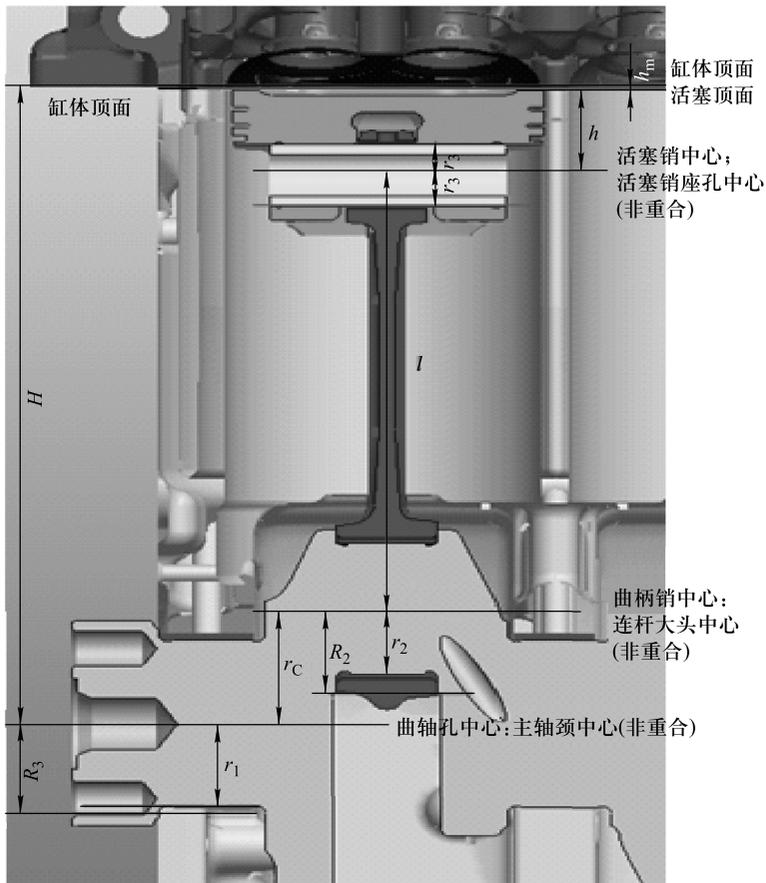


图 5 尺寸 - 压缩比影响关系模型

表 1 关键尺寸对压缩比影响情况

对压缩比影响程度	参数符号	意义名称	设计公差引起的 压缩比波动比率/%
1	$V_1$	缸盖燃烧室容积	2.142
2	$V_5$	活塞燃烧室容积	1.606
3	$r_c$	曲轴回转半径	1.249
4	$h_n$	缸垫压缩后高度	1.051
5	$l$	连杆中心距	1.021
6	$h$	活塞压缩高	1.021
7	$H$	缸体上表面到曲轴孔中心距离	1.021
8		缸盖下表面平面度	0.54
9		缸体上表面平面度	0.51

2) 为了将尺寸波动与性能搭建联系,建立了压缩比 - 性能影响关系的性能仿真模型。利用 AVL - BOOST 搭建的性能仿真模型如图 6 所示。经仿真计算,获得压缩比波动对扭矩、功率和油耗等性能波动的影响关系。

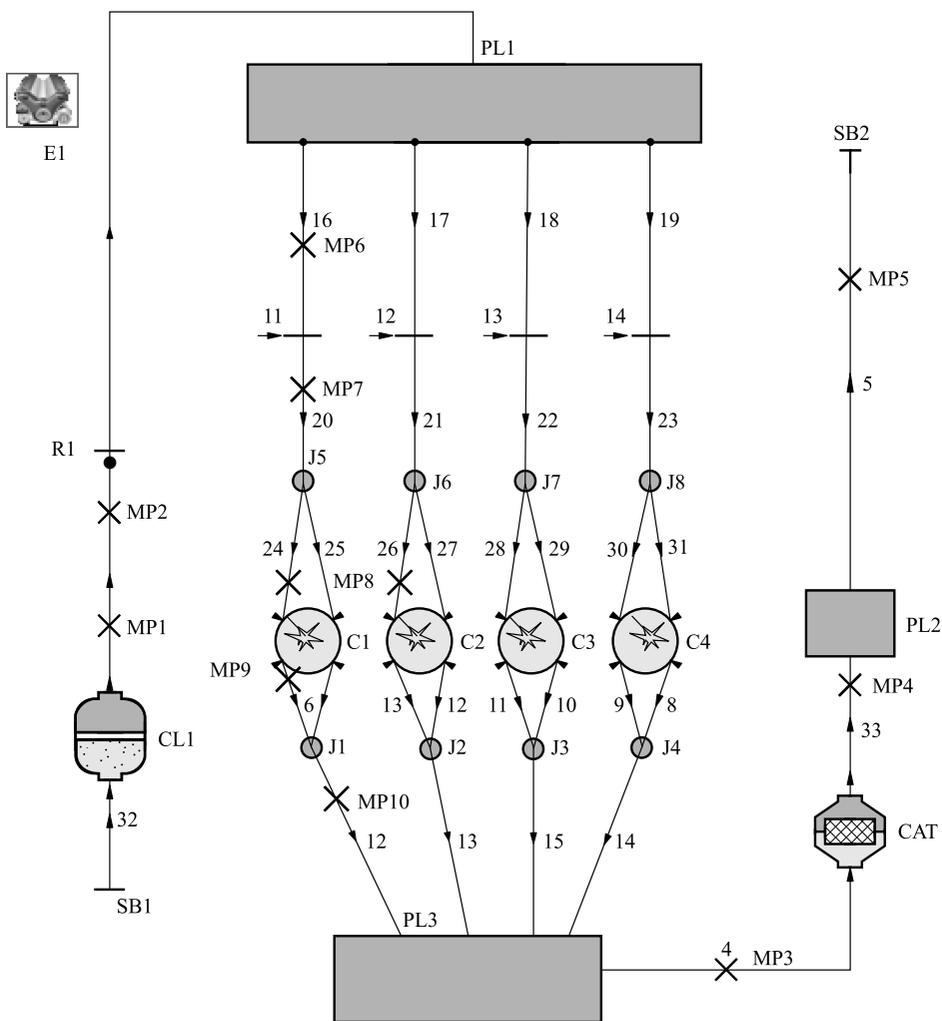
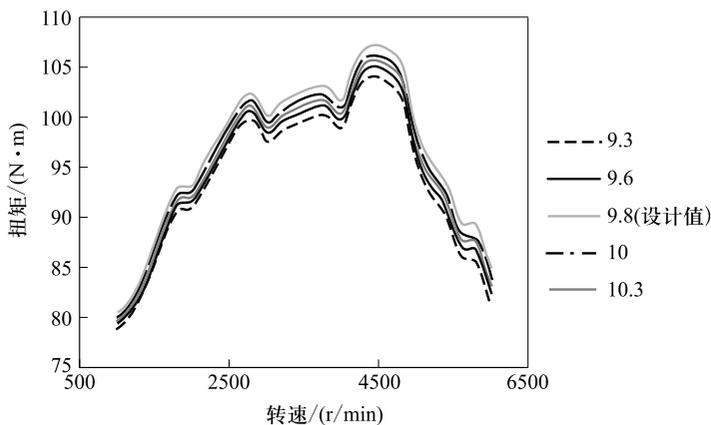


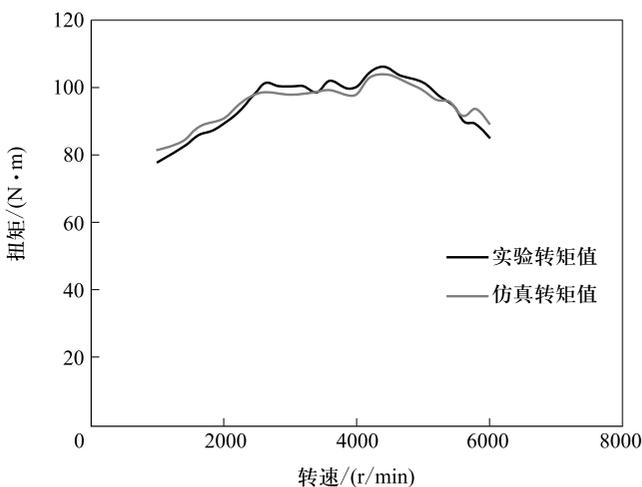
图 6 发动机性能仿真模型

以发动机 6000 r/min 为例,压缩比波动减小 1%,扭矩波动可减小 2.33 N·m,燃油消耗率减小 5.48 N·m(图 7)。同时,选取若干台实测全尺寸及实际压缩比的发动机进行台架实验,对比仿真计算,全转速外特性下扭矩最大差值为 2.96%,功率最大差值为 2.95%,燃油消耗率最大差值为 2.51%,误差均在 3% 内。

3) 压缩比影响关系建模与公差优化。通过基于遗传算法的公差优化分配,收紧关键尺寸公差,以降低压缩比的波动,提高发动机功率、扭矩、油耗的一致



(a) 仿真结果



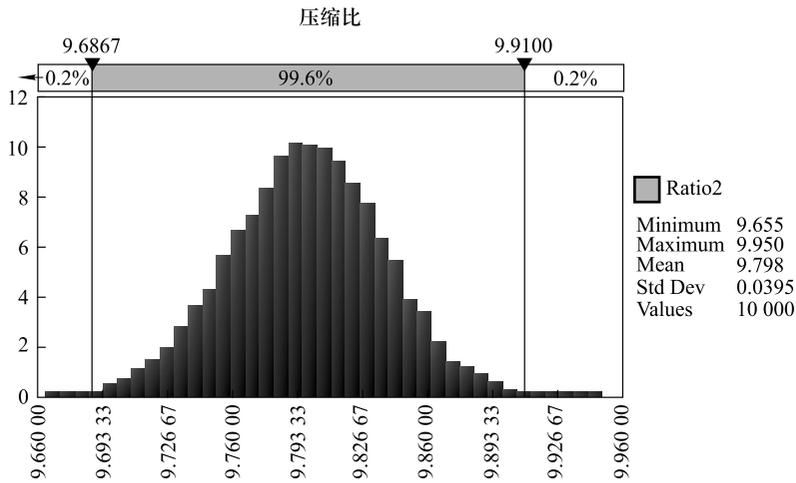
(b) 对比结果

图 7 扭矩的仿真结果与对比结果

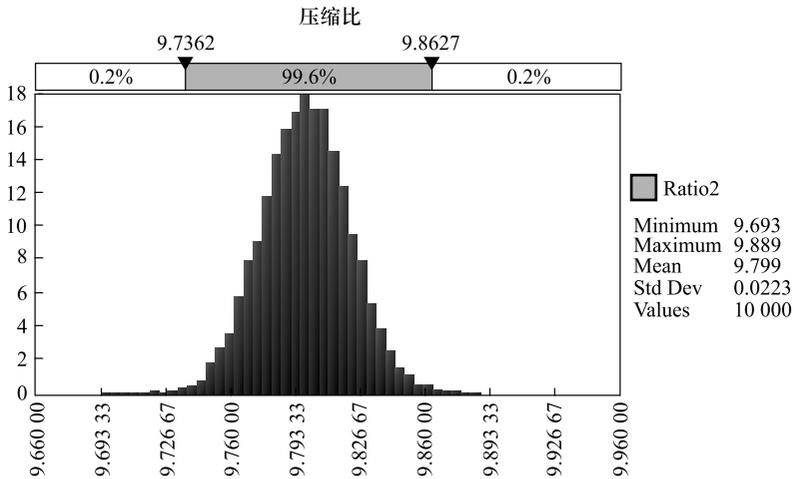
性;同时基于加工现状放松部分非关键尺寸公差,降低大批量加工成本。采用蒙特卡洛模拟优化结果,公差优化前后的压缩比分布分别如图 8 所示。结果表明,通过公差优化,提高了压缩比一致性,同时代入压缩比变动到性能仿真模型,也验证了发动机性能一致性得到很大提升。

### (三) 零件表面微米级形貌检测与诊断

目前对零件加工表面的形貌测量是由三坐标和粗糙度仪完成,无法对其精确测量和评价。通过引进高清晰光学表面测量仪器,扫描工件表面所有点的三维信息,实现大数据条件下的零件表面形貌评价及缺陷监测方法,探索三维表面形貌与加工工艺参数关联机理,实现加工工艺在线控制与优化。



(a) 蒙特卡洛模拟优化前压缩比分布



(b) 蒙特卡洛模拟优化后压缩比分布

图 8 蒙特卡洛模拟优化前、后压缩比分布

1) 提出基于高清晰测量的三维宏观形貌评价与故障诊断新方法<sup>[13]</sup>,通过灰度共生矩阵转换建立三维形貌特征表达方法,实现精密加工零件表面三维宏观形貌质量的评价和控制,如图 9 所示。

高清晰测量技术与传统零件表面测量技术不同,能够生成覆盖整个零件表面的数百万个点的点云数据<sup>[14]</sup>。高清晰测量与三坐标测量都具有较大的测量范围和横向分辨率,均可以测量零件表面的整体形貌,但是高清晰测量的测量密度高,能够对整个表面三维形貌进行高清晰的展示。高清晰测量与三维微观形貌测量都可实现对表面形貌的三维测量,均能输出数百万的三维测点,但三维微观形貌测量方法<sup>[15]</sup>的测量区域小,难以对长达数百毫米的零件的整体形貌进行测量。

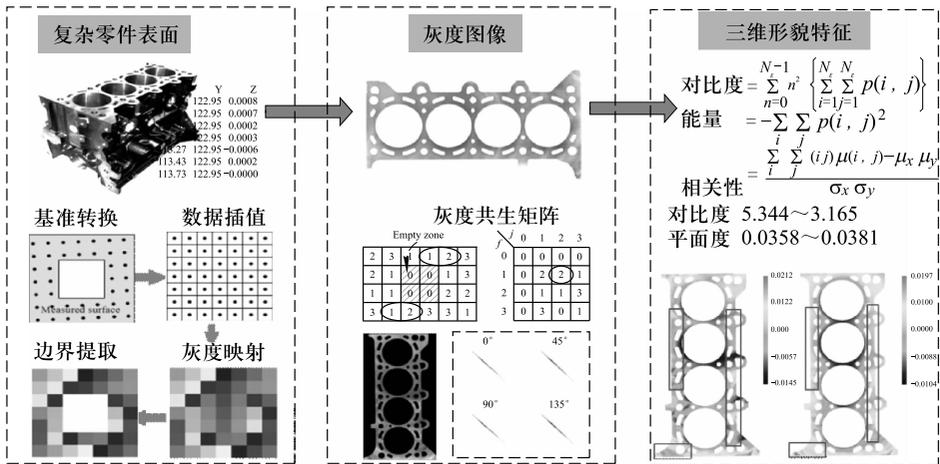


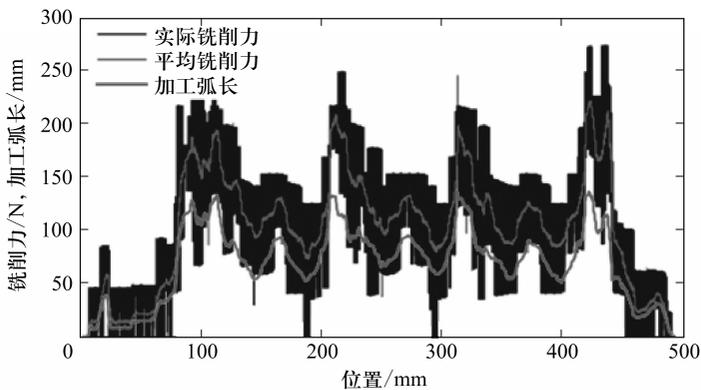
图 9 三维形貌特征表达方法

新的测量方式的出现使得对零件三维整体宏观形貌评价成为可能。传统基于滤波的三维形貌分析方法,为了消除边界效应,需要足够大小的区域数据来进行分析<sup>[16]</sup>。缸体、缸盖结合面等表面,包含缸孔、油孔、水孔等孔洞,难以得到足够大小规整区域的数据进行三维形貌分析。为了实现大尺寸不连续平面的形貌评价,提出了基于灰度共生矩阵的形貌评价方法。灰度共生矩阵根据有一定距离和一定方向的两个像素之间的灰度相关性,对图像的所有像素进行二阶统计分析<sup>[17]</sup>。首先将海量点云数据,转换为可通过多种图像处理方法分析的灰度图像;然后计算零件表面的灰度共生矩阵;最后得到反映零件三维形貌的特征值,如熵、对比度等。上述三维宏观形貌特征能够检测出传统检测方法难以发现的缺陷。例如,平面度相同的两个零件其对比度相差很大,可用来诊断零件局部误差大、四角翘曲的缺陷。

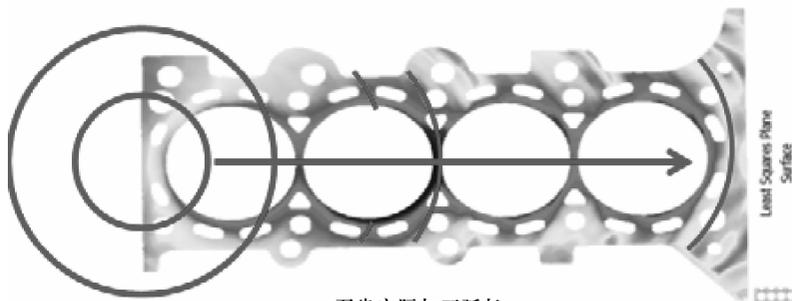
2) 发动机缸体与缸盖结合面的平面形貌是发动机制造过程中的关键质量参数,其加工精度优劣直接影响装配后是否会发生泄漏情况。通过三维形貌特征误差模式提取,建立轴向铣削力与有效加工弧长的映射关系<sup>[18,19]</sup>。

发动机缸体顶面精加工过程中,铣刀刀齿与缸体顶面相接触,在铣床的进给运动与铣刀刀盘的轴向自转运动结合下,对工件顶面材料进行削除。铣刀对缸体具有轴向铣削力,由于缸体自身存在缸孔与冷却液孔,导致不同位置与铣刀的接触面积不同,因此导致对铣刀的支撑力发生变化,在加工过程中发生了表面高低不同的形貌误差。刀齿的实际加工弧长可以反映铣刀与工件接触区域的大小。当接触区域越大(即加工弧长较长)时,缸体支撑力越大,抗挠曲越强,因此加工后的形貌高度越高;接触区域越小(加工弧长较短时)缸体支撑力较小,铣削力造成的缸体顶面挠曲较大,加工后的表面高度较低<sup>[20-22]</sup>。

在上述理论基础的支持下,通过三维形貌特征误差模式提取,建立轴向铣削力与有效加工弧长的映射关系。结果显示,弧长与轴向铣削力成正相关,如图 10 所示。该模型可用于改进走刀路径和优化弧长。实施走刀路径改进后,显著减少四角翘曲,波纹度改善了 39%,表面粗糙度也有所提高,为提高缸体缸盖结合密封性、减少泄露提供了有效保障,如图 11 所示。



(a)



刀齿实际加工弧长

(b)

图 10 加工弧长与铣削力关系分析

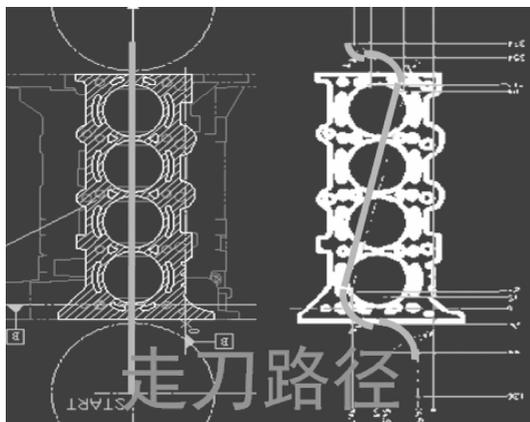


图 11 原始加工路径与改进加工路径对比

#### (四) 数字化工艺分析与加工参数优化

研究缸体、曲轴等加工过程中的误差产生、传递、累积规律,以优化工艺参数和生产线的布局,指导国产与进口装备配置的集成优化。以某机型缸孔珩磨工艺质量控制为例,经在线检测数据分析发现缸孔加工出现两头小、中间大的腰鼓形状(图 12),严重影响配合误差,因此需要从装夹位置、珩磨头结构、加工参数入手,结合有限元等数字化工艺分析方法,实现缸孔珩磨工艺优化。

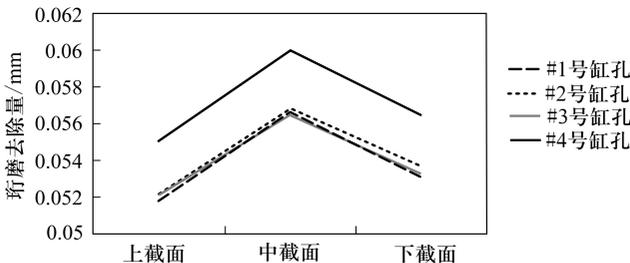


图 12 实际加工过程中珩磨去除量

1) 通过对缸体珩磨装夹和加工变形的仿真分析,提出装夹参数优化方法,提高缸孔珩磨四缸一致性。

由于切削参数改变、磨粒与待磨表面的接触状态、夹具刚度以及珩磨时的装夹方式等因素而引起的工件受力情况的变化均会导致加工过程中工件变形情况的改变,对缸孔加工精度造成影响。加工过程中,工件受力变形不仅与缸孔壁面材料的去除率有很大关系,同时它也是导致缸孔加工误差的一个重要原因<sup>[23-27]</sup>。

如图 13,针对发动机缸体珩磨进行受力分析,通过对缸体珩磨装夹和加工变形的仿真分析,得出缸体变形与正压力  $F_p$ 、扭转力矩  $M$  和轴向磨削力  $F_c$  的关系,如图 14 所示。

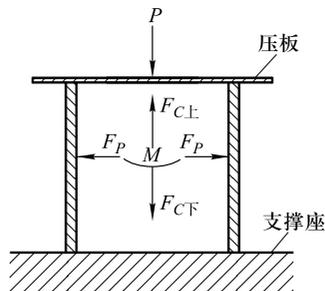


图 13 缸孔珩磨受力示意图

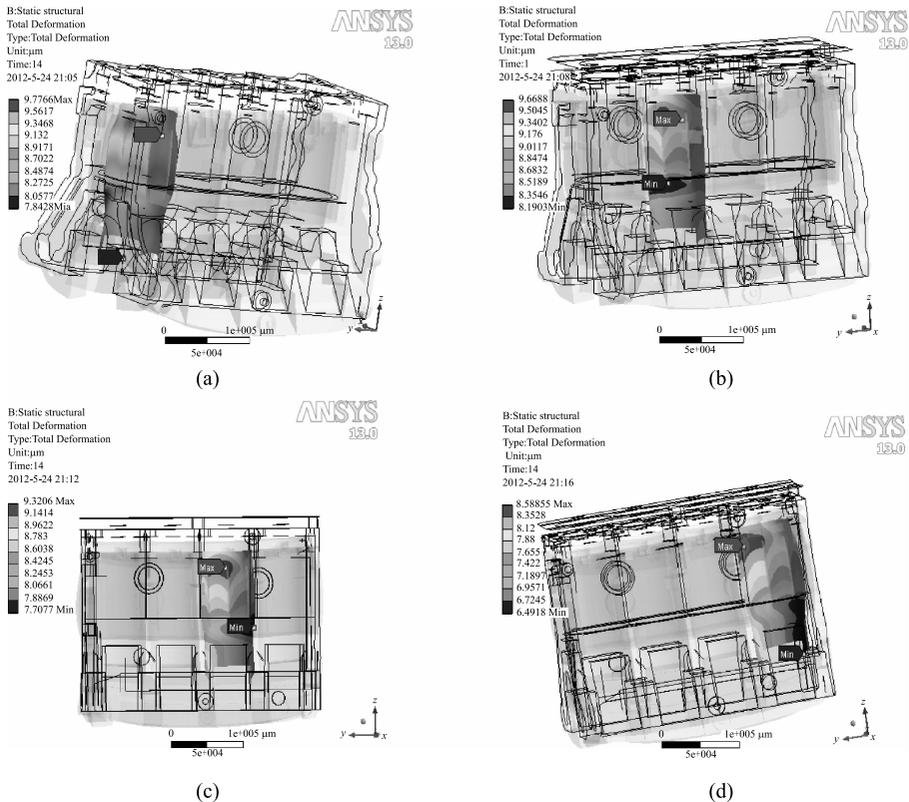


图 14 缸孔珩磨装夹和加工变形的仿真分析及优化

根据实际加工参数,通过有限元仿真分析得到孔壁面不同部位处变形量的大小,利用最小二乘法计算缸孔的圆度、圆柱度误差值。结果表明:缸体结构上的不对称导致了缸体上各部位刚度间的差别,引起了各孔受力变形差异,使得四个缸孔圆度、圆柱度误差不一致。

据此提出装夹参数优化方法:在现有装夹方式的基础上,增加缸体两侧面的支撑,提高其刚度,减小其受理变形,提高四个缸孔珩磨精度及一致性,如图 15 所示。通过有限元仿真计算分析,改进后各孔圆度和圆柱度误差均有所降低,改进后的装夹方式能有效改善各缸的形状精度和一致性,如图 16 所示。

2) 通过珩磨走刀轨迹重构,提出轨迹叠加的工艺优化方法,发明新型珩磨头结构,改进珩磨表面质量。

通过珩磨走刀轨迹重构,可以发现其珩磨工艺的内在缺陷,即中间走刀量多、两端走刀量少。根据轨迹叠加的工艺优化方法,发明油石错位安装的珩磨头结构。通过仿真计算发现,新型的珩磨头在缸孔深度方向上的走刀量更加均匀,相比较于现有珩磨头,能够有效提高缸孔珩磨的形状精度,如图 17 所示。

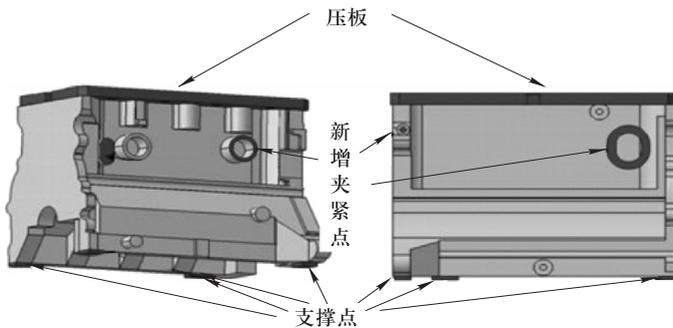


图 15 改进后的装夹方式

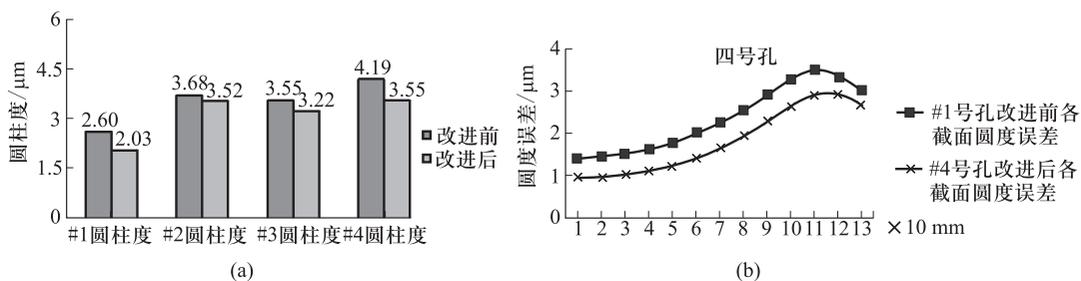


图 16 改进前后各缸圆柱度和#4号缸圆度对比

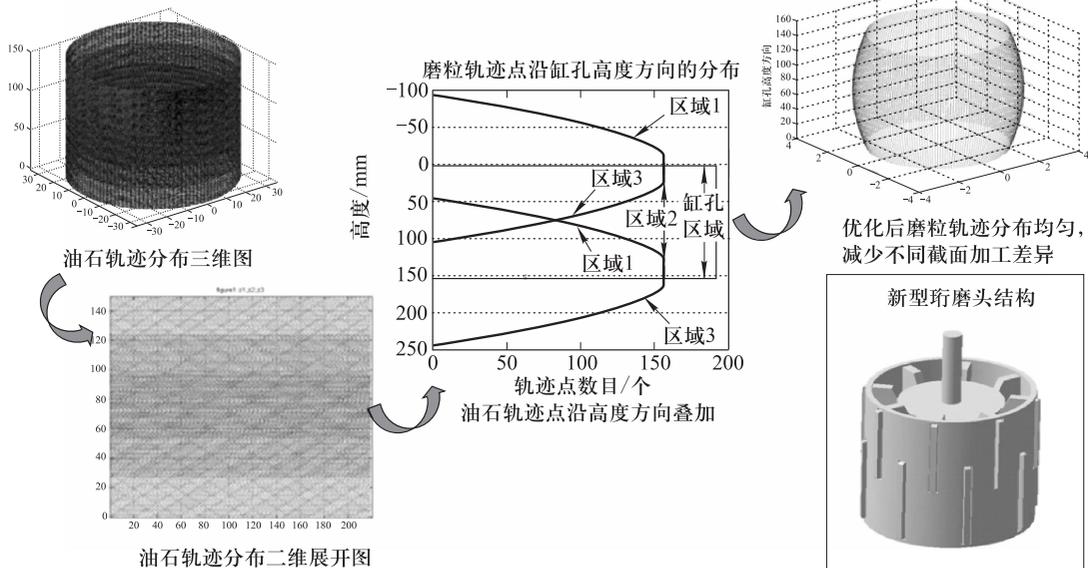


图 17 珩磨轨迹重构及优化

此外,鉴于镗削工艺的可控性更高,通过镗削的协调控制,可以提高缸孔的珩磨精度。假设缸体内孔的珩磨去除量和镗削形状一致,两者进行叠加,理论上能得到理想的圆柱形状;而实际生产中,缸孔珩磨后最终形状为小马鞍形,即镗削内孔时中间去除材料少,形成的马鞍形状起主要作用,在规定的时间内完成珩磨切削,最终没能完全修正内孔的马鞍形状,而呈现小马鞍形,如图 18 所示。

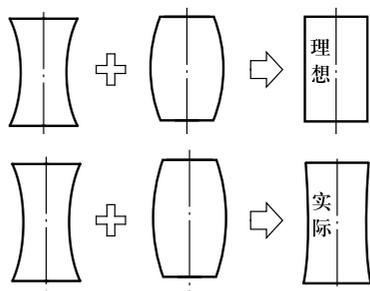


图 18 镗削形状与珩磨去除量叠加后缸孔的理想与实际情况

适当改善镗削后的“马鞍形”程度,就能提高缸孔珩磨的形状精度。通过镗削轨迹重构与镗削受力变形仿真分析,变速镗削能够有效地降低缸孔镗削后“马鞍形”程度,如图 19。优化镗削宏程序,在缸孔不同深度方向上引入进给量变化因子,镗刀进给量以先减小后增大的方式变化,最终获得理想的小“束腰形”,对试件进行跟踪,发现珩磨后,其圆度和圆柱度均有所提高。

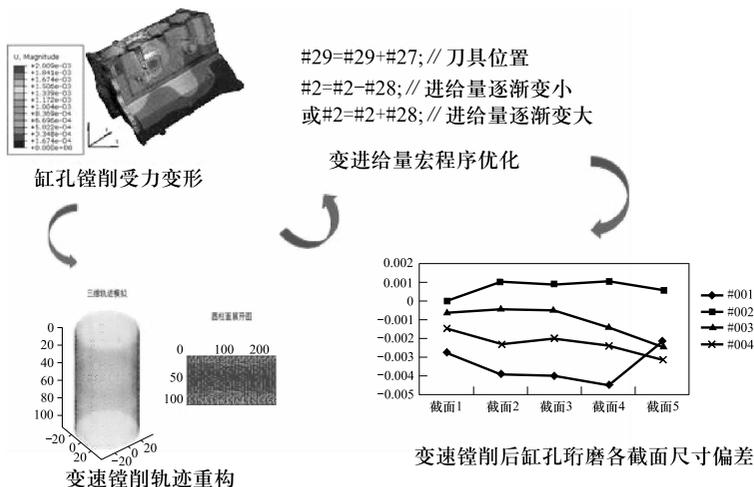


图 19 变速镗削的技术路线及实验验证

## (五) 自主检测装备开发

传统的接触式测量仪器很难实现高精度快速测量,严重制约了其在线集成和反馈控制的能力。经过技术攻关和现场调试验证,自主研发了基于光学和声学非接触式精密测量装备,适用于曲轴、燃烧室容积和压缩比的柔性自动测量,测量效率显著提高。借助数字化技术与精密测量等新方法工具,可以掌握发动机制造精度和产品性能的影响关系,对提高批量产品燃油经济性等性能指标、降低废品率和制造能耗、提升自主工艺开发能力具有重要作用。

1) 自主研制基于机器视觉的曲轴关键特征精密测量设备,适用于多种曲轴柔性自动测量,效率和精度显著提高,且可实现沟槽表面微观三维几何的建模与评价,如图 20 所示。

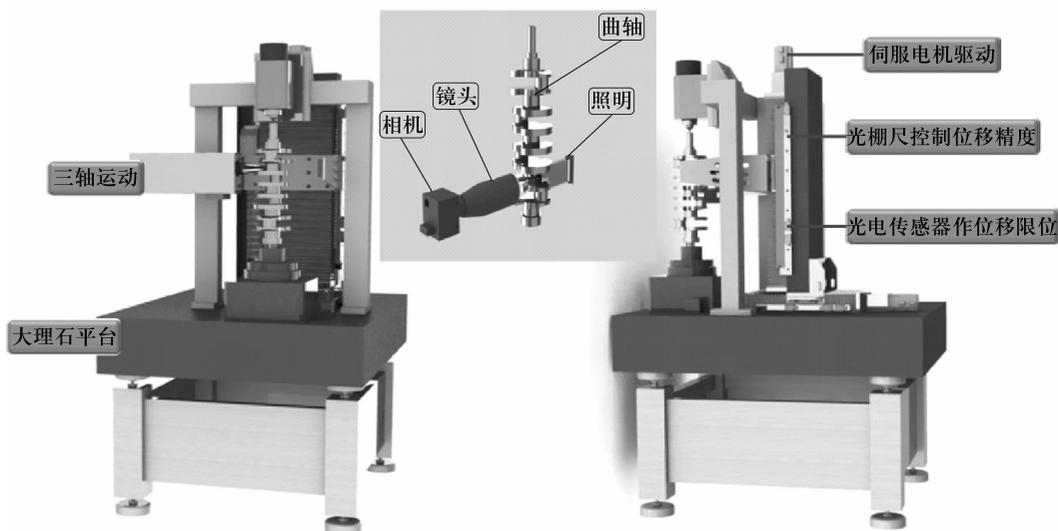


图 20 曲轴沟槽光学测量设备

该设备能够在 3 min 内实现对曲轴关键特征的自动检测,测量精度达到 0.012 mm,在满足实际生产效率要求的前提下,大幅度提高了测量效率。并且,该设备具有 360°全周测量的功能,为曲轴全周加工状态和失效诊断提供了有力工具。系统全周向三维建模如图 21 所示<sup>[28-30]</sup>。

2) 基于自主开发非接触测量传感器,研制缸盖燃烧室容积精密测量设备,不仅可为缸盖毛坯和成品的质量监控提供有效工具,也为缸盖燃烧室加工的实时反馈补偿提供了技术基础,对提高燃烧室容积的制造精度和一致性提供了保证,如图 22 所示。

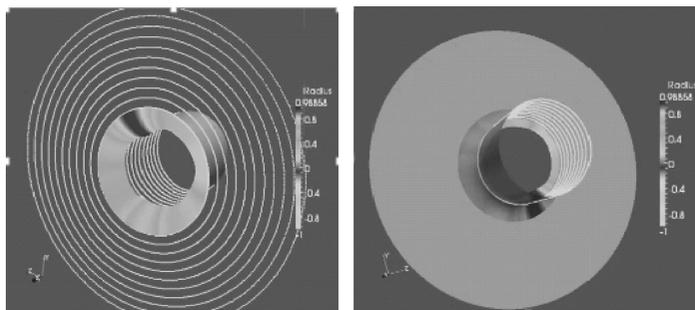


图 21 沟槽全周向三维模型



图 22 缸盖燃烧室容积光学测量设备

该设备通过自主研发的三维测量传感器,获取缸盖燃烧室点云,通过一系列滤波及容积计算程序,即点云的滤波处理、孔洞修补、曲面重建、燃烧室有效点云提取及容积计算程序等,获取缸盖燃烧室容积<sup>[31,32]</sup>。缸盖燃烧室容积检测系统流程如图 23 所示。由三维测量传感器获取的缸盖燃烧室点云如图 24 所示。



图 23 缸盖燃烧室容积检测系统流程

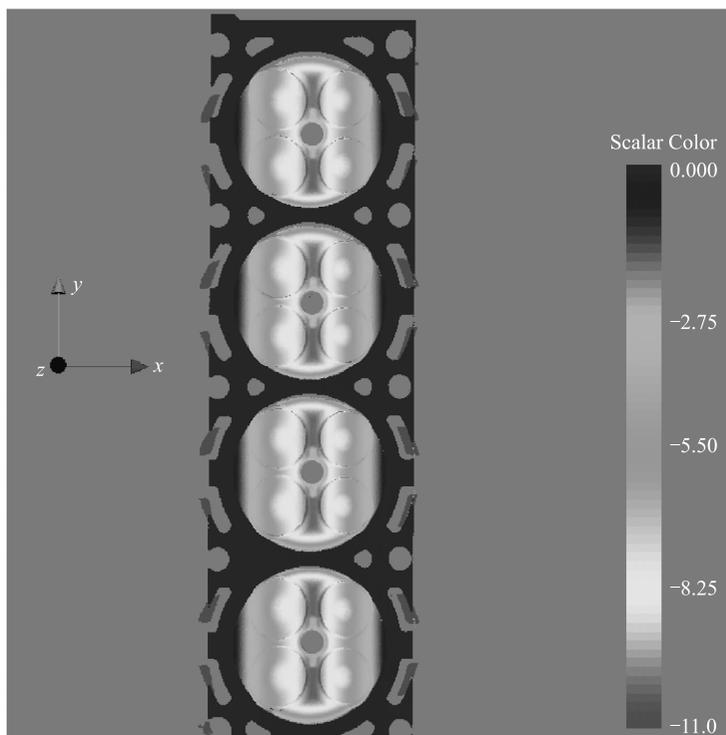


图 24 发动机缸盖燃烧室点云

3) 自主研发基于声学原理的发动机整机压缩比快速测量设备,在不拆解发动机的情况下,实现气缸容积及压缩比的快速、精密、自动测量,克服了传统滴定法测量精度和效率低下的问题。

压缩比作为影响发动机性能的重要因素之一,其大小及波动情况受零部件制造及装配精度直接影响。精密测量压缩比,为研究发动机制造精度与产品性能关系构建桥梁,同时也为评价与监控制造水平、指导发动机公差优化与标定提供重要参考。传统的滴定法测量压缩比需拆解发动机,寻找上止点,静止状态下用液体测量缸体、缸盖各部分的容积,其测量精度和效率低下,无法适应精密、批量测量的需求。为此,开发用于测量整机发动机压缩比的设备,实现快速、精密、自动测量。

气缸容积的测量基于亥姆霍兹共振原理——向带有一开口短管的刚性封闭容腔内吹气即发生亥姆霍兹共振,共振频率与容积大小  $V$  有关,满足关系式  $f = 1 / (2\pi \sqrt{M_a C_a}) = (c/2\pi) \cdot \sqrt{S/IV}$ , 根据该原理可实现容积的精密测量<sup>[33-35]</sup>。利用专门制作的测头从火花塞孔插入,测头向气缸中通入一定压力的压缩空气并拾取气缸内的声音信号,如图 25 所示。测头与数据采集卡、计算机、PLC、步进电机、光电传感器等构成了如图 26 所示的测量系统,可对曲轴转动情况下的不

断变化的气缸容积进行动态测量,并根据气缸最小容积确定发动机压缩比。

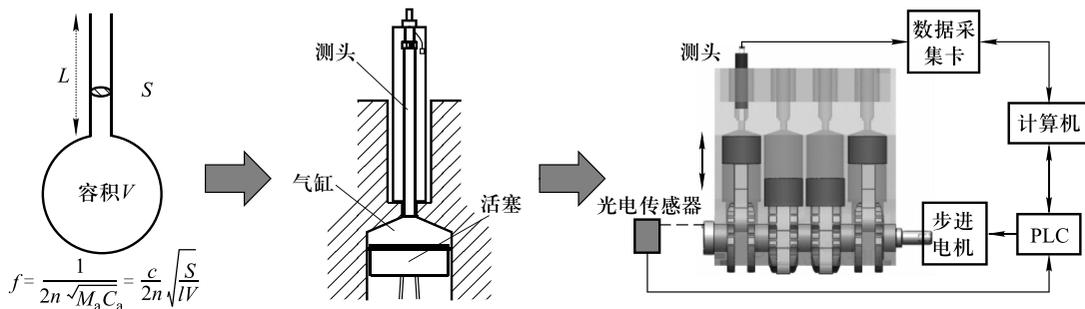


图 25 基于声学原理测量气缸容积

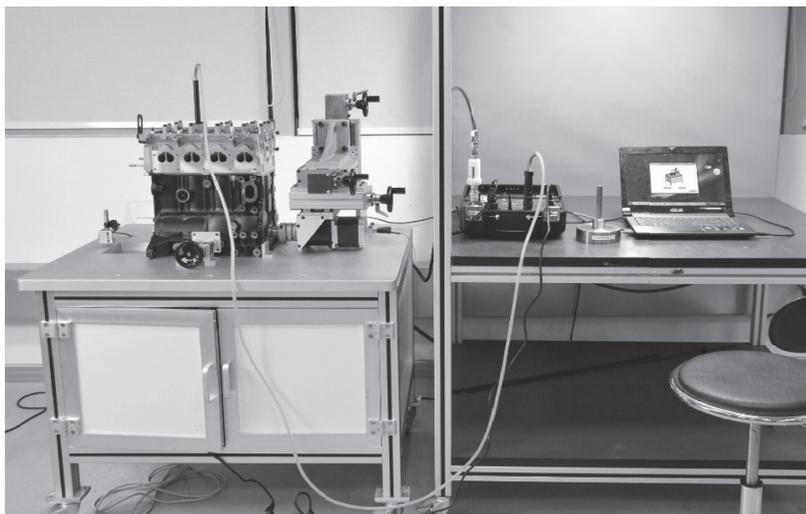


图 26 发动机压缩比快速测量设备

### 三、总结展望

“2 μm 工程”以跨学科大团队方式,通过紧密的产学研合作研究,探索构建了一套 2 μm 工程研究的系统思路与方法,在汽车发动机产品开发中初步验证了研究的可行性和有效性,可以预期的研究成果包括:2 μm 基础试验平台与成套分析方法;精密测量、加工和质量控制等自主软硬件装备;发动机工艺设计、生产线规划与制造过程控制等相关技术规范、标准和数据库;核心发明专利等知识产权等。

“2 μm 工程”是国际机械工程技术研究发展的重要方向,旨在通过具有国际先进水平的新一代发动机制造工艺和装备研发,提升大批量制造产品质量、降低制造成本,研究成果不仅有助于大幅提升汽车发动机制造精度控制与自主设计

水平,并可推广至航空发动机、燃气轮机、高档数控机床、电子制造等行业,对我国精密制造学科占领国际前沿高地具有重要意义。

## 参考文献

- [1] 徐东,鲍劲松,金焯. 复杂发动机关键机构的公差分析和优化[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 5(12): 721 - 726.
- [2] Desrochers A, Ghie W, Laperrière L. Application of a unified Jacobian-Torsor model for tolerance analysis [J]. ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2003, 3(1): 2 - 14.
- [3] Clément A, Desrochers A, Rivière A. Theory and practice of 3D tolerancing for assembly [C]//Proceedings of the CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Penn State University, USA, 1991.
- [4] Lafond P, Laperrière L. Jacobian-based modeling of dispersions affecting predefined functional requirements of mechanical assemblies [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, Porto, Portugal, 1999.
- [5] Shen Z. Tolerance analysis with EDS/VisVSA [J]. ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2003, 3(1): 95 - 99.
- [6] Zhu D, Arai T, Hamai K, et al. A numerical analysis for piston skirts in mixed lubrication-part I: basic modeling [J]. Journal of Tribology, 1992, 114(3): 553 - 562.
- [7] Zhu D, Arai T, Hamai K, et al. A numerical analysis for piston skirts in mixed lubrication-part II: deformation considerations [J]. Journal of Tribology, 1993, 115(1): 125 - 133.
- [8] Fukuzawa Y, Shimoda H, Kakuhma Y. Development of High Efficiency Miller Cycle Gas 23 Engine [J]. Technical Review, 2001, 38(3): 146 - 150.
- [9] Wang Y, Lin L, Anthony P, et al. An analytic study of applying Miller cycle to reduce  $\text{NO}_x$  emission from petrol engine [J]. Applied thermal engineering, 2007, 27(11): 1779 - 1789.
- [10] 郑建军,王金华,王彬,等. 压缩比对直喷天然气发动机燃烧与排放特性的影响 [J]. 内燃机学报, 2010, 28(1): 20 - 25.
- [11] 王志,杨俊伟,张志福,等. 缸内直喷汽油机 HCCI 燃烧对压缩比和辛烷值的适应性研究 [J]. 内燃机工程, 2008, 28(6): 11 - 15.
- [12] 胡乐明. 发动机性能参数分析及优化 [J]. 中国高新技术企业, 2010(9): 40 - 42.
- [13] Meng W, Lifeng X, Shichang D. 3D surface form error evaluation using high definition metrology [J]. Precision Engineering, 2013, 38: 230 - 236
- [14] Huang Z, Shih A J, Ni J. Laser interferometry hologram registration for three-dimensional precision measurements [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2006, 128(4): 1006 - 1013.
- [15] Mathia T G, Pawlus P, Wiczorowski M. Recent trends in surface metrology [J]. Wear,

2011, 271(3): 494 – 508.

- [16] Raja J, Muralikrishnan B, Fu S. Recent advances in separation of roughness, Waviness and Form [J]. Precision Engineering, 2002, 26(2): 222 – 235.
- [17] Dutta S, Datta A, Chakladar N D, et al. Detection of tool condition from the turned surface images using an accurate grey level co-occurrence technique [J]. Precision Engineering, 2012, 36(3): 458 – 466.
- [18] Ocafor A C, Ertekin Y M. Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(8): 1199 – 1213.
- [19] Franco P, Estrems M, Faura F. Influence of radial and axial runouts on surface roughness in face milling with round insert cutting tools [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(15): 1555 – 1565.
- [20] Gu F, Melkote S N, Kapoor S G, et al. A Model for the prediction of surface flatness in face milling [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1997, 119(4A): 476 – 484.
- [21] Lim E M, Meng C H. Integrated planning for precision machining of complex surface. Part I: cutting path and federate optimization [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, 37(1): 61 – 75.
- [22] Huang Y, Hoshi T. Improvement of flatness error in milling plate-shaped workpiece by application of side-clamping forces [J]. Precision Engineering, 2000, 24(4): 364 – 370.
- [23] Vrac D S, Sidjanin L P, Kovacetc P P. The influence of honing process parameters on surface quality, productivity, cutting angle and coefficients of friction [J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2012, 64(2): 77 – 83.
- [24] Kumar S, Paul S. Numerical modeling of ground surface topography: effect of traverse and helical super abrasive grinding with touch dressing [J]. Production Engineering, 2012, 6(2): 1 – 6.
- [25] 黄伟, 耿富荣, 王衍学. 磨削力和磨削表面粗糙度预测的新方法 [J], 航空制造技术, 2005(2): 75 – 78.
- [26] Hou Y X, Wang Q, Feng Q, et al. Study of force measurement in honing [J]. Advanced Materials Research, 2011, 314: 2381 – 2384.
- [27] Guo J Y, Yu C, Cai G Q. The influence of the grinding force to the material removal rate in the heavy load honing [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 63: 719 – 722.
- [28] Shen H T, Hu W C. Multiprimitive segmentation of planar curves—a two-level breakpoint classification and tuning approach [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(8): 791 – 797.
- [29] 李百华, 王时龙. 基于图象处理的发动机曲轴自动非接触检测系统 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2006(6): 22.

- [30] Sithole G, Vosselman G. Filtering of airborne laser scanner data based on segmented point clouds [J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2005, 36(part 3): W19.
- [31] Dey T K, Sugihara K, Bajaj C L. Delaunay triangulations in three dimensions with finite precision arithmetic [J]. Computer Aided Geometric Design, 1992, 9(6): 457 - 470.
- [32] 王泉德. 任意三角网格模型体积的快速精确计算方法 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(18): 32 - 58.
- [33] Webster E S, Davies C E. The use of helmholtz resonance for measuring the volume of liquids and solids [J]. Sensors, 2010, 10(12): 10663 - 10672.
- [34] Nishizu T, Ikeda Y, Torikata Y, et al. Automatic, continuous food volume measurement with a Helmholtz resonator [J]. International Commission of Agricultural Engineering, 2001, 3: 1 - 10.
- [35] Imanishi M, Nagashima A, Moriyama A. Measurement of combustion-chamber volume using an acoustic resonance technique [C]// Proceedings of Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1994: 589 - 592.



**林忠钦** 1957年12月出生于上海市,原籍浙江省宁波市镇海区。机械工程专家。1982年毕业于上海交通大学。1989年获得上海交通大学工学博士。现任上海交通大学教授。

将弹塑性力学、工程统计学与制造工艺相结合,开展薄板成形与装配质量控制研究。突破了薄板成形工艺稳健设计的技术瓶颈,使车身覆盖件平均废品率控制在0.5%以内,形成了汽车板精益成形技术体系;突破了离线检测条件下车身质量评价与诊断

的技术瓶颈,形成了中国汽车车身制造2 mm工程技术体系;发明了复杂薄板装配的数字化封样方法,实现了薄板装配工艺设计从经验类比向科学量化的转变,使新车型车身开发的实物试制样车大幅度减少。获国家科技进步奖二等奖3项,省部级奖9项,出版专著三部,发表国内外期刊论文270多篇,获得发明专利50多项。研究成果在汽车工业和钢铁工业得到广泛应用,为我国汽车车身设计与制造技术进步做出了重要贡献。2011年当选中国工程院院士。

## 第四部分

### 论坛研究报告

# 提高我国内燃机节能减排技术创新能力的建议

苏万华 倪维斗 秦裕琨 黄其励

内燃机广泛应用于轿车(乘用车)、商用车(卡车)、工程机械、农用机械、军用车辆、机车和船舶等动力装置,是国家的基础制造业。2011年,我国内燃机年产总功率已达13.5亿kW,每年所消耗的石油约占我国石油消费总量的60%,目前我国对外石油依存度已达54%。内燃机、汽车排出的尾气是温室气体和环境污染的主要来源之一,发展高效清洁内燃机技术是我国经济和社会发展的重大需求。

2009年美国科学院在国家能源报告中指出,“内燃机至今仍是热效率最高、功率密度最高的发动机,广泛应用于汽车等动力装置,内燃机在未来几十年仍将在移动式动力装置中占有支配地位”<sup>[1]</sup>。内燃机可以使用包括石油燃料、生物质燃料、天然气和煤制燃料等多种燃料,通过合理设计都可以实现高热效率、清洁排放和低制造成本。2009年以来,国际学术界对内燃机热效率极限进行了广泛深入的论证。2010年3月美国汽车研究理事会(USCAR)组织召开了有美国和欧洲29个权威学术机构参加的学术会议,对提高内燃机热效率的研究进行了交流,形成了会议结论<sup>[2]</sup>:“活塞式内燃机最高有效热效率,不考虑摩擦损失可以达到60%”(当前是40%或略高);“经过根本性改造,内燃机最高热效率可望超过60%,但小于85%”。2009年美国能源部(Department of Energy, DOE)宣布,将在2010—2015年投资2.7亿美元用于研发比目前卡车油耗低50%的新一代卡车,即“超级卡车”计划。为了实现这一目标,美国能源部与部分世界领先的卡车和发动机厂商合作,双方共同出资,对发动机技术和整车技术的重要领域进行创新性研究。美国能源部要求2020年重型内燃机热效率由当前的约42%提高到55%。乘用车由28%提高到45%。2009年欧盟颁布了强制性汽车CO<sub>2</sub>排放法规( EC443 - 2009 *Setting emission performance standards for new passenger cars as part of the Community's integrated approach to CO<sub>2</sub> emission from light-duty vehicles* ),要求2015年轿车的CO<sub>2</sub>平均排放低于130 g/km,2020年低于

95 g/km;2014—2017 年轻型商用车的 CO<sub>2</sub> 排放比 2007 年降低 14%,2020 年进一步减少 28%,达到 147 g/km。2009 年英国汽车委员会提出的目标是汽车发动机能源利用率达到 70%。2011 年 8 月,日本要求 2020 年乘用车燃油消耗降低 24%。

近 10 年,我国内燃机工业取得了有目共睹的进步。大中型卡车、工程机械、农用机械、移动式 and 分布式发电设备等领域,我国自主品牌柴油机工业占有绝对支配地位,并出口东南亚、非洲和南美。在乘用车(轿车)领域,也涌现了包括吉利、长安汽车和长城汽车等一大批自主品牌企业,在我国汽车工业快速发展的背景下迅速成长,改变了由国外汽车品牌一统市场的状况。

我国已经是世界内燃机制造大国,但技术创新能力和产品技术水平还比较落后,与制造大国地位不相称,远远不能适应我国能源和环境的重大需求。我国长期以来对内燃机和汽车主流产品的油耗和排放性能,没有从能源安全和环境安全的高度给予重视。主要表现为:

1) 新的节能减排法规的实施一再推迟执行,对本已落后的法规监管不力。例如,我国原计划在 2009 年开始执行“国四”机动车排放法规,实现与国际排放法规基本同步,但是拖至 2013 年也未执行。虽然有多种解读,但主要是主管部门过分考虑技术落后企业的现状。不仅如此,对于已经滞后的法规也没有认真严格的监管机制,致使一些内燃机企业长期生产落后产品,不重视产品节能减排核心技术的创新研发,导致了严重后果。第一,企业从国外咨询公司购买国外较落后的技术即可以满足我国汽车油耗和排放法规,抑制了企业自主创新的积极性,造成了引进—落后—再引进—再落后的被动局面。第二,大量高能耗、高污染的落后产能不能被淘汰,在一些领域这些落后产品出现低价竞争的局面,严重打击了企业技术进步的积极性。第三,我国内燃机关键零部件制造技术严重滞后。内燃机的技术进步主要是内燃机新型燃烧系统和整机设计思想的进步,为了实现燃烧系统和设计思想的进步,必须以内燃机关键零件、部件和系统为支撑。其中包括高强度、低惯量活塞、活塞环和高强度连杆等,以及电子控制超高压喷射“共轨燃油系统”、高效率涡轮增压系统、高速电机驱动增压系统、柴油机尾气颗粒物和氮氧化物后处理系统等。这些零部件和系统科技含量越来越高,目前我国自主品牌的零部件企业基本不具备高水平零部件和系统的研发以及生产能力,高质量零部件和系统严重依赖在华国外公司提供。我国内燃机关键零部件制造技术严重滞后的状况,与内燃机整机企业缺失新产品研发需求有关,而零部件和附件系统制造业的落后又制约了我国内燃机整机的研发。必须指出的是内燃机作为基础装备制造业,我国必须具备高水平的、完整的内燃机零部件的研发和生产链条。

2) 我国缺少提高内燃机和汽车企业技术创新能力的政策和机制。欧、美等发达国家内燃机技术的快速发展,将使我国内燃机和汽车工业面临严酷的国际竞争,我国经济发展模式的转型也将使内燃机和汽车市场由过去的卖方市场,向买方市场转变。我国从 2012 年开始执行第三阶段油耗法规,按该法规到 2015 年我国乘用车产品平均  $\text{CO}_2$  排放降至  $161 \text{ g/km}$ ,仅相当于欧盟 2006 年水平,与欧盟同时期相比油耗高出 23.8%。到 2020 年我国第四阶段燃料消耗量的  $\text{CO}_2$  排放限值预计将降至  $117 \text{ g/km}$ ,仍比欧盟标准高 23.2%。在尾气排放法规方面,我们与美国和欧盟等发达国家存在两三个法规等级的差距,发达国家 2010 年已全部执行与“欧 VI”相当的“超低排放”法规,我国尚有不能满足“欧 III”的产品上市。2013 年 3 月工业和信息化部印发五部委关于《乘用车企业平均燃料消耗量核算办法》的公告<sup>[3]</sup>,虽然提出了显著降低乘用车燃油消耗的规定,但有些计算办法并不合理。例如该公告第四章第十五条规定,“为鼓励发展节能与新能源汽车产品,在统计企业达到国家乘用车平均燃料消耗量目标时,对企业生产或进口的纯电动车、燃料电池乘用车、纯电动驱动模式综合工况续驶里程达到 50 km 及以上的插电式混合动力车,综合工况燃料消耗量实际值按零计算,并按 5 倍数量计入核算基数之和;综合工况燃料消耗量实际值低于  $2.8 \text{ L/100km}$ (含)的车型(不含纯电动、燃料电池乘用车),按 3 倍数量计入核算基数之和;其他插电式混合动力乘用车,按实际数量核算”。按照这个公告,一个汽车企业只要生产 16.7% 的电动车(或纯电动行驶里程超过 50 km 的插电式混合动力汽车),其他汽车产品的油耗不变,该企业所有汽车产品的平均油耗就“下降了”一半。该“办法”把电池的能耗按零能耗计算是不科学的,而按 3~5 倍数量计入企业产品总台数也是没有根据的。

计算实例:某企业汽车年产 100 辆,汽车的平均油耗为  $8 \text{ L/100km}$ ,如果其中 17% 为电动车,按照上述法规计算的平均油耗如下:

$$\begin{aligned} \text{所产汽车的总油耗} / \text{所产汽车产品总数} &= (83 \times 8 + 17 \times 0) / (83 + 17 \times 5) \\ &= 3.95 \text{ (L/100km)} \end{aligned}$$

则平均油耗下降:  $3.95 / 8.0 \times 100\% = 49.4\%$ 。

显然,这个“核算办法”是通过不合理的核算办法,人为地推崇纯电动车、燃料电池车等技术,客观上降低了汽车企业对其内燃机主流产品平均油耗的重视程度,对电动车倾斜了,但是对量大面广的内燃机和汽车的技术进步十分不利,对节能减排总战略不利。

为解决上述问题,提出如下建议。

#### 1. 尽快修改、完善并严格执行内燃机产品油耗和排放法规

国家有关部门应尽快修改、完善和严格执行内燃机和汽车产品的油耗和排

放法规。发达国家内燃机和汽车工业的发展经验表明,科学和严格监管的油耗和排放法规是推动内燃机和汽车工业技术进步的主要杠杆。国家应运用法规和标准这一杠杆的力量,激发我国内燃机和汽车生产厂家的创新能力,推动产品平均油耗和排放指标尽快达到国外同类产品的水平,尽快与国际接轨,实现我国由内燃机和汽车制造大国向技术强国的转化,提高产品的国际竞争力,为我国能源和环境的可持续发展做出贡献。

2. 尽快建立科学、严格的内燃机和汽车燃油消耗和排放指标的监管机制和方法,把“产品申报,通过检测,批准投产”改为“企业申报,环保部门监督执行”

我国目前对内燃机新产品批准生产的程序是,指定的检测机构按相关法规指标进行检测,并要求其主要技术特征符合有关部门规定。通过检测的产品,同时报工业和信息化部、环保部“入库”或“公告”后,方可进行生产。在实际执行中出现的问题是对实际销售和使用的产品没有监管机制。造成偷梁换柱、弄虚作假现象时有发生,严重扰乱了内燃机排放法规的正常执行,破坏了公平竞争的秩序,抑制了我国内燃机技术进步。因此建议尽快建立科学、严格的内燃机和汽车燃油消耗以及排放指标的监管机制和方法,采取企业自行申报新产品公告,在工信部和环保部备案,并指定相关机构抽查监督,建立并严格实施包括惩罚在内的监管办法。

3. 尽快完善激励企业自主创新的机制

提高技术创新能力是实现从内燃机制造大国转变为制造强国的关键。但我国目前存在着管理部门对新产品技术特征进行干预的情况。例如,我国某柴油机企业开发出了不需要尾气后处理器的“国四”柴油机,这本来是一项对国外依赖后处理器的“国四”柴油机的重要技术进步,可以大幅度降低柴油机制造成本(可达柴油机成本的1/3),节省柴油机添加尿素的运行费用和添加尿素的基础设施建设,大幅度提高柴油机的可靠性和柴油机尾气排放的可监管性。据我们了解,国内主要柴油机制造企业大都已经开发成功了无后处理器的“国四”柴油机。但是有关主管部门,在没有法规依据的情况下,以“非典型技术路线”为名,两年来不予批准生产。像这种政府干预企业技术路线的现象相当普遍,与鼓励自主创新的思想背道而驰。为了建设创新型国家,应当鼓励技术创新和市场竞争,不应干预企业创新的技术路线。只有研发效率更高、尾气更清洁、成本更低的内燃机,我们的内燃机工业才能在国内外竞争中占据主动地位。

4. 建立以技术创新为目标的产学研协同创新体系

为提高企业科技创新能力,建议国家有关部门创造更有利的发展环境,给予财政支持和政策保障,使企业能在以标准和法规为代表的社会需求和用户市场需求的共同推动下,激发创新动力,通过创新能力和产品研发的竞赛,赢得市场

的竞争力。企业的需求是建立产学研协同创新的动力。为此建议,通过竞争选择技术基础好、创新理念强的企业及相关的产学研单位,建立协同创新团队,做好示范工作,完成确定的国家目标。

### 参考文献

- [1] American Academy of Sciences. Real prospects of energy in the United States[R]. 2009.
- [2] Daw C S, Graves R L. Report on the transportation combustion engine efficiency[R]. 2010.
- [3] 中华人民共和国工业和信息化部,中华人民共和国国家发展和改革委员会,中华人民共和国商务部,等. 乘用车企业平均燃料消耗量核算办法[S]. 2013.



## 附录

## 主要参会人员名单

序号	姓名	单 位	职务/职称
1	谢克昌	中国工程院	院士、副院长
2	苏万华	天津大学	院士
3	陈念念	中国核工业集团公司核工业理化工程研究院	院士、科技委主任
4	曹湘洪	中国石化股份公司	院士、总工程师
5	林忠钦	上海交通大学	院士、常务副校长
6	秦裕琨	哈尔滨工业大学	院士
7	闻雪友	中国船舶重工集团第七〇三研究所	院士
8	叶声华	天津大学	院士
9	余贻鑫	天津大学	院士
10	李家俊	天津大学	校长/教授
11	舒歌群	天津大学	副校长/教授
12	杨 丽	中国工程院一局	副巡视员
13	贾 堤	天津市科委	副主任
14	邢 敏	中国内燃机工业协会	副会长、秘书长
15	阳树毅	中国内燃机学会	副理事长、秘书长
16	李 康	中国一汽技术中心	副总工程师
17	黄 震	上海交通大学	副校长/教授
18	尧命发	天津大学	内燃机重点实验室主任/教授
19	佟德辉	潍柴动力股份有限公司	副总裁
20	金 隼	上海交通大学	教授
21	王爱红	中国工程院	处长
22	张 宁	中国工程院	
23	纪玉娟	天津市科委院士办	副主任
24	葛 红	中国内燃机工业协会/中汽协车用发动机分会	副秘书长

续表

序号	姓名	单 位	职务/职称
25	詹樟松	长安汽车动力研究院	院长
26	林铁坚	广西玉柴机器股份有限公司工程研究院	副院长
27	冯明志	中国船舶重工集团公司第七一一研究所	副所长
28	张孔明	绿能控股集团	董事长
29	平 涛	中国船舶重工集团公司第七一一研究所	研究员
30	帅石金	清华大学	教授
31	裴普成	清华大学	教授
32	李雁飞	清华大学	博士
33	刘福水	北京理工大学	教授
34	张玉银	上海交通大学	教授
35	孔令逊	上海交通大学	教授
36	谢晓敏	上海交通大学	副教授
37	王树新	天津大学	机械学院院长/教授
38	宋轶民	天津大学	机械学院党委书记/教授
39	李桂新	中国汽车工业协会	主任
40	杜 青	天津大学	教授
41	谢 辉	天津大学	教授
42	姚春德	天津大学	教授
43	高文志	天津大学	教授
44	张俊红	天津大学	教授
45	王天友	天津大学	教授
46	裴毅强	天津大学	副教授
47	侯圣智	天津大学内燃机研究所	博士
48	贾 滨	天津大学内燃机研究所	研究员
49	胡春明	天津大学内燃机研究所	研究员
50	祖炳锋	天津大学内燃机研究所	副教授
51	秦 静	天津大学内燃机研究所	副研究员

续表

序号	姓名	单 位	职务/职称
52	楼狄明	同济大学	教授
53	李理光	同济大学	教授
54	胡志远	同济大学	副教授
55	尤林华	中国汽车技术研究中心	研究员
56	宋恩哲	哈尔滨工程大学	副研究员
57	刘 友	哈尔滨工程大学	博士
58	董 全	哈尔滨工程大学	博士
59	杨晓涛	哈尔滨工程大学	博士
60	马修真	哈尔滨工程大学	教授
61	王贺春	哈尔滨工程大学	博士
62	杨传雷	哈尔滨工程大学	博士
63	孙永瑞	哈尔滨工程大学	博士
64	蒋炎坤	华中科技大学	教授
65	袁文华	邵阳学院	教授
66	林学东	吉林大学	教授
67	刘忠长	吉林大学	教授
68	赵国群	山东大学	教授
69	李方义	山东大学	教授
70	李剑峰	山东大学	教授
71	田学雷	山东大学	教授
72	李国祥	山东大学	教授
73	隆武强	大连理工大学	教授
74	王 铁	太原理工大学	教授
75	韩志强	西华大学	副教授
76	刘宝莉	科学出版社	副编审
77	梁世希	绿能控股集团	
78	金则兵	绿能控股集团	

续表

序号	姓名	单 位	职务/职称
79	周 群	绿能控股集团	
80	阳松林	东风商用车有限公司技术中心	
81	殷 勇	东风商用车有限公司技术中心	
82	李海言	东风商用车有限公司技术中心	
83	陈小迅	东风商用车有限公司技术中心	
84	钱多德	安徽江淮汽车股份有限公司	
85	杨永忠	昆明云内动力股份有限公司	
86	王玉春	潍柴动力股份有限公司	
87	孙奎崧	潍柴动力股份有限公司	
88	任冲冲	潍柴动力股份有限公司	
89	周月亭	仪征双环活塞环有限公司	
90	高 景	中国船级社武汉规范研究所	
91	雷 伟	中国船级社武汉规范研究所	
92	王仁辉	龙口龙泵燃油喷射有限公司	
93	黄爱源	江苏金湖输油泵有限公司	
94	朱志强	湖南天雁机械有限责任公司增压器研究所	
95	韩雪莲	烟台润蚌祥油封有限公司	
96	李爱红	烟台润蚌祥油封有限公司	
97	张建鹏	烟台润蚌祥油封有限公司	
98	陈晓华	内江金鸿曲轴有限公司行政部	
99	王柏生	安徽白兔湖动力有限公司技术中心	
100	赵卫东	山东鑫亚工业股份有限公司	
101	赵霄鹏	东风朝阳朝柴动力有限公司开发处	
102	钟晓渝	中国重汽集团杭州发动机有限公司	
103	吴 青	柳州五菱柳机动力有限公司规划发展部	
104	王 平	无锡威孚英特迈增压技术有限公司	
105	张明珠	无锡威孚英特迈增压技术有限公司	

续表

序号	姓名	单 位	职务/职称
106	李 德	怀集登云汽配股份有限公司技术中心	
107	吴松平	合肥恒信汽车发动机部件制造有限公司	
108	刘永东	莱州日进机械有限公司	
109	张金伟	绵阳富临精工机械股份有限公司	
110	许国卫	广西玉柴机器股份有限公司产品应用开发部	
111	杨育军	昆明云内动力股份有限公司办公室	
112	屈满财	中国重汽集团重庆燃油喷射系统有限公司技术部	
113	卢卓华	东风康明斯发动机有限公司	
114	李来群	道依茨一汽(大连)柴油机有限公司	
115	李永华	淄博永华滤清器制造有限公司	
116	孙 浩	四川中自尾气净化有限公司	
117	李香娥	中汽协车用发动机分会	
118	赵 敏	中汽协车用发动机分会	
119	朱洪超	中国内燃机工业协会	
120	张永莲	潍坊富源增压器有限公司技术中心	
121	余 超	中汽成都配件有限公司	
122	陈 伟	武汉市菱电汽车电子有限责任公司	
123	朴真松	巴斯夫催化剂(上海)有限公司	
124	宗华甫	合肥恒信汽车发动机部件制造有限公司	
125	褚 霞	无锡威孚力达催化净化器有限责任公司	
126	董 兵	济南沃德汽车零部件有限公司	
127	董旭兵	烟台润蚨祥油封有限公司	
128	费 波	中国重汽集团杭州发动机有限公司	
129	贾贵起	东风朝阳朝柴动力有限公司开发处	
130	刘小军	南岳电控(衡阳)工业技术有限公司	

续表

序号	姓名	单 位	职务/职称
131	吕子丰	天纳克同泰(大连)排气系统有限公司市场开发部	
132	王 东	中国一汽无锡油泵油嘴研究所行业部	
133	王 航	康跃科技股份有限公司技术中心	
134	王子琬	华晨汽车集团控股有限公司发动机工厂销售服务处	
135	吴小军	一汽解放汽车有限公司无锡柴油机厂研发部	
136	谢正良	广西玉柴机器股份有限公司	
137	徐云峰	无锡威孚高科技集团股份有限公司	
138	于孝源	天纳克同泰(大连)排气系统有限公司市场开发部	
139	张志强	安徽白兔湖动力有限公司技术中心	
140	黄 萧	江苏金湖输油泵有限公司	
141	黄丽玲	潍柴动力扬州柴油机有限责任公司	
142	邓德伟		

# 后 记

科学技术是第一生产力。纵观历史,人类文明的每一次进步都是由重大科学发现和技术革命所引领和支撑的。进入 21 世纪,科学技术日益成为经济社会发展的主要驱动力。我们国家的发展必须以科学发展为主题,以加快转变经济发展方式为主线。而实现科学发展、加快转变经济发展方式,最根本的是要依靠科技的力量,最关键的是要大幅提高自主创新能力。党的十八大报告特别强调,科技创新是提高社会生产力和综合国力的重要支撑,必须摆在国家发展全局的核心位置,提出了实施“创新驱动发展战略”。

面对未来发展之重任,中国工程院将进一步加强国家工程科技思想库的建设,充分发挥院士和优秀专家的集体智慧,以前瞻性、战略性、宏观性思维开展学术交流与研讨,为国家战略决策提供科学思想和系统方案,以科学咨询支持科学决策,以科学决策引领科学发展。

工程院历来重视对前沿热点问题的研究及其与工程实践应用的结合。自 2000 年元月,中国工程院创办了中国工程科技论坛,旨在搭建学术性交流平台,组织院士专家就工程科技领域的热点、难点、重点问题聚而论道。十年来,中国工程科技论坛以灵活多样的组织形式、和谐宽松的学术氛围,打造了一个百花齐放、百家争鸣的学术交流平台,在活跃学术思想、引领学科发展、服务科学决策等方面发挥着积极作用。

至 2011 年,中国工程科技论坛经过百余场的淬炼,已成为中国工程院乃至中国工程科技界的品牌学术活动。中国工程院学术与出版委员会今后将论坛有关报告汇编成书陆续出版,愿以此为实现美丽中国的永续发展贡献出自己的力量。

中國工程院

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120