中国工程科技论坛

先进热处理的重要性 和发展战略

Xianjin Rechuli De Zhongyaoxing He Fazhan Zhanlue

第134场中国工程科技论坛—先进热处理的重要性和发展战略



中国工程科技论坛—先进热处理的重要性和发展战略参会人员合影(2012.8.28)

内容提要

本书是中国工程院中国工程科技论坛系列丛书之一。 该书力图阐明在先进装备制造业中热处理是调控材料性能、提高产品使用寿命、可靠性和安全性的关键技术,也是实现产品轻量化的重要途径,因此先进热处理和表面改性技术是国家核心竞争力。 我国热处理技术落后并被边缘化和附属化,已成为制约我国装备制造业发展的瓶颈,大力发展先进热处理技术是实现由制造业大国向制造业强国转变的必由之路。 在深入剖析我国热处理现状和国内外发展趋势的基础上,本次论坛提出了关于我国热处理发展战略的建议,可供装备制造业工程技术人员和决策层管理人员,以及各级政府主管部门决策人员阅读和参考,也可供高等学校装备制造、机械工程、材料科学与工程等相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

先进热处理的重要性和发展战略 / 中国工程院编著.

北京:高等教育出版社,2013.5 (工程科技论坛)

ISBN 978 - 7 - 04 - 037272 - 4

I. ①先… Ⅱ. ①中… Ⅲ. ①热处理 - 研究 Ⅳ. ①TG15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 075450 号

总策划 樊代明

策划编辑 王国祥 黄慧靖 责任编辑 朱丽虹

封面设计 顾 斌 责任印制

出版发行 高等教育出版社 咨询电话 400-810-0598 址 北京市西城区德外大街4号 社 bl http://www. hep. edu. cn 邮政编码 100120 http://www. hep. com. cn 钔 刷 网上订购 http://www.landraco.com 开 本 850mm × 1168mm http://www.landraco.com.cn 印 张 字 数 千字 版 次 年 月第1版 页 1 插 印 次 年 月第 次印刷 购书热线 010-58581118 定 价 60.00 元

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 37272-00

编辑委员会

主 任:赵振业 潘健生

副主任:林忠钦 周 玉 翁宇庆

委 员:阮雪榆 吴毅雄 杨晓秋

凌 进 顾剑锋 雷明凯

(按姓氏笔画排序)

目 录

第一部分 综述

综述	3
第二部分 主题报告及报告人简介	
我国热处理发展战略的探讨	9
发展热处理和表面改性技术,提升国家核心竞争力 赵振业	34
热处理对自韧化 α - SiAlON 陶瓷显微组织与力学性能的影响 ··· 周 玉	40
核泵零部件热处理与表面改性原理及应用 雷明凯	51
智能热处理及其发展前景 顾剑锋	58
附录 参会人员名单	73
后记	75

第一部分

综 述

综 述

热处理工艺已经有几千年历史,对人类文明进步做出了巨大贡献。在现代装备制造业中,热处理是改善和控制材料性能,提高产品使用寿命、可靠性和安全性的关键工艺,也是实现装备轻量化的重要途径。因此,热处理在发达国家受到高度重视,已成为装备制造业竞争力的核心要素之一,并且国外关于热处理技术对我国实施严格的技术封锁。我国热处理技术落后并被边缘化和附属化,许多机械产品使用寿命、可靠性和安全性都远低于国外先进水平,很多关键零部件不得不依赖进口或者热处理和表面改性工艺装备依赖进口,已成为我国先进材料和高端装备制造中的瓶颈问题,制约着我国装备制造业的发展。为了应对日趋激烈的国际竞争,我国装备制造业转型迫在眉睫,而先进装备制造业发展更需要先进热处理支撑。要想从制造大国向制造强国转变,必须要发展先进热处理技术,这是必经之路。

从2000年开始,由中国工程院举办的各类中国工程科技论坛在促进我国工程科技事业发展,促进工程科技重大方向性和前沿性问题的研究,提高我国工程科技创新能力和管理水平方面起到了巨大的推动作用。因此,在潘健生院士和赵振业院士的共同努力下,举办本场中国工程科技论坛,旨在认识到先进热处理的重要性,剖析我国热处理现存的问题和落后原因,谋划我国热处理的发展战略,对于提高我国装备业自主创新能力和核心竞争力都有十分重要的意义。

2012 年 8 月 28 日,由中国工程院主办的第 143 场中国工程科技论坛——先进热处理的重要性和发展战略在沪召开。论坛主席由北京航空材料研究院赵振业院士和上海交通大学潘健生院士共同担任。本次论坛突出了热处理技术在我国高端制造业发展中的重要作用和发展战略,得到了中国工程院的高度重视。

本次论坛由中国工程院机械与运载工程学部,中国工程院化工、冶金与材料工程学部,上海交通大学,全国热处理学会和上海市中国工程院院士咨询与学术活动中心共同承办,上海热处理学会和上海电站装备材料产业联盟协办。

中国工程院机械与运载工程学部主任李培根院士、上海市科学技术委员会副巡视员施强华和上海交通大学常务副书记苏明出席开幕式并致辞。阮雪榆院士、江东亮院士、徐志磊院士以及来自全国各地170余位相关领域的专家、企业代表和政府部门负责人出席论坛并参与讨论。

论坛邀请北京航空材料研究院赵振业院士、上海交通大学潘健生院士、中国

4 中国工程科技论坛:先进热处理的重要性和发展战略

钢研科技集团公司翁宇庆院士、哈尔滨工业大学周玉院士、大连理工大学雷明凯教授、上海交通大学顾剑锋教授、上海重型机器厂有限公司凌进副总经理等7位专家做主题报告。报告结束后所有与会专家围绕论坛主题和报告内容,展开了热烈讨论,会上产生的有关观点归纳如下:

1. 提高认识

充分认识到热处理是提高材料性能的"内因",是决定各类机械制造业产品的内在质量,提高使用寿命和可靠性的关键技术,是国家竞争力的核心要素。热处理技术水平的提高是新一代产品开发的重要支撑,是自主创新的活力源泉,是建设材料强国和制造强国的根基和必由之路。各级政府部门、企业界、高校和研究所应该就热处理的战略地位和重要性达成共识,共同推进热处理的迅速发展。

2. 目前现状

- 1)我国热处理设备和规模与制造业大国相称,种类齐全,但热处理技术水平落后,以致我国制造业产品的寿命、可靠性、安全性与国外水平有很大差距,只能大量制造低附加值的中、低端产品,以沉重的环境和资源代价,换取微薄利润,不少高端装备或关键零部件依赖进口,威胁到我国的经济安全和国家安全。
- 2)企业忽视热处理工序,技术人员严重不足,重产品开发,轻关键技术研究,重冷加工轻热加工,重成形轻控性。粗放式生产,追求产量不重视质量,无热处理监督机构和体制。
- 3) 热处理基础研究日渐凋零,热处理专业迅速萎缩,人才培养受到了限制。 目前热处理专业挂靠在材料或机械学科,不恰当地附属于成形制造,被边缘和附 属化,研究工作很难拿到题目,热处理发展举步维艰。

3. 发展战略

- 1)从国家层面上,充分认识到热处理的重要性和关键作用,在制定发展规划、课题立项、资金投放等方面给予热处理专业更多的倾斜。
- 2) 热处理专业设置需要改革,将热处理专业纳入到国家特色专业建设;或者向政府部门建议建设材料制造学科,包括热处理、铸造、焊接、锻造等材料热加工专业;或者在机械学科中设立与凝固成形、塑性成形、焊接等成形制造相并列的以热处理为核心的控性制造学科,而在材料科学学科中,就热处理的共性问题设立相关的研究课题。使热处理摆脱在学科设置中被边缘化和附属化的尴尬地位,为基础研究和人才培养提供有利条件。
- 3)建议政府在我国工业界更大范围内建设一个热处理统一战线,因为不仅机械制造行业需要先进热处理,冶金系统、能源系统、交通系统、航空航天系统等很多领域也需要高精尖的热处理技术。
 - 4)聚焦有限目标,创新竞争发展。关注国家急需解决的重大需求。重点发

展跟先进材料和关键基础构件相关的先进热处理技术,实现轴承、齿轮、叶片等关键构件的优质化,建立品牌,提升核心竞争力。一方面应抓紧提升国内现有的各种热处理,诸如真空热处理、高能束热处理、感应热处理、离子/等离子体表面改性、大锻件热处理等工艺和装备的水平,另一方面,我国热处理有必要克服安于模仿和低水平重复的惰性,密切关注现代高科技发展,及时将其他领域的新技术应用于热处理,促进热处理重大创新。

- 5)推行热处理精益生产,深入研究热处理工艺并精确控制,大力发展智能 热处理技术及装备,积极采用先进技术和炉用材料,切实提高热处理设备的制造 质量,建立严格的维护保养制度、健全传感器标定和校验制度,完善热处理设备 的维护保养和日常工作状态的监测,实现生产全流程质量控制与管理。
- 6)加强热处理基础研究,尤其对共性基础问题的研究。热处理是跨材料学与机械学的制造技术,也是两大类学科交叉的重要领域,它以相变原理、扩散理论、强化机理等材料科学基本理论为依据基础,热处理工艺和设备还涉及传热学、流体力学、热弹性力学、电磁场、等离子体物理等相关的基础理论。
- 7)发展信息化的智能热处理技术。包括热处理虚拟生产,热处理设备虚拟制造,全流程管理质量,生产过程智能控制,产品全生命周期优化。其核心技术是热处理的计算机数值模拟,是使热处理从传统的经验技艺型跨越为科学计算型不可或缺的手段。需要建立微观组织精确计算的模型和性能场预测模型,准备描述热处理过程的边界条件如表面换热系数和气氛物质传递系数,搭建并逐步完善材料数据库与热处理数据库,开发专业软件,进而建设热处理虚拟制造中心和远程网络服务中心。

部分与会代表于次日(8月29日)参观了上海重型机器厂,对国家重型装备制造业有了直观的认识,更深刻意识到热处理对提升企业自主创新能力,提高高端装备制造业技术水平做出的突出贡献。

对本论坛组织工作的总结

- 1. 中国工程科技论坛的主题要与国家产业发展战略相结合。中国工程科技论坛是中国工程院的品牌学术活动,每次活动都要突出"工程科技"的特点,要结合行业需求,解决当前产业调整中遇到的问题;
- 2. 要吸引企业参与讨论。企业是科技创新的主体,很多新工艺、新技术、新设备的研发,都离不开企业的参与,并且企业对我国在产业调整中面临的机遇和挑战应该最具发言权。论坛也应为企业面临的困难,提供良策;
- 3. 会后能形成重要的报告或建议。工程院是我国最高的咨询性学术机构, 论坛形成的咨询报告或院士建议,都可为热处理行业的可持续发展提供方向;

- 6 中国工程科技论坛:先进热处理的重要性和发展战略
- 4. 其他会务组织工作。本次论坛的组织工作得到中国工程院机械与运载 工程学部办公室的大力支持,在邀请院士、有关部委等方面做了很多工作,也得 到上海院士中心等有关单位的支持和配合,较为圆满地完成了论坛的组织工作;
- 5. 存在的不足。对于参会人数预估不足,本次论坛预计参会人数 80 人,实际到会人数超过 170 人,这造成论坛资料印刷、餐饮等相关工作准备相对不充分。

第二部分

主题报告及报告人简介

我国热处理发展战略的探讨

潘健生等

上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海交通大学材料科学与工程学院

摘要:我国热处理与世界先进水平有很大差距,以致制造业产品的寿命低、 可靠性安全性差,只能大量生产中低端产品,以沉重的环境与资源代价换取微薄 的利润,难以可持续发展。许多高端装备或关键零部件依赖进口,威胁国家安 全。亟需改变热处理在我国未受应有重视的现状,正确认识热处理在先进制造 业中的关键作用和核心技术的地位。努力提高我国热处理水平,突破制约我国 由制造业大国向制造业强国转变的瓶颈,是一项紧迫而艰巨的任务。我国热处 理发展战略的要点大致有三方面。1)推行热处理精益生产、革除粗放式恶习, 是当前要务。采用分析测试 - 计算机模拟 - 生产试验相结合的技术路线,开展 热处理工艺研究和热处理设备虚拟设计,并实施严格的生产过程控制,切实提高 热处理质量。2)立足长远,加强热处理基础研究。相变理论、微观组织与性能 的关系及其调控原理、正确反映各种外场对材料内部演变的复杂影响的多学科 交叉研究等等有待开展。这些研究涉及面广,难度很大,需要给予充分和持续的 支持。3)发展信息化智能热处理技术。充分利用信息化的优越性,融合多学科 基础理论知识和科技新成果,发展高度知识密集型的智能热处理技术,是我国热 处理实现跨越式发展,攀登世界顶峰的必由之路;并将成为整个制造业智能制造 的重要组成部分,具有重大而深远的意义。

一、前言

新中国成立前,一穷二白的旧中国热处理几近空白。新中国成立以来,我国 热处理工作者艰苦奋斗使我国热处理从无到有、由小到大不断发展,为我国装备 制造业的发展壮大作出了无可替代的重要贡献,留下不可磨灭的功绩。特别是 改革开放以来我国热处理发展迅猛,据中国热协不完全统计,到"十一五"期末, 全行业共有热处理企业(含专业化厂、热处理设备制造厂、热处工艺材料生产企 业及主机厂的热处理分厂、车间)约18000家,其中年产值2000万元以上的约 100 余家、500 万元以上的近 6000 余家。全行业热处理生产设备近 10 万标准台 (150 kW·h/台),装机容量约 1500 万 kW,年耗电约 230 亿 kW·h。全行业规模以上企业实现销售收入 560 亿元。全行业职工约 54 万人,全员劳动生产率平均 11 万元/人年。论规模已与制造业大国相称。就技术种类而言,各种整体热处理、化学热处理、感应加热、高能束表面改性、形变热处理、气相沉积、真空热处理等等,可谓门类齐全,支撑着我国现有制造业的运行。

在肯定成绩的同时也应清醒地认识到,我国制造业高端产品的寿命、可靠性、安全性与国外水平有很大差距,不少高端装备或关键零部件依赖进口,威胁到我国的经济安全和国家安全。更面临着后金融危机时期将引发的新一轮工业革命的挑战,我国装备制造业转型已时不待我。因此,深入剖析我国热处理所存在的问题,探索解决途径,调整发展战略,已成当务之急。

二、我国热处理发展中存在的问题

我国热处理与世界先进水平的差距主要反映在质量差、能耗大和高端热处理装备依赖进口等方面。

(一) 热处理质量难以适应高端装备和关键零部件的要求

以轴承为例:我国滚动轴承产量已占世界 60% 左右,但时速 200 公里以上的铁路轴承、转速 2500 r/s 以上的精密机床轴承、大功率风力发电机主轴变速器轴承、大型轧钢机轴承等高端轴承不得不依赖进口。

滚珠丝杠,国内已能制造精度最高的0级丝杠,但同一企业制造的丝杠,精度保持时间最好的可以超过600万次往复,低的只有几万次甚至更低,国产滚珠丝杠的技术指标为平均10万次,与国外名牌产品承诺不低于100万次无法相比,以致我国高档数控机床只能选用进口的滚珠丝杠。

江西某厂生产的螺旋泵是仿制国外产品,外型与功能都与进口泵一致,但进口泵没有发生过螺杆芯轴断裂事故,国产泵则经常出现,即便改用更高档的材料亦未见好转。因故障率太高,售后服务无法跟上,只好免费为用户提供备用泵,不但增加成本,而且难以令用户满意,不得不低价销售。

变速箱是广泛应用于各类机械的通用部件,改革开放以来,我国变速箱行业 发展很快,但因热处理质量不高,齿轮承载能力低,只能增大齿轮模数,以致变速 箱的体积和重量,明显大于国外同样功率变速箱器,即便如此,断齿等恶性事故 仍时有所闻。

浙江省宁波地区和台州地区被称为模具之乡。大量制造各类模具,包括高精度组合模具,但制造高品质的大型模具,尚力所难及。问题不在于加工精度,

而在于热处理水平。例如汽车变速箱箱体铝合金压铸模,目前还得依赖进口,每 套价格达几千万元。宁波地区某企业投入2亿元,建立了由四台大型精密的加 工中心和一台非接触精密测量仪组成的生产线,具有自动准确测绘、自动数控加 工的功能,为上海汽车集团制造了整套铝合金压铸模,试用效果令人满意,压铸 件的精度完全达到了要求。于是又供货三套,其中一套销往美国,可是模具不久 即损坏,打乱了汽车厂的生产计划,造成经济损失,用户向模具制造厂提出巨额 索赔。台州地区一家塑料机械厂生产宽幅薄膜吹塑机,其关键是上下两块模板, 宽度达2~3 m,平直度要求很高。虽然机械加工精度可以满足要求,但因没有 掌握提高尺寸稳定性的热处理技术,模板使用时很易因变形而失效,寿命很低。

以上案例表明,虽然我们装备制造业的机械加工水平提高很快,数控机床、 加工中心、非接触精密测量仪等先进装备的广泛应用,众多形状复杂、精度要求 很高的零部件和整机国内都有能力制造(例如不仅能制造0级丝杆,而且可以制 造用于加工0级丝杆的成套机床),但存在长期被忽视的短板——热处理质量 差,以致产品的寿命和可靠性和世界先进水平存在巨大差距。在中低端领域,我 国基本上尚处仿制、代工阶段,大量制造国外早年开发的产品。由于在其开发的 年代技术水平还不可能较充分发挥材料的潜力,设计时材料性能指标并不高,热 处理也就比较容易达到要求。这类产品量大而附加值低,况且由于使用寿命低 于国外,只好低价销售,付出沉重的环境、资源代价换取微薄利润,何以可持续发 展!

在高端领域,国内有可以制造出样机成为好看的展品,但却无法形成耐用的 商品,其原因正是热处理水平落后,以致高端装备或关键零部件不得不依赖进 口,威胁我国的经济安全和国家安全。

(二)能耗大,环境污染严重

20 世纪 70 年代末,欧洲热处理单位能耗达到 400 kW·h/t 以下,日本达到 300 kW·h/t 以下。我国同期的热处理能耗是 1200~1300 kW·h/t,到"十一 五"期末降到约600 kW·h/t,虽然已取得很大进步但仍远高于70年代世界先 进水平。加以淬火油烟和保护气氛热处理尾气大量排放,环境污染严重。热处 理的高能耗和高污染已成为难以承受之重。

(三)高端热处理设备依赖进口

我国热处理与国际先进水平的差距还突出表现在热处理装备的设计制造严 重落后,高端的热处理和表面改性工艺装备依赖性进口,重复引进,落后一引 进一再落后一再引进的现象相当严重,高端设备的售价是传统意义上的"制造成 12

本"的十几倍以至几十倍,取决于其中的知识含量、高新技术集成度以及技术的独占性与知识产权等因素。然而我国热处理设备制造厂虽然多达数千家,但是只能制造相当于国外几十年前水平的产品,在惨烈的价格战中苦苦挣扎。不久前,国内一些航空和军工单位公开招标采购渗氮设备,国内厂商的报价只有国外的几十分之一,却无一能中标。这一事例表明,目前我国热处理工艺装备制造业缺乏创新能力,无力满足高端用户的需求,自身也难以可持续发展。

总之,我国热处理技术落后,已成为制约我国由制造业大国转变为制造业强国的瓶颈,必须引起高度的重视。

三、我国热处理技术落后的原因

(一) 观念落后

在发达国家中,凡是拥有著名品牌的机械产品的企业都高度重视热处理技术研发,通过大量的投入、持续的改进和长期的积累,形成各自独有的技术、并作为市场竞争力的要素而严加保密。人们可以购得名牌产品,通过测绘和解剖分析,仿制出外型和成分与之完全相同的产品,但使用寿命和可靠性常常相差甚远。正是依靠其热处理技术的先进性确立在高端制造业中的领先地位。

目前,热处理在我国却未受应有的重视,热处理的产值按斤论价,其中的知识含量的价值被严重扭曲,被视为一个"产值很小的产业"而处于边缘化,以致我国热处理严重落后于国际先进水平。长期以来我国制造业存在着重产品、轻毛坯,而在毛坯制造中则重控形、轻控性,重产能、轻质量等倾向。发展规划、项目立项和技改资金很少顾及热处理技术的研发,其后果是常常由于产品的使用寿命和可靠性差而在市场竞争中处于劣势,只能陷入在惨烈价格战中挣扎的困境。

国内对于热处理与节能减排的关系存在片面的认识。固然热处理能耗占到制造业总能耗的 1/4~1/3,热处理生产过程中节能减排应予重视。但必须认识到,就全局而论"搞好热处理,零件一顶几"才是节能减排最有效途径,否则就会出现在一些地区和企业以牺牲热处理质量或关、停、并、转的方式追求一时的表面上"节能减排"的错误倾向。

我国制造业长期以来依靠增加投入、扩大产能实现增长,广大企业缺乏通过制造长寿命、高可靠的高附加值产品的意识,缺乏提高热处理水平的动力,这就难以扭转热处理落后的局面。

(二)粗放式的生产

热处理是整个制造业中质量控制难度最大的工艺,原因之一是热处理过程中工件温度和内部微观组织变化无法直接观测。以工件在炉内加热为例,只能测量和控制炉腔的温度,但工件内的温度场与炉温之间的关系受加热规程、工件在炉内位置、装炉方法等众多因素影响,前后工序中的每个细节,例如:仪表和传感器测量值的准确性,热处理设备状况,操作方式等等都影响到最终的热处理质量。所以,热处理,尤其是高端产品的热处理本应精益求精,从热处理工艺、设备、控制技术、操作方法和生产管理各个方面着手,严把质量关。令人遗憾的是,粗方式的热处理生产在我国相当普遍,热处理质量得不到保证。例如,我国某一机车机辆制造的大型骨干企业,车轴淬火处理时,十几根轴一起竖放在井式炉中加热,然后逐一吊到水槽中淬火,转移时间未作规定,每根轴在加热炉中的受热状况、保温时间、在水槽所处的位置均各不相同,且相差很大,怎能做到热处理质量的一致!对于原有型号的车辆,由于时速低,对车轴的性能要求不很高,这种粗放式的热处理还没有暴露其弱点,但不可能满足高铁车轴的要求。

有一家专门生产某种通用零部件的大型企业,用推杆式热处理生产线进行零件热处理。本来推杆式生产线是比较有利于提高产品质量一致性的。然而该厂在每个料盘上分两层装载八个零件。后来,为了降低成本,又在上面多装了二个零件。这样的操作方法导致处于不同位置上的各个零件加热冷却状况各不相同,而且造成每个零件前、后、左、右、上、下的加热冷却差异很大。该厂曾请来过一位已退休的日本热处理专家到生产现场进行示范操作,在同样的料盘中只在前后放上两个零件,以保证加热冷却的均匀性。这一案例反映了我们与世界先进热处理观念上的巨大差距。

类似的情况在国内热处理行业屡见不鲜,乃是我国高端装备关键零部件长期依赖进口的原因之一。尤其是大量专营热处理的企业(亦称热处理专业化厂)粗放式生产更为严重。不同零件拼在一起装炉、超载装炉;没有必要的热处理质量检验设备和检验制度,甚至热处理后不进行质量检验;热处理设备带病运行;传感器、仪表不按期检验等等现象十分普遍,热处理质量无从保证,而且面对我国热处理加工年营业额已高达几百亿的市场,竟没有热处理质量监督机构,更没有建立应有的质量监督体制,成为质量不受监督的无序竞争的畸形市场。

"十一五"以来,我国热处理行业设备更新明显加快,其中真空热处理的比重逐步增加,可是不少单位进行真空热处理时,没有采用正确的装料方法,甚至为降低成本而超载装炉。因此即便更新了设备,未必就能提高热处理质量。

(三) 基础研究日渐凋零

现代热处理技术要求以相变原理、微观组织结构与性能的关系等材料科学理论知识为基础,还要求应用传热学、流体力学、热弹塑性力学、化学热力学、电磁场理论、低能核物理等学科的知识。是一种多学科交叉的高度知识密集型的科技。

我国热处理基础研究曾经十分繁荣,正式出版的热处理专业的期刊就有5种。多达几十所主要工科院校都设有金属材料热处理专业,并被誉为工科中的理科。另有几十家研究所开展热处理方面的研究,几十年来我国热处理取得大量研究成果。学术活动十分活跃,并受到国际热处理界的高度评价。1983年在上海召开了第三届国际热处理大会,时任国际热处理联合会主席的已故 T. Bell教授(本世纪初当选中国工程院外籍院士)曾评价说:"中国的热处理基础研究基本上与世界同步,但热处理生产的水平则落后了几十年。"又过去了近四十年,T. Bell院士当年所说的第一句话已打成问号,因为很难获得政府经费的支持或企业界的资助,最近十几年来,我国热处理基础研究日渐萎缩,许多高校中原本一派火热的热处理专业中,大批高水平的研究人员或改行或年迈退休,许多研究所则纷纷转制,国内仍能坚持开展系统的热处理研究的高校或研究单位已屈指可数。然而 T. Bell 院士所说的我国热处理生产落后于世界先进水平几十年的残酷现实依然存在,值得深刻反思。

我国有大量科研成果未能在生产中应用和产业化,常常将其原因归咎于科研人员理论脱离实际和不重视生产应用。其实这种观点存在片面性,在热处理界固然存在理论脱离实际和不重视生产实践的现象,尤其是目前高校的考核制度,强调论文的数量和影响因子,以致论文的数量迅速增加,而真正能应用于生产的科研成果越来越少。如前所述,热处理生产是一种复杂的物理、化学过程,所以从科研成果到生产应用常常需要解决很多涉及多学科知识的技术难关,因此为了将热处理基础理论成果应用于生产,还要进行后续的应用基础研究,常常需要更大的投入和更充裕的时间。然而在我国却很难得到应有的理解和扶持。即使有人有兴趣从事这方面研究,但在目前的学术生态环境下也不得不知难而退了。另一方面,也应看到我国在热处理领域曾取得很多出色的研究成果,其中许多已应用于生产,但得到推广并实现大规模产业化的成果却为数极少。成果的生产应用和成果的推广产业化是技术创新过程中两个不同阶段,后者显然只可能是企业界的任务,高校教师是无能为力的。事实上,我国热处理界曾涌现出一批文武双全的杰出人才,他们不但取得了大量出色成果,而且十几年以至几十年为推广其成果做出了不懈努力。例如刘志儒教授、徐重教授等年届七八十高

龄,仍想方设法推广各自的成果,感人至深。所以我国大量热处理成果未能推广 和产业化不能简单的说成是理论脱离实际,分析造成热处理基础研究日渐凋零 和推广应用举步维艰的深层次原因,为我国热处理科技创新营造良好的条件,才 是根本大计。

四、关于我国热处理发展战略的若干问题探讨

我国热处理发展战略可概括为重视热处理在制造业发展中的关键作用,使 热处理从被边缘化回归到关键核心技术的地位;践行热处理的精益生产,扭转粗 放生产的状态:加强多学科交叉的热处理基础研究和发展数字化、信息化的智能 热处理技术。

(一) 重视热处理在先进制造业发展中的关键作用

如果没有就热处理在先进制造业发展中的关键作用,以及努力扭转我国热 处理落后面貌的必要性取得共识,就不可能得到各级政府部门和广大企业界的 支持。因此,首先应该克服重产品开发、轻关键技术研究,重冷、轻热和重成形、 轻控性的错误倾向。牢固树立热处理是决定各类机械制造业产品的内在质量、 提高使用寿命和可靠性的关键技术,是市场竞争力的核心要素,热处理技术水平 的提高是新一代产品开发的重要支撑等正确观点。充分认识到不改变热处理的 落后面貌就不可能实现由制造业大国向制造业强国的转变。

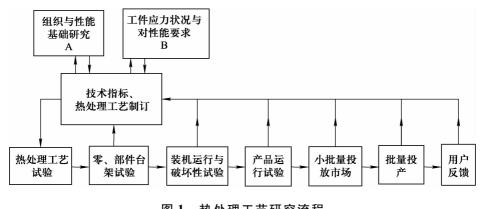
(二)推行热处理精益生产

我国现代热处理的奠基人、已故周志宏院士曾经说过:从事热处理就要像雕 刻象牙那样精益求精。半个世纪已过,环顾世界先进热处理技术的发展,面对国 内的现实,更令人感到老夫子的这句简朴的话,真是至理名言。我国热处理亟待 抛弃粗放式的恶习,牢固树立质量第一的理念,努力倡导和践行热处理精益生 产。

(1) 深入的热处理工艺研究

同种材料的各项性能都会因热处理方法及其工艺参数的不同而改变,各项 性能指标又常常此消彼长,例如强度的增加伴随着韧性的下降等等。唯有针对 具体的工件优化热处理工艺参数,获得与工件使用条件和应力状况相适应的性 能,才有可能制作出高质量的产品。这就应该从对工件使用时的受力状况和失 效原因的分析出发,结合热处理工艺与组织性能关系的知识,拟订初步的热处理 工艺,然后通过将热处理工艺试验与零部件台架试验、整机试验台试验、运行试 验(例如汽车道路试验、飞机试飞等)、小批量试制产品的用户试验,以及大批量 16

投放市场后收集用户反馈意见等环节相结合,改进热处理工艺参数,才能实现热 处理的优化,流程如下图1所示。



热处理工艺研究流程 图 1

这种热处理工艺研发模式远非始自近日,大量的成功案例表明:是行之有效 的,也是必要的。以汽车制造业为例,我国第一汽车厂、第二汽车厂、杭州万向集 团等大型企业的技术中心都备有大量的台架试验装置,并开展正规的热处理工 艺研究,我国装备制造业其他部门的骨干企业也是如此。在上海地方工业的制 告业发展过程中也有不少通过图 1 所示的方式进行优化热处理工艺的成功案 例。早在70年代,原上海第一石油机械厂石油钻井钻头,正是用热处理工艺试 验、台架试验、油田钻井试验相结合的方法,逐步优化牙爪和牙轮渗碳淬火工艺 参数,使得钻头寿命由27小时提高到52小时,收到一个钻井队顶两个的效果, 达到当时世界先进水平。

上海动力机械厂生产的 495 柴油机曲轴,在台架试验的配合下,采用气体氮 碳共渗替代感应加热淬火并优化了工艺参数,使疲劳强度提高20%;在气体氮 碳共渗之后再施以圆角滚压则疲劳强度可提高30%。这一热处理工艺研究成 果的生产应用,克服了495柴油机断轴事故,保证了当时国产主流型号农用柴油 机的整机可靠性。

到80年代后期,上海地区零部件台架试验逐步增多,包括汽车拖拉机的关 键零部件、工业链条、大型变速箱。煤矿机械传动齿轮等台架试验条件陆续具 备。与台架试验相结合的热处理工艺研究也取得不少成果,虽然和国外先进水 平仍有差距,但毕竟是良好的开端。然而随后一阵热衷于合资的浪潮,未能在引 进的同时坚持自主研发。在以"市场换技术"的美梦破灭之后留下许多值得吸取 的教训。例如,上海与德国合资生产一种汽车变速箱,除了支付巨额技术转让费之 外,德方规定其中一个齿轮必须用欧洲设备进行渗氮热处理。设备的报价则高达 一千多万人民币,相当于这种齿轮年产值的二十余倍。正反两个方面的经验教训 都说明,通过深入系统的试验研究,掌握适合于特定工件的热处理工艺的重要性。

热处理工艺研究过程中应当格外强调热处理工艺试验的严格性。各项工艺 参数(温度、加热和冷却速度、炉气的成分、碳势等等)的控制精度应高于日常生 产过程的控制精度,才能准确掌握工艺参数与材料组织、性能和使用寿命之间的 关系,为正确制订热处理工艺和规定允许的波动范围提供依据。工艺试验的高 度精确性,是保证日后生产中良好重现性的前提。用于热处理工艺试验的装置 应是精确性达到甚至高于高档实验电炉,而体积和功率足以容纳实际零件热处 理的设备。目前国内还没有合适的产品可供选用,有必要填补这一空白,为广泛 开展热处理工艺研究创造条件。

(2) 精心设计制造热处理设备

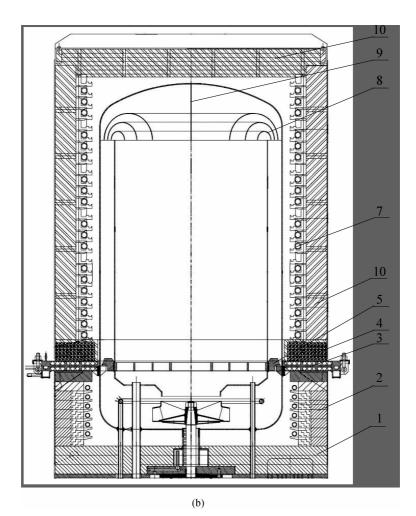
精密的、可靠的热处理设备是准确实施热处理工艺和保证产品质量的一致 性和重现性的物质条件。为了推行热处理精益生产,就应改变我国热处理设计 水平低、制造质量差的现状。

① 提高热处理设备设计水平

由于不同工件的几何形状千差万别,产品的批量又各不相同,热处理又是一 种多场耦合换热的复杂过程,所以传统的凭经验或简单的传热学计算进行炉腔 设计方法不可能应对高端制造业发展的要求。

国内有关单位正在研发的"扩展求解域计算机模拟"方法,是将炉内所有工 件、工装夹具、炉内构件、炉膛空间、流动介质、发热体、炉衬等作为一个求解域进 行耦合换热计算,有可能更好地反映温度场变化的规律。初步的研究成果应用 于大型渗氮炉的试制,收到了明显提高温度场和流场均匀性的效果(如图2所 示)。如能在此基础上深入开展研究,不断改进数学模型,提高计算机模拟的精 度,就有可能成为一种精密热处理设备虚拟设计的方法。





6.80e+00 6.46e+00 6.12e+00 5.78e+00 5.44e+00 5.10e+00 4.76e+00 4.42e+00 4.08e+00 3.74e+00 3.40e+00 3.06e+00 2.72e+00 2.38e+00 2.04e+00 1.70e+00 1.36e+00 1.02e+00 6.80e+00 3.40e+00 0.40e+00

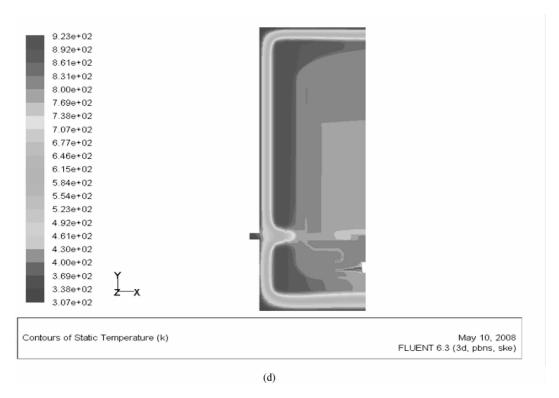


图 2 大型渗氮炉

(a) 外貌;(b) 总图;(c) 流场云图;(d) 温度场云图

除了炉膛的总体结构之外,有些看来是局部的细节,例如:法兰支承架、电热 丝引出棒、热电偶套管、观察孔、取样孔等等所造成的"热短路"都有可能影响炉 内温度场的均匀性,采用基于计算机模拟的虚拟设计方法有助于减少热短路的 影响。

图 3 是用虚拟设计方法制造的空心法兰,收到显著减少热短路的效果,已在生产中应用并申请了专利。图 4 表明有可能借助于大锻件淬火水槽流场计算机模拟,找到使水流集中于工件的表面,从而提高冷却的强度和均匀性的方法。综上所述,发展基于计算机模拟的热处理设备虚拟设计技术将是热处理精益生产的重要内容之一。

② 积极采用先进技术和炉用材料

已有一些有利于改善炉膛温度均匀性和节能减排的先进技术和耐火保温材料,应在我国大力推广应用,例如:

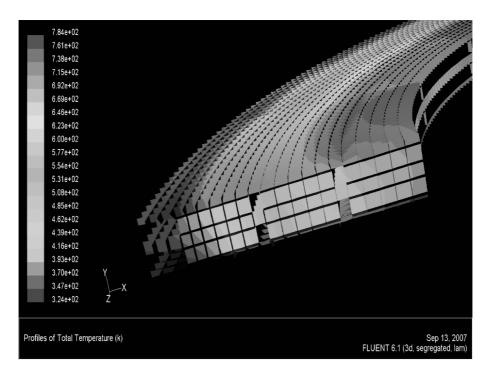
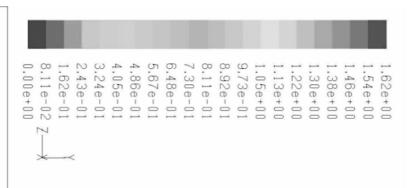
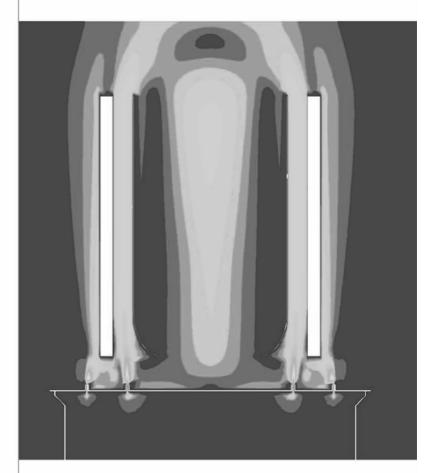


图 3 空心法兰温度场云图

- 将电阻丝埋在耐火材料表层之下,制成发热体、耐火层、保温层一体化的 预制件,可以使炉壁成为均匀的幅热源,从而改善炉膛温度均匀性,并且 延长电热丝的使用寿命,有利于炉况稳定。
- 先进的燃烧技术可大幅度降低能耗并提高燃料炉温度控制的准确性。
- 平焰喷嘴可以有效改善燃气炉的加热均匀性。
- 各种先进的保温材料不仅节能减排的效果好,并有利于提高炉膛温度的均匀性和热处理设备的可靠性。
- 改变发热体或炉衬表面发射率的涂料,可以在提高加热均匀性的同时收到节能减排的效果。
- 真空加热室与高压气淬室相互分离,并且气流的方向可以调节的真空加热高压气淬技术,具有改善冷却均匀性,提高压强以提高冷却强度,以及延长真空加热室寿命的优点。
- 活性屏离子渗氮技术克服了离子轰击化学热处理渗层不均匀的缺点,提高了离子渗氮的质量,用于改造我国为数众多的离子渗氮设备有重大价值。

Contours of Velocity Magnitude (m/s)





Jul 02, 2008 FLUENT 6.3 (3d, pbns, S-A)

> 筒形零件流场 (a)

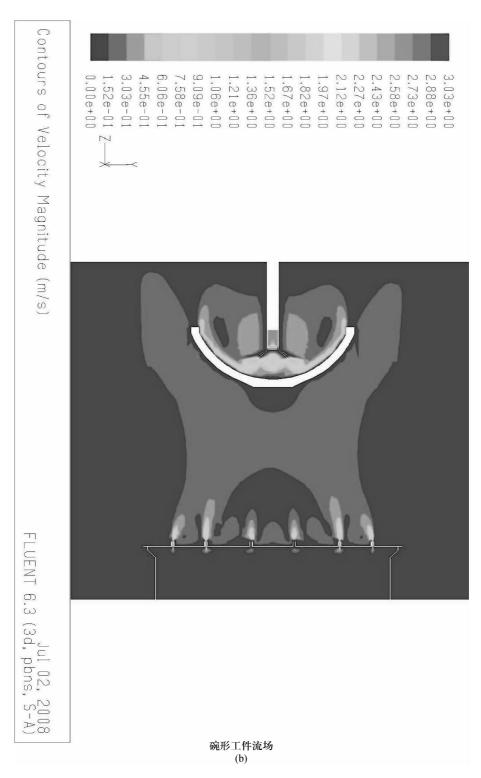


图 4 筒形大锻件和碗形大锻件淬火的流场云图

- 非平衡磁场离子镀显著提高膜层的质量。纳米复合镀层有可能赋予工件表面特殊的性能(例如高硬度低脆性与高耐磨性低摩擦系数等)。在先进高端零部件制造中有广阔的应用前景。
- 离子注入技术及全方位离子注入技术赋予材料表面优异的性能,离子注 入与离子镀复技术显著提高了改性层的厚度,我国已有出色成果可供推 广。

• • • • • •

除了积极推广国内外已有的先进技术之外,还应积极开展热处理设备新技术新材料的自主研发。

③ 切实提高热处理设备的制造质量

目前国内热处理设备制造业粗制滥造,恶性价格竞争的局面亟待改变,否则就无法提供高质量的热处理装备以支持热处理精益生产。

(3) 建立严格的维护保养制度

由于在高温下长期工作,热处理设备维护保养显得格外重要。要求建立完善的制度并严格执行。

① 传感器的标定和校验

美国宇航局 20 世纪 80 年代颁布的温度测量标准(2750D)对热电偶的选用、标定、系统精度的校验、炉温均匀性的测定和复验等作了明确规定。2005 年之后,美国的机械制造、造船等工业也采用了该项标准。我国有关温度测量的国家标准与世界先进水平差距很大,2010 年国家标委会组织力量参照 2750D,拟定了新的国家标准修订稿,有待批准之后贯彻执行。有必要着重指出,作为国家标准必须顾及不同行业和各类企业都有可能实施,所以并非最严格的标准,仅仅是必须达到的最低标准。所以,凡是制造高端产品和关键零部件的企业,有必要根据具体情况制订更严格的内控标准。

其他的各种传感器,例如气体成分、压力、流量传感器也应有健全的标定和校验的制度。

② 热处理设备的维护保养和日常工作状态的监测

热处理设备长期在高温下工作,加以每当进出炉时温度骤然变化,造成炉子工作状况改变的可能性难以排除。所以除了对设备定期检查和维修之外,在日常的生产过程中应采取有效措施对热处理设备工作状况进行经常性检测,例如检测炉外壁的温度,若出现异常的温升或局部的热点,就应对炉衬和发热元件进行检查。炉膛与管路的密封性或真空系统的泄漏率应经常检测,配件和辅助设备都应经常检查和及时维护,以保证整套热处理设备处于正常工作状态。

(4) 严格认真的操作

在热处理生产操作规程中,应明确规定采用的热处理设备的型号、规格,每炉工件的数量、工件在炉内的位置、工夹具设计、进炉与出炉的操作方法、淬火操作方法、传动部件、仪器、仪表、开关、阀门和各种辅机的操作规程。操作人员必须认真按规程进行操作。重要零件应有操作全过程的监控录像以记录热处理工艺的实施情况。生产一线人员,要像母亲呵护婴孩那样对待所使用的设备,尽早发现设备的异常情况,保障设备的正常运行。

(5) 全流程质量控制与管理

按炉号和批号对进厂的原材料进行检验,除了化学成分分析之外,还应按规定取样进行高低倍金相组织检验(例如疏松、宏观偏析、树枝状偏析、非金属夹杂物、本质晶粒度、表面脱碳层和贫碳层、高碳钢的网状碳化物、碳化物液析、球化级别、茱氏体钢的碳化物偏析等)。对一些重要的零件和特种钢材还有必要进行热处理工艺性试验和力学性能测试,只有检验合格的原材料才允许验收进厂,并分炉号,分批号投入生产线。

在每一道热处理工序之后对每一炉工件进行硬度和金相组织的检验,必要时进行力学性能(或特殊要求的其他性能)检验,应规定取样方法、测试方法和质量标准。对重要零件有必要制订严于国家标准的内控标准。除了热处理之外,在每一道热加工工序之后都应进行金相组织检验。

热处理并非决定材料性能的唯一因素,治炼、铸造、塑性成形、焊接等工序都在不同程度上对材料性能产生不同程序的影响,而且材料制造过程是一种流程工程,热处理时的组织转变与前面各道工序中所形成的组织有密切关系。因此热处理精益生产离不开全流程质量控制。在每一道工序之后都要进行组织检验,严防组织不合的工件进入下一道工序。

全流程质量控制包含大量的数据采集、存储和调用,应用现代信息技术有助于实现严格的材料制造全流程质量控制和管理,无疑是"二化融合"的重要内容。

(三)加强热处理基础研究

现代热处理技术是高度知识密集型的技术,加强基础研究对我国热处理发展至关重要,包括:

(1) 相变原理及组织与性能关系的研究

百余年来,相变原理始终是一个百花齐放、百家争鸣、人才辈出、成果丰硕的研究领域,积累了大量的研究成果,成为现代热处理技术发展的理论基础。我国在这一领域硕果累累,并不落后。例如我国学者在魏氏组织、马氏体和马氏体相

变、贝氏体和贝氏体相变、形变热处理、二相区加热热处理、钢的强韧性等重要领域都取得了达到国际先进水平的成果。目前和可以预见的将来,这一领域仍然是有重大意义和充满活力的研究方向,这是因为现代测试技术的发展提供了日益先进的实验手段,从而有可能在更微观的尺寸和更深层次上开展研究,从而破解长期未能取得共识的许多重要问题,并发现前所未知的新现象,创建新的理论,用以正确指导热处理生产实践,满足先进制造业对材料性能越来越高的要求。例如:

高强度和超高强度钢的进一步发展得益于马氏体相变研究的不断深入。最近十余年,QP和QPT热处理十分引入注目。在中、低碳钢淬火时,碳在马氏体残余奥氏体之间配分,淬火后在马氏体周边形成厚度为纳米级的稳定的残余奥氏体膜,构成纳米复合组织,改善了钢的塑性;在一定合金化条件下回火马氏体中碳化物沉淀硬化,进一步提高钢的强度。正是这些现象的发现成为QPT新工艺的基础,使超高强度钢的强塑积提高到前所未有的水平。改进碳配分的数学模型,掌握相变过程的动力学规律,以及深入研究马氏体、残余奥氏体和碳化物三者组成的纳米复合结构的强度及断裂韧性,有助于更好地实施微观组织调控,无疑是值得重视的研究方向。

核电和超超临界汽轮的大锻件,淬火态的组织以贝氏体为主。贝氏体实际 上是过冷奥氏体在中间转变温度范围内形成的一系列组织的统称,由于 $\gamma \rightarrow \alpha$ 的 相界推移、碳的扩散和碳化析出三者相对速度相互消长,转变温度对贝氏体中铁 素体形貌、碳化物的形貌和分布的影响十分敏感,造成贝氏体形貌的多样性和复 杂性及性能的巨大差异。长期以来,众多学者对贝氏体和贝氏体相变理论开展 了大量的研究,但至今不同学派之间仍难以形成共识。大锻件淬火时冷却速度 缓慢,常常是不同温度下形成的贝氏体的混合物。而且先前已形成的组织的性 质、形貌和数量对后面的转变过程产生显著影响,大锻件冷却时贝氏体转变的规 律和组织特征,还有许多前人的研究未涉及的内容,这就有深入研究的必要。另 一方面,大锻件冷速很慢,上贝氏体形成时有大量碳配分到奥氏体,从而使残余 奥氏体量增加。残余奥氏体的大小、形貌和碳化物的密集程度则随着冷却速度 而改变,它们在随后回火时的行为也各不相同。初步的观察发现:在一些大锻件 中的残余奥氏体在回火后分解成密集堆积的碳化物,有可能造成韧性明显下降。 为此,有必要开展回火时贝氏体组织变化和残余奥氏体分解过程的研究。高碳 钢的纳米贝氏体有可能提高滚动轴承等关键零部件的性能,是近年来颇受关注 的研究方向。

高端大锻件热处理中,另一个重大问题是粗晶粒组织遗传的机理至今仍未有定论,以至大锻件的锻后热处理存在很大的盲目性。随着锻件尺寸不断增大,

问题更为突出,迫切需要进行不同原组织在不同加热条件下奥氏体形成和晶粒长大规律的系统性研究。

从长远考虑,研究在宏观应力场作用下,各种微观组织中裂纹前端微区应力场的变化规律及其与材料断裂行为的关系,是关于钢的组织与性能研究领域中有重大潜在价值的研究方向。

(2) 与热处理工艺和设备设计相关的多学科基础研究

除了相变原理、金属微观组织与性能关系等材料科学理论之外,热处理工艺和设备还涉及传热学、流体力学、热弹性力学以及与电磁场、离子轰击等相关的基础理论。用不同学科的知识解决热处理的生产实际问题,属潜力大、难度高的应用基础研究。例如:

钢在水或油中淬火时沸腾状态下的界面换热、蒸汽与液体、二相流的流动规律、在搅拌驱动下介质的流场的计算、金属在炉内加热时多场耦合和复杂的边界条件、流态床热处理时二相流及其温度场等等都是热处理中广泛涉及的传热学与流体力学问题,也是提高热处理工艺科学性、控制准确和设备设计合理性的基础研究课题。

离子化学热处理的渗层浓度场控制是一个长期未能解决的难题。离子化学 热处理是一个包含非体积功的过程,所以基于化学位驱动的物质传递模型不适 用于离子化学热处理。开展离子化学热处理界面反应的基础研究,建立离子化 学热处理的物质传递模型是离子化学热处理发展中有待解决的问题。

离子镀、离子注入等等表面改性技术的发展离不开电磁场的计算、电子和离子在电磁场中运动、离子在表面沉积或离子注入到金属表层时与基体金属的相互作用、膜层组织的形成机理、膜层与基体的结合力、复合膜或梯度膜的力学行为等等都是离子表面改性技术进一步发展的研究方向。

(四)发展信息化的智能热处理技术

热处理过程十分复杂,在不同的外场(热、力、电、磁、光等)和环境的作用下,材料发生相变、应力、应变、化学反应和扩散等变化,对这些复杂现象中的客观规律认识的深化,是提高热处理质量的基础。然而在昔日条件下,常常只能应用某一学科的知识,研究其中个别因素的影响。并且必须进行大量试验,效率很低,以致热处理技术研发周期远远大于产品研制的周期,无法适应现代先进制造业高速发展的形势。电子计算机的发展,为人们提供了强大的科学计算和信息处理的能力,从而有可能集成不同学科的知识,用多场耦合的方法建立描述材料热处理过程中,各种复杂现象及其相互作用的物理数学模型和计算机模拟方法,构成热处理的虚拟生产平台。这将有可能使热处理技术由传统的"技艺"型的

落后状态,向着以科学计算为依据的高度知识密集型技术的方向转化。

另一方面,由于热处理过程的复杂性,还有许多基本原理尚待进一步深入探 索,以致热处理中有很多问题还不可能建立物理数学模型。这就有必要用"基于 知识的工程(KBE)"和知识挖掘等信息学方法,从大量的生产记录、测试数据、案 例和工程技术人员的经验中挖掘隐性的知识,建立信息化的知识模型,实现高效 的知识重用。

计算机模拟和知识重用技术是发展知识密集型热处理技术的两大支柱,是 开发信息化智能热处理技术的基础(图5)。

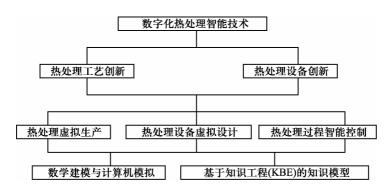


图 5 信息化智能热处理技术

借鉴美国材料基因组计划的思路,信息化的智能热处理技术的基本框架也 可以用图 6 描述,其核心由计算机模拟、实验工具和数字化数据所组成,三者相 辅相成。

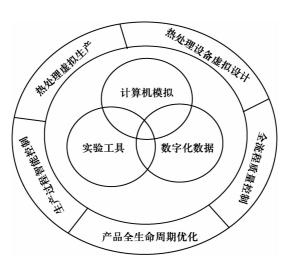


图 6 信息化智能热处理基本框架

28

(1) 计算机模拟

计算机模拟技术是一种强大的计算工具,有助于最大限度减少试验的次数, 大幅度缩短研发的周期,是热处理虚拟生产和热处理设备虚拟设计的关键技术。 近年来发展迅速,并已显示出提升热处理水平的巨大潜力。

例如:温度一相变一应力场耦合数值模拟应用于百万千瓦超临界汽轮机转子热处理(图7),收到保证机械性能并防止淬火开裂的效果(图8)。在三代核电 AP-1000 核岛主设备研制中,以流场和温度场模拟为辅助决策工具,改进淬火冷却方法,为 AP-1000 成套大锻件一次投产试制成功作出了贡献;新近推出的"扩展求解域热处理模拟"方法,使 12 500 吨挤压机主活塞差温加热淬火一次试验成功(图9)。以该方法为基础进行新型渗氮炉虚拟设计,大幅度提高了温度场和流场均匀性。基于计算机模拟的气体渗碳动态控制技术(图10)保证了电站给水泵齿轮等重大装备中关键零件的可靠性。这些成功的先例都说明了热处理计算机模拟技术的优越性。

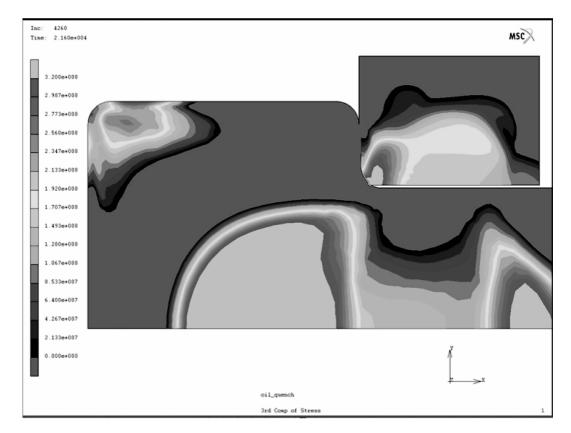


图 7 百万千瓦超超临界转子淬火应力场云图

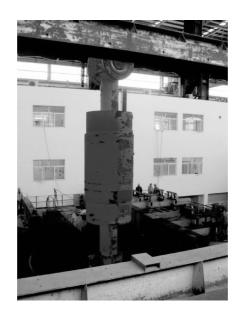


图 8 百万千瓦超超临界转子热处理

但应指出,热处理计算机模拟技术还很不成熟,还有一系列基础研究有待进行。例如气 - 固表面换热和液 - 固表面换热的测试计算方法、非等温非等速条件下相变动力学的定量计算、相变超塑性、多场耦合的算法、复杂非线性问题的算法、界面反应的物质传递、离子化学热处理和离子表面改性的数学建模等等,都属于高难度的有待长期深入研究的课题。计算机模拟结果的验证和数学模型的修正都是工作量浩大的基础工作。

(2) 实验工具

实验工具之所以重要,是因为计算机模拟所需的基础数据需要用实验方法准确的测定。计算机模拟中的数学模型需要经过试验验证和修正,而且对于一些尚未能建立数学模型的过程,只能用实验方法探索其中规律。智能热处理技术中的实验工具不仅包括材料科学的分析测试技术,还包括各种热处理工艺试验设备(其温度和气氛控制的精度要求比生产用的热处理设备高一两个档次)、温度场测试技术、流场测试技术以及用于确定换热边界条件的测试技术,其中有不少需要专门设计开发的新的实验设备和表征技术。

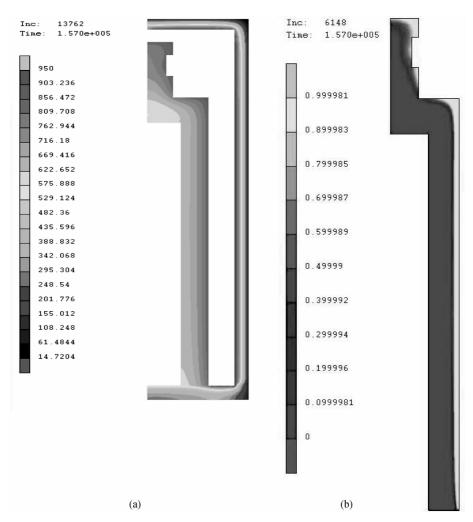


图 9 125 000 吨挤压机主活塞加热计算机模拟
(a) 温度场;(b) 奥氏体云图

(3) 数字化数据

目前,热处理是制造业信息化中最薄弱的环节,成为产品全生命周期信息集成的瓶颈。热处理技术的开发与产品设计脱节,热处理工艺的制订甚至热处理技术要求都有很大盲目性,是造成产品肥头大耳或可靠性差的原因之一。另一方面,热处理技术的研究成果,未能及时地恰当地体现在新产品的设计中,有碍于发挥热处理创新引领产品创新的巨大潜力。数字化数据亦称为数据信息学工具,将为热处理提供一个"信息学的维度",使处于产品研发不同阶段上的不同学科人员实现数据共享和协同研发,数字化数据在热处理工艺研究流程中的应用有助于显著提高效率,也有可能将产品计算机辅助设计(CAD)、产品运行状态

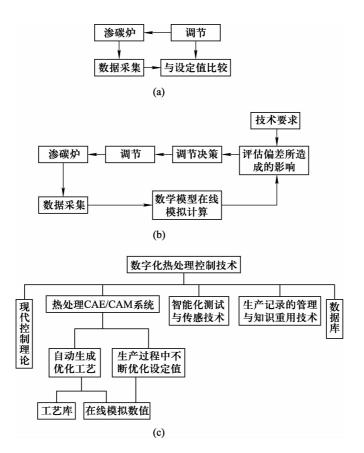


图 10 动态碳势控制框图

的动力学仿真、热处理计算机模拟相结合,并实现虚拟制造与实体试制的信息快速整合,构建产品创新设计平台,实现重量轻、体积小、高性能、长寿命、高可靠的产品设计和热处理工艺设计的优化,如图 11 所示。进而有可能将智能化热处理

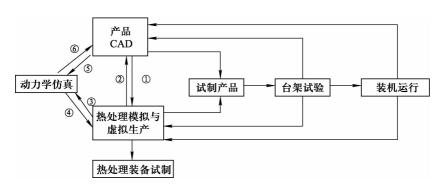


图 11 热处理与产品创新

- ① 尺寸、形状、性能指标:② 设计的合理性评价:③ 热处理后工件内的强度场和残余应力场:
- ④ 选材与热处理合理性评估;⑤ 产品设计与服役条件;⑥ 可靠性和冗余度

32

技术整合到"产品设计—材料设计—成形、控性制造"相互融合的产品,全生命周期数据信息学工具之中(图 12),促进产品设计和制造工艺水平的全面跃升并大幅度缩短开发周期,所以智能化热处理将成为智能制造的重要组织部分,符合工业化与信息化深度融合的发展方向,需要长期持续投入和多学科合作研究。

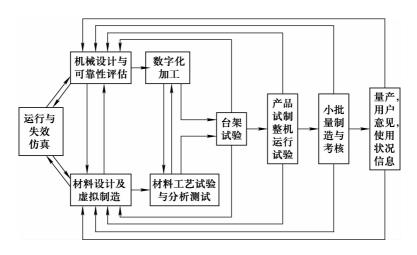


图 12 产品全生命周期数据信息学平台

五、结束语

热处理是装备制造业中提高产品寿命、安全性和可靠性的关键,大力提升我国热处理技术水平,有利于改变我国装备制造业产品质量低、高端装备或关键零部件依赖进口的局面,是我国制造业转型所迫切需要解决的问题。为此首先应该克服重产品开发轻关键技术研究、重冷加工轻热加工、重成形轻控性的错误倾向。树立热处理是决定产品内在质量,提高寿命、可靠性和安全性的关键技术的观念。改变在制定发展规划、课题立项、资金投放等方面热处理被边缘化、附属化的局面。

我国热处理发展战略的要点大致有三:

- 1. 推行热处理精益生产,革除粗放式旧习,狠抓热处理质量是当前的要务。
- 2. 加强基础研究,促进热处理创新,应多方给予支持。根据热处理基础研究难度大、时间长的特点,创造有利于基础研究的环境,并探索合理的产、学、研机制,以利于成果的应用和产业化。
- 3. 发展信息化智能热处理技术,大幅度提高我国热处理创新的效率和水平,推动我国热处理不断攀登世界顶峰,并将智能热处理整合到产品设计—材料设计—工艺设计相互结合的装备制造业产品全生命周期的数据信息学工具之

中,成为智能制造的重要部分,对我国装备制造业的发展有重大意义。

本文是在中国机械工程学会热处理分会下属的热处理发展战略研究工作委员会多年工作的基础上拟就,作为群众性学术团体开展的战略研究,其局限性不言而喻,加以笔者水平有限,不当甚至谬误在所难免,恳请诸位斧正。



潘健生 上海交通大学教授、博士生导师,中国工程院院士。1959年毕业于上海交通大学冶金系金属材料及热处理专业,留校任教至今。现任中国热处理学会荣誉理事长,热处理与表面工程国际联合会的数学模型与计算机模拟技术委员会主任。主要从事热处理设备的计算机辅助设计,化学热处理,热处理生产过程的计算机控制,热处理过程的数值模拟等方面的研究。潘健生教授近50年来始终在教学、科研和生产应用第一线,多次获优秀教学奖,曾被评

为上海市优秀教育工作者,上海市劳动模范。获得国家科技进步二等奖1项,国家发明三等奖1项,部委和上海市科技进步一等奖2项,二等奖3项,其中1项列入国家级科技成果重点推广计划,发明专利5项,实用新型专利12项。发表学术论文百余篇,出版专著2部。

发展热处理和表面改性技术, 提升国家核心竞争力

赵振业

北京航空材料研究院

摘要:评述了先进热处理和表面改性技术赋予材料极限性能、赋予关键构件极限服役性能的作用,国家核心技术地位,解决关键构件的"三大问题";提高疲劳寿命几倍至百倍、提高可靠性一个至几个数量级的效果。认为发展先进热处理和表面改性技术是建设机械制造强国和材料强国的必由之路与紧迫需求。

一、绪言

高端机械装备,诸如飞机、船舶、车辆、高速列车、风电装置、汽车、机床等,是一个复杂的体系。不仅是一个机械结构体系,即构件、部件、系统等组成的整机,还是一个经济可承受性体系,即与其功能、性能统一的全寿命期成本。其中,机械结构体系用以实现装备的功能,经济可承受性体系则保证其生存力。在这合二为一复杂的体系中,长寿命和高可靠成为关键因素。

众所周知,在我国高端机械装备中有两个"瓶颈"制约其发展和安全服役,就是发动机和变速器。无论航空发动机还是燃气轮机,都由压气机、燃烧室、涡轮等关键部件组成,其主要特征是数以千计的叶片、盘和轴承构件。直升机靠减速器把发动机的能量传递到旋翼以实现功能,风电装置依赖变速器将风能传递到发电机转化为电能,汽车的核心是发动机和变速器,机床靠变速器控制主轴运动实现加工功能。这些变速器的共同特点是由大量的传动齿轮、轴承、轴等关键构件组成。不难看出,叶片、盘、轴、齿轮、轴承等关键构件是发动机、变速器的保障,也是高端机械装备的基础。因此,与其说发动机、变速器是高端机械装备的"瓶颈",莫如说关键构件是高端机械装备的"瓶颈"。

所谓关键构件,指的是那些决定装备的主要功能、体现装备的寿命和可靠性、失效导致灾难性后果、疲劳是主要失效模式的构件。具体涉及三类构件,即转动构件,如叶片、盘、轴;传动构件,齿轮、轴承;主承力构件,如飞机起落架构件、接头、对接螺栓、弹簧等。这些构件的服役环境特点主要有两个,一是动,它

们都在动态下服役,因而导致疲劳失效;一是极端,它们都在最高应力、最高温度等状态下服役,加剧了疲劳失效。当前,我国关键构件存在三大问题:寿命短,可靠性差,结构重。"三大问题"使关键构件成为我国高端机械装备的"瓶颈"和制约因素,成为导致我国虽然已是一个机械制造大国,但却处于国际竞争的弱势的主要原因之一。我国已是世界第二大经济体,机械制造业的规模很大,不少制造业规模已居世界第一或前列,但高端产品仍依赖进口;机械制造业的产值增长很快,但经济效益较低。与国外先进水平差距大,与国民经济和国防安全需求差距大,其根本原因是关键构件的"三大问题"长期得不到解决。问题和落后并不可怕,可怕的是对问题和落后不认识,更为可怕的是企业不能从"引进仿制一落后一再引进仿制一再落后"的怪圈中走出来。这一落后状态必须改变,中国必须从机械制造大国走上机械制造强国。而在机械制造强国发展中,其重要目标和任务是解决"三大问题",实现关键构件长寿命、高可靠、结构减重,达到国际先进水平,具有核心竞争力。

如今,关键构件遇到了前所未有的发展机遇。这一机遇来自建设机械制造 强国和材料强国的战略目标。大型客机、航空发动机与燃气轮机、高档数控机床 等已被列入国家重大专项:高速列车、风电装置、汽轮机、船舶、汽车等均为重点 发展领域。新型材料,包括电子材料、复合材料、功能材料、结构材料和特种材料 也成为国家重点发展目标。而在实现机械制造强国和材料强国战略目标时,面 临三重挑战:(1) 自主产权,即自主创新能力;(2) 经济可承受性,从长期以来解 决"有无"模式,转变为全寿命期低成本;(3)技术,即实现关键构件的长寿命、高 可靠、结构减重的先进技术。不能忘记,我国建设机械制造强国和材料强国、发 展高端机械装备和先进材料是在国际大环境中进行的。这一大环境的主要特征 是"两极分化"、"梯度转移"。在过去几十年中,发达国家占据了技术先机,形 成了高端、高附加值产品地位,而发展中国家只能发展低、中端的产品和技术。 同时,发达国家要把已落后的、乃至淘汰了的技术和产品转移到发展中国家,以 获取最后一笔利润。更何况先进技术和产品历来属于国家核心竞争力和国家级 机密。从这一大环境格局应当清醒地认识到,先进技术从发达国家拿不来、买不 来、合作不来。所谓卖和合作的承诺只不过是个陷阱。这一陷阱不仅最终得不 到先进技术,反而扼杀了自主创新,到头来把原有的落后距离拉得更大、更远。 摒弃依赖国外的思维、认识和行为后,自主创新成为建设机械制造强国和材料强 国,发展高端机械装备和先进材料唯一可选的道路。但是,迎面而来的困惑是创 新什么?从何处入手创新?如何实现创新?

36

二、关键构件的主要失效模式是疲劳

疲劳是在循环应力或应变作用下,构件一处或多处产生裂纹或断裂的过程和形式。其突出特点是在无明显变形下突然失效,常常是在失效后分析确定为疲劳失效,而难以有效预防。因此,疲劳是一类最危险的失效模式,严重的威胁关键构件安全服役。大量失效案例分析指出,齿轮断齿、叶片断裂、涡轮盘隼齿裂纹、螺栓断裂等大都起源于加工刀痕,刀痕不连续处的高应力集中使之成为疲劳裂纹源。据统计,普通机械的关键构件疲劳失效占总失效量的50%~90%,航空构件占80%以上。其中,构件表面萌生疲劳裂纹者又占80%以上,裂纹萌生寿命占构件总寿命的80%以上。这充分证明了疲劳是关键构件的主要失效模式。研究发现,这一特点源自于高强度构件的疲劳强度应力集中敏感特性。由此不难得出,关键构件"三大问题"的主要原因是疲劳。因此,解决"三大问题"的方向在于解决疲劳失效问题。解决疲劳失效问题的关键是热处理和表面改性技术。

三、热处理和表面改性技术是国家核心竞争力

热处理是采用加热一冷却方法控制相变、微观组织,赋予材料和关键构件极限性能和极限服役性能的技术。表面改性是采用应力 - 应变方法控制微观组织、残余应力场,赋予关键构件极限服役性能的技术。看起来方法比较简单,但它们却既是理论性很强的科学,又是实践性很强的技术。热处理的理论基础是相变,相变一直是学科的前沿问题。例如,高强度钢的强度主要来自马氏体相变,而至今尚不能给出马氏体相变的理论模型。其实践性很强说的是先进热处理工艺和表面改性工艺能够导致构件疲劳行为的巨大提高,而且随着材料和构建千变万化,不断发展、不断进步,成为发达国家研究热点。热处理和表面改性的主要适应对象是先进材料和关键构件。可以看到,没有哪个材料可以离开热处理,没有哪个关键构件不依赖热处理和表面改性技术。而且特别强调,热处理和表面改性是当今赋予材料极限性能、赋予关键构件极限服役性能仅有的两种技术。毋庸置疑,它们是机械制造强国和材料强国不可或缺的核心技术、关键技术、共性技术和基础技术。它们是国家的核心竞争力。

先进热处理赋予材料极限性能。所谓极限性能是指在现有应用基础理论下能够达到的最高性能。在超高强度钢中,马氏体相变自 1895 年 Martens 开始,已经历了百年以上的研究发展,从马氏体的形态、板条束、板条直到板条超细化。随之在 Hall - Petch 理论指导下,发展出各种先进热处理工艺,催生了大量的高强度钢牌号。目前,控制相变热处理又在推动着各类超高强度钢发展,甚至可以

统称为控制相变型超高强度钢,其工程用抗拉强度已达到 2100 MPa 以上。一种 特种热机械处理(STMT)工艺将 Fe-10Ni-18Co-12Mo-1Ti 钢的抗拉强度提 升至 4295 MPa。在高强度铝合金中,θ 相的析出相变研究进展导致了回归热处 理工艺创新。这一工艺不仅使 7055 - T77 状态抗拉强度达到 650 MPa 以上,并 用于 B-787 飞机机身上蒙皮,而且为高强度铝合金广泛应用开创了一个新时 代。未来一代新型材料还在企盼新概念的热处理将其提升到新的性能极限水 平。比如,超高强度钢研究中,按照 Kelly 理论和 Frankel 理论,钢的抗拉强度和 剪切强度可分别达到 30 GPa 和 7 GPa,但至今仅达到抗拉强度 4295 MPa。美国 加州大学伯克利分校提出探索抗拉强度 14 000 MPa 的超高强度钢,尚无试验数 据。非晶-纳米铝合金的抗拉强度可望达到 1000~1500 MPa,但目前仅处于 700 MPa 水平。非晶 - 纳米钛合金的抗拉强度应可达到 2200 MPa 水平,但当前 工程可用合金仅达到 1500 MPa 以下。它们不能成为合金的原因是缺少适当的 热处理技术。

先进热处理和表面改性技术赋予关键构件极限服役性能。所谓极限服役性 能,指的是现有材料和工艺所能达到的最高服役性能。

表层硬化赋予传动构件极限服役性能。研究数据表明,齿轮轴承钢(硬度 HRC45) 经表面渗碳硬化至 HRC62 后,弯曲疲劳寿命可提高 300 倍以上;表面硬 度从 HRC62 提高至 HRC70,弯曲疲劳寿命再提高约 100 倍,接触疲劳寿命提高 约 70 倍。不仅如此,表面渗氮后,应力集中系数 Kt = 2 时,构件的拉 - 压疲劳强 度提高 80%; Kt = 5 时,可提高 100%,弯曲疲劳强度可提高 100%,显著抑制了 疲劳强度应力集中敏感。可见,表层硬化能够大幅度提高传动齿轮和轴承的服 役寿命和可靠性。表层硬化是传动齿轮、轴承等关键构件服役行为的重要保障。

早在20世纪80年代,国外研究并提出了激光冲击和超声喷丸两种高能表 面改性新方法,因其提高疲劳强度和寿命的显著效果而引起轰动。据报道,经激 光冲击后,高强度铝合金 7475 - T6 的微动磨损疲劳寿命提高了约 100 倍,而且 将疲劳裂纹扩展速率改善了 1500 倍。齿轮钢 SAE8620 机械加工后,105 循环下 的弯曲疲劳强度约为 1000 MPa,经表面改性后提高至 1200 MPa,而超声喷丸表 面改性后升高至约 1450 MPa。GH4169DA 高温合金经机械加工后,应力集中系 数 Kt = 4 时弯曲疲劳强度为 197 MPa, 经表面改性后提高至 679 MPa, 寿命提高 100 倍以上;650 ℃下的疲劳强度从234 MPa 提升至558 MPa,寿命也提高100 倍 以上,抑制了疲劳强度应力集中敏感。从上述数据可以看到,表面改性技术可大 幅度提高叶片、盘等转动关键构件的服役寿命和可靠性。不仅如此,超高强度钢 300 M 的疲劳强度 σ_{ϵ} 为 1035 MPa, 在硬度压痕应力集中下的疲劳强度 $\sigma_{N\epsilon}$ 为 35 MPa,在 3.5% 的 NaCl 水溶液中的疲劳强度 σ_{cf} 为 40 MPa;而压痕应力集中下

38

在 3.5% 的 NaCl 水溶液中的疲劳强度 σ_{Nef} 为 15 MPa。显示出疲劳强度应力集中敏感性很大,应力腐蚀疲劳强度应力集中敏感性更大。经过辊压表面改性后 σ_{Nf} 、 σ_{cf} 、 σ_{Nef} 均保持在 1000 MPa,而且经 1500 h 试验未失效。表面改性还抑制了应力腐蚀环境中的疲劳强度应力集中敏感。因而,可以保证构件在应力腐蚀环境中长寿命、高可靠服役。

综上所述,热处理和表面改性不仅赋予材料极限性能和赋予关键构件极限 服役性能,为关键构件服役提供了保障,而且为先进材料研究提供了方向,还为 实现材料和关键构件高经济可承受性提供了保障。

四、聚焦有限目标,创新竞争发展

近些年来,作为国家核心竞争力的热处理和表面改性技术,在形而上学和急功近利的践踏下被边缘化和附属化了。其直接结果便是技术与国外先进水平的差距拉大、关键构件"三大问题"和高端机械装备的竞争弱势。因此,在建设机械制造强国和材料强国中,最需要的是凝聚有限目标,全力以赴突破热处理和表面改性这一核心技术,建设一个中国特色的精密-高效-经济-清洁-产业化的先进热处理和表面改性技术体系。解决关键构件的"三大问题",实现产业化,快速提升发动机、变速器竞争能力。实现这一目标需要以相变和"无应力集中"抗疲劳概念等应用基础理论为指导,遵循创新、体系、竞争和中国特色的基本理念,采用"全过程"研究方法。20世纪90年代将飞机起落架寿命从不足200飞行小时提升到6000飞行小时以上,1991年服役至今20年无故障,达到并超过国外5000飞行小时最高规定寿命等经历已证明,实现这一目标是完全可能的。

五、结 论

- 1. 先进热处理和表面改性是赋予材料极限性能,赋予关键构件极限服役性能仅有的两项技术,是国家核心竞争力。先进热处理和表面改性边缘化和附属化导致了我国关键构件寿命短、可靠性差、结构重等三大问题,是机械制造竞争弱势和材料技术落后的主要原因
- 2. 新一代材料企盼新概念热处理,关键构件企盼先进热处理和表面改性技术解决"三大问题",达到长寿命、高可靠、结构减重和国际先进水平。发展先进热处理和表面改性技术是建设机械制造强国和材料强国的必由之路与紧迫需求。

参考文献

- 1. 赵振业. 梦·热处理[J]. 金属热处理学报,2012,37(1):1-6.
- 2. David P. Davies. Duplex hardening: an advanced surface treatment [J]. Heat treating, 1992, August: 38 46.
- 3. Nathalie Limodin, Yves Verreman. Fatigue strength improvement of a 4140 steel by gas nitriding: Influence of notch severity [J]. Materials Science and Engineering A,2006,435 436:460 467.



赵振业 金属材料科学家,北京航空材料研究院研究员,中国工程院院士。1961年西北工业大学金属学与热处理专业毕业。50年来,一直从事航空超高强度钢应用基础理论、合金设计和应用技术专业研究。研究成功我国第一个12% Cr型热强不锈钢 GX-8,第一个航空中温超高强度钢 38Cr2Mo2VA,第一个VIM-VAR高纯熔炼超高强度钢 300M,实验室率先把不锈钢、不锈齿轮轴承钢提升到超高强度高韧性水平,获国家发明奖多项。提出的"无应力集中"

抗疲劳概念,建立抗疲劳制造技术体系,研究成功 300M 钢制长寿命飞机起落架,疲劳寿命 6000 飞行小时(54 000 起落)以上,达到并超过国外同类起落架5000 飞行小时最高规定寿命,广泛用于多种型号飞机,1991 年至今无一故障,获国家科技进步一等奖。

热处理对自韧化 α – SiAlON 陶瓷 显微组织与力学性能的影响

周玉等

哈尔滨工业大学特种陶瓷研究所

摘要:分别对不同稀土掺杂的自韧化 α – SiAlON 陶瓷进行热处理,研究了稀土类型及稀土添加剂含量在热处理过程中对 α – SiAlON 陶瓷的微观结构与力学性能的影响规律。结果表明, α – SiAlON 陶瓷在 1300 $\mathbb C$ ~ 1900 $\mathbb C$ 条件下热处理,均未发生 α – SiAlON 向 β – SiAlON 的转变。1500 $\mathbb C$ 长时间热处理导致 α – SiAlON 晶粒形貌改变,长径比降低,大量晶间相析出,材料性能下降;1800 $\mathbb C$ ~ 1900 $\mathbb C$ 高温热处理促进了各相成分的调整、玻璃相的晶化以及长棒晶的各向异性长大,显著改善了材料的韧性,稀土添加剂含量高的 α – SiAlON 陶瓷性能提高最为突出。

一、引言

 α – SiAlON 陶瓷是 α – Si₃N₄ 的固溶体,具有优良的综合性能,在工程应用中受到广泛关注^[1]。但由于本征等轴晶形貌导致其断裂韧性较低,其应用受到限制。为了改善材料的断裂韧性,有研究者利用 β – SiAlON 高韧性的特点,制备了(α + β) – SiAlON 双相陶瓷^[2-4]。(α + β) – SiAlON 双相陶瓷的生成改善了纯 α – SiAlON 陶瓷的韧性,然而却降低了材料的硬度^[2,4]。因此获得具有长棒状晶粒的自韧化 α – SiAlON 陶瓷已成为研究者追求的目标。

金属离子 Li^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 以及 Y^{3+} 、 Yb^{3+} 、 Sm^{3+} 、 Er^{3+} 等大多数稀土阳离子都可以用来稳定 α – SiAlON 陶瓷,其微观组织与力学性能随着掺杂的稳定元素种类不同而呈现差异[5-8]。此外,体系中液相含量、粘度以及酸碱性等物理化学性质对 α – SiAlON 的晶粒形貌具有直接或间接影响,进而影响材料的力学性能[9]。

获得致密的氮化物陶瓷通常采用液相烧结过程实现,这也致使冷却后材料内存在玻璃相,其高温软化将会恶化材料的高温性能。研究认为,对氮化物陶瓷进行后期热处理,有助于陶瓷内非晶相析晶形成难熔晶间相,从而降低晶界残余

玻璃相的含量。但也有研究发现,对使用稀土添加助剂烧结的($\alpha+\beta$) – SiAlON 陶瓷进行后续热处理,低温条件下将导致陶瓷中 α – SiAlON 相不稳定,发生分解形成富集稀土的晶间相和 β – SiAlON 相^[10-12]。相比较而言,自韧化 α – SiAlON 陶瓷的热处理报道则较少。 α – SiAlON 晶粒形貌受掺杂离子类型、初始粉末成分、制备过程等多种因素影响^[5-8,13],研究热处理对不同自韧化 α – SiAlON 陶瓷的影响具有重要意义。

本文将对添加不同含量稀土、不同类型稀土的以及不同方法制备的自韧化 α - SiAlON 陶瓷分别进行后期热处理,研究材料的微观组织与力学性能的变化规律,并评价 α - SiAlON 陶瓷的稳定性。

二、试验

本文利用的通式 $Re_{m/3}Si_{12-(m+n)}Al_{(m+n)}O_nN_{16-n}$,选择 m=n=1 时的成分为试验所需成分,即 $Re_{0.333}Si_{10}Al_2ON_{15}$ (Re = Y,Nd,Lu,Yb)。同时,又加入了过量 2 wt. %或 6 wt. %的稀土氧化物(参见表 1 所列)促进致密化,制备的材料简称为 ReE2 或 ReE6。另外,又制备了 Yb³+和 Nd³+共同掺杂的 α – SiAlON 陶瓷,其中 Yb₂O₃ 和 Nd₂O₃ 总过量 2 wt. %,其摩尔比为 1:1,简称为 Yb/NdE2。原材料分别为 α – Si₃N₄ (UBE – 10,日本),Al₂O₃ (Grade A163G,美国),Aln (Grade C,德国柏林),Yb₂O₃、Y₂O₃、Nd₂O₃ (Grade C,德国柏林),Lu₂O₃ (Grade Fine,广东惠州瑞尔化学科技公司)。

依照上述成分配比,将粉末湿混并烘干过筛后在氮气气氛下进行两步热压烧结(HP)或热等静压烧结(HIP),具体工艺参数如表1所示。

Sample	Sintering process	Heat - treated process	
NdE2	HP1500℃/1 h + 1900℃/1 h	1900℃/1 h	
Yb/NdE2	HP1500℃/1 h + 1900℃/1 h	1900℃/1 h	
YE2	HP1500℃/1 h + 1900℃/1 h	1900℃/1 h	
LuE2	HP1500℃/1 h + 1900℃/1 h	1800℃/1 h	
LuE6	HP1500℃/1 h + 1900℃/1 h	1800℃/1 h	
YE6	HP1500℃/1 h + 1900℃/1 h	1900℃/1 h	
		1300℃/10 h	
YE2	HIP1800℃/1 h	1500℃/10 h	

1500℃/74 h

表 1 α-SiAION 陶瓷的烧结及热处理工艺

对于热处理的 α – SiAlON 试样,将其放置在气压炉内,在氮气气氛下升温至要求温度后保温所需时间然后随炉冷却,具体工艺参数见表 1。样品简称为 ReE2 – HT 或 ReE6 – HT。

采用阿基米德法测量材料的密度,利用 X 射线衍射仪确定物相组成。形貌观察试样经喷金后在 HITACHI S – 35000N 型扫描电子显微镜下观察。材料的精细组织分析在 Tecnai G2 F30 场发射透射电镜下进行。材料的硬度(Hv)在 HV – 50 型维氏硬度计上测定,试验中载荷为 98 N,保压 15 s。断裂韧性(K_{IC})则根据 Anstis 等人的压痕法方法进行测定 [14]。

三、结果与讨论

(一)物相分析

图 1 示出了 $Lu - \alpha - SiAlON$ 陶瓷高温热处理后和初始烧结态的相组成。分析发现,高温热处理后陶瓷中没有其他相生成,说明其在高温条件下稳定性好。但是,二次析出相 $J'(Lu_4Si_{2-x}Al_xO_{7+x}N_{2-x})$ 的衍射峰数目增多,而且峰强也略有增加。这是因为热处理促进了陶瓷中的玻璃晶间相的析出,即 J'相的含量增加。

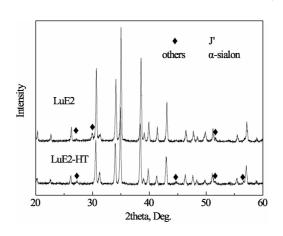


图 1 LuE2 陶瓷热压态及 1800 ℃/1 h 热处理后的相组成

图 2 显示了热等静压烧结的 $Y-\alpha$ – SiAlON 陶瓷经过低温热处理前后的相组成。从图中可以看出,烧结态的 YE2 陶瓷中只有 α – SiAlON 相存在。 α – SiAlON 具有很高的稳定性,即使在低温条件下长期热处理,仍没有发生向 β – SiAlON 的转变。同高温热处理相似,热处理后晶间相 $M'(Y_2Si_{3-x}Al_xO_{3+x}N_{4-x})$ 析出,并随着热处理时间的延长略有增加。

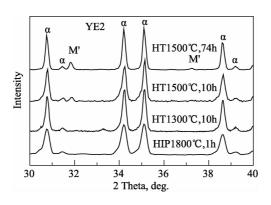


图 2 YE2 陶瓷烧结态及热处理后的相组成

(二) 高温热处理对微观组织的影响

(1) 不同稀土掺杂 α - SiAlON 陶瓷

不同稀土掺杂 α – SiAlON 陶瓷高温热处理前后的晶粒形貌如图 3 和 4 所示。从中可以看出,随着掺杂稀土离子的尺寸增大,即 Lu³+(0.085 nm)、Yb³+(0.086 nm)、Y³+(0.089 nm)、Nd³+(0.100 nm),晶粒直径减小,长径比增大,Yb/Nd 复合后 α – SiAlON 晶粒较 NdE2 的明显变粗。

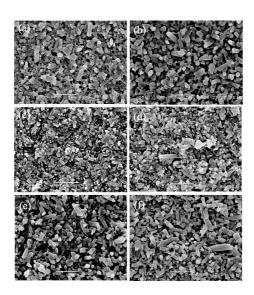


图 3 不同稀土掺杂 α – SiAION 陶瓷热压态及 1900 ℃/1 h 热处理后腐蚀表面形貌
(a) YE2;(b) YE2 – HT;(c) NdE2;(d) NdE2 – HT;(e) Yb/NdE2;(f) Yb/NdE2 – HT

热处理后陶瓷中的长棒状晶粒增多,而且长径比明显变大。这表明合适工



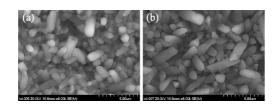


图 4 LuE2 陶瓷 1800 ℃/1h 热处理前后腐蚀表面形貌 (a) 处理前;(b) 处理后

艺的热处理过程能够有效地促进晶粒的各向异性生长。可能的原因是陶瓷在重新加热过程中,晶间玻璃相发生溶解,材料中有部分液相生成,为晶粒的各向异性生长提供了自由的空间,同时也可能为 α – SiAlON 晶粒生长提供了一定的原材料。

(2) 添加不同含量稀土添加剂的 α - SiAlON 陶瓷

图 5 和 6 给出了 YE6 和 LuE6 两种陶瓷热处理前后晶粒形貌变化照片。同 YE2 和 LuE2 相比,可以发现,过量稀土氧化物含量的增加促进了晶粒长径比增大,有利于 α – SiAlON 晶粒的各向异性生长。同时,也可以看到,稀土氧化物含量的增加导致了热压态和热处理态的 α – SiAlON 晶粒径向尺寸减小。而且,即使对试样进行高温热处理,晶粒径向变化也不大,但晶粒长度及长径比则明显增大,在稀土氧化物含量较高的 YE6 – HT 和 LuE6 – HT 陶瓷中更加显著。就LuE6 陶瓷来说,中 α – SiAlON 晶粒平均尺寸由原来的 1.5 μ m 增大到 2.2 μ m (长度方向),径向尺寸由 0.56 μ m 增大到 0.64 μ m,长径比变化明显由 2.6 扩大到 3.4,而 LuE2 陶瓷长度方向尺寸由热压态 1.6 μ m 增大到 2.0 μ m,径向由 0.8 μ m 增大到 0.87 μ m,长径比由 2.0 增大为 2.3。

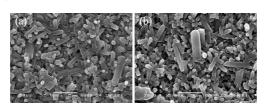


图 5 YE6 陶瓷 1900 ℃/1 h 热处理前后腐蚀表面形貌 (a) 处理前;(b) 处理后

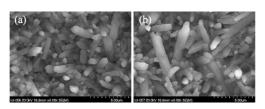


图 6 LuE6 陶瓷 1800 ℃/1 h 热处理前后腐蚀表面形貌 (a) 处理前;(b) 处理后

热处理后陶瓷中 α – SiAlON 晶粒的形貌变化主要归因于热处理过程引起的成分变化,同时,热处理过程也影响了陶瓷中的晶间相的分布情况和形貌变化。图 7 给出了 LuE6 陶瓷烧结态和热处理后的 STEM 形貌照片。通过比较可以看出,热处理后尺寸较小的 α – SiAlON 晶粒减少,大尺寸晶粒增多。

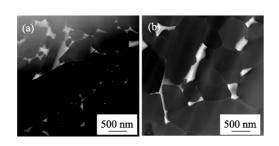


图 7 LuE6 陶瓷 1800 ℃热处理 1 h 前后的 STEM 照片

(a) 处理前;(b) 处理后

另外,热处理也使得两相邻 α – SiAION 晶粒间的晶间相减少,甚至消失。而更多的晶间相则分布在三晶粒或四晶粒连接处,而且位于这些位置的晶间相体积变大,说明热处理过程促进了晶间相成分的重新分配,改善了晶间相的分布。

为了定量分析成分变化,表 2 列出了 LuE6 热压态和热处理后的 α – SiAlON 晶粒及晶间相的成分,这些数值是不同部位多个点的平均值。同热处理前相比, LuE6 – HT 的 α – SiAlON 晶粒内 Lu 和 Si 的计数强度显著降低,Al 的计数强度略有降低,而 N 的强度显著增加。就晶间相的成分而言,热处理使得晶间相内 O和 Lu 的含量显著升高,Al 的含量增加较少,而 Si 和 N 的含量明显降低。

 α - SiAlON 晶粒及晶间相的成分变化主要是由于在热处理过程中,材料体系中发生了如下反应:

$$\alpha_1$$
 + 晶间液相 + $J'_1 \longrightarrow \alpha_2$ + J'_2

其中, α_2 是溶解度比 α_1 低的 α – SiAlON 相,这主要是因为 J'_2 的生成引起的。同时, α – SiAlON 相中的 Lu、晶间液相以及初始晶间相中的 Lu 被 J'_2 相消耗,因而,热处理后晶间相中 Lu 含量急剧增加。

	- 74	MX21137A		HH 1-3 1H H3750 23	(/	
Phase	Sample	Si	Al	0	N	Lu
α – SiAlON	HPed	53. 67	11. 83	6. 18	26. 22	2. 10
	HTed	41. 59	10. 25	4. 09	42. 15	1. 92
GB phase	HPed	40. 59	11. 20	7. 65	28. 02	12. 54
	HTed	20. 62	12. 99	30. 17	6. 090	30. 14

表 2 LuE6 热处理前后 α-SiAION 和晶间相的成分 (wt. %)

(三) 低温热处理后的微观组织演变

图 8 显示了热等静压 YE2 陶瓷烧结态和低温热处理后的微观组织形貌。灰色的长棒状晶粒为 α – SiAlON 相,白色的晶间相均匀分布于晶界处。1300℃热处理 10 h 后,显微组织基本没有变化,随着热处理温度升高到 1500℃保温 10 h,可以观察到大量的白色块状相析出,结合 XRD 和能谱分析结果,可以证实该白色相为 M′相。此时, α – SiAlON 晶粒仍为长棒状。进一步延长保温时间至74 h,发现陶瓷中长棒状晶粒形貌发生变化,由长棒状向等轴状转变,而且晶界变模糊不清,如图 8(d)所示。M′相含量及体积进一步增大,这与高温热处理后晶间相的变化相近,说明 M′相的析出主要由于玻璃相的进一步析晶。

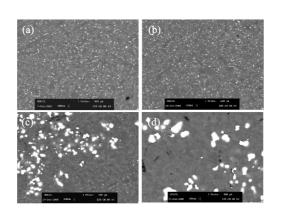


图 8 不同低温热处理后的 $Y - \alpha - SiAION$ 组织照片

- (a) HIP1800℃/1h;(b) HT1300℃/10h;
- (e) HT1500℃/10h;(d) HT1500℃/74h

(四) 热处理对力学性能的影响

表 3 中分别列出了不同稀土掺杂 α – SiAlON 陶瓷烧结态和 1800 ~ 1900 $^{\circ}$ 高温热处理后的力学性能。在不同的 α – SiAlON 陶瓷中, α – SiAlON 相作为主晶相的相构成没有改变,因而材料的硬度在热处理前后基本没有变化,仍保持其高硬度。由于稀土类型不同,陶瓷中的晶间相含量等略有不同导致相同状态下相互之间在硬度上存在一定的差异。但断裂韧性经过热处理后得到明显改善,均显著提高,稀土添加剂含量高的 LuE6 和 YE6 陶瓷的韧性改善最为显著。

Sample	Hardness (GPa)	Toughness (MPa · m ^{1/2})
Lu1010E2	22. 0 ± 0. 3	4. 0 ± 0. 1
LuE2 – HT	21. 8 ± 0. 4	4.6 ± 0.2
NdE2	18. 4 ± 0. 1	4.8 ± 0.2
NdE2 – HT	18. 4 ± 0. 2	5. 3 ± 0. 2
Yb/NdE2	19. 2 ± 0. 1	5. 1 ± 0. 2
Yb/NdE2 – HT	19. 1 ± 0. 3	6.1 ± 0.3
YE2	19.7 ± 0.2	4. 0 ± 0. 2
YE2 – HT	19.6 ± 0.2	4.7 ± 0.3
YE6	18. 4 ± 0. 5	5.9 ± 0.3
YE6 – HT	18. 3 ± 0. 4	7.0 ± 0.2
LuE6	21.8 ± 0.2	4.6 ± 0.1
LuE6 – HT	21.6 ± 0.3	6. 0 ± 0. 2

表 3 热压烧结和高温热处理后的 α-SiAlON 陶瓷的力学性能

图 9 显示了热处理后 YE6 陶瓷的断口形貌,断口很粗糙,留有大量长棒状晶粒拔出的痕迹或呈晶体学刻面的口,而且也能看到一些突出于断面的长棒状晶粒,充分体现了陶瓷的自韧化效果。

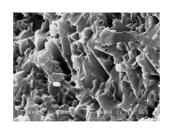


图 9 YE6 陶瓷高温热处理后的断口形貌

表 4 列出了 YE2 陶瓷热等静压及低温热处理不同时间后的力学性能。可以看出,烧结后的 YE2 陶瓷具有高硬度和高断裂韧性。在 1300% 热处理 10~h~f,由于陶瓷各组成相含量及微观组织变化很小,硬度基本不变,韧性稍有降低。提高热处理温度至 1500%,保温 10~h~f,由于大量晶间相析出,硬度下降明显,晶粒仍保持长棒状形貌,故韧性降低不大。进一步延长热处理时间至 74~h,陶瓷的硬度和韧性都进一步降低,这归因于陶瓷显微组织的变化,大量的晶间相析出以及 α – SiAlON 晶粒等轴化均导致陶瓷的力学性能恶化。

Sample	Process	Hardness (GPa)	Toughness (MPa·m ^{1/2})
YE2	HIP 1800℃	20.2 ± 0.5	6.0 ± 0.1
YE2 – HT	1300℃/10 h	20.0 ± 0.4	5.7 ± 0.1
YE2 – HT	1500℃/10 h	19.6 ± 0.3	5. 8 ± 0. 1
YE2 – HT	1500℃/74 h	19. 4 ± 0. 6	5. 3 ± 0. 1

表 4 低温热处理前后 Y - α - SiAION 陶瓷的力学性能

图 10 显示了低温热处理前后 YE2 陶瓷压痕裂纹扩展路径。可以看出,烧结态陶瓷中裂纹扩展路径曲折,有明显的裂纹偏转和长棒状晶粒的拔出,故其韧性高。而经过低温长时间热处理后,棒晶等轴化,裂纹扩展路径平直,没有棒晶拔出及桥接现象,因而陶瓷的韧性下降。

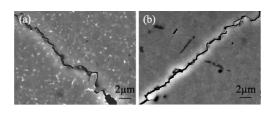


图 10 YE2 陶瓷低温热处理前后裂纹扩展路径 (a) HIPed 1800/1h;(b) HTed 1500/74h

四、结论

- (1) 成功制备了不同稀土稳定的自韧化 α SiAlON 陶瓷。在 1300 ~ 1900 \mathbb{C} 温度下热处理,具有很高的热稳定性,均未发生 α SiAlON 向 β SiAlON 的相转变。
- (2) 1300℃低温热处理 10 h 对 α SiAlON 陶瓷的组织和性能影响不大;升高温度到 1500℃热处理 10 h,二次相 M′析出,硬度略有下降;继续延长热处理时间至 74 h,α SiAlON 晶粒等轴化,性能明显下降。
- (3) 1800 ~ 1900 ℃ 高温热处理促进了各相成分调整及玻璃相含量降低,有利于 α SiAlON 棒状晶粒的各向异性长大,断裂韧性显著提高,稀土添加剂含量高的 α SiAlON 陶瓷受热处理影响更显著。

参考文献

1. Ekström T, Nygren M. SiAlON ceramics [J]. J. Am. Ceram. Soc., 1992, 75

- (2):259-276.
- 2. Zhang C, Sun W Y, Yan D S. Optimizing mechanical properties and thermal stability of Ln α β SiAlON by using duplex Ln elements (Dy and Sm) [J]. J. Eur. Ceram. Soc, 1999, 19:33 39.
- 3. Pettersson P, Shen Z J, Johnsson Mats, et al. Thermal shock resistance of α/β SiAlON ceramic composites [J]. J. Eur. Ceram. Soc, 2001, 21:999 1005.
- 4. Ye F, Hoffmann M J, Holzer S, et al. Microstructural development of Y α /(β) SiAlONs after post heat treatment and its effect on mechanical properties [J]. Ceram. Int, 2004, 30:229 238.
- 5. Peng H, Shen Z J, Nygren M. Reaction sequences occurring in dense Li doped SiAlON ceramics; influence of temperature and holding time [J]. J. Mater. Chem, 2003, 13:2285 2289.
- 6. Shin I H, Kim D J. Growth of elongated grains in α SiAlON ceramics [J]. Mater. Lett. 2001,47:329 333.
- 7. Wood C A, Zhao H, Cheng Y B. Microstructure development of calcium with elongated grains [J]. J. Am. Ceram. Soc, 1999, 82(2):421-428.
- 8. Zenotchkine M, Shuba R, Chen I W. Effect of heating schedule on the microstructure and fracture toughness of α SiAlON cause and solution [J]. J. Am. Ceram. Soc, 2002, 85(7):1882 1884.
- 9. Peng H, Shen Z J, Nygren M. Formation of in situ reinforced microstructure in α SiAlON ceramics: part II. In the presence of a liquid phase. J. Mater. Res, 2002, 17(5):1136-1142.
- 10. Mandal H, Thompson D P. Reversible $\alpha \leftrightarrow \beta$ SiAlON transformation in heat treatment SiAlON ceramics [J]. J. Eur. Ceram. Soc, 1993, 12:421 429.
- 11. Shen Z J, Ekström T, Nygren M. Relations occurring in post heat treated α/β SiAlONs: on the thermal stability of α SiAlON [J]. J. Eur. Ceram. Soc, 1996, 16:873 883.
- 12. Falk L K, Shen Z J, Ekström T. Microstructural stablility of duplex α β SiAlONs ceramics [J]. J. Eur. Ceram. Soc, 1997, 17:1009 1112.
- 13. Chen W W, Sun W Y, Li Y W, et al. Effect of processing on the morphology of α SiAlON grains [J]. Mater. Lett. 2000, 46:343 348.
- 14. Anstis G R, Chantikul P, Lawn B R, Marshall D B. A critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness [J]. J. Am. Ceram. Soc. 1981,64:533 538.



周玉 1955年出生于黑龙江省五常。无机非金属材料专业。1982.1 毕业于哈工大金属材料及工艺系,获学士学位,1984.11 获哈工大硕士学位;1987.10-1988.10 为东京大学中日联合培养博士生,1989.3 获哈工大博士学位。1994.10-1995.4月为英国利兹大学高级访问学者。现任哈工大教授、博士生导师、副校长。主要从事陶瓷的相变与韧化、陶瓷复合材料的抗热震与耐烧蚀性能及其在航天防热部件上的应用等研究。发明了新型防热陶瓷

复合材料,并成功应用于航天型号。获国家技术发明二等奖1项、省部级科技奖7项;获国家发明专利5项;出版专著及教材5部,获全国普通高校优秀教材一等奖1项;发表SCI、EI 收录主要学术论文300余篇,论著被国内外同行他引2000余次。已培养博士研究生、硕士研究生各30余名。曾获国家杰出青年基金资助,国家"有突出贡献的中青年专家"、"中国青年科学家奖"、航天总公司"航天奖"等荣誉称号。2009年当选为中国工程院院士。

核泵零部件热处理与表面改性原理及应用

雷明凯

大连理工大学材料科学与工程学院表面工程实验室

前 言

大型先进压水堆核电站建设,是国家应对全球能源问题和气候变化所采取的调整能源结构、减少污染排放,实现经济和环境协调发展的战略决策。包括核一、二、三级的各级核泵是核电站的循环动力系统,特别是核主泵,其功能在于驱动核岛内高温高压水循环,将反应堆芯核裂变的热能传递给蒸汽发生器产生蒸汽,推动汽轮机发电,是核电站的"心脏"。核主泵的设计工作压力 17 MPa,流量24 000 m³/h,扬程100 m,温度340℃,工作效率79%以上。核主泵是在强放射性的核岛中唯一的长期高速旋转装备,并且要求在启停、事故和地震、火灾等全工况下高效稳定运行,瞬态流动特性不应导致发生非计划停堆事件,确保高放射性高温高压水无外泄漏。目前新一代核主泵正常使役时间已增至60年,对核主泵的高可靠性制造带来了极大挑战。先进压水堆核电站核主泵是核电技术国产化最后一个难度最大的重大装备,目前其核心技术完全由美、日、法、俄、德、奥等核能先进国家所垄断,我国迄今全部依赖进口。

核泵运行的安全性,要求保证材料的物理、化学、力学性能满足零部件的使役性能要求,而且要达到零部件表面具有加工和使役过程的高洁净度,无表面杂质元素和外来物污染,避免对工作介质的理化性质和流动特性产生不良影响,零部件表面必须具有一体化的高使役性、高完整性和高洁净度。核泵零部件材料与表面处理面临的主要困难包括:(1)高放射性环境下使役的泵壳、转子组件、轴承、密封和屏蔽套等,不仅承受高动压载荷,保证零部件过流表面的流体动压面承载、耐热和耐磨性能,而且长期承受特殊工质冲刷和腐蚀作用,高的耐磨损抗腐蚀性能必须与高表面完整性相配合。(2)在零件机加工、热处理、装配、储运等过程中,制造环境、刀具与工装夹具、切削液和热处理介质等可能在零部件表面引起任何异质物质污染,如奥氏体零部件表面的铁素体粘附,F、Cl、Ni、Cr等杂质或有害元素的扩散和渗入等。(3)关键零部件的强化表面、亚表面严格的无损伤要求,如水润滑轴承工作面涂覆的硬质改性涂层,需兼备高表面完整性,

机械密封动、静环端面具有亚微米级面型精度和表面粗糙度,且无任何缺陷和损 伤等。

迄今,大型先进压水堆核电站核泵材料研发与制造技术有待于进一步完善 和发展. 超长使役高安全性的核主泵制造仍是世界性重大技术难题。核泵关键 零部件热处理与表面改性原理和技术是今后核泵关键科学研究与技术发展的主 攻方向和前沿课题。主要包括 4 项具有代表性的技术。

一、不锈钢的低温渗氮技术

不锈钢是核泵泵壳、转子组件的主要材料,其具有优良的耐蚀性,但其硬度 低,摩擦磨损性能较差,难以满足超长使役的零部件既耐磨又抗蚀的长期复合性 能要求。

许多表面改性技术,包括常规等离子体渗氮、氮离子注入和激光渗氮等,都 曾用于提高奥氏体不锈钢的耐磨性,遗憾的是,改性表面耐磨性提高的同时耐蚀 性却相应恶化。1985 年张仲麟和 T. Bell 报道了 400℃ 等离子体低温渗氮处理 AISI 316 奥氏体不锈钢, 获得了耐孔蚀的渗氮硬化层。此后大量研究结果相继 证实了等离子体低温渗氮奥氏体不锈钢具有耐磨抗蚀复合改性的作用。10多 年前欧洲已将这项改进的等离子体渗氮技术用于核岛中燃料控制升降机构部件 的表面强化。但在实践中发现,等离子体低温渗氮奥氏体不锈钢耐蚀性的改善 仅限于耐孔蚀性能,耐其他酸性介质的均匀腐蚀性能仍不理想,奥氏体不锈钢耐 磨损腐蚀复合改性的难题仍未彻底解决。

等离子体源离子渗氮技术(Plasma Source Ion Nitriding)是一种全新的等离 子体低温表面工程技术,这项技术将低能离子束注入技术引入到等离子体基离 子注入技术,即全方位离子注入中。一方面利用低能离子注入的"低能"优势, 另一方面利用等离子体基离子注入的"全方位"优势,采用高密度、高电子温度 和高离化率的等离子体,结合施加脉冲负偏压和辅助外热源,通过 0.4~3 keV 的低能离子注入结合同步扩散传质,实现在200~300℃超低工艺温度下、高传质 效率的表面处理各种零部件。等离子体源离子渗氮技术,是低温、低压表面改性 金属材料的新方法,与等离子体渗氮的对比实验,在相同的等离子体参数、工艺 条件下,证明了等离子体源离子渗氮具有"低能离子注入—同步热扩散"的主要 传质机制,等离子体热化学吸收仅起到一种补充的传质作用。低能离子注入是 不依赖于工艺温度的工艺过程,根据离子在固体中传输理论计算,可以在数十纳 米深度范围内形成注入改性层。由于表面确定温度场的存在,在表面高浓度注 人的粒子随后发生相应的扩散,达到一定的深度。等离子体源离子渗氮同时具 有独立测量和控制低能注入离子能量、离子注入剂量速率和工艺温度的特点,而 且拥有高的渗氮效率,高的工艺稳定可靠性,以及装置设计比较简单,技术成本低等优点。目前,这项技术已拓展研发出等离子体源渗氮、碳、硼和等离子体源低能离子增强沉积薄膜两大类工艺。

法国 Ecole des Mines de Nancy 表面工程国家实验室(CNRS7570)主任 H. Michel 教授系统总结了国际上 4 种先进等离子体低压渗氮技术:英、美学者提出 的增强的直流等离子体低温渗氮技术;澳、德学者升温的等离子体基离子注入技 术;我们自主研发的等离子体基低能离子注入(Plasma Based Low Energy Ion Implantation)技术;以及法国学者自己的电弧等离子体增强渗氮技术。通过比较, 我们的等离子体基低能离子注入技术,具有高等离子体密度、高电子温度和高离 化率,以特有的低温高传质效率,与英、美、澳、德、法等国学者的工作并称为4种 先进的氮等离子体/离子表面工程技术之一。Michel 教授所总结的 4 种先进的 氮等离子体/离子表面技术均在不锈钢表面工程中被尝试或采用,但是耐磨抗蚀 复合性能的改善程度却差别极大,甚至会导致性能的恶化。我们采用等离子体 源离子渗氮奥氏体不锈钢,获得了高硬度(HV 20 GPa)、高承载能力和高耐磨 性,同时完全不发生孔蚀、目抗均匀腐蚀的渗氮表面,是迄今所见报道的最佳耐 磨抗蚀复合性能的不锈钢改性表面,彻底解决了耐磨抗蚀复合改性不锈钢表面 工程的难题。等离子体基低能离子注入技术可以有效地改善目前广泛工业化的 等离子体热扩散处理工艺,拓展加工领域及加工能力,从而在工业领域取得应 用。等离子体源离子渗氮马氏体不锈钢同样实现了这类不锈钢耐磨抗蚀的复合 改性,应用前景明确。

二、代替电镀的表面涂层技术

目前我国引进的核主泵,其泵轴、紧固件的表面耐磨抗蚀防护涂层是传统的电镀层,铬的钝性可以安全地用于核泵零部件。镀铬层硬度高、耐磨抗蚀并能长期保持表面光亮,工艺相对简单,成本较低。尽管电镀铬是一种传统的表面电镀技术,已经应用近一个世纪之久。然而,电镀工艺的三废排放,对环境污染严重。事实上导致环境问题的不是铬本身,而是镀铬过程。我国包括沿海经济发达地区仍有许多中小电镀企业分布,环境治理问题亟待解决,国际上对镀铬工艺的限制已经越来越严格。美国将现行的六价铬的空气排放标准从 0.1 mg/m³降低到 0.0050~0.0005 mg/m³。而据美国海军部门估计,单是美国海军在实施该标准后已需要 2200 万美元一次性投资用于更新设备,以后每年仍要花费 4600 万美元作为收集、处理等费用。

从涂层特性与技术应用方面分析,电镀铬涂层仍然存在硬度较低等问题,尽管核电关键零部件镀铬层硬度要求为HRC62-64,但是远不及一些金属氧化物、

氮化物陶瓷涂层硬度高和耐磨性好,而且硬铬镀层的硬度在温度升高时会因其 内应力的释放而迅速降低,对使用温度明确限制。镀铬层内微裂纹的控制问题 虽然得到严格控制,但是穿透性裂纹的产生,导致腐蚀介质从表面渗透至界面而 腐蚀基体,造成镀层表面出现锈斑甚至剥落问题时有发生。

随着近年来涂层技术的不断发展,代替电镀硬铬的涂层工艺,已经有不同涂 层技术的使用效果证明,较电镀硬铬层更清洁、更有效,甚至成本更低。这些涂 层技术包括物理气相沉积(PVD)、化学气相沉积(CVD)、激光涂层技术,以及 冷、热喷涂和等离子体喷涂技术等。另外,金属铬离子注入技术同样成为部分关 键零部件代替电镀硬铬的一种有效途径。

三、超硬涂层与功能涂层技术

核主泵轴承、密封等关键零部件的耐磨配副要求超硬涂层的制备,机械密封 组件是核主泵中最易损坏部件之一。根据对核主泵工作情况调查,70%以上的 故障来自机械密封。正常工况下,核主泵密封环的密封端面处于水膜支撑的水 润滑摩擦状态,但核反应堆启停、升降负荷,异物及瞬时波动等工况可导致密封 端面发生短时接触摩擦,要求硬环材料有足够的强度和刚度以及良好的摩擦学 性能。同时核心紧固件也要求减摩润滑等功能涂层的保护。

目前,超硬涂层是指显微硬度超过 40 GPa 的涂层材料,可分为本征超硬涂 层和纳米复合超硬涂层两类。前者主要有金刚石、无氢类金刚石、c-BN、BC,和 三元化合物 B-C-N 等单一结构涂层,CVD 是制备此类涂层的主要方法。纳米 复合超硬涂层是指由完全分离的两相或两相以上纳米晶或纳米晶与非晶在三维 方向调制混合组成的多元涂层,纳米晶通常为过渡族金属氮化物、碳化物、硼化 物或氧化物,晶粒尺寸为3~10 nm,镶嵌于1~2个原子层厚的网状非晶相(如 Si₃N₄,BN,C等)或软金属(如 Cu等)基体中,形成具有高硬度、高韧性的多功能 涂层。目前,纳米复合超硬涂层是超硬涂层的发展方向。等离子体增强化学气 相沉积(PECVD)和 PVD的磁控溅射是制备 nc - TiN/a - Si₃N₄等纳米复合超硬 涂层的两类主要方法,前者的硬度可高达80~100 GPa,远高于磁控溅射沉积涂 层,而磁控溅射技术具有无污染、低温和低损伤等优点,适合工业生产。磁控溅 射沉积超硬涂层的硬度为 30~50 GPa,低基体温度和高氧含量是导致其硬度低 于 PECVD 的主要原因。磁控溅射靶材原子离子化可提高沉积原子的扩散速度 和形核率,促进纳米晶和非晶两相完全分离,可调控纳米晶和非晶的组成、尺寸、 数量和分布形态,进而控制涂层的硬度和残余应力状态。同时,高束流金属离子 轰击可改变涂层与基体界面结构,产生化学键合界面,改善涂层的膜基结合性 能。

离子化磁控溅射工艺的发展主要体现在两个方面,一是平衡磁场向非平衡磁场的转变,闭合场非平衡磁控溅射(Closed - Field Unbalanced Magnetron Sputtering)是应用广泛的一种非平衡磁控溅射工艺,与其他磁控溅射工艺相比,具有高离子密度、高束流密度和高沉积速率的优点,同时离子对沉积膜层表面具有轰击作用,能有效地提高涂层与基体的结合力。另一方面是新型磁控溅射新技术——高功率脉冲磁控溅射技术(High Power Pulsed Magnetron Sputtering)的发展,采用高功率脉冲供电模式为磁控溅射阴极提供高达 2.8 kW/cm²的峰值功率密度,可在基体获达 3.4 A/cm²的电流密度(传统磁控溅射技术为 10 mA/cm²),靶材粒子离化率达 100%,同时利用 5~400 Hz 的低脉冲频率和 1%~30%的低占空比,保证平均功率与传统磁控溅射相当,使磁控溅射阴极不会因过热而增加其冷却要求。

与常规磁控溅射相比,高功率脉冲磁控溅射虽同为低温工艺,但具有很高的靶材原子离化率,已有的报道在20%~100%范围内,可产生高达数百 mA/cm²的离子束流轰击,所沉积的涂层具有如下优点:在电子反常输运的影响下,离子输运机制转变为横向和纵向正交运动机制,大幅提高了绕镀能力,并可通过施加基片偏压提供电场,控制靶材离子运动方向,实现全方位均匀沉积,有利于在复杂零件表面制备均匀致密涂层。高密度离子束流轰击基体表面,在去除基体表面污染的同时注入至涂层与基体界面,改变基体的取向和表面结构,使涂层与基体之间形成局部外延生长,获得化学键合界面,大幅增强膜基结合强度。离子轰击可提高沉积原子表面扩散能力,促进了晶粒的重复形核速率和迁移速率,进而抑制贯穿涂层厚度的柱状晶结构形成,提高涂层的致密度和均匀性,改善涂层硬度、耐磨和抗蚀等性能。高功率脉冲磁控溅射技术作为最新的离子化磁控溅射技术,在调控纳米复合涂层成分、结构和残余应力状态方面具有综合技术优势,是设计和发展核主泵关键超硬涂层的一种新思路和新技术。

四、离子束表面强化技术

强流脉冲离子束(High Intensity Pulsed Ion Beam)从 20 世纪 80 年代后期开始,由核聚变技术领域逐步拓展、并迅速发展成为一种新的表面工程技术。强流脉冲离子束具有超高温、超高压和强磁场等工艺特性,强流脉冲离子束辐照固体材料,可在小于 1 μs 的时间内在辐照表面层实现 1 ~ 100 J/cm² 高能量密度沉积,辐照表面产生强烈的远离平衡态的热效应和力学效应,10° ~ 10¹0 K/s 的急剧升温和冷却,发生显著的熔融、蒸发和剧烈烧蚀,物质喷射的反冲作用和热冲击在辐照表面形成由表及里的应力波,造成表面成分、组织及性能的显著变化。与激光束、电子束处理相比,强流脉冲离子束具有能量转换效率高、加工面积大、改

56

性层较深等突出优点。国际上,俄、美、日三国学者分别是这项表面技术的原创者,德、英和我国分别从俄罗斯引进了这项技术。我们与俄罗斯 Tomsk 核物理研究所 G. E. Remnev 教授团队合作,建立了我国第一套强流脉冲离子束表面改性装置。经过了10多年的研究、消化和吸收,不仅掌握了这项技术,而且在技术的核心内容一高功率磁绝缘离子二极管研制方面取得了突破,获得了3项发明专利。

硬质合金是机械密封中最常用的硬质摩擦副材料,以 Ni 代 Co 的 WC - Ni 系硬质合金,具有更好的抗氧化性、抗蚀性和良好的防辐射性,可适用于高压、高温、腐蚀介质及放射性环境下的机械密封。利用强流脉冲离子束对 WC - Ni 硬质密封环进行辐照处理,研究辐照对 WC - Ni 硬质密封材料表面层相结构、表面形貌、成分和性能的影响,分析其辐照改性作用。强流脉冲离子束辐照导致 WC - Ni 硬质合金表发生由六方碳化物 WC 硬质相向面心立方碳化物 β - WC_{1-x}转变,且表层中的 β - WC_{1-x}相随辐照次数的增加而增加。辐照引发硬质合金表面快速重熔和 Ni 粘结相的选择性烧蚀,随着辐照次数增加至 10 次,形成了网状"峰 - 谷"起伏结构的表面重熔烧蚀层,在微区范围表面光滑致密化。在辐照应力波的作用下,辐照后硬质合金表层深度硬化,随着辐照次数的增加,硬化层深度显著增加,10 次辐照硬化层深度可达 160 μ m。随着辐照次数的增加,硬质合金表面摩擦系数显著降低,表面耐磨性线性提高,10 次辐照后硬质合金表面摩擦系数降低了 38%、耐磨性提高了近 3 倍。改善的减摩抗磨性能,有利于提高核主泵机械密封工作的可靠性。

核泵制造技术的发展,与热处理与表面改性技术的进步紧密相关。核泵零部件对于材料热处理和表面改性的严格要求,亟待开展高温高压高放射性条件下零部件热处理与表面改性原理研究。适用于核泵制造的先进热处理和表面改性技术,建立零部件表面使役性、表面洁净度和表面完整性一体化的评价体系,并提出严格的工艺控制策略和有效的表面处理与改性方法,仍然是核主泵材料研发与先进制造技术面临的重大科学与技术挑战。



雷明凯 工学博士;教授,博士生导师。大连理工大学材料科学与工程学院院长。国家杰出青年基金获得者,长江学者特聘教授,中国高校青年教师奖获得者。国家 973 计划"核主泵制造的关键科学问题"项目首席科学家。从事等离子体/离子表面工程研究。1984 年本科毕业于大连工学院机械工程系金属材料专业,留校工作至今。1991 - 1992 在苏联科学院西伯利亚分院热物理研究所等离子体化学与新材料研究室访问工作,后多次在美、俄、法、日等国短期

访问和讲学。兼任亚欧等离子体表面工程科学与技术委员会委员,中国机械工程学会表面工程分会副主任委员,中国材料研究学会理事,金属腐蚀与防护国家重点实验室学术委员会副主任,表面工程国防重点实验室学术委员会委员,表面技术国防重点实验室学术委员会委员。

智能热处理及其发展前景

顾剑锋等

上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海交通大学材料科学与工程学院

一、热处理的重要性

热处理(heat treatment)是指采用适当的方式对金属材料或工件进行加热、保温和冷却以获得预期的组织结构与性能的一种工艺。金属材料或工件内在性能和质量,除成分因素影响外,主要是在热加工过程中形成。而热处理则是热加工过程的最后一道工序,对微观组织和综合性能进行调控,同时也控制热处理变形。热处理作为机械制造业四大基础工艺(铸造、锻造、焊接、热处理和表面处理)之一,是机械制造技术的重要组成部分,是强化金属材料、发挥其潜在能力的重要工艺手段,是保证和提高机械产品质量与可靠性,延长其使用寿命的关键技术,是制造业竞争力的核心要素。国际工业界公认制造业的先进性很大程度上取决于热处理的水平。

热处理特点是质量控制难度大:1)工件内部材料组织结构的变化无法直接观测;2)出厂时的质量检验无法全面反映质量状况;3)过程中影响因素众多,交互作用复杂。

热处理过程是多物理场交互作用下进行的,在最为普通和常见的简单热处理过程中,至少也包括温度、相变、应力/应变三种物理场的相互作用,如图 1 所示。

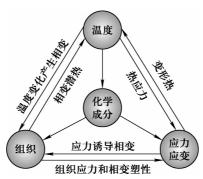


图 1 热处理过程中温度、相变和应力/应变相互作用关系

具体来说,包括:①温度对相变的作用,即加热或冷却速度导致相变,尤其是冷却速度决定了获得何种组织;②相变对温度的作用,相变是潜热释放会改变温度场,在大型锻件中尤其明显;③温度对应力的作用,由于较大温度梯度的存在往往造成不同部位的热胀冷缩不同步而产生热应力;④相变对应力的作用,由于相变产生不同组织的比容不同会引起"组织应力";⑤应力对相变的作用,热处理过程不可避免的应力对相变动力学有一定影响;⑥应力对温度的作用,应变产生塑性功发热影响温度场,相对来说,这部分的影响比较小。

热处理过程是对金属材料或工件微观组织进行调控,要求综合性能的达标, 也就是要求材料各项性能指标的平衡。众所周知,对于一定晶粒度的金属材料 来讲,总会有随着强度升高,塑性/韧性下降的情况。目前核电等能源装备大型 锻件中必须要考虑到强韧性的兼顾,基本达到了材料性能的极限。热处理工艺 窗口十分狭窄,对热处理更提出了非常高的要求。高精密轴承制造中,热处理扮 演着至关重要的角色。研究表明,微观组织中马氏体、碳化物、残余奥氏体的含 量、形态等相互关联,使得最后性能出现:强度提高伴随着韧性的降低,韧性提高 则伴随尺寸稳定下降,提高耐磨性却使脆性增大等等现象。

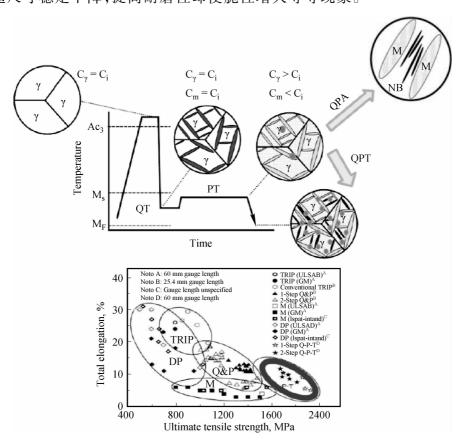


图 2 TRIP、DP、M、Q&P和Q-P-T钢的总延伸率及其抗拉强度

先进高强钢(AHSS)通常通过相变调控获得马氏体、贝氏体、铁素体和残余 奥氏体的两相或多相组织,使得各相充分发挥自身特点,从而达到提高钢综合性能的目的。以当前的研究热点 Q-P-T 钢为例,碳含量 0.2C% 左右时抗拉强度能够达到 1200 MPa,延伸率达到 15%;碳含量 0.4C% 左右时抗拉强度能够达到 2000 MPa,延伸率达到 10%;应该说性能显著提高。虽然已在实验室研制成功这样的材料,但仍无法应用于大规模工业生产,其最大难点在于热处理工艺的优化设计和热处理工艺的精确控制(图 2)。

热处理在先进制造业中的作用可以概括为四两拨千斤!成本只占百分之几,附加值提高几倍至十几倍。国际上知名企业以热处理技术作为竞争力核心要素重视其研发,且严加保密!而我国的现状是:(1)热处理水平低,产品的使用寿命、可靠性和质量重现性都远远低于国外先进水平,国防工业和重大工艺装备中的关键零部件依赖进口,民用产品因寿命短、故障率高而缺乏竞争力。(2)热处理装备的设计制造水平严重落后,高端的热处理工艺装备依赖性进口。(3)缺乏具有自主知识产权的热处理核心技术的支撑。

二、智能热处理是智能制造的重要组成

制造智能化(或称智能制造)的内涵是针对产品、装备与设施的设计制造过程,利用信息感知、决策判断、安全执行等先进智能技术,实现制造产品、制造工具与制造环境以及制造工人等资源的最佳组织与优化配置,达到由人类专家与智能机器共同组成的人机系统去扩大、延伸和部分取代人类在制造过程中体力与脑力劳动的目的。可以预见,21世纪将是智能制造获得大发展和广泛应用的时代,智能制造将引发制造业的重大变革,甚至是革命性变化。

从发展历程来看,20 世纪 50 年代诞生的数控技术以及随后出现的机器人技术和计算机辅助设计技术,开创了数字化技术用于制造活动的先河,也解决了制造产品多样化对柔性制造的要求;传感技术的发展和普及,为大量获取制造数据和信息提供了便捷的技术手段;人工智能技术的发展为生产数据与信息的分析和处理提供了有效的方法,给制造技术增添了智能的翅膀。信息技术和自动化技术使制造业的发展模式、运行效率等发生了深刻变化。制造智能化是制造自动化、制造数字化发展的必然结果和高级阶段。

数字化和智能化制造具有柔性、高效、低耗的特点,可以满足科学技术的发展、市场需求的变化对制造业提出的新要求:低碳环保、个性化多样化、高品质、快速反应市场。信息技术日趋成熟和广泛应用,为普及数字化制造和培育智能化制造奠定了物质基础和技术基础。随着信息技术与制造技术的不断深度融合,随着知识对经济增长的基础作用越来越显现,智能化制造将会成为我国制造

业转型升级和跨越式发展的关键技术。

制造智能化不仅是单元技术的集成,也是一种制造模式的创新,具有以下特征:(1)以知识为核心;(2)制造商与客户和市场的联系更为密切;(3)管理更高效;(4)生产组织更为柔性;(5)可大幅度提高制造效益和产品质量,降低产品成本和资源消耗。使制造业由资源的高消耗和环境的高污染转变为资源节约型和环境友好型,实现绿色制造。

智能热处理作为智能制造的重要环节,它使用数学建模(数值模拟)、物理模拟、实验测试相结合的方法,在准确预测材料组织性能变化规律的基础上优化热处理生产工艺的多学科交叉集成技术,其基本架构如图 3 所示。智能热处理基本要素包括热处理工艺的设计与优化、热处理装备的设计与优化、热处理工艺过程的智能控制,三者也是相互联系,密不可分的。支撑智能热处理的基础研究包括热处理工艺过程的数学建模与计算机模拟,基于知识工程技术的应用,物理模拟与实验测试技术。

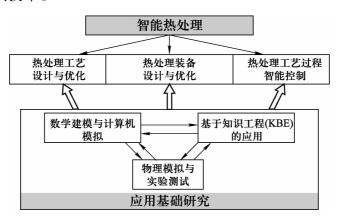


图 3 智能热处理架构

智能制造装备是实现智能制造的物质基础,同样,智能热处理装备是实现智能热处理的物质基础。为此,重视智能热处理装备的研发对提升我国热处理水平至关重要。目前我国热处理装备技术及工艺应用水平与国外先进国家相比,存在较大差距,不论是设备类型、设备构造、控制精度、能耗指标、自动化程度、智能化水平、工艺应用等方面都存在许多薄弱环节。建立国家级的智能热处理装备工程技术中心已经是迫在眉睫,势在必行。

智能制造装备,包括智能热处理装备,是具有感知、决策、执行功能的制造装备,它是先进制造技术、信息技术和智能技术的集成和深度融合。智能制造装备是实现智能、绿色制造的必要保障条件。智能制造装备具有如下特征:对制造过程状况(工况或环境)实时感知、处理和分析能力;实时辨识和预测制造过程状况变化的能力;根据制造过程状况变化的自适应规划、控制和动态补偿能力;对自身故障自诊断、自修

复能力;对自身性能劣化的主动分析和维护能力;具有参与网络集成和网络协同的能力。

2010年《国务院关于加快培育和发展战略性产业的决定》将高端装备作为七大战略性新兴产业之一。而智能制造装备是高端装备制造业五个重点发展方向之一。为此,工信部组织制定了《"十二五"智能制造装备发展规划》。2011年9月,经国务院领导批准,智能制造装备创新工程专项计划正式启动,第一批支持10个方向、19个项目,共获得9.75亿国家经费的支持。

三、热处理计算机模拟是智能热处理的核心技术

(一) 热处理数值模拟软件的定义,国内外现状及进展

热处理计算机模拟是在建立热处理工艺过程中温度、相变、应力/应变等多场量耦合数学模型基础上,发展基于有限元/有限体积/有限差分等的数值计算方法,开发相应模拟软件,进而实现过程中各类场量的模拟计算,预测全过程温度场、应力场、浓度场和微观组织场等,甚至预测性能性能场。它是优化达到设计和优化热处理工艺与装备,实现热处理工艺过程精确控制的重要手段,是实现智能热处理的核心技术。

发达国家十分重视基于数值模拟的智能热处理的研究。美国能源部等提出了美国 2020 年热处理的远景目标,为实现提高热处理质量和大幅度节能减排,在众多项目中广泛采用热处理计算机模拟。"提高航天器渗碳齿轮弯曲疲劳强度"项目,通过渗碳和强烈淬火过程数学建模的研究和应用,在不改变现有的直升飞机齿轮箱的尺寸和外形的条件下,提高其传动的功率和使用寿命。以美、欧、日为首的国际组织 IMS (Intelligent Manufacturing System)强调:①需要通过热处理技术提高零部件的机械强度、韧性和耐磨损性等性能;②热处理过程数值模拟是一个值得重视的方法。IMS 于 2003 年组织欧盟、日本、韩国和加拿大的一些大学、企业以及研究机构成立了虚拟热处理系统研究,投入大量研发经费。

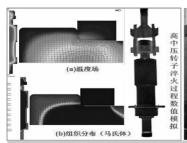
近年来,热处理计算机数值模拟进展缓慢,主要由于存在以下问题:(1)现有的模型不足以反映实际热处理过程的复杂现象。而且由于求解域的局限性,只能孤立地模拟单个工件,难以反映炉内所有物体之间的相互作用。国内外尚未开发出在全三维尺度上多变量相互作用的热处理模型。(2)基本数据获取的难度很大。基本数据残缺是计算机模拟技术广泛应用的另一个障碍。(3)数值模拟需要与实验测试、物理模拟、工艺试验和 KBE 技术相结合,才能更好地解决实际生产问题,但目前在国内外尚未见有关将它们有机结合的报道。

尽管如此,国内在一些高校、研究单位和企业的产学研合作下,在国家有关部门,如科技部、工信部等的支持下,我国在热处理数值模拟与智能技术的研究

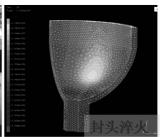
方面也取得了一些可喜的成果,使得热处理过程计算机模拟技术得到一些工程应用,并取得了良好的效果。例如,上海交通大学与上海重型机器厂有限公司合作,针对极端条件下,超超临界汽轮机转子、核电大锻件等重大装备的关键部件制造,成功进行热处理工艺和装备优化设计,取得了很好进展,如图 4 和图 5。其他成功的智能热处理具体案例,在本文不一一列举。



图 4 汽轮机低压转子淬火







温度-相变-应力耦合的热处理模拟







筒体和封头淬火流场模拟

图 5 超超临界高中压转子、核电封头和简体的热处理模拟

(二)热处理数值模拟软件的开发

热处理数值模拟软件是分析工程实际热处理问题的数字化工具,是具有知识产权的智慧结晶,需要长期深入的研发。目前在国外成功开发的仅仅有 DEFORM - HT、SYSWELD - HT、COSMAP、DANTE 等少数几个,并且模拟精度、功能性等方面有比较大的不足,推广应用程度尚待扩展。在国内,清华大学刘庄等早期和一重、二重等企业合作,开发热处理数值模拟软件 NSHT,最终没有推广而消失了。近期,上海交通大学研发了热处理模拟软件 Thermal Prophet。它基于通用有限元分析软件 MSC. MARC 提供的二次开发接口,开发了独立于 MSC. Metat的模拟参数输入界面。采用温度场、组织场和应力/应变场耦合计算模型,对钢铁材料退火、正火和淬火等涉及温度、相变和应力/应变演变的过程进行模拟(图 6)。

它的基本功能包括:

(1) 设置材料参数

材料参数包含材料基本参数(材料名称、材料来源和化学成分等),TTT 曲线 参数以及材料性能参数(热物性能、力学性能和相变动力学参数)。

(2) 设置换热模式

可添加至多99种换热模式。每种换热模式的换热系数可采用自定义或经 验公式两种方式给出。

(3) 制定热处理工艺

可添加至多99条热处理工艺。每条热处理工艺可包含多个工艺段,每个工 艺段可采用时间模式或温度模式两种控制模式,因此能够实现复杂热处理工艺 的制定。

(4)制定作业

可添加至多99个作业。每个作业提供多个相变和应力/应变计算选项,并可自由选择已制定的热处理工艺参与模拟计算。

(5) 查看模型、计算结果和运行状态

可打开每个作业对应的 MSC. Marc 模型文件和结果文件,并可实时监控其运行状态。

它的技术特点包括:

- (1) Thermal Prophet 利用 MSC. Marc 提供的二次开发接口,集成了温度场、组织场和应力/应变场模拟模块,并能够相互耦合计算,从而保证了热处理模拟的精度。
- (2)组织场模拟模块考虑了两种类型相变,即扩散型相变(铁素体、珠光体和贝氏体相变)和非扩散型相变(马氏体相变)。其中扩散型相变的模拟基于

65

Scheil 叠加原理和 Avrami 方程,非扩散型相变的模拟基于 Koistinen – Marburger 方程。两种类型的相变均提供 Denis 和 Inoue 两种模型以考虑应力对相变动力学的影响。

- (3) 应力/应变场模拟模块考虑了热应变、相变应变和相变塑性应变等因素,其中相变塑性应变的计算基于 Desalos 模型。
- (4)采用广泛应用于金属材料的 von Mises 准则作为屈服准则,并提供各向同性硬化、Zeigler 随动硬化和混合硬化三种硬化法则。
- (5)提供多种模拟参数可选项,用户能够对模拟参数(如相变应变和相变塑性等)进行组合参与计算,从而为分析影响材料组织和残余应力分布的关键因素提供了有效途径。
- (6) 用户能够输入多种换热模式,制定复杂的热处理工艺,并能够同时提交 多个作业进行模拟计算。
- (7) 软件采用 MDI 技术,能够同时打开多个子文档。软件界面友好,数据输入简便,并具有自纠错功能。

目前 Thermal Prophet 还在不断发展,回火、化学热处理和表面热处理等模拟模块正在开发之中。由于紧密结合最新的相关学科和研究领域(如相变塑性、相变动力学、弹塑性力学、数值传热学等等)的理论和模型,相信这款具有自主知识产权的热处理数值模拟软件将在我国热处理行业得到广泛应用。

(三) 热处理数值模拟的发展趋势

显然,热处理计算机模拟对热处理水平的提高有重大意义,但是由于它牵涉多学科交叉的技术,通常涉及传热、流体力学、固体力学、数值分析技术等等学科,很多难题如流场、界面换热、耦合传热、相变量计算、应力对相变动力学的影响、相变塑性等专题的研究还不够成熟,尚需深入,因此,热处理计算机模拟还是一种不成熟的技术。目前,计算机模拟还只能作为热处理工艺和装备涉及的辅助决策工具。

热处理数值模拟的发展趋势大致可以归纳为:(1)模型精细化;(2)计算大规模化;(3)结果精确化。而从研究对象和应用范围来看,热处理模拟的发展方向进一步分析如下。

(1) 方向之一:全流程

鉴于热加工过程是一个成形控性的连续过程,如图 7 所示,显著的趋势是全流程一体化制造,因此,模拟不仅由单个热处理工艺的模拟发展为整个热处理工艺流程的模拟,如渗碳+淬火+回火;加热+淬火+回火等,而且牵涉到整个热加工工艺全流程的模拟。考虑整个铸锻焊热处理热加工过程中材料组织与性能

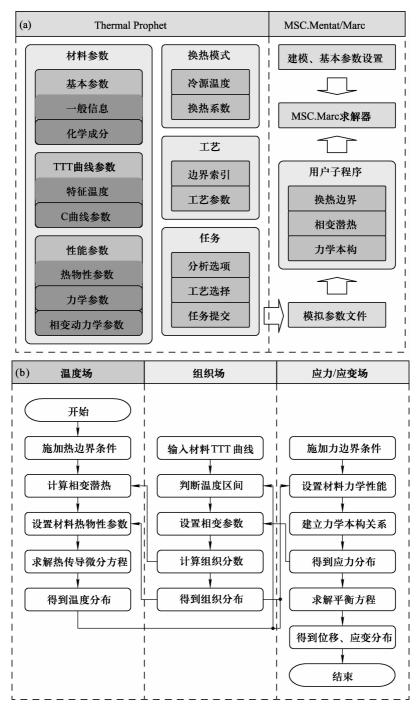


图 6 (a) Thermal Prophet 实现热处理模拟的基本过程;

(b) 增量步内温度场、组织场和应力/应变场的耦合计算流程

的遗传与继承关系,进行全流程的数值模拟,如铸造+热处理、锻造+热处理、焊接+热处理、铸造+锻造+热处理等等。如图 8 为汽车铸件冲凝固充型到热处

理整个过程的模拟,能够预测最终的微观组织分布,淬火后的残余应力等等信息。



图 7 成形控性的热加工全流程一体化制造

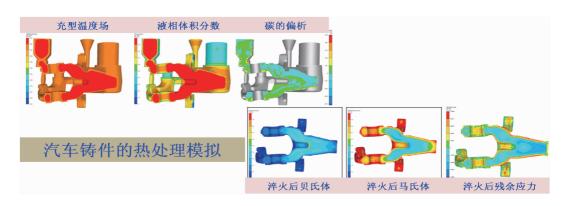


图 8 汽车铸件的铸造——热处理全流程模拟

(2) 方向之二:扩展求解域

模拟对象由热处理工件扩展至周围环境。由于工件与周围环境之间的边界条件难以精确确定,利用高性能计算机能力,可以将热处理工件和周围环境作为整体,借助于多体辐射模型、流固耦合模型等等求解,称之为扩展求解域热处理模拟方法。如图 9 所示,可以将真空炉中工件、炉体本身、流体介质等等一起进

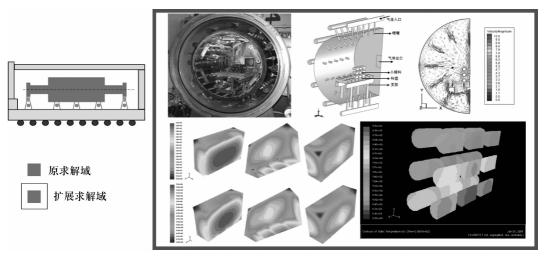


图 9 汽车铸件的铸造——热处理全流程模拟

68

行整体求解,获得各个对象的详细信息,如工件的温度和微观组织、炉体的温度、 气体的流场等等。

(3) 方向之三:基于多尺度的性能预测

目前的模拟仅仅达到预测微观组织、浓度分布、变形/残余应力的层次,对于最终力学性能分布的预测是今后的另一个重要方向。材料宏观力学性能和力学行为源于更小尺度的微观组织,借助于微观、介观和宏观尺度的结合可以获得如多相结构、偏析、内应力等导致的宏观效应的模型与模拟。因此,利用细观力学,结合分子动力学、位错动力学、相场方法,建立微观上有明晰物理解释,宏观是吻合实验结果的唯象材料力学本构关系,实现基于多相非均质材料性能场的预测必定是热处理模拟的重要方向之一。图 10 是利用 RVE(Representative Volume Method)方法进行 TRIP 钢力学性能分析的例子。

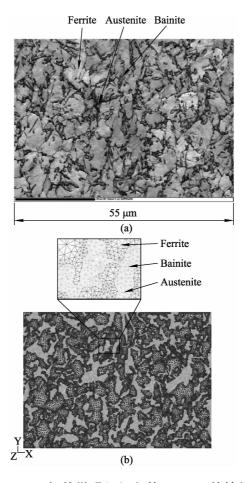


图 10 TRIP 钢的微观组织和基于 RVE 的性能预测

(4) 方向之四:多物理场耦合

热处理方式的多样化使得模拟内容由温度场、组织场、应力场进一步扩展, 电磁场、浓度场、流场等直接加入到模拟中(见图 11),模型更加复杂,计算量更大。如感应加热的模拟、淬火水槽和淬火工件的模拟、渗碳淬火过程的模拟等等。

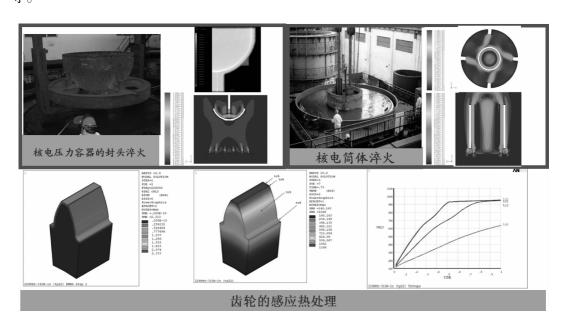


图 11 包含流场的核电锻件淬火和齿轮感应淬火的数值模拟

四、智能热处理需要重点开展的工作

热处理是跨材料学与机械学的制造技术,也是两大类学科交叉的重要领域,这也是国内热加工学科在有些大学设置在材料学院,而有些大学则设置在机械学院的原因。热处理本身有其非常独特的特点,需要科学与工程的紧密结合。首先它以相变原理、扩散理论、强化机理等材料科学基本理论为依据基础,确定精准的工艺应用于制造过程;其次,制造过程的复杂性要求热处理过程中综合考虑传热、力学、化学反应等等各种因素。简言之,热处理是一种具有极强材料背景的制造工艺。

因此,建议在机械的成形制造学科中设立与凝固成形、塑性成形、焊接等相并列热处理研究课题,而在材料科学的研究中,就热处理模拟仿真的共性问题也应该设立相关的研究课题。

热处理数值模拟面临的技术挑战包括:(1)相变是热处理中最关键的现象, 是在多种物理场的作用下,固态金属内部微观尺度上晶体结构转变的过程,比其 他热加工成形所遇到的科学问题更为复杂。人们对固态相变客观规律的认识有 待不断深化。由于影响因素众多,交互作用复杂而且十分敏感,相变量的计算准 确性依然是热处理数学建模所面临的严峻挑战。

- (2) 为了准确反映工件与外部热交换过程需要创建多场耦合的界面综合换 热模型以及扩展求解域计算机模拟技术。
- (3) 材料科学与工程有多种不同研究手段,各有所长,又各有局限。目前的研发模式往往只采用其中一、二种研究手段,难以解决热处理技术发展中所面临的复杂的科学问题。
- (4)基本数据的残缺及测试方法的不完善,阻碍了热处理数字化智能技术的研究与应用。

因此,未来 5~10 年应当研究的重大科学问题和重点技术攻关应涉及三维 非线性多场耦合的热处理数学建模、扩展求解域的计算机模拟方法、智能热处理 中多种研究手段的结合等等。开展智能热处理基础研究和开发,包含内容有:

- (1) 三维非线性多场耦合热处理数学模型的研究:a) 在温度场非线性变化的条件下相变准确计算及其与应力/应变场耦合计算的模型;b) 三维多种物理耦合的综合换热数学模型,完善扩展求解域的计算机模拟方法;c) 基于微观组织特征的材料力学本构关系与性能预测。
- (2)建立多种方法融合的智能热处理研究平台:将改进的数值模拟方法与实验测试、物理模拟、工艺模拟、基于知识工程等多种研究手段相结合、在数字化条件下实现数据交换和信息处理,建成热处理工艺优化和热处理设备优化设计的数字化研发平台。
- (3)基础数据的获取与数据库建设:换热系数、材料相变动力学数据等基本数据的测试技术;实验测试、数值模拟、基于知识工程三者结合的基础数据获取技术;支持智能热处理的数据库的建立。

五、结 论

热处理是涉及冶金、机械等多个行业的重要制造工艺,是提升我国制造水平和能力的关键之一。热处理在不同行业的重视程度不同,发展水平也不均衡。 热处理处在材料和制造两大学科的中间地带,造成对热处理的边缘化。我国对 热处理应用基础研究的支持仍需加强,尤其对共性基础问题研究。

智能热处理的核心技术是热处理的计算机数值模拟,是使热处理从传统的经验技艺型跨越为科学计算型不可或缺的手段。智能热处理研究将使热处理由技艺型向高科技型转化,摆脱依赖于经验和技能的落后状态,向精确预测生产结果和实现可靠的质量控制的方向发展。对于改变我国热处理的落后面貌、提升

我国制造业自主创新能力有重大作用,并将推动材料科学与工程学科与其他学 科的交叉、集成,对学科发展有深远意义。



顾剑锋 1998 年获上海交通大学工学博士学位, 2000-2001年法国特鲁瓦技术大学博士后从事金属 材料表面纳米化研究,2005年美国内华达拉斯维加 斯大学高级访问学者。从事材料力学行为多尺度模 拟,现为上海交通大学材料科学与工程学院教授、博 士生导师,上海交通大学晨星学者。

主要研究领域包括材料热处理过程的温度场、 微观组织场、应力/应变场以及扩散浓度场等多场耦 合数值模拟,材料力学行为的多尺度模拟。获国家

科技进步二等奖、教育部技术发明一等奖各一项。主持国家自然基金两项,承担 973 重大基础研究项目、04 重大专项(3 项)、上海市科技攻关项目的课题,及工 业应用项目近二十项。担任中国机械工程学会高级会员,中国热处理学会理事, 《热处理》期刊副主编等,在国内外学术期刊和重要学术会议上发表论文80余 篇,申请专利14项。

附录

参会人员名单

姓名	工作单位	职务/职称
李培根	中国工程院机械与运载工程学部	学部主任
子坦似	华中科技大学	院士、校长
黄崇琪	上海电缆研究所	院士
江东亮	中国科学院上海硅酸盐研究所	院士
林忠钦	上海交通大学	院士、常务副校长
潘健生	上海交通大学	院士
阮雪榆	上海交通大学	院士
翁宇庆	中国钢研科技集团公司	院士
徐志磊	上海激光等离子体研究所	院士
赵振业	北京航空材料研究院	院士
周玉	哈尔滨工业大学	院士
雷明凯	大连理工大学	教授
顾剑锋	上海交通大学	教授
凌进	上海重型机器厂有限公司	副总经理
王振海	中国工程院一局	副局长
施强华	上海市科学技术委员会	副巡视员
苏明	上海交通大学	副书记
车成卫	国家自然科学基金委员会工程与材料科学部	副主任
王建宇	工信部装备工业司	处长
融亦鸣	清华大学	教授
丁文江	上海交通大学	教授
潘红良	华东理工大学	教授
周建新	华中科技大学	教授
邵光杰	上海大学	教授
潘登	上海理工大学	教授
许并社	太原理工大学	教授

姓名	工作单位	职务/职称
宋力昕	中国科学院上海硅酸盐研究所	副所长、研究员
张文清	中国科学院上海硅酸盐研究所	研究员
唐电	福州大学材料研究所	所长、教授
张冠军	中国石油集团石油管工程技术研究院	院长/教授级高工
方 杰	中国机械科学研究院中机生产力促进中心	所长
张艳姝	机械科学研究总院先进制造技术研究中心	高工
蔡安定	上海材料研究所	所长
佟晓辉	全国热处理协会	秘书长
徐兴宝	上海市热处理学会	高工
郦 剑	浙江省热处理学会	教授
左家和	中国工程院一局机械与运载工程学部办公室	主任
傅国庆	上海市科学技术委员会基础研究处	处长
王晔	上海市科学技术委员会高新技术处	副处长
杨晓秋	上海院士中心	常务副主任
王晓俊	中国工程院一局机械与运载工程学部办公室	
蔡昌金	中国工程院一局机械与运载工程学部办公室	
张清廉	宝山钢铁股份有限公司研究院管条中心	高工
龚斌芳	江苏省昆山溢阳潮热处理有限公司	总经理,高工
宋卫华	昆山奥马热工科技有限公司	董事长
王锡樵	南京科润工业介质有限公司	高级工程师
沈红卫	上海电气电站设备有限公司汽轮机厂	副总工程师
左孝顺	上海热处理厂有限公司	董事长
任颂赞	上海市机械制造工艺研究所有限公司	总工程师
叶 俭	上海市机械制造工艺研究所有限公司	总经理
张成利	舟山市 7412 工厂	总经理
陆金二	《热处理》杂志	高工
秦理曼	《中国工程科学》杂志社	编辑

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。

中国工程院

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