

中国工程科技论坛

先进热处理的重要性 和发展战略

● 中國工程院



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

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



高等教育出版社·北京
HIGHER

BEIJING

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 韩刚

出版发行 高等教育出版社

社址 北京市西城区德外大街 4 号

邮政编码 100120

印刷 北京汇林印务有限公司

开本 787mm × 1092mm 1/16

印张 5.25

字数 86 千字

插页 1

购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598

网址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.landraco.com>

<http://www.landraco.com.cn>

版次 2013 年 5 月第 1 版

印次 2013 年 5 月第 1 次印刷

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	潘健生	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的发展战略在沪召开。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

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的关键作用,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;

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 18 000 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 ($150 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{台}$), 装机容量约 1500 万 kW , 年耗电约 230 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。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发生。

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 $400\text{ kW}\cdot\text{h/t}$ 以下,日本达到 $300\text{ kW}\cdot\text{h/t}$ 以下。我国同期的热处理能耗是 $1200\sim1300\text{ kW}\cdot\text{h/t}$,到“十一五”期末降到约 $600\text{ kW}\cdot\text{h/t}$,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—引进—再落后—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

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,仿制出外形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 $1/4 \sim 1/3$,热处理生产过程中节能减排应予以重视。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。