



2006-2007

冶金工程技术

学科发展报告

REPORT ON ADVANCES IN METALLURGICAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY

中国科学技术协会 主编

中国金属学会 编著



 中国科学技术出版社



2006-2007

冶金工程技术

学科发展报告

REPORT ON ADVANCES IN METALLURGICAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY

中国科学技术协会 主编

中国金属学会 编著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

2006—2007 冶金工程技术学科发展报告/中国科学技术协会主编;
中国金属学会编著. —北京:中国科学技术出版社,2007.3

ISBN 978-7-5046-4511-1

I. 2... II. ①中... ②中... III. 冶金工业—研究报告—
中国—2006—2007 IV. TF

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 022272 号

自 2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志,未贴防伪标志的为盗版图书。

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

电话:010-62103210 传真:010-62183872

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

科学普及出版社发行部发行

北京中科印刷有限公司印刷

*

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:8.25 字数:200 千字

2007 年 3 月第 1 版 2007 年 3 月第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:22.00 元

ISBN 978-7-5046-4511-1/TF·20

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

2006—2007 冶金工程技术学科发展报告

REPORT ON ADVANCES IN METALLURGICAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY

首席科学家 李文秀

顾问组成员 (按姓氏笔画排序)

干 勇 仲增墉 张寿荣 陈先霖 洪及鄙
殷瑞钰 翁宇庆

专家组成员 (按姓氏笔画排序)

王 立 王国栋 王维兴 王筱留 孔令坛
包燕平 冯根生 成国光 朱 荣 刘建华
刘润藻 苏天森 杜 涛 李士琦 李京社
张家芸 顾 飞 徐安军 高 斌 康永林
储少军 蔡九菊

学术秘书 王耀琨 张 岩 倪伟明 高 斌

序

基于我国经济社会发展和国际社会竞争态势的客观要求,党中央、国务院做出增强自主创新能力、建设创新型国家的战略部署,这是综合分析我国所处历史阶段和世界发展大势做出的重大战略决策。学科创立、成长和发展,是科学技术创新发展的科学基础,是科学知识体系化的象征,是创新型国家建设的重要方面,是国家科技竞争力的标志。在科学技术繁荣、发展的过程中,传统的自然科学学科得以不断深入发展,新兴学科不断产生,学科间的相互渗透、相互融合的趋势不断增强;边缘学科、交叉学科纷纷涌现,新的分支学科不断衍生,科学与技术趋向综合化、整体化。及时总结、报告自然科学的学科最新研究进展,对广大科技工作者跟踪、了解、把握学科的发展动态,深入开展学科研究,推进学科交叉、融合与渗透,推动多学科协调发展,促进原始创新能力的提升,建设创新型国家具有非常重要的意义。为此,中国科协在连续4年编制《学科发展蓝皮书》基础上,自2006年开始启动学科发展研究及发布活动。

按照统一要求,中国力学学会、中国化学会、中国地理学会等30个全国学会申请承担了2006年相应30个一级学科发展研究任务,并编撰出版30本相应学科发展报告。在此基础上,中国科协学会学术部组织有关专家编撰了全面反映这30个一级学科的总报告——《学科发展报告综合卷(2006—2007)》。

中国科协是中国科学技术工作者的群众组织,是国家推动科学技术事业发展的重要力量,开展学术交流、活跃学术思想、促进学科发展、推动自主创新是其肩负的重要任务之一。开展学科发展研究及学科发展报告发布活动,是贯彻落实科技兴国战略和可持续发展战略,弘扬科学精神,繁荣学术思想,展示学科发展风貌,拓宽学术交流渠道,更好地履行中国科协职责的一项重要举措。这套由31卷、近800余万字构成的系列学科发展报告(2006—2007),对本学科近两年来国内外科学前沿发展情况进行跟踪,回顾总结,并科学评价了近年来学科的新进展、新成果、新见解、新观点、新方法、新技术等,体现了学科发展研究的前沿性;报告根据本学科的发展现状、动态、趋势以及国际比较和

战略需求,展望了本学科的发展前景,提出了本学科发展的对策和建议,体现了学科发展研究的前瞻性;报告由本学科领域首席科学家牵头、相关学术领域的专家学者参加研究,集中了本学科专家学者的智慧和学术上的真知灼见,突出了学科发展研究的学术性。这是参与这些研究的全国学会和科学家、科技专家劳动智慧的结晶,也是他们学术风尚和科学责任的体现。

希望中国科协所属全国学会坚持不懈地开展学科发展研究和发布活动,持之以恒地出版学科发展报告,充分体现中国科协“三服务、一加强”(为经济社会发展服务,为提高全民科学素质服务,为科学技术工作者服务,加强自身建设)的工作方针,不断提升中国科协和全国学会的学术建设能力,增强其在推动学科发展、促进自主创新中的作用。

A stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to Chen Mofan, positioned above the date.

2007年2月

前 言

《2006—2007 冶金工程技术学科发展报告》是根据中国科协“科协发[2006]96 号文”的规定,按照国家标准学科分类与代码 GB(T13745—92)冶金工程技术学科的分类进行编撰的。

编撰人员查阅了有关资料,进行了广泛的调研讨论,对冶金工程技术近几年来年的发展,推动中国乃至世界钢铁工业持续高速发展的情况加以分析对比,一致认为,冶金工程技术无论在流程工程理论创新与实践方面,还是在钢材产品品种质量方面都取得了重大进展,其中生产工艺优化理论与技术创新、节能降耗、污染物无害化与再资源化技术创新方面都取得了具有原创意义、引进技术消化吸收再创新等多方面的显著进展。以此为基础,冶金工程所需的装备、相关材料与技术的自主开发、创新也取得了长足的进步。这是中国钢铁工业进入 21 世纪以来得以持续高速增长最重要的支撑条件之一,也是中国冶金工程技术迅速达到国际先进水平的重要标志。

按国家标准学科分类与代码规定的冶金工程技术学科学科号为 450,下设 450.10~450.99 等 10 个学科分号,涉及面十分广泛。从中国金属学会从事的工作来看,“450.30 冶金技术”分学科、“450.40 有色金属冶金”分学科及“450.99 冶金工程技术其他学科”分学科均未涉及或较少涉及,因此本报告均未对这 3 个分学科的内容作全面叙述。而重点的“450.25 冶金热能工程”分学科、“450.35 钢铁冶金”分学科、“450.45 轧制”分学科则另附有专题报告,进行较详细的研究与汇报。其他内容在综合报告中进行了深度与广度不同的介绍。

综合报告和各专题报告的研究和编撰共有 22 位专家参加,由于冶金工程技术学科属于发展周期较长的类型,因此研究范围除了以 2005 年和 2006 年为主以外,还涉及 2000~2004 年的有关内容和数据。这些内容和数据大量地来自“冶金科学技术奖”评定材料、各类学术会议论文集、专家报告、咨询项目报告、考察调研(包括国内外考察)等材料,各专题报告分别征求了部分专家的意见,综合报告则邀请行业内 30 多名专家进行评审。

我们诚挚地向为本报告研究作出贡献的所有专家和工作人员表示谢意!

本报告可供冶金工程技术学科(及与学科有关的)工程技术人员在了解学科发展、确定研究开发方向时参考。

由于项目研究总体上时间较紧,加上对项目研究的要求与精神领会不够深刻,且水平有限,不当之处,敬请批评指正。

中国金属学会

2006 年 12 月

目 录

序	韩启德
前言	中国金属学会

综合报告

冶金工程技术学科的研究现状与发展前景	(3)
一、引言	(3)
二、中国冶金工程技术学科发展的新进展	(3)
三、与国际先进水平的对比分析	(13)
四、学科发展的主要方向和重点	(14)
参考文献	(16)

专题报告

冶金热能工程分学科发展	(21)
钢铁冶金分学科发展——炼钢	(34)
钢铁冶金分学科发展——炼铁	(55)
钢铁冶金分学科发展——铁合金	(86)
轧制分学科发展	(98)

ABSTRACTS IN ENGLISH

Comprehensive Report

Advances in Metallurgical Engineering and Technology	(117)
--	-------

Reports on Special Topics

Advances in Metallurgical Thermal Engineering	(120)
Advances in Iron and Steel Metallurgy——Steelmaking	(120)
Advances in Iron and Steel Metallurgy——Iron Making	(121)
Advances in Iron and Steel Metallurgy——Iron Alloy	(121)
Advances in Rolling Technology	(122)

综合报告

冶金工程技术学科的研究现状与发展前景

一、引言

冶金工程技术学科是工程技术学科中的重要学科,它是冶金工业,尤其是钢铁工业发展的基础和保证。

现代冶金工程技术学科在我国钢铁工业高速发展中努力创新,支持了钢铁生产流程的优化和符合循环经济基本原则、符合人类社会可持续发展目标的要求。

我国现代冶金工程技术学科新世纪的主要发展是:提出了可循环钢铁生产流程工艺与装备新理念;利用现有生产装备在优化工艺技术的基础上,运用高洁净、高均匀性和超细晶理论,经济高效地批量生产高强韧性钢材;大大地促进了薄板坯连铸连轧紧凑流程工艺与装备技术的发展;丰富与发展了冶金反应工程学理论与技术;实现高效的钢铁清洁生产方面取得了长足进步等。另外,在各个二级分学科的理论与技术上取得了一批创新成果,还开创了学术交流、论文和科技著作繁荣的新局面,真正成为我国钢铁工业稳定发展的有力支撑。从总体上可以认为,我国冶金工程技术学科的自主创新能力有了很大提高,已取得的创新成果中,有不少已达到国际先进或领先水平,成为我国钢铁工业优化与发展的重要标志。

但是,由于我国钢铁企业大、中、小并存,落后工艺装备与先进装备并存的局面在较长时间内还难以改变,制约了先进技术推广应用的速度,加上一批核心高水平的装备和工艺技术开发应用还需要积累经验和不断完善优化,使我国冶金工程技术学科的发展水平与国外先进钢铁工业国家之间还存在一定的差距,需要通过认真的分析对比,确定目标,重点研发,加速赶上。

本报告将就冶金工程技术学科新世纪以来发展取得的新进展,与国际先进水平的对比,未来发展的目标、研究方向和重点分别进行论述。

二、中国冶金工程技术学科发展的新进展

(一)具有较广泛综合性的学科发展新进展

主要有以下3个方面。

1. 建立可循环钢铁生产流程新理念,是学科发展最重要的进展之一

中国钢铁工业高速发展的同时,提出了新世纪应重点发展怎样的新一代钢铁生产流程的命题。钢铁工业是流程工业,流程的优化是钢铁工业整体优化的基础和保证。冶金工程技术学科的专家们研究了钢铁流程功能优化、钢铁生产在循环经济中的作用和责任、环境与能源结构对钢铁生产制约及推动钢铁流程优化的作用等问题后,明确提出了钢铁

企业要集产品制造、能源转换、社会废弃物再资源化三大功能于一体为主要内容的新一代钢铁制造流程新理念^[1]。指出钢铁生产流程的知识是由3个层次的知识协同结合而成的,即由基础科学、技术科学、工程科学3个层次知识体系集成起来的。目前这一理念正在不断深化中,把研究衡量其水平的目标体系,在若干现有先进技术、装备基础上,与新开发的工艺、装备及界面技术集成,重新构筑新一代生产流程作为重点,对现有企业的改造和新建钢厂的设计都有很好的指导意义。目前这一理念已纳入国家中长期科学和技术发展规划纲要及“十一五”国民经济和社会发展规划纲要。首钢京唐钢铁公司就是力图按照这一理念建设的新一代钢铁联合企业。

2. 实现优质、低耗、高效的超细晶钢产业化生产

利用生产高洁净钢、高均匀性和超细晶粒的理论和新技术^[2],利用现有钢铁生产装备,开发出低成本、批量生产高强韧性钢材的系统技术是冶金工程技术学科发展最主要的新进展之一。

2004年根据研发成果出版的《超细晶钢》一书获2004年中国图书奖,是这一创新与优化的集中体现。据不完全统计,从2000~2006年,我国共生产和使用超细晶钢达 10×10^7 t,产值在300亿元以上。获国家科技进步一、二等奖共2次,省部级奖5项,中国材料学会二等奖1次。合理选择细晶粒度($3 \sim 5 \mu\text{m}$)而不是 $<1 \mu\text{m}$,是区别世界其他先进国家的研究发展新思路,使我国成为世界上首个利用现有装备批量生产具有超细晶粒特征的高强韧性钢材的国家。2006年5月在日本举办的亚洲钢铁年会上,一些日本学者发表论文表示,他们也开始将重点转向研究 $3 \sim 10 \mu\text{m}$ 细晶粒钢的产业化问题,比我国的进展晚了5年左右。

“低碳铁素体/珠光体钢的超细晶强韧化与控制技术”成果获2004年冶金科技特等奖、国家科技进步奖一等奖。目前这一学科进展还在国家新的“973”、“863”计划中进一步深入研究与应用,将成为钢铁产品性能优化、低成本生产技术的重要内容。

3. 钢铁前沿科技领域的薄板坯连铸连轧紧凑流程工艺技术与装备在中国迅速进行了引进技术消化吸收再创新,取得了显著的成绩

薄板坯连铸连轧是一项跨多个分学科的综合学科新技术,是近终形连铸连轧技术中最早实现产业化并迅速发展起来的全新紧凑型流程。我国在已有研发的基础上,在多条引进生产线上进行了引进技术消化吸收再创新的工作^[3]。进入21世纪短短几年,尤其是2005年和2006年,这一全新流程的生产能力和产量都已居世界首位,并在生产高效化、产品高档化、装备与相关技术自主开发等方面取得了重大进展,使我们国家在这一高新技术领域中跻身于世界先进的行列。其主要表现为:第一,开发了稳定高效的系统生产工艺技术,使我国在日产、月产和年产水平,连浇炉数及作业率、事故率等主要技术经济指标上居世界先进水平;第二,已开发应用冶炼—精炼—薄板坯连铸—热连轧—冷轧—涂镀层板等贯通全流程的系统优化技术;第三,发挥与传统流程相比生产薄规格钢带卷优势的技术已日趋完善;第四,自主开发了核心装备与相关材料设计、制造、应用的系统技术;第五,实现了这一学科领域的技术输出,协助马来西亚、泰国的CSP提高生产效率,超过设计能力。现在中厚度板坯连铸连轧成套设备和工艺设计、制造、生产应用等先进技术已可完全

自主提供;多个企业试验了半无头轧制和铁素体轧制技术、最高连轧 269 m,连续生产出 7 卷热带;已可批量生产汽车、造船用高强高韧性钢、无取向冷轧硅钢;新流程在高温、连续、高速条件下,运用微合金元素纳米析出物析出强化理论与实践,生产超薄超高强度耐候钢;单一 Ti 微合金化生产的各向性能、板形均一的高强钢卷成套技术达到国际先进水平;结晶器、连铸耐材与保护渣已可立足国内研制、开发、供应。这项综合多个分学科成果的前沿科技成果大大提升了我国冶金工程技术学科在世界上的水平与地位,成为学科技术最新发展的重要标志之一。

(二) 各分学科发展的主要进展

除了上述 3 项最重要的进展外,冶金工程技术学科的各个分学科还取得了许多新进展,分述如下:

1. 冶金物理化学

冶金物理化学(简称冶金物化)是冶金工艺技术的理论基础。在我国钢铁工业发展面临资源、能源及环境严峻挑战形势下,着眼于从冶金工艺源头上解决上述问题是其发展的主要目标,也是当前国际冶金物化的主要发展趋势。

(1) 溶液(及相图热力学)理论与冶金熔体性质的测定。

冶金熔体的热力学性质决定了熔炼和精炼反应进行的条件。熔体热物理性质,如黏度、表面张力、电导率等会直接影响工艺过程速率。因而,它们是进行工艺参数优化、实现过程控制所必需的参数。钢铁冶金涉及的冶金熔体成分及结构复杂,温度很高,测定困难。预报冶金熔体的热力学、热物理性质是冶金熔体理论研究的核心内容。近年来,我国在该领域有较快发展。

第一,溶液的新一代几何模型到质量三角形模型。周国治院士 20 世纪末曾提出了统一的溶液模型,将国际公认的溶液理论中各种几何溶液模型统一起来。21 世纪初,又将其发展为“新一代溶液模型”^[4],使由二元溶液热力学性质预报三元乃至多元溶液的热力学性质在理论上成为可能。最近,他又提出浓度三角形模型^[5],克服了遇到溶解度间隙时公式积分遇到的困难。实现了由组成二元系性质数据预报三元系及多元系同一性质(包括热力学及热物理性质)。在溶液(及相图热力学)理论上达到国际先进水平。

第二,研制测定钢液成分的新型固体电解质和新型化学传感器。东北大学继测定钢水中稀土元素活度的传感器之后,最近又开发研制了钢中快速定硫、硅活度新型固体电解质和化学传感器^[6-7],已成功完成了实验室试验,这是属于国际先进水平的成果。

第三,开展国际合作开发直接用于钢铁冶金预报炉渣黏度、活度、硫化物容量的软件 ThermoSlag^[8],合作指导研究生提出用炉渣热力学性质预报其热物理性质的模型,对二元系及三元系密度的预报已取得满意结果,成果与国际先进水平同步。

(2) 提出可控氧流冶金学,指导开发冶金新工艺、新方法。

周国治院士根据熔渣和金属反应的电化学特征提出可控氧流新概念^[9],应用此概念提出的冶金新方法有望改变传统冶金流程中反应物与产物直接接触、反复进行高能耗和高污染的氧化-还原反应的状况。已开发了 ZrO_2 氧离子导体制成的脱氧体,成功进行了

铜液、钢液无污染脱氧实验室实验^[10]。为了降低成本和简化工艺,以熔渣代替 ZrO_2 脱氧体的实验也取得了可喜的成果^[11]。利用可控氧流从熔渣提取金属,已在实验室实现了 Ti、Ta、V 等的提取^[12]。

(3) 材料物理化学在功能性耐火材料研究中的新进展。

近年来对 SiAlON、AlON 系列高级耐火材料制备物理化学、材料性能与结构关系等进行了系统、深入的研究。在近、现代耐火材料应用基础研究方面已居国际领先水平。在科学的成分设计和工艺设计下,开发研制出如 MgAlON-BN 等先进耐火材料。其中一些材料(如 MgAlON-15%BN 等)综合性能已超过目前应用及试用的各类连铸用水平分离环、长水口用材料^[13]。

(4) 环境保护及绿色冶金。

主要在电镀液处理和铬铁矿提铬上有新成绩。

中科院过程工程研究所张懿院士等在研究了铬盐物理化学性质的基础上,提出治理电镀液重金属污染的新工艺;还提出了从铬铁矿提取铬的全新的零排放的绿色工艺流程,已获国家发明专利,正申请国际专利,并成功进行了中试试验,其工艺、技术证明属国际先进水平^[14]。

(5) 冶金电化学、资源综合利用。

我国攀枝花钢铁公司高炉所产的高钛渣是生产金属钛的原料。生产过程经历从渣中提取 TiO_2 及氯气氯化(加碳)得到金属钛的两个步骤。北京科技大学提出碳热还原与熔盐电解结合的工艺路线得到金属钛,并取得实验成功^[15]。与国内外现行流程相比,其过程的工艺简单、总能耗大大降低,已显示出其先进性和应用前景,将在攀钢扩大试验。

综上所述,我国冶金物理化学在熔体及相图理论、耐火材料制备物理化学等某些领域已居国际领先地位。应用物理化学研究绿色冶金的工艺也已取得一些国际先进水平的成果。应用电化学原理和方法,提出了一些新的冶金工艺路线,突破了传统冶金的概念。

2. 冶金反应工程

冶金反应工程分学科新世纪以来也有新成绩。首先,完成了《冶金反应工程》丛书(21卷)的出版工作。其次,每两年一次的冶金反应工程学术年会进行热烈的交流。第三,各专业学术会议中也有了越来越多的冶金反应工程学论文发表。

3. 冶金原料与预处理

冶金原料的充分利用与“精料”是这一分学科发展的主要方向。这几年都有了一定的进步。首先是中国钢铁生产主要原料铁矿石既有品位低、杂质多的问题,又有数量少,不能长期保障钢铁生产的问题。进一步勘查、增加储量、利用进口矿是一个重要的方向,但从采选入手,尽可能充分利用现有矿产资源,更是十分重要的研究方向。“精料”已成为钢铁生产优化的关键,这方面我们已有显著的进展。这个分学科中主要进展有如下 3 个方面。

(1) 铁矿深凹露天高陡坡安全高效开采与汽车-胶带半连续高效运输系统理论和技术进入世界先进的行列。

理论与技术创新主要在于用三维极限平衡分析模型代替二维模型,大大提高了边坡

安全设计的精度与实用安全性,从而安全开采陡坡达到 65° ,在世界同类地质矿床中居先进的水平。与自主设计的汽车—皮带半连续运输系统及基于 GPS 定位的生产设备自动化调度相结合,系统寿命与生产效率比国内一些引进生产线提高 15% 以上,全员劳动生产率为国内平均水平的 6 倍。此项技术获钢铁行业 2006 年冶金科技特等奖^[16]。

(2) 贫磁(赤)铁矿选矿技术达到国际领先水平。我国铁矿普遍品位低,选矿提铁降杂(主要是降硅)是低品位矿充分利用、扩大资源利用率、保障钢铁生产的重要研究课题。2005 年此项技术获冶金科技特等奖、国家科技进步二等奖。主要创新技术为采用弱磁选—细筛—反浮选流程选别“鞍山式”贫磁铁矿,铁品位可达 68%,回收率 90%;采用弱磁—强磁—反浮选或弱磁—强磁选—重选—反浮选联合流程选别“鞍山式”贫赤铁矿,可获品位达 66% 的铁精矿,回收率达 75% 以上^[17]。这一技术使鞍钢主要采用自产铁矿,比采用进口矿节约几十亿元成本。已推广到国内十几个企业应用,获得巨大的经济效益。此外菱铁矿、高磷矿、褐铁矿利用等方面工作也已加强,有的已有初步成果。

(3) 铁水预处理各类技术和研究取得长足进步。我国从 2005 年起已成为世界上铁水预处理量最多的国家(约 9×10^7 t/a)。而且 CaO 基搅拌法脱硫、纯镁颗粒脱硫等工艺与装备齐全。镁基脱硫剂脱硫尤其是纯镁颗粒脱硫在处理量、效率、冶金效果和减少镁的消耗等方面均已居世界前列。搅拌法脱硫理论研究证明可用单一 CaO,取消了引进时日方规定使用 CaC_2 和添加活性炭的工艺,取得了降低消耗、提高效率和提高冶金效果的良好成绩。尤其是搅拌头寿命提高了几倍,稳定在 600 炉以上,最高达 750 炉,超过日本最高 400 炉左右的水平,已在 2004~2006 年推广了多条处理线,并有望在多个新建钢厂中被采用,是加快推进我国铁水预处理的又一有力手段^[18]。转炉铁水预脱磷技术也已于 2005 年在宝钢热试成功,并批量生产超低磷钢,这种 BRP 技术获 2006 年冶金科技成果一等奖,在钢铁行业具有重大影响^[19]。以铁水罐运输并进行铁水预脱硫后兑入转炉进行铁水预脱硅和磷的全量铁水“三脱”新工艺,已纳入首钢京唐公司工程建设项目,实施后,将对钢铁生产流程的紧凑、高效、优质、低耗产生深远的影响。

4. 冶金热能工程

首先是研究理论与方向已由冶金单体部件(如烧嘴)、单体设备为主要对象转变到与流程紧密结合,研究工序间、全流程的热能传递、转换及优化节能为主的方向上来,并在这几年取得了新的进展。这种由流程优化为主体的节能技术进步还与污染物无害化、再资源化技术相结合,已成为钢铁生产环境友好的主流。2004 年、2005 年吨钢综合能耗已分别达到 761 kg/t 和 741 kg/t 的新水平,比上年分别下降 18 kg/t 和 20 kg/t。废气、废水、固体废弃物的无害化和再资源化处理技术也都有了长足进步^[22]。冶金热能工程分学科的其他进展主要有:

(1) 各工序都研发与应用了充分利用废气余热预热燃料与助燃空气(双预热),以使低热值煤气获得高附加值利用。近两年蓄热式、双预热全燃高炉煤气的电站锅炉、热风炉、钢坯加热炉、石灰窑炉、钢包烘烤的技术迅速发展,多次获得冶金科技奖,有效地优化了钢厂利用煤气的结构^[20-21]。

(2) 以减轻环境污染为目标的低 NO_x 、低 CO_2 高效燃烧理论与技术结合蓄热式“双预热”等工艺不断扩大应用范围。

(3) 各类冶金余热、余压、余能利用的理论和技術也在中国得到充分发展。近几年,尤其是 2005 和 2006 两年,TRT、CDQ 技术经过引进技术消化吸收再开发,基本具有自主知识产权的技术与装备在市场需求情况下,得到迅速发展。2005 年 TRT 和 CDQ 装置已分别达到 128 套与 34 套,并且在单位发电量、运行稳定可靠等方面全面优于过去引进的技术和装备^[23]。有的钢厂在国内首次实现了烧结环冷废气余热发电的技术产业化,为国内余热高效利用开辟了新途径。高炉煤气 CCGP 发电技术已在多个企业应用,2006 年已在我国建设属于世界上能力最大的 350 MW 的发电设备。

(4) 冶金分析技术在快速、微量、高精度等方面有了新的发展。各企业在建设企业快速分析系统方面都有了新的进展或规划,有力地促进了生产效率的提高。我国高温合金与钢材痕量元素分析技术在分析元素种类、分析精度等方面都达到了国际先进和领先水平。2004 年、2006 年在美国、欧洲举办的国际分析技术研讨会上受到广泛的关注和认可^[24]。另外原位分析设备可对铸坯、钢材、焊缝的表面和内部成分、质量状况进行高效率分析检验,并在原位情况的准确表现等方面开创了分析领域理论与技术的新途径,不仅为高校、科研院所的科研提供了更为直观准确的分析手段,还为钢铁、造船、机械等行业生产提供了高效可靠的检验方法,意义重大^[25]。此项技术与装备已有出口。

我国在冶金炉气分析、控制冶炼终点的技术领域也有新进展^[26],主要是引进技术的消化吸收再创新。有的已成为钢厂稳定生产必不可少的手段。

5. 钢铁冶金

钢铁冶金分学科和轧制分学科是冶金工程技术学科中有关主生产流程的重要分学科,其发展是钢铁科技创新最重要的内容。钢铁冶金分学科的主要进展将按照炼铁、炼钢(包括铁水预处理、冶炼、连铸)、铁合金的顺序进行叙述。

(1) 烧结、球团、高炉、转炉、电炉、精炼炉大型化、高效化技术开发与应用取得新成绩。

2004 年以来,过去需引进的大型高炉($\geq 4\,000\text{ m}^3$)装备技术已可完全立足国内,同样也自主建设 $\geq 100\text{ t}$ 的电炉、 $100\sim 300\text{ t}$ RH 多功能真空精炼炉。宝钢 RH 成套技术装备成果还被评为 2005 年国家科技进步二等奖。

现在 $\geq 350\text{ m}^3$ 烧结机,年产能力 $\geq 2.5\times 10^6\text{ t/a}$ 甚至 $3.5\times 10^6\text{ t/a}$ 的球团生产工艺和装备技术, $\geq 250\text{ t}$ 的转炉设备与成套技术都可以完全立足国内。 $\geq 1.2\times 10^6\text{ t/a}$ 的链篦机回转窑装备与技术还获得 2003 年冶金科技进步一等奖^[27]。

(2) 高炉高效长寿系统技术达到新水平。高炉长寿是一项包括炉衬耐材、优化炉料结构与操作工艺,采用先进的冷却壁与水处理技术、自动控制技术在内的综合技术,而且一定要同时实现高炉生产的高效化。过去这是我国与国外高炉生产的主要差距之一。经过多年的研发,到 2006 年,我国已拥有一批炉龄达到 15 年的高炉,而且在二代炉龄期内有效容积产量 $\geq 13\,000\text{ t/m}^3$,实现了高效化,使我国在这一技术领域中进入了世界先进行列。新设计的大型高炉,一代炉龄都以 20~25 年为目标。

(3) 高炉喷煤技术优化有新成绩。我国高炉喷煤在提高风温、实行富氧等条件下,单位喷煤量不断提高,全国高炉的平均喷煤量在 2005 年已达到 124 kg/t 。宝钢更是在进入新世纪后平均喷煤量保持 $\geq 200\text{ kg/t}$ 的世界领先水平。还研发出高风温、低富氧条件下提高喷煤比的理论与实践成果,达到国际先进水平。