

“十一五”国家重点图书

现代电炉炼钢 理论与应用

傅杰 著



冶金工业出版社

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

“十一五”国家重点图书

现代电炉炼钢理论与应用

傅 杰 著

北 京
冶金工业出版社
2009

内 容 提 要

现代电炉炼钢流程由于在节能环保、循环经济等方面所特有的优势,在钢铁生产领域占据着重要地位。我国电炉工作者坚持自主创新,在现代电炉炼钢技术的理论研究及其工程应用等方面取得了许多开拓性的成果,达到国际领先水平。

本书共6章。第1章论述了与我国现代电炉炼钢发展有关的问题,阐明了现代电炉炼钢的“特征”、现代电炉炼钢与现代转炉炼钢的“共性”及电炉炼钢发展历史的“分期”等;第2~5章对现代电炉炼钢的核心问题,即电炉冶炼周期的综合控制理论、钢液中氮的控制、现代电炉冶炼终点动态控制、电炉流程工程问题进行了系统介绍;第6章介绍了建立在钢组织性能的综合控制理论和经济分析基础上的电炉钢高附加值产品。附录汇集了作者撰写的与现代电炉炼钢发展和薄板坯连铸连轧有关的一些论文的目录和几篇未公开发表资料,以便于读者查阅。

本书可供钢铁冶金领域的科研人员、生产技术人员、工程设计人员、管理人员和教学人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

现代电炉炼钢理论与应用/傅杰著. —北京:冶金工业出版社,2009.2

“十一五”国家重点图书

ISBN 978-7-5024-4838-7

I. 现… II. 傅… III. 电炉炼钢 IV. TF741

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第023638号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 刘小峰 张熙莹 美术编辑 李 心 版式设计 葛新霞

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4838-7

北京盛通印刷股份有限公司印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销
2009年2月第1版,2009年2月第1次印刷

169mm×239mm;16.75印张;328千字;251页;1-3000册

46.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

序 1

电炉炼钢发端于 19 世纪初叶电弧的发明,用于炼钢并进行工业规模生产则始于 20 世纪初。现在,电炉炼钢已成为现代钢铁工业的重要组成部分。以再生废钢为主要资源和以电力为主要能源的电炉—精炼—连铸—热轧流程,即所谓“短流程”所生产的粗钢已占全球粗钢产量的三分之一左右。电炉炼钢是社会废弃物循环处理的重要手段,也是发展循环经济的一个环节。

傅杰教授从事电冶金学科的教学和科研工作已将近五十年,是我国电冶金领域资深教授和著名学者。长期以来,傅杰教授一方面从事教育工作并进行理论研究,一方面特别注重深入工厂开展实验研究,取得了卓著的成就。

傅杰教授曾参与过“八五”直流电炉与钢包精炼炉攻关,当时攻关的结果是建成了一台容量为 5t 和一台容量为 30t 的直流电弧炉,还建成了几台容量为 25~50t 的直流钢包炉……从当时的背景和认识水平看,应该说是取得了成功,有所进步。后来,傅杰教授认识到这些小电炉难以解决现代电炉流程的顺行问题,特别是不能适应现代连铸机的多炉连浇问题;由此他对现代电炉炼钢的核心价值、核心技术问题、工艺流程问题等不断进行深入思考、理论研究和实验证明,提出了许多颇有见地的观点,为推动我国电炉钢厂的技术进步做出了贡献,特别是对珠江钢厂电炉—薄板坯连铸—连轧新流程健康发展付出了巨大努力,成就卓著。

鉴于现代电炉流程的技术进步集中地体现在:电炉生产节奏“转炉化”;二次精炼在线化;凝固成型过程全连铸化;建立在连续轧制基础上的产品专业化、系列化。由此就出现了与全连铸工艺相适应的现代电炉炼钢的概念。傅杰教授新著《现代电炉炼钢理论与应用》提到对于未来钢铁工业的发展而言,电炉炼钢的核心价值是:消纳—处理大量的社会废弃物,实现钢铁工业生态化发展和实施循环经济;对发展电炉流程而言,电炉炼钢的核心技术应该是围绕缩短冶炼周期使之与高效率的连铸机、连轧机匹配协同运行;作为电炉炼钢质量问题的核心问题是冶金过

程钢中氮的控制;为了增强电炉流程的市场竞争力则应着力开发高附加值的产品,在这过程中应该充分挖掘、利用电炉—薄板坯连铸连轧过程中纳米尺度析出物的特性。这些观点都是重要的、精当的,而且是言而有据的。其中体现了傅杰教授严谨的学风,体现了他对电炉炼钢理论和实践的洞察性理解和勇于实践创新所得的结晶。

《现代电炉炼钢理论与应用》一书,具有重要的学术价值和现实意义。这是一本不同于一般教科书的新著,内容新颖,既重视冶金理论的研究和拓展,又重视实践应用和推广,具有创新性和可读性。本书可作为钢厂和科研、设计院所的重要参考书,可作为冶金院校研究生和本科生的选修课参考书,也可作为产业部门、投资部门在进行决策思考时的参考书。相信此书将有助于推进钢铁工业特别是电炉流程钢厂的健康发展,也有助于未来工业生态化和循环经济社会的建设。

中国工程院院士

殷文瑞 题

2008年11月17日于北京

序 2

傅杰教授的新著《现代电炉炼钢理论与应用》，以全新的视野概括了国内外电炉炼钢工艺技术的发展趋势，总结了作者本人在电炉炼钢领域多种独创性的研究成果，是富含学术意义和应用价值的著作。

从 20 世纪 90 年代开始，我国电炉炼钢生产面貌有了很大的变化，迈入了现代电炉炼钢的领域。从技术层面上说，三段式操作的小型电炉让位于高速运转的 UHP 大容量电炉；炉外精炼在线化运转；钢的全连铸体制和产品专业化取代了钢锭开坯和万能型产品生产模式；节约资源的低合金钢和微合金钢生产更快的发展。这些现代电炉炼钢的技术特征，傅杰教授在其新著中均作了恰当的介绍和深入的分析。特别是关于控制电炉冶炼周期问题，因为只有当冶炼周期缩短到其临界值，才有可能使高速快节奏的间歇型炼钢作业和连续型的连铸—轧钢作业协调进行，形成稳定的钢材制造生产流程，使电炉炼钢可成为一种新型的、以废钢资源再循环为主要目标的、大规模的钢铁生产方法。

我国现代电炉炼钢的发展是在近年来异乎寻常的年产钢总量增长速度的背景下实现的。电炉钢的绝对产量有较大幅度的增长（约 2000 万~4000 万 t/a 以上），但其相对比例却在逐步下降，直至 10% 左右，和世界电炉炼钢比已达三分之一的局面相差甚远。这是我国冶金工作者都应该注意的。

钢铁生产有两类：一类是提取铁矿石中资源为主的生产，即高炉—转炉流程；一类是以回收废钢资源为主的生产，即电炉流程。

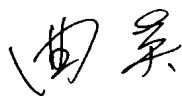
从铁元素循环观点看，前者属于动脉流程，后者属于静脉流程。两者结合构成较完整的循环经济，是钢铁工业的特点和优点。所以，电炉炼钢的比例，不是炼钢方法间的选择问题，而是资源再生和资源提取能否协调发展的问題。

转炉炼钢最合适的主原料是铁水。发达国家，特别在 20 世纪后期，废钢积累大增，转炉全废钢炼钢的研究曾经成为热门。德国 Klöckner 公司的 KS 法在 Georgsmarienhütte 厂有多年生产经验，熔池所缺的碳可用

喷吹炭粉补充,但最终还是被电炉炼钢所取代。日本的住友金属法和川崎制铁法均做过工业试验,在炉底加入焦炭层进行复吹,但是都未正式生产而不再研究。实践已经证明,无论转炉或是电炉,冶炼时所用原料会有一定的灵活性,但作为反应器,其基本功能特征不可能随意改变。我国转炉炼钢比已经达到 90% 以上,虽然可以促成钢产量快速增长,但铁资源消耗也迅速增加,其结果导致国际铁矿石价格猛涨。当废钢积累逐渐多起来后,不少转炉的产能难免过剩。为了保持钢铁工业的可持续发展,增加电炉炼钢的比例是必要的。傅杰教授新著的出版,对推动我国冶金工作者在这一重大问题上的思考,无疑是有意义的。

我和傅杰同志相识于上世纪 60 年代初。学校办钢厂,我被委派到钢厂工作。恰逢我国第一台 150kg 工业性电渣炉在钢院钢厂建设投产。出于技术管理的需要,我必须对这个全新冶金技术作必要的了解。傅杰同志当时给我很多帮助,我也逐渐积累了一些资料。后来钢厂停办,我又回到炼钢教研室从事平炉、转炉的教学和研究,于是便把积累的资料转交傅杰,经过他的努力,终于在 1965 年 6 月由中国工业出版社出版了《电渣冶金文集》一书。以后由于工作领域不同,我们不再有更多的直接联系,但这次合作使我认识到傅杰同志坦荡的性格、助人为乐的品质、思想敏锐而且孜孜不倦、勇于创新攀登科学高峰的精神,也留下了永恒的友谊。现在傅杰同志以其《现代电炉炼钢理论与应用》书稿示我,并嘱为之序。我读后受益匪浅,看到这本书稿既包括了关于发展电炉生产流程的宏观性的讨论,又包括了一些关键冶金过程的微观性深层次研究(例如氮反应的动力学,纳米析出物的形成与作用)。我相信本书的出版,能对我国电炉炼钢生产的发展有所指导,而且对在学术层面提高我国冶金学科在国际上的地位,起到一定的作用。

北京科技大学冶金与生态工程学院教授



2008 年 12 月 28 日

前 言

1989年美国印第安纳州纽柯公司克拉福茨维莱厂电炉—CSP生产线投产,这是世界上第一条薄板坯连铸连轧生产线,也是现代电炉炼钢技术达到成熟阶段的一个里程碑。

在20世纪80年代末90年代初,世界现代电炉炼钢主要发展直流电炉,在这一段时期,国外没有哪家企业新建大型交流电炉。上海90年代中期新建的4台大型直流电炉就是在这一背景下引进的。

90年代初,作者与安阳钢铁公司(安钢)合作,跟踪国外现代电炉炼钢技术发展,并结合我国国情进行了高配碳强化用氧、电炉加部分铁水冶炼(以铁水作原料代替高配碳用生铁,下同)、小型直流钢包炉等技术的研究开发。

1993年6月,冶金部和上海市在上海举办了“当代电炉流程和电炉工程问题研讨会(第一次上海会议)”,当时担任冶金部副部长的殷瑞钰同志和在上海市任副市长的徐匡迪教授在会上介绍了世界电炉炼钢技术的发展趋势。在这次会议上,作者介绍了国外直流电炉工艺的发展情况。这次会议明确了中国电炉钢生产及电炉炼钢技术的发展方向,推动了中国电炉炼钢技术的进步。

1993年11月~1994年5月,作者以考察国外直流电炉技术为目标在美国卡内奇·梅隆大学钢铁研究中心作了半年访问教授,在此期间对美国的电炉炼钢技术进行了较深入地调查研究,深感中国在电炉钢生产方面,以实现电炉炉子大型化为目标的设备引进势在必行,但外国人不会卖给我们核心的工艺技术,为此,在1994年底召开的全国特钢冶炼学术会议上,发表了《加强电炉钢短流程生产工艺研究与产品开发的建议》一文,指出在实现电炉容量大型化的同时应围绕缩短冶炼周期这一核心在我国发展现代电炉炼钢技术,特别要加强电炉加部分铁水冶炼及包括二次燃烧在内的强化用氧技术的研究开发。

1995年河南省科委对安钢电炉加部分铁水冶炼工艺,包括控制最佳铁水加入比等技术进行了鉴定。

1994~1996年间,作者作为安钢的技术顾问参与了安钢 100t 电炉工程的调研、引进谈判、出国考察、工艺方案制订等一系列的工作。当安钢电炉工程进入设计、设备制造、安装、调试阶段时,作者工作重点转到珠钢。珠钢电炉—CSP 生产线是我国第一条也是迄今我国唯一的一条电炉—薄板坯连铸连轧生产线。

1996 年以后,作者在珠钢主要进行薄板坯连铸连轧的工艺研究与产品开发工作,根据我国废钢与电力紧缺、转炉钢比电炉钢成本低的特点,认为现阶段,电炉要生存发展,珠钢要生存发展,必须采取生产高附加值钢的决策,增加企业效益和市场竞争力,提出了以废钢中的残余元素 Cu、Ni、Cr 代替合金料,生产外国专家认为在该生产线上不能生产的 09CuPNiCr 集装箱板,特别是薄规格集装箱板产品;以及不添加昂贵的微合金元素 V、Nb、Ti,生产性能与 400MPa 级的低合金高强度钢(HSLA 钢)相当的低碳高强度钢(HSLC 钢),并以热轧板代替冷轧板。

在珠钢和北京科技大学的共同努力下,开发了低氮电炉钢生产、以氮代氩底吹、电炉冶炼终点控制等一系列电炉创新技术;并指出 HSLC 钢和集装箱板中存在纳米铁碳析出物等,提出了钢组织性能的综合控制理论要点。珠钢率先实现了强度为 400MPa 级铁素体+珠光体类型超级钢的产业化,并成为世界上产量最大的集装箱板生产企业。

1993 年“第一次上海会议”以后在各级政府的支持引导下,企业对发展现代电炉炼钢进行了第一轮投资,新建了一批大型现代电炉,现代电炉钢年产量逐渐增加,但由于从 1993 年至 2000 年,我国转炉钢产量增长更快,以致电炉钢比例从 23.2% 下降到 15.7%,不少电炉钢生产企业亏损,甚至停产,电炉行业感到压力很大,在学术界也出现了不同观点。据此,2002 年 3 月,中国金属学会炼钢分会电炉学术委员会在广州召开了全国电炉炼钢学术会议,会上作者发表了《现代电炉炼钢技术的发展、问题及对策》一文,肯定了 1993 年“第一次上海会议”以来我国电炉炼钢技术的进步及存在问题,提出了我国电炉应生产高附加值钢及围绕缩短冶炼周期降低生产成本的两个对策。在肯定了珠钢电炉生产高附加值钢的经验后,又将自己的工作重点转到了安钢,与安钢同志们一道进行电炉高效化生产技术的研究开发,总结、提出了冶炼周期的综合控制理论,并利用这一理论指导生产。安钢的电炉技术经济指标进入了国际领先行列,作为一个降低电炉钢成本的榜样,促进了我国电炉钢生

产的发展。2000~2003 年我国电炉钢比例回升了 2 个百分点。

因势利导,在 2005 年作者积极建议并参与筹备了由中国工程院产业科技委员会发起,中国金属学会承办的“中国电炉流程与工程技术研讨会(第二次上海会议)”。但是这次会议没有收到预期的效果,2005 年后中国电炉钢比例未能继续增长,反而开始出现了第二次逐年下降的局面。针对这一情况,在近几年内作者在不同场合反复强调,应重视提高我国电炉钢比例,呼吁国家支持和引导企业对发展我国现代电炉炼钢及时地进行第二轮投资,促进我国现代电炉炼钢的进一步发展。

作者在现代电炉炼钢技术的发展方面,主要贡献有三方面:

(1)提出了电炉钢低氮控制理论。研究结果表明:2600℃时,氧、硫等对钢液的表面活性作用消失,碳氧反应区温度可高达 2600℃。为此,电炉、转炉、VOD、AOD 等在钢液氧硫高的情况下可通过碳氧反应生成的 CO 气泡,实现气泡携带法脱氮;在 $[O] > 0.0200\%$ 时, $[O]$ 可阻碍钢液吸氮,电炉底吹和转炉顶底复吹可以以氮代氩实现全程底吹。全程底吹氮气时,电炉出钢氮含量可低至 0.0030%,转炉出钢氮含量达 0.0010%,目前电炉钢及转炉钢中氮含量较高,主要是连铸过程中增氮导致的。

(2)提出了电炉冶炼周期综合控制理论。该理论是从原子分子尺度到工厂时空尺度上的电炉炼钢过程理论,内容包括建立在能量平衡基础上的冶炼周期数学表达式、电炉冶炼周期的计算模型、以工序效益最大化为目标的工艺优化模型以及电炉冶炼终点控制技术。电炉冶炼终点在线动态控制模型是这一理论的一个重要组成部分。

(3)提出了电炉炼钢流程经济分析的概念,把钢厂电炉流程产品的质量与品种、成本与售价、效率与效益、投入与产出通过经济分析有机地结合起来。

作为钢组织性能的综合控制理论和冶炼周期综合控制理论的应用效果,一是指导开发出了高强度集装箱板,创造了显著的经济效益和社会效益,为国家节约了大量外汇开支,并指导开发出了 HSLC 钢,显著节约了 V、Nb、Ti 资源。二是指导开发了电炉加部分铁水冶炼的一系列高效化电炉生产技术,使我国电炉钢的废钢回收量达到 760kg/t 钢。以铁水代替生铁,大大节约了能源,提高了电炉钢产量和电炉钢比例;加 30% 铁水冶炼时,电炉吨钢比转炉吨钢多回收废钢 600kg 左右,减少了

铁矿石、焦煤的消耗,降低能耗 350kgCE/t,减轻了 CO₂ 的排放。三是通过现代电炉炼钢流程的经济分析,明确了我国现代电炉发展的策略。

为了总结我国冶金工作者在电炉炼钢方面所取得的成绩和积累的经验,基于作者半个世纪以来的经历和对电炉技术的认识,特撰写本书以供读者参考。

本书内容安排分为七个部分:第1章为概论,论述了与我国现代电炉炼钢发展有关的问题,阐明了现代电炉炼钢的“特征”、现代电炉炼钢与现代转炉炼钢的“共性”及电炉炼钢发展历史的“分期”等;第2~5章对现代电炉炼钢的核心问题,即电炉冶炼周期的综合控制理论、钢液中氮的控制、现代电炉冶炼终点动态控制、电炉流程工程问题进行了系统介绍;第6章介绍了建立在钢组织性能的综合控制理论和经济分析基础上的电炉钢高附加值产品,重点介绍了我国自主创新开发的薄板坯连铸连轧集装箱板和 HSLC 钢,低成本高强度螺纹钢。在这一章中,还简要地介绍了作者在开发高附加值钢的过程中,在发现碳素钢中存在纳米析出物的基础上,特别是存在纳米铁碳析出物的基础上提出的钢的综合强化机理及 TRC 和 F-TMCP 技术。最后在附录1、2中分别汇集了作者撰写的与现代电炉炼钢发展和薄板坯连铸连轧有关的一些论文的目录(部分未公开发表、读者难以查找的文献列出了全文)。现代电炉炼钢和薄板坯连铸连轧是我国从一个钢铁大国转变为钢铁强国的两个重要的切入点,在未来的一定时期内,这些论文的观点和内容仍有参考价值,故将其单独汇集在一起,以便于读者查阅,希望能对了解我国现代电炉炼钢及薄板坯连铸连轧技术的发展有所裨益。

这本书是作者与许多工厂的技术人员和作者指导的研究生们坚持科学发展观,自主创新,理论联系实际,产学研结合,长期共同努力工作,互相取长补短所取得成果的结晶,也与各级领导的关心支持分不开,没有他们这本书是不可能写成并出版的。在此作者衷心感谢王中丙、毛新平、史美伦、王新江、柴毅忠、王平、李晶、王开力、徐迎铁、唱鹤鸣、周世祥、迪林、徐卫国、吴华杰、刘阳春、周德光、陈希春、于月光、徐晓达等博士及博士生余健、阿不力克木对本书研究工作及撰写的参与和支持。我和他们既是师生也是朋友,和他们一起工作和讨论的过程也是本书内容充实完善的过程。特别是徐迎铁、吴华杰、刘阳春等博士的卓越工作丰富了本书的理论和实践内容。感谢中国工程院徐匡迪院长、王淀佐副院

长、殷瑞钰院士、干勇院士、邱定蕃院士、陈先霖院士、才鸿年院士、胡壮麒院士、中国科学院柯俊资深院士、曲英教授、柳得櫓教授、康永林教授、王泰昌先生、李世俊先生以及许多未能一一提名的老师、同事、朋友和学生们的指导、鼓励、支持、帮助与鞭策。殷瑞钰院士是我的老领导,也是我的学长和朋友。我和殷瑞钰院士一道访问过美国、加拿大、巴西、日本、德国和我国台湾。印象最深的是1995年在巴西考察了一个电炉钢厂,看到该厂用一台90t电炉、一台四流小方坯连铸机,年产72万t钢,小方坯连铸机单流年产量18万t,他们用40%的生铁块作电炉原料,全冷料操作。这坚定了我们研究加部分铁水操作的决心和信心。曲英先生是我大学年代的老师,四十多年来我一直和他保持联系、向他请教。1961年我和他在重庆参加了全国第一次电渣炉会议,会后共同编译出版了《电渣冶金文集》,这本文集成为我国早期电渣冶金工作者的一本重要参考书。这次承蒙殷瑞钰院士在百忙之中,曲英先生在年近八旬高龄时,逐字逐句对本书进行审校,提出了许多宝贵的修改意见,并为本书作序。对此,再次表示衷心的感谢!最后作者对妻子、女儿对我的理解、支持和关怀表示深深的谢意。

由于作者水平所限,本书不足之处敬请读者批评指正。

傅 杰

2009年2月18日

目 录

1 概论	1
1.1 炼钢技术发展史	1
1.1.1 古代炼钢法	1
1.1.2 近代炼钢法	3
1.1.3 现代炼钢法	4
1.2 电炉炼钢技术发展历史的“分期”问题	8
1.2.1 传统电炉炼钢技术的发生发展期和成熟期	9
1.2.2 现代电炉炼钢技术的发生发展期和成熟期	9
1.2.3 现代炼钢流程的共性	15
1.3 我国现代电炉钢生产的发展、问题及对策	17
1.3.1 世界电炉钢生产的发展	17
1.3.2 我国电炉钢生产的发展	22
1.3.3 我国现代电炉炼钢技术及电炉钢生产的发展、问题与对策	24
1.4 现代电炉和转炉钢的制造成本分析	32
1.4.1 研究对象及研究内容	32
1.4.2 关于废钢和生铁价格的分析和确定	33
1.4.3 测算条件	34
1.4.4 基本测算的计算结果	36
1.4.5 废钢价格对各种模式制造成本的影响	37
1.4.6 电价对不同模式成本的影响	38
1.4.7 分析结论	39
1.5 冶金学的发展	40
参考文献	41
2 现代电炉炼钢冶炼周期的综合控制理论与应用	44
2.1 现代电炉炼钢技术是围绕冶炼周期这一核心发展起来的	44
2.2 传统电炉冶炼周期的综合控制理论	50
2.3 现代电炉冶炼周期的综合控制理论及应用	50

2.3.1	修正的电炉冶炼周期综合控制公式	50
2.3.2	现代电炉冶炼周期的计算模型	54
2.3.3	电炉加部分铁水的技术分析	58
2.3.4	以工序效益最大化为目标的现代电炉冶炼工艺优化模型	64
2.3.5	电炉全废钢冶炼的技术分析	73
2.3.6	现代电炉设计	77
2.4	现代电炉炼钢冶炼周期综合控制理论的形成过程	79
	参考文献	80
3	现代电炉冶炼过程钢液中氮的控制	81
3.1	概述	81
3.1.1	氮在钢中的作用	81
3.1.2	钢冶炼过程中氮反应的共同规律	82
3.1.3	研究过程	84
3.2	表面活性物质氧、硫对钢液吸氮、脱氮的影响	86
3.2.1	理论分析	86
3.2.2	温度及硫含量对钢液脱氮动力学影响的实验研究	88
3.2.3	碳氧反应区的温度	92
3.2.4	钢液吸氮的实验研究	94
3.3	现代电炉钢液氮反应的数学模型	95
3.3.1	总体数学描述	95
3.3.2	氮反应数学模型	96
3.3.3	氮反应模型的验证	106
3.4	氮控制理论的工业应用	109
3.4.1	全程底吹氮工艺研究	109
3.4.2	底吹氮流量对冶炼终点[N]的影响	110
3.4.3	变流量底吹氮对冶炼终点[N]的影响	110
3.4.4	连铸过程的增氮	112
	参考文献	113
4	现代电炉冶炼终点控制	115
4.1	电炉自动化炼钢技术概述	115
4.2	电炉终点动态控制的目标	119
4.3	宏观优化模型	121
4.4	废钢熔化及钢液温度计算模型	123

4.4.1 废钢熔化数学描述	123
4.4.2 电炉冶炼过程温度计算模型	128
4.5 电炉冶炼过程脱碳模型	131
4.5.1 氧传递过程描述	132
4.5.2 乳化反应区的脱碳计算	133
4.5.3 钢渣界面反应区脱碳速率计算	141
4.6 电炉冶炼终点动态控制相关数学模型的应用	143
4.6.1 废钢熔化及钢液温度计算模型的应用	143
4.6.2 脱碳模型的应用	146
参考文献	149
5 电炉流程工程学	152
5.1 20 世纪 90 年代以来中国在冶金领域的若干理论贡献	152
5.1.1 冶金流程工程学	152
5.1.2 冶金反应工程学在中国的发展	153
5.1.3 现代电炉炼钢理论	155
5.2 电炉功能演变与现代电炉炼钢技术特征	157
5.2.1 钢产品制造功能	157
5.2.2 能源转化功能	157
5.2.3 循环经济功能	158
5.3 钢厂分类与电炉钢生产流程的类型	159
5.4 电炉流程的节能减排	167
5.5 电炉流程的工序与“界面”	170
参考文献	170
6 电炉高附加值钢	173
6.1 电炉高附加值钢概述	173
6.2 电炉 CSP 集装箱板的生产与研发	175
6.2.1 电炉 CSP 生产线生产集装箱板的难点	176
6.2.2 生产集装箱板的技术措施	177
6.2.3 2000 ~ 2005 年珠钢生产集装箱板的状况	177
6.2.4 集装箱用钛微合金化高强耐候钢的研发	179
6.3 HSLC 钢	180
6.3.1 HSLC 钢成分设计要点	180
6.3.2 HSLC 钢的力学性能	181

6.3.3 HSLC 钢的基本组织与晶粒尺寸	184
6.4 小方坯连铸连轧低成本高强度螺纹钢及线材探讨	185
6.5 铁素体 + 珠光体钢中纳米析出物及其对钢的析出强化作用	187
6.5.1 HSLC 钢中的纳米铁碳析出物及其对钢的强化作用	187
6.5.2 TRC 和 F-TMCP	189
6.5.3 铁素体 + 珠光体钢的强化机理	194
6.5.4 钢的软化机理	200
6.5.5 HSLC 钢中纳米氮化物的析出作用	202
6.6 有待进一步研究的科学问题	213
参考文献	214
附 录	216
引言	216
附录 I 我国现代电炉炼钢的发展主要论文目录	219
附录 II 薄板坯连铸连轧主要论文目录	220
附录 III 几篇未正式发表、读者不便查找的论文	221
III.1 关于开展“电磁技术在连续铸钢生产中应用基础研究” 的建议	221
III.2 关于开设“钢铁冶金工程”课程的设想	226
III.3 关于举办第二次“当代电炉流程和电炉工程问题研讨会” 的建议	230
III.4 《电炉 CSP 工艺与材料研究文集》前言	235
III.5 电炉 CSP 工艺基础研究与技术创新	236

1 概 论

1.1 炼钢技术发展史

钢铁是人类文明的基础。足够数量的优质钢铁材料是人类社会发展的重要需求,反过来又推动社会的发展,是各国实现工业化的必要条件。

炼钢技术发展历史可以划分为三个时期,即古代、近代、现代,各时期炼钢方法分别为古代炼钢法、近代炼钢法和现代炼钢法。

1.1.1 古代炼钢法

我国是世界上最早使用铁的国家之一。商代中期即公元前十四世纪开始使用陨铁,春秋晚期即公元六世纪左右出现人工冶炼的铁器。最初炼出的铁是用木炭加热和还原铁矿石得到的块铁,以后由于强化鼓风和加高炉炉身又炼出了生铁。生铁在铸锻成器具过程中脱碳成钢是我国古代冶金技术的特点。

我国的炒钢是世界上最早用熔化生铁氧化熔炼的炼钢方法。西汉后期,生铁冶炼已达到较高水平,能够为炼钢提供充足的生铁原料,发展了炒钢技术^[1],文献[2]指出,我国炒钢技术始于西汉中期(公元前二世纪)。

炒钢就是把生铁加入炉膛中,燃烧木炭以提高炉温来使生铁升温,借助空气中的氧和加入铁矿石的氧并通过人工搅拌,使生铁中的碳氧化,得到碳含量较低、可锻的钢或熟铁。由于冶炼温度及金属温度低于金属的熔点,故成品钢不是可供铸造的钢液,而是半熔融状态的团块,在炉膛中成蜂窝状,空隙中含有氧化性渣,与铁或钢液相共存。工人用铁钳将团块夹出,在铁砧子上反复锻打锤击,将蜂窝孔隙中的渣液挤出,得到致密钢坯或成品件。以后也有用铸铁件碎块,甚至铁水作原料,用鼓风设备,例如活塞式风箱向炉膛中鼓入空气并辅以上温剂、熔剂来进行冶炼的。1958年我国各地出现的“炒钢”就属于这种改进了的炒钢工艺。

用铁碳二元相图,可以解释炒钢的物理化学过程。

由图 1.1 可见:曲线①为铁碳二元相图的一条液相线,曲线②为金属的平均温度值。由于炉膛中温度不均匀,金属各部分温度是不均匀的。但因为 $T=f_1(\tau)$, $[C]=f_2(\tau)$, 有 $T=f[C]$ 。

曲线③为冷装操作时炉膛温度变化曲线,是作者 1958 年参加“炒钢”操作时,用辐射高温计测得的。