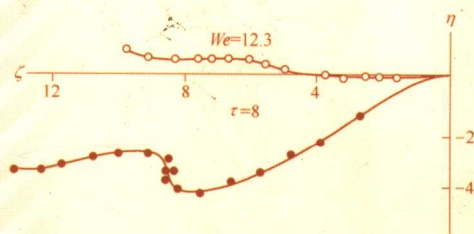
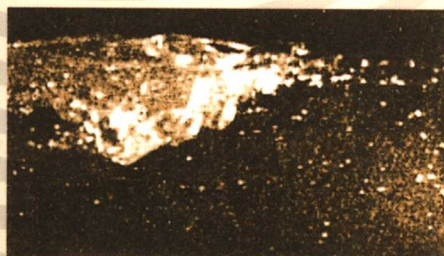


Studies on Unit Processes and
Unit Phenomena in Metallurgy

冶金中单元过程和 现象的研究

萧泽强 等著



冶金工业出版社

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

冶金中单元过程和现象的研究

*Studies on Unit Processes and
Unit Phenomena in Metallurgy*

萧泽强 等著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2006

内 容 提 要

本书分8个专题,介绍了作者及其合作者在研究冶金单元过程和现象时所获得的研究结果,涉及的主要冶金过程和现象包括熔池喷吹、气泡行为、搅拌与混合、两相流、界面现象、非等温流动、二次燃烧和高温低氧空气燃烧等。为了便于读者了解全书梗概,方便阅读,作者特别在第1章中总体介绍了浸没式侧吹特征、气泡泵现象的全浮力模型、渣金界面卷混模型、中间包非等温流现象和无焰燃烧等专题的主要研究结论,及其在国内外学术界引起的反响等。此外,各章均概略地做了导读提示和小结。

本书可供冶金领域的科研、生产、设计、管理、教学人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

冶金中单元过程和现象的研究/萧泽强等著. —北京:冶金工业出版社, 2006. 10
ISBN 7-5024-3982-X

I. 冶… II. 萧… III. 冶金—过程—研究 IV. TF01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 031198 号

出 版 人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)
责任编辑 刘小峰 美术编辑 李 心
责任校对 王永欣 李文彦 责任印制 牛晓波
北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销
2006 年 10 月第 1 版, 2006 年 10 月第 1 次印刷
169mm×239mm; 37.5 印张; 732 千字; 575 页; 1-2000 册
96.00 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

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)



萧泽强，1934年出生于湖南长沙，1961年东北工学院钢铁冶金本科毕业后留校工作，先后任助教、副教授、教授、博士生导师。1973~1974年在地拉那大学讲授冶金专业课，1978~1980年赴瑞典进修，1988~1994年兼任瑞典皇家工学院冶金专业研究生课讲师。1996年起在中南工业大学热能工程专业任博士生导师。自20世纪70年代起，先后从事熔池侧吹氧、喷射冶金、炉外精炼、熔融还原和高温空气燃烧等工艺技术的研究，开发出“全氧侧吹转炉炼钢法”；80年代起重点从事冶金中单元过程和现象、冶金过程数值分析技术的应用，以及冶金反应工程学领域的学术研究和教学工作，提出金属熔池搅拌现象分析的全浮力模型、渣钢界面卷混模型和中间包非等温流动模型等。发表论文百余篇，专著4部，参与和组织编著出版《冶金反应工程学丛书》。

封底照片说明：
全浮力模型现场试验

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	定价(元)
冶金反应工程学丛书	
冶金反应工程学基础	32.00
传递过程原理及应用	38.00
高炉过程数学模型及计算机控制	28.00
熔融还原	24.00
铁合金冶金工程	34.00
钢的精炼过程数学物理模拟	24.00
连续铸钢过程数学物理模拟	45.00
中间包冶金学	35.00
钢冶金学	45.00
钢冶金过程动力学	32.00
电磁冶金学	35.00
金属轧制过程人工智能优化	36.00
化工冶金过程人工智能优化	26.00
化工冶金模型实验研究及测试技术	30.00
有色冶金炉窑仿真与优化	32.50
有色金属熔池熔炼	32.00
有色金属材料的真空冶金	42.00
有色冶金动力学和新工艺(英文版)	28.00
固体电解质和化学传感器	45.00
传输理论和计算	24.00
冶金传输原理基础	49.00
冶金传输原理	40.00
传输过程基本原理	26.00
冶金物理化学	39.00
冶金物理化学研究方法(第3版)	48.00
冶金热力学数据测定与计算方法	28.00
现代冶金学(钢铁冶金卷)	36.00
有色冶金原理(第2版)	35.00
有色金属冶金学	48.00
冶金过程动力学导论	45.00
冶金流程工程学	65.00
冶金试验研究方法	29.00
冶金工程实验技术	39.00
现代流体力学的冶金应用(英文版)	25.00
冶金研究(2006年)	80.00
非高炉炼铁工艺与理论	28.00
炉外精炼及铁水预处理实用技术手册	146.00
中国电炉流程与工程技术文集	60.00
现代电炉—薄板坯连铸连轧	98.00
薄板坯连铸连轧(第2版)	45.00
薄板坯连铸连轧工艺技术实践	56.00
冶金设备液压润滑实用技术	68.00
燃料及燃烧(第2版)	29.50
冶金过程数值分析技术的应用	65.00

序

“冶金”一词在中国及世界范围均可追溯到人类文明的起源时期，大约在 2000 至 3000 年前，而其中最大量生产的钢铁至今仍是人类社会主要的结构材料，也是用途最广、覆盖面最大的功能材料。尽管现在已有的各种新型复合材料、镁合金、稀土功能材料等，在不同的高技术领域逐步取代了传统的钢铁材料，但从全球经济发展和社会文明进步的宏观角度来看（如工业化、城市化、交通运输及农业现代化等），起支撑作用的仍然是钢铁材料。

过去的 100 多年，是钢铁工业发展最迅速的时期，1900 年全球的钢产量还不到 4000 万吨，而 2000 年增长到 8 亿吨，年均增长 760 万吨。而本世纪的头五年，增长更快，2005 年突破了 11 亿吨大关，年均粗钢增长数为 5600 万吨，其中贡献最大的是中国，约占 78.6%，这当然是和这些年中国经济的持续、快速发展和主要依靠固定资产投资拉动国民经济增长有密切的关系。

除了外部需求拉动以外，近 50 年来，钢铁冶金工业内部的生产工艺技术有了两项革命性的变化，使生产效率大大提高：

一是用氧气转炉（开始时顶吹，现在普遍是顶底复吹）取代了平炉，并辅之以钢包精炼，使炼钢速度提高十倍以上；

二是用连续铸钢取代了模铸，使浇铸速度可与转炉高速炼钢相匹配，同时因取消了钢锭开坯工序，使各种连轧技术得以应运而生，从而使轧钢速度也提高了十倍以上。

无论是氧气转炉、钢包精炼还是连续铸钢，它们与传统的平炉、炉内精炼、模铸相比，从反应机理上看，有一项根本的变化，即其中熔体间的热量、动量、质量传递是在熔体的激烈运动、交互混合中迅速完成的。而传统炼钢的上述过程则是在渣—钢间相对平静的扩散反应中缓慢进行的。模铸中钢锭的凝固过程，亦可简化成定向传热的过程。

上世纪 30 ~ 50 年代关于炼钢过程热力学的研究, 指导了造渣工艺和明确了各种钢铁冶金反应的方向与极限, 但由于炉内渣—钢反应的速度慢、动力学条件差, 虽然有过电磁搅拌、混合炼钢 (钢包中液态合成渣与钢水的混冲) 等工艺试验, 但冶金反应的动力学研究始终未能提升到工艺开拓的主流和过程控制的高度。60 ~ 70 年代, 钢铁工业开始普及氧气转炉、钢包精炼和连铸技术后迫切需要理论研究的引领与支撑。可以说就在中国的冶金学者被送到农村“五七”干校接受贫下中农再教育的时候 (1968 ~ 1975 年), 国际上冶金学科的研究方向正在急剧地发生变化, 到了 70 年代后期, 几乎所有外国的冶金学博士生研究的课题方向都从传统的平衡实验转向了对气体射流、气液混合、熔体流场及传输现象的研究, 并借用“化学反应工程学”的概念, 把冶金熔池中的速率与传输现象、单元操作的优化及反应器设计等综合起来, 形成了冶金动力学研究的一个新的综合领域, 此后不久被称为“冶金反应工程学”。它明显区别于以界面上原子—分子扩散为基础的传统“静态”的 (当然这是相对于激烈搅动的两相间传输现象而言)、非工业性的 (以实验室反应速度常数测定及小型感应炉、钼丝炉、碳管炉实验验证) 传统冶金动力学研究, 其最终研究目的是用于工业装置的设计和过程计算机控制模型的制定。

萧泽强教授是我国冶金科学界在此领域的开拓者, 是把这一全新概念导入中国的第一人。1978 年他到瑞典 MEFOS 冶金中心作访问学者, 由于 70 年代曾在国内从事过氧气侧吹转炉的开发研究, 在大量氧气射流由喷嘴吹入熔池, 对铁液进行搅拌及反应方面积累了丰富经验, 所以他立即敏锐地抓住了喷吹气体对金属熔池进行搅拌这一带有普遍意义的工艺技术进行深入的理论研究, 提出了描述钢包精炼中喷吹气体进入熔池后, 气液两相流的“全浮力模型” (Plume Model), 通过这一模型不仅采用计算流体力学求得了流速分布, 正确阐明了流场结构、搅动功率和混合机理, 还在 60 吨钢包的钢液内进行了实测验证。这一结果首先在国际会议上发表 (SCANINJECT), 受到国外同行的普遍关注, 并得到 Öters、森一美等知名学者的高度评价和推荐, 可以毫不夸张地说, 萧泽强教授是文革后我国冶金学科中, 因学术研究工作首先受到国外同行关注和推崇的中国学者。正因为如此, 早在上世纪 80 年代, 他的研究成果已被编入国外若干大学的博士研究生教材, 并

多次应邀在瑞典、日本系统讲授研究生课程。1980年他回国后,带回了上述研究成果,还在国家“六五”攻关中,承担“钢包喷射冶金过程渣钢界面卷渣现象”的研究,出色地完成了课题研究工作,并提出了描述渣钢界面不稳定现象的“卷混模型”(We=12.3)。与此同时,他在国内、外积极参与和推动了冶金学科,特别是反应动力学、反应工程学的研究与创新工作。除了培养研究生和建立东北大学的“三传”实验室外,还组织彭一川、樊养颐和我一起翻译了麻省理工学院舍克里教授所著的《冶金中的流体流动现象》(FLUID FLOW PHENOMENA IN METALS PROCESSING, J. Szekely, 1979年)一书。译述中他与译者一起,对原书的文字、公式、计量符号等进行了仔细校核,发现原书有若干原则错误。在萧泽强教授与舍克里教授交换意见后,对应改的地方帮助原书作者一一进行认真的改正,体现了中国学者严谨的科学精神,也受到了美国作者的尊敬。此书出版后,成为国内冶金学科研究生重要的教学参考书。

在80年代初,萧泽强还是冶金学科中首先引入CFD数值计算的中国教授,除了与其他模拟手段、测试方法相结合来完成研究生培养任务外,还通过编制程序、应用和补充CFD商业软件,带出了好几名高素质的数值分析人才,使中国高校冶金类专业的研究生教育和科研水平有了显著提高,并出版了专著《钢的精炼过程数学物理模拟》和《冶金过程数值模拟分析技术的应用》等书。

世纪之交,萧泽强教授曾组织我国冶金学科的方方面面近40位专家、学者,总结20年来在各自领域从事冶金反应工程学方面的心得、体会,编著出版了一套《冶金反应工程学丛书》,共21册,近千万字。这样巨大的工作量,从约稿、审核到组织出版要耗费他多少精力啊!这不仅是一个中国知识分子对事业呕心沥血、执著追求的赤子之心,也是他为中国冶金科学毕生奉献的真实写照。

萧泽强教授是我的同龄人,曾共同参与我国喷射冶金、炉外精炼技术的开发,可以说是志同道合的益友。但他在文革结束,就远赴瑞典,作为访问学者,为中国冶金工作者打开了一片“天地”,赢得了瑞典冶金学界的好评。之后,在他的帮助、推荐下,我亦于1983年去了瑞典工作,从这个意义上讲,他应是先行者,是我的良师。我和他“亦友亦师”的情谊,也可作为同行之间的一段佳话吧。

这次他在古稀之年，将近 30 年来的学术工作汇总成册，我十分高兴，因为我认为这不光是他人生旅途和事业奋斗的总结，而是一个中国学者对冶金科学所做理论贡献的真实记录，应该集中起来留给后学者。同时，向世人表明，中国在成为钢铁生产大国的同时，也有理论研究上的学术贡献。

全国政协副主席
中国工程院院长

徐匡迪

2006 年 8 月 16 日

序

20 世纪 60 ~ 70 年代, 国际上冶金学科的发展经历了一个巨大的变化。速率过程、传输现象、单元过程和操作、反应器理论等应用于冶金问题的研究和阐释逐渐普及。冶金学开始从着眼于各种冶金反应的热力学和原子—分子尺度范围的动力学理论研究, 向考虑工艺装置的结构、效率和控制等更大尺度层次的工程科学迅猛发展。然而十分遗憾, 我国当时正处于“文革”时期, 钢铁生产“十年徘徊”, 对冶金理论极为忽视, 连成熟的热力学也难逃遭受批判的厄运, 对冶金学的这一新学科分支(以后称之为冶金反应工程学)更是乏人问津。

1978 年, 萧泽强君赴瑞典进行学术访问研究, 两年间完成了大量理论和实验工作。其中, 关于喷吹气体搅拌金属熔池的全浮力模型、实际测量钢液流动速度的技术和 60t 钢包内的流速测量数据, 都是很有意义的研究成果。全浮力模型能正确解析底吹气体搅拌熔池时的流场结构、搅拌功率和混合机理。底吹气体搅拌是一项关键的单元操作过程, 不仅可直接应用于钢液炉外精炼, 而且也可广泛应用于转炉复合吹炼、有色金属熔池熔炼等工艺过程。钢液流动速度的直接测量填补了冶金过程传输现象研究中的一个重要的数据空白, 证明了用计算流体力学求得的流速分布可以符合喷吹钢包的 actual 钢液流速, 从而证明了数学物理模拟方法在冶金流体研究中的可行性。萧泽强同志这些工作结果发表后, 受到国内外学术界的关注和重视。奥特斯、葛斯里、森一美和佐野正道等国际知名学者发表文章进行评议和推荐, 这些讨论有利于现代冶金学理论研究的发展, 也促进了我国冶金学领域与国际学术界的交流。

作为一个关心祖国科学事业的冶金学者, 萧泽强教授在进行上述卓越工作的同时, 还十分关注国内冶金学科的新发展。例如, 关于 SCANINJECT、Seminar of ECHMT 等国际学术活动的资讯, 是他传达到国内的。他较早认识并研究了孔口射流、气泡、液滴等现象的意义和

规律。归国以后，他又积极参加冶金反应动力学学组（后发展为冶金反应工程学学术委员会）的组建工作。本书 2.1 节就是我国首届冶金过程动力学会议收到的第一篇论文。20 余年来，萧泽强教授是我国冶金反应工程学领域十分活跃的学者，而且有很高的国际知名度。他善于组织发挥不同方面有关学者的特长，共同推进我国冶金工程科学的前进。《冶金反应工程学丛书》是 80 年代以来我国冶金学者应用反应工程学原理，分析不同冶金反应器和单元过程问题研究成果的汇总。《冶金反应工程学丛书》由萧泽强教授倡议并组织、推动完成，表现了我国冶金学术领域繁荣发展的一个侧面。

“冶金反应工程学”这一新学科名称，在提出当时考虑冶金属于高温化工，依据和参照“化学反应工程学”而命名的。然而经过二十余年的实践，已经体会到冶金工业和化学工业的重要区别。冶金过程不仅有反应温度高、反应速度快的特征，过程复杂且多由传质控制，而且原料条件及产品要求不同。冶金生产中关于熔池的搅拌及浓度分布，气泡、液滴等弥散现象，多相流运动，凝固和偏析等占有重要地位。而这些都是物理过程。现在看来，采用“冶金过程工程学”比“冶金反应工程学”可能更全面和确切一些。但“冶金反应工程学”已经被普遍接受，大家都已了解了它所包含的内容，再做一次修改订正似无此必要。我国文学名著《红楼梦》，最初的手抄版本大都标名为《石头记》。到程、高活字排印时，用了《红楼梦》之名，于是随着小说的流行，《红楼梦》一名相沿逐渐普及。而考证起来，《石头记》才是曹雪芹的原意，才更完整、更准确反映小说的内容。但即使现在对程、高续作和篡改深恶痛绝的红学专家，也不主张重新更改书名。这一文艺方面的现象对“冶金反应工程学”的命名，应该有些参考罢。

本书所收录的论文，充分展现了各种单元过程对冶金反应器的意义。例如，对气体孔口流出、气泡形态、气流中颗粒运动和界面卷混机理等的认识，奠定了熔池吹气搅拌的基础，使钢包精炼、复合吹炼、熔融还原等工艺的控制成为可能；对中间包内非等温条件下自然对流规律的阐释，有助于中间包钢液流动控制装置的正确设计和使用。这些论文在不同时期分别结合新技术的开发而作，但又不局限于一种工艺操作上。萧泽强教授理论造诣很深，但他的研究工作不限于单纯的理论推演，而是紧密结合带动冶金工艺发展的课题，如喷吹冶金、熔

融还原、熔池侧吹氧技术、钢中大颗粒夹杂物控制、提高连铸中间包效率等。在进行理论探讨的同时,广泛进行了实验室内深入细致的试验和工厂内的开拓性生产试验。现在把这些论文汇聚起来做一番综合观察,从中不难感受到冶金反应工程学发展的脉络,也展现了萧泽强教授在学术道路上的远见卓识和持续积累过程。这种为了祖国科学技术发展而献身的精神,以及效果显著的学术研究工作方法,对研读冶金工程的新一代年轻学人,很有启迪意义。

本论文集还收录了关于高温低氧空气燃烧 (HTAC) 方面的论文。HTAC 是 20 世纪 90 年代国外开发的创新性技术,对于节能和减少温室气体 (CO_2 和 NO_x) 排放有极其突出的效果。泽强同志于 1999 年最先将 HTAC 技术介绍到我国。他通过国内外学者间的学术友谊,绕过科技体制管理上的某些不顺畅,积极奔走于国内外学术单位和国内钢厂,在 4~5 年的时间使上百座加热炉和许多钢包烘烤都实际应用了这一技术,取得了显著的节能和生态效益。泽强同志在我国推广 HTAC 技术是在没有科研立项和资金、而且在身患重病 (期间曾作冠状动脉支架手术两次) 的条件下往来奔走的,充分显示了他的满腔爱国的赤子之心。HTAC 的研究也广泛运用计算流体力学和传热学、多相流和燃烧理论等方法,和冶金反应工程学是互通的。从更广阔的视野观察与思考冶金反应工程学问题,已不能仅仅限于单个反应器的效率,而要兼顾过程流程系统的整体优化,以及过程中伴生的物质的再循环和再利用。这也是为了人与自然和谐发展所必需的重要方面。而高温低氧空气燃烧无疑是实现该理想的一颗亮丽的星光。

书中许多文章过去均曾拜读。泽强命我为本书作序,这次重新通读一次,仍觉获益匪浅,不免忆起 20 余年来共同勉励、相互交流的情景,恍如昨日。下笔陈言,拉杂零乱,难免偏颇,有负嘱托。谨请作者、读者见谅。

中国金属学会冶金反应工程学学术
委员会主任, 北京科技大学教授



于 2005 年国庆节

前 言

近 30 年来，现代冶金学随着冶金工艺和技术的发展，从内容和研究方法上都有很大进步。测试技术的进步和计算机的应用为冶金过程的研究提供了前所未有的条件。

现代冶金学研究的重要方法之一是从复杂和难以观察的冶金流程中，提出主要的单元过程和现象进行分析和研究。冶金中单元过程和现象的研究可以采取对实物进行直接测定、热态模拟、物理模型模拟和数值模拟等方法。对时间和空间、初始和边界条件有一定限制的单元过程和现象进行研究时，往往可以通过建立动量、质量和热量守恒方程，将冶金物理化学反应和传输过程结合起来作宏观或微观机理性的、定量或半定量的解析和描述。得到的结果可以直接用于描述或指导实践，也可和相关单元过程和现象的研究结果综合起来指导实践。对大量单元过程和现象研究所积累起来的信息和认识，将使人们对某些复杂和难以观察的冶金流程有更深入的了解，将使工程技术人员更容易控制生产过程或开发新的工艺。这些研究也将不断丰富冶金学的内容。

钢包冶金是近几十年来给炼钢生产流程带来巨大变化的新工艺，也是现代冶金学中最受重视的研究领域之一。在目前世界冶金主要学术刊物中，钢包冶金是报道文章最多的研究课题之一。初步估计，20 多年来，国内外各冶金院校安排研究生以钢包冶金过程和现象做学位论文的学生数以百计。钢包，相对地说，是一个比较单一的冶金反应器，但其中包括了现代冶金学学者十分关心的许多过程和现象。构成钢包精炼过程的重要单元反应和现象有：气泡的生成和运动、射流喷吹、气液两相流、循环流场、搅拌和混合、渣钢界面反应、夹杂物行为、脱气和合金化等，其中被研究得最多的是与气泡有关的课题。气泡的作用和重要性并不是所有现场冶金工作者都理解的，但现在几乎所有炼钢现场操作人员都知道，为了均匀包中钢液的成分和温度，仅

需对钢液吹几分钟氩气即可，但他们之中可能有人并不深知其道理。如一台 100t 的钢包，3~5min 的总吹氩量只有 $1\sim 2\text{m}^3$ ，可实现足够均匀的混合。100t 钢液体积约 16m^3 ，达到均匀混合的循环量不能少于 50m^3 。吹入的少量氩气所驱动的钢液量却有几十万千克，可见搅拌力之巨大。气泡驱动液体做循环流动的现象是熔（溶）池中的一种气泡泵现象（bubbling phenomenon），这是发明钢包吹氩和 RH 提升处理的基础知识。因此，不能不了解这些重要的单元现象，或忽视对它们的研究。

改革开放以来，国内外冶金学术交流扩大。20 世纪 80 年代初，在中国金属学会冶金物理化学学术委员会支持下，成立了冶金反应工程学会。冶金中单元过程和现象的研究愈来愈受到重视。

本书作者结合教学和科研活动，对一些涉及到的冶金中单元过程和现象进行了较长时期和较连贯的研究。陆续地在国内外刊物上发表了有关结果，部分内容已被作者和一些国外教授编入教材给学生讲授，其中包括 1988 年、1992 年和 1994 年作者在瑞典皇家工学院讲授的博士专业课“冶金反应器理论与实践”。在相关研究中作者提出了一些结论性意见或观点，其中一些受到国内外学者，如舍克里、葛斯里、森一美、奥特斯和曲英教授等的关注或被接受。这些工作对推动某些单元过程和现象的研究起到了作用。其中，主要研究结果有：描述喷吹熔池中气液两相流的“全浮力模型（Plume Model）”；描述渣钢界面不稳定现象的“卷混模型（ $We = 12.3$ ）”；描述中间包流动的非等温模型（ $Zb = \beta gl/u^2$ ）；以及熔池中侧吹浸入射流的结构和金属熔池中孔口气泡的生成规律等。工艺性的应用成果有：浸入式侧吹氧技术的开发和应用；喷吹工艺技术的研究和应用；中间包流场的控制；高温空气燃烧技术的研究和应用等。在研究方法上有所创新的工作是钢液内流动速度的形阻件直测技术。在完成有关课题的研究中，CFD 数值计算技术在课题组内，从 80 年代初第一位研究生开始，就作为最重要的研究手段与过程研究紧密结合。在 CFD 方面，除完成课题本身任务的研究外，通过自编程序、应用和补充 CFD 商业软件，同时也培养一批水平较高的数值分析人才。这方面的具体工作情况，已在《冶金过程数值模拟分析技术的应用》（冶金工业出版社，2006 年）中进行了介绍。

作者在所做的一些研究工作中，在与徐匡迪教授、曲英教授、李正邦教授、梅炽教授、特·内勒先生、荷拉帕教授、森一美和佐野教授等的交往中，通过与他们的学术讨论、交流，获益匪浅，之所以取得如上所述的一些结果，与他们的无私帮助是分不开的。在本书所介绍的研究工作中，许多工作是在一些朋友的大力支持下进行的，在十余年的教学和研究工作中与东北大学的彭一川和肖兴国等同志有过良好的值得记述的合作，许多论文工作是在与数十位研究生的共同学习中完成的，他们的名字都在论文的编汇中做了说明或已在论文中署名。葛斯里、沙哈依、森一美、佐野正道、奥特斯、杨森、张信昭和曲英等著名学者对作者工作的评议，是对上述研究结论得以完善和扩散的重要支持。为了说明他们评议的内容和意义，在本书绪论中按专题做了简要介绍。在本书出版之际，特在此对他们一并表示衷心感谢！

在本书出版过程中，徐匡迪院士、曲英教授自始至终给予作者以支持和关怀，书稿出来后，又亲自审读并作序，从学科发展的高度对书中的内容和有关工作给予了热情评价和鼓励，作者在此表示衷心感谢！

列入本书的论文都是在国内外学术刊物、国际或全国性学术会议上发表的文章。由于这些论文发表时间延续几十年，前后及相互间在内容、表述方式或单位应用上可能不甚统一，汇编时虽尽量做了修订，但难免仍有不足之处，恳请批评指正。

萧泽强

2006年9月

目 录

1 冶金单元过程 and 现象的研究及其意义	1
1.1 引言	2
1.2 现代冶金工艺和冶金学学科的发展	2
1.3 冶金反应工程学的发展及其研究方法	4
1.4 冶金单元过程 and 现象研究的意义	7
1.5 金属熔池中气泡、液滴的行为和孔口气体的流出研究综述	12
1.6 金属熔池的搅拌和混合研究综述	17
1.7 金属熔池中浸入式侧吹技术及其工业应用研究综述	28
1.8 管道和熔池中的气粉两相流行为研究综述	31
1.9 渣金界面和相间反应研究综述	33
1.10 连铸中间包内热工及流动特性研究综述	38
1.11 熔融还原技术的可行性研究综述	42
1.12 高效蓄热技术和燃料在高温低氧空气中的燃烧研究综述	45
1.13 本章小结	49
参考文献	50
2 金属熔池中气泡、液滴的行为和孔口气体流出	57
2.1 冶金过程浸入式气流流出和气泡形成行为的研究	(萧泽强) 58
2.2 熔池中浸入式喷嘴周边气体的流出行为	(萧泽强 约·特勒 皮·梅尔伯) 72
2.3 液相中浸没式喷嘴气体流出行为的研究	(吴建国 顾文俊 王新建 萧泽强) 78
2.4 锥顶液滴形成机理的研究	(拉·巴布 萧泽强) 86
2.5 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO}$ 熔渣起泡行为的研究	(黄宗泽 肖兴国 斯·辛格 萧泽强) 93
3 金属熔池的搅拌和混合	99
3.1 喷吹钢包中流体流动的实验研究	(萧泽强 特·内勒 波·切尔伯) 100