



■ 李远洲 编著

氧气转炉炼钢过程的 解析与控制

YANGQI ZHUANLU LIANGANG GUOCHENG DE
JIEXI YU KONGZHI

冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

氧气转炉炼钢过程的 解析与控制

李远洲 编著

北京

冶金工业出版社

2018

内 容 提 要

本书包括氧气转炉炼钢反应特点,射流、相似原理和射流与熔池的相互作用,硅、锰的氧化反应,脱磷反应,脱硫反应,脱碳反应,转炉吹炼过程解析,氧气转炉造渣和石灰熔化特点,复吹转炉合理的供氧、供气制度,喷枪和炉型的设计,转炉热工调控,计算机在转炉中的应用共12章内容。

本书资料来源于作者从事科研、教学和工程设计过程中,通过生产操作、科学试验得到的研究成果,以及对国内外专家学者发表论文中的科研成果的分析。

本书对从事钢铁冶金基础研究科研、教学人员以及生产人员有很大的启发作用。

图书在版编目(CIP)数据

氧气转炉炼钢过程的解析与控制/李远洲编著. —北京:冶金工业出版社, 2018. 5

国家科学技术学术著作出版基金

ISBN 978-7-5024-7524-6

I. ①氧… II. ①李… III. ①氧气转炉炼钢—研究 IV. ①TF72

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第046367号

出版人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 刘小峰 曾 媛 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7524-6

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2018年5月第1版,2018年5月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;52印张;1264千字;810页

200.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

序

李远洲教授的学术著作《氧气转炉炼钢过程的解析与控制》终于出版问世了。谨致以衷心的钦敬和祝贺！

李远洲教授是我国冶金界应用反应工程学方法研究解决问题的开拓者之一。早在20世纪70年代，就对氧气顶吹射流以及底吹气流和熔池的相互作用进行了认真的研究，认识到关于熔池运动动力学的重要性和有关规律。从此出发，对转炉熔渣中三价铁和二价铁的比例关系、渣的氧化性、石灰在渣中溶解动力学，以及脱磷和脱碳反应的综合控制等问题，做了深入研究，并得到许多独到的见解。在多届冶金过程动力学和反应工程学学术会议上，李远洲教授都发表了内容充实而且新颖的论文。在理论的指导下，我国的钢铁生产走向高效率，增强了国际竞争力。

20世纪90年代，我国冶金界合作编著出版《冶金反应工程学丛书》时，萧泽强、蔡志鹏和我均认为李远洲教授可以撰写氧气转炉炼钢过程理论解析方面的专著。萧泽强亲赴南方和李远洲约定了著书计划。编委会曾将李远洲拟写的著作作为丛书的核心著作之一。这是因为炼钢是钢铁生产的主体工艺之一，而李远洲教授对转炉炼钢过程的理论解析当时在国内是最深刻的。可惜的是，在约稿安排之后，李远洲教授罹患重病，直到21世纪初丛书出版工作结束，未能完成撰稿。幸而倪瑞明等三学者翻译成功柏林工业大学F. Oeters教授著的《钢冶金学》(Metallurgie der Stahlherstellung)，纳入丛书出版。

李远洲同志为祖国钢铁事业执着追求，付出了毕生精力。早在20世纪50年代，他就在平炉设计方面有所改进。后在转炉炼钢的设计和解析方面，以严谨的科学精神进行大量研究。可惜由于突患重病，未能完成

著作。令人钦佩的是，病魔并未使李远洲放弃对冶金事业的追求，当病情有所好转后，他继续修改书稿，并在一些年轻学人的帮助下，校核补充了一些理论公式和计算机控制模型方面的内容，使《氧气转炉炼钢过程的解析与控制》这部内容丰富的学术著作呈现在人们面前。书稿相当多的部分是李远洲教授在病榻上毅然坚持完成的，是融入他毕生心血的科学著作。

本书所依据的实验研究，大多是在20世纪70~80年代进行的。当时炼钢生产的特征是各个炼钢反应（四脱二去）集中在同一个反应容器内完成。随着时代脚步的发展，炼钢工序的多种功能逐渐实现了解析优化，例如脱硫在铁水预处理时完成、脱磷和脱碳在有条件时也分别在不同的反应器中单独进行。对这些功能单一性冶金反应器的设计和解析时，李远洲教授的研究成果也可以从单元过程、单元操作的方式来运用。

最后，还应该对冶金工业出版社的编辑表示深深的谢意。由于编辑同志默默无闻的辛勤劳动，祖国冶金学著作的花圃中又增添了一朵亮丽的鲜花。

应作者之嘱，谨以此拙劣的笔触写了一点粗糙的话，聊以塞责，请作者和读者见谅。

北京科技大学

曲英

于丁酉岁暮

前 言

我的工作经历如下：

1954~1979年，北京钢铁设计研究总院（现中冶京诚工程技术有限公司）和马鞍山钢铁设计研究院（现中冶华天工程技术有限公司）；

1980~1987年，华东冶金学院（现安徽工业大学）；

1987~1990年上海第二冶金专科学校（现上海应用技术学院）；

1991~1997年，上海东沪高等职业技术学校（现上海第二工业大学）。

本书内容源自我的工作经历以及同事、学生及朋友们的帮助。

是我在北京钢铁设计研究总院和马鞍山钢铁设计研究院参加的设计和工厂试验，使我学到了氧气转炉炼钢设计，在此还要感谢重庆院、武汉院的朋友馈赠我的有关设计资料。书中的射流与熔池的相互作用、供氧制度、喷枪和炉型设计以及转炉中的热工控制等，无一不是设计院惠及的知识（包括资料和工作体会）。

如果说，我对射流的兴趣来自设计工作的需要，但到马鞍山钢铁设计研究院工作后，特别是参加了马钢底吹氧气转炉的试验研究并研读了攀枝花钢铁研究所做的水模实验后，便使我真正感知到射流与熔池的相互作用对冶金的重要性，从而写出底吹氧气转炉的熔池运动动力学的文章。这要感谢马鞍山金属学会和《钢铁》编辑部朱文佳同志的大力支持，文章得以发表在《钢铁》1980年第3期上，并得到中美建交后1980年美国派来访华的第一个科学技术代表团成员中冶金专家张一中先生（美籍华人）的赞许，认为“它发现了该领域的金矿所在地”，并建议我写一本氧气底吹转炉熔池运动动力学的书，他愿将它翻译介绍到美国，为中国增光，冶金工业出版社对该书立了项。

但遗憾的是，那时我已调往华东冶金学院工作，一边要任教、一边要搞科研，一者我没有写书的精力，二者自己也可以做水力学模拟实验

和中频感应炉的热模拟实验了，需要学习和积累更多知识才能不辜负大家的期望，故只能暂时把它放下。

不过张先生的鼓励一直鞭策我进行射流与熔池相互作用的各项实验研究，所以才有本书的第2章。参加这部分实验研究的有黄永兴、何一平、刘晓亚老师以及学生张萍、杨尚宝等。应当说模型和喷头的制作、仪表的维护和使用没有黄、何两位老师的指导，是不可能完成的，而测试数据则是学生们尽心尽力的结果，在此深表感谢。我在华东冶金学院工作的七年中，除了完成射流与熔池相互作用的各项实验研究之外，还完成了部分热模拟实验和冶金热力学和动力学方面的研究，和我一起从事这方面工作的有黄永兴、何一平、李国经、沈新民、范鹏老师以及参与双流复吹氧枪毕业设计的学生斯卫国等。参与脱磷、石灰溶解实验的学生有孙亚琴、李晓红、王建军等，而一直与我一起在华东冶金学院完成双流复吹氧枪的水模实验、喷枪设计（王建军也参加了）到在上钢三厂进行工业性试验的则是张萍，在此深表感谢。

应当说，当时在华东冶金学院由于实验经费和设备的限制，射流与熔池相互作用的实验，我也只能做到宏观动力学和实用为止，故后来就转而去学习研究冶金反应热力学和动力学方面的东西，如脱磷反应的热力学和动力学及固体石灰在渣中的溶解动力学……原本只是向前人学习如何去做这些实验，目的只在验证前人的结论，没想到发现它们在理论上还有不足，公式的误差还较大，故才有在本书第1章中对氧化铁活度系数（ γ_{FeO} 、 $\gamma_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$ ）和 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值的见解及对建立氧气转炉吹炼前、中、后期渣中（FeO）含量控制模型的意见。这些除了自身的努力外，更多的是文献资料的启迪和帮助，如刘越生教授测试的氧分压与（FeO）含量的关系图，就给了我建立 γ_{FeO} 回归方程很大的支持，从而获得了这方面较他人精度更高的公式。应当说，它也是在他人试验数据的基础上的继续攀登的结果，没有他人的公式和数据，也就没有李远洲的公式，所以非常感谢他们。

第4章脱磷是源于在华东冶金学院教学和指导学生毕业论文的需要而怀着对 Turkdogan 和 Healy 等大师们崇敬的心情去学习的结果。开始，

我们做实验的方法和处理实验结果的模式也是沿着他们的路走的，只是随着学习的深入，才发现他们的路有问题；这得感谢华东冶金学院和上海第二冶金专科学校图书馆提供了国内外脱磷书籍和期刊，使我看到了Turkdogan和Healy等权威公式不足之处；而指引我去改进它的则是炉渣的键化学和炉渣的矿相结构知识。这里要特别感谢华东冶金学院的俞盛义老师帮助制作实验炉渣的矿相试片和拍摄矿相照片，马钢钢研所的金淑筠工程师帮助对渣样不同矿相区进行电子扫描分析。如果没有他们的这些帮助，理论的设想就得不到证明，也就难以令人信服。特别要说的是，通过实验，有了对 P_2O_5 在渣中的矿相结构随碱度而变化的认识，并证实这个认识是正确的以后，才产生了一系列的建议、想法，如最佳化初渣、最佳化终渣、脱磷的碱度公式及最佳化脱磷工艺和最佳化造渣工艺等。

可以说20世纪70年代对碱性氧气转炉造渣理论和工艺的试验研究热潮也把我卷了进来，从研究石灰的溶解进而深入研究转炉造渣理论和工艺。为了教学和科研需要，将学生领到这一学科发展的前沿，在华东冶金学院与从东工（现东北大学）刚毕业的研究生范鹏老师一起开始了固体石灰在转炉渣中溶解速度的第一个实验，参加了沈阳国际学术交流会议，增长了见识，并由此使我去进一步收集当时许多国内外造渣方面的资料，特别是首钢钢研所翻译的那篇炉渣熔剂对我造好炉渣的启发最大，在此深表感谢，是它们丰富了造渣这章的内容。

我于1987年下半年调上海后又带领学生李晓红和1987年参加脱磷实验的孙亚琴老师回到华东冶金学院去完成我在华东冶金学院接受的冶金部课题，而再次与沈新民老师一起去做比范鹏老师那次碱度更高的石灰溶解动力学实验及脱磷动力学实验，这一实验研究丰富了本书脱磷和造渣两章的内容。

在此我还要说，我能写成本书，我能有一些科研成果，都是因为华东冶金学院培养了我。打倒“四人帮”后，当时华东冶金学院的党委书记吴湘君、副校长李川及教研室主任李大经的关心、支持，来自五湖四海的老师们的友善，使我在华东冶金学院的七年得以教、学相长，并得

以完成一个接一个的射流与熔池交互作用和各种转炉炼钢的水模实验、完成与马钢合作的顶底复吹试验、与上钢三厂合作的双流复吹顶枪试验，并把他们发表在院刊和《钢铁》《炼钢》《化工冶金》及《江西冶金》等国内知名刊物上。这些都收入本书的有关章节中，这都是七年华东冶金学院支持帮助的结果。

还得提到的是我的知识和资料积累，除了来自参加的各种学术会议，还与我工作过的各单位的图书馆、情报室分不开，尤其要感谢华东冶金学院图书馆的管理员。总之是华东冶金学院给我这个老兵新传打下了创新的基础。所以我要感谢华东冶金学院，感谢马钢，当然更离不开冶金部科技司的课题支持，这里要感谢周传典副部长、徐炬良司长、胥昌弟司长、李一中工程师等，他们能在当时的情况下支持我完成一些项目，使我十分感激。

我于1987年调上海第二冶金专科学校（二冶专）工作后得到了杨子宁校长和上海冶金局方汉庭总工程师的支持，先后在原上钢五厂、上钢三厂，随后又在甘肃酒钢进行了造渣、脱磷试验研究，并都取得很好效果，它验证了理论，丰富了理论，使本书内容得以丰富和有根可寻。在此还要感谢原上钢三厂的史荣贵总工和分厂温昌才厂长、汤克庆工程师等，及原上钢五厂的邵维裘总工、张怀珺工程师等，酒钢公司炼钢厂的龙腾春总工和公司科技部的傅兵副部长等。没有他们的精心组织、协作和工人的辛勤劳动，是不可能取得这些试验成功和本书供氧制度、造渣工艺和热工控制等章节中那些生动、具体的事例和理论应用的效果。还应当说，这些知识的积累与早期在北京钢铁设计研究总院工作时参加的唐钢侧吹转炉实验、OLP法试验和在马鞍山工作参加的马钢各种转炉炼钢试验所得的教益分不开，特别是马钢的张叔和总工等对我在马工作期间对顶底复吹转炉研究的支持和帮助分不开，在此一并表示感谢。

另外，作者能有对碱性氧气转炉气化脱硫最佳化的认识，一要感谢学生林建国和马洛文对实验数据的精心处理，才可能发现脱硫的起跃点和气化脱硫的最佳碱度值、(FeO)含量；二要感谢王国忱在首钢对气化脱硫的研究，启迪了作者从理论和实践两方面去深入研究。

本书的脱磷脱硫最佳工艺、造渣最佳化工艺、转炉的热工控制和计算机在氧气转炉中的应用，则是得益于我 1987 年下半年调上海工作后，学校和冶金局的支持，上钢三厂、五厂的合作，工人师傅的协作以及同学们尽心尽力的参与，在此深表感谢。在此还应着重提到：(1) “氧气转炉静态控制模型”的计算机程序是上海二冶专 88 届毕业同学马洛文完成的，后来东沪高职的老师郑佳铭稍作了修改。(2) 回归分析程序与数据库程序关联的模型也是马洛文同学完成的，他帮助我完成了许多回归分析，找到了与试验结果最符合的物理（理论）模型的回归方程式，使理论得以分层次的体现。(3) 艾明同学帮助编写了造渣的线性规划模型程序，顶枪射流冲击熔池的深度、平面面积和凹坑面积的程序及各类底枪的设计计算程序。(4) 最后要说明和感谢的，也是本书功劳最大的孙亚琴副教授。她是 1987 年华东冶金学院毕业时我指导作脱磷论文的学生，我调上海时，她也分到上海二冶专当老师，她参与了我调上海后的各个实验和数据处理等工作，并共同发表论文。在我 2008 年骨折又中风后，她接手了本书未完的工作，我当时只完成了第 1~10 章的初稿，且它们中还有相当部分只是手稿，甚至残缺，而第 11、12 章的内容则大多是手稿，甚至有些杂乱，我就把这样一个烂摊子交给了孙亚琴。她在身负教学任务和照顾家庭的双重重担下完成了第 1、3、5、7、8、11、12 章的电子文稿和第 2、4、11、12 章的编排工作，只是 2010 年，她儿子身患重症后才把第 2、5、6、9、10 章的书稿交我另请迪奈美公司的员工协助完成，最后由孙亚琴老师汇总后于 2011 年底交给了出版社初审。本想随后的补全和校对工作由孙亚琴去完成，无奈她已实在无力再帮助我了，我只得从 2012 年元旦后着手整理 2.3 节，学习用左手写字，上电脑审校书稿（包括文字、图、表和公式）及查找、补充尚缺的图、表和参考文献及内容，同时各方请人帮忙。应当说，孙亚琴在工作十分繁忙、家庭十分困难的情况下，仍接受了我 2012 年国庆时交给她的第 11 章的修补工作，因这部分的修改工作是他人不能取代的，我只有麻烦她了，再次说声谢谢。还要说的是第 2、8 两章的图，基本上是王建英和李星稀在 2013 年元旦回国休假期间突击扫描完成的；有少部分文字是李晓东整理的。

这里还要感谢夏谦从2012年元旦直至2013年春节前夕,在工作繁忙中还抽出时间来帮助做了大量文字、公式、图表及内容的修改和补缺工作(如2.3节的电子版文稿,及第1、3、4、6、8、12各章的修补)。在此要着重感谢上海第二工业大学学生处的经晓峰和陈勇老师于2013年春节前派来的陆韵吉、梁尚云等六位同学突击完成了第8、10、12三章的遗漏部分;特别是春节后,陆、梁两同学还每周轮流来帮忙,直到7月8日为止。这里还要特别感谢上海第二工业大学退休办的王善为老师及陆、梁两同学在相处的这段日子里,教会了我一些电脑修改公式、图表的知识。

最后,要向一直支持我、帮助我、鼓励我的曲英教授表示感谢,因为没有他的支持,我不可能执着去完成本书。同时我也要感谢萧泽强教授的支持和信任,是您和曲英教授当年在筹划《冶金反应工程学丛书》时把这本书的光荣任务交给了我,并鼓励我坚持完成。

转炉炼钢过程解析与控制涉及的知识非常丰富,本书谨作抛砖引玉,为读者提供参考,希望我国炼钢人能取得更大的成果!

李远洲

2013年7月12日

编辑的话

首次见到书稿，第一反应就是惊讶，书稿的内容风格与十多年前我社出版的《冶金反应工程学丛书》的那些书相近。读到当年曲英教授、萧泽强教授曾向李远洲教授约稿，也就不觉得奇怪了，而只剩下当年这本书没能按期出版的遗憾。

细读书稿，更为书中丰富的内容所震撼。作者李远洲教授将对熔池运动动力学的深刻理解，融入转炉炼钢的各个冶金功能和过程控制，书中直观地反映十多分钟的吹炼时间里，转炉内部发生的各种变化。

射流与熔池相互作用的熔池运动动力学，将动力学的反应速度和热力学的反应平衡程度，与转炉冶炼的造渣、供氧、供气和冶炼容器关联在一起。它不仅是解析转炉炼钢过程，更重要的是它要让生产者控制冶炼过程，使冶金反应趋于平衡，从而获得优质低耗的效果。因此，冶金专家张一中先生称熔池运动动力学是“这个领域的金矿所在地”，并称李远洲教授“发现了这个领域的金矿所在地”。

本书围绕熔池运动动力学展开，这是一本把转炉炼钢从技艺变成学问的著作。炼钢就是炼渣，而炼渣就是炼 (Fe_1O) ，炼 (Fe_2O) 则是控制氧在炉渣和钢水中的合理分配，而要做到氧的合理分配就必须掌控氧气射流与熔池的相互作用。书中通过文献分析和工业实验，探讨和量化冶炼过程的最佳化参数。魏寿昆先生1993年曾在给李远洲教授“最佳化脱磷和造渣工艺及其理论”项目的冶金科技进步奖评审书中说“该项目的全部论文达到或接近国际先进水平，属国内领先”。

然而，这不是一本容易写出来的书。李老师在书里“推荐的理论和公式及最佳化工艺，不论是出自作者还是名家，都一律经过科学论证、评估、实际应用比较，乃至对各家之说和公式的精度进行方差分析后才择优推荐”，这也就理解李老师所说的“不得不把原本的编著，变成了边写作边进行研究，故而拖延了交稿时间，再加上为了证明提出的公式、理论、模型、方法等的正确，和把创新思维传递给读者，又不得不增大了文字篇幅。”“本书提出的公式和理论是更符合实际的，是可派上用场的。”

为了核对书稿内容，责编多次查阅20世纪50~80年代国外经典文献原文和近二三十年的国内论文，由衷地钦佩前人在冶金过程动力学方面所做过的细致的研究工作，更为我国冶金工作者所取得的成就感到骄傲。李老师多次提到，他只希望这本书能写出水平，为国争光。尤其是得知李老师是在中风后仍坚持十余年完成科研与写作

工作,更加敬佩李老师数十年来的执著。李老师是我国炼钢人奋发进取、求实创新精神的写照。

这本书也不是一本容易出版的著作。书中对动力学、热力学等冶金理论的深度分析,尽管解释过程已经很是详细,在编辑出版中仍然感到难以把握。书中引用了近千条参考文献,有的文献没有公开发表过,不够规范且难以查找;个别的文献经查阅原文发现被几次转录引用后有误;不同的文献作者采取的写作方式也不同,增加了理解难度。编辑出版时,尽力按照国内炼钢界的通用方法和读者阅读习惯做了统一规范,尽力做了校核。不妥之处,望李老师(以及参与者)和读者谅解。

近年转炉趋向大型化,自动控制程度提高,生产节奏加快,加上炉外精炼技术迅速发展,转炉功能也有转变。为此,原稿中包括像转炉设计、物料平衡和热平衡实例、计算机控制等内容没有完全刊印。此外,由于李老师身体原因,大量书稿委托他人录入,个别章节内容有缺失或错误。本书难以反映作者对氧气转炉炼钢过程解析和控制所做的全部工作,为便于读者查阅,作者李远洲教授将部分不成熟的原稿和部分学术论文托付本书责编,可提供给有兴趣的读者可向责编索取(forrest_liuxf@sohu.com)。

读者通过阅读本书,能看到李远洲教授从对经典文献的顶礼膜拜,到质疑,到修正,有实验数据和现场数据的验证,这种科学研究的方法,值得提倡,令人敬重。责编同时在书中看到了冶金反应工程学在转炉炼钢中的应用和发展,深感冶金反应工程学意义重大。在炼钢工艺与设备不断取得重大进展之际,不正是需要我们像李远洲教授一样潜下心来,看一看熔池中同时在发生的剧烈变化吗?这其中蕴含着巨大的宝藏,等待炼钢专业人士来开发。

本书得到国家科学技术学术著作出版基金资助,萧泽强教授、王新华教授、张福明教授分别为本书撰写了专家推荐意见。在此,向三位专家和国家科学技术学术著作出版基金委员会表示感谢。

感谢曲英教授应作者之邀为本书作序。曲英教授在序言中表达了对李远洲教授的钦佩,客观中肯地介绍了李远洲教授所取得研究成果的价值和意义,让我们更全面地了解了这本书的来龙去脉,由衷地敬佩我国冶金人筚路蓝缕、砥砺前行的奋斗精神。感谢曲英教授对编辑出版工作的肯定和鼓励。

责任编辑:刘小峰

目 录

1 氧气转炉炼钢反应特点	1
1.1 炼钢反应的宏观结构（渣、金属液、气相的乳化与混合）	1
1.1.1 氧气转炉炼钢过程的基本特征	1
1.1.2 泡沫渣的生成与乳化反应	3
参考文献	6
1.2 熔池的氧化	7
1.2.1 熔池氧化过程的机理	7
1.2.2 熔池的传氧方式	10
1.2.3 氧流在炉渣和金属中的宏观分配	16
1.2.4 炉渣的氧化性及其影响因素	19
参考文献	20
1.3 金属滴在铁质渣中的氧化行为	20
参考文献	26
1.4 金属滴中碳还原渣中氧化铁的动力学	26
1.4.1 金属滴中碳还原渣中 FeO 的动力学分析	28
1.4.2 S>0.01% 时的 FeO 还原模型	36
1.4.3 低 [S] 含量下的 FeO 还原模型	38
参考文献	41
1.5 炉渣的氧化性状态	41
1.5.1 氧化铁活度	42
1.5.2 渣中 Fe^{3+}/Fe^{2+} 比及其变化规律	65
参考文献	85
1.6 控制炉渣氧化性的因素和手段	87
1.6.1 影响炉渣氧化性的因素	87
1.6.2 炉渣 (TFe) 的控制模型	93
参考文献	100
1.7 如何更好地创建 (TFe) 控制模型	101
1.7.1 吹炼前、中期控制炉渣 (TFe) 含量的第一方程和第二方程如何建立	101
1.7.2 吹炼后期和终点控制炉渣 (TFe) 含量的第一方程和第二方程 如何建立	103
1.7.3 全程控制炉渣 (TFe) 含量的模型如何建立	104
参考文献	105

1.8 炉渣氧分压、氧化铁活度和 TFe 含量的检测及新得出的 $\lg P_{O_2}$ 公式	105
参考文献	109
附录 Fe^{3+}/Fe^{2+} 和 Fe_2O_3/FeO 的回归分析结果	110
2 射流、相似原理和射流与熔池的相互作用	118
2.1 射流	119
2.1.1 亚音速湍流自由射流	119
2.1.2 具有伴随流的亚音速湍流自由射流	124
2.1.3 超音速湍流自由射流	129
2.1.4 具有伴随流的超音速湍流自由射流	139
2.1.5 非工况下超音速湍流自由射流	143
2.1.6 具有中心孔的四孔喷枪的射流特性	147
2.1.7 喷头结构和操作参数对射流特性的影响	151
2.1.8 氧气射流在实际转炉中的情况	157
2.1.9 底吹射流	160
参考文献	166
2.2 相似原理	168
2.2.1 实验研究的任务和相似原理的价值	168
2.2.2 相似的定义和概念	168
2.2.3 单值条件	170
2.2.4 流动的力学相似	171
2.2.5 黏性流体流动的力学相似准数	172
2.2.6 量纲分析法	185
2.2.7 相似准数在实验研究中的应用	190
参考文献	195
2.3 射流与熔池相互作用下的熔池运动动力学	195
2.3.1 顶吹氧气射流冲击熔池深度的实验研究	196
2.3.2 底吹氧气转炉的熔池运动动力学	236
2.3.3 顶吹、底吹和复吹转炉熔池搅拌强度的实验研究	244
参考文献	253
3 硅、锰的氧化反应	256
3.1 硅和锰在熔池中的氧化	256
参考文献	260
3.2 锰氧化反应平衡研究	260
3.2.1 锰在铁液和 Fe_1O -MnO 渣系间的平衡分配	260
3.2.2 锰在铁液与 FeO -MnO- MO_x ($MO_x = PO_{2.5}, SiO_2, Al_2O_3, MgO, CaO$) 三元熔渣间的平衡分配	265

3.2.3 锰在铁液和多元渣系间的平衡分配	269
参考文献	279
3.3 硅、锰氧化还原动力学	281
3.3.1 锰的氧化反应动力学	281
3.3.2 锰的还原反应动力学	290
3.3.3 硅的氧化反应动力学	299
参考文献	305
3.4 硅、锰在氧气转炉中对冶金特性的影响	305
3.4.1 铁水硅含量对脱磷的影响	306
3.4.2 铁水含锰量对造渣的影响	313
3.4.3 铁水含锰量和渣中 MnO 含量对脱磷的影响	314
参考文献	323
3.5 元素的同时氧化和反应偏离平衡程度	324
3.5.1 元素的同时氧化条件和炉渣一次氧化产物中的氧在元素之间的分配	324
3.5.2 元素 i 的氧化过程偏离平衡的程度	327
参考文献	330
4 脱磷反应	331
4.1 磷的氧化反应热力学	331
4.1.1 磷的氧化条件	331
4.1.2 磷与硅、锰的耦合氧化	333
4.1.3 碳和磷的选择性氧化	336
参考文献	337
4.2 磷容量及其在脱磷中的地位	338
4.2.1 磷容量	338
4.2.2 L_P 与 C_P (或 $C_{P_{O_4^{3-}}}$) 等因素的关系	341
参考文献	342
4.3 磷酸盐容量 $C_{P_{O_4^{3-}}}$ 的实验研究	342
4.3.1 熔剂成分对 $C_{P_{O_4^{3-}}}$ 的影响	343
4.3.2 氧分压对 $C_{P_{O_4^{3-}}}$ 的影响	347
4.3.3 温度对 $C_{P_{O_4^{3-}}}$ 的影响	347
参考文献	348
4.4 磷的活度系数 f_P	349
参考文献	349
4.5 脱磷的氧分压 P_{O_2}	349
参考文献	351
4.6 磷在渣和碳饱和的铁液间的平衡分配比 (L_P)	351
4.6.1 炉渣成分的影响	351

4.6.2	P_{O_2} 的影响	356
4.6.3	温度的影响	356
4.6.4	L_p 的半经验式	358
	参考文献	360
4.7	钢液氧化脱磷的平衡研究	361
4.7.1	脱磷平衡经验公式	361
4.7.2	温克勒-启普曼经验式	361
4.7.3	巴拉耶瓦经验式	362
4.7.4	李远洲对脱磷分配比表达式的见解	367
4.7.5	李远洲对 P_2O_5 活度系数 $\gamma_{P_2O_5}$ 表达式的见解	397
	参考文献	410
4.8	脱磷反应动力学	412
4.8.1	磷氧化反应动力学	412
4.8.2	冶金过程的弥散相(金属滴和渣滴或粉粒)与熔体(渣池和金属熔池)间的宏观动力学	422
4.8.3	钢渣乳化的去磷动力学	424
4.8.4	喷粉去磷的动力学	425
	参考文献	432
4.9	顶底复吹转炉脱磷最佳化工艺模型的探讨	432
4.9.1	试验条件	432
4.9.2	试验结果和讨论	433
4.9.3	小结	441
	参考文献	441
4.10	氧气转炉最佳化脱磷工艺模型的探讨	442
4.10.1	吹炼前期最佳化脱磷工艺模型	443
4.10.2	拉碳脱磷的控制模型	447
4.10.3	冶炼低碳钢的终点脱磷控制模型	452
4.10.4	优化炼钢工艺的微机智能系统初步方案	456
4.10.5	小结	459
	参考文献	459
5	脱硫反应	461
5.1	顶吹氧气转炉的脱硫行为	461
5.1.1	试验装置和条件	461
5.1.2	试验结果和讨论	462
5.1.3	小结	467
	参考文献	468
5.2	顶吹氧气转炉的气化脱硫率和终点脱硫能力	468