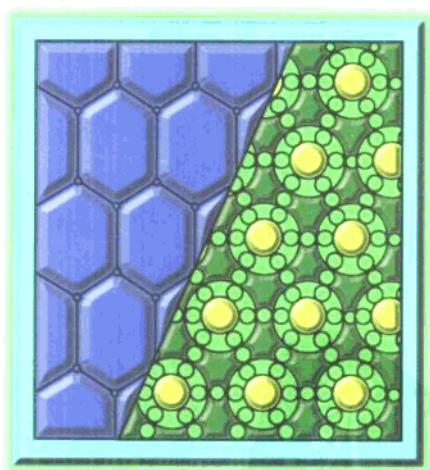


泡沫冶金熔体的 基础理论

吴铿 著



Fundamental Theory on
Melts of Bubble Metallurgy

冶金工业出版社

泡沫冶金熔体的 基础理论

Fundamental Theory on
Melts of Bubble Metallurgy

吴 铿 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2000

内 容 简 介

根据冶金领域有关泡沫研究工作的进展,本书提出了泡沫冶金学的概念。结合高炉、转炉、电弧炉和炉外精炼等工艺过程中出现的泡沫化现象,对其表面张力和界面反应现象进行了讨论。采用改进的高温旋转粘度计和拟牛顿流体的方法,测量了高温冶金熔体流变特性。试验证实,在外引气源的条件下熔体生成多面体泡沫;而在内生气源条件下熔体生成球状泡沫。对在这两种情况下泡沫稳定性的判断依据进行了讨论,并对泡沫化指数 Σ 的适用范围进行了分析。讨论了非牛顿流体的流变特性对泡沫化的影响并解释了泡沫化指数 Σ 在某些条件下不适用的原因。对内生气源引起的冶金熔体泡沫现象给出了定量的描述的方法。另外,介绍了关于熔融还原和泡沫铝有关的基础研究。

本书可以作为冶金、能源、化工等行业的工程技术人员,以及大专院校相关专业的教师、研究生和高年级本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

泡沫冶金熔体的基础理论/吴铿著. —北京:冶金工业出版社, 2000. 3

ISBN 7-5024-2526-8

I. 泡… II. 吴… III. 泡沫渣-火法冶金-研究
IV. TF111.17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 03272 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 赵培德 易文君 美术编辑 李 心 责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

北京源海印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2000 年 3 月第 1 版, 2000 年 3 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 6.25 印张; 167 千字; 189 页; 1-1000 册

15.00 元

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

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)

前 言

近年来,冶金熔体的泡沫化现象愈来愈引起冶金新工艺和新材料制备相关学科内研究人员的重视。由于人们在冶金熔渣泡沫化和泡沫金属领域进行了大量的研究工作,泡沫冶金学逐渐成为多学科相互渗透和交叉发展的边缘学科。它涉及力学、化学、化工学和冶金学等学科,目前发展势头很好,特别是在实际生产应用上取得了非常显著的成果。另一方面,也应该看到泡沫冶金熔体的理论研究还远远落后于实际应用,到目前为止,国内尚未见到有关这方面的专著。笔者根据十多年来在科研工作中积累的资料和心得撰写本书,目的是在这个新兴学科中抛砖引玉,以促进泡沫冶金学理论的迅速发展。

笔者于1982年至1984年在东北大学冶金物理化学专业从事和完成硕士论文工作期间,在杨祖磐教授指导下进行了含钛高炉渣的表面性能的研究。1989年至1994年在德国亚琛(Aachen)大学冶金所从事和完成博士论文工作期间,在古德纳(H. W. Gudenau)教授、达尔(W. Dahl)教授和杨天钧教授的指导下进行了熔融还原泡沫化现象的研究。在此对上述各位教授的指导表示衷心的感谢。

从1996年起至今,笔者在北京科技大学冶金学院与储少军教授合作进行了泡沫渣基础理论的研究。在此期间笔者对泡沫冶金熔体的理论有了较为深入的认识,并在研究方面取得了很大的进展。为此对储少军教授表示深切的谢意。

本书的主要内容是来自笔者的学位论文和指导研究生的论文,其中潜伟同志在其为完成硕士论文的工作期间,所进行的泡沫冶金熔体高温熔体流变学研究是很具有开创性的工作,这是非常值得称赞的。笔者在协助指导罗森鲍姆(H. Rosenbaum)和斯蒂芬(N. Stefnh)的硕士论文(Diplomarbeit)及指导潜伟的硕士论文期

间与他们进行了富有成果和愉快的合作,这些美好的回忆将保留在笔者的心中。

东北大学翟玉春教授提供了有关泡沫金属的参考资料,北京科技大学冶金学院牛强、林怡娴、王颖、谢良德、赵纪伟、梁志刚、张炳哲等同志也为本书提供了部分参考资料,在此一并鸣谢。

本书中涉及的许多研究工作都曾经得到国家自然科学基金委员会的资助,目前笔者关于泡沫冶金熔体内生气源发泡机理和泡沫流变特性的研究项目又获得国家自然科学基金委员会的大力支持。笔者在此表示最真诚的感谢。

笔者的父亲吴国懋教授对本书进行了审校,提出了一些宝贵的意见。笔者的妻子戴学斐博士多年来对笔者的研究工作给予了大量的支持。

由于泡沫冶金熔体涉及的内容非常广泛,加之笔者的专业知识面有限,很难对其内容进行全面的论述,书中有些论点不一定准确、全面,敬请读者指正。

吴铿 于北京科技大学

1999. 10. 30

目 录

1 概论	(1)
2 泡沫冶金熔体及泡沫冶金学概念的提出	(4)
2.1 泡沫冶金熔渣	(4)
2.1.1 钢铁冶炼过程的泡沫渣	(4)
2.1.2 高炉泡沫渣	(5)
2.1.3 平炉泡沫渣	(7)
2.1.4 转炉泡沫渣	(7)
2.1.5 电弧炉泡沫渣	(8)
2.1.6 铁水预处理和炉外精炼的泡沫渣	(9)
2.1.7 熔融还原的泡沫渣	(10)
2.2 泡沫金属	(11)
2.2.1 泡沫金属的特点	(11)
2.2.2 生产泡沫金属的工艺方法	(12)
2.2.3 泡沫铝的研究	(16)
2.3 熔钎冶炼过程的泡沫	(17)
2.4 泡沫冶金学概念的提出	(19)
2.4.1 泡沫冶金学的发展	(19)
2.4.2 泡沫冶金学	(21)
3 泡沫基础理论概述	(23)
3.1 液体中气泡特性	(23)
3.1.1 气泡的形成	(23)
3.1.2 气泡在液体中上浮	(25)
3.2 乳化液和泡沫的分类	(26)
3.3 冶金熔体中的泡沫	(29)
3.3.1 泡沫的形成	(29)
3.3.2 泡沫的稳定性	(30)
3.4 泡沫流变学	(31)

3.4.1	流变学基础	(31)
3.4.2	泡沫流变学	(32)
3.5	泡沫的传输性能	(34)
3.5.1	泡沫的能量传输	(34)
3.5.2	泡沫的热量传输	(34)
3.5.3	泡沫的质量传输	(36)
3.5.4	界面湍流和马拉戈尼(Marangoni)效应	(37)
3.6	冶金熔体的泡沫化和稳定性	(38)
3.6.1	影响泡沫化的因素	(38)
3.6.2	冶金熔体泡沫的稳定性	(39)
4	泡沫冶金熔体的表面特性	(40)
4.1	表面(界面)张力及影响因素	(40)
4.1.1	表面能和表面张力	(40)
4.1.2	影响表面张力的因素	(41)
4.2	冶金熔体表面(界面)张力的测定方法	(42)
4.2.1	最大气泡压力法	(43)
4.2.2	座滴法	(44)
4.2.3	座滴法的误差分析	(45)
4.2.4	用B-A表计算体积公式的讨论	(46)
4.3	含氧化钛熔渣表面张力测定	(47)
4.3.1	座滴法的选定和垫片材料	(48)
4.3.2	试验设备	(48)
4.3.3	垫片的确定和渣样中气体的排出	(49)
4.3.4	预备试验	(50)
4.3.5	试验结果	(51)
4.3.6	试验时熔渣中钛的价态	(53)
4.4	熔渣与TiC, TiN和Ti(C,N)的界面性质	(55)
4.4.1	试验方法	(55)
4.4.2	试验结果	(55)
4.5	含钛熔渣界面现象结果的分析和讨论	(57)
4.5.1	加合规则的适用性	(57)
4.5.2	用总离子矩的观点分析试验结果	(59)

4.5.3	钛的化合物对泡沫渣的影响	(60)
4.6	液态金属的界面张力	(62)
4.7	本章小结	(64)
5	泡沫冶金熔体的流变特性	(66)
5.1	牛顿流体与非牛顿流体	(66)
5.2	冶金熔体的粘度	(68)
5.2.1	牛顿粘性定律	(68)
5.2.2	冶金熔体的粘度测定方法	(69)
5.2.3	冶金熔体的粘度	(70)
5.3	一种测定冶金熔体流变特性的方法	(71)
5.3.1	拟牛顿流体原理	(71)
5.3.2	实验装置	(72)
5.3.3	仪器常数和系统误差	(73)
5.4	试验及其结果	(75)
5.4.1	试验设备及试验过程	(75)
5.4.2	试验结果和数据处理	(77)
5.5	分析和讨论	(81)
5.5.1	冶金熔渣	(81)
5.5.2	铝熔体和硼酸盐	(84)
5.5.3	影响熔体流变特性的因素	(84)
5.6	本章小结	(86)
6	泡沫冶金熔体的分类和稳定性	(88)
6.1	泡沫冶金熔体的冷态模拟实验	(88)
6.1.1	多面体泡沫实验	(88)
6.1.2	球状泡沫实验	(90)
6.2	泡沫冶金熔体的高温模拟实验	(90)
6.2.1	铁水熔池终还原的泡沫渣	(90)
6.2.2	多面体和球状泡沫渣的高温形态	(93)
6.2.3	熔融铝合金的发泡实验	(96)
6.2.4	冶金熔体中泡沫分类标准的探讨	(96)
6.3	泡沫冶金熔体的稳定性和衰减	(97)
6.3.1	泡沫冶金熔体的稳定性	(97)

6.3.2	泡沫衰减动力学	(98)
6.4	冶金熔体发泡的性能	(99)
6.4.1	泡沫化指数和泡沫寿命	(99)
6.4.2	平均泡沫寿命	(100)
6.5	泡沫化指数 Σ 和其影响因素的探讨	(102)
6.5.1	泡沫化指数 Σ 守常普适性的探讨	(102)
6.5.2	影响泡沫化指数的因素	(104)
6.6	本章小结	(105)
7	外引气源冶金熔渣的发泡性能	(106)
7.1	试验装置和预备试验	(106)
7.1.1	试验装置	(106)
7.1.2	试验原料准备及方法	(107)
7.1.3	预备试验	(108)
7.2	试验结果和分析	(109)
7.2.1	泡沫化指数适用性的再讨论	(109)
7.2.2	添加物对泡沫化的影响	(112)
7.3	熔渣的流变特性与泡沫化的关系	(115)
7.3.1	熔渣流变特性和发泡特性的方程	(115)
7.3.2	熔渣流变特性和泡沫化的关系	(115)
7.3.3	泡沫化指数守常的条件	(118)
7.3.4	粘性因子数值比与发泡能力的关系	(119)
7.4	冶金熔体的流变方程与泡沫化方程	(120)
7.4.1	牛顿公式和泡沫化方程的对比	(120)
7.4.2	流变方程和发泡性能方程的类比	(122)
7.5	本章小结	(123)
8	内生气源硼酸盐熔体的发泡性能	(125)
8.1	内生气源发泡过程的方程	(125)
8.1.1	发泡参数和消泡参数	(125)
8.1.2	内生气源平均发泡寿命和强度的定义	(128)
8.1.3	平均发泡寿命和发泡强度的计算式	(129)
8.2	试验条件	(131)
8.3	数据处理和计算程序框图	(132)

8.4	计算结果和分析	(134)
8.5	发泡方程的收敛性和简化形式	(141)
8.6	内生气源引起冶金熔体泡沫化过程的定量描述 ..	(144)
8.7	本章小结	(146)
9	铁水熔池熔融还原发泡过程的基础研究	(147)
9.1	冷态模拟实验	(147)
9.1.1	冷态模型中流体的相似性	(147)
9.1.2	实验设备和实验过程	(149)
9.1.3	冷态实验结果	(149)
9.2	热态模拟实验	(153)
9.2.1	实验设备和实验过程	(153)
9.2.2	热态实验结果和讨论	(154)
9.3	本章小结	(160)
10	铝合金熔体发泡过程的基础研究	(162)
10.1	发泡过程的工艺参数的研究	(162)
10.1.1	试验和发泡效果评价	(162)
10.1.2	试验结果	(164)
10.1.3	分析和讨论	(165)
10.2	增粘过程的基础研究	(168)
10.2.1	搅拌扭矩的测定方法和试验过程	(168)
10.2.2	试验结果和讨论	(169)
10.3	由搅拌扭矩研究流变特性	(174)
10.3.1	牛顿流体的搅拌扭矩和转速的关系	(174)
10.3.2	试验结果和讨论	(178)
10.4	本章小结	(180)
	参考文献	(182)

1 概 论

冶金过程中的泡沫渣现象已越来越引起人们的重视。在转炉炼钢过程中,适当的泡沫渣有利于反应顺利进行,而过多的泡沫渣则会产生溢渣喷溅等不利影响。电弧炉冶炼过程中,熔化期和氧化期的泡沫渣有利于保护电极和耐火材料,电弧炉还原期也需要较多的泡沫渣。在炼铁方面,高炉冶炼钒钛磁铁矿的泡沫渣曾是整个工艺过程的限制性环节,熔融还原工艺中对泡沫渣的抑制,已为众多研究者重视。随着对产品质量要求的提高,炉外精炼技术已成为获得高质量产品的必要手段,而在炉外精炼过程中(如炉外脱硫和LF精炼脱气等工艺)同样也会遇到熔渣发泡现象。

在一种新兴功能材料-泡沫金属材料的制备工艺中,向金属熔体加入增粘剂、发泡剂等能生产出铝基、锌基的泡沫金属材料。这种用熔融法生产的泡沫金属材料已经成为促进新兴功能材料商业化的重要手段之一。

综上所述,人们对气泡-熔体或液滴-熔体系统的研究越来越感兴趣。同时也认识到,现代冶金过程必须研究熔体中泡沫的行为。从目前国内外的实际情况看,冶金熔渣泡沫化和熔融法生产泡沫金属的实践已超前于理论研究,因此许多关于熔体泡沫化的基本理论和不同冶炼过程中发泡的机理等都亟待进一步探讨和研究。

冶金过程中泡沫化现象的研究不仅涉及冶金物理化学和冶金传输原理,还涉及流变学和胶体表面化学。随着人们对冶金过程泡沫化现象研究的不断深入,泡沫冶金学作为冶金学的一个分支逐渐发展起来。泡沫冶金学一方面利用传统的物理化学和传输原理的方法研究冶金过程中的泡沫化现象(如熔体的表(界)面张力和粘度、泡沫熔体的传热和传质),另一方面是引入流变学中的一些概念和研究方法来解决泡沫冶金熔体问题。由于在冶金工艺

过程中要进行渣-金分离和除去有害元素,要求冶金熔体在高温冶炼条件下应有良好的流动性。当冶金熔体中没有固体悬浮物且过热度较高时,熔体可以作为牛顿流体;而当熔体中存在固体悬浮物、复杂的阴离子团且熔体的过热度较低时,熔体是非牛顿流体。熔体的流变特性发生变化后,熔体的一些物理性质也会随之变化。比如对于牛顿流体在温度和成分不变时,表观粘度和实际粘度相同;而非牛顿流体在此情况下,表观粘度和实际粘度是不同的,实际粘度随剪切应力变化。流变特性发生变化将导致冶金熔体泡沫稳定性的改变,这将是本书中讨论的一个重点问题。

冶金熔体中的泡沫化现象较为复杂,形成泡沫的气源可以分成外引气源和内生气源。所谓外引气源是指吹入熔体中的气体,包括惰性和非惰性气体,如 N_2 、Ar、 O_2 等。内生气源是指在高温下,熔体中发生化学反应(如分解反应和还原反应等)所产生的气体。前人通过试验发现,泡沫有两种形式:多面体泡沫(或称干泡沫)和球状泡沫(或称湿泡沫)。冶金熔体中由外引气源产生的泡沫为多面体泡沫;而由内生气源产生的泡沫为球状泡沫。在一定参数条件下,外引气源引起的泡沫增长将保持动态平衡,到达一个稳定的高度,即泡沫的高度和供气速率之间存在一定的关系;而内生气源产生的气体量随时间而变化,泡沫高度随时间而变化,其变化曲线类似于正态分布曲线。内生气源引起的整个发泡过程是生成和消亡的动态非平衡过程。建立判断冶金熔体中不同气源产生的泡沫稳定性判据,是本书的第二个重点问题。

美国弗吕汉(Fruehan)教授将泡沫化指数 Σ 引入冶金熔体的研究,这对推动定量描述冶金熔体的泡沫化过程起到了很大的促进作用,它被亚洲的一些冶金学者在研究冶金熔体的泡沫化现象时较为广泛地应用。但由于冶金熔体内生气源形成泡沫的稳定性是随时间变化的,泡沫化指数显然不能应用于这种情况。另外,当冶金熔体的流变特性发生变化时,泡沫化指数适用的范围也应进行深入地讨论。关于泡沫化指数的普适性和内在原因是本书讨论的第三个重点问题。

制备泡沫金属的方法很多，所涉及的领域非常广泛，本书只对用熔融金属中发泡法制备泡沫金属的情况进行了讨论。因为用其他的方法只是最后得到固体泡沫金属的产品，而在生产过程中不涉及泡沫冶金熔体，故不在本书中讨论。冶金熔体凝固时涉及传热和传质过程，凝固过程会引起熔体的流变特性发生变化。通常把凝固过程看成一个独立的领域，故在本书中只讨论具有较好流动性的过热度较高的冶金熔体。

2 泡沫冶金熔体及泡沫冶金学概念的提出

在冶金过程中出现泡沫化的现象已经引起国内外学者的广泛重视,最早是平炉的泡沫渣,然后在转炉、高炉、熔融还原、铁水预处理、炉外精炼、电弧炉等各种冶金工艺过程中都出现过不同程度的泡沫渣现象,即熔体泡沫化的现象遍及冶金过程的各个领域,对熔体泡沫化现象的研究近年来已成为冶金领域一个较为热门的课题。

2.1 泡沫冶金熔渣

2.1.1 钢铁冶炼过程的泡沫渣

早在1894年,埃文斯(Evans)就对平炉的炉渣发泡现象进行了描述。1950年拉桑(Larsan)和他的助手们在关于平炉冶炼的文章中对此现象也进行了讨论^[1,2]。LD转炉的出现和兴起,引起了人们对熔渣-金属-气体三相乳化和渣-金泡沫化现象研究的兴趣^[3,4]。对铁水预处理过程中和高炉冶炼钒钛磁铁矿时高钛渣所产生的泡沫化现象和电弧炉及LF钢包炉埋弧渣工艺的应用研究等也取得了长足的进步^[5~7],特别是20世纪80年代中期以来,对铁浴法作为熔融还原原始还原反应器所引起的泡沫现象的研究,使泡沫渣的研究达到了一个高潮^[8~11]。表2-1给出了钢铁冶炼过程中形成泡沫渣的情况。

表 2-1 钢铁冶炼工艺过程中泡沫渣情况的对比

冶炼工艺	泡沫渣产生原因	泡沫渣的作用	控制程度
平炉过程	铁水中碳和渣中氧反应产生CO气体	恶化火焰向熔池热的传递,加剧对炉顶、炉衬的侵蚀	严格控制

续表 2-1

冶炼工艺	泡沫渣产生原因	泡沫渣的作用	控制程度
转炉过程	铁水中碳和喷入的氧反应产生 CO 气体, 熔渣发泡性能良好 顶吹氧气带入能量和气体	适当: 增加反应界面, 加快反应速度; 过量: 溢渣和喷溅	严格控制在合适的高度
高炉过程	高炉冶炼钒钛磁铁矿时, 渣中表面活性物质钛氧化物和固体的 TiC 和 TiN	炉渣上涨外溢, 炉料透气性恶化, 影响高炉操作和出铁作业	完全控制
熔融还原	铁氧化物还原, 喷入的氧和煤裂解产生的气体	加强二次燃烧的传热效率和降低气体中的粉尘侵蚀炉衬和喷溅, 溢出	控制合适的高度
电弧炉	加入含碳的物质等发泡剂, 碳氧反应产生 CO 气体	埋弧渣冶炼操作, 提高传热效率, 保护炉衬材料	促进发泡
钢包精炼炉 (还原期)	加入碳酸盐分解放出 CO ₂ 气体底吹气体产生搅拌作用	埋弧渣操作, 提高传热, 脱气和脱硫效率	大力促进

2.1.2 高炉泡沫渣

高炉冶炼中高钛型炉渣的泡沫化会给冶炼过程带来很大的困难。如在出铁过程中熔渣流入渣罐内, 产生的大量气体使熔渣形成泡沫, 并急剧上涨和外溢。这使炉内的渣铁不能排放干净, 将引起炉内下部透气性恶化, 出铁前后风量急剧波动, 不接受风量, 使炉料下降不顺。当炉内形成泡沫渣时, 炉渣的流动性能变差, 会引起鼓风阻力增加和炉内煤气流分布不均匀。这些都影响高炉冶炼的顺行并限制冶炼强度的提高, 尤其是高炉在冶炼全钒钛磁铁

时, 会面临许多更为严重的问题。

针对我国攀枝花等地高炉冶炼钒钛磁铁时出现的泡沫化现象, 国内研究者对含钛熔渣的物理化学性质和发泡过程进行了研究, 经过长时间努力已经定性地探明发泡的原因^[12]。通过 X 光透射装置观察高温下渣-金界面形成气泡过程可以发现, 在界面之间形成泡核-长大-形成小气泡群-聚合长大气泡-上浮渣面形成泡沫沸腾层。含高 TiO_2 磁铁矿的发泡过程会出现两个高峰, 而普通铁矿的发泡过程只有一个高峰。出现的第二个高峰是由于 TiO_2 被还原所引起的。此峰值的来到和高度与 TiO_2 的含量、温度和碱度等有关。高炉冶炼含高钛渣时能生成泡沫渣, 认为当渣中 $w(\text{TiO}_2) > 22\%$ 出现泡沫渣, 而 $w(\text{TiO}_2) < 25\%$ 和 $w(\text{Ti}(\text{C}, \text{N})) < 0.7\%$ 可以抑制泡沫渣; $w(\text{TiO}_2) > 26\%$, 则泡沫化难以控制。渣中 TiO_2 的还原为泡沫渣提供了气源。还原的钛会生成 TiC 和 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$ 细小颗粒并随还原出的钛量的增加而增加, 使渣中残存的固体颗粒增加, 形成一种悬浮胶体液。这些细小颗粒起到降低熔渣表面张力和增加炉渣对气泡吸附的作用, 使气泡稳定存在于熔渣中, 且形成稳定的泡沫。

高钛型炉渣是一种非均匀质且带有大量高度弥散的凝聚相, 并为润湿渣系。在界面反应过程中, 不仅由于 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$ 颗粒形成稳定泡沫膜, 且膜内 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$ 颗粒又增加了膜的粘弹性, 使气泡不易从膜内逸出, 而且有相当的稳定性。

另外, 在普通高炉冶炼时形成的初渣也会有起泡行为。高炉炉料经过块状带可被还原, 未还原的氧化物进入软熔带的初渣中, 与焦炭相接触产生激烈的直接还原反应, 同时在渣焦界面产生大量的气体, 部分 CO 进入初渣形成泡沫渣。初渣起泡的现象从高炉解剖及生产所取得的试样得到证实。通过摄像机荧屏观察了高炉解剖的烧结矿和人造试样, 认为初渣起泡行为与预还原度有关, 酸性原料比碱性原料易于发泡, 碱金属会明显促进自熔性熔渣的起

① w 为质量分数, 下同。

泡行为^[13,14]。

2.1.3 平炉泡沫渣

对泡沫渣的认识,最早来源于平炉炼钢过程^[1,2]。铁水中的碳和渣中的氧在渣-金界面反应生成 CO 气体上,当炉渣发泡性能良好时就形成了泡沫渣。由于气泡搅拌界面的传质系数很小,炉渣性能对泡沫化的作用更大。表 2-2 给出了平炉中易发泡和不易发泡的炉渣成分等理化指标。

表 2-2 平炉中易发泡和不易发泡的熔渣理化指标

炉渣发泡性	$w(\text{SiO}_2)$ /%	$w(\text{MnO}+\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ / %	碱度 $\frac{m(\text{CaO})}{m(\text{SiO}_2)}$	脱碳速度 / (%) · h ⁻¹
易发泡	22.5	28.7	1.26	0.242
不易发泡	18.0	24.0	2.55	0.173

库珀 (Cooper) 和基奇纳 (Kitchener) 指出 SiO_2 可以提高泡沫表面膜粘度,但形成的表面膜弹性不高, PO_4^{3-} 和 SiO_4^{4-} 同为泡沫渣稳定的必要条件,随着温度和碱度的升高, P_2O_5 对泡沫稳定性的影响会降低^[15]。在具有一定温度和碱度的 CaO-SiO_2 渣系条件下, Cr_2O_3 的作用是有限的^[16]。

2.1.4 转炉泡沫渣

在转炉炼钢过程中,铁水中的碳和喷入的氧气反应生成 CO 气体,形成泡沫渣。由于氧气射流的高速喷入在转炉中往往形成渣-金-气三相乳化液,适当的泡沫渣有利于渣-金反应,但过强的泡沫化易引起喷溅和溢出。转炉渣泡沫化(包括乳化)使渣-金界面剧增从而改善了反应动力学条件,这是转炉炼钢高效率最重要的原因之一。转炉冶炼过程中因氧气射流产生的泡沫化,使金属进入渣中的比例高达 30%。

佩尔克 (Pehlke) 在总结了前人关于转炉泡沫渣研究的基础上,认为形成稳定泡沫渣量的多少主要取决于以下三个因素:直接由吹氧提供的外来气体和能量;脱碳反应过程的剧烈程度及反