

炉外精炼用 耐火材料

(第2版)

王诚训 张义先 编著



冶金工业出版社

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

炉外精炼用耐火材料

(第 2 版)

王诚训 张义先 编著

北 京

冶金工业出版社

2007

内 容 简 介

本书内容包括:炉外精炼及其发展简况,耐火材料抗蚀性和抗热震性,真空脱气装置用耐火材料,不锈钢精炼装置用耐火材料,钢包精炼装置用耐火材料等。

本书可供从事钢液炉外精炼用耐火材料科研开发、生产应用的工程技术人员使用,也可供大专院校有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

炉外精炼用耐火材料/王诚训等编著. —2 版. —北京:
冶金工业出版社, 2007. 7

ISBN 978-7-5024-4297-2

I. 炉… II. 王… III. 炉外精炼—耐火材料 IV. TF065.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 106173 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 章秀珍 美术编辑 李 心 版面设计 张 青

责任校对 白 迅 李文彦 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4297-2

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1996 年 6 月第 1 版,2007 年 7 月第 2 版,2007 年 7 月第 2 次印刷

850mm×1168mm 1/32;6.875 印张;180 千字;205 页;5001-8000 册

20.00 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)

第2版 前言

连铸及钢种多样化要求在钢包中对金属进行精炼处理,这些措施与碱性氧气转炉(BOF)或电弧炉(EAF)中的炼钢工艺过程一起被称为二次精炼。其中,钢包(炉)精炼也称炉外精炼。钢包精炼技术完全改变了以往钢包对耐火材料的要求。其主要要求见表1。

表1 工艺过程改进对耐火材料的要求

工艺过程(进行改进)	对耐火材料的要求
提高钢包的出钢温度	高热稳定性
钢液在钢包中停留时间长	高热机械稳定性
在钢包中进行剧烈搅拌	高抗腐蚀性
各种侵蚀性熔渣	高抗侵蚀性
脱氧、合金化	热化学稳定性
真空脱气	高抗腐蚀和侵蚀性
加热(电或化学加热)	高热稳定性和抗渣性
各种不同的工艺和过程	在不同条件下应用的灵活性

由此可见,钢包精炼技术的发展导致炼钢的工作环境变得苛刻,这就要求对钢包内衬用耐火材料加以调整。由于精炼过程、工作条件以及耐火材料设计思想不同,在实际应用中,钢包内衬在不同钢厂以及不同地区的差别是比较大的,因而钢包内衬的设计也是不同的。其中几种典型设计方案见表2。

表2 几种典型设计方案

类 型	渣 线	钢 包 壁	钢 包 底
高铝砖 I	MgO-C 砖 (5%~15%C)	高铝砖 (65%~85%Al ₂ O ₃)	铝-Sp 预制品

续表 2

类 型	渣 线	钢 包 壁	钢 包 底
高铝砖 II	MgO-C 砖 (5%~15%C)	Al ₂ O ₃ -C 砖 (65%~91%Al ₂ O ₃)	Al ₂ O ₃ -C 砖
整体衬 I	Al ₂ O ₃ -Sp/cc	高铝/cc(铝质黏土)	Al ₂ O ₃ -Sp/cc
整体衬 II (例如脱硫)	MgO-C 砖 (10%~15%C)	Al ₂ O ₃ -Sp/cc	Al ₂ O ₃ -Sp/cc
碱性白云石 I (例如脱硫)	MgO-C 砖 (10%~15%C)	碳结合白云石砖	碳结合 白云石砖
碱性白云石 II (不锈钢)	白云石砖 (烧成)	碳结合白云石砖	碳结合 白云石砖
碱性 MgO(含碳)	MgO-C 砖 (10%~15%C)	MgO-C 砖 (10%~15%C)	碳结合 高铝砖
MgO-Cr ₂ O ₃ (例如 VOD)	MgO-Cr ₂ O ₃ 砖	MgO-Cr ₂ O ₃ 砖	MgO-Cr ₂ O ₃ 砖

归纳起来,钢包内衬可以分为整体衬和砖砌衬两大类。按材质划分,有高铝(中性)和碱性衬之分。考虑到精炼和经济方面的原因,钢包内衬设计思想是渣线、钢包壁、钢包底和预制件的寿命应进行综合平衡,以使钢包内衬设计达到最佳化。

就熔渣性质而论,CaO-SiO₂系低碱度熔渣要求在渣线部位用MgO-CaO-C砖;用饱和石灰渣和CaF₂添加剂进行脱硫处理要求在渣线部位用MgO-C砖;出于对环境的保护,要求对使用耐火材料中的铬进行处理,因此,现在含铬耐火材料仅限于在特殊条件下应用,例如真空电弧加热脱气炉的钢包(VOD)内衬才选用MgO-Cr₂O₃砖砌筑,由于其熔渣成分不同,在这一特殊应用环境下,MgO-Cr₂O₃砖表现出了最好的结果。即便如此,耐火材料研究人员和用户也正在积极进行研究替代材质。

随着高性能L_{cc}和UL_{cc}技术的发展和完善,整体钢包内衬早已广泛应用,合成氧化铝(电熔和烧结)基耐火浇注料与补浇技术密切结合,使钢包实现了长寿比。

根据炉外精炼的使用要求,王诚训、栾永杰和李洪申曾编著出版了《炉外精炼用耐火材料》(1996,冶金工业出版社)一书,该书出版以来,很受读者欢迎。现在考虑到该书出版十多年来,钢铁冶炼技术又取得了长足发展,炉外精炼用耐火材料也发生了很大变化。为了将这十年以来炉外精炼用耐火材料进行归纳概括,作者根据自己多年来研究和开发炉外精炼用耐火材料的经验,汇集了这十多年来国内炉外精炼用耐火材料工作者的最新技术成果,结合炉外精炼用耐火材料研究、开发、设计、生产和应用实践,并参考了国外炉外精炼用耐火材料的最新资料,对该书进行修订再版。

本书在编写过程中得到了侯瑾、刘永峰、丁铁民、孙炜明、孙宇飞、王雪梅、侯泽、裘富伟、周绪超、李长江等的大力支持和帮助;赵亮等为本书提供了宝贵资料和信息;孙菊为本书的线条图做了大量工作。吴东明、吴东风和罗椒颂等给予了积极支持和鼓励。在此,谨向他们表示最诚挚的感谢。

本书的出版,若能对从事炉外精炼和耐火材料研究品种开发的工程技术人员有所裨益,将是作者最大的欣慰。

限于作者水平,书中问题和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

王诚训 张义先

2007年3月

第1版 前言

炉外精炼用耐火材料是1990年10月在德国阿亨召开第33届国际耐火材料研讨会的主题。与会专家认为,耐火炉衬材料的抗侵蚀性能仍然是研讨的主要问题,因为这些材料处于高温活性炉渣作用之下。改进耐火炉衬的目的是提高精炼炉的寿命、可用性和经济性,使钢水杂质尽量低。并且认为,处于这种条件下使用的最耐侵蚀的耐火材料仍然是镁铬砖。

由于 MgO-CaO 系(包括镁白云石和白云石)耐火材料资源丰富,属于廉价材料,亦用于炉外精炼作炉衬材料。其中树脂结合的 MgO-CaO 系耐火材料使钢的碳吸收量比沥青结合的少,而且加入 ZrO_2 等氧化物对钢水除硫有利,因而也被大量采用。

在钢包炉渣线等高蚀区则更多地选用 MgO-C 砖。而侧壁(金属线)低蚀区则选用 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$ 砖和 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO(MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3)$ 浇注料,这些材料在使用过程中伴随 $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 的生成其体积膨胀,使工作带变得致密并减少了收缩。

作者以此为线索,将收集的资料汇总归纳写成《炉外精炼用耐火材料》一书,但由于涉及面太广,内容又多,限于作者水平,书中问题和错误在所难免,请读者批评指正。

在本书的编写过程中,得到了侯瑾、耿国枢和高心魁等同志的大力支持和帮助,在此向他们表示衷心的感谢。

作 者

1995年12月

目 录

1 炉外精炼及其发展简况	1
2 耐火材料抗蚀性和抗热震性	3
2.1 耐火材料向熔渣中的溶解	3
2.2 熔渣向耐火材料内部的浸透	6
2.2.1 在 θ 小于 90° 时, 熔渣易于浸透耐火材料	9
2.2.2 在 θ 大于 90° 时, 熔渣难于浸透耐火材料	12
2.3 抑制熔渣向耐火材料内部渗透的途径	14
2.4 第二固相对提高碱性耐火材料抗渗透性能的作用	15
2.5 抗渗透性与耐蚀性的关系	15
2.6 耐火材料的抗热冲击破坏性	18
2.7 耐火材料非线性破坏特性	28
2.7.1 耐火材料非线性破坏力学性能值	31
2.7.2 非线性性能与显微结构	41
2.7.3 耐火材料非线性性能设计	45
2.8 MgO-C 砖在高温减压下的损毁	48
2.8.1 高温减压下 MgO-C 反应模型	48
2.8.2 影响 MgO-C 反应的因素	49
2.9 抗蚀性与耐剥落性兼备的 MgO-Cr ₂ O ₃ 砖	56
3 真空脱气装置用耐火材料	66
3.1 RH/RH-OB 真空脱气装置用耐火材料	66
3.1.1 RH/RH-OB 真空脱气装置概况	66
3.1.2 选用 RH/RH-OB 真空脱气装置用耐火材料 的原则	67
3.1.3 RH/RH-OB 用 MgO-Cr ₂ O ₃ 砖	70

3.1.4	RH 真空脱气装置用 $\text{MgO-MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 砖	75
3.1.5	RH/RH-OB 装置用 MgO-C 砖	85
3.1.6	RH/RH-OB 真空脱气装置试用特种碱性 耐火材料	90
3.1.7	RH/RH-OB 装置用耐火浇注料	94
3.2	DH 真空提升脱气装置用耐火材料	100
4	不锈钢精炼装置用耐火材料	102
4.1	VOD 炉(真空吹氧脱碳炉)	102
4.1.1	设备概况及其操作特点	102
4.1.2	VOD 工艺和 VOD 钢包里衬的损毁	103
4.1.3	VOD 钢包用耐火材料	107
4.1.4	熔渣控制技术	121
4.2	AOD 炉用耐火材料	123
4.2.1	设备概况和工艺操作	123
4.2.2	AOD 炉耐火里衬的损毁和区域划分	126
4.2.3	AOD 炉用 $\text{MgO-Cr}_2\text{O}_3$ 砖	128
4.2.4	AOD 炉用白云石砖	132
4.2.5	CaO 砖在 AOD 炉上的试用	135
4.2.6	AOD 炉综合砌衬	156
4.2.7	出钢槽用耐火材料	159
4.2.8	CLU 炉	161
4.2.9	炉渣控制技术	162
5	钢包精炼装置用耐火材料	165
5.1	设备概况及其特点	165
5.1.1	LF 法	166
5.1.2	VAD 法	166
5.1.3	ASEA-SKF 法	167
5.2	精炼钢包用耐火材料	168

5.3 精炼钢包耐火里衬的设计	172
5.3.1 渣线部位用耐火材料	173
5.3.2 低蚀区用耐火材料	174
5.3.3 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ 系耐火材料	177
5.3.4 钢水真空脱气装置用 MgO-SiC-C 砖	179
5.3.5 耐火材料预制件	181
5.4 钢包熔池(低蚀)区域用 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO(MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3\text{)-C}$ 系耐火材料	182
5.4.1 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 系耐火材料的抗渣性	183
5.4.2 高铝耐火材料中引入 $\text{MgO(MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3\text{)}$ 的作用	187
5.4.3 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$ 系耐火材料	192
5.4.4 钢包用 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 系耐火材料	193
参考文献	202

1 炉外精炼及其发展简况

1949年,西德曼内斯曼公司和容汉斯组成了连铸共同体,并于1950年研制出第一台5t水平连铸机;1952年氧气顶吹转炉问世,取代平炉炼钢,逐步成为主要的炼钢技术。为了保证钢水质量稳定,提高钢的质量,强化冶金反应过程,提高钢的洁净度,控制夹杂物形态,开发了炉外精炼技术。显然,它是由钢水精炼功能分化所产生的技术。

炉外精炼是把传统的炼钢方法分为两步,即初炼和精炼。初炼:在氧化性气氛下进行炉料熔化、脱磷、脱硫和主合金化。精炼:在真空、惰性气氛或可控气氛的条件下进行脱氧、脱硫、去除夹杂物和改变夹杂物形态,调整成分(微合金化)以及控制钢水温度。显然,炉外精炼是以前集中于转炉、电炉的功能分化所带来的产物,与钢的高级化密切相关。

炉外精炼的发展可以追溯到1933年佩林(Perrin)用高碱度合成渣炉外脱硫。20世纪50年代开发的钢水真空处理技术,1956~1959年开发的DH法和RH法,60年代开发的RH-OB、VAD、VOD和AOD炉,70年代开发的LF、CLU炉等。以后,各种炉外精炼装置不断涌现。目前,炉外精炼的方法已有三十多种,其中,使用较多的方法有DH、RH、AOD、VOD、LF、VAD、CAS和ASEA-SKF等。现在,它们已经成为提高钢水质量的关键手段,即炼钢—炉外精炼—连铸生产过程中的关键环节。

虽然各种炉外精炼方法的工艺不同,但它们却存在着许多共同点:

(1) 通常应用真空、惰性气氛或还原性气氛等,为钢水精炼创造了一个理想的精炼气氛条件;

(2) 采用电磁力、惰性气体或者机械搅拌的方法搅拌钢水;

(3) 采用加热设施,如电弧加热、埋弧加热、等离子加热或者增加钢水中的化学热等,来补偿精炼过程中钢水的温度损失。

按设备类型分,炉外精炼一般可分为两大类:钢水处理型炉外精炼的方法和钢包精炼型炉外精炼的方法。除了 DH、RH、RH-OB 和 AOD 属于钢水处理型炉外精炼的方法之外,其他如 VOD、VHD、VAD、LF、CAS 和 ASEA-SKF 等都是钢包精炼型炉外精炼的方法,即精炼操作在钢包内进行。这两类炉外精炼的特征见表 1-1。

表 1-1 炉外精炼的特征

类 型	精炼时间/min	补充热源	精炼机能	投资	设备
钢水处理型	<30	无	单一	少	简单
钢包精炼型	60~120	有	多种	多	复杂

按功能可分为真空脱气精炼处理(DH、RH、RH-OB、VOD)和电弧加热精炼处理(LF、VOD、ASEA-SKF 等)以及不锈钢的精炼方法(AOD、VOD)。

由于各种精炼方法对钢水的处理目的和操作条件不同,因而要求使用不同性能的耐火材料与之相适应,以提高各精炼装置的使用寿命。表 1-2 列出主要炉外精炼装置所选用的典型耐火材料,下面将分别进行讨论。

表 1-2 二次精炼装置用的典型耐火材料

装 置	主 要 材 质	其 他 材 质
RH	镁铬砖(直接结合)	镁炭砖、高铝砖等 铝尖晶石浇
DH	高铝浇注料	注料
AOD	镁铬砖(再结合、半再结合及直接结合)	镁钙砖等
VOD	镁白云石砖、镁铬砖	锆砖
LF	镁炭砖	镁白云石砖、铝镁炭砖、刚玉尖晶石砖、MgO-MA-ZrO ₂ 砖
VAD	铝镁炭砖	炭砖
ASEA-SKF	铝尖晶石浇注料、镁炭砖、镁铬砖	高铝砖

2 耐火材料抗蚀性和抗热震性

由于各种二次冶炼装置的操作条件不同,因此其耐火内衬的损毁机理也不一样。例如,在一定的操作条件下,VOD 钢包耐火内衬蚀损的主要原因是高温以及低碱度熔渣的侵蚀;AOD 炉风口及风口周围部位的衬砖,是由于热剥落和结构剥落造成很大的损伤,经常成为停炉的主要原因。其他精炼装置及其钢包耐火内衬的蚀损也各有其特征,所以,我们先讨论耐火材料的抗渣性和抗热震性。

2.1 耐火材料向熔渣中的溶解

耐火材料工作衬的抗熔渣侵蚀性,主要决定于其化学矿物性质(相组成)和结构特征,并与晶体的大小密切相关。

酸性耐火材料如蜡石砖,在钢包上使用时以熔蚀方式损毁,是由于 SiO_2 在浸透熔渣达到饱和后即可使侵入熔渣的黏度增大 1~2 个数量级。因此,熔渣的浸透速度变小,只有在工作衬表面的耐火材料组分向熔渣中溶解。

在耐火材料表面进行单纯的溶解蚀损时,溶解速度决定于耐火材料本身的成分、生成液相的数量、液相种类和耐火材料组分对液相的饱和浓度以及液相的黏度,并随温度的上升而增加。

如果耐火材料以溶解为主要方式蚀损时,那它属于较严格的物理化学过程,所以扩散则具有重要的意义。

由费克(Fick)扩散第一定律可知,耐火材料向熔渣中的扩散速度为:

$$dn/dt = DSdn/dx \quad (2-1)$$

式中 dn/dt ——耐火材料在单位时间 t 内通过的扩散面积即熔渣接触面积 S 的摩尔数;

dn/dx ——耐火材料在熔渣中沿 x 方向的浓度梯度；

D ——扩散系数。

如果用 δ 表示扩散层的厚度，耐火材料工作衬在扩散层中从紧接其表面的溶解浓度 n_s (接近于饱和浓度) 均匀地降到熔渣中的浓度 n ，则扩散层中的浓度梯度为：

$$dn/dx = (n_s - n) / \delta \quad (2-2)$$

代入式(2-1)为：

$$dn/dt = DS(n_s - n) / \delta \quad (2-3)$$

式(2-3)说明，耐火材料的蚀损速度还决定于它与熔渣接触的表面积 S 。 S 不仅应理解为直接与熔渣接触的工作衬的表面积，还包括熔渣浸入气孔和裂缝的表面积。 S 与耐火材料的气孔率 (P_A) 存在如下关系式：

$$S = [(100 + BP_A) / 100] S_0 \quad (2-4)$$

式中 P_A ——耐火材料的气孔率；

B ——与耐火材料结构有关的常数；

S_0 ——假定耐火材料工作衬为无气孔时的表面积。

总起来说，耐火材料的气孔率应当包括：气孔大小和形状(比表面积)；气孔的体积(总气孔率)；气孔种类，即是开口气孔(显气孔)还是封闭气孔，因为前者便于外来物质的入侵(说明封闭气孔比开口气孔有利)。

由式(2-4)可知，耐火材料的抗熔蚀性能随其气孔率的降低而提高。一般认为，气孔率小于 5% 能大大提高耐火材料的抗熔蚀性能。

众所周知，化学反应惰性决定了耐火材料是否能与接触的熔渣发生溶解反应以及溶解反应的程度，而耐火材料的密度在很大程度上则决定这种溶解反应的动力学条件。所以，提高耐火材料的密度对于减少熔渣蚀损具有重要的意义。因为，密度高时不仅可以减少耐火材料与熔渣发生溶解反应的总面积，而且还可以保证耐火材料工作衬的重量同侵入的熔渣相占最大的比重。

应当指出：虽然体积密度一般用来作为评价耐火材料致密程

度的标准,但它不能表明开口气孔与封闭气孔的比例。因为“气孔聚合”易于形成开口气孔,而不会导致更多的封闭气孔的形成。

此外,扩散系数 $D \propto \eta^{-1}$, 所以式(2-3)为:

$$dn/dt = (AS/\delta\eta)(n_s - n) \quad (2-5)$$

式中 η ——熔渣黏度;

A ——常数。

式(2-5)说明,耐火材料在熔渣中的溶解速度随熔渣黏度的降低而增加。

熔渣黏度 η 不仅决定于其本身的特性,而且取决于熔渣的温度(随温度上升成指数倍降低)。

根据黏度公式:

$$\eta = \eta_0(1 + a\phi) \quad (2-6)$$

式中 η_0 ——无固相存在时熔渣中的黏度;

η ——有固相悬浮体时熔渣的黏度;

ϕ ——分散相的体积;

a ——常数。

在特定的条件下, η 、 s 、 δ 均是定值, 当 $t=0 \rightarrow t$ 时, $n=n_0 \rightarrow n$, 对式(2-5)积分:

$$n = n_s - (n_s - n_0) \exp[(-A/\delta\eta)st] \quad (2-7)$$

式(2-6)、式(2-7)可以说明,在熔渣中存在固相悬浮体时,是降低耐火材料熔损的一个重要途径。

关于温度对 η 的影响,认为简单的不缔合熔体满足于弗兰克利方程式:

$$\eta = c \exp(-E/RT) \text{ 或 } \ln \eta = c' + E/RT \quad (2-8)$$

式中 c 、 c' ——常数;

E ——黏程活化能,它决定黏程本身的熔体质点做直线运动时所必需的能量;

R ——气体常数;

T ——绝对温度。

对于炼钢熔渣的黏度而言,式(2-8)只是近似的。不过,黏度 η

随温度的上升成指数倍下降的规律却是存在的。在不同的温度下,熔渣黏度存在如下关系:

$$\eta_1 / \eta_2 = \exp(E\Delta T / T_1 T_2) \quad (2-9)$$

式(2-9)说明,温度愈高,耐火内衬熔损就愈快。

2.2 熔渣向耐火材料内部的浸透

一般而言,耐火材料是一种多孔材料,除了气孔的数量(主要是气孔率)有变化之外,气孔大小(直径)对耐火材料的抗蚀损性能也有重要影响,因为它决定了熔渣向耐火材料内部浸透的速度。

熔渣在毛细管(气孔)内浸透的速度根据下述方程式而变化:

$$dL/dt = r^2 \bar{d} (2\sigma \cdot \cos\theta / drL - g \cdot \sin\nu) / \delta\eta \quad (2-10)$$

式中 dL/dt ——熔渣沿气孔浸透的速度;

r ——气孔半径;

$\bar{d}$ ——熔渣密度, g/cm^3 ;

η ——熔渣黏度;

σ ——熔渣的表面张力;

θ ——润湿角, $(^\circ)$;

ν ——气孔的倾斜角, $(^\circ)$;

L ——气孔内浸透熔渣的深度;

g ——重力加速度。

多孔耐火材料中的气孔一般都处于水平位置,此时 $\nu = 0^\circ$, 即 $\sin\nu = 0$, 故式(2-10)变为:

$$dL/dt = r\sigma\cos\theta / 4\eta L \quad (2-11)$$

采用 $t=0, L=0; t=t, L=L$ 积分, 式(2-11)变为:

$$L^2 = (r\sigma\cos\theta / 2\eta) t \quad (2-12)$$

或者

$$L = \sqrt{(r\sigma\cos\theta / 2\eta) t} \quad (2-13)$$

由式(2-12)、式(2-13)看出,熔渣浸透到耐火材料内的气孔中的深度 L 决定于气孔相结合的特征和气孔半径的大小以及熔渣的表面张力和黏度。

在时间 t 内,熔渣经过截面积为 S 的一束气孔浸透的熔渣体积为 $\bar{V}$:

$$\bar{V} = S \cdot L = S \sqrt{tr\sigma \cos\theta / 2\eta} \quad (2-14)$$

对于实际的多孔耐火材料,式(2-14)的不足之处是没有考虑材料的结构因素。

对于同一种耐火材料,由于结构因素是相同的,因此,在一定的温度下,不同熔渣 I 和 II 经过一定时间后浸透的深度或者浸透熔渣的体积遵从下面的关系:

$$L_I / L_{II} = \bar{V}_I / \bar{V}_{II} = (\sigma_I \eta_{II} \cos\theta_I / \sigma_{II} \eta_I \cos\theta_{II}) \quad (2-15)$$

将 $P_A = 32\%$ 的镁质试样,在 1450°C 下,分别浸入到 CaO-FeO-SiO_2 渣及平炉渣中,在相同的时间内,前一种渣充填在试样中的体积为 12.5% ,后一种则为 8% 。由此算得 $V_I / V_{II} = 1.56$ 。利用式(2-15)计算得 $V_I / V_{II} = 1.72$,计算值与实际值很接近,说明式(2-15)是正确的。

由此可以得出,熔渣浸透到多孔耐火材料内的深度 L 或者体积 V 与因子 $(\sigma \cos\theta / \eta)^{1/2}$ 有关。为此,阻止熔渣浸透的方法是:增加接触角 θ ,降低熔渣的表面张力 σ ,提高熔渣的黏度 η ,并减少气孔尺寸 r ,见式(2-13)。

上述式中的 σ 可以利用下面经验公式来计算:

$$\sigma = \sum N_i F_i \quad (2-16)$$

式中 N_i ——熔渣中组元 i 的摩尔数;

F_i ——组元 i 的表面张力。

无论从炼钢熔渣的已有数据或利用式(2-16)计算, σ 值大致在 $4 \times 10^{-3} < \sigma < 6 \times 10^{-3} \text{ N/cm}$ 之间。

转炉渣同碱性耐火材料的接触角 θ ,在 1400°C 以上时 θ 值都较小,