



高等专科学校教学用书

GAODENG
ZHUANKE
XUEXIAO
JIAOXUE
YONGSHU

电炉炼钢学

冶金工业出版社

高等专科学校教学用书

电炉炼钢学

本溪冶金专科学校 孙培林 主编

冶金工业出版社

(京)新登字036号

高等专科学校教学用书

电炉炼钢学

本溪冶金专科学校 孙培林 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷99号)

新华书店总店科技发行所发行

河北省阜城县印刷厂印刷

*

787 × 1092 1/16 印张18 1/4 字数 432千字

1992年10月第一版 1992年10月第一次印刷

印数00,001~4,650册

ISBN 7-5024-1061-9

TF·254(课) 定价4.70元

前 言

本书是根据1989年冶金高等专科学校教材规划要求编写的，主要内容包括：电炉钢炉渣，电炉炼钢原材料，碱性电弧炉炼钢过程主要反应和工艺，超高功率电弧炉与直流电弧炉技术，二次炼钢技术，镇静钢浇注，电炉钢质量分析，常用合金钢生产，真空冶金，无芯感应炉熔炼、电渣重熔，炼钢电弧炉炉衬及计算，电弧炉炼钢车间设计等。本书着重阐述电炉钢冶炼过程中的主要反应和工艺以及提高钢质量和防止产生缺陷的措施。有关电炉设备等内容，将在“电弧炉炼钢机械设备”课程中讲授。

本书由本溪冶金专科学校电冶金教研室有关同志编写：孙培林编第一、二、三、七、八、九章；吴国玺编第四、五、十一章；姜洪渤编第六、十章。全书由孙培林任主编。

重庆钢铁专科学校肖伟军和本溪冶金专科学校李春德参加审稿并提出了许多宝贵意见，编者深表谢意。本书引用了某些特殊钢厂和研究单位的资料，也在此一并致谢。

本书作为专科钢铁冶金专业教学用书，也可供冶金科技人员参考。

由于编者学识有限，不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

1991年5月

目 录

第一章 电炉钢炉渣	1
第一节 炉渣的作用、来源及组成	1
第二节 炉渣的结构理论	2
第三节 炉渣的化学性质	7
第四节 炉渣的物理性质	10
第二章 电弧炉炼钢的原材料	20
第一节 电弧炉炼钢的金属料	20
第二节 电弧炉炼钢的辅助材料	28
第三章 碱性电弧炉冶炼工艺及炼钢过程的主要反应	34
第一节 碱性电弧炉操作法及程序	34
第二节 炉衬的维护与修补	35
第三节 装料	38
第四节 熔氧期	39
第五节 还原期	42
第四章 超高功率电弧炉与直流电弧炉技术	86
第一节 超高功率电弧炉技术	86
第二节 直流电弧炉技术	99
第五章 二次炼钢技术	105
第一节 概述	105
第二节 二次炼钢过程基础	107
第三节 夹杂及残余元素的控制	111
第四节 二次炼钢设备操作特点	114
第五节 二次炼钢法比较	115
第六章 镇静钢的浇注	117
第一节 镇静钢的模铸及设备	117
第二节 连续铸钢	137
第七章 电炉钢质量分析	151
第一节 钢中气体	151
第二节 钢中非金属夹杂	160
第三节 钢锭的质量检验与分析	169
第八章 常用合金钢生产	175
第一节 合金结构钢冶炼	175
第二节 高速工具钢冶炼	179
第三节 不锈钢冶炼	187
第四节 滚珠轴承钢冶炼	199
第九章 真空冶金、感应炉冶炼及电渣重熔	209
第一节 真空冶金	209

第二节	感应炉冶炼	217
第三节	电渣重熔	232
第十章	炼钢电弧炉炉衬及计算	242
第一节	炼钢电弧炉炉衬	242
第二节	炼钢电弧炉尺寸计算	246
第三节	电弧炉变压器功率及电气参数	253
第四节	炼钢电弧炉尺寸计算的例题	257
第十一章	电弧炉炼钢车间设计	260
第一节	设计概述	260
第二节	生产规模与品种的确定及全厂金属平衡	261
第三节	电弧炉容量、座数的确定及锭型选择	363
第四节	车间类型与布置	265
第五节	车间主要设备的选择与计算	275
第六节	电炉炼钢的排烟与除尘	278
第七节	电炉炼钢技术经济指标及原材料消耗	281

第一章 电炉钢炉渣

第一节 炉渣的作用、来源及组成

一、炉渣的作用

炼钢就是炼渣！这是一句流传在炼钢工人中的至理名言，也是丰富的经验总结。它深刻地描述了炉渣在炼钢过程中的重要作用，要想炼好钢，就必须先炼好渣。

炼钢是一个复杂的高温物理化学过程，炉渣在此过程中有以下重要作用。

1. 炉渣比金属轻，能浮在钢液面上，阻止炉气中的有害气体氢和氮直接被钢液吸收，对钢液起保护层的作用。

2. 控制炼钢过程反应进行的方向和速度。例如在电弧炉炼钢过程的氧化期，为了使杂质（碳、磷等）迅速氧化，炉渣应具有强烈的氧化性；但在最后阶段的还原期，为了达到去除钢中硫、氧等目的，炉渣必须保持还原性。

3. 炉渣能很好地吸收从熔池中上浮的化合物，以减少钢中非金属夹杂。

4. 粘度适当的炉渣能保证熔池沸腾时气体的自由逸出，以及降低混杂在炉渣中的金属损失。

二、炉渣的来源

1. 人工加入的造渣材料：石灰、石灰石、萤石、耐火砖块、铁矾土等；

2. 人工加入的氧化剂铁矿石中的杂质二氧化硅和三氧化二铝等以及部分三氧化二

表 1-1 各种炼钢方法的炉渣组成

炉渣名称	项目	化学成分	转(平)炉	电 弧 炉
酸性氧化渣		$\text{FeO} + \text{MnO} + \text{CaO} + \text{SiO}_2$	SiO_2 50~60%	SiO_2 50~60%
碱性氧化渣		CaO/SiO_2	3.0~4.5	2.5~3.5
		FeO	15~40%	10~25%
		MnO	4~15%	5~10%
		MgO	4~12%	5~10%
		Al_2O_3	2~4%	2~5%
碱性还原渣		CaO/SiO_2		2~3.5
		MgO		8~15%
		CaF_2		10~15%
		Al_2O_3		2~5%
		FeO		<0.5%
		CaC_2		<1%
中性还原渣		CaO		25~30%
		SiO_2		30~35%
		Al_2O_3		15~20%
		CaF_2		15~20%
		FeO		<0.5%

铁;

3. 金属炉料、脱氧剂和合金剂中各元素被氧化生成的氧化物; 脱硫时的产物硫化物;

4. 被侵蚀的耐火材料以及炉料带入的杂质。

三、炉渣的组成

炉渣组成随炼钢操作不同而不同, 通常可分为三大类。一类是碱性氧化物占多数的碱性渣, 其中以CaO为主; 另一类是酸性氧化物占多数的酸性渣, 其中以SiO₂为主; 最后一类含有较多的两性氧化物Al₂O₃, 称中性渣或半酸性渣, 具体成分见表1-1。

从表中可知不同炉渣的特点。酸性渣含SiO₂高达50~60%; 而碱性渣含CaO约在30~55%之间。炉渣内各种氧化物含量的比例不同, 其性质也不相同。因此, 可根据需要, 选用不同性质的炉渣。

第二节 炉渣的结构理论

本世纪30年代以德国人H.申克(Schenck)为代表的一些学者, 用对凝固炉渣进行矿物鉴定和化学分析的方法以确定其组成, 从而推断液体渣的结构。认为炉渣中的氧化物可分为酸性的和碱性的两类。酸性和碱性氧化物有相互化合形成化合物的趋势。

一、分子理论

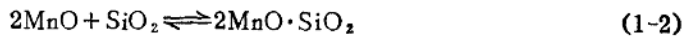
分子理论的要点可归纳如下:

1. 炉渣是由自由的简单氧化物分子和复杂的化合物分子组成。简单的分子有CaO、MgO、MnO、FeO、Fe₂O₃、Al₂O₃、P₂O₅、SiO₂等, 另外还有CaS、MnS、CaF₂、CaC₂等; 复杂的分子有CaO·SiO₂、2CaO·SiO₂、2FeO·SiO₂、2MnO·SiO₂、mCaO·nFe₃O₄、4CaO·P₂O₅等。

2. 简单的氧化物分子和复杂的氧化物分子处于动平衡状态。例如:



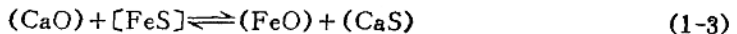
$$K_1 = \frac{N_{\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2}}{N_{\text{CaO}} \cdot N_{\text{SiO}_2}}$$



$$K_2 = \frac{N_{2\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2}}{N_{\text{MnO}}^2 \cdot N_{\text{SiO}_2}}$$

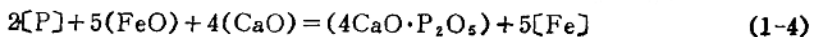
随着温度的升高, 分解程度增加, 自由氧化物的浓度增大。

3. 只有自由氧化物才有参加反应的能力。例如在炼钢过程中的脱硫反应:



显然, 只有(CaO)才能参加反应, 而渣中被结合了的2CaO·SiO₂就无此能力。即去硫能力决定于自由CaO的浓度。

4. 炉渣是理想溶液, 可以利用物化中的定律计算钢、渣间的平衡反应。如:



$$K = \frac{(4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5) \cdot [\text{Fe}]^5}{[\text{P}]^2 \cdot (\text{FeO})^5 \cdot (\text{CaO})^4}$$

总之, 分子理论的贡献是:

(1) 确定了炉渣是由分子组成。用自由氧化物解释炉渣的氧化和还原能力以及脱磷、脱硫能力的变化。

(2) 分子理论历史悠久，理论较为完整，可以方便地解释许多冶金问题，现在尚广泛的应用。

分子理论不足之处是：

(1) 分子理论中包含着没有根据的人为假设。现就 J. 启普曼等冶金工作者研究的渣、铁中 FeO 的分配为例进行分析：



当炉渣全部由纯氧化铁组成时其分配系数为：

$$L_o = \frac{a_{\text{FeO}}}{[\text{O}]} = \frac{1}{[\text{O}]_{\text{max}}}$$

若炉渣不是由氧化铁组成时，其 a_{FeO} 必然降低，这时有下列平衡关系：

$$L_o = \frac{a_{\text{FeO}}}{[\text{O}]}$$

$$\text{即 } a_{\text{FeO}} = L_o \cdot [\text{O}] = \frac{[\text{O}]}{[\text{O}]_{\text{max}}}$$

在 1600°C 时，使 CaO—MgO—SiO₂—FeO—Fe₂O₃ 渣和铁液平衡，并测得其氧含量为 0.087%。将 MgO 和 Fe₂O₃ 分别并入 CaO 和 FeO，渣的组成简化为：

组元	CaO	FeO	SiO ₂
重量	56	24	20
摩尔数	1.0	0.33	0.33

由于 1600°C 时铁液中氧的最大溶解度为 0.23%，那么该渣系中氧化铁的活度为：

$$a_{\text{FeO}} = \frac{0.087}{0.23} = 0.38$$

这时炉渣中氧化铁的摩尔分数 (N_{FeO})：

$$(N_{\text{FeO}}) = \frac{0.33}{1 + 0.33 + 0.33} = 0.20$$

显然，(N_{FeO}) \neq a_{FeO} 。假定炉渣是理想溶液：设炉渣中有 2CaO·SiO₂ 存在，再求 N_{FeO} ，其值为 0.33，仍与 a_{FeO} 的值不符；再进一步假设渣中有更复杂的 (2CaO·SiO₂) 存在，这时计算结果为 $N_{\text{FeO}} = 0.395$ ，基本相符。

通过上述分析，说明这种人为的假设缺乏一定的根据。

(2) 没有解决平衡常数不守常的问题。还需在平衡常数中引入活度系数。

为了不再作主观上的各种假设，现代分子理论学派直接使用组元活度和活度系数的概念。这是因为分子理论中自由氧化物浓度的含义和物理化学上组元活度的作用是相等的。

(3) 无法解释炉渣的导电与电解事实。

二、炉渣的离子理论

由于分子理论无法解释炉渣的导电现象，离子理论就应运而生。

通常应用的离子理论有：

(一) 捷姆金 (Тёмкин) 完全离子理论。认为炉渣是一种完全离子化的理想溶液，

它应满足下列三个条件:

1. 炉渣完全由离子所构成, 没有中性的分子存在;
2. 炉渣和离子晶体一样, 阴、阳离子相间排列, 即符号相同的离子均匀分布在异号离子的周围;

3. 不同阴离子对阳离子的作用是等同的, 反之亦然。

这种溶液的离子浓度表示法为:

$$N_i^{T+} = \frac{n_i^+}{\sum n_i^+}, \quad N_j^{T-} = \frac{n_j^-}{\sum n_j^-}$$

式中 n_i^+, n_j^- ——分别为阳离子和阴离子的摩尔数;

N_i^{T+}, N_j^{T-} ——分别为阳离子和阴离子的摩尔分数。

显然, 对完全离子溶液各离子分数之总和等于 2 而不是 1。

设有二元电解质 ij 解离为 i^+ 和 j^- , 那么:

$$ij = i^+ + j^-$$

对于稀电解质溶液中该电解质活度:

$$a_{ij} = a_i^+ \cdot a_j^-$$

因为

$$a_i^+ = N_i^+, \quad a_j^- = N_j^-$$

所以

$$a_{ij} = N_i^+ \cdot N_j^- \quad (1-6)$$

例1-1 用完全离子理论计算下列成分炉渣的FeO活度。

组元	CaO	MgO	FeO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃
摩尔数	0.339	0.114	0.467	0.016	0.064

解: 设炉渣中形成 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 O^{2-} 、 SiO_4^{4-} 、 $Fe_2O_5^{4-}$ 等离子, a_{FeO} 则可用下式表示:

$$a_{FeO} = N_{Fe^{2+}} \cdot N_{O^{2-}}$$

阳离子 Fe^{2+} 摩尔分数:

$$N_{Fe^{2+}}^{T+} = \frac{n_{Fe^{2+}}}{n_{Ca^{2+}} + n_{Mg^{2+}} + n_{Fe^{2+}}} = \frac{0.467}{0.920} = 0.508$$

阴离子 O^{2-} 摩尔分数:

$$\text{因为: } n_{O^{2-}} = n_{CaO} + n_{MgO} + n_{FeO} - 2n_{SiO_2} - 2n_{Fe_2O_5} = 0.76$$

$$n_{SiO_4^{4-}} = n_{SiO_2}$$

$$n_{Fe_2O_5^{4-}} = n_{Fe_2O_3}$$

所以

$$N_{O^{2-}}^{T-} = \frac{n_{O^{2-}}}{n_{O^{2-}} + n_{SiO_4^{4-}} + n_{Fe_2O_5^{4-}}} = 0.905$$

则:

$$a_{FeO} = N_{Fe^{2+}} \cdot N_{O^{2-}} = 0.508 \times 0.905 = 0.46$$

渣中氧化铁的活度系数

$$\gamma_{FeO} = \frac{a_{FeO}}{N_{FeO}} = \frac{0.46}{0.467} \approx 1$$

在酸性渣中除形成 SiO_4^{4-} 外还有 $Si_2O_6^{6-}$ 、 $Si_3O_8^{8-}$ 等离子团, 利用上述计算法, 误差较大。

(二) 海尔赛门科 (Herasymenko) 法

此法以阴阳离子的总数之和作为分母：

$$N_i^{n+} = \frac{n_i^+}{\sum n_i^{++} + \sum n_j^-}; \quad N_j^{n-} = \frac{n_j^-}{\sum n_i^{++} + \sum n_j^-} \quad (1-7)$$

该法与捷姆金法的不同之处是：阴离子和阳离子的位置可以任意互换。显然，只有在极高温下，才能克服阴离子和阳离子间的吸引力，达到这种状态。

(三) 弗路德 (Flood) 法

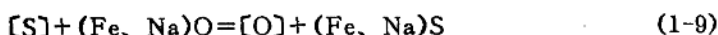
以上两种方法都没有考虑离子电荷的影响，弗路德则考虑了这种影响。其计算方法是：

$$N_{M_2}^P = \frac{2n_{M_2}^{2+}}{n_{M_1}^{+} + 2n_{M_2}^{2+} + 3n_{M_3}^{3+} + \dots} \quad (1-8)$$

该法仍然把炉渣当作理想溶液处理，但考虑到渣钢两相间反应的平衡常数随炉渣组成变形的事实，找出这种变化规律。

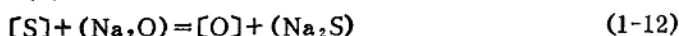
其考虑的原则是：

1. 设炉渣中有 Fe^{2+} 、 Na^+ 、 O^{2-} 、 S^{2-} 等离子存在，它们和钢液中组元发生下列反应：



$$-\Delta G_{Fe, Na}^{\circ} = RT \ln \frac{a_{(Fe, Na)S}}{a_{(Fe, Na)O}} \times \frac{a_{[O]}}{a_{[S]}} = RT \ln K \quad (1-10)$$

2. 将上式 1 摩尔 $(Fe, Na)O$ 直接变成 1 摩尔 $(Fe, Na)S$ ，看成分别与钢液反应，最后再混合成 $(Fe, Na)S$ 。



3. 根据物化中的盖斯定律，则可得到下列自由能之间的关系：

$$\Delta G_{Fe, Na} = N_{Fe}^F \Delta G_{Fe} + N_{Na}^F \Delta G_{Na} + N_{Fe}^F (\Delta \bar{G}_{FeS} - \Delta \bar{G}_{FeO}) + N_{Na}^F (\Delta \bar{G}_{Na_2S} - \Delta \bar{G}_{Na_2O}) \quad (1-13)$$

式中 $\Delta G_{Fe, Na}$ ——混合氧化物转变为混合硫化物反应的自由能；

ΔG_{Fe} 、 ΔG_{Na} ——单独进行反应时的自由能；

$\Delta \bar{G}_{FeO}$ 、 $\Delta \bar{G}_{Na_2O}$ 、 $\Delta \bar{G}_{FeS}$ 、 $\Delta \bar{G}_{Na_2S}$ ——形成溶液时的混合自由能。

4. 认为溶液和理想溶液偏离不大，即 (1-13) 式中最后两项等于零。

5. 将 $-\Delta G^{\circ} = RT \ln K$ 关系代入，则可得：

$$\lg K = N_{Fe}^F \lg K_{Fe} + N_{Na}^F \lg K_{Na} \quad (1-14)$$

这里的 K 值随炉渣组成而变化，显然，不是平衡常数，而称“平衡商”。

6. 若为多元系 (m 元) 溶液，并考虑了与理想溶液的偏离，则可得通式如下：

$$\lg K = \sum_{i=1}^m N_i^F \lg K_i + f(\gamma) \quad (1-15)$$

式中 $f(\gamma)$ 为对理想溶液的偏离项。

三、分子离子共存理论

实际上炉渣中有些熔体导电能力很小，或者说并不导电，例如 SiO_2 、 Al_2O_3 等。有些复杂离子如 SiO_4^{4-} 和 PO_4^{3-} 等并不稳定，它们会分解成 SiO_2 、 P_2O_5 和 O^{2-} 。因此，邱依柯

(ЧУЙКО) 等认为:

(1) 炉渣由简单的阳离子 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 等和阴离子 O^{2-} 、 F^- 、 S^{2-} 等及未分解的化合物 SiO_2 、硅酸盐、磷酸盐和铝酸盐等所组成;

(2) 炉渣内的化学反应符合质量作用定律;

(3) 离子和分子之间存在着动平衡关系。

譬如以炉渣中的 CaO 为例, 有下述关系:

$$n_{\text{CaO自由}} = \sum n_{\text{CaO}} - n_{\text{CaO结合}} = (B-i) \cdot n_{\text{SiO}_2}$$

式中 $\sum n_{\text{CaO}} = B \cdot n_{\text{SiO}_2}$, B 即为后面所讲的碱度。

$$B = \frac{(n_{\text{CaO}} + n_{\text{MgO}}) - (n_{\text{Al}_2\text{O}_3} + n_{\text{TiO}_2})}{n_{\text{SiO}_2}} \quad (1-16)$$

说明炉渣碱度 B 提高时总的氧化钙类的含量提高。

而

$$n_{\text{CaO结合}} = i \cdot n_{\text{SiO}_2}$$

说明随着 B 的增加与 SiO_2 结合的氧化钙的数量也增加。 i 称“结合”度。

B 和 i 的关系为:

B 1、 1.2、 1.4、 1.6、 1.8、 2.0、 2.2、 2.4、 3.0、 4.0、 9.0

i 0.995、 1.18、 1.275、 1.56、 1.73、 1.84、 1.884、 1.91、 1.94、 1.95、 1.953

例 1-2 在 $1540 \sim 1580^\circ\text{C}$, 经渣洗处理后盛钢桶中滚珠轴承钢的组成如下, 试求渣中氧化铁, 氧化钙活度。

组元	CaO	MgO	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaF ₂
重量%	47.8	5.50	1.0	6.8	33.4	3.9
摩尔数 n	0.85	0.131	0.0139	0.114	0.32	0.05

$$\text{按 (1-16) 式 } B = \frac{n_{\text{CaO}} + n_{\text{MgO}} - n_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{n_{\text{SiO}_2}} = \frac{0.85 + 0.131 - 0.32}{0.114} = 5.82$$

查表 $B=5.82$ 时 $i=1.95$

求 $n_{\text{CaO自由}}$:

$$n_{\text{CaO自由}} = \sum n_{\text{CaO}} - n_{\text{CaO结合}} = (B-i)n_{\text{SiO}_2} = (5.82 - 1.95) \times 0.114 = 0.44$$

由于 100g 炉渣中总质点数 $\sum n'$ 为:

$$\begin{aligned} \sum n' &= n_{\text{CaO自由}} + n_{\text{FeO}} + 1.5n_{\text{CaF}_2} + 0.5(n_{\text{SiO}_2} + n_{\text{Al}_2\text{O}_3}) = 0.44 + 0.0139 \\ &\quad + 1.5 \times 0.05 + 0.5(0.114 + 0.32) = 0.7459 \end{aligned}$$

这时 FeO 和 CaO 的活度分别为:

$$a_{\text{FeO}} = \frac{n_{\text{FeO}}}{\sum n'} = \frac{0.0139}{0.7459} = 0.0187$$

$$a_{\text{CaO}} = \frac{n_{\text{CaO自由}}}{\sum n'} = \frac{0.44}{0.7459} = 0.589$$

再根据下式求出 L_0 值

$$\lg L_0 = \frac{[\text{O}]}{\lg a_{\text{FeO}}} = -\frac{6320}{T} + 2.734$$

平均处理温度为 1560°C , $L_0 = 0.195$

钢液中氧的平衡含量为:

$$[O] = L_O \cdot a_{FeO} = 0.195 \times 0.0187 \approx 0.0034\%$$

实际测出为0.0032%，计算和实测值基本相同。当(FeO)为0.3~0.35%时，实际测出的氧含量比计算值偏高。

分子离子共存理论可用于计算炉渣的活度，但能否用于各类渣，尚需进一步研究和证实。

第三节 炉渣的化学性质

炼钢过程是一个高温下的多相反应。特别是钢和渣界面上进行的许多化学反应更是如此。为了使反应向人们预期的方向进行，必须了解炉渣的内在规律。只有这样，才能使化学反应顺利进行。

炉渣的主要化学性质是碱度和氧化性(或还原性)。

一、炉渣的碱度

(一) 按分子理论的碱度表示法

1. 通常用渣中碱性最强、含量最高的CaO和酸性最强、含量最高的SiO₂比值R(或B)来表示。渣中含量以重量百分数、摩尔分数等表示。即：

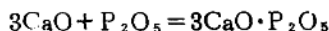
$$R = \frac{CaO\%}{SiO_2\%}, \quad R = \frac{N_{CaO}}{N_{SiO_2}}$$

这种表示法最简单。当渣中P₂O₅很少时较为准确。否则将用下面的表示法：

$$2. R = \frac{(CaO\%) - 1.18(P_2O_5\%)}{(SiO_2\%)} \quad \text{或} \quad R = \frac{(CaO\%)}{(SiO_2\%) + 0.634(P_2O_5\%)}$$

这种表示法适用含P₂O₅较多的炉渣。P₂O₅%前的系数是按下列方法计算出来的。

设P₂O₅与CaO生成3CaO·P₂O₅。因为



所以每1%P₂O₅消耗的CaO为

$$x = \frac{3 \times 56}{142} = 1.18\%$$

又设P₂O₅、SiO₂和CaO分别生成3CaO·P₂O₅、2CaO·SiO₂，即1摩尔P₂O₅与3摩尔CaO化合，而1摩尔SiO₂只与2摩尔CaO化合。因此从与CaO化合的角度来看，1摩尔P₂O₅相当于 $\frac{3}{2}$ 摩尔SiO₂。

所以

$$142 : \frac{3}{2} \times 60 = 1 : y$$

$$y = \frac{1.5 \times 60}{142} = \frac{90}{142} = 0.634$$

即每1%P₂O₅相当于0.634%的SiO₂。

若渣中含CaO40%、SiO₂18%、P₂O₅2%时用上述诸法表示的碱度如下：

$$\frac{CaO\%}{SiO_2\%} = \frac{40}{18} = 2.22$$

$$\frac{\text{CaO}\% - 1.18\text{P}_2\text{O}_5\%}{\text{SiO}_2\%} = 2.08$$

$$\frac{\text{CaO}\%}{\text{SiO}_2\% - 0.634\text{P}_2\text{O}_5\%} = 2.08$$

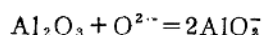
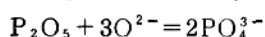
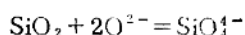
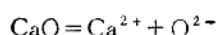
一般电炉氧化渣中 $\text{P}_2\text{O}_5 < 1\%$ ，故用上面各式表示的差别不大。通常重量百分数表示的碱度常用于生产中，以摩尔分数则多用于冶金中的理论计算。

(二) 按离子理论的碱度表示法

通常用每100克炉渣中所含氧离子的摩尔数来表示。

渣中氧离子由碱性氧化物供给；酸性或两性氧化物则消耗氧离子形成复杂的阴离子。

例如：



由于酸性和两性氧化物所消耗的氧离子的摩尔数不同，从上式可知：每增加1摩尔 SiO_2 、 P_2O_5 、 Al_2O_3 分别为：2，3，1。因此炉渣的碱度 R 为：

$$R = n_{\text{O}^{2-}} = n_{\text{CaO}} + n_{\text{MgO}} + n_{\text{FeO}} + n_{\text{MnO}} + \dots - 2n_{\text{SiO}_2} - 3n_{\text{P}_2\text{O}_5} - n_{\text{Al}_2\text{O}_3} \quad (1-17)$$

显然，渣中的碱度决定于自由 O^{2-} 的浓度。即 O^{2-} 浓度越高，炉渣碱度就越高。

由于复杂阴离子在渣中存在形式不同，所以需要的 O^{2-} 摩尔数也不同。例如： Al-O 离子有 AlO_2^- 、 $\text{Al}_2\text{O}_3^{4-}$ 等形式。因此，用 O^{2-} 摩尔数表示的碱度就不同。

知道了炉渣的各种表示方法后，便于人们选择合适的碱度，这是问题的关键所在。

炉渣碱度是十分重要的化学性质。碱度高，有利于钢水的脱磷和脱硫。当然在考虑钢—渣间反应时不应该单纯地着重于碱度，必须同时兼顾炉渣的其它物理和化学性能。只有这样，才能使炼钢过程顺利进行，达到优质、低耗、高产的目的。

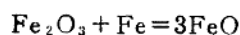
二、炉渣的氧化能力

在平炉炼钢过程或电炉炼钢的氧化期中，当炉渣形成后，如不吹氧，只加入氧化剂铁矿石，那么矿石熔化和分解后渣中就有一定数量的 FeO 。由于氧化铁既溶于渣又溶于钢液中，就会不断地向钢中传氧，直到达到平衡为止。这时钢中的杂质元素就靠由渣中传来的氧进行氧化。反之在电炉炼钢的还原期，新造的还原渣中 FeO 很低而钢中氧却较高。根据分配定律氧将从钢中往渣转移，这就是扩散脱氧。也就是钢的氧化性的一种特定情况。由此可见，炉渣的氧化能力就是炉渣向钢液熔池供氧的能力。

炉渣氧化能力一般有以下数种表示方式。

(一) 以 Fe_2O (或 $\% \Sigma \text{FeO}$) 表示全部的氧化铁。即包括 FeO 本身和 Fe_2O_3 折合为 FeO 两部分。将 Fe_2O_3 折合为 FeO 有两种方法：

1. 全氧折合法

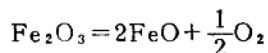


$$x = \frac{216}{160} = 1.35$$

所以计算式为

$$\% \Sigma \text{FeO} = \% \text{FeO} + 1.35(\% \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

2. 全铁折合法



$$\begin{array}{ccc} 160 & 2 \times 72 & \\ 1 & y & \end{array}$$

$$y = \frac{144}{160} = 0.9$$

所以
$$\% \Sigma \text{FeO} = \% \text{FeO} + 0.9(\% \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

通常按全铁法将 Fe_2O_3 折算为 FeO 。因为取出的渣样冷却时，表面的低价铁部分被空气氧化为高价铁，使分析时 Fe_2O_3 量偏高。用全铁法折算，则可抵消此误差。

由于这种方法较简便，因此生产中常采用。其不足之处是渣中其它成分，特别是炉渣碱度，对它的影响很大。

(二) 用炉渣中氧化铁的活度 $a_{(\text{FeO})}$ 来代替浓度，以表示其氧化能力。即渣中氧化铁活度 $a_{(\text{FeO})}$ 等于钢液中与渣平衡的含氧量 $[\% \text{O}]$ 和纯氧化铁渣下钢液饱和含氧量 $[\% \text{O}]_{\text{饱和}}$ 之比，即：

$$a_{(\text{FeO})} = \frac{[\% \text{O}]}{[\% \text{O}]_{\text{饱和}}} = L_o [\% \text{O}]$$

L_o 为氧的分配系数，其与温度的关系为：

$$\lg L_o = \lg \frac{1}{[\% \text{O}]_{\text{饱和}}} = \frac{6320}{T} - 2.734$$

当 1600°C 时 $[\% \text{O}]_{\text{饱和}} = 0.23$

这时如果测得某炉渣下，钢中氧量为 0.10% ，则该炉渣的 $a_{(\text{FeO})}$ 应为

$$a_{(\text{FeO})} = \frac{0.10}{0.23} = 0.435$$

根据这一关系，可计算不同成分渣中氧化铁的活度，为了使用方便，启普曼(Chipman)等人将计算结果以渣中氧化铁等活度线的三元相图(图1-1)表示出来。

酸性渣中氧化铁活度和它的浓度相近，其氧化能力较低。当氧化铁含量一定时(凡是平行于 $\text{CaO}-\text{SiO}_2$ 边的直线， FeO 含量相同)，随着炉渣碱度的提高，氧化铁活度增大，即氧化能力增强。当达到一定的碱度 $R \approx 2$ (过 FeO 顶点的一条虚线与 $\text{CaO}-\text{SiO}_2$ 边的交点，即可表示 $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ 数值(碱度)，或精确地说 $R = 1.87$ 时，碱性渣的氧化能力最强。当炉渣碱度继续提高时，由于渣中开始形成铁酸钙，或者受升温所限，炉渣流动性下降，致使氧化铁活度减小。

同样，用离子理论也可解释这一现象。由于 O^{2-} 是从碱性氧化物中产生的，所以加入碱性氧化物后碱度提高，除一小部分 O^{2-} 用来破坏 $\text{Si}-\text{O}$ 复合离子外，大部分使 O^{2-} 浓度增加，因而 $a_{(\text{FeO})}$ 增大。如果继续加入碱性氧化物，那么当 $\text{Si}-\text{O}$ 离子全部破坏后，将产生下

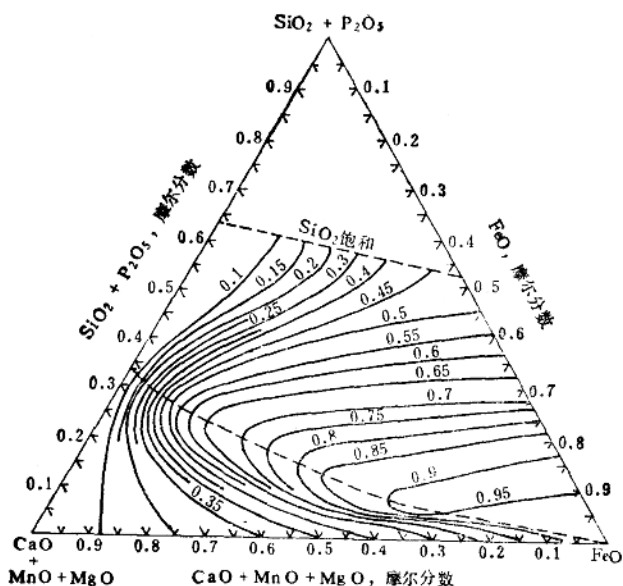
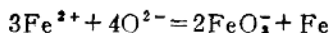


图 1-1 1600°C时, 渣中氧化铁的等活度线

• 这里的FeO即前面所述的 Fe_tO

列反应:



由于铁酸根离子的形成, 使 Fe^{2+} 和 O^{2-} 的浓度大为降低, 结果 $a_{(FeO)}$ 减小。

综上所述, 实际上是解释了炉渣碱度对氧化能力的重要影响。

此外, 当温度、炉渣碱度一定时, 随着渣中 $\Sigma(\%FeO)$ 的增加, $a_{(FeO)}$ 增大。即炉渣氧化性增强, 反之亦然。

当渣中 $\Sigma(\%FeO)$ 一定时, 温度对炉渣氧化能力的影响则随碱度的高低而不同。碱度特低时 ($R=0.8$ 以下), 温度几乎没有影响; 当 $R=1\sim 2$ 时, 随温度的升高而略有下降。碱度较高时 ($R>1.4$), $a_{(FeO)}$ 随温度的升高而减小。

第四节 炉渣的物理性质

一、炉渣的粘度

(一) 粘度的含义

炉渣的粘度是其重要物理性质之一, 它对渣—钢间的物质和热量的传递有很大影响。过粘的炉渣熔池不活跃, 冶炼不能顺利进行。电炉氧化期的脱磷、脱碳以及还原期的脱氧和脱硫都难以完成。反之, 炉渣太稀, 电弧的辐射热被强烈地反射给炉顶和炉壁, 引起炉衬的浸蚀和热损失增加。同时在电炉中扒除氧化渣重造还原渣的操作也难于进行。

液体流动时, 由于内摩擦力的存在, 使各流层间的速度不同, 其关系式:

$$f = \eta S \left(\frac{dV}{dx} \right)$$

式中 f ——内摩擦力;
 η ——比例系数;
 S ——两流层间的接触面积;

$\frac{dV}{dx}$ ——垂直于液体运动方向上的速度梯度。

因此, 上式可改写为:

$$\eta = \frac{f}{S\left(\frac{dV}{dx}\right)}$$

当 $f=1\text{dyn}$, $S=1\text{cm}^2$, $\left(\frac{dV}{dx}\right)=1\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}/1\text{cm}$ 时, $\eta=1$ 。这个 η 就代表液体的粘度, 其单位定为泊(P) ($1\text{P}=0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$)。

显然, η 的物理意义是: 单位面积上, 每单位距离内速度变化率为 1 时所产生 1 单位内的摩擦力, 就称为 1 泊(P)。

通常所说的炉渣流动性 φ 与其粘度 η 互为倒数关系:

$$\varphi = \frac{1}{\eta}$$

亦即炉渣越粘其流动性就越差。下面列出常温下的一些物质和炼钢温度下的钢、渣粘度, 作一比较 (表1-2)。

表 1-2 物质的粘度

物 质	温度, $^{\circ}\text{C}$	粘度 $[\text{Pa}\cdot\text{s}]$	物 质	温度, $^{\circ}\text{C}$	粘度 $[\text{Pa}\cdot\text{s}]$
水	25	0.089	钢 液	1595	<0.25
松节油	25	0.16	稀 炉 渣	1595	0.20
轻机油	25	8.0	正常炉渣	1595	2~10
甘 油	25	50.0	稠 炉 渣	1595	>20.0

从表1-2可知: 合适的炉渣粘度在2~10(Pa·s) 之间, 相当于轻机油的粘度, 钢液的粘度在0.25Pa·s左右, 比炉渣的粘度小10倍, 相当于室温下松节油的粘度。电弧炉还原期中, 常用扒杆上粘结的渣层厚度来判断炉渣粘度是否合适, 一般以3~4mm为宜。

(二) 影响炉渣粘度的因素

概括起来, 影响粘度的因素有三个方面:

1. 化学成分的影响 图1-2为氧化性炉渣的碱度、温度和粘度的关系。曲线上的数字表示炉渣的酸、碱性。一般说来, 温度升高即过热度大时, 炉渣粘度将下降。但变化程度不同。如图所示, 酸性渣随温度的变化比较平缓, 俗称“长渣”; 而碱性渣的曲线较陡, 即从液态变为固态所须的温度间隔比较窄, 俗称“短渣”。

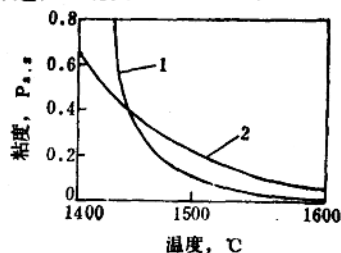


图 1-2 温度对炉渣粘度的影响
 1—碱性渣; 2—酸性渣

在1450 $^{\circ}\text{C}$ 以后, 酸性渣比一般碱性渣的粘度要大。这主要是由于 SiO_2 以正硅酸根离子