

# 改善钢质量的炉外方法

H.M.丘依科 等编著

李吉夫 译

知 水 宗 联 枝 校

## 提 要

本书是根据苏联1978年基辅技术出版社出版的《Внепечные способы улучшения качества стали》翻译的。书中总结了有关钢与渣的物理化学性质的数据；根据炉渣结构的理论，分析了用电炉渣、合成渣、氧化钙—粘土砖渣、固态混合渣进行渣洗（吹氩和不吹氩）等不同工艺对钢液脱氧和脱硫的影响；指出了块状固体混合渣料的组成成分和数量，以及渣的脱氧程度对平炉钢和转炉钢的脱氧和脱硫率的影响。根据脱气理论概括分析了电炉、平炉和氧气顶吹转炉钢炉外真空处理（在钢包中用提升法和循环法进行钢流处理）的实践数据。

另外，书中还提供了大量的有关用渣洗，吹入惰性气体和真空处理法进行炉外精炼，以及在浇注时防止钢液二次氧化等方法对平炉、转炉、电炉钢质量影响的研究成果。本书对冶金工业的工程技术人员是很有参考价值的。

本书在翻译过程中，对原书前言作了删减。

## 改善钢质量的炉外方法

H.M.丘依科 等编著

李吉夫 译

知 水 宗 联 枝 校

\*

冶金工业出版社出版

（北京厂胡同74号）

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

\*

850×1168 1/32 印张 4 1/4 字数 110 千字

1983年9月第一版 1983年9月第一次印刷

印数00,001~2,500册

统一书号：15062·3970 定价0.56元

# 目 录

## 前言

第一章 炉渣和金属的物理化学性质 .....	1
一、元素与氧的化学亲和力 .....	1
二、钢和铁的物理化学性质 .....	3
三、炉渣的物理化学性质 .....	4
四、炉渣结构及其组分活度的计算 .....	19
第二章 包中渣洗 .....	30
一、包中渣洗金属的理论基础 .....	30
二、沉淀脱氧 .....	32
三、钢的扩散(提取)脱氧 .....	36
四、钢的脱硫 .....	40
五、钢的合成渣洗 .....	46
六、还原渣下电炉钢的钢包吹氩 .....	53
七、在包中加入固体渣料吹入惰性气体处理平、转炉钢 .....	56
第三章 钢液的炉外真空处理和脱碳 .....	71
一、钢液真空处理的理论基础 .....	72
二、钢包真空处理 .....	85
三、提升法和循环法真空处理 .....	93
四、钢流真空处理 .....	97
五、钢液炉外真空脱碳 .....	104
第四章 浇注过程中防止钢液的二次氧化 .....	107
一、浇注过程中钢液与空气的相互作用 .....	107
二、浇注过程中用惰性气体保护防止钢液二次氧化 .....	110
三、用发热性混合渣料保护浇注 .....	114
四、防止连续铸钢时的二次氧化 .....	117
第五章 炉外精炼的技术经济效果 .....	119
一、合成渣洗 .....	119
二、炉外真空处理 .....	120

三、电炉钢液在还原渣下的吹氩处理 .....	122
四、包内固体渣洗吹氩处理 .....	123
五、浇注过程中防止钢液的二次氧化 .....	124
参考文献 .....	125

# 第一章 炉渣和金属的物理化学性质

## 一、元素与氧的化学亲和力

为了成功地控制冶金过程，必须了解炉渣和金属的物理化学性质及冶金过程的热力学和动力学。热力学可以确定金属—炉渣—气相之间达到的平衡状态。动力学可以指明以最大速度进行冶金过程的途径。

根据热力学第二定律，衡量反应组分的化学亲和力的是在恒温下由状态 1 变为状态 2 时的热力势（等压位）变化：

$$\Delta G = \Delta H - \Delta S'T \quad (1)$$

式中  $\Delta G = G_2 - G_1$ ——热力势的变化；

$\Delta H = H_2 - H_1$ ——焓的变化；

$\Delta S' = S_2 - S_1$ ——熵的变化；

$G_1$ 、 $H_1$ 、 $S_1$ ——参与反应组分的热力势、焓和熵；

$G_2$ 、 $H_2$ 、 $S_2$ ——反应产物的热力势、焓和熵。

令  $Q_p = -\Delta H$ ， $\Delta S = -\Delta S' = S_1 - S_2$ ，功  $A = -\Delta G$ ，代入 1 式可得：

$$A = -\Delta G = Q_p - \Delta S T = Q_p - (S_1 - S_2) T \quad (2)$$

式中  $Q_p$ ——恒压下反应的热效应；

$S_1$ 、 $S_2$ ——反应物和生成物各组分的熵。从 2 式得知，反应物的化学亲和力可由反应组分热力势的减少所作的最大功来决定。

熵的绝对值  $S_1$  和  $S_2$  依物质的状态而定。物质在气态具有高的熵值，凝聚态具有小的熵值。 $\Delta S$  值的大小及正负取决于反应的气态分子熵值的代数和。对于那些增加气态分子数的反应（例如  $2C + O_2 = 2CO$  或  $MeO + C = Me + CO$ ）， $S_1 < S_2$ ，即  $\Delta S < 0$ 。随着温度的升高，化学亲和力则有所增加：

$$A = -\Delta G = Q_p + \Delta ST$$

对于那些减少气态分子数的反应（例如  $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$  或  $2\text{MeO} + \text{O}_2 = 2\text{MeO}_2$  ①）， $S_1 > S_2$ ，即  $\Delta S > 0$ 。随着温度的升高，化学亲和力则有所减小：

$$A = -\Delta G = Q_p - \Delta ST$$

图 1 根据文献[26]数据示出了各元素与气态氧生成氧化物反应的化学亲和力与温度的关系。从列出的关系中可知，元素与氧化合后气态分子数减少的反应，其化学亲和力随温度的上升而减小，特别是对于由凝聚态直接变为气态分子的元素（如 Ca、Mg、Na）减少的最为显著。增加气态分子（CO）数的碳—氧反应，碳和氧的化学亲和力，随温度的升高和  $p_{\text{CO}}$  分压的降低而有所增加。

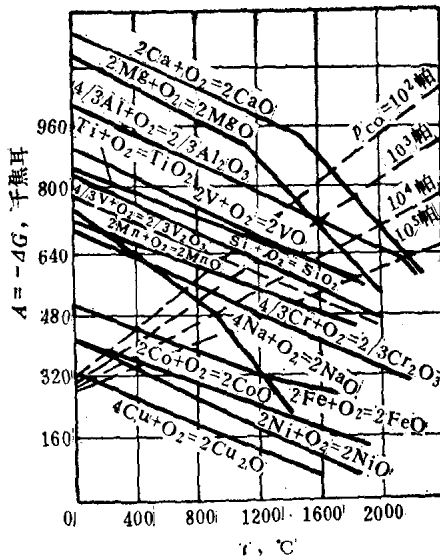


图 1 各元素和气态氧生成氧化物反应的化学亲和力 ( $A = -\Delta G$ ) 与温度的关系

① 原文为  $2\text{MeO} + \text{O}_2 = 2\text{MeO}$ ，可能有误，似应为  $2\text{MeO} + \text{O}_2 = 2\text{MeO}_2$ 。

## 二、钢和铁的物理化学性质

研究钢的精炼问题时，除了解热力学规律外，还必须了解与炉渣和金属的物理化学性质密切相关的动力学过程。铁是属于过渡族金属元素，其外层电子均未达到饱和。〔铁原子的电子分布在1、2、3、4、5、6、7各能阶和s、p、d、f亚能阶各轨道层上。铁原子有26个电子，其中18个呈氩的电子层分布，6个在 $3d^6$ 层上，2个在 $4s^2$ 层上〕<sup>①</sup>。铁原子半径为1.26埃。铁离子 $Fe^{2+}$ 的半径为0.75埃， $Fe^{3+}$ 的半径为0.64埃。铁的熔点为 $1539^{\circ}C$ ，沸点为 $2756^{\circ}C$ 。铁的溶解潜热和蒸发潜热分别为14120千焦耳/公斤和32960千焦耳/公斤。 $\delta$ -Fe在 $1536^{\circ}C$ 时的热容量为0.72千焦耳/公斤 $\cdot^{\circ}C$ ，液态铁的热容量为0.79千焦耳/公斤 $\cdot^{\circ}C$ 。在 $1650^{\circ}C$ 时铁的电阻值等于 $139 \times 10^{-8}$ 欧姆 $\cdot$ 米。Fe-C合金的密度值列于表1。铁的粘度值列于表2

表 1 Fe-C合金的密度， $\times 10^{-3}$ 公斤/米<sup>3</sup>

温 度, $^{\circ}C$	含 碳 量, %								
	0	0.1	0.15	0.20	0.30	0.40	0.60	0.80	1.0
1550	7.04	6.96	6.94	7.01	7.06	7.05	6.89	6.78	6.70
1650	7.00	6.89	6.90	6.93	6.98	6.97	6.80	6.67	6.59

加入脱氧剂可降低液态铁的粘度〔2〕。含0.16%氧的钢液其运动粘度为0.81毫米<sup>2</sup>/秒，加入0.25%Al后，其粘度增加到1.21毫米<sup>2</sup>/秒，而保持20分钟后，则又降低到0.3毫米<sup>2</sup>/秒，即比原有粘度降低60%。从实践中得出重要的结论：钢液脱氧越完全和钢中非金属夹杂物越少，则钢液粘度就越低。关于铁和钢的其它物理性质，文献〔1〕有详细的论述。

① (中括号内)原文有误，应写为：铁原子有26个电子，其能级分布为： $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 4s^2$ 。——译校者

表 2 不同温度下铁液的粘度

粘 度	温 度, °C			
	1539	1600	1700	1800
动力粘度, 帕·秒	0.007	0.006	0.0058	0.0053
运动粘度, 毫米 <sup>2</sup> /秒	1.01	0.87	0.805	0.765

### 三、炉渣的物理化学性质

为了在炉外进行脱硫、脱氧, 以获得非金属夹杂物含量低的纯净钢并缩短冶炼时间, 可利用电炉还原渣、合成渣和特殊渣料进行炉外精炼。按成分可将各类渣分为: 石灰—三氧化二铝( $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 渣系, 石灰—硅酸盐 ( $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 渣系,  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{CaF}_2$  渣系以及含二氧化硅大于50% 的酸性 ( $\text{SiO}_2-\text{CaO}-\text{MnO}-\text{FeO}$ ) 渣系。这些渣的主要成分为  $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaF}_2$ 、 $\text{MnO}$  及  $\text{FeO}$  等。用于炉外钢包处理的各种渣, 其化学成分如表3所示。

为了有效地进行炉外精炼, 所用炉渣必须有高的碱度、脱氧能力和有一定的物理化学性质, 其中最重要的是密度、熔点、粘度、扩散系数、表面张力及电导系数。炉渣的密度与其化学成分和温度有关。重金属氧化物 ( $\text{FeO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{V}_2\text{O}_5$  等) 含量多的渣具有最大的密度。石灰—三氧化二铝渣的密度为 2800 公斤/米<sup>3</sup> 左右, 石灰—硅酸盐渣的密度为 2700~2900 公斤/米<sup>3</sup>。炉渣的密度约比钢液密度 (7000 公斤/米<sup>3</sup>) 低 1/2~4/5。

在包中渣洗的温度条件下, 所用精炼渣的熔点应低于钢的熔化温度。钢的液相线温度可按 Fe-C 相图用下式估算。

$$t_{\text{液}} = 1535^{\circ}\text{C} - 70[\% \text{C}]^{\circ}$$

选择精炼渣成分时必须参照渣系相图。 $\text{CaO}-\text{SiO}_2$  渣系的相图如图2所示。渣中主要成分具有很高的熔点:  $\text{CaO}$ ——2600°C,  $\text{SiO}_2$ ——1713°C。该渣系中有两种稳定的氧化物:  $\text{CaSiO}_3$  和



表 3 渣的化学成分, %

渣 的 类 别	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>	S	R <sup>①</sup>
电炉渣	42~56	11~21	14~22	9~20	0.4~0.8	0.05~0.29	1.0~5.0	0.2~0.8	—
包中取出的石灰-粘土残渣	51.0	1.88	19.0	12.3	0.6	0.12	3.0	0.48	3.64
炉中取出的石灰-粘土合成渣	51.65	1.95	17.3	19.90	0.34	—	—	0.04	2.07
包中取出的石灰-粘土合成渣	50.91	3.34	16.14	22.27	0.52	—	—	0.18	2.82
炉中取出的石灰-三氧化二铝渣 <sup>(61)</sup>	50.95	1.88	4.02	40.66	0.36	—	—	0.12	2.02
包中取出的石灰-三氧化二铝渣	48.94	4.0	6.5	37.83	0.74	—	—	0.63	2.02
包中取出的脱氧渣	57.7	5~8	13.4	6.0	1.78	1.03	9.25	0.64	3.5
包中取出的自熔性合成渣 <sup>(58)②</sup>	46~50	—	3~12	22~26	—	—	—	—	3.8~6.1

$$\textcircled{1} \text{ 对于石灰-粘土残渣 } R = \frac{n\text{CaO} + n\text{MgO} - n\text{Al}_2\text{O}_3}{n\text{SiO}_2}$$

$$\text{对于石灰-氧化铝渣 } R = \frac{n\text{CaO} + n\text{MgO} - 2n\text{SiO}_2}{n\text{Al}_2\text{O}_3}$$

$$\text{对于自熔性合成渣 } R = \frac{\text{CaO} + 0.7\text{MgO}}{0.94\text{SiO}_2 + 0.18\text{Al}_2\text{O}_3}$$

② 包中取出的自熔性合成渣中含有5~6%Na<sub>2</sub>O, 5~27%F和其它杂质3.8~6.1%。

$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ 。在相图上 $\text{CaSiO}_3$ 有一个向上突的拐点，而 $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ 有一个突出的峰值，这两点的温度分别为 $1540^\circ\text{C}$ 和 $2130^\circ\text{C}$ 。在 $1800\text{K}$ 时它们的生成能分别为 $82.5$ 千焦耳/克分子和 $142$ 千焦耳/克分子<sup>[52]</sup>。该渣系在炼钢温度（ $1550\sim 1650^\circ\text{C}$ ）范围内，得不到碱度大于 $2$ 的流动性好的炉渣，却能得到含 $\text{SiO}_2$   $60\%$ 左右，熔点约为 $1500^\circ\text{C}$ 的酸性渣。为了使这种渣保持较高的碱度，经常用 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaF}_2$ 等渣料作稀释剂。

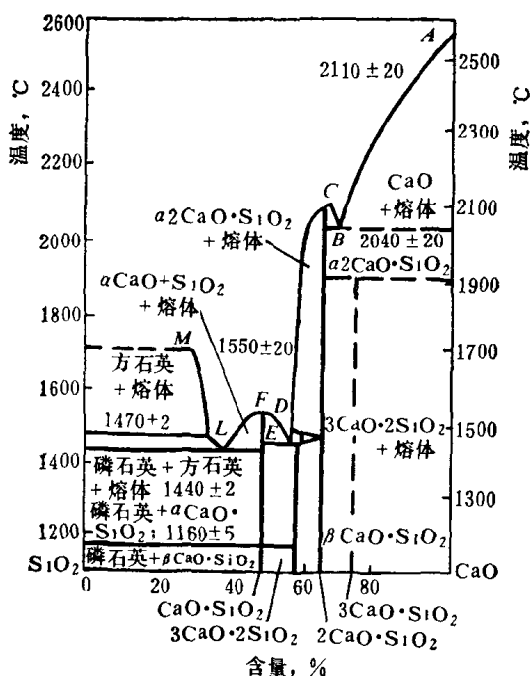


图 2 CaO-SiO<sub>2</sub>系相图

CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>渣系相图如图3所示，在此渣系内有四种化合物。从相图可看出，所有氧化钙和三氧化二铝的化合物的稳定性都比硅酸钙差得多。在CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>渣系中，当Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为 $48\sim 56\%$ 和CaO含量为 $44\sim 52\%$ 时，其熔点最低（ $1450\sim 1550^\circ\text{C}$ ）。当渣中含有少量的二氧化硅和二氧化镁杂质时，渣的熔点会更低。

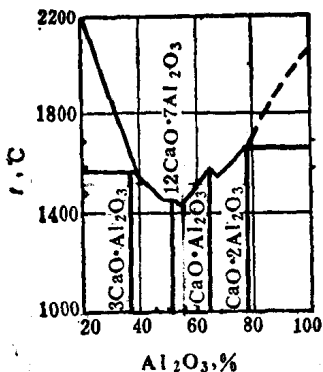


图 3 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系相图

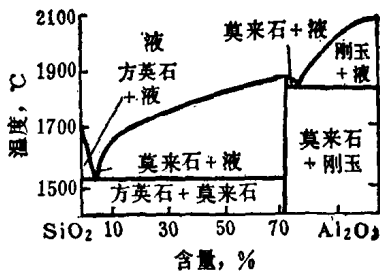


图 4 SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系相图

$\frac{\text{CaO}}{\text{Al}_2\text{O}_3} = 1.0 \sim 1.15$  和  $\frac{n\text{CaO}}{n\text{Al}_2\text{O}_3} = 1.75 \sim 2.1$  的渣具有较高的

精炼能力。在SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>渣系中(见图4),有一个稳定的化合物称为莫来石(2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>),它含有72%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,其熔点为1850°C。在此渣系中当Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量约6%时具有一个熔点为1590°C的明显的共晶点。在耐火材料生产中广泛应用的是含35~40%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的粘土砖系和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>≥70%的高三氧化二铝砖系。

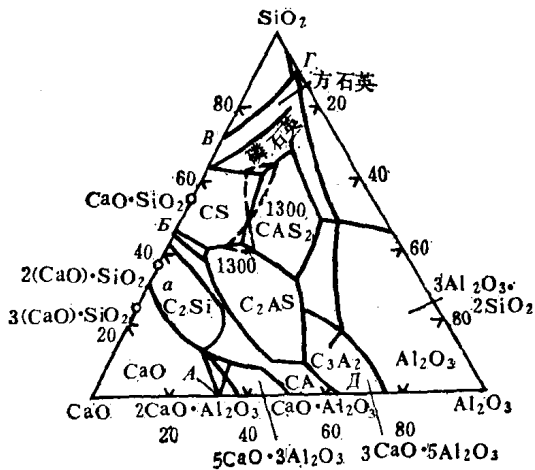


图 5 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系相图

包衬废砖、下注砖及烧粘土砖用的焙烧高岭土广泛用于稀释碱性电炉渣及合成渣。 $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 渣系的相图如图5所示。在此渣系中除有二元氧化物  $\text{CaSiO}_3$ 、 $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ 、 $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$  等外，还有两个三元氧化物：钙长石  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$  和弹性地腊  $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ ，其熔点分别为 $1600^\circ\text{C}$ 和 $1593^\circ\text{C}$ 。熔点最低的是二元和三元共晶体。熔点约为 $1500^\circ\text{C}$ 的均质渣碱度很低 ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2 < 1.2$ )，高碱度 ( $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} > 2.5$ ) 的渣，需在 $1600^\circ\text{C}$ 或更高的温度获得。这些渣都不适用于炉外渣洗。加入 $6\sim 12\%$   $\text{MgO}$  可将其熔点降低到 $1500^\circ\text{C}$ ，同时也降低了渣的粘度。加入 $\text{CaF}_2$ 、 $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 等也能达到上述效果。

$\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{CaF}_2$ 渣系的相图如图6所示。这种渣系长期应用于电炉炼钢。加入 $\text{CaF}_2$ 可使低熔点（低于 $1500^\circ\text{C}$ ）高碱度渣的碱度范围加宽。氟化钙与二氧化硅反应生成气态 $\text{SiF}_4$ ：

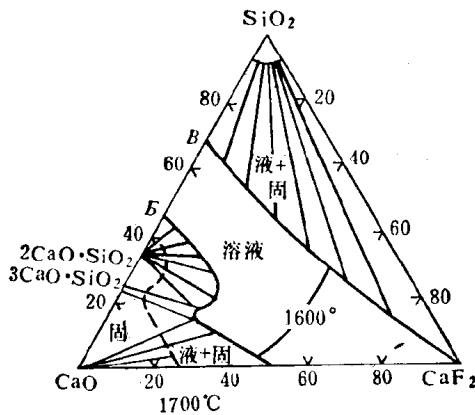
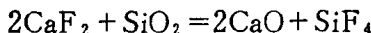


图 6  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{CaF}_2$ 系相图



该反应进行的结果可使稀释渣的 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{CaF}_2$ 的浓度降低，同时

使渣组分中的CaO有所增加。因此这种渣将逐渐变稠。为确保这种渣的流动性，应周期地加入少量萤石。

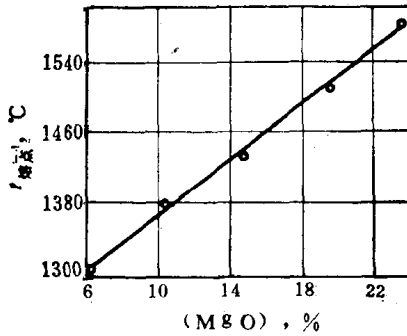


图 7 含CaO+MgO62~66.2%、CaF<sub>2</sub>9%、SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>24.8~29%之炉渣的熔点与MgO含量的关系

最有实际意义的是CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO渣系。此渣系的石灰—粘土砖渣已广泛地用于电炉和合成渣处理。渣的成分已于表3。这种渣可以用石灰和粘土砖块（炼钢生产中的废砖）组成，MgO是从炉底和炉坡进入渣中的。

H.M.丘依科于1942~1945年首次在电炉炼钢中试验并应用了石灰—粘土砖渣。已证明，用成分为CaO+MgO60~65%（MgO<12%），SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>35%和FeO小于0.5%的流动性良好的电炉渣，可在包中精炼出含氧和硫均很低的钢。根据文献[17]，丘依科等研究了CaO+MgO的总含量对粘度一定的炉渣熔点的影响（见表4）。

Г. А. 索柯洛夫研究了上述渣系成分为CaO+MgO62~65.2%、CaF<sub>2</sub>9%和SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>24.8~29%的炉渣成分对液相线温度的影响。将这些数据处理后，得到了液相线温度与渣中MgO含量的关系（见图7），并可将其写成如下直线式：

$$t_{液} = 1208^{\circ}\text{C} + 15.5 (\text{MgO}\%) \quad (3)$$

从3式可知，每增加1%的MgO，可使渣的液相线温度提高15.5°C。要想制取液相线温度不高于1400°C的炉渣，在渣中含有

表 4 炉渣粘度 $\approx 0.275$ 帕·秒的条件下炉渣成分(%)  
对其熔点的影响<sup>[17]</sup>

CaO	MgO	CaO + MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>	$t_{\text{熔}}, \text{ } ^\circ\text{C}$
58	10	68.0	20	5.0	7.0	1617
55.3	9.5	65.8	19.0	9.5	6.7	1540
52.7	9.1	61.8	18.2	13.7	6.4	1465
50.4	8.7	59.1	17.4	17.4	6.1	1448

60~62%CaO+MgO和9%CaF<sub>2</sub>的条件下, MgO含量不应高于12%。

渣的粘度、电导率或扩散系数随温度的变化可用下面的指数准则来表示:

$$\ln x = \frac{Ax}{RT} \pm \frac{Bx}{RT}$$

式中  $x$  为粘度、电导率或扩散系数;  $Ax$ 、 $Bx$  相当于活化能和熵。随着温度的升高, 粘度有所降低, 而电导率和扩散系数却有所增大。在恒温时, 扩散系数  $D$  与动力粘度  $h$  的乘积为一常数, 在1550~1650°C时, 炼钢炉渣的粘度通常波动在0.05~0.3帕·秒的范围内。

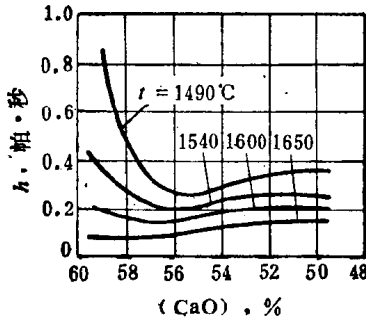


图 8 在不同温度下CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>渣系的粘度与CaO含量的关系

CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 渣系的粘度如图 8<sup>[61]</sup>所示。根据这些数据可

知，在1490~1650°C的温度范围内，含CaO54~56%、 $\frac{\text{CaO}}{\text{Al}_2\text{O}_3} = 1.2$ 的渣具有最低的粘度。加入CaF<sub>2</sub>和MgO达10%，可使这种渣的粘度降低。

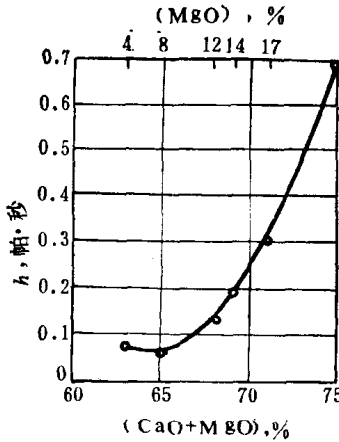


图 9 1600°C时CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>渣系的粘度与CaO + MgO含量的关系

借助于文献〔18〕的数据，H.M.丘依科等研究了CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>（SiO<sub>2</sub>20~25%，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>5~11%， $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} = 2.4 \sim 2.5$ ）渣系在1600°C时的粘度与CaO + MgO含量的关系（见图9）。

从图9的关系中可清楚地看出，当渣的成分为CaO + MgO63~65%和MgO4~8%时，其粘度最低，仅为0.05~0.06帕·秒。随着MgO浓度的增加，粘度则急剧地升高，当含MgO25%时，粘度可达到0.7帕·秒。

文献〔66〕介绍了加入Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaF<sub>2</sub>和Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>对成分为CaO58%、SiO<sub>2</sub>20%、MgO10%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>5%、CaF<sub>2</sub>7%的白渣粘度的影响，当渣的粘度为恒定值（0.3帕·秒）时，将这一研究结果绘成图10，由图可知，在上述组分全部加入的条件下，炉渣的

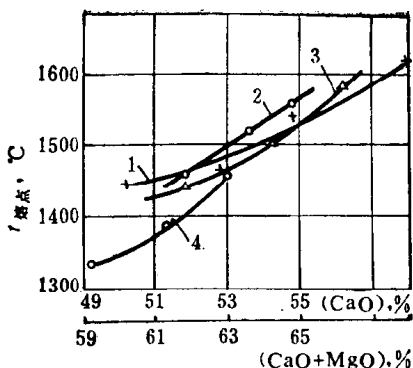


图 10 粘度为0.3帕·秒的炉渣熔点与CaO和CaO + MgO含量的关系

1—渣中含6.1~7%CaF<sub>2</sub>；2—11.5~15.5%CaF<sub>2</sub>；3—6.4~6.8%CaF<sub>2</sub>、2.9~9.1%Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>；4.6~4.8%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>；4—6.1~6.5%CaF<sub>2</sub>、2.7~2.8%Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>、8.7~9.3%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。

熔点随渣中CaO和CaO + MgO含量的增加而升高。为了得到熔点低于1500°C的炉渣，CaO + MgO的总含量应不大于63%。用Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>或Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>代替CaO，能显著地降低炉渣的熔点。总之，可推荐化学成分为：CaO50~55%、MgO6~10%、SiO<sub>2</sub>15~20%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>8~15%、CaF<sub>2</sub>50%、SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + CaF<sub>2</sub>35~40%的渣作为炉外精炼用渣。

渣的电导是研究炉渣结构的一个重要特征，它可分为离子电导和混合（电子—离子）电导。表征炉渣是离子电导特征的根由是电导随温度升高而增大；炉渣从液态向固态转变时，其电导突然急剧变小；熔渣电解时服从法拉第定律。具有离子电导特征的有碱金属和碱土金属元素(Be、Mg、Ca、Ba及其它元素)的化合物，因为这些金属元素内层电子层中充满电子。过渡族金属元素(Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co等)的高价氧化物具有混合型电导特征。

O.A.叶欣等<sup>[19]</sup>在研究FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>渣系成分与电导率关系时确认，随着SiO<sub>2</sub>含量的增加，电导率有所降低，这可用渣从电子导电向离子导电过渡来加以解释。当渣中 $\frac{FeO}{SiO_2} < 2$ 时，渣



具有离子导电性，也就是电子导电的程度随渣中高价氧化物（ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ）的减少而降低。当炉渣具有离子导电特性时，其电导率与粘度有密切关系。

图11示出， $\frac{\text{CaO}}{\text{Al}_2\text{O}_3} = 1$ 时  $\text{CaF}_2$  含量与炉渣某些性能的关系。

$\text{CaF}_2$  含量从零增加到40%，温度从1823K增加到1923K时，炉渣

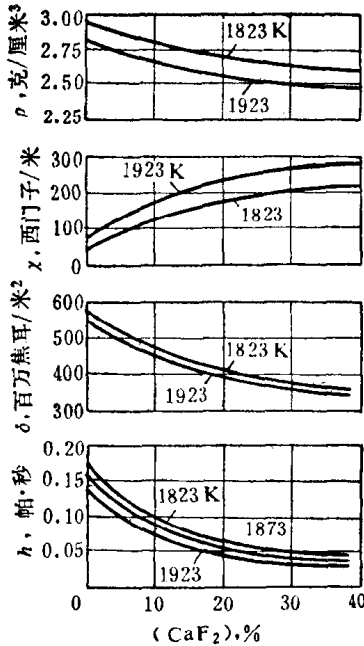


图 11  $\frac{\text{CaO}}{\text{Al}_2\text{O}_3} = 1$ 时，渣的密度  $\rho$ 、电导率  $\chi$ 、表面张力  $\sigma$  及粘度  $h$  与  $\text{CaF}_2$  含量的关系

粘度有所降低，而电导率则有所增加<sup>[88]</sup>。炉渣和熔盐的电导率及扩散系数，随着其中阴离子和阳离子半径的减小而有所增大。然而，在  $\text{NaCl}$ 、 $\text{MgCl}_2$  和  $\text{AlCl}_3$  熔体中，在熔点温度条件下，由第一熔体向第三熔体转变时，随着阳离子半径的减小，电导率有明显的降低。根据 IO. B. 巴依玛克夫的资料，某些盐类熔体在一