

Mn-Fe 熔体的脱 Si 过程及 Mn-Fe 熔体氧位研究 *

陈二保 董元麓 郭上型

(安徽工业大学冶金工程系, 马鞍山 243002)

摘要 通过实验 (1350 ℃) 测定 Mn-MnO₂ 平衡体系 Mn 液氧位, 验证了 ZrO₂(MgO) 固体电解质定氧探头可用于测定 Mn-Fe 熔体和锰液氧位. 电动势 - 氧位换算关系式为 $\ln p_{O_2} = 31.56 - (69548.8 + 46427.7 \times E) / T$. 使用 BaCO₃70%-MnO₂5%-(Fe₂O₃+BaF₂)25% (质量分数) 的熔剂对高炉 Mn-Fe 脱 Si 时, 与最高脱 Si 率 (75%) 对应的 Fe₂O₃ 含量是 12%; Mn-Fe 熔体中氧位和 C 的活度关系式为 $p_{O_2} \times 10^{12} = 35.812 - 0.106 \times a_C$; Mn-Fe 熔体中氧位和 Mn 损 ($\Delta[Mn]$) 关系为 $p_{O_2} \times 10^{12} = 6.238 + 0.679 \times \Delta[Mn]$. 使用 BaCO₃60%-BaF₂10%-MnO₂15%-Fe₂O₃15% 熔剂对高炉 Mn-Fe 脱 Si 时, 最高脱 Si 率 (88.9%) 和最高氧位 (8.31×10^{-12} Pa) 对应的脱 Si 时间为 15 min. 脱 Si 实验结果表明, 脱 Si 过程中 Mn-Fe 熔体的氧位是由熔体中碳氧反应控制的; 脱 Si 保 Mn 的最高氧位是 6.238×10^{-12} Pa.

关键词 Mn-Fe 熔体, 脱 Si, 氧位

中图分类号 TF762.8

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2001)04-0400-05

DESILICONIZATION FOR FERROMANGANESE MELT AND ITS OXYGEN POTENTIAL IN DESILICONIZATION PROCESS

CHEN Erbao, DONG Yuanchi, GUO Shangxing

Department of Metallurgy Engineering, Anhui Polytechnic University, Ma'anshan 243002

Correspondent: CHEN Erbao, professor, Tel: (0555)2400531, E-mail: ecumo@mail.ahwhpht.net.cn

Manuscript received 2000-08-14, in revised form 2000-12-12

ABSTRACT Experimental measurements of oxygen potential in liquid Mn of Mn-MnO₂ equilibrium system (1350 ℃) show that ZrO₂(MgO) solid electrolyte oxygen probe can be used to measure the oxygen potential in liquid Mn and ferromanganese melts. The relation between oxygen potential and electromotive force is $\ln p_{O_2} = 31.56 - (69548.8 + 46427.7 \times E) / T$. When BaCO₃70%-MnO₂5%-(Fe₂O₃+BaF₂)25% fluxes are used to desiliconize for blast furnace ferromanganese, the maximum desiliconization rate(75%) corresponds to Fe₂O₃12% in flux, the relations between the oxygen potential in ferromanganese melt and carbon activity as well as manganese loss ($\Delta[Mn]$) in the melt are $p_{O_2} \times 10^{12} = 35.812 - 0.106 \times a_C$ and $p_{O_2} \times 10^{12} = 6.238 + 0.679 \times \Delta[Mn]$ respectively. When blast furnace ferromanganese is desiliconized by BaCO₃60%-BaF₂10%-MnO₂15%-Fe₂O₃15% fluxes, the maximum desiliconization rate (88.9%) and the highest oxygen potential in ferromanganese melt correspond to 15 min treatment. The results of desiliconization experiments show that the oxygen potential in ferromanganese melt is controlled by carbon-oxygen reaction in the melt. In order to desiliconize for ferromanganese and to prevent manganese from oxidation the oxygen potential in ferromanganese melt has to be controlled at or under 6.238×10^{-12} Pa.

KEY WORDS ferromanganese, desiliconization, oxygen potential

降低高炉 Mn-Fe 的 P 含量, 对纯净钢冶炼具有重要意义. 根据初始 Si 含量对 Mn-Fe 氧化脱 P 影响的研

究^[1-4], 高炉 Mn-Fe 氧化脱 P 前, 一般必须氧化脱 Si, 使 Si 量降到氧化脱 P 应控制的水平. Mn-Fe 氧化脱 Si 和氧化脱 P, 必须保 Mn, 即应该控制 Mn-Fe 熔体中溶解氧的氧位, 使 Si 或 P 氧化时, Mn 不氧化或只是少量氧化. 本实验通过固体电解质定氧探头测定了脱 Si 剂氧化性和脱 Si 时间对 Mn-Fe 氧化脱 Si 保 Mn 和 Mn-Fe 熔体氧位的影响, 确定脱 Si 保 Mn 的氧位, 讨论了控制

* 国家自然科学基金资助项目 59774015

收到初稿日期: 2000-08-14, 收到修改稿日期: 2000-12-12

作者简介: 陈二保, 男, 1945 年生, 教授, 硕士

Mn-Fe 熔体氧位的反应, 为 Mn-Fe 氧化脱 Si 脱 P 保 Mn 的理论研究和工业生产提供科学依据。

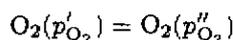
1 实验方法

实验在 1350 ℃ (偏差 ±3 ℃), N₂ 保护的 MoSi₂ 炉内进行。用 MgO 稳定的 ZrO₂ 固体电解质氧浓差电池测定 Mn 液或 Mn-Fe 熔体氧位。参比电极为 Mo+MoO₂ 电极, Mn 液或 Mn-Fe 熔体为待测电极。电动势用台式自动平衡记录仪记录。实验中各炉都用铁棒搅拌两次。Mn-MnO₂ 平衡实验, 每炉处理时间不等。将 150 g 的电解 Mn(>99.97%) 和 20 g 的 MnO₂(化学纯) 共同加入用酚醛树脂为粘结剂捣成的 MgO 坩埚内, 外套石墨坩埚保护, Mn 完全熔化后开始计时。到达预定时间后, 粘出 MnO, 定氧。脱 Si 剂用化学纯 BaCO₃、BaF₂、MnO₂ 和 Fe₂O₃ 配制。将 150 g 高炉 Mn-Fe 加入外套石墨坩埚的 Al₂O₃ 坩埚中, 待 Mn-Fe 完全熔化后, 分两批加入 15 g 脱 Si 剂。第二批脱 Si 剂加入 3 min 后开始计时。到预定脱 Si 时间后, 粘出熔渣, 定氧, 取样供分析用。本文除特别说明外, 脱 Si 剂和 Mn-Fe 熔体的含量均用质量分数。

2 实验结果与讨论

2.1 Mn-MnO₂ 平衡实验

Mn-MnO₂ 体系很容易平衡, 30 min 后, 氧浓差电池电动势或锰液氧位基本不变。设: 氧浓差电池参比电极端氧分压为 p'_{O_2} , 即固态 MoO₂ 的分解压; 待测电极端氧分压为 p''_{O_2} , 即 Mn 液溶解氧的平衡氧分压或 Mn 液氧位, 则固体电解质电池反应为



Gibbs 自由能变化与电动势的关系为

$$\Delta G = RT \ln(p''_{O_2}/p^\ominus) - RT \ln(p'_{O_2}/p^\ominus) = -nEF \quad (1)$$

式中, p^\ominus 为标准压力, 即 101.325×10^3 Pa; R 为气体常数, 即 8.314 J/(K·mol); n 为得失电子数, 此处为 4; F 为 Faraday 常数, 即 96.5×10^3 C/mol; T 为热力学温度, K; E 为电动势, V。

MoO₂(s) 分解反应为

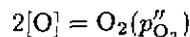
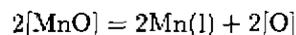
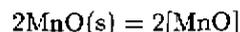
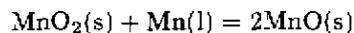


$$\Delta G^\ominus = -RT \ln(p'_{O_2}/p^\ominus) = 578.229 \times 10^3 - 166.52T \quad (J/mol) \quad (2)$$

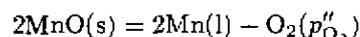
由式 (1) 和式 (2) 得到氧位 - 电动势换算式为

$$\ln p''_{O_2} = 31.56 - (69.5488 \times 10^3 + 46.4277 \times 10^3 \times E)/T \quad (3)$$

Mn-MnO₂ 体系平衡, 则以下反应及它们相互组合所得到的反应都达到平衡



后 3 个反应组合, 得到 MnO(s) 的分解平衡反应为



$$\Delta G^\ominus = -RT \ln(p''_{O_2}/p^\ominus) = 814.708 \times 10^3 - 176.74 T \quad (J/mol) \quad (4)$$

实验结果列于表 1。其中, E_m 为实测电动势; $p''_{O_2,m}$ 为按电动势 - 氧位换算式 (3) 计算的 Mn 液氧位的测量值; $p''_{O_2,c}$ 为 Mn-MnO₂ 平衡体系通过式 (4) 热力学计算得到的 Mn 液氧位的计算值。

表 1 Mn-MnO₂ 平衡实验结果

Table 1 Results of Mn-MnO₂ equilibrium experiments

Time min	E_m V	$p''_{O_2,m}$ 10^{-12} Pa	$p''_{O_2,c}$ 10^{-12} Pa
30	0.571	1.000	1.040
60	0.569	1.060	1.040
90	0.570	1.030	1.040
120	0.570	1.030	1.040
150	0.571	1.000	1.040
180	0.570	1.030	1.040

根据式 (4), 通过热力学计算得到当 1350 ℃ Mn-MnO 平衡时, MnO(s) 的分解压 (即 Mn 液的氧位) $p''_{O_2} = 1.04 \times 10^{-12}$ Pa。

固体电解质定氧探头测得的氧位测量值和上面热力学计算得到的氧位计算值相同。脱 Si 过程中 Mn-Fe 熔体的氧位高于 Mn-MnO₂ 平衡时 Mn 液的氧位, 因此, ZrO₂ 固体电解质定氧探头可用于测定 Mn 液和 Mn-Fe 熔体溶解氧的氧位, 电动势和氧位换算式为式 (3)。

2.2 熔剂氧化性对脱 Si 率和氧位的影响

实验采用的高炉 Mn-Fe 的组成为: [Mn]_i 59.72%, [C]_i 6.30%, [Si]_i 0.621%, [P]_i 0.381%, 余为 Fe。其中, 下标 i 代表各组元的初始含量。脱 Si 时间为 15 min。No.1—No.5 炉脱 Si 剂中, BaCO₃ 和 MnO₂ 的含量分别为 70% 和 5%; Fe₂O₃ 含量分别是 5%, 8%, 12%, 16% 和 20%; 余为 BaF₂。

实验结果见表 2 中的 No.1—No.5。其中 [Mn]_f, [C]_f, [Si]_f 和 [P]_f 分别是脱 Si 后 Mn-Fe 熔体中相应组元的含

表 2 Fe₂O₃ 含量不同的脱 Si 剂以及脱 Si 时间不同脱 Si 后 Mn-Fe 熔体的组成和氧位
Table 2 Composition and oxygen potential of ferromanganese melts desiliconized by flux with different Fe₂O₃ contents and for different treatment times

Furnace No.	Composition, mass fraction (%)				<i>t</i> min	<i>E_m</i> V	η_{Si} %	$\Delta[Mn]$ %	<i>a_C</i>	<i>p_{O_{2,m}}</i> 10 ⁻¹² Pa	<i>p_{O_{2,c}}</i> 10 ⁻¹² Pa
	[Mn] _f	[C] _f	[Si] _f	[P] _f							
1	59.23	6.17	0.213	0.316	15	0.504	66.0	0.49	273.0	6.80	4.40
2	60.53	6.32	0.205	0.286	15	0.514	67.0	-0.81	291.0	5.11	3.88
3	60.79	6.27	0.154	0.329	15	0.509	75.0	-1.07	280.0	5.90	4.19
4	58.54	6.11	0.231	0.349	15	0.502	63.0	1.18	270.0	7.21	4.50
5	57.98	6.09	0.341	0.316	15	0.502	45.0	1.74	274.0	7.21	4.37
6	64.51	6.30	0.133	0.385	5	0.512	76.3	-0.37	271.2	5.41	4.46
7	64.21	6.20	0.107	0.392	10	0.505	80.9	-0.07	255.1	6.61	5.05
8	64.08	6.28	0.062	0.391	15	0.497	88.9	0.06	265.4	8.31	4.66
9	64.73	6.32	0.109	0.393	20	0.502	80.5	-0.59	272.8	7.21	4.41
10	63.95	6.27	0.167	0.388	25	0.515	70.2	0.19	271.4	4.97	4.46

量, 余为 Fe; 脱 Si 率按定义式 $\eta_{Si} = ([Si]_i - [Si]_f) / [Si]_i$ 计算; Mn 损按 $\Delta[Mn] = [Mn]_i - [Mn]_f$ 计算; 实测 Mn-Fe 熔体氧位 $p_{O_{2,m}}$ 用式 (3) 计算; $p_{O_{2,c}}$ 是假设碳氧反应平衡, 由 Mn-Fe 熔体中 C 的活度 (表 2 中的 a_C), 用式 (14) 通过热力学计算得到的 Mn-Fe 熔体氧位; E_m 为实测的电动势。

脱 Si 剂中的 Fe₂O₃ 作为氧化剂, 为 Mn-Fe 中 Si 等元素氧化供氧。脱 Si 剂中 Fe₂O₃ 含量增加 (<12%), 有使脱 Si 率提高的倾向。Fe₂O₃ 是酸性氧化物, 在熔渣中以 FeO²⁻ 离子形式存在, 生成 FeO²⁻ 必然消耗渣中的 O²⁻ 离子, 使熔渣碱度降低。因此, 脱 Si 剂中 Fe₂O₃ 含量超过 12% 之后, 也有使脱 Si 率减少的倾向。另外, 脱 Si 剂中 BaF₂ 含量, 随 Fe₂O₃ 含量增加而降低, 使渣的流动性变差, 也会使脱 Si 率降低。在 Fe₂O₃ 含量较低的范围, 使脱 Si 率增加的倾向超过使其降低的倾向, 脱 Si 率随 Fe₂O₃ 含量增加而增加。在 Fe₂O₃ 含量较高的范围则相反, 脱 Si 率随 Fe₂O₃ 含量增加而减小。从表 2 中 (No.1—No.5) 可见, 脱 Si 剂中 Fe₂O₃ 含量为 9%—12% 时, 脱 Si 率较高 (75% 左右)。

脱 Si 剂的氧化性对 Mn-Fe 熔体氧位的影响没有明显的规律。例如, Fe₂O₃ 的含量从 5% 增至 20%, Mn-Fe 的熔体氧位从 6.80×10^{-12} Pa 微增至 7.21×10^{-12} Pa; Fe₂O₃ 含量为 8% 和 12% 时, Mn-Fe 熔体氧位 (5.11×10^{-12} 和 5.90×10^{-12} Pa) 低于 Fe₂O₃ 含量为 5% 时的值。

选 Mn-C 系 C 的浓度为 1% 的熔体为标准态, 以 Henry 定律作参考。Mn-Fe 熔体中 C 的活度计算式为

$$a_C = f_C \times [\%C] \quad (5)$$

其中, 活度系数 f_C 的计算式为

$$\lg f_C = e_C^C [\%C] + e_C^{Si} [\%Si] + e_C^P [\%P] + e_C^{Fe} [\%Fe] \quad (6)$$

文献 [6] 报道, 1350 ℃ Mn 基体系 Si 对 C 的活度相互作用系数 $e_C^{Si} = 0.1219$, 而其它活度相互作用系数缺少 1350 ℃ 的值, 可选用文献 [7] 报道的 1400 ℃ 的值作为近似值, 即: $e_C^C = 0.2150$, $e_C^P = 0.1408$, $e_C^{Fe} = 0.0073$ 。代入式 (6) 计算出 Mn-Fe 熔体中 C 的活度 a_C , 亦见表 2。

将表 2 No.1—No.5 中 Mn-Fe 熔体实测氧位 $p_{O_{2,m}}$ 对 C 的活度 a_C 进行线性回归处理。得到的直线回归方程为

$$p_{O_{2,m}} \times 10^{12} = 35.872 - 0.106 \times a_C \quad (r = -0.96) \quad (7)$$

其中, r 为线性相关系数。

将表 2 No.1—No.5 中 Mn-Fe 熔体实测氧位 $p_{O_{2,m}}$ 对 Mn 损 $\Delta[Mn]$ 做线性回归处理。得到直线回归方程为

$$p_{O_{2,m}} \times 10^{12} = 6.238 + 0.679 \times \Delta[Mn] \quad (r = 0.91) \quad (8)$$

令式 (8) 中 $\Delta[Mn] = 0$, 则得到 Mn-Fe 熔体脱 Si 保 Mn 的最高氧位为 6.238×10^{-12} Pa。

2.3 脱 Si 时间对脱 Si 率和氧位的影响

实验用的高炉 Mn-Fe 组成为: [Mn]_i 64.14%, [C]_i 6.32%, [Si]_i 0.56%, [P]_i 0.393%, 余为 Fe。实验用的脱 Si 剂组成相同, 即 BaCO₃ 为 60%, MnO₂ 为 15%, BaF₂ 为 10%, Fe₂O₃ 为 15%。实验结果见表 2 中 No.6—No.10。

脱 Si 率对脱 Si 时间作图 1。根据化学平衡的概念, 极限脱 Si 率为脱 Si 反应 $[Si] + O_2 = (SiO_2)$ 平衡时所对应的脱 Si 率。脱 Si 时间越长则脱 Si 率越高。本实验用的是 Al₂O₃ 坩埚, Al₂O₃ 对强碱性的 BaCO₃ 基脱 Si 剂而言为酸性氧化物。脱 Si 时间长, Al₂O₃ 坩埚受侵蚀严重, 脱 Si 剂碱度会降低, 脱 Si 率减小。从表 2 中 No.6—No.10 和图 1 可以看到, 本实验最佳脱 Si 时间为 15 min, 对应的脱 Si 率和 Mn 损分别为 88.9% 和 0.06%。

Mn-Fe 熔体氧位 $p_{O_{2,m}}$ 对脱 Si 时间作图 2。实质上

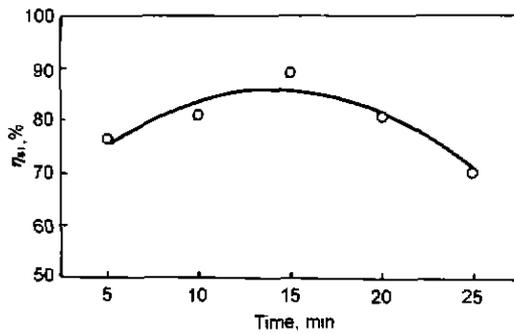


图 1 脱 Si 率和脱 Si 时间的关系

Fig.1 Relation between η_{Si} and desilicization time

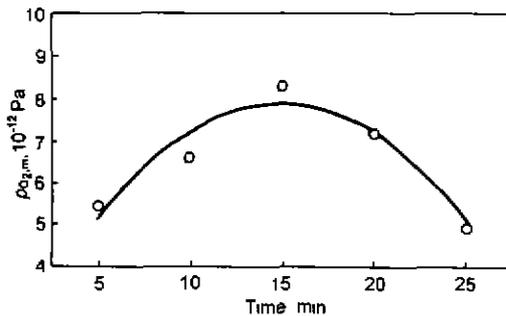


图 2 Mn-Fe 熔体氧位 $p_{O_2,m}$ 与脱 Si 时间的关系

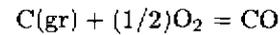
Fig.2 Oxygen potential of ferromanganese melts vs desilicization time

Mn-Fe 熔体氧位 $p_{O_2,m}$ 是由脱 Si 剂中的氧化剂 (MnO_2 , Fe_2O_3 和 $BaCO_3$ 分解产生的 CO_2) 向 Mn-Fe 熔体供氧的速度和 Mn-Fe 熔体中的组元 (Mn, Fe, Si 和 P) 氧化耗氧速度决定的。供氧速度与脱 Si 剂中的氧化剂浓度和 Mn-Fe 熔体中的溶解氧浓度 (即氧位) 有关。耗氧速度与 Mn-Fe 熔体中组元与氧的碰撞 (有效) 几率有关, 氧位高、碰撞几率大、耗氧速度大。脱 Si 初期, 脱 Si 剂中氧化剂浓度高, Mn-Fe 熔体氧位低 ($p_{O_2,m}=3.23 \times 10^{-12}$ Pa), 供氧速度大于耗氧速度, 氧位随脱 Si 时间延长而提高。脱 Si 时间越长, 脱 Si 剂中氧化剂浓度越低, Mn-Fe 熔体氧位越高, 即供氧速度降低, 耗氧速度提高。15 min 后, 耗氧速度超过供氧速度, 氧位随时间延长而降低。

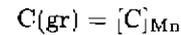
表 2 中 No.6—No.10 的脱 Si 率都高于 70%, Mn 损最高仅为 0.19%, 完全达到脱 Si 保 Mn 的目的。 $p_{O_2,m}$ 平均值为 6.502×10^{-12} Pa, 与式 (8) 得到的值 (6.238×10^{-12} Pa) 的相对误差为 4%。No.8 炉实验, 氧位高, 脱 Si 率也高, 但 Mn 损仅为 0.06%, 原因在于脱 Si 剂中 MnO_2 (能抑制 Mn 氧化) 高。No.3 和 No.8 炉实验, 脱 Si 时间相同 (15 min), 均达到了脱 Si 率最高且保 Mn 的目的。比较脱 Si 剂的组成以及脱 Si 效果后可以看出, 选择后一组成的脱 Si 剂, 不但经济而且脱 Si 率更高。

2.4 控制脱 Si 过程中 Mn-Fe 熔体氧位的反应

由石墨 (graphite, 本文略写为 gr) 不完全燃烧反应的标准 Gibbs 自由能变化和石墨溶解于 Mn 液的标准溶解 Gibbs 自由能变化, 可以计算出 Mn-Fe 熔体中碳氧反应的标准 Gibbs 自由能变化。



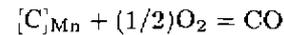
$$\Delta G^\ominus = -112.877 \times 10^3 - 86.52T \quad (\text{J/mol}) \quad (9)$$



$$\Delta G^\ominus = RT \ln \gamma_C^0 + RT \ln x_C^0 \quad (\text{J/mol}) \quad (10)$$

式中, γ_C^0 为 Mn-C 系中 C 含量无限稀时 C 的活度系数, x_C^0 为 Mn-C 系 C 的质量分数为 1% 时所对应的摩尔分数。

Mn-Fe 熔体中碳氧反应为



$$\Delta G^\ominus = -112.877 \times 10^3 - 86.52T - RT \ln \gamma_C^0 - RT \ln x_C^0 \quad (\text{J/mol}) \quad (11)$$

将 $\ln \gamma_C^0 = -2.429$ [7] 和 $x_C^0 = 0.044$ 代入式 (11), 得

$$\Delta G^\ominus = -112.877 \times 10^3 - 40.43T = -RT \ln K^\ominus \quad (\text{J/mol}) \quad (12)$$

式中, K^\ominus 为 Mn-Fe 熔体中碳氧反应的标准平衡常数。

将 $T=1623$ K 代入式 (12), 计算出 $K^\ominus=555761$

将碳氧反应的标准平衡常数的表示式整理后得到

$$K^\ominus = \frac{p_{CO}^{1/2} \times (p_{CO}/p^\ominus)^{1/2}}{a_C \cdot p_{O_2}^{1/2}} \quad (13)$$

设 $p_{CO}=101.325 \times 10^3$ Pa, 计算后得到

$$p_{O_2}^{1/2} = 0.573 \times 10^{-3}/a_C \quad (14)$$

将 Mn-Fe 熔体中 C 的活度 a_C 代入式 (14), 即可计算出表 2 中列出的 $p_{O_2,c}$ 值。

从式 (7) 可知, $p_{O_2,m}$ 与 a_C 之间存在很好的线性关系: 表 2 中 $p_{O_2,m}$ 的值总是高于 (有时很接近) $p_{O_2,c}$ (碳氧反应未达到平衡), 这说明脱 Si 过程中 Mn-Fe 熔体氧位是由 Mn-Fe 熔体中碳氧反应控制的。由实验结果得出的这一结论与文献 [8] 通过锰氧和碳氧反应平衡热力学计算得出的结论吻合。

3 结论

(1) Mo-MoO₂ 参比电极、MgO 稳定的 ZrO₂ 固体电解质定氧探头可用于测定 Mn-Fe 熔体氧位。电动势-氧位转换式为

$$\ln p_{O_2} = 31.56 - (69.5488 \times 10^3 + 46.4277 \times 10^3 \times E)/T$$

(2) 脱 Si 过程中 Mn-Fe 熔体氧位是由碳氧反应控制的.

(3) 在 1350 ℃, 组成为 BaCO₃70%-MnO₂5%-(Fe₂O₃+BaF₂)25% 的脱 Si 剂, 对高炉 Mn-Fe 脱 Si 时间为 15 min, 最高脱 Si 率 (75%) 所对应的 Fe₂O₃ 含量为 12%; Mn-Fe 熔体氧位与 C 活度和 Mn 损的关系式分别是

$$p_{O_2} \times 10^{12} = 35.812 - 0.106 \times a_C$$

和

$$p_{O_2} \times 10^{12} = 6.238 + 0.679 \times \Delta[Mn]$$

(4) 在 1350 ℃, 组成为 BaCO₃60%-BaF₂10%-MnO₂15%-Fe₂O₃15% 的脱 Si 剂, 对高炉 Mn-Fe 脱 Si (处理时间不同), 最高脱 Si 率 (88.9%) 和最高氧位 (8.31×10^{-12} Pa) 所对应的脱 Si 时间为 15 min.

(5) 在 1350 ℃, BaCO₃-BaF₂-MnO₂-Fe₂O₃ 脱 Si 剂对高炉 Mn-Fe 脱 Si, 脱 Si 保 Mn 的最高氧位为 6.238×10^{-12} Pa.

参考文献

- [1] Guo S X, Dong Y C, Zhang Y P, Chen E B. *J Iron Steel Res*, 1999; 11(1): 8
(郭上型、董元篪、张友平、陈二保. 钢铁研究学报, 1999; 11(1): 8)
- [2] Maya K, Matsuo T. *Tetsu Hagané*, 1996, 82: 123
(真屋敬一、松尾亨. 铁と钢, 1996; 82: 123)
- [3] Fujita M, Katayama H, Yamamoto A, Matsuo M. *Tetsu Hagané*, 1988; 74: 816
(藤田正村、片山裕之、山本明、松尾充高. 铁と钢, 1988; 74: 816)
- [4] Aida E, Joon M D, Sano N. *Tetsu Hagané*, 1988; 74: 1931
(相天英二、冈东隆、佑野信雄. 铁と钢, 1988; 74: 1931)
- [5] Huang X H. *Metallurgical Principles of Iron and Steel*. Revised Edition, Beijing: Metallurgical Industrial Press, 1990: 330
(黄希祐. 钢铁冶金原理 (修订版). 北京: 冶金工业出版社, 1990: 330)
- [6] Wang H C. *Doctoral Thesis*, University of Science and Technology Beijing, 2000
(王海川. 北京科技大学博士学位论文, 2000)
- [7] Chen E B, Yu X B, Dong Y C, Guo S X. *J Iron Steel Res Int*, 1997; 4(2): 7
- [8] Dong Y C, Guo S X, Chen E B. *J Iron Steel Res Int*, 1999; 6(1): 8