

Effect of weak oxidizer $\text{CO}_2(\text{g})$ on the vanadium slag production from the vanadium-bearing molten iron

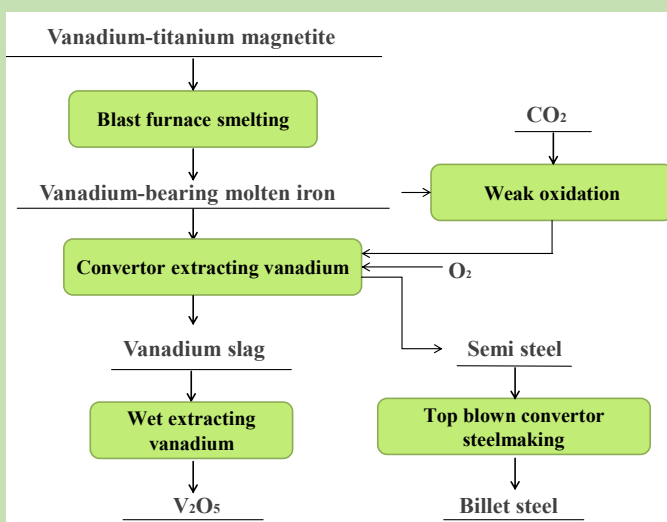
Zhitong SUI*, Taiping LOU, Shouxing HUO

School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China

Abstract: 75%~85% of vanadium products in the world are produced from the vanadium–titanium magnetite, in vanadium–titanium magnetite, Fe, V and Ti are distributed in the isomorphism phase, which cannot be enriched and separated by physical methods. Usually, the vanadium slag and the semi-steel are obtained by the oxygen blowing process in the steel making process. The semi-steel is used to produce steel, and the vanadium slag is the raw material for extracting vanadium. When vanadium slag is obtained by blowing vanadium-bearing molten iron with oxygen, the impurities such as Ca, Mg, Al, Ti and Si in the molten iron enter into slag phase along with V, oxygen as a strong oxidizer. Both vanadium oxide and impurity oxides are contained in the vanadium slag, resulting in high impurity content and low vanadium grade, which make the subsequent vanadium extraction process costly, that is the drawback of the current vanadium slag process. Weak oxidizer $\text{CO}_2(\text{g})$ was used in this research to produce the low-silicon and high-vanadium slag by selective oxidation, during which Si was removed into slag firstly and then V left in the molten iron by weak oxidation. Theoretical analysis was firstly performed and then the effects of temperature, flow rate of $\text{CO}_2(\text{g})$, stirring and smelt agent on the desilication process were investigated. The results showed that the desilication rate reached 68.62%, and the oxidation rate of vanadium was only 0.73% when the desilication process was performed with stirring and $\text{CO}_2(\text{g})$ flow rate of 1 L/min at 1450 °C.

Both vanadium oxide and impurity oxides are contained in the vanadium slag, resulting in high impurity content and low vanadium grade, which make the subsequent vanadium extraction process costly, that is the drawback of the current vanadium slag process. Weak oxidizer $\text{CO}_2(\text{g})$ was used in this research to produce the low-silicon and high-vanadium slag by selective oxidation, during which Si was removed into slag firstly and then V left in the molten iron by weak oxidation. Theoretical analysis was firstly performed and then the effects of temperature, flow rate of $\text{CO}_2(\text{g})$, stirring and smelt agent on the desilication process were investigated. The results showed that the desilication rate reached 68.62%, and the oxidation rate of vanadium was only 0.73% when the desilication process was performed with stirring and $\text{CO}_2(\text{g})$ flow rate of 1 L/min at 1450 °C.

Key words: vanadium slag; vanadium-bearing molten iron; desilication; weak oxidizer $\text{CO}_2(\text{g})$; selective oxidation



收稿: 2019-02-27, 修回: 2019-04-16, 网络发表: 2019-06-05, Received: 2019-02-27, Revised: 2019-04-16, Published online: 2019-06-05
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 50234040); 国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(编号: 2007CB613503)
作者简介: 隋智通(1940-), 男, 山东省烟台市人, 本科, 教授, 冶金物理化学专业, Tel: 024-23913669, E-mail: suizt3583@163.com.

引用格式: 隋智通, 娄太平, 霍首星. 弱氧化剂 $\text{CO}_2(\text{g})$ 对含钒铁水吹炼制钒渣的影响. 过程工程学报, 2019, 19(增刊 1): 45-50.
Sui Z T, Lou T P, Huo S X. Effect of weak oxidizer $\text{CO}_2(\text{g})$ on the vanadium slag production from the vanadium-bearing molten iron (in Chinese).
Chin. J. Process Eng., 2019, 19(S1): 45-50, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219149.

弱氧化剂 CO₂(g)对含钒铁水吹炼制钒渣的影响

隋智通*, 姜太平, 霍首星

东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819

摘要: 采用弱氧化剂选择性氧化含钒铁水, 先弱氧化脱硅, 再强氧化提钒, 以获得高品位的钒渣。对弱氧化剂 CO₂ 浅度氧化含钒铁水炼制钒渣进行了理论分析, 确定脱硅保钒反应的物理化学条件, 研究了温度、CO₂ 气体流量、搅拌和熔剂等因素对脱硅保钒反应的影响及脱硅反应产物的分布。结果表明, 温度 1450℃ 及 CO₂ 气体流量 1 L/min、有搅拌条件下, 脱硅率高达 68.62%, 而钒氧化率仅为 0.73%。

关键词: 钒渣; 铁水; 脱硅; 弱氧化剂; 选择性氧化

中图分类号: P618.61 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2019)S1-0045-06

1 前言

当前, 世界上 75%~85% 的钒产品是以钒钛磁铁矿为原料生产的^[1]。钒钛磁铁矿中 Fe、V 和 Ti 以类质同像形式赋存, 无法借助物理方法富集分离, 通常在炼钢过程中通过氧气吹炼含钒铁水生产钒渣。钒钛磁铁矿精矿经高炉或电炉冶炼得含钒生铁水, 经氧化吹炼得含 12%~16% V₂O₅ 的钒渣和半钢, 半钢用于吹炼成钢, 钒渣为提钒原料, 这是用含钒铁水生产钒渣的主要方法^[2]。用强氧化剂-氧气吹炼含钒铁水时, 铁水中 Ca、Mg、Al、Ti 和 Si 等杂质随 V 一起进入渣相, 所得钒渣是既含氧化钒又含硅等杂质的氧化物, 导致钒渣杂质含量高、钒品位低, 严重恶化后续由钒渣提钒过程^[1-6]。该问题的解决思路是选择氧化能力比氧气弱的氧化剂浅度氧化含钒铁水^[7-9], 使铁水中 Ca、Mg、Al、Ti 和 Si 等与氧亲和力比钒强的杂质有选择地氧化进入渣相, 而钒几乎不氧化留在铁水中, 再用强化剂-氧气深度氧化已净化的含钒铁水, 所得钒渣杂质含量低而钒品位高, 对后续提高 V₂O₅ 的资源利用率具有重要意义^[10-12]。

因此, 选择合适的弱氧化剂是实现脱硅保钒的关键, 而弱氧化剂需只氧化铁水中的硅等杂质而几乎不氧化钒, 以达到脱硅保钒的目的, 这是选择弱氧化剂的关键。为此, 本工作拟从理论与实验两方面分析研究弱氧化剂对含钒铁水炼制钒渣的影响。

2 含钒铁水中 CO₂ 脱硅保钒反应的热力学分析

由热力学数据^[10-14]知, 标准状态下, 铁水中元素氧化能力为 Ca>Mg>Al>Ti>Si>V>Mn>Cr>Fe, 其中 Si 与 V 氧化能力相近、化学性质相似。铁水中 Si 氧化可生成 SiO₂(s) 和 SiO(g), V 氧化生成 V₂O₃(s) 和 V₂O₅(s), 但钒渣中以 V₂O₃(s) 为主^[15-18]。由于 Si 与 V 的化学性质相

似, 且铁水中 Si 含量高, 对后续钒加工及钒制品的危害大^[1-5,13,14], 因此以 Si 为典型杂质探讨脱硅保钒反应的物理化学条件。可用作脱硅保钒的弱氧化剂多种多样(固态或气态、单一或复合化合物), CO₂ 是一种典型的弱氧化剂, 又是温室气体, 在冶金企业中排放量较大, 用其为脱硅保钒的弱氧化剂, 既改善钒渣品质, 又变害为利, 具有双重意义^[19,20]。因此, 从热力学方面分析 CO₂ 脱硅保钒反应的物理化学条件。表 1 为典型含钒铁水的组成。

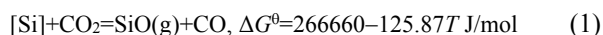
表 1 典型含钒铁水的组成

Table 1 Chemical composition of the vanadium-bearing molten iron

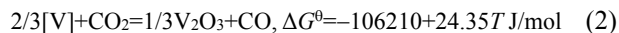
Element	C	Si	Mn	P	S	V	Fe
Content/wt%	4.41	0.58	0.33	0.061	0.044	0.41	94.165

2.1 脱硅反应产物为 SiO(g)

向钒铁水中喷入 CO₂(g) 时, 形成的气泡不断上浮到铁水表面的过程中, CO₂(g) 气泡与铁水中 Si 和 V 分别发生氧化反应^[15]:

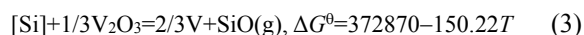


$$\Delta G_{(1)}=\Delta G^0+RT\ln[p_{\text{CO}}p_{\text{SiO}}/(a_{[\text{Si}]}p_{\text{CO}_2}^0)] \text{ J/mol}$$



$$\Delta G_{(2)}=\Delta G^0+RT\ln[a_{[\text{V}_2\text{O}_3]}^{1/3}p_{\text{CO}}/(a_{[\text{V}]}^{2/3}p_{\text{CO}_2}^0)] \text{ J/mol}$$

联立式(1)与(2)得竞争反应式(3):



$$\Delta G_{(3)}=\Delta G^0+RT\ln[a_{[\text{V}]}^{2/3}p_{\text{SiO}}/(a_{[\text{Si}]}p_{\text{V}_2\text{O}_3}^{1/3})]$$

式中, [Si], [V] 分别为铁液中 V 和 Si 含量(wt%), [V₂O₃] 为渣相中 V₂O₃ 的摩尔分数, $a_{[\text{V}]}$, $a_{[\text{Si}]}$ 和 $a_{[\text{V}_2\text{O}_3]}$ 分别为铁液中 V, Si 和渣相中 V₂O₃ 的活度, ΔG^0 为标准吉布斯自由能变(J/mol), $\Delta G_{(3)}$ 为反应(3)的吉布斯自由能变(J/mol), $R=8.314 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$ 为气体常数, $p=p^0$ (标准压力)=10⁵ Pa 为

压力, T 为温度(K)。

铁液中 A 元素的活度系数 f_A 可由下式计算:

$$\lg f_A = \sum_{i=1} e_A^{B_i} w[B_i]$$

式中, $e_A^{B_i}$ 为铁液中元素 B_i 与元素 A 的相互作用系数, $w[B_i]$ 为铁液中元素 B_i 的含量(wt%)。

设 $p_{\text{SiO}}=p_{\text{CO}}=10^{-3}p^0$, $p_{\text{CO}_2}=p^0$, $a_{[\text{V}_2\text{O}_3]}=1$, $a_{[\text{Si}]}=f_{[\text{Si}]}[\text{Si}]$, $a_{[\text{V}]}=f_{[\text{V}]}[\text{V}]$, 根据表 1 铁水成分, 假定平衡时 V 含量 $[\text{V}]_e=0.41\text{wt}\%$, 计算不同温度下反应(3)达平衡时 Si 含量 $[\text{Si}]_e^{[10]}$, 结果见表 2。可以看出, 含钒铁水中实际 Si 含量低于 $[\text{Si}]_e$ 时, 钒开始氧化; 喷吹 CO_2 可脱除铁水中的硅使其含量大幅度降低; 温度越高, 钒越难氧化, 铁水中 $[\text{V}]_e$ 基本无变化。

表 2 反应(3)在不同温度下平衡时的 Si 和 V 含量
Table 2 Equilibrium concentrations of Si and V in reaction (3) at different temperatures

Temperature/K	1623	1673	1723	1773
$[\text{Si}]_e/\text{wt}\%$	0.503	0.221	0.101	0.049
$[\text{V}]_e/\text{wt}\%$	0.410	0.410	0.410	0.410

从热力学和动力学两方面阐释 CO_2 脱硅保钒反应的机制。

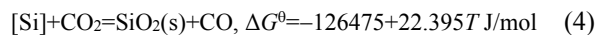
(1) 热力学方面: 在铁水中 CO_2 气泡上浮过程中, 气泡表面发生气/液间脱硅反应[式(1)]。开始反应瞬间, 气泡中 $p_{\text{CO}_2}=p^0$, 而反应产物 $\text{CO}(\text{g})$ 和 $\text{SiO}(\text{g})$ 很少, 分压接近于 $p_{\text{CO}}=p_{\text{SiO}}=0$, 此时脱硅反应的热力学趋势最大。随反应进行, 气泡中 p_{CO_2} 逐渐变小, p_{CO} 和 p_{SiO} 逐渐变大, 反应趋势逐渐减弱。 CO_2 气泡上浮时间短, 气泡里维持 p_{CO} 和 $p_{\text{SiO}} \approx 0$ 的似“真空”状态, 有利于推进脱硅反应。该气泡上浮到达液面即破裂, 反应即刻结束。这种气泡往复不断地上浮-破裂的现象称为气泡冶金, 喷吹 CO_2 气浅度氧化铁水中硅的反应过程即是气泡冶金

原理的应用^[21-23]。

(2) 动力学方面: 脱硅反应发生在气泡-铁水界面上, 生成的气态产物 $\text{CO}(\text{g})$ 和 $\text{SiO}(\text{g})$ 直接进入 CO_2 气泡, 无需克服生成新相(CO 和 SiO 气泡)的势垒, 促进脱硅反应。

2.2 脱硅反应产物为 $\text{SiO}_2(\text{s})$

含钒铁水中的 Si 与 $\text{CO}_2(\text{g})$ 还会发生如下反应:



$$\Delta G_{(4)}=\Delta G^0+RT\ln[a_{[\text{SiO}_2]}p_{\text{CO}}/(a_{[\text{Si}]}p_{\text{CO}_2})]$$

当 $p_{\text{CO}}=10^{-3}p^0$, $p_{\text{CO}_2}=p^0$, $a_{[\text{SiO}_2]}=1$, $a_{[\text{Si}]}=f_{[\text{Si}]}[\text{Si}]$ 时, 脱硅反应(1)和(4)的吉布斯自由能 $\Delta G_{(1)}$ 与 $\Delta G_{(4)}$ 随温度 T 的变化见表 3。可以看出, 温度越高, $\Delta G_{(4)}$ 与 $\Delta G_{(1)}$ 越接近, 越有利于硅氧化成 $\text{SiO}(\text{g})$ 降低铁水中 Si 的含量。

表 3 脱硅反应(1)和(4)的吉布斯自由能随温度的变化
Table 3 Changes of Gibbs free energy of the desilication reactions (1) and (4) at different temperatures

Temperature/K	1623	1673	1723	1773
$\Delta G_{(1)}/(\text{kJ/mol})$	-143.978	-156.629	-169.280	-181.930
$\Delta G_{(4)}/(\text{kJ/mol})$	-193.304	-195.363	-197.422	-199.380

3 结果与讨论

3.1 脱硅保钒反应的影响因素

基于上述热力学分析, 研究并优化 CO_2 脱硅保钒反应的影响因素^[23-25]。含钒铁水脱硅保钒实验在 MoSi_2 高温炉(自制)中进行, 用 Pt-Rh 热电偶配合可编程序温度控制仪(北京新宇胜利仪器有限责任公司)测定炉温。将一定量的含钒生铁和 30 g 熔渣装入刚玉坩埚中, 放入 MoSi_2 高温管式炉内加热熔融, 通氩气保护, 融化并保温 30 min, 通入 CO_2 气体, 开始计时, 每隔 8 min 取一次样, 用 Optima8300DV 电感耦合等离子质谱(ICP-MS, 美国 PE 公司)分析其化学成分, 直至实验结束。

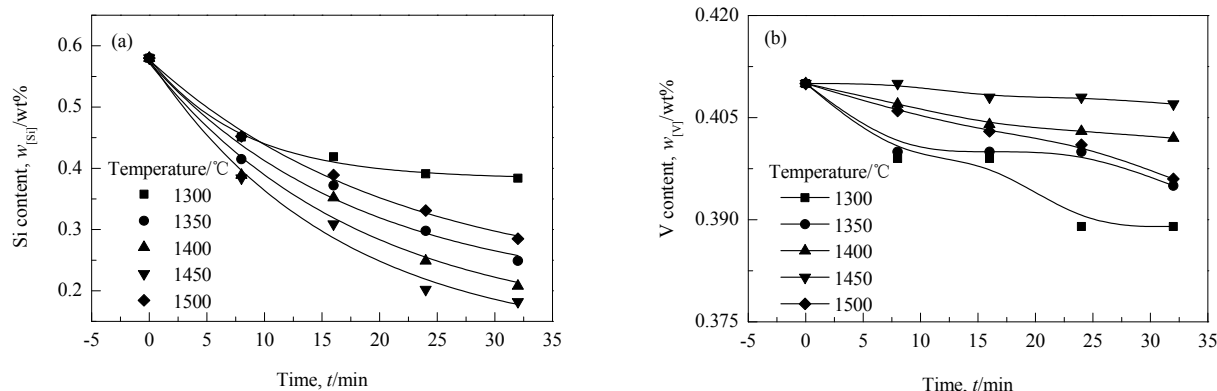


图 1 温度对含钒铁水中 Si 和 V 含量的影响

Fig.1 Effects of temperature on contents of Si and V in the vanadium-bearing molten iron

3.1.1 温度的影响

图 1 为喷吹 CO_2 流量为 1 L/min、无搅拌、未加熔剂条件下, 不同温度下含钒铁水中 Si 和 V 含量随喷吹 CO_2 时间的变化。可以看出, 反应温度一定时, 随 CO_2 通气时间延长, Si 含量逐渐降低, V 含量略下降; 反应时间一定时, 温度在 1300~1450 $^{\circ}\text{C}$ 范围内, 温度越高脱硅率越高, 但 V 含量无明显变化。因此, 脱硅保钒的最佳温度为 1450 $^{\circ}\text{C}$, 脱硅率可达 68.62%, 钒氧化率仅为

0.73%。

3.1.2 CO_2 流量的影响

图 2 为喷吹温度 1450 $^{\circ}\text{C}$ 、无搅拌、未加熔剂条件下不同 CO_2 气体流量下含钒铁水中 Si 和 V 含量随喷吹 CO_2 时间的变化。可以看出, 1450 $^{\circ}\text{C}$ 下, 通入 CO_2 气体流量不同时, 铁水中 Si 和 V 的含量降低。通入 CO_2 气体流量越大, 脱硅速率加快, V 略微氧化。

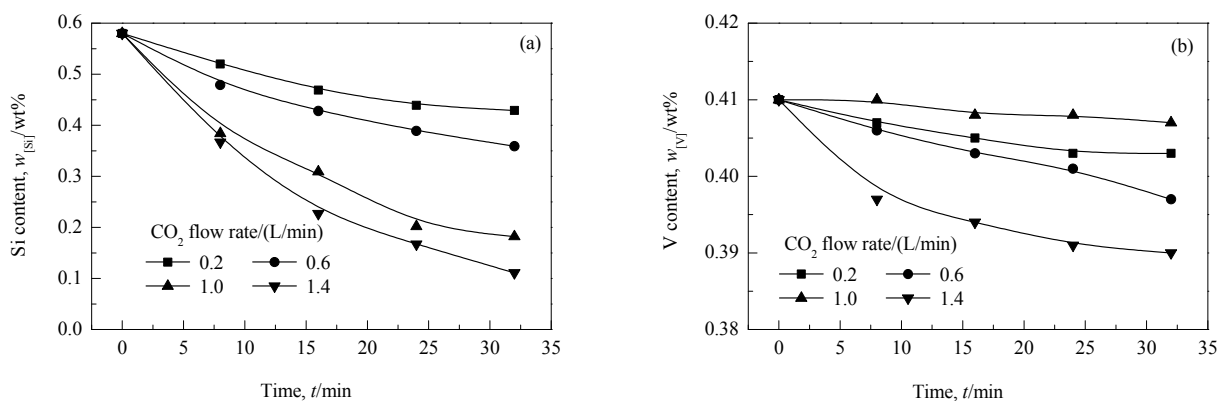


图 2 CO_2 流量对含钒铁水中 Si 和 V 含量的影响

Fig.2 Effects of CO_2 flow rate on contents of Si and V in the vanadium-bearing molten iron

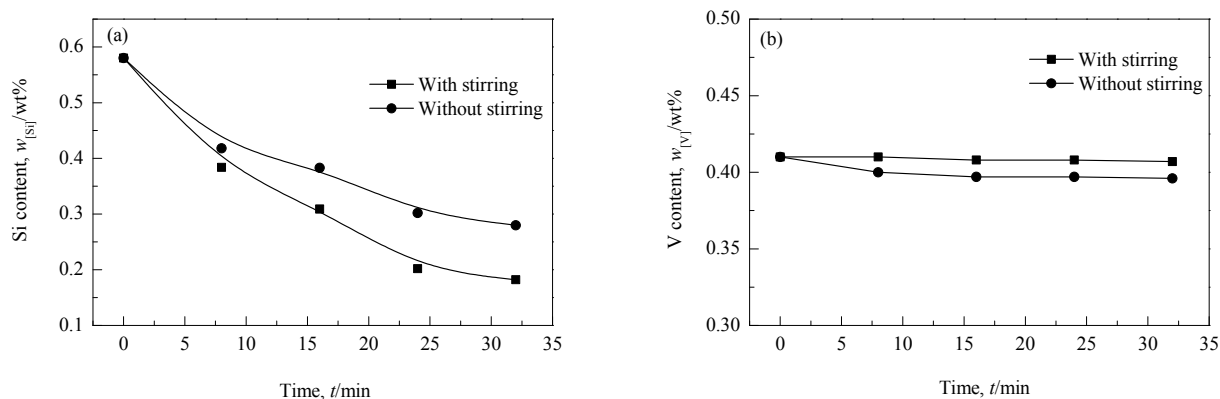


图 3 搅拌对含钒铁水中 $w_{[\text{Si}]}$ 和 $w_{[\text{V}]}$ 的影响

Fig.3 Effects of stirring on contents of Si and V in the vanadium-bearing molten iron

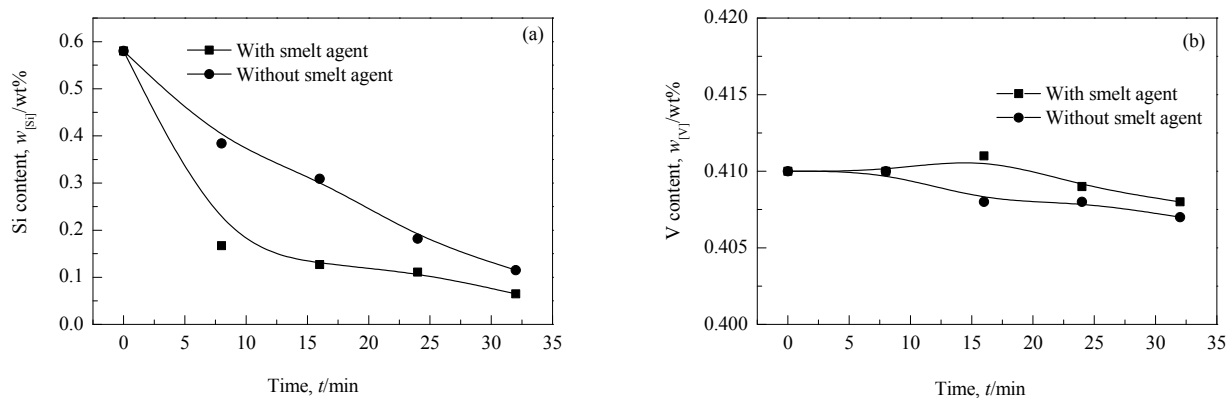


图 4 熔剂对含钒铁水中 Si 和 V 含量的影响

Fig.4 Effects of smelt agent on contents of Si and V in the vanadium-bearing molten iron

3.1.3 搅拌的影响

图 3 为喷吹温度 1450°C 、喷吹 CO_2 流量 1 L/min 条件下, 添加搅拌(搅拌速度 20 r/min), 未加熔剂时含钒铁水中 Si 和 V 含量随喷吹时间的变化。可以看出, 搅拌明显改善反应过程的传质效率, 提高了脱硅速率, 而钒的氧化并不明显。

3.1.4 熔剂的影响

图 4 为喷吹温度 1450°C 、 CO_2 流量 1 L/min 时, 添加熔剂($62.5\% \text{ CaO}+37.5\% \text{ CaF}_2$)、加搅拌(搅拌速度 20 r/min)时含钒铁水中 Si 和 V 含量随喷吹时间的变化。可以看出, 加入熔剂可显著提高脱硅率, 减少钒的氧化损失。当铁水中 Si 含量由 0.58% 降至 0.15% 时, V 含量由 0.41% 降至 0.408% , 氧化率仅为 0.49% 。

3.2 脱硅保钒反应产物的分布

计算不同平衡温度时脱硅反应产物中 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 和 $\text{SiO}(\text{g})$ 的分布规律, 结果见表 4。

表 4 不同平衡温度时含钒铁水脱硅反应(4)和(1)产物中 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 和 $\text{SiO}(\text{g})$ 的含量

Table 4 The contents of $\text{SiO}_2(\text{s})$ and $\text{SiO}(\text{g})$ in the desilication products of reactions (1) and (4) at different equilibrium temperatures in the vanadium-bearing molten iron

Temperature/ $^\circ\text{C}$	Content/wt%	
	$\text{SiO}_2(\text{s})$	$\text{SiO}(\text{g})$
1350	49.92	50.08
1400	43.13	56.87
1450	21.72	78.28

反应在温度 1400°C 、 CO_2 气体流量 1 L/min 条件下进行时, 含钒铁水中硅含量反应前 $w_{[\text{Si}]_0}=0.70\%$, 反应后 $w_{[\text{Si}]_t}=0.382\%$ 。在此条件下研究了温度、渣碱度对铁水中硅的走向与分布的影响, 结果如图 5 所示。可以看出, 温度为 $1350\sim 1450^\circ\text{C}$ 时, 温度升高, 生成 $\text{SiO}(\text{g})$ 的量逐渐增多, 生成 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 的量减少, 实验结果与计算结果一致; 随渣碱度增大, 铁水中 Si 转化成 SiO_2 的量略增加, 转化成 $\text{SiO}(\text{g})$ 的量略减少。

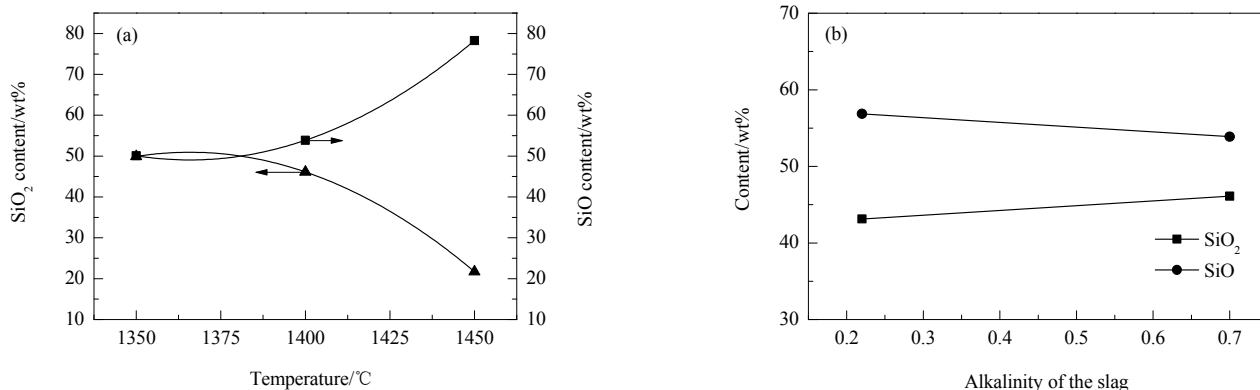


图 5 温度和渣碱度对脱硅产物 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 和 $\text{SiO}(\text{g})$ 分布的影响

Fig.5 Effects of temperature and alkalinity of the slag on the contents of desilication products $\text{SiO}_2(\text{s})$ and $\text{SiO}(\text{g})$

4 结论

采用弱氧化剂 CO_2 选择性氧化含钒铁水, 先浅氧化除 Si 再强氧化 V 得到高品位钒渣, 对浅氧化除 Si 过程进行了理论分析并优化了影响因素, 同时对脱硅产物进行了初步分析, 得到以下结论:

(1) 温度为 $1300\sim 1500^\circ\text{C}$ 时, 弱氧化剂 CO_2 可先氧化含钒铁水中的 Si, 降低 Si 含量, 而 V 含量变化甚微。

(2) 弱氧化剂 CO_2 氧化含钒铁水脱硅保钒的最佳工艺条件为温度约 1450°C , CO_2 气体流量 1 L/min 、搅拌(搅拌速度 20 r/min), 此时硅氧化率可达 68.62% , 钒氧化率仅为 0.73% 。

(3) 加入适量熔剂($62.5\% \text{ CaO}+37.5\% \text{ CaF}_2$), 可提高脱硅效率, 减少钒的氧化损失。当铁水中 Si 含量由 0.58% 降至 0.15% 时, V 含量由 0.41% 降至 0.408% , 氧

化率仅为 0.49% 。

(4) 喷吹 CO_2 气体时, 铁水中硅有 3 种去向: 生成 $\text{SiO}(\text{g})$ 气体逸出、形成 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 进入渣中和残留在铁水中。温度越高, 生成 $\text{SiO}(\text{g})$ 的量越多, $\text{SiO}_2(\text{s})$ 量越少; 渣碱度增大时, Si 转化成 SiO_2 的量略增加, 而 $\text{SiO}(\text{g})$ 的量略减少。

参考文献

- [1] 付自碧. 钒钛磁铁矿提钒工艺发展历程及趋势 [J]. 中国有色冶金, 2011, (6): 29–33.
Fu Z B. Development process and trends of vanadium extraction from vanadium–titanium magnetite ore [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2011, (6): 29–33.
- [2] 张生芹. 钒渣体系物化性能及相平衡的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012: 5–40.
Zhang S Q. Research on physicochemical properties and phase equilibrium of vanadium slag [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012: 5–40.

- [3] 张生芹, 任正德, 邓能运. SiO_2 对钒渣粘度的影响预测 [J]. 中国稀土学报, 2012, 30(专辑): 170–174.
Zhang S Q, Ren Z D, Deng N Y. Research on forecast of SiO_2 on vanadium slag viscosities [J]. Journal of Chinese Society of Rare Earths, 2012, 30(Spec. Issue): 170–174.
- [4] 黄正华. 高硅铁水转炉提钒钒渣质量的影响及对策 [J]. 四川化工, 2010, 13(6): 35–40.
Huang Z H. The effect of high silicon molten iron used in converter V-recovering on the quality of vanadium slag and the countermeasure [J]. Sichuan Chemical Engineering, 2010, 13(6): 35–40.
- [5] 高剑辉. 转炉提钒工艺对钒渣质量的影响 [J]. 金属世界, 2008, (4): 1–3.
Gao J H. The effect of vanadium extraction by converter process on the quality of vanadium slag [J]. Metal World, 2008, (4): 1–3.
- [6] 陈东辉, 杨树德. 钒渣化学形成理论研究 [J]. 河北冶金, 1993, (5): 31–39.
- [7] 工业和信息化部. 《产业关键共性技术发展指南(2017)》 [Z]. 2017–10–18.
- [8] 隋智通, 娄太平, 王明华. 含钒硅铁水制备低硅钛型钒渣的方法: CN 201710363475.0 [P]. 2017–05–22.
- [9] 霍首星, 隋智通, 娄文博, 等. 含钒硅铁水 CO_2 脱硅保钒实验研究 [J]. 材料与冶金学报, 2016, 15(3): 166–170.
Huo S X, Sui Z T, Lou W B, et al. Study on removal of silicon and keeping vanadium in hot metal containing vanadium and silicon with carbon dioxide injection [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2016, 15(3): 166–170.
- [10] 黄希祜. 钢铁冶金原理, 第 3 版 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 46–440.
Huang X H. Principle of iron and steel metallurgy, third Ed. [M]. Beijing: Metallurgy Industrial Press, 2002: 46–440.
- [11] Atkins P. Physical chemistry, 8th Ed. [M]. Oxford: Oxford University Press, 1987: 200–390.
- [12] 林洁, 王新华, 周荣章, 等. 含钒铁水预脱硅时硅与钒的分离 [J]. 钢铁, 1989, (6): 14–19.
- [13] 张景宜. 含钒铁水炼钢应用研究 [J]. 河南冶金, 2013, 21(3): 12–14.
Zhang J Y. Research of smelting hot metal containing vanadium [J]. Henan Metallurgy, 2013, 21(3): 12–14.
- [14] 甄小鹏. 转炉提钒过程中碳、钒氧化的热力学和宏观动力学研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012: 4–20.
Zhen X P. Thermodynamic and macro-kinetic studies on oxidations of carbon and vanadium during vanadium extraction by converter [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012: 4–20.
- [15] 梁英教, 车荫昌. 无机物热力学数据手册 [M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1994: 449–485.
- [16] 孙迪. 含钒铁水钛、钒氧化的热力学分析 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2014: 3–15.
Sun D. Thermodynamic analysis of titanium and vanadium oxidation in iron water [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2014: 3–15.
- [17] Werme A, Astrom C. Recovery of vanadium from melt iron—thermodynamics and injection applications [J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 1986, 15(6): 273–278.
- [18] 李丹柯. 含钒铁水钒氧化动力学研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2009: 3–15.
Li D K. Study on oxidation kinetics of vanadium in hot metal containing vanadium [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009: 3–15.
- [19] 刘文权. 低碳炼铁: 钢铁业发展低碳经济的重点 [N]. 世界金属导报, 2010–05–11 (046).
- [20] 朱荣, 毕秀荣, 吕明. CO_2 在炼钢工艺的应用及发展 [J]. 钢铁, 2012, 47(3): 1–5.
Zhu R, Bi X R, Lü M. Application and development of carbon dioxide in the steelmaking process [J]. Iron & Steel, 2012, 47(3): 1–5.
- [21] 魏寿昆. 冶金过程热力学 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980: 10–20.
- [22] 车荫昌. 冶金热力学 [M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1989: 41–50.
- [23] 张延安, 刘燕, 王东兴, 等. 氧气底吹造钼过程中气泡冶金行为的水模实验研究 [C]//中国金属学会. 第十五届冶金反应工程学会会议论文集. 2011: 651–656.
Zhang T A, Liu Y, Wang D X, et al. Experimental study of water model on bubble metallurgical behavior in oxygen bottom blown matte manufacturing [C]//The Chinese Society for Metals. The Fifteenth Symposium Collection of Metallurgical Reaction Engineering Society. 2011: 651–656.
- [24] Hornby-Anderson S, Douglas C L, Bermel C L. Use of CO_2 in the AOD [C]//Warrendale Iron and Steel Society. The 48th Electric Furnace Conference Proceedings. 1990: 297–304.
- [25] 文光远. 含钒铁水的预处理 [J]. 重庆大学学报, 1999, 22(2): 113–120.
Wen G Y. Pretreatment of the hot iron containing vanadium and titanium [J]. Journal of Chongqing University, 1999, 22(2): 113–120.