



## 氧气底吹铜熔炼渣中多组元造渣行为及渣型优化

王亲猛<sup>1,2</sup>, 郭学益<sup>1,2</sup>, 田庆华<sup>1,2</sup>, 廖立乐<sup>1,2</sup>, 张永柱<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学 冶金与环境学院, 长沙 410083;

2. 中南大学 中国有色金属工业清洁冶金工程研究中心, 长沙 410083)

**摘要:** 通过分析氧气底吹铜熔炼过程产生的铁硅型工业铜渣中 SiO<sub>2</sub>、Fe、S、Cu、CaO 等组元含量变化趋势, 结合冶金过程原理, 研究上述各组元造渣行为及组元含量相互间的映射关系, 并进行渣型优化。结果表明: SiO<sub>2</sub>、Fe、S、Cu 及 CaO 等组元的造渣行为具有相互关联性, 且各组元与 Cu 造渣行为的关联性由强到弱的顺序依次为 S、 $m(\text{Fe})/m(\text{SiO}_2)$ 、SiO<sub>2</sub>、Fe。同时, SiO<sub>2</sub> 和 Fe 含量对 Cu 含量的耦合作用较明显, 随 SiO<sub>2</sub> 含量升高, Fe 含量降低, Cu 含量呈降低趋势。通过渣型优化, 渣中 SiO<sub>2</sub> 含量为 26.5%~28%、Fe 含量为 38.5%~40%(质量分数), 该渣型的流动性较好, 理论上底吹熔炼渣含 Cu 可降低到 2.5%(质量分数)以下。

**关键词:** 铜冶炼; 氧气底吹; 铜渣; 组元行为; 渣型优化

中图分类号: TF811

文献标志码: A

## Multicomponent slagging behavior and constitution optimization of slag in copper oxygen bottom blowing bath smelting process

WANG Qin-meng<sup>1,2</sup>, GUO Xue-yi<sup>1,2</sup>, TIAN Qing-hua<sup>1,2</sup>, LIAO Li-le<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong-zhu<sup>1,2</sup>

(1. School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Cleaner Metallurgical Engineering Research Center, Nonferrous Metal Industry of China, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The multicomponent slagging behavior and mapping relationship of SiO<sub>2</sub>, Fe, S, Cu and CaO and slag constitution optimization were investigated by analyzing SiO<sub>2</sub>, Fe, S, CaO and Cu content variation trends of industrial iron silicate slag in copper oxygen bottom blowing bath smelting (BBS) process, combined with metallurgical process principles. The results show that the slagging behaviors of SiO<sub>2</sub>, Fe, S, Cu and CaO have certain correlation, and the correlation sequence with Cu slagging behavior is S,  $m(\text{Fe})/m(\text{SiO}_2)$ , SiO<sub>2</sub>, Fe. The rule of coupling interaction between SiO<sub>2</sub> and Fe to Cu is sensible. Cu content increases with the increase of SiO<sub>2</sub> and the decrease of Fe. Through optimizing the slag, SiO<sub>2</sub> and Fe contents in slag are 26.5%~28% and 38.5%~40% (mass fraction), respectively. The slag has good fluidity, Cu content of BBS slag is lower than 2.5% in theory.

**Key words:** copper smelting; oxygen bottom blowing; copper slag; component behavior; slag constitution optimization

氧气底吹炼铜技术具有我国自主知识产权<sup>[1-2]</sup>, 因其更加清洁高效<sup>[3]</sup>, 国家工信部发文<sup>[4-5]</sup>明确指出把该技术列为我国有色金属工业重点开发技术, 并加强其推广和应用。该技术已先后成功应用于国内外多家铜

冶炼企业<sup>[6]</sup>, 表现出高效、节能及环境友好等优势, 目前, 该技术已成为重要的应用理论研究对象。

氧气底吹炼铜技术因其工艺特性, 目前主要采用高  $m(\text{Fe})/m(\text{SiO}_2)$  渣型, 渣含铜 3%左右, 为进一步优

化底吹炼铜过程和降低渣含铜, 有必要了解该工艺的工业炉渣中多组元行为的相互映射关系。YAZAWA<sup>[7]</sup>、SERGEI 等<sup>[8]</sup>、SRIDHAR 等<sup>[9]</sup>、NAGAMORI 等<sup>[10]</sup>和 MACKEY<sup>[11]</sup>等对铜冶炼过程广义的组元行为、过程热力学及炉渣相图进行了研究; CHEN 等<sup>[12]</sup>和刘柳等<sup>[13]</sup>分析了氧气底吹铜熔炼渣的微观形貌; GUI 等<sup>[14]</sup>、刘建华等<sup>[15]</sup>采用基于数据驱动的方法对闪速炼铜及转炉吹炼过程进行了过程优化及在线控制研究, 但目前有关针对氧气底吹炼铜工艺中炉渣内多组元行为分析及渣型优化的研究还鲜见报道, 因此, 以期本文研究成果为底吹炼铜工艺炉渣组元预测、控制及渣型优化提供理论指导。

# 1 实验

## 1.1 造钼熔炼

造钼熔炼是在国内某铜厂的氧气底吹炉中进行的, 炉体结构如图 1 所示。

根据配料比例, 不同成分的铜精矿混合配料后,

不经过磨细、干燥或制粒, 直接搭配一定量的石英砂熔剂, 经传送皮带连续地加入到炉内, 氧化反应和造渣反应激烈地进行, 并通过间歇式放渣、放铜钼, 使熔炼过程连续进行。入炉混合料成分如表 1 所列。

表 1 混合矿料的化学成分

Table 1 Chemical composition of mixed ore (mass fraction, %)

Cu	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaO	H <sub>2</sub> O	Others
24.62	23.40	26.72	13.44	1.45	7.51	2.86

氧气和空气通过炉体底部氧枪连续送入炉内的铜钼层, 富氧浓度 73% 以上, 氧枪内层输送氧气, 外层输送空气对氧枪有降温保护作用, 使氧枪周围形成“蘑菇头”<sup>[13, 16-17]</sup>, 主要成分为 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, 可有效防止熔体对氧枪的侵蚀作用。

## 1.2 反应原理

氧气底吹熔炼机理如图 2 所示, 沿轴向分为反应区、分离过渡区、液相澄清区 3 个区域。气体在向上

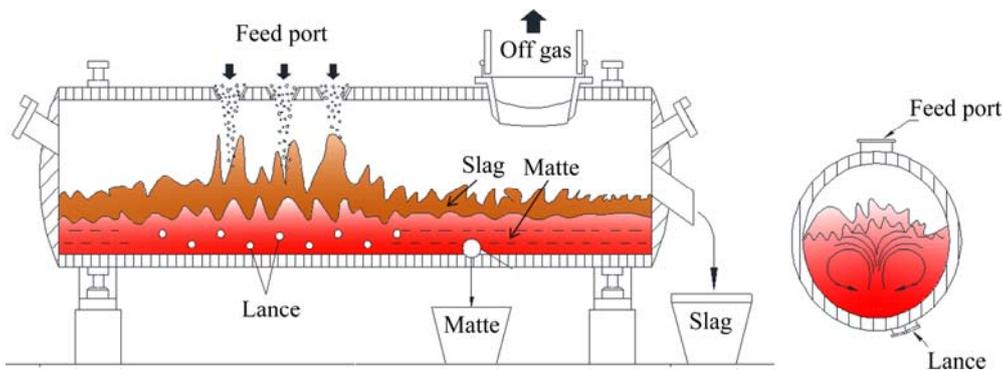


图 1 氧气底吹熔炼炉示意图

Fig. 1 Schematic diagram of BBS furnace

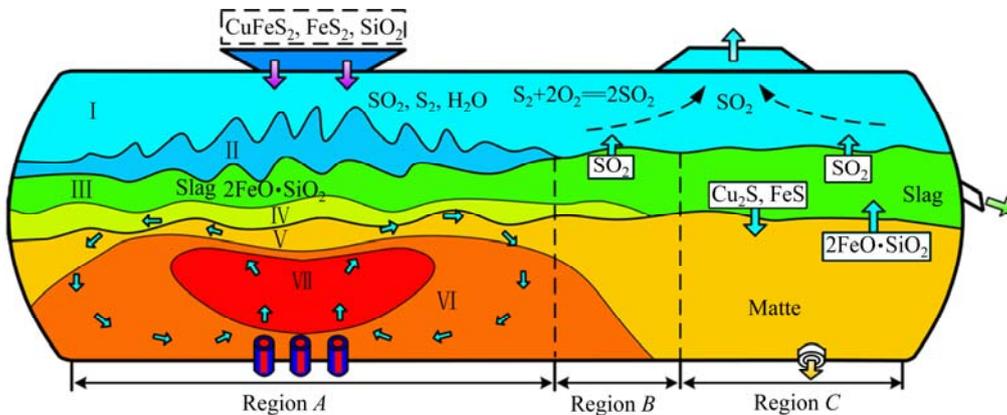
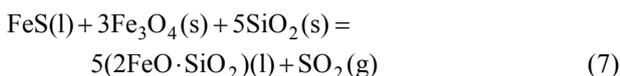
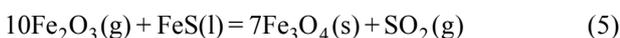
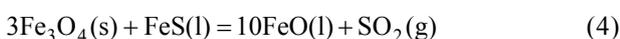
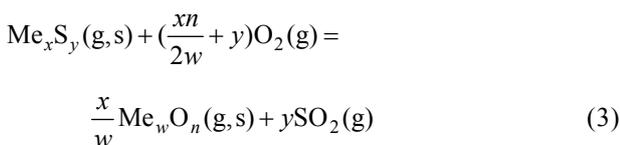


图 2 氧气底吹铜熔炼机理模型

Fig. 2 Mechanism model of BBS process: I—Gaseous layer; II—Ore decomposition transition layer; III—Slag layer; IV—Slag formation transition layer; V—Matte formation transition layer; VI—Weak oxidation layer; VII—Strong oxidation layer; Region A—Reaction region; Region B—Separation transition region; Region C—Liquid phase clarification region

喷吹过程中, 分化为许多微细的小气流, 先进入铜铈层, 气液相接触面积大、历程长, 气体在熔体内停留时间长, 有较好的反应动力学条件, 有较大的熔炼潜能。

由于底吹炉内熔体温度高达 1200℃, 矿料落到炉渣熔体上面后, 促使其中的部分高价硫化矿分解为低价硫化物和单质硫气体, 硫化物进入熔体内部逐渐被氧化进行造铈和造渣反应, 具体反应如式(1)~(7)所示:



### 1.3 数据分析方法

炉渣经冷却、破碎、细磨、筛分、制样, 测定样品成分, 渣中  $\text{SiO}_2$ 、Fe、S、Cu、CaO 等组元的质量分数分别为  $w_{\text{SiO}_2}$ 、 $w_{\text{Fe}}$ 、 $w_{\text{S}}$ 、 $w_{\text{Cu}}$ 、 $w_{\text{CaO}}$ 。连续一个月每天采集上述数据, 采用 Origin9.0 软件分析  $w_{\text{SiO}_2}$ 、 $w_{\text{Fe}}$ 、 $w_{\text{S}}$ 、 $w_{\text{Cu}}$ 、 $w_{\text{CaO}}$  等数据相互之间的关联性(即映射关系), 并通过分析实测数值与拟合公式的预测数值之间的绝对误差与相对误差, 评估  $w_{\text{SiO}_2}$ 、 $w_{\text{Fe}}$ 、 $w_{\text{S}}$ 、 $w_{\text{Cu}}$ 、 $w_{\text{CaO}}$  等数据相互之间关联性的强弱及预测准确性。

## 2 结果与分析

氧气底吹炼铜属于强氧化熔炼过程, 其渣型为 FeO-SiO<sub>2</sub> 型, 且  $m(\text{Fe})/m(\text{SiO}_2)$  较高, CaO 含量较低, 铜在渣中的损失物相分布有别于其他工艺, 因此, 有必要对氧气底吹炼铜工业渣进行深入分析, 了解该渣中各组元的内在关联性以及对渣含铜的影响, 进而对渣型进行优化。

### 2.1 单组元之间的映射关系

主要分析底吹工业渣中多组元 Cu、SiO<sub>2</sub>、Fe、S、CaO 及铁硅比  $m(\text{Fe})/m(\text{SiO}_2)$  之间的映射关系, 重点研究其他各主要组元含量对渣含 Cu 的影响。

#### 2.1.1 渣中 Cu 含量与 SiO<sub>2</sub> 含量之间的映射关系及分析

SiO<sub>2</sub> 是铁橄榄石渣的主要成分之一, 它在渣中的含量对炉渣的性质及渣含铜影响极大, 因此, 首先关注的成分是 SiO<sub>2</sub>。图 3 所示为渣中 Cu 含量与 SiO<sub>2</sub> 含量之间的映射关系及分析。如图 3(a)所示, 渣中 SiO<sub>2</sub> 含量为 21.3%~27.8%(质量分数), Cu 含量在 2.3%~3.8%(质量分数)之间波动, 且有一定的关联性,  $w_{\text{Cu}}$  整体上呈现出随  $w_{\text{SiO}_2}$  的增加而降低的趋势。对  $w_{\text{Cu}}$  和  $w_{\text{SiO}_2}$  进行拟合, 式(8)为其拟合函数关系式。

$$w_{\text{Cu}} = 4.95 - 7.81 \times 10^{-2} w_{\text{SiO}_2} \quad (8)$$

$$R^2 = 0.11$$

这种趋势的主要原因是随着 SiO<sub>2</sub> 含量的增大, 渣的黏度、渣-铈间界面张力、渣-铈间的密度差发生变化所致。在 SiO<sub>2</sub> 含量较小时, 如在 21.3%~27.8%(质量分数)内时, 随着 SiO<sub>2</sub> 含量的增大, 可以有效降低 FeO 的活度, 从而降低 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的含量, 进而降低炉渣的黏度, 改善渣中机械夹带的冰铜滴汇集、生长、沉降的条件, 降低渣含铜; 但若 SiO<sub>2</sub> 含量继续增大, 超过一定值后, 渣中的硅氧四面体链状结构增多, 黏度呈现上升的趋势。

在铜铈品位一定时, 随渣中 SiO<sub>2</sub> 含量逐渐增大, 渣-铜铈间界面张力增大, 渣的密度降低, 渣-铜铈间的密度差增大, 铜铈滴在渣中的沉降速度增加, 从而有利于铜铈与渣的分离。球形铜铈液滴在熔渣中沉降速度服从方程(9):

$$v_s = 2gr^2\Delta\rho/(9\mu) \quad (9)$$

式中:  $g$  为重力加速度( $\text{m/s}^2$ );  $r$  为铈滴直径( $\text{m}$ );  $\Delta\rho$  为铜铈与炉渣的密度差( $\text{kg/m}^3$ );  $\mu$  为熔渣黏度( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )。

因此, 当 SiO<sub>2</sub> 含量在 21.3%~27.8%(质量分数)区间时, Cu 含量应随 SiO<sub>2</sub> 含量( $w_{\text{SiO}_2}$ )的增加而降低。图 3(a)中的渣中 Cu 含量有较大的上下波动现象, 主要是除了渣中 SiO<sub>2</sub> 含量影响 Cu 含量外, Fe 含量、CaO 含量及铜铈品位对 Cu 含量也有较大影响, 且样本中的 Fe 含量、CaO 含量及铜铈品位并非完全稳定的值, 存在一定的波动。

通过函数关系式(8)对炉渣中 Cu 含量( $w_{\text{Cu}}$ )进行分析, 如图 3(b), 得出预测值分布在 2.8%~3.3%(质量分数)之内, 图 3(c)中绝对误差在 -0.8%~0.5%(质量分数)之内, 因  $w_{\text{Cu}}$  基数较小, 图 3(d)中最大相对误差为 28%, 但主体的相对误差 < 15%, 因此, 实测数值和预测数值有一定的一致性, 在 SiO<sub>2</sub> 含量 21.3%~27.8%(质量分数)区间内, 一定程度上可用  $w_{\text{SiO}_2}$  预测  $w_{\text{Cu}}$ 。

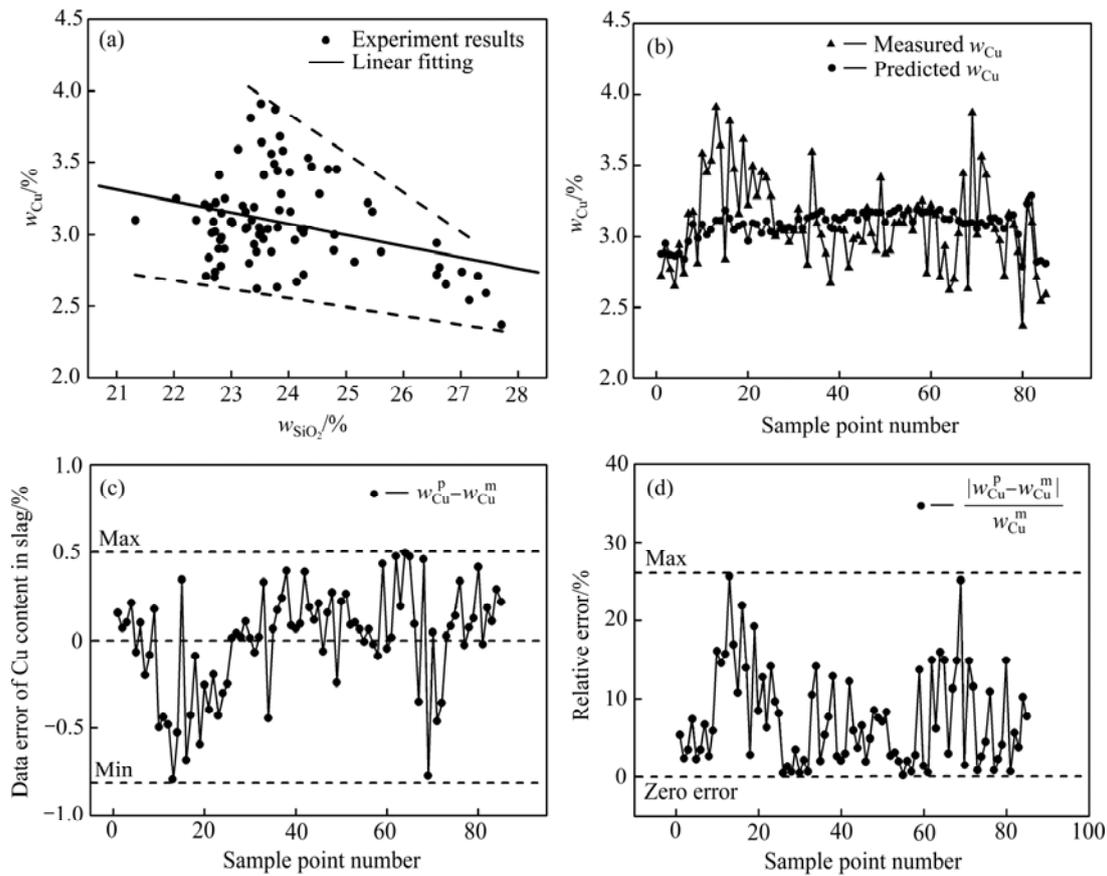


图 3 渣中 Cu 含量与 SiO<sub>2</sub> 含量之间的映射关系及分析

Fig. 3 Mapping relationship and analysis of  $w_{Cu}$  and  $w_{SiO_2}$  in slag ( $w_{Cu}^p$  and  $w_{Cu}^m$  are predicted  $w_{Cu}$  and measured  $w_{Cu}$ , respectively): (a) Linear fitting of measured data; (b) Comparison of predicted data and measured data; (c) Absolute error; (d) Relative error

2.1.2 渣中 Cu 含量与 Fe 含量之间的映射关系及分析

FeO 与 SiO<sub>2</sub> 一样, 也是铁橄榄石渣的另一种主要成分, 其在渣中的含量对炉渣的性质及渣含铜有较大影响。图 4 所示为渣中 Cu 含量及 Fe 含量之间的映射关系及分析。如图 4(a)所示, 渣中 Fe 含量在 38%~42.3%(质量分数)范围内, Cu 含量与 Fe 含量也呈一定的相关性,  $w_{Cu}$  整体上呈现出随  $w_{Fe}$  的增加而增加的趋势, 式(10)为其拟合函数关系式。

$$w_{Cu} = 1.08 + 5.01 \times 10^{-2} w_{Fe}$$

$$R^2 = 2.79 \times 10^{-2} \tag{10}$$

这种趋势的主要原因是 Fe 含量 38%~42.3%(质量分数)范围内, 随着 Fe 含量的增大, FeO 的活度增加, 从而 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的含量增加, 增大了炉渣的黏度, 恶化了渣中机械夹带的冰铜滴汇集、生长、沉降的条件, 使渣含铜上升。

通过函数关系式(10)对 Cu 含量进行分析, 如图 4(b), 得出预测值分布在 2.9%~3.2%(质量分数)之内, 图 4(c)中绝对误差在 -0.8%~0.7%之内, 图 4(d)中最大相对误差为 29%, 主体的相对误差 < 18%, 因此,  $w_{Fe}$

单独预测  $w_{Cu}$  的准确度不及  $w_{SiO_2}$  的。

2.1.3 渣中 Cu 含量与铁硅比 Fe/SiO<sub>2</sub> 之间的映射关系及分析

单独使用  $w_{SiO_2}$  和  $w_{Fe}$  预测  $w_{Cu}$ , 但准确度都不是理想, 由于铁硅比  $m(Fe)/m(SiO_2)$  是炼铜过程中的重要因素, 因此有必要使用  $m(Fe)/m(SiO_2)$  对渣中 Cu 含量的影响进行分析。图 5 所示为渣中 Cu 含量与  $m(Fe)/m(SiO_2)$  之间的映射关系及分析。

图 5(a)中,  $m(Fe)/m(SiO_2)$  在 1.4~2.0 范围内,  $w_{Cu}$  随  $m(Fe)/m(SiO_2)$  的增加而增加, 且有一定的线性关系, 式(11)为其拟合函数关系式。

$$w_{Cu} = 0.92 + 1.29 \times m(Fe)/m(SiO_2)$$

$$R^2 = 0.14 \tag{11}$$

式(11)的相关系数  $R^2$  值要比式(8)的和式(10)的大, 说明  $m(Fe)/m(SiO_2)$  预测  $w_{Cu}$  可能比单独使用  $w_{SiO_2}$  和  $w_{Fe}$  预测  $w_{Cu}$  效果要好。

通过函数关系式(11)对炉渣中 Cu 含量进行预测分析, 如图 5(b), 得出预测值分布在 2.7%~3.4%之内, 图 5(c)中绝对误差在 -0.7%~0.5%之内, 图 5(d)中最大

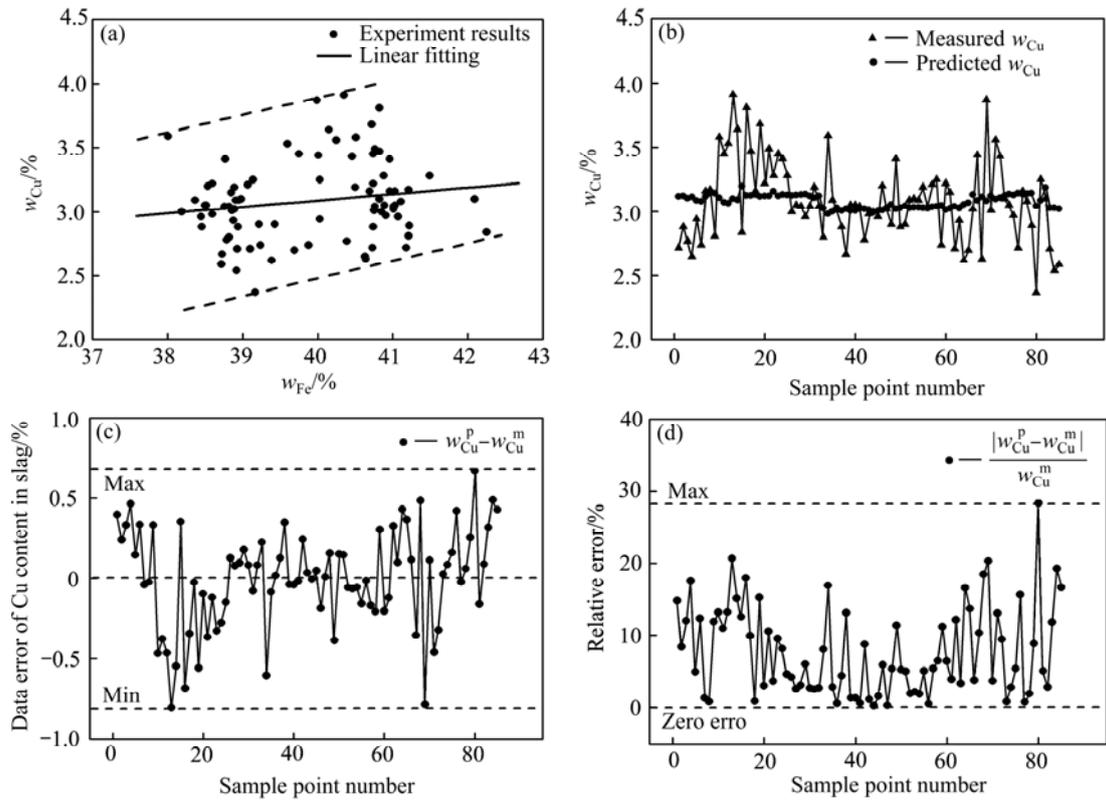


图4 渣中Cu含量与Fe含量之间的映射关系及分析

Fig. 4 Mapping relationship and analysis of  $w_{Cu}$  and  $w_{Fe}$  in slag ( $w_{Cu}^p$  and  $w_{Cu}^m$  are predicted  $w_{Cu}$  and measured  $w_{Cu}$ , respectively):

(a) Linear fitting of measured data; (b) Comparison of predicted data and measured data; (c) Absolute error; (d) Relative error

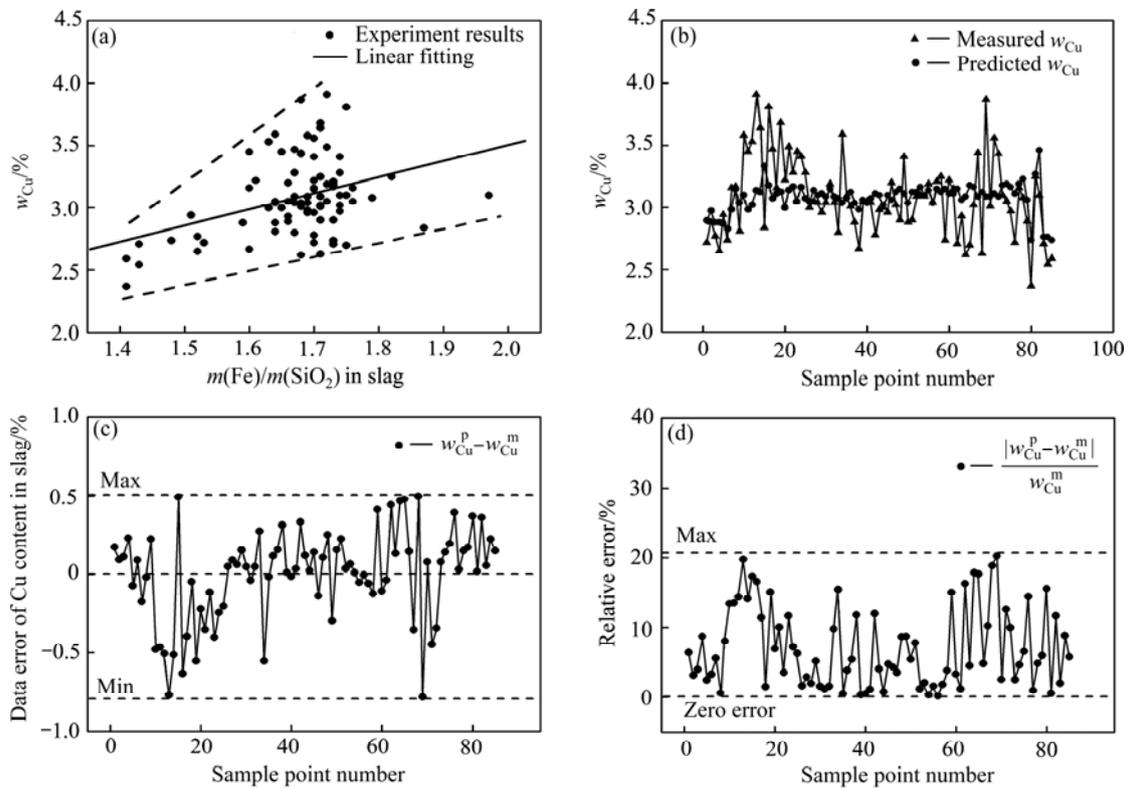


图5 渣中Cu含量与m(Fe)/m(SiO<sub>2</sub>)之间的映射关系及分析

Fig. 5 Mapping relationship and analysis of  $w_{Cu}$  and  $m(Fe)/m(SiO_2)$  in slag ( $w_{Cu}^p$  and  $w_{Cu}^m$  are predicted  $w_{Cu}$  and measured  $w_{Cu}$ , respectively):

(a) Linear fitting of measured data; (b) Comparison of predicted data and measured data; (c) Absolute error; (d) Relative error

相对误差为 20%, 主体的相对误差 < 12%, 印证了采用  $m(\text{Fe})/m(\text{SiO}_2)$  预测  $w_{\text{Cu}}$  的效果比单独使用  $w_{\text{SiO}_2}$  或  $w_{\text{Fe}}$  要好。

2.1.4 渣中 Cu 含量与 S 含量之间的映射关系及分析

S 在渣中以多种形态存在, 主要为  $\text{Cu}_2\text{S}$  和  $\text{FeS}$ , 而 Cu 在渣中的主要损失形态为  $\text{Cu}_2\text{S}$  和  $\text{Cu}_2\text{O}$ , 且渣中的 S 含量对渣的氧势-硫势有一定影响, 进而影响  $\text{Cu}_2\text{O}$  的含量, 因此在渣中 S 含量对渣中的 Cu 损失总量应有一定的映射关系。图 6 所示为渣中 Cu 含量与 S 含量之间的映射关系及分析。图 6(a)所示, 当 S 含量 0.6%~1.5% 时,  $w_{\text{Cu}}$  随  $w_{\text{S}}$  的增加而增加, 且呈二次线性关系。对其进行线性拟合, 线性相关系数  $R^2$  为 0.36, 式(12)为其拟合函数关系式:

$$w_{\text{Cu}} = 3.86 - 2.87w_{\text{S}} + 2.00w_{\text{S}}^2$$

$$R^2 = 0.36 \tag{12}$$

渣中不同硫滴中的  $\text{Cu}_2\text{S}$  与  $\text{FeS}$  比例不尽相同, 且渣中  $\text{Cu}_2\text{O}$  的溶解量还受到铜硫品位等多因素的影响, 因此在 S 含量 0.6%~1.5% 范围内,  $w_{\text{Cu}}$  随  $w_{\text{S}}$  的增加而有一定的上下波动。

通过函数关系式(12)对炉渣中 Cu 含量进行预测

分析, 如图 6(b)所示, 得出预测值分布在 2.8%~3.8% 之内, 图 6(c)中绝对误差在 -0.8%~0.7% 之内, 由于样本中个别数据本身的差异, 虽然图 6(d)中的最大相对误差为 25%, 但主体的相对误差 < 10%, 因此, 相比单独使用  $w_{\text{Fe}}$ 、 $w_{\text{SiO}_2}$  或  $\text{Fe}/\text{SiO}_2$  预测  $w_{\text{Cu}}$ , 使用  $w_{\text{S}}$  预测  $w_{\text{Cu}}$  的准确度获得进一步提升。

2.1.5 渣中组元含量之间其他次要映射关系

除了上述的多组元因素对渣含 Cu 的映射关系外, 渣中其他组元之间也存在着一定的相关性, 具体如图 7 所示。

图 7(a)中  $w_{\text{S}}$  和  $w_{\text{CaO}}$  之间的线性关系较为明显,  $w_{\text{S}}$  整体上呈现出随  $w_{\text{CaO}}$  的增加而降低的趋势, 其主要原因是在 CaO 含量 1.5%~2.3% 范围内,  $w_{\text{CaO}}$  的增加有助于降低炉渣的黏度, 减少铜硫的机械夹带, 进而可降低渣中 S 含量, 式(13)为其拟合函数关系式:

$$w_{\text{S}} = 2.32 - 0.70w_{\text{CaO}}$$

$$R^2 = 0.39 \tag{13}$$

由于其他组元之间的映射关系不是很明显, 且不是炉渣优化的主要考虑因素, 因此, 本研究中不做进一步细化分析。

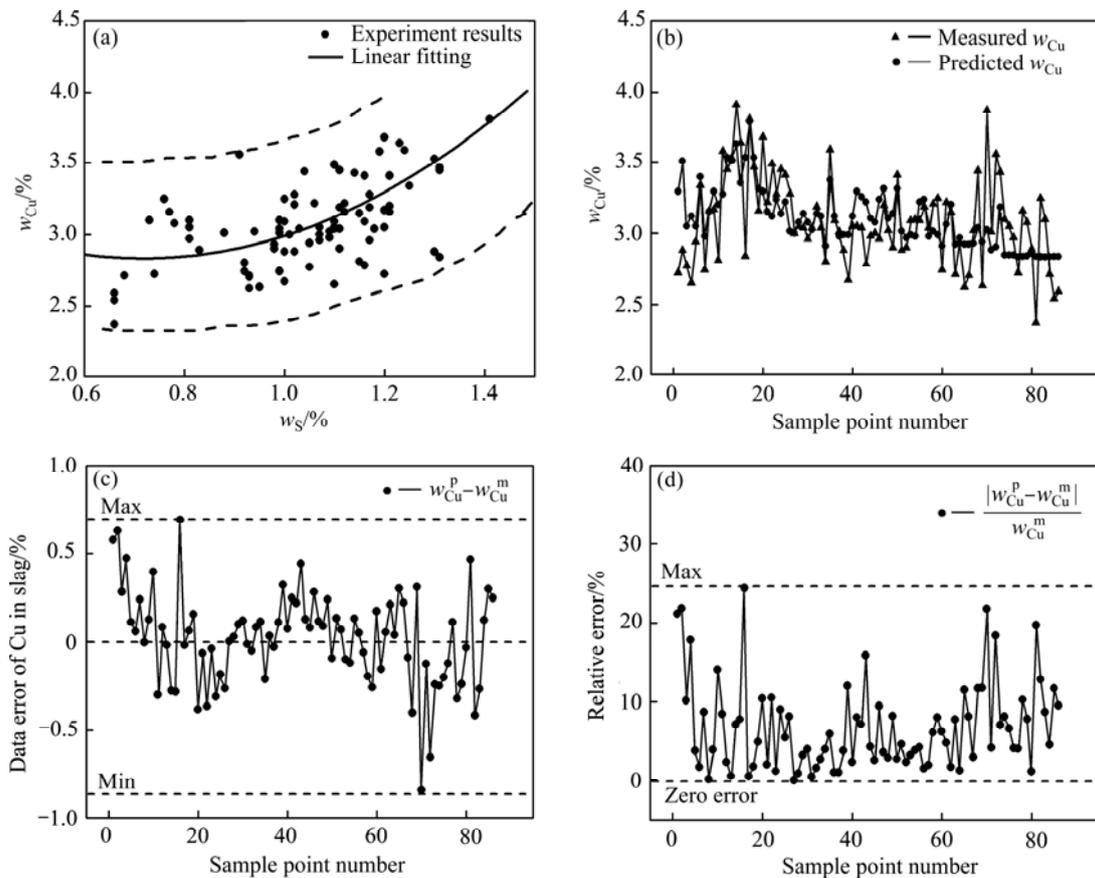


图 6 渣中 Cu 含量与 S 含量之间的映射关系及分析

Fig. 6 Mapping relationship and analysis of  $w_{\text{Cu}}$  and  $w_{\text{S}}$  in slag ( $w_{\text{Cu}}^{\text{p}}$  and  $w_{\text{Cu}}^{\text{m}}$  are predicted  $w_{\text{Cu}}$  and measured  $w_{\text{Cu}}$ , respectively): (a) Linear fitting of measured data; (b) Comparison of predicted data and measured data; (c) Absolute error; (d) Relative error

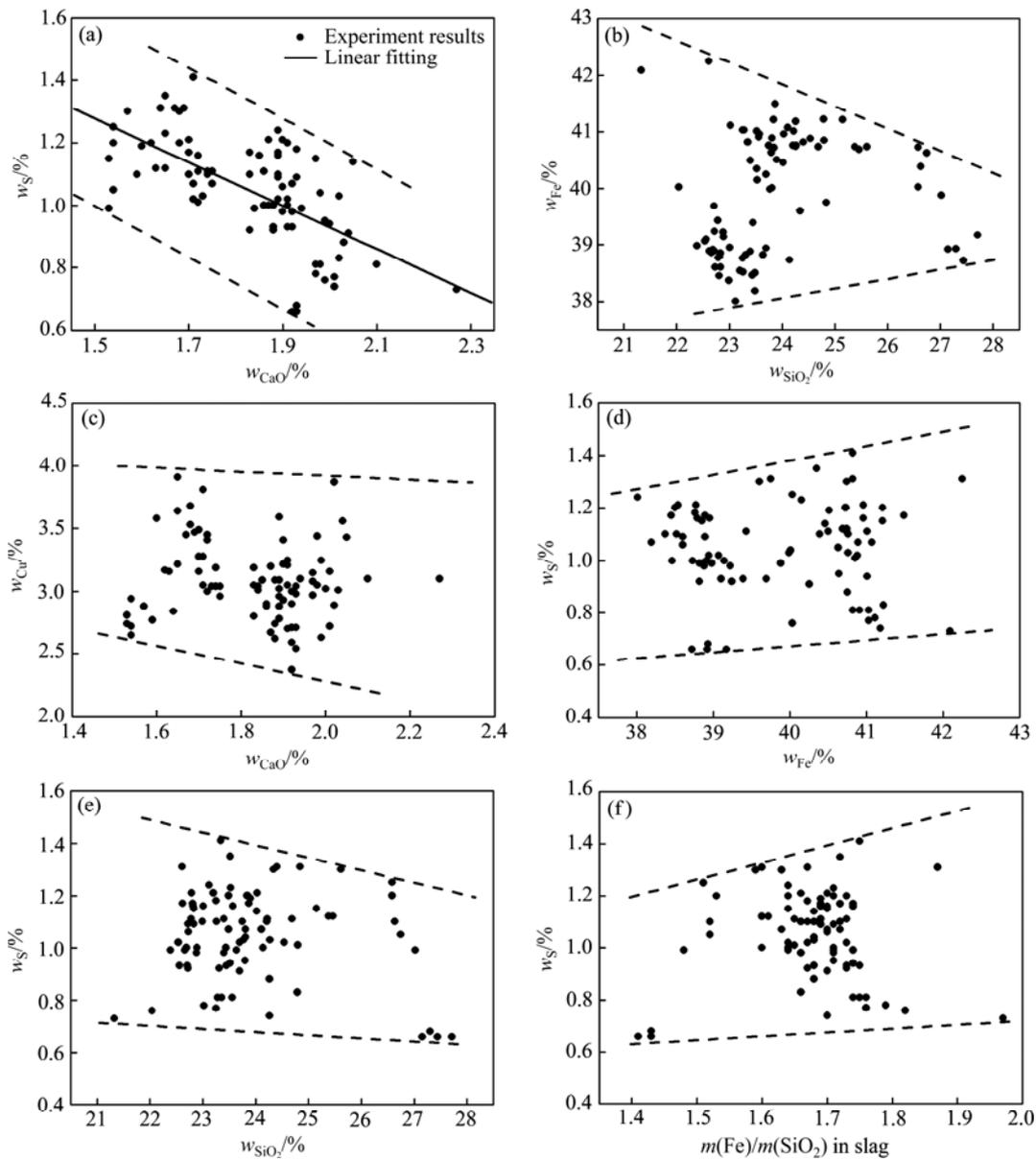


图7 渣中组元含量之间其他次要映射关系

Fig. 7 Other secondary mapping relationship of multicomponent content in slag: (a)  $w_S-w_{CaO}$ ; (b)  $w_{Fe}-w_{SiO_2}$ ; (c)  $w_{Cu}-w_{CaO}$ ; (d)  $w_S-w_{Fe}$ ; (e)  $w_S-w_{SiO_2}$ ; (f)  $w_S-m(Fe)/m(SiO_2)$

2.2 多组元复合映射关系及渣型优化

通过对渣中多组元含量的映射关系分析,发现  $w_{SiO_2}$ 、 $w_{Fe}$  和  $w_S$  分别对  $w_{Cu}$  有较大影响,且呈现出较强规律性。因此,有必要对  $w_{SiO_2}$ 、 $w_{Fe}$  及  $w_S$  三者对  $w_{Cu}$  的复合映射关系进行研究,进行精确分析及渣型优化。

又由于渣中 S 和 Cu 类似,都是从铜硫中通过机械夹带或溶解而进入炉渣的,属于渣型结构的因变量,而不是自变量,因此,将复合因素中的  $w_S$  排除,主要研究  $w_{SiO_2}$  和  $w_{Fe}$  二者对  $w_{Cu}$  的复合映射关系,深入分析其耦合作用。图 8 所示为渣中  $SiO_2$  含量和 Fe 含量对 Cu 含量的复合映射关系。

图 8(a)和(b)展示了  $w_{SiO_2}$  和  $w_{Fe}$  对  $w_{Cu}$  的耦合作用

关系。从图中可见,耦合规律较明显,由于渣中  $SiO_2$  含量与  $FeO$  含量之和小于 100%,所以,  $w_{SiO_2}+w_{Fe}$  是有最高限度的,函数关系只能出现在图中一定的区域内;随  $w_{SiO_2}$  升高、 $w_{Fe}$  降低,  $w_{Cu}$  呈降低趋势;随  $w_{SiO_2}$  降低、 $w_{Fe}$  升高,  $w_{Cu}$  呈升高趋势;随  $w_{SiO_2}$ 、 $w_{Fe}$  同时降低,渣中的杂相含量会增加,因此,  $w_{Cu}$  升高。式(14)为其拟合函数关系式:

$$w_{Cu} = 2.18 - 5.36 \times 10^{-2} w_{SiO_2} + 5.54 \times 10^{-2} w_{Fe}$$

$$R^2 = 3.97 \times 10^{-2} \tag{14}$$

图 9 所示为渣型优化分析结果。把  $w_{SiO_2}$  和  $w_{Fe}$  对  $w_{Cu}$  的耦合作用三维关系图进行平面等值化处理,

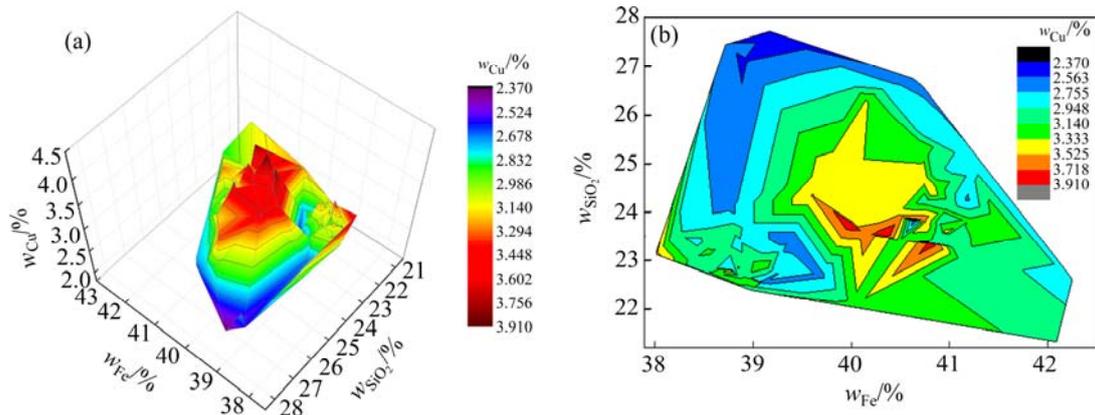


图 8 渣中 SiO<sub>2</sub> 含量和 Fe 含量对 Cu 含量的复合映射关系

Fig. 8 Mapping relationship between  $w_{SiO_2}$  and  $w_{Fe}$  and  $w_{Cu}$  in slag : (a) Three-dimensional diagram; (b) Contour diagram

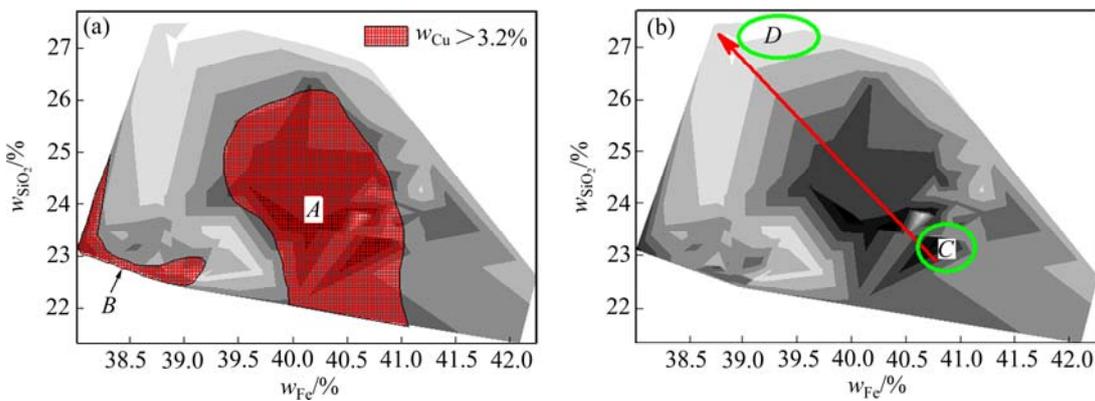


图 9 渣型优化分析结果

Fig. 9 Analysis results of slag constitution optimization: (a) Area of Cu in slag > 3.2%; (b) Path of slag constitution optimization

其关系如图 9(a)所示。A 和 B 区域对应的  $w_{SiO_2}$  和  $w_{Fe}$  范围内  $w_{Cu} > 3.2\%$ , A 区域主要是由 SiO<sub>2</sub> 和 FeO 含量变化对炉渣黏度、密度、界面张力等性质产生影响造成的; B 区域主要是渣中 FeO 和 SiO<sub>2</sub> 含量太低, 杂质多引起的; 由于 A 区与 B 区的原理不同, 因此, 两区域是分开的。

图 9(b)中, 由点 C 到点 D 渣含 Cu 是逐渐降低的, 其中点 D 附近区域对应的渣含 Cu 在 2.3%~2.5%。

因此, 在采用 FeO-SiO<sub>2</sub> 渣进行氧气底吹造钼熔炼时, 渣型优化为渣含 SiO<sub>2</sub>: 26.5%~28%(质量分数)、Fe: 38.5%~40%(质量分数), 理论上渣含 Cu 可保持在 2.5%以下。该渣型的铁硅比  $m(Fe)/m(SiO_2)$  为 1.35~1.50, 渣率有所上升, 但渣流动性较好。

### 3 结论

1) 氧气底吹铜熔炼过程产生 FeO-SiO<sub>2</sub> 型渣中

SiO<sub>2</sub>、Fe、S、Cu 及 CaO 等组元行为之间呈现出一定的相关性, 对渣中 Cu 含量预测分析的准确性由高到低的顺序依次为 S、 $m(Fe)/m(SiO_2)$ 、SiO<sub>2</sub>、Fe。

2) 渣中 SiO<sub>2</sub> 含量和 Fe 含量对 Cu 含量的耦合作用规律较明显, 随 SiO<sub>2</sub> 含量升高、Fe 含量降低, Cu 含量呈降低趋势; 随 SiO<sub>2</sub> 含量降低、Fe 含量升高, Cu 含量呈升高趋势; 若 SiO<sub>2</sub> 含量、Fe 含量同时降低, 则渣中的杂相含量会增加, Cu 含量会升高。

3) 通过渣型优化, 底吹熔炼过程采用渣成分为 SiO<sub>2</sub>: 26.5%~28%(质量分数)、Fe: 38.5%~40%(质量分数), 理论上渣中 Cu 含量可降低到 2.5%以下, 且该渣型的流动性较好。

### REFERENCES

[1] 陈淑萍, 伍赠玲, 蓝碧波, 郭其章. 火法炼铜技术综述[J]. 铜业工程, 2010(4): 44-49.  
CHEN Shu-ping, WU Zeng-ling, LAN Bi-bo, GUO Qi-zhang.

- Summarize on the technology of copper pyrometallurgy[J]. *Copper Engineering*, 2010(4): 44–49.
- [2] 崔志祥, 申殿邦, 王 智, 李维群, 边瑞民. 高富氧底吹熔池炼铜新工艺[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2010(3): 17–20.  
CUI Zhi-xiang, SHEN Dian-bang, WANG Zhi, LI Wei-qun, BIAN Rui-min. New process of copper smelting with oxygen enriched bottom blowing technology[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2010(3): 17–20.
- [3] 申殿邦. 氧气底吹炼铜新工艺 [EB/OL]. [2012-01-31]. <http://www.cmra.cn/a/33333/2012/0131/228221.html>.  
SHEN Dian-bang. New process of copper smelting with oxygen enriched bottom blowing technology[EB/OL]. [2012-01-31]. <http://www.cmra.cn/a/33333/2012/0131/228221.html>.
- [4] 中华人民共和国工业和信息化部. 有色金属工业“十二五”发展规划 [EB/OL]. [2012-01-30]. <http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11293832/n11293907/n11368223/14447635.html>.  
Ministry of industry and information technology of the people's republic of China. Non-ferrous metals industry twelfth five-year development plan [EB/OL]. [2012-01-30]. <http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11293832/n11293907/n11368223/14447635.html>.
- [5] 中华人民共和国工业和信息化部. 铜冶炼行业规范条件 [EB/OL]. [2014-04-28]. <http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11293832/n12845605/n13916898/15976630.html>.  
Ministry of industry and information technology of the people's republic of China. Copper smelting industry norms conditions [EB/OL]. [2014-04-28]. <http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11293832/n12845605/n13916898/15976630.html>.
- [6] 陈知若. 底吹炼铜技术的应用[J]. *中国有色冶金*, 2009(5): 16–22.  
CHEN Zhi-ruo. The application of oxygen bottom-blown bath smelting of copper[J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2009(5): 16–22.
- [7] YAZAWA A. Thermodynamic considerations of copper smelting[J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1974, 13(3): 443–453.
- [8] SERGEI A D, ARTHUR D P. A thermodynamic database for copper smelting and converting[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1999, 30(4): 661–669.
- [9] SRIDHAR R, TOGURI J M, SIMEONOV S. Copper losses and thermodynamic considerations in copper smelting[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1997, 28(2): 191–200.
- [10] NAGAMORI M, MACKEY P J. Thermodynamics of copper matte converting: Part 1. Fundamentals of the Noranda process[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1978, 9(3): 255–265.
- [11] MACKEY P J. The physical chemistry of copper smelting slags—A review[J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1982, 21(3): 221–260.
- [12] CHEN Mao, CUI Zhi-xiang, ZHAO Bao-jun. Slag chemistry of bottom blown copper smelting furnace at Dongying Fangyuan[C]// Orlando, FL, USA: The Minerals, Metals & Materials Society, 2015: 257–264.
- [13] 刘 柳, 闫红杰, 周子民, 高 强, 张振杨, 刘方佩, 崔志祥. 氧气底吹铜熔池熔炼过程的机理及产物的微观分析[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(7): 2116–2124.  
LIU Liu, YAN Hong-jie, ZHOU Jie-min, GAO Qiang, ZHANG Zhen-yang, LIU Fang-kan, CUI Zhi-xiang. Mechanism of copper smelting process by oxygen bottom blowing and microanalysis of smelting products[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(7): 2116–2124.
- [14] GUI Wei-hua, WANG Ling-yun, YANG Chun-hua, XIE Yong-fang, PENG Xiao-bo. Intelligent prediction model of matte grade in copper flash smelting process[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2007, 17(5): 1075–1081.
- [15] 刘建华, 桂卫华, 谢永芳, 王雅琳, 蒋朝辉. 基于投影寻踪回归的铜闪速熔炼过程关键工艺指标预测[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(11): 3255–3260.  
LIU Jian-hua, GUI Wei-hua, XIE Yong-fang, WANG Ya-lin, JIANG Zhao-hui. Key process indicators predicting for copper flash smelting process based on projection pursuit regression[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(11): 3255–3260.
- [16] 崔志祥, 申殿邦, 王 智, 边瑞民. 低碳经济与氧气底吹熔池炼铜新工艺[J]. *工艺节能*, 2011(1): 17–20.  
CUI Zhi-xiang, SHEN Dian-bang, WANG Zhi, BIAN Rui-min. Low-carbon economy and new process of copper smelting with oxygen enriched bottom blowing technology[J]. *Energy Saving on Technique*, 2011(1): 17–20.
- [17] 曲胜利, 董准勤, 陈 涛. 富氧底吹造钽捕金工艺研究[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2013(6): 40–42.  
QU Sheng-li, DONG Zhun-qin, CHEN Tao. Study on gold collection in matte with oxygen enriched bottom blowing smelting process[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2013(6): 40–42.

(编辑 李艳红)