



氧气底吹炼铜多组元造钼行为及 组元含量的映射关系

王亲猛^{1,2}, 郭学益^{1,2}, 廖立乐^{1,2}, 田庆华^{1,2}, 张永柱^{1,2}

(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: 通过分析氧气底吹炼铜过程产生的高品位铜钼中 Cu、Fe、S、SiO₂ 等组元含量变化趋势, 结合冶金过程原理, 研究上述各组元造钼行为及组元含量间的映射关系。结果表明: Cu、Fe、S、SiO₂ 等组元在铜钼中的造钼行为具有相互关联性, 其中 Cu、Fe、S 相互之间的关联性较强, Cu-Fe、Cu-S、Fe-S 含量之间线性相关系数 R^2 分别为 0.96、0.89、0.79, 但 SiO₂ 与 Cu、Fe、S 之间的关联性较弱。构造了 Cu、Fe、S 组元含量复合映射模型, 该复合模型预测精确度高于单因素模型的预测精确度, 可为生产过程中高品位铜钼多组元含量的精细调控, 及熔炼-吹炼过程热量精确分配提供指导。

关键词: 氧气底吹; 炼铜; 铜钼; 预测模型

中图分类号: TF811

文献标志码: A

氧气底吹炼铜技术具有我国自主知识产权^[1-2], 因其更加清洁高效^[3], 国家工信部发文^[4-5]明确指出把该技术列为我国有色金属工业重点开发技术, 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^[6], 表现出高效、节能及环境友好等优势, 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, 主要生产高品位铜钼, 为了精确调控铜钼成分, 进而实现热量在熔炼-吹炼之间的精细调控, 因此, 有必要对底吹工业铜钼中多组元造钼行为及相互映射关系进行研究。YAZAWA^[7]、SERGEI 等^[8]、SRIDHAR 等^[9]、NAGAMORI 等^[10]和 MACKAY^[11]对铜冶炼过程广义的组元行为、冶炼过程热力学、及炉渣相图进行了研究。本文作者研究氧气底吹炼铜机理模型^[12]、炉内氧势硫势梯度变化规律^[13]、底吹熔炼多组元造钼行为及渣型优化^[14]。CHEN 等^[15]分析氧气底吹铜熔渣渣及铜钼的微观形貌; SHUI 等^[16]研究了氧气底吹炉内熔体波动情况; GUI 等^[17]、刘建华等^[18]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模型预测及在线控制研究, 但前有关针对氧气底吹炼铜过程中的组元造钼行为分析及模型预测还鲜见报道。因此, 以期本研究成果为底吹炼铜过程高品位铜钼组元含量

预测及控制提供理论指导。

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, 炉体结构示意图如图 1 所示。

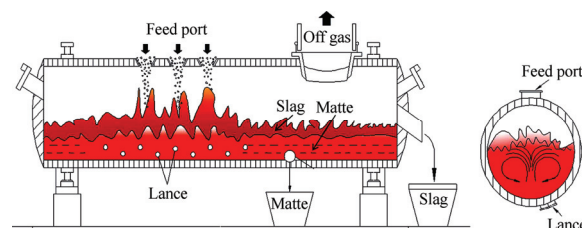


图 1 氧气底吹熔炼炉结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of oxygen bottom blowing bath smelting furnace

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。

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”^[19],主要成分为 Fe_3O_4 ,可有效防止熔体对氧枪的侵蚀作用。

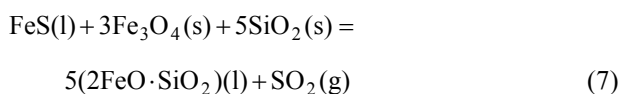
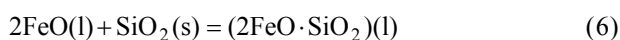
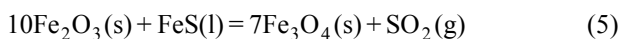
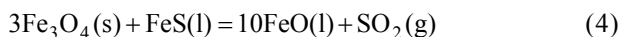
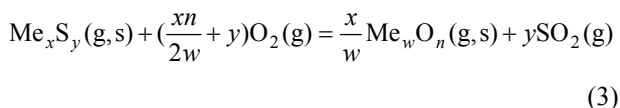
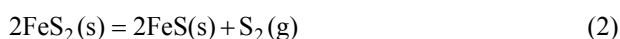
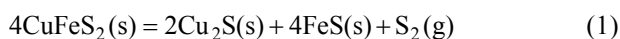
表1 混合矿料的化学成分

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

Cu	Fe	S	SiO_2	CaO	H_2O	Bal.
24.62	23.40	26.72	13.44	1.45	7.51	2.86

1.2 反应原理及理论函数式推导

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钼和造渣反应,具体反应如式(1)~(7)所列。



铜钼是重金属硫化物的共熔体,其主要成分为 Cu_2S 和 FeS ,还含有少量的杂质及微量脉石成分。熔融铜钼中的Pb、Zn、Ni等重金属是以硫化物形态(PbS 、 ZnS 、 Ni_3S_2)存在,而铁除了以 $\text{FeS}_{1.08}$ 形式(本研究中近似为 FeS)存在外,还有微量以氧化物(FeO 或 Fe_3O_4)形态存在。

本研究涉及的高品位铜钼中Cu含量高达65%~75%(质量分数),杂质成分非常少,可近似认为由 Cu_2S 和 FeS 组成,其熔体随温度变化过程符合 Cu_2S - FeS 二元系相图规律,如图2所示。

根据图2,在 Cu_2S - FeS 二元系中,铜钼组成可视为 $[\text{xCu}_2\text{S} + \text{yFeS}]$,则其组元含量关系为式(8)和(9):

$$w_{\text{Cu}} + w_{\text{S}} + w_{\text{Fe}} = 100\% \quad (8)$$

式中: w_{Cu} 、 w_{S} 、 w_{Fe} 分别为铜钼中Cu、S、Fe质量分数。

$$\frac{m_{\text{S}}}{2m_{\text{Cu}}}w_{\text{Cu}} + \frac{m_{\text{S}}}{m_{\text{Fe}}}w_{\text{Fe}} = w_{\text{S}} \quad (9)$$

式中: m_{Cu} 、 m_{S} 、 m_{Fe} 分别为铜钼中Cu、S、Fe质量。

联立公式(8)和(9)可得出 w_{Cu} 、 w_{Fe} 和 w_{S} 之间的理论函数关系式:

$$w_{\text{Fe}} = 63.48\% - 0.80w_{\text{Cu}} \quad (10)$$

$$w_{\text{S}} = 36.52\% - 0.20w_{\text{Cu}} \quad (11)$$

$$w_{\text{S}} = 20.18\% + 0.26w_{\text{Fe}} \quad (12)$$

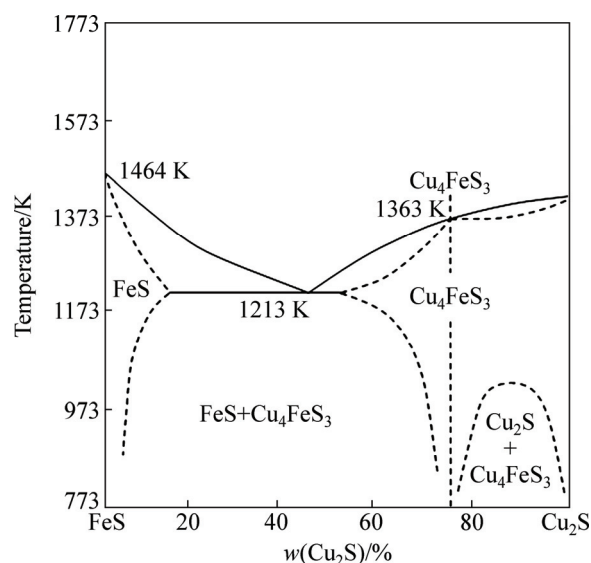


图2 Cu_2S - FeS 二元系相图

Fig. 2 Binary phase diagram of Cu_2S and FeS

1.3 数据分析方法

铜钼经冷却、破碎、细磨、筛分、制样,测定样品成分,铜钼中Cu、Fe、S、 SiO_2 等组元的含量(质量分数)分别为 w_{Cu} 、 w_{Fe} 、 w_{S} 、 w_{SiO_2} 。连续30d每天采集上述数据,采用Origin9.0软件分析 w_{Cu} 、 w_{Fe} 、 w_{S} 、 w_{SiO_2} 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_{Cu} 、 w_{Fe} 、 w_{S} 、 w_{SiO_2} 等数据相互之间的关联性强弱及预测准确性。

2 结果与分析

氧气底吹炼铜技术生产高品位铜钼,为了精确调控铜钼成份,实现热量在熔炼-吹炼之间的精细调控,

有必要对底吹高品位铜钼进行深入分析,明晰铜钼中多组元造钼行为的内在关联性,确定组元含量的映射关系。

2.1 单组元之间的映射关系

2.1.1 高品位铜钼中 Cu 含量与 Fe 含量之间的映射关系及分析

Cu 和 Fe 是铜钼中的主要元素,图 3 为所示为铜钼中 Cu 含量与 Fe 含量之间的映射关系及分析。如图 3(a)所示,在铜钼品位 64%~76%(质量分数)范围内, w_{Fe} 随 w_{Cu} 的增加而降低,且表现出较强的线性关性,对 w_{Fe} 和 w_{Cu} 进行线性拟合,线性相关系数 R^2 为 0.96,式(13)为其拟合函数关系式。

$$w_{\text{Fe}} = 60.61\% - 0.77w_{\text{Cu}} \quad (13)$$

w_{Fe} 与 w_{Cu} 的变化趋势符合铜冶金原理。由于熔炼过程为铜钼脱 S 和脱 Fe 的过程,随着熔炼的进行,铜钼中的 S 和 Fe 不断被氧化分别进入烟气和炉渣,导致铜钼中的 S 和 Fe 含量不断降低,铜钼品位不断升高。但采集的实际样本中数据与理论函数关系还是存在一定的偏差,如图 3(a)中所示,数据点均位于理论线的下方,且拟合式(13)中常数项小于理论式(10)中的常数项,主要是由于实际铜钼中含有的 SiO_2 、 CaO

等杂质;拟合式(13)中 w_{Cu} 的系数绝对值小于理论式(10)中 w_{Cu} 的系数绝对值,主要是由于实际铜钼中有少量 Fe 以 FeO 、 Fe_3O_4 等形式存在。

通过函数关系式(13)对铜钼中 w_{Fe} 进行预测分析,如图 3(b)所示预测值和实际值非常接近,整体趋势一致, w_{Fe} 值分布在 2%~11%(质量分数)之内;如图 3(c)所示绝对误差在 -1%~0.75%之内(质量分数);由于部分样本的 w_{Fe} 较小,基数小,虽然最大相对误差为 14%,但主体的相对误差 < 5%,如图 3(d)所示。因此函数关系式(13)能较好地预测 w_{Fe} 与 w_{Cu} 的关系。

2.1.2 高品位铜钼中 Cu 含量与 S 含量之间的映射关系及分析

图 4 所示为铜钼中 Cu 含量与 S 含量之间的映射关系及分析。图 4(a)所示,在铜钼品位 64%~76%(质量分数)范围内, w_{S} 随 w_{Cu} 的增加而降低,也表现出较强的线性关性,对 w_{S} 和 w_{Cu} 进行线性拟合,线性相关系数 R^2 为 0.89,式(14)为其拟合函数关系式。

$$w_{\text{S}} = 33.5\% - 0.18w_{\text{Cu}} \quad (14)$$

w_{Cu} - w_{S} 的变化趋势符合理论过程,随着熔炼的进行,铜钼中的 S 不断被氧化进入烟气,铜钼品位不断升高。实际数据与理论函数关系也存在一定的误差,如图 4(a)中所示,数据点均位于理论线的下方,拟合

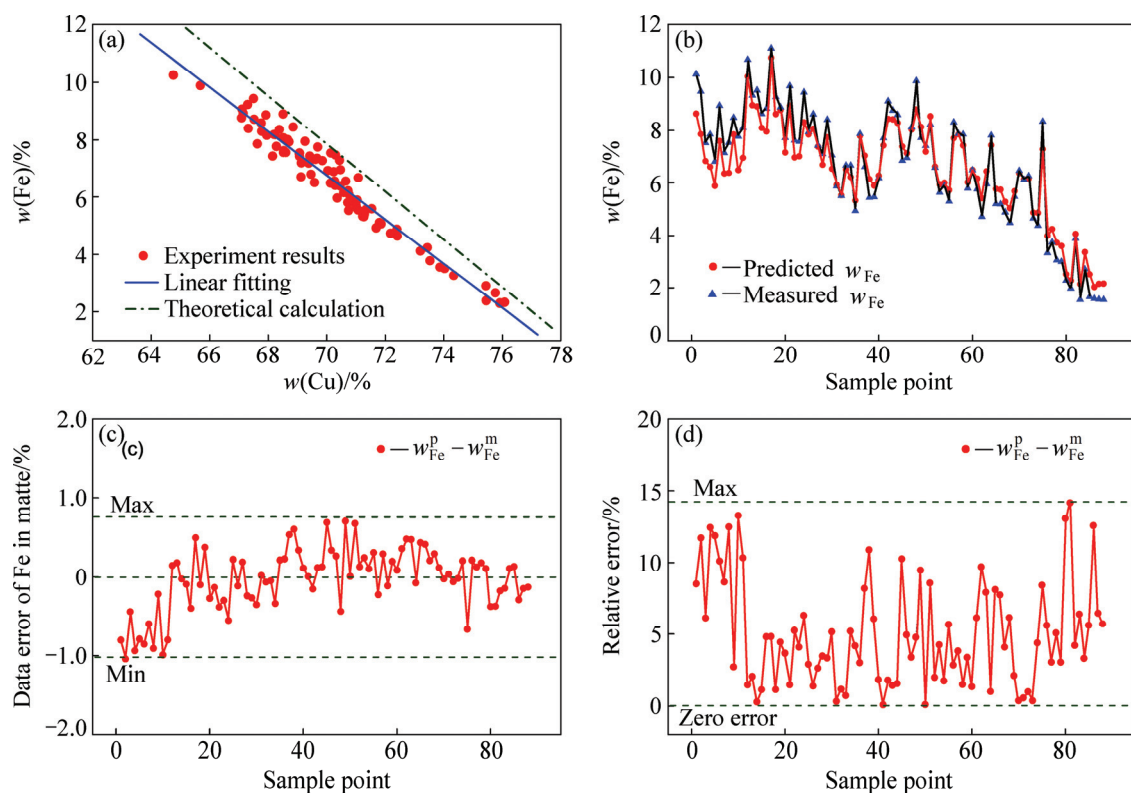


图 3 铜钼中 Cu 含量与 Fe 含量之间的映射关系及分析

Fig. 3 Mapping relationship and analysis of w_{Cu} and w_{Fe} in matte (w_{Fe}^{p} and w_{Fe}^{m} are predicted w_{Fe} and measured w_{Fe} , respectively):

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

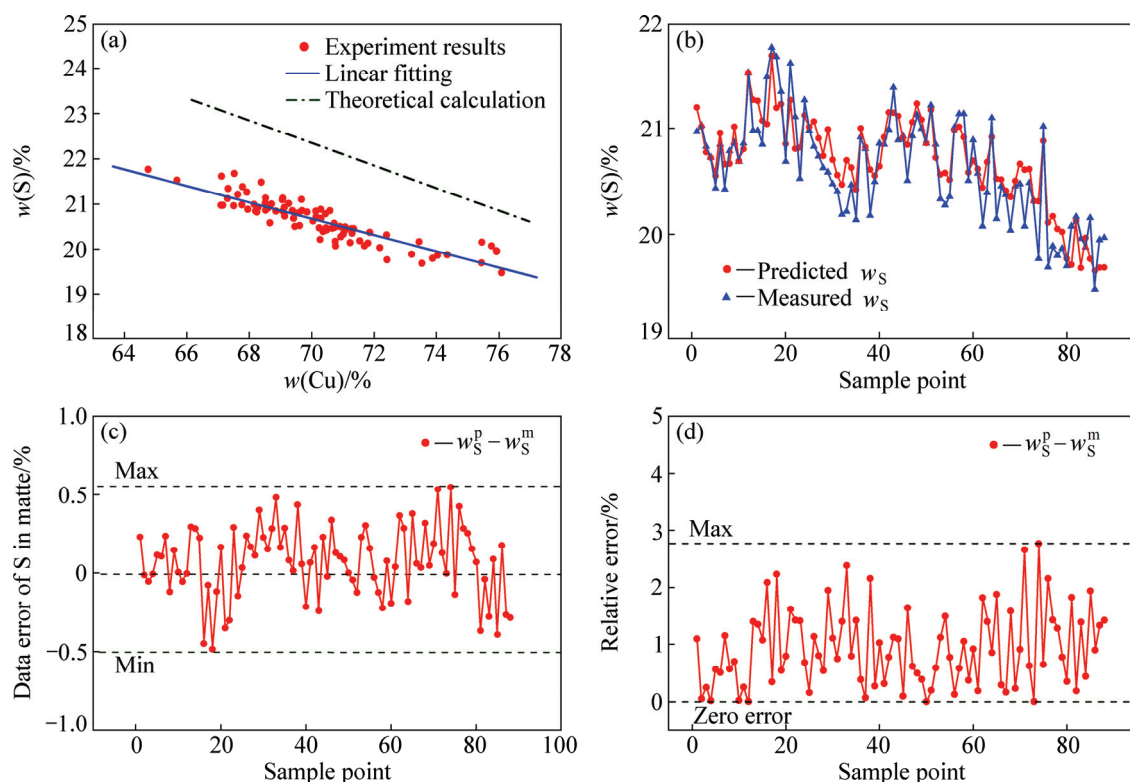


图 4 铜锍中 Cu 含量与 S 含量之间的映射关系及分析

Fig. 4 Mapping relationship and analysis of w_{Cu} and w_S in matte (w_S^p and w_S^m are predicted w_S and measured w_S , respectively): (a) Linear fitting of measured data; (b) Comparison of predicted data and measured data; (c) Absolute error; (d) Relative error

式(14)中常数项小于理论式(11)中常数项, 主要是因为实际铜锍中含有的 SiO_2 、 CaO 、 FeO 、 Fe_3O_4 等杂质; 拟合式(14)中 w_S 的系数绝对值小于理论式(11)中 w_{Cu} 的系数绝对值, 主要是由于实际铜锍中还有少量 PbS 、 ZnS 、 Ni_3S_2 等其他的含硫组元。

通过函数关系式(14)对铜锍中 w_S 进行预测分析, 预测值也非常接近实际值(见图 4(b)), w_S 值分布在 19.5%~21.8%之内, 绝对误差在 $\pm 0.5\%$ 之内(见图 4(c)); 最大相对误差为 2.7%, 主体的相对误差 $< 1.5\%$ (见图 4(d)), 较好地预测了 w_S 与 w_{Cu} 的关系。

2.1.3 高品位铜锍中 Fe 含量与 S 含量之间的映射关系及分析

图 5 所示为铜锍中 Fe 含量与 S 含量之间的映射关系及分析。由图 5(a)可看出, w_S 随 w_{Fe} 的增加而降低, 对 w_S 和 w_{Fe} 进行线性拟合, 线性相关系数 R^2 为 0.79, 式(15)为其拟合函数关系式:

$$w_S = 19.13\% + 0.23w_{Fe} \quad (15)$$

$w_{Fe}-w_S$ 的变化趋势不同于 $w_{Cu}-w_S$ 的变化趋势。主要是由于 FeS 中 S 的质量分数为 36.52%, Cu_2S 中 S 的质量分数为 20.18%, 相差 16.34%, 随着铜锍中 Fe

增加, FeS 形式的 S 含量会增加, Cu_2S 形式的 S 含量会减少, 但增加的幅度大于减少的幅度, 整体上呈现 $w_{Fe}-w_S$ 增加趋势, 斜率为正值。实际数据和理论关系比较一致, 但也存在一定偏差, 主要是因为实际铜锍中含有的 SiO_2 、 CaO 、 FeO 、 Fe_3O_4 、 PbS 、 ZnS 、 Ni_3S_2 等杂质。

通过函数关系式(15)对 w_S 进行预测分析, 如图 5(b), 预测值接近实际值, 绝对误差在 $\pm 0.5\%$ 之内, 如图 5(c); 最大相对误差为 2.5%, 主体的相对误差 $< 1\%$, 如图 5(d)所示, 较好地预测了 w_{Fe} 与 w_S 的关系。

2.1.4 铜锍中组元含量之间其他次要映射关系

图 6 所示为铜锍中组元含量之间其他次要映射关系。铜锍中含有少量的 SiO_2 杂质, $w_{SiO_2}-w_{Cu}$ 、 $w_{SiO_2}-w_S$ 、 $w_{SiO_2}-w_{Fe}$ 的关系分别如图 6(a)、(b)和(c)所示, 随着 Fe、S、Cu 含量的变化, SiO_2 含量的变化并未呈现出一定的规律性, 其拟合的线性相关系数 R^2 很小, 分别为 2.53×10^{-4} 、 2.26×10^{-6} 、 7.76×10^{-3} , 因此, 无法建立可信的函数关系式。造成这种现象的主要原因是由于 Cu_2S 和 FeS 具有类金属性质, 可以形成共熔体, 而在高温熔体内 SiO_2 属于酸性介质, 与铜锍的之间的界面张力很大, 不能溶解在铜锍中, 主

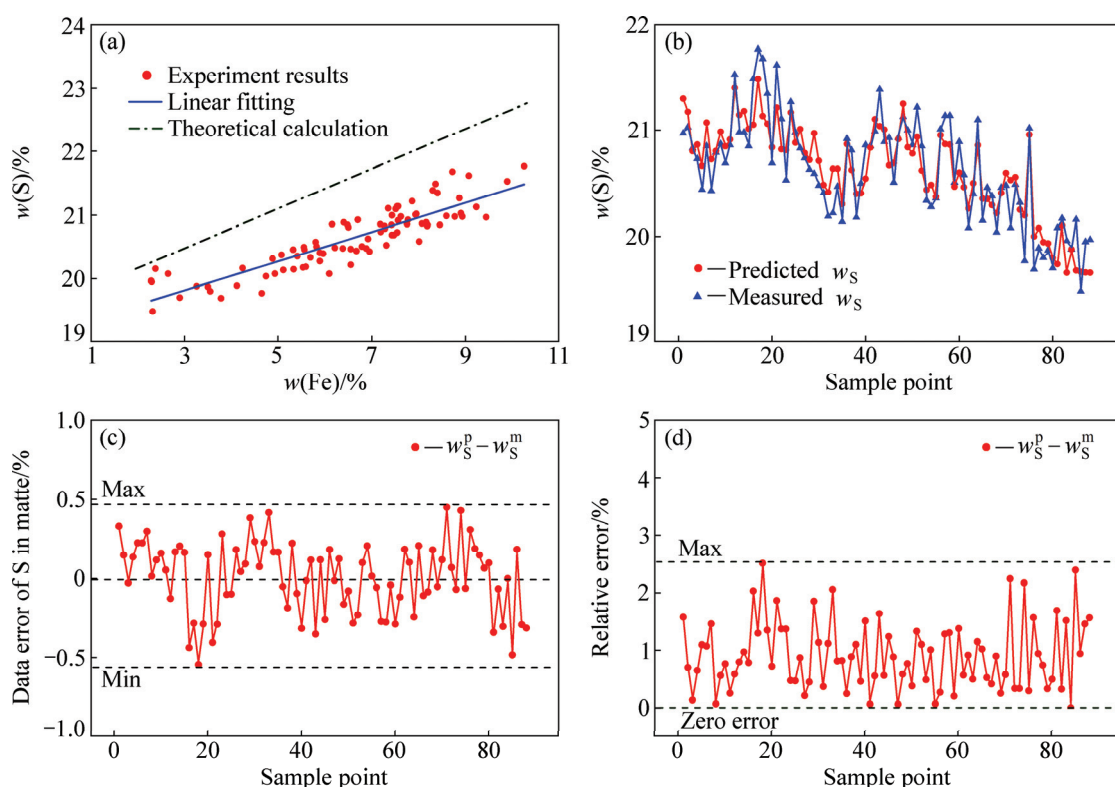


图 5 铜钨中 Fe 含量与 S 含量之间的映射关系及分析

Fig. 5 Mapping relationship and analysis of w_{Fe} and w_{S} in matte (w_{S}^{p} and w_{S}^{m} are predicted w_{S} and measured w_{S} , respectively): (a) Linear fit of measured data; (b) Comparison of predicted data and measured data; (c) Absolute error; (d) Relative error

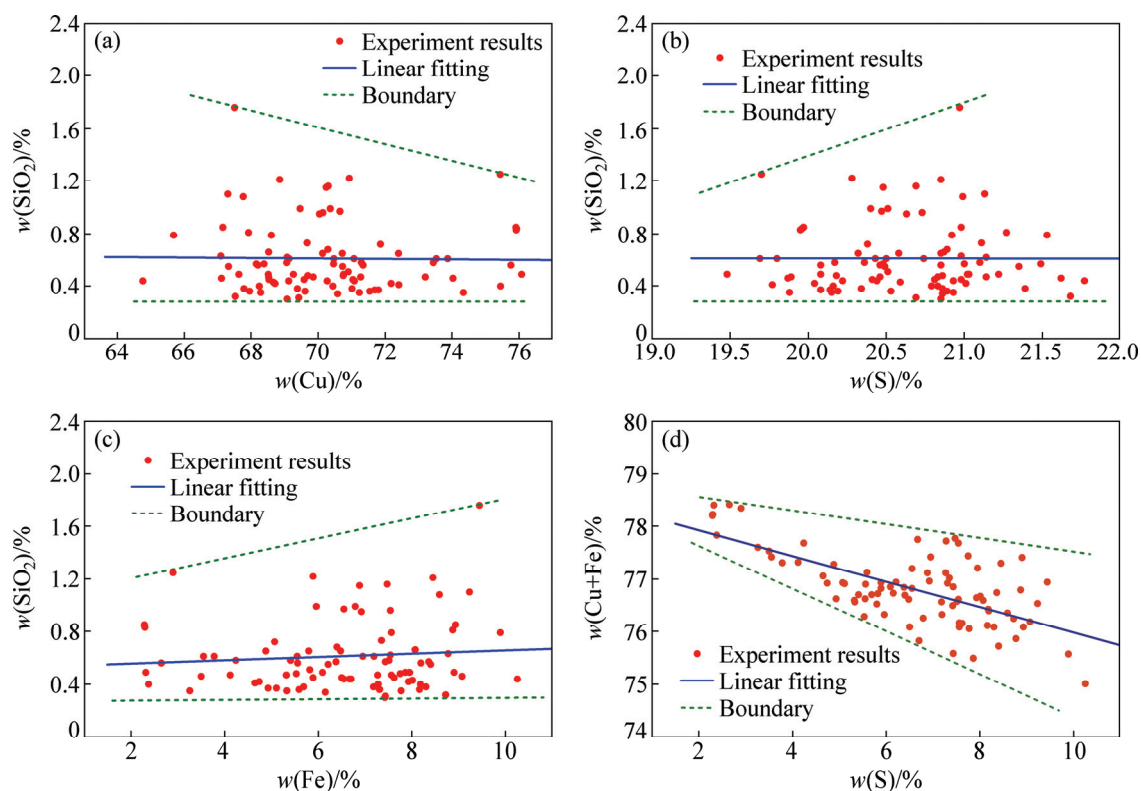


图 6 铜钨中组元含量之间其他次要映射关系

Fig. 6 Other secondary mapping relationship of multicomponent content in matte: (a) $w_{\text{SiO}_2} - w_{\text{Cu}}$; (b) $w_{\text{SiO}_2} - w_{\text{S}}$; (c) $w_{\text{SiO}_2} - w_{\text{Fe}}$; (d) $w_{\text{S}} - w_{(\text{Cu}+\text{Fe})}$

要以夹带的 $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ 和 SiO_2 形式存在, 底吹工艺铜钼中 SiO_2 质量分数恒定在 0.3%~1.2% 范围内, Fe、S、Cu 含量的单因素变化对 SiO_2 含量几乎没有影响, 因此, 本研究中不对其进一步预测分析。

可近似通过 $w_{\text{SiO}_2}=100-(w_{\text{Cu}}+w_{\text{S}}+w_{\text{Fe}})$ 对 w_{SiO_2} 进行计算, 由于铜钼还含有少量 CaO 、 FeO 、 Fe_3O_4 、 PbS 、 ZnS 、 Ni_3S_2 等杂相组元, 因此, 上述计算的相对误差也会比较大。

图 6(d) 中还分析了 w_{S} 与 $w_{(\text{Cu}+\text{Fe})}$ 的关系, 由于 FeS 和 Cu_2S 中 S 的质量分数相差较大, w_{S} 与 $w_{(\text{Fe}+\text{Cu})}$ 拟合的线性相关系数 R^2 为 0.46, 误差率较大, 因此, 单纯依靠 $w_{(\text{Fe}+\text{Cu})}$ 不能准确预测 w_{S} 。

2.2 多组元复合映射关系及分析

Cu、S、Fe 是铜钼中的主要元素, 通过上节分析, 每两个元素含量之间都表现出了较强的线性相关性, 因此, 有必要对 w_{Cu} 、 w_{Fe} 、 w_{S} 三者之间的复合映射关系进行研究, 如图 7 所示, 深入分析多因素的耦合作用, 进行精确预测。

图 7(a) 显示了 w_{Cu} 和 w_{Fe} 对 w_{S} 的耦合作用关系。

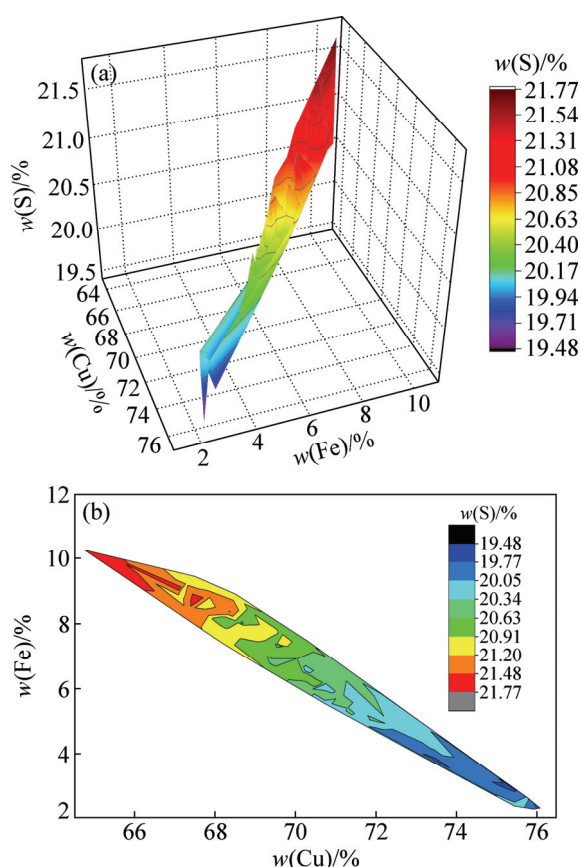


图 7 铜钼中 Cu 含量和 Fe 含量对 S 含量的复合映射关系
Fig. 7 Mapping relationship between w_{S} and w_{Cu} and w_{Fe} in matte: (a) Three-dimensional diagram; (b) Contour diagram

由于 w_{Cu} 和 w_{Fe} 本身具有较高的线性相关性, 图中的响应区间呈现条形, 分布区域比较窄, 如图 7(b) 所示。随着 w_{Cu} 的增加, w_{Fe} 逐渐降低, w_{S} 也随之降低, 趋势明显。

式(16)为其拟合函数关系式:

$$w_{\text{S}} = 133.84\% - 1.51w_{\text{Fe}} - 1.47w_{\text{Cu}} \quad (16)$$

图 8 所示为 w_{Fe} 和 w_{S} 对 w_{Cu} 的耦合作用。 w_{Cu} 、 w_{Fe} 和 w_{S} 三维映射关系如图 8(a) 所示, 由于 w_{Fe} 和 w_{S} 本身也具有较高的线性相关性, 图 8(b) 中的 w_{Fe} 、 w_{S} 响应区间也呈现条形, 分布区域比较窄。随着 w_{Fe} 增加, w_{S} 也增加, w_{Cu} 降低, 呈阶梯状分布, 趋势明显。其拟合函数关系式(17)可通过式(16)转化:

$$w_{\text{Cu}} = 91.01\% - 1.03w_{\text{Fe}} - 0.68w_{\text{S}} \quad (17)$$

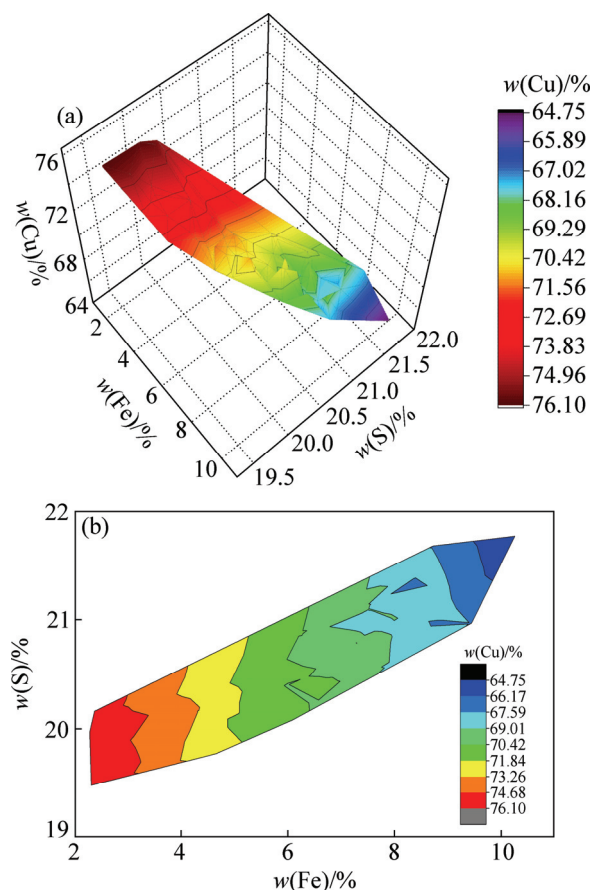


图 8 铜钼中 Fe 含量和 S 含量对 Cu 含量的复合映射关系
Fig. 8 Mapping relationship between w_{Cu} and w_{Fe} and w_{S} in matte: (a) Three-dimensional diagram; (b) Contour diagram

图 9 所示为式(17)和(18)的映射关系模型预测精确度分析。通过二元函数关系式(17)对 w_{Cu} 进行预测分析, 预测值接近实际值, 如图 9(a), 绝对误差基本在 $\pm 1\%$ 之内, 如图 9(b); 主体的相对误差 $< 0.8\%$, 最大

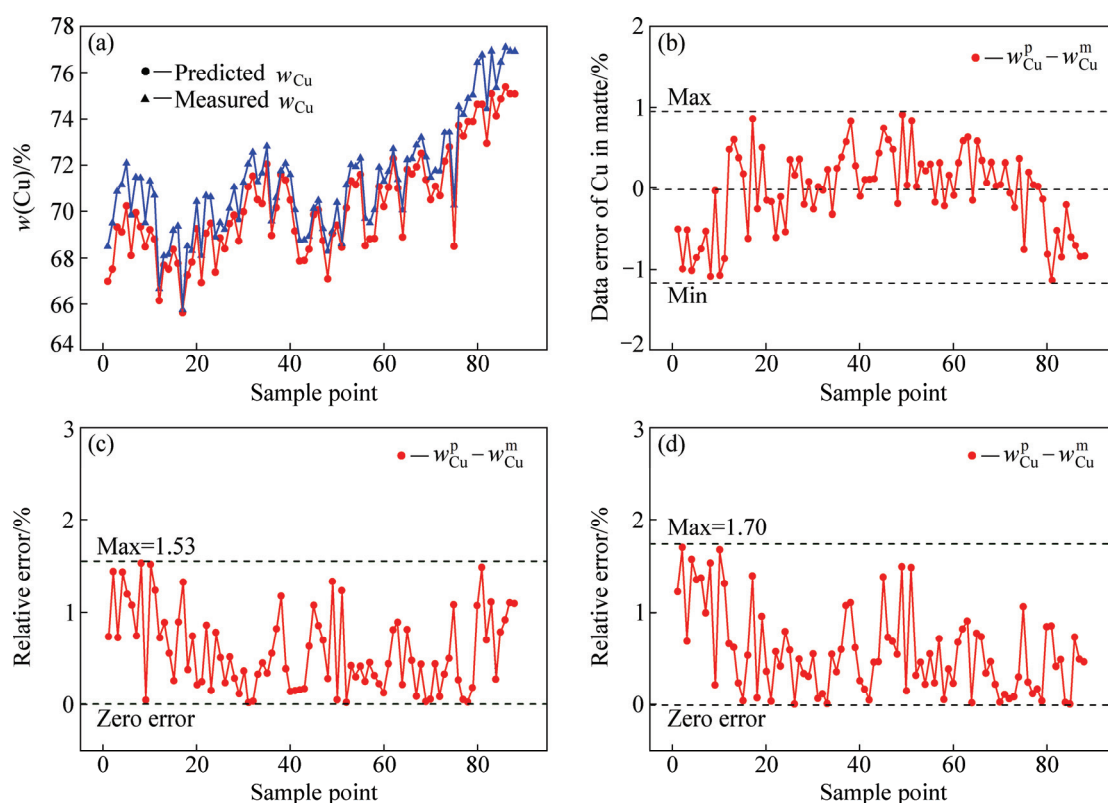


图9 映射关系模型预测精确度分析

Fig. 9 Prediction accuracy analysis of mapping relationship model (w_{Cu}^p and w_{Cu}^m are predicted w_{Cu} and measured w_{Cu} , respectively): (a) Comparison of predicted data and measured data; (b) Absolute error; (c) Relative error of formula (17); (d) Relative error of formula (18)

相对误差为 1.53%，如图 9(c)所示，较好地预测了 w_{Fe} 和 w_S 对 w_{Cu} 的复合映射关系。

$$w_{Cu} = 78.41\% - 1.24w_{Fe} \quad (18)$$

为了分析式(17)的准确性，特将单因素函数关系式(13)转化为式(18)后，进行相对误差比较，由图 9(d)可得，式(18)的最大相对误差为 1.70%，大于式(17)的相对误差 1.53%，式(17)较式(18)缩小了相对误差范围，因此，复合映射关系式(17)较单因素函数关系式(18)提高了模型预测的准确度。

为了进一步明确高品位铜钼中 w_S 、 w_{Cu} 、 w_{Fe} 三者之间关系，将三者的测量数据点在三维坐标空间离散作图，如图 10 所示，在铜钼品位 64%~76%(质量分数)研究范围内， w_{Cu} 、 w_S 、 w_{Fe} 3 个因子近似在一条直线上，其物理意义明确说明底吹工艺高品位工业铜钼中，在 w_{Cu} 64%~76%内，对于每一个 w_{Cu} ，应有确定的 w_S 、 w_{Fe} 值或窄区间值域与之对应，其规律与 Cu_2S-FeS 二元系相图规律一致。

将式(16)和式(18)联合，构建联合预测模型，如图 10 中的预测模型，测量的数据点均围绕在预测模型周

围，主要是由于工业铜钼中还含有 SiO_2 、 CaO 、 FeO 、 Fe_3O_4 、 PbS 、 ZnS 、 Ni_3S_2 等杂相组元，造成实际的 w_{Cu} 、 w_S 、 w_{Fe} 会有一定波动，而离散在预测模型周围。但理

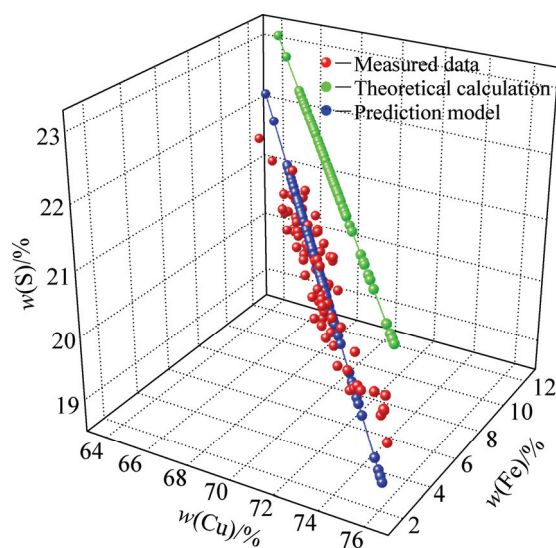


图10 铜钼中 $w_S-w_{Fe}-w_{Cu}$ 的线性映射关系图

Fig. 10 Linear mapping relationships between w_S , w_{Fe} and w_{Cu} in matte

论计算的数据值偏离实际测量值较大,说明该联合预测模型相比理论计算精度更高。因此,该联合预测模型能清晰地阐明高品位铜钼中多组元含量 w_{Cu} 、 w_{S} 、 w_{Fe} 的映射关系,并能进行准确地预测分析,为实际氧气底吹生产高品位铜钼过程中的成份精细调控,及热量精确分配提供理论指导。

4 结论

1) 高品位工业铜钼中多组元含量 w_{Cu} 、 w_{S} 、 w_{Fe} 相互之间表现出较强的线性关系,分别对 $w_{\text{Fe}}-w_{\text{Cu}}$ 、 $w_{\text{S}}-w_{\text{Cu}}$ 、 $w_{\text{S}}-w_{\text{Fe}}$ 进行线性拟合,线性相关系数 R^2 分别为 0.96、0.89、0.79,且其变化趋势符合 $\text{Cu}_2\text{S}-\text{FeS}$ 二元系相图理论,模型公式能较准确地对 w_{Cu} 、 w_{S} 、 w_{Fe} 进行预测。

2) w_{SiO_2} 与 w_{Cu} 、 w_{S} 、 w_{Fe} 之间未呈现出一定的相关性, $w_{\text{SiO}_2}-w_{\text{Fe}}$ 、 $w_{\text{SiO}_2}-w_{\text{S}}$ 、 $w_{\text{SiO}_2}-w_{\text{Cu}}$ 的拟合线性相关系数 R^2 很小,因此,不能用 w_{Cu} 、 w_{S} 、 w_{Fe} 单因素对 w_{SiO_2} 进行准确预测。

3) 构建的联合预测模型能清晰地阐明高品位铜钼中多组元含量 w_{Cu} 、 w_{S} 、 w_{Fe} 的映射关系,并能进行准确地预测分析,可为实际氧气底吹生产高品位铜钼过程中的成份精细调控及热量精确分配提供理论指导。

REFERENCES

- [1] 胡立琼,李 栋. 氧气底吹熔炼炉的开发与应用[J]. 有色设备, 2011(1): 33-37.
HU Li-qiong, LI Dong. Development and application of oxygen bottom blowing melting furnace[J]. Non-Ferrous Metallurgical Equipment, 2011(1): 33-37.
- [2] 梁帅表,陈知若. 氧气底吹炼铜技术的应用与发展[J]. 有色冶金节能, 2013(2): 16-19.
LIANG Shuai-biao, CHEN Zhi-ruo. Application and development of oxygen bottom-blowing copper smelting technology[J]. Energy Saving of Non-ferrous Metallurgy, 2013(2): 16-19.
- [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] 郭学益,王亲猛,廖立乐,田庆华,张永柱. 铜富氧底吹熔池熔炼过程机理及多相界面行为[J]. 有色金属科学与工程, 2014, 5(5): 28-34.
GUO Xue-yi, WANG Qin-meng, LIAO Li-le, TIAN Qing-hua, ZHANG Yong-zhu. Mechanism and multiphase interface behavior of copper sulfide smelting in oxygen-enriched bottom blowing furnace[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2014, 5(5): 28-34.
- [13] 郭学益,王亲猛,田庆华,张永柱. 基于区位优势硫势梯度变化下铜富氧底吹熔池熔炼非稳态多相平衡过程[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(4): 1072-1079.
GUO Xue-yi, WANG Qin-meng, TIAN Qing-hua, ZHANG Yong-zhu. Non-steady multiphase equilibrium process of copper oxygen-enriched bottom blowing bath smelting with gradual change of oxygen and sulfur potential of different positions in furnace[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015,

- 25(4): 1072–1079.
- [14] 王亲猛, 郭学益, 田庆华, 廖立乐, 张永柱. 氧气底吹铜熔炼渣中多组元渣行为及渣型优化[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(6): 1678–1686.
- WANG Qin-meng, GUO Xue-yi, TIAN Qing-hua, LIAO Li-le, ZHANG Yong-zhu. Multicomponent slagging behavior and constitution optimization of slag in copper oxygen bottom blowing bath smelting process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(6): 1678–1686.
- [15] 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.
- [16] SHUI Liang, CUI Zhi-xiang, MA Xiao-dong, RHAMDHANI M A, NGUYEN A V, ZHAO Bao-jun. Mixing phenomena in a bottom blown copper smelter: A water model study[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2015, 46: 1218–1225.
- [17] 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(15): 1075–1081.
- [18] 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.
- [19] 刘柳, 闫红杰, 周子民, 高 强, 张振杨, 刘方侃, 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.

Mapping relationship between multicomponent matte forming behavior and content in copper oxygen bottom blowing bath smelting process

WANG Qin-meng^{1,2}, GUO Xue-yi^{1,2}, LIAO Li-le^{1,2}, TIAN Qing-hua^{1,2}, ZHANG Yong-zhu^{1,2}

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

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

Abstract: The multicomponent matting behavior and mapping relationship of Cu, Fe, S and SiO₂ were investigated by analyzing Cu, S, Fe and SiO₂ content variation trends of high-grade matte in copper oxygen bottom blowing bath smelting (BBS) process, combined with metallurgical process principles. The results show that the matting behavior of Cu, Fe, S and SiO₂ in matte have certain correlation, and the correlations of Cu, Fe and S are stronger. The correlation coefficients (R^2) of Cu-Fe, Cu-S and Fe-S are 0.96, 0.89 and 0.79, respectively. But the correlations of SiO₂ with Cu, Fe and S are weaker. The composite mapping model of the content of Cu, Fe and S is constructed, and its forecast accuracy is higher than that of the single factor model, so, it can be applied to the precise control of multicomponent content of high grade matte and the precise heat distribution between smelting and converting in the practical production process.

Key words: oxygen bottom blowing; copper smelting; matte; prediction model

Foundation item: Project (YSZN2013YJ01) supported by the Hunan Nonferrous Metals Research Fund, China

Received date: 2015-06-09; **Accepted date:** 2015-10-23

Corresponding author: GUO Xue-yi; Tel: +86-731-88877863; E-mail: xyguo@csu.edu.cn

(编辑 李艳红)