

含固相铜冶炼渣的黏度计算及其应用

盛 力¹⁾, 李江涛^{1,2)}, 张建坤^{1,2)}, 张家靓^{1,3)}✉, 张立峰^{1,3)}, 侯新梅¹⁾

1) 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083 2) 谦比希铜冶炼有限公司, 谦比希 999134, 赞比亚
3) 稀贵金属绿色回收与提取北京市重点实验室, 北京 100083
✉ 通信作者, E-mail: jialiangzhang@ustb.edu.cn

摘 要 利用 Roscoe 方程,结合 FactSage 的多元多相平衡计算和纯液相渣黏度计算功能可对含固相熔渣的黏度进行计算. 本研究针对基于铜冶炼渣的 FeO-SiO₂-Fe₃O₄-CaO-Al₂O₃-MgO 系,首先根据相似炉渣的黏度测定值对 Roscoe 方程中的参数进行拟合,同时验证了该方法在计算所研究体系时的准确性. 基于所得的计算模型考察不同组分含量对平衡相组成及黏度的影响规律,并总结获得合理的渣型配比. 当炉渣中各组分的质量分数分别控制在 FeO 40% ~ 60%、SiO₂ 25% ~ 40%、Fe₃O₄ 0% ~ 15%、CaO 0% ~ 10%、Al₂O₃ 0% ~ 8% 和 MgO 0% ~ 4% 时,可在冶炼过程中得到流动性较好、固体量较少的熔渣.
关键词 铜冶炼; 渣; 黏度; 固相; 计算
分类号 TF811

Viscosity calculation and its application of the copper smelting slag containing solid phase

SHENG Li¹⁾, LI Jiang-tao^{1,2)}, ZHANG Jian-kun^{1,2)}, ZHANG Jia-liang^{1,3)}✉, ZHANG Li-feng^{1,3)}, HOU Xin-mei¹⁾

1) School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
2) Chambishi Copper Smelter Limited, Chambishi 999134, Zambia
3) Beijing Key Laboratory of Green Recycling and Extraction of Metals, Beijing 100083, China
✉ Corresponding author, E-mail: jialiangzhang@ustb.edu.cn

ABSTRACT The viscosity of solid-containing slags can be calculated using the Roscoe equation combined with the calculation functions of multi-component & multi-phase equilibria and pure-liquid slag's viscosity in FactSage software. An FeO-SiO₂-Fe₃O₄-CaO-Al₂O₃-MgO system used in copper smelting was studied in this paper. Firstly, the parameters of the Roscoe equation were fitted using the measured viscosities of analogous slag in the literature, and the accuracy of viscosity calculated by the method for this slag system was verified additionally. Then, the effect of slag components' contents on the equilibrium phase-composition and viscosity was investigated based on the calculation model. Accordingly, the reasonable proportions of components in the slag were obtained. When the mass fractions of slag components are FeO 40% ~ 60%, SiO₂ 25% ~ 40%, Fe₃O₄ 0% ~ 15%, CaO 0% ~ 10%, Al₂O₃ 0% ~ 8%, and MgO 0% ~ 4%, the molten slag with good liquidity and fewer solids can be obtained in the smelting process.
KEY WORDS copper smelting; slag; viscosity; solid phase; calculations

黏度是铜冶炼渣重要的物理化学性质之一,直接影响冶炼过程中熔体的搅动、铜渣的分离等^[1-2]. 铜冶炼渣中最主要的成分是 SiO₂ 和 FeO, 其次还有 CaO、Al₂O₃、Fe₃O₄、MgO 等. 有学者曾对 FeO-SiO₂ 系^[3-4]、

FeO-SiO₂-CaO 系^[5-6]、FeO-SiO₂-Al₂O₃ 系^[7] 和 FeO-SiO₂-CaO-Al₂O₃ 系^[8] 的黏度进行研究,但所研究的这些渣系并未涵盖实际铜冶炼炉渣的所有组分,迄今为止对于 FeO-SiO₂-Fe₃O₄-CaO-Al₂O₃-MgO 六元渣系的

黏度研究较为少见。另一方面,在实际生产过程中如果操作温度和炉渣成分控制不当,会在熔渣中析出尖晶石、橄榄石等固相物质,显然固相的生成会使熔渣的黏度大幅上升,对于铜冶炼过程极其不利。因此,当前亟需对考虑固相生成时 $\text{FeO-SiO}_2\text{-Fe}_3\text{O}_4\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 系的黏度进行研究。

对于含固相时熔渣黏度的计算,Einstein 曾提出一个非常著名的公式,即

$$\eta_r = \frac{\eta_s}{\eta_L} = 1 + 2.5\Phi_s \tag{1}$$

式中, η_r 为相对黏度,即含固相熔渣的黏度(η_s)与剩余纯液相熔渣黏度(η_L)的比值, Φ_s 为固相的体积分数^[9]。

基于该公式,只要得到固相的体积分数以及纯液相熔渣的黏度即可计算出含固相熔渣的黏度值。但是该公式只适用于固相体积分数低于 5% 的熔渣体系,并且计算的准确性也不甚理想。随后,Roscoe 提出另一个计算含固相黏度的方程,如下所示:

$$\eta_r = (1 - a\Phi_s)^{-n} \tag{2}$$

式中 a 和 n 为经验参数^[10]。Wright 等^[11-12]对含 Fe_3O_4 固相的 CaO-FeO_x 系和含尖晶石 MgAl_2O_4 固相的 $\text{CaO-MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系的黏度进行研究,结果表明两种体系的黏度均可用 Roscoe 方程来描述,但是在不同体系中 a 和 n 值并不相同,需要用黏度的实验值进行拟合。Konratiev 等^[13-14]针对 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-“FeO”-SiO}_2$ 系,采用 FactSage 软件分别计算出该渣系在一定温度下的固、液相组成以及纯液相的黏度,再通过 Roscoe 方程(a 和 n 值通过线性拟合得到)得到含固相熔渣的黏度,结果表明在固相体积分数不高于 30% 时计算值与实验值均较为接近。

基于 Roscoe 方程在相关熔渣体系中的成功应用,本文将利用这一方法对含固相的 $\text{FeO-SiO}_2\text{-Fe}_3\text{O}_4\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 系的黏度进行计算,考察不同组分含量对平衡相组成及黏度的影响规律,从而为实际冶炼过程中炉渣组分与操作温度的控制提供理论指导。

1 计算方法

FactSage 热力学软件是由 F * A * C * T/FACT-
Win 和 ChemSage 两个热化学软件整合而成,现已广泛应用于冶金反应过程的优化、炉渣物理化学性能的预测、材料设计等领域^[15-16]。FactSage 的 Equilib 模块基于吉布斯自由能最小化原理,加之软件自带丰富的数据库,可实现多元多相的平衡计算。利用这一功能,本文首先选择纯物质数据库 FactPS 和氧化物数据库 FToxid,设定初始的熔渣氧化物组成与平衡温度,通过软件计算即可得到该温度下固液相的平衡组成。

含固相熔渣的黏度由 Roscoe 方程(式(2))计算得到,其中固相的体积分数 Φ_s 可通过式(3)~式(5)求得:

$$\Phi_s = \frac{V_s}{V_s + V_L} \tag{3}$$

$$V_s = \sum \frac{m_i}{\rho_j} \tag{4}$$

$$V_L = \sum v_i \frac{m_i}{M_i} \tag{5}$$

式中, V_s 和 V_L 分别为固相和剩余液相的体积, m_j 和 ρ_j 分别为每种固相的质量和密度, v_i 、 m_i 和 M_i 分别为液相中每种物质的偏摩尔体积、质量与摩尔质量。其中 ρ_j 的值出自 FactSage 的纯物质数据库,而液相中每种物质在熔炼温度(1230 ℃)下的偏摩尔体积 v_i 的值如表 1 所示^[17]。

表 1 1230 ℃ 下各种炉渣组分的偏摩尔体积值

Table 1 Recommend values for the partial molar volume of various slag components at 1230 ℃

组分	$v_i/(\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1})$
Al_2O_3	$(28.31 + 32x_{\text{Al}_2\text{O}_3} - 31.45x_{\text{Al}_2\text{O}_3}^2) \times 0.973$
CaO	20.1
FeO	15.4
Fe_2O_3	37.4
MgO	15.7
SiO_2	$(19.55 + 7.966x_{\text{SiO}_2}) \times 0.973$

注: $x_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 和 x_{SiO_2} 分别为 Al_2O_3 和 SiO_2 的摩尔分数。

纯液相的黏度 η_L 采用 FactSage 的 Viscosity 模块计算,该计算模块基于改进的准化学模型(modified quasi-chemical model),可利用二元系和三元系的黏度数据计算含有相应组分的多元系的黏度^[18]。本文首先对 Factsage 的黏度计算功能是否适用于 $\text{FeO-SiO}_2\text{-Fe}_3\text{O}_4\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 渣系进行验证。由于缺乏该渣系黏度的实验数据,因此选取若干个同样以 FeO 和 SiO_2 为主,并含有 0~2 种次要组分的纯液相渣系作为验证对象。如该方法可以用于计算这些简单氧化物体系的黏度,则也可较好地预测 $\text{FeO-SiO}_2\text{-Fe}_3\text{O}_4\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 六元渣系的黏度。而对于 Roscoe 方程中的 a 和 n 值,本文将通过类似含固相熔渣体系的实验值拟合得到。

根据铜冶炼的实际渣型,给出 $\text{FeO-SiO}_2\text{-Fe}_3\text{O}_4\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 渣系各组分的初始含量,如表 2 所示。计算中当考察某一组分的含量对平衡相组成以及黏度的影响时,通过固定其余组分之间的比例而变动该组分的质量分数得到该渣型的计算输入值。多元多相平衡计算与黏度计算的温度均设定为 1230 ℃。

表 2 六元渣系各组分的初始质量分数

Table 2 Initial mass fraction of various components in the slag system

%					
Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	FeO	Fe ₃ O ₄	MgO
4.53	30.57	4.82	49.05	10.01	1.02

2 结果与讨论

2.1 FactSage 计算纯液相熔渣黏度的准确性验证

将文献[3-5,18-20]中与铜冶炼渣系 FeO-SiO₂-Fe₃O₄-CaO-Al₂O₃-MgO 类似的渣系的黏度测定值与 FactSage 的计算值进行对比(见图 1),从而验证 FactSage 计算纯液相熔渣黏度的准确性。从图 1 中可以看到,计算值与实验值较为接近,表明 FactSage 的纯液相黏度计算功能适用于 SiO₂-FeO、SiO₂-FeO-CaO、SiO₂-FeO-Fe₂O₃、SiO₂-FeO-Al₂O₃、SiO₂-CaO-MgO-FeO、SiO₂-FeO-CaO-Fe₂O₃ 等渣型的黏度计算。本文所研究的铜冶炼渣为高 FeO 和 SiO₂,同时含有少量 CaO、Al₂O₃、Fe₃O₄ 和 MgO 的渣型,因此当该熔渣为纯液相时,可利用 FactSage 对其黏度进行计算。

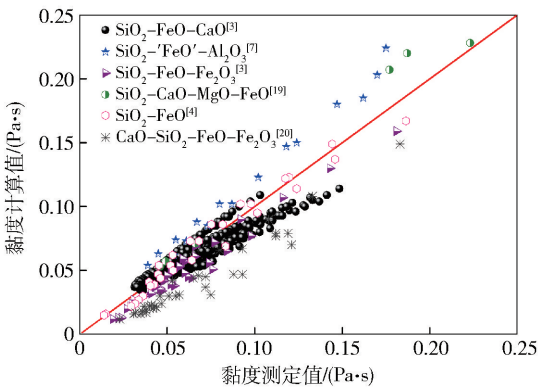


图 1 多元渣系黏度测定值与 FactSage 计算值的对比

Fig. 1 Comparison of the measured and calculated values for the viscosity of multi-slag systems

2.2 Roscoe 方程参数的拟合

此前众多利用 Roscoe 方程计算含固相熔渣黏度的研究均表明:不同体系中方程参数 a 和 n 值并不相同。由于过往文献中未见含固相的 FeO-SiO₂-Fe₃O₄-CaO-Al₂O₃-MgO 系的黏度测定值,因此需要采用类似体系黏度的实验值来拟合出 a 和 n 这两个参数值。

本文选取文献[21]报道的 FeO-SiO₂-Fe₃O₄-CaO 系在 1150~1300℃ 的黏度测定值。这是因为一方面本身铜冶炼渣中 MgO 和 Al₂O₃ 含量就较少,因此对整个体系黏度的影响相对较小。另外,铜熔炼渣中生成的固相多为尖晶石(以 Fe₃O₄ 为主)、橄榄石、铁氧化物、SiO₂ 等,与 MgO 和 Al₂O₃ 关系不大,因此该四元系与本文所研究的六元体系应具有相似的 a 和 n 值。利用该

文献中黏度的实验值拟合出 a 和 n 的值,分别为 2.0 和 3.95。根据该拟合值,利用前文所述的计算方法对文献[21]中所测定的各种炉渣的黏度进行计算,并与相应的实验值进行对比,如图 2 所示。可以看到几乎所有点的计算误差都在 30% 以内,因此采用该参数值用于计算含固相的 FeO-SiO₂-Fe₃O₄-CaO-Al₂O₃-MgO 系的黏度,其误差也应在可接受的范围内。

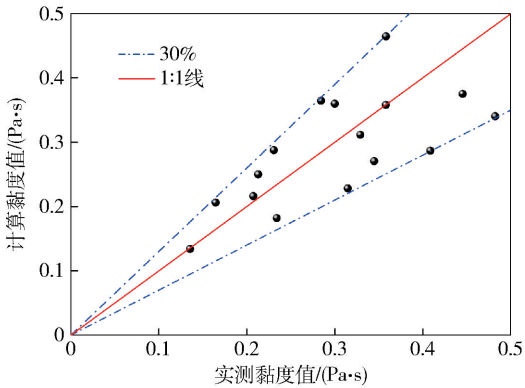


图 2 含固相 FeO-SiO₂-Fe₃O₄-CaO 系的黏度计算值与实测值的对比

Fig. 2 Comparisons of the calculated and measured values for the viscosity of the FeO-SiO₂-Fe₃O₄-CaO system containing solid phase

2.3 铜冶炼渣系黏度的计算及其应用

在温度为 1230℃ 的条件下,考察不同组分的含量对 FeO-SiO₂-Fe₃O₄-CaO-Al₂O₃-MgO 系中生成固相的体积分数和熔渣黏度的影响,分别如图 3~图 8 所示。

从图 3 中可以看到,当熔渣中 FeO 的质量分数为 35% 时,体系中存在体积分数为 5% 左右的尖晶石固体,此时熔渣的黏度较大,接近 1.2 Pa·s。当 FeO 的含量增大,生成固体的量逐渐降低,黏度也大幅度下降。当 FeO 的质量分数为 50%~60% 时,熔渣中不含有任何固体,为纯液相,此时熔渣黏度均低于 0.15 Pa·s。一般有色冶金炉渣的黏度在 0.5 Pa·s 以下便认为是流动性良好的炉渣^[22],因此根据图 3 中所示的黏度曲线,当 FeO 的质量分数在 40%~60% 时,熔渣的流动性较好。

图 4 为 SiO₂ 含量对铜冶炼渣固相体积分数和黏度的影响。当 SiO₂ 的含量较低时(质量分数为 15%~25%),体系中的铁会以氧化物的形式析出,并且随着 SiO₂ 含量的降低,固相的体积分数越大,熔渣的黏度也急剧升高。当 SiO₂ 的质量分数在 25%~40% 的范围内时,体系中固相含量很低,此时熔渣的黏度均低于 0.5 Pa·s,表现出良好的流动性。但当继续增大 SiO₂ 的含量时,体系中的 SiO₂ 达到饱和并从液相中析出,而渣的黏度则会急剧升高,因而冶炼过程中应避免炉渣中的 SiO₂ 含量在此范围内。

从图 5 所示的不同 Fe₃O₄ 含量下固相体积分数和

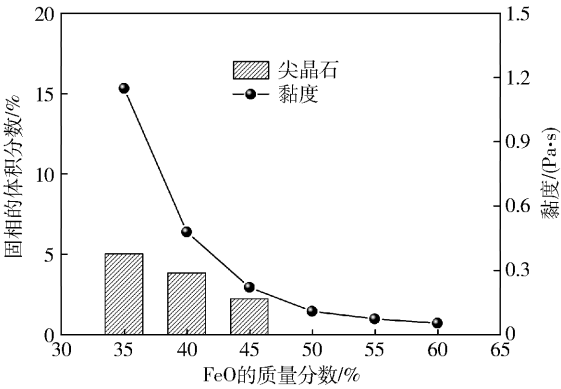


图3 FeO 含量对铜冶炼渣固相体积分数和黏度的影响

Fig.3 Effect of FeO content on the volume fraction of solids and the viscosity

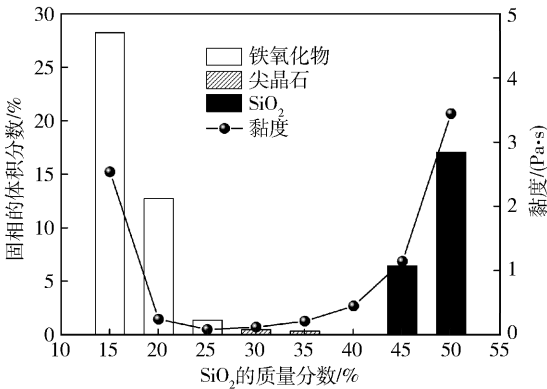


图4 SiO₂ 含量对铜冶炼渣固相体积分数和黏度的影响

Fig.4 Effect of SiO₂ content on the volume fraction of solids and the viscosity

黏度的变化可以看到,当 Fe_3O_4 质量分数在 10% 以下时,熔渣的黏度随 Fe_3O_4 含量的升高略有降低,这与 Sumita 等的研究结果是一致的^[23],该研究考察 Fe_3O_4 对铁橄榄石渣系黏度的影响,发现 Fe_3O_4 熔于液相中生成的 Fe_2O_3 可在一定程度上破坏硅酸盐的三维网状结构,使体系的黏度下降. 但根据图 5,当 Fe_3O_4 质量分数高于 10% 时,体系中会析出 Fe_3O_4 尖晶石固体,渣的黏度也会急剧上升. 在生产实践中,一般认为 Fe_3O_4 含量的提高会使炉渣黏度升高,因此必须严格控制. 但通过本研究发现, Fe_3O_4 本身并不会使炉渣黏度升高,相反适量的 Fe_3O_4 反而会降低渣的黏度,但 Fe_3O_4 在铜冶炼渣中的溶解度较低,因而极易以固体形式析出,从而使黏度大幅升高. 根据图 5 所示的计算结果,在铜冶炼过程中为得到固体量较少、流动性较好的熔渣, Fe_3O_4 的质量分数应控制在 15% 以下.

图 6 为 CaO 含量对铜冶炼渣固相体积分数和黏度的影响. 可以看到当 CaO 质量分数低于 9% 时,熔渣体系几乎为纯液相,此时渣的黏度均低于 0.15 Pa·s,但黏度随 CaO 含量的变化并不大,这一结论与传统

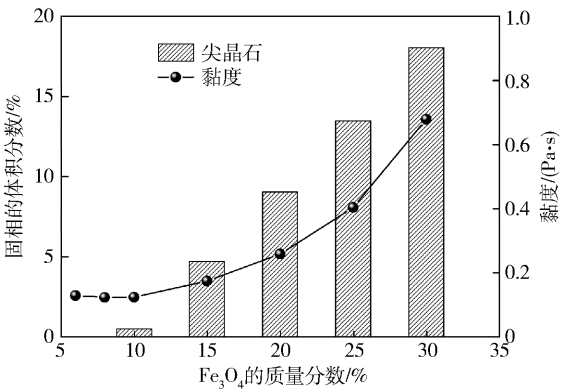


图5 Fe_3O_4 含量对铜冶炼渣固相体积分数和黏度的影响

Fig.5 Effect of Fe_3O_4 content on the volume fraction of solids and the viscosity

上的认识有所出入. 一般认为 CaO 的加入会促进聚合的硅酸盐结构逐渐解聚,因而会使黏度降低. 造成本研究中 CaO 影响较小的原因可能是本渣系本身的碱度就较高,而硅的聚合程度并不高,因而 CaO 作为碱性氧化物可发挥作用的空间就较小. 相反,当继续增加 CaO 的含量,体系中出现铁氧化物固体,黏度逐渐升高.

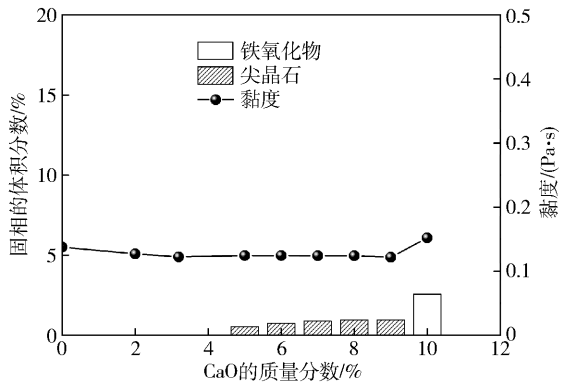


图6 CaO 含量对铜冶炼渣固相体积分数和黏度的影响

Fig.6 Effect of CaO content on the volume fraction of solids and the viscosity

Al_2O_3 和 MgO 含量对固相体积分数和黏度的影响分别如图 7 和图 8 所示. 当 Al_2O_3 的质量分数在 0% ~ 4% 的范围内增长时,体系的黏度略有升高. 但当 Al_2O_3 含量继续增加时,渣中开始生成尖晶石固相 (Fe_3O_4 和少量的 FeAl_2O_4),体系黏度升高的趋势也更加显著. 因此,为得到黏度较低、固体量较少的熔渣体系,应控制 Al_2O_3 的质量分数在 8% 以内. 当 MgO 质量分数在 0% ~ 4% 内变化时,熔渣中固体量极低,其黏度随 MgO 含量的变化也很小. 但当 MgO 含量继续增加,体系中开始出现大量的橄榄石固相以及少量的尖晶石固相,导致熔渣的黏度激增. 可以看到当炉渣中 MgO 质量分数为 8% 时,其黏度就高达 3.5 Pa·s. 因此,炉渣中 MgO 对铜冶炼过程极为不利,也曾有报道

认为铜渣中 MgO 含量不能超过 6%, 否则就会因黏度过高影响冶炼过程的顺利进行^[24]. 这与本研究的结论基本是一致的.

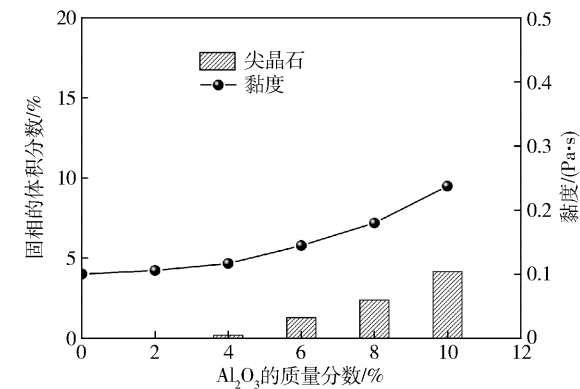


图 7 Al_2O_3 含量对铜冶炼渣固相体积分数和黏度的影响
Fig. 7 Effect of Al_2O_3 content on the volume fraction of solids and the viscosity

综上所述,根据本研究中对铜冶炼渣黏度的计算结果,当炉渣中各组分的质量分数控制在 FeO 40% ~

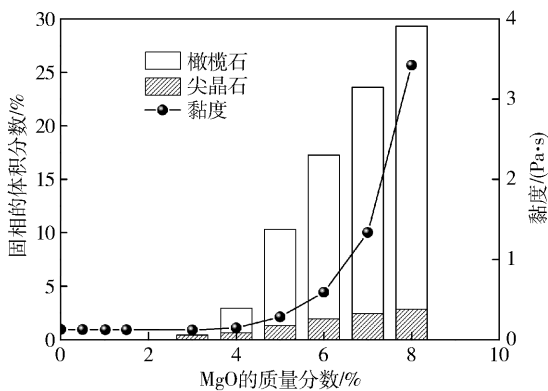


图 8 MgO 含量对铜冶炼渣固相体积分数和黏度的影响
Fig. 8 Effect of MgO content on the volume fraction of solids and the viscosity

60%、 SiO_2 25% ~ 40%、 Fe_3O_4 0% ~ 15%、CaO 0% ~ 10%、 Al_2O_3 0% ~ 8% 和 MgO 0% ~ 4% 时,可在冶炼过程中得到流动性较好、固体量较少的熔渣. 巧合的是,这些组分的含量范围与表 3^[22] 所示的现有绝大部分铜冶炼工艺的炉渣组分都较为相符.

表 3 各种铜冶炼工艺典型炉渣的化学组成(质量分数)
Table 3 Chemical composition of typical slags in various copper smelting technologies

熔炼工艺	FeO	Fe_3O_4	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO
高炉	37.29	—	38.00	7.50	11.00	0.74
奥托昆普闪速炉(未贫化)	57.09	11.80	26.60	—	—	—
奥托昆普闪速炉(贫化)	56.65	—	29.70	7.80	0.60	—
国际镍公司悬浮熔炼	56.57	10.80	33.00	4.72	1.73	1.61
诺兰达熔炼	51.43	15.00	25.10	5.00	1.50	1.50
瓦兹科夫熔炼	51.43	5.00	34.00	4.20	2.60	1.40
白银熔炼	45.00	3.15	35.00	3.80	8.00	1.40
特尼恩特熔炼	55.29	20.00	26.50	—	—	—
艾萨熔炼	47.07	6.55	31.48	3.64	4.37	1.98
奥斯麦特熔炼	43.71	7.50	31.00	7.50	5.00	—
三菱熔炼	49.11	—	32.20	2.90	5.90	—

3 结论

- (1) 基于 Roscoe 方程的含固相熔渣黏度的计算方法可较为准确地预测铜冶炼渣的黏度.
- (2) 在 1230 °C 条件下,铜冶炼渣的黏度随 FeO 含量的升高而降低;当 SiO_2 质量分数低于 25% 或高于 40% 时,体系中都会出现大量的固相物质,使熔渣黏度急剧升高.
- (3) Fe_3O_4 在溶于液相后可使体系黏度略微降低,但其在铜冶炼渣中的溶解度较低,因而极易以固体形式析出,从而使黏度大幅升高;CaO 的含量对本体系的黏度影响不大.

- (4) 当 Al_2O_3 和 MgO 的质量分数超过 4%, 渣中分别生成尖晶石固相及橄榄石固相,体系的黏度也会急剧升高.
- (5) 当控制炉渣中各组分的质量分数为 FeO 40% ~ 60%、 SiO_2 25% ~ 40%、 Fe_3O_4 0% ~ 15%、CaO 0% ~ 10%、 Al_2O_3 0% ~ 8% 和 MgO 0% ~ 4% 时,可在铜冶炼过程中得到流动性较好、固体量较少的熔渣.

参 考 文 献

[1] Zhu Z Z, He J Q. *Modern Copper Metallurgy*. Beijing: Science Press, 2003
(朱祖泽, 贺家齐. 现代铜冶金学. 北京: 科学出版社, 2003)
[2] Liu C P. *Physical Chemistry of Copper Metallurgy*. Shanghai:

- Shanghai Science and Technology Press, 1990
(刘纯鹏. 铜冶金物理化学. 上海: 上海科学技术出版社, 1990)
- [3] Shiraishi Y, Ikeda Y, Tamura A, et al. On the viscosity and density of the molten FeO-SiO₂ system. *Trans Jpn Inst Met*, 1978, 19(5): 264
- [4] Chen M, Raghunath S, Zhao B J. Viscosity measurements of "FeO"-SiO₂ slag in equilibrium with metallic Fe. *Metall Mater Trans B*, 2013, 44(3): 506
- [5] Kucharski M, Stubina N M, Toguri J M. Viscosity measurements of molten Fe-O-SiO₂, Fe-O-CaO-SiO₂, and Fe-O-MgO-SiO₂ slags. *Can Metall Q*, 1989, 28(1): 7
- [6] Ji F Z, Du S C, Seetharaman S. Experimental studies of the viscosities in the CaO-Fe_nO-SiO₂ slags. *Metall Mater Trans B*, 1997, 28(5): 827
- [7] Chen M, Raghunath S, Zhao B J. Viscosity of SiO₂- "FeO"-Al₂O₃ system in equilibrium with metallic Fe. *Metall Mater Trans B*, 2013, 44(4): 820
- [8] Seok S H, Jung S M, Lee Y S, et al. Viscosity of highly basic slags. *ISIJ Int*, 2007, 47(8): 1090
- [9] Jeffrey D J, Acrivos A. The rheological properties of suspensions of rigid particles. *AIChE J*, 1976, 22(3): 417
- [10] Roscoe R. The viscosity of suspensions of rigid spheres. *Br J Appl Phys*, 1952, 3(8): 267
- [11] Wright S, Zhang L, Sun S Y, et al. Viscosities of calcium ferrite slags and calcium aluminosilicate slags containing spinel particles. *J Non Cryst Solids*, 2001, 282(1): 15
- [12] Wright S, Zhang L, Sun S Y, et al. Viscosity of a CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ melt containing spinel particles at 1646K. *Metall Mater Trans B*, 2000, 31(1): 97
- [13] Kondratiev A, Jak E. Modeling of viscosities of the partly crystallized slags in the Al₂O₃-CaO-"FeO"-SiO₂ system. *Metall Mater Trans B*, 2001, 32(6): 1027
- [14] Kondratiev A, Jak E. Predicting coal ash slag flow characteristics (viscosity model for the Al₂O₃-CaO-'FeO'-SiO₂ system). *Fuel*, 2001, 80(14): 1989
- [15] Bale C W, Chartrand P, Decterov S A, et al. FactSage thermochemical software and databases. *Calphad*, 2002, 26(2): 189
- [16] Cao Z M, Song X Y, Qiao Z Y. Thermodynamic simulation software FactSage and its application. *Chin J Rare Met*, 2008, 32(2): 216
(曹战民, 宋晓艳, 乔芝郁. 热力学模拟计算软件 FactSage 及其应用. 稀有金属, 2008, 32(2): 216)
- [17] Keene B J, Mills K C. *Densities of Molten Slags (Chapter 8)*, *Slag Atlas*. Dusseldorf: Verlag Stahl-Eisen, 1995
- [18] Pelton A D, Chartrand P. The modified quasi-chemical model: Part II. Multicomponent solutions. *Metall Mater Trans A*, 2001, 32(6): 1355
- [19] Seetharaman S, Mukai K, Du S C. Viscosities of slags: an overview // *VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts*. The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004
- [20] Seki K, Oeters F. Viscosity measurements on liquid slags in the system CaO-FeO-Fe₂O₃-SiO₂. *Trans Iron Steel Inst Jpn*, 1984, 24(6): 445
- [21] Zhang H W, Sun F, Shi X Y, et al. The viscous and conductivity behavior of melts containing iron oxide in the FeO₁-SiO₂-CaO-Cu₂O system for copper smelting slags. *Metall Mater Trans B*, 2012, 43(5): 1046
- [22] Peng R Q. *Copper Metallurgy*. Changsha: Central South University Press, 2004
(彭容秋. 铜冶金. 长沙: 中南大学出版社, 2004)
- [23] Mackey P J. The physical chemistry of copper smelting slags: a review. *Can Metall Q*, 1982, 21(3): 221
- [24] Higgins R, Jones T J B. Viscosity characteristics of Rhodesian copper smelting slags. *Bull Inst Min Metall*, 1963, 72: 825