

高锌含量下 $\text{ZnO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 渣系黏度研究

欧阳坤¹, 豆志河²

(1. 深圳市中金岭南有色金属股份有限公司 韶关冶炼厂, 广东 韶关 512000;

2. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

[摘要] $\text{ZnO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 是铅锌火法冶炼过程中重要渣系, 本文研究高锌含量下 $\text{ZnO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 渣系的黏度, 为进一步优化铅锌氧化渣还原熔融设计提供理论支撑。研究过程中采用内旋转圆柱法测量了不同组成成分下 $\text{ZnO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 渣系的黏度, 采用傅里叶红外光谱仪测定了高温淬冷渣的结构, 并计算了不同熔渣成分下的表观活化能。研究表明: 初始 ZnO 含量 (16% ~ 32%) 的增加可降低 $\text{ZnO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 系炉渣黏度; 进一步增加 ZnO 含量 (> 36%) 则会使黏度大幅增加; 当 ZnO 含量为 36% 时, 温度较高 (> 1 623 K) 时, Fe/SiO₂ 和 CaO/SiO₂ 的增加可以降低炉渣黏度, 但随着温度的降低, Fe/SiO₂ 和 CaO/SiO₂ 的增加会使得炉渣黏度显著增加。

[关键词] 铅锌混合精矿; 熔池熔炼; 黏度; 炉渣; 表观活化能

[中图分类号] TF812; TF813; TF803.11 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2023)06-0125-06

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2023.06.016

0 引言

随着高品位铅精矿、锌精矿资源的日益减少, 难选铅锌混合矿已成为铅锌冶炼的重要原料^[1-2]。ISP 工艺 (鼓风炉炼锌法) 由于原料适应性强, 能够直接处理难选铅锌混合矿, 且可在一个炉子内同时产出粗铅和粗锌, 已成为目前世界上处理铅锌混合矿的主要冶炼工艺^[3-5]。然而由于 ISP 工艺流程长且需要使用焦炭作为还原剂^[6-7], 亟需开发绿色清洁冶炼工艺处理难选铅锌混合矿。

目前, 熔池熔炼法由于能耗低、工艺流程短、冶炼强度高优点在火法炼铅、火法炼铜领域占据主导地位^[8-13]。使用熔池熔炼法替代 ISP 工艺处理难选铅锌混合矿是目前较好的工艺选择, 即难选铅锌混合矿经熔池熔炼氧化炉氧化脱硫后得到高锌含量铅锌氧化渣, 高锌含量铅锌氧化渣流入还原炉, 经

熔融还原后得到铅、锌金属, 进而实现铅锌混合矿中的铅锌金属在两段工艺内完成分离与提取, 缩短了工艺流程。然而, 铅锌氧化渣进入熔融还原炉后铅优先被还原出来, 导致熔渣中 ZnO 含量增加, 高锌含量下 $\text{ZnO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 渣系成为铅锌氧化熔渣还原过程的中间渣系。熔渣黏度是优化控制和改善铅锌冶炼工艺的重要炉渣物理性质之一, 因此, $\text{ZnO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 中间渣系黏度大小对铅锌氧化渣还原工艺的顺行至关重要, 目前高锌含量下 $\text{ZnO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 渣系黏度相关研究较少。本文系统研究了不同 ZnO 含量、Fe/SiO₂、CaO/SiO₂ 对 $\text{ZnO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 渣系黏度的影响, 为铅锌混合矿直接熔池熔炼绿色清洁新工艺的工业应用提供了理论支撑。

1 试验材料和试验方法

本试验所用炉渣是由国药化学试剂有限公司提供的分析纯 ZnO、CaO、SiO₂、Fe₂O₃、Fe、Al₂O₃ 粉末合成得到, 试验方案具体见表 1。

以刚玉坩埚为容器, 将配置好的 CaO、SiO₂、Fe₂O₃、Fe、Al₂O₃ 试剂按表 1 混合均匀后置于刚玉坩埚, 升温至 1 648 K 恒温 10 min; 向高温熔渣中加入 ZnO, 恒温 20 min, 以获得较为均匀的熔渣。采用

[收稿日期] 2023-06-06

[第一作者] 欧阳坤 (1985—), 男, 湖南常宁人, 博士研究生, 工程师, 主要从事铅锌冶金、资源综合回收等关键技术的研究工作。

[基金项目] 广东省重点领域研发项目 (2022B0111130002)。

[引用格式] 欧阳坤, 豆志河. 高锌含量下 $\text{ZnO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 渣系黏度研究[J]. 中国有色冶金, 2023, 52(6): 125-130.

RTW-10 型熔体物性综合测定仪定温测定炉渣黏度。在黏度测试前使用已知黏度的蓖麻油对黏度计进行校正,当温度达到目标温度时,熔渣在此试验温度下恒温 30 min 后开始测定该温度下的炉渣黏度。试验过程通入 1 L/min 高纯氩气(氩气纯度 $\geq 99.999\%$,含氧量: $\leq 1.5 \times 10^{-6}$)保护,以防止熔渣氧化。

表 1 合成炉渣的化学成分

Table 1 Chemical composition of synthetic slag

样品 编号	化学组成(质量百分数)/%					Fe/ SiO ₂	CaO/ SiO ₂
	ZnO	SiO ₂	FeO	CaO	Al ₂ O ₃		
1#	16	32.4	32.4	16.2	3	0.78	0.5
2#	20	30.8	30.8	15.4	3	0.78	0.5
3#	24	29.2	29.2	14.6	3	0.78	0.5
4#	28	27.6	27.6	13.8	3	0.78	0.5
5#	32	26.0	26.0	13.0	3	0.78	0.5
6#	36	24.4	24.4	12.2	3	0.78	0.5
7#	36	29.1	17.4	14.5	3	0.47	0.5
8#	36	26.5	21.2	13.3	3	0.62	0.5
9#	36	20.3	30.5	10.2	3	1.17	0.5
10#	36	29.1	29.1	3.0	3	0.78	0.1
11#	36	26.5	26.5	8.0	3	0.78	0.3
12#	36	21.8	21.8	17.4	3	0.78	0.8

2 结果与讨论

2.1 ZnO 含量对炉渣黏度的影响

在 $Fe/SiO_2 = 0.78$ 、 $CaO/SiO_2 = 0.5$ 的条件下,考察了 ZnO 含量对 ZnO-FeO-SiO₂-CaO-Al₂O₃ (3%) 渣系黏度的影响。由图 1 可知,在试验温度区间范围内,温度升高可有效降低炉渣黏度。当炉渣中 ZnO 含量在 16%~32% 时,炉渣黏度随着炉渣中 ZnO 含量的增加而降低。当温度高于 1 523 K 时,炉渣黏度均低于 0.4 Pa·S。据研究,在有色金属冶炼过程中,流动性良好的熔渣黏度应在 0.5 Pa·S 以下^[14]。因此,温度在 1 523 K 以上,炉渣黏度能够满足熔炼的要求。继续增加 ZnO 含量至 36% 时,炉渣黏度则进一步降低。而当温度低于 1 498 K 时,炉渣黏度开始明显增加,达到 0.512 Pa·S 以上。Jin 等^[15]观测到类似的结果,认为在硅酸盐体系中,ZnO 的加入可离解出自由氧与 $Si_xO_y^{2-}$ 结合,进而解

聚炉渣中复杂网状结构,进而降低炉渣黏度。使用 Factsage6.4 热力学软件分别计算 ZnO 含量对炉渣熔点的影响,结果表明:当 ZnO 含量由 16% 增加至 36% 时,炉渣熔点由 1 417 K 增加至 1 593 K。由此可知,ZnO 含量的增加会使炉渣熔点显著增加。

因此,炉渣中 ZnO 含量的增加有利于降低炉渣的黏度,而炉渣的结晶能力随着 ZnO 含量增加而增强,这可能是 ZnO 为 36% 时且温度低于 1 573 K 时炉渣黏度大幅增加的原因。

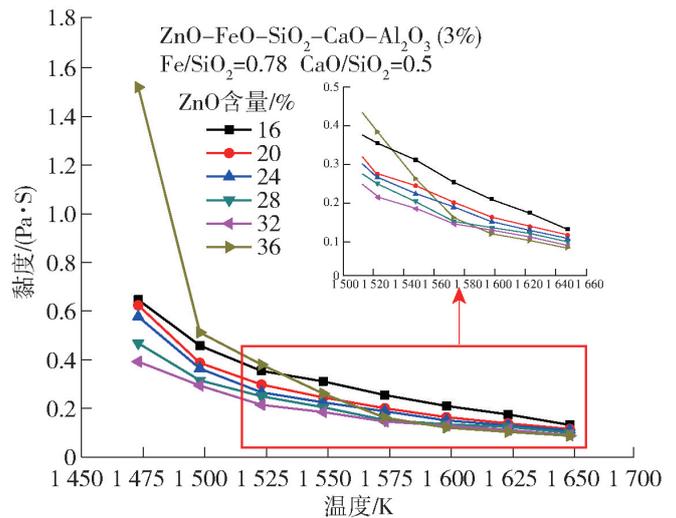


图 1 ZnO 含量对炉渣黏度的影响

Fig. 1 Effect of ZnO content on viscosity of slag

在硅酸盐熔体结构的研究中,连接一个 Si^{4+} 离子与一个金属阳离子的氧称为非桥氧^[14],非桥氧平均数(NBO/Si)常被用来表明硅酸盐炉渣结构的聚合度^[16],其中 NBO/Si 越低说明炉渣聚合程度越高^[17],硅酸盐矿渣的 FTIR 光谱(傅里叶红外光谱)通常集中在 $1200 \sim 800 \text{ cm}^{-1}$ 之间的波数区域内^[18]。Mysen 等^[19]认为 $1100 \sim 1050 \text{ cm}^{-1}$ 、 $980 \sim 950 \text{ cm}^{-1}$ 、 $920 \sim 900 \text{ cm}^{-1}$ 、 $880 \sim 850 \text{ cm}^{-1}$ 的波数区域分别代表 NBO/Si 为 1(片状)、2(链状)、3(二聚体状)和 4(单聚体)的 $[SiO_4]$ 四面体能带群。图 2 为 1 648 K 下不同 ZnO 含量高温淬冷渣 FTIR 结果,由图可知,当 ZnO 含量增加时, $1150 \sim 750 \text{ cm}^{-1}$ 处的 $[SiO_4]$ 四面体峰变弱,这表明炉渣的结构可以通过提高 ZnO 含量来解聚,这是高温下 ZnO 含量增加导致炉渣黏度降低的原因。

黏度的大小取决于炉渣的结构和反应温度,因为温度的升高可以解聚炉渣的结构,阿伦尼乌斯方程被广泛用于表示黏度对温度的依存关系^[20-21],见式(1)。

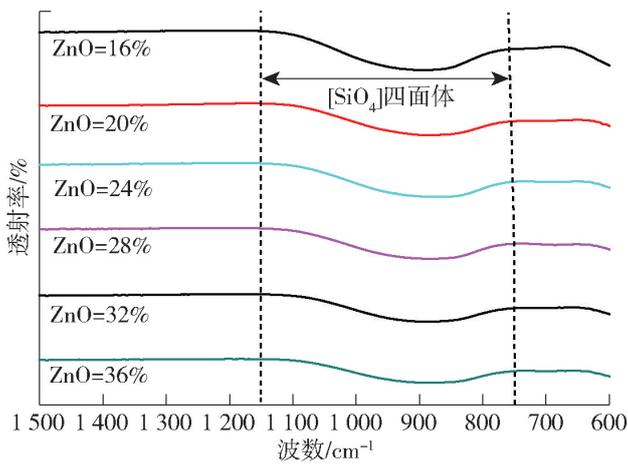


图 2 1 648 K 下不同 ZnO 含量淬冷渣 FTIR 结果

Fig. 2 FTIR results of as-quenched slag with different ZnO content at 1 648 K

$$\ln \eta = A + \frac{E_{\eta}}{RT} \quad (1)$$

式中: η 为炉渣黏度, Pa·s; A 为常数, Pa·s; R 为理想气体常数, $8.314 \text{ J/mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T 为绝对温度, K; E_{η} 为表观活化能, 代表黏度对温度的敏感性, 表观活化能的变化可以揭示黏性流动的摩擦阻力和炉渣结构的变化, 并显示出形成炉渣结构的黏性流动单元的变化, $\text{J/mol}^{[22]}$ 。

将不同 ZnO 含量下炉渣黏度的自然对数 ($\ln \eta$) 与温度倒数 ($1/T$) 之间进行线性拟合, 其线性拟合结果可计算出相应的表观活化能, 表观活化能计算值见表 2。在指定温度下, 表观活化能在 $142.4 \sim 224.5 \text{ kJ/mol}$ 范围内。表观活化能随着 ZnO 含量的增加而减小, 更多的 ZnO 意味着向熔体中添加更多的 O^{2-} , 这会导致炉渣结构的解聚。炉渣结构的简化导致更简单的黏性流动单位和黏性流动摩擦阻力

表 2 不同 ZnO 含量的 ZnO-FeO-SiO₂-CaO-Al₂O₃ 炉渣黏度的表观活化能

Table 2 Apparent activation energy of viscosity with different ZnO content in the ZnO-FeO-SiO₂-CaO-Al₂O₃ slag system

对应表 1 中样品编号	温度范围/K	$E_{\eta}/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$
1#	1 523 ~ 1 648	162.9
2#	1 523 ~ 1 648	158.6
3#	1 523 ~ 1 648	149.6
4#	1 523 ~ 1 648	148.5
5#	1 523 ~ 1 648	142.2
6#	1 548 ~ 1 648	224.5

的减少, 所以表观活化能降低。而当炉渣中 ZnO 含量增加至 36%, 表观活化能急剧增大。

2.2 Fe/SiO₂对炉渣黏度的影响

铅锌渣还原过程, 由于 Pb 被优先还原出来, 炉渣中 PbO 含量减小, 导致 ZnO 含量大幅增加 (约 36%), 其 ZnO 含量远高于传统炼铅还原渣中 ZnO 含量 (约 20%), Fe/SiO₂ 和 CaO/SiO₂ 是铅锌熔融还原过程中调节炉渣成分的重要手段, 可通过调整 Fe/SiO₂ 和 CaO/SiO₂ 优化高 ZnO 含量下的炉渣黏度。图 3 为不同 Fe/SiO₂ 对 ZnO-FeO-SiO₂-CaO-Al₂O₃ (3%) 渣系黏度的影响。从图中可以看出, Fe/SiO₂ 对炉渣黏度的影响较为复杂, 当温度高于 1 598 K 时, Fe/SiO₂ 的增加有利于炉渣黏度的降低, 当温度低于 1 598 K 时, 炉渣的黏度随着 Fe/SiO₂ 的增加而急剧增加。

使用 Factsage6.4 热力学软件计算了 Fe/SiO₂ 对熔渣熔点的影响, 当炉渣 Fe/SiO₂ 由 0.47 增加至 1.17 时, 炉渣熔点由 1 497 K 增加至 1 634 K。由此可知, Fe/SiO₂ 增加会显著增加炉渣的结晶能力, 这可能是温度较低时炉渣的黏度随着 Fe/SiO₂ 的增加而急剧增加的原因。

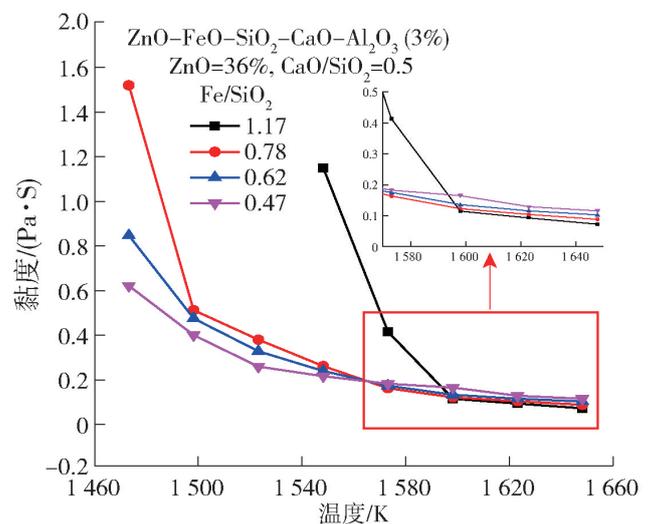


图 3 Fe/SiO₂对炉渣黏度的影响

Fig. 3 Effect of Fe/SiO₂ on viscosity of slag

Fe_xO 与 CaO 均是硅酸盐网络结构的改进剂^[23], Fe_xO 的加入可有效解聚熔渣中复杂的黏性单元, 进而降低炉渣黏度。图 4 为 1 648 K 不同 Fe/SiO₂ 淬冷渣 FTIR 结果。由图 4 可知, 在 $1150 \sim 750 \text{ cm}^{-1}$ 的区域内, 带长的增加表明硅酸盐网络结构发生解聚, 这是高温下 Fe/SiO₂ 的增加导致 ZnO-FeO-SiO₂-CaO-Al₂O₃ (3%) 渣系黏度降低的原因。

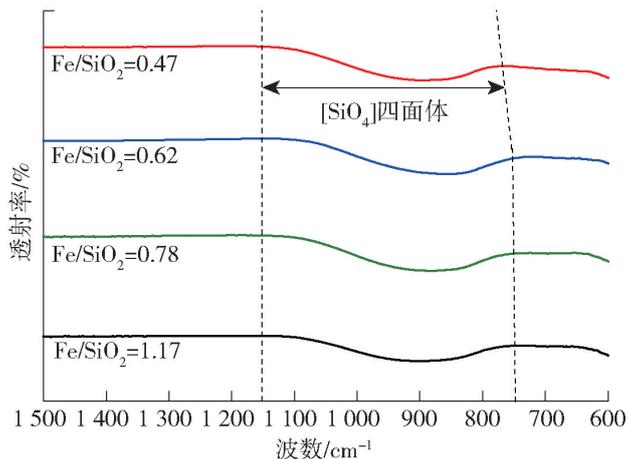


图4 1648 K 不同 Fe/SiO₂ 淬冷渣 FTIR 结果

Fig.4 FTIR results of as-quenched slag with different Fe/SiO₂ at 1648 K

将不同 Fe/SiO₂ 炉渣黏度的自然对数 (lnη) 与温度倒数 (1/T) 之间进行线性拟合, 其线性拟合结果可计算出对应的表观活化能, 表观活化能计算值见表3。由表3可知, 在试验温度下, 表观活化能处于 137.2 ~ 205.4 kJ/mol 范围, Fe/SiO₂ 的减小有利于 ZnO-FeO-SiO₂-CaO-Al₂O₃ (3%) 渣系表观活化能的减小。

表3 ZnO-FeO-SiO₂-CaO-Al₂O₃ (3%) 渣系不同 Fe/SiO₂ 黏度的表观活化能

Table 3 Apparent activation energy of viscosity with different Fe/SiO₂ in the

ZnO-FeO-SiO₂-CaO-Al₂O₃ (3%) slag system

对应表1中样品编号	温度范围/K	E _η / (kJ·mol ⁻¹)
7#	1548 ~ 1648	137.2
8#	1548 ~ 1648	179.6
9#	1598 ~ 1648	205.4

2.3 CaO/SiO₂对炉渣黏度的影响

图5为不同 CaO/SiO₂对 ZnO-FeO-SiO₂-CaO-Al₂O₃ (3%) 渣系黏度的影响。由图5可知, 在高温下, CaO/SiO₂对黏度的影响较小, 其黏度随着 CaO/SiO₂的增加而减小; 而当温度降低至 1598 K 时, 随着温度的降低, CaO/SiO₂的变化对炉渣黏度影响显著, 黏度随着 CaO/SiO₂的增加而急剧增加。

CaO 是一种已知的典型碱性氧化物, Ca²⁺ 阳离子通过形成非桥氧和提供自由氧有助于破坏 Si-O 键, 并使熔体解聚^[24], CaO 含量的增加使得炉渣中的非桥氧和低聚物增多。图6为温度 1648 K 时不

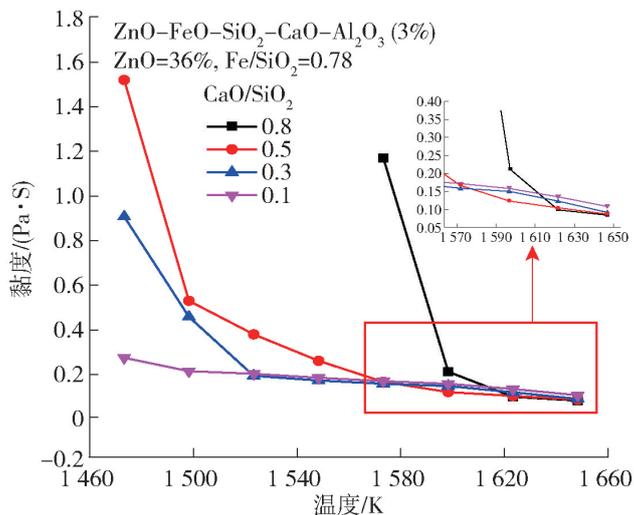


图5 CaO/SiO₂对炉渣黏度的影响

Fig.5 Effect of CaO/SiO₂ on viscosity of slag

同 CaO/SiO₂ 淬冷渣的 FTIR 结果, 由图可知, 随着 CaO/SiO₂ 的增加, [SiO₄] 四面体相关带的下限上移, 表明了硅酸盐网状结构的解聚, 这是高温 (1648 K) 下 CaO/SiO₂ 的增加导致 ZnO-FeO-SiO₂-CaO-Al₂O₃ (3%) 渣系黏度降低的原因。据研究, 过高或过低的 CaO/SiO₂ 均会对炉渣熔炼产生较大影响^[25], 使用 Factsage6.4 热力学软件计算了 CaO/SiO₂对炉渣熔点的影响, 当炉渣 CaO/SiO₂ 由 0.1 增加至 0.3, 炉渣熔点由 1551 K 降低至 1502 K, 继续增加 CaO/SiO₂ 至 0.8, 炉渣熔点增加至 1705 K, 可能是过高 CaO/SiO₂ 导致炉渣黏度增加。

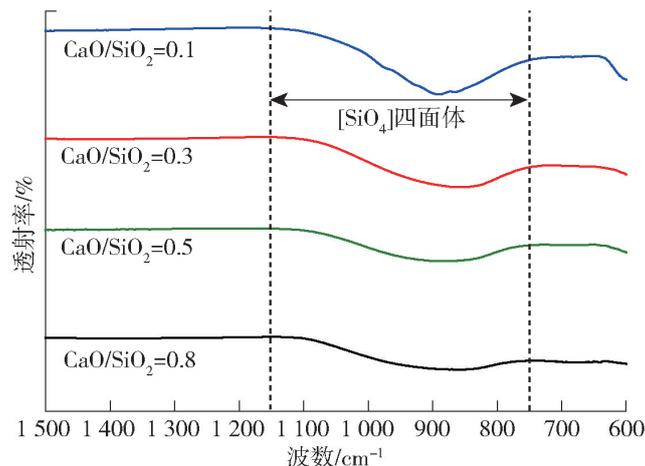


图6 1648 K 下不同 CaO/SiO₂ 淬冷渣 FTIR 结果

Fig.6 FTIR results of as-quenched slag with different CaO/SiO₂ at 1648 K

将不同 CaO/SiO₂ 炉渣黏度的自然对数 (lnη) 与温度倒数 (1/T) 之间进行线性拟合, 根据线性拟合结果可计算出对应的表观活化能, 结果见表4。由

表4可知,在试验温度下,样品表观活化能处于93.7~409 kJ/mol,在此渣型下,CaO/SiO₂的减小有利于ZnO-FeO-SiO₂-CaO-Al₂O₃(3%)渣系表观活化能的降低。

表4 不同CaO/SiO₂的ZnO-FeO-SiO₂-CaO-Al₂O₃(3%)炉渣黏度的表观活化能

Table 4 Apparent activation energy of viscosity with different CaO/SiO₂ in the ZnO-FeO-SiO₂-CaO-Al₂O₃(3%) slag system

对应表1中样品编号	温度范围/K	$E_{\eta}/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$
10 [#]	1 473 ~ 1 648	93.7
11 [#]	1 523 ~ 1 648	118.2
12 [#]	1 523 ~ 1 648	409

3 结论

1)在试验温度(1 473~1 648 K)范围内,炉渣中ZnO含量从16%增加至32%有利于ZnO-FeO-SiO₂-CaO-Al₂O₃渣系黏度的降低,但进一步增加ZnO含量(36%)则会使黏度大幅增加。当ZnO含量为36%且试验温度>1 623 K时,Fe/SiO₂和CaO/SiO₂的增加可以降低ZnO-FeO-SiO₂-CaO-Al₂O₃渣系黏度,但随着温度的降低,Fe/SiO₂和CaO/SiO₂的增加会使得炉渣黏度显著增加。因此,当ZnO含量为36%时,建议冶炼温度为1 523~1 623 K,Fe/SiO₂为0.62~0.78,CaO/SiO₂为0.3~0.5。

2)测定了不同ZnO含量(1 523~1 648 K)、Fe/SiO₂(1 548~1 648 K)、CaO/SiO₂(1 473~1 648 K)下的表观活化能,其分别为142.2~224.5 kJ/mol、137.2~205.4 kJ/mol、93.7~409 kJ/mol。炉渣中ZnO含量低于32%时,表观活化能随着ZnO含量的增加而减小,但当炉渣中ZnO含量增加至36%,表观活化能急剧增大;Fe/SiO₂的减小有利于ZnO-FeO-SiO₂-CaO-Al₂O₃(3%)渣系表观活化能的减小;CaO/SiO₂的减小有利于ZnO-FeO-SiO₂-CaO-Al₂O₃(3%)渣系表观活化能的降低。

[参考文献]

[1] 王新志. 难选硫化铅锌混合矿的选-冶联合新工艺试验研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2008.
WANG Xinzhi. Study on a new combined process of dressing and metallurgy for refractory lead-zinc sulfide mixed ore [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2008.

[2] 张向阳,王吉坤,巨佳,等. 一种高铁低品位硫化铅锌混合精

矿综合利用工艺探讨[J]. 矿冶,2010,19(3):78-80.
ZHANG Xiangyang, WANG Jikun, JU Jia, et al. Utilization process of a high-iron low-grade bulk concentrate of lead and zinc [J]. Mining&Metallurgy, 2010,19(3):78-80.

[3] 白桦,李阳. 铅锌密闭鼓风炉的机理及改进[J]. 设备节能,2008(1):33-36.
BAI Hua, LI Yang. Smelting mechanism and improvement on hermetic blast furnace for lead and zinc [J]. Equipment Energy-Saving, 2008(1):33-36.

[4] 林岚. Cu在ISP工艺中的行为、分布及回收[J]. 中国有色冶金,2013,42(3):14-16.
LIN Lang. The distribution conduct and recovery of Cu in ISP process [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2013,42(3):14-16.

[5] 林岚. 银在ISP铅锌冶炼中的行为分布及回收[J]. 湖南有色金属,2005,21(2):28-31.
LIN Lang. The distribution conduct and recovery of Ag in ISP zinc and lead smelting process [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2005,21(2):28-31.

[6] Kun OuYang, Zhihe Dou, Tingan Zhang, et al. Desulfurization kinetics of high lead and zinc sulfide containing slag with oxygen blowing [J]. Journal of Mining and Metallurgy Section B, 2019,55(2):187-196.

[7] 欧阳坤,豆志河,张延安,等. 铅锌混合矿氧气熔融脱硫[J]. 有色金属科学与工程,2020,11(2):1-6.
OUYANG Kun, DOU Zhihe, ZHANG Tingan, et al. The desulfurization process of lead and zinc mixed concentrate with oxygen [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2020,11(2):1-6.

[8] 李卫锋,张晓国,郭学益,等. 我国铅冶炼的技术现状及进展[J]. 中国有色冶金,2010,(2):29-33.
LI Weifeng, ZHANG Xiaoguo, GUO Xueyi, et al. Current status and progress of lead smelting technology in China [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2010,39(2):29-33.

[9] 廖爱民. 我国铅火法冶炼技术现状及进展研究[J]. 世界有色金属,2018(1):3-5.
LIAO Aimin. Study on current status and progress of lead and fire smelting technology in China [J]. World Nonferrous Metals, 2018(1):3-5.

[10] 王成彦,郜伟,尹飞. 中国铅锌冶金技术状况及发展趋势:铅冶金[J]. 有色金属科学与工程,2016(7):1-7.
WANG Chengyan, GAO Wei, YIN Fei. Lead and zinc metallurgy technology situation and development trends of China: lead metallurgy [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2016(7):1-7.

[11] 张立,蔺公敏,宾万达,等. 氧气侧吹还原炉及高铅渣熔融还原过程研究[J]. 中国有色冶金,2012,41(2):12-14,19.
ZHANG Li, LIN Gongmin, BIN Wanda, et al. Research on oxygen side blowing reduction furnace and melting reduction

- process of high lead slag [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2012, 41(2): 12-14, 19.
- [12] 李锋. 铜硫化矿熔池冶炼技术的发展与展望[J]. 中国有色冶金, 2022, 51(4): 8-15.
- LI Feng. Development and prospect of copper sulfide ore melting pool smelting technology[J]. China nonferrous metallurgy, 2022, 51(4): 8-15.
- [13] 周松林, 葛哲令. 中国铜冶炼技术进步与发展趋势[J]. 中国有色冶金, 2014, 43(5): 8-12, 39.
- ZHOU Songlin, GE Zheling. Technology advance and development trends of copper smelting in China [J]. China nonferrous metallurgy, 2014, 43(5): 8-12, 39.
- [14] 李洪桂. 冶金原理[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 10-351.
- LI Honggui. Metallurgical principles [M]. Beijing: Science Press, 2004: 10-351.
- [15] Zhenan Jin, Hongying Yang, Jianfang Lv, et al. Effect of ZnO on viscosity and structure of CaO-SiO₂-ZnO-Al₂O₃ slags[J]. JOM, 2018, 70(8): 1430-1436.
- [16] Zhanjun Wang, Yongqi Sun, Seetharaman Sridhar. Effect of Al₂O₃ on the viscosity and structure of CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃-Fe₂O₃ slags[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2015, 46: 537-541.
- [17] SAgathopoulos, D UTulyaganov, J M GVentura, et al. Structural analysis and devitrification of glasses based on the CaO-MgO-SiO₂ system with B₂O₃, Na₂O, CaF₂ and P₂O₅ additives[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2006, 352(4): 322-328.
- [18] H Park, J YPark, G HKim. Effect of TiO₂ on the viscosity and slag structure in blast furnace type slags [J]. Steel Research International, 2012, 83: 150-156.
- [19] Mysen B O, David V, Scarfe C M. Relations between the anionic structure and viscosity of silicate melts-a Raman spectroscopic study[J]. American Mineralogist, 1980, 65(7-8): 690-710.
- [20] L Zhang, S Jahanshahi. Review and modeling of viscosity of silicate melts; Part I. Viscosity of binary and ternary silicates containing CaO, MgO, and MnO [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1998, 29: 177-186.
- [21] H Zhang, F Sun, X Shi, et al. The viscous and conductivity behavior of melts containing iron oxide in the FeO_t-SiO₂-CaO-Cu₂O system for copper smelting slags [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2012, 43: 1046-1053.
- [22] Z Yan, X Lv, L Zhang, et al. Influence of MgO, Al₂O₃ and CaO/SiO₂ on the viscosity of blast furnace type slag with high Al₂O₃ and 5wt% TiO₂ [J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2016, 55: 186-194.
- [23] Y S Lee, J M Dong, S M Jung, et al. Influence of basicity and FeO content on viscosity of blast furnace type slags containing FeO [J]. ISIJ international, 2004, 44(8): 1283-1290.
- [24] H Kim, W H Kim, I Sohn, et al. The Effect of MgO on the viscosity of the CaO-SiO₂-20wt% Al₂O₃-MgO slag system [J]. Steel Research International, 2010, 81: 261-264.
- [25] 黄昊, 张家靛, 陈永强, 等. PbO-FeO-CaO-SiO₂-ZnO 五元渣系的熔化温度和黏度研究 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(5): 11-16.
- HUANG Hao, ZHANG Jiajing, CHEN Yongqiang, et al. Study on melting temperature and viscosity of PbO-FeO-CaO-SiO₂-ZnO system [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(5): 11-16.

Viscosity of ZnO-FeO-SiO₂-CaO-Al₂O₃ slag system with high zinc oxide content

OUYANG Kun¹, DOU Zhihe²

(1. Shaoguan Smelter, Zhongjin Lingnan Non-ferrous Metal Company Limited, Shaoguan 512000, China;

2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: ZnO-FeO-SiO₂-CaO-Al₂O₃ is an important slag system in the lead and zinc pyrometallurgy process, and the study of the viscosity of ZnO-FeO-SiO₂-CaO-Al₂O₃ slag system with high zinc oxide content could provide theoretical support for the design of lead and zinc oxide slag. The viscosity of ZnO-FeO-SiO₂-CaO-Al₂O₃ slag system with different compositions was measured by the rotating cylinder method involving a spindle. The structure of high temperature quenched slag was determined by Fourier infrared spectrometer, and the apparent activation energy of different slags was calculated. The results show that the initial increase of ZnO content (16% ~ 32%) could reduce the viscosity of ZnO-FeO-SiO₂-CaO-Al₂O₃, and further increase of ZnO content would greatly increase the viscosity. When the content of ZnO was 36% and experimental temperature was higher than 1623 K, the increase of Fe/SiO₂ and CaO/SiO₂ could reduce the slag viscosity, however, the increase of Fe/SiO₂ and CaO/SiO₂ would significantly increase the slag viscosity as the decrease of experimental temperature.

Key words: lead and zinc bulk concentrate; bath smelting; viscosity; slag; apparent activation energy