

# 二元碱度对 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$ 渣系黏度和熔渣结构的影响<sup>①</sup>

赵付恒<sup>1,2</sup>, 辛文彬<sup>1,2</sup>, 邓永春<sup>1,2</sup>, 张婧<sup>1,2</sup>, 姜银举<sup>1,2</sup>, 曹祚君<sup>1,2</sup>, 王利勇<sup>1,2</sup>

(1.内蒙古科技大学 稀土产业学院(稀土工程技术学院), 内蒙古 包头 014010; 2.内蒙古科技大学 轻稀土资源绿色提取与高效利用教育部重点实验室, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 为合理选择熔渣成分以服务于含稀土熔渣高效富集稀土, 采用旋转柱体法和红外光谱、拉曼光谱、X 射线光电子能谱研究了不同二元碱度条件下混合稀土渣系的黏度和熔体结构。结果表明: 二元碱度为 0.50、0.86、1.00、1.20 时, 1 550 °C 下渣系对应的黏度分别为 1.30、0.87、0.60、0.36 Pa·s, 对应的活化能分别为 268、220、216、202 kJ;  $Q^1(\text{Si})$  和  $Q^2(\text{Si})$  在熔渣中的面积分数均在 24% 以上; 随着二元碱度增加, 桥氧( $O^0$ ) 面积分数减少, 非桥氧( $O^-$ ) 和自由氧( $O^{2-}$ ) 面积分数增加, 代表熔渣聚合度的  $K$  值逐渐从 0.53 降至 0.10。随着二元碱度增加, 熔渣结构体系趋于简单化是混合稀土渣系黏度降低的主要原因。

**关键词:** 稀土渣; 碱度; 黏度; 熔渣结构; 稀土; 结晶相; 渣系

中图分类号: TF04

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.01.017

文章编号: 0253-6099(2025)01-0092-05

## Effect of Binary Basicity on Viscosity and Structure of $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$ Slag

ZHAO Fuheng<sup>1,2</sup>, XIN Wenbin<sup>1,2</sup>, DENG Yongchun<sup>1,2</sup>, ZHANG Jing<sup>1,2</sup>, JIANG Yinju<sup>1,2</sup>,  
CAO Zuojun<sup>1,2</sup>, WANG Liyong<sup>1,2</sup>

(1. School of Rare Earth Industry (School of Rare Earth Engineering and Technology), Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, 014010, Inner Mongolia, China; 2. Key Laboratory of Green Extraction & Efficient Utilization of Light Rare-Earth Resources of Ministry of Education, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** To reasonably select the composition of molten slag for efficient enrichment of rare earth elements therein, the viscosity and melt structure of mixed rare earth slag under different binary basicity conditions were explored using rotating cylinder method, FTIR, Raman spectroscopy, and X-ray photoelectronic spectroscopy. The results show that with the binary basicity of 0.50, 0.86, 1.00, and 1.20 respectively, the corresponding viscosity of the slag system at 1 550 °C is 1.30, 0.87, 0.60, and 0.36 Pa·s, and the activation energy of the viscous flow unit is 268, 220, 216, 202 kJ respectively; the area fractions of  $Q^1(\text{Si})$  and  $Q^2(\text{Si})$  in the molten slag are all more than 24%. As the binary basicity increases, the area fraction of bridging oxygen ( $O^0$ ) decreases, and the area fractions of non-bridging oxygen ( $O^-$ ) and free oxygen ( $O^{2-}$ ) decrease, and the  $K$  value representing the polymerization degree of slag gradually decreases from 0.53 to 0.10. It is found that the structure system of molten slag tends to be simple with the increase of binary basicity, which is the main reason for decrease in the viscosity of a mixed rare earth slag.

**Key words:** rare earth slag; basicity; viscosity; molten slag structure; rare earth; crystalline phase; slag system

从熔渣中提取低含量有价值组分的常用方法是选择性结晶后再分离。该方法通常首先研究渣系成分变化

对渣系基础物理化学特性如黏度、结晶物相种类的影响规律, 然后调控合适温度及冷速使有价值组分选择性

① 收稿日期: 2024-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(52164035); 内蒙古科技大学基本科研业务费专项资金资助(037)

作者简介: 赵付恒(1994—), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要研究方向为稀土熔渣物性与结晶行为。E-mail: zhaofuheng1994@163.com

通信作者: 辛文彬(1987—), 男, 山东海阳人, 博士, 副教授, 主要研究方向为稀土资源高效提取与利用、稀土在金属材料中的应用。E-mail: xwb2580zxc@163.com

地富集于某一结晶相中,最后再利用重选、浮选等传统分离技术富集得到有价值组分的结晶相或采用湿法冶金方法直接浸出回收有价值组元。二元碱度不仅可以直接改变结晶相的类型,还可通过影响渣系黏度间接影响结晶相的长大过程,进而控制有价值组元的富集结晶行为。

白云鄂博矿中稀土资源利用率不高。在含稀土渣的研究方面,已有研究多聚焦于单一稀土氧化物精炼渣或保护渣<sup>[1-4]</sup>,对含稀土渣结晶富集方面有关黏度的关注不多。本文基于改变二元碱度以调控含稀土渣系黏度从而服务于富稀土相结晶析出的目的,开展二元碱度变化对复合稀土氧化物体系黏度及熔渣结构影响的研究,以期提高白云鄂博矿的稀土资源利用率。

## 1 实验方法

### 1.1 实验渣系设计及实验方法

文献[5]研究了碱度对 CaO-SiO<sub>2</sub>-15%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaF<sub>2</sub> 渣中结晶相的影响,但结晶相种类偏多,应该与其较高的 CaF<sub>2</sub> 含量有关。本课题组前期通过调控渣系合适碱度能够获得单一富稀土结晶相<sup>[6]</sup>,单一富稀土相的结晶析出无疑对后续选矿更有利。另外,考虑到白云鄂博矿中稀土主要以 Ce、La 配分为主,本文选择 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CeO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 渣系作为研究对象,实验渣系的化学成分及碱度如表 1 所示。实验原料中的 CeO<sub>2</sub> 和 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 由各自的碳酸盐于 1 100 °C 马弗炉中焙烧 2 h 得到;配料前,分析纯试剂 CaO、SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 先在马弗炉中 1 000 °C 下焙烧 2 h 以去除试剂中的水分及部分挥发性杂质。

表 1 实验渣系化学成分及碱度

| 样品<br>编号       | 化学成分(质量分数)/% |                  |                                |                  |                                | 碱度   |
|----------------|--------------|------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------|
|                | CaO          | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CeO <sub>2</sub> | La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |      |
| 1 <sup>#</sup> | 23.34        | 46.66            | 15                             | 9                | 6                              | 0.50 |
| 2 <sup>#</sup> | 32.37        | 37.63            | 15                             | 9                | 6                              | 0.86 |
| 3 <sup>#</sup> | 35.00        | 35.00            | 15                             | 9                | 6                              | 1.00 |
| 4 <sup>#</sup> | 38.18        | 31.82            | 15                             | 9                | 6                              | 1.20 |

按表 1 比例配制每个渣样 180 g(考虑料损失),混匀后装入 Φ45 mm × 80 mm 钼坩埚,在氩气气氛下放入管式炉中预熔,水淬后破碎研磨成粉,用于黏度检测。重新配制每个渣样 4 g,装入 Φ15 mm × 25 mm 钼坩埚,在氩气气氛下升温至 1 550 °C 后保温 30 min 以便熔渣完全熔化,取出后立即水淬获得玻璃态熔渣,随后将水淬渣烘干、破碎、研磨至 0.074 mm 以下,用于熔

渣结构检测。所获得的玻璃态熔渣 XRD 分析结果如图 1 所示。

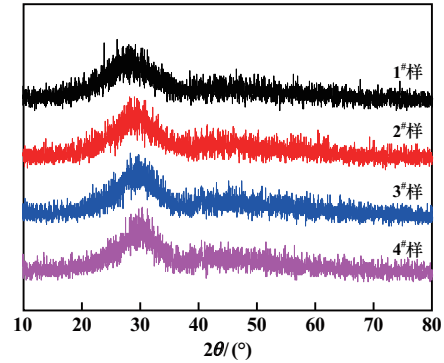


图 1 水淬玻璃态熔渣 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of water-quenched glassy slag

### 1.2 检测方法

采用旋转柱体法,利用 RTW-16 型熔渣物性综合测试仪测定熔渣在不同温度下的黏度,得到黏度-温度曲线。利用傅里叶变换红外光谱 (FTIR)、拉曼 (Raman) 光谱和 X 射线光电子能谱 (XPS) 研究熔渣结构。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 碱度对渣系黏度的影响

图 2 为不同碱度条件下 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CeO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 渣系的黏度-温度曲线。可以看出,所有样品的黏度均随着温度下降逐渐升高。值得注意的是,碱度 1.20 时出现明显的拐点,为碱性渣特点;其他碱度时没有明显拐点,表现为酸性渣。温度高于 1 370 °C 后,随着碱度增加,样品黏度逐渐降低。碱度从 0.50 增加到 0.86 时,黏度降低幅度增大,且随着温度降低,黏度降低幅度逐渐增大,1 550 °C 时,碱度 0.50、0.86、1.00、1.20 渣系对应的黏度分别为 1.30、0.60、0.51、0.36 Pa·s。

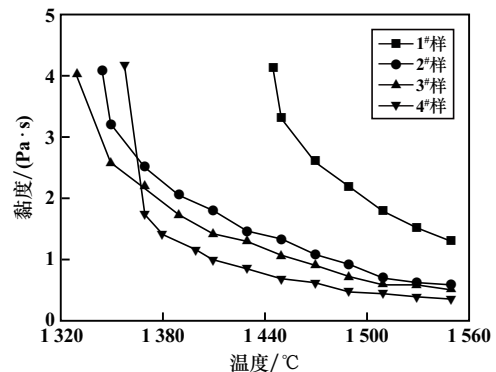


图 2 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CeO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 渣系黏度-温度曲线

Fig. 2 Viscosity-temperature curves of CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CeO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slag

### 2.2 碱度对渣系活化能的影响

黏度与温度的关系通常用阿伦尼乌斯公式表示：

$$\eta = A \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (1)$$

式中： $\eta$  为熔渣黏度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； $A$  为指前因子； $E_a$  为活化能，指流动单元由一个平衡位置跃迁到另一个平衡位置所需克服的能垒， $\text{kJ/mol}$ ； $R$  为摩尔气体常数， $R=8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ； $T$  为绝对温度， $\text{K}$ 。

对式(1)两边取对数，得：

$$\ln\eta = \ln A + \frac{E_a}{RT} \quad (2)$$

活化能计算拟合结果如图3所示。碱度0.50、0.86、1.00、1.20条件下拟合的活化能分别为268、220、216、202 kJ，说明随着碱度增加，活化能逐渐降低。

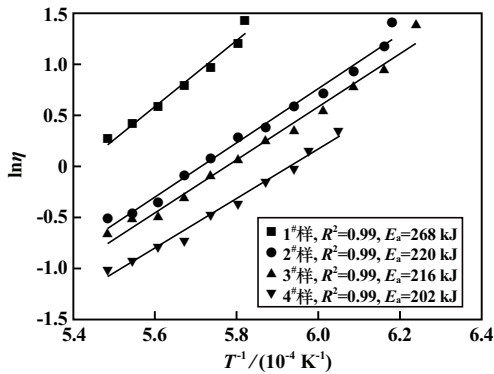


图3 活化能计算拟合结果

Fig. 3 Calculation and fitting results of activation energy

### 2.3 碱度对渣系结构的影响

硅酸盐熔渣中对熔渣结构影响最大的是硅氧四面体，而硅氧四面体主要有5种结构单元，可以用 $Q^i(\text{Si})$  ( $i=0, 1, 2, 3, 4$ )来表示，其中 $i$ 表示连接两个四面体的氧的数量，分别对应的是单体 $Q^0$ 、二聚体 $Q^1$ 、链状 $Q^2$ 、片状 $Q^3$ 及完整四面体 $Q^4$ ，其结构如图4所示。

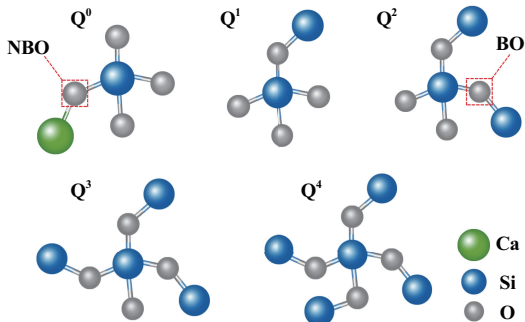


图4 硅氧四面体结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of structure of silica tetrahedra

### 2.3.1 FTIR 分析

图5为不同碱度条件下 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$ 渣系的FTIR分析结果。从图5可以看出，在FTIR图中主要分为低频区( $400\sim 600 \text{ cm}^{-1}$ )、中频区( $600\sim 800 \text{ cm}^{-1}$ )和高频区( $800\sim 1100 \text{ cm}^{-1}$ )。一般而言，高频区主要反映的是硅氧四面体的伸缩振动，中频区与铝氧四面体和 $\text{Si-O}$ 伸缩振动有关<sup>[7-9]</sup>，低频区反映的是 $\text{T-O-T}$  (T代表Si、Al等元素)的弯曲振动<sup>[10]</sup>。从高频区看，随着碱度增加，波谷变得不明显且逐渐向低波数段偏移；中频区也有类似的变化规律，波峰逐渐向低波数段偏移；低频区呈现相反的变化规律，波峰逐渐向高波数段偏移。以上现象表明，随着碱度增加，硅氧四面体和铝氧四面体数量减少， $\text{T-O-T}$ 结构数量增加。

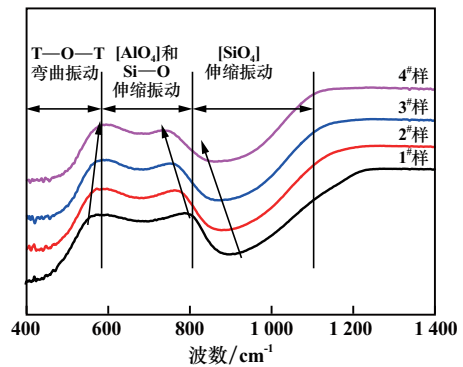


图5  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$ 渣系的FTIR光谱图

Fig. 5 FTIR spectra of  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$  slag

### 2.3.2 Raman 光谱分析

尽管FTIR分析已经从一定程度上反映了碱度对熔渣结构的影响规律，但还不能详细阐释熔渣中各结构单元的具体变化。采用Raman光谱进一步分析。图6为不同碱度条件下实验渣系的Raman光谱，熔渣中硅氧四面体的Raman光谱范围汇总于表2中。可以看出，随着碱度增加， $800\sim 1200 \text{ cm}^{-1}$ 范围内的波

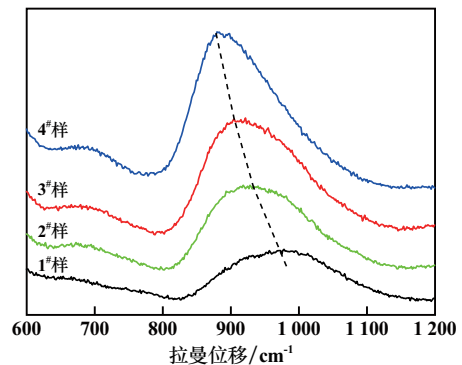


图6  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$ 渣系的拉曼光谱图

Fig. 6 Raman spectra of  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$  slag

表 2 熔渣中硅氧四面体对应的拉曼位移

Table 2 Raman displacement of silica tetrahedra in slag

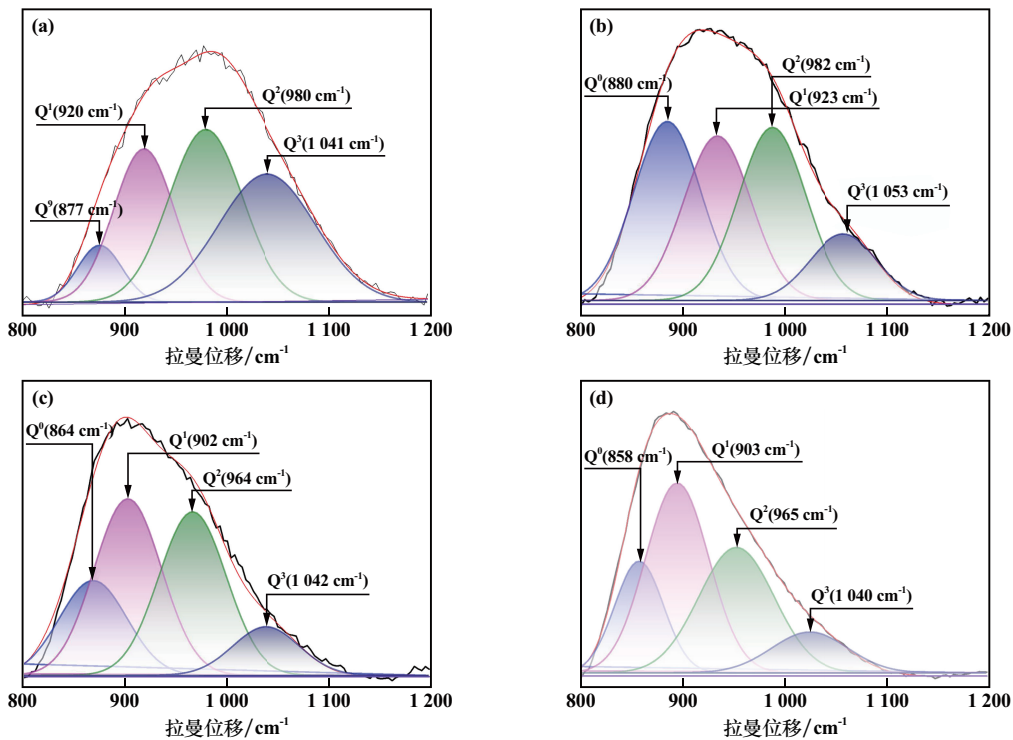
| 拉曼位移/cm <sup>-1</sup> | 结构单元                | 参考文献 |
|-----------------------|---------------------|------|
| 850~880               | Q <sup>0</sup> (Si) | [11] |
| 900~930               | Q <sup>1</sup> (Si) | [12] |
| 950~1 000             | Q <sup>2</sup> (Si) | [13] |
| 1 040~1 060           | Q <sup>3</sup> (Si) | [14] |
| 1 134~1 170           | Q <sup>4</sup> (Si) | [10] |

峰逐渐向低波数段偏移。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为两性氧化物,其对熔渣结构的影响存在两面

性<sup>[15]</sup>。本实验渣系中含有 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,因此尚需分析 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对本渣系熔渣结构的作用。图 7 和表 3 是对各样品的拉曼光谱解谱结果及各结构单元的面积分数统计。

从图 7 可以看出,熔渣中 Q<sup>2</sup>(Si) 和 Q<sup>1</sup>(Si) 是硅氧四面体的主要存在形式。结合表 3 数据可见,随着碱度增加,片状 Q<sup>3</sup>(Si) 和链状 Q<sup>2</sup>(Si) 面积分数下降,二聚体 Q<sup>1</sup>(Si) 和结构更简单的 Q<sup>0</sup>(Si) 面积分数增加。由拉曼分峰拟合结果可知,渣中的 Q<sup>3</sup>(Si) 和 Q<sup>2</sup>(Si) 生成了结构更简单的 Q<sup>1</sup>(Si) 和 Q<sup>0</sup>(Si),熔渣聚合度降低,黏度随着碱度增加而降低。



(a) 1#样; (b) 2#样; (c) 3#样; (d) 4#样

图 7 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CeO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 渣系拉曼光谱解谱结果

Fig.7 Analysis of Raman spectra of CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CeO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slag

表 3 不同碱度条件下 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CeO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 渣系中硅氧四面体的面积分数统计结果

Table 3 Area fraction of silica tetrahedra in CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CeO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slag under different basicity conditions

| 碱度   | 面积分数/%              |                     |                     |                     |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|      | Q <sup>0</sup> (Si) | Q <sup>1</sup> (Si) | Q <sup>2</sup> (Si) | Q <sup>3</sup> (Si) |
| 0.50 | 16.2                | 24.5                | 44.2                | 15.1                |
| 0.86 | 19.6                | 29.6                | 33.1                | 12.6                |
| 1.00 | 20.9                | 37.1                | 32.8                | 8.1                 |
| 1.20 | 23.7                | 40.4                | 29.8                | 6.1                 |

### 2.3.3 XPS 分析

在硅铝酸盐熔渣中,氧主要以桥氧(BO)、非桥氧(NBO)和自由氧(FO)类型存在。非桥氧和自由氧数

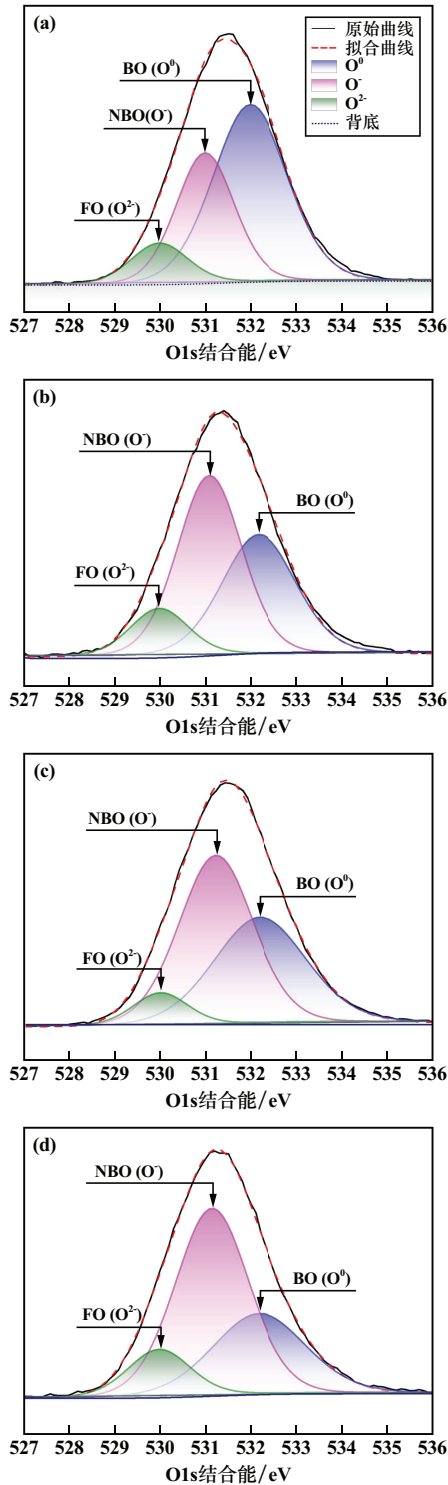
量增加代表熔渣聚合度降低,桥氧数量增加代表熔渣聚合度升高。桥氧、非桥氧和自由氧在 O1s 的 XPS 结合能分别位于 532、531.2 和 530 eV 附近<sup>[16]</sup>。图 8 为 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CeO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 渣系 O1s 的 XPS 分峰拟合结果。可以看出,随着碱度增加,桥氧数量逐渐降低,非桥氧和自由氧数量逐渐增加。说明随着碱度增加,渣系结构变得简单,这与黏度随着碱度增加而降低的变化规律相吻合。

CaO 在本实验渣系中提供 O<sup>2-</sup> 并发挥网络修饰体作用,因此存在 3 种类型氧的相互转化:



文献[17]指出,熔渣的聚合度可以用平衡常数

$K [K=c(O^0) \cdot c(O^{2-})/c(O^-)^2]$ 来表示。计算得到本实验渣系碱度 0.50、0.86、1.00、1.20 对应的样品  $K$  值分别为 0.53、0.18、0.11、0.10, 可见, 随着二元碱度增加, 熔渣聚合度降低, 熔渣结构变得更简单。



(a) 1#样; (b) 2#样; (c) 3#样; (d) 4#样  
图 8 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CeO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 渣系 O1s 的 XPS 分峰拟合结果

Fig. 8 Fitting results of XPS sub-peak of O1s in CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CeO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slag

### 3 结论

1) 二元碱度 0.50、0.86、1.00、1.20 时, 1 550 °C 下渣系黏度分别为 1.3、0.6、0.51、0.36 Pa·s, 对应的活化能分别为 268、220、216、202 kJ, 渣由酸性渣逐渐转变为碱性渣。

2) 碱度增加, 结构相对复杂的 Q<sup>3</sup>(Si) 和 Q<sup>2</sup>(Si) 面积分数下降, 结构简单的 Q<sup>1</sup>(Si) 和 Q<sup>0</sup>(Si) 面积分数增加, 且 Q<sup>2</sup>(Si) 和 Q<sup>1</sup>(Si) 在熔渣中占比超过 24%, 熔渣中 Q<sup>3</sup>(Si) 和 Q<sup>2</sup>(Si) 逐渐形成结构简单的 Q<sup>1</sup>(Si) 和 Q<sup>2</sup>(Si)。

3) CaO 在本渣系中发挥网络修饰体作用, 二元碱度 0.50、0.86、1.00、1.20 时, 代表熔渣聚合度的  $K$  值分别为 0.53、0.18、0.11、0.10, 熔渣聚合度降低。

#### 参考文献 (References):

- [1] 刘文博, 宋波, 蔡长焜, 等. CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-SiO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub> 五元精炼渣系粘度的研究[J]. 稀土, 2021, 42(5): 13-20.  
LIU Wenbo, SONG Bo, CAI Changkun, et al. Study on viscosity of CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-SiO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub> pentagonal refining slag system[J]. Chinese Rare Earths, 2021, 42(5): 13-20.
- [2] QI J, LIU C, ZHANG C, et al. Effect of Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on structure, viscosity, and crystalline phase of CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Li<sub>2</sub>O-Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slags[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 1(48B): 11-16.
- [3] 王爱兰, 智建国, 刁望才, 等. 稀土钢钢水对保护渣理化性能及物相组成的影响[J]. 包钢科技, 2021, 47(6): 16-19.  
WANG Ailan, ZHI Jianguo, DIAO Wangcai, et al. Effects of molten steel of rare earth steel on physical and chemical properties and phase composition of mould flux[J]. Science & Technology of Baotou Steel, 2021, 47(6): 16-19.
- [4] SHE X F, AN Z L, ZHANG Z, et al. Crystallization behavior of synthesized CaO-SiO<sub>2</sub>-CaF<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> rare earth-containing slag[J]. ISIJ International, 2020, 60(5): 832-839.
- [5] XIN W, DENG Y, JIANG Y, et al. Crystallization characteristics of the CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> rare earth-bearing slag system[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2021, 74(6): 1549-1556.
- [6] LAN X, GAO J, WANG Z, et al. Viscosity of RE-bearing slag systems and kinetics of nucleation and growth for RE-phases[J]. Ceramics International, 2022, 48(9): 13304-13310.
- [7] KIM G, SOHN I. Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the viscosity and structure of calcium silicate-based melts containing Na<sub>2</sub>O and CaF<sub>2</sub>[J]. Journal of non-crystalline solids, 2012, 358(12/13): 1530-1537.
- [8] GAO E, WANG W, ZHANG L. Effect of alkaline earth metal oxides on the viscosity and structure of the CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based mold flux for casting high-al steels[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2017, 473: 79-86.
- [9] SUN Y, ZHANG Z, LIU L, et al. FTIR, Raman and NMR investigation of CaO-SiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and CaO-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> glasses[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2015, 420: 26-33.

(下转第 102 页)

- [9] 任相宇,刘少葵,刘勇奇,等.磷酸铁前驱体制备方法研究进展[J].矿冶工程,2022,42(3):92-95.  
REN Xiangyu, LIU Shaokui, LIU Yongqi, et al. Technical progress in preparation of iron phosphate precursor[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(3):92-95.
- [10] 施春红,张喜玲,杨春雪.磷酸盐分步沉淀不锈钢酸洗污泥浸出液铬铁镍[J].化工进展,2021,40(11):6378-6384.  
SHI Chunhong, ZHANG Xiling, YANG Chunxue, et al. Selective separation of Cr-Fe-Ni by phosphate precipitation from stainless steel pickling sludge leaching solution[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021,40(11):6378-6384.
- [11] 肖超,曾理,李义兵,等.磷酸盐沉淀法除铁过程热力学分析[J].中国有色金属学报,2018,28(3):637-643.  
XIAO Chao, ZENG Li, LI Yibing, et al. Thermodynamic analysis on removing iron by phosphate precipitation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018,28(3):637-643.
- [12] 湛金,李鹏.用磷酸盐从硫化镍矿石浸出液中除铁试验研究[J].湿法冶金,2022,41(4):355-358.  
ZHAN Jin, LI Peng. Removal of ferric from nickel sulfide ore leachate using phosphate[J]. Hydrometallurgy of China, 2022,41(4):355-358.
- [13] 胡美世.镍钴铁粉浸出-净化-沉淀制备磷酸铁和氢氧化镍钴研究[D].长沙:中南大学,2024.  
HU Meishi. Preparation of  $\text{FePO}_4$  and mixed hydroxide of nickel and cobalt from Ni-Co-Fe powder by leaching-purification-precipitation [D]. Changsha: Central South University, 2024.
- [14] HG/T 4701—2021.电池用磷酸铁[S].  
HG/T 4701—2021. Iron Phosphate for Battery[S].
- 引用本文:胡美世,陈靖,罗骏,等.富镍钴铁浸出液除杂及磷酸铁制备研究[J].矿冶工程,2025,45(1):97-102.  
HU Meishi, CHEN Jing, LUO Jun, et al. Purification of nickel-cobalt-iron rich leachate and preparation of iron phosphate[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(1):97-102.

(上接第91页)

- [14] ZHENG J Y, ZHENG Z Q, LI L, et al. Acid-leaching mechanism of electroplating sludge: based on a comprehensive analysis of heavy-metal occurrence and the dynamic evolution of coexisting mineral phases[J]. Environmental science and pollution research international, 2023,30(53):113600-113608.
- [15] SALHI. Recovery of nickel and copper from metal finishing hydroxide sludges by ammoniacal leaching[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2010,119(3):147-152.
- [16] 宋强,童雄,谢贤,等.溶剂萃取法分离提取镍和钴的研究现状及展望[J].中国有色金属学报,2023,33(6):1957-1971.  
SONG Qiang, TONG Xiong, XIE Xian, et al. Research status and prospect of separation and extraction of nickel and cobalt by solvent extraction[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023,33(6):1957-1971.
- [17] 马玉翔,李玲,王海瑜,等.皂化 P204、P507 对电镀含镍废水中镍离子萃取性能探究[J].山东化工,2023,52(24):27-28.  
MA Yuxiang, LI Ling, WANG Haiyu, et al. Study on nickel extraction properties from electroplating wastewater by saponified P204 and P507[J]. Shandong Chemical Industry, 2023,52(24):27-28.
- 引用本文:焦奥博,刘牡丹,吕先谨,等.高镍电镀污泥中镍的分离与硫酸镍的制备研究[J].矿冶工程,2025,45(1):86-91.  
JIAO Aobo, LIU Mudan, LYU Xianjin, et al. Separation of nickel from high-nickel electroplating sludge and preparation of nickel sulfate [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(1):86-91.

(上接第96页)

- [10] GUO W, WU J, LIU X, et al. Raman and X-ray photoelectron spectroscopy study on the influence of  $\text{La}_2\text{O}_3$  on the melt structure of  $\text{SiO}_2$ -CaO- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -MgO[J]. Ceramics International, 2022,48(18):25933-25939.
- [11] MCMILLAN P. A Raman spectroscopic study of glasses in the system CaO-MgO- $\text{SiO}_2$ [J]. American Mineralogist, 1984,69:645-659.
- [12] MYSEN B O, FRANTZ J D. Raman spectroscopy of silicate melts at magmatic temperatures:  $\text{Na}_2\text{O}$ - $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ - $\text{SiO}_2$  and  $\text{Li}_2\text{O}$ - $\text{SiO}_2$  binary compositions in the temperature range 25~1475 °C [J]. Chemical Geology, 1992,96:321-332.
- [13] MYSEN B O, FRANTZ J D. Structure of silicate melts at high temperature: In-situ measurements in the system BaO- $\text{SiO}_2$  to 1669 °C [J]. American Mineralogist, 1993,78:699-709.
- [14] LI Q, YANG S, ZHANG Y, et al. Effects of MgO,  $\text{Na}_2\text{O}$ , and  $\text{B}_2\text{O}_3$  on the viscosity and structure of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ -bearing CaO- $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  slags[J]. ISIJ International, 2017,57(4):689-696.
- [15] 李倩倩,吴婷,杨文,等.碱度对精炼渣理化性能及磷元素迁移的影响[J].炼钢,2022,38(3):20-25.  
LI Qianqian, WU Ting, YANG Wen, et al. Effect of basicity on physicochemical properties and phosphorus migration of refined slag [J]. Steelmaking, 2022,38(3):20-25.
- [16] FAN L, LIU C, JIANG M. Viscosity and its correlation to the ionic structure of CaO- $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{B}_2\text{O}_3$  slags with various  $\text{La}_2\text{O}_3$  additions[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2022,53(2):1295-1307.
- [17] WANG Z, SOHN I. Influence of the  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  mass ratio and gas composition on the viscous behavior and structure of Cr-containing stainless steel slags[J]. Ceramics International, 2020,46:903-912.
- 引用本文:赵付恒,辛文彬,邓永春,等.二元碱度对 CaO- $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{CeO}_2$ - $\text{La}_2\text{O}_3$  渣系黏度和熔渣结构的影响[J].矿冶工程,2025,45(1):92-96.  
ZHAO Fuheng, XIN Wenbin, DENG Yongchun, et al. Effect of binary basicity on viscosity and structure of CaO- $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{CeO}_2$ - $\text{La}_2\text{O}_3$  slag [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(1):92-96.