

试验研究

引文格式:彭程,黄育飞,冯浩明,等. 基于分子-离子共存理论的 CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ 四元渣系黏度预测[J]. 中国有色冶金, 2026, 55(3): 152-162.

PENG Cheng, HUANG Yufei, FENG Haoming, et al. Viscosity prediction of CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ quaternary slag system based on the molecular-ionic coexistence theory[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(3): 152-162.

基于分子-离子共存理论的 CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ 四元渣系黏度预测

彭程^{1,2}, 黄育飞^{1,2}, 冯浩明^{1,2}, 杨鑫^{1,2}, 湛文龙^{1,2}, 刘吉辉^{1,2}

(1. 辽宁科技大学材料与冶金学院, 辽宁鞍山 114051;

2. 辽宁省绿色低碳与智能冶金重点实验室, 辽宁鞍山 114051)

[摘 要] 黏度是冶金过程中影响渣金间传质与传热效率的关键参数。本研究针对 CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ 四元基础渣系, 基于离子-分子共存理论, 通过 Matlab 编程计算结构单元的平衡活度, 继而采用 Arrhenius 方程进行回归分析建立黏度模型, 并在不同熔渣成分范围内进行了实验验证。发现预测模型的黏度计算结果高度接近实验检测, 其中黏流活化能的差值分别为 0.08、0.61、0.10 和 0.28 kJ/mol。熔渣体系可形成简单离子 Ca²⁺、Mg²⁺、O²⁻ 和 [Si₃O₇]⁴⁻ 和 [AlO₄]⁻ 聚合结构, 且随着 Ca²⁺、Mg²⁺ 离子增加, 导致复杂聚合结构简化, 即分子结构向离子结构演变, 降温条件下通过检测可确定主要渣相为 2CaO·SiO₂, MgO·Al₂O₃, CaO·Al₂O₃·SiO₂ 和 CaO·MgO·SiO₂。本研究为实际生产中 CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ 渣系提供了黏度评估的快速方法, 揭示了熔渣成分变化对结构-性能的影响。

[关键词] 炉渣; CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ 四元渣系; 黏度预测模型; 黏流活化能; 平衡活度; 共存理论; 结构单元

[中图分类号] TF02 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6103(2026)03-0152-11

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.03.016

0 引言

黏度是熔渣微观结构与宏观冶金性能之间的核心纽带, 直接影响着冶炼过程中的物化反应速率及炉衬的寿命^[1-5]。目前熔渣黏度值主要依赖于实验测定, 成本高难度大, 因此基于理论模型的计算方法值得探索。Kim M 等^[6]研究了不同炉渣黏度模

型在熔渣流动和瞬态行为中的应用, 得到了渣层厚度及黏度对传热效率的影响。Yan Z 等^[7]基于聚合结构理论对熔渣黏度预测模型进行了改进, 并认为在没有 Al₂O₃ 的条件下, MgO 比 CaO 具有更强降低黏度的能力。Zhang G H 等^[8]提出氧化物熔体黏度模型, 研究认为, 熔体的黏性行为根本上取决于其内部硅氧离子网络结构的聚合程度, 结果表明该模型对 CaO-Al₂O₃-SiO₂ 等多元体系的黏度预测结果与实验数据吻合良好。Duchesne M A 等^[9]设计了一种人工神经网络(ANN)模型, 用来确定不同助熔剂对炉渣黏度的影响。Müller M 等^[10]通过实验测量和理论建模研究了熔渣在液态及晶化过程中的黏度变化, 成功描述了熔渣晶化过程的流变演化及残余液相

[收稿日期] 2025-11-06 [修订日期] 2025-12-11

[录用日期] 2025-12-15 [出版日期] 2026-06-01

[第一作者] 彭程(2000—), 男, 硕士研究生, 湖北麻城人, 研究方向为低碳与智能冶金创新技术。

[通信作者] 刘吉辉, 教授, 研究方向为冶金资源高效利用及分离提取基础理论, 低碳与智能冶金创新技术。

[基金项目] 国家自然科学基金(52474359; 52104331)。

成分对黏度的影响。Xuan W等^[11]基于分子动力学(MD)模拟得到硅酸盐熔体结构黏度模型,并与其他模型进行比较,认为新模型的预测效果优于常用的Urbain模型。Zhang P等^[12]通过热力学模拟方法,建立了TiO₂-Ti₂O₃-CaO三元渣系的黏度计算模型,研究通过将模型计算值与文献中的实验实测值进行对比,发现两者具有良好的一致性,从而验证了所建立模型的合理性。Huang A等^[13]提出了一种双阶段黏度预测建模方法,模拟结果认为对熔渣组分影响的临界温度为980℃,其中组分中SiO₂和P₂O₅对熔渣黏度正相关,而Al₂O₃和CaO则为负相关,所建立的模型可为炉渣的工业应用和再利用提供理论指导。

尽管现有的黏度模型已取得诸多进展,但现有模型在考虑CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂四元体系多组分的熔渣黏度时仍存在明显局限,Urbain等模型假设熔渣完全解聚为单一离子,忽视CaO·SiO₂、MgO·Al₂O₃等复杂结构单元对黏滞流动的阻滞作用;人工神经网络虽精度较高,但是无法揭示黏度变化的结构本质。为此,本文引入熔渣分子-离子共存理论^[14-16],将高温熔渣分为“简单离子对(Ca²⁺·O²⁻、

Mg²⁺·O²⁻)”与“分子型结构单元(硅酸盐、铝酸盐及复合化合物)”,在热力学平衡条件下共存且相互转化,通过计算各结构单元的平衡活度进而定量确定成分-结构-黏度关联性,具有物理可解释性与多元体系适应性,为冶金工作者对熔渣黏度的确定提供了新方法。

本文基于熔渣分子-离子共存理论,结合质量守恒定律和热力学分析,针对CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂四元体系,通过定量分析主要成分在不同温度下的活度变化提出新的黏度预测模型,进而通过实验和检测结果分析该预测模型对应渣系的高温聚合结构和物相演变规律,验证预测模型的准确性,并从微观层面阐释预测渣系的分子-离子结构。

1 实验方案

1.1 黏度模型构建

炉渣的基础渣系为CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂,结合CaO-MgO-Al₂O₃、CaO-MgO-SiO₂、CaO-Al₂O₃-SiO₂、MgO-Al₂O₃-SiO₂三元系相图以及CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂四元系相图,应用熔渣分子与离子共存理论确定渣系中基本结构单元,见表1。

表1 四元熔渣体系的结构单元

Table 1 Structural units of quaternary slag system

结构类型	结构单元
简单离子	Ca ²⁺ 、Mg ²⁺ 、O ²⁻
简单化合物	Al ₂ O ₃ 、SiO ₂
复杂化合物	CaO·SiO ₂ 、2CaO·SiO ₂ 、3CaO·SiO ₂ 、CaO·Al ₂ O ₃ 、CaO·2Al ₂ O ₃ 、CaO·6Al ₂ O ₃ 、3CaO·Al ₂ O ₃ 、12CaO·7Al ₂ O ₃ 、MgO·SiO ₂ 、2MgO·SiO ₂ 、MgO·Al ₂ O ₃ 、3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ 、CaO·MgO·SiO ₂ 、CaO·MgO·2SiO ₂ 、2CaO·MgO·2SiO ₂ 、3CaO·MgO·2SiO ₂ 、CaO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ 、2CaO·Al ₂ O ₃ ·SiO ₂

根据表1中熔渣组成单元,根据热力学标准吉布斯自由能(式(1))与平衡常数的关系(式(2))^[17,18],再利用质量平衡和物料守恒关系开展熔渣成分的活度计算^[19-23],并应用Matlab编程,依据热力学条件快速计算求解出各结构单元的活度,最后应用Arrhenius方程回归计算即可得到熔渣的黏度预测模型,并与实验测试的黏度进行对应验证分析。

$$\Delta G = \sum v_i \mu_i \quad (1)$$

式中: ΔG 为吉布斯自由能变化, v_i 为反应物或生成物的摩尔数(反应物为负值,生成物为正值), μ_i 为组分*i*在标准状态下的摩尔吉布斯自由能。

$$\Delta G = -RT \ln K \quad (2)$$

式中: R 为理想气体常数,8.314 J/(mol·K); T 为绝对温度,K; K 为平衡常数。

1.2 模型验证

1.2.1 样品制备

为了验证构建的黏度模型适用性与准确性,按表2的化学配比称取试剂级CaO、SiO₂、Al₂O₃、MgO粉末,其中1[#]-3[#]渣为二元碱度增加同时伴随着 $\omega(\text{CaO})/\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$ (简化为C/A)逐渐降低,4[#]渣是继续增加熔渣碱度,且增加MgO含量至10%。将原料使用球磨机进行均匀混合,然后放入坩埚中置于马弗炉中加热至1 873 K,确保其完全熔化成液态炉

渣,随后保温 30 min 使渣样处于熔融状态,取一部分迅速倒入水中进行水淬处理得到水淬渣,同时将另一部分渣使其自然冷却得到预熔渣。水淬后的渣样需要进行干燥,去除水分后,用研磨机将水淬渣和预熔渣打磨成 200 目(0.074 mm)粉末,将其保存好留待备用。

表 2 四元熔渣配比表(质量分数)

Table 2 Compositional Ratio of the Quaternary Slag (mass fraction) %

渣样编号	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	R
1 [#]	38.50	38.50	15.00	8.00	1.00
2 [#]	44.30	27.70	20.00	8.00	1.60
3 [#]	48.00	19.00	25.00	8.00	2.50
4 [#]	48.75	16.25	25.00	10.00	3.00

1.2.2 熔渣黏度测试

利用 RTW-10 型高温黏度测试设备,采用旋转圆筒法测定熔渣黏度^[24,25]。实验装置如图 1 所示。将 150 g 预熔渣试样放入钼坩埚中,然后将坩埚置于电阻炉的均匀温区,实验炉渣加热至 1 873 K 保证完全熔化,且保温 30 min 实现成分均匀化,然后将钼转轴缓慢浸入熔渣中,并保持在坩埚底部上方 10 mm 的距离进行黏度测量,在整个实验过程中吹入高纯 Ar(纯度>99.999%)作为保护气。

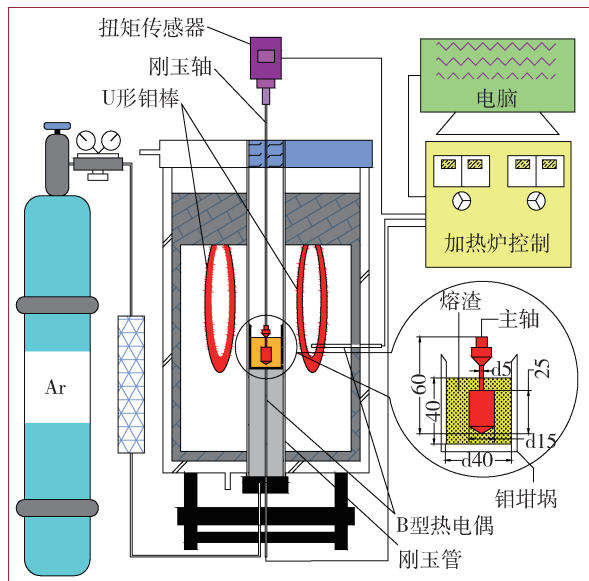


图 1 黏度实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for viscosity measurement

1.2.3 熔渣结构特性验证

实验利用高分辨率拉曼光谱仪(LabRAM HR Evolution)研究水淬渣在不同碱度、不同 Al₂O₃ 和 MgO 含量条件下的聚合结构变化。X 射线衍射仪(D8 ADVANCE, Germany)用于确定渣样的物相组成,再结合扫描电子显微镜(SEM)与能谱仪(EDS)进一步确定微观形貌和物相演变规律。

2 实验结果与分析

2.1 四元熔渣体系黏度计算模型构建

2.1.1 活度计算

高温熔渣由 Ca²⁺、Mg²⁺、硅氧络合物、铝氧络合物等组成。各组分间的反应都伴随着特定的吉布斯自由能变化和平衡常数,这些参数可以用来计算反应物和生成物的活度。应用离子理论,熔融状态下的(Ca²⁺+O²⁻)及(Mg²⁺+O²⁻)的平衡活度分别表示为 N₁和 N₂;应用分子理论,熔渣中的 Al₂O₃和 SiO₂的平衡活度分别表示为 N₃和 N₄;而各反应产物平衡时的活度设定为 N_i(i=5,6,7,⋯,22),具体见表 3。表 4 列出了炉渣在高温下存在的化学平衡关系式及标准吉布斯自由能(ΔG),通过各组元间的化学平衡关系可以得到各反应平衡常数 K_i(i=5,6,7,⋯,22),进而得到此反应产物平衡时的活度 N_i。

熔渣各组元参与的任何物理化学反应,进入与离开某一体系的所有物质总质量必定相等,即熔渣体系中的质量守恒。而在熔渣体系发生一系列复杂反应期间,尽管物质的存在形式、化学组成会发生改变,但原子总数是恒定不变的,此即为熔渣体系中的物料守恒。因此可以利用本熔渣体系的质量平衡和物料守恒得以平衡时熔渣的总活度表示的关系见式(3),各组元的总活度加和为 1,因此得反应前 CaO, MgO, Al₂O₃, SiO₂的摩尔分数 a_i(i=1,2,3,4),计算模型见式(4)–(7)。

$$N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 + N_7 + N_8 + N_9 + N_{10} + N_{11} + N_{12} + N_{13} + N_{14} + N_{15} + N_{16} + N_{17} + N_{18} + N_{19} + N_{20} + N_{21} + N_{22} = 1 \quad (3)$$

$$a_1 = \sum n(0.5N_1 + N_5 + 2N_6 + 3N_7 + N_8 + N_9 + N_{10} + 3N_{11} + 12N_{12} + N_{17} + N_{18} + 2N_{19} + 3N_{20} + N_{21} + 2N_{22}) \quad (4)$$

$$a_2 = \sum n(0.5N_2 + N_{13} + 2N_{14} + N_{15} + N_{17} + N_{18} + N_{19} + N_{20}) \quad (5)$$

表3 熔渣体系中简化表示

Table 3 Simplified representation in slag system

a	N	N	N	N
$a_1 = \sum n_{\text{CaO}}$	$N_1 = N_{\text{CaO}}$	$N_7 = N_{3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2}$	$N_{13} = N_{\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2}$	$N_{17} = N_{\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2}$
$a_2 = \sum n_{\text{MgO}}$	$N_2 = N_{\text{MgO}}$	$N_8 = N_{\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3}$	$N_{14} = N_{2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2}$	$N_{18} = N_{\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2}$
$a_3 = \sum n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$N_3 = N_{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$N_9 = N_{\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3}$	$N_{15} = N_{\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3}$	$N_{19} = N_{2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2}$
$a_4 = \sum n_{\text{SiO}_2}$	$N_4 = N_{\text{SiO}_2}$	$N_{10} = N_{\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3}$	$N_{16} = N_{3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2}$	$N_{20} = N_{3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2}$
	$N_5 = N_{\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2}$	$N_{11} = N_{3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3}$		$N_{21} = N_{\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2}$
	$N_6 = N_{2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2}$	$N_{12} = N_{12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3}$		$N_{22} = N_{2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2}$

表4 熔渣体系中存在的化学平衡

Table 4 Chemical equilibrium in the slag system

化学反应方程式	$\Delta G/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	平衡常数 K_i	N_i
$(\text{Ca}^{2+} + \text{O}^{2-}) + \text{SiO}_2 = (\text{CaSiO}_3)$	$\Delta G_1 = -81416 - 10.498T$	$K_1 = N_5 / (N_1 N_4)$	$N_5 = K_1 N_1 N_4$
$2(\text{Ca}^{2+} + \text{O}^{2-}) + \text{SiO}_2 = 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\Delta G_2 = -160431 + 4.160T$	$K_2 = N_6 / ((N_1)^2 N_4)$	$N_6 = K_2 (N_1)^2 N_4$
$3(\text{Ca}^{2+} + \text{O}^{2-}) + \text{SiO}_2 = 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\Delta G_3 = -92366 - 23.027T$	$K_3 = N_7 / ((N_1)^3 N_4)$	$N_7 = K_3 (N_1)^3 N_4$
$(\text{Ca}^{2+} + \text{O}^{2-}) + \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\Delta G_4 = -18120 - 18.62T$	$K_4 = N_8 / (N_1 N_3)$	$N_8 = K_4 N_1 N_3$
$(\text{Ca}^{2+} + \text{O}^{2-}) + 2\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$	$\Delta G_5 = -16400 - 26.8T$	$K_5 = N_9 / (N_1 (N_3)^2)$	$N_9 = K_5 N_1 (N_3)^2$
$(\text{Ca}^{2+} + \text{O}^{2-}) + 6\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$	$\Delta G_6 = -17430 - 37.2T$	$K_6 = N_{10} / (N_1 (N_3)^6)$	$N_{10} = K_6 N_1 (N_3)^6$
$3(\text{Ca}^{2+} + \text{O}^{2-}) + \text{Al}_2\text{O}_3 = 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\Delta G_7 = -17000 - 32.0T$	$K_7 = N_{11} / ((N_1)^3 N_3)$	$N_{11} = K_7 (N_1)^3 N_3$
$12(\text{Ca}^{2+} + \text{O}^{2-}) + 7\text{Al}_2\text{O}_3 = 12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$	$\Delta G_8 = -86100 - 205.1T$	$K_8 = N_{12} / ((N_1)^{12} (N_3)^7)$	$N_{12} = K_8 (N_1)^{12} (N_3)^7$
$(\text{Mg}^{2+} + \text{O}^{2-}) + \text{SiO}_2 = (\text{MgSiO}_3)$	$\Delta G_9 = 43400 - 40.0T$	$K_9 = N_{13} / (N_2 N_4)$	$N_{13} = K_9 N_2 N_4$
$2(\text{Mg}^{2+} + \text{O}^{2-}) + \text{SiO}_2 = 2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$	$\Delta G_{10} = -77403 + 11.0T$	$K_{10} = N_{14} / ((N_2)^2 N_4)$	$N_{14} = K_{10} (N_2)^2 N_4$
$(\text{Mg}^{2+} + \text{O}^{2-}) + \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\Delta G_{11} = -3550 - 2.09T$	$K_{11} = N_{15} / (N_2 N_3)$	$N_{15} = K_{11} N_2 N_3$
$3\text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{SiO}_2 = 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	$\Delta G_{12} = 8589.9 - 17.39T$	$K_{12} = N_{16} / ((N_3)^3 (N_4)^2)$	$N_{16} = K_{12} (N_3)^3 (N_4)^2$
$(\text{Ca}^{2+} + \text{O}^{2-}) + (\text{Mg}^{2+} + \text{O}^{2-}) + \text{SiO}_2 = (\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2)$	$\Delta G_{13} = -124766.6 + 3.768T$	$K_{13} = N_{17} / (N_1 N_2 N_4)$	$N_{17} = K_{13} N_1 N_2 N_4$
$(\text{Ca}^{2+} + \text{O}^{2-}) + (\text{Mg}^{2+} + \text{O}^{2-}) + 2\text{SiO}_2 = \text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$	$\Delta G_{14} = -80387 - 51.916T$	$K_{14} = N_{18} / (N_1 N_2 (N_4)^2)$	$N_{18} = K_{14} N_1 N_2 (N_4)^2$
$2(\text{Ca}^{2+} + \text{O}^{2-}) + (\text{Mg}^{2+} + \text{O}^{2-}) + 2\text{SiO}_2 = 2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$	$\Delta G_{15} = -73688 - 63.639T$	$K_{15} = N_{19} / ((N_1)^2 N_2 (N_4)^2)$	$N_{19} = K_{15} (N_1)^2 N_2 (N_4)^2$
$3(\text{Ca}^{2+} + \text{O}^{2-}) + (\text{Mg}^{2+} + \text{O}^{2-}) + 2\text{SiO}_2 = 3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$	$\Delta G_{16} = -315469 + 24.786T$	$K_{16} = N_{20} / ((N_1)^3 N_2 (N_4)^2)$	$N_{20} = K_{16} (N_1)^3 N_2 (N_4)^2$
$(\text{Ca}^{2+} + \text{O}^{2-}) + \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{SiO}_2 = \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	$\Delta G_{17} = -28006 - 74.195T$	$K_{17} = N_{21} / (N_1 N_3 (N_4)^2)$	$N_{21} = K_{17} N_1 N_3 (N_4)^2$
$2(\text{Ca}^{2+} + \text{O}^{2-}) + \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{SiO}_2 = 2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	$\Delta G_{18} = -17092 + 8.778T$	$K_{18} = N_{22} / ((N_1)^2 N_3 N_4)$	$N_{22} = K_{18} (N_1)^2 N_3 N_4$

$$a_3 = \sum n(N_3 + N_8 + 2N_9 + 6N_{10} + N_{11} + 7N_{12} + N_{15} + 3N_{16} + N_{21} + N_{22}) \quad (6)$$

$$a_4 = \sum n(N_4 + N_5 + N_6 + N_7 + N_{13} + N_{14} + 2N_{16} + N_{17} + 2N_{18} + 2N_{19} + 2N_{20} + 2N_{21} + N_{22}) \quad (7)$$

式(4)–(7)即为本熔渣体系的活度计算模型,为了计算精确与生产应用,将这些公式结合具体熔渣的化学组成完成 Matlab 编程,进而求解出 $N_1, N_2, N_3, N_4 \dots N_i$ 。对实验用渣样(成分见表2)计算平衡活度,结果见表5。

2.1.2 黏度计算

根据 CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂熔渣结构单元的作

用活度模型,采用 Arrhenius 方程回归得到炉渣的黏度计算模型(式(8)),取特定成分渣样,根据其实际生产中的熔融温度,带入上述模型即可得到黏度值。

$$\eta = A_0 \exp \sum_{i=1}^n (A_i + \frac{B_i}{T}) N_i \quad (8)$$

式中: $A_0 = \exp(-111.703)$; $N_i (i=1, 2, 3, \dots, 22)$ 表示各组分 i 平衡时的活度; A_i 和 B_i 为回归参数,由不同熔渣经过实验测试得到的黏度及熔渣间反应得到,见表6(若上述所求活度数值小于 10^{-10} ,在此黏度模型中将不加以考虑其回归参数); T 为开氏温度, K 。

对表1成分的渣系构建黏度模型,并计算在特

表5 熔渣作用单元活度计算值

Table 5 Calculated values of model activity of four slags

活度值	熔渣 1 [#]	熔渣 2 [#]	熔渣 3 [#]	熔渣 4 [#]
N ₁	1.639 316E-02	5.112 634E-02	1.623 135E-01	2.119 050E-01
N ₂	7.725 576E-02	1.513 194E-01	2.660 397E-01	3.387 266E-01
N ₃	8.750 658E-02	7.424 840E-02	3.286 706E-02	2.153 977E-02
N ₄	2.555 519E-02	4.233 844E-03	3.543 948E-04	1.567 842E-04
N ₅	0.318 736 834	0.164 691 014	0.043 765 542	0.025 277 478
N ₆	0.164 626 03	0.265 288 348	0.223 815 662	0.168 763 47
N ₇	0.000 796 164	0.004 001 326	0.010 717 319	0.010 550 199
N ₈	0.044 520 754	0.117 812 386	0.165 567 315	0.141 658 07
N ₉	0.009 302 946	0.020 887 927	0.012 994 296	0.007 286 176
N ₁₀	1.985 32E-06	2.310 42E-06	5.518 78E-08	5.708 35E-09
N ₁₁	5.555 27E-05	0.001 429 874	0.020 253 557	0.029 535 281
N ₁₂	2.243 73E-16	6.015 61E-11	166.628 481 7	2 677.120 615
N ₁₃	0.013 845 138	0.004 492 797	0.000 661 182	0.000 372 425
N ₁₄	0.006 709 45	0.004 264 522	0.001 103 383	0.000 791 31
N ₁₅	0.010 986 909	0.018 259 372	0.014 210 566	0.011 857 532
N ₁₆	2.010 65E-06	3.371 22E-08	2.048 86E-11	1.128 71E-12
N ₁₇	0.077 327 172	0.078 258 887	0.036 563 506	0.026 887 599
N ₁₈	0.085 680 51	0.014 366 111	0.000 561 831	0.000 182 778
N ₁₉	0.003 696 34	0.001 932 908	0.000 239 987	0.000 101 928
N ₂₀	0.012 349 208	0.020 140 039	0.007 938 652	0.004 401 887
N ₂₁	0.044 651 662	0.003 243 227	3.193 49E-05	5.347 64E-06
N ₂₂	6.462 81E-07	8.836 64E-07	3.300 15E-07	1.630 8E-07

表6 CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂渣系黏度计算模型的回归参数Table 6 Regression parameters of the viscosity calculation model of CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ slag system

<i>i</i>	结构单元	<i>A_i</i>	<i>B_i</i>	<i>i</i>	结构单元	<i>A_i</i>	<i>B_i</i>
1	CaO	146.78	1.07E+06	11	MgO·SiO ₂	5 631.66	-5.39E+06
2	MgO	360.31	-4.81E+05	12	2MgO·SiO ₂	1 196.31	-7.19E+06
3	Al ₂ O ₃	-740.485	1.57E+06	13	MgO·Al ₂ O ₃	-625.626	1.73E+06
4	SiO ₂	-1 209.68	1.66E+06	14	CaO·MgO·SiO ₂	-678.11	2.13E+07
5	CaO·SiO ₂	36.74	1.72E+07	15	CaO·MgO·2SiO ₂	-1 996.48	1.98E+06
6	2CaO·SiO ₂	-1 487.74	-3.35E+06	16	2CaO·MgO·2SiO ₂	-77 812.90	1.97E+08
7	3CaO·SiO ₂	-35 881.6	6.51E+07	17	3CaO·MgO·2SiO ₂	-26 485.60	4.08E+07
8	CaO·Al ₂ O ₃	-775.262	1.38E+06	18	CaO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	14 296.00	-2.11E+05
9	CaO·2Al ₂ O ₃	32 889.95	-2.56E+06	19	2CaO·Al ₂ O ₃ ·SiO ₂	8 503.68	-1.21E+05
10	3CaO·Al ₂ O ₃	892.00	-1.79E+06				

定温度下的黏度,结果如图2(a)所示。由图可知,熔渣黏度随着温度的升高逐渐降低,同时因为熔渣的成分差异而导致渣黏度不同;渣的黏流活化能计算结果如图2(b)所示,可以看出,黏流活化能的趋势与黏度的趋势相反,2[#]渣黏度最大,但是其活化能最小,为39.97 kJ/mol,3[#]渣和4[#]渣黏流活化能相当,

分别为57.16 kJ/mol、58.31 kJ/mol。

2.2 熔渣黏度实验结果

图3(a)为连续冷却测量所得各熔渣的黏度。从图中可以看出,配置熔渣的黏度在降温过程中缓慢增加,整个过程没有明显的黏度突变。各渣系黏度表现各异,其中2[#]渣整体黏度较高。3[#]与4[#]渣黏

度相当,说明炉渣黏度变化不但与碱度有关,还与C/A比及MgO等各渣中其他成分有关,进而获得 $\ln\eta$ 随 $1/T$ 的变化曲线,如图3(b)所示,黏流活化能(E_η)^[26,27]如图3(c)所示。从图3(b)可以看出, $\ln\eta$ 与 $1/T$ 具有良好的线性关系,所配置的熔渣的黏温

关系均符合Arrhenius行为。从图3(c)可以看出2[#]渣样对应的黏流活化能最低,为40.57 kJ/mol,而黏度相近的3[#]与4[#]渣样的黏流活化能相当,分别为57.07 kJ/mol与58.03 kJ/mol。

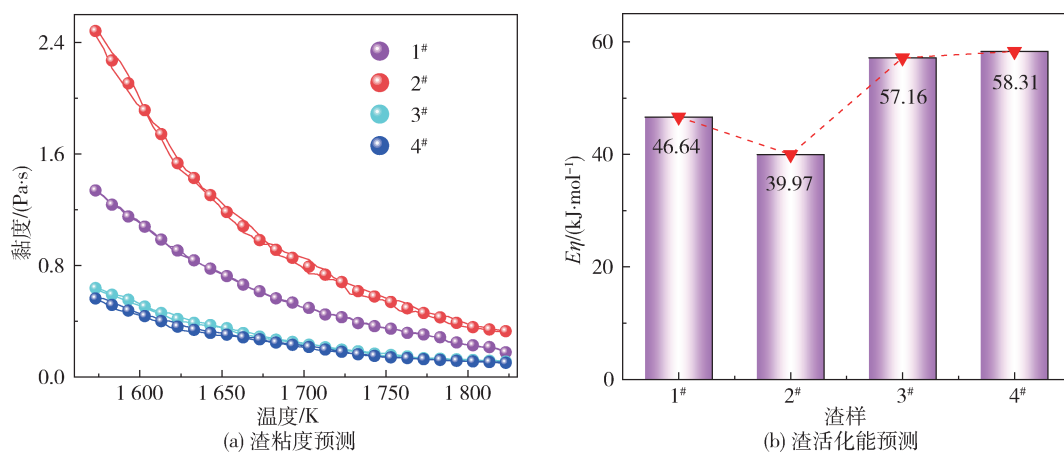


图2 渣黏度和活化能的预测

Fig. 2 Prediction of slag viscosity and activation energy

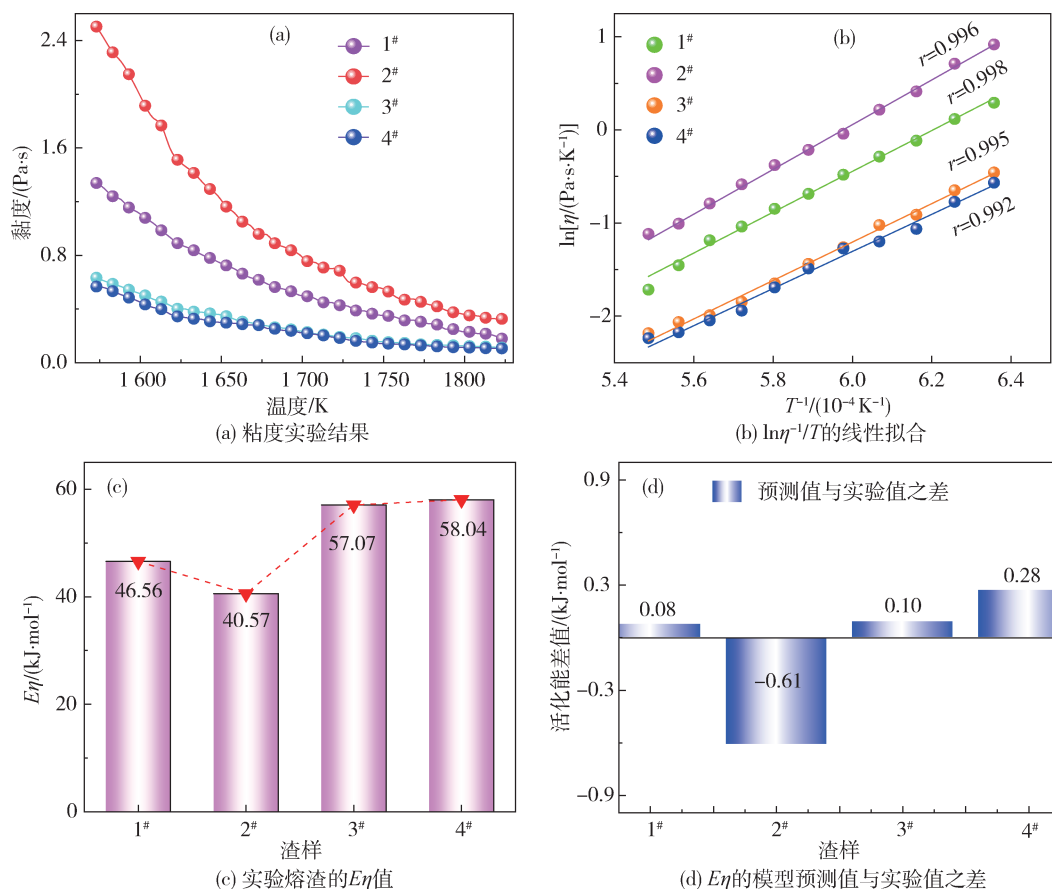


图3 实验渣的黏度和活化能

Fig. 3 Viscosity and activation energy of the test slag

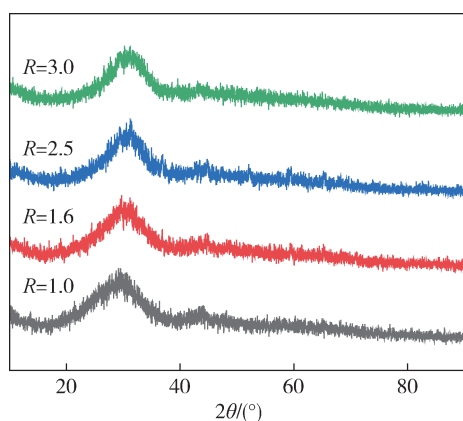


图4 淬火样品的XRD检测结果

Fig. 4 XRD patterns of quenched samples

将图3中模型预测值与实验值进行对比,发现预测值整体趋势与实验值保持一致,特别是在低碱度 $R=1.0$ 和高碱度 $R=3.0$ 的情况下,偏差较小,表明模型能够较好描述炉渣流动行为的变化规律。虽然在中间比值 $R=1.6$ 存在一定的数值偏差,但总体误差较小。这表明模型在描述炉渣黏度与活化能

关系方面具有良好的准确性和适用性。

2.3 熔渣中结构单元分析

为了更好确定实验终点温度下炉渣是否处于熔融状态,对水淬渣样进行XRD检测,结果见图4。图4表明,熔渣处于无定形态,没有特征峰。

为了验证应用熔渣分子理论及离子共存理论构建的炉渣计算模型的准确性,测试了熔渣(水淬

表7 实验渣拉曼特征谱段

Table 7 Raman characteristic spectrum of experimental slag

拉曼位移/ cm^{-1}	熔渣结构单元	参考文献
400 ~ 800	Si-O 和 Al-O 键重新排列或解聚, $i(\text{Si}/\text{Ca}/\text{Mg}/\text{Al})-\text{O}-j(\text{Si}/\text{Ca}/\text{Mg}/\text{Al})$ 复杂聚合结构结构变化	WANG P, et al. [28]
830 ~ 900	$[\text{SiO}_4]^{4-}$	
900 ~ 950	$[\text{Si}_2\text{O}_7]^{6-}$	ZHEN Y L, et al.
950 ~ 1 050	$[\text{Si}_2\text{O}_6]^{4-}$	MYSEN B
1 050 ~ 1 100	$[\text{Si}_2\text{O}_5]^{2-}$	O, et al. [29, 30, 31]
1 100 ~ 1 200	SiO_2	

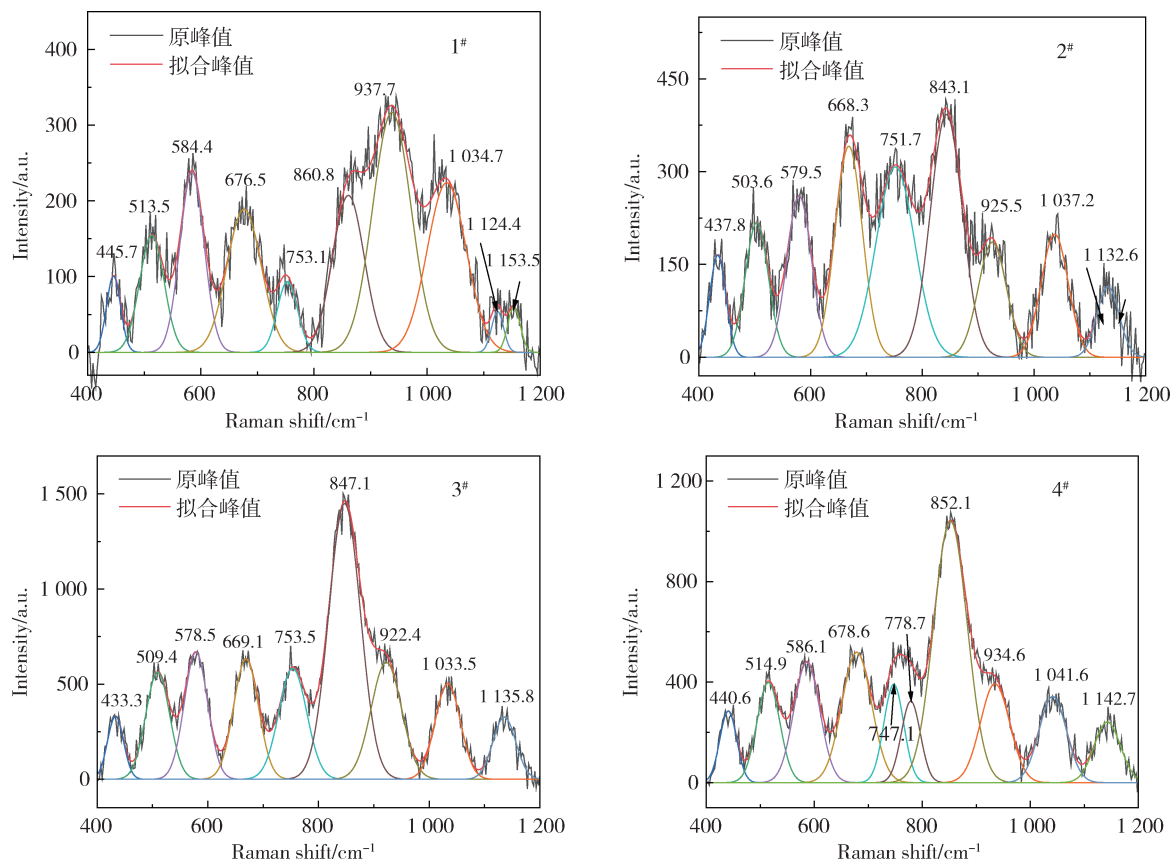


图5 熔渣的拉曼测试及拟合结果

Fig. 5 Raman test and fitting results of slag

渣)的硅酸盐聚合结构及熔渣的物相组成(预熔渣),并对熔渣微观组织进行详细表征,从而确定熔渣中结构单元随组分的变化趋势。

利用拉曼发射光谱对不同组分条件下的炉渣结构进行表征,以分析组分变化对炉渣结构中硅酸盐结构单元 Q_n ($n=0,1,2,3,4$)的影响。表7所示为不同硅酸盐结构单元对应的特征振动谱段。

图5为不同碱度,不同C/A比及不同MgO含量下熔渣的拉曼光谱在波段400~1200 cm⁻¹的分峰结果。在波数400~800 cm⁻¹区间内,随着碱度,C/A比及MgO含量的变化,波段信号强度逐渐增强,峰位向低波数移动,反映出硅酸盐网络中非桥氧逐渐增加,其硅氧四面体解聚为低聚合度的 Q_{Si}^1 和 Q_{Si}^0 单元,同时Ca-O、Mg-O和Al-O键的作用显著增强。在波数800~1200 cm⁻¹区间内,硅酸盐网络由高度聚合的 Q_{Si}^4 和 Q_{Si}^3 单元逐渐解聚为 Q_{Si}^2 、 Q_{Si}^1 ,甚至孤立的 Q_{Si}^0 单元,同时复杂的阴离子基团转变为简单基团,反映出硅酸盐网络中桥氧逐渐减少,非桥氧增加,硅氧四面体解聚为低聚合度的 Q_{Si}^1 和 Q_{Si}^0 单元。这表明Ca²⁺和Mg²⁺破坏了网络结构,释放了自O²⁻,打破Si-O-Si,从而降低了硅酸盐网络的聚合度,导致炉渣内部由3CaO·SiO₂逐渐解聚为2CaO·SiO₂、CaO·SiO₂,这与黏度显著下降的趋势完全一致。

渣样的拉曼光谱拟合峰相对面积如图6所示,可以看出,熔渣随着碱度、C/A比及MgO含量的增加,中频段聚合网络缩聚-解聚量与高频段硅氧网络变化量相等,分别为17.84%、13.96%、3.32%及7.20%。随着碱度、C/A比及MgO含量的变化,硅氧网络的聚合程度逐渐降低,网络解聚的趋势非常明显。可以看出熔渣 Q_{Si}^0 和 Q_{Si}^4 均逐渐增加, Q_{Si}^1 和 Q_{Si}^2 则先大幅减小后变化不大,对应中频段各峰强度均有所增强,表明随着CaO和Al₂O₃含量的增加,增强了铝硅氧网络聚合度,Al³⁺和Ca²⁺分别通过与[AlO₄]⁵⁻

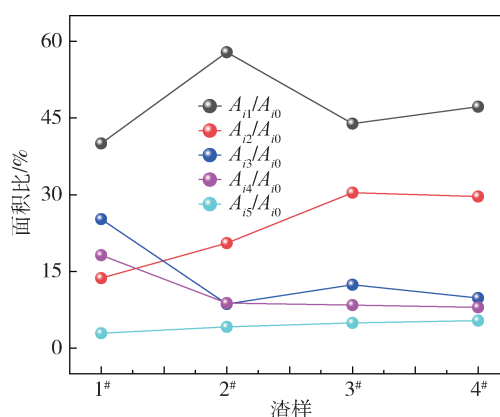


图6 实验渣拉曼光谱各结构单元相对面积占比

Fig. 6 Relative area contributions of structural units in experimental residue Raman spectra

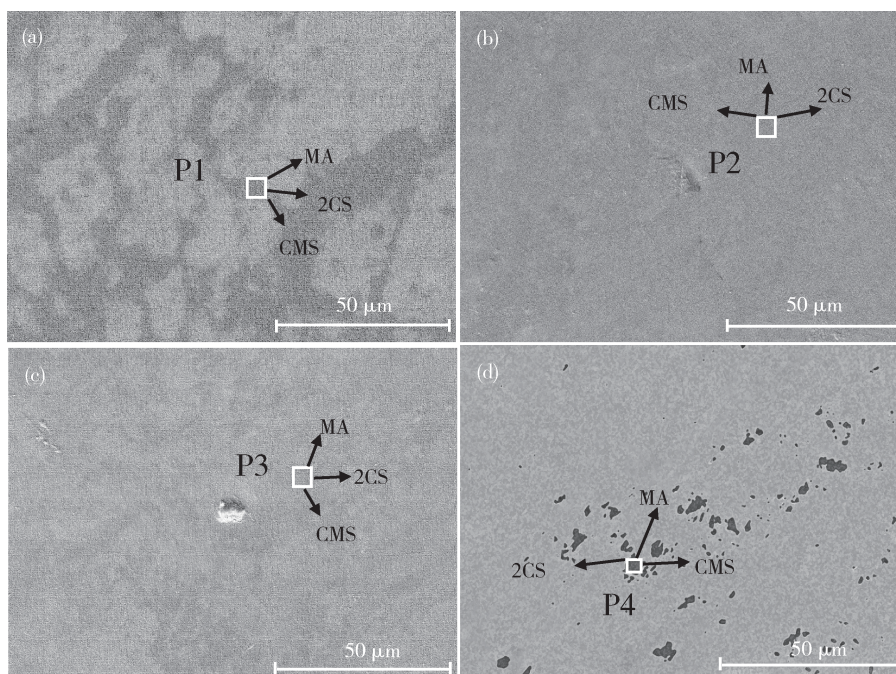


图7 熔渣电镜微观图

Fig. 7 Electron microscope Micrograph of Molten Slag

结构单元的相互作用,补偿了剩余的负电荷,形成了更多的 Al-O-Al,渣的结构变得更加复杂。当 CaO 和 Al₂O₃ 进一步增加, Ca²⁺ 和 Al³⁺ 过量, [O]²⁻ 增加, O/Si 及 O/Al 比升高, 当 [AlO₄]⁵⁻ 中的剩余负电荷全部被平衡后, 过量的 Ca²⁺ 和 Al³⁺ 作为网络修饰体使 *i* (Si/Ca/Mg/Al)-O-*j* (Si/Ca/Mg/Al) 聚合结构发生解聚, 产生大量 Q_{Si}⁰ 单元和 CaO·SiO₂。(图 6 中, A₄₁-A₄₅ 代表 400~800 cm⁻¹ 以及 Q⁰-Q⁴ 各结构单元拉曼峰的面积; A₄₀ 代表所有峰的面积之和。两者相除代表熔渣中各结构单元的相对面积占比, 以明确熔渣中各结构单元的相对含量变化, 从而确定熔渣各结构单元对黏度的影响。)

2.4 熔渣的微观结构

图 7 为自然冷却条件下熔渣结构从熔渣均相 (P1) 逐渐过渡到分散颗粒状 (P4) 的演变过程。P1 区域背景较暗且均匀, 又因为其 Si 含量较高而 Ca 含量较低, 表明其区域为富含 SiO₂ 和 Al₂O₃ 的硅酸盐相; P2 点 Ca 含量显著升高并形成硅酸盐结晶且形貌上开始出现较亮的结晶颗粒; P3 点附件有明显的白色亮点, 同时因为其 Al 含量较高, 表明该区域有尖晶石族矿物或钙铝黄长石的生成, 伴随尖晶石类矿物生成; 在 P4 点, 成分高度富集钙、镁、铝, 并析出大量钙铝酸盐或镁铝尖晶石等晶相。结合表 8 可以得出, 氧、硅含量随渣样成分的变化逐渐降低, 铝和钙含量逐步增加, 表明熔渣析出了大量 MgO·Al₂O₃ (MA)、2CaO·SiO₂ (2CS)、CaO·2MgO·2SiO₂ (CMS) 分子结构的物相。

表 8 能谱检测样点 P1-P4 元素成分分析(质量分数)

Table 8 Specific ingredients of P1-P4(mass fraction)

检测样点	%				
	O	Mg	Al	Si	Ca
P1	39.9	5.4	8.1	20.5	16.5
P2	39.3	5.5	11.6	15.7	28.9
P3	38	6.9	15.2	11.1	28.8
P4	37.4	7	15.1	9.8	30.7

3 结论

本文基于熔渣分子-离子共存理论, 针对 CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ 四元体系, 构建了黏度预测模型, 并进行了实验验证, 得到以下主要结论。

1) 根据炉渣结构的分子离子共存理论, 建立了 CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ 四元熔渣黏度预测模型 $\eta = A_0 \exp \sum_{i=1}^n (A_i + \frac{B_i}{T}) N_i$, 计算得到预测黏度与实验黏度所对应的活化能最大差值为 0.61 kJ/mol, 两者相差不大, 因此预测模型精度在合理范围内。

2) 通过拉曼光谱、XRD 和电镜分析, 表明熔渣高温态下存在着聚合结构, 并且随着碱度、C/A 和 MgO 含量增加桥氧断裂向低聚合度转变, 降温后可检测到 CaO-MgO-SiO₂、CaO-Al₂O₃-SiO₂ 等镁铝硅酸盐相。

3) 该模型主要适用于实验碱度范围内 CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ 四元渣系, 对于含 FeO、MnO 等组分的复杂渣系, 其适用性仍有一定局限, 后续研究将融合机器学习算法进行深入探究。

[参考文献]

- [1] WANG X, LIU G, MU W, et al. Enhancement of mass transfer in converter by improving the flow of slag and molten steel [J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(10): 11.
- [2] MIAO L, MASSOUDI M. Heat transfer analysis and flow of a slag-type fluid: Effects of variable thermal conductivity and viscosity [J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2015, 76: 8-19.
- [3] ZHANG B, SHEN Z, LIANG Q, et al. Modeling the slag flow and heat transfer with the effect of fluid-solid slag layer interface viscosity in an entrained flow gasifier [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 122: 785-793.
- [4] POMFRET R J, GRIEVESON P. The kinetics of slag-metal reactions [J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1983, 22(3): 287-299.
- [5] LIU Z, DEKKERS R, BLANPAIN B, et al. Experimental study on the viscosity of stainless steelmaking slags [J]. *ISIJ International*, 2019, 59(3): 404-411.
- [6] KIM M, YE I, RYU C. Effect of slag viscosity model on transient simulations of wall slag flow in an entrained coal gasifier [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2018, 35: 1065-1072.
- [7] YAN Z, REDDY R G, LV X. Structure based viscosity model for aluminosilicate slag [J]. *ISIJ International*, 2019, 59(6): 1018-1026.
- [8] ZHANG G H, CHOU K C, MILLS K. A structurally based viscosity model for oxide melts [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2014, 45: 698-706.
- [9] DUCHESNE M A, MACCHI A, LU D Y, et al. Artificial neural network model to predict slag viscosity over a broad range of temperatures and slag compositions [J]. *Fuel Processing Technology*, 2010, 91(8): 831-836.
- [10] MÜLLER M, SEEBOLD S, WU G, et al. Experimental

- investigation and modeling of the viscosity of oxide slag systems [J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2018, 4: 3-14.
- [11] XUAN W, GUHL S, ZHANG Y, et al. A structural viscosity model for silicate slag melts based on MD simulation [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(19): 28291-28298.
- [12] ZHANG P, MA W H, ZHANG S J, et al. Thermodynamic simulation of viscosity of TiO₂-Ti₂O₃-CaO ternary slag [C]// *Materials Science & Engineering Conference Series. Materials Science and Engineering Conference Series*, 2017.
- [13] HUANG A, HUO Y, YANG J, et al. Computational modeling and prediction on viscosity of slags by big data mining [J]. *Minerals*, 2020, 10(3): 257.
- [14] WANG Q, DUAN S, HUANG J, et al. New molecular theory and its model applications[J]. *Processes*, 2025, 13(3): 828.
- [15] LEI J, LI J, YANG L, et al. Optimal alkalinity model of ladle furnace slag for bearing steel production based on ion-molecule coexistence theory[J]. *Processes*, 2023, 11(3): 763.
- [16] DONG J, LI D, TIAN J, et al. Atomic ionic-scale mechanism on inclusion modification by calcium treatment in the electroslag remelting process based on Ion and molecule coexistence theory and molecular dynamics simulation [J]. *ISIJ International*, 2025, 65(3): 350-359.
- [17] WANG J, GUO B, LYU B, et al. Thermodynamic modelling on the reaction between steel and slag [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 32: 1761-1771.
- [18] ROMERO-SERRANO A, LÓPEZ-RODRÍGUEZ J, HERNÁNDEZ-RAMÍREZ A, et al. Thermodynamic modelling of sulphide capacity of ternary silicate slags [J]. *ISIJ International*, 2021, 61(6): 1768-1774.
- [19] PARK S, ABATE S Y, KIM H K. Hydration kinetics modeling of sodium silicate-activated slag: a comparative study [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 242: 118144.
- [20] KIM C O, KIM R G, WU Z, et al. Dynamic modeling and simulation of reaction, slag behavior, and heat transfer to water-cooling wall of shell entrained-flow gasifier[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2016, 33: 1767-1776.
- [21] GUO P, LI Z, LIN G. Activity model and its application in CaO-FeO-SiO₂-MoO₃ quaternary system [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2004, 11(5): 406-410.
- [22] WANG J, ZHANG C, ZHANG W. Activity calculation model for slag system of CaO-Cu₂O-Fe₂O₃ [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2009, 19(5): 955-959.
- [23] ZHOU J, WANG Q, QIN Z, et al. Activity Calculation model for ternary slag system of Al₂O₃-BaO-B₂O₃ [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2013, 20(11): 46-50.
- [24] FENG C, CHU M, TANG J, et al. Effects of MgO and TiO₂ on the viscous behaviors and phase compositions of titanium-bearing slag[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2016, 23: 868-880.
- [25] FENG C, GAO L, JUE T, et al. Effects of MgO/Al₂O₃ ratio on viscous behaviors and structures of MgO-Al₂O₃-TiO₂-CaO-SiO₂ slag systems with high TiO₂ content and low CaO/SiO₂ ratio [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30(3): 800-811.
- [26] ZHANG X, GAO Y, WANG Q, et al. Determination of density and surface tension of CaO-SiO₂-Al₂O₃ molten slag by pendant drop method [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2023, 54(3): 1499-1510.
- [27] WU T, LI Q, XIA W, et al. Effects of typical components on physicochemical properties of refining slag and sulfur migration enhanced by electric field [J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2022, 8(3): 1180-1190.
- [28] WANG P, GONG W, JIANG Z, et al. Effect of MgO content and CaO/Al₂O₃ ratio on melting temperature and viscosity of CaF₂-CaO-Al₂O₃-MgO slag for electroslag remelting [J]. *Ceramics International*, 2024, 50(19): 36829-36837.
- [29] ZHEN Y L, ZHANG G H, CHOU K C. Influence of Al₂O₃/TiO₂ ratio on viscosities and structure of CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-TiO₂ melts[J]. *ISIJ international*, 2014, 54(4): 985-989.
- [30] MYSEN B O, VIRGO D, 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.
- [31] MYSEN B O, RYERSON F J, VIRGO D. The influence of TiO₂ on the structure and derivative properties of silicate melts [J]. *American Mineralogist*, 1980, 65(11-12): 1150-1165.

Viscosity prediction of CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ quaternary slag system based on the molecular-ionic coexistence theory

PENG Cheng^{1,2}, HUANG Yufei^{1,2}, FENG Haoming^{1,2}, YANG Xin^{1,2}, ZHAN Wenlong^{1,2}, LIU Jihui^{1,2}

(1. School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China;

2. Key Laboratory of Green Low-Carbon and Intelligent Metallurgy, Anshan 114051, China)

Abstract: Viscosity is a crucial physicochemical parameter that regulates mass and heat transfer kinetics at the slag-metal interface in pyrometallurgical reactors. In this study, a quaternary CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ reference slag system was examined within the framework of the Ion-Molecule Coexistence Theory. Using MATLAB based

algorithms, the equilibrium activities of all likely structural entities were carefully calculated; then, an Arrhenius-type regression was applied to develop a semi-empirical viscosity model. Experimental validation over different compositional ranges showed that the predicted viscosities closely matched the measured data, with deviations in activation energy for viscous flow limited to 0.08, 0.61, 0.10, and 0.28 kJ·mol⁻¹, respectively. Spectroscopic and phase-equilibrium analyses confirm that the melt consists of simple ionic species (Ca²⁺, Mg²⁺, O²⁻) coexisting with [Si_xO_y]^{z-} and [AlO_m]ⁿ⁻ polymeric units. Increasing concentrations of Ca²⁺ and Mg²⁺ ions have a network-modifying effect, depolymerizing the aluminosilicate structure and causing a structural shift from molecular to ionic dominance. During controlled cooling, the primary solid phases identified were 2CaO·SiO₂, MgO·Al₂O₃, CaO·Al₂O₃·SiO₂, and CaO·MgO·SiO₂. This model provides the metallurgical community with a fast, composition-dependent viscosity predictor for CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ slags and explains the direct link between melt speciation and overall transport properties.

Key words: smelting slag; CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ quaternary slag system; viscosity prediction model; viscoelastic activation energy; equilibrium activity; coexistence theory; structural unit

2026年重点新材料创新发展论坛举办 人工智能正全方位融入原材料及新材料领域

5月29日,由工业和信息化部产业发展促进中心主办的2026年重点新材料创新发展论坛在江苏省南通市举办。论坛以“材聚江海 智领未来”为主题,旨在推动科技创新与产业创新深度融合,加快新材料领域科技成果推广应用。来自新材料领域的专家学者以及科研院所、行业协会、龙头企业代表齐聚一堂,共探产业创新路径,共寻合作共赢机遇。

工业和信息化部原材料工业司司长常国武,中国科学院院士谢在库,中国工程院院士林忠钦、谢建新、陈勇,江苏省工业和信息化厅副厅长石晓鹏,南通市委副书记、市长张彤,南通市委常委、副市长凌屹,中国钢铁工业协会副会长夏农,中国有色金属工业协会党委常委、副会长朱景兵等出席会议。工业和信息化部产业发展促进中心党委书记、副主任邢涛主持论坛。

常国武在讲话中表示,当前,人工智能正全方位融入原材料及新材料研发、制备、生产、应用全链条,深刻重塑行业研发范式、生产模式与产业形态,也为新材料产业创新发展提供了新的机遇和发展空间。南通是长三角重要的先进制造业基地,也是新材料创新发展的沃土,希望南通市以本次论坛为纽带,以“料要成材、材要成器、器要好用”为使命,强化关键核心技术研发创新,加强新材料重点平台建设,加速推动成果产业化、规模化应用,加快培育新质生产力,为江苏省乃至全国高端装备、电子信息、新能源等关键领域自主可控安全发展提供坚实材料保障。

朱景兵在报告中介绍了我国有色金属工业的发展情况并指出,有色金属是支撑高端制造、航空航天、新能源等战略性新兴产业的核心基础材料,是高端新材料研发创新、规模化应用的重要依托,更是我国新材料产业高质量发展的中坚力量。面向“十五五”,有色金属新材料产业将聚焦“自主可控、高端引领、绿色低碳、融合创新”四大方向,全力推动产业从“材料大国”向“材料强国”跨越。为此,他提出4点建议:一是攻克关键核心技术,筑牢自主可控根基;二是优化产业结构布局,推动高端化升级;三是深化绿色低碳转型,践行可持续发展理念;四是推进产业融合创新,培育新质发展动能。加快推动产业高端化、绿色化、融合化发展,为我国新材料产业高质量发展贡献智慧和力量,为全面建设社会主义现代化国家提供坚实的材料支撑。

(资料来源:中国有色金属报)