

# 低碳铝镇静钢精炼渣理化性能研究及动态调控

王多刚<sup>1</sup>, 虞大俊<sup>1</sup>, 夏云进<sup>2</sup>

(1. 上海梅山钢铁股份有限公司, 南京 210039; 2. 安徽工业大学 冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

**摘要:** 为提升低碳铝镇静钢水的可浇性, 基于低碳铝镇静钢精炼渣的热力学计算, 研究典型组分  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  (C/A)、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{FeO}$  对精炼渣液相线温度、1 650 °C 黏度和表面张力的影响规律, 结合精炼渣理化性能 (熔点和黏度-温度曲线) 测试结果, 建立吹氩直上精炼渣动态调控模型, 并投入生产实践应用。结果表明: 随着 C/A 增加, 精炼渣熔点在渣中  $\text{SiO}_2$  质量分数为 5% 时单调升高, 在渣中  $\text{SiO}_2$  质量分数为 10% 时先降后升, 另随 C/A 的增加精炼渣黏度及黏度-温度曲线的转折温度升高; 精炼渣组分范围为 C/A 0.75~1.50、 $\text{SiO}_2$  质量分数 0~10%、 $\text{FeO}$  质量分数 2%~6% 时, 可获得较低的液相线温度、较高的黏度和表面张力。生产实践中应用建立的模型可实现造渣物料的动态加入, 精炼渣理化性能的稳定性得到显著提升, 精炼渣的 C/A 和全铁 (TFe) 质量分数标准差明显降低; 液相线温度、1 650 °C 时的黏度和表面张力平均值分别降低 6.9 °C、增加 0.020 6 Pa·s 和 0.010 9 N/m; 全氧 (TO) 质量分数均值由  $2.78 \times 10^{-3}\%$  下降为  $2.25 \times 10^{-3}\%$ , 改进了 19.1%, 钢水的可浇性得到显著改善。

**关键词:** 低碳铝镇静钢; 吹氩; 精炼渣; 动态调控; 熔化温度; 黏度; 表面张力; 钙铝比

**中图分类号:** TF 7 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.24121



## A Study of Physical and Chemical Properties of Slag for Low Carbon Al-killed Steel Refining Slag and Its Dynamic Control

WANG Duogang<sup>1</sup>, YU Dajun<sup>1</sup>, XIA Yunjin<sup>2</sup>

(1. Shanghai Meishan Iron and Steel Co., Ltd, Nanjing 210039, China; 2. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

**Abstract:** In order to improve the castability of low carbon Al-killed steel, based on the thermodynamic calculation of low carbon Al-killed steel refining slag, the effect of typical components  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  (C/A),  $\text{SiO}_2$  and  $\text{FeO}$  on the liquidus temperature, viscosity and surface tension at 1 650 °C in the refining slag was studied. Combining the test results of the physical and chemical properties (melting temperature and viscosity-temperature curve) of the refining slag, a dynamic control model for the argon-blowing top-up refining slag was established and implemented in production practice. The results show that as C/A increases, the melting point of the refining slag increases when  $\text{SiO}_2$  mass fraction is 5%, while it first decreases and then increases when  $\text{SiO}_2$  mass fraction is 10%. Meanwhile, with the increase of C/A, the viscosity of refined slag and the inflection temperature of the viscosity-temperature curve also rise. When the composition range of refined slag is C/A 0.75~1.50,  $\text{SiO}_2$  mass fraction of 0~10%, and  $\text{FeO}$  mass fraction of 2%~6%, lower liquidus temperature, higher viscosity, and higher surface tension can be obtained. The model established in production practice can achieve the dynamic addition of slag-forming materials, significantly improve the stability of physical and chemical properties of refining slag, and significantly reduce

收稿日期: 2024-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52074001)

作者简介: 王多刚 (1984—), 男, 安徽淮南人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为炼钢质量与成本控制。

引文格式: 王多刚, 虞大俊, 夏云进. 低碳铝镇静钢精炼渣理化性能研究及动态调控 [J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(5):474-482.

the standard deviations of C/A and total iron (TFe) mass fraction in refined slag. The average values of liquidus temperature, viscosity and surface tension at 1 650 °C decrease by 6.9 °C, increase by 0.020 6 Pa·s, and 0.010 9 N/m, respectively. The average mass fraction of total oxygen (TO) decreases from  $2.78 \times 10^{-3}\%$  to  $2.25 \times 10^{-3}\%$ , an improvement of 19.1%, and the castability of molten steel is significantly improved.

**Keywords:** low carbon Al-killed steel; argon blowing; refining slag; dynamic control; melting point; viscosity; surface tension; calcium aluminum ratio

钢铁工业被视为国民经济的重要基础产业,是实现绿色低碳发展的重要领域。炼钢吹氩精炼低碳铝镇静钢技术是钢铁工业中的 1 项重要技术,具有流程短、冶炼成本低等优势。这种技术的应用符合国家对钢铁工业提出的绿色低碳发展要求,是推动钢铁工业高质量发展的重要手段之一。吹氩精炼低碳铝镇静钢的典型生产工艺流程<sup>[1]</sup>为铁水预处理脱硫→转炉冶炼→吹氩站精炼→连铸机。转炉出钢过程完成精炼渣的调整,目前造渣物料为固定量加入,使得精炼渣的物性参数控制精度差,吸附夹杂物的能力波动大,同时钢水的精炼时间短,进一步恶化了钢水的洁净度,钢水全氧含量高,可浇性差。因此,研究吹氩精炼低碳铝镇静钢精炼渣的理化性能及调控方法,对于提高钢水质量、解决钢铁工业技术难题以及促进技术创新具有重要的意义。

已有研究表明,通过控制精炼渣的碱度<sup>[2]</sup>及渣中钙铝比<sup>[3]</sup>、(FeO+MnO)含量<sup>[4]</sup>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量<sup>[5-6]</sup>可提高精炼渣吸收夹杂物的能力。近年,贾攀<sup>[7]</sup>对生产数据进行全方面统计,通过适当提高精炼渣黏度并降低其熔点,实现了更好的脱硫效果。邢凯等<sup>[8]</sup>研究表明,通过采用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-SiO<sub>2</sub> 高铝渣系、避免使用萤石、提高精炼渣中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 占比等措施可提高渣的碱度,有利于提高脱氧和脱硫;另外对于高 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 精炼渣,随碱度的增加表面张力也会增加,有利于促进钢中夹杂物上浮去除。杨建等<sup>[9-10]</sup>研究表

明,对于低碳低硅铝镇静钢,精炼渣中 SiO<sub>2</sub> 质量分数控制在 5% 以下,会导致精炼渣碱度高、流动性差、吸附夹杂物能力降低;提高渣中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量且降低熔点,可确保炉渣良好的流动性和吸附夹杂物能力的提高。武剑等<sup>[11]</sup>综合考虑炉渣碱度、流动性及脱硫效率,结合现场经验对低碳低硅铝镇静钢的快速脱硫工艺进行优化,结果表明合适的 CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 1.8~2.0(质量分数之比)、渣中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 质量分数应控制在 30% 左右。可见,精炼渣组分对其冶金功能的有效发挥尤为关键,但现有研究主要聚焦于 LF 炉精炼工艺下的精炼渣调控,缺乏吹氩精炼工艺下的精炼渣研究与控制技术。鉴于此,基于吹氩精炼低碳铝镇静钢精炼渣的热力学计算及熔化温度和黏度的测试,研究精炼渣组分对其理化性能的影响规律,获得最佳的成分控制范围,并建立精炼渣动态调控模型,以期实现生产实践中造渣物料的动态加入,有效提升钢水精炼效果。

## 1 实验方法

### 1.1 组分设计

于梅钢厂生产现场取低碳铝镇静钢的精炼渣样,采用 X 射线荧光光谱(X ray fluorescence, XRF)进行成分分析,结果如表 1,得到该渣系为 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-MgO-MnO-FeO 多组元混合体系。

表 1 吹氩精炼渣的主要成分

Tab. 1 Argon-blowing refining slag composition

w/%

w/%

编号	熔炼号	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	MnO	FeO
#1-Ar	4 028 167	41.68	27.16	10.57	5.33	2.65	5.81
#2-Ar	4 028 174	43.43	26.70	11.14	4.08	3.47	8.00
#3-Ar	4 028 181	44.37	32.47	6.04	4.50	2.44	3.65
#4-Ar	4 028 184	39.42	33.06	6.34	4.85	3.73	8.29
#5-Ar	5 028 422	45.70	29.74	7.28	4.13	2.05	3.79
#6-Ar	5 028 426	40.42	32.38	10.17	4.89	2.88	3.81
#7-Ar	5 028 437	34.33	39.43	6.78	3.50	3.96	5.15
#8-Ar	5 028 441	39.04	36.34	4.54	4.05	2.75	5.24
#9-Ar	5 028 448	41.24	38.42	4.39	5.13	1.99	3.05
#10-Ar	5 028 450	42.46	37.80	4.27	4.86	2.12	3.11

基于现场渣组分含量,设计表2所示精炼渣组分范围和计算步长。为实现实验点个数最少条件下的最优设计,首先采用单纯形格子法<sup>[12]</sup>设计渣样组分,基于精炼渣组分,固定MgO和MnO质量分数分别为4%和3%,设置FeO质量分数分别为2%,4%,6%,8%和10%,则CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>组成的单纯形格子试验点是四维空间的5个截面;然后采用单因素法设计组分,分析C/A(CaO与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的质量分数之比)与SiO<sub>2</sub>或FeO协同作用对精炼渣理化性能的影响。实验过程中采用国药分析纯试剂CaCO<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, MnO制备精炼渣样品,按照样品组分要求称量试剂,将其搅拌均匀并用感应炉预熔备用。值得注意的是,测试过程中,鉴于FeO的非稳定性,FeO以Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>形式加入,文中忽略Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>替换FeO对实验结果的影响。

表2 精炼渣组分范围及计算步长 w/%

组分	范围	步长
CaO	30~50	5
SiO <sub>2</sub>	0~20	5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25~45	5
FeO	2~10	2
MgO	4	
MnO	3	

## 1.2 热力学计算

采用FactSage 8.1热力学软件的Equilib与Viscosity模块分别计算表2所示精炼渣的液相线温度及熔渣黏度-温度曲线,采用熔渣组分表面张力因子计算其表面张力。采用Viscosity模块只能计算纯熔融态熔渣黏度,随温度降低,熔渣会析出固相,形成固液混合态,故需对固液混合相的黏度计算进行处理。根据计算得到的精炼渣液相线温度,当熔

渣处于纯液相状态时,基于FactSage的Viscosity模块直接计算其黏度;当渣系为固液混合状态时,利用Equilib模块计算该温度条件下的液相和固相组成比例,再用Viscosity模块计算液相组成的黏度,最后由Einstein-Roscoe公式<sup>[13-15]</sup>得到固液混合物的黏度。当缺乏密度数据时,可近似用质量分数代替体积分数。

## 1.3 实验测定

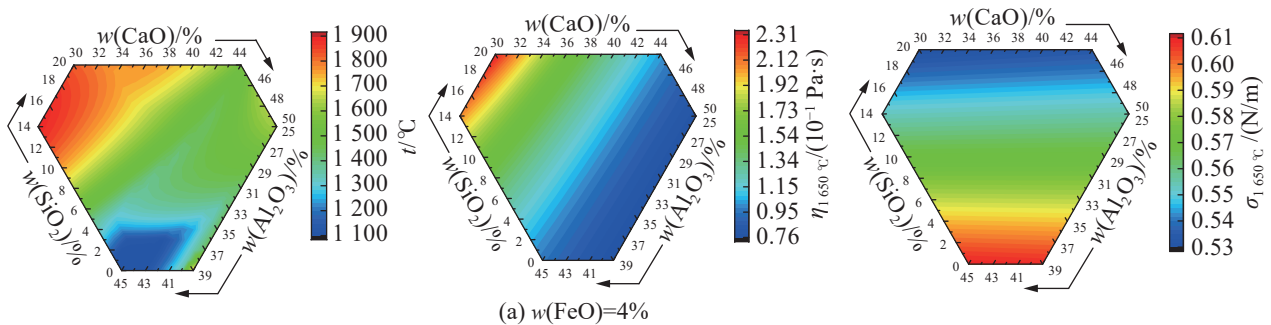
半球点熔化温度的测量:取实渣样30g,磨成粒径小于74 μm的粉末,加入少量无水乙醇混合,将其制成尺寸为3 mm×3 mm的圆柱体,再将其放入炉渣半球点熔点仪,以15 °C/min的升温速度加热,待样品高度减至原高度的1/2时,此时的炉温为半球点熔化温度。每个样品测试3次以上,直到其中2个测试结果的差值不超过10 °C,并选取3组相似数据的均值作为最终结果。

黏度的测量:基于炉渣熔体物性测定仪,采用旋转黏度计测量黏度。按照YB/T 185—2001连铸保护渣黏度试验方法,将试样放入氧化镁坩埚中,在氩气气氛(流量为0.5 L/min)下再将坩埚置于炉内加热至1 600 °C,保温10 min后进行黏度测试。在计算机上自动记录黏度数据,当数据稳定时,保存记录实验数据。

## 2 结果与讨论

### 2.1 精炼渣理化性能的热力学分析

由表2的精炼渣组分范围,设置FeO质量分数为2%,4%,6%,8%和10%,得出精炼渣的液相线温度( $t$ )、黏度( $\eta$ )和表面张力( $\sigma$ )的等值面图。鉴于现场精炼温度为1 650 °C左右,故计算1 650 °C条件下精炼渣的黏度( $\eta_{1650\text{ }^\circ\text{C}}$ )和表面张力( $\sigma_{1650\text{ }^\circ\text{C}}$ )。另外,现场精炼渣中FeO质量分数主要集中在4%和6%左右,故以此为例显示其计算结果,如图1。



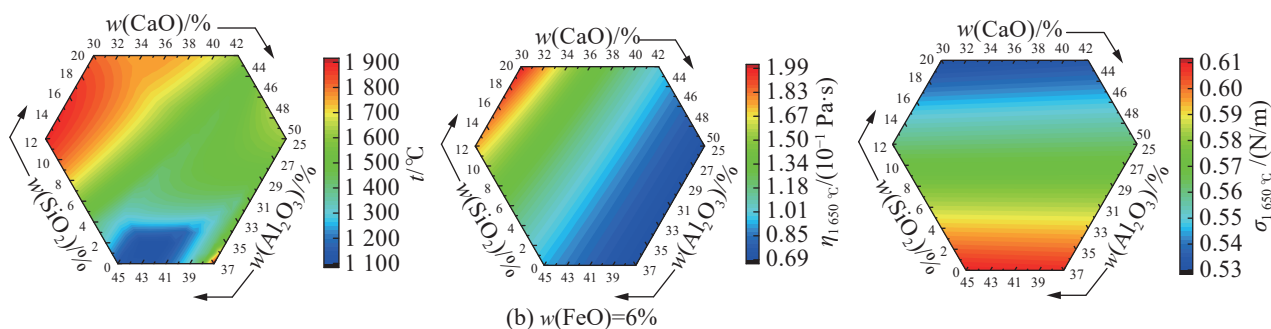


图1 精炼渣理化性能等值面图

Fig. 1 Isosurface diagram of physical and chemical properties of refining slag

由图 1 中的精炼渣液相线温度分析可知:  $\text{SiO}_2$  组分处于较低含量区间时, 渣系液相线温度较低 (低于  $1300\text{ }^\circ\text{C}$ ), 随  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的升高, 液相线温度降低; 当 FeO 质量分数从 2% 升高至 6% 时, 渣系液相线温度变化不大; 低温液相区主要分布在低  $\text{SiO}_2$ 、较高  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量区域。由图 1 中的  $1650\text{ }^\circ\text{C}$  黏度分析可知: 渣系黏度会随  $\text{SiO}_2$  含量增加而升高, 随 CaO 含量增加而不断降低, FeO 含量增加对渣系黏度影响不大; 低黏度区域主要集中在高 CaO、低  $\text{SiO}_2$  含量范围。由图 1 中  $1650\text{ }^\circ\text{C}$  表面张力分析可知: 渣系表面张力随 CaO 含量的增加而小幅增加, 随  $\text{SiO}_2$

含量增加而降低, 当 FeO 质量分数从 2% 增加到 6% 时, 低表面张力区域变化不大, 高表面张力区小幅增大; 高表面张力区域主要集中在高 CaO、低  $\text{SiO}_2$  含量区域。综合而言, 为获得精炼渣液相线温度较低、高温黏度较低、表面张力较高的理化性能, 组分范围应控制在低  $\text{SiO}_2$ 、较高 CaO、较高  $\text{Al}_2\text{O}_3$  组分区域。

### 2.1.1 C/A 与 $\text{SiO}_2$ 协同作用对精炼渣理化性能的影响

图 2 为渣中 C/A 与  $\text{SiO}_2$  含量对精炼渣液相温度线、 $1650\text{ }^\circ\text{C}$  黏度以及表面张力的影响, 同理选择 FeO 质量分数为 4% 和 6% 作为示例说明。

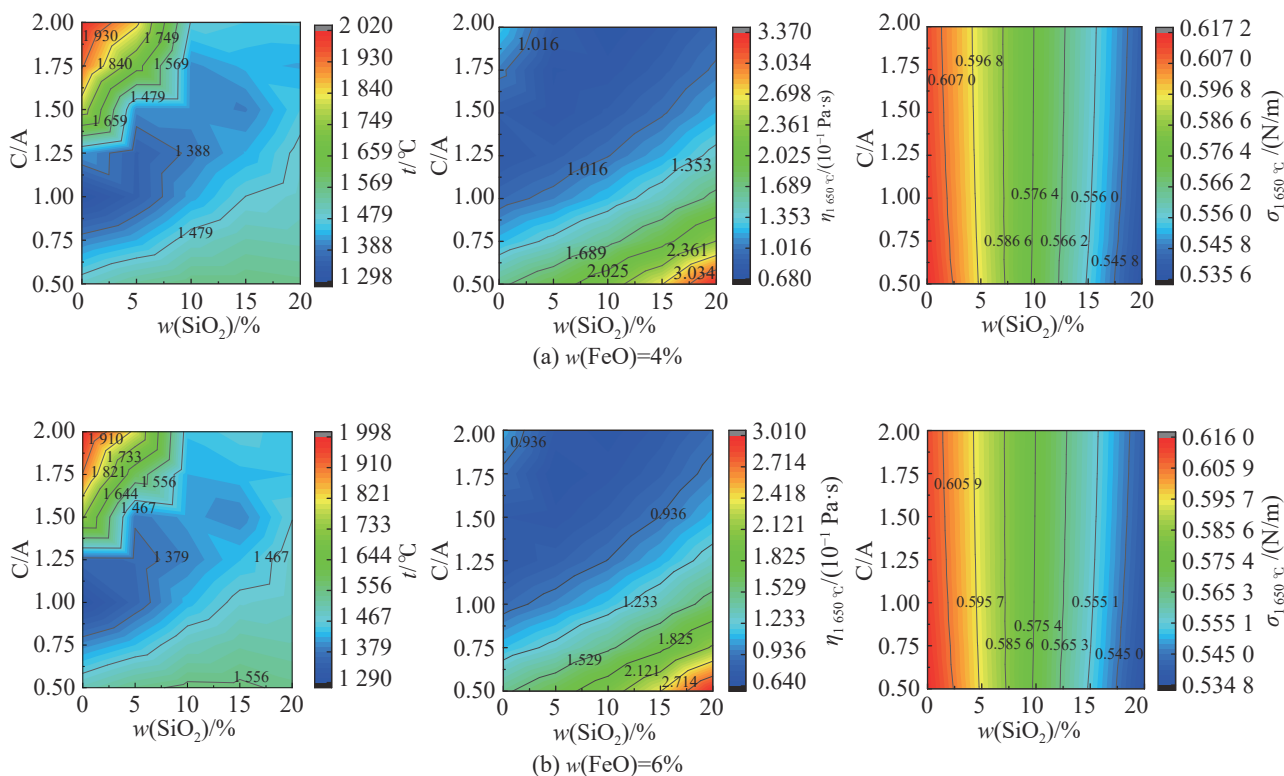


图2 C/A 和  $\text{SiO}_2$  含量对精炼渣液相温度线、 $1650\text{ }^\circ\text{C}$  黏度和表面张力的影响

Fig. 2 Effect of C/A and  $\text{SiO}_2$  content on liquidus temperature, viscosity and surface tension of refining slag at  $1650\text{ }^\circ\text{C}$

由图 2 可看出: 渣中 FeO 质量分数由 4% 增至 6% 时, 整体渣系液相线温度和  $1650\text{ }^\circ\text{C}$  黏度有所降低,

而  $1650\text{ }^\circ\text{C}$  表面张力有所增加。低温液相区集中在 C/A 为 0.75~1.25、 $\text{SiO}_2$  质量分数在 0~10% 范围;

当 C/A 为 1.25~2.00 时,只有当  $\text{SiO}_2$  质量分数为 10%~15% 时,才出现相对较低温度液相区。由 1 650  $^{\circ}\text{C}$  黏度分析,黏度较低的区域主要在 C/A 为 0.75~2.00 范围内。由 1 650  $^{\circ}\text{C}$  表面张力分析,同一 C/A 条件下,随  $\text{SiO}_2$  含量增加,表面张力单调减低;同一  $\text{SiO}_2$  含量下,随 C/A 比不断增加,表面张力变化不大,即表面张力主要受  $\text{SiO}_2$  含量影响。

### 2.1.2 C/A 与 FeO 协同作用对精炼渣理化性能的影响

图 3 为渣中 C/A 与 FeO 含量对精炼渣液相温度线、1 650  $^{\circ}\text{C}$  黏度以及表面张力的影响。渣中

$\text{SiO}_2$  质量分数为 5% 时,同一 FeO 含量下,随着 C/A 增加,液相线温度基本单调升高,但 1 650  $^{\circ}\text{C}$  黏度和表面张力单调降低且变化显著;同一 C/A 条件下,随着 FeO 含量增加,液相线温度和 1 650  $^{\circ}\text{C}$  黏度有较小幅度的降低,而 1 650  $^{\circ}\text{C}$  表面张力显著降低。渣中  $\text{SiO}_2$  质量分数为 10% 时,同一 FeO 含量下,随着 C/A 增加,液相线温度先降低后升高、1 650  $^{\circ}\text{C}$  黏度单调降低、1 650  $^{\circ}\text{C}$  表面张力单调增加;同一 C/A 条件下,随着 FeO 含量增加,液相线温度和 1 650  $^{\circ}\text{C}$  黏度有较小幅度的降低,而 1 650  $^{\circ}\text{C}$  表面张力显著降低。

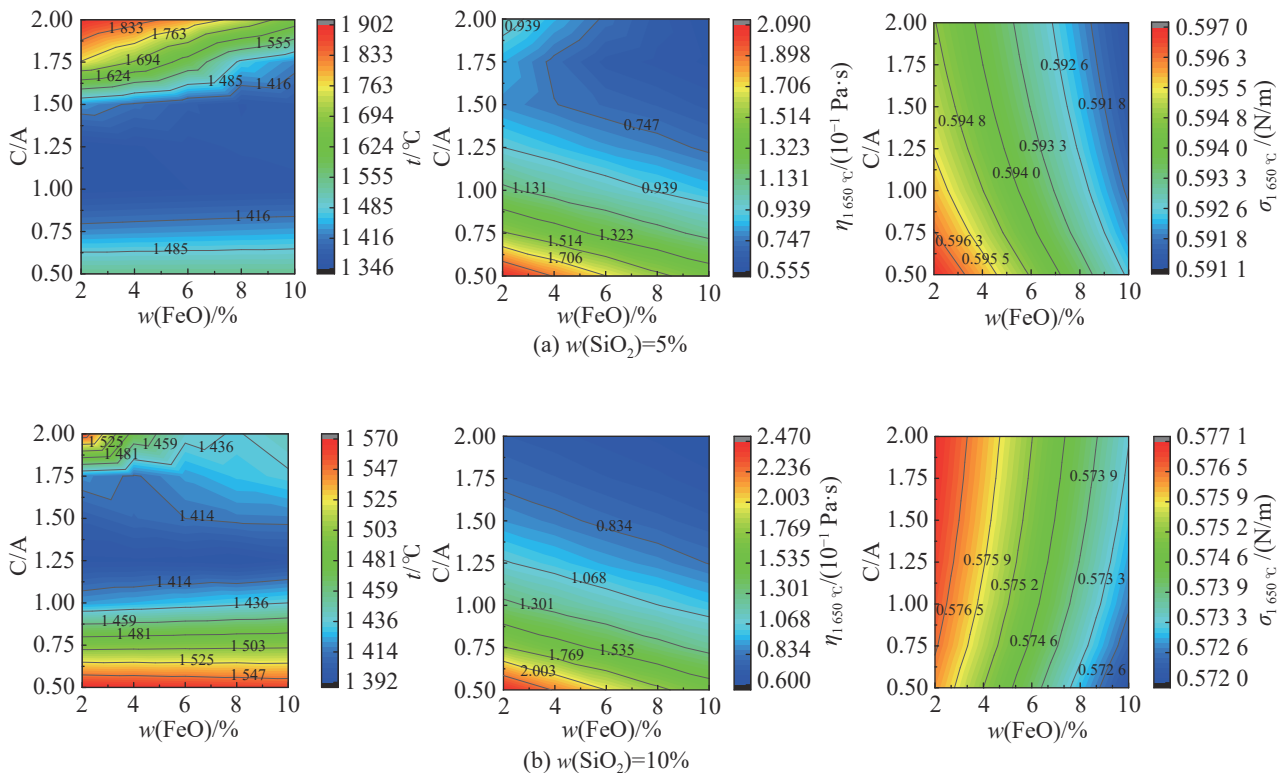


图3 C/A 和 FeO 含量对液相温度线、1 650  $^{\circ}\text{C}$  黏度以及表面张力的影响

Fig. 3 Effect of C/A and FeO content on liquidus temperature, viscosity and surface tension at 1 650  $^{\circ}\text{C}$

## 2.2 精炼渣理化性能的实验测试结果分析

温度和组分是影响精炼渣黏度最重要的因素<sup>[16-19]</sup>,基于热力学计算结果,选择  $\text{SiO}_2$  质量分数分别为 5% 和 10% 作为示例,固定 MgO 和 FeO 质量分数均为 4%,将 C/A 作为单因素变量,测试分析不同  $\text{SiO}_2$  含量条件下渣样的理化性能。

### 2.2.1 $\text{SiO}_2$ 质量分数为 5% 时 C/A 对精炼渣理化性能的影响

渣中  $\text{SiO}_2$  质量分数 5% 时,C/A 对精炼渣熔点和黏度的影响如图 4。由图 4 可见:渣中  $\text{SiO}_2$  质量分数 5% 时,随 C/A 的增加精炼渣熔点单调升高,且 C/A>1.00 时熔点升高幅度明显增加,这与热力学

计算液相线温度结果趋势相符。但测试结果低于计算结果,一方面是由于热力学计算为完全平衡态,而测试没有达到平衡;另一方面液相线温度为熔渣完全熔化温度,而测试的半球点温度为行业标准,低于完全熔化温度。另渣中  $\text{SiO}_2$  质量分数 5% 时,随 C/A 的增加,精炼渣黏度小幅升高,且随温度降低,升高幅度有所增加,这与热力学计算的结果有所区别。这是由于熔渣黏度受网络结构聚合度和过热度综合影响,1 650  $^{\circ}\text{C}$  时 C/A 增加使网络结构聚合度降低显著,致使熔渣黏度降低;实验测试温度时,随 C/A 的增加液相线温度升高,即熔渣过热度降低更显著,致使熔渣黏度小幅升高。

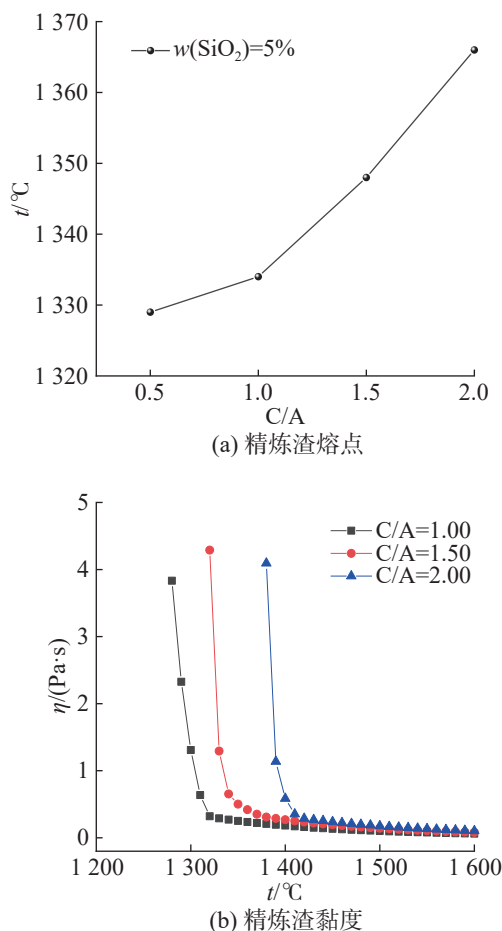


图4  $\text{SiO}_2$  质量分数为 5% 时 C/A 对精炼渣熔点和黏度的影响

Fig. 4 Effect of C/A on melting temperature and viscosity of refining slag at  $w(\text{SiO}_2)=5\%$

### 2.2.2 $\text{SiO}_2$ 质量分数为 10% 时 C/A 对精炼渣理化性能的影响

渣中  $\text{SiO}_2$  质量分数为 10% 时, C/A 对精炼渣熔点和黏度的影响如图 5。由图 5 可见, 渣中  $\text{SiO}_2$  质量分数为 10% 时, 随 C/A 的增加使精炼渣熔点呈先降后升趋势, 这与热力学计算结果一致。这是由于  $\text{SiO}_2$  含量较高时, C/A 在 0.50~1.50 范围增加, CaO 与  $\text{SiO}_2$  作用形成低熔点物质, 熔渣熔点降低, 但当 C/A 超过 1.05 时, CaO 过剩, 导致熔渣熔点逐渐升高; 另随 C/A 的增加, 炉渣高温黏度变化不大, 即精炼渣高温流动性均较好, 但黏度-温度曲线的转折温度升高, C/A 为 2.00 时, 转折温度近  $1400^\circ\text{C}$ 。精炼渣黏度是影响熔渣流动性及渣-金界面反应的重要因素, 液相中传质速率与熔渣的黏度成反比。一般而言, 精炼渣黏度过大, 会恶化渣-金界面作用的动力学条件, 适当降低精炼渣黏度可提高其流动性, 进而可减小乳化渣滴的平均直径, 增大渣-金接触面积; 精炼渣黏度过小, 精炼渣向耐火材料的渗透能力增

加, 会造成耐火材料损耗的增加。因此, 要求精炼渣黏度适中, 并具有一定的流动性。

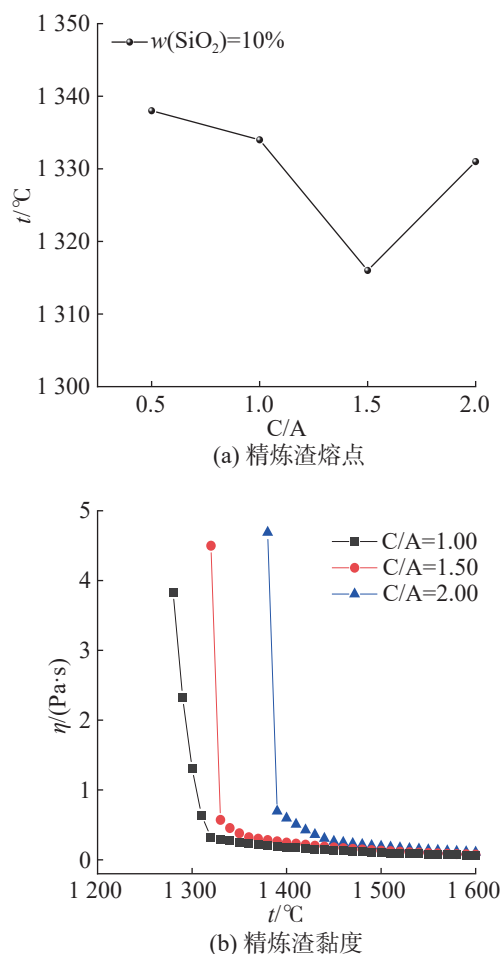


图5  $\text{SiO}_2$  质量分数为 10% 时 C/A 精炼渣熔点和黏度的影响

Fig. 5 Effect of C/A on melting temperature and viscosity of refining slag at  $w(\text{SiO}_2)=10\%$

### 2.3 低碳铝镇静钢精炼渣动态调控模型的建立与应用

基于以上精炼渣典型组分对理化性能影响规律研究, 针对上海梅山钢铁股份有限公司吹氩精炼低碳铝镇静钢冶炼工艺特点, 精炼渣的液相线温度应控制在 1 个较低水平, 才能实现其良好的流动性; 黏度适中且表面张力应适当提高, 使钢-渣界面张力增大, 促进钢-渣更好分离<sup>[20]</sup>。综合精炼渣理化性能的热力学分析及实验测定结果, 选择具备较低液相线温度、较高黏度、较高表面张力特点的精炼渣组分, 同时为尽可能地覆盖生产过程中的组分范围, 控制 C/A 为 0.75~1.50、 $\text{SiO}_2$  质量分数为 0~10%、FeO 质量分数为 2%~6%。通过上述建立的吹氩直上精炼渣动态调控模型, 指导现场低碳铝镇静钢转炉出钢过程的石灰和铝渣用量。

2023年1至6月份,将建立的吹氩直上精炼渣动态调控模型在梅钢二炼钢进行工业实验。提取模型投入前后的250组低碳铝镇静钢精炼渣渣样,其中模型投入前渣样220组,模型投入后渣样30组。对模型投入前后渣样的钙铝比(C/A)和全铁(TFe)含量进行统计,结果如图6。

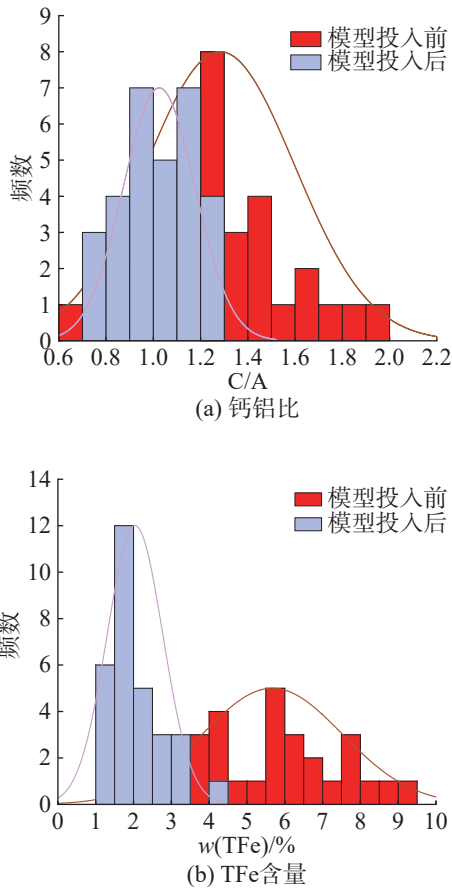


图6 低碳铝镇静钢精炼渣中钙铝比和TFe含量分布

Fig. 6 Distribution of C/A ratio and TFe content in refining slag of low carbon Al-killed steel

由图6可看出:模型投入前后C/A标准差由0.32降低为0.15,  $\pm 0.2$ 的符合率由56.3%提升为85.3%;TFe质量分数标准差由1.85降低为0.74,  $\pm 2\%$ 的符合率由46.9%提升为100%。结果表明,模型给出的加料方案,有利于大包顶渣成分的稳定,相比于石灰和铝渣固定量加入模式具有显著的优势。

同理根据模型投入前后的250个渣样,基于成分分析,计算每个渣样的液相线温度、1650℃黏度和表面张力,结果如图7。由图7可知:模型投入后,精炼渣的性能稳定性得到提升,液相线温度、黏度、表面张力的平均值分别稳定在1409.7℃, 0.0826 Pa·s, 0.5937 N/m,其中液相线平均温度降低6.9℃,熔渣熔化特性得到改善,有利于提高熔渣稳定性;工艺温度条件下黏度和表面张力平均值分

别增加0.0206 Pa·s和0.0109 N/m,有利于促进渣-金分离。

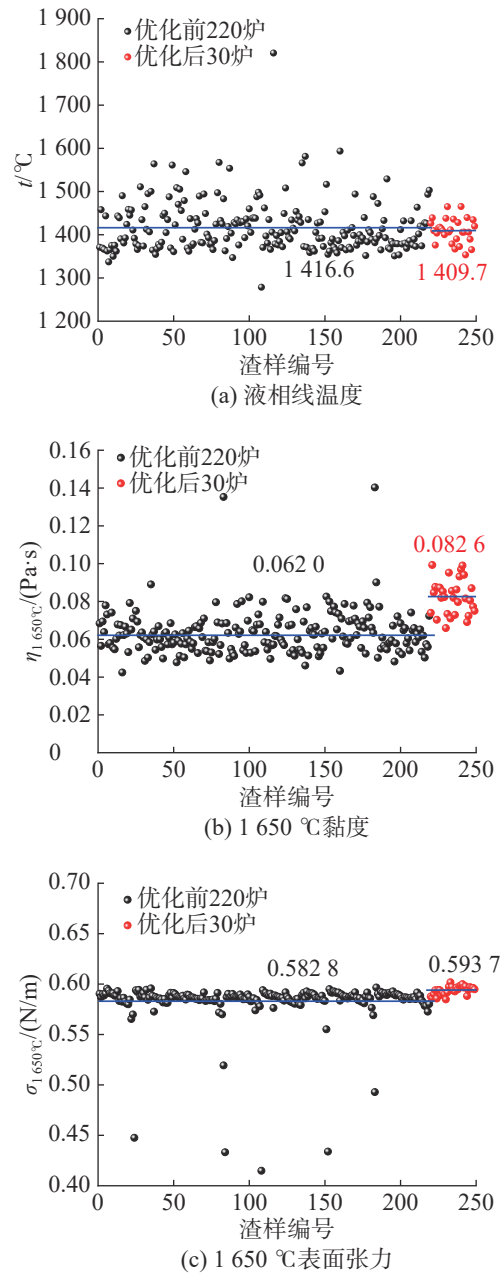


图7 低碳铝镇静钢精炼渣的液相线温度、1650℃黏度和表面张力的统计

Fig. 7 Statistics of liquidus temperature, 1650℃ viscosity and surface tension of refining slag for low carbon Al-killed steel

图8为吹氩站精炼结束时,低碳铝镇静钢水中全氧(TO)质量分数的变化情况。由图8可看出:模型投入前后,全氧质量分数均值由 $2.78 \times 10^{-3}\%$ 下降为 $2.25 \times 10^{-3}\%$ ,改进了19.1%;并且钢水全氧质量分数 $\leq 3.00 \times 10^{-3}\%$ 的比例由70.1%提升为89.4%,钢水的可浇性得到显著改善。进一步说明吹氩直上精炼渣动态调控模型投入使用后,实现了转炉出钢过程

石灰和铝渣用量的动态调整,稳定并调整了精炼渣的成分与性能,使精炼渣性能保持液相线温度低、黏度适中、表面张力较高的状态,有利于吸收  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂并促进钢-渣分离,钢水洁净度得到稳定提升。

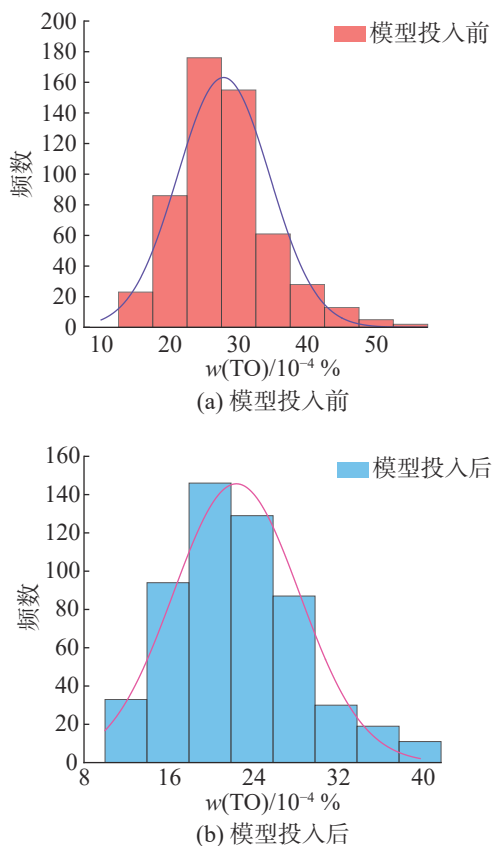


图8 出吹氩站低碳铝镇静钢水全氧含量变化

Fig. 8 Variation of total oxygen content in low carbon Al-killed steel after ladle argon stirring

### 3 结论

针对吹氩精炼低碳铝镇静钢精炼渣的物性参数控制精度差,吸附夹杂物能力波动大的现状,为提升低碳铝镇静钢水的可浇性,对低碳铝镇静钢精炼渣理化性能进行热力学计算以及实验测试研究,建立精炼渣动态调控模型,据此在生产实践中实现造渣物料的动态加入,得到如下主要结论为:

1) 设计组分范围内,渣中不同  $\text{SiO}_2$  含量时,随渣中 C/A 的增加,精炼渣熔点在  $\text{SiO}_2$  质量分数为 5% 时单调升高,而渣中  $\text{SiO}_2$  质量分数为 10% 时先降后升;另随渣中 C/A 的增加,精炼渣黏度及黏度-温度曲线上的转折温度升高。

2) 低碳铝镇静钢精炼渣的液相线温度应控制在 1 个较低水平,以实现其良好流动性;黏度应适中且表面张力应适当提高,使钢-渣界面张力增大,以

促进钢-渣更好地分离。适宜的精炼渣组分: C/A 为 0.75~1.50、 $\text{SiO}_2$  质量分数为 0~10%、FeO 质量分数为 2%~6%。

3) 采用建立的精炼渣动态调控模型可提升精炼渣物化性能的稳定性, C/A 和 TFe 含量标准差均有明显降低,且 C/A 在  $\pm 0.2$  范围的符合率由 56.3% 提升为 85.3%, TFe 质量分数在  $\pm 2\%$  范围的符合率由 46.9% 提升为 100.0%;同时精炼渣液相线温度、1 650  $^{\circ}\text{C}$  黏度和表面张力的平均值相应分别降低 6.9  $^{\circ}\text{C}$ 、增加 0.020 6  $\text{Pa}\cdot\text{s}$  和 0.010 9  $\text{N/m}$ 。模型应用后,吹氩精炼结束时的钢水全氧质量分数均值由  $2.78 \times 10^{-3}\%$  下降为  $2.25 \times 10^{-3}\%$ ,改进了 19.1%,并且钢水全氧质量分数  $\leq 3.00 \times 10^{-3}\%$  的比例由 70.1% 提升为 89.4%,钢水的可浇性得到显著改善。

#### 参考文献:

- [1] 王多刚,虞大俊,左康林. 吹氩钢脱氧铝消耗及脱氧工艺对夹杂物的影响 [J]. 钢铁, 2017, 52(6):45-51.
- [2] 刘成松,李京社,高晓杰,等. BOF-LF-CC 工艺生产 SPHC 钢的洁净度 [J]. 钢铁, 2015, 50(2):27-38,80.
- [3] 王宝,李任春,刘俊山,等. DC06 IF 钢精炼渣成分优化及钢-渣中氧的控制 [J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(4): 293-301.
- [4] 彭素云,赵玉钢. 唐钢 SPHD 吹氩直上工艺开发与应用 [J]. 冶金标准化与质量, 2018, 4(7):56-58.
- [5] 于会香,邱光元,郝丽霞,等. 精炼渣  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量对铝脱氧钢中夹杂物的影响 [J]. 炼钢, 2023(2):18-23
- [6] 朱苗勇,邓志银. 钢精炼过程非金属夹杂物演变与控制 [J]. 金属学报, 2022, 58(1):28-44.
- [7] 贾攀. 低碳铝镇静钢 LF 精炼工艺的研究 [J]. 冶金与材料, 2021, 41(5):25-26.
- [8] 邢凯,胡建东,张永集. 高  $\text{Al}_2\text{O}_3$  精炼渣冶炼铝镇静钢 [J]. 大型铸锻件, 2021(1):4-5,17.
- [9] 杨建,黄治成. 低碳低硅-铝镇静钢 C4C-Q 工艺优化实践 [J]. 特殊钢, 2022, 43(2):59-63.
- [10] 盖一铭,杨健. 低硅钢种 LF 精炼控硅脱硫技术进展 [J]. 炼钢, 2023, 39(3):1-15.
- [11] 武剑,周伟,赵梓云,等. 低碳低硅铝镇静钢快速脱硫工艺实践 [J]. 山西冶金, 2021, 44(5):48-50.
- [12] 鲍光达,吴婷,熊晨光,等.  $\text{CaF}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  对 KR 脱硫剂性能的影响研究 [J]. 炼钢, 2023, 39(4):13-20.
- [13] YOU D, BERNHARD C, MAYER P, et al. Modeling of the BOF tapping process: the reactions in the ladle [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2021,

- 52:1854–1865.
- [14] WANG K, XIA M, YAO Q F, et al. Low-temperature rheological properties and viscosity equation of Al/HTPB suspension system[J]. *Energetic Materials Frontiers*, 2024, 5(2):96–104.
- [15] HOTTIB A, RANGANATHAN P, SELOMULYA C, et al. A new empirical viscosity model for ceramic suspensions[J]. *Chemical Engineering Science*, 2011, 66(12):2798–2806.
- [16] 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.
- [17] DUCHESNE M A, BRONSCH A M, HHGHES R W, et al. Slag viscosity modeling toolbox[J]. *Fuel*, 2013, 114:38–43.
- [18] PATI A, SAHOO S K, MISHRA B, et al. Viscosity of industrial blast furnace slag in Indian scenario[J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2018, 71:801–812.
- [19] ZHOU J, SHEN Z, LIANG Q, et al. A new prediction method for the viscosity of the molten coal slag. Part 2: the viscosity model of crystalline slag[J]. *Fuel*, 2018, 220:233–239.
- [20] BAO G D, WU T, WANG D G, et al. Multi-model coupling-based dynamic control system of ladle slag in argon blowing refining process[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2023, 30:926–936.

责任编辑:何莉