

# TFe 对钒渣熔体物化性质影响的研究

杜昌武<sup>1</sup>, 陈 均<sup>2</sup>, 陈 炼<sup>2</sup>, 付新瑞<sup>3</sup>, 王丽君<sup>1,4\*</sup>

(1. 北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心, 北京 100083; 2. 攀钢集团研究院有限公司, 四川 攀枝花 617000; 3. 攀钢集团西昌钢钒有限公司, 四川 西昌 615000; 4. 北京科技大学绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**通过旋转柱体法和半球法研究了 FeO-SiO<sub>2</sub>-V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-MnO-CaO-MgO 体系的黏度和熔化特性, 探讨了全铁含量 (TFe) 对钒渣熔体物化性质的影响规律。结合 X 射线衍射 (XRD) 和扫描电镜 (SEM) 分析, 研究了钒渣在高温下的物相析出及其与黏度、熔点之间的关系。结果表明, 随着 TFe 含量的增加, 熔渣流动温度降低而黏度升高, 且在温度降低时黏度出现明显的转折点。高于转折温度时, TFe 变化对熔渣的黏度影响不显著, 而低于转折温度时, 钒渣的黏度随 TFe 的增加而显著升高。在提钒温度 1 350 °C 下, 熔渣析出相主要为高熔点尖晶石相, TFe 含量的增加促进了尖晶石相的析出且单颗粒长大的趋势, 导致熔体黏度骤增和熔化温度升高。研究结果为调控钒渣的物相组成和优化理化性能提供了理论依据。

**关键词:**钒渣; 尖晶石; TFe; 黏度; 熔点

中图分类号: TF111

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)01-0028-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.01.004

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Study on the effect of TFe on the physicochemical properties of molten vanadium slag

DU Changwu<sup>1</sup>, CHEN Jun<sup>2</sup>, CHEN Lian<sup>2</sup>, FU Xinrui<sup>3</sup>, WANG Lijun<sup>1,4\*</sup>

(1. Collaborative Innovation Center of Steel Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Pangang Group Research Institute Co., Ltd, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 3. Pangang Group Xichang Steel & Vanadium Co., Ltd., Xichang 615000, Sichuan, China; 4. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The viscosity and melting characteristics of the FeO-SiO<sub>2</sub>-V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-MnO-CaO-MgO system were investigated by rotating column method and hemispherical method, and the influence of total iron content (TFe) on the physicochemical properties of vanadium slag melts was discussed. Combined with X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) analysis, the phase precipitation of vanadium slag at high temperatures and its relationship with viscosity and melting point were investigated. The results showed that with the increase of TFe content, the slag flow temperature decreased while the viscosity increased, and there was an obvious transition point of viscosity when temperature decreased. Above this critical temperature, TFe content had negligible effect on the viscosity of the slag, while below the transition temperature, the viscosity of the vanadium slag increased dramatically with the increase in TFe. At the vanadium extraction temperature of 1 350 °C, the precipitated phase of the slag was mainly a high melting point spinel phase, and the increase in TFe content promoted the

收稿日期: 2025-03-20; 修回日期: 2025-04-14; 接受日期: 2025-04-25

基金项目: 国家自然科学基金 (52274406)。

作者简介: 杜昌武, 2000 年出生, 男, 河北省石家庄人, 硕士, 主要从事转炉提钒方向研究工作, E-mail: 723606310@qq.com;

\*通信作者: 王丽君, 1979 年出生, 女, 博士, 教授, 主要从事高品质特殊钢绿色冶炼制造、能源材料开发方面研究; E-mail: lijunwang@ustb.edu.cn。

precipitation of the spinel phase and the single particle became larger, resulting in a sudden increase in the viscosity of the melt as well as the melting temperature. The present work would provide a theoretical basis to some extent for optimizing the physical and chemical properties of vanadium slag.

**Key words:** vanadium slag; spinel; TFe; viscosity; melting point

## 0 引言

钒是现代钢铁工业的重要合金元素,其消费量的 90% 以上集中于钢铁领域<sup>[1]</sup>。全球已探明的钒资源中 98% 赋存于钒钛磁铁矿,该矿物中  $V_2O_5$  的含量可达 1.8%<sup>[2]</sup>,经冶炼可制得含钒铁水,之后可以通过转炉提钒的方式从含钒铁水中获得钒渣<sup>[3]</sup>,而后将获得的钒渣进行后续钠化焙烧或钙化焙烧,浸出后得到含钒溶液,最终沉降获得  $V_2O_5$ <sup>[4]</sup>。我国普遍采用转炉吹氧工艺,通过选择性氧化实现钒元素向渣相的富集。该工艺过程中,钒渣的物化性质直接影响提钒效率与钒产品的质量。

钒渣是多相体系,由尖晶石相( $(Fe,Mn)V_2O_4$ )、硅酸盐相( $MeSiO_4$ )及金属铁夹杂构成。其中,尖晶石相作为主要钒载体( $V^{3+}$ 占比超 80%)<sup>[5-6]</sup>,其颗粒被低熔点硅酸盐相包裹形成复合结构<sup>[7]</sup>。若硅酸盐相过多,不仅会包裹尖晶石相,导致尖晶石在焙烧工序中难以被破坏,还会导致部分钒溶解在硅酸盐相中无法被浸出<sup>[8-11]</sup>,造成钒资源的浪费。值得注意的是,钒渣中 FeO 含量往往超过 30%,过量的 FeO 不仅会降低钒渣品位,更造成了铁资源浪费与后续工艺能耗增加。工艺参数控制不当容易导致金属铁夹杂增多,使得回转窑结瘤黏炉,还会使钒的焙烧转化率降低<sup>[12]</sup>。

钒渣的黏度特性与熔化行为是决定提钒效率的关键理化指标<sup>[13]</sup>。转炉提钒过程需维持适宜温度窗口(1 350 ~ 1 450 °C),温度过高将引发碳过度氧化,导致半钢碳含量不足,温度过低则加剧渣相凝固,降低传质效率。而铁水中 Fe、Mn、Si 等元素的氧化属于放热反应,因此一般通过加入冷却剂的方式稳定熔池温度,达到提钒保碳的目的<sup>[13]</sup>。钒渣在提钒温度区间呈现尖晶石和硅酸盐两相共存特征,尖晶石相的析出会显著改变渣系的流变特性,当尖晶石相体积占比较高时,熔渣呈现非牛顿流体的性质,体系黏度呈指数级增长,直接影响渣-金分离效果。此外,由于钒渣的黏度较高且难以附着在炉衬上,以往炼钢工艺使用的溅渣护炉技术难以应用在提钒转炉上<sup>[14-16]</sup>。因此降低钒渣黏度对实际生产的顺行有重要意义。铁氧化物作为钒渣渣系的主要组分会影响熔体结构,转炉钒渣中的铁氧化物一般为 FeO。过量 FeO 将加剧尖晶石相与硅酸盐相的交互作用,

改变熔渣表面张力与界面润湿性,导致金属铁夹杂率升高。深入研究 FeO 对钒渣结构-性能的协同作用机制,对优化冷却制度、调控渣相组成具有重要理论价值。

## 1 试验过程

### 1.1 渣料准备

试验钒渣的成分配比见表 1。钒渣成分比例来自某钢铁公司的转炉钒渣,该钒渣中  $Al_2O_3$  的含量较低,为简化渣系,在此忽略不计。试验采用纯度 >99% 的  $FeC_2O_4$ 、 $SiO_2$ 、 $V_2O_3$ 、 $TiO_2$ 、 $MnO$ 、 $CaO$  和  $MgO$  配置成渣,温度高于 300 °C 时,  $FeC_2O_4$  会分解为 FeO。将上述原料按照表 1 中的比例混合均匀,并在液压机下压制成块以备使用。渣中的 TFe 即为渣中所有铁元素的质量百分比,包括金属铁和高价铁。在工业生产中,习惯使用 TFe 来代替 FeO 含量,而金属铁会在钒渣后处理的过程中被磁选筛分出去,因此试验钒渣中 TFe 的来源均为 FeO。

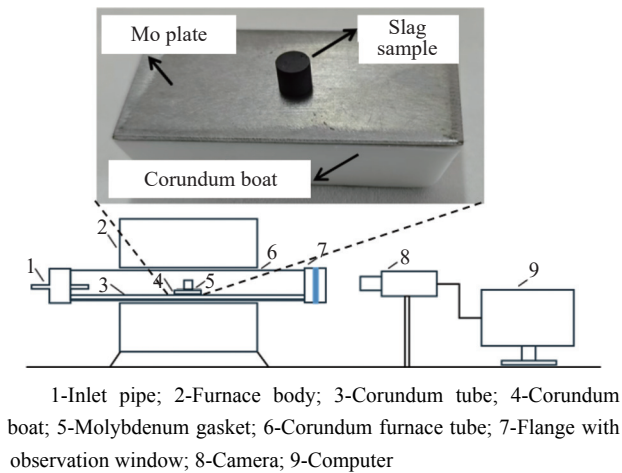
表 1 渣样的组成  
Table 1 Compositions of experimental slags %

FeO	$SiO_2$	$V_2O_3$	$TiO_2$	$MnO$	$CaO$	$MgO$	TFe
30.20	19.57	15.66	15.66	14.35	2.61	1.96	22.73
37.43	17.54	14.04	14.04	12.87	2.34	1.75	29.03
44.97	15.43	12.34	12.34	11.32	2.06	1.54	34.08

### 1.2 熔化温度的测定

采用半球点法测定熔渣的熔化性能。随着温度的升高,渣样逐渐软化流淌,定义渣样高度降低为初始的 75%、50% 和 25% 时对应的温度为熔渣的软化温度、半球点温度和流动性温度,通常以半球温度作为被测试样的熔点。图 1 为熔化试验的试验装置。试验前首先将配置好的渣料置于钼坩锅中升温至 1 600 °C 保温 1 h 后降温至 1 350 °C 预熔 2 h 并水淬。试验样品制备过程如下:将水淬渣依次进行破碎并研磨处理,经标准筛筛分至粒径小于 75  $\mu m$  后,称取 0.5 g 渣样,将其压制成直径为 6 mm、高度为 6 mm 的圆柱体试样。为保障高温试验稳定性,将制备的圆柱体试样置于 1 mm 厚钼垫片上,并整体安置于刚玉板表面。将试样推入横式炉的恒温带

区间,旋紧观察窗,调试摄像头焦距和位置,使摄像头与试样水平并在屏幕上呈现渣样清晰的轮廓。炉内通入流量为 0.5 L/min 的高纯氩气(纯度 >99.999%),试验温度控制程序为分段升温:首先以 5 °C/min 的速率将体系升温至 1 000 °C,随后将升温速率调整至 4 °C/min 继续升温至 1 200 °C,最终阶段采用 3 °C/min 的升温速率达到目标温度 1 500 °C。在升温过程中,通过高分辨率 CCD 相机对渣样的形貌进行监测并记录。



1-Inlet pipe; 2-Furnace body; 3-Corundum tube; 4-Corundum boat; 5-Molybdenum gasket; 6-Corundum furnace tube; 7-Flange with observation window; 8-Camera; 9-Computer  
图 1 熔化温度测定装置

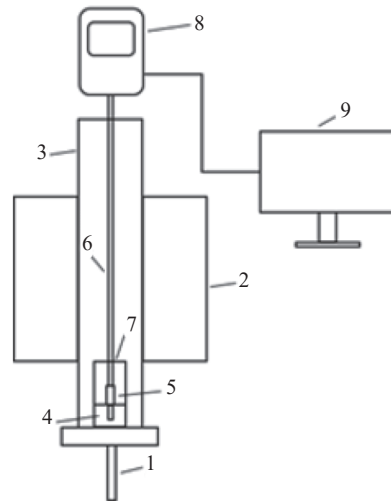
### 1.3 黏度的测定

试验采用旋转柱体法测定了熔渣在 1 300 ~ 1 600 °C 范围内的黏度,图 2 为黏度测定装置示意图。试验过程为:取 170 g 渣料加压成块,随后将制好的试样放入钼坩埚内。由于黏度测试时为开放系统,为防止渣料和坩埚氧化,将钼坩埚外套石墨坩埚放入硅钼炉中心。升温至 1 600 °C 保温 1 h 使熔渣充分熔化,全程通入高纯氩气作为保护气,流量为 0.5 L/min。Brookfield DV-2T 黏度计自动控制测量不同温度下钒渣的黏度。测试过程由高温向低温进行,降温速率为 3 °C/min。当降低至目标温度时,将炉子保温并开始测量黏度。在试验的温度区间内,钒渣的黏度变化较大,因此在高温测量时使用直径为 15 mm 的转子,随着温度的降低,在钒渣黏度超出大转子的量程后换用直径为 5 mm 的转子,以保证尽可能测得较为全面的数据。

### 1.4 物相平衡试验

使用图 1 中熔点测试的高温炉进行平衡物相试验。将压好的渣样放入钼坩埚内,再将钼坩埚放入钼硅棒加热炉中,通入 0.5 L/min 的氩气作为保护气

氛,升温至 1 600 °C,并保温 1 h 使渣反应完全。保温结束后以 3 °C/min 的速率降温至 1 350 °C,并保温 2 h 使物相达到平衡状态。保温时间结束后迅速将渣取出投入水桶中水淬。将水淬得到的部分渣样用导电树脂镶嵌并打磨抛光,喷金后使用 SEM 观察微观形貌,部分渣样破碎后过 75 μm 筛进行 XRD 检测(扫描范围  $2\theta$  为 10°~90°,扫描速率 10°/min),以获得其晶体结构。使用图像处理软件(Image Pro Plus)统计钒渣中尖晶石相与硅酸盐相的比例。Image Pro Plus 可统计出所选区域的面积、周长等信息,并且可以通过颜色差别自动识别尖晶石的边界。



1-Inlet pipe; 2-Furnace body; 3-Corundum furnace tube; 4-Slag to be tested; 5-Molybdenum rotor; 6-Corundum rod; 7-Molybdenum crucible; 8-Viscometer; 9-Computer  
图 2 黏度测定装置

图 2 Schematic illustration of viscosity measurement device

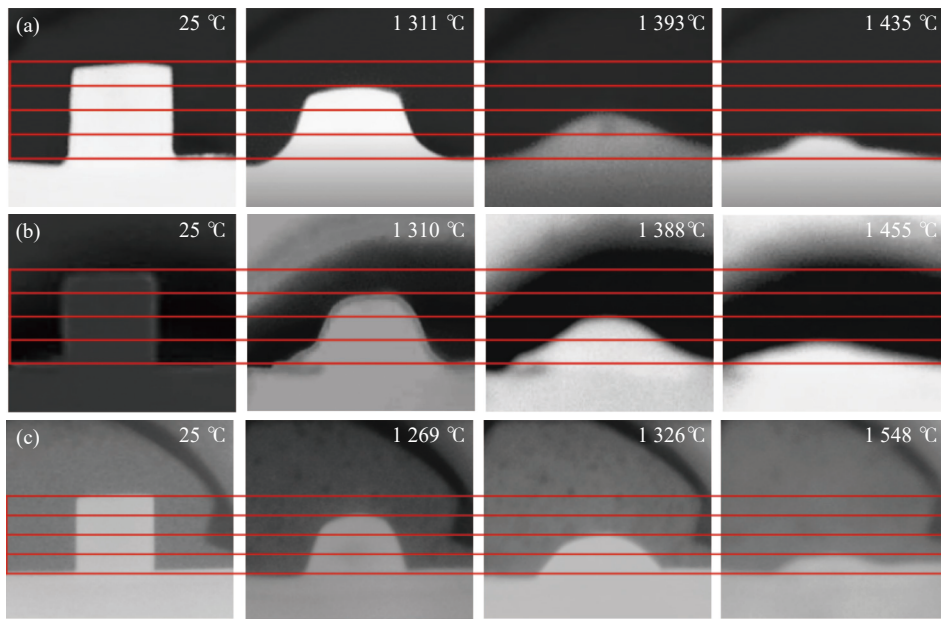
## 2 结果与讨论

### 2.1 TFe 对钒渣熔化过程的影响

使用半球点法测量了不同 TFe 含量钒渣的熔化温度。图 3 展示了在不同 TFe 含量条件下钒渣的熔化过程。由图 4 可清晰观测到,随着升温过程的进行,钒渣开始熔化并发生塌落现象。图 4 呈现了不同 TFe 含量的钒渣所对应的软化温度、半球温度、流动温度的变化趋势以及使用热力学计算软件 FactSage8.3 计算得到的完全熔化温度。结果表明,随着 TFe 含量从 22.73% 逐渐增加至 34.08%,钒渣的软化温度由 1 269 °C 升高至 1 311 °C,半球温度从 1 326 °C 提升至 1 393 °C, TFe 含量的升高提高了钒渣的软化温度和半球温度,而流动温度却从 1 548 °C 降至 1 435 °C。热力学计算结果显示,钒

渣的完全熔化温度伴随 TFe 含量的升高呈现出下降的趋势, 这与试验测得的流动性温度的变化规律一致。在 TFe 含量处于较低水平时, 经热力学计算所得的完全熔化温度与试验实测的流动温度近乎一致。但在 TFe 含量较高时计算值与试验值有较大差距, 这是因为试验测得的流动温度为试样高度降低为初始高度 25% 时的温度, 此时试样中仍有未熔化的尖晶石相。而 TFe 含量较高的钒渣中尖晶石相的含量会更高, 这就是导致其流动温度比理论熔点偏高的原因。

在实际的转炉提钒过程中, 温度通常处于 1 300~1 400 °C, 提钒终点温度大致稳定在 1 350 °C 左右。值得注意的是, 如果钒渣的熔点过高, 将会引发一系列不利于生产的状况, 如熔渣流动性显著降低, 致使出渣环节困难, 同时还极易出现出渣带铁量过多等问题。从前文所探讨的关于钒渣熔化特性与 TFe 含量的关系可知, TFe 含量在很大程度上决定了钒渣的熔点。因此, 在实际生产实践中, 适度降低钒渣中的 TFe 含量可有效降低熔渣的熔点, 提高钒渣的流动性。



(a)w(TFe)=34.08%; (b)w(TFe)=29.03%; (c)w(TFe)=22.73%

图 3 不同 TFe 含量下熔体的熔化过程

Fig. 3 Melting process of vanadium slags with different TFe contents

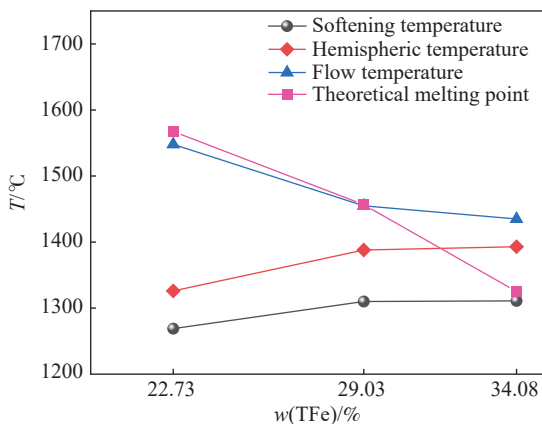


图 4 TFe 含量对熔化温度的影响

Fig. 4 Effects of TFe content on melting temperature

### 2.2 TFe 对钒渣黏度的影响

图 5(a) 呈现了不同 TFe 含量钒渣的黏度-温度曲线。从该图能够清晰地观察到, 当温度从 1 600 °C

逐步降至 1 500 °C 时, 钒渣的黏度呈现缓慢上升趋势, 但 TFe 含量升高对钒渣黏度降低的效果不明显。而当温度进一步由 1 500 °C 降低至 1 300 °C 时, 钒渣黏度则急剧上升, 且在此过程中, 随着 TFe 含量的升高, 钒渣的黏度也随之升高。在转炉提钒的温度区间, TFe 含量对钒渣黏度的影响非常显著。

高温区间, 钒渣表现出牛顿流体特征, 黏度和温度之间的关系可以用阿伦尼乌斯(Arrhenius)方程表示, 见式 (1)。

$$\ln \eta = \ln A + \frac{E_{\eta}}{RT} \tag{1}$$

其中  $\eta$  是黏度 (Pa·s),  $A$  是前指数因子 ( $s^{-1}$ ),  $R$  是理想气体常数 ( $J/(mol \cdot K)$ ),  $T$  是绝对温度 (K),  $E_{\eta}$  是黏滞活化能 ( $kJ/mol$ )。

黏滞活化能可以用来表示熔体流动所需要克服的潜在障碍,也是克服流体间阻力所需的最小能量。应该注意的是,熔渣活化能的变化意味着其结构的变化,否则该值是不变的<sup>[17]</sup>。图5(b)展示了 $\ln\eta$ 与 $10^4/T$ 之间的关联,并采用直线对其进行了分段拟合操作。由于直线斜率与黏滞活化能呈现正相关,因此当直线斜率发生改变时,说明熔渣的内部结构发生了变化。试验中钒渣的黏度-温度拟合曲线出现转折是因为尖晶石相的析出。将直线斜率发生改

变时对应的温度称为黏度转折温度 $T_{cv}$ 。由表2可知,随着TFe含量由22.73%升高至34.08%,转折温度随之升高。这是由于TFe含量的增加促进了尖晶石更早析出。当体系温度高于转折温度时,TFe含量的增加降低了钒渣的活化能。TFe对钒渣黏度的影响主要体现在温度低于转折温度时,钒渣的黏度随着TFe的升高而快速升高。这是因为温度较低时TFe含量的升高促进了尖晶石的析出和长大。

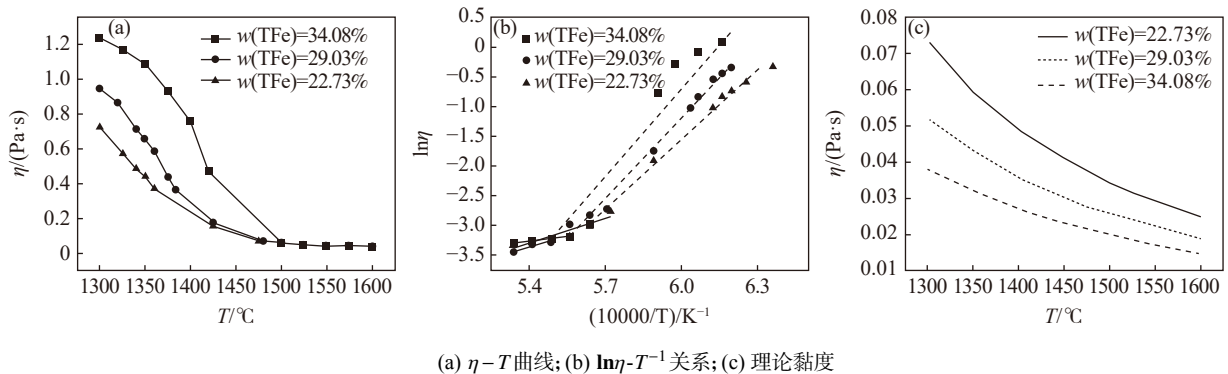


图5 不同TFe含量下熔体黏度与温度的关系

Fig. 5 Relationship between viscosity and temperature of melts at different TFe contents

表2 不同TFe含量钒渣黏度-温度曲线拟合结果  
Table 2 Fitting results of viscosity-temperature curves for vanadium slags with different TFe contents

w(TFe)/%	$T_{cv}/^{\circ}\text{C}$	$E_f/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	$\ln A/\ln(\text{Pa}\cdot\text{s})$
22.73	1 510	118.1	-11.0
29.03	1 532	97.3	-9.7
34.08	1 548	38.9	-28.9

图5(c)展示的是经由Factsage8.3热力学计算所得到的钒渣黏度。由图可知,钒渣黏度随着TFe含量的升高而呈现下降趋势。当温度高于1500℃时,通过试验所测得的黏度数值与理论计算所得的黏度数值相近。然而,在实际提钒温度条件下,理论计算所得的钒渣黏度仅约为0.03 Pa·s,而实际测量所获取的黏度数值却远高于此。造成这一差异的原因在于,热力学计算所得到的黏度是基于纯液相渣的理想模型,而在实际条件下,钒渣在1500℃时就开始析出尖晶石。这就意味着,在冶炼温度下,实际的钒渣处于尖晶石和硅酸盐两相共存的状态,在此状态下,渣的黏度会急剧增大,并且其黏度数值还受到尖晶石相的尺寸大小、含量占比以及形貌特征等诸多因素的复合影响。

### 2.3 TFe对钒渣物相的影响

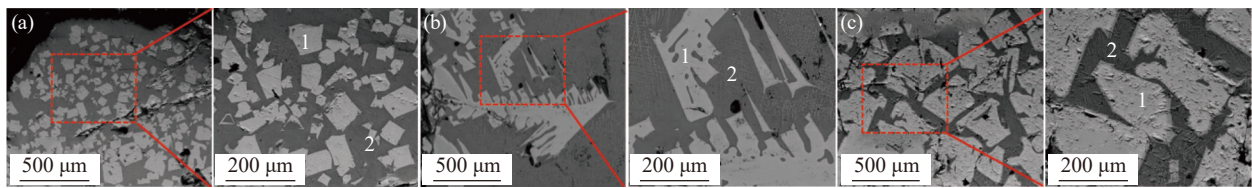
对试验钒渣进行了SEM+EDS分析,以获得其元素分布情况以及物相组成,高温淬冷的渣样保留了在高温下的物相。图6为不同TFe含量、不同倍率的1350℃高温淬冷渣样的SEM图像及EDS结果。其中,标记为1的浅灰色区域为富含钒的尖晶石相,标记为2的深灰色部分是硅酸盐相。钒渣中的FeO、V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、MnO的含量可达70%以上,而FeO可与V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、MnO结合形成尖晶石相,钒铁尖晶石和钛铁尖晶石的熔点较高,可达1700℃以上。因此在1350℃的温度下钒渣中会析出大量的尖晶石,硅酸盐相包裹在尖晶石相四周。TFe含量较低时尖晶石相的形状为简单的多边形,随着渣样TFe含量逐渐上升,析出尖晶石的尺寸明显增大且形状逐渐不规则。

根据图6中能谱点扫描的数据折算成氧化物的结果可知,FeO在硅酸盐相中略高于尖晶石中的分布,这说明虽然渣中的FeO含量较高,但部分FeO没有参与形成尖晶石,而是与SiO<sub>2</sub>结合生成硅酸盐。而V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>绝大部分富集在尖晶石中,其占尖晶石的质量可达34%~51%。MnO在硅酸盐相中的含量高于其在尖晶石中的含量;TFe含量较低时,TiO<sub>2</sub>大部

分富集在尖晶石相中, 而随着 TFe 含量的升高, TiO<sub>2</sub> 开始更多地进入到硅酸盐相中。Si 与 Fe、Mn、Ca、Ti 形成硅酸盐相而不进入到尖晶石相。图 7 为 TFe 含量为 22.73% 渣样的元素分布情况。由图 7 可见, V、Ti 主要富集在尖晶石相中, Si、Ca 和 O 则富集在硅酸盐相中, 而 Mg、Mn 和 Fe 的分布较为均匀。

图 8(a) 为不同 TFe 含量钒渣的 XRD 图谱, 由图可以看出, 钒渣在 1350 °C 时的组成主要为 (Fe,Mn)V<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 和 Fe<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub>, 但由钒渣 SEM 图可知 Fe<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub> 并未单独析出, 硅酸盐因为熔点较低难以结

晶。图 8(b) 统计了熔渣中不同 TFe 含量下尖晶石的体积分数与粒径, 随着 TFe 含量的升高, 熔渣中尖晶石的含量随之升高, TFe 含量由 22.73% 升高至 34.08%, 尖晶石含量由 23.4% 增加至 34.4%。尖晶石的平均粒径由 73 μm 升高至 519 μm。这可能是因为, 一方面 TFe 的增加降低了硅酸盐相的黏度, 改善了渣中的传质条件和尖晶石长大的动力学条件, 促使小尺寸尖晶石颗粒频繁碰撞、聚集, 最终生长成更大尺寸的尖晶石; 另一方面 TFe 含量地升高促进了生成尖晶石的化学反应正向进行。



w(TFe)/%	Position	y/%						
		FeO	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	MgO
22.73	1	45.98	34.80	0.62	0.18	8.03	9.48	0.92
	2	49.58	0.67	22.33	3.17	3.69	19.41	1.14
29.03	1	35.64	43.87	0.31	0.15	12.13	7.26	0.65
	2	44.49	2.45	19.48	3.30	13.64	15.53	1.10
34.08	1	34.91	51.06	0.23	0.25	6.76	6.32	0.47
	2	49.80	1.16	20.97	3.08	8.10	15.76	1.14

(a) w(TFe) = 22.73%; (b) w(TFe) = 29.03%; (c) w(TFe) = 34.08%; 1-尖晶石相; 2-硅酸盐相

图 6 不同 TFe 含量钒渣的 SEM 图及 EDS 结果

Fig. 6 SEM images and EDS results of vanadium slag with different TFe contents

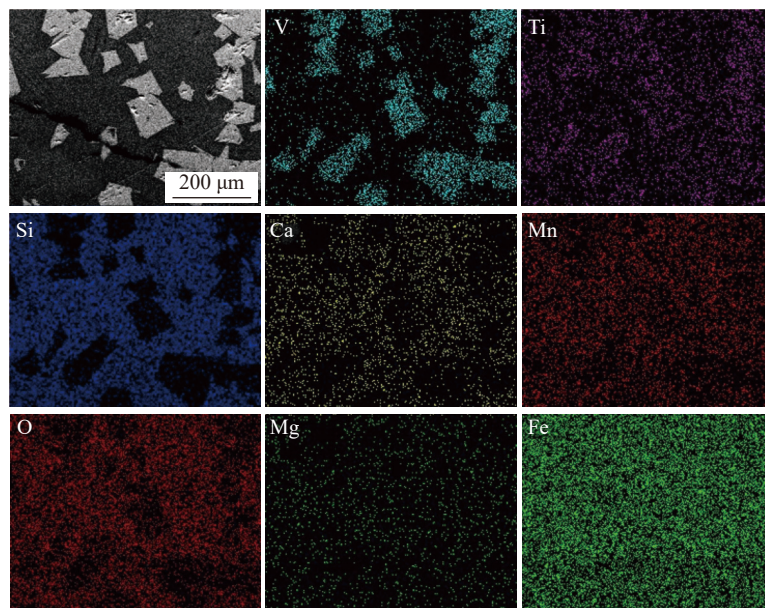
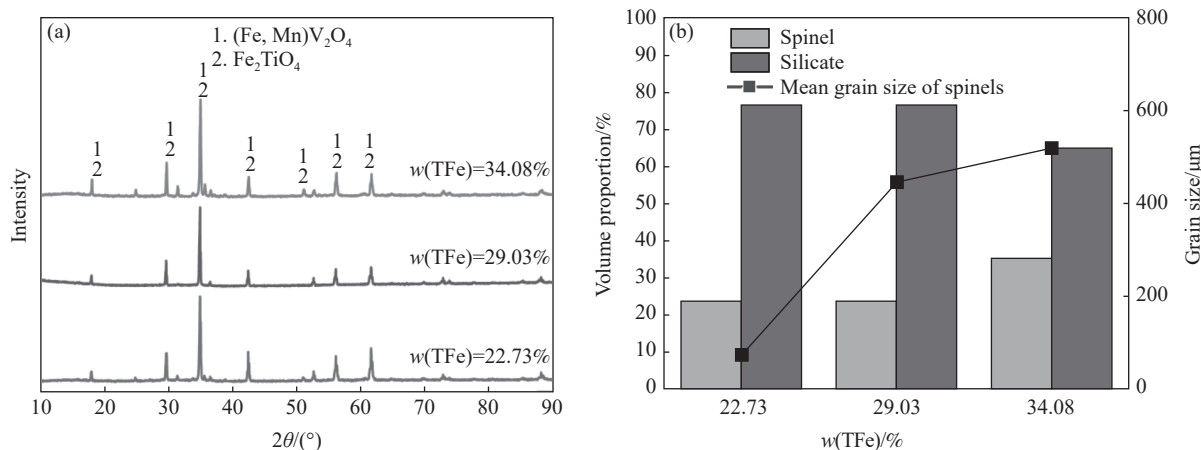


图 7 w(TFe)=22.73% 渣样的元素面扫描结果

Fig. 7 Elemental mapping result of w(TFe)=22.73% slag

鉴于尖晶石具备较高熔点的特性,在 TFe 含量偏高的钒渣体系内,高熔点的尖晶石所占比例增大,而硅酸盐相的占比相对较低。在升温过程中,尖晶石更难以熔化,故而表现为软化温度与半球温度偏高。随着温度进一步升高,高熔点的尖晶石也逐步

进入熔化状态,与此同时,碱性氧化物 FeO 在渣中充当网络破坏体的角色,促使硅酸盐相和尖晶石相的熔点进一步降低,最终使得熔渣在高温环境下的熔化进程得以加速推进。因此降低钒渣中的 TFe 含量有利于改善钒渣的黏流特性。



(a) 不同 TFe 含量渣样的 X 射线衍射图谱; (b) 尖晶石相、硅酸盐相含量和尖晶石粒径与 TFe 含量之间的关系

图 8 TFe 含量对物相组成及含量的影响

Fig. 8 The influence of TFe content on phase compositions and content

### 3 结论

通过半球点法测得了钒渣的熔化温度,使用旋转柱体法测量了钒渣的黏度,还通过高温平衡试验配合 SEM/EDS 对钒渣微观形貌进行分析。研究了关于 TFe 含量对钒渣物相析出、熔化性能和黏度的影响,具体结论如下:

1) TFe 增加有利于降低钒渣的流动性温度。随着 TFe 含量由 22.73% 增加至 34.08%,流动性温度由 1548 $^{\circ}\text{C}$  降低至 1435 $^{\circ}\text{C}$ 。但其升高了钒渣的半球点温度,这是因为高含量的 TFe 促进了高熔点尖晶石的析出和长大。

2) 熔渣黏度随温度的降低而增大,黏度会出现骤增的转折点,温度低于转折点时, TFe 含量的升高会极大地促进钒渣黏度增长,这是因为熔渣中析出

了尖晶石。在提钒温度 1350 $^{\circ}\text{C}$  下,随着 TFe 含量由 22.73% 增加至 34.08%,黏度由 0.44 Pa·s 升高至 1.02 Pa·s;黏度的转折温度由 1510 $^{\circ}\text{C}$  升高至 1548 $^{\circ}\text{C}$ 。

3) 试验钒渣在 1350 $^{\circ}\text{C}$  的物相主要为 (Fe, Mn) $\text{V}_2\text{O}_4$  尖晶石相和硅酸盐相,其中硅酸盐相的含量高于尖晶石。随着 TFe 含量由 22.73% 增加至 34.08%,尖晶石的析出量由 23.4% 增加至 34.4%;尖晶石的平均尺寸由 73 $\mu\text{m}$  升高至 519 $\mu\text{m}$ 。尖晶石的大量析出以及长大导致了钒渣半球温度的变化和提钒温度下钒渣黏度的骤增。为保证获得较大尺寸尖晶石的同时又能一定程度上降低钒渣的流动温度和黏度,将 TFe 含量控制在 29.03%~34.08% 较为合适。

### 参考文献

- [1] CHEN D H. Technology development trend of vanadium containing steel in China[J]. Non-ferrous Metals of China, 2010: 40-41.  
(陈东辉. 中国含钒钢技术发展趋势[J]. 中国有色金属, 2010: 40-41.)
- [2] TAYLOR P R, SHUEY S A, VIDAL E E, *et al.* Extractive metallurgy of vanadium containing titaniferous magnetite ores: are view[J]. Minerals and Metallurgical Processing, 2006, 23(2): 80-86.
- [3] LIU W H, DU Y W, LIU Y W, *et al.* Research progress of removing vanadium from hot metal[J]. Henan Metallurgy, 2016,

- 24(4): 26-29.  
(刘文浩, 杜亚伟, 刘玉敏, 等. 含钒铁水提钒工艺的发展[J]. 河南冶金, 2016, 24(4): 26-29.)
- [ 4 ] ZHENG S L, DU H, WANG S N, *et al.* Efficient and cleaner technology of vanadium extraction from vanadium slag by sub-molten salt method[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2012, 33(1): 15-19.  
(郑诗礼, 杜浩, 王少娜, 等. 亚熔盐法钒渣高效清洁提钒技术[J]. 钢铁钒钛, 2012, 33(1): 15-19.)
- [ 5 ] CAO P. Research on vanadium slag roasted with calcium salt[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2012, 33(1): 30-34.  
(曹鹏. 钒渣钙化焙烧试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2012, 33(1): 30-34.)
- [ 6 ] CHEN D H, YANG S D. Theoretical study on chemical formation of vanadium slag[J]. *Hebei Metallurgy*, 1993(5): 32-40.  
(陈东辉, 杨树德. 钒渣化学形成理论研究[J]. 河北冶金, 1993(5): 32-40.)
- [ 7 ] HUANG Q Y. Basic research on the related technology of high efficient extraction of vanadium from hot metal by BOF[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.  
(黄青云. 转炉高效提钒相关技术基础研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.)
- [ 8 ] ZHAI T H, WANG L, MA B Z, *et al.* Crystallization control mechanism of molten vanadium slag for effective vanadium transformation and extraction[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2024, 34(2): 537-548.  
(翟婷好, 王玲, 马保中, 等. 熔融钒渣析晶调控高效提钒机理[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(2): 537-548.)
- [ 9 ] SHI Z X. Study on the structure of vanadium-containing phase and its evolution during the calcination and leaching processes for calcification extraction of vanadium[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2016, 37(5): 15-19.  
(史志新. 钙化提钒焙浸工艺中含钒物相结构及其演变规律研究[J]. 钢铁钒钛, 2016, 37(5): 15-19.)
- [ 10 ] LUO F H. Residual vanadium mechanism of extracted vanadium tailings by calcified roasting and their vanadium re-extraction process[J]. Shenyang: Northeastern University, 2019.  
(罗富怀. 钙化焙烧提钒尾渣残钒机制及其再提钒工艺研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.)
- [ 11 ] LIU S. Technique and mechanism of oxidation roasting of vanadium slag produced from Pangang Group[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.  
(刘爽. 攀钢钒渣氧化焙烧工艺及其机制研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.)
- [ 12 ] SHI Z X, LIU J Y. Mineralogical characterization of physical phases in vanadium slag roasting process[J]. *Metallurgical Analysis*, 2014, 34(7): 12-17.  
(史志新, 刘锦燕. 钒渣焙烧过程中物相的矿物学特征探讨[J]. 冶金分析, 2014, 34(7): 12-17.)
- [ 13 ] ZENG X L. Research on physicochemical properties and phase diagram of vanadium slag[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.  
(曾晓兰. 钒渣物化性质与相图研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.)
- [ 14 ] WANG S, WANG L, GONG B, *et al.* Optimization practice of low iron consumption vanadium extraction process in converter[J]. *Shanxi Metallurgy*, 2023, 46(12): 186-187, 190.  
(王松, 王林, 龚波, 等. 转炉低铁耗提钒工艺的优化实践[J]. 山西冶金, 2023, 46(12): 186-187, 190.)
- [ 15 ] CHEN L, YANG S X, DIAO J, *et al.* Experimental study on slag splashing with modified vanadium slag[J]. *Steelmaking*, 2022, 38(1): 26-31.  
(陈炼, 杨森祥, 刁江, 等. 提钒转炉溅渣护炉试验研究[J]. 炼钢, 2022, 38(1): 26-31.)
- [ 16 ] YANG J, FU Z S. Discussion on the cause of damage of resistant material and the maintenance of lining of converter for extracting vanadium[J]. *Gansu Metallurgy*, 2024, 46(3): 63-66.  
(杨军, 富志生. 提钒转炉耐材损毁原因及炉衬维护探讨[J]. 甘肃冶金, 2024, 46(3): 63-66.)
- [ 17 ] XING X, PANG Z, MO C, *et al.* Effect of MgO and BaO on viscosity and structure of blast furnace slag[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2020, 530.