

# 含钛微合金钢保护渣固态渣膜 析晶传热性能研究

刘国旗<sup>1,2</sup>, 徐子谦<sup>1,2\*</sup>, 司旭林<sup>3</sup>, 孔麒畅<sup>3</sup>, 黄伟丽<sup>1,2</sup>, 王杏娟<sup>3</sup>

(1. 德龙钢铁有限公司技术中心, 河北 邢台 054009; 2. 河北省热轧板带钢技术创新中心, 河北 邢台 054009; 3. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063210)

**摘要:** 保护渣固态渣膜是结晶器和铸坯间的关键介质。基于渣膜热流模拟仪制取的含钛微合金钢保护渣固态渣膜, 对渣膜的厚度、孔隙度、粗糙度等物理性质进行分析; 使用 XRD、扫描电镜、矿相显微镜分析渣膜的析晶性能; 此外, 对渣膜的热阻、热流密度等传热性能进行研究。研究表明, 渣膜表面粗糙度在固态渣膜凝固初期就已形成, 受液渣温度变化影响明显; 固态渣膜呈现玻璃态和结晶态两层结构, 且矿相主要为钙钛矿; 铜探头浸入液渣初期, 热流密度迅速增大, 当水冷铜探头浸入液渣时间 13 s 时, 保护渣的热流密度均到达了最大值, 分别为 0.988、1.208 MW/m<sup>2</sup> 和 1.355 MW/m<sup>2</sup>, 随着铜探头浸入时间的增加, 固态渣膜逐渐变厚, 热阻变大, 热流密度逐渐降低。

**关键词:** 保护渣; 渣膜; 析晶; 传热; 含钛合金钢

中图分类号: TF065; TF777

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)01-0149-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.01.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音  
聊科研  
与作者互动

## Study on crystallization and heat transfer performance of solid slag film in mold flux for titanium-bearing microalloyed steel

LIU Guoqi<sup>1,2</sup>, XU Ziqian<sup>1,2\*</sup>, SI Xulin<sup>3</sup>, KONG Qichang<sup>3</sup>, HUANG Weili<sup>1,2</sup>, WANG Xingjuan<sup>3</sup>

(1. Technical Center, Delong Steel Co., Ltd., Xingtai 054009, Hebei, China; 2. Hebei Hot Rolled Plate and Strip Technology Innovation Center, Xingtai 054009, Hebei, China; 3. College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China)

**Abstract:** The solid slag film of mold flux is a key medium between the mold and the continuous casting slab. Based on the solid slag film of mold flux for Ti-containing microalloyed steel prepared by a slag film heat flux simulator, the physical properties of the slag film, such as thickness, porosity, and roughness, were analyzed. XRD, scanning electron microscopy (SEM), and mineral phase microscopy were used to analyze the crystallization performance of the slag film. In addition, the heat transfer properties of the slag film, including thermal resistance and heat flux density, were studied. The results show that the surface roughness of the slag film is formed at the initial stage of solidification of the solid slag film and is significantly affected by the temperature of the liquid slag. The solid slag film has a two-layer structure: glassy and crystalline, with perovskite as the main mineral phase. At the initial stage when the copper probe is immersed in the liquid slag, the heat flux density increases rapidly. When the water-cooled copper probe is immersed in the liquid slag for 13 seconds, the heat flux densities of the mold

收稿日期: 2025-12-09; 修回日期: 2025-12-18; 接受日期: 2025-12-25

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(246Z1007G); 国家自然科学基金(52374335, 51974133)。

作者简介: 刘国旗, 1970 年出生, 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为钢铁冶金技术与研究, E-mail: 652164366@qq.com;

\*通信作者: 徐子谦, 1989 年出生, 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为钢铁冶金技术, 连铸保护渣, E-mail: xzqjszx123123@126.com。

flux reach their maximum values, which are  $0.988 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  $1.208 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$ , and  $1.355 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$  respectively. With the increase of the immersion time of the copper probe, the solid slag film gradually thickens, the thermal resistance increases, and the heat flux density decreases gradually.

**Key words:** mold flux; slag film; crystallization; heat transfer; Ti-containing alloy steel

## 0 引言

含钛微合金钢凭借钛元素与碳、氮形成的碳氮化物带来的细晶强化、沉淀强化效应,在建筑工程、工程机械、油气输送管道等领域展现出优异的强韧平衡性能与抗疲劳性能,已成为现代钢铁工业向“高强度、轻量化、长寿命”发展的核心钢种之一<sup>[1-3]</sup>。

在连铸过程中,保护渣控制传热功能的实现主要依靠结晶器一侧的固态渣膜实现<sup>[4]</sup>。渣膜的厚度和表面粗糙度受保护渣渣膜矿相的影响,而渣膜的厚度和表面粗糙度影响到渣膜的润滑和传热性能<sup>[5]</sup>。因此,保护渣的固态渣膜直接决定了铸坯凝固速率、坯壳均匀性及表面质量。为了研究渣膜形成过程中的传热行为,WEN等<sup>[6-7]</sup>利用浸入式水冷铜探头制取固态渣膜,并观察到渣膜靠近铜探头一侧晶体密集且尺寸较小,而靠近液渣一侧的晶体以树枝状和块状为主。此外,结晶器内固态渣膜表面粗糙度是控制结晶器传热和润滑的关键因素之一<sup>[8]</sup>。随着结晶层厚度的增加,辐射传热系数大大降低<sup>[9]</sup>。何峰等<sup>[10]</sup>研究了析晶行为对结晶器内部传热的影响,其试验结果表明,随着保护渣渣膜中晶相含量的提高,渣膜的热阻提高,减小了铸坯与结晶器之间的热辐射,并表明热阻的增加主要是由于空气间隙的形成造成的。由于渣膜玻璃层中晶体的析出,渣膜微区会有一定的体积收缩,进而促使固渣膜表面(与结晶器壁接触侧)粗糙度增大以达到控制传热的目的。龙潇等<sup>[11]</sup>在研究固渣膜结晶行为中发现,当渣膜厚度增加时,保护渣固渣膜热阻较低,渣膜孔隙率大,在一定程度上控制了固渣膜厚度的持续增加,保证液渣膜对铸坯的润滑。此外,该团队的其他研究表明<sup>[12]</sup>,渣膜表面粗糙度与渣膜凝固初期玻璃层内气孔的析出行为及玻璃层凝固收缩有直接联系,开放气孔在渣膜表面(与水冷铜壁接触)的生成增加了其粗糙度。现有的研究大多是基于改善现有渣开展的,并未对含钛微合金钢保护渣固态渣膜进行研究。

为了深入分析含钛微合金钢保护渣润滑铸坯和控制传热的作用,对含钛微合金钢保护渣的固态渣膜冶金特性进行了研究。使用结晶器渣膜热流模拟仪制取保护渣固态渣膜,对固态渣膜的厚度、孔隙度、粗糙度等物理性质进行分析,通过XRD、3D形

貌仪、扫描电镜等观察固渣膜微观结构及矿相组成,揭示固态渣膜的析晶及传热特性。

## 1 研究方法

### 1.1 保护渣成分及性能

研究选用某厂含钛微合金钢用保护渣,其成分及性能见表1。保护渣中主要成分有CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>,熔点为1070℃,黏度为0.37 Pa·s。

表1 含钛微合金钢保护渣成分及性能  
Table 1 Composition and properties of mold flux for titanium-bearing microalloyed steel

Composition/%										Viscosity/ (Pa·s)	Melting temperature/°C
CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	BaO	Na <sub>2</sub> O	MgO	Li <sub>2</sub> O	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Tc		
24	24.2	10.1	4.0	9.9	8.1	3.0	0.9	8.2	8.1	0.37	1070

### 1.2 保护渣渣膜的制备

含钛微合金钢保护渣渣膜的制取采用HF-201型结晶器渣膜热流模拟仪,装置如图7所示。试验过程如下:

1)将硅钼炉升高至不同温度(1200、1300、1400℃)。随后将铜探头缓缓下降,直至完全浸没在坩埚中的液渣中。

2)有研究表明<sup>[11]</sup>,探头浸入时间超过45s后,渣膜的生长和传热达到稳态。因此,在研究中分别控制水冷铜探头在三种不同液渣温度中停留15、30、45s和60s。达到所需时间后,将水冷铜探头从液渣中取出,并获得固态渣膜和热流密度。

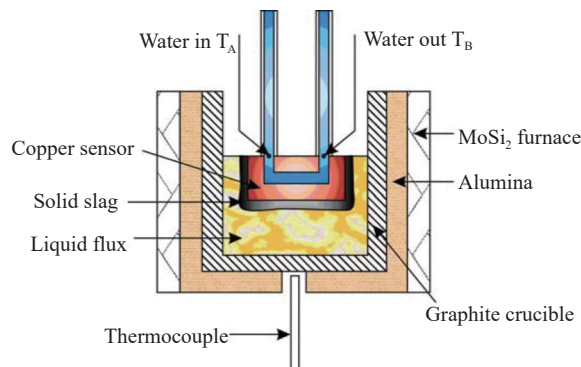


图1 结晶器渣膜热流模拟  
Fig. 1 Mold flux film heat flux simulation

### 1.3 保护渣固态渣膜物理性质测定

1)采用密度差法对保护渣固态渣膜进行孔隙度

测试, 孔隙度公式如式(1)所示<sup>[12]</sup>。

$$P_c = \frac{\rho_t - \rho_a}{\rho_t} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $P_c$ 为渣膜闭孔率, %;  $\rho_t$ 为渣膜的真密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $\rho_a$ 为渣膜的表观密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

2) 研究采用 3D 形貌扫描仪来测定保护渣固态渣膜的表面粗糙度。

### 1.4 保护渣固态渣膜析晶传热性能测定

#### 1) 析晶性能测定

使用 XRD、扫描电镜和矿相显微镜观察保护渣固态渣膜的成分及矿相结构。

#### 2) 传热性能测定

为了准确得到保护渣固态渣膜的有效导热系数, 需要合理分析并计算结晶器热流模拟仪中热阻对应的热量损失, 并结合该保护渣固态渣膜厚度等参数进行计算。热量从液渣传递到铜探头壁的过程中涉及到多个热阻, 分别为冷却水的热阻、铜探头的热阻、铜探头与液渣之间的热阻、保护渣固态渣膜的热阻, 如图 2 所示。

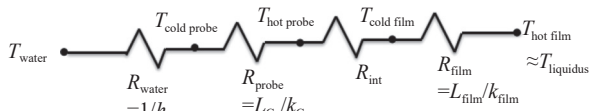


图 2 结晶器热流模拟仪热阻

Fig. 2 Thermal resistance of mold heat flux simulator

由傅里叶导热定律得到冷却水与液渣之间的总热阻如式(2)所示。

$$R = \frac{\Delta d}{k} = \frac{\Delta T}{q} = \frac{T_{\text{liquid}} - T_{\text{water}}}{q} \quad (2)$$

式中:  $R$  为热阻,  $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ;  $k$  为导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $q$  为热流量,  $\text{W}$ ;  $\Delta d$  为传热路径的长度,  $\text{m}$ ;  $\Delta T$  为传热路径两端温差,  $\text{K}$ ;  $T_{\text{liquid}}$  为液渣温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{water}}$  为铜探头冷却水温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

固态渣膜热阻见式(3)。

$$R_{\text{film}} = \frac{L_{\text{film}}}{k_{\text{film}}} \quad (3)$$

式中:  $L_{\text{film}}$  为固态渣膜厚度,  $\text{mm}$ ;  $k_{\text{film}}$  为固态渣膜有效导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

由于固态渣膜的界面热阻为固态渣膜与水冷铜探头壁之间的导热热阻。因此, 界面热阻可以表示为式(4)。

$$R_{\text{int}} = \frac{d_{\text{air}}}{\lambda_{\text{air}}} \quad (4)$$

式中:  $d_{\text{air}}$  为空气的间隙厚度, 即表面粗糙度,  $\text{m}$ ;  $\lambda_{\text{air}}$  为空气导热系数,  $\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ 。

冷却水热阻见式(5)。

$$R_{\text{water}} = \frac{1}{h_{\text{water}}} \quad (5)$$

式中:  $h_{\text{water}}$  为铜探头内部冷却水的对流换热系数,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

铜探头热阻见式(6)。

$$R_{\text{probe}} = \frac{L_{\text{Cu}}}{k_{\text{Cu}}} \quad (6)$$

式中:  $L_{\text{Cu}}$  为铜探头内壁厚度,  $\text{mm}$ ;  $k_{\text{Cu}}$  为铜的导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 保护渣固态渣膜物理性质分析

#### 1) 渣膜厚度分析

保护渣固态渣膜厚度统计结果如表 2 所示。随着铜探头浸入液渣时间的延长, 固态渣膜的厚度不断上升, 但增长速率逐渐降低, 在凝固时间为 60 s 时, 测得三种不同液渣温度下的固态渣膜厚度为 2.33、2.94 mm 和 4.22 mm。分析原因认为, 固态渣膜的厚度主要受保护渣熔化温度的影响, 由于含钛微合金钢保护渣熔化温度为 1 070  $^{\circ}\text{C}$ , 随着液渣温度的降低, 与铜探头之间的温度梯度差距小且冷却水不断地向外输送热量, 导致渣膜厚度越来越厚, 但是固态渣膜厚度降低了保护渣自身的传热能力, 提高了保护渣的热阻, 导致保护渣向外界传送热量的能力降低, 减缓了保护渣固态渣膜厚度的增长速率。

表 2 保护渣固态渣膜厚度统计

Table 2 Statistics on the thickness of the solid slag film of mold flux

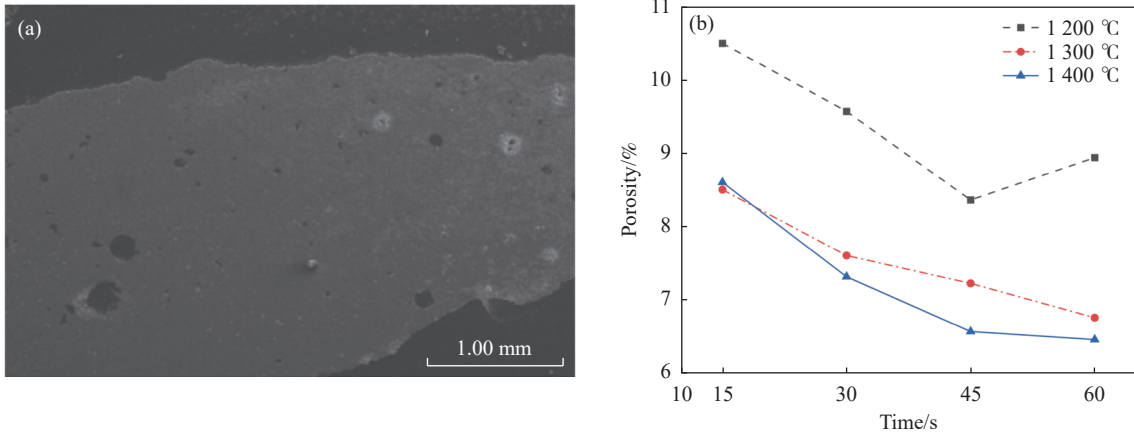
1 200 $^{\circ}\text{C}$				1 300 $^{\circ}\text{C}$				1 400 $^{\circ}\text{C}$			
15 s	30 s	45 s	60 s	15 s	30 s	45 s	60 s	15 s	30 s	45 s	60 s
2.82	3.15	3.75	4.22	2.09	2.36	2.67	2.94	1.30	1.72	1.86	2.33

#### 2) 孔隙度分析

保护渣固态渣膜的截面形貌如图 3(a) 所示。从中可以看出, 固态渣膜截面分布着大量的孔洞, 孔洞的生成改变了保护渣渣膜的导热系数, 影响保护渣渣膜的传热特性。孔隙度随温度及浸入时间的变化如图 3(b) 所示。从图 3(b) 可以看出, 不同液渣温度的固态渣膜孔隙度随着凝固时间的增加总体上呈现下降的趋势。在铜探头浸入液渣初期, 各液渣温度的孔隙度均较高, 特别是液渣温度 1 200  $^{\circ}\text{C}$  时固态渣膜的孔隙度达到了 10.5%, 而液渣温度为 1 400  $^{\circ}\text{C}$  和 1 300  $^{\circ}\text{C}$  的孔隙度相差不大, 分别为 8.6% 和 8.5%。在水冷铜探头浸入液渣时间 15 ~

45 s 时间内, 液渣温度 1 200 °C 时孔隙度降低速度最为明显, 此后, 随着水冷铜探头浸入时间的延长, 在浸入时间 45 s 时渣膜的孔隙度升高。原因是水冷铜探头刚与液渣接触时, 与水冷铜探头接触的液渣温度急速下降, 导致液渣迅速凝固成固态渣膜, 液渣中的气体无法立即排出形成孔洞。随着铜

探头浸入时间的增加, 渣膜的厚度逐渐变厚, 气孔所占整个渣膜的体积逐渐减少, 且水冷铜壁与液渣形成了一定的温度梯度, 固态渣膜中开始形成结晶层, 导致体积收缩形成孔隙, 但在液渣温度 1 300 °C 和 1 400 °C 时由于在凝固初期就已开始析晶, 并在固态渣膜中晶体不断长大, 导致孔隙度逐渐减少。



(a)截面形貌; (b)孔隙度

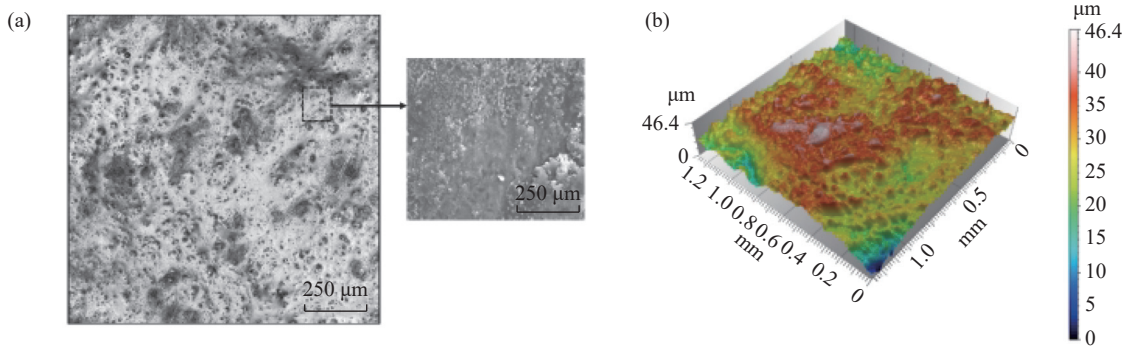
图 3 固态渣膜截面形貌和孔隙度

Fig. 3 Cross-sectional morphology and porosity of solid slag film

### 3) 表面粗糙度分析

表面粗糙度是指渣膜表面的起伏不平整程度, 通常用算术平均粗糙度  $Ra$  值来量化表征<sup>[13-14]</sup>。保

护渣与水冷铜壁接触侧的固态渣膜形貌利用 3D 形貌扫描仪进行观察, 其观察图和表面 3D 形貌图如图 4 所示。



(a)渣膜与铜探头壁接触形貌; (b)固渣膜与水冷铜壁接触表面 3D 形貌

图 4 渣膜与铜探头壁接触形貌和固渣膜与水冷铜壁接触表面 3D 形貌

Fig. 4 Morphologies of the contact interface between slag film and copper probe wall and the 3D contact surface between solid slag film and water-cooled copper wall

从图 4(a) 观察得到, 液渣与水冷铜壁接触的界面分布着众多细小的尖状突起, 利用电镜及能谱分析发现这些尖状突起并不是晶体。因此, 与铜壁接触的渣膜表面粗糙度在液渣凝固初期阶段就已形成, 与保护渣自身的凝固特性以及不同的冷却条件有关。

膜表面粗糙度变化趋势如图 5 所示。从图中可以看出, 固态渣膜表面粗糙度在 4.35 ~ 11.4 μm 范围内变化。1 300、1 400 °C 下获取的固态渣膜, 当水冷铜探头浸入时间在 15 s 时, 两者表面粗糙度分别为 4.42 μm 和 4.35 μm, 没有明显的差别。1 200 °C 时取得的固态渣膜表面粗糙度比 1 300、1 400 °C 下固态渣膜表面粗糙度高得多, 为 10.3 μm。随着水冷

不同液渣温度及不同浸入时间下获取的固态渣

铜探头浸入液渣的时间不断地增加, 1 200 °C 下固渣膜的表面粗糙度虽降低, 但仍比 1 300、1 400 °C 下的粗糙度高得多。含钛微合金钢保护渣渣膜的表面粗糙度不会随水冷铜探头浸入时间的增加呈现出增大或减少的规律, 但不同液渣温度和冷却条件下的粗糙度大不相同。

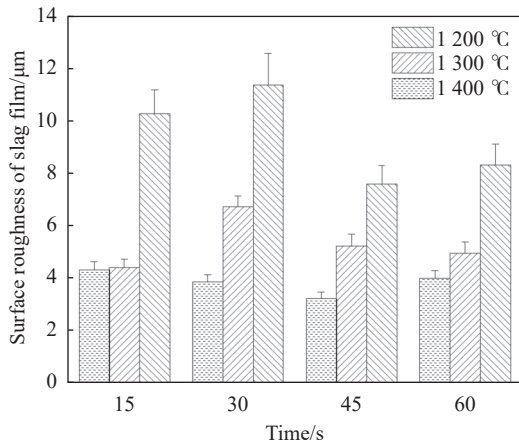


图 5 渣膜与水冷铜壁接触表面粗糙度

Fig. 5 Surface roughness of the slag film in contact with the water-cooled copper wall

高温(1 300、1 400 °C)条件下, 液渣温度远高于保护渣的结晶温度, 熔渣的过热度高, 高过热度抑制晶体形核的形成, 使得保护渣倾向于玻璃化, 表面趋于光滑。低温(1 200 °C)条件下, 低过热度意味着过冷度大, 而过冷度是晶体形核的主要驱动力, 显著提高了形核率, 在水冷铜探头的作用下, 大量晶核在探头表面(作为理想的异质形核基底)迅速形成并快速生长。这些晶体各自具有不同的结晶取向, 它们在生长过程中相互竞争、挤压、交汇, 导致晶体边界突出, 表面凹凸不平。总体而言, 液渣温度的变化对固态渣膜的孔隙度影响显著。

## 2.2 保护渣固态渣膜析晶性能分析

试验取得的固态渣膜进行 XRD 试验, 如图 6 所示, 分析可知该保护渣析出的晶体主要为钙钛矿(CaTiO<sub>3</sub>), 与上述利用 Factsage 模拟得到的 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 基保护渣相图析出晶体结果相符合。

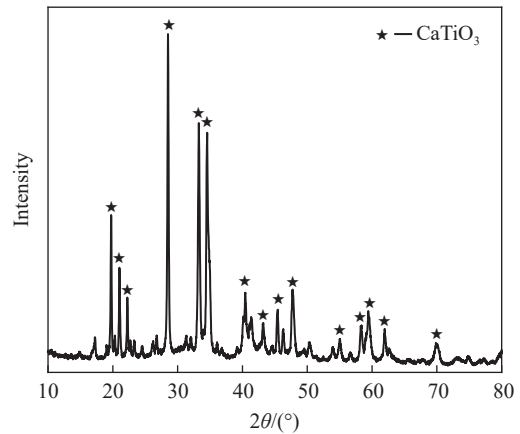
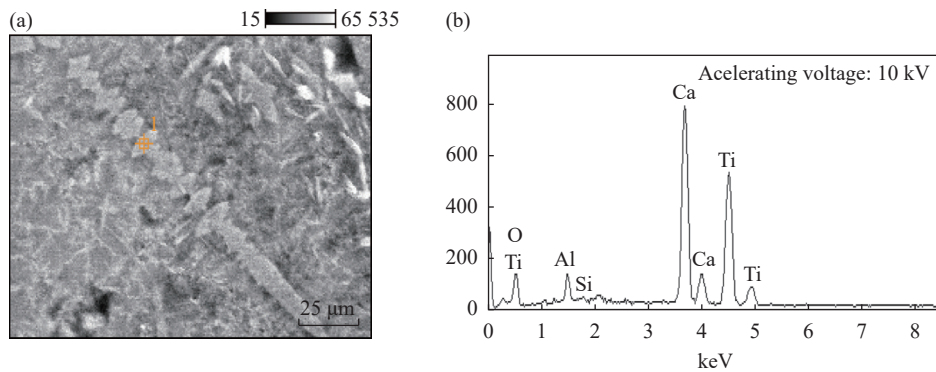


图 6 1 300 °C、浸入 45 s 时渣膜 X 射线衍射结果

Fig. 6 X-ray diffraction results of the slag film at 1 300 °C for 45 s

为了观察保护渣渣膜的晶体形貌及分布, 将所得渣膜制成光薄片, 利用扫描电镜并结合 EDS 技术对该保护渣渣膜横截面采集图像和进行元素分布分析, 如图 7 所示。从图 7 可以看出, 渣膜横截面上存在着十字形树枝状晶体, 该区域元素分布图显示该晶体主要由 Ca、Ti、O 三种元素组成。结合 XRD 结果, 可以确定这些特征形貌区域对应的晶体即为钙钛矿(CaTiO<sub>3</sub>)。这说明, 钙钛矿(CaTiO<sub>3</sub>)晶体在保护渣固态渣膜中的存在并对渣膜的传热和结构形成过程产生重要影响, 钙钛矿的析出在渣膜结晶层内形成粗大的骨架状结晶结构, 改变了辐射传热机制, 使得热阻增加, 控制了传热。

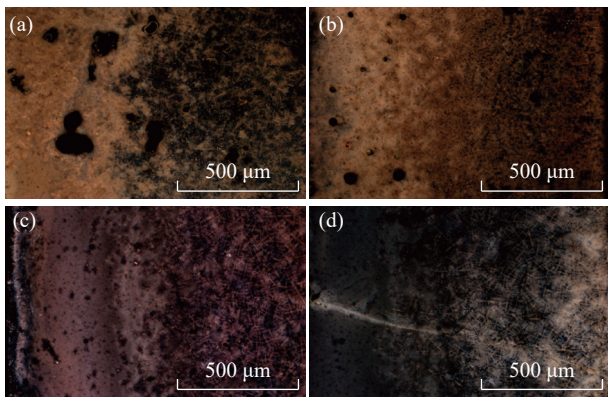


(a) 钙钛矿电子图像; (b) 钙钛矿能谱分析结果

图 7 渣膜横截面电子图像及 EDS 分析结果

Fig. 7 Cross-sectional electron image of the slag film and EDS analysis result

为观察含钛微合金钢保护渣在结晶器内的析晶特性,将制取得到的固态渣膜光薄片通过矿相显微镜观察。保护渣不同凝固时间下的渣膜截面形貌如图8所示。从图8可以看到保护渣固态渣膜明显分为两层结构,其中与水冷铜壁接触的液渣率先凝固形成玻璃层,靠近液渣侧的因为温度高形成结晶层。在水冷探头浸入液渣初期,渣膜析晶程度不明显,在矿相显微镜中可以观察到一些光亮点。随着水冷铜探头浸入时间的增加,在铜探头浸入时间30 s时可见原来的细小亮点逐渐变大,结晶层能够比较明显的看出。铜探头浸入时间继续增加,结晶层厚度继续变厚且晶体逐渐长大。这是因为铜探头浸入初期,由于液渣温度高,铜探头温度低,保护渣中晶体的形成无法满足足够的过冷度,导致分子运动减小,因此晶体只是呈现出细小亮点的形状。随着浸入时间的不断增加,液渣与水冷铜壁之间存在足够高的过冷度,满足晶体的生长,因此晶体不断长大,核化速率增加,有原始的晶芽围绕着晶核逐渐长大。



(a) 15 s; (b) 30 s; (c) 45 s; (d) 60 s.

图8 保护渣不同凝固时间下的渣膜截面形貌

Fig. 8 Cross-sectional morphology of the slag film under different solidification times of mold flux

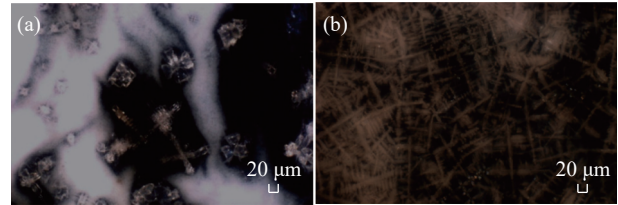
此外,对渣膜截面进行观察,如图9所示。图9(a)可明显观察到气孔周围有大量晶粒析出,这说明在铜探头浸入渣膜凝固过程中,由于冷却速率大,渣膜迅速凝固,易产生气孔,容易成为形核的有利位置,因此晶体优先在气泡边界处形核生长。图9(b)区域构成了疏松多孔的结晶层组织,这表明靠近液渣侧的渣膜过冷度较小,虽然不利于新晶核的形成,但该区域有利于已有晶体的长大生长。因此,可以观察到粗大树枝状晶体。

### 2.3 保护渣固态渣膜传热性能分析

由公式(2)~(6)结合可得到公式(7)。

$$\frac{(T_{\text{liquid}} - T_{\text{water}})}{q} = \frac{1}{h_{\text{water}}} + \frac{L_{\text{Cu}}}{k_{\text{Cu}}} + R_{\text{int}} = \frac{L_{\text{film}}}{k_{\text{film}}} \quad (7)$$

式中:  $T_{\text{liquid}}$  为导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ;  $T_{\text{water}}$  为铜探头冷却水温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。  $L_{\text{film}}$  为固态渣膜厚度,  $\text{mm}$ ;  $k_{\text{film}}$  为固态渣膜有效导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。  $h_{\text{water}}$  为铜探头内部冷却水的对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 。  $L_{\text{Cu}}$  为铜探头内壁厚度,  $\text{mm}$ ;  $k_{\text{Cu}}$  为铜的导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。  $q$  为热流密度,  $\text{MW}/\text{m}^2$ 。



(a) 固态渣膜孔隙附近晶体形貌; (b) 钙钛矿晶体形貌

图9 渣膜截面观察图

Fig. 9 Cross-sectional observation images of the slag film

利用公式(7)可得含钛微合金钢保护渣固态渣膜热阻与渣膜厚度的拟合曲线,如图10所示。从图中可以直观看出,拟合公式的纵截距为1.06,这意味着该保护渣的渣膜厚度在极薄的情况下也存在热阻。随着渣膜厚度的增加,热量在渣膜中有着更长的传导路径,导致其渣膜热阻也相应增加,渣膜的有效导热系数由  $0.89 \text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$  升高至  $1.68 \text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

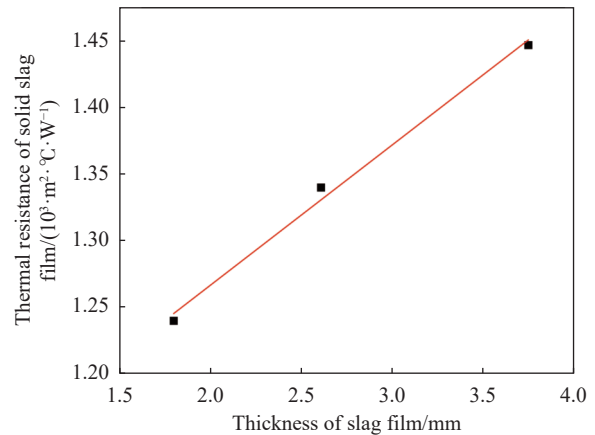


图10 固态渣膜热阻与厚度的拟合曲线

Fig. 10 Fitting curve of thermal resistance and thickness of the solid slag film

通过结晶器模拟装置采集热流传感器进出水口的温度差,并由公式(8)计算出不同时间通过渣膜的热流密度<sup>[15]</sup>。

$$\Phi = W \cdot C \cdot \Delta T / (F \cdot 1000) \quad (8)$$

式中:  $\Phi$  为单位面积内得到的热通量,  $\text{MW}/\text{m}^2$ ;  $W$  为冷却水流量,  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $\Delta T$  为进出口水温差,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $F$  为水冷铜探头与液渣接触的有效面积,  $\text{m}^2$ ;  $C$  为冷却水比热容,  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

利用结晶器热流模拟仪模拟三种不同液渣温度下(1200、1300、1400  $^{\circ}\text{C}$ )的保护渣热流密度

变化, 测试时间为 60 s, 得到保护渣热流密度随时间的变化曲线如图 11 所示。从图 11 可以看出, 保护渣热流密度随时间变化曲线分为两个阶段: 0 ~ 13 s, 保护渣的热流密度随铜探头浸入时间的增加快速增长, 这是因为在水冷铜探头浸入初期液渣与铜探头之间存在很大的温差, 热量迅速从液渣传递到铜探头表面, 导致保护渣热流密度迅速增大。在 13 s 时 1 200、1 300 °C 和 1 400 °C 三种不同液渣温度下的保护渣热流密度各自达到最大值, 分别为 0.988、1.208 MW/m<sup>2</sup> 和 1.355 MW/m<sup>2</sup>; 在 13 s 之后, 三种不同液渣的热流密度随着铜探头浸入时间的延长逐渐降低, 但降低速率逐渐趋于稳定。当铜探头浸入液渣时间为 60 s 时, 1 200、1 300 °C 和 1 400 °C 三种不同液渣温度下的保护渣热流密度为 0.807、0.941 MW/m<sup>2</sup> 和 1.06 MW/m<sup>2</sup>, 13 ~ 60 s 的下降速率分别为 0.004、0.005 6 MW/s 和 0.006 3 MW/s。

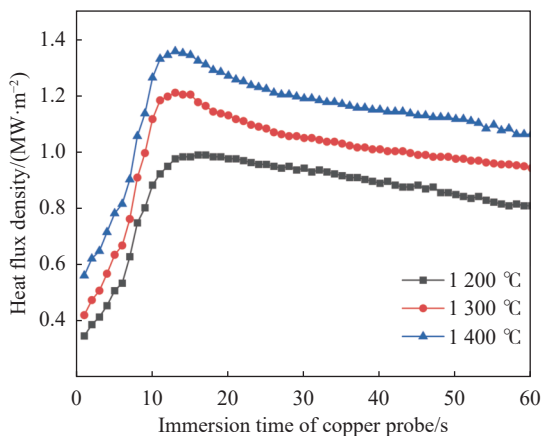


图 11 不同液渣温度的热流密度变化

Fig. 11 Heat flux density variation at different liquid slag temperatures

热流密度的变化也体现了保护渣热阻的变化情况。在 0 ~ 13 s 的时间内, 水冷铜探头表面仅有极薄的固态渣膜形成, 对保护渣热量向外界传递的阻

碍很小, 最主要的热阻来自液渣本身。随着水冷铜探头浸入时间的延长, 液渣的热量不断向外界传递, 固态渣膜的厚度不断增厚, 且固态渣膜中析出的晶体阻碍了液渣向外传递热量, 导致渣膜本身的热阻越来越大, 使得保护渣热流密度逐渐呈下降的趋势。

### 3 结论

1) 渣膜厚度随凝固时间的增加逐渐变厚, 且密度也呈增大的趋势, 液渣温度在 1 200 ~ 1 400 °C 和凝固时间 0 ~ 60 s 内密度从 1.34 g/cm<sup>3</sup> 升高到 1.66 g/cm<sup>3</sup>, 造成密度变化的原因主要为渣膜中晶体的析出以及结晶层所占整个渣膜体积比例的增加。

2) 保护渣渣膜表面粗糙度在固态渣膜凝固初期就已形成, 因此与结晶行为无关, 但受液渣温度变化影响明显, 当液渣由 1 400 °C 降至 1 200 °C 时, 表面粗糙度值由 4.35 μm 增加到 11.4 μm。表面粗糙度的提高增加了渣膜的界面热阻, 能够更好地控制铸坯的传热。

3) 保护渣固态渣膜结构为靠近水冷铜壁的玻璃态渣膜和靠近液渣的结晶态渣膜的两层结构, 结晶态渣膜中矿相主要为钙钛矿 (CaTiO<sub>3</sub>), 呈十字形树枝状, 钙钛矿的析出在渣膜结晶层内形成粗大的骨架状结晶结构, 改变了辐射传热机制, 使得热阻增加, 控制了传热。

4) 水冷铜探头浸入液渣初期, 热流密度迅速增大, 当水冷铜探头浸入液渣时间为 13 s 时, 三种不同液渣温度下的保护渣的热流密度均到达了最大值, 分别为 0.988、1.208 MW/m<sup>2</sup> 和 1.355 MW/m<sup>2</sup>。随着水冷铜探头浸入时间的增加, 固态渣膜逐渐变厚, 热阻变大, 热流密度逐渐降低。

### 参考文献

- [ 1 ] THRIDANDAPANI R R, MISRA R D K, MANNERING T, *et al.* Effect of vanadium addition on the microstructure and mechanical properties of low carbon micro-alloyed powder metallurgy steels[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2006, 422(1-2), 287.
- [ 2 ] HUANG R K, ZHANG L F, JIANG R B, *et al.* Evolution of inclusions in ultra-low carbon Al-killed steel during continuous casting[J]. *Steelmaking*, 2020, 36(6): 39-45.  
(黄日康, 张立峰, 姜仁波, 等. 超低碳铝脱氧钢连铸过程中非金属夹杂物的演变[J]. *炼钢*, 2020, 36(6): 39-45.)
- [ 3 ] HANG Z D, FENG Y L. Research status and development trend of titanium microalloying steel[J]. *Hot Working Technology*, 2021, 50(6): 22-25.  
(杭子迪, 冯运莉. 钛微合金钢研究现状和发展趋势[J]. *热加工工艺*, 2021, 50(6): 22-25.)
- [ 4 ] HE Y M, HE S P. Analysis of lubrication and heat transfer function of mold flux[J]. *Continuous Casting*, 2021(2): 2-6.

- (何宇明, 何生平. 结晶器保护渣的润滑与传热控制功能剖析[J]. 连铸, 2021(2): 2-6.)
- [ 5 ] ZHU C Y, LIU C J, SHI P Y, *et al.* Effect of compositions of mold flux on crystalline phase[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2004(6): 559-562.  
(朱传运, 刘承军, 史培阳, 等. 保护渣成分对结晶矿相的影响[J]. 东北大学学报, 2004(6): 559-562.)
- [ 6 ] WEN G H, TANG P, YANG B, *et al.* Simulation and characterization on heat transfer through mould slag film[J]. ISIJ Int, 2012, 52(7): 1179-1185.
- [ 7 ] WEN G H, ZHU X B, TANG P, *et al.* Influence of raw material type on heat transfer and structure of mould slag[J]. ISIJ Int, 2011, 51(7): 1028-1032.
- [ 8 ] YIN H B, YAO M. Analysis of the nonuniform slag film, mold friction, and the new cracking criterion for round billet continuous casting[J]. Metall Mater Trans B, 2005, 36: 857-864.
- [ 9 ] HAN X L, ZHAO K, LIU L, *et al.* Research progress of metallurgical properties of fluorine-free continuous casting mold fluxes[J]. Materials Reports, 2022, 36(11): 187-193.  
(韩秀丽, 赵凯, 刘磊, 等. 无氟连铸保护渣冶金性能的研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(11): 187-193.)
- [ 10 ] LI X Y, HE F, ZHAO C B, *et al.* Study on crystallization behavior and heat transfer performance of CaO-SiO<sub>2</sub> based continuous casting protective slag[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2023, 45(12): 28-32,73.  
(李晓阳, 何峰, 赵春宝, 等. CaO-SiO<sub>2</sub> 基连铸保护渣的析晶行为与传热性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(12): 28-32,73.)
- [ 11 ] LONG X, HE S P, WANG Q. Crystallization features of solid slag films of ultrahigh-basicity mold fluxes for continuous casting[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2018, 30(1): 21-25.  
(龙潇, 何生平, 王谦. 超高碱度连铸保护渣固渣膜凝固和结晶行为特性[J]. 钢铁研究学报, 2018, 30(1): 21-25.)
- [ 12 ] LONG X, HE S P, WANG Q. Factors influencing roughness of solidified mold flux film for peritectic steel continuous casting[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2017, 29(7): 551-555.  
(龙潇, 何生平, 王谦. 包晶钢连铸保护渣固渣膜粗糙度影响因素[J]. 钢铁研究学报, 2017, 29(7): 551-555.)
- [ 13 ] GAO H X. Review of surface roughness measurement methods[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2021, 57(9): 145-146.  
(高海霞. 表面粗糙度测量方法综述[J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57(9): 145-146.)
- [ 14 ] HAO Y H, FAN B X, LI H, *et al.* Effect of erosion angles on roughness of tempered glass and float glass and analysis of three-dimensional morphology[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2021, 39(3): 407-414.  
(郝负洪, 范宝鑫, 李慧, 等. 冲蚀角度对建筑用钢化玻璃和普通玻璃喷砂磨损粗糙度的影响及三维分析[J]. 材料科学与工程学报, 2021, 39(3): 407-414.)
- [ 15 ] WEN G H. Influence of raw material type on heat transfer and structure of mould slag[J]. ISIJ international, 2011, 51(7): 1028-1032.

编辑 唐肖