

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20170536

CaF₂对CaO-SiO₂-Al₂O₃渣系保护渣结晶行为的影响

王 哲, 唐 萍, 米晓希, 胡 泉, 陆逸帆, 文光华

(重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 针对CaF₂对CaO-SiO₂-Al₂O₃渣系保护渣结晶性能的影响问题,在实验室运用热丝法、X射线衍射法获得了不同CaF₂质量分数下的保护渣TTT曲线以及相应温度条件下的结晶物类型。试验结果表明,该渣系保护渣低温下稳定存在的结晶物质不是传统CaO-SiO₂渣系的枪晶石,而为钙铝黄长石和氟化钙;随着CaF₂质量分数的增加,平均结晶孕育时间减少,鼻尖点孕育时间缩短,鼻尖点处的结晶温度提高,结晶能力增强。而在CaF₂质量分数增加到一定程度后,F⁻将从网络外体破网作用转化为有一定的成网作用,会减弱保护渣的促晶能力,结晶能力增加趋势减缓。同时,与传统CaO-SiO₂渣系保护渣相比,具有更强的结晶性能。

关键词: 连铸保护渣; CaO-SiO₂-Al₂O₃渣系; CaF₂质量分数; 结晶性能

文献标志码:A **文章编号:** 0449-749X(2018)07-0038-07

Effect of $w(\text{CaF}_2)$ on crystallization properties of CaO-SiO₂-Al₂O₃ based mold fluxes

WANG Zhe, TANG Ping, MI Xiao-xi, HU Quan, LU Yi-fan, WEN Guang-hua

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Single hot thermocouple technology and XRD were used to research the effect of $w(\text{CaF}_2)$ on the crystallization of CaO-SiO₂-Al₂O₃ mold fluxes. What's more, time-temperature transformation(TTT)curves with varied $w(\text{CaF}_2)$ was obtained and the type of the crystal was verified. Results show that the crystallization of CaO-SiO₂-Al₂O₃ mold fluxes is gehlenite and CaF₂, while cuspidine appears during the transformation of mold fluxes with low $w(\text{CaF}_2)$; with $w(\text{CaF}_2)$ increasing, the crystallization incubation time decreases, and the crystallization rate is accelerated. However, after $w(\text{CaF}_2)$ reaches 12%, the changing trend of crystallization incubation time and crystallization rate are not remarkable. Compared with mold fluxes with low $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$, the crystallization capacity of the mold fluxes researched is stronger.

Key words: mold flux; CaO-SiO₂-Al₂O₃ mold flux; $w(\text{CaF}_2)$; crystallization property

超低碳钢冷轧板的线状(带状)缺陷(或称条痕)被认为是其常见而又难以消除的顽疾^[1],其中保护渣的卷入以及凝固钩夹渣是产生这种缺陷的主要原因^[2]。为了减少这种凝固钩夹渣,须降低保护渣液渣在结晶器弯月面弯钩上的吸附能力,而这主要受控于液渣与铸坯间的润湿性和界面性质,其中高表面张力的熔渣是追求的方向,同时防止保护渣卷渣也需要高表面张力的熔渣^[3-4]。在1 300 ℃下保护渣中常见物质表面张力系数从大到小顺序是:CaO>CaF₂>Al₂O₃>Na₂O>SiO₂,将传统低Al₂O₃质量分数的CaO-SiO₂渣系保护渣中一部分SiO₂用Al₂O₃替换,形成新型高Al₂O₃质量分数的CaO-SiO₂-Al₂O₃渣系,应比目前采用控制保护渣中R₂O(Na₂O和

K₂O)碱金属来控制表面张力^[5]以减小冷轧钢板表面缺陷的方式更优越。同时,Al₂O₃具有在保护渣熔渣浸水时减少F⁻进入水中的作用(固F⁻作用)^[6],这无疑环境友好的渣系。

传统连铸保护渣中的CaF₂的氟将以破网的Ca—F离子键形式存在,是网络破坏体^[7],并且是枪晶石析晶物的形成物质^[8-9],在保护渣中是调整熔渣黏度、结晶性能的关键性熔剂^[10-11],而最近的研究指出^[12],在高Al₂O₃的CaO-SiO₂-Al₂O₃渣系中,氟则会以Al—F共价键和Ca—F离子键的形式存在,即氟在该类熔渣中将会以促进铝氧离子联网的桥氟形式存在,同时也会以破网的Ca—F离子键非桥氟形式存在。而氟在所研究的CaO-SiO₂-Al₂O₃渣系熔渣中究竟是促进

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574050)

作者简介: 王 哲(1993—),男,硕士生;

E-mail: zhewang@cqu.edu.cn;

收稿日期: 2017-11-07

成网进而有利于润滑作用为主导,还是促进断网有利结晶作用为主导尚不明确。因此本研究选用热丝法、X射线衍射法(XRD),建立 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 渣系随 CaF_2 质量分数变化的 TTT 曲线基础图库及不同温度下的结晶物类型,以探寻 CaF_2 质量分数的变化对其结晶性能及作用机制的影响规律,为该类保护渣的开发提供基础参数。

1 试验方案及方法

1.1 试验渣样成分设计

传统低 Al_2O_3 质量分数的 CaO-SiO_2 渣系连铸保护渣,基础成分于图 1 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 三元相图中的伪硅灰石 A 区域,该区域的熔渣成分在一定熔剂

条件下,存在满足连铸工艺需求的保护渣熔化特性。由于熔剂及控制熔化速度碳的存在,实际保护渣中 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 一般小于 10%,以此常也称为 CaO-SiO_2 渣系。同样具备该熔化特性的区域在图 1 所示的 B 区与 C 区也存在。虽然这两个区域的 Al_2O_3 质量分数都高于 A 区域,能得到较大表面张力的保护渣,但是过低 $w(\text{SiO}_2)$ ($\leq 10\%$) 碳区域低熔点区域窄,熔渣的短渣性强,温度对黏度影响变化大,满足连铸工艺的需求困难。而 B 区不仅存在与 A 区相近的低熔点区域,而且短渣性远弱于 C 区,所以本文建立的新型高 Al_2O_3 的 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 渣系,以 B 区域的熔渣成分为基进行试验渣成分设计,称为 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 渣系。

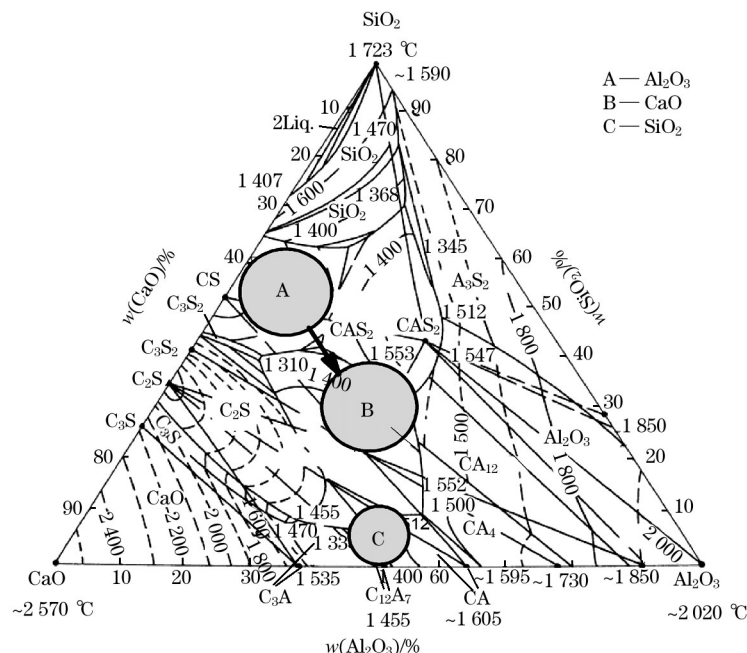


图 1 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 三元相图

Fig. 1 Ternary phase diagram of $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$

选取的 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 渣系中,考虑 Al_2O_3 的两性特点,用碱性系数 $M^{[13]}$: $M=(w([\text{CaO}])+1/3w([\text{Al}_2\text{O}_3]))/(w([\text{SiO}_2])+2/3w([\text{Al}_2\text{O}_3]))$,来反映与传统 CaO-SiO_2 渣系碱度类似的碱性特征。根据前人的研究^[13], $M=1$ 时,熔渣的凝固温度、黏度、热流密度、固渣膜厚度及渣膜结晶率具备保护渣的使用条件范围,所以本研究在保持碱性系数为 $M=1$ 不变的条件下,改变保护渣中的 CaF_2 质量分数,保护渣成分见表 1。

1.2 试验方法

1.2.1 渣样制备

将各种原料按照表 1 中的成分配置 50 g 置于石

表 1 试验渣样成分设计(质量分数)

编号	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Li ₂ O	CaF ₂	MgO
1	31.09	23.7	22.21	10	2	8	3
2	30.28	23.08	21.63	10	2	10	3
3	29.48	22.47	21.06	10	2	12	3
4	28.67	21.85	20.48	10	2	14	3
5	27.86	21.23	19.9	10	2	16	3
6	27.06	20.63	19.33	10	2	18	3
7	26.25	20.01	18.75	10	2	20	3
8	25.44	19.39	18.17	10	2	22	3

墨坩锅中,用硅钼炉将装有原料的石墨坩锅加热到 1 400 ℃,渣样熔清后保温 15 min 均化,迅速水淬至室温。将水淬渣进行烘干、研磨,过 0.074 mm 细筛,制得用于进行热丝法测试的均匀玻璃质试样。

1.2.2 TTT 测试

该研究采用冷却速度能满足连铸工艺 1~100 ℃/s 要求的热丝法 (Single Hot Thermocouple Technique, 简称 SHTT) 构建保护渣的等温转变曲线 (Temperature Time Transformation, 简称 TTT)。试验中用到的热丝法设备为 DHTT-II 型熔化结晶温度测试仪,设备实物图如图 2 所示。



图 2 热丝法试验设备

Fig. 2 Experimental equipment of hot wire method

热丝法测 TTT 曲线的热制度如图 3 所示。试验过程中,试样先以 15 ℃/s 升温至 1 500 ℃,然后在 1 500 ℃ 的温度下保温 60 s,使保护渣充分熔清。待保护渣熔清后,以冷却速度为 80 ℃/s 迅速降温度至设定的试验温度,进行恒温测试。该方法分别将保护渣出现 5% 的晶体时刻和达到 95% 的晶体时刻定义为开始结晶时刻和结束结晶时刻。

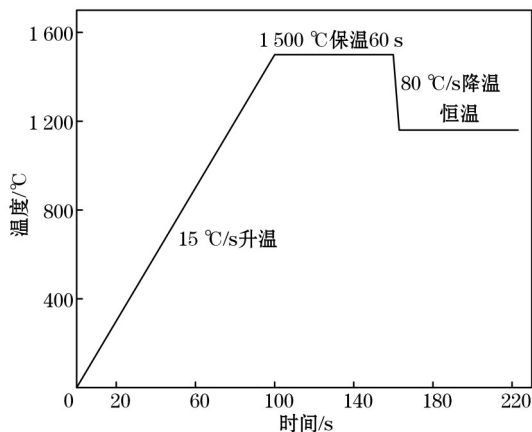


图 3 热丝法测 TTT 曲线热制度

Fig. 3 Temperature control curve of TTT testing

1.2.3 结晶物类型测试

为了探明 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 渣系随着 CaF₂ 变化的结晶物类型,试验选取 $w(\text{CaF}_2)$ 为 12%、16%、20% 的渣样进行 XRD 测试。由于 TTT 曲线呈现出的“C”型个数,反映了在不同温度范围结晶析出物的历程,试验选取 TTT 曲线每个“C”的“鼻子”对应区间的温度,作为检测试样的温度选取条件。

XRD 测试试样制备的条件为:将配好的渣样在 1 300 ℃ 的硅钼炉中熔清后,以 10 ℃/min 的速度冷却至指定的温度 (TTT 曲线每个“C”所对应区间的温度),并保温 30 min。然后将熔融的保护渣从炉中取出,迅速水淬至室温。将冷却之后的保护渣烘干,进行研磨,过 0.074 mm 的细筛,制得 XRD 测试所需的试样。

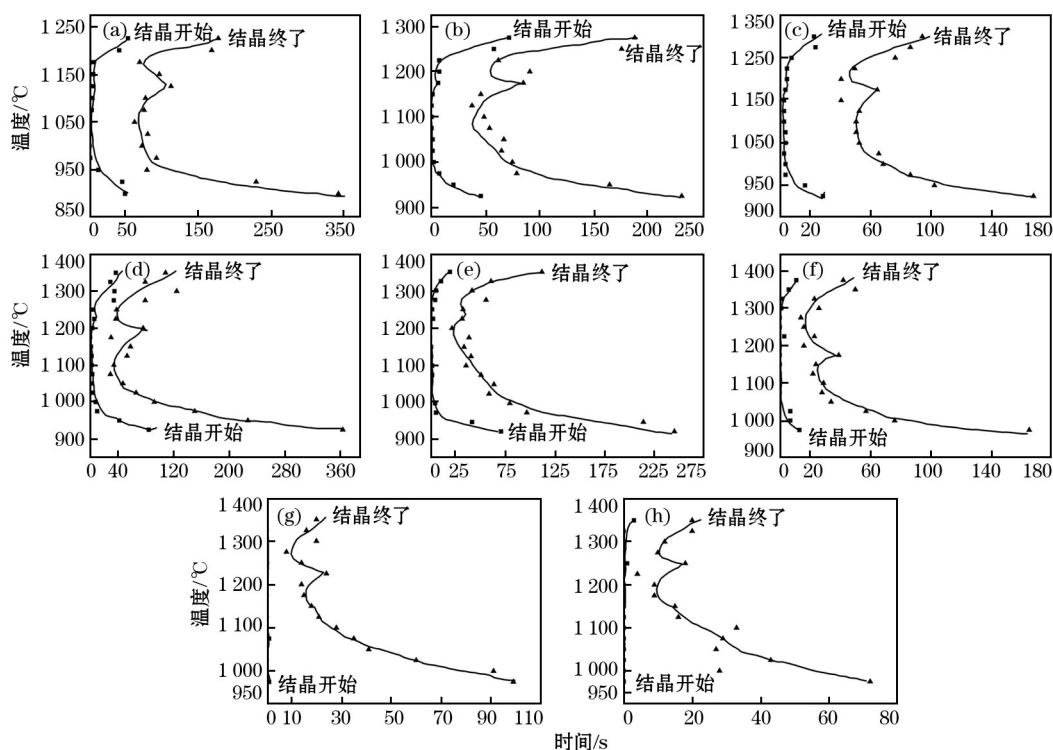
2 结果分析与讨论

2.1 TTT 测试结果与分析

按照上述试验方法,测得的 8 个渣样的 TTT 曲线如图 4 所示。

通过图 4 可以看到,各渣样的 TTT 曲线都有两个“C”,则,所有渣样在冷却的过程中应有两种晶体析出。同时从图 4 变化趋势可以看出,保护渣的结晶孕育时间随着 CaF₂ 质量分数的增加而缩短,保护渣结晶能力增强。

为定量分析保护渣结晶性能随 CaF₂ 的变化,研究分析了涵盖所研究渣样测试温度区间 (1 000~1 250 ℃) 的平均结晶孕育时间与 CaF₂ 质量分数的关系,如图 5 所示。由图 5 可知, $w(\text{CaF}_2)$ 为 8%~12% 时, $w(\text{CaF}_2)$ 每增加 1%, 平均结晶孕育时间缩短 8.25 s; $w(\text{CaF}_2)$ 为 12%~22% 时, $w(\text{CaF}_2)$ 每增加 1%, 平均结晶孕育时间缩短 0.52 s, 即 $w(\text{CaF}_2)$ 小于 12% 时, 随 CaF₂ 质量分数增加保护渣的结晶性能增强显著; $w(\text{CaF}_2)$ 大于 12% 时, 保护渣结晶性能随 CaF₂ 质量分数的增加趋势减弱。这是因为^[14-15]保护渣中 F⁻ 少量增加, 将促进硅氧四面体、铝氧四面体等网络结构解体, 从而促进离子迁移, 熔渣结晶性能增强, 但 CaF₂ 质量分数增大到一定程度后, 本研究渣系为 $w(\text{CaF}_2)$ 大于 12%, 保护渣中 F⁻ 会在 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 渣系中参与铝的配位形成 [AlO₃F] 四面体, 即形成 Al-F-Al 结构, 该结构与硅氧四面体连接成网 (图 6), 从而减弱离子迁移, 结晶性能增加趋势减弱。由此表明, 在研究的 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 渣系中 $w(\text{CaF}_2) \leq 12\%$, 氟起网络外体破网作用, 促进结晶的发展, 在 CaF₂ 质量分数高时氟有一定的成网作用, 会减弱保护渣的促进结晶的能力。



(a) 8%; (b) 10%; (c) 12%; (d) 14%; (e) 16%; (f) 18%; (g) 20%; (h) 22%。

图 4 试验渣样的 TTT 曲线

Fig. 4 TTT curves of slag samples

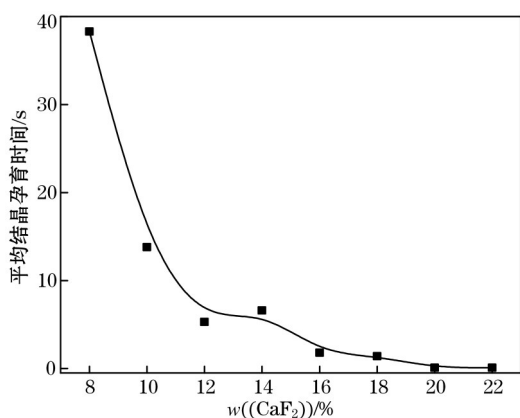
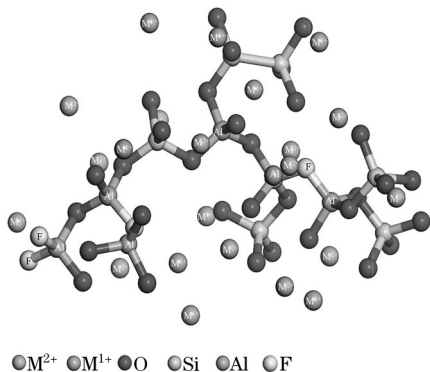


图 5 平均结晶孕育时间

Fig. 5 Average incubation time of crystallization

图 6 含 Al_2O_3 和 CaF_2 连铸保护渣的结构示意图Fig. 6 Structure of mold fluxes containing Al_2O_3 and CaF_2

由于 TTT 曲线“C”上半部分反映的是过冷度为结晶限制条件的热力学因素,“C”下半部分由于温度低,反映了扩散传质为结晶限制性条件的动力学因素,而鼻尖点则反映的是物质自生的结晶能力,以此研究分别对每个渣样 TTT 曲线上鼻尖点处的孕育时间与结晶温度进行了分析,其变化规律如图 7 和图 8 所示。

如图 7 所示,随着 CaF_2 质量分数的增加,两个“C”的鼻尖点孕育时间都在缩短,都在 $w((\text{CaF}_2))$ 大于 18% 缩短趋于 0。而且在 $w((\text{CaF}_2))$ 为 16% 范围第一个“C”的缩短幅度明显大于第二个“C”。对于第二个“C”,XRD 分析表明低温析出的物质为 CaF_2 ,而 CaF_2 的析出应主要受控于饱和浓度,因此表现为在低浓度范围鼻尖点孕育时间变化不明显,只有质量分数达到一定量时才表现出结晶速度迅速增加。

图 8 表明,随着 CaF_2 质量分数增加,鼻尖点温度增加,说明达到最大结晶速度所需要的过冷度降低,结晶能力增强。如图 8 所示,对于第一个“C”同样反映在 CaF_2 质量分数高时出现平缓变化趋势,即 CaF_2 质量分数增大到一定程度, F^- 会在 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 渣系中参与铝的配位减弱离子迁移,结晶性能增加趋势减弱。

文献指出^[16], CaO-SiO₂渣系在二元碱度为 1.25, F⁻质量分数为 6%~11%, 鼻尖点的孕育时间在 20 s 以上, 如图 7 所示, 该渣系鼻尖点的孕育时间小于 10 s。因此该渣系保护渣较 CaO-SiO₂渣系连铸保护渣具有更强的结晶性能。这是由于 CaO-SiO₂-Al₂O₃渣系是将 CaO-SiO₂渣系的一部分 SiO₂用 Al₂O₃取代, 四配位的 Si⁴⁺是主要的网络形成体^[17], 而 Al³⁺可为四配位、五配位和六配位同时存在^[12], Al³⁺只有四配位形式才能取代部分 Si⁴⁺, 形成网络结构, 而五配位和六配位是以离子键连接的网络外体, 存在于网络的间隙之中, 不利于网络结构的形成, 使得熔渣离子迁移阻力小, 结晶性能增强。

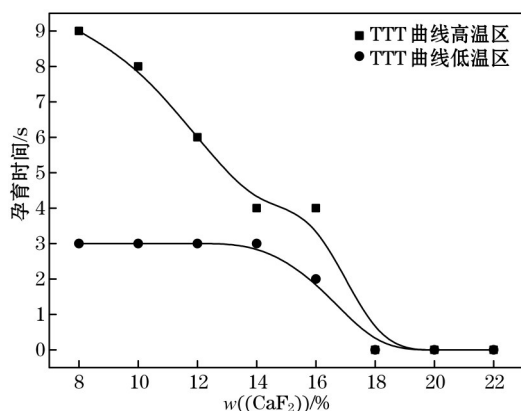
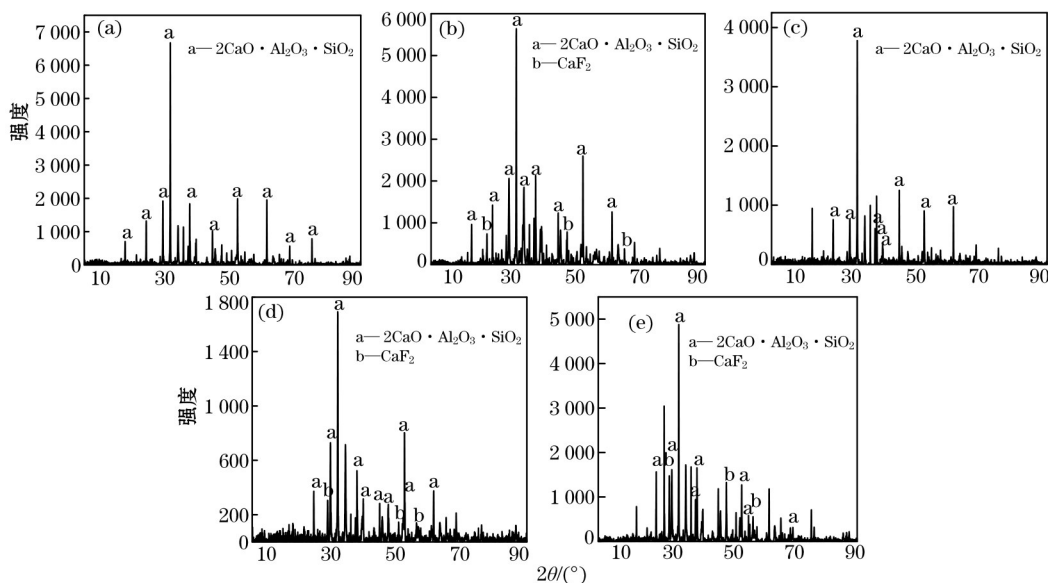


图 7 鼻尖点孕育时间

Fig. 7 Incubation time of nose point



(a) 1 250 °C, $w((\text{CaF}_2))=12\%$; (b) 1 025 °C, $w((\text{CaF}_2))=12\%$; (c) 1 275 °C, $w((\text{CaF}_2))=16\%$;

(d) 1 025 °C, $w((\text{CaF}_2))=16\%$; (e) 1 175 °C, $w((\text{CaF}_2))=20\%$ 。

图 9 渣样的 XRD 图像。

Fig. 9 XRD curves of slag

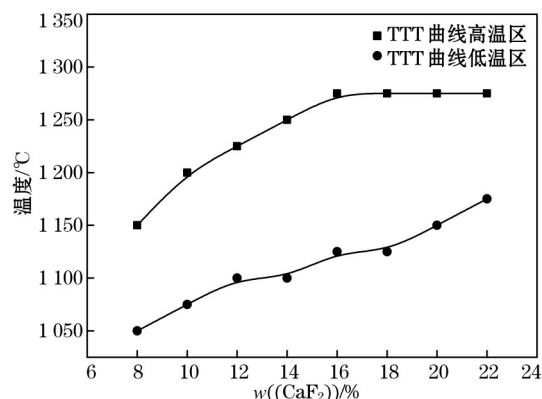


图 8 鼻尖点温度

Fig. 8 Temperature of nose point

2.2 XRD 测试测试结果及分析

由图 4 反映, 各渣样的 TTT 曲线都存在两个“C”, 以此判断所有渣样在冷却的过程中应有两种晶体析出。为清楚两种晶体的析出物类型, 研究对 $w((\text{CaF}_2))$ 为 12%、16%、20% 的渣样进行了 XRD 测试, 制样方法见 1.2 节。XRD 试验分析结果如图 9 所示, 根据 XRD 结果可知, 保护渣在高温时析出的主要相为钙铝黄长石, 在低温时析出相为 CaF₂, 并且钙铝黄长石在低温时能稳定存在。参考 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 三元相图和 CaO-SiO₂-CaF₂ 三元相图^[7], 可以推测在试验的温度范围内都应有钙铝黄长石

析出, 而 CaF₂ 的析出温度为 1 104~1 150 °C, 这与 XRD 分析的结果吻合。而传统的 CaO-SiO₂渣系保

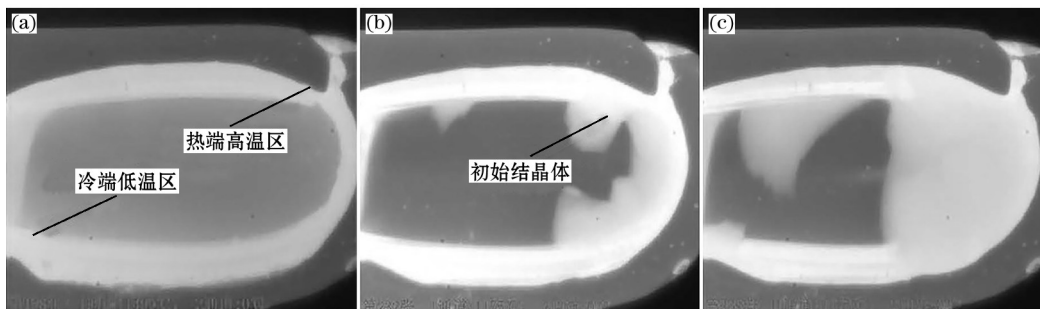
护渣在高碱度情况下, 随着 CaF₂ 质量分数的增加, 低温下能稳定析出的主要相是枪晶石晶体^[18], 因此

两类渣系保护渣在析出物类型上有较大的差别。

2.3 结晶过程原位观察分析

由于熔渣的等温转变曲线(TTT 曲线)呈现出的“C”型反映了结晶过程热力学和动力学关系,同时热丝法又是一种在高温下能够原位观察熔渣结

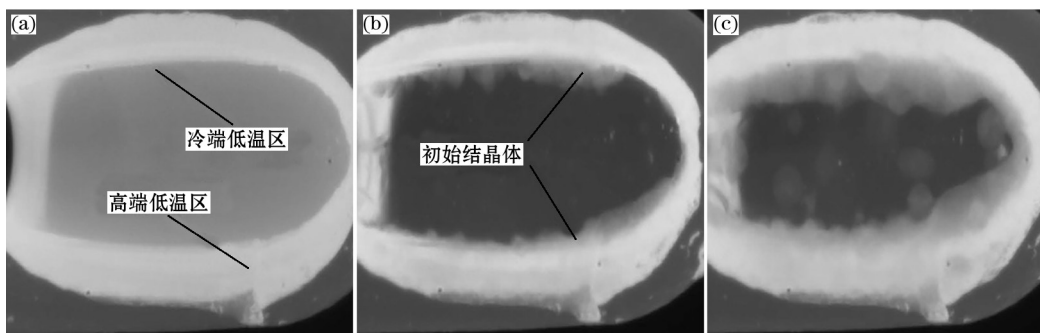
晶现象的一种方法,为此本文为了能够直观地体现熔渣结晶过程的这种热动力学关系,以 $w(\text{CaF}_2)$ 为 16% 保护渣为例,分析了在 1 175 °C 高温等温及 1 050 °C 低温等温的析晶热力学和动力学现象,结果如图 10 和图 11 所示。



(a) 熔清状态; (b) 晶体生长初期; (c) 晶体继续生长。

图 10 $w(\text{CaF}_2)=16\%$ 渣样的 1 175 °C 时的析晶过程(焊点区为热端)

Fig. 10 Crystallization process of slag with $w(\text{CaF}_2)=16\%$ at 1 175 °C



(a) 熔清状态; (b) 晶体生长初期; (c) 晶体继续生长。

图 11 $w(\text{CaF}_2)=16\%$ 渣样的 1 050 °C 时的析晶过程(焊点区为热端)

Fig. 11 Crystallization process of slag with $w(\text{CaF}_2)=16\%$ at 1 050 °C

由图 10 可见,在 1 175 °C 时,该渣系的初始结晶体偏于热电偶头部(焊点)的高温区生长,说明影响结晶的限制性环节是离子的迁移。结合该成分的 TTT 曲线(图 4(e)),1 175 °C 处于第一个 C 曲线的后半段,即离子的迁移动力学因素为限制性环节阶段,图 10 结晶过程的原位观察反映了该动力学现象。

1 050 °C 下的等温析晶过程如图 11 所示。在该温度下初始结晶在热电偶的热端(焊点端)与冷端同时较均衡地生长。同样结合图 4(e),1 050 °C 温度处于第二个 C 曲线的前半段,则相对于高温结晶物 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 离子的迁移动力学因素为限制性环节,而低温结晶物 CaF_2 析出的限制性环节为过冷度决定的热力学因素,结晶过程的原位观察如图 11 所示,反映了该热力学及动力学同时为限制环节的现象。

3 结论

(1) 随着 CaF_2 质量分数的增加,平均结晶孕育

时间减少,鼻尖点孕育时间缩短,鼻尖点处的结晶温度提高,结晶能力增强。而在 CaF_2 质量分数增加到一定程度后, F^- 将从网络外体破网作用转化为有一定的成网作用,会减弱保护渣的促晶能力,结晶能力增加趋势减缓。

(2) 研究的 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 渣系最短孕育时间都小于 10 s,与传统的 CaO-SiO_2 渣系相近碱性系数及氟质量分数范围的熔渣相比减少近 1 倍,该渣系保护渣具有更强的结晶性能。

(3) CaO-SiO_2 渣系的保护渣在高碱度情况下,随着 CaF_2 质量分数的增加,低温下能稳定析出的主要物相为枪晶石,而 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 渣系,在高温下析出的主要相是钙铝黄长石,低温下的析出相为 CaF_2 ,钙铝黄长石在低温下能稳定存在。

参考文献:

[1] Tsai H, Sammon W, Hazelton D. Characterization and counter-

- measures for sliver defects in cold rolled products[C]//Steel-making Conference Proceedings, Warrendale: Iron and Steel Society, 1990: 49.
- [2] Sengupta J, Thomas B G, Shin H J. A new mechanism of hook formation during continuous casting of ultra-low-carbon steel slabs[J]. Metallurgical and Materials Transactions: A, 2006, 37: 1597.
- [3] 李建民, 姜茂发, 孙丽枫. 20Mn23AlV 钢用低反应性连铸保护渣的开发[J]. 中国冶金, 2017, 27(12): 28. (LI Jian-min, JIANG Mao-fa, SUN Li-feng. Development of low responsiveness mold fluxes for 20Mn23AlV[J]. China Metallurgy, 2017, 27(12): 28.)
- [4] Masahito Hanao, Masayuki Kawamoto. Influence of mold flux basicity on surface quality of ultra-low carbon steel slabs[J]. ISIJ International, 2008, 48(8): 12.
- [5] 高金星, 文光华, 唐萍. Al_2O_3 对连铸保护渣中氟浸出的影响[J]. 工程科学学报, 2015, 37(5): 573. (GAO Jin-xing, WEN Guang-hua, TANG Ping. Effects of Al_2O_3 on the leaching of fluorine in mold fluxes[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37(5): 573.)
- [6] Hanao M, Tanaka T, Kawamoto M. Evaluation of surface tension of molten slag in multi-component systems[J]. ISIJ International, 2007, 47: 935.
- [7] Mills K C. Structure and properties of slags used in the continuous casting of steel: Part 2 specialist mould powders[J]. ISIJ International, 2016, 56: 14.
- [8] Hanao M, Kawamoto M, Watanabe T. Influence of Na_2O on phase relation between mold flux composition and cuspidine[J]. ISIJ International, 2004, 44: 827.
- [9] Yamauchi A. Heat transfer between mold and strand through mold flux film in continuous casting[J]. ISIJ International, 1993, 33(1): 140.
- [10] Sridhar S. Estimation models for molten slag and alloy viscosities[J]. JOM, 2002, 54(11): 46.
- [11] Mills K C, Sridhar S. Viscosities of ironmaking and steelmaking slags[J]. Ironmaking Steelmaking, 1999, 26: 262.
- [12] GAO Jin-xing, WEN Guang-hua, HUANG Ting, et al. Effect of Al speciation on the structure of high-Al steels mold fluxes containing fluoride[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2016, 99: 3941.
- [13] 付孝锦. 高铝 TRIP 钢连铸结晶器保护渣基础研究及应用实践[D]. 重庆: 重庆大学, 2014. (FU Xiao-jin. Basic Research and Application of Mold Fluxes for Continuous Casting of High-al Trip Steel[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.)
- [14] 高金星, 文光华, 黄挺, 等. $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ 渣系连铸保护渣结构的拉曼光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 10: 3190. (GAO Jin-xing, WEN Guang-hua, HUANG Ting, et al. Raman spectroscopic study on slag structure of $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ continuous casting slag[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 10: 3190.)
- [15] 李建民, 姜茂发. 连铸保护渣对 20Mn23AlV 铸坯表面微裂纹的影响[J]. 钢铁, 2017, 52(9): 48. (LI Jian-min, JIANG Mao-fa. Effect of mold fluxes on slab surface crack for 20Mn23AlV[J]. Iron and Steel, 2017, 52(9): 48.)
- [16] 唐萍. 连铸结晶器内渣膜结晶动力学及渣膜结构研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010. (TANG Ping. Study of Crystallization Kinetics and Structure of Slag Film in the Continuous Casting Mold [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.)
- [17] Kwak J H, Hu J, Mei D. Coordinatively unsaturated Al^{3+} centers as binding sites for active catalyst phases of platinum on $\gamma-Al_2O_3$ [J]. Science, 2009, 325: 1670.
- [18] Mills K C, Däcker C Å. The Casting Powders Book[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2017.

《中国冶金》杂志征稿启事

《中国冶金》是由中国科学技术协会主管, 中国金属学会、北京钢研柏苑出版有限责任公司主办的中国金属学会会刊和金属行业综合类科技期刊, 由北京钢研柏苑出版有限责任公司负责编辑出版和发行, 创刊于 1991 年, 现为月刊, 大 16 开。《中国冶金》是“中国科技核心期刊”, 美国《化学文摘(CA)》收录期刊, ASPT《中国科学文献计量评价数据库》来源期刊, 《中国学术期刊综合评价数据库》来源期刊。

1 征稿范围

《中国冶金》的报道范围涵盖了钢铁及有色金属矿山地质、采矿、焦化、废钢铁、铁合金、烧结和球团、炼铁、炉外处理、炼钢、连铸、压力加工、材料研究、能源环保等金属冶金工业的主要技术领域, 也征集部分化学化工、新型复合材料等方面的稿件。

2 投稿和联系方式

(1) 请登录“钢铁期刊网”网站(<http://www.chinamet.cn>), 点击《中国冶金》的图标或刊名导航条, 进入期刊的首页进行投稿。

(2) 直接登录《中国冶金》网站(<http://www.zgyj.ac.cn>), 从“作者投稿中心”进行投稿。

编辑部联系人: 曹微言, 魏来

电话: 010-62181032

广告部联系人: 高京慧 010-62183298

发行部联系人: 魏来

电话: 010-62181032

邮箱: CM@chinamet.cn

传真: 010-62185134

通讯地址: 北京市海淀区学院南路 76 号



衷心欢迎广大科技工作者踊跃来稿!