

高碳钢中包渣连铸过程理化性能的劣化演变研究

胡 昊^{1,2}, 王先扬^{1,2}, 吴晨辉², 石 鹏³, 谢 鑫², 曾建华², 龙木军^{1*}, 陈登福¹

(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044; 2. 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000; 3. 攀钢集团攀枝花钢铁有限公司, 四川 攀枝花 617000)

摘 要:中包渣在浇铸过程中保持良好的理化性能对稳定钢液纯净度具有重要意义。针对高碳钢中间包在连铸过程中各炉次的中包渣的理化性能进行测试研究, 并利用 Factsage 对熔渣的高温物相进行热力学计算, 分析其成分、熔点、粘度、表面张力演变规律。结果表明, 中间包冲击区与浇注区渣的理化性能呈现不同的变化规律。随浇注炉次的增加, 浇注区中包渣的 SiO_2 与 MgO 含量明显升高, 由于高熔点组分增多, 完全融化温度由 $1\,325\text{ }^\circ\text{C}$ 升高到 $1\,500\text{ }^\circ\text{C}$ 以上, 粘度上涨接近 10 倍、表面张力由 0.4 N/m 上涨到 0.8 N/m , 中包渣对夹杂物的吸附能力变差。而冲击区中包渣变化规律与浇注区相反, 在冲击区容易发生卷渣。

关键词:连铸; 中包渣; 理化性能; 夹杂物

中图分类号: TF777

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)01-0115-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.01.017

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 deterioration of physicochemical properties of tundish slag for high carbon steel during continuous casting process

Hu Hao^{1,2}, Wang Xianyang^{1,2}, Wu Chenhui², Shi Peng³, Xie Xin², Zeng Jianhua²,
Long Mujun^{1*}, Chen Dengfu¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 3. Panzhihua Steel and Vanadium Co., Ltd., Pangang Group, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: Well keeping physicochemical properties of tundish slag during continuous casting is of great significance to stabilize the cleanness of molten steel. In this study, the physicochemical properties of tundish slag for high carbon steel bloom in the process of continuous casting were tested and studied, and the high-temperature phase of molten slag was calculated by a Factsage software, and the evolution laws of its composition, melting point, viscosity and surface tension were analyzed. The results show that the physicochemical properties of slag in tundish pouring zone and impact zone show different changing evolution. With the increase of casting heats, the SiO_2 and MgO contents of tundish slag in casting zone increase significantly. Due to the increase of high melting point components, the complete melting temperature rises from $1\,325\text{ }^\circ\text{C}$ to more than $1\,500\text{ }^\circ\text{C}$, the viscosity rises nearly 10 times, the surface tension rises from 0.4 N/m to 0.8 N/m , and the adsorption capacity of tundish slag to inclusions

收稿日期: 2023-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(U1960113)。

作者简介: 胡昊, 男, 1997 年出生, 山西朔州人, 硕士研究生, 主要从事连铸方面基础研究, E-mail: huhaoms@cqu.edu.cn;

* 通讯作者: 龙木军, 1982 年出生, 男, 博士, 教授, 主要从事连铸等方面研究, E-mail: longmujun@cqu.edu.cn。

becomes poor. The change law of impact zone is opposite to that of pouring zone, and slag entrapment is easy to occur in the impact zone.

Key words: continuous casting, tundish slag, physicochemical properties, inclusions

0 引言

中间包作为常用的冶金反应器之一,具有均匀钢液温度与成分、促进夹杂物上浮与去除的重要作用。最初,在中间包内添加中包渣的目的只是为了防止钢液降温^[1-3]。而近年来,随着纯净钢等高品质钢种的开发,中包渣的冶金功能也逐渐多样化。其中,最重要的作用之一即为吸收并去除钢液中的夹杂物^[4-6]。

目前,大量学者仅针对不同中包渣的成分及其理化性能进行了研究。V H Tapia 等人^[7-8]从热力学角度出发,优化了中包渣的成分,并认为提高碱度、降低中包渣中 SiO_2 的含量有利于吸附钢中夹杂物,进而净化钢液,且具有较低的氧化性。张立峰、Yang Shufeng 等人^[5,9]明确指出,中包渣溶解吸收夹杂的能力与其化学成分直接相关。李晓亮^[10]研究发现,中包渣吸附夹杂物的过程主要受粘度及对夹杂物容纳能力的影响。研究表明,中包渣要保持适当的熔点、粘度与表面张力,从而为其有效吸收夹杂物提供合适的动力学条件。另外,中包渣在应用过程中要易于同金属液分离^[11],一方面防止卷渣的发生,另一方面有利于夹杂物在钢渣界面的传质。

但在中包渣使用后期,理化性能是否偏离正常状态,以及恶化程度是否大幅影响其使用效果也未得到深入研究。通常熔渣的熔点、粘度的升高会进一步使熔渣吸附夹杂的动力学条件变差,从而影响钢液洁净度。同时,由于中间包内往往会采用控流装置来调节流场、均匀钢液的成分与温度^[12],控流装置使中间包分为冲击区与浇注区两个部分。通常冲击区与浇注区的中包渣并不接触,在浇铸过程中,其成分与性能可能存在一定差异。然而,目前关于中包渣在吸收夹杂后理化性能恶化程度的变化,以及冲击区与浇注区的差异研究较少。

基于此,笔者以生产过程中各炉次的中包渣作为研究对象,分别对冲击区与浇注区中包渣的理化性能进行了研究。通过测定浇铸过程中中包渣的成分、熔点、粘度与表面张力,分析了其理化性能的演变规律。研究结果对实际生产中中包渣成分与性能

的调控具有重要的指导作用。

1 试验方案

对某高碳钢(Si 合金脱氧)所使用的中包渣进行研究。钢水在钢包中精炼结束后经钢包水口流入中间包开始浇铸,一个中间包可以浇注多炉钢水,该中间包共浇注 18 炉钢水,从第 4 炉开始,分别每隔 2 炉采集一次,采集第 4、6、8、10、12、14、16、18 炉钢包在浇注中期时浇注区与冲击区的中包渣。

1)采用 X 射线荧光分析仪测试中包渣成分:将渣样在球磨机球磨后经过 0.075 0 mm 筛网过滤后,经 X 射线荧光分析仪测定其主要成分含量。

2)采用熔点测试仪测试中包渣熔点:将粉状渣样制成 3 mm×3 mm 的圆柱体,放入熔点测试仪中。在氩气保护下,以 5 °C/min 的升温速率测试其高度变为原本高度的 3/4 与 1/8 时所处的温度即为该中包渣的开始熔化温度与完全流动温度。

3)采用旋转粘度测试仪测试中包渣粘度:将试样置入石墨坩埚中,随钼硅炉升温至 1 500 °C,恒温搅拌 1 h 使中包渣充分熔化并混合均匀,将标准转子完全插入熔渣液面以下一定深度,以 50 r/min 的转速转动内柱体,系统通过记录标准转子在熔渣中转动所受的粘滞阻力,从而转化为被测样品的粘度。

4)采用拉环法测试中包渣表面张力:在 1 500 °C 下保温 1 h 使中包渣熔化后,将钼环浸入熔渣液面下 5 mm,以 0.5 mm/s 的速度向上提起钼环,直至熔渣与液面之间的液膜拉断,系统通过记录钼环所受的拉力变化从而转化为熔渣的表面张力。

2 结果与讨论

2.1 浇铸过程中包渣成分的演变规律

在相同的工作温度下,中包渣的成分变化是影响其物化性能的主要因素,因此探究各成分的变化规律有助于分析其理化性能发生变化的根本原因。中包渣各成分变化见图 1,原始中包渣成分见表 1。

在浇注过程中,随着中包渣对夹杂物的吸收(主要成分为 SiO_2)与耐火材料(主要成分为 MgO)的侵蚀,导致 12 炉之前中包渣中 CaO 成分含量不

断减小。但在冲击区浇铸到约 12 炉时, 中包渣中的 CaO 含量有明显增高趋势, 可能是此阶段钢包中较高碱度的钢包渣下渣量较大导致^[13]。

由 F 含量变化趋势可知, 在浇铸开始时刻, 受

到钢包少量下渣影响, 中包渣存在较大的 F 含量, 且随着浇铸过程进行, F 含量不断下降, 而在约 12 炉附近, F 含量明显增大, 也主要是由该炉次存在较多的钢包渣下渣引起。

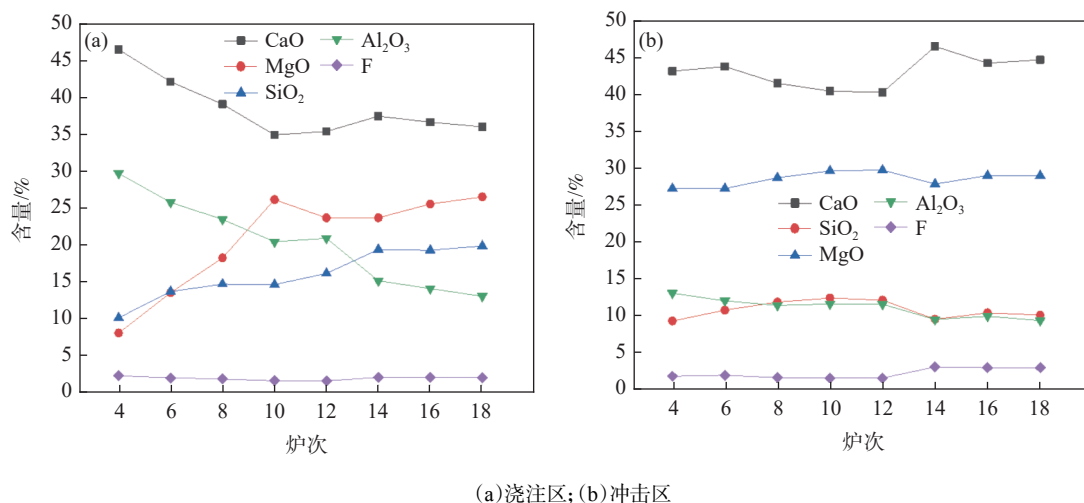


图 1 中包渣成分演变规律

Fig. 1 Evolution of composition of tundish slag

表 1 原始中包渣成分

Table 1 Composition of original tundish slag %

CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	F	其他物质 (可挥发成分)
40 ~ 50	0 ~ 10	5 ~ 10	30 ~ 40	1 ~ 5	0 ~ 10

与原中包渣相比, 浇注区内的中包渣 SiO_2 含量不断增加, 主要是由于钢中 SiO_2 夹杂物与引流砂 (SiO_2 含量为 40%) 等物质在浇注过程中上浮进入中包渣, 并逐渐积累。冲击区中包渣 SiO_2 含量增长趋势小于浇注区, 基本保持稳定, 是由于在冲击区加入了为防止中包渣结壳的碳化稻壳 (SiO_2 含量为 50%), 使得中包渣 SiO_2 在初始时期就达到了比较高的含量, 且钢包渣 (以 CaO 为主) 等下落融入中包渣, 使 CaO 等物质含量也在不断提高, 因此冲击区内的 SiO_2 降低趋势小于浇注区。

中包渣中的 MgO 含量上升的主要原因是 在浇铸过程中, 中包耐材受到钢液冲刷, 温度不均衡等因素影响, 不断受到侵蚀, 崩落并上浮进入中包渣, 因此, 中包渣中的 MgO 含量不断增加, 且与冲击区相比, 浇注区内的 MgO 含量增加更为显著, 与原中包渣成分相比, MgO 含量增加了约 10 倍^[14]。

由于中包渣不断吸附夹杂物, 同时受耐材侵蚀、钢包下渣影响, 中包渣量不断增加, 导致 Al_2O_3 成分

含量不断下降。

2.2 中包渣物相的热力学计算

随着浇铸炉次的增加, 浇注区的中包渣成分变化量明显; 而冲击区成分变化量较小, 故没有明显的渣相变化。浇注区中包渣在工作温度的矿相结构也逐渐从液相中逐渐析出镁尖晶石 (见图 2), 在 1 500 °C 下不易完全融化, 不利于中包渣发挥良好的吸收夹杂与保温功能。

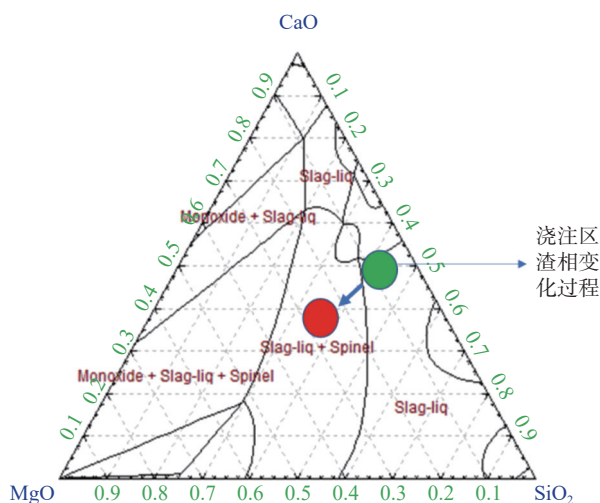


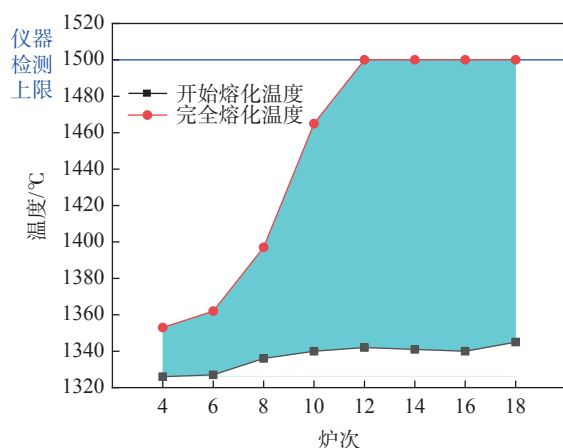
图 2 $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3(20\%)$ 相图, 1 500 °C
Fig. 2 Phase diagram of $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3(20\%)$, 1 500 °C

随着渣相的变化,浇注区中包渣中液相含量逐渐降低,在 Factsage-Equilib 中对各炉次中包渣在 1 500 ℃ 时的物相进行计算,结果如图 3 所示。

随浇铸炉次的增加,浇注区中包渣中积累的 MgO 含量明显增加, MgO 为高熔点物质,易于在渣中析出,或形成高熔点尖晶石在渣中析出,熔渣中液相的含量从第 4 炉的 98% 到第 10 炉时下降到 78%。大量析出的固相物质混合在液态熔渣中会使熔渣的熔点与粘度有大幅升高。

2.3 浇铸过程中包渣熔化温度的演变规律

图 4 为浇注过程中中包渣的熔点变化曲线。适宜的熔点能够使中包渣及时形成液渣层,防止钢水的二次氧化,并吸收夹杂物。



(a) 浇注区

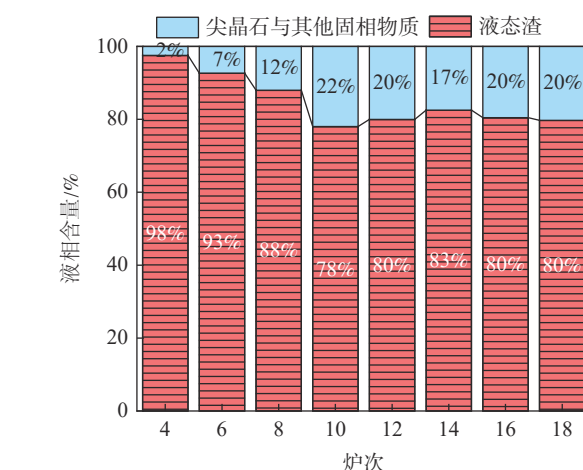
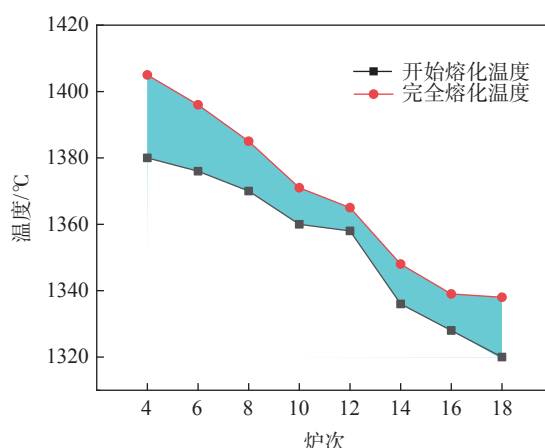


图 3 1 500 ℃ 时浇注区各炉次中包渣中液相含量
Fig. 3 Liquid phase content in tundish slag of each casting heat in pouring zone at 1 500 ℃



(b) 冲击区

图 4 中包渣熔点演变规律

Fig. 4 Evolution law of melting point of tundish slag

在 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ 熔渣体系中,熔渣熔点主要受 $\text{CaO/Al}_2\text{O}_3$ 比例、 CaO/SiO_2 比例以及助熔物(如 CaF_2 、 Na_2O)等因素的影响^[15-16]。在浇注区,随着浇注炉数的增加,中包渣的熔点整体呈现升高趋势,开始熔化温度升高幅度较小,但完全熔化温度增幅较大,在 10 炉以后超出了仪器检测温度的上限(>1 500 ℃),熔化温度区间随之变宽;而在冲击区,熔点则随炉数的增加大幅降低,且开始熔化温度与完全融化温度差异并不明显。

在浇注区,随着中包渣 SiO_2 、 MgO 含量的增加较为明显,熔渣中的 CaO 和 SiO_2 更容易形成高熔点的 Ca_2SiO_4 (2 130 ℃);并且熔渣部分组分由较低熔点的黄长石区域,如 $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$, $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ (1 392 ℃)等进入较高的尖晶石和方镁石区域,如 $\text{Ca}_{20}\text{Al}_{26}\text{Mg}_3\text{Si}_3\text{O}_{18}$, $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ (1 535 ℃)^[17]。随高熔

点物质析出并积累,导致完全熔化温度的大幅提升与熔化温度区间逐炉次增加。所以 SiO_2 、 MgO 含量的增加会使浇注区中包渣熔点升高。此外,浇注区内中包渣中的 F 含量较少,是浇注区中包渣熔点升高的另一因素。从第 4 炉到第 18 炉,开始熔化温度增加 20 ℃,完全熔化温度增长>180 ℃,熔化温度区间逐渐延长,对于液渣层的厚度以及对夹杂物的吸收能力影响明显。

在冲击区,中包渣中 SiO_2 含量无明显变化,且 $\text{CaO/Al}_2\text{O}_3$ 比值增加较大,渣中形成的高熔点的 $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$,向低熔点的 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 转变,导致中包渣熔点呈较大的降低趋势。与此同时,冲击区内受钢包下渣影响,该区域内的 F 含量较高,也是冲击区熔点降低的主要因素,第 4 炉到第 18 炉,冲击区中包渣的熔点降低 60 ℃。且冲

击区中包渣熔化温度区间较小,各炉次之间熔化温度区间的大小无明显变化。

中包渣在钢液的传热作用下会分为液渣层、烧结层、粉状层。在工作温度下,各层厚度主要由中包渣熔点所决定。熔点越高,粉状层和烧结层的总厚度增加,而液渣层变薄,过薄的液渣层不能良好地发挥其防止二次氧化、吸收夹杂的功能,而且很可能引起钢液增碳;另一方面,随着熔点的升高,烧结层变厚,容易引起中包渣结壳,导致处理中包渣操作困难,吸收夹杂物的性能大大减弱。根据前人的研究^[18],中包渣熔点稳定在 1 350 ℃ 最好,会形成稳定的三层结构,保障中包渣稳定的使用性能,避免出现结壳等问题。

通过对中包渣熔点分析研究,发现浇注区内中包渣熔点升高幅度大,会减小液渣层厚度,导致中包渣对夹杂吸收能力降低^[19]。对冲击区而言,从包次开浇至浇铸结束,冲击区中包渣变化显著,整体降低约 60 ℃,虽利于夹杂物吸收,但中包渣保温与防止二次氧化能力大幅下降。

2.4 浇铸过程中包渣粘度的演变规律

中包渣具有合适的粘度范围,既能有良好的吸收夹杂能力,又使中包渣易于与钢液分离,避免在钢液流速较快时发生卷渣。试验采用内圆柱体旋转粘度计测试各炉中包渣在 1 500 ℃ 时的粘度曲线,如图 5 所示。

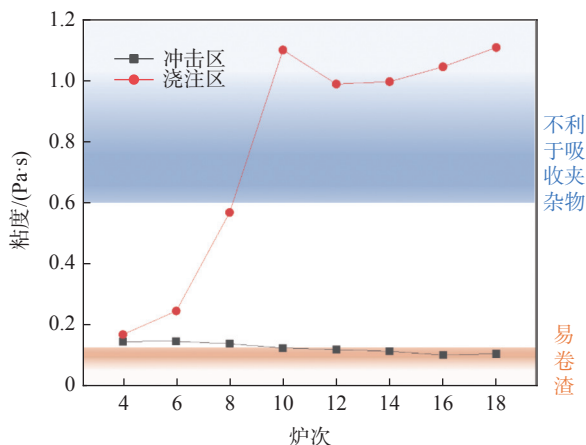


图 5 1 500 ℃ 时中包渣粘度演变规律

Fig. 5 Evolution law of viscosity of tundish slag at 1 500 ℃

在冲击区,随着浇注炉数的增加, SiO₂ 含量无明显变化,但 CaO/Al₂O₃ 比值增大, F 含量升高,粘度呈逐渐递减趋势。这主要是由于随着 CaO 和 CaF₂ 含量的大幅增加,可以向覆盖中提供使复杂硅氧离子解体的 O²⁻ 和 F⁻,促使复杂的硅氧离子解体为

简单的硅氧离子,降低了中包渣的粘度^[20-21]。相反,在浇注区, SiO₂、MgO 增幅明显,在 1 500 ℃ 的温度下并不能完全熔化,有大量析出的尖晶石类物质分散于熔体中,粘度随之大幅上升。

合适的粘度可以防止卷渣的产生并能较好地吸收钢液中上浮的夹杂物。在钢液流速较快时,中包渣粘度过小,中包渣难以与钢液分离,增大发生卷渣的可能性。在实际生产中,钢液表面的临界流速一般在 0.05 ~ 0.8 m/s,所以为防止因液面流速而造成的卷渣,要求中包渣的粘度大于 0.12 Pa·s^[18, 22]。同时中包渣粘度对夹杂物进入熔渣所受的曳力有着极其重要的影响,熔渣对固态夹杂物的曳力是固态夹杂物在钢—渣界面处分离过程的主要阻力^[9],随着中包渣粘度的升高,固态夹杂物在钢—渣界面处的停留时间将延长,周业连等人^[23]的研究表明顶渣粘度超过 0.6 Pa·s 时,固态夹杂在钢渣界面的停留时间明显增加。所以中包渣的粘度过大不利于吸收夹杂物^[9, 24]。

因此控制粘度在 0.12 ~ 0.6 Pa·s 是中包渣的理想粘度。针对本次中包渣粘度分析研究,在第 8 炉之前,粘度保持在 0.12 ~ 0.6 Pa·s,既不容易发生剪切卷渣,同时对固态夹杂物的吸收能力也较强。但 12 炉之后,冲击区中包渣粘度大幅下降到 0.105 Pa·s 左右,乳化性能变好,钢液流速过快时,钢—渣不易分离,容易造成卷渣。因此,需严格控制钢包下渣。浇注区粘度在 8 炉以后粘度升高至 1 Pa·s 以上,严重影响中包渣对夹杂物的吸收。

2.5 浇铸过程中包渣表面张力的演变规律

熔渣的表面张力是研究钢渣界面行为的关键参数,是影响钢—渣分离和液渣吸收夹杂物的能力的重要指标。表面张力与界面张力共同影响着钢—渣的黏附功,黏附功计算如公式 (1)。

$$W_{\text{黏}} = \sigma_{\text{m}} + \sigma_{\text{s}} - \sigma_{\text{ms}} \quad (1)$$

其中, $W_{\text{黏}}$ 为黏附功(J/m²); σ_{m} 为钢液表面张力(mN/m),钢液在 1 500 ℃ 时约等于 1 800 mN/m; σ_{s} 为熔渣表面张力(mN/m), σ_{ms} 为钢—渣界面张力(mN/m)。

而 Good R J 等人^[25]提出钢—渣界面黏附功可以由 σ_{m} 与 σ_{s} 共同表示,公式如下:

$$W_{\text{黏}} = \sigma_{\text{m}} + \sigma_{\text{s}} - 2\varphi_{\text{ms}} \sqrt{\sigma_{\text{s}} \sigma_{\text{m}}} \quad (2)$$

$$\varphi_{\text{ms}} = \sum_{i=1}^n \varphi_{\text{ms}(i)} \cdot X_i \quad (3)$$

其中, φ_{ms} 为界面张力参数; i 为熔渣组元; X_i 为组元

i 的摩尔分数。 $\varphi_{\text{ms}(i)}$ 数值见表 2。

钢—渣界面黏附功计算结果如图 6 所示。

表 2 $\varphi_{\text{ms}(i)}$ 的参考值
Table 2 $\varphi_{\text{ms}(i)}$ data

i 组元	$\varphi_{\text{ms}(i)}/\text{kJ}$
SiO_2	0.597
Al_2O_3	0.468
MgO	0.687
CaO	0.607
CaF_2	0.326

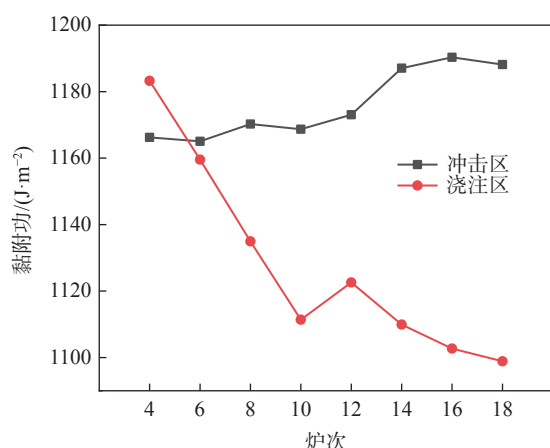


图 6 钢—渣界面黏附功演变规律

Fig. 6 Evolution of adhesion work at metal/slag interface

对渣样的表面张力分析研究表明,冲击区钢渣界面之间的黏附功随炉序增长而逐渐升高,最后一炉渣黏附功比初始炉次升高约 3%,钢渣分离时需要的能量更大,不利于钢-渣分离,容易发生卷渣现象。

3 结论

1)中间包冲击区与浇注区的中包渣成分演变规律不一致,导致两个区域中包渣的物理化学性能在浇铸过程中的变化不同。

2)浇注区中包渣随着浇铸时间的增加,碱度减小,完全熔化温度由 1 350 ℃ 增加到 1 500 ℃ 以上,粘度增加至初始状态的 10 倍左右,表面张力约上涨至初始状态的 2 倍。各项性能在浇铸到第 8 炉后严重恶化,吸收夹杂物的能力降低,中包渣的设计需要兼顾其使用后期性能恶化的问题。

3)冲击区中包渣的完全熔化温度下降约 60 ℃,粘度与表面张力随浇注炉数的增加均呈下降趋势,液渣层变厚,烧结层与粉状层变薄,不利于钢液保温,且钢液面波动较大时容易发生卷渣。

参考文献

- [1] Sun Yongchao, Huang Jun, Wu Yonglai, *et al.* Study on impurity-absorptivity of basic tundish covering flux[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2006, 27(1): 17–20.
(孙永超, 黄俊, 吴永来, 等. 碱性中间包覆盖剂吸附夹杂能力的研究[J]. 钢铁钒钛, 2006, 27(1): 17–20.)
- [2] Wang Jianchang. Influence of high basicity tundish shielding agent on improvement of cleanliness of stainless steel 0Cr18Ni9[J]. Special Steel, 2015, 36(4): 38–40.
(王建昌. 高碱度中间包覆盖剂对改善 0Cr18Ni9 不锈钢洁净度的影响[J]. 特殊钢, 2015, 36(4): 38–40.)
- [3] Zhang L, Wang W L, Shao H Q. Review of non-reactive $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ based mold fluxes for casting high-aluminum steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2019, 36(4): 336–344.
- [4] Li Dejun, Xu Mengchun, Lü Chunfeng, *et al.* Analysis on developments of covering fluxes for tundish[J]. Angang Technology, 2020, (1): 15–18, 22.
(李德军, 许孟春, 吕春风, 等. 中间包覆盖剂开发状况分析[J]. 鞍钢技术, 2020, (1): 15–18, 22.)
- [5] Cheng Limei, Zhang Lifeng. Effect of basicity of tundish power on its melting property and wetting property[J]. China Metallurgy, 2018, 28(S1): 13–16.
(程礼梅, 张立峰. 中间包覆盖剂碱度对熔化和润湿性能的影响[J]. 中国冶金, 2018, 28(S1): 13–16.)
- [6] Li Maokang, Zhang Jiongming, Luo Yanzhao, *et al.* Utilizing reduction calcium slag to make high basicity carbon-free tundish covering flux with low silicon[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2014, 26(1): 16–21.
(李茂康, 张炯明, 罗衍昭, 等. 利用还原钙渣配制高碱度低硅无碳中间包覆盖剂[J]. 钢铁研究学报, 2014, 26(1): 16–21.)
- [7] Tapia V H, Morales R D, Camacho J, *et al.* Influence of the tundish powder on steel cleanliness and nozzle clogging[J]. Steelmaking Conference Proceedings, 1996, 79: 539.
- [8] Xu Jinzhong, Han Yihua, Bi Yanxue, *et al.* Study on the dissolution behavior of Al_2O_3 for $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ based slag[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2018, 39(2): 127–131.
(许进忠, 韩毅华, 毕延雪, 等. $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 基连铸保护渣对 Al_2O_3 溶解行为的研究[J]. 钢铁钒钛, 2018, 39(2): 127–131.)

- [9] Yang Shufeng, Li Jingshe, Liu Wei. Motion of solid particles at molten metal-liquid slag interface[J]. *JOM*, 2015, 67(12): 2993-3001.
- [10] Li Xiaoliang. Study on physiochemical properties of tundish covering flux[D]. Shengyang: Northeastern University, 2010.
(李晓亮. 中间包覆盖剂理化性能的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.)
- [11] Long Xiao, He Shengping, Wang Qian. Study on structure characteristics of solid slag films of mold fluxes for peritectic steel 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] Wang Xianyang, Hu Hao, Xie Xin, *et al.* Flow behavior of molten steel during fewer strands casting of six-strand bloom[J]. *Continuous Casting*, 2022, (2): 25-34.
(王先扬, 胡谔, 谢鑫, 等. 大方坯六流中间包少流浇注时钢液的流动行为[J]. 连铸, 2022, (2): 25-34.)
- [13] Gai Shaoqun, Ding Shengli, Zhang Wentao, *et al.* Research on the mechanism of tundish slag to form the solidified crusts for continuous casting[C]//2019 National High Efficiency Continuous Casting Application Technology and Slab Quality Control Seminar. Yangzhou: Hebei Province Society for Metals, 2019.
(盖少群, 丁胜利, 张文涛, 等. 连铸中间包渣结壳机理研究[C]//2019全国高效连铸应用技术及铸坯质量控制研讨会. 扬州: 河北省金属学会, 2019.)
- [14] Xie Jian. Mechanism analysis for basic tundish fluxes to form the solidified crusts[J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2010, 9(1): 15-17.
(谢健. 碱性中间包覆盖剂结壳机理分析[J]. 材料与冶金学报, 2010, 9(1): 15-17.)
- [15] Zhang Yifei, Han Xiuli, Liu Lina, *et al.* Influence of basicity on crystallization temperature and crystalline phase of mould powder[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2015, 36(5): 103-107.
(张翼飞, 韩秀丽, 刘丽娜, 等. 碱度对保护渣结晶温度及结晶矿相的影响[J]. 钢铁钒钛, 2015, 36(5): 103-107.)
- [16] Zheng D L, Shi C B, Li Z J, *et al.* Effect of SiO_2 substitution with Al_2O_3 during high-Al TRIP steel casting on crystallization and structure of low-basicity CaO-SiO_2 -based mold flux[J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2020, 27(1): 33-41.
- [17] Xia Junfei, Xu Jifang, Liu Gongyuan, *et al.* Influence of CaO and SiO_2 content on melting properties of $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ slag system[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2010, 10(S1): 78-82.
(夏俊飞, 许继芳, 刘恭源, 等. CaO 和 SiO_2 含量对 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 熔渣熔化性能的影响[J]. 过程工程学报, 2010, 10(S1): 78-82.)
- [18] Gao Jie. Study on covering fluxes in tundish for high aluminium steel[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
(高杰. 高铝钢用中间包覆盖剂的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.)
- [19] Chen Xingrun, Hu Huanzhang. Effect of tundish fluxes on cleanliness of 430 stainless steel[J]. *China Metallurgy*, 2017, 27(8): 36-40.
(陈兴润, 胡恒彰. 中间包覆盖剂对430不锈钢钢水洁净度的影响[J]. 中国冶金, 2017, 27(8): 36-40.)
- [20] Du Yizhe, Yuan Yonggui, Li Li, *et al.* Insights into structure and properties of P_2O_5 -based binary systems through molecular dynamics simulations[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, 339: 10.
- [21] Ren Yun, Sun Luyan, Zhao Fucui, *et al.* Effect of CaF_2 content and basicity on viscosity of tundish covering fluxes[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2015, 27(1): 35-39.
(任耘, 孙璐艳, 赵福才, 等. CaF_2 及碱度变化对中间包覆盖剂黏度的影响[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(1): 35-39.)
- [22] Mo Rongzhen, Zhang Lifeng, Ren Ying, *et al.* Review on effect of composition on viscosity of low-reactive mold flux for high-Al steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2021, 33(8): 695-708.
(莫嵘臻, 张立峰, 任英, 等. 高铝钢用低反应型保护渣成分对其黏度的影响[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(8): 695-708.)
- [23] Zhou Yelian, Deng Zhiyin, Zhu Miaoyong. Consideration on removal of non-spherical solid inclusions at steel-slag interface[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2022, 22(2): 222-231.
(周业连, 邓志银, 朱苗勇. 非球形固态夹杂物穿过钢-渣界面行为研究 [J]. 过程工程学报, 2022, 22(2): 222-231.)
- [24] Abdeyazdan H, Monaghan B J. Interfacial tension in the $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-(MgO)}$ liquid slag-solid oxide systems[J]. *Metallurgical & Materials Transactions B*, 2017, 48(4): 1-11.
- [25] Good R J, Oss C J V. The modern theory of contact angles and the hydrogen bond components of surface energies [M]. Boston: Springer, 1992.