

· 试验研究 ·

## 影响连铸钢包自开率因素的分析

康 铭<sup>1,2</sup> 杨 杰<sup>1</sup> 孔令种<sup>1,2</sup> 徐 东<sup>1,2</sup> 郑 冰<sup>1,2</sup> 郭龙鑫<sup>3</sup>

(1 辽宁科技大学材料与冶金学院,鞍山 114051; 2 河北工程大学河北省高品质冷镦钢技术创新中心,邯郸 056038;  
3 河北普阳钢铁集团河北省高塑性韧性耐磨钢板技术创新中心,邯郸 056305)

**摘 要** 钢包自开是影响连铸顺行的关键环节,同时也是影响钢液洁净度的重要因素。钢包无法自开则需烧氧引流,破坏烧结层,会导致钢液大量增氧,严重降低钢液洁净度。为了提高钢包自开率以改善钢液洁净度,总结了引流砂种类、粒度、含水量、填充剂、填充方式、水口座砖形状特点以及引流砂与钢液反应等因素对钢包自开率的影响,其中粒度在 0.5~1.4 mm,并且含有适量的圆角粗颗粒、填充剂石墨的含量为 2%~4%、含水量低于 0.15% 的引流砂开浇率较高。

**关键词** 引流砂 滑动水口 钢包 自开率

## Analysis of Factors Affecting Self-Opening Rate of Continuous Casting Ladle

KANG Ming<sup>1,2</sup>, YANG Jie<sup>1</sup>, KONG Ling-zhong<sup>1,2</sup>, XU Dong<sup>1,2</sup>, ZHENG Bing<sup>1,2</sup>, GUO Long-xin<sup>3</sup>

(1 College of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051; 2 Technology Innovation Center for High Quality Cold Heading Steel of Hebei Province, Hebei University of Engineering, Handan 056038; 3 Technology Innovation Center for Wear Resistant Steel Plate of High Plasticity and High Toughness of Hebei Province, Hebei Puyang Iron and Steel Corp Ltd, Handan 056305)

**Abstract** The ladle self-opening is a key step that affects the smooth running of continuous casting. Meantime, it is an important factor that affects the cleanliness of molten steel. If the ladle can not be opened by itself, it will have to use oxygen lance for introducing liquid flowing to destroy the sintered layer, but this will lead to a large amount of oxygenation of steel and seriously damage the cleanliness of the molten steel. In order to improve the cleanliness of molten steel by increasing ladle self-opening rate, the influences of filler sand types, particle sizes, water content, additives, adding methods, shape characteristics of nozzle base brick and the reaction between filler sand and molten steel on the self-opening rate of ladle are summarized, among them, the filler sand with particle size is 0.5~1.4 mm contained appropriate amount of coarse rounded particles, filler graphite content 2%~4% and water content less than 0.15% has a higher opening rate.

**Material Index** Filler Sand, Sliding Nozzle, Ladle, Self-Opening Rate

冶金工作者围绕钢包对钢液质量的影响开展了大量的研究工作,但多集中于熔渣<sup>[1-2]</sup>、耐材<sup>[3-4]</sup>和底吹工艺<sup>[5]</sup>等。钢包不能自开,则需通过氧枪烧氧破坏滑动水口内的引流砂烧结层<sup>[6-12]</sup>,在这个过程中大量固结的引流砂、氧化铁等进入钢液,严重降低钢液的洁净度<sup>[13-15]</sup>。钢包不自开不仅会对钢液质量有着严重的影响,而且还会中断钢液的连续浇注。有学者<sup>[6-16]</sup>提出了钢包不自开的三个直接原因:(1)引流砂烧结层厚度过厚;(2)钢液渗透进引流砂<sup>[17-18]</sup>;(3)引流砂未烧结层流动性差。另外,研究人员<sup>[19-21]</sup>对钢液与引流砂之间的反应对钢包自开的影响也进行了初步探索。

### 1 钢包自开机理

钢包自动开浇是精炼结束后打开滑动水口,未

烧结的引流砂在重力作用下顺着长水口落入中间包内,烧结的引流砂瞬间失去了支撑力,在自身重力和钢液静压力作用下破裂,钢液顺着滑动水口流入中间包内。引流砂在整个过程中主要有两个作用,一是阻止钢液进入滑动水口,二是自动开浇<sup>[22]</sup>。

钢液与引流砂接触后会形成如图 1(a)所示的三层结构<sup>[23]</sup>。转炉出钢时,钢液进入钢包并与引流砂接触,使最上层的引流砂熔化形成熔化层;随着温度的降低,引流砂中的液相量减少,在液相层下方会形成烧结层;烧结层下方温度更低,几乎不存在液相,称之为未烧结层。上层的引流砂被钢液冲刷熔化后,钢液会进入水口填补上被熔化的引流砂的位置,因此提出第1层为凝钢层,第2层为烧结层,第

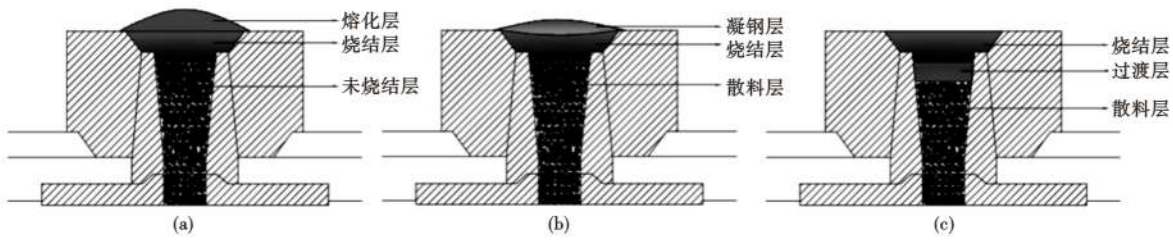


图 1 3 种引流砂结构分布图

Fig. 1 Distribution of three kinds structure of filler sand

3 层为散料层如图 1(b) 所示<sup>[19]</sup>。上层引流砂烧结后,中间部分引流砂受热也会烧结但烧结程度较轻,因此又有第 1 层为烧结层,第 2 层为过渡层,第 3 层为散料层的结构,如图 1(c) 所示<sup>[24-26]</sup>。

### 2 引流砂

#### 2.1 引流砂的种类

硅质引流砂为酸性引流砂,主要由石英砂、碱性长石以及一些添加剂组成(表 1)<sup>[27]</sup>,熔点为 1 680 ~ 1 700 °C,但硅质引流砂在高温下会发生相变使体积膨胀,会使水口内壁对引流砂烧结层的支撑力增加,散料层的摩擦力增加,影响引流砂的流动性能,影响钢包自动开浇。其价格便宜,但冶炼高碳、高合金钢种其开浇率低<sup>[19]</sup>。

铬质引流砂一般由铬矿砂、石英砂和一些添加剂组成(表 2)<sup>[10]</sup>,熔点为 1 730 ~ 1 750 °C,铬矿砂具有流动性强的特点,并且在高温下会与钢液中 FeO 以及引流砂中熔化的 FeO 反应形成二次尖晶石<sup>[10]</sup>,二次尖晶石容易破碎,更易开浇。铬质引流砂价格适中,且开浇率高。因此,企业大多使用铬质引流砂。

锆质引流砂含锆石英 Zr(SiO<sub>4</sub>) 高达 97%, SiO<sub>2</sub> 含量在 2% 左右,其熔点为 1 800 ~ 2 000 °C,价格昂贵,但开浇率高<sup>[27]</sup>。

镁橄榄石质引流砂是弱碱性砂,主要由镁橄榄石和添加剂等混合制成的,其适用于模铸,主要用于高锰钢等高合金钢种。

#### 2.2 引流砂的理化性能

表 1 硅质引流砂的化学成分 / %

| Table 1 Chemical ingredient of siliceous filler sand / % |                  |                   |                                |
|--|------------------|-------------------|--------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>   | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| 93 ~ 95  | 2.0 ~ 3.0        | 2.0 ~ 3.0         | 2.0 ~ 4.0                      |

表 2 铬质引流砂的组成 / %

| Table 2 Ingredient of chromic filler sand / % |         |                                |         |                  |
|---|---------|--------------------------------|---------|------------------|
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                | MgO     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO     | SiO <sub>2</sub> |
| 32 ~ 35                                       | 12 ~ 18 | 16 ~ 25                        | 14 ~ 17 | 2 ~ 12           |

烧结性能是指钢液与引流砂接触时,由于钢液的高温作用使引流砂自身产生烧结行为,其好坏直接影响了烧结层的厚度从而影响钢包自开率。烧结程度分为 6 个等级,完全不烧结为 0 级,完全烧结为 5 级,中间部分根据操作工手感经验分为 4 个等级,现场认为 2 ~ 3 级为最佳<sup>[27]</sup>。

流动性能是指引流砂流动的能力。在打开滑动水口的一瞬间,引流砂由于自身重力下落。如果流动能力较差,则其下落速度慢,其对烧结层的支撑力在那一瞬间不会完全消失,对开浇造成不利影响。流动性能的好坏可以用安息角的大小来判定,引流砂因重力自由下落直至静止后,在平面上会形成一个凸起,形状类似椎体,椎体表面与平面所形成的夹角叫作安息角,如图 2 所示。安息角越小,流动性越好,安息角越大,流动性越差<sup>[10]</sup>。

在狭窄的水口里,引流砂受热膨胀,会导致烧结层受到水口内壁的支撑力变大。膨胀越大,支撑力越大,破碎越困难,从而导致未烧结层内的引流砂摩擦力增加,流动性能变差,下落困难。

引流砂在承受钢液带来的高温时,温度会不断向下传导,导热能力强的引流砂会使烧结层厚度增加,影响开浇。Garlick 等<sup>[19]</sup>指出,铬质引流砂的导热性能要优于硅质引流砂。

耐火度在一定程度上用熔点表示即可。熔点高

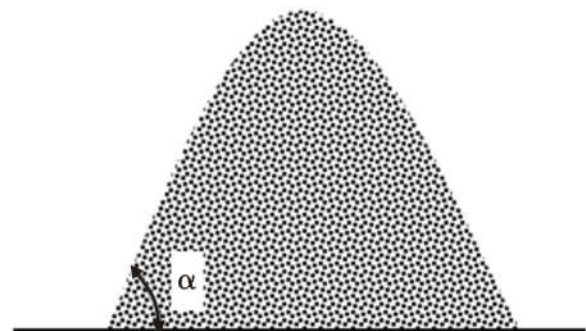


图 2 安息角示意图

Fig. 2 Diagram of angle of repose

的引流砂耐火度高,而熔点高的引流砂不容易熔化成液相,相应地也不会过度烧结,烧结形成的烧结层厚度小,且强度低,对钢包自动开浇有利。相反,熔点低的引流砂耐火度低,引流砂在高温作用下容易熔化形成液相,烧结形成的烧结层厚度大,且强度高,不利于钢包自动开浇。

### 2.3 烧结行为

钢包是否自开主要受烧结层的影响,因此,对于烧结层的研究是重中之重。烧结层可分为两层,一层为上层接触钢液烧结的反应烧结层,一层为下层因高温烧结的纯烧结层,掌握烧结层的烧结机理才能更好把控钢包自开。

#### 2.3.1 硅质引流砂纯烧结层烧结机理

引流砂烧结是通过生成液相进行的,首先硅质引流砂中富含钠、钾的长石熔化,形成液相,连接砂子颗粒,形成烧结层<sup>[28]</sup>。

#### 2.3.2 铬质引流砂纯烧结层烧结机理

铬质引流砂片进行烧结实验<sup>[20]</sup>研究发现随着烧结时间的增加,液相逐渐增加,石英相逐渐减少直至消失,即引流砂中的铬铁矿相和石英相反应生成液相是铬质引流砂的烧结机理,并且石英的含量和尺寸也是影响烧结的关键。铬矿砂的烧结性能主要取决于石英相的含量<sup>[29]</sup>。

#### 2.3.3 锆质引流砂纯烧结层烧结机理

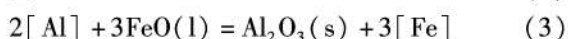
由莫来石(硅酸铝)和锆石(硅酸锆)组成的锆质引流砂在没有钢液接触的情况下也能进行足够的烧结,其烧结机理是锆质引流砂中的莫来石颗粒溶解以及锆石颗粒分解<sup>[30]</sup>。

#### 2.3.4 引流砂与钢液之间的反应

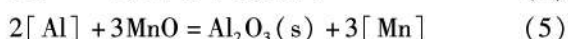
(1) [Al]与引流砂的反应:



$$\Delta G^0 = -526\,804 + 53.56 T^{[32]} \quad (2)$$

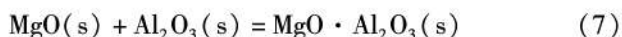


$$\Delta G^0 = -914\,747 + 162.2 T^{[32]} \quad (4)$$

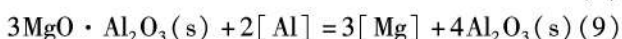


$$\Delta G^0 = -460\,865 + 58.13 T^{[32]} \quad (6)$$

反应式(1)、(3)、(5)在钢包内均能发生,但其对烧结层的影响并不明确,有待进一步研究。反应式(5)中 MnO 是反应式(18)的产物。



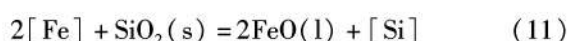
$$\Delta G^0 = -35\,600 - 2.09 T^{[11]} \quad (8)$$



$$\Delta G^0 = -898\,958.3 + 658.09 T^{[11]} \quad (10)$$

在一定温度下,引流砂内部会发生反应式(7),生成镁铝尖晶石。在刚玉-镁铝尖晶石体系中, $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  仍然有可能继续固溶于镁铝尖晶石中,发生二次尖晶石反应<sup>[31]</sup>,二次尖晶石会使引流砂烧结层产生裂纹,在开浇时,裂纹迅速扩展,烧结层破碎,从而使钢包自动开浇。反应式(9)表明钢液中的 Al 会与镁铝尖晶石反应,从而使二次尖晶石无法产生,使开浇困难。

(2) [Fe]与引流砂的反应:



$$\Delta G^0 = 340\,972 - 118.5 T^{[33]} \quad (12)$$

反应式(11)是简单的置换反应,反应会使液相增加,促进烧结层的烧结。

(3) FeO 与引流砂的反应:

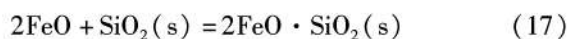


$$\Delta G^0 = -71\,086 + 11.89 T^{[34]} \quad (14)$$



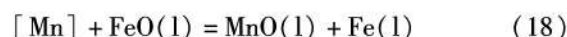
$$\Delta G^0 = -74\,440 + 26.65 T^{[32]} \quad (16)$$

反应式(13)、(15)说明 FeO 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  均反应形成尖晶石,二次尖晶石化会使烧结层体积发生膨胀,产生裂纹,自动开浇率高。



反应式(17)产物为低熔点的铁橄榄石,高温下成为液相,降低了引流砂的流动性能,增加了引流砂烧结层的厚度,不利于自动开浇<sup>[21]</sup>。

(4) [Mn]与引流砂的反应:



$$\Delta G^0 = -115\,950 + 52.04 T^{[33]} \quad (19)$$



$2\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$  是低熔点化合物,与反应式(17)类似,低熔点化合物会增加烧结层的厚度从而影响开浇。

### 2.4 引流砂对钢包自开率的影响

(1) 填充不同种类的引流砂,钢包自开率不同。

(2) 引流砂的颗粒形状会直接影响未烧结层的流动性能,带有棱角的引流砂流动性能差,开浇率低,圆角的引流砂流动性能好,开浇率高。

(3) 引流砂的粒度大小直接影响引流砂的显气孔率和体积密度,而显气孔率和体积密度直接影响烧结层的致密程度,引流砂的显气孔率低则体积密度大,烧结性能好<sup>[10,35]</sup>。目前许多钢厂都采用粗细

颗粒结合的引流砂,并进行粒度级配,提高了钢包的自开效率。梁静召等<sup>[22]</sup>认为引流砂的粒度应在 0.1~2 mm 且 1~2 mm 要占整体引流砂的 70%。祝红喜等<sup>[36]</sup>根据钢液向耐火材料中渗透的最小孔径,得到粒度的下限为 0.5 mm 或 0.7 mm,因此其认为引流砂的粒度应在 0.7~1.4 mm。

(4)引流砂在加砂前,都需要规范烘烤,将水分控制在要求范围内。引流砂中的水分也是许多学者关注的影响因素之一,引流砂中的水分在烧结时会形成水蒸气,使排布紧密的引流砂变得松散,这会导致引流砂的熔化层增大,严重影响烧结性能,烧结层的位置在水口内靠下,在烧结层上面便会形成凝钢层,使开浇困难。含水量为 0.44% 的引流砂开浇率小于含水量为 0.15% 的引流砂<sup>[23]</sup>。含水量越高,显气孔率越大,体积密度越小,开浇越困难<sup>[37]</sup>。

(5)通过加入相应的填加剂使引流砂获得对应的物理性能,如低熔点烧结剂、还原剂和润滑剂<sup>[36]</sup>。一般采用石墨作还原剂,石墨的填加量为 2%~4% 时钢包开浇率高。石墨的填加会提高钢包的开浇率<sup>[11]</sup>。加入 0.5%~2% 的焦炭可以降低烧结层厚度,提高开浇率<sup>[38]</sup>。

(6)钢液的高温 and 机械冲刷都会促进引流砂的烧结,并且钢液与引流砂之间的反应也会促进引流砂的烧结,但这种促进并不一定是有利的,因为烧结层过厚会导致钢包不自开,因此通过研究钢液与引流砂之间的反应来控制引流砂的烧结。

### 3 影响钢包开浇的其他因素

#### 3.1 冶炼条件

温度和时间对开浇率的影响最为严重。不同的冶炼条件要选择不同的引流砂进行填充水口,如果是普通钢种,出钢温度不高且精炼时间较短则用硅质引流砂或普通铬质引流砂即可,开浇率高且价格便宜。若是高合金钢,出钢温度高并且精炼时间长,则需采用精配铬质引流砂或钼质引流砂,但采用何种引流砂还需要现场的具体把控。

06Cr19Ni10 不锈钢的出钢温度对 75 t 钢包自开率的影响(图 3)表明,随着温度的升高,钢包自开率不断下降。在 1 600~1 660 °C 钢包自开率下降不大,但当超过 1 660 °C 时,随着温度的升高,钢包自开率显著下降<sup>[26]</sup>。

徐爱芳等<sup>[39]</sup>分析研究了 150 t 钢包内钢水停留时间包括转炉出钢到进精炼站以及出精炼站到连铸开浇两个过程,其对开浇率的影响如图 4 所示,从图

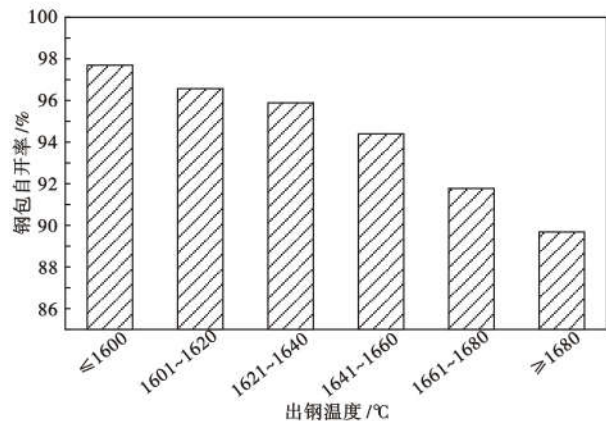


图 3 出钢温度对钢包自开率的影响

Fig. 3 Influence of tapping temperature on ladle self-opening rate

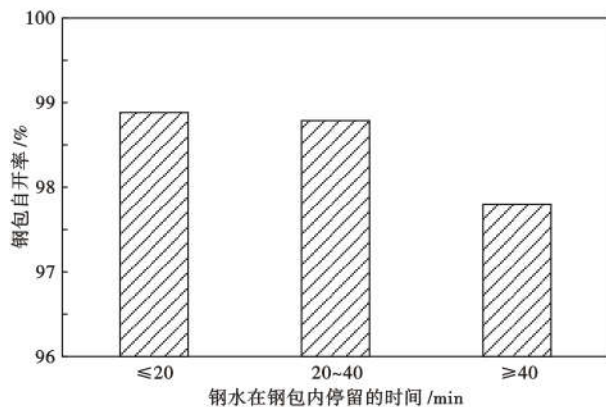


图 4 钢水在钢包停留时间对钢包自开率的影响

Fig. 4 Effect of holding time of liquid in ladle on ladle self-opening rate

4 中可以看出,周转时间从小于 20 min 到 20~40 min 时自开率相差不大,都可以达到 98.8% 以上,但当周转时间大于 40 min 时自开率大幅下降。Balajee<sup>[40]</sup>、Wessel 等<sup>[41]</sup>的研究也发现钢包周转时间对开浇率的影响很大,缩短钢包周转时间可以显著提高开浇率。

#### 3.2 其他因素

(1)引流砂的填入方式。引流砂的填充方式有投放人工抛砂、灌砂桶、导管式灌砂和引流棒<sup>[42]</sup>。灌砂桶和导管式灌砂这两种投放引流砂的方式能够使引流砂在上水口形成沙丘状,不出现凹陷或偏移,如图 5(a) 所示<sup>[18]</sup>,并且砂子在水口内分布饱满均匀,因此,企业一般采用这两种方式填加引流砂。人工抛砂准确性低,会造成引流砂偏移或出现加砂不饱满的情况,如图 5(b,c) 所示<sup>[18]</sup>,且连袋抛掷会混入污染物,但节省物力。引流棒在热修后装入,伴随钢包插正,钢包在进行工作时引流棒上的可燃物会燃烧,使其内部装的引流砂露出,完整的填满水口,

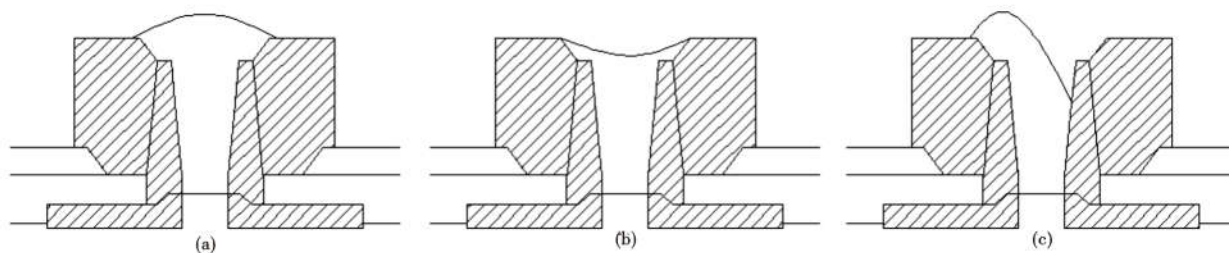


图5 引流砂的导管式(a)和人工抛砂(b)(c)填入形貌

Fig. 5 Filling of filler sand morphology by guide tube (a), manual thrown sand (b) and (c)

但其在国内应用较少。

(2)滑动水口的清理包括水口内部的残钢残渣以及座砖上的残钢残渣<sup>[43-44]</sup>。如果水口中的残钢与残渣清理不干净,一方面会缩小钢包水口的直径,另一方面,在盛钢时,残钢与残渣受热熔化会污染引流砂,导致引流砂遭受化学侵蚀,影响自动开浇。

(3)钢包烘烤制度。如果钢包的包底温度低,钢液进入钢包时,由于温差较大,就会形成凝钢,从而影响开浇<sup>[45]</sup>。

(4)出钢口角度。研究发现<sup>[10-11,36]</sup>,出钢口偏移一定角度,钢液对于钢包的冲击部位会远离引流砂,会减少引流砂的熔化,钢液就不会进入滑动水口凝固,可提高钢包的自开率。黄燕飞等<sup>[46]</sup>通过对宽高比为0.95、有效装入量为45 t的钢包进行实验研究也证实了这一结论。

(5)水口座砖。通过对重轨钢钢包研究发现将分体型的水口座砖改为整体型的水口座砖能够解决上下座砖渗钢的问题<sup>[47]</sup>。

(6)水口形状。通过对100 t的钢包研究发现将图6(a)所示的上水口改为图6(b)所示的喇叭状的上水口有利于引流砂未烧结层的自由流动,利于开浇<sup>[48]</sup>。杜成武等<sup>[18]</sup>研究也证实了这一结论。

#### 4 结论与展望

(1)锆质引流砂其熔点高达2 000 ℃,开浇容易但价格昂贵,硅质引流砂熔点在1 700 ℃左右,开浇较困难但价格便宜,应针对不同情况选择不同的引流砂。

(2)圆角颗粒的引流砂比棱角颗粒的引流砂流动性好,开浇容易。一般引流砂的粒度在0.5 ~ 1.4 mm即可,但须有适量的粗颗粒。

#### 参考文献

[1] Shin J H and Park J H. Modification of Inclusions in Molten Steel by Mg-Ca Transfer from Top slag: Experimental Confirmation of the 'Refractory-Slag-Metal-Inclusion (ReSMI)' Multiphase Reaction

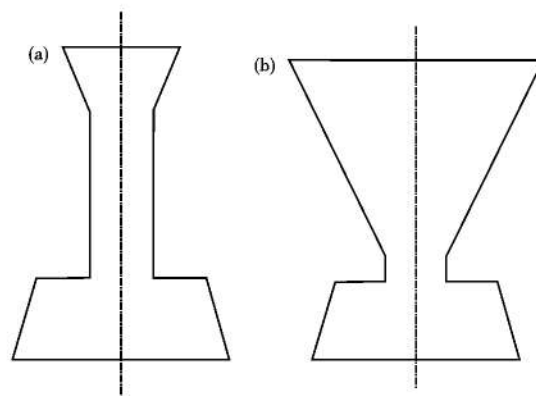


图6 改进前(a)和改进后(b)上水口形状

Fig. 6 Upper nozzle figure before (a) and after improvement (b)

(3)针对想要提高引流砂的某一性能可填加相应的填加剂,常见的填加剂有石墨和焦炭。引流砂与钢液反应若生成低熔点化合物则有可能会降低钢包自动开浇率,若生成尖晶石并能够二次尖晶石化则对钢包自动开浇较为有利。

(4)过高的冶炼温度以及过长的冶炼时间都会导致开浇困难。引流砂的填充以及水口的清理等操作因素的影响是可以避免的,因此,规范操作十分重要。为了降低水口座砖以及形状对钢包自开的影响,在实际冶炼中应不断改进滑动水口,以应对高要求的开浇状况。

(5)高合金钢种如高锰钢、高铝钢等自动开浇仍是一个需要攻克的难题,对如何提高高合金钢种的钢包自开率还有待深入研究。

辽宁省重大科技专项计划项目(2020JH1/1010001)、国家自然科学基金项目(U20A20272、52174317)和河北省钢铁联合基金(E2020402016)资助

Model[J]. Metall Mater Trans B, 2017, 48(6): 2820-2825.

[2] Qin Y M, Wang X H and Li L P, et al. Effect of Oxidizing Slag on Cleanliness of IF Steel during Ladle Holding Process[J]. Steel Re-

- search International, 2015, 86(9): 1037-1045.
- [3] Beskow K, Tripathi N N and Nzotta M, et al. Impact of Slag-Refractory Lining Reactions on the Formation of Inclusions in Steel [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2004, 31(6): 514-518.
- [4] Wang Y J, Huang A and Wu M, et al. Corrosion of Alumina-Magnesia Castable by High Manganese Steel with Respect to Steel Cleanliness [J]. Ceramics International, 2019, 45(8): 9884-9890.
- [5] 刘 彭, 隋亚飞, 徐 刚, 等. 低铁水比下钢水中氮的控制 [J]. 钢铁, 2019, 54(6): 121-126.
- [6] 孙庚辰, 王战民. 钢包滑动水口用引流砂的现状与进展 [C] // 第十四届全国不定形耐火材料学术会议, 贵阳, 中钢集团洛阳耐火材料研究院, 2017: 140-172.
- [7] 占海涛, 李 婷. 提高钢包自浇率的理论分析与措施 [C] // 第十七届全国炼钢学术会议, 杭州, 中国金属学会, 2013: 661-665.
- [8] 苏春阳, 潘明旭, 鲍家琳, 等. 钢包自开率的影响因素及改善措施 [J]. 特殊钢, 2012, 33(4): 26-28.
- [9] 周国子. 提高 80 t 钢包自动引流率的工艺实践 [J]. 特殊钢, 2012, 33(4): 29-32.
- [10] 贺俊海. 新型钢包引流砂的研制与应用 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2013.
- [11] 康 健. 一种新型碱性钢包引流砂的开发研究 [D]. 沈阳: 东北大学冶金工程, 2008.
- [12] 高金星, 陈守杰, 李秀峰, 等. 球型颗粒状钢包引流砂的研究与开发 [C] // 第十六届全国耐火材料青年学术报告会议. 营口, 中钢集团洛阳耐火材料研究院, 2018: 171-174.
- [13] 杨锋功, 邓志银, 马玉强, 等. 轴承钢铸坯中大型夹杂物来源分析 [J]. 钢铁研究学报, 2018, 30(7): 536-541.
- [14] 邓志银, 朱苗勇. 合金钢中 MnO/FeO 大型夹杂物来源分析 [J]. 钢铁, 2018, 53(2): 27-31 + 72.
- [15] 邓志银, 朱苗勇. 引流砂: 钢中大型夹杂物的重要来源 [C] // 第十一届中国钢铁年会论文集. 北京: 中国金属学会, 2017: 274-278.
- [16] Tseng T T, Wu H M and Chen C N, et al. Refractory Filler Sands with Core-Shell Composite Structure for the Taphole Nozzle in Slide-Gate System of Steel Ladles [J]. Ceramics International, 2012, 38(2): 967-971.
- [17] 米 源, 李凤喜, 邹继光, 等. 影响钢包自动开浇率的因素分析及对策 [J]. 柳钢科技, 2007(F9): 149-152.
- [18] 杜成武. 影响钢包滑动水口自然开浇率因素的分析 [J]. 本溪冶金高等专科学校学报, 2002, 4(3): 6-9.
- [19] Garlick C and Lucas J. The Effect of Sand Properties at High Temperature on Ladle Free Opening Performance [J]. Ironmaking and Steelmaking, 1991, 18(2): 12-13.
- [20] Deng Z, Glaser B and Bombeck M A, et al. Effects of Temperature and Holding Time on the Sintering of Ladle Filler Sand with Liquid Steel [J]. Steel Research International, 2015, 87(4): 484-493.
- [21] Tani K, Ueda Y and Mori S. Interfacial Reaction Between Cast Steel and Olivine Sand or Silica Sand [J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1987, 2006, 53(3): 197-204.
- [22] 常庆明, 许森泉, 李宗伦. 基于 PFC 的钢包引流砂参数标定与服役过程的数值模拟 [J]. 炼钢, 2019, 35(3): 34-41.
- [23] 梁静召, 王 倩. 提高钢包自开率的生产实践 [J]. 河北冶金, 2018, 275(11): 60-63.
- [24] 黄宏虎, 刘志鹏, 钱伟涛, 等. 影响钢包自开率的因素分析及改进措施 [J]. 河北冶金, 2020, 293(5): 50-52 + 73.
- [25] 孙永林, 罗衍昭, 贾祥超. 钢包自开率影响因素分析及措施 [J]. 连铸, 2016, 41(4): 23-25.
- [26] 田伟光. 提高 75 t 钢包自开率的工艺研究 [J]. 连铸, 2018, 43(4): 1-4.
- [27] 李孝诗. 提高钢包滑动水口自开率的对策 [J]. 首钢科技, 1995(6): 36-41.
- [28] Yusuke K, Hidekazu T and Waki N, et al. Sintering Mechanism of Silica-Rich Filler Sands for Sliding Nozzle in a Ladle [C] // Asia Steel. Yokohama: 2015.
- [29] Tomba M, 许 营. 钢包引流砂性能的测定 [J]. 鞍钢技术, 2007(6): 48-50.
- [30] Deng Z, Yang B and Zhu M. Laboratory Study on the Sintering Behavior of Zircon-Based Ladle Filler Sands [J/OL]. Steel Research International, 2021. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/srin.202100071>. DOI:10.1002/srin.202100071.
- [31] 曹振兴, 张 伟, 石 干. 二次尖晶石化反应对 MA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 材料烧结的影响耐火材料 [J]. 2011, 45(6): 417-419 + 423.
- [32] 黄希佑. 钢铁冶金原理 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014: 630-634.
- [33] Deng Z, Glaser B and Bombeck M A, et al. Mechanism Study of the Blocking of Ladle Well Due to Sintering of Filler Sand [J]. Steel Research International, 2016, 87(4): 921-929.
- [34] 陈肇友, 柴俊兰, 李 勇. 氧化亚铁与铁铝尖晶石的形成 [J]. 耐火材料, 2005, 39(3): 207-210.
- [35] Farshidfar F and Kakroudi M G. Effect of Chromite-Silica Sands Characteristics on Performance of Ladle Filler Sands for Continuous Casting [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2012, 19(3): 11-13.
- [36] 祝红喜, 邓承继, 白 晨, 等. 钢包用引流材料的特性与控制参数 [J]. 炼钢, 2008, 24(5): 49-53.
- [37] 刘 锋, 刘志强, 赵惠忠, 等. 引流砂含水量对钢包自动开浇率的影响 [J]. 耐火材料, 2011, 45(2): 112-114.
- [38] 郑仁和, 黄元梅, 刘南平, 等. 攀钢钢包自动开浇技术研究 [J]. 钢铁钒钛, 2000, 21(1): 50-54.
- [39] 徐爱芳, 王爱东, 魏星光, 等. 钢包自开率研究与实践 [C] // 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: 320-324.
- [40] Balajee S R and Bradley J E. Ladle Free-Opening Performance at Inland's Steelmaking Shops [J]. Steelmaking Conference Proceedings, 1994: 199-208.
- [41] Wessel R L, Benefiel J A and Hughes-Thompson S M. Development of Operating Practices for Improved Free-Open Performance of Slide Gate Ladles [J]. Iron Steelmaker, 1984, 11(7): 38-44.
- [42] 李彦明, 李 伟, 童则明. 浅析钢包引流砂的填充方式 [J]. 耐火与石灰, 2015, 40(3): 13-15.
- [43] 尤 良. 提高钢包自动开浇率 [J]. 科学之友, 2010(17): 7-9.
- [44] 廖德桥, 马 鹏, 吴春红, 等. 提高钢包自开率的生产实践 [J]. 江西冶金, 2018, 38(3): 21-24.
- [45] 朱稳超. 提高钢包自开率的工艺实践 [J]. 冶金管理, 2019, 373(11): 71 + 102.
- [46] 黄燕飞, 杜丕一, 李友胜, 等. 提高同侧出钢钢包自开率的研究 [J]. 耐火材料, 2006, 40(6): 433-436.
- [47] 郝 强. 提高重轨钢包自开率的工艺实践 [J]. 冶金与材料, 2018, 38(5): 9-10.
- [48] 张 梁. 提高 100 t 钢包自开率实践 [J]. 耐火与石灰, 2020, 45(1): 18-20 + 25.

康 铭 (1997-), 女, 硕士研究生 (辽宁科技大学), 高品质钢洁净化冶炼研究. E-mail: km471977617@163.com

收稿日期: 2021-09-06