

## 自旋式浸入水口对 LZ50 车轴钢 $\Phi 690$ mm 连铸坯质量的影响

赵志刚 张锦文 王松伟 王育田  
(山西太钢不锈钢股份有限公司技术中心,太原 030003)

**摘要** 研究了自旋式 6 孔浸入水口对铁路车轴钢 LZ50  $\Phi 690$  mm 连铸坯包括低倍组织、夹杂物、碳偏析等质量的影响。结果表明:与传统 5 孔水口相比,自旋式浸入水口连铸坯中心最大中心缩孔由 22.7 mm 降低到 12.8 mm,平均缩孔尺寸从 7.8 mm 减小到 5.5 mm,大于 15 mm 的缩孔消失;疏松程度均为 1 级,中心等轴晶区增大了 74.1%。夹杂物上浮效果显著,钢中夹杂物数量显著减少,且消除大于 40  $\mu\text{m}$  的夹杂物;偏析比由 0.92 ~ 1.1 降低到 0.93 ~ 1.05。

**关键词** 大圆坯 自旋式浸入水口 碳偏析 低倍 夹杂物

## Effect of Swirling Flow Submerged Entry Nozzle on Quality of $\Phi 690$ mm Continuous Casting Bloom of LZ50 Axle Steel

Zhao Zhigang, Zhang Jinwen, Wang Songwei and Wang Yutian  
(Technology Center, Shanxi Taigang Stainless Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

**Abstract** The effect of six-hole swirling flow submerged entry nozzle on quality of LZ50 railway axle steel continuous casting bloom  $\Phi 690$  mm including macrostructure, inclusions, carbon segregation etc has been studied. The results show that, compared with the traditional five-hole nozzle, the maximum central shrinkage cavity size in the center of continuous casting bloom with six-hole swirling flow submerged entry nozzle decreases from 22.7 mm to 12.8 mm, the average shrinkage cavity size decreases from 7.8 mm to 5.5 mm, and the shrinkage cavity larger than 15 mm disappears, the rating of porosity is all quality 1, and the central equiaxed crystal region increases by 74.1%. The inclusion floating effect is remarkable, the number of inclusions is obviously reduced, and inclusions larger than 40  $\mu\text{m}$  are eliminated; the segregation ratio is reduced from 0.92 ~ 1.1 to 0.93 ~ 1.05.

**Material Index** Round Bloom, Swirling Flow Submerged Entry Nozzle, Carbon Segregation, Macrostructure, Inclusion

随着对高质量、高致密度、大规格钢铁材料需求的增加,连铸坯大断面的需求也随之增加。而大圆坯由于其固有特性,通常会出现较严重的中心缩孔和宏观偏析,影响产品的成材率及性能<sup>[1-3]</sup>,因此,大圆坯中心缩孔<sup>[4-5]</sup>和成分偏析<sup>[6-7]</sup>的优化措施成为大圆坯质量提升的研究热点。近年来冶金工作者研究通过改变浸入式水口侧孔射流方向来控制结晶器内钢流流动状态,从而促进夹杂物上浮、提高结晶器过热耗散、减小铸坯中心缩孔,最终达到改善铸坯质量的目的。Shavkat<sup>[8]</sup>等人在浸入式水口内部添加一个旋流叶片,以促成钢液在结晶器内部形成水平旋流,提高过热耗散,达到了提高铸坯质量的目标,但这种旋流叶片结构较复杂,加工困难,尤其使用时受钢液的冲刷和侵蚀,易引起水口堵塞,使用寿命较短。Li<sup>[9]</sup>等通过数值模拟计算了旋流水口作用下钢液在结晶器内的流动行为及温度分布;耿佃桥<sup>[10]</sup>研究了连铸电磁旋流水口流体流动和夹杂物行为,得出旋流水口能有效去除夹杂物的结论。吴春雷<sup>[11]</sup>

研究了旋流水口连铸技术对小方坯凝固组织形貌和宏观偏析的影响,得到旋流水口能有效减轻连铸坯的宏观偏析。钢铁研究总院<sup>[12]</sup>设计了大圆坯连铸用新型旋流浸入式水口,该水口能显著降低钢水的冲击深度,促进夹杂物上浮,提高弯月面的温度。贾洪海<sup>[13]</sup>通过水模研究了旋流水口对小方坯连铸结晶器流场的影响,结果表明,改善结晶器内的流场,可起到增强表面融渣效果。程晓文<sup>[14]</sup>研究了旋流水口浇铸技术对大方坯连铸的应用中心偏析、疏松和缩孔均有明显的改善效果。本文试验研究了 6 孔旋流水口对 LZ50 车轴钢大圆坯( $\Phi 690$  mm)低倍质量、夹杂物去除及宏观碳偏析的影响,并用以指导实际生产。

### 1 试验方法

采用大圆坯( $\Phi 690$  mm)连铸生产铁路车轴钢 LZ50,其化学成分如表 1 所示。该钢种在国内的生产流程为:电弧炉(转炉)冶炼-LF-VD-连铸/模铸。

表 1 铁路车轴钢 LZ50 化学成分/%

Table 1 Chemical composition of railway axle steel LZ50/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Al
0.5	0.25	0.77	0.01	0.002	0.24	0.01	0.20	0.05	0.10	0.03

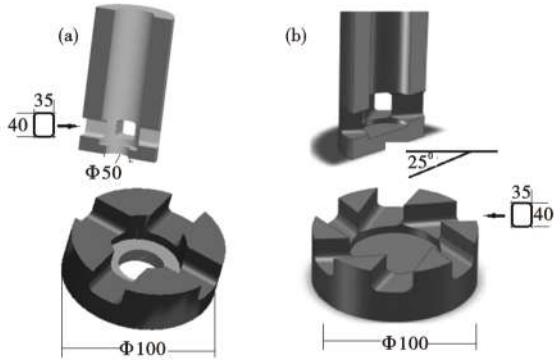


图 1  $\Phi 690$  mm 铸坯结晶器浸入式水口结构示意图:a-5 孔水口;b-6 孔旋流水口

Fig.1 Schematic diagram of submerged entry nozzle structure for  $\Phi 690$  mm casting bloom mould; a-five-hole SEN and b-six-hole swirling flow SEN

试验采用国内钢厂 3 机 3 流大圆坯连铸机(全保护浇注、结晶器电磁搅拌、二冷区电磁搅拌、末端电磁搅拌),钢包容量 60 t,中间包容量为 40 t。为研究水口结构对连铸坯质量的影响,采用两种浸入式水

口分别进行生产。两种水口结构如图 1 所示,其中图 1(a)为普通 5 孔水口,图 1(b)为 6 孔旋流水口。对比分析了上述两种水口结构条件下铸坯的低倍质量、夹杂物尺寸和类型、碳偏析程度等质量指标。

## 2 检验方法

(1) 低倍检测:在两水口条件下生产的连铸坯横截面上分别取 30 mm 厚的低倍片,沿铸坯纵向取一个 800 mm 长的纵剖低倍片,经磨光后在 40  $^{\circ}\text{C}$  1:1 的 HCl 溶液中浸泡 30 min 进行酸洗,检测铸坯

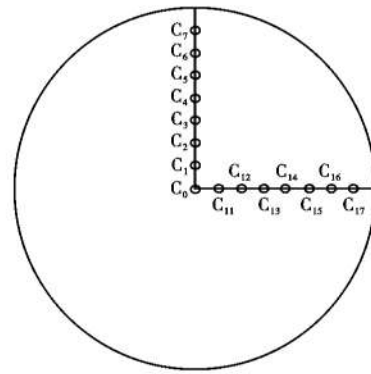


图 2  $\Phi 690$  mm 连铸坯横截面碳偏析取样位置示意图  
Fig.2 Schematic diagram of sampling location of carbon segregation at cross-section of  $\Phi 690$  mm continuous casting bloom

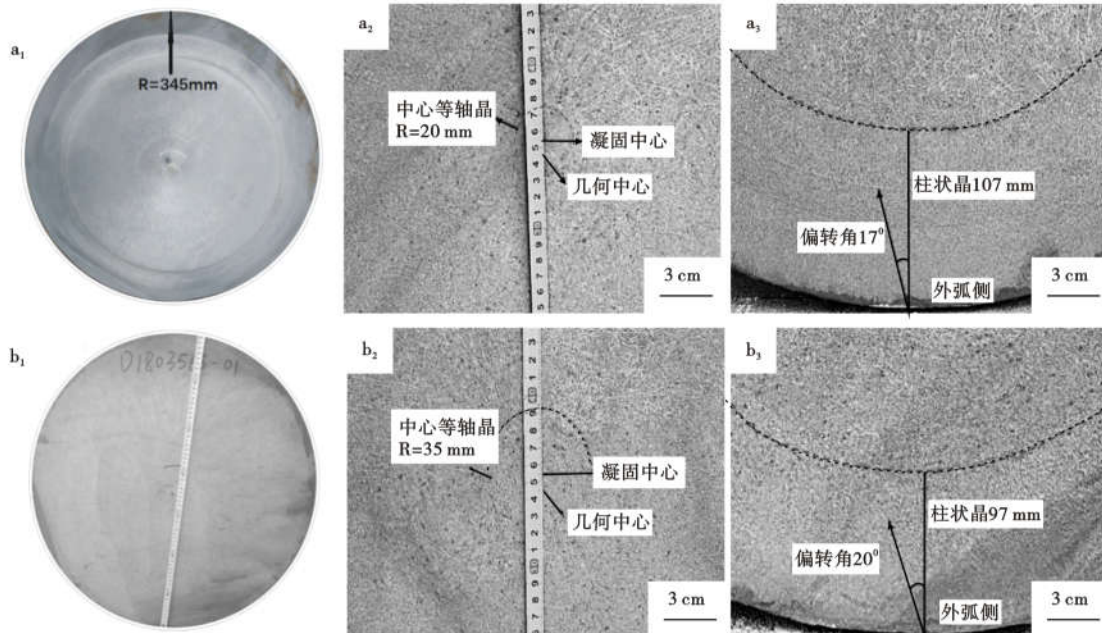


图 3 LZ50 钢 5 孔水口 ( $a_1, a_2, a_3$ ) 和 6 孔旋流水口 ( $b_1, b_2, b_3$ )  $\Phi 690$  mm 连铸坯横截面低倍组织形貌:( $a_1$ ) ( $b_1$ ) 全貌;( $a_2$ ) ( $b_2$ ) 中心和 ( $a_3$ ) ( $b_3$ ) 外侧枝晶

Fig.3 Morphology of cross section macrostructure of LZ50 steel  $\Phi 690$ mm casting bloom by 5-hole SEN ( $a_1, a_2, a_3$ ) and 6-hole swirling flow SEN ( $b_1, b_2, b_3$ ): ( $a_1$ ) ( $b_1$ ) a complete picture; ( $a_2$ ) ( $b_2$ ) bloom center and ( $a_3$ ) ( $b_3$ ) outer arc dendritic

低倍质量。

(2) 夹杂物检测:在铸坯横截面上 1/2R 处取夹杂物检测试样,经磨抛后在显微镜和扫描电镜下观察夹杂物形貌,统计夹杂物尺寸和数量,并检测其夹杂物的成分。

(3) 保护渣成分检测:在试验前后取保护渣原样和生产过程中液渣样,采用 X 射线荧光光谱仪(XRF)进行成分检测。

(4) 碳偏析检测:在断面为  $\Phi 690$  mm 的 LZ50 连铸坯内弧侧,从中心到边部每 5 cm 钻取一个屑样,钻孔直径 5 mm,钻孔深度 10 mm,一共钻取 8 个屑样,编号 C<sub>0</sub>-C<sub>7</sub>,同时在内弧侧的垂直方向取 C<sub>11</sub>-C<sub>17</sub>,如图 2 所示。在 5 孔普通水口和 6 孔旋流水口两水口条件下分别进行 20 炉试验,每炉钢均进行碳偏析检测,即两水口条件下均统计 20 组碳偏析数据。

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 旋流水口对低倍质量的影响

在通过 5 孔普通水口和 6 孔旋流水口生产的连铸坯上分别截取横剖面和纵剖面,在 40 °C 1:1 的 HCl 溶液侵蚀 30 min,得到两水口条件下的低倍组织,观察两水口条件下铸坯的凝固组织分布和铸坯中心质量。两水口条件下 LZ50  $\Phi 690$  mm 连铸坯横截面和纵截面低倍分别如图 3 和图 4 所示。

从图 3(a<sub>1</sub>)和图 3(b<sub>1</sub>)可以看出 5 孔和 6 孔水口条件下的试验连铸坯横截面内均无明显缩孔,疏松评级为 1 级,无白亮带。LZ50 钢铸坯横截面内外弧凝固组织不对称,其等轴晶区主要分布在外弧侧。分析原因,铸坯经过铸流搅拌区后内部趋近于层流流动,游离的晶粒在重力作用沉积到外弧,阻碍柱状晶的生长并成为等轴晶的形核核心。图 3(a<sub>2</sub>)和图 3(b<sub>2</sub>)为铸坯横截面中心区域枝晶形貌图,中心区域内弧侧主要为柱状晶区,外弧侧为等轴晶区,5 孔水口试验铸坯内弧侧中心等轴晶区长 20 mm;6 孔水口试验铸坯内弧侧中心等轴晶区长 35 mm。铸坯中心等轴晶率计算公式为长度比: $R_{等}/R_{圆}$ ,计算可得,5 孔水口试验铸坯中心等轴晶区比例为 5.8%,6 孔水口试验铸坯中心等轴晶区比例为 10.1%。由图 3(a<sub>3</sub>)和图 3(b<sub>3</sub>)可知,5 孔水口试验铸坯柱状

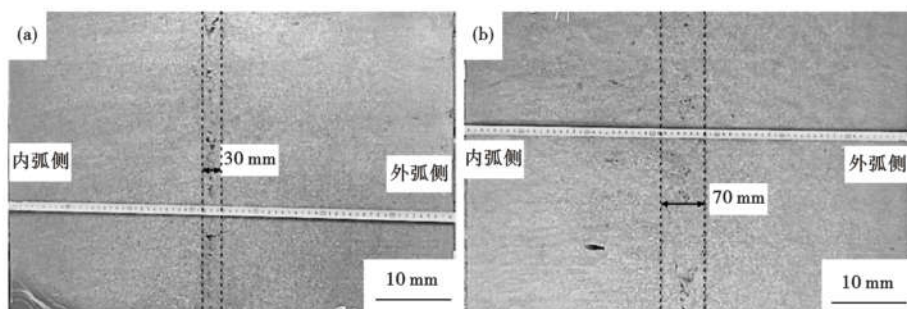


图 4 a-5 孔水口和 b-6 孔旋流水口 LZ50 钢  $\Phi 690$  mm 连铸坯纵截面低倍组织  
Fig.4 Macrostructure of longitudinal section of LZ50 steel  $\Phi 690$  mm continuous casting bloom by (a) 5-hole SEN and 6-hole swirling flow SEN

晶偏转角度为 17°,6 孔水口试验铸坯柱状晶偏转角度为 20°。分析其原因,采用 6 孔水口后,结晶内钢液流动加强,促进了钢水过热的消耗与枝晶尖端的破碎,使得外弧侧柱状晶向等轴晶转变(CET, Columnar to Equiaxed Transition)提前 10 mm。且由于结晶器内水平面上流动加强,柱状晶偏转角度随着略微增加了 3°。

测量图 4 两低倍图中最大缩孔可以得到,5 孔水口试验铸坯纵截面最大缩孔尺寸为 22.7 mm,6 孔旋流水口试验铸坯纵截面最大缩孔尺寸为 12.8 mm。图 5 为铸坯纵剖缩孔尺寸统计结果,仅统计尺寸大于 1 mm 的缩孔。由图 5 可知,采用 6 孔水口浇铸后,铸坯纵剖低倍上小尺寸缩孔(0 ~ 5 mm 和 5 ~ 10 mm)数量变化不大,大尺寸缩孔(10 ~ 15 mm)明显减少,且大于 15 mm 的缩孔消失;平均缩孔尺寸从 7.8 mm 减小到 5.5 mm。分析其原因,采用 6 孔水口浇铸加快了结晶器内钢水的过热耗散,增加了铸坯中心等轴晶区的比例,凝固收缩而形成的中心缩孔被分散到更大的区域,因此大尺寸缩孔数量减少,平均缩孔尺寸减小。

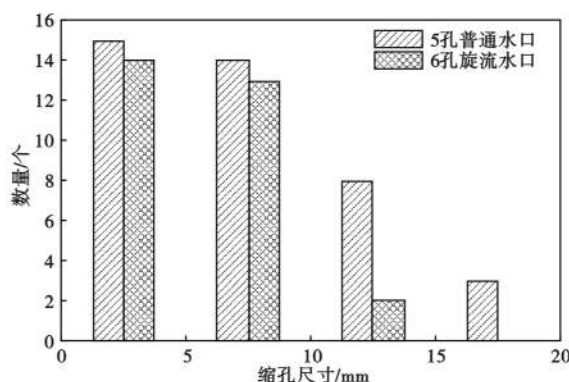


图 5 两水口条件下 LZ50 铸坯纵截面缩孔尺寸统计  
Fig.5 Statistics of shrinkage cavity size in longitudinal section of LZ50 steel continuous casting bloom with two SEN condition

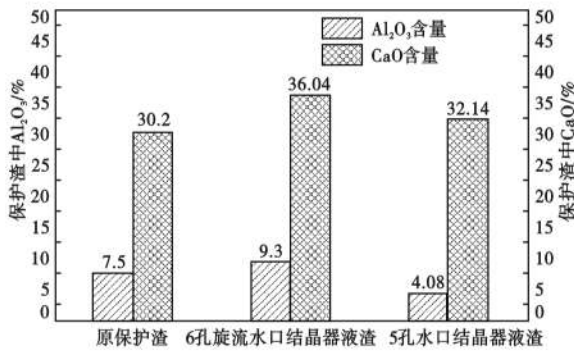


图 6 两水口结构条件下结晶器保护渣中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{CaO}$  含量  
Fig. 6  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{CaO}$  content in mould fluxes with two SEN condition

### 3.2 旋流水口对夹杂物的影响

6 孔旋流水口对钢液中夹杂物的上浮有着重要影响。LZ50 钢的主要夹杂物为  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$  系内生夹杂物,其组成主要为  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$  及少量的  $\text{Mg}$  和  $\text{Si}$  元素。结晶器保护渣对上浮的夹杂物具有吸附作用,可以通过研究保护渣的成分的变化来判断钢液中夹杂物的上浮效果。统计了两水口条件下保护渣成分使用前后的变化情况,如图 6 所示。从图 6 可以看出,6 孔旋流水口结晶器保护渣  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量增加量,由原始的 7.5 % 增加到 9.3 %,使用后比使用前增加了 24 %,  $\text{CaO}$  由 30.2 % 增加到 36.04 %,使用后比使用前增加了 19.3 %;而 5 孔水口液渣中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量由原保护渣 7.5 % 降低到 4.08 %,保护渣中  $\text{CaO}$  的含量由 30.2 % 增加到 32.14 %。综上所述,可以得出,6 孔水口更有利于  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$  夹杂物的上浮,且被保护渣吸收;而 5 孔水口对夹杂物的上浮作用不大,同时使用 5 孔水口,保护渣中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  有降低的趋势。

在 100 倍显微镜下统计 40 个钢样的夹杂物,统

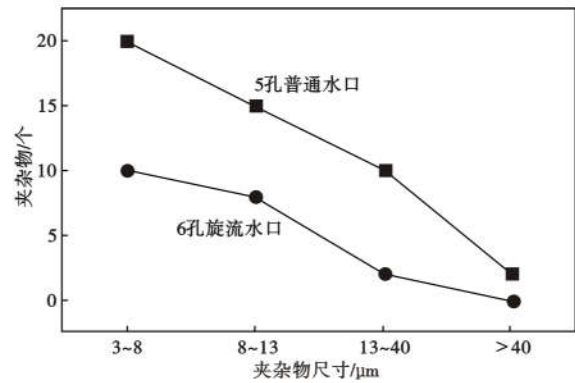


图 7 两水口结构条件下不同尺寸范围夹杂物的个数  
Fig. 7 Number of inclusions in different size range under two SEN condition

计两种水口结构下钢样中不同尺寸范围内夹杂物的数量的分布情况,如图 7 所示,从图 7 可以看出,6 孔旋流水口条件下各尺寸范围的夹杂物数量均明显少于 5 孔水口,3 ~ 8  $\mu\text{m}$ 、8 ~ 13  $\mu\text{m}$  和 13 ~ 40  $\mu\text{m}$  的夹杂物分别减少了 50%、46.7% 和 80%,且没有 40  $\mu\text{m}$  的夹杂物。

### 3.3 旋流水口对碳偏析的影响

大圆坯在连铸过程中由于其固有特性,在连铸过程中极易发生碳偏析。而碳偏析的产生原因是钢在凝固过程中发生选分结晶,会造成钢液溶质组元偏析。而溶质组元偏析主要与该溶质组元在固态和液态的分配系数、溶质组元在钢中的扩散速度、钢的冷却速度有关。而对于特定的溶质组元偏析的主要因素是钢的冷却速度。而 6 孔旋流水口能有效增加热量在结晶器内的耗散,降低钢液的温度,缩短凝固时间,从而减轻偏析。本文通过碳偏析系数来描述铸坯不同位置处碳偏析情况,定义碳偏析系数 =  $W(C)/\bar{W}(C)$

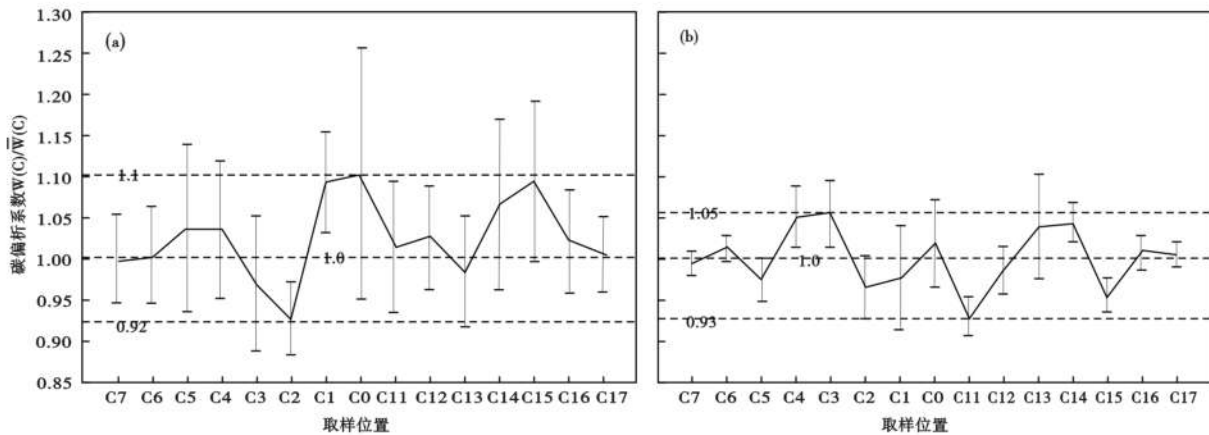


图 8 (a)5 孔普通水口和(b)6 孔旋流水口条件下各取样位置碳偏析系数  
Fig. 8 Carbon segregation coefficient at each sampling position with (a) 5-hole SEN and (b) 6-hole swirling flow SEN condition

(C)。其中  $\overline{W}(C)$  为横截面上某点的碳含量,为该断面上所有取样的平均值。

不同水口结构对车轴钢碳连铸坯横截面上各位置的碳偏析系数的影响,如图 8 所示。从图 8 可以看出,5 孔普通水口条件下连铸坯横截面上碳元素偏析系数为 0.92 ~ 1.1,6 孔水口碳元素偏析系数范围为 0.93 ~ 1.05。对比图 8(a) 和图 8(b) 可以看出,6 孔旋流水口各取样位置处 C 偏析系数明显较五孔普通水口分布均匀,且波动范围较小,使铸坯的质量更加稳定,对后续的优化和处理提供了保证。从图 8 中可以看出,碳偏析最大值位于铸坯中心,且该位置处碳含量波动范围较大,而采用 6 孔旋流水口其中心位置的碳偏析系数由原来的 1.103 15 降低到 1.017 44,波动由  $\pm 0.153$  降低到  $\pm 0.054$ ,相比于 5 孔普通水口,6 孔旋流水口中心碳偏析系数减小了 7.8%,但其波动范围减小了 64.7%,可见 6 孔旋流水口不仅对铸坯

中心碳偏析系数有积极的作用,同时对连铸坯质量稳定性有着重要影响。

#### 4 结论

(1) 采用 6 孔水口后铸坯纵截面上中心缩孔有所改善,与传统 5 孔水口相比,最大缩孔尺寸由 22.7 mm 减小到 12.8 mm; 平均缩孔尺寸从 7.8 mm 减小到 5.5 mm,大于 15 mm 的缩孔消失。

(2) 采用 6 孔水口后铸坯横截面上等轴晶率略微增加,中心等轴晶区增大了 74.1%。

(3) 采用 6 孔水口后夹杂物上浮效果显著,夹杂物数量显著减少,且消除大于 40  $\mu\text{m}$  的夹杂物。

(4) 采用 6 孔水口后碳偏析系数由 0.92 ~ 1.1 降低到 0.93 ~ 1.05; 圆坯中心的碳偏析系数减小了 7.8%,但其波动减小了 64.7%。

#### 参考文献

- [1] Presslinger H, Mayer M, Kaltenbruner T, et al. Quantitative Assessment of Segregates in Continuously Cast Slabs by Electron Probe Microanalysis[J]. Steel Research, 2002, 73(4): 149-156.
- [2] Choudhary S K, Ganguly S. Morphology and Segregation in Continuously Cast High Carbon Steel Billets[J]. ISIJ International, 2007, 47(12): 1759-1766.
- [3] 张广军, 彭继承, 张学诚, 等. 齿轮钢铸坯碳偏析的改善[J]. 特殊钢, 2010, 31(3): 38-40.
- [4] 方庆, 倪红卫, 王社教, 等. Q345E 钢  $\Phi 600$  mm 大圆坯连铸凝固数值模拟[J]. 炼钢, 2014, 30(5): 57-61.
- [5] 吴明洋. 800 mm 圆坯连铸机 45 钢生产工艺优化[J]. 中国冶金, 2018, 28(4): 53-56.
- [6] 景财良, 王新华, 许志刚, 等. 高碳钢大圆坯 R/2 偏析现象形成机理与控制策略的研究[J]. 铸造技术, 2011, 32(7): 78-82.
- [7] 牛亮, 仇圣桃, 赵俊学, 等. 连铸工艺参数对 38CrMoAl 大圆坯碳偏析的影响[J]. 钢铁研究学报, 2018, 30(5): 359-367.
- [8] Kholmatov S, Takagi S, Jonsson L, et al. Effect of Nozzle Angle on Flow Field and Temperature Distribution in a Billet Mould When Using Swirl Flow[J]. Steel Research International, 2008, 79(1): 31-39.
- [9] Li D W, Su Z J, Marukawa K, et al. Simulation on Effect of Divergent Angle of Submerged Entry Nozzle on Flow and Temperature Fields in Round Billet Mold in Electromagnetic Swirling Continuous Casting Process[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2014, 21(2): 159-165.
- [10] 耿佃桥, 雷洪, 苏志坚, 等. 连铸电磁旋流水口流体流动和夹杂物行为[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(5): 519-524.
- [11] 吴春雷, 李德伟, 朱晓伟, 等. 电磁旋流水口连铸技术对小方坯凝固组织形貌和宏观偏析的影响[J]. 金属学报, 2019, 55(7): 875-884.
- [12] 陈远清, 仇圣桃, 徐李军. 大圆坯连铸用新型浸入式水口的数值模拟研究[C]//中国金属学会. 圆坯大方坯连铸技术论文集, 北京, 2009.
- [13] 贾洪海, 于湛, 雷作胜, 等. 旋流水口对小方坯连铸结晶器流场影响的水模拟研究[J]. 金属学报, 2008, 44(3): 375-380.
- [14] 程晓文, 付谦惠, 戴方钦, 等. 旋流水口浇铸技术在大方坯连铸的应用研究[J]. 炼钢, 2015, 31(5): 32-37.

赵志刚(1985-), 男, 博士, (2018年北京科技大学), 工程师, 2009年昆明理工大学(本科)毕业, 钢铁新产品和技术开发。  
E-mail: zhaozg02@tisco.com.cn

收稿日期: 2020-07-21