

多孔水口对轴承钢 280 mm × 325 mm 铸坯结晶器钢液流场和温度场的影响

党爱国^{1,2} 崔娟^{1,2} 刘敬军^{1,2} 冯艳^{1,2}

(1 邢台钢铁有限责任公司, 邢台 054027; 2 河北省线材工程技术研究中心, 邢台 054027)

摘要 采用数值模拟的方法对比分析了直通式、四孔式以及五孔式水口对 GCr15 轴承钢 280 mm × 325 mm 坯连铸结晶器内钢液流场和温度场的影响。结果表明, 当前常用的直通式水口对坯壳无冲刷, 利于坯壳均匀生长, 但钢液冲击深度大, 在弯月面处速度小, 不利于大方坯质量的提高。当采用四孔水口时, 钢液热中心上移, 钢液面处温度可提高 8 °C, 钢液向上漩流增强, 有利于降低结晶器内钢水过热及保护渣的熔化, 但由于钢液对结晶器宽、窄面坯壳的冲刷致使冲击区域附近坯壳出现不同程度的零增长区域。当采用五孔水口时, 除了钢液热中心上移, 钢液向上漩流增强, 由于侧孔钢液流速减小, 对坯壳的冲刷减小, 有利于保护渣的快速熔化、过热度的快速降低, 坯壳的均匀生长, 显著提高大方坯的质量。

关键词 GCr15 轴承钢 280 mm × 325 mm 方坯连铸 结晶器 多孔水口 数值模拟

Effect of Multihole Nozzle on Flow Field and Temperature Field of Liquid in Mold for Casting Bearing Steel 280 mm × 325 mm Bloom

Dang Aiguo^{1,2}, Cui Juan^{1,2}, Liu Jingjun^{1,2} and Feng Yan^{1,2}

(1 Xingtai Iron and Steel Corp Ltd, Xingtai 054027; 2 Hebei Wire Engineering Technical Research Center, Xingtai 054027)

Abstract With using numerical simulation method the effect of single straight, four holes and five holes submerged nozzle on flow field and temperature field of liquid in mold for casting GCr15 bearing steel 280 mm × 325 mm bloom has been compared and analyzed. Results show that the present conventional single straight nozzle has not flow impingement on shell that is favorable for uniform growth of bloom shell, but the impact depth of liquid is large, velocity of flow at meniscus is small, it is unfavorable to increase quality of bloom; as using four holes submerged nozzle the liquid heat center moves up, the surface liquid temperature may increases by 8 °C to enhance liquid up whirl, it is available to decrease the superheat extent of liquid in mold and melt the mold powder, but due to flow impingement on narrow and width face of shell in mold, the zero growth regions with different degree near the impact region occur; as adopting five holes submerged nozzle, besides the liquid heat center moves up and the liquid up whirl enhance, due to decreasing the flow velocity of liquid in side hole, the flow impingement on shell decreases, it is available to quick melt the mold powder, fast decrease the superheat extent, uniformly grow the shell and markedly increase the quality of bloom.

Material Index Bearing Steel GCr15, 280 mm × 325 mm Bloom Casting, Mold, Multihole Nozzle, Numerical Simulation

浸入式水口的结构和类型对结晶器内钢液的流场和温度场分布具有重要影响, 通过优化浸入式水口结构, 可改善结晶器内钢液的流动状态, 进而增强夹杂物去除效果, 提高铸坯质量^[1]。目前, 为了提高高级别钢种如轴承钢、高碳硬线用钢等钢种的质量, 都需要利用大方坯生产, 然后通过开坯来提高铸坯质量。结晶器是连铸机的核心, 结晶器内部的流场、温度场和凝固分布规律对铸坯质量有直接的影响。本文以 5# 大方坯连铸结晶器为研究对象, 按照现场直通式、四孔式和五孔式 3 种不同类型浸入式水口, 利用 $k-\varepsilon$ 模型, 对结晶器内流场和温度场进行了数值模拟计算和分析。

1 数值模拟方法及相关参数

结晶器内数学模型的基本假设: (1) 钢水为不可压缩流体; (2) 钢水运动属于湍流流动; (3) 忽略液面波动及保护渣对流动的影响; (4) 忽略结晶器内凝固坯壳的影响; (5) 钢水物性参数为常数^[2]。

基于 FLUENT 软件, 采用有限体积法对控制方程组进行离散化处理, 计算区域为结晶器, 有效长度为 0.75 m; 考虑到对称性, 直通水口计算区域取结晶器的 1/4; 由于多孔水口不对称分布, 取全结晶器模型。不同类型水口的计算区域及网格如图 1 所示。

本文以 GCr15 轴承钢为研究对象, 按照大方坯连铸机 (280 mm × 325 mm) 进行建模 (表 1)。

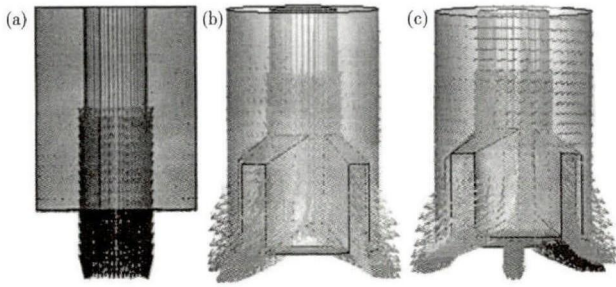


图 1 (a) 直通; (b) 四孔和 (c) 五孔浸入式水口内腔中钢液流场分布速度矢量图

Fig. 1 Velocity vector diagram of flow field distribution of liquid in straight (a), four holes (b) and five holes (c) submerged nozzle

表 1 GCr15 钢种的数值模拟相关计算参数

Table 1 Relevant calculated-parameters of numerical simulation for steel GCr15

断面/ (mm × mm)	过热度/ ℃	拉速/ (m · min ⁻¹)	水口浸入深度/mm	
			直通式	多孔式
280 × 325	30	0.7	100	120

2 计算结果及分析

2.1 水口内腔中钢液流场分析

以 GCr15 钢为研究对象,在拉速为 0.7 m/min、5# 水表情况下分析不同类型水口作用下结晶器内钢液的流场和温度场。钢水的速度矢量图和流线图分别代表钢液流动速度和运动轨迹,钢液在浸入式水口内腔中的流动状况如图 1 所示。

由图 1 可以看出,在浸入式水口内腔中,直通式水口的钢液在垂直方向上整体向下冲击,四孔式和五孔式水口内钢液向侧孔喷出时速度迅速减小,由于钢液冲击的影响,高压区位于垂直方向的水口出口,直通式和五孔式垂直方向出口的钢液压力较大。由于多孔水口的不对称射流,致使钢液射流方向有一定偏角,从而在结晶器内形成了漩流,对钢液有一定的搅动作用。

2.2 结晶器内钢液流场分析

2.2.1 钢液在结晶器内的流动状态

利用流线分布可以很好的描述钢液的运动轨迹和结晶器内的流场分布^[3]。

由图 2 (a) 和图 3 (a) 看出,当采用直通式水口时,钢液在结晶器内的冲击深度较深,并在距结晶器上沿 600 mm 左右形成漩流,由于漩涡

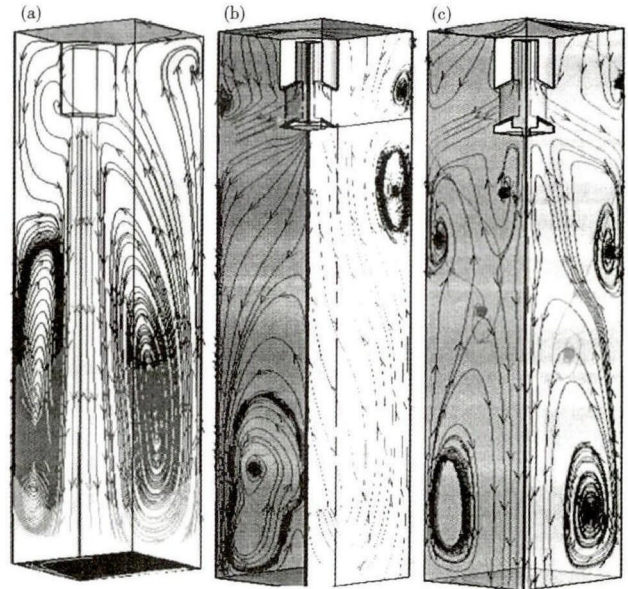


图 2 (a) 直通; (b) 四孔和 (c) 五孔浸入式水口时结晶器内钢液流线及停留时间分布图

Fig. 2 Distribution diagram of flow line and residence time of liquid in mold with straight (a), four holes (b) and five holes (c) submerged nozzle

流动距离弯月面较大,对钢液面的冲击较大。由于钢液冲击较深,速度较大,会使夹杂物迅速冲击在结晶器下端,不利于夹杂物上浮。由图 2 (b) 和图 3 (b) 可见,当采用四孔水口时,钢液到达水口底端后从 4 个侧孔流出,由于钢液流股不是垂直于结晶器壁喷出,因此会在水口下部区域形成微弱的漩涡流动。四孔式水口形成了多个小的漩流区,这样可以加速钢液中夹杂物的上浮和去除,另外四孔式水口出口方向与结晶器壁形成一定的角度,四孔水口对钢液有一个搅动的作用。由图 2 (c) 和图 3 (c) 看出,五孔式水口和四孔式水口一样形成了多个漩流区,由于五孔式水口在垂直方向上有出水口,钢液在侧孔方向上的流速很小,因此所形成的漩涡也较小,五孔水口同样形成了水平方向的漩涡流动,有利于等轴晶生长。

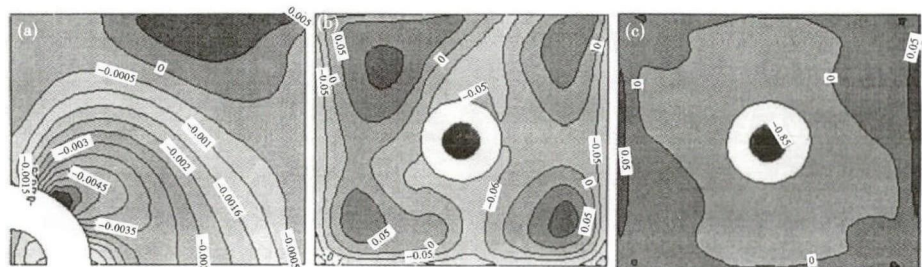


图 3 弯月面处钢液流速等值线分布图:浸入式水口 (a) 直通式; (b) 四孔式; (c) 五孔式
Fig. 3 Contour map of distribution of liquid steel flow velocity at meniscus: submerged nozzle- (a) straight; (b) four holes and (c) five holes

由 3 种类型水口条件下结晶器内钢液流线分布图,可以直观反映新鲜钢液从进入结晶器后的流动轨迹。结合流线分布图,利用 DPM 模型模拟粒子在结晶器内的运动轨迹以及停留时间可以得出,直通式水口条件下钢液在结晶器内的平均停留时间仅为 121 s,四孔式和五孔式水口条件下,钢液在结晶器内的平衡停留时间分别为 173 s 和 195 s,采用多孔水口可以延长钢液在结晶器内的停留时间,因此采用多孔水口可为夹杂物的去除创造良好的物理条件。

2.2.2 不同类型水口对钢液的搅动分析

由于多孔水口出口方向与结晶器壁成一定角度,因此采用多孔水口可以在水平方向上对钢液进行搅动,可以使钢液做旋转运动,起到漩流水口的作用^[4]。如图 4(a₁, b₁)所示为不同类型水口条件下,结晶器1/4横截面上钢液的速度矢量图。

由图 4(a₁, b₁)可以看出,直通式水口条件下,结晶器横截面上的钢液速度较小且不做旋转运动,不利于保护渣熔化,结晶器角部及边部区域的钢液基本处于相对静止状态,不利于钢液中夹杂物的上

浮,但是可以减轻对凝固坯壳的冲刷,减少表面裂纹的产生。由图 4(a₂, b₂)可以看出,结晶器横截面上的钢液由于水口出口方向不一致,使钢液在结晶器内进行了旋转运动,对结晶器中心区域的钢液搅动较弱,对结晶器角部及边部区域的钢液运动加剧,对凝固坯壳的冲刷较严重,不利于铸坯表面裂纹的控制,但对钢液的搅动可以促进中心等轴晶的生长,促进钢水中夹杂物的快速上浮。由图 4(a₃, b₃)可以看出,钢液在水平方向上的搅动没有很明显的方向性,但是在结晶器各个区域的钢液搅动较均匀,有利于结晶器内夹杂物上浮和铸坯表面裂纹的控制,因此从对结晶器内钢液搅动方面看,五孔式水口更有利于夹杂物上浮。

2.3 水口类型对结晶器内温度场的影响

优化流场可以促进夹杂物的上浮和使钢液热中心上移,优化温度场可以促进钢液温度的均匀分布和凝固坯壳的均匀生长,改善铸坯的低倍质量^[5]。

由图 5 可以看出,四孔式水口在结晶器内的高温区域有所上移,且高温区域范围分布较大。直通式、四孔式和五孔式水口条件下弯月面温度分别为:

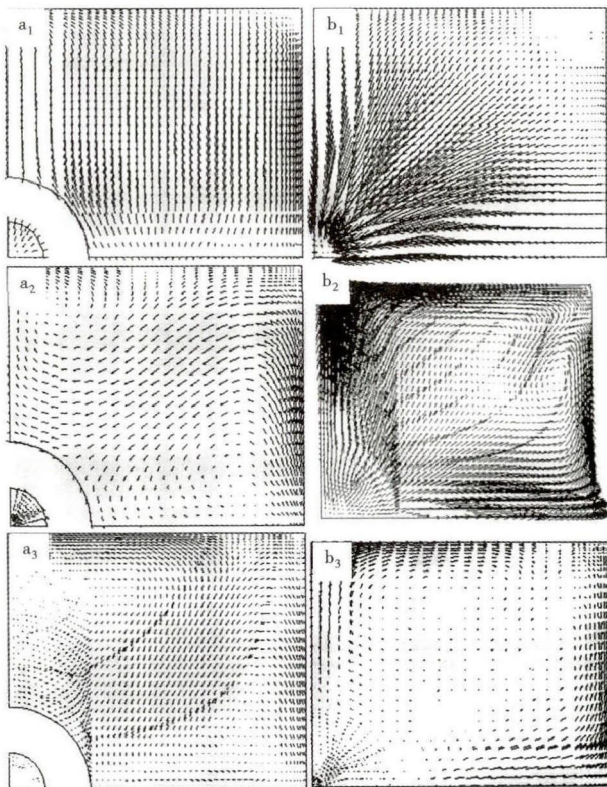


图 4 结晶器横截面上钢液的速度矢量图:(a₁)(b₁)直通式水口;(a₂)(b₂)四孔水口;(a₃)(b₃)五孔水口;距弯月面 10 mm (a₁)(a₂)(a₃)和 130 mm(b₁)(b₂)(b₃)

Fig. 4 Velocity vector diagram of liquid at cross section of mold: (a₁) (b₁) straight nozzle; (a₂) (b₂) four holes nozzle an (a₃) (b₃) five holes nozzle; distance from meniscus 10 mm (a₁) (a₂) (a₃) and 130mm (b₁) (b₂) (b₃)

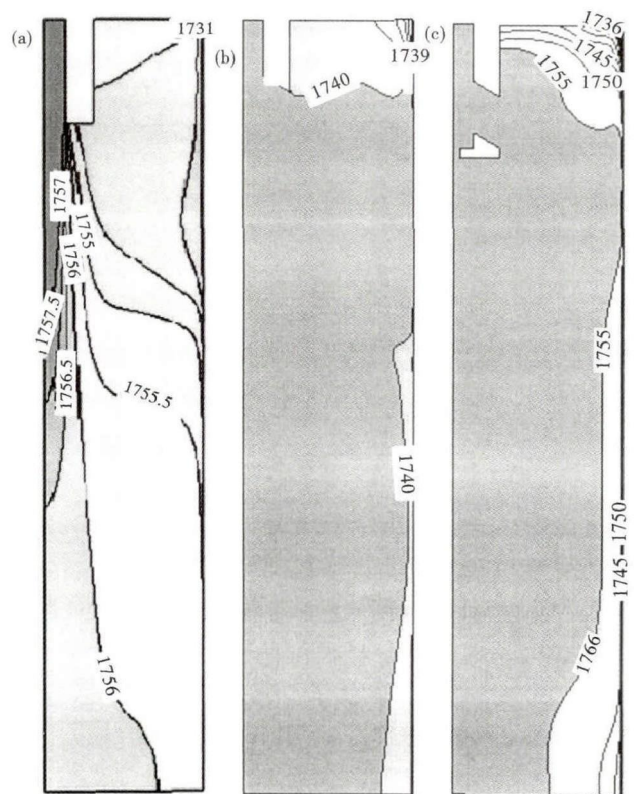


图 5 (a)直通;(b)四孔和(c)五孔浸入式水口时结晶器中心纵截面上钢液的温度场分布图

Fig. 5 Distribution diagram of temperature field of liquid at mold center longitudinal section with straight (a), four holes (b) and five holes (c) submerged nozzle

1 731, 1 739, 1 736 K, 四孔式和五孔式水口的弯月面温度比直通式水口的弯月面温度分别提高了 8 °C 和 5 °C (由于五孔式水口侧孔出水速度较四孔式水口小, 因此上回流区域钢液流速较小), 有利于保护渣熔化。

2.4 水口类型对铸坯凝固坯壳厚度的影响

由于宽面和窄面的凝固坯壳厚度变化规律一致, 本文以宽面坯壳为例描述不同类型水口浇铸条件下凝固坯壳生长的规律, 不同类型水口浇铸条件下凝固坯壳厚度如图 6 所示。

如图 6 所示, 直通式水口下凝固坯壳均匀生长,

基本上不出现零增长和负增长现象, 坯壳生长过程最均匀; 四孔式水口浇铸条件下, 凝固坯壳在水口射流区域有一段零增长甚至负增长区域, 坯壳生长不均匀; 五孔式水口和四孔式水口变化一致, 但五孔式水口零增长区域较短, 没有负增长现象产生。

由图 7 可以看出, 四孔式水口浇铸条件下凝固坯壳生长过程最不稳定, 由于四孔式水口侧孔钢液流速最大, 钢液对初生凝固坯壳的冲刷非常严重, 因此在距弯月面 0.20 ~ 0.35 m 凝固坯壳呈零增长甚至负增长趋势, 对铸坯质量有较大影响。五孔式水口也由于钢液对坯壳的冲刷在距弯月面 0.20 ~ 0.35 m 坯壳生长速度非常慢, 但不存在零增长现象。

3 结论

(1) 直通式水口下钢液在结晶器内的平均停留时间为 121 s, 四孔式和五孔式水口下, 钢液在结晶器内的平均停留时间分别为 173 s 和 195 s, 因此采用多孔水口可为夹杂物的去除创造良好的物理条件。

(2) 四孔式和五孔式水口在结晶器内的高温区域有所上移, 且高温区域范围分布较大。五孔式水口条件下的弯月面温度最高, 最有利于保护渣熔化。

(3) 直通式水口浇铸下凝固坯壳生长过程最均匀; 四孔式水口浇铸下, 距弯月面 0.20 ~ 0.35 m 凝固坯壳呈零增长甚至负增长趋势, 对铸坯质量有较大影响; 五孔式水口也在距弯月面 0.20 ~ 0.35 m 坯壳生长速度非常慢, 但不存在零增长现象。

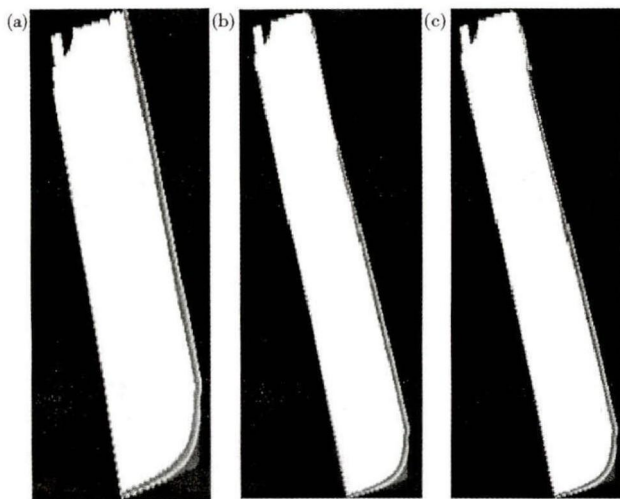


图 6 (a) 直通; (b) 四孔和 (c) 五孔浸入式水口时铸坯凝固坯壳厚度分布图

Fig. 6 Distribution diagram of casting slab solidified shell thickness with straight (a), four holes (b) and five holes (c) submerged nozzle

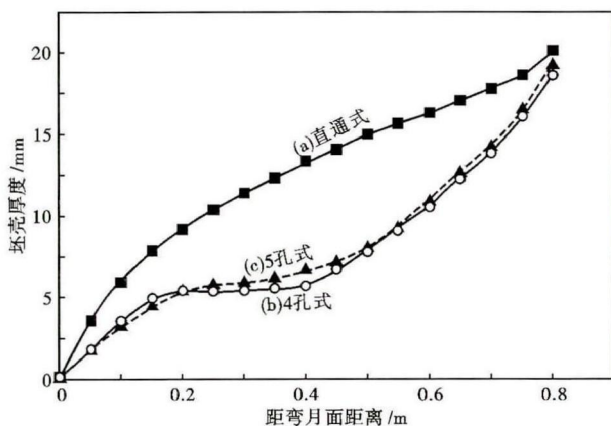


图 7 (a) 直通; (b) 四孔和 (c) 五孔浸入式水口铸坯宽面凝固坯壳厚度分布曲线

Fig. 7 Distribution curves of solidified shell thickness at width face of casting slab with straight (a), four holes (b) and five holes (c) submerged nozzle

参考文献

- [1] 蔡开科. 连铸坯质量控制 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [2] 陈远清, 尚正鸿, 陶乃标, 等. 200 mm × 200 mm 方坯连铸用新型浸入式水口的数值模拟 [J]. 特殊钢, 2014, 35(2): 13-15.
- [3] 孙海波, 张家泉, 王敬慧, 等. 水口类型对大方坯结晶器内钢水流动与凝固行为的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(2): 25-29.
- [4] 贾洪海, 于 湛, 雷作胜, 等. 漩流水口对小方坯连铸结晶器流场影响的水模拟 [J]. 金属学报, 2008, 44(3): 375-380.
- [5] 杨 建, 李 杰, 王世俊, 等. 浸入式水口结构对大方坯结晶器流场和温度场影响的数值模拟 [J]. 钢铁研究学报, 2011, 39(8): 12-15.

党爱国 (1984-), 男, 硕士 (2011 年辽宁科技大学), 工程师, 2008 年辽宁科技大学 (本科) 毕业, 连铸坯质量控制。
E-mail: dangaiquo@163.com

收稿日期: 2015-11-02