

4孔浸入式水口结晶器钢水流场的仿真分析及其在连铸生产中的应用

吴国文 李明晓

(江阴兴澄特种钢铁有限公司, 江阴 214429)

摘要 为减少轴承钢 300 mm × 300 mm 连铸坯的碳偏析, 通过 CFX-4.4 软件仿真分析了连铸结晶器内钢水流动和传热凝固过程, 探讨了有关工艺参数和浸入式水口结构的关系。实践表明, 通过 4 孔水口替代直孔水口, 铸坯的碳偏析级别由 1.0 ~ 2.0 级降至 1.0 ~ 1.5 级, 采用 4 孔水口中心碳偏析 ≤ 1.0 级占 79%, 直孔水口仅为 50%。

关键词 轴承钢 连铸方坯 4 孔浸入式水口 中心碳偏析

Simulation Analysis on Liquid Steel Flow Field in Mold with 4 Holes Immersed Nozzle and Its Application in Casting Production

Wu Guowen and Li Mingxiao

(Jiangyin Xingcheng Special Steel Co Ltd, Jiangyin 214429)

Abstract Liquid steel flow and heat transfer-solidification process were simulated and analyzed by CFX-4.4 software, and relation between relative process parameters and immersed nozzle structure has been discussed in order to decrease carbon segregation of 300 mm × 300 mm cast bloom of bearing steel. Production practice showed that a immersed nozzle with 4 holes was used instead of original one with straight hole, the center carbon segregation rating of cast bloom decreased from 1.0 ~ 2.0 to 1.0 ~ 1.5, and the percentage of ≤ 1.0 rating of bloom with using 4 holes nozzle was 79% while that with using straight hole nozzle was only 50%.

Material Index Bearing Steel, Cast Bloom, Immersed Nozzle with 4 Holes, Center Carbon Segregation

1 铸坯生产工艺

100 t 铁水预处理炉 → 100 t 转炉 → 100 t 钢包精炼炉 → 100 t RH → 5 机 5 流 300 mm × 300 mm 合金钢连铸机 (DEMAG)。

中间包工作液位 25 t, 溢流液位 28 t, 构造形式为梯形。采用 4 孔水口, 并与结晶器壁成 90° 安装: 使钢流的热点上移, 并加强与结晶器壁接触换热, 进一步降低其过热度; 减轻直通水口中心区域温度过高的现象, 降低柱状晶的搭桥机率。

为此对 3 种浸入式水口进行试验并进行仿真分析和研究。其中第 1 种为圆筒直管式, 内外径分别为 45 mm 和 90 mm, 目前已被广泛使用; 另外两种的工作端为 4 开孔 90° 对称分布式, 开孔倾角分为水平 0° 和向上 12° (图 1)。实际应用时, 4 孔水口的各开孔宜在水平面上与结晶器铜板保持垂直, 水口浸入钢液的深度一般控制在 100 ~ 150 mm。

2 仿真分析和研究

开展数值仿真工作的基本思路 and 过程为: (1) 根据大方坯连铸结晶器和浸入式水口实际形状尺寸, 在 CFX 流体分析软件平台上进行空间结构建模; (2) 根据实际生产工艺 (结晶器冷却水流量、进

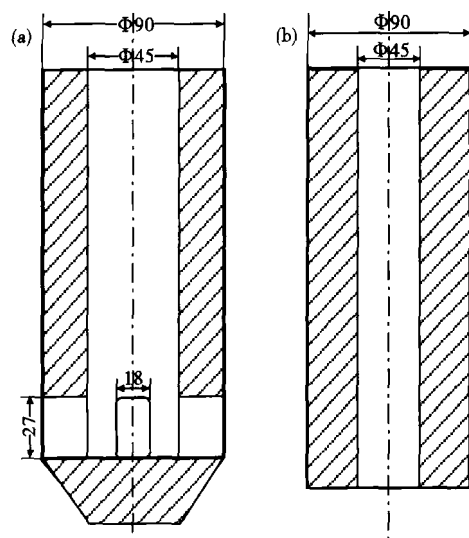


图 1 4 孔水口 (a)、直孔水口 (b) 示意图

Fig. 1 Schematic diagram of immersed nozzle with 4 holes (a) and with straight hole (b)

出口水温差和二冷区冷却强度) 确定传热凝固仿真计算的边界条件; (3) 在 CFX 软件平台上进行程序代码的二次开发和编程, 用以进行传热凝固的仿真计算; (4) 针对不同拉速和水口插入深度等工艺条件, 分别考察结晶器内温度分布, 坯壳凝固发育状况等冶金行为。

2.1 数学模化和边界条件

2.1.1 空间结构的模化及有关简化

主要研究包括:(1)结晶器内的钢水和坯壳;(2)浸入式水口内腔中的钢水;(3)结晶器下方铸坯坯壳及其包围的钢水流动和传热凝固行为。

其中浸入式水口内外结构尺寸对结晶器内钢水射流状况和液面表动具有显著影响,必须将其纳入仿真研究工作的范围之内;结晶器下方铸坯坯壳包围的钢水与结晶器内的钢水共同构成了钢水内循环流动,故此也必须将其考虑在内。

在体系空间结构的模化过程中,作如下简化:(1)钢水自由液面的方法分析时,忽略铸坯坯壳的影响;(2)将浸入式水口内外结构中的圆角和小角度倾角按直角考虑;(3)因体系几何关系和动力条件的对称性,取实际空间体系的1/4作为仿真计算的对象。在CFX软件平台上进行结构空间建模。

2.1.2 流场计算涉及的基本方程

基于上述空间结构和恒定的拉坯速度,结晶器内的钢水流动呈稳态,即任何一个位置上的湍流时均速度、湍流脉动参数以及压力等不随时间发生变化,同时进口和出口的钢水流量保持一致。对此湍流流动过程的数学描述分别需要以下微分方程:(1)时均化的Navier-Stokes方程;(2)连续方程;(3)标准 κ - ϵ 模型。

2.1.3 钢水流动和传热凝固的耦合计算方法

连铸结晶器内液态金属的凝固使得其中的热物理现象表现为热-力耦合条件下的多相流动。结晶器内的金属可分为液相、固相和两相区等3层结构,稳态情况下,金属所有的运动参数和物性参数均不随时间发生变化,而仅仅是空间坐标($x_i, i = x, y, z$)函数^[1]。结晶器内金属的主要物理参数包括:温度(T);固相率(f_s),是温度 T 的函数;液-固混合体速度 $u_i (i = x, y, z)$ 。

在假设液相和固相密度相同的条件下,液、固金属及其混合体的宏观运动速度存在下式关系。

$$u_i = u_{s,i} \cdot f_s + u_{l,i} \cdot f_l$$

式中: $u_{s,i}, u_{l,i} (i = x, y, z)$ - 分别为固相和液相速度,设拉坯方向为 x ,拉坯速度 $= V_{\text{cast}}$,液相率 f_l ,则分别有 $u_{s,x} = V_{\text{cast}}$ 和 $u_{s,y} = u_{s,z} = 0; f_l = 1 - f_s, f_s$ 为固相率。

基于湍流时均化的Navier-Stokes方程和能量守恒方程,构造能够分别描述液相、固相以及两相区金属运动和传热凝固的统一结构模型。其要点包括:(1)假设结晶器内各部分金属的密度相同,按单相流

计算液固相金属的运动,由呈空间分布的液相率 f_l 的大小来界定金属凝固状态;(2)采用标准 κ - ϵ 模型描述液相钢水的湍流特性;(3)两相区中流体承受的附加阻力按多孔介质模型处理;(4)能量方程中将两相区凝固潜热的释放作为源项处理。

本研究工作在CFX软件4.4版本的平台上进行了用于连铸过程钢水凝固计算的二次代码开发,取得了良好的收敛性和较高的计算效率。

3 4孔水口生产试验

用4孔水口共试验3个浇次共计24炉。试验在1、2流进行,1流为开孔倾角 0° 的4孔水口,2流为开孔倾角向上 12° 的4孔水口,与5流的直孔水口进行对比,除水口不同外,其它参数均不作改动。

由表1可见,采用4孔水口(倾角 0°)中心碳偏析 ≤ 1.0 级为79%;4孔水口(倾角 12°)为75%;直孔水口为50%。

表1 使用4孔水口(倾角 0° 和 12°)和直孔水口的轴承钢连铸坯中心碳偏析比较/级

Table 1 Comparison of center carbon segregation of bearing steel cast bloom using immersed nozzle with 4 holes (angle 0° and 12°) and with straight hole /rating

炉号	水口			炉号	水口		
	4孔 (倾角 0°)	4孔 (倾角 12°)	直孔 水口		4孔 (倾角 0°)	4孔 (倾角 12°)	直孔 水口
253	1.0	1.0	1.0	265	1.0	1.0	1.0
254	1.0	1.5	1.5	266	1.0	1.0	2.0
255	1.0	1.0	1.5	267	1.5	1.0	1.0
256	1.5	1.0	2.0	268	1.0	1.0	1.5
257	1.0	1.5	1.0	269	1.0	1.0	1.0
258	1.5	1.0	2.0	270	1.0	1.5	1.5
259	1.0	1.0	1.5	271	1.0	1.0	1.0
260	1.0	1.0	1.0	272	1.0	1.5	1.0
261	1.5	1.0	1.0	273	1.5	1.0	1.5
262	1.0	1.0	1.5	274	1.0	1.5	1.0
263	1.0	1.5	1.0	275	1.0	1.0	1.5
264	1.0	1.0	1.5				

4 结论

300 mm × 300 mm 轴承钢坯连铸时,采用4孔水口可明显减少中心碳偏析。实际应用时,4孔水口的各开孔宜在水平面上与结晶器铜板保持垂直,水口浸入钢液的深度一般控制在100~150 mm。

参考文献

- 1 贾光霖,齐雅丽,张国志.合金钢连铸坯动态凝固过程数值模拟.东北大学学报,2004,42(3):8

吴国文(1972-),男,工程师,1996年株洲冶金技术学院毕业,连铸技术研究。

收稿日期:2008-11-24