

H型钢连铸质量缺陷和浸入式水口结构优化的数值模拟

李小明 史雷刚 崔雅茹 李文峰
(西安建筑科技大学冶金学院,西安 710055)

摘要 研究的H型钢Q235(/% : 0.06C, 0.30Si, 1.60Mn, 0.010P, 0.003S, 0.025Mo, 0.40Ni, 0.017Ti, 0.15Cu)由80 t LD-LF-喂硅钙线-28 t 中间包-430 mm × 300 mm × 85 mm H型连铸-热轧工艺生产。由于H型钢铸坯易产生纵裂纹缺陷,根据H型钢连铸坯采用直通型浸入式双水口浇铸的实际工艺参数建立数学模型,采用流体有限元软件CFD进行结晶器流场和温度场分布计算,得出直通型双水口浇铸时,熔池冲击深度大,不利夹杂上浮;液面得不到足够热量补充,导致坯壳过早凝固,不利于化渣。数值模拟结果表明,改用三侧孔水口进行浇铸,避免了直通型水口的不利因素,流场和温度场分布合理,可降低漏钢事故和裂纹发生的机率。

关键词 Q235钢 H型钢连铸坯 质量缺陷 数值模拟 浸入式水口 结构优化

Quality Defects of H Section Steel Continuous Casting and Numerical Simulation for Structure Optimization of Submerged Nozzle

Li Xiaoming, Shi Leigang, Cui Yaru and Li Wenfeng
(School of Metallurgical engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055)

Abstract The tested H section steel Q235 (/% : 0.06C, 0.30Si, 1.60Mn, 0.010P, 0.003S, 0.025Mo, 0.40Ni, 0.017Ti, 0.15Cu) is produced by 80t LD-LF-feeding silicon-calcium wire-28t tundish-430 mm × 300 mm × 85 mm H section CC bloom-hot rolling process. Due to the longitudinal crack easily occurred on surface of H section steel bloom, based on real process parameters of through type double submerged nozzle for H section casting bloom, a mathematical model is established and the calculation of distribution of flow field and temperature field in mold is carried out by using fluid finite element simulation software CFD. It is obtained that with using through type double submerged nozzle the impact depth in pool is large that is unfavorable to inclusions floating off; and the liquid surface can't get enough heat supply led to bloom shell more earlier solidification and unfavorable to slag melting. The results of numerical simulation show that as casting by using modified three side nozzle, the unfavorable factors with using through nozzle are avoided, the distribution of flow field and temperature field is reasonable, and the possibility of bleeding trouble and occurrence of crack decreases.

Material Index Steel Q235, H Section Steel Continuous Casting, Quality Defects, Numerical Simulation, Submerged Nozzle, Structure Optimization

H型钢具有优良的力学性能和优越的结构性能,传统生产是以方坯为料,经开坯、粗轧、精轧等多道次轧制成型,近年发展采用的近终形异型坯生产工艺,可显著减少开坯及轧制工作量,既节省轧制和加热能耗,又改善表面质量^[1],近终形异型坯越来越受到行业重视^[2]。

1 H型钢连铸质量缺陷及原因分析

1.1 H型钢铸坯质量缺陷

首钢长治钢铁公司H型钢连铸主要问题是铸坯纵裂纹和漏钢事故。铸坯表面纵向短裂纹一般10~20 mm长,5 mm深,形成于结晶器内,纵向长裂纹短则几厘米,长则十几厘米,深度≥10 mm。

产生纵裂纹的主要原因是初生坯壳的厚度不均匀,在坯壳厚度薄的地方应力集中,当应力超过坯壳的抗拉强度时就产生裂纹^[3]。H型钢铸坯表面纵裂纹常出现于腹板、内缘和翼缘部位,腹板和内缘处较

多,且内弧高于外弧(图1a)。

钢液进入结晶器,接触结晶器壁的一侧降温较快,使凝固坯壳有明显的横向收缩,当收缩应力分布不均,出现局部应力集中,产生纵向微小裂纹。

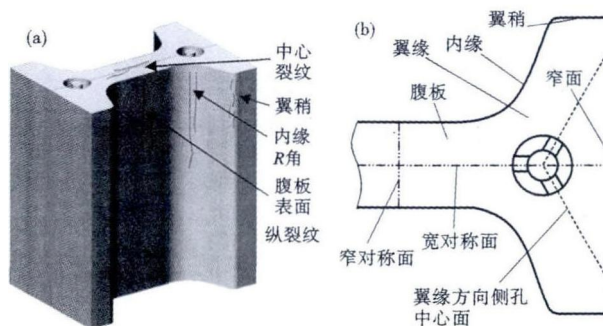


图1 (a) H型钢连铸坯物理模型及裂纹部位;(b)异型坯横断面形状

Fig.1 (a) Physical model of H section continuous bloom and position of crack; (b) cross section of shape beam bloom

随着拉坯的进行,由于结晶器锥度不合适或保护渣流动性变差,在铸坯和结晶器壁之间会出现气隙,严重影响了结晶器的传热效率,导致坯壳再次升温,部分已凝固的坯壳甚至出现重熔,坯壳变薄,当钢水静压力大于坯壳抗拉强度时,之前形成的小裂纹由于应力集中便沿裂纹长度方向扩展,最终形成纵向长裂纹,这种裂纹形成机制一般出现在腹板或者窄面。结晶器上部坯壳和器壁接触良好,传热快,当铸坯运动到结晶器下部时,坯壳厚度增加,收缩应力逐渐增大,腹板和翼缘处的凝固坯壳则产生一对方向成一夹角的拉应力,由于结晶器内缘的存在,这对应力无法得到抵消,就会在铸坯内缘形成纵裂纹,易发生漏钢等生产事故。

1.2 结晶器流场和温度场对 H 型坯质量的影响

图 1(b) 所示为 H 型坯断面形状,水口在结晶器中的安装位置及其侧孔的开孔方向,三孔的夹角皆为 120° 。翼缘和翼稍是二维散热,冷却速度快,腹板处是一维散热,冷却较慢,内缘处比表面积小,散热更慢。以现行采用的直通型水口为例,熔池射流冲击深,使大回流循环区涡心偏低,不但不利夹杂物上浮,同时也对出结晶器坯壳造成冲击,导致坯壳变薄,或无法承受钢水静压力,或因铸坯拉应力而产生纵裂纹。

1.3 研究内容及方法

计算机数值计算已广泛应用于连铸、冷轧热轧、热处理等环节^[4-6]。本文利用流体仿真模拟软件 CFD 对长冶异型坯连铸结晶器内钢液的流场和温度场进行了耦合模拟研究。分析了水口结构对结晶器内钢液流场和温度场的影响,并结合模拟结果分析该厂异型坯产生质量缺陷,如铸坯纵裂纹,连铸拉漏事故的原因,为改善异型坯质量缺陷问题提供理论依据^[7]。

2 模拟计算所需的条件

模拟计算的钢种为 Q235 钢 ($\%: 0.06\text{C}$ 、 0.30Si 、 1.60Mn 、 0.010P 、 0.003S 、 0.025Mo 、 0.40Ni 、 0.017Ni 、 0.15Cu)。

2.1 连铸机设备参数

4 机 4 流,弧形连铸机,二冷段采用水-气冷却,三段矫直,半径分别为 10, 15, 30 m。结晶器断面 (mm) $430 \times 300 \times 85$,长 0.7 m,采用直通型浸入式双水口浇铸。钢液密度 7020 kg/m^3 ^[8],浇注温度 1537°C ;液相线温度 1521°C ;固相线温度 1490°C ;导热系数 $83.7 \text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$;质量热容 682

$\text{J/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$ ^[9];粘度 $0.0055 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$;凝固潜热 274129 J/kg ;拉坯速度 0.8 m/min 。

2.2 生产工艺流程

生产 Q235 H 型钢的工艺流程为:80 t 复吹转炉出钢→LF→钢包回转台→中间包→结晶器→二次冷却→拉矫机→火焰切割→热送轧钢。

80 t LF 精炼时,喂入 120 m 硅钙线,通过提供还原气氛,底吹氩搅拌、埋弧加热、白渣精炼 4 个功能,对钢水进行升温、脱硫、造渣、成分微调、均匀温度等处理。T 型中间包工作容量 28 t,最大容量 30 t,工作液面高度 500 ~ 700 mm。

2.3 基本假设、主控方程及边界条件

(1) 钢液为不可压缩粘性流体,稳态流动;忽略液面波动和凝固坯壳对流动的影响和结晶器震动及其锥度对流动的影响;热量传递的主要方式为热传导。

(2) 流动控制方程主要包括质量守恒方程(即连续性方程),动量方程和湍流模型,即常用的 κ - ε 双方程^[10],包括湍动能方程和湍动能耗散方程。

(3) 取原模型的 1/4 作为计算区域。入口边界为速度边界,即给定钢水流速,流速由拉坯速度根据流量平衡计算得出;自由液面处,物理量沿自由液面法向的梯度为 0;对称面边界物理量沿对称面法向的梯度均为 0;结晶器壁面,采用第三类壁面边界,即热传递边界;水口壁面为无滑移壁面,此处边界层的粘性流动用低雷诺数 κ - ε 模型计算;结晶器出口,由于存在钢液回流现象,所以设为压力出口边界^[11]。

3 计算结果及分析

3.1 异型坯生产数值模拟

图 2(a_1, a_2) 分别是图 1(b) 中的宽对称面和水口中心面的速度矢量图(单位: m/s)。采用直通型双水口浇注,水口内径 24 mm,浸入深度 100 mm,拉速 0.8 m/min ,结晶器实际高度 0.7 m,整个计算区域高 0.9 m,结晶器内钢液的实际填充高度为 0.65 m。由图 2(a_1) 可知,钢液进入结晶器后,形成很深的冲击流股,由于水口位置距内缘和窄面近,所以此处凝壳受钢液冲刷最严重。在 0.5 m 深处钢液形成较明显的回流区,小部分钢液进入液相穴深处,大部分则沿横向流入腹板,向上形成回流区。图 2(a_2) 显示出翼缘方向的流动情况,钢液在发生分流时一部分流向了翼缘方向,对翼稍处的坯壳产生冲刷,又形成一回流区。

由图 2(b_1, b_2) 可见,上部温度过低,过早凝固的坯壳在钢流的冲刷下再次熔化,坯壳厚度减小,很

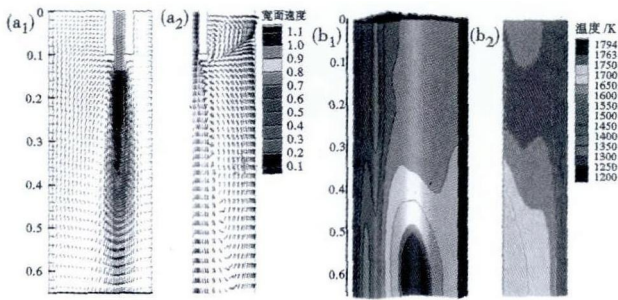


图 2 宽对称面(a₁)和翼缘方向侧孔中心面(a₂)速度矢量图;宽面内缘(b₁)和窄面(b₂)的温度云图,直通型双水口浇铸

Fig.2 Velocity vector diagram of wide symmetry (a₁) and central plane of side hole in flange direction (a₂); temperature cloud map of wide surface inside fringe (b₁) and narrow surface (b₂), through type double nozzle casting

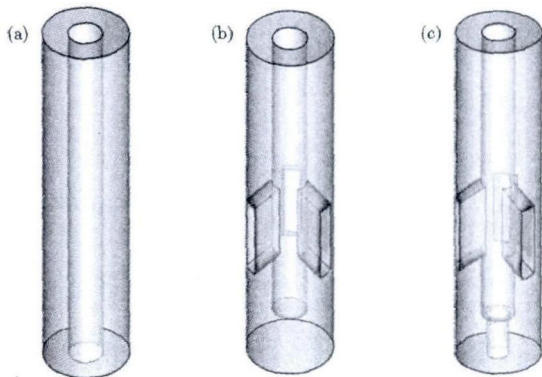


图 3 浸入式水口结构:(a)直通型;(b)三侧孔型;(c)四孔型
Fig.3 Structure of submerged nozzle: (a) through type; (b) three side holes type; (c) four holes type

容易发生拉漏事故。

3.2 工艺改进措施

采用现行直通型双水口(图 3a)浇注存在的问题除内裂纹和表面裂纹外,主要还有钢液流股冲击太深,夹杂物上浮难;下部坯壳冲刷严重,坯壳厚度得不到保证;上部传热不足,坯壳过早形成,不利于化渣;出结晶器铸坯断面温度分布不均,内缘和窄面中心存在高温区,尤其是内缘处,极易发生漏钢事故。针对这一系列问题提出改进方法。方案一:采用三侧孔双水口浇注,即对水口设置 3 个侧孔,如图 3(b)所示;方案二:采用三侧孔加一底孔双水口浇注,如图 3(c)所示。图 3(b,c)水口的侧孔倾角均为 -15°(即开口中心线与水平面的夹角),侧孔间夹角均为 120°。

通过图 4(a₁, a₂)与图 2(a₁, a₂)比较可知,采用三侧孔水口浇铸,结晶器流场有很大改善。钢液出水口后分别流向腹板和翼缘方向。腹板方向的流股

到达腹板中心和另一个水口出来的钢流发生激烈冲击,从而改变流向,分别形成向上和向下的回流区。向上的回流既有利于夹杂的上浮,又为自由钢液面传递了热量,这对液面化渣和均匀渣层有重要意义。大部分钢液进入下回流区,又为内部夹杂的上浮创造了必要条件。腹板方向的流股为结晶器翼缘提供了足够的热量,并对其初生坯壳产生强烈的冲击,所以此处没有生成坯壳。图 5(a₁, a₂)所示为采用 4 孔水口的流场,除结晶器上部传热有所改善,水口底孔的设置也增加了结晶器下部钢液的循环流动。

通过图 4(b₁, b₂)和图 5(b₁, b₂)对比图 2(b₁, b₂)可知,采用三孔型水口浇铸时,铸坯表面内缘和窄面中心并没有出现高温区,温度分布比较均匀,这在一定程度上保证了出结晶器坯壳的厚度和强度,减少了因坯壳太薄而发生拉漏事故的机率。采用四

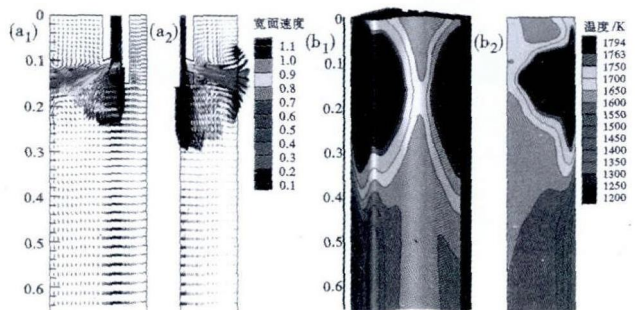


图 4 方案一:宽对称面(a₁)和翼缘方向侧孔中心面(a₂)速度矢量图;宽面内缘(b₁)和窄面(b₂)温度云图,三侧孔水口浇铸

Fig.4 Scheme 1; velocity vector diagram of wide symmetry (a₁) and central plane of side hole in flange direction (a₂); temperature cloud map of wide surface inside fringe (b₁) and narrow surface (b₂), three side holes nozzle casting

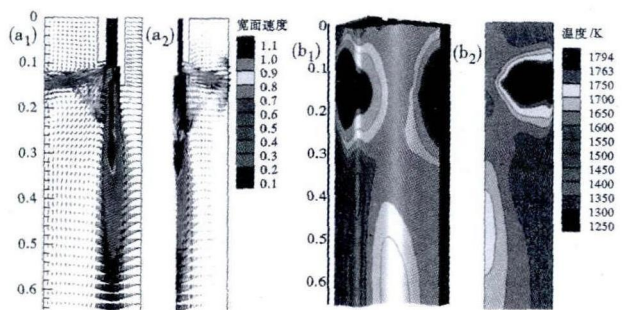


图 5 方案二:宽对称面(a₁)和翼缘方向侧孔中心面(a₂)速度矢量图;宽面内缘(b₁)和窄面(b₂)温度分布云图,四孔水口浇铸

Fig.5 Scheme 2; velocity vector diagram of wide symmetry (a₁) and central plane of side hole in flange direction (a₂); temperature cloud map of wide surface inside fringe (b₁) and narrow surface (b₂), four holes type nozzle casting

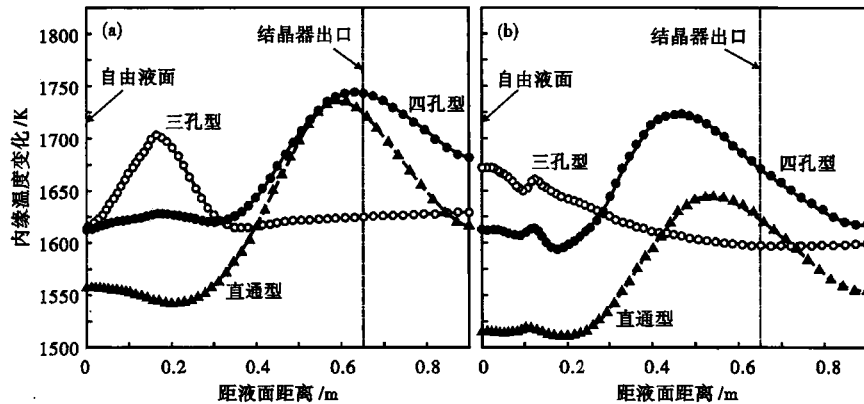


图 6 铸坯断面内缘处拉坯方向(a)和窄面中心拉坯方向(b)的温度变化

Fig. 6 Temperature change of inside fringe in drawing direction (a) and of narrow face center in drawing direction (b) of casting bloom section

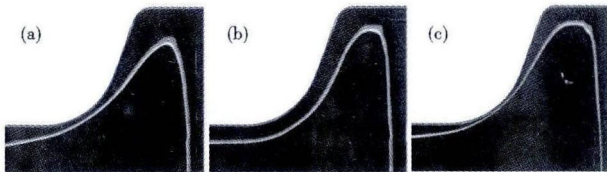


图 7 采用不同水口时出结晶器坯壳厚度:(a)直通型;(b)三侧孔型;(c)四孔型

Fig. 7 Thickness of bloom shell out of mold with different type nozzle: (a) through type; (b) three side holes type; (c) four holes type

孔型水口时,不但结晶器上部温度升高,而且由于底孔射流冲击深,使下部钢液流动比较激烈,从而在窄面和内缘处又形成比较明显的高温区。

由图 6 可知,采用直通型水口时,从 0.3 m 深一直到结晶器出口温度不断升高,使高温区正好处于结晶器出口,不利于出结晶器坯壳的正常生长。采用三孔型水口时内缘和窄面中心都没有出现明显的

温度波动,温度变化缓慢。而四孔型水口对应的内缘和窄面处温度不但没有降低,反而更高,仍然存在明显的波动。其主要原因是四孔型水口底孔的设置加强了下部钢液的波动,同时也提供了热量,所以在内缘和窄面中心温度有明显回升。

翼缘和腹板中心厚,内缘处薄,坯壳厚度分布很不均匀(图 7a),易发生拉漏事故。而三侧孔型水口对应的坯壳厚度分布很均匀,基本在 15 mm 以上(图 7b),满足要求。而四孔型水口并没有达到预期的效果,虽然底孔射流增加了下部钢液的循环流动,可能会有利于夹杂物的上浮,但铸坯表面温度分布并没有得到改善,反而在一定程度上有所恶化(图 7c),有可能是底孔射流过促促使了下部钢液流动所致。

4 结语

(1) 直通型双水口浇铸,熔池受钢液冲击深,不利于夹杂物上浮,液面因得不到足够的热量补充导致坯壳过早凝固,不利于化渣。出结晶器坯壳受钢液冲击严重,导致该处坯壳变薄,增大拉漏事故机率。

(2) 改用三侧孔水口浇铸,避免了直通型水口的不利因素,流场和温度场分布合理,可降低漏钢事故和裂纹发生机率。

(3) 三孔型水口相比于直通型水口和四孔型水口拥有更合理的流场和温度场分布。

参考文献

- [1] Leingruber F, Chimani C, Thalhammer M, 等. 奥钢联方坯及异型坯浇铸技术的最新进展[C]. 奥地利:2004 奥钢联铸热轧会议-连铸论文精选集,2004.
- [2] 刘建华,包燕平,杜松林,等. 近终形异型坯连铸特点分析[J]. 鞍钢技术,2008(1):1-5.
- [3] 贾艳,冯捷. 连铸坯纵裂产生原因及防止措施[J]. 河北冶金,2000(2):14-17.
- [4] Dvorkin E N, Cavaliere M A, Goldschmit M B. Finite Element Models in the Steel Industry Part I: Simulation of Flat Product Manufacturing Processes[J]. Computers and Structures, 2003, 81: 559.
- [5] 李东辉,白金兰,邱以清. 方坯连铸机结晶器凝固传热模型的研究[J]. 特种铸造及有色合金,2004(6):37-40.
- [6] Jang J W, Park I W, Kim K H. FE Program Development for Predicting Thermal Deformation in Heat Treatment[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130-131: 546-551.
- [7] 王翠娜,温良英,陈登福,等. 板坯连铸结晶器内流场的数值模拟[J]. 过程工程学报,2009(9):325-329.
- [8] 赵磊. 强冷工艺生产特厚扁锭的模拟研究[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2011:88-90.
- [9] 罗伟,严波,熊跃兴,等. 连铸异型坯凝固过程的三维仿真分析[J]. 系统仿真学报,2012(2):301-305.
- [10] 萧泽强,朱苗勇. 冶金过程数值模拟分析技术的应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2006:27.
- [11] 李建生. 异型坯连铸结晶器流场和温度场的耦合模拟[D]. 唐山:河北理工大学,2008:26-28.

李小明(1974-),男,博士,副教授,冶金工艺及资源综合利用研究. E-mail: xml88@126.com

史雷刚(1985-),男,硕士,冶金过程数值模拟及工艺优化研究. E-mail: shileigang2006@.com

收稿日期:2013-04-15