

200 mm × 200 mm 方坯连铸用新型浸入式水口的数值模拟

陈远清^{1,2} 尚正鸿¹ 陶乃标¹ 王进¹ 仇圣桃²

(1 张家港联峰钢铁研究所有限公司, 张家港 215628; 2 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心, 北京 100081)

摘要 为了减轻水口侧孔射流对凝固坯壳的冲刷, 便于侧孔水口在较小断面的方坯连铸上使用, 提出扇形侧孔的水口设计理念。利用结晶器内钢水流动、传热的三维数学模型, 分析比较了直筒形水口、矩形侧孔水口和扇形侧孔水口条件下 200 mm × 200 mm 的方坯结晶器内的流场及温度场特征。研究表明, 侧孔水口能降低射流冲击深度, 促进夹杂物上浮, 并提高弯月面温度和活跃程度, 有利于化渣; 扇形侧孔射流较分散, 对凝固坯壳的冲刷作用显著减弱。

关键词 方坯 浸入式水口 扇形侧孔 流场 温度场 数值模拟

Numerical Simulation of a New Type Submerged Entry Nozzle for 200 mm × 200 mm Billet Continuous Casting

Chen Yuanqing^{1,2}, Shang Zhenghong¹, Tao Naibiao¹, Wang Jin¹ and Qiu Shengtao²

(1 Zhangjiagang Lianfeng Iron & Steel Research Institute Co Ltd, Zhangjiagang 215628; 2 National Engineering and Research Center for Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract In order to alleviate the impact of flow jet of nozzle side-ports on solidifying shell and easy to use the side-port nozzle to the mold for casting square billet with smaller cross section, a design idea of submerged entry nozzle (SEN) with flabelliform side-ports is advanced. The characteristics of flow field and temperature field in mold for casting 200 mm × 200 mm billet with straight channel nozzle, rectangular side-ports nozzle and flabelliform side-ports nozzle are analyzed and compared by using three dimension math model of fluid flow and heat transfer in mold. Research results show that the side-ports nozzle is available to reduce the impact depth of flow jet, improve the inclusions floating up, and increase the temperature and activity of liquid at meniscus and favorable to smelt slag; the flow from flabelliform side-port is more disperse, so the effect of impact on solidifying shell is sharply decreasing.

Material Index Square Billet, Submerged Entry Nozzle, Flabelliform Side-Port, Flow Field, Temperature Field, Numerical Simulation

方坯和圆坯连铸普遍采用直筒形水口, 但是直筒形水口具有流股冲击深度大的特点, 进而导致夹杂物上浮困难, 热中心靠下, 液面平静且温度低, 不利于化渣等问题。研究^[1-4]表明侧孔水口在夹杂物上浮、液面化渣等方面具有很大优势, 因此目前在大断面的方坯、矩形坯和圆坯上已逐渐使用侧孔水口。然而, 当铸坯断面较小时, 侧孔离坯壳较近, 侧孔射流对坯壳的冲刷使得坯壳局部过薄, 容易导致漏钢、粘结等生产问题, 因此目前较小断面的方、圆坯上仍采用直筒形水口。为了减弱侧孔射流对坯壳的冲刷, 使侧孔水口能够在小断面方、圆坯上使用, 提高高品质线材(如帘线、钢绞线等)的质量, 提出扇形侧孔的水口设计理念, 分散侧孔射流, 减小坯壳的被冲刷程度。采用数值模拟方法, 对直筒形水口、普通矩形侧孔水口和扇形侧孔水口进行了对比研究, 分析了不同水口条件下的流场和温度场特征。

1 数值模拟方法及相关参数

1.1 数学模型及计算方法

基于以下假设建立结晶器内钢水流动、传热数学模型: (1) 钢水为不可压缩的粘性流体; (2) 钢水运动属于稳态高雷诺数的湍流流动; (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。

结晶器内的钢水流动、传热可以由连续性方程、 $N-S$ 方程、 $k-\varepsilon$ 湍流方程和能量方程来描述, 各方程的表达式和边界条件设置参见文献[5-6]。

基于 FLUENT 商业软件平台, 采用有限体积法对控制方程组进行离散化处理, 除压力用中心差分格式外, 其他变量均使用上风差分格式进行离散, 速度-压力校正采用基于交错网格的 SIMPLE 算法。计算区域包括结晶器和部分二冷段, 长度共 1.5 m; 考虑到对称性, 计算区域在横向上取结晶器截面的 1/4; 采用贴体网格对计算区域进行 6 面体网格划分。直筒形水口条件下的计算区域及网格如图 1(1) 所示。

1.2 浸入式水口结构及工艺参数

直筒形水口、矩形侧孔水口和扇形侧孔水口的

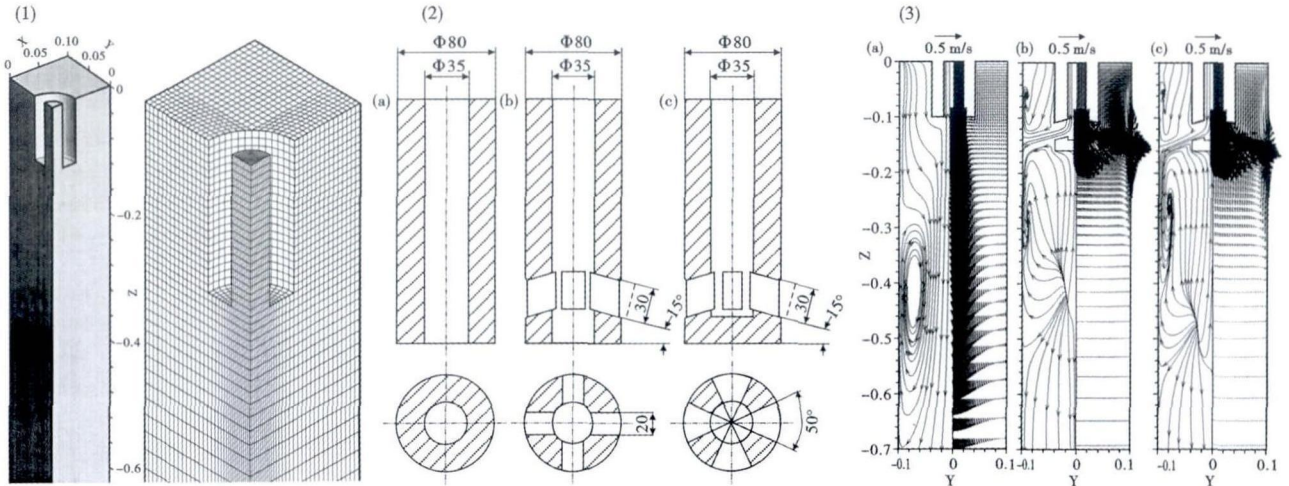


图 1 (1) 计算区域及网格划分。(2) 浸入式水口结构:(a) 直筒形;(b) 矩形侧孔;(c) 扇形侧孔。 (3) 对称面上的流线及速度分布,水口:(a) 直筒形;(b) 矩形侧孔;(c) 扇形侧孔

Fig. 1 (1) Computed zone and mesh division. (2) Structure of submerged entry nozzle: (a) straight channel; (b) rectangular side-port; and (c) flabelliform side-port. (3) Distribution of stream line and velocity on plane of symmetry for nozzle (a) straight channel; (b) rectangular side-port; and (c) flabelliform side-port

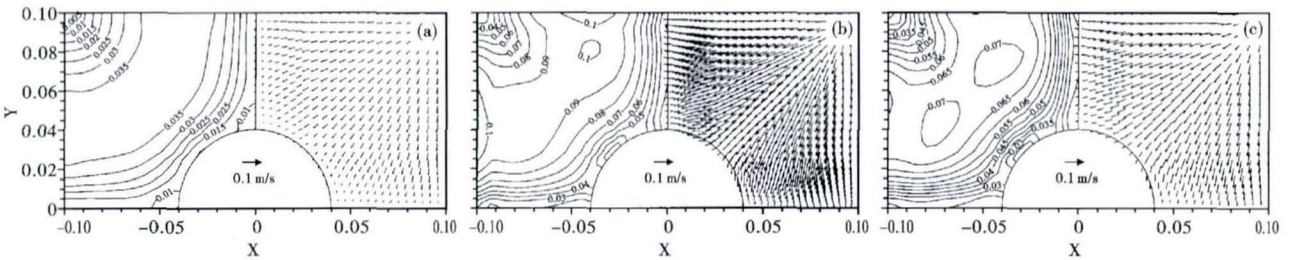


图 2 结晶器弯月面的速度分布,水口:(a) 直筒形;(b) 矩形侧孔;(c) 扇形侧孔

Fig. 2 Distribution of velocity at meniscus in mold with nozzle: (a) straight channel; (b) rectangular side-port; and (c) flabelliform side-port

表 1 数值模拟计算的工艺参数

Table 1 Process parameters for numerical simulation

参数	钢种	铸坯断面/ mm × mm	拉速/ (m · min ⁻¹)	过热 度/℃	水口浸入深度/mm	
					直筒形	多侧孔
取值	60	200 × 200	1.5	25	100	110

端部结构如图1(2)所示。其中,矩形侧孔水口是目前大断面方、圆坯连铸中常用的水口形式;扇形侧孔水口的侧孔呈扇形,由内向外逐渐扩大,对流股起到分散作用。计算采用的工艺参数如表 1 所示。

2 数值模拟结果及分析

2.1 流场结果及分析

3 种水口条件下的结晶器对称面和弯月面的流场分布分别如图1(3)、图 2 所示。两种侧孔水口条件下水口射流区特征面(弯月面下方 140 mm)上的速度对比如图3(1)所示,壁面的湍动能对比如图 3(2)所示。从图 3 可以看出,直筒形水口条件下,流股冲击深度大,高温钢水快速到达结晶器下部,

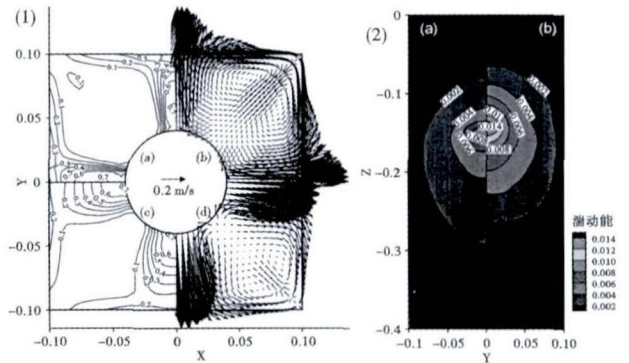


图 3 (1) 水口射流区特征面($Z = -140$ mm)的速度分布对比,水口:(a) (b) 矩形侧孔, (c) (d) 扇形侧孔; (2) 壁面湍动能分布对比,水口:(a) 扇形侧孔, (b) 矩形侧孔
Fig. 3 (1) Contrast of distribution of velocity at place ($Z = -140$ mm) flow jet distance from nozzle: (a) (b) rectangular side-port; and (c) (d) flabelliform side-port; (2) contrast of distribution of turbulent kinetic energy on wall, with nozzle (a) flabelliform side-port; and (b) rectangular side-port

上返流强度很弱,夹杂物上浮条件差,液面速度很小;两种侧孔水口条件下的流场分布相似,流股冲击

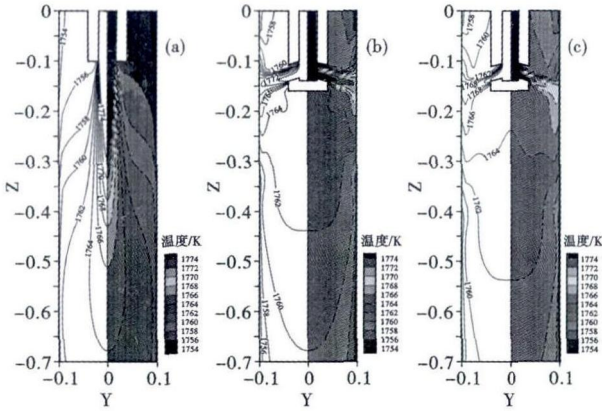


图4 对称面上的温度场分布,水口:(a)直筒形;(b)矩形侧孔;(c)扇形侧孔

Fig.4 Distribution of temperature field at plane of symmetry with nozzle; (a) straight channel; (b) rectangular side-port; and (c) flabelliform side-port

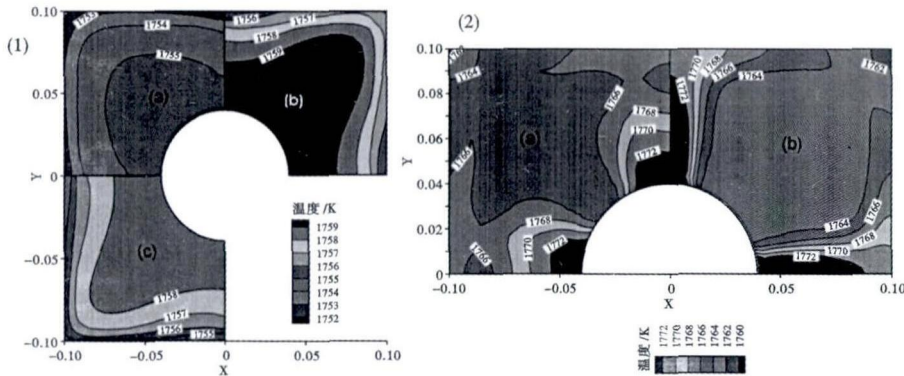


图5 (1)弯月面的温度场对比(a-直筒形,b-矩形侧孔,c-扇形侧孔);(2)水口射流区特征面(Z = -140 mm)的温度分布对比(a-扇形侧孔,b-矩形侧孔)

Fig.5 (1) Contrast of temperature field distribution at meniscus (a- straight channel; b- rectangular side-port; c- flabelliform side-port); (2) contrast of temperature distribution at featuring place (Z = -140 mm) in nozzle jetting zone (a- flabelliform side-port; b- rectangular side-port)

深度显著降低,上返流强度增大,液面速度增加,侧孔射流对凝固坯壳造成一定的冲刷;扇形侧孔水口和矩形侧孔水口相比,侧孔射流较分散,射流速度大幅减小,壁面冲击点的湍动能也大幅减小,表明射流对凝固坯壳的冲刷显著减弱。

2.2 温度场结果及分析

3种水口条件下的结晶器对称面和弯月面的温度场分布分别如图4、图5(1)所示,两种侧孔水口条件下射流区特征面(弯月面下方140 mm)上的温度对比如图5(2)所示。

从图5可以看出,直筒形水口条件下,由于流股冲击深度大,高温区比较靠下,结晶器中下部温度梯度较大,液面温度低,不利于保护渣的熔化;两种侧孔水口条件下的温度场分布特征相似,由于冲击深

度显著降低,热中心上移,液面温度升高3~4℃,结晶器中下部温度较均匀,温度梯度小,但在射流冲击点存在局部高温区,会造成坯壳重熔,影响其均匀性;扇形侧孔水口和矩形侧孔水口相比,射流高温区分散,壁面冲击点的温度降低,表明射流对凝固坯壳的冲刷减弱。

3 结论

(1)直筒形水口条件下,流股冲击深度大,上返流强度很弱;液面速度小,温度较低,不利于化渣;热中心靠下,温度梯度大。

(2)多侧孔水口能显著减低水口射流的冲击深度,有利于夹杂物上浮;高温区上移,液面速度增大且温度升高,有利于化渣;结晶器中下的温度较均匀,但射流冲击点存在局部高温区,影响坯壳均匀性。

(3)扇形侧孔水口条件下,流股较分散,能显著减弱侧孔射流对凝固坯壳的冲刷,降低凝固坯壳的不均匀性,该理念可以用于较小断面方坯连铸浸入式水口的设计。

参考文献

[1] 文光华,唐 萍,苏振江,等.大方坯连铸结晶器伸入式水口结构类型研究[J].钢铁钒钛,2002,23(3):21-24.
 [2] 顾武安,唐 萍,文光华,等.大方坯连铸四孔浸入式水口的应用研究[J].钢铁,2008,43(4):101-104.
 [3] 幸 伟,沈巧珍.方坯连铸结晶器浸入式水口结构类型的研究[J].钢铁研究,2004(5):24-27.
 [4] 吴国文,李明晓.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[J].特殊钢,2009,30(3):46-47.
 [5] 吴耀光,陈远清,仇圣桃,等.大圆坯连铸用新型旋流水口的数值模拟[J].钢铁钒钛,2009,30(4):49-54.
 [6] Kholmatov S, Takagi S, Jonsson L, et al. Development of Flow Field and Temperature Distribution during Changing Divergent Angle of the Nozzle When Using Swirl Flow in a Square Continuous Casting Billet Mould[J]. ISIJ International, 2007, 47(1):80-87.

陈远清(1981-),男,硕士,博士研究生(钢铁研究总院),工程师,2004年重庆大学(本科)毕业,炼钢及连铸工艺研究。
 E-mail: yuanqing_chen@163.com

收稿日期:2013-10-15