DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.05.022

连铸板坯结晶器流场的数值模拟

郝赳赳[1,2]

(1. 山西工程职业学院 冶金与环境工程系,山西 太原 030009; 2. 北京科技大学 冶金与生态学院,北京 100083)

摘　要:板坯结晶器液面流速对保护渣熔化、坯壳均匀性都有着较为重要的影响。使用瞬态数模模拟的方法对板坯结晶器内钢液流动进行研究,通过对比结晶器液面平均流速,评价了不同参数对结晶器流场的影响。结果表明,水口倾角由 20°将至 10°时,表面流速平均值由 0.192 m/s 增加至 0.211 m/s,表面流速提高,有利于保护渣的熔化和流场的稳定,水口最佳倾角为 10°。水口浸入深度由 100 mm 增加到 140 mm 时,表面流速从 0.215 m/s 降至 0.189 m/s,应避免水口在较深的浸入深度下长时间停留。椭圆形出口要优于正方形出口。

关键词:连铸板坯;数值模拟;结晶器流场;表面流速;浸入深度

中图分类号:TF777　　文献标识码:A　　文章编号:1000-8365(2021)05-0423-04

Numerical Simulation of Flow in Mold for Continuous Casting Slab

HAO Jiujiu[1,2]

(1. Department of Metallurgy and Environmental Engineering, Shanxi Engineering Vocational College, Taiyuan 030009, Shanxi, China. 2.School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The surface flow rate of slab mould has an important effect on the melting of protective slag and the uniformity of slab shell. The flow of molten steel in slab mould was studied by transient numerical simulation method, and the influence of different parameters on the flow field of mould was evaluated by comparing the average flow velocity of mould surface. The results show that the average surface velocity increases from 0.192 m/s to 0.210 m/s when the nozzle angle increases from 20° to 10°. The increase of surface velocity is conducive to the melting of protective slag and the stability of flow field. The optimal nozzle angle is 10°. When the nozzle immersion depth increases from 100 mm to 140 mm, the surface flow rate will decreases from 0.215 m/s to 0.189 m/s. Therefore, the nozzle should be avoided to stay for a long time under the deeper immersion depth. Oval nozzle is better than square nozzle.

Key words: continuous casting slab; numerous simulation; mold flow; surface velocity; immersion depth

结晶器是钢液冷凝成钢坯的起始点,其内部的钢液传热和流动状态直接影响钢坯的最终质量,不合理的流场会造成钢液表面流速过大,弯月面波动加剧,形成卷渣。由于钢液对结晶器窄边的冲击过大,使窄边坯壳变薄,发生漏钢事故,或者使夹渣物和气泡被坯壳捕捉等一系列降低连铸钢坯质量和效率[1-3]。

使用连铸板坯结晶器浇注碳质量分数为 0.09%～0.15%的亚包晶钢时,由于在凝固过程中会发生由 $L+\delta$ 相向 γ 相的相变,坯壳的收缩率较大,易导致结晶器弯月面附近形成的初生坯壳厚度不均匀,热应力集中在某一薄弱部位而产生纵裂纹。因此,对结晶器内钢液流动的研究可以对降低包晶钢缺陷率、防止漏钢等均起到积极的意义[4-7]。

与结晶器内钢液流动状态直接相关的主要是浸入式水口的结构。浸入式水口的结构参数主要包括水口的浸入深度、出口形状、出口倾角、底部形状和内径等,合理的浸入式水口的参数和连铸工艺参数直接影响流场对去除夹渣物、熔化保护渣、流场稳定[8]。仇灏[9]等人研究了板坯不同浸入式水口的流动过程,使用数值模拟的方法对不同水口对结晶器流场、弯月面和温度场的影响,从而对不同的水口进行评价。刘阳[10]等人对浸入式水口侧孔结构对板坯结晶器流场的影响,使用结晶器流速对不同侧孔的水口进行了评价,吴炳胜[11]等人有研究了不同水口对结晶器流场的影响,对比了不同拉速、浸入深度下结晶器流场。

然而,在以往的模拟中,通常假设结晶器流动是对称的,但在实际生产中,即使水口没有任何堵塞,其结晶器液面流速也是随时间发生变化的。本模拟使用瞬态模拟的方法,充分考虑不同时间下钢液流

收稿日期:2021-01-29

基金项目:2019 年度山西省高等学校科技创新资助项目(2019L0995)

作者简介:郝赳赳(1982—),女,山西洪洞人,博士,副教授.研究方向:钢铁冶金、微波冶金.电话:029-88493744,0351-3350420,Email:ustb0471@126.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

速的波动情况，最终使用平均流速对参数实现了有效评估。

1 数学模型

1.1 控制方程

(1)基于质量守恒定律的连续性方程

钢液在结晶器内的流动满足质量守恒定律：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

(2)Navier-Stokes 方程

$$\rho\left(\frac{\partial v_i}{\partial t}+v_j\frac{\partial v_i}{\partial x_j}\right)=-\frac{\partial P}{\partial x_i}+\mu_e\left(\frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j}\right)\rho g_i \tag{2}$$

(3)k-ε 方程

湍动能方程：

$$\rho\left(\frac{\partial k}{\partial t}+v_i\frac{\partial k}{\partial x_i}\right)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_e}{\sigma_k}+\frac{\partial k}{\partial x_i}\right)+G-\rho\varepsilon \tag{3}$$

湍动能耗散方程：

$$\rho\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+v_j\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon}+\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right)+\frac{\varepsilon}{k}(C_1G-C_2\rho\varepsilon) \tag{4}$$

式中，ρ 为密度，t 为时间，s；$v_i(i=1(x),2(y),3(z))$ 为 x、y、z 方向速度；x_i 为 x、y、z，k 湍动能；ε 为湍动能耗散率；μ_e 为有效粘度；C_P 为热容；λ 为有效导热系数；G 为湍动能产生项。方程中系数确定依据 Launder 和 Spalding 推荐的数据。C_μ=0.09，C_1=1.43，C_2=1.92，σ_k=1.0，σ_ε=1.3。

1.2 边界条件

本文计算过程忽略了糊状区和凝固壳，对固体界面采用壁面函数处理，水口的出口平面假定位于中心对称线上。根据质量守恒，采用水口出流的实际面积、连铸速度和射流角度计算入口速度边界条件。在计算域的底部出口边界上，令所有变量沿底部边界法线方向的导数为零(包括 v，k，ε，式中 v 为钢液速度，m/s；k 为湍动能系数，m^2/s^2；ε 为湍动能耗散系数，m^2/s^3)。沿中心对称线，令法向速度以及其它变量法向方向导数为零。该边界条件也适用于顶表面。

1.3 基本假设

本数值模拟假设：①钢液为不可压缩流动；②不计结晶器液面的波动及传热，把液面设置为自由面；③不考虑结晶器内凝固壳的存在，计算区域的边界为达到但不包括糊状区的位置；④忽略结晶器振动及锥度等因素的影响。

2 试验结果及分析

通过变化参数来研究单一因素对结晶器流场及结晶器液面流速的影响，从而评价不同因素对结晶器内流场的影响，最终选取最佳的工艺参数，模拟的工艺参数主要有水口倾角、浸入深度和水口出口类型等，为现场生产提供指导。

在国内某钢厂使用插钉法[12]对钢液流动过程进行测量，使用测量结果与计算的结果进行对比，如图 1 所示，本模拟计算的液面流速和实际测量的液面流速均存在一定的波动性，而模拟的结果和实际的结果有较好的吻合度，说明计算结果真实可靠。

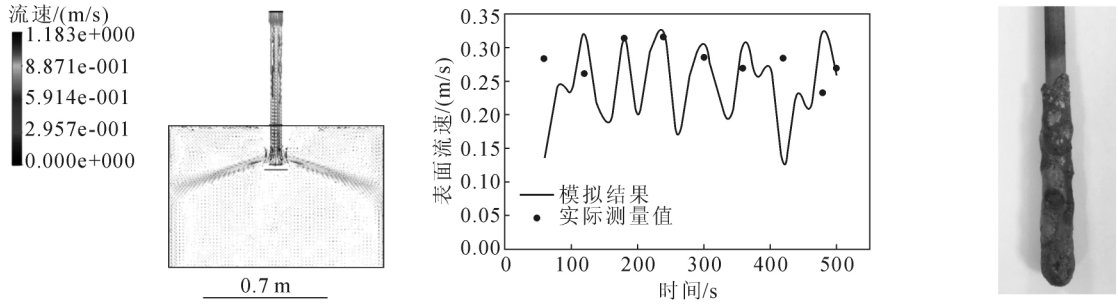
2.1 不同水口倾角对结晶器流场的影响

固定其他因素，研究不同水口倾角对结晶器流动的影响，其中浸入深度为 120 mm，水口出口类型为椭圆形，拉速为 1.0 m/min，取结晶器表面位置的液面流速进行对比，如图 2 所示。从云图上可以看出，浸入深度 10°时，其液面流动对称性最好。

对表面流速取平均值进行对比，如图 3 所示，结果显示，表面流速平均值随着水口倾角增加而降低，当水口倾角从 10°增加到 20°时，表面流速平均值从 0.211 m/s 降低至 0.192 m/s。结晶器的合理流速在 0.2~0.4 m/s，在这个范围内，表面流速越大，保护渣熔化效果越好[13]。对比可知，水口倾角易选用10°。

2.2 不同水口浸入深度对结晶器流场的影响

不同水口浸入深度对结晶器流动的影响，其中水口倾角为 10°，水口出口形状为椭圆形，拉速为 1.0 m/min，不同浸入深度下表面流速矢量图如图 4 所示，浸入深度从 100 mm 增加到 140 mm，其表面

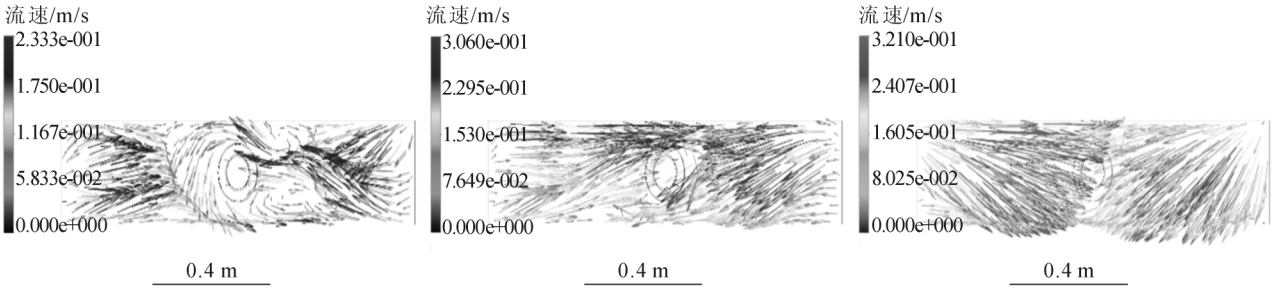


(a)模拟流场图　(b)模拟数据与实际值对比　(c)测量流速后的铁钉

图 1 模拟结果与实际测量数据对比

Fig.1 Comparison of actually measured data with simulation results

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)10°　(b)15°　(c)20°

图 2 不同水口倾角下钢液表面流速

Fig.2 Surface velocity under different nozzle angle

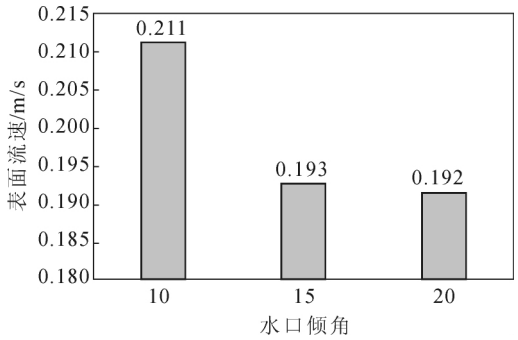


图 3 不同水口倾角对表面流速的影响

Fig.3 Influence of different nozzle angle on the surface velocity

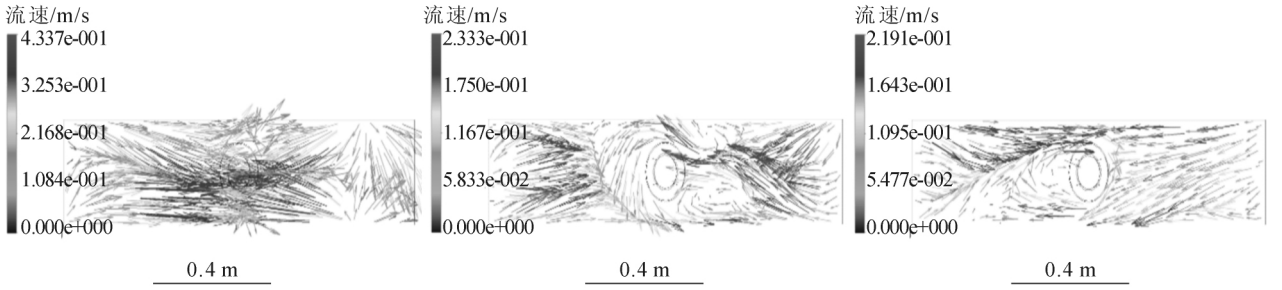
流速最大值由 4.34 m/s 降至 2.19 m/s。

对比浸入深度对表面流速平均值的影响，如图 5 所示。当浸入深度由 100 mm 增加 140 mm 时，表面流速平均值从 0.215 m/s 降低到 0.189 m/s。结合钢液截面的矢量图可以看出，当浸入深度增加时，钢液向上形成的流动越小，较小的流动会影响保护渣的熔化。因此，不建议在较深的浸入深度下保持太久的时间。

2.3 不同水口出口类型对结晶器流场的影响

不同水口出口类型对结晶器流场的影响。水口倾角为 10°，浸入深度为 120 mm，拉速 1.0 m/min，两种水口出口类型如图 6。

不同水口形状下钢液表面流速如图 7 所示，不同水口形状下表面平均流速如图 8 所示。对比可知，正方形水口下，钢液表面流速较小，仅为 0.185 m/s，与椭圆形水口时表面流速 0.211 m/s 相比，正方形水口不利于保护渣的熔化。因此，建议使用出口为椭圆形的水口。



(a)100 mm　(b)120 mm　(c)140 mm

图 4 不同浸入深度下钢液表面流速

Fig.4 Surface velocity at different immersion depths

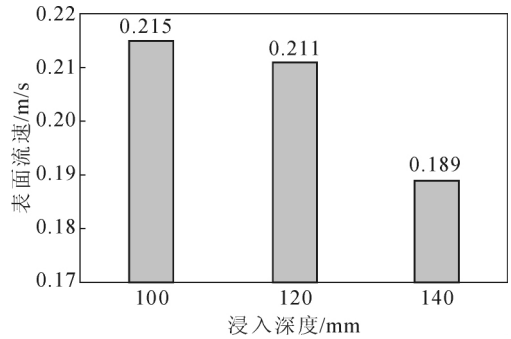
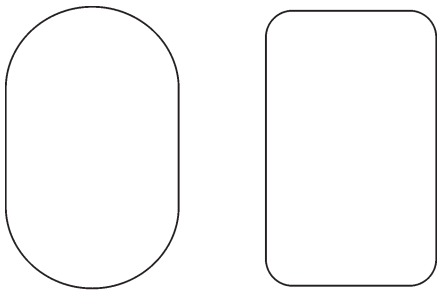


图 5 浸入深度对表面流速的影响

Fig.5 Effect of immersion depth on the surface velocity

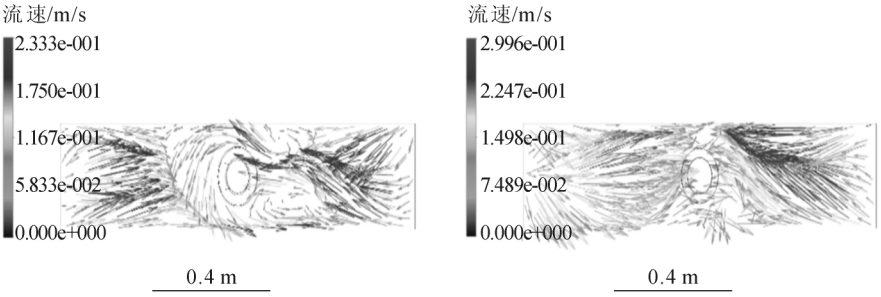


(a)椭圆形　(b)正方形

图 6 不同水口出口类型示意图

Fig.6 Schematic diagram of different nozzle types

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)椭圆形　　(b)正方形

图 7 不同水口形状下钢液表面流速

Fig.7 Surface velocity under different nozzle shapes

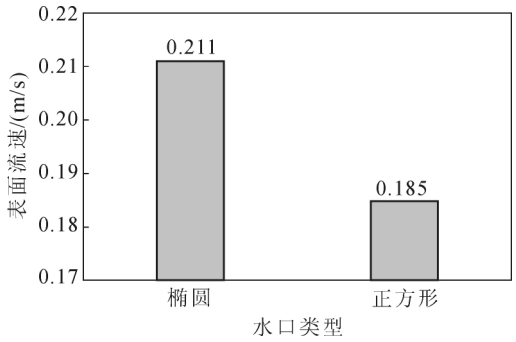


图 8 不同水口类型对表面流速的影响

Fig.8 Influence of different nozzle types on the surface velocity

3 结论

使用瞬态的模拟方法，考虑不同时间下液面的波动，使用平均流速评价不同因素对结晶器流场和液面流速的影响。

(1)通过实际流速测量对比，模拟数据规律与实测值相同，可以用本模型对现场改进进行模拟预测。

(2)水口倾角由 10°增加到 20°时，表面流速平均值由 0.211 m/s 降低至 0.192 m/s，这不利于保护渣的熔化和流场的稳定。因此，水口最佳倾角为10°。

(3)当水口浸入深度由 100 mm 增加到 140 mm 时，结晶器流场旋流变小；钢液无法直接打到结晶器窄面，表面流速由 0.215 m/s 降低至 0.189 m/s，因此，尽量避免水口在较深的浸入深度下长时间停留。

(4)正方形水口表面流速为 0.185 m/s，椭圆形水口表面流速为 0.211 m/s；在合理的范围内，流速越大，则更加有利于保护渣熔化。因此，建议选用椭圆形出口的水口。

参考文献：

[1] 蔡开科. 连铸坯结晶器[M]. 北京:冶金工业出版社，2008.

[2] 蔡开科. 连铸坯质量控制[M]. 北京:冶金工业出版社，2010.

[3] 李殿明，邵明天，杨宪礼，等. 连铸结晶器保护渣应用技术[M]. 北京:冶金工业出版社，2008.

[4] 宋景欣，蔡兆镇，朱苗勇. 连铸板坯结晶器内凝固坯壳裂纹敏感性研究[J]. 铸造技术，2016，37(11):2376-2383.

[5] Celso Luiz Moraes Alves, Joao Rezende, Dieter Senk, et al. Phase-field simulation of peritectic steels solidification with transformation-induced elastic effect [J]. Journal of Materials Research and Technology.2020,9(3):3805-3816.

[6] 李亚强，刘建华，邓振强，等. 15CrMoG 钢包晶凝固特征与机制[J]. 金属学报, 2020, 56(10):1335-1342.

[7] 李树森，张立峰，杨小刚，等. 亚包晶钢连铸坯角部横裂纹控制研究[J]. 炼钢, 2016, 32(3):62-67.

[8] 李志国，伍成波，王逢春. 连铸结晶器中钢液行为数值模拟研究进展[J]. 铸造技术, 2002(4):197-200.

[9] 仇灏， 时朋召. 不同浸入式水口 250 mm×1800 mm 板坯连铸过程模拟[J]. 铸造技术, 2017, 38(7):1701-1707.

[10] 刘阳，张彩军，刘中柱，等. 浸入式水口侧孔结构对板坯结晶器流场的影响[J]. 铸造技术，2016，37(7):1442-1445，1455.

[11] 吴炳胜，傅彦棉，田倩影，等. 新型水口作用下的结晶器流场数值模拟[J]. 铸造技术, 2015, 36(3):763-766.

[12] Seong-Mook CHO, Seon-Hyo KIM, Brian G. THOMAS. Transient Fluid Flow during Steady Continuous Casting of Steel Slabs: Part I. Measurements and Modeling of Two-phase Flow [J]. ISIJ International, 2014,54(4):845-854.

[13] KUBOTA J, OKIMOTO K, SHIRAYAMA A, et al. Steelmaking Conference [C], Washington, D.C. USA, 14-17 Apr. 1991 1991, Iron and Steel Society, Inc, 410 Commonwealth Dr. Warrendale, Pennsylvania 15086, USA, 233-241.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2021 年《铸造技术》杂志

国内邮发代号：52–64　国外发行号：M855　国内定价：25 元/本　海外定价：25 美元/本

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net