

模底砖结构对大钢锭充型过程卷渣的影响

张超杰,包燕平[✉],王敏,张乐辰

北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室,北京 100083

✉ 通信作者,E-mail: zcj_ustb@163.com

摘 要 通过建立 19 t 大钢锭充型过程的流动和传热模型,研究大钢锭充型初期的流场和温度场分布特征,针对一系列不同尺寸结构模底砖的钢锭模进行充型过程的数值模拟,研究模底砖结构对充型初期钢液面卷渣的影响。充型初期钢液面波动大,且凝固层推进快,易发生卷渣并被捕获至坯壳。当模底砖下口直径小于上口直径时,钢液进入钢锭模的流速主要取决于模底砖下口直径,并随着下口直径的增大而迅速减小。对于 19 t 钢锭,当模底砖下口直径大于 90 mm 后能在很大程度上减小充型初期的卷渣概率。

关键词 钢锭; 卷渣; 充型; 数值模拟

分类号 TF775⁺.1

Influence of entrance nozzle structure on mould powder entrapment during filling process of large steel ingot mould

ZHANG Chao-jie, BAO Yan-ping[✉], WANG Min, ZHANG Le-chen

State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉ Corresponding author, E-mail: zcj_ustb@163.com

ABSTRACT A model for fluid and heat transfer of early stage of filling of a 19 ton ingot mould was built, and the flow and temperature distribution characteristics during early stage of filling were investigated. Numerical simulations of mould filling with a series of entrance nozzles with the different top diameters and bottom diameters were carried out, and the effects of entrance nozzle structure on mould powder entrapment during early stage of filling were investigated. The results show that level fluctuation in molten steel is strong and solidified shell grows fast so that mould powder can be entrapped easily. When top-end interior diameter is larger than bottom-end, the velocity of molten steel stream depends on the bottom-end interior diameter, and decreases with the increasing of top-end interior diameter. As for 19 ton steel ingot, the risk of mould powder entrapment can be greatly decreased when the bottom-end interior diameter is larger than 90 mm.

KEY WORDS steel ingot; mould powder entrapment; mould filling; numerical simulation

在大钢锭下注法浇注过程中,由于保护渣要先铺在锭尾一部分或者悬挂于较低的位置一部分,而在充型初期,钢锭模内熔池浅,液面波动大,常常会有保护渣被卷入钢锭中成为大颗粒夹杂物^[1-4]。

卷渣的发生主要受充型过程中钢渣界面的波动、保护渣的熔化性能、保护渣的加入方式等影响,其中钢渣界面的波动在很大程度上取决于模底砖的结构。张

文等^[5]使用 ProCAST 模拟了 25 t 大钢锭的浇注及凝固过程,考察了模底砖孔径对钢水流场的影响。喻钟义^[6]针对研究发现扩张性钢锭模模底砖出口断面大,钢液进入模内流速小。范鼎东等^[7]通过冷态试验发现将模底砖的孔型由直筒型改为喇叭口型,可以减少大型夹杂物的数量。

目前还鲜有对于模底砖上口和下口直径之间的具

体关系对卷渣影响的研究,本文采用数值模拟的方法针对模底砖上口和下口直径对19 t钢锭充型初期尾部卷渣的影响进行了研究.发现当模底砖下口直径小于上口直径时,钢液进入钢锭模的流速主要取决于模底砖下口直径,并随着下口直径的增大而迅速减小.

1 实验原理与方法

本文采用数值模拟的方法研究大钢锭充型过程的卷渣,建立了大钢锭充型过程的数学模型,并进行计算得到大钢锭充型初期的流场和温度场,然后据此分析模底砖结构对卷渣趋势的影响.

基本假设:

- (1) 模底砖下口横截面的钢液流速和温度均匀分布;
- (2) 钢锭模和模底砖摆放绝对竖直;
- (3) 钢液和保护渣不发生化学反应和大量热量传递.

边界条件:

- (1) 钢液入口流速根据钢锭实际浇注速度计算得到;
- (2) 壁面采用无滑移边界;
- (3) 浇钢过程中钢锭与钢锭模界面之间换热系数为 $2 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ [8];
- (4) 钢锭模底和地面换热系数为 $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

控制方程为连续性方程、动量守恒方程、标准 $k-\varepsilon$ 两方程、能量守恒方程和 VOF 函数. 钢锭模初始温度设为 40°C , 钢种为 1.2738, 钢锭模为球墨铸铁. 19 t 钢锭模和模底砖的几何模型见图 1, 考虑到对称性, 建立了 1/4 模型以节约计算资源. 钢种和钢锭模的主要物性参数由 ProCAST 的数据库计算得到, 图 2 为钢种的物性参数随温度变化曲线. 使用 MeshCAST 进行网格划分, 共计 75469 个网格节点, 390954 个四面体单元, 在 ProCAST 平台上进行该模型的数值计算和后处理.

2 结果与讨论

2.1 充型初期的卷渣特征

图 3 为锭尾充满时钢液的流场分布, 可以看出从

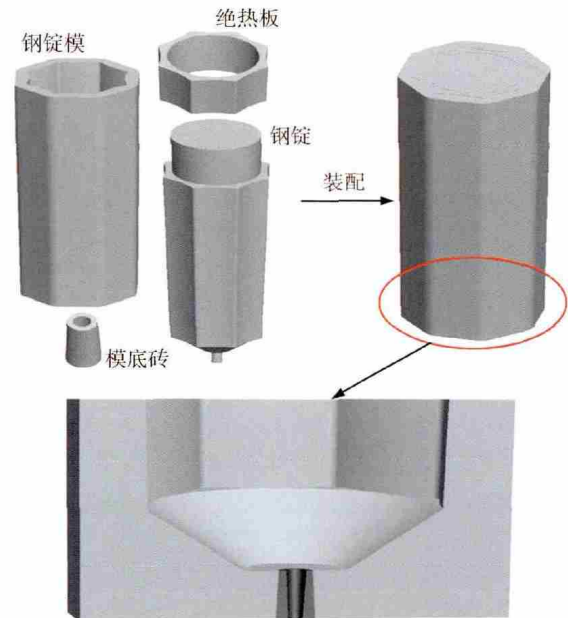


图 1 19 t 钢锭及钢锭模尾部的几何结构图

Fig. 1 Geometries of the 19 ton steel ingot and the bottom of the mould

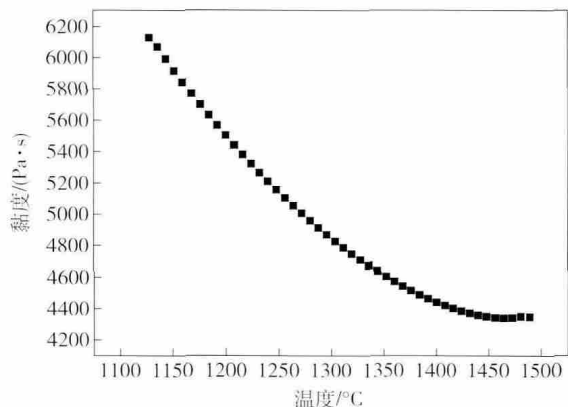


图 2 钢种的黏度随温度变化曲线

Fig. 2 Viscosities of steel at the different temperatures

模底砖注入钢锭模的高温钢液以较大的速度流入钢锭模内腔后主流股仍以较大的速度竖直向上涌至液面, 然后向四周分散并向下流动, 在 1/2 半径范围内形成循环流. 中心钢液流股的流速远大于其周围向下回流

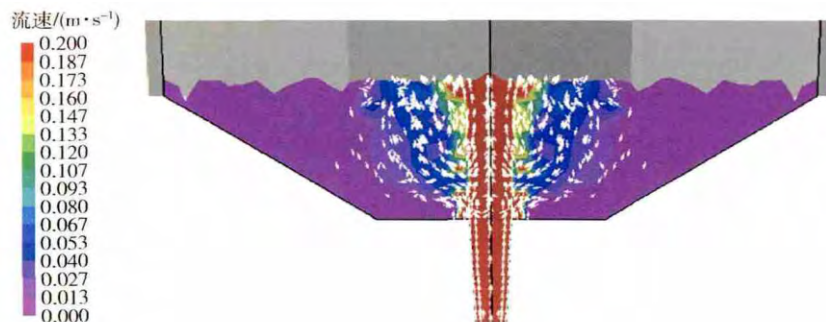


图 3 锭尾充满时钢液的流场分布

Fig. 3 Velocity distribution of molten steel when ingot bottom is filled

钢液的流速,可见中心钢液流股会对液面造成很强的冲击,使液面中心处发生剧烈的波动,容易导致液面保护渣卷入钢液内部并滞留其内成为大型夹杂物。根据图4所示的液面流速分布可知,在50 mm半径范围内钢液的流速在 $0.17 \sim 0.80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,远远大于其他区域的流速。可见如果充型过程液面存在卷渣现象,则主要发生在液面的中心区域附近。

图5为锭尾充满时钢液的温度场分布,从中可以看出,在钢锭模壁的激冷作用下,锭尾充满时靠近模壁的 $1/3$ 半径厚度范围内钢液的固相率已经大于0.5,而此时一旦有夹杂物进入该区域便容易被捕捉至凝固壳内,形成大颗粒夹杂物,严重影响钢锭的质量。结合图3所示的流场分布,可知当中心高速流股造成的液面波动到达一定程度后会导致大量保护渣卷入钢液内部,容易被凝固坯壳捕获形成大颗粒夹杂物,严重危害

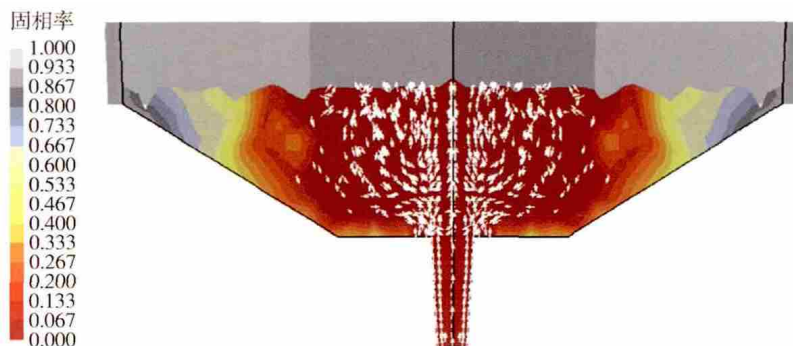


图5 锭尾充满时钢液的温度场分布

Fig. 5 Temperature distribution of molten steel when ingot bottom is filled

多数研究者^[1 9-10]认为,Weber数可作为描述钢液面是否发生卷渣的决定性准数,如式(1)所示。并且很多学者研究发现,12.3可作为钢液面发生明显卷渣的临界Weber数,即当Weber数大于12.3时将发生明显的卷渣现象。本文使用Weber数作为判定钢液发生卷渣现象的指标。图6为锭尾充满时的液面Weber数,可以看出液面中心30 mm半径范围内的Weber数大于12.3,即,中心30 mm半径范围内易发生卷渣现象。在浇注速度一定的条件下,从图3可知钢液面的波动很大程度上取决于中心流股的流速,而中心流股的流速又取决于模底砖的结构。因此,模底砖结构尤其是模底砖的孔径对卷渣有着决定性的影响。

$$We = \frac{U^2 \rho_{\text{steel}}}{\sqrt{\mu g (\rho_{\text{steel}} - \rho_{\text{slag}})}} \quad (1)$$

式中: We 为韦伯数(Weber Number); U 为钢、渣界面处钢液流速; μ 为钢、渣之间的界面张力, $0.15 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$; ρ_{steel} 为钢液密度; ρ_{slag} 为液态保护渣的密度。

2.2 模底砖结构对充型初期卷渣的影响

为研究模底砖结构对卷渣的影响规律,本文结合某厂19 t钢锭模模底砖结构并设计了11种不同孔径

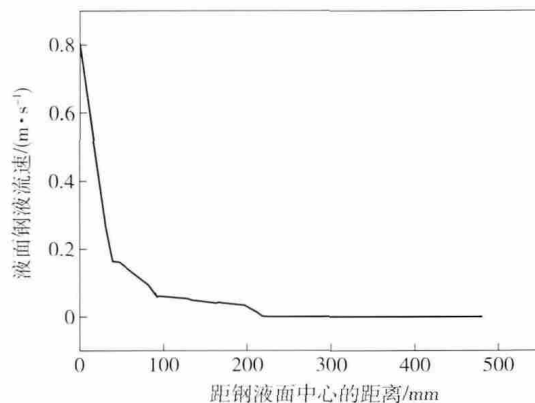


图4 锭尾充满时的液面流速

Fig. 4 Velocity distribution in the level of molten steel when ingot bottom is filled

钢的质量。

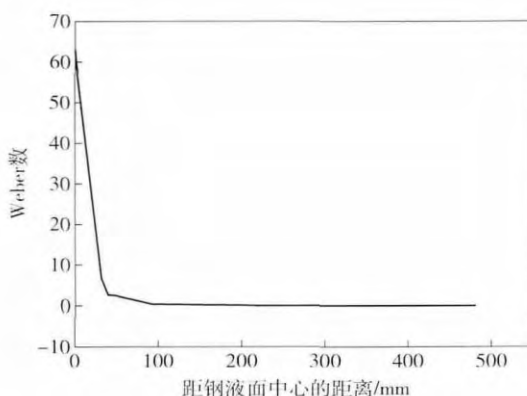


图6 锭尾充满时的液面 Weber 数

Fig. 6 Weber numbers in the level of molten steel when ingot bottom is filled

和锥度的模底砖。然后分别对各方案进行了充型过程的数值模拟,并根据模拟结果计算得到锭尾充满时的钢液面Weber数分布,表1为模底砖结构及相应的锭尾充满时的液面韦伯数。

不同模底砖平均孔径条件下的锭尾充满时钢液面中心半径50、100 mm范围内的平均Weber数以及最大

表1 模底砖结构及相应的锭尾充满时的液面韦伯数

Table 1 A series of entrance nozzle structures and the corresponding Weber numbers

编号	上口直径/mm	锥度 (单面)	下口直径/mm	平均 Weber 数		最大 Weber 数
				半径范围 50 mm	半径范围 100 mm	
0 [#]	70	-0.06	50	27.0	9.9	62.8
1 [#]	70	-0.10	35	44.7	23.3	136.6
2 [#]	70	0	70	13.4	6.5	34.8
3 [#]	70	0.09	100	9.7	6.3	29.8
4 [#]	50	-0.04	35	56.2	31.2	188.8
5 [#]	50	0	50	25.6	14.1	131.3
6 [#]	50	0.06	70	14.9	9.6	58.6
7 [#]	50	0.11	90	13.1	6.4	67.6
8 [#]	100	-0.14	50	24.1	13.5	77.5
9 [#]	100	-0.06	80	6.1	3.2	14.4
10 [#]	100	0	100	5.0	2.9	10.3
11 [#]	100	0.06	120	7.1	3.7	14.5

Weber 数分布如图7所示。可见随着模底砖平均孔径的增加,液面中心半径50、100 mm范围内的平均 Weber 数以及最大 Weber 数均减小,并且其差距也减小。这说明了模底砖平均孔径越大,钢液面发生卷渣现象的倾向越小,并且钢液面的流速越趋向均匀。

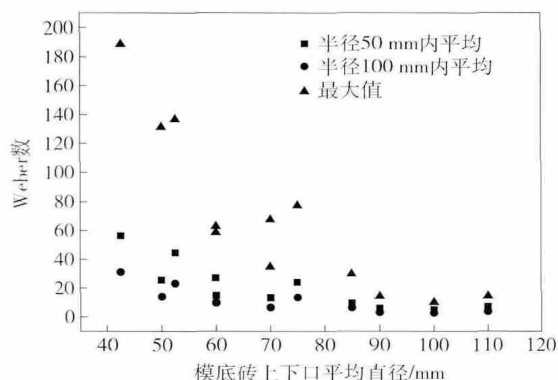


图7 不同模底砖平均孔径的 Weber 数

Fig. 7 Weber numbers of different entrance nozzle average interior diameters

图8为不同模底砖上口和下口直径条件下的锭尾充满时钢液面中心半径50 mm范围内的平均 Weber 数。可以看出对于固定的上口直径,当模底砖下口直径小于上口直径时,随着下口直径的增大,Weber 数迅速降低,而当下口直径增大至大于上口直径后,Weber 数随下口直径增加而降低的非常缓慢。由于 Weber 数主要取决于钢液流股的流速,而该流速很大程度上取决于钢液进入钢锭模时刻的流速。因此,可以认为当模底砖下口直径小于上口直径时,钢液进入钢锭模时刻的流速主要取决于模底砖下口直径,并随着下口直

径的增大而迅速减小。这说明了当模底砖下口直径小于上口直径时,从模底砖下口端流入的钢液在流经模底砖的过程中流股扩张程度很小,流股受模底砖内壁和上口直径的约束不大。并且,还可以进一步推知模底砖下口直径小于上口直径的情况下,钢液对模底砖内壁的冲刷侵蚀程度很小。

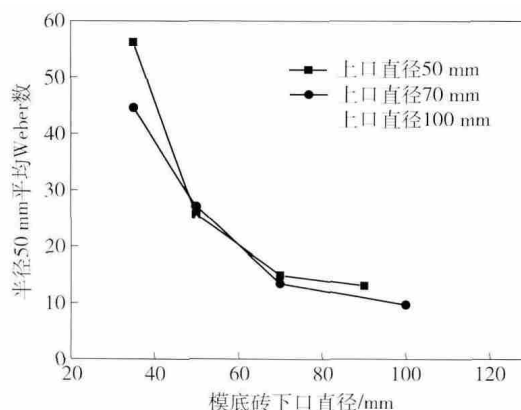


图8 不同模底砖上口及下口直径的 Weber 数

Fig. 8 Weber numbers of different entrance nozzle top-end and bottom-end interior diameters

从图8还可以看出,对于固定的模底砖下口直径,随着上口直径的增大,液面中心半径50 mm范围内的平均 Weber 数有一定程度的减小。但是从整体上看,决定 Weber 数的主要因素为模底砖下口直径的大小。从计算数据还可以得到,当模底砖下口直径大于90 mm后,液面中心半径50 mm范围内的平均 Weber 数基本小于12.3,液面发生卷渣的倾向很小。

3 结论

(1) 大钢锭充型初期,靠近模壁的1/3半径厚度范围内钢液凝固较快,易捕获被卷进钢液的保护渣形成大颗粒夹杂物滞留于钢锭中。

(2) 当模底砖下口直径小于上口直径时,钢液进入钢锭模的流速主要取决于模底砖下口直径,并随着下口直径的增大而迅速减小。

(3) 对于19 t钢锭,当模底砖下口直径大于90 mm后,钢锭充型初期液面发生卷渣的倾向很小。

参 考 文 献

- [1] Eriksson R, Jonsson L, Jonsson P G. Effect of entrance nozzle design on the fluid flow in an ingot mold during filling. *ISIJ Int*, 2004, 44(8): 1358
- [2] Yang J, Hu B, Zhang J M, et al. Study on non-metallic inclusions in Q420 steel. *Foundry Technology*, 2011, 32(1): 43
(杨锦, 胡波, 张炯明, 等. Q420 钢中非金属夹杂物的分析. 铸造技术, 2011, 32(1): 43)
- [3] Liu X H, Dong L R, Yang Z J, et al. Type and source of large oxide inclusions. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 1985, 6(3): 23

- (刘新华,董履仁,杨卓钧,等. 大型氧化物夹杂的类型和来源. 钢铁钒钛,1985,6(3): 23)
- [4] Sun R X, Yang Z J, Dong L R, et al. Source and removal methods of large inclusions in steel. *Steelmaking*, 1987, 3(2): 54
(孙仁孝,杨卓钧,董履仁,等. 钢中大型夹杂的来源及去除途径. 炼钢,1987,3(2): 54)
- [5] Zhang W, Zhong Y B, Wang Y, et al. Numerical simulation of influence of entrance nozzle diameters on filling and solidification process of large steel ingot. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2010, 30(9): 803
(张文,钟云波,王赞,等. 模底砖孔径影响大钢锭浇注及凝固过程的数值模拟. 特种铸造及有色合金,2010,30(9): 803)
- [6] Yu Z Y. Design and application of dilated entrance nozzle of ingot mould. *CISC Technology*, 1992, 35(1): 40
(喻钟义. 扩张型钢锭模模底砖的设计与应用. 重钢技术, 1992, 35(1): 40)
- [7] Fang D D, Shi H Y, Zhu R T, et al. Research on the forming mechanism of large inclusions in wheel steel. *J of East China University of Metallurgy*, 2000, 17(2): 113
(范鼎东,史怀远,朱瑞田,等. 车轮钢大型夹杂形成机理研究. 华东冶金学院学报,2000,17(2): 113)
- [8] Ho K, Pehlke R D. Metal-mold interfacial heat transfer. *Mater Trans B*, 1985, 16(3): 585
- [9] Xiao Z Q, Peng Y C. Mathematical modeling of entrapment phenomena at slag/metal interface in gas-stirred ladle. *Iron Steel*, 1989, 24(10): 17
(肖泽强,彭一川. 喷吹钢包中渣金卷混现象的数学模拟及其应用. 钢铁,1989,24(10): 17)
- [10] Jonsson L, Jönsson P. Modeling of fluid flow conditions around the slag/metal interface in a gas-stirred ladle. *ISIJ Int*, 1996, 36(9): 1127