

全水口自旋流与电磁搅拌协同结晶器流动传热行为研究

谢清华，倪培远*，厉英

（东北大学冶金学院，沈阳 110819）

摘要：旋流水口连铸是从源头上优化结晶器内流动和传热行为的重要技术。本文利用数值模拟手段对全水口自旋流连铸开展研究，分析了传统/旋流水口协同电磁搅拌下大圆坯结晶器流动传热行为。结果表明，与传统水口相比，旋流水口连铸能有效消除结晶器冲击流，加速钢水过热去除。旋流水口协同电磁搅拌下钢液速度和温度更加均匀，与旋流水口+反向搅拌相比，同向搅拌下钢水过热进一步降低约 2 K。

关键词：旋流水口；连铸；数值模拟；流动；传热

Study on steel flow and heat transfer in continuous casting mold with full-nozzle automatic swirling flow technology and electromagnetic stirring

Qinghua Xie, Peiyuan Ni*, Ying Li

(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang, 110819, China)

Abstract: Swirling flow nozzle continuous casting is an important technology to optimize the steel flow and heat transfer in mold. In this paper, the steel flow and heat transfer in large round bloom mold under the conventional nozzle or swirling flow nozzle with the mold electromagnetic stirring (M-EMS) were analyzed. The results showed that swirling flow nozzle casting can effectively eliminate the impinging flow in mold and accelerate the dissipation of steel super-heat compared to a conventional nozzle. The application of swirling flow nozzle coupled with M-EMS can obtain a more uniform velocity and temperature distribution. When the M-EMS was in the opposite rotational direction as the swirling flow in nozzle, the steel super-heat can be decreased by about 2 K.

Key words: swirling flow nozzle; continuous casting; numerical simulation; steel flow; heat transfer

1. 前言

连铸结晶器内的多相流动、凝固、溶质再分配等多物理行为是影响铸坯质量和生产效率的关键因素，这些多物理行为耦合的动态过程与钢水流动密切相关，因此，结晶器内流场优化成为连铸过程控制的重要方法。近年来，为了从源头上优化结晶器流场，旋流连铸技术得到了广泛研究，它是通过在浸入式水口(SEN)内产生钢水旋转流动，进而改善水口出口钢水流动及结晶器内的流场状态，实现结晶器流场的源头优化。研究表明，旋流水口连铸能够消除结晶器冲击流，加速钢水过热耗散^[1-2]，日本新日铁住金工业试验表明，旋流水口能够提高铸坯表面质量，减缓水口阻塞^[2]。当前，水口内钢水旋流产生方法主要包括旋流叶片技术和电磁旋流技术^[2-3]。然而，旋流叶片技术受叶片寿命限制不能长时间使用，且能量效率较低，仅为 20% 左右^[3]，电磁旋流水口则需电磁设备及电能消耗，因此开发一种简单、有效且低成本的旋流产生技术对旋流连铸的工业化至关重要。

本文对全水口自旋流连铸新技术开展研究，该技术利用旋流中间包、中间包内柱状旋流发生装置(SFG)或中间包座砖设计等方法，在浸入式水口内产生钢水旋流，分析了水口内旋流特征，并以大圆坯为研究对象，分析了传统水口/旋流水口协同电磁搅拌(M-EMS)作用下大圆坯结晶器内钢水流动和传热行为。

2. 模型描述

旋流中间包、柱状旋流发生装置及中间包座砖设计几何模型如图 1 所示。通过求解连续性方程、动量

方程、能量方程及湍流方程获得钢水速度场和温度场。Realizable $k-\varepsilon$ 模型耦合 Enhanced Wall Treatment 模型用于求解初始湍流流场，随后使用 RSM 模型及 Stress-Omega 子模型获得充分发展的流场，研究表明，上述模拟方法获得的流场与实验测量结果吻合较好^[4]。电磁搅拌作用下结晶器中磁感应强度通过求解 Maxwell 方程获得，利用 UDF 在动量方程中添加源项实现电磁力对钢液流场影响的模拟。

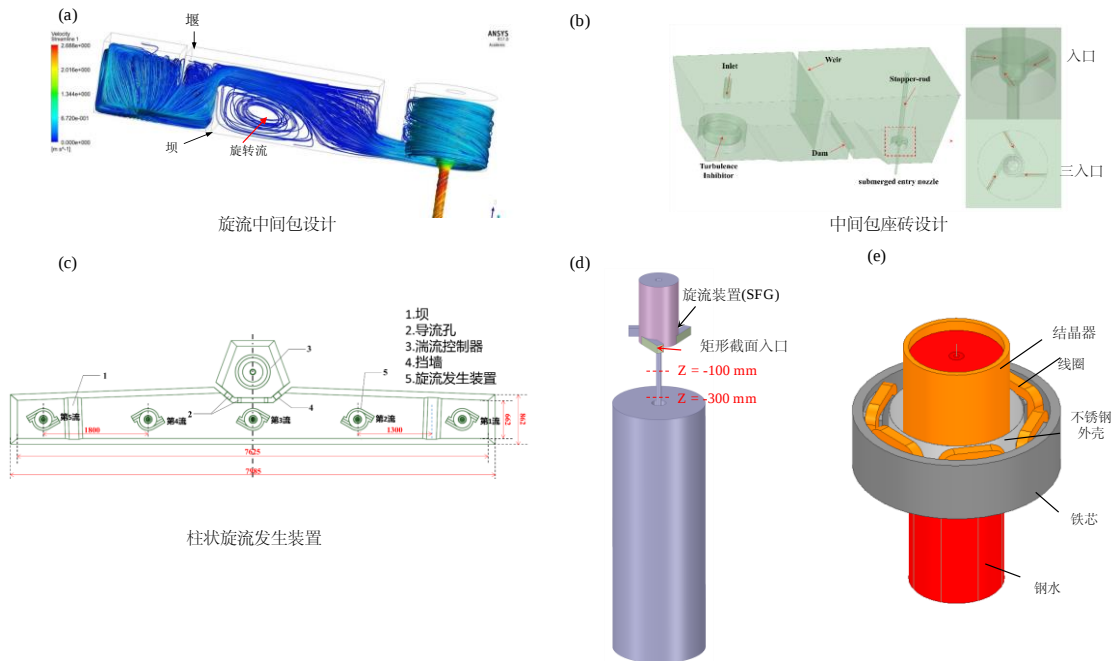


图 1 (a) 旋流中间包示意图^[5] (b) 多流中间包内柱状旋流发生装置示意图 (c) 中间包座砖结构示意图 (d) 圆坯结晶器示意图^[6]和 (e) 电磁搅拌结构示意图

Fig.1 (a) Schematic of swirling flow tundish; (b) installation of swirling flow generator in multi-strand tundish; (c) structure of tundish outlet brick; (d) coupling between the swirling flow generator and mold and (e) structure of mold electromagnetic stirring

3. 结果与分析

3.1. SEN 内钢水流动特性

图 2 为 SEN 不同截面处的钢水切向速度及压力分布，各截面位置如图 2(a)所示。结果表明，钢水由双切向入口进入旋流装置，在旋流装置及 SEN 内部形成钢水旋转流动。在低于 SEN 入口 0.1 m 处的截面上 ($Z=-0.1$ m)，形成了均匀的旋流，旋流的旋涡中心位于水口中心，旋转速度最大值位于旋流中心与壁面之间。随着钢水向下流动，由于钢水的粘性耗散作用，旋转动能不断减小，切向速度的最大值由 $Z=-0.1$ m 截面处的 3.2 m/s 减小至 $Z=-0.55$ m 截面处的 2.37 m/s，切向速度随钢水在 SEN 内向下流动逐渐变的更加均匀分布。

由图 2(c)和(d)可知，在 SEN 壁面附近压力较大，其平均静压力比大气压高约 6 kPa，SEN 中心处为低压区，静压力低于大气压。随着 SFG 入口尺寸由 4 cm×6 cm 减小至 4 cm×3 cm，SEN 壁面附近最大压力由 10 kPa 提高至 16 kPa，水口壁面静压力高于大气压有利于抑制水口吸气而造成的钢水二次氧化。此外，图 2(e)所示为 SEN 壁面切应力分布，旋流导致壁面切应力变大，但壁面切应力对夹杂物沉积及水口堵塞的影响还需要进一步研究。

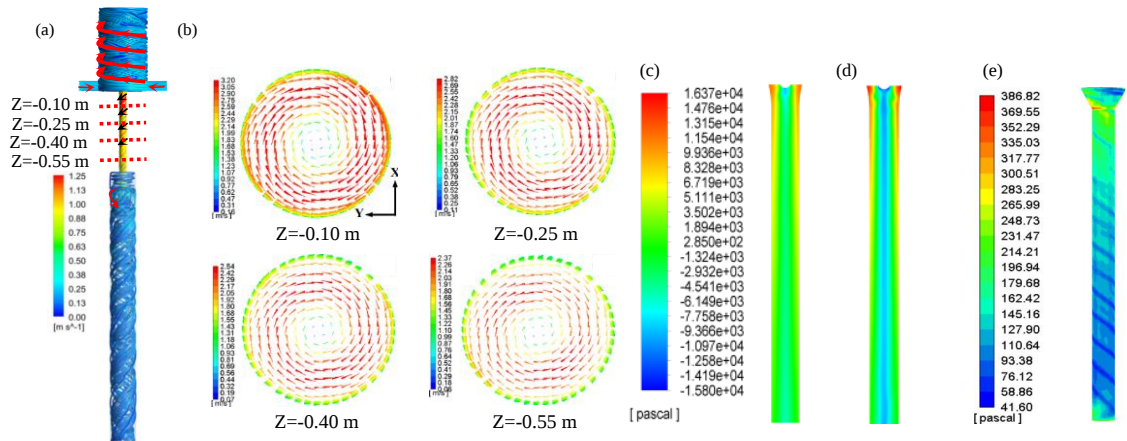


图2 (a) 钢水流动轨迹^[6] (b) 不同 SEN 截面处的切向速度分布^[4] (c) 4 cm × 6 cm 入口尺寸水口压力分布 (d) 4 cm × 3 cm 入口尺寸水口压力分布和 (e) 水口壁面切应力分布

Fig.2 (a) Steel flow path; (b) tangential velocity at different SEN positions; (c) SEN pressure distribution with 4 cm × 6 cm inlet size; (d) SEN pressure distribution with 4 cm × 6 cm inlet size and (e) wall shear stress distribution

3.2. 不同坯型结晶器内钢水流动行为

图 3(a) 为传统水口/旋流水口连铸结晶器内钢水速度场分布，与传统水口相比，旋流水口连铸能够有效消除冲击流，且结晶器速度分布更加均匀。通过使用旋流水口，钢水从 SEN 出口以 360° 方向均匀流向结晶器壁面，这有助于加快钢水过热消除。此外，钢水到达凝固前沿后，在结晶器壁面处形成向上的流动，引起弯月面附近形成环流，这有助于促进弯月面处的传热，加快保护渣熔化以更好发挥润滑功能。图 3(b) 为传统水口/旋流水口与电磁搅拌(310 A, 1.5 Hz)协同作用下结晶器内速度场特征，结果表明，电磁搅拌作用下结晶器流场分布相似，结晶器壁面附近钢水最大速度约 0.47 m/s，弯月面速度约 0.3 m/s。此外，由图 3(b) 可知，传统水口+电磁搅拌不能完全消除冲击流，SEN 出口附近最大速度约 0.8 m/s，旋流水口+电磁搅拌条件下冲击流消失，与反向搅拌相比，同向搅拌条件下 SEN 出口速度更加均匀分布。

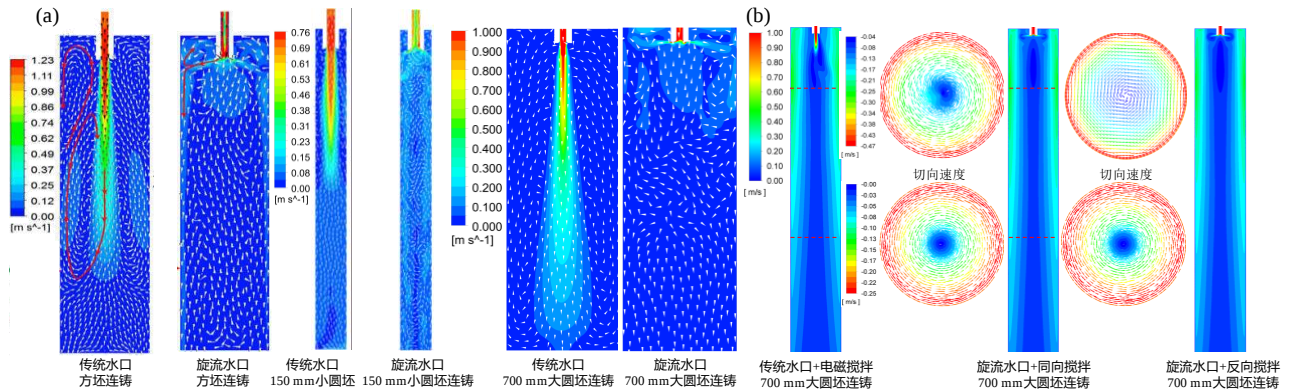


图3 (a) 传统水口/旋流水口条件下结晶器速度分布^[7]和 (b) 传统水口/旋流水口耦合电磁搅拌条件下结晶器速度分布
Fig.3 (a) Velocity distribution in mold with a conventional SEN and a swirling flow SEN and (b) velocity distribution in mold with a conventional SEN + M-EMS and a swirling flow SEN + M-EMS

3.3. 结晶器内钢水温度分布

图 4(a) 为传统水口/旋流水口连铸结晶器钢水温度分布，结果表明，与传统水口相比，旋流水口条件下结晶器中心高温冲击流消失，钢水温度分布更加均匀。在传统水口连铸结晶器横截面 $Z = -0.75$ m 和 $Z = -1.5$ m 处，钢水最大温度分别为 1773 K 和 1755 K，相同横截面处，旋流水口连铸结晶器钢水最大温度分别为 1768 K 和 1753 K，钢水过热耗散加快，这有利于凝固坯壳生长及铸坯质量的提高。此外，由于旋流水

口连铸引起弯月面附近形成环流，传热更加活跃，弯月面钢水最大温度升高约 4 K。图 4(b)为传统水口/旋流水口协同电磁搅拌(310 A, 1.5 Hz)作用下结晶器温度分布，传统水口+电磁搅拌条件下结晶器中心最大温度约 1803 K，旋流水口+电磁搅拌最大温度为 1798 K，结晶器温度呈均匀分布。与反向搅拌相比，同向搅拌条件下 SEN 出口附近钢水温度降低约 2 K，过热耗散进一步提高。

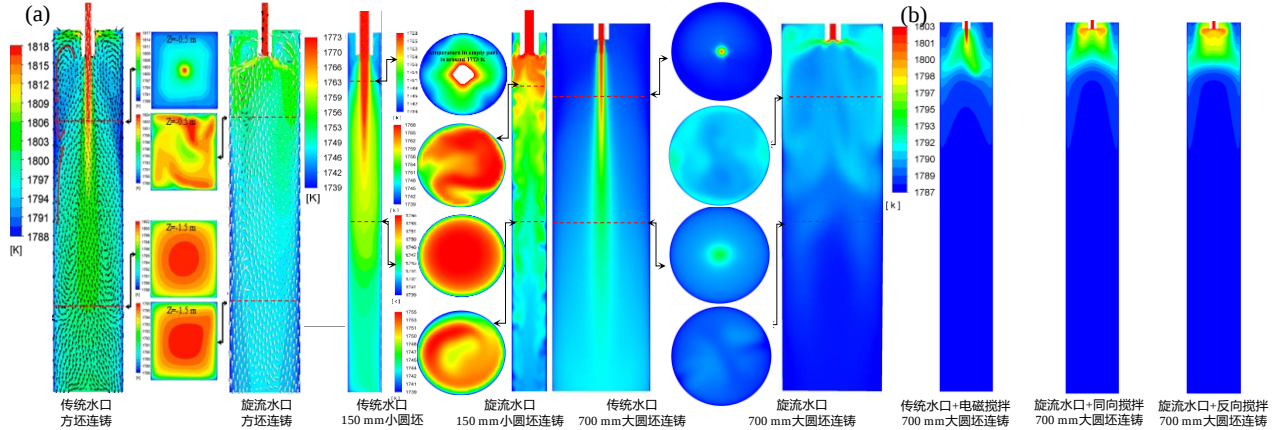


图 4 (a) 传统水口/旋流水口条件下结晶器温度分布^[6, 7]和 (b) 传统水口/旋流水口耦合电磁搅拌条件下结晶器温度分布
Fig.4 (a) Temperature distribution in mold with a conventional SEN and a swirling flow SEN and (b) temperature distribution in mold with a conventional SEN + M-EMS and a swirling flow SEN + M-EMS

4. 结论

- (1) 与传统水口连铸结晶器相比，旋流水口连铸能有效消除结晶器冲击流，均匀结晶器速度和温度分布，加速钢水过热去除，改善弯月面流动和传热；
- (2) 旋流水口协同电磁搅拌作用下结晶器速度和温度分布更均匀，与反向搅拌相比，同向搅拌条件下钢水过热进一步可降低约 2 K。

致谢

感谢国家自然科学基金项目资助项目（项目号：51704062）的支持。

参考文献

- [1] Yokoya S, Takagi S, Iguchi M, et al. Swirling Effect in Immersion Nozzle on Flow and Heat Transport in Billet Continuous Casting Mold. *ISIJ Int.*, 1998, 38(8): 827.
- [2] Tsukaguchi Y, Hayashi H, Kurimoto H, et al. Development of Swirling-flow Submerged Entry Nozzles for Slab Casting. *ISIJ Int.*, 2010, 50(5): 721.
- [3] Geng D Q, Lei H, He J C, et al. Effect of electromagnetic swirling flow in slide-gate SEN on flow field in square billet continuous casting mold. *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)*, 2012, 25(5): 347.
- [4] Ni P Y, Wang D X, Jonsson L, et al. Numerical and Physical Study on a Cylindrical Tundish Design to Produce a Swirling Flow in the SEN During Continuous Casting of Steel. *Metall. Mater. Trans. B*, 2017, 48(B): 2695.
- [5] Ni P Y, Jonsson L, Ersson M, et al. A New Tundish Design to Produce a Swirling Flow in the SEN During Continuous Casting of Steel. *Steel Res. Int.*, 2016, 87(10): 1356.
- [6] Xie Q H, Ni P Y, Ersson M, et al. Numerical Simulations on Dynamic Behavior of Multiphase Flow and Heat Transfer in a Round Mold with a Swirling Flow Tundish Design. *Metall. Mater. Trans. B*, 2022, 53(B): 3197.
- [7] Ni P Y, Ersson M, Jonsson L, et al. Numerical Study on the Influence of a Swirling Flow Tundish on Multiphase Flow and Heat Transfer in Mold. *Metals*, 2018, 8(5): 368.