

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.05.012

连铸结晶器内偏流及漩涡卷渣的实验研究

刘中秋, 李宝宽
(东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 连铸结晶器内的偏流和漩涡卷渣行为严重影响连铸坯的质量,因此建立了一套直弧型结晶器系统,研究了偏流和漩涡卷渣的运动规律. 结果发现:偏流是由于流场自身的不稳定造成的,是时刻变化的;偏流发生在二冷区弯曲段附近. 即使保证水口中对中放置,结晶器上表面漩涡依然存在,多数情况下只有单个漩涡出现,其位置和大小是瞬变的. 对称涡出现的机率较小,尺寸和强度较小,持续时间较短. 同时考察了拉速、水口插入深度、滑动水口开度和中间包液位高度对偏流及其周期和漩涡卷渣的影响.

关 键 词: 连铸结晶器;偏流;漩涡卷渣;水模型实验

中图分类号: TF 777.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)05-0666-05

Experimental Studies on Asymmetrical Flow and Vortex Slag Entrapment in Continuous Casting Mold

LIU Zhong-qiu, LI Bao-kuan
(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIU Zhong-qiu, E-mail: liuzq@smm.neu.edu.cn)

Abstract: The asymmetrical flow inside the mold and the slag entrapment induced by vortex at the top surface have great influences on the quality of continuous casting slab. One vertical – curved mold system was set to study the asymmetrical flow and slag entrapment behaviors. The results show that the asymmetrical flow in the mold is induced by the instability of the flow field itself and the flow pattern is not stationary but changed over frequently. The asymmetrical flow occurs near the bending section of the secondary cooling zone. Although the geometrical and operating conditions were made to be symmetric strictly, the vortex cannot be avoided. In the most cases, only one vortex took place and its size and position varies with time. The probability, size and strength of the symmetric vortex are very small and the durations is also short. Moreover, the effects of casting speed, gas injection rate, immersion depth of nozzle, slide gate opening, and liquid level height of tundish on the periodic asymmetrical flow and slag entrapment are analyzed.

Key words: continuous casting mold; asymmetrical flow; vortex slag entrapment; water model experiment

结晶器偏流会导致结晶器内两侧对称位置的钢液流速不等,其中两侧上回流在渣界面流速不等易产生漩涡,形成漩涡卷渣;两侧下回流在窄面的冲击深度和冲击压力不等将导致结晶器两侧偏流. 最初,Robertson 等^[1]采用物理水模型实验发现了结晶器内的偏流现象. 随后,Gupta 等^[2]利用水模型实验研究了结晶器内的偏流现象,发现偏流随时间左右摆动,无明显的变化周期.

Lawson 等^[3]采用 PIV 和 LDV 等先进的测试手段监测水口附近和上回流区的水平速度,发现结晶器内的自持振荡没有明显的周期.

在实际生产过程中,保护渣的卷入不仅污染钢液,增加钢液中的夹杂物水平,而且会导致钢液的二次氧化,影响铸坯质量^[4-6]. 李宝宽等^[5]利用可视化实验捕获液面漩涡,发现水口偏斜出流是产生毗邻水口漩涡的原因. 朱苗勇等^[6]利用水模型实验

发现结晶器内主要存在 4 种卷渣方式：表面回流卷渣、漩涡卷渣、气泡乳化卷渣和冲击卷渣。

结晶器偏流和漩涡卷渣对连铸坯质量至关重要。以往研究者的工作主要集中于研究偏流和漩涡等相关现象的描述上,而对获得偏流和表面漩涡形成周期的物理实验进行得不够充分。本文采用水模型实验研究结晶器内偏流和漩涡卷渣的运动规律,并分析了拉速、水口插入深度、滑动水口开度和中间包液位高度对偏流和漩涡卷渣的影响。

1 实验系统

以往的水模型一般只考虑结晶器或者包括垂直延长段的区域,没有考虑二冷区弧形弯曲段对内部流动的影响。本研究考虑了二冷区弧形形状的作用,采用 1:3 的模型实物比确定模型尺寸,采用透明有机玻璃建立了直弧型结晶器水模型,如图 1 所示。实验系统及对应原型的主要参数见文献[7]。



图 1 直弧型结晶器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the vertical-bending mold

2 结果与讨论

2.1 偏流现象

为了捕捉结晶器内的流型,实验中由中间包底部出口加入墨汁以显示流动的流型,并采用摄像机进行记录。图 2 为不同时刻捕捉到的结晶器偏流现象。由图可知,结晶器下部的流动是不对称的,在 T_1 时刻呈现左侧回流、右侧偏流; T_2 时刻呈现右侧回流、左侧偏流。观察偏流发生的位置可以发现,偏流发生在二冷区弯曲段附近,可见二冷区弧形形状对结晶器内部流场的影响较大,原因是弯曲形状造成流动方向的改变,有利于回流的产生。

2.2 不同参数对偏流周期的影响

通过单因素实验,分别研究了拉速、浸入式水口插入深度、滑动水口开度和中间包液位高度对

结晶器内偏流周期的影响。表 1 示出了不同工况下的实验参数。文献[8]采用水力学模拟发现自由液面波动保持与结晶器流场相同频率的周期性不对称变化。因此,本实验通过观察上表面的波动情况来判断偏流的周期。采用黑芝麻作为示踪剂,在结晶器流场稳定后观察结晶器上表面黑芝麻的分布情况,当大部分黑芝麻在结晶器某一侧时开始计时,把黑芝麻从结晶器的一侧转到另一侧所消耗的时间记为半个周期,在同一工况下记录 5 组数据,取平均值分析。结果如图 3 所示。

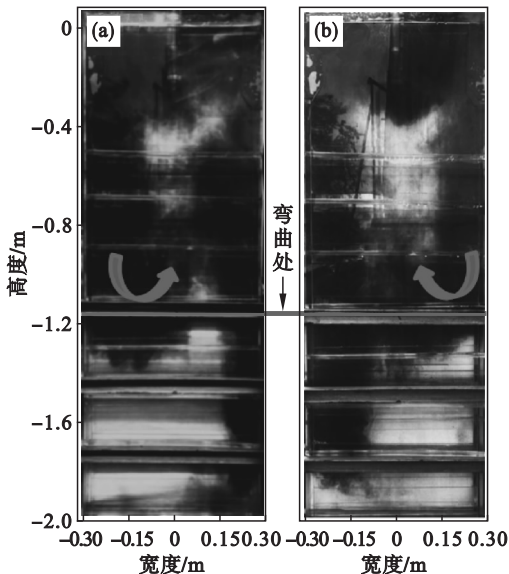


图 2 不同时刻结晶器内部偏流流型
Fig. 2 Asymmetric flow pattern at different times
(a)— T_1 时刻; (b)— T_2 时刻。

图 3a 为拉速对偏流周期的影响规律。在保证其他操作参数一致的前提下,随着拉速由 0.46 增加至 0.82 m/min,偏流周期快速减小,由 44.4 降至 26.07 s。原因是拉速的增加使钢液的射流强度增大,速度的波动频率增大,缩短了偏流周期。

图 3b 给出了水口插入深度对偏流周期的影响规律。从图中可以看出,随着水口插入深度的增加,偏流周期逐渐增大。原因是水口插入深度的增加使钢液射流运动至结晶器上表面的距离增加,射流强度的衰减增大,所以速度的波动频率减小,从而增大了偏流周期。

图 3c 为滑动水口开度对偏流周期的影响。随着滑动水口开度的增加,偏流周期存在减少的趋势,但变化不明显。这主要是因为滑动水口开度虽然改变了水口内部流场的结构,但通钢量不变,所以对钢液射流强度的影响较小。

图 3d 给出了中间包液位对偏流周期的影响规律。由图可知,随着中间包液位高度由 400 减小

至 100 mm,偏流周期由 29.78 增加至 42.48 s. 原因是在保证滑动水口开度的情况下,减小中间包液位高度,此时的浸入式水口的出口所受钢流的静压力减小,则钢通量会减小,射流速度强度减小,所以速度的波动频率减小,从而增大了变化的时间.

表 1 不同工况下的实验参数
Table 1 Experimental parameters at different working conditions

参数	拉速/($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	插入深度/mm	水口开度/%	中间包液位/mm
拉速/($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	0.46, 0.58, 0.7, 0.82	100	100	—
插入深度/mm	0.7	70, 100, 130	100	—
水口开度/%	0.7	100	40, 57.5, 68.5, 100	—
中间包液位/mm	—	100	100	100, 200, 300, 400

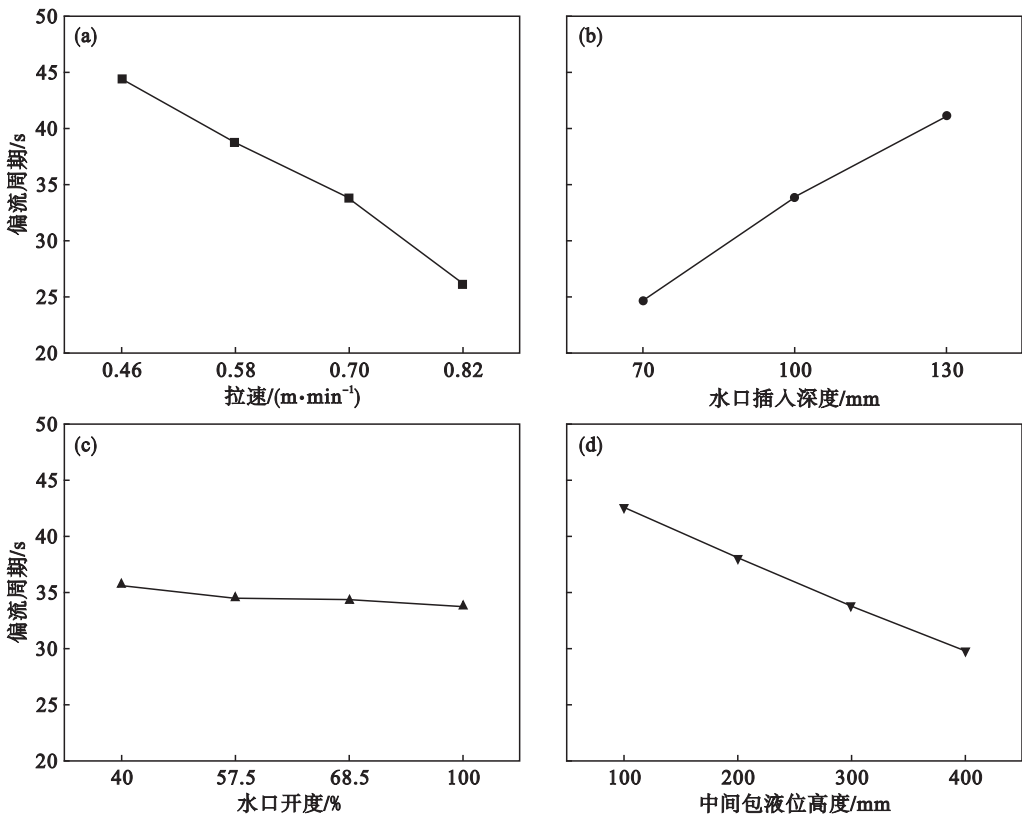


图 3 不同参数对偏流周期的影响
Fig. 3 Effect of different parameters on the asymmetrical flow period
(a)—拉速; (b)—水口插入深度; (c)—水口开度; (d)—中间包液位高度.

2.3 漩涡卷渣现象

为捕捉漩涡流态,实验中在自由液面上播撒黑芝麻以显示液面流场形状^[5]. 图 4 示出了同一组实验中得到的不同时刻自由液面的漩涡形态. 大多数情况下,自由液面只有单个漩涡出现,其位置随着时间变化. 在图 4a 时刻,一个较大的漩涡出现在水口左侧;图 4b 时刻,漩涡处于水口右侧,且漩涡的大小也在一直变化. 对称涡出现的机率较小且持续时间较短,如图 4c 所示,水口两侧各出现一个小漩涡. 在实验操作过程中尽可能使水口对中,发现涡流现象依然存在,所以漩涡的出现是由于流场自身的不稳定、不对称造成的.

2.4 不同参数对漩涡卷渣的影响

由于漩涡卷渣是间断有规律的发生,所以可以用单位时间内卷渣的次数来表征实际生产中卷渣的情况,这是优化工艺参数的一个重要指标. 此处以黑芝麻作为示踪剂,平均覆盖在整个结晶器的上表面. 如果发现结晶器液面上的黑芝麻被漩涡卷入结晶器内,即视为一次卷渣. 每次统计时间为 1 min,每个参数统计 5 轮次,取平均值. 需要注意的是,在实际结晶器的弯月面处,并不是所有的漩涡均会引起卷渣,因为有些漩涡强度较弱,并不能产生足够大的向下吸力. 但此处为了研究漩涡的发生频率,特命名为漩涡卷渣的次数. 图 5 示出了不同参数对漩涡卷渣次

数的影响.

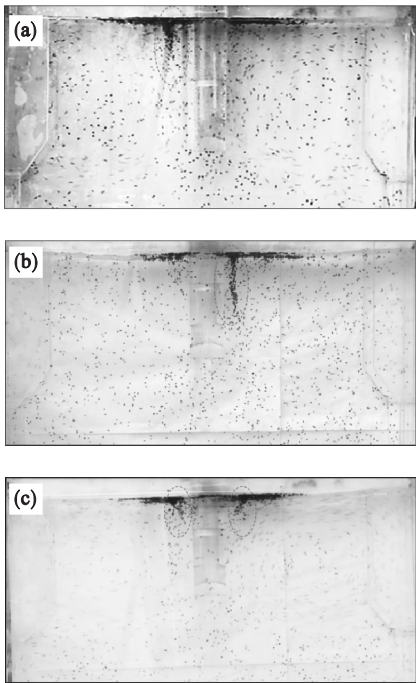


图 4 结晶器上表面漩涡分布

Fig. 4 Observed vortices at the top surface

(a) — 水口左侧；(b) — 水口右侧；(c) — 水口两侧.

图 5a 给出了拉速对漩涡卷渣次数的影响规律. 由图可知,随着拉速的增加,漩涡卷渣的次数

逐渐增多,漩涡的强度也逐渐变大. 原因是随着拉速的增加,水口出口的射流强度增加,形成的上回流流股的动能增加,加剧了液面波动及水口两侧速度的不对称程度,使形成漩涡卷渣的机率增加. 而且水口出口射流的增加,也会增加水口出口顶部的负压值,使水口附近负压卷渣的机率增加.

图 5b 为浸入式水口插入深度对漩涡卷渣发生次数的影响规律. 结果发现:随着水口插入深度的增加,漩涡卷渣次数逐渐减少. 原因是随着插入深度的增加,流股冲击到窄边后的位置降低,上回流股到达液面的动能减少,液面波动降低,降低了漩涡卷渣的产生机率.

如前面所述,在本实验中滑动水口的开度不影响钢通量,所以其对钢液射流的强度影响较小. 如图 5c 所示,随着滑动水口开度的增加,漩涡卷渣次数有增多的趋势,但幅度较小.

图 5d 示出了中间包液位高度对漩涡卷渣次数的影响规律. 随着中间包液位高度的增加,漩涡卷渣次数逐渐增加. 这主要是因为随着中间包液位高度增加,中间包内液体的静压力增加,水口出口的射流强度增加,形成的上回流股的动能增加,加剧了液面的波动,使产生漩涡卷渣的机率增加.

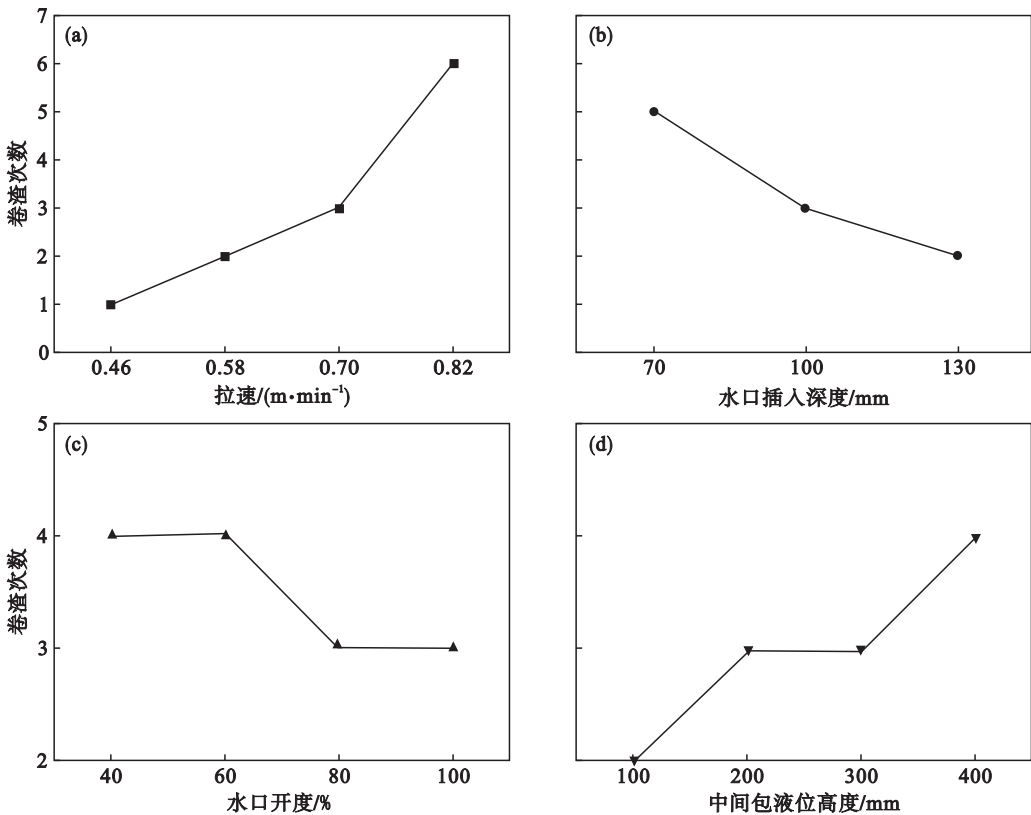


图 5 不同参数对漩涡卷渣的影响

Fig. 5 Effect of different parameters on vortex slag entrapment

(a) — 拉速；(b) — 水口插入深度；(c) — 水口开度；(d) — 中间包液位高度.

3 结 论

1) 结晶器内的钢液流动是瞬态的、非对称的. 偏流是由于流场自身的不稳定造成的,是时刻存在的;偏流发生在二冷区弯曲段附近. 通过研究偏流的周期发现:拉速对偏流周期的影响较大,随着拉速的增加偏流周期快速减小;随着水口插入深度的增加,偏流周期逐渐增大;在保证通钢量不变的情况下,滑动水口开度对偏流周期的影响较小;在保证滑动水口开度的情况下,减小中间包液位高度,偏流周期逐渐减小.

2) 即使保证水口对中放置,结晶器上表面漩涡依然存在,所以漩涡的出现是由于流场自身的不稳定、不对称造成的. 大多数情况下,自由液面只有单个漩涡出现,其位置和大小随着时间的变化而改变. 对称漩涡出现的机率较小、尺寸较小、强度较弱,且持续时间较短. 不同参数的研究发现:随着拉速的增加,漩涡卷渣的次数增多,强度增强;随着水口插入深度的增加,漩涡卷渣次数减少;保证通钢量不变的情况下,滑动水口开度对漩涡卷渣次数的影响较小;随着中间包液位高度的增加,漩涡卷渣次数增加.

(上接第 665 页)

[2] Liu Z J,Zhang J L,Yang T J. Research and development of sintering flue gas desulphurization technology [J]. *China Metallurgy*, 2009,2:1-5,9.

[3] Liu W Q. Development of sintering flue gas desulfurization technology in iron and steel industry [J]. *China Environmental Protection Industry*,2009,5:24-27.

[4] Zhang H,Rao M,Fan Z,et al. Effects of circulated flue gas components on iron ore sintering [J]. *ISIJ International*, 2012,52(12):2139-2144.

[5] Li G,Liu C,Rao M,et al. Behavior of SO₂ in the process of flue gas circulation sintering (FGCS) for iron ores[J]. *ISIJ International*,2014,54(1):37-42.

[6] 董辉,李磊,蔡九菊,等. 烧结余热回收竖罐内料层传热过程数值计算[J]. 东北大学学报(自然科学版),2012,33(9):1299-1302.

(Dong Hui,Li Lei,Cai Jiu-ju,et al. Numerical simulation of heat exchange in vertical tank of waste heat recovery[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*,2012,33(9):1299-1302.)

[7] Wang S J,Zhu P,Zhang G,et al. Numerical simulation research of flow field in ammonia-based wet flue gas desulfurization tower[J]. *Journal Energy Institute*,2014,88(3):284-291.

[8] Wang X,Li Y,Zhu T,et al. Simulation of the heterogeneous semi-dry flue gas desulfurization in a pilot CFB riser using the two-fluid model [J]. *Chemical Engineering Journal*,

参考文献:

[1] Robertson T, Moore P, Hawkin R J. Computational flow model as aid to solution of fluid flow problems in the industry [J]. *Ironmaking and Steelmaking*,1986,13(4):195-203.

[2] Gupta D,Lahiri A K. A water model study of the flow asymmetry inside a continuous slab casting mold [J]. *Metallurgical and Materials Transaction B*,1996,27(10):757-764.

[3] Lawson N J, Davidson M R. Crossflow characteristics of an oscillating jet in a thin slab casting mould [J]. *Journal of Fluids Engineering*,1999,121(3):588-594.

[4] He Q L. Observations of vortex formation in the mould of a continuous slab caster [J]. *ISIJ International*,1993,33(2):343-345.

[5] Li B K,Tsukihashi F. An investigation on vortexing flow patterns in water model of continuous casting mold[J]. *ISIJ International*,2005,45(1):30-36.

[6] 张胜军,朱苗勇,张永亮,等. 高拉速吹氩板坯连铸结晶器内的卷渣机理研究[J]. 金属学报,2006,46(10):1087-1090.

(Zhang Sheng-jun,Zhu Miao-yong,Zhang Yong-liang,et al. Study on mechanism of entrapment in slab continuous casting mould with high casting speed and argon blowing[J]. *Acta Metallurgica Sinica*,2006,46(10):1087-1090.)

[7] Liu Z Q,Li B K,Jiang M F. Transient asymmetric flow and bubble transport inside a slab continuous-casting mold [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*,2014,45(4):675-697.

[8] Shen B Z,Shen H F,Liu B C. Instability of fluid flow and level fluctuation in continuous thin slab casting mould [J]. *ISIJ International*,2007,47(3):427-432.

2015,264:479-486.

[9] Ooi T C,Lu L. Formation and mitigation of PCDD/Fs in iron ore sintering. [J]. *Febs Letters*,2011,85(3):291-299.

[10] Wang G,Wen Z,Lou G,et al. Mathematical modeling of and parametric studies on flue gas recirculation iron ore sintering [J]. *Applied Thermal Engineering*,2016,102:648-660.

[11] Wang G,Wen Z,Lou G,et al. Mathematical modeling and combustion characteristic evaluation of a flue gas recirculation iron ore sintering process[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,2016,97:964-974.

[12] Yamaoka H,Kawaguchi T. Development of a 3-D sinter process mathematical simulation model [J]. *ISIJ International*,2005,45:522-531.

[13] Wang J,Zhong W. Simultaneous desulfurization and denitrification of sintering flue gas via composite absorbent [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*,2016,24(8):1104-1111.

[14] 潘建. 铁矿烧结烟气减量排放基础理论与工艺研究[D]. 长沙:中南大学,2007.

(Pan Jian. Theoretical and process studies of the abatement of flue gas emissions during iron ore sintering[D]. Changsha: Central South University,2007.)

[15] Chen X L,Huang Y S,Gan M,et al. Effect of H₂O(g) content in circulating flue gas on iron ore sintering with flue gas recirculation [J]. *Journal of Iron & Steel Research International*,2015,22(12):1107-1112.