

# 连铸结晶器内液面波动行为的研究进展

王哨兵

(瑞浦科技集团特殊钢研究院 丽水 323900)

**摘要:** 在钢的连铸生产过程中,过热的钢液通过浸入式水口浇注到结晶器中,浇注的流股冲击结晶器窄面会引起结晶器的自由液面发生波动。钢液液面波动过大会发生保护渣卷渣现象,钢液液面波动过于平静时钢液中的夹杂物不能上浮,这两种情况都会导致的铸坯发生质量缺陷。因此,研究和控制结晶器内钢液液面的波动行为,可以获得良好的铸坯质量,并且提高了连铸生产效率。近年来,随着对铸坯质量要求的提高,科研工作者对结晶器内自由液面的波动行为进行了大量的物理实验和数值模拟。

**关键词:** 液面波动; 物理实验; 数值模拟

## 0 引言

众所周知,连铸结晶器内的自由液面波动情况不仅关系着保护渣的熔融,而且还对夹杂物的分布有着重要的影响。当结晶器内钢液自由液面波动剧烈时,会发生保护渣卷渣现象;当结晶器内钢液自由液面波动平静时,保护渣不能较好的熔融,因此不能起到吸渣和润滑的作用。因此在实际的生产过程中,一定要将钢液的液面波动控制在一定的范围内,但是由于现实操作的困难性,大部分实验工作者都采用物理实验和数值模拟相互结合的方法,来分析研究结晶器内钢液液面波动情况。

## 1 物理实验方法

钢水由于温度的过高,进行现场实验操作会很困难,因此科研工作者主要采用水模型的实验方法来探索研究,根据实验原理的相似性,可以探索出最合理的连铸工艺参数,将钢液的液面波动控制在合理的范围内。关于这方面有着很多的国内外科研工作者进行研究。日本的 NKK 公司综合材料技术研究所的 T. Teshima 等<sup>[1-2]</sup>以 NKK 福山制铁所 5 号连铸机现场的生产工艺条件和工艺参数作为研究基础,主要采用水模型实验,如图 1 所示。

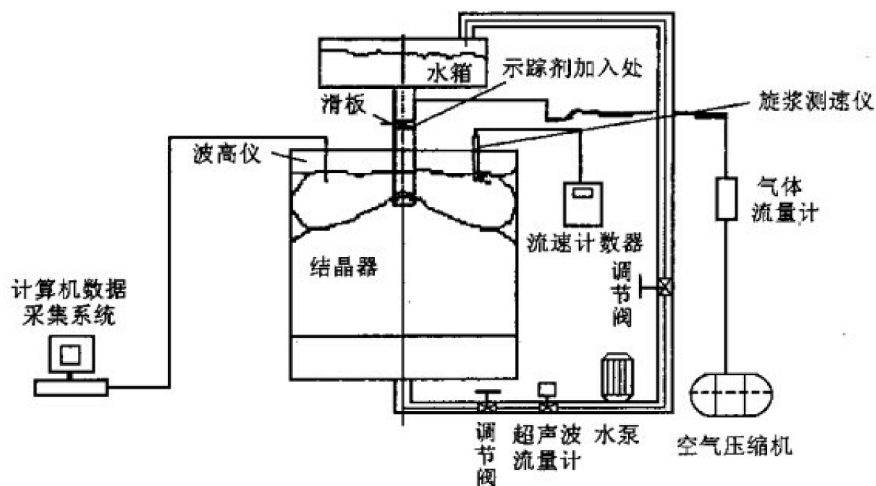


图 1 水模型实验示意图

分析在较大的拉速下板坯结晶器内钢液的流动行为,将所得到的实验数据和现场进行相互结合测试,推导出在不同的连铸工艺条件下,其对结晶器内钢液的流动行为和自由液面波动的影响,提出了反应结晶器内钢液自由液面波动的指数—液面波动指数  $F$ ,其表达式为:

$$F = \rho_L V_e (1 - \sin\theta) / (4D)$$

式中  $\rho$ —钢水的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $Q_L$ —钢水的流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $\theta$ —注流撞击窄面的角度,  $^\circ$ ;  $V_e$ —注流的撞击速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $D$ —撞击点距自由面之间的距离,  $\text{m}$ 。

式中各个物理量如图 2 所示。T. Teshima 等充分的利用水模型实验,推导出在不同的工艺参数下结晶器内钢液的流动行为,其所得到的结果表明:过热的钢水通过浸入式水口浇注到结晶器中时,水口射流出的钢液撞击结晶器窄面后,钢液会形成两种流股:上升流股和下降流股,上升的流股会沿着结晶器窄面上升,从而造成钢液发生卷渣现象。要想获得较高质量的铸坯,必须将液面波动控制在一定的范围内,通过大量科研工作者的实验结果,我们可以推断出最佳的液面指数  $F$  值应该在  $3\text{mm} \sim 5\text{mm}$ 。要想将  $F$  值控制在合理的范围内,其连铸工艺参数有着一定的要求,主要包括:浸入式水口的深度、水口侧孔倾角、铸坯出口拉速和氩气流量,通过合理的控制连铸工艺参数,可减少由卷渣引起的连铸板坯的缺陷。与此同时,将  $F$  值与应用行波磁场的电磁制动进行相互结合,也可以作为防止保护渣发生卷渣引起缺陷的参考依据。

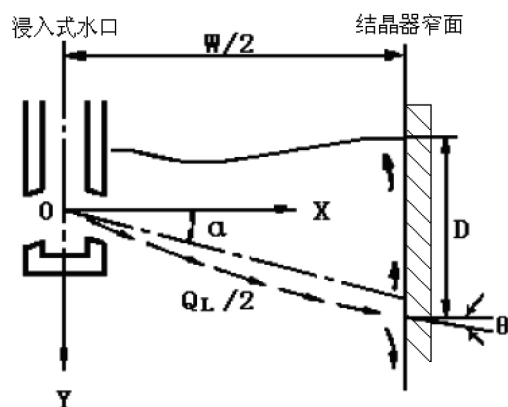


图 2 各个物理量的示意图

在结晶器弯月面处的自由液面波动程度我们同样可以借用  $F$  值来表示。因此,可以将  $F$  值运用

到现场的的实际生产中,根据  $F$  值的大小,精确的反映出当前连铸工艺参数条件下自由液面波动情况,合理的调整连铸工艺参数,将  $F$  值保持在一定的范围内,达到控制液面波动的效果。目前,很多企业的生产线都已经采用了利用  $F$  值大小来控制液面波动的方法,印度的京德勒西南钢铁公司 (JSW Steel) 建立了先进的关于液面波动指数  $F$  值的在线监测模型,利用该模型可以精确的观察液面波动指数  $F$  值,实时的进行在线监测来反映结晶器内钢液的液面波动情况,通过及时的改变水口浸入深度、水口倾角、氩气流量等工艺参数,将  $F$  值控制在一个合适的范围内,从而防止了结晶器保护渣发生卷渣现象。

M. Gebhard 和 Q. L. He 等<sup>[3,4]</sup>在不考虑表面保护渣的情况下,充分的利用摄像机和皮托管研究观察出结晶器自由液面的速度与漩涡现象,进而推导出漩涡的形成机理、位置、深度以及稳定性等。

D. Gupta 等<sup>[5]</sup>研究液面波动主要也是采用水模型的物理实验,不过采用了 1:4、1:6.25、1:8 和 1:10 的几何相似比,在水模型中用水取代钢液来进行模拟,采用记录速度为 2.5 帧/秒的 TV 摄像机分析得到无渣覆盖下结晶器内的液面波动情况,通过摄像机可以得到结晶器自由液面波动幅度随着水口出口速度呈抛物线形变化,即无量纲液幅与弗鲁德准数构成线性关系。与此同时,他们又以氯化锌溶液作为介质来取代钢液,将油作为液态保护渣,利用 TV 摄像机和图像分析仪,通过观察推导出第二相的出现对无量纲液面波幅产生的影响。并且在此基础上,通过观察结晶器自由液面处发生的漩涡以及卷渣现象,分析出漩涡以及卷渣现象的发生与结晶器宽度、浸入式水口的深度、侧孔倾角、水油的黏度以及密度密切相关。

雷洪等<sup>[6]</sup>根据浪高仪的原理,测量出在水模型实验下结晶器内自由液面的波动情况,用阻片所测得的数据可以得到自由液面的速度,与此同时,分析了操作工艺参数、保护渣黏度等对结晶器弯月面波动以及卷渣行为所存在的影响。

包燕平和齐新霞等<sup>[7-10]</sup>也是通过水模型的物理实验,根据观察到的(薄)板坯连铸结晶器内自由液面的波动情况以及卷渣现象,分析得到结晶器内自由液面发生卷渣的方式主要包括:表面回流卷渣、漩涡卷渣、水口吹氩卷渣和水口插入深度过低

引起的卷渣。在不同的浸入式水口深度、水口侧孔倾角、拉速情况下,推算出结晶器内自由液面的波动情况以及保护渣卷入量和卷入方式。

陆巧彤等<sup>[11,12]</sup>也是根据水模型的实验方法,观察在不同的连铸工艺参数下其结晶器内自由液面的波动情况。与此同时,也利用水模型的实验来对分析结晶器内自由液面的卷渣行为,推导出结晶器内自由液面发生卷渣现象时的类型,考察了在不同工艺参数条件下对卷渣的影响。

采用水模型的物理实验方法,利用相似性原理,可以较好的反应出现场连铸生产过程中结晶器内钢液液面波动的情况,不在受到现场条件的限制,为现场的钢液液面波动提供理论依据,具有较强的实用性。

## 2 数值模拟方法

G. A. Panaras 等<sup>[13]</sup>主要采用的是有限体积法,建立曲线坐标系模拟得到连铸结晶器水模型条件下自由液面的波动行为,根据在不同拉速下,其钢液自由液面发生瞬时波动时有一个范围,根据波形图,我们可以发现拉速有一个临界值,当超过该值时会导致非稳定性的自由液面波动的情况。

A. Theodorakakos 等<sup>[14]</sup>利用有限体积法结合压力预测-修正法在曲线非正交网格上求解纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程,将所得到的结果应用到该曲线上,采用自适应网格技术使其适应于自由液面波动形状,进行数值模拟得到结果,可以推导出在水模型的实验条件下结晶器内的二维水/油界面波动行为,观察波形图,我们可以得出能够完全覆盖水/油界面的最小油层厚度临界值,从而确定保持自由液面稳定和不易乳化的临界弗鲁德准数,具有很大的实际意义。

K. Takatani 等<sup>[15]</sup>主要采用建立数学模型的方法,根据连铸结晶器内出现的瞬态流动现象,充分结合动网格技术,模拟出结晶器内自由液面波动形状随时间的变化特征,我们可以看出在不同的结晶器宽度、浸入式水口深度、水口侧孔倾角和拉速下,其对结晶器内自由液面的波动形状和速度所产生的影响。

谭利坚等<sup>[16]</sup>应用 SOLA-VOF 方法研究分析出板坯连铸结晶器内钢液自由液面的波形形状以及钢液的流动行为,分析出水口侧孔倾角、水口出

口流出速度对自由液面波动的影响,指出自由液面及波形与回流区大小及位置密切相关,即钢液射流撞击结晶器窄面的位置相关。

曹娜等<sup>[17]</sup>主要是采取建立数学模型的方法,充分结合自由液面表面体积函数 F,利用 VOF 模型,观察在高拉速结晶器内钢/渣界面波动情况,分析出在不同的拉速、水口浸入深度、水口侧孔倾角、铸坯宽度以及保护渣黏度对钢/渣界面行为的影响。

刘国林等<sup>[18]</sup>利用 VOF 法追踪流体的自由表面运动,可以较为精确的模拟出保护渣-钢液自由液面的形状和运动规律。通过 ANSYS CFX 10.0 模拟计算得到的自由液面形状和水模型试验中观察得到的空气-水界面形状极其相似。

于海岐等<sup>[19-21]</sup>采用数值模拟的方法分析结晶器内钢液-保护渣-气体多相传输行为,以国内的某两厂的圆坯连铸机和高拉速板坯连铸机为研究对象,首次实现了建立圆坯连铸结晶器电磁搅拌和板坯结晶器电磁制动与吹氩气双重作用下的三维多场耦合数学模型,采用了数值模拟的计算方法,分析出连铸结晶器电磁搅拌和电磁制动过程中的钢液流动、传热、钢/渣界面的卷混、气泡、夹杂物等传输行为。在圆坯结晶器电磁搅拌过程中钢液流场、温度场和夹杂物运动行为的三维多场耦合数学模型中,分析出电磁搅拌使结晶器的纵截面上会出现两个回流区:上回流区和下回流区,其流动的方向相反,钢液在水平截面做旋转运动,迫使铸坯的芯部温度降低,高温区域逐渐的缩小,结晶器内热区位置会向上移动,夹杂物会不断的上浮,这样可以提高铸坯的质量和性能。

通过采用数值模拟的方法,分析在电磁搅拌作用下连铸结晶器内电磁场-流场-温度场多场耦合下的液面波动行为,分析出在不同连铸工艺参数下的液面波动振幅,当液面波动剧烈时,钢液自由液面会发生卷渣现象;当钢液自由液面波动平静时,夹杂物不能上浮,因此探究出合适的工艺参数可以得到最合理的液面情况,铸坯的质量也将大大的提高。

## 3 结论

连铸结晶器内钢液自由液面的波动行为对连铸坯质量有着严重的影响。当结晶器内自由液面

发生剧烈的波动时,其保护渣的厚度分布将会发生改变,进而可能会导致钢液发生二次氧化以及保护渣发生卷渣现象,会导致铸坯质量下降。另外,钢液自由液面处的波动也是影响连铸坯的高拉速顺行和高质量产品生产的关键因素。如何合理的控制结晶器内钢/渣界面处的自由液面波动已越来越受到人们的重视。尽管上述研究工作者对连铸结晶器内的液面波动行为和保护渣卷渣机理进行了大量的物理实验和数值模拟,但是随着连铸结晶器控流技术的不断发展与应用,研究多种结晶器控流技术共同作用下的钢/渣界面处液面波动行为将更具实际的意义。

### 参考文献

- [1] Teshima T, Osame M, Okimoto K, et al. Improvement of surface property of steel at high casting speed [A], Steel-making Conference Proceedings [C], 1988, 71: 111 ~ 118
- [2] Teshima T, Kubota J, Suzuki M, et al. Influence of casting conditions on molten steel flow in continuous casting mold at high speed casting of slabs [J], Tetsu - to - Hagane, 1993, 79(5): 576 ~ 582
- [3] Gebhard M, He Q L, Herbertson J. Vortexing phenomena in continuous slab casting moulds [A], Steelmaking Conference Proceedings [C], 1993, 76: 441 ~ 446
- [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] Gupta D, Lahiri A K. Water - modeling study of the surface disturbances in continuous slab caster [J], Metallurgical and Materials Transactions B, 1994, 25B(2): 227 ~ 233
- [6] 雷洪, 许海虹, 朱苗勇, 干勇等. 高速连铸结晶器内卷渣机理及其控制研究[J], 钢铁, 1999, 34(8): 20 ~ 23.
- [7] 包燕平, 朱建强, 蒋伟, 王昌旭等. 薄板坯结晶器内卷渣现象的研究[J], 北京科技大学学报, 1999, 21(6): 530 ~ 534
- [8] 齐新霞, 岳峰. 板坯连铸结晶器钢液卷渣现象研究[J], 河南冶金, 2003, 11(2): 12 ~ 14
- [9] 齐新霞, 刘国林, 包燕平等. 板坯连铸机结晶器钢液卷渣的水模型研究[J], 特殊钢, 2004, 25(3): 29 ~ 31
- [10] 齐新霞, 包燕平. 结晶器钢液卷渣指数的讨论[J], 钢铁研究, 2005, (3): 17 ~ 20
- [11] 陆巧彤, 杨荣光, 王新华, 张炯明等. 板坯连铸结晶器内液面波动的水模型研究[J], 包头钢铁学院学报, 2006, 25(1): 13 ~ 17
- [12] 陆巧彤, 杨荣光, 王新华, 张炯明等. 板坯连铸结晶器保护渣卷渣及其影响因素的研究[J], 钢铁, 2006, 41(7): 29 ~ 32
- [13] Panaras G A, Theodorakakos A, Bergeles G. Numerical investigation of the free surface in a continuous steel casting mold model [J], Metallurgical and Materials Transactions B, 1998, 29B(5): 1117 ~ 1126
- [14] Theodorakakos A, Bergeles G. Numerical investigation of the interface in a continuous steel casting mold water model [J], Metallurgical and Materials Transactions B, 1998, 29B(6): 1321 ~ 1327
- [15] Takatani K, Tanizawa Y, Mizukami H, et al. Mathematical model for transient fluid flow in a continuous casting mold [J], ISIJ International, 2001, 41(10): 1252 ~ 1261
- [16] 谭利坚, 沈厚发, 柳百成等. 连铸结晶器液位波动的数值模拟[J], 金属学报, 2003, 39(4): 435 ~ 438
- [17] 曹娜, 朱苗勇. 高拉速板坯连铸结晶器内钢/渣界面行为的数值模拟[J], 金属学报, 2007, 43(8): 834 ~ 838
- [18] 刘国林, 吴苏州, 张炯明, 王万军, 王新华等. 宽板坯连铸结晶器内液面波动的数值模拟[J], 北京科技大学学报, 2009, 31(2): 229 ~ 233
- [19] 于海岐, 朱苗勇. 板坯结晶器电磁制动和吹氩过程的钢/渣界面行为[J], 金属学报, 2008, 44(9): 1141 ~ 1148
- [20] 于海岐, 朱苗勇. 圆坯结晶器电磁搅拌过程三维流场和温度场数值模拟[J], 金属学报, 2008, 44(12): 1465 ~ 1473
- [21] 于海岐, 朱苗勇. 板坯结晶器内钢液过热消除过程的数值模拟[J], 金属学报, 2009, 45(4): 476 ~ 484

收稿日期: 2017 - 09 - 25

审稿: 余国松

编辑: 吴彩霞