DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.10.002

吹氩结晶器内钢渣界面氩气泡行为研究

程常桂,张金磊,陈　赢,李　阳,金　焱
(武汉科技大学 钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室,湖北 武汉 430081)

摘　要:吹氩结晶器内钢渣界面氩气泡的行为对液态保护渣的乳化有重要影响,与钢渣界面处气泡大小、数量及上浮速度等因素有关。因此,本文建立了原型与模型相似比为1:0.6的板坯结晶器水模型,研究了吹氩量、拉速、水口浸入深度和侧孔倾角对结晶器内钢渣界面氩气泡行为的影响。结果表明,增大吹氩量,从水口到结晶器窄面上浮气泡平均尺寸减小趋势愈加明显,水口附近气泡数量增多且上浮速度逐渐增大,结晶器窄面附近气泡数量有所增加,气泡上浮速度逐渐减小;增大拉坯速度,结晶器内气泡尺寸减小,气泡数量增加,水口附近气泡上浮速度呈减小趋势,窄面附近气泡上浮速度则逐渐增大;增大水口浸入深度,气泡平均尺寸呈减小趋势,水口附近气泡上浮速度略有增加,窄面附近气泡上浮速度先增大后减小;增大水口倾角,气泡直径峰值逐渐减小,窄面附近气泡上浮速度先增加后减小

关键词:连铸;结晶器;吹氩;钢渣界面;气泡行为

中图分类号:TF777　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)10-1027-08

Study on Argon Bubble Behavior at Interface of Steel and Slag in Continuous Slab Casting Mold with Argon Blowing

CHENG Changgui, ZHANG Jinlei, CHEN Ying, LI Yang, JIN Yan
(Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: The argon bubble behavior at the interface of steel and slag in continuous slab casting mold with argon blowing had an important effect on the emulsification of the liquid mold powder, which was related to the bubble number, size and floating velocity. As a result, a physical model of the mold with the similarity ratio of 1:0.6 had been established, and the effects of operation parameters on the argon bubble behavior at the liquid interface of steel and slag had been studied. The results show that the increase trend of the floating bubble size from the nozzle to the mold narrow surface becomes obvious when the flow rate of argon increases, the bubble number and floating speed near nozzle increase, while the bubble number and floating speed decrease near the mold narrow surface. With the increase of the casting speed, the bubble size decreases, the bubble number increases, and the floating speed of bubble near the nozzle trends to decrease, while it increases gradually near the mold narrow surface. As the immersion depth of submerged entry nozzle raises, the average size of argon bubbles decreases, the floating speed of bubbles near nozzle increases slightly, while the floating speed near the mold narrow surface increases first and then decreases. With the increase of the inclination angle of the submerged entry nozzle port, the peak value of bubble size at the steel/slag interface decreases gradually, the floating speed of bubble near the nozzle has no significant change, but the floating speed of bubble near the mold narrow surface increases first and then decreases.

Key words: continuous casting; mold; argon blowing; interface of steel and slag; bubble behavior

连铸生产中,为防止浸入式水口堵塞,冶金工作者常采用水口吹氩方法[1,2],通过水口向结晶器内吹氩,不仅可以减轻浸入式水口内夹杂物的粘附,还可以降低钢液冲击深度,均匀钢液成分和温度,促进夹杂物上浮,提高铸坯纯净度[3,4],但是吹氩参数不合理时,会导致钢液卷渣、铸坯出现皮下缺陷,产品质量降低,这与氩气泡在结晶器内钢渣界面行为密切相关[5,6]。

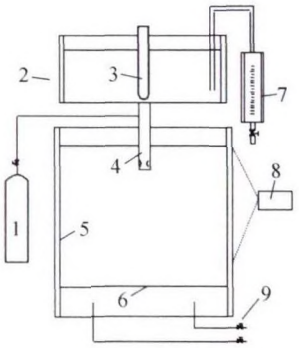
有关吹氩对结晶器内气液两相流的影响,冶金工作者进行了大量研究。陈登福等[7]研究结果表明:当吹气量较小时,气泡直径相对较小,气泡在结晶器内呈扇形分布,结晶器窄边气泡数量较多;吹气量较大时,结晶器内气泡数量和尺寸均有增大趋势。张立峰等[8]、于会香等[9]的研究结果表明:结晶器内吹氩能够改变结晶器内上部区域的流场形态,使得上回

收稿日期:2019-06-21
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51474163;51874215)
作者简介:程常桂(1970-),湖北浠水人,博士,教授.研究方向:连铸新技术.电话:027-68862507,
E-mail: ccghlx@wust.edu.cn

流区钢液的流动强度增大，下回流区流动减弱。Thomas 等[10]的研究结果表明：吹氩使得钢液冲击点及循环区中心上移，氩气流量较小时可导致表面流速降低，氩气流量较大时，结晶器上部窄面钢液的流动方向可能会发生变向，气泡越小、气量越大，氩气对钢液流动行为的影响越显著。朱苗勇等[11,12]对结晶器内钢渣界面的波动及水口附近的二次涡流进行了研究，认为：合适的吹氩量在一定程度上有利于减缓钢渣界面的剧烈波动，但吹氩量过大时，上回流的涡心从结晶器的中部向水口方向移动，使得水口附近钢渣界面波动显著增加，而弯月面处钢液速度降低，界面波动减弱；吹氩量的增加能显著改变钢液的流型和熔渣层分布，气泡浮力越大，气泡对界面的扰动也更剧烈，而靠近窄面处的界面则相对平静；与未吹氩条件相比，吹氩时结晶器内靠近水口附近的钢渣界面易形成二次涡流。上述这些工作对于理解吹氩条件下结晶器内流场、结晶器内气泡分布、钢渣界面波动行为有重要意义，但没有涉及到钢渣界面氩气泡进入液渣时的临界速度及沿结晶器宽面分布的行为。Liu 等[13]研究了连铸板坯结晶器内非对称瞬态流动和气泡传输行为，分析了结晶器内气泡分布及钢渣界面氩气泡逸出位置，但没有涉及到逸出钢渣界面时的气泡速度。张彩军等[14]研究了塞棒和中间包上水口的临界吹气量、吹气量对于结晶器流场中液面波动和流股在窄边冲击点的影响规律。孙全利等[15]利用水模拟方法，研究水口形状、拉坯速度、吹氩量等参数对结晶器内气泡运动终速的影响，为进一步分析液渣内氩气泡行为提供了一定基础，但研究工作没有涉及到钢渣界面气泡大小、分布。事实上，氩气进入结晶器后形成氩气泡，气泡通过钢 / 渣界面进入液态保护渣中，其必然会影响液态保护渣的流动、传热和熔化行为，与从钢渣界面进入液态保护渣的气泡大小、数量和速度有直接的关系。因此，本文研究钢渣界面氩气泡的这种行为，可以为进一步研究氩气泡与液态保护渣流动和传热行为提供基础，为优化连铸工艺参数、保护渣性能、提高铸坯质量提供理论依据。

1 实验方法

根据相似原理，为保证模型与原型中流体运动行为相似，并考虑到熔体间界面张力的影响，需要原型与模型的 Fr 准数和 We 准数相等，对应的结晶器原型与模型相似比必须为 1.0:0.6[16,17]。为此，本文建立了结晶器原型与模型相似比为 1.0:0.6 的水模型，结晶器、浸入式水口采用有机玻璃制成，结晶器原型高度为 900 mm，对应结晶器水模型有效高度应为 540 mm，为消除结晶器下部出口流对流场的影响，结晶器模型高度加长到 1 000 mm，距结晶器底部 150 mm 处设置制衡板。实验中，用水模拟钢液，用硅油模拟液态保护渣，利用高速相机记录氩气泡在结晶器内的行为，利用 HSSC Link 软件分析气泡大小、数量分布及钢渣界面气泡的行为。实验装置示意图如图 1 所示。



1- 氩气瓶；2- 中间包；3- 塞棒；4- 浸入式水口；5- 结晶器；6- 制衡板
7- 流量计；8- 光源；9- 调节阀

图 1 结晶器水模型实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of water model experimental device of mould

实验中，典型结晶器内钢渣界面 Ar 气泡分布如图 2 所示，将结晶器内浸入式水口右侧到结晶器窄面之间平均划分为 12 个区域，区域间隔 35.2 mm。在每个区域内统计从钢渣界面到距钢渣界面 35.2 mm 范围的气泡数量，通过粒径分布计算软件中的划线法测出每个气泡的直径，然后求出平均直径。由于气泡在该区域停留时间很短，分析过程中，就以该区域内的氩气泡数量、尺寸作为结晶器内钢渣界面进入液态保护渣的气泡数量和尺寸。用 HotShot Link 软件对高速摄像机录制的结晶器内气泡行为进行分析，跟踪气泡的轨迹沿宽度得出 1~12 区域内多个气泡的位移与时刻表，计算得到气泡在钢渣界面的平均上浮速度。

图 2 结晶器内钢渣界面气泡分布

Fig.2 Argon bubble distribution at interface of liquid steel and slag in mold

实验过程中，模型与原型的液体体积流量满足式(1)：

$$\frac{Q_m}{Q_p}=\frac{\nu_m L_m^2}{\nu_p L_p^2} \tag{1}$$

式中，Q_m、Q_p 分别是模拟钢液、实际钢液的体积流量，m^3/h；ν_p、ν_m 是原型、模型水口出口处流速，m/min；L_p、L_m 是原型、模型几何尺寸，m。

根据相似原理，模型与原型的 Fr 准数相等，则有：

$$\frac{\nu_p}{\nu_m}=\sqrt{\frac{L_p}{L_m}} \tag{2}$$

将式(2)及模型与原型相似比(L_m/L_p)0.6 代入式(1)中，则有：

$$\frac{Q_m}{Q_p}=0.279 \tag{3}$$

根据实际生产中的氩气和水模型实验用氩气之间的修正 Fr 常数相等原则，则有：

$$\frac{\rho_{Arp}\nu_{Arp}^2}{(\rho_{steel}-\rho_{Arp})gL_p}=\frac{\rho_{Arm}\nu_{Arm}^2}{(\rho_{steel}-\rho_{Arm})gL_m} \tag{4}$$

式中，ρ_{Arp}、ρ_{Arm} 是原型、模型的氩气密度，kg/m^3；ρ_{steel} 是 1 530 ℃下钢液的密度，kg/m^3；ν_{Arp}、ν_{Arm} 是型、模型的氩气流量，L/min。

现场生产处于高温条件下，水模拟是在室温条件下，根据理想气体状态方程和式(4)，钢液温度下的气流量和水模型实验时的气流量之间的关系为：

$$Q_{Arp}\cdot\frac{T_{室温}}{T_{steel}}=\left(\frac{Lp}{Lm}\right)2.5\cdot\frac{T_{室温}}{T_{steel}}\cdot\sqrt{\frac{\rho_{Arm}}{\rho_{Arp}}\frac{\rho_{steel}}{\rho_{water}}}\cdot Q_{Arm} \tag{5}$$

式中，Q_{Arm}、Q_{Arp} 分别是模拟实验中、实际生产中的 Ar 气流量，L/min。

水模拟条件下 $T_{室温}$=25 ℃，氩气密度为 1.783 kg/m^3，室温下水的密度为 1 000 kg/m^3，实际生产条件下 T_{steel} 为 1 530 ℃，ρ_{steel} 为 7 000 kg/m^3，ρ_{Arp} 为 0.275 kg/m^3，假设 Ar 在常温下和标准条件下的密度相等。将模型相似比代入，可得氩气流量比如下：

$$Q_{Arp}=4Q_{Arm} \tag{6}$$

研究过程中，拉坯速度取 0.8、1.0、1.2 和 1.4 m/min，对应的结晶器水模型体积流量分别为：4.76、5.96、7.16 和 8.35 m^3/h。实验过程中，水模型实验参数与原型工艺参数的关系如表 1 所示。

表1　结晶器原型与模型工艺参数

Tab.1 Process parameters in model and prototype of mold

规格	原型	水模型
断面尺寸 /mm	230×1 550	138×930
水口外径 /mm	140	84
水口内径 /mm	78	46.8
水口倾角(°)	12, 15, 18	12, 15, 18
水口侧孔尺寸 /mm	90×70	54×42
水口插入深度 /mm	160, 180, 200, 240	96, 108, 120, 144
吹氩量 /L·min^{-1}	2, 4, 6, 8	0.5, 1.0, 1.5, 2.0

2　实验结果及分析

2.1　吹氩量对钢渣界面氩气泡行为的影响

拉速为 1.2 m/min，水口浸入深度为 160 mm，水口侧孔倾角为 15°，结晶器吹氩量分别为 2、4、6 和 8 L/min 时，钢渣界面上浮气泡尺寸及数量分布如图 3 所示，图 3 中，不同区域数据点的个数表示的是气泡的个数，不同区域氩气泡平均尺寸如图 4 所示，模拟钢渣界面氩气泡上浮速度分布如图 5 所示。

由图 3、图 4 可知，在吹氩量一定的条件下，浸入式水口附近区域钢渣界面气泡平均尺寸比结晶器窄边附近区域气泡尺寸大。随着距水口中心线距离的增大，钢渣界面上浮气泡尺寸呈减小趋势，随吹氩量的增大，这种减小的趋势愈加明显，气泡平均直径峰值由结晶器窄面向浸入式水口方向移动。吹氩量为 2 L/min 时，气泡平均直径峰值在 10 区域附近，气泡平均直径为 1.60 mm。吹氩量为 4 L/min 时，气泡尺寸峰值在区域 5 附近，气泡平均直径为 1.63 mm，吹氩量为 6 L/min 时，区域 2-3 附近范围内气泡尺寸出现峰值，气泡平均直径为 1.75 mm。吹氩量较低时，水口附近区域的气泡数量相对较少，结晶器窄边附近气泡很少；随吹氩量的逐步增大，水口附近区域的气泡数量增多，结晶器窄面附近气泡数量有所增加。

在钢液作用下，进入浸入式水口内的氩气受剪切力作用分解为气泡，吹氩量越大，水口空间内的气体体积分数越高，由于单位时间内的钢液体积流量不变，所以钢液流速相对增加，剪切作用增强，氩气被分解的气泡数量增多，气泡在水口内碰撞长大的机会增大，从而更易形成直径较大的气泡，气泡数总量也随之增多。在结晶器内，随吹氩量的增大，气泡流股涡心向浸入式水口附近移动，该区域气体体积分数增大，气泡之间的相互碰撞变得剧烈起来，气泡长大的几率也会相应增大。气泡随流股出水口进入结晶器后，受到浮力和流体拖拽力作用，气泡尺寸越大，气泡受到的浮力越大。吹氩量较高时，有更多的大气泡在结晶器内 2~3 区域范围内进入液态保护渣中，对应进入液渣的气体体积量增加；吹氩量较低时，气泡数量较少，气泡尺寸相对较小，部分小气泡会被钢液携带至结晶器窄面上浮，因此窄面附近的气体体积就相对较低，气泡平均尺寸也小。

由图 5 可以看出，吹氩量由 2 L/min 增加到 8 L/min 时，在水口一侧的钢渣界面气泡上浮速度逐渐增大，而靠近结晶器窄边附近钢渣界面氩气泡上浮速度逐渐减小。这是因为随吹氩量的增加，结晶

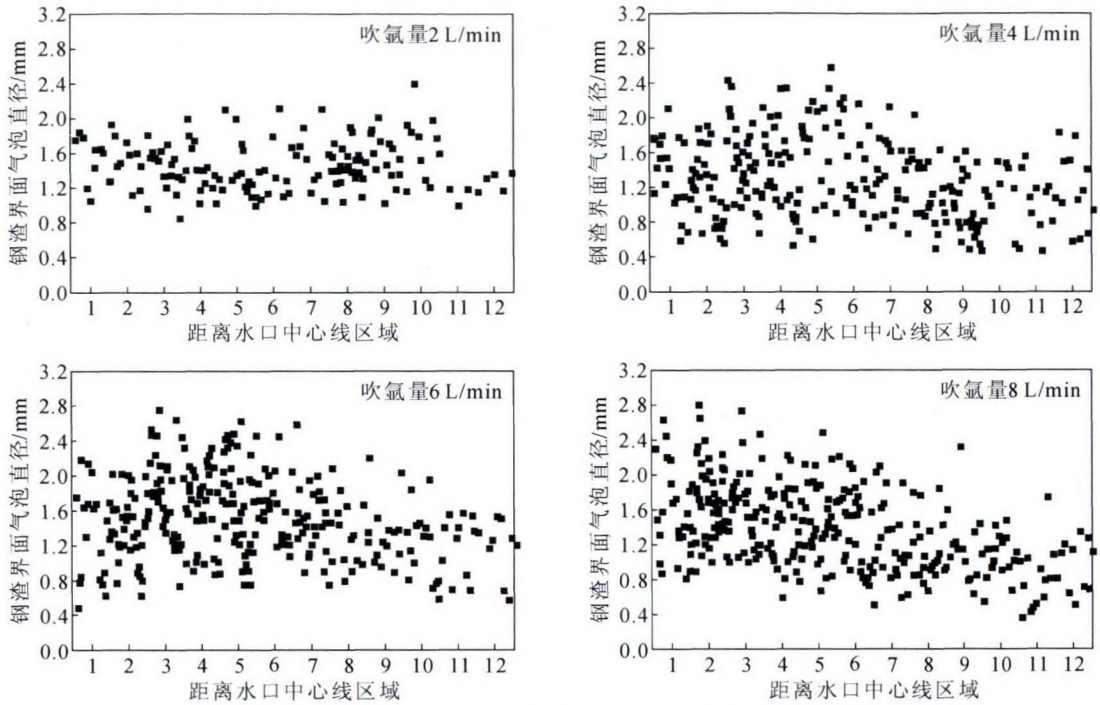


图 3 吹氩量对钢渣界面气泡数量及大小的影响

Fig.3 Effect of argon flow rate on number and size of bubbles at interface of steel and slag

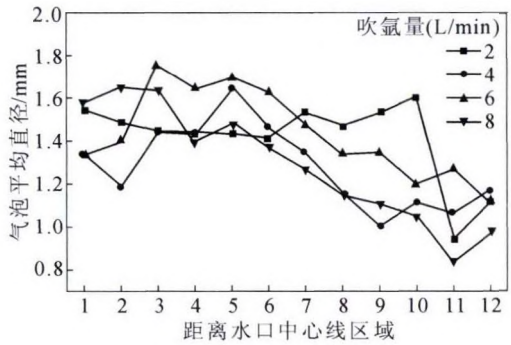


图 4 吹氩量对钢渣界面气泡平均直径的影响

Fig.4 Effect of argon flow rate on average size of bubbles at interface of steel and slag

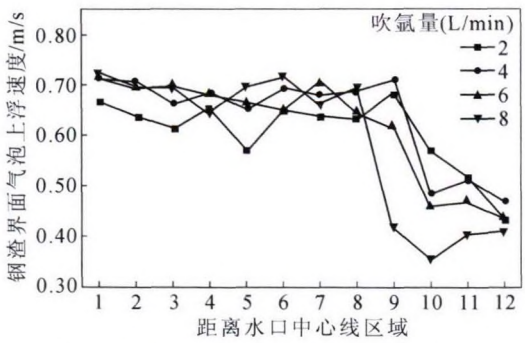


图 5 吹氩量对钢渣界面气泡上浮速度的影响

Fig.5 Effect of argon flow rate on floating velocity of bubbles at interface of steel and slag

器内的含气率变大，气泡碰撞几率变大，使得大量的气泡会碰撞长大在水口附近上浮，同时，气泡越大，受到的浮力也越大，表现在钢渣界面氩气泡的上浮速度就越大。只有少量的小气泡会被液相流股携带至窄面附近上浮，尺寸小，受到的浮力也小，因此钢渣界面处液渣上浮速率低。

2.2 拉坯速度对钢渣界面氩气泡行为的影响

吹氩量为 4 L/min，水口浸入深度为 160 mm，浸入式水口侧孔倾角为 15°，拉速分别为 0.8、1.0、1.2 和 1.4 m/min 时，钢渣界面上浮气泡尺寸及数量分布如图 6 所示，不同区域氩气泡平均尺寸如图 7 所示。对应的不同拉速下，钢渣界面气泡上浮速度变化如图 8 所示。

由图 6、7 可以看出，拉坯速度较低时，靠近水口附近区域气泡尺寸明显偏大，靠近结晶器窄面附近区域气泡尺寸偏小；增大拉坯速度，结晶器窄面附近区域气泡平均直径呈增大趋势。拉坯速度越小，在结晶器宽度方向平均气泡尺寸差异性越大，增大拉速，钢渣界面上浮的氩气泡尺寸差异性明显改善。同时，随拉坯速度增大，结晶器内钢渣界面气泡数量也随之增大，水口附近区域气泡数量减少，结晶器窄面附近区域气泡数量增多，气泡数量沿结晶器宽度方向分布的均匀性也显著改善。拉坯速度为 0.8 m/min 时，最大平均尺寸为 2.741 mm，最小平均尺寸为 0.46 mm；当拉坯速度为 1.2 m/min 时，最大平均尺寸为 1.635 mm，最小平均尺寸为 1.003 mm。

这是由于：拉速较低时，结晶器内钢液流股整体流速不高，气泡大都在浸入式水口附近直接上浮，只有少量气泡会随着流股来到结晶器窄边；当拉速较高且气泡的浮力不够大时就会随流股带离水口附近区域，气泡数量和大小在结晶器宽度方向分布均匀性较好，因此气泡体积分布均匀性相对较好。

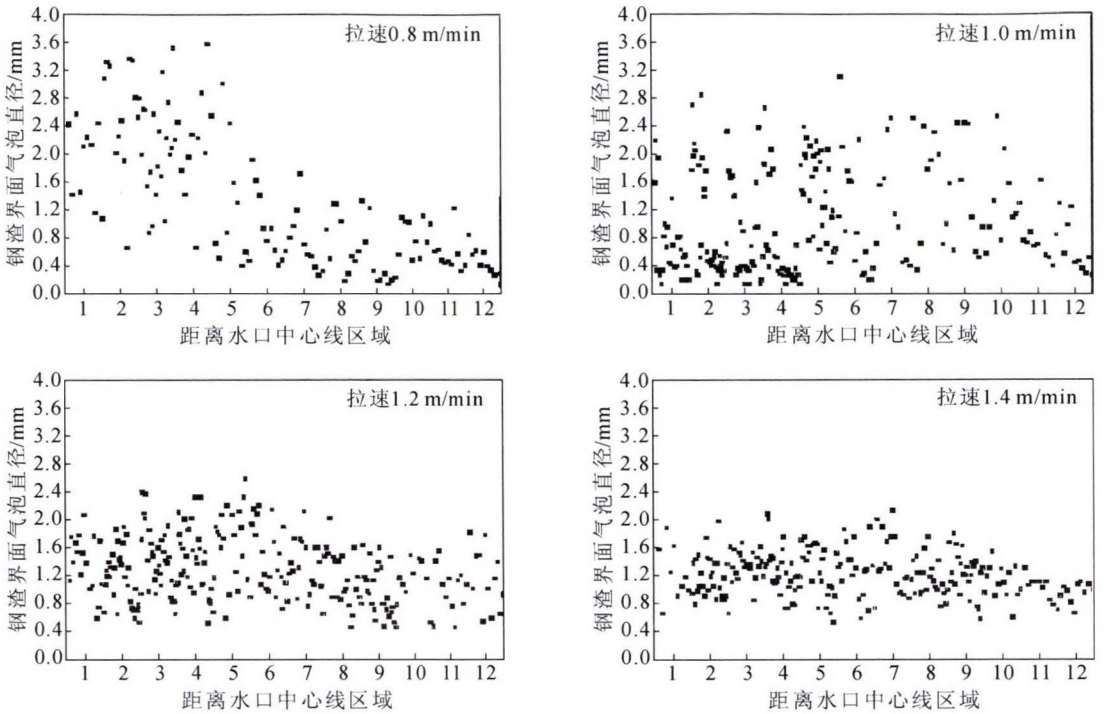


图 6 拉速对钢渣界面气泡数量及大小的影响

Fig.6 Effect of casting speed on number and size of bubbles at interface of steel and slag

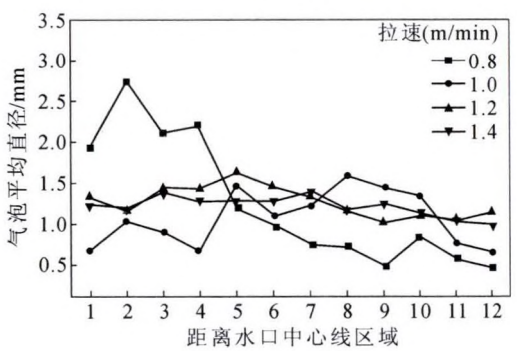


图 7 拉速对钢渣界面气泡平均直径的影响

Fig.7 Effect of casting speed on average size of bubbles at interface of steel and slag

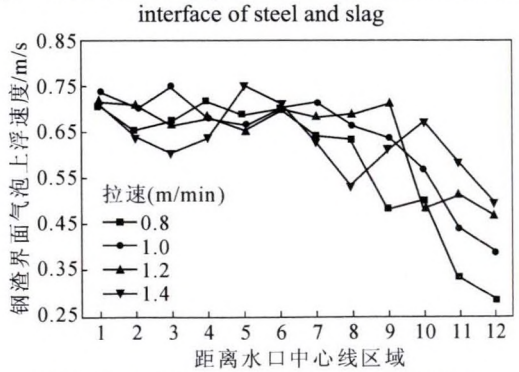


图 8 拉速对钢渣界面气泡上浮速度的影响

Fig.8 Effect of casting speed on floating velocity of bubbles at interface of steel and slag

可以看出，随着拉速的增加，在水口附近区域内钢渣界面气泡上浮速度呈减小趋势，在结晶器窄面附近区域，气泡上浮速度则逐渐增大，同时，在结晶器宽度方向上钢渣界面氩气泡上浮速度差异性随拉坯速度增大而逐渐减小。这是因为：随拉坯速度增大，出水口气泡尺寸有所减小，使得水口附近区域大气泡减少，相应受到的浮力降低，气泡进入钢渣界面的速度也就有所降低；在钢液流股的携带下，有相对较多的尺寸较大气泡到达结晶器窄面附近区域，气泡受到浮力增强，同时，拉速增大，钢液上回流强度变大，对结晶器窄面附近上浮的气泡起到一个加速的效果，因此在结晶器窄面附近区域，钢渣界面氩气泡上浮速度增大。

2.3 水口浸入深度对钢渣界面氩气泡行为的影响

拉速为 1.2 m/min，水口侧孔倾角为 15°，吹氩量为 4 L/min 时，水口浸入深度分别为 120、160、200 和 240 mm 时，钢渣界面上浮气泡尺寸及数量分布如图 9 所示，不同区域氩气泡平均尺寸如图 10 所示。对应的不同水口浸入深度条件下，钢渣界面气泡的上浮速度变化如图 11 所示。

由图 9、10 可知，水口浸入深度对结晶器宽度方向气泡平均直径峰值的位置影响不大，基本位于区域 5 附近；浸入深度由 120 mm 增大到 240 mm，峰值处的氩气泡平均直径分别为：1.99、1.63、1.69 和 1.49 mm，呈整体减小趋势。在结晶器窄面处，随水口浸入深度增加，气泡尺寸也呈现减小趋势，水口附近区域，水口浸入深度为 200 mm 时，氩气泡尺寸最小。随水口浸入深度增大，在结晶器宽度方向气泡数量分布均匀性要好。出现这一现象的原因与水口浸入深度对结晶器内钢液流场的影响有关，当水口浸入深度增加时，从水口侧孔流出的流股对铸坯窄面

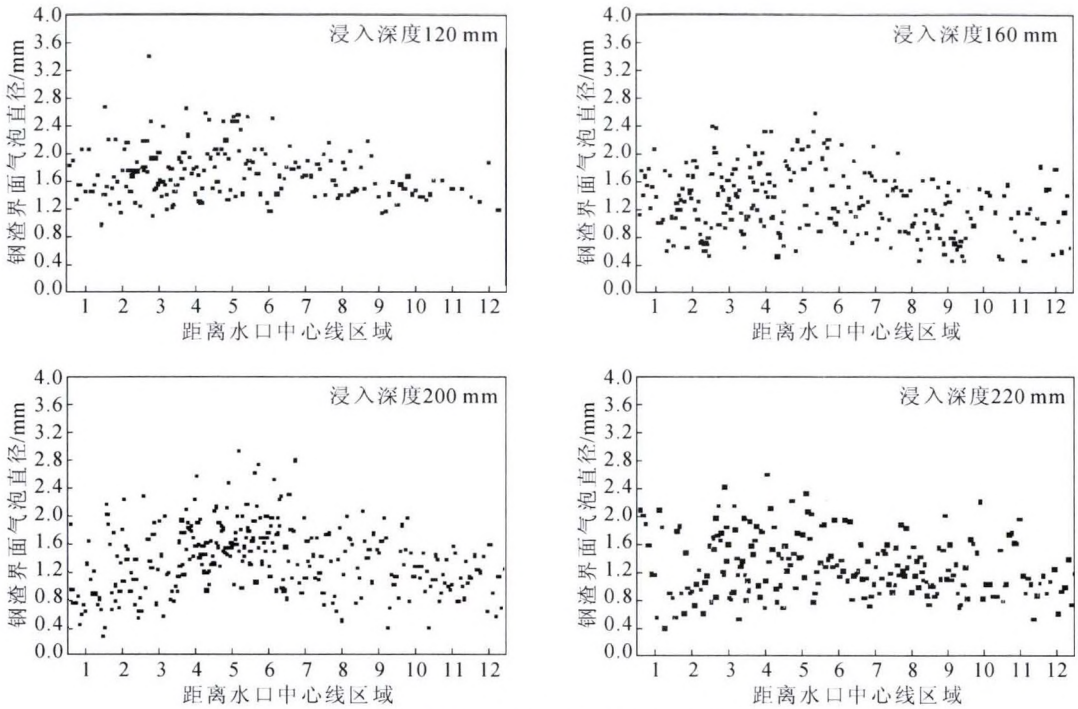


图 9 水口浸入深度对钢渣界面不同区域气泡数量及大小的影响

Fig.9 Effect of nozzle immersion depth on number and size of bubbles at interface of steel and slag

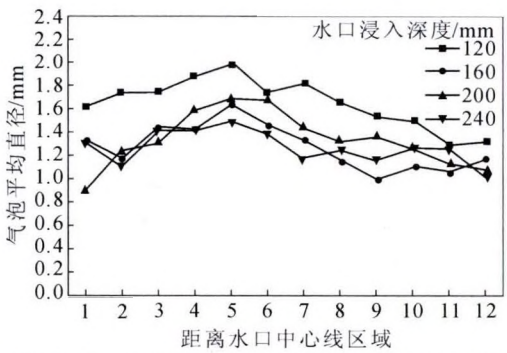


图 10 水口浸入深度对钢渣界面气泡平均直径的影响

Fig.10 Effect of nozzle immersion depth on average size of bubbles at interface of steel and slag

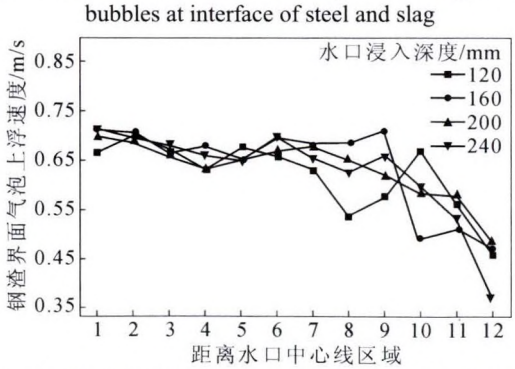


图 11 水口浸入深度对模拟钢渣界面气泡上浮速度的影响

Fig.11 Effect of nozzle immersion depth on floating velocity of bubbles at interface of steel and slag

的冲击点位置下移，上下回流涡心也有所下移，从水口侧孔出来随钢液流股运动的气泡被带到远离钢渣界面的地方，且在结晶器内分布于更为分散，在上浮过程中，氩气泡碰撞长大的几率有所降低，表现为钢渣界面上浮气泡的平均直径就有所减小。

可以看出，增加水口浸入深度，靠近水口附近的界面气泡上浮速度有略有增加；靠近窄面附近的界面气泡上浮速度比较混乱，气泡上浮速度先增大后减小，浸入深度为 240 mm 时上浮速度明显降低；浸入深度为 200 和 240 mm 时，区域 1 到区域 9 之间气泡上浮速度变化较为平稳，浸入深度为 120 和 160 mm 时，气泡上浮速度的起伏变化大。

在水口附近区域，随水口浸入深度的增加，虽然平均气泡尺寸有所减小，但是氩气泡在结晶器内的位置偏低，受到浮力的加速作用强，因此，在水口附近区域气泡上浮速度略有增加。而在窄面附近，随水口浸入深度的增加，气泡位置下移，但其气泡尺寸比水口附近要小，如水口浸入深度为 240 mm 时，水口附近区域，气泡平均尺寸为 1.32 mm，结晶器窄面附近区域气泡平均尺寸为 1.02 mm，因此该区域附近水口浸入深度较深时，钢渣界面上浮气泡速度低。

2.4 水口侧孔倾角对钢渣界面氩气泡行为的影响

当吹氩量为 4 L/min，水口浸入深度为 160 mm，拉速为 1.2 m/min，水口侧孔倾角分别为 12°、15°和 18°时，钢渣界面上浮气泡尺寸及数量分布如图 12 所示，不同区域氩气泡平均尺寸如图 13 所示。钢渣界面气泡的上浮速度变化如图 14 所示。

由图 12、13 可知，当水口倾角为 12°时，靠近水口附近区域氩气泡尺寸较大，靠近结晶器窄面处氩气泡尺寸较小，在结晶器宽度方向上，气泡平均尺寸均匀性也较差，水口倾角为 15°时，结晶器宽度方向

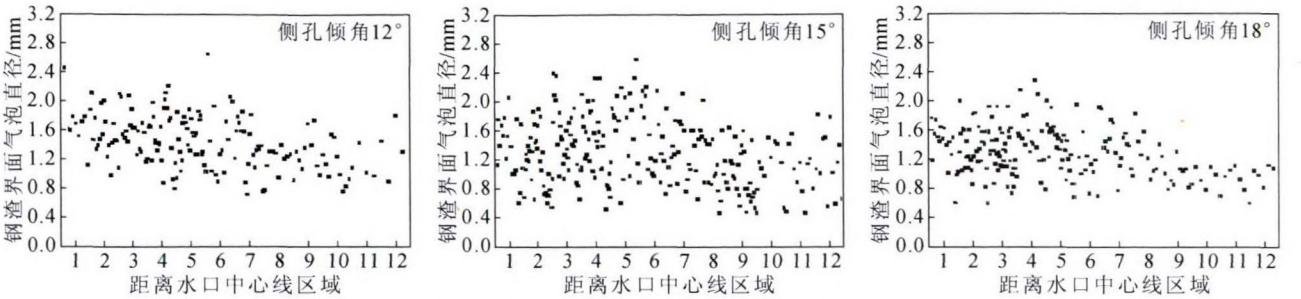


图 12 水口倾角对钢渣界面不同区域气泡数量及大小的影响

Fig.12 Effect of nozzle inclination angle on number and size of bubbles at interface of steel and slag

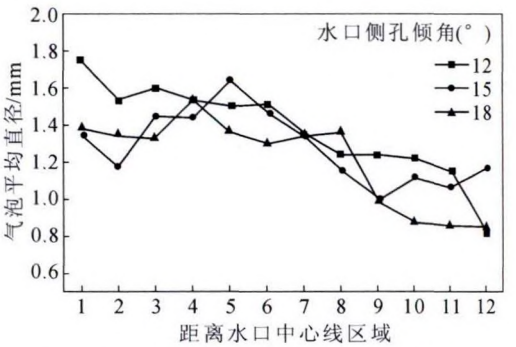


图 13 水口倾角对钢渣界面气泡大小的影响

Fig.13 Effect of nozzle inclination angle on average size of bubbles at interface of steel and slag

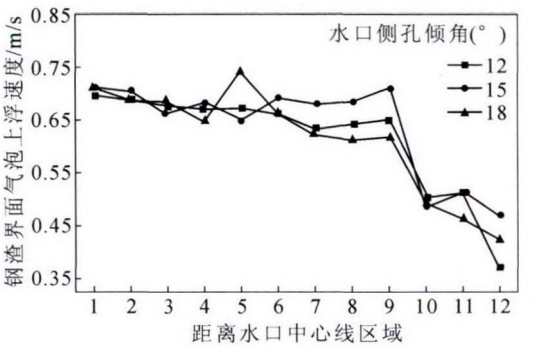


图 14 水口倾角对钢渣界面气泡上浮速度的影响

Fig.14 Effect of nozzle inclination angle on floating velocity of bubbles at interface of steel and slag

气泡平均尺寸均匀性相对较好。随水口倾角增大，结晶器宽度方向的气泡峰值逐渐减小，水口倾角为12°、15°和18°时，最大气泡平均直径分别为1.75、1.63和1.52 mm。水口倾角为15°时，气泡数量在结晶器宽度方向的分布也相对较均匀。

当水口倾角较小时，出水口钢液流股方向上移，气泡更易脱离钢液流股上浮、并碰撞长大，因此使得水口附近区域气泡尺寸较大，数量较少，只有较小尺寸的气泡才能随流股达到结晶器窄面，因此，在结晶器窄面气泡尺寸较小，数量较低。当水口倾角增大时，出水口钢液流股方向下移，钢液上下回流涡心有所下移，气泡在结晶器内分散更为均匀，因此在水口附近区域气泡尺寸降低，结晶器窄面附近区域气泡尺寸增大；当水口倾角进一步增大达到18°时，此时，由于下流股涡心向水口方向偏移，使得有更多的气泡在3~4区域上浮，因此该处气泡数量较多，气泡尺寸较大，在结晶器窄面处，气泡尺寸比水口倾角15°时要小。

由图14可得，靠近水口附近的界面气泡上浮速度随着侧孔倾角的增加，先增大后减小但变化不是很明显，靠近结晶器窄面处的界面气泡上浮速度随着水口倾角的增加也会先增加后减小。这与气泡不同水口倾角条件下气泡尺寸及气泡出流股时的位置相关，气泡尺寸越大，气泡位置越低，对应的钢渣界面气泡上浮速率也就越大。

3 结论

通过结晶器原型与模型相似比为1:0.6的水模型实验，利用高速相机及分析软件，研究了吹氩量、拉速、浸入深度、侧孔倾角对板坯结晶器内钢渣界面的气泡平均直径、上浮体积和上浮速度的影响，主要结论如下：

(1)吹氩量一定的条件下，浸入式水口附近区域气泡平均尺寸上比结晶器窄边附近区域气泡尺寸大。随吹氩量的增大，气泡平均直径峰值由结晶器窄面向浸入式水口方向移动，水口附近区域的气泡数量增多，钢渣界面气泡上浮速度逐渐增大；结晶器窄面附近区域，气泡数量有所增加，钢渣界面氩气泡上浮速度随吹氩增大逐渐减小。

(2)随拉坯速度增大，结晶器内气泡尺寸减小、气泡数量增加，结晶器宽度方向上钢渣界面上浮的氩气泡尺寸、数量分布更均匀；在水口附近区域内钢渣界面气泡上浮速度呈减小趋势，在结晶器窄面附近区域，气泡上浮速度则逐渐增大。

(3)随水口浸入深度的增大，氩气泡平均直径呈减小趋势，在结晶器宽度方向气泡数量分布均匀性要好，靠近水口附近的界面气泡上浮速度有略有增加，靠近窄面附近的界面气泡上浮先增大后减小。

(4)随水口倾角增大，结晶器宽度方向的气泡峰值逐渐减小，靠近水口附近的界面气泡上浮速度随着

侧孔倾角的变化不明显,结晶器窄面处的界面气泡上浮速度随着水口倾角的增大而先增加后减小。

参考文献:

[1] Rackers K G, Thomas B G. Clogging in continuous casting nozzles [C]//78th Steelmaking Conference Proceedings. Nashville, TN: Iron and Steel Society, Warrendale, PA, 1995: 723.

[2] 袁方明,王新华,张炯明,等. 连铸中间包水口堵塞的数值模拟[J]. 金属学报,2006,42(10): 1109-1114.

[3] Bai H, Thomas B. G. Effects of clogging, argon injection, and continuous casting conditions on flow and air aspiration in submerged entry nozzles [J]. Metallurgical and materials transaction B, 2001, 32B (8): 707-722.

[4] Zhang L, Aoki J, Thomas B G. Inclusion removal by bubble flotation in a continuous casting mold [J]. Metallurgical and Materials Transaction B, 2006, 37B (8): 361-379.

[5] 张胜军,朱苗勇,张永亮,等. 高拉速吹氮板坯连铸结晶器内的卷渣机理研究[J]. 金属学报,2006,42(10): 1087-1090.

[6] Yamashita S, Iguchi M. Mechanism of mold powder entrapment caused by large argon bubble in continuous casting mold [J]. ISIJ International, 2001, 41(12): 1529-1531.

[7] 陈登福,张献光,张立峰,等. 板坯连铸结晶器内氩气泡行为的模拟研究[J]. 钢铁,2010,45(4):20-24.

[8] Zhang L, Yang S, Cai K, et al. Investigation of fluid flow and steel cleanliness in the continuous casting strand [J]. Metallurgical and Materials Transaction B, 2007, 38B (2): 63-83.

[9] 于会香,朱国森,王新华,等. 连铸板坯结晶器内钢液吹氩行为的数值模拟[J]. 北京科技大学学报,2003,25(6): 216-217.

[10] Thomas B G, Huang X. Effect of argon gas on fluid flow in a continuous slab casting mold [J]. Metallurgical and Materials Transaction B, 1994, 25B (4): 527-547.

[11] Zheng S, Zhu M. Physical modeling of gas-liquid interfacial fluctuation in a thick slab continuous casting mold with argon blowing [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2010, 17(6): 704-708.

[12] Yu H, Zhu M, Wang J. Interfacial fluctuation behavior of steel-slag in medium-thin slab continuous casting mold with argon gas injection [J]. Journal of Iron and Steel Research, International. 2010, 17 (4): 5-11.

[13] Liu Z, Li B, Jiang M. Transient asymmetric flow and bubble transport inside a slab continuous-casting mold [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2014, 45B (2): 675-697.

[14] 张彩军,张林杨,刘宏强,等. 板坯塞棒和中间包上水口吹氩工艺水模型研究[J]. 铸造技术,2017,38(5):1084-1087.

[15] 孙全利. 水口吹氩结晶器气泡运动终速的研究 [J]. 山西冶金,2014(5):14-17.

[16] 徐海伦,文光华,唐萍. 连铸结晶器物理模拟中吹气量的相似转换[J]. 北京科技大学学报,2010,32(7):843-848.

[17] 徐海伦,文光华,唐萍,等. 板坯连铸结晶器内吹氩参数优化[J]. 钢铁研究学报,2008,20(3):13-17.

(上接第 1026 页)

尺寸偏小,这就是颗粒状夹杂物产生的原因。

丝状和块状夹杂物的出现会导致裂纹萌生和扩展,降低材料的强度和疲劳寿命。颗粒状、散落状夹杂物及与其共生的退化石墨会明显地减弱强度、伸长率和冲击韧度。而对于降低水平连铸大断面球墨铸铁型材内的夹杂,主要方向在于优化球化处理工艺,包括球化处理温度、处理方式、球化剂的选用以及规范的操作。

3 结论

(1)大直径型材中夹杂物主要分布在中心线上方 3/4R 处,夹杂物尺寸较大。

(2)按形貌特征将主要的夹杂物分为 4 类:丝状、块状、颗粒状和散落状。丝状夹杂物是在夹杂物聚集位置检测到的数量最多、尺寸最大的夹杂物,且它和块状夹杂物都由 Mg、Ti 和少量的其它元素组成,分布在铁素体中伴随有少量的短棒状石墨;颗粒状夹杂由富硅、富孕育剂元素、富球化剂元素 3 种成分构成,分布在铁素体中,或在铁素体和珠光体的交界处;散落状夹杂一般独立存在,分布在铁素体中且出现与之共生的开花石墨。

(3)丝状、块状夹杂物皆产生于球化处理。颗粒状夹杂物则是金属液与球化剂和孕育剂发生反应生成复杂的化合物,其形核后长大速度较慢,形成尺寸较小的颗粒。

参考文献:

[1] Iulian, Riposan, Mihai, et al. Performance of heavy ductile iron castings for windmills[J]. China Foundry, 2010, 7(2):163-170.

[2] Onsφien M I, Grong φ, Skaland T, et al. Mechanism of graphite formation in ductile iron containing rare earth metals [J]. Material Science and Technology, 1999, 15: 253-259.

[3] Llorca-Isern N, Tartera J, Espanol M, et al. Internal features of graphite in cast irons. Confocal microscopy: useful tool for graphite growth imaging[J] Micron, 2002, 33(4): 357-364.

[4] 蔡开科,邢文彬,李秀文,等. 水平连铸圆坯非金属夹杂物的研究[J]. 工程科学学报,1986(4):11-16.

[5] 岳强,陈怀昊,姚成虎,等. 钢液中非金属夹杂物碰撞、长大的研究进展[J]. 钢铁研究学报, 2012, 24(9):1-5.