

· 试验研究 ·

浸入式水口结构对409 L钢连铸坯表面“卷渣”的影响

李晓军 陈景锋 马骏鹏 谭俊 王伟
(山西太钢不锈钢股份有限公司炼钢二厂,太原030003)

摘要 基于太钢409 L钢连铸生产工艺及板坯连铸机工艺参数,采用水模型实验和工业试验相结合方式研究了浸入式水口结构对结晶器内钢水流动行为及其对连铸坯[200 mm × (1 060 ~ 1 240 mm)]表面“卷渣”的影响。结果表明:使用原浸入式水口(侧孔48 mm × 70 mm,和上倾15°)结晶器内钢液流场不稳定,对应连铸坯表面存在严重“卷渣”缺陷;在不改变水口结构条件下,上倾5°和上倾10°水口均无法解决连铸坯表面“卷渣”;32 mm × 52 mm小侧孔水口能有效解决小断面[200 mm × (900 ~ 1 100 mm)]或低拉速(0.7 ~ 0.9 m/min)时409 L钢表面“卷渣”;Φ60 mm内径水口对应结晶器中心平均波高在3.5 ~ 4.5 mm,连铸坯表面“卷渣”缺陷由原来的36.5%降低至0.8%,该型水口不仅能适用现有断面[200 mm × (900 ~ 1 320 mm)]及拉速(0.7 ~ 1.1 m/min)要求,还能提升连铸坯实物质量。

关键词 409 L钢 浸入式水口 表面质量 卷渣机理 波高 水模型

Effect of Submerged Nozzle Structure on Casting Slab Surface “Entrapped Slag” of 409 L Steel

Li Xiao jun, Chen Jingfeng, Ma Junpeng, Tan Jun and Wang Wei
(No 2 Steel Works, Shanxi Taigang Stainless Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract Based on the Taigang 409 L steel casting production process and the parameter of the slab continuous caster machine, influence of submerged nozzle structure on the molten steel flow behavior in the mould and the surface slag entrapment defect of [200 mm × (1 060 ~ 1 240 mm)] casting slab are studied by means of water model experiment and industrial experiment. The results show that the nozzle structure currently in use (side hole 48 mm × 70 mm, nozzle up dip 15°) causes severe fluctuation of the liquid level in mold and heavy entrapment slag on the surface of casting slab. With the condition of no-change nozzle structure, the problem of slag entrapment is impossible to be solved by using nozzle up dip 5° or 10°. The nozzle with side hole size 32 mm × 52 mm can effectively solve the slag entrapment on steel 409 L surface at small section [200 mm × (900 ~ 1 100 mm)] or low casting speed (0.7 ~ 0.9 m/min). The nozzle with inner diameter 60 mm the average wave height is between 3.5 mm to 4.5 mm and entrapment slag decreases from original 36.5% to 0.8%, the submerged nozzle not only can be applied for present section [200 mm × (900 ~ 1 320 mm)] and casting speed (0.7 ~ 1.1 m/min) but also the casting slab quality can be improved.

Material Index 409 L Steel, Submerged Nozzle, Surface Quality, Mechanism of Entrapment, Wave Height, Water Model

浸入式水口作为钢水流经中间包进入结晶器的通道,在连铸过程起防止钢水二次氧化、控制结晶器流场以及防止保护渣卷入连铸坯等重要作用^[1],因而要求其尺寸及结构能保证钢液在结晶器内形成合理的流场分布。如水口设计不合理,对应连铸坯表面容易产生纵裂、卷渣等表面缺陷。

409 L钢作为典型的钛稳定型铁素体不锈钢,主要应用于汽车排气系统等关键部件^[2]。汽车排气系统用钢要求有良好的成形性、焊接性等,因而对钢材冷板表面夹杂物种类、数量及大小要求严格^[3-4]。

太原钢铁集团有限公司(以下简称“太钢”)的板坯连铸机所生产的409 L钢连铸坯表面经常出现

“卷渣”缺陷(如图1所示),统计数据显示有“卷渣”缺陷坯块数占实际生产总块数比例达36.5%。该缺陷主要特征为:连铸坯内外弧均有,内弧中部居多,呈不规则分布,卷入深度不一,部分嵌入深度超5 mm。如不进行深修磨,对应冷轧板表面相应位置会出现“黑线”缺陷,严重影响冷轧板表面质量。

1 浸入式水口结构及409 L钢“卷渣”机理

1.1 浸入式水口结构

太钢板坯连铸机生产用浸入式水口结构如图2所示,该水口总长为700 mm,内径68 mm,本体采用铝碳材料,渣线处采用锆碳材料,侧孔类似椭圆型结构,其尺寸为48 mm × 70 mm,倾角为上倾15°,水口

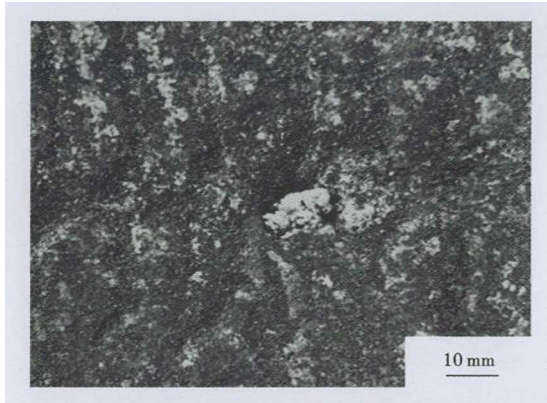


图 1 连铸坯表面“卷渣”形貌

Fig. 1 Morphology of “entrapped slag” at casting slab surface

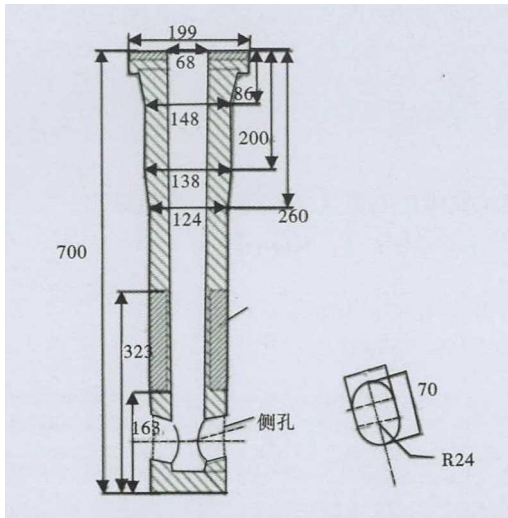


图 2 浸入式水口结构

Fig. 2 Nozzle structure of SEN

内底部为“凹”型。

1.2 连铸坯表面“卷渣”机理

文献[5-7]显示,连铸坯“卷渣”的产生主要有以下 4 种情况:(1)为窄面区域保护渣被切入;(2)浸入式水口周围因产生漩涡而造成卷渣;(3)结晶器液位波动过大造成卷渣;(4)氩气吹入量过大造成卷渣。其中连铸坯宽面中部“卷渣”缺陷的机理为:浸入式水口周围因钢流不稳而产生涡流,涡流将保护渣卷入,然后被初生坯壳捕捉而进入连铸坯表面,进而形成“卷渣”缺陷。通过优化浸入式水口尺寸、出口倾角等参数,可提高结晶器液位稳定性,进而降低连铸坯表面“卷渣”缺陷发生几率。

2 实验研究

2.1 连铸机工艺参数

太钢生产 409 L 钢板坯连铸机主要工艺技术参数如表 1 所示。

2.2 409 L 钢水成分

表 1 连铸机主要技术参数

Table 1 Main parameters of continuous casting machine

项目	技术参数
机型	板坯直弧形连铸机
台数×流数	1×1
基本半径/mm	8 000
铸坯厚度/mm	200
铸坯宽度/mm	900~1 320
冶金长度/m	23.6
拉速($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	0.7~1.1

表 2 409 L 钢化学成分/%

Table 2 Chemical composition of 409 L steel/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	N
0.01	0.35	0.35	0.02	0.002	11.3	0.22	0.008

409 L 钢水主要化学成分如表 2 所示。

2.3 水模实验

根据相似原理,对不可压缩粘性流体的稳定等温流动,应保证模型与实物中的雷诺数 Re 和弗劳德数 Fr 相等。水模实验模型中结晶器用有机玻璃按 1:1 比例制作而成,实际断面厚度方向 200 mm 固定不变、宽度方向可按需调整;本次实验选用 200 mm×1 060 mm 和 200 mm×1 240 mm 两组典型规格为研究对象,浸入式水口插入深度选 130 mm、140 mm、150 mm、160 mm 四组,拉速设定 0.9 m/min。实验用浸入式水口由耐火材料厂按图纸制作而成,水口尺寸如表 3 所示。实验过程中,用水模拟钢液,水经浸入式水口中孔-侧孔进入结晶器,当结晶器液面稳定后,用浪高仪系统测定结晶器中部水口周围液面波动情况,以该处测量 5 次的平均波高值定义为对应工况条件下的平均波高。用示踪剂和摄像仪记录保护渣覆盖情况及结晶器内流场分布。

3 实验结果与讨论

3.1 倾角对结晶器液位波动的影响

选 1[#]~3[#]样研究不同倾角(上倾 15°、5°、10°)下结晶器中部水口周围液位波动与浸入式水口插入深度关系,水模实验结果如图 3(a、b、c)所示。通常认为:以波高在 3~5 mm 为最佳范围,低于 3 mm 则认为液面太死,上循环弱,对化渣不利,高于 5 mm 则会增加“卷渣”发生几率。由图 3 可知:使用原上倾 15°水口、浸入式水口插入深度在 130~160 mm 时,结晶器中心平均波高在 2.5~2.8 mm。低于 3 mm,偏低,使用上倾 5°和 10°水口对应结晶器中心波高更低,更不利于化渣。对比三种角度的水口,使用原上倾 15°水口时结晶器液位波动相对较好。另外,实验过程发现三种浸入式水口对应侧孔流股均存在水流不稳情形,其冲击位置及冲击深度不断

表3 浸入式水口尺寸
Table 3 Nozzle dimension of SEN

水口	中孔尺寸/mm	侧孔尺寸/(mm×mm)	出口倾角/°
1#(原型水口)	68	48×70	上倾15
2#	68	48×70	上倾5
3#	68	48×70	上倾10
4#	68	32×52	上倾15
5#	60	48×70	上倾15

变化,肉眼观察水流为非连续性射流。结合水模试验结果和连铸坯表面“卷渣”缺陷产生原因,认为使用原型水口时,连铸坯表面“卷渣”原因并非是浇注过程中结晶器液位波动较大,而是由于钢流不稳所致。钢流不稳造成结晶器宽面中部产生局部涡流,涡流将保护渣卷入而形成“卷渣”缺陷;如涡流与出

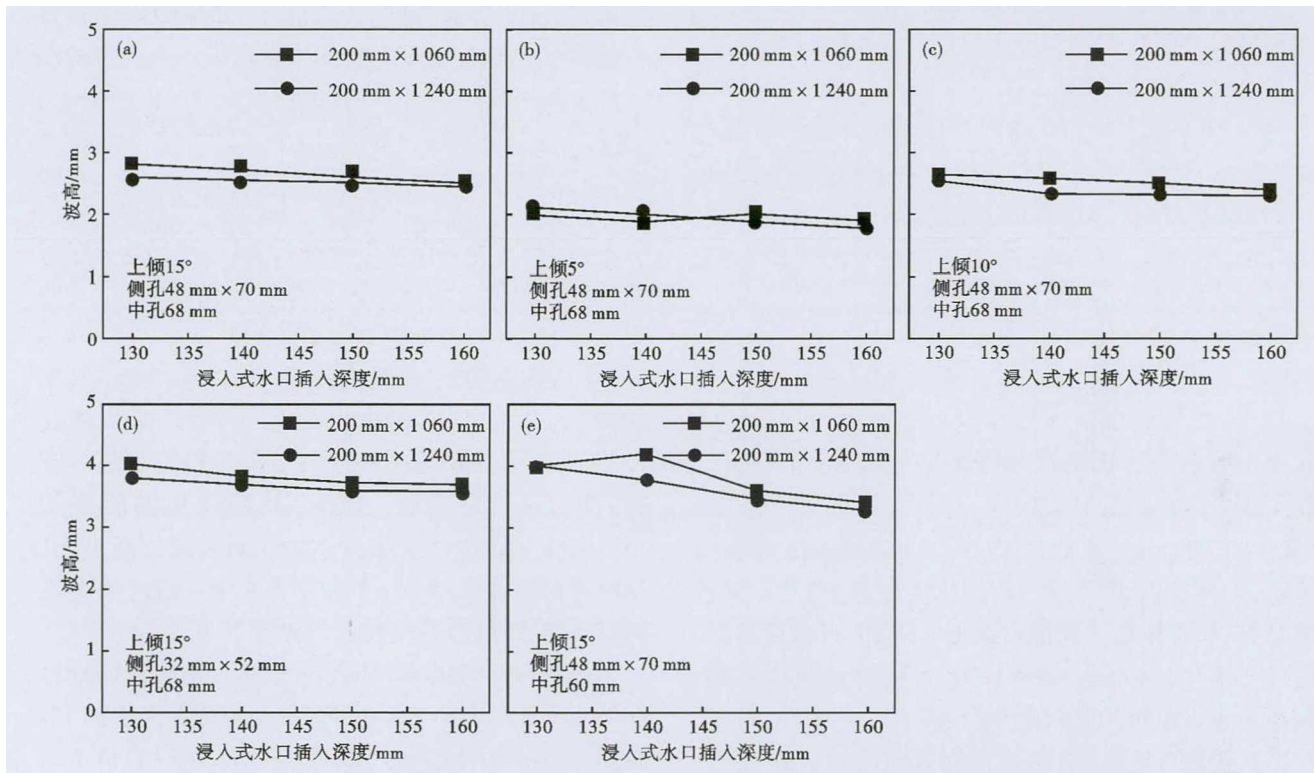


图3 结晶器液位波动情况与浸入式水口插入深度和水口角度的关系

Fig. 3 Relationship between the fluctuation of mould liquid level and immersion depth and nozzle angle

侧孔钢流流股发生碰撞时,则由漩涡卷吸的保护渣就会被流股冲击到结晶器更深的位置,继而形成大范围“卷渣”缺陷^[8]。

3.2 侧孔尺寸对结晶器液位波动的影响

选1#、4#样研究相同倾角、同一中孔尺寸下浸入式水口侧孔尺寸(48 mm×70 mm、32 mm×52 mm)对结晶器液位波动的影响,水模实验结果如图3(a、d)所示。由图3可知:在浸入式水口中孔尺寸、倾角、拉速等参数保持不变且水口插入深度仍为130~160 mm、浇铸断面仍为200 mm×1 060 mm和200 mm×1 240 mm情况下。与1#样相比,4#样小侧孔水口对应结晶器中心平均波高在3.5~4.0 mm,处于较好水平,且试验期间水流较平稳,从侧孔流出的水流变得更加均匀、平稳且连续,未见肉眼可见水流失稳现象。从水模试验结果看,减小水口侧孔尺寸有利于提升结晶器中心波高,进而有利于稳定结晶器流场。其原理为:在浸入式水口中孔内径不变情

况下,减小侧孔面积有利于提升侧孔出口流股的平均速度,降低侧孔上部产生“回流漩涡”的可能性,且有利于提高侧孔两侧钢流均匀性,使结晶器流场变得更加均匀。

3.3 中孔尺寸对浸入式水口出口流股影响

选1#、5#样研究相同倾角、同一侧孔尺寸下浸入式水口中孔尺寸(68 mm、60 mm)对结晶器液位波动的影响,水模实验结果如图3(a、e)所示。结合图及实验过程知:在浸入式水口侧孔尺寸为48 mm×70 mm,倾角为上倾15°、插入深度为130~160 mm范围内、拉速为0.9 m/min、浇铸断面为200 mm×1 060 mm和200 mm×1 240 mm情况下。相比1#样,5#样对应结晶器中心平均波高在3.5~4.5 mm,处于较好水平,浇铸过程中水流平稳连续,流场稳定,无肉眼可见水流失稳现象,有利于降低连铸坯表面“卷渣”缺陷产生的可能性。其原理为:1#样浸入式水口截面积和侧孔面积比为1.61,而5#样浸入式水

口截面积和侧孔面积比为 1.26,减小截面积与侧孔面积之比有利于稳定钢流在中孔和侧孔之间的流速,提升侧孔水流流股的稳定性和平均流速,稳定上循环流,进而降低“涡流”产生的可能性^[9]。

4 工业试验

为了验证水模实验效果,分别按照 1#~5#浸入式水口尺寸制作 5 种类型水口(尺寸同表 3)并开展了工业化试验,结果显示:

(1)1#、2#、3#浸入式水口使用效果比较:在保持浸入式水口侧孔尺寸和中孔尺寸不变前提下,使用 3 种角度水口,连铸坯表面“卷渣”缺陷比例分别为 36.5%、34.8%、37.2%,无明显差别。说明在不改变浸入式水口侧孔或中孔尺寸情况下,优化浸入式水口倾角对解决连铸坯表面“卷渣”缺陷效果不明显。

(2)1#、4#浸入式水口使用效果比较:在保持浸入式水口中孔尺寸、出口倾角不变前提下,插入深度在 130~150 mm 时,4#浸入式水口在生产小断面(900~1 100 mm)或低拉速(0.7~0.9 m/min)409 L 钢时,连铸坯表面“卷渣”缺陷比例降低至 2.5%,效果显著;但在浇铸大断面(1 100~1 320 mm)或高拉速(0.9~1.1 m/min)409 L 钢时,浇铸过程中有钢流跟不上、偏流严重等情形,不利于生产顺行,对应连铸坯表面“卷渣”缺陷比例时好时坏。这主要与 409 L 钢属铝镇静钢有关,如浇铸过程中钢水纯净度高,则结晶器流场平稳,对应连铸坯表面“卷渣”缺陷比例较低,如出现单侧孔或双侧孔堵塞后,结晶

器侧孔流股将变得非常不稳定,结晶器液面波动增大,对应连铸坯表面“卷渣”缺陷产生几率则大幅增加,严重时会出现连续“卷渣”。

(3)1#、5#浸入式水口使用效果比较:在保持浸入式水口倾角、侧孔尺寸不变前提下,插入深度在 130~150 mm 时,5#样浸入式水口对应 409 L 钢种连铸坯表面“卷渣”缺陷大幅减少,实际连铸坯表面“卷渣”缺陷比例由原来的 36.5%降至 0.8%,且该水口可适用于 900~1 320 mm 规格及 0.7~1.1 m/min 拉速。

5 结论

(1)针对太钢 409 L 钢特定生产工艺,连铸坯表面“卷渣”缺陷与浸入式水口侧孔倾角关系较小,使用上倾 15°水口有利于结晶器化渣。

(2)在浇铸低拉速(0.7~0.9 m/min)或小断面(900~1 100 mm)409 L 钢时,使用 4#样小侧孔(32 mm×52 mm)浸入式水口有利于稳定结晶器流场,对应连铸坯表面“卷渣”缺陷比例由原来的 36.5%降至 2.5%,但在浇注大断面或高拉速 409 L 钢时水口堵塞几率高,不利于生产顺行,这主要与 409 L 钢浇铸过程易出现水口堵塞有关。

(3)5#样 $\Phi 60$ mm 中孔尺寸浸入式水口能较好解决 409 L 钢表面“卷渣”问题,对应连铸坯表面“卷渣”缺陷比例由原来的 36.5%降至 0.8%,且该水口可适用于 950~1 320 mm 规格及 0.7~1.1 m/min 拉速。

参考文献

- [1] 蔡开科,潘毓淳,赵家贵.连续铸钢 500 问[M].北京:冶金工业出版社,2002:121-125.
- [2] 王伟明,毛惠刚.汽车排气系统用 409 型铁素体不锈钢的开发研究[J].宝钢技术,2005(4):56-60.
- [3] 陈敏,于景坤,马北越.连铸复合式水口内层用镁铝尖晶石质耐火材料的合成研究[J].工业加热,2005,34(2):59-61.
- [4] 朱诚意,谢军,钟贤岱,等.柯昌明.钛对 409 不锈钢中夹杂物析出及耐蚀性影响机理[J].中国稀土学报,2012,30:77-82.
- [5] 蔡开科.连铸坯质量控制[M].北京:冶金工业出版社,2009:327-335.
- [6] 陆巧彤,杨荣光,王新华,等.王万军.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):29-33.
- [7] 陈敏,王楠,韩文习,等.板坯连铸机浸入式水口结构优化的水模研究[J].炼钢,2007,23(3):36-40.
- [8] 孙彦辉,韦耀环,蔡开科,等.宽板坯连铸结晶器内卷渣现象试验研究[J].钢铁,2007,42(11):31-34.
- [9] 李俊桥.宽板坯连铸结晶器浸入式水口结构参数优化的数值与物理模拟研究[D].2012:12-15.

李晓军(1986-),男,硕士(2011年重庆大学),工程师,2008年重庆科技学院(本科)毕业,连铸工艺技术及研究。
E-mail:lixj01@tisco.com.cn

收稿日期:2019-11-13