



1 000 ~ 2 200 mm 宽板坯连铸机结晶器 流场优化与应用

王玉平, 吴健博

(本钢板材股份有限公司炼钢厂, 本溪 117000)

摘要:为改善某厂超低碳钢连铸过程中出现偏流、跳棒及水口堵现象,通过对中间包透气上水口、塞棒和浸入式水口等连铸功能耐材进行改进,将透气上水口改用特殊的弥散式透气材质,吹入的氩气气泡沿水口内壁形成均匀的气幕,表面气孔率较改进前提高 5.2%,防止了夹杂物在水口内壁蓄积,缓解水口堵;将塞棒棒头由中心部位的吹氩孔由 1 个改为 6 个,实现 360° 均匀吹入氩气,减少棒头夹杂物蓄积;将浸入式水口改用无碳,低铝,高硅内衬,改变水口内壁材质,防止浸入式水口堵塞。改进后耐材在超低碳钢上推广应用,使得每浇次跳棒次数减少 0.83 次、降幅 31.8%,水口堵造成的在线更换浸入水口频次减少了 0.38 支、降幅 41.3%,稳定结晶器液面控制精度,提升冷轧卷夹杂合格率 0.238%,并提高了单中间包连浇炉数 0.53 炉、增幅 8%,使 1 000~2 200 mm 宽板坯连铸机结晶器流场得以优化。

关键词:宽板坯连铸; 结晶器; 浸入式水口; 塞棒; 液面控制; 夹杂

DOI:10.20057/j.1003-8620.2024-00072 **中图分类号:**TF703

Application and Optimization of Mould Flow Field in 1 000 mm–2 200 mm Wide Slab Caster

Wang Yuping, Wu Jianbo

(Steel-making Plant, Bengang Steel Plates Co., Ltd., Benxi 117000, China)

Abstract: In order to improve bias flow, jump bar and water plugging phenomenon during ultra-low carbon steel continuous casting process in a factory, through the tunish breathable on the nozzle, plug rod and immersion nozzle such as continuous casting function resistant material improvement, switch the air top nozzle to switch to special diffusion breathable material, blowing into the argon bubbles along the nozzle form uniform air curtain. The surface stomatal rate is 5.2% higher than that before the improvement, which prevents the accumulation of inclusions in the inner wall of the nozzle and alleviates the clogging of the nozzle. One argon hole located in center is changed to six holes of stopper rod, which can realize 360° even argon blowing around its head and decrease inclusion collection on the head. The SEN adopts merterials of carbon free, low aluminum, high silicon content. These refractory can react with the inclusion on the wall of SEN, which prevents its clogging. After the application of improved resistant materials in ultra-low carbon steel, the number of jumping rods per casting is reduced by 0.83 times and 31.8%, the frequency of on-line replacement of SEN caused by nozzle plugging is reduced by 0.38 pieces and 41.3%, and the control accuracy of crystallization level is stabilized, the qualified rate of cold rolled coil inclusion is improved by 0.238%, and the number of single tunish casting heats is increased by 0.53 heats and increasing by 8%, thus optimize the flow field of mould. It is proved to put forward to optimize 1 000 mm–2 200 mm caster's mould flow field.

Key Words: Wide Slab Continual Casting; Mould; Submerged Nozzle; Stopper Rod; Mould level Control; Inclusion

随着对钢材质量要求的不断提高,对钢水纯净度、铸坯表面质量的要求也越来越高,近年来,随着对汽车轻量化和高效生产的加速推进,对诸如汽车面板等超低碳钢提出了更高的质量要求,研究表明,合理的结晶器流场对提升铸坯表面质量、促进夹杂物上浮有利^[1],国内外生产汽车板的先进钢企通过配置结晶器电磁搅拌来优化结晶器流场,获得“双环流”、最佳的结晶器弯月面钢水速度、均匀结

晶器弯月面钢水温度、提升结晶器液面精度等好处,达到降低夹杂缺陷率的目的。

以生产 1 000~2 200 mm 宽度的宽板坯连铸机为对象,连铸机冶金长度是 35.14 m,结晶器铜板高度是 900 mm,连铸机采用塞棒控流系统、内置式结晶器液位自动控制系统,生产超低碳钢的最大工艺拉速是 1.80 m/min。针对浇注超低碳钢过程中,水口堵原因发生跳棒、结晶器液面波动大的频次较

多,造成铸坯下线清理,同时由于水口堵,单中间包连浇炉数不能进一步提升以降低吨钢成本,而且结晶器流场不稳定造成液面控制精度达不到高级别汽车板(以Ti处理钢为主) ± 3 mm的工艺质量要求,引起卷渣等生产工艺问题,从改进塞棒、透气上水口和浸入水口等连铸功能耐材设计上入手,对这些耐材进行设计创新,减缓超低碳钢水口堵及其严重程度,优化控流,减轻浸入式水口絮流和塞棒棒位不稳定等问题对结晶器流场的影响,达到稳定和优化结晶器流场、提升汽车板质量的目的。

1 结晶器流场不稳定的耐材因素

1 000~2 200 mm宽板坯连铸机浇铸超低碳钢时,随着浇铸时间的增长,在连浇炉数大于3炉的浇次上,经常发生水口堵的问题,水口通道缩径,造成钢流跟不上设定拉速的通钢量,需要降低拉速维持浇铸,并伴随着跳棒、控流效果不好,导致结晶器液位大幅波动,进而制约连浇炉数和产品质量的提高。浇钢后,通过对耐材进行留样,发现水口堵问题主要表现如图1所示,中间包透气上水口结瘤、堵塞如图1(a)所示;塞棒棒头结瘤、堵塞如图1(b)所示;浸入式水口吐出孔结瘤、堵塞,更严重时,浸入式水口的堵塞甚至产生在水口的整个内壁,如图1(c)所示。

2 水口堵塞的形成

有关水口堵塞,研究者提出了多种机理^[2-3],概括如下:

(1)悬浮在钢水中的 Al_2O_3 ,由于具有高的界面能,在与透气上水口、塞棒及浸入式水口等耐火材料接触时, Al_2O_3 的界面能急剧降低,并粘附在这些耐材上,与耐火材料烧结成网状 Al_2O_3 ,成为堵塞流钢通道的沉积物。

(2)耐火材料领域的研究者普遍认为:在铝碳

质水口中含有 SiO_2 、 Na_2O 、 K_2O 等第二相,在浇注过程,水口中的碳与第二相反应,生成 $SiO_2(g)$ 、 CO 、 $Na(g)$ 、 $K(g)$ 等气体,这些气体再与钢水中的铝、氧及耐材中的 Al_2O_3 反应,生成的钠长石和三氧化二铝等粘附在水口内壁上,成为堵塞水口的沉积物。

(3)在各种材质的水口中都存在或多或少的低熔点相(FeO 、 K_2O 、 Fe_2O_3 、 Na_2O 等),当其与高温钢水接触时,耐火材料中的低熔点相析出,附着在水口内壁,成为钢中高熔点复合夹杂物的落脚点;同时根据界面层理论,在水口内壁处钢水的流速为零,高熔点复合夹杂物有与低熔点析出物烧结固定在水口内壁。

上述三种机理,都有可能是水口堵塞的原因。另外,还有研究发现^[4-6],由于含钛氧化物(如 $Al_2O_3-TiO_x$ 、 $FeO-TiO_x$ 等)相比于纯 Al_2O_3 夹杂物与钢液面的湿润性更好,钛处理IF钢液比不含钛的超低碳钢浇铸时更容易发生水口堵塞,尤其是在水口存在二次氧化的情况下。为此,对透气上水口、塞棒及浸入式水口等连铸功能耐火材料重新进行设计,优化结晶器流场,减少水口堵塞。

3 连铸功能耐材设计改进

针对1 000~2 200 mm宽板坯连铸机浇铸超低碳钢水口堵的问题,结合水口堵塞原因的机理分析,对浇铸超低碳钢的功能耐材,如透气上水口、塞棒和浸入式水口的设计进行改进。

3.1 透气上水口

中间包透气上水口采用特殊的弥散式透气材质,保证吹入的氩气气泡的数量大,但尺寸小,沿水口内壁形成均匀的气幕,防止夹杂物在水口内壁蓄积,是改进透气上水口以缓解水口堵的主要思路,如图2所示。

改进前、后透气上水口的主要区别在于材质的



图1 水口堵的表现形式:(a)透气上水口水口碗堵塞,(b)塞棒棒头堵塞,(c)浸入水口吐出孔堵塞

Fig. 1 Pattern of manifestation of clogging : (a) clogging of top nozzle, (b) clogging of stopper rod head, (c) clogging of SEN side hole

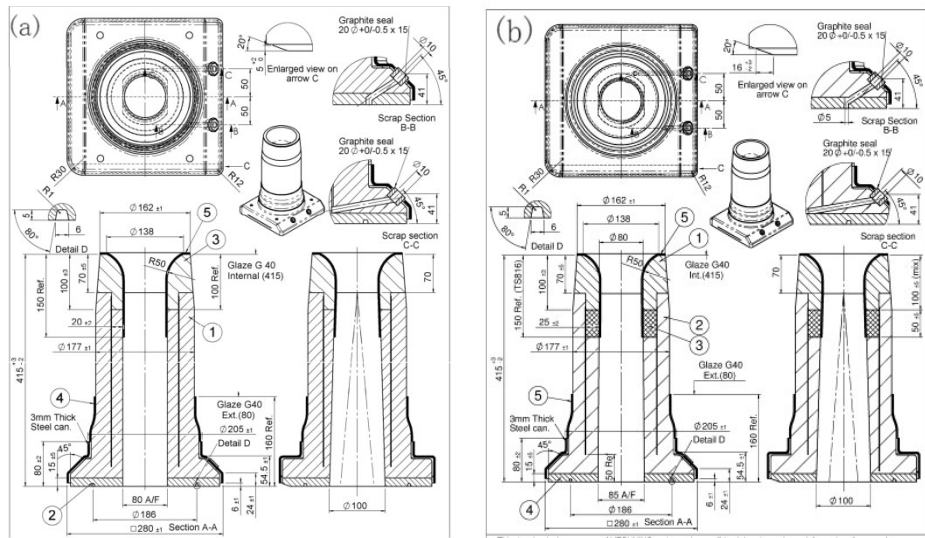


图 2 透气上水口改进设计:(a)改进前的透气上水口,(b)改进后的透气上水口

Fig. 2 Optimization design of breathable top nozzle:(a)breathable top nozzle before optimization,(b)breathable top nozzle after optimization

透气率以及透气方式,两者物理指标对比见表 1。

表 1 改进前后透气上水口物理指标对比

Table 1 The physical index comparison of top nozzle optimization before and after

工艺	主要理化指标	数值范围	代表值
改进前	表面气孔率/%	10.5 ~ 17.8	13.5
改进后			
改进前	体积密度/(g·cm ⁻³)	2.51 ~ 2.68	2.61
改进后			

改进前、后透气上水口的透气方式均为弥散式,但改进后的透气上水口如图 2(b)所示,采用特殊透气材质,表面气孔率较改进前提高 5.2%,在相同氩气流量下,透气效果较改进前更显著,利于减缓上水口絮流、堵塞。

3.2 塞棒

采用特殊设计的塞棒连接螺栓,保证塞棒与连接螺栓对接的位置不吸入空气,提高保护浇铸效果;塞棒棒头部位由中心部位的 1 个吹氩孔改为 6 个吹氩孔,均匀分布在棒头,实现 360°均匀吹入氩气,达到棒头部位无夹杂物蓄积和发生二次氧化反应的目的,如图 3 和 4 所示。

塞棒棒头改进后,取消原设计棒头顶部的吹氩孔,在与透气上水口结合处,均匀新增 6 个吹氩孔,实物情况如图 4 所示。

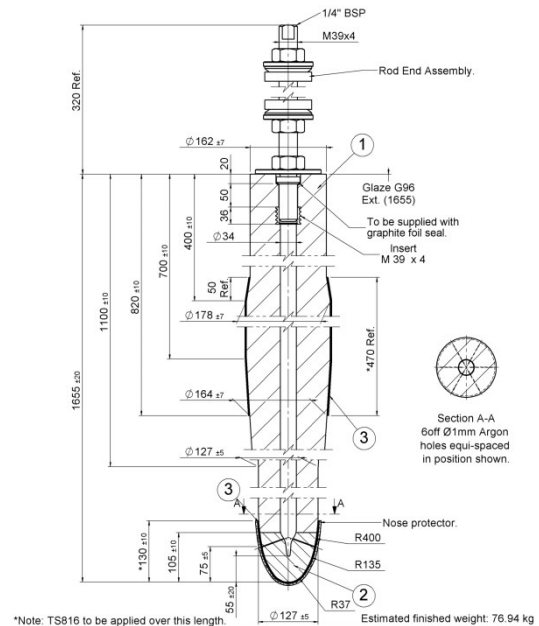


图 3 塞棒改进设计

Fig. 3 Optimization design of stopper rod

3.3 浸入式水口

为缓解浸入式水口堵塞,降低浇钢过程中更换浸入式水口的频次和耐材成本,减少换水口带来的非稳态铸坯(拉速变化大、手动控制并干扰结晶器液面),提高超低碳钢铸坯质量,有必要对浸入式水口进行改进:对其板面采用膨胀性材料做膨胀环,在浇铸过程中体积膨胀,增强浸入式水口与透气上水口之间的板间密封,防止浇钢通道吸入空气而产

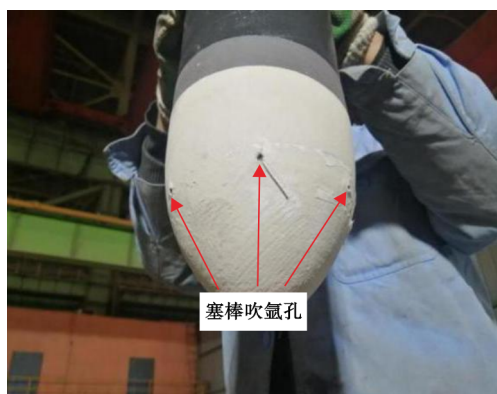


图 4 塞棒吹氩孔的优化

Fig. 4 Optimization of stopper rod argon holes

生二次氧化以及弱化吹氩效果,降低水口堵几率;浸入式水口采用无碳,低铝,高硅内衬,加入添加剂,改变水口内壁材质,防止浸入式水口堵塞^[7-8],在浇铸过程中与附着在水口壁上的夹杂物反应,反应产物为液态,不会蓄积在水口内壁,同时由于反应产物比重小,进入结晶器后,上浮、不会污染钢水。

优化浸入式水口形状和结构对于高拉速下优化、稳定超低碳钢结晶器流场是有利的,均衡结晶器弯月面钢水温度与流速^[9]、提高结晶器液面精度。有研究^[10]认为,对于坯厚 230 mm 的连铸结晶器而言,最佳浸入式水口为:凹形、上角度 40°、下角度 -15°,并发现井深为 10 mm 的凹底浸入式水口可以有效降低结晶器的液面波动与表面流速,防止卷渣的发生^[11-12]。改进后浸入式水口设计如图 5 所示:

4 耐材改进后的应用实践

透气上水口、塞棒和浸入式水口的改进设计,经过反复论证、冷试后,确定在 1 000~2 200 mm 宽板坯连铸机的超低碳钢上进行试验。试验浇次钢种是 DQ2J,浇铸断面是 230 mm×1 580 mm,在连浇 8 炉的情况下,浇铸过程中没有“跳棒”等大幅度的棒位及液位波动,塞棒棒位的变化相对平缓、突变少,结晶器液位精度控制在±3 mm 以内,在浇铸第 6 炉的初期,由于偏流原因在线更换了一支浸入式水口。浇铸过程的结晶器液位及塞棒开口度情况,

通过试验得到跳棒、结晶器液位波动能够有效

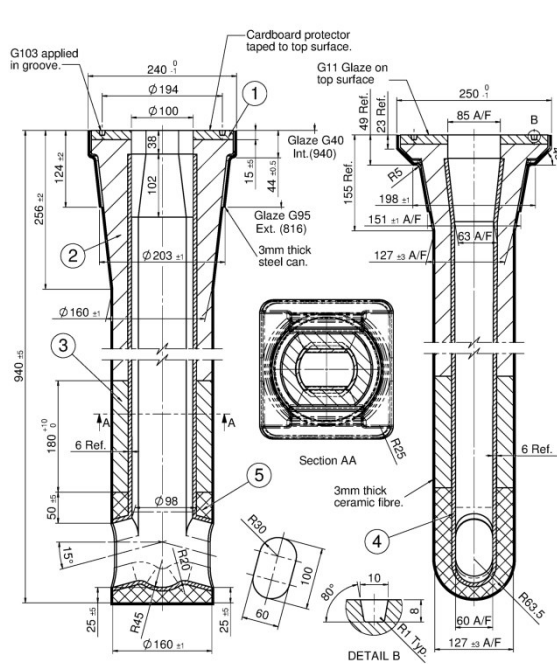


图 5 浸入式水口改进设计

Fig. 5 Optimization design of one piece SEN

控制,为此进行了推广应用,改进前后同期各三个月下,1 000~2 200 mm 宽板坯连铸机浇铸超低碳钢(常见钢种是 DQ2J、SEDDQJ、EDDQV 等)的浇次数据进行对比(单中间包连浇炉数≥4 炉的浇次),具体对比情况见表 2。

由表 2 可知,耐材改进后,1 000~2 200 mm 宽板坯连铸机浇铸超低碳钢的单中间包连浇炉数提高了 0.53 炉/浇次,增幅 8%;跳棒次数减少了 0.83 次/浇次,降幅 31.8%;由于偏流及水口堵原因在线更换浸入水口的数量由 0.92 降低到 0.54 支/浇次,减少 0.38 支/浇次,降幅 41.3%,由于夹杂缺陷的降级率由 0.480% 降低到 0.242%,降幅 49.6%,产品合格率提高了 0.238%,产品质量得到进一步提升,改善效果较为明显。

5 结论

通过对 1 000~2 200 mm 宽板坯连铸机浇铸超低碳钢的功能耐材,透气上水口、塞棒和浸入式水口进行设计改进,采用特殊的弥散式透气材质使表

表 2 耐材改进前后三个月的浇铸及质量数据对比

Table 2 Comparison of casting and quality data in three months before and after refractory improvement

工艺	浇次/次	总炉数/炉	平均连浇炉数/炉	跳棒数/次	换水口数/支	冷轧缺陷量/t	铸坯产量/t	夹杂缺陷率/%
改进前	73	484	6.63	2.61	0.92	422.45	88 001.7	0.480
改进后	83	592	7.16	1.78	0.54	259.16	107 069.1	0.242

面气孔率较改进前提高5.2%;塞棒中心吹氩孔由1个改为6个,实现360°均匀吹入氩气;浸入式水口改用无碳,低铝,高硅内衬,改变水口内壁材质,防止浸入式水口堵塞,结晶器流场得到了优化。

(1)连铸功能耐材的独特设计结合现场的浇铸工艺,能够减少在浇铸过程中出现“跳棒”等大幅度的棒位及液位波动,缓解絮流造成的偏流,而且每

浇次浸入式水口更换支数减少0.38支,降幅41.3%。

(2)能够较为有效地稳定结晶器液位控制精度,减少卷渣和冷轧产品夹杂缺陷,提高冷轧产品合格率0.238%。

(3)改进工艺达到了优化结晶器流场地预期目标,提升超低碳钢的单中间包连浇炉数0.53炉/浇次,增幅8%,降低连铸吨钢成本。

参考文献

- [1] 刘启龙, 邓 勇, 李华刚, 等. IF钢板坯结晶器电磁搅拌数值模拟与工艺实践[J]. 特殊钢, 2023, 44(6): 83-88.
- [2] 张一夫, 刘增勋. 钢包和中间包水口结瘤机理浅析[C]. 2005中国钢铁年会论文集(第3卷). 北京, 2005: 379-382.
- [3] 李积鹏, 程树森, 程子建, 等. BOF→RH→CSP工艺生产含钛IF钢浸入式水口结瘤机理研究[J]. 炼钢, 2017, 33(4): 46-51.
- [4] Cui H, Bao Y P, Wang M, et al. Clogging behavior of submerged entry nozzles for Ti-bearing IF steel [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2010, 17(2): 154-158.
- [5] Bernhard C, Xia G, Egger M, et al. Experimental Investigation Into the Influence of Ti on the Clogging of ULC Steels in Continuous Casting [C]. Conference Organizer. AISTech 2012 Proceedings. Atlanta, GA, 2012: 2191-2000.
- [6] Basu S, Choudhary S K, Girase N U. Nozzle clogging behaviour of Ti-bearing Al-killed ultra low carbon steel [J]. ISIJ International, 2004, 44(10): 1653-1660.
- [7] 蔡开科. 连续铸钢技术丛书, 连铸结晶器, 结晶器钢水流量控制及控流装置的设计. 北京: 冶金工业出版社, 1994.
- [8] 闫文涛, 李 勤. IF钢浇铸过程浸入式水口结瘤的治理研究[J]. 山西冶金, 2020, 43(1): 16-17+42.
- [9] 邓小旋, 熊 霄, 王新华, 等. 水口底部形状对高拉速板坯连铸结晶器液面特征的影响[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(4): 515-522.
- [10] 雷琳琳, 常运合, 罗衍昭, 等. 浸入式水口及其对板坯连铸结晶器流动行为的影响[J]. 连铸, 2023, 48(6): 1-16+40.
- [11] 张立峰. 钢中非金属夹杂物: 工业实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2019.
- [12] 杨文轩, 王 勇, 高锦国, 等. 1500 mm×230 mm板坯结晶器液面波动与卷渣行为水力学模型试验和应用[J]. 特殊钢, 2022, 43(2): 21-26.