

Nb-V-Ti 微合金化低合金钢 SG610E 250 mm × 2 000 mm 连铸尾坯封顶工艺试验与实践

曹磊 马保振 黄伟青 韩立浩 石永亮
(河北工业职业技术学院材料工程系, 石家庄 050000)

摘要 针对低合金钢 SG610E 250 mm × 2 000 mm 连铸尾坯封顶工艺进行了试验研究, 结果表明, 传统的打水封顶工艺, 在距离铸坯尾部 2 000 mm 范围内存在严重的中心缩孔, 而低拉速无水封顶可以将缩孔尾坯长度减小到了 900 mm。但是由于低拉速无水封顶工艺, 拉速 ≤ 0.2 m/min 持续时间长, 导致连铸坯表面温度降低, 进入第三脆性区, Nb-V-Ti 微合金化低合金钢连铸尾坯表面出现了表面横裂纹。为此, 开发了一种宽厚板连铸机拉速 0.4 m/min 不停机无水封顶方法, 不仅获得了良好的连铸尾坯内部质量, 同时解决了该钢连铸尾坯表面横裂纹的问题。

关键词 Nb-V-Ti 微合金化低合金钢 SG610E 连铸尾坯 打水封顶 无水封顶 表面横裂纹

Test and Practice on Capping Process of 250 mm × 2 000 mm Casting Tail Slab of Nb-V-Ti Microalloying Low Alloy Steel SG610E

Cao Lei, Ma Baozhen, Huang Weiqing, Han Lihao and Shi Yongliang
(Material Engineering Department, Hebei College of Industry and Technology, Shijiazhuang 050000)

Abstract The capping technology of low alloy steel SG610E 250 mm × 2 000 mm continuous casting tail slab is studied. The results show that with traditional water-cooling capping process, there are severe shrinkage cavities at distance 2 000 mm from the slab end; while with the low-speed casting anhydrous capping, the distance of slab shrinkage cavities decreases to 900 mm, but the slab surface temperature drops into the third brittle zone due to the long duration of ≤ 0.2 m/min casting speed, which lead to transverse cracks on Nb-V-Ti microalloying low alloy steel casting tail slab. Therefore a non-stopped-pouring speed casting 0.4 m/min anhydrous capping technology for wide and thick slab is developed which improves the internal quality and reduces the surface crack incidence of the steel tail slab.

Material Index Nb-V-Ti Microalloying Low Alloy Steel SG610E, Continuous Casting Tail Slab, Water-Cooling Capping, Anhydrous Capping, Surface Transverse Crack

连铸机封顶操作在连铸工艺领域是非常重要的技术, 因为封顶操作的好坏不仅关系到连铸尾坯的浇注安全, 而且关系到连铸尾坯的内部质量和外部质量。长期以来, 国内外的钢铁企业为了生产安全的考虑, 担心尾坯封顶冷却不好导致漏钢, 所以大多数采用打水方式进行尾坯封顶。

基于传统打水封顶操作模式, 国内外学者在连铸浇注末期预防结晶器内钢液卷渣^[1-4]、中间包流场优化控制^[5-7]、尾坯洁净度提高^[8-11]、尾坯表面质量提高^[12]以及尾坯切割优化^[13]等方面针对连铸尾坯质量的改善与提高进行了许多研究探索。

曹磊^[14]等人曾在板坯连铸机上通过工艺技术创新, 变“打水”为“无水”, 通过尾坯自然冷却、收缩使得钢水在凝固过程中可以有效得到补充, 解决传统打水封顶无法解决的连铸尾坯内部质量缺陷这一技术难题, 尾坯探伤合格率从 78.2% 提高到了

98.8%, 坯尾切除量从 2 m 降低至 0.8 m。

无水封顶工艺为了增加连铸坯在结晶器内的冷却凝固, 将终浇封顶拉速降低至 0.15 ~ 0.2 m/min, 持续时间长达 4 ~ 5 min。在终浇封顶操作时, 过低的拉速, 过长的低拉速持续时间, 会造成连铸机扇形段内的连铸坯表面温度过低, 如果表面温度进入第三脆性区间, 连铸坯在矫直过程受到矫直应力作用, 致使表面矫直裂纹的发生率增加。

本文提出了一种宽厚板连铸机高拉速不停机无水封顶方法, 不仅获得了良好的连铸尾坯内部质量, 同时解决了含 Nb 合金钢连铸尾坯表面裂纹的问题。

1 试验方案

本试验研究采用的连铸机生产断面是 250 mm × 2 000 mm, 正常连铸拉速为 1.1 m/min, 试验钢种为含 Nb 合金钢 SG610E, 化学成分如表 1 所示。工艺

表 1 Nb-V-Ti 微合金化低合金钢 SG610E 化学成分/%
Table 1 Chemical composition of Nb-V-Ti microalloying low alloy steel SG610E/%

C	Si	Mn	P	S	Al _T	Nb	V	Ti	Ni	Cr	Mo
0.10~0.12	0.2~0.3	1.45~1.55	≤0.010	≤0.003	0.025~0.050	0.025~0.035	0.045~0.055	0.010~0.015	0.2~0.3	0.1~0.2	0.1~0.15

表 2 250 mm × 2 000 mm 含 Nb 低合金钢 SG610E 连铸尾坯封顶工艺试验方案
Table 2 Capping test programs of 250 mm × 2 000 mm Nb bearing low alloyed steel SG610E casting tail slab

不同的尾坯封顶工 艺试验方案	浇注断面/mm × mm	是否打水	封顶时是否捞结 晶器保护渣	最低拉速 /(m · min ⁻¹)	尾坯在结晶器内 停留时间/min	是否加冷 却料
方案(1):传统打水封顶	250 × 2000	是	是	0	2~3	否
方案(2):低拉速无水封顶	250 × 2000	否	否	0.15	>5	否
方案(3):高拉速不停机无水封顶	250 × 2000	否	是	0.40	<3	是

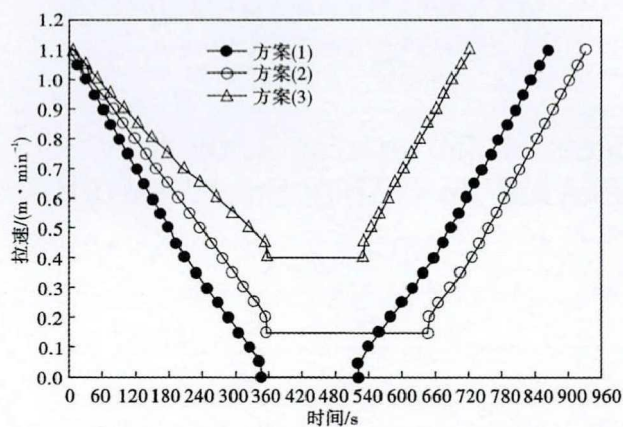


图 1 封顶模式的拉速控制:方案(1)传统打水封顶;方案(2)低拉速无水封顶;方案(3)高拉速不停机无水封顶
Fig. 1 Casting speed control of capping scheme (1) traditional water-cooling capping, (2) low-speed casting anhydrous capping and (3) non-stopped-pouring high-speed casting anhydrous capping

试验方案如表 2 与图 1 所示。

方案(1):传统打水封顶过程包括三个阶段:

减速阶段,钢包停浇后,根据中间包吨位,结合中间包测量实际液面,逐步降低拉速,在降低拉速的过程中进行耗渣,或者捞渣;

打水封顶阶段,根据中间包吨位和实际测量液面,确定停浇后,关闭塞棒,同时,将拉速降低至 0 m/min,然后往结晶器内打水,打水时间约 2 min,打水后,用烧氧管确认封顶完好。

提速阶段:确认封顶完好后,逐步提高拉速至 1.1 m/min。

方案(2):低拉速无水封顶也包括三个阶段,减速阶段、低速运行阶段和提速阶段。

减速阶段:钢包停浇后,根据中间包吨位,结合中间包测量实际液面,缓慢均匀降低拉速,在降低拉速的过程中不进行耗渣,不捞渣,正常加渣,保持黑渣操作,拉速降至 0.20 m/min;

低速运行阶段:拉速降至 0.20 m/min 后,根据中间包吨位和实际测量液面,确定停浇后,关闭塞

棒,同时,将拉速降低至 0.15 m/min,一直到坯尾出结晶器下口;

提速阶段:坯尾拉出结晶器后,缓慢均匀拉速至目标拉速。

无水封顶工艺采用的结晶器水流量与常规打水封顶工艺相同,宽面结晶器水流量 3 600 L/min;窄面水流量 400 L/min。

方案(3):高拉速不停机无水封顶同样包括三个阶段,减速阶段、低速运行阶段和提速阶段。不同的是,封顶拉速 0.4 m/min 高于方案 2 的 0.15 m/min,由于提高了封顶拉速,尾坯在结晶器内停留时间缩短,为了避免尾坯出结晶器时出现漏钢事故,方案 3 需要在关闭塞棒,捞干净结晶器内保护渣后,往结晶器内钢液面加入冷却方钢,冷却方钢的尺寸为 40 mm × 40 mm × 40 mm。

三种方案一次冷却和二次冷却制度相同,一次冷却的冷却水流量宽面 3 800 L/min,窄面 400 L/min。二冷水流量随着拉速降低而降低,当拉速低于 0.4 m/min 时,为了生产安全考虑,二冷水执行拉速 0.4 m/min 对应的冷却水流量。

2 试验结果与讨论

2.1 连铸生产安全

按照试验方案,分别进行了 10 次工艺试验,三种方案都没有出现封顶失败导致漏钢等事故,说明传统的打水封顶和无水封顶工艺都可以满足生产要求。

2.2 连铸尾坯内部质量

对不同封顶方案条件下连铸尾坯进行内部质量检验,从距离连铸坯尾部 600 mm 位置开始,每隔 100 mm 进行切割取样,先肉眼观察是否有明显缩孔,并记录不同封顶方案条件下肉眼缩孔消失位置。统计结果如表 3 所示,可以看出,对于传统打水封顶工艺,在距离坯尾 2 000 mm 之前的连铸坯均具有严重的肉眼可见的缩孔,内部质量较差;对于方案(2)和

表3 各试验方案连铸尾坯缩孔消失位置

Table 3 Shrinkage cavities disappeared positions at casting tail slab with each testing scheme

距离坯尾位置/mm	方案(1)	方案(2)	方案(3)
600	有	有	有
900	有	无	有
1 000	有	无	有
1 100	有	无	无
1 200	有	无	无
1 300	有	无	无
1 400	有	无	无
1 500 ~ 1 900	有		
2 000	无		
2 100	无		

方案(3),肉眼可见的缩孔分别在距离坯尾 900 mm 和 1 100 mm 位置开始消失。

从表4可以看出,对于传统打水封顶工艺方案,虽然肉眼可见缩孔消失,但是具有较为严重的中心疏松,中心偏析 C 类 2.5 级夹杂,相对也比较严重,如图2所示;对于方案(2)和方案(3),无水封顶工艺条件下,连铸坯的低倍检验结果明显好于方案1的传统打水封顶,中心疏松由 2.5 级降低至 1.0 级,中心偏析也得到了较大程度改善,分别为 C 类 0.5 级和 C 类 1.0 级。

表4 各试验方案缩孔消失位置处连铸坯低倍检验/级

Table 4 Macrostructure examination of shrinkage cavities disappeared positions at tail slab with each testing scheme/raing

方案	钢种	中心偏析	中心疏松	中间裂纹	角裂纹	三角区裂纹	规格/(mm × mm)
(1)	SG610E	C 类 2.0	2.5	0.5	0	0	250 × 2000
(2)	SG610E	C 类 0.5	1	0	0	0	250 × 2000
(3)	SG610E	C 类 1.0	1	1	0	0.5	250 × 2000

相对于传统的打水封顶工艺,无水封顶工艺将连铸尾坯缩孔导致的直接废坯长度从 2000 减少至了 900 ~ 1 100 mm,即使是切除了 2 000 mm 具有缩孔的连铸坯尾,打水封顶的连铸尾部内部还具有较为严重的中心疏松。所以从连铸尾坯内部质量控制角度看,方案(2)和方案(3)明显优于方案(1),方案(2)与方案(3)两者相比,低拉速下的无水封顶工艺略优于高拉速不停机方案下的无水封顶工艺。

常规打水封顶,尾坯冷却方式是“上加下,双层夹击冷却”,冷却强度大,凝固过程中柱状晶发达,过分发达的柱状晶产生搭桥,阻碍了钢液的流动,导致坯尾产生了严重的缩孔。

而方案(2)的无水封顶工艺冷却通过结晶器冷却,尾坯冷却方式是在保护渣保温状态下“从下至上逐步冷却”。“自下而上”的自然冷却方式,钢液可以有效补缩,减小缩孔,提高了连铸尾坯的内部质量。

对于方案(3)的高拉速不停机的无水封顶模式,综合了方案(1)和方案(2)的特点,取消了传统封顶工艺的打水操作,降低了连铸尾坯的冷却强度和严重缩孔问题。但是在 0.4 m/min 拉速条件下,

表5 各试验方案连铸尾表面横裂纹情况

Table 5 Transverse cracks at casting tail slab surface of each testing scheme

方案	存在裂纹/块	肉眼可见表面裂纹/块	皮下裂纹/块	裂纹发生率/%
(1)	1	0	1	3.33
(2)	11	1	10	36.67
(3)	0	0	0	0.00

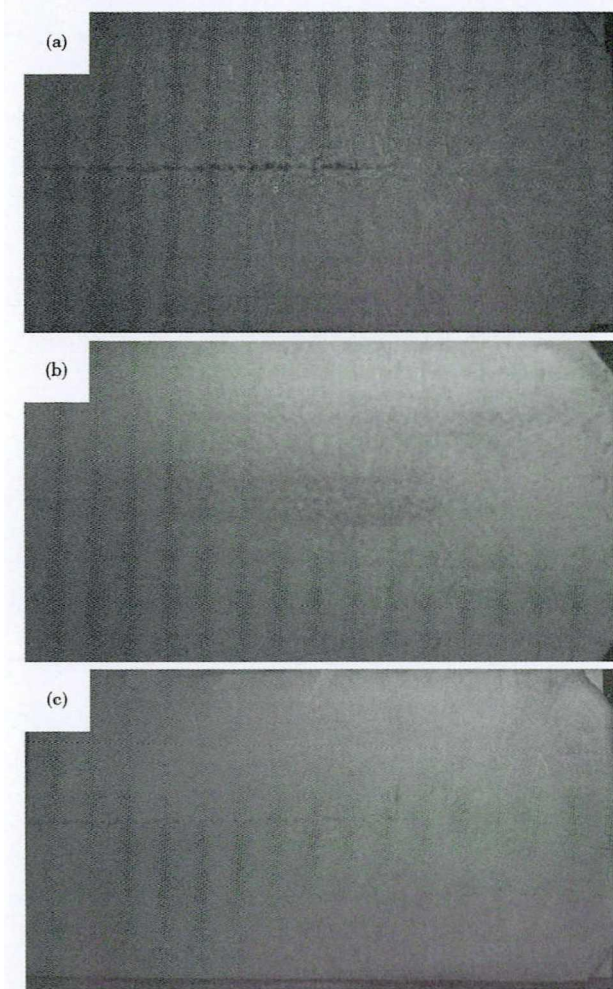


图2 (a)方案(1),(b)方案(2)和(c)方案(3)缩孔消失连铸坯低倍组织形貌

Fig. 2 Macro structure morphology of shrinkage cavities disappeared position at tail slab with (a) scheme (1), (b) scheme (2) and (c) scheme (3)

连铸尾坯在结晶器内停留时间仅仅只有 120 s,远小于方案(2)的 300 s 时间,所以为了防止冷却能力不足导致连铸尾坯拉出结晶器时产生钢水上冒或者漏钢等事故,在无水封顶时,需要向结晶器内钢液中加入冷却方钢,强化冷却。

2.3 连铸尾坯表面横裂纹情况

对三种试验方案条件下,每次工艺试验的最后三块尾坯(长度 3 000 mm)进行表面横裂纹检验,每个方案进行了 10 次试验,所以每个方案检验连铸坯 30 块,表面横裂纹情况统计如表 5 所示:

由表 5 可知,方案(1)传统的打水封顶工艺 30 块连铸坯仅存在 1 块皮下裂纹,裂纹发生率 3.33%;而方案(2)低拉速无水封顶工艺,发现了 11 块连铸坯表面裂纹,裂纹发生率达到 36.6%,其中还有一块肉眼可见的表面裂纹。对于方案(3)高拉速不停机无水封顶模式,没有发现连铸坯表面裂纹。

对于同样的钢种,在生产工艺条件基本相同的条件下,不同的封顶工艺,连铸坯的表面质量产生了较大差别。探讨其原因,与连铸尾坯低拉速运行的时间长短导致的连铸坯表面温度的高低有关。如图 1 所示,对于方案(1),拉速 ≤ 0.2 m/min 的时间约 250 s,方案 2,拉速 ≤ 0.2 m/min 的时间约 330 s,而方案 3,最低拉速提高至了 0.4 m/min,没有进入 0.2 m/min 低拉速范围。从三种不同封顶方案的低拉速 (≤ 0.2 m/min) 运行时间结合连铸坯表面裂纹

的检验结果,实践证明,拉速 ≤ 0.2 m/min 持续时间超过 4 min 后,含 Nb 钢连铸坯进入矫直区时表面温度 < 900 °C,进入第三脆性区,Nb(C,N)等在晶界析出,会进一步降低钢的高温塑性,在矫直过程中受到矫直应力作用,最终产生了连铸坯表面横裂纹。

3 结论

(1)传统的打水封顶,低拉速无水封顶以及高拉速无水封顶工艺都可以满足连铸生产安全的需求。

(2)传统的打水封顶工艺,连铸尾坯内部质量较差,在距离尾部 2 m 范围内存在严重的中心缩孔,而低拉速无水封顶和高拉速无水封顶工艺连铸尾坯内部质量较好,将存在肉眼可见的缩孔的尾坯长度减小到了 900 ~ 1 100 mm。

(3)由于低拉速无水封顶工艺,拉速 ≤ 0.2 m/min 持续时间较长达到了 250 s,导致连铸坯表面温度降低,进入第三脆性区,含 Nb 钢连铸尾坯表面出现了表面横裂纹。

(4)拉速 0.4 m/min 不停机无水封顶工艺,不仅解决了传统打水封顶工艺内部质量差的问题,也解决了低拉速无水封顶工艺连铸尾坯表面横裂纹的问题。

河北省自然科学基金(E2017417008);河北工业职业技术学院科研项目(yzk2020005)资助

参考文献

- [1]刘金刚,郝宁,姜中行,等.中间包下挡墙溢流卷渣行为[J].北京科技大学学报,2010,32(7):850-854.
- [2]Qinfu Hou, Qiang Yue, Huanyang Wang, et al. Modelling of Inclusion Motion and Flow Patterns in Swirling Flow Tundishes with Symmetrical and Asymmetrical Structures [J]. ISIJ International, 2008, 48(6):787-792.
- [3]Liu J G, Yan H C, Liu L, et al. Water Model of Controlling Vortex in Tundish [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2006, 18(12):18-22.
- [4]王海奇,包燕平,唐德池,等.中间包内吹气与卷渣行为的水模拟研究[J].钢铁钒钛,2010,31(2):49-52.
- [5]Yuji Miki, Hidenari Kitaoka, Nagayasu Bessho, et al. Inclusion Separation from Molten Steel in Tundish with Rotating Electromagnetic Field [J]. Tetsu-to-Hagane, 1996, 82(6):498-503.
- [6]Zhan S H, Qu J P, Xiao Z Q. Numerical Simulation on Gas-liquid Two Phase Flow in Continuous Casting Tundish with Bottom Gas Blowing [J]. Chinese Journal of Process Engineering, 2005, 5(3):232-238.
- [7]Zhang C J, Zhao T C, Ai L Q. Mathematical Simulation of Steel Flow and Trajectory of Inclusion in FTSC Tundish [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(28):1015-1020.
- [8]高攀,田志红,崔阳,等.钢非稳态浇铸铸坯洁净度分析[J].钢铁,2012,47(7):31-35.
- [9]彭其春,于学森,熊伟,等.不同浇铸阶段低碳钢连铸板坯洁净度研究[J].中国冶金,2012,22(8):17-21.
- [10]孙彦辉,蔡开科,赵长亮.非稳态浇注操作对连铸坯洁净度影响[J].钢铁,2008,43(1):22-25.
- [11]Zhang Qiaoying, Wang Litao, Wang Xinhua. Influence of Casting Speed Variation during Unsteady Continuous Casting on Non-metallic Inclusions in IF Steel Slabs [J]. ISIJ International, 2006, 46(10):1421-1426.
- [12]薛文辉,吴华章,宋满堂.非稳态浇铸对板坯质量影响的研究[J].炼钢,2009,25(6):56-58.
- [13]张川,黄晔华,阎建兵.宽厚板连铸机板坯切割长度计算模型与应用[J].冶金自动化,2007,1(1):27-30.
- [14]曹磊,王国连.板坯连铸机无水封顶技术的开发与应用[J].炼钢,2017,33(6):47-50.

曹磊(1984-),男,硕士,2010年东北大学毕业,高效炼钢连铸研究。E-mail:672908254@qq.com

收稿日期:2020-11-12