

Nb-V-Ti 微合金低碳钢 Q550D 250 mm × 1 820 mm 连铸板坯角部横裂纹的控制工艺

曹磊 王国连 史志强 秦登平 郑翠军
(秦皇岛首秦金属材料有限公司, 秦皇岛 066000)

摘要 分析了 Q550D 钢 (/% : 0.15C, 0.25Si, 1.40Mn, $\leq 0.010P$, $\leq 0.002S$, 0.03Nb, 0.06V, 0.015Ti, 0.020Al) 连铸板坯角部横裂纹, 得出角部横裂纹产生于结晶器内, 并进一步扩展于二冷区, 另外, 在弯曲段 (Ⅲ脆性区) 外弧铸坯受拉应力, 也是造成外弧角部横裂纹产生的重要原因。通过降低结晶器宽面水流量 200 L/min, 窄面 20 L/min, 对弧精度从 ± 0.5 mm 提高至 ± 0.3 mm, 振幅和振频分别从 4 ~ 5 mm 和 130 ~ 136 opm 改进至 3.6 ~ 4.5 mm 和 140 ~ 146 opm, 结晶器锥度从 0.9% ~ 1.0% 增至 1.0% ~ 1.1%, 二冷工艺由边部自然冷却改进为喷嘴冷却, 钢中氮含量由 $\leq 60 \times 10^{-6}$ 降至 $\leq 40 \times 10^{-6}$ 等工艺措施, 角部裂纹发生率大幅度降低。

关键词 Nb-V-Ti 微合金低碳钢 Q550D 板坯 角部横裂纹 控制措施

Control Measures of 250 mm × 1 820 mm Casting Slab Corner Transverse Cracks of Nb-V-Ti Micro-Alloying Low-Carbon Steel Q550D

Cao Lei, Wang Guolian, Shi Zhiqiang, Qin Dengping and Zheng Cuijun
(Qinhuangdao Shouqin Metal Material Co Ltd, Qinhuangdao 066000)

Abstract The casting slab corner transverse cracks of steel Q550D (/% : 0.15C, 0.25Si, 1.40Mn, $\leq 0.010P$, $\leq 0.002S$, 0.03Nb, 0.06V, 0.015Ti, 0.020Al) have been analyzed to get the corner transverse cracks form in mold and further develop at secondary cooling area, besides at bending part (Ⅲ brittle zone) of slab, the tensile-stress action of outer face of slab is also an important factor for corner cracking. With the process measures including decreasing water flow rate of width face of mold by 200 L/min and of narrow face by 20 L/min, improving precision of arc each other from ± 0.5 mm to ± 0.3 mm, improving the amplitude and vibration frequency respectively from 4 ~ 5 mm and 130 ~ 136 opm to 3.6 ~ 4.5 mm and 140 ~ 146 opm, increasing the mold taper from 0.9% ~ 1.0% to 1.0% ~ 1.1%, improving edge natural cooling at secondary section to nozzle cooling, and decreasing nitrogen content in steel from $\leq 60 \times 10^{-6}$ to $\leq 40 \times 10^{-6}$, the occurring rate of corner cracks markedly decreases.

Material Index Nb-V-Ti Microalloying Low-Carbon steel Q550D, Casting Slab, Corner Transverse Crack, control Measure

外弧角部横裂纹是宽厚板连铸坯常见的铸坯缺陷, 它属于晶间裂纹, 且常常发生在连铸坯皮下, 被氧化铁层覆盖, 难以发现, 只能通过火焰清理方式进行挽救。不仅增加了连铸坯精整检查的工作量, 减缓了连铸坯的物流周转速度, 而且严重影响了轧制钢板的表面质量, 造成改判率和生产交付的不可控。国内外学者对连铸坯角部横裂纹进行了大量研究^[1-4], 但是研究重点主要针对连铸坯内弧角部横裂纹, 针对板坯外弧角部横裂纹的研究较少^[5]。

1 外弧角部横裂纹的检验和形成机制

图 1 是 Q550D 钢 (/% : 0.15C, 0.25Si, 1.40Mn, $\leq 0.010P$, $\leq 0.002S$, 0.020Al, 0.03Nb, 0.06V, 0.015Ti) 250 mm × 1 820 mm 连铸坯角部横裂纹与角部横裂轧制后在钢板表面形貌。连铸坯角部皮下裂纹一般分布在从表皮往里 20 mm 左右的范围内,

并与表面相垂直, 大部分靠角部附近, 通常在振痕波谷处, 裂纹长度通常为 5 ~ 30 mm, 裂纹宽度 1 ~ 2 mm, 裂纹深度 2 ~ 5 mm。连铸坯角部横裂纹缺陷在后续钢板轧制过程中无法焊合, 会传至钢板表面, 方向不规则, 一般与钢板边部有一定夹角。

1.1 钢种高温延塑性

连铸坯表面裂纹形成的原因一方面取决于连铸坯形成过程中, 坯壳的受力状况 (类型、方向和大小), 另一方面则取决于钢种高温下的机械性能, 主要是高温延塑性^[6]。研究发现, 采用 Gleeble3500 热模拟试验机测量的断面收缩率小于 40% 的温度区域, 是钢种的脆性区域, 铸坯在该温度区域承受弯曲、热和机械应力容易形成横裂纹^[7]。

1.2 钢中析出物对钢种高温延塑性影响

国内钢厂宽厚板连铸机生产 250 mm × 1 820 mm

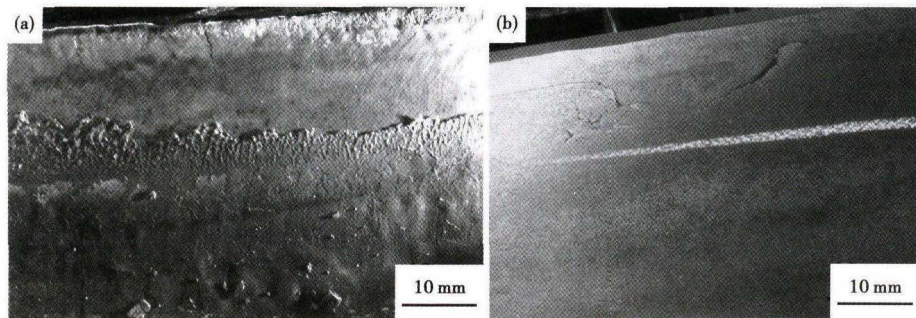


图 1 Q550D 钢(a)连铸坯和(b)钢板宏观裂纹形貌

Fig. 1 Macro cracks morphology of casting slab (a) and plate (b) of steel Q550D

断面的含有 Nb、V、Ti 等微合金钢连铸坯外弧角裂纹发生率是普通碳素钢的 4 倍。这是因为, Nb、V、Ti 等元素都有明显扩大钢的脆性区的趋势^[8], 如果结晶器以及弯曲段部分铸坯冷却工艺不合理, 很容易使进入弯曲段的连铸坯角部进入低温脆性区, 在弯曲拉应力作用下产生外弧角裂纹。

1.3 连铸板坯外弧角部横裂纹形成原因

通常认为铸坯外弧皮下角部横裂纹形成于结晶器内铸坯振痕的低谷处^[9-10]。因为连铸坯波谷处的传热不良、冷却速度较低, 相应凝固壳较薄且凝固组织较其他部位要粗大, 粗化的组织本身强度低些, 加上粗化的组织又易造成沿奥氏体晶界产生析出物, 最终导致此处连铸坯高温下的塑性降低, 拉坯过程当坯壳与结晶器之间的摩擦力超过一定限度后, 沿振动波纹谷部凝固壳较薄弱部位便有微细横裂纹产生。

由于宽厚板连铸机喷淋宽度的限制和连铸坯角部二维传热的影响, 连铸坯的角部更容易因为冷却不均匀形成较大热应力, 使已产生的微细横裂纹进一步扩展。

当弯曲段铸坯外弧角部处于钢的第三脆性温度区间时, 在弯曲张力的作用下, 铸坯的外弧边角部会产生横裂, 在结晶器内产生的微细裂纹也会扩大形成较严重的皮下横裂纹缺陷。板坯越宽, 其宽面与角部的温差越大, 高温延塑性能的差别也越大, 使铸坯更容易发生角部外弧横裂纹缺陷。

2 外弧角部横裂纹的控制

2.1 结晶器冷却工艺

部分角部横裂纹起源于结晶器, 根据钢种在结晶器内的凝固特性, 降低结晶器冷却强度, 控制铸坯在结晶器内的收缩量, 均匀坯壳角部在结晶器内的传热十分关键。另外, 结晶器宽面与窄边冷却水流量的匹配是否合适也会影响连铸坯角部的凝固。采

用弱冷方式控制结晶器宽面和窄面水流量分别为 4 600 ~ 4 800 L/min 和 380 ~ 400 L/min, 宽面和窄面水槽内水流速度分别为 6.2 ~ 6.7 m/s 和 6.1 ~ 6.5 m/s; 结晶器水进口温度控制在 27 ~ 31 °C。改进前后板坯连铸参数对比如表 1 所示。

表 1 改进前后板坯连铸的工艺参数对比

Table 1 Comparison of slab casting process parameters before and after improvement

项目	改进前	改进后
结晶器水流量	宽面 4 800 ~ 5 000 L/min; 窄面 400 ~ 420 L/min	宽面 4 600 ~ 4 800 L/min; 窄面 380 ~ 400 L/min
对弧精度	±0.5 mm	±0.3 mm
振动参数	振幅控制在 4 ~ 5 mm; 振频控制在 130 ~ 136 opm	振幅控制在 3.6 ~ 4.5 mm; 振频控制在 140 ~ 146 opm
结晶器锥度	0.9% ~ 1.0%	1.0% ~ 1.1%
二次冷却工艺	边部自然冷却	增加弯曲段、扇形 1 段至扇形 6 段弧形段边部冷却喷嘴, 对铸坯边部实施强冷
钢水氮含量	≤60 × 10 ⁻⁶	≤40 × 10 ⁻⁶

2.2 结晶器-弯曲段-扇形 1 段对弧精度控制

由于出结晶器下口的连铸坯壳厚度只有 17 ~ 25 mm, 故结晶器与弯曲段的对弧精度如何, 将直接影响坯壳(尤其是角部)所受应力大小。另据测算, 如果弯曲段上口错位 1 mm, 就能影响下部与扇形 1 段 0.1 mm 的顺弧偏差, 因此必须精确控制对弧精度, 保证结晶器、弯曲段、扇形 1 段的对弧精度控制在 ±0.3 mm 以内。设备对弧精度的保障需要从设备离线准备开始严格要求, 对弧精度不符合 ±0.3 mm 时需要通过加减垫片调整对弧, 每半月需要对设备对弧状况进行测量调整, 从而保障设备精度在可控范围内。

2.3 结晶器振动参数控制

通过现场实践调研发现, 振幅控制在 3.6 ~ 4.5 mm; 振频控制在 140 ~ 146 opm; 负滑脱时间控制在 0.2 s 以内可以有效减少振痕深度, 从而较少角部横裂纹产生。

2.4 结晶器锥度设置

锥度设置过大, 不仅造成结晶器铜板磨损严重, 还会增加坯壳与结晶器的摩擦力, 导致角部应力集

中,从而促使角部横裂纹产生;锥度设置过小,坯壳冷却过程中容易导致与结晶器之间产生气隙,从而影响坯壳的凝固,造成角部凹陷,甚至产生角部纵裂纹,严重时产生偏离角纵裂漏钢。根据钢厂宽厚板连铸坯连铸机现场生产试验,当结晶器锥度为1.0%~1.1%时可以有效减少角部裂纹发生率同时可以有效避免角部凹陷和纵裂发生率。

2.5 连铸坯二次冷却工艺控制

铸坯出结晶器后经过垂直段时,将连铸坯外弧边部温度冷却到第三脆性塑性温度区低温下线以下,通过强冷避开钢的脆性温度区间,以避免角部裂纹产生。根据此原理,对连铸坯二冷区外弧喷嘴进行布置方式的改进。增加弯曲段、扇形1段至扇形6段弧形段边部冷却喷嘴,对铸坯边部实施强冷。具体布置方式如图2所示,在连铸坯出结晶器后至矫直区前的弯曲段、扇形1段、扇形2段、扇形3段、扇形4段、扇形5段、扇形6段铸坯两侧边部沿浇注方向每排增加两个冷却喷嘴。增加的边部冷却水通过单独水路控制,边部冷却水量控制按照中心区域水流量的1.1~1.3倍进行控制。将铸坯外弧角部温度控制在700℃以下。

2.6 钢水氮含量控制

铸坯角部横裂纹的出现与AlN或VCN,NbCN在奥氏体晶界析出有关。由于它们在晶界的聚集,阻止了金属热变形过程中晶界的移动,晶界产生应力集中,当该应力值超过晶粒间的亲和力时,即产生了晶界裂纹。根据宽厚板连铸坯生产实际,钢水中氮含量应控制在 $\leq 40 \times 10^{-6}$ 。

2.7 进行火焰清理

为了将外弧角横裂的损失降至最低,可以强化

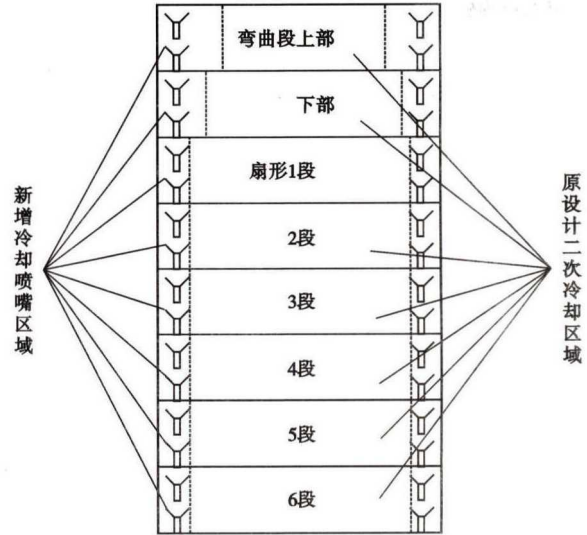


图2 Q550D钢250 mm × 1 820 mm连铸坯二冷区外弧喷嘴布置图

Fig. 2 Layout diagram of outer arc spray nozzles of 250 mm × 1 820 mm casting slab of steel Q550D at secondary cooling zone

对有角部横裂铸坯的火焰清理。每浇次抽查前3支、中间3支、最后3支铸坯进行翻坯检查,如果发现外弧角横裂,则相应铸坯全部下线检查清理,可以有效减少裂纹废品缺陷,从而提高产品合格率。

3 结论

(1)微裂纹产生于结晶器内,通过选择合适的结晶器冷却水量、水流速度、调整水温、结晶器锥度等方法,控制一次冷却,可以大幅度地降低外弧角部横裂的发生率。

(2)将结晶器、弯曲段及扇形1段的对弧精度控制在 ± 0.3 mm以内,以减少坯壳所受应力。

(3)通过强冷避开钢的第三脆性温度区间,可以有效防止角部裂纹产生。

参考文献

- [1] Kato T, Ito Y, Kawamolo M, et al. Prevention of Slab Surface Transverse Cracking by Microstructure Control [J]. ISIJ International, 2003, 43 (11): 1742-1750.
- [2] 王新华, 王文军, 刘新宇, 等. 减少含铌、钒、钛微合金化钢连铸板坯角部横裂纹的研究[J]. 钢铁, 1998, 33(1): 22-25.
- [3] 魏励, 杨海滨. 连铸含铌钢板坯表面横裂纹原因分析和措施[J]. 中国冶金, 2008, 18(12): 17-21.
- [4] Mintz B. Influence of Nitrogen on Hot Ductility of Steels and its Relationship to Problem of Transverse Cracking [J]. Iron Making and Steel Making, 2000, 27(5): 343-347.
- [5] 王明林, 杨春政, 陶红标, 等. 微合金化钢连铸坯角部横裂纹形成机制[J]. 钢铁, 2012, 47(10): 27-33.
- [6] 陈雷. 连续铸钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000: 125.
- [7] 王新华. 减少铌钒钛微合金化钢连铸坯角部横裂纹的研究[J]. 钢铁, 1998, 33(1): 22-25.
- [8] Comineli O, Abushosha R, Mintz B. Influence of Titanium and Nitrogen on Hot Ductility of C-Mn-Nb-Al Steel [J]. Materials Science and Technology, 1999, 15(9): 1058-1068.
- [9] Sengupta J, Thomas B G, Shin H J, et al. A new Mechanism of Hook Formation during Continuous Casting of Ultralow Carbon Steel Slabs [J]. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 2006, 37(5): 1597-1611.
- [10] Brimacombe J K, Sorimachi K. Crack Formation in the Continuous Casting of Steel [J]. Metallurgical Transactions B, 1977, 8(2): 489-505.

曹磊(1984-),男,硕士(2010年东北大学),工程师,2008年武汉科技大学(本科)毕业,钢铁冶金研究。

E-mail: 2290566367@qq.com

收稿日期: 2017-04-10