

包钢 CSP 生产线耐大气腐蚀钢带 Q450NQR1 试制

贾瑞杰¹, 刘政峰¹, 张 玮¹, 黄 利², 岳祎楠²

- 内蒙古包钢钢联股份有限公司薄板坯连铸连轧厂, 内蒙古 包头 014010;
- 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 根据包钢 CSP 生产线特点, 采用合理的成分设计, 通过对冶炼到热轧工序工艺方案的制定, 试制 450 MPa 级别耐大气腐蚀钢带, 利用 Cu、Cr、Ni 等合金元素来获得良好耐腐蚀性能, 通过 Ti 元素微合金化和控轧控冷实现晶粒细化及析出强化。对优化后的耐大气腐蚀钢带 Q450NQR1 的显微组织和力学性能进行了检测分析, 结果表明, Q450NQR1 钢带显微组织、晶粒度和力学性能均满足铁道用钢 Q450NQR1 标准要求, 相对腐蚀率为 47.4%。

关键词: CSP; 控轧控冷; Q450NQR1; 耐腐蚀性能

中图分类号: TG142.1

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2024)06-0055-04

Trial Production of Weather Resistant Steel Strip Q450NQR1 with CSP Production Line of Baotou Steel

Jia Rui-jie¹, Liu Zheng-feng¹, Zhang Wei¹, Huang Li², Yue Yi-nan²

- CSP Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
- Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: According to the characteristics of CSP production line of Baotou Steel, the trial production of 450 MPa grade weather resistant steel strip is carried out through adopting reasonable component design and formulating the process plan from processes of smelting to hot rolling. The good corrosion resistance is obtained with such alloy elements as Cu, Cr and Ni as well as grain refinement and precipitation strengthening are realized through microalloying of Ti and controlled rolling and controlled cooling. The microstructure and mechanical properties of optimized weather resistant steel strip Q450NQR1 are tested and analyzed. The results showed that the microstructure, grain size and mechanical properties of Q450NQR1 steel strip could meet the requirements of standard for railway steel Q450NQR1 as well as relative corrosion rate was 47.4%.

Key words: CSP; controlled rolling and controlled cooling; Q450NQR1; corrosion resistance

随着铁路车厢用钢升级换代的要求, 高强度耐大气腐蚀钢 Q450NQR1 已经广泛应用于 C70 敞车,

国内多家钢铁企业也陆续开展了高强度耐大气腐蚀钢 Q450NQR1 的研发工作。包钢稀土钢板材厂

2 250 mm 热轧生产线成功生产了高强度耐大气腐蚀 Q450NQR1 钢带,并且顺利通过国内 18 家铁路车辆生产制造厂家的联合资质认证^[1]。

由于 Q450NQR1 钢带自身具备高强度、高韧性、抗疲劳、抗腐蚀、耐磨、耐候等综合性能,近些年厚度 5.0 mm 以下规格也被广泛用于铁路集装箱的制造。随着“一带一路”战略的深入推进,中欧班列、中亚班列的开行,使铁路用集装箱制造业迎来了良好的发展空间,为扩大 CSP 生产线产品结构,拓宽市场,包钢利用 CSP 生产线试制耐大气腐蚀 Q450NQR1 热轧钢带。

1 包钢 CSP 生产线试制 Q450NQR1 钢带的优势

(1) 结晶器在线调宽和动态液芯压下技术的应用。结晶器在线调宽主要特点是在不断浇的情况下通过结晶器窄面的移动(最大调宽量为 120 mm),在线调整铸坯宽度得到所需尺寸,可提高连铸机的

生产能力和效率。动态液芯压下技术可通过扇形段松动侧框架整体压下,获得 57 mm 和 72 mm 厚度铸坯,从而获得最终产品需要的压缩比,增加了成品的覆盖面,保证了产品质量。

(2) CSP 生产线连铸冷却速率较高,因而连铸坯低倍组织中粗大枝晶数量减少,二次枝晶间距较短,原始铸态组织晶粒较细且分布均匀,为产品性能稳定提供保障。

(3) CSP 工艺属于铸坯热态直接轧制,减少了传统热连轧工艺中铸坯二次加热环节,有效减少了因铜在晶界富集导致的龟裂、边裂等缺陷。由于其工艺流程短,作业率高,加工成本低,更适合薄规格耐大气腐蚀钢带生产。

2 耐大气腐蚀 Q450NQR1 钢带试制

中华人民共和国铁道用耐大气腐蚀钢带 Q450NQR1 行业标准(TB/T 1979—2014)^[2]化学成分及力学性能要求见表 1 和表 2。

表 1 Q450NQR1 钢带化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni
≤0.12	≤0.75	≤1.50	≤0.025	≤0.008	0.2~0.55	0.30~1.25	0.12~0.65

注:为了改善钢材性能,可以加入 Nb、V、Ti 等微量合金元素,这些合金的加入量总和不应超过 0.22%。

表 2 Q450NQR1 钢带力学性能

厚度/mm	R_{eL}/MPa	R_m/MPa	$A/\%$	180° 冷弯试验($D = a$)	晶粒度/级	相对 Q345B 腐蚀速率/%
≤6.0	≥450	≥550	≥22	完好	>7.0	≤55

2021 年 9 月份,包钢 CSP 生产线结合铁路集装箱市场需求和自身产线工艺特点,对耐大气腐蚀钢带 Q450NQR1 主要规格 5.8 mm × 1 275 mm、4.5 mm × 1 275 mm、3.0 mm × 1 275 mm、2.75 mm × 1 275 mm 进行了试制生产。

2.1 成分设计

表 3 为 Q450NQR1 钢带的设计成分,为了获得良好的耐大气腐蚀性能、力学性能和焊接性能,采用低 C、低 S、低 P,添加 Cu、Cr、Ni 等耐大气腐蚀元素。

为了保证产品力学性能,降低薄规格轧制负荷,主要加入价格低廉但强化效果显著的 Ti 元素,利用 Cu、Cr、Ni 等合金元素实现在大气腐蚀环境下耐候钢的均匀钝化,利用 Ti 元素微合金化及控轧控冷实现晶粒细化和析出强化,从而提高耐候钢的强韧性。另外采用低 C 设计不但保证了产品良好的焊接性能,而且较低的碳含量可限制珠光体组织及其他碳化物的形成,保证形成均匀组织,从而避免异相电位差引起原电池腐蚀,达到提高钢的耐腐蚀性的目的^[1]。

表 3 Q450NQR1 钢带设计成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Ti
≤0.08	≤0.3	0.5~0.7	≤0.020	≤0.005	0.2~0.4	0.3~0.7	0.12~0.40	0.045~0.065

2.2 生产工艺过程

耐大气腐蚀钢带 Q450NQR1 的生产工艺流程如下。

铁水预处理→转炉顶底复合吹炼→LF 精炼处理→薄板坯连铸→辊底式加热炉加热→7 机架热连轧→层流冷却→卷取→检验→包装→入库。

由于加入强化元素 Ti, 冶炼时要注意 N、O 含量控制, 过多的 N、O 会形成不良的化合物, 使得 TiC 的形成量减小, 钢带的有效 Ti 含量下降, 影响其强

化机制。因此在冶炼过程中应将 O 含量控制不大于 0.004 0%、N 含量控制不大于 0.005 0%。还需要严格控制加热炉炉内气氛以及升温速度, 出炉温度应控制在 1 060 ~ 1 090 °C 之间, 减少铜在晶界及铸坯表面富集。另外为了板形良好, 性能稳定, 细化奥氏体晶粒, 避免出现混晶, 连轧机 F1 轧制压下量不小于 42%, F2 轧制压下量不小于 35%。耐大气腐蚀 Q450NQR1 钢带主要轧制工艺参数见表 4。

表 4 Q450NQR1 钢带主要轧制工艺参数

厚度/mm	出炉温度/°C	F1 压下量/%	F2 压下量/%	终轧温度/°C	冷却模式	卷取温度/°C
≤4.0	1 070 ± 20	≥42	≥35	890 ± 20	前集中	580 ± 20
4.0 ~ 6.0	1 070 ± 20	≥45	≥37	880 ± 20	前集中	580 ± 20

终轧温度是决定钢带组织状态的关键参数, 高的终轧温度可推迟 TiC 在奥氏体中的形变诱导析出, 增加卷取过程中 TiC 的析出量; 低的终轧温度可增加奥氏体未再结晶的总变形量, 细化晶粒且改变了析出物分布, 使得 Ti 在奥氏体晶界和晶内变形带析出, 减少了铁素体中的析出量, 最终卷取后 TiC 的析出量减小, 析出效果减弱, 所以将终轧温度设定为 880 ~ 890 °C。目标卷取温度设定除了要考虑相变组织外, 更重要的是保证纳米级 TiC 在铁素体中充分析出, 在 560 ~ 600 °C 之间第二相粒子沉淀析出强化对总的屈服强度的增量贡献较大, 可以有效地提高产品机械性能。

3 产品实物质量

3.1 力学性能

由表 5 可知, 试制厚度为 5.8 mm、4.5 mm、3.0 mm、2.75 mm 的 Q450NQR1 钢带力学性能符合产品标准要求。对试制 Q450NQR1 钢带进行了 180° 弯曲试验, 试样完好无裂纹, 产品具有良好的冷成形性能。为了验证试制 Q450NQR1 钢带抗冲击性能, 在厚度为 5.8 mm 的钢带取样, 加工成 5 mm × 10 mm × 55 mm 的试样, 进行了 -40 °C 低温冲击性能检测, 平均冲击功为 90 J, 达到了 -40 °C 冲击功不小于 60 J 的要求, 试制钢带具有良好的冲击韧性。

为了确保钢带整体性能稳定, 对典型厚度进行了头部、尾部和带钢横断面性能跟踪。由图 1 可见, 试制厚度规格头部、尾部性能偏差小, 屈服强度偏差

为 2 ~ 12 MPa, 抗拉强度偏差为 1 ~ 13 MPa, 延伸率偏差为 0.5 ~ 1 个百分点。对厚度 5.8 mm 钢带进行横向各位置力学性能稳定性跟踪, 带钢屈服强度横向偏差不大于 1.13%, 抗拉强度横向偏差不大于 0.8%, 延伸率横向偏差不大于 2%, 力学性能波动小、稳定性高。

表 5 试制的 Q450NQR1 钢带各厚度力学性能及标准要求

厚度/mm	R_{el} /MPa	R_m /MPa	A /%
5.8	516 ~ 528	588 ~ 598	23.0 ~ 23.5
4.5	548 ~ 551	617 ~ 630	24.0 ~ 25.0
3.0	537 ~ 548	605 ~ 617	23.5 ~ 24.0
2.75	537 ~ 539	614 ~ 615	25.0 ~ 25.5
标准	≥450	≥550	≥22

3.2 显微组织和夹杂物分析

对试制厚度为 5.8 mm、4.5 mm、3.0 mm、2.75 mm 钢带取样进行显微组织和夹杂物分析。由图 2 可知, 各厚度钢带组织为铁素体 + 珠光体, 晶粒细小均匀, 图 2(a)、(b) 晶粒度为 11 级, 图 2(c)、(d) 晶粒度为 12 级, A 类、B 类、Ds 类夹杂物评级均为 0.5 级, 钢质纯净, 符合产品标准要求。

3.3 耐大气腐蚀性

本文中的周期浸润耐腐蚀试验标准执行 TB/T 2375—1993。试验溶液为 NaHSO₃ 溶液, 溶液浓度为 0.01 mol/L, pH 值为 4.4 ~ 4.8; 试验温度目标值设定为 45 °C, 湿度目标值设定为 70%。整个试验周期时间为 60 ± 3 min, 试样浸润的时间为 12.0 ±

1.5 min, 试验过程的测试时间为 72 h。选用的对比试样为标准要求的 Q345B 钢种, 试样经过烘烤后表面温度为 70 ± 10 °C。试验结果如表 6 所示, 耐大气

腐蚀钢带 Q450NQR1 相对腐蚀速率为 47.4%, 达到了技术条件要求。

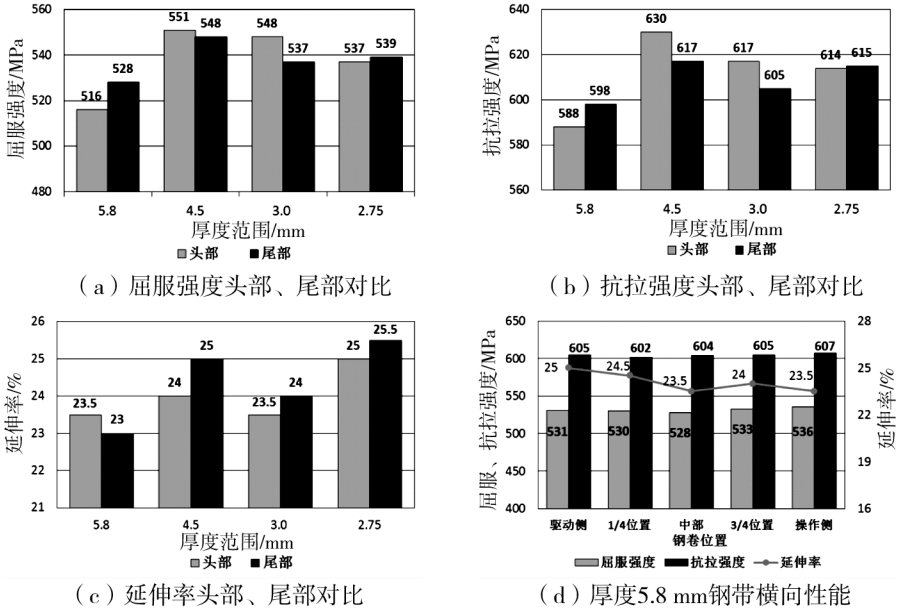


图 1 耐大气腐蚀钢带 Q450NQR1 力学性能

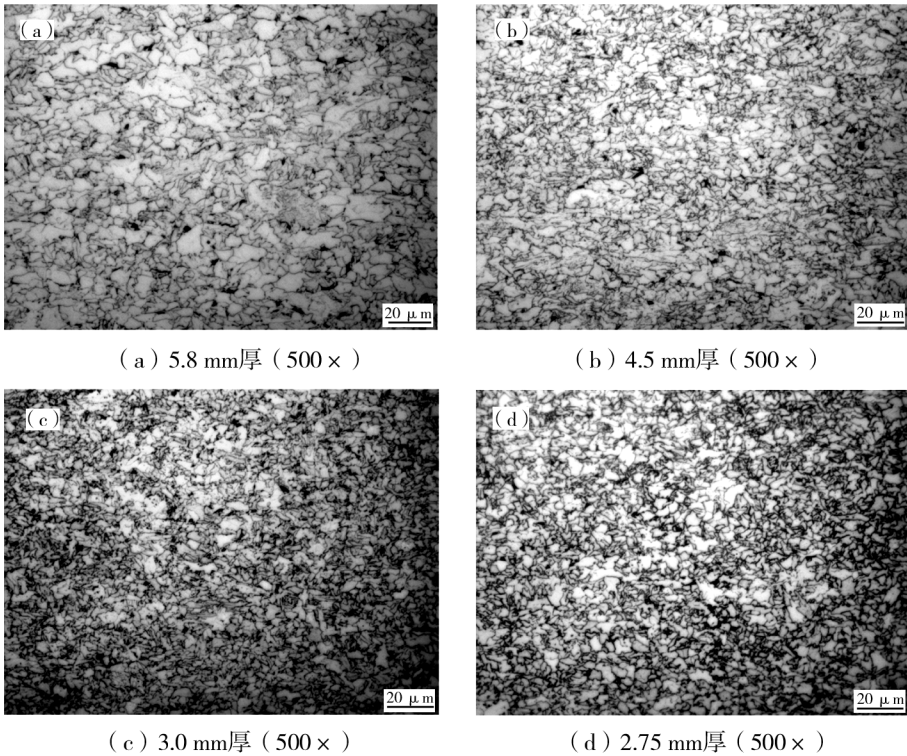


图 2 耐大气腐蚀钢带 Q450NQR1 显微组织

- [2] 王海华,郑晓伟. 高强度螺栓用 35CrMo 免退火冷镀锌热轧盘条的研制[J]. 特殊钢,2023,44(2):33-36.
- [3] 朱祥睿,罗新中,李富强. ML20MnTiB-1 合金冷镀锌螺栓镢头开裂原因分析[J]. 南方金属,2023(3):40-42.
- [4] 成旭东. ML08Al 冷镀锌生产实践[J]. 中国冶金,2011,21(12):42-44.
- [5] Francisco B, Macedo D S. Dual-Phase Steel for 8.8 Strength Class Fasteners[J]. Wire Journal International,1993(9):70-73.
- [6] 陈继林,马洪磊,霍立伟. Cr-Mo-V 系冷镀锌表面脱碳演变规律的研究[J]. 钢铁钒钛,2022,43(6):153-160.
- [7] 黄宝,何立波,邢娜. 日本生产高品质冷镀锌品种现状[J]. 上海金属,2013,35(2):46-50.
- [8] Cook W T, Williams R G, Albiston J N. Cold Forging for High Strength Lower Cost Steel Fasteners[J]. Iron-Making and Steel-Making,1995(22):117-118.
- [9] Walper E, Kohler H. High-Tensile Bolts without Heat Treatment[J]. Steel Research,1993(8):437-440.

(上接第 58 页)

表 6 Q450NQR1 钢带周期浸润试验结果

样品名称	腐蚀失重量 /(g·m ⁻²)	腐蚀失重率 /(g·m ⁻² ·h ⁻¹)	相对腐蚀 速率/%
Q450NQR1	146	2.05	47.4
Q345B	308	4.32	100

4 结论

(1) 包钢 CSP 生产线试制的耐大气腐蚀钢带 Q450NQR1 采用 C-Mn-Ti-Cu-Cr-Ni 合金体系设计,通过微合金化和控轧控冷工艺,试制钢带各项性能符合标准要求。

(2) 厚度为 5.8 mm、4.5 mm、3.0 mm、2.75 mm 耐大气腐蚀钢带 Q450NQR1 显微组织为铁素

体+珠光体,晶粒均匀细小,晶粒度为 11~12 级,A 类、B 类、Ds 类夹杂物评级均为 0.5 级,钢质纯净,符合标准要求。

(3) Q450NQR1 试制规格钢带具有稳定的头部、尾部及横向力学性能,具有良好的冷成形和冲击性能,Q450NQR1 钢带相对腐蚀率为 47.4%,满足产品标准要求。

参 考 文 献

- [1] 黄利. 铁路货车用钢 Q450NQR1 研究与试制[J]. 包钢科技,2016,42(5):42-44.
- [2] TB/T 1979—2014,铁道车辆用耐大气腐蚀钢[S].