

高强度高耐蚀性热轧卷板组织和性能研究

白海瑞, 袁晓鸣

(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: 依据铁路车厢用高强度高耐蚀性热轧卷板的技术要求, 包钢进行了自主研制开发。采用低碳 + 铜铬镍合金体系, 通过合适的控轧控冷工艺, 试验钢各项力学性能和耐腐蚀性能均满足技术要求。试制结果表明, 试验钢屈服强度为 550 ~ 580 MPa, 抗拉强度为 645 ~ 690 MPa, 断后延伸率为 20.0% ~ 22.0%, -40 °C 低温冲击吸收功为 202 ~ 255 J。试验钢室温显微组织为铁素体 + 珠光体 + 贝氏体, 具有优良的强韧性匹配。试验钢的平均腐蚀速率为 2.813 5 mm/a, Q235B 的平均腐蚀速率为 36.060 5 mm/a, 试验钢相对 Q235B 的腐蚀速率为 7.8%。

关键词: 高强度; 高耐蚀性; 组织; 性能

中图分类号: TG335.5; TG142.1

文献标识码: B

文章编号: 1009 - 5438(2023)04 - 0039 - 05

Study on Microstructure and Properties of Hot Rolled Coil with High Strength and Corrosion Resistance

Bai Hai - rui, Yuan Xiao - ming

(Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The independent research and development has been carried out by Baotou Steel based on the technical requirements of hot rolled coil with high strength and corrosion resistance for railway carriages. The mechanical properties and corrosion resistance of the test steel all meet technical requirements through adopting the system of low carbon + copper chromium nickel alloy and appropriate controlled rolling and controlled cooling processes. The trial production results showed that its yield strength was 550 ~ 580 MPa, tensile strength was 645 ~ 690 MPa, elongation after fracture was 20.0% ~ 22.0%, low - temperature impact absorbing energy at -40 °C was 202 ~ 255 J and microstructure at room temperature was ferrite + pearlite + bainite, which was with excellent matching of strength and toughness. Its average corrosion rate is 2.813 5 mm/a, while that of Q235B is 36.060 5 mm/a, so its corrosion rate is 7.8% of that of Q235B.

Key words: high strength; high corrosion resistance; microstructure; property

目前, 铁路货车使用较多的耐候钢牌号有 09CuPCrNi、09CuPTiRE 和 Q450NQR1 等。随着耐候钢逐渐应用于货车车厢, 使铁路货车车厢的耐腐蚀性能明显提高, 不但使车体维检修的周期延长, 而且使检修用工用时明显减少, 相当长一段时间内支持

我国铁路货车事业的发展。随着 Q450NQR1 型高强度耐候钢在 70 t 级货车上的大量应用, 其力学性能完全满足 70 t 级铁路货车的技术要求, 但其耐腐蚀性能较 09CuPCrNi 和 09CuPTiRE 提高不明显^[1], 不能满足大吨位货车车厢检修维修周期进一步延长

的技术要求。随着 27 t 轴重通用货车、30 t 轴重专用货车的研制开发,车厢钢不但要长期经受磨损腐蚀的影响,还要经受长期的复杂环境变化带来的腐蚀影响,而煤炭运输等恶劣条件下的腐蚀更加明显。因为煤中含有硫元素及其化合物,尤其硫的氧化物(SO_2 、 SO_3)在适宜的温度条件下将与大气中的水(H_2O)发生反应,生成硫酸(H_2SO_4)和亚硫酸(H_2SO_3),当其车厢基体材料表面直接接触,使材料基体表面腐蚀严重,加上运煤过程中多变的湿度、温度以及间断服役的特点,使腐蚀速度增加,车厢基体金属表面进一步恶化,甚至引起基体表面起壳和

大面积脱落,即使是耐候钢板也经受不住酸性溶液的腐蚀,影响敞车的使用寿命。综上所述,亟需开展新型高强度高耐蚀性铁路车厢用钢,同时满足下游用户的需求,增强包钢产品与国内外同类产品间的竞争力。

1 产品技术要求与开发设计

1.1 技术要求

铁路车厢用高强度高耐蚀性热轧卷板要求具有高强度、优异的冷成形性、高的低温冲击韧性、优异的耐大气腐蚀性能等特点,具体技术要求见表 1。

表 1 铁路车厢用高强度高耐蚀性热轧卷板技术要求

屈服强度 R_{eL} /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	延伸率 A /%	180 °C 冷弯试验 ($D = 2a$)	-40 °C 冲击功 /J	相对(Q345B) 腐蚀速率/%
≥450	550 ~ 750	≥18.0	无裂纹	≥60	≤30

1.2 化学成分设计

合理的化学成分设计是铁路车厢用高强度高耐蚀性热轧卷板组织和性能的有力保证。采用低碳成分设计,碳含量小于 0.10%,有利于提高焊接性能。试验钢中加入适量的铜元素和磷元素,可在钢板基体与锈层之间形成阻挡层,具有良好的保护作用(阻挡层与基体结合牢固)。同时磷作为去极化剂(阳极),可加速钢表面 Fe^{2+} 的氧化,利于钢材表面形成 FeOOH (非晶态羟基氧化铁)致密产物,从而提

高了表面锈层的阻抗。镍元素可以促进一些元素在钢中的扩散速度,从而使钢的自腐蚀电位向正方向移动,同时降低钢的临界相变温度。镍元素易在锈层中富集,阻碍 Cl^- 向基体扩散,可提高钢的耐蚀性^[2]。铬元素可以替代钢基体表面锈层 $\alpha - \text{FeOOH}$ 中铁元素,使 $\alpha - \text{FeOOH}$ 转变为 $\alpha - (\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x})\text{OOH}$,从而提高钢基体锈层阻碍阴离子扩散的能力,可以显著提高钢的耐蚀性。化学成分设计具体见表 2。

表 2 试验钢化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al ₁
≤0.10	≤0.50	≤1.50	≤0.015	≤0.005	≤1.30	≤0.60	≤0.60	0.02 ~ 0.05

1.3 轧制及冷却工艺设计

本钢种板坯经步进式加热炉加热保温后,进行轧制和冷却,加热温度为 $1\ 220 \pm 20$ °C,保温时间为 0.5 ~ 1.0 h。轧制和冷却工艺采用热机械控制工艺(TMCP)并匹配快速冷却,轧制工艺采用奥氏体完全再结晶区和非再结晶区两阶段轧制。第 I 阶段在奥氏体完全再结晶区轧制,此阶段影响高温奥氏体的晶粒大小,由于晶粒具有遗传性,高温奥氏体晶粒越小成品组织越均匀细小。此阶段轧制应采用大压下量,严格控制每道次的压下,保证变形的奥氏体晶粒再结晶,达到第 I 阶段结束后奥氏体晶粒均匀细

小的效果,终轧温度不低于 1 050 °C。第 II 阶段轧制在奥氏体非再结晶区,依据最终试验钢轧制厚度,中间坯的厚度应为试验钢轧制最终厚度的 2 ~ 3 倍,该阶段开轧温度不大于 950 °C,终轧温度应为 820 ~ 840 °C,试验钢经大道次反复压下,奥氏体被压长压扁,同时积累了大量的变形储能,为轧后的快速冷却做相变组织准备,从而提高试验钢的综合性能。第二阶段轧制结束后,需要在合适的温度条件下保温一定时间,在保温过程中试验钢中的微合金元素形成细小弥散的第二相^[3],优先析出于位错线,发挥钉扎位错的作用^[4],提高钢的强度。

2 结果与分析

2.1 力学性能

轧制三个厚度规格的试验钢,分别为 10 mm、12 mm、15 mm,各厚度规格试验钢试样均采用双样,检测值如表 3 所示。由表 3 可知,试验钢的屈服强度为 550 ~ 580 MPa,抗拉强度为 645 ~ 690 MPa,断后延伸率为 20.0% ~ 22.0%,各项拉伸力学性能指标均满足技术要求,且富余量适中。

三个厚度规格试验钢冲击性能和 180°弯曲性能检测值见表 4,可知 -40 °C 低温冲击功和冷弯性能均合格。试验钢低温冲击功远大于技术要求的 60 J,富余量较大,平均值范围为 202 ~ 255 J,冲击功

数值稳定波动小。

表 3 试验钢拉伸力学性能

钢板厚度 /mm	屈服强 R_{e1} /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	断后延伸率 A /%	屈强比
10	580	690	20.0	0.84
	585	675	21.0	0.87
12	570	680	20.5	0.84
	570	660	21.0	0.86
15	550	650	22.0	0.85
	555	645	21.0	0.86
技术要求	≥450	550 ~ 750	≥18.0	

表 4 试验钢低温冲击性能及冷弯性能

钢板厚度 /mm	-40 °C 冲击功 KV_2 /J				均值	180°弯曲试验 ($b \geq 20$ mm, $D = 2a$)
	单值 1	单值 2	单值 3	单值 4		
10	194	204	207	202	合格	
	241	246	243	243	合格	
12	237	235	222	231	合格	
	268	244	252	255	合格	
15	224	236	191	217	合格	
	256	243	234	244	合格	
技术要求				≥60	无裂纹	

12 mm 厚试验钢的冷弯照片如图 1 所示,可知试样弯曲表面和侧面完好无裂纹,满足技术要求。12 mm 厚试验钢的 -40 °C 低温冲击试样扫描电镜断口形貌如图 2 所示,可知该断口形貌呈韧窝状,韧窝大小相对均匀,尺寸深浅不一,为典型的韧性断裂特征。



图 1 12 mm 厚试验钢的冷弯照片

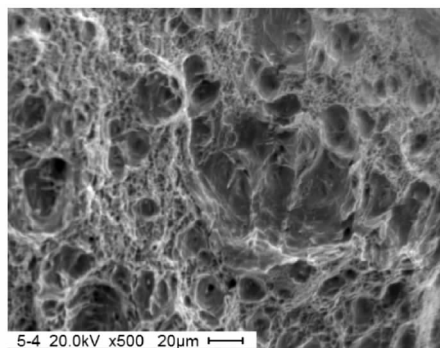


图 2 12 mm 厚试验钢的典型冲击断口形貌

2.2 显微组织

试验钢室温金相组织为铁素体(F) + 珠光体(P) + 贝氏体(B),分布均匀,组织细小,晶粒度约为 10 级,12 mm 厚试验钢室温金相组织如图 3 所示。用 Image pro plus 软件测得各组织比例,铁素体为 58.6%,珠光体为 5.2%,贝氏体为 34.2%。百分之五十以上的铁素体为试验钢贡献塑性和韧性,百

分之三十以上的贝氏体为试验钢强度的主要贡献者。同时试验钢钢质纯净,夹杂物较少,夹杂物照片如图 4 所示,评级为 Ds 类 1 级,综合使得试验钢具有优良强韧性匹配。

2.3 耐腐蚀性

试验钢耐腐蚀性采用对比全浸试验^[5],对比材料为同厚度规格的 Q235B,溶液为 20% 硫酸溶液,试验温度为 25 ℃,试验周期 24 h。试验钢和 Q235B 全浸试验过程试样照片如图 5 和图 6 所示。可见试验钢表面形成了比较致密的防护锈层,对试验钢的基体起到了很好的保护作用,阻碍了样品的进一步腐蚀,降低了试验钢的腐蚀速率。试验完成后计算腐蚀速率。计算公式为:

$$R = 8.76 \times 10^4 \times (M - M_1) \div S \div T \div \rho \quad (1)$$

式中: R 为腐蚀速率,mm/a; M 为试验前的试样质量,g; M_1 为试验后的试样质量,g; S 为试样的总表面积, cm^2 ; T 为试验时间,h; ρ 为材料的密度, g/cm^3 。

经计算,试验钢的平均腐蚀速率为 2.813 5 mm/a, Q235B 的平均腐蚀速率为 36.060 5 mm/a,可知试验钢的耐腐蚀性优于 Q235B,试验钢相对 Q235B 的腐蚀速率为 7.8%,远小于 30% 的技术要求,试验钢的耐腐蚀性满足技术要求。

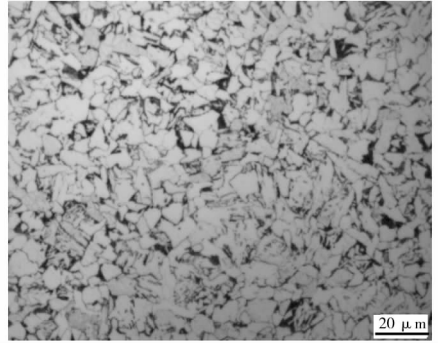
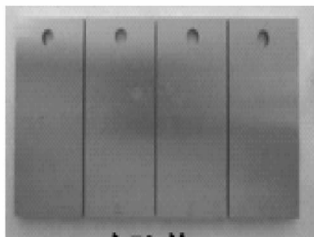


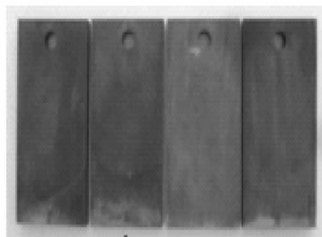
图 3 12 mm 厚试验钢金相照片



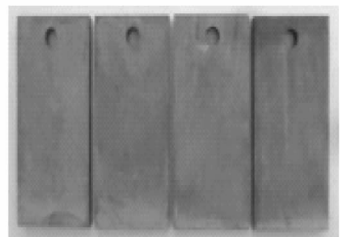
图 4 12 mm 厚试验钢夹杂物照片



试验前



试验后



清洗后

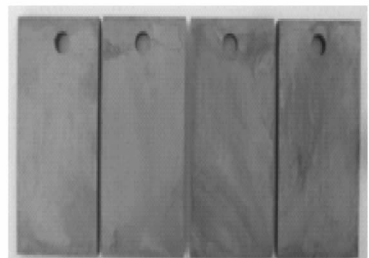
图 5 12 mm 厚试验钢腐蚀试验照片



试验前



试验后



清洗后

图 6 12 mm 厚 Q235B 腐蚀试验照片

3 结论

(1)采用低碳+铜铬镍合金体系,通过合适的控轧控冷工艺,试验钢各项力学性能均满足技术要求。

(2)试验钢室温金相组织为铁素体+珠光体+贝氏体,各组织比例为铁素体占58.6%,珠光体占5.2%,贝氏体占34.2%。晶粒度约为10级,夹杂物评级为Ds类为1级,具有优良的强韧性匹配。

(3)试验钢的平均腐蚀速率为2.813 5 mm/a, Q235B的平均腐蚀速率为36.060 5 mm/a,试验钢相对Q235B的腐蚀速率为7.8%,耐腐蚀性满足技术要求。

参 考 文 献

[1] 张海涛.重载列车用高强度高耐候钢腐蚀性

能研究[D].马鞍山:安徽工业大学,2018.

[2] 张海涛,张建,吴保桥,等.合金元素对高强耐候钢耐大气腐蚀行为的影响[J].安徽工业大学学报(自然科学版),2018,35(3):209-215.

[3] 齐俊杰,黄运华,张跃.微合金化钢[M].北京:冶金工业出版社,2006.

[4] 傅杰,朱剑,迪林,等.微合金钢中TiN的析出规律研究[J].金属学报,2000(36):801-804.

[5] JB/T 7901—2001,金属材料实验室均匀腐蚀全浸试验方法[S].