

## 高速列车转向架构架用 Nb-Ti 微合金化钢板的研制

张瑞琦 刘志伟 孙 傲 郭晓宏 杨 玉 严平沅 高 磊

(鞍钢集团钢铁研究院,鞍山 114009)

**摘 要** 通过铁水预处理-260 t BOF-LF-RH-170 mm 板坯连铸-轧制流程,结合相应的控轧控冷工艺终轧 850 °C 快冷至 720 °C 空冷,成功研制 12 mm 高速列车转向架构架用钢板( /% :0.09C,0.28Si,1.12Mn,0.020P,0.006S,0.58Cr,0.25Ni,0.32Cu,0.045Nb,0.030Ti),低温韧性优异(-60 °C 冲击功 166 ~ 255 J),各项指标满足 YB/T 4684-2018 要求;显微组织为大量多边形铁素体和少量珠光体;钢板耐大气腐蚀指数 I 为 6.3 ~ 6.7,在 72 h 周期浸润腐蚀试验中相对于 Q345B 的腐蚀速率为 54.7%,锈层表面致密,耐大气腐蚀性能良好。

**关键词** 高速列车转向架构架用钢 低温韧性 周期浸润 耐大气腐蚀

## Development of Nb-Ti Microalloying Steel Plate for Bogie Frame of High-speed Train

Zhang Ruiqi, Liu Zhiwei, Sun Ao, Guo Xiaohong, Yang Yu, Yan Pingyuan and Gao lei

(Ansteel Iron and Steel Research Institute, Anshan 114009)

**Abstract** The 12 mm steel plate (0.09C,0.28Si,1.12Mn,0.020P,0.006S,0.58Cr,0.25Ni,0.32Cu,0.045Nb,0.030Ti) for the bogie frame of high-speed train was successfully developed by hot metal pretreatment -260 t BOF-LF-RH-170 mm slab casting-rolling process and TMCP (finished rolling at 850 °C fast cooling to 720 °C, air cooling). It shows excellent low-temperature impact toughness (impact energy at -60 °C 166 ~ 255 J), and all properties meets the requirements of YB/T 4684-2018. The microstructure consists of a large amount of polygonal ferrite and a small amount of pearlite. The atmospheric corrosion resistance index I is 6.3 ~ 6.7, and the relative corrosion rate of the steel plate is 54.7% compared with Q345B by 72 h periodic alternate immersion and dry corrosion test. The surface of the rust layer is very dense. The atmospheric corrosion resistance of the steel plate is excellent.

**Material Index** Steel Plate for Bogie Frame of High-Speed Train, Low Temperature Impact Toughness, Periodic Alternate Immersion and Dry Corrosion Test, Atmospheric Corrosion Resistance

目前,动车组转向架构架采用的主要是进口钢板,日本的 SMA490BW 热轧钢板和欧洲的 S355J2W 耐候钢,随着高速铁路的不断扩建,每年从国外采购的钢板已达万吨以上<sup>[1-2]</sup>。

结合国内高速列车转向架构架用钢应用的环境特点和综合性能要求,鞍钢以微合金化结合控轧控冷(TMCP)工艺,成功地开发出耐大气腐蚀 355 MPa 级中厚板,并对其组织性能进行了分析讨论。

### 1 成分和工艺设计

#### 1.1 成分设计

表 1 为高速列车转向架构架用钢和对比试验钢 Q345B 的化学成分。表 2 为高速列车转向架构架用钢板的力学性能要求(YB/T 4684-2018)。

为保证钢的焊接性能,严格控制碳当量  $CEV = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni +$

$Cu)/15$ ,低碳含量对控制碳当量效果最显著,根据设计成分确定目标碳当量为 0.38 ~ 0.44。采用低碳和超低磷硫设计,可抑制钢水凝固时的树枝晶发展<sup>[3]</sup>,降低连铸坯中心偏析,有利于钢板轧制时带状组织的控制;Cu 是提高钢耐大气腐蚀性能最有效的合金元素之一,Cr 能在钢表面形成致密的氧化膜提高钢的钝化能力<sup>[4]</sup>,Cr 与 Cu 同时加入钢中耐大气腐蚀效果尤为明显,两种元素同时具有一定的固溶强化作用;Ni 能显著改善钢的低温韧性,使基材和焊接热影响区低温韧性大幅度提高,Ni/Cu 1/2 以上,可有效防止含铜钢由于热脆引起的网裂;Nb、V、Ti 微合金元素在轧制过程中,通过应变诱导机制,以碳化物、氮化物或碳氮化合物形式析出并钉扎

表 1 试验钢化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test steels/%

试验钢	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Cr	Nb	Ti
12 mm 转向架钢板	0.09	0.28	1.12	0.020	0.006	0.25	0.32	0.58	0.045	0.030
Q345B 钢	0.14	0.33	1.55	0.022	0.010	-	-	-	-	-

表 2 转向架构架钢板力学性能要求

Table 2 Requirements of mechanical properties for steel plate for bogie frame

厚度/mm	ReL/MPa	Rm/MPa	A/%	(-40℃, KV <sub>2</sub> )/J	180°冷弯试验
≤16	≥355		≥22		D=2a
>16-40	≥345	470~630		≥34	
>40-63	≥335		≥21		D=3a

在晶界和位错上,抑制奥氏体再结晶和晶粒长大,细化晶粒,同时在轧制和冷却时弥散析出,起到第二相沉淀强化作用<sup>[5]</sup>。

### 1.2 工艺设计

工艺路线:铁水预处理→260 t 转炉冶炼→LF→RH→170 mm 板坯连铸→板坯堆垛→加热→4 300 mm 轧机轧制。

使用 LF 和 RH 真空处理双联精炼方法。LF 精炼过程中,按一定的白灰与萤石配比加入造渣材料,实现快速造白渣。精炼渣主要成分(%)为:25~35 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、50~60 CaO、5~10 SiO<sub>2</sub>、5~10 MgO;提高钢水吹氩流量,钢水搅拌时间保证为≥15 min,进站钢水温度≥1 580℃。RH 真空度≤200 Pa,高真空时间≥18 min,纯脱气时间≥13 min。杂质元素控制水平:[S]≤0.006%, [P]≤0.020%, [N]≤0.008%, [O]≤10×10<sup>-6</sup>, [H]≤5×10<sup>-6</sup>。低过热度全程保护浇注,施以动态轻压下技术并根据实际情况调整动态轻压下位置,减轻连铸坯中心偏析<sup>[6]</sup>。铸坯中心偏析为 B 类≤1.0 级,中心疏松≤1.0 级。

考虑到 Nb、V、Ti 等 C、N 化物的溶解和析出行为,将板坯加热温度控制在 1 250℃;保温时间设计为 2.5 h;采用两阶段轧制(奥氏体再结晶区和未再结晶区),粗轧温度控轧在 1 100℃,保证较大的形变率(≥60%),终轧温度控制在 850℃左右,终冷温度控制在 720℃左右,获得细小均匀的铁素体晶粒。

## 2 试验方法

在钢板横向(垂直于轧制方向)和纵向(平行于轧制方向)分别切取圆拉伸试样,根据 GB/T 228.1-2010 进行拉伸试验;根据 GB/T 229-2007,进行系列夏比摆锤冲击试验。

周期浸润腐蚀试验利用苏南环试“JR-A 模拟浸蚀试验机”进行加速腐蚀试验,依据 TB/T 2375-1993 进行腐蚀试验,介质为 0.01 mol/L NaHSO<sub>3</sub> 溶液,试验环境温度(45±2)℃、相对湿度(RH)(70±5)%,每个干湿循环周期为 60 min(浸入时间 12 min,干燥时间 48 min)。每组 5 个平行试样取其平均值。试验完成后计算腐蚀失重率(W),其中失重率计算公式如下:

$$W = \frac{G_0 - G_1}{2(a \times b + b \times c + a \times c)t} \times 10^6 \quad (1)$$

式中:W-失重率/g·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>;G<sub>0</sub>、G<sub>1</sub>-分别为试样原始和除锈后质量/g;a、b、c-试样的长度、宽度和厚度/mm;t-试验时间/h。

## 3 试制结果及分析

### 3.1 钢板性能

表 3 所示为 12 mm 高速列车转向架构架钢板的横纵向力学性能,可以看出钢板在 -60℃ 下冲击功最低值依然远高于 34 J 的指标要求,余量充裕。

从图 1 可以看出,钢板的韧脆转变温度在 -50℃,此时横向冲击功的最低值保持在 177 J(平均值)以上,低温韧性优异。

图 2 为利用扫描电镜观察到的钢板横向拉伸断口形貌图,可以看出,拉伸断口全部为韧窝,室温下为韧性断裂,没有出现脆性断裂的特征,这与钢板较高的断后伸长率是相一致的。

图 3 为钢板 -40℃ 横向冲击断口形貌,利用扫

表 3 研制的高速列车转向架构架用钢板力学性能

Table 3 Mechanical properties of developed steel plate for bogie frame of high-speed train

方向	序号	ReL/MPa	Rm/MPa	A/%	冲击性能(KV <sub>2</sub> )/J						180°弯曲试验
					20℃	0℃	-20℃	-40℃	-50℃	-60℃	
纵向	1	415	545	28.5	288	269	304	221	252	255	合格
	2	410	540	31.0	266	295	220	226	219	206	
	3	405	540	35.0	264	260	279	304	219	230	
平均值		410	542	31.5	273	275	268	250	230	230	
横向	1	405	540	32.0	213	238	259	246	220	166	
	2	400	535	32.0	247	182	287	180	158	194	
	3	395	545	32.0	220	212	207	238	153	213	
平均值		400	540	32.0	227	211	251	221	177	198	

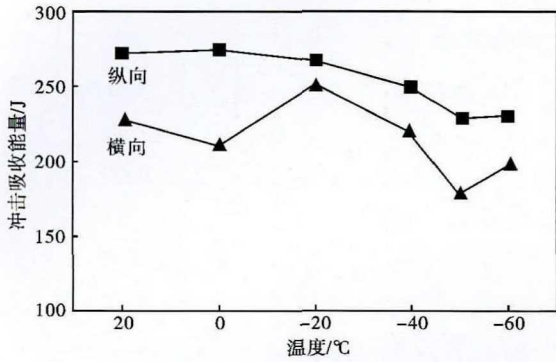


图 1 12 mm 试验钢板的低温冲击性能

Fig. 1 Low-temperature impact toughness of 12 mm test steel plate

扩展,改善脆性失稳状态,提高裂纹扩展功,最终实现钢板高的低温韧性<sup>[7]</sup>。YB/T 4684-2018 要求钢板的铁素体晶粒度应为 8 级或更细,带状组织不应大于 3.0 级,其中带状组织是钢中的脆弱部位,同时是裂纹萌生的敏感区域,有利于裂纹的形成及扩展,严重的带状组织会损害钢板的塑韧性和抗疲劳性能。根据 GB/T 6394-2017 测定铁素体晶粒度为 9.5 级[图 4(b)],根据 GB/T 13299-1991 检测钢板带状组织级别为 1.5 级。

根据 GB/T 10561-2005 测定,钢板的非金属夹杂物为 D 类细系 1.5 级和 DS 类 0.5 级。

### 3.3 超声波检测

依据 GB/T 2970-2016,采用单面直探头接触式纵波检测,有效探伤范围覆盖钢板距边部 50 mm 以外的全部面积,结果符合 I 级要求。

### 3.4 耐大气腐蚀性能

根据 ASTM G101“低合金钢耐大气腐蚀性评价指南”推荐的经验公式

$$I = 26.01(Cu) + 3.88(Ni) + 1.20(Cr) + 1.49(Si) + 17.28(P) - 7.29(Cu)(Ni) - 9.10(Ni)(P) - 33.39(Cu)^2 \quad (2)$$

适用范围:0.012% ~ 0.51% Cu, 0.05% ~ 1.1% Ni, 0.10% ~ 1.3% Cr, 0.10% ~ 0.64% Si, 0.01% ~ 0.12% P。一般耐大气腐蚀指数(I)大于 6 即可认为具有较好的耐大气腐蚀性能;根据实际成分计算,高速列车转向架构架用钢的 I 指数范围为 6.3 ~ 6.7,说明其具有良好的耐大气腐蚀性能。

高速列车转向架构架用钢与对比试样 Q345B 钢(化学成分见

表 1),经 72h 周期浸润试验后,计算平均失重速率,得出与 Q345B 钢的相对腐蚀速率为 54.7%,耐大气腐蚀性能良好。

图 5 所示为在扫描电镜下观察到的两种钢板周期浸润腐蚀样品表面锈层形貌,可以看出,对比钢

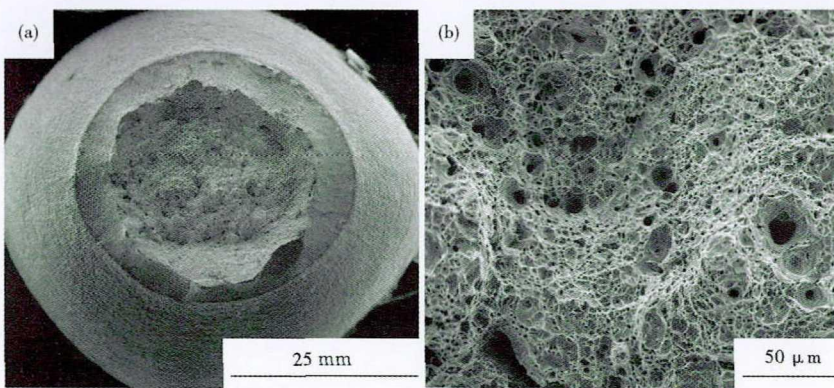


图 2 高速列车转向架构架用钢拉伸断口形貌:(a)宏观;(b)微观

Fig. 2 (a) Macroscopic and (b) microscopic morphologies of tensile fracture of steel plate for bogie frame of high-speed train

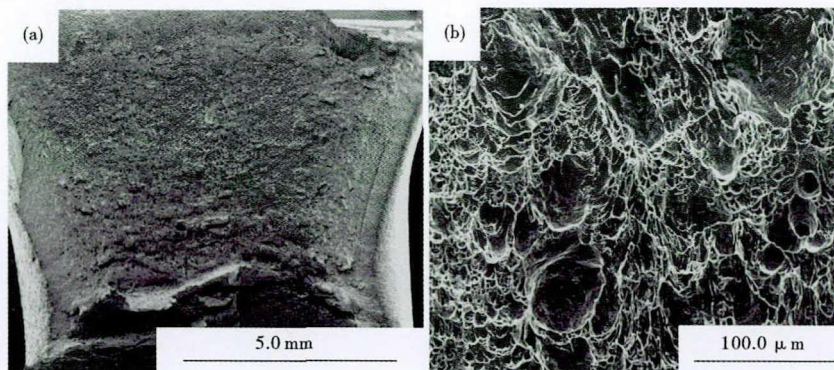


图 3 高速列车转向架构架用钢冲击断口形貌:(a)宏观;(b)微观

Fig. 3 (a) Macroscopic and (b) microscopic morphologies of impact fracture of steel plate for bogie frame of high-speed train

描电镜对钢板拉伸断口形貌进行观察分析,为典型韧性断口,韧窝数量较多且分布均匀。

### 3.2 显微组织

从图 4(a)可以看出钢板主要由大量多边形铁素体和少量珠光体组成。铁素体有利于阻碍裂纹的

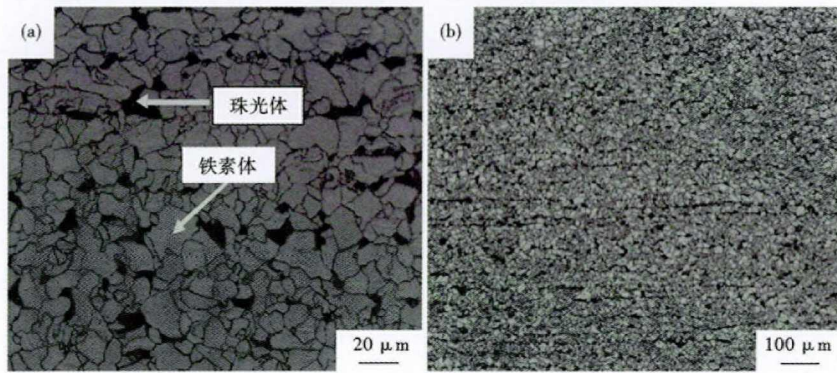


图 4 高速列车转向架构架用钢板:(a)显微组织和(b)晶粒度

Fig.4 (a) Microstructure and (b) grain size of steel plate for bogie frame of high-speed train

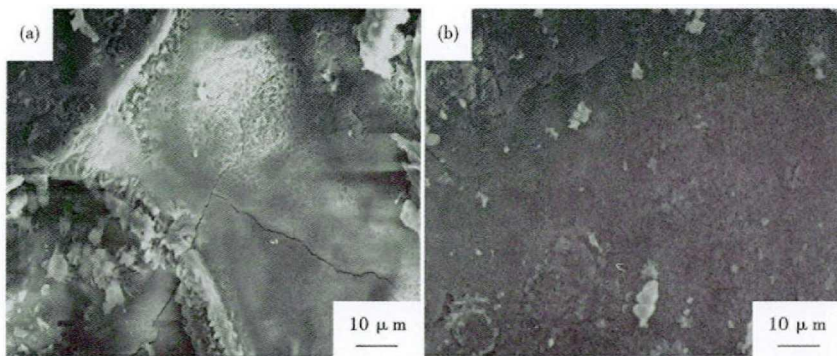


图 5 周期浸润腐蚀样品表面锈层形貌:(a) Q345B 钢;(b) 研制的高速列车转向架构架用钢

Fig.5 Surface morphologies of rust layer for periodic alternate immersion and dry corrosion test:(a) steel Q345B;(b) developed steel plate for bogie frame of high-speed train

Q345B 表面锈层斑驳粗糙,有明显显微裂纹和点状腐蚀存在,类似花瓣形状,研究表明<sup>[8]</sup>,在锈层形成过程中由于腐蚀产物和钢基体体积间的变化引起应力快速增长,因此产生显微裂纹;高速列车转向架构架用钢锈层表面相对光滑致密,无明显裂纹,有大量小棉球状产物,为典型的  $\alpha$ -FeOOH 显微形貌<sup>[9-10]</sup>。锈层致密、连续性好,能有效地阻止腐蚀介质向钢基体的渗透,起到物理阻挡效果,对基体有很好的保护作用,因此降低钢的腐蚀速率。

#### 4 结论

(1)通过合理的成分和工艺设计,结合相应的控轧控冷工艺,成功研制了 12 mm 高速列车转向架构架用钢,各项考核指标满足 YB/T 4684-2018 的要

求。显微组织由大量多边形铁素体和少量珠光体组成,晶粒度 9.5 级,带状组织 1.5 级,非金属夹杂物 D 类细系 1.5 级、DS 类 0.5 级;屈服强度 390 MPa,塑性、冷弯性能良好,具有优异的低温韧性,碳当量  $CEV \leq 0.44$ 。

(2)高速列车转向架构架用钢耐大气腐蚀指数 I 范围为 6.3~6.7;经 72 h 周期浸润腐蚀试验,相对于 Q345B 钢的腐蚀速率为 54.7%,钢的锈层表面致密、无明显裂纹,耐大气腐蚀性能良好。

十三五国家重点研发计划 (2017YFB0304600) 资助

#### 参考文献

- [1] 郑瑞. 我国高速铁路发展趋势及用钢浅析[J]. 冶金信息导刊, 2011(4): 9.
- [2] 李恒奎, 马立军, 李晓燕, 等. 动车组转向架构架板材耐候性分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2014, 26(1): 8-12.
- [3] 张宝荪, 王耀山. 汽车大梁钢板的带状组织控制[J]. 特钢技术, 2012, 18(71): 10-13.
- [4] 封辉. 355 MPa 级耐候钢中 Cu、Cr 和 P 元素的作用[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- [5] 刘年富, 何矿年, 李桦, 等. E36 级海洋平台用钢的试制[J]. 钢铁, 2011, 46(5): 97-100.
- [6] 孙群, 任子平, 姜茂发. 管线钢连铸轻压下工艺的研究[J]. 钢铁研究学报, 2010, 22(4): 1-4.
- [7] 孙宪进. 高性能海洋工程用钢的研究与开发[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- [8] Yuhai Qian, Chaohui Ma, Dun Niu, et al. Influence of Alloyed Chromium on the Atmospheric Corrosion Resistance of Weathering Steels[J]. Corrosion Science, 2013, 74: 424-429.
- [9] Castana J G, Botero C A, Agudelo A H, et al. Atmospheric Corrosion of Carbon Steel in Colombia[J]. Corrosion Science, 2010, 52: 216-223.
- [10] Fuente D, Díaz I, Simancas J, et al. Long-Term Atmospheric Corrosion of Mild Steel[J]. Corrosion Science, 2011, 53: 604-617.

张瑞琦(1988-),男,硕士(2014年东北大学),工程师,2011年江苏科技大学(本科)毕业,耐候钢研究。  
E-mail:450836191@qq.com。

收稿日期:2019-07-05