

耐腐蚀钢轨工业试制

郑瑞¹, 董捷¹, 薛虎东^{1,2,3}, 边影¹

1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010;
2. 北京包钢钢铁技术有限公司, 北京 100083;
3. 西南交通大学机械工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 通过严格执行耐腐蚀钢轨的冶炼、连铸、加热及轧制工艺制度, 成功实现耐腐蚀钢轨的工业试制。对试制钢轨的显微组织、力学性能和耐腐蚀特性进行综合检测, 结果表明: 钢轨抗拉强度达 1 050 MPa 以上, 轨头顶面硬度 (HBW) 超过 300, 钢轨断面为均匀珠光体加微量铁素体组织, 珠光体片层间距较传统热轧 U75V 钢轨缩小 21%。试制钢轨模拟沿海大气环境的耐腐蚀性能相比 U75V 钢轨提高 45.3%, 模拟酸雨环境的耐腐蚀性能相比 U75V 钢轨提高 54.9%, 达到了设计指标。

关键词: 钢轨; 耐腐蚀; 工业试制

中图分类号: U213.4

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2025)03-0054-05

Industrial Trial Production of Corrosion-resistant Rail

Zheng Rui¹, Dong Jie¹, Xue Hudong^{1,2,3}, Bian Ying¹

1. Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Beijing Baotou Steel Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China;
3. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: The industrial trial production of corrosion-resistant rail is successfully realized through strictly implementing its process system of smelting, continuous casting, heating and rolling. The comprehensive detection for microstructure, mechanical performances and corrosion resistance of trial-produced rail is carried out. The results showed that the tensile strength of rail could reach over 1 050 MPa, top surface hardness of rail head (HBW) was over 300, cross section of rail was uniform pearlite and trace amount of ferritic structure as well as lamellar spacing of pearlite was reduced by 21% compared with that of traditional hot rolled U75V rail. Compared with U75V rail, the corrosion resistance of trial-produced rail for simulating coastal atmospheric environment is improved by 45.3% and corrosion resistance of simulating acid rain is improved by 54.9%, which could reach the design indexes.

Key words: rail; corrosion-resistant; industrial trial production

钢轨暴露在不同的大气环境中会发生不同的腐蚀。我国幅员辽阔, 各地区气候条件不一样, 因此,

钢轨腐蚀的情况也不同^[1]。西南地区、东北沿海地区铺设的钢轨在服役过程中会受到潮湿、海洋大气

的腐蚀。有的隧道由于受到渗水等因素影响,钢轨及扣件腐蚀速率快,钢轨的服役寿命缩短至1年以下,严重影响钢轨使用寿命和铁路运输安全^[2]。针对以上问题,需要开发一种锈蚀速度慢、锈层均匀稳定,且具有较好强韧性的耐腐蚀钢轨。

表1 60 kg/m 钢轨维修规则^[3]

损伤类型	高速铁路无砟道线路		铁路线路(重载部分)	
	轻伤	重伤	轻伤	重伤
钢轨锈蚀	-	经除锈后,轨底厚度不足8 mm或轨腰厚度不足12 mm	经除锈后,轨底厚度不足8 mm或轨腰厚度不足14 mm	经除锈后,轨底厚度不足5 mm或轨腰厚度不足8 mm

本文设计要求耐腐蚀钢轨抗拉强度 ≥ 980 MPa、伸长率 $\geq 10\%$ 、轨头顶面硬度(HBW) ≥ 280 ,相对U75V钢轨的耐腐蚀性能提高35%以上。

根据实验室模拟研究、加速腐蚀试验、电化学试验结果,确定了以C、Si、Mn为主要元素,添加Cu、Cr、Ni、Mo等合金元素的化学成分体系,制定生产工艺进行工业试制。试制工艺流程为铁水预处理→转炉冶炼→LF精炼→VD真空处理→连铸→缓冷→加热→轧制→矫直→探伤→检查→加工→入库。

对试制的耐腐蚀钢轨进行常规性能检验,包括抗拉强度、延伸率、轨头顶面硬度、金相组织、非金属夹杂物、脱碳层、珠光体片层间距等,并进行耐腐蚀性能试验。

1.1 炼钢生产

工业试制1炉。铁水经脱硫预处理,采用无铝脱氧工艺冶炼,出钢过程挡渣,连浇时中间包钢水量大于15 t,连铸过程液位自动控制,过热度 $\Delta T \leq 30$ °C,恒拉速操作。铸坯规格为280 mm × 380 mm,铸坯放入缓冷坑缓冷。

1.2 轨梁轧制

与U75V钢轨相比,耐腐蚀钢轨由于合金含量相对较高,并且含有一定量的Cu元素,为保证加热过程中不产生裂纹,加热工序采取以下措施:①铸坯加热温度要均匀,预热段温度不得高于800 °C,控制加热I段加热速度,不可快速加热升温,保证加热I段加热时长在1 h以上;②均热段保证铸坯在炉内加热时长大于45 min;③应时刻观察炉内铸坯表面颜色,控制炉内气氛,防止铸坯出现过热、过烧等问题。

出炉铸坯表面经高压水除鳞,开轧温度(BD1第二道次)为1 103 °C,终轧温度为950 °C。钢轨矫直温度不超过60 °C,经矫直后的钢轨平直,无波浪弯、硬弯和明显的扭曲。

1 工业试制

目前我国铁路线路对钢轨锈蚀、伤损类别判定有明确的规定,如表1所示。

2 试制结果

2.1 铸坯检验

铸坯硫印检验结果:中心裂纹为1级,夹杂物为1级,中间裂纹、皮下裂纹、角部裂纹均为0级,铸坯硫印检验合格。

铸坯热酸检验结果:中心疏松和中心裂纹最大级别为1.0级,未发现缩孔、中间裂纹、皮下裂纹、角部裂纹、皮下气泡等缺陷。

2.2 钢轨尺寸

对钢轨几何尺寸进行测量,结果见表2。检测结果满足TB/T 2344.1—2020^[4]标准要求,几何尺寸合格率达到100%。

表2 60 kg/m 钢轨几何尺寸检测结果

检测项目	标准要求/mm	实测范围/mm	合格率/%
轨高	176 ± 0.5	175.8 ~ 176.2	100
轨底宽度	150 ± 0.8	149.5 ~ 150.3	100
轨腰厚度	16.5 ± 0.5	16.4 ~ 16.6	100
轨头对称度	≤ 0.3	0.1 ~ 0.2	100

2.3 钢轨低倍检验

钢轨低倍热酸检验均未发现白点及超限的缩孔(残余)、内裂、非金属夹杂物、翻皮、分层、肉眼可见夹杂物等缺陷,低倍检验照片见图1。



图1 钢轨低倍热酸检验照片

2.4 力学性能

2.4.1 拉伸性能

为检验百米钢轨性能稳定性,每隔 25 m 取轨头拉伸试样,编号分别为 A、B、C、D,拉伸性能检验结果见表 3。

表 3 拉伸性能检验结果

试样编号	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A /%	Z /%
A	691	1 076	13.0	42
B	743	1 095	12.5	38
C	689	1 103	13.5	32
D	731	1 121	12.5	32

钢轨的抗拉强度为 1 076 ~ 1 121 MPa,延伸率为 12.5% ~ 13.5%,满足抗拉强度 ≥ 980 MPa,延伸率 $\geq 10\%$ 的设计要求。

2.4.2 轨头顶面硬度

取 A、B、C、D 段钢轨试样进行轨头顶面硬度检验,结果见表 4。轨头顶面硬度 (HBW) 为 306 ~ 312,硬度稳定性较好,轨头顶面硬度满足设计要求。钢轨具有较高的强度和硬度,保证了在线路服役过程中的滚动接触疲劳性能和耐磨性,有效延长使用寿命。

表 4 轨头顶面硬度 (HBW) 检验结果

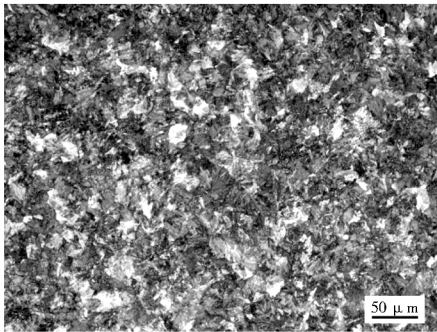
试样编号	1	2	3	4	5	平均值
A	309	309	309	310	310	309
B	310	310	310	311	311	310
C	308	306	308	308	306	307
D	309	309	310	312	309	310

2.5 显微组织

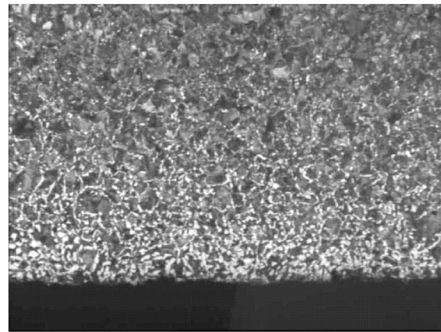
2.5.1 金相组织及脱碳层

钢轨轨头、轨腰、轨底金相组织均为珠光体加微

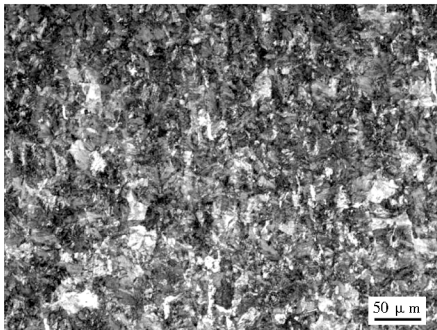
量铁素体,未见异常组织。钢轨踏面脱碳层深度为 0.32 mm,见图 2。钢轨金相组织、脱碳层检验结果满足 TB/T 2344.1—2020 标准要求。



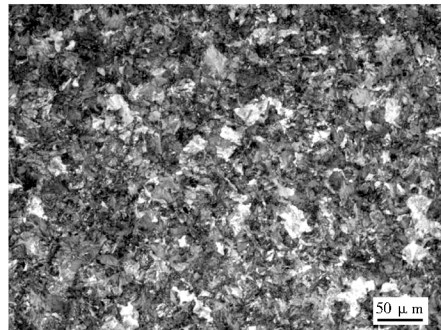
(a) 轨头金相组织



(b) 轨头脱碳层



(c) 轨腰金相组织



(d) 轨底金相组织

图 2 钢轨金相组织及脱碳层照片

2.5.2 非金属夹杂物

2344.1—2020 标准的要求。

钢轨非金属夹杂物检验结果见表5,满足TB/T

表5 非金属夹杂物检验结果

试样 编号	A类		B类		C类		D类		DS类
	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	
A	1.5	1.5	1	1	1	1	0.5	0.5	1.0
D	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

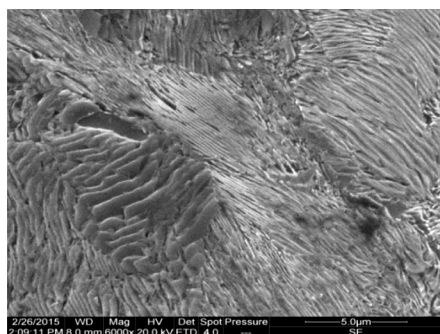
2.5.3 珠光体片层间距

采用扫描电镜分别测量耐腐蚀钢轨及U75V钢轨的珠光体片层间距,在5000倍视场下随机测量

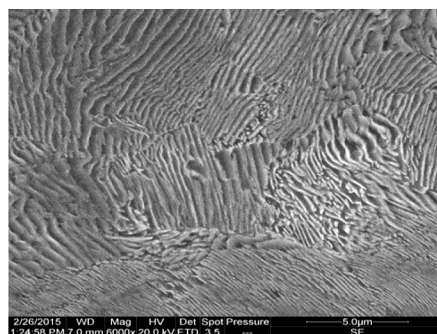
25组珠光体片层间距,取平均值,发现耐腐蚀钢轨珠光体片层间距相比U75V钢轨明显细化,见表6和图3。

表6 钢轨珠光体片层间距

钢种						μm
	1	2	3	4	5	平均值
U75V	0.335	0.242	0.256	0.277	0.268	0.256
	0.249	0.239	0.181	0.25	0.336	
	0.311	0.234	0.245	0.263	0.215	
	0.205	0.252	0.162	0.147	0.335	
	0.356	0.249	0.215	0.271	0.295	
	0.232	0.267	0.264	0.165	0.172	
	0.245	0.354	0.181	0.331	0.228	
耐腐蚀钢轨	0.163	0.132	0.145	0.256	0.138	0.211
	0.216	0.168	0.162	0.327	0.134	
	0.167	0.251	0.116	0.176	0.286	



(a) U75V热轧钢轨



(b) 耐腐蚀钢轨

图3 珠光体片层间距扫描电镜照片

由表6和图3可见,耐腐蚀钢轨珠光体片层间距相对U75V钢轨更小,是由渗碳体和铁素体薄片交替叠合而成的珠光体组织。珠光体的片层排列方向和间距对材料的性能有很大影响,渗碳体片有一定的塑性,薄片渗碳体比厚片渗碳体更有柔性和塑

性,厚片渗碳体更容易破裂而不易弯曲或发生变形,因而细化珠光体片层间距有利于提高强度、塑性。

3 耐腐蚀性能

根据我国的大气环境条件,模拟沿海大气环境、

酸雨环境等条件,按照国标 GB/T 18175—2000^[5]进行钢轨加速腐蚀试验。设计三个腐蚀周期,分别为 72 h、120 h、168 h,试验结果见表 7。

表 7 加速腐蚀试验结果

腐蚀介质	钢种	平均失重率/(g·m ⁻² ·h ⁻¹)			相对腐蚀率/%		
		72 h	120 h	168 h	72 h	120 h	168 h
3.5% NaCl	U75V	4.79	3.42	2.85	149	145	142
	耐腐蚀钢轨	3.21	2.36	2.01			
H ₂ SO ₄ + HNO ₃ (pH = 4)	U75V	5.62	4.15	3.40	151	158	156
	耐腐蚀钢轨	3.72	2.63	2.18			

耐腐蚀钢轨在两种腐蚀环境下试验,两种环境的耐腐蚀性能均优于 U75V 钢轨,在沿海环境下耐腐蚀性平均提高 45.3%,酸雨环境下耐腐蚀性平均提高 54.9%,达到相比 U75V 钢轨提高 35% 以上的目标。

4 结论

(1) 耐腐蚀钢轨化学成分设计合理,试制工艺流程正确,试制的耐腐蚀钢轨各项性能满足设计要求。

(2) 耐腐蚀钢轨抗拉强度为 1 076 ~ 1 121 MPa,伸长率为 12.5% ~ 13.5%,轨头顶面硬度(HBW)为 306 ~ 312,钢轨具有较高的强度和硬度。

(3) 按照国标 GB/T 18175—2000 试验方法,模拟沿海大气、酸雨环境的加速腐蚀试验结果表明,耐

腐蚀钢轨失重率小,相对腐蚀率低,耐腐蚀性能优于 U75V 钢轨。

参 考 文 献

- [1] 王晓丽,安胜利,曹峥. 耐腐蚀重轨钢研究进展[J]. 内蒙古科技大学学报,2016,35(3): 205-208.
- [2] 李样兵. 模拟大气环境下重轨钢腐蚀性能的研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2013.
- [3] TG/GW 102—2019,普速铁路线路维修规则[S].
- [4] TB/T 2344.1—2020,43 kg/m ~ 75 kg/m 钢轨[S].
- [5] GB/T 18175—2000,水处理剂缓蚀性能的测定 旋转挂法[S].