

美国 AREMA 标准 IS350 钢轨工业试制

边 影¹, 薛虎东¹, 王嘉伟¹, 丑永菲²

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. 内蒙古包钢钢联股份有限公司轨梁厂, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: IS350 钢轨为美国 AREMA—2019 标准中的中等强度钢轨, 多用于北美地区繁忙的货运铁路的铺设, 应用前景较为广阔。结合美标要求和钢轨万能轧机设备条件, 开展了 IS350 钢轨的工业试制。试制结果表明, IS350 钢轨成分设计合理, 冶炼工艺、炉外精炼工艺以及轧制工艺、在线热处理工艺得当, 试制钢轨常规性能及特殊性能均符合美国 AREMA—2019 标准要求, 均具有充裕的富余量, 为包钢钢轨产品结构调整、开拓新市场探索出新路。

关键词: AREMA 标准; IS350 钢轨; 在线热处理

中图分类号: TG142.1; TG335.43

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2023)02-0030-06

Industrial Trial Production of IS350 Rail in American AREMA Standard

Bian Ying¹, Xue Hu-dong¹, Wang Jia-wei¹, Chou Yong-fei²

1. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;*
2. *Rail and Beam Rolling Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)*

Abstract: The IS350 rail is medium strength rail in the American AREMA—2019 standard, which is mostly used for laying busy freight railways in North America and with a broad application prospect. Its industrial trial production is carried out combining with the requirements of American standard and the equipment conditions of universal rolling mill of rail. The results of trial production showed that its composition design was reasonable, the smelting, external refining, rolling and on-line heat treatment processes were proper as well as its general and special performances were in line with the requirements of American AREMA—2019 standard and with sufficient surplus so that a new way was explored for adjusting the product mix of rail of Baotou Steel and developing new markets.

Key words: AREMA standard; IS350 rail; on-line heat treatment

北美洲是重载铁路建设发达地区, 在铁路重载运输技术方面位居世界前列。北美铁路运输以货运为主, 铁路车辆轴重多为 32.4 t, 随着重载运输要求的提高, 铁路车辆轴重不断增大, 目前最大轴重可达

35.7 t^[1]。美国铁路工程和保养协会 (AREMA) 工程师手册中的货运重载铁路标准被钢轨制造厂视为进入美洲钢轨市场的门槛, 其 2019 版标准根据钢轨踏面硬度不同, 将碳素钢轨分为标准强度钢轨

SS310 级、中等强度钢轨 IS350 级和高强度钢轨 HH370 级。包钢 2015 年成功开发标准强度 SS310 钢轨并批量出口美国上万吨^[2]。

1 IS350 钢轨标准要求

IS350 钢轨为美国 AREMA—2019 标准中的中等强度钢轨,规定轨头踏面硬度(HB)不低于 350,热处理状态交货。美国 AREMA 标准对钢轨性能要

求主要体现在常规力学性能指标上,比我国铁标增加了屈服强度的要求。表 1、表 2 分别给出了美标 AREMA—2019^[3] IS350 钢轨与铁标 TB/T 2344—2020^[4] U75VH、欧标 EN 13674—2011^[5] R350HT 钢轨成分与性能指标的对比情况。由表 2 可知,不同标准的三个钢轨硬度级别相近,IS350 钢轨的抗拉强度要求低于铁标 U75VH 和欧标 R350HT。

表 1 不同标准踏面硬度(HBW)340~350 钢轨的成分对比

标准	钢种	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Mo	Al
TB/T 2344—2020	U75VH	0.71~0.80	0.50~0.80	0.75~1.05	≤0.030	≤0.025		0.04~0.12		
EN 13674—2011	R350HT	0.72~0.80	0.15~0.58	0.70~1.20	≤0.020	≤0.025	≤0.30	≤0.030		
AREMA—2019	IS350	0.74~0.86	0.10~0.60	0.75~1.25	≤0.020	≤0.020	≤0.30	≤0.010	≤0.010	≤0.010

表 2 不同标准踏面硬度(HBW)340~350 钢轨性能对比

产品标准	钢种	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	踏面硬度(HBW)
TB/T 2344—2020	U75VH		1 180	≥10	340
EN 13674—2011	R350HT		1 175	≥9	350
AREMA—2019	IS350	723	1 065	≥10	350

2 IS350 钢轨工业试制

2.1 成分设计

铬、钒在钢中的应用十分普遍。铬加入钢中有很多益处,它固溶于铁素体中,提高铁素体强度,增加基体的强度和硬度,而且铬能显著增加钢的淬透性和提高抗氧化能力,但需将铬元素控制在 0.30% 以下,否则会增加回火脆性倾向。而且钒与钢中的碳、氮构成难熔的碳化物和氮化物,小而硬的碳氮化合物能够起到细化晶粒、沉淀强化的作用,从而提高

钢的强度、韧性和耐磨性。

工业试制前,在实验室开展了钢种成分、工艺模拟与组织性能之间关系的试验。通过实验室试验,基本确定了 C、Si、Mn 等主元素含量水平,对比了钢中添加 Cr、V、Nb 后力学性能、硬度方面的变化情况。

由于 V、Nb 属于价格较高的合金元素,对比试验结果表明单独添加 Cr 元素,无需添加 V、Nb 元素即可满足要求。综合考虑实验室和工业生产之间的差异,按照美标要求确定了 IS350 钢轨工业试制成分控制范围,设计成分详见表 3。

表 3 IS350 钢轨成分设计(质量分数)

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	V
设计成分	0.77~0.82	0.45~0.55	0.90~1.15	≤0.020	≤0.025	0.20~0.25	
标准成分	0.74~0.86	0.10~0.60	0.75~1.25	≤0.020	≤0.020	≤0.30	≤0.01

2.2 生产工艺流程

IS350 钢轨工业试制工艺流程:脱硫预处理铁水→150 t 顶底复吹转炉冶炼→LF 精炼→VD 真空脱气精炼→方坯连铸(280 mm×380 mm)→加热→高压水除鳞→BD1 粗轧→BD2 粗轧→万能轧机轧制→在线热处理→矫直→探伤→加工→检查入库。

2.3 试制过程

2.3.1 冶炼与连铸工艺

工业试制 1 炉(转炉公称容量 150 t)。铁水预处理采用镁基喷粉脱硫,入炉铁水 $\omega(S) \leq 0.030\%$ 。转炉冶炼终点控制 $\omega(C) > 0.08\%$,出钢温度 $T > 1\ 610\ ^\circ\text{C}$,控制 $\omega(P) \leq 0.120\%$,出钢加入

硅锰、锰铁和硅铁合金进行罐内脱氧合金化。

LF 精炼采用硅钙钡脱氧,加入硅铁和铬铁合金,脱硫和微调化学成分。LF 炉就位温度为 1 545 ℃,加热时间为 22 min,离位温度为 1 580 ℃。VD 真空度不大于 0.10 kPa,深真空处理时间不低于 15 min,真空处理结束后软吹时间保证 15 min 以上,软吹全程钢液表面无裸露。

浇注铸坯尺寸为 280 mm × 380 mm。大方坯连铸机中间包覆盖剂采用钙镁质颗粒,结晶器采用低铝保护渣,全程保护浇注,同步开启结晶器电磁搅拌和凝固末端轻压下模式。试制钢轨液相线温度为 1 464 ℃,过热度 (ΔT) 控制在 29 ℃。全程恒拉速操作,拉速 0.65 m/min。

2.3.2 轧制

铸坯送轨梁厂 2[#] 万能轧制线轧制钢轨,钢轨轧制断面为 60 N。连铸坯经三段步进式加热炉加热 3.5 h 后,在 2[#] 线共轧制 13 道次,压缩比为 13.1,轧制道次分配:BD1 开坯 3 道次,BD2 粗轧 7 道次,万

能轧机轧制 3 道次,BD1 开轧温度为 1 090 ~ 1 150 ℃,终轧温度为 940 ~ 950 ℃。

2.3.3 钢轨淬火

轧制后的钢轨进入淬火机组进行全长热处理,热处理工序的控制要点是钢轨入、出淬火机组的温度区间和钢轨头尾温差,保证钢轨入口温度不高于 850 ℃、出口温度不高于 700 ℃,头尾温差要求不大于 50 ℃,实际温差在 35 ℃,淬火风压为 12 kPa。待钢轨温度降至 60 ℃ 以下进行全长矫直,超声波探伤合格后入库。

3 试制结果

3.1 铸坯质量

在铸坯上取样分析化学成分,结果显示成分控制理想,各元素均满足目标要求,见表 4。铸坯硫印检验结果表明低倍质量良好,见表 5。

铸坯取样检测气体含量,结果为 H 含量为 0.000 142%,O 含量为 0.001 8%,N 含量为 0.004 2%。

表 4 铸坯成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Al
≤0.82	≤0.60	≤1.20	≤0.020	≤0.020	≤0.3	0.003

表 5 铸坯硫印评级

熔炼号	中心偏析	中心裂纹	中间裂纹	皮下裂纹	角部裂纹	夹杂物
22904300	0	0.5	0	0	0	0.5

为查验成分偏析状况,分别沿铸坯横断面长度、宽度和对角线三条线等间隔钻取粉末分析 C、Mn 成分,图 1 为铸坯成分取样点位置,图 2 为 C、Mn 偏析指数分布图。由图 2 可见,铸坯横断面上 C 元素的偏析程度略大于 Mn 元素,二者偏析情况相对同步,总体上看 C、Mn 成分偏析情况良好,各点位置含量波动较小。

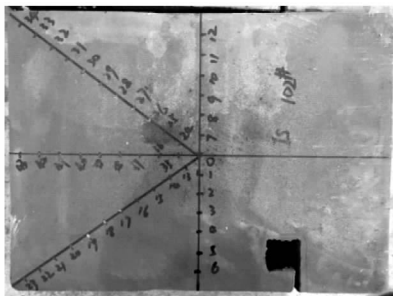


图 1 铸坯 C、Mn 偏析取样位置

以上检验结果表明,铸坯成分、气体控制理想,铸坯内部质量良好。

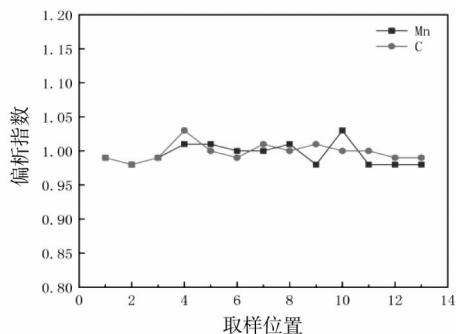


图 2 铸坯 C、Mn 偏析指数图

3.2 钢轨内部质量

3.2.1 低倍检验

分别在 2 支热轧钢轨成品上取样作热酸低倍质

量检验,见图3。检验未发现白点、缩孔、偏析、内裂、翻皮、分层以及肉眼可见的夹杂物等缺陷,说明钢轨成品低倍质量良好。

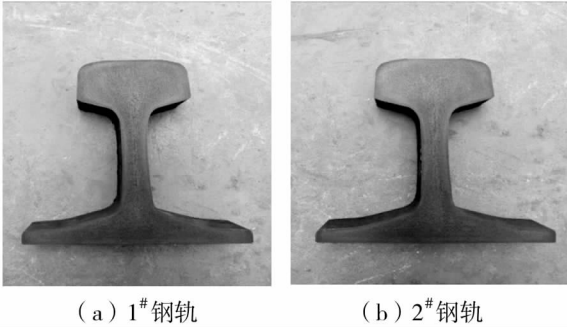


图3 钢轨低倍照片

3.2.2 成分偏析

在钢轨成品上作全断面 C、Mn 成分偏析检测,取样部位如图4所示,轨头取6个点,密度比轨腰、轨底大。成分偏析指数结果见图5。由图5可见,钢轨全断面上 C、Mn 元素含量波动小,两个元素在全断面上的分布较为均匀。与铸坯成分偏析情况相比,钢轨 C、Mn 元素偏析程度减轻,进一步说明轧制变形有利于改善化学成分的偏析程度。

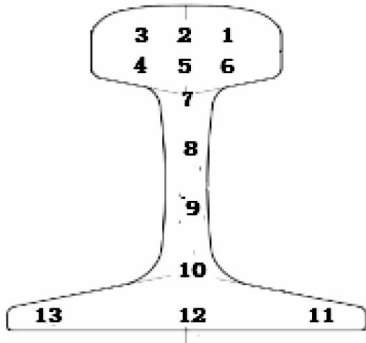


图4 钢轨偏析取样位置

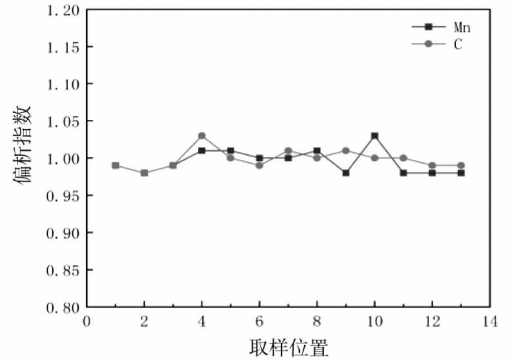


图5 全断面钢轨 C、Mn 成分偏析指数图

3.3 钢轨性能检验

3.3.1 力学性能

分别对热轧钢轨和风淬钢轨的力学性能进行检验,检验项目包括力学性能和轨头踏面硬度。在风淬钢轨成品上每隔 25 m 取样,以验证钢轨热处理后的通条性能。

检测结果分别见表6、表7。2支热轧钢轨的屈服强度、抗拉强度分别为 675 MPa、1 073 MPa 和 588 MPa、1 065 MPa;2支钢轨踏面硬度(HBW)分别在 313~315 和 309~311 范围内均匀分布。由表6、表7可知,对于风淬钢轨来说,强度和硬度在全长上的检测数值变化不大,1#钢轨的屈服强度平均为 859.3 MPa,抗拉强度平均为 1 273.5 MPa、延伸率为平均为 11.2%,踏面硬度(HBW)平均为 368.8;2#钢轨的屈服强度平均为 846.2 MPa,抗拉强度平均为 1 273.1 MPa,延伸率平均为 10.5%,踏面硬度(HBW)平均为 370.2。结果显示屈服强度、抗拉强度有一定的富余量,轨头踏面硬度控制良好,全长踏面硬度均匀,基本都在 370 左右,说明淬火工艺恰当,参数设计合理,钢轨淬火后的性能满足要求。

表6 热轧钢轨性能

编号	$R_{p0.2}/MPa$	R_m/MPa	$A/\%$	踏面硬度(HBW)			HBW 平均值	
1#	675	1 073	14	315	315	313	315	314.6
2#	588	1 065	13	309	311	311	309	310.2

3.3.2 显微组织

检验淬火钢轨全断面金相组织,每隔 25 m 在轨头、轨腰、轨底、轨底角分别取样,取样检测结果一致

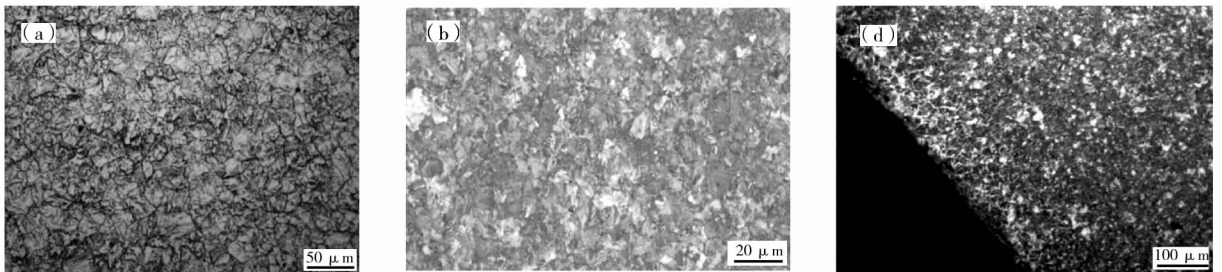
性强,无明显差异,显微组织晶粒度为 8 级,以细小珠光体为主,其余为微量的铁素体,未发现异常组织,脱碳层深度最大 0.25 mm (见图6)。

利用扫描电镜观测热轧钢轨轨头和淬火钢轨轨头的珠光体片层间距。从轨头珠光体片层间距观测结果来看,热轧钢轨轨头片层间距平均值为 $0.22\ \mu\text{m}$,淬火钢轨轨头片层间距则更细,平均值为

$0.18\ \mu\text{m}$,见图 7。珠光体片层间距的减小极大改善了钢轨各项性能,使得钢轨的强度和硬度得以提高,从数值上看强度提高幅度较大。

表 7 全长 100 m 风淬钢轨每隔 25 m 的强度和轨头硬度分布

编号	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$	踏面硬度(HBW)					HBW 平均值
1 [#] A	852.9	1 250.7	11.6	368	367	367	367	368	367.4
1 [#] B	853.0	1 283.1	11.0	365	365	368	368	369	367.0
1 [#] C	859.1	1 277.4	11.7	369	368	368	371	367	368.6
1 [#] D	872.1	1 276.8	10.7	370	368	370	372	371	370.2
1 [#] E	859.3	1 279.5	10.8	372	368	370	372	371	370.6
平均值	859.3	1 273.5	11.2	368.8	367.2	368.6	370	369.2	368.8
2 [#] A	812.6	1 268.5	10.1	370	370	370	370	371	370.2
2 [#] B	861.3	1 271.8	10.7	373	373	373	372	374	373.0
2 [#] C	856.2	1 275.0	10.8	369	368	368	371	368	368.8
2 [#] D	846.7	1 274.5	10.5	369	367	372	371	369	369.6
2 [#] E	854.4	1 275.9	10.3	368	369	368	371	371	369.4
平均值	846.2	1 273.1	10.5	369.8	369.4	370.2	371.0	370.6	370.2

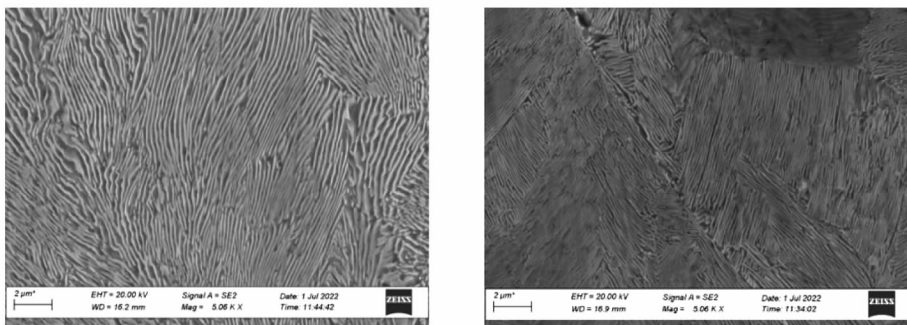


(a) 晶粒度

(b) 组织照片

(c) 脱碳层照片

图 6 风淬钢轨轨头全相组织、脱碳层照片



(a) 热轧钢轨

(b) 淬火钢轨

图 7 淬火钢轨轨头珠光体片层间距

4 结语

通过前期一系列的试验研究,成功开发出满足 AREMA—2019 标准的中强度钢轨,并进行了工业试制。该强度钢轨品种的增加,为包钢出口美洲钢轨市场提供了产品储备。

在成分设计过程中,设计出不添加 V、Nb 等价格较高合金元素的低成本化学成分,通过调整 C、Si、Mn 元素含量,添加碳化物形成元素 Cr,提高钢轨的淬透性,由此获得了符合标准的热处理性能。

参 考 文 献

[1] 张银花,周清跃,陈朝阳,等. 北美重载铁路钢

轨技术及发展趋势[J]. 铁道技术监督,2015, 43(7):1-6.

[2] 李平,周乐育,梁正伟,等. 美标 SS310HB 钢轨的试制[J]. 轧钢,2018,35(1):42-45.

[3] AREMA—2019,美国铁路工程和保养协会工程师手册[S].

[4] TB/T 2344—2020,43 kg/m~75 kg/m 钢轨订货技术条件[S].

[5] EN 13674—2011,43 kg/m 及以上 T 型钢轨 [S].

(上接第 14 页)

[5] 卢军辉,王晓春,张慧,等. Nb-Ti 微合金化 610 MPa 级汽车大梁钢板工艺研究[J]. 炼钢,2011,27(4):61-64.

[6] GB/T 228.1—2001,金属材料拉伸试验第一部分:室温试验方法[S].

[7] GB/T 6394—2002,金属平均晶粒度测定方法

[S].

[8] GB/T 229—2020,金属材料夏比摆锤冲击试验方法[S].

[9] GB/T 3075—2008,金属材料疲劳试验轴向力控制方法[S].