

包钢新型重载铁路用稀土钢轨研发

王嘉伟¹, 赵桂英¹, 涛雅¹, 梁正伟¹, 王永明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总工室, 内蒙古包头 014010)

摘要:随着列车的轴重和运量逐年增加,需要使用新型高强度钢轨以满足使用要求,延长钢轨使用寿命和减少线路维护。包钢通过对稀土钢轨的成分优化与热处理工艺研究,成功开发第三代稀土热处理钢轨,钢轨的抗拉强度 $R_m \geq 1300$ MPa,断后延伸率 $A \geq 10\%$,踏面硬度HB为380~430。试验研究表明,稀土在高碳钢轨中易附集在夹杂物上,可以变质MnS和 Al_2O_3 等类型夹杂物;同时稀土可以减小珠光体片层间距和细化奥氏体晶粒尺寸,从而改善高碳重轨钢的韧性。新型热处理稀土钢轨可显著改善钢轨耐磨性和抗接触疲劳性能,适用于重载铁路和小曲线路段。

关键词:稀土钢轨;冶炼;轧制

中图分类号:U213.4⁺¹

文献标识码:B

文章编号:1009-5438(2022)04-0046-05

Research and Development of New Type Rare Earth Rail for Heavy Haul Railway of Baotou Steel

Wang Jia-wei¹, Zhao Gui-ying¹, Tao Ya¹, Liang Zheng-wei¹, Wang Yong-ming²

- (1. Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Chief Engineer Office of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: With the axle load and transport volume of train increase year by year, it's necessary to use new type high strength rail to satisfy the operating requirements, prolong the service life of rail and reduce the maintenance of railway. The third generation of rare earth heat-treated rail is successfully developed by Baotou Steel through researching the composition optimization and heat treatment process of rare earth rail. Its tensile strength $R_m \geq 1300$ MPa, percentage elongation after fracture $A \geq 10\%$, tread hardness HB is 380~430. The experimental study showed that the rare earth was easy to attach to the inclusions in high carbon steel rail so that such inclusions as MnS and Al_2O_3 were modified; simultaneously, the lamellar spacing of pearlite was reduced and austenite grain size was refined by rare earth so as to improve the toughness of high carbon heavy rail steel. The wear resistance and contact fatigue resistance of rail could be significantly improved with new type heat-treated rare earth rail, which is suitable for heavy haul railway and section with small curve.

Key words: rare earth rail; smelting; rolling

收稿日期:2022-04-08

基金项目:内蒙古自治区科技重大专项(zdxc2018024)。

作者简介:王嘉伟(1988-),男,内蒙古包头市人,工程师,现从事钢轨新产品研发工作。

铁路是我国国民经济的大动脉,随着我国国民经济的快速发展,铁路运输发挥了至关重要的作用,国家修建了大秦铁路、朔黄铁路、神华铁路等重载铁路运输专用线以缓解国内资源的供需矛盾。铁路运输日趋繁忙,列车轴重、行车速度及密度大幅度提高,钢轨的服役条件越来越恶劣,使用寿命大大缩短。特别是重载或小半径曲线,由于钢轨硬度偏低、强度不足,使钢轨产生严重磨耗和发生接触疲劳损伤,致使钢轨使用寿命降低,线路养护费用增加,严重影响行车安全。对于重载运输线路如大秦铁路线,国内 HB340 硬度级别 U75V 热处理钢轨已不能满足线路使用的要求^[1],急需研究开发更高硬度和强度级别的钢轨;对于小半径曲线段线路,需要开发合适的高硬度和强度级别的热处理钢轨^[2]。

包钢针对铁路用轨的这种需要,开发了热处理态 HB380 硬度级别的高强度钢轨。在钢种成分方面添加了具有包钢自身资源特点的稀土(RE)元素和 Nb 元素^[3],新钢种钢轨称为包钢三代稀土高强钢轨(BGRE III)。通过实验室钢种成分设计、工业试验、小批量工业试生产等阶段研究,钢轨已达到抗拉强度 $R_m \geq 1\ 300\ \text{MPa}$ 、断后延伸率 $A \geq 10\%$ 。踏面硬度(HB)380~430 等性能指标要求。

1 试验部分

目前国内标准主要应用于重载铁路钢轨钢种有 U75VH、U77MnCrH、U78CrVH、U76CrREH(包钢二代稀土钢轨)四个钢轨钢种^[4],包钢自主研发的 BGRE III 三代稀土钢轨强度和硬度均高于以上四种钢轨,并且随着强度和硬度的提高,钢轨仍然能保持

良好的韧性^[5]。钢轨力学性能指标见表 1。

表 1 钢轨力学性能指标

钢种	抗拉强度 R_m /MPa	延伸率 A /%	踏面硬度 (HBW)
U75VH	$\geq 1\ 180$	≥ 10	340~400
U77MnCrH	$\geq 1\ 180$	≥ 10	350~410
U78CrVH	$\geq 1\ 280$	≥ 10	370~420
U76CrREH	$\geq 1\ 280$	≥ 10	370~420
BGRE III	$\geq 1\ 300$	≥ 10	380~430

根据研制目标及国内外开发高强钢轨的经验,选择微合金化和热处理的途径来提高钢轨强度。国内外高强钢轨普遍使用 Cr、V 等合金元素。在钢中 Cr 和 Fe 形成连续固溶体,与碳形成多种碳化物,可提高钢的强度和耐磨性,增加淬透性,改善抗氧化和抗腐蚀能力,并且 Cr-Fe 合金价格较低。Nb 固溶于铁素体中,以碳化物形态存在,可细化组织和晶粒,提高强度和韧性,包钢第一代稀土钢轨(BNbRE 钢轨)采用过 Nb 微合金化来提高钢轨强度和韧性,钢轨在大秦铁路线服役效果良好^[6]。稀土可以净化钢质,改变夹杂物形态,分布在碳化物和固溶体中,可以提高钢轨的韧塑性和改善耐磨性,而且稀土是包钢的特色资源,因此考虑采用^[7]。

1.1 BGRE III 稀土钢轨成分范围的制定

采用实验室小炉炼钢和热模拟试验,以试验钢性能为依据进行钢种成分筛选,确定钢种成分范围,由大量试验钢结果中选出 5 炉试验钢为代表,试验钢化学成分及性能见表 2。

表 2 试验钢化学成分及性能

编号	化学成分(质量分数)/%						硬度 (HBW)	抗拉强度 /MPa	延伸率 /%	金相 组织
	C	Si	Mn	Cr	Nb	RE				
1#	0.78	0.69	0.87				356	1 230	10.0	P
2#	0.80	0.71	0.91	微量			372	1 285	9.5	P
3#	0.79	0.68	1.02	中等含量			389	1 326	9.0	P
4#	0.80	0.75	0.93	中等含量		0.022	392	1 345	10.0	P
5#	0.81	0.82	0.95	中等含量	微量	0.020	401	1 350	11.0	P

由表 2 结果分析,钢轨 C、Si、Mn 含量大致相同,试验钢添加 Cr 元素后钢轨强度、硬度显著提高,韧性指标延伸率少量降低,试验钢加入 Cr、Nb 和稀

土元素后能保证钢轨具有良好的强度和硬度,同时具有良好的韧性,延伸率指标明显提高,钢轨力学性能指标均满足设计目标要求^[8]。BGRE III 钢轨最终

化学成分范围见表 3。

表 3 BGRE III 钢轨化学成分范围(质量分数)

钢种	C	Si	Mn	P	S	Cr + Nb	RE
BGRE III	0.70 ~ 0.90	0.60 ~ 0.90	0.80 ~ 1.10	≤0.020	≤0.020	≤0.70	加入量大于 0.02

采用 4[#]试验钢进行 CCT 和 TTT 曲线的测定,为工业在线热处理提供数据支持。检测结果表明,BGRE III 钢轨在线热处理冷却速度应控制在 1.5 ~ 4.0 °C/s,钢轨强韧性满足目标要求,金相组织为珠光体^[9]。

1.2 BGRE III 稀土钢轨工业试生产

采用包钢现有钢轨生产设备,结合实验室研究结果进行钢轨工业试生产,工业试验的工艺流程为:铁水预处理→复吹转炉冶炼→LF 精炼→VD 真空脱气→方坯连铸→步进炉加热→万能轧制→在线热处理→步进式冷床冷却→矫直→探伤→加工→检查入库。

转炉冶炼采用经过脱硫预处理的铁水,出钢碳含量不小于 0.08%,出钢温度不低于 1 630 °C。LF 精炼工艺采用石灰、萤石加发泡剂造渣,埋弧加热,

加热过程用电石和硅钙粒扩散脱氧造白渣。VD 真空脱气,破真空后进行软吹使夹杂物充分上浮,将稀土钕铁合金加入钢包中。连铸采用 280 mm × 380 mm 铸坯规格,长水口和浸入式水口保护浇注,并加强密封。连铸操作采用恒拉速浇注,过热度不高于 30 °C,凝固末端加电磁搅拌^[10]。

钢坯在加热炉内加热 4 h 以上,钢坯表面进行高压水除鳞,钢坯经 BD1、BD2 和 CCS 三套轧机进行轧制,共轧制 13 道次,开轧温度 1 150 ~ 1 200 °C,终轧温度 900 ~ 950 °C,终轧结束后钢轨进入余热淬火线快速冷却,淬火入口温度在 680 ~ 820 °C,淬火出口温度保持在 450 ~ 550 °C^[11],钢轨出余热淬火线后进入步进式冷床冷却,冷却至室温后进行矫直和超声波探伤。钢轨力学性能检验结果见表 4。

表 4 BGRE III 钢轨工业试制结果

	R_m /MPa	A /%	踏面硬度(HBW)	横断面硬度(HRC)	
				A1、B1、C1、D1、E1	A4、B5、C5、D3、E3
最大值	1 365	12.5	398	40.3	37.8
最小值	1 312	10.0	385	38.2	36.5
平均值	1 342	11.0	392	38.9	37.1
技术指标	≥1 300	≥10.0	380 ~ 430	37.0 ~ 44.0	≥36.0

2 结果与讨论

2.1 稀土在钢轨中的存在状态和作用

稀土可以净化钢质,改变夹杂物形态,分布在碳化物和固溶体中,可以提高钢轨的韧塑性和改善耐磨性^[12]。采用电解法检测稀土在钢轨中的含量,在钢轨轨头取 Φ10 mm × 65 mm 的圆棒,电解夹杂物,检测钢轨中稀土含量为 0.023%,夹杂物中稀土含量为 0.02%,表明稀土更易与夹杂物相结合,少量存在于钢轨的基体中。通过扫描电镜对拉力断口稀

土夹杂物形态进行分析,见图 1。

BGRE III 钢轨的断裂形式以准解理断裂为主,解理片数量较多并且有明显的卷曲形貌,同时解理片上有典型的撕裂棱,这些都对吸收冲击过程中的能量有利,此时,高碳稀土钢的韧性为最佳。对夹杂物成分扫描,稀土附集在夹杂物上,可以变质 MnS 和 Al₂O₃ 等类型夹杂物。同时稀土可以减小珠光体片层间距和细化奥氏体晶粒,从而改善高碳重轨钢的韧性。见图 2、图 3。

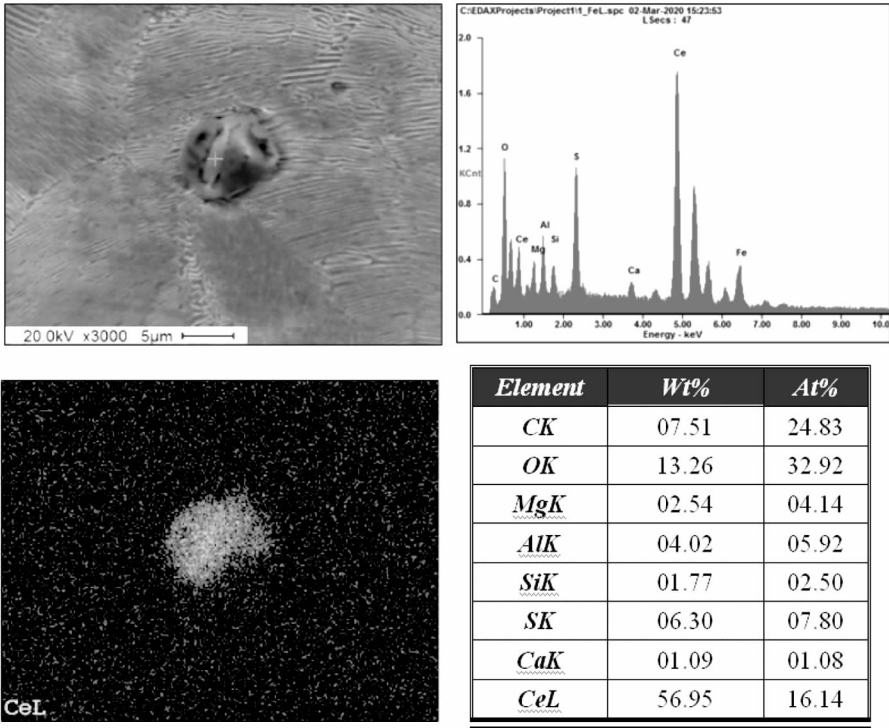
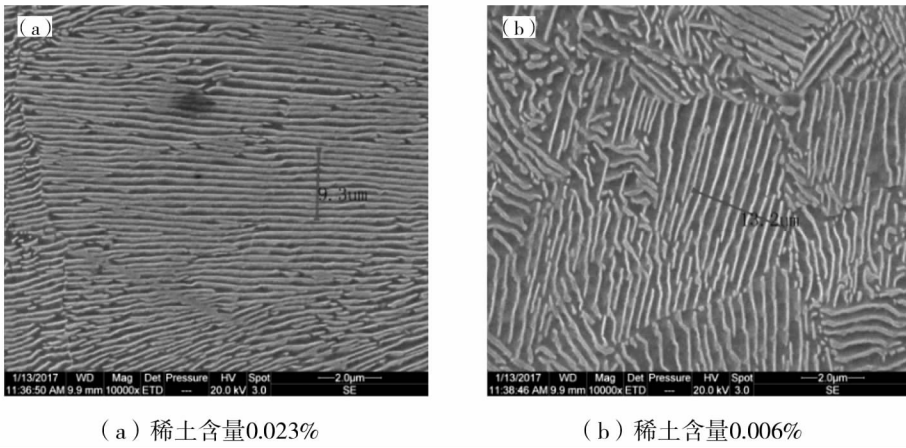


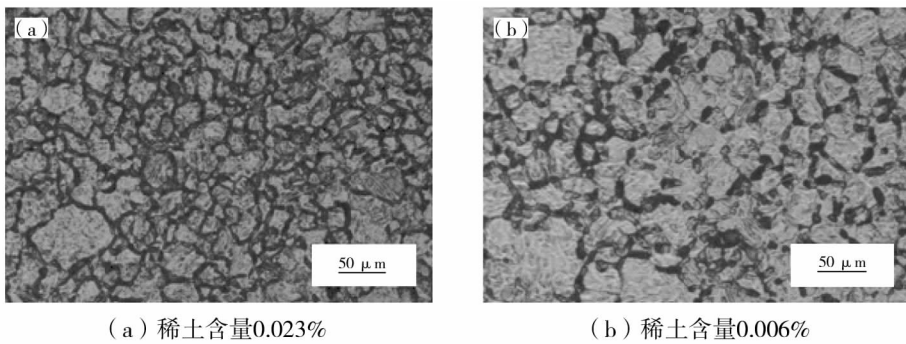
图1 BGRE III钢轨稀土夹杂物扫描电镜照片



(a) 稀土含量0.023%

(b) 稀土含量0.006%

图2 BGRE III钢轨片层间距照片



(a) 稀土含量0.023%

(b) 稀土含量0.006%

图3 BGRE III钢轨奥氏体晶粒尺寸照片

2.2 BGRE III 稀土钢轨磨损试验

针对 BGRE III 钢轨进行磨损试验,采用 U75VH、U76CrREH 和 BGRE III 钢轨进行对比试验,三个钢种硬度(HB)检测结果为 356、382 和 398。磨损试验依据 GB 12444.1—90《金属磨损试验方法 MM 型磨损试验》标准进行试验^[13]。磨损试验设备型号为 AMSLER MM 型磨损试验机,磨耗转速:车轮试样为 200 r/min,钢轨试样为 180 r/min;磨耗压力为 490 N。每磨耗 1 万次时对车轮和钢轨试样进行一次清洗,用感量为 0.1 mg 的分析天平称重,当磨耗 10 万转时试验终止,试验结果见图 4。

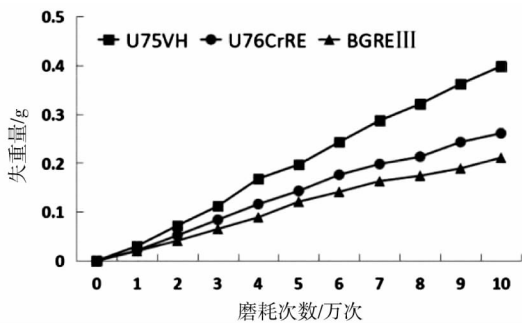


图 4 钢轨磨损试验

通过试验数据可以看出,钢轨失重量随钢轨硬度的提高而降低,BGRE III 耐磨性明显优于其他两种钢轨^[14]。目前重载铁路钢轨下线原因主要是磨耗超限,特别是小曲线段钢轨侧磨尤其突出,因此,包钢 BGRE III 三代稀土钢轨更适用于重载铁路线,以提高钢轨使用寿命。

3 结论

(1)通过开展成分和热处理工艺研究,成功开发出包钢三代稀土钢轨(BGRE III),钢轨抗拉强度 $R_m \geq 1\ 300$ MPa、延伸率 $A \geq 10\%$ 、踏面硬度(HB) 380~430,钢轨耐磨性良好。

(2)稀土与钢液中的氧硫结合力强,可以变质 MnS 和 Al_2O_3 等类型夹杂物。同时稀土可以减小珠

光体片层间距和细化奥氏体晶粒,从而改善高碳重轨钢的韧性。

参 考 文 献

- [1] 贾国平,方华龙. 稀土在钢轨中的研究[J]. 铁道物资科学管理,1997,15(1):89-91.
- [2] 余宗森. 稀土在钢铁中的应用[M]. 北京:冶金工业出版社,1995.
- [3] 余景生,余宗森,章复中. 稀土处理钢手册[M]. 北京:冶金工业出版社,1989.
- [4] TB/T 2344—2012,43~75 kg/m 钢轨订货技术条件[S].
- [5] 李春龙. 稀土在钢中应用与研究新进展[J]. 稀土,2013,34(3):78-84.
- [6] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [7] 余永宁. 金属学原理[M]. 北京:冶金工业出版社,2000.
- [8] 张银花,詹新伟,周清跃. CrNb 轨钢与 PD3、BNbRE 轨钢组织和性能的对比较研究[J]. 铁道学报,2003,25(4):35-40.
- [9] 韩振宇. 攀钢 1 300 MPa 级重载铁路钢轨开发[J]. 鞍钢技术,2012,(1):12-17.
- [10] 李春龙,王云盛,陈建军,等. 稀土在 BNbRE 重轨钢中的作用机理[J]. 钢铁研究学报,2005,17(3):47-51.
- [11] 吴庆辉,杨忠民,杨超飞,等. 轧后热处理温度对热轧钢轨组织和性能的影响[J]. 钢铁,2012,47(12):59-63.
- [12] 刘霞,王晓丽,史凤武,等. 稀土元素对重轨钢显微组织、强度的影响[J]. 稀土,2010,31(5):92-95.
- [13] GB 12444.1—90,金属磨损试验方法 MM 型磨损试验[S].
- [14] 戢景文,于宁,任新建,等. 稀土对 BNb 钢轨踏面区内耗谱的影响[J]. 金属学报,2003,39(11):1219-1222.