

贝/马复相贝氏体钢轨硬度变化规律

张凤明¹, 何建中¹, 蒋波², 梁正伟¹, 张宁², 张鑫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. 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要:测试了75 kg/m热轧贝氏体钢轨和热处理贝氏体钢轨轨头横截面和纵截面的硬度,并结合显微组织及EDS能谱分析原因。结果表明:两种状态的钢轨轨头硬度不管横截面还是纵截面,从轨头到轨腰的变化规律一致。热轧钢轨轨头硬度由踏面至轨腰呈现先下降后升高的规律,轨头顶面至踏面下13 mm处硬度波动较小,组织为粒状贝氏体+板条贝氏体+板条马氏体,由于马氏体偏析带或硬相夹杂物的存在导致局部硬度异常偏高;热处理钢轨轨头硬度由踏面至轨腰呈现先下降后升高的规律,高硬度异常点因为压痕处含有硬相夹杂物,低硬度异常点因为微区存在粒状贝氏体组织,钢轨具有较均匀贝氏体和马氏体复相组织,且均以板条形式存在,宏观表现为偏析明显改善。

关键词:贝氏体钢轨;轨头硬度;马氏体;偏析带

中图分类号: TG142.1

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2025)04-0048-06

Change Laws for Hardness of Bainite Rail with Complex Phase of Bainite and Martensite

Zhang Fengming¹, He Jianzhong¹, Jiang Bo², Liang Zhengwei¹,
Zhang Ning², Zhang Xin¹

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

2. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing,
Beijing 100083, China)

Abstract: The hardness of cross section and longitudinal section of rail head for 75 kg/m hot rolled bainite rail and heat treated bainite rail is tested as well as the reasons are analyzed combining with microstructure and energy dispersive spectrometer (EDS). The results showed that the change laws for hardness of cross section and longitudinal section of rail head were consistent from rail head to rail web for both states of rail. The hardness of rail head for hot rolled rail is decreased first and then increased from tread to rail web, hardness fluctuation is smaller from top surface of rail head to 13 mm below tread, microstructure is granular bainite + lath bainite + lath martensite as well as local hardness is abnormally high due to the existence of martensite segregation band or hard phase inclusions; the hardness of rail head for heat

treated rail is decreased first and then increased from tread to rail web. The outliers of high hardness are because indentation contains hard phase inclusions and outliers of low hardness are because there is granular bainite structure in micro region. The rail is with more uniform duplex structure of bainite and martensite as well as both of them are existed in the form of lath so that segregation is significantly improved from the macroscopical view.

Key words: bainite rail; hardness of rail head; martensite; segregation band

贝氏体钢轨具有高强度、高韧性和优良的抗接触疲劳性能等特点,在国内外铁路行业被广泛应用于道岔制作^[1-3]。国内外研发及应用的贝氏体钢轨的合金强化体系主要由 Mn、Si、Cr、Mo 组成,并添加 V、Nb、Ni、B、Al 等微合金化元素,根据产线装备实际情况和不同强度级别要求,贝氏体钢轨通常采用空冷或在线控冷工艺进行生产,以满足不同线路服役需求^[4-6]。公开报道的贝氏体钢轨合金元素含量可达 5% 以上,明显高于珠光体钢轨,合金元素的增

加极易造成铸坯和成品钢轨内部出现元素偏析等情况,从而导致钢轨不同部位的机械性能不均匀,可能引起轨头核伤、剥离掉块或波浪形磨损等现象^[7-8]。

1 试验材料及方法

试验选取 75 kg/m 热轧贝氏体钢轨和热处理贝氏体钢轨进行研究,钢轨的化学成分和力学性能如表 1 所示。

表 1 试验用 75 kg/m 贝氏体钢轨化学成分及力学性能

钢轨状态	化学成分(质量分数)/%				力学性能			
	C	Si	Mn	Cr + Ni + Mo	抗拉强度 R_m /MPa	断后伸长率 A /%	室温冲击 吸收能量 KU_2 /J	轨头顶面 中心线硬度 HBW10/3000
热轧	0.20	0.90	2.30	2.0	1 330	13.0	100	405
热处理	0.20	0.90	2.20	1.7	1 400	14.0	120	430

热轧钢轨的生产流程为铸坯加热→高压水除鳞→BD1 粗轧→BD2 粗轧→CCS 精轧→冷床冷却→矫直→探伤;热处理钢轨的生产流程为铸坯加热→高压水除鳞→BD1 粗轧→BD2 粗轧→CCS 精轧→在线热处理→冷床冷却→矫直→探伤,在线热处理方式为利用压缩空气或水雾对钢轨进行控制冷却。

分别检测热轧钢轨和热处理钢轨轨头的维氏硬度、显微组织。采用 HMV-2T 显微硬度计测量轨头的维氏硬度,施加载荷 200 g(即 HV0.2),加载时长 15 s。轨头硬度的测量分为横断面和纵截面,横断面以轨头中心线左右两侧间隔 8~10 mm 测量硬度,从轨头顶面开始至轨头和轨腰交界处(测量段全长 57.5 mm),分别标为 1 线、2 线,每线检测 23 点,每点间隔 2.5 mm;纵截面沿轨头长度方向中心 A 线剖开的纵向截面作为测量面,从轨头踏面至轨头踏面下 20 mm 处(测量段全长 20 mm),每个硬度点间隔 1 mm。

采用蔡司 Axio Observer. D1m 金相显微镜、EDS

能谱仪和 Sigma 500 场发射扫描电镜对钢轨轨头横断面和纵截面的微观组织进行全面观察和检测分析。

2 试验结果及分析

2.1 横断面硬度及组织

2.1.1 热轧钢轨

热轧钢轨轨头横断面的硬度变化如图 1 所示。由图 1 可见,热轧钢轨轨头横断面硬度变化总体呈现先降低后升高的规律,由轨头顶面至踏面下 43 mm 处,硬度逐渐降低,然后沿 43~57 mm 逐渐升高,轨头横断面硬度位于 378~452 HV 之间。其中,在 2.5~28 mm 段的硬度下降缓慢,在 43 mm 点硬度最低为 378 HV。由于热轧钢轨是在空冷状态下发生相变,轨头踏面至心部的温度梯度变化相对较小,所以轨头硬度梯度变化不明显。检测发现,2 线的第 7 点(475 HV)和第 18 点(442 HV)、1 线的第 14 点(449 HV)硬度异常过高,需结合显微组织另行分析。

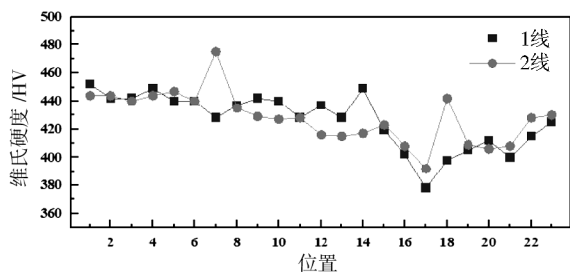
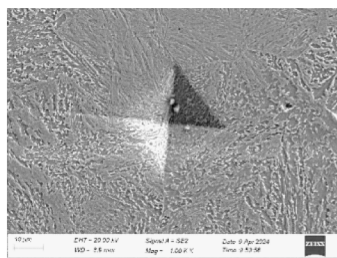
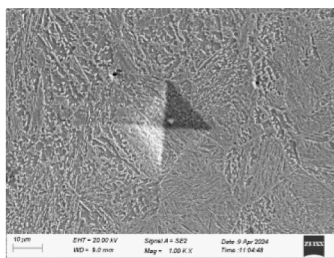


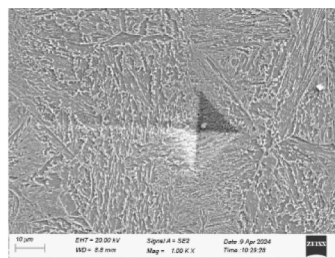
图 1 热轧钢轨轨头横断面硬度曲线



(a) 2 线第 7 点



(b) 2 线第 18 点



(c) 1 线第 14 点

图 2 热轧钢轨轨头异常硬度点区域显微组织

2.1.2 热处理钢轨

热处理钢轨轨头横断面的硬度变化如图 3 所示。由图 3 可见,热处理钢轨轨头横断面硬度呈现先下降后升高的规律,硬度由轨头顶面至踏面下 26 mm 逐渐降低,硬度从 26.0 ~ 57.0 mm 处逐渐升高,轨头横断面硬度位于 406 ~ 503 HV 之间。其中,轨头踏面下 2.5 ~ 26.0 mm 段的硬度下降较快,硬度梯度差值达到 97 HV;硬度在 25.0 ~ 27.5 mm 处最低(406 HV)。在钢轨热处理过程中,由于轨头表面至心部冷却速度不同,导致显微组织和硬度存在一定的差别。钢轨表面冷却速度大,显微组织中板条马氏体占比多且板条束较细,所以表面硬度较高;轨头心部冷却速度相对较小,心部显微组织中板条马氏体比例较少,并且有粒状贝氏体,所以心部硬度相对较低。检测发现,1 线的 14 点硬度异常过高(462 HV),1 线的第 16 点硬度异常过低(426 HV),且 1 线 16 点(426 HV)和 2 线的 16 点(467 HV)相邻两点硬度差距较大,需结合显微组织另行分析。

热处理钢轨正常显微组织为板条贝氏体 + 板条马氏体的混合组织,利用扫描电镜对 1 线 14 点、16 点和 2 线 16 点区域的显微组织进行观察,如图 4 所示。由图 4 可知,1 线 14 点区域显微组织为板条贝氏体,伴有 $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{MgO}$ 复合硬相夹杂

热轧钢轨正常显微组织为粒状贝氏体 + 板条贝氏体 + 板条马氏体的混合组织。利用扫描电镜对 2 线 7 点、18 点和 1 线 14 点区域的显微组织进行观察,如图 2 所示。由图 2 可知,2 线 7 点区域显微组织为板条马氏体,伴有 $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ 类硬相夹杂物(图 2a);2 线 18 点区域为板条贝氏体 + 板条马氏体的复合组织,含有硬相夹杂物(图 2b);1 线 14 点区域为粒状贝氏体 + 板条马氏体组织,并有硬相夹杂物(图 2c)。

物(图 4a);1 线 16 点区域为板条贝氏体 + 粒状贝氏体的复合组织,2 线 16 点区域为板条贝氏体 + 板条马氏体复合组织,由于板条马氏体组织硬度要高于粒状贝氏体,因此导致了轨头踏面下 2 条线相邻检测点的硬度差距。

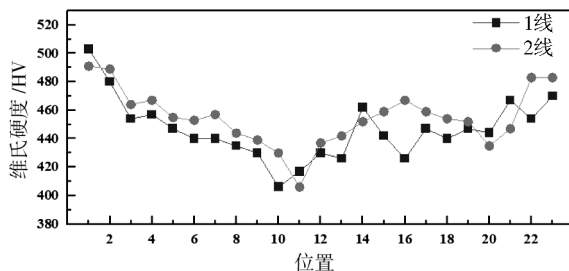


图 3 热处理钢轨轨头横断面硬度曲线

2.2 纵截面硬度及组织

2.2.1 热轧钢轨

热轧钢轨轨头纵截面的硬度变化如图 5 所示。由图 5 可知,热轧钢轨轨头踏面下 1 ~ 13 mm 范围内的硬度波动较小,在 420 ~ 440 HV 之间,硬度从轨头踏面下 14 mm 开始大幅波动,甚至在 1 mm 范围内硬度相差 51 HV,区域的显微组织及 EDS 能谱分析结果见图 6。

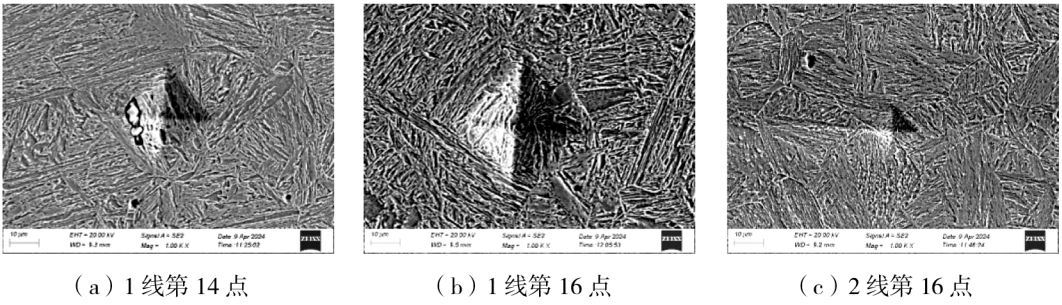


图 4 热处理钢轨轨头异常硬度点 SEM 组织

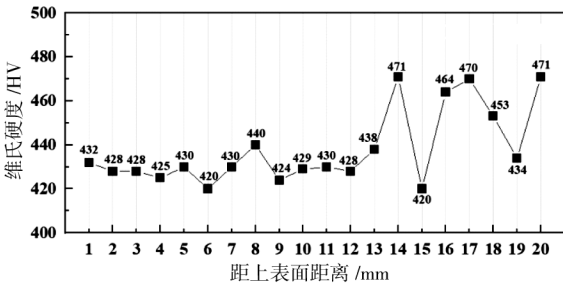
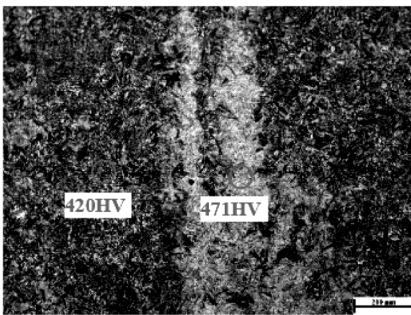
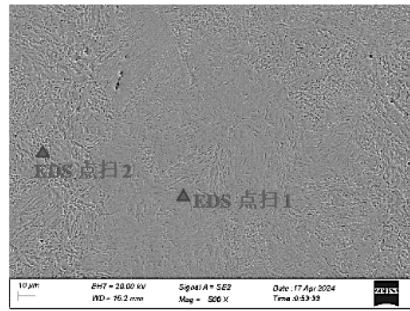


图 5 热轧钢轨轨头纵截面的硬度变化

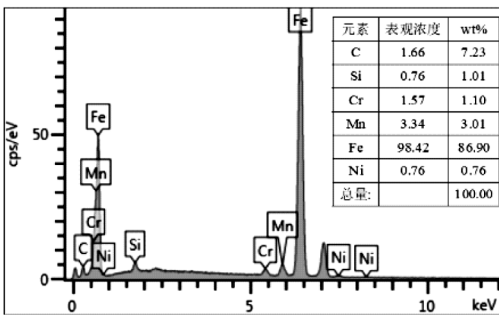
热轧钢轨正常显微组织以贝氏体为主。显微镜下观察,沿着轧制方向轨头踏面下 14 mm 区域有明显的马氏体带状组织,见图 6b。结合 EDS 能谱仪分析,发现带状组织区域内的 Mn 元素含量达 3.01% (图 6c),超过基体的 2.18% (图 6d)。由此可见,钢水连铸过程中发生局部 Mn 元素的带状偏析,后来在钢轨轧制和空冷过程中,高淬透性的富锰偏析带优先发生马氏体转变,所以偏析带硬度高。



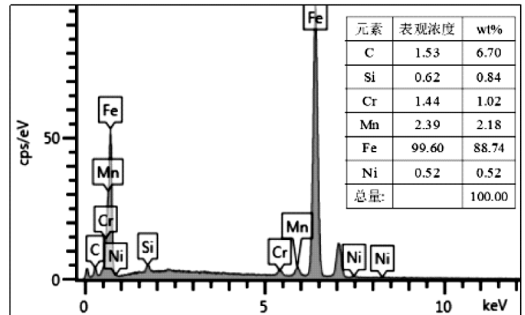
(a) 偏析带



(b) 显微组织



(c) EDS 扫描 1 点能谱



(d) EDS 扫描 2 点能谱

图 6 热轧钢轨轨头踏面下 14 mm 处显微组织及 EDS 能谱分析

2.2.2.2 热处理钢轨

热处理钢轨轨头纵截面的硬度变化如图 7 所示。由图 7 可知,热处理钢轨轨头和踏面下 18 mm 处的硬度相差较大,达到 58 HV。钢轨轨头表面硬

度最高,达到 489 HV,随着轨头踏面下沿深度的增加,硬度几乎一直下降,直到踏面下 14 mm 位置硬度趋于平稳,在 431 ~ 440 HV 之间。

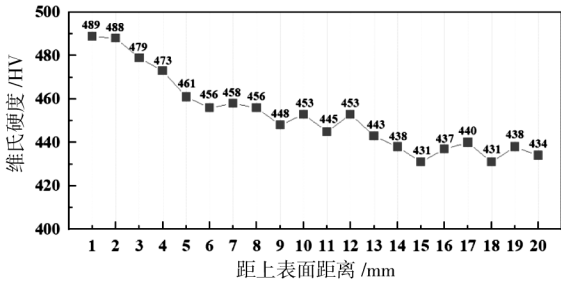
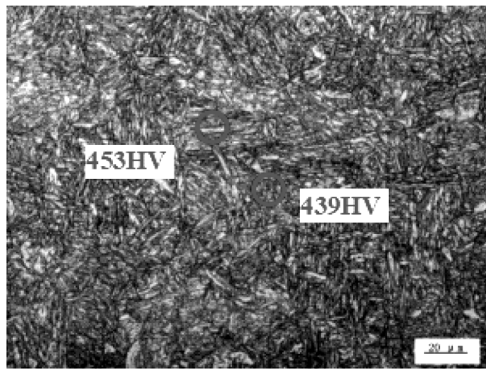
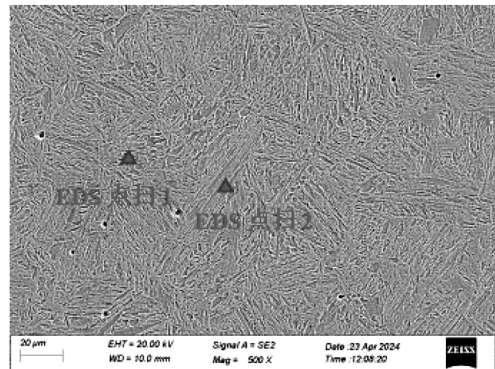


图 7 热处理钢轨轨头纵截面硬度变化

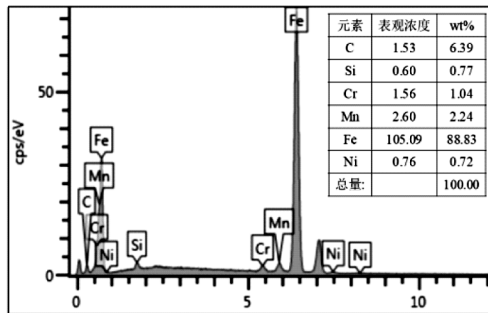
热处理钢轨正常显微组织为贝氏体和马氏体的均匀复相组织,以板条状存在,没有热轧钢轨中的高 Mn 马氏体偏析带。轨头踏面下 12 mm 区域的 EDS 能谱仪分析发现微区的各个合金元素含量基本相当。由于轨头表面及心部冷却速度不同,钢轨热处理形成贝氏体和马氏体复相组织的板条束宽度由轨头表面到内部逐渐变粗,所以其硬度逐渐降低,如图 8 所示。



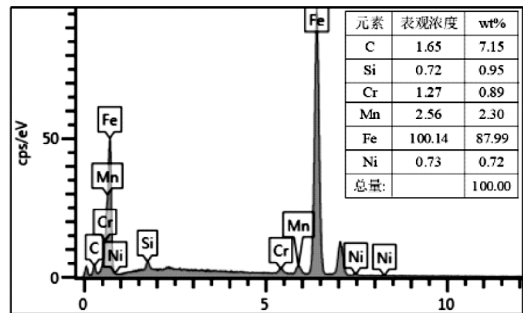
(a) 微区组织及硬度



(b) 显微组织



(c) EDS 扫描 1 点能谱



(d) EDS 扫描 2 点能谱

图 8 热处理钢轨轨头踏面下 12 mm 处显微组织及 EDS 能谱分析

3 结论

(1) 热轧钢轨轨头横断面硬度由踏面至轨腰呈现先下降后升高的规律,硬度在踏面下 43 mm 点最低,降至 378 HV。钢轨组织为粒状贝氏体 + 板条贝氏体 + 板条马氏体,高硬度异常点主要为板条马氏体组织,且压痕处含有 $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ 类硬相夹杂物。

(2) 热处理钢轨轨头横断面硬度由踏面至轨腰呈现先下降后升高的规律,硬度在踏面下 2.5 ~ 26.0 mm 下降较快,在 25.0 ~ 27.5 mm 处硬度降至 406 HV。钢轨组织为板条贝氏体 + 板条马氏体,高

硬度异常点因为压痕处含有硬相夹杂物,导致硬度升高;低硬度异常点因为微区存在粒状贝氏体组织,导致硬度降低。

(3) 热轧钢轨纵截面硬度由轨头顶面至踏面下 13 mm 波动较小,在 420 ~ 440 HV 之间,轨头踏面下 14 ~ 20 mm 范围内由于局部 Mn 元素的带状偏析,导致钢轨存在马氏体偏析带,从而提高了局部硬度,马氏体带状组织硬度可达 471 HV。

(4) 热处理钢轨纵截面硬度由轨头顶面至踏面下 14 mm 范围内一直降低,钢轨轨头表面硬度最高达到 489 HV,硬度在踏面下 14 ~ 20 mm 区间相对稳定,在 431 ~ 440 HV 之间。钢轨具有较均匀贝氏体

和马氏体复相组织,且均以板条形式存在,宏观表现为偏析明显改善。

参 考 文 献

- [1] 刘新阳. 贝氏体钢轨钢相变和微观组织的研究[D]. 北京:北京交通大学,2021.
- [2] 陈昕,金纪勇,王冬,等. 复合微合金化贝氏体钢轨组织性能研究[J]. 鞍钢技术,2022(5): 30-34.
- [3] 张凤明,梁正伟,何建中,等. 贝氏体钢轨高温回火试验研究[J]. 包钢科技,2021,47(5): 68-71,95.
- [4] 李智丽,梁正伟,张凤明,等. U20Mn2SiCrNiMo 贝氏体钢等温冷却转变的显微组织演化[J]. 金属热处理,2025,50(5):236-241.
- [5] 张迪,包喜荣,陈林,等. Mn-Cr-Mo 系贝氏体钢连续冷却转变的原位观察[J]. 金属热处理,2022,47(8):34-40.
- [6] 董瑞,陈林,岑耀东,等. 不同热处理条件下贝氏体钢的微观组织和疲劳裂纹扩展[J]. 金属热处理,2022,47(2):153-158.
- [7] 张瑞杰,郑春雷,张佩君,等. 定量分析贝氏体钢轨钢中的偏析对疲劳磨损性能的影响[J]. 机械工程学报,2023,59(12):253-263.
- [8] 韩青阳,程丹,任映奇,等. 偏析带对贝氏体钢轨钢腐蚀磨损性能的影响[J]. 燕山大学学报,2023,47(4):298-306.

(上接第47页)

4 结 论

(1)该规格气瓶用无缝钢管的内表面横向缺欠为轧制缺欠,产生于连轧机机组轧制过程。

(2)气瓶用无缝钢管内表面产生横向缺欠的原因为润滑效果不良,由穿孔工序的毛管硼砂润滑效果不良和连轧工序的芯棒石墨润滑不理想造成。

(3)通过改善润滑效果和提高连轧机开轧温度的措施可以有效减少该产品的内表面横向裂纹缺欠。

参 考 文 献

- [1] 王康. 宝钢高强度气瓶管的开发与组织性能研究[J]. 钢管,2024,53(3):30-35.
- [2] GB/T 18248—2021,气瓶用无缝钢管[S].
- [3] 寇沙沙. Q345B 无缝钢管结疤缺陷原因分析[J]. 包钢科技,2016,42(5):49-51,54.
- [4] 王君国. $\Phi 460$ mm PQF 连轧管机钢管内划道分析[J]. 天津冶金,2020(2):29-31.