贝氏体钢轨高温回火试验研究*

张凤明,梁正伟,何建中,李智丽,王嘉伟,杨 静

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章对75 kg/m在线热处理态贝氏体钢轨,在实验室进行了系列高温回火试验,并对不同回火工艺下钢轨的常规力学性能、-20 ℃断裂韧性、疲劳裂纹扩展速率、残余应力、显微组织进行了对比分析。试验结果表明,在线热处理态钢轨随着回火温度的升高,强度、硬度、残余应力呈线性降低; -20 ℃断裂韧性、冲击功等韧性指标先降低后升高,断裂韧性及疲劳裂纹扩展速率性能指标优于低温回火状态。在线热处理态钢轨高温回火处理,具有较高的断裂韧性和较低的疲劳裂纹扩展速率,可进一步发挥贝氏体钢轨高韧性特点和抗裂纹萌生扩展能力。

关键词: 贝氏体钢轨; 高温回火; 力学性能; 显微组织

中图分类号: TG161 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009-5438(2021)05-0068-04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2021.05.017

Experimental Research on High Temperature Tempering of Bainite Rail

Zhang Feng-ming, Liang Zheng-wei, He Jian-zhong, Li Zhi-li, Wang Jia-wei, Yang Jing

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

Abstract: In this article, it is introduced a series of high temperature tempering tests for 75 kg/m on-line as-heat-treated bainite rails in the laboratory as well as compared and analyzed the conventional mechanical properties, fracture toughness at -20 ℃, spreading rate of fatigue crack, residual stress and microstructure of rails with different tempering processes. The test results show that the strength, hardness and residual stress of on-line as-heat-treated rails decrease linearly; such toughness indexes as fracture toughness at -20 ℃ and impact energy firstly decrease and then increase with the tempering temperature increases as well as the performance indexes of fracture toughness and spreading rate of fatigue crack are better than those at low temperature tempering state. The on-line as-heat-treated with high temperature tempering is with higher fracture toughness and lower spreading rate of fatigue crack so that the characteristics of high toughness and resistance to generation and spread of crack for bainite rails could be further exerted.

Key words: bainite rail; high temperature tempering; mechanical properties; microstructure

目前,我国大宗和长途货物的运输主要依靠货运铁路承担,重载铁路是提高货运能力最有效的途径,随着我国重载铁路轴重增加、运量加大将对钢轨材料的韧塑性、耐磨性、抗疲劳性提出更加严苛的要求[1-2]。在线热处理态贝氏体钢轨与传统的高碳珠光体型钢轨相比,具有高强韧性、抗接触疲劳性能和

* **收稿日期**: 2021-08-18

作者简介: 张凤明(1987-),男,内蒙古赤峰市人,工程师,现从事钢轨研发工作。

长服役寿命的特点，因而具有巨大的开发潜力。本文针对在线热处理的 75 kg/m 贝氏体钢轨开展了实验室高温回火试验研究，对比分析了不同回火工艺对贝氏体钢轨常规力学性能、－20 ℃断裂韧性、疲劳裂纹扩展速率、残余应力、显微组织的影响，为在线热处理贝氏体钢轨实际应用提供数据支持。

1　试验材料及方法

回火试验采用 75 kg/m 线热处理贝氏体钢轨，试样长度 1 m，试验用的贝氏体钢轨中 C 含量为 0.10% ~0.25%，加入适量的 Si、Mn、Cr、Ni、Mo 等合金元素，具体化学成分和力学性能如表 1 所示。

表 1　贝氏体钢轨化学成分及力学性能

化学成分(质量分数)/%				力学性能					
C	Si	Mn	Cr + Ni + Mo	$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	KU_2/J	HBW	残余应力/MPa
0.10 ~0.25	0.5 ~1.5	1.4 ~2.5	1.5 ~2.0	1 230 ~1 290	1 380 ~1 420	10 ~12	80 ~100	410 ~430	350 ~430

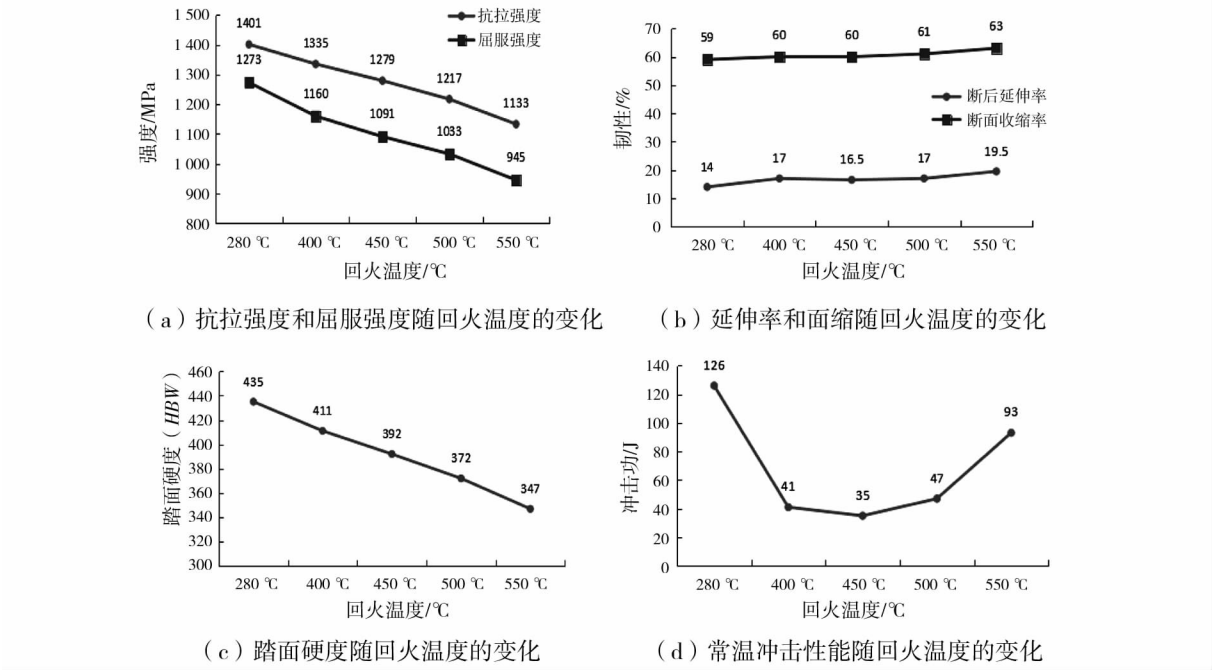
试验采用高温回火工艺，设定温度分别为 400 ℃、450 ℃、500 ℃、550 ℃，保温时间 24 h，并增加 280 ℃做为对比温度。对 1 m 长的在线热处理态钢轨进行高温回火处理，针对回火后钢轨的残余应力、拉伸、冲击、踏面硬度、－20 ℃断裂韧性、疲劳裂纹扩展速率、显微组织等进行检测对比分析。

高温回火试验采用 RX4 －65 －8 回火炉；检测试验分析分别采用 Instron60 电子拉伸试验机、NI750 冲击试验机、TH600 布氏硬度计、德国蔡司 observer AIM 光学显微镜和 EVO50HV 型扫描电子显微镜、MTS810 材料试验机。

2　试验结果及分析

2.1　不同回火温度对钢轨常规力学性能的影响

实验室对在线热处理的 75 kg/m 贝氏体钢轨进行了保温时间为 24 h、不同回火加热温度的对比试验。



（a）抗拉强度和屈服强度随回火温度的变化　（b）延伸率和面缩随回火温度的变化

（c）踏面硬度随回火温度的变化　（d）常温冲击性能随回火温度的变化

图 1　不同回火温度钢轨常规力学性能变化

由图 1 可知，随着回火温度从 280 ℃提高到 550 ℃，钢轨抗拉强度、屈服强度、踏面硬度呈线性降低，抗拉强度降低到 1 133 MPa，踏面硬度（HBW）降低到 347，且随着回火温度升高，屈强比小幅度降

低，屈强比基本保持在0.83～0.92之间；钢轨延伸率、面缩率线性小幅度升高，当回火温度达到550 ℃时，延伸率可达19.5%，面缩可达63%，钢轨具有了较高的延伸率和面缩值。钢轨常温冲击性能随着回火温度升高，先降低后升高，这与钢轨不同回火温度贝氏体、马氏体组织转变有关。

2.2 不同回火工艺对钢轨残余应力的影响

贝氏体钢轨经过在线热处理后，在获得高强度高韧性的同时，也伴生了较高的残余应力，影响钢轨的服役寿命。资料研究表明通过回火处理可以稳定贝氏体钢轨中的残余奥氏体，降低钢轨内部的残余应力[3]。实验室通过对在线淬火的75 g/m贝氏体钢轨进行了不同回火工艺试验，对钢轨残余应力的变化进行了研究。由图2可知，随着回火温度从280 ℃提高到550 ℃，钢轨轨底残余应力随回火温度的提高呈下降趋势，当回火温度为550 ℃时，钢轨轨底的残余应力值下降至39 MPa。在线热处理贝氏体钢轨由于热应力、组织应力和矫直应力的存在，从而使钢轨宏观体现出较大的残余拉应力，高温回火可有效的降低钢轨的残余应力。由试验数据可知，当回火温度高于400 ℃时，钢轨残余应力降低到214 MPa，可以满足小于等于250 MPa目标要求，从而降低因轮轨作用力和钢轨残余应力相互作用，而引起的核伤发生几率。

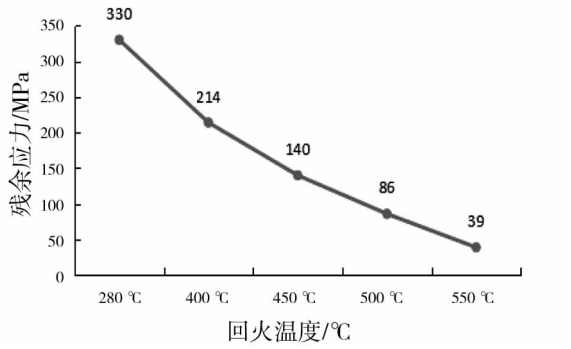


图2 不同回火温度钢轨残余应力变化

2.3 不同回火工艺对钢轨断裂韧性和疲劳裂纹扩展速率的影响

钢轨断裂韧性、疲劳裂纹扩展速率指标对服役性能有着重要的影响。钢轨生产制造过程中，表面和内部不可避免的会产生宏观或微观的缺陷，这些缺陷在服役过程中，会因轮轨作用而产生裂纹并可能导致钢轨断裂。实验室对在线热处理的75 kg/m贝氏体钢轨进行了保温时间为24 h、不同回火加热温度的对比试验。

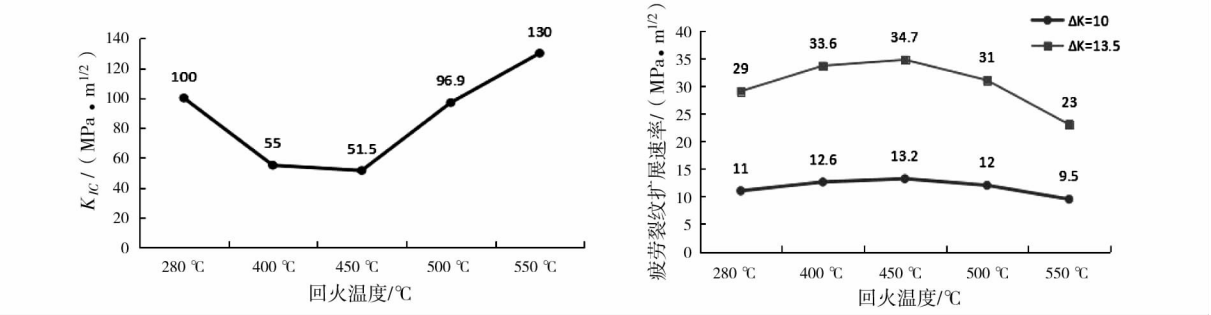


图3 不同回火温度断裂韧性和疲劳裂纹扩展速率性能变化

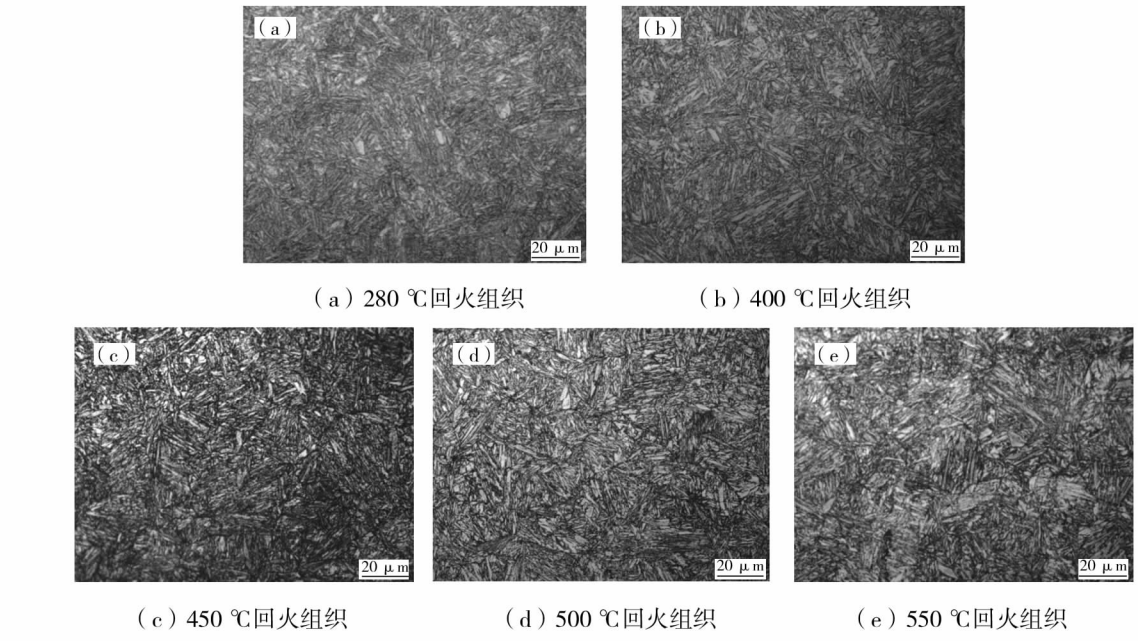
由图3可知，随着回火温度从280 ℃提高到550 ℃，钢轨－20 ℃断裂韧性K_{IC}值先降低后升高，当回火温度为550 ℃时，最大值可达130 MPa·m$^{1/2}$，使在线热处理态钢轨具有了较高的断裂韧性值；钢轨疲劳裂纹扩展速率da/dN先升高后降低，当回火温度为550 ℃时，应力强度因子ΔK=10 MPa·m$^{1/2}$和ΔK=13.5 MPa·m$^{1/2}$平均值分别为9.5 MPa·m$^{1/2}$和23 MPa·m$^{1/2}$，使在线热处理态钢轨具有了较低的疲劳裂纹扩展速率值。较高的断裂韧性值和较低的疲劳裂纹扩展速率，保证了钢轨具有良好的韧性、抗裂纹萌生和扩展能力，从而有效的提高贝氏体钢轨服役性能。

2.4 不同回火工艺钢轨的显微组织

对280 ℃、400 ℃、450 ℃、500 ℃、550 ℃ 5个加热温度的试验钢轨轨头部位的显微组织形貌进行了对比分析。从图4可以看出，显微组织均由贝氏体、回火马氏体和少量的残余奥氏体组成。试样随着回火温度从280 ℃提高到550 ℃，贝马复相组织中马氏体发生回火转变，部分的碳化物析出，导致组织固溶强化效应消失，且贝氏体、铁素体板条持续粗化，

因此钢轨强度、硬度线性降低，且高的回火温度会因碳化物的粗化而使屈强比降低。

贝氏体、铁素体含有较低的过饱和碳和较低的位错密度，因此在回火过程中，贝氏体、铁素体析出碳化物的倾向相对于马氏体来说要困难一些，因此它所需的分解温度要高一些。当钢轨回火温度超过 450 ℃，贝氏体、铁素体板条厚度增加，位错密度降低，并伴有碳化物析出、聚集、长大。由于钢轨位错密度、残余应力会随着回火温度的升高进一步降低，贝氏体、铁素体中析出的弥散细小的碳化物能更有效的钉扎住位错，且马氏体的高温回火处理韧性会进一步增加，从而体现回火温度高于 450 ℃时，冲击功、断裂韧性增加和疲劳裂纹扩展速率的降低。



（a）280 ℃回火组织　（b）400 ℃回火组织

（c）450 ℃回火组织　（d）500 ℃回火组织　（e）550 ℃回火组织

图 4　不同回火温度显微组织变化

3　结论

(1) 在线热处理态贝氏体钢轨高温回火试验表明，随着回火温度的增加，钢轨强度、踏面硬度降低，屈强比小幅度降低，屈强比基本保持在 0.83 ~ 0.92 之间；延伸率、面缩率线性小幅度升高，延伸率可达 19.5%，面缩可达 63%，此时钢轨具有较高的延伸率值。

(2) 由试验数据可知，钢轨轨底残余应力随回火温度的提高呈下降趋势，当回火温度高于 400 ℃时，钢轨残余应力降低到 214 MPa，可以满足钢轨小于等于 250 MPa 目标要求，当回火温度为 550 ℃时，钢轨轨底的残余应力值下降至 39 MPa，高温回火可有效的降低残余应力。随着回火温度的升高，钢轨 −20 ℃断裂韧性先降低后升高，钢轨疲劳裂纹扩展速率先升高后降低。当回火温度为 550 ℃时，−20 ℃断裂韧性 K_{IC} 值可达 130 MPa · $m^{1/2}$，疲劳裂纹扩展速率 da/dN 分别为 9.5 MPa · $m^{1/2}$ 和 23 MPa · $m^{1/2}$，使在线热处理态钢轨具有较高的断裂韧性值和较低的疲劳裂纹扩展速率值。

(3) 钢轨高温回火后显微组织均由贝氏体、回火马氏体和少量的残余奥氏体组成。随着回火温度的升高，组织中马氏体、贝氏体发生回火转变，贝氏体、铁素体板条厚度增加并伴随着碳化物析出、聚集、长大。

参　考　文　献

[1] 周清跃，张银花，陈朝阳，等. 国内外钢轨钢研究及进展 [J]. 中国铁道科学，2002，23(6)：120 − 126.

[2] 谭谆礼，高博，高古辉，等. 国内外贝氏体钢轨的研发现状 [J]. 金属热处理，2018，43(4)：10 − 18.

（下转第 95 页）

对值如图 5 所示，该程序测量的位置误差不大于 0.6 mm，且大部分情况下测量误差不会大于 0.3 mm，考虑到全自动充电机器人的充电接口可以加装柔顺机构，因此该范围是可以接受的。

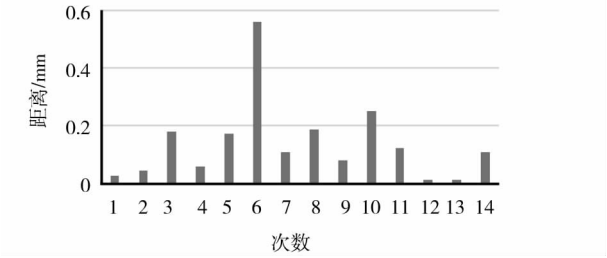


图 5　误差距离绝对值

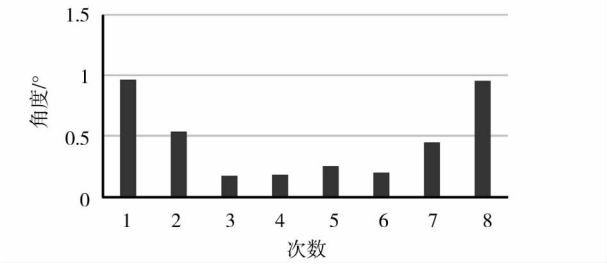


图 6　误差角度绝对值

图 6 是对元件水平角、俯仰角变化时，进行测量得到的误差角度的绝对值，角度变化的测量进行了 8 次。通过图 6 可以看出，视觉程序的角估算误差不超过 1°，且在大部分情况下都在 0.5°左右，依然是一个可以通过在充电口加装柔顺机构来解决的角度。

4　结语

本文针对电动汽车直流充电接口圆形的特点，提出了一种基于椭圆特征的电动汽车直流充电接口位姿估计方法，利用圆与椭圆之间的关系，针对最小二乘法拟合后的椭圆，进行相关参数求解，进而得到直流充电接口的位姿参数。该方法能够对电动汽车直流充电接口进行较准确的位姿估计，满足全自动充电机器人的导航精度需求。该方法简单可靠，不需要额外添加任何特征点，普适性高。

参　考　文　献

[1] 钟佩思，刘敬华，刘梅，等. 基于改进的加速鲁棒特征算法的工件定位方法[J]. 科学技术与工程，2019，19(5)：197－202.

[2] 翟永杰，刘金龙，程海燕. 基于机器视觉的汽车工件抓取定位系统设计与开发[J]. 现代电子技术，2018，41(20)：6－9，13.

[3] Fornaciari M.，Prati A.，Cucchiara R. A fast and effective ellipse detector for embedded vision applications [J]. Pattern Recognition，2014，47：3693－3708.

[4] 潘琪，秦襄培，尹雄，等. 基于双目视觉的工件测量研究[J]. 智能计算机与应用，2018，8(1)：18－21，26.

(上接第 71 页)

[3] 武会宾，尚成嘉，赵云堂，等. 回火对低碳贝氏体钢组织稳定性及力学性能的影响[J]. 钢铁，2005，40(3)：62－65.