

回火工艺对热轧 U20Mn2SiCrNiMo 贝氏体钢轨组织性能的影响

杨维宇¹ 何建中² 梁正伟² 李智丽²

(1 内蒙古包钢金属制造有限责任公司研发中心, 包头 014010; 2 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 包头 014010)

摘要 U20Mn2SiCrNiMo 贝氏体钢轨的生产流程为 150 t 转炉-LF-VD-280 mm × 380 mm 铸坯-轧制, 终轧 930 ~ 980 °C, 空冷 -340 °C 4 h 两次回火, 空冷。U20Mn2SiCrNiMo 钢热轧态(终轧 930 ~ 980 °C 空冷)和(320 °C 一、二次回火)组织均由贝氏体、马氏体和残余奥氏体组成。力学性能试验结果表明: U20Mn2SiCrNiMo 钢轨最佳回火工艺为 320 °C 4 h 空冷 + 320 °C 4 h 空冷二次回火, 其性能为: 屈服强度 1 242 MPa, 抗拉强度 1 393 MPa, HBW 硬度值 417, 伸长率 15.0%, 断面收缩率 60%, 冲击吸收功 K_{I2} 98 J, 轨底纵向残余应力 +180 MPa。

关键词 U20Mn2SiCrNiMo 贝氏体钢轨 回火 显微组织 力学性能 残余应力

Effect of Tempering Process on Microstructure and Properties of Hot-rolled U20Mn2SiCrNiMo Bainitic Rail Steel

Yang Weiyu¹, He Jianzhong², Liang Zhengwei² and Li Zhili²

(1 Research Center of Metal Manufacture Co Ltd of Inner Mongolia Baotou Steel Union, Baotou 014010;
2 Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co Ltd, Baotou 014010)

Abstract The flowsheet process of U20Mn2SiCrNiMo bainitic rail steel is 150 t BOF-LF-VD-280 mm × 380 mm cast bloom-rolling, finishing at 930 ~ 980 °C, air cooling -340 °C 4 h, air cooling, double tempering. The microstructure of hot-rolled (end rolling at 930 ~ 980 °C air cooling) and tempered (320 °C once-and double-tempering) of U20Mn2SiCrNiMo steel is composed of bainite, martensite and retained austenite. Mechanical properties test results show that the optimum tempering process of U20Mn2SiCrNiMo steel rail is 320 °C 4 h air cooling + 320 °C 4 h air cooling, double tempering, its yield strength is 1 242 MPa, tensile strength 1 393 MPa, HBW hardness 417, elongation 15.0%, reduction of area 60%, impact absorption work K_{I2} is 98 J, and longitudinal residual stress of rail bottom +180 MPa.

Material Index U20Mn2SiCrNiMo Bainitic Steel Rail, Tempering, Microstructure, Mechanical Properties, Residual Stress

2002 年包钢与清华大学合作开发出 Cr-Mn-Mo 系 60 kg/m 贝氏体钢轨, 用于制作铁路道岔, 已成功应用在京沪、京广、大秦、石太等线路上, 其使用寿命是传统珠光体道岔的 2 ~ 3 倍^[1]。经过近二十年的研究与应用, 合适形态的贝氏体组织在具高强韧性配合的同时, 其抗接触疲劳抗力远高于同等条件下的珠光体组织^[2], 所以国内贝氏体钢轨生产企业一直致力于贝氏体钢轨在重载铁路的应用, 包钢贝氏体钢轨继首次成功试铺在瓦日铁路后, 又成功在世界年货运量最大的运煤专线大秦铁路上试铺。

热轧态贝氏体钢轨一般不直接使用, 需要经过后续的热处理来改善组织提高性能, 主要有回火、正火等工艺。Kaikai Wang^[3]、许亚娟^[4]、熊志强^[5]等研究了一次回火对不同成分体系热轧态贝氏体钢轨

组织、力学性能、残余奥氏体转变的影响, 以期找到最佳的回火工艺, 使其钢轨中的残余奥氏体稳定, 强韧性配合最佳, 提高其服役性能。强度等级相近而最佳回火温度不同和贝氏体钢轨的成分体系有关, 主要是 Si 含量, 随着 Si 含量的增加, 贝氏体钢轨的最佳回火温度升高, U 25CrNi 高强贝氏体钢轨中 Si 含量为 1.53%, 最佳回火温度为 400 °C^[5]。V. I. Vorozhishchev^[6]研究了正火 + 回火工艺对贝氏体钢轨微观组织的影响, 该热处理工艺可以降低贝氏体钢轨的残余奥氏体, 升高马氏体含量, 同时在马氏体和贝氏体晶界、马氏体内部析出细小的碳化物。但很少有文献研究二次回火对贝氏体钢轨显微组织和力学性能的影响。本文主要研究一次回火和二次回火对热轧态 U20Mn2SiCrNiMo 贝氏体钢轨显微组

织、力学性能、轨底纵向残余应力的影响。

1 试验材料和方法

试验用 U20Mn2SiCrNiMo 贝氏体钢轨,化学成分见表 1,其生产工艺流程为:KR 铁水脱硫→150 t 转炉→LF 精炼→VD 真空处理→连铸→280 mm × 380 mm 铸坯缓冷→连铸坯加热→高压水除鳞→BD1 轧制→BD2 轧制→CCS 终轧后空冷(930 ~ 980 ℃)→冷却→矫直→探伤→质量检查→热处理→力学性能检测^[7]。

选用长度为 1 m 的热轧钢轨在工业热处理炉中进行回火试验,75 kg/m 钢轨断面形状示意图如图 1 所示,轨底宽 150 mm,轨高 192 mm。一次回火工艺:320 ℃ 4 h,空冷,二次回火工艺:320 ℃ 4 h,空冷 + 320 ℃ 4 h,空冷。

由于钢轨为非对称截面,不同位置的冷速不同、铸坯质量及轧制压缩比不同导致钢轨轨头、轨腰、轨底的组织和性能存在一定差异,而钢轨服役时主要考验轨头的综合性能^[5],故本文选取轨头处的试样进行分析,将截取的试样经过打磨、抛光、4% 硝酸酒精溶液浸蚀后,用蔡司 Axio observer A1M 光学显微镜对金相组织进行表征。

根据 TJ/GW117《U20Mn2SiCrNiMo 贝氏体钢轨暂行技术条件》从轨头上取标准拉伸、冲击、踏面硬度试样^[7],根据国标 GB/T228-2010,在 Instron 60 t 电子拉伸试验机下进行拉伸试验,测定试样的力学性能^[8];根据国标 GB/T229-2007,用 NI750 冲击试验机进行 U 型缺口室温冲击试验,取三次测定结果求平均值^[8];根据国标 GB/T231.1-2018,用 TH600 型布氏硬度计测定轨头硬度,取五次测定结果求平均值。用 AFT-CM-10 静态电阻应变仪采用贴片法测定不同热处理状态下轨底正中心纵向残余应力值。

表 1 U20Mn2SiCrNiMo 贝氏体钢轨的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of U20Mn2SiCrNiMo bainitic rail steel/%

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Alt
0.15 ~ 0.28	0.70 ~ 1.50	1.50 ~ 2.50	0.70 ~ 1.50	0.30 ~ 0.80	0.25 ~ 0.55	≤ 0.035

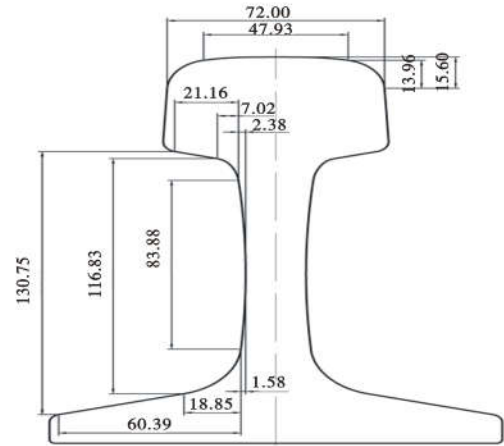


图 1 75 kg/m 钢轨断面图
Fig. 1 Section of 75 kg/m steel rail

2 试验结果

2.1 显微组织

图 2 为 U20Mn2SiCrNiMo 贝氏体钢轨热轧态、一次回火、二次回火后轨头踏面下 15 mm 处横截面显微组织,从图 2 可以看出,试验钢热轧态显微组织以板条贝氏体和低碳马氏体为主,因钢轨热轧后空冷,在连续冷却时接连发生了贝氏体和马氏体相变,室温组织中还有 8% 左右的残余奥氏体^[3]。和热轧态的组织相比,回火后试验钢显微组织形貌基本没有改变,以板条贝氏体和回火马氏体为主。由于回火温度为 320 ℃,为低温回火,一次回火和二次回火后试验钢显微组织中马氏体还保留位向,贝氏体板

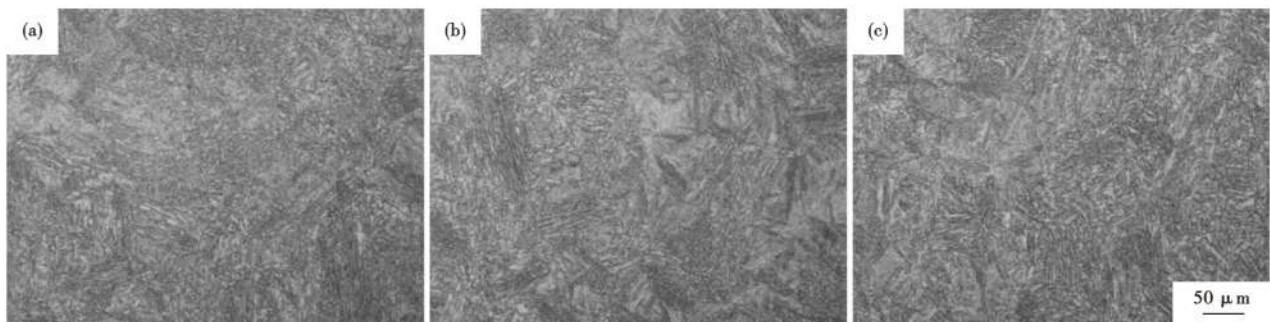


图 2 U20Mn2SiCrNiMo 钢热轧(a),320 ℃ 4 h 回火(b),320 ℃ 4 h + 320 ℃ 4 h 回火(c)的组织形貌

Fig. 2 Morphology of structure of U20Mn2SiCrNiMo steel hot-rolled (a), 320 ℃ 4 h tempered (b) and 320 ℃ 4 h + 320 ℃ 4 h tempered (c)

表 2 回火对 U20Mn2SiCrNiMo 钢轨力学性能的影响

Table 2 Effect of tempering on mechanical properties of U20Mn2SiCrNiMo steel rail

状态	R _{p0.2} /MPa	R _m /MPa	A/%	Z/%	K _{U2} /J	HBW 硬度值
热轧,终轧 930~980 °C,空冷	1240	1344	10.0	38	68	420
一次回火,320 °C 4 h,空冷	1245	1364	13.5	54	96	430
二次回火,320 °C 4 h,空冷	1242	1393	15.0	60	98	417
TJ/GW117-2013	≥1000	≥1280	≥12.0	≥35	≥70	360~430

表 3 回火对 U20Mn2SiCrNiMo 钢轨底残余应力的影响/MPa

Table 3 Effect of tempering on residual stress at rail bottom of U20Mn2SiCrNiMo steel rail/MPa

状态	热轧态	一次回火	二次回火
轨底残余应力	+290	+240	+180
TJ/GW117-2013		≤+330	

条并未粗化。

2.2 力学性能

U20Mn2SiCrNiMo 贝氏体钢轨热轧态、一次回火、二次回火后轨头力学性能如表 2 所示。从表 2 可知,热轧态 U20Mn2SiCrNiMo 贝氏体钢轨的屈服强度为 1 240 MPa,抗拉强度为 1 344 MPa,断后伸长率为 10.0%,断面收缩率为 38%,冲击吸收功 K_{U2} 为 68 J,踏面 HBW 硬度值为 420。

和热轧态力学性能相比,经一次回火后,试验钢的强度、硬度略有升高,塑性、韧性显著提升,屈服强度为 1 245 MPa,抗拉强度为 1 364 MPa,踏面 HBW 硬度值为 430,断后伸长率提升了 35%,达到 13.5%,断面收缩率提升了 42%,达到 54%,冲击吸收功 K_{U2} 提升了 41%,达到 96J。

经二次回火后,试样钢的屈服强度为 1 242 MPa,抗拉强度为 1 393 MPa,断后伸长率为 15.0%,断面收缩率为 60%,冲击吸收功 K_{U2} 为 98 J,踏面 HBW 硬度值为 417。对比二次回火和一次回火对试验钢热轧态力学性能的影响,二次回火后,试验钢塑性指标进一步改善,断后伸长率从 13.5% 提高到 15.0%,断面收缩率从 54% 提高到 60%,抗拉强度和冲击吸收功略有升高,抗拉强度从 1 364 MPa 升高到 1 393 MPa,冲击吸收功 K_{U2} 从 96 J 升高到 98 J,而屈服强度和踏面硬度略有降低。

2.3 轨底残余应力

表 3 为 U20Mn2SiCrNiMo 贝氏体钢轨热轧态、一次回火、二次回火后轨底纵向残余应力值,都是拉应力。热轧后试验钢轨底纵向残余应力值最大,为 290 MPa;试验钢经一次回火后轨底残余应力略有降低,降为 240 MPa;和热轧态残余应力相比,经两次回火后,试验钢轨底残余应力大幅降低,降为 180

MPa。综合回火工艺对力学性能的影响,热轧态 U20Mn2SiCrNiMo 贝氏体钢轨的最佳回火工艺为:320 °C 4 h,空冷+320 °C 4 h,空冷。

钢轨热轧态残余应力是钢轨冷却、相变产生的应力和矫直产生的应力叠加的结果^[9]。钢轨轧后冷却是温度、组织、应力、应变等相互作用的复杂过程,内外部冷却速度不同所引起的温度梯度以及微观显微组织的转变,会产生很大的热应力和相变应力,两者叠加使钢轨产生不均匀的塑性变形^[9],焊接热循环试验表明,贝氏体钢轨冷却时体积膨胀量是珠光体钢轨的 4 倍^[10],相变应力较大;随后钢轨采用辊式矫直,轨头、轨底横向拉伸,纵向变短,轨底产生纵向拉应力^[11],所以试验钢热轧态轨底残余应力较大,为纵向拉应力。

贝氏体钢轨回火是一个显微组织由非平衡态向平衡态转化的过程,但回火温度不能太高,如回火温度超过试验钢的最佳回火温度,贝氏体板条粗化,碳化物粗大,残余奥氏体完全分解,可能会导致试验钢强度、塑性同时降低^[4],根据试验钢成分特点和 Kai-kai Wang^[3]研究成果,U20Mn2SiCrNiMo 贝氏体钢轨采用 320 °C 低温回火处理。低温回火可以降低钢的淬火应力,改善钢的韧性、塑性,同时可以大幅度提高钢轨尺寸稳定性,主要包括碳原子的脱溶和偏聚、碳化物的析出、板条贝氏体(马氏体)的回复、残余奥氏体的分解。

从表 2 可知,回火对试验钢的屈服强度影响不大,但抗拉强度随着回火次数的增加略有升高,试验钢热轧态抗拉强度为 1 344 MPa,一次回火后提高到 1 364 MPa,二次回火后提高到 1 393 MPa,这可能和残留奥氏体在回火过程中发生分解形成贝氏体或马氏体有关,这种强化作用对抗拉强度的贡献较大^[12],所以 U20Mn2SiCrNiMo 贝氏体钢轨经低温回火后,抗拉强度会略有提高。

和热轧态力学性能相比,试验钢经一次回火后,塑性和韧性大幅提高,贝/马复相组织经低温回火时马氏体中过饱和碳元素发生扩散和偏聚,内应力降低,板条贝氏体(马氏体)发生回复,位错密度降低,位错缠结打开,位错间的交互作用减弱,可使位错密

度升高,位错运动自由程增加,位错运动及动态回复减少了裂纹的萌生和扩展,减缓应力集中,这是一个软化过程,有利于塑性、韧性的提高;同时低温回火时析出的细小碳化物能有效钉扎位错产生析出强化。回火过程伴随着回复再结晶的软化效应和析出产生的强化效应^[12],两者同时发生且相互矛盾,所以试验钢经一次回火后,屈服强度基本保持不变,但塑性、韧性提高。试验钢经二次回火,位错密度进一步降低,位错间的交互作用减弱,位错运动自由程增加,导致塑性进一步提高。

3 结论

(1) 热轧态 U20Mn2SiCrNiMo 贝氏体钢轨的回火组织为板条贝氏体、马氏体和残余奥氏体。

(2) 热轧态 U20Mn2SiCrNiMo 贝氏体钢轨经 320 ℃ 一次回火后,屈服强度为 1 245 MPa,抗拉强度为 1 364 MPa,断后伸长率为 13.5%,断面收缩率

为 54%,冲击吸收功 K_{I2} 为 96 J,踏面 HBW 硬度值为 430,和热轧态力学性能相比,强度、硬度略有升高,塑性、韧性大幅提高。

(3) 热轧态 U20Mn2SiCrNiMo 贝氏体钢轨经 320 ℃ 二次回火后,屈服强度为 1 242 MPa,抗拉强度为 1 393 MPa,断后伸长率为 15.0%,断面收缩率为 60%,冲击吸收功 K_{I2} 为 98 J,踏面 HBW 硬度值为 417,和一次回火的力学性能相比,抗拉强度提高约 30 MPa、塑性进一步提升。

(4) U20Mn2SiCrNiMo 贝氏体钢轨热轧态轨底纵向残余应力为 +290 MPa,经 320 ℃ 一次回火后降低至 +240 MPa,经 320 ℃ 二次回火后降低至 +180 MPa。

(5) 热轧态 U20Mn2SiCrNiMo 贝氏体钢轨的最佳回火工艺为:320 ℃ 4 h,空冷 + 320 ℃ 4 h,空冷。

国家重点研发计划资助(2017YFB0304504)

参考文献

- [1] 陈建军,姜茂发,李 凯. 高强度高韧性贝氏体钢轨研究[J]. 钢铁,2007,42(2):68-71.
- [2] 谭漳礼,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.
- [3] Wang Kaikai, Tan Zhunli, Gao Guhui, etc. Effect of Retained Austenite Stability on Mechanical Properties of Bainitic Rail Steel[J]. Advanced Materials Research, 2014, (1004-1005): 198-202.
- [4] 许亚娟,周清跃,陈朝阳,等. 回火工艺对 1 200 MPa 级贝氏体钢轨组织性能的影响[J]. 材料热处理学报,2012,33(增刊):72-76.
- [5] 熊志强,徐 光,袁 清. 回火工艺对热轧高强贝氏体钢轨组织和力学性能的影响[J]. 武汉科技大学报,2018,41(6):410-415.
- [6] Vorozhishchev V I, Ivanov Yu F, Korneva L V. Structural-Phase Analysis of Bainitic-Steel Rail[J]. Steel in Translation, 2006, 36(10): 13-18.
- [7] 杨维宇,张凤明,何建中,等. 高强度 U20Mn2SiCrNiMo 贝氏体钢轨热处理工艺的优化[J]. 特殊钢,2020,41(6):28-31.
- [8] 李智丽,何建中,梁正伟,等. 贝氏体钢轨的回火试验研究[J]. 包钢科技,2020,46(4):1-8.
- [9] 李 兴. 重轨复合矫直数值模拟及残余应力研究[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2007.
- [10] 丁 韦,高振坤,李 力,等. 贝氏体钢轨闪光焊水平裂纹形成原因分析[J]. 热加工工艺,2020,49(21):155-159.
- [11] 王 权,付学义,李智丽. 钢轨内残余应力的产生及其危害[J]. 金属热处理,2004,29(6):29-33.
- [12] 万德成. 超高强贝氏体钢的回火组织与力学性能[J]. 材料热处理学报,2013,34(5):143-148.

杨维宇(1982-),男,硕士(2009年中北大学),高级工程师,2006年中北大学(本科)毕业,新产品开发和失效分析。
E-mail:153884843@qq.com

收稿日期:2021-04-02

下 期 要 目

Fe-Ni-Cr 系合金连铸保护渣冷却过程矿相析出热力学分析	侯 昱等
镁处理对 45 钢中夹杂物的改质效果	朱浩然等
260 t 顶底复吹转炉喷溅特征的水模型研究和应用	郭龙鑫等
单流厚板坯中间包物理模拟研究和应用	姜学锋等
碲对 46MnVS 非调质钢中硫化物改质的工业实践	钟亮美等
120 t LF 精炼渣系对弹簧钢 55SiCrA 夹杂物塑性变质的影响	王清波等
大容积无缝气瓶用 4130X 钢 Φ600 mm 连铸圆坯研发	李 刚等
履带链轨节用 35MnB 圆钢生产实践	薛伟江等
高强度低合金钢 Q420N 轧制工艺优化实践	李小龙等
耐候结构用热轧钢带 Q355NHC 研制与开发	黄 利等
开发的石油化工抗 HIC 容器用 SA-516Gr65 钢板的组织和性能	郑建平