DOI: 10.3901/JME.2014.04.047

辙叉用贝氏体钢热处理工艺研究*

曹 栋^{1,2} 康 杰^{1,2} 龙晓燕^{1,2} 王艳辉^{1,2} 张福成^{1,2}

(1. 燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学材料科学与工程学院 秦皇岛 066004)

摘要: 对新型辙叉用含 Al 贝氏体钢进行热处理工艺对比研究。通过对比分析直接空冷、贝氏体开始转变温度(B_s)之前快冷后空冷以及等温淬火之后的组织及性能,发现等温淬火的组织具有最佳的综合力学性能,且组织最细。但等温淬火工艺会导致较高的生产成本,并且辙叉本身较大的尺寸导致在实际生产中较难实现。所以根据等温淬火的工艺特点设计出在温度 B_s 之前快冷,温度 B_s 与马氏体开始转变温度(M_s)温度期间置于炉中保温缓冷,最后空冷的三阶冷却方式,结果表明三阶冷却方式处理之后的贝氏体钢具有和等温淬火相似的组织形貌及大致相同的强韧性。对接近实际铁路辙叉尺寸的大块试样的不同冷却方式的冷却曲线进行测定,发现油冷不仅能够达到所需的冷速且容易在实际生产中应用。

关键词: 贝氏体钢; 热处理; 力学性能; 组织结构; 铁路辙叉

中图分类号: TG142

Research on Heat Treatment of Bainitic Steel Crossing

CAO Dong^{1,2} KANG Jie^{1,2} LONG Xiaoyan^{1,2} WANG Yanhui^{1,2} ZHANG Fucheng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology,

Yanshan University, Qinhuangdao 066004;

2. College of Materials Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract: A comparison study is performed on the heat-treatment processes of a new bainitic steel containing Al used for railway crossing. Microstructures and properties obtained by air cooling, fast cooling before bainite transformation starting temperature (B_s) followed by air cooling and isothermal quenching are analyzed. Results show that the microstructure obtained by isothermal quenching is the finest and possesses the best comprehensive properties. However, higher production cost is caused by isothermal quenching and it is not available in actual production limited by the large size of railway crossing. Based on the character of isothermal quenching process, a three-step cooling method is designed, which consists of fast cooling before B_s point, then slow cooling in furnace between B_s and martensite transformation starting temperature (M_s) and eventually followed by air cooling. It is found that the microstructure, strength and toughness obtained by the three-step cooling method are almost the same as that of isothermal quenching. The cooling curves of the bulk samples close to the actual size of rail crossing under different cooling ways are measured and find that oil cooling can achieve the required cooling rate and easy to realize in actual production.

Key words: bainitic steel; heat treatment; mechanical property; microstructure; railway crossing

0 前言

高锰钢作为铁路辙叉材料已经拥有了悠久的历史^[1],但是高锰钢辙叉一般由铸造制造,不可避免存在大量缩孔、疏松、晶粒粗大的现象,同时,因为其强度低^[2-3],已经无法适应重载线路使用要

求,因此研发新型辙叉材料成了必然。随着贝氏体相变理论的不断成熟,人们对贝氏体组织及性能的了解不断深入,国内外大量的辙叉材料研究者开始对其展开研究。20 世纪 80 年代,英国首先研制出了代号为 Titan 的贝氏体钢辙叉,并且进行了少量的铺设^[4]。1996 年美国铁路协会与俄勒冈科学技术研究院合作开发出了代号为 J9 的贝氏体钢辙叉材料^[5]。我国最早开始研发贝氏体钢辙叉是 1998 年清华大学与中铁宝桥集团有限公司,它们合作研制出

* 国家杰出青年科学基金(50925522)和国家自然科学基金(50871094)资助项目。20130312 收到初稿,20130803 收到修改稿

的具有良好低温冲击韧度的新型 Mn-B 系铁路辙叉用贝氏体钢, 该钢的抗拉强度大于 1 300 MPa, 同时具有较好的韧性, 为我国贝氏体钢辙叉的研究和应用奠定了基础^[6]。后来浙江贝尔通信集团有限公司与铁道部科学研究院共同开发了 MnSiCrMoNi 系贝氏体钢组合辙叉, 并得到广泛应用。燕山大学经过多年的努力开发了铁路辙叉专用含铝贝氏体钢, 其综合力学性能十分优异^[7-8]。目前, 我国贝氏体钢辙叉已经在铁路线路上广泛应用, 并且在 160 km/h 以上运行速度的铁路线路上使用的辙叉基本都是采用贝氏体钢制造。

英国剑桥大学 GARCIA 等^[9]研究发现钢中添加适当的 Al, 可以增加钢的贝氏体相变驱动力, 从而加快贝氏体转变。随后燕山大学课题组研究发现, 含 Al 贝氏体钢不仅具有优异的综合力学性能, 而且具有低的氢脆敏感性, 还大幅度提高了钢的延迟断裂性能^[10-12]研究。研究还发现, 含 Al 贝氏体钢的耐磨性能明显高于普通高锰钢^[13]。另外, GRAJCAR 等^[14]通过对一种 Al 代 Si 的 TRIP 钢(相变诱发塑性)的不同冷却方式的研究发现, Al 可以增加钢中残余奥氏体的稳定性, 并且不同的冷却方式对贝氏体铁素体及残余奥氏体体积分数影响很大。因此, 含 Al 贝氏体钢是一种制造铁路辙叉的理想材料。通过改变热加工工艺来提高贝氏体钢辙叉材料的性能也是一种经济有效的方法, 有研究发现在一种高强度钢中, 分别在较高温度下等温淬火和较低温度下等温淬火的两阶冷却方式可以使得组织避免出现较大块的残余奥氏体组织, 与其他任何单一温度下等温淬火所形成的组织相比, 这种两阶冷却方式下所产生的贝氏体铁素体板条及残余奥氏体更有益于力学性能^[15]。连续冷却可以使贝氏体孕育期增长, 使等温转变图向右下方移动, 而在连续冷却的过程中, 加快冷却速度可以使组织中贝氏体铁素体细化程度增大, 质量分数增加, 板条中的位错密度增加, 从而导致塑性下降, 强度增加^[16-17]。所以为了辙叉用贝氏体钢具有最佳的强韧性配合, 研究其不同温度区间的冷却方式和冷却速度对最终组织及性能的影响十分重要。本文通过对一种辙叉用含 Al 贝氏体钢分别在高温、中温和低温区间, 以不同的冷却方式和冷却速度进行热处理, 研究其组织构成和力学性能差异, 优化出最佳的含 Al 贝氏体钢热处理工艺, 同时, 研究了如何在实际应用中实现这种热处理工艺。

1 试验方法

选取的试验用钢化学成分(质量分数)如表 1 所

示。将铸造完成的试验用钢分别锻造成断面尺寸为 25 mm×25 mm 及 130 mm×180 mm(接近实际铁路辙叉截面)两种试样。使用 Gleeble-3500 测得该钢的马氏体转变开始温度(M_s)为 310 °C。本研究模拟了实际铁路辙叉的热处理工艺, 也就是利用断面尺寸接近实际辙叉断面尺寸的大块试样进行了热处理试验研究。

表 1 试验用钢化学成分 %

元素	C	Si	Mn	Cr	Al	Mo
质量分数	0.34	1.73	1.88	1.64	0.50	0.42
元素	Ni	V	Ti	B	S	P
质量分数	0.84	0.01	0.02	0.001 8	0.005	0.007

表 2 给出了试验用贝氏体钢的热处理工艺条件, 首先将试样加热到 920 °C 保温 1 h 进行奥氏体化处理, 然后按照 A1~A9 的不同冷却方式冷却。为了提高残余奥氏体稳定性, 增加贝氏体钢强韧性, 所有试样又进行了 320 °C 保温 1 h 的回火处理。选择的热处理工艺目的是研究贝氏体钢在高温、中温、低温区间冷却方式和冷却速度对其组织和性能的影响。经过上述热处理的试样, 对其力学性能进行了测定, 包括硬度、拉伸和冲击。拉伸试验采用厚度为 3 mm、宽度为 10 mm 的板状拉伸试样, 其标距为 25 mm, 拉伸变形速度为 0.034 mm/s。冲击试验采用标准的夏比 U 型缺口试样, 尺寸为 10 mm×10 mm×55 mm。采用 Axiovert 200 Mat 型数字金相显微镜观察各种热处理工艺之后的金相组织, 所用腐蚀剂为 2%硝酸酒精。采用 X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD)测定残余奥氏体体积分数及残余奥氏体中碳的质量分数, XRD 试验测试时, X 射线扫描速度为 2° /min。对于残余奥氏体体积分数的计算采用了奥氏体相的 200、220 和 311 衍射峰以及铁素体相的 200 和 211 衍射峰数据, 残余奥氏体体积分数的计算公式为

$$V_r = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{I_r^j}{R_r^j} \left/ \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{I_r^j}{R_r^j} + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{I_a^j}{R_a^j} \right) \right.$$

式中, V_r 为钢中奥氏体相的体积分数; n 为计算用的相应衍射峰数目, a 代表铁素体, r 代表残余奥氏体, I 为衍射峰积分强度, R 为材料散射因子, 其大小为

$$R = \frac{1}{V^2} F^2 P \frac{1 + \cos^2 2\theta}{\sin \theta \sin 2\theta} \exp(-2M)$$

式中, θ 为衍射角, V 为单胞体积, F 为结构因子, P 为多重性因子, $\exp(-2M)$ 为温度因子。

表 2 试验用贝氏体钢热处理工艺

工艺代号	冷却方式
A1	直接空冷至室温
A2	空冷至 500 ℃后, 以 0.08 ℃/s 速度缓冷 1 h, 随后空冷至室温
A3	空冷至 500 ℃后, 以 0.1 ℃/s 速度缓冷 1 h, 随后空冷至室温
A4	以 1.4 ℃/s 快冷至 500 ℃, 随后空冷至室温
A5	以 1.4 ℃/s 快冷至 500 ℃, 随后以 0.08 ℃/s 的速度缓冷 1 h, 随后空冷至室温
A6	以 1.4 ℃/s 快冷至 500 ℃, 随后以 0.1 ℃/s 的速度缓冷 1 h, 随后空冷至室温
A7	以 1.7 ℃/s 快冷至 400 ℃, 随后以 0.04 ℃/s 的速度缓冷 1 h, 随后空冷至室温
A8	以 1.7 ℃/s 快冷至 400 ℃, 随后以 0.03 ℃/s 的速度缓冷 1 h, 随后空冷至室温
A9	330 ℃盐浴中等温 1 h, 随后空冷至室温

利用 TEM-2010 透射电镜对贝氏体微观组织进行观察, 样品采用 TenuPol-5 型双喷电解减薄仪双

喷制备, 双喷所用电解抛光液为 7%高氯酸+93%冰醋酸溶液, 电解抛光工作电压为 28 V。

利用镍铬镍硅热电偶测定模拟实际辙叉尺寸试样的冷却曲线, 试样尺寸为 200 mm×130 mm×180 mm 的方坯。为了测试其冷却曲线, 分别在距试样表面 20 mm 和 90 mm 位置加工直径为 ϕ 12 mm、深为 30 mm 的小孔, 用于设置热电偶。

2 试验结果及分析

表 3 给出了试验用贝氏体钢经不同热处理工艺处理后的力学性能及残余奥氏体体积分数。首先对直接空冷(A1)、贝氏体转变温度 B_s 之前快冷后空冷(A4)以及等温淬火(A9)这三种工艺的组织及性能分析, 可以看出: A9 工艺具有最佳的综合力学性能, 同时, 在 B_s 温度之前快冷之后的 A4 工艺抗拉强度较 A1 工艺更高, 同时冲击韧度也有所增加。

表 3 试验用钢经各种热处理工艺处理后力学性能及残余奥氏体体积分数

工艺	硬度 HRC	冲击韧度/ (J/cm ²)	伸长率 (%)	断面收缩率 (%)	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	残余奥氏体体积分数 (%)	残余奥氏体中碳质量分数 (%)
A1	49.9	59	12.7	31.1	1 218	1 622	9.5	0.80
A2	48.6	69	9.5	21.2	1 144	1 555	10.2	0.86
A3	48.6	63	11.8	30.6	1 183	1 577	12.2	1.05
A4	51.7	67	12.9	26.1	1 437	1 788	11.7	0.74
A5	46.9	77	12.0	25.6	1 083	1 533	11.8	0.85
A6	47.5	75	14.9	33.9	1 132	1 532	17.0	0.98
A7	46.4	82	17.6	36.5	1 059	1 520	18.7	0.91
A8	45.2	89	12.0	16.2	906	1 467	16.9	0.79
A9	49.2	83	18.1	36.1	1 162	1 598	8.9	0.75

图 1 所示为贝氏体钢在不同热处理工艺条件下的 XRD 图谱, 可以看出, 辙叉用贝氏体钢经过各种热处理工艺处理后, 都为铁素体和奥氏体两类衍射峰。但 A4 工艺残余奥氏体体积分数较 A1 工艺有所提高, A9 工艺残余奥氏体体积分数最少, 见表 3。图 2 给出了贝氏体钢在经过不同热处理工艺处理之后的金相及透射电镜组织, 可以看出, A1、A4、A9 工艺下得到的组织形貌明显不同, A1 工艺的组织多为板条状; A4 工艺的组织呈片状; A9 工艺的组织呈针叶状。而从微观组织分析结果可以看出, 贝氏体钢组织均由贝氏体铁素体板条及板条间残余奥氏体构成, 其中亮色条状为贝氏体铁素体, 暗色的为残余奥氏体。统计可知, A1、A4、A9 工艺贝氏体铁素体板条厚度分别 215 nm、184 nm 和 160 nm, 可见, A9 工艺处理的贝氏体钢中贝氏体铁素体板条厚度最小。

由于 A1 工艺是在 B_s 温度之前冷却速度过慢,

图 1 贝氏体钢经不同热处理工艺处理后的 XRD 图谱

所以在冷却过程中, 贝氏体相变在较高的温度下发生, 有较多的上贝氏体组织形成, 导致各项性能较差。而加快冷速之后的 A4 工艺处理后, 残余奥氏体体积分数有所提高, 说明加快冷却速度可以防止

图 2 试验用贝氏体钢金相和透射电镜组织

奥氏体向上贝氏体转变。所以在贝氏体相变温度之前, 提高冷速后, 可以使得在贝氏体相变发生之前避开珠光体转变区和上贝氏体转变区, 在较低的温度下发生贝氏体相变, 从而获得各项力学性能均较高的贝氏体组织。对于 A9 工艺, 其残余奥氏体体积分数较 A1、A4 工艺都少, 表明 A9 工艺下奥氏体向贝氏体转变比较完全, 贝氏体铁素体体积分数比 A1、A4 工艺的多, 并且贝氏体铁素板条也最细小。因此在此工艺处理获得的贝氏体组织具备最佳的强韧性配合。

通过上述研究发现, 贝氏体钢经等温淬火工艺处理后具有最细的贝氏体铁素体板条组织, 且贝氏体相体积分数较高, 因此具备最佳的综合力学性能。但由于实际辙叉尺寸较大, 等温盐浴淬火具有一定的环境污染问题, 所以贝氏体钢辙叉等温盐浴淬火工艺不是很理想的工艺。因此, 根据等温淬火的冷却特点设计出在 B_s 温度之前快冷, B_s 温度与 M_s 温度区间缓冷, 最后空冷的三阶冷却方式, 并且选择不同的快冷和缓冷速度进行热处理, 以对热处理工艺进行优化, 具体如表 2 所示。

首先对比 A1 与 A2、A3 及 A4 与 A5、A6 的力学性能及残余奥氏体体积分数, 见表 3, 可以看出, 加入第二阶段 $B_s \sim M_s$ 温度区间减缓冷却后, 钢的硬度降低, 但韧性增加, 并且残余奥氏体体积分数增加。再从 A5 与 A6 和 A7 与 A8 的对比来看, 在高温阶段冷却速度相近的情况下, $B_s \sim M_s$ 温度区间冷却速度越慢, 韧性越好, 但硬度越低, 且强度也会随之有所下降。

从图 2e 与图 2g 的金相组织可以看出, A7 工艺组织形貌与 A9 较为相似。并统计发现, 该工艺下贝氏体铁素体板条厚度为 163 nm, 与 A9 工艺下的贝氏体铁素体板条厚度大致相同。

在 $B_s \sim M_s$ 温度区间加入减慢冷却的步骤后, 延长了贝氏体转变时间, 并使其在较宽的温度区间完成贝氏体相变, 增加贝氏体转变量, 并且避免了马氏体相变的发生。在 $B_s \sim M_s$ 温度区间的冷却速度非常重要, 如果冷速过快, 会产生马氏体组织, 如果冷速过慢, 又会使贝氏体在较高的温度下转变, 得到高温下转变的贝氏体组织, 降低贝氏体钢的力学性能。通过对比不同缓冷速度发现, 在 $B_s \sim M_s$ 温度区间速度约为 $0.04^\circ\text{C}/\text{s}$ 时, 钢具有最好的强韧性配合, 并与 A9 工艺处理的贝氏体钢有大致相同的组织形貌及综合力学性能。

3 实际辙叉热处理工艺优化

通过上述研究发现, 连续冷却过程中, 贝氏体钢在经过 920°C 完全奥氏体化后, 利用在高温区快速冷却, 可以有效阻止珠光体和高温贝氏体组织的形成, 而在贝氏体转变温度与马氏体转变温度期间置于炉中缓慢冷却, 可以使贝氏体转变时间延长, 并且避免马氏体相变的发生, 所以这样的三阶冷却方式可以使贝氏体钢性能更好。如何能够在实际中实现上述第一阶段的快速冷却成为首要问题, 首先试验了提高辙叉冷速的多种方法, 包括空冷、单鼓风吹、双鼓风吹、喷雾、喷水、油冷等, 将奥氏体化完成之后的大块试样从炉中取出后使用这些冷却方式进行冷却, 时间均为 5 min。空冷主要用于和其他冷却方式对比。其中, 采用的鼓风机功率为 520 kW, 转速为 2 800 r/min; 喷雾流量为 $180\text{ m}^3/\text{h}$; 浇水流量为 $600\text{ m}^3/\text{h}$; 油冷采用工业用普通淬火油。所测模拟实际辙叉尺寸大块试样, 分别距表面 20 mm 和 90 mm 位置的冷却速度, 冷却曲线如图 3 和图 4 所示。

图 3 模拟辙叉大块试样距表面 20 mm 处冷却曲线

图 4 模拟辙叉大块试样距表面 90 mm 处冷却曲线

通过不同方式的冷却曲线对比发现, 鼓风吹和

喷雾达不到所需冷却速度, 浇水虽然可以达到所需冷速, 但是浇水过程极不容易控制, 而油冷不仅能够达到所需的冷速, 且容易在实际生产中实现。所以实际辙叉最合适的高温区间快速冷却方式为油淬。

4 结 论

(1) 辙叉用含铝贝氏体钢经过等温盐浴淬火处理, 具有最细的贝氏体铁素体组织和最佳的综合力学性能。

(2) 根据等温淬火工艺特点, 设计出在 B_s 温度以上快冷、 $B_s \sim M_s$ 温度区间缓冷、 M_s 温度以下空冷的贝氏体钢辙叉的三阶冷却热处理工艺, 并且当快冷速度约为 $1.7\text{ }^\circ\text{C/s}$, 缓冷速度约为 $0.04\text{ }^\circ\text{C/s}$ 时得到的贝氏体钢的组织形貌和力学性能与等温盐浴淬火热处理工艺获得的结果相近。

(3) 油冷是实际辙叉在高温区快速冷却的最佳方式, 且容易在实际生产中实现。

参 考 文 献

- [1] FRANK E E. Evolution of the rail-bound manganese frog [J]. Transportation Research Record, 1986, 1071: 43-48.
- [2] 张福成. 高锰钢辙叉材料研究进展[J]. 燕山大学学报, 2010, 34(3): 189-193.
ZHANG Fucheng. Research progress of high manganese crossing steels[J]. Journal of Yanshan University, 2010, 34(3): 189-193.
- [3] 杨志南, 张福成, 张明, 等. 高锰钢辙叉机械冲击预硬化工艺研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(16): 20-24.
YANG Zhinan, ZHANG Fucheng, ZHANG Ming, et al. Study on mechanical impact pre-hardening technology of high manganese steel crossing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(16): 20-24.
- [4] PENDLETON D, RCOMPTON K, JONES E G. Welded and cast-cetre crossings accepted after trial[J]. Railway Gazette International, 1986(3): 176-177.
- [5] DAVID D, MITON S, HUSEYIN S. Development of bainitic frogs for HAL service[J]. Railway Track & Structures, 1997, 35(12): 14-16.
- [6] 方洪生, 陈颜堂, 郑燕康. 铁路辙叉专用超强高韧可焊接空冷贝氏体钢: 中国, 98124899.3[P]. 2000-06-14.
FANG Hongsheng, CHEN Yantang, ZHENG Yankang. Air-cooled bainitic steel with high strength and toughness used for railway crossing: China, 98124899.3[P]. 2000-06-14.
- [7] 张福成, 郑炆曾, 吕博. 铁路辙叉专用含钨铝贝氏体锻钢: 中国, CN1880497[P]. 2006-12-20.
ZHANG Fucheng, ZHENG Yangzeng, LÜ Bo. Bainite forging steel contained W used for railway crossing: China, CN1880497[P]. 2006-12-20.
- [8] 张福成, 王天生, 吕博, 等. 高铝纳米贝氏体钢高速铁路辙叉及其制造方法: 中国, CN101748331A[P]. 2010-06-23.
ZHANG Fucheng, WANG Tiansheng, LÜ Bo, et al. Naono-bainite steel with high Al-containing and its manufacturing method: China, CN101748331A[P]. 2010-06-23.
- [9] GARCIA M C, CABALLERO F G, BHADSHIAU H K D H. Acceleration of low-tempereture bainite[J]. ISIJ International, 2003(43): 1821-1825.
- [10] ZHENG Chunlei, LÜ Bo, CHEN Cheng. Hydrogen Embrittlement of a manganese-aluminum high-strength bainitic steel for railway crossings[J]. ISIJ International, 2011(51): 1749-1753.
- [11] 张福成, 杨志南, 康杰. 铁路辙叉用贝氏体钢研究进展[J]. 燕山大学学报, 2013, 37(1): 1-7.
ZHANG Fucheng, YANG Zhinan, KANG Jie. Research progress of bainitic steels used for railway crossing[J]. Journal of Yanshan University, 2013, 37(1): 1-7.
- [12] 张福成, 吕博, 郑春雷. 高锰钢和贝氏体钢辙叉失效机理及其磨面组织[J]. 机械工程学报, 2008, 44(12): 232-243.
ZHANG Fucheng, LÜ Bo, ZHENG Chunlei. Failure mechanism and worn surface microstructure of high manganese steel and bainite steel crossings[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(12): 232-243.
- [13] 但锐, 郑春雷, 张福成, 等. 氢对贝氏体辙叉钢摩擦磨损行为的影响[J]. 机械工程学报, 2012, 48(20): 33-38.
DAN Rui, ZHENG Chunlei, ZHANG Fucheng, et al. Effects of hydrogen on wear behavior of bainitic steel used for crossing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(20): 33-38.
- [14] GRAJCAR A, ZALECKI W, KUZIAR R. Designing of cooling conditions for Si-Al microalloyed TRIP steel on the basis of DCCT diagrams[J]. Journal of Achievements (下转第 59 页)