

· 组织和性能 ·

1 200 MPa 新型 Nb-V 微合金化贝氏体钢轨钢的组织转变及性能

杨维宇 张凤明 李智丽 何建中
(包钢钢联股份有限公司技术中心, 包头 014010)

摘要 利用膨胀仪并结合金相法和硬度法, 测定了新型 Nb-V 微合金化贝氏体钢轨钢 20 mm 板 (wt% : 0.24C, 0.39Si, 1.86Mn, 0.007S, 0.002P, 1.36Cr, 0.33Mo, 0.04Nb, 0.11V) 的连续冷却转变 (CCT) 曲线, 研究冷却速度 0.04 ~ 4.0 °C/s 对钢的显微组织及硬度的影响。结果表明, 试验钢 Bs 点温度低于 400 °C, 当冷却速度在 0.1 ~ 0.8 °C/s, 试验钢可获得全贝氏体组织, 符合贝氏体钢轨的合金设计原理; 试验钢的轧态显微组织以板条贝氏体为主, 还有少量的马氏体, 其强度、塑性、韧性、硬度各指标匹配较好, 满足现行贝氏体钢轨相关技术条件的要求。

关键词 Nb-V 微合金化贝氏体钢 钢轨 静态 CCT 曲线 显微组织 力学性能

Microstructure Transformation and Properties of a 1 200 MPa New Type Nb-V Micro-Alloying Bainite Rail Steel

Yang Weiyu, Zhang Fengming, Li Zhili and He Jianzhong
(Technical Center of Steel Union Co Ltd, Baotou Steel (Group) Corp., Baotou 014010)

Abstract Using expansion instrument combined with metallographic analysis and hardness measurement, a continuous cooling transformation (CCT) curves of new Nb-V microalloyed bainite rail steel 20 mm plate (wt% : 0.24C, 0.39Si, 1.86Mn, 0.007S, 0.002P, 1.36Cr, 0.33Mo, 0.04Nb, 0.11V) are determined, the effect of cooling rate 0.04 ~ 4.0 °C/s on microstructure and hardness of steel are studied. The results show that the Bs point of tests steel is lower than 400 °C, when the cooling rate is in the range of 0.1 to 0.8 °C/s, the whole bainite structure can be obtained, which is consistent with the bainite rail alloy design principle; the rolled microstructure of test steel is lath bainite and a small amount of martensite. The strength, plasticity, toughness and hardness of the rolled state are well matched, which meets the relevant technical conditions of the current bainitic rail production.

Material Index Nb-V Micro-Alloying Bainite Steel, Rail, Static CCT Curve, Microstructure, Mechanical Properties

随着中国铁路建设的迅猛发展, 各钢轨生产厂家不断优化提升钢轨质量, 期望钢轨获得更高水平的强韧性和耐磨性。目前普遍使用的珠光体钢轨, 由于其成分和组织结构的特点其强韧性基本发挥到极限, 且冲击韧性、断裂韧性相对较低。近年来, 世界各国一直致力于研究强韧性、耐磨性更好的贝氏体钢轨, 力求实现钢轨更新换代, 主要有美国的 J6、日本的 1 400 MPa 级含 Nb 贝氏体钢轨, 波兰的两种新型空冷低碳贝氏体钢轨 RB370 和 RB390 等。

包钢和清华大学合作于 2002 年试制 Cr-Mn-Mo 系的 60 kg/m 贝氏体钢轨, 初试结果表明, 采用贝氏体钢制作的铁路道岔使用寿命明显提高^[1]。2002 年鞍钢与铁道部铁科院合作, 开发出 1 200 MPa 级 C-Si-Mn-Mo 系贝氏体钢轨, 并开展了钢轨组织尤其是残余奥氏体和力学性能稳定化的研究, 围绕钢轨的使用安全性开展了断裂力学性能、残余应力等方面的研究^[2]。其他研究贝氏体钢轨及道岔的企业和高校还有攀钢、中国宝武钢铁集团 (武钢)、中国铁道科学研究院^[3,4]、燕山大学^[5]、西华大学、西北

工业大学等。

本文研究了一种新型 Nb-V 微合金化 C-Si-Mn-Cr-Mo 系贝氏体钢轨用钢的连续冷却转变规律, 分析不同冷速下的显微组织和硬度, 绘制其静态 CCT 曲线, 以期为优化和改进贝氏体钢轨轧后在线控冷工艺提供参数, 同时对试验钢热轧态显微组织和力学性能进行检测和分析。

1 试验材料和方法

采用 25 kg 真空感应炉冶炼试验用钢, 钢锭质量 25 kg, 钢锭最大直径 $\Phi 110$ mm, 化学成分为 (wt%): 0.24C, 0.39Si, 1.86Mn, 0.007S, 0.0016P, 1.36Cr, 0.33Mo, 0.04Nb, 0.11V。钢锭经 1 200 °C × 3 h 高温均质处理后, 在 $\Phi 750$ mm × 550 mm 热轧实验机组轧制成 20 mm 厚的钢板, 轧后空冷。

试样在车床上加工成 $\Phi 3$ mm × 10 mm 的小圆柱, 并在一端开一个 $\Phi 2$ mm × 2 mm 的盲孔, 利用 Formastor-F 型全自动相变仪测定试验钢的静态 CCT 曲线。首先采用 < 200 °C/h 的速度加热试样, 测量膨胀量并利用切线法确定出试验钢 Ac₁ 和 Ac₃ 的

值^[6],测定静态 CCT 曲线的试样以 10 °C/s 的速率加热到 840 °C 进行奥氏体化,保温 10 min,分别以 0.04、0.1、0.17、0.35、0.5、0.8、1.0、2.0、4.0 °C/s 的冷却速度冷至室温,记录不同冷速下试样的膨胀量并采用切线法确定相变的开始点和结束点,绘制出试验钢的静态 CCT 曲线。用 450 SVD 显微维氏硬度计测定不同冷速下试样的显微维氏硬度 HV10,每个试样测 3 点,取平均值^[7]。根据 GB/T228.1-2010 标准,纵向取样,试样直径 $d = 10$ mm,原始标距 $L_0 = 50$ mm 的双肩拉伸试样,用英斯特朗 120T 电液伺服拉伸试验机在室温进行拉伸测试。根据 GB/T229-2007 标准,横向取 10 mm × 10 mm × 55 mm 夏比 U 型缺口冲击试样,在 JBD-300A 冲击试验机上测定室温冲击吸收功。根据 GB/T231.1-2018 标准,使用 TH600 布氏硬度计测试试验钢的硬度,测 5 点,取平均值。金相试样用 4% 硝酸酒精溶液进行腐蚀,用 Axio observer A1M 光学显微镜观察其显微组织。

2 试验结果及分析

2.1 静态 CCT 曲线

图 1 为试验钢的静态 CCT 曲线,从图 1 可以看出,新型微合金化贝氏体钢轨用钢的 A_{c1} 为 655 °C, A_{c3} 为 751 °C, M_s 为 343 °C, M_f 为 203 °C。根据每条曲线冷却时间的不同,该曲线中从左至右的冷速逐渐降低,依次为 4、2、1、0.8、0.5、0.35、0.17、0.1、0.04 °C/s。从图 1 可知,当冷速小于 0.1 °C/s 时,试验钢在高温区(550 ~ 650 °C)出现了铁素体 + 珠光体相变区,同时发生贝氏体相变,随着冷速的增加,扩散型的铁素体 + 珠光体相变受到抑制,半扩散型的贝氏体相变占主导地位,贝氏体开始转变的温度先升高后降低。当 0.1 °C/s < 冷速 < 0.8 °C/s,可获

得单一的贝氏体组织,由于其贝氏体转变开始温度 B_s 在 400 °C 以下,预测其组织以板条状下贝氏体为主。临界冷速为 1 °C/s,当冷速 ≥ 1 °C/s 时,可获得到全马氏体组织。

图 2 为试验钢不同冷速下的显微组织。从图 2 (a,b) 可知,当冷速为 4、1 °C/s 时,室温组织为板条马氏体,图 2(c) 表明当冷速为 0.8 °C/s 时,室温组织以板条马氏体为主,还有少量的贝氏体。图 2 (d ~ f) 表明当 0.1 °C/s < 冷速 < 0.8 °C/s 时,室温组织为板条贝氏体,即下贝氏体。图 2(g) 表明当冷速为 0.1 °C/s 时,室温组织以下贝氏体为主,还有少量的铁素体。图 2(h) 表明当冷速为 0.04 °C/s 时,室温组织为贝氏体、铁素体的混合组织,其中白色部分为先共析铁素体,还有极少量的珠光体。

图 3 为试验钢不同冷速下的显微硬度,随着冷却速度的增大,室温组织的硬度逐渐升高。当冷速小于 1.0 °C/s 时随着冷却速度的增大,铁素体含量减少,贝氏体含量逐渐增加,显微硬度逐渐升高,冷速为 0.1 °C/s 时,显微 HV10 硬度值为 425 左右,当冷速大于 1.0 °C/s 时显微硬度基本保持不变, HV10 硬度值在 525 左右。在 0.1 ~ 4 °C/s 的冷速范围内,显微 HV 硬度值只变化了 100,而某试验用贝氏体钢轨钢在该冷速范围内的 HV 硬度差为 186、250^[8]。贝氏体钢轨用钢的合金设计中需要满足在很宽的冷速范围内得到具有较高硬度的贝氏体组织,因为贝氏体钢轨工业生产中不同端面、不同环境温度下,钢轨不同位置的冷速是不同的。从图 1 还可知该试验钢的贝氏体相变区较宽,贝/马复相区较窄。因为马氏体组织为亚稳态组织,如不进行马氏体稳定化处理容易使钢轨内应力增大,且由于工业生产中冷速变化较大,两相的比例难以控制,所以在保证硬度的前提下,尽可能减少复相区。

2.2 力学性能和显微组织

表 1 为试验钢热轧态力学性能,由表 1 可知,新型 Nb-V 微合金化贝氏体钢轨用钢抗拉强度 R_m 为 1 353 MPa,断后伸长率 A 为 15.5%,室温冲击吸收功 K_{I2} 为 85 J, HB 硬度值 412,其性能完全满足 TJ/GW117-2013《U20Mn2SiCrNiMo 贝氏体钢轨暂行技术条件》中的要求。贝氏体钢轨工业生产时为热轧空冷,由于贝氏体相变自身的特点,贝氏体钢轨室温组织主要以贝氏体为主,还可能存在马氏体、残余奥氏体、铁素体、碳化物、M/A 等组织或第二相,由于钢轨轨型上下的非对称性,钢轨的相变和组织应力较大,可能导致钢轨弯曲,甚至断裂。为了改善其组织

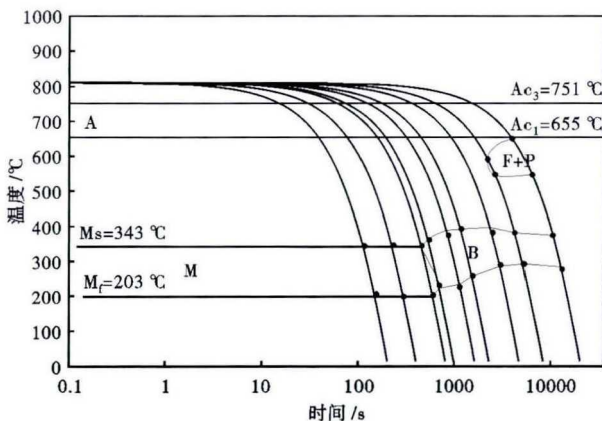


图 1 新型贝氏体钢轨钢的 CCT 曲线
Fig. 1 CCT curves of new bainite rail steel

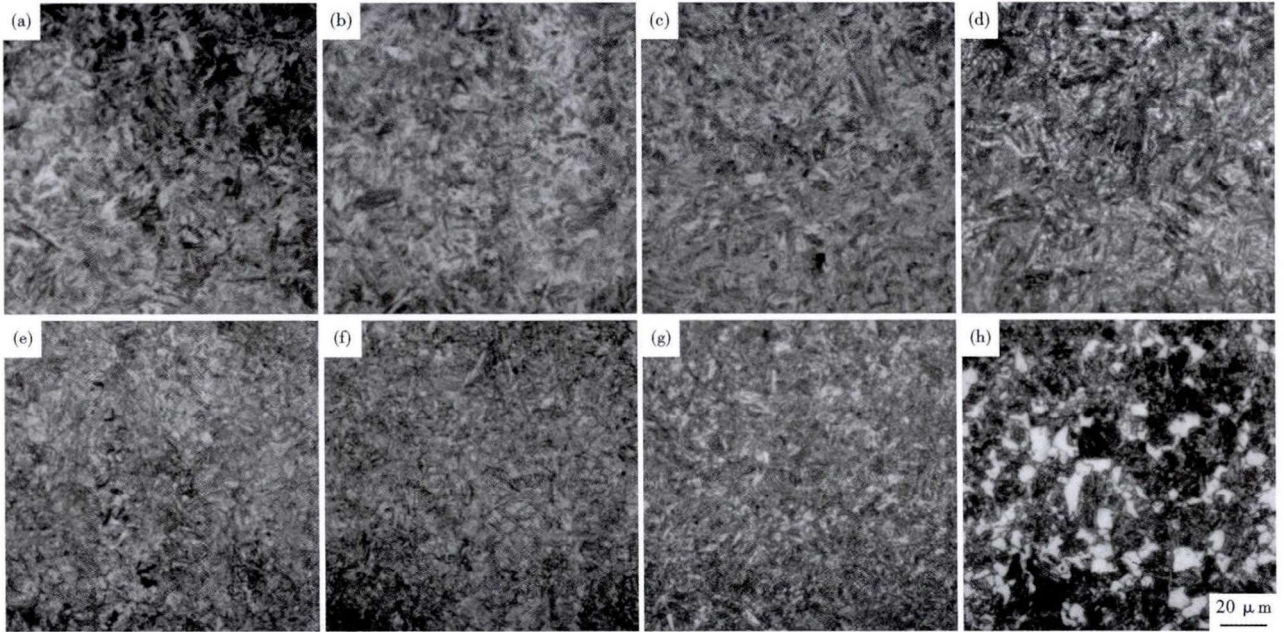


图 2 试验钢在冷速(°C/s) (a)4;(b)1;(c)0.8;(d)0.5;(e)0.35;(f)0.17;(g)0.1;(h)0.04 时的显微组织

Fig. 2 Microstructure of tested steel at cooling rates (°C/s) (a)4;(b)1;(c)0.8;(d)0.5;(e)0.35;(f)0.17;(g)0.1;(h)0.04

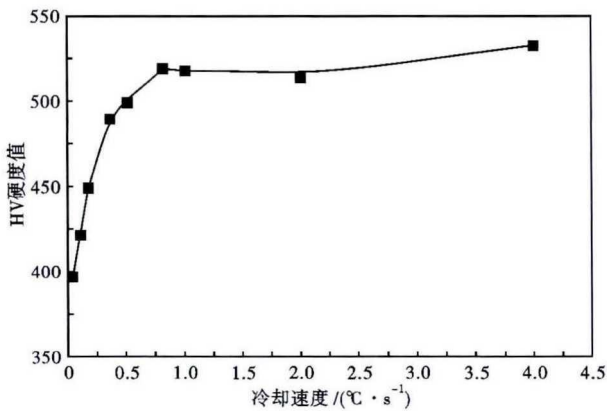


图 3 冷速对试验钢显微硬度的影响

Fig. 3 Effect of cooling rate on microhardness of tested steel

表 1 试验钢热轧态力学性能

Table 1 Hot-rolled mechanical properties of tested steel

项目	$R_{p0.2}$ / MPa	R_m / MPa	A/%	HB 值	K_{U2} /J
试验钢	1 041	1 353	15.5	412	85
TJ/GW117-2013	$\geq 1\ 000$	$\geq 1\ 280$	≥ 12.0	360 ~ 430	≥ 70

和应力分布、大小,贝氏体钢轨大多需要进行回火处理。回火工艺可以改善钢轨的塑性、韧性,特别是冲击韧性^[9-10],最佳回火温度因成分而定,大多在 250 ~ 450 °C,沈金强^[11]认为贝氏体钢轨经 300 °C 回火后钢轨塑韧性有所提高,缺口敏感性降低,组织中 M-A 组织量减少。许亚娟^[9]认为 1 200 MPa 级贝氏体钢轨经 350 °C 回火 4 h 及以上,强韧性配合最

好。Pavlov^[10]认为当回火温度为 350 ~ 420 °C 时,可以显著提高钢轨的塑性和韧性,超过 420 °C,钢轨冲击韧性和伸长率将大幅降低。可以预测该试验钢回火后其塑性、特别是冲击韧性会有大幅的提高。

从试验钢横向取样,其显微组织如图 4 所示,热轧态组织以板条贝氏体为主,还有少量的马氏体。试验钢合金设计中加入了 Nb、V 等微合金,Nb 的主要作用是 NbC 的析出来细化奥氏体晶粒和析出强化,晶粒细化后,贝氏体板条宽度、长度同时降低,可以改善试验钢的强度、韧性。据文献[12]报道,V 对低碳贝氏体钢中的贝氏体转变开始和终止温度没有显著影响,但可以细化显微组织,提高大角度位相的板条束含量来提高强度,还可以通过析出细小

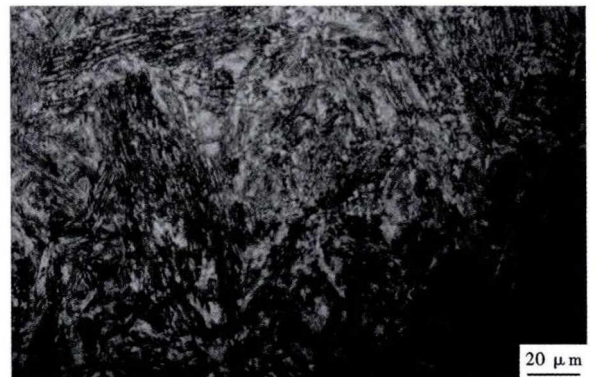


图 4 热轧试验钢的显微组织

Fig. 4 Microstructure of hot-rolled tested steel

的V(C,N)阻碍位错回复进一步提高强度,贝氏体钢轨在回火或正火时还可能析出 V_2C 、 V_4C_3 等碳化物。因为Nb、V都是强碳化物形成元素,Nb、V的加入,使碳的扩散系数下降,增加了过冷奥氏体的稳定性,使得受碳扩散控制的 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变受到限制,抑制了 α 在原始 γ 晶界的形成和生长,扩大了A→B转变区,在较宽的冷速范围内得到下贝氏体组织。试验钢属于C-Si-Mn-Cr-Mo系贝氏体,同时发挥了Nb、V等微合金的作用,其贝氏体呈板条状态,属于下贝氏体。

3 结论

(1)新型微合金化贝氏体钢轨用钢,当冷速小于0.1℃/s时,在高温区出现了铁素体+珠光体相

变区,当冷速在0.1~0.8℃/s,可获得全部的贝氏体组织,当冷速 ≥ 1 ℃/s时,可获得全马氏体组织。A→B相变区较宽,且贝氏体转变开始温度在400℃以下,符合贝氏体钢轨用钢的合金设计要求。

(2)新型微合金化贝氏体钢轨用钢的硬度随着冷却速度的增大,呈逐渐增大的趋势,冷却速度为0.1℃/s时,HV10硬度值为425,冷却速度为1℃/s时,HV10硬度达525。

(3)新型微合金化贝氏体钢轨用钢热轧态显微组织为板条贝氏体+少量的马氏体,其强韧性配合较好,力学性能完全满足现行贝氏体钢轨生产的相关技术条件的要求。

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] 陈昕,金纪勇,刘春明,等. 抗拉强度1200 MPa 贝氏体钢轨的开发及其在铁路上的应用[J]. 钢铁,2008,43(11):108-112.

[3] 陈朝阳,周清跃,张银花,等. 低合金高强度贝氏体钢轨的试验研究[J]. 铁道学报,2013,35(8):75-79.

[4] 张金,刘丰收,俞喆. 贝氏体钢轨连续冷却转变曲线的测定及分析[J]. 热加工工艺,2016,45(8):84-86.

[5] 郑春雷,张福成,吕博,等. 辙叉用贝氏体钢的氢脆特性氢退火工艺[J]. 材料热处理学报,2008,29(2):71-75.

[6] YB/T 5128-1993 钢的连续冷却转变曲线图的测定方法(膨胀法)[S]. 中华人民共和国冶金工业部1993-12-08批准.

[7] 杨维宇,张瑞芳,白雅琼,等. 低合金调质高强度钢Q890D奥氏体连续冷却转变曲线[J]. 热加工工艺,2013,42(16):98-100.

[8] 陈朝阳,周清跃,张银花,等. 试验用贝氏体钢轨连续冷却曲线的测定及组织特征[J]. 铁道学报,2005,27(3):35-39.

[9] 许亚娟,周清跃,陈朝阳,等. 回火工艺对1200 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.

[10] Pavlov V V, Godik L A and Korneva L V, et al. Railroad Rails Made of Bainitic Steel[J]. Metallurgist, 2007, 51(3-4): 209-212.

[11] 沈金强,李大东,栾道成. 实验用贝氏体钢轨组织和性能分析[J]. 热加工工艺,2014,43(6):119-121.

[12] Yu Li and David Milbourn. Vanadium in Bainitic Steels: A Review of Recent Developments[J]. Advanced Steels, 2011, DOI: 10.1007/978-3-642-17665-4_31:303-308.

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

何建中(1965-),男,博士,正高级工程师,从事产品开发。

收稿日期:2020-04-28

“讲文明树新风”公益广告

绿化环境
从我做起