

硼对 780 MPa 低碳贝氏体钢组织和力学性能的影响

赵燕青¹ 孙力¹ 刘宏强¹ 王九清² 安会龙¹ 罗应明² 车金锋²

(1 河钢集团钢研总院, 石家庄 050023; 2 河钢集团舞钢公司, 平顶山 462500)

摘要 试验低碳贝氏体钢(/% : 0.08C, 0.11 ~ 0.13Si, 1.10 ~ 1.20Mn, 0.008 ~ 0.009P, 0.002S, 0.21 ~ 0.23Ni, 0.020 ~ 0.021Ti, 0.003 ~ 0.004Nb, 0 ~ 0.0010B, 0.0007 ~ 0.0008O, 0.0031 ~ 0.0033N) 由 50 kg 真空感应炉熔炼, 轧成 45 mm 钢板, 并经 930 °C 淬火, 610 °C 回火。研究了 0.001 0% 硼对 780 MPa 低碳贝氏体钢 45 mm 板组织和力学性能的影响。结果表明, 硼可显著提高试验钢的淬透性, 不含硼试验钢淬火后得到粒状贝氏体, 0.001 0% 硼试验钢淬火后得到板条贝氏体。硼明显改善试验低碳贝氏体钢的力学性能, 含 0.001 0% 硼试验钢淬、回火后的抗拉强度 834 MPa 和屈服强度 771 MPa 远高于不含硼试验钢的抗拉强度 702 MPa 和屈服强度 591 MPa, 实际生产中应加入适量硼可使低碳贝氏体钢得到板条贝氏体。

关键词 硼 低碳贝氏体钢 组织 力学性能

Effect of Boron on Structure and Mechanical Properties of 780 MPa Low Carbon Bainite Steel

Zhao Yanqing¹, Sun Li¹, Liu Hongqiang¹, Wang Jiuqing², An Huilong¹, Luo Yingming² and Che Jinfeng²

(1 General Research Institute, Hesteel Group, Shijiazhuang 050023;

2 Wuyang Iron and Steel Co Ltd, Hesteel Group, Pingdingshan 462500)

Abstract The tested low carbon bainite steel (/% : 0.08C, 0.11 ~ 0.13Si, 1.10 ~ 1.12Mn, 0.008 ~ 0.009P, 0.002S, 0.21 ~ 0.23Ni, 0.020 ~ 0.021Ti, 0.003 ~ 0.004Nb, 0 ~ 0.0010B, 0.0007 ~ 0.0008O, 0.0031 ~ 0.0033N) is melted by a 50 kg vacuum induction furnace, rolled to 45 mm plate, quenched at 930 °C and tempered at 610 °C. The effect of 0.001 0% boron on structure and mechanical properties of 45 mm plate of 780 MPa low carbon bainite steel has been studied. Results show that boron can remarkably improve the hardenability of tested steel, the structure of quenched tested steel without bearing boron is granular bainite, and the structure of quenched 0.001 0% boron tested steel is lath bainite. The boron can obviously improve the mechanical properties of tested low carbon bainite steel, the tensile strength 834 MPa and yield strength 771 MPa of quenched-tempered bearing 0.001 0% boron tested steel is higher than the tensile strength 702 MPa and yield strength 591 MPa of quenched-tempered without bearing boron tested steel. Adding suitable boron in steel in practical production the low carbon bainite steel can get lath bainite structure.

Material Index Boron, Low Carbon Bainite Steel, Structure, Mechanical Properties

低碳贝氏体钢具有良好的综合力学性能, 是化学冶金及物理冶金最新研究成果相结合的新一代钢种^[1], 已被广泛应用于压力容器、工程机械、造船和石油天然气输送管线等行业^[2]。硼在钢中的显著作用是以其极微少的有效硼可使钢的淬透性成倍增加^[3], 加入硼可明显抑制铁素体在奥氏体晶界上的形核, 并可使贝氏体转变曲线变得扁平, 从而在低碳的情况下, 在较宽冷速范围内都可以得到贝氏体组织^[1]。加入成本较低的硼元素, 可以节约大量昂贵的合金元素, 同时对钢的组织 and 力学性能也有明显影响。本文分析了硼对 780 MPa 低碳贝氏体钢组织和力学性能的影响, 为低碳贝氏体钢的工业化大生产提供理论参考依据。

1 试验材料与方法

试验用钢采用 50 kg 真空感应炉冶炼, 浇铸成断面尺寸为 150 mm × 150 mm 的钢锭。其熔炼化学成分如表 1 所示。由于硼的加入量少, 且硼与氧、氮的亲合力较大, 冶炼时保证一定的有效硼含量便显得非常重要, 为了保证钢中有效硼的含量, 对钢中氮和氧等杂质元素含量进行了严格控制。在冶炼过程中, 先添加钛固定氮和氧, 最后添加硼, 以减少钢中氮化硼的生成, 保证有效硼的含量。

钢锭采用 550 mm 轧机轧制, 1#、2# 钢锭采用相

表 1 试验低碳贝氏体钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of tested low carbon bainite steel / %

试验钢	C	Si	Mn	P	S	Ni	Ti	Nb	Cr	B	O	N
1#	0.08	0.11	1.10	0.009	0.002	0.21	0.020	0.003	0.71	0	0.0008	0.0031
2#	0.08	0.13	1.20	0.008	0.002	0.23	0.021	0.004	0.68	0.0010	0.0007	0.0033

同的轧制及热处理工艺,钢锭随炉升温到1 220 ℃,保温 1.5 h 出炉,钢锭采用两阶段控制轧制工艺,奥氏体再结晶区轧制温度为 980 ~ 1 150 ℃,单道次压下率为 12% ~ 16%,累积压下率为 40% ~ 60%,奥氏体未再结晶区轧制温度为 840 ~ 940 ℃,单道次压下率为 11% ~ 16%,累计压下率为 40% ~ 70%,终轧温度为 840 ℃,轧后将钢板水冷至 620 ℃后空冷至室温,钢板轧制厚度为 45 mm,钢板的断面尺寸为 45 mm × 200 mm。

钢板的热处理工艺为:钢板的淬火温度为 930 ℃,保温 0.5 h 出炉进行水淬至室温,钢板的回火温度为 610 ℃,钢板在炉保温时间为 1 h,出炉空冷至室温。用 Zeiss 扫描电镜对试验钢的试样进行组织分析。试验钢的拉伸试验采用直径为 10 mm 的标准棒状试样,冲击试样为横向取样,加工成 (mm) 10 × 10 × 55 的标准 V 型缺口试样。

2 试验结果与分析

2.1 临界点

试验钢临界点的测定结果为:1# 试验钢 $Ac_1 = 722$ ℃, $Ac_3 = 869$ ℃; 2# 试验钢 $Ac_1 = 717$ ℃, $Ac_3 = 861$ ℃,可见硼对试验钢的临界点影响不大,此结果可为试验钢的调质热处理提供参考依据。

2.2 硼对试验钢显微组织的影响

图 1 为试验钢轧态的显微组织。从图 1 中可以看出,1# 试验钢得到以多边形铁素体为主的组织(图 1a),而 2# 试验钢得到以粒状贝氏体为主的组织(图 1b),这是由于 2# 试验钢加入了硼元素,而硼易偏聚于奥氏体晶界,抑制铁素体形核^[4],使试验钢的淬透性得以提高,扩大了贝氏体的形成范围,使试验钢的粒状贝氏体组织增加。

图 2 为试验钢淬火态的显微组织。从图 2 中可以看出,1# 试验钢(图 2a)淬火后得到以粒状贝氏体为主的组织,在贝氏体铁素体基体及晶界处分布有大量块状 M/A 岛,部分 M/A 岛颗粒粗大,而 2# 试验钢

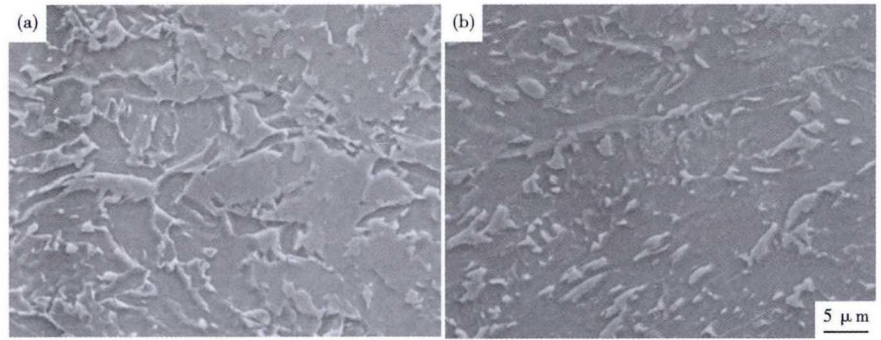


图 1 试验低碳贝氏体钢热轧 45 mm 板的组织形貌,硼含量:(a)0;(b)0.001 0%
Fig. 1 Structure morphology of 45 mm hot-rolled plate of tested low carbon bainite steel, boron content in steel: (a) 0; (b) 0.001 0%

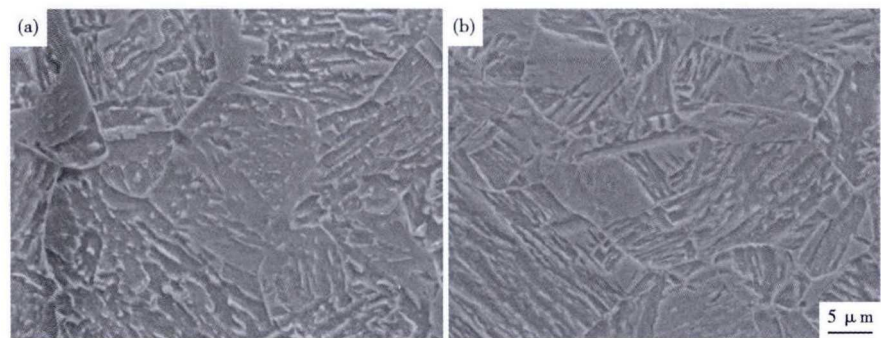


图 2 试验低碳贝氏体钢 45 mm 热轧板 930 ℃ 水淬的组织形貌,硼含量:(a)0;(b) 0.001 0%
Fig. 2 Structure morphology of 45 mm hot-rolled plate of tested low carbon bainite steel water-quenched at 930 ℃, boron content in steel: (a) 0; (b) 0.001 0%

(图 2b) 淬火后得到以板条贝氏体为主的组织,板条贝氏体形成于连续冷却的低碳低合金钢的贝氏体转变区的最下端,板条贝氏体可被视为贝氏体钢中转变温度最低、显微硬度最高的组织^[5],而粒状贝氏体是贝氏体铁素体和富碳的奥氏体岛所构成的复相组织^[6]。由于两试验钢硼含量的不同,2# 试验钢(含硼 0.001 0%)的淬透性好于 1# 试验钢(不含硼),从而使试验钢淬火后呈现出不同的组织状态。

图 3 为试验钢回火态的显微组织。从图 3 中可以看出,1# 试验钢(图 3a)回火后的组织演变主要表现为部分 M/A 岛的分解,尺寸减小。2# 试验钢(图 3b)经 610 ℃ 回火后,基本保持了淬火态的板条结构,但高温回火大量的位错具有足够的热激活能而发生迁移,相互作用甚至抵消,因此位错密度显著降低,一些相邻板条的部分边界变得模糊或消失,基体的回复明显^[7],贝氏体板条宽度有所增加。

2.3 硼对试验钢力学性能的影响

表 2 为试验钢回火态的力学性能,从表 2 中可

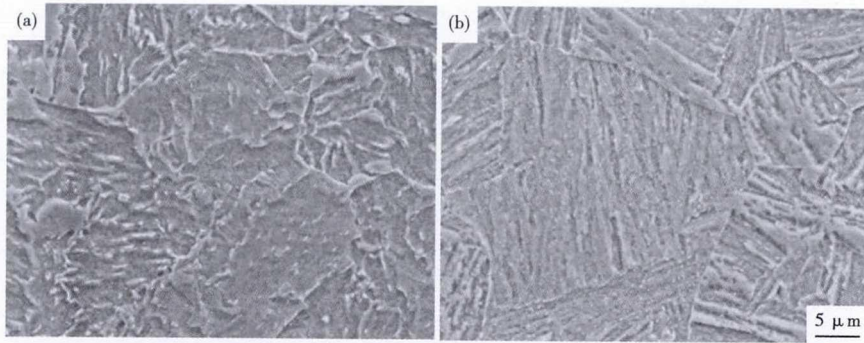


图3 试验低碳贝氏体钢 45 mm 热轧板 930 ℃ 水淬、610 ℃ 回火的组织形貌,硼含量:(a)0;(b)0.001 0%

Fig.3 Structure morphology of 45mm hot-rolled plate of tested low carbon bainite steel water-quenched at 930 ℃ and tempered at 610 ℃, boron content in steel: (a) 0; (b) 0.001 0%

3 结论

(1) 硼可显著提高试验钢淬透性,从而使试验钢淬火后呈现出不同的组织状态,不含硼试验钢淬火后得到以粒状贝氏体为主的组织,含0.001 0%硼试验钢淬火后得到以板条贝氏体为主的组织。

(2) 硼对试验钢的力学性能有明显的影 响。含0.001 0%硼试验钢回火后的强度远高于不含硼试验钢,实际大生产中应加入适量硼以控制试验钢得到板条贝氏体为宜。

参考文献

- [1] 王克鲁,鲁世强,康永林,等. 硼对高强度低碳贝氏体钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理,2009,34(3):6-9.
- [2] 孙明雪,王 猛,衣海龙,等. 回火温度对低碳贝氏体高强度钢组织性能的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版),2013,34(12):1725-1729.
- [3] 张 涛,侯华兴,衣海龙,等. 硼含量及热处理对低碳贝氏体钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理,2011,36(11):76-80.
- [4] 张 凯,邱春林,赵 宇,等. 硼对高级别管线钢连续冷却转变与动态再结晶的影响[J]. 钢铁研究学报,2006,41(9):22-28.
- [5] 贺信莱,尚成嘉,杨善武,等. 高性能低碳贝氏体钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2008.
- [6] 邵振遥,史文博,李 壮,等. 热处理对 X90 管线钢组织性能的影响[J]. 材料与冶金学报,2016,15(3):225-236.
- [7] 康健,卢 峰,王 超,等. 工程机械用 Q960 钢的调质热处理工艺[J]. 机械工程材料,2012,36(1):7-10.
- [8] 于庆波,孙 莹,倪宏昕,等. 不同类型的贝氏体组织对低碳钢力学性能的影响[J]. 机械工程学报,2009,45(12):284-288.

表2 不含硼和含0.001 0%硼试验低碳贝氏体钢的力学性能
Table 2 Mechanical properties of without bearing boron and with bearing 0.001 0% boron tested low carbon bainite steel

试验钢	B/ %	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	延伸率/ %	-40 ℃ 冲击功/J
1 [#]	0	591	702	19	228
2 [#]	0.001 0	771	834	16	221

以看出,硼对试验钢的力学性能有明显的影 响。1[#]试验钢的屈服强度、抗拉强度分别为591 MPa和 702 MPa,延伸率为 19%; -40 ℃ 冲击功为 228 J,而 2[#]试验钢的屈服强度上升到 771 MPa,抗拉强度升至 834 MPa,延伸率降至 16%, -40 ℃ 冲击功为 221 J,可见试验钢硼对试验钢的强度有较大影响,由于硼对试验钢的淬透性有较大影响,1[#]试验钢得到粒状贝氏体,2[#]试验钢得到板条贝氏体组织,而粒状贝氏体铁素体尺寸大、位错密度低,所以粒状贝氏体钢的强度明显低于板条贝氏体钢^[8]。

综合上述分析,板条贝氏体的综合力学性能优于粒状贝氏体,实际大生产中试验钢应加入适量硼以控制试验钢得到板条贝氏体组织为宜。

赵燕青(1984-),男,硕士(2011年北京科技大学),工程师,2008年河北工业大学(本科)毕业,轧钢工艺及金属热处理研究。E-mail:zyqzyq200@126.com

收稿日期:2017-10-30