

· 组织和性能 ·

淬火温度对 780 MPa 级 Ti-Nb-B 微合金化水电用钢组织和力学性能的影响

赵燕青¹ 孙力¹ 梁爱国¹ 田志强¹ 陈振业¹ 罗应明² 杨浩¹

(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 研究了淬火温度对 780 MPa 级水电用钢 (C: 0.09, Si: 0.10, Mn: 1.50, P: 0.009, S: 0.002, Cr: 0.90, Ni: 0.20, Ti: 0.023, Nb: 0.004, B: 0.001) 组织和力学性能的影响。结果表明, 试验钢不同温度淬火后均得到了板条贝氏体组织, 随着淬火温度 910 °C 升高至 950 °C, 奥氏体平均晶粒从 9.1 μm 长到 16.6 μm, 试验钢回火后基本保持了淬火态的板条结构。淬火温度在 910 ~ 950 °C, 试验钢的强度随着淬火温度的升高先增大后减小, 并在 930 °C 时达到最大, 试验钢冲击韧性和断后延伸率与强度有着相同的变化规律。在 930 °C 淬火, 610 °C 回火的工艺参数条件下, 获得最佳的力学性能: 屈服强度为 802 MPa, 抗拉强度为 858 MPa, 伸长率为 19%, -40 °C 冲击功为 238 J。

关键词 Ti-Nb-B 微合金化 淬火温度 水电用钢 组织 力学性能

Effect of Quenching Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of 780 MPa Grade Ti-Nb-B Microalloying Hydroelectric Steel

Zhao Yanqing¹, Sun Li¹, Liang Aiguo¹, Tian Zhiqiang¹, Chen Zhenye¹, Luo Yingming² and Yang Hao¹

(1 Hesteel Group Technology Research Institute, Shijiazhuang 050023;

2 Hesteel Group Wusteel Company, Pingdingshan 462500)

Abstract The effect of quenching temperatures on microstructure and mechanical properties of 780 MPa grade hydroelectric steel (C: 0.09, Si: 0.10, Mn: 1.50, P: 0.009, S: 0.002, Cr: 0.90, Ni: 0.20, Ti: 0.023, Nb: 0.004, B: 0.001) was investigated. The results showed that the tested steel can transform into lath bainite microstructure when the steel was quenched at different temperatures, and the average grain size of prior austenite grows from 9.1 μm to 16.6 μm with increasing quenching temperature from 910 °C to 950 °C, the microstructure of the tested steel after tempering is basically maintained a lath structure after quenching. When the quenching temperature is between 910 °C and 950 °C, with increasing quenching temperature, the strength of the tested steel increases firstly then decreases and the maximum value reaches at 930 °C, and variation of the impact toughness and elongation of tested steel are identical compared with the strength. The optimum mechanical properties are obtained when quenching at 930 °C and tempering at 610 °C, the yield strength is 802 MPa, tensile strength 858 MPa and elongation 19% with the Charpy impact energy 238 J at -40 °C.

Material Index Ti-Nb-B Microalloying, Quenching Temperature, Hydroelectric Steel, Microstructure, Mechanical Properties

水力发电是可再生能源, 具有低成本、节能环保等优点^[1], 我国近 10 年来, 多数抽水蓄能电站, 为降低工程施工和焊接难度, 普遍采用高强度钢板^[2]。780 MPa 级水电用钢板国内只有少数中厚板厂家可以生产, 普遍采用调质热处理工艺实现高强度、高韧性^[3], 调质高强钢因为其良好的性能均匀性和组织稳定性等优势占据着主流高端市场。

淬火是使钢强化和获得特殊使用性能的主要方法^[4]。淬火温度影响着钢原奥氏体晶粒大小和合金元素在钢中的溶解分布状态, 由此改变钢的淬透性和相变后的板条束尺寸, 进而影响钢的力学性能^[5], 本文分析了淬火温度对 780 MPa 级水电用钢组织和力学性能的影响。

1 试验材料与方法

试验用钢采用 50 kg 真空感应炉冶炼, 真空度为 10 Pa; 浇筑钢锭的断面尺寸为 150 mm × 150 mm。其熔炼化学成分如表 1 所示, 钢锭采用 550 mm 轧机轧制, 钢锭随炉加热到 1 230 °C, 保温 1.5 h 后出炉, 钢锭奥氏体再结晶区轧制温度为 980 ~ 1 150 °C, 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 840 ~

表 1 试验钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of the tested steel / %

C	Si	Mn	P	S	Ni	Ti	Nb	Cr	B
0.09	0.10	1.50	0.009	0.002	0.20	0.023	0.004	0.90	0.001 0

940 ℃,单道次压下率11%~16%,累计压下率40%~70%,终轧温度840 ℃,轧后将钢板水冷至620 ℃后空冷至室温,钢板的断面尺寸为45 mm×200 mm,钢板的相变点温度 $Ac_1 = 733$ ℃, $Ac_3 = 878$ ℃。热轧钢板的淬火温度分别为910 ℃、930 ℃和950 ℃,保温0.5 h,出炉进行水淬至室温,钢板的回火温度为610 ℃,保温1 h,出炉后空冷至室温。用Zeiss扫描电镜对试样进行组织分析。拉伸试验采用直径为10 mm的标准试样,横向取冲击试样,加工成10 mm×10 mm×55 mm的标准V型缺口试样。

2 试验结果与分析

2.1 淬火温度对试验钢显微组织的影响

从图1可见,试验钢得到粒状贝氏体组织,大量块状M/A岛弥散分布于贝氏体铁素体基体内。

从图2可以看出,试验钢不同温度淬火后均得到板条贝氏体组织,通常板条贝氏体可被认为低碳贝氏体钢中转变温度最低、硬度最高的组织^[6],组织中细长平直的贝氏体板条束贯穿整个原奥氏体晶粒,因为在淬火中发生了以切变方式进行的贝氏体转变,在奥氏体晶界上形核并贯穿整个奥氏体晶粒,这种贝氏体板条束有效分割了奥氏体晶粒^[7],随着淬火温度的升高,奥氏体晶粒逐渐长大,贝氏体板条

束在长度和宽度方向上明显增长。

图3为试验钢在不同温度淬火,610 ℃回火后的SEM组织形貌,可以看出,试验钢的组织均为回火贝氏体,组织基本保持了淬火态的板条结构,但高温回火使大量的位错具有足够的热激活能发生迁移,相互作用甚至抵消,因此位错密度显著降低,一些相邻板条的边界变得模糊或消失,基体的回复明显^[8],有部分板条束贯穿整个奥氏体晶粒,在原奥氏体晶界处以及板条束间有大量碳化物析出。随着淬火温度的升高,贝氏体板条束逐渐长大。

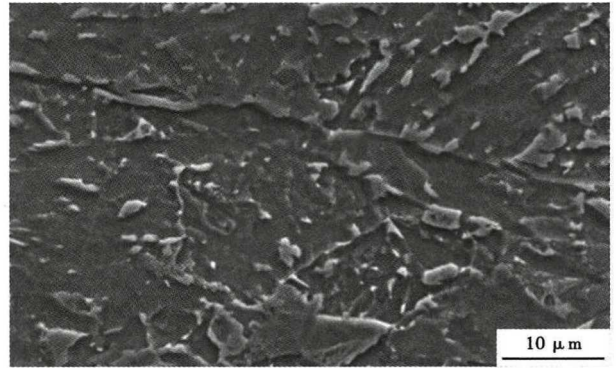


图1 试验钢热轧态的组织形貌,SEM
Fig.1 Morphology of structure of tested steel hot-rolled, SEM

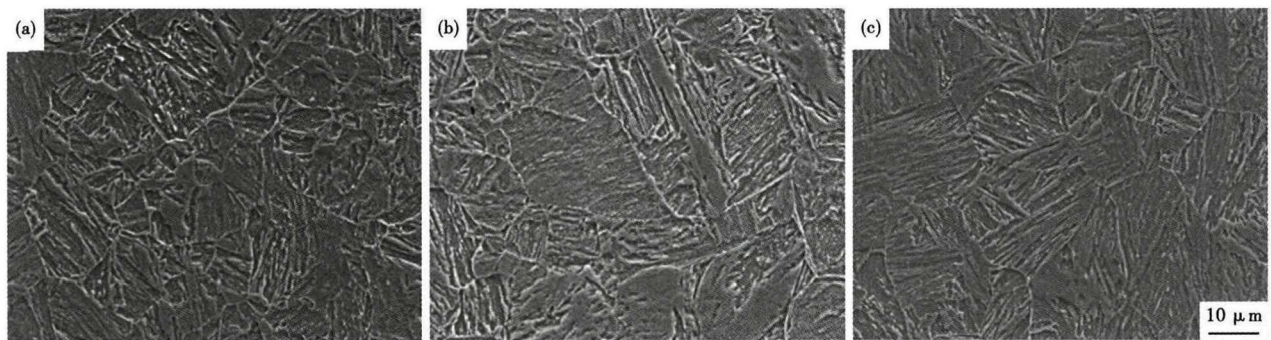


图2 试验钢(a)910 ℃,(b)930 ℃和(c)950 ℃淬火的组织形貌,SEM
Fig.2 Morphology of structure of tested steel quenched at (a) 910 ℃,(b) 930 ℃ and (c) 950 ℃, SEM

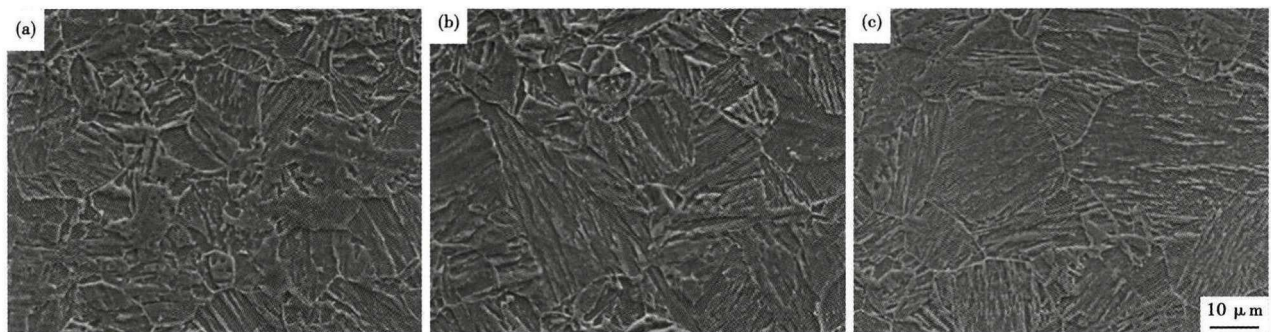


图3 试验钢(a)910 ℃,(b)930 ℃和(c)950 ℃淬火再经610 ℃回火后的组织形貌,SEM
Fig.3 Morphology of structure of tested steel quenched at (a) 910 ℃,(b) 930 ℃ and (c) 950 ℃ and then tempered at 610 ℃,SEM

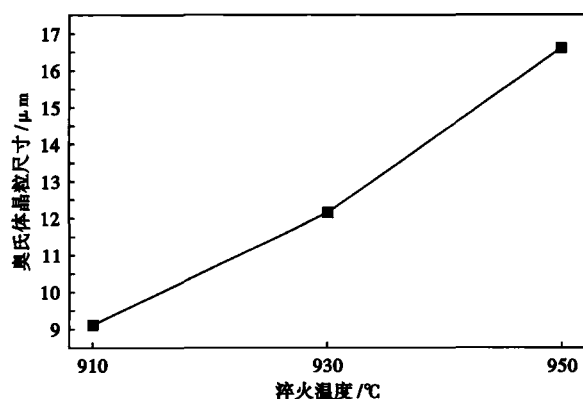


图4 试验钢 910 °C、930 °C 和 950 °C 淬火的奥氏体晶粒尺寸
Fig.4 Austenite grain size of tested steel quenched at 910 °C, 930 °C and 950 °C

表 2 试验钢淬火、回火温度对力学性能的影响

Table 2 Effect of quenching and tempering temperature on mechanical properties of tested steel

淬火温度 / °C	回火温度 / °C	屈服强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	延伸率 / %	-40 °C 冲击功 / J
910	610	771	830	17.5	224
930	610	802	858	19	238
950	610	792	848	17	208

图 4 为试验钢奥氏体平均晶粒尺寸随淬火温度的变化曲线,淬火温度由 910 °C 升高到 950 °C,奥氏体平均晶粒从 9.1 μm 长到 16.6 μm。

2.2 淬火温度对试验钢力学性能的影响

表 2 为试验钢在不同温度淬火,610 °C 回火后的力学性能,可以看出,淬火温度在 910 °C 时,试验钢的屈服强度为 771 MPa,抗拉强度为 830 MPa。随着淬火温度的升高,试验钢的屈服强度和抗拉强度均有所增加,淬火温度为 930 °C 时,试验钢的屈服强度为 802 MPa,抗拉强度为 858 MPa,均达到最大值。当淬火温度继续升高至 950 °C 时,试验钢的屈服强度和抗拉强度有所下降,分别为 792 MPa 和 848 MPa。随着淬火温度的升高,试验钢冲击功和断后

延伸率与强度有着相同的变化规律。

在试验钢再加热奥氏体化过程中,淬火温度影响了合金元素的溶解分布状态以及奥氏体晶粒尺寸,最终造成了试验钢力学性能的差异^[9],钢中 Nb、Ti、Mo 等碳化物形成元素降低了碳在钢中的扩散速率,抑制了奥氏体化的进程,另外还减小了原晶界面积,降低了总界面能,起到抑制晶粒长大的作用,随着淬火温度的升高,钢中的合金元素在奥氏体中的固溶量增大^[10],这些合金元素可以更多更均匀地溶入到奥氏体中,淬火后组织中的碳及合金元素的过饱和度增大,高温回火后析出的碳化物数量和均匀度相应提高,有利于提升钢的强度与韧性,另一方面,随着淬火温度的升高,奥氏体晶粒尺寸增大,淬火后得到的板条束尺寸相应增大^[7],使得钢的强韧性降低,因此势必存在一种临界淬火温度,即适当的淬火温度下保证奥氏体化充分、合金碳化物溶解与分布均匀,同时又不导致晶粒过分长大而降低强韧性。针对本研究中的试验钢,综合考虑,确定出最佳的淬火工艺参数为:淬火温度 930 °C,回火温度 610 °C。

3 结论

(1) 试验钢不同温度淬火后均得到了板条贝氏体组织,组织中细长平直的贝氏体板条束贯穿整个奥氏体晶粒,随着淬火温度的升高,奥氏体晶粒逐渐长大,奥氏体平均晶粒从 9.1 μm 长到 16.6 μm,试验钢回火后基本保持了淬火态的板条结构。

(2) 淬火温度在 910 ~ 950 °C,试验钢的强度随着淬火温度的升高先增大后减小,在 930 °C 时达到最大,试验钢冲击韧性和断后延伸率与强度有着相同的变化规律,在 930 °C 淬火,610 °C 回火的工艺参数条件下,获得最佳的力学性能为:屈服强度 802 MPa,抗拉强度 858 MPa,伸长率 19%, -40 °C 冲击功 238 J。

参考文献

- [1] 洪光涛,霍松波,朱晓辰,等. 800 MPa 级水电网钢的微观组织和力学性能研究[J]. 河南冶金,2014,22(6):9-11,48.
- [2] 朱晓英,梅燕,胡木生,等. 国内大型水电站压力钢管用钢的探讨[J]. 水利电力机械,2007,29(8):42-46,49.
- [3] 万德成,余伟,李晓林,等. 淬火温度对 550 MPa 级厚钢板显微组织和力学性能的影响[J]. 金属学报,2012,48(4):455-460.
- [4] 胡光立,谢希文. 钢的热处理-原理和工艺(1993 年修订版)[M]. 西安:西北工业大学出版社,1993.
- [5] 惠卫军,董瀚,王毛球,等. 淬火温度对 Cr-Mo-V 系低合金高强度钢力学性能的影响[J]. 金属热处理,2002,27(3):14-16.
- [6] 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.
- [7] 段争涛,李艳梅,朱伏先,等. 淬火温度对 Q690D 高强钢组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理,2012,37(2):81-84.
- [8] 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.
- [9] 康健,卢峰,王昭东,等. 工程机械用 960 MPa 级调质钢板的淬火工艺研究[J]. 东北大学学报(自然科学版),2011,32(1):52-55.
- [10] 许晨旭,李云凯,郭佩,等. 淬火温度对 42CrNi2MoWV 钢力学性能的影响[J]. 金属热处理,2010,35(11):62-64.

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:2018-11-16