

水电站用 800 MPa 级低焊接裂纹敏感性高强钢板 SX780CF 的开发

罗应明¹ 王九清¹ 庞辉勇¹ 张朋¹ 蒙耀华¹ 赵燕青²
(1 河钢集团舞钢公司,舞钢 462500;2 河钢集团钢研总院,石家庄 050023)

摘要 通过设计成分(/%:0.09C,0.15Si,1.15Mn,0.58Ni,0.47Cr,0.44Mo,0.033V,0.022Nb,0.0012B,0.036Al,0.014Ti),控制熔炼分析 N 含量 $\leq 20 \times 10^{-6}$ 冶炼,钢锭最高加热温度 ≤ 1200 °C 轧制、930 °C 淬火、610 °C 回火,开发出的 60 mm 厚 SX780CF 钢板屈服强度 780 MPa,抗拉强度 887 MPa,延伸率 18%,5% 应变 250 °C 时效后 -20 °C 冲击功(KV₂) 203 ~ 210 J,满足水电站用 800 MPa 级低焊接裂纹敏感性高强钢技术要求。

关键词 微合金化 SX780CF 钢 酸溶硼 淬透性 板条贝氏体

Development of 800 MPa Low Welding Crack Sensitivity High Strength Steel Plate SX780CF for Hydropower Station

LUO Ying-ming¹, WANG Jiu-qing¹, PANG Hui-yong¹,
ZHANG Peng¹, MENG Yao-hua¹, ZHAO Yan-qing²
(1 Wuyang Iron and Steel Co Ltd of Hegang group, Pingdingshan 462500;
2 Steel Research Institute of Hegang group, Shijiazhuang 050023)

Abstract Through the design composition (/%:0.09C,0.15Si,1.15Mn,0.58Ni,0.47Cr,0.44Mo,0.033V,0.022Nb,0.0012B,0.036Al,0.014Ti), the N content of smelting analysis controlled to be $\leq 20 \times 10^{-6}$ in steel smelting, rolling with ingot maximum heating temperature ≤ 1200 °C, and quenching at 930 °C and tempering at 610 °C, the developed 60 mm SX780CF steel plate has yield strength 780 MPa, tensile strength 887 MPa, elongation 18% and 5% strain 250 °C aged -20 °C impact energy (KV₂) 203 ~ 210 J, which meet the technical requirements of 800 MPa low welding crack sensitivity high strength steel for hydropower station.

Material Index Microalloying SX780CF Steel, Acid Soluble Boron, Hardenability, Lath Bainite

水电专用钢属于压力容器钢板,一般情况下以中厚板为主,早期的水电站建设一般采用抗拉强度不低于 500 MPa 或者 600 MPa 级别的钢板,后来随着水电站的装机容量和水头等数值越来越大,对水电用钢板提出了更高的要求,包括更高的强度、更好的低温韧性和焊接性能。水电站为了减小钢管、蜗壳、岔管的壁厚,降低施工和焊接的难度,开始采用 800 MPa 级的水电用钢。

舞钢公司结合三峡集团乌东德、白鹤滩巨型电站以及国网丰宁、敦化抽水蓄能电站用 800 MPa 级钢板国产化的需要,研发了水电站用 800 MPa 级低焊接裂纹敏感性高强钢板 SX780CF。

1 试验钢成分和主要力学性能要求

SX780CF 钢板化学成分要求见表 1,主要力学性能要求见表 2,钢板厚度 60 mm。

从表 1 可以看出,水电站用 800 MPa 级低焊接裂纹敏感性高强钢化学成分的主要特点是通过低 C 和低碳当量(C_{eq})来实现低焊接裂纹敏感性(P_{cm}),从表 2 可以看出,钢板延伸率要求比普通 800 MPa 级高强钢板高出 1%,横向冲击功要求达到普通 800 MPa 级 E 级钢的 2 倍以上(普通 800 MPa 级 E 级钢 -40 °C 横向冲击功要求 ≥ 47 J)。同时,由于引水管道通常都是埋藏在地下,在外压作用下容易

表 1 SX780CF 钢化学成分/%
Table 1 Chemical Composition of SX780CF steel/%

项目	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Nb	B	Al	Ti	C _{eq}	P _{cm}
技术要求	≤ 0.09	≤ 0.50	0.70 ~ 1.50	0.50 ~ 1.70	≤ 0.60	≤ 0.70	≤ 0.050	≤ 0.120	≤ 0.0030	-	≤ 0.05	≤ 0.52	≤ 0.25
试验钢	0.09	0.15	1.15	0.58	0.47	0.44	0.033	0.022	0.0012	0.036	0.014	0.51	0.23

注:(1) C_{eq}(%) = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14

(2) P_{cm}(%) = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B

表 2 60 mm SX780CF 钢板力学性能
Table 2 Mechanical properties of 60 mm SX780CF steel plate

项目	横向拉伸试验			横向冲击试验	
	屈服强度($R_{p0.2}$)/MPa	抗拉强度(R_m)/MPa	延伸率(A)/%	-40℃冲击功(KV ₂)/J	-20℃5%应变250℃时效冲击功(KV ₂)/J
技术要求	≥690	770~930	≥15	≥100	≥100
试验钢	780	887	18	282,245,271	203,218,210

发生失稳破坏^[1],且由于冷加工塑性变形及焊接内应力变形,使钢板强度和硬度升高,塑性和韧性下降,水电站用 800 MPa 级低焊接裂纹敏感性高强钢板除了要求普通低温冲击韧性外,对应变时效低温冲击同样要求较高。

2 开发流程

2.1 成分设计

SX780CF 钢板化学成分设计思路主要考虑以下几点:

(1)低 Si 含量($\leq 0.15\%$)能有效减缓焊缝处高温 δ 铁素体向硬脆 σ 相转变的过程,使堆焊层有更好的韧性和低周疲劳寿命,有利于改善焊接热影响区韧性^[2]。

(2)钢中添加微量 B,可以提高钢材的淬透性,钢中加入 0.0010% B 就可以成倍提高钢材的淬透性,改善韧性^[3]。但是 B 也是易偏析元素,容易在晶界偏析形成对钢材性能危害较大的硼相 $[\text{Fe}_3(\text{B}, \text{C}) + \text{Fe}_{23}(\text{B}, \text{C})_6]$ 。当钢中 B 含量超过 0.0030%,晶界处就会形成明显的网状析出物。析出物 $[\text{Fe}_3(\text{B}, \text{C}) + \text{Fe}_{23}(\text{B}, \text{C})_6]$ 硬且脆,分布在晶界上削弱了基体间的联系,对钢的塑性和韧性有不良影响,特别当析出物尺寸大、数量多时,影响更加明显^[4]。

(3)在 Al 镇静钢中,钢液中 Al、Ti、Si 优先于 B 与 O 结合,钢液的溶解 O 含量主要由铝氧平衡决定,只要钢液中存在合适的 Al 含量(0.020% ~ 0.050%),Ti、B 就将会被保存下来,不生成相应的氧化物。钢液中的氧含量控制在 20×10^{-6} 以下为理想状态。且在含 B 钢中,Ti、B、Al 三种元素,Ti 优先于 B、Al 与 N 结合,只要钢液中有足够的 Ti(3.4 倍的 N)或者足够多的 Al(0.050% 以上),B 将会被保存下来,不生成 BN^[5]。通常钢液中 N 含量通常为 0.0030% ~ 0.0060%,所以 Ti 含量 0.010% ~ 0.020% 较为合适。

(4)结合 Cr、Mo 对 C_{eq} 和 P_{cm} 贡献量远大于 Ni 的特性,以适当降低 Cr、Mo,适当提高 Ni 为设计思路,匹配 Ni、Cr、Mo 合金元素含量,保证钢板的强度、韧性;并且添加 Nb、V 微合金元素,利用其细化晶粒和析出强化的特点,对低碳钢的强韧性控

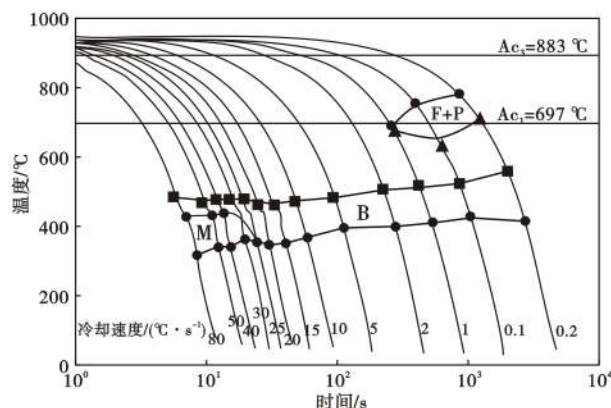


图 1 SX780CF 钢静态连续冷却曲线
Fig. 1 Static continuous cooling curve of SX780CF steel

制形成有效的补充。

2.2 中试和相变研究

根据上述的成分设计思路,用 50 kg 真空感应炉冶炼 1 炉钢,成分见表 1,浇铸成 150 mm × 150 mm 的钢锭,用实验室 550 mm 轧机轧成 50 mm 试板,热处理后的力学性能完全满足表 2 要求,取样的 DIL805L 相变淬火膨胀仪上测得 $Ac_1 = 697\text{ }^\circ\text{C}$, $Ac_3 = 883\text{ }^\circ\text{C}$,绘制静态 CCT 曲线见图 1。从图 1 可以看出冷却速度 $\leq 1\text{ }^\circ\text{C/s}$ 时会产生部分铁素体和珠光体转变,冷却速度在 2 ~ 25 $^\circ\text{C/s}$ 时全部为贝氏体转变,冷却速度 $\geq 30\text{ }^\circ\text{C/s}$ 时会有部分马氏体转变。

2.3 冶炼操作

中试在真空感应炉中冶炼,气体 O、N 的影响较小。实际冶炼过程中的 O、N 会降低 B 的收得率,是含 B 钢生产的难点^[6]。有国外研究指出,为了提高 B 的收得率,精炼过程中要做到有效的脱氧固氮,在加 B 前应先加入与 B 结合力更强的 Al、Ti,即先加入 Al 脱氧,再加入 Ti 固氮,防止产生 B 的氧化物和氮化物^[7]。

在含 B 钢的生产中,Ti/N 比对含硼钢中有效 B 存在显著影响:当 Ti/N 比 6 时,随着 Ti/N 比值的降低,B 元素收到率大幅度降低,造成淬透性波动较大;当 Ti/N 比 6 时,B 元素的收到率受 Ti/N 比值的影响较小,即使 Ti/N 比值增加再大,酸溶硼的含量不再变化;保证含 B 钢中有效硼收得率的 Ti/N 比临界值为 6^[8]。而鞍钢在低碳贝氏体钢生产中发现

Ti/N 比 < 3.3 时,酸溶硼的收得率小于 50%; Ti/N 比 > 3.6 时酸溶硼收得率在 75% 以上, Ti/N 比 ≥ 4 时,酸溶硼收得率趋于 90%, 并不再明显提高; 随着 Ti/N 比的增加钢板性能合格率明显提高, 增加 Ti 含量提高 Ti/N 比是提高 B 收得率, 并提高性能合格率的比较经济有效手段^[9]。

受钢中 N 含量的影响, 俄罗斯北方钢铁公司生产的含 B 钢质量常常不符合汽车制造业的要求, 但后来通过冶炼过程 N 含量控制, 包括采用铁水达整个炉料量 40% 且具有强烈氧化脱碳的“福克斯”井式电炉, 采用无电弧脱碳补吹技术和氩封保护浇注技术, 钢中 Al、Ti 和有效 B 最佳化控制等措施, 成功生产出了冶金质量和淬透性优良的含硼钢^[10]。

舞钢公司通过学习国内外的研究成果, 结合自身设备和工艺特性, 采取了降低 N 含量的方式来提高 Ti/N 比, 整个冶炼工序都围绕降低 N 含量开展工作, 包括加大铁水比例、减少精炼过程增 N、铝钛复合脱氧固氮、氩气保护浇注等措施, 生产的 SX780CF 钢板熔炼分析 N 含量 $\leq 20 \times 10^{-6}$, 酸溶硼收得率达到 80% 以上。

2.4 加热轧制

钢坯的加热温度直接影响到微合金元素固溶程度和初始奥氏体晶粒度, 从而影响到轧制过程中的奥氏体再结晶以及轧后钢中碳氮化物的状态、数量。文献[11]表明, 加热温度在 1 150 ~ 1 200 °C 时, 钢坯中的 Nb、V 就能达到一个较高的固溶度。为了验证 800 MPa 低焊接裂纹敏感性高强加热过程中的晶粒粗化程度, 将小块试样加热到不同的温度保温 20 min, 然后入水淬火, 通过观察淬火后的晶粒度变化趋势反推加热时的初始奥氏体晶粒粗化趋势, 由图 2 可以看出, 加热温度超过 1 200 °C 后, 初始奥氏体晶粒开始有明显的粗化现象, 因此, SX780CF 钢坯最高加热保温温度不宜超过 1 200 °C。

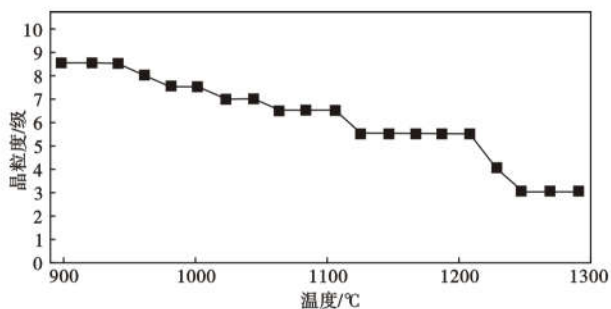


图2 加热温度对 SX780CF 钢晶粒度的影响

Fig. 2 Effect of heating temperature on grain size of SX780CF steel

为了给后期的离线调质做组织准备, SX780CF 钢板采用控轧控冷工艺轧制。粗轧阶段通过最后两个道次压下率超过 15% 的大压下, 达到动态再结晶的目的, 细化初始奥氏体晶粒; 根据相关公式计算得到该钢再结晶温度 T_{nr} 在 910 °C 左右, 考虑坯料表面温度和中心温度差异为 50 °C, 精轧的开轧温度要求 ≤ 860 °C, 将经过再结晶区轧制有了一定程度细化的奥氏体继续轧制变形, 使它被压扁和拉长, 增加单位体积中奥氏体的晶界面积, 在晶内生成大量的形变带和高密度位错; 根据相关公式计算得到贝氏体开始转变温度为 680 °C 左右, 轧后水冷阶段尽量加大冷却速度控制组织转变, 采用控制冷却或者在线淬火工艺, 将钢板冷却到 680 °C 以下, 得到粒状贝氏体和板条贝氏体混合组织。

2.5 热处理工艺

淬火温度影响着钢中原奥氏体晶粒的大小和合金元素的溶解分布状态, 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。通过实验研究和实际生产数据发现, 800 MPa 低焊接裂纹敏感性高强钢在 910 ~ 950 °C 淬火后, 均得到了板条贝氏体组织, 组织中细长平直的板条束贯穿整个奥氏体晶粒, 随着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 长大到 16.6 μm ; 钢的强度、延伸率和冲击韧性都随着淬火温度的升高先增大后减小, 930 °C 时达到最大; 回火后基本保持了淬火态的板条结构; 930 °C 淬火时, 610 °C 的回火温度能得到最佳的综合力学性能^[12]。

3 实物质量

3.1 力学性能

按上述流程开发的 60 mm 厚 SX780CF 钢板厚度力学性能见表 2, -40 °C 横向冲击功达到 260 J 以上, 5% 应变加上 250 °C 时效保温 1 h 后 -20 °C 横向冲击功略有下降, 但还是能达到平均 210 J 以上, 且强度适中, 强韧性匹配良好, 完全满足水电站用 800 MPa 级低焊接裂纹敏感性高强钢板技术要求。

3.2 金相组织

60 mm 厚 SX780CF 钢板板厚 1/4 处金相照片见图 3, 组织以板条贝氏体为主, 伴随有少量的粒状贝氏体和回火索氏体, 晶粒度 7 级。

3.3 可焊性

舞钢公司开发的 800 MPa 低焊接裂纹敏感性高强钢板在电力工业金属结构设备质量检验中心做了焊评试验, 综合评价是具有良好的焊接性能。焊条

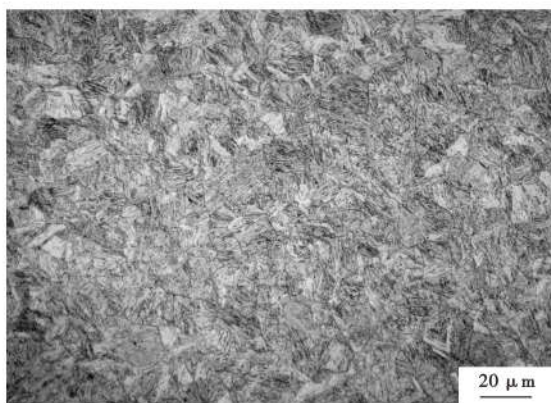


图 3 60 mm SX780CF 钢板 930 °C 淬火, 610 °C 回火的组织形貌

Fig. 3 Morphology of structure of 60 mm SX780CF steel plate quenched at 930 °C and tempered at 610 °C

电弧焊预热温度 75 °C 以上, 气体保护焊预热 100 °C 以上, 埋弧自动焊预热 50 °C 以上即可防止冷裂纹产生, 在合理的热输入条件下, 焊接接头力学性能满足标准要求。推荐焊接热输入为: 焊条电弧焊采用 CHE807RH 焊条时, 焊接热输入 ≤ 30 kJ/cm; 气体保

护焊采用昆山中冶宝钢 BHG-4M 焊丝, 焊接热输入 ≤ 35 kJ/cm; 埋弧自动焊采用大西洋 BHM-4M 焊丝, 配昆山中冶宝钢 XUNI23 焊剂, 焊接热输入 ≤ 45 kJ/cm。

4 结语

通过以 Ni、Cr、Mo 合金保证强韧性, 以 Nb、V 微合金元素细化晶粒、析出强化, 以添加 B 元素提高淬透性的成分设计; 冶炼时采用加大铁水比例、减少精炼过程增氮、铝钛复合脱氧固氮、氩气保护浇铸等措施降低 N 含量提高酸溶硼比例的冶炼方法; 采用防止晶粒粗化的加热和控轧控冷轧制工艺以及控制组织以板条贝氏体为主的调质热处理工艺, 开发出的 60 mm 厚 SX780CF 钢板在 -40 °C 下平均冲击功 266 J, -20 °C 平均时效冲击功 210 J, 常温下屈服强度 780 MPa, 抗拉强度 887 MPa, 延伸率 18%, 强韧性匹配和焊接性能良好, 完全满足水电站用 800 MPa 级低焊接裂纹敏感性高强钢的技术要求。

参考文献

- [1] 岑黛蓉, 王建, 丁丽. 地下埋藏式钢管抗外压稳定性分析[J]. 水力发电, 2006, 32(1): 52-54.
- [2] 何杨松. 使用低 Si 焊材提高临氢压力容器 347L 堆焊层的韧性[J]. 江西石油化工, 2002, 14(2): 28-32.
- [3] 赵燕青, 孙力, 刘宏强, 等. 硼对 780 MPa 低碳贝氏体钢组织和力学性能的影响[J]. 特殊钢, 2018, 39(2): 65-67.
- [4] 郭达人. 50B 钢中的晶界析出物及脆化机理的初步探讨[J]. 金属热处理, 1996(10): 37-38.
- [5] 孙永喜, 李法心, 张君平, 等. 冶炼硼钢控制硼含量的工艺实践[J]. 特殊钢, 2013, 34(4): 33-35.
- [6] 冯士超, 王艳红, 潘秀兰, 等. 硼钢炼钢连铸技术发展现状[J]. 炼钢, 2012, 28(4): 69-73.
- [7] Masafumi H. Method for Continuously Casting Boron-Containing Stainless Steel; Japan, 2007-090367[P]. 2007. 12. 04.
- [8] 陈继林, 郭明仪, 刘振民, 等. 氮含量对含硼钢淬透性的影响[J]. 轧钢, 2015, 32(4): 94-96.
- [9] 张涛, 侯华兴, 陈军平, 等. Ti/N 对低碳贝氏体钢组织和力学性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2011, 32(4): 22-25.
- [10] 任晓红. 含硼调质钢淬透性及成分的最佳化[J]. 国外金属热处理, 2004, 25(1): 17-19.
- [11] 杨秀亮. 加热温度对管线钢第二相粒子固溶及晶粒长大的影响[J]. 钢铁钒钛, 2002, 23(2): 11-13.
- [12] 赵燕青, 孙力, 梁爱国, 等. 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[J]. 特殊钢, 2019, 40(3): 46-48.

罗应明(1985-), 男, 2008 年西安建筑科技大学(本科)毕业, 高级工程师, 低焊接裂纹敏感性高强钢和镍系超低温钢板生产工艺研究。E-mail: 15093765368@163.com。

收稿日期: 2021-10-12