

低焊接裂纹敏感性钢板组织和性能研究

魏慧慧, 白海瑞, 杨 雄, 卢晓禹, 杨源远

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 采用低碳、低碳当量 (Ceq)、低焊接裂纹敏感性指数 (Pcm) 的合金体系路线, 利用 100 kg 真空感应炉进行试验钢冶炼, 在 TMCP 及调质的工艺下在实验室研制 800 MPa 级水电工程用低焊接裂纹敏感性钢。对试验钢的强度、冲击及弯曲等力学性能进行了检测, 并利用光学显微镜 (OM) 和场发射扫描电镜 (SEM) 对试验钢的显微组织及断口形貌进行分析。结果表明, 试验钢室温显微组织为回火索氏体, 各项力学性能优良, 试验钢屈服强度、抗拉强度、断后伸长率分别为 788 MPa、842 MPa、18.1%, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温冲击吸收功为 197 J, 强韧性匹配好, 焊接裂纹敏感指数低, 满足使用性能要求。

关键词: 800 MPa 级水电钢; 低焊接裂纹敏感性; 组织性能

中图分类号: TG142.1

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2022)03-0043-05

Research on Microstructure and Properties of Steel Plate with Low Welding Crack Sensibility

Wei Hui-hui, Bai Hai-ru, Yang Xiong, Lu Xiao-yu, Yang Yuan-yuan

(Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The 800 MPa grade hydropower engineering steel with low welding crack sensibility is developed through smelting test steel with 100 kg vacuum induction furnace as well as thermal mechanical control processing (TMCP), quenching and tempering processes adopting the alloy system route of low carbon, carbon equivalent (Ceq) and welding crack sensibility index (Pcm) in laboratory. Such mechanical properties as the strength, impact and bending of test steel are tested as well as its microstructure and fracture morphology are analyzed with the optical microscope (OM) and field emission scanning electron microscope (SEM). The results showed that its microstructure at room temperature was tempered sorbite, all its mechanical properties were excellent, its yield strength, tensile strength and elongation after fracture were 788 MPa, 842 MPa and 18.1%, low temperature impact absorbing energy at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ was 197 J, strength and toughness well matched as well as welding crack sensitivity index was low, which could meet the performance requirements in use.

Key words: 800 MPa grade hydropower steel; low welding crack sensibility; microstructure and property

水力发电作为清洁能源,具有无污染、运行费用低等特点。我国水电资源世界第一,河流水电资源储量为 6.76 亿 kW,年发电量 5.922 亿 kWh,可开发

水电资源装机容量为 3.78 亿 kW,年发电量 9.200 亿 kWh^[1]。数据显示,我国已建成 10 万多座大中型水电站,建成 230 多座单站 5 万 kW 的大中

型水电站^[2]。近年来,随着水电工程的装机容量和水头等数值越来越大,对用于制造压力钢管、蜗壳、岔管等部件的钢板性能提出更高的要求,要求其具有极高的强度、优良的低温韧性和应变时效冲击韧性。目前可生产 800 MPa 级水电用低焊接裂纹敏感性钢板的企业有鞍钢、湘钢、宝武、舞钢、首钢、南钢等,属于典型的高附加值产品。本文制定了 800 MPa 级水电工程用低焊接裂纹敏感性钢的化学成分及生产工艺,完成了钢板的中试试验,分析了其力学性能及显微组织特征,为包钢 800 MPa 级水电工程用低焊接裂纹敏感性钢板工业化生产提供技术支持。

1 试验材料与方法

1.1 化学成分

采用低碳、低碳当量(Ceq)、低焊接裂纹敏感性指数(Pcm)的合金体系,碳含量不大于 0.09%,

$C_{eq} = \omega(C) + \omega(Si)/24 + \omega(Mn)/6 + \omega(Ni)/40 + \omega(Cr)/5 + \omega(Mo)/\omega(C) + \omega(V)/14 \leq 0.52\%$,
 $P_{cm} = \omega(C) + \omega(Si)/30 + \omega(Mn)/20 + \omega(Cu)/20 + \omega(Ni)/60 + \omega(Cr)/20 + \omega(Mo)/15 + \omega(V)/10 + 5\omega(B) \leq 0.25\%$ 。合理的化学成分设计是 800 MPa 级水电工程用低焊接裂纹敏感性钢板组织和性能的有力保证。碳在钢中主要起固溶强化作用,同时提高钢的淬透性,但碳含量过高会影响钢的焊接性能;镍的加入可显著改善钢基体的低温冲击韧性^[3];铬、钼合金元素的加入使钢的 CCT 曲线右移,有利于提高钢的强度与淬透性^[4];铌、钒、钛的微合金化有利于改善钢的强韧性,铌可以在轧制过程中细化奥氏体晶粒,通过 VC 的析出强化作用以提高钢的强度,钛可以形成碳氮化钛,阻止焊接时热影响区的晶粒长大,显著改善焊接性能^[5]。化学成分设计具体见表 1。并利用 100 kg 真空感应炉进行试验钢冶炼。

表 1 试验钢化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb + V + Ti
≤0.09	0.15 ~ 0.50	≤1.50	≤0.015	≤0.005	≥1.5	≤0.6	≤0.6	适量

1.2 轧制及冷却工艺

试验钢采用热机械轧制(TMCP),经 11 道次从 200 mm 轧制到 20 mm。轧制过程的核心是细化奥氏体晶粒,这个过程通过形变奥氏体晶粒的再结晶来实现。控制奥氏体再结晶后晶粒尺寸的关键是形变温度和相对压下量。轧制及冷却工艺为加热温度 1 220 °C,保温 1.0 h,热轧开轧温度大于 1 150 °C,再结晶区轧制温度大于 1 050 °C,未再结晶区轧制温度小于 950 °C,钢板终轧后经层流冷却设备冷却,终冷温度控制在(650 ± 20) °C。

1.3 热处理工艺

热处理是保证钢板最终力学性能和钢板力学性能均匀性的关键工艺步骤。试验钢板采用调质工艺(淬火 + 高温回火)进行热处理。淬火温度为 900 ~ 950 °C,保温时间 20 min,回火温度为 600 ~ 650 °C,保温时间 30 min。20 mm 厚度钢板在淬火过程中可获得全截面均匀的马氏体组织,淬火后钢板在随后的高温回火过程中转变为回火索氏体。在回火的过程中不仅可以消除组织应力,同时固溶的碳、氮原子以析出物的形式被固定,降低应变时效敏感性。

1.4 组织性能检测

将调质后钢板加工成标准的拉伸试样、冲击试

样及冷弯试样,使用 CMT5105 微机控制万能试验机进行室温拉伸试验,拉伸速度 3 mm/min;使用 Instron 9250HV 落锤式示波冲击试验机进行 -40 °C 低温冲击试验;使用 LWC-2000 型压力试验机进行 180°冷弯试验, $b = 2a$, $D = 3a$ (a 为试样厚度, b 为试样宽度, D 为弯曲压头直径);同时在钢板上切取金相试样,经 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀后,在 LEICAQ550IW 型光学显微镜和 FEI QUANTA 600 扫描电子显微镜下观察试样的金相组织。

2 试验结果与分析

2.1 力学性能

20 mm 试验钢经不同调质工艺(不同淬火温度和回火温度正交)处理后,力学性能检测值见表 2。可见在 900 ~ 940 °C 保温 20 min 淬火、600 ~ 640 °C 保温 30 min 回火的调质工艺下,试验钢各项力学性能均能满足技术要求。在相同回火工艺下(640 °C 保温 30 min),随着淬火温度的升高(900 °C 升至 940 °C),试验钢抗拉强度明显增加(793 MPa 增加至 868 MPa),900 °C 淬火时抗拉强度较技术要求下限富余量较小,仅为 13 MPa,而 940 °C 淬火时抗拉强度较技术要求下限富余量又太大,达 88 MPa,

920 ℃ 淬火时抗拉强度较技术要求下限富余量适中,且断后延伸率及 -40 ℃ 低温冲击性能更优,故淬火温度优选 920 ℃;在相同淬火工艺下(920 ℃ 保温 30 min),随着回火温度的升高(600 ℃ 升至 640 ℃),试验钢 -40 ℃ 低温冲击性能不断改善,600 ℃ 回火时 -40 ℃ 低温冲击性能较低且出现单值波动,620 ℃ 回火时 -40 ℃ 低温冲击性能整体提高且稳定性趋好,640 ℃ 回火时 -40 ℃ 低温冲击性能最优,且断后延伸率明显提高,故回火温度优选

640 ℃。在优选 920 ℃ 保温 20 min 淬火、640 ℃ 保温 30 min 回火的调质工艺下,试验钢屈服强度为 788 MPa,抗拉强度为 842 MPa,断后延伸率为 18.1%, -40 ℃ 低温冲击吸收功平均值为 197 J,180°冷弯合格。不同调质工艺下典型冷弯照片如图 1 所示, -40 ℃ 低温冲击断口形貌如图 2 所示,可见冲击断口形貌呈韧窝状,韧窝尺寸大小、深浅不一但相对均匀,属于典型的韧性断裂特征。

表 2 试验钢力学性能

调质工艺	屈服强度	抗拉强度	断后延	-40 ℃ 冲击吸收功 KV_2/J			180° 弯曲试验
	R_{el}/MPa	R_m/MPa	伸率 $A/\%$				
900 ℃ 保温 20 min 淬火,640 ℃ 保温 30 min 回火	784	793	17.0	198	192	195	合格
920 ℃ 保温 20 min 淬火,640 ℃ 保温 30 min 回火	788	842	18.1	198	200	193	合格
940 ℃ 保温 20 min 淬火,640 ℃ 保温 30 min 回火	839	868	17.2	204	187	193	合格
920 ℃ 保温 20 min 淬火,620 ℃ 保温 30 min 回火	763	811	16.7	169	172	158	合格
920 ℃ 保温 20 min 淬火,600 ℃ 保温 30 min 回火	827	875	16.5	57	147	194	合格
技术要求	≥ 690	780 ~ 930	≥ 15	≥ 47			无裂纹

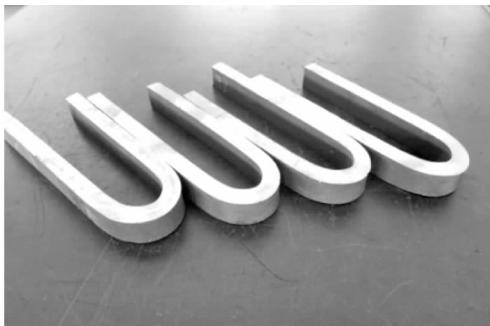
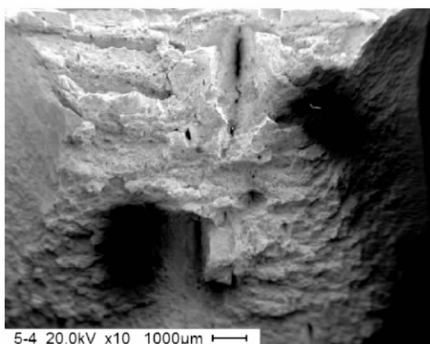


图 1 试验钢不同调质工艺下冷弯照片

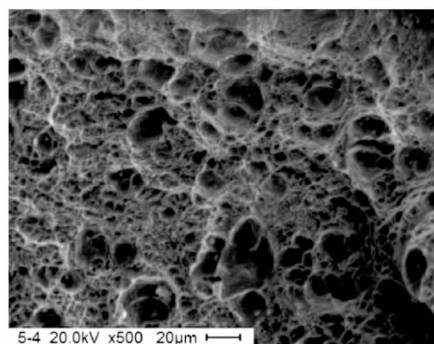
度,进行 -80 ~ -20 ℃ 系列温度冲击试验,具体低温冲击试验温度及冲击吸收功见表 3。可见试验钢板在 -80 ℃ 低温冲击吸收功仍高于 100 J,表明试验钢低温冲击性能优良,韧脆转变温度较低。

为表征试验钢板的应变时效敏感性,经调质处理后的钢板进行拉伸,设定一定的残余应变,拉伸后的钢板经人工时效,保温温度为(250 ± 10) ℃,保温时间为 1 h。随后对钢板进行 -20 ℃ 和 -40 ℃ 冲击试验检测,具体检测值见表 4。可见试验钢应变时效冲击吸收功满足技术要求,且富余量较大,表明试验钢具有良好的应变时效性能。

为表征试验钢板的低温冲击韧性及韧脆转变温



(a) 低倍



(b) 高倍

图 2 试验钢冲击断口典型形貌

表 3 试验钢系列温度冲击吸收功

J

调制工艺	-20 ℃	-40 ℃	-50 ℃	-60 ℃	-80 ℃
	204	198	228	150	114
920 ℃保温 20 min 淬火, 640 ℃保温 30 min 回火	220	200	181	173	162
	204	193	221	75	165

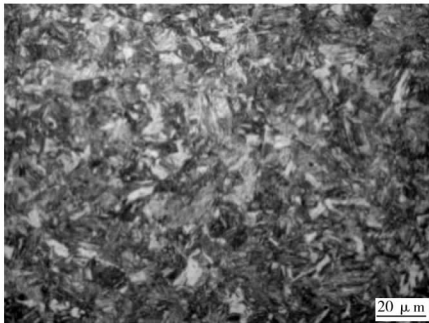
表 4 试验钢应变时效冲击吸收能

调制工艺	残余应变变量/%	保温制度	试验温度/℃	冲击吸收功 KV_2/J			冲击吸收功平均值 KV_2/J
920 ℃保温 20 min 淬火,	5	250 ℃, 1 h	-20	191	201	198	197
640 ℃保温 30 min 回火			-40	188	188	198	191
技术要求			-20				≥ 47

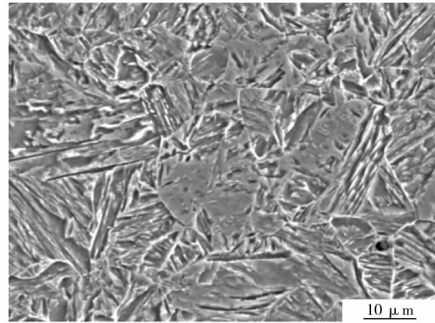
2.2 显微组织

20 mm 试验钢淬火后全断面生成板条马氏体, 板条束较窄, 呈小角度晶界分布, 金相照片及扫描电镜照片如图 3 所示。可见化学成分设计可保证材料具有优异的淬透性, 为后续回火做组织准备; 试验钢

淬火后经高温回火, 马氏体发生分解, 碳化物析出, 最终形成回火索氏体组织, 高温回火后金相照片及扫描电镜照片如图 4 所示。可见回火索氏体组织细小, 均匀分布, 致使试验钢具有高强度、高韧性及良好的低温冲击性能。

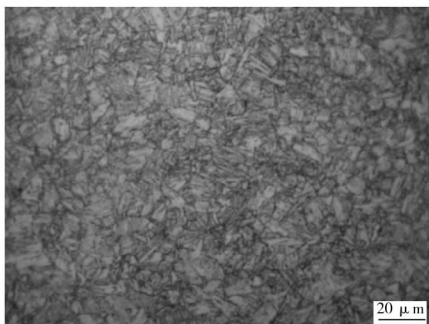


(a) 金相

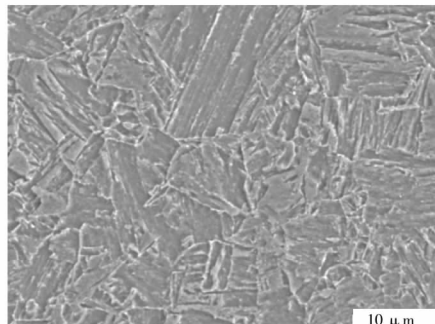


(b) 扫描电镜

图 3 试验钢淬火组织



(a) 金相



(b) 扫描电镜

图 4 试验钢典型调质组织

3 结论

(1) 采用低碳、低碳当量、低焊接裂纹敏感性指数的合金体系设计路线,通过合理的热机械轧制及调质处理,试验钢各项性能均能满足 800 MPa 级水电用低焊接裂纹敏感性钢板的技术要求。

(2) 试验钢不同调质工艺下各项力学性能均能满足技术要求,淬火后获得全截面板条马氏体,回火后显微组织为回火索氏体,考虑综合性能最优,调质工艺优选 920 °C 保温 20 min 淬火、640 °C 保温 30 min 回火。

(3) 试验钢 -20 °C 应变时效冲击吸收功平均值为 197 J,满足技术要求,富余量较大; -80 °C 低温冲击吸收功大于 100 J,韧脆转变温度低。

参 考 文 献

[1] 张群. 我国水力发电的现状和前景[J]. 科技

风,2016,(8):104.

[2] 周兴波,杜效鹤. 2018 年全球水电发展现状与开发潜力分析[J]. 水利水电科技进展,2019,39(3):18-23.

[3] 王克鲁,鲁世强,康永林,等. 微合金低碳贝氏体钢形变奥氏体连续冷却转变行为[J]. 金属热处理,2008,33(10):17-19.

[4] 孔君华,郑琳,郭斌,等. 钼对低碳微合金钢组织和性能的影响[J]. 轧钢,2005,22(4):27-29.

[5] 齐俊杰,黄运华,张跃. 微合金化钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.

(上接第 34 页)

5 结论

(1) 大梁钢 BT700L 钢水脱氧脱硫后加入稀土,通过采取降低钢水中的氧含量、降低炉渣的氧化性及加强铸机的保护浇注等措施,钢水中夹杂物的形貌球状化,夹杂物尺寸减小,降低产品中夹杂物的危害性。

(2) 添加稀土的大梁钢经过夹杂物检测,非金属夹杂物都在 1.0 级以内,夹杂物控制满足工艺要求,夹杂物主要为 Ce_2O_3 、 RE_2O_3 - CaC_2 等稀土复合夹杂物。

(3) BT700L 加入微量稀土 Ce 元素后低温冲击值明显高于未加稀土,添加稀土 Ce 元素产品的低温冲击韧性明显提高。

参 考 文 献

[1] 袁志亮,王拓,陈立杰,等. 稀土元素在钢中加入方法的对比分析[J]. 金属加工,2015,

(13):45.

[2] 林勒,郭锋,朱兴元,等. 镧和铈在碳锰洁净钢中的合金作用[J]. 中国稀土学报,2006,24(5):427-430.

[3] 徐曾启. 炉外精炼[M]. 北京:冶金工业出版社,1994.

[4] 纪绯绯. 添加稀土金属的钢中非金属夹杂物的性质及形态变化[J]. 济南大学学报,2003,17(1):76-78.

[5] 高泽平. 钢中夹杂物变性处理技术研究[J]. 湖南冶金职业技术学院学报,2004,4(2):161-163,166.

[6] 王静. 汽车用钢现状及其在邯钢的发展[J]. 河北冶金,2014,(9):67-71.

[7] 赵成林. 稀土元素在钢水中的作用机理及加入技术研究[J]. 鞍钢技术,2017,(1):20-24.