

丰宁抽水蓄能电站蜗壳 WDB620D 钢 GMAW 工艺评定及生产应用

李明伟¹, 雷进波², 于莉莉², 吴建忠², 周长安²
(1. 杭州鸿辰能源科技有限公司, 杭州 310063;
2. 浙江阿祥新能源设备有限公司, 浙江 湖州 313000)

摘要: 采用熔化极气体保护焊(GMAW)对 WDB620D 钢进行了焊接工艺评定, 对其焊缝进行了 NDT 无损检测, 并对焊接接头进行了拉伸、弯曲、冲击等力学性能试验。试验结果表明, 焊接工艺评定的各项力学性能和焊接性能指标都达到了图纸设计和 ASME IX 标准的各项要求, 该 GMAW 工艺在丰宁抽水蓄能电站的蜗壳制造中进行了应用和验证, 并取得了良好的效果。

关键词: WDB620D; 焊接工艺评定; 热影响区; 蜗壳制造

中图分类号: TG444 文献标识码: A doi: [10.12073/j.hj.20230616002](https://doi.org/10.12073/j.hj.20230616002)

GMAW procedure qualification and production application of WDB620D steel for spiral case of Fengning Pumped Storage Power Station

Li Mingwei¹, Lei Jinbo², Yu Lili², Wu Jianzhong², Zhou Changan²
(1. Hangzhou Hongchen Energy Technology Co., Ltd., Hangzhou 310063, China;
2. Zhejiang Axiang New Energy Equipment Co., LTD., Huzhou 313000, Zhejiang, China)

Abstract: Welding procedure qualification of WDB620D steel was evaluated by gas metal arc welding (GMAW). Non-destructive testing was carried out on welds of WDB620D steel, and mechanical properties tests of tensile, bending and impact were carried out on welded joints. Test results showed that mechanical properties and weldability indexes of welding procedure qualification met requirements of drawings and ASME IX standard. GMAW process was applied and verified in the volutes manufacturing of Fengning Pumped Storage Power Station, and good results were obtained.

Key words: WDB620D, welding procedure qualification, heat affected zone, spiral case manufacturing

0 前言

丰宁抽水蓄能电站是目前世界上最大的抽水蓄能电站之一^[1], 总装机 3 600 MW, 年设计发电量 66.12 亿千瓦时, 年抽水量 87.16 亿千瓦时。二期工程装机 6 台 300 MW 抽水蓄能机组, 包括 2 台变速机组, 是国内首次采用大型变速抽水蓄能机组技术^[2]。变速机组可以实现水泵功率的有效调节, 使其运行效率更高、稳定性更优。丰宁可变速机组

水泵水轮机座环蜗壳整体装配约 173 t, 是机组主要的支撑及引水部件, 是机组埋件的核心部件。蜗壳主要材质为 WDB620D, 材料具有良好的强韧性和焊接性^[3]。蜗壳钢板最小板厚 35 mm, 最大板厚达 100 mm, 具有拘束度大、焊接难度大、焊接填充量大等难点。

对 WDB620D 厚板进行焊接, 按 ASME 第 IX 卷《焊接、钎接和粘结评定规范》标准要求进行了相关工艺评定试验及生产实践。

1 焊接工艺评定试验

1.1 试验标准

焊接工艺评定流程、试验项目、检测及合格标准严格按 ASME 第 IX 卷《焊接、钎接和粘接评定规范》

标准执行。

1.2 WDB620D 材质及规格

试验材料为舞阳钢铁有限责任公司生产,厚度 50 mm, 热处理状态为淬火+回火。化学成分及力学性能分别见表 1 和表 2。

表1 WDB620D 试验材料化学成分 (质量分数, %)

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	V	Ti	B	Al _i
0.06	0.19	1.31	0.002	0.011	0.30	0.20	0.27	0.25	0.021	0.045	0.002	0.000 3	0.003

注: $C_{eq}(\%)=C+Mn/6+Si/24+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14$; $P_{cm}(\%)=C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B$

表2 WDB620D 试板力学性能

力学性能(横向)				工艺性能(横向)
屈服强度 $R_{p0.2}/MPa$	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A(\%)$	-20 °C 冲击吸收能量 A_{KV2}/J	$\alpha=180^\circ, d=3a$
610	725	18	266, 256, 281	无裂纹

注: α 为弯曲角度; d 为弯心直径; a 为试样厚度。

1.3 预热及层间温度

根据化学成分,可以计算出试板材料的碳当量 $C_{eq}=0.42\%$, 焊接冷裂纹敏感性指数 $P_{cm}=0.19\%$, 从 2 项指数来看, 钢板焊接性较好, 但有一定的淬硬倾向, 会在热影响区产生淬硬组织, 由于板材较厚、焊接热循环导致内应力大, 可能在热影响区产生敏感的金相组织。为避免或减少冷裂纹的产生, 综合考虑冷裂纹敏感性 & 生产实际可操作性, 确定焊接前试板预热大于 80 °C, 焊接层间温度小于 200 °C。

1.4 焊接材料

按照等强匹配原则, 焊接材料选用 AWS A5.28 ER90S-G 等级, 由哈尔滨威尔焊接材料有限公司生产的 HS-60NiMo 气保焊焊丝, 其化学成分及力学性能, 分别见表 3 和表 4。热处理状态为 580 °C×8 h。

表3 HS-60NiMo 焊丝化学成分 (质量分数, %)

C	Mn	Si	S	P	Ni	Mo	Cu
0.076	1.63	0.54	0.006	0.008	0.86	0.37	0.10

表4 HS-60NiMo 焊丝熔敷金属力学性能

屈服强度 $R_{p0.2}/MPa$	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A(\%)$	-20 °C 冲击吸收能量 A_{KV2}/J
630	710	21	112, 137, 128

1.5 焊接工艺参数

试板焊接接头采用 X 形对接坡口, 接头形式及焊接顺序如图 1 所示。

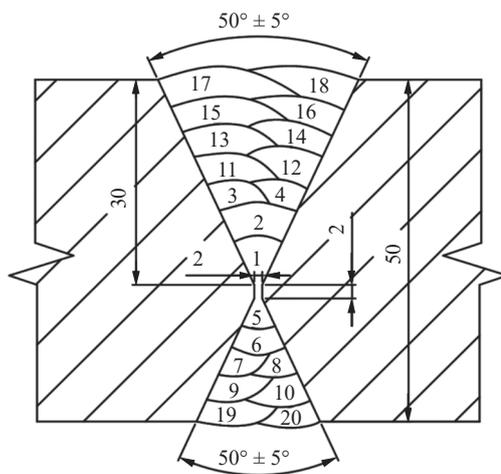


图1 焊接顺序及坡口尺寸示意图

焊接保护气体为 80%Ar+20%CO₂, 清根方法为碳弧气刨并砂轮打磨。焊接位置采用立焊 3G 位置。评定试验的焊接工艺参数见表 5。

焊后 48 h 进行焊缝外观检查, 检验合格后使用 CTS-2020 超声波探伤仪按 ASME VIII 附录 12 的要求进行焊缝无损检测。检验合格后, 进行 580 °C×11.5 h 热处理。超声波无损复探合格后, 分别对焊接接头

表5 焊接工艺参数

焊丝直径 d/mm	电流极性	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 $v/(cm \cdot min^{-1})$
1.2	直流反接	170 ~ 190	22 ~ 25	7.0 ~ 10.0

及热影响区制取力学性能检测试样,进行拉伸、弯曲、冲击等试验。力学性能取样位置如图2所示。

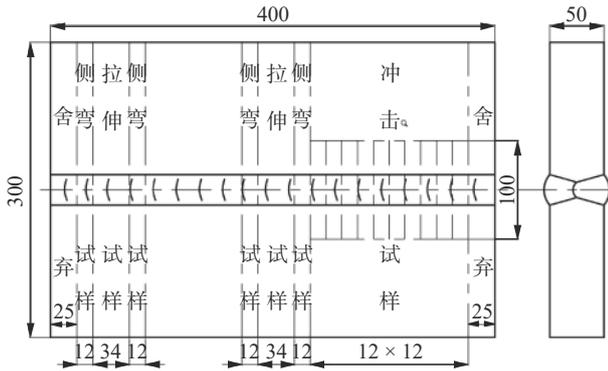


图2 试件力学性能取样位置图

2 试验结果

2.1 拉伸试验

拉伸试样采用全板厚尺寸制备,按 QW-150 规范进行试验操作,共做 2 组检测。拉伸后试样断裂位置为母材区域,如图3所示。从图中可以看出断裂方式为塑性断裂。试验结果见表6,满足母材标准 $R_{p0.2} \geq 620$ MPa 的要求。

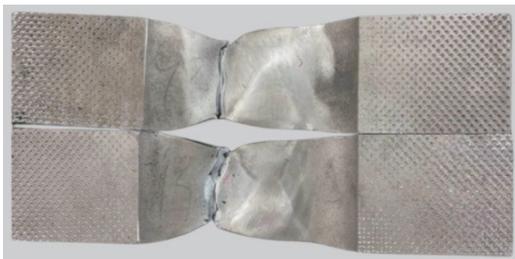


图3 拉伸试验后试样图

2.2 弯曲试验

弯曲试样采用横向侧弯方式制备,按 QW-163 规范进行试验操作,共做 4 组检测。弯曲后试样表面均没有裂纹开口产生,如图4所示。试验结果见表7,满足导向弯曲试样在弯曲后的凸面上沿任何方向测量,焊缝和热影响区内都不得有超过 3.2 mm 的开口缺陷的要求。

表6 拉伸试验结果

试样编号	宽度 b/mm	厚度 h/mm	面积 S/mm^2
T-01	19.6	49.8	976.1
T-02	19.7	50.0	985.0

试样编号	极限总载荷 F/kN	极限单位应力 R/MPa	断裂位置
T-01	683.3	700.0	母材
T-02	699.4	710.1	母材



图4 弯曲试验后试样图

表7 弯曲试验结果

试样编号	试样厚度 h/mm	弯曲半径 r/mm	弯曲角度 $\alpha/(^\circ)$	试验结果
B-01	10	48	180	无裂纹
B-02	10	48	180	无裂纹
B-03	10	48	180	无裂纹
B-04	10	48	180	无裂纹

2.3 冲击试验

夏比 V 形缺口韧性试验试样,按照母材规范及 ASME 第 VIII 卷 UG-84 夏比冲击试验的要求进行制备,按 QW-170 规范进行,试样尺寸 10 mm×10 mm×55 mm,试验温度为 -20 ℃,共做 4 组检测,试验结果见表8,满足焊缝及热影响区冲击吸收能量 $A_{KV} \geq 47$ J 要求。

表8 冲击试验结果

试样编号	缺口位置	冲击吸收能量 A_{KV}/J
C-01	热影响区(厚度 1/4)	162, 212, 204
C-02	热影响区(厚度 3/4)	206, 82, 234
C-03	焊缝(表面 1.5 mm)	140, 138, 140
C-04	焊缝(厚度 3/4)	72, 86, 78

2.4 试验结果分析

从各项试验结果,可以看出 WDB620D 钢采用以上工艺参数焊接时,抗拉强度、弯曲韧性、焊接接头的焊缝及热影响区在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的夏比 V 形冲击试验结果均优于母材各项性能要求,并且有一定的强度裕量。

3 蜗壳厂内焊接施工工艺规程

在焊接工艺评定试验的基础上,进行了焊接工艺规程的编制,指导蜗壳厂内焊接施工。

3.1 焊前准备

焊接电源采用直流反接,要求其动特性良好,调节灵敏度高。

焊缝坡口,均按图开出,打磨去除氧化皮及淬硬层,露出金属光泽。蜗壳环组对接的坡口间隙 $0\sim 4\text{ mm}$ 。焊前将坡口及其两侧 20 mm 范围内的铁锈、油污、氧化皮、水迹等杂质打磨清理干净。

定位焊焊缝,焊接于坡口的清根侧,每段长约 $100\sim 150\text{ mm}$,间距约 $200\sim 400\text{ mm}$,焊缝厚度约 $15\sim 20\text{ mm}$ ^[4],预热要求与正式焊接相同。定位焊需保证强度且无裂纹、气孔、夹渣等缺欠。

当日未使用完的焊丝,采取防潮保护措施,防止焊丝受潮。

焊前预热 $80\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$,层间温度 $100\sim 220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。预热及层间保温,使用远红外履带式加热板及自动加热温控柜进行控制。加热宽度约 200 mm ,均匀布置在焊缝上,升温速度按 $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 进行,不宜过快,以使升温均匀,防止加温过快导致定位焊缝开裂。坡口两侧 50 mm 处测量预热温度^[5]。

3.2 焊接

3.2.1 通用要求

蜗壳成形组对后,存在一定拘束应力,为了减小焊接变形、提高焊缝的塑形和韧性,焊接时采用小热输入、多层多道焊,焊道摆宽不大于 20 mm 。

3.2.2 焊接工艺参数

蜗壳厂内焊接工艺参数见表 9。焊接生产过程中详细记录了相关工艺参数、预热温度、层间温度等信息。

3.2.3 焊接顺序

在蜗壳焊缝环向方向采用分段退步焊,两端部需加引弧板和熄弧板。双面焊缝先从蜗壳内侧过流面进行打底焊接,先焊接 3 层左右,从蜗壳外侧进行清

表9 蜗壳焊接工艺参数

焊接位置	电流极性	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 v/(cm·min ⁻¹)
平焊、横焊	直流反接	180~320	22~32	16~40
立焊	直流反接	160~240	18~25	9~25

根,打磨渗碳层至露出金属光泽后,进行外侧焊缝的焊接,两侧交替焊接直至焊平。注意层与层之间接头需错开 50 mm 左右,焊接接头需打磨。焊接完成后,过流面焊缝需将余高去除打磨平,且与周边母材圆滑过渡。

3.3 热处理前焊缝检验

外观检验:通过目视对焊缝表面裂纹、夹渣、咬边、气孔、飞溅、未焊满、焊瘤、余高、焊缝宽度等进行仔细检查,检验标准按 ISO 5817-C 级。

无损检测:根据图纸及检验规范,对蜗壳所有焊缝进行 100% TOFD(包含横向扫描)、MT 检查,对于 TOFD 不使用区域的焊缝需做 UT 检查。TOFD 检验标准按 NB/T 47013.10 B 级,UT 检验标准按 EN ISO 11666-2 级,MT 检验标准按 EN ISO 23278-2X 级。

焊缝一次探伤合格率高,焊缝内部及表面产生的裂纹极少。对于超标缺陷及可记录缺陷,均详细记录了缺陷的大小、位置及缺陷的性质等,并归档留存。

3.4 缺陷返修

3.4.1 焊缝内部缺陷处理

返修前将缺陷位置周围区域进行预热,预热温度应比正常预热温度高约 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。使用碳弧气刨将缺陷清除干净,气刨长宽需较缺陷两端各延长至少 $30\sim 50\text{ mm}$,并用磨光机打磨去除渗碳层,使用高温 PT 或干粉 MT 检测方法确认缺陷已经去除干净。返修过程中,严格控制层间温度,避免返修区域温度过高而引起局部热影响区晶粒粗大,使焊缝强度及低温冲击韧性下降的可能^[6]。

3.4.2 钢板表面缺陷和焊缝表面缺陷处理

母材表面的压痕、夹痕如深度小于 1 mm ,则需要与周边打磨过渡平滑。如深度不小于 1 mm ,需预热并补焊打磨过渡^[7]。补焊过的区域需要做目视及 MT 检查,确认无缺陷。

焊缝表面不允许有任何的裂纹和未熔合,如发现需严格按规程进行预热、返修及打磨处理。表面气

孔、咬边、焊瘤、弧坑等需仔细处理至满足外观检验等级要求^[8]。

3.5 消应力处理

检验合格后,蜗壳连同座环进行炉内整体热处理,工件多点垫平入炉,防止热处理过程中工件变形。从室温自由升温到 200 ℃ 后,加热升温速度按 $v_1 < 50$ ℃/h 控制,升温至 (580±10) ℃ 保温 4 h,之后进行冷却降温,冷却降温速度按 $v_d < 50$ ℃/h 控制,降至 200 ℃ 后自由冷却。

3.6 热处理后焊缝复检

按照热处理前的外观、NDT 检验标准及要求,对热后焊缝进行复检。

4 结论

(1)通过合理的焊接工艺进行焊接工艺评定试验,从试验结果可以看出,焊缝接头的强度高、塑形优、低温韧性良好。

(2)在焊接工艺评定的基础上,编制合理的焊接工艺规程,通过对焊前预热、层间保温、焊接热输入控制、热处理消应等严格的过程控制,克服了蜗壳 WDB620D 材料焊接填充量大、有淬硬倾向等难题,焊缝表面成形良好,无损检测的一次合格率达到 97.5%。焊缝质量得到了保障,完全满足各项检验要求。

本文引用格式:

李明伟,雷进波,于莉莉,等.丰宁抽水蓄能电站蜗壳 WDB620D 钢 GMAW 工艺评定及生产应用[J].焊接,2024(3):76-80.
Li Mingwei, Lei Jinbo, Yu Lili, et al. GMAW procedure qualification and production application of WDB620D steel for spiral case of Fengning Pumped Storage Power Station[J]. Welding & Joining, 2024(3): 76-80.

(上接第 75 页)

- [12] 蔡志海,秦航,何嘉武,等.激光-电弧复合焊接高强钢显微组织与力学性能[J].装甲兵工程学院学报,2017,31(5):91-96.
- [13] 徐良,雷振,杨海锋,等.激光-电弧复合焊接接头根部特性分析[J].焊接学报,2019,40(3):76-79.
- [14] 陆斌锋,芦凤桂,唐新华,等.激光焊接工艺的现状与进展[J].焊接,2008(4):53-57.

本文引用格式:

刘家奇,薛正荣,陈书强,等.不同焊接方法对超高强装甲钢焊接接头力学性能与组织的影响[J].焊接,2024(3):71-75,80.
Liu Jiaqi, Xue Zhengrong, Chen Shuqiang, et al. Influence of different welding methods on mechanical properties and microstructure of laser welded joints of ultra-high strength armored steel[J]. Welding & Joining, 2024(3): 71-75, 80.

参考文献

- [1] 余健,刘蕊,喻冉.河北丰宁抽水蓄能电站高强钢岔管设计优化与技术研究[J].水电与抽水蓄能,2021,7(1):99-103.
- [2] 赵杰君,王婷婷.丰宁二期抽水蓄能电站应用可变速机组的必要性分析[J].中国高新技术企业,2016(7):118-119.
- [3] Garcia C I, Lis A K, Pytel S M, et al. Ultra-low carbon bainitic plate steels: processing, microstructure properties[J]. Iron & Steelmaker, 1991(10):97-106.
- [4] 张永睿.压力钢管 WDB620 高强钢的焊接技术[J].四川水力发电,2006,25(5):54-56.
- [5] 杨航,朱新,游凯.白鹤滩水电站左岸蜗壳焊接工艺解析[J].人民长江,2020,51(2):138-142.
- [6] 吴芳,赵宏杰.WDB620D 高强钢岔管焊接工艺探讨[J].水电站机电技术,2006,29(4):57-59.
- [7] 叶世忠,罗前林,王涛,等.乌东德左岸水电站转子支架焊接工艺[J].焊接,2023(1):60-64.
- [8] 曹阳,刘明昌,张建明,等.锦屏电站 B610CF 钢压力钢管焊接施工研究[J].人民长江,2023(10):24-27.

第一作者:李明伟,工程师;主要从事水轮发电机、汽轮发电机的制造工艺工作;feilong5622588@163.com。

(编辑:王龙权)

- [15] 董现春,潘辉,赵阳,等.防弹钢板激光焊接接头的组织和性能[J].材料热处理学报,2019,40(9):163-168.

第一作者:刘家奇,硕士,高级工程师,国际焊接工程师;主要从事防护型装甲车辆焊接工艺研究;已研发专利 12 项;liujiaqi1228@126.com。

(编辑:王龙权)