

抽水蓄能电站高强度钢焊接质量控制技术研究

张俊峰 戴国华

浙江江能建设有限公司, 浙江 杭州 310000

[摘要] 本文以乌海抽水蓄能电站工程为背景, 针对大型水电工程中高强度钢材焊接质量控制的关键技术展开系统研究。文章详细分析了 800MPa 级高强度钢的材料特性及其焊接难点, 重点围绕焊接工艺设计与评定、焊接过程质量控制措施, 以及在洞内特殊环境下的焊接施工管理等方面进行论述。通过引用工程具体数据, 如钢板化学成分要求 $C \leq 0.09\%$ 、焊接裂纹敏感性指数 $P_{cm} \leq 0.28\%$, 以及具体的预热与后热工艺要求, 分析并验证了焊接工艺参数的科学性与合理性是保障焊接质量的关键。

[关键词] 高强度钢; 焊接质量控制; 工艺评定; 过程监控; 抽水蓄能电站

DOI: 10.33142/hst.v8i12.18450

中图分类号: TV743

文献标识码: A

Research on Welding Quality Control Technology of High Strength Steel in Pumped Storage Power Station

ZHANG Junfeng, DAI Guohua

Zhejiang Jiangneng Construction Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

Abstract: This article takes the Wuhai Pumped Storage Power Station project as the background and conducts a systematic study on the key technologies for controlling the welding quality of high-strength steel in large-scale hydropower projects. The article provides a detailed analysis of the material characteristics and welding difficulties of 800MPa high-strength steel, with a focus on welding process design and evaluation, welding process quality control measures, and welding construction management in special environments inside the tunnel. By citing specific engineering data, such as the requirement for steel plate chemical composition $C \leq 0.09\%$, welding crack sensitivity index $P_{cm} \leq 0.28\%$, and specific preheating and post heating process requirements, the scientificity and rationality of welding process parameters are analyzed and verified as the key to ensuring welding quality.

Keywords: high strength steel; welding quality control; process evaluation; process monitoring; pumped storage power station

随着抽水蓄能电站建设向高水头、大容量方向发展, 电站输水管道如压力钢管与钢岔管广泛采用 600MPa、800MPa 及以上级别的高强度钢材。乌海抽水蓄能电站安装 4 台单机容量 300MW 的机组, 总装机容量 1200MW, 其引水系统压力钢管及对称 Y 形内加强月牙肋钢岔管即为典型代表。然而, 高强钢焊接过程中易出现冷裂纹、热影响区脆化及残余应力集中等质量问题, 加之焊接作业面临空间受限、通风照明条件差及环境湿度偏高等不利因素, 这些因素对焊接质量的稳定控制构成了严峻挑战。因此, 系统研究高强度钢焊接质量控制技术, 对于保障电站安全稳定运行具有重要现实意义。

1 高强度钢焊接特点及难点

1.1 高强度钢的材料特性

乌海抽水蓄能电站引水高压钢岔管采用的 800MPa 级高强钢板, 其材料特性显著区别于普通钢材。该钢材为承受高静水头, 设计内水压力 7.2MPa, 即 735m 水头, HD 值 3528m·m 的极端工况, 对化学成分有严格限制, 要求 $C \leq 0.09\%$, $S \leq 0.008\%$, $P \leq 0.015\%$, 旨在提升钢材纯净度。同时, 添加了 $Ni 0.7\% \sim 1.5\%$ 、 $Mo \leq 0.6\%$ 、 $V \leq 0.08\%$ 等微量合金元素以改善强韧性。其焊接裂纹敏感性指数 P_{cm} 需严格控制, 对于厚度 50~75mm 钢板, P_{cm}

$\leq 0.28\%$, 该指标直接关联焊接预热与后热工艺的制定。力学性能方面, 钢板屈服强度 $ReL \geq 670MPa$, 抗拉强度 $Rm \geq 770MPa$, 断后伸长率 $A \geq 14\%$, 并须满足 $-40^\circ C$ 低温冲击吸收能量 $KV2 \geq 60J$ 。这些优异性能也带来了较高的碳当量与淬硬倾向, 使得焊接热过程控制不当极易引发接头性能劣化。

1.2 焊接质量的主要难点

基于上述材料特性, 本工程高强钢焊接面临系列突出难点。首要难点在于高拘束度条件下的焊接冷裂纹防治, 岔管月牙肋板厚达 116mm, 主锥与支锥壁厚为 60/64mm, 厚板多层多道焊中氢扩散困难, 叠加巨大拘束应力, 极易诱发氢致延迟裂纹, 要求严格执行合理的焊前预热与焊后消氢或消应力热处理工艺^[1]。其次, 焊接热影响区 HAZ 的脆化问题显著, 高强钢中微合金元素在高温输入下可能导致 HAZ 组织粗大、韧性下降, 尤其在斜井压力钢管洞内受限空间作业中, 焊接位置多变、环境湿度可能偏高, 加剧了控制焊接线能量、保证 HAZ 韧性的难度。再者, 本工程焊接工作量大且工艺复杂, 压力钢管制安总量约 1.36 万 t, 设计内径最大达 6600mm, 钢管多采用 600MPa、800MPa 级高强钢, 其中高强钢最大管壁板厚为 56mm, 按规范要求需对焊缝进行焊前预热、焊后消氢及焊缝残余应力消除处理。最

后,特殊施工环境带来额外挑战,压力钢管安装主要为洞内施工,单条上斜井段长度约260m(含下弯段,高差194m),单条下斜井段长度约350m(含上、下弯段,高差273m),洞内空间狭小、通风照明受限,使焊接过程质量监测、参数记录及焊工操作稳定性面临考验,起重吊装及洞内运输施工难度较大,协调焊接与吊装运输作业、避免钢管变形并保证焊接环境稳定,成为质量管理必须统筹解决的关键问题。

2 焊接工艺设计与评定

2.1 焊接工艺评定要求

焊接工艺评定是确保高强钢焊接质量符合设计要求的根本前提。对于乌海电站采用的800MPa级高强钢,焊接工艺评定须严格遵循GB50766、GB50661及设计文件规定。评定需覆盖工程中所有母材材质、厚度范围、接头形式及焊接方法,特别是针对不同板厚组合,如60mm至116mm厚板的对接、角接接头进行系统试验。评定试板焊接应由本单位技能熟练焊工、使用拟采用的焊接设备与材料,在实际施工可能遇到的最不利位置下进行。评定内容主要包括焊接接头的力学性能试验,拉伸、弯曲、冲击韧性,冲击试验温度应 $\leq -40^{\circ}\text{C}$,焊缝金属化学成分分析、扩散氢含量测定及宏观金相检验等。只有当所有评定试验结果均满足标准规定时,该焊接工艺规程WPS才能被批准用于指导生产,从而从源头上杜绝工艺不当导致的质量隐患。工程中要求根据现场情况重做焊接工艺评定,并结合现场实际情况制定出最科学、最合理、最符合现场要求的焊接工艺。

2.2 焊接方法选择

科学选择焊接方法是保证焊接效率与质量的基础。在本工程高压钢管及压力钢管的制作与安装中,需根据作业阶段与结构特点区分焊接方法的应用。在工厂制作阶段,对于直管段的纵缝焊接,因其位置固定、工况条件良好,主要采用生产效率高、质量稳定的埋弧自动焊。而对于岔管等异形管件,由于其几何形状复杂、曲率变化大,所有焊缝,包括瓦片纵缝、组拼环缝以及月牙肋的对接缝和角焊缝,均采用灵活性更高的焊条电弧焊进行制作。在现场安装阶段,包括洞内、斜井等所有位置的管节环缝、合拢缝安装焊接,则全部采用焊条电弧焊,以适应空间受限、位置多样的施工环境。选用的焊接材料须与800MPa级母材力学性能相匹配,例如选用大西洋牌CHE807RH焊条用于手工焊,CHW-S80焊丝配CHF101R焊剂用于埋弧焊。这种基于制作与安装阶段、结构形式差异化的方法选择策略,兼顾了工厂高效自动化与现场施工灵活性的需求。

2.3 预热与后热处理工艺

制定并严格执行合理的预热与后热处理工艺是防止高强钢焊接冷裂纹和降低残余应力的关键环节。预热主要目的在于降低焊缝及热影响区的冷却速度,利于氢逸出,减少淬硬组织。对于本工程采用的800MPa级、板厚56~116mm的高强钢,预热温度通常需 $\geq 100^{\circ}\text{C}$,具体参数应依据焊接工艺评定结果确定。预热范围应为焊缝两侧不小于焊件厚度3倍且不小于100mm的区域,加热应均匀,

并使用测温仪监测。高强钢焊后需进行后热消氢处理。主要通过焊后立即将焊缝区域加热至特定温度并保温,促使焊缝金属中扩散氢的加速逸出。高强钢后热温度控制在 200°C ,保温3~4h,后热工艺参数必须严格按照经评定的工艺规程执行,并做好详细记录。

3 焊接过程质量控制措施

3.1 焊工培训与资格认证

焊工技能水平与质量意识直接影响焊接质量。本工程需对所有参与高强钢焊接的焊工进行严格专项培训和资格认证。培训内容涵盖800MPa级高强钢材料特性、焊接工艺要点、预热后热操作规程及质量意识教育。焊工资格认证须遵循DL/T679等标准,进行针对性技能考试。考试试板的母材材质、厚度、焊接位置、焊接方法应与实际产品工况相同或更严。考试合格焊工仅能从事其考试合格项目范围内的焊接工作,并需定期复核。施工中应实行焊工钢印代号制度,确保每条重要焊缝可追溯至施焊焊工,强化其责任感。

3.2 焊接设备与材料管理

性能稳定的焊接设备与合格的焊接材料是获得优质接头的物质保障。所有投入工程的焊机、加热设备、保温设备、测温仪器等需在进场前进行全面检查和校准,确保其处于良好工作状态。施工期间应建立设备维护保养制度,定期检查、保养和维修。焊接材料须有完整质量证明文件,其化学成分、力学性能、扩散氢含量等须符合国家标准和设计要求。焊接材料应设专用库房存放,库房通风良好,室温宜 $\geq 5^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $\leq 60\%$ 。焊条、焊剂使用前应按说明书规定烘焙,焊丝应清除油、锈。焊接材料的领用、发放、回收应建立严格台账制度,防止误用、混用或使用受潮变质材料。

3.3 焊接过程监控与记录

对焊接全过程实施有效监控与详尽记录,是实现质量可追溯、可分析的重要手段。每条重要焊缝施焊前,须检查并确认坡口加工质量、组装间隙、错边量、预热温度等符合工艺要求。施焊过程中,应监控并记录焊接电流、电压、焊接速度、层间温度等主要参数,确保其在WPS规定范围内。对于厚板多层多道焊,应严格控制道间清理质量。质量检查人员应进行巡检,及时纠正不规范操作。所有焊接过程参数、操作记录、检验记录等均应形成文档,纳入工程档案,实现焊缝质量全生命周期管理。

3.4 无损检测与质量检验

无损检测是评价焊接接头内部质量的核心手段。本工程高强钢焊接接头的无损检测须按设计文件和GB/T11345、DL/T821等规范执行。所有一、二类焊缝应进行100%超声波探伤,并辅以50%tofd无损检测,对岔管月牙肋等重要结构或怀疑部位可辅以相共振无损检测探伤,提高无损检测比例。无损检测应由持证专业人员在外观检查合格后进行。检测发现的超标缺陷须按规定定位、记录、评估,并制定详细返修工艺,经批准后由合格焊工返修,返修后须重新检测。此外,应按规范要求从产品上切取焊接试板或焊接见证试板,进行力学性能试验,以综合验证产品焊缝实际质量水平。

4 特殊环境下的焊接施工管理

4.1 洞内焊接作业环境控制

本工程压力钢管安装大量工作位于引水隧洞斜井和平洞内,封闭、潮湿、通风照明受限的环境对以手工焊为主的焊接质量控制构成特殊挑战。需建立有效的强制通风系统,及时排出焊接烟尘和有害气体,为焊工提供充足新鲜空气。需提供充足、稳定、防爆的照明,确保焊工操作精度。洞内湿度控制至关重要,必要时应在焊接作业区设置除湿设备,并加强对焊接材料的现场保管。针对洞内手工焊作业,还需特别关注焊接电缆的敷设与管理,防止破损漏电;并需为焊工配备有效的个人防护装备,如防尘口罩、防弧光面罩等,以应对持续作业环境。针对斜井内焊接,需专门设置安全可靠的焊接操作平台,如在钢管内设置自制施工台车用于拼装焊接和检验防腐,台车牵引到位后通过钢质链环及挂钩锁定在管口处,并设置防坠落保护,确保焊工在稳定、安全位置作业。

4.2 焊接与吊装、运输的协调

高强钢压力钢管洞内安装中,焊接作业与钢管吊装、运输环节紧密交织,需周密协调。钢管从加工厂至安装主洞口运输采用平运方式,即将钢管平放到40t平板车上运输,行车速度不得超过10km/h。钢管运至主洞口后,使用10t卷扬机配合50t天锚将管节吊起,卸至运输台车上,用卷扬机牵引到位^[3]。钢管洞内运输到位后用8个32t千斤顶将钢管顶起、调整安装。在焊接工作面,需规划专用焊接材料、设备存放区及焊前预热区,与运输通道、吊装作业区明确隔离。焊接作业前,应确保该节钢管已精确就位并稳固支撑。通过细致施工组织设计和现场统一指挥,实现各工序顺畅衔接。

4.3 季节性施工措施

乌海地区属于温带大陆性气候类型,在这里,多年来的平均气温达到了9.7℃,而极端情况下,最高气温能够攀升至41.1℃,最低气温则会低至-32.6℃,如此显著的季节性气候差异,对于高强钢焊接而言,其产生的影响是颇为突出的。在冬季那种低温的环境下开展施工活动的时候,焊前预热所设定的温度得适当予以提升,并且要采取诸如防风、防雪以及环境保温等一系列的措施,务必要保证焊接区域的环境温度不会低于5℃,就连焊后的保温缓冷相关措施也都需要进一步强化。到了夏季的高温时段,那就得着重去控制层间温度,使其不要超过工艺规程所规定的上限值,可以通过采用遮阳、强化通风、实行间歇施工等办法来达成这一目的。除此之外,在春季这个风沙比较大的时节里,进行焊接作业的时候,必须要搭建起防风棚,以此来防止风力对电弧的稳定性以及保护气体的效果产生不利的影响。所以,得依据不同季节各自不同的气候特点,去制定出相应的差异化焊接施工技术措施,同时还要切实加以执行,并且配套制定与之相适应的管理方案。

4.4 应急预案与质量事故处理

需构建起健全的应急预案以及质量事故处理机制。应急预案要把在焊接施工过程中有可能碰到的重大风险都涵盖进去,像突发停电、设备出现故障、发生火灾、有害气体发生泄漏、人员出现坠落或者触电等情况都要包含在内,并且要明确应急响应的具体流程,还要提前做好演练工作^[4]。要是出现了焊接质量事故,比如发现了重大焊接缺陷或者焊缝出现开裂的情况,那就要立刻启动相应的处理程序:首先要停止作业,同时保护好现场;然后要组织相关人员展开调查,仔细分析产生事故的原因;接着要制定出详细的返修或者加固处理方案,而且这个方案还得经过评审并获得批准;之后要由有着丰富经验的焊工严格按照工艺来实施相关操作,强化对整个过程的监控以及检验工作;最后还要对整个事故处理过程进行全面的总结,制定出纠正与预防措施并且切实落实到位。通过不断完善相关的机制,把意外产生的影响降到最低限度,进而实现质量管理体系的持续改进。

5 结束语

通过对乌海抽水蓄能电站高强度钢焊接质量控制技术的系统研究,可以认识到确保此类工程焊接质量是一项贯穿全过程的系统性工程。从理解800MPa级高强钢材料特性与焊接难点,到科学进行焊接工艺设计与评定,实施覆盖焊工、设备、材料、过程监控、无损检验的全方位控制措施,直至应对洞内特殊环境、协调多工种作业、适应季节性变化及建立应急机制,每一环节均紧密关联。本研究结合工程具体数据与实践经验探讨的焊接质量控制技术体系,不仅为乌海抽水蓄能电站压力钢管与钢岔管的制造安装提供了直接指导,其系统性的管理思想与关键控制点也对其他类似工程具有参考价值。随着更高强度钢材的应用,持续深化焊接质量控制技术创新,提升质量管理的精细化、标准化与智能化水平,对于推动我国能源基础设施建设高质量发展、保障重大工程长久安全运行,具有重要意义。

【参考文献】

- [1]褚汗霖,欧笛声,周雄新.预拉力下高强度不锈钢薄板焊接数值仿真分析[J].科技创新,2025(22):21-25.
- [2]吕万青,尉文超,吴志方,等.1500 MPa级高碳当量超高强度钢焊接接头的组织和力学性能[J].材料热处理学报,2025,46(9):220-228.
- [3]刘鑫雨,孙有平,李旺珍,等.焊接间隙对Q690D高强度钢CO₂气体保护焊接接头组织和性能的影响[J].机械工程材料,2025,49(9):38-47.
- [4]邢维升.焊接工艺技术在高强度材料中的应用探索[J].冶金与材料,2025,45(6):34-36.

作者简介:张俊峰(1990—),男,汉族,浙江金华人,专科毕业于扬州大学,助理工程师;研究方向:水利金属结构制作安装;戴国华(1991—),女,汉族,浙江金华人,本科,工程师,浙江工业大学,研究方向:水利金属结构制作安装。