

水电站压力钢管焊接技术应用研究

汤正军, 杜波

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610000)

摘要 水电站压力钢管是输送高压水流的重要组成部分, 其焊接质量直接决定了输送管道结构的完整性, 若存在裂纹、气孔、未熔合等焊接缺陷, 就容易引发严重事故。因此, 深入研究压力钢管的材料特性及焊接工艺, 对提升工程质量具有重要意义。本文结合实际工程需求, 分析常用钢材的性能参数及其焊接性, 探讨影响焊接质量的关键因素, 并系统介绍了焊接前后需采取的检测方法, 以为焊接水电站压力钢管提供技术支持。

关键词 水电站; 压力钢管; 焊接技术

中图分类号: TV547.2; TG457

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.20.036

0 引言

在水电站中, 压力钢管作为承受高水头、高流速水流冲击的重要部件, 必须具备足够的强度以及良好的韧性。而焊接技术是连接压力钢管各段的核心工艺, 其质量对管道的承压能力影响较大。不合理的焊接工艺会降低管道的结构强度, 甚至引发严重的安全事故。因此, 在水电站压力钢管的焊接过程中, 焊接人员需严格控制焊接工艺参数, 优化焊材选配, 并采取科学的预热、焊接、焊后处理及缺陷检测技术, 以提升焊缝质量, 保证其在高压或低温等复杂工况下稳定运行。

1 水电站压力钢管材料与焊接性分析

1.1 常用钢材性能参数

压力钢管是水电站中用于输送高压水流的管道, 其材料需要具备高强度、韧性好、耐腐蚀等性能, 提高压力钢管的安全性、耐久性。表1为常见的钢材性能参数。

1.2 焊接性检验方法

焊接性是评价钢材在焊接过程中是否易于获得优质接头的重要指标, 而对于水电站压力钢管, 焊接质量更是直接关系到其安全性^[1]。焊接性试验方法主要包括焊接工艺评定、焊接接头性能测试以及无损检测等, 利用这些方法可以全面评估焊接接头的质量。

焊接工艺评定主要目的是确定焊接工艺参数的合理性, 施工人员主要检查焊条、焊丝等焊接材料是否与母材的化学成分匹配, 并利用试验确定最佳的焊接电流、电压等参数, 根据压力钢管的设计要求, 检验对接头、角接头等形式的适用性。同时, 焊接接头性能测试是焊接性试验的核心内容, 主要包括力学性能测试和微观组织分析, 其中, 结合拉伸试验、弯曲试验等方法, 评估焊接接头的强度、塑性以及韧性, 使用金相显微镜观察焊接接头的微观组织, 检查是否存在裂纹、气孔、夹渣等缺陷, 并分析热影响区的组

表1 常用钢材性能参数

| 钢材牌号 | 屈服强度 (MPa) | 抗拉强度 (MPa) | 延伸率 (%) | 冲击韧性 (J) | 焊接性能 | 耐腐蚀性 |
|------------|------------|------------|---------|-------------|------|------|
| Q345 | 345 | 470 ~ 630 | ≥ 21 | ≥ 34(20 °C) | 良好 | 一般 |
| Q390 | 390 | 490 ~ 650 | ≥ 19 | ≥ 34(20 °C) | 良好 | 一般 |
| Q420 | 420 | 520 ~ 680 | ≥ 18 | ≥ 34(20 °C) | 良好 | 一般 |
| Q460 | 460 | 550 ~ 720 | ≥ 17 | ≥ 34(20 °C) | 良好 | 一般 |
| 16Mn | 345 | 510 ~ 660 | ≥ 21 | ≥ 34(20 °C) | 良好 | 一般 |
| 15MnV | 390 | 530 ~ 685 | ≥ 19 | ≥ 34(20 °C) | 良好 | 一般 |
| 14MnMoV | 490 | 610 ~ 785 | ≥ 16 | ≥ 34(20 °C) | 良好 | 一般 |
| 07MnCrMoVR | 490 | 610 ~ 785 | ≥ 16 | ≥ 34(20 °C) | 良好 | 良好 |

织变化^[2]。无损检测则主要用于检测焊接接头内部的缺陷：施工人员利用超声波在材料中的传播特性，检测焊缝内部的裂纹、气孔等缺陷，借助 X 射线或 γ 射线透视焊缝，生成影像以检测内部缺陷。而磁粉检测 (MT) 与渗透检测 (PT)，负责检测焊缝表面的裂纹、气孔等缺陷。对于水电站压力钢管，耐腐蚀性也是焊接性试验的重要内容之一。采用盐雾试验、浸泡试验等方法，评估焊接接头在腐蚀环境中的抗腐蚀能力，保证其长期使用的可靠性。

2 水电站压力钢管焊接技术分析

2.1 焊材选配协同低氢工艺控制技术

在水电站压力钢管焊接中，焊材选配协同低氢工艺控制技术主要负责解决高强度钢材 (如 Q390、Q460) 在焊接中的氢致裂纹问题，施工人员借助焊材选型、优化工艺参数及焊后处理，系统降低焊缝氢含量 ($\leq 5 \text{ mL}/100 \text{ g}$)，提升接头抗裂性，应用于高强度低合金钢 (碳当量 $\geq 0.45\%$)、厚板 ($\geq 40 \text{ mm}$) 多层焊及低温 ($< 5 \text{ }^\circ\text{C}$) 环境。焊材选配选用低氢型碱性焊条 (如 E7018-G，扩散氢 $\leq 4 \text{ mL}/100 \text{ g}$)、ER80S-G 焊丝配合高纯 Ar+20%CO₂ 保护气，或 SJ101 碱度焊剂，从源头减少氢来源^[3]。在焊接工程中，施工人员需要执行焊材复验 (按 GB/T3965 检测扩散氢)、工艺评定 (NB/T47014 覆盖全工况) 及焊接参数全程记录 (WeldLogic 系统)。该技术可将氢致裂纹率控制在 0.5%，接头抗拉强度 \leq 母材强度上限 +30 N/mm² -20 $^\circ\text{C}$ 冲击功 $\geq 47 \text{ J}$ ，满足水电站压力钢管在高压、交变载荷下的长期安全服役需求。

2.2 工艺参数优化及热输入精准调控

2.2.1 工艺参数优化

压力钢管焊接时，施工人员根据钢材碳当量 (Ceq) 及厚度动态调整预热温度。如 Q460 钢 (Ceq $\approx 0.48\%$) 板厚 40 mm 时，预热温度需 $\geq 150 \text{ }^\circ\text{C}$ ，板厚 60 mm 时提高至 180 ~ 200 $^\circ\text{C}$ ，以降低焊接冷裂纹风险^[4]。同时采用阶梯式参数设置，打底焊使用较小电流 (如 $\Phi 3.2 \text{ mm}$ 焊条，电流 90 ~ 110 A)，填充盖面焊逐步增加 ($\Phi 4.0 \text{ mm}$ 焊条，电流 160 ~ 220 A)，电压匹配范围为 22 ~ 28 V，保障熔深与熔宽比例合理 (熔宽 / 熔深 $\approx 1.2 \sim 1.5$)。另外，针对不同焊道功能调整速度，打底焊速度 8 ~ 12 cm/min 以减少烧穿，填充焊提高至 15 ~ 20 cm/min 提升效率。利用红外测温仪实时监控层间温度，严格控制在 150 ~ 200 $^\circ\text{C}$ (高强度钢上限为 200 $^\circ\text{C}$)，避免过热导致晶粒粗化。

2.2.2 热输入精准调控

热输入调控侧重于高强度钢焊接热影响区 (HAZ) 性能劣化问题，适用于压力钢管环缝焊接、低温环境 (-10 $^\circ\text{C}$ 以下) 施工等需平衡焊接效率与接头韧性的场景。施工人员依据 $Q = \frac{60 \times I \times U}{1000 \times V}$ (单位: kJ/cm)，限定热输入在 15 ~ 25 kJ/cm 范围内。如 Q420 钢焊接时，采用 $\Phi 4.0 \text{ mm}$ 焊条，电流 180 A、电压 24 V、速度 15 cm/min，热输入为 17.28 kJ/cm。之后，采用脉冲 MIG 焊，基值电流设置为 80 A、峰值电流 220 A、频率 2 Hz，降低平均热输入 20% ~ 30%，减少 HAZ 软化。针对厚板 ($\geq 50 \text{ mm}$) 环缝，采用坡口角度 $\leq 10^\circ$ 的窄间隙工艺，热输入在 18 ~ 22 kJ/cm 之间，减少焊道数量 (由常规 30 道降至 18 道)，HAZ 宽度由 3 mm 缩至 1.5 mm。

2.2.3 预热梯度设计与温控策略实施

压力钢管焊接前需要预热，焊接人员根据板厚分层设置预热温度，其中 60 mm 厚 Q460 钢板，采用三层梯度预热：底层 (近焊缝区) 预热至 180 ~ 200 $^\circ\text{C}$ ，中层 150 ~ 170 $^\circ\text{C}$ ，表层 (远离焊缝区) 120 ~ 140 $^\circ\text{C}$ ，梯度温差 $\leq 50 \text{ }^\circ\text{C}/\text{层}$ 。并采用中频感应加热器 (频率 1 ~ 10 kHz)，功率密度 3 ~ 5 W/mm²，加热宽度为焊缝两侧各 100 mm，升温速率 $\leq 50 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ，维持温度波动 $\leq \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 。同时，焊缝两侧 50 mm、150 mm、250 mm 处还需布置热电偶，实时监控温度分布，并使用红外热像仪校准^[5]。焊接过程中还会存在层间温度波动问题，焊接人员在多层焊接时，采用 PID 算法实时调节加热功率，定层间温度 150 ~ 180 $^\circ\text{C}$ (高强度钢上限为 200 $^\circ\text{C}$)，波动范围 $\leq \pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$ 。当环境温度低于 -5 $^\circ\text{C}$ 时，增设防风棚与辐射加热器，将焊接区域微环境温度提升至 $\geq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ，并延长预热时间 20% ~ 30%。该技术借助抑制焊接残余应力 ($\leq 150 \text{ MPa}$)、保障低温韧性 (-30 $^\circ\text{C}$ KV2 $\geq 27 \text{ J}$)，可将氢致裂纹率降至 0.3% 以下，HAZ 晶粒度细化至 8 ~ 9 级，残余应力降低 60% ~ 70%，焊缝一次合格率 $\geq 98\%$ (按 GB/T19869.1 标准)，大幅提升压力钢管在高压、低温及交变载荷下的安全性。

2.2.4 多层焊道排布耦合残余应力控制

对于多层焊道排布耦合残余应力控制技术，焊接人员在焊接水电站压力钢管时，采用“窄焊道 + 对称交错跳焊”策略，单道焊层厚度 $\leq 4 \text{ mm}$ ，焊道宽度 8 ~ 12 mm，相邻焊道搭接量 30% ~ 50% (如首层焊道中心偏移坡口中心线 2 ~ 3 mm，次层反向偏移)。环缝焊接中，按“4-8-12 点对称分段退焊法”划分焊接区段，每段长度 $\leq 300 \text{ mm}$ ，焊接顺序遵循“先内后外、先下后上”原则，电流参数分级设置 (打底焊 $\Phi 3.2 \text{ mm}$ 焊条

110~130 A, 填充焊 $\Phi 4.0$ mm 焊条 160~200 A, 盖面焊 180~220 A), 层间温度严格控制在 150~180 °C, 热输入限定为 18~22 kJ/cm。每焊完 2~3 层后, 便采用液压式焊缝碾压机碾压焊道(碾压力 5~8 kN, 辊轮直径 50 mm), 降低 40%~50% 的表层残余应力。若产生厚板 (≥ 60 mm) 焊缝, 焊后立即进行局部感应加热消应力(温度 350~400 °C, 升温速率 ≤ 50 °C/h, 保温时间 2 min/mm 板厚), 配合超声冲击(频率 20 kHz, 冲击能量 0.5~1.0 J) 细化表层晶粒。最后, 使用气动锤击枪(锤头半径 3 mm), 锤击力度 0.15~0.25 MPa, 锤击密度 4~6 点/cm², 重点作用于焊缝中心及热影响区, 促使残余应力峰值从 350 MPa 降至 ≤ 120 MPa。

3 水电站压力钢管焊接注意事项

3.1 焊前严格检查材料质量

在焊接前, 焊接人员需严格检查进场钢管材料的材质证明、合格证及相关检测报告, 分类存放不同批次、不同材质的钢管, 并做好标识, 防止混淆使用。采用目视检查和量具测量相结合的方法, 检查钢管表面质量, 重点检查是否存在裂纹、夹杂、锈蚀、凹坑等缺陷, 同时测量钢板厚度是否均匀, 管道是否变形或弯曲。使用超声波探伤、射线探伤或磁粉探伤等无损检测方法, 检测钢管内部缺陷, 排查是否存在分层、夹杂、气孔等隐患。及时剔除不合格材料, 并根据相关标准处理。

3.2 焊中严格挑选焊接方法

在焊接过程中, 焊接人员需要根据钢管材质、壁厚等因素进行合理选定焊接工艺, 并保证所选方法满足工程要求。同时, 避免使用可能导致焊缝缺陷的方法, 以降低焊接风险。焊接材料的选用必须符合设计要求, 与母材匹配良好, 保证焊接接头的强度。并防止使用不合格或受潮的焊接材料, 以免影响焊缝质量。焊接设备需保持正常状态, 要求电流、电压等参数稳定, 以避免焊接不均匀、夹渣等问题。焊接环境也是一个重要影响因素, 要尽量在适宜的温度、湿度和风速条件下焊接, 如果必须在不利条件下施工, 则应采取相应的保护措施。焊工应具备相应的资质, 严格按照施工方案操作, 并注意清理焊缝, 避免夹渣、未焊透等缺陷。在焊接过程中, 需特别注意焊接应力的控制, 减少变形、开裂。采取合理的焊接顺序, 均衡释放应力。

3.3 焊后及时检验焊缝质量

压力钢管焊接完成后, 焊缝表面要求无裂纹、气孔等明显缺陷, 焊道连续均匀, 焊缝过渡区域平滑,

需特别注意焊缝与母材连接处的融合状态, 避免因应力集中导致潜在开裂风险。除目视检查外, 必须采用无损检测技术全范围扫描焊缝内部, 检测范围需覆盖焊缝全长度及热影响区, 避免漏检。焊缝检验应在焊接完成后及时进行, 避免因环境温度变化或外部应力干扰影响检测结果。若焊接区域存在残余应力或变形, 需在应力释放或矫正后复检。检验过程中需确保环境湿度、温度符合检测要求, 避免水汽、油污或灰尘附着焊缝表面, 干扰检测精度。露天作业时采取防风、防雨措施, 保证检测条件稳定。检验人员需持有相关无损检测资质证书, 熟悉压力钢管焊接标准(如 GB/T3323、NB/T47013 等), 并严格按照规范操作检测设备, 避免因人为误判影响结果准确性。对检测不合格的焊缝, 明确标注缺陷区域, 制定返修方案并经审批后实施。

4 结束语

水电站压力钢管作为输送高压水流的重要组成部分, 其焊接技术的优劣直接决定管道的安全性。在压力钢管的焊接过程中, 焊接人员需选择合适的材料以及焊接工艺, 并优化焊接参数, 控制热输入及合理安排焊后处理工艺, 以保证焊接质量符合设计要求。此外, 为保障水电站压力钢管在高压、低温等复杂工况下的长期稳定运行, 焊接人员必须结合现代无损检测技术, 全面检测每一处焊接接头。通过不断优化焊接技术, 不仅可以提高焊接接头的可靠性, 还能有效延长水电站压力钢管的使用寿命, 减少维护成本。未来, 随着新材料、新工艺的不断发展, 焊接技术将不断完善, 为水电站的高效、安全运营提供更为坚实的技术保障。

参考文献:

- [1] 罗聪, 李诚. 大型水电站压力钢管无气刨清根高效率焊接工艺研究 [J]. 水电站机电技术, 2024, 47(09): 116-118.
- [2] 罗聪. 水电站压力钢管全位置自动焊接技术研究 [J]. 水电站机电技术, 2024, 47(09): 132-134.
- [3] 汪海雁, 张顺强. 杨房沟水电站压力钢管鼓包原因分析及处理措施 [J]. 水利水电快报, 2023, 44(S2): 32-34, 38.
- [4] 蔡汝明. 高湿度环境下压力钢管快速制作安装技术 [J]. 水电站机电技术, 2023, 46(11): 78-82.
- [5] 李婷, 许超. 水电站压力钢管焊缝检测中相控阵超声技术的应用研究 [J]. 中国高科技, 2023(20): 130-132.