

水利压力钢管现场焊接工艺优化研究

文 / 王少博 中国水利水电第三工程局有限公司

摘要：水利水电工程输水系统中压力钢管是主要的承压结构部件，它的焊接质量对于水利工程管道的耐久性、安全性存在直接影响。目前水利压力钢管在焊接过程中受到空间、环境、温度、装配误差等方面因素影响，造成焊接位置存在气孔、裂纹、未熔合等缺陷，这导致水利压力钢管焊接质量无法达到要求。本文选择我国新疆某引水式水电站压力钢管安装工程作为案例，系统性分析压力钢管现场焊接问题的原因，并且提出焊接工艺优化措施，能够提高水利压力钢管现场焊接质量水平，为水利工程系统的运行可靠性、稳定性提升奠定基础。

关键词：压力钢管；现场焊接；焊接工艺；预热控制；焊缝质量；工艺优化

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.21.065

引言

水利水电工程中压力钢管的主要作用是满足水流从调压井或水库传输到水轮机的需求，其在运行过程中受到水锤冲击、水压力、外部荷载共同作用，技术人员对其结构完整性提出更高要求。而对于抽水蓄能电站来说，压力钢管需要频繁受到压力波动、双向水流的共同作用，这导致钢管焊接接头受到疲劳损伤、应力集中等影响引发断裂^[1]。水利压力钢管在现场焊接中受到条件、环境复杂等方面因素影响，这对于钢管焊接质量产生巨大危害。目前国内大型水利工程中应用Q345R、Q370R等高强度钢制作压力钢管，其钢板厚度一般为18~40mm，选择多层多道焊方式完成现场焊接作业。然而水利压力钢管焊接中因为层间温度失控、预热不足、焊接参数控制不当等因素，导致钢管存在冷裂纹、氢致延迟裂纹等缺陷。某水利工程压力钢管因为焊缝存在裂纹需要进行返工处理，这就造成现场工期延误达三个月，所产生经济损失在千万元以上。因此，深入分析水利压力钢管焊接工艺优化措施，能够保证水利工程管道运行的安全性以及经济效益。

一、工程概况

本工程为位于我国新疆的某引水式水电站工程，引水流量100m³/s，3台机组，单机单管布置，单机容量44MW，总装机容量132MW，最大净水头160.3m。压力钢管全长2.02km，管径4m~6m，钢管采用Q345R、Q370R，壁厚由18mm~40mm不等。所有钢管均采用明挖沟槽敷设，无隧洞或地下洞室段，焊接作业在地面或沟槽内进行，施工空间开阔，通风条件良好。

二、水利压力钢管现场焊接工艺优化

(一) 焊接方法与材料选择

1. 焊接方法优化。水利压力钢管采用Q345R、Q370R，壁厚由18mm~40mm不等，原设计方案中选择手工电弧焊工艺，其在焊接过程中存在热输入波动大、焊接效率低等缺陷。通过技术人员的综合方案对比分析，对于原方案调整为“埋弧自动焊打底+气体保护焊填充盖面”的组合焊接工艺。其中，埋弧焊具备熔深大、热效率高等特点，能够满足水利压力钢管打底焊接要求；

药芯焊丝电弧焊脱渣性好、抗风性能。该组合工艺能够充分发挥两种焊接技术优势提高焊接熔透质量，并保证焊接作业具备较高环境适应性。在焊接时将埋弧自动焊应用在缓坡或平直段保持连续稳定焊接，而气体保护焊则在弯管、变径段等受空间限制区域具备较高灵活性，解决单一焊接方法在适应性、效率不足的问题^[2]。

2. 焊接材料控制。水利钢管焊接前需要选择适宜焊接材料，保证焊接材料和母材强度、韧性保持匹配，如下：埋弧焊选用H08Mn2MoA焊丝搭配SJ101焊剂；气体保护焊选用E71T-1C药芯焊丝，其扩散氢含量≤5mL/100g。焊接材料在焊接作业前需采取烘干处理措施，入库前焊材放置在350℃烤箱内烘干2h，并在使用时使用保温桶随用随取，防止焊材暴露在空气中发生受潮反应。焊接材料管理按照“领用登记—使用追踪—余料回收”的闭环管理体系，确保焊材质量具备可追溯性。同时，焊接作业现场设置二级库，并在库内配置温湿度自动监控与报警装置，使得库存温度为20℃~25℃、相对湿度50%以下，避免焊材存放中因为受潮导致氢致裂纹问题。

(二) 坡口设计与组对控制

1. 坡口设计优化

原水利钢管焊接工艺方案中采用单V型坡口设计方式，其坡口角度为60°、根部间隙8mm，其在焊接中容易产生未焊透现象。经过技术人员的工艺方案优化，采用X型对称坡口，其设计方案能够减少单侧热输入以降低焊接变形和残余应力。X型坡口使焊接热源分布具备较高均匀性，防止在焊接时因为热积累不均匀导致角变形或纵向收缩。同时，水利钢管的焊缝位置根部间隙较小设置4mm钝边，能够保证打底焊熔透可靠性，且防止间隙过大造成填充金属过量、焊接效率下降、热影响区扩展等问题。这一优化方案使钢管焊接接头力学性能得到改善，确保焊接工艺具备可控性、稳定性。

2. 精准组对控制

水利钢管组对前需要使用激光测距仪检测管口椭圆度，如果管口椭圆度超出标准，则使用机械校圆处理。钢管组对时使用专用卡具确保错边量在2mm以下，间隙

超差采用堆焊磨平工艺进行处理，禁止强行组对造成钢管变形或损坏。同时，钢管焊接作业前使用角磨机将坡口及两侧 50mm 范围内打磨露出金属光泽，并使用丙酮擦拭掉表面的水分和油污，为确保管道组对具备较高的精准性，现场建设测量、校正、复核三步作业流程，如下：首次测量后，钢管椭圆度偏差超过 8mm 的管节采用液压校圆处理；钢管组对使用三维定位支架微调管道轴线对中度；管道组对完成后，由质检人员使用塞尺和直尺检测错边量和间隙，达到要求之后通过焊点固定。点焊固定中所应用工艺和正式焊接完全相同，并在正式焊接前清理掉焊渣以防存在夹渣缺陷^[3]。

表 1 不同预热温度下焊缝冷裂纹发生率对比（模拟试验）

预热温度（℃）	层间温度控制	焊后 24h 裂纹检测结果	冷裂纹发生率
80	未严格控制	发现 3 处微裂纹	15%
100	控制 120 ~ 180℃	无裂纹	0%
120	控制 120 ~ 180℃	无裂纹	0%
150	控 120 ~ 180℃	无裂纹，但热影响区硬度偏高	0%

通过上述试验结果显示，采用 100℃ 预热并配合层间温度控制措施，能够有效控制冷裂纹形成，并不需要过热的预热温度即可满足焊接标准。

（四）焊接参数优化

本工程在焊接前进行系统化焊接工艺评定，通过综合性分析热输入控制、熔深需求、现场操作条件等，明确适用于 Q345R/Q370R 厚壁钢管（18 ~ 40mm）组合方式，如下：埋弧自动焊采用直流反接方式，电流 650 ~ 700A、电弧电压 32 ~ 34V、焊接速度 28 ~ 32cm/min，能够保证熔池状态稳定、根部熔透效果良好；药芯焊丝电弧焊参数为电流 220 ~ 240A、电压 26 ~ 28V，保护焊气体采用 80%Ar+20%CO₂ 混合气，流量控制在 20 ~ 22L/min，能够保证电弧稳定且焊缝质量合格。

（五）钢管焊接工艺优化

水利压力管道焊接时需要落实工艺精细化控制措施，保证焊接接头的完整性以及耐久性达到要求。本工程选用高强度钢环缝焊接，其并不是简单的金属堆敷作业，而要在焊接过程中对熔池动态行为、焊接热输入、冶金反应等进行系统化精细控制。

（1）钢管打底焊是焊缝成型以及质量合格的基础，其关系到钢管的运行效果和使用寿命。本工程在打底焊焊接时首层焊接厚度 6 ~ 8mm，其具备如下作用：打底焊焊接厚度过小造成根部无法完全溶透，容易存在未焊透缺陷；焊接厚度过大，因为熔池体积过大、重力作用下坠，导致焊缝存在烧穿、内凹等问题。基于此，在焊接过程中按照小电流、慢送丝、稳运条的操作要领完成焊接，确保电弧状态稳定，达到焊缝饱满、质量合格的标准^[4]。

（2）水利压力钢管在填充焊阶段采用多道排焊工艺，能够提高焊接质量。本工程焊接中单道焊缝宽度保持在

（三）预热与层间温度控制

Q345R 与 Q370R 钢材碳当量（CEV）分别为约 0.40% 和 0.44%。科研人员根据 IIW 冷裂纹敏感性公式计算得出，该钢材最低预热温度应 ≥ 100℃。现场施工中，施工人员采用陶瓷电阻加热片环绕焊缝区域进行预热，加热宽度为焊缝两侧各 300mm，升温速率控制在 ≤ 150℃ / h。焊接过程中，施工人员采用红外测温仪实时监测层间温度，严格将其控制在 120-180℃ 区间。温度过低易导致氢滞留，过高则会引起晶粒粗化。每焊完一道焊缝后，施工人员立即用石棉布覆盖焊缝进行缓冷，防止焊缝因骤冷产生马氏体组织。

15mm 以下（如图 1 所示），这是考虑到熔池流动特性确定的，具体如下：单道焊宽度过大时边缘热输入量明显减小，并不能完全熔化坡口侧壁母材，导致未熔合、夹渣等缺陷。因此，在焊接过程中需要沿着坡口方向采用横向、小幅、摆动运条方式，确保每道焊缝和前一道焊缝以及坡口侧壁实现完全熔合搭接；同时，每完成一道焊缝后及时进行焊渣清理，禁止存在夹渣缺陷。该工艺虽然增加焊道数量，但采取分层细化控制措施，能够保证焊缝位置具备致密度。



图 1 焊接控制

（3）盖面焊保证接头功能、外观质量达到要求，确保焊缝余高达到 1.5 ~ 2.5mm，能够防止因为余高过高导致焊接应力集中，也能防止余高过低出现承载截面削弱的现象。盖面焊时由焊接作业人员采用细腻的收弧控制和均匀运条节奏，确保焊缝和母材平滑过度以防存在弧坑、咬边、局部超高的问题^[5]。

(六) 焊后热处理

为消除焊缝残余应力、改善组织性能，施工人员对所有环缝实施局部焊后热处理 (PWHT)。该工序采用履带式加热器，将焊缝升温至 $580 \pm 10^\circ\text{C}$ ，保温 2.5 小时 (保温时间按板厚 2.5min/mm 计算)，降温速率控制在 $\leq 100^\circ\text{C/h}$ ，待温度降至 300°C 后进行空冷。

焊缝质量检验严格执行“外观检查→无损检测→力学性能试验”三级流程。外观检查需符合 DL/T869 标准要求；无损检测采用 100% 超声波探伤 (UT) 结合 20% 射线探伤 (RT) 的方式；力学性能试验需从焊缝、热影响区及母材取样，分别测试试样的抗拉强度、冲击功 (-20°C) 及硬度。

表 2 工艺优化前后焊缝质量指标对比

指标	优化前	优化后	提升效果
焊缝一次 UT 合格率	86.5%	98.7%	↑ 12.2%
平均焊接效率 (kg/h)	3.2	5.8	↑ 81.3%
热影响区 ~ 20°C 冲击功 (J)	48	62	↑ 29.2%
焊接返修率	9.3%	1.1%	↓ 88.2%

数据显示，优化后的焊接工艺在提升焊缝质量的同时，

显著提高了焊接效率，降低了返工成本。

三、关键技术实施要点

(一) 环境控制要点

内焊接作业区域采用全封闭式防风防潮棚进行隔离，棚体由轻型钢架支撑，外覆阻燃防水帆布，接缝位置通过压条与密封胶带双重处理，确保气密性。棚内配置大功率工业除湿机，持续运行以将相对湿度稳定控制在 60% 以下，并辅以温湿度自动记录仪进行 24 小时监测，数据实时上传至项目质量管理平台。每次焊接开始前，操作人员使用便携式露点仪对母材坡口及热影响区表面进行检测，确认钢板表面温度高于当前环境露点温度至少 3°C ，防止因温差导致冷凝水在金属表面析出。若检测结果不满足要求，则启用局部电加热装置对管壁进行温和升温，直至环境条件达标。若棚内还设有低风速轴流风机，布置于远离电弧的上风侧，仅用于维持空气微循环，避免形成直吹气流干扰电弧稳定性。所有环境参数均纳入焊接开工前的强制检查项，未经验收确认，严禁进入正式施焊工序。

焊接作业过程中，技术人员进行工艺优化，重点从热输入控制、熔敷效率、冶金质量、协同平衡方面展开。打底焊施工环节使用埋弧自动焊工艺进行焊接，确保熔深、电弧稳定达到要求以提高焊接质量。同时，采用精准匹配 H08Mn2MoA 焊丝与 SJ101 焊剂使焊缝位置金属的低温韧性、低扩散、氢含量达到要求。在填充与盖面施工阶段，由焊接作业人员将焊接工艺切换为药芯焊丝电弧焊，并使用 E71T-1C 焊丝作为焊接材料，在 $80\%\text{Ar}+20\%\text{CO}_2$ 混合气体的保护下进行焊接作业，能够形成美观、脱渣、顺畅的焊道，并且在露天的作业环境中能够提高焊接效果。

(二) 焊接顺序要点

水利钢管环缝焊接按照“对称分段退焊法”工艺进行，如下：焊接作业人员沿着整圈环焊缝圆周方向分为 8 个区段，每段焊接长度控制在 1.5m 内。同时，两名焊接作业人员分别从直径相对起始位置同步焊接，沿着相同旋转方向推进以使热输入在圆周上对称分布。每名焊接作业人员完成一段焊接后暂停焊接，跳过相邻段后间隔一段位置交替焊接，直到整圈焊缝完全闭合。该方式能够结合实际情况适当调整分段数量，但应保持双人对称间隔跳焊的原则进行焊接作业。焊接时两名焊接作业人员保持节奏，协调焊接电流、电压等关键参数，利用在线监测设备实时对比，一旦焊接参数超出标准则及时暂停焊接，并校准每段焊缝的起弧、收弧点位，使其交错在 50mm 上防止同一位置叠加。

结语

水利压力钢管焊接工艺优化能够提高钢管连接质量等，进而保证水利工程运行的可靠性以及安全性。针对高强钢厚壁管在复杂地形施工容易产生气孔、裂纹、未熔合等焊接缺陷，需要采取焊接方法、坡口形式、热过程控制、参数匹配、过程监测等工艺优化方案，进而能够提高水利钢管焊接稳定性和成型质量，满足水利工程运行可靠性、稳定性要求，为今后同类型工程项目施工奠定坚实基础。

(三) 焊接工艺要点

本工程 Q345R/Q370R 高强度厚壁压力钢管 ($18 \sim 40\text{mm}$)

参考文献

[1] 王彦刚. 浅析 DN450 钢管焊接过程中的质量控制 [J]. 产品可靠性报告, 2024, (05): 93-94.
 [2] 伊聪慧. 刍议水利水电工程金属结构制作焊接工艺 [J]. 河南水利与南水北调, 2019, 48(12): 39-40.
 [3] 崔晨曦, 鲁永宏, 郭金萍. 大中型水电站压力钢管焊接技术及缺陷分析 [J]. 人民黄河, 2021, 43(S2): 160-161.
 [4] 安皓源. 辽宁某输水工程 PCCP 管道的安装工艺探讨 [J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50(05): 166-168.
 [5] 李金晓, 仪彤. 压力管道的安装工艺及其质量控制研究 [J]. 中国质量监管, 2024, (11): 70-71.

作者简介：王少博 (1991.4.6)，男，汉，陕西渭南，大学，本科，高级工程师，研究方向：水利水电。