

水利工程压力钢管现场安装焊接质量控制技术

杜德平

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘要 压力钢管是水利枢纽引水、发电、泄洪系统的关键结构部件, 现场安装焊接质量直接决定其承压性能、结构安全与长期服役寿命。本文系统梳理了水利工程压力钢管现场安装焊接全流程的质量控制体系, 明确了原材料管控、工艺评定、组对焊接、焊后处理等关键环节的管控要点, 分析了焊接施工中常见缺陷的形成机理, 归纳了标准化的防控与处置对策, 以期为同类水利工程施工提供技术参考。

关键词 水利工程; 压力钢管; 现场安装; 焊接质量控制

中图分类号: TV547.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.019

0 引言

随着我国水利基础设施建设的持续推进, 高水头水电站、长距离跨流域引水工程等项目的建设规模不断扩大, 压力钢管凭借承压能力强、输送效率高、结构适应性好等特点, 成为水利工程中输水、发电、泄洪系统的核心结构形式之一^[1]。现场安装焊接是压力钢管施工的关键环节, 焊接接头的质量直接决定钢管整体的结构强度、密封性与抗疲劳性能, 是保障水利工程长期安全稳定运行的基础^[2]。因此, 深入分析常见焊接缺陷的形成机理, 归纳标准化的防控与处置对策, 具有重要的现实意义。

1 压力钢管现场安装焊接前期准备与基础质量管控

1.1 原材料与焊接材料质量管控

原材料与焊接材料的性能是保障焊接质量的基础, 需在施工前开展全流程、全批次的质量检验与管控。针对压力钢管母材, 需严格核对钢板的牌号、规格、质量证明文件, 重点检验其屈服强度、抗拉强度、冲击韧性、化学成分等关键指标, 确保符合设计与规范要求; 钢板进场后需按批次开展复检, 同时检查外观质量, 严禁使用存在锈蚀、裂纹、夹层、变形超标的钢板^[3]。

焊接材料的选用需与母材的冶金性能、力学性能完全匹配, 焊条、焊丝、焊剂、保护气体的型号需符合设计要求, 严禁擅自更换焊材类型。焊材的存放、烘干与使用需执行标准化管控。焊材存放需设置专用库房, 控制库房内温度与湿度, 避免焊材受潮、锈蚀; 低氢型焊条烘干后需放入保温筒随用随取, 重复烘干次数不得超过 2 次, 药皮脱落、锈蚀严重的焊材严禁使用。

1.2 现场作业环境与工装设备管控

水利工程压力钢管现场焊接多涉及隧洞内、户外高空、临水等复杂工况, 作业环境的管控直接影响焊接质量与施工安全。施工前需对作业区域进行专项整治, 高空作业需搭建稳固的操作平台与安全防护设施, 洞内作业需完善通风、照明、排水系统, 确保作业环境符合焊接施工要求。同时, 需提前预判环境因素对焊接的影响, 制定专项管控措施, 严禁在不符合要求的环境下开展焊接作业。

施工前需完成吊装设备、坡口加工设备、焊接设备、热处理设备及无损检测设备的全面检修与校验, 确保设备运行状态完好、计量精度符合规范要求。焊接设备需重点校验电流、电压输出的稳定性, 送丝机构运行的流畅性; 热处理设备需校验温控系统的精度, 确保加热温度可控。同时, 需完成钢管预制管节的进场验收, 核对管节的几何尺寸、椭圆度、周长偏差、坡口加工质量, 管口平面度、坡口角度与钝边尺寸需符合设计要求, 验收不合格的管节严禁进入组对环节。

1.3 焊接工艺评定与作业人员资质管控

焊接工艺评定是现场焊接施工的根本依据, 需在施工前完成全项焊接工艺评定工作。针对工程所用的母材材质、规格、焊接方法、接头形式、焊接位置, 需编制专项焊接工艺评定方案, 通过试验验证焊接接头的力学性能、弯曲性能、冲击韧性与耐腐蚀性能, 确保各项指标符合设计与规范要求。焊接工艺评定合格后, 需编制正式的焊接作业指导书, 明确焊接方法、焊接参数、预热要求、层间温度控制、焊后处理等全流程作业标准, 严禁无评定依据开展焊接施工。

作者简介: 杜德平 (1993-), 男, 本科, 研究方向: 水利水电工程。

参与焊接作业的焊工必须持有特种设备作业人员资格证书,证书核准的焊接方法、母材类型、焊接位置需与现场作业内容完全匹配,严禁无证上岗或超范围作业。焊工上岗前需开展岗前培训与实操考核,考核内容贴合工程实际工况,考核合格后方可参与现场作业。施工前需完成全员技术交底,明确作业标准、质量要求与安全管控要点,确保每一位作业人员掌握焊接工艺的核心要求。

2 压力钢管现场安装焊接关键工序质量控制技术

2.1 钢管组对与定位焊质量控制

钢管组对是焊接施工的前置环节,组对精度直接影响焊接成型质量与结构受力性能,需执行严格的尺寸偏差管控。管口组对前需彻底清理坡口及两侧50 mm范围内的油污、铁锈、水分、氧化皮等杂物,露出金属光泽。组对时需严格控制管口错边量、对口间隙与坡口角度,壁厚 ≤ 10 mm的钢管,对口错边量不得超过1 mm;壁厚 > 10 mm的钢管,对口错边量不得超过壁厚的10%且最大不超过3 mm,严禁采用强行组对的方式消除错边^[4]。

定位焊是固定组对管口的关键工序,其焊接工艺需与正式焊接完全一致,严禁使用与正式焊接不符的焊材与焊接参数。定位焊的焊缝长度宜为30~50 mm,间距宜为100~300 mm,焊缝高度不得超过设计焊缝厚度的2/3,定位焊需布置在坡口内侧,不得布置在管口起弧、收弧位置。定位焊完成后需检查焊缝质量,存在裂纹、气孔、夹渣等缺陷的定位焊缝必须彻底清除后重新焊接,严禁直接在缺陷定位焊缝上进行正式焊接。组对完成后需对钢管的轴线位置、高程、里程进行复核,偏差符合规范要求后,设置牢固的内支撑与外加固装置,防止焊接过程中发生管口变形。

2.2 焊接工艺参数与作业过程管控

焊接工艺参数的精准控制是保障焊接接头质量的关键,需严格按照焊接作业指导书确定的参数开展作业,严禁擅自调整焊接参数。现场焊接需根据钢管材质、壁厚、焊接位置选择适配的焊接方法,埋弧自动焊适用于管节预制纵缝、现场环缝平焊位置,焊接效率高、成型质量稳定;手工电弧焊适用于全位置焊接、现场修补与空间受限部位作业;气体保护焊适用于薄壁钢管、高空全位置焊接作业。

焊接过程中需重点管控焊接电流、电弧电压、焊接速度、热输入量等关键参数,多层多道焊需严格控制层间温度,每层焊缝焊接完成后,需彻底清理焊渣与飞溅物,检查焊缝表面质量,存在缺陷需清除后方

可焊接下一层。焊接顺序需遵循“对称焊接、分段退焊、减少应力集中”的原则,先焊接纵缝后焊接环缝,环缝焊接宜采用双人对称同步焊接,避免单侧焊接引发的管口变形与残余应力集中。纵缝焊接需设置引弧板与熄弧板,焊接完成后采用机械方式切除,严禁强行敲除。

2.3 特殊工况下焊接作业质量管控

水利工程压力钢管现场焊接常面临低温、高湿、大风、洞内受限空间等特殊工况,需制定专项质量管控措施,避免环境因素引发焊接缺陷。针对大风工况,手工电弧焊作业区域风速超过8 m/s、气体保护焊风速超过2 m/s时,必须设置防风棚或防风围挡,封闭作业空间,严禁在无防风措施的情况下开展焊接作业。针对雨雪天气,严禁露天开展焊接作业,焊接部位受潮时,需采用火焰烘干处理,确认坡口干燥后方可焊接。

针对高湿工况,作业区域相对湿度大于90%时,需采用除湿机、火焰烘干等方式降低局部湿度,否则不得开展焊接作业。针对低温工况,环境温度低于0℃时,需对焊缝两侧各100 mm范围内的母材进行预热,预热温度较常温工况提高20~30℃,焊接过程中需控制层间温度不低于预热温度,焊后采用保温棉覆盖缓冷,避免焊缝快速冷却引发冷裂纹。针对洞内受限空间作业,需完善通风系统,及时排出焊接烟尘,确保作业人员安全,同时加强照明与过程监控,避免空间受限引发的焊接操作不到位问题。

2.4 焊后热处理与残余应力管控

对于厚壁钢管、低合金高强度钢钢管,焊后热处理是消除焊接残余应力、防止延迟裂纹、改善焊缝力学性能的关键工序,需严格按照规范要求执行。焊后热处理优先采用局部热处理方式,选用履带式电加热器配合保温棉进行加热,加热范围为焊缝两侧各3倍壁厚,且不小于100 mm,保温范围需超出加热范围至少100 mm。热处理过程中需严格控制升温速率、保温温度、保温时间与降温速率,升温与降温速率不得超过50℃/h,保温时间根据钢管壁厚确定,通常按每25 mm壁厚保温1 h控制,且最短保温时间不低于30 min。

热处理完成后,需对焊缝及热影响区开展硬度检测,验证热处理效果,硬度值需符合设计与规范要求。对于壁厚较薄、无需开展热处理的钢管,可采用锤击法、振动时效法消除焊接残余应力,锤击作业需在焊后焊缝温度处于200~300℃时开展,避免在蓝脆温度区间锤击引发焊缝开裂。焊接完成后需对钢管的几何尺寸进行复核,检查椭圆度、轴线偏差、管口平整度,确保焊接变形控制在规范允许范围内。

3 焊接常见质量缺陷与标准化防控处置技术

3.1 体积型缺陷（气孔、夹渣）防控处置

气孔、夹渣是压力钢管现场焊接最常见的体积型缺陷，虽危害性较面状缺陷低，但会降低焊缝的有效截面积，影响焊缝的力学性能与密封性。气孔的主要形成原因包括焊材受潮、坡口清理不彻底、保护气体纯度不足、防风措施不到位、焊接参数不当导致熔池冷却过快；夹渣的主要形成原因包括层间焊渣清理不彻底、坡口角度过小、焊接电流过小、焊接速度过快、焊条角度不当。需严格执行焊材烘干与存放要求，焊前彻底清理坡口及两侧的油污、铁锈、水分，优化焊接参数，加强层间焊渣清理，完善作业区域防风措施。缺陷处置需根据缺陷深度与范围采取差异化措施：表面气孔、浅表层夹渣，可采用角磨机打磨彻底清除后，按焊接工艺进行补焊；深层气孔、密集夹渣，需采用碳弧气刨彻底清除缺陷至完好母材，清理干净后按焊接工艺补焊，补焊完成后需重新进行无损检测。

3.2 面状缺陷（未焊透、未熔合）防控处置

未焊透、未熔合是压力钢管焊接中危害性较大的面状缺陷，会大幅降低焊缝的有效承载面积，形成应力集中点，在钢管高压运行过程中易引发裂纹扩展，导致焊缝失效。未焊透的主要形成原因包括坡口角度过小、组对间隙不足、焊接电流过小、焊接速度过快、钝边尺寸过大；未熔合的主要形成原因包括焊接热输入不足、焊条角度不当、层间清理不彻底、焊接电弧偏离坡口侧壁。针对该类缺陷的防控，需优化坡口设计，合理控制坡口角度、钝边尺寸与组对间隙，选用适配的焊接参数，规范焊工操作手法，加强层间清理与过程检查。未焊透、未熔合缺陷严禁采用表面打磨的方式处置，必须采用碳弧气刨彻底清除全部缺陷，直至露出完好母材，清理干净后严格按照焊接作业指导书进行补焊，补焊层数与焊接参数需符合要求，补焊完成后必须进行无损检测，确认缺陷完全消除^[5]。

3.3 裂纹类缺陷防控处置

焊接裂纹是压力钢管焊接中危害性最大的缺陷，分为焊接过程中形成的热裂纹与焊后冷却过程中形成的冷裂纹，其中延迟冷裂纹具有隐蔽性，易在钢管运行过程中引发突发性断裂事故。热裂纹的主要形成原因包括母材硫、磷等杂质含量过高、焊接热输入过大、熔池冷却速度过快、焊缝成型不良、应力集中；冷裂纹的主要形成原因包括母材淬硬倾向大、焊材含氢量过高、焊前预热不足、焊接残余应力过大、焊后未及时缓冷。针对裂纹类缺陷的防控，需严格控制母材与焊材的化学成分，选用低氢型焊接材料，严格执行焊前预热、层间温度控制与焊后缓冷要求，优化焊接顺

序降低焊接残余应力，厚壁钢管焊后及时开展热处理。裂纹缺陷的处置必须执行专项流程，先通过超声波、射线检测确定裂纹的长度、深度与延伸范围，在裂纹两端钻止裂孔，防止裂纹进一步扩展，随后采用碳弧气刨彻底清除全部裂纹，直至完好母材，再按焊接工艺补焊，补焊后需开展焊后热处理，完成后重新进行无损检测，严禁擅自对裂纹缺陷进行补焊。

3.4 焊接变形与尺寸偏差防控处置

焊接变形主要表现为管口椭圆度超标、钢管轴线弯曲、角变形、波浪变形等，会影响钢管的安装精度与结构受力性能。其主要形成原因包括焊接顺序不合理、未设置反变形措施、组对加固不到位、焊接热输入过大、焊接参数不对称。针对焊接变形的防控，需在组对时根据焊接工艺预设合理的反变形量，采用对称焊接、分段退焊的方式控制焊接热输入的均匀性，加强组对后的内支撑与外加固，优化焊接参数与焊接顺序，多层多道焊严格控制层间温度。变形处置需根据变形程度采取差异化措施：轻微变形可采用千斤顶、压力机等设备进行机械矫正，矫正过程中严禁损伤母材；变形量较大的，可采用局部加热矫正法，控制加热温度在 600 ~ 800 °C，严禁过烧，矫正后缓慢冷却；变形严重、无法矫正的，需割除焊缝，重新组对焊接，确保钢管尺寸偏差符合规范要求。

4 结束语

本文系统梳理了水利工程压力钢管现场安装焊接全流程的质量控制体系，明确了前期原材料管控、工艺评定、作业环境准备的基础要求，细化了组对焊接、过程管控、焊后处理等关键工序的技术要点，归纳了各类常见焊接缺陷的形成机理与标准化处置对策。未来研究可聚焦智能化焊接装备研发、焊接过程在线监测技术应用、新型低氢焊接材料研发等方向，完善质量管控标准体系，提升水利工程压力钢管的建设质量与长期服役安全保障能力。

参考文献：

- [1] 张玉国. 焊接速度对水电站压力钢管残余应力的影响分析[J]. 水电站机电技术, 2026, 49(01): 97-103.
- [2] 肖云鹏. 压力钢管焊接接头性能优化与结构安全分析[J]. 冶金与材料, 2025, 45(06): 157-159.
- [3] 余志亮, 崔成林, 刘小刚, 等. 高承压钢管焊接技术研究与应用[J]. 珠江水运, 2024(19): 130-132.
- [4] 施秉亮, 高丽萍. 大仰角长斜井压力钢管快速安装技术[J]. 水电站机电技术, 2023, 46(07): 31-33, 69.
- [5] 刘迎帝. 倒虹吸工程钢管制作安装施工技术分析[J]. 黑龙江水利科技, 2023, 51(01): 88-91.