

压力钢管制作工艺及关键控制点分析

苏 伟

中国水利水电第四工程局有限公司 青海 西宁 810007

摘 要：压力钢管作为水利水电工程中的关键承压部件，其制作质量直接关系到工程的安全性与稳定性。本文围绕压力钢管制作展开，详细阐述了从材料选用到最终验收的完整工艺流程，并深入分析各环节的关键控制点，提出相应的质量控制措施。旨在为压力钢管制作提供系统性的工艺指导与质量管控参考，确保压力钢管在水利水电工程中安全可靠运行。

关键词：压力钢管；制作工艺；关键控制点；质量控制

1 引言

在水利水电工程中，压力钢管承担着输送高压水流的重要任务，是连接水库与水电站厂房的关键通道。随着水利水电工程朝着大型化、高参数方向发展，压力钢管的工作环境愈发严苛，对其制作质量提出了更高要求。压力钢管制作是一项复杂的系统工程，涵盖材料选择、切割加工、卷板成型、焊接、无损检测、防腐蚀处理等多个环节，每个环节的工艺水平和质量控制都将直接影响压力钢管的整体性能。若制作过程中存在缺陷，可能导致钢管在高压水流作用下发生泄漏、爆裂等严重事故，不仅会造成巨大的经济损失，还可能威胁到周边人员的生命安全。因此，深入研究压力钢管制作工艺及关键控制点，对于保障水利水电工程的安全稳定运行具有至关重要的意义。

2 压力钢管制作的基本工艺流程

2.1 材料选用与检验

压力钢管的材料选用是制作的首要环节，通常选用高强度低合金钢，如Q345R、Q460C等，这些钢材具有良好的力学性能和焊接性能，能够满足压力钢管在高压工况下的使用要求。材料选用时，需根据工程设计压力、管径大小、工作环境等因素综合考虑，确定合适的钢材牌号和规格。材料进场后，必须进行严格的检验。首先检查材料的质量证明书，核对钢材的牌号、规格、炉批号、力学性能等参数是否符合设计要求。然后进行外观检验，查看钢材表面是否有裂纹、结疤、折叠、夹渣等缺陷。对于重要工程或大直径压力钢管，还需进行抽样复验，包括力学性能试验（如拉伸试验、冲击试验）和化学成分分析，确保钢材质量符合相关标准和设计要求。

2.2 下料与切割

根据压力钢管的设计尺寸和排版图，进行下料计算。下料时需考虑钢管的周长、长度以及焊接接头的坡

口形式和加工余量，避免因下料误差导致钢管成型后尺寸不符合要求。切割方法主要有机械切割、火焰切割和等离子切割等。机械切割适用于厚度较小的钢板，具有切割精度高、切口质量好的优点；火焰切割适用于厚度较大的钢板，切割效率高，但切口边缘可能存在氧化皮和热影响区；等离子切割则适用于各种厚度的金属材料，切割速度快，切口质量较好^[1]。在切割过程中，需根据钢材的厚度和切割要求选择合适的切割方法，并严格控制切割参数，如切割速度、火焰温度、等离子弧功率等，以保证切口平整、光滑，无裂纹、毛刺等缺陷。切割完成后，需对切口进行清理和检验，去除氧化皮和毛刺，并检查切口尺寸和表面质量是否符合要求。

2.3 卷板与成型

卷板成型是将切割好的钢板通过卷板机卷制成圆弧形或圆柱形管节的过程。卷板前，需对卷板机的辊轴进行检查和调整，确保辊轴的平行度和表面粗糙度符合要求。然后将钢板放置在卷板机上，根据钢管的曲率半径调整卷板机的辊距和压力，缓慢进行卷板。在卷板过程中，要注意控制钢板的变形量，避免出现过度弯曲或扭曲等缺陷。同时，需随时用样板检查卷制后的管节弧度是否符合设计要求，及时调整卷板机的参数。对于大直径压力钢管，可能需要分多次卷制，逐步达到所需的曲率半径。卷板完成后，对管节进行初步的校圆处理，使管节的圆度和周长符合设计要求。

2.4 焊接工艺

焊接是压力钢管制作中最为关键的环节之一，焊接质量直接影响压力钢管的强度和密封性。压力钢管的焊接通常采用手工电弧焊、埋弧焊、气体保护焊等方法，根据钢管的厚度、材质和焊接位置选择合适的焊接方法和焊接材料。焊接前，需对焊接接头进行预处理，包括打磨坡口、清除油污和锈迹等，确保焊接接头表面清

洁、平整。然后进行焊接工艺评定,根据评定结果确定最佳的焊接参数,如焊接电流、电压、焊接速度、层间温度等^[2]。焊接过程中,严格按照焊接工艺规程进行操作,控制焊接变形和焊接应力,避免出现焊接裂纹、气孔、夹渣等缺陷。对于重要的焊缝,如纵缝和环缝,需采用多层多道焊,每焊完一层后,及时清理焊渣并检查焊接质量,确保层间无缺陷。

2.5 无损检测

为确保压力钢管的焊接质量,焊接完成后需进行全面的无损检测。常用的无损检测方法包括超声波检测(UT)、射线检测(RT)、磁粉检测(MT)和渗透检测(PT)等。超声波检测主要用于检测焊缝内部的缺陷,如裂纹、未焊透、夹渣等,具有检测速度快、灵敏度高的优点;射线检测则能直观地显示焊缝内部的缺陷形状和位置,适用于对焊接质量要求较高的焊缝;磁粉检测和渗透检测主要用于检测焊缝表面和近表面的缺陷,如表面裂纹、气孔等。根据设计要求和相关标准,确定各焊缝的无损检测比例和合格级别,对检测出的缺陷进行标记和返修,直至检测合格为止。

2.6 防腐蚀处理

压力钢管长期处于水下或潮湿环境中,容易发生腐蚀,影响其使用寿命和安全性。因此,防腐蚀处理是压力钢管制作的重要环节。防腐蚀处理通常包括表面预处理和涂层施工两个步骤。表面预处理是防腐蚀的基础,通过喷砂或抛丸等方法去除钢管表面的氧化皮、锈迹和油污,使表面达到一定的粗糙度,以增强涂层与基体的附着力。表面预处理后,需在规定时间内进行涂层施工,避免表面再次生锈。涂层施工可采用刷涂、喷涂等方法,根据设计要求选择合适的防腐涂料,如环氧树脂涂料、聚氨酯涂料等,确保涂层厚度均匀、无漏涂、无气泡等缺陷。涂层施工完成后,需进行涂层厚度检测和附着力测试,确保防腐蚀效果符合要求。

2.7 管节组装与整体验收

将制作好的管节运输到现场进行组装,组装时需控制管节的对接精度,包括错边量、圆度、直线度等参数,确保管节之间的连接紧密、平整。组装完成后,进行整体验收,包括尺寸检验、压力试验等。尺寸检验主要检查压力钢管的管径、长度、直线度等是否符合设计要求;压力试验则是对压力钢管进行耐压测试,通常采用水压试验的方法,将钢管内充满水后逐步升压至设计压力的1.25倍,保持一定时间,观察钢管是否有泄漏、变形等现象。若压力试验合格,说明压力钢管的制作质量符合要求,可以投入使用。

3 压力钢管制作过程中的关键控制点分析

3.1 材料质量控制

材料质量是压力钢管制作的基础,其性能直接影响钢管的承压能力与使用寿命。选材时需严格遵循设计要求,优先选用Q345R、Q460C等高强度低合金钢,并核查生产厂家的资质与信誉。材料进场检验需执行“三控制”:核对质量证明书与设计参数的一致性,进行外观缺陷排查(如裂纹、夹渣等),按规范抽样复验力学性能(拉伸、冲击试验)与化学成分。对复验不合格的材料,须立即标识并清退出场,从源头杜绝质量隐患。

3.2 焊接质量控制

焊接是压力钢管制作的核心环节,焊接缺陷可能引发高压工况下的泄漏或爆裂事故。控制要点包括:焊接人员须持有效资质证书上岗,且定期参与技能考核;正式焊接前完成工艺评定,确定电流、电压、焊接速度等关键参数;焊接过程中严格执行层间温度控制(如低合金钢层间温度不低于150℃),采用多层多道焊减少应力集中^[3];对无损检测发现的缺陷,由资深焊工按返修方案处理,返修后须重新检测,确保焊缝金属性能与母材匹配。

3.3 几何尺寸控制

压力钢管的几何精度直接影响安装精度与水流阻力。下料时需结合排版图精确计算周长、长度,并预留焊接变形余量(通常按0.1%~0.3%估算);卷板成型时用弧形样板(弦长不小于1.5m)实时校验弧度,通过调整卷板机辊距控制圆度误差(管径 $\leq 4\text{m}$ 时,圆度偏差 $\leq 3D/1000$,D为管径);管节组装时采用定位夹具控制错边量(纵缝 $\leq 10\%$ 板厚且 $\leq 2\text{mm}$,环缝 $\leq 15\%$ 板厚且 $\leq 3\text{mm}$),并通过全站仪监测整体直线度(每米偏差 $\leq 2\text{mm}$)。

3.4 无损检测控制

无损检测是焊接质量的关键验证手段。检测设备需定期校准(如超声波探伤仪每季度标定),检测人员须具备UT II级、RT II级及以上资质;根据《压力钢管制造安装及验收规范》,对纵缝实施100%UT检测,环缝按设计要求抽取20%~50%进行RT/UT检测^[4];对超标缺陷,需绘制缺陷位置图谱,分析成因后制定返修方案,返修次数不得超过2次,避免母材性能劣化。

3.5 防腐蚀质量控制

防腐蚀处理决定压力钢管的服役寿命。表面预处理需达到Sa2.5级标准(喷砂后表面粗糙度40~80 μm),并在4小时内完成涂层施工;选用环氧树脂类涂料时,严格控制涂装环境(温度5~35℃,湿度 $\leq 85\%$),采用高压无气喷涂确保涂层厚度均匀(干膜厚度偏差 $\leq -5\%$ 设计

值)；完工后用磁性测厚仪抽检涂层厚度，用划格法测试附着力(ISO等级 ≤ 1 级)，对漏涂、针孔等缺陷需局部返工处理。

4 压力钢管制作质量控制的措施与建议

4.1 建立完善的质量管理体系

为确保压力钢管制作质量，制作单位应建立完善的质量管理体系，明确各部门和人员的质量职责，制定详细的质量控制程序和作业指导书。从材料采购、下料、卷板、焊接、无损检测到防腐处理等各个环节，都应严格按照质量管理体系的要求进行操作和控制，确保制作过程的可追溯性。

4.2 加强人员培训与管理

制作人员的技术水平和质量意识直接影响压力钢管制作质量，制作单位需强化人员培训与管理。定期开展技能培训，组织学习新工艺、新技术，提升人员操作水平与问题解决能力；加强质量意识教育，使其明确质量重要性，树立“质量第一”观念，严格遵守操作规程；对焊接、无损检测等关键岗位人员，严格实施资质管理，确保其具备相应专业能力。

4.3 优化制作工艺和设备

不断优化压力钢管制作工艺，采用先进的制作技术和设备，提高制作效率和质量。例如，在切割工序中采用数控切割设备，提高切割精度和效率；在焊接工序中采用自动化焊接设备，减少人为因素对焊接质量的影响；在无损检测工序中采用先进的检测设备和技術，提高检测的准确性和可靠性。

4.4 加强过程监督与检验

在压力钢管制作过程中，加强对各环节的过程监督与检验，及时发现和解决问题。制作单位应设立专职的质量检验人员，对制作过程进行全程跟踪检验，从材料

进场到成品验收，每一个环节都严格把关。同时，监理单位和业主单位也应加强对制作过程的监督和检查，确保压力钢管制作质量符合要求。

4.5 建立质量追溯机制

建立压力钢管制作质量追溯机制，对每一个管节的材料来源、制作过程、检测结果等信息进行记录和存档，以便在出现质量问题时能够及时追溯原因，采取相应的措施进行处理。质量追溯机制的建立，不仅能够提高制作单位的质量责任意识，还能为后续的压力钢管制作提供经验教训，不断改进制作工艺和质量控制水平。

5 结论

压力钢管制作是水利水电工程的关键环节，其质量直接影响工程安全与效益。本文梳理了材料选用、焊接、无损检测等工艺流程，分析了各环节关键控制点，提出质量控制措施。研究表明，需从材料、焊接、尺寸、检测、防腐五方面入手，构建质量管理体系，强化人员培训，优化工艺设备，加强过程监督与追溯，方能保障制作质量。未来，制作单位应紧跟技术发展，创新工艺材料，提升制作水平，为水利水电事业发展提供支撑。

参考文献

- [1]佟德宇,息丽琳,孟杨.高强钢与普通钢在压力钢管制安工程中的工效差异研究[J].建筑经济,2024,45(S1): 568-572.
- [2]王建命.倒虹吸压力钢管制作与安装工艺探讨[J].中华建设,2021,(09):156-157.
- [3]令强华.水电站超长压力钢管制造工艺[J].安装,2020,(08):31-34.
- [4]梁金亮.金安桥水电站压力钢管制作与安装施工[J].云南水力发电,2012,28(04):67-69+132.