

# 水利水电工程压力钢管防腐涂层施工技术研究

艾冰涛

(中国水利水电第三工程局有限公司, 陕西 西安 710000)

**摘要** 在水利水电工程建设过程中, 压力钢管防腐涂层施工是确保钢管运行可靠性、结构稳定性及使用寿命的关键, 其需要采用系统化操作技术才能提高钢管防腐效果。本文以某抽水蓄能电站压力钢管防腐涂层施工作业为例, 通过分析喷砂除锈、无气喷涂、内壁旋转喷涂、涂层固化等关键工序, 重点阐述工艺流程、设备选型、操作要点、关键技术参数, 构建符合水利工程严格要求的防腐涂层施工技术, 以期为满足水利压力钢管防腐涂层施工要求提供借鉴, 进而提高水利工程运行的可靠性以及稳定性, 为水利工程安全运行提供技术支撑。

**关键词** 压力钢管; 防腐涂层; 喷砂除锈; 无气喷涂; 内壁涂装

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.32.019

## 0 引言

水利水电工程项目开展阶段, 压力钢管施工通常采用直接开挖埋管方式进行敷设, 钢管外壁接触潮湿围岩, 内壁则受到高速水流冲刷, 这就造成钢管的腐蚀问题加剧。而压力钢管防腐涂层若采取常规的防护手段, 其施工质量不仅受到防腐材料性能影响, 还要受现场施工技术精准性和实施效果的干扰。目前在压力钢管防腐涂层施工阶段, 虽然很多工程均选择优质涂料进行施工, 但在防腐涂层施工环节, 由于喷砂粗糙度控制不到位、喷涂厚度控制不均匀, 这就使得钢管内壁涂装存在死角, 使得钢管的防腐效果下降。因此, 针对水利压力钢管防腐涂层施工技术展开研究, 通过掌握压力钢管防腐涂层施工关键技术细节, 以提升水利水电工程压力钢管防腐性能。

## 1 喷砂除锈施工技术

水利水电工程压力钢管防腐涂层施工过程中, 喷砂是防腐涂层施工的第一道工序, 其核心目标是清除氧化皮、锈蚀、焊渣等附着物, 并形成适宜的表面粗糙度以增强涂层附着力。施工采用移动式干式喷砂机, 配备 6 立方米储砂罐和  $\Phi 25$  毫米高压橡胶软管。磨料选用粒径 0.8~1.2 毫米的棱角状铜渣(替代石英砂, 减少硅尘危害), 经筛分后装入储罐。压缩空气由 10 立方米螺杆空压机提供, 工作压力稳定在 0.65 兆帕。喷砂工人佩戴供气式防护头盔, 手持  $\Phi 10$  毫米碳化钨喷嘴, 沿钢管轴向匀速移动, 喷射角度控制在 75 度左右, 距离管壁 150~200 毫米。对于外壁, 工人站在钢管两侧搭设的移动脚手架上, 从一端向另一端推进, 每

遍喷射覆盖宽度约 300 毫米, 搭接 50 毫米, 确保无遗漏。对于内壁, 工人进入管内, 采用“环向旋转、轴向推进”方式作业: 先围绕管周喷一圈, 再向前移动 200 毫米, 重复操作。焊缝区域因存在余高和飞溅, 需重点处理, 局部采用角磨机预打磨后再喷砂。喷砂完成后, 表面呈现均匀灰白色金属光泽, 无可见油脂、污垢、氧化皮。粗糙度经复制胶带法检测, 外壁控制在 50~75 微米, 内壁因水流冲刷要求更高, 控制在 75~100 微米。喷砂结束至底漆涂装间隔不超过 4 小时, 防止返锈<sup>[1]</sup>。

## 2 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 100 立方米/秒, 3 台机组, 单机单管布置, 单机容量 44 兆瓦, 总装机容量 132 兆瓦, 最大净头 160.3 米。压力钢管全长 2.02 千米, 管径 4~6 米, 钢管采用 Q345R、Q370R, 壁厚由 18~40 毫米不等。钢管内壁喷锌厚度 120 微米, 环氧封闭底漆 20 微米, 改性耐磨环氧面漆 160 微米, 内壁共计 300 微米; 钢管外壁采用无溶剂刚性聚氨酯厚 600 微米。鉴于工程地质环境复杂、服役条件严格, 对压力钢管防腐涂层的附着力、耐磨性、耐水性及耐候性提出极高要求, 设计采用“底漆+中间漆+面漆”三层涂装体系, 涂层使用寿命设计值不低于 50 年。

## 3 水利水电工程压力钢管防腐涂层施工技术分析

### 3.1 外壁涂层无气喷涂施工技术

外壁涂装在钢管吊装前于地面完成, 采用高压无气喷涂工艺, 该工艺具有施工效率高、涂层膜厚均匀的显著优势。具体施工要求及流程按以下三方面执行:

1. 施工前期准备与设备参数设定。外壁涂层施工选用Graco XHD 750型无气喷涂机,该设备最大工作压力可达25兆帕,施工时配备0.43毫米口径喷嘴以保障喷涂效果。涂料制备方面,外壁无溶剂刚性聚氨酯涂料,采用机械搅拌方式搅拌5分钟后,静置熟化30分钟,确保涂料充分混合反应。喷涂前的设备调试不可忽视,需用稀释剂彻底清洗喷涂管路,同时排除管路内空气,防止喷涂过程中出现气泡等缺陷影响涂层质量<sup>[2]</sup>。

2. 核心施工工艺与操作规范。水利水电压力钢管防腐涂层施工环节需要明确关键技术参数,确保喷枪和钢管表面垂直,且喷涂距离300~400毫米、喷枪移动速度0.5米/秒、喷幅宽度250毫米,相邻喷幅保持1/3搭接宽度以防存在漏喷现象。为避免涂层流淌,单节钢管选择分区域喷涂方式,先喷涂下半圆,喷涂完成后钢管翻身后再喷涂上半圆。钢管防腐涂层施工按照底漆、中间漆、面漆顺序逐步进行,确保无溶剂刚性聚氨酯涂层干膜厚度达到600微米。此外,三道涂层需要保证无雨、无尘、通风条件良好,施工环境温度15~30℃、相对湿度80%以下以保证防腐涂层喷涂施工环节不受影响。

3. 质量检测与后期养护要求。水利水电工程压力钢管防腐涂层喷涂环节需要落实各项施工质量控制措施,现场施工环节由工作人员操控湿膜测厚仪检测涂层厚度。如果发现有位置涂层厚度未能达到技术标准,则及时进行补喷处理;每一道涂层喷涂完成后使用强光手电斜照检查涂层表面,需要将涂层表面的流挂、针孔等缺陷及时去除。而在钢管表面防腐涂层喷涂结束后且经过7天固化,固化期间钢管存放在遮雨棚内防止暴晒或淋雨,否则涂层固化效果不足而影响钢管防腐涂层施工效果。

### 3.2 内壁涂层施工技术

1. 水平管段人工背负喷涂作业。水利水电工程钢管施工阶段,针对水平管段进行涂装时,由工作人员采用背负式喷涂方式完成钢管的防腐涂层喷涂施工。在具体喷涂作业环节,工作人员进入钢管内部背负Graco Ultra Max II型小型无气喷涂机,手持加长喷杆进行喷涂作业。喷枪前部安装有环形反光镜,以便喷涂作业过程中能够及时了解喷涂轨迹和覆盖情况。上述所有喷涂材料均选择使用无溶剂环氧耐磨性涂料,材料指标如表1所示,现场按照规定比例混合后适用期为4小时左右。喷涂作业环节由工作人员沿着管道轴线缓慢向后退,并且均匀左右摆动喷枪以确保管道环向全面覆盖。喷涂作业环节每次推进1米距离完成两遍喷涂,

湿膜厚度为600~650微米,能够保证最终干膜完成后其厚度达到500微米以上<sup>[3]</sup>。

表1 无溶剂环氧耐磨性涂料指标

指标名称	指标要求
适用期(25℃)	≥4小时
湿膜厚度	600~650微米
干膜厚度	≥500微米
耐磨性(Taber磨耗)	≤50毫克
附着力(拉开法)	≥5兆帕
耐盐水性(3.5%NaCl, 720小时)	无起泡、无脱落

2. 斜坡段机械牵引喷涂小车应用。对于坡度达45度的斜坡段,因人员无法稳定站立,项目团队研发并应用了专用“内壁喷涂小车”。该小车由不锈钢框架、承重滚轮、涂料缓冲桶及可调喷枪支架构成,整体结构紧凑,适配6.2米内径钢管。小车通过地面卷扬机牵引,在管内沿轴线匀速移动,进速度设定为0.3米/分钟。喷枪固定于小车前端,操作人员在管端通过控制面板同步启停喷涂。喷涂压力稳定在18兆帕,实现连续、均匀、无死角的自动化涂装,有效解决了陡坡段人工操作困难的问题。

3. 内施工现场壁涂装组织与过程保障措施。为保障壁涂装连续高效推进,现场实行三班倒作业制度,每班配置4名作业人员:1人负责喷涂操作或设备监控,1人专职照明与通风管理,1人值守涂料输送系统,1人实时记录施工参数。施工现场全程配置防爆型轴流风机,每30分钟强制换气一次,确保空气流通,防止涂料挥发物积聚。每段涂装完成后,待涂层表干,立即使用工业内窥镜对加劲环背面、焊缝根部等隐蔽区域进行检查,发现漏涂或膜厚不足部位,及时采用手持喷枪或毛刷进行局部补涂,确保内壁防腐层完整、均匀、无缺陷<sup>[4]</sup>。

### 3.3 特殊部位处理技术

1. 焊缝与热影响区精细化预涂。焊缝区域因存在余高、咬边及微小凹坑,常规喷涂难以保证涂料充分润湿。施工人员在喷砂除锈完成后、正式喷涂前,立即使用软毛刷蘸取经稀释的环氧底漆,对焊缝及两侧各50毫米,范围进行手工预涂。预涂动作轻柔而均匀,确保涂料渗入所有微观缝隙。正式无气喷涂时,操作人员在焊缝上方适当减缓喷枪移动速度,使该区域膜厚略高于母材,补偿因表面不平整导致的干膜减薄,有效避免早期点蚀。

2. 法兰与加劲环死角部位专项处理。法兰密封面

严禁涂漆，施工前采用高粘性耐溶剂胶带严密遮蔽，边缘压实，防止涂料渗入。喷涂结束后 30 分钟内及时揭除胶带，避免胶残留。加劲环与管壁连接处形成 90 度内角，属于典型喷涂死角。对此，工人改用Φ2 毫米，小口径弯头喷嘴，将喷枪贴近缝隙，以低压力（约 10 兆帕）短距喷涂；对于极狭窄区域，则直接采用毛刷蘸取同体系涂料进行点涂补强。每完成一道涂层，立即使用手持式反光镜或工业内窥镜检查内角、背面等隐蔽部位，确认无漏涂、无气泡后方可进入下道工序<sup>[5]</sup>。

3. 现场组焊焊缝。水利水电工程施工时，当压力钢管管节在现场完成组对焊接后，新焊缝以及热影响区需要进行防腐层的恢复处理。现场施工环节由工作人员进行焊缝作业区域的局部喷砂，通常选择使用便携式喷砂罐将表面处理达到 2.5 级，确保钢管表面粗糙度和原管壁一致。而后由喷涂作业人员按照涂层体系逐一完成手工补涂作业：底漆预涂→中间层→面层，每一层防腐涂层施工时间间隔时间达到要求，防腐涂层补涂区域边缘向外延伸 100 毫米，并使用砂纸打磨成 30 度斜坡，确保新旧涂层达到平滑过渡的要求<sup>[6]</sup>。

#### 3.4 涂层固化与养护技术

1. 外壁涂层环境适应性养护措施。水利水电工程钢管施工阶段，当外壁防腐涂层在地面涂装完成后，需要保持自然条件下完成固化，并且禁止极端天气条件对涂层的性能造成不利影响。夏季环境施工阳光照射下造成涂层表面迅速结膜，而内部溶剂没有及时挥发出现针孔、附着力下降等缺陷问题<sup>[7]</sup>。基于该问题，由施工人员在钢管从表面 1 米以上距离搭设遮阳网，能够遮蔽阳光照射且保持空气流通。冬季环境温度在 10 ℃以下时，导致环氧类涂料交联反应减缓甚至停滞而引起固化时间延长。这时需要在钢管周边搭设全封闭的保温棚，棚内安装防爆暖风机，使其温度在 10 ℃以上并监测温度变化，以保证涂层固化效果达到要求。

2. 内壁涂层封闭空间通风与静置管理。水利水电工程钢管施工中，当内壁涂层喷涂完成后需立刻开启强制通风系统，以保证封闭空间通风效果达到要求。具体操作阶段，由施工人员在管口位置安装大功率防爆轴流风机，持续送风 48 小时，能够使残留溶剂或反应副产物排出，以防因为密闭空间引发涂层固化不良或者气泡滞留。同时，通风操作中使用防水帆布和密封条进行管道两端管口封闭处理，并且进入到静置养护期，在之后 7 天内禁止任何人进入管道行走踩踏，也不能在管口堆放设备或材料，防止未完全固化的涂层导致机械损伤而影响涂层效果。本项目施工中每日进行封闭状态检查，保证养护环境具备稳定性<sup>[8]</sup>。

3. 无溶剂涂料固化特性与工期衔接控制。虽然钢管内壁采用无溶剂环氧涂料，不含有挥发性有机物，表干速度较快，但要完全交联还需要留有足够时间。因此，在现场施工时采用硬度测试方式跟踪固化流程，具体如下：第 3 天铅笔硬度达到 2H，第 7 天达到 3H 以上，即可判定其涂层表面具备抗刮擦能力。并且在水利水电压力钢管防腐涂层现场施工中，针对钢管吊装、运输、后续安装作业时需落实涂层状态检查，确保涂层养护期结束后指标合格，方可进行后续操作。

#### 4 结语

水利水电工程压力钢管防腐涂层施工对提高管道性能、延长使用寿命有积极作用，需要严格落实防腐涂层施工工艺方案，并对各环节进行质量监督检测。根据防腐涂层施工要求优化现场施工工艺方案，通过优化喷砂工艺、引入内壁喷涂小车、强化特殊位置处理等手段，能够有效保证大直径压力钢管防腐涂层施工质量合格。未来，先进科学技术发展速度不断加快，在水利水电工程钢管施工时，可将自动爬行喷涂机器人、在线膜厚监测等技术应用到实践中，使压力钢管防腐涂层施工精度、效率得到全面提升，满足水利水电工程压力钢管防腐涂层施工标准，这对水利水电工程事业发展和进步有积极作用。

#### 参考文献：

- [1] 王治波, 吴加友, 杨继平, 等. .3PE 防腐钢管管端涂层车削质量的影响因素及控制方法 [J]. 焊管, 2022, 45(02): 53-56.
- [2] 马俊俊, 刘云, 毕宗岳, 等. 耐高温内防腐涂层钢管的壁面减阻应用 [J]. 热加工工艺, 2023, 52(10): 78-80.
- [3] 闫军南, 陈佳培, 吴嘉妮, 等. 工程环境温湿度对钢管防腐涂层黏结力检测结果的影响 [J]. 水利科学与寒区工程, 2024, 07(08): 123-125.
- [4] 闫林森, 焦振峰, 胡建飞, 等. 直焊缝钢管 3LPE 防腐涂层厚度分析及控制 [J]. 全面腐蚀控制, 2022, 36(10): 85-88.
- [5] 徐美奇, 李武, 侯文和. 深层岩盐矿卤水输送管线防腐技术及应用 [J]. 中国氯碱, 2025(04): 22-26, 64.
- [6] 罗顺杰, 李兆恒, 张君禄, 等. 水利工程环氧树脂防腐涂层研究进展 [J]. 广东轻工职业技术学院学报, 2024, 23(03): 7-11.
- [7] 李江江, 汪杰, 丁立群, 等. 石墨烯防腐涂料在水利水电工程环境中的性能研究 [J]. 合成材料老化与应用, 2022, 51(01): 13-15.
- [8] 张泽辉, 朱翊宇, 陶拥政, 等. 老通扬运河钢坝闸防腐涂层耐久性试验 [J]. 江苏水利, 2020(08): 49-53, 57.