

水利工程大口径 PCCP 管道施工关键技术与质量控制

朱方超

黄河水电工程建设有限公司 河南 郑州 450000

摘要：水利工程大口径 PCCP 管道施工融合了预应力混凝土、钢筒与高强钢丝的复合优势，具有抗压强度高、抗渗性能强、耐久性优异等特点，广泛应用于长距离输水、城市供水及工业流体输送领域。其施工关键技术涵盖沟槽开挖、管道吊装、接口密封及回填压实等环节，需通过精准控制管道椭圆度、保护层完整性、橡胶圈压缩量及压实度等参数，确保施工质量。本文系统梳理了 PCCP 管道施工的核心技术与质控要点，为水利工程管道施工提供理论支持与实践指导，助力行业向智能化、绿色化方向发展。

关键词：水利工程；大口径 PCCP 管道；施工关键技术；质量控制

引言：随着我国水利基础设施建设的加速推进，大口径 PCCP 管道因其独特的结构优势与经济性，成为长距离输水工程的首选管材。其由钢筒、预应力钢丝及混凝土保护层复合而成，兼具钢管的抗渗性与混凝土管的耐久性，可承受高内压与复杂地质条件。然而，PCCP 管道施工涉及多工序协同作业，技术要求高、质量风险大，尤其在管道安装、接口密封及回填压实等环节，任何偏差均可能导致渗漏、沉降或结构失效，威胁工程安全。因此，系统研究 PCCP 管道施工关键技术，建立全流程质量控制体系，对提升水利工程可靠性、延长管道使用寿命具有重要意义。

1 大口径 PCCP 管道施工关键技术

1.1 材料与设备准备

在 PCCP 管道安装工程中，材料与设备准备是保障施工质量与效率的基础环节，需从管道本体、连接配件、施工机械及辅助设施四方面进行系统性管控。（1）管道验收需严格核出厂证明文件完整性，包括原材料检测报告、生产过程质量控制记录及成品合格证，确保管道生产全程符合设计规范。（2）橡胶密封圈作为管道连接的关键部件，其材质需符合设计要求，优先选用耐老化、抗撕裂的三元乙丙橡胶或丁基橡胶，硬度控制在 60 ± 5 Shore A，确保在长期水压（最高 1.6MPa）及温差作用下不发生硬化或龟裂。（3）施工机械选型需结合管道规格（DN1200-DN4000）、施工场地及工艺要求综合确定^[1]。大口径管道吊装需选用起重能力匹配的履带吊（主臂长 42m，额定起重量 200t）或龙门吊，吊点间距严格按设计要求布置，确保吊装过程管道弯曲应力不超过允许值；在狭窄场地或深基坑作业时，可选用汽车吊

配合可调节支腿加固，提高设备灵活性；过河段施工需配备抓斗式挖泥船进行基槽开挖，并配置泥浆泵进行排泥，槽底平整度需控制在 $\pm 50\text{mm}$ 以内。（4）施工道路修建需提前规划，主干道宽度不小于 6m，采用 20cm 厚碎石垫层 + 20cm 厚 C25 混凝土硬化，转弯半径满足大型车辆调头需求；采用内拉法安装时，需配备专用内拉装置，包括高强度拉杆、可调式支座及液压千斤顶，拉杆材质选用 40Cr 合金钢，屈服强度 $\geq 785\text{MPa}$ ，确保安装过程中管道接口受力均匀，避免局部应力集中导致密封失效。

1.2 管道安装技术

（1）沟槽开挖需采用机械与人工协同的分层作业模式，首先由挖掘机按设计深度进行初步开挖，预留 20-30cm 保护层由人工修整，确保基底平整度偏差控制在 $\pm 20\text{mm}$ 以内，避免超挖破坏地基承载力。边坡坡比需根据地质条件动态调整，软土地层需按 1:1.5-1:2 放缓坡比，并增设支护措施——钢板桩通过液压振动锤打入至设计深度，形成连续挡土墙，有效隔离土体防止塌方。竹排支护则适用于浅层开挖，通过 $\phi 100\text{mm}$ 竹竿密集排列并横向绑扎加固，增强边坡稳定性。（2）管道吊装与就位需根据管道规格与场地条件制定专项方案，陆地大口径管道采用双机抬吊法，通过两台 200t 履带吊协同作业，主吊点位于管道重心上方 1.5m 处，辅吊点距管端 1/3 管长处，同步起升至离地 0.5m 后调整姿态，确保管道轴线与沟槽中心线偏差 $\leq 50\text{mm}$ 。水上管道安装则利用拖船运输，通过浮力减少吊装负荷，采用 4 点捆绑式吊具，单点载荷不超过额定起重量的 80%。吊装过程中严禁穿心吊装，必须使用兜身吊带或专用尼龙吊具，避免局部

应力集中导致管道开裂^[2]。管道轴线与高程控制需通过全站仪与水准仪实时监测,每节管道安装后需复测管顶高程,偏差控制在 $\pm 10\text{mm}$ 以内,确保整体线形符合设计路由要求。(3)承插口连接与密封是管道安装的关键工序,橡胶圈安装前需用高压水枪清理管口杂物,再均匀涂抹水基润滑剂,采用 $\varphi 20\text{mm}$ 钢棒辅助定位,确保橡胶圈准确嵌入承口环形槽内且无扭曲。承插口间隙需严格控制,控制在 $25\sim 35\text{mm}$ 范围内,间隙过小易导致橡胶圈挤压破损,间隙过大则影响密封效果。(4)管道安装完成后需进行接缝处理,外缝采用1:2水泥砂浆分层抹压,每层厚度 $\leq 10\text{mm}$,表面收光后覆盖塑料薄膜养护7天;内缝使用双组份聚硫密封胶填充,采用专用压胶枪从底部向上均匀注入,确保密封胶与管壁粘结密实,形成连续防水屏障。

1.3 回填与压实技术

实际工程中需结合三次打压试验构建全流程管控体系,确保管道在回填过程中及完成后具备足够的抗外载能力与水密性。第一次打压试验在管道对口完成后立即进行,重点检验单处接口的密封可靠性。此时需对每一处承插口连接部位实施水压试验,试验压力设定为管道设计工作压力,通过缓慢注水排除接口内空气后封闭排气阀,维持恒压状态持续观测。第二次打压试验在管道安装累积完成三节后实施,形成对已安装管道接缝的二次验证机制。此时需对首节管道的承插口进行重复打压,试验方法与首次相同,但需额外关注管道轴向位移与接口错台情况。回填作业需在第三次打压试验合格后开展,此时管道已形成连续受力体系,需严格控制回填材料与压实工艺^[3]。回填料应选用级配良好的砂砾石或中粗砂,避免使用腐殖土或冻土等不良材料,填筑时需分层对称进行,每层厚度控制在三百毫米以内,通过小型振动压路机与人工夯实相结合的方式,确保管道两侧压实度同步提升。当回填至管顶五十厘米高度时,需暂停施工进行第三次打压试验,此阶段管道已承受部分回填土压力,试验可验证接口在复合荷载作用下的密封耐久性,同时检测管身是否因不均匀沉降产生结构性裂缝。三次打压均合格后方可继续回填至设计标高,最终压实度需满足管道设计抗浮要求与地面承载需求。

1.4 分段通水试验

试验需在管道安装完成、镇墩浇筑及回填土压实度达到设计要求后进行,通过模拟实际运行工况,对管道逐段施加设计压力下的水流,全面检测其承载能力与密封性能。通水试验需遵循分级加压、稳压观测的原则,初始阶段以低压缓慢注水,排除管道内空气,避免气

锤效应对管道造成冲击损伤,待排气阀持续出水且无气泡时关闭排气阀,逐步升至设计压力的相应比例进行预试验。预试验阶段重点观测管道沿线是否存在异常声响、地面沉降或接口渗水现象,若发现渗漏需立即降压处理,通过涂抹快凝水泥或安装哈夫节等方式进行临时封堵,待修复后重新进行预试验。预试验合格后,将压力升至设计压力进行主试验,保持恒压状态持续观测,期间需加密巡查频次,重点监测弯头、三通及地质复杂段等应力集中区域的变形情况,同时记录压力表与流量计读数,分析压力降是否符合规范要求。

2 大口径 PCCP 管道施工质量控制要点

2.1 水平方向偏差控制

PCCP 管道单节长度通常达5米,若水平偏差累积超标,会导致管道轴线偏离设计路由,引发局部应力集中甚至接口脱节。施工时需采用“双控法”,一方面通过全站仪实时监测管道中心线位置,每安装一节管道后复测其轴线与设计中心线的偏移量,确保单节偏差 $\leq 20\text{mm}$,累计偏差 $\leq 50\text{mm}$;另一方面利用激光导向系统在沟槽内投射基准线,配合人工拉线校核,形成双重校验机制^[4]。在弯道段施工时,需根据曲率半径计算每节管道的允许偏转角度,通过调整承插口安装方向实现平滑过渡,避免出现“折线”现象。此外,水平偏差控制还需与沟槽开挖质量联动,确保槽底宽度满足管道安装及校正需求,避免因空间不足导致强行纠偏破坏管道结构。

2.2 垂直方向(高程)偏差控制

垂直方向(高程)偏差控制直接关系到管道排水坡度与接口密封效果,PCCP 管道多采用重力流设计,对坡度精度要求极高,高程偏差过大会造成局部积水或流速突变,加速管道磨损并增加爆管风险。施工时需建立“三级测量体系”,首先在沟槽开挖阶段使用水准仪控制槽底标高,每10米设置一个高程控制点,偏差控制在 $\pm 10\text{mm}$ 以内。其次在管道安装阶段采用精密水准仪(精度 $\pm 0.3\text{mm/km}$)监测管顶高程,结合设计坡度计算每节管道的安装标高,通过可调式支墩或楔形木垫进行微调。最后在镇墩浇筑前进行终验,确保管道高程符合设计要求。对于穿越河流或地质复杂段的管道,需考虑地基沉降影响,适当预留预拱度,并通过沉降观测桩定期监测,及时调整管道高程。垂直偏差控制还需与接口密封工艺协同,确保橡胶圈在压缩状态下仍能保持设计压缩率,避免因高程偏差导致密封失效。

2.3 管道安装间隙控制

PCCP 管道采用承插口连接方式,橡胶圈的压缩量

直接影响密封效果，而安装间隙则是决定压缩量的核心参数。间隙过小会导致橡胶圈过度挤压，加速老化并可能引发破裂；间隙过大则会使橡胶圈压缩不足，无法形成有效密封^[5]。施工时需根据管道规格、橡胶圈硬度及设计压缩率（通常为 20%-25%）计算理论间隙值，并通过专用量具（如塞尺、游标卡尺）进行实测。安装过程中需采用“三步定位法”：第一步在管口清洁后涂抹润滑剂，减少摩擦阻力；第二步使用钢棒或专用导杆将橡胶圈准确嵌入承口环形槽，确保无扭曲或翻转；第三步通过拉线或激光测距仪控制承插口间隙，偏差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内。对于大口径管道，还需在接口两侧设置临时支撑，防止安装过程中因自重导致间隙变化。间隙控制还需与温度补偿措施配合，在高温季节安装时适当增大间隙，预留橡胶圈热胀冷缩空间，避免低温环境下接口受拉破坏。

2.4 成品保护与验收

（1）管道内部清洁需在安装完成后立即开展，首先通过高压水枪或专用清管器对管道内壁进行全面冲洗，清除施工过程中残留的焊渣、砂石、泥浆等杂物，避免异物堆积影响水流顺畅或划伤管道内壁。随后采用消毒剂对管道进行浸泡或循环冲洗，杀灭可能存在的细菌、藻类等微生物，确保水质符合卫生标准，尤其针对饮用水管道工程，消毒处理需严格遵循相关规范要求，防止微生物滋生引发水质污染。清洁完成后需对管道进行封闭管理，防止二次污染，直至正式通水运行。（2）水压试验是验证管道整体强度与严密性的核心工序，需分段进行以降低风险并精准定位问题。试验前需检查管道固定支墩、排气阀及排水阀等附属设施的安装质量，确保试验过程中管道无位移或泄漏风险。试验时先向管道内缓慢注水，排出内部空气后封闭两端，逐步升压至设计

压力，重点检测管道焊缝、承插口及法兰连接等薄弱部位的渗漏情况，同时观察压力表读数变化，若压力降符合规范要求且无异常渗漏，则判定强度试验合格。最后进行严密性试验，通过恒压观察管道变形及渗漏量，确保管道在长期运行中具备足够的密封性能。（3）竣工资料整理与归档是工程交付的重要依据，需涵盖设计文件、施工记录、材料合格证明、检测报告及试验数据等全流程资料。所有资料需经审核后分类归档，便于后期运维查阅，为管道全生命周期管理提供基础支撑。

结语

综上所述，水利工程大口径 PCCP 管道施工是一项系统性工程，其成功实施依赖于技术、管理与创新的深度融合。通过强化沟槽稳定性控制、规范管道吊装与接口密封工艺，可显著提升施工效率与质量。未来，随着材料科学、信息技术与施工工艺的持续进步，PCCP 管道施工将向模块化、标准化、智能化方向演进，进一步降低全生命周期成本，推动水利行业高质量发展。

参考文献

- [1] 马鲸清, 王娜. 水利工程管道施工技术与管理策略[J]. 建筑与装饰, 2025, (6): 169-171.
- [2] 潘延. 长距离大口径 PCCP 管在水利供水工程施工中的技术研究[J]. 水上安全, 2025, (15): 174-176.
- [3] 江佩轩. 大口径 PCCP 管道水压试验监测方法在水利工程中的应用研究[J]. 水上安全, 2025, (21): 131-133.
- [4] 刘建平, 何飞, 刘星宏. 湿陷性黄土地区大口径 PCCP 管道对接施工质量控制技术研究[J]. 安徽建筑, 2022, 29(4): 42-43.
- [5] 张柯勋, 刘欢, 毕金凤. 水利工程大直径 PCCP 管自动对接安装技术与安全控制要点[J]. 云南水力发电, 2023, 39(8): 20-23.