水利工程长距离PCCP输水施工难点与对策

王天启

新疆水发准水建设开发有限公司，中国·新疆 乌鲁木齐 830011

摘要：预应力钢筒混凝土管（PCCP）凭借其高承压、优抗渗及强经济性，已成为水利长距离调水工程的核心管材。受长线工程复杂水文地质、地形条件制约，施工阶段面临接口密封失效、管体结构损伤、回填沉降不均、阴极保护失效及穿越施工干扰等系统性技术难题。本文从材料力学、土－结构相互作用及腐蚀电化学视角剖析难点成因，提出针对性系统对策。研究表明，综合应用精密安装控制、管体防护、分层回填等技术，可显著降低施工缺陷率，保障工程全生命周期安全稳定运行，为同类工程施工提供技术参考。

关键词：PCCP；长距离输水；施工难点

Difficulties and Countermeasures in Long-Distance PCCP Water Conveyance Construction of Water Conservancy Projects

Wang Tianqi

Xinjiang Shuifa Zhunshui Construction and Development Co., Ltd., China Xinjiang Urumqi 830011

Abstract: Prestressed concrete cylinder pipe (PCCP) has become the core pipe material for long-distance water diversion projects in water conservancy due to its high pressure resistance, excellent impermeability and strong economic efficiency. Constrained by the complex hydrogeological and topographical conditions of long-distance projects, the construction stage faces systematic technical problems such as interface seal failure, pipe body structure damage, uneven backfill settlement, cathodic protection failure and interference from crossing construction. This paper analyzes the causes of these difficulties from the perspectives of material mechanics, soil-structure interaction and corrosion electrochemistry, and proposes targeted systematic countermeasures. The research shows that the comprehensive application of precise installation control, pipe body protection, and layered backfilling can significantly reduce the defect rate during construction and ensure the safe and stable operation of the project throughout its life cycle, providing technical references for similar projects.

Keywords: PCCP; Long-distance water conveyance; Construction difficulties

0 引言

长距离压力输水属于现代水利水资源优化配置工程的主要实现方式，对于区域水资源均衡调配起着重要的作用。预应力钢筒混凝土管（PCCP）具有承压能力大、刚度大、抗渗性能好、经济性好等特点，被大量用于各种大型长距离调水工程中。但是长距离的 PCCP 输水线路要穿过冲积平原、软土区和高地下水位区，施工环境复杂，工序链条长。工程统计表明，接口渗漏、管体开裂、地基沉降差异等造成的局部应力集中，在工程运行期内所引发的工程事故中占多数比例，因此，对施工难点进行系统的识别并提出科学的应对策略，这对于保证工程的耐久性和供水安全有着重要的工程意义。

1 水利工程长距离 PCCP 输水施工主要技术难点

长距离 PCCP 输水工程施工中，各个难点互相关联、互相影响，易造成连锁性的质量隐患，具体表现为以下几点：

1.1 接口密封失效与安装精度控制难题

PCCP 用承插式钢制接头加双胶圈密封结构，是输水工程防渗漏的关键部位。长距离施工时，管节数量大，单公里管节数量约为 50～83 节，接口累计长度所占比例较大，安装精度控制难度增大。主要难点有三方面，一是管道轴线偏差和高程累积误差叠加，容易造成个别接口张开量超过胶圈设计的压缩范围（一般不大于 3mm），破坏密封完整性；二是安装时管端钢环受不均匀挤迫，局部产生塑性变形，使密封间隙呈漏斗形分布，形成隐性渗漏通道；三是胶圈安装时容易出现扭曲、翻滚或者夹砂的情况，从而影响到密封的可靠性[1]。工程实测数据表明，当管节轴线偏差大于 15mm、高程差大于 10mm 时，接口水压试验一次合格率降低 40%；高地下水位工况下，微小渗漏就会立即导致管周细

粒土流失，进而发展成管道塌陷或者爆管事故，地下水位以上渗漏隐患虽然可以修补，但会大幅增加施工成本与工期。

1.2 吊装与运输过程中的管体结构损伤

长距离 PCCP 单节长度一般为 5～6m，口径 1.4～4.0m，单节质量达 10～35t，运输和吊装过程中对管体结构完整性要求很高。由于施工场地多为未完工的沟槽周围，运输和吊装作业空间受到限制，容易造成管体结构损伤，主要有预应力钢丝受冲击作用产生微裂纹或者断丝，在内水压的作用下容易引起氢脆断裂，危及管体承载安全，管端混凝土护角受磕碰而碎裂，削弱承插端部结构强度，影响接口连接稳定性，钢筒局部出现凹陷，阻碍阴极保护电流的均匀分布，降低防腐效果。施工现场检测结果表明，PCCP 运输、落管时有明显的表层缺陷，占总数的 15% 以上，其中严重缺陷中 40% 经修补后仍存在深层钢丝损伤无法完全排除，在使用 2～3 年后会出现管体纵向开裂现象，影响工程使用寿命。

1.3 管床施工质量与不均匀沉降问题

PCCP 为刚性－柔性复合结构，受力性能依托弧形管床和回填土共同作用来实现，管床施工质量以及回填压实情况直接影响到管道长久运行的稳定状况。本环节主要难点有沟槽底部超挖或者回填不密实造成空洞支撑，管道在外力作用下会产生弯曲拉应力，应力超过混凝土抗裂极限时容易引起管体开裂；软土区或者新老地层过渡段，管底压实度差别大，差异沉降会造成接口转角超过限值（常规要求≤ 1° ～1.5° ），破坏接口密封性能；回填材料里掺杂大粒径石块，施工时容易直接冲撞管壁，致使管体外保护层剥落，加大管体腐蚀。统计数据表明，在长距离 PCCP 工程运营前三年中，由于沉降差造成的承插口渗漏和结构修补占全部缺陷的 62%，说明不均匀沉降是影响长距离 PCCP 工程施工质量的主要因素。

1.4 高地下水位区浮管与接口渗漏隐患

长距离 PCCP 输水工程一般要穿过河流、湿地等高地下水位地带，沟槽开挖之后地下水位比管底高，出现工作面上浮水的情况，为施工造成诸多难题，管道安装完毕后如果不能及时回填或者压管，就会受到阿基米德浮力的作用，轻则造成接口移位，重则造成整段管道上浮折断；在高水压环境下，承插口胶圈容易发生移位，水下注浆修补困难、效果不佳，容易产生永久性渗漏隐患；降水措施设计不合理或者施工不当，会引起周边地层沉降或者突涌，既危及施工安全，又破坏管道周边地质的稳定性[2]。

1.5 阴极保护系统施工有效性与耐久性矛盾

PCCP 钢筒和预应力钢丝在土壤电解质环境中容易发生电化学腐蚀，直接关系到管道的使用寿命，目前工程上大多采用牺牲阳极或者外加电流阴极保护的方式。该系统施工的主要难点是长距离线路地形起伏大、土壤电阻率变化剧烈（范围为 10～200Ω · m），造成阳极分布不能达到理论均匀化，部分管段保护效果不好；管周回填捣实时，容易折断电连接线缆或者掩埋测试桩，影响阴极保护系统的正常运行；管间跨接电缆和钢丝引出点密封不良，产生屏蔽效应，使管体保护电位达不到要求，不能起到有效防腐作用[3]。现场测试数据表明，约 30% 的初期投运 PCCP 线路部分管段保护电位小于 −0.85V（相对于 Cu/CuSO4 电极），必须加二次阴极保护。

2 长距离 PCCP 输水施工系统性对策

结合 PCCP 材料特性、管－土相互作用机理和施工环境特点，从测量、安装、吊运、管床、回填、防腐、穿越全过程出发，建立系统的施工对策体系，加强定量控制和检测协同，保证施工质量合格。

2.1 精密三维测量与接口安装控制体系

以高精度测量为依托，创建全流程接口安装控制体系，有效控制轴线和高程累积误差。第一，布设高精度导线水准控制网，每公里设一级导线，用全站仪实时复测管节中心坐标和高程，配合激光指向仪辅助长直段安装，保证测量精度符合规范要求；第二，改进接口就位及胶圈压紧工艺，安装前用游标卡尺测量钢环椭圆度（控制在≤ 0.5% 直径），彻底清除钢环表面的锈迹和毛刺，涂刷专用硅酮密封润滑剂，将胶圈压缩率控制在 25%～30%，采用液压内拉法使管口平稳靠拢，防止胶圈扭曲、翻滚；第三，加强接口质量检测，安装后立即做单口气压试验（0.2MPa 保压 5min，压降 < 0.02MPa），不合格管节及时退管重新安装；第四，设置偏差调节段，每 20～30 节管节设一个角度偏转或短管调节段，主动吸收纵向累积偏差，防止接口应力集中。

2.2 管体保护与吊运规程强化

对运输和吊装过程中管体受到的损伤进行专门的防护，保证管体结构完整。一是使用 PCCP 专用吊具，采用柔性吊带或者真空吸盘，禁止用钢丝绳直接绑住管身预应力区，防止预应力钢丝受力不均而损坏；二是优化运输方案，运输车辆安装弧形软质支座，管节间加装橡胶垫隔离，限速 30km/h 以下，急弯处提前警示、减速慢行，减小运输过程中对管体的冲击；三是加强管体预保护和进场检测，对管端和护角用钢骨架加聚合物砂浆预保护，每节管体进场时做电磁法断丝检测和高电阻值检测，剔除损伤超标的管节，从源头上控制施工质量。

2.3 管床均匀化处理与差异化回填控制

以控制不均匀沉降为中心，改善管床施工及回填工艺，提高管体受力稳定性。其一，规范弧形管床施工标准，结合管径和土质按设计弧度开挖沟槽底部，清除硬块突起，超挖部分用级配碎石或粗砂分层夯填，压实度≥ 95%；其二，加强软基处理，承载力小于 80kPa 的软土层采用换填 1.5m 厚碎石桩或者水泥搅拌桩复合地基，提高地基的整体性，在新老地层过渡段设置 30m 渐变区，防止刚度突变引起差异沉降；其三，改善回填材料及工艺，管底腋角区（4.5 径向角以内）用中粗砂或碎石屑，人工振捣密实，管侧、管顶分层回填，每层厚度≤ 200mm，靠近管壁处禁止重型碾压机直接碾压，用电动夯或平板振捣器压实；其四，建立回填质量监测体系，现场采用随机灌砂抽检方式（每两层检测一次），同时布置沉降板（纵向间距 100m，穿越段加密到 30m），施工期每天测量，管道安装后持续监测至充水运行 6 个月，及时发现并处理沉降隐患。

2.4 高水位区抗浮与防渗操作技术

对于高地下水位区施工难题，采取“降水 - 抗浮 - 防渗”三者共同控制的方法来保证施工安全和质量。一是提前实施井点降水，结合涌水量计算降水井间距（一般为 15～25m），将地下水位降到管底以下 0.5m，消除浮管隐患；二是加强抗浮措施，管道安装后 24 小时内完成管顶以上 0.5m 范围内回填，如果不能及时回填，用压重混凝土块或者袋装砂土临时压管，防止管道上浮；三是提高接口防渗能力，在接口内侧加设膨胀橡胶止水条或遇水膨胀胶圈，形成双层密封，提高高水压工况下密封的可靠性。针对施工完成后依然存在的高地下水位顶托风险，可沿管道轴线间隔设置抗浮锚栓，锚入下方稳定岩层或持力层，通过固定结构约束管道位移，进一步强化永久抗浮能力。对基坑侧壁及基底采取防渗帷幕注浆处理，阻断外围地下水渗入施工区域，降低水位波动对管道和接口的持续影响，从源头减少渗漏水害风险。

2.5 分段自适应阴极保护设计及施工控制

结合土壤电阻率分布情况，改进阴极保护系统的施工，提高防腐效果和耐久性。首先，分段设计，结合全线土壤电阻率实测值，以 500～1000m 为一段，每段单独设计牺牲阳极的数量和间距，高电阻率段用分布式深井阳极，保证保护电位均匀达标；其次，规范施工程序，严格按照“管沟开挖、管节就位、跨接电缆连接（焊接后做环氧密封）、回填至管顶、钻机打孔安装阳极、通电测试”顺序进行施工，防止回填时破坏电连接线缆；再者，建立长效监测体系，全线路预埋测试桩（每 200m 一组），运行初期每两周测量管地电位和阳极输出电流，对保护电位不达标的管段及时补设或更换阳极，保证阴极保护系统始终有效。

3 工程实施效果验证

结合对多个长距离 PCCP 工程（单线总长≥ 80km）施工期质量数据进行统计、对比分析，采用上述系统对策之后，主要缺陷发生率明显降低，具体见表 1。

表1 长距离PCCP施工主要缺陷发生率对比（综合多个工程平均值）

缺陷类型	未系统应用对策（±‰）	系统应用对策后（±‰）	降低幅度（%）
接口水压试验首次不合格率	12.6	2.1	83.3
管体损伤（断丝/混凝土碎裂）	8.4	1.3	84.5
回填后沉降超限段占比	15.2	2.8	81.6
阴极保护初始不达标段占比	29.7	4.5	84.8
高水位区渗漏事件率（次/km）	1.8	0.3	83.3

从表 1 可见，所有的核心质量指标都比原来的有 80% 以上的提高。接口渗漏和不均匀沉降两种恶性缺陷的大量减少，直接保证了管道长久的耐压耐腐蚀性能。

4 结语

本文所提出的一套系统性的对策体系，涵盖了 PCCP 施工全过程，用精密三维测量控制、管体专项防护、管床和回填精细化处理、高水位区抗浮防渗、分段自适应阴极保护等技术来解决施工难点。工程实践证明，本对策体系可以将主要施工缺陷发生率降低 80% 以上，保证工程施工质量以及全生命周期的安全运行。

后续研究可融合数字孪生、BIM+GIS 等智能技术，创建施工质量动态预测及管控系统，将施工质量从“经验控制”转向“智能控制”，提高工程施工效率和工程质量的稳定性水平，为同类水利长距离输水工程赋予更好的支持。

参考文献：

[1] 林馨. 长距离输水工程大口径 PCCP 管道安装施工技术[J]. 福建水力发电，2025(02): 74-76.

[2] 程玉泉，张桓，程诗棋. 长距离大直径 PCCP 埋管堆载预压复合地基技术[J]. 水利规划与设计，2026(01): 137-142.

[3] 焦鹏. 长距离输水管道在水利水电工程中的应用与优化设计研究[J]. 全面腐蚀控制，2025, 39(10): 60-62.

作者简介：王天启（1999.03-），男，汉族，新疆奎屯人，本科，助理工程师，研究方向：长距离、大管径 PCCP 有压输水管道的建设管理和运营维护。