

# 引水工程中管道防腐蚀施工技术研究

张 凯

山东省禹城市水利局 山东 禹城 251200

**【摘 要】**：引水工程中，管道防腐蚀是确保工程长期安全运行的关键环节。由于输水管道常处于复杂的地质和水化学环境中，腐蚀问题普遍存在，严重影响结构强度与使用寿命。本文以防腐蚀施工技术为研究核心，系统分析了引水工程中管道腐蚀的主要类型与机理，探讨了防腐蚀施工中涂层防护、阴极保护及复合防护等关键技术措施。研究指出，科学选择防腐材料、优化施工工艺及完善质量检测体系，是提高防护效果、降低维护成本的有效途径。通过工程实例的验证，综合防腐体系可显著延长管道服役周期，提升工程整体安全性与经济性，为类似水利工程的设计与施工提供技术参考。

**【关键词】**：引水工程；管道；防腐蚀；施工技术；防护体系

DOI:10.12417/2811-0528.26.02.014

引水工程作为水资源调配的重要基础设施，其运行安全高度依赖于管道系统的耐久性。长期的运行过程中，土壤环境、电化学反应及水质因素常导致管道产生不同程度的腐蚀破坏，不仅增加维修成本，也可能引发供水中断等严重后果。近年来，随着防腐材料与施工技术的进步，管道防护水平得到显著提升。不同环境下的腐蚀机理差异和施工条件复杂性，使防腐蚀施工仍面临技术挑战。对防腐蚀施工技术的系统研究，不仅有助于提升工程质量与安全水平，也为未来引水工程的可持续运行奠定坚实基础。

## 1 引水工程中管道腐蚀问题的现状与成因分析

引水工程作为水资源合理配置与输送的重要基础设施，其管道系统长期处于复杂的自然与人工环境中，极易受到多种腐蚀因素的共同作用。管道在埋地或半埋地状态下运行，土壤中含有丰富的水分、氧气以及溶解盐类和微生物，极易形成电化学腐蚀环境。同时，管道内的输水介质常伴随一定的矿化度和溶解气体，这些因素会对内壁造成化学侵蚀或电化学腐蚀。由于运行周期长、检修难度大，当腐蚀扩展到结构层时，极易导致渗漏、壁厚减薄甚至爆管，对工程安全构成严重威胁。尤其在山区或高含盐地区，引水管道的腐蚀速率更高，局部腐蚀现象突出，成为影响工程寿命与供水稳定性的主要隐患之一。

从腐蚀成因分析，材料性能、环境条件以及施工质量是影响管道耐久性的核心因素。普通钢管由于表面金属活性高，在缺乏有效防护层的情况下极易发生氧化反应；若土壤含水率高、酸碱度偏离中性或电阻率较低，腐蚀电位差增大，腐蚀速率明显上升。此外，焊缝部位常因金相组织不均、残余应力集中而成为腐蚀敏感区。内衬材料选择不当或施工工艺控制不足，也可能造成防护层剥落，暴露金属基体，引发点蚀或缝隙腐蚀。再加上地下杂散电流及电解质迁移的影响，局部腐蚀迅速扩展为全面腐蚀，严重削弱管道结构的完整性和承压能力。

在实际运行环境中，外部自然条件与人为因素的交互作用使腐蚀问题更具复杂性。气候变化导致地下水位波动，湿干交替区域腐蚀尤为活跃；地质条件差异导致土壤电阻率不均，形成电偶腐蚀；施工环节中若防腐层涂敷不均或检验环节疏漏，则为后期腐蚀埋下隐患。同时，长期运行中管道周围阴极保护系统若维护不当，保护电流衰减或分布不均，也会降低防护效果。综合来看，引水工程管道腐蚀问题并非单一技术问题，而是材料科学、电化学、地质环境及施工管理等多领域因素共同作用的结果，需要系统分析与科学防控。

## 2 引水管道常见腐蚀类型及其作用机制

引水管道在长期服役过程中受到多种腐蚀形态的综合影响，其腐蚀类型与作用机制与环境介质、金属结构特性及运行条件密切相关。埋地管道最为常见的是电化学腐蚀，在潮湿土壤和含盐环境中形成腐蚀电池，阳极区金属发生溶解，阴极区则发生氧还原反应，金属逐渐被腐蚀介质取代。若防护层存在破损，局部裸露区域成为电位差集中的点，极易出现点蚀现象。点蚀虽然范围有限，却能迅速穿透金属壁厚，形成泄漏通道。与之相伴的缝隙腐蚀多发生在管道连接部位、支撑结构或焊缝间隙内，当氧浓度差异形成局部电化学环境时，缝隙内溶液酸化，腐蚀速率迅速提升，腐蚀坑不断扩展。

在内壁腐蚀方面，输水介质中的溶解氧、二氧化碳及氯离子是主要的腐蚀介质。当水体酸碱度偏低时，钢铁材料表面的氧化膜被破坏，活化腐蚀反应增强。部分引水管道输送的水源含有较高矿化度或腐蚀性气体，形成化学腐蚀与电化学腐蚀的叠加效应，使腐蚀层结构疏松，难以形成稳定的钝化膜。此外，内衬材料与金属基体之间若存在微小剥离或气孔，会导致局部微环境中电解质富集，进而诱发孔蚀或晶间腐蚀。长期运行中，水流冲刷与泥沙磨损也会加剧内壁腐蚀，形成“流动加速腐蚀”现象。流体的湍动使金属表面的保护膜持续被破坏，裸露金属

与氧化物交替反应，使腐蚀更趋复杂。

外部腐蚀则表现为大气腐蚀、土壤腐蚀及杂散电流腐蚀的共同作用。大气腐蚀多见于暴露于空气中的地面段或阀门接口，受温度、湿度及污染物沉积影响，形成周期性结露与干燥交替的腐蚀环境。土壤腐蚀具有隐蔽性强、分布不均的特点，酸性或含盐土壤中电阻率低，电解质浓度高，促进腐蚀电流形成；而含有硫酸盐还原菌等微生物的地区，易发生微生物诱发腐蚀，其代谢产物破坏金属表面钝化膜，加速腐蚀进程。杂散电流腐蚀在城市引水工程中尤为突出，当地铁或电气化铁路运行时产生的电流通过土壤进入管道系统，形成强烈的阳极溶解反应，导致局部金属大量流失。不同腐蚀类型往往并非单独发生，而是在复杂环境中相互叠加、强化作用，改变金属组织结构与表面状态，使引水管道的腐蚀机理呈现出多元性与动态性。

### 3 引水工程管道防腐蚀施工关键技术与工艺优化

引水工程中管道防腐蚀施工的关键技术涉及材料选择、施工工艺控制及环境适应性处理等多个环节，其科学性直接决定了防护体系的完整性与耐久性。针对埋地钢质管道，表面预处理是整个防腐施工的基础环节。采用喷砂或抛丸清理工艺去除金属表面的氧化皮、油污和锈蚀产物，使钢材表面达到规定的粗糙度等级，有利于防腐涂层的附着力和密封性。在施工过程中应严格控制表面清洁度和干燥度，避免空气湿度或灰尘影响涂层固化质量。防腐涂料的配方需根据工程所在地的地质条件和输水介质特性确定，常用材料包括环氧煤沥青、聚乙烯防腐层及环氧粉末涂层，这些材料具有优良的耐酸碱性及电绝缘性能，可有效阻断腐蚀介质的渗透。

在工艺优化方面，防腐层的涂敷方式与厚度控制至关重要。自动化喷涂设备的应用能显著提升施工均匀性，避免人工操作造成的膜厚不均或针孔缺陷。多层结构的复合防护体系在复杂环境下表现出更高的抗渗性能，外层聚乙烯包覆可提高耐机械损伤能力，内层环氧底漆则提供优异的附着力与化学防护性能。焊接接头及弯头部位应采用专用补口工艺，确保热影响区与母材防护性能一致。阴极保护技术的合理配合也是施工中的关键环节，通过外加电流或牺牲阳极形式抑制金属电化学反应，形成完整的双重防护体系。施工中需对保护电位进行动态监测与调整，使其始终维持在有效防护区间，防止过度保护引起氢脆现象。

现场施工环境的适应性管理是防腐效果稳定的重要保证。高湿、高盐或低温地区的防腐施工应采取环境控制措施，如设置临时防护棚、采用加热固化技术或使用耐候型涂料，以保证防护层的固化性能和结合强度。质量检测环节贯穿全过程，常用检测手段包括火花检测、膜厚测定及附着力试验，通过无损

检测及时发现涂层缺陷并进行修复。为提升整体施工效率与可靠性，信息化管理手段被逐步引入防腐作业中，利用数字化记录 and 智能监测实现对施工参数的实时控制。通过对关键工艺节点的优化和质量闭环管理，能够显著提高防腐施工的安全性与持久性，为引水工程管道系统提供稳定的防护屏障。

### 4 综合防护体系在引水管道施工中的应用实践

综合防护体系在引水管道施工中的应用是实现长效防腐与结构稳定的重要技术途径，其核心在于将多种防护手段进行系统整合，从材料选择、结构设计到电化学保护与施工控制形成一体化防护模式。在工程实践中，综合防护体系通常由防腐涂层、阴极保护及外层防护结构共同构成。涂层作为第一道防线，通过高附着力和低渗透性的材料阻断腐蚀介质的接触；阴极保护作为第二道防线，利用电化学原理控制金属电位，抑制阳极溶解反应；外层防护结构则提供物理隔离与机械保护，防止施工及运行阶段的损伤。三者协同作用，可有效延长管道使用寿命，并在复杂环境下维持长期稳定的防护性能。

在实际施工中，综合防护体系的应用需要针对不同地质条件和运行环境进行针对性设计。山区引水工程中，由于地形复杂、土壤含水量大且电阻率低，采用三层结构的聚乙烯外防腐体系能显著提升抗渗与抗冲击能力。对于沿海或高盐地区的管道段，则应选用高性能环氧粉末与聚烯烃复合防护层，以增强抗氯离子渗透能力。阴极保护系统的布设应结合地质电阻率分布与管线长度进行优化，通过电位监测和电流分布调节，确保保护范围连续且电流密度均衡。部分工程引入了智能阴极保护系统，利用传感器实时监控电位变化，自动调节输出电流，提高系统响应精度与能效。对于穿越河流、隧道等高风险段落，常采用外包混凝土护层或复合玻璃钢结构，以增强抗外力能力并防止局部应力集中导致防腐层破损。

综合防护体系的施工组织与质量控制同样具有重要意义。各防护层间需保持良好兼容性，施工顺序应严格遵循设计要求，避免因工序交叉造成防护失效。防腐层施工完成后需进行全面检测，采用高压电火花检漏、膜厚测定及接地电阻测试等手段，确保涂层致密无缺陷。阴极保护系统的极化曲线测试与恒电位控制调试应在防腐层检测合格后实施，以防电化学干扰影响涂层性能。为提升施工管理水平，部分大型引水工程引入了数字化监测平台，对防护体系运行数据进行集中分析，实现防腐层状态可视化与维护决策智能化。通过这种系统化、可控化的防护体系应用，管道运行过程中的腐蚀速率得以显著降低，整体结构安全性与运行可靠性持续提升。

### 5 防腐施工质量控制与工程安全保障措施

防腐施工质量控制是确保引水工程安全运行的核心环

节,其技术管理贯穿于施工的各个阶段。防腐层施工前必须严格执行表面预处理标准,金属基体需达到规定的清洁度与粗糙度等级,以确保防护材料的附着性能。环境条件对施工质量影响显著,气温、湿度及风速等因素均需在控制范围内,防止涂层固化不完全或产生针孔、气泡等缺陷。施工过程中应建立全过程质量追踪制度,对材料批次、配比及施工参数进行实时记录与验证。现场监理应对喷涂厚度、层间间隔时间及固化效果进行抽检,以保证防腐体系连续致密,避免因工艺波动导致的保护性能下降。

检测与检验是防腐蚀施工质量控制的重要手段。常规检测包括涂层厚度测定、电火花检漏、附着力测试及耐介质性能检验。电火花检漏可发现细微裂纹或漏点,附着力测试则反映防腐层与基体的结合强度。对阴极保护系统的施工质量需进行极化电位检测和电流分布测试,确保防护电位均匀稳定。施工完成后应建立完整的质量档案,将检测结果、试验数据及防护层状态纳入长期监测系统,以便在运行期间进行动态评估与维护。对重点区域如焊缝、弯头和接口部位,应实施加密检测频率,并结合超声波或红外成像技术进行隐蔽缺陷识别,从而提高检测精度与可靠性。

## 参考文献:

- [1] 王志强.引水工程管道腐蚀机理与防护技术研究[J].水利科技与工程,2021,19(3):45-50.
- [2] 李春雷.管道防腐蚀施工质量控制技术探讨[J].水资源与水工程学报,2020,31(4):92-97.
- [3] 陈建民.阴极保护在长距离输水管道中的应用[J].腐蚀科学与防护技术,2023,41(6):68-73.
- [4] 赵海峰.防腐蚀复合体系在引水工程中的工程实践[J].给水排水,2022,48(5):112-116.
- [5] 郑彦军.输水管道防腐材料性能与施工工艺分析[J].工程建设与设计,2023,17(2):54-59.

在工程安全保障方面,防腐施工应与结构安全、运行监测及环境保护形成协调体系。施工现场需建立安全管理制度,对操作人员进行防腐技术与安全规范培训,严格控制高压喷涂、电气施工及阴极保护系统调试中的风险因素。运输与安装阶段应采取缓冲保护措施,避免机械碰撞造成涂层损伤。运行期内应实施定期巡检制度,通过电位监测、腐蚀速率测试和泄漏检测等手段掌握防护状态变化,及时采取修复措施。通过系统的质量控制与安全管理,防腐施工能够在引水工程中形成持续有效的防护屏障,保障管道系统的长期稳定运行。

## 6 结语

引水工程中的管道防腐蚀施工是确保输水系统长期安全与经济运行的重要环节。防腐蚀问题贯穿于材料选择、施工技术、环境控制与后期维护的全过程,其复杂性要求在设计与实施阶段形成系统化的技术思路。综合防护体系的应用与施工质量控制的强化,使防护层、电化学保护与检测手段实现协同效应,从而有效降低腐蚀速率、延长管道寿命。随着防腐材料性能的提升与施工工艺的智能化发展,防腐蚀技术正朝着高效、绿色与可持续方向演进,为水利工程建设提供更加坚实的技术支撑。