

建筑城市燃气管网腐蚀防护技术及其应用研究

杨艳荣

陕西天物建设工程有限公司, 陕西省西安市, 710000;

摘要: 建筑城市燃气管网在复杂土壤与建筑界面中长期运行, 腐蚀机理多源叠加, 失效后果具有突发性与外溢性。为构建面向高可靠的防护体系, 研究从机理、技术与治理三条线索展开, 以外防护与内环境控制为核心, 以阴极保护与杂散电流治理为支点, 以监测与完整性管理为闭环, 形成从材料选择、节点连接到运行维护的系统图谱。文稿提出基于风险分层的设计方法、可验证的施工与验收要点、面向运行期的监测与评估指标, 并给出数字化记录与审计的实现路径, 兼顾存量改造与分期切换, 力求在不增加过度冗余的前提下提升韧性与可恢复能力。

关键词: 燃气管网; 腐蚀防护; 阴极保护; 完整性管理; 数字化

DOI: 10.69979/3029-2727.25.07.075

引言

建筑城市燃气管网覆盖入户、立管、庭院与市政接驳等多场景, 受介质成分、温湿变化、土壤电化学条件与人员活动影响, 腐蚀路径呈现电化学、应力与微生物等多机制叠加。传统以材料加厚与经验性包覆的办法难以应对长周期与多接口环境, 现场还存在口径不一与记录缺失带来的治理断点。为获得更稳的安全边界, 需要把机理认识、工程技术与组织流程纳入同一坐标, 建立可度量、可追溯与可纠偏的措施序列。研究以分层分区的思路配置措施, 把外防护与电化学手段与内环境控制耦合, 把检测与维护与应急接续起来, 使目标、资源与动作在时间与空间上保持一致。本文据此构造机理与技术与治理的三层框架, 提出实施路径与检查要点, 使防护水平在运行中持续收敛。

1 腐蚀机理与风险图谱

1.1 城市燃气管网的腐蚀场景与作用机理

城市燃气管网在土壤、空气与结构构件之间跨界运行, 金属表面处于含水与含盐微环境, 阳极与阴极在表面微区内自发形成。差异充氧会在覆土厚薄、涂层缺陷与潮湿区产生电池效应, 坑蚀沿涂层破损向下扩展, 涂层屏蔽一旦与细缝并存将形成难以检测的隐蔽通道^[1]。季节性地下水位与融冻循环改变含水率与含氧量, 腐蚀速率随温度与导电性变化出现多峰轨迹。

杂散电流由电气化交通与邻近接地系统引入, 经接触电阻较小的区段进入管体并在远端泄放, 电流离开点形成快速金属溶解。接地极与纵向钢构件会放大通道效应, 未绝缘跨接与临时搭设进一步降低回路电阻。焊缝与冷弯部位因组织与残余应力差异更易触发裂纹, 压力

波动与温差循环叠加易诱发表层剥落与微动磨损。

微生物在缺氧与富营养区形成生物膜, 代谢产物改变局部酸碱度与氧化还原电位, 促发点蚀与缝隙腐蚀。埋置与外露交替处容易出现冷凝, 阴阳面切换导致位错累积, 长时段后沿界面产生浅裂。穿墙与穿板位置若套管与封堵不协调, 水汽与应力集中会在密封周缘形成弱区。内壁腐蚀与介质洁净度相关, 水汽与含硫成分提高导电性并削弱保护膜, 停输与复输阶段的湿干交替改变膜的完整度。非金属管材虽不发生电化学溶解, 仍可能因紫外、热氧与应力松弛产生性能衰减, 连接金属性件成为薄弱点。综合各因素, 可将场景划分为土壤电化学主导、应力环境主导与界面耦合三类, 分别对应坑蚀快速化、裂纹萌生与密封性能下降三条主导路径, 后续防护与监测据此配置差异化手段。涂层与阴极保护在脱粘区可能出现屏蔽效应, 间隙内氧浓度与电阻分布不均, 常规电位读数难以反映真实状态, 需要以定向定位与开挖抽检交叉验证。

1.2 失效模式、后果等级与安全边界

失效以渗漏与破裂为主要形态, 前者多起源于微孔与密封件退化, 后者常见于薄弱段的坑蚀穿孔与应力集中的裂纹扩展。后果与压力等级、人员密度与环境约束相关, 可据泄漏速率、点位通风与火源分布构建分级矩阵。与人员密集空间相连的立管与入户管道需要更高的安全余量, 庭院与屋外敷设则更依赖快速切断与分区限流^[2]。

安全边界的设定依赖材料强度储备、涂层完整度与电位保护裕度三项核心量, 并辅以形变监测与位移吸收能力。边界不是单一数值, 而是由结构冗余、工艺稳定与监测频次共同定义的区域。路径控制可通过隔离接头、

阀组与阻火装置设置多层屏障，将可能的能量与介质在最短路径内限制。风险图谱以管段、节点与外部耦合为单元，记录电位、涂层节段质量、阴极保护配置与杂散源距离。图谱随运行数据与施工改动滚动校正，当新设备并网或基坑靠近时更新权重并触发复核。把高后果小概率与中后果高频率区分，在资源有限的条件下优先固化关键节点与薄弱区段，形成兼顾即时处置与长期韧性的安全边界。评估方法可引入分层保护思路，将预防、检测与缓解三类措施串联，预防负责降低触发概率，检测负责缩短暴露时间，缓解负责限制影响范围。验收阶段以外观、假期检测与电位基线三项作为移交门槛，运行阶段以电位合格率、缺陷修复时效与泄漏处置时长三项作为核心评价。对与人员活动密切的空间设定更严格的通风要求与报警灵敏度，夜间与假期保持最低值守。应急响应以分区隔离与定向排放为基本动作，信息记录以时间线与位置坐标为标准格式，便于复盘与责任确认。安全边界还体现在信息透明与培训强度，值守人员对异常信号的理解与处置能力决定暴露时间，组织能力与技术能力相互放大，边界随之收敛或放大。

2 防护技术体系与工程设计

2.1 外防护、阴极保护与杂散电流治理

外防护以表面处理、底层防锈、主体涂覆与现场补口组成序列，基体清洁度与粗糙度决定附着，涂层的致密性与柔韧性决定耐久。表面处理需达到规定等级并确保干燥，盐分与油污残留会显著降低寿命。包覆选型兼顾耐土壤介质、抗剥离与修补友好度，直管与弯头在应力与热胀冷缩差异处配置过渡带，防止拉裂。施工完成后以电火花检测定位针孔与细裂，并按工艺手册执行修补^[3]。

阴极保护通过牺牲阳极或外加电流将管体电位移入受控区，测试桩与极化曲线用于校核保护裕度，过保护会引发涂层起泡与氢脆，需要与涂层阻抗匹配。阳极床分布与土壤电阻率相关，应避免与外部接地密集区耦合。跨越高压输电线路与电气化轨道时关注感应与泄流路径，设置去耦与排流装置并开展干扰测试。绝缘与跨接的配置以电连续与电隔离两项目标平衡，连续用于电位均衡，隔离用于断开不利回路。通过周期测量电位与电流密度趋势，结合涂层缺陷定位与复测，完成对外防护与电化学手段的协同调优。土方回填选择与压实方式与涂层寿命密切相关，尖锐颗粒与含盐含酸土体会破坏屏障与改变电化学环境，宜采用缓冲垫层与排水构造降低滞水。穿越套管两端避免密封死腔，预留呼吸通道并

设置防渗结构。测试桩布设在代表性土壤与结构节点附近，便于长期追踪，整流器与阳极床的运行参数纳入台账并按周期校核。保护效果评估结合开挖验证，选择代表性缺陷段进行局部剥离检查，以证实电化学与涂层的耦合是否达到预期。对交流干扰较强的区段增设接地网或并联阻抗，限制电位摆动幅度。涂层固化时间与环境条件应按工艺表执行，低温高湿会显著降低成膜质量，必要时设置临时遮蔽与加热。验收文件包含检验批记录、检测照片与坐标索引，便于长期追溯。

2.2 内环境控制、材料匹配与节点工艺

内壁腐蚀可通过介质净化与干燥、冷凝治理与过滤实现抑制，调压与计量前后设置排污口与集液部件，减少水汽与颗粒在低流速区沉积。对含硫与含酸成分的场景采用兼容的密封材料与内涂配方，避免化学相容性不良导致的局部退化。坡度与放空点的布置影响积液与积气的分布，设计应确保检修窗口与排放路径直观可达^[4]。

材料匹配遵循力学与电化学一致原则，埋地钢管与立管在转接处采用过渡件，非金属管段的金属承插件与阀门需具备外防护与密封寿命的同等级。节点工艺以焊接与熔接质量为核心，设置工艺评定与样板段，控制热输入与冷却速度，减少残余应力与热影响区脆性。可拆卸节点采用卡压与螺纹锁定，密封圈硬度与形状与沟槽匹配，并在温度循环条件下验证回弹性能。墙体穿越与设备接入处配合套管与封堵，防止渗水与电偶作用叠加。通过限制接头密度、优化走向与减少现场冷弯，让内外防护在节点处保持连续。阀门井与调压箱易受积水与腐蚀性沉积物影响，结构与排水需要形成通畅路径，并内固定件选用耐蚀材料并保持电隔离。调压过程中因焦耳效应引起的降温可能触发结霜，仪表脉冲管与放空口应防堵与防冻。对异种金属接触部位采用绝缘垫片与护套，降低电偶差。施工质量记录包括焊口编号、无损检测结果与热处理记录，并与图纸坐标建立一一对应关系。试压介质洁净并控制升压与保压节拍，试后及时干燥与置换，防止残留形成隐患。标识与色带沿线设置，便于维护人员识别走向与节点。对密闭空间与井室设置通风换气，检修前进行可燃气体与氧含量检测，作业许可与监护同步到位。资料移交包含节点清单与扭矩记录与试压曲线，后续维护据此快速定位。

3 监测、完整性与全生命周期治理

3.1 监测技术与完整性评估方法

监测体系由电位、电流与涂层缺陷定位组成，埋地段采用间隔电位测量与定向电位梯度定位识别屏蔽与

破损,必要时以成像手段验证连续性。外露段结合外观巡查与厚度测量建立退化曲线,对支架与固定点同步记录位移与振动,识别应力集中。在线检漏与巡检以气体感知、声学与红外成像互为补充,夜间与低风速窗口提高分辨率,对管井与地下室采用置换与通风提升安全余量。

完整性评估以数据贯通为前提,将施工记录、材料批次、试压与阴极保护参数汇总到台账,以分区打分与阈值预警呈现风险分布。腐蚀试片与电阻探针提供速率与趋势,停输检修窗口用于开挖验证,结果回写模型修正权重。评估输出维护优先级与窗口建议,重大作业前进行校核,并把事后表现纳入复盘。在运维节奏上设置巡检、复核与专项治理三层节拍,避免长期观察无动作或短期动作缺复盘两种极端。腐蚀试片的布设与更换周期与土壤与保护等级相配,取回后结合金属损失与表面形貌判读主导机制。对关键区段设定策略阈值,当速率或电位偏离进入警戒带,先调整电化学参数,再复核涂层与回填环境,必要时开挖或增设过渡构件。分级处置清单明确从观察到行动的最短路径,避免长期告警而无动作。风险排序采用后果与概率双维度,叠加可达性与施工影响系数,得到更贴近现场的优先级。残余风险以解释性记录并进入年度评估,在预算与窗口条件成熟时消化。对数据跨越系统的共享设定权限与脱敏规则,既保障协同又保护隐私与安全。

3.2 实施路径、组织保障与数字化支撑

实施路径遵循标准先行与样板引路,编制细化的表面处理、涂覆、补口与测试作业卡,工序完成后按清单留痕。招采文件在技术条款中写明防护指标、试验方法与验收口径,并与支付节点联动,减少口头约定。施工期把电绝缘、测试桩位置与跨接设置同步纳入验收,移交期附带图纸、照片与电位基线,便于后续追踪。运营期以分级巡检、年度评估与专项治理闭环推进,对重复异常的部位实施设计复核与工艺改良。

数字化支撑以主数据与空间底图为基础,管段、节点与监测点以统一编号关联记录,移动端采集实时回传,台账自动校核口径与时效。看板呈现风险地图与趋势曲线,异常触发提醒与工单,形成从发现到处置的透明链路。培训与演练以短课与剧本完成知识转移,合规审计与绩效考核接入同一底座,促使组织在规则内完成高质

量循环。经验以知识卡形式沉淀,供下一项目直接调用,形成可复制的改进路径。数字化体系与地理底图与三维模型联动,变更以版本链记录,任何新增与拆改均通过定位与照片予以固化。移动终端支持离线模式,网络受限时缓存并在恢复后同步,系统以时间戳校验。能力建设以岗位画像为起点,制定培育路径与准入门槛,外包队伍按表现动态分级。承包商管理与履约表现挂钩,将隐患记录与后续投标关联。组织保障围绕角色清晰与权责对等展开,监理与第三方检测独立于承包单位,现场设置见证与停检点,对关键工序实施旁站。供应链准入要求材料与设备具备一致的合格证与批次可追溯,抽检不合格时触发成批复验。绩效激励与安全质量挂钩,将缺陷闭环率与台账完整度纳入评价。应急体系通过演练校核响应链路,备品备件与工具箱按区域分布以缩短修复时间。生命周期成本评估进入年度预算,使维护与改良获得稳定资源。

4 结语

腐蚀防护的成效取决于机理认知的准确、工程手段的匹配与组织治理的稳定。建筑城市燃气管网需要在外防护、阴极保护与杂散电流治理之间形成协调结构,在内环境控制与节点工艺上维持一致边界,在监测与完整性评估中实现数据贯通。标准化作业与数字化记录让事实可见与责任可追,分级治理与复盘机制让节奏保持有序。通过持续迭代与滚动校正,系统能够在扰动与老化条件下保持可控,并在运行中把风险转化为可管理的残差,安全边界与环境绩效随时间收敛到更优水平。

参考文献

- [1] 徐亮, 韩萌, 袁页. 聚乙烯管材在城市燃气管网腐蚀防护中的应用与实践 [J]. 化工设计通讯, 2024, 50(10): 34-36.
- [2] 李聪, 徐子烜, 庄育锋, 等. 燃气管网外腐蚀事故 DBN 模型 [J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(09): 227-236. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2023.09.2314.
- [3] 崔政, 尹华伟, 陈星, 等. 城镇燃气埋地管网外腐蚀的风险研究 [J]. 山东化工, 2022, 51(14): 182-185. DOI: 10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2022.14.019.
- [4] 罗涛, 高观玲, 田晓江, 等. 中低压燃气管网的腐蚀泄漏规律及关键影响因素 [J]. 腐蚀与防护, 2023, 44(4): 104-106+118.