

埋地管道阀门防腐技术与应用研究

何新华

宁波永享铜管道有限公司 浙江 宁波 315135

摘要:埋地管道阀门因电化学、化学及微生物腐蚀长期处于严峻环境中,阀杆密封、法兰连接及焊缝等部位尤为敏感。防腐涂层与阴极保护构成主要防护手段,耐蚀合金及非金属材料从本体层面提升抗蚀能力,波纹管密封与绝缘法兰等技术针对薄弱环节实施精准防护。涂层完整性检测、腐蚀速率监测与阴极保护评价技术为防腐质量提供量化依据,基于土壤腐蚀性等级的涂层与阴极保护联合方案及运行期定期检测修复策略,可有效延长阀门服役寿命。

关键词:埋地管道;阀门防腐技术;综合应用

引言:埋地管道阀门作为管网关键控制部件,长期处于土壤电化学、化学及微生物腐蚀的复合作用下,阀杆密封、法兰连接及焊缝等特殊部位因结构复杂而成为腐蚀高发区域,严重影响管网安全运行。当前防腐技术涵盖涂层保护、阴极保护、耐蚀材料及专项密封防护等多种手段,同时需要配合检测评价与运行维护策略形成完整防护体系。围绕埋地阀门腐蚀机理、常用防腐技术、特殊部位专项防护及综合应用方案展开研究,对提升阀门服役寿命具有重要工程价值。

1 埋地管道阀门腐蚀机理与特殊腐蚀部位分析

1.1 土壤腐蚀环境特征

土壤的理化性质直接决定其对金属材料的腐蚀倾向。酸碱度影响金属表面氧化膜的稳定性,盐分含量提高土壤电导率从而加速电化学过程。土壤含水率通过改变离子迁移速率影响腐蚀强度,过高的含水率会限制氧气扩散,而适中的含水率既能维持电解质条件又能保证氧气供应,从而形成最恶劣的腐蚀环境。含氧量分布不均会引发氧浓差电池效应,导致局部剧烈腐蚀。土壤中微生物活动通过代谢产物改变局部酸碱度和氧化还原电位,某些细菌参与硫酸盐还原反应,产生硫化物加速金属破坏,另一些细菌则通过形成生物膜改变金属表面状态,影响腐蚀进程。

1.2 埋地阀门腐蚀类型

埋地阀门主要经历电化学腐蚀、化学腐蚀和微生物腐蚀三类作用。电化学腐蚀是主导形式,阀门金属与土壤电解质构成原电池,不同金属部位因电位差异形成阳极区和阴极区,阳极区金属溶解流失。化学腐蚀由阀门表面与土壤中非电解质物质直接发生氧化还原反应造成,产物通常为金属氧化物或硫化物,反应过程不产生电流。微生物腐蚀并非独立机制,而是通过微生物代谢活动改变金属表面化学环境从而诱发或加速电化学腐蚀,例如微

生物呼吸消耗氧气制造缺氧区域,或其代谢产物攻击金属表面保护膜,使腐蚀在原本相对惰性的区域持续发展。

1.3 阀门腐蚀的特殊部位分析

阀体与阀盖连接处因存在微小缝隙且密封材料与金属形成异种材料接触,成为腐蚀敏感区域。缝隙内容易滞留水分和污染物形成局部电解质池,同时氧气的匮乏与外部富氧区构成浓差电池,加速缝隙内部金属溶解。阀杆密封区域在阀门启闭过程中反复受到摩擦,表面保护层被破坏形成新鲜金属面,同时密封填料与阀杆之间的微小间隙容易积聚腐蚀介质,形成闭塞电池环境。法兰螺栓连接面存在多个金属部件紧密贴合形成的缝隙,螺栓预紧力导致应力分布不均,应力较高的区域电位较低成为阳极,同时不同材料接触引发电偶效应^[1]。阀体内腔滞留区因介质流速极低,固体颗粒和腐蚀性物质在此沉降积聚,形成局部高浓度腐蚀介质环境,长期的物质累积使该区域持续处于高腐蚀风险状态。

2 埋地管道阀门常用防腐技术

2.1 防腐涂层技术

环氧树脂涂层由环氧树脂基料、固化剂及辅助填料混合而成,施工前需对阀门表面进行除油除锈处理以达到规定的清洁度,然后采用刷涂或喷涂方式将涂料均匀覆盖于金属表面,经室温或加热固化反应后形成致密坚硬且附着力优良的膜层。聚氨酯涂层具备突出的耐化学介质性能和抗机械损伤能力,其配套体系通常包括用于增强与金属基体结合力的底涂层以及抵御土壤环境中水分离子侵蚀的面涂层,两层之间形成牢固的化学键结合以满足长期埋地防护需求。聚乙烯热缩带经加热后径向收缩紧密贴合于阀门不规则外形表面,熔结环氧粉末通过静电喷涂吸附于预热阀门表面然后加热熔融流平再固化成膜,两种技术均适用于焊缝及异形部位的连续覆盖防护。底漆—中间漆—面漆复合涂层结构中底漆负责与

金属基体产生牢固附着并提供初步缓蚀作用,中间漆增加涂层总厚度以延长腐蚀介质渗透路径,面漆抵御外部土壤环境的侵蚀并赋予涂层一定的抗划伤能力,三层协同构建完整的物理屏障。

2.2 阴极保护技术

牺牲阳极阴极保护依靠电位更负的金属材料作为阳极在土壤电解质中优先溶解从而为阀门提供保护电流,阳极选型需依据阀门所处环境的电阻率确定合适的合金成分与规格,布置方式采用围绕阀门均匀分布或集中埋设于阀门附近以形成均匀的阴极电位分布。外加电流阴极保护通过外部直流电源将电流经辅助阳极导入土壤再流向阀门从而使阀门电位负移至保护范围,地床设计包括辅助阳极的材料选择埋设深度排列间距及阳极周围的回填材料,参数控制涉及调节输出电流电压使阀门电位维持在保护准则规定范围内且不发生极化不足或过保护现象^[2]。阀门阴极保护的特殊问题在于阀杆与阀体之间因结构原因可能存在电气不连续性导致保护电流难以均匀到达阀杆表面,同时阀门开关操作中活动部件与固定部件的接触状态不断改变会干扰电流通路,需要在阴极保护系统中设置相应的电流分流与调节措施确保各部件均获得有效保护。

2.3 阀门材料本体防腐技术

耐蚀合金材料通过调整金属化学成分提高自身抵抗腐蚀的能力,不锈钢依靠表面形成的致密氧化膜在多数土壤环境中保持稳定,镍基合金在含氯离子等苛刻腐蚀条件下仍能维持优良的耐蚀性能而不发生局部点蚀或晶间腐蚀破坏。非金属阀门材料从根本上避免了金属腐蚀的电化学过程,内衬环氧树脂球墨铸铁以球墨铸铁为结构骨架提供足够的力学强度并在内外表面覆盖环氧树脂层隔绝腐蚀介质,玻璃钢阀门整体由树脂基体与玻璃纤维增强材料复合而成完全不涉及金属腐蚀问题。金属表面处理技术通过改善阀门表层物理化学状态提升防护效果,喷砂除锈清除表面氧化皮与污染物并产生均匀的锚纹深度利于后续涂层机械锚固,化学转化膜在金属表面生成难溶化合物层提供临时防护或作为涂层的良好基底,热喷涂将耐蚀材料加热至熔融或半熔融状态后高速喷射至阀门表面形成具有一定厚度的覆盖层。

3 阀门密封、连接及焊缝部位专项防腐技术

3.1 阀杆密封区域防腐

填料函防腐密封结构设计通过优化填料函内腔形状与尺寸,减少介质积聚空间,选用耐化学腐蚀的填料材料填充阀杆与填料函壁之间的环状间隙,配合合理的填料压盖紧固方式形成长效密封屏障,阻断腐蚀介质沿阀

杆向外渗漏的通道。波纹管密封替代填料密封的防腐优势体现在波纹管将阀杆与阀门内介质完全隔离,介质无法接触阀杆表面,从而彻底消除了填料与阀杆相对运动产生的磨损腐蚀以及填料老化导致的密封失效问题,波纹管两端分别与阀杆和阀盖密封连接构成全封闭结构。阀杆表面镀层与涂层防护是在阀杆工作表面沉积具有高硬度和耐蚀性的金属镀层或涂覆有机涂层,提高阀杆抵抗腐蚀介质侵蚀的能力,同时镀层与涂层需要具备良好的抗微动磨损性能以适应阀门启闭过程中阀杆的往复运动,防止局部破损引发点蚀。

3.2 法兰连接面及紧固件防腐

法兰面涂层保护是在法兰密封面以外的法兰外表面及法兰侧面涂覆防腐涂料,阻隔土壤中的水分和腐蚀性离子接触法兰金属基体,绝缘法兰设置通过在法兰对接面间安装绝缘垫片并在螺栓上套用绝缘套筒,切断管道与阀门之间的电气通路,防止杂散电流腐蚀和不同金属材料间的电偶腐蚀。螺栓及紧固件的防腐处理包括对螺栓、螺母及垫片进行表面镀覆或涂覆耐蚀层以增强其自身抗腐蚀能力,在安装装配时向螺纹部位涂抹防腐蚀密封胶或润滑脂填充螺纹间隙排除水分和空气,对于重要部位的紧固件还可采用整体防护罩将螺栓头部与螺母完全包裹,使其与外部埋地环境隔绝。

3.3 焊缝及热影响区防腐

焊接热影响区的腐蚀敏感性分析指出焊接高温循环使热影响区金属发生组织转变,晶粒粗大且碳化物沿晶界析出,同时焊接残余应力集中于该区域,导致热影响区电位相对于母材发生负移,在腐蚀介质中成为优先溶解的阳极区域从而加速局部腐蚀。焊后补口防腐工艺与涂层修复是在阀门焊接完成并经表面清理后,对焊缝及其两侧热影响区涂刷与母管防腐层相容的补口涂料或缠绕热收缩带,确保焊缝区域的防腐层厚度与性能不低于主体防腐层,实现防腐层的连续覆盖^[3]。焊缝无损检测与防腐质量的关联控制强调在实施防腐补口施工之前必须完成焊缝无损检测并确认焊缝内部无裂纹气孔等缺陷,因为这些缺陷不仅削弱焊缝结构强度,更会成为腐蚀介质穿透防腐层直接接触金属的通道,造成防腐层下的隐蔽性腐蚀。

4 埋地阀门防腐检测评价与综合应用方案

4.1 防腐检测与评价技术

涂层完整性检测通过三种方法协同评估。电火花检测利用高压探头在涂层表面扫描,当遇到针孔或破损时产生电火花从而精确定位缺陷位置。附着力拉拔试验采用专用仪器将试柱粘固于涂层表面施加垂直拉力,测量

涂层从基体脱离所需的力值以评价结合强度。厚度测量使用磁性或涡流原理的测厚仪在涂层表面多点采集数据,判断厚度是否达到设计要求并发现厚度不均区域。腐蚀速率监测中挂片法将加工成规定尺寸的金属试片与阀门同置于土壤环境,经过一定周期后取出称量失重计算平均腐蚀速率。电阻探针法利用金属元件因腐蚀导致截面积减小从而电阻值升高的原理,通过连续监测电阻变化实时反映腐蚀进程。智能传感器集成多种敏感元件埋设于阀门附近,自动采集温度湿度氧化还原电位等参数并通过数据传输系统远程发送至分析中心^[4]。阴极保护效果评价中瞬间断电法通过迅速中断保护电流并测量阀门电位相对于参比电极的极化衰减判断保护程度是否充足。

4.2 防腐方案设计与施工质量控制

土壤腐蚀性等级依据电阻率酸碱度氧化还原电位氯离子含量硫酸盐含量及平均含水率等多项指标进行综合评定,将土壤划分为弱腐蚀中腐蚀强腐蚀以及特强腐蚀等不同等级,各等级对应不同的防腐方案最低要求,强腐蚀及以上等级必须采用涂层与阴极保护联合防护。涂层与阴极保护的组合策略中涂层承担主要隔离功能,依靠其高电阻特性阻断大部分腐蚀介质与金属接触,阴极保护负责弥补涂层的微观缺陷与机械损伤部位暴露的金属基体,两者互补可显著降低保护电流密度需求并延长阀门整体使用寿命。表面处理过程控制包括清除油脂氧化皮及原有涂层至规定的清洁度等级同时获得均匀的锚纹深度。涂装环境控制要求施工期间温度相对湿度及露点温度保持在涂料技术说明书允许范围内,遇大风雨雪及高粉尘条件应停止作业。

4.3 运行期防腐维护策略

定期检测周期的确定依据阀门所处土壤腐蚀性等级防腐层类型及等级阴极保护系统的配置以及阀门在管网中的重要程度综合制定。强腐蚀土壤中的阀门应每六个月至一年进行一次全面检测,中腐蚀土壤可延长至每两

年一次,弱腐蚀土壤每三至五年检测一次。新建阀门投入运行后第一年内应加密检测以验证防腐方案的实际效果并及时发现施工缺陷。防腐层局部损伤的修复方法首先清除损伤区域周围已松动或失效的涂层,对暴露的金属基体进行局部表面清理达到规定的清洁度等级,按照原涂层配套体系的要求涂刷补口底漆中间漆及面漆或缠绕补口用热收缩带,修复层须与原有涂层搭接一定宽度,完成后检测厚度附着力及电火花无漏点^[5]。阀门启闭操作对防腐层的影响表现为阀杆的往复旋转运动和阀体在操作力矩作用下的弹性变形,这些机械作用会使附着于运动及变形部位表面的涂层产生微裂纹剥落及疲劳破坏。

结束语:埋地管道阀门防腐是保障管网安全运行的关键环节。土壤电化学、化学及微生物腐蚀的复合作用使阀杆密封、法兰连接及焊缝等特殊部位面临严峻腐蚀威胁。涂层保护与阴极保护联合应用构成核心防护体系,耐蚀合金、非金属材料及波纹管密封等专项技术针对薄弱环节实施精准防护,涂层完整性检测与腐蚀速率监测为防腐质量提供量化支撑。基于土壤腐蚀性等级制定综合防腐方案并严格控制施工质量,配合运行期定期检测与局部修复策略,可有效延长阀门服役寿命,降低管网运维成本。

参考文献:

- [1]高炳翔,张晓峰.城镇燃气管道防腐技术与维护管理[J].石化技术,2024,31(12):331-332.
- [2]夏冰峰,郝蕴华,刘艳华.长输油气管道和城镇燃气管道定向钻穿越设计[J].煤气与热力,2024,44(10):8-9+15.
- [3]单武迪.城镇燃气管道防腐技术与维护管理[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(05):173-175.
- [4]吴必龙.石油机械阀门防腐蚀技术研究与应用[J].中国设备工程,2024(23):212-214.
- [5]杨卫东.市政冷热水管道焊接、防腐保温及阀门安装技术[J].安装,2023(1):20-22.