

定向钻穿越管道防腐层质量评价与阴保有效性研究

张 雄¹ 郑 刚¹ 吴 骏¹ 李林林² 熊 伟¹

(1. 四川德源兴能科技股份有限公司, 四川 成都 610040)

(2. 国家管网集团储气库有限责任公司, 河南 濮阳 457000)

摘要: 为解决定向钻穿越管道防腐层在复杂地质回拖中易受损、质量难量化评价及计算阴保电流需用量, 本研究建立了定向钻穿越段防腐层施工质量控制与馈电试验测试评价体系。采用馈电试验, 通过现场测量电位、土壤电阻率等, 计算并修正面电阻率和面电导率, 结合阴极保护电流密度分级进行综合评价, 评价防腐层质量。该评价方法为定向钻穿越管道防腐层质量量化及阴极保护优化提供技术支撑, 对降低管道腐蚀风险、指导运维决策具有重要工程应用价值。

关键词: 定向钻穿越; 防腐层质量评价; 馈电试验; 面电导率; 阴极保护

中图分类号: TE988 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 030-0094-03

Quality Assessment of Coating for Directionally Drilled Crossing Pipelines and Study on Cathodic Protection Effectiveness

Zhang Xiong¹, Zheng Gang¹, Wu Jun¹, Li Linlin², Xiong Wei¹

(1. Sichuan Deyuan Xingneng Technology Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610040, China)

(2. National Pipe Network Group Energy Storage Technology Company Zhongyuan Gas Storage Co., Ltd., Puyang Henan 457000, China)

Abstract: To address the issues of coating damage during complex geological dragging of directionally drilled crossing pipelines, the difficulty in quantitatively evaluating coating quality, and the need to calculate cathodic protection current requirements, this study established a quality control system for coating construction and an evaluation system based on feed-in tests. By conducting feed-in tests, on-site measurements of potential and soil resistivity were performed to calculate and revise surface resistivity and surface conductivity. Combined with a graded assessment of cathodic protection current density, the coating quality was comprehensively evaluated. This evaluation method provides technical support for quantifying the coating quality of directionally drilled crossing pipelines and optimizing cathodic protection, offering significant engineering application value for reducing pipeline corrosion risks and guiding operation and maintenance decisions.

Keywords: directional drilling crossing; coating quality assessment; feed-in test; surface conductivity; cathodic protection

随着国内“十五五”管道超级工程规划等一系列国家重大战略提出, 形成“气网密如织、氢管连东西、油脉通南北”的地下能源动脉。传统明挖施工管道建设对地表破坏极大, 尤其在环境敏感区域或障碍物下方施工时, 定向钻技术(HDD)脱颖而出, 2002年国内西气东输一线首次大规模应用HDD技术来穿越长江、黄河等大型水域。但定向钻穿越管道深埋地下, 防腐层在长距离的复杂地质环境中回拖, 因高强度机械应力或弯曲应力产生破损, 质量难以量化评价, 腐蚀性介质一旦直接接触管体金属, 形成点蚀或大面积腐蚀, 将会威胁运行安全。因此, 防腐层作为管道腐蚀控制的第一道防线, 只有建立起可靠、适用的防腐层质量评价体系, 增设保护措施(如加强级3LPE防腐层、外加阴极保护), 才能控制风险, 保障管道安全、

高效运行。

1 防腐层质量检测

1.1 水压试验法

水压试验是管道建设中的一个关键验收程序, 向封闭的管段内注入液体(通常为水, 可添加缓蚀剂), 加压至设计压力的1.25~1.5倍, 保压一定时间, 观察管端的压力变化。水压试验是管道安全的“底线”, 其核心价值在于排除重大结构风险, 间接评价防腐层结构完整性, 其目的是用于验证新建管道的结构完整性、强度及密封性。水压试验并非直接检测防腐层质量, 但可以暴露出严重物理损伤。当防腐层在回拖过程中被岩石或钻具大面积刮伤或刺穿, 导致管体裸露, 若试压过程中产生压力骤降现象, 即可追溯至防腐层失效引起的管体破损。

1.2 电流 - 电位法

电流 - 电位法是向穿越段管道施加有阴极保护效用的极化电流, 使管道电位偏移达到规定值, 其在管道中传播衰减程度主要取决于防腐层的绝缘性能, 然后按照电位衰减或电流衰减计算穿越段管道的电位或电流衰减系数, 从而计算出穿越段管道的电阻率, 评价防腐层质量。

$$\alpha = \ln(\Delta V_a / \Delta V_b) / L \quad (1)$$

$$\alpha = \ln(\Delta I_a / \Delta I_b) / L \quad (2)$$

式中: α —穿越段电位或电流衰减系数; L —穿越段端头测试点 a 与测试点 b 之间的距离, m。

当定向钻穿越段安装了可更换式 (或测试桩引出式) 的牺牲阳极, 可直接测量牺牲阳极初期输出电流大小, 管道通电电位来辅助判断该穿越段防腐层的整体状况。王颖等人通过 PCM 发射机向已经碰口的在役穿越管道施加高频交流电流信号, 通过配套软件计算管道防腐蚀层的 R_g 值, 评估防腐层的整体质量。

1.3 馈电试验法

馈电试验法由 GUMMOV 等人在美国煤气协会管道研究委员会下的项目中首次提出, 采用馈电试验对未碰口穿越段管道防腐蚀层性能进行了检测与评价, 通过计算防腐层面电阻率, 评估防腐层质量。现场直流电流馈电试验时, 输出电源采用可调电源, 经多次调整输出, 设定馈电电流为, 并测量穿越段管端的平均电压降, 从而得到穿越段管道的面电阻率 (电导率), 并对数据采用 $1000 \Omega \cdot \text{cm}$ 进行电导率归一化, 根据相关规范指标进行防腐层评价。

1.3.1 入土端测试点 a 和出土端测试点 b 电位变化

入土端测试点 a:

$$\Delta V_a = V_{a,\text{on}} - V_{a,\text{off}} \quad (3)$$

式中: $V_{a,\text{on}}$ 为入土端测试点 a 通电电位, $V_{\text{vs-CSE}}$; $V_{a,\text{off}}$ 为入土端测试点 a 断电电位, $V_{\text{vs-CSE}}$; ΔV_a 为入土端测试点 a 电位变化, V。

出土端测试点 b:

$$\Delta V_b = V_{b,\text{on}} - V_{b,\text{off}} \quad (4)$$

式中: $V_{b,\text{on}}$ 为出土端测试点 b 通电电位, $V_{\text{vs-CSE}}$; $V_{b,\text{off}}$ 为出土端测试点 b 断电电位, $V_{\text{vs-CSE}}$; ΔV_b 为出土端测试点 b 电位变化, V。

穿越段管端电位变化比 k :

$$k = \Delta V_a / \Delta V_b \quad (5)$$

1.3.2 穿越段管道平均电位变化

若电位变化比 k 在 $0.625 \sim 1.6$ 之间, 两端电位变化的算术平均值可以认为是穿越段管道的平均电位变化 ΔV :

$$\Delta V = (\Delta V_a + \Delta V_b) / 2 \quad (6)$$

若电位变化 k 不在 $0.625 \sim 1.6$ 之间, 即有两种情况: $k < 0.625$, 远端接地不良或存在强杂散电流; $k > 1.6$, 近端电流泄漏或防腐层严重破损。在此情况下, 按照电流 - 电位法计算、评价穿越段管道的防腐层质量。

1.3.3 穿越段管道防腐层面电阻

$$R = \Delta V / I \quad (7)$$

1.3.4 穿越段管道平均防腐层面电阻率

$$r = R \times \pi \times D \times L \quad (8)$$

式中: r 为穿越段管道平均防腐层面电阻率, $\Omega \cdot \text{m}^2$; R 为穿越段管道防腐层面电阻, Ω ; D 为管道外径, m; L 为管道穿越段长度, m。

1.3.5 穿越段管道平均防腐层面电阻率修正

将防腐层面电阻率修正到土壤电阻率为 $1000 \Omega \cdot \text{cm}$ 环境下的面电阻率, 防腐层在标准条件下的面电阻率为 r_{1000} , 应按式 (9) 计算。

$$r_{1000} = (r \times 1000 \Omega \cdot \text{cm}) / \rho \quad (9)$$

式中: ρ 为现场测试泥浆电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$ 。

1.3.6 穿越段管道平均防腐层面电导率

$$g_{1000} = 1 / r_{1000} \quad (10)$$

目前, 国内对于新建管道的定向钻穿越段管道的防腐层质量检测主要采用馈电试验, 采用面电阻率归一化后评价穿越段管道的防腐层质量。

乐山市某输气管道定向钻穿越施工项目, 管道规格为 $\Phi 813*12.7\text{mm}$, 防腐层类型为 3LPE 加强级外防腐层 + 玻璃钢外防护层, 管线路由穿越河流, 主河道槽宽度约 60m, 水面宽度约 50m, 整体穿越长度为 611.74m。测试人员对管段的通 / 断电位、泥浆电阻率等相关数据进行了现场测试, 通过计算得到该输气管道定向钻穿越段管道的防腐层质量见表 1。

2 阴极有效性评价

定向钻穿越段管道施工完成后, 应通过外界施加阴极保护电流, 应达到阴极保护指标 (-850mV).

表 1 管道防腐层质量评价结果

工程名称	泥浆电阻率 ρ / $(\Omega \cdot \text{m})$	电源输出 /V, A	入土端电位 / ΔV_a V vs CSE	出土端电位 / ΔV_b V vs CSE	面电阻率 / $(\Omega \cdot \text{m}^2)$	面电导率 / $(\mu\text{S} \cdot \text{m}^{-2})$	面电阻率归一化 / $(\Omega \cdot \text{m}^2)$	评级
某输气管道定向钻工程	8.5	1.6/0.02	0.9333	0.9490	7.3476×10^4	11.57	8.644×10^4	优

vsCSE) 所需要的保护电流密度, 尤其是管段防腐层面电阻率评价结果为“良”及以下的应进行阴极保护电流密度评价。

2.1 估算裸露面积百分率

对定向钻穿越管道, 优先估算防腐层裸露面积百分率, 然后乘以与环境条件相适应的电流密度, 即可获得所需的保护电流需要量。

$$I_{cp} = \frac{\%bare}{100} \times i_{cp,bare} \times \pi \times D \times L \quad (11)$$

式中: $i_{cp,bare}$ 为估算裸露面积大小, 按比例放大后每单位面积的电流密度, A/m^2 ; I_{cp} 为整个防腐层表面所需的当量保护电流, A 。

2.2 最小电压降法

经验表明, 在中等程度电阻率的土壤环境中, 在结构物和远地点之间施加 300 mV 阴极保护电位, 对于达到工业判据的极化水平是足够的。但该法在低电阻率环境中将过高估计阴极保护电流需用量, 而在高电阻率土壤中将低估阴极保护电流需用量。

2.2.1 基于电压变化

通过一个电流表和通断开关从远地点对管道施加直流测试电流为 I , 并测量管端测试点 a 相对远方参比电极的通电和断电时的管地电位 (V_{on}) 和 (V_{off})。对于较长的定向钻穿越管道, 在一系列位置测试通/断的管地电位, 取电位偏移最小位置的数据进行电流需用量的保守计算。

$$I_{cp} = \frac{300mV \times 10^{-3}}{V_{on} - V_{off}} \times I \quad (12)$$

2.2.2 基于管道接地电阻

根据馈电试验测试得到的管道穿越段的平均电位变化, 对管道施加直流测试电流, 得到管道平均接地电阻 (管道相对远地点的电阻), 为获得电位偏移 300mV, 计算出该定向钻穿越段管道需用的电流。

$$I_{cp} = \frac{300mV \times 10^{-3}}{\Delta V/I} \quad (13)$$

2.2.3 基于防腐层电阻

当对结构物施加阴极保护电流时, 产生的电压降中大多数份额为跨越防腐层而不是电解质, 则就最低电压降准则而论, 使用管道防腐层面电阻率修正值来确定单位表面积的电流需要量。

$$I_{cp} = \frac{300mV \times 10^{-3}}{r_{1000}} \quad (14)$$

2.3 极化偏移法

通电前测量管道腐蚀电位后, 施加一个测试电流 I_1 并持续一定的时间周期, 当通电电位达到稳定时, 通/断器调整到断开并持续一个很短的断电时间, 在

每个测点处记录瞬时断电电位, 此时采用极化偏移量 100mV 为阴极保护标准, 计算电流需用量。

$$I_{cp} = \frac{100mV \times 10^{-3}}{E_p - E_{corr}} \times I_1 \quad (15)$$

式中: E_p 为瞬时断电电位, V ; E_{corr} 为管道腐蚀电位, V 。

乐山市某输气管道定向钻穿越施工项目, 对穿越段管道的防腐层质量评价为“优”级别, 但随着管道的长期运行, 地质变化、地壳板块运动及后续管道内腐蚀等原因, 穿越段管道防腐层微小破损呈发展趋势, 为了保证管道安全运行, 对穿越段管道施加外加强制电流 + 局部牺牲阳极阴极保护系统。

3 结论

研究了管道定向钻穿越管段的防腐层质量与阴保有效性评价方法, 得出以下结论: ①对于新建穿越段管道, 管道防腐层质量最优评价方式为馈电试验, 可进行定量评价, 并计算出后续阴极保护电流需用量。②现场数据测试, 计算出管道面电阻率, 作归一化处理, 乐山市某输气管道定向钻穿越段管道防腐层质量为“优”。③馈电试验测试位置仅有穿越段两端相关信息, 而定向钻管道全线的阴极保护电位分布规律与地质环境相关, 应在计算出的电流需用量基础上适当增大阴保电流电源输出, 提高保护水平。

参考文献:

- [1] 葛艾天, 李伟, 杜艳霞, 刘权. 定向钻穿越管道防腐蚀层及阴极保护的评价方法 [J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(5):365-368.
- [2] 程浩力. 海外油气田集输管道设计水压试验标准探讨 [J]. 油气储运, 2021, 40(4):474-480.
- [3] 王颖. 电流电位法在定向钻穿越管道外防腐层评价中的应用研究 [J]. 石油天然气学报, 2013, 35(4):302-304.
- [4] 钱国梁, 王长保, 安峰. 定向钻穿越在管道工程中的应用 [J]. 石油和化工设备, 2013, 16(6):35-37.
- [5] 张合平. 水平定向钻管道防腐层的选择和检验 [J]. 管道技术与设备, 2017(2):51-54.
- [6] GUMMOVRA, WAKELIN RG, SEGALL S M. Coating quality testing of directionally drilled pipesections[C]. CORROSION 2000.S.1.:NACE International,2000.
- [7] 霍峰, 王玮, 张文瑞, 刘睿, 卢哲, 赵敏. 定向钻穿越管道外涂层应用现状与发展趋势 [J]. 油气储运, 2013, 32(9):943-947.

作者简介:

张雄 (1993-), 男, 汉族, 四川西昌人, 硕士, 工程师, 现从事腐蚀与防护 (阴极保护) 专业方向的研究工作。