管道阴极保护电位与土壤环境的关系探讨

张丽萍　王　波　侯少峰（秦皇岛输油气分公司管道管理部，河北 秦皇岛 066000）

摘　要：现阶段主要采取调整恒电位仪输出电流强度和防腐层修复的方式，来解决管道阴极保护电位不达标的问题。实践中发现，阴极保护电位的能否达标与多方面因素有关，恒电位仪输出电流强度的调整要考虑过保护和欠保护的问题而有所局限，防腐层修复也不能解决所有的阴极保护问题。综合分析影响阴极保护电位不达标的相关因素，土壤电阻率就是不可忽略的重要因素之一。

关键词：阴极保护电位；防腐层质量；土壤环境

管道保护电位受多种因素影响，如杂散电流影响、防腐层质量及破损情况、土壤环境干扰等。

本文从某输油处某管段阴极保护电位异常问题入手，对保护电位形成的原因与衰减情况进行分析，最终推测导致电位异常的原因主要由土壤环境造成，主要针对土壤含水率、离子浓度和土壤疏松程度等因素对电位的影响做出阐述。

1 某管段的阴极保护电位异常问题

某输油处某段原油加热输送管道，材质 16Mn，直径 426mm，防腐层为特加强级沥青玻璃丝布。使用强制电流阴极保护系统，恒电位仪控制电位 –1.3V，输出电流 1A。阴极保护站出站后 300m 即为 178# 测试桩，管道电位开始衰减，178#—179# 测试桩通电电位衰减达到 240mV。如图 1 所示。

对 178#—179# 桩进行密间隔电位（CIPS）测试，发现电位衰减较快，通电电位从 –1.20V 衰减至 –0.96V，断电电位从 –1.0V 衰减到 –0.81V，如下图 2 所示。

外检测结果显示 178#—179# 桩防腐层质量为 1 级。

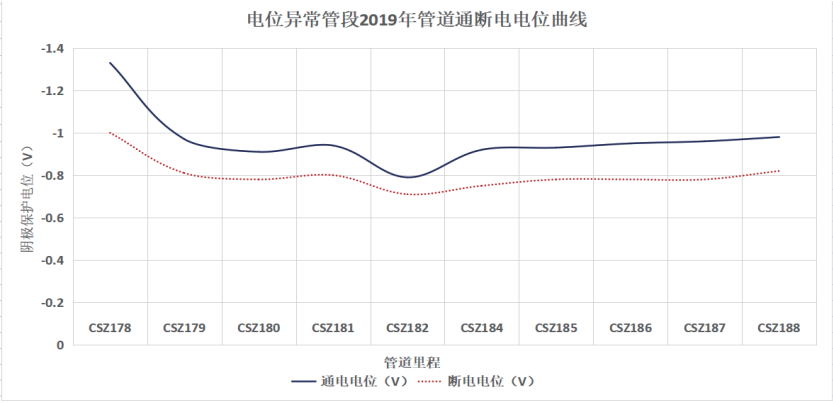

图 1 某管段出站后通断电电位曲线

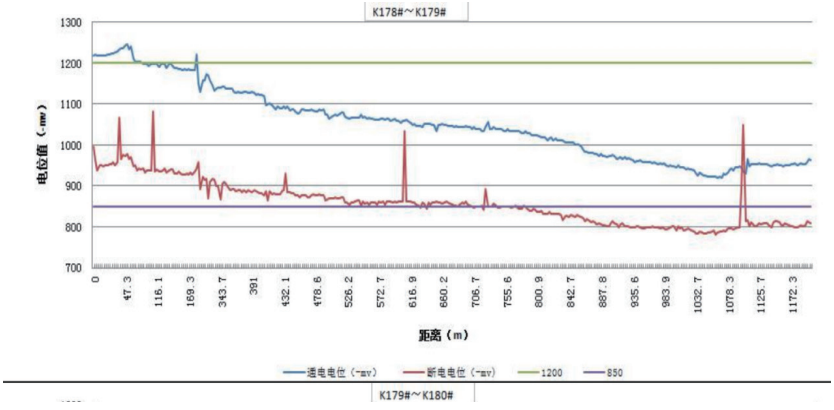

图 2 178#—179# 桩管道电位衰减图

现场测试发现：①阴极保护站的辅助阳极为深井阳极，距管道垂直距离大于100m，管道附近电位梯度小于0.5mV/m，阳极干扰可以忽略；②未发现出站端管道与其他金属构筑物搭接短路的现象；③178#—179#桩之间共存在6处防腐层破损点，其中评价为二类的2处、三类4处。

2 阴极保护电位相关计算及问题分析

2.1 防腐层整体评价及阴保电流泄漏量估算

防腐层整体质量和破损点数量是阴极保护电位衰减的最主要因素，而178#—179#段管道防腐层评价为“1”级。计算该段管道所需阴保电流，按1%破损面积计取，保护电流密度取较为保守的20mA/m^2，计算如下：

$S=\pi Dl\times 1\%$ （式1）

$I=SJ$ （式2）

式中：

S为1km管道破损点的表面积，单位m^2；

D为管道直径，取0.426m；

l为管道长度，取1km；

J为裸钢电流密度，取20mA/m^2。

计算得S=13.37m^2，计算得I=0.268A。

2.2 阴极保护电位衰减计算

根据178#—179#桩管道的阴保电流与电阻数值，可计算出1km管道正常的保护电位衰减值。该管道直径为426mm，阴保电流按照0.268A计取，则该管段的管道电阻值可按式3计算：

$$Rs=\frac{\rho}{\pi(1000D-\sigma)\sigma}$$ （式3）

其中：

Rs，管道电阻，单位Ω；

ρ，钢管电阻率，单位Ω·mm^2/m；

D，管道外径，单位m；

σ，管道壁厚，单位mm；

代入数值计算可得该管段电阻值RS约为14.8mΩ；

该管段电位差可按照式4计算：

$\Delta V=I\cdot Rs$ （式4）

其中：

ΔV为该段管道的电位差，单位mV；

I为该段管道阴极保护电流，取计算式1结果268mA；

将上述数值代入计算式4计算可得，ΔV为3.95mV，即178#—179#桩之间的最大电位差为3.95mV。

2.3 阴极保护电位衰减异常的原因分析

假设恒电位仪实际输出的1A电流全部流入178#—179#管段，其电位衰减为14.8mV。而178#—179#管段的通断电位的衰减均超过240mV，测量电位差数值(240mV)与计算电位差值(3.95mV)差距非常大。

通过理论计算、现场测量和初步分析，得出以下结论：①防腐层存在破损点并不是电位衰减异常的根本原因。具有一定质量的防腐层，可以保证其所需阴保电流较小，里程增大导致的电位差可以忽略；②现场测量，排除阳极地床的电场干扰问题③现场测量，排除了与其他金属构筑物搭接的可能；④针对该段管道的电位异常现象，推测是土壤环境造成的。

3 土壤环境对阴极保护电位的影响

3.1 保护电位形成的因素分析

阴极保护电位一是要求阴极保护系统能提供足够的电流，二是要求管道附近土壤有适合保护电位形成的条件。决定土壤电阻率主要是湿度、离子浓度、土壤疏松程度（含氧量）等。

①湿度（土壤含水率），决定了土壤中正离子能否移动到管道附近。上述案例中管道加热输送，附近温度较高，周围不适宜保存水分，造成周边土壤较为干燥，土壤电阻率大，不利于形成有效保护电位。

②离子浓度，决定了管道附近的可移动正离子的数量，一般来说湿度和正离子浓度越大，管道越易阴极极化。

③土壤疏松程度，土壤越疏松，溶解氧浓度越大，其消耗电子的速率越快，在其他条件相同的前提下，极化越困难。

3.2 阴极保护电位差异的原因分析

如果土壤电阻率均匀，管道电位衰减是一条非常平缓的曲线；如果土壤电阻率不均匀，且跳跃性非常大，则管道电位可能会出现非常大的波动。

3.2.1 以大地作为零电势点进行管道各点的管地电位测量

管道对地电位连在一起就是一条线，线上各点之间电位差值非常小。但在实际测量过程中，管道各测试桩间电位变化可能非常大，本案例的两个测试桩之间电位差高达240mV。

3.2.2 以管道为参考点进行管道各点的管地电位测量

每个测量点的电位是离散的，这些离散的点组成

了一条线，每个点的电位，跟管道本身、管道周围环境、地面电场等都有关系，可以将每个点拿出来单独解释其电位问题。

如本案例，阴保站处于低洼区域，附近有水塘，水分充足，土质紧密，通电点电位非常容易达到–1.3V，从 178# 桩后土质陡然变差，178#—179# 之间土壤多粉质粘土、碎石土、细晶白云岩、白云岩、细晶灰岩、含磷细晶白云岩、花岗片麻岩，在 179# 桩测得的保护电位就比较正，CIPS 数据显示该段管道通断电电位衰减约 200mV，可以用管道不同位置的环境区别来具体分析。计算该电位差，如公式 5 和 6：

$$V_{test}=V_{con}+V_{act} \quad （式 5）$$

其中，

V_{test} 为当前测试桩电位，单位 V；

V_{con} 为当前测试桩的浓差极化部分电位，单位 V；

V_{act} 为当前测试桩的活性极化部分电位，单位 V；

$$V_{test}=V_{test-1}+\Delta V_{env}+\Delta V_{pip} \quad （式 6）$$

其中，

V_{test-1} 为后一测试桩电位，单位 V；

ΔV_{env} 为环境导致的两个测量点之间的电位差（可能达到几百毫伏），单位 V；

ΔV_{pip} 为阴保电流导致的两个测量点之间的电位差（一般为毫伏级），单位 V；

可以看到计算管道之间电位差公式默认管道所处土壤环境一致且单一、因环境因素造成的电位差均为零，但实际该值不能完全忽略，尤其是管道穿越环境变化较大的区域，该值可能达到几百毫伏。

4 该案例问题解决方案和效果

4.1 科学的解决方法

以该案例管段为例分析极化电位的影响因素：①确保管道防腐层具备一定的质量，管道内阴保电流不能太大；②确保管道周围土壤有利于阴极保护电位的形成。建设阶段的管道，管道回填时应细土回填，保持合适的深度并适当夯实；投用阶段的管道，在后期管道维修中，要坚决消除管道周边存在的岩石等坚硬和较大粒径的土质环境，开选择细土回填，积少成多，逐步改善管道周围的土壤环境。

4.2 土壤电阻率较高环境下的阴极保护电位现状

对于土壤电阻率差异较大的不同管段，其自然电位和阴极保护电位会出现较大差异。土壤含水率较高、土壤结构较为密实的环境，土壤中的可移动正离子数量相对较多，断电电位容易形成，且因土壤密实而氧气浓度低，环境消耗电子程度就低，IR 降相对较小；反言之，在土壤干燥、疏松，或者管道周边有大量石子、砂砾的情况下，管道周围不容易聚集水分，并且存在相对多的氧气，浓度极化不易进行，活性极化程度一直较大，断电电位难以达标。本案例阴保站出站位置相对低洼，并且附近有水塘和水田，管道处于一个有利于极化的环境中，而从 178# 桩开始，管道周围多为风化岩，土壤质地疏松，既无法有效保存水分，也不能形成密实结构，土壤电阻率持续变大，而该管段正是阴极保护电位衰减较为异常的管段，该管段外腐蚀较为严重。

4.3 改善土壤环境后的阴极保护电位对比

下图 3 为该电位异常管段开展管道检测维修，对管道周边岩石、大颗粒土进行了细土置换后的阴极保护电位曲线，维修前后恒电位仪输出电流均维持在 1A 的水平，但阴极保护电位有了明显改善。

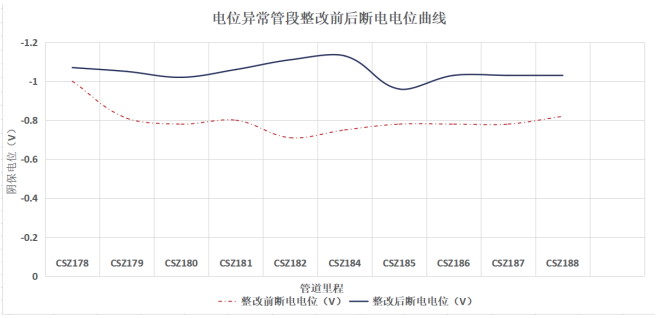

图 3 整改前后阴极保护断电电位曲线对比图

5 小结

越来越多的案例证明环境对管道阴极保护电位的影响不容忽略，应该作为分析阴极保护问题首先要考虑的重要因素之一。随着管道服役环境更复杂，应重视土壤环境对阴极保护电位的影响，多种因素综合分析，逐项分析排查才能找到真正的原因。

参考文献：

[1] 阴极保护系统维护 / 冯洪臣编著 [S]. 北京：中国石化出版社，2021

[2] 何平，蒋宏业 . 土壤湿润度对埋地钢质管道外加电流阴极保护的影响 [J]. 门窗 ,2018(6):1.

[3] 李雄，陆家榆，曹方圆等 . 考虑非线性极化时不同土壤电阻率下直流接地极电流对油气管道的腐蚀影响分析 [J]. 电网技术 ,2022,46(12):5021-5029.

[4] 李自力，王太源，郝宏娜，等 . 土壤含水率和氯离子含量对最佳保护电位的影响 [J]. 腐蚀科学与防护技术 , 2012, 24(003):232-235.