

Innovative application of electrochemical corrosion principle in cathodic protection control of oil and gas pipeline

Minfei Ai Jie Zou Lingxiang Wang

Huazhong Branch of National Oil and Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Qianjiang, Hubei, 433100, China

Abstract

This study focuses on the oil and gas pipelines operated by China Pipeline Network Group Central China Company (Wuhan, Hubei Province), exploring innovative applications of electrochemical corrosion principles in cathodic protection control. By integrating electrochemical corrosion mechanisms with polarization theory, it identifies challenges in traditional cathodic protection systems, including potential imbalance, lagging regulation, and stray current interference. Three novel approaches are introduced: 1) Dynamic potential threshold setting based on corrosion current density ensures precise protection potential alignment; 2) Adaptive regulation of cathodic protection current through soil resistivity monitoring enhances real-time adjustment responsiveness; 3) Suppression of stray currents caused by multi-electrode coupling maintains stable protection potentials. Quantitative analysis using Tafel equations and polarization resistance formulas establishes control parameters validated by field data. These innovations significantly improve the compliance rate of pipeline cathodic protection potentials, providing an efficient and intelligent technical solution for corrosion prevention in oil and gas pipelines.

Keywords

electrochemical corrosion; cathodic protection; polarization theory; dynamic control

电化学腐蚀原理在油气管道阴极保护控制中的创新应用

艾敏飞 邹杰 王凌翔

国家石油天然气管网集团有限公司华中分公司，中国·湖北 潜江 433100

摘要

本研究以国家管网集团华中公司（湖北武汉）的油气管道为核心，着重研究阴极保护控制里电化学腐蚀原理的创新性运用，结合电化学腐蚀的反应机制与极化理论，指出传统阴极保护控制面临的难题，如电位不均衡、调节滞后以及杂散电流的干扰现象。引入三项创意应用，借助对基于腐蚀电流密度的动态电位阈值的设定，做到保护电位精准契合；结合土壤电阻系数实现阴极保护电流的自适应调控，提高电流调整的及时程度；抑制多电极耦合产生的杂散电流干扰，实现保护电位有效稳定。运用塔菲尔公式、极化电阻公式等开展量化，推导控制参数，再结合实际应用数据做验证，创新办法让管道阴极保护电位达标比例得以提高，为油气管道腐蚀防护供应了高效且智能的技术途径。

关键词

电化学腐蚀；阴极保护；极化理论；动态控制

1 引言

国家管网集团华中公司位于湖北武汉，承担着保障该区域能源输送的重要使命，其管理的油气管道遍布湖北且影响周边区域，管道总里程数超过数千公里，在能源战略布局里起到关键作用，因湖北地区地质状况复杂，油气管道遭遇严重的电化学腐蚀难题。

电化学腐蚀作为油气管道失效的重要致因之一，其根本是金属在电解质环境里进行的氧化还原反应。作为控制电化学腐蚀的关键手段，借助给管道施加外部电流或者牺牲阳

极，让管道电位极化到无腐蚀范围，以此有效降低腐蚀的速率。传统阴极保护控制大多采用固定电位阈值与人工定期调节的方式，难以契合管道沿线复杂多变的腐蚀环境，往往会出现保护不充分或过度保护的状况，而且应对杂散电流干扰时能力有限，对阴极保护效果造成严重阻碍。本文从电化学腐蚀的原理出发，探究创新型阴极保护控制办法，对增强华中公司油气管道的安全与可靠程度有重大现实价值。

2 油气管道电化学腐蚀核心原理

2.1 电化学腐蚀的电极反应机制

因湖北地区土壤电解质环境呈现复杂态势，油气管道金属（以 Fe 为例）会生成大量微小的腐蚀原电池，阳极部位出现金属氧化溶解反应，这是造成管道腐蚀的源头，该反应的式子为：

【作者简介】艾敏飞（1983-），中国湖北仙桃人，本科，助理工程师，从事管道腐蚀控制研究。



Fe^{2+} 离子进入土壤电解质，导致管道金属不断损耗，形成腐蚀坑。

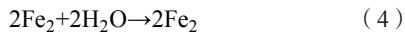
不同的还原反应会在阴极区域按照土壤的酸碱性发生，鄂北地区以中性土壤为主，吸氧还原反应如下：



而在鄂南部分酸性较强的土壤中，析氢还原反应更为显著：



总反应如下：



生成的 Fe_3 进一步被氧化为 Fe_3 ，指的是普遍可见的铁锈，因其结构疏松有孔隙，无法遏制腐蚀的继续，加快了管道毁坏。

2.2 极化理论与阴极保护原理

按照电化学极化理论，当向管道施加外部阴极电流，管道充当阴极会出现阴极极化现象，电极电位向负向偏移，此情况造成阳极氧化反应（公式 1）的活化能提升，反应速度急剧下降，若管道电位极化达到 -0.85V - -1.20V（针对硫酸铜参比电极 CSE）的免蚀区间，阳极的溶解速率近乎为零，达成有效防护。

极化过程中，管道腐蚀电流密度 i_{corr} （反映腐蚀速率）与极化电位满足塔菲尔公式：

$$\Delta E = \beta_c \lg \left(\frac{i_{\text{app}}}{i_{\text{corr}}} \right) \quad (5)$$

其中， ΔE 为阴极极化电位（V）， β_c 为阴极塔菲尔斜率（V/dec，华中公司管道在湖北地区实测值为 0.12V/dec）， i_{app} 为施加的保护电流密度（A/m²）， i_{corr} 为管道自腐蚀电流密度（A/m²）。

由公式（5）可知，增大 i_{app} 可使 ΔE 升高，降低 i_{corr} ，但当 ΔE 超过一定范围（如电位 < -1.20V/CSE），会引发过度保护，导致管道涂层剥离或氢脆等问题，所以精准调控 i_{app} 与 ΔE 的匹配关系至关重要。

2.3 腐蚀速率与极化电阻的关联

管道腐蚀速率 v （mm/年）与自腐蚀电流密度 i_{corr} 遵循法拉第定律，结合极化电阻 R_p （反映电极表面极化难易程度），可通过极化电阻公式量化腐蚀速率^[1]：

$$v = \frac{K \cdot i_{\text{corr}} \cdot M}{\rho \cdot n} \quad (6)$$

$$i_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p} \quad (7)$$

公式（6）中， K 为常数（ $3.27 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{A}/(\text{m} \cdot \text{年})$ ）， M 为 Fe 的摩尔质量（55.85g/mol）， ρ 为 Fe 的密度（7.87g/cm³）， n 为电极反应转移电子数（ $n=2$ ，对应公式 1）。

公式（7）中， B 为常数（ $B = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2.3(\beta_a + \beta_c)}$ ）， β_a 为阳极塔菲尔

斜率，华中公司管道 β_a 实测值为 0.08V/dec，计算得 $B=0.024\text{V}$ ）， R_p 为极化电阻（ $\Omega \cdot \text{m}^2$ ）。

通过测量极化电阻 R_p ，可反推腐蚀电流密度 i_{corr} 与腐蚀速率 v ，为阴极保护控制提供量化依据，这也是后续创新控制方案的理论基石。

3 传统阴极保护控制的痛点与问题

3.1 固定电位阈值导致保护精度不足

传统阴极保护控制采用了单一且固定的电位阈值，未考量湖北地区土壤环境参数存在的明显差异。选取华中公司湖北东部与西部的管道作例，东部平原区域的土壤呈现高含水量、低电阻率（约 $10\Omega \cdot \text{m}$ ）的特性，当电位固定为 -1.0V/CSE 时，实际的保护电流密度达到 $25\text{A}/\text{m}^2$ ，大幅超出了 $15\text{A}/\text{m}^2$ 的需求，引发了过度防护，导致 2021 年该区域部分管道出现涂层鼓包与剥离状况^[2]。西部山区土壤干燥且电阻率高，于相同电位时，保护电流密度仅达 $6\text{A}/\text{m}^2$ ，低于所需的标准值 $10\text{A}/\text{m}^2$ ，处于保护缺失的情形，腐蚀速度达 $0.18\text{mm}/\text{年}$ ，远高于行业安全界限。

3.2 人工调节无法匹配动态腐蚀工况

传统控制方式需人工按月到现场定时测量电位，手动调节保护电流，难以即刻响应腐蚀状况的动态变动。2022 年夏天，湖北历经连续强降雨，武汉周边区域土壤含水率自 18% 陡然上升至 35%，致使土壤电解质的导电性能增强。管道自腐蚀的电流密度自 $0.06\text{A}/\text{m}^2$ 迅速涨至 $0.15\text{A}/\text{m}^2$ ，然而人工调控延迟近 20 天，此阶段管道腐蚀速度从 $0.05\text{mm}/\text{年}$ 猛增到 $0.12\text{mm}/\text{年}$ ，一些管段有局部腐蚀穿孔现象。

3.3 杂散电流干扰导致保护电位波动

华中公司的部分管道经过城市变电站和轨道交通线路等区域，遭受杂散电流的强烈干扰。以武汉市区某段管道为例，因周边地铁施工牵引电流作用，管道保护电位在 -0.6V 到 -1.4V/CSE 范围大幅波动，每日平均波动次数达 30 次以上，这种起伏使管道时而处于保护不足状态，时而保护过度。2021 - 2022 年期间，此段管道因腐蚀故障维修了 7 次，累计维修费用超 800 万元。

4 基于电化学原理的阴极保护控制创新应用

4.1 基于腐蚀电流密度的动态电位阈值设定

4.1.1 核心逻辑

基于塔菲尔公式（公式 5）和极化电阻公式（公式 7），构建“极化电阻 $R_p \rightarrow$ 腐蚀电流密度 $i_{\text{corr}} \rightarrow$ 最优保护电流密度 $i_{\text{app, opt}} \rightarrow$ 动态电位阈值 E_{set} ”的量化推导链，实现电位阈值随实时腐蚀工况自动变动，做到保护电位的精准契合。

4.1.2 公式推导与参数设定

算出腐蚀电流密度值，通过在管道周边布置的 RD - 6 型无线极化电阻探头实时获取极化电阻数据，代入公式（7）计算腐蚀电流密度 $i_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p}$ ；

确定最优保护电流密度，以将腐蚀速率 v 控制在

0.01mm/年以下为目标,代入公式(6)可得 $i_{corr,max}=0.008A/m^2$ 。再结合公式(5),令 $i_{corr,max}=0.008A/m^2$ 为自腐蚀电位,华中公司管道在湖北地区实测值约为-0.5V/CSE),推导得出:

$$i_{app,opt}=i_{corr} \cdot 10^{\frac{E_{corr}-E_{set}}{\beta_c}} \quad (8)$$

当 $i_{corr}=0.1A/m^2$, $\beta_c=0.12V/dec$ 时,代入 E_{set} 目标区间(-0.85V~1.20V/CSE),计算得到 $i_{app,opt}=10A/m^2$ 。

动态调整电位阈值,根据计算得到的 $i_{app,opt}$ 与现场实测的 i_{app} 的偏差,实时修正 E_{set} ,确保 $i_{app}=i_{app,opt}$,实现保护电位的动态优化^[3]。

4.1.3 华中公司应用实践

对“西气东输”湖北段(200公里)进行布置,安装30套极化电阻传感器,同时把动态电位阈值算法整合进阴极保护控制柜。2023年应用数据表明,电位阈值会依据实时状况动态改变,取值覆盖-0.90V至-1.18V/CSE,能精确契合不同土壤段的防腐蚀要求。处于-0.85V~1.20V/CSE的管道保护电位达标率由82%大幅提高至97%,超量保护区的占比由15%急剧降至3%,涂层剥落等问题被有效抑制。

4.2 融合土壤电阻率的阴极保护电流自适应调节

4.2.1 核心逻辑

保护电流的分布与传输受土壤电阻率影响大(数值越低,电流越易扩散,传统控制手段忽略其动态变化,造成电流调节延迟,按照欧姆定律,搭建保护电流与土壤电阻率之间的关联模型,达成保护电流的自动调节,以便适应不断变化的复杂土壤环境)。

4.2.2 公式推导与模型构建

保护电流与土壤电阻率的关联:阴极保护系统的总保护电流 I_{total} (A)与土壤电阻率 ρ_s ($\Omega \cdot m$)、管道长度 L (m)、保护电位 E_{set} 的关系为^[4]:

$$I_{total}=\frac{2\pi L(E_{set}-E_{ref})}{\rho_s \ln\left(\frac{2L}{r}\right)} \quad (9)$$

其中, E_{ref} 为参比电极电位(-0.25V/CSE,硫酸铜电极), r 为管道半径(0.3m,华中公司天然气管道规格);

自适应调节算法通过FRS-2型土壤电阻仪(每5分钟采集一次 ρ_s)实时获取土壤电阻率数据,将实时代入公式(9)计算 $I_{total,opt}$,并利用PID控制器自动调整阴极保护电源输出电流,使 $I_{total}=I_{total,opt}$,实现保护电流的动态自适应调节。

4.2.3 华中公司应用实践

在湖北荆州到荆门180公里长的原油管道上设置25套土壤电阻率传感器,2023年汛期阶段(由于土壤含水率上升,土壤电阻率从 $25\Omega \cdot m$ 降到 $8\Omega \cdot m$,系统按公式(9)自动把总保护电流从75A调低至30A,有效防止出现过度保护现象,管道的腐蚀速率从每年0.12mm明显降低至每年0.06mm,阴极保护系统能耗下降40%,每年节省电费大约280万元,达成了节能与防腐的双重功效)。

4.3 多电极耦合的杂散电流干扰抑制

4.3.1 核心逻辑

管道受杂散电流侵入,会产生局部阳极区域,使保护电位的均匀状态被破坏,利用在管道沿线设置“辅助阳极-参比电极”耦合部件,实时检测杂散电流干扰的强度,主动注入补偿电流I以抵消杂散电流的影响,消除杂散电流干扰,保障保护电位的稳定性。

4.3.2 公式推导与补偿策略

杂散电流干扰强度计算,杂散电流导致的管道电位偏移量 ΔE_{stray} 与 I_{stray} 的关系为:

$$\Delta E_{stray}=I_{stray} \cdot R_{pipe} \quad (10)$$

其中, R_{pipe} 为管道-土壤接触电阻($\Omega \cdot m$,华中公司实测值 $0.5\Omega \cdot m$);

补偿电流计算,为使 $\Delta E_{stray}+\Delta E_{comp}=0$ (ΔE_{comp} 补偿电流导致的电位偏移),即:

$$I_{comp}=-I_{stray} \cdot \frac{R_{pipe}}{R_{aux}} \quad (11)$$

其中, R_{aux} 为辅助阳极-土壤接触电阻($\Omega \cdot m$,华中公司采用高硅铸铁阳极, $R_{aux}=0.2\Omega \cdot m$),负号表示补偿电流方向与杂散电流相反^[5]。

4.3.3 华中公司应用实践

在武汉市区某段受地铁施工杂散电流严重干扰的天然气管道上,布置了5套“辅助阳极-参比电极”耦合单元,2023年该系统对杂散电流干扰开展实时监测,按照公式(11)精准地注入补偿电流,让管道保护电位的波动区间从 $\pm 0.4V$ 缩减至 $\pm 0.1V$ 。从2022年到2023年,腐蚀维修次数由6次降至1次,维修成本削减85%,有力维护了管道的安全平稳运行。

5 结语

基于腐蚀电流密度的动态电位阈值,借助塔菲尔公式和极化电阻公式开展量化推导,让保护电位能依管道自腐蚀工况实时调整,消除固定阈值引发的欠保护或过度保护状况,三项创新性应用从理论推导过渡到现场应用落地,构建起“原理-模型-控制-验证”的完备技术链条,为油气管道电化学腐蚀防治提供可复制推广的实践范例。未来研究可进一步构建跨区域电化学腐蚀数据库和控制算法的共享体系,按照不同土壤类型来优化模型的参数,打造覆盖华中整个区域的阴极保护智能控制网络。

参考文献

- [1] 刘阳舟.油气管道运输中的腐蚀与防护[J].流程工业,2025, (01):71-73.
- [2] 苏强.油气管道腐蚀与防护技术研究[J].石化技术,2024,31 (12):193-195.
- [3] 安鹏飞.探究埋地钢制油气管道的防腐蚀策略及其实践[J].全面腐蚀控制,2024,38(12):16-18.DOI:10.13726/j.cnki.11-2706/tq.2024.12.016.03.