

油气集输系统中管道腐蚀的电化学机制与控制

张亦彬 杨 藤

森诺科技有限公司 山东 东营 257100

【摘 要】：油气集输管道在含水、含盐、含二氧化碳和硫化氢等多相介质中工作，腐蚀行为具有局部化、耦合化和动态化等特点。管壁表面阳极溶解、阴极析氢或者吸氧反应形成腐蚀原电池，流动状态、温度、压力、矿化度、微生物代谢以及腐蚀产物膜都会影响电极反应的动力学。对集输系统中常见的均匀腐蚀、点蚀、垢下腐蚀、冲刷腐蚀、硫化物应力开裂进行分析，研究二氧化碳腐蚀、硫化氢腐蚀、溶解氧腐蚀和微生物腐蚀的电化学过程，建立包含介质调节、材料及涂层防护、缓蚀剂注入、阴极保护和在线监测的协同控制体系。代表性工况数据说明，降低水相酸度、控制氧进入、保持保护膜稳定，可以大大减小腐蚀电流密度；单一的防护措施不能适应多相流集输环境，必须按照腐蚀机理进行分区、分级、动态管理。

【关键词】：油气集输；电化学机制；二氧化碳腐蚀；缓蚀剂；在线监测

DOI:10.12417/2705-0998.26.13.025

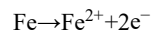
引言

油气集输系统连接井口、计量站、加热炉、分离器和外输设备，管道内介质一般有原油、天然气、地层水、固体颗粒和化学处理剂。生产水在管底沉积之后，容易形成连续水膜或者局部积液区，从而造成钢材表面产生阳极区和阴极区。伴随着压力、温度的变化，二氧化碳、硫化氢在水相中溶解的状态也会发生变化，管壁腐蚀速率也会有明显的时序波动。腐蚀造成壁厚减薄、穿孔泄漏、阀件失效，严重的时候还会引发含硫环境下的氢致开裂。传统的根据平均腐蚀速率来确定检修周期的方法，不能发现点蚀坑、焊缝热影响区和沉积物覆盖区的突然危险。以电化学反应为基础，结合流动、传质和腐蚀产物膜演化过程，可以更好地解释集输管道腐蚀发生的原因，也可以为控制参数的设定提供依据。

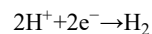
1 集输管道腐蚀的电化学基础

1.1 阳极溶解与阴极反应

碳钢在含水介质中的阳极反应可表示为：



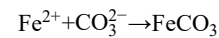
电子沿着金属内部从阳极区向阴极区移动，水相中的离子完成电荷传递。无氧酸性环境下的阴极反应主要是氢离子或者碳酸体系中的活性氢的还原过程。



二氧化碳溶解在水中生成碳酸，水解生成氢离子，使管壁附近 pH 值下降。部分钢材表面还会发生碳酸氢根参与的阴极还原，反应速率受界面 pH、流速、扩散边界层厚度的影响。腐蚀电位是由阳极极化曲线和阴极极化曲线的交点所决定的，腐蚀电流密度是表示金属溶解动力学水平的指标。

1.2 二氧化碳腐蚀与碳酸亚铁膜

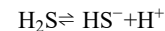
二氧化碳腐蚀的显著特点就是腐蚀产物有双重作用。钢材溶解释放的亚铁离子与碳酸根结合，生成碳酸亚铁膜



当管壁温度高、局部铁离子浓度达到过饱和状态的时候，碳酸亚铁膜就会慢慢变得致密起来，阳极溶解速率就会变慢。流速大、剪切应力高或者水相不断更新时，保护膜会被冲刷、溶解、反复修复，局部腐蚀就会加快。膜层不是固定的，它的保护作用是由孔隙率、厚度、附着力和晶体形貌来决定的。

1.3 硫化氢腐蚀与氢渗透

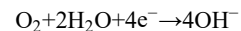
硫化氢溶于水后发生电离：



硫化氢既可以促进阴极反应，又可以和铁离子结合成硫化亚铁膜。硫化亚铁膜在一些情况下有阻滞作用，但是膜层疏松、开裂或者被流体剥离时，腐蚀就会变成局部快速溶解。阴极反应产生的原子氢一部分结合成氢气，另一部分进入钢材内部，在高强度钢、焊接接头或者高残余应力的地方，氢的聚集会引发硫化物应力开裂以及氢致鼓泡。

1.4 差异充氧与微生物影响

含氧水相进入集输系统后，氧还原反应可表示为：



沉积物下方、液滴边缘和管底积液区容易形成氧浓差电池，缺氧区为阳极，发生点蚀。硫酸盐还原菌、产酸菌、产甲烷菌等改变局部氧化还原电位、pH、硫化物浓度来促进腐蚀产物膜的破坏。微生物腐蚀和二氧化碳腐蚀常常同时存在，单纯依靠水质中硫酸盐含量来判定风险是不够的，还要考虑生物膜的形成以及代谢产物。

2 腐蚀行为的影响因素与风险表征

2.1 水相组成对腐蚀电流的影响

水相是电化学腐蚀发生所必需的条件。含水率增大时连续电解质的覆盖范围变大，氯离子能穿透或者破坏局部钝化膜，提高点蚀倾向。pH 降低时，阴极析氢反应更容易发生，腐蚀

电流也随之增大。高矿化度水相虽然增大了电导率，但是并不一定会使腐蚀速率线性提高；当高浓度盐分改变气体溶解度和水活度的时候，腐蚀过程就会受到复合的影响。

表1给出的是某碳钢在模拟集输水相中的一些电化学数据。试验温度60℃，二氧化碳分压0.10MPa，氯化物质量分数3.5%，流速1.5m/s，得到的是参数变化的趋势。

表1 模拟集输水相中pH对碳钢腐蚀行为的影响

pH	腐蚀电流密度 / $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	极化电阻 / $\Omega\cdot\text{cm}^2$	质量腐蚀速率 / $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$	表面形貌特征
	146	86	1.33	大量活性溶解区
5.0	92	137	0.84	腐蚀产物膜较疏松
5.5	58	214	0.53	局部膜层趋于连续
6.0	35	361	0.32	膜层较完整，点蚀减少

腐蚀速率按法拉第定律计算，表中代表性测试数据，实际数值与钢级、流速、气体分压有关。

由表1可知，当pH从4.5提高到6.0的时候，腐蚀电流密度降低约76%，极化电阻明显增大。该变化并不意味着单纯提高pH值就可以消除腐蚀，过量的碱化会造成结垢，沉积物又会形成垢下腐蚀电池，所以水质调节要与阻垢、排液措施相结合。

2.2 流动状态对电化学极化的影响

流动并非独立的机械腐蚀因素，而是通过改变电极表面的传质过程与极化状态介入腐蚀反应。流速升高时，管壁扩散层厚度减小，水相中的 H^+ 、 H_2CO_3 及溶解氧更快到达阴极区，阴极去极化作用增强；生成的 Fe^{2+} 又被迅速带离阳极界面，使阳极反应持续向金属溶解方向发展。由此形成的腐蚀电流增幅，本质上源于反应物与产物传递条件的变化。

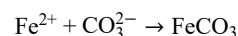
段塞流经过弯头、变径和低洼积液段时，壁面液膜呈周期性更新，腐蚀电位随气液交替发生波动。液膜较薄阶段容易受到氧扩散控制，积液阶段则可能转变为析氢或碳酸还原控制。若沉积物覆盖区与高速冲刷区相邻，两者之间还会产生电位差，裸露区域因阳极面积较小而承受较高的局部电流密度。流动状态评价因而应纳入极化曲线、传质系数和电化学噪声分析，而不能仅依据流速判断腐蚀程度。

2.3 腐蚀产物膜的界面电化学效应

腐蚀产物膜直接参与金属—溶液界面的电荷转移。碳酸亚铁、硫化亚铁及铁氧化物覆盖钢材表面后，会增加离子迁移与电子交换阻力，使电荷转移电阻 R_{ct} 升高，双电层电容降低。膜层致密且连续时，阳极铁溶解与阴极去极化反应均受到抑制；膜内若存在孔隙、裂纹或成分差异，膜覆盖区与裸露基体便会

构成电偶体系。

以碳酸亚铁膜为例，其沉积反应为：



该反应消耗界面附近的 Fe^{2+} 和 CO_3^{2-} ，改变局部pH与电极平衡。膜层破损后，裸露钢材成为阳极，周围大面积膜覆盖区承担阴极反应，形成“小阳极—大阴极”结构，点蚀坑内随即出现 Fe^{2+} 水解、氢离子积聚和氯离子迁入。坑内酸化又促进铁持续溶解，使局部腐蚀呈自催化发展。电化学阻抗谱中的膜层电阻和低频阻抗变化，可用于辨识保护膜由生成、致密到破裂的演化过程。

3 腐蚀控制技术及其协同应用

3.1 介质调控与统一防护体系

统一防护并非采用单一技术覆盖全部管段，而是按照相同的风险判据，将介质处理、药剂注入、阴极保护、涂层隔离和腐蚀监测纳入同一运行体系。井口、集气支线、站内管网与外输干线应建立统一的介质检测项目和腐蚀等级划分规则，使硫化氢分压、溶解氧、含水率、pH、氯离子浓度及细菌数量能够在不同环节连续衔接。

工艺端通过密闭输送、气液分离、低点排液和脱氧降低电解质覆盖程度；药剂端依据水量与腐蚀电流变化调整缓蚀剂注入浓度；设备端以涂层和阴极保护限制钢材电化学活性；监测端则利用电阻探针、腐蚀挂片和超声测厚验证防护效果。各项措施应共享运行数据，当含水率上升、保护电位偏移或腐蚀速率异常时，控制系统同步调整排液、加药和保护电流，避免不同防护环节相互割裂。

3.2 缓蚀剂的选型与注入管理

油气集输常用的吸附型有机缓蚀剂有咪唑啉类、季铵盐类和含氮、含硫杂环化合物。它的分子会以极性基团的形式吸附到钢的表面，疏水链段形成一层阻隔层，从而阻止阳极溶解以及阴极反应的发生。缓蚀剂的效果受温度、剪切、含水率、乳化状态、固体沉积等因素的影响，实验室静态评价的结果不能直接代替现场动态评价。

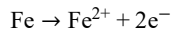
注入点应设在水相能充分混合、距离高风险部位足够近的地方。连续注入适合于腐蚀负荷变化小的系统，间歇冲击适合于停输后再启动或者低含水工况，但是不能造成局部浓度过高而产生乳化、起泡、分离困难。缓蚀效率可以按以下公式计算：

$$\eta = \frac{i_0 - i_{\text{inh}}}{i_0} \times 100\%$$

式中， i_0 为未加药时腐蚀电流密度， i_{inh} 为加药后的腐蚀电流密度。现场应将电化学测量、挂片失重和超声壁厚数据联合使用。

3.3 以阴极保护为核心的材料与表面防护

阴极保护是埋地集输管道控制外腐蚀较为有效的电化学方法，其原理是向被保护管道输入电子，使管体电位向负方向移动，从而压低铁的阳极溶解电流：



当外加电子使管体表面的阴极反应得到满足后，铁失去电子的趋势受到抑制，腐蚀速度随之下降。工程中可采用牺牲阳极法或外加电流法。牺牲阳极法利用镁、锌等电位更负的金属优先溶解，具有结构简单、干扰较小的特点，适合短距离支线及电流需求较低的管段；外加电流法借助整流设备和辅助阳极持续供电，输出电流可调，更适合长距离管网和高电阻率土壤环境。

阴极保护效果取决于管地电位分布，而非整流器输出电流的大小。保护电位不足时，防腐层破损点仍会发生阳极溶解；保护电位过负，则可能引起析氢、涂层剥离及高强钢氢损伤。运行中应测量通电电位、瞬时断电电位和电流衰减，并排除电压降造成的测量偏差。对于站场接地网、平行管线、高压直流设施及电气化铁路邻近区域，还需评估杂散电流的流入与流出位置，因为电流离开管体的区域常形成集中腐蚀。

防腐层与阴极保护具有互补关系：完整涂层减少保护电流需求，阴极保护则控制涂层针孔、划伤和老化缺陷处的腐蚀。工程设计中应根据涂层类型、破损率、土壤电阻率和管道表面积核算保护电流密度，并通过测试桩、参比电极和远程监测装置检查保护电位。发现保护盲区后，可采用增设阳极床、调整输出电流、修复绝缘接头或补强防腐层等方式恢复电位连续性。

3.4 在线监测与闭环维护

腐蚀监测要形成“过程参数-电化学信号-实体损伤”的对应联系。电阻探针可以反映金属截面积的变化，线性极化电阻法适合于连续估算瞬时腐蚀速率，电化学阻抗谱可以分析膜层电阻和界面电荷转移的过程；超声测厚、智能清管和腐蚀挂片可以校验长期壁厚损失。

监测点应设在管底、弯头、分离器入口、低点排液处和含

水相汇合处。数据平台要同步记录压力、温度、流量、含水率、药剂泵频率和 pH，不能把腐蚀速率异常简单地归因于材料问题。表 2 给出了面向现场运行的控制项目及判据类型。

表 2 集输管道腐蚀控制项目与监测判据

控制环节	主要措施	监测参数	判据或处置方向
水相管理	分离、排液、脱氧	含水率、溶解氧、pH	排液不畅或氧升高时调整工艺
气体控制	脱碳、脱硫、密闭输送	CO ₂ /H ₂ S 分压	超出设计介质等级时重新核算腐蚀余量
药剂防护	连续或间歇注入缓蚀剂	注入量、腐蚀电流、挂片失重	腐蚀速率上升时开展浓度和覆盖率评价
表面防护	内涂层、衬里、阴极保护	涂层电阻、电位、漏点	发现缺陷后局部修复或调整保护电流
结构维护	清管、除垢、焊口复检	沉积物厚度、超声壁厚、点蚀深度	对高风险部位缩短检测周期
生物控制	杀菌剂、营养源管理	ATP、菌量、硫酸盐还原菌	根据生物膜变化调整杀菌方案

控制体系要形成闭环，现场数据引起风险识别，风险识别决定药剂、清管或者检修措施，处理结果还要用电化学和壁厚数据来验证。对有深点蚀或者裂纹征兆的管段，不能只用平均腐蚀速率来判断是否可以放行，应该用最大坑深、裂纹长度和剩余强度来进行安全评价。

4 结论

油气集输管道腐蚀实质上是钢材阳极溶解和介质中阴极反应共同作用所形成的电化学过程，二氧化碳、硫化氢、溶解氧、氯离子、流动剪切以及微生物代谢都会影响到界面反应和腐蚀产物膜的稳定性。连续水相、管底沉积、焊接缺陷和流型突变处容易形成局部腐蚀电池，平均腐蚀速率不能完全体现它的失效风险。腐蚀控制要针对水相停留、酸性气体进入、保护膜稳定、局部缺陷暴露这四个问题进行。分离排液、脱氧可以削弱腐蚀介质，缓蚀剂可以减缓界面反应速度，内涂层、耐蚀材料和阴极保护可以减少钢基体的暴露，电化学监测、超声测厚和智能清管可以为控制效果提供验证依据。针对多相流及工况变化，采用分区风险加药、定点检测、周期性维护的方式比单一的防腐措施更符合油气集输系统长期运行的要求。

参考文献：

- [1] 李康.油气集输系统中管道腐蚀的电化学机制与控制[J].石油工程建设,2026,48(6):141-143.
- [2] 高建伟,黄鹏,张思北,等.油气集输管道内腐蚀因素的研究进展[J].电镀与涂饰,2026,45(3):56-66.
- [3] 蒲辰宇.基于缓蚀剂优化的油气集输管道腐蚀防护技术研究[J].石化技术,2026,33(2):202-204.
- [4] 张超,张桐硕,刘震,等.油气集输管道电化学腐蚀机理及速率预测分析与研究[J].内江科技,2025,46(7):126-127.
- [5] 刘诚.油气集输管道内腐蚀及内防腐技术[J].中国储运,2025,(5):78-79.