

# 石化高温高压工况下压力仪表的腐蚀失效机制 与防护优化经济效益

王佳伟 (中建安装集团有限公司, 江苏 南京 210000)

**摘要:** 石化行业在高温高压环境下, 压力仪表面临  $H_2S$  应力腐蚀、高温氧化和氯离子点蚀等腐蚀问题, 影响设备的稳定运行。通过分析失效案例, 研究提出了优化防护策略, 包括材料选型、表面涂层和智能诊断系统。这些措施显著延长了仪表使用寿命, 降低了维修成本, 提高了生产效率, 具有重要的经济和应用价值。

**关键词:** 石化; 高温高压工况; 压力仪表; 腐蚀失效机制; 防护优化策略

中图分类号: TE980.7 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2026) 003-0059-03

## Corrosion failure mechanism and Protection Optimization Economic benefits of Pressure gauges under high-temperature and high-pressure working conditions in petrochemicals

Wang Jiawei (China Construction Installation Group Co., Ltd, Nanjing Jiangsu 210000, China)

**Abstract:** In the high-temperature and high-pressure environment of the petrochemical industry, pressure instruments are confronted with corrosion problems such as  $H_2S$  stress corrosion, high-temperature oxidation, and chloride ion pitting corrosion, which affect the stable operation of the equipment. By analyzing failure cases, the research proposed optimized protection strategies, including material selection, surface coating and intelligent diagnostic systems. These measures have significantly prolonged the service life of the instruments, reduced maintenance costs, and enhanced production efficiency, thus possessing significant economic and application value.

**Key words:** Petrochemical High-temperature and high-pressure working conditions; Pressure gauge Corrosion failure mechanism Protection optimization strategy

石化行业在高温高压环境中, 压力仪表的腐蚀失效问题长期限制着装置的安全稳定运行。在加氢反应器这类典型的工艺环境里, 压力仪表同时碰到  $H_2S$  应力腐蚀、高温氧化以及氯离子点蚀这些多重影响, 造成测量不准、密封失效这类故障经常发生<sup>[1]</sup>。现在国内外的研究大多集中在单一腐蚀因素的分析上, 对多场耦合作用下的失效机制理解不够, 防护技术存在材料选择不合理、结构设计有缺陷这类问题。现有的标准规范很难满足极端工况的需求, 智能监测的方法还不够完善。在这样的背景下, 开展石化高温高压环境中压力仪表腐蚀失效机制和防护优化策略的研究, 具有显著的现实意义和价值。

### 1 项目概述

以某沿海炼化一体化项目为实例, 这个工程处在高盐雾、高湿度的环境当中, 核心加氢装置长时间处在  $423\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $14.7\text{MPa}$  的极端工作环境里。项目运用的压力仪表需要去应对  $H_2S$  应力腐蚀、高温氧化以及氯离子点蚀等多重挑战, 其中反应器出口压力变送器在投产后的第 7 个月出现膜片晶间腐蚀开裂的情况, 使得测量偏差超过  $\pm 1.6\%FS$ 。经过初步分析之后, 失效的主要原因是 316L 不锈钢膜片在硫化氢与氯化物的

共同作用之下, 出现钝化膜破裂的问题, 同时高温还加快材料敏化的进程。这个案例突出显示出石化极端工况当中材料、环境、应力耦合作用的复杂性, 为后面的腐蚀机制研究提供典型的场景。

### 2 石化高温高压工况下压力仪表的腐蚀失效机制分析

#### 2.1 工作环境下的腐蚀类型及作用机理

在石化高温高压工况下, 压力仪表的腐蚀失效是多种腐蚀类型和极端环境条件协同作用的结果。 $H_2S$  应力腐蚀开裂在硫化物环境下尤其显著, 当硫化氢分压超过  $0.003\text{MPa}$  且系统压力达到  $14.7\text{MPa}$  时, 压力环境会加剧 316L 不锈钢膜片表面钝化膜的破裂, 促进阳极溶解通道的形成。氯离子和硫化氢的共同作用进一步加速了晶界裂纹的扩展, 而高温 ( $423\text{ }^\circ\text{C}$ ) 和高压环境使氯离子的渗透能力增强, 导致晶界处的腐蚀加速。温度超过  $400\text{ }^\circ\text{C}$  时, 高压和热应力的耦合作用使材料敏化, 晶界的  $Cr_2_3C_6$  碳化物析出增多, Cr 贫化区扩大, 导致晶界耐蚀性显著下降, 最终形成穿晶-沿晶混合型脆性断裂<sup>[2]</sup>。

高温氧化腐蚀也是压力仪表的一大威胁。在加氢反应器等设备中, 氧分压波动会导致金属表面生成不

稳定的氧化膜，而频繁的热循环会加速氧化层剥落，增加基体金属的消耗。316L 不锈钢膜片在极端工况下运行 237 天后，表面  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  氧化层局部剥蚀，造成厚度损失  $12\mu\text{m}$ ，影响测量稳定性。此外，高温高压水蒸气环境可能导致氢脆现象，氢原子扩散到金属内部，形成微裂纹并最终导致仪表失效。多种腐蚀介质的相互作用加速了压力仪表的损伤过程， $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{CO}_2$  的混合环境共同形成复杂的协同腐蚀机制，导致腐蚀速率显著提高。

## 2.2 腐蚀对压力测量精度与结构完整性的影响

压力仪表的测量准不准，很大程度上和敏感元件的机械性能以及电学特性有关。腐蚀现象会使得金属膜片厚度变薄或者局部出现穿孔，直接对它的弹性模量以及应变响应产生影响。某加氢装置的压力变送器在使用过程中，316L 不锈钢隔离膜片因为  $\text{H}_2\text{S}$  腐蚀，有效厚度从最开始的  $0.5\text{mm}$  减少到  $0.42\text{mm}$ ，弹性变形的范围缩小 17%，结果满量程的输出信号漂移达到  $2.3\text{mV}$ 。另外，晶间腐蚀产生的裂纹沿着焊接热影响区延伸，使得惠斯通电桥的应变片基底附着强度降低，零点漂移量增加到标准值的 2.8 倍。

在高温高压的环境里，腐蚀过程会对仪表的密封完整性造成破坏。某重整装置的压力传感器，其 Inconel 625 合金波纹管在运行 18 个月后，表面氧化层和基体之间形成厚度在  $30$  到  $50\mu\text{m}$  的硫化镍过渡区，因为热膨胀系数不一样，密封面就出现微裂纹。当系统压力波动到  $12.4\text{MPa}$  的时候，测量腔室里的硅油介质通过裂纹漏出来，不仅让毛细管传压效率降低 34%，还使得传感器内部的参考压力不准确<sup>[3]</sup>。交变载荷与腐蚀环境协同作用通过应力集中（系数 3.7）、裂纹扩展速率提升 41% 及晶界 Cr 贫化（最低 9.6%）等机制降低疲劳寿命。

## 2.3 典型腐蚀失效案例及机理分析

在加氢反应器出口压力变送器的腐蚀失效案例中，经过 237 天运行后，316L 不锈钢膜片出现了网状裂纹，裂纹呈现穿晶 - 沿晶混合扩展模式。微观分析揭示（如图 1），裂纹区域存在硫元素聚集，且 Cr 元素含量显著降低。电化学测试表明膜片表面钝化膜局部破坏，阻抗值由  $34.7\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$  降至  $7.9\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。腐蚀过程展现了氯化物与硫化氢的协同腐蚀作用，氯化物首先在缺陷处形

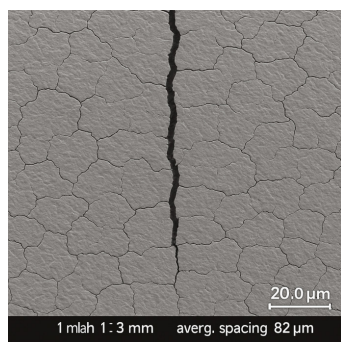


图 1 微观结构分析图

成蚀坑，硫化氢在蚀坑底部与金属离子反应，生成硫化物并加速腐蚀过程。此过程中，膜片表面的裂纹沿着敏化的晶界扩展，形成微电偶腐蚀机制。

失效膜片的晶界腐蚀明显，透射电镜观察到有连续分布的  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  碳化物及 Cr 贫化区，且材料的敏化程度在  $423\text{℃}$  长期作用下达到 ASTM 标准 4 级。电化学测试显示贫 Cr 区和基体相比开路电位负移  $182\text{mV}$ ，晶界应力集中加速裂纹扩展。温度梯度对腐蚀行为的影响也不可忽视，膜片边缘的温度低于中心区域，产生电位差并导致电化学噪声增大。温差引起的热应力降低了材料屈服强度，并促进氯离子扩散，形成氯离子富集带，从而使得温度交界区的腐蚀速率达到  $0.26\text{mm/a}$ ，成为决定仪表寿命的关键因素。

## 3 防护优化策略

### 3.1 材料选型与表面防护涂层技术

针对案例项目加氢装置  $423\text{℃}/14.7\text{MPa}$  极端工况下的腐蚀防护需求，采用三级梯度材料组合方案：工艺介质侧选用哈氏合金 C276，其钼含量 16% 与镍基体形成稳定钝化膜，在含  $1380\text{ppm}$  氯离子介质中临界点蚀温度达  $150\text{℃}$ ；中间过渡层采用  $0.1\text{mm}$  厚钼箔，凭借其优异氯离子耐受性建立腐蚀屏障；仪表侧采用超低碳 316L 不锈钢，碳含量严格控制在 0.02% 以下以抑制晶界碳化物析出。实际运行数据表明，方案能够将膜片年腐蚀速率降至  $0.02\text{mm}$  以下，电化学阻抗值提升至  $25\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ ，使用寿命大幅度延长至 63 个月。失效分析显示，材料表面形成厚度  $8\text{--}12\mu\text{m}$  的致密  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{--MoO}_3$  复合氧化膜，能有效阻隔  $\text{H}_2\text{S}$  与氯离子的协同腐蚀作用<sup>[4]</sup>。

表面防护技术主要是要解决涂层在复杂工况里的稳定性问题。 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiN}$  纳米叠层涂层运用多靶材磁控溅射工艺，基底温度控制在  $300\text{--}350\text{℃}$ ，工作气压保持在  $0.3\text{--}0.5\text{Pa}$ ，沉积速率维持在  $5\text{--}8\text{nm/min}$ 。智能自修复涂层系统选用粒径分布在  $50\text{--}80\mu\text{m}$  的微胶囊，运用原位聚合法来制备，芯材装载率达到 85% 以上。在  $400\text{℃}$  以上工况中， $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiN}$  纳米叠层涂层会出现界面扩散和硬度下降，微胶囊系统自修复效率降低，激光微织构发生形变，进而影响防护效果。表面微织构处理运用激光加工工艺，脉冲频率  $20\text{kHz}$ ，能量密度  $15\text{J/cm}^2$ ，扫描速度  $500\text{mm/s}$ 。

### 3.2 工艺改进与仪表结构防护优化

针对压力仪表焊接接头易腐蚀问题，采用低热输入  $12\text{--}15\text{kJ/cm}$  的  $1070\text{nm}$  激光 - 脉冲 MIG 复合焊，配合 98%Ar 加 2% $\text{CO}_2$  混合气体，流量  $18\text{--}22\text{L/min}$ ，通过优化焊接顺序和对称分段跳焊，结合  $650 \pm 10\text{℃}$  局部感应加热控制残余应力。隔离膜片采用双曲面设

计, 曲率半径 85mm, 引压接口设置多级减压槽, 槽深 1.5mm, 宽 2mm, 间距 8mm。波纹管组件采用变壁厚设计, 波峰厚 0.3mm, 波谷厚 0.45mm, 承压转角采用 R2mm 以上圆角过渡。设计三级介质隔离防护体系, 在传统隔离膜基础上增加容积占导压腔 30% 的中间缓冲腔, 填充特殊氟油介质。隔离膜片采用梯度材料组合, 工艺介质侧为哈氏合金 C276, 中间层为钽箔, 仪表侧为 316L 不锈钢, 通过真空扩散焊连接。压力仪表采用引压管式结构设计, 通过双套管系统应对加氢装置极端工况: 内层直接接触含  $H_2S/Cl^-$  介质; 外层 10mm 316L 不锈钢套管形成隔离屏障, 环隙充氦气保持 0.3–0.5MPa 正压。

### 3.3 在线监测与智能诊断系统构建

针对石化装置压力仪表的腐蚀监测需求, 运用基于工艺参数关联分析的诊断方法。系统会实时采集反应器温度、压力、介质组分等关键工艺参数, 接着建立与仪表腐蚀速率的定量关系模型。借助在线氢通量监测技术, 运用固态氢传感器来检测金属表面的氢渗透量, 测量灵敏度达到 0.01ppm, 可以早期预警应力腐蚀开裂的风险。配套开发的腐蚀产物分析模块, 借助 X 射线衍射技术实时识别  $FeS$ 、 $FeCl_2$  等特征腐蚀产物, 分析周期缩短到 2h。系统整合 DCS 历史数据, 建立介质腐蚀性指数计算模型, 综合考虑  $H_2S$  分压、 $Cl^-$  浓度以及 pH 值等参数, 得以实现腐蚀风险的动态评估。

系统设置三级预警机制, 当腐蚀速率超过 0.15mm/a 的时候, 就会启动维护预案, 结合装置运行周期智能推荐最佳检修窗口, 具体情况如表 1 所示。借助整合工艺操作数据以及设备状态信息, 形成覆盖全生命周期的腐蚀防护决策支持体系。

表 1 三级预警机制

预警等级	响应措施	技术支撑	执行时限
初级预警	加强在线监测频率至 4h/次	超声波测厚系统	24h 内响应
	启动腐蚀产物成分分析	在线氢通量监测	
中级预警	调整工艺参数优化操作条件	电化学阻抗谱分析	72h 内处置
	实施局部防护涂层修复	红外热成像检测	
	更换关键密封部件	微观结构分析	
高级预警	启动备品备件准备工作	剩余寿命评估模型	立即执行
	制定检修方案		
	立即停机检修	数字孪生仿真系统	
	整体更换受损仪表	材料失效分析实验室	
	全面腐蚀防护系统评估	智能决策支持平台	
	根本原因分析		

在诊断策略方面, 运用基于失效模式的专家系统架构。系统知识库包含 12 类典型腐蚀失效案例的特征参数阈值, 比如晶间腐蚀对应的 Cr 贫化区宽度阈值设定成 500nm。运用多参数关联分析算法, 当介质温度超过 400℃ 并且  $H_2S$  浓度大于 800ppm 时, 就会

自动触发硫化物应力腐蚀诊断流程。现场安装的超声波测厚系统每隔 8h 扫描关键部位, 壁厚测量精度  $\pm 0.1mm$ , 数据会自动录入腐蚀速率趋势模型<sup>[5]</sup>。

### 4 压力仪表的腐蚀防护优化取得的经济效益

通过实施先进的腐蚀防护技术, 企业有效提高了压力仪表的使用寿命并降低了维修成本。采用哈氏合金、钽箔与超低碳 316L 不锈钢等材料组合, 成功将膜片的年腐蚀速率控制在 0.02mm 以下, 电化学阻抗值大幅提升, 使用寿命延长至 63 个月, 相比传统设计, 延长了设备的维护周期, 降低了替换和维修成本。智能在线监测系统的应用, 使得企业能够实时监控设备状态, 及时预警腐蚀风险并进行有针对性的维护, 避免了生产中断和意外停机, 减少了维修费用。

从经济效益角度来看, 这些防护措施显著提高了设备的可靠性, 降低了设备故障率, 提升了生产效率并减少了对外部维护服务的依赖。优化后的维护周期和精准的故障预测不仅节省了大量成本, 还增强了企业的市场竞争力, 为企业带来了持续的经济效益和更强的自主控制力。

### 5 结论

研究通过系统分析揭示了石化高温高压工况下压力仪表出现腐蚀失效的机制, 并且验证  $H_2S-Cl^-$  和温度梯度共同作用, 是导致 316L 不锈钢膜片失效的主要因素。借助开展梯度材料选型准则的建立工作、进行纳米复合涂层技术的开发以及实施仪表结构设计的优化, 形成一套完整的防护技术体系, 让仪表在极端工况下的可靠性有明显的提升。未来的研究需要进一步去探索新型耐蚀材料的应用潜力, 推进基于机器学习的腐蚀预测模型发展。

### 参考文献:

- [1] 唐志成. 高压管件压力监测仪表研究 [J]. 中国标准化, 2023(12):147-150.
- [2] 代思洋, 曹德舜, 李娜, 等. 腐蚀环境下石化压力仪表力学-化学耦合分析 [J]. 安全、健康和环境, 2025, 25(2):18-25.
- [3] 张贾雨. 压力容器的应力腐蚀及检验中的问题分析 [J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2023(4):4.
- [4] 张艺潇. 压力容器的应力腐蚀及检验中的问题研究 [J]. 中国设备工程, 2023(3):165-167.
- [5] 沈兵, 邱一男. 压力表接头开裂失效分析 [J]. 机电产品开发与创新, 2024, 37(4):208-210.

### 作者简介:

王佳伟(1995—), 男, 汉族, 江苏徐州人, 助理工程师, 大学本科, 研究方向: 化工石化医药自控设计。