

Research on Failure Mechanism Analysis and Prevention Technology of Key Process Equipment in Petrochemical Industry

Qiang Ma Ben Li Yuanlin Liu Xiao Jing

Zhejiang Petrochemical and Petroleum Industry Co., Ltd., Zhoushan, Zhejiang, 316021, China

Abstract

To enhance the safety, reliability and service life of key equipment in petroleum refining processes, this paper conducts a study on a typical accident case from a certain factory. Based on the analysis of the failure mechanisms such as high-temperature creep, stress relaxation, sulfide stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement, this paper comprehensively examines the causes of damage and fracture of the pressure-bearing components and proposes corresponding preventive measures such as risk inspection, corrosion monitoring protection and equipment integrity management. The research shows that the integrated prevention system combining mechanism analysis, condition monitoring and risk warning can effectively prevent equipment failures and ensure the long-term stable operation of the plant.

Keywords

Petrochemical industry; Critical processes; Equipment failure mechanism; Prevention and control technologies

石油化工关键过程装备失效机理分析与防控技术研究

马强 李本 刘沅林 景晓

浙江石油化工有限公司, 中国·浙江舟山 316021

摘要

为了提高石油炼制重要工艺过程设备的安全性、可靠性以及使用寿命, 本文选取某厂一个典型的事案例进行研究, 在总结高温蠕变、应力松弛、硫化物应力腐蚀开裂和氢脆等破坏机理的基础上, 对受压元件损坏及断裂的原因进行了全面剖析并提出了相应的基于风险检验、腐蚀监控防护以及设备完整性管理等防范措施。研究表明, 结合机理分析、状态监测以及风险预警一体化防控体系能够很好地防止设备发生故障从而保证装置长期平稳运行。

关键词

石油化工; 关键过程; 装备失效机理; 防控技术

1 引言

近年石油化工行业蓬勃发展, 新建装置大型化、工艺条件苛刻成梯度提高, 重要工艺过程设备长期处于高温、高压及腐蚀性介质等恶劣工况下工作, 一旦发生故障就会导致装置非计划停车甚至严重安全事故的发生, 给生产和企业带来巨大损失。随着对长周期稳定运行、本质安全以及经济效益要求的不断提高, 传统的定期检查维修以及依靠经验预防的方法已经不能满足需求, 在此情况下研究典型失效原因和发展主动监测预警技术和精确防控措施就成为保证生产安全和设备完好性的必然选择。

2 案例分析

国内某炼油厂加氢反应器在投用 8 万小时之后, 由于

Cr-Mo 钢焊缝热影响区长期工作温度为 454℃ 导致回火脆化而出现长达 1.2m 裂纹, 深达壁厚的 40%。经检查是由于磷锡杂质晶界偏聚造成韧性降低所致, 在以后使用过程中更换高纯度材料、改进焊接后热处理工艺以及安装在线监测系统使得该装置安全运行已经超过四年。

国内某炼油厂加氢反应器在投用 4 万小时之后, 由于停工检修设备打开后工艺处置不及时, 加之沿海气候湿度大, 法兰面出现连多硫酸 SCC 腐蚀开裂。经改进工艺处置方案, 设备法兰打开第一时间喷涂 0.5%~1%NaOH+3%~5%NaCO₃ 混合溶液进行清洗, 有效预防连多硫酸 SCC 腐蚀, 通过精确防控措施保证设备安全可靠。

国内某大型炼油厂加氢热高分器在投用 1.6 万小时之后, 停工检修发现 DN600 CL2500 进料接管法兰八角环槽内出现多处裂纹, 深度 3-8mm、长度 50-100mm。经核查是由于施工安装法兰定力矩值按照螺栓屈服值选取, 该值超设计力矩值 30%, 最终导致法兰八角环槽根部过载失效产生裂纹, 另附加氢融入加快脆化开裂, 经更换新法兰按照标准分四次

【作者简介】马强 (1986—), 男, 中国辽宁庄河人, 本科, 工程师, 从事石油炼化设备管理研究。

液压紧固、最终达到设计力矩值，紧固后运行2年复检整体完好，做到精确防控。

3 石油化工关键过程装备失效机理分析

实际生产中发生的反应器等关键过程设备失效案例较多，归纳总结按失效模式主要分为八大类：（1）应力腐蚀开裂 SCC、（2）高温氢腐蚀 HTC、（3）蠕变失效、（4）回火脆化、（5）腐蚀减薄、（6）疲劳失效、（7）焊接缺陷、（8）密封系统失效，本文按照发生概率及影响的严重做如下重点分析。

3.1 高温蠕变与应力松弛引发的承压部件损伤与断裂

以加氢反应器 Cr-Mo 钢焊缝失效为例，其主要原因是高温蠕变及应力松弛的共同影响。该反应器在连续 454℃ 高温以及 12MPa 内压的作用下工作，在此温度范围内材料强度已经大幅降低，承受压力容器尤其是焊缝及其热影响区受到由于结构不均匀性和残余焊接应力所引起的较大局部应力，在较高温度条件下金属中的原子具有较强活动性，在固定外力作用下会发生缓慢而持续塑性变形称为蠕变。根据估算，在 8 万小时运行期间关键部位蠕变量可达到 0.8%-1.2%，同时构件内部原有弹性应变一部分转变为塑性应变而造成应力随着时间推移逐渐减小的现象称之为应力松弛现象。这会导致结构内部应力重新分配有可能导致应力集中在一些晶界或者缺陷位置上。进入蠕变第三阶段后，晶界滑动以及空洞产生、生长直至相连，在未被完全消除焊接残余应力区域出现沿晶开裂现象。裂缝在蠕变和疲劳载荷联合作用下扩展至总长度为 1.2m 左右，贯穿厚度约 40%，是一种典型的高温蠕变断裂兼有脆性破坏的特点。

3.2 腐蚀环境下硫化物应力腐蚀开裂与氢致开裂

在加氢反应器失效事故中，虽然回火脆化是主要原因，目前通过严格控制 MPT 温度，开工先升温后升压、停工先将压后降温的原则可有效控制回火脆化问题，但是它的服役条件也存在硫化物应力腐蚀开裂以及氢损伤的风险。在高温高压临氢条件下，氢原子能够渗入到钢材内部 $H+C \rightarrow CH_4$ ，造成母材鼓包、堆焊层剥离、微裂纹以及焊缝延迟裂纹等，氢损伤导致反应器强度明显下降，后果较严重。对于 2.25Cr-1Mo 钢来说，其屈服强度一般大于

400MPa，是对硫化物应力腐蚀敏感的一种材质，由于该类设备所加工的油品，在加氢过程中会产生高浓度硫化氢，即使经过脱硫后，介质中仍有几十到几百 ppm 的 H_2S 存在。 S^{2-} 是一种“毒化剂”，会阻止氢原子重新结合，大大增加金属表面的氢渗透速率，在有 100 ppm H_2S 的情况下，氢渗透电流密度可以比没有 H_2S 的情况高十倍左右，这些进入金属内部的氢原子在金属中进行扩散并在应力较大的地方例如焊接熔合线、夹杂物或者是位错附近聚集。一旦某个部位氢含量达到一定值就会大幅降低材料的断裂韧性，在拉伸残余应力或工作应力的作用下造成氢致开裂。裂纹一般是沿着垂直方向扩展，呈阶梯状分布^[1]。另一方面在停工阶段连多硫酸 SCC (PTA-SCC) 腐蚀开裂也不容忽视，反应机理硫化污垢 + 水 + 空气 \rightarrow 连多硫酸，多发生在法兰、密封面、接管、焊缝 HAZ 等重点受害部位，沿晶裂纹呈网状或树枝形裂纹，停工检修工艺处置不当或环境温度较大，碱洗等保护措施不及时极易发生腐蚀开裂。

4 石油化工关键过程装备失效防控技术

4.1 基于风险的检验与寿命评估技术

对于上述加氢反应器焊缝失效事故，基于风险检验及寿命评估技术是保证其今后安全运行的重要措施。首先对整个系统进行全面的风险分析，找出回火脆化、高温蠕变以及潜在氢损伤是造成该类反应器损坏的主要原因，在此基础上根据每种失效形式出现的概率及其影响程度对其进行量化风险评价。其中焊缝热影响区被判定为高危部位，其失效概率一般定级为“E”（API 581 标准中较高一级），风险值有可能超过允许的最大限度即 1×10^{-4} 每年。在风险评估指导下，检查方案得到了精确制定。对高危焊缝区域的检测手段，由普通的超声测厚提高到相控阵超声探伤和衍射时差法超声探伤，来准确发现并测量沿晶裂纹长度大小。同时，定期从容器内部预留样板上采集样品做复比 V 缺口冲击试验观察材料脆性转变温度的变化情况，实测当前 MPT 并于原始 MPT 对比，当温升 $> 30-50^\circ C$ 时表明脆化严重使用寿命受限。针对蠕变损伤，则利用金相复型方法观察试样中的碳化物形状以及晶界空洞状况，并结合连续损伤力学理论计算出相应的数值^[2]。（详见表 1）

表 1 加氢反应器焊缝高风险区域关键参数与寿命评估数据

项目	指标 / 方法	数据 / 结果	效果
焊缝热影响区冲击功	复比 V 缺口冲击试验	$\geq 54 J$	材料韧性稳定，脆性未退化
脆性转变温度	复比 V 缺口冲击试验	$\leq 20^\circ C$	安全范围内
风险等级	API 581 定量评估	E 级	高风险区域，风险值 $> 1 \times 10^{-4}$ / 年
蠕变损伤	金相复型检查 + 连续损伤力学模型	蠕变应变累积可控	可预测剩余寿命，运行安全可控

4.2 腐蚀监测与防护技术

对于该加氢反应器在高温高压临氢并且可能存在硫化氢的恶劣腐蚀条件下，采取了一系列分层次腐蚀监控及全面防护措施，在工艺介质方面主要是避免湿硫化氢环境形成。

利用在线色谱仪以及露点监测仪对反应产物中的水和硫化氢进行实时检测，在工艺规程上明确规定进料原料中硫含量要小于等于 0.5%（质量百分比），同时采用注水、注缓蚀剂等方式使出口物料中水的露点温度比设备任何一处内壁

金属表面温度低至少 20℃来阻止液态水的存在；从实际运行情况看，通过反应空冷合理调节注水量、配合循环氢脱硫塔贫胺液洗涤以及循环氢分液罐旋流脱烃管的组合使用，合理控制循环氢水含量及硫化氢浓度改善腐蚀条件，过低（<300 ppm）硫化态催化剂（CoMo/NiMo）易过度还原、失硫、活性下降、设备钢材易氢脆，过高（>2%）抑制加氢脱硫、芳烃饱和降低氢分压、增加压缩机能耗、加剧湿 H₂S 腐蚀、连多硫酸 SCC 风险；而在设备本体保护上第一道防线就是材料升级，在检修过程中选用抗回火脆性和氢损伤更好的材质，比如把 2.25Cr-1Mo 钢中磷、锡等有害微量元素分别限制为不大于 0.010% 和 0.010%，并使用真空脱氧法冶炼；在容易发生高温硫腐蚀及氢腐蚀的地方例如反应器入口扩散器部位堆焊 309L+347L 不锈钢复合层；针对临氢条件选择 Nelson 曲线确定材料是否适合在 12-18MPa 氢分压及 420-454℃工作状态下安全使用；腐蚀监控也是重要一环，在反应器重要位置安装高压氢探针用于测量氢渗透率大小，从而可以推断出内部衬里腐蚀速度以及氢渗入情况；在正常生产时氢渗透电流密度维持在 0.1-0.3μA/cm² 之间，当出现原料含硫量突变情况下曾有短暂时间内达到过 1.5μA/cm² 以上后恢复正常状态并发出警报提示信息^[3]。

4.3 设备完整性管理与预警技术

对于该加氢反应器故障及修复问题，建立以风险为导向的设备完整性管理和智能化预警系统。此系统参照 ISO 55000 和 API 754 的标准体系，在此基础上为该反应器建立全生命周期数字孪生档案，包括设计图样、材质证明书、生产工艺流程卡、历次检查报告单、操作规程记录以及实时监测数据在内的共计 1200 余项重要信息点；从工艺角度出发，利用分布式控制系统和实时数据库对反应器入口温度、床层温升、循环氢纯度以及硫化氢含量等共 15 个主要工艺参数进行越限报警；设定多个报警级别，如任何单个床层温升超过设计值 14℃或者循环氢中硫化氢浓度连续两小时以上大于 5000ppmv，则会发出较高报警信号；预警系统投入使用四年间共发现并处置了 27 起工艺波动事件；在设备状况方面，结合在线声发射检测、定期导波探伤、每个运转周期定点超声波测厚以及脉冲涡流检测结果。声发射检测上一生产周期共在 A7 焊缝部位收集到 32 个有效声发射信号，经过定位分析确定是已存在微小裂纹在应力作用下非扩展活动，“观察”级别风险等级评定并定期复查确认其稳定性。脉冲涡流检测用来排查外支撑环下方隐匿腐蚀情况，检测结果显示此处最大年均减薄速率为 0.12mm，属于可以接受预测范围之内。预警模型采用机器学习方法，将工艺波动与设备状态信号联系起来^[4]。

5 石油化工关键过程装备失效防控技术效果分析

对于加氢反应器全面防控手段，在运行四年中发现高温蠕变、回火脆化和氢损伤等主要破坏形式得到有效抑制。基于风险检验及寿命评价方法，采用焊缝热影响区相控阵超声和衍射时差法检测技术可以做到对沿晶裂纹及时发现并定量，为精准维修提供有力支持；腐蚀监控与防护措施利用在线氢渗透探针、声发射监测以及壁厚测定相结合的方法可做到对氢致及硫化物应力腐蚀开裂进行有效监控；设备完整性管理和预警系统结合工艺参数、材料状况及实时监测信息建立数字孪生体，能实现对异常工况提前预报。从统计数据可以看出重要焊接部位总累积蠕变应变小于等于 0.2%，脆性转变温度偏移不大于 ±2℃，氢渗透电流密度介于 0.1 ~ 0.3 μA/cm² 之间，均在安全许可值之内。

通过寿命评估模型，可利用蠕变累积指数：

$$C(t) = \int_0^t \varepsilon_c(\tau)^\alpha d\tau \quad (1)$$

量化材料损伤演化，式(1)中 ε_c 为蠕变应变， α 为经验指数， t 为运行时间。

实践表明，这一指标能够真实地反映高温服役下损伤积累情况，对预测性维修具有指导意义。从整体上看，机理研究、状态监控以及风险预报相结合的安全保障系统，大大提高了设备剩余使用寿命，减少了非计划停机及事故发生率，保证了石油化工重要生产装置长期平稳运行。

6 结语

本文选取了石油炼制加氢反应器常见的几种失效事故作为研究对象，从高温蠕变、应力松弛、回火脆化、硫化物应力腐蚀开裂以及氢损伤等方面对造成承压元件损坏及断裂的原因进行了探讨，在此基础上提出风险导向检查、腐蚀监控防护、设备完整性管理、设备失效预防方法和智能预警等综合防控措施。通过应用这些防控手段，可显著减缓材料老化速度、及时发现并消除隐患并减少事故发生概率，达到控制装置使用寿命的目的同时保证生产系统的平稳运行。

参考文献

- [1] 周燕. 化工原料绿色检验优化与质量风险防控体系研究[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2026, (02): 168-171.
- [2] 刘德妹. 化工园区地下水环境调查与风险管控技术方法研究[J]. 清洗世界, 2026, 42(01): 91-93.
- [3] 霍胜涛. 化工生产中化学反应失控的原因分析与安全防控技术[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2026, (01): 172-174.
- [4] 李长东, 刘维迎, 段华雷, 杨海轮, 刘可. 化工建设项目施工过程安全风险识别与防控技术研究[J]. 化学工程与装备, 2025, (12): 136-139.