

鲁奇低温甲醇洗绕管式换热器内漏经济影响与治理优化

王学森 (中海油惠州石化有限公司, 广东 惠州 516086)

摘要: 某煤制氢装置鲁奇低温甲醇洗单元1#绕管式换热器频发的内漏问题,造成原料气与换热介质互串、产品及副产品指标超标,严重影响装置连续生产与经济效益。本文剖析了内漏引发经济损耗的核心诱因,对标国内同类装置故障案例总结了行业共性规律。基于此制定并实施了针对性治理措施,不仅从根源上遏制了内漏故障,还实现了装置整体经济运行效益跨越式提升。为同类型换热器运维及化工装置经济运行优化提供了切实可行的工程参考。

关键词: 低温甲醇洗; 绕管式换热器; 内漏治理; 经济损失; 运行效益

中图分类号: TQ051.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 012-0055-03

Economic Impact and Optimization of Internal Leakage in Lurgi Low-Temperature Methanol Wash Coiled Tube Heat Exchanger

Wang Xuesen (CNOOC Huizhou Petrochemical Co., Ltd., Huizhou Guangdong 516086, China)

Abstract: The frequent internal leakage in Unit 1# coiled tube heat exchanger of a coal-to-hydrogen plant's Lurgi low-temperature methanol wash unit caused cross-contamination between feed gas and heat transfer medium, leading to excessive product and by-product parameters that severely impacted continuous production and economic efficiency. This study analyzes the core causes of economic losses from internal leakage and summarizes industry-wide patterns by benchmarking domestic failure cases. Targeted optimization measures were implemented, effectively curbing leakage at its source while achieving a significant leap in overall operational efficiency. The findings provide practical engineering references for maintenance of similar heat exchangers and optimization of chemical plant operations.

Keywords: low-temperature methanol wash; coiled-tube heat exchanger; internal leakage control; economic loss; operational efficiency

1 装置及设备概况

某煤制氢装置低温甲醇洗单元采用鲁奇经典工艺,1#绕管式换热器作为系统首台关键冷却设备,是保障后续深冷吸收工艺稳定、实现装置经济运行的核心。该设备壳程通变换后原料气,管程为两股CO₂产品气及一股变换净化气,可将原料气温度由40℃降至17℃,为深冷吸收奠定温度基础。

设备核心设计参数如下:管程设计压力4.0/0.6 MPa,壳程设计压力4.0MPa;设计温度0.5℃~80℃;换热管选用S31603耐低温、抗腐蚀材质;结构为缠绕管式,管板采用胀焊结合密封结构,保障管壳程介质隔离效果。

实际生产中,该换热器多次出现内漏故障,系统工艺参数呈现明显异常:CO₂管程总硫含量短时间骤升;变换净化气管程CO₂含量超量程,导致PSA吸附系数很低,氢气回收率下降严重;经多次采样验证,管壳程介质发生互串,判定为换热管本体或管板接头部位泄漏,直接导致装置生产工况紊乱,各项经济运行指标持续恶化。

2 内漏的表现、危害及经济损失构成

2.1 工艺运行层面异常

内漏发生后,CO₂产品气中总硫含量、变换净化

气中CO₂含量快速上升,致使下游CO₂用户杂质超标严重,停止生产;PSA系统吸附系数减小,PSA原料气硫含量超标,威胁下游PSA单元吸附剂使用寿命,甚至引发停车,造成生产连续性中断。

2.2 设备运行层面损伤

内漏导致换热器泄漏缺陷加快扩大,并且泄漏介质高速冲刷和化学腐蚀相叠加,导致换热管管壁变薄和管板接头失效区域增大,降低了设备使用寿命。频繁发生内漏也会引起系统冻堵和局部腐蚀加重的后果,加大了非计划检修频率及现场检修的困难。

2.3 经济损失层面构成

内漏使设备的经济运行受到各方面的伤害,并随着泄漏的时间和泄漏的程度增加而不断增大,直接经济损失主要表现在CO₂用户停产造成的产物直排流失,PSA效率降低引起的氢产损失以及设备检漏,堵管和维修工作中的人工,备品备件和机具等各项直接成本。

间接经济损失主要是因非计划停车而发生的生产断电损失和下游装置随后的维修和更换费用、换热效率降低导致装置生产效率下降、单位产品的生产成本增加,由于CO₂品质达不到要求而导致产品质量出现争议从而影响了企业在市场中的声誉和合作收益。

3 内漏引发经济损耗的核心原因

换热器内部泄漏并非只由一个要素引起，它是由工艺介质温度低、压力高和含水量大等因素所决定，同时受到绕管结构特性及现场运行工况诸多要素的共同影响，各种诱因不仅会使其结构受损而且还会加大设备损耗，提高系统的能耗并使生产效率下降从而导致经济损失的增加，在这些因素当中冰堵冻胀是最为关键的因素。

3.1 冰堵冻胀导致管材破裂，引发基础性经济损耗

原料气中的饱和水及游离液滴进入低温换热器后，在局部低温区快速结冰，冰体膨胀产生的物理应力胀裂换热管；冰粒随高速气流冲击管壁、弯管及管板，形成冲蚀孔洞引发泄漏。该问题源于原料气含水、无喷淋甲醇、系统低负荷流速低、开停车违规低温带水运行等。冰堵冻胀造成的管材破裂为突发性损伤，直接引发介质互串，造成氢气减产、CO₂ 超标，形成基础性经济损耗，处理不及时将扩大冻堵范围，造成设备集群损伤和巨额损失。

3.2 气流冲刷与颗粒磨蚀，加剧设备损耗并推高维护成本

原料气携带的铁锈、催化剂粉末等固体杂质，在换热器入口、管束弯段、管板等高流速区形成持续冲刷。绕管式换热器流场复杂，边缘管束流速不均，局部冲刷更集中，长期运行致换热管管壁逐步减薄、穿孔泄漏。该类损伤为渐进式，初期泄漏量小、损失缓慢上升，但损伤持续扩大，不仅增加堵漏检修频次，还因管壁减薄降低换热效率，推高系统能耗和备品备件更换成本，长期累积损失可观。

3.3 低温疲劳与振动疲劳失效，增加非计划检修经济成本

装置频繁升降负荷、开停车，使设备内部压力、温度大幅波动，换热管承受剧烈交变应力；管程气流脉动、壳程流体扰动引发管束振动，在管板根部、弯管等应力集中区形成疲劳裂纹。低温下金属材料韧性下降，裂纹扩展加快，最终导致换热管开裂泄漏。该类失效隐蔽性强，初期微裂纹难以监测，泄漏时已造成多处管束损伤，需大面积查漏堵管甚至更换，检修周期长、费用高，还导致装置降负荷或停车，造成巨额产能和生产中断损失。

3.4 管板接头失效，成为持续性经济损耗重要诱因

绕管换热器采用胀接+焊接的管板接头密封结构，泄漏多集中于管-管板连接部位，主要原因包括：设备制造阶段胀接工艺控制不当、焊接工序存在气孔、未熔合等先天质量缺陷；设备运行中温度、压力交变导致接头密封性能松弛、微裂纹逐步扩展；检修堵管

作业后局部流场改变，流速与应力重新分布，加剧周边管板接头失效概率。管板接头失效多表现为局部性、多发性泄漏，难以通过单次检修彻底治理，导致系统介质持续微量互串，形成持续性能耗、物耗损失，同时频繁局部堵漏检修会增加人工和维护成本，长期影响装置经济运行水平。

3.5 局部腐蚀加速失效，降低设备使用寿命并增加重置成本

原料气中 H₂S、CO₂ 与微量游离水形成弱酸性腐蚀环境，在换热管壁死角、垢下、缝隙等区域产生点蚀、坑蚀，长期运行形成腐蚀孔洞。在低温、应力、冲刷共同作用下，腐蚀速率加快，最终引发泄漏。局部腐蚀为缓慢的老化损伤，逐步降低换热管有效壁厚和设备结构强度，大幅缩短设计使用寿命，导致设备提前大修或更换，增加重置成本；泄漏随腐蚀加剧扩大，能耗物耗损失同步攀升，不利装置长期经济运行。

4 国内同类装置案例及共性经济影响规律

国内煤化工、煤制氢、化肥、炼化等行业配套的鲁奇/林德低温甲醇洗装置中，原料气冷却段绕管式换热器内漏属于高发典型故障，设备失效模式高度相似，经济影响呈现明显行业共性规律，是制约装置效益提升的共性问题。

4.1 典型行业案例

①某大型煤制氢装置低温甲醇洗单元 1# 原料气冷却绕管换热器运行 16 个月后突发内漏，多根换热管弯段及近管板部位穿孔，装置降负荷 30% 紧急检修。解体分析确认，故障主因是原料气带水结冰冻胀与气流冲刷耦合，此次内漏致甲醇单耗上升 0.8kg/Nm³，制冷系统能耗增加 15%，直接经济损失超 200 万元，间接损失约 500 万元。②某炼化系统煤气净化装置原料气冷却绕管换热器多次重复性内漏，泄漏集中在管板边缘，系流场不均引发局部高流速冲刷、低温振动疲劳，且开停车温变过快加剧热冲击损伤。该设备年均检修 4 次，每次停车 2-3 天，年均产能损失超 8000t，甲醇消耗和系统能耗年均增加约 1200 万元，设备实际使用寿命较设计值缩短 50%。③某化肥企业低温甲醇洗装置绕管式换热器因局部腐蚀与管板接头失效耦合引发内漏，因泄漏发现较晚导致贫液严重污染，热再生系统全面瘫痪，装置被迫停车检修 15 天。此次事故造成直接检修、原料损耗费用超 300 万元，停车导致的产品订单、市场效益损失超 1000 万元，成为企业年度经济运行重大损失点。

4.2 行业共性经济影响规律

梳理国内多行业案例，总结内漏经济影响四大共性规律：一是损失规模与泄漏时间、程度正相关，初

期微量泄漏仅能耗物耗小幅上升,未及时处理则工况全面紊乱,损失呈指数级增长;二是间接损失远大于直接损失,非计划停车的产能、市场效益损失占总损失 70% 以上;三是内漏具有反复性,仅临时堵漏会使累计损失持续攀升,源头系统性综合治理可显著延长设备运行周期、降低损失;四是 80% 以上内漏损失由冰堵、冻胀、冲刷、振动引发,腐蚀和制造缺陷占比低,泄漏多集中在入口段、弯管、管板附近、边缘管束,为针对性治理指明方向。

同时梳理出内漏共性诱发因素:原料气带水、低温段防冻措施不到位,是冰堵冻胀首要原因;绕管结构先天流场不均,局部冲刷与振动加剧设备损伤;装置操作波动大、开停车流程不规范,热冲击与交变应力增加停车风险;上游除尘分液设施运行不佳,固体颗粒超标加剧管壁冲刷;检修堵管后局部负荷升高,流场与应力重分布,加速周边管束失效致泄漏反复。

5 基于经济效益提升的综合治理与优化措施

5.1 严控系统含水,从源头消除冰堵

以严格控制系统含水量为第一举措杜绝冰堵冻胀危险:加强原料气分液罐的每天的管理,避免满液带水等现象的发生;新建和稳定启用喷淋甲醇系统准确控制喷淋量和压力并通过降低介质冰点来抑冰;对设备启停车操作过程进行标准化,禁止在低温情况下带水工作以免冰堵冻胀造成的经济基础损失。

5.2 抑制振动与低温疲劳,减少非计划检修

从运行优化及设备改造两个维度对疲劳裂纹进行抑制:平缓地调控装置的升、降负载速率,使温度变化的速度严格地保持在每分钟不高于 30 摄氏度,以减少温度和压力交替变化所引起的反复的应激;对设备周围工艺管线进行了优化、增加适当的支撑、减少了气流脉动及设备共振等现象、减少了管束的振动;加大生产计划统筹力度,优化运行方案,尽量减少非计划开停车现象的发生,规避因温压骤变引发热冲击伤害事件发生,最大程度上降低设备出现渗漏几率,同时也减少了由于非计划停机和维护造成的生产能力损失。

5.3 提升检修与堵漏质量,避免泄漏反复

强化检修全流程管控,提升施工质量,避免泄漏反复造成的累积经济损失。一是采用高精度气压保压查漏技术,精准识别漏管位置,避免盲目堵管造成局部应力和流速分布失衡;二是执行标准化堵管工艺,选用高质量耐低温密封材料,合理控制单次堵管数量,避免局部流速过高加剧周边管束失效;三是检修中重点检查管板焊口与胀口密封性能,对存在缺陷的部位及时补焊。通过提升检修质量,实现漏点彻底治理,减少多次检修带来的人工、备品备件成本和产能损失。

6 内漏治理后的经济性分析

本装置对 1# 原料气冷却绕管式换热器实施系统性综合治理后,内漏故障得到彻底控制,装置生产工况恢复稳定并持续优化,各项经济运行指标显著改善,效果显著。设备维护层面,治理前换热器检修 2 次,检修直接成本和产能损失超 500 万元;治理后未再发生内漏故障,彻底消除检修直接成本和产能损失。产能和效益层面,治理前每次内漏都会导致 CO₂ 产品气长时间放空,产品氢产能下降,治理后实现稳定生产,PSA 原料气质量稳定达标,吸附剂使用寿命得到保障,减少了更换吸附剂的经济成本。综合来看,本次综合治理后,减少了装置非计划停工次数,装置实现长周期稳定运行,提升了企业市场供应能力和品牌形象,带来良好社会效益,为后续节能降耗、提质增效工作奠定了坚实的技术和管理基础。

7 结论

本次研究明确了内漏及后续经济损失的核心诱因,按影响程度依次为:冰堵冻胀破裂、气流冲刷磨损、低温振动疲劳、管板接头失效、局部腐蚀,其中冰堵冻胀是造成基础性、突发性经济损失的主导因素。本装置实施的严控系统含水防冰堵、减缓冲刷与颗粒损伤、抑制振动与低温疲劳、提升检修堵漏质量等系统性综合治理措施,从源头防控、过程管控、后期保障全流程解决了内漏故障,实现设备运行周期与装置经济效益双重提升。本文开展的内漏原因分析、经济性分析及制定的综合治理方案,为该装置后续设备运维和经济运行优化提供了明确指导,也为国内煤化工、煤制氢、化肥、炼化等行业同类型绕管式换热器的故障治理、节能降耗、提质增效工作提供了可复制、可推广的工程参考,对提升行业整体经济运行水平具有重要现实意义和应用价值。

参考文献:

- [1] 李选志. 低温甲醇洗绕管式换热器泄漏原因分析及处理 [J]. 煤化工, 2023, 51(4): 64-67.
- [2] 朱世勇. 低温甲醇洗系统换热器内漏典型案例与治理 [J]. 大氮肥, 2022, 45(3): 178-181.
- [3] 王洪彬. 鲁奇低温甲醇洗绕管换热器冻堵与泄漏防控 [J]. 石油化工应用, 2021, 40(10): 112-115.
- [4] 张明远. 化工设备泄漏治理的经济性分析与优化 [J]. 中国化工贸易, 2022, 14(28): 167-169.
- [5] 刘建峰. 低温甲醇洗装置节能降耗技术措施及经济效益分析 [J]. 化工设计, 2023, 33(2): 45-48.

作者简介:

王学森(1991-),男,汉族,河南焦作人,本科,助理工程师,研究方向:合成气净化。