

Analysis of Common Fault Causes and Targeted Maintenance of Tube and Shell Heat Exchanger

Shengchang Hu Hong Lu Bozhong Hao

Zhejiang Dingsheng Petrochemical Engineering Co., Ltd., Zhoushan, Zhejiang, 316200, China

Abstract

Shell-and-tube heat exchangers, as one of the most prevalent shell-and-tube heat transfer devices in chemical plants, perform continuous heat transfer functions across heating, cooling, condensation, evaporation, and heat recovery processes. Their operational status directly impacts plant energy consumption, product quality, and long-term stability. Both current heat exchanger standards and fixed-pressure vessel safety regulations have incorporated shell-and-tube heat exchangers into their compliance frameworks. In petrochemical facilities, typical configurations include fixed-tube-sheet, floating-head, and U-tube designs. The most prevalent issues in chemical plants involve four major failure modes: scaling blockage, corrosion perforation, tube end leakage, and vibration-induced wear. These failures often result from combined effects of medium properties, water quality fluctuations, thermal stress, flow velocity imbalance, and inadequate maintenance. This paper systematically analyzes the root causes of these common failures and proposes targeted maintenance strategies tailored to practical field conditions.

Keywords

Chemical industry; Shell-and-tube heat exchanger; Common faults; Cause analysis; Targeted maintenance

管壳式换热器常见故障成因分析与针对性检修

胡盛昌 陆宏 郝波众

浙江鼎盛石化工程有限公司, 中国·浙江 舟山 316200

摘要

管壳式换热器是化工装置中最常见的间壁式换热设备之一,在加热、冷却、冷凝、蒸发及热量回收环节承担连续传热任务,其运行状态直接影响装置能耗、产品质量与长周期稳定性。现行热交换器产品标准与固定式压力容器安全技术要求均已将管壳式换热器纳入规范体系,炼化现场则普遍存在固定管板式、浮头式和U形管式等典型结构。当前化工企业中此类设备的高发问题主要集中在结垢堵塞、腐蚀穿孔、管端泄漏和振动磨损四类,这些故障往往与介质性质、水质波动、温差应力、流速失衡及检修不到位相互叠加。本文据此对常见故障成因进行归纳,并围绕现场可实施的检修环节提出针对性做法。

关键词

化工; 管壳式换热器; 常见故障; 成因分析; 针对性检修

1 引言

在中国炼油、煤化工、氯碱、合成氨及精细化工装置中,管壳式换热器数量大、分布广、服役工况复杂,既承受温度和压力波动,又长期接触含盐、含硫、含氯及悬浮颗粒介质。由于服役环境恶劣、介质复杂多变,管壳式换热器易发生介质渗漏等问题,严重影响设备安全性与运行效率。同时换热器一旦出现泄漏、降压异常或换热能力衰减,往往会连带造成炉负荷上升、流程温度失控甚至装置被迫停工,因此检修工作不能停留在简单拆洗层面,而应建立以故障机理为基础

的针对性处置思路^[1]。

2 管壳式换热器概述

管壳式换热器属于典型间壁式换热设备,其基本结构由壳体、管束、管板、折流板、封头及连接法兰组成,以壳体内部的管壁作为高效换热表面,通过管内与壳侧液体的热交换实现调温与换热。资料显示,管壳式换热器长期作为独立国家标准对象存在,后由GB/T 151《热交换器》统一规范,且在固定式压力容器安全技术体系中,管板和换热管被明确列为主要受压元件。结合炼化企业的实际应用情况看,浮头式适合温差较大且需抽芯清洗的场合,固定管板式结构紧凑、成本较低但清洗受限,U形管式适用于温差较大工况但弯管部位检修不便。正因为其适应性强、制造成熟、维护方式成套,管壳式换热器至今仍是中國化工装置中的主力冷换设备。

【作者简介】胡盛昌(1989-),男,中国江西九江人,本科,工程师,从事炼化装置维保工作和装置技改项目及工程建设项目研究。

3 管壳式换热器常见故障成因分析

3.1 传热面结垢堵塞

传热面结垢堵塞是化工换热器最普遍的运行故障之一,常见表现为换热效果变差、进出口温差异常、压降升高和局部流量不足。其形成机理并不单一,循环水中的钙镁盐、铁锈、油污、微生物黏泥及工艺侧析出的盐类都可能在低流速区、低温端和管板附近沉积。水质中总铁、浊度、石油类升高会促进污泥沉积和垢下腐蚀,而低流速又会加快污垢附着,进一步造成堵塞与传热衰减。在炼油装置中,铵盐还会在露点以下结晶,优先沉积于管箱端部、管板和流动死角,堵塞与腐蚀往往同步出现^[2]。

3.2 换热管腐蚀穿孔

换热管腐蚀穿孔多发生在冷却水侧、壳程入口区、低温冷凝区及沉积物覆盖区域,故障后通常表现为介质互串、液位异常、壳程或管程带油带水。结合实践和行业资料表明,酸性环境中的 H_2S 、 HCl 及 Cl^- 会破坏金属表面钝化膜,导致点蚀和坑蚀不断加深,沉积物形成后又易演变为垢下腐蚀。对于循环水系统,油品漏入、水质恶化、悬浮物增多和菌藻繁殖会明显加剧腐蚀速率。若介质中同时存在高流速、颗粒或气泡,冲刷与电化学腐蚀还会叠加,最终使管壁减薄失稳并形成穿孔泄漏。

3.3 管端及连接部位泄漏

管端及连接部位泄漏主要出现在管子与管板胀接处、焊接处以及法兰密封处,这类故障往往不像管体腐蚀那样有明显的长期预兆,但一旦形成通道,介质互串速度较快。部分高压换热器内漏与螺栓预紧力不足、温度变化及压力升降密切相关,说明密封系统在热循环和载荷波动下容易失稳。对于管板连接区,若管壳程压差大、启停频繁、升降温过快,局部热应力与机械应力会集中于胀焊过渡部位,造成微裂纹扩展。缝隙腐蚀资料还表明,管板连接区本身就是腐蚀敏感部位,一旦积垢或残液滞留,泄漏风险会进一步增大。

3.4 管束振动磨损开裂

管束振动磨损开裂多发生在入口冲击区、折流板穿孔处和支撑不足的跨距部位,现场常伴随异响、周期性振动升高和泄漏点重复出现。高速流体冲击、外部泵机脉动、管道振动传递及折流板间距不合理,都可能诱发管束共振或高频微振。振动产生后,管子与折流板或支撑件反复碰磨,会先造成表面保护膜破坏和局部减薄,再在交变载荷作用下出现裂纹扩展。有关换热管裂纹研究也指出,局部高频振动是碰磨痕迹和裂纹形成的重要诱因,而温差过大与启停过快还会放大疲劳损伤^[3]。

4 管壳式换热器常见故障针对性检修

4.1 结垢堵塞的分级清洗与通道恢复

就管壳式换热器结垢堵塞的检修而言,现场处置应按先判堵塞部位、再分级清洗、后核实通道恢复的顺序展开。

检修前,班组先把运行期同负荷下的进出口温差、流量和压降变化与历史台账逐项比对,再拆看管箱、管板近端、折流板背流区及低温端沉积形貌,并留取垢样做水溶性、酸溶性和含油性判别,借此区分管程缩流、壳程旁路和局部结晶沉积,不把换热下降一概判成普通水垢。进入清洗阶段后,检修人员要按垢层厚度、硬度和附着牢固度确定级别,对硬垢或近乎堵死的管子先做机械通管、通刷或高压水射流疏通,把主通道先打通,再安排与母材、焊缝和胀接结构相容的酸洗、碱洗或复配药洗,循环过程中同时盯住药液温度、浓度、时间和缓蚀状态,必要时控制回流过滤和排污频次,防止剥落垢块在回路中反复沉积,也防止把旧缺陷洗成新腐蚀。对含氯铵、硫酸铵等晶盐性沉积,处理时不能只求局部溶解速度,通常要先疏通后洗、分段冲洗、分侧排放的办法控制清洗顺序,低点排净后再切换下一段,冲洗液颜色和导电度明显回落后再进入下一轮,避免剥落晶体转移到U形弯头、短节和近管板端形成二次堵塞。清洗结束后,检修人员还要逐根复核通球或通刷结果,并复测压降恢复、流通均匀性和端部残垢情况,必要时对可疑管口做内窥复查,壳程则应把折流板间隙、支撑处和死角松散沉积彻底清除;凡发现麻点、垢下腐蚀、壁厚异常或局部减薄超限的换热管,应直接转入补管、堵管或更换处置,回装前再做封头、垫片和紧固件复查,不带缺陷回装。

4.2 腐蚀穿孔的抽芯检查与分区处置

围绕换热管腐蚀穿孔实施检修时,现场应把抽芯核查、减薄判级、分区修复和再投用边界校核连成一条线处理。第一,设备解体后检修人员不能只在管口找漏,应按介质走向先查壳程入口迎流面、导流筒至管板间和折流板邻近区,再把可抽芯管束整体抽出,逐排核对点坑、沟槽、鼓包、壳侧冲刷痕和垢下腐蚀分布,对历史泄漏排号单独做标识复核,并对可疑管位逐根保留复测记录;公开案例显示,穿孔常落在壳程进料口一侧及导流构件附近,局部实测厚度可由原始2 mm降到约1.5 mm,已不宜按单点偶发缺陷处理^[4]。第二,对怀疑普遍减薄的管束,宜先洗净管内水锈、油泥和硬垢,再做涡流筛查,长管段可先用Bobbin快速普查,管板近端、折流板对应段和异常区补做旋转探头复核,并把检测结果与抽查解剖、外观和壁厚数据交叉确认;内壁附着物、磁导率变化与真实缺陷信号接近,若清洗不到位,现场极易把伪显示误判为完好或误报缺陷。第三,处置时要按缺陷密度分区,同一跨距或同一流场区若连续出现穿孔、深坑或成片减薄,应成组堵管或局部换管,堵后还要复算有效流通面积和压降;若相邻区域已形成面状失效、同排多根剩余壁厚明显偏低,或堵管后已影响热负荷,就应直接换束,不再零星补漏。第四,回装前还要倒查腐蚀介质来源,循环水浊度、含油和余氯长期超标时,易叠加氧腐蚀与垢下腐蚀,工艺侧若存在含氯含硫冷凝液滞留、低点积液或停车后残液未排净,也要同步清源、冲洗和校核隔离效果后再确定投用条件。

4.3 管端泄漏的重胀补焊与密封复装

在管壳式换热器管端泄漏处置中,重胀补焊与密封复装必须沿着先判部位、再定工艺、后做试验的顺序展开。首先,拆检后要把漏点分清是在管板胀口、法兰密封面还是管口焊缝热影响区,并调取压差、温差和启停记录对照判断,对疑似胀接松驰的管口,应用塞尺、着色和低压保压复查松动圈、拉痕及渗液线,必要时逐孔编号记录,不仅看管口一圈,还要看邻近两至三排是否存在同向渗漏,以便区分局部失效和成片松驰。其次,对母材未明显减薄且仅表现为微渗的管端,可采用重胀或重胀后补焊,施工前必须把管内壁、管端氧化皮和沉积物清到露出金属光泽,同时校正圆度、伸出量和同轴度,重胀量不宜一次加满,应分次推进,每次处理后复测胀口状态,补焊宜选小热输入氩弧焊短段施焊,层间清理干净,收弧处要磨平再接续,焊后做渗透复查。再次,若泄漏位于法兰系统,处理时不能只换垫片,还要同步修整密封面划伤、复核法兰平行度和螺柱通孔状态,新垫片应按介质、压力和温度重新匹配,螺栓按对称顺序分级上紧,初紧、复紧和终紧至少分三轮完成,终紧应用力矩扳手复核,螺柱外露扣数应基本一致,必要时热紧后再做一次回检,严禁混用旧垫片、旧螺母和咬扣螺柱。最后,回装后应按设计文件先做耐压试验,再视介质危险性决定是否加做气密试验,对高毒、可燃或设计上不允许微漏的设备,必须把管端、法兰和补焊区作为保压检查重点,气密试验压力应与设计压力一致,稳压期间一旦发现汗渍、压降或起泡异常,应卸压返修,不得带缺陷交付。

4.4 振动磨损的支撑校正与结构恢复

针对管壳式换热器管束振动磨损,检修时应把振源排查、支撑恢复和跨距校正作为同一工序连续处理。其一,停机抽芯后不能只盯泄漏管口,检修人员应把运行期振动记录、异响方位与泄漏点分布对照起来,重点复查入口接管对首排管的冲刷方向,检查防冲板、折流板孔、拉杆、定距管及支撑板边缘是否存在松脱、偏磨、变形或缺件,并按现行GB/T 151相关要求复核无支撑跨距,公开研究指出换热器损坏约有30%与管束振动有关,入口区受扰管排往往最先出现擦痕和减薄。其二,对发生碰磨的换热管要沿各跨逐根测查,既看折流板孔边磨亮、拉毛、压痕和椭圆变形,也要

用测厚配合着色检查剩余壁厚与裂纹状态,现场若减薄控制在原壁厚10%以内且未见裂纹,可通过更换支撑件、补配定距元件、校正孔桥毛刺和修正孔隙配合恢复约束;若已出现裂纹、局部失圆、明显偏摆或多跨失稳,就应直接换管,连续成片磨损时宜整束处理,不再采用补焊抹平代替结构恢复。其三,入口冲击明显的设备不能只换管不改结构,应同步校核防冲板位置、覆盖宽度、与入口中心线关系及固定状态,对折流板间距偏大、挡板开孔失当造成的长跨段一并整改,必要时增设支撑、缩短首跨长度或调整首道折流板布置,否则新管仍会在原部位重复碰磨^[5]。其四,管束回装后还要复查壳体与外接管线的受力传递,松开并校正不合理支吊点,消除硬连接和附加载荷,试车按低负荷、中负荷、设计负荷分级升量,每升一级都复测振动、温差和压降,确认异常点不再放大后再转入连续运行。

5 结语

管壳式换热器故障表面上表现为堵、漏、振、蚀,实质上多由介质条件、结构特点和检修质量共同决定。结合实践与行业资料可以看出,结垢堵塞、腐蚀穿孔、管端泄漏和振动磨损并不是彼此孤立的单项问题,而是经常以前后衔接、相互放大的方式出现。因此,检修人员在现场处理时,应坚持先判机理、后定方案,再按清洗、检测、修复、试验和复验的顺序展开,避免用单一经验替代系统判断。只有把故障原因与检修动作真正对应起来,管壳式换热器检修才能做到稳妥、准确和可重复实施。

参考文献

- [1] 张玉福,苏厚德,沈溃领,等.管壳式换热器换热管的泄漏失效原因[J].腐蚀与防护,2023,44(1):97-101.
- [2] 刘嘉琪.化工企业管壳式换热器故障分析与对策研究[J].设备管理与维修,2025(10).
- [3] 葛娟,李志刚,曹鑫,等.管壳式换热器和板式换热器的比较分析[J].广州化工,2025(15).
- [4] 赵光浦.管壳式换热器故障的影响因素分析与预防性措施[J].中国设备工程,2024(13):23-25.
- [5] 王景阳.管壳式换热器常见泄漏现象及消漏方法研究[J].家电维修,2024(7):7-9.