

列管式换热器管束泄漏原因及密封处理技术分析

张 翔

宁夏和宁化学有限公司 宁夏 灵武 750411

【摘 要】：列管式换热器长期承受温差变化、介质腐蚀及流体冲刷，管束泄漏易造成介质串漏、换热能力下降甚至装置非计划停运。针对管壁减薄、振动磨损、管板连接松动及局部裂纹等故障，结合泄漏检测结果判定损伤位置及失效程度，采用堵管、补胀、密封焊、局部换管等技术进行分类处理，并同步控制流速、温差及腐蚀环境。处理后可降低泄漏复发概率，恢复设备密封性能及换热能力，提高列管式换热器运行可靠性。

【关键词】：列管式换热器；管束泄漏；失效分析；密封处理；检维修技术

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.055

1 列管式换热器管束运行特征及泄漏故障识别

1.1 管程壳程介质作用下管束服役状态变化

管程、壳程介质长期处于不同温度、压力及流动状态，换热管同时承受内外压差、温度梯度、介质腐蚀和流体冲刷，管壁服役状态具有持续变化特征。高流速介质经过入口端、折流板附近及局部转向区域时，容易形成冲刷和振动载荷，使换热管表面逐渐出现减薄、沟槽或疲劳损伤；腐蚀性介质接触管壁后，还可能发生点蚀、缝隙腐蚀或应力腐蚀，削弱局部承压能力。冷热介质周期性交替又会引起管束反复伸缩，管板连接区域及支撑位置长期承受附加应力，密封界面稳定性逐渐下降。管束服役状态判断需要结合介质性质、运行周期、壁厚变化及振动水平进行综合分析，为泄漏部位识别提供基础。

1.2 压差温差波动引起泄漏风险逐步累积

压差和温差频繁波动会改变换热管受力状态，使局部应力由稳定载荷转变为交变载荷。启停、升降负荷或工艺参数快速调整过程中，管程和壳程压力变化不同步，换热管可能出现瞬时压差增大，薄弱部位承受的环向应力和轴向应力随之提高^[1]。温差突变还会造成管束热伸长量不一致，管板、折流板及换热管连接区域形成附加约束，经过多次热循环后容易产生疲劳裂纹、胀接松动或焊缝微裂纹。若运行流量存在明显波动，流体诱导振动还会与热应力相互叠加，加快支撑接触部位磨损。泄漏风险控制不能只关注单次超限，更需要分析压差、温差变化频率、持续时间及累积效应，识别长期运行形成的渐进性损伤。

1.3 压力试验检测定位管束泄漏具体区域

压力试验是确认管束泄漏位置和判断密封失效范围的重要手段，需要根据设备结构、介质系统及检修条件合理选择试压方式。检修隔离完成后，可分别对管程或壳程建立规定试验压力，通过稳压观察、压降变化及泄漏迹象判断异常区域。对于管板端部泄漏，应重点检查胀接接口、焊接接头及管口附近是否存在渗漏；管壁中部存在穿孔或裂纹时，可结合单管封堵、气密检测、涡流检测或超声测厚进一步缩小定位范围。检测过程中还需控制升压速率和保压时间，避免试验载荷对已有缺陷

造成二次扩展。将压力试验结果同壁厚数据、历史检修记录及运行参数进行对应，可提高泄漏定位准确性，为后续堵管、补胀、密封焊或换管处理提供可靠依据。

2 列管式换热器管束泄漏主要失效原因分析

2.1 腐蚀减薄造成换热管局部穿孔失效

腐蚀介质长期接触换热管内外表面后，管壁金属会发生持续性损耗，局部减薄程度通常受介质成分、流速、温度、含氧量及沉积物分布影响。均匀腐蚀会使整体壁厚逐渐下降，点蚀、缝隙腐蚀则容易形成尺寸较小但深度较大的局部缺陷，承压截面因此快速缩减。沉积物覆盖区域还可能形成浓差环境，使腐蚀过程集中于局部位置，造成壁厚分布明显不均。管壁减薄达到临界程度后，原有设计余量被持续消耗，运行压力作用下薄弱部位容易出现塑性变形、微孔贯穿或裂纹连通，最终形成管程、壳程之间的介质串漏。腐蚀造成的泄漏具有隐蔽性和渐进性，单纯依据外观状态难以准确判断，需要结合壁厚趋势、腐蚀形貌和剩余承压能力识别失效程度。

2.2 流体冲刷振动诱发管壁磨损裂纹扩展

流体速度、流向和局部湍流状态发生明显变化时，换热管表面会承受持续冲击，入口区域、折流板窗口及支撑接触位置更容易产生冲刷磨损。高速介质携带颗粒或气液两相流动时，局部剪切作用进一步增强，管壁材料不断损失，表面保护层受到破坏后，机械磨损和腐蚀作用可能相互促进。流体脉动还会诱发管束横向振动，若振动频率接近管束固有频率，振幅增大后会加剧换热管同折流板孔之间的反复摩擦，使接触位置形成沟槽状减薄^[2]。周期性弯曲应力长期作用于磨损区域，微裂纹会从表面缺口或应力集中处萌生，并沿管壁厚度或周向持续扩展。裂纹同减薄缺陷叠加后，有效承载面积进一步下降，较小压力波动也可能促使缺陷贯穿，形成突发性泄漏。

2.3 热应力循环导致管板接口密封能力下降

冷热介质温度反复变化会使换热管、管板及壳体产生不同程度的热膨胀和收缩，各部件材料性能、厚度及约束条件不同，热变形难以保持完全同步。启停频繁或温度升降速率较快时，

管束轴向伸缩受到管板和支撑结构限制,接口附近容易形成较高的局部热应力。胀连接部位经过多次热循环后,管壁同管孔之间的接触压力可能逐渐衰减,原有过盈量下降,界面出现微小间隙;焊接接口则可能因热疲劳产生细微裂纹,焊趾、熔合区等应力集中位置更为敏感。温差变化同内部压力交替叠加,还会推动已有缺陷扩展,使接口密封由稳定状态转变为间歇渗漏,继而发展为持续泄漏。密封失效程度不仅取决于单次温差幅度,还与循环次数、升降温速度、连接结构及材料热膨胀差异密切相关。

3 不同泄漏类型对应密封处理技术选择

3.1 轻微泄漏管实施堵管隔离控制介质串漏

轻微泄漏且损伤范围集中于少量换热管时,堵管处理可在不大范围拆换管束的条件下快速切断泄漏通道。施工前应依据压力试验、涡流检测、内窥检查及壁厚测量结果确认失效管号,避免将邻近存在减薄趋势但尚未贯穿的换热管遗漏。堵管材料需同换热管、管板材料及介质工况相匹配,重点考虑热膨胀系数、耐腐蚀性和长期接触稳定性,防止运行温差变化导致堵头松动。管口清理后,应去除油污、腐蚀产物及毛刺,保证堵头同管壁形成均匀有效接触。机械胀紧或锥形堵塞过程中需严格控制装配深度和扩张量,避免胀紧力过大引起管板孔变形、邻管连接受损。堵管完成后还应核算有效换热面积损失,当堵管数量接近设备允许限值时,不宜继续采用单纯封堵方式,以免流通截面变化造成局部流速升高并诱发新的冲蚀损伤。

3.2 管板连接松动采用补胀工艺恢复结合强度

管板接口出现渗漏但换热管主体仍具备足够剩余壁厚时,补胀处理的核心在于重新建立换热管外壁同管孔内壁之间的有效接触压力,使连接区域恢复机械结合能力和密封性能。处理前需要检查原胀接长度、管口椭圆度、管板孔状态及胀接区壁厚,若已经出现严重减薄、纵向裂纹或明显塑性变形,则不宜继续依靠增加胀量解决泄漏。补胀施工应根据管材塑性、管板厚度及原始胀接参数确定合理胀度,控制胀管器进入深度和扩张位置,防止重复胀接产生过度加工硬化^[3]。胀接范围还应避开焊接热影响敏感区域,减少局部残余应力重新分布。对于液压胀接或机械胀接,应保持驱动力稳定,使管壁沿圆周均匀扩张,避免局部接触压力过高形成新的薄弱点。补胀完成后通过严密性试验检查接口渗漏状态,并结合管口尺寸变化确认胀接质量,使修复结果从“止漏”进一步转向对连接强度、结构完整性及后续运行稳定性的同步恢复。

3.3 裂纹穿孔部位采取密封焊接局部换管修复

裂纹、穿孔已经造成换热管结构连续性破坏时,处理方式需要根据缺陷位置、长度、深度及剩余壁厚选择密封焊接或局部换管,不能单纯依赖表面封堵掩盖结构损伤。管板接口附近出现细小裂纹且母材状态良好时,可清除缺陷区域腐蚀层和疲

劳裂纹后实施密封焊,焊前需确认坡口状态、清洁程度及材料焊接性能,焊接热输入应保持稳定,减少烧穿、咬边、未熔合及过大的热影响区。缺陷已经沿管壁扩展、穿孔面积较大或剩余壁厚明显不足时,应将损伤管段拆除并实施局部换管,新管材质、规格、壁厚和热膨胀性能应符合原设备设计条件。换管过程中需控制管孔清理、穿管间隙、胀接尺寸和焊缝成形质量,避免安装偏斜造成附加应力。修复结束后应进行无损检测及耐压、气密检验,确认焊缝连续性、换管接口结合状态和整体密封能力,降低缺陷残留导致再次泄漏的可能。

4 密封处理施工过程质量控制技术

4.1 泄漏部位清理检测确保修复边界准确确定

泄漏部位处理质量直接影响后续密封修复的可靠程度,施工前需要将管口、管板表面及缺陷周边的油污、锈蚀产物、结垢和残留介质清理干净,使裂纹、孔蚀、减薄及连接松动等真实状态充分暴露。清理方式应根据换热管材质、腐蚀程度和缺陷位置合理控制,避免过度打磨造成壁厚继续减小,也要防止表面残留物掩盖微小缺陷。完成基础清理后,可结合渗透检测、涡流检测、超声测厚、内窥检查等手段复核缺陷形态,重点确认裂纹长度、穿孔范围、管壁剩余厚度、胀接区完整性及邻近管束受损情况。检测结果不能只停留于单点判断,还需将缺陷位置同折流板支撑区、介质入口区、管板连接区等结构位置进行对应,识别损伤是否存在连续扩展可能。对于多处相邻缺陷,应扩大检查范围,避免仅处理已泄漏点而遗漏潜在薄弱区域。修复边界确定后,需要明确堵管、补胀、焊接或换管的具体位置和长度,使修复范围覆盖实际损伤区域,又不造成无效扩大施工,为后续工艺参数设定提供准确依据。

4.2 胀接焊接参数控制避免形成新的局部损伤

胀接和焊接属于列管式换热器密封处理中对结构状态影响较大的工序,参数控制不当容易使原有泄漏消除后又形成新的应力集中、壁厚减薄或接口缺陷。补胀施工应依据换热管外径、壁厚、材料塑性、管板孔尺寸及原始胀接状态确定胀度,机械胀接需要控制胀管器位置、转速和进给量,液压胀接则应保持压力加载平稳,避免局部过胀造成管壁塑性变形过大。胀接长度应与管板有效厚度相匹配,不能延伸至不需要变形的区域,否则容易形成过渡段应力集中。焊接处理则需要控制焊接电流、电压、层间温度及热输入,管壁较薄时尤其要防止烧穿、咬边、未熔合和焊缝过厚^[4]。施焊区域清洁度、坡口尺寸及装配间隙需要保持稳定,使熔合范围均匀连续。热输入过大会扩大热影响区,使管板或换热管产生附加变形;热输入不足则可能形成未焊透和结合不牢。施工过程中还应对关键参数进行记录,将胀接量、焊接参数、缺陷位置及检验结果形成对应关系,便于发现异常后及时调整,降低重复返修对母材性能造成的不利影响。

4.3 压力试验严密性检查验证修复部位密封质量

修复完成后的压力试验需要从静态密封和受压稳定两个层面检验处理效果,试验前应确认堵头、补胀接口、焊缝及更换管段全部完成外观和无损检查,避免带有明显缺陷的部位直接进入承压环节。试压介质、试验压力及保压时间需要符合设备设计条件和检修要求,升压过程应分阶段进行,观察管板端面、修复接口及管束内部是否出现渗漏、压力异常下降或局部变形。达到规定压力后保持稳定状态,可结合压力变化、泄漏痕迹和接口表面状态判断密封质量,不能仅依据短时间无明显漏点作出结论。对于原泄漏程度较轻或缺陷位置隐蔽的部位,还应根据设备条件采用气密性检查,提高对微量泄漏的识别能力。试验结束后的降压过程同样需要平稳进行,防止快速卸压使薄壁换热管承受异常载荷。若出现渗漏,应重新确认缺陷来源,区分原修复点失效、邻近管束新生缺陷或接口应力重新分布等情况,再确定返修范围。试压数据、保压时间、修复位置和检验结果应完整记录,使密封质量从单次验收转变为可追溯的过程控制依据。

5 管束密封处理后的运行效果及长效管控

5.1 泄漏复发频率降低保障介质系统稳定隔离

密封处理完成后,原有穿孔、裂纹及接口松动等泄漏通道得到有效控制,管程、壳程介质之间的非正常串流明显减少,系统压力和介质纯度更易保持稳定。堵管、补胀、密封焊及局部换管措施按照缺陷类型匹配后,可降低同类泄漏在短周期内重复出现的概率。运行过程中若压力波动、液位异常和介质成分变化趋于平稳,说明修复区域密封状态保持良好。泄漏复发率下降还能减少非计划停机和重复检修次数,使列管式换热器恢复稳定隔离功能,避免介质互窜对后续工艺单元造成连续影响。

参考文献:

- [1] 彭晖,盛赵平,闫光年.列管式换热器泄漏处理方式及技术改进[J].化工设计通讯,2022,48(6):64-66.
- [2] 何源.烯烃分离装置丙烯换热器泄漏原因分析及优化措施[J].煤炭加工与综合利用,2025,(4):83-87.
- [3] 刘云秀,郑显伟,仵拴强,等.制氢装置中变气-除盐水换热器管束泄漏问题的处理及改造[J].石油化工设备技术,2023,44(6):31-36+I0002.
- [4] 涂护林.离心压缩机组翅片列管式换热器故障分析及处理措施[J].福建冶金,2025,54(5):45-47.
- [5] 李雄.汽车列管式换热器管程结构的数值模拟与优化[J].内燃机与配件,2024,(16):11-13.

响。

5.2 换热效率恢复改善设备连续运行可靠程度

泄漏管束得到修复后,介质能够按照设计流道重新完成热量交换,因串漏、旁流及局部流量失衡造成的传热损失得到削弱。运行阶段可结合进出口温度、压降、流量及传热温差判断换热能力恢复程度,若关键参数重新进入正常控制区间,说明有效换热面积和流动状态得到改善^[5]。对于局部堵管后的设备,还需关注剩余管束负荷分布,防止流速升高造成新的冲蚀。换热效率恢复后,设备频繁降负荷、切换备用或临时停车的情况相应减少,有利于延长连续运行周期,提升工艺系统运行稳定性。

5.3 运行参数检验维护机制降低管束再次损伤风险

长效管控需要把一次性修复转化为持续性的运行监测和状态维护。日常管理应重点记录管程、壳程压力差、进出口温度、介质流量、压降及腐蚀相关参数,对异常波动建立趋势判断,提前识别局部减薄、振动磨损和接口松动风险。检修周期可结合壁厚变化速率、堵管数量、历史泄漏位置及无损检测结果动态调整,避免单纯依赖固定周期维修。对高风险区域实施重点测厚和针对性检测,同时优化升降温速率、介质流速及启停操作,可减少热冲击和流体冲刷对管束的重复损伤,使密封处理后的可靠性得到持续保持。

6 结语

列管式换热器管束泄漏与腐蚀减薄、冲蚀振动、热应力循环及接口松动密切相关。依据损伤类型实施堵管、补胀、焊接及换管处理,可恢复密封性能和换热能力。强化参数监测、定期检测及维修质量控制,有助于减少重复泄漏,提升设备连续运行可靠性。