

换热器管板结构强度分析与失效模式研究

吴 渊

宁夏恒泰化工设备有限公司 宁夏 银川 750100

摘 要：换热器管板作为核心承压部件，其结构强度直接影响设备安全运行。研究固定、浮头及U型管板等典型结构，结合材料力学特性与多物理场耦合作用，通过有限元分析与实验验证，揭示热应力、流体压力及振动载荷对管板强度的影响机制。分析表明，应力集中、腐蚀、疲劳裂纹及高温蠕变是主要失效模式，需通过优化管孔布局、改进焊接工艺及采用复合材料等措施提升结构强度，为换热器设计优化与安全运行提供理论依据。

关键词：换热器；管板结构；强度分析；失效模式

引言：换热器在化工、能源等领域应用广泛，管板作为其关键承压与连接部件，其结构强度关乎设备整体安全性与可靠性。在实际运行中，管板受热应力、流体压力、振动载荷等多因素耦合作用，易出现过度变形、断裂、腐蚀等失效问题，引发安全事故与经济损失。深入探究管板结构强度特性，精准识别失效模式并剖析其内在机理，对优化管板设计、改进制造工艺及制定运行维护策略，保障换热器长期稳定运行意义重大。

1 换热器管板结构与受力分析

1.1 管板典型结构与材料特性

管板类型：管板是换热器的核心承压部件，典型类型包括固定管板、浮头管板、U型管板等。固定管板结构简单、制造成本低，适用于温差较小的工况，但热膨胀适应性差；浮头管板通过浮头补偿热膨胀差，适配高温差、易结垢工况，不过结构复杂且密封要求高；U型管板因管束呈U型弯曲，仅需一端管板固定，热膨胀补偿能力强，常用于高温高压场景，缺点是管内清洗难度大。(2) 材料选择：需结合工况压力、温度及介质腐蚀性选取。碳钢材料成本低廉、强度适中，适用于无腐蚀介质的工况；不锈钢耐腐蚀性优异，能适含酸碱等腐蚀性介质的场景，但成本较高；复合材料多采用基层+耐腐蚀复层结构，兼顾基层的强度与复层的耐腐蚀性，常用于苛刻工况下的大型换热器，可有效降低材料成本。

1.2 管板受力分析

(1) 热膨胀差引起的热应力：换热器运行时，管板、管束与壳体因材质或温度分布差异，热膨胀量不同，相互约束产生热应力。当温差较大时，热应力易导致管板变形、管接管口泄漏甚至结构损坏，是管板失效的重要诱因之一。(2) 流体压力与管束载荷的耦合作用：管程与壳程流体压力差会使管板承受弯曲、拉伸载荷；管束通过管孔与管板连接，运行中管束的振动、热胀冷缩会产生

附加载荷，二者耦合作用会加剧管板的应力集中，尤其在管孔周边区域^[1]。(3) 边界条件与约束模型：不同支撑方式决定管板受力状态，固定支撑模型中管板边缘位移被完全限制，易产生较大约束应力；弹性支撑模型通过支座或弹性元件提供缓冲，可释放部分热膨胀位移，降低约束应力，更贴合实际运行工况。

1.3 理论模型建立

(1) 基于弹性力学、板壳理论的解析解：将管板简化为圆形薄板，依据弹性力学薄板弯曲理论和板壳理论，建立管板受力的控制方程，通过求解解析解可快速获取管板的应力分布和位移规律，适用于结构简单、载荷对称的理想工况。(2) 多孔介质模型与管孔应力集中系数：管板因密集管孔存在，可等效为多孔介质，通过多孔介质力学理论描述其宏观力学特性；同时，管孔会导致局部应力集中，需通过理论推导或试验确定应力集中系数，修正管板的应力计算结果，提升模型的准确性。

2 换热器管板结构强度有限元分析

2.1 有限元模型建立

(1) 几何模型简化与网格划分：基于实际管板结构，忽略倒角、微小倒角等非关键细节以简化模型，降低计算复杂度。网格划分采用实体单元，针对管孔周边、管板与壳体连接等易产生应力集中的区域进行局部加密处理，保证高应力区域计算精度；非关键区域采用较粗网格，平衡计算效率与结果准确性，网格质量需满足畸变率、长宽比等指标要求。(2) 材料属性与边界条件设定：输入管板材料的弹性模量、泊松比、屈服强度、热导率等力学与热学参数，参数取值需结合材料试验数据或标准手册。边界条件依据实际安装工况设定，固定支撑对应约束管板边缘的平移与转动自由度，弹性支撑通过设置弹性系数模拟支座缓冲作用；同时施加管程与壳程流体压力、温度载荷，明确载荷的分布形式与大小^[2]。

2.2 静强度分析

(1) 不同工况下的应力分布: 针对设计压力、额定温度、极端温度等典型工况, 通过有限元计算获取管板的整体应力分布云图。分析结果显示, 管孔边缘、管板与管束连接区域及边缘支撑部位应力较大, 且温度荷载会加剧应力分布不均, 需重点关注多荷载叠加下的应力响应。(2) 高应力区域识别与强度校核: 依据计算结果精准定位高应力区域, 采用ASME标准或TEMA标准进行强度校核。通过计算当量应力, 与材料许用应力对比, 判断管板是否满足强度要求; 对不满足要求的区域, 需提出结构优化方案, 如增大管孔间距、增加管板厚度等。

2.3 疲劳寿命分析

(1) 循环荷载下的疲劳损伤累积模型: 基于Miner线性累积损伤理论, 建立管板在启停循环、荷载波动等循环荷载作用下的疲劳损伤模型。通过材料S-N曲线, 将循环应力转化为疲劳损伤, 累计各循环周期的损伤量, 判断管板是否存在疲劳失效风险。(2) 关键部位疲劳寿命预测与敏感性分析: 针对高应力关键部位进行疲劳寿命预测, 明确其使用寿命是否满足设计要求。同时开展敏感性分析, 探究荷载波动幅度、温度变化频率、材料参数偏差等因素对疲劳寿命的影响, 为结构优化和运行维护提供依据^[3]。

2.4 多物理场耦合分析

热-力耦合、流-固耦合对强度的影响。热-力耦合分析需考虑温度场与应力场的相互作用, 温度分布不均产生的热应力会改变结构力学响应, 而结构变形又会影响温度传递路径。流-固耦合分析聚焦流体压力、流速分布对管板结构的力学作用, 以及管板变形对流体流动状态的影响, 精准评估多物理场共同作用下管板的强度安全性, 为复杂工况下的换热器设计提供更全面的理论支撑。

3 换热器管板失效模式与机理研究

3.1 常见失效模式分类

(1) 机械失效: 主要包括过度变形、断裂及振动疲劳三类。过度变形多由荷载超出材料承载极限导致, 表现为管板翘曲、鼓包; 断裂常伴随应力集中发生, 如管孔边缘裂纹扩展至贯穿; 振动疲劳则源于换热器运行时管束振动, 长期循环荷载使管板与管束连接部位产生疲劳裂纹, 最终引发失效。(2) 腐蚀失效: 常见形式有点蚀、应力腐蚀开裂和间隙腐蚀。点蚀由介质中氯离子等腐蚀性离子局部富集引发, 在管板表面形成微小蚀坑, 逐步加深破坏材料; 应力腐蚀开裂是腐蚀介质与拉应力协同作用的结果, 裂纹扩展迅速且隐蔽性强; 间隙腐蚀发生在管板与管束、管板与壳体的间隙处, 因间隙内介质流

动不畅形成腐蚀环境, 加速局部材料损耗^[4]。(3) 热应力失效: 分为高温蠕变和低温脆断。高温工况下, 管板材料长期承受热应力与荷载, 会发生缓慢塑性变形即蠕变, 最终导致结构失效; 低温环境下, 材料韧性下降、脆性增强, 温差产生的热应力易使管板产生突发性脆断, 多发生在低温介质换热或启停温差过大的场景。

3.2 失效机理分析

(1) 应力腐蚀开裂(SCC)的电化学-力学耦合模型: 腐蚀介质引发管板表面电化学腐蚀, 形成阳极溶解通道; 同时拉应力使材料内部产生微裂纹, 裂纹尖端因应力集中加速阳极溶解, 腐蚀与应力协同促进裂纹扩展, 最终导致断裂, 该模型可精准描述SCC的动态失效过程。(2) 振动引起的管束-管板接触疲劳损伤: 流体流动诱发管束振动, 管束与管板管孔边缘产生周期性接触冲击, 导致局部材料发生循环塑性变形, 逐步形成疲劳裂纹; 振动频率与管束固有频率共振时, 会大幅加剧接触疲劳损伤, 缩短失效周期。(3) 温差应力导致的微裂纹扩展: 启停或工况波动时, 管板各部位温差不均产生热应力, 当热应力超过材料屈服强度, 会在管孔边缘、连接焊缝等薄弱部位产生微裂纹; 后续循环温差荷载使微裂纹不断扩展, 最终导致管板失效。

3.3 失效案例分析

(1) 实际工程失效案例复现与原因追溯: 选取化工装置中管板断裂失效案例, 通过外观检测、金相分析、应力测试等手段复现失效过程, 追溯发现失效根源为氯离子介质引发的应力腐蚀开裂, 叠加管板厚度设计不足导致的应力集中。(2) 失效模式与工艺参数、操作条件的关联性: 案例分析表明, 介质温度升高、压力波动幅度增大, 会提升热应力失效与振动疲劳失效风险; 介质中腐蚀性离子浓度超标, 易诱发腐蚀失效; 而启停频率过高、保温措施不完善, 会加剧温差应力对管板的破坏, 明确各参数与失效模式的量化关联。

4 换热器管板结构优化与预防措施

4.1 结构优化设计

管板厚度、管孔布局的参数化优化: 基于有限元分析结果, 采用参数化设计方法对管板厚度进行优化。以强度要求、刚度要求及经济性为约束条件, 建立管板厚度与应力分布、制造成本的关联模型, 在满足强度校核标准(如ASME、TEMA)的前提下, 确定最优厚度, 避免因厚度过大导致材料浪费或过小引发失效风险。管孔布局优化聚焦于减少应力集中, 通过调整管孔间距、采用三角形或正方形优化排布方式, 均衡管板受力分布; 对管孔边缘进行倒角处理, 降低局部应力峰值, 尤其针对

高应力区域,可通过局部加密管孔或调整孔位偏移量,进一步提升结构承载能力。(2)新型材料与表面处理技术:针对腐蚀工况,优先选用耐蚀性优异的新型材料,如双相不锈钢、钛合金等,提升管板本质耐蚀能力;对于成本敏感场景,采用复合材料管板,以碳钢或低合金钢为基层保证强度,以耐腐蚀合金为复层抵御介质侵蚀,实现强度与耐蚀性的平衡。表面处理技术是提升耐蚀性的重要补充,通过喷涂耐腐蚀涂层(如聚四氟乙烯涂层、陶瓷涂层),在管板表面形成致密防护膜,隔绝腐蚀介质与基体接触;采用等离子喷涂、激光熔覆等先进工艺提升涂层结合力,避免涂层脱落失效;此外,对管孔内壁进行抛光、钝化处理,减少腐蚀介质附着点,进一步降低腐蚀失效概率。

4.2 制造工艺改进

焊接工艺对残余应力的影响:管板与壳体、管束的焊接过程易产生残余应力,叠加工作应力后易引发裂纹。通过优化焊接工艺参数,如调整焊接电流、电压、焊接速度,采用多层多道焊替代单层焊,减少焊接热输入,降低热变形与残余应力;焊接后采用焊后热处理(如退火、正火),释放残余应力,改善焊缝及热影响区的金相组织,提升材料韧性;对关键焊缝采用窄间隙焊接技术,减少焊缝截面积,降低残余应力集中程度,从制造源头提升管板结构完整性。(2)无损检测技术:建立全流程无损检测体系,覆盖管板制造的关键环节。采用超声检测技术对管板母材、焊缝进行内部缺陷检测,可精准识别内部裂纹、气孔、夹杂等缺陷,确保材料与焊接质量;针对管孔内壁、表面缺陷,采用涡流检测技术,利用电磁感应原理捕捉表面及近表面的微小裂纹、腐蚀坑等缺陷,尤其适用于不锈钢等导电材料的检测;对检测出的缺陷进行分级评估,根据缺陷大小、位置采取补焊、打磨等处理措施,避免缺陷在运行中扩展引发失效^[5]。

4.3 运行维护策略

在线监测与预警系统:在管板高应力区域(如管孔边缘、焊缝)布置应变传感器,实时监测应力变化;采用声发射技术捕捉管板内部裂纹扩展产生的弹性波信号,

结合数据采集与分析系统,实现对管板运行状态的在线监测。通过设定应力阈值、声发射信号特征参数,建立预警机制,当监测数据超出阈值时,及时发出预警信号,指导运维人员采取停机检查、维修等措施,避免突发失效。(2)操作参数优化:优化换热器操作参数,避免工况剧烈波动。严格控制温度上升、下降速率,减少启停过程中的温差应力,尤其在高温或低温工况下,需延长升温、降温时间,降低热冲击对管板的影响;稳定管程与壳程压力,避免压力骤升骤降,减少压力载荷对管板的冲击;合理控制流体流速,避免流速过高引发管束振动,同时防止流速过低导致介质滞留,加剧腐蚀。此外,定期对介质成分进行检测,及时更换或处理超标介质,从运行层面降低管板失效风险。

结束语

本文对换热器管板结构强度与失效模式进行了系统探究。通过理论分析、数值模拟与实验验证,明确了管板在不同工况下的应力分布规律及关键影响因素,揭示了常见失效模式的形成机理与演化过程。研究成果为管板结构优化设计、材料合理选用以及制造工艺改进提供了坚实理论支撑,有助于提升换热器的可靠性与安全性。然而,实际工况复杂多变,后续仍需进一步开展多因素耦合作用下的深入研究,以不断完善相关理论,推动换热器技术向更高水平发展。

参考文献

- [1]杨贵迅.板式换热器泄漏原因分析[J].建筑技术科学,2022,(07):62-63.
- [2]于华.板式换热器失效原因分析及维修方法探讨[J].文化科学,2020,(12):115-117.
- [3]郭宝瑞.板式换热器失效原因分析及维修方法探讨[J].中国科技信息,2023,(07):78-80.
- [4]郝建峰,王博,王蒙.管板式换热器管束的腐蚀穿孔失效分析[J].材料保护,2020,52(7):149-152.
- [5]齐红梅,俄馨,史伟等.换热器板片失效原因分析[J].热处理技术与装备,2020,40(5):48-52.