

# 换热器管板与壳程筒体连接结构在热循环载荷下的失效分析

鲁金汉 李娜

哈尔滨新唐锅炉容器工程有限责任公司 黑龙江 哈尔滨 150000

**【摘要】**：在热循环载荷作用下，换热器管板与壳程筒体连接结构常因反复的温度变化而发生失效，进而影响热交换性能。热循环过程中的应力、热膨胀等因素导致连接部分产生疲劳、腐蚀等失效现象。为此，研究该连接部分的失效机理，对于提升换热器的设计与使用寿命具有重要意义。通过有限元分析、实验验证等手段，分析了热循环载荷下连接结构的应力分布、变形情况及失效模式，为优化设计和增强结构可靠性提供了理论依据。优化设计方案可有效提高换热器的性能，延长其使用寿命，减少维护成本。

**【关键词】**：换热器；管板；壳程筒体；热循环载荷；失效分析

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.006

## 引言

热交换器广泛应用于化工、能源等领域，其核心功能是通过管道传递热量以提高系统的效率。换热器的管板与壳程筒体的连接结构在承受热循环载荷时，常常成为失效的关键部位。由于热循环过程中温度的剧烈变化，这一连接部分容易因疲劳、应力集中及热膨胀不均匀等问题发生损坏。失效不仅影响换热器的运行效率，还可能导致安全隐患。因此，深入研究这一连接部分在热循环载荷下的失效机制，评估其工作状态及风险，对换热器的设计优化和可靠性提高具有重要意义。

## 1 换热器管板与壳程筒体连接的失效模式分析

### 1.1 热循环载荷对连接部分的影响

温度变化引起的热膨胀效应使得管板与壳体连接部位经历多次的应力和变形循环。反复的加热和冷却过程导致的热应力分布不均匀，使得某些局部区域承受较大的拉伸或压缩力，进而产生微裂纹。尤其在高温环境下，热膨胀与材料的机械性能密切相关，材料的屈服强度和硬度随着温度的升高而下降，这直接影响到连接处的稳定性。长期暴露于热循环载荷下的应力积累加剧了连接部分的疲劳，逐步导致失效的风险增加。不同的热循环工况下，热应力的分布和强度变化对失效模式的影响程度也有所不同。

### 1.2 应力集中与变形分析

管板与壳程筒体的连接处由于几何形状和材料特性的不同，通常会出现应力集中的现象。在热循环载荷作用下，这种应力集中可能导致局部塑性变形和微裂纹的生成<sup>[1]</sup>。尤其在连接部分的转角、孔口及焊接区域，容易产生较大的应力集中区域。这些部位不仅承受热膨胀应力，还受到流体压力、机械载荷等多重因素的作用，使得连接结构的应力状态更加复杂。通过有限元分析可以揭示连接处不同工况下的应力分布，精确定位应力集中的位置，为优化设计提供理论依据。

### 1.3 常见失效模式及其表现

在换热器的管板与壳程筒体连接处，常见的失效模式包括

疲劳裂纹、腐蚀破坏和过度变形等。由于热循环引起的反复应力作用，管板与壳程筒体连接部位容易出现疲劳裂纹，尤其是在应力集中的地方。疲劳裂纹的扩展通常表现为微小裂纹逐渐向外扩展，最终导致结构断裂。由于温差的作用，连接部位的材料在不同温度下可能会发生不同程度的腐蚀，特别是在高温、腐蚀性介质存在的情况下，腐蚀加速了材料的劣化，进一步降低了连接结构的承载能力。过度的热变形也可能导致连接部位的松动或失效，影响换热器的运行效果。针对不同失效模式的发生，需采取相应的优化措施，避免单一因素引起的多重失效效应。

## 2 热循环载荷下的应力与变形模拟

### 2.1 有限元分析方法概述

有限元分析（FEA）作为一种强大的数值计算工具，被广泛应用于换热器管板与壳程筒体连接结构的热循环载荷下的应力与变形分析。通过将结构划分为离散的小单元，有限元方法可以精确求解各个小单元在热应力、外部载荷等多种因素作用下的响应。这种分析方法能够通过模拟实际工况，提供结构在热循环条件下的应力和变形分布信息，帮助研究人员识别潜在的失效区域。针对换热器管板与壳程筒体的复杂连接，有限元模型能够考虑到材料非线性、几何非线性以及多场耦合等效应，从而提高模拟的准确性。通过对计算结果的分析，能够深入理解结构在热循环载荷下的受力机理，为优化设计提供理论支持。

### 2.2 应力分布与变形特征

热循环载荷的作用导致换热器管板与壳程筒体连接部位的应力分布呈现复杂特征。有限元分析显示，受热膨胀效应的影响，管板与壳程筒体连接部位的应力呈现明显的不均匀分布，尤其在连接角部、焊接点和孔周围，局部应力集中较为明显<sup>[2]</sup>。在高温环境下，热膨胀引起的轴向应力与环向应力的相互作用加剧了这些区域的应力集中现象，从而提高了材料发生疲劳和破坏的风险。变形方面，热循环载荷造成的温差使得结

构发生显著的弹性或塑性变形，特别是高温下，材料的热膨胀变形与机械应力之间的相互作用导致了连接部位的几何形状发生变化。

### 2.3 不同工况下的失效趋势

对于高温高压工况，热循环载荷引发的应力集中现象更加显著，材料疲劳和裂纹扩展的风险大大增加。在极端温差变化下，热膨胀不均匀导致连接部位应力波动频繁，使得结构易于发生疲劳性失效。针对不同流体介质的使用，腐蚀作用在失效进程中也发挥着重要作用，特别是在高温腐蚀环境下，管板与壳程筒体连接部位容易受到应力腐蚀开裂的影响。工况温差的增大、流体压力的波动以及材料的老化等因素共同作用下，加速了裂纹的扩展和材料的疲劳失效。通过对不同工况下的应力与变形模拟，能够预测并防止潜在失效的发生，制定有效的优化设计方案。

## 3 失效原因分析与影响因素研究

### 3.1 温度变化对连接结构的影响

温度变化对换热器管板与壳程筒体连接部分的影响深远。在热循环过程中，连接结构经历温度升高与降低的反复作用，导致材料的热膨胀和收缩。这种周期性的温差变化使得连接部位承受不同方向的应力变化，尤其是在高温条件下，材料的屈服强度和硬度会随之降低，导致其承载能力下降。温差的梯度也会加剧局部区域的应力集中，尤其是接头、焊缝和孔口部位，容易发生裂纹或疲劳破坏。温度变化还可能导致连接部位的塑性变形，甚至影响整体结构的几何稳定性。长期受热变化的影响，使得连接部分的疲劳积累加速，逐渐积聚的热应力会导致材料逐步退化，从而缩短换热器的使用寿命。

### 3.2 材料疲劳与腐蚀机制

材料疲劳与腐蚀机制是换热器管板与壳程筒体连接部分失效的关键原因。反复的热循环载荷导致材料在应力作用下逐渐发生疲劳裂纹扩展，尤其是在连接部位的应力集中区域，如焊缝和接头部位，微裂纹可能随着热循环的持续作用而扩展，最终导致结构破坏<sup>[3]</sup>。与此同时，热循环条件下的高温环境加剧了腐蚀性介质对材料的侵蚀，尤其是在存在湿气或腐蚀性流体时，腐蚀性应力会加速裂纹的扩展，形成应力腐蚀裂纹。腐蚀的发生降低了材料的抗拉强度与延展性，使得结构在承受载荷时更容易发生破裂。疲劳和腐蚀的交互作用加速了失效进程，成为连接部分失效的重要因素。

### 3.3 载荷波动与长期使用关系

连接部位在热循环过程中，常常同时承受流体压力、机械负载和温度变化等多重载荷。流体压力波动导致管道和壳程的内外力变化，使得连接部分的应力分布发生剧烈波动，进一步加剧材料的疲劳积累。长期使用过程中，载荷波动可能导致局部区域的应力逐渐超过材料的疲劳极限，从而引发裂纹或变

形。长期运行下的载荷循环导致材料的力学性能逐渐退化，特别是在承受重复性载荷时，材料的疲劳强度逐步下降，最终可能引发连接结构的失效。载荷波动与长期使用的结合，不仅使材料疲劳累积，还可能引起微观结构的改变，导致换热器连接部位的性能下降，缩短使用寿命。

## 4 优化设计方案与失效预防

### 4.1 材料选择与热膨胀匹配

材料选择在换热器管板与壳程筒体连接的优化设计中至关重要。为应对热循环载荷引起的热膨胀不匹配，选用的材料应具备较好的高温强度、耐腐蚀性和热膨胀性能。不同材料的热膨胀系数差异会导致连接部位出现较大的应力集中，增加疲劳破裂的风险。合理选择热膨胀系数相似的材料，或者采用复合材料及耐高温合金材料，可以有效缓解热膨胀不均匀带来的应力影响。高温合金材料如 Inconel 或哈氏合金等，因其具有优异的高温抗拉强度与稳定的热膨胀性能，适合作为高温工况下的连接部分材料。还可以采用涂层技术，给材料表面增加耐腐蚀和抗氧化的保护层，延长其在热循环载荷作用下的使用寿命。材料的选择不仅影响换热器的可靠性，还决定了整个系统在高温环境下的性能。

### 4.2 连接部位强化设计

连接部位是换热器管板与壳程筒体最容易出现失效的区域，优化设计可以通过强化这些关键部位来提高其耐久性。加强连接部位的结构，优化焊接工艺，改善接头区域的几何形状，可以显著减小应力集中现象，避免过度的塑性变形和裂纹产生。采用渐变厚度设计或加装支撑加强结构，使连接部位能分担更多的热应力，减少局部材料的疲劳损伤<sup>[4]</sup>。对于焊接区域，可以通过精细的焊接工艺控制热输入，减少热影响区的应力集中，避免因高温引起的变形和裂纹。通过提高连接部位的抗疲劳设计，采用耐高温耐腐蚀的合金材料，并合理控制焊接接头的过渡区，可以有效提升连接结构的整体强度与稳定性。连接部位的强化设计，能够显著延长换热器的使用周期并减少维修频率。

### 4.3 热循环工况下的结构优化

换热器在热循环工况下的结构优化，旨在提高其整体稳定性和抗失效能力。热循环工况下的温差波动会对管板与壳程筒体的连接部位造成不同程度的应力冲击，结构优化设计需要重点解决这一问题。采用有限元分析技术，结合热应力与机械应力的耦合效应，对结构进行优化。优化措施包括合理调整管道布局、减小应力集中区以及增强应力分布的均匀性。加强热膨胀与结构的匹配，避免不同材料之间因膨胀差异引发的热应力积累。针对不同工况条件进行定制化设计，确保在高温高压环境下，换热器的管板与壳程筒体连接部位仍能维持良好的结构稳定性。结构优化还应结合实际运行经验，对设计进行动态调

整,确保热循环工况下的热应力变化不会导致失效。这一系列优化措施为换热器提供了更强的抗热循环载荷的能力,确保其长期稳定运行。

## 5 实验验证与优化效果评估

### 5.1 实验设备与测试方法

在换热器管板与壳程筒体连接的失效分析中,实验验证是检验设计优化是否有效的关键步骤。常用的实验设备包括高温疲劳试验机、热循环模拟器、显微硬度测试仪及腐蚀试验箱等。这些设备可以模拟换热器在实际工作环境中的热循环载荷,精确测量连接结构在不同温度、压力条件下的应力响应与变形情况。在测试过程中,通过施加温度变化和机械载荷,监测连接部位的应力、位移及温度变化,并记录失效的发生时间和位置。采用数字图像相关技术(DIC)监测结构表面的微小变形,以提供精确的位移数据。腐蚀试验则帮助评估材料在高温流体环境中的耐腐蚀性能。通过这些实验设备和方法,能够全面验证连接结构在热循环工况下的性能表现,为设计改进提供真实数据支持。

### 5.2 失效模式验证与数据分析

实验验证过程中,失效模式的验证至关重要,通过多种测试手段可以深入分析连接部位的破坏机制。在热循环试验中,连接结构在反复热应力作用下表现出不同的失效模式,主要包括疲劳裂纹扩展、焊缝破裂及腐蚀引发的应力腐蚀裂纹等。通过对裂纹形态、扩展方向及裂纹源位置的分析,结合断口分析

技术,可以明确具体的失效模式<sup>[5]</sup>。在数据分析方面,实验结果通过应力-应变曲线、疲劳寿命曲线等参数进行评估,从而确认失效的起因。进一步的数据处理可通过回归分析与有限元模拟结果进行对比,验证热循环载荷对失效的影响。实验数据的准确性为后续的优化设计提供了理论依据和实际参考,帮助发现设计中的薄弱环节和潜在风险点。

### 5.3 优化方案效果评估

优化方案的效果评估依赖于对比实验结果与原设计性能的差异。通过实施优化设计后,再次进行热循环实验,监测结构在新设计下的应力分布、变形情况及失效发生时间。优化方案主要针对连接部位的应力集中、材料选择、结构强化及热膨胀匹配等方面,评估其对疲劳寿命、抗腐蚀性能及热循环适应性的提升效果。在评估过程中,主要关注优化后的结构是否能够减小应力集中区域的应力峰值,是否能够延长连接部位的疲劳寿命。通过长期实验数据的积累,分析优化设计对换热器长期运行的影响,是否能够在高温高压条件下提高整体的可靠性和稳定性。

## 6 结语

换热器管板与壳程筒体连接的热循环载荷失效分析为换热器的设计优化提供了有力支持。实验验证与优化方案的实施有效提高了结构的抗疲劳和耐高温性能,延长了使用寿命。未来,进一步的多工况实验和模拟分析将有助于更深入理解失效机制,推动换热器设计向更高的可靠性和性能迈进。

## 参考文献:

- [1] 苏亚宁,尹华,李金梅,等.混合气四级换热器下管板与壳程筒体内表面处开裂原因分析[J].热处理技术与装备,2026,47(01):60-64.
- [2] 米海霞,宋长飞,刘世峰.化工换热器管板的应力分析与评定[J].化工设计通讯,2024,50(04):83-85.
- [3] 宋利滨,朱国栋,于闯.JB 4732—1995 附录I浮头式换热器管板计算方法探讨[J].压力容器,2023,40(07):66-72.
- [4] 刘丽芳,戴波,张震.基于热-力耦合分析的换热器管板强度校核[J].工程建设,2022,54(12):20-26.
- [5] 李红云,陈盛秒.H-L型螺纹锁紧环换热器管板计算方法的分析与比较[J].广东化工,2021,48(13):177-178+196.