

固定管板式换热器应力分析和疲劳分析

王在刚 康庆华

陕西航天航天机电环境工程设计院有限责任公司 陕西西安 710000

摘要: 介绍了某固定管板式换热器压力温度循环条件, 建立热分析和结构分析的有限元模型, 计算得出管板的温度场和应力场, 进行应力分析和疲劳分析。

关键词: 换热器管板; 线处理法; 应力分析; 强度评定

Stress analysis and fatigue analysis of fixed tube-plate heat exchanger

Zaigang Wang, Qinghua Kang

Shaanxi Aerospace Electromechanical Environment Engineering Design Institute Co., LTD., Xi 'an, Shaanxi 710000

Abstract: The paper introduces the pressure and temperature cycling conditions of a fixed tube-plate heat exchanger, establishes the finite element model of thermal analysis and structural analysis, calculates the temperature field and stress field of tube-plate, and carries on the stress analysis and fatigue analysis.

Keywords: Heat exchanger tube; sheet line treatment; stress analysis; strength evaluation

引言:

固定管板式换热器是管壳式换热器的一种常见形式, 它由壳体、管板、管束、封头压帽等构件构成, 管束的端部采用强度焊法和膨胀接头连接在管板上, 管板的两端均与壳体焊接, 并在壳体上焊上工艺接管。根据 JB4732-1995《钢制压力容器—分析设计标准》, 应用有限元方法对其在不同的设计条件下进行分析和计算, 以保证其使用的可靠性和安全性。本文涉及受压和温度的周期性变化, 需要对其进行应力和疲劳分析。在设计管板时, 应充分考虑其温度场、温差所引起热应力等因素。

一、相关理论概述

1. 换热器概述

换热器是一种可以在两种或多种流体之间, 或流体与固体颗粒之间、固体颗粒与流体之间或在各种温度下发生热接触的设备。它在化工、炼油、食品、轻工、能源、制药、机械等行业中占有举足轻重的作用。根据统计, 在化工企业中, 换热器设备的总投资大约为 10%~20%, 而在现代化的精炼企业中, 这一比例大约为 35%~40%。

在工业上, 根据用途、工作条件、制造材料和材料性质等因素, 采用各种类型的换热器具。详细分类见下图。

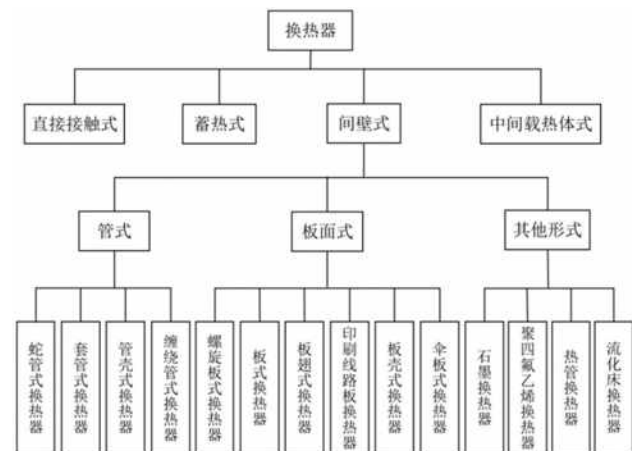


图1 换热器分类图

目前, 应用最广泛的是间壁式换热器, 也就是表面换热器。这种新型的换热器具, 利用固态的壁面上把热和热的液体分开, 把热液体的热从壁面上转移到冷的液体上, 从而实现了热的转换。可以将它分成管壳式、间

壁式以及其它类型的换热器, 而以管壳式换热器的应用最广。

2. 固定管板式换热器

管壳内固定管板式换热器工作时, 管壁与管壁间因物料的线性扩张率差异而引起的热应力过大, 从而使其发生失效, 从而对其安全、稳定的工作产生不利的作用。在固定管板式换热器中, 可以采用弹性材料, 以吸收热膨胀差异, 降低热应力。

在固定管板式换热器中, 由于管束和壳体的热膨胀差异, 导致了管板管壁温度的变化。管程与壳程是一种冷、热两种不同的温度, 从而导致壳体和换热管壁的温度差异, 从而导致了换热管与壳体的热膨胀形变差。对于没有安装伸缩节的固定管板换热器, 管束、壳体、管板以刚性联结形式相互制约, 管板作用是限制管束和壳体自由扩张。为了使管与壳的变形差异得到平衡, 使膨胀率较大的物料受到挤压, 而膨胀较少的物料受到拉紧。由此引起了壳体及管束之间的温度和温度的变化, 随着温度的升高, 管板中的温度变化也随之增大。当温度变化较大时, 会导致换热管与管板的接头出现泄漏, 严重时还会出现拔出。进而会对换热设备的安全使用产生不利的作用, 导致设备损坏, 生产系统停止运转, 造成重大的经济损失。

当前采用的减小温差应力措施, 从结构和工艺优化两个角度进行了研究。在构造上, 可以从增加内壁的受力性能和减小壳体的轴向刚性两个角度进行。在技术上, 通过减小管束和壳体的温度、材料选择, 可以采用相应的方法。

2.1 增加管板厚度

采用增大管板的厚度, 可以有效地减小管板受力。然而, 随着管板的厚度增大, 钢管的抗弯刚度得到增强, 管板的挠曲变形降低, 壳体和管束的弯曲变形也随之增大, 从而导致管板横向剪切和弯矩增大, 导致管板应力增大。

2.2 采用弹性管板

在管程、壳程温差及压强条件下, 管板的减薄可以有效地减轻管板两侧产生的热应力, 但这种方法无法确保管片的受热性能, 从而造成管片的强度和降低热应力之间的矛盾。因而, 可以使用一种具有弧形的弓形弹性管, 它既可以增加钢管的压力, 又可以通过弯曲截面的弹性变形来局部减小其热胀率。在相同工况下, 与环形管相比, 弹性管板厚度要比圆形管板薄, 这对减小管板的中央和边沿之间的径向热应力。

2.3 降低壳体的轴向刚度

管板可以使换热管与壳体之间的变形差异得到协调, 管板的变形与壳体、管束以及管板的刚性有关。当管程与壳程温度相差较大时, 管板将会发生较大的变形, 从而使管板发生较大的弯曲, 从而引起较大的应力。在换热器外壳上增加一个扩张节, 可以减小其轴向刚度, 减小其横向剪切力和弯矩, 从而大幅度地减小应力。

3. 国内外换热器的仿真分析研究状况

在1974年, 帕塔·伊尔卡和斯帕丁首先提出了用换热管作为多孔介质的简化模型, 并对其进行了简化模拟计算。1982年, Sha、Yang等人在文中引入表面渗透率的概念, 并将其应用于管束内的各向异性因子, 并利用容积渗透率来描述其对介质的影响。在1994年, zhang应用多孔介质的简化模型, 首次对较为复杂的有相变过程进行计算, 并与试验结果进行了对比, 得出了与试验结果一致的结论。2002年, Ko.J.H等采用流场可视化软件技术, 在雷诺数较小的情况下, 对针翅表面强化管的强化换热进行了实验, 并对其进行了强化。

高宏宇在2010年应用《曲面弓形折流板换热器的研究》中, 采用数值计算方法, 分析了不同的折流板和板距对换热器壳体程压降及换热系数的影响。2012年, 刘磊等对管壳式换热器的壳流场进行了数值模拟, 并应用FLURNT软件对壳体流场、温度场、压力场的分布情况进行了数据分析。

近年来, 国内外对管壳式换热器的数值计算方法进行了几十年的探索, 但在当今快速发展的情况下, 其整体性能还不能完全适应。这就要求我们的新一代研究者不断地学习、利用和开发流体动力软件, 以适应我国经济的发展。

二、模型结构尺寸及技术参数

1. 结构参数

在实际工程中, 采用固定管板式换热器的管板结构。圆筒的内径 $D_i=1800$ 毫米, 筒壁厚度 $\delta_1=12$ 毫米。传热管规格为 $108\text{mm}\times 4\text{mm}$, 以直角三角形的形式布置, 管间距 133mm , 共计139个。管道介质是一种极具腐蚀性的介质, 因此在管板管程交界面上堆焊了一层不锈钢板, 该钢板的堆焊厚度为 $\delta=8\text{mm}$, 而不锈钢衬里只能承受腐蚀, 不能承受外力。模型中的忽约管在管程一侧的伸长, 壳体与管板为刚性连接, 管板兼作法兰简化结构见图2。

2. 应力数值分析

本文着重探讨了换热器管板的应力分布, 忽略开孔接管、管箱封头和支架等问题。鉴于换热管、管板、

筒体结构的构造特征及负载特征符合对称条件, 故在 Geometry 模块中, 采用对称法的四分之一的模型进行研究。另外, 在管板和管程流体接触面上堆焊的不锈钢衬层没有承受力。因此, 模型中只采用了 Q345R 的局部厚度。将圆筒与管板相连, 长度为实际管径的二分之一, 从而消除了筒体边缘的轴向应力分布的影响。同时, 充分考虑到换热管对管板的支承作用。

3. 边界条件

按照 GB151 的规定, 在管程、壳程的单独作用, 以及管程和温差同时作用、壳程和温差同时作用、管程和温差同时作用、管程和壳程同时作用、管程、壳程和温差同时作用的多种工况下进行加载和计算。由于外部的重力和外部的压力对仿真结果的影响很少, 所以将 P_t 加到传热管的内壁上, 将壳压 PS 应用于外壁上, 将管程和管壁的两边分别加到管壁的两边, 将壳层的压力作用于外壳的内侧, 在管板的外侧面施加圆柱面约束。在壳体端面和换热管端面施加对称约束。

三、计算结果与应力评定

在管板与筒体接头处, 受力不均衡, 应力梯度大, 应力集中明显。在管径和温度共同作用下, 管板的当量应力达到最大, 且最大应力发生在管板与筒体之间的交界处。

应用线处理法对换热器的受力等效线性化, 进行应力分级评价, 以评价其安全性。选取在各种情况下等效应力最大值的路径作为应力处理线, 根据 JB4732-1995 (2005)《钢制压力容器-分析设计标准》的应力分级原理, 得出了由于内压产生的薄膜应力是一次区域膜应力 PL , 而由于不连续性引起的弯曲应力是第二次应力 Q 。对路径做线性化法, 得到了薄膜应力、弯曲应力和峰值应力, 一次应力值是指材料的塑性破坏和弹性变形的情况, 将一次应力加二次应力相联系, 得到结构疲劳破坏程度结果。采用单次弯曲法进行评价, 在管板与筒体之间采用一次应力和二次应力进行评价。对各种工作条件下的处理线进行了计算, 发现在六种工况下, 管板结构都达到了要求, 而在有温度变化的条件下, 这种工况危险。

四、疲劳分析

因本换热器壳程承受压力、温差循环, 需进行疲劳分析, 考虑 4 种情况:

1. 将温差与壳程压力的改变视为单独的疲劳事件, 并将其与最大的应力强度相关联, 并以其最大的应力交变幅度最大。

2. 将温差和壳程压力的改变视为单独的疲劳事件, 并将其与最大的应力峰值相关联, 并以其最大的应力峰值和最大的温差变化相关联。

3. 将温差与壳程压力的变化同时视为一种应力现象。

4. 在此基础上, 将温差与壳程压力力的异步效应视为一种失效现象。

通过对换热器上接管的疲劳特性进行了研究, 得到了其总体和接管结构满足疲劳强度指标。

五、换热器的结构优化

由于固定管板式换热器管板长期受到热应力的重复影响, 导致了管材蠕变, 根据管板分析受热应力和形成的机理, 并根据管板的设计规范提出了相应的减小热应力的方法, 如下:

1. 管束与壳体采用同一材料

在相同的结构和工作条件下, 采用相同材质的 S30408 (0Cr18Ni9), 可以防止由于管束和壳体线膨胀系数太大而引起的局部应力。管束和壳体采用相同的材料, 可以有效地防止由于管束和壳体线的膨胀系数过大而引起的局部应力, 从而降低管板与壳体、管板与管束之间的应力。

2. 设置膨胀节

在热负荷下, 由于固定管板式换热器壳体与管束发生热变形, 由于壳体与管束在轴向上存在着很大的热变形, 因此采用扩张节, 可以有效地减少壳体与管束的轴向热膨胀, 减少了壳体与管束的热膨胀, 减少传热压力。选用 S30408 材料制作的波浪式膨胀节。该节节件的特点是构造简单、易于制作、补偿性能好、成本低廉、抗压和伸长性能良好, 因此, 伸缩节的设置必须尽量接近于管板, 并避免发生外壳内液体的短路。通过对该优化设计的热应力场进行了计算, 结果显示, 该方案能较好地解决换热管和管板的热应力问题。

3. 其他措施

在此基础上, 研制了一种弹性管, 它通过弹性变形来吸收热胀差, 而在同一工作条件下, 其厚度要小于相同工作条件下的圆形管板, 从而减少了管板中心与边缘之间的径向热应力。

降低换热管与外壳的温度差。在运行过程中, 若冷热介质温差大, 则应尽量避免采用固定管板式换热器, 以消除换热管、壳程温差造成的热应力。

采用预应力技术可以有效地改善管板热应力分布状况, 从而减小了受热应力对管板的应力强度和弯矩的影响。

六、结束语

对换热器的热应力进行强度和结构优化研究, 得出了以下几点结论:

(1) 利用 Workbench 对 1/2 的固定管板式热交换器进行了模型化, 利用 Fluent 程序对其进行了热-固耦合仿真, 获得了其工作状态下的固相温度场, 并根据传热原理对其进行了分析。采用 ANSYS 的计算结果对其进行了热应力的精确计算, 并将其应用于 ANSYS 的计算中。

(2) 管束和壳体采用相同的材质, 可有效地防止管束与壳体之间的温差太大, 而引起的局部应力, 从而降低管板与壳体、管板与管束间的热应力。

在热应力计算和结构优化上, 还需进一步探讨:

(1) 在实际操作中, 除了考虑温度负载外, 还可以对其自重、管程压力、壳程压力、壳程压力等因素进行分析; (2) 对换热器进行模拟改进后, 可以进一步的研究换热器的高温蠕变问题; (3) 本文还可以对在使用中所产生的腐蚀和振动问题进行了深入的分析。

参考文献:

[1] 钱路燕, 贺斌兰, 万雷. 固定管板式换热器应力分析[J]. 工程建设与设计, 2020 (01): 162-164.

[2] 于春柳, 郑旭东, 任金平, 张琪, 芦娅妮. 固定管板式换热器管板热应力分析及控制措施[J]. 化工机械, 2019, 46 (02): 210-212.

[3] 陈一鸣, 王宏, 王兆蕊, 栾德玉. 固定管板式换热器管板的应力分析和强度评定[J]. 石油化工设备技术, 2018, 39 (06): 15-18+21+5.

[4] 蔡宏伟. 固定管板式换热器的热应力分析与结构优化[D]. 南昌大学, 2018.

[5] 刘义民. 预应力固定管板式换热器分析与设计技术研究[D]. 华南理工大学, 2016.

[6] 陈超, 李艳明. 复杂载荷作用下管壳式换热器管板的应力和疲劳分析[J]. 化工设备与管道, 2010, 47 (06): 14-18.

[7] 肖芬, 陈志伟. 固定管板式换热器应力分析和疲劳分析[J]. 化工设备与管道, 2010, 47 (05): 5-7.

[8] 马永其. 换热器固定管板有限元应力分析的进一步研究——采用面向对象设计方法的固定管板式换热器有限元应力分析系统及“薄管板”结构强度计算的研究[D]. 北京化工大学, 2000.

[9] 王建鹏. 固定管板式换热器的热应力特性分析[D]. 山东科技大学, 2019. DOI: 10.27275/d.cnki.gsdku.2019.000250.

[10] 李子豪. 固定管板式换热器法兰螺栓连接系统的预紧力计算方法验证及安全评价[D]. 兰州理工大学, 2019.

[11] 蔡宏伟. 固定管板式换热器的热应力分析与结构优化[D]. 南昌大学, 2018.

[12] 刘义民. 预应力固定管板式换热器分析与设计技术研究[D]. 华南理工大学, 2016.