doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2026.02.004

设计计算

热交换器管板分析设计中值得关注的非受压结构因素

陈孙艺

（茂名重力石化装备股份公司，广东茂名 525024）

摘　要：针对热交换器管板分析设计中容易强化技术手段，而忽视工程因素的状况，基于前人的分析成果并结合3个失效案例与相关工程经验，指出了建模中值得关注的非受压结构件及工况失真问题。某些情况下，管束模型中折流板、拉杆与定距管及隔板的缺失，都会使分析结果不符合工程实际。在案例的分析讨论中，提出了不同程度加以完善的分析模型。有限元二次分析技术、常规设计技术与工程辅助技术对分析设计技术的协同互补是较好的处理对策。通过分析设计的内容及完整性，分析模型的概念及模型的校验，分析设计的客观资源及主观意识等3个专题共7点认识的讨论，提出管束分析设计中采用应力与位移双判据的必要性。建议分析设计中加强工程素养的培养与个性技能的自觉提升。

关键词：热交换器；管板；管束；分析设计；工程因素；工程素养

中图分类号：TH49；TK172；TH122　　**文献标志码**：A

Non-pressurized structural factors worth considering in heat exchanger tube sheet design by analysis

CHEN Sunyi

（The Challenge Petrochemical Machinery Corporation of Maoming，Maoming 525024，China）

Abstract: In view of the tendency in the analysis and design of heat exchanger tube sheets to overemphasize technical means while neglecting engineering factors，this paper，based on previous research results combined with three failure cases and relevant engineering experience，identifies the issues worthy of attention in modeling，including non-pressure-bearing structural members and the distortion of actual operating conditions.In some cases，the absence of baffles，tie rods，spacer tubes and partition plates in the tube bundle model will lead to analysis results inconsistent with engineering practice.In the analysis and discussion of the cases，analytical models improved to varying degrees are proposed.The synergistic complementarity of finite element secondary analysis technology，conventional design technology and engineering auxiliary technology to the analysis and design technology is a better handling countermeasure.Through the discussion of 7 points of understanding across 3 topics—including the content and integrity of analysis and design，the concept and verification of the analytical model，and the objective resources and subjective awareness of analysis and design—the necessity of adopting the dual criteria of stress and displacement in the analysis and design of tube bundles is put forward.It is suggested that in analysis and design，the cultivation of engineering literacy and the conscious improvement of individual skills should be strengthened.

Key words: heat exchanger；tube sheet；tube bundle；design by analysis；engineering factor；engineering literacy

0　引言

长期以来，压力容器分析设计中的工程因素，始终是相关标准规范与工程实践重点关注与着重强调的内容。1995年，JB 4732—95《钢制压力容器——分析设计标准》发布并实施，其K.2.2条要求分析人员对工程实际问题应具有合理模型化的处理能力。2015年，陈孙艺[1]列举了10多个案

收稿日期：2025-07-09　修回日期：2025-12-01

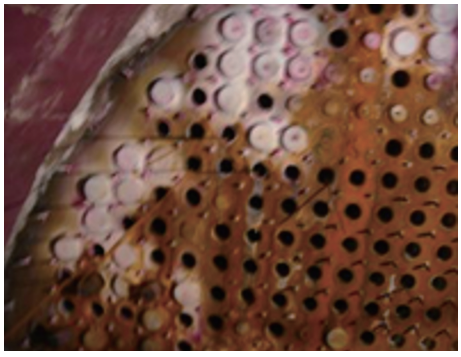
例，针对设备结构、设备运行工艺和分析技术等三方面对模型的影响，讨论了压力容器有限元分析中某些简化模型建模中值得关注的工程因素。2024年，GB/T 4732.1~6—2024《压力容器分析设计》标准在第1~6各部分的引言中都强调其不能替代工程经验和工程评价；同时明确，工程评价应由具备扎实专业知识、熟练掌握规范应用的技术人员，依据分析设计相关国家标准，结合具体产品开展；并强调在采用计算机程序进行分析设计时，设计者要确认所采用程序输入参数及输出结果用于工程设计的正确性。2024年，朱志颖等[2]针对某DN300、换热管长度3 m的浮头式热交换器管束在壳程轴向压力作用下的失稳进行数值模拟合理性研究，在不考虑换热管和折流板之间的间隙，采用直接绑定接触将换热管和折流板连接在一起进行非线性失稳分析时，发现由于无支撑长度变短，整个管束形成一个稳定的钢架，抗失稳刚度显著增加，特别是管束在轴向载荷作用下发生塑性失效，没有出现失稳，凭经验判定这不符合工程实际。

当前，在知网总库上以“受压元件”为主题或关键词可分别获得2 170，590条结果，而以“非受压元件”为主题或关键词获得的结果都为0；在以“压力容器分析设计”为主题获得的747条结果中，再以“工程因素”或“工程素养”为主题词进行二次搜索，获得的结果也都为0。由此可见，在行业持续开展研究与分析设计工作的过程中，工程因素的影响问题，堪称一项长期性乃至世纪性的课题。为进一步强化行业内对该现状及潜在问题的重视与认知，本文在梳理汇总相关文献资料与工程经验的基础上，就热交换器管板分析设计中值得关注的非受压元件及其相关工程因素进行探讨，寻找提高设计质量的对策。

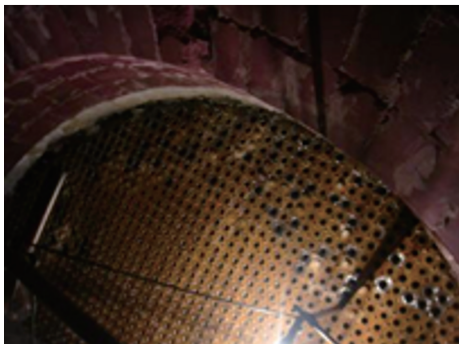
1 炼化装置热交换器管接头失效典型案例

1.1 蒸汽发生器管束周边管接头失效

炼油装置蒸汽发生器又称废热锅炉，管程的低压高温烟气从前端管箱进入，通过炉管与壳程的锅炉水换热后从后端管箱流出。因管程降温幅度显著，以及壳程压力明显高于管程压力，管板周边应力较为集中，其挠性薄管板常采用标准推荐的折边结构，与壳体采用对接焊接形式形成周边固支连接。这样设计制造的结构，有的还存在强度失效问题。2013年，某新建硫磺回收装置的蒸汽发生器仅运行半年后出现故障，停车检修时发现前端管板周边若干层管接头普遍出现开裂泄漏现象，处理现场如图1所示。



（a）周边管头堵管



（b）周边管头泄漏

图1 管头失效处理

Fig.1 Tube head failure treatment

1.2 气冷器管束布管区交界处管接头失效

在同一制造厂第一次制造及第二次制造的某固定管板式变换气冷却器，都在装置开车期间相对集中地在布管区与上部、下部两个面积较小的弓形非布管区的交界附近出现管接头内漏，甚至另一家制造厂按同一套施工文件制造的第三台设备也发生了泄漏。图2示出该设备失效管接头及其周边2圈管接头实施预防性堵管后的现场照片，该照片由上下两个半圆形局部图像拼接合成，呈现为近似圆形的整体视图。陈孙艺等[3]针对管束内多种双向拉紧式管板的结构形式及工程应用进行了总结分析，并从另一角度阐释了该堵管，指出其相当于把换热管改造成两端都与管板焊接连接的双向拉紧结构，具有对管板周边的加强作用。

1.3 废热锅炉前端管板管接头失效

图3示出某废热锅炉热端管口保护结构的瓷套断裂失效现场。

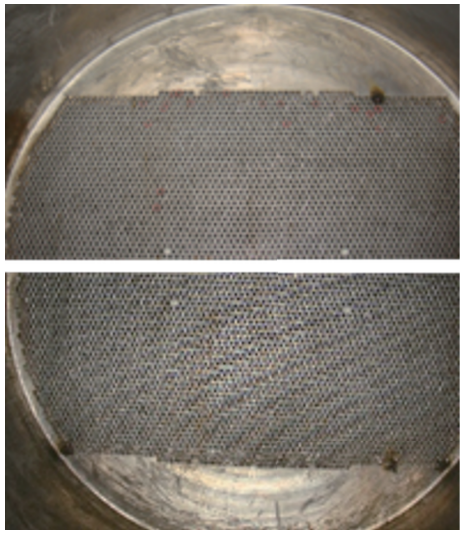


图2 周边管接头堵管现场

Fig.2 Blockage of surrounding pipe joints at the scene



图3 管口热保护瓷套管断裂失效现场

Fig.3 The site of the fracture failure of the hot-protection porcelain sleeve at the pipe orifice

2 炼化装置热交换器管接头失效分析中设计因素的文献调研

2.1 管板的解析设计法无法校核管接头的结构强度

2.1.1 管板的解析设计法不考虑管接头保护层这一非受压组件

管板设计的评定内容主要涉及管板本体和管接头的强度,管接头的影响包括管孔对管板的削弱及换热管对管板的支撑。解析法可校核挠性管板折边结构强度以及管接头的拉脱力,但无法校核管接头结构强度。

陈孙艺[4]针对废热锅炉进行研究,其壳程介质由水蒸发成饱和蒸汽,由于其给热系数很大,对壳程圆筒和换热管的金属壁温起到绝对的决定作用,从而忽略管程和壳程的金属壁温差。由此基于一次结构法的解析解分析,决定管板应力水平的主要载荷是壳程压力,管壳程的热载荷对管板的应力水平没有影响,只影响材料性能。管板与壳体内壁连接处的径向弯曲应力,通常为该区域的最大应力,且具有从压应力到拉应力的突变,是校核的关键,解析法设计中可能需要多次反复计算,才能达到优化。由于解析法没有考虑管口热保护层的非受压结构,管接头强度没有保证。

2.1.2 管板的解析设计法不能揭示管接头保护区的温度畸变

王素芹[5]对如图4所示的高温换热设备管口热保护结构建立了热应力计算的物理模型和数学模型,并采用有限元法对热应力进行了计算。计算结果表明,由于管口热保护区存在温度畸变,使得瓷保护套管内产生较大剪应力,从而造成瓷套管的热应力损坏。具有类似保护套管结构的案例[4],仅通过解析法无法考虑温度畸变在管接头和管板周引起的热应力,以及潜在高温工况的参数失真问题。由于文献[4]与文献[5]分析的侧重点不同,模型考虑的因素不同,难以判断文献[4]揭示的内压应力突变与文献[5]揭示的热应力突变是否是影响管束周边管接头失效的主要因素。

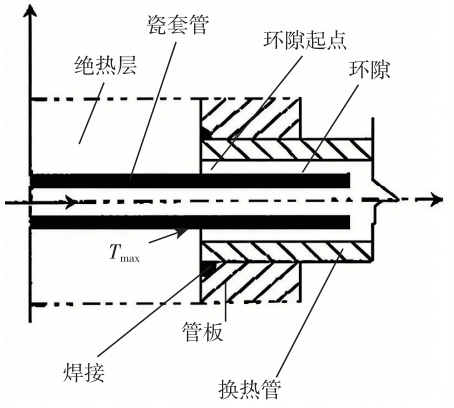


图4 废热锅炉热端管口保护结构

Fig.4 Protective structure of the hot end tube port of waste heat boiler

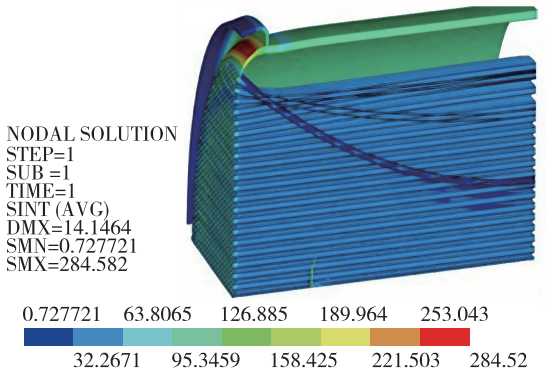
2.1.3 管板的解析设计法未考虑管接头保护层承受的热辐射

安连想等[6]基于换热管口陶瓷保护套管和浇注高温耐火材料的实际情况,考虑废热锅炉换热管与管板连接结构的换热是集导热、对流、辐射于一体的换热过程,因此,在传统模型中的辐射面上通过矩阵生成器覆盖一层新的单元进行辐射计算,然后生成角系数矩阵用于热分析计算,求取更精确的温度场。

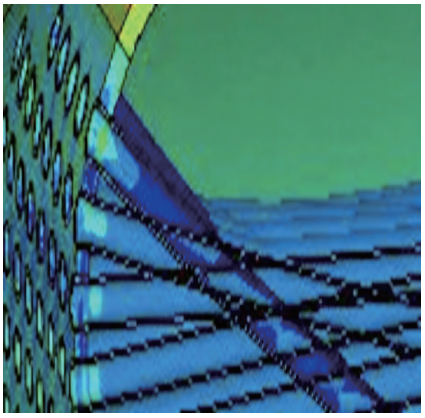
2.2 热交换器有限元计算模型简化不合理

2.2.1 废热锅炉挠性管板分析模型中结构与工况的双重简化使换热管内拱变形失真

缺失支持板的非全模型结构简化问题。采用有限元法进行全模型分析，可以通过结果透视图，更全面地探讨这类结构失效的作用机理。一些研究采用有限元法分析了近似图1所示失效废热锅炉过渡段结构对薄管板应力分布的影响，结果如图5所示。周边6圈换热管表现出显著弯曲变形的趋势，具有“换热管交叉”的特点。这主要是由于分析模型不考虑管束支持板产生的失真变形问题。变形既包含内压作用下管板周边变形所引发的换热管被动协调变形，也涵盖周边换热管因热膨胀伸长受两端管板约束而产生的失稳弯曲。



(a)管束应力云图



(b)管板周边局部放大图

图5 废热锅炉管束应力分析结果

Fig.5 Stress analysis results of waste heat boiler tube bundle

偏离实际温度场的失真工况问题。张起侨[7]采用的模型考虑了筒体外壁保温材料、管程侧隔热材料的影响，通过对流传热求取金属结构的温度场，并在应力场的边界条件基础上，将温度场计算所得的单元节点温度作为体积载荷施加到对应的结点上。但是传热初始时，在换热管内的温度假定从进口至出口呈均匀下降，按下式在陶瓷保护内套管及换热管内表面施加温度：

$$T=1\,350-0.15x \tag{1}$$

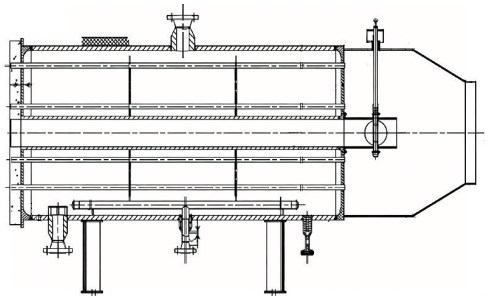
式中，T为施加温度，℃；0.15为温度均匀下降的斜率；x为施加温度点与进口的距离。

这一带“均匀”性的模拟与文献[5]的温度畸变现象有所不同，也未考虑文献[6]的辐射传热，工况简化潜在的影响值得探讨。关于换热管的温度，一方面，对于这类蒸发器操作工况，GB 151—89《钢制管壳式换热器》标准的图G1(b)和GB 151—1999《管壳式换热器》标准的图F1(b)都给出了热流体从进口高温到出口低温过程的下凹形温度曲线，对比标准中的温度曲线和线性关系式的温度线可知，当两者的进口温度和出口温度都相同时，标准中温度曲线的温度值要小于线性温度线的温度值；另一方面，烟道口从轴向进入这类蒸发器前端管箱的高温烟气温度不均匀，直径较大时，上部的温度可能较高，管箱扩径时管板周边的烟气因旋流而温度较低。烟道口从径向进入这类蒸发器前端管箱时，各换热管入口温度分布更加复杂。

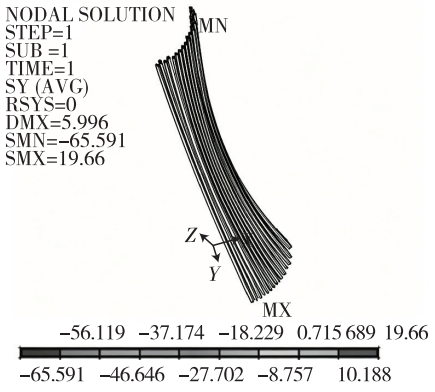
2.2.2 废热锅炉薄管板分析模型中结构不合理简化使换热管内拱变形失真

薄管板在结构上有别于挠性管板之处是其周边的折边结构。薄管板通常采用锻件制造，挠性管板一般采用厚壁钢板制作，也有部分挠性管板采用周边锻件与中间布管区厚壁钢板组焊而成。

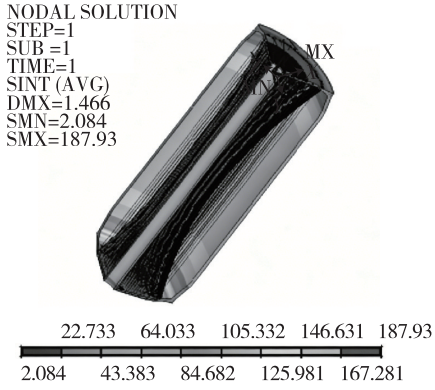
修维红等[8]对薄管板结构废热锅炉进行有限元分析，分别获得了只有壳程压力作用、壳程压力和温差载荷共同作用、试验压力作用等3种工况作用下第三强度当量应力分布、温度场分布及位移分布，结果表明，结构变形使热端管板和冷端管板有明显凸起，周边换热管受压弯曲变形见图6(b)，壳程筒体大部分外凸，仅在两管板附近向内收缩，中心管基本保持直线，无较大变形。3种工况下，废热锅炉最大应力点位于热端管板、冷端管板的弯角两端，是管板与壳程筒体连接过渡区。虽然图6(b)所示管束没有展现出图5(b)所示管束中换热管端部交叉的现象，但图6(b)周边换热管的弯曲变形挠度较大，工程实际上也不大可能出现，这也是由于分析模型未考虑支撑板对管束的约束作用，从而导致变形失真。



(a)废热锅炉结构简图



(b)工况下应力分析换热管云图



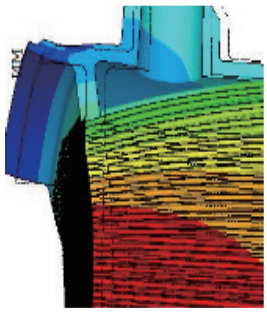
(c)工况下应力分析模型云图

图6 周边换热管向内弯曲

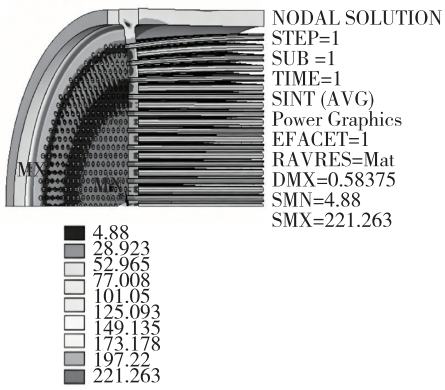
Fig.6 The peripheral heat exchange tubes bents inward

2.2.3 废热锅炉薄管板分析模型中结构不合理简化使换热管外拱变形失真

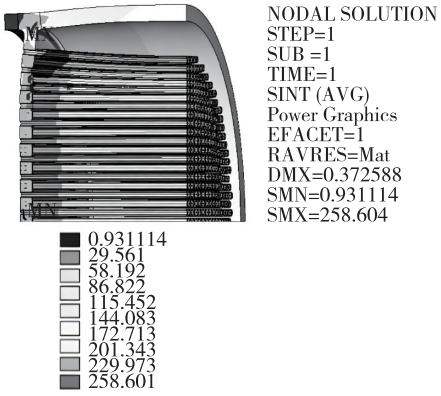
图7(a)示出某固定管板热交换器某工况仿真的轴向变形位移情况,图7(a)中的点划线显示了结构变形前形状。图中与外部结构相连的顶部接管及左端的管箱短筒节明显向左侧位移,管板周边向左侧的管箱方向位移,管板中间向右侧的壳程方向位移,管接头的轴向变形位移分别为-0.43,0.11,0.29,0.47,0.64 mm,相互差异达到167%。而且管束周边约7层换热管径向向外拱出,中间段已失真地贴紧壳体内壁,表明换热管承受弯矩作用。工程实际中,周边换热管不可能出现外拱失真的变形,这仍然是前处理分析模型不考虑管束支持板对换热管存在约束的结果。如果考虑支持板的作用,工程实际的周围管接头可能承受更复杂的应力,成为容易失效泄漏的部位。



(a)废热锅炉结构简图



(b)管程水压试验应力分布



(c)壳程水压试验应力分布

图7 周边换热管弯曲

Fig.7 The peripheral heat exchange tubes bents

图7(b)[9]示出某高温低压工况下运行的甲烷化废热锅炉,在管程水压试验下的第三强度应力分布,其结构及变形与图7(a)相似。管束周边约3层换热管径向向外拱出,虽然外层尚未贴近壳体内壁,但也占据了周边非布管区一半的径向间隙。图7(c)[9]示出壳程水压试验工况下的第三强度应力分布,管束周边约3层换热管径向向

内收缩，扩大了周边非布管区的径向间隙近一倍。值得注意的是，这些换热管外拱或收缩的间隙只是就模型图中壳体离管板轴向400 mm处而言，可断定径向间隙在壳体轴向中间处变化更大，换热管的挠度肯定超出了支持板管孔对换热管的限位。由此表明换热管承受的弯矩作用产生明显的失真现象，这还是前处理分析模型不考虑管束支持板对换热管存在约束的结果。

2.2.4 不合理简化模型存在的问题及风险

热交换器分析设计的模型简化是难免的，不合理的简化模型对计算结果产生不利影响。图1实物和图5模型，图2实物和图7模型，图3实物和图6模型三组结构及功能相似，有的图组结构尺寸及工况参数相近，表明失效案例与分析模型存在不容忽视的潜在关联性。图5~图7及类似的分析存在如下工程因素考虑不周的问题，有潜在的设备失效风险。

（1）三个管束模型都不考虑支持板，出现了明显的换热管整体结构变形。但换热管沿管束径向弯曲的方向相反。图5和图6所示废热锅炉因管程高温与壳程高压而出现换热管向管束内部弯曲，很容易与内层换热管发生接触等干扰现象。石油炼化中很多固定管板热交换器都把低温高压介质安排在管程，管束管程耐压试验时的高压也在管程，换热管承受两端管板的轴向压缩，其周边换热管容易出现图7所示向管束外弯曲的现象，管束周边非布管区为换热管的向外弯曲提供了空间。

（2）换热管与管板连接结构简化的合理性。图5模型假设换热管与管板采用全焊透结构，单元是互相连接的，不考虑两者的接触关系。这与其所在文献所示焊脚高度不到管板厚度一半的实际不一致，管接头实际的弱结构被人为假设成强结构，实际的弱结构存在承受超高应力、开裂失效的风险。由于图6和图7的分析模型未交代换热管与管板连接结构的处理，因此不便讨论。

（3）模型长度简化的合理性。通常而言，废热锅炉前端管板与后端管板往往存在厚度不同、周边结构尺寸差异，只有前端管板管程设有隔热保护层、外圆设有全周长焊接件等，具有这些工程实际特点的图6采用了包括两端管板的全长模型。图5模型取到轴向中间处，而图7模型只取到离管板轴向400 mm处，图5和图7的简化是否合理，值得怀疑。

（4）从中还可粗略认识到，换热管弯曲变形的长度约等于壳体半径的尺寸，影响范围较大。

（5）从图5和图6及其他已公开的管束模型案例分析看，其目的主要是确认管板周边结构的可行性。虽然表面上保证了管板结构的强度是安全的，但无法保证管束整体结构及其功能的完整性。一方面，如果管束模型考虑了支持板，工程实际上的换热管在支持板的支承与变形限制下，管板和换热管只能稍微弯曲。弯曲变形程度减少，但变形协调中结构承受的弯矩与剪力会增加。内压引起的一次局部薄膜应力与一次弯曲应力都会变化，模型结构安全须重新计算评定。其被限制的弯曲变形在一定程度上转变为对管接头的作用，意味着管接头应力的变化。文献[7-9]未考虑到这一结构缺失引起的应力变化，文献[7]也未能判断假设管内温度呈线性均匀下降的参数失真引起的应力偏差，两种因素的性质不同，但都导致应力失真，使结果不可靠。另一方面，分析评定的许用值也因此变化。在GB/T 151—2014《热交换器》标准中，支持板的间距通过两个变量影响管束结构的设计，分别是换热管的受压失稳当量长度，以及换热管稳定许用压应力。虽然这两个变量有明显关联，但换热管稳定许用压力还受其他因素的影响，因此这是两个涉及结构完整性的独立因素。

3 热交换器分析设计中支持板等支撑结构的模拟技术

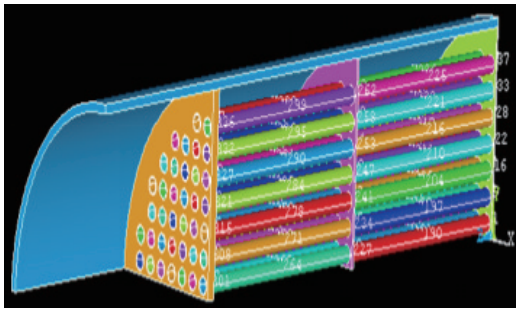
3.1 关于支持板等支撑结构的有限元模拟技术

3.1.1 换热管与折流板管孔之间的摩擦关系

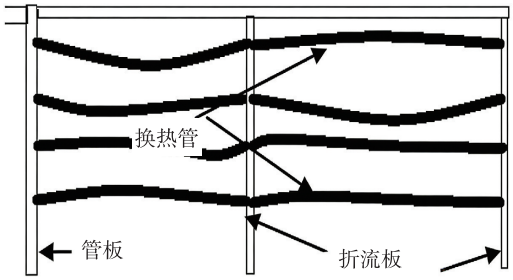
国际上，早在2014年的PVP会议上，沙特和印度学者交流的成果就采用ANSYS表面接触单元模拟了换热管与支持板管孔之间的摩擦作用关系[10]。由于载荷、材料和接触面等因素，换热管和管孔之间可能会以不可预测和突然的方式进行接触或离开接触。因此，采用表面接触优化技术来计算结构应力和挠度。管孔和管之间采用3D、4节点的174号面对面接触单元和170号目标单元来模拟柔性接触。

图8（a）[10-11]示出只带一块支持板的固定管板式挠性管板管束模型，壳体内径1 984 mm、壳内换热管长6 704 mm，换热管规格∅88.9 mm×7.62 mm，管、壳程的设计压力分别为1，5 MPa，设计温度均为245 ℃。研究表明，当考虑换热管与

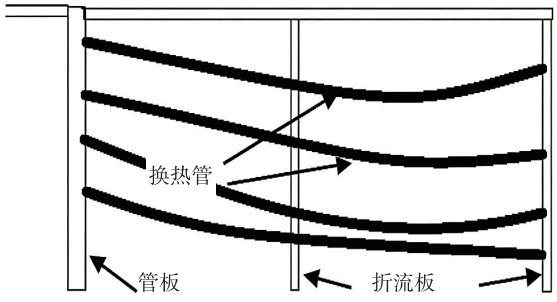
折流板管孔之间摩擦系数为0.78的摩擦作用后，换热管在垂直方向的变形位移如图8(b)[10-11]所示，换热管受到的约束沿长度分布明显不均匀，各换热管之间的位移也有明显区别，但是最大横向位移只有0.23 mm，都能保持直管状态，此时，换热管和管孔上的弯曲应力分别达83.93，86.35 MPa。如果不考虑换热管与折流板管孔之间表面接触单元的摩擦作用关系，换热管会出现如图8(c)[10-11]所示的弯曲失真，换热管最大横向位移2.64 mm。判断是否需要开展接触单元分析的依据为:换热管位移超出折流板孔径与换热管外径差值的二分之一。



(a)热交换器的3D实体模型



(b)考虑管孔摩擦的换热管变形



(c)不考虑管孔摩擦的换热管变形

图8 带支持板的换热管变形分析

Fig.8 Deformation analysis of heat exchange tubes with support plates

工程实际中的结构偏差致使绝大多数换热管与多数折流板管孔之间都有直接接触，相互摩擦作用难以避免。该案例分析并未详细公开柔性接触的模拟方法，但其提出的接触分析适用性判据仍具备一定的理论价值。

3.1.2 折流板对换热管的位移约束关系

在国内，自2019年以来，出现了两起模拟换热管与折流板管孔管系的成果报道[2,12]。

换热管与折流板管孔之间的位移约束技术。雒定明等[12]在某固定管板式薄管板高压预冷器水压试验后管板变形的成因分析中，为模拟实际情况进行大变形、弹-塑性分析时，在模型中考虑了3种非受压元件。首先，采用八节点实体单元模拟2块支撑板和上下各8块弓形折流板这两种非受压元件，板上的圆孔简化成边长为直径的方孔，便于实现换热管和支撑板/折流板孔壁的接触判断；考虑壳体内壁与支撑板/折流板侧面的面-面接触，以及换热管外壁与支撑板/折流板上孔洞构成的线-面接触，通过该模型在支撑板/折流板上施加自重分析得出竖向位移。其次，在水压试验工况的模拟中，为缩减计算时间，并使大变形分析计算容易收敛，不再单独考虑与支撑板/折流板相关的两种接触关系，而是在各支撑板/折流板的垂直方向施加由自重分析求得的竖向位移，由此模拟换热管在自重作用下的微弯状态，微弯作为换热管轴向受压失稳分析的一个条件。再次采用实心梁单元对第三种非受压元件——定距管进行模拟，10根定距管与后端管板及支撑板/折流板的焊接连接用Ansys软件的“点焊”功能或绑定型接触来模拟。

3.1.3 换热管与折流板管孔之间的间隙等效技术

朱志颖等[2]针对直接绑定接触将换热管和折流板连接在一起进行壳程轴向压力作用下的非线性失稳分析进行研究。针对换热管和折流板之间存在间隙，如果将所有间隙设置为非线性接触，不但数量太多，而且接触状态也随载荷及相关因素而变化，会造成计算难以收敛的分析难题，因此，提出间隙等效法的处理对策。即在间隙中填充软材料，将填充软材料的弹性模量设置成一个很小的量，这样的柔性材料刚性非常小，几乎没有抵抗变形的能力，但可以将换热管和折流板之间存在间隙的非线性接触转变为无间隙的绑定接触，从而使计算收敛，间接实现非线性失稳分析。针对该浮头热交换器，采用间隙等效法成功进行了在壳程等效压力作用下的非线性稳定性分析。结果发现，由于热交换器没有筒体支撑，管束会发生整体失稳，失稳变形呈整体偏斜，此时的等效轴向压

力为18.6 MPa，小于换热管和折流板直接绑定的结果。另外还发现，管板的弯曲变形会引起管束外侧换热管弯曲，并可能出现屈服。

3.1.4 同一管束中换热管支撑件在不同分析模型中的合理处理

缪洪康等[13]通过仿真研究了管壳式熔盐空气热交换器U形管弯管段受空气冲击诱导振动的响应特性。该案例根据不同的需要采用如下5点合理的处理技术，在充分利用有限资源的同时，提升了分析结果的精度与可靠性。

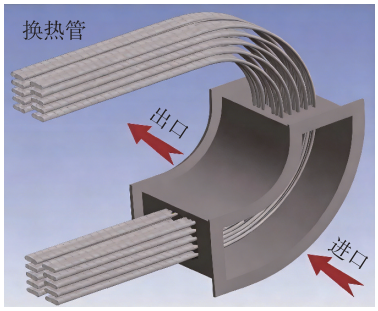
（1）避免单向流固耦合分析的不足而采用双向流固耦合分析。双向流固耦合是将流体计算结果和结构计算结果相互传递，同时分析流场对结构场的作用和结构对流场的影响。

（2）为减少全模型双向流固耦合分析过大的计算量，提高计算速度，抓住了典型结构，保证结果具有代表性。只选取相对危险的第一排中间整根传热管作为分析对象，将图9（a）[13]所示的全管冲击段几何模型简化为图9（b）[13]所示的单管双向流固耦合计算模型。还通过仿真结果与试验结果的分析讨论，验证了该方案的合理性。

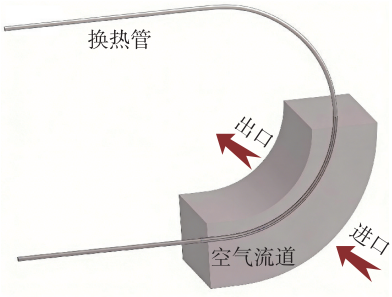
（3）在模态分析中，研究的是系统在没有外界激励情况下的自由振动特性，少了载荷等外来因素的作用后，其计算量没有双向流固耦合计算那么大，在计算能力匹配计算量时采用了图9（c）[13]所示的全模型。

（4）基于分析的内容设置不同的边界。在双向流固耦合分析中，模型通过施加固定约束模拟了支撑换热管的两端管板，但是没有考虑抗震条这一边界情况，使分析结果倾向保守。在模态分析中，模型通过施加固定约束模拟了支撑束管的两端管板，而且在束管的U形顶部施加了模拟抗震条结构实际情况的约束条件，使固有频率和振型反映结构固有的属性，如图9（c）[13]所示。因此，可以推测该束管很短，否则在管板与束管U形段之间的直段还应设有支持板，分析模型应予以反映。

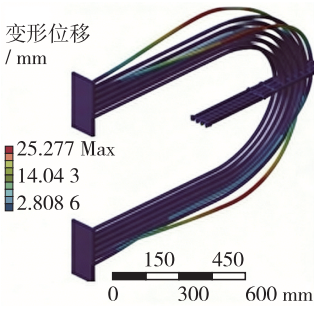
（5）明确的结论。在所分析工况下U形束管的位移变形趋向稳定，热交换器不会发生流致振动引起的严重共振破坏。图9所示模型中U形换热管放置于黑色壳体内，传热管外径14 mm，厚2 mm。空气入口位于壳体前部（垂直于图示方向），出口位于壳体后部，流道呈“月牙形”，主要冲击区域位于半圆形弯管段的下半部分。从图9（c）中可看出第一排管出现向外拱出的变化，但通过对CFD计算结果进行分析，已经得出流场影响从弱到强并迅速趋于稳定的结论，即0.06 s后空气对传热管的正向作用力几乎不变，而涡脱引起的交变力使管子最终将于某一微小形变区间内做“8”字往复运动，且每个周期最大位移与最小位移之差不断减小。传热管外扩-回弹的周期性变化过程主要由管子本身的阻尼特性引起，这一特性使其必须经过上述周期性振动衰减过程。



（a）全管冲击段几何模型



（b）单管双向流固耦合计算模型



（c）全模型第四阶模态响应

图9 U形换热管流致振动分析

Fig.9 Flow-induced vibration analysis of U-tube bundle

3.2 热交换器分析设计中模拟支持板的工程对策

3.2.1 间接考虑换热管与折流板管孔关系的工程技术

当设计资源难以支持对管束全模型进行有限元分析，不带折流板的管束有限元分析结果出现

周边换热管明显弯曲变形的现象时，可依循如下技术处理。

（1）折流板管孔与换热管位移约束分析。采用间接工程技术判断折流板管孔约束换热管的位移关系。基于壳程进料口与出料口的温度估算各折流板的温度，计算各折流板周边2~3层管孔的径向位移，再提取不带折流板管束模型有限元分析结果中的换热管径向位移。陈孙艺[14]在探讨如图10所示的浮头管束双头拉杆常规设计技术时，另外构建如图11所示的管束模型进行有限元应力分析。

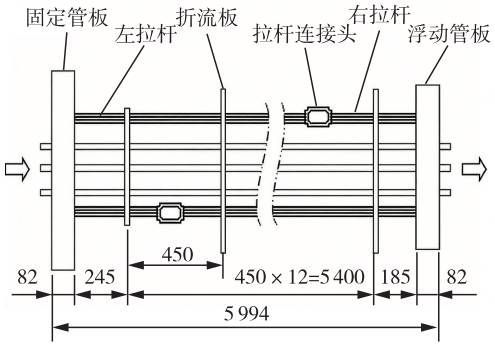
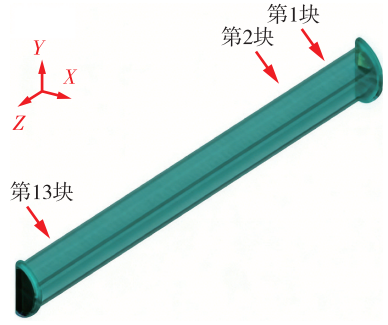
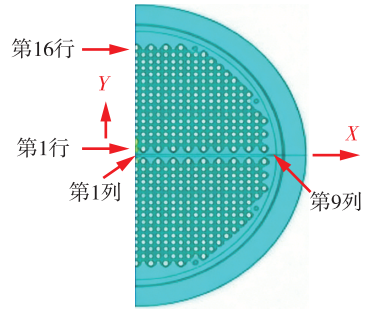


图10　双头拉杆管束结构示意

Fig.10　Structure schematic diagram of double-end tie rod tube bundle



（a）折流板位置



（b）换热管位置

图11　坐标方向和折流板位置示意

Fig.11　Coordinate direction and baffle position schematic diagram

对于变形位移较大的同一根换热管，例如图11中的第1行第9列的换热管，在未受折流板影响时，其X方向位移如图12所示。

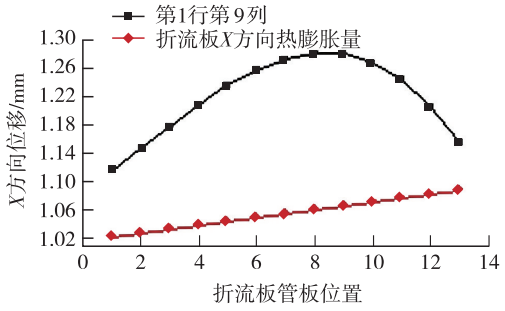


图12　第1行第9列换热管与各折流板的X方向位移

Fig.12　X-direction displacement of the 1st row and 9th column heat exchanger tube with respect to each baffle

可以看出，其最大位移与最小位移差为1.28−1.116=0.164 mm，如果不考虑壳程温度的影响，其位移差在折流板管孔与换热管间的间隙（±0.2mm）内。如果基于壳体进口与出口温度，按照壳体内温度线性变化平均分布的原则确定各块折流板的温度；再根据GB/T 150.2—2011《压力容器 第2部分：材料》，查取各温度下的线膨胀系数，据此计算各折流板的热膨胀位移，将位移曲线绘制于图12。分析可得在管束中间位置，换热管与折流板的位移差较大。最大位移差在第8块折流板处，为1.28−1.062=0.218 mm。最大位移差减去折流板管孔与换热管之间±0.2 mm的间隙后，尚余0.018 mm的位移差，需要通过换热管的微小变形来协调。

（2）公式法二次分析。第一步，换热管位移约束引起的轴向应力。当换热管与折流板管孔存在明显的径向位移差，难以判断是否可以通过换热管的微小变形达到协调时，换热管因受到弯曲变形而产生应力。基于材料力学原理，换热管承受的弯矩M计算式如下：

$$M=3EI\,\Delta r/x^2 \tag{2}$$

式中，E为换热管材料的弹性模量，MPa；I为换热管横截面的惯性矩，mm^4；Δr为换热管与其所在位置折流板管孔的径向位移之差，mm；x为同一根换热管上第一块折流板与管板之间，或者两块相邻的折流板之间的距离，mm。

第二步，计算弯矩M在换热管中产生轴向拉应力σ_t，其计算式如下：

$$\sigma_t=M/W \tag{3}$$

式中，W为换热管的抗弯截面系数，mm^3。

W计算式如下：

$$W=\frac{\pi}{32\varphi_o}(\varphi_o^4-\varphi_i^4) \quad (4)$$

式中，φ_o为换热管的外直径，mm；φ_i为换热管的内直径，mm。

第三步，计算校核换热管轴向组合应力。将轴向拉应力σ_t附加到有限元分析计算的换热管轴向拉应力上，判断换热管的强度是否满足要求。

第四步，计算校核管接头轴向组合应力。对于第一块折流板与管板之间的换热管的附加轴向拉应力σ_t，还应组合到管接头的应力上，判断管接头的强度是否满足要求。

第五步，对于大直径、薄壁的换热管，还应结合换热管挠曲半径计算横截面的趋扁变形程度，判断变形对流通面积的影响，避免变形处受到流体的冲刷腐蚀。

（3）有限元法二次分析。当换热管与折流板管孔存在显著的径向位移差，判断无法通过换热管的微小变形达到协调时，需要针对具有挠性变形功能的薄管板的管接头进行强度校核。对此，可探讨采用其他适宜的工程技术来简化处理换热管与折流板管孔的关系。这里从复杂高难到简易的维度列举几个替代处理方法。

第一种方法是支持板径向周边部分局部模拟法。这是基于不带支持板管束模型的初步分析，该方法基于位移变形最大的换热管通常位于管束周边而确定。

第二种方法是支持板周向部分角度范围的局部模拟法。这是基于不带支持板管束模型的初步分析，该方法基于深入管束内部也存在位移变形较大的换热管而确定。

第三种方法是管束周边单根换热管被支持板限位模拟法。这是基于不带支持板管束模型的初步分析，该方法基于位移变形最大的换热管不多，而且只位于管束周边而确定。

第四种方法是反向位移载荷试算法。例如以图5所示非全模型第一次有限元分析结果作为第二次分析模型的初始条件，并提取出换热管在折流板位置处的位移Δr。在模型中第一块折流板管孔对应的周边2~3层换热管位置处，各施加相应的径向位移载荷Δr，其作用是使自由弯曲的换热管恢复为承受Δr的约束，经过第二次分析计算后，再判断管接头的强度是否满足要求。如果需要更精确的分析，可在换热管全长上各折流板管孔对应的位置处施加相应的所有位移载荷。这里把基于原模型计算结果在新的条件下再次进行计算的方法称为有限元二次分析（Finite Element Second Order Analysis），该技术是一种用较简单的问题代替复杂问题后再求解的工程分析手段，与扩展有限元法（Extended Finite Element Method，XFEM）在本质上有所区别。

第五种方法是在校核管接头的应力时，充分估计到各种可能的危险工况，并使许可应力强度具有明显的富余，切忌应力水平过于接近许可应力强度。具体可采用更大直径的厚壁管作为管束周边换热管的规格，基于式（1）~（3）可知，这可以提高其抗弯曲变形的能力，减少弯曲引起的应力。

3.2.2 制造技术与设计技术相互协同弥补不足

热交换器在各自工况下的分析表明，同一管板上的所有管接头内的应力状况及变形位移差别很大。受限于既有条件，未能实现对实际结构与工况的精确模拟，这在现阶段属正常情况，技术进步本身是一个不断完善的渐进过程。然而，技术手段之间可以协同互补，应通过恰当的工程技术来弥补分析模型的不足。对策一是结构的差异性，管束周边换热管与中间换热管在尺寸规格及其与管板的接头形式上是可以不同的。对策二是质量技术的差异性，在同一张施工图上区别对待同一管板上不同位置管接头的制造质量及检测技术要求。遗憾的是，热交换器施工文件缺乏针对性要求，产品制造工艺缺少差异化依据，对所有管接头一视同仁，同一份焊接或胀接工艺应用于全部管接头。对策三是产品制造时通过保证材料优良的质量技术指标，满足设备功能要求。

4 热交换器分析设计中拉紧件的模拟

4.1 薄管板斜拉杆的模拟

针对废热锅炉的这种受力变形情况，一方面仍采用有限元法进行温度场与耦合应力场分析，近15年来，分析技术进步明显，但是分析模型存在或大或小、或参数或结构的各种不同的简化与缺陷，部分分析结果在安全性与可靠性方面仍有待验证；另一方面为应对意外，工程上持续在管束周边设置创新的加强结构。图13示出2013年报道某锅壳式锅炉管板周边的加强形式，增设了角板拉撑的局部结构[15]。

刘雪东等[16]通过贴合实际情况的模拟分析为工程优化设计提供依据。采用有限元分析废热

锅炉热交换器管板,考虑管板弓形不布管区的实际情况,模型中采用壳单元模拟管束、管板和筒体,采用杆单元link8模拟圆柱形的斜拉杆(类似图13中的角板拉撑)。并考虑斜拉杆与管板及圆筒体的连接处对三维空间方向的位移施加耦合约束,管束对管板转角的约束,能更全面地反映管板的真实情况。如果单纯以管板作为模型来研究,难以确定管板的边界条件。

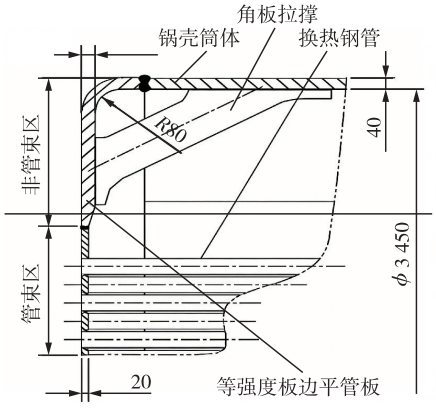


图13 管板周边加强形式

Fig.13 Peripheral reinforcement of tube plate

4.2 对直拉杆/定距管的模拟

与拉杆相关的定距管存在对管板的加强作用。雒定明等[12]的数值模拟结果表明,某固定管板式高压预冷器在试压过程中先是换热管失稳,然后导致薄管板发生难以修复的内凹变形。后端管板残余变形的凹陷量为10 mm,小于前端管板的凹陷量15 mm,原因在于后端管板上焊接的定距管提供了更大的支撑刚度。因此,在薄管板管束设计中,忽略拉杆与定距管的分析模型,难以反映管板及管接头应力的真实状况。

双头拉杆和传统拉杆都是管束中的一种非受压元件。陈孙艺[14]在探讨浮头管束双头拉杆技术时,判断双头拉杆承受管束轴向热伸长的拉伸作用,也对其周边的换热管施加轴向压缩的反作用力。因此,需对拉杆进行强度分析,对换热管进行轴向压缩的稳定性分析。基于图10和图11所示的双头拉杆浮头管束的有限元分析,对于文献[3]中带双向拉紧件的热交换器,也需要根据工况判断,是否需要构建带拉紧件的模型进行分析设计。

4.3 管束中的隔板类拉紧件的模拟

管箱隔板与薄管板的实际关系,包括焊接固定,或压紧垫片,以及插槽连接等,对管板有不同程度的加强作用。分析模型应考虑这些差异性因素。

壳程纵向隔板也称纵向折流板,其常见固定方式有图14所示的两种。纵向隔板不但从结构上约束了横向折流板或壳体的位移,间接地影响换热管的横向位移,而且一端与管板壳程侧焊接连接的隔板对管板有明显的加强作用。因此精确的分析模型中不宜忽略纵向隔板的影响。



(a)隔板与折流板焊接



(b)隔板与壳壁焊接

图14 纵向隔板固定形式

Fig.14 Fixing form of longitudinal baffle

王保田等[17]针对图15所示某核电机组建安现场发现的高压加热器汽侧管束结构件损伤问题及其返修方案进行多方面分析。

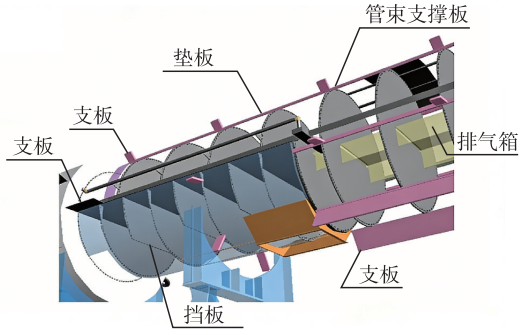


图15 高压加热器管束垫板和支板结构简图

Fig.15 Structure sketch of high-pressure heater tube support pad and support

该高压加热器管束除了管板和传热管,还包括隔板、支板、垫板、挡板。隔板的作用是支撑传

热管；支板的作用是在制造阶段设备转动时，短时支撑管束与筒身相对静止，并在设备正常运行时长期支撑管束；垫板的作用是连接支板与隔板，增大与隔板的接触面积；挡板的作用是防止蒸汽直接进入管束中心形成短路，使蒸汽可以充满整个管束，提高换热效率。由此可见，诸多非受压件不但直接支撑或约束换热管，而且通过引导介质流向与流态，间接影响管束承受的工况，成为分析模型不可或缺的元件。

5 模型的复杂性及其影响因素的讨论

结合上述案例分析，在讨论中可获得如下认识。

5.1 分析设计的内容及完整性

5.1.1 基于分析设计内容的模型

图5~图7作为偶然的案例，模型结构、载荷及边界条件不同，结果显示，换热管弯曲变形的数量、变形方向及变形程度均有明显差异，可能只属于个性案例，不一定具有普遍性。但必然性会通过偶然现象暴露出来，现象背后可能藏着必然规律。若干个性案例形成一种现象，分散的系列个性案例就是普遍现象。由此需引起关注，模型运算前是否要考虑非受压结构对工程分析结果的影响，不能一概而论。热交换器的分析设计通常应用到结构强度与结构刚度，介质流场与模态响应，流固换热与结构传热等专题，非受压结构在不同分析中的影响程度各不相同。非受压元件对主要受压元件分析设计模型的影响大小需要判断，与非受压元件相关的工程因素也需要判断。一方面，非受压元件对主要受压元件起到加强作用；另一方面，这种加强的局部性往往使结构附加了弯矩，产生分布不清、数值不明的附加应力。目前，欲针对热交换器各种结构、各种工况、各种计算内容的分析设计，制定出是否需要把非受压元件纳入模型的一套规定，尚欠缺基础。这里可基于前面所列举的具体案例，讨论是否需要模拟其存在非受压结构。

（1）图5和图6的分析意向本来是管板结构强度，却出现了换热管失稳弯曲的失真现象。这种情况下模型中可忽略拉杆与定距管的影响，但换热管支持板不能再简化，否则管板和换热管缺失实际存在的加强性约束，分析结果将显示两者各自本体的应力水平有所升高，而作为连接节点的管接头结构应力水平有所降低，评定通过的管接头存在开裂失效的风险。

（2）3.1.2节中文献[2]和文献[12]的分析意向是换热管的稳定性与管板变形的关系，模型中除了常规地考虑了支持板/折流板的影响，还特别考虑了定距管对管板的约束。否则分析结果将显示换热管在更低载荷下就失稳，或者管板的应力水平将有所升高，评定难以通过。随之仅采用增加管板厚度的技术对策时，会增加设备建造成本，还可能明显提高管板本体的温差应力，使技术经济矛盾扩大化。

（3）非受压结构对流场的影响，需要计算局部温度场，再进行流固耦合模拟计算。当构建分析壳程流场的模型时，非受压结构对管接头的影响更加隐蔽。模型中显然不能忽略的是支持板/折流板。如果拉杆/定距管的数量较多，由于其大多设置在管束的周边，位于折流形成的滞流区内，也不宜忽略。对于图15所示应用于核电机组的特殊管束结构，其支撑板相当于一种支持板，挡板相当于不带定距管的拉杆，也是流场分析不宜忽略的对象。模型是否合理应视分析内容而定，不同模型对管接头的作用方式有所区别。首先，不合理简化模型通常的显性表现是流态缓和化失真，实际的激变流态使换热效率不准确会增加系统操作的难度，换热不均匀使局部区域的壳程与管程温差偏大，相应换热管管接头的热应力较大。其次，半显性半隐性的表现是流态中如果没有展示出实际存在的滞流区，实际情况下会使泥沙与杂物积垢，除了局部区域的壳程与管程温差，还增大换热管轴向热胀冷缩过程的摩擦阻力，改变关联换热管管接头的应力。再次，不明确的表现是非受压元件对受压元件实际存在的形位约束是管接头的应力。最后，隐蔽的是局部区域温度的改变可能使某些介质析出盐分，严重时会引起焦泥、盐垢的结块与堵塞，导致设备低效运行。

（4）在图9（c）所示的模态分析中，模型模拟了抗振条这一非受压结构的约束条件；否则难以达成基于失效模式的设计。

（5）文献[6]如果不考虑废热锅炉换热管与管板连接结构的辐射换热，将导致管口热保护结构的温度场是粗糙的，温度场的热强度及最高温度都有所降低，结构实际运行时会偏于超温工况，存在潜在失效的风险。

（6）在图4所示的高温换热设备管口热保护结构热应力计算模型中，如果忽略隔热层和陶瓷

套管这些非受压结构,有限元计算结果不会展示管口热保护区的温度畸变,也就理解不了致使陶瓷套管断裂的较大剪应力这一根本成因,无法保证前端管板结构的完整性。

5.1.2 基于关键制造技术的模型

高质量制造与高质量设计一样,都离不开高质量的分析设计技术。文中案例主要针对运行工况及充水耐压试验分析模型存在的问题,其实重大固定管板热交换器的整体热处理、薄壁热交换器的整体吊装等特殊建造工序的质量也需要数值模拟技术的支持。制造工艺的分析模型也存在类似分析设计模型那样考虑不周的情形。制造工艺的模拟设计可以视为传统分析设计的一部分,只不过其设计的主要内容不是设备结构运行中的受力,而是制造中的受力,涉及不同的工程因素,也值得业内进行总结。

5.2 分析模型的概念及模型的校验

5.2.1 基于结构概念的模型

非受压元件及其工程因素是一个很广的概念,正因其貌似普通设计的一般属性,分析设计中专门公开讨论的报道不多。基于关联管板和换热管的变形,以及管接头的失效,文中讨论的非受压元件包括各种支持板、折流板、抗振条、管接头保护层组件、拉杆与定距管、角板拉撑、各种挡板与支板等种类,其中,换热管口保护结构涉及非金属材料,但文中没有强调对非受压元件的分析设计,主要强调的是要关注非受压元件对受压元件的影响。在主要受压元件分析设计模型中纳入非受压元件及其工程因素,难免会增加设计难度,使分析复杂化。模型的复杂程度除了关联研究对象及其内容,还关联到设计者个性及设计项目资源的相对性。有时通过合适的方法能把复杂的内容化繁为简,因此,充分挖掘各种分析方法的独特优势,可为热交换器分析设计提供坚实的支撑和保障。

5.2.2 基于完整合理性的模型

热交换器的全模型主要指其表达的实物结构在零部件种类及数量上齐全完整,是没有零部件缺失的模型。非全模型是指有零部件缺失的模型。整体模型主要指其表达的实物结构在三维空间上外形尺寸的完整性,是没有在任何方向上截断缩短的模型。但也不强调热交换器的分析设计一定要采用全模型,通过设定边界的对称性等条件,整体模型可以只展示整体结构的一部分。因此,全模型肯定是整体模型,整体模型则不一定是全模型,两者在概念上略有差异。分析设计模型既包括有限元分析模型,也包括差分法等其他数值模型,还有基于公式法的分析模型。

模型的初始条件是模型不可或缺的部分,其中的边界条件与载荷条件两者不但名称概念不同,所反映的力学内涵有明显区别。边界条件往往是一次性地施加到模型上,载荷条件则可以逐渐分为几部分,而且各部分荷载均分步施加至模型上,即便是位移载荷也是这样。温度载荷除了模拟温度自身,一般难以模拟介质的其他物性变化,而同一介质的气相、液相和固相对壳壁的作用可能不仅仅表现在温度这一个指标。这些差异都可视为工程因素。

5.2.3 基于可靠性的模型

从模型校验来说,运算前后的验证各有侧重,不宜偏颇。有限元分析模型正式运算前需要进行无关性验证,主要是指网格无关性,在一些特殊的场合中可能包括有时间步长无关性检验。这一事前验证是为了判断模型离散化是否使相关单元尺寸足够小,以保证运算结果达到合适的精度,其必要性已成共识。目前,模型运算后没有独立的技术环节来验证结果的准确性,其必要性尚未达成共识,GB/T 4732.1~4732.6—2024 标准各引言中强调的工程经验和工程评价失去一个落脚点。运算后的验证正是本文重点强调的。

5.3 分析设计的客观资源及主观意识

5.3.1 基于设计资源条件的模型

从分析设计资源需求来说,一方面,设计者需要不断提高分析设计技能,才能高质量应用 GB/T 4732.1~4732.6—2024 标准规定的分析设计方法与技术。普遍共享的标准方法与技术是技能的前提,技能是带有个性的技术应用,也是对技术的补充,附加了应用技能的技术也就具有了特殊性。加强贴向工程的技能训练,不但可以深耕技术原理创新的土壤,还使分析人员获得进步的方向与动力,获得难以共享的个性技能,在仿真中模拟出工程因素的影响,为企业竞争创造优势,这也是值得重点强调的。另一方面,设计者普遍需要足够的算力,才能应对全模型分析计算带来的复杂性与难度。一般而言,瞬态分析对计算机软硬件资源的消耗较大,而静态分析的资源消耗则相对较低。正如分析模型不只是有限元这一种分析模型,有限元分析的算力也不只是设计者所在企业的算力。2024 年《政府工作报告》中提出“加快形

成全国一体化算力体系，培育算力产业生态”，发展以算力共享为核心理念的需求侧算力基础设施是解决当前算力资源低效利用问题的关键[18]。目前国内建成并提供优质服务的14座国家级超算中心和20多座智算中心，计算软件的智能化与计算硬件的高效迭代，这些公共资源为复杂工程问题的高速运算提供了基础。因此，重大承压设备有限元分析设计的模型是否需要简化，不宜过分强调算力因素。

5.3.2 基于设计者主观意识的模型

管壳式热交换器作为较复杂的压力容器，工程应用量大面广，影响其正常运行的因素众多。由于对特殊情况下非受压元件与受压元的功能关系及受力关系认识不深甚至缺乏认识，构建热交换器分析模型中对非受压元件关注不够，忽略了非受压元件对分析结果的不良影响。一方面，在确定结构分析对象时，分析人员往往容易将注意力集中在受压元件乃至主要受压元件上，主观上将其余元件归为“次要元件”，对非受压元件不够重视，甚至有所忽略，例如大型高压热交换器的轻量化设计，容易先入为主地认为管板肯定是可以设计减薄的，忽视管板减薄带来的其他问题；另一方面，在构建分析模型时，分析人员往往不自觉地将主要精力集中于软件化的技术手段，却忽视了对工程实际因素的合理模拟，模型构建应立足于客观实际，尽可能降低主观认知带来的干扰，从图9所示U形换热管流致振动分析的3种模型中，可以发现基于有限算力资源，也能灵活构建贴合分析内容的可靠模型。

6 结语

分析设计相关理论经过近二百年的发展，经典应力分析、计算应力分析与试验应力分析的有机结合与不断深化，机械力学、土木工程力学、地质力学等相关力学学科的持续拓展，特别是以有限元法为代表的计算固体力学的高速发展，极大推动了应力分析设计技术的普及与工程应用。

热交换器管板分析设计其实是管束分析设计，其中与非受压结构相关的一些工程问题，如果被忽略了会使分析结果不切工程实际，可能带来设备的技术经济不合理，运行堵塞而低效，结构开裂而失效等风险。在管板分析设计的后处理阶段，应力强度评定位置与评定路径的选取是两个存在递进关系的不同环节。首先，要正确选取评定的位置，对必要的位置选取齐全，评定路径的选择，不能只聚焦管板本体及管板周边与壳体的连接，还需关注管板布管区与换热管的连接；其次，在每一个选取的位置所在区域，合理设置数量足够的评定路径，如果位置选取不当或不齐全，评定路径再多也难以保证评定的可靠性。在管束分析设计中，不仅要考虑受压结构的应力水平，还要考虑非受压件的位移量。在承压设备分析设计过程中，不仅需要扎实的技术素养，还需具备相应的工程素养并实现二者协同，分析设计模型中工程因素的合理考量，是工程素养的重要体现，也在很大程度上反映了分析设计者的工作态度。由多重准则支撑的评定，逐渐校准管束分析设计的不合理模型，确保了结构在承受载荷时既不会因为过高的应力而导致材料失效，也不会因为过大的位移而导致结构不稳定或者功能丧失，需引起更多关注。

参考文献：

[1] 陈孙艺.压力容器有限元分析建模中值得关注的几个工程因素[J].压力容器，2015，32(5)：50-57.
CHEN S Y. Several notable engineering factors on modeling of pressure vessels finite element analysis [J]. Pressure Vessel Technology, 2015, 32 (5): 50-57.

[2] 朱志颖，于洪杰，朱国栋，等.管壳式换热器管束有限元模拟合理性研究及失稳分析[J].压力容器，2024，41(9)：39-47.
ZHU Z Y, YU H J, ZHU G D, et al. Study of finite element simulation rationality and buckling analysis of tube bundle in shell-and-tube heat exchangers[J]. Pressure Vessel Technology, 2024, 41(9): 39-47.

[3] 陈孙艺，梁雄东，杨志强，等.管束中双向拉紧结构的工程应用[J].石油化工设备技术，2025，46(3)：1-9.
CHEN S Y, LIANG X D, YANG Z Q, et al. Engineering application of bidirectional tensioning structures in tube bundles [J]. Petrochemical Equipment Technology, 2025, 46(3): 1-9.

[4] 陈孙艺.基于一次结构法的挠性管板强度计算新方法[J].石油化工设备技术，2016，37(5)：6-12.
CHEN S Y. A new method for strength calculation of flexible tube sheet based on primary structure method [J]. Petrochemical Equipment Technology, 2016, 37(5): 6-12.

[5] 王素芹.高温换热设备管口保护结构热应力的分析与计算[J].四川工业学院学报，2003，22(1)：64-65.

WANG S Q.The analysis and calculation of the stress caused by heat the protection structure of the pipe entrance of the heat exchanger set [J]. Journal of Sichuan University of Science and Technology，2003，22(1)：64-65.

[6] 安连想，雷飞，孟繁然，等.新型结构的废热锅炉在甲烷化装置中的应用[J].化工设备与管道，2015，52(5)：29-31.
AN L X，LEI F，MENG F R，et al.Application of waste heat boiler with new structure used in methanation plant[J].Process Equipment & Piping，2015，52(5)：29-31.

[7] 张起侨.过渡段结构对废热锅炉薄管板应力分布的影响[J].压力容器，2016，33(8)：41-48.
ZHANG Q Q.Influence of transition section on stress distribution of thin tube-sheet for waste heat boiler[J]. Pressure Vessel Technology，2016，33(8)：41-48.

[8] 修维红，李永泰，李云福，等.薄管板结构废热锅炉有限元分析[J].化工设备与管道，2011，48(4)：1-5.
XIU W H，LI Y T，LI Y F，et al. Finite element analysis for waste heat boiler with thin tubesheet[J]. Process Equipment & Piping，2011，48(4)：1-5.

[9] 张海龙.基于ANSYS的甲烷化废热锅炉柔性管板有限元分析[J].机械管理开发，2019，34(8)：51-53.
ZHANG H L. Finite element analysis of flexible tubesheet of methanation waste heat boiler based on ANSYS [J]. Mechanical Management and Development，2019，34(8)：51-53.

[10] NAIK Y T，SHIRODE K D，RANE S B.Application of surface contact elements for finite element analysis of fixed tube sheet heat exchanger：A new approach[C]// Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Conference，Anaheim，California，USA，2014：PVP2014-28028.

[11] SHIRODEA K D，NAIKB Y T.Application of surface contact elements for finite element analysis of fixed tube sheet heat exchanger：A new approach[C]//14th International Conference on Pressure Vessel Technology，Shanghai，China，2015：ICPVT-14-P0038.

[12] 雒定明，张玉明，焦建国，等.高压预冷器管板变形原因分析[J].压力容器，2019，36(4)：52-62.
LUO D M，ZHANG Y M，JIAO J G，et al.Analysis of the deformation cause of high pressure precooler tube-sheet [J]. Pressure Vessel Technology，2019，36(4)：52-62.

[13] 缪洪康，陈玉爽，吕刘帅，等.基于双向流固耦合的换热管流致振动分析[J].核技术，2018，41(5)：80-86.
MIAO H K，CHEN Y S，LYU L S，et al.Flow-induced vibration analysis of heat transfer tube based on two-way fluid-structure interaction [J]. Nuclear Techniques，2018，41(5)：80-86.

[14] 陈孙艺.浮头管束双头拉杆常规设计技术探讨[J].压力容器，2024，41(8)：30-39.
CHEN S Y.Exploration of rule design for double-end pull rod of floating head tube bundle [J]. Pressure Vessel Technology，2024，41(8)：30-39.

[15] 卜银坤.一种新型管板的结构设计[J].化工设备与管道，2013，50(1)：25-28.
BU Y K.Structural design of one new tubesheet [J]. Process Equipment & Piping，2013，50(1)：25-28.

[16] 刘雪东，何云松，巢建伟.废热锅炉换热器管板结构有限元分析研究[J].锅炉技术，2004，35(5)：54-57.
LIU X D，HE Y S，CHAO J W.Finite element analysis of tubesheet of a waste heat boiler exchanger [J]. Boiler Technology，2004，35(5)：54-57.

[17] 王保田，沈秀波，薛承，等.某核电高压加热器汽侧结构件损伤原因分析及处理[C]//第十一届全国压力容器学术会议论文集，2025：412-418.
WANG B T，SHEN X B，XUE C，et al.Analysis and treatment of high pressure feedwater heaters inside structure damage of certain nuclear power plant[C]// Proceedings of the 11th National Conference on Pressure Vessels Technology，2025：412-418.

[18] 王勇，傅芳宁，陆树檀.算力共享与算力市场培育——基于需求侧的算力资源配置研究[J].财经问题研究，2025(4)：3-14.
WANG Y，FU F N，LU S T. Computility sharing and computility market cultivation：a study on computility resource allocation from demand-side perspective[J]. Research on Financial and Economic Issues，2025(4)：3-14.

作者简介：陈孙艺(1965)，男，教授级高级工程师，高级顾问，工学博士，主要从事承压设备建造技术方面工作，通信地址：525024广东省茂名市环市西路91号茂名重力石化装备股份公司，E-mail：sunyi_chen@sohu.com。

本文引用格式：
陈孙艺.热交换器管板分析设计中值得关注的非受压结构因素[J].压力容器，2026，43(2)：35-49.
CHEN Sunyi. Non-pressurized structural factors worth considering in heat exchanger tube sheet design by analysis [J]. Pressure Vessel Technology，2026，43(2)：35-49.