管壳式换热器管板强度与刚度计算方法研究

刘小峰
上海电气核电设备有限公司　上海　201306

摘　要：管壳式换热器在工业生产中应用广泛，管板是管壳式换热器中最重要的部件之一，管板强度与刚度计算对其安全运行至关重要。本文阐述了管板强度与刚度计算的理论基础，包括基本假设、计算原理和相关标准。探讨了几何参数、材料性能、工况条件和周边连接等因素对管板强度与刚度的影响，为管壳式换热器管板的设计与优化提供参考。

关键词：管壳式换热器；管板强度；刚度；受力模型

管壳式换热器广泛应用于化工、核电等工业生产装置中，管板作为管壳式换热器中最重要的部件之一，同时承受管程及壳程载荷的作用，管板的受力极为复杂。大多设计人员对管板计算原理及方法知之甚少，直接使用计算软件进行计算，特别是随着计算机在工程设计中不断普及，加剧了设计人员对计算软件的依赖，独立思考的能力逐步退化。作为换热器强度设计的核心内容，若不了解管板的基本力学模型及计算过程，很难对管板进行合理设计。

1 管壳式换热器管板强度与刚度计算理论基础

1.1 基本假设与简化模型

管壳式换热器管板结构复杂，为便于计算，需进行基本假设与简化。通常假设管板为弹性体，材料均匀且各向同性，符合胡克定律。将管板视为当量圆平板。对于管板与换热管连接，假设连接处紧密无间隙，某些形式的换热器，换热管对管板起到支承作用，可将管板简化为弹性基础圆平板。由于管板上密布着管孔，管板对管板有削弱作用，规范中一般将管板当作一块均匀削弱的当量圆平板来考虑。

1.2 强度与刚度计算原理

强度计算的目标是确保管板在复杂多变的各类工况下都能保持结构完整，不会发生破坏。它依据材料力学理论展开，通过对管板进行细致的应力分析来判断其是否满足强度要求。在实际应用中，管板会受到管程及壳程多种载荷的影响。因此，需要分析计算在这些载荷作用下管板所产生的最大应力，并将其与管板材料的许用应力进行对比。通常利用板壳理论，像经典薄板理论或厚板理论，构建管板的平衡方程、几何方程和物理方程，再结合具体的边界条件，求解出管板的应力和变形分布，从而对管板的强度与刚度进行科学评估。

作者简介：刘小峰（1981~），男，高级工程师，学士，从事压力容器设计及制造工作。

2 相关标准与规范

关于管壳式换热器管板强度与刚度计算，国内外均制定了一系列全面且细致的标准与规范。如美国的ASME《锅炉及压力容器规范》及TEMA（美国列管式换热器制造商协会标准）等标准均在全球范围内被广泛采用，规范对管板的设计原则、计算方法以及材料要求等诸多方面都作出了详尽的规定，为全球范围内的管板设计与计算提供了重要的参考依据。另外，德国的AD规范、英国的BS规范等，均制定了管板计算方法。需要说明的是，各国规范采用不同的简化，且假定简化与真实管板受力情况出入较大，致使在同样设计条件下不同规范的设计厚度可能相差甚远。

在我国，GB/T151《热交换器》标准是管壳式换热器设计制造过程中最重要的参考依据，也是广大压力容器从业人员必须熟悉的基本标准。该标准明确规定了管板强度与刚度的计算方法，规范中充分考虑了多种影响管板计算的因素，确保了管板设计的科学性和合理性。对于工业中常见的部分管板结构型式，我国规范的计算方法更加成熟，已经超越美、英、法等国。

3 管壳式换热器管板强度与刚度计算方法研究

3.1 管板规则设计方法

在我国GB/T151标准中，依据管板的不同结构型式，分别给出了固定管板式换热器管板、U形管式换热器管板、浮头式换热器管板和填料函式换热器管板的计算公式。

以上四种换热器管板的计算方法中，U形管式换热器中，管束对管板起不到支承作用，其简化后的受力模型为承受均布载荷、且被管孔均布削弱的当量圆平板，如下图所示1所示。当管板周边与筒体焊接时（如GB/T151图7-3中b型结构），周边按固支考虑。当管板周边采用法兰夹持连接时（如GB/T151图7-3中a型结构），周边按简支考虑。

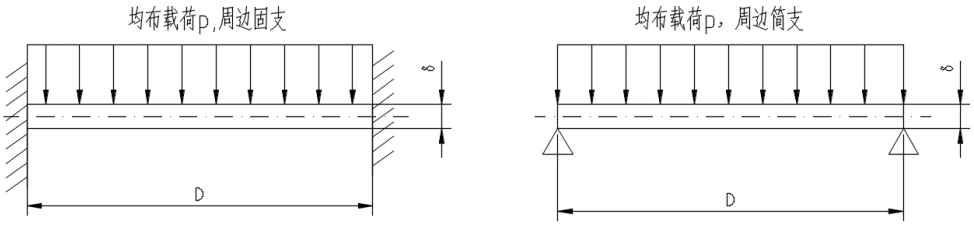

图1 受均布载荷的圆平板

固定管板式换热器、浮头换热器、填料函换热器，管束对管板起到支承作用，管束对管板在外载荷作用下挠度和转角均起到约束效果，减少了管板中的应力水平。如果管板的直径与管子直径相比足够大，而管子的数量又足够多时，则各个管子的支承作用可以简化为均匀连续支承管板的弹性基础。此时，管板简化后的受力模型为承受均布载荷、放置在弹性基础上且受管孔均布削弱的当量圆平板。

对于弹性基础圆平板，其整体应力并非由圆平板面的均布压力作用产生，而是因圆平板周边的横剪力和径向弯矩作用而产生。为此管板的扰度、弯矩等自周边向中心迅速衰减、波状分布，当K值（换热管加强系数）越大时，则衰减越快，波数越多。下图2为周边简支与固支的弹性基础圆板弯矩图。

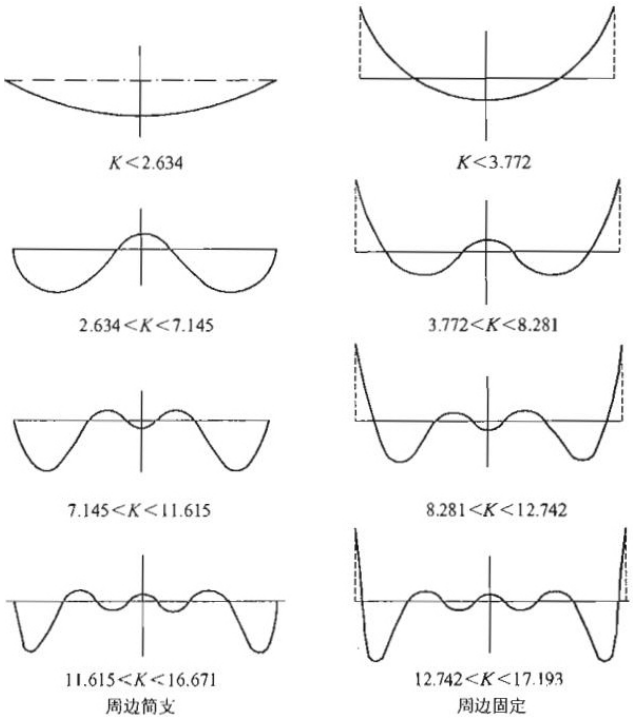

图2 弹性基础圆弯矩图（摘自参考文献3中图26.5）

3.2 管板分析设计方法

3..2.1 数值分析模型的建立

数值分析模型在深入探究管板强度与刚度特性方面扮演着举足轻重的角色，是开展相关研究不可或缺的重要工具。借助当下广泛应用的有限元软件，像功能强大的ANSYS、以高精度著称的ABAQUS等，能够构建出管板精准的三维实体模型或者高效的壳单元模型。在建模的细致过程中，必须全方位、精准无误地考量管板的各项关键要素。这涵盖其精确的几何尺寸，包括长度、宽度、厚度等具体数值。与此同时，合理且科学地划分网格是确保计算精度达到要求的关键所在。在应力集中区域和变形较大区域，应当适当加密网格，这样能够有效捕捉到这些关键区域的细微变化，进而显著提高计算结果的准确性和可靠性。

3.2.2 强度与刚度计算方法

在成功建立数值分析模型的基础之上，采用先进且成熟的有限元法来开展管板强度与刚度的计算工作。首先，要通过合理的方式施加边界条件，这些边界条件涵盖了固定约束，比如将管板的某些边缘固定不动，以模拟其在实际安装中的固定状态；以及载荷作用，包括压力载荷、温度载荷等多种形式的载荷，以此来精准模拟管板在实际工况下所承受的各种作用力。通过有限元软件的强大计算功能，能够精确计算出管板在各种载荷共同作用下的应力分布情况和变形情况。可以得到管板上不同位置处的应力大小，绘制出详细的应力分布云图，同时还能确定管板的最大应力值以及最大变形量。然后，依据所使用材料的力学性能参数，如弹性模量、屈服强度等，以及相关行业的设计标准，对管板的强度和刚度是否满足实际工程要求进行严谨的判断。若计算结果显示管板的强度或刚度不满足要求，那么就需要通过一系列有效的措施进行改进。

4 管板强度与刚度计算方法的影响因素分析

管板的强度与刚度并非由单一因素决定，而是受到多种因素的综合影响。

4.1 几何参数的影响

管板的几何参数是影响其强度与刚度的关键要素。管板厚度方面，当其增加时，抗弯刚度会显著提升。管板直径增大时，承受载荷的面积增加，在相同压力作用下，所受总载荷增大，这会使管板内部的应力和变形都

增加。另外，换热管的间距和排列方式也不容忽视，管板上管孔的数量及排列方式，对管板管板削弱系数，管板布管区当量直径、换热管加强系数均有影响，进而影响到管板的强度和刚度。选用合理成熟的排列方式，能让管板受力均匀，避免局部应力过于集中，有效提高管板的强度和刚度，延长其使用寿命。

4.2 材料性能参数的影响

材料性能参数对管板强度与刚度起着决定性的作用。弹性模量是衡量材料抵抗弹性变形能力的重要指标，弹性模量越大，管板在受载时就越不容易发生变形，刚度也就越好。屈服强度是材料开始发生塑性变形时的应力值，屈服强度越高，管板允许承受的最大应力就越大，强度也就越高。材料的泊松比也会对管板的力学性能产生影响。在选择管板材料时，不能仅仅考虑强度和刚度，还需综合考虑材料的韧性、成本、可加工性等因素。

4.3 工况条件的影响

工况条件对管板强度与刚度的影响不容小觑。操作压力是影响管板应力的主要因素之一，随着压力的增大，管板所受的弯曲应力也会相应增加，如果压力超出管板的承受范围，就可能导致管板变形甚至破裂。温度变化也是一个重要因素，在高温环境下，材料的强度和弹性模量会降低，管板材料的许用应力也会降低，导致管板的强度和刚度下降，过高的温度还可能引起高温蠕变。同时，管壳程的不同操作温度，还会引起管板与换热管、壳体之间的热膨胀差，产生温差应力，进一步影响管板的安全性和可靠性。此外，管板材料与介质的相容性，也将影响到管板的整体力学性能，当介质对管板产生腐蚀时，会增加管板的失效风险。

4.4 管板同周边连接方式的影响

管板周边的连接方式，对管板的强度与刚度也有较大影响。如U形管换热器中的管板，如采用管板与筒体焊接连接结构，相较于管板采用法兰夹持式连接，管板内的应力水平会显著下降，扰度也会下降很多。而在固定管板式换热器中，如壳程设置膨胀节，对管板内应力水平也有明显影响。当管壳程热膨胀差较大时，设置膨胀节，会有效的降低管板的应力水平。与管板相连接的法兰也会对管板的应力和挠度产生影响。

5 结束语

管壳式换热器管板强度与刚度计算是保障设备安全运行的关键环节。管板的合理设计度对提高设备的整体安全性、降低制造成本具有重要意义。本文通过对其理论基础、计算方法、影响因素的深入研究，明确了各因素对管板性能的影响规律。未来，随着工业技术的不断发展，还需进一步优化计算方法，综合考虑更多复杂因素，提高管板设计的科学性和可靠性。

参考文献

[1]GB/T151-2024,热交换器[S]

[2]张延丰等.GB/T151-2014《热交换器》标准释义及算例[M].北京：新华出版社,2015

[3]李世玉.压力容器设计工程师培训教程[M].北京：新华出版社,2019

[4]周耀,桑如苞等.板壳理论在压力容器强度设计中的经典应用之一——四种换热器管板强度设计技术分析(上)[J].石油化工设备技术,2016,37(6):19-24.

[5]周耀,桑如苞等.板壳理论在压力容器强度设计中的经典应用之一——四种换热器管板强度设计技术分析(下)[J].石油化工设备技术,2017,38(1):7-11.