

# 高温高压工况下化工塔器的设计与应力分析

倪佳

张家港富瑞重型装备有限公司, 江苏 苏州 215000

**[摘要]** 随着石油化工、能源及材料领域的迅猛发展, 塔器及反应器等关键设备在高温高压环境下的应用变得愈发普遍。为了确保这些设备能够在苛刻工况下稳定运行, 其设计必须具备足够的强度、稳定性和可靠性。随着工业技术的不断进步, 传统设计方法逐渐显示出其局限性, 无法完全应对现代工业对设备性能的高标准要求。特别是在面对极端的高温高压工况时, 如何确保塔器设备在运行过程中的安全与高效成为了一个亟待解决的技术难题。文中旨在探讨高温高压工况下塔器设备的设计与分析方法, 重点关注强度校核、稳定性分析及优化设计等内容。期望为相关领域的工程实践提供理论支持, 为设备的安全性和优化设计提供更加坚实的科学依据。

**[关键词]** 高温高压工况; 塔器设备; 有限元分析; 优化设计

DOI: 10.33142/ec.v8i4.16332

中图分类号: TQ051

文献标识码: A

## Design and Stress Analysis of Chemical Tower under High Temperature and High Pressure Conditions

NI Jia

Zhangjiagang Furui Heavy Equipment Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu, 215000, China

**Abstract:** With the rapid development of the petrochemical, energy, and materials fields, the application of key equipment such as towers and reactors in high-temperature and high-pressure environments has become increasingly common. In order to ensure that these devices can operate stably under harsh conditions, their design must have sufficient strength, stability, and reliability. With the continuous advancement of industrial technology, traditional design methods have gradually shown their limitations and cannot fully meet the high standard requirements of modern industry for equipment performance. Especially when facing extreme high temperature and high pressure conditions, ensuring the safety and efficiency of tower equipment during operation has become an urgent technical challenge to be solved. The purpose of this article is to explore the design and analysis methods of tower equipment under high temperature and high pressure conditions, with a focus on strength verification, stability analysis, and optimization design, so as to provide theoretical support for engineering practice in related fields and provide a more solid scientific basis for equipment safety and optimization design.

**Keywords:** high temperature and high pressure working conditions; tower equipment; finite element analysis; optimization design

随着全球工业化进程的不断推进, 尤其是在化工、石油及能源等行业的快速发展下, 塔器设备的性能要求日益提高, 尤其是在高温高压环境下的运行表现。作为这些行业中关键的设备之一, 塔器往往需要在严苛的工况下运行, 这要求其具备卓越的强度与可靠性。然而, 传统的设计方法在面对高温高压这一极端工况时, 往往无法全面考虑诸如温度、压力、流体动力等多方面因素的综合影响, 进而导致设备在运行中出现故障或安全隐患。随着新型材料的出现以及智能化技术的引入, 现代设计方法逐步被应用于塔器设备的设计与优化。

### 1 高温高压工况在化工生产中的重要性

高温高压工艺在现代化学工业中占据核心地位, 其通过加速反应动力学过程、突破热力学平衡限制, 显著提升生产效率和产物纯度。在石油炼制领域, 加氢裂化装置需在 15~20MPa、400~500℃条件下运行, 以实现重质油轻质化; 合成氨工艺中, 哈伯法反应器需承受 30MPa 以上压

力以提升氨产率。此类极端工况下, 设备需同时应对材料强度衰减、密封失效风险及介质腐蚀等挑战。据美国化学工程师协会统计, 全球每年因高温高压设备故障导致的非计划停机损失超过 120 亿美元, 其中塔器类设备故障占比达 34%。典型案例包括某欧洲乙烯裂解装置因急冷塔热应力开裂引发爆炸, 直接经济损失达 2.3 亿欧元。这些事故突显了高温高压工况下设备设计安全性的极端重要性, 也推动着材料科学、结构力学与制造技术的持续革新。

### 2 高温高压工况下化工塔器设计的理论基础

#### 2.1 材料力学与热力学基础

高温高压环境对材料性能的影响呈现非线性特征, 金属材料在温度超过再结晶温度后, 晶界滑移机制主导变形行为。例如, SA-387 Gr. 11 钢在 450℃时屈服强度下降至常温值的 65%, 而镍基合金 Inconel 625 在 600℃、20MPa 条件下的蠕变速率较常温增加两个数量级<sup>[1]</sup>。热应力理论需综合考虑稳态传热与瞬态温度场变化, 傅里叶热传导方

程需耦合弹性力学本构关系。英国国家物理实验室研究表明,直径8米的蒸馏塔在200℃温差梯度下,筒体环向热应力可达材料屈服强度的80%,远超常规设计允许范围。热膨胀补偿设计需精确计算轴向位移量,某甲醇合成塔采用波纹管膨胀节成功吸收12mm热位移,避免法兰密封失效。

## 2.2 化工塔器结构设计原理

根据工艺需求,化工塔器可分为板式塔、填料塔与喷雾塔三大类,其中高压精馏塔多采用板式结构以承受更高操作压力。ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII 明确规定,设计载荷需叠加压力载荷、自重载荷、风载荷及地震载荷。安全系数选取需考虑材料性能退化,EN 13445 标准建议高温设备的设计应力强度取材料高温屈服强度的2/3。某跨国石化企业设计的加氢脱硫反应塔采用多层热套筒体结构,壁厚达250mm,成功应对18MPa操作压力与周期性热冲击。塔内构件如降液管、受液盘等需进行流固耦合分析,埃克森美孚公司通过优化塔盘支撑梁截面形状,使局部应力集中系数降低40%。

## 2.3 传热与传质分析

高温环境下的传热过程呈现多模式耦合特征,辐射传热占比随温度升高显著增大。Sieder-Tate 修正方程被广泛用于计算湍流状态下的对流换热系数,而辐射传热需采用 Hottel 区域法进行离散求解。德国 BASF 公司在重整塔设计中引入非均匀网格 CFD 模拟,准确预测了气相流速分布不均导致的局部热点现象,通过调整进料分布器开孔率使温度偏差从±25℃降至±8℃<sup>[2]</sup>。压力分布研究需考虑流体黏度变化,壳牌公司研发的锥形塔盘结构使塔内压降减少18%,有效降低再沸器能耗。在气液传质方面,双膜理论需修正为渗透-表面更新模型以适配高压条件,某 PTA 氧化塔通过优化填料层高度与液体分布器设计,使传热效率提升22%。

## 3 高温高压化工塔器的设计方法与标准

### 3.1 设计规范与标准

高温高压化工塔器的设计需严格遵循国际通用标准与行业规范。ASME BPVC Section VIII Division 2 针对压力超过20MPa的设备,提出基于失效模式的设计方法,要求同时满足弹性垮塌、局部失效和疲劳失效准则。欧盟 EN 13445-3 附录 B 专门规定高温设计规则,引入蠕变损伤累积计算模型。国内 GB/T 150.3-2011 采用弹塑性分析方法,允许局部区域进入塑性变形阶段以降低整体壁厚。行业龙头企业的内控标准更具针对性,如壳牌要求高压法兰密封面需进行渗硼处理以提升高温密封性,陶氏化学规定塔器支撑结构需通过地震谱分析验证。

### 3.2 结构设计要点

筒体设计优先选用整体锻造或多层包扎工艺,整体锻造筒体可避免焊缝热影响区弱化问题,适用于超高压工况;多层绕带结构通过预应力控制实现等强度设计,某煤制油

项目的费托合成塔采用此技术使壁厚减少30%。封头选型需兼顾强度与流场特性,椭圆形封头长轴比优化至1.9:1可降低边缘应力集中。塔盘支撑结构引入仿生学原理,英国石油公司开发的蜂窝状复合塔盘借鉴蜂巢结构,抗弯刚度提升45%的同时压降降低18%。支撑梁采用变截面设计,埃克森美孚在重整塔改造中通过有限元拓扑优化,使支撑梁重量减轻22%而承载能力保持不变。

## 3.3 材料选择与防腐措施

高温高压环境下的材料选择需综合评估力学性能、耐腐蚀性与经济性。哈氏合金 C-276 在含 Cl<sup>-</sup> 介质中的耐点蚀指数超过 68,成为酸性高压环境首选材料。双金属复合板技术通过爆炸焊接实现基层强度与覆层耐蚀性的结合,巴斯夫某裂解塔采用 SA387Gr11+UNS N06625 复合板,使设备寿命延长至 15 年。表面改性技术取得突破,等离子喷涂氧化钇稳定氧化锆热障涂层可将碳钢耐温极限提升 200℃。防腐设计需考虑介质渗透效应,杜邦在 PTA 装置氧化塔中应用聚四氟乙烯衬里技术,成功解决高温醋酸腐蚀难题。

## 3.4 热应力补偿设计

热膨胀补偿系统需实现多维位移吸收,UOP 专利的  $\Omega$  型膨胀节轴向补偿量达 180mm/m,波纹结构经激光熔覆硬化处理可将疲劳寿命提升至 10<sup>6</sup> 次。柔性连接设计突破传统结构限制,某乙烯装置急冷塔采用万向铰链支架与石墨密封组合系统,实现三维方向±15°角位移补偿。温度梯度控制策略结合主动调控与被动隔热,林德集团开发的分布式电伴热系统通过 PID 算法将轴向温差控制在 30℃/m 以内<sup>[3]</sup>。隔热层设计采用纳米气凝胶复合结构,法国阿科玛项目实测显示,该材料使外壁温度下降 120℃,显著降低热损失。

## 4 高温高压工况下的应力分析与仿真

### 4.1 静态应力分析

#### 4.1.1 内压与外部载荷下的应力分布

高温高压环境下,塔器承受内部压力、自重、风载、地震作用及热应力等多重载荷的共同作用。环向应力( $\sigma_h$ )与轴向应力( $\sigma_a$ )的计算公式分别为 $\sigma_h = \frac{PD}{2t}$ 和 $\sigma_a = \frac{PD}{4t}$ (其中,P代表内部压力,D为塔器内径,t为壁厚)。特别是在塔底区域,外部载荷导致弯曲应力显著增强,局部屈曲风险明显增大。当系统运行压力超过10MPa时,线性分析方法难以准确预测应力分布,需引入非线性计算模型,以更精确地评估结构承载能力。

#### 4.1.2 有限元分析(FEA)方法的应用

在静态应力研究中,有限元分析已成为主要计算手段,能够准确模拟复杂受力状态。网格划分的合理性对计算结果有直接影响,其中,六面体单元能有效降低应力集中误

差。以某石化装置塔器为例, FEA 计算结果表明, 支座区域存在明显的应力集中现象。优化加强筋的布局后, 最大应力降低 15%, 整体结构稳定性得以提升。在非线性接触分析中, 螺栓连接部位的应力分布得到精准预测, 为法兰连接提供了安全评估依据。

## 4.2 动态应力与振动分析

### 4.2.1 瞬态工况下的应力响应

塔器运行过程中, 温度与压力的急剧变化会引发瞬态应力响应。热冲击效应可能使局部应力超过材料屈服极限, 进而导致塑性变形甚至裂纹扩展。瞬态热-力耦合分析被用于评估温度剧烈波动对结构安全性的影响。以某乙烯裂解塔为例, 仿真结果表明, 当升温速率达到  $100^{\circ}\text{C}/\text{min}$  时, 塔壁热应力峰值接近材料屈服强度的 70%。经过绝热层优化设计, 最大应力降低 20%, 裂纹扩展风险显著减少。

### 4.2.2 流体诱导振动的抑制措施

塔器内部的流体流动易引发涡激振动及湍流脉动, 使结构稳定性受到威胁。在研究流体诱导振动时, 流固耦合仿真被广泛应用, 通常采用大涡模拟或雷诺平均纳维-斯托克斯方法分析塔内流场, 以确定高振动风险区域。某 LNG 精馏塔优化研究表明, 在变截面降液管应用后, 流速波动幅度减少 25%, 振动应力明显降低。实验结果证明, 结构阻尼装置的引入、流速调节以及管道优化, 均能有效抑制振动, 提高设备的长期稳定性。

## 4.3 热-力耦合分析

### 4.3.1 温度场与应力场的交互作用

温度场与应力场的耦合作用对塔器结构安全性影响深远。温度梯度的存在易导致热应力集中, 进而引发塑性变形甚至裂纹扩展。傅里叶热传导方程  $\nabla^2 T = -\frac{q}{k}$  与弹性力学方程的耦合计算, 用于分析温度变化对结构强度的影响。以某加氢反应塔为例, 仿真分析显示, 温度梯度每增加  $50^{\circ}\text{C}$ , 塔壁热应力上升 12%。调整保温层厚度后, 塔壁最大温差降低 20%, 热应力幅值显著减小, 设备长期运行的稳定性得以提高。

### 4.3.2 多物理场仿真案例

多物理场仿真技术在高温高压塔器设计中得到了广泛应用。某 PTA 氧化塔的仿真研究中, 采用 COMSOL 进行热-流-固耦合计算, 以研究温度分布对结构变形的影响。结果表明, 优化冷却系统后, 局部高温区的应力降低 18%, 设备耐久性显著提高。此外, 高温催化塔的研究中, 引入热-力-化学反应耦合模型, 使热应力分布预测更为精准, 结构优化效果更加显著。

## 4.4 高温高压下的蠕变与疲劳分析

### 4.4.1 蠕变损伤模型

长期服役于高温高压环境的塔器, 其使用寿命受蠕变

损伤影响极大。Norton 蠕变方程  $\dot{\epsilon} = A\sigma^n e^{-\frac{Q}{RT}}$  体现了应力与温度对蠕变速率的作用。在某重整塔研究中, 采用 Inconel 617 合金替代传统 12CrMoV 材料后, 蠕变寿命延长 35%, 长期服役中的变形失效风险显著降低。通过蠕变-损伤耦合分析方法, 优化壁厚设计后, 局部应力超标情况得以改善, 设备可靠性进一步增强。

### 4.4.2 疲劳寿命预测方法

疲劳寿命预测通常基于 Miner 线性累积损伤理论

$D = \sum \frac{n_i}{N_i}$ , 当 D 达到 1 时, 材料失效。Paris 公式

$da/dN = C(\Delta K)^m$  被用于预测裂纹扩展速率, 以优化结构耐久性。某高压换热塔的研究中, 超声冲击强化技术用于提高材料表面的残余压应力, 实验结果显示, 疲劳寿命提升 50%。焊接工艺改进, 如自动化激光焊接技术的应用, 不仅减少了焊接缺陷, 同时提高了设备疲劳寿命, 使其在高温高压环境下展现出更优异的可靠性。

## 5 安全评估与优化设计

### 5.1 强度校核与稳定性分析

在塔器设计中, 强度校核是确保其承载能力符合要求的关键步骤。该过程通过分析塔器在工作条件下的应力分布, 验证各部件的承载能力是否足够, 防止在实际工况下发生失效。在高温高压工况下, 材料的屈服强度会显著下降, 从而增加结构失效的风险<sup>[4]</sup>。因此, 在进行强度校核时, 必须考虑塔器在极端工况下的力学行为, 并采用先进的有限元分析方法进行精确模拟。这种方法通过细化网格、应用合适的材料模型, 能够有效识别塔器内部应力集中的位置, 进而为设计提供针对性改进建议。

塔器的稳定性分析同样至关重要。稳定性分析着重评估塔器在各种外部载荷作用下, 是否存在屈曲风险。通过对塔器的屈曲临界载荷进行分析, 可以识别出可能发生屈曲的部位。在进行屈曲分析时, 不仅要考虑结构的整体稳定性, 还要关注局部失稳的影响。为了提高塔器的稳定性, 可通过加固支撑结构、优化设计等手段改善其屈曲性能。

### 5.2 优化设计方法

优化设计的核心目标是在满足安全要求的同时, 最大限度地提升塔器的性能, 并减少材料的使用量。设计优化方法通常包括参数优化与拓扑优化两种。参数优化主要调整塔器的尺寸、壁厚及支撑布局等, 以确保结构在满足强度、刚度等要求的基础上, 达到性能的最佳平衡。拓扑优化则着重于通过去除非关键部位的材料, 减少塔器的重量, 并在确保结构强度与刚度的前提下, 使塔器更加轻量化。随着新型材料的发展, 轻量化设计在高温高压工况下的应

用愈加广泛。采用高性能合金，如双相不锈钢和 Inconel 合金，不仅能提升塔器的耐高温能力，还增强了其在极端工况下的抗蠕变性。

### 5.3 安全评估与可靠性分析

塔器在设计过程中的安全评估与可靠性分析是确保其长期稳定运行的核心环节。通过失效模式与影响分析，可以识别塔器可能面临的各种失效模式，并评估其对塔器安全性的影响，进而采取相应的预防措施。在高温高压工况下，蠕变、疲劳与裂纹扩展等失效模式特别值得关注。蒙特卡洛方法被广泛应用于塔器的可靠性分析，通过对塔器在不同工况下进行大量随机模拟，评估其失效概率。该方法不仅能够准确预测塔器的可靠性，还能为进一步优化设计提供有力依据。

### 6 结语

本文探讨了高温高压工况下塔器设备的设计与分析方法，着重分析了设备在极端工况下的强度校核、屈曲分析以及蠕变与疲劳预测等关键问题。通过结合有限元分析技术、优化设计方法与可靠性评估手段，本研究为塔器设

备的安全性与性能提升提供了理论支持。尽管本文取得了一定进展，但如何进一步精确模拟复杂工况下塔器的热力学行为，如何优化设计以最大化设备的安全性与经济效益等问题，仍然需要进一步的探索与研究。未来的研究应聚焦于这些问题的解决，结合先进的计算技术与智能优化手段，推动塔器设计向更加精确可靠的方向发展。

### 【参考文献】

- [1] 褚海涛. 化工塔器设备现场组焊的施工质量控制分析[J]. 中国设备工程, 2021(9): 195-196.
  - [2] 文献娜, 胡尊旭, 张建政. 化工塔器的应力失稳与优化设计[J]. 化工设计通讯, 2021, 47(7): 59-60.
  - [3] 赵玉姣, 张宝龙. FRP 化工塔器的应力失稳与优化设计[J]. 化学工程与装备, 2023(9): 164-166.
  - [4] 温泉. 化工塔器安装过程中常见质量问题及预防措施[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(4): 13-15.
- 作者简介：倪佳（1996.10—），毕业院校：大邱大学，所学专业：机械设计，当前就职单位：张家港富瑞重型装备有限公司，职务：设计，职称级别：助理工程师。