

化工装置管道应力分析与优化设计研究

覃中发

南宁中天科技工程有限公司 广西 南宁 530032

摘要: 在现代化工生产中,管道系统作为连接各类工艺设备、输送高温高压及腐蚀性介质的生命线,其安全性和可靠性直接关系到整个装置能否长周期、稳定运行。管道应力分析是确保管道系统结构完整性的核心技术环节,而在此基础上进行的优化设计则是实现工程经济性与安全性统一的关键路径。本文系统阐述了化工装置管道应力分析的理论基础、核心方法与评价准则,深入探讨了影响管道应力状态的关键因素,并在此基础上构建了以安全性、经济性和可施工性为多目标的管道优化设计框架。文章详细论述了柔性设计、支吊架布置、材料选择及设备管口载荷控制等优化策略,旨在为化工装置管道工程的设计与实践提供系统的理论参考。

关键词: 管道应力分析;优化设计;一次应力;二次应力;柔性设计

引言

化工装置通常在高温、高压、深冷或强腐蚀等严苛工况下运行,其内部错综复杂的管道网络不仅要承受介质内压、自重等持续性载荷,还需应对由温度变化引起的热胀冷缩、设备振动、风载、地震等偶然性载荷。这些复杂载荷的共同作用会在管道系统中产生复杂的应力状态。若应力水平超出材料的许用范围或导致过大的位移,将可能引发管道破裂、法兰泄漏、焊缝开裂乃至支撑结构失效等一系列严重后果,不仅会造成巨大的经济损失,更可能威胁人员安全和环境。因此,在管道系统设计阶段,必须进行严谨的应力分析,以验证其在各种工况组合下的力学响应是否满足相关规范的安全要求。然而,仅仅满足规范要求并非设计的终点。在激烈的市场竞争和精益化管理的背景下,如何在确保绝对安全的前提下,通过科学的优化设计手段,降低材料消耗、减少支撑成本、简化施工难度,已成为工程界普遍关注的核心议题。

1 管道应力分析的理论基础与核心方法

1.1 应力分类与失效机理

根据应力产生的原因、特性及其对管道失效的影响模式,管道应力通常被划分为三类:一次应力、二次应力和峰值应力。

1.1.1 一次应力 (Primary Stress)

由平衡外部机械载荷(如内压、自重、风载、地震载荷等)所必需的法向应力或剪应力。其最显著的特征是“非自限性”,即当应力达到材料的屈服强度时,材料会发生塑性流动,无法通过自身的变形来限制应力的进一步增长,最终可能导致塑性垮塌或过度变形。因此,一次应力的校核准则主要基于防止塑性破坏,其许用值通常取材料在最高工作温度下的基本许用应力(S_h)。

1.1.2 二次应力 (Secondary Stress)

为了满足位移约束条件(如热膨胀受阻、端点附加位移、不同部件间的变形协调等)而产生的法向应力或剪应力。其核心特征是“自限性”。当局部区域的二次应力超过屈服强度时,材料会发生局部塑性变形,从而释放部分约束,使应力重新分布并趋于稳定,不会立即导致结构的整体破坏。然而,这种反复的塑性变形会在交变载荷(如启停、温度循环)作用下引发疲劳裂纹,最终导致疲劳失效^[1]。因此,二次应力的校核准则主要基于防止疲劳破坏,其许用应力范围远高于一次应力的许用值,但需遵循特定的疲劳分析准则。

1.1.3 峰值应力 (Peak Stress)

在一次应力和二次应力的基础上,由局部结构不连续(如焊缝、开孔、几何突变处)或局部热应力集中所产生的附加应力增量。峰值应力本身不会引起明显的变形,但会显著加剧疲劳裂纹的萌生和扩展速率,是疲劳分析中的关键考量因素。

1.2 分析标准与评价准则

国际上,美国机械工程师协会(ASME)颁布的《B31.3 工艺管道》规范是化工、石化等行业管道应力分析最权威、应用最广泛的标准。该规范为管道系统的静力分析和动力分析提供了详尽的设计、材料、制造、检验和测试要求。对于静力分析,ASME B31.3 主要通过两种工况组合进行校核:(1)持续工况(Sustained Load Case):校核一次应力。要求管道在内压、自重及其他持续外载作用下的轴向应力总和不超过材料在最高工作温度下的许用应力(S_h)。(2)膨胀工况(Expansion/Displacement Load Case):校核二次应力。要求由热位移或其他位移载荷引起的应力范围(Stress Range)不超

过一个特定的许用应力范围 (SA)。该许用应力范围 (SA) 的计算公式为 $SA = f(1.25Sc + 0.25Sh)$; 其中 Sc 是材料在最低预期温度下的许用应力, f 是一个考虑材料疲劳性能的应力范围减小系数^[2]。对于动力分析 (如地震、水锤、流致振动等), 则需要采用反应谱法或时程分析法等动态分析手段, 评估管道在瞬态载荷下的加速度、速度、位移及应力响应, 并确保其满足相应的安全裕度要求。

1.3 分析工具与流程

现代管道应力分析高度依赖于专业的计算机辅助工程 (CAE) 软件, 其中 CAESAR II 是业界公认的标准工具。其分析流程通常包括:

1.3.1 模型建立

根据管道的三维走向、管径、壁厚、材料属性等信息, 在软件中精确构建管道系统的有限元模型。模型中的每个单元都代表一段直管或弯头, 其物理特性 (如弹性模量、泊松比、线膨胀系数) 和几何特性 (如外径、壁厚、弯曲半径) 均需准确输入。软件内部采用梁单元理论, 能够高效地模拟管道的弯曲、扭转和轴向变形。

1.3.2 载荷定义

输入所有相关的载荷条件, 包括设计压力、设计温度、保温层重量、风载、地震参数、设备管口附加位移等。温度载荷是关键, 它决定了管道的热膨胀量, 通常以操作温度与安装温度之差 (ΔT) 的形式施加。

1.3.3 边界条件设置

定义管道的约束点 (如固定支架、导向支架、弹簧吊架等) 和设备管口的连接方式。设备管口通常被模拟为具有特定刚度的节点, 其约束特性直接影响管口载荷的传递。

1.3.4 工况组合

按照 ASME B31.3 或其他适用规范的要求, 创建一系列静态和动态的载荷工况组合。例如, 一个典型的工况序列可能包括: 重力 (W)、内压 (P)、热膨胀 (T1, T2...)、风载 (WIN1, WIN2...) 以及它们的组合 (如 W+P+T1, OPE-W-T1 等)。

1.3.5 求解与后处理

软件自动进行数值求解, 计算出各节点的位移、应力、支反力等结果, 并生成详细的合规性报告。工程师需要仔细审查报告, 特别是应力超标点、大位移区域以及设备管口载荷, 以判断模型的合理性并指导后续的优化工作。

2 影响管道应力状态的关键因素

2.1 热载荷与柔性设计

热载荷是化工管道最主要的应力来源之一。管道从安装温度 (通常为环境温度) 升至操作温度时会发生显著的热膨胀。若管道系统缺乏足够的柔性来吸收这部分膨胀量, 就会在系统中产生巨大的热应力。因此, 柔性设计是管道应力分析的核心任务。常见的自然补偿元件包括 L 形、Z 形和 U 形弯管, 它们利用管道自身的弯曲变形来吸收热位移。当自然补偿不足以满足要求时, 则需考虑使用膨胀节 (如金属波纹管膨胀节) 进行强制补偿。

2.2 支吊架系统

支吊架不仅是支撑管道重量的承重结构, 更是控制管道位移、引导热膨胀方向、分担载荷的关键部件。其类型包括固定支架、导向支架、限位支架、弹簧吊架、恒力吊架等。合理的支吊架布置能够有效降低管道的一次应力和二次应力, 同时将设备管口的载荷控制在允许范围内。反之, 不当的布置则可能形成应力集中点或阻碍必要的热位移, 反而加剧应力问题。

2.3 设备管口载荷限制

管道系统与泵、压缩机、换热器等动、静设备相连。管道因热胀冷缩或自重产生的推力和力矩会直接作用于设备的管口法兰上。过大的管口载荷会导致设备壳体变形、内部构件错位 (如泵的轴对中偏移)、法兰泄漏等问题, 严重影响设备的正常运行和寿命。因此, 必须将设备管口的合力与合力矩限制在制造商提供的允许值内, 或参照 API 610 (离心泵)、API 617 (离心压缩机)、NEMA SM23 (汽轮机) 等通用行业标准进行校核。

2.4 材料性能与环境因素

管道材料的许用应力、弹性模量、热膨胀系数等物理性能随温度变化而变化, 直接影响应力计算结果。此外, 腐蚀性介质要求在设计壁厚中计入腐蚀裕量; 高温工况下需考虑材料的蠕变和应力松弛效应; 低温工况则需关注材料的脆性转变, 确保其具有足够的韧性。

3 管道系统的优化设计策略

3.1 柔性布局优化

柔性布局优化是管道应力控制的根本途径。其核心在于通过三维空间内管道走向的巧妙规划, 利用管道自身的几何形状 (如 L 形、Z 形或空间立体弯管) 来吸收由温度变化引起的热位移, 从而避免过大的二次应力。这一过程并非简单的增加弯头, 而是对系统“柔度系数”的精确调控。工程师需在 CAESAR II 等分析软件中反复迭代, 微调关键弯头的角度、位置及弯曲半径 (R/D 比), 以最大化单位热位移所产生的应力效率^[3]。例如, 将一段长直管改为带有适当短臂的 L 形管, 其短臂长度 l 的经验公式 $I \approx 1.1 \sqrt{(\Delta L \cdot D)}$ 直接关联了膨胀量 ΔL 与管径 D, 体现

了通过几何参数实现应力控制的内在逻辑。然而,过度追求柔性会增加管道长度、压降和支撑成本,因此必须进行全局权衡,寻找既能有效吸收热胀又经济合理的布局方案。

3.2 支吊架系统优化

支吊架系统是引导荷载路径、控制管道位移的关键。其优化远不止于选型,更在于对整个支撑体系的精密设计。弹簧支吊架的刚度(K值)和预设压缩量是核心参数,它们共同决定了支架在冷、热态下的荷载输出特性。理想的设计应确保弹簧在整个运行周期内都处于有效工作行程内,并留有足够的“热态裕量”以应对意外超温。通过在泵出口附近设置导向支架,可以有效限制有害的横向位移,保护设备轴对中,同时允许必要的轴向膨胀。对于承受大推力的管段,采用带止推装置的恒力吊架能防止管道摆动。整个优化过程旨在构建一条清晰高效的“荷载路径”,将自重、内压等持续荷载平稳传递至基础,同时为热位移提供无障碍的释放通道。

3.3 材料与规格优化

材料与规格的优化是精细化成本控制的体现。它要求紧密结合应力分析报告中的节点利用率数据,对不同管段实施差异化设计。对于利用率远低于1.0的低应力管段,可评估降级使用成本更低的材料或减薄壁厚。壁厚的选择不仅是内压强度(由Barlow公式 $t = PD/(2SE+0.4P)$ 确定)和腐蚀裕量的问题,还深刻影响管道的截面惯性矩(I)和整体刚度。增加壁厚虽能提高抗弯能力,但也会增大自重和热容,对热应力产生复杂影响^[4]。因此,壁厚优化必须在强度、刚度和热力学性能之间进行综合考量,有时选用更高许用应力或更低热膨胀系数的材料,虽初始成本高,却可能因简化布局而带来整体效益。

3.4 设备管口荷载控制优化

设备管口荷载控制是优化设计的难点,尤其对于API 610标准下苛刻的离心泵。除了常规的布局和支架优化外,“虚拟锚固点”是一种高级策略:通过在设备附近精心布置导向和限位支架,人为创造出一个近似固定的

点,将设备附近的管段隔离成一个独立的、短小的柔性单元,从而将绝大部分热位移和应力转移到远离设备的主管线上。冷紧(Cold Springing)技术则通过在安装时预置反向位移(通常为预期热位移的一半),直接削减热态下的实际位移量和应力。此外,在靠近管口处使用高柔性金属软管也能有效吸收局部微小位移。所有这些措施都必须协同作用,并通过软件校核所有管口载荷的合力与合力矩是否同时满足制造商或行业标准的严格限制。

4 结语

化工装置管道应力分析是一项融合了力学、材料学、热力学和工程规范的综合性技术。深刻理解一次应力、二次应力的产生机理与评价准则是进行有效分析的前提。在此基础上,通过系统性的优化设计——包括柔性布局、支吊架配置、材料选择及设备接口控制——能够在确保本质安全的同时,实现工程的经济性和高效性。面向未来,将可靠性工程思想、非线性分析方法以及数字孪生、人工智能等前沿技术融入管道设计流程,将是提升化工装置管道系统整体性能和智能化水平的必然趋势。这不仅要求工程师具备扎实的理论功底,更需要其拥有跨学科的知识视野和拥抱新技术的开放心态。

参考文献

- [1]张瑞.石油化工装置管道柔性分析与应力优化设计关键技术[C]//河北省绿色低碳循环发展协会.2025年工程技术与建设管理创新发展交流论文集(二).江苏航天惠利特环保科技有限公司南京分公司,;2025:359-362.
- [2]朱晏萱.化工装置中压力管道基于应力分析的柔性设计研究[J].化工管理,2025,(06):130-133.
- [3]王进飞.化工装置中安全阀工艺设计及附属管道应力分析[J].化工管理,2022,(01):120-122+143.
- [4]王琳.化工装置管道布置规范与三维设计技术应用[C]//河北省绿色低碳循环发展协会.2025年工程技术与建设管理创新发展交流论文集.南京合创工程设计有限公司,;2025:211-215.