

# 试论化工管道设计中的管道应力分析

王慧丽 潘浩 巩向辉 赵治雨

空气产品(山东)工程设计有限公司 山东 淄博 255022

**摘要:** 化工管道设计中的管道应力分析至关重要。化工生产过程中,管道承受各种复杂载荷,其安全性能直接关系到生产效率和人员安全。因此,通过专业的应力分析,评估管道在不同工况下的应力分布和变形情况,能够及时发现并解决潜在的安全隐患。本文详细介绍了化工管道应力分析的基础理论、流程、优化处理及其在设计中的应用,并通过案例分析验证了应力分析的重要性和有效性。

**关键词:** 化工管道;设计;管道应力分析

引言: 化工管道作为工业生产中的重要组成部分,其设计过程对于整个系统的稳定性和安全性至关重要。在化工管道设计中,管道应力分析是一项关键技术,它能够评估管道在不同工况下的应力状态,确保管道在承受各种载荷时仍能保持稳定。本文将深入探讨化工管道设计中的管道应力分析方法和实际应用,为提升管道设计质量和安全生产提供理论支持。

## 1 化工管道应力分析的基础理论

### 1.1 管道应力分类及产生原因

管道应力可以分为两大类:一次应力和二次应力。一次应力是由外部载荷(如重力、压力、温度等)直接引起的,它的大小和方向可以由静力平衡条件确定,并且是引起管道破坏的主要原因。二次应力则是由于管道约束条件的变化(如热胀冷缩、位移约束等)引起的,它是管道设计中需要特别关注的部分,因为它可能导致管道的疲劳破坏。

### 1.2 管道应力分析的基本方法

目前,管道应力分析主要采用以下几种方法:(1)有限元法:这是一种数值分析方法,通过将连续的管道离散为有限个单元,建立每个单元的力学方程,然后联立求解,得到管道的应力分布,有限元法可以处理复杂的管道结构,具有很高的计算精度。(2)有限差分法:这种方法将连续的问题离散化,通过差分代替微分,建立离散化后的数学模型并进行求解,有限差分法计算效率较高,适用于处理大规模问题。(3)解析法:对于一些简单的管道结构,可以通过建立管道的力学模型,利用弹性力学理论直接求解管道的应力分布,解析法计算简单,但适用范围有限。

### 1.3 管道应力分析的相关标准和规范

为了确保化工管道设计的安全性和合理性,各国都制定了相应的标准和规范,例如,美国机械工程师协会

(ASME)的B31系列标准、欧洲标准(EN)以及中国的GB/T等相关标准都对管道应力分析提出了明确的要求,这些标准和规范不仅规定了管道应力的限值,还提供了管道应力分析的方法和步骤,在进行管道应力分析时,必须遵循这些标准和规范,以确保分析结果的准确性和可靠性。

## 2 化工管道设计中的管道应力分析流程

### 2.1 管道应力分析的准备工作

在进行化工管道设计中的管道应力分析之前,需要完成一系列的准备工作,这些工作为后续的分析提供了基础数据和条件,确保分析的准确性和可靠性。一是管道布置,这涉及到管道的路径选择、管径确定、支撑结构设计等多个方面,合理的管道布置可以减少应力集中,提高管道的整体稳定性,因此,在设计阶段,应充分考虑管道的布置方案,避免可能出现的高应力区域。二是材料选择,材料的性能对管道应力分析具有重要影响,不同材料具有不同的弹性模量、热膨胀系数等力学特性,这些特性决定了管道在不同工况下的应力分布情况,因此,在材料选择时,应根据管道的使用环境和受力情况,选择具有合适力学性能的材料。三是边界条件的确定,边界条件是指管道在外部约束下的位移和受力情况,在应力分析中,边界条件的选择对于模型的建立和求解至关重要,例如,固定支撑、滑动支撑等不同类型的约束会对管道应力产生不同的影响,因此,在进行分析前,应明确管道的边界条件,确保其符合实际情况<sup>[1]</sup>。

### 2.2 管道应力分析的步骤

管道应力分析的步骤包括建模、加载、求解和结果评估等几个阶段。一是建模阶段,建模是管道应力分析的基础。在这个阶段,需要根据管道的实际尺寸、形状和材料属性等信息,建立准确的三维模型,模型的质量直接影响到后续分析的准确性和精度。因此,在建模过

程中,应尽可能地还原管道的实际情况,避免简化或忽略重要细节。二是加载阶段,加载是指将外部载荷(如重力、压力、温度等)施加到模型上的过程。在这个阶段,需要根据管道的实际工作环境和使用条件,合理确定各种载荷的大小和方向,同时,还需要考虑载荷的组合方式和作用时间等因素,以更全面地模拟管道在实际运行中的受力情况。三是求解阶段,在求解阶段,需要使用适当的算法和软件工具对模型进行数值求解,这个过程涉及到大量的数学计算和迭代优化,以得到管道在各种工况下的应力分布情况,求解结果可以为后续优化设计和安全评估提供重要依据。四是结果评估阶段,结果评估是对求解结果进行分析和评价的过程。在这个阶段,需要对管道在各种工况下的应力分布、变形情况等进行全面评估,如果发现存在应力集中、变形过大等问题,需要对设计方案进行优化调整,以提高管道安全性和稳定性。

### 2.3 管道应力分析结果的优化处理

在完成管道应力分析后,根据分析结果进行优化处理是确保管道设计满足安全要求的重要环节,优化处理的主要目的是消除或减少管道中的高应力区域、防止塑性变形和疲劳破坏等问题的发生。第一,针对分析结果中出现的高应力区域,可以通过调整管道布置、优化支撑结构等方式来降低应力水平,例如,增加支撑点、调整支撑间距或更换具有更高承载能力的支撑结构等方法都可以有效地改善应力分布。第二,针对分析结果中可能出现的塑性变形和疲劳破坏等问题,可以采取相应的措施进行预防,例如,选择具有更高屈服强度和疲劳极限的材料、增加管道的壁厚或采用加强筋等方式来增强管道的承载能力。第三,在优化处理过程中,还可以利用先进的仿真软件和技术手段对设计方案进行迭代优化和验证,通过不断地模拟分析和调整设计方案,可以进一步提高管道安全性和稳定性。

## 3 管道应力分析在化工管道设计中的应用

### 3.1 管道支撑设计

在化工管道设计中,管道支撑设计是保障整个管道系统稳定运行和安全性的重要环节,合理的支撑设计能够有效地分散和传递管道应力,防止应力集中和管道变形,从而确保管道在各种工作条件下的安全、可靠运行。管道应力分析在这一过程中起到了至关重要的作用。通过应力分析,设计师可以深入了解管道在不同工况下的应力分布情况,为支撑设计提供准确的数据和理论支持。这使得支撑设计更加科学、合理,能够有效地满足管道的实际需求。(1)支撑位置的选择是基于管道

应力分析结果的关键决策。通过分析应力分布情况,设计师可以确定支撑点的最佳位置,以最大程度地分散和传递管道应力。这有助于防止应力集中,减少管道变形的可能性,从而提高管道的整体稳定性。(2)支撑类型的选择同样重要。不同的支撑类型具有不同的承载能力和约束条件,需要根据管道的实际情况进行选择。固定支撑,由于其强大的约束和支撑力,适用于承受较大载荷的管道。而滑动支撑则允许管道在一定范围内自由伸缩,适用于需要减少管道应力和变形的场景。通过合理选择支撑类型,可以确保管道在各种工作条件下都能得到有效的支撑和约束<sup>[2]</sup>。(3)支撑尺寸的设计也是不可或缺的一环。支撑尺寸的大小直接影响到支撑的承载能力和稳定性。通过管道应力分析,设计师可以确定支撑所需的最小尺寸和形状,以确保支撑能够有效地承受管道载荷并保持稳定。这有助于避免因支撑尺寸不足而导致的支撑失效或管道变形等问题。

### 3.2 管道柔性设计

在化工管道设计中,管道柔性设计是一项至关重要的措施,其目的是为了优化管道的应力分布并减少潜在的变形。柔性设计能够确保管道在受到外部载荷或温度变化时,具有一定的适应性和缓冲能力,从而避免应力集中和过度的形变,确保管道系统的稳定运行。(1)管道柔性设计的关键在于材料选择。在选用管道材料时,必须充分考虑材料的弹性、柔韧性以及与管道系统相容性等特点。例如,一些高性能的合成材料或波纹管材料,具有良好的柔韧性和抗疲劳性能,能够在复杂的工作环境中表现出色。这些材料的选择对于确保管道系统的柔性至关重要。(2)合理设置管道的弯曲半径和弯曲角度也是柔性设计的关键环节。通过合理的弯曲设计,可以有效地分散应力并减少管道变形。设计时应考虑管道的工作条件、流体特性以及管道支撑结构等因素,以确保弯曲设计的合理性。(3)除了合理的弯曲设计外,增加支撑点和优化支撑间距也是提高管道柔性的有效措施。支撑点的合理布置可以有效地支撑管道,防止其发生过大的变形。同时,优化支撑间距可以确保管道在受到外部载荷时,有足够的空间进行自由伸缩,从而减少应力集中和变形。(4)管道应力分析在柔性设计中发挥着关键作用。通过应力分析,可以模拟管道在不同工况下的受力情况和变形情况,从而评估柔性设计的效果。这有助于及时发现设计中存在的问题,并进行相应的优化调整。通过不断地迭代优化,可以确保管道柔性设计的有效性<sup>[3]</sup>。

### 3.3 安全评定

在化工管道设计中,安全评定是至关重要的一个环节。它旨在确保管道在各种工作条件下都能保持安全性能,从而防止潜在的事故和风险。为了实现这一目标,管道应力分析发挥着关键的作用。(1)安全评定的首要任务是评估管道材料的力学性能和承载能力是否满足设计要求。这包括对材料的强度、刚度、耐腐蚀性等方面进行全面的考虑。通过对比材料的性能数据和实际工作环境的要求,可以判断材料是否适合用于特定的管道系统。(2)除了材料评估外,安全评定还需要对管道在各种工况下的应力分布和变形情况进行深入的分析。通过管道应力分析,可以准确地了解管道在不同工作条件下的应力状态和变形程度。这有助于发现潜在的应力集中区域和变形过大的问题,为后续的优化调整提供依据。(3)安全评定还需要考虑外部环境因素对管道安全性能的影响。例如,温度的变化可能导致管道材料的热胀冷缩,从而对管道应力分布产生影响;压力的变化可能引发管道的振动和疲劳损伤等问题。通过综合考虑这些外部因素,可以更加全面地评估管道的安全性能。在安全评定过程中,如果发现管道存在安全隐患或问题,就需要采取相应的措施进行优化调整。例如,可以通过优化管道布局、增加支撑点、调整支撑结构等方式来改善管道的应力分布和变形情况;也可以采用高强度、高耐腐蚀性的材料来增强管道的承载能力。这些措施的实施需要基于管道应力分析的结果进行,以确保优化调整的有效性和可靠性。

#### 4 案例分析:化工管道设计中的管道应力分析及其优化

在化工生产过程中,管道作为物料输送的关键设备,其设计与运行的稳定性对于生产安全至关重要。本次案例选取了一家化工企业的某生产线中的关键管道系统进行分析,该管道系统负责输送高温高压的液态物料,由于其工作环境的特殊性,对管道的安全性能提出了很高的要求。

在进行管道设计时,首先进行了管道应力分析。通

过利用专业的应力分析软件,结合管道的实际工作条件,模拟了管道在不同工况下的应力分布情况。分析结果显示,在管道的某些弯曲部位和固定支撑点附近,存在较为明显的应力集中现象。这些区域可能成为潜在的安全隐患,需要进行优化处理。

针对分析结果,设计团队提出了一系列优化建议。首先,对于应力集中的弯曲部位,通过调整弯曲半径和弯曲角度,使得应力分布更加均匀。其次,对于固定支撑点,优化了支撑结构,增加了弹性支撑,以减小对管道的约束和应力集中。此外,还增加了管道的壁厚,提高了管道的承载能力。

经过优化后的管道设计方案重新进行了应力分析,结果显示应力分布得到了显著改善,应力集中现象得到了有效缓解。这说明优化措施是有效的,能够提升管道的安全性能。

在实际运行中,经过优化设计的管道系统表现出了良好的稳定性和安全性。通过定期的检查和维护,管道系统始终保持在最佳的工作状态,为化工生产的连续性和稳定性提供了有力保障。

#### 结束语

经过深入的探讨,我们对化工管道设计中的管道应力分析有了更为全面的理解。通过合理的应力分析,不仅可以优化管道设计,确保其在复杂多变的工况下稳定运行,还能有效预防潜在的安全风险,保障生产的安全与效率。未来,随着技术的不断进步和应用领域的拓宽,管道应力分析将在化工管道设计中发挥更加关键的作用,助力化工行业实现更高水平的安全与可持续发展。

#### 参考文献

- [1]张国忠.化工管道设计中的管道应力分析与优化研究[J].化工设备与管道,2021,58(4):56-61.
- [2]王磊.化工管道设计中的应力分析及应对措施[J].化工设计通讯,2020,46(10):32-33.
- [3]韩志超.化工管道设计中的管道应力分析探讨[J].石化技术,2020,27(10):232-233.