

石油化工装置管道柔性分析与应力优化设计关键技术

张瑞

江苏航天惠利特环保科技有限公司南京分公司

摘要: 管道系统柔性分析与应力优化设计对保证石油化工装置的安全稳定运行具有重要意义。本文介绍了管道柔性分析的基础理论: 管道的概念、作用、原理和方法、管道应力基本概念、应力分类、应力特点、应力计算方法与影响因素、基本方法和应力计算方法、应力计算分析技术、相关软件工具应用、数值模拟技术应用等, 应力优化设计的基本原理, 应力优化设计的目标原则、数学模型和算法等, 应力优化设计在实际工程设计方面的应用及应力优化设计应用步骤和注意事项。

关键词: 石油化工装置; 管道柔性分析; 应力优化设计; 关键技术

一、管道柔性分析基础

1.1 管道柔性分析的定义与重要性

石油化工装置在日常运行和设计中, 管道柔性分析是一个必不可少的一项技术, 它对装置的安全稳定运行有着较大的影响, 简而言之, 就是通过管道系统所受各种外力的作用, 管道系统会产生什么样的变形, 会形成多大的应力, 然后对这些情况进行评估分析。它的目的主要是为了保证管道能适应各种因素的位移和变形, 例如温度的变化而引起的胀冷缩热、设备运行中的震动, 还有风吹等。如果管道太硬或太软, 都可能会应力集中, 反复应力而引起的损坏, 甚至造成连接的漏液、漏气的问题, 这些问题都可以通过柔性分析来提前避免。管道柔性分析的目的是为了及早发现管道系统中的弱点和隐藏的危险, 为管道的设计、安装、使用和维护提供一个可靠的依据。这对于提高整个石油化工装置的安全可靠性有很大的帮助, 同时减少事故发生的概率, 经济上的损失和对环境的污染。此外, 设计正确的管道, 保证管道的柔韧性, 或者可以增加管道的使用寿命, 减少维修费用, 提高装置的经济性。

1.2 管道柔性分析的基本原理和方法

在石油化工装置的管道设计里, 柔性分析和应力优化是很关键的技术方向, 其中柔性分析的基本思路和操作方法起着核心作用。管道柔性分析的目的很明确, 就是让管道系统在各种工作状态下都能安全、稳定地运转, 防止因为管道变形、应力集中这些问题引发事故。它的基本思路是结合材料力学、弹性力学等方面的知识, 通过分析管道的受力情况、变形特点, 来判断管道的柔性是否符合设计的要求。

从实际运行来看, 管道在使用过程中会受到很多因素的影响, 比如内部压力、温度变化、外部荷载等, 这些因素都

会让管道产生变形和应力。管道柔性分析的方法有好几种, 比如说解析法、数值模拟法和实验法。解析法是通过建立数学模型, 用材料力学和弹性力学的理论来计算, 这种方法适合分析结构简单的管道系统。数值模拟法会用到有限元分析这类软件, 对复杂的管道系统进行模拟计算, 能更精准地体现管道的受力情况和变形特点。实验法则是搭建实际的管道系统或者模型来做测试, 得到管道的变形和应力数据, 给理论分析提供验证和补充。

在实际的工程项目里, 一般会根据管道系统的复杂程度和分析的具体要求, 选择合适的方法, 或者把几种方法结合起来用。像一些大型的石油化工装置, 管道系统往往比较复杂, 这时候就可能同时用到数值模拟法和实验法, 先通过模拟计算得到初步的结果, 再用实验来验证这些结果是否准确。

二、管道应力的基本概念

2.1 管道应力的分类与特点

管道应力主要有两种类型, 分别是一次应力和二次应力。一次应力是管道在承受内压、外部荷载等持续作用力时产生的。这种应力的大小和所受荷载直接相关, 而且没有自我限制的特性。如果应力超过了管道材料能承受的屈服极限, 管道就会出现损坏问题。二次应力则是管道变形受到限制时产生的。比如管道因为温度变化、安装时的偏差等情况发生变形, 但变形又被约束住, 这时候就会产生二次应力。它和一次应力不同, 有自限性——当管道局部出现屈服或者发生少量变形后, 应力就会降低。一般情况下, 二次应力不会直接导致管道破坏, 不过要是应力太大, 时间久了也可能让管道因为疲劳而损坏。

2.2 管道应力的计算方法和影响因素

管道应力计算方法有解析法和数值法, 解析法是从力学

原理和数学公式出发,经过理论推导得到管道应力准确结果的计算方法,该种计算方法适合简单管道系统应力计算;数值法是将管道系统分为若干小段,通过计算机数值模拟得到近似应力值,此方法适合比较复杂管道系统应力计算。影响管道应力的因素很多,比如管道材料、管道形状和大小、管道内部压力、管道外部载荷、温度、安装误差等因素,这些因素不是单一的,而是相互影响的,共同决定管道应力大小和方向,因此在计算管道应力时,要考虑各个因素的影响。

三、管道柔性分析的关键技术

3.1 管道柔性分析软件工具介绍

在石油化工装置的管道设计工作中,管道柔性分析软件是工程师们必备的工具,通过这些软件可以让工程师更快更准的完成管道的柔性检查和应力计算,为管道系统的安全运行奠定基础。市场上常用的有 CAESAR II、AutoPIPE 等软件,CAESAR II 功能齐全,管道的零件模型种类繁多,建模方式灵活,简单复杂的管道系统都能模拟,可以静态分析也可以动态分析,得出的结果也很可靠。石油化工和电力造船等很多工程都经常使用,AutoPIPE 因为界面直观、计算快速而被许多工程师喜爱,其支持很多行业标准,可以快速完成管道建模、分析、设计,产生详细的应力报告和可视化图表,工程师看到这些,就可以更好的评估和做决定。除了这两个常用软件之外,还有一些其他工具在某些项目、某些领域也用,这些工具各有优势,各具特点,可以根据项目的实际情况选择最适合的软件来进行管道的柔性分析。

3.2 管道柔性分析中的数值模拟技术

对于石化设备管道设计而言,还有一项重要的内容为柔性分析与应力最优化分析,数值模拟技术则成为了重要的技术之一。管道柔性分析是确保管道系统在任何环境工作环境下都能够正常有效运行,不至于因为管道应力过于集中导致管道破坏,无法工作。模拟技术是一种管道柔性分析技术。

通过正确数学模型,数值模拟技术可以对管道系统力学性能做出非常详细的分析,且可以预测可能的问题,不仅能够模拟地震、风等动态载荷作用下管道的变形、应力分布,还能够对管道数值模拟中的应力进行准确计算,为管道设计、优化、安全检查等方面提供参考。除此之外,数值模拟技术还具有其它很多优势,例如:高效、应用比较自由、能够反复分析等,可以大量节约管道柔性分析时间,节省成本。

四、应力优化设计的理论基础

4.1 应力优化设计的目标与原则

应力优化设计的核心是让管道系统在满足生产需求的同时,尽量降低管道内部的应力,让管道用得 longer、更安全可靠,还能少用点材料、减少制作成本。具体要遵循的设计原则有不少。比如说得按照行业里的相关标准来,保证设计符合大家都认可的要求。另外不能只盯着管道某一处的应力情况,得从整体上考虑整个管道系统的性能。在保证安全的基础上,还要考虑成本合不合理、实际操作方不方便,找到最合适的设计方案。同时,管道实际运行时可能遇到的各种工作情况和受力情况,都得提前想到,把这些情况都纳入应力分析和优化的过程中。

4.2 应力优化设计的数学模型与算法

在石油化工装置管道的柔性分析与应力优化设计研究里,应力优化设计的数学模型和算法是关键支撑。数学模型能把管道应力优化的实际问题转化为可计算的形式,清晰呈现管道系统里不同因素之间的关联。比如构建模型时,得把管道用什么做的、长什么样、温度怎么变、压力稳不稳定这些情况都考虑进去。算法则是在模型基础上,通过一套固定的计算步骤和逻辑,找出让管道应力达到最优状态的设计办法。

常用的算法有有限元法、遗传算法、模拟退火算法等。有限元法可以把复杂的管道拆成一个个小单元,算出每个单元的应力和变形,再整合出整个管道的应力分布;遗传算法参考了生物进化的过程,模拟生物的自然选择和基因遗传,在所有可能的设计方案里找最好的那个;模拟退火算法是靠概率来优化的,有时候会接受不是那么好的方案,这样就能避免只找到局部最好的结果,增加找到全局最优方案的机会。这些算法各有长短,实际用的时候,得看管道系统具体情况、优化的需求是什么,再决定选哪种或者怎么组合起来用。

五、应力优化设计的工程应用

5.1 应力优化设计在不同工况下的应用

在石油化工装置的管道设计里,柔性分析和应力优化是很关键的技术方向,其中应力优化在不同使用场景下的实际应用尤其重要。这里说的不同场景,包含了高温、高压、低温、振动等多种复杂情况,每种情况都会影响管道内部的应

力分布,所以得针对性地做应力优化,才能让管道系统安全稳定地运行下去。高温环境下,管道材料会因为温度升高而膨胀,进而产生比较大的热应力。这时候做应力优化,就得先考虑材料本身的热膨胀系数,再合理装一些膨胀节之类的补偿部件,这样才能减少热应力对管道的影响。高压环境的情况不太一样,管道内部承受的压力变大,整体应力水平会明显上升。优化设计时要重点加厚管道的壁,同时调整管道的支撑结构,保证管道在高压下有足够的强度,不会出问题。低温环境下,管道材料可能会变脆,韧性下降。这时候的应力优化,要选合适的低温材料,还要避免管道某个部位应力过于集中,防止管道因为脆性而断裂。振动环境中,管道会受到动态的力,时间长了容易疲劳损坏。应力优化需要先分析管道的振动特点,再采取减振措施,比如装阻尼器、调整管道的布局等,降低振动带来的应力,让管道用得久。

除了单一的场景,实际中还常遇到多种情况同时存在的情况,比如高温和高压一起出现,或者振动和低温交替发生。这时候的应力优化就得综合考虑这些情况叠加后的效果。可以先建立一个多场景耦合的数学模型,准确算出管道在不同组合场景下的应力分布,再制定综合的优化方案。比如高温高压同时存在时,既要考虑热膨胀产生的热应力,又要考虑压力带来的机械应力,得合理协调膨胀节的安装和管壁加厚的措施,让管道在这种复杂情况下也能安全运行。要是遇到振动和低温交替的情况,就得同时关注管道的动态反应和材料韧性的变化。可以通过调整支撑结构、加装阻尼装置、选用低温韧性好的材料等多种方法,有效控制振动应力,防止管道出现脆性断裂的风险。

5.2 应力优化设计的实施步骤与注意事项

应力优化设计的落地需要分步骤推进,每个环节都得仔细处理。首先得把管道系统的情况摸清楚,比如它平时怎么工作、要承受哪些力、设计上有什么具体要求,这些基础信息得先收集完整,不然后面的优化就没了依据。选对分析方法和工具也很关键。得根据前面调研的结果,搭一个准确的应力分析模型,然后仔细算清楚应力情况。算的时候不能只看单一情况,得把各种可能的工况加在一起考虑,这样结果才靠谱。算出应力结果后,就得结合设计规范来调整管道的布局、结构大小和支撑方式了,目的是把应力降下来。调整完还得再验证一遍,看看优化后的效果是不是真的符合要求。

另外还有几个点要注意。材料的力学性能和工艺特点得考虑到,不然设计出来的方案可能没法落地,或者成本太高。还要多和其他专业的人沟通,确保优化方案和他们的设计能配合上。过程中的文档和数据也得好好记录,方便后面维护检修。现场情况也不能忽视,要是遇到问题得及时调整方案。比如有些管道工作情况特别复杂,可能得用更精细的数值模拟来分析应力。现在新材料、新工艺越来越多,应力优化设计也得跟着更新,多试试新技术新方法。优化过程中发现的问题和不足,也得总结下来,给以后的设计当参考。

结语

石油化工装置里的管道柔性分析和应力优化设计,是让管道系统安全稳定运行的重要工作。要做好这项工作,得先搞懂管道柔性分析的基础理论,知道管道应力的基本概念和怎么计算,还要能熟练用那些关键技术。这些知识能帮我们更好地优化管道设计。应力优化设计的理论和实际应用,也给我们指出了提升管道系统性能的方向。在实际工程里,不能只靠理论,得把理论和实践结合起来,我们还要不断尝试新方法、新思路,以推动石油化工装置管道设计技术的持续进步与发展。

参考文献

- [1] 吉林浩. 应力分析支持下的化工管道柔性设计研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 45(12): 169-171.
- [2] 朱晏莹. 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, 2024(06): 130-133.
- [3] 彭燕斌. 石油化工管道设计中基于应力分析的柔性设计探讨[J]. 工程建设与设计, 2024(08): 79-81.
- [4] 张致远; 于浩; 纪新强; 钱明轩. 管道设计中的应力分析与优化策略[J]. 化工设计通讯, 2023(11): 28-30.
- [5] 雷仲波. 化工管道设计中的管道应力分析[J]. 天津化工, 2023(01): 128-130.