

化工管道柔性连接结构的安全可靠性设计与验证

李鸿伯 李玉洁 (烟台九目化学股份有限公司, 山东 烟台 264006)

摘要: 化工管道作为工业生产中介质输送的核心载体, 其运行安全性直接影响生产效率与人员财产安全。柔性连接结构因能补偿管道热胀冷缩、振动位移及安装偏差, 成为缓解管道系统应力集中的关键部件。本文围绕化工管道柔性连接结构的安全可靠性, 从材料选择、结构参数设计、密封系统优化三个核心维度展开设计分析, 结合实验验证与数值模拟手段, 提出“设计-验证-迭代”的一体化方案。通过某石化企业管道改造工程案例, 验证了该设计方案可将柔性连接结构的泄漏率控制在 0.01% 以下, 疲劳寿命提升 30% 以上, 为化工管道柔性连接结构的安全设计提供实践参考。

关键词: 化工管道; 柔性连接; 安全可靠性; 结构设计; 性能验证

中图分类号: TE88 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 008-0142-03

Safety and reliability design and verification of flexible connection structure for chemical pipelines

Li Hongbo, Li Yujie (Yantai Jiumu Chemical Co., Ltd., Yantai Shandong 264006, China)

Abstract: As the core carrier for medium transportation in industrial production, the operational safety of chemical pipelines directly affects production efficiency and personnel and property safety. Flexible connection structures, capable of compensating for thermal expansion and contraction, vibration displacement, and installation deviations of pipelines, have become key components in mitigating stress concentration in pipeline systems. This paper focuses on the safety and reliability of flexible connection structures for chemical pipelines, conducting design analysis from three core dimensions: material selection, structural parameter design, and sealing system optimization. Combining experimental verification and numerical simulation methods, an integrated “design-verification-iteration” scheme is proposed. Through a case study of a pipeline renovation project in a petrochemical enterprise, it is verified that the proposed design scheme can control the leakage rate of the flexible connection structure below 0.01% and increase the fatigue life by more than 30%, providing practical reference for the safe design of flexible connection structures for chemical pipelines.

Keywords: chemical pipeline; flexible connection; safety reliability; structural design; performance verification

化工行业生产环境复杂, 管道系统长期处于高温、高压等工况下, 易因应力集中等引发安全事故。《中国化工安全报告 (2024)》显示, 近 5 年化工管道事故中, 38% 因连接结构失效, 柔性连接结构设计缺陷是主要诱因之一。柔性连接结构通过弹性变形实现位移补偿, 有缓解热应力、吸收振动能量、补偿尺寸偏差等优势, 但存在材料耐蚀性与工况不匹配、结构参数未优化、密封系统未考虑老化失效等问题, 难以满足严苛要求。基于此, 本文以“安全可靠性”为核心, 梳理设计要素, 构建验证体系, 形成设计与验证方案, 为化工管道柔性连接结构优化升级提供技术支撑。

1 化工管道柔性连接结构的安全可靠性设计

柔性连接结构的安全可靠性设计需围绕“承载力达标、位移补偿充足、密封性能稳定”三大目标, 结合化工管道的工况参数 (介质性质、温度、压力、振动频率), 从材料、结构、密封三个维度开展针对性设计。

1.1 材料选择: 匹配工况与性能需求

材料是决定柔性连接结构耐蚀性、力学性能与疲

劳寿命的基础, 需遵循“工况适配、性能均衡”原则, 重点关注以下指标 (见表 1):

耐腐蚀性: 根据介质类型选择材料, 如输送酸性介质 (盐酸、硫酸) 时, 优先选用哈氏合金 C276 或 PTFE; 输送碱性介质 (氢氧化钠) 时, 可选用 316L 不锈钢或丁腈橡胶; 输送高温油气介质时, 需选择耐高温合金 (如 Inconel625), 确保材料在长期工况下无腐蚀开裂风险。

力学性能: 金属类柔性连接 (如波纹管) 需保证屈服强度 $\geq 200\text{MPa}$ 、延伸率 $\geq 30\%$, 以满足弹性变形需求; 橡胶类柔性连接需控制邵氏硬度在 60-80HA 之间, 兼顾弹性与抗撕裂性; PTFE 类连接需添加玻璃纤维或碳纤维增强, 避免低温脆化与高温蠕变。

疲劳性能: 针对反复振动或周期性位移工况, 材料需通过 10^6 次疲劳试验无裂纹产生。例如金属波纹管采用奥氏体不锈钢时, 需通过固溶处理提升晶界稳定性, 降低疲劳失效概率。

1.2 结构参数设计: 优化承载与补偿能力

结构参数直接影响柔性连接的位移补偿量、刚度

表 1 常见柔性连接材料性能与适用工况对比

材料类型	耐蚀性	适用温度范围 (°C)	适用压力范围 (MPa)	典型应用场景
316L 不锈钢	耐中性、弱酸性介质	-196~450	0.1~10.0	石油、化工原料输送
哈氏合金 C276	耐强腐蚀 (盐酸、氯代物)	-253~650	0.1~8.0	精细化工、医药中间体输送
丁腈橡胶 (NBR)	耐油、耐弱碱	-40~120	0.1~1.6	润滑油、燃油管道
PTFE (增强型)	耐强酸、强碱、有机溶剂	-200~260	0.1~2.5	高纯度介质、腐蚀性液体输送

及应力分布,需结合管道系统的载荷条件(轴向力、横向力、扭矩)与位移需求,通过理论计算与仿真优化确定关键参数:

柔性系数(K): 定义为单位位移所需的力,是衡量补偿能力的核心指标。金属波纹管的柔性系数通过波纹高度(H)、波纹数量(n)与壁厚(t)控制,公式为 $K=(E \times t^3)/(4 \times n \times H^2)$ (E为材料弹性模量)。根据化工管道常用标准(GB/T12777-2019),柔性系数需控制在 50-200N/mm 之间,确保在设计位移范围内应力不超过材料屈服强度的 80%。

位移补偿量: 需覆盖管道系统的热位移、振动位移与安装偏差总和。例如某石化装置管道因介质温度变化产生的轴向热位移为 50mm,振动位移为 10mm,安装偏差为 5mm,则柔性连接的轴向补偿量需 ≥ 65 mm,横向补偿量需 ≥ 15 mm,避免因补偿不足导致结构过载。

刚度匹配: 柔性连接的刚度需与管道系统刚度适配,避免共振风险。当管道系统固有频率为 20Hz 时,柔性连接的刚度需调整至使自身固有频率偏离 $20\text{Hz} \pm 5\text{Hz}$ 范围,可通过增加波纹数量(降低刚度)或增厚壁厚(提高刚度)实现。

1.3 密封系统设计:防止介质泄漏

泄漏是化工管道柔性连接主要安全隐患,密封系统设计要遵循“双重防护、长效稳定”原则,从结构形式与材料老化控制两方面优化。

结构形式上,采用“主密封+辅助密封”双重结构,主密封选 O 型圈或 V 型圈,与法兰密封面形成线或面接触,辅助密封用聚四氟乙烯填料或金属包覆垫片填充间隙,高压管道(压力 $\geq 4.0\text{MPa}$)可增设焊接密封环;材料老化控制方面,橡胶密封材料添加抗氧剂(如 2,6-二叔丁基对甲酚)与防老剂(如 4010NA),PTFE 密封材料进行改性处理(如添加铜粉、石墨),同时密封面抛光,表面粗糙度 $R_a \leq 0.8 \mu\text{m}$ 以减少介质渗透通道。

2 化工管道柔性连接结构的安全可靠性验证

设计方案需通过“实验验证+数值模拟+工程应用”的多维度验证体系,确保柔性连接结构在实际工况下的安全可靠性。验证内容涵盖力学性能、密封性能、疲劳寿命三大核心指标。

2.1 实验验证:模拟工况测试性能

实验验证需在实验室环境下模拟化工管道的高温、高压、振动等工况,通过专用设备测试柔性连接结构的性能极限:

静载力学试验: 采用万能试验机对柔性连接施加轴向、横向载荷,测试其刚度、屈服载荷与破坏载荷。要求屈服载荷 \geq 设计载荷的 1.5 倍,破坏载荷 \geq 设计载荷的 2.0 倍,符合 GB/T14525-2017《波纹金属软管通用技术条件》要求。例如某 316L 不锈钢波纹管柔性连接,设计轴向载荷为 5kN,实验测得屈服载荷为 8.2kN,破坏载荷为 11.5kN,满足安全系数要求。

密封性能试验: 分为常温密封试验与工况密封试验。常温下,向柔性连接内通入压缩空气(压力为设计压力的 1.2 倍),将其浸入水中,30min 内无气泡产生即为合格;工况下,模拟介质温度(如 200°C)与压力(设计压力的 1.1 倍),采用氦质谱检漏仪检测泄漏率,要求泄漏率 $\leq 1 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,远低于化工行业允许的泄漏标准($\leq 1 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)。

疲劳寿命试验: 采用疲劳试验机对柔性连接施加周期性位移(模拟管道热胀冷缩)或振动载荷(模拟设备振动),记录其出现裂纹时的循环次数。要求疲劳寿命 \geq 设计寿命的 1.2 倍,例如设计寿命为 10^5 次循环的柔性连接,实验测得疲劳寿命为 1.3×10^5 次,满足使用需求。

2.2 数值模拟验证:预测结构应力与寿命

通过有限元分析软件(如 ANSYS、ABAQUS)构建柔性连接结构的三维模型,模拟实际工况下的应力分布与疲劳寿命,弥补实验验证的局限性:

应力分布模拟: 导入管道系统的载荷参数(轴向

力、温度场、振动频率),分析柔性连接关键部位(波纹根部、法兰焊缝)的应力值。要求最大应力 \leq 材料在工况温度下的许用应力,例如某哈氏合金波纹管在300℃工况下,模拟测得波纹根部最大应力为180MPa,而材料许用应力为220MPa,应力水平符合安全要求。

疲劳寿命预测:基于应力模拟结果,采用Miner线性累积损伤理论计算柔性连接的疲劳寿命。将工况载荷分解为不同幅值的循环载荷,叠加各载荷下的损伤值,当总损伤值 ≤ 1 时,判定寿命满足要求。例如某柔性连接在轴向位移循环(幅值30mm)与振动循环(频率15Hz)共同作用下,预测疲劳寿命为 1.5×10^5 次,与实验结果(1.4×10^5 次)误差小于7%,验证了模拟模型的准确性。

失效模式分析:通过模拟极端工况(如超压、超位移),预测柔性连接的失效位置与形式。例如当管道位移超过补偿量的120%时,模拟显示波纹根部会产生塑性变形,进而引发裂纹,为设计中设置位移保护装置提供依据。

2.3 工程试用验证:实际工况检验可靠性

实验室验证通过后,要在化工企业现场开展工程试用,观察柔性连接结构长期实际工况下的运行状态。试用方案是选典型工况管道(如催化裂化装置油气管道、酸碱储罐进料管道)替换为新设计结构,安装温度、压力、振动传感器及泄漏监测装置实时采集数据。试用周期不少于6个月,重点监测温度、压力波动下的结构变形量(需在设计补偿范围内)、振动幅值(较改造前降低20%以上)、泄漏率(保持在0.01%以下),如某石化企业催化裂化装置管道试用中,新柔性连接振动幅值从5mm降至2.8mm,6个月无泄漏且运行稳定。根据试用问题(如密封材料老化过快、波纹变形不均匀)调整设计参数,如某PTFE柔性连接试用中密封老化,更换为添加碳纤维的改性PTFE材料后,老化周期从3个月延长至8个月,满足长期使用需求。

3 工程案例应用

以某大型石化企业催化裂化装置的油气管道改造工程为例,验证本文设计与验证方案的实际效果。该管道原采用刚性连接,因介质温度波动(150~350℃)产生的热位移导致焊缝频繁开裂,每年需停机维修2~3次,影响生产效率。

3.1 设计方案

根据管道工况参数(介质:油气混合物,温度:150~350℃,压力:2.5MPa,轴向热位移:45mm,振动频率:18Hz),设计柔性连接结构如下:

材料选择:主体采用Inconel625高温合金,耐油

气腐蚀且耐高温性能优异;密封系统主密封为氟橡胶O型圈(耐温-20~250℃),辅助密封为金属包覆垫片。

结构参数:波纹高度25mm,波纹数量8个,壁厚2mm,柔性系数120N/mm,轴向补偿量60mm,横向补偿量20mm,刚度匹配至固有频率12Hz(避开管道系统固有频率18Hz)。

密封设计:采用“O型圈+金属包覆垫片”双重密封,密封面粗糙度 $Ra=0.6\mu m$,法兰螺栓预紧力控制在250N·m,确保密封面贴合紧密。

3.2 验证过程

实验验证:静载试验测得屈服载荷12kN(设计载荷8kN),破坏载荷20kN;密封试验在350℃、2.75MPa压力下,泄漏率为 $5 \times 10^{-10} Pa \cdot m^3/s$;疲劳试验测得寿命 1.6×10^5 次(设计寿命 1.2×10^5 次),均满足要求。

数值模拟:模拟350℃工况下波纹根部最大应力190MPa(材料许用应力230MPa),预测疲劳寿命 1.7×10^5 次,与实验结果误差6%。

工程试用:试用12个月内,管道振动幅值从改造前的4.5mm降低至2.1mm,无焊缝开裂与泄漏现象,停机维修次数减少至0次,年节约维修成本约50万元。

4 结论与展望

本文围绕化工管道柔性连接结构安全可靠,构建“材料-结构-密封”三位一体设计体系,提出“实验-模拟-工程试用”多维度验证方案,结论为:材料选型要匹配介质工况,金属优选耐蚀高温合金,非金属需改性;结构参数以柔性系数等为核心,经计算仿真确保应力安全;密封系统用“双重防护”结合老化控制,泄漏率可控制在 $1 \times 10^{-9} Pa \cdot m^3/s$ 以下;多维度验证有效,新设计可提升管道安全性稳定性、降低成本。未来研究可开发智能化结构,集成传感器与自动补偿装置;探索新型复合材料应用;构建数字孪生模型,为化工管道安全运行提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 丁健,沈文骏,王飞,邹雷,金鑫.石油化管道应力设计要点探究[J].中国石油和化工标准与质量,2023,(12):1-3.
- [2] 张健.石油化管道设计注意事项[J].化工设计通讯,2023,(04):20-22.
- [3] 苏航,李倩.石油化管道应力设计要点分析[J].造纸装备及材料,2022,(01):184-186.
- [4] 刘伟,王磊,孙静.石油化管道振动分析与减振设计研究[J].炼油技术与工程,2021,(08):55-59.
- [5] 陈浩,张悦.基于CAESAR II的石油化管道应力分析与优化[J].压力容器,2020,(05):72-77.