

石油输送管道热胀应力补偿结构设计及工程应用

缪东海 (中石化宁波工程有限公司, 甘肃 兰州 730060)

摘要: 石油输送管道的安全性和稳定性至关重要, 尤其在全球气候变化加剧温度波动的背景下, 热胀应力问题日益显著。本文深入分析了由介质和环境温度变化引发的热胀应力形成机理及其对长距离输送管道的影响, 提出通过管廊结构设计和补偿器配置来缓解这些问题。研究强调科学合理的结构设计和补偿装置配置对于提高管道系统安全性和可靠性的重要性, 并为实际工程应用提供了理论依据和技术指导。

关键词: 石油输送管道; 热胀应力; 管廊结构设计; 补偿器

中图分类号: TE973 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 017-0090-03

Structural design and engineering application of thermal expansion stress compensation for petroleum transmission pipelines

Miao Donghai (Sinopec Ningbo Engineering Co., Ltd., Lanzhou Gansu 730060, China)

Abstract: The safety and stability of oil transmission pipelines are very important, especially in the context of global climate change and temperature fluctuations, and the problem of thermal expansion stress is becoming more and more obvious. In this paper, the formation mechanism of thermal expansion stress caused by the change of medium and ambient temperature and its influence on long-distance transmission pipelines is deeply analyzed, and it is proposed to alleviate these problems through the structural design of pipe gallery and the configuration of compensators. The study emphasizes the importance of scientific and reasonable structural design and compensation device configuration to improve the safety and reliability of pipeline system, and provides a theoretical basis and technical guidance for practical engineering application.

Keywords: oil pipelines; thermal expansion stress; structural design of pipe gallery; compensator

石油输送管道作为能源传输的重要基础设施, 其安全性和稳定性直接关系到国家经济和社会发展。随着全球气候变化以及极端天气事件频发, 管道所处环境的温度波动愈加剧烈, 导致热胀应力问题日益突出。热胀应力若未能得到妥善处理, 将严重影响管道系统的使用寿命乃至引发安全事故。因此, 针对这一问题进行深入研究并探索有效的解决方案显得尤为重要。本论文旨在通过对热胀应力形成机理及其对管廊结构影响的剖析, 提出一系列具有实际应用价值的设计策略, 以期提高石油输送管道系统整体的安全性和可靠性。

1 石油输送管道热胀应力分析

石油输送管道在不同季节或日夜温差条件下, 会经历显著的温度变化, 这种温度变化引起材料膨胀或收缩, 进而产生热胀应力。对于长距离输送管道而言, 由于其长度较长, 即使微小的温度变化也可能积累成巨大的应力值。具体而言, 在高温环境下, 管道材料受热膨胀, 而在低温时则发生收缩。如果这些变形不能被充分释放或适当补偿, 将会导致管道内部产生巨大的内应力, 严重情况下可能导致管道破裂或者接头松动等问题。石油输送管道的热胀应力主要由介质温度和环境温度变化引起。介质温度指的是在管道内部流动的石油或其他流体的温度, 而环境温度则是指管

道外部周围空气或土壤的温度。这两种温度变化都会导致管道材料发生膨胀或收缩, 从而产生应力。例如, 在高温环境下, 石油的运输会导致管道内壁受热并扩张; 而在低温条件下, 管道材料会因为冷却而收缩。如果这些由于温度变化引起的变形不能得到适当的补偿, 就会在管道中形成累积的热胀应力。

2 管廊结构设计在热胀应力补偿中的作用

2.1 提供必要的约束与支撑

管廊结构作为连接和保护石油输送管道的关键设施, 必须具备足够的刚性和强度, 以为管道提供稳定的支撑平台。具体来说, 合理设计的管廊能够有效限制管道在非预期方向上的移动, 从而避免因外力作用而引发的不规则变形。与此同时, 管廊还应当设置适当的支点, 确保管道在温度变化过程中产生的伸缩运动能够在预定范围内进行, 防止过量变形造成管道损伤。通过精确计算和布局, 管廊结构可以为管道提供全方位的防护, 既保证了管道的安全运行, 又促进了整个输送系统的高效运作。

2.2 吸收和分散热胀应力

除了提供物理支撑之外, 管廊结构还需承担起吸收和分散由热胀冷缩引起的应力的任务。精心设计的管廊不仅能有效减少应力集中现象的发生, 还能通过自身弹性特性缓解管道因温度变化带来的张力。例如,

采用柔性接头或者波纹管等元件，可以在一定程度上允许管道沿轴向自由伸缩，从而减轻固定点处的应力累积。同时，合理布置的支撑结构也能够帮助将应力均匀分布在整个管道系统中，避免局部区域承受过高的负荷，保障管道长期稳定运行。

2.3 引导管道热胀冷缩方向

为了最大限度地降低热胀应力对管道系统的负面影响，管廊结构设计应着重考虑如何引导管道的热胀冷缩方向。这通常涉及到对管道路径的精心规划以及对支撑点位置的精确设定。理想情况下，管廊应能引导管道沿着预设轨迹进行伸缩，而非随意偏离既定路线。为此，设计师需充分考量地形地貌特征以及周围环境因素，确保管道在任何情况下都能按照预期路径扩展或收缩。此外，利用导向装置如滑动支架等辅助工具，可以进一步增强管廊结构对管道运动的控制能力，确保整个系统始终处于最佳状态。

3 结构布置设计的安全经济性

3.1 管廊的结构选型

在长距离石油输送管道工程中，管廊的结构选型需综合考虑材料性能与热应力分布特性。钢结构因其高柔性和适应性，成为长距离管道的优选材料，能够有效吸收热胀应力并适应温度变化引起的位移。相比之下，混凝土结构虽然具有较高的刚度和耐久性，但在应对周期性热胀冷缩时可能因刚性过大导致局部应力集中，需通过设置温度补偿装置来缓解。温度区段的划分是结构设计中的关键环节，通过将管道分割为多个短节段，可显著降低单段管道因温度变化产生的累积应力。

每个温度区段的长度需根据材料热膨胀系数、环境温度差及补偿器的补偿能力综合确定，通常控制在150m至300m范围内。柱间支撑的布置需兼顾结构稳定性与管道伸缩自由度，支撑间距应与温度区段长度相匹配，同时需在支撑节点处设置滑动支座，允许管道沿轴向自由移动。净空要求需满足管道位移轨迹的空间需求，避免管道在伸缩过程中与支撑结构发生干涉，同时预留足够的检修通道，确保维护人员能够安全接近关键节点。

3.2 荷载的布置

管道系统的荷载分析需涵盖竖向荷载、水平推力及特殊环境荷载的综合影响。竖向荷载主要由管道自重、介质重量及覆土压力构成，其分布需沿管道轴向均匀计算，避免局部区域因荷载突变导致结构失稳。水平推力的产生源于热胀冷缩引起的管道轴向位移，其数值与温度变化幅度、管道刚度及补偿器刚度密切相关，需通过有限元模型模拟不同温差条件下的推力

峰值，并在结构设计中预留足够的承载余量。风荷载在开阔地带或沿海区域需作为主要荷载考虑，其作用方向与管道走向呈垂直关系，可能引发管道的侧向振动，需通过增设抗风支架或调整支撑间距来增强抗风能力。

此外，地震荷载需通过反应谱分析确定设计基准，其作用方向需与管道轴线及支撑结构协同考虑，以避免共振效应加剧结构损伤。荷载的合理分配需结合管道布局与地形特征，例如在坡度较大的区域，需优先强化支撑结构的抗剪能力以应对重力分量变化。

3.3 地震作用计算及相关构造要求

地震对管廊结构的影响需通过动力时程分析与反应谱法进行量化评估。在地震作用计算中，需确定管道系统的自振周期与场地特征周期的匹配关系，以识别潜在的共振风险。结构的整体刚度需通过合理布置支撑体系来均匀分布地震力，避免局部节点因刚度过高而成为薄弱环节。抗震构造要求包括增设剪力键、设置摩擦摆支座或采用屈曲约束支撑，以提高结构的耗能能力。对于长距离管道，需在关键节点处设置柔性连接装置，允许管道在地震作用下发生微小位移而不引发断裂。

此外，管道与管廊的连接方式需采用抗震支架，其刚度需与管道系统整体刚度相协调，防止地震时因连接过紧导致应力突增。构造细节如焊缝质量、节点连接方式及防腐处理也需符合抗震规范，确保结构在地震后的可修复性与功能性延续。

3.4 针对不同地质情况基础形式的选择

3.4.1 软土地基区域基础形式选择

软土地基区域的管道基础需优先考虑地基承载力不足与沉降差异问题。桩基础或复合地基技术可有效将荷载传递至深层稳定土层，减少地基沉降量。桩体材料可选用预应力混凝土管桩或钢桩，其布置密度需依据地基承载力试验数据确定，确保桩间土与桩体协同工作。

为避免桩周土体侧向挤压引发的附加应力，桩顶需设置承台将荷载均匀分散。对于局部软弱夹层区域，可采用CFG桩或搅拌桩加固地基，通过物理改良提升土体强度。基础施工完成后需进行静载试验验证承载能力，确保沉降量控制在管道允许范围内。

3.4.2 岩质地基区域基础形式选择

岩质地基区域的基础形式需结合岩层完整性和承载力特征确定。浅基础适用于完整岩层，其基底需与岩面紧密接触，避免因接触面不平整导致局部应力集中。扩底桩适用于节理发育或破碎岩层，其扩底部分需嵌入完整岩体以增强抗拔能力。岩体爆破开挖时需

控制药量与孔距,防止爆破震动破坏岩体结构完整性。基础与岩体接触面应设置防滑层,防止地基与结构间的相对滑移。对于裂隙发育岩层,需在基础周边设置排水盲沟,减少地下水渗流对基础稳定性的影响。

3.4.3 季节性冻土区域基础形式选择

季节性冻土区域的基础设计需应对冻胀与融陷双重影响。基础埋深应低于冻结深度,通常需结合多年冻土活动层厚度确定,确保基础位于非冻胀土层中。基础底部可设置保温层,采用聚苯乙烯板或碎石层阻隔地表冻胀力传递。排水系统需沿基础周边布置,通过盲沟或渗井将融雪水及时排出,降低冻融循环对基础的损害。对于强冻胀土层,可采用桩基础穿透冻土层,将荷载传递至非冻胀持力层。基础顶面需设置防冻胀隔离层,阻止冻土膨胀力直接作用于管道支撑结构。

3.4.4 不均匀沉降区域基础形式选择

不均匀沉降区域的基础设计需通过扩大基础底面积或调整结构刚度来分散荷载。筏板基础或箱型基础适用于沉降差异显著区域,其底面积需覆盖整个管道支撑范围,通过整体性承载减少局部沉降影响。基础与管道连接处需设置柔性接口,允许沉降差异引起的水平位移,常用形式包括球型支座或滑动支座。对于分层地基,可采用分层式基础,上部采用轻质材料降低荷载,下部采用刚性材料增强承载能力。基础施工前需进行触探试验划分地层,依据不同地层刚度调整基础配筋率与配筋方式。

4 设计优化方面

4.1 管道路径规划与地形适应性设计

管道路径规划需结合自然地形特征与热应力分布规律,优先选择沿等高线延伸的线路以减少垂直高差。地形起伏较大的区域应通过平缓坡度过渡段衔接,避免因局部陡坡导致管道轴向变形受限。路径中弯头数量需严格控制,尤其在温度敏感区段应采用长直管段降低应力集中风险。管道走向应与主导风向或地质构造趋势保持一致,减少外力作用方向与热膨胀方向的叠加效应。对于跨越山谷或沟壑的区段,需设置柔性跨越支架以适应双向热位移,同时确保支架高度满足管道热位移轨迹的净空要求。

4.2 补偿装置配置与热力-结构协同优化

补偿装置配置应遵循热力学与结构力学协同原则,波纹管补偿器适用于位移量小但需刚度匹配的区域,套筒补偿器则适合大位移需求且允许自由滑动的场景。两者的组合需依据温度区段划分确定,波纹管补偿器宜布置于固定支座附近以吸收局部热应力,套筒补偿器则应设于相邻温度区段交界处以协调整体位

移。补偿器安装位置需避开支吊架、阀门等应力集中节点,其轴线方向应与管道热膨胀方向完全一致。补偿器刚度参数需通过非线性有限元模型与管道系统刚度进行匹配计算,确保热位移能量在补偿装置与管道结构间合理分配。

4.3 结构参数优化与材料性能匹配

结构参数优化需依托多目标优化算法,支撑间距与补偿器间距的比值应根据管道热膨胀速率与环境温差动态调整。支撑结构刚度需分级配置,固定支座采用高刚度设计以约束管道端部位移,滑动支座则需具备低摩擦系数与位移导向功能。材料选择应区分关键节点与普通区段,关键节点如补偿器连接处可采用低膨胀系数的因瓦合金钢,普通管段则选用高延性碳钢以降低制造成本。

基于BIM技术的协同设计平台需整合地质勘测、热应力模拟与结构力学分析数据,通过参数化建模实现支撑布局、补偿器位置与材料选型的多目标优化。设计验证需结合非线性时程分析与物理缩尺试验,确保优化方案在极端温度循环与荷载组合下的长期稳定性。

5 结语

综上所述,石油输送管道热胀应力的管理与控制离不开科学合理的管廊结构设计。从提供必要的约束与支撑到吸收和分散热胀应力,再到引导管道热胀冷缩方向,每一个环节都彰显着设计者的智慧与匠心。无论是自然补偿结构还是人工补偿结构的应用,均需紧密结合实际工况进行灵活调整。而面对复杂多变的地形条件、广泛的温差范围、多样化的管道材质与规格以及严格的约束条件时,只有秉持严谨态度,才能制定出切实可行的设计方案,确保石油输送管道系统的长期稳定运行。

参考文献:

- [1] 王雅倩.石油与天然气管道输送中BOG处理技术的应用与研究[J].辽宁化工,2025,54(02):328-330.
- [2] 燕传亮,田佳佳,徐占杰.石油化工输送管道的焊缝缺陷在线修补技术应用[J].化工管理,2025(01):123-126.
- [3] 涓琛.基于小波变换的石油输送管道泄漏定位方法[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(23):108-110.
- [4] 李春漫.石油管道输送用高效减阻剂超高分子量聚1-辛烯的合成及其结构性能[J].石油化工,2023,52(02):209-215.
- [5] 叶洋帆,张文辉,闻志,等.基于ANSYS的输油栈桥供热管道热-结构耦合分析[J].南京晓庄学院学报,2021,37(06):5-8.