

直埋热力管道固定支墩缺失对管道应力分布的影响研究

路彦振

能源热电集团第二热力有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i8.8352

[摘要] 本文围绕直埋热力管道固定支墩缺失对管道应力分布的影响展开研究。通过阐述直埋热力管道及固定支墩相关理论，分析固定支墩现状、缺失原因及潜在危害，运用理论分析、数值模拟与现场实测相结合的方法，探究固定支墩缺失后管道应力分布变化规律。研究发现，固定支墩缺失会导致管道轴向应力显著增加、应力集中现象加剧，威胁管道安全运行。基于研究结果，建立安全评估指标体系，提出修复策略与预防建议，为直埋热力管道安全运行提供理论依据与实践指导。

[关键词] 直埋热力管道；固定支墩；应力分布；安全评估；修复策略

Study on the influence of the absence of fixed piers in direct buried thermal pipelines on the stress distribution of pipelines

Lu Yanzhen

Energy Thermal Power Group No. 2 Thermal Power Co., Ltd.

[Abstract] This paper focuses on the effect of the absence of fixed piers in direct buried thermal pipelines on the stress distribution of pipelines. By expounding the relevant theories of directly buried thermal pipelines and fixed piers, the current situation, causes and potential hazards of fixed piers are analyzed, and the stress distribution of pipelines after the absence of fixed piers is explored by using theoretical analysis, numerical simulation and field measurement. It is found that the lack of fixed piers will lead to a significant increase in the axial stress of the pipeline and the aggravation of stress concentration, which threatens the safe operation of the pipeline. Based on the research results, a safety assessment index system is established, and repair strategies and prevention suggestions are put forward to provide theoretical basis and practical guidance for the safe operation of directly buried thermal pipelines.

[Key words] direct buried thermal pipelines; fixed piers; stress distribution; security assessment; Fix Strategy

引言

随着城市化进程的加速，集中供热系统在城市基础设施建设中占据重要地位。直埋热力管道以其占地少、热损失小、美观等优点，成为城市供热的主要方式。固定支墩作为直埋热力管道系统的关键部件，承担着限制管道位移、承受管道热膨胀产生的推力等重要功能，对保障管道稳定运行至关重要。然而，在实际工程中，由于设计不合理、施工质量缺陷、运行维护不当等原因，固定支墩缺失现象时有发生。固定支墩缺失会改变管道的受力状态，导致应力分布异常，进而引发管道变形、泄漏甚至破裂等严重事故，造成巨大的经济损失和安全隐患。因此，开展直埋热力管道固定支墩缺失对管道应力分布影响的研究，对于保障城市供热安全、提高供热系统可靠性具有重要的现实意义。

1. 直埋热力管道及固定支墩概述

1.1 直埋热力管道工作原理与结构特点

直埋热力管道通过输送高温热水或蒸汽，将热源产生的热量传递到用户端。在热量传输过程中，管道内部的热媒与外界环境存在较大的温差，导致管道产生热膨胀。同时，管道还承受着自身重力、土壤压力以及热媒压力等多种载荷作用。直埋热力管道主要由管材、保温层和防腐层组成（表1）。管材通常采用无缝钢管或螺旋焊接钢管，要求具有良好的强度和耐高温性能，以承受热媒压力和温度变化；保温层多采用聚氨酯泡沫塑料等高效保温材料，能够有效减少热量散失，降低能源消耗；防腐层一般采用环氧煤沥青、聚乙烯夹克等防腐材料，可防止管材受到土壤中化学物质的腐蚀，延长管道使用寿命。

表1 直埋热力管道结构组成及功能

结构组成	材料类型	主要功能
管材	无缝钢管、螺旋焊接钢管	承受热媒压力、温度变化及外部载荷
保温层	聚氨酯泡沫塑料	减少热量散失，降低能源消耗
防腐层	环氧煤沥青、聚乙烯夹克	防止管材受土壤腐蚀

1.2 固定支墩的功能与设计要

固定支墩在直埋热力管道系统中起到限制管道位移、固定管道位置的作用,同时承受管道因热膨胀产生的轴向推力、弯矩以及管道内压力产生的环向力等。其设计需满足强度、稳定性和耐久性要求。在强度设计方面,需根据管道的管径、压力、温度以及热膨胀量等参数,计算固定支墩所承受的最大推力,确保固定支墩的抗压、抗剪强度能够满足要求^[1]。稳定性设计时,要考虑土壤的承载能力和摩擦力,防止固定支墩发生倾覆或滑移。耐久性设计则需选用合适的建筑材料,采取有效的防腐、防水措施,保证固定支墩在长期运行过程中性能稳定。不同工况下,如管道转弯处、管径变化处、阀门连接处等,固定支墩的设计要点也有所不同,需进行针对性设计^[2]。

1.3 管道应力分析理论

管道应力分析基于材料力学和弹性力学理论。在材料力学中,应力应变关系遵循胡克定律,即 $\sigma = E\varepsilon$

其中 σ 为应力, E 为材料弹性模量, ε 为应变。直埋热力管道的应力主要分为轴向应力 σ_x 、环向应力 σ_θ 和弯曲应力 σ_w 。轴向应力主要由管道热膨胀受约束、内压作用产生;环向应力由管道内压力引起,可根据薄壁圆筒理论计算,公式为:

$$\sigma_\theta = \frac{PD}{2t}$$

其中, P 为管道内压力, D 为管道外径, t 为管道壁厚;弯曲应力则在管道发生弯曲变形时产生。通过对这些应力的分析计算,可评估管道的受力状态,为管道设计和安全运行提供依据。

2. 直埋热力管道固定支墩现状及缺失原因分析

2.1 直埋热力管道固定支墩应用现状

通过对多个城市供热管网的调研发现,直埋热力管道固定支墩在应用中存在诸多问题。固定支墩类型多样,包括混凝土重力式支墩、钢结构支墩等,但部分支墩选型未充分考虑实际工况需求。在固定支墩数量和分布上,存在布置不合理的情况,部分区域支墩间距过大,无法有效限制管道位移;不同规模供热系统中,固定支墩的设计和施工质量参差不齐,一些小型供热项目中,固定支墩存在尺寸不足、配筋不合理等问题^[3]。

例如,在北方的哈尔滨市 2015 年建设的“道里 - 南岗供热联络线工程”中,由于设计阶段对松花江漫滩区域的地质条件判断失误,该路段采用的 C25 混凝土重力式固定支墩在运行 5 年后,因无法承受 DN800 管道热膨胀产生的 280kN 推力,出现了支墩倾斜、开裂现象,导致周边 3 公里范围内的管道产生了明显的轴向位移,影响了群力新区约 5000 户居民的正常供暖。另外,在南方的长沙市 2017 年新建的“湘江新区供热管网项目”中,部分施工单位为节省成本,在岳麓区路段固定支墩施工时,将设计要求的 HRB400 钢筋替换为 HRB335 钢筋,并私自降低混凝土标号至 C20,使得固定支墩强度不达标。运行 3 年后,多处支墩出现破损,引发管道应力分布异常,最终导致梅溪湖片区一处管道接口处发生热媒泄漏事故,直接经济损失达 120 万元。

2.2 固定支墩缺失的原因分析

设计环节,部分设计人员对固定支墩的重要性认识不足,设计计算不准确,未充分考虑管道热膨胀产生的推力,导致固定支墩设计强度不够,在运行过程中逐渐损坏缺失。施工阶段,施工单位为降低成本,偷工减料,如减少混凝土标号、降低配筋率等,使得固定支墩的实际承载能力无法满足设计要求;同时,施工过程中对固定支墩的定位不准确,也会影响其正常功能发挥。运行维护方面,长期的热胀冷缩、土壤沉降以及地下水侵蚀等因素,会导致固定支墩出现裂缝、松动等损坏现象,若维护不及时,最终会造成固定支墩缺失。

2.3 固定支墩缺失对管道运行的潜在危害

固定支墩缺失后,管道失去约束,热膨胀产生的位移无法得到有效限制,会导致管道产生较大的轴向位移和弯曲变形。管道连接处的密封件因变形过大而失效,引发热媒泄漏。同时,管道应力分布发生改变,原本由固定支墩承担的应力会重新分配到管道其他部位,导致局部应力集中。当局部应力超过管道材料的许用应力时,会使管道产生塑性变形甚至破裂,严重威胁供热系统的安全运行^[4]。

3. 固定支墩缺失对直埋热力管道应力分布的影响分析

3.1 理论分析

基于管道应力分析理论,建立固定支墩缺失情况下的管道力学模型。假设管道为两端固定的梁结构,在固定支墩缺失后,管道的约束条件发生改变,其受力状态也相应变化。以轴向应力为例,根据热膨胀公式:

$$\Delta L = \alpha L \Delta T$$

其中, ΔL 为热膨胀量, α 为材料线膨胀系数, L 为管道长度, ΔT 为温度变化量,由于固定支墩缺失,管道热膨胀产生的伸长量无法得到限制,会在管道内产生较大的轴向应力 σ_x 。通过力学推导可得,轴向应力:

$$\sigma_x = E_\alpha \Delta T$$

该公式表明,固定支墩缺失后,管道轴向应力与材料弹性模量、线膨胀系数和温度变化量成正比。同时,分析环向应力和弯曲应力在固定支墩缺失后的变化规律,研究管径、壁厚、管材弹性模量等管道参数对各应力分布的影响。

3.2 数值模拟

利用 ANSYS 有限元分析软件,建立直埋热力管道及固定支墩的三维有限元模型。模型中,管道采用实体单元模拟,固定支墩采用刚体单元模拟,管道与固定支墩之间通过接触单元连接。设置正常工况(固定支墩完整)和固定支墩缺失工况,模拟管道在热膨胀作用下的应力分布情况。在正常工况下,管道应力分布较为均匀,固定支墩有效承担了管道热膨胀产生的推力;而在固定支墩缺失工况下,管道应力分布发生明显变化,缺失支墩附近的管道轴向应力显著增加,出现应力集中现象(图 1)。通过数值模拟结果,直观展示固定支墩缺失对管道应力分布的影响,分析应力集中区域及应力变化趋势,为进一步研究提供数据支持。

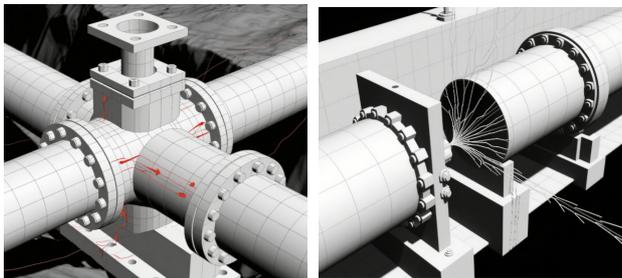


图1 固定支墩缺失前后直埋热力管道轴向应力分布对比

3.3 现场实测

选取哈尔滨某段存在固定支墩缺失问题的直埋热力管道作为研究对象,进行现场应力测试。该段管道管径为 DN500,设计供热温度为 80℃ - 60℃,运行压力 0.8MPa,在运行过程中因固定支墩损坏缺失,出现了管道局部变形情况。在管道表面粘贴应力传感器和应变片,测量管道在实际运行工况下的应力数据。同时,记录管道的运行温度、压力等参数。将现场实测数据与理论分析和数值模拟结果进行对比,验证理论模型和数值模拟的准确性。对比发现,实测的管道轴向应力值与理论计算和数值模拟结果基本吻合,证明了研究方法的可靠性。此外,通过现场实测还发现,土壤条件、管道埋深等实际工程因素也会对管道应力分布产生一定影响,需在后续研究中进一步考虑。

4. 基于应力分布的直埋热力管道安全评估与修复策略

4.1 安全评估指标与方法

构建由应力强度、应力集中系数和管道变形量构成的安全评估指标体系。应力强度以管道材料许用应力为基准,要求最大应力:

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma]$$

其中, σ_{\max} 为管道最大应力, $[\sigma]$ 为材料许用应力。应力集中系数用于量化管道局部应力集中程度,其数值越大,局部结构越易发生破坏,是判断薄弱环节的关键依据。管道变形量通过激光测距、应变监测等技术,对管道位移与弯曲程度进行测量,过大的变形会改变管道受力状态,影响正常运行。

评估方法采用基于规范的安全系数法与可靠性评估模型相结合的方式。安全系数法依据行业标准(如 CJJ/T81 相关规定),通过设定安全系数对管道应力进行校核;可靠性评估模型则综合考虑材料性能、荷载波动、环境因素等不确定性,通过概率分析量化管道失效风险。通过加权评分机制,对管道安全状态进行分级,划分“安全”“预警”“危险”三个等级,为后续决策提供依据。

4.2 修复策略与措施

针对固定支墩缺失及应力异常问题,制定系统性修复策略。在固定支墩修复方面,依据管道管径、热膨胀量及土壤条件,重新设计并安装适配的固定支墩。采用混凝土重力式或钢结构支墩时,精确计算尺寸与配筋,确保其抗推、抗倾覆能力满足要求^[5]。

对于应力集中导致的管道损伤,采用补强焊接工艺修复。选用与母材匹配的焊接材料,通过局部加固提升管道承载能

力;对于损伤严重区域,可粘贴补强板并辅以螺栓连接,增强结构强度。同时,优化管道布局,在热膨胀变形较大处增设补偿器,如波形补偿器或套筒补偿器,有效吸收管道热伸长量,降低轴向应力。

运行维护环节,建立“日巡检、月检测、季评估”制度。巡检重点关注管道泄漏、支墩裂缝等表现异常;检测通过超声波探伤、应力复测等技术,排查内部损伤;评估则结合历史数据与检测结果,预测潜在风险。针对发现的问题,及时采取修复措施,保障管道安全运行。

4.3 预防固定支墩缺失的建议

从设计、施工、运行三阶段构建预防体系。设计阶段引入 BIM 技术,建立三维模型精准计算固定支墩受力,结合热应力分析结果优化支墩布局与选型。严格执行设计审查制度,重点核查热膨胀推力计算、支墩稳定性验算等内容,确保设计方案科学合理。

施工过程强化质量监督,建立质量追溯机制。对支墩混凝土浇筑、预埋件安装等关键工序进行旁站监理,实时记录施工参数;采用物联网设备监测混凝土强度、钢筋间距等指标,确保施工质量符合设计要求。

运行维护阶段,部署智能监测系统,利用光纤传感、无人机巡检等技术,对固定支墩与管道进行实时监测。通过数据分析平台,建立支墩健康档案,对裂缝扩展、位移变化等异常情况进行预警。同时,制定定期维护计划,对支墩表面防腐层、基础稳定性等进行周期性检查,及时处理潜在隐患,避免固定支墩缺失问题发生。

结束语:

本研究通过对直埋热力管道固定支墩缺失对管道应力分布影响的深入研究,揭示了固定支墩缺失与管道应力分布变化之间的内在联系。研究表明,固定支墩缺失会显著改变管道的应力分布,导致应力集中和管道安全隐患。通过理论分析、数值模拟和现场实测相结合的方法,建立了管道应力分布计算模型,为管道应力分析提供了科学依据。基于研究结果,提出了一套完整的安全评估指标体系和修复预防策略,对保障直埋热力管道的安全运行具有重要的指导意义。未来,随着城市供热系统的不断发展,还需进一步研究复杂工况下固定支墩缺失对管道应力分布的影响,完善管道安全评估与修复技术,推动供热行业的安全、高效发展。

参考文献

- [1]朱晓健.城市直埋热力管道泄漏的数值模拟研究[D].华北电力大学(北京),2023.
- [2]高荣俊.承插式球墨铸铁热力管道力学性能研究[D].燕山大学,2023.
- [3]刘松涛.直埋供热管及土体系统的热力耦合分析[D].黑龙江大学,2023.
- [4]宋翔宇.直埋球墨铸铁热力管道热动态传热特性及保温优化[D].燕山大学,2021.
- [5]朱闯.直埋热力管道预制装配式固定支墩设计与计算探讨[J].区域供热,2021,(01): 154-158.