

长输油气管道应力分析仿真技术研究

王佳旭 付现燕

中国石油工程建设有限公司华北分公司, 河北 任丘 062500

[摘要]长输油气管道是我国能源战略的重要组成部分, 其结构强度和安全性关系重大。文中针对长输油气管道的应力分析进行了深入研究。采用了有限元方法和仿真技术, 以分析管道在各种工况下的应力状况, 评估其结构强度和安全性。研究发现, 管道的应力状态受到多种因素的影响, 如管道材料、壁厚、直径、长度、内外压力、温度和地质条件等。通过已建立的有限元模型, 模拟实验发现在综合这些因素后, 管道的最大应力集中在贯穿管道的纵向焊缝附近。同时, 模型显示在复杂地理环境(如断层、山地)下, 管道应力的增加明显, 且容易产生应力集中现象。为此, 提出了采取适当的工程措施, 如改变管道路径, 增加支持结构, 使用更优质的材料, 以降低管道运行的风险。此外, 通过比较不同类型油气管道的应力分析, 若综合考量工况、经济性、安全性, 提出了更适合我国长输油气管道建设的优化措施。该项应力分析仿真技术的研究, 对于确保长输油气管道的安全运行, 提高我国能源运输效率具有重要的实践意义。

[关键词]长输油气管道; 应力分析; 有限元方法; 仿真技术; 安全性能

DOI: 10.33142/ec.v8i3.15679

中图分类号: TE832

文献标识码: A

Research on Stress Analysis and Simulation Technology for Long-distance Oil and Gas Pipelines

WANG Jiaxu, FU Xianyan

North China Branch of China Petroleum Engineering & Construction Corp, Renqiu, Hebei, 062500, China

Abstract: Long-distance oil and gas pipelines are an important component of Chinese energy strategy, and their structural strength and safety are closely related. The article conducted in-depth research on stress analysis of long-distance oil and gas pipelines. Finite element method and simulation technology were used to analyze the stress conditions of pipelines under various working conditions, evaluate their structural strength and safety performance. Research has found that the stress state of pipelines is influenced by various factors, such as pipeline material, wall thickness, diameter, length, internal and external pressure, temperature, and geological conditions. Through the established finite element model, simulation experiments have found that after considering these factors, the maximum stress of the pipeline is concentrated near the longitudinal weld seam that runs through the pipeline. Meanwhile, the model shows that in complex geographical environments such as faults and mountains, there is a significant increase in pipeline stress, and stress concentration is prone to occur. Therefore, appropriate engineering measures have been proposed, such as changing the pipeline path, increasing support structures, and using higher quality materials, to reduce the risk of pipeline operation. In addition, by comparing the stress analysis of different types of oil and gas pipelines, and considering the working conditions, economy, and safety comprehensively, optimization measures more suitable for the construction of long-distance oil and gas pipelines in China have been proposed. The research on stress analysis simulation technology has important practical significance for ensuring the safe operation of long-distance oil and gas pipelines and improving energy transportation efficiency in China.

Keywords: long-distance oil and gas pipelines; stress analysis; finite element method; simulation technology; safety performance

引言

长输油气管道, 作为能源运输的重要载体, 其结构强度和安全性关系到我们的能源供应安全, 甚至影响到国民经济的安全运行。从这个角度说, 研究长输油气管道的应力状态, 进行有限元仿真分析, 以确保其结构强度和安全性, 是我们至关重要的任务。然而, 作为一个复杂工程系统, 长输油气管道的应力状态受到许多因素的影响, 如管道材料、管道壁厚、管道直径和长度、管道的内外压力、温度以及周围地质结构等, 这些因素互相影响, 共同决定了管道的应力状态。而一旦管道的应力超过了一定的限值, 可能会产生应力集中现象, 使得管道在某些区域的应力剧

增, 从而加大了管道发生破裂的风险。考虑到这些复杂的情况, 本文深入探讨长输油气管道的应力分析方法, 运用有限元仿真技术, 分析在各种工况下管道的应力状态, 评估其结构强度和安全性, 以期寻找一种有效的方法, 降低长输油气管道应力的风险。

1 长输油气管道的重要性和安全需求

1.1 长输油气管道在我国能源战略中的作用

长输油气管道在我国能源战略中扮演着至关重要的角色^[1]。作为连接能源资源地与消费市场的关键通道, 长输油气管道有效提高了资源输送的效率与安全性, 降低了运输成本, 保障了能源供应的稳定性。面对日益增长的能

源需求,长输油气管道提供了强有力的支持,使得大规模能源的跨区域调配成为可能。与此长输油气管道作为一种环保、高效的运输方式,能够减少传统运输方式带来的环境影响,符合我国可持续发展的战略要求。尤其在当前全球能源格局变动的背景下,长输油气管道的建设与维护不仅直接影响我国能源安全,还对经济发展和政治稳定具有深远影响。确保长输油气管道的结构强度和安全性,对维护国家能源命脉、实现长远发展目标尤为重要^[2]。

1.2 长输油气管道导致安全问题的主要因素

长输油气管道作为能源运输的重要基础设施,其运行的安全性受到多种因素的显著影响。地质条件复杂性是导致管道安全问题的主要原因之一,例如地震、滑坡和地基不均匀沉降等地质灾害可能引发管道局部变形或断裂。管道内外压力的变化同样是关键因素,长期的高压作用可能诱发管道结构的疲劳破坏,而外部压力变化则可能导致应力集中现象加剧。管道材料和焊接质量也对安全性构成直接威胁,不均匀焊接或材料缺陷将导致管道焊缝处的应力集中和强度下降。运行环境中的温度波动对管道热胀冷缩的影响,以及输送介质的腐蚀性,也可能对管道强度与使用寿命产生不利影响。这些因素的协同作用使长输油气管道的安全性面临严峻挑战。

1.3 长输油气管道结构强度的重要性

长输油气管道结构强度直接关系到其运行的安全性和稳定性。作为承载高压介质的核心设施,管道需在复杂工况和环境中长期运行,其结构强度是抵御内外压力、温度变化及地质应力等多种因素综合作用的关键指标。结构强度不足可能导致管道破裂或泄漏,造成能源损失与环境污染,必须通过科学设计、先进材料应用和精准工程计算,确保管道具备足够强度以满足安全需求并延长使用寿命。

2 对长输油气管道应力的深入理解

2.1 应力分析对于评估管道强度的重要性

应力分析是评估长输油气管道结构强度与安全性能的核心环节,对于确保其稳定运行具有不可或缺的作用^[3]。长输油气管道在运行过程中会受到多种复杂工况的影响,其中包括高内压、温差变化、地质不均匀及外部荷载等,这些因素均会在管道中引发应力分布不均的现象。通过精确的应力分析,可以全面了解管道各部分的应力分布情况,识别潜在的薄弱部位及可能导致失效的危险区域。

科学的应力分析不仅为材料选择和工艺优化提供了依据,也可用于验证和改进现有设计方案,从而降低失效风险。应力数据的准确获取能够帮助工程师预测管道在长期服役中的受力状态,对防止疲劳损伤与断裂具有指导意义。应力分析的深入应用能够显著提升管道的整体可靠性与使用寿命,为油气的安全输送提供重要保障。

2.2 对应力状况影响较大的主要因素

应力状况的主要影响因素涉及多个方面。管道材料是

应力分析的关键,其物理性能直接影响管道的承载能力和应力分布。壁厚和直径同样对应力状况起着重要作用,厚壁管道一般承受的内外应力较小。管道长度则关系到弯曲和热胀冷缩等因素对应力的影响。内外压力是直接作用于管道的主要外力来源,往往是应力集中产生的原因。温度变化导致热应力,尤其在极端气候条件下显著影响管道安全。地质条件影响地基的稳定性,复杂地形如断层和山地可能导致应力分布不均,增加破坏风险。

2.3 在不同工况下,管道应力的问题

在不同工况下,长输油气管道的应力分布表现出显著差异。管道的内外压力是影响其应力的关键因素,内压过高会导致管壁拉伸应力增加,而外部压力变化可能引起压缩应力。温度梯度变化对应力分布同样具有显著影响,温差较大时容易导致热应力集中。地质条件的差异,如断层、滑坡地带等,会使管道产生不均匀载荷,从而形成复杂的应力集中区域。管道的几何结构与尺寸,如壁厚不足或直径较大,可能加剧局部应力集中现象^[4]。复杂工况下应力超出材料的承受极限,将增加断裂或失效的风险,威胁管道安全性。

3 有限元方法和仿真技术在长输油气管道应力分析中的应用

3.1 有限元方法在长输油气管道应力分析中的价值

有限元方法在长输油气管道应力分析中具有重要价值,其核心在于能够有效模拟复杂工况下管道的应力和变形行为。通过将管道简化为有限数量的单元,并通过节点建立数学模型,该方法能够精确描述管道在多种力学条件下的应力分布。面对长输油气管道复杂的运行环境,有限元方法可以综合考虑材料特性、几何形状以及外部荷载等因素,为应力分析提供科学依据。特别是在管道的薄弱部位,如焊缝和弯头,有限元方法通过局部细化网格,能够捕捉到高应力集中区域的细节。该方法还便于对不同工况和设计参数进行快速调整与验证,从而为管道工程的设计优化、材料选择和运营管理提供支持。有限元方法不仅提高了管道应力分析的精度与效率,还为确保长输油气管道的安全性与可靠性奠定了技术基础。

3.2 将仿真技术应用于长输油气管道的应力分析

在长输油气管道的应力分析中,仿真技术被广泛应用于模拟复杂工况及预测潜在安全问题。仿真技术通过建立详细的三维模型,将管道的几何结构、材料特性以及运行环境等关键因素纳入分析范围。结合有限元方法,仿真技术能够动态展示管道在内外荷载、温度变化和地质应力等多重作用下的应力分布特征。通过调整输入参数,仿真技术可用于评估不同条件下管道的变形量、应力集中以及可能的失效模式,进而对关键区域进行重点分析。尤其在复杂地理环境中,如跨越断层或山地时,该技术能够模拟地质活动对管道应力的影响,为提出优化设计方案提供科学

依据。这种方式显著提高了管道安全评估的准确性和效率，降低了试验过程中的实际风险和成本。

3.3 通过有限元方法和仿真技术制定出的应对策略

通过有限元方法和仿真技术，长输油气管道的应对策略包含优化结构设计和选材策略^[5]。结合实验数据，调整管道路径设计以减少应力集中，增强关键部位的支撑结构，选择具有更高抗压强度和耐腐蚀性能的材料，以提高管道在复杂地理条件下的稳定性和安全性。

4 通过有限元方法和仿真技术进行的实验研究

4.1 实验设计及过程

在实验设计过程中，采用了有限元方法和仿真技术对长输油气管道进行应力分析。考虑到各种工况对管道应力状态的影响，实验中综合了管道不同材料、壁厚、直径、长度以及内外压力等因素。在模拟实验中还纳入了温度变化和地质条件等动态环境因素。模型的几何参数基于典型长输油气管道的实际尺寸，并对关键区域，如纵向焊缝，进行了细化网格划分以获取精确结果。实验过程使用专业的仿真软件，构建管道整体的有限元模型，对管道在静态和动态载荷条件下的应力分布进行详细分析。通过数据分析，识别出应力集中区域，为后续的优化设计和风险评估提供基础。

4.2 实验结果以及应用

实验结果显示，通过应用有限元方法和仿真技术，能够有效地评估长输油气管道在实际工况下的应力分布和结构强度。分析表明，在高压及变温环境下，管道的应力集中主要发生在纵向焊缝附近，这是由于材料接缝处存在的不均匀性和应力转移导致的。复杂地理条件下，如位于山地或断层区域，管道会经历额外的变形和应力集中现象。该研究还揭示了通过调整管道路径、采用新型支撑结构和优质材料，可以显著降低管道局部应力水平，提高整体的安全性与稳定性。这些发现为长输油气管道设计和建设提供了科学依据，有助于提升对潜在风险的防范能力，确保能源运输系统的可靠运营。

4.3 采用此课题研究的长输油气管道的建设优化建议

基于研究中建立的有限元模型和仿真技术分析结果，可提出针对长输油气管道建设的优化建议。在路径设计上，应优先避开复杂地质环境，如断层、山地等，以减少应力集中现象的发生。在材料选择方面，可选用高强度、耐腐蚀性能优异的管材，以提高管道的结构强度和抗变形能力。针对容易出现最大应力集中的焊缝区域，可优化焊接工艺，提升焊缝质量，降低应力集中的风险。在复杂地形区域，可增加管道支持结构，采用柔性设计以缓解地质变形对管道的影响。通过合理的建设和设计优化，可有效提升管道运行的安全性和可靠性。

5 对长输油气管道建设改进的建议

5.1 优化长输油气管道路径的解决方案

在长输油气管道建设中，路径优化是降低风险和保证

结构安全的关键环节。选择合理的管道路径可以有效减少环境和自然地质带来的潜在威胁。应进行详尽的地形和地质勘测，识别如断层、滑坡等不稳定区域，将这些因素纳入路径设计的考量范围。基于地勘数据，通过仿真技术评估不同路径方案在运行过程中的应力特性，以选出应力分布较均匀且应力集中现象最小的路径。在路径设计过程中，还需综合考虑经济性，包括施工成本、维护便利性及环境影响等因素，实现路径的最优化。通过采用多学科协同的方法，结合地理信息系统（GIS）技术，能够提供更全面的路径优化方案，从而提升管道整体运行的稳定性和安全性。上述路径优化措施不仅有助于管道建设的安全高效，还能显著降低长期运营中的经济和环境风险。

5.2 提高质量以及降低风险的建议

为了提高长输油气管道的质量并降低风险，需要采取一系列关键措施。选择高质量的材料是提升管道强度的基础，尤为重要是使用抗腐蚀性能优良的钢材。精细化的施工工艺能有效减少焊接缺陷，降低应力集中带来的安全隐患。在检测方面，引入先进的监控系统，实时监测管道运行状态，能够及时发现潜在问题并进行处理。定期的维护与检修计划也不可或缺，以确保管道在使用周期内保持良好的运行状态。通过强化培训，提升施工与运维人员的专业水平，将进一步保障管道的安全性与可靠性。

5.3 针对复杂地理环境下的长输油气管道进行优化的措施

在复杂地理环境下，长输油气管道面临更大的应力集中风险，应通过以下措施进行优化。针对高山、断层等地质条件复杂区域，可适当调整管道路径，避开高应力集中区域，减少地质作用对管道的破坏。加强管道材料的选择，采用高强度、抗腐蚀性能优良的管材，以提升结构可靠性。在地势变化较大的区域增加支撑结构，如设置柔性支架或缓冲装置，以缓解地表变形带来的额外应力。优化施工技术，通过精确的焊接工艺和非破坏性检测手段，确保管道连接部位的质量。加强运行监测与维护，布设应力监测系统，实现对运营状态的实时掌控，从而降低风险。这些措施对于确保复杂地理环境下长输油气管道的安全运行具有重要意义。

6 结束语

本次研究着重探讨了长输油气管道应力分析的仿真技术，并对管道在各种工况下的应力状态进行了深入研究。结果显示，管道应力状况受到多种因素（如管道材料、壁厚、直径、长度、内外压力、温度和地质条件等）的综合影响，而且这些应力集中在管道的纵向焊缝附近，特别是在复杂地理环境下会更加明显。对于这种情况，本文提出了采取一系列应对措施，如改变管道路径、增加支持结构和使用优质材料等，以降低管道运行中的风险。另外，研究中还比较了不同类型油气管道的应力分析，基于工

况、经济性、安全性等综合考量,给出了对国内长输油气管道建设的优化措施。此次研究工作不仅增加了长输油气管道应力分析仿真技术的理论储备,同时也为我国长输油气管道的安全运行和效率提升提供了实践指导。尽管本研究取得了明显的成效,但关于如何处理复杂地理环境下的应力分析仍然留有诸多问题,需要进一步探索和研究。我们希望通过后续的研究,能够进一步优化长输油气管道应力分析的仿真技术,为我国能源运输提供更强大的技术支持。

[参考文献]

- [1]张威.长输油气管道检测技术研究[J].科学与信息化,2021(3):80-80.
- [2]王迪.长输油气管道试压技术分析[J].好日子,2020(20):19.
- [3]牛爱军,郭克星,董超,高杰.长输油气管道检测技术研究现状[J].石油工程建设,2023,49(4):1-8.
- [4]申成华,李洋,樊林华.长输油气管道运行安全性分析[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(9):44-45.
- [5]寇健.长输油气管道安全管理探讨[J].现代职业安全,2021(5):94-96.

作者简介:王佳旭(1996.5—),男,辽宁石油化工大学,油气储运工程。