

张鹏, 罗梓洋, 许田, 等. 考虑地震入射方向影响的埋地天然气管道损伤机理分析[J]. 安全与环境学报, 2026, 26(6): 2304–2314.

ZHANG P, LUO Z Y, XU T, et al. Analysis of damage mechanisms in buried natural gas pipelines due to seismic incident direction [J]. Journal of Safety and Environment, 2026, 26(6): 2304–2314.

考虑地震入射方向影响的埋地天然气管道损伤机理分析*

张 鹏¹, 罗梓洋², 许 田³, 刘 为³, 郭 攀¹

(1 西南石油大学土木工程与测绘学院, 成都 610500; 2 西南石油大学石油与天然气工程学院, 成都 610500;

3 西南石油大学机电工程学院, 成都 610500)

摘 要:地震灾害严重威胁长距离天然气输送管道的安全运营, 深入研究地震作用下管道的损伤机理, 对于科学指导抗震设计与维护管理具有重要意义。通过建立管道地震响应的有限元模型, 系统分析了地震入射方向、内压荷载及腐蚀缺陷对管道地震损伤行为的影响, 并揭示了相应的破坏机制。结果表明: 横向地震作用对管道最为不利, 更易引发结构破坏; 弯曲应力是导致管道地震损伤的主要因素, 瞬时地震冲击作用下的失效模式以弯曲破坏为主; 内压荷载会削弱管道耗散地震能量的能力, 从而加剧地震损伤。此外, 仅在地震荷载作用下, 腐蚀缺陷对峰值应力的影响较为有限, 但在内压与地震荷载共同作用下, 腐蚀缺陷导致的材料损失会显著降低管道的抗震性能, 且轴向腐蚀间的相互作用效应尤为突出。

关键词:安全工程; 天然气管道; 地震; 入射方向; 运行压力; 腐蚀簇

中图分类号: X937; TE832

文献标志码: A

文章编号: 1009-6094(2026)06-2304-11

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2025.1119

0 引 言

天然气具有稳定、清洁的特点, 是实现碳达峰、碳中和目标的战略性过渡资源, 在日常生活和工业生产中发挥着至关重要的作用^[1-2]。保障天然气的稳定供应关系到经济发展和社会稳定, 是维护国家能源安全的关键环节。埋地管道作为运输天然气资源的主要媒介, 具有安全、高效、经济的特点。据调查, 截至2023年, 全国长输天然气管道总里程已经超过了12.4万km^[3]。然而天然气管道的长距离运输不可避免地穿越地震易发区, 面临地震灾害的威胁。地震导致的管道破坏会影响能源供应, 严重的情况还可能造成重大的人员伤亡与经济损失^[4-5]。因此, 天然气管道的抗震防护及维护管理对于管道的安全运营至关重要^[6]。

以往有大量文献聚焦于地震事件下结构工程的安全评价与性能评估, 为结构抗震防护措施和决策提供了基础, 如地震韧性评估^[7-9]、地震风险评价^[10-11]等。然而, 随着完整性管理中对于决策精度要求的提高, 地震事件的安全评价和评估中所需的管道损伤数据质量也受到广泛关注。精确的管道地震损伤数据能

够提高评估结果的精度, 从而避免不必要的资源浪费和额外的风险增加。由于简便、高效且适应性较高的特点, 目前已经有大量的文献使用有限元方法探究管道地震损伤情况并获得地震损伤变化的数据和规律, 其研究结果支撑了管道遭受地震情况下的安全评价及性能评估。2024年, 代建波等^[12]开创性地研发了可以实现土体层状剪切效应及非均匀场试验的双向层状剪切型连续体模型土箱, 通过试验及有限元模拟分析了不同强度地震激励下非均匀场地中埋地油气管道的应变和加速度响应, 以及场地管周土体的加速度和位移响应规律, 为理解管土相互作用提供了关键试验与数据支撑。翁光远等^[13]通过对管道-流体耦合系统流体动压力开展有限元模拟, 探讨了地震作用下管道内原油动压力沿管道长度方向的分布特点及随液面高度、管径的变化趋势。张亮超等^[14]建立了架空管道有限元模型, 研究了架空管道地震破坏特征, 分析了架空管道几种典型破坏模式。这些研究结果为管道的地震安全评估提供了理论和数据支持。然而, 地震事件通常具有较高的随机性, 特别是震源位置具有较高的不确定性。不同于其他结构, 大跨度和高长细比的特点使

* 收稿日期: 2025-06-30

作者简介: 张鹏, 教授, 博士(后), 从事完整性管理及结构可靠性技术研究, zp_swpi@sina.com; 许田(通信作者), 博士研究生, 从事能源管道完整性管理及结构可靠性技术研究, xutian_swpu@sina.com。

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(22&ZD105)