

爆炸荷载下油气管道动态响应的研究进展

朱恩泽, 章文姣

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2026年5月26日; 录用日期: 2026年6月18日; 发布日期: 2026年6月30日

摘要

油气管道作为国家能源运输的“大动脉”，是保障能源安全与经济社会发展的关键基础设施。随着我国油气管道网络快速扩张与工程爆破活动日益频繁，邻近爆炸产生的地震波易引发管道塑性变形、焊缝开裂甚至油气泄漏爆炸等灾难性事故，开展爆破荷载下管道动态响应研究迫在眉睫。本文系统梳理了该领域国内外研究进展，对比了埋地与海底管道的结构差异及材料特性，阐述了理论分析、物理实验、数值模拟三类研究方法的技术演进与适用边界，重点剖析了爆破角度、管道铺设方式、服役环境三大核心因素对管道振动幅值与损伤模式的影响规律。研究表明，当前已形成多维度研究体系，但复杂工况下多场耦合响应机理与精准安全判据仍不完善。

关键词

爆炸荷载, 油气管道, 结构安全, 动态响应, 完整性

Research Progress on Dynamic Responses of Oil and Gas Pipelines under Blast Loads

Enze Zhu, Wenjiao Zhang

School of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: May 26, 2026; accepted: June 18, 2026; published: June 30, 2026

Abstract

Oil and gas pipelines serve as the “main artery” for national energy transportation and are crucial infrastructure for ensuring energy security and economic development. With the rapid expansion of China’s oil and gas pipeline network and the increasingly frequent engineering blasting activities, the seismic waves generated by nearby explosions are prone to cause catastrophic accidents such as plastic

deformation of the pipeline, weld cracking, and even oil and gas leakage and explosion. Therefore, it is urgent to conduct research on the dynamic response of pipelines under blast loads. This paper systematically reviews the research progress in this field both domestically and internationally, compares the structural differences and material characteristics of buried and submarine pipelines, elaborates on the technical evolution and applicable boundaries of the three research methods (theoretical analysis, physical experiments, and numerical simulation), and focuses on analyzing the influence laws of three core factors (blast angle, pipeline laying method, and service environment) on the vibration amplitude and damage mode of the pipeline. The research shows that a multi-dimensional research system has been formed at present, but the coupling response mechanism of multiple fields under complex conditions and precise safety criteria are still not perfect.

Keywords

Blast Load, Oil and Gas Pipeline, Structural Safety, Dynamic Response, Completeness

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

油气管道作为国家能源运输的“大动脉”，是保障能源安全、支撑经济社会发展的关键基础设施[1]。在全球能源转型加速推进的背景下，天然气作为清洁低碳的过渡能源，其消费量持续增长，进一步凸显了管道运输的核心地位。与铁路、公路、海运等运输方式相比，油气管道具有运量大、成本低、连续性强、安全性高、占地面积小等显著优势，承担着全球 90% 以上的原油和天然气输送任务。截至 2025 年，全球在役油气管道总里程已突破 200 万公里，形成了覆盖各大洲的能源输送网络。我国作为世界最大的能源消费国，油气管道建设进入了高速发展期，“十四五”期间规划新增油气管道里程约 4.5 万公里，目前陆上油气管道总里程已超过 18 万公里，建成了西气东输、中俄东线、中缅油气管道等一批国家级战略通道；海底管道建设也取得了突破性进展，总里程突破 2 万公里，为南海、渤海等海域的油气资源开发提供了重要支撑。

随着我国城镇化进程的加快和基础设施建设的全面推进，城市地下空间开发、山区交通建设、矿山资源开采、港口航道疏浚等工程活动日益频繁[2][3]。爆破施工作为岩土工程中最经济、最高效的开挖手段，在隧道掘进、路基平整、矿山剥离、水下炸礁等工程中得到了广泛应用[4]。据统计，我国每年开展的爆破工程超过 10 万项，使用炸药量超过 400 万吨。然而，由于城市地下空间布局复杂、山区地形受限、能源管网与基础设施建设同步推进等原因，爆破施工不可避免地会邻近既有油气管道开展。例如，我国多个城市的地铁线路穿越了城市燃气管网，西南地区的高速公路隧道多次邻近输油管道施工，南海油气田开发中的水下爆破作业也对周边海底管道构成了潜在威胁。

爆破作业产生的地震波会对邻近管道结构产生复杂的动力作用，如图 1 所示。其中，爆破地震波是对管道安全影响最大的因素，其在土体中传播时会引起管道的振动响应，当振动强度超过管道的承受极限时，会导致管道产生塑性变形、焊缝开裂、防腐层脱落等损伤，降低管道的使用寿命和承载能力；严重时会引起管道破裂、油气泄漏，进而造成爆炸、火灾、人员伤亡和环境污染等灾难性事故。这些事故不仅造成了巨大的经济损失和生态破坏，还严重威胁了人民群众的生命财产安全，影响了社会稳定和能源供应安全。

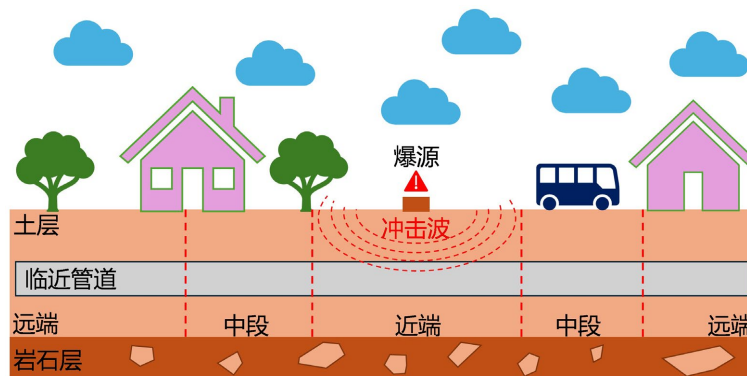


Figure 1. Blasting operation schematic diagram
图 1. 爆破作业示意图

为了保障油气管道在爆破施工期间的安全运行, 众多学者围绕爆破荷载下管道的动态响应问题开展了长达半个多世纪的系统研究[5] [6]。经过多年的研究, 目前已经形成了包括理论分析、物理模拟实验、数值模拟在内的完整研究体系, 建立了一系列管道爆破安全评估方法和防护技术, 为油气管道工程的安全设计和施工提供了重要的理论支撑和技术保障。

本文系统梳理了爆破荷载下管道影响的国内外研究进展, 首先介绍了油气管道的主要类型、结构和材料特性, 然后详细阐述了理论分析、实验和数值模拟三大研究方法的发展现状, 重点分析了爆破角度、管道铺设方式和管道服役环境等关键因素对管道响应的影响规律, 旨在为油气管道爆破安全评估和工程防护提供全面的参考, 推动该领域研究的进一步发展。

2. 爆破荷载下管道响应的研究方法进展

2.1. 理论分析方法

理论分析方法是管道爆破响应研究的基础, 其核心是通过简化力学模型推导解析解或半解析解。图 2 为都的箭等人的解析解分析结果[7]。

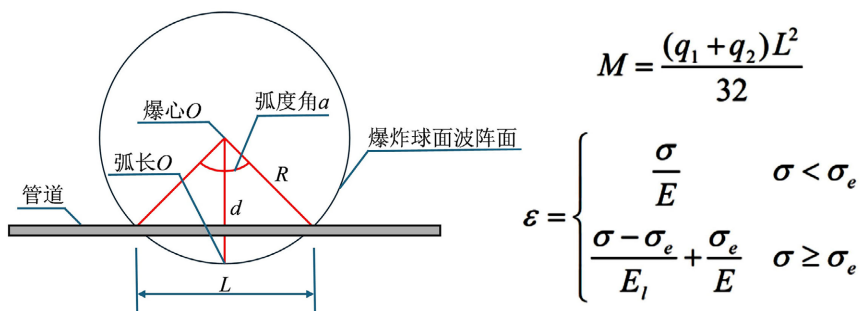


Figure 2. Force calculation of buried pipelines under blast load conditions [7]
图 2. 爆炸荷载下埋地管线受力计算[7]

早期研究多基于弹性波传播理论, 将管土相互作用简化为 Winkler 地基梁模型, 推导了管道在简谐荷载下的振动响应公式。后续学者引入 Pasternak 双参数模型, 考虑了土体剪切效应的影响, 显著提升了计算精度。针对爆破荷载的瞬态特性, 研究者发展了基于三角波、指数波和实测波拟合的荷载数学模型, 建立了管道应力应变与爆破参数的定量关系。但理论分析需对边界条件和材料特性作理想化假设, 难以准确模拟管土滑移分离、土体破碎等复杂非线性行为, 目前主要用于工程初步设计阶段的快速估算。

2.2. 实验方法

实验是验证理论模型和揭示破坏机理的关键手段。如图 3 所示, 分为室内模型实验[8]和现场试验[9]两类。

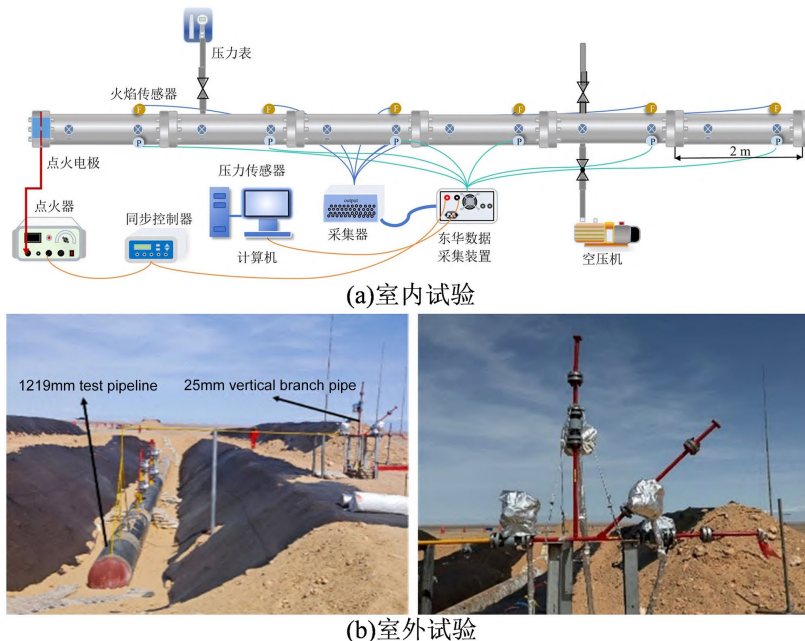


Figure 3. Different experimental methods [8] [9]
图 3. 不同实验方法[8] [9]

室内模型实验基于相似理论, 通过缩尺模型复现爆破-管土相互作用过程, 加载方式从传统的炸药爆破发展为激振器、霍普金森杆、落锤冲击等可控加载技术, 测试手段也从单点应变片监测升级为数字图像相关(DIC)全场变形测量、高速摄影裂纹观测和超声无损检测, 实现了管道损伤演化过程的精细化捕捉。现场试验能够反映真实地质条件和工程尺度下的管道响应, 但存在成本高昂、风险大、可重复性差等问题, 且难以监测管道内部应力和裂纹扩展。

2.3. 数值模拟方法

数值模拟方法凭借其低成本、可复现性和全工况覆盖能力, 已成为当前管道爆破响应研究的主流手段。有限元法(FEM)如 LS-DYNA、ABAQUS/Explicit 广泛应用于管道结构动力响应分析, 能够准确计算管道的应力分布和变形规律; 有限差分法(FLAC3D)在岩土体大变形和爆破波传播模拟中具有显著优势; 离散元法(DEM)则可从细观尺度揭示土体颗粒运动和管土接触机理。针对单一方法的局限性, FEM-DEM 耦合、CEL 欧拉-拉格朗日耦合等技术快速发展, 有效解决了土体破碎、管道大变形等数值难题。但数值模拟结果的准确性高度依赖材料本构模型和参数选取, 仍需通过物理实验进行标定和验证。

3. 油气管道类型

3.1. 管道结构

油气管道服役时所处环境不同, 结构也有所差别。海底管道需抵抗海水、低温保温及强腐蚀, 埋地管道仅需抵抗土壤腐蚀与地面荷载。图 4 为管道常见结构。

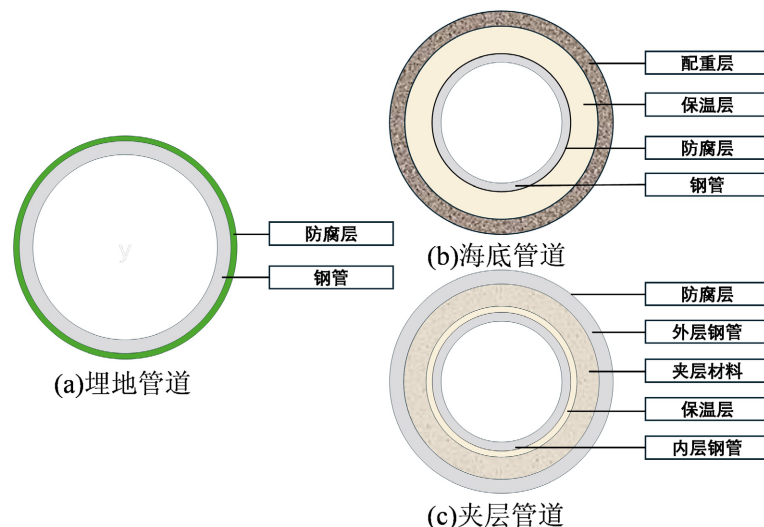


Figure 4. Different pipeline structures
图 4. 不同管道结构

埋地管道多采用单层钢管结构体系, 主体为无缝钢管或焊接钢管, 辅以防腐层和回填土层构成完整的防护结构。长距离干线管道普遍采用大口径、薄壁设计以降低建设成本。在穿越河流、铁路、公路等特殊地段, 会采用套管保护或加厚管壁的方式增强结构安全性。埋地管道的受力特点是主要承受土体压力、内压和地面荷载, 结构形式相对简单, 管土相互作用是影响其动力响应的核心因素。

海底管道的结构形式更为复杂, 根据功能和环境条件可分为单层管和夹层管两种类型。单层管结构与埋地管道类似, 但需额外设置混凝土配重层以抵抗海水浮力和波浪荷载。夹层管由内管和外管组成, 内管输送油气, 外管提供机械保护和保温功能, 内外管之间的夹层填充空气、泡沫材料等保温材料, 主要用于深水和寒冷海域。

3.2. 管道材料

埋地管道的主体材料以高强度低碳管线钢为主, 常用牌号包括 X60、X70 和 X80, 其中 X80 钢凭借其高强度、高韧性和良好的焊接性能, 已成为我国长距离输气管道的主流材料[10]。近年来, X90、X100 等更高强度等级的管线钢也逐步进入工程应用阶段, 有效降低了管道壁厚和建设成本。防腐材料方面, 埋地管道普遍采用 PE 防腐层结合阴极保护的联合防护体系, 能够有效抵御土壤腐蚀。

海底管道对材料性能的要求更为严苛, 除了高强度和高韧性外, 还需具备优异的抗海水腐蚀、抗疲劳和抗氢致开裂能力。主体材料仍以 X70、X80 管线钢为主, 但对钢材的低温韧性和焊接质量提出了更高标准。在腐蚀严重的深海油气田, 会采用双相不锈钢、镍基合金等耐腐蚀合金材料, 或采用碳钢内衬耐腐蚀合金的复合管结构。混凝土配重层通常采用高密度混凝土, 掺加铁矿砂等骨料以提高密度, 满足抗浮要求。

4. 爆破荷载下管道响应的关键影响因素研究

4.1. 爆破角度的影响

爆破角度主要指爆源与管道之间的空间夹角, 包括水平夹角、竖向倾角以及爆破临空面朝向等, 直接控制爆破地震波的入射方向、能量传播路径与应力加载形式, 是影响管道振动响应与应力分布的关键几何因素。图 5 展示了不同爆破角度。不同爆破角度下, 地震波在土体或海床介质内的传播效率不同, 作用于管道上的动荷载大小、作用方向存在明显差异。当爆破方向正对管道轴向或环向薄弱区域时, 管

道易产生集中应力;若爆破角度倾斜,能量沿侧向扩散,管道整体响应会显著降低。朱渊等人[11]的研究表明,合理调整爆破角度能够有效降低管道失效风险。爆破角度还会改变管-土、管-海床之间的接触受力状态,使管道出现局部受压、受拉或剪切变形,进而影响整体损伤模式,因此在工程爆破设计中,爆破角度的优化是管道安全防护的重要手段。

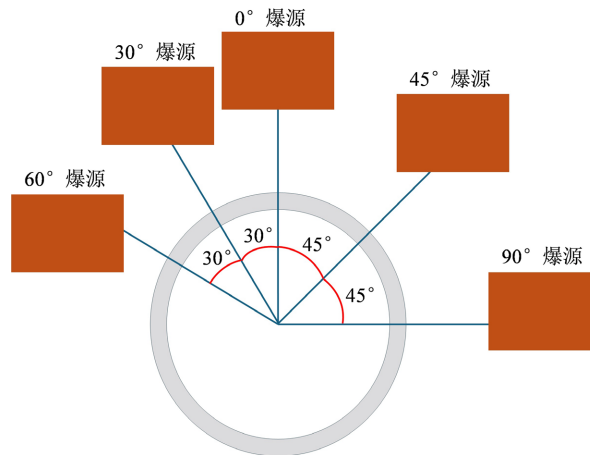


Figure 5. Different blast angles
图 5. 不同爆破角度

4.2. 管道铺设方式的影响

铺设方式直接决定管道的约束边界条件、受力传递路径与结构变形自由度,是影响爆破荷载下管道动力响应幅值与损伤模式的核心因素。埋地管道与海底管道根据与周围介质的接触状态形成了不同的主流铺设形式,不同约束状态下管道对爆破振动的敏感程度与破坏形式存在显著差异。图 6 为不同环境下的管道铺设方式。

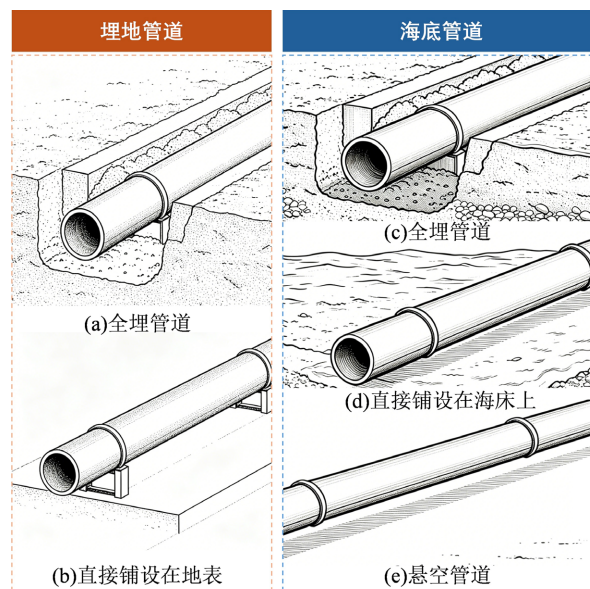


Figure 6. Common methods of pipeline laying
图 6. 常见管道铺设方式

对于埋地管道, 工程应用中主要存在全埋式敷设与地表直接铺设两种形式。全埋式直埋敷设是长距离陆上油气干线管道的绝对主流铺设方式, 管道完全被压实回填土均匀包裹, 四周受连续、对称的土体约束。这种约束形式下, 土体对爆破地震波具有一定的滤波与能量吸收作用, 但同时也会将振动能量高效、均匀地传递至管壁, 使管道产生整体协同振动, 环向与轴向应力分布相对平缓, 破坏多表现为整体屈服或环焊缝开裂。地表直接铺设仅适用于临时输油管线、山区施工便道段或冻土区特殊地段, 管道直接放置于自然地表, 仅底部与土体存在局部接触, 上半部分完全暴露于空气中, 整体约束极弱。爆破荷载作用下, 地表管道的自由变形空间极大, 应力高度集中在管道与地表的接触点处, 易引发局部管壁凹陷、屈曲变形, 严重时会发生整体倾覆。

对于海底管道, 根据与海床的接触关系可分为全埋管道、半埋管道、海床表面直接铺设管道与悬空管道四种典型形式。全埋式管道通过挖沟埋设完全嵌入海床泥沙中, 受海床土体约束较强, 爆破振动传播规律与陆地全埋管道类似, 但海床软土的阻尼系数更大, 振动衰减速度更快, 整体响应相对温和。半埋式管道多为挖沟后未完全回填或海床自然淤积形成, 仅下半部分与海床接触, 上半部分暴露于海水中, 约束不对称性明显。爆破荷载作用下, 半埋管道同时承受海床传递的地震波与海水传递的冲击波, 两种荷载耦合作用会加剧管道的扭转振动与偏心受力, 管土接触界面处易产生应力集中。海床表面直接铺设是浅水海域常用的铺设方式, 管道直接放置于海床表面, 仅依靠自身重量与混凝土配重层固定, 接触面积小、约束刚度低。爆破作用下, 管道易发生整体滑移与滚动变形, 且海水冲击波的直接作用会使管道承受更大的动荷载。悬空管道是海底管道中最危险的铺设形式, 多由海床冲刷、地形起伏或施工误差导致, 管道完全脱离海床, 仅两端受约束。在水下爆破冲击波与地震波的共同作用下, 悬空管道易产生大幅横向摆动与弯曲变形, 且当爆破振动频率接近其自振频率时会引发共振, 导致管道断裂失效。

4.3. 管道服役环境的影响

管道所处环境包含土壤或海水介质、地形地貌等, 介质的物理力学性质决定爆破波的能量衰减速度, 是控制管道损伤程度的重要外部条件, 埋地管道与海底管道所处环境差异明显, 响应规律区别较大。

埋地管道主要处于陆地土壤环境中, 土体类型、含水率、覆土厚度是核心影响因素。砂土孔隙大、刚度小, 爆破波衰减快, 对管道振动放大效应较弱; 黏土密实度高、阻尼小, 振动传播距离远, 管道振动响应更强; 覆土厚度越大, 土体对爆破能量的吸收作用越显著, 管道受振程度越低。高含水率土体在爆破作用下易发生液化, 降低对管道的约束作用, 使管道产生不均匀沉降与额外变形。山区、丘陵等复杂地形会造成爆破波反射、绕射, 局部位置振动能量叠加, 加剧管道损伤风险。

海底管道长期处于海水-海床耦合环境, 受海水、海床泥沙、洋流、水深等多重因素影响。海水具有流动性, 水下爆破产生的冲击波传播速度快、能量衰减小, 相较于陆地土体, 海水介质对爆破振动的缓冲能力更弱, 管道承受的动荷载更大。海床淤泥质软土刚度低、易扰动, 爆破作用下易发生液化与滑移, 导致管道局部失稳; 砂质海床稳定性较强, 但振动放大效应明显。水深越大, 静水压力越高, 管道初始应力水平更高, 在爆破动荷载叠加下更易达到屈服状态; 同时, 洋流冲刷造成的管道悬空、海床冲刷等, 会进一步放大爆破荷载带来的结构损伤, 整体环境风险显著高于埋地管道。

5. 结论

本文系统梳理了爆破荷载下油气管道动态响应的研究进展, 从研究方法、管道特性及关键影响因素三个维度进行了全面分析, 得出以下主要结论:

(1) 目前已形成理论分析、物理实验、数值模拟三位一体的完整研究体系, 为油气管道爆破安全评估提供了多维度支撑。理论分析方法基于弹性波传播与地基梁理论, 可实现工程初步快速估算, 但受理想

化假设限制难以模拟复杂非线性行为;物理实验通过室内缩尺模型与现场试验揭示了管道损伤演化机理,测试技术已实现从单点监测到全场精细化测量的升级,但存在成本高、可重复性差等问题;数值模拟凭借低成本、全工况覆盖能力成为主流研究手段,多方法耦合技术有效解决了土体破碎、管道大变形等难题,但其结果准确性仍高度依赖材料本构模型与参数的实验标定。

(2) 爆破角度、管道铺设方式与管道环境是影响爆破荷载下管道动态响应的三大核心因素,其作用机制与影响规律已得到较为清晰的揭示。爆破角度通过控制地震波入射方向与能量分布决定管道应力集中程度,垂直入射荷载的破坏作用显著大于斜向入射;不同铺设方式下管道的约束边界条件差异巨大,全埋管道以整体协同振动为主,地表与悬空管道则易发生局部应力集中与大变形破坏;介质物理力学性质直接决定爆破波的衰减与放大效应,海底管道因海水-海床耦合环境面临比埋地管道更高的爆破安全风险。

(3) 未来研究应聚焦以下方向进一步深化:一是开展复杂工况下的多场耦合响应研究,重点关注腐蚀、缺陷、焊缝等初始损伤管道,以及地震、洋流与爆破荷载耦合作用下的管道失效机理;二是发展高精度数值模拟与大尺度实验技术,建立更符合工程实际的管土或海床接触本构模型,突破缩尺模型的尺度效应限制,实现管道爆破损伤全过程的精准预测。

参考文献

- [1] 门金坤, 卢泓方, 程玉峰. 面向“双碳”目标的能源管道工程: 建设现状、安全挑战与范式转移[J/OL]. 交通运输工程学报: 1-32. <https://link.cnki.net/doi/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.242>, 2026-06-17.
- [2] 陈宏强, 张欢, 王金贵, 等. 服务城市地下空间开发利用的多属性三维地质建模——以廊坊临空经济区为例[J]. 地质通报, 2026, 45(5): 870-884.
- [3] 李江华, 彭雨森, 华可, 等. 特厚煤层开采远场离层突水模式及微震响应特征研究[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-11. <https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20260401.0927.002>, 2026-06-17.
- [4] 崔莹, 林江雨, 高一弘, 等. 近爆荷载下 CFRP 加固含缺陷油气管道损伤评价方法研究[J]. 振动与冲击, 2026, 45(10): 168-178.
- [5] 刘朝阳. CO₂ 管道全尺寸爆裂失效特性试验研究取得突破[J]. 油气储运, 2026, 45(4): 480.
- [6] 黄剑, 朱新星, 蒋楠, 等. 爆破振动影响下邻近 LNG 管道专用隧道组合结构动力响应[J]. 工程爆破, 2026, 32(2): 166-174.
- [7] 都的箭, 梁雪莹, 邓正栋, 等. 埋地管线爆炸地冲击作用下解析解计算研究[J]. 爆破, 2011, 28(3): 21-25.
- [8] 胡洋, 张海霞, 宋民航, 等. 密闭管道内掺氢天然气爆炸特性的数值模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(10): 3725-3734.
- [9] 李小鸥, 王旭, 王佳帅, 等. 开放空间高压天然气管道小孔泄漏扩散特性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2025, 21(S2): 7-14.
- [10] 蒋庆梅, 邓丽阳, 王昊, 等. X80 管道焊缝热影响区硬度预测公式与应用[J]. 油气储运, 2025, 44(7): 784-793.
- [11] 朱渊, 师吉浩, 陈国明, 等. 长输天然气埋地并行管道泄漏爆炸的安全间距[J]. 油气储运, 2016, 35(6): 591-595.