

引文: 帅义, 徐春燕, 史鹏宇, 等. 地震灾害作用下埋地管道事故统计分析与启示[J]. 天然气工业, 2025, 45(7): 158-167.

SHUAI Yi, XU Chunyan, SHI Pengyu, et al. A statistical analysis of buried pipeline failure cases under the impact of earthquakes[J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(7): 158-167.

地震灾害作用下埋地管道事故统计分析与启示

帅 义¹ 徐春燕² 史鹏宇¹ 胡融睿¹ 范玉然¹
韩俊艳³ 任运波⁴ 田 野² 张 怡¹ 高 唯¹

1. 应急管理部油气生产安全与应急技术重点实验室·中国石油大学(北京)

2. 新疆多介质管道安全输送重点实验室·国家管网集团西部管道有限责任公司

3. 城市与工程安全减灾教育部重点实验室·北京工业大学 4. 中国石油西南油气田公司华油公司

摘要: 随着中国管道系统建设规模的持续扩大, 地震灾害对埋地管道安全完整性的威胁日益加剧。地震灾害可能导致埋地管道发生断裂、变形损伤、屈曲失稳等失效破坏, 严重时甚至会引发泄漏、燃烧、爆炸等重大事故。为此, 系统收集地震灾害引发管道失效的案例, 通过广泛收集国内外地震灾害下管道失效案例共 55 例, 总结了地震导致管道失效的主要原因、失效形式及其后果, 并从震级、管道类型、失效模式等多个维度进行事故规律的统计, 分析了地震作用下埋地管道的失效事故规律, 对埋地管道的建设与安全运行具有重要意义。研究结果表明, ①国内外由地震引发的管道失效事故数量逐年增多, 特别是跨越地震断裂带区域的管道尤其明显; ②城市天然气和供水管道系统因其分布集中、路由复杂, 在地震中更容易遭受破坏, 且常伴随严重的次生灾害发生; ③ 6 级及以上地震是管道失效的主要诱因, 失效模式以断裂和泄漏为主, 占比分别为 53.3%、29.0%; ④断层位移、地震诱发的滑坡和土壤液化等永久地表变形是引发管道失效的主要原因, 其中断层活动占比最大, 达到 72.8%。结论认为, 通过对管道失效案例的统计分析, 揭示了地震作用下埋地管道的事故规律及特点, 可为埋地管道的抗震设防、管道地震灾害的风险评估以及管道的安全运维提供重要的参考依据。

关键词: 地震破坏; 管道失效; 统计分析; 破坏机制; 失效类型; 抗震能力

中图分类号: TE832

文献标识码: A

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2025.07.013

A statistical analysis of buried pipeline failure cases under the impact of earthquakes

SHUAI Yi¹, XU Chunyan², SHI Pengyu¹, HU Rongrui¹, FAN Yuran¹, HAN Junyan³,
REN Yunbo⁴, TIAN Ye², ZHANG Yi¹, GAO Wei¹

(1. Key Laboratory of Oil & Gas Production Safety and Emergency Technology, Ministry of Emergency Management//China University of Petroleum - Beijing, Beijing 102249, China; 2. Xinjiang Key Laboratory Multi-Medium Pipeline Transportation Safety//PipeChina West Pipeline Co., Ltd., Urumchi, Xinjiang 830063, China; 3. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education//Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 4. Huayou Company, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610051, China)

Natural Gas Industry, Vol.45, No.7, p.158-167, 7/25/2025. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: With the expansion of pipeline system in China, the safety and integrity of buried pipelines are increasingly threatened by earthquakes, which can cause pipeline failures such as fracture, deformation and damage, and buckling instability, or in severe cases, even lead to leakage, fire, explosion, and other major accidents. With a systemic review of 55 cases of pipeline failures caused by earthquakes globally, the main causes, forms and consequences of pipeline failures due to earthquakes are investigated, and the failure patterns are analyzed statistically from the perspective of earthquake magnitude, pipeline type, and failure mode, in order to guide the construction and operation of buried pipelines. The following results are obtained. First, the number of pipeline failures caused by earthquakes is increasing annually, especially that of pipelines crossing seismic fault zones. Second, urban natural gas and water supply pipeline systems, due to their concentrated distribution and complex routing, are more prone to damage during earthquakes and are often accompanied by severe secondary disasters. Third, the majority of buried pipeline failures are caused by earthquakes of magnitude 6.0 or above, and failure modes are mainly fractures and leakages (53.3% and 29.0%). Third, permanent ground deformations such as fault displacement, earthquake-induced landslides, and soil liquefaction are the main causes of pipeline failures, with 72.8% coming from fault activities. In conclusion, the statistical analysis of pipeline failure cases reveals the failure patterns and characteristics of buried pipelines under seismic action, providing reference for the earthquake-resistant design, the risk assessment on pipelines in the case of earthquake, and the safe operation and maintenance of buried pipelines.

Keywords: Earthquake damage; Pipeline failure; Statistical analysis; Failure mechanism; Failure type; Earthquake resistance

基金项目: 国家自然科学基金项目“纳入裂尖多尺度约束效应的 X80 管道环焊缝断裂评估方法研究”(编号: 52204071)、国家重点研发计划子课题项目“基于内检大数据的城市燃气管道服役状态综合评价与决策技术研究”(编号: 2022YFC3004802-4)、国家石油天然气管网集团公司揭榜挂帅项目“油气管道地震灾害完整性管理技术研究”(编号: AQWH202304)。

作者简介: 帅义, 1987 年生, 副教授, 本刊青年编委; 主要从事油气管道检测、风险管理与完整性评价等方面的研究工作。地址: (102249) 北京市昌平区府学路 18 号。ORCID: 0009-0003-3215-7643。E-mail: yshuai@cup.edu.cn

通信作者: 徐春燕, 女, 1972 年生, 高级工程师; 主要从事油气管道完整性研究工作。地址: (830000) 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市新市区四平路 2288 号创新广场。ORCID: 0009-0006-4000-581X。E-mail: xucy04@pipechina.com.cn

0 引言

进入 21 世纪以来,中国管道生命线工程高速发展,截至 2024 年底,油气管网总里程达 $19 \times 10^4 \text{ km}$,基本形成横跨东西、纵贯南北、联通海外的“全国一张网”基本布局。西北、东北、西南、海上四大战略通道已基本建成,并与“五纵五横”主干管网共同构成中国油气输送大动脉。与此同时,城市地下管网的建设也初具规模,截至 2023 年底,城市供水、排水(含污水)、燃气、供热管道总里程已达 $367.65 \times 10^4 \text{ km}$ 。由于地理条件限制,中国大量埋地能源输送管道(特别是长输管道)路经地震带,相当一部分管道面临较大的地震巨灾风险。

根据美国地质调查局(USGS)数据,过去 10 年全球年平均地震频次约为 1.4×10^6 次。2019 年记录地震 13 803 次(含 5.0 级以上 1 456 次)。全球地震活动呈现出相对稳定的趋势,但区域差异显著,亚洲最为频繁。中国位于环太平洋地震带和欧亚地震带交汇部位,受太平洋板块、印度板块和菲律宾海板块的挤压,地震断裂带十分发育,是地震多发国家。地震活动分布范围广、频度高、强度大、震源浅,几乎所有的省区市都发生过 6 级以上强震。20 世纪以来,全球 7 级以上强震之中,中国约占 35%。地震灾害对埋地管道的安全影响及威胁也日益凸显。例如,1976 年唐山大地震,导致秦京管道 4 处损坏,其中 3 处由活动断层引起,1 处因滦河大桥倒塌拉断引起,造成超过 10 000 t 的原油流失^[1];2008 年,汶川大地震导致兰成渝管道受损,出现裂缝和山体滑坡,过滤器泄漏造成管道停输 22 小时 10 分钟^[2];2014 年,加拿大不列颠哥伦比亚省南尼姆发生 6.6 级地震,导致天然气管道系统破裂并引发火灾;2018 年,帕普亚新几内亚地震引起天然气管道泄漏,导致下游工厂的生产全部中断^[3];2021 年,新西兰马拉卡伊发生 8.1 级地震,导致该地区的供水管道和天然气管道系统受损,使得供水和供气中断;2022 年,雅安芦山发生 6.1 级地震,导致水电站压力管道断裂,使得供水管网损坏约 800 m^[4]。由此可见,地震灾害对埋地管道的安全威胁较大,可能使埋地管道发生变形、断裂等损伤,进而引发管线停输、油气泄漏,甚至发生火灾爆炸等事故,严重影响能源供应安全。

美国、加拿大和欧洲的一些发达国家在埋地管道建设领域发展较早,为系统分析管道失效原因,各国相继建立了专门的管道失效数据库。例如,美国管道及危险物品安全管理局(PHMSA)事故数据

库、加拿大能源监管机构(CER)的管道事故数据库以及欧洲输气管道事故输气组织(EGIG)的天然气管道事故数据库等。姜开等^[5]基于 PHMSA 数据库(2010—2022 年),量化了油气管道 6 类失效原因的失效率,结果显示自然灾害位列第 4,仅次于第三方破坏、材料失效和腐蚀。王钰滔等^[6]通过对比国外主要管道数据库(PHMSA、EGIG、NEB)与中国公开数据,指出国外天然气管道失效的主要原因为腐蚀及材料焊接缺陷,而中国则以第三方破坏为主。其中,地质灾害在欧美失效原因中的占比为 7.3%~15.8%,在国内占比约 10%且呈上升趋势。户英杰等^[7]基于 2004—2023 年 PHMSA 数据的分析表明,美国城镇燃气管道失效主要由人为活动引发,其中开挖破坏(33.8%)和其他外力损伤(30.8%)最为突出,而地质灾害导致的破坏占比仅为 2.3%~7.3%。综上所述,自然灾害在埋地管道失效中的占比较少,尤其是针对地震灾害引发的管道失效的系统性研究尤为匮乏。部分学者针对特定的地震灾害中的管道失效案例进行调查分析与研究,侧重于揭示强震诱发的地质灾害(如断层错动、液化、滑坡)对管道失效的致灾机理。例如,Unal 等^[8]通过分析 2023 年土耳其地震中记录的 21 处天然气管道事故点数据,结合区域滑坡易发性图、液化易发性图、峰值地面加速度(PGA)图及地表破裂图,量化评估了液化、高 PGA、地表破裂和滑坡等地质灾害对管道失效的影响程度及其空间相关性,论证了地质灾害易发性图谱在管道线路规划中的重要性。Toprak 等^[9]基于对土耳其阿德里安曼等 3 省供水管网地震破坏案例的实地勘察数据及高分辨率航空影像分析,揭示了断层错动、滑坡及液化 3 类地质灾害对管道失效的影响程度与空间分布规律。Kaya 等^[10]则基于 1999 年土耳其科贾埃利地震中泰晤士水管线 3 处褶皱的详细事故报告,通过三维非线性有限元数值模拟与事故反演,系统量化评估了碳纤维复合材料 CFRP 包裹、钢塑复合管和波纹钢管等不同抗震措施在压缩载荷下对管道失效位移及破坏模式的改善效果。

文献调研表明,当前针对埋地管道事故统计分析的研究已较为丰富,但主要集中在常规服役工况下管道失效因素的探究。相比之下,针对全球地震灾害作用下管道失效事故的系统性统计研究还未见公开报道,尤其是地震灾害下埋地管道的失效模式、失效原因及其影响规律等关键问题尚未解决。因此,系统收集国内外地震灾害引发管道失效的案例,深入研究地震作用下管道的失效规律,可为管道抗震

设计及灾害防控提供理论支撑,有效减少地震灾害带来的社会经济损失,保障能源安全和基础设施韧性。

1 管道失效案例收集

围绕地震灾害对埋地管道失效的影响,本研究系统收集了 1990—2023 年国内外由地震导致的 55 起管道失效案例(表 1、2)^[8-46]。其中,国内 10 例,

国外 45 例,所有案例震级均大于等于 4.3 级。这些数据源自各国政府事故报告、地震/地质机构监测数据、管道运营商记录、学术数据库、国际/非政府组织研究报告及公开媒体报道。研究汇总了各次地震事件对管道系统的影响,明确了受损管道的类型、管径等参数,并统计了其失效模式、原因及后果,为后续地震作用下管道失效规律分析提供了详实的实例数据支撑(部分案例管道规格信息不完整)。

表 1 国内 1975—2022 年地震灾害造成的管道失效事故统计表

序号	地震名称	年份	震级	管道类型	管径/mm	事故情况概述	失效原因	失效模式	失效后果
1	山东海城地震	1975	7.3	供水	—	营口、盘锦供水系统严重受损,水压水量异常	断层	断裂	大量漏水,供水受限
2	河北唐山地震	1976	7.8	天然气、供水	529	秦京管道 4 处损坏,3 处由活动断层引起,1 处因滦河大桥倒塌拉断引起	滑坡	断裂	大量原油流失、供水中断
3	云南丽江地震	1996	7.0	供水	—	旧水厂主管道多处破裂,供水管道漏损严重	断层	断裂	供水中断
4	台湾集集地震	1999	7.6	天然气、燃气	—	断层位错引起地表破裂 105 km,最大的垂直方向断层错位达 8 m	断层	断裂屈曲拉伸破坏	管道漏气、破坏引发爆炸、火灾
5	青海昆仑山口西地震	2001	8.1	成品油	159	断层位错造成管体断裂,输油功能丧失	断层	断裂	成品油泄漏
6	云南宁洱地震	2007	6.4	供水	—	断层效应致宁洱县城供水中断	断层	断裂	县城供水中断
7	四川汶川地震	2008	8.0	天然气	508	兰成渝管道受损,出现裂缝和山体滑坡,过滤器泄漏	滑坡	变形损伤	管道停输
8	青海玉树地震	2010	7.1	供水	—	重创供水网,380 m 铸铁管爆裂两处,最长裂缝 2 m	断层	断裂	供水中断
9	四川雅安地震	2013	7.0	供水	—	供水管网严重破坏,芦山县 800 km 管道受损	断层	断裂	供水中断
10	四川芦山地震	2022	6.1	供水	—	芦山县水电站受损严重,山洪沟治理和水利工程受损	断层	断裂	供水管网损毁 800 m

2 统计分析

2.1 按国内/外统计分析

各国由地震引发的埋地管道失效案例数量统计情况见图 1。可以看出,地震引发的埋地管道失效案例在全球广泛分布,其中美国(15 例)、中国(10 例)和日本(5 例)最为突出,3 国合计占比 54.6%(美国 27.3%,中国 18.2%,日本 9.1%),显著高于其他国家。其主要原因有两方面:①能源需求巨大(尤其中美),管道建设规模数量庞大;②3 个国家均位于全球主要地震带,如美国位于环太平洋地震带、加利福尼亚地震带和新马德里断层带,中国位于太平洋—亚欧板块交界带,日本位于太平洋—亚欧板块碰撞

带,地震活动频繁。据美国地质调查局统计,全球年均发生 2 000~2 500 次大于等于 5 级的地震,而中、美、日三国因地处地震高发区,其管道面临的震害风险显著增加。其中,日本因地震频次全球最高,管道震害案例占比尤为突出。

2.2 按年份统计分析

自 1900 年起每 10 年由地震引发的管道失效案例数量统计情况见图 2。整体上看,地震导致管道失效案例的数量呈现逐年增长的趋势。其中,1900—1960 年仅记录 5 起案例,主要受限于两次世界大战期间较低的工业化程度和有限的管道网络。二战后,全球经济复苏推动能源需求激增,欧美等国大规模铺设管道,其路径常跨越断层或地质高风

表 2 国外地震灾害造成的管道失效事故统计表

序号	地震名称	年份	震级	管道类型	管径 / mm	事故情况概述	失效原因	失效模式	失效后果
1	美国旧金山地震	1906	8.3	天然气	400	3 条主管道受损, 圣安德烈亚斯水库北 29 处断裂	断层液化	断裂	引发火灾 50 起
2	日本关东地震	1923	7.9	供水	—	供水中断, 东京、横滨火灾加剧伤亡	断层	断裂	自来水总管发生断裂
3	美国加利福尼亚州长滩地震	1933	6.4	成品油、天然气	—	超过 500 起管道破裂, 其中管道失效集中在海湾、河流和防洪渠道附近	断层	断裂	燃气管道的焊接接头有 50 多处断裂
4	土库曼斯坦阿什哈巴德地区地震	1948	9.0	燃气	—	燃气管道受损, 对接套管、法兰盘破坏, 螺口断裂	断层	断裂	引发爆炸、建筑物坍塌
5	美国加利福尼亚克恩县地震	1952	7.3	成品油、天然气	—	输油管沿断层破裂, 外部管道腐蚀致 10 起泄漏, 白沃尔夫断层断裂 60 km	断层	断裂 泄漏	引发火灾, 炼油厂发生爆炸
6	美国阿拉斯加地震	1964	7.3	天然气	1 220	油气管道受损泄漏, 破裂超 100 km	土壤液化 滑坡	断裂	高压输气管线破裂, 供气中断
7	美国阿拉斯加地震	1964	9.2	天然气、供水	—	发生了 200 多次天然气管道破裂和 100 多次供水管道破裂	液化 滑坡 断层	断裂	管道或煤气装置的破坏引发多起大火
8	日本新潟地震	1964	7.6	供水、燃气	—	失效类型包括管道和焊缝断裂以及接头分离	液化 断层	断裂 屈曲	供水管损坏
9	美国普吉特海湾地震	1965	6.7	供水、燃气	—	85% 为泄漏, 15% 为破损, 损坏主要由地震波传播造成, 无地面位移	地震波	泄漏 变形 损伤	管道破损、变形, 发生泄漏
10	美国圣罗莎地震	1969	5.7	供水、燃气	—	建筑物受损, 烟囱倒塌, 人行道弯曲, 地下管道破裂	断层	断裂 泄漏	地下管道破裂
11	美国圣费尔南多地震	1971	6.6	天然气、供水	—	埋地天然气管道和给排水管道共发生 450 处断裂, 破坏频率为 24 处 /km	断层 滑坡	断裂	管道破裂, 引起多次的次生灾害
12	日本宫城地震	1978	7.4	供水	—	供水管道破坏 1 600 余处, 经济损失 14.7×10^{12} 日元	断层	泄漏	供水中断
13	美国帝国谷地震	1979	6.4	供水、天然气	—	发生断层, 高压管道、天然气管道产生偏移	断层	断裂 屈曲	4 个断层带地表移动
14	美国科林加地震	1983	6.2	供水、天然气	—	弯管处发生管道破裂和泄漏	断层	断裂	供水中断
15	墨西哥肯省地震	1985	8.1	供水、燃气	1 067	供水和煤气管网严重破坏, 主干管线破坏 800 余处, 煤气管线破坏 400 余处	地震波传播	屈曲 破坏	房屋和管道遭破坏
16	厄瓜多尔地震	1987	6.9	原油	660	引发巨型滑坡摧毁原油管道, 损毁管道长达 40 km	滑坡	断裂	原油发生大面积泄漏
17	澳大利亚滕南特克里克地震	1988	6.7	集输	—	由于地表断裂造成了煤气田的管道被轴向压缩了近 1 m	断层	屈曲 破坏	管道轴向压缩导致破坏
18	美国洛马普列塔地震	1989	7.2	供水、燃气	—	供水管网发生 350 处严重破坏, 城市供气系统漏气达到 1 000 余处	断层	泄漏	供水中断致火灾扑救困难
19	伊朗曼吉尔地震	1990	7.4	供水、天然气	—	地震反向断层的构造运动导致管道严重压缩和弯曲	断层	断裂 屈曲	输水管道屈曲导致功能丧失
20	美国加利福尼亚兰德斯—大熊地震	1992	6.5	供水	—	供水系统破坏	断层	断裂	部分地区供水中断

表 2 国外地震灾害造成的管道失效事故统计表（续）

序号	地震名称	年份	震级	管道类型	管径 / mm	事故情况概述	失效 原因	失效 模式	失效后果
21	美国北岭地震	1994	6.8	供水、 燃气	—	大量供水和煤气管道被拉断	断层	断裂	供气中断
22	日本阪神大地震	1995	7.2	供水	50 ~ 1 000	主干管网破坏 1 610 处，断水率 80%，液化区及旧管道损坏严重	断层 液化	泄漏	地下水管损坏严重
23	墨西哥克雷塔罗地震	1999	7.5	供水	—	墨西哥城供水系统中断和管道破坏	断层	断裂	管道破裂引发火灾
24	土耳其伊兹米特地震	1999	7.8	供水、 原油	—	输水主管道 3 处屈曲，码头管道破坏，炼油厂管道受损	断层	屈曲 破坏	供水中断、管道漏油
25	美国阿拉斯加德纳里地震	2002	7.9	天然气	1 220	地震导致阿拉斯加管道位移，主体未损但支架破坏	断层	屈曲 破坏	天然气管道停止运转
26	新西兰坎特伯雷地震	2010	7.1	供水、 天然气	—	管网受到多种因素影响，削弱了为基督城大部分地区提供服务的能力	断层 液化	断裂	饮用水管道和下水道出现泄漏和堵塞
27	新西兰克莱斯特彻奇地震	2011	6.3	供水	—	废水处理系统受损，管道配件故障，液化导致管道变形	液化	屈曲	管道拉伸、弯曲、破裂
28	加拿大南尼姆地震	2014	6.6	天然气	—	天然气管道系统破裂，产生了泄漏和火灾	断层	泄漏	天然气泄漏引发火灾
29	加拿大马尼托巴地震	2016	5.8	天然气	—	天然气管道发生泄漏	断层	泄漏	天然气泄漏
30	巴布亚新几内亚地震	2018	7.5	天然气	—	帕普亚新几内亚地震引起油气管道受损，泄漏停产，破裂超 100 km	断层 滑坡	断裂	管道泄露，下游工厂的生产中断
31	印度尼西亚龙目地震	2018	6.9	天然气、 供水	—	引起滑坡超 10 000 次	断层 滑坡	泄漏	供气和供水中断
32	美国阿尔班尼地震	2019	7.1	天然气、 供水	—	管道系统受损，包括水管道和天然气管道的破坏	断层	泄漏	供气和供水中断
33	土耳其伊兹密尔地震	2020	7.0	天然气	660	位于的爱琴海板块的断层破裂，断层滑动 1.8 m	断层 滑坡	泄漏	天然气泄漏引发火灾
34	克罗地亚地震	2020	6.5	天然气、 供水	—	部分天然气管道和供水系统出现了泄漏或破损	断层	泄漏	供水中断
35	美国阿拉斯加州地震	2021	8.2	天然气	1 220	天然气管道受损泄漏	断层	断裂	天然气管道受损
36	新西兰马拉卡伊地震	2021	8.1	天然气、 供水	—	供水管道和天然气管道系统受损，导致泄漏和供水中断	断层	泄漏	供气和供水中断
37	苏门答腊地震	2021	6.2	天然气、 供水	—	天然气管道和供水管道受损，造成泄漏和供水中断	断层	泄漏	供气和供水中断
38	新西兰吉斯伯恩地震	2021	7.3	供水	—	供水管道遭受破坏，居民面临供水中断	断层	断裂	供水中断
39	智利地震	2022	7.5	天然气、 供水	—	天然气管道和供水管道受损	断层	断裂	部分地区能源供应中断
40	意大利卡什卡达里亚地震	2022	4.3	供水	—	供水管道破坏，造成供水中断和紧急修复需求	断层	泄漏	供水中断
41	巴基斯坦地震	2022	4.3	天然气、 供水	—	天然气管道和供水管道受损，造成泄漏和供水中断	断层	泄漏	供水中断，引发火灾
42	爱尔兰地震	2022	4.7	天然气、 供水	—	天然气和供水管道泄漏，部门紧急维修	断层	泄漏	供气和供水中断
43	埃及红海地震	2022	6.3	供水、 燃气	—	燃气管道和供水管道破坏	断层	断裂	引发火灾，供水中断

表 2 国外地震灾害造成的管道失效事故统计表（续）

序号	地震名称	年份	震级	管道类型	管径 / mm	事故情况概述	失效原因	失效模式	失效后果
44	阿尔巴尼亚地震	2022	6.6	供水、燃气	—	燃气管道和供水管道受损	断层	断裂	供水中断
45	土耳其卡赫拉曼马拉什地震	2023	7.8	天然气、供水	813	天然气运输管道受地震影响发生爆炸并引发火灾	断层	泄漏	管道两段相隔 3 km 处发生爆炸

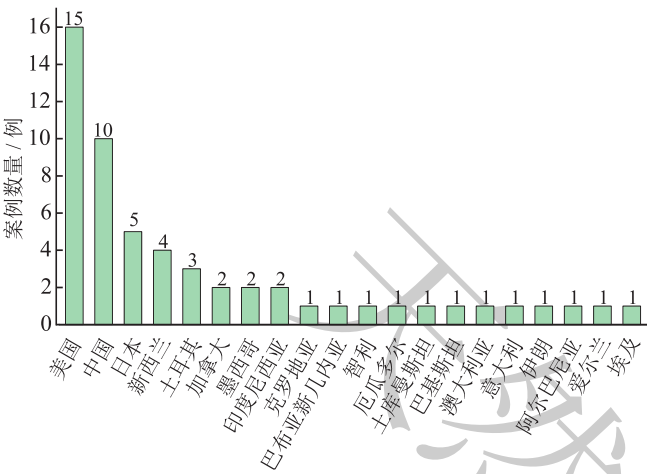


图 1 全球地震造成管道失效案例统计图

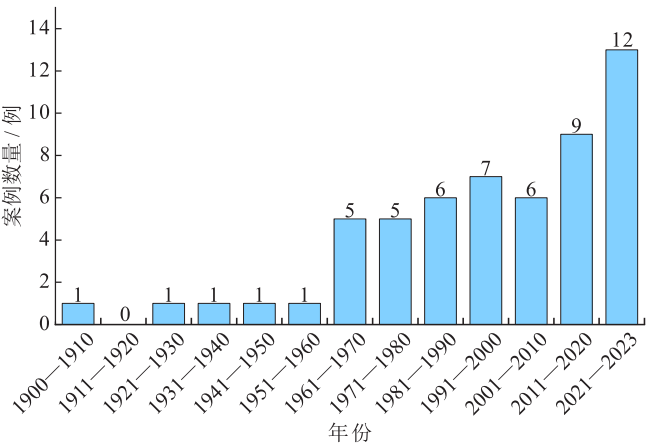


图 2 全球不同年份地震造成管道失效案例统计图

险区，导致地震引发的失效事件显著增加（70 年代尤为明显）。1961—2010 年案例数量稳定在每 10 年 5～7 例，部分归因于早期建设的管道已接近或超过管道的设计寿命，老化问题（如腐蚀、凹陷）日益凸显，削弱了结构完整性与抗震能力。进入 21 世纪，新一轮管道建设高峰伴随持续增长的能源需求而至。2011—2020 年案例增至 9 例，而 2021—2023 年仅 3 年内即达 12 例。该趋势表明，全球油气管网的快速扩张显著加剧了地震对埋地管道的威胁及安全风险。

2.3 按管道类型统计分析

地震作用下不同类型管道失效案例数量分布情况见图 3。可以看出，地震对供水管道和天然气管道的影响最为显著。其中，供水管道的失效案例为 39 例，占比 70.9%；天然气管道失效案例 28 例，占比 50.9%。其主要原因在于这两类管道系统通常密集分布于城市高密度建设区，布局集中、数量众多、路径复杂，易受震害且常引发严重次生灾害。相比之下，长输管道（原油、成品油、集输管道）失效案例较少，归因于其铺设密度低、多远离城市密集区、路由设计相对简单，以及自身较大的柔性可有效吸收和分散地震应力。需要指出的是，因部分案例数据未详细分类，无法区分是长输天然气管道还是城市燃气管道，因此统计中将两者统一归为天然气管道。

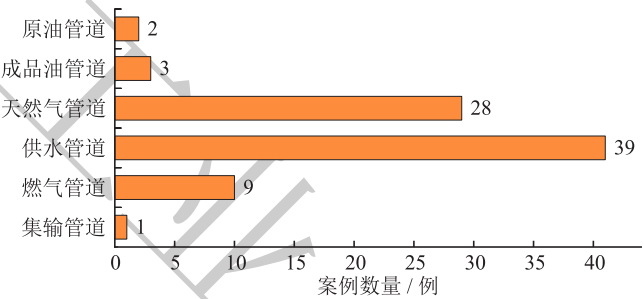


图 3 不同类型管道在地震作用下的失效统计图

2.4 按地震震级统计分析

全球范围内地震引发管道失效事件的地震震级分布情况见图 4。从图 4 中可以看出，90% 以上的失效案例发生于 6～9 级地震（仅 5 例低于 6 级）。主要原因可能是强震（高震级）易引发地表断裂、大规模位移及剧烈地震波，导致管道严重变形或断裂；而低震级地震产生的地面振动较弱，管道柔性可在一定程度上有效吸收此类载荷的激励。统计案例中，最高失效震级为 9.2 级（1964 年阿拉斯加地震，造成安克雷奇地区 200 余例天然气管道破裂及 100 余例供水管道破裂，并引发火灾）；最低为 4.7 级（2022 年爱尔兰地震，也引发局部供气/水管道泄漏）。本

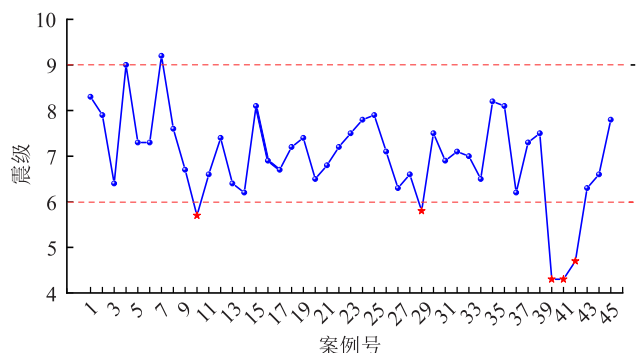


图4 全球范围内不同震级地震造成管道失效案例统计图

注：案例号对应表2中序号。

次统计的10例中国案例(图5)震级均大于等于6级。典型案例如2001年昆仑山口西8.1级地震导致格拉成品油管道扭曲10.5 m并于3.2 m处拉断；2007年宁洱地震因断层效应造成县城供水中断。

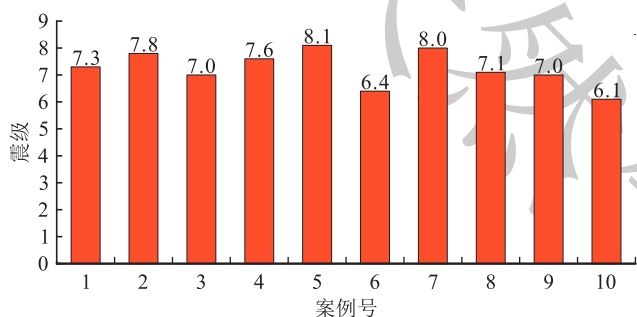


图5 中国不同震级地震造成管道失效案例统计图

注：案例号对应表1中序号。

2.5 按失效模式统计分析

地震导致管道失效的模式分布见图6，主要失效模式包括断裂、泄漏、屈曲和变形损伤。统计结果表明，地震作用下管道最为频发的失效模式是断裂破坏，在本次事故统计中案例数为33例，占比高达53.3%。主要由断层错动、沉降或滑坡等永久地表位移运动引发的不均匀拉伸载荷所致，尤其在环焊接头处易形成应力集中并发生开裂^[45]。例如，2001年昆仑山口西地震导致格拉管道在断层交汇处发生严重断裂，引起输油中断。地震导致管道泄漏失效的案例数为18例，占比为29.0%，通常是由于地震引起的地层不均匀振动诱发管道连接处或管体破裂。例如，2010年青海玉树地震中，整个城市的供水管网遭受了严重破坏，其中，一根380 m长的灰口铸铁管发生了3处爆管，最长的裂缝达到2 m。屈曲通常发生在地震引起的强烈地面振动中，管道受到强烈的压缩载荷作用而发生结构屈曲失稳^[46]，统计的失效占比为12.9%。一

一般而言，管道屈曲破坏可能不会直接导致泄漏。例如，1988年澳大利亚滕南特克里克地震，由于地表断裂造成了某气田的管道被轴向压缩了近1 m而发生屈曲，但此次事故管道并未发生泄漏。所有事故案例中，变形损伤占比最小，仅为4.8%，表现为管道永久性变形^[47]，虽不直接引发泄漏，但会严重影响管道正常运行。例如，1964年日本新潟地震，在土壤液化作用下，供水管网破坏率达70%，管道发生了变形损伤，引发了供水中断。

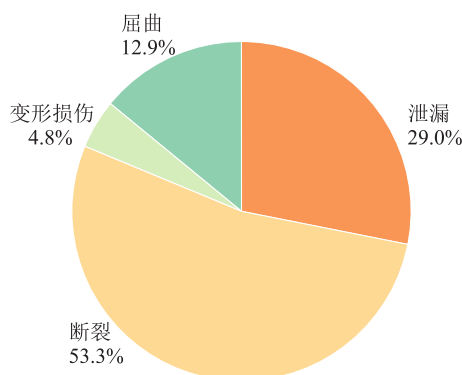


图6 地震作用下管道失效模式统计图

2.6 按失效原因统计分析

地震灾害对埋地管道的影响主要包括两方面：①地面震动与断层滑移直接引发的管道机械损伤；②地震诱发的次生灾害（如土壤液化、滑坡等）改变了管道的受力状态从而增加了破坏风险^[48]。地震导致管道失效的原因统计如图7所示，断层错动是管道失效的首要原因（48例，占比高达72.8%），其机理在于断层突发错动可对管道产生直接剪切或拉/压作用，并引发管道周围剧烈的土体变形，使管道承受远超材料极限的应力，导致断裂或严重变形。管道的失效模式取决于断层与管道的夹角：夹角小于等于90°时以拉伸破坏为主；夹角大于90°时则以压缩屈

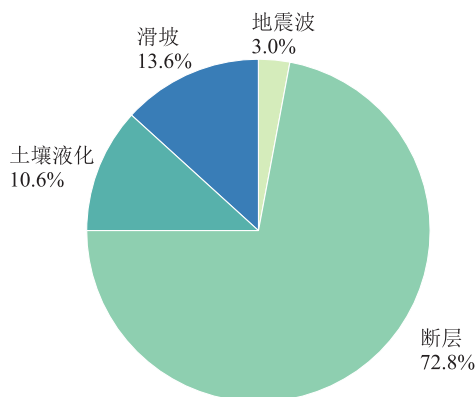


图7 地震作用下管道失效原因统计图

曲为主。典型案例为1992年美国兰德斯一大熊地震，圣安德烈斯断层2 m水平错动导致与其呈30°夹角的供水管道发生拉伸断裂；2001年中国昆仑山口西地震在昆仑山口泵站上行8 km处引发地表断裂，断裂带宽度为0.55 m（图8）。该断裂带与套管内垂直穿越青藏公路的主管道相交，导致10.5 m长的主管发生扭曲，其中3.2 m段完全断裂。此外，滑坡导致管道失效的比例也高达13.6%，作为一种直接的地表破坏现象，其巨大的冲击力和重量极易压垮或挤压管道，造成管道的物理破坏。1987年的厄瓜多尔地震引发的巨型滑坡摧毁了长达40 km的原油管道，导致原油大面积泄漏。地震引发的土壤液化现象会显著削弱土壤的承载能力，导致管道失去支撑，可能引发管道上浮、弯曲、屈曲、侧向扩展位移乃至断裂泄漏等一系列问题。本次案例统计中，由此导致的管道失效占比达10.6%。2011年的新西兰克莱斯特彻奇地震，土壤液化作用就曾造成管道被拉伸、弯曲而发生破裂。相较而言，地震波本身直接引起管道失效案例仅记录2例，占比3.0%，表明地震波效应对管道的直接影响相对有限。然而，地震波从震源产生并向四周辐射，其携带的振动能量可直接作用于管道结构，可能诱发管道的共振或加速疲劳破坏。此类破坏效应可能不会即时显现，但持续的振动应力累积可最终导致管道失效。典型案例为1965年美国普吉特海湾地震。尽管震中区域地面未出现显著位移，但地震波传播却直接致使管道发生结构变形与破损，并最终引发泄漏。

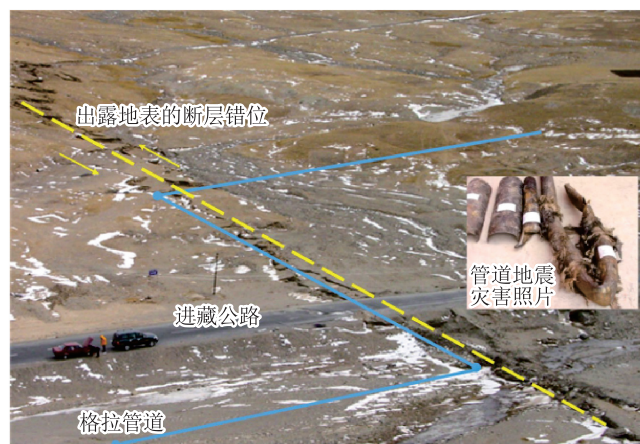


图8 中国昆仑山地震断裂带与格拉管道交汇示意图

（资料来源：据本文参考文献[49]）

3 结论与启示

本文基于全球55例地震引发的管道失效案例，统计分析了地震作用下埋地管道的失效规律，揭示

了地震灾害中管道的主要破坏机制。研究结果可为我国管道抗震设防策略提供一定的借鉴意义，并为未来管道的抗震技术研发方向提供重要参考。主要研究结论如下：

1) 全球地震频率的增大以及当前管道建设的快速发展共同造成了近年来管道地震破坏事故数量的逐年增加，地震对管道安全的威胁日渐加重，需要引起足够的重视。

2) 相对于长输管道，城市天然气和供水管道数量多、分布集中、路由复杂，在地震中更容易遭受破坏，且常伴随严重的次生灾害。

3) 全球超过90%的管道失效事件发生在震级6级以上的地震中，因此，可以此为依据并结合不同的地震数据，对国内穿越地震断裂带管道进行风险分级管控和抗震设防资源的投入。即震级在6级以下的地震对管道的影响相对有限。

4) 地震导致的管道失效以断裂为主（占比53.3%），其次为泄漏（29.0%）、屈曲（12.9%）及变形（4.8%）。这些失效主要源于地震诱发的强地面振动、断层错动及次生地质灾害（滑坡、土壤液化等）。建议未来管道的抗震研究可重点关注不同地震模式作用下管道断裂机制，以及如何避免或减少地震灾害下管道的断裂事故。

5) 断层错位位移是地震引起管道失效的主要原因，占比达72.8%，其次是滑坡和土壤液化，占比分别为13.6%和10.6%，在地震断裂带管道的抗震设防及运维中需要重点关注。此外，应定期关注管道穿越地震断裂带区域的滑坡、土壤液化等地质灾害的隐患排查工作。

6) 通过地震案例调研报告收集与分析发现，地震作用下管道的失效是个极复杂的物理过程，与地震动载荷、土壤、管道之间的相互作用形式、大小等有关，建议对国内外典型地震载荷导致的管道事故进行反演，为管道地震灾害事故预防提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] 郝建斌, 刘建平, 张杰, 等. 地震灾害对长输油气管道的危害[J]. 油气储运, 2009, 28(11): 27-30.
HAO Jianbin, LIU Jianping, ZHANG Jie, et al. Risk of earthquake hazard to long-distance oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2009, 28(11): 27-30.
- [2] 周荣军, 黄润秋, 雷建成, 等. 四川汶川8.0级地震地表破裂与震害特点[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2173-2183.
ZHOU Rongjun, HUANG Runqiu, LEI Jiancheng, et al. Surface

- rupture and hazard characteristics of wenchuan earthquake with magnitude 8.0 in Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2173-2183.
- [3] TANYAŞ H, HILL K, MAHONEY L, et al. The world's second-largest, recorded landslide event: Lessons learnt from the landslides triggered during and after the 2018 M_w 7.5 Papua New Guinea earthquake[J]. Engineering Geology, 2022, 297: 106504.
- [4] 潘毅, 范元青, 任宇, 等. 芦山 6.1 级地震山区典型震害调查与分析[J]. 土木工程学报, 2023, 56(12): 35-48.
PAN Yi, FAN Yuanqing, REN Yu, et al. Typical seismic damage investigation and analysis in Mountain area after Ms 6.1 Lushan earthquake[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(12): 35-48.
- [5] 姜开, 孙庆峰, 王学谦, 等. 基于失效数据统计的油气管道失效概率评估方法[J]. 港口航道与近海工程, 2024, 61(3): 71-75.
JIANG Kai, SUN Qingfeng, WANG Xueqian, et al. A method for evaluating failure probability of oil gas pipeline based on failure data statistics[J]. Port Engineering Technology, 2024, 61(3): 71-75.
- [6] 王钰滔, 吕延鑫, 杨万里, 等. 国内外输气管道事故研究综述[J]. 化工设备与管道, 2022, 59(4): 78-84.
WANG Yutao, LYU Yanxin, YANG Wanli, et al. Review of research for accidents occurred in gas transportation pipeline in home and abroad[J]. Process Equipment & Piping, 2022, 59(4): 78-84.
- [7] 卢英杰, 王艳, 严荣松, 等. 美国城镇燃气管道数据库建设和事故分析[J]. 城市燃气, 2024(11): 30-36.
HU Yingjie, WANG Yan, YAN Rongsong, et al. Construction of U.S. town gas pipeline database and accident analysis[J]. Urban Gas, 2024(11): 30-36.
- [8] UNAL E O, KOCAMAN S, GOKCEOGLU C. Impact assessment of geohazards triggered by 6 February 2023 Kahramanmaraş Earthquakes (M_w 7.7 and M_w 7.6) on the natural gas pipelines[J]. Engineering Geology, 2024, 334: 107508.
- [9] TOPRAK S, WHAM B P, NACAROGLU E, et al. Impact of seismic geohazards on water supply systems and pipeline performance: Insights from the 2023 kahramanmaraş earthquakes[J]. Engineering Geology, 2024, 340: 107681.
- [10] KAYA E S. Earthquake damage mitigation methods for buried pipelines under compressive loads: A case study of the Thames water pipeline[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2024, 212(Part A): 105322.
- [11] ALVES D T S, LIMA G B A. Establishing an onshore pipeline incident database to support operational risk management in Brazil—Part 2: Bowtie proposition and statistics of failure[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 155: 80-97.
- [12] SHEN Y, ZHOU W. A comparison of onshore oil and gas transmission pipeline incident statistics in Canada and the United States[J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2024, 45: 100679.
- [13] WANG Yihuan, XIA Ailin, LI Ruiling, et al. Probabilistic modeling of hydrogen pipeline failure utilizing limited statistical data[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 95: 1052-1066.
- [14] YANG Ruochen, SCHELL C A, RAYASAM D, et al. Hydrogen impact on transmission pipeline risk: Probabilistic analysis of failure causes[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2025, 257(Part A): 110825.
- [15] 帅健, 王晓霖, 左尚志. 地质灾害作用下管道的破坏行为与防护对策[J]. 焊管, 2008, 31(5): 9-15.
SHUAI Jian, WANG Xiaolin, ZUO Shangzhi. Breakage action and defend measures to pipeline under geological disaster[J]. Welded Pipe and Tube, 2008, 31(5): 9-15.
- [16] 孙祥杰. 泥石流的形成机理与其安全防护措施[J]. 黑龙江科技信息, 2012(13): 5.
SUN Xiangjie. Formation mechanism of debris flow and its safety protection measures[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2012(13): 5.
- [17] 汤爱平, 王连发, 武百超, 等. 考虑土结相互作用的逆断层作用下埋地管道性能离心机试验[J]. 地震工程学报, 2015, 37(3): 639-642.
TANG Aiping, WANG Lianfa, WU Baichao, et al. Centrifuge model test on a buried pipeline crossing reverse fault considering soil-structure interactions[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(3): 639-642.
- [18] 唐锦, 杨志全, 陈茂, 等. 地震作用下埋地管道动力响应研究进展及展望[J]. 工业安全与环保, 2024, 50(3): 12-17.
TANG Jin, YANG Zhiquan, CHEN Mao, et al. Research progress and prospect of dynamic response of buried pipelines under earthquake action[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2024, 50(3): 12-17.
- [19] 王志佳, 徐海岩, 张浩, 等. 地下管线管体破坏模式分类与发生机制[J]. 世界地震工程, 2016, 32(4): 118-124.
WANG Zhijia, XU Haiyan, ZHANG Hao, et al. Mode classification and mechanism of failure of underground pipeline body[J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(4): 118-124.
- [20] 孙明明, 方宏远, 赵海盛, 等. 不规则缺陷管道失效压力影响因素及评价方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(4): 152-159.
SUN Mingming, FANG Hongyuan, ZHAO Haisheng, et al. Influence factors and evaluation method on failure pressure of pipelines with irregular-shaped defects[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2022, 46(4): 152-159.
- [21] 彭卓南, 叶银灿. 台湾 9.21 集集地震考察兼论强震发震断层[J]. 地震地质, 2004, 26(4): 576-585.
PENG Funan, YE Yincan. Seismogenic fault of the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan province and the features of earthquake damages[J]. Seismology and Geology, 2004, 26(4): 576-585.
- [22] 王卫民, 赵连锋, 李娟, 等. 1999 年台湾集集地震震源破裂过程[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 132-147.
WANG Weimin, ZHAO Lianfeng, LI Juan, et al. Rupture process of the Chi-Chi (Taiwan) earthquake in 1999[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(1): 132-147.
- [23] 谢琛琦, 杨殷哲, 李军. 天水市“8·17”群发性地质灾害主要类型及影响因素分析[J]. 甘肃科技, 2023, 39(10): 59-62.
XIE Chenqi, YANG Yinzhe, LI Jun. Analysis of the main types and influencing factors of the "8.17" mass geological hazards in Tianshui City[J]. Gansu Science and Technology, 2023, 39(10): 59-62.
- [24] 叶飞, 郭恩栋, 刘金龙, 等. 芦山地震供水系统震害调查分析[J]. 世界地震工程, 2013, 29(4): 52-58.
YE Fei, GUO Endong, LIU Jinlong, et al. Seismic damage

- investigation and analysis of water supply system in Lushan earthquake[J]. *World Earthquake Engineering*, 2013, 29(4): 52-58.
- [25] 山西洪洞甘亭 ML5.0 地震现场工作队. 2003 年 11 月 25 日山西洪洞甘亭 ML5.0 地震考察报告[J]. *山西地震*, 2004(1): 1-9. Field Working Group for Hongtong, Shanxi, Earthquake of ML5.0 survey report on Nov. 25, 2003 Ganting Town of Hongtong, Shanxi, earthquake[J]. *Earthquake Research in Shanxi*, 2004(1): 1-9.
- [26] 周铁钢, 钱相博, 张冰冰. 芦山地震农村房屋震害调查与分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2013, 33(3): 53-58. ZHOU Tiegang, QIAN Xiangbo, ZHANG Bingbing. Investigation and analysis of damage to rural houses in Lushan earthquake[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2013, 33(3): 53-58.
- [27] BAI Yuzhu. Extrusion deformation process of ground surface during the Lushan earthquake in China[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2017, 8(2): 84-89.
- [28] DUEÑAS-OSORIO L, KWASINSKI A. Quantification of lifeline system interdependencies after the 27 February 2010 M_w 8.8 offshore maule, Chile, earthquake[J]. *Earthquake Spectra*, 2012, 28(1_suppl1): 581-603.
- [29] FAN Xiaoqing, ZHANG Libao, WANG Juke, et al. Analysis of faulting destruction and water supply pipeline damage from the first mainshock of the February 6, 2023 Türkiye earthquake doublet[J]. *Earthquake Science*, 2024, 37(1): 78-90.
- [30] KARIMIAN H, WIJEWICKREME D, HONEGGER D. Buried pipelines subjected to transverse ground movement: Comparison between full-scale testing and numerical modeling[C]//25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Hamburg: ASME, 2006: 73-79.
- [31] KONUK I, FREDJ A. FEM model for pipeline analysis of ice scour: A critical review[C]//ASME 2004 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Vancouver: ASME, 2004: 979-984.
- [32] KONUK I, YU S, GRACIE R. An ALE FEM model of ice scour[C]//The 11th International Conference of the International Association of Computer Methods and Advances in Geomechanics. Turin: International Association of Computer Methods and Advances in Geomechanics, 2005: 1-8.
- [33] KYRIAKIDES S, CORONA E. Plastic buckling and collapse under axial compression[Z]. *Mech. Offshore Pipelines Buckling Collapse*, 2007, 1: 280-318.
- [34] LEE L N H, ARIMAN T, CHEN C C. Elastic-plastic buckling of buried pipelines by seismic excitation[J]. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1984, 3(4): 168-173.
- [35] LI Yane, CHEN Xuezhong, CHEN Lijuan. The earth's rotation-dominated seismicity preceding the 2023 M_w 7.8 Gaziantep, Türkiye, earthquake[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2024, 15(6): 592-601.
- [36] LIANG Weijian, ZHAO Jidong. Multiscale modeling of large deformation in geomechanics[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2019, 43(5): 1080-1114.
- [37] LIANG Weijian, ZHAO Jidong. Multiscale modeling of large deformation in geomechanics[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2019, 43(5): 1080-1114.
- [38] MARUYAMA Y, KIMISHIMA K, YAMAZAKI F. Damage assessment of buried pipes due to the 2007 Niigata Chuetsu-Oki earthquake in Japan[J]. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 2011, 5(1): 57-70.
- [39] MATHESON I, ZHOU Wenxing, ZHOU J, et al. An upheaval buckling limit state function for onshore natural gas pipelines[C]//2008 7th International Pipeline Conference. Calgary: ASME, 2008: 781-791.
- [40] MATSUHASHI M, TSUSHIMA I, FUKATANI W, et al. Damage to sewage systems caused by the Great East Japan Earthquake, and governmental policy[J]. *Soils and Foundations*, 2014, 54(4): 902-909.
- [41] MELNICK D, CISTERNAS M, MORENO M, et al. Estimating coseismic coastal uplift with an intertidal mussel: Calibration for the 2010 Maule Chile earthquake ($M_w = 8.8$)[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 42: 29-42.
- [42] MEYERSON W D, O'ROURKE T D. Pipeline buckling caused by compressive ground failure during earthquakes[Z]. *Technical Rep*, 1991, 471-487.
- [43] MITSUYA M, SAKANOU E, MOTOHASHI H. Beam-mode buckling of buried pipeline subjected to seismic ground motion[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2013, 135(2): 021801.
- [44] MIYAJIMA M. Damage to water supply system induced by the 2011 Great East Japan earthquake[C]//Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake. Tokyo: [s.n.], 2012: 1467-1474.
- [45] O'ROURKE T D, ROTH B L, MIURA F, et al. Case history of high pressure pipeline response to liquefaction-induced ground movements[C]//Proceedings. 4th U.S. National Conference on Earthquake Engineering. El Cerrito: Earthquake Engineering Research Institute, 1990: 955-964.
- [46] TANG A K, ENG P, ENG C, et al. Lifelines performance of the M_w 8.8 off Shore Biobío, Chile earthquake[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 14: 922-930.
- [47] 帅义, 张俊杰, 王俊强, 等. 含褶皱凹陷管道抗弯能力试验及屈曲失效预测[J]. *天然气工业*, 2024, 44(12): 151-161. SHUAI Yi, ZHANG Junjie, WANG Junqiang, et al. Bending resistance test and buckling failure prediction model of pipelines with wrinkled dents[J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(12): 151-161.
- [48] ASGARHAJIFIROUZ M, DONG Xiaoyu, SHIRI H. Structural response of the spiral-welded pipelines buried in different uniform soil types to the strike-slip fault[J]. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2023, 3(4): 100142.
- [49] 刘爱文, 张立宝, 王铭锋. 超剪切破裂地震对跨断层管道的破坏与启示[J]. *城市与减灾*, 2022, 卷缺失(3): 52-57. LIU Aiwen, ZHANG Libao, WANG Mingfeng. Destruction of fault-crossing pipelines caused by super-shear fracture earthquakes and its enlightenment[J]. *City and Disaster Reduction*, 2022(3): 52-57.

