

· 施 工 ·



紧邻海底管道的水下爆破施工技术*

许建武^{1,2}, 卢玉敏²

(1. 大连理工大学, 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 针对海洋工程中水下爆破施工对已建海底管道的破坏风险等问题, 以紧邻海底管道的码头港池疏浚炸礁为例, 围绕水下爆破过程中对海底管道的保护, 系统阐述和分析紧邻海底管道的水下爆破施工关键思路和技术应用。结果表明, 相比水下裸露爆破方法, 水下钻孔爆破是更兼顾爆破效率、耗材和保护周边结构物的施工方法; 在爆破施工中, 炸药量是控制管道振动速度的核心, 需要根据管道安全允许振动速度计算出炸药量和安全距离的关系, 并结合施工设备和材料, 设计不同爆破距离的安全起爆网络; 通过设置减振孔和减振沟, 可以进一步减弱水下爆破引起的振动传递, 降低管道的振动破坏风险; 振动监测可以及时观察和收集管道在水下爆破过程中的振动状态, 为调整施工方法或分析管道安全提供参考, 施工后的管内完整性检测则是确保管道在后续生产中安全使用的重要方法。

关键词: 海底管道; 水下爆破; 炸药量; 起爆网络; 减振孔/沟; 振动监测

中图分类号: U655.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)10-0217-07

Technologies for underwater blasting construction adjacent to submarine pipelines

XU Jianwu^{1,2}, LU Yumin²

(1. The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: For the risk of damage to built submarine pipelines caused by underwater blasting construction in marine engineering, taking the reef blasting in harbor dredging engineering adjacent to submarine pipelines as an example, this paper systematically describes and analyzes key thinking and technical applications of underwater blasting construction, and it mainly focus on the protection of the submarine pipelines during construction. The conclusion indicates that compared with underwater exposed blasting methods, underwater drilling blasting is a better method in blasting efficiency, consumables, and protection of surrounding structures. In blasting construction, the explosive quantity is the core of controlling the vibration speed of pipelines. It is necessary to calculate the relationship between explosive quantity and safety distance based on the allowable vibration speed of pipeline before construction, and design a safe detonation network for different blasting distances combined with equipment and materials. By setting weakened vibration holes and groove, the vibration transmission caused by underwater blasting can be further reduced, and the risk of vibration damage to pipelines can be lowered. Vibration monitoring can timely observe and collect the vibration status of pipelines during underwater blasting, providing a reference for adjusting construction methods or analyzing pipelines safety, and the pipeline integrity testing after construction is an important method to ensure the safety use of pipelines in production.

Keywords: submarine pipeline; underwater blasting; explosive quantity; detonation network; weakened vibration holes and groove; vibration monitoring

收稿日期: 2025-01-09

*基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52071060)

作者简介: 许建武(1984—), 男, 博士, 正高级工程师, 从事港口与海岸工程等方面研究。

经过几十年的高速建设,海洋工程如港口码头、海洋油气等已具备一定的范围与规模^[1-4],不少新建工程在选址时经常存在与现有海底管道等直接交叉或距离过近的情况^[5-6],使得对已建管道的保护成为施工过程中无法回避的关键问题,尤其是在应用影响范围较大的施工技术时,如疏浚工程中岩石开挖常用的水下爆破方法,爆破时往往伴随着周围几十米至几百米范围内结构物的明显振动^[7-8],当振动速度超过管道所能承受的安全范围时,将可能导致管道发生变形、破裂甚至断开等问题,引发重大的安全问题,造成经济和环境损失。

虽然 JTS 204—2023《水运工程爆破技术规范》^[9](简称《规范》)中已有关于水下爆破的设计、施工、质量和安全等方面的技术指导,但在实际工程应用时,仍需结合工程现场的条件和保护对象的特点,选择合适的施工方法并制定专项施工方案。为此,本文以紧邻海底管道的水工工程为例,围绕水下爆破施工中对海底管道的保护,从爆破方法、炸药量、起爆网络、减振措施、振动监测和管道检测等方面,系统阐述和分析紧邻海底管道条件下的水下爆破施工关键思路和技术应用,旨在为类似工程的施工提供有价值的经验和参考。

1 工程概况

1.1 工程内容

项目新建 1 个 5 万 GT 的液化烃码头泊位,主要工程内容包括长 300 m 的码头、314 m 的接岸引桥、面积 25 万 m² 的港池航道水域以及相应的配套设施;港池航道附近,有一条已建的海底输油管道,整体工程平面布置见图 1。

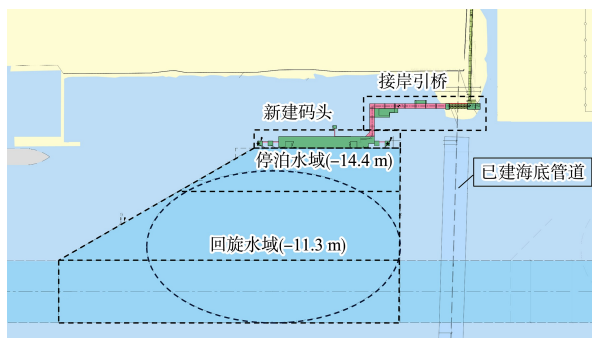


图 1 工程总平面

Fig. 1 Layout of the project

1.2 炸礁范围

本工程设计高/低水位为 4.7/0.4 m,港池航道疏浚底高程为-11.3(回旋水域)/-14.4 m(停泊水域)。原泥面至底高程的土层分布情况为:表层是海相沉积的淤泥层等较软弱土层;中部为强度稍高的砂层和粉质黏土层;下部则是强度较高且连续稳定分布的基岩层,主要包括全风化、强风化和中风化砂质泥岩。表层和中部土层均可使用挖泥船直接挖除,挖泥土层平均厚度约 6.0 m;下部土层则需要炸礁,即先进行水下爆破预处理后,才可使用挖泥船清礁。炸礁土层平均厚度约为 4.0(回旋水域)/7.5 m(停泊水域),最大炸礁土层厚度为 8.8 m,集中分布在码头前沿靠近管道的区域。

炸礁区域的面积为 15 万 m²,其中,靠近已建海底管道的炸礁区域与管道的最短距离仅有约 120 m,见图 2。近距离的水下爆破施工会对管道产生较大的振动效应和破坏风险,加之该管道自投产以来经常处于高频率使用状态,一旦管道受损将带来极大的经济损失。因此,水下爆破实施过程中对管道的保护为本工程炸礁安全施工的关键。

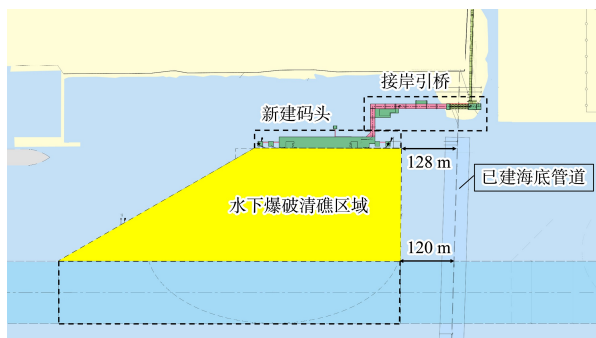


图 2 水域清礁范围

Fig. 2 Rock clearing area in the harbor basin

1.3 海底管道

已建的海底管道为连接出海口两侧罐区和炼油厂的原油输送管道, 管道外径 813 mm, 壁厚 11.9 mm, 海底埋地长 700 m, 管道底高程为 -21.6 m, 管道上方覆土厚 9 m。管道于 2010 年建成投产, 一直处于正常运行状态, 年使用天数约 330 d。

2 水下爆破

2.1 爆破方法

港池航道疏浚中, 水下炸礁常用的方法主要有水下钻孔爆破和水下裸露爆破 2 种。水下钻孔爆破往往需要使用大型设备进行施工, 施工工艺较为复杂, 人员和设备等资源消耗较大, 一般适用于大面积的炸礁施工, 施工应用范围广, 技术也较为成熟; 水下裸露爆破则更多用于面积较小的礁石、浅点区域清理, 或是盲炮处理以及施工条件难以支持水下钻孔爆破施工的情况。

本文工程炸礁施工具有面积大、土层厚的特点, 且施工地点周边有需要保护的已建管道, 相比水下裸露爆破, 水下钻孔爆破具有效率高、消耗低、爆破危害范围小等明显优点, 故采用水下钻孔爆破作为工程水下爆破的施工方法。

2.2 施工设备和材料

结合计划工期和炸礁工效要求, 工程水下钻孔爆破施工使用 2 艘炸礁船进行施工。炸礁船长 40 m, 宽 15 m, 满载吃水 2 m, 每艘船上配置 8 台 100 型潜孔钻, 直径 115 mm, 固定间距 2.5 m。水下爆破预处理完成后, 采用 1 艘 13 m³ 抓斗挖泥船进行清礁。

材料方面, 采用防水性能较好的 2 号岩石乳化炸药, 药卷用塑料袋包装, 直径 90 mm, 药卷长 40 cm, 标称质量为 3 kg。根据水位变化、孔深情况, 选择长 25 m 的防水型毫秒延期塑料导爆管雷管作为起爆元件, 毫秒延期为 1~17 共 17 个段别, 对应延期范围 25~1 200 ms, 用远距离击发器击发起爆雷管以击发塑料导爆管。

2.3 管道安全风险

已建管道上方覆土较深(9 m), 施工中的船舶抛锚、重物掉落等情况很难对管道造成损害, 故水下爆破施工对管道最直接的影响是爆破产生的振动效应对管道的扰动, 以及由此导致的管道变形或破损; 同时, 由于水下爆破深度绝大部分在水面 6 m 以下, 爆破时向上的能量转化为水中冲击波, 经水体吸收部分能量, 再经过水面与空气交界面的反射, 进入空气的能量比较小, 形成的空气冲击波影响范围有限, 因此, 水下爆破对陆上管道的影响远远小于海底管道。

根据已建管道的设计资料, 本区地震基本烈度为 VI 度, 特征周期分区为第 1 区, 地震动峰值加速度值为 0.05g, 地震动反应谱特征周期为 0.35 s。参考《规范》表 9.2.2 中对保护对象的爆破振动安全允许标准, 已建管道安全允许质点振动速度取为 1.5 cm/s。

3 施工方法

3.1 炸药量的计算和控制

3.1.1 单孔装药量

根据《规范》第 6.2.3.6 条, 单孔装药量 Q_s 按下式计算:

$$Q_s = q_0 abH_0 \quad (1)$$

式中: q_0 为水下钻孔爆破单位炸药消耗量, 取 1.72 kg/m³; a 为炮孔间距, 由钻机间距确定 $a = 2.5$ m; b 为炮孔排距, 参考炮孔间距宜大于炮孔排距的建议, 结合工程经验, 取 $b = 2$ m; H_0 为设计爆层厚度, 即开挖岩层厚度与计算超深值(根据爆破类别, 取 0.5 m)之和, 则最大 $H_0 = 9.30$ m。计算得到最大单孔装药量 $Q_{smax} = 79.98$ kg。

3.1.2 安全允许距离和装药量

《规范》第 9.2.3 条, 爆破振动安全允许距离 R 可通过下式行计算:

$$R = \left(\frac{K}{V} \right)^{1/\alpha} Q^{1/3} \quad (2)$$

式中: Q 为炸药量, kg, 齐发爆破为总药量, 延时爆破为最大单段药量; v 为保护对象所在质点振动安全允许速度, 本工程中 $v = 1.5 \text{ cm/s}$; K 为与爆破点至计算保护对象间的地形、地质条件有关的系数, α 为衰减指数, 根据工程炸礁地质, 参照《规范》中表 9.2.3 取 $K = 250$, $\alpha = 1.8$ 。

根据式(2), 可得到 R 和 Q 的对应关系。结合 Q_{Smax} , 可计算出相应的单段最大孔位数, 见表 1。

表 1 单段最大孔位数计算结果
Tab. 1 Calculation result of maximum number of holes in a single section

R/m	Q/kg	单段最大孔位数/个
120	342	4
130	435	5
140	544	6
150	669	8
160	811	10

3.2 爆破孔网设计和减振措施

3.2.1 爆破孔网设计

根据水下爆破使用的船机和钻机设备, 炮孔按梅花形布置, 每排 8 孔, 炮孔间距 2.5 m, 炮孔排距 2.0 m。由表 1 可知, 距离管道 150 m 以内的炸礁区域, 单段最大孔位数量为 4~8 个; 超过 150 m 外的炸礁区域, 单段最大孔位 ≥ 8 个。结合起爆元件的延期段别, 导爆管雷管起爆网络可采用 2 种方案, 见图 3。现场施工时, 在距离管道 200 m 范围内的爆破区域, 采用方案 1 中的起爆网络模式; 超过 200 m 范围的, 则采用方案 2 中的起爆网络模式。

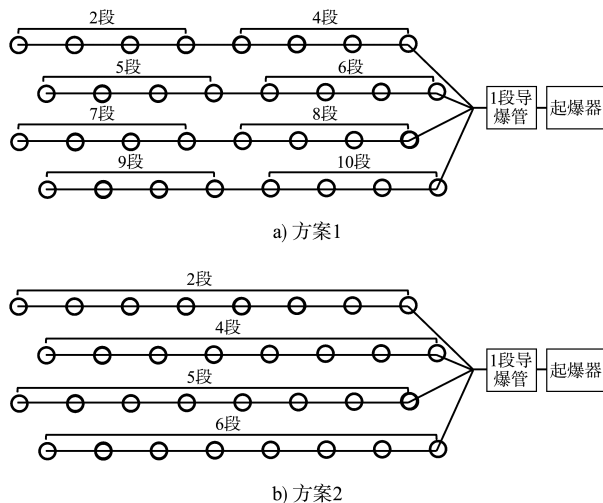


图 3 起爆网络

Fig. 3 Detonation network

3.2.2 减振孔和减振沟

在爆破区和保护对象间设置低于爆破区设计高程的密集钻孔, 用于消耗和吸收地震波能量, 形成减振隔离带, 能够有效实现降低爆破振动效应的目的^[10-12]。为了进一步减小爆破振动对海底管道的破坏风险, 爆破施工前, 使用水下爆破施工的钻孔设备, 在靠近管道的水域爆破边界处布置一条长约 300 m 的减振孔, 见图 4。根据工程地质情况和施工条件, 设置现场减振孔的参数为: 减振孔直径 115 mm, 孔间距 2.5 m, 共 2 排, 排间距 2 m, 孔底高程取 -13.3 (回旋水域)/-16.4 m (停泊水域)。

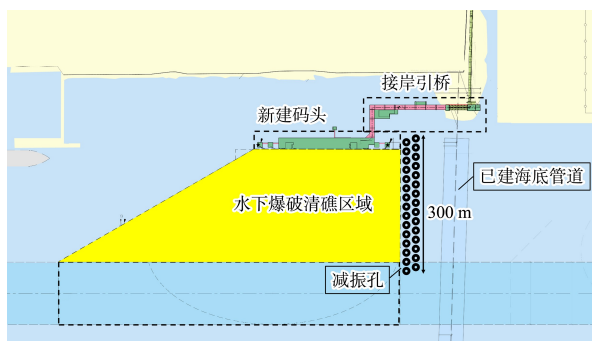


图 4 减振孔布置

Fig. 4 Layout of weakened vibration holes

紧接着, 以区别于第 3.2.1 条中的爆破孔网设计, 采用两孔起爆的网络模式(图 5), 优先在靠近管道的疏浚区域开始炸礁施工, 爆破完成后立即安排清礁, 形成一条宽约 10 m、深度与设计高程接近的减振沟。减振沟形成之后, 再陆续开展其他区域的炸礁施工。

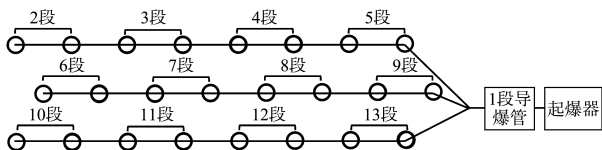


图 5 减振沟起爆网络

Fig. 5 Detonation network for weakened vibration groove

3.3 管道振动监测

3.3.1 振动监测点

为监测管道受水下爆破施工振动的影响情况, 更好地指导爆破施工, 在海底管道上方设置振动监测点。距离爆破区域最近的海底管道上方覆土深度较大(9 m), 难以布置直接的监测点, 但考虑到管道属于金属材料, 振动传递效果很好, 故将振动监测点设置在管道的接岸处, 距离爆破区域的最近距离约 150 m。

3.3.2 振动监测方法

现场采用专用爆破测振仪, 支持最长 1.5 h 的持续监测和记录, 且具备防水功能, 可以满足不同爆破工况的振动监测。

监测步骤为: 1) 起爆前 30 min, 根据当次监测的起爆工况, 设置仪器条件参数; 2) 安装固定测振仪, 通过轻微敲打下方管道, 调试测振仪正常运行; 3) 起爆预告发出后, 启动仪器, 开始监测, 监测人员撤离现场至安全地点; 4) 起爆警戒撤除后, 停止测振仪, 查看监测数据, 若正常则回收仪器, 若存在异常, 现场查明原因后进行记录; 5) 导出振动监测数据, 对比振动控制标准(1.5 cm/s), 初步判断管道受水下爆破振动的影响情况, 以及是否需要调整施工方法。

4 实施成效

4.1 振动监测结果

经过现场近 800 余次的振动监测, 主要监测

数据见表 2。爆破振动过程中监测到的最大振动速度为 1.08 cm/s, 平均振动速度为 0.31 cm/s, 均小于管道的安全允许质点振动速度 1.5 cm/s, 满足水下爆破过程中对管道的安全控制要求。

表 2 振动监测数据

Tab. 2 Data of vibration monitoring

监测次数/ 次	单次最大 药量/kg	最大振动速度/ (cm·s ⁻¹)	平均振动速度/ (cm·s ⁻¹)
834	960	1.08	0.31

4.2 管道内完整性检测

爆破施工全部结束后, 为查看海底管道是否受到水下爆破炸礁施工影响, 特对管道内部进行完整性检测^[13]。

- 1) 检测范围: 受爆破振动影响最大的海底区域管道段, 长度约 900 m。
- 2) 检测内容: 管道变形、缺陷检测。
- 3) 检测仪器: $\phi 813$ mm 变形检测器、 $\phi 813$ mm 漏磁检测器, 见图 6。



a) 变形检测器



b) 漏磁检测器

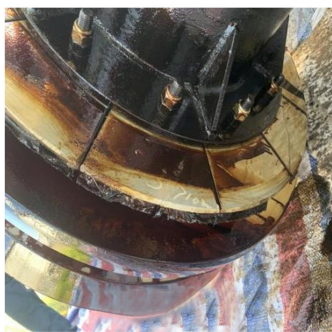
图 6 管内完整性检测仪器

Fig. 6 Inspection instrument for pipeline integrity

4) 检测步骤: ①对管道进行清管和测径, 确保管道具备发送检测器的环境和空间要求, 见图 7; ②沿管道设置定位盒, 类似步骤①, 从发球站发送变形检测器, 在收球站回收, 观察检测器状况, 确认数据有效性, 分析得到变形检测初步结果; ③根据变形监测结果调试漏磁检测器, 使用漏磁检测器重复上一次收发动作。



a) 发球前



b) 收球后

图 7 测径收发球

Fig. 7 Sending and receiving the ball for measuring diameter

5) 检测结果: 通过对变形和漏磁检测数据的分析, 未发现大于 2% 管道外径的几何变形点和除金属腐蚀以外的管道缺陷, 证明水下爆破炸礁施工未对管道造成不利影响。

5 结论

1) 常用的水下炸礁方法主要有水下钻孔爆破和水下裸露爆破, 水下钻孔爆破方法在爆破效率、耗材和影响范围方面都具有更加明显的优势, 尤其是在重要结构物(如海底管道)周边进行爆破时, 施工条件允许的情况下, 水下钻孔爆破是更好的

选择; 爆破施工的设备 and 材料可综合考虑工程地质特点、工程量、工期要求和设备调遣费用等方面进行选择。

2) 炸药量是决定爆破影响范围的重要因素, 实施水下爆破前, 应对单孔装药量、最大单段药量与管道的安全允许距离进行重点计算, 得到理论炸药量数据, 在此基础上, 设计爆破的起爆网络方案。

3) 开始水下钻孔爆破施工前, 可利用水下钻孔设备, 在保护对象和爆破点之间设置 2~3 排减振孔, 降低水下爆破产生的振动效应; 开始爆破后, 优先采用影响范围更小的起爆网络方案, 在距离管道更近的边界处进行爆破和清礁, 形成减振沟作为第 2 道管道保护屏障。

4) 施工中的振动监测可以及时跟踪管道受爆破振动影响的状态, 从而更好地指导水下爆破施工; 施工后的管道内变形和缺陷检测则是确定管道是否受爆破振动损害的重要方法。本文工程的管道振动监测和完整性检测结果也证明, 在采取有效的施工技术情况下, 如炸药量控制和减振措施等, 可以大大降低水下爆破对邻近海底管道的破坏风险。

参考文献:

- [1] 张志明, 杨国平. 我国沿海深水港口建设技术进展、发展趋势和面临的关键技术问题[J]. 水运工程, 2011(S1): 57-63.
ZHANG Z M, YANG G P. Technology development, development trend and key technical problems of construction of China's coastal deep-water ports [J]. Port & waterway engineering, 2011(S1): 57-63.
- [2] 毕珊珊, 沈益华, 刘长俭, 等. 我国海上通道及港口支布局建设现状特征及展望[J]. 水运工程, 2022(11): 7-12, 20.
BI S S, SHEN Y H, LIU C J, et al. Current situation characteristics and prospects of layout and construction of

- China's maritime channels and port fulcrums[J]. Port & waterway engineering, 2022(11): 7-12, 20.
- [3] 李秋扬, 赵明华, 任学军, 等. 中国油气管道建设现状及发展趋势[J]. 油气田地面工程, 2019, 38(S1): 14-17.
- LI Q Y, ZHAO M H, REN X J, et al. Construction status and development trend of Chinese oil & gas pipeline[J]. Oil-gas field surface engineering, 2019, 38(S1): 14-17.
- [4] 黄维和, 郑洪龙, 李明菲. 中国油气储运行业发展历程及展望[J]. 油气储运, 2019, 38(1): 1-11.
- HUANG W H, ZHENG H L, LI M F. Development history and prospect of oil & gas storage and transportation industry in China[J]. Oil & gas storage and transportation, 2019, 38(1): 1-11.
- [5] 崔占明, 黄峰, 宏常军, 等. 海底管道跨航道改造施工可行性研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(5): 127-128.
- CUI Z M, HUANG F, HONG C J, et al. Feasibility study on cross-channel reconstruction construction of submarine pipeline[J]. China petroleum and chemical standard and quality, 2018, 38(5): 127-128.
- [6] 张海顺, 周冠南, 蒋小金, 等. 海上桩基施工对邻近既有污水管道的影响[J]. 土木工程与管理学报, 2022, 39(4): 55-61.
- ZHANG H S, ZHOU G N, JIANG X J, et al. Influence of offshore pile foundation construction on adjacent existing sewage pipeline [J]. Journal of civil engineering and management, 2022, 39(4): 55-61.
- [7] 刘临雄, 吴绪权, 王建宙, 等. 水下爆破地震效应对公路桥影响的测试与分析[J]. 水运工程, 2002(3): 21-24.
- LIU L X, WU X Q, WANG J Z, et al. Measurement and analysis of the influence to highway bridge brought by underwater blasting vibration [J]. Port & waterway engineering, 2002(3): 21-24.
- [8] 张利洪. 水下爆破振动传播规律及其控制技术[J]. 水运工程, 2022(8): 186-191.
- ZHANG L H. Propagation law of underwater blasting vibration and its control technology[J]. Port & waterway engineering, 2022(8): 186-191.
- [9] 水运工程爆破技术规范: JTS 204—2023[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2023.
- Technical code of blasting for port and waterway engineering: JTS 204-2023 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2023.
- [10] 何兴贵, 左宇军, 赵明生, 等. 减振孔对爆破振动的影响规律研究[J]. 矿业研究与开发, 2016, 36(9): 93-96.
- HE X G, ZUO Y J, ZHAO M S, et al. Influence study of damping hole on blasting vibration[J]. Mining research and development, 2016, 36(9): 93-96.
- [11] 赵蕊, 李雅诗, 王建新, 等. 减振孔减振效应的数值模拟研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(2): 49-59.
- ZHAO R, LI Y S, WANG J X, et al. Numerical study on vibration reduction effect of barrier holes[J]. Journal of civil and environmental engineering, 2021, 43(2): 49-59.
- [12] 郭涛, 毛益明, 杨力, 等. 减振沟对爆破振动加速度峰值减振效应的试验研究[J]. 工程爆破, 2010, 16(2): 76-78, 90.
- GUO T, MAO Y M, YANG L, et al. Experimental study on damping effect of damping ditch on peak value of blasting vibration acceleration[J]. Engineering blasting, 2010, 16(2): 76-78, 90.
- [13] 油气管道内检测技术规范: SY/T 6597—2018[S]. 北京: 石油工业出版社, 2018.
- Specification for in-line inspection of oil & gas pipeline: SY/T 6597-2018 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.

(本文编辑 王传瑜)