

埋地输油管道对胶州湾第二海底隧道 爆破施工的动力响应

孙丰森¹,王海亮¹,张勇²,张雨晨¹

(1. 山东科技大学 安全与环境工程学院,山东 青岛 266590;

2. 青岛市政空间开发集团有限责任公司城轨分公司,山东 青岛 266000)

摘要:为深入研究埋地输油管道运行过程中的动力响应机制及不同工况下的输油管道振动规律,以青岛胶州湾第二海底隧道黄岛端斜井二期工程为背景,青岛港油港码头厂区内的埋地输油管道为研究对象,根据实测数据,采用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立数值模型,通过模拟起爆药量、爆心距、管道埋深3种工况因素,建立输油管道振动预测模型。结果表明:管道环迎爆侧的振动速度大于管道环的背爆侧,管道轴向的峰值振动最大值出现在工作面前方4m左右的管道截面上。得到的埋地输油管道振动速度预测模型对于工程爆破施工中邻近埋地输油管道的保护有重要参考意义。

关键词:海底隧道;爆破;输油管道;动力响应;安全标准

中图分类号:X947

文献标志码:A

Dynamic response of buried oil pipeline to blasting construction of the second submarine tunnel in Jiaozhou Bay

SUN Fengsen¹, WANG Hailiang¹, ZHANG Yong², ZHANG Yuchen¹

(1. College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and
Technology, Qingdao 266590, China;

2. Urban Rail Branch, Qingdao Municipal Space Development Group Co. Ltd, Qingdao 266000, China)

Abstract: To further study the dynamic response mechanism of buried oil pipelines and the vibration velocity law of oil pipelines under different working conditions, this study took the Huangdao end inclined shaft phase II project of the second submarine tunnel of Qingdao Jiaozhou Bay as the background and the buried oil pipeline in the Qingdao Oil Port dock plant as the research object. Based on the measured data, a numerical model was established by using ANSYS/LS-DYNA software. The oil pipeline's vibration velocity prediction model was established by simulating the three working conditions of detonation charge, detonation center distance, and pipeline buried depth. The results show that the vibration velocity on the pipe ring's side is greater than that on the back explosion side of the pipe ring, and the maximum value of the axial peak vibration velocity of the pipeline appears on the pipeline cross-section about 4 m in front of the working face. The obtained vibration velocity prediction model of buried oil pipelines can provide important reference for the protection of the neighboring buried oil pipelines in engineering blasting construction.

Key words: submarine tunnel; blasting; oil pipeline; dynamic response; safety standard

收稿日期:2023-07-01

基金项目:国家自然科学基金项目(10672091)

作者简介:孙丰森(1998—),男,山东泰安人,硕士研究生,主要从事爆破安全、地下工程研究。

王海亮(1963—),男,河北石家庄人,教授,博士,主要从事爆破安全、地下工程研究,本文通信作者。

E-mail:A403405@126.com

管道作为一种高便捷、经济的能源运输方式,是保障现代化工业生产和城市运转不可或缺的一部分。埋置地底深处的管道,受力情况复杂,不易检测,管道的安全稳定性受到地质灾害、施工爆破等多方面影响,且我国现实行的《爆破安全规程》等安全条例中,也未列出针对地下输油管道的爆破振动控制依据。吴铭芳等^[1]在施工爆破基础上利用数值模拟分析爆破对周围输油管道的作用距离以及对振动反应的规律。Jiang等^[2]利用数值模拟建立了不同工作内压下管道在爆破振动作用下的 Von-Mises 应力预测模型。彭佳伟^[3]通过建立三维有限元模型研究了管、土、油三者的耦合关系。张震^[4]采用现场监测与数值模拟相结合的方法,对超浅埋地铁站通道爆破开挖对临近埋地混凝土管道的动力响应进行研究。彭梦龙等^[5]建立管-土-隧动静耦合作用模型分析不同管道内压、围岩属性、管隧间距、药量条件下埋地管道的振速应力变化规律,引入 Morris 筛选法对各因素的影响程度进行评价。Jiang 等^[6]利用数值模拟,研究不同埋深、管道工作压力和管径的管道在爆破振动作用下的动力响应特征,基于量纲分析法提出了管道埋深、运行压力和管径的振动速度预测模型。现有研究主要集中于管压、管径、爆心距单个因素下爆破振动对管道的影响,但同时考虑多种工况因素下相同管道对隧道爆破振动响应特征的研究较少,且没有综合分析起爆药量、爆心距、管道埋深 3 种工况因素对埋地管道的动力响应。同时,目前大量研究仅探讨了管道对爆破振动动力响应的影响,未提及隧道爆破振动下管道整体的动力响应特征。

以青岛市胶州湾第二海底隧道黄岛端斜井工程爆破施工过程中附近的埋地输油管道为对象,运用 ANSYS/LS-DYNA 模拟隧道爆破施工时土中输油管道对振动响应的有限元模型,依据现场实测数据验证了模型的可靠性,然后进一步研究不同药量、爆心距、管道埋深等多种工况因素对管道动力响应的影响,建立多种工况下的管道安全预测模型,为爆破施工过程中下埋输油管道的振动响应及评判标准的研究提供参考,并为类似工程的埋地输油管道安全评价提供一定的指导。

1 工程概况

山东省青岛市胶州湾第二海底隧道起点位于黄岛区淮河东路千山南路路口以东 650 m 处,黄岛端采用钻爆法施工,爆破区域下穿刘公岛路东端及青岛油港区域,沿线邻近或下穿多条输油管线,油港码头内距离输油管道最近的隧道工作面埋深 20.71 m,距工作面水平距离为 12.88 m,直线距离仅为 24.38 m。

根据现场施工情况,将测振仪布设至暗埋管线出地接口(即距斜井隧道最近处)附近固定位置,确保测振位置保持一致,监测隧道掘进至不同里程位置处时暗埋输油管线附近地表的质点振速差异,监测的隧道工作面里程范围为 X1DK0+334~X1DK0+424。

2 数值模型及验证

2.1 模型尺寸及边界条件

基于隧道工作面距埋地管道最近处的地质条件及爆破方案等工况因素建立对应模型。隧道工作面爆破施工中,因自由面数量有限和周围岩石的夹制,一般隧道周围岩石对掏槽孔爆破的振动响应最明显^[7]。因此按自由面最少的一级掏槽孔单孔装药量 0.8 kg 建立炸药模型并赋予相应参数。模型总体尺寸为 30.8 m×30 m×34 m,其中输油管道埋深为 2 m,距隧道工作面水平距离为 12.8 m,距隧道拱顶垂向距离为 20.4 m,建立的模型基本符合现场实际工况。模型中,坐标系 x 方向沿隧道轴线方向指向已开挖区, y 方向指向隧道掘进方向的水平切向, z 方向指向垂直向上的方向,模拟采用国际单位制 kg-m-s。模型尺寸如图 1 所示。

根据油港码头厂区内的现场工况条件,有限元模型中的隧道内壁、隧道工作面及整体模型的顶面设为自由边界条件,有限元模型的其余边界均设置为无反射边界条件,关键字为 * BOUNDARY_NON_REFLECTING。

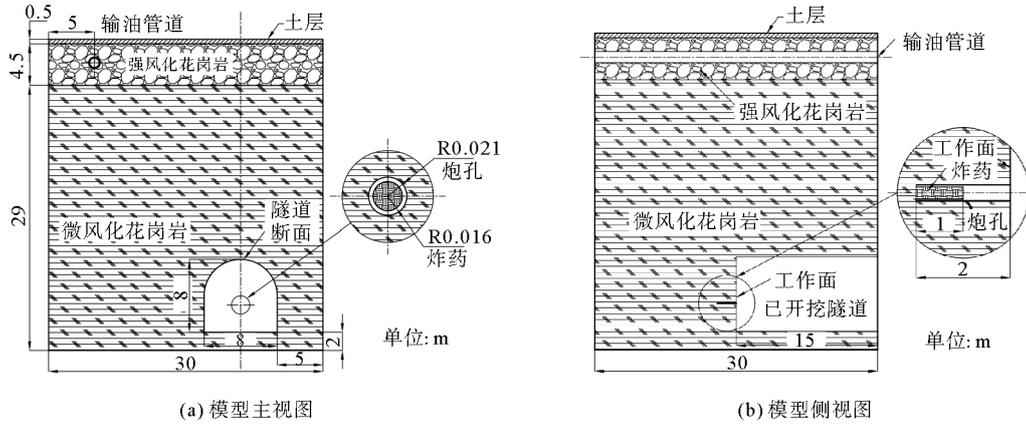


图 1 模型尺寸示意图

Fig. 1 Model size diagram

2.2 材料模型及参数

模型包含地土层、强风化花岗岩、微风化花岗岩、管道、石油、炸药、炮泥、空气 8 个部分。将空气、炸药及石油部分划分为 ALE 网格,将土体、管道、炮泥、岩土过渡层、微风化花岗岩划分为 Lagrange 网格。在流固耦合算法中,耦合范围的大小会影响数值模拟计算的精度,但当耦合半径增大到一定值后,影响可忽略不计^[8]。为了保证计算精度,在炸药附近 6 m 范围内建立空气域,与岩体、炮泥重合。模型中 ALE 网格和 Lagrange 网格间采用 * CONstrained_Lagrange_in_Solid 关键字耦合,石油与管道耦合;空气、炸药与微风化花岗岩、炮泥耦合^[9]。

实验室岩石样品采用岩性相近的均质体,与隧道施工中的岩体有区别,但实验室岩石的各项参数可以较好与隧道施工的岩性对应^[10],因此选择 * MAT_PLASTIC_KINEMATIC 模型模拟岩石。油港码头内邻近隧道掘进工作面的埋地输油管道均为 DN1000 型特制钢管,该管材是一种弹性均匀的塑性材料,采用弹塑性材料模型模拟输油管道材料,关键字为 * MAT_PLASTIC_KINEMATIC。选用 * MAT_SOAL_AND_FOAM 材料模型模拟土层介质^[11]。管道、岩体和土层的材料参数如表 1。

表 1 管道、岩层及土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of pipeline, rock and soil layer

类别	密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /GPa	泊松比 /MPa	屈服极限 /MPa	切线模量 /GPa	体积卸载 模量/GPa	屈服函数 常数 a_0
管道	7 900	210	0.30	516	13.5	—	—
强风化花岗岩	1 900	11	0.35	6	0.2	—	—
微风化花岗岩	2 600	52	0.25	60	20.0	—	—
土层	1 800	—	—	—	—	30	3.4×10^{-13}

选用关键字 * MAT_NULL 作为本次模拟的气体材料模型,气体流体 Arbitrary Lagrange-Euler 状态方程选择 * EOS_LINEAR_POLYNOMIAL,方程如式(1):

$$p_n = C_0 + C_1\mu_1 + C_2\mu_1^2 + C_3\mu_1^3 + (C_4 + C_5\mu_1 + C_6\mu_1^2)E_0 \quad (1)$$

式中: μ_1 为相对密度, $\mu_1 = \rho/\rho_0 - 1$, ρ 为当前气体的密度, ρ_0 为标准气体密度; p_n 为气体压力; $C_0 \sim C_6$ 为状态方程的相关参数; E_0 为气体的初始内能。气体的相关物理力学参数^[12]如表 2 所示。

表2 气体材料参数

Table 2 Air material parameters

密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E_0/Pa
1.29	0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5×10^5

炸药的材料模型采用关键字 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN, 状态方程采用关键字 * EOS_JWL, 方程如式(2):

$$p_e = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (2)$$

式中: p_e 为爆轰产物压力, Pa; V 为相对体积, E_0 为初始内能, A, B, R_1, R_2, ω 是 Jones-Wilkins-Lee(JWL) 状态方程参数。爆破施工采用 2 号岩石乳化炸药, 炸药参数^[13] 及 * EOS_JWL 方程参数如表 3 所示。

表3 2号岩石乳化炸药及JWL方程参数

Table 3 Parameters of No. 2 rock emulsion explosive and JWL equation

爆压 $p/$ GPa	爆速 $v/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	密度 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	JWL 方程参数					
			A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa
5.73	4 200	1 300	236	0.198	4.47	1.2	0.33	4.29

石油的材料模型采用关键字 * MAT_NULL, 状态方程采用关键字 * EOS_GRUNEISEN, 方程如式(3):

$$p_o = \frac{\rho_{o_0} C^2 \mu_2 \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2}\right) \mu_2 - \frac{a}{2} \mu_2^2\right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu_2 - S_2 \frac{\mu_2}{\mu_2 + 1} - S_3 \frac{\mu_2}{(\mu_2 + 1)^2}\right]} + (\gamma_0 + a \mu_2) E \quad (3)$$

式中: p_o 为石油的压力; C 为石油中声速, m/s; μ_2 为相对密度, $\mu_2 = \rho_o / \rho_{o_0} - 1$, ρ_o 为当前石油密度, ρ_{o_0} 为初始石油密度; γ_0 为 Gruneisen 常数; a 为一阶体积修正系数; E 为石油的初始内能; S_1, S_2, S_3 为激波-粒子速度曲线斜率系数。石油材料参数^[14] 如表 4。

表4 石油材料参数

Table 4 Petroleum material parameters

密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	压力截止/Pa	黏度系数	声速 $C/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	S_1	S_2	S_3	γ_0
890	-10	1.01×10^{-3}	1 290	2.56	1.986	1.226 8	0.5

2.3 数值模拟的可靠性分析

为了保证模拟模型的准确性, 需要校验数值模拟计算结果与现场实测数据的误差是否在合理范围内, 进而判断有限元模型的准确性与可行性。选取在工作面爆破施工时现场监测的管道振速数据与模拟结果进行对比, 模拟与实测值的绝对误差 0.007~0.090 cm/s, 相对误差 1.3%~15.1%, 由于数值模拟情况与现场工况之间总会存在一些出入, 存在 30% 以内的误差属于正常范围^[15]。因此, 认为该模型能够较为准确地反映现场实际情况。

3 模拟结果分析

3.1 模拟有效应力云图

提取整体模型的 Von-Mises 有效应力云图, 如图 2 所示。

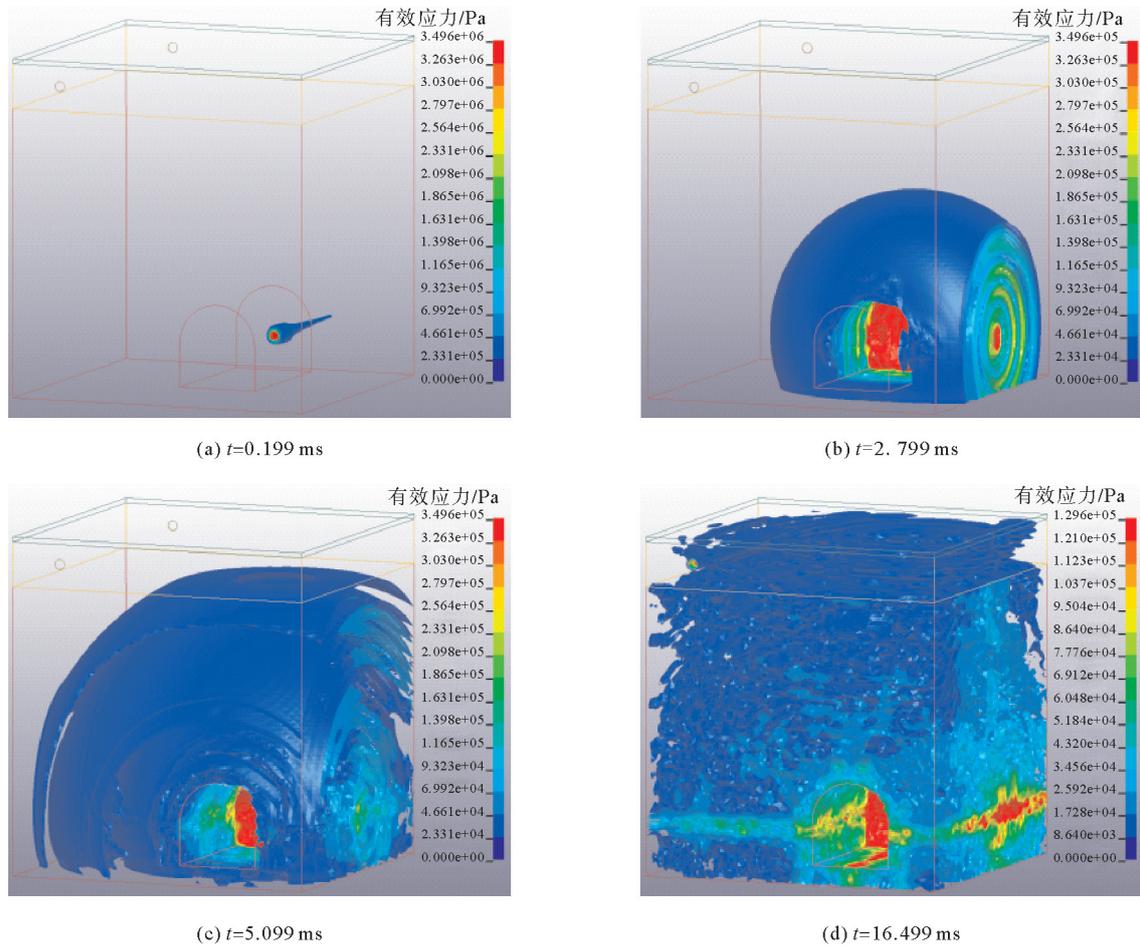


图 2 不同时刻整体模型 Von-Mises 有效应力云图

Fig. 2 Von-Mises effective stress nephogram of the whole model at different moments

由图 2 模型的有效应力云图可见, $t=0.199$ ms 时, 初始时刻炸药爆炸产生的应力波自起爆点以圆柱状向外传播, 此时炮孔周围岩体形成粉碎区、裂隙区。当 $t=2.799$ ms 时, 爆破地震波传至模型边界, 爆破地震波以规则球状向外传播, 引起周围介质应力发生变化。在 $t=5.099$ ms 时, 爆破地震波传至微风化花岗岩与岩土过渡层的交界位置, 由于地层性质差异, 爆破地震波的传播速度逐渐放缓, 造成的应力扰动也不断降低。在 $t=16.499$ ms 时, 可以看到整体模型已完全受到爆破地震波作用影响, 但是模型各位置处的有效应力均小于爆破地震波最初传至该处时的应力。当爆破地震波完全衰减后, 模型即停止动力响应。

分别提取 4.899、6.399、7.299、24.299 ms 时刻管道的有效应力图, 如图 3 所示, 分析爆破施工时管道的动力响应特点。由图 3 可知, $t=4.899$ ms 时, 输油管道还未受到爆破地震波影响。当 $t=6.399$ ms 时, 爆破地震波传至管道附近, 管道的中部位置率先受到爆破地震波作用, 有效应力增大。随着爆破地震波继续向前传播, 当 $t=7.299$ ms 时, 管道中部的有效应力继续增大且影响范围逐渐扩大, 管道多处出现应力集中现象, 整条管道逐步受到爆破地震波作用影响。 $t=24.299$ ms 时, 管道对爆破振动的响应基本结束。

3.2 管道振速响应特征

为直观分析模型中管道不同位置处的动力响应情况, 沿管道轴向、与隧道工作面平齐的管道截面起, 每隔 2 m 选取一个监测截面提取振速数据; 在管道的监测截面中, 将管道切面每隔 15° 选取一个监测点, 共选取 24 个节点。管道的监测截面及节点选取情况如图 4, 管道各节点峰值振速分布情况如图 5。

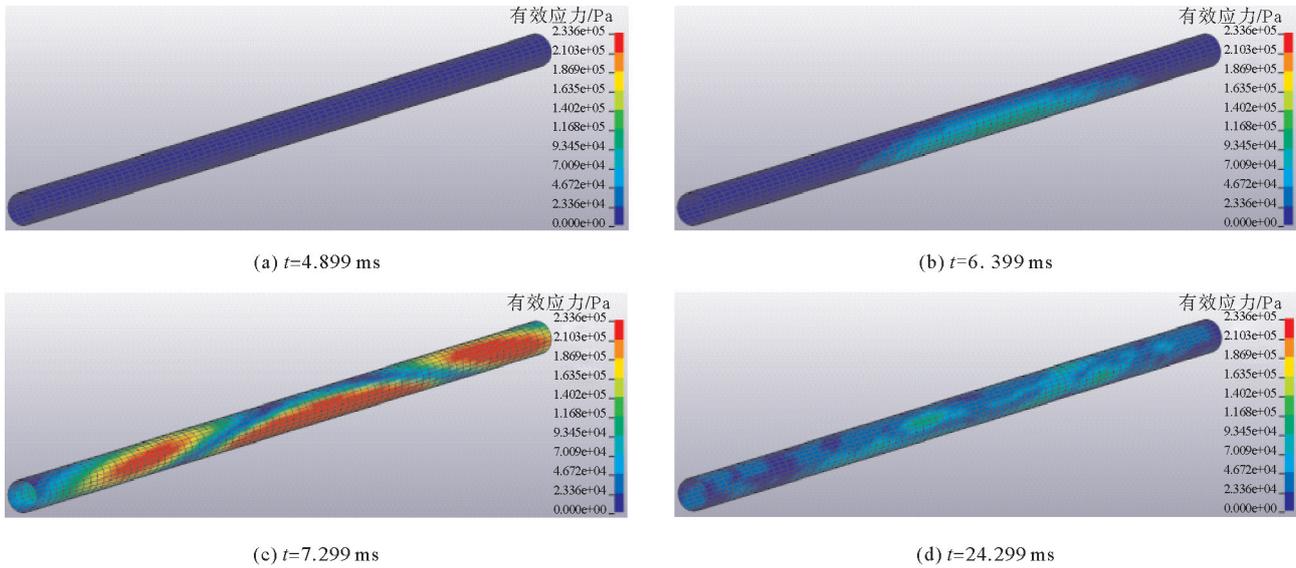


图3 不同时刻管道 Von-Mises 有效应力云图

Fig. 3 Von-Mises effective stress nephogram of pipeline at different times

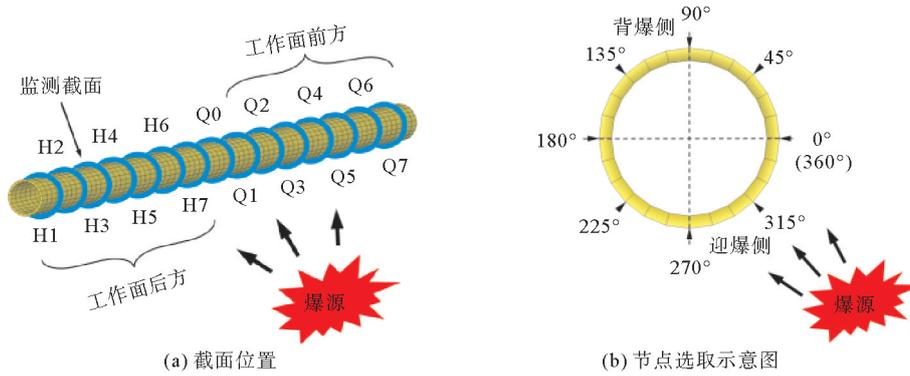


图4 管道监测截面、节点选取示意图

Fig. 4 Diagram of piping monitoring section and node selection

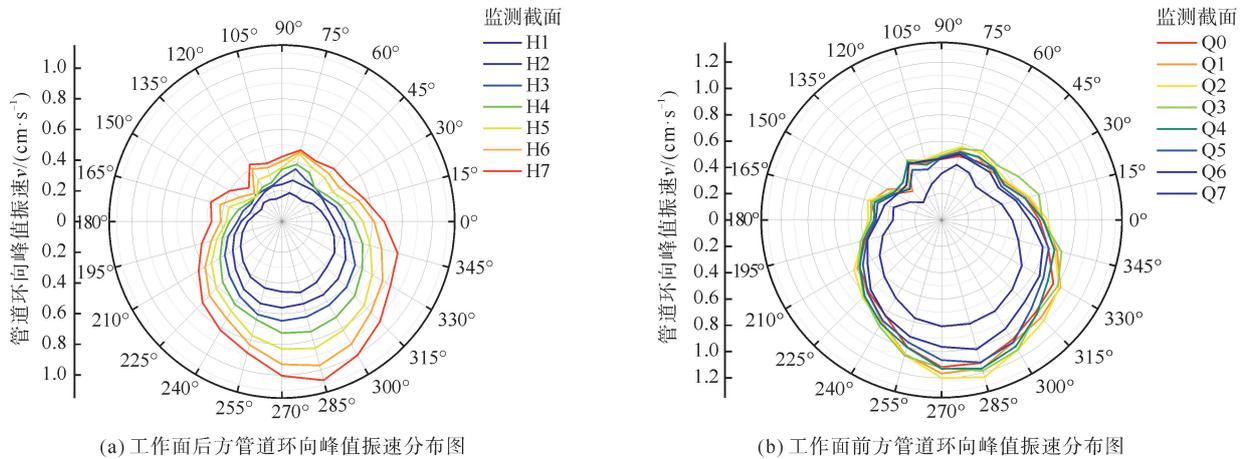


图5 工作面管道截面节点振动图

Fig. 5 Vibration velocity diagram of pipe section node in working face

在各个监测截面上的 24 个监测节点中,单截面上的最大峰值振动速度均出现在管道环向的 255°~315°,其中最大峰值振动速度为 1.24 cm/s,出现在 Q2 监测截面 285°节点处,可以认为管道的迎爆侧振动速

度普遍大于其他部位。当管道中无液体时,峰值振速表现为:管道底部迎爆侧最大、顶部背爆侧次之、腰部最小^[16]。综合分析此次模拟管道 15 个监测截面上峰值振速分布特征,当管道内有汽油液体时,峰值振速分布特征为:管道迎爆侧>管道腰部两侧>管道背爆侧。

鉴于管道环向最大峰值振动速度均出现在 255°~315°,因此选取管道所有监测截面 255°~315°节点的峰值振速数据,以隧道工作面所在平面为原点绘制管道轴向的峰值振动速度分布图,如图 6 所示。横轴正方向表示未开挖区域,负方向表示已开挖区域。

由图 6 可知,管道轴向上的最大峰值振速出现在工作面前方 4 m 左右的管道截面 Q2 上,与现场实测数据中的最大峰值振速相印证。推测隧道爆破时,上方埋地管道及地表的最大峰值振速出现在工作面前方未开挖部分的上部位置,与爆破振动预测公式(萨道夫斯基公式)中体现的随爆心距增大振速衰减有一定差异。从整体趋势上看,管道各节点振动速度会随着距隧道工作面前方 4 m 左右位置的直线距离增加而逐渐减小,符合爆破地震波传播特性^[17]。因此在隧道爆破振速预测中,传统的萨道夫斯基经验公式并不准确,应建立适用于隧道爆破施工下的振动速度预测公式,且在研究隧道爆破振动作用对埋地输油管道安全性影响时,应着重关注隧道工作面前方 10 m 到工作面后方 2 m 范围内的上部埋地输油管道迎爆侧的峰值振速。

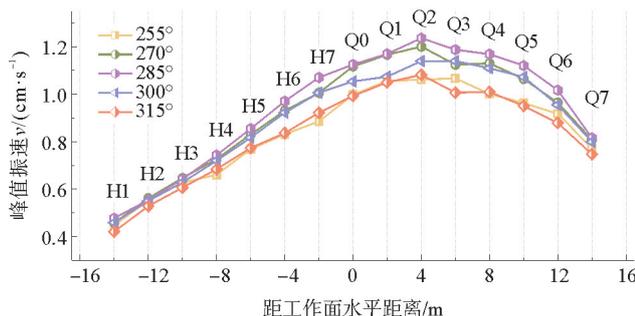


图 6 管道轴向峰值振速图

Fig. 6 Maximum axial vibration velocity diagram of pipeline

4 埋地管道对不同工况的动力响应

现场施工过程中,随着隧道工作面的推进、爆破方案的优化、管道运行状态及各种工况因素的改变,埋地输油管道受隧道爆破振动作用的影响程度也随之改变,以油-管-隧道模型为基础,通过控制单一变量,采用数值模拟方法研究起爆药量、爆心距和管道埋深 3 种主要工况因素对隧道爆破振动作用下埋地输油管道动力响应的影响。

4.1 不同药量

在其他条件不变的情况下,改变隧道起爆药量分别为 0.8、1.6、2.4、3.2、4.0 kg。根据模拟结果提取振速如图 7。

由图 7 可知,在 5 种不同药量条件下,管道轴向最大峰值振速出现在工作面前方 4~6 m 的 Q2、Q3 监测截面上。在 Q2、Q3 监测截面上,随着起爆药量的等量增加,管道最大峰值振速的并非等量增加,而是在某一定值附近浮动增加,同时增大幅度会随着药量的增大而逐渐减小。

4.2 不同爆心距

在其他条件不变的情况下,改变隧道与埋地输油管道之间的相对位置,研究爆心距对输油管道振动响应的影响,其中选取研究的管道距起爆点的垂向距离 H 分别为 15.4、20.4、25.4 m,水平距离 L 分别为 0、8、16.8 m,建立 9 个爆心距不同的模型,模型提取的数据见图 8、图 9。

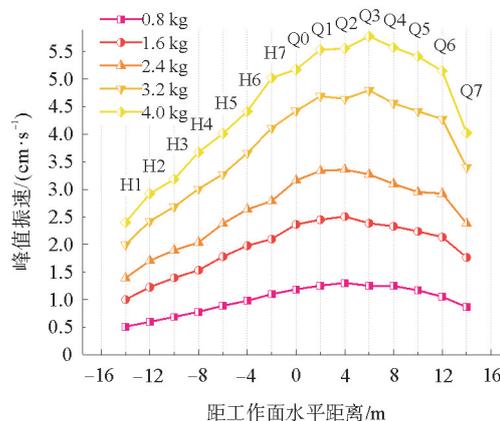


图 7 不同药量下管道轴向峰值振速图

Fig. 7 Maximum axial vibration velocity diagram of pipeline under different charge amount

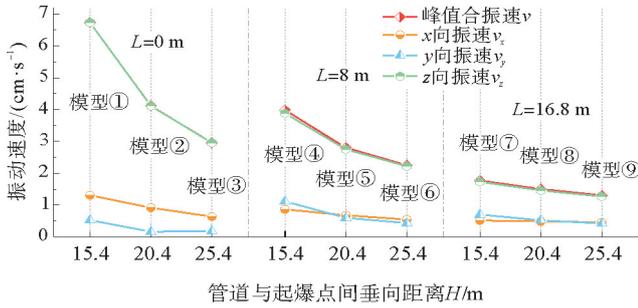


图8 三矢量振速与垂向距离 H 关系图

Fig. 8 Correlation between three vector vibration velocities and the vertical distance H

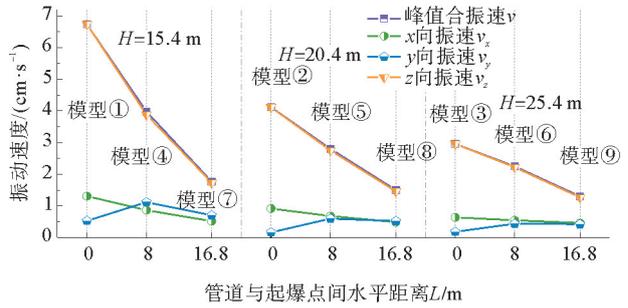


图9 三矢量振速与水平距离 L 关系图

Fig. 9 Correlation between three vector vibration velocities and the horizontal distance L

在9个模型中管道最大峰值合振速 v_{max} 与三向振速中的Z向振速最接近,X向振速与Y向振速的数值远小于Z向振速,隧道工作面位于埋地输油管道下部起爆时,输油管道的振动速度以Z向振动速度占主导。由此推测,各模型的管道与隧道起爆点之间相对角度不同,管道环向峰值合振速最大值均在管道迎爆侧偏下部位的原因是Z向振动速度占主导,同时在X向振速与Y向振速的共同作用下,模型中管道的最大峰值合振速出现在285°节点上。

4.3 不同埋深

在其他条件不变的情况下,选取1、1.5、2、2.5、3 m埋深下的埋地输油管道进行研究,分析其动力响应情况。根据模拟结果对振速进行提取如图10。

根据图10分析,管道埋深从1.0 m增至3.0 m,管道最大峰值振动速度从1.13 cm/s增大至1.32 cm/s,提高了0.19 cm/s,增幅17.6%,属于在一个较小的范围内浮动。因此在判定管道安全性时可考虑通过添加安全系数($K_f=1\sim 1.5$)来保证不同埋深下的埋地输油管道在相同爆破条件下均处于安全状态。

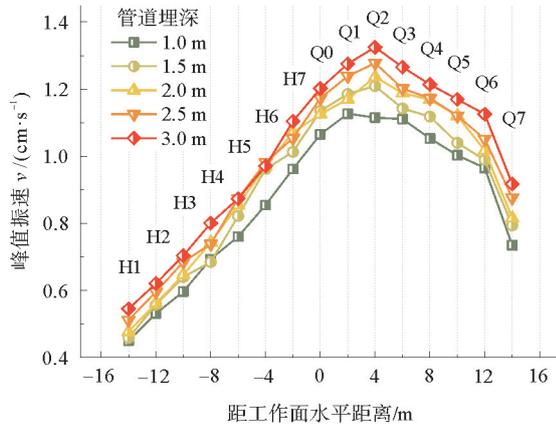


图10 不同爆心距下管道轴向峰值振速图

Fig. 10 Maximum axial vibration velocity diagram of pipeline under different explosion center distances

5 安全评判

5.1 振动预测模型

影响管道对爆破振动响应的因素^[18-19]包括:①因变量。峰值振速 v , 振动加速度 a , 振动频率 f , 振动位移 u ; ②自变量。炸药量 Q , 岩石密度 ρ , 爆轰时间 t , 波速 c , 管道距起爆点距离 R , 管道埋深 D 。

由量纲分析的 π 定理,埋地输油管道上的质点峰值振动速度 v 可表示为:

$$v = \phi(a, f, u, Q, \rho, t, c, d, R, D) \tag{4}$$

根据 π 定理, Q 、 R 和 c 为独立量纲,其余为无量纲量。对隧道爆破振动下埋地输油管道的药量 Q 、管道距起爆点距离 R 、管道埋深 D 进行分析,引入修正系数 λ_1 、 ω_1 ,可以得到 v 与 Q 、 R 、 D 间的函数关系式:

$$v = k_1 \left(\frac{1}{QR^{-3}} \right)^{\lambda_1} \left(\frac{D}{R} \right)^{\omega_1} \tag{5}$$

根据《爆破安全规程:GB 6722—2014》^[20]中评判安全许用振动速度的萨道夫斯基经验公式:

$$v = k \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^a \tag{6}$$

式中: v 质点峰值振动速度, cm/s; α 为振动衰减系数; k 为与介质和爆破条件因素有关的系数。

对式(5)、式(6)取对数, 合并两式整理得到管道埋深、起爆药量、垂向距离、水平距离的埋地输油管道振动速度预测模型:

$$v = k \left(\frac{D}{\sqrt{0.26H^2 + L^2}} \right)^\omega \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{\sqrt{0.26H^2 + L^2}} \right)^\lambda \quad (7)$$

式中, ω, λ 为实验修正系数。

5.2 振动预测模型修正系数

模拟获取了多工况下的管道最大峰值振速, 而且模型中地质地形条件未发生改变, 较为符合工程的实际条件。根据模拟数据, 求出适用于类似地形地质条件下的对应实验修正系数。将式(7)经过变换, 再代入扰动数据, 经过线性回归即可得到实验修正系数 $\omega = -0.334$, $\lambda = 2.318$, 所得预测模型为:

$$v = 417.75 \left(\frac{D}{\sqrt{0.26H^2 + L^2}} \right)^{-0.33} \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{\sqrt{0.26H^2 + L^2}} \right)^{2.32} \quad (8)$$

6 结论

1) 根据实测数据验证了提出的爆破影响下管道振动速度验证模型的准确性, 进一步建立其他不同工况的有限元模型分析得出, 当管道埋深、隧道与管道间爆心距等空间位置在一定范围内变化时, 在管道轴向上, 与隧道工作面推进方向平行的埋地输油管道最大峰值振动速度出现在工作面前方 2~6 m 的管道监测截面上; 在管道环向上, 管道的振动速度在迎爆侧上方最大, 腰部两侧次之, 背爆侧最小。

2) 采用量纲分析法, 基于萨道夫斯基经验公式建立考虑管道埋深、起爆药量、垂向距离、水平距离的埋地输油管道振动速度预测模型, 并根据模拟所提取数据对其修正系数进行拟合, 得到符合本研究工况条件下的埋地输油管道振动速度预测模型, 可为工程爆破施工中保护邻近埋地输油管道预测爆破振动速度提供理论依据。

参考文献:

- [1] 吴铭芳. 邻近隧道爆破施工对输油管道影响范围研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(增2): 703-706.
WU Mingfang. Research on the influence scope of adjacent tunnel blasting construction on oil pipeline[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(S2): 703-706.
- [2] JIANG N, ZHU B, HE X, et al. Safety assessment of buried pressurized gas pipelines subject to blasting vibrations induced by metro foundation pit excavation[J/OL]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 102. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103448.
- [3] 彭佳伟. 隧道爆破振动下埋地长输油管道的管-土-油相互作用及振动特征[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
PENG Jiawei. Research on the interaction between pipe and soil and vibration characteristics of long buried oil pipeline under blasting vibration[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [4] 张震, 周传波, 路世伟, 等. 爆破振动作用下邻近埋地混凝土管道动力响应特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(9): 79-84.
ZHANG Zhen, ZHOU Chuanbo, LU Shiwei, et al. Dynamic response characteristic of adjacent buried concrete pipeline subjected to blasting vibration[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(9): 79-84.
- [5] 彭梦龙, 施成华, 陈家旺. 隧道开挖和爆破扰动耦合作用下埋地管道安全性研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(19): 193-199.
PENG Menglong, SHI Chenghua, CHEN Jiawang. Safety of buried pipeline under coupling effect of tunnel excavation and blasting disturbance[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(19): 193-199.
- [6] JIANG N, ZHANG Y, WU T, et al. Determination of blasting vibration safety criterion for HDPE pipeline using vibration and strain data in a coastal metro line[J/OL]. Sensors, 2021, 21(21). DOI: 10.3390/s21217252.
- [7] 刘小鸣, 陈士海. 隧道掘进中掏槽孔爆破引起的地表振动波形预测[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(9): 1731-1737.
LIU Xiaoming, CHEN Shihai. Prediction of surface vibration waveform caused by cuthole blasting in tunneling[J]. Chinese

- Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(9): 1731-1737.
- [8] 黄佑鹏,王志亮,杨辉,等.流固耦合法模拟岩石爆破时耦合范围的确定[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2019,42(12):1672-1678.
HUANG Youpeng, WANG Zhiliang, YANG Hui, et al. Determination of coupling range in the simulation of rock blasting using fluid-solid coupling algorithm[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2019, 42(12): 1672-1678.
- [9] 周刚.隧道爆破振动对天然气管道影响规律研究[D].成都:西南交通大学,2016.
ZHOU Gang. Study on the effect of blasting vibration on gas pipeline[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [10] 武文宾.基于弹塑性损伤的软煤水压致裂渗流耦合数值模型[J].山东科技大学学报(自然科学版),2021,40(5):69-76.
WU Wenbin. Coupled numerical model of hydraulic fracturing and seepage of soft coal based on elastoplastic damage[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2021, 40(5): 69-76.
- [11] GIANNAROS E, KOTZAKOLIOS T, KOSTOPOULOS V. Blast response of composite pipeline structure using finite element techniques[J]. Journal of Composite Materials, 2016, 50(25): 3459-3476.
- [12] 郝郁清.爆破地震波对埋地燃气管道的动力响应研究[D].武汉:武汉理工大学,2020.
HAO Yuqing. Study on dynamic response of blasting seismic wave to underground gas pipeline[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [13] 高文乐,闫振伟,李元振,等.爆破振动对埋地输油管道影响的数值模拟[J].油气储运,2021,40(4):391-396.
GAO Wenle, YAN Zhenwei, LI Yuanzhen, et al. Numerical simulation of the influence of blasting vibration on buried oil pipelines [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(4): 391-396.
- [14] 张宪堂,董国庆,余辉,等.围压下空孔直径对直眼掏槽爆破振动的影响[J].山东科技大学学报(自然科学版),2023,42(3):44-52.
ZHANG Xiantang, DONG Guoqing, YU Hui, et al. Influence of empty hole diameters on blasting vibration of parallel cut under confining pressure[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2023, 42(3): 44-52.
- [15] 张雨晨,王海亮,石晨晨,等.隧道爆破下邻近管道动力响应的数值模拟[J].工程爆破,2023,29(3):95-105.
ZHANG Yuchen, WANG Hailiang, SHI Chenchen, et al. Numerical simulation of dynamic response of adjacent pipeline under tunnel blasting[J]. Engineering Blasting, 2023, 29(3): 95-105.
- [16] 吴钦鑫,王海亮,胡红星,等.海底新建隧道爆破对既有隧道的振动影响研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(4):41-49.
WU Qinxin, WANG Hailiang, HU Hongxing, et al. Study on blasting vibration of new undersea tunnel affecting existing tunnels[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2019, 38(4): 41-49.
- [17] 唐海,李海波,蒋鹏灿,等.地形地貌对爆破振动波传播的影响实验研究[J].岩石力学与工程学报,2007(9):1817-1823.
TANG Hai, LI Haibo, JIANG Pengcan, et al. Experimental study on the effect of topography on the propagation of blasting waves[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(9): 1817-1823.
- [18] 王超,周传波,路世伟,等.城市暗挖隧道爆破地震波传播规律研究[J].科学技术与工程,2017,17(6):158-162.
WANG Chao, ZHOU Chuanbo, LU Shiwei, et al. Propagation pattern of blasting vibration in the surrounding rock of metro tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(6): 158-162.
- [19] 黄一文,蒋楠,周传波,等.承插式混凝土管道爆破振动动力响应尺寸效应研究[J].振动工程学报,2021,34(5):969-978.
HUANG Yiwen, JIANG Nan, ZHOU Chuanbo, et al. Size effect of dynamic response to blasting vibration of socketed concrete pipeline[J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(5): 969-978.
- [20] 国家安全生产监督管理局.爆破安全规程:GB 6722—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.

(责任编辑:吕海亮)