

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.03.028

埋地输气管道对城市地下空间掘进爆破的力学响应*

孙宝财¹, 凌晓², 周文海², 王树江³

(1. 甘肃省特种设备检验检测研究院, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 石油化工学院, 兰州 730050;

3. 中国石油大学(北京) 机械与储运工程学院, 北京 102249)

摘要: 城市地下空间掘进爆破过程中冲击载荷对爆源近区的埋地输气管道的影响作为工程施工中的主要安全问题已被广泛关注。以某一具体施工案例为背景, 采用动力有限元软件 LS-DYNA 建立了土体-管道-岩石流固耦合模型。对 $\delta=0.02\text{ m}$ 、 0.04 m 、 0.06 m 、 0.08 m 的 4 种不同壁厚条件下管道的迎-背爆面有效应力和振动合速度分布规律进行了分析; 同时基于管土耦合模型, 进一步研究了爆破振动速度峰值由爆源传至管道迎爆面、背爆面和地表三个关键位置时的衰减情况。结果表明: 随着管道壁厚的增加, 管壁质点的有效应力、振动合速度都呈现出非线性衰减规律, 管道背爆面局部应力峰值数值明显高于迎爆面, 而迎爆面振动合速度明显高于背爆面。当管壁厚度增量为 $\Delta\delta=0.02\text{ m}$ 时, 迎爆面和背爆面有效应力峰值衰减率分别为 $\kappa_1=25.2\%$ 、 19.2% 、 10.7% 和 $\kappa_2=50\%$ 、 25% 、 13.3% 。4 种不同壁厚条件下迎-背爆面和背爆面-地表质点峰值振动速度平均衰减率分别为 $\eta_1=24.6\%$ 、 18.96% 、 15.04% 、 14.78% 和 $\eta_2=73.46\%$ 、 69.4% 、 66.52% 、 63.6% , 而衰减系数 α 的变化明显小于衰减率。故对于存在管道的这种非均匀地质条件振动速度预测采用萨道夫斯基公式已不再准确, 需要对该公式进行修正使用。

关键词: 地下空间; 掘进爆破; 埋地管道; 动力响应

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2022)03-0190-09

Mechanical Response of Buried Gas Pipeline to Excavation Blasting in Urban Underground Space

SUN Bao-cai¹, LING Xiao², ZHOU Wen-hai², WANG Shu-jiang³

(1. Gansu Province Special Equipment Inspection and Testing Institute, Lanzhou 730050, China;

2. School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

3. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of

Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China)

Abstract: The influence of impact loading generated during the excavation blasting process on a buried gas pipeline near the blasting source has been widely concerned as a major safety issue in the engineering construction of an urban underground space. Based on a specific construction case, this issue is studied with a fluid-solid coupling model considering soil, pipeline and rock by using the dynamic finite element software LS-DYNA. The distribution laws of the effective stresses and the resultant velocities of vibration on the two sides of the pipeline towards and away from the blasting source are analyzed with four different wall thicknesses (δ) of 0.02 m , 0.04 m , 0.06 m and 0.08 m . At the same time, the attenuation characteristics of the peak blasting vibration velocities on the ground and the two sides of the pipeline towards and away from the blasting source are further investigated based on the established coupling model. The results present a nonlinear attenuation law of the effective stresses and the resultant velocities of vibration with the increase of the pipe wall thickness. Specifically, Moreover, the local peak stress on the side of the pipeline away from the blasting source is significantly higher than that on the side towards the blasting source, whereas the resultant vibration velocities on the side of the pipeline towards the blasting source is significantly higher than that on

the side away from the blasting source. Now that the pipe wall thickness increases by an increment of $\Delta\delta = 0.02$ m, the attenuation rates of the peak effective stresses on both sides (towards and away) of the pipeline are $\kappa_1 = 25.2\%$, 19.2% , 10.7% and $\kappa_2 = 50\%$, 25% , 13.3% , respectively. For the four different wall thicknesses, the average attenuation rates of peak particle vibration velocities from the side of the pipeline towards the blasting source to the side of the pipeline away from the blasting source and from the side of the pipeline away from the blasting source to ground are $\eta_1 = 24.6\%$, 18.96% , 15.04% , 14.78% and $\eta_2 = 73.46\%$, 69.4% , 66.52% , 63.6% respectively. However, the change of attenuation coefficient is significantly smaller than the attenuation rate. Therefore, it is no longer accurate to use the Sadovsky formula, which needs to be corrected, to predict the vibration velocities of pipelines in such inhomogeneous geological conditions.

Key words: underground space; excavation blasting; buried pipeline; dynamic response

近年来我国城市地下空间工程广泛采用掘进爆破的方式进行开挖,同时对临近爆破区域已有埋地输气管道的安全稳定运行问题提出了巨大挑战。爆破过程中地震波通过岩土体传播到管道和地表,一旦地震波强度超过管道屈服强度,管道则发生较大的塑性变形,甚至造成屈服破坏。

目前为止,已有不少学者通过试验和数值计算的方法对该问题做了相关研究^[1,2]。张黎明等基于管道屈服破坏的应变准则创建了管道破坏时临界应变值与地表质点振动峰值速度之间的数学模型^[3],并利用试验监测的振动数据对管道可承受最大允许峰值振速进行了判断。朱斌等通过下穿预埋燃气管道的现场爆破试验^[4],并结合应变分布特性和应力波传播理论对地震波传播规律进行分析。研究指出管道允许的应变峰值为 366.4×10^{-6} ,地表最大安全控制振速为 8.5 cm/s。夏宇馨等以青岛地铁下穿给水管道隧道爆破为工程背景^[5],结合现场试验和数值模拟方法对给水管道的动力响应特性进行了研究,同时还建立了管道的有效应力和地表质点振速间的数学模型。指出类似这种钢筋混凝土管的极限动态抗拉强度约为 2 MPa,确保管道安全的地表振速应控制在 3.3 cm/s 以内。郑爽英等同样以下穿既有输气管道的隧道爆破工程为背景^[6],利用数值模拟结合正交试验的方法对管道应力与振速响应特征影响的 5 个因素(管径、壁厚、管深、管道与隧道净距、管道内压)进行了研究,指出管道应力分布主要受内压和壁厚的影响,管道运行时的最大动应力可叠加空管动态应力峰值和有压静载状态的主应力进行估算。梁政等同样通过控制变量法^[7,8],分析了不同爆源间距、管道壁厚和装药量下的管道受

载情况。Kouretzis 等在不考虑管道周围岩土体对管道挤压作用的前提下^[9],给出了爆破载荷作用下管道受载的解析解,并与实际工程案例进行了对比,验证了其理论的准确性。Mirzaei 等分别采用试验^[10-13]、数值模拟以及两者对比的方式对工程爆破近区的管道受载机制和动态响应情况进行了深入研究。Nan Jiang 等利用动力有限元软件建立了 $3D$ 爆破模型^[14],通过数值计算结果和现场监测数据的对比,对管道和管道近区岩土体的振动效应进行了研究。王飞等采用数值模拟的方法对天然气管道在爆破载荷作用下的变形情况、应力应变分布以及破坏模式进行了分析研究^[15]。

依托某一具体城市地下掘进爆破实例,采用动力有限元软件 LS-DYNA 建立岩土流固耦合模型,对爆源近区管道受载情况以及动力响应机制进行了研究,主要分析了管道迎-背爆面有效应力的分布情况、管道上振动波传播规律以及衰减情况,为类似工程爆破安全施工提供理论指导。

1 管道弹塑性理论

在冲击载荷作用下,管道的变形通常有体积和形状改变,体积改变是由各向相等的应力引起,一般表现为弹性性质,而管道塑性变形是由于形状的改变而引起。管道任意质点处受力状态可分解为两部分,即球形应力张量 σ_m 和偏斜应力张量 s_{ij} ,总应力方程为

$$\sigma_{ij} = \sigma_m + s_{ij} \quad (1)$$

任意一点处主平面方程可表示为

$$(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_n)l_j = 0 \quad (2)$$

式中: δ_{ij} 为 Kronecker 符号; σ_n 为主应力; l_j 为方向余弦。

由(2)式展开的线性方程有非零解的充要条件是系数行列式等于零,并将式(1)代入系数行列式可得

$$\sigma_n^3 - J_1\sigma_n^2 - J_2\sigma_n - J_3 = 0 \quad (3)$$

收稿日期:2022-04-22

作者简介:孙宝财(1981-),男,高级工程师、博士,研究方向承压设备安全,(E-mail)332820859@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金(51904138);甘肃省自然科学基金(21JR7RA221、20JR5RA451)

式中: J_1 、 J_2 、 J_3 为偏应力的三个不变量; J_2 代表塑性变形时有效剪应力大小,表征物体屈服破坏形式。

$$J_2 = -\frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = s_1s_2 + s_2s_3 + s_3s_1 \quad (4)$$

Von Mises 应力是基于剪切应变能的一种等效应力,可定义为

$$\sigma_{effective} = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (5)$$

由公式(4)和(5)可以看出, J_2 和 $\sigma_{effective}$ 具有相同的函数模式,也就是说 Von Mises 应力可表征偏应力引起塑性变形导致物体的屈服破坏,因此采用 $\sigma_{effective}$ 对物体弹塑性状态的屈服破坏分析更为准确。

2 材料模型及参数

依据某城市地下空间掘进爆破案例,拟建立相似 3D 数值计算模型,模型总尺寸取长度 $L = 20$ m,高度 $H = 20$ m,厚度 $d = 2$ m。从地表至管道中心 4 m 厚度为软土层,管道置于软土层中心,软土层下部为约 16 m 的岩土层,管道直径 $D = 1$ m。为了对比爆炸载荷对不同壁厚输气管道的破坏以及安全运行的影响,分别设置 4 种不同壁厚管道进行对比分析,管壁厚度 δ 分别取 0.02 m、0.04 m、0.06 m、0.08 m。掘进形式采用左右两侧双向同时起爆,其中炮孔深度距地表 10 m,孔径 $\phi = 40$ mm,孔深和堵塞长度分别为 2 m 和 0.5 m,单段最大药量 $Q = 8$ kg。炸药和岩体外侧采用位移约束和非反射条件控制,管道与土体、炸药与岩体接触面定义流固耦合算法,为防止管道轴向变形过大,对管道两端采用固体约束控制。岩土体以及管道采用 LAGRANGE 算法控制,炸药选取流变性的 ALE 算法控制,具体模型如图 1 所示。

炸药采用乳化炸药,材料为 * MAT-HIGH-EXPLOSIVE-BURN, 假定岩体为满足各向同性的弹塑

性材料,选用 * MAT-PLASTIC-KINEMATIC 作为其材料类型;土体选用材料类型为 * MAT-SOIL-AND-FOAM。低碳合金钢制管道材料选用 * MAT-PLASTIC-KINEMATIC 类型,该模型可表征各向同性硬化和随动硬化塑性模型。

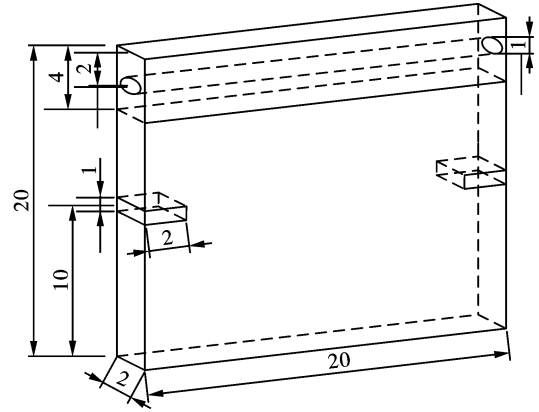


图 1 结构模型(单位:m)
Fig. 1 Structural model(unit:m)

结合 JWL 状态方程来表示炸药爆炸过程中压力与体积的关系^[16]

$$P = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (6)$$

土介质材料选取满足失效准则的模型,要表现出破裂失效还需要添加失效关键字。其屈服应力关系为

$$\begin{cases} \varphi = \frac{1}{2}\varepsilon_{ij}^2 - \frac{1}{3}\sigma_y^2 = 0 \\ \sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\varepsilon}{c}\right)^{\frac{1}{p}}\right](\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_{ij}^p) \\ \varepsilon_{ij}^2 = s_{ij} - a_{ij} \end{cases} \quad (7)$$

式中, s_{ij} 为柯西应力张量; P 、 c 为输入常数; β 为硬化参数; σ_0 为屈服应力,MPa; E_p 为塑性硬化模量,MPa; ε 、 ε^p 为应变率、有效塑性应变。见表 1、表 2、表 3。

表 1 炸药参数^[17]

Table 1 Parameters of explosive

$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$v/(m \cdot s^{-1})$	P/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa
1.18	5122	9.53	276.2	8.44	5.2	2.1	0.5	3.87

P 为爆轰压力; V 为相对体积; E_0 为初始比内能; A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 均为描述 JWL 方程的独立常数。

表 2 岩土体材料参数

Table 2 Material parameters of rock and soil mass

材料	$\rho/(g \cdot m^{-3})$	E/MPa	G/MPa	μ	σ_y/MPa	β
土壤	1800	—	1.6	0.30	—	—
岩体	2650	40	—	0.15	100	0.5

ρ 为密度; E 为弹性模量; G 为剪切模量; μ 为泊松比; σ_y 为屈服极限; β 为岩体硬化系数。

表 3 管道材料参数

Table 3 Pipe material parameters

材料	$\rho / (\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	E / MPa	μ	σ_y / MPa	$E_{\text{tan}} / \text{GPa}$
钢管	7850	205	0.3	353	10

ρ 为密度; E 为弹性模量; μ 为泊松比; σ_y 为屈服应力; E_{tan} 为剪切模量。

3 爆破载荷作用下输气管道有效应力及振动速度分布

3.1 有效应力分布

定义管道下侧靠近爆源为迎爆面, 上侧背离爆源为背爆面, 沿管道延伸方向每隔 5 m 距离取一监测点, 从左至右共取 5 个监测点分别为 A、B、C、D、E, 具体情况如图 2 所示。

通过上文分析可知, Von Mises 应力 $\sigma_{\text{effective}}$ 考虑了三个方向的应力变化, 并且能够较为准确地反映管道在冲击载荷作用下的塑性变形和屈服破坏形

式, 因此有必要对管道延伸方向迎背爆面上不同质点的 $\sigma_{\text{effective}}$ 进行分析。图 3 为不同时刻壁厚 $\delta = 0.02 \text{ m}$ 的管道上有效应力分布云图。

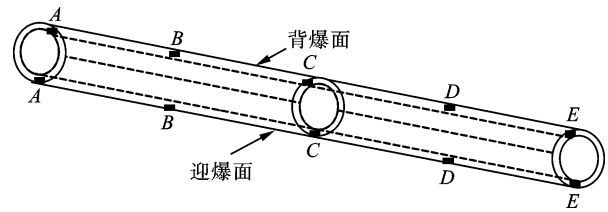


图 2 监测质点分布情况

Fig. 2 Locations of the monitoring points

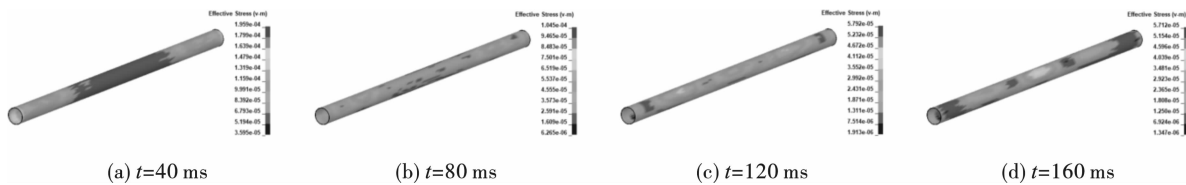


图 3 不同时刻管道有效应力云图

Fig. 3 Effective stress nephogram of the pipeline at different times

地震波约 $t = 12 \text{ ms}$ 时传到管道中并引起管道表面质点有效应力的增加, 管壁振动效应逐渐增强。约 $20 \sim 50 \text{ ms}$ 时刻达到应力峰值状态, 其最大值可达 0.107 GPa 。约 $t = 80 \text{ ms}$ 以后爆破振动波在管道中传播能量逐渐消失, 管壁上有效应力逐渐降低并趋于稳定。对比不同时刻有效应力云图发现, 管道背爆面局部应力峰值数值明显高于迎爆面, 而文献 [4] 中朱斌等人通过对下穿预埋燃气管道的现场爆破试验研究指出管道中心截面为最危险截面, 并且截面背爆侧峰值应力大于迎爆侧, 该规律与本文数值模拟结果一致。其原因是背爆面上侧为无限大地表, 即背爆面上侧存在较大区域的自由面, 当应力波

穿过背爆面之后, 在地表自由面上会形成强烈的反射拉伸波, 导致背爆面出现了局部应力放大效应。由于是双爆源起爆, 所以接近管道两端处有效应力最大, 而管道中心部位最小, 其最危险工况接近管道两端位置。该规律与文献 [4] 正好相反, 原因是本文选择两端同时起爆, 而文献 [4] 则是爆源选在管道中心正下方的单爆源起爆方式。由于迎背爆面应力分布存在较大差异, 所以有必要对其进一步研究。分别提取 4 种不同壁厚 $\delta = 0.02 \text{ m}$ 、 0.04 m 、 0.06 m 、 0.08 m 条件下管道迎、背爆面 5 个监测质点的有效应力随时间变化数值, 绘制有效应力时程曲线, 如图 4、图 5 所示。

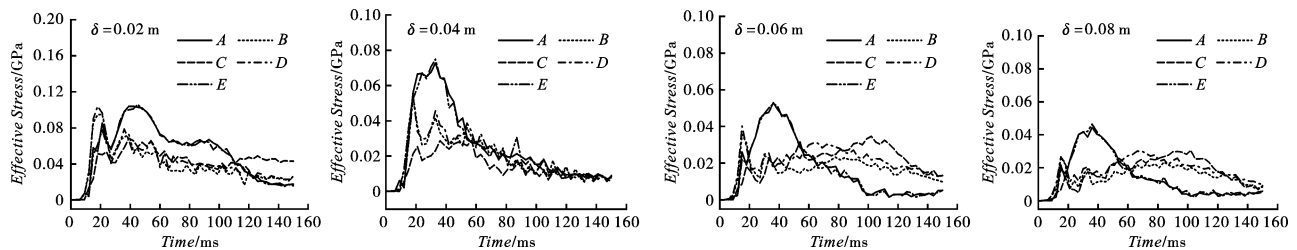


图 4 迎爆面监测质点有效应力时程曲线

Fig. 4 Time history curve of the effective stresses at the monitoring point on the side of the pipeline towards the blasting source

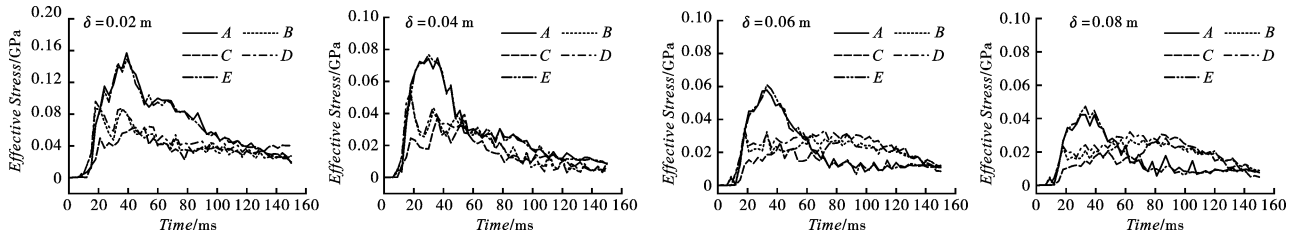


图5 背爆面监测质点有效应力时程曲线

Fig. 5 Time history curve of the effective stresses at the monitoring point on the side of the pipeline away from the blasting source

通过分析发现,无论迎背爆面,都呈现出随管道壁厚增加,有效应力呈衰减趋势,并且呈非线性衰减,文献[8]对不同壁厚条件下管道表面的应力分布进状况进行了研究,其分布规律与本文所得结论一致。当管壁厚度增量为 $\Delta\delta = 0.02\text{ m}$ 时,迎爆面和背爆面有效应力峰值衰减率分别为 $\kappa_1 = 25.2\%$ 、 19.2% 、 10.7% 和 $\kappa_2 = 50\%$ 、 25% 、 13.3% ,背爆面有效应力峰值衰减率明显高于迎爆面。其主要原因是,壁厚增加的同时增大了振动波阻抗,使其管道

表面受力载荷减弱。在等厚度增加壁厚的情况下,有效应力衰减率逐渐减小,在节约工程成本的情况下,不能无限制增加管道壁厚,其具体壁厚取值范围应控制在某一最佳工程成本的基础上。

3.2 振动速度分布

管道单元受冲击载荷发生非线性振动,振动速度作为一项重要的振动强度因子需要进行监测分析。图6为不同时刻壁厚 $\delta = 0.02\text{ m}$ 的管道上合速度布云图。

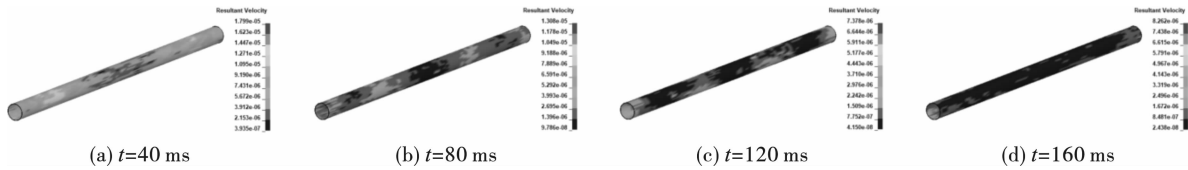


图6 不同时刻管道质点合速度云图

Fig. 6 Cloud diagram of the particle resultant velocity of the pipeline at different times

同样分别提取4种不同壁厚 $\delta = 0.02\text{ m}$ 、 0.04 m 、 0.06 m 、 0.08 m 条件下管道迎、背爆面5个

监测质点的合速度随时间变化数值,绘制合速度时程曲线,如图7、8所示。

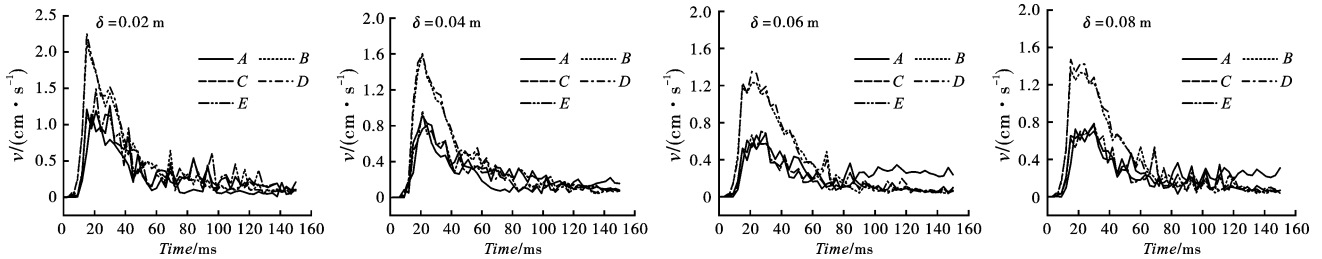


图7 迎爆面监测质点合速度时程曲线

Fig. 7 Time history curve of the resultant velocities at the monitoring point on the side of the pipeline towards the blasting source

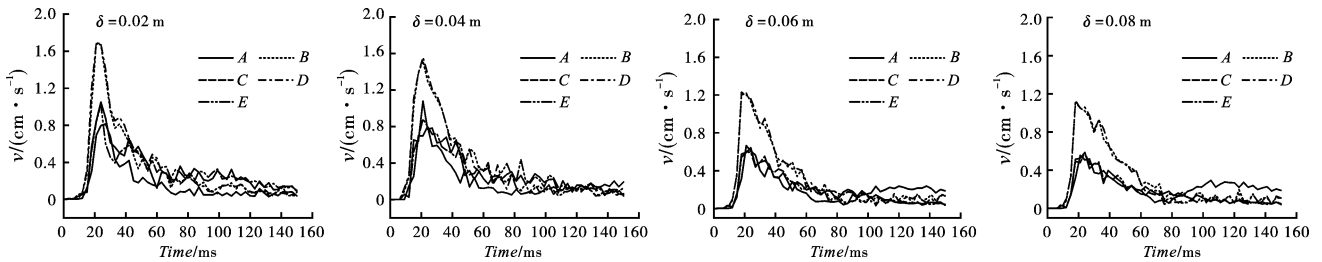


图8 背爆面监测质点合速度时程曲线

Fig. 8 Time history curve of the resultant velocities at the monitoring point on the side of the pipeline away from the blasting source

通过分析发现,当 $t = 12 \text{ ms}$ 时,管道表面振动合速度开始上升,也就是说该时间点振动波传至管道,约 $20 \sim 40 \text{ ms}$ 时刻振动合速度达到峰值状态,最大值可达 $v_{\max} = 2.2 \text{ cm/s}$ 。同样约 $t = 80 \text{ ms}$ 时,合速度接近零,趋于稳定态。随着管壁厚度的增加,合速度同样呈现出非线性衰减规律。但值得注意的是,迎爆面振动合速度明显高于背爆面。文献[18]中郑爽英等人采用有限元 3D 模型对下穿兰成渝输气管道的仙女岩隧道爆破进行数值分析,研究指出管道底部振动速度和位移明显高于管道顶部,与本文所得结论完全吻合。根据《爆破安全规程》规定,若以爆破振动速度作为地表安全判据时,当 $v_{\max} = 2.2 \text{ cm/s}$ 时,监测值点属于安全状态。无论迎背爆面,都呈现出随管道壁厚增加,合速度呈非线性衰减

趋势,并且衰减率逐渐减小。距管道两端 $1/4$ 处质点合速度值最大。

4 管土耦合模型振速衰减分析

地下空间掘进爆破过程中,由于输气管道深埋地下,故管道振动情况测量存在较大难度,但对于管道上方地表质点的振动情况监测较为方便。通常质点的峰值振动速度 v_{\max} 可以作为振动大小的主要判据之一,所以有必要对爆点至地表垂直方向质点的 v_{\max} 传播规律进行研究,该垂直方向 v_{\max} 的特征点主要是迎爆面、背爆面以及地表处的 3 个质点。基于 4 种不同壁厚的管土耦合爆破模型,沿输气管道长度方向分别提取 3 个特征质点的峰值振动速度 v_{\max} ,绘制变化曲线,如图 9 所示。

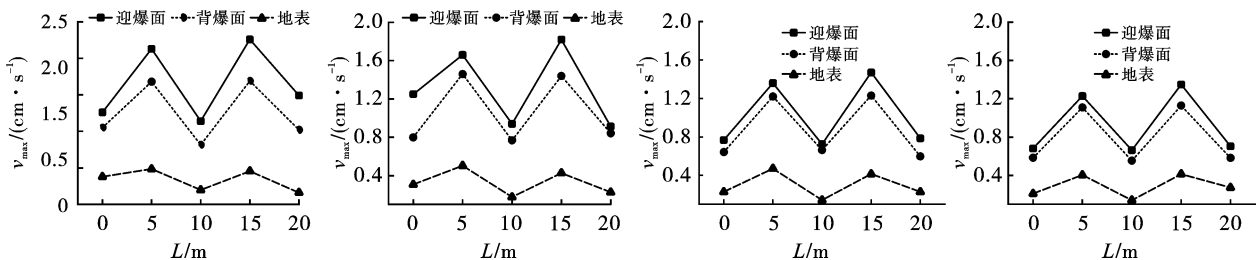


图 9 耦合模型振动速度峰值曲线

Fig. 9 Peak vibration velocity curve of the coupling model

通过对图 9 分析发现,随着管道壁厚的增加,各特征点峰值振动速度逐渐衰弱,其中迎爆面出现最大峰值 $v_{\max} = 2.26 \text{ cm/s}$,而地表质点出现最小峰值 $v_{\max} = 0.142 \text{ cm/s}$ 。并且由于爆源和管道沿着管线长度的对称性,各特征点的 v_{\max} 沿长度方向分布规律基本一致。另外建模时未对管体内部添加油气流量,管道中主要成分为空气,空气对振动波的损耗远远小于土体,加之管体迎-背爆面间距小于背爆面到地表的距离,所以 v_{\max} 在软土层传播过程中衰减更

为明显。另外 v_{\max} 在 3 个特征点处衰减规律基本一致,管道中心处 v_{\max} 值最小,而距管两端面 $1/4$ 处 v_{\max} 值最大。

对 3 个特征点 v_{\max} 的衰减规律进行分析,可获得管土耦合模型的爆破振动效应衰减情况。依据图 9 的 v_{\max} 数值,计算出 4 种不同壁厚的 3 个特征点峰值振动速度衰减率 η 。定义振动速度衰减率 $\eta = -v_{i+1}/v_i$,其中 $i = 1, 2, 3$,分别代表迎爆面、背爆面和地表质点。具体如表 4 所示。

表 4 各质点振动速度峰值衰减率

Table 4 Attenuation rate of peak vibration velocity of each monitoring point

衰减率%	$\delta = 0.02 \text{ m}$		$\delta = 0.04 \text{ m}$		$\delta = 0.06 \text{ m}$		$\delta = 0.08 \text{ m}$	
	迎-背爆面	背爆面-土表	迎-背爆面	背爆面-土表	迎-背爆面	背爆面-土表	迎-背爆面	背爆面-土表
A	16.7	63.9	36.0	61.4	16.3	64.5	14.1	64.0
B	21.1	71.2	12.0	65.4	10.3	61.4	9.8	63.4
C	28.5	75.8	18.2	76.9	8.4	78.6	16.4	74.2
D	25.2	73.1	20.9	70.3	16.3	66.3	16.3	63.3
E	31.5	84.2	7.7	73.0	23.9	61.8	17.3	53.1
平均衰减率%	24.6	73.46	18.96	69.4	15.04	66.52	14.78	63.6

通过表4计算可得,输气管道壁厚取 $\delta = 0.02\text{ m}$ 、 0.04 m 、 0.06 m 、 0.08 m 时,迎-背爆面质点峰值振动速度平均衰减率分别为 $\eta_1 = 24.6\%$ 、 18.96% 、 15.04% 和 14.78% ,而背爆面到地表质点峰值振动速度平均衰减率分别为 $\eta_2 = 73.46\%$ 、 69.4% 、 66.52% 和 63.6% 。

目前国内外对于爆破振动引起的质点峰值速度半经验公式运用最为广泛的是萨道夫斯基模型^[19-20]

$$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (8)$$

本数值计算模型中,炸药量 Q 始终未定值,可作为常数项进行处理,依据速度衰减率 $\eta = -v_{i+1}/v_i$

公式,可获得迎-背爆面和背爆面-地表质点的峰值振动速度衰减率 η_1 和 η_2 的函数关系

$$\begin{cases} \eta_1 = 1 - \frac{v_2}{v_1} = 1 - \frac{(1/R_2)^{\alpha_1}}{(1/R_1)^{\alpha_1}} \\ \eta_2 = 1 - \frac{v_3}{v_2} = 1 - \frac{(1/R_3)^{\alpha_1}}{(1/R_2)^{\alpha_1}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: R_1 、 R_2 、 R_3 分别为起爆点距迎爆面、背爆面和地表质点的垂直距离; α_1 、 α_2 为衰减系数。

将表5中计算出的不同壁厚情况下 v_{\max} 衰减率带入公式(9),可求得相应的衰减系数 α_1 、 α_2 ,具体数据见表5,平均衰减率和衰减系数随管壁厚度变化关系见图10所示。

表5 各质点振动速度峰值衰减系数

壁厚	$\delta = 0.02\text{ m}$		$\delta = 0.04\text{ m}$		$\delta = 0.06\text{ m}$		$\delta = 0.08\text{ m}$	
	η_1	η_2	η_1	η_2	η_1	η_2	η_1	η_2
平均衰减率%	24.6	73.46	18.96	69.4	15.04	66.52	14.78	63.6
衰减系数 α	α_1	α_2	α_1	α_2	α_1	α_2	α_1	α_2
	2.35	7.99	1.75	7.13	1.36	6.59	1.33	6.09

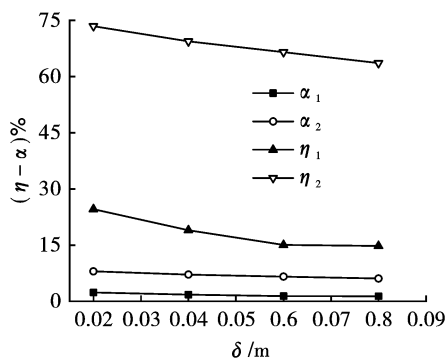


图10 不同壁厚条件下峰值速度平均衰减率以及衰减系数

Fig. 10 Average attenuation rate and attenuation coefficient of the peak velocity for different wall thicknesses

通过对平均衰减率和衰减系数随管壁厚度变化关系曲线分析发现,各衰减因子变化符合爆破衰减规律。其中平均衰减率 η 变化最为明显,而衰减系数 α 变化不大。故,对于存在管道的这种非均匀地质条件振动速度预测采用萨道夫斯基公式已不再准确,需要对该公式进行修正使用。所以可对该公式添加修正比例系数 λ ,此时公式可表示为 $\lambda v = K(\sqrt[3]{Q}/R)^{\alpha}$ 可通过试验数据拟合得到。

5 结论

基于弹塑性理论建立了以岩石-土体-管道流固

耦合数值模型,探究了该模型在不同管道壁厚条件下管道动力响应机制,通过计算分析,主要得到以下结论:

(1)城市输气管道在强烈的爆破载荷作用下属于弹塑性力学问题,所以采用塑形变形理论 Mises 准则对管道屈服模式进行分析更符合实际情况。

(2)在双爆源对称起爆模式下,管道迎-背爆面质点的有效应力和振动速度都随管道壁厚的增减呈非线性衰减趋势,且衰减率逐渐减小。管道背爆面局部应力峰值数值明显高于迎爆面,而迎爆面振动合速度明显高于背爆面。有效应力峰值靠近管道两端,而振动速度峰值对称分布在距管道两端1/4位置处。

(3)当管壁厚度增量为 $\Delta\delta = 0.02\text{ m}$ 时,迎-背爆面有效应力峰值衰减率分别为 $\kappa_1 = 25.2\%$ 、 19.2% 、 10.7% 和 $\kappa_2 = 50\%$ 、 25% 、 13.3% 。4种不同壁厚条件下迎-背爆面和背爆面-地表质点峰值振动速度平均衰减率分别为 $\eta_1 = 24.6\%$ 、 18.96% 、 15.04% 、 14.78% 和 $\eta_2 = 73.46\%$ 、 69.4% 、 66.52% 、 63.6% 。

参考文献 (References)

[1] 管晓明,张 良,王利民,等.隧道近距下穿管线的爆破振动特征及安全标准[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(11):2870-2885.

- [1] GUAN Xiao-ming, ZHANG Liang, WANG Li-min, et al. Blasting vibration characteristics and safety standard of pipeline passed down by tunnel in short distance [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(11): 2870-2885. (in Chinese)
- [2] 王栋, 何历超, 王凯. 钻爆法施工对邻近埋地管道影响的现场实测与数值模拟分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(S2): 134-140.
- [2] WANG Dong, HE Li-chao, WANG Kai. Field measurement and numerical simulation for influence of blasting excavation on adjacent buried pipelines [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S2): 134-140. (in Chinese)
- [3] 张黎明, 赵明生, 池恩安, 等. 爆破振动对地下管道影响试验及风险预测[J]. 振动与冲击, 2017, 36(16): 241-247.
- [3] ZHANG Li-ming, ZHAO Ming-sheng, CHI En-an, et al. Experiments for effect of blasting vibration on underground pipeline and risk prediction [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(16): 241-247. (in Chinese)
- [4] 朱斌, 蒋楠, 周传波, 等. 下穿燃气管道爆破振动效应现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(12): 2582-2592.
- [4] ZHU Bin, JIANG Nan, ZHOU Chuan-bo, et al. Field experiment on blasting vibration effect of underpass gas pipeline [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(12): 2582-2592. (in Chinese)
- [5] 夏宇馨, 蒋楠, 周传波, 等. 下穿地铁隧道爆破振动作用下给水管动力响应特性研究[J]. 爆破, 2019, 36(1): 6-13, 37.
- [5] XIA Yu-qing, JIANG Nan, ZHOU Chuan-bo, et al. Dynamic response characteristics of water supply pipeline under blasting vibration of underneath tunnel [J]. Blasting, 2019, 36(1): 6-13, 37. (in Chinese)
- [6] 郑爽英, 杨立中. 隧道爆破地震下输气管道动力响应数值试验[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(2): 264-271.
- [6] ZHENG Shuang-ying, YANG Li-zhong. Numerical experiments of dynamic response of buried gas pipeline under the action of seismic waves induced by tunnel blasting [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(2): 264-271. (in Chinese)
- [7] 梁政, 张澜, 张杰. 地面爆炸荷载下埋地管道动力响应分析[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(3): 158-162.
- [7] LIANG Zheng, ZHANG Lan, ZHANG Jie. Dynamic response analysis of the underground buried pipeline under the ground surface explosive load [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(3): 158-162. (in Chinese)
- [8] 陈勇, 纪冲, 龙源, 等. 爆炸荷载下不同壁厚圆柱壳动力学行为的研究[J]. 高压物理学报, 2014, 28(5): 525-532.
- [8] CHEN Yong, JI Chong, LONG Yuan, et al. Research on dynamic behaviors of cylindrical shells with different wall-thickness under explosion loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2014, 28(5): 525-532. (in Chinese)
- [9] KOURETZIS G P, BOUCHOVALAS G D, GANTES C J. Analytic calculation of blast-induced strains to buried pipelines [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(10): 1683-1704.
- [10] MIRZAEI M, NIASARI H. Experimental and numerical analysis of dynamic rupture of steel pipes under internal high-speed moving pressure [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 85: 27-36.
- [11] 郑爽英, 杨立中. 下穿隧道爆破地震作用下埋地输气管道的动力响应规律研究[J]. 爆破, 2015, 32(4): 70-76.
- [11] ZHENG Shuang-ying, YANG Li-zhong. Dynamic response law of buried gas pipeline caused by blasting seismic waves of undercrossing tunneling [J]. Blasting, 2015, 32(4): 70-76. (in Chinese)
- [12] MOKHTARI M, NIA A A. A parametric study on the mechanical performance of buried X65 steel pipelines under subsurface detonation [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2015, 15(3): 668-679.
- [13] 文霞, 姚安林, 陈谦, 等. 隧道并行输气管道爆炸对邻管的冲击效应分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(1): 156-162.
- [13] WEN Xia, YAO An-lin, CHEN Qian, et al. Analysis on impact effect of gas pipeline explosion to adjacent pipeline for parallel pipeline in tunnel [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(1): 156-162. (in Chinese)
- [14] JIANG Nan, GAO Tan, ZHOU Chuan-bo, et al. Effect of excavation blasting vibration on adjacent buried gas pipeline in a metro tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2018, 81: 590-601.
- [15] 王飞, 王连来, 刘广初. 爆炸荷载对天然气管道(空管)的破坏作用研究[J]. 爆破, 2006, 23(4): 20-24.
- [15] WANG Fei, WANG Lian-lai, LIU Guang-chu. Numerical simulation on damage of pipeline (empty) [J]. Blasting, 2006, 23(4): 20-24. (in Chinese)
- [16] YI C, JOHANSSON D, GREBERG J. Effects of in-situ stresses on the fracturing of rock by blasting [J]. Computers and Geotechnics, 2017, 104(DEC.): 321-330.
- [17] 梁瑞, 包娟, 周文海, 等. 地铁隧道掘进爆破对既有埋地管道的动力影响[J]. 爆破, 2021, 38(1): 41-

- 50.
- [17] LIANG Rui, BAO Juan, ZHOU Wen-hai, et al. Dynamic effects of existing buried pipes in metro tunnels under tunnel excavation blasting[J]. *Blasting*, 2021, 38(1): 41-50 (in Chinese)
- [18] 郑爽英, 张继春. 隧道爆破下底部脱空地输气管道的动力响应[J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(1): 83-91.
- [18] ZHENG Shuang-ying, ZHANG Ji-chun. Dynamic response of buried gas pipeline with partially bottom empty under tunneling blasting vibration[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2022, 18(1): 83-91. (in Chinese)
- [19] 周文海, 梁 瑞, 陈金林, 等. 时程稳定性系数确定的边坡逐孔起爆孔间微差降振时间[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(8): 183-191.
- [19] ZHOU Wen-hai, LIANG Rui, CHEN Jin-lin, et al. Millisecond time for reducing vibration between two holes for slope blasting determined by stability coefficient of time history[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(8): 183-191.
- [20] 周文海, 梁 瑞, 余建平, 等. 边坡抛掷爆破峰值质点振动速度的无量纲分析[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(5): 76-83. (in Chinese)
- [20] ZHOU Wen-hai, LIANG Rui, YU Jian-ping, et al. Dimensionless analysis on peak particle vibration velocity induced by slope casting blast[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(5): 76-83. (in Chinese)

英文编辑: 李立锋

(上接第 171 页)

参考文献 (References)

- [1] GB6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [2] 张 鹏. 浅埋隧道爆破施工对上覆高压铁塔的动力影响分析[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [2] ZHANG Peng. Dynamic analysis of impact of shallow tunnel blasting construction on high-voltage tower above [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018. (in Chinese)
- [3] 肖欣欣, 李夕兵, 宫凤强. 隧道开挖及爆破对地表高压输电铁塔影响的 FLAC3D 分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2013, 9(6): 1401-1405.
- [3] XIAO Xin-xin, LI Xi-bing, GONG Feng-qiang. FLAC3D analysis of influence of tunnel excavation and blasting on ground high-voltage transmission tower[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2013, 9(6): 1401-1405. (in Chinese)
- [4] 樊浩博, 邱军领, 谢永利, 等. 下穿村庄隧道爆破振动对地表建筑的影响[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 17(3): 209-214.
- [4] FAN Hao-bo, QIU Jun-ling, XIE Yong-li, et al. Blast-induced ground vibration from tunnel undercrossing a village [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2016, 17(3): 209-214. (in Chinese)
- [5] 曲 颀. 公路隧道爆破工程对既有电力铁塔影响分析[J]. *山西建筑*, 2018, 44(33): 133-134.
- [5] QU Xie. The influence of existing power iron tower to highway tunnel blasting engineering[J]. *Shanxi Architecture*, 2018, 44(33): 133-134. (in Chinese)
- [6] 余 顺, 丁 浩, 郭 军, 等. 下穿高压铁塔的大跨小净距隧道控制爆破技术研究[J]. *公路交通技术*, 2013(3): 125-129.
- [6] YU Shun, DING Hao, GUO Jun, et al. Research on controlled blasting techniques for large-span-small-clearance tunnels with high-voltage towers crossing underneath [J]. *Technology of Highway and Transport*, 2013(3): 125-129. (in Chinese)
- [7] 孟 琦, 邱明灿, 薛建峰, 等. 隧道爆破振动对上部高压铁塔的影响分析[J]. *采矿技术*, 2014, 14(1): 94-97.
- [7] MENG Qi, QIU Ming-can, XUE Jian-feng, et al. Analysis on the influence of tunnel blasting vibration on the upper high-voltage tower[J]. *Mining Technology*, 2014, 14(1): 94-97. (in Chinese)
- [8] K Iwano, K Hashiba, J Nagae, et al. Reduction of tunnel blasting induced ground vibrations using advanced electronic detonators[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 105: 1-10.
- [9] TIAN X X, SONG Z P, WANG J B. Study on the propagation law of tunnel blasting vibration in stratum and blasting vibration reduction technology[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 126: 1-12.
- [10] 朱和昆, 张庆彬, 李传华, 等. 上跨临近既有有线隧道爆破振动响应分析[J]. *交通科学与工程*, 2021, 37(3): 65-71.
- [10] ZHU He-kun, ZHANG Qing-bin, LI Chuan-hua, et al. Blasting vibration response of the existing tunnels to the neighboring and overpassing tunnel[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2021, 37(3): 65-71. (in Chinese)

英文编辑: 黄 刚