地面爆炸荷载作用下土埋管道的动力响应研究

纪　冲[1]　汤晓勇[2]　汤建平[2]　李　强[2]
1.解放军理工大学野战工程学院，江苏　南京　210007；
2.中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司，四川　成都　610041

摘　要：基于动力有限元程序 LS-DYNA 及 Euler-Lagrange 耦合方法，分别以 75 g 柱状和 200 g 块状 TNT 炸药为爆源，对管道在爆炸载荷作用下的非线性动态响应过程进行三维数值模拟，描述了管道在不同埋深和壁厚的动力响应，并与实验结果进行了对比。研究结果为人防工程油气管道的抗爆能力分析和安全性评估提供了重要的参考依据。

关键词：地面爆炸；冲击荷载；土埋管道；数值模拟；动力响应
DOI：10.3969/j.issn.1006-5539.2014.06.001

0　前言

人防工程管线系统，负责输送工程所需的各种物质、能量和信息，是防护工程重要的支持保障系统，同时也是防护工程平战时军事职能实现的重要保证。石油和天然气管线系统作为防护工程管线系统的一部分，关系国家经济和军事后勤保障命脉。一旦人防设施中油气输送管道遭受打击，将严重危害战略安全。埋地油气管道受到常规弹药、恐怖爆炸装置在地面或浅埋地下爆炸时，其内部应力可能虽未达到强度失效，但突然产生的大位移可使结构降低承载能力，甚至发生整体变形或局部破坏失效。一旦重要部位的油气输送管道遭到近距离处爆炸破坏，则石油和天然气得不到正常运输和供应，将对国家安全、经济利益影响重大。

姚安林、赵师平等人[1]利用 LS-DYNA3D 有限元程序，对爆炸地冲击作用下引起埋地输气管道的动力响应问题进行了数值模拟分析；刘建民、陈文涛[2]利用有限元软件 ANSYNS/LS-DYNA 对炸药地面爆炸或侵入土中浅层爆炸两种情形下埋地管道的动力响应问题作了三维模拟，对比分析了炸药设置方式、炸药用量、爆心距和管道管径等因素对埋地管道损伤的不同作用；马维[3]通过小当量爆炸实验研究爆源近区地下管道结构的爆炸振动效应及破坏行为。

本文采用显式动力分析软件 LS-DYNA 建立了 200 g 块状和 75 g 柱状 TNT 炸药在地面爆炸的数值模型，并将计算结果与地面爆炸试验进行对比分析。采用流固耦合算法，分别对不同埋置深度和不同壁厚条件下土中浅埋金属管道在装药地面爆炸荷载作用下的动力响应问题进行了研究，重点论述不同条件下管道受力环境的变化及其对管道动力响应的影响。

1　数值模拟

本研究中的圆管长度 L 为 1.0 m，直径 D 为 10 cm，壳体厚度 δ 为 0.2 cm，壳体材料为 Q 235。以长度为 7 cm、直径为 3 cm 的 75 g 柱状 TNT 炸药作为爆炸源和 10 cm×5 cm×2.5 cm 的 200 g 块状 TNT 炸药作为爆炸源（200 g 块状 TNT 炸药 5 cm×10 cm 的面与圆柱壳迎爆面相对），装药中心位于圆管中轴线的垂直平分线上。

1.1　数值计算模型及边界处理

图 1 是 75 g TNT 炸药作为爆炸源的动力分析有限元模型示意图。为了便于说明，图 1 中只给出了 1/4 计算模型。根据爆轰产物剧烈的变形扩展及其与圆管介质相互作用问题的特性，采用多物质 Euler 材料与 Lagrange 结构相耦合算法，即将爆轰气体产物、空气和岩土等物质与圆管固体结构的相互作用进行耦合计算。定义炸

收稿日期：2014-09-11
基金项目：国家自然科学基金“常规爆炸地冲击荷载下土中充液压力圆柱壳动力屈曲研究”(11102233)
作者简介：纪　冲(1981-)，男，山东淄博人，讲师，博士，主要从事油气管道抗爆炸冲击安全评估研究工作。

药、空气和岩土为 Euler 网格，定义圆管为 Lagrange 网格，同时将空气侧面定义为透射边界。采用 SOLID164 六面实体单元划分网格，炸药和空气的网格尺寸为 0.25 cm，圆管网格尺寸为 0.2 cm。对称面上的节点设置对称约束，并采用 g-cm-μs 单位制。为避免渗漏现象，流体-固体耦合中采用了渗漏控制算法。

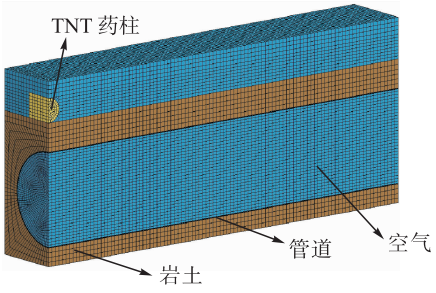


图 1　数值计算模型

1.2　材料模型

TNT 装药采用高能炸药模型，爆轰产物的膨胀采用 JWL 状态方程[4]，并假定爆轰前沿以常速率传播。以炸药爆轰产物的压力 p 表示的 JWL 状态方程为：

$$p=A_1\left(1-\frac{\omega\eta}{R_1}\right)e^{\frac{-R_1}{\eta}}+B_1\left(1-\frac{\omega\eta}{R_1}\right)e^{\frac{-R_2}{\eta}}+\omega E_0\eta \tag{1}$$

式中：$\eta=\rho/\rho_e$，ρ 为爆轰产物密度，kg/m^3；ρ_e 为炸药密度，kg/m^3；E_0 为单位体积炸药内能，J/m^3；A_1 为实验拟合参数，GPa；B_1 为实验拟合参数，GPa；R_1 为实验拟合参数，无量纲；R_2 为实验拟合参数，无量纲；ω 为实验拟合参数，无量纲。

空气采用空材料模型(NULL)，可以通过调用状态方程来避免偏应力计算。假设空气介质为无黏性的理想气体，爆炸波的膨胀传播过程为绝热过程。

岩土介质采用 SOIL_AND_FOAM 材料模型，其本构模型构造简单，所需输入参数较少，在爆炸条件下岩土的动态力学响应数值计算中应用广泛。

圆管材料选取 Johnson-Cook 材料模型[5]。该模型把材料屈服应力表示为：

$$\sigma_y=[A+B(\bar{\varepsilon}^p)^n][1+C\ \mathrm{In}\dot{\varepsilon}^*][1-(T^*)^m] \tag{2}$$

式中：$\bar{\varepsilon}^p$ 为等效塑性应变，无量纲；$\dot{\varepsilon}^*$ 为相对等效塑性应变率，s^{-1}；T^* 为相对温度，无量纲；A 为屈服应力，MPa；B 为应变硬化，MPa；n 为应变硬化指数，无量纲；C 为应变率相关因数，无量纲；m 为温度相关因数，无量纲。

断裂应变的表达式为：

$$\varepsilon_f=[D_1+D_2\exp D_3\sigma^*][1+D_4\mathrm{In}\dot{\varepsilon}^*][1+D_5T^*] \tag{3}$$

式中：$\sigma^*=p/\sigma_e$，p 为压力，MPa；σ_e 为 Von Mises 等效应力，MPa；当损伤参数 $D=\sum\Delta\varepsilon/\varepsilon_f$ 值为 1.0 时断裂发生，其中 $\Delta\varepsilon$ 为积分循环期间的等效塑性应变增量。

2　结果分析

数值模拟结果表明，TNT 炸药在地面爆炸后，高温高压的爆轰产物迅速膨胀对岩土介质产生冲击作用，在其内部激发冲击波场。爆心正下方圆管迎爆面最先受到冲击波的冲击作用。由于爆炸冲击压力极高，圆管体迅速塑性变形，产生局部凹陷，形成凹陷区窝。凹陷区窝改变了冲击点处圆管的圆形截面特性，局部凹陷的变形范围在作用过程中不断地向径向和轴向发展，冲击点附近圆管截面的结构强度、抗弯刚度和整体承载能力大大降低。与空爆不同的是，截面两侧和底部受岩土介质的约束变形较小，最终截面呈扁口形。

2.1　埋置深度对管道动力响应的影响

图 2 是以 200 g TNT 炸药作为爆源，三种不同埋置深度管道上产生峰值压力时的压力分布云图。从图 2 可以看出，装药地面爆炸在土中激起的爆炸应力波由上至下在土壤介质中传播，由于埋置深度的不同，作用在管道上压力达到峰值的时间不同，峰值的大小也不同。三种埋置深度管道上产生峰值压力的时间分别为 45、64、80 μs，压力峰值分别为 424、403、348 MPa；管道发生整体变形的时间分别为 140、160、200 μs。由此可知，埋深越大，管道上达到峰值压力的时间越晚，而且峰值压力也越小，衰减的幅度逐步增大。当作用在管道上的压力达到峰值时，整个管道受到荷载作用的范围也不同。随着管道埋置深度的增加，在管道产生峰值压力时整个管道上的受载范围也越大；局部凹陷的面积增大，但凹陷的程度减小。

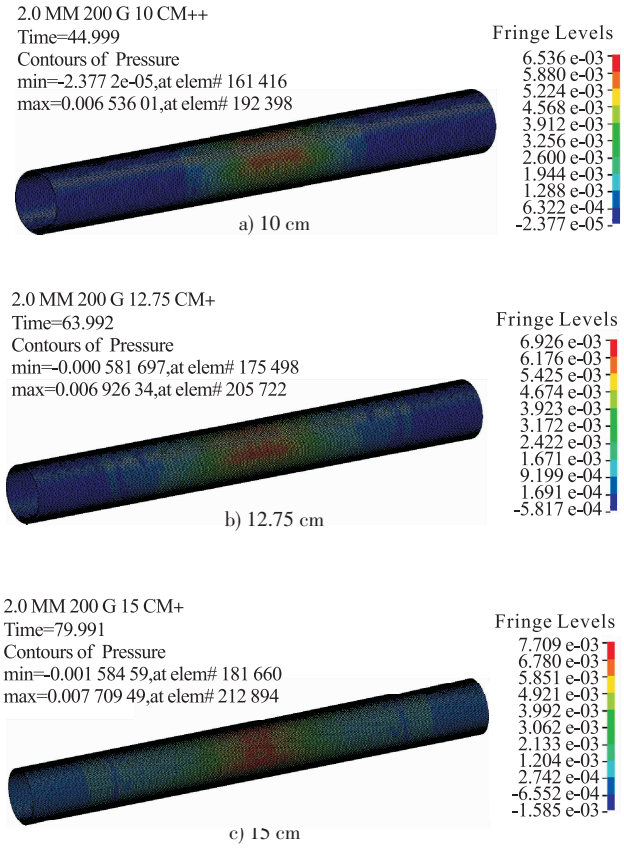


图 2　不同埋深下管道峰值压力分布云图

图 3 为三种不同埋置深度正对爆心处竖直方向速度对比图。由图 3 可知，爆炸荷载作用下土中浅埋金属管道发生塑性变形，管道迎爆面竖直方向发生位移，速度峰值随埋置深度增加而变小。三条曲线都有一个突跃上升的加速阶段，而后速度继续缓慢上升，在达到峰值后迅速下降，最后在零点处振荡，直至衰减为零。不同的是，随着埋置深度的增大，其突跃加速阶段和速度峰值都随之变小，速度衰减过程变长，速度零点处振荡也相对平缓。

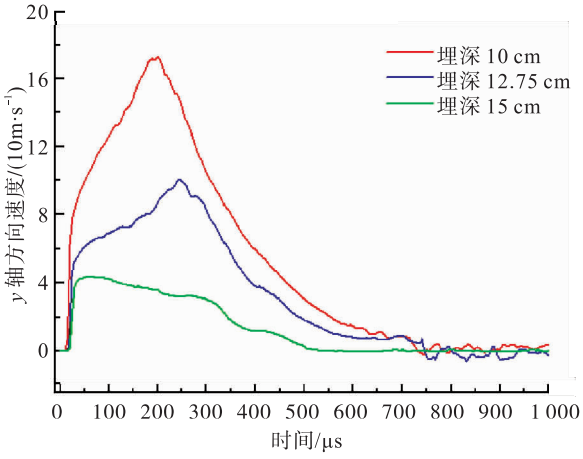


图 3　不同埋深下正对爆心处竖直方向速度对比

埋置深度的不同，导致管道变形程度不同。埋设深度越浅，爆炸冲击能量就越大，管道的变形，尤其是轴向的变形越剧烈。图 4 为三种埋置深度下管道的最终变形形态。岩土中管道迎爆面变形较大，而被爆面变形很小，甚至不变形，这是因为岩土起到了支撑反力的作用。

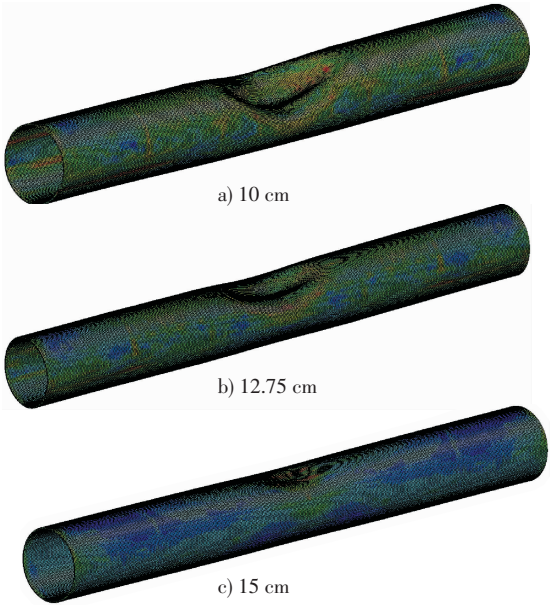


图 4　不同埋深下管道的最终变形模态

2.2　管道壁厚对管道动力响应的影响

图 5 为不同壁厚条件下管道峰值压力分布云图。从图 5 可以看出，由于埋置深度相同，作用在管道上压力达到峰值的时间基本相同，在 9 μs 左右，峰值压力则不相同，图 5 中三种壁厚的管道上峰值压力分别为 284、433、487 MPa。由此可知，即使装药量和埋置深度均相同，由于管道自身刚度不同，作用在管道上的荷载也不相同。当作用在管道上的压力达到峰值时刻，整个管道受到荷载作用的范围基本相同，这与考虑埋置深度的情况不同。

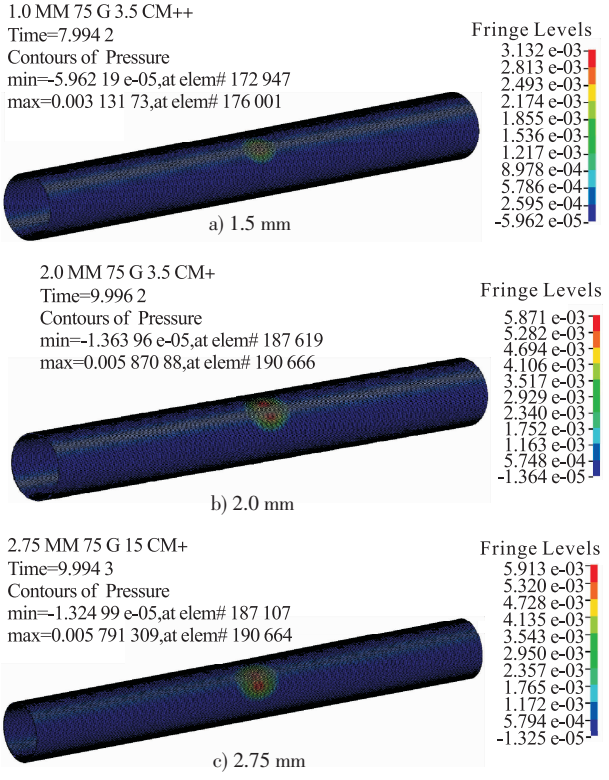


图 5　不同壁厚下管道峰值压力分布云图

图 6 为不同壁厚条件下管道竖直方向产生峰值速度时的速度分布云图。从图 6 可以看出，三种不同壁厚管道单元在相同条件下(装药量和埋置深度)，由于所受荷载不同，达到峰值速度所用时间也不同，分别为 48、60、64 μs，即壁薄的加速快，壁厚的加速慢。从图 6 可以看到，壁厚越薄，速度峰值越大，速度衰减越缓慢平滑；

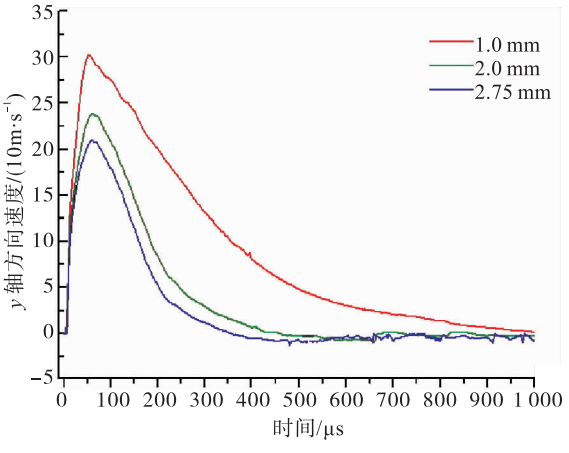


图 6　不同壁厚下正对爆心处竖直方向速度对比

壁厚越厚，速度峰值越小，速度衰减越迅速，且在速度零点处振荡越猛烈。

图 7 为不同壁厚条件下管道的最终变形模态。由图 7 可知，在爆炸荷载作用下，与考虑埋置深度情况相同，管道顶部单元发生整体塑性变形，向内翻转，凹陷，形成凹槽，截面呈扁口形。壁厚越薄，截面变形尺寸越大。由于作用在各自壁面上的荷载不同，管道形成稳定塑性变形的时间也不相同，壁厚越薄形成稳定变形的时间越长，图 7 中三种模型形成稳定变形的时间分别为 1 070、450、380 μs，即管道对爆炸荷载响应的时间越长，管道轴向变形范围也越大。

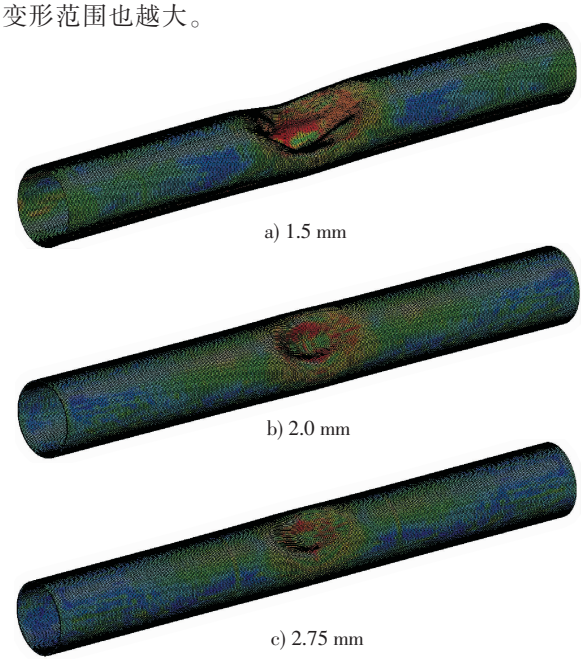
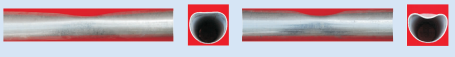


图 7　不同壁厚下管道的最终变形模态

3　实验验证

为验证模拟结果的正确性，表 1 给出了 Project1（Q=200 g、δ=0.2 cm、H=15 cm）和 Project2（Q=75 g、δ=0.275 cm、H=3.5 cm）两种工况下管道的最终变形情况的模拟结果和实验对比。通过对比可以看出，实验现象与数值模拟结果具有良好的一致性，表明本文所选计算模型和参数合理，数值计算结果可信。

表 1　圆管变形情况数值模拟与实验对比

工况	工况 1	工况 2
Experiment		
Simulation		

4　结论

a）数值模拟结果表明，爆心正下方圆管迎爆面最先受到爆炸冲击波的冲击作用，由于爆炸冲击压力极高，圆管体迅速塑性变形，产生局部凹陷，形成凹陷区窝。凹陷区窝改变了冲击点处圆管的圆形截面特性，其结构强度和抗弯刚度以及整体承载能力大大降低。

b）圆管变形破坏特征与埋深 H、壁厚密切相关，埋深越大，在管道产生峰值压力时整个管道上的受载范围也越大，局部凹陷的面积增大，但凹陷的程度减小；壁厚不同，作用在管道上的峰值压力不同，变形程度也不相同。

c）Euler-Lagrange 耦合数值仿真方法可模拟和预测钢管在爆炸冲击下的非线性动态响应，与实验结果比较误差在工程允许的范围内，是实验方法的有益补充。

参考文献：

[1] 姚安林，赵师平，么惠全，等. 地下爆炸对埋地输气管道冲击响应的数值分析[J]. 西南石油大学学报（自然科学版），2009，31(4)：168-172.
Yao Anlin, Zhao Shiping, Yao Huiquan, et al. Numerical Simulation of Response of Underground Explosion Ground Shock to Buried Gas Pipeline[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 31 (4): 168-172.

[2] 刘建民，陈文涛. 爆炸荷载下埋地管道动力响应分析研究[J]. 工程爆破，2008，14(2)：20-24.
Liu Jianmin, Chen Wentao. Dynamic Response Study of Buried Pipeline Subjected to Blast Loads [J]. Engineering Blasting, 2008, 14(2): 20-24.

[3] 马　维. 地下管道结构爆振效应和冲击破坏行为实验[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版)，2008，9(1)：39-46.
Ma Wei. Experimental Investigations on Effects of Blast Vibration and Behaviors of Impacting Failure of Underground Pipeline Structures [J]. Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2008, 9(1): 39-46.

[4] Johnson G R, Cook W H. Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1): 31-48.

[5] 章冠人，陈大年. 凝聚炸药起爆动力学[M]. 北京：国防工业出版社，1991.
Zhang Guanren, Chen Danian. Agglomerate Explosive Initiation Physics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1991.