文章编号：1000-5773(2013)04-0567-08

爆炸载荷下 X70 钢管道的局部破坏效应*

纪 冲[1]，龙 源[1]，唐献述[2]，高振儒[1]，李裕春[1]

(1. 解放军理工大学，江苏南京 210007；
2. 桂林空军学院，广西桂林 541003)

摘要：对大直径 X70 钢油气管道在接触爆炸下的破坏效应进行了野外化爆实验，获得了不同装药量及不同壁厚条件下钢管道的接触爆炸破坏特征。实验结果表明：接触爆炸载荷作用下管壁迎爆面局部破坏明显，且呈花瓣形破口，同时产生具有较大质量和动能的爆炸破片，破片与对面管壁碰撞后形成凹坑，甚至发生贯穿现象。基于动力有限元程序 LS-DYNA 及 Lagrangian-Eulerian 耦合方法，对钢管在外接触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，得到管壁迎爆面的变形破坏及对面管壁在爆炸破片碰撞下的后效作用过程，计算结果与实验结果符合良好。研究结果为在役油气管道的抗爆能力分析及安全性评估提供了参考依据。

关键词：接触爆炸；钢管；局部破坏；后效作用
中图分类号：O383 **文献标识码**：A

1 引 言

金属圆管结构被广泛应用于工业领域，例如作为运输管网输送气体和液体。然而，在石油、天然气和煤气等领域，爆炸载荷后圆管结构的破坏会带来灾难性的后果。近年来，世界范围内的恐怖袭击和意外爆炸事件频繁发生，与战略和经济利益休戚相关的各种能源管道成为恐怖组织袭击的目标。研究金属管道在爆炸载荷作用下的破坏模式及破坏程度，分析油气管道系统抵御化学爆炸的能力，对于管道结构的抗爆安全设计及灾后评估具有重要的理论意义和工程价值。

针对金属管道(圆柱壳)在冲击载荷下的破坏效应问题，Zhang 等人[1]实验研究了内空薄壁软钢圆管在平头、圆头及半圆头弹体正冲击和斜冲击下的破坏模式；沈晓军等人[2]研究了不同质量和速度的杀爆战斗部破片对厚壁钢管的冲击毁伤效应，建立了表面凹坑导致钢管失效的判据；Rushton 等人[3]针对直径 324 mm、壁厚 9.5 mm 的无缝钢管，进行了内部装药爆炸实验，由于药量较小(0.8 kg PE4 炸药)，因而只观察到了管壁的膨胀鼓包现象；路胜卓等人[4]为获得薄壁圆柱壳结构在可燃气体爆炸作用下的动力响应特性，进行了乙炔-空气混合气体爆炸冲击波对缩比薄壁柱壳模型的冲击实验；潘旭海等人[5]对圆柱形储罐薄壁结构在爆炸冲击载荷作用下的动力响应问题进行了数值模拟。上述工作为冲击载荷下金属圆管结构的破坏分析提供了重要的参考依据，但针对大直径、厚壁金属管道在较大药量外接触爆炸条件下的破坏效应研究鲜见报道。

在接触爆炸载荷作用下，厚壁钢管结构将产生局部破坏。这种局部破坏现象一般发生在局部载荷作用点及其周围，或结构背面局部作用区投影点周围，具有明显的局部破坏特征。本研究在野外爆炸实

* **收稿日期**：2012-03-31；**修回日期**：2012-07-17
基金项目：国家自然科学基金(11102233)；解放军理工大学野战工程学院青年基金(KYGYZLYY1302)
作者简介：纪 冲(1981－)，男，博士，讲师，主要从事爆炸冲击效应及防护研究. E-mail：blastingcaptain@163.com
通讯作者：龙 源(1958－)，男，博士，教授，主要从事爆炸冲击效应及防护研究. E-mail：long_yuan@sohu.com

验的基础上，采用适合处理爆炸加载引起大变形的 Euler-Lagrange 耦合算法，对两种不同壁厚的 X70 钢管道在不同质量炸药接触爆炸载荷作用下的非线性动态响应过程进行数值计算，分析管道局部破坏效应的影响因素。

2 实 验

2.1 实验设计

目前，X70 管线钢已成为国际石油、天然气长输管线钢中用量最多的钢级。为使实验结果更具针对性和代表性，实验中采用我国西气东输工程中的原型管道。管道材料为高强度、高韧性的 X70 管线钢，管道壁厚(δ)分为 26.2 和 14.6 mm 两种，管道直径均为 1016 mm，如图 1 所示。作为预先研究内容，本研究不考虑管道中实际运行的内充压力液体。图 2 为接触爆炸实验示意图。实验时，将内空 X70 钢管静置于松软地面，将 TNT 集团装药水平放置在钢管顶端中心处，装药量(Q)有 3.0、5.0 和 10.0 kg 3 种，装药尺寸分别为 20 cm×20 cm×4.7 cm、20 cm×20 cm×7.8 cm 和 20 cm×20 cm×15.6 cm，装药与钢管的接触面均为 20 cm×20 cm。采用军用 8 号瞬发电雷管于装药顶端中心点处起爆。



图 1 实验中采用的 X70 钢管

Fig. 1 X70 steel pipes used in the experiment

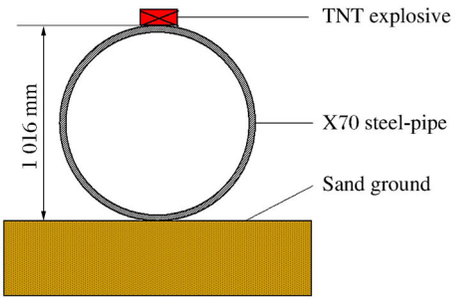


图 2 接触爆炸实验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of contact explosion

2.2 实验结果

接触爆炸后 X70 钢管道在迎爆面管壁的局部破坏效应、对面管壁局部破坏效应及回收破片情况见图 3。实验结果表明，接触爆炸载荷对 X70 钢管产生了强烈的破坏作用，具有明显的局部破坏特征。

由图 3 可知，装药外接触爆炸后，X70 钢管道迎爆面管壁将发生贯穿破坏，形成破口、裂缝及花瓣状翻唇，该现象与锥形弹丸贯穿薄靶板类似。当 Q=3.0 kg、δ=14.6 mm(Project 1)时，迎爆面管壁孔洞尺寸为 22 cm×27 cm，在破口 4 角处各产生一条裂缝，4 条裂缝的平均长度为 5.7 cm，且破口四周内侧有翻唇；当 Q=3.0 kg、δ=26.2 mm(Project 2)时，破口尺寸为 23 cm×17 cm，破口 4 角处裂缝的平均长度为 4.6 cm，且破口内侧四周有翻唇；当 Q=5.0 kg、δ=14.6 mm(Project 3)时，破口近似为圆形，平均直径为 34.1 cm，破口角处裂缝的平均长度为 8.0 cm，破口内侧翻唇现象更明显；当 Q=5.0 kg、δ=26.2 mm(Project 4)时，破口尺寸为 26 cm×20 cm，管道内壁有翻唇现象；当 Q=10.0 kg、δ=26.2 mm(Project 5)时，破口尺寸为 29 cm×23 cm，破口四周产生 6 条裂缝，且管道内侧四周有翻唇现象。

此外，在实验中还发现一个重要现象，即 X70 钢管道在接触爆炸载荷作用后形成了类似弹丸的爆炸破片。破片具有较大的质量，在形成时还具有较高的速度及动能，与对面管壁碰撞后仍能造成不同程度的局部冲击后效效应。破片对管壁破坏的严重程度与装药量、钢管壁厚紧密相关。在 Project 1、Project 3 及 Project 5 实验条件下，对面管壁被击穿，形成破口；在 Project 4 实验条件下，对面管壁呈现临近贯穿现象；而在 Project 2 实验条件下，因爆炸形成的破片动能较小，而管壁较厚，因此未能将对面管壁击穿，只形成一道凹坑。



图 3　接触爆炸后 X70 钢管的破坏形貌

Fig. 3　Damage morphology of X70 steel pipe after contact explosion

3　数值模拟

3.1　数值计算模型及边界处理

为更深刻认识钢管在接触爆炸冲击载荷作用下的动态破坏机理,采用 LS-DYNA 有限元程序,对上述实验过程进行数值模拟。根据爆轰产物剧烈的变形扩展及其与钢管道相互作用的特性,采用多物质 Euler-Lagrange 耦合算法,即将爆轰气体产物、空气等气体物质与钢管固体结构的相互作用进行耦合计算。在实际建模过程中,定义炸药、空气为 Euler 网格,定义钢管为 Lagrange 网格,将空气侧面定义为透射边界。鉴于上述物理模型的轴对称性,取原型的 1/2 建立计算模型,其中对称面上的节点设置为对称约束。为避免渗漏现象,流固耦合中用渗漏控制算法。图 4 给出了采用 SOLID164 六面实体单元建立的接触爆炸有限元计算模型。

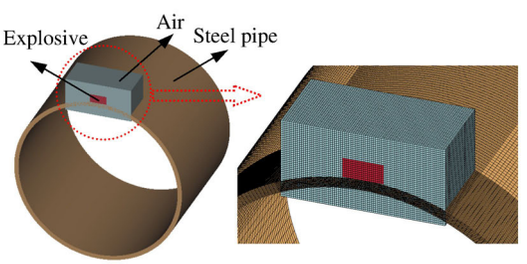


图 4　有限元计算模型

Fig. 4　Finite element model

3.2 材料模型及参数

管道钢材料采用考虑应变率效应的 Johnson-Cook 材料模型[6] 及 Grüneisen 状态方程。根据 Grüneisen 状态方程,定义压缩材料压力 p_1,即

$$p_1 = \frac{\rho_0 c^2 \mu [1 + (1 - \gamma_0/2)\mu - \alpha\mu^2/2]}{1 - (S_1 - 1)\mu - S_2\mu^2/(\mu+1) - S_3\mu^3/(\mu+1)^2} + (\gamma_0 + \alpha\mu)E \tag{1}$$

定义膨胀材料的压力 p_2,即

$$p_2 = \rho_0 c^2 \mu + (\gamma_0 + \alpha\mu)E \tag{2}$$

式中:c、S_1、S_2、S_3、γ_0 和 α 是与材料冲击压缩特性有关的常数,其中 c 为 u_s-u_p(冲击波速度-质点速度)曲线的截距,S_1、S_2 和 S_3 为 u_s-u_p 曲线斜率的系数,γ_0 为 Grüneisen 参数,α 为对 γ_0 的一阶体积修正;E 为材料内能;μ 为体积变化率,$\mu=\rho/\rho_0-1$,其中 ρ 为材料密度,ρ_0 为材料初始密度。X70 钢管材料的密度为 7.85 g/cm^3,其 Grüneisen 状态方程中,$c=4\,569$ m/s,$S_1=1.49$,$S_2=0$,$S_3=0$,$\gamma_0=2.17$,$\alpha=0.46$。

TNT 装药采用高能炸药模型,其爆轰产物的膨胀采用 Jones-Wilkins-Lee(JWL)状态方程[7] 描述,并假定爆轰前沿以常速率传播。以炸药爆轰产物压力 p 表示的 JWL 状态方程为

$$p = A_1\left(1 - \frac{\omega\eta}{R_1}\right)e^{-R_1/\eta} + B_1\left(1 - \frac{\omega\eta}{R_2}\right)e^{-R_2/\eta} + \omega E_0 \eta \tag{3}$$

式中:$\eta=\rho_p/\rho_e$,其中 ρ_p 为爆轰产物密度,ρ_e 为炸药密度;E_0 是单位体积炸药内能;A_1、B_1、R_1、R_2、ω 为实验拟合参数。计算中,TNT 炸药的 C-J 系数和 JWL 状态方程参数为:$\rho_e=1.63$ g/cm^3,爆速 $D=6.93$ km/s,CJ 爆压 $p_{CJ}=21.0$ GPa,$A_1=371.2$ GPa,$B_1=3.231$ GPa,$R_1=4.15$,$R_2=0.95$,$\omega=0.30$,$E_0=7.0$ GJ/m^3。

空气采用空材料模型(NULL),该模型可通过调用状态方程来避免偏应力计算。假设空气介质为无粘性的理想气体,爆炸波的膨胀传播过程为绝热过程。根据 Gama 准则,空气的状态方程为

$$p = (\gamma - 1)\rho e_0/\rho_{a,0} \tag{4}$$

式中:$\rho_{a,0}$ 为空气的初始密度,$\rho_{a,0}=1.29$ mg/cm^3;γ 为绝热指数,$\gamma=1.4$;e_0 为气体比内能,$e_0=0.25$ MPa。

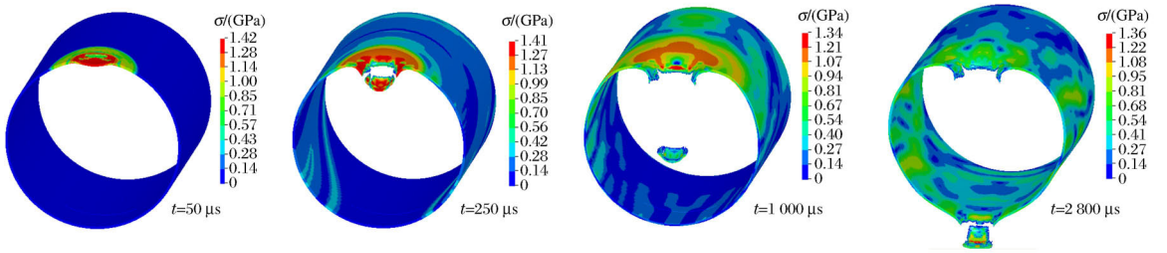
4 结果与分析

受篇幅限制,本研究的数值计算只考虑 3 种典型情况:Project 1($Q=3.0$ kg,$\delta=14.6$ mm)、Project 2($Q=3.0$ kg,$\delta=26.2$ mm)及 Project 5($Q=10.0$ kg,$\delta=26.2$ mm)。

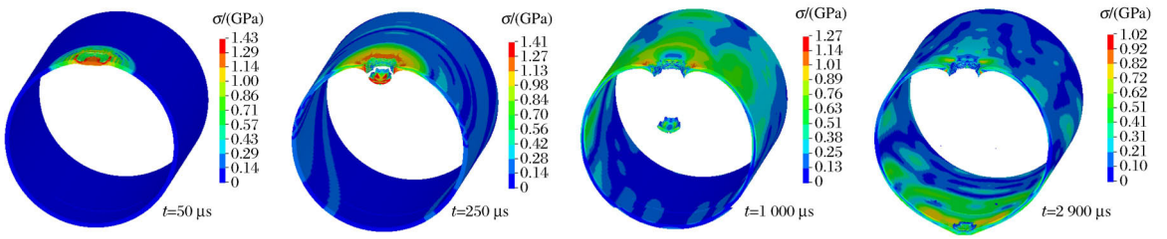
4.1 管壁局部破坏过程分析

图 5(a)和图 5(b)为 3.0 kg TNT 装药对 14.6 mm 及 26.2 mm 壁厚钢管的破坏过程,图 5(c)为 10.0 kg TNT 装药对 26.2 mm 壁厚钢管的破坏过程,其中 σ 为应力。从图 5 可以看出,炸药在顶部中央起爆后,内部形成一个半球形爆轰波阵面。依据装药高度的不同,经过 10～15 μs 的时间,爆轰波传播到装药底端与钢管的接触面。钢管曲面中心处首先受到爆轰波的作用,产生大塑性变形,并在爆轰波传播方向上产生凹陷,同时塑性区呈圆形迅速向接触面周边管壁扩展,随后钢管变形不断增大。当塑性应变超过钢管材料的极限断裂应变时,形成破口,同时产生爆炸破片。之后 4 条裂纹向四周扩展,呈花瓣状开裂。当环向应变等于开裂应变时,裂纹终止扩展,破口达到最大[8]。计算表明,破口尺寸、翻唇程度随装药质量 Q 的增大而增大,随管道壁厚 δ 的减小而减小。爆炸破片以较高速度与对面管壁碰撞后,造成不同程度的局部冲击后效效应,即产生凹坑或贯穿现象。因此,鉴于圆管结构的特殊性,在考虑爆炸载荷引起的损伤效应时,局部冲击后效效应不容忽视。

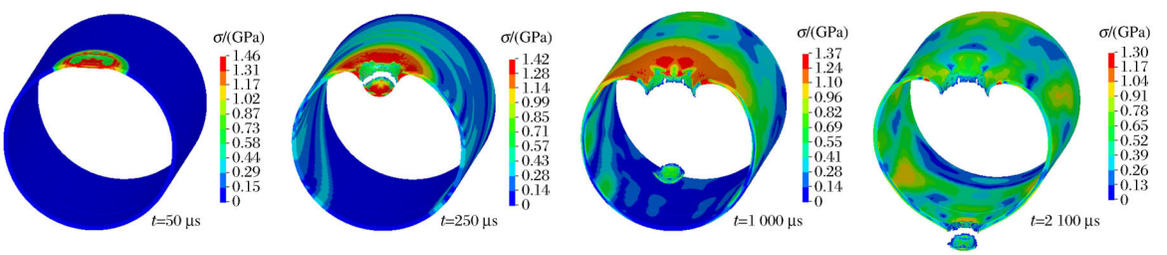
以 Project 1($Q=3.0$ kg,$\delta=14.6$ mm)为例,迎爆面及对面管壁局部破坏效应的数值模拟结果与实验结果的对比如图 6 所示。通过对比可以看出,数值模拟结果与实验现象具有良好的一致性,表明本研究所选的计算模型和参数合理,数值计算结果可信。



(a) Q=3 kg, δ=14.6 mm



(b) Q=3 kg, δ=26.2 mm



(c) Q=10 kg, δ=26.2 mm

图 5　接触爆炸作用下钢管变形破坏过程的数值模拟结果

Fig. 5　Simulation results of deformation process of steel pipe under contact explosion

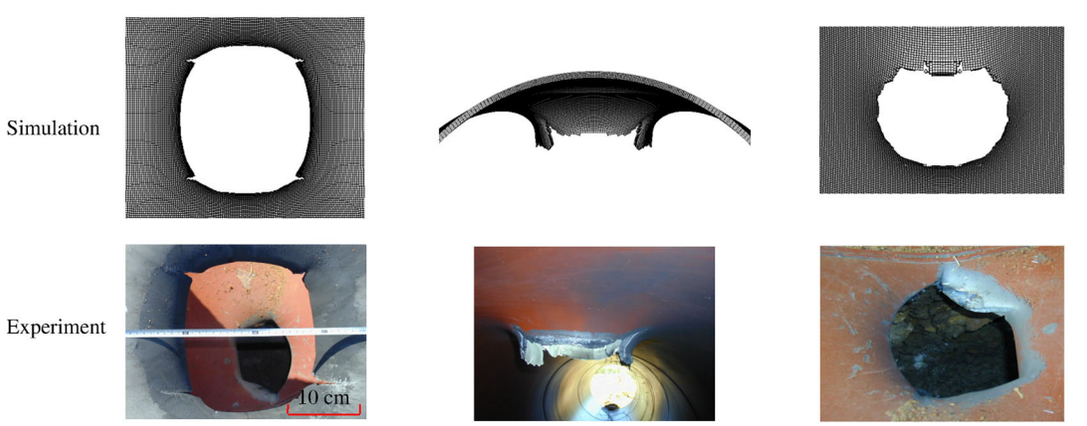
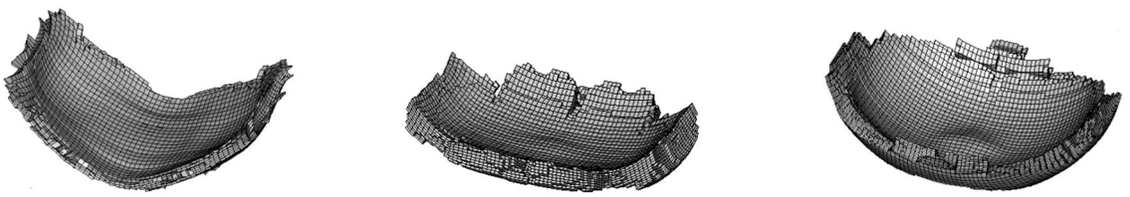


图 6　3.0 kg TNT 装药爆炸后 14.6 mm 厚钢管破坏情况的模拟结果与实验结果对比

Fig. 6　Comparison of experiment and simulation of 14.6 mm thickness steel pipe after the explosion of TNT charge of 3.0 kg

4.2 爆炸破片特性分析

数值计算表明,接触爆炸载荷下管道断裂形成的破片形态与管道壁厚密切相关。相同的装药量条件下,厚壁管道的破片弯曲程度较轻,而薄壁管道的破片变形程度较重,接近于爆炸成形弹丸(Explosively Formed Projectile)形状。图 7 给出了 Project 1、Project 2 及 Project 5 这 3 种工况下形成的爆炸破片形态数值模拟结果。可见,破片形态与实验结果基本一致。

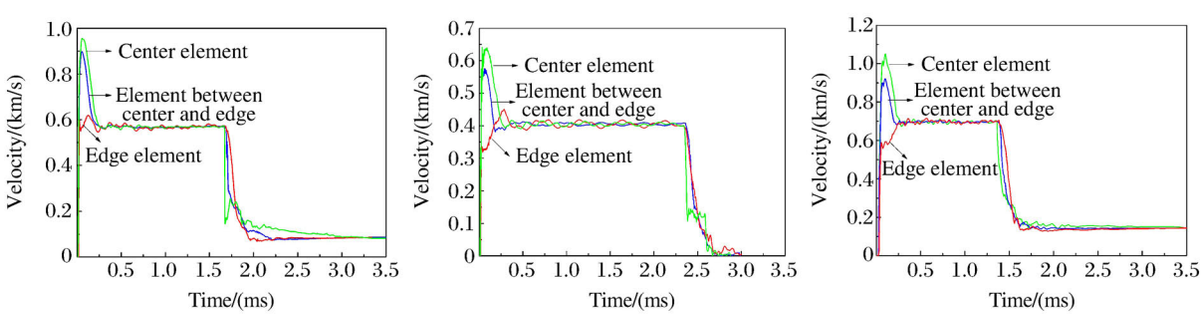


(a) Q=3 kg, δ=14.6 mm (b) Q=3 kg, δ=26.2 mm (c) Q=10 kg, δ=26.2 mm

图 7 破片形态的数值模拟结果

Fig. 7 Numerical simulation results of fragment morphology

选取破片中心、中心至边缘中间及边缘 3 个观测单元,3 个破片单元的速度变化如图 8 所示。可以看出,当爆轰波传至装药与管壁接触面时,首先接触面的中心区域压垮,然后沿圆周方向由中心向外依次压垮。管壁与装药接触面各质点的运动速度以中心处最大,且沿对称边界向外质点速度越来越小(见图 8)。由于接触面中心部位与边缘存在速度梯度,使得接触面的钢管材料不断变形并向内凹陷(见图 5)。钢管材料断裂产生破口后,破片生成,但破片上的不同质点仍然存在一定的速度梯度。因此破片在运动过程中仍会产生一定变形,最终形成类似弹丸的破片,破片各部分的质点速度基本趋于一致。从图 8 可以看出,Project 1、Project 2 及 Project 5 3 种工况下形成的爆炸破片整体速度分别达到 568、406 及 695 m/s。由于爆炸破片形成后,其速度和动能较大,致使对面管壁在破片的冲击作用下发生大变形,形成凹坑(Project 2);若破片动能足够大,对面管壁将被击穿,形成塞块,塞块被破片的剩余动能推出(Project 1、Project 5)。Project 1、Project 2 及 Project 5 3 种工况下爆炸破片与对面管壁碰撞后的剩余速度分别为 88、0 及 143 m/s。虽然受实验条件限制,没有对破片速度进行测量,但可以通过数值模拟方法对实验结果拓展,以供分析,



(a) Q=3 kg, δ=14.6 mm (b) Q=3 kg, δ=26.2 mm (c) Q=10 kg, δ=26.2 mm

图 8 破片单元速度曲线

Fig. 8 Velocity of fragment element

5 结 论

(1) 大直径 X70 钢油气管道接触爆炸实验结果表明:接触爆炸载荷对钢管的损伤呈现显著的局部破坏特征,管壁迎爆面局部结构损伤较大,且为花瓣形破口,而破口周围区域的变形程度较小;破口尺寸、翻唇程度与装药质量、管道壁厚密切相关。

(2) 大药量炸药与管道的接触爆炸不但在爆炸部位形成孔洞、裂缝,而且形成类似弹丸的破片。这

种破片具有较大的质量,在形成时还具有较高的速度,并携带较大的动能,与对面管壁碰撞后形成凹坑或发生贯穿现象,具有较强的后效作用。

(3) Lagrangian-Eulerian 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,模拟结果与实验结果的相对误差在工程允许范围内,是实验方法的有益补充,对于进行管道结构的抗爆承载计算及安全性评估提供参考依据。

下一步研究工作将针对大直径充液 X70 钢油气管道,研究管中充液对爆炸局部破坏效应的影响。

References:

[1] Zhang T G, Stronge W J. Rupture of thin ductile tubes by oblique impact of blunt missiles: Experiments [J]. Int J Impact Eng, 1998, 21(7): 571-587.

[2] Shen X J, Zhang P X, Sun T, et al. Research on thick barrel's damages due to impaction by fragments of high explosive projectile [J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(4): 438-442. (in Chinese)
沈晓军,张鹏翔,孙　韬,等. 杀爆战斗部破片对厚壁钢管的毁伤效应研究 [J]. 兵工学报,2005,26(4):438-442.

[3] Rushton N, Schleyer G K, Clayton A M, et al. Internal explosive loading of steel pipes [J]. Thin-Walled Struct, 2008, 46(7/8/9): 870-877.

[4] Lu S Z, Zhang B Y, Wang W, et al. Experimental research on dynamic response mechanism of thin cylindrical shell under blast loading [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2011, 35(5): 621-626. (in Chinese)
路胜卓,张博一,王　伟,等. 爆炸作用下薄壁柱壳结构动力响应实验研究 [J]. 南京理工大学学报,2011,35(5):621-626.

[5] Pan X H, Xu J, Jiang J C. Simulation analysis of dynamic response of thin-wall cylindrical tank to shock wave [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2008, 59(3): 798-801. (in Chinese)
潘旭海,徐　进,蒋军成. 圆柱形薄壁储罐对爆炸冲击波动力学响应的模拟分析 [J]. 化工学报,2008,59(3):798-801.

[6] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. Eng Fract Mech, 1985, 21(1): 31-48.

[7] Zhang G R, Chen D N. Condensed Explosives Detonation Dynamics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1991. (in Chinese)
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.

[8] Mu J L, Zhu X, Huang X M, et al. Crevasse computation for a clamped square plate subjected to near-field noncontact underwater explosion [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(1): 37-39. (in Chinese)
牟金磊,朱　锡,黄晓明,等. 水下近场非接触爆炸作用下固支方板破口计算 [J]. 振动与冲击,2011,30(1):37-39.

Local Damage Effects of X70 Steel Pipe Subjected to Contact Explosion Loading

JI Chong[1], LONG Yuan[1], TANG Xian-Shu[2], GAO Zhen-Ru[1], LI Yu-Chun[1]

(1. *PLA University of Science and Technology, Nanjing* 210007, *China*;
2. *Guilin Air Force Academy, Guilin* 541003, *China*)

Abstract: Field explosion experiments were carried out to investigate the contact explosion damage effects of large diameter X70 steel oil-gas pipes. The contact explosion damage characteristics of pipes

with different pipe wall thickness under various charge were analyzed. The experimental results show that the local damage of the pipe wall facing explosion is predominant and there is a petal-shaped crevasse. In addition, the fragments with abundant kinetic energy are formed. The dent or perforation phenomenon will occur after the opposite pipe wall is impacted by the fragment. By means of an explicit nonlinear dynamic finite element computer code LS-DYNA, the nonlinear dynamic response process of the steel pipe under contact explosion loading was numerically simulated with Lagrangian-Eulerian coupling method. The damage process of the pipe wall facing explosion and the after-effects of opposite pipe wall due to the impact of fragment were described. The numerical simulation results are in good agreement with experimental data. The results can provide important reference for the blast-resistant properties analysis and safety assessment of oil-gas pipes.

Key words: contact explosion; steel pipe; local damage; after-effects