文章编号：1001-1455(2014)02-0137-08

钢质圆柱壳在侧向爆炸荷载下的动力响应*

纪 冲[1]，徐全军[1]，万文乾[2]，高福银[1]，宋克健[1]
(1.解放军理工大学，江苏 南京 210007；
2.总装工程兵技术装备研究所，江苏 无锡 214035)

摘要：将壁厚为 2.75 mm、外径为 100 mm 的钢质圆柱壳置于 75 g 裸装圆柱形压装 TNT 药柱产生的爆炸场中进行冲击实验，获得了不同装药条件下圆柱壳的变形破坏特征。实验表明：非接触爆炸条件下，壳壁迎爆面局部破坏呈现碟型凹陷，同时沿壳体轴线方向产生了整体屈曲变形，且装药距离较大或药柱轴线与壳体轴线垂直放置情况下对壳体损伤程度较大；而接触爆炸时，壳壁发生破裂形成破口及破片。利用动力有限元程序 LS-DYNA 及 Lagrangian-Eulerian 流固耦合方法对圆柱壳的非线性动态响应过程进行数值模拟，分析了壳壁的屈曲变形过程及迎爆曲面中心点速度、位移时程曲线，计算结果与实验吻合较好。并基于数值计算确定了壳壁发生破裂的临界装药距离。

关键词：爆炸力学；动力响应；冲击实验；钢质圆柱壳；爆炸荷载；屈曲变形
中图分类号：O383 **国标学科代码**：1303520 **文献标志码**：A

金属圆管或圆柱壳由于其独特的构形和功能，被广泛应用于军事及民用工程的诸多领域。当金属圆管或柱壳结构受到爆炸冲击载荷作用时，常常产生大的塑性变形，或发生局部或整体的断裂破坏而导致结构失去原有功能。因此，研究圆管或柱壳结构在爆炸冲击载荷下的动力响应，对预测结构的变形特征、提高结构的抗爆能力具有重要的工程应用价值。

M. S. Hoo Fatt 等[1]和 T. Wierzbicki 等[2]针对半无限长薄壳体在侧向局部区域冲击载荷作用下的毁伤评估进行了理论研究；孙韬等[3]将圆柱壳看作理想刚塑性材料，给出了两端自由金属圆柱薄壳体在侧向非对称脉冲载荷下的变形和运动方程；金乾坤[4]采用动态显式非线性有限元软件对破片和冲击波对圆柱壳靶的毁伤实验进行了数值模拟，检验了圆柱壳材料模型及其参数选取的合理性和网格收敛性；郭志昀等[5]开展了∅90 mm 圆柱壳对侧向爆炸荷载弹性响应的实验研究，分析了圆柱壳弹性响应的基本特征；路胜卓等[6]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，测得模型壁面的超压荷载、动态应变和振动加速度时程曲线；潘旭海等[7]对圆柱形储罐薄壁结构在爆炸冲击荷载作用下的动力响应问题进行了数值模拟。以上研究对金属柱壳结构在冲击荷载下的破坏分析具有重要的参考价值。

在前述工作的基础上，本文中拟进行 Q235 钢质圆柱壳中心部位受侧向爆炸荷载破坏实验，以获得不同装药条件下圆柱壳的变形破坏特征；进而利用 LS-DYNA 有限元程序及 Lagrangian-Eulerian 流固耦合算法，建立三维实体模型对实验过程进行数值模拟，并将模拟结果与实验结果进行比较，分析不同侧向爆源条件下圆柱壳的变形及破坏特征，以期为防护工程应用和结构损伤评估等领域提供参考。

1 实验研究

实验所用试件为 Q235 钢质圆柱壳，壁厚为 2.75 mm，试件长为 1.0 m，外径为 100 mm；以裸装圆

* **收稿日期**：2012-09-27；**修回日期**：2013-01-27
基金项目：国家自然科学基金项目(11102233)
作者简介：纪 冲(1981—)，男，博士，讲师。

柱形压装 75 g TNT 药柱(∅3 cm×7 cm)作为爆炸源,装药密度为 1.61 g/cm^3。爆炸冲击实验现场的布置如图 1 所示,其中 R 为装药距离。实验前平整地面,安装固定好靶架,将圆柱壳和装药分别固定在支架上,确保两者的轴线平行或垂直,如图 1(b)所示,且圆柱壳的底面距地面高度大于 30 cm,装药悬挂于圆柱壳的上方,采用电雷管对装药进行中心起爆。不同装药距离(装药中心至壳壁迎爆面顶端的距离)下的实验结果和测量的参数如表 1 所示,其中 d 为圆柱壳迎爆曲面中心点最大挠度,r_1 为圆柱壳凹陷变形区宽度,r_2 为圆柱壳凹陷变形区轴向长度,如图 2 所示。图 3给出了圆柱壳在不同实验条件下的变形情况。

表 1 圆柱壳在各工况下受爆炸载荷的冲击变形模态

Table 2 Deformation mode of cylindrical shells on different test conditions subjected to explosion

实验编号	装药设置	R/cm	d/cm	r_1/cm	r_2/cm
1	平行	1.5	贯穿破坏		
2	平行	3.0	5.8	8.5	17.0
3	平行	4.0	5.4	8.0	16.5
4	平行	6.0	2.8	7.0	13.0
5	平行	8.0	1.3	5.0	9.0
6	垂直	3.0	7.5	10.5	21.0
7	垂直	4.0	5.7	8.5	17.5
8	垂直	6.0	4.1	8.5	17.5
9	垂直	8.0	2.4	6.8	14.5

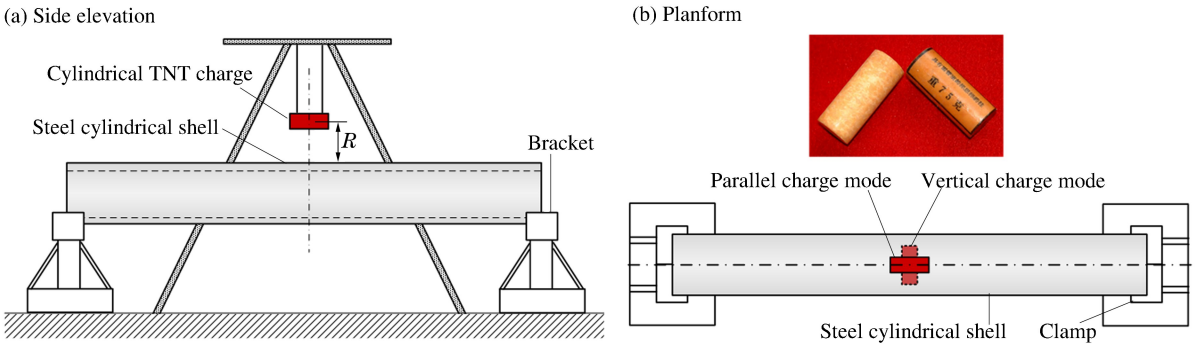


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Sketches of experimental layout

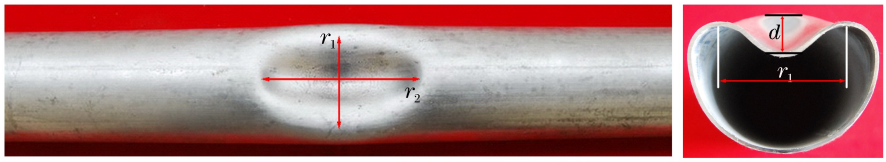


图 2 变形参数说明

Fig. 2 Sketches of the deformation parameters

由实验结果可看出,由于壳壁较薄,迎爆面中心点及附近的壳壁产生明显的内凹屈曲变形或严重的损伤破裂,从而大大降低了整体承载能力和屈曲强度。因爆炸载荷沿壳壁圆周方向及圆柱壳轴线方向对称分布,因而沿圆周方向及轴线方向壳壁迎爆面各点的变形也是对称的。且随着装药距离的减小,变形量也逐渐增大。实验中还发现,装药距离一定的情况下,TNT 药柱轴线与壳体轴线垂直放置情况下对壳体损伤程度较大。圆柱壳在不同强度爆炸冲击载荷作用下的塑性屈曲变形呈现出相同的特点,即在壳壁不破裂的情况下其变形可以分为 2 个区域:(1) 爆炸冲击作用使壳壁产生的碟型凹陷变形区;(2) 碟型凹陷变形区以外沿圆柱壳轴线方向的整体变形区,产生了结构挠度变形。其中凹陷变形区(俯视)呈椭圆形,而随装药距离的增大,凹陷变形区的扩展范围减小并且趋近于圆形。

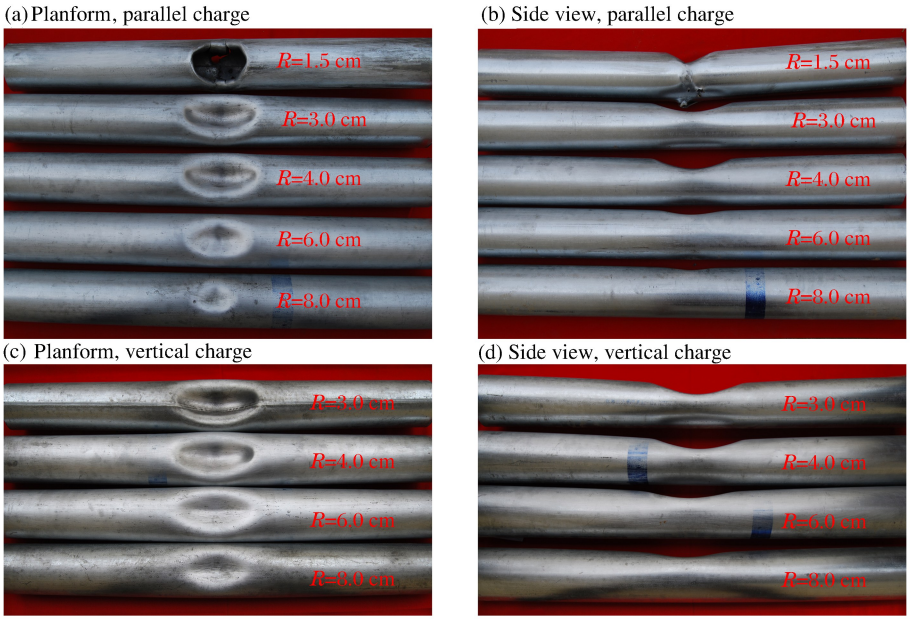


图 3　圆柱壳冲击变形情况

Fig. 3　Deformation of the cylindrical shells under impact

2　数值计算模型及材料

为更深刻认识圆柱壳在侧向爆炸冲击荷载作用下的动力响应过程，采用 LS-DYNA 有限元程序对上述实验进行数值模拟。

2.1　数值计算模型

根据爆轰产物与钢圆柱壳介质相互作用问题的特性，采用多物质 Euler 材料与 Lagrange 结构相耦合的算法，即将炸药、空气等物质与钢圆柱壳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，定义钢圆柱壳为 Lagrange 网格。鉴于上述物理模型的对称性，可取原型的 1/2 建立计算模型，其中对称面上的节点设置对称约束，并将空气侧面定义为透射边界。图 4 所示为采用 SOLID164 六面实体单元建立的有限元计算模型。

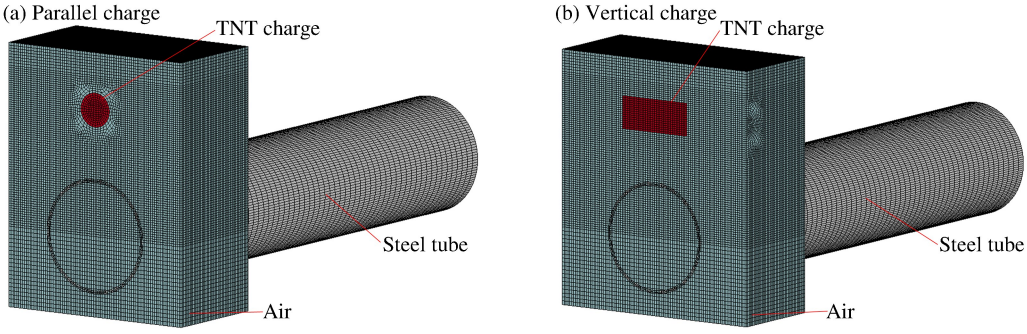


图 4　有限元计算模型

Fig. 4　The finite element model

2.2　材料模型及参数

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[8]进行描述，并假定爆轰前沿以常速率传播。以炸药爆轰产物的压力 p_d 表示的 JWL 状态方程为：

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

式中：$\eta=\rho_d/\rho_e$，ρ_d 为爆轰产物密度，ρ_e 为炸药密度；e_e 是炸药的体积内能；A_1、B_1、R_1、R_2 和 ω 为实验拟合参数。计算中，TNT炸药的C-J参数和 JWL 状态方程参数为[8]：$\rho_e=1.61$ g/cm^3，$D=6.93$ km/s，$p_{CJ}=21.0$ GPa，$A_1=371.2$ GPa，$B_1=3.231$ GPa，$R_1=4.15$，$R_2=0.95$，$\omega=0.30$，$e_e=7.0$ GJ/m^3，其中 D 为爆轰速度，p_{CJ} 为 C-J 爆轰压力。

对空气采用空材料模型，可通过调用状态方程来避免偏应力计算。假设空气介质为无黏性的理想气体，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 $p_a=(\gamma-1)e_0\rho_a/\rho_0$。其中：$p_a$ 为气压，ρ_a 为空气密度，空气初始密度 $\rho_0=1.29$ kg/m^3，绝热指数 $\gamma=1.4$，气体的体积内能 $e_a=0.25$ kJ/m^3。

圆柱壳材料选取 Johnson-Cook 材料模型[9]。对 Von Mises 屈服应力模型，材料屈服应力表示为：

$$\sigma_y=[A+B(\bar{\varepsilon}_p)^n](1+C\ln\dot{\varepsilon}^*)[1-T_r^m] \tag{2}$$

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

断裂应变的表达式表示如下：

$$\varepsilon_f=[D_1+D_2\exp(D_3\sigma^*)](1+D_4\ln\dot{\varepsilon}^*)(1+D_5T_r) \tag{3}$$

式中：$\sigma^*=p/\sigma_e$，p 为压力，σ_e 为 Von Mises 等效应力。当损伤参数 $D=\sum\Delta\varepsilon/\varepsilon_f$ 的值为 1.0 时，断裂发生（$\Delta\varepsilon$ 为积分循环期间的等效塑性应变增量）。Q235 钢的材料模型参数为[10]：$\rho_s=7.8$ g/cm^3，$A=229.0$ MPa，$B=439.0$ MPa，$n=0.503$，$C=0.1$，$m=0.55$，$D_1=0.3$，$D_2=0.9$，$D_3=-2.8$，$D_4=0.0$，$D_5=0.0$。

3 数值计算结果及分析

3.1 圆柱壳塑性动力屈曲响应分析

炸药非接触爆炸数值计算时选取下列 4 种典型情况：方案 1，$R=3.0$ cm，装药平行放置；方案 2，$R=3.0$ cm，装药垂直放置；方案 3，$R=6.0$ cm，装药平行放置；方案 4，$R=6.0$ cm，装药垂直放置。数值模拟结果表明，炸药在中心点起爆后，内部形成一个球形爆轰波阵面，之后爆轰产物极速向外膨胀。依据装药距离的不同，经过 4～9 μs，爆轰产物作用至与圆柱壳的接触面。当爆轰产物作用到金属圆柱壳上时，圆柱壳迎爆曲面中心处首先受到爆轰产物的冲击作用，此时局部变形开始，冲击力使迎爆面产生一个表面光滑的凹陷区窝，这一局部凹陷在冲击瞬时耗散了一部分初始冲击能量。凹陷窝区改变了冲击点处管的圆形截面特性，并使这种改变向迎爆面的轴向和径向扩展。金属圆柱壳发生的凹陷变形区呈碟形，此明显的碟形变形区是圆柱壳区别于梁的一个显著特征：由于薄壁圆柱壳的抗弯刚度远大于具有相同截面面积的实心截面梁的抗弯刚度，且薄壁圆柱壳与爆炸冲击波的接触面是弧形，所以冲击开始瞬间具有比梁更大的接触应力，必然有较大的碟形变形发生。

以方案 1、方案 2 为例，图 5 给出了圆柱壳在爆炸冲击荷载下壳壁的位移等值云图。由图 5 可知，在方案 1 情况下，由于药柱轴线平行于圆柱壳轴线放置导致的爆炸荷载分布特性以及壳壁周向受到圆柱壳构型的限制发展相对缓慢的原因，在整个冲击过程中等效位移云图为长椭圆形；而在方案 2 情况

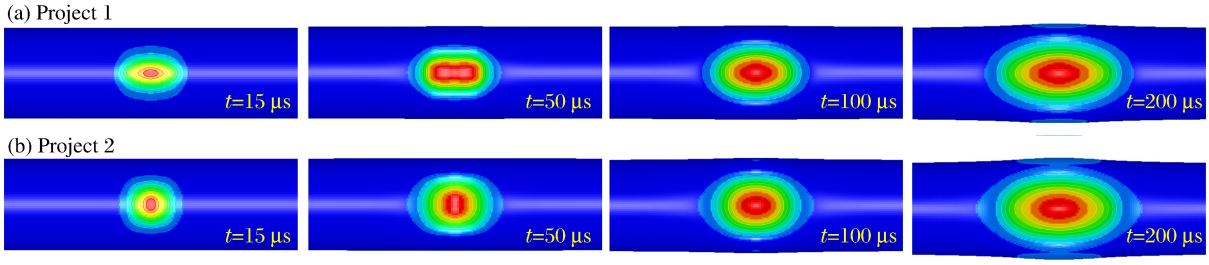


图 5 壳壁位移云图

Fig. 5 Displacement nephograms of the cylindrical shell

下，由于药柱轴线垂直于圆柱壳轴线放置改变了爆炸荷载的分布特性，在冲击作用初始阶段（$t\leqslant 15\ \mu s$）等效位移云图为圆形，但随变形的发展，位移云图在轴向扩展迅速，而在周向则受到圆柱壳构型的限制发展相对缓慢，之后位移云图也逐渐变为椭圆形。

数值计算结果表明，在圆柱壳受冲击约80 μs之内，由于惯性，壳壁只发生局部碟形凹陷变形，没有发生沿轴线方向的整体屈曲变形。随着碟形变形区域的扩展，圆柱壳的抗弯刚度减小，开始发生整体变形。碟形凹陷和整体弯曲变形耦合时，爆炸冲击动能由 2 种变形的塑性功所耗散。当装药距离较大且装药平行放置时（方案 3），整体变形较小，碟形变形占主导地位。随着爆炸作用距离的减小，冲击点处的壳体截面扁化越来越严重，极大地改变了柱壳的抗弯刚度。

爆炸作用下圆柱壳迎爆面中心点相关参数变化是衡量其变形程度的重要指标，对4种方案下圆柱壳迎爆曲面中心点的位移 u 和速度 v 时程曲线进行了对比，如图6～7所示。可以看出，中心点最大速度出现在爆炸荷载作用结束时；当蝶形凹陷完全形成之后圆柱壳产生整体变形，而后圆柱壳由于惯性作用将整体继续向下运动。在整个计算时间段内，中心点位移在达到最大值后发生回复，随后结构在平衡位置附近不断振动。另外计算表明，在装药垂直放置或装药距离 R 较小的情况下振幅相对较大。

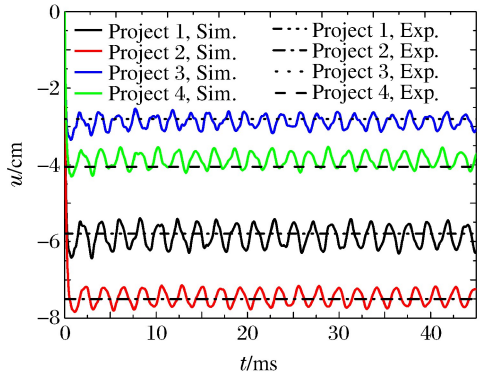


图 6　迎爆面中心点位移时程曲线

Fig. 6　Displacement-time curve of impact point

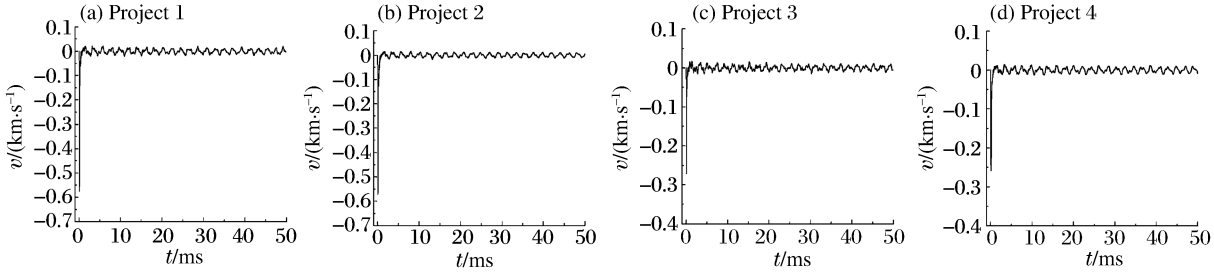


图 7　迎爆面中心点速度时程曲线

Fig. 7　Velocity-time curve of impact point

圆柱壳屈曲变形效应数值计算结果与实验结果对比情况如图 8～11 所示（需说明的是，因圆柱壳在受爆炸冲击后发生整体振动，要得到静止状态情况下圆柱壳变形情况计算量巨大，因此表中圆柱壳变形情况近似取振动平衡点处情况）。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，表明本文所建立的计算模型和选取的材料参数合理，数值计算结果可信。

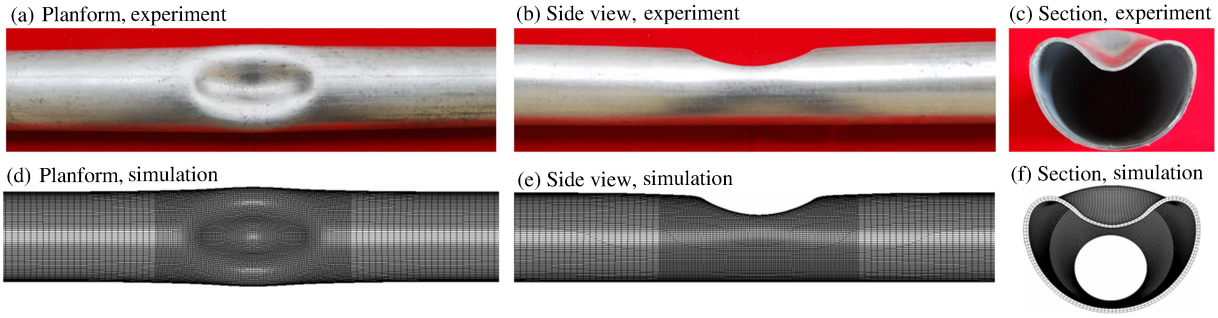


图 8　圆柱壳变形情况数值模拟与实验的对比（方案 1）

Fig. 8　Numerically simulated deformation of cylindrical shells compared with experiments for the project 1

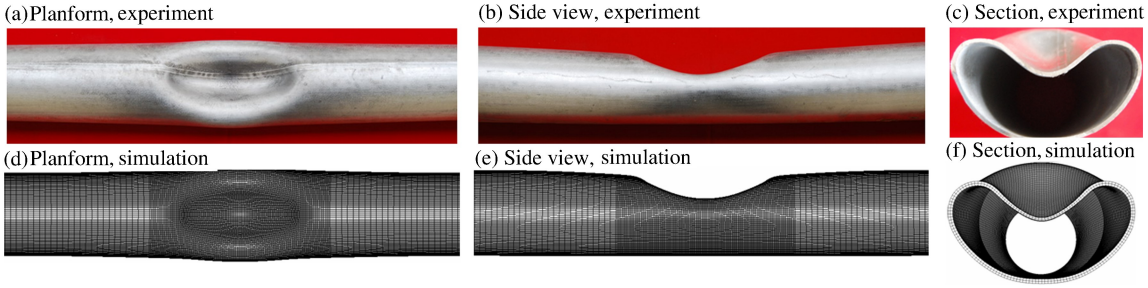


图 9 圆柱壳变形情况数值模拟与实验的对比(方案 2)

Fig. 9 Numerically simulated deformation of cylindrical shells compared with experiments for the project 2

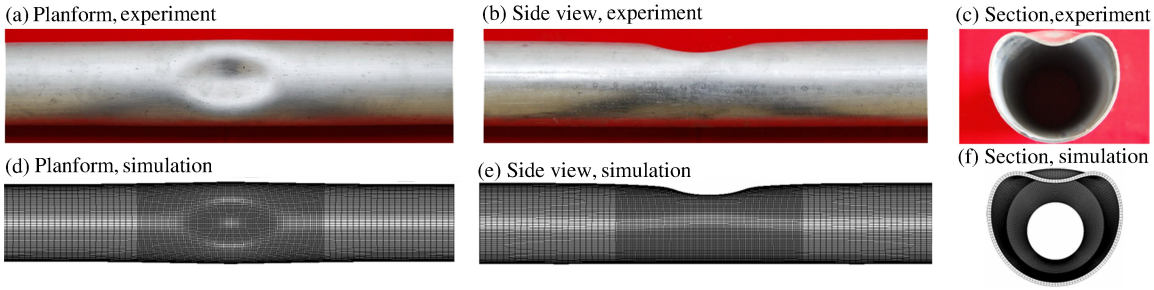


图 10 圆柱壳变形情况数值模拟与实验的对比(方案 3)

Fig. 10 Numerically simulated deformation of cylindrical shells compared with experiments for the project 3

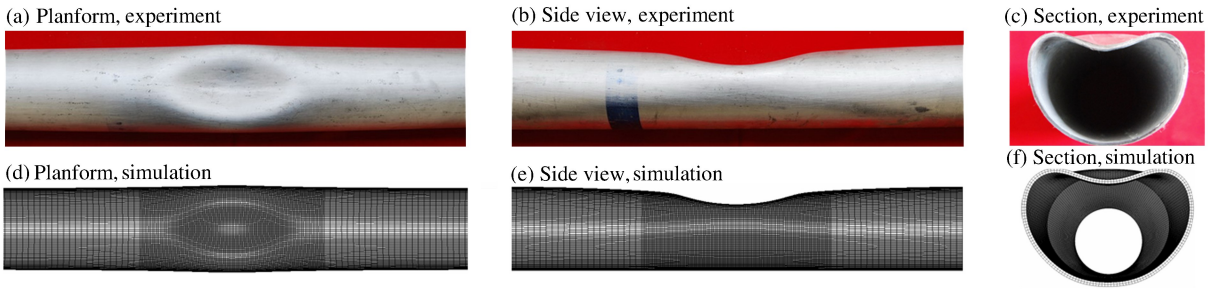


图 11 圆柱壳变形情况数值模拟与实验的对比(方案 4)

Fig. 11 Numerically simulated deformation of cylindrical shells compared with experiments for the project 4

3.2 圆柱壳破裂响应分析

数值计算表明,当 $R=1.5$ cm 即装药与壳壁接触爆炸时,爆轰产物作用到金属圆柱壳上使壳壁产生剧烈变形向内凹陷。随后壳壁塑性应变迅速超过圆柱壳材料的极限断裂应变,导致裂纹产生直至形成破口,同时产生爆炸破片。之后裂纹向四周扩展,呈现花瓣开裂。当环向应变等于开裂应变时裂纹扩展终止[11],破口达到最大。爆炸破片以较高速度与对面壳壁碰撞后,发生贯穿现象。圆柱壳破裂情况数值计算结果与实验结果对比情况如图 12 所示。变形过程数值计算结果还表明,由于壳壁发生破裂,爆轰产物迅速向壳体内部扩散导致压力卸载,因此壳体的整体屈曲程度小于非接触爆炸情况。

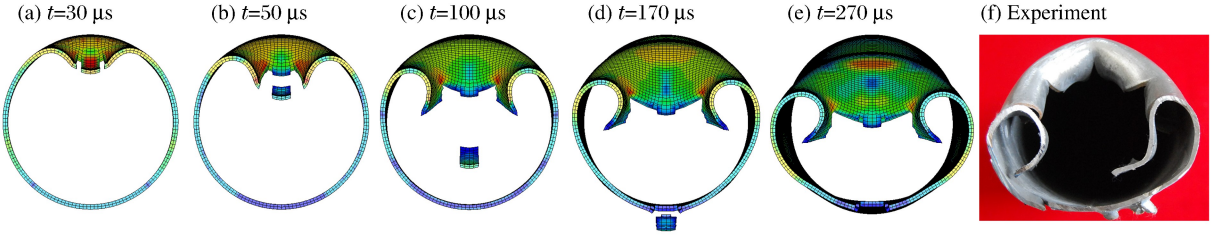


图 12 圆柱壳破裂情况数值模拟与实验的对比

Fig. 12 Numerially simulated damage of cylindrical shells compared with experiment

在金属圆柱壳抗爆炸荷载能力的安全评估中，装药形式一定的情况下需确定壳体发生破裂的临界装药距离。临界装药距离是使壳壁产生穿透性裂纹的最小距离。由于壳壁发生局部破裂时，管内介质的泄露可能引起火灾、爆炸等灾难性事故。因此在评估柱壳结构抗爆炸冲击性能时，选取临界破裂装药距离更具工程应用价值。在保证数值计算其他参数不变的情况下，经过多次试算，确定了裸装 75 g TNT 药柱在平行放置与垂直放置情况下使壳壁发生破裂的临界装药距离 R_c 分别为 2.1 和 2.6 cm，圆柱壳的破坏情况如图 13 所示。由于由于壳壁较薄，2 种装药放置情况下临界装药距离差别似乎不明显，但进一步验证了装药垂直放置情况下对壳壁造成的损伤程度要更为严重的结论。

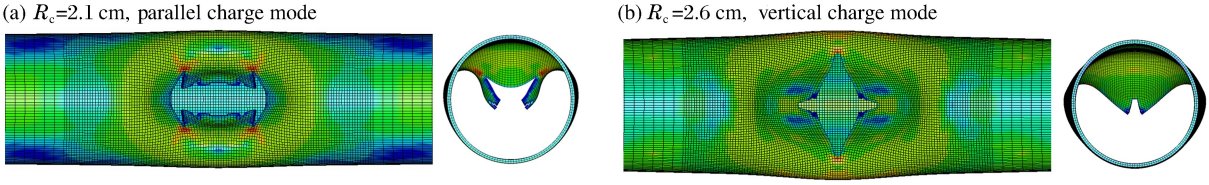


图 13 临界装药距离条件下圆柱壳的破裂情况

Fig. 13 Damage of cylindrical shells under the conditions of critical charge distance

3 结　论

(1)钢质圆柱壳在 75 g 裸装圆柱形压装 TNT 药柱产生的爆炸场中的冲击实验表明：迎爆面中心点附近的壳壁产生了明显的内凹屈曲变形或严重的损伤破裂；随装药距离减小，对应的变形量也逐渐增大；并且装药距离一定的情况下，TNT 药柱轴线与壳体轴线垂直放置情况下对壳体损伤程度较大。

(2)壳壁不破裂的情况下其变形可以分为 2 个区域：中心冲击点附近的凹陷变形区及其以外壳壁的整体变形区，其中碟形凹陷区(俯视)呈椭圆形，而随装药距离的增大，碟形变形区的扩展范围减小并且趋近于圆形。

(3)采用 Lagrangian-Eulerian 耦合数值模拟方法计算了圆柱壳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，并得到了圆柱壳迎爆面中心点的位移和速度时程曲线。确定了裸装 75 g TNT 药柱在平行放置与垂直放置情况下的临界破裂装药距离分别为 2.1 和 2.6 cm。

参考文献：

[1] Hoo Fatt M S, Wierzbicki T. Damage of plastic cylinders under localized pressure loading[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1991,33(12):999-1016.

[2] Wierzbicki T, Hoo Fatt M S. Damage assessment of cylinders due to impact and explosive loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 1993,13(2):215-241.

[3] 孙韬,冯顺山. 自由圆柱壳体在侧向非对称脉冲载荷下的塑性破坏[J]. 爆炸与冲击,1998,18(2):103-111.
Sun Tao, Feng Shun-shan. Damage of free plastic cylinders under lateral impulsive loading[J]. Explosion and Shock Waves, 1998,18(2):103-111.

[4] 金乾坤. 破片和冲击波毁伤圆柱靶的数值仿真[J]. 兵工学报,2006,27(2):215-218.
Jin Qian-kun. Simulation of cylindrical shell damage by fragments and shock waves[J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(2):215-218.

[5] 郭志昀,王占江,王伟,等. 侧向爆炸引起圆柱壳弹性响应的初步实验研究[J]. 兵工学报,2011,32(增刊 2):196-199.
Guo Zhi-yun, Wang Zhan-jiang, Wang Wei, et al. Experimental study on elatic reponse of cylindrical shells under side explosive loading[J]. Acta Armamentarii, 2011,32(suppl 2):196-199.

[6] 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:自然科学版,2011,35(5):621-626.
Lu Sheng-zhuo, Zhang Bo-yi, Wang Wei, 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.
[7] 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.
Pan Xu-hai, Xu Jin, Jiang Jun-cheng. Simulation analysis of dynamic response of thin-wall cylindrical tank to shock wave[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008,59(3):798-801.
[8] 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.
[9] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperature[C]// Proceedings of 7th Symposium on Ballistics. Hegue, Netherlands: International Ballistics Committee, 1983:541-547.
[10] 肖新科.双层金属靶的抗侵彻性能和 Taylor 杆的变形与断裂[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
[11] 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.
Mu Jin-lei, Zhu Xi, Huang Xiao-ming, 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.

Dynamic responses of steel cylindrical shells under lateral explosion loading*

Ji Chong[1], Xu Quan-jun[1], Wan Wen-qian[2], Gao Fu-yin[1], Song Ke-jian[1]
(1. *PLA University of Science and Technology, Nanjing* 210007, *Jiangsu, China*;
2. *Institute of Engineer Technical Equipment of the General Armaments Department, Wuxi* 214035, *Jiangsu, China*)

Abstract: By choosing naked cylindrical 75-g-TNT charges as explosion sources, impact experiments were carried out on steel cylindrical shells with the wall thickness of 2.75 mm and the outer diameter of 100 mm. The damage characteristics of the shells were obtained under different explosion conditions. The experimental results show that subjected to non-contact explosion, the cylindrical shell wall facing explosion deforms in a dish-shaped pit and the whole buckling deformation will occur along the axis of the cylindrical shell direction. The damage of the cylindrical shell is more serious when the shell-to-charge distance is bigger or the axis of the charge is perpendicular to the axis of the cylindrical shell. However, the crevasse and fragment will occur under the conditions of contact explosion. By means of LS-DYNA, the nonlinear dynamic response processes of the cylindrical shells subjected to explosion loading were numerically simulated with the Lagrangian-Eulerian coupling method. The deformation processes of the shell walls were described as well as the displacement-time and velocity-time curves of the impact points. The numerical simulation results are in good agreement with the experimental data. And based on the numerical simulations, the critical shell-to-charge distance was determined for estimating the rupture of the shell wall.

Key words: mechanics of explosion; dynamic response; impact experiment; steel cylindrical shell; explosion loading; buckling deformation

* Received 27 September 2012; Revised 27 January 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (11102233)
Corresponding author: Ji Chong, blastingcaptain@163.com

(责任编辑 王小飞)