文章编号：1000-5773(2013)01-0076-07

炸药条加载圆柱壳的数值模拟(Ⅱ)：解耦分析与实验验证*

毛勇建[1]，李玉龙[2]，陈　颖[1]，邓宏见[1]，黄海莹[1]，周　擎[1]，黄含军[1]

(1.中国工程物理研究院总体工程研究所，四川绵阳　621900；
2.西北工业大学航空学院，陕西西安　710072)

摘要：根据已报道的二维流固耦合数值模拟结果，建立了经缓冲橡胶整形后的单炸药条载荷模型。将炸药条载荷叠加后直接施加在圆柱壳表面，进行二维解耦模拟，得到了与流固耦合模拟基本吻合的应力结果。在此基础上，对19条炸药条加载∅265 mm×380 mm圆柱壳进行了三维解耦模拟，并采用相同状态的实验予以验证。结果表明，特征点应变响应吻合较好，验证了炸药条加载圆柱壳解耦数值模拟的有效性，为大量工况数值分析、提高建模和计算效率奠定了基础。

关键词：圆柱壳；X射线；炸药；结构响应；解耦

中图分类号：O383　　**文献标识码**：A

1　引　言

对于脉冲X射线辐照诱导的喷射冲量[1-2]，国内外均广泛采用炸药条加载方法进行实验模拟[3-6]。但是该方法是采用离散的炸药条载荷模拟连续分布(对旋转体而言为余弦分布)的X射线载荷，其时空分布具有一定差异，因此实验模拟的等效性评估十分必要[7]。然而，作为等效性研究的重要手段之一，对实验状态的数值模拟因涉及多种材料(固体和流体)和多种本构(状态)方程，效率十分低下，不利于大量工况的计算分析[8]。因此，对炸药条加载实验的解耦分析，对今后大量数值实验和等效性研究的开展具有基础性意义。

事实上，邓宏见[5]及毛勇建等人[9]均采用解耦的分析方法，即直接施加炸药条载荷的方法，研究了壳体的结构响应，但对解耦的合理性未予论证。同时，邓宏见等人[5]仅提取了缓冲层表面的炸药条载荷(即接触爆炸载荷)，解耦模型中仍涉及两层橡胶，简化程度不够；由于未考虑缓冲层对模态的影响，其分析结果与实验数据的吻合程度不甚理想。毛勇建等人[9]虽对圆柱壳施加了经缓冲层整形后的炸药条载荷，但作为计算方法的应用实例，其载荷模型具有一定的假定成分。

对此，本研究将在毛勇建等人[8]的流固耦合数值模拟基础上，依据计算结果，建立经缓冲层整形后的单炸药条载荷模型，叠加后直接施加在圆柱壳表面，进行解耦的二维数值模拟。在解耦合理性得到初步验证的基础上，进一步外推到实验状态，进行三维模拟，并通过实验结果进行验证。

2　单炸药条载荷模型

由毛勇建等人[8]的流固耦合分析结果可知，单炸药条的载荷脉宽为50～100 μs，起始时差也为50

* **收稿日期**：2011-05-27；**修回日期**：2011-11-14
基金项目：国家自然科学基金(11102196)；装备预研基金(XXXZW04)；国防技术基础
作者简介：毛勇建(1976－)，男，博士，高级工程师，主要从事冲击动力学研究. E-mail：maoyj@caep.ac.cn
通讯作者：李玉龙(1961－)，男，博士，教授，主要从事冲击动力学研究. E-mail：liyulong@nwpu.edu.cn

~100 μs。根据相关计算结果,建立单炸药条载荷模型。

为获得单炸药条载荷的比冲量分布函数,根据文献[8]中的经缓冲层整形后的炸药条载荷特性图,采用高斯分布曲线,拟合得到比冲量随距离的归一化衰减函数,如图 1(a)所示。拟合曲线的表达式为

$$f(x)=\exp\left[-\left(\frac{x}{10.15}\right)^2\right] \tag{1}$$

式中:x 为环向坐标(单位为 mm),并约定炸药条中心位于 $x=0$ 处。

将压力脉冲的时域形状简化为等腰三角形,其归一化分布如图 1(b)所示,表达式为

$$g(x,t)=\begin{cases}0 & 0\leqslant t<t_s\\ 2\dfrac{t-t_s(x)}{t_w(x)} & t_s\leqslant t\leqslant t_s+\dfrac{1}{2}t_w\\ 2-2\dfrac{t-t_s(x)}{t_w(x)} & t_s+\dfrac{1}{2}t_w<t\leqslant t_s+t_w\\ 0 & t>t_s+t_w\end{cases} \tag{2}$$

式中:t 为时间(ms),t_s 为载荷起始时间(ms),t_w 为压力脉宽(ms)。t_s、t_w 均与 x 相关,根据计算结果,近似为如下线性关系

$$t_s(x)=0.05+0.0050\,|x| \tag{3}$$

$$t_w(x)=0.05+0.0025\,|x| \tag{4}$$

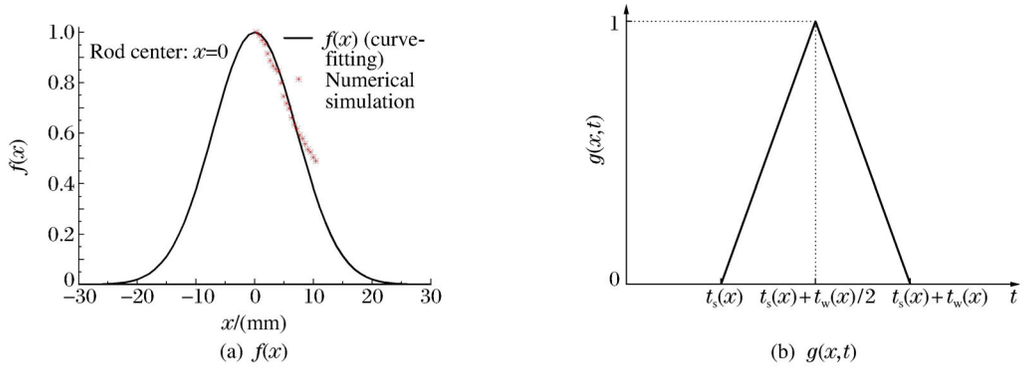


图 1　单炸药条载荷模型的两个函数因子

Fig. 1　Two factorial functions of the load model of single explosive rod

引入无量纲压力系数 $C_p(x)=t_w(0)/t_w(x)=0.05/t_w(x)$,以及压力峰值 p_{max}(单位为 MPa),即可构建经橡胶缓冲层整形后的单炸药条载荷模型,即

$$p(x,t)=p_{max}C_p(x)f(x)g(x,t) \tag{5}$$

式中:$p(x,t)$ 表示压力载荷的时空分布。根据(5)式,结合文献[8]中的比冲量峰值,可得 $p_{max}=11.99$ MPa。有必要指出,由于在短脉冲载荷作用下,结构响应主要依赖于冲量,因此在上述载荷模型的建立中,以比冲量分布为主要依据,使得压力曲线的形状和峰值与流固耦合模拟结果存在一定差异,但这种差异对结构响应的影响较小。

依据上述载荷模型,通过积分反推片炸药的比冲量约为 1 480 Pa·s,与机械方式得到的测量结果(1 437.3 Pa·s)基本吻合(见 4.2 节),说明建立的单炸药条载荷模型与炸药条性能基本吻合。

需要说明的是,本研究根据解耦分析及验证需要,仅针对特定类型和尺寸的条形装药,由数值模拟和实测结果拟合压力载荷模型,适用范围有限。考虑各种参数变化的炸药条载荷模型,将另作探讨。

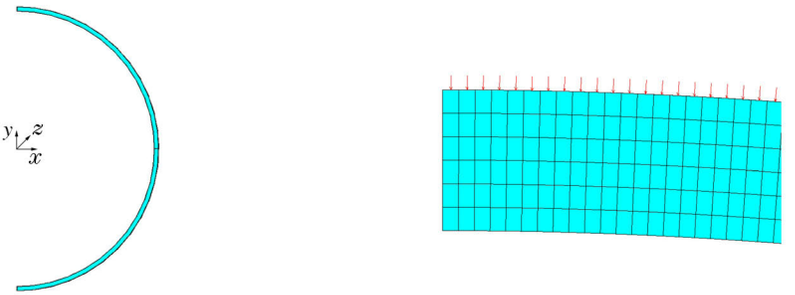
3　二维解耦分析

3.1　计算模型

不考虑空气、炸药和两层橡胶,只建立圆柱壳模型(圆柱壳材料为合金钢,外形尺寸为∅265 mm×

380 mm，壁厚 4 mm，与文献[8]相同)，如图 2(a)所示。有限元网格划分见图 2(b)，共计 5 400 个 SOLID 164 实体单元 12 614 个节点，所有单元采用 Lagrange 方法描述。

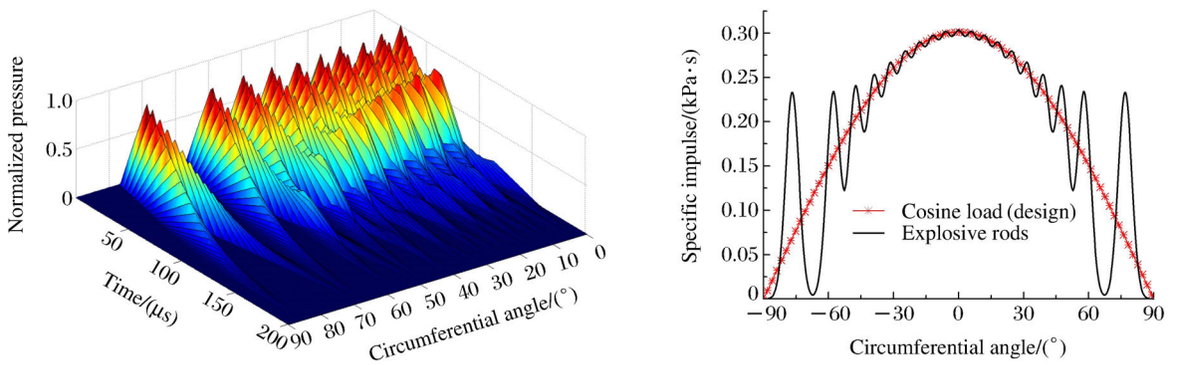
采用(5)式描述的单炸药条载荷模型，根据炸药条分布位置，叠加得到压力时空分布，如图 3(a)所示。施加的载荷所对应的比冲量分布及其与标准余弦分布载荷的比较如图 3(b)所示。可见，炸药条分布为中间密、两侧疏，叠加而成的炸药条载荷在±30°范围内与余弦分布吻合较好，但随着周向角(绝对值)的增加，炸药条载荷的离散性逐渐表现出来，呈振幅不断增加的波浪状。



(a) Geometrical model　　(b) Finite element meshes

图 2　解耦分析的有限元模型

Fig. 2　Finite element model of decoupling analysis



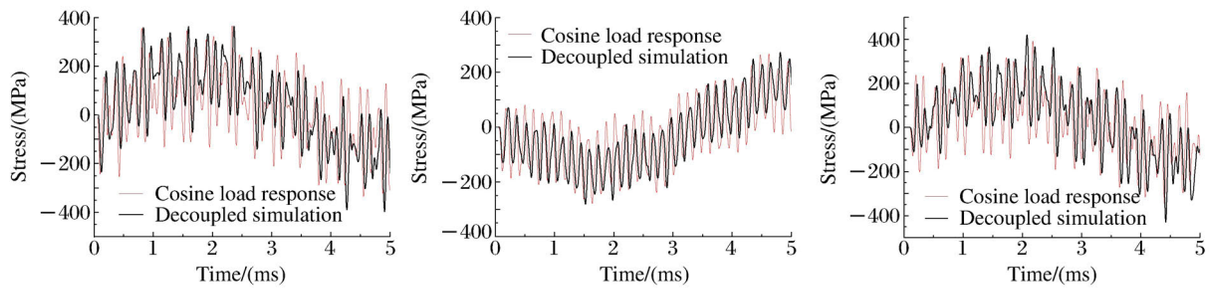
(a) Spatio-temporal distribution　　(b) Distribution of specific impulse

图 3　19 条炸药条在∅265 mm 圆柱壳表面产生的载荷

Fig. 3　Load of 19 explosive rods distributed on the surface of ∅265 mm cylindrical shell

3.2　计算结果

采用 3.1 节所述模型得到的分析结果及其与标准余弦载荷响应、流固耦合模拟结果的比较见图 4、图 5。对结构设计而言，一般比较关注强度问题，因此本研究仅比较应力分析结果。从图 4 所示的 0°、90°、180°内表面环向应力响应曲线可以看出，解耦分析得到的应力响应与对应的标准余弦载荷响应的



(a) Stress at 0°　　(b) Stress at 90°　　(c) Stress at 180°

图 4　解耦分析结果与余弦载荷响应分析结果的比较

Fig. 4　Results of decoupled analysis compared to cosine load responses

频率特性吻合,幅值基本相当,但解耦载荷激起的高频响应略低于余弦载荷。由图 5 可见,解耦分析与流固耦合分析结果吻合较好,频率、幅值以及最大应力值均基本相当,说明用解耦分析代替流固耦合分析是可行的。

流固耦合分析采用多物质 ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian)方法,模型庞大,计算效率低;而解耦分析只需要建立圆柱壳模型,直接施加炸药条载荷,建模复杂性和计算规模均大幅降低,计算效率大幅提高(根据计算情况,效率可提高 30～90 倍)。

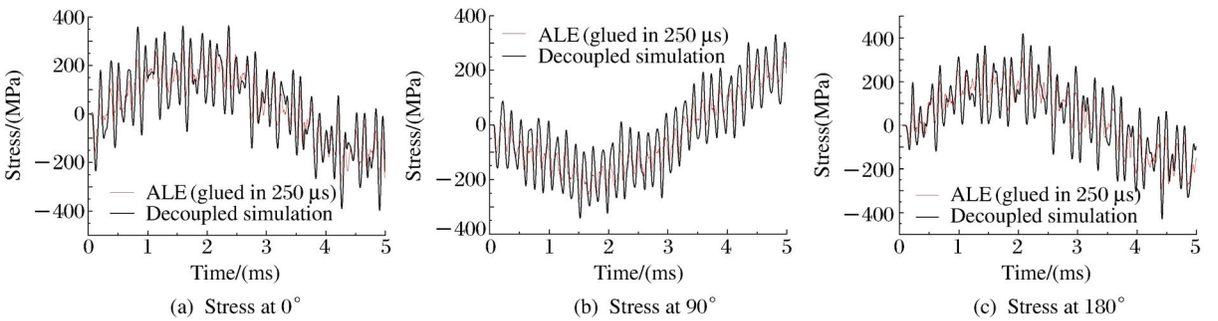


图 5　解耦分析结果与流固耦合分析结果的比较

Fig. 5　Results of decoupled analysis compared to fluid-structure interaction analysis

4　三维模拟与实验验证

4.1　三维数值模拟

根据文献[8]中描述的实际问题,建立三维计算模型。为控制计算规模,依据对称性建立 1/4 模型,即沿 $X=0$ 截面(即 0°～180°截面,过对称轴)和 $Z=0$ 截面(垂直于对称轴)剖开,建立如图 6 所示的半截半圆柱壳模型。在有限元网格剖分中:沿壳体厚度方向划分为 4 等份;周向划分为 900 等份;轴向不等距划分为 100 份,靠近 $Z=0$ 对称面处的网格较密,靠近 $Z=-190$ mm 端面处的网格较疏,最大与最小尺寸比为 3。整个模型共计 360 000 个 SOLID 164 实体单元 455 005 个节点,所有单元采用 Lagrange 方法描述。在 $X=0$ 和 $Z=0$ 截面施加面对称边界条件,$Z=-190$ mm 端面保持自由。在外层单元表面(0°～90°),施加如图 3 所示的动态压力载荷。

模型建立后,采用 LS-DYNA 进行计算,提取相关特征点的环向和轴向应变计算结果。

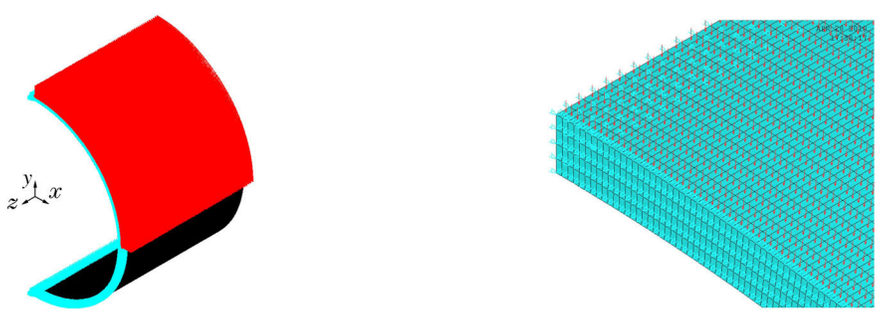


图 6　三维计算模型及其有限元网格、边界条件和载荷

Fig. 6　Three-dimensional model and its finite element meshes, boundary conditions and loads

4.2　实　验

实验所用的圆柱壳和橡胶板的结构和材料均与文献[8]相同。片炸药由中国工程物理研究院化工材料研究所生产,厚度具有一定分散性。采用机械方式[6]测量了不同厚度样品的比冲量(见图 7),通过线性拟合得到实际炸药条的比冲量。采用人工操作方法,将片炸药切割成宽度为 3 mm 的等宽炸药条。

采用游标卡尺对炸药厚度进行抽检，结果表明，炸药厚度在 0.445～0.485 mm 之间，平均厚度为 0.467 mm。根据图 7 所示的比冲量测量结果，得到加载用炸药条的平均比冲量为 1 437.3 Pa·s。

采用“粘得牢”，在圆柱壳外表面±90°范围内依次粘贴 FM-32 海绵橡胶板和 RB-55 真空橡胶板。将圆柱壳悬挂在龙门架上，按照设计的炸药条分布，用厚度为 0.2 mm 的双面不干胶纸将炸药条粘贴在真空橡胶板表面。炸药条的加载段与橡胶板紧密粘接，传爆段被汇集后由雷管起爆。

图 8 给出了实验前、后的照片，从图中可以看到炸药条爆炸后在真空橡胶板表面留下的痕迹。为对比分析，实验测量了圆柱壳内表面 0°、90°、180°母线中点的环向和轴向应变变化曲线，如图 9 所示。

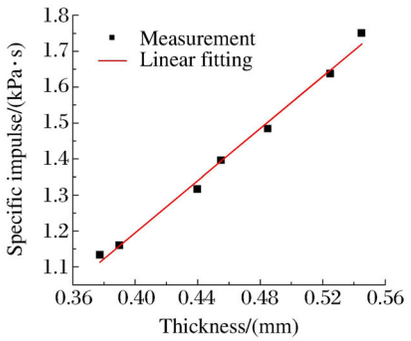


图 7 片炸药比冲量测量结果

Fig. 7 Measured specific impulse of sheet explosive



图 8 炸药条加载实验状态

Fig. 8 Photos of rod-explosive loading test

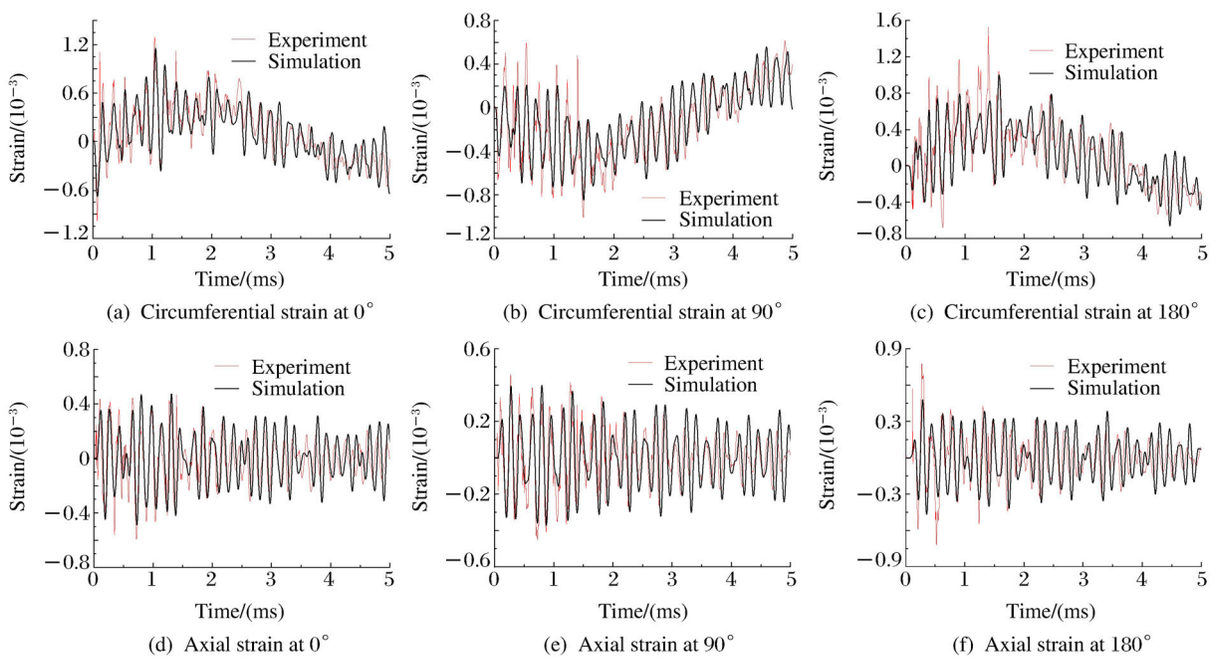


图 9 数值模拟结果与实验结果的比较

Fig. 9 Comparison between numerical and experimental results

4.3 数值模拟与实验结果比较

将应变测量结果与三维数值模拟中相应位置的应变分析结果进行对比，如图 9 所示。可见，数值模拟结果与实验结果的波形趋势和频率特征吻合较好，幅值基本相当，说明建立的炸药条载荷模型和三维有限元模型总体上能够反映实际情况；二者的差别主要表现在个别高频响应的峰值差异上。经波形展开分析，发现个别地方（尤其是峰值差异较大处）存在毛刺，其形状不符合结构响应特征，频率也高于测试系统的通频带，因此判断该部分属于非力学响应信号。此外，炸药条的不均匀性及测量误差等因素也

造成了实验结果与数值模拟结果的不一致。

数值模拟与实验结果的对比分析表明,通过解耦建立的三维数值模型能够较真实地反映实验状态,可以得到比较可信的结构响应预测结果。

虽然解耦后的数值模拟效率较流固耦合模拟大大提高,但仍然不能满足多工况分析的需要。以上述三维数值模拟为例,仅分析一个简单的圆柱壳结构,每次计算时间都在若干小时。如果改变炸药条数量和分布,还需要耗费大量的时间修改模型。因此,尽管解耦模拟的效率较高,但对于多工况计算而言,仍然存在诸多不便,效率仍然不够理想。下一步工作将在单炸药条载荷模型及解耦分析结论的基础上,利用已经建立的快速算法(即旋转叠加法)[9-10],进行大量工况分析,进一步研究炸药条加载实验对 X 射线力学效应模拟的等效性。

5　结　论

根据文献[8]的流固耦合数值模拟结果,建立了单炸药条载荷模型,进行了二维解耦分析。在初步验证解耦分析有效性的基础上,进行了三维数值模拟,并用实验予以验证,得到如下结论:

(1) 二维解耦分析结果与流固耦合模拟结果的对比表明,所建立的单炸药条载荷模型和有限元模型能够反映原问题特征,基于直接施加炸药条载荷的解耦分析可以代替流固耦合模拟,从而大大简化了建模和计算,提高了分析效率;

(2) 三维数值模拟结果与实验结果的对比表明,特征点应变曲线的频率特征吻合,幅值基本相当,说明建立的单炸药条载荷模型以及在验证解耦分析有效性的基础上建立的三维数值模型,能够较真实地反映实际的实验状态。

References:

[1] Tang W H, Zhang R Q, Zhao G M. Thermal shock wave induced by impulsive X-ray [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1995, 9(2): 107-111. (in Chinese)
汤文辉,张若棋,赵国民. 脉冲 X 射线诱导的热击波 [J]. 高压物理学报,1995,9(2):107-111.

[2] Peng C X, Tan H M, Lin P, et al. Measurement of blowoff impulse in materials radiated by pulsed soft X-ray with a pendulum target system [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(1): 80-85. (in Chinese)
彭常贤,谭红梅,林　鹏,等. 采用靶摆式探头测量软 X 射线辐射材料产生的喷射冲量 [J]. 高压物理学报,2005,19(1):80-85.

[3] Rivera W G, Benham R A, Duggins B D, et al. Explosive technique for impulse loading of space structures, SAND 99-3175C [R]. Albuquerque, USA: Sandia National Laboratories, 1999.

[4] He M H, Liu D C, Nie J X. Transient dynamic response analysis of a thin-walled conical shell [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(6): 157-161. (in Chinese)
何明辉,刘得成,聂景旭. 圆锥薄壳体瞬态动力响应分析 [J]. 振动与冲击,2006,25(6):157-161.

[5] Deng H J, Xiao H W, He R J, et al. Structural response of cylindrical shells subjected to external impulsive loads with slice explosive [C]//Proceedings of the 8th National Conference on Explosion Mechanics, Ji'an, 2007: 206-212. (in Chinese)
邓宏见,肖宏伟,何荣建,等. 片炸药爆炸加载下壳体结构响应研究 [C]//第八届全国爆炸力学学术会议论文集,吉安,2007:206-212.

[6] Mao Y J, Deng H J, Li Y L, et al. A rod-explosive technique for testing structural responses induced by X-ray blow-off impulses [J]. Appl Mech Mater, 2010, 29: 72-77.

[7] Peng C X. Analysis of equivalence for structural response induced by pulsed X-ray with other analogue sources [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2002, 16(2): 105-110. (in Chinese)
彭常贤. 脉冲 X 光与其他模拟源的结构响应等效性分析 [J]. 高压物理学报,2002,16(2):105-110.

[8] Mao Y J, Li Y L, Chen Y, et al. Numerical simulation of cylindrical shell loaded by explosive rods (Ⅰ): Fluid-structure interaction simulation [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012, 26(2): 155-162. (in Chinese)
毛勇建, 李玉龙, 陈 颖, 等. 炸药条加载圆柱壳的数值模拟(Ⅰ): 流固耦合模拟 [J]. 高压物理学报, 2012, 26(2): 155-162.

[9] Mao Y J, Li Y L, Huang H J, et al. A quick method for solving responses of axisymmetric structures subjected to loads of rotational similarity: Rotation-superposition method and its application [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2011, 32(3): 306-312. (in Chinese)
毛勇建, 李玉龙, 黄含军, 等. 旋转相似载荷下轴对称结构弹性响应的快速算法: 旋转叠加法及其应用 [J]. 固体力学学报, 2011, 32(3): 306-312.

[10] Mao Y J, Li Y L, Deng H J, et al. A quick method for analyzing dynamic responses of axisymmetric structures under lateral impulsive loadings [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(3): 563-568. (in Chinese)
毛勇建, 李玉龙, 邓宏见, 等. 求解轴对称结构侧向冲击响应的一种快速算法 [J]. 计算力学学报, 2010, 27(3): 563-568.

Numerical Simulation of Cylindrical Shell Loaded by Explosive Rods (Ⅱ): Decoupling Analysis and Experimental Validation

MAO Yong-Jian[1], LI Yu-Long[2], CHEN Ying[1], DENG Hong-Jian[1], HUANG Hai-Ying[1], ZHOU Qing[1], HUANG Han-Jun[1]

(1. *Institute of Systems Engineering, CAEP, Mianyang* 621900, *China*;
2. *School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an* 710072, *China*)

Abstract: According to the previous simulation results of two-dimensional fluid-structure interaction, the model of impulsive load generated by a single explosive rod and shaped by the buffer is built. Then the loads generated by multiple explosive rods are superposed and applied on the surface of the cylindrical shell, and a two-dimensional decoupled simulation is performed. The results basically agree with those of the fluid-structure interaction simulation. Based on that, a three-dimensional decoupled simulation of the ∅265 mm×380 mm cylindrical shell loaded by 19 explosive rods is accomplished. Meanwhile, the corresponding test is performed. There shows a good agreement between the three-dimensional numerical and tested strain histories at typical locations. These results prove the effectiveness of decoupled numerical simulation and provide a foundation for improving the modeling and computational efficiency in performing a large number of numerical simulations.

Key words: cylindrical shell; X-ray; explosive; structural response; decoupling