文章编号：1000-5773(2012)02-0155-08

炸药条加载圆柱壳的数值模拟(Ⅰ)：流固耦合模拟*

毛勇建[1]，李玉龙[2]，陈 颖[1]，黄含军[1]，张青平[1]，苗应刚[2]

(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：对炸药条加载圆柱壳模拟 X 射线力学效应的试验进行了流固耦合数值模拟。首先建立了包括圆柱壳、两层缓冲橡胶、炸药条和空气在内的二维数值模型，其中，两层橡胶采用 Ogden 超弹性本构模型描述，炸药条及其爆轰产物采用高能炸药燃烧(High Explosive Burn)模型和 JWL 状态方程描述，空气采用多项式状态方程描述。然后采用多物质 ALE 流固耦合算法进行计算，获得了爆炸加载的物理图像、载荷传递与结构响应。结果表明，采用 19 条炸药条加载∅265 mm 的圆柱壳模拟 X 射线余弦载荷作用，特征点应力响应基本等效；试验附加的两层橡胶对结构响应特征具有影响，在壳体质量较小和(或)刚度较低的情况下，紧密粘接会引起结构响应失真。

关键词：圆柱壳；X 射线；炸药；结构响应；流固耦合
中图分类号：O383 **文献标识码**：A

1 引 言

脉冲 X 射线辐照结构表面，瞬时能量沉积形成高温高压物质的反冲喷射[1-2]，从而给结构施加一个脉冲载荷，引起结构的动态响应，甚至失效或破坏。因此，研究 X 射线作用下的结构响应，对再入结构的抗 X 射线能力评估与加固设计具有基础性意义[3]。但在核禁试、无大型 X 光源的情况下，只能采用试验与数值模拟相结合的方法进行研究。目前，模拟 X 射线载荷的主要试验手段有光敏炸药加载[4]、柔爆索加载[5-7]、片炸药加载[8]和炸药条加载[9-11]等。其中，炸药条加载是一种实施简便、耗费低廉的试验方法，在国内外应用较多。

在圆柱壳侧面，X 射线产生的脉冲载荷具有比冲量(即单位面积内的冲量)沿环向呈余弦分布、沿母向保持不变，方向沿外法线向内的特点[12]，如图 1 所示。炸药条加载的基本原理是：采用多条母线将沿周向呈余弦分布的载荷划分为若干单元，每个载荷单元采用一条炸药条的爆炸载荷(经橡胶缓冲层整形)进行模拟[11]，如图 2 所示。

由于炸药条载荷与 X 射线载荷的时空分布具有一定差异，因此研究试验模拟的等效性，对试验设计、响应预测和结果评估均具有重要意义[13]。在无法开展真实 X 射线效应试验的情况下，等效性研究需要借助理论分析或(和)数值模拟。

国内外学者曾针对圆环或圆柱壳受余弦或类似分布载荷的问题开展过一些理论分析，如 Humphreys等[14]、Forrestal 等[15]、Li 等[16]、陆赛华等[17]以及江松青等[18]的工作。数值模拟方面，有 Kirkpatrick等[5]、蔡成钟等[19]、何明辉等[20]、毛勇建等[21]的工作。但对炸药条加载试验的数值模拟

* **收稿日期**：2010-09-25；**修回日期**：2011-05-26
基金项目：国家自然科学基金项目(11102196)；国防科工局技术基础科研项目
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

却很少报道。1999 年,Rivera 等[9]利用 CTH 流体程序分析了炸药条加载的波传播问题。2007 年,邓宏见等[10]采用 LS-DYNA 对炸药条加载平板进行了流固耦合模拟,得到炸药条接触爆炸载荷后施加于缓冲层表面,计算了圆柱壳的响应。但其中橡胶材料模型比较简单,未考虑缓冲层对结构响应的影响,其结果也未得到很好的试验验证。同年,范书群[22]也采用 LS-DYNA 模拟了炸药条加载试验,但模型中没有缓冲层,直接采用炸药条的爆炸冲击波加载,与典型试验状态差异较大。

本研究采用 Ogden 超弹性本构模型描述缓冲橡胶材料,对炸药条加载圆柱壳的试验进行了二维流固耦合模拟,获得了爆炸加载的物理图像、载荷传递和圆柱壳结构响应,并讨论了缓冲层对结构响应的影响。

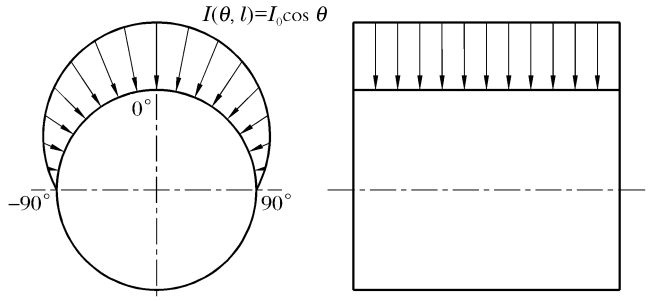


图 1 X 射线载荷在圆柱壳表面的分布

Fig. 1 Distribution of X-ray load on cylindrical shell

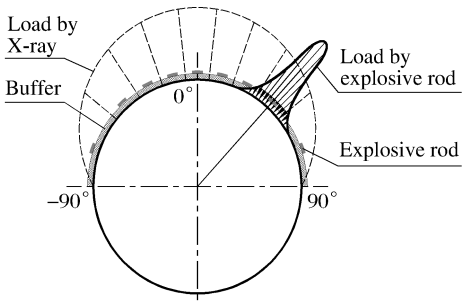


图 2 炸药条模拟的基本原理[11]

Fig. 2 Basic concept of rod-explosive simulation[11]

2 问题简述

圆柱壳外形尺寸为∅265 mm×380 mm,壁厚 4 mm;材料为合金钢。缓冲层由两层橡胶组合而成,覆盖范围为±90°。其中,表层为 RB-55 真空橡胶,密度 1.541 5 g/cm^3,平均厚度 2.82 mm;里层为 FM-32海绵橡胶,密度 0.822 6 g/cm^3,平均厚度 8.14 mm。

圆柱壳和 RB-55 橡胶板之间,以及两层橡胶板之间均采用“粘得牢”粘接,但即粘即用,固化不充分。在 RB-55 真空橡胶板表面粘贴炸药条,对圆柱壳进行爆炸加载,模拟 X 射线引起的余弦载荷作用。炸药条材料为太安(PTEN),平均厚度 0.467 mm,密度 1.56 g/cm^3,采用机械方式[11]实测炸药片(炸药条原材料)的平均比冲量为 1437.3 Pa·s。采用文献[23]中的方法,设计了比冲量峰值(即图 1 中的 I_0)为 301.2 Pa·s 的模拟余弦载荷,其中炸药条为 3 mm 等宽,数量 19 条,具体分布见后文模型(第 4 节)。所有炸药条汇集后实施单点起爆,在圆柱壳某一截面,可近似看作是多点同时起爆。

3 材料模型与参数

3.1 橡胶材料本构模型

采用 Ogden 模型[24]描述两种橡胶的超弹性本构特性。其中,RB-55 真空橡胶为实心材料,由不可压缩 Ogden 模型描述

$$W=\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{n}\frac{\mu_j}{\alpha_j}(\lambda_i^{\alpha_j}-1) \tag{1}$$

式中:W 为应变能,μ_j、α_j 为材料常数,$\lambda_i(i=1,2,3)$为主拉伸比。FM-32 海绵橡胶为开孔泡沫材料,由可压缩 Ogden 模型描述

$$W=\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{n}\frac{\mu_j}{\alpha_j}(\lambda_i^{*\alpha_j}-1)+K(J-1-\ln J) \tag{2}$$

式中:$\lambda_i^*(i=1,2,3)$为等容变形部分的主拉伸比,K 为体积模量,J 为变形前后的体积比。

两种橡胶材料的动态力学性能测试和 Ogden 本构模型参数的确定比较复杂,作者将另文给出。

3.2　炸药及其爆轰产物的模型与参数

采用 LS-DYNA 中 High Explosive Burn(高能炸药燃烧)模型[24]描述炸药爆轰,其爆轰产物由 JWL 状态方程描述

$$p = A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)\mathrm{e}^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)\mathrm{e}^{-R_2V}+\frac{\omega e_0}{V} \tag{3}$$

式中:ω、A、B、R_1 和 R_2 为材料常数,p 为压力,V 为相对体积,e_0 为初始比内能。根据文献[25]中 5 种不同密度的 PETN 炸药参数,拟合得到所用炸药的相关参数,如表 1 所示。

表 1　PETN 炸药(密度 1.56 mg/mm³)及其 JWL 状态方程参数

Table 1　Parameters of PETN explosive (mass density 1.56 mg/mm³) and its JWL equation of state

A/(GPa)	B/(GPa)	R_1	R_2	ω	D/(km/s)	e_0/(GPa)	p_{CJ}/(GPa)
628.94	22.98	5.045 7	1.525 4	0.275 98	7.675 2	8.925 4	24.5

3.3　空气状态方程与参数

空气由多项式状态方程[24]描述

$$p = (\gamma-1)\frac{\rho}{\rho_0}E \tag{4}$$

式中:p 为压力,γ 为比热比,ρ 和 ρ_0 分别为密度和初始密度,E 为单位体积的能量。参数取值为[26]:$\gamma=1.4$,$\rho_0=1.18\ \mu g/mm^3$,$E=2.533\,125$ MPa。

3.4　壳体材料模型与参数

强脉冲 X 射线可能会引起结构的弹塑性响应,但本工作旨在探索数值模拟方法并进一步研究炸药条模拟的等效性,因此暂仅考虑壳体弹性响应,其材料采用线弹性本构描述,取弹性模量为 207 GPa,密度为 7.83 Mg/m³,泊松比为 0.28。

4　计算模型与方法

本工作研究的问题涉及金属壳体、两层橡胶、19 条炸药及周围空气,若建立三维模型,计算规模巨大。因此先简化为平面应变问题,并依据问题的面对称性,建立 1/2 模型(0°～180°),如图 3 所示。但 LS-DYNA 在多物质 ALE 算法等方面不支持二维单元,因此建立了一个 0.5 mm 厚的薄片三维模型,通过约束强制蜕化为二维,减小计算规模。为模拟爆轰流场,在真空橡胶板(及炸药条)外包络了 15.467 mm 厚的空气层,范围为 0°～90°。

将整个模型划分为 34 792 个 SOLID 164 实体单元,共计 72 438 个节点,如图 4 所示。将炸药条和

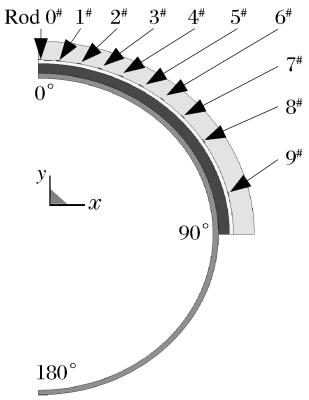


图 3　几何模型

Fig. 3　Geometrical model

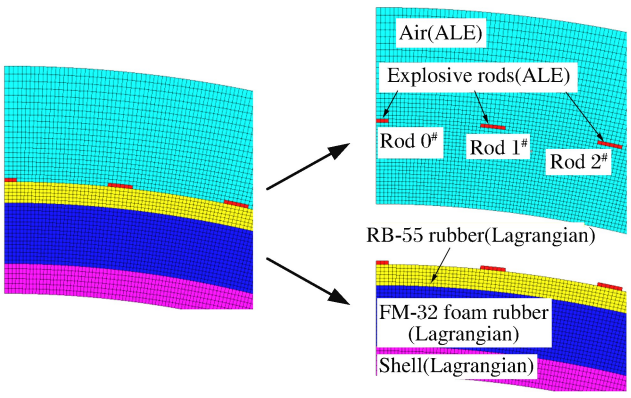


图 4　有限元网格划分

Fig. 4　Finite element meshes

空气定义为多物质 ALE 单元,采用单点 ALE 算法进行描述;壳体和两层橡胶定义为单点高斯积分 Largrange单元。3 种 Largrange 单元采用共节点方式连接;两种 ALE 单元也采用共节点方式建立联系,完成物质输运。Lagrange 和 ALE 单元在空间上重叠,以便程序自动搜索流固边界,并进行相互约束和参量传递。在对称面($X=0$)进行 X 向约束,在 $Z=0$ 和 $Z=0.5$ mm 截面进行 Z 向约束,在空气层外表面及 90°端面施加透射边界条件。采用多点同时点火方式起爆炸药。

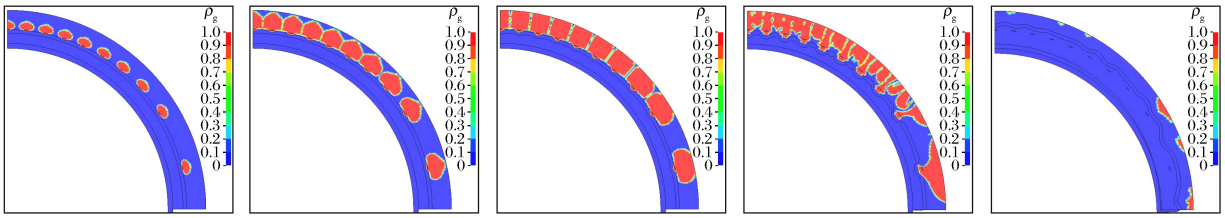
5 计算结果

5.1 物理图像

图 5 给出了起爆后 0.8 ms 内爆轰产物的归一化密度分布情况。由图 5 可见,炸药条起爆后,爆轰产物迅速膨胀,6 μs 时已基本充满外部 ALE 空间,到 0.8 ms 左右才基本扩散出去。

图 6 给出了起爆后 40 μs 内的压力分布情况,该图反映了爆炸产生的冲击波传播过程。由图 6 可见,10 μs 时空气中压力已衰减至 10 MPa 以下,到 40 μs 已经衰减至接近扰动前压力的水平。根据图 6(b)可估算出 4 μs 内冲击波的平均速度在 3.75 km/s 左右,远高于标准大气声速 340 m/s,这是因为冲击波压力较高,在 4 μs 内波前压力与扰动前压力之比 $p_s/p_0>50$,属于较强冲击波。

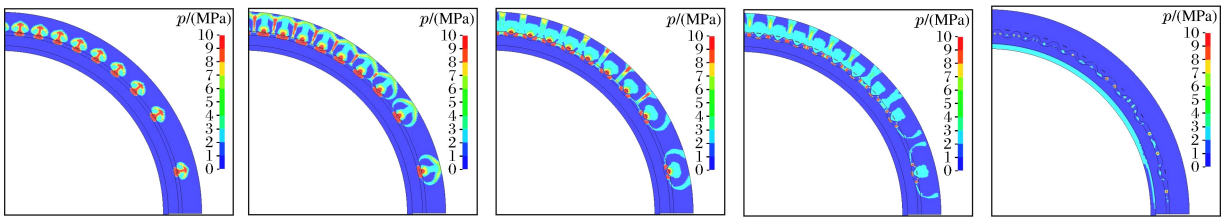
从图 5 和图 6 还可以看出,相邻炸药条的爆轰流场存在一定相互干扰。相比之下,9# 药条受到的干扰较小,尤其是靠 90°一侧。



(a) $t=2$ μs (b) $t=4$ μs (c) $t=6$ μs (d) $t=50$ μs (e) $t=800$ μs

图 5 爆轰产物的膨胀过程(归一化密度分布)

Fig. 5 Expansion process of explosion product (normalized density distribution)



(a) $t=2$ μs (b) $t=4$ μs (c) $t=6$ μs (d) $t=10$ μs (e) $t=40$ μs

图 6 爆轰后压力分布变化

Fig. 6 Variation of pressure distribution after explosion

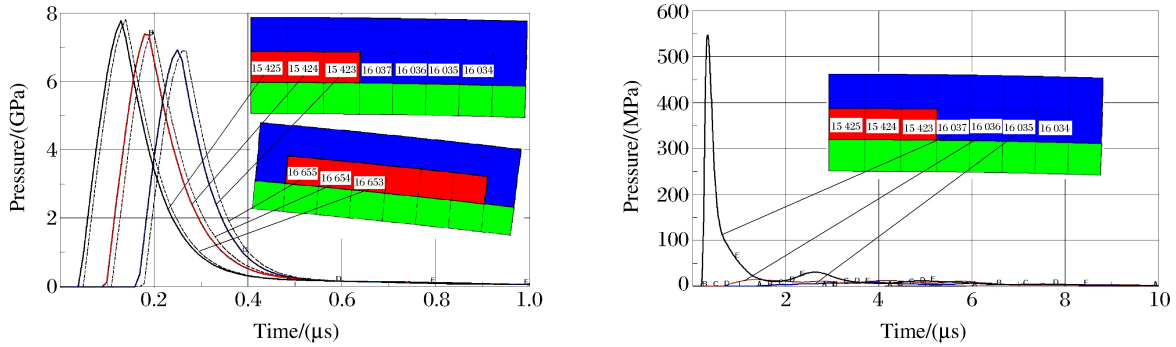
5.2 载荷传递

图 7 给出了炸药条及其附近空气单元的压力时间历程。由图 7(a)可见,炸药条单元内爆轰压力峰值在 7.84 GPa 左右,脉宽在 0.5 μs 左右。但随着距离的增加,临近空气单元中压力峰值急剧衰减,脉宽不断增加。如图 7(b)所示,距炸药条中心 1.87 mm 处其峰值衰减为 549 MPa,2.37 mm 衰减至 14.7 MPa。

由于 9# 炸药条受到的干扰较小,因此提取了该炸药条下方 FM-32 橡胶与壳体表面间的压力载荷,用以研究单炸药条载荷经两层橡胶传递后的特征。图 8(a)给出了部分压力时间历程曲线。由图 8(a)

可见,炸药条正下方的压力起始时间延迟为 50 μs 左右,峰值在 10 MPa 左右,主峰脉宽大于 50 μs。随着环向距离的增加,峰值衰减,脉宽增加。到距炸药条中心 10.39 mm 处,压力峰值衰减至 2 MPa 左右,脉宽增加至约 100 μs。图 8(b)给出了压力峰值和比冲量随环向距离的衰减情况。由于压力脉宽的增加,比冲量的衰减程度未及压力峰值衰减剧烈。需要指出的是,图 8(b)所示分布表现了炸药条附近的局部载荷特性,与余弦分布相差较大。因此炸药条加载方法只能从整体上等效,不能模拟局部细节。由多条炸药条产生的载荷分布及其与余弦载荷的比较,将在后续文章中给出。

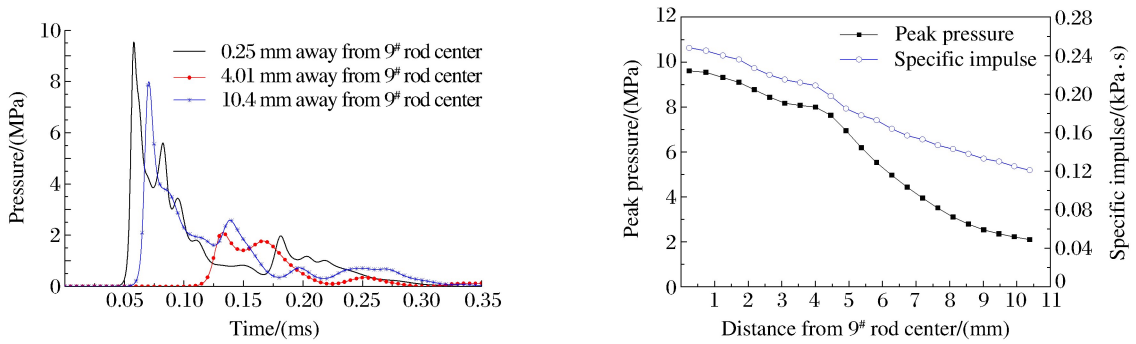
由图 7 曲线积分反推原炸药片(炸药条原材料)接触爆炸的比冲量为 1 365 Pa·s,由图 8(a)反推为 1 240 Pa·s 左右。由于除上述压力曲线外,其远端尚有部分载荷,因此反推结果与机械方式测量结果是吻合的。图 7 和图 8 所示结果不仅验证了计算模型和方法的有效性,同时还反映了单条炸药条的载荷特性(接触爆炸和经缓冲层整形后),为后续文章解耦分析中的载荷提取与模型化提供了计算依据。



(a) In elements of rods 0# and 1#　　(b) In elements of rod 0# and neighboring air

图 7　炸药条及其临近空气单元的压力时间历程

Fig. 7　Pressure histories in elements of explosive rods and neighboring air



(a) Pressure histories　　(b) Peak pressure and specific impulse vs. circumferential distance

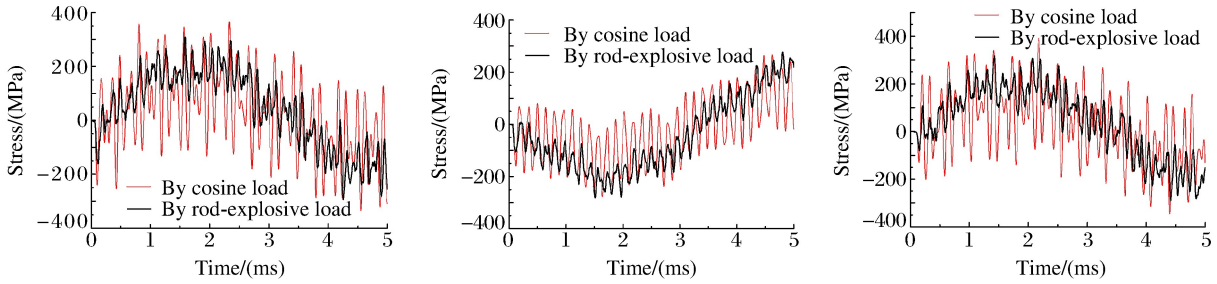
图 8　经缓冲层整形后的炸药条载荷特征

Fig. 8　Characteristics of load generated by explosive rod and shaped by buffer

5.3　应力响应

在炸药条加载试验中,FM-32 海绵橡胶与壳体之间的粘接剂未经固化,粘接强度较低。此种连接刚度远低于数值模拟中的共节点方式。因此,为模拟此种界面关系,并考虑计算效率,先采用共节点方式计算至 250 μs(即加载基本结束时),再采用重启动技术,删除两层橡胶、空气及炸药单元,并对圆柱壳进行应力初始化,继续计算至 5 ms。完成计算后,对接得到 0～5 ms 计算结果。同时为进行比较,将图 3和图 4 所示模型去掉橡胶、空气和炸药,直接在壳体表面施加对应的余弦载荷,计算壳体响应。得到的圆柱壳内表面应力响应如图 9 所示。由图 9 可见,两种载荷作用下的应力曲线具有相似的震荡趋

势，应力峰值相当；但相比之下，炸药条载荷下的应力曲线高频幅值较低，分析为橡胶材料以及人工体积粘性吸收了部分高频能量。



(a) 0° (b) 90° (c) 180°

图 9 圆柱壳内表面环向应力响应及其与对应余弦载荷响应的比较

Fig. 9 Comparison of stresses at the inner surface of the cylindrical shell subjected to loads of explosive rods and X-ray

为进行对比，同时采用全程共节点方式进行计算，图 10 为 90°环向应力曲线。显然，两种计算流程得到的结果具有较大差异。在全程共节点的计算结果中，除图 9(b)中的高频和低频外，还含有一种中等低频成份，且具有较高能量。分析认为，两层橡胶与圆柱壳的刚度相差若干量级，但质量却占整个壳体的 19%，局部(加载半圆)达 38%(橡胶和壳体密度、尺寸见第 2 节)，此种不可忽略的质量比改变了结构的模态特性，从而改变了应力响应的特征(因为在真实 X 射线载荷作用时没有两层橡胶)。文献[10]的结果也证实了这一推断。由此可见，在壳体结构质量较小和(或)刚度较低的情况下，壳体与缓冲层间的紧密粘接会给结构响应带来较大程度的失真(即与真实 X 射线载荷引起响应的差异)。

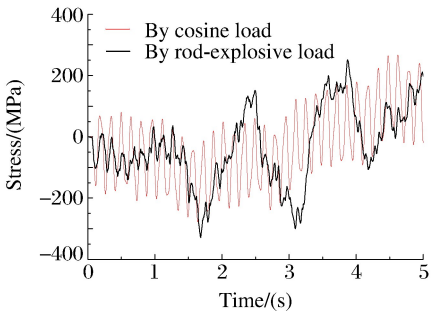


图 10 全程共节点的 90°环向应力

Fig. 10 Circumferential stress at 90° computed by fully node-sharing method

6 结 语

采用 ALE 方法对炸药条加载试验进行了流固耦合数值模拟，得到了爆炸加载的物理图像、载荷传递以及圆柱壳的结构响应。由计算结果反推的炸药片比冲量与实测结果基本吻合，旁证了数值模拟的有效性。

计算结果表明，采用 19 条炸药模拟余弦载荷加载∅265 mm 圆柱壳，特征点应力响应基本吻合；试验附加的两层橡胶对结构响应特征具有影响，在壳体结构质量较小和(或)刚度较低的情况下，紧密粘接会引起结构响应失真。

此外，由于流固耦合分析效率较低，即使是本文中简单的二维模型，每次模拟也需数个小时，因此有必要开展解耦分析并发展更加高效的计算方法；另外，本研究仅用炸药片的比冲量实测数据旁证了数值计算，其结果尚需进一步的试验验证。这些工作将在后续文章中介绍。

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] Mao Y J,Deng H J,He R J. Several simulation techniques of blow-off impulses by intense pulsed cold X-rays [J]. Structure & Environment Engineering,2003,30(2):55-64. (in Chinese)
毛勇建,邓宏见,何荣建. 强脉冲软 X 光喷射冲量的几种模拟加载技术 [J]. 强度与环境,2003,30(2):55-64.

[4] Benham R A,Mathew F H. X-ray simulation with light-initiated explosive [J]. The Shock and Vibration Bulletin,1975,45:87-91.

[5] Kirkpatrick S W,Hohmes B S. Structural response of thin cylindrical shells subjected to impulsive external loads [J]. AIAA Journal,1988,26(1):96-103.

[6] Zhao G M,Wang Z J,Zhang R Q. To form a cosine distribution impulse around cylindrical shell circumference by using mild detonating fuse [J]. Explosion and Shock Waves,2008,28(6):557-560. (in Chinese)
赵国民,王占江,张若琪. 用柔爆索构成沿圆柱壳体周向呈余弦分布的冲量载荷 [J]. 爆炸与冲击,2008,28(6):557-560.

[7] Fan S Q,Li Y C,Jiang D,et al. Layout optimization of MDFs that produce cosine density impulse around cylindrical shells and its experimental validation [J]. Journal of Ballistics,2008,20(1):80-84. (in Chinese)
范书群,李永池,蒋　东,等. 模拟余弦冲量载荷的柔爆索布局优化和实验验证 [J]. 弹道学报,2008,20(1):80-84.

[8] Witmer E A,Clark E N,Balmer H A. Experimental and theoretical studies of explosive-induced large dynamic and permanent deformation of simple structures [J]. Experimental Mechanics,1967,7(2):56-66.

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

[10] Deng H J,Xiao H W,He R J,et al. Structural response of cylindrical shells subjected to external impulsive loads applied with slice explosive [A]//Proceedings of the 8th National Conference of Explosion Mechanics [C]. 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 [A]//第八届全国爆炸力学学术会议论文集 [C]. 吉安,2007:206-212.

[11] 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 impulse [J]. Appl Mech Mater,2010,29-32:72-77.

[12] Zhou N,Qiao D J. Materials Dynamics under Pulse Beam Radiation [M]. Beijing:National Defense Industry Press,2002. (in Chinese)
周　南,乔登江. 脉冲束辐照材料动力学 [M]. 北京:国防工业出版社,2002.

[13] 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.

[14] Humphreys J S,Winters R. Dynamic response of a cylinder to a side pressure pulse [J]. AIAA Journal,1965,3(1):27-32.

[15] Forrestal M J,Walling H C. Comment on "dynamic response of a cylinder to a side pressure pulse" [J]. AIAA Journal,1973,11(9):1355.

[16] Li S M,Zhong H,Ruiz C. Transient response of a cylindrical shell of finite length to transverse impact [J]. Int J Solids Struct,1991,27:485-503.

[17] Lu S H,Zhong H Z. An approximate series solution of transient response of cylindrical shells with two free ends subject to localized impact [J]. Engineering Mechanics,2004,12(6):65-71. (in Chinese)
陆赛华,钟宏志. 两端自由圆柱壳受局部横向冲击瞬态响应的一个近似级数解 [J]. 工程力学,2004,12(6):65-71.

[18] Jiang S Q,Li Y C,Chen Z X. Dynamic response of ring-stiffened cylindrical shells under non-uniform lateral impact [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics,2001,18(4):443-448,462. (in Chinese)
江松青,李永池,陈正翔. 侧向不均匀冲击下环向加筋圆柱壳的动力响应 [J]. 计算力学学报,2001,18(4):443-448,462.

[19] Cai C Z,Chen H. Dynamic response analysis of conical shell under high impulse load [J]. Missiles and Space Vehicles,2007,(4):52-53. (in Chinese)
蔡成钟,陈 浩. 截锥壳在强脉冲载荷作用下的动响应分析 [J]. 导弹与航天运载技术,2007,(4):52-53.

[20] 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.

[21] 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.

[22] Fan S Q. Study on the dynamic responses and failure of cylindrical shell subjected to typical explosive loadings [D]. Hefei:University of Science and Technology of China,2007. (in Chinese)
范书群. 典型爆炸载荷下柱壳结构的冲击响应和破坏研究 [D]. 合肥:中国科技大学,2007.

[23] Mao Y J,Li Y L,Huang H J. A simplified method for distribution design of explosive rods to simulate cosine-distributed impulse on cylindrical/conical shell [J]. Adv Mater Res,2010,108-111:1039-1042.

[24] Hallquist J O. LS-DYNA Theoretical Manual [M]. California:Livermore Software Technology Corporation,1998.

[25] Dobratz B M,Crawford P C. LLNL explosives handbook,UCRL-52997 [R]. USA:University of California,Lawrence Livermore National Laboratory,1985.

[26] Gai J B. Local destroy study of ship structure under the loading of blast and impact [D]. Harbin:Harbin Engineering University,2005. (in Chinese)
盖京波. 舰船结构在爆炸冲击载荷作用下的局部破坏研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2005.

Numerical Simulation of Cylindrical Shell Loaded by Explosive Rods (Ⅰ): Fluid-Structure Interaction Simulation

MAO Yong-Jian[1], LI Yu-Long[2], CHEN Ying[1], HUANG Han-Jun[1], ZHANG Qing-Ping[1], MIAO Ying-Gang[2]

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

Abstract: A loading test by explosive rods to simulate mechanical effects of pulsed X-ray was numerically simulated by fluid-structure interaction method. The 2-D numerical model including a cylindrical shell, two layers of rubbers, nineteen explosive rods and a layer of air was built. Therein, the two rubber materials were described by Ogden hyperelastic models, the explosive rods and their explosion product were described by High Explosive Burn model and JWL equation of state, and the air was described by polynomial equation of state. The numerical simulation was performed by the multi-material ALE method. The physical images, load transmission and structural responses were obtained. The results show that, in the loading test of ∅265 mm cylindrical shell by 19 explosive rods to simulate a cosine-distributed load induced by X-ray, the stress responses at typical locations are basically equivalent. Furthermore, the additive two rubber layers can affect the response characteristics of the shells, and tightly glued interactions can distort the structural responses of shells with small mass and/or low stiffness.

Key words: cylindrical shell; X-ray; explosive; structural response; fluid-structure interaction