文章编号：1000-5773(2013)05-0711-08

炸药条加载圆柱壳的数值模拟(Ⅲ):对X射线力学效应的模拟等效性分析*

毛勇建[1]，李玉龙[2]，陈　颖[1]，黄含军[1]，王军评[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：利用建立的解耦分析技术，结合旋转叠加法对炸药条加载圆柱壳的试验进行了大量工况的数值模拟。定义3个特征点环向应变的平均差异作为评价等效性的指标，发现了炸药条数量与壳体半径之比 n/r 对平均应变差异的控制作用，得到了正常(理想)、少量炸药条熄爆、考虑炸药条位置误差以及起爆不同步4种情况下平均应变差异随 n/r 的变化关系。数值试验结果为炸药条加载试验设计与结果评估提供了指导。

关键词：X射线；圆柱壳；炸药条；结构响应；旋转叠加法；等效性

中图分类号：O383　　**文献标识码**：A

1　引　言

炸药条加载试验方法是采用离散的炸药条载荷模拟连续分布的X射线余弦载荷，从而研究结构在X射线诱导脉冲载荷作用下的力学响应[1-2]。显然，真实载荷与模拟载荷的固有差异，必定会带来结构响应的差异。那么，两种载荷作用下的结构响应差异有多大？受何种因素影响？如何才能控制和改善这种差异？这就是所谓的等效性问题。只有明确了上述问题，才可能更好地进行试验设计与结果评估。

尽管炸药条加载试验方法已经建立并应用多年，但对其等效性的研究尚未得到有效开展。目前仅有的一些研究，均是基于个例的。例如：Rivera等[3]针对圆环，何明辉等[4]及蔡成钟等[5]针对圆锥壳，采用数值模拟计算X射线载荷下的结构响应，通过与试验结果的比较，获得了试验模拟等效性的定性认识；而邓宏见等[6]通过数值模拟两种载荷下的结构响应，并结合试验结果分析了炸药条加载圆柱壳和圆锥壳的结构响应模拟等效性。上述工作之所以仅仅针对具体个例，其主要原因就在于多工况试验和数值模拟均具有较高的耗费和代价。

对此，我们尝试了基于流固耦合的全物理过程的数值模拟[1]，但该方法效率太低。随后进行了解耦分析[2]，结果表明，解耦的数值模拟能够代替流固耦合模拟，计算效率可提高数十倍，但仍然不能满足多工况分析的效率要求。为此，基于结构的轴对称性和载荷的旋转相似性，建立了一种适用于多工况分析的快速算法，即旋转叠加法[7-8]，彻底解决了多工况分析的效率问题[7-8]。本研究将在解耦分析的基础上，利用建立的旋转叠加法，进行大量工况的数值试验，系统研究炸药条加载模拟X射线余弦载荷的结构响应等效性。

---

* **收稿日期**：2011-11-19；**修回日期**：2012-01-02

基金项目：国家自然科学基金(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.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

2 数值试验概述

2.1 基本思路

针对不同数量炸药条加载不同尺寸圆柱壳，分析两种载荷作用下的结构响应，对比其差异并分析其与各因素之间的关系，获得模拟等效性认识。具体研究思路如图 1 所示。由图 1 可见，对于某一种结构，只需要两次数值模拟[7-8]：一是均布载荷单元作用下的响应，从而用旋转叠加法得到不同工况下的余弦载荷响应；二是单炸药条载荷单元作用下的响应，从而用旋转叠加法得到相应工况下的分布炸药条载荷响应。

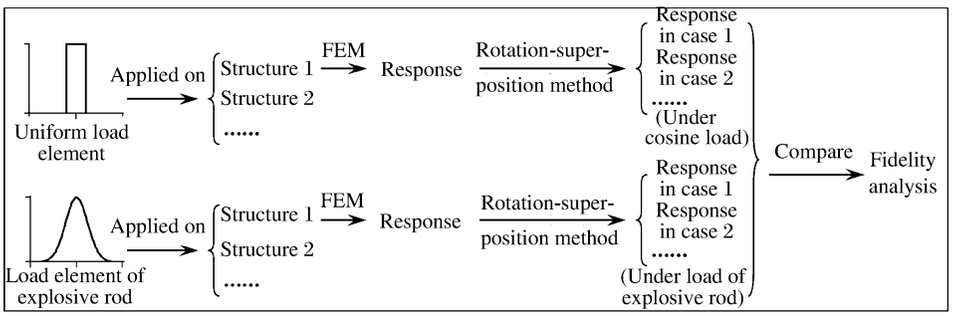


图 1 等效性分析的基本思路

Fig. 1 The basic idea for fidelity analysis

2.2 计算模型

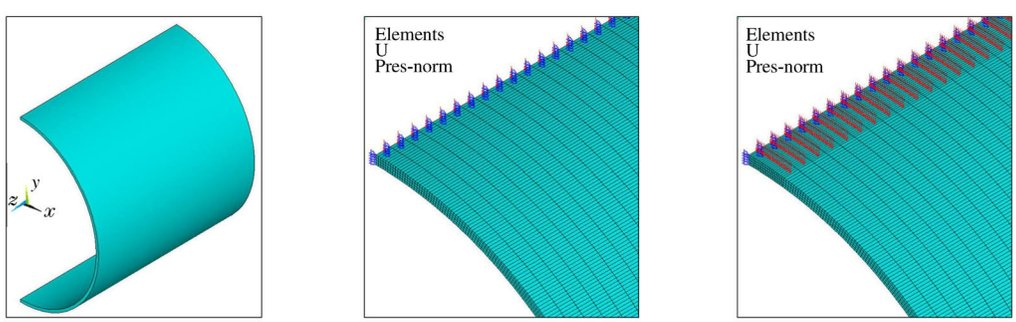
考虑 4 种典型圆柱壳结构，其尺寸呈比例关系，如表 1 所示，其中 d 表示圆柱壳直径，l 表示圆柱壳长度，h_{wall} 表示圆柱壳壁厚。壳体材料均考虑为高强度合金钢，假设其具有足够高的屈服极限，因此总是认为结构在弹性范围内，从而采用线弹性本构描述。材料参数取密度 7.83 Mg/m^3，弹性模量 207 GPa，泊松比 0.28。

依据问题的面对称性，沿 0°～180°截面剖开建立 1/2 有限元模型，如图 2(a)所示。在对称面施加面对称边界条件，其余保持自由，如图 2(b)、图 2(c)所示。

表 1 4 种圆柱壳的外形尺寸

Table 1 Geometrical sizes of the four cylindrical shells

No.	d/(mm)	l/(mm)	h_{wall}/(mm)	No.	d/(mm)	l/(mm)	h_{wall}/(mm)
1	300	300	4.5	3	500	500	7.5
2	400	400	6.0	4	600	600	9.0



(a) Geometrical model (b) Uniform load element (c) Load element of single explosive rod

图 2 圆柱壳计算模型(以∅400 mm 圆柱壳为例)

Fig. 2 The computational model of cylindrical shells (Taking example for ∅400 mm)

图 2(b)所示是对均布载荷单元的模拟,考虑为±0.5°范围内的均布压力,脉宽 10 μs,峰值 1 MPa。图 2(c)所示是对单炸药条载荷单元的模拟,载荷按文献[2]中(5)式施加,并考虑 7 km/s 的传爆速度。在 $Z=0$ 截面起爆并记零时,各位置压力的起始时刻为文献[2]中(3)式确定的起始时刻 t_s 加上爆轰传播到该点所需的时间。

2.3 评价指标

首先,为使等效性评价指标更具代表性,考虑 3 个典型位置,即 0°、90°和 180°内侧母线中点;其次,在试验研究中,常将实测应变与数值模拟结果进行比较,因此等效性指标中考虑应变响应;此外,由于旋转壳体结构在类似表面动态载荷作用下的应力/应变响应以环向为主,因此以上述 3 个位置的环向应变作为考察对象。为此,定义 3 点应变正、负峰值的平均差异为

$$\overline{\Delta\varepsilon}_0=\frac{1}{2}\left[\frac{|\max(\varepsilon_0^{\mathrm{rods}})|-|\max(\varepsilon_0^{\cos})|}{|\max(\varepsilon_0^{\cos})|}+\frac{|\min(\varepsilon_0^{\mathrm{rods}})|-|\min(\varepsilon_0^{\cos})|}{|\min(\varepsilon_0^{\cos})|}\right] \tag{1}$$

$$\overline{\Delta\varepsilon}_{90}=\frac{1}{2}\left[\frac{|\max(\varepsilon_{90}^{\mathrm{rods}})|-|\max(\varepsilon_{90}^{\cos})|}{|\max(\varepsilon_{90}^{\cos})|}+\frac{|\min(\varepsilon_{90}^{\mathrm{rods}})|-|\min(\varepsilon_{90}^{\cos})|}{|\min(\varepsilon_{90}^{\cos})|}\right] \tag{2}$$

$$\overline{\Delta\varepsilon}_{180}=\frac{1}{2}\left[\frac{|\max(\varepsilon_{180}^{\mathrm{rods}})|-|\max(\varepsilon_{180}^{\cos})|}{|\max(\varepsilon_{180}^{\cos})|}+\frac{|\min(\varepsilon_{180}^{\mathrm{rods}})|-|\min(\varepsilon_{180}^{\cos})|}{|\min(\varepsilon_{180}^{\cos})|}\right] \tag{3}$$

式中:$\varepsilon_0^{\mathrm{rods}}$ 为炸药条载荷作用下 0°环向应变响应时间历程,余类推;$\varepsilon_0^{\cos}$ 为余弦分布载荷作用下 0°环向应变响应时间历程,余类推。则评价等效性的指标定义为

$$\overline{\Delta\varepsilon}=\frac{1}{3}(\overline{\Delta\varepsilon}_0+\overline{\Delta\varepsilon}_{90}+\overline{\Delta\varepsilon}_{180}) \tag{4}$$

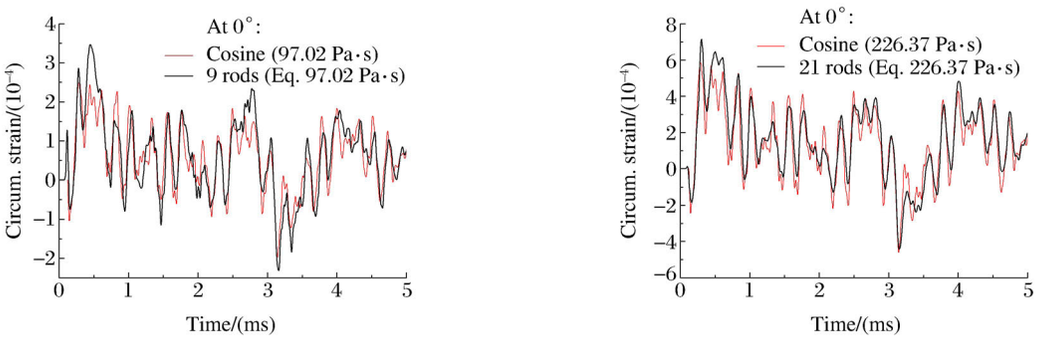
$\overline{\Delta\varepsilon}$反映了 3 个典型位置环向应变响应的平均差异,因此不妨称之为“平均应变差异”。

3 数值试验结果

根据上述圆柱壳的有限元计算结果,利用旋转叠加法计算不同数量炸药条加载(炸药条分布的具体设计方法见文献[9])与相应余弦载荷下的响应,获得不同情况下的平均应变差异$\overline{\Delta\varepsilon}$。

3.1 正常(理想)状况下的等效性

图 3 给出了正常(理想)情况下的典型计算曲线。比较可见,对于∅400 mm 圆柱壳,在 21 条炸药条加载下,炸药条模拟载荷与对应余弦载荷的响应吻合程度高于 9 条炸药条的情况。说明对一定尺寸的圆柱壳,增加炸药条数量可以提高对余弦载荷模拟的等效性。



(a) Strain histories at 0° under loads of 97.02 Pa·s (b) Strain histories at 0° under loads of 226.37 Pa·s

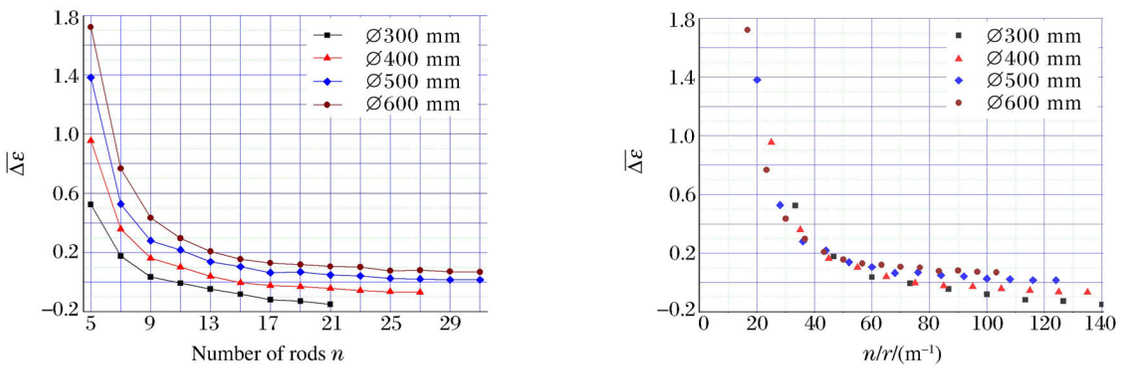
图 3 正常(理想)状况下的典型计算曲线(∅400 mm 圆柱壳)

Fig. 3 Typical computational curves under normal (ideal) conditions (For ∅400 mm)

为了解平均应变差异$\overline{\Delta\varepsilon}$与圆柱壳直径($2r$)和炸药条数量($n$)之间的关系,图 4(a)根据逐个工况的分析,绘制了不同直径圆柱壳的$\overline{\Delta\varepsilon}$-$n$ 曲线。由图 4(a)可见,对相同直径的圆柱壳,$\overline{\Delta\varepsilon}$-$n$ 曲线整体上呈下

降趋势(与图 3 趋势一致)。$\overline{\Delta\varepsilon}$-$n$ 曲线在起始阶段下降剧烈,而后随着炸药条数量的增加而变得平缓。另外,对相同的炸药条数量,平均应变差异$\overline{\Delta\varepsilon}$随圆柱壳直径的增加而增加。

上述结果揭示了等效性指标$\overline{\Delta\varepsilon}$与圆柱壳直径及炸药条数量之间的关系,但尚未触及问题的本质,也不便于应用。对此我们分析,炸药条在空间上的平均分布密度(也即模拟载荷设计中对原余弦载荷的离散程度)应该是影响模拟等效性的主要因素。在受载的±90°半圆周范围内,炸药条平均分布密度可以表示为 $n/\pi r$。为方便应用,我们根据图 4(a)的数据,绘制了$\overline{\Delta\varepsilon}$和 n/r 之间的关系曲线,如图 4(b)所示。容易理解,n/r 与 $n/\pi r$ 呈比例关系,同样表征了炸药条的平均分布密度。由图 4(b)可见,对于不同直径的圆柱壳,$\overline{\Delta\varepsilon}$-$n/r$ 曲线表现了良好的一致性。这说明,图 4(a)中圆柱壳直径和炸药条数量对$\overline{\Delta\varepsilon}$的影响,实质上可归结为 n/r 对$\overline{\Delta\varepsilon}$的控制。这种单因素关系的获得,对认识和控制模拟等效性具有重要意义。当 n/r 达到 45 m^{-1}时,$\overline{\Delta\varepsilon}$可控制在±20%以内。



(a) Variation of $\overline{\Delta\varepsilon}$ with r and n (b) Variation of $\overline{\Delta\varepsilon}$ with n/r

图 4 正常(理想)状况下的平均应变差异($\overline{\Delta\varepsilon}$)

Fig. 4 $\overline{\Delta\varepsilon}$ under normal (ideal) conditions

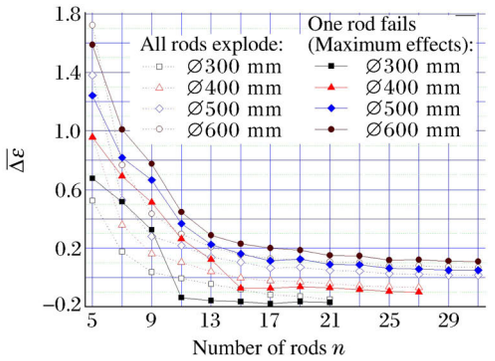
3.2 少量炸药条熄爆时的等效性

在实际应用中,由于所用片炸药的厚度已经接近类似炸药稳定传爆的极限尺寸(0.36 mm)[10],加之制造工艺等问题,炸药条的传爆并不完全可靠,因此少量炸药条熄爆的情况时有发生(如 Rivera 等[3]报道的铝环试验)。炸药条熄爆一旦发生,模拟载荷的整体性和对称性将遭到破坏,从而导致结构响应的变化。由于某些试验的成本较高,重复实施比较困难,因此研究少量药条熄爆对结构响应的影响,定量掌握对结构响应造成的差异(范围),对这种带瑕疵的试验结果的评估具有重要意义。

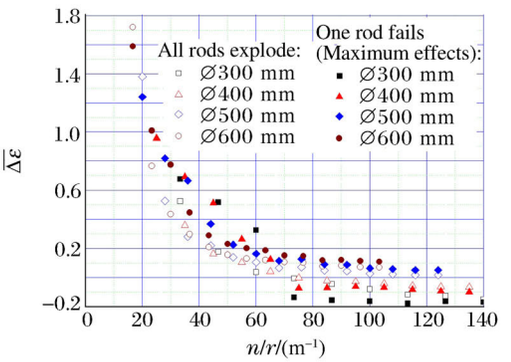
仍然采用前文数值模拟结果,针对 4 种尺寸圆柱壳和不同炸药条数量,依次进行分析。对每种工况,首先针对任意一条炸药条熄爆的情况,找出导致平均应变差异$\overline{\Delta\varepsilon}$的绝对值最大者,从而获得单条炸药条熄爆时的$\overline{\Delta\varepsilon}$包络曲线,分析其等效性变化。

图 5(a)给出了单条炸药条熄爆情况下的$\overline{\Delta\varepsilon}$包络随壳体直径和炸药条数量的变化情况,并与正常情况下进行比较。由图 5(a)可见,单条炸药条熄爆时的$\overline{\Delta\varepsilon}$绝对值均大于正常加载情况。图 5(b)给出了包络的$\overline{\Delta\varepsilon}$-$n/r$ 曲线及其与正常情况的比较。由图 5(b)可见,$n/r\geqslant 60$ m^{-1}时,$\overline{\Delta\varepsilon}$包络曲线可进入±20%,较正常情况 $n/r\geqslant 45$ m^{-1}的要求更高。

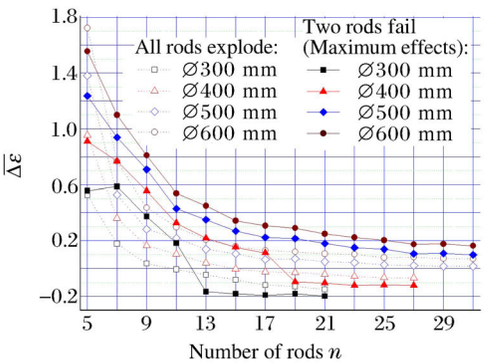
图 5(c)和图 5(d)所示的$\overline{\Delta\varepsilon}$包络曲线是通过对任意两条炸药条熄爆的情况进行全面模拟得到的结果。由图 5(c)和图 5(d)可见,两条炸药条熄爆导致的等效性变化更为明显,要达到$\overline{\Delta\varepsilon}$包络曲线进入±20%的要求,$n/r$ 必须达到 90 m^{-1},并且此时小直径的情况还可能超出±20%的界限。上述结果表明,在保守情况下,两条炸药条熄爆对结构响应模拟的等效性影响非常明显,因此在没有充分证据的情况下,此种情况的试验结果应当慎用。



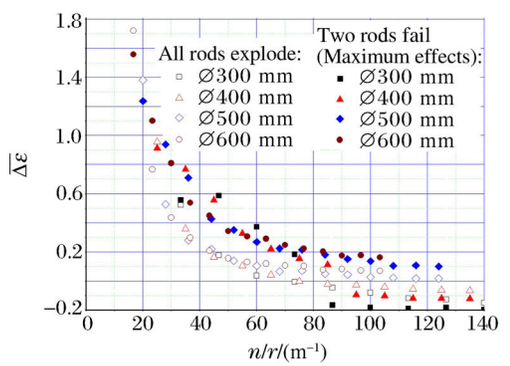
(a) Envelope of $\overline{\Delta\varepsilon}$ with r and n when a rod fails



(b) Envelope of $\overline{\Delta\varepsilon}$ with n/r when a rod fails



(c) Envelope of $\overline{\Delta\varepsilon}$ with r and n when 2 rods fail



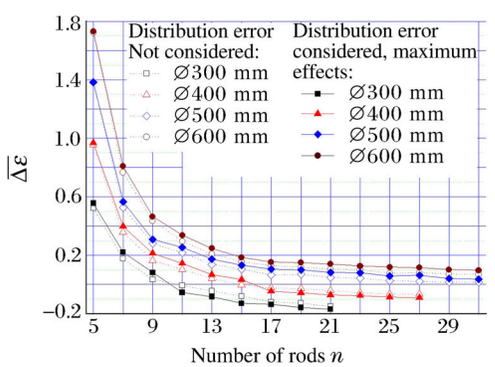
(d) Envelope of $\overline{\Delta\varepsilon}$ with n/r when 2 rods fail

图 5　少量(1～2 条)炸药条熄爆时的等效性

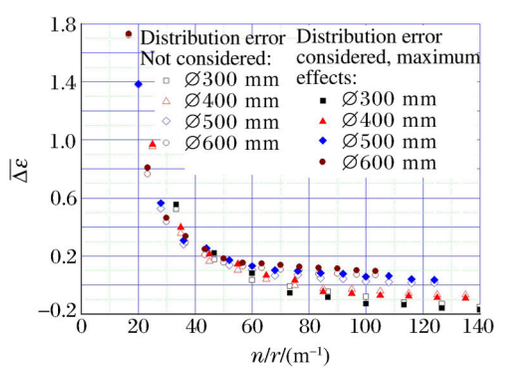
Fig. 5　Fidelity analysis in case 1-2 explosive rods fail

3.3　考虑炸药条位置误差的等效性

前面的分析均是基于炸药条精确分布的。但在实际试验中,炸药条是根据设计结果由人工划线、定位和粘贴的,其位置必然存在一定误差,并由此给模拟等效性带来影响。为此,我们在使用旋转叠加法的过程中,随机生成各炸药条的位置误差进行抽样分析,得到平均应变差异$\overline{\Delta\varepsilon}$的包络曲线。根据试验中实际操作流程,假定炸药条周向位置误差 Δx 服从 $\mu=0$、$\sigma=1$ mm 的正态分布,对每种结构的每种炸药条分布进行 1 000 次抽样分析,得到如图 6 所示$\overline{\Delta\varepsilon}$包络曲线。



(a) Envelope of $\overline{\Delta\varepsilon}$ with r and n



(b) Envelope of $\overline{\Delta\varepsilon}$ with n/r

图 6　考虑炸药条位置误差的等效性

Fig. 6　Fidelity analysis considering the distribution error of explosive rods

由图 6(a)可见，考虑炸药条位置误差的$\overline{\Delta\varepsilon}$包络较精确分布情况明显增大，但不及图 5(a)和图 5(c)中炸药条熄爆的影响明显。换算为$\overline{\Delta\varepsilon}$-$n/r$ 关系，如图 6(b)所示，这种变化表现得并不明显，在 $n/r\geqslant 55\ \mathrm{m}^{-1}$时，$\overline{\Delta\varepsilon}$包络曲线仍可进入±20%范围，较炸药条精确分布的情况($n/r\geqslant 45\ \mathrm{m}^{-1}$)变化不大。

由于本节分析的保守性，可以认为，炸药条位置误差对结构响应的影响是不明显的，只要将每条炸药条的位置误差控制在一定范围内，其带来的影响在大多数情况下是可以接受的。

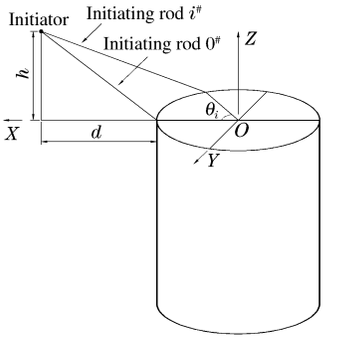


图 7 炸药条加载试验的典型引爆状态

Fig. 7 Typical initiation setup of tests

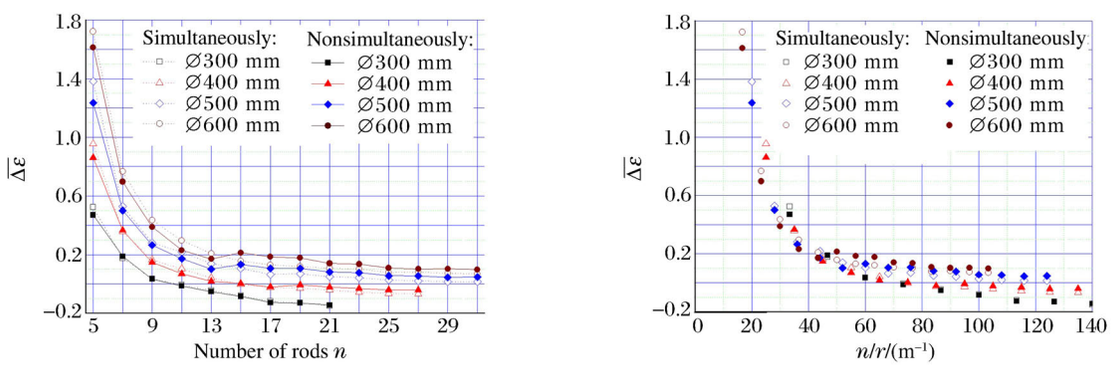
3.4 考虑引爆时差的等效性

在前面几节中，均视所有炸药条同时起爆，未考虑引爆时差。事实上，在实际试验中，一般采用单点起爆方式，因此同时起爆是不易实现的。如图 7 所示，起爆点一般高于壳体端面，并距 0°母线有一定水平距离。对此，根据其空间几何关系，则可计算出每条引爆药条的长度。以药条 i 为例，其引爆药条长度可以表示为

$$L_i=\sqrt{(r+d-r\cos\theta_i)^2+(r\sin\theta_i)^2+h^2},\quad i=0,\pm1,\cdots,\pm(n-1)/2 \tag{5}$$

据此，便可计算各炸药条的长度差异，再根据爆速得到起爆时差。根据典型试验状态，取 $d=400$ mm，$h=200$ mm，考虑 7 km/s 的爆速进行分析。得到各加载药条的起爆时差后，在旋转叠加过程中将相应炸药条所对应的项沿时间坐标平移，即可获得考虑延时情况下的结构响应。

图 8 给出了起爆不同步对$\overline{\Delta\varepsilon}$的影响规律。由图 8(a)可见，在所考虑的典型起爆状态下，加载不同步对$\overline{\Delta\varepsilon}$的影响较小。转化到如图 8(b)所示的$\overline{\Delta\varepsilon}$-$n/r$ 关系，可以看到这种变化确实不太明显。在 $n/r\geqslant 55\ \mathrm{m}^{-1}$时，可确保$|\overline{\Delta\varepsilon}|\leqslant 20\%$。



(a) Variation of $\overline{\Delta\varepsilon}$ with r and n (b) Variation of $\overline{\Delta\varepsilon}$ with n/r

图 8 考虑典型引爆时差的等效性

Fig. 8 Fidelity analysis considering the typical nonsimultaneous initiations

4 结 论

在文献[2]解耦分析的基础上，利用旋转叠加法，对炸药条加载圆柱壳的试验进行了大量的数值试验，获得了各种工况下壳体结构特征点的应变响应；并通过定义等效性的评价指标，对试验模拟的等效性进行了系统分析和讨论，获得了较为全面和深刻的认识，并得到以下主要结论。

(1) 通过对不同直径圆柱壳在不同数量炸药条加载下的数值试验，获得了平均应变差异$\overline{\Delta\varepsilon}$随壳体直径 r 和炸药条数量 n 的变化关系，并发现了 n/r 对$\overline{\Delta\varepsilon}$的控制作用。$n/r$ 具有明确的物理意义，它反映

了炸药条平均分布密度。数值结果表明,$n/r \geqslant 45\ \mathrm{m}^{-1}$时,平均应变差异$\overline{\Delta\varepsilon}$可保持在±20%以内。

(2) 对少量炸药条熄爆的分析表明,在任一炸药条熄爆情况下,$n/r \geqslant 60\ \mathrm{m}^{-1}$时,$|\overline{\Delta\varepsilon}| \leqslant 20\%$;在任两条炸药条熄爆时,$n/r \geqslant 90\ \mathrm{m}^{-1}$可确保$|\overline{\Delta\varepsilon}| \leqslant 20\%$。显然,炸药条熄爆对模拟等效性具有明显影响。

(3) 采用随机抽样方法,分析了具有典型随机分布的炸药条位置误差对模拟等效性的影响。结果表明,炸药条位置误差对结构响应的影响不大,当 $n/r \geqslant 55\ \mathrm{m}^{-1}$时,可确保$|\overline{\Delta\varepsilon}| \leqslant 20\%$。

(4) 针对典型试验状态,对炸药条起爆不同步的情况进行了分析。结果表明,加载不同步对等效性的影响较小。当 $n/r \geqslant 55\ \mathrm{m}^{-1}$时,可确保$|\overline{\Delta\varepsilon}| \leqslant 20\%$。

另外,本研究只针对 4 种结构进行了 8 次有限元分析,却通过旋转叠加法进行了数万种工况的数值试验,累计计算时间只有十多分钟。而利用物理试验或传统数值模拟方法,这种分析是无法完成的。因此,本研究的应用再次显示了旋转叠加法在效率方面的无比优势。

References:

[1] Mao Y J, Li Y L, Chen Y, et al. Numerical simulation of loading cylindrical shell 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.

[2] Mao Y J, Li Y L, Chen Y, et al. Numerical simulation of loading cylindrical shell by explosive rods (Ⅱ): Decoupling analysis and experimental validation [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(1): 76-82. (in Chinese)
毛勇建, 李玉龙, 陈　颖, 等. 炸药条加载圆柱壳的数值模拟(Ⅱ):解耦分析与试验验证 [J]. 高压物理学报, 2013,27(1):76-82.

[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, NM, 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] 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.

[6] Deng H J, Xiao H W, He R J. Structural response of cylindrical shells subjected to external impulsive loads applied with slice explosive [C]//Proceedings of the 8th National Conference of Explosion Mechanics. Ji′an, 2007: 206-212. (in Chinese)
邓宏见,肖宏伟,何荣建. 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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]. Advanced Materials Research, 2010, 108-111: 1039-1042.

[10] Benham R A, Bickes R W, Grubelich M C, et al. LDRD summary report. Part 1: Initiation studies of thin film explosvies used for scabbling concrete. Part 2: Investigation of spray techniques for use in explosive scabbling of concrete, SAND-96-2470 · UC-742 [R]. Albuquerque, NM, USA: Sandia National Labs, 1996.

Numerical Simulation of Loading Cylindrical Shell by Explosive Rods (Ⅲ): Fidelity for Simulating X-Ray Mechanical Effects

MAO Yong-Jian[1], LI Yu-Long[2], CHEN Ying[1],
HUANG Han-Jun[1], WANG Jun-Ping[1]

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

Abstract: According to the prior uncoupling analysis and utilizing the Rotation-Superposition Method, a large number of numerical experiments for loading cylindrical shells by explosive rods were performed. The average strain difference at three typical locations was defined as the index for evaluating the test simulation fidelity. It was found that the index mainly relies on the ratio of the rods number to the shell radius, i. e. n/r. The relations between the average strain difference and n/r under four conditions, i. e. the normal (ideal) condition, considering incomplete initiations, explosive rod distribution error and non-simultaneous initiations, were obtained. The investigation provides guidelines for the test design and results evaluation.

Key words: X-ray; cylindrical shell; explosive rod; structural response; rotation-superposition method; fidelity

《高压物理学报》征稿简则

《高压物理学报》是我国高压物理领域唯一的专业性学术刊物，在国内外公开发行。力求及时报道高压物理学科基础理论和应用研究方面具有创新性、高水平、有重要意义的研究成果，读者对象为国内外科技工作者。征稿内容为动态及静态高压技术，人工合成新材料，高温高压下材料的力学、光、电、磁等特性以及物质微观结构的研究，动态及静态高压研究中的测试技术，高温高压下的相变，高温高压物态方程等。接受中、英文稿件。

1. 来稿应具有科学性、先进性和实用性，论点明确、论据可靠、数据准确、逻辑严谨、文字简练、图表清晰。每篇论文的篇幅应在 6 000～8 000 字以内，请使用中华人民共和国法定计量单位。论文格式请参考近期出版的《高压物理学报》。请使用网站(www. gywlxb. cn)的作者投稿系统进行投稿。

2. 所投稿件不得涉及国家及本单位机密，投稿时请附本单位保密审查意见，由审查者签名并加盖公章。

3. 文章标题字数应在 20 字以内。文中图、表应有自明性，所有图题、图注、表题、表注均为中、英文对照，图、表中的文字一律用英文。

4. 第一作者应确保全体作者同意文章署名，请提供第一作者、通讯作者简介(姓名、出生年、性别、职称、学位、研究方向等)，以及所有联系方式(通信地址、邮政编码、电话号码、传真、电子邮箱等)，以备联系。请注明论文(工作)的资助项目(资助项目名称和批准号)，简要介绍工作背景和论文意义。

5. 来稿应保证文章版权的独立性，严禁抄袭，文责自负，请勿一稿多投。

重点注意事项

▲ 中英文摘要 摘要用第三人称书写，语言要简练，应有具体内容。要求：(1) 拥有与论文同等量的主要信息，重点包括 4 个要素：即研究目的、方法、结果和结论。(2) 以提供论文梗概为目的，不得评论、解释论文内容。中文摘要应在 200～400 个字之间，英文摘要不少于 120 个实词。为便于 Ei Compendex 以及国外其它数据库收录，英文摘要中尽量避免特殊字符(各种数学符号、上下脚标及希腊字母)及由特殊字符组成的数学表达式；第一句不要与英文题名重复；尽量用短句子并避免句形单调；用过去时态叙述主要工作，用现在时态叙述结论，尽量用主动语态代替被动语态。

▲ 参考文献 参考文献应是公开出版物。请充分著录参考文献，引用条数不宜太少，并尽量引用近期国内外文献，采用“顺序编码制”著录。中文参考文献必须附英译文，著录项目应齐全。

▲ 版权与稿酬 《高压物理学报》已加入《中国学术期刊(光盘版)》、万方数据——数字化期刊群、中国核心期刊(遴选)数据库、中文科技期刊数据库、中国期刊网、台湾中文电子期刊服务——思博网(CEPS)等，并被 Ei Compendex 光盘收录。凡经本刊录用的稿件，其著作权(包括光盘版和网络版出版权)便自动转让给《高压物理学报》编辑部，编辑部不再另行通知。

《高压物理学报》一贯秉承服务科学、服务读者、服务作者的办刊理念，慎重对待每一篇来稿，尊重作者劳动。优秀稿件享有快速发表通道，重大创新性成果可在 3 个月内刊出。

通信地址：四川绵阳 919 信箱 110 分箱《高压物理学报》编辑部，邮政编码：621900

网　　站：www. gywlxb. cn；　电子邮件：gaoya@caep. ac. cn (征订、咨询)

电　　话：(0816)2490042；　传　　真：(0816)2485139

《高压物理学报》编辑部