

内部爆炸载荷下泡沫铝夹心柱壳 动态响应仿真研究*

张国栋, 李翔宇, 梁民族, 卢芳云

(国防科学技术大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 泡沫铝夹心柱壳在防爆容器领域具有广阔的应用前景。对泡沫铝夹心柱壳在内部爆炸载荷下的动态响应特性进行了实验研究, 并建立了基于 Voronoi 技术的泡沫铝夹心柱壳有限元模型, 对其动态响应进行了数值模拟。研究结果表明: 仿真结果与实验结果吻合较好, 内部爆炸载荷作用下内壳变形量随芯体相对密度增大而减小, 外壳变形量随芯体相对密度的增大而增大, 且壳体变形量与芯体相对密度近似满足二次函数关系。

关键词: 内部爆炸; 泡沫铝; 夹心柱壳; 变形量; Voronoi 技术

中图分类号: O383; O347.1

文献标识码: A

泡沫铝材料具有较低的密度和良好的能量吸收性能, 是目前冲击防护领域研究热点之一。在实际应用中, 常将其作为芯体置于两层面板之间构成夹心结构, 以降低载荷的强度、吸收载荷能量, 从而达到冲击防护的目的。不同几何形状的夹心结构, 其抗冲击性能的影响因素及变形模式也有所不同。对于防爆罐、长途运输的防爆装置等, 通常在仿真计算时抽象为内部爆炸载荷下的夹心柱壳结构, 以有效地简化模型, 减小计算量。

内部爆炸载荷下夹心柱壳动态响应问题是结构抗爆的研究热点之一。倪小军等^[1]基于流体弹塑性模型, 建立了描述泡沫铝在爆炸载荷下的冲击响应方程, 并进行了药柱水下爆炸的一维数值计算, 得到了描述泡沫铝夹心柱壳结构在爆炸载荷下的弹塑性模型。Shen 等^[2]通过爆炸实验和数值模拟, 研究了短尺寸泡沫夹心柱壳在内部爆炸加载下的动态响应, 并给出了内外壳体运动的解析解。Liu 等^[3]通过数值模拟研究了壳体和芯体的组合对夹心结构能量吸收的影响, 发现相同质量条件下泡沫夹心柱壳的外壳最大变形量与能量吸收均大于实心结构。Karagiozova 等^[4]研究了芯体压溃和外壳变形过程, 提出了夹心柱壳的动态响应理论分析模型。王家维等^[5]对分层梯度的泡沫夹心柱壳结构的水下抗爆性能进行了仿真, 通过 LS-DYNA 内置的实体单元辅以已知的泡沫铝本构关系得到仿真模型, 仿真结果表明, 在其他条件相同的情形下, 泡沫铝密度沿径向按低高中分布具有最好的能量吸收效果和最小的中心位移量。Liang 等^[6-8]也对夹心柱壳的动态响应进行了研究, 发现外壳最大变形量与芯体相对密度、内径、厚度以及爆炸当量有关。从文献调研看, 当前内部爆炸载荷下泡沫铝夹心柱壳的研究主要集中在理论分析、LS-DYNA 仿真及简单的实验研究方面。

Voronoi 技术可以模拟泡沫材料的生成过程和细观结构, 并具有一定随机性, 因而广泛适用于建立泡沫材料的仿真模型, 但鲜见应用于泡沫铝夹心柱壳。本研究首先进行典型工况的爆炸实验, 通过分析实验结果得到内部爆炸载荷下泡沫铝夹心柱壳内外壳体变形量随芯体相对密度的变化趋势; 然后采用

* 收稿日期: 2017-06-21; 修回日期: 2017-07-05

作者简介: 张国栋(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事泡沫金属冲击防护研究。

E-mail: zhangguodong11@nudt.edu.cn

通信作者: 李翔宇(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事高效毁伤技术及其应用、爆炸冲击动力学研究。

E-mail: xiangyulee@nudt.edu.cn

Voronoi 技术建立泡沫铝夹心柱壳的二维仿真模型,并将仿真结果与实验规律进行对比,验证该模型的可靠性;最后对仿真结果进行分析、归纳和拟合,得到壳体变形量随芯体相对密度的变化情况。

1 泡沫铝夹心柱壳在内部爆炸加载下的爆炸实验

为得到内部爆炸载荷下泡沫铝相对密度对泡沫铝夹心柱壳抗爆性能的影响规律,进行了不同爆炸载荷和不同相对密度时泡沫铝夹心柱壳的内部爆炸实验。实验装置见图 1,其中泡沫铝内径为 35 mm、外径为 45 mm,泡沫铝内外各有 1 个厚 1.5 mm 的 45 钢壳,TNT 装药位于圆柱几何中心位置。实验过程中共采用 3 种不同密度的泡沫铝,其相对密度分别为 0.12、0.16、0.26;采用两种不同药量作为内部爆炸载荷,分别为 9.6 g 和 14.1 g,具体工况设计如表 1 所示,其中 m 为装药质量, ρ_R 为相对密度。

实验后测量内外壳体沿径向的最大变形量,并分析芯体相对密度对壳体变形量的影响规律。不同工况下壳体变形情况及变形量分别如图 2 和表 2 所示,其中 d_{in} 表示内壳变形量, d_{out} 表示外壳变形量。从实验结果可以看出:内壳变形量随芯体相对密度增大而减小,外壳变形量随芯体相对密度增大而增大。

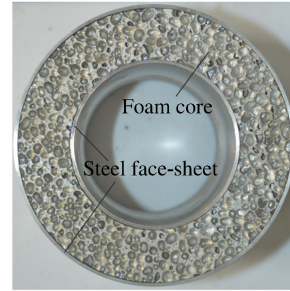


图 1 实验装置
Fig.1 Experimental device

表 1 实验工况设计
Table 1 Experimental designs

Case No.	m/g	ρ_R	Case No.	m/g	ρ_R	Case No.	m/g	ρ_R
J1	9.6	0.12	J3	9.6	0.16	J5	9.6	0.26
J2	14.1	0.12	J4	14.1	0.16	J6	14.1	0.26

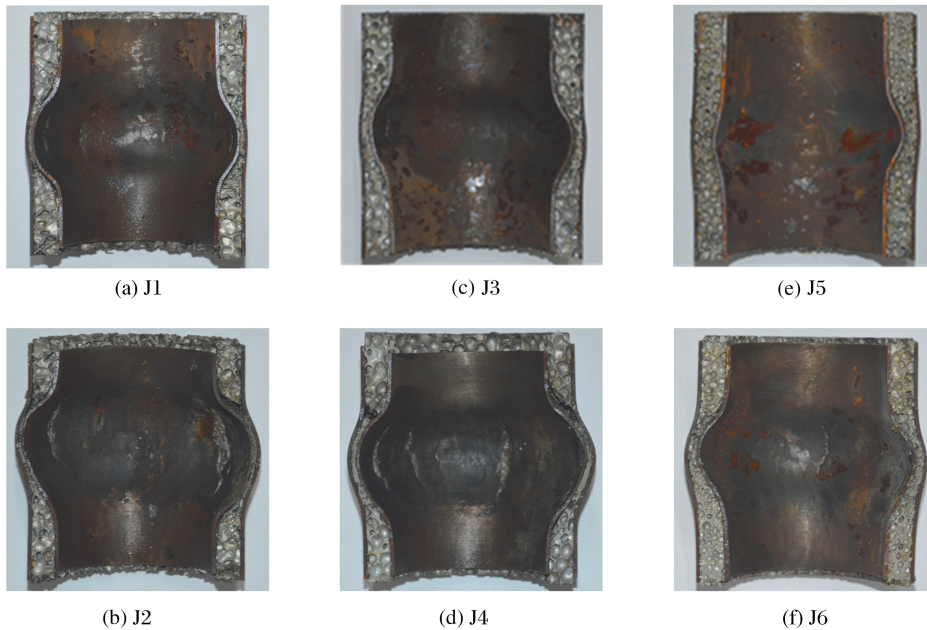


图 2 不同工况下壳体的变形情况

Fig.2 Deformation of the sandwich cylinders under different work conditions

表 2 实验结果

Table 2 Experimental results

Case No.	d_{in}/mm	d_{out}/mm	Case No.	d_{in}/mm	d_{out}/mm	Case No.	d_{in}/mm	d_{out}/mm
J1	19.7	11.7	J3	18.7	14.9	J5	13.8	15.0
J2	28.6	22.5	J4	27.6	23.6	J6	24.6	24.4

2 基于 Voronoi 技术的泡沫铝夹心柱壳仿真模型

2.1 仿真模型构建

基于 Voronoi 技术构建仿真模型,利用 MATLAB 程序中的 Voronoi 函数生成描述泡沫铝模型的数据,而后将生成的模型描述文件提交仿真软件进行仿真。将仿真结果中的相关数据提取出来,通过与实验结果进行对比,验证模型的可靠性并分析规律。

为了模拟泡沫铝的随机性,首先在所研究的平面区域内随机生成核点,通过控制核点之间的距离下限控制泡沫元胞的尺寸。此外,由于 MATLAB 生成的 Voronoi 图形是不封闭的,因此需要进行进一步的处理,过程大致如图 3 所示。而后将生成的模型几何数据与描述夹心柱壳结构的各项参数一同写入模型描述文件,最终生成泡沫铝夹心柱壳的仿真模型。

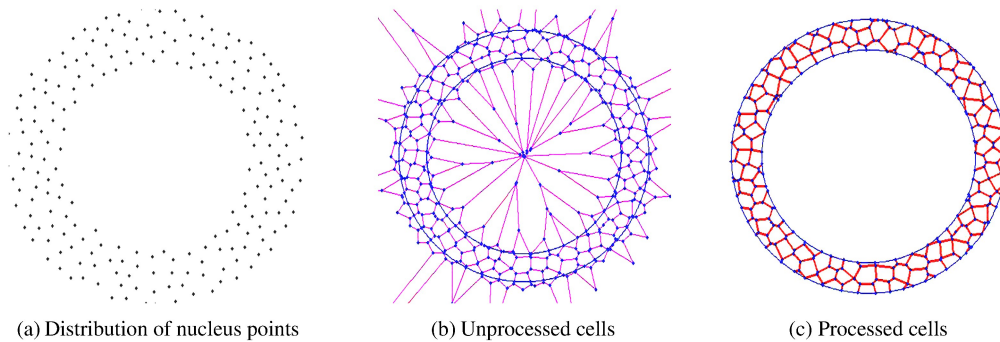


图 3 Voronoi 图形在 MATLAB 中的生成过程

Fig. 3 Creation process of Voronoi diagram in MATLAB

仿真模型的各项结构参数与实验保持一致,载荷为施加于内壳内表面的脉冲载荷,满足

$$p(t) = \begin{cases} p_0 \exp[-(t - \tau_0)/\tau_0] & t > \tau_0 \\ p_0 t / \tau_0 & t \leq \tau_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:载荷峰值 $p_0 = 90 \text{ MPa}$, $\tau_0 = 0.02 \text{ ms}$ 。仿真中采用的各项材料参数如表 3 所示。

表 3 材料参数

Table 3 Material parameters

Material	Density/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Young's modulus/GPa	Yield stress/MPa	Poisson's ratio
Aluminum	2.70	69	170	0.3
Steel	7.85	210	410	0.3

2.2 仿真工况设计

由于二维模型与三维实体之间的差异,模型在相对密度的设定上与实际实验装置有所不同,如图 4 所示。在泡沫元胞尺寸一定的条件下,若不考虑元胞的壁厚,二维情况与三维情况的相对密度之比约为 45%;考虑元胞壁厚以后,这一数值约为 50%。因此,实验所用泡沫铝的相对密度对应应在二维模型中应为 0.06、0.08 和 0.13,设计仿真工况时相对密度的取值范围应包含这 3 个数值。

全部工况按照元胞孔径分为 3 组,分别为 6.0、4.5 和 3.0 mm。每组工况中泡沫铝相对密度的取值范围为 0.06~0.15,步长为 0.01,如表 4 所示,其中数字为工况编号,3 组工况的示例如图 5 所示。

表 4 仿真工况设计
Table 4 Simulation designs

Relative density	No. of work condition			Relative density	No. of work condition		
	$d=6.0$ mm	$d=4.5$ mm	$d=3.0$ mm		$d=6.0$ mm	$d=4.5$ mm	$d=3.0$ mm
0.06	301	401	501	0.11	306	406	506
0.07	302	402	502	0.12	307	407	507
0.08	303	403	503	0.13	308	408	508
0.09	304	404	504	0.14	309	409	509
0.10	305	405	505	0.15	310	410	510

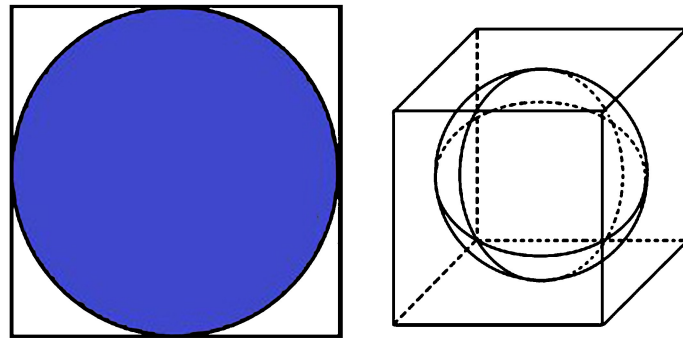


图 4 二维情况与三维情况的相对密度不同

Fig. 4 Difference between relative densities of 2D and 3D models

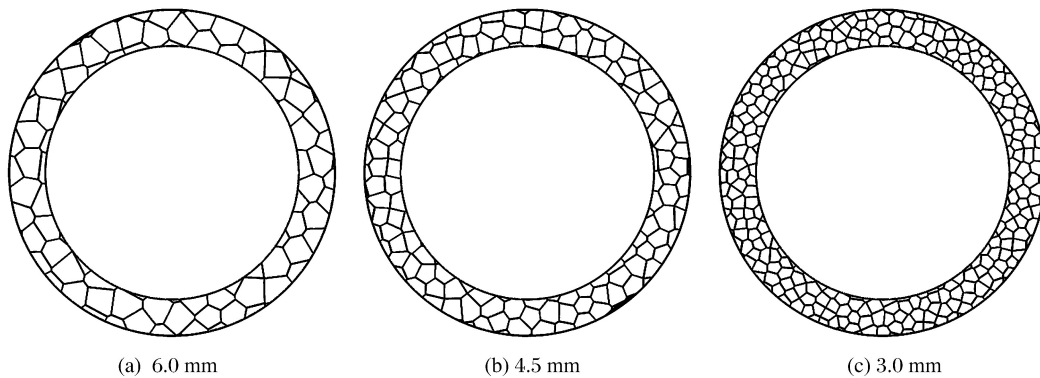


图 5 不同工况的示例

Fig. 5 Different cases

3 动态响应过程及仿真结果分析

3.1 动态响应过程

在仿真模拟中,夹心柱壳结构的动态响应可大致分为 3 个阶段:第 1 阶段,内部爆炸载荷驱动内壳加速,泡沫铝元胞受内壳压力开始变形、压溃,外壳尚无明显变形;第 2 阶段,芯体应力逐渐上升,达到外壳屈服点,内壳、芯体与外壳一起向外运动;第 3 阶段,内壳停止膨胀并与芯体分离,芯体与外壳共同向外运动,并最终停止。典型工况的动态响应过程如图 6 所示。

3.2 仿真结果分析

将从仿真得到的内外壳体变形量对最大值归一化后,得到归一化后变形量随相对密度的变化情况,如图 7 所示。图 7(a)和图 7(b)中元胞孔径为 6.0 mm,图 7(c)和图 7(d)中元胞孔径为 4.5 mm,图 7(e)和图 7(f)中元胞孔径为 3.0 mm。红线为用二次函数拟合的结果。

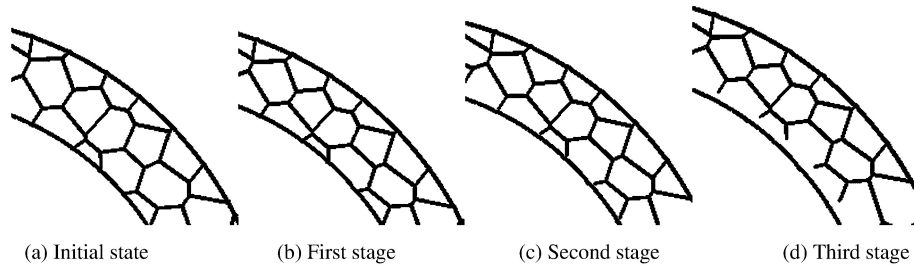


图 6 变形过程

Fig. 6 Deformation process

从仿真结果可以看出,对于 3 组元胞孔径不同的工况,内外壳体的变形量随相对密度的变化趋势与实验结果相符,即内壳变形量随相对密度增大而减小,外壳变形量随相对密度增大而增大。结合 3.1 节中的动态响应过程定性分析可知:泡沫铝的相对密度越大,其压溃过程中的平台应力越大,一方面导致内壳更快地停止膨胀、变形量减小,另一方面外壳更快地达到屈服点、变形量增大。研究结果验证了这一模型在模拟内部爆炸载荷下泡沫铝抗爆性能上的有效性,且从拟合结果的相关系数 R^2 可知,壳体变形量与相对密度近似满足二次函数关系。

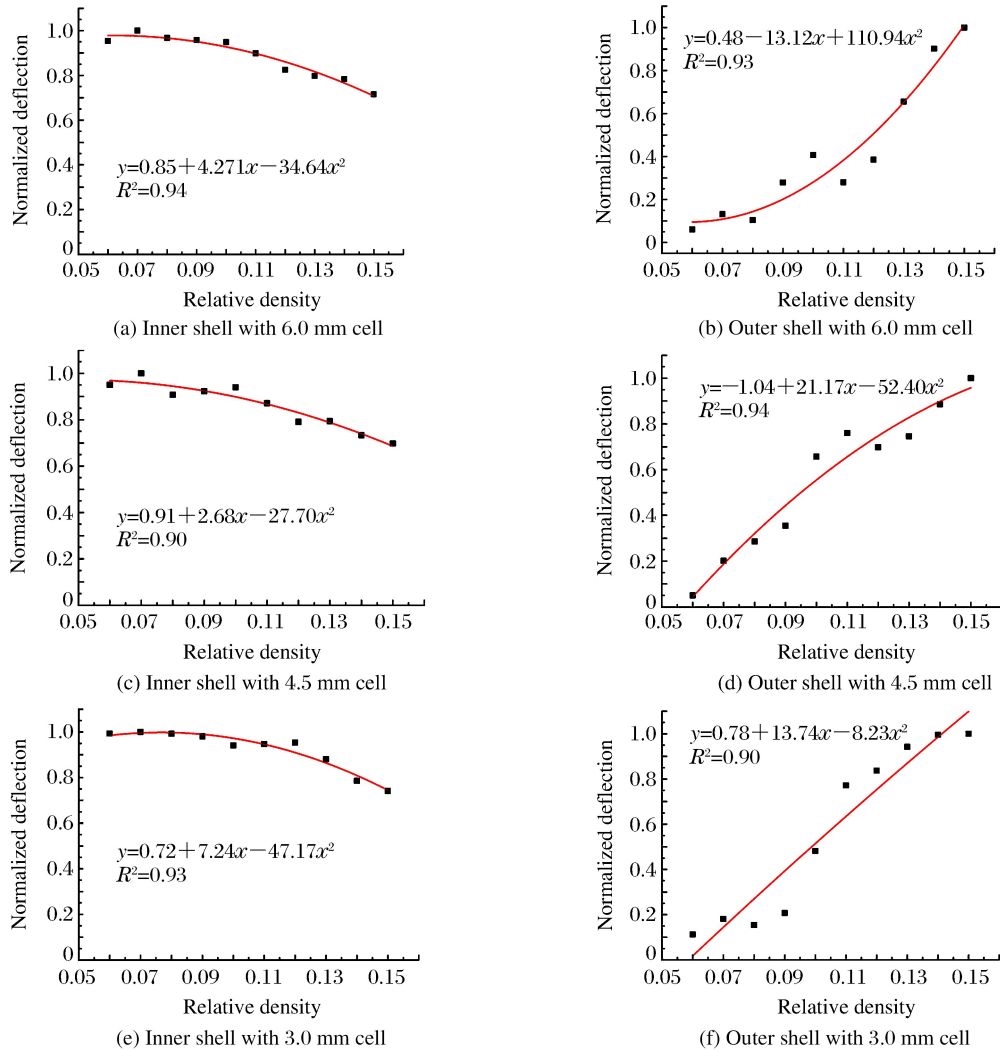


图 7 归一化后的变形量随相对密度的变化

Fig. 7 Relationship between normalized deflection and relative density

4 结 论

进行了泡沫铝夹心柱壳的内部爆炸加载实验,并建立了基于 Voronoi 技术的二维有限元模型,通过对比实验结果和仿真规律得到以下结论:(1) 由于二维图形与三维图形几何特征不同,二维模型的芯体相对密度应设定为实际泡沫金属的 50%左右;(2) 实验与仿真结果均表明,内部爆炸加载下,内壳变形量随相对密度增大而减小,外壳变形量随相对密度增大而增大;(3) 仿真结果表明,内外壳体的变形量与芯体相对密度大致满足二次函数关系,相关系数在 0.90 以上。

参考文献:

- [1] 倪小军,马宏昊,沈兆武,等. 泡沫铝柱壳对药柱水下爆炸压力场影响的数值研究 [J]. 高压物理学报,2014,28(2): 175-181.
NI X J, MA H H, SHEN Z W, et al. Effects of Al foam on pressure fields of underwater explosion [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2014, 28(2): 175-181.
- [2] SHEN J H, LU G X, ZHAO L M, et al. Short sandwich tubes subjected to internal explosive loading [J]. Engineering Structures, 2013, 55(4): 56-65.
- [3] LIU X R, TIAN X G, LU T J, et al. Blast resistance of sandwich-walled hollow cylinders with graded metallic foam cores [J]. Composite Structures, 2012, 94(8): 2485-2493.
- [4] KARAGIOZOVA D, LANGDON G S, NURICK G N, et al. The influence of a low density foam sandwich core on the response of a partially confined steel cylinder to internal air-blast [J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 92: 32-49.
- [5] 王家维,田晓耕. 水中爆炸载荷下夹心圆柱壳的结构优化 [J]. 固体力学学报, 2015, 36(增刊 1): 1-7.
WANG J W, TIAN X G. Structure optimization of aluminum foam-cored sandwich shell subjected to underwater explosion [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2015, 36(Suppl 1): 1-7.
- [6] LIANG M Z, LU F Y, ZHANG G D, et al. Experimental and numerical study of aluminum foam-cored sandwich tubes subjected to internal air blast [J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 125: 134-143.
- [7] LIANG M Z, ZHANG G D, LU F Y, et al. Blast resistance and design of sandwich cylinder with graded foam cores based on the Voronoi algorithm [J]. Thin-Walled Structures, 2017, 112: 98-106.
- [8] LIANG M Z, LU F Y, ZHANG G D, et al. Design of stepwise foam claddings subjected to air-blast based on Voronoi model [J]. Steel and Composite Structures, 2017, 23(1): 107-114.

Dynamic Response of Sandwich Cylinders Cored with Aluminum Foam under Internal Blast Loading

ZHANG Guodong, LI Xiangyu, LIANG Minzu, LU Fangyun

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Sandwich cylinders cored with aluminum foam have been widely applied in the fabrication of blast protection containers. The experiment under internal blast loading was performed and, based on the Voronoi technique, finite element models of sandwich cylinders were constructed and then used to simulate the deformation process of the sandwich cylinders. The results show that the simulation results agree well with the experiment results. With the increase of the cores' relative densities, the deflections of the inner shells increase and the deflections of the outer shells decrease. Furthermore, the deflections of the shells and the relative density of the cores approximately satisfy a quadratic relationship.

Keywords: internal blast; aluminum foam; sandwich cylinders; deflection; Voronoi technique