

doi: 10.7690/bgzd.2018.05.021

泡沫铝材料防护性能的数值模拟

崔小杰, 张国伟

(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要: 为了解不同材料参数对防护结构防护性能的影响, 对泡沫铝材料防护性能的数值进行模拟。针对应用 AUTODYN 软件数值模拟单一泡沫铝作防护材料时对爆炸冲击波的衰减特性, 设计防护结构为圆柱形的 3 维实体, 根据圆柱形轴对称的特性, 建立 2 维仿真简化模型, 采用 2 维欧拉多物质算法数值模拟单一泡沫铝圆柱形防护结构, 得出其对爆炸冲击波的衰减效果。结果表明: 泡沫铝对冲击波有着显著的衰减作用, 可为泡沫铝在相关复合防护结构中的应用提供参考。

关键词: AUTODYN; 泡沫铝; 材料参数; 爆炸冲击波; 衰减; 数值模拟

中图分类号: TJ410.3 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Protective Performance of Foamed Aluminum Materials

Cui Xiaojie, Zhang Guowei

(College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to understand the influence of different material parameters on the protective performance of protective structure, the numerical simulation of the protective performance of aluminum foam material was carried out. The attenuation characteristics of blast wave were studied by using AUTODYN software to simulate single aluminum foam as protective material. According to the characteristics of cylindrical axisymmetry, a simplified 2 dimensional simulation model is established, and a two-dimensional Euler multi-material algorithm is used to numerically simulate a single aluminum foam cylindrical protective structure. The results show that aluminum foam has a remarkable attenuation effect on shock wave, which can be used in the related composite protective structure. And it also provides reference for application of foam aluminum in related complex defense structure.

Keywords: AUTODYN; foam aluminum; material parameter; explosion shock wave; attenuation; numerical simulation

0 引言

近年来, 泡沫铝因其优良性能被作为防护材料广泛应用于各个领域。国内王礼立等对爆炸冲击波在多孔铝、硬质泡沫塑料等轻质多孔疏松材料的传播规律和冲击性能进行了理论和试验分析, 研究结果表明, 轻质多孔材料可以有效地吸收冲击波^[1]。万剑芳等对开孔泡沫铝、闭孔泡沫铝硅和闭孔泡沫铝铜进行了准静态的压缩试验, 研究泡沫铝材料的准静态压缩力学行为及吸能机制, 分析相对密度和试件高度对泡沫铝吸能特性的影响, 发现泡沫铝的吸收能量均随着应变量和密度的增大而增大, 因为低密度闭孔泡沫铝平台流动应力基本恒定; 所以它比高密度开口泡沫铝的吸能能力更强, 更适合作吸能材料^[2]。基于爆炸冲击波球形传播的理念, 笔者在设计过程中应尽量使整个装置受力均匀对称, 减少应力集中的区域分布, 增加防护结构的强度^[3-4], 并根据生活中圆柱形垃圾桶的设计理念, 把防护装置设计成圆柱形^[5]。其优点是增大了受力面积, 减

少了应力集中, 并且运输和存放方便。笔者主要研究泡沫铝材料用做圆柱形冲击波防护结构时, 不同材料参数对防护结构防护性能的影响。

1 模型建立及数值模拟分析

依据文中的主要研究内容, 设计防护结构的 3 维实体形状为圆柱形, 为轴对称结构。模型高 300 mm, 圆柱空心半径为 100 mm。防护结构整体结构如图 1。

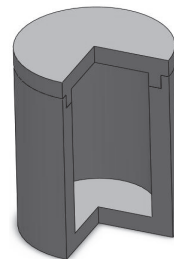


图 1 防护整体结构

为了既能简化仿真计算又能确保仿真的准确性, 根据圆柱形轴对称特性将建立 1/2 的 2 维界面

收稿日期: 2018-02-05; 修回日期: 2018-03-19

作者简介: 崔小杰(1993—), 男, 山西人, 在读硕士, 从事弹药工程与毁伤技术研究。

模型，具体的建模为建立 $1\ 000\ \text{mm} \times 1\ 500\ \text{mm}$ ($I \times J$) 空气域，并对空气域边界施加透射条件，网格尺寸为 $3.33\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$ ($I \times J$)，以 Y 轴为刚性地面边界，沿 X 轴填充泡沫铝和炸药并以 X 轴为旋转轴。如图 2。

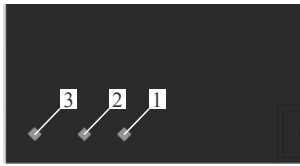


图 2 1/2 截面模型

对单一泡沫铝材料做防护层时进行仿真计算，3 种泡沫铝厚度分别为：10、20、30 mm，观测点距

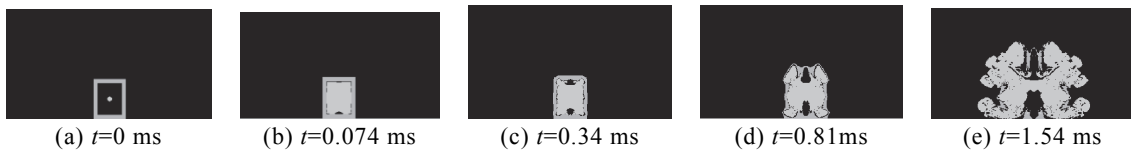


图 3 泡沫铝防护结构防爆过程

1.2 3 种厚度泡沫铝防护层的防护仿真结果对比

3 种厚度泡沫铝防护材料各观测点超压曲线如图 4 所示。

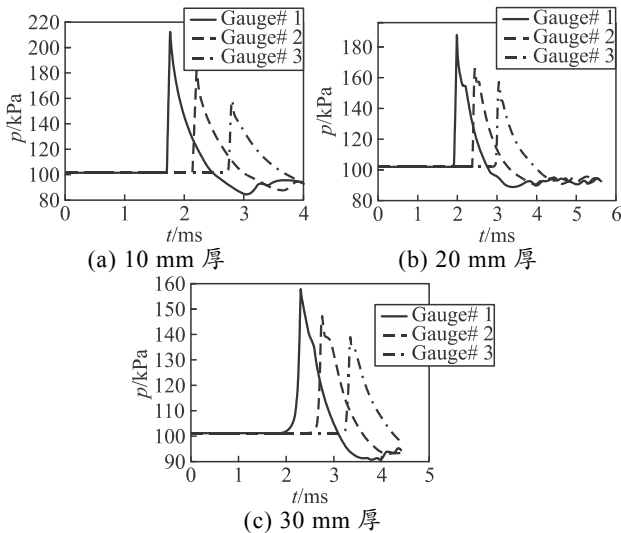


图 4 3 种厚度泡沫铝材料超压曲线

表 1 3 种厚度泡沫铝防护与空爆时各观测点超压峰值对比

厚度/mm	观察点/m		
	0.9	1.1	1.35
10	110.78	80.19	57.07
20	86.85	64.64	55.81
30	56.86	45.88	37.84

从表中可以发现：用泡沫铝材料做防护时，削波减爆效果明显，且随着泡沫铝材料厚度的增加，各观测点对应的超压峰值明显降低，即在使用泡沫铝材料做防护层时增加泡沫铝的厚度可以增加防护

爆炸中心的距离分别为：900、1 100、1 350 mm。

1.1 泡沫铝防护结构防爆过程

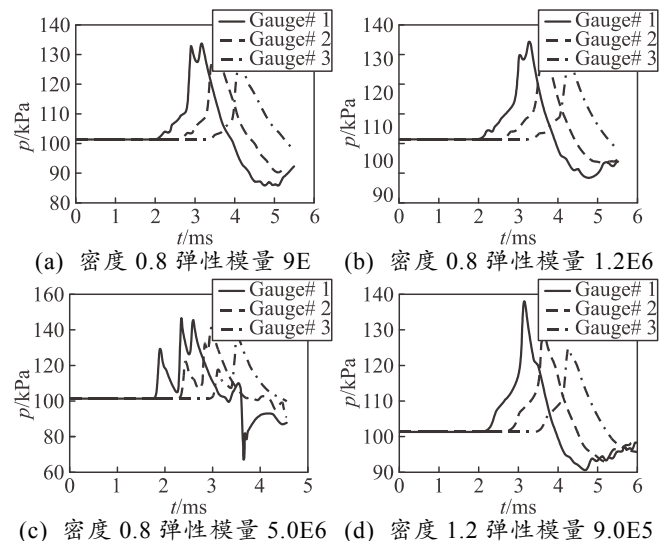
从图 3 中可以看出泡沫铝防护结构防爆的主要过程。 $t=0$ 为爆炸起始时刻，该时刻炸药起爆，瞬间产生大量的爆炸产物压缩周围空气，导致空气介质压力突变，产生冲击波；在 $t=0.074\ \text{ms}$ 时，爆炸生成物充满整个防护装置并在结构的尖角处出现应力集中^[6]，爆轰波持续作用在泡沫铝上；在 $t=0.34\ \text{ms}$ 时尖角处出现严重的压缩破坏；在 $t=0.81\ \text{ms}$ 时整个装置几乎被破坏；最终在 $t=1.54\ \text{ms}$ 时，防护装置完全破裂，爆炸产物外泄。

效果，减小超压峰值。

1.3 泡沫铝的密度和弹性模量对防护效果的影响

在 1.2 节得出泡沫铝材料防护层越厚，防护效果越好。但只通过增加泡沫铝的厚度来改善防护结构的防护性能是不实际的，还需要考虑它的密度和弹性模量这 2 个参数对防护结构防护性能的影响。

为了得到泡沫铝材料密度和弹性模量对防护结构防护效果的影响，笔者选择 3 种密度分别为 0.8、1.2、2.0 g/cm^3 ，弹性模量为 9.0E5、1.2E6、5.0E6 kPa 的泡沫铝材料进行仿真，同样使用正交优化法安排试验并得出影响因素的大小。对比 3 种密度和弹性模量的泡沫铝材料做防护层的防护结构仿真结果，各观测点超压曲线如图 5。



(a) 密度 0.8 弹性模量 9E (b) 密度 0.8 弹性模量 1.2E6 (c) 密度 0.8 弹性模量 5.0E6 (d) 密度 1.2 弹性模量 9.0E5

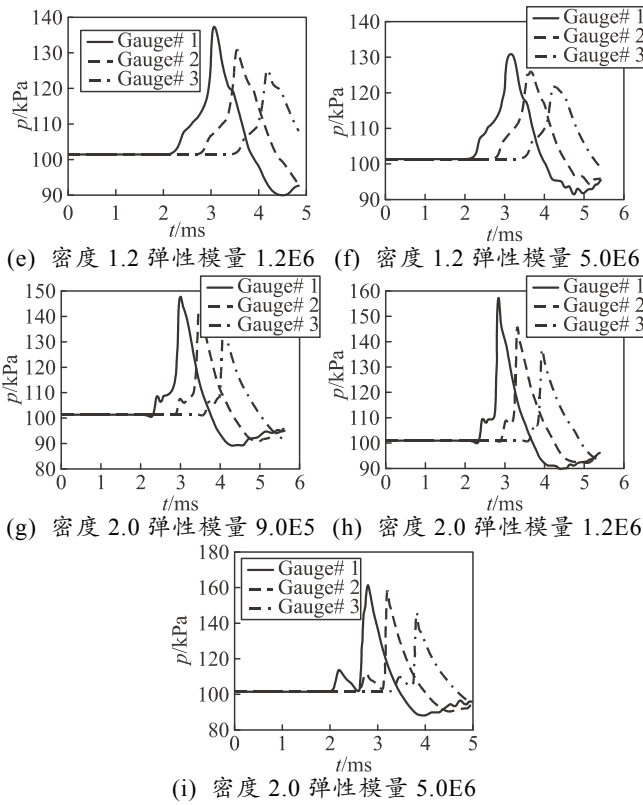


图 5 各观测点超压曲线

笔者对以上 9 种仿真计算，所得 3 个高斯点超压峰值与空爆情况下的对应点超压峰值进行归纳，如表 2 所示。

表 2 各高斯点超压峰值 kPa

泡沫铝材料种类		观测点 r/m		
密度/(g/cm ³)	弹性模量	0.9	1.1	1.35
0.8	9.0E5	32.70	30.00	25.88
0.8	1.2E6	33.08	30.02	26.12
0.8	5.0E6	45.38	40.37	34.78
1.2	9.0E5	36.80	29.42	23.54
1.2	1.2E6	34.28	28.48	23.51
1.2	5.0E6	29.54	24.85	20.73
2.0	9.0E5	46.37	40.90	35.50
2.0	1.2E6	56.25	44.42	36.05

所在列	1	2	3	4	实验结果
因素	密度	弹性模量			
实验 1	1	1	1	1	25.88
实验 2	1	2	2	2	26.12
实验 3	1	3	3	3	34.78
实验 4	2	1	2	3	23.54
实验 5	2	2	3	1	23.51
实验 6	2	3	1	2	20.73
实验 7	3	1	3	2	35.5
实验 8	3	2	1	3	36.05
实验 9	3	3	2	1	44.69
均值 1	28.927	28.307	27.553	31.360	
均值 2	22.593	28.560	31.450	27.450	
均值 3	38.747	33.400	31.263	31.457	
极差	16.154	5.093	3.897	4.007	

图 6 正交优化直观分析

由表 2 可以发现：当泡沫铝材料的密度为 1.2 g/cm³，弹性模量为 5E6 kPa 时，防护效果最好。为进一步分析密度和弹性模量对防护性能的影响，采用正交优化法分析实验结果，比较影响因子对超压

的影响^[7]。在正交试验中对比在 1.35 m 观测点处的超压值，选择 L9_3_4 正交表。由正交优化法得到的直观分析如图 6 所示，效应曲线如图 7 所示。

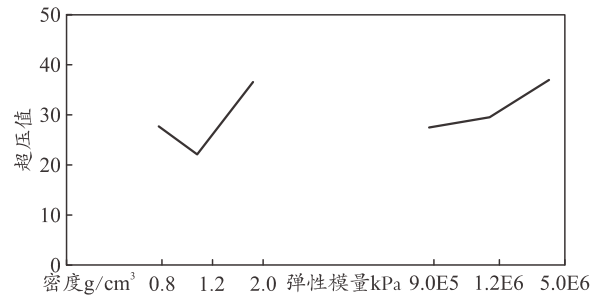


图 7 正交优化效应

从图 6 中发现：密度所对应的极差为 16.154，而弹性模量所对应的极差为 5.093。根据正交优化影响因素判断准则，得出泡沫铝的密度对防护性能的影响比弹性模量大。同时根据图 7 正交优化效应曲线可看到：密度对防护性能的影响有临界值。纵坐标代表超压值，超压值越低表明防护性能越好。当密度小于 1.2 时防护性能提高，当泡沫铝材料密度为 1.2 时为最佳，当大于 1.2 时防护性能降低；对弹性模量来说，防护性能随弹性模量的增大而减小，即观测点处的超压峰值与弹性模量成正相关。

2 结论

1) 泡沫铝材料做防护层介质时，防护结构对爆炸冲击波有很好的衰减性。

2) 不同材料参数的泡沫铝防护效果不同，这为泡沫铝材料在各个领域复合防护设计中的应用提供了参考。

3) 笔者只考虑了厚度、密度和弹性模量 3 个材料泡沫铝参数对防护效能的影响，在以后的研究中可以考虑其他不同材料参数的影响。

参考文献：

- [1] 王永刚, 胡时胜, 王礼立. 爆炸载荷下泡沫铝材料中冲击波衰减的实验和数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2013, 23(6): 516-521.
- [2] 万剑芳, 屠永清. 不同基体泡沫铝材料的吸能特性研究[J]. 煤矿机械, 2009, 30(2): 70-72.
- [3] 王礼立, 杨黎明, 周风华. 强动载荷下结构的柔性防护和刚性防护[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(4): 337-344.
- [4] 杨相礼, 何勇, 何源. 圆柱形预制破片爆炸驱动仿真研究[J]. 兵工自动化, 2016, 35(8): 9-12.
- [5] 宁建国, 王成, 马天宝. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 266-274.
- [6] 张国伟. 爆炸作用原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 37-45.
- [7] 朱福林, 赵捍东. 含水介质装甲对聚能射流防护性能研究[J]. 兵工自动化, 2016, 35(2): 93-96.