

文章编号: 1001-1455(2003)06-0516-07

爆炸荷载下泡沫铝材料中冲击波衰减特性的 实验和数值模拟研究*

王永刚¹, 胡时胜², 王礼立¹

(1. 宁波大学力学与材料科学研究中心, 浙江 宁波 315211;

2. 中国科学技术大学力学和机械工程系, 安徽 合肥 230026)

摘要: 通过实验和数值模拟对泡沫铝中冲击波传播特性进行了研究, 结果表明: 冲击波在泡沫铝中传播时显示明显的衰减特性; 与此同时波头升时逐渐增加。这种衰减耗散特性主要来源于泡沫铝本身的本构粘性效应, 而追赶卸载效应又会进一步促进冲击波的衰减。这为泡沫铝作为新型抗冲击缓冲材料提供设计基础。

关键词: 固体力学; 冲击波衰减; PVDF 压电计; 泡沫铝; 爆炸荷载

中图分类号: O347.4 国标学科代码: 130¹⁵⁷⁵ 文献标志码: A

1 引 言

多孔泡沫材料作为一种新型的工程材料, 已被广泛地应用于易损物品的缓冲吸能包装、各类结构物抗爆炸耐冲击防护等, 越来越受到航空航天、包装运输、军事防护等各领域的重视。除已广泛应用的泡沫塑料, 不同泡孔尺寸及孔隙率的多孔泡沫铝在我国已形成产业化生产。

有关泡沫铝材料在准静态和动态加载条件下的压缩行为和能量吸收机理问题, 已经有了多方面的研究, 并取得了初步研究成果^[1~3]。但对于爆炸荷载作用下冲击波压力传播衰减问题, 研究还不多。A. G. Evans 等^[4]曾对泡沫铝的抗爆性能提出如图 1 所示的模型, 但对于一定的爆轰波需要多厚的泡沫铝防护层, 仅从能量吸收角度利用经验公式进行了推算, 而对泡沫铝中波传播特性对抗爆缓冲的影响尚未进行深入的研究。实际上, 冲击波在泡沫铝材料中的传播特性, 既是泡沫铝动态本构特性在结构中的重要表现形式, 又是评价其抗冲击防护性能的基础, 对爆炸防护设计有重要的参考和应用价值, 因此进一步研究此类材料对冲击波的衰减特性显得尤为重要。

本文中利用聚偏四氟乙烯(PVDF)压电传感器与低阻锰铜计相结合的动态测试技术, 直接测量爆轰波作用下泡沫铝材料中传播的压力波形, 同时结合数值模拟对泡沫铝中冲击波传播特性进行研究。

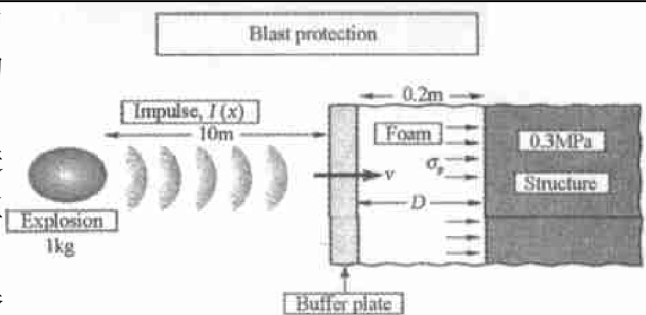


图 1 泡沫铝的抗爆模型

Fig. 1 Resistance blast model of aluminum foams

2 试验方法

实验装置原理如图 2 所示。炸药采用普通的 2# 岩石炸药。药柱直径比测压传感器敏感源尺寸大一倍以上, 以减少侧向稀疏波对测试结果的影响。试件采用厚 10mm 的薄层叠合而成, 并增加最后一层的厚度, 以减少试样背面(自由面)发射卸载波的影响。

* 收稿日期: 2002-12-25; 修回日期: 2003-03-10

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金项目(10076020)

作者简介: 王永刚(1976—), 男, 硕士。

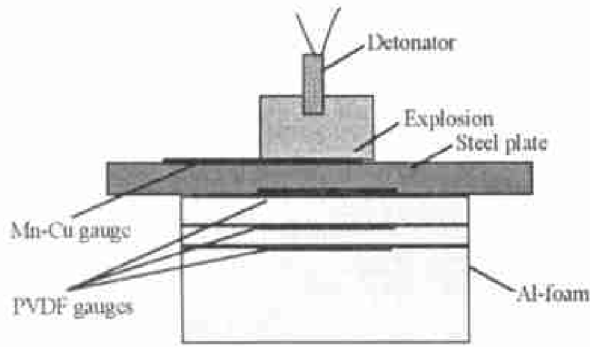


图 2 实验原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of experimental principle

本实验加载为短历时(10^μs 量级)、陡升时(1^μs 量级)的强脉冲载荷(10² ~ 10³ MPa 量级),要求直接测量动态压力的传感器频响高、线性度好,并在测量过程中不明显干扰冲击波传播。王海福等^[5]采用传统的锰铜压阻传感器对聚氨酯泡沫材料中冲击波压力特性进行了研究,但因泡沫材料孔隙与锰铜计敏感部分尺寸相当或更大,而导致锰铜计无法获得较理想的压阻信号,从而影响测试精度。因此他们不得不改用间接测压实验方法,即先测出 LY-12 铝对冲击波压力传播的衰减系数;将不同初始密度和厚度的聚氨酯泡沫材料试件放置在 LY-12 铝板上,分别测出距分界面 5mm 处 LY-12 铝中冲击波压力,并借助衰减系数推算出入射到 LY-12 铝中的初始冲击波压力;最后,借助分界面阻抗匹配原理和聚氨酯泡沫材料高压 Hugoniot 方程,换算出聚氨酯泡沫材料中的冲击波压力。这种方法一次实验仅能得到一个数据并且数据处理较繁。由于 PVDF 的优良的压电特性^[6],我们将 PVDF 薄膜压电计夹在泡沫铝试样块之间,直接测量冲击波在泡沫铝中的传播特性。所用 PVDF 压电计的厚度仅为 40^μm,应力波在其中传播的时间极短(约几十纳秒),可忽略 PVDF 压电传感器对冲击波传播的干扰。泡沫铝试样泡孔尺寸约 1mm,由于传感器敏感源比泡孔尺寸大一个量级才能得到有效的平均压力数据,因此采用的 PVDF 压电计敏感源尺寸长宽各为 10mm。测试电路如图 3 所示,当 PVDF 压电计受动态应力作用后产生的电荷量 Q 经电阻 R 放电形成电流回路 $I(t)$ 后,可由瞬态波形存储器采集到放电电阻 R 上的电压 $V(t)$,则可据此求得 PVDF 压电计在这瞬态过程中释放的总电荷量

$$Q = \int_0^t i(t)dt = \int_0^t V(t)/R \cdot dt \tag{1}$$

则 PVDF 压电计所测定的瞬态应力

$$\sigma = KQ/a \tag{2}$$

式中: a 为 PVDF 压电计的工作面积, K 为 PVDF 压电计的灵敏度系数。 K 的动态标定在 SHPB 上进行的, 标定得 $K = 40.9\text{GN/C}$ 。同等条件下, PVDF 压电计在泡沫铝中两次测得的电压波形如图 4 所示。

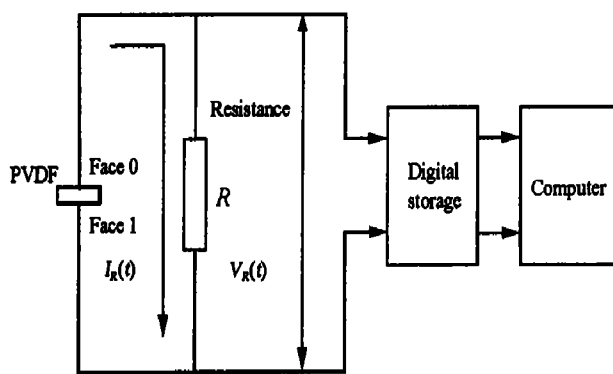


图 3 PVDF 压电计测量电路

Fig.3 The measurement circuit of PVDF gauge

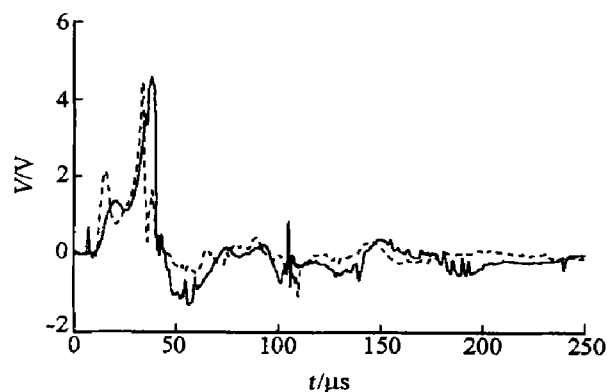


图 4 两次实验 PVDF 记录的波形的比较

Fig.4 Comparison of waveforms recorded by PVDF gauges

PVDF 压电计不耐炸药爆炸产生的高温,因而采用低阻锰铜计来测炸药-钢板接触爆炸界面上的压力。锰铜计测压原理如图 5 所示,炸药起爆后将使置于炸药底部的游离式探针导通触发网络源,网络源再触发恒流源,恒流源将在锰铜计的两脚线之间通过一持续时间约 200^μs 的恒电流,爆炸产生的高压作用

锰铜计前的电压值为 V_0 。当高压作用时, 锰铜计电阻发生改变, 从而引起电压改变, 此时压力

$$p = k(V - V_0) / V_0 \quad (3)$$

式中: k 为锰铜计标定系数。对所采用的锰铜计经气炮标定, $k = 40.2 \text{ GPa}$ 。

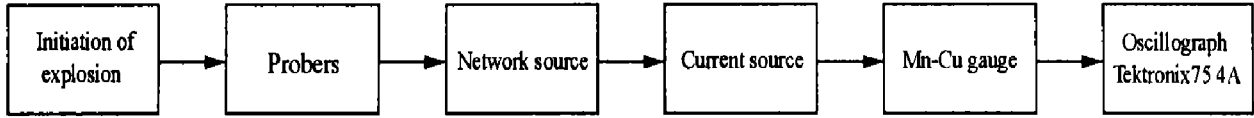


图 5 锰铜计测试系统示意图

Fig.5 Schematic diagram of Mn-Cu gauge

3 实验结果与讨论

图 6 为典型的实测电压-时间原始曲线, $V_0 = 0.282 \text{ V}$, $V = 0.341 \text{ V}$, 根据式 (3) 计算得钢板上所承受压力为 8.41 GPa 。图 7 给出了图 2 所示的三个 PVDF 压电计采集到原始波形。按式 (1) ~ (2) 所换算而得的应力波波形如图 8 所示。由此可见冲击波在泡沫铝中传播时有比较明显的衰减过程, 同时冲击波在传播过程中形状发生了变化, 上升沿逐渐被拉长。实际上本实验是根据一定的工程应用背景安排的, 没有采用平面波发生器进行加载, 所以加载波并不是平面波而更接近于球面波。实验得到的冲

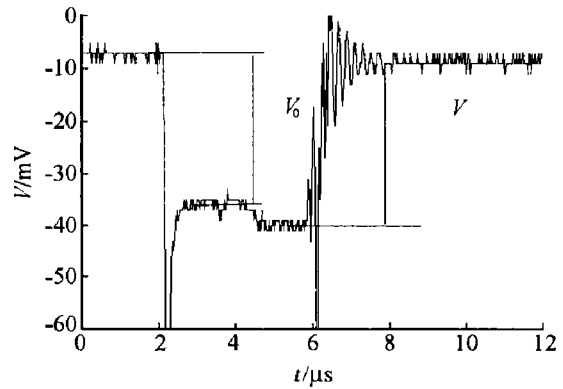


图 6 锰铜计采集到的原始电压曲线

Fig.6 The original voltage curve recorded by Mn-Cu gauge

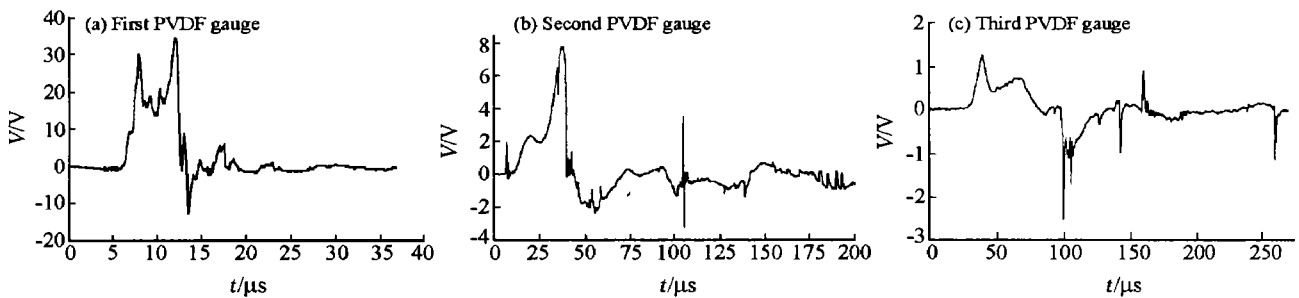


图 7 PVDF 记录的电压波形

Fig.7 Waveform recorded by PVDF gauges

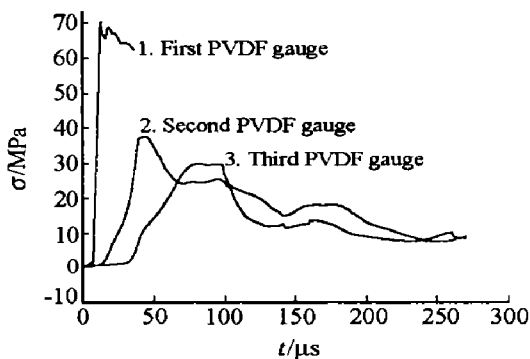


图 8 PVDF 记录的应力波形

Fig.8 Stress versus time recorded by PVDF gauges

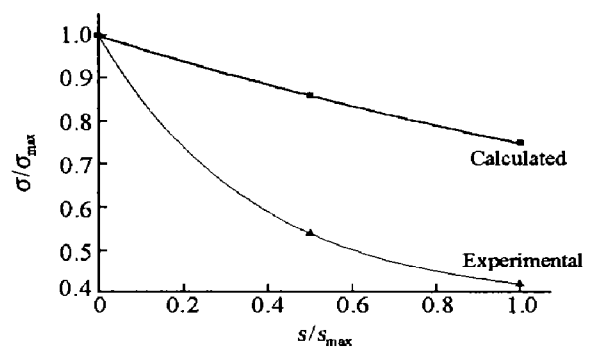


图 9 压应力随距离变化曲线

Fig.9 Curves of stress versus distances

击波在泡沫铝中传播时的衰减是由球面波扩散效应引起的衰减和泡沫铝本构效应引起的衰减共同作用的结果。理论上认为: 强间断球面弹性波的应力幅值随距球心距离的增大, 与半径成反比地衰减^[7]。图 9 给出了理论计算球面波扩散效应和实验测得的最大压应力随传播距离而衰减的变化特性。分别对他们进行拟合, 可表达如下的指数衰减形式

$$\sigma(x) = a + be^{-x/c} \quad (4)$$

衰减因子分别为 2.07、0.37。从图 9 中可以看出, 冲击波在泡沫铝中传播时的衰减主要是由泡沫铝的本构特性效应引起的。另外, 发现 PVDF 采集到的电压正向波形都具有双峰, 这一特征是与压力波形加载段上出现两段不同斜率的曲线相对应的, 而这又可追溯到泡沫材料的本构特性。泡沫材料变形一般经历三个阶段: 弹性段、屈服段、压实段。从时间上推算, 电压正向波形上的第一个峰对应于压力值处于泡沫铝弹性段向屈服段过渡时的应力值; 而第二个峰则对应于压力值处于屈服段向压实段过渡时的应力值。由于 PVDF 测得的电压波形需通过积分才可以转化为压力/应力波形, 所以说电压波形实质上与压力/应力对时间的变化率对应。泡沫材料在屈服段一般随变形大大增大而应力仅缓慢增加, 甚至保持平台, 因而应力率在这个阶段将减小, 但到压实段后将会增大, 从而导致了正向波形双峰结构。所以说正向波形双峰结构正是泡沫铝本构特性在波形上的体现。

上述现象清楚地表明泡沫铝具有明显的粘性效应, 正是材料粘性效应可导致波传播中波幅随传播距离而衰减和弥散的现象^[7]。

4 数值模拟

4.1 LS-DYNA3D 程序

LS-DYNA 是一个以显式为主、隐式为辅的通用非线性动力分析有限元程序, 可以求解各种二维、三维非线性结构的高速碰撞, 爆炸和金属成型等非线性问题。LS-DYNA 程序采用 Lagrangian 描述, 质量守恒方程、动量守恒方程与能量守恒方程分别为

$$\rho J = \rho_0 \quad (5)$$

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \dot{x}_i \quad (6)$$

$$E = VS_{ij}\epsilon_{ij} - (p + q)V \quad (7)$$

式中: ρ 为当前质量密度; J 为相对体积; ρ_0 为初始质量密度; σ_{ij} 为柯西应力; f_i 为单位质量体积力; \dot{x}_i 为加速度; V 为现时构形的体积; S_{ij} 为偏应力; ϵ_{ij} 为应变率张量; p 、 q 分别为压力和体积粘性阻力。根据虚功原理, 有

$$\int_V \rho \dot{x}_i \delta x_i dV + \int_V \sigma_{ij} \delta x_{i,j} dV - \int_V \rho f_i \delta x_i dV - \int_{S_1} g_i \delta x_i dS = 0 \quad (8)$$

式中: g_i 为作用在 S_1 边界上的面力载荷。上式中各项分别表示单位时间内体系的惯性力、内力和外力 (体力和表面力) 的虚功。再加上材料的本构方程将构成问题的全部方程。

4.2 有限元模型

数值模拟模型尺寸与试验试样大小相同, 即钢板尺寸为 $120\text{mm} \times 120\text{mm} \times 5\text{mm}$, 泡沫铝尺寸为 $120\text{mm} \times 120\text{mm} \times 30\text{mm}$ 。由于模型的对称性, 采用四分之一的模型 (如图 10) 进行计算。钢板单元与泡沫铝的对称面采用对称约束。对泡沫铝底面施加了无反射边界条件, 以避免应力波从模型的边界反射。把实测炸药-钢板接触界面所承受的荷载曲线作为模型的荷载条件 (以下简称为 A 荷载条件)。总计算时间 $150\mu\text{s}$ 。

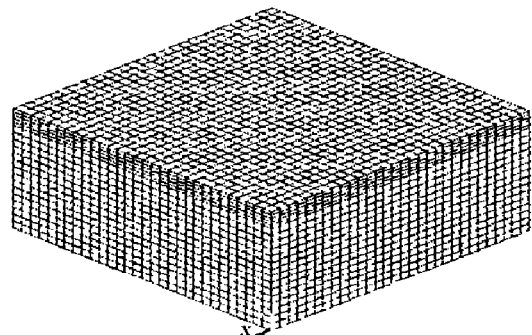


图 10 模型与单元划分

Fig. 10 Model and division of element

4.2.1 材料参数

钢板采用 DYNAT24^[8] 双线性弹塑性本构模型进行模拟, 材料的参数分别为: $\rho = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $E = 210 \text{ GPa}$, $E_t = 3 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$, $\sigma_s = 0.4 \text{ GPa}$ 。B. A. Gama 等^[9] 对泡沫铝材料进行数值模拟时曾采用 Honeycomb 蜂窝结构模型, 这里采用 Crushable foam 本构模型^[8] 来模拟。泡沫铝的本构关系需要输入材料的工程应力应变曲线。通过 SHPB 实验得到了如图 11 所示泡沫铝应力应变曲线及其他参数: $\rho_0 = 1.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $E = 1.2 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$, $p_{\text{cut}} = 10 \text{ MPa}$ 。其中 p_{cut} 为拉伸载荷下定义失效的拉伸应力截止值。

4.2.2 计算结果

泡沫铝层中心各单元压应力时程曲线如图 12(a) 所示。单元 18900 是与钢板接触的泡沫铝中心单元, 从此单元开始每相邻曲线相距为 5mm。从 18900 单元的压应力时程曲线来看, 最大压应力达到 88.6MPa, 其变形显然超过了图 11 所示泡沫铝变形平台阶段而达到密实阶段。靠近下底面的单元 12600、单元 9900 则仍然处于应力平台屈服阶段。

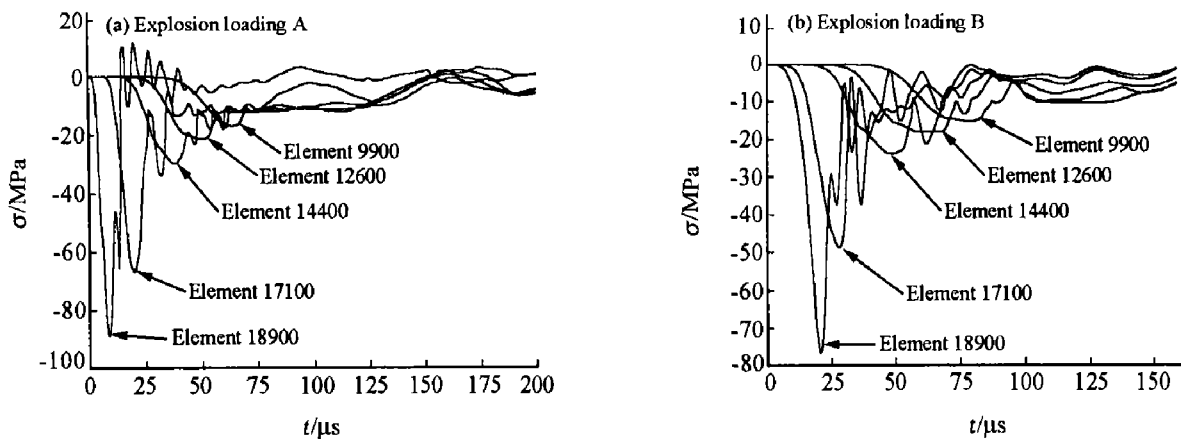


图 12 泡沫铝层中心单元压应力时程曲线

Fig. 12 Stress versus time of the central element of Al-foams

值得注意的是上表面单元 18900 的应力时程中出现了拉应力。我们认为是卸载波追赶卸载引起的。为了弄清楚此现象, 改变了加载条件, 即除去 A 载荷条件的卸载部分, 使载荷最大值保持恒值无卸载 (以下简称为 B 载荷条件), 计算结果如图 12(b) 所示。此时单元 18900 就没有出现拉应力状态。这表明拉应力的形成与追赶卸载密切相关的。这两种不同加载条件下的泡沫铝层中心各单元压应力最大值随距离变化的曲线如图 13 所示。按式 (4) 拟合得衰减因子分别为 0.329 (A 载荷条件)、0.595 (B 载荷条件)。从图中可以看出:

(1) 在恒值平面波加载条件 (B 条件) 下, 衰减速度较慢, 这反映了仅仅由于泡沫铝本构粘性所造成

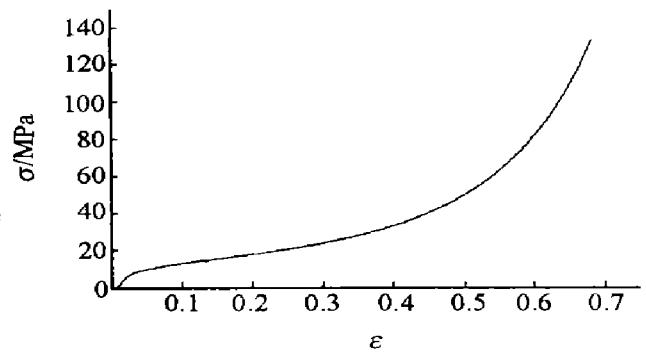


图 11 泡沫铝的应力应变曲线

Fig. 11 Stress versus strain curve of aluminum foams

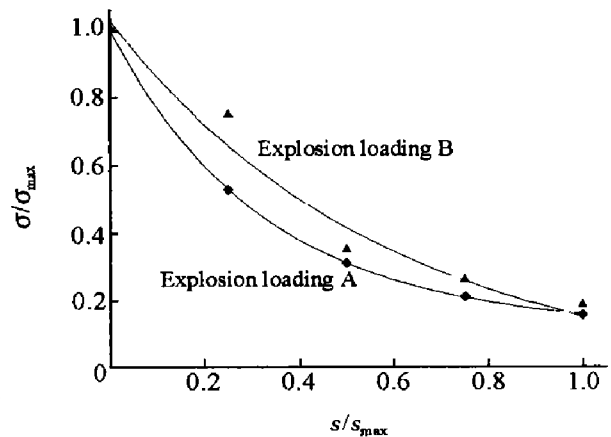


图 13 泡沫铝层中心各单元压应力随距离变化

Fig. 13 Curves of stress versus distance of the central element of Al-foams

的冲击波衰减;

(2)在脉冲平面波加卸载条件(A 条件)下,衰减较快,反映了卸载波追赶卸载所引起的冲击波衰减与泡沫铝本构粘性所致衰减的共同作用。

(3)由计算结果,冲击波在泡沫铝中传播时,随着传播距离增大波头上沿变得越来越缓,这与实验结果观测到的现象是基本一致的(如表 1 所示),尽管他们在具体数值上有较大差别。实验与数值模拟共同揭示的这一现象,主要是因为泡沫铝材料本身具有的耗散特性引起的,也是泡沫铝本构特性在压力波形上的体现。

表 1 上升沿时间随距离变化

Table 1 Change of rise time of shock front versus distance

距离/mm	上升沿时间/ μs		
	A 载荷条件	B 载荷条件	实验条件
0	9.8	14.8	7.1
5	15.1	20.3	
10	23.1	22.2	31.2
15	30.6	30.3	
20	35.4	39.4	44.5

5 结 论

(1)试验结果表明,采用的 PVDF 压电计多点测量法能直接测量出泡沫材料中冲击波压力衰减过程,为实验研究泡沫材料高应变率下的力学性能提供了一种简便而高效的实验方法。

(2)泡沫铝在爆炸荷载下冲击波传播特性实验研究与数值模拟研究的结果共同表明:泡沫铝具有明显的本构粘性效应,这是导致了冲击波传播中吸收和弥散现象的主要因素,而追赶卸载会进一步促进冲击波的衰减。

(3)上述特性为泡沫铝作为新型抗爆吸能和抗冲击缓冲材料提供了分析设计的依据。

参考文献:

- [1] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: Structure and properties[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 203-208.
- [2] Mukai T, Kanahashi H, Miyoshi T, et al. Experimental study of energy absorption in a closed-celled aluminium foam under dynamic loading[J]. Scripta Materialia, 1999, 40(8): 921-927.
- [3] Deshpande V S, Fleck N A. High strain rate compressive behavior of aluminium alloy foams[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24: 277-298.
- [4] Evans A G, Hutchinson J W, Ashby M F. Multifunctionality of cellular metal systems[J]. Progress in Materials Science, 1999, 43: 171-221.
- [5] 王海福, 冯顺山. 爆炸荷载下聚氨酯泡沫材料中冲击波压力特性[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(1): 78-83.
WANG Hai-fu, FENG Shun-shan. Properties of shock pressure caused by explosion loads in polyurethane foam[J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(1): 78-83.
- [6] 席道瑛, 郑永来. PVDF 压电计在动态应力测量中的应用[J]. 爆炸与冲击, 1995, 15(2): 174-179.
XI Dao-ying, ZHENG Yong-lai. Application of PVDF gauges of dynamical stress measurements[J]. Explosion and Shock Waves, 1995, 15(2): 78-83.
- [7] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [8] 美国 ANSYS 公司上海办事处. ANSYS/LS-DYNA 分析指南[Z]. 2000.
- [9] Gama B A, Bogetti T A, Fink B K. Aluminum foam integral armor: A new dimension in armor design[J]. Composite Structures, 2001, 52: 381-395.

Shock attenuation in aluminum foams under explosion loading

WANG Yong-gang^{1*}, HU Shi-sheng², WANG Li-li¹

(1. *Mechanics and Material Science Research Center, Ningbo University,
Ningbo 315211, Zhejiang, China;*

2. *Department of Mechanics and Engineering, University of Science and Technology of China,
Hefei 230026, Anhui, China*)

Abstract: The propagating characters of shock wave in aluminum foams have been studied by means of experimental and numerical methods. The results show an attenuation of shock pressure and an increase of rise time of shock front in aluminum foams. The shock wave attenuation is mainly caused by the constitutive viscosity of aluminum foams. An additional attenuation is caused by the unloading wave. The results obtained could be used as a design basis when aluminum foams are chosen as protective buffer materials.

Key words: solid mechanics; shock attenuation; PVDF gauge; aluminum foams; explosion loading

* Corresponding author: WANG Yong-gang

E-mail address: wyg76612@163.com