文章编号：1000-5773(2005)01-0059-07

多层介质对应力波传播特性影响分析*

董永香[1]，黄晨光[2]，段祝平[1]

（1. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室，北京 100080；
2. 中国科学院力学研究所，北京 100080）

摘要：通过在气炮上进行多层介质的低速冲击实验及相应的数值计算，分析了不同组成的多层介质对应力波传播特性的影响。结果表明：多层介质中的泡沫材料不仅能够改变应力波的幅值与作用时间，而且具有显著的吸能效果，引起应力波在传播过程中在各层介质中能量与动量分配的改变。通过对泡沫铝和泡沫混凝土两种软材料在多层介质中作用的比较表明，在低速冲击的实验条件下，含泡沫混凝土的多层介质具有较好的削波作用，含泡沫铝的多层介质具有较好的吸能性能。

关键词：应力波传播；数值计算；多层介质；泡沫材料
中图分类号：O347.4 **文献标识码**：A

1 引 言

多层介质无论在军事应用还是在国民经济中，都发挥着越来越重要的作用：如国防领域中抗弹丸侵彻的多层靶，坦克上的多层防护装甲，以及防护工事中的抗爆多层组合结构；在民用方面包括用于车辆防护，特别是燃油箱及燃油管路的安全防护装置，以及航空防护中的抗冲击吸能装置的应用。多层组合介质作为吸能减压装置已有近几十年的应用，国内外对多层介质的性能从不同角度进行了分析研究，如Guruprasad等人[1]提出了一种新型的吸能装置，在爆炸载荷作用下对其性能进行了分析讨论；Holmquist等人[2]在进行材料本构模型的研究中，对子弹侵彻多层介质的问题进行了分析，主要考虑了多层介质靶的损伤破坏对侵彻的影响；Gupta与Ding[3]借助于数值模拟对冲击波在多层介质中的衰减性能进行表征，提出了探索性的判定方法；较多的文献对三明治夹心结构进行了研究，如Skvortsov等人[4]在冲击速度大于弹道极限下，对三明治板的能量分配进行了分析研究，文献[5]分析了夹心为泡沫铝的三明治梁的变形与失效机制，文献[6]提出了一种测量泡沫铝夹心板的剪切模量的方法。由于应力波在多层介质中的传播问题存在载荷与介质的耦合，以及多层组合介质自身较复杂的边值条件等难点，仍有诸多待解决的问题，特别对于泡沫材料在冲击载荷作用下的动态响应，文献[7]指出了应力波通过泡沫材料时，动量与能量下降，但应力波幅值存在增强的可能性。

应力波在多层介质中的传播研究，作为多层介质应用于国防和民用工程的基础，弄清应力波在多层介质中的传播规律具有重要的实践意义。本工作采用气炮实验装置，分析了在低速冲击载荷作用下，多层组合介质对应力波传播特性的影响，特别是对不同组成的多层介质对应力波的传播影响进行了对比。同时通过数值计算，对应力波在多层介质中波幅的变化、作用时间的改变以及能量分配进行了分析。

* **收稿日期**：2003-10-08；**修回日期**：2004-07-03
作者简介：董永香(1973—)，女，博士，主要从事爆炸与冲击动力学研究.
E-mail：dongyongx@bit.edu.cn

2 实验装置

图 1 是口径为∅37 mm 的气炮实验装置。通过子弹冲击输入杆，分析在低速冲击载荷下，应力波在多层组合介质中的传播，比较不同组成的多层介质对应力波传播特性的影响，以及软材料在多层介质中的吸能作用。实验通过激光测速仪确定子弹速度，采用辽宁锦州佳信高新电子材料有限责任公司生产的压力式压电传感器(PVDF)，记录当地压力随时间的变化。测量时 PVDF 经过电荷放大器连接到数据采集仪(型号为 CS20000)，对信号进行采集记录。测量系统及试样在气炮装置上的放置如图 2 与图 3 所示。

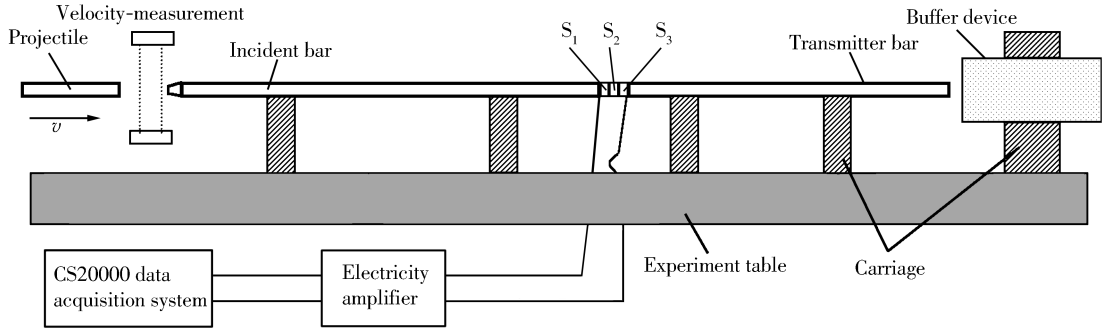


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental arrangement



图 2 测量系统

Fig. 2 System of measurement

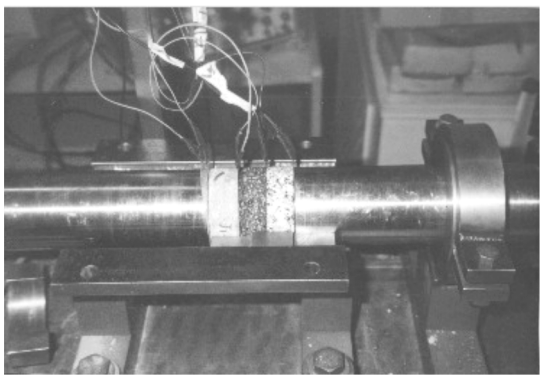


图 3 位于气炮装置上的试样

Fig. 3 Diagram of samples on gas gun

实验采用的多层介质的试样分别由岩石、钢纤维混凝土(SFRC)、泡沫混凝土与泡沫铝组成。每个试样加工成与输入杆和输出杆等直径的圆柱体，直径为 60 mm(大于粗骨料和材料缺陷的 4～5 倍)。岩石为采自北京房山的花岗岩。钢纤维混凝土强度等级为 CF80，钢纤维含量为 2%的体积率，选用鞍山市宏昌钢纤维厂的剪切螺纹形钢纤维，长为 30 mm，长细比为 50。泡沫铝由东北大学材料加工实验室提供。由于子弹为∅36.5 mm，输入杆与输出杆均为∅60 mm，所以实验中输入杆设计为前端带有变截面的过渡段。

实验时子弹速度约 7.3 m/s，采用如下三组多层介质的组合形式，试样 S_1、S_2、S_3(见图 1)依次为：

组合Ⅰ 花岗岩、花岗岩、钢纤维混凝土，

组合Ⅱ 花岗岩、泡沫铝、钢纤维混凝土，

组合Ⅲ 花岗岩、泡沫砼、钢纤维混凝土。

3　计算模型

数值计算通过模拟不同组成的多层介质在低速冲击下的响应,分析应力波通过多层组合介质的传播特性。根据气炮实验装置,建立的计算模型及尺寸如图 4 所示(单位为 mm)。计算采用 2D 轴对称模型,采用有限元商业软件 DYNA 进行模拟。子弹的轴向速度取值与实验相同,为 7.3 m/s。

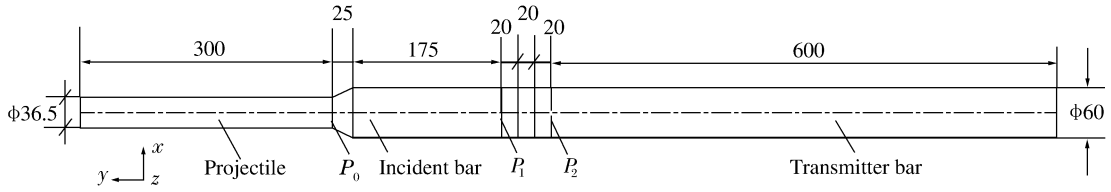


图 4　计算模型尺寸示意图

Fig. 4　Schematic of simulation model

计算中子弹、入射杆和透射杆均采用弹性材料模型。由于是低速碰撞,子弹速度不足以对花岗岩和钢纤维混凝土形成较大的破坏,二者均采用弹塑性模型(材料参数分别来自材料实验和 SHPB 实验)。另外,根据泡沫砼[8]和泡沫铝[9,10]的应力应变关系特点,选用双线性硬化材料模型。Deshpande[11]对泡沫铝的应变率敏感性分析表明,在动态与静态的实验中,弹性阶段与压实阶段并没有较大的变化,只是弹性模量与屈服强度略有提高,静态下强化上升区所达到的应力幅值与变形量较大。结合所做的泡沫材料静态实验结果,可以近似得到低速冲击下泡沫材料的相关参数。各材料的主要参数见表 1,其中 ρ 为密度,E 为杨氏模量,ν 为泊松比,σ_s 为材料屈服强度,E_t 为硬化模量。

表 1　主要材料参数

Table 1　Material parameters used in simulations

Material	ρ/(g/cm^3)	E/(GPa)	ν	σ_s/(MPa)	E_t/(GPa)
Steel	7.80	210.00	0.30	—	—
Granite	2.60	55.00	0.27	117.0	—
SFRC	2.50	40.00	0.29	80.0	—
Foamed aluminum	0.80	3.00	0.21	15.0	1.0
Foamed concrete	0.72	0.27	0.18	6.0	0.2

4　实验与数值计算结果分析

首先对所研究的问题进行简单分析。由于实验中所采用的多层组合介质包含粗骨料的钢纤维混凝土,特定泡孔结构的泡沫材料,考虑到尺度效应,采用了带有变截面过渡段的大直径实验杆。但过渡段与大直径杆均具有明显的二维效应,不符合 SHPB 杆一维应力的假定,并且 SHPB 多用来通过测试输入输出杆的应变信号来分析试样的材料力学行为,因此本工作采用了三组不同的组合介质进行气炮实验。考虑到子弹、输入杆和输出杆等组成的试验装置完全相同,所不同的是实验中放置的组合介质,因而通过对三组介质的实验与数值结果,如应力波通过不同组合介质时的应力幅值、作用时间与能量分配等方面,来分析比较组合介质对应力波传播特性的影响。

为了得到应力波通过各组多层介质的传播特性,将 PVDF 膜置于如图 4 所示的 P_1 和 P_2 位置。图 5(a1)、图 5(b1)和图 5(c1)为实验测得的应力曲线,分别对应于多层介质的组合Ⅰ、组合Ⅱ和组合Ⅲ,图 5(a2)、图 5(b2)和图 5(c2)为数值计算输出的与实验相对应的应力曲线(数值计算中 P_1 和 P_2 处的应力值以轴线上单元的应力 σ_y 近似代替)。

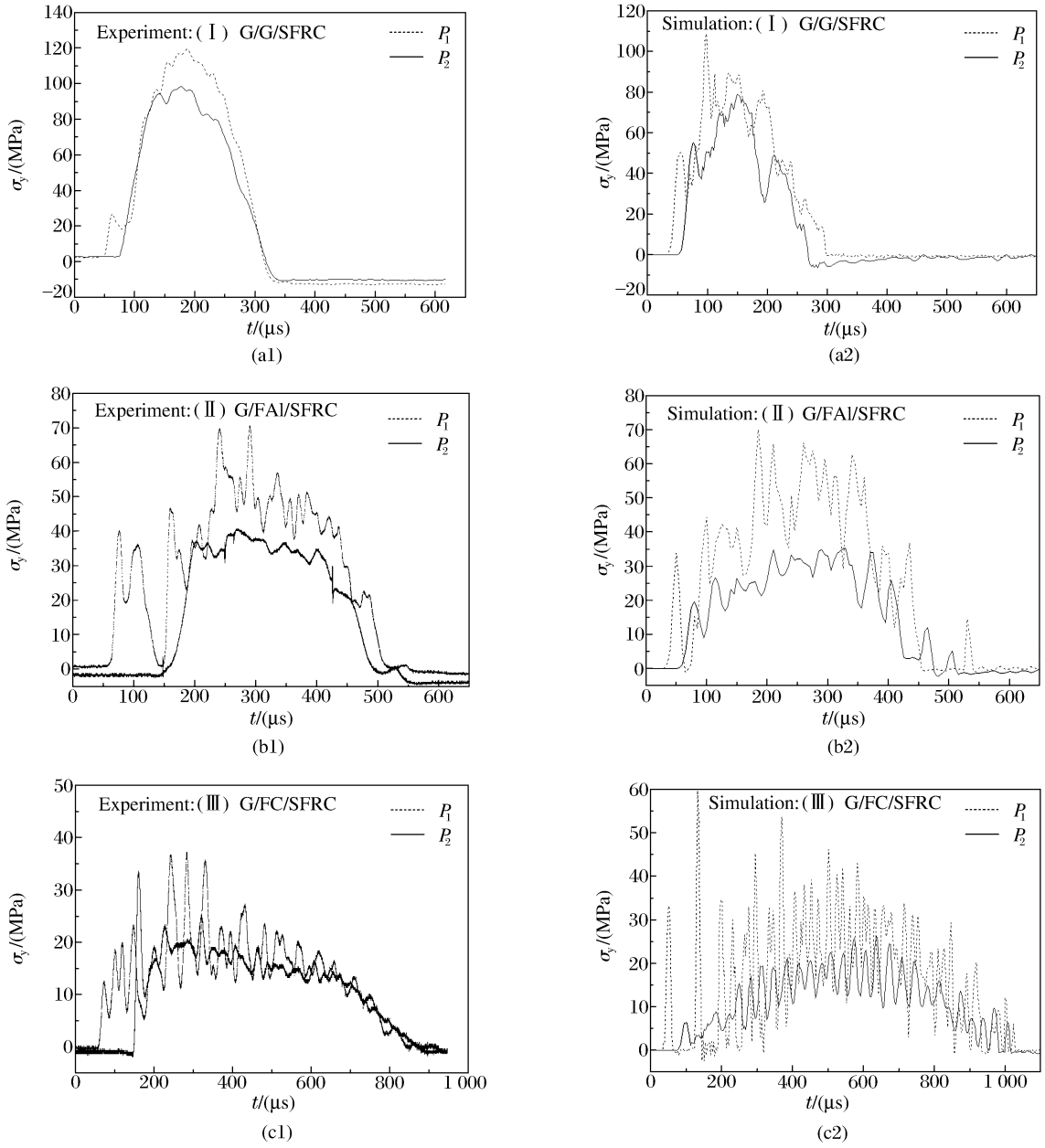


图 5 实验与仿真结果曲线对比图

Fig. 5 Comparison between experimental and computational curves of different multi-layer media

由图5中组合Ⅰ的实验与数值仿真结果看，当组成多层介质的材料均为较硬的花岗岩和 SFRC 时，在相同的子弹速度下，应力波幅由输入杆与子弹接触位置 P_0 点的约 200 MPa(见图 6)，在 P_1 点下降为约 120 MPa，在 P_2 点下降为约 100 MPa，由此可见通过组合Ⅰ的各层介质后，P_2 点的应力幅值下降为 P_0 点入射波幅的约 1/2，这除了由于入射杆过渡段变截面与入射杆的大直径引起的不可忽略的几何弥散和多层组合介质的几何弥散之外，还包括多层组合介质引起的非线性物质弥散。从图 5 多层介质的实验与仿真结果可以得出，不同的多层介质组

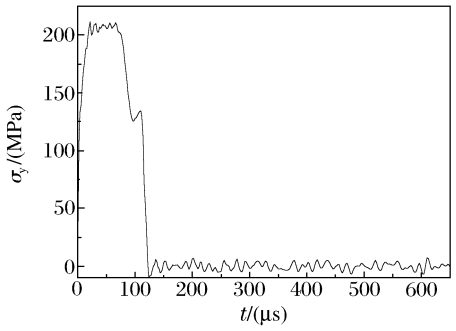


图 6 数值计算的子弹应力波形

Fig. 6 Stress profile of projectile from calculation

合形式在相同的位置得到不同的应力幅值,进一步说明多层介质本身的材料力学行为对应力波的衰减作用,下面将对此作进一步的分析。

从图 5 的不同组成的多层介质实验中可以看出,P_1 点与 P_2 点的应力波幅值相差较小。为了分析处理的方便,且基于三组介质的组合性能分析都是在相同的实验装置上进行的,将带过渡段的入射杆与多层组合介质看作一个整体来分析,每组多层介质的试验中只有试样 S_2 是不同的。下面的动量与能量分析也是将带过渡段的入射杆与组合介质一同分析考虑的。

如图 5 中(b1)、(b2)、(c1)、(c2)所示,当多层介质的组成为硬-软-硬的三明治结构,即夹层为泡沫铝或泡沫砼软材料时,应力波在 P_1 和 P_2 处的应力幅值降低,分别下降到 P_0 点幅值的约 1/5 和 1/10。由此可以看出,含软材料泡沫铝和泡沫砼的组合Ⅱ与组合Ⅲ的多层介质,波幅下降要大于组合Ⅰ,并且含泡沫砼的组合Ⅲ要比含泡沫铝的组合Ⅱ具有较大的波幅下降。从 P_1 和 P_2 应力波的时间历程来看,应力波作用时间由大到小依次为组合Ⅲ、组合Ⅱ、组合Ⅰ,而应力波与作用时间直接影响系统内动量、能量的分配,下面将对该问题作进一步讨论。由此看出,软材料在多层介质中改变了整个结构的受载情况,包括应力波幅值与作用时间。

由图 5 可以看出,无论是实验测试曲线还是计算所得曲线,应力波在介质中传播时,波形都存在振荡现象,这一方面是由大直径杆的二维效应引起的;另一方面是由于每个试样厚度仅为 20 mm,应力波在传播过程中,在多层介质界面上要进行多次反射和透射,直到每层介质应力均匀为止。因此振荡中起伏的周期与所在介质的波速与厚度相关,而每一点处应力的作用时间除与各介质的力学性能、介质厚度和相邻介质的波阻抗匹配特性相关外,还与入射波的波长有关。

在本研究中入射波的波长相同,各介质厚度相同。下面仅就不同组成的多层介质波阻抗匹配特性对作用时间的影响进行分析。参考应力波垂直入射(见图 7)时的反射与透射系数

$$R_{ij}=\frac{(\rho C)_j-(\rho C)_i}{(\rho C)_j+(\rho C)_i} \tag{1}$$

$$T_{ij}=\frac{2(\rho C)_j}{(\rho C)_j+(\rho C)_i} \tag{2}$$

对于波阻抗不匹配程度较大的组合介质,由图 8 可以看出,一种情况是反射系数小,透射系数大;另一种情况是透射系数小,反射系数大。无论哪种情况,都会造成相邻介质之间在达到平衡前需要进行多次的反射和透射。这说明介质越不匹配,在多层介质中的反射和透射次数越多。如组合Ⅲ泡沫砼与岩石比组合Ⅱ中泡沫铝与岩石的波阻抗不匹配程度大,所以在多层介质达到与周围介质应力平衡时,反射和透射次数多,需要的时间长,而组合Ⅰ中为材料较硬(波阻抗大)的岩石与 SFRC,二者之间不匹配程度小,从而反射和透射次数少、达到应力平衡所需的时间短。根据实验采用子弹的长度,可以推算出脉宽约为 120 μs(与数值结果一致,见图 6),组合Ⅰ中 P_1 和 P_2 点的作用时间约为 250 μs,相当于子弹产生的应力波对多层介质的一次加卸载过程,为入射波脉宽的两倍,而含有泡沫铝组合Ⅱ的作用时间约为组合Ⅰ的两倍,含有泡沫砼组合Ⅲ的作用时间约为组合Ⅰ的 3 倍。不同介质具有不同的弹性波速(当载荷超过材料的弹性极限时,其波速将不再是弹性波速),因而应力波通过相同厚度的介质时所需的时间不同。

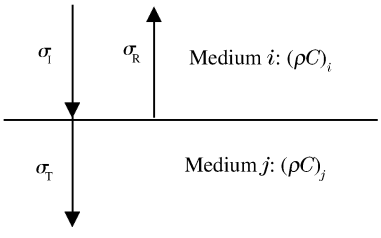


图 7　界面处波的反射和透射示意图

Fig. 7　Schematic of reflection and transmission of waves on boundary condition

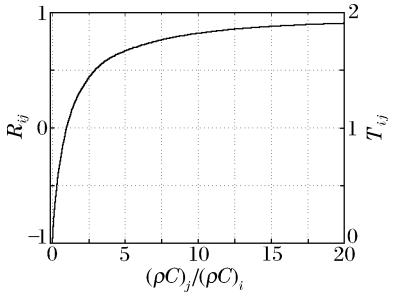


图 8　垂直入射时反射率与透射率随阻抗比的变化

Fig. 8　Reflection and transmission ratios versus impedance ratio at normal incidence

图 9 为数值仿真结果中输出杆的总能量 E_{out} 与子弹动能 E_{in} 之比随时间的变化曲线。不同组合的多层介质导致不同的吸能效果。从能量吸收的角度看，在低速情况下，含泡沫铝组合Ⅱ的吸能性能最好，其次是含泡沫砼的组合Ⅲ，吸能最少的是不含泡沫材料的组合Ⅰ。由于输出杆是弹性杆，所以对于不同组合的多层介质，输出杆的动量与能量在变化趋势与排序大小次序上是相同的。

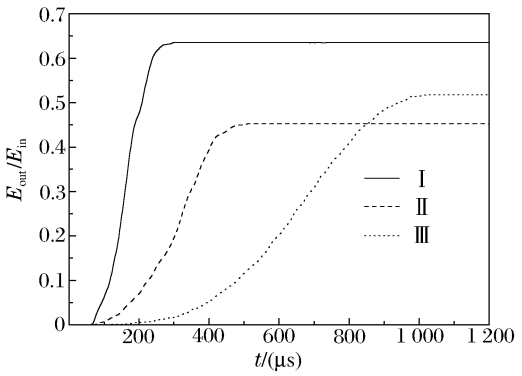


图 9 不同组合的多层介质输出能量对比图

Fig. 9 Comparison among the output energy of the different multi-media

综合上述分析，从多层介质对应力波幅值的衰减看，衰减效果的优劣依次为含泡沫砼的组合Ⅲ、含泡沫铝的组合Ⅱ、花岗岩与 SFRC 的组合Ⅰ。从应力波对多层介质的作用时间看，达到应力平衡所需时间值的大小排列仍为：组合Ⅲ、组合Ⅱ、组合Ⅰ；从多层介质吸能的角度来看，各组合吸能多少依次为组合Ⅱ、组合Ⅲ、组合Ⅰ。由此可见，在工程中选用什么样的多层介质组合，需要根据工程结构的特点和防护要求来选择，为了较大地削减应力峰值，要选用能够最大幅度衰减应力波的材料组合，为了减少传给被防护结构的动量与能量，则选用具有较好吸能性能的多层介质组合。

从图 5 可以看出，计算曲线与实验曲线的变化趋势基本一致。

5 结 论

通过在∅37 mm 气炮上的低速冲击实验，结合数值模拟，对不同组成的多层介质对应力波传播特性的影响进行了分析讨论，主要结论如下：

(1) 在低速冲击下，泡沫材料在多层介质中对应力波的传播特性具有较大的影响。当入射波通过时，波幅削减、作用时间增长，并且吸能增加。泡沫材料改变了整个多层介质的受载情况；

(2) 在本研究条件下，泡沫铝与泡沫砼在多层介质中对应力波的传播特性影响不同。二者相比，含有泡沫砼的多层介质使应力波波幅下降更大，作用时间更长，但含有泡沫铝的多层介质吸能较多；

(3) 波的作用时间除了与组成多层介质的各介质相关外，还与介质厚度、组合介质的波阻抗匹配特性和入射波的波长有关。并进一步验证了作用时间与波幅均是影响多层介质吸能效果的关键要素。

References:

[1] Guruprasad S, Abhijit M. Layered Sacrificial Claddings under Blast Loading Part Ⅰ—Analytical Studies [J]. Int J Impact Eng, 2000, 24: 957－973.

[2] Holmquist T J, Templeton D W, Bishnoi K D. Constitutive Modeling of Aluminum Nitride for Large Strain, High-Strain Rate, and High-Pressure Applications [J]. Int J Impact Eng, 2001, 25: 211－231.

[3] Gupta Y M, Ding J L. Impact Load Spreading in Layered Materials and Structures: Concept and Quantitative Measure [J]. Int J Impact Eng, 2002, 27: 277－291.

[4] Skvortsov V, Kepler J, Bozhevolnaya E. Energy Partition for Ballistic Penetration of Sandwich Panels [J]. Int J Impact Eng, 2003, 28: 697－716.

[5] Yu J L, Wang X, Wei Z G, et al. Deformation and Failure Mechanism of Dynamically Loaded Sandwich Beams with Aluminum-Foam Core [J]. Int J Impact Eng, 2003, 28: 331－347.

[6] Wada A, Kawasaki T, Minoda Y, et al. A Method to Measure Shearing Modulus of the Foamed Core for Sandwich Plates [J]. Composite Structures, 2003, 60: 385－390.

[7] Li Q M, Meng H. Attenuation or Enhancement—A One-Dimensional Analysis on Shock Transmission in the Solid Phase of a Cellular Material [J]. Int J Impact Eng, 2002(27), 1049－1065.

[8] Kearsleya E P, Wainwright P J. The Effect of Porosity on the Strength of Foamed Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32: 233－239.

[9] Santosa S P, Wierzbicki T, Hanssen A H, et al. Experimental and Numerical Studies of Foam-Filled Sections [J]. Int J Impact Eng, 2000, 24: 509－534.

[10] Pan Y, Hu S S, Wei Z G. Experimental Study on Dynamic Behavior of Foamed Aluminum [J]. Materials Science & Engineering, 2002, 20(3): 341－343. (in Chinese)
潘　艺, 胡时胜, 魏志刚. 泡沫铝动态力学性能的实验研究 [J]. 材料科学与工程, 2002, 20(3): 341－343.

[11] Deshpande V S, Fleck N A. High Strain Rate Compressive Behaviour of Aluminium Alloy Foams [J]. Int J Impact Eng, 2000, 24: 277－298.

Analysis on the Influence of Multi-Layered Media on Stress Wave Propagation

DONG Yong-Xiang[1], HUANG Chen-Guang[2], DUAN Zhu-Ping[1]

(1. *State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing* 100080, *China*;
2. *Institute of Mechanics, CAS, Beijing* 100080, *China*)

Abstract: The influence of multi-layered media on stress wave propagation characteristics has been analysed by the low velocity impact experiments and the corresponding numerical simulation. It shows that the wave amplitude and the actuation time are both affected by foamed materials in the layered media, and the energy absorption of multi-layered media with the foamed materials is obvious. As a result, the energy and momentum of different layer are changed when stress wave propagates in the layered media. Comparing the media including foamed aluminium with the media including foamed concrete, it has been shown that foamed concrete can lead to the lower wave amplitude, but foamed aluminium can absorb the more energy than that of foamed concrete under the condition of low velocity impacts.

Key words: propagation of stress wave; numerical simulation; multi-layered media; foamed material