

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.05.004

# 应力波在泡沫铝夹层三明治板中传播规律的数值研究\*

胡亚峰 顾文彬 刘建青 王怀奎 黄 鹤 徐景林

中国人民解放军理工大学(江苏南京,210007)

[摘 要] 根据 Gibson 理论模型确定出泡沫铝的力学参数,设计出不同密度组合的 5 种数值计算模型,利用非线性动力学程序 LS-DYNA 研究了爆炸载荷作用下,应力波在泡沫铝夹层三明治板中的传播规律。对其缓冲吸能、衰减应力波特性进行对比分析。研究表明:由 Gibson 理论模型确定出的泡沫铝力学参数,在 Crushable\_Foam 本构模型中能够较好地反映应力波在不同介质界面间的反射与透射情况,与弹性波理论吻合度较高。在总体密度相同的情况下,H-M-S 梯度结构对爆炸冲击波具有更好的缓冲效果。其对应力波的持续削弱能力和爆炸冲击能量的持续吸收能力都要强于其他结构。

[关键词] 应力波;泡沫铝;数值模拟

[分类号] O383+.2

## 引言

在工程防护领域,为了有效应对爆炸冲击下的高强度高应变率载荷,越来越多的防护目标已经由原来的单一材料、单层结构发展为由不同密度、不同波阻抗介质组成的复合结构,多为“硬-软-硬”三明治结构,而泡沫铝正是夹层材料的绝佳选择。泡沫铝是一种具有众多优异物理和力学特性的多孔材料,它以铝或铝合金为基体,包含大量孔洞,具有质量轻和比强度高的特点,作为功能材料,具备隔音、吸声、散热、阻燃、吸收冲击能量和电磁屏蔽等多种物理性能。其作为结构防护材料,通常要与传统的致密金属复合使用,这样才能实现在高强度载荷下的最佳力学性能。

泡沫铝准静态的力学特性已得到国内外专家的广泛关注<sup>[1-2]</sup>,其动态特性的研究多是采用 Hopkinson 压杆撞击试验<sup>[3-4]</sup>。但在更高应变率的爆炸载荷作用下,有关应力波在泡沫铝夹层三明治板中传播规律的研究还比较少,尤其是泡沫铝在高应变率下的动态力学参数很难准确测得。本文主要根据 Gibson 提出的预测泡沫金属弹性模量的平方函数模型<sup>[5]</sup>,确定出 3 种泡沫铝材料的整套力学参数,并将其应用在 Crushable\_Foam 本构模型中,利用非线性动力分析软件 ANSYS/LS-DYNA,对泡沫铝夹层三明治板在爆炸载荷作用下的动态响应及应力波传播

规律进行数值模拟研究。同时结合应力波理论分析了不同密度梯度三明治结构的缓冲吸能特点。

## 1 计算模型的建立

本文主要研究爆炸冲击波加载下的三明治板响应,因此设置非接触爆炸,如图 1 所示:三明治板为正方形,边长 25 cm。棕色部分为上层钢板,红色部分为下层钢板,黄绿蓝部分为泡沫铝夹层。上下钢板厚度均为 1 cm,每层泡沫铝厚度为 2 cm,500 g TNT 柱形装药在距离上层钢板 20 cm 处爆炸。在非对称界面处设置透射边界。下层钢板两端伸出 2 cm,设置固定支撑约束。

根据对称简化原则,使用 Turegrid 软件建立 1/4

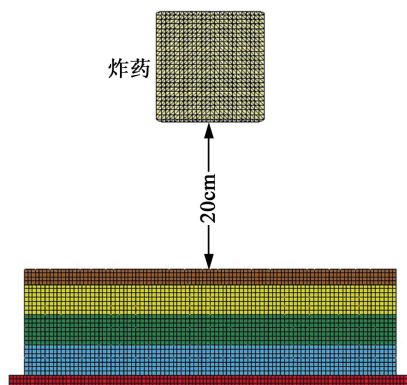


图 1 三维有限元模型示意图

Fig. 1 Sketch of 3D finite element analysis

\* 收稿日期:2014-03-03

作者简介:胡亚峰(1988~),男,硕士,主要从事火炮、自动武器与弹药工程的研究。E-mail:827734300@qq.com

通信作者:顾文彬(1961~),男,博导,主要从事火炮、自动武器与弹药工程的研究。

三维数值模型。拉格朗日网格边长为 2.5 mm,欧拉网格边长为 3.0 mm。利用 LS-DYNA 程序模拟。炸药和空气均采用 ALE 算法,编为一个 ALE 多物质组;三明治板采用 Langrange 算法;在三明治板和 ALE 多物质组之间应用流固耦合。钢板和泡沫铝采用自动面接触,定义动态摩擦系数、黏性阻尼系数(避免接触震荡)。另外软硬材料接触必须选择合适的接触刚度,因此调用基于段(Segment based)的接触算法,可有效避免贯穿。

## 2 材料模型参数

### 2.1 炸药材料模型及参数

炸药 TNT 的物化性质由 Mat\_High\_Explosive\_Burn 材料模型<sup>[6]</sup>和 JWL 状态方程<sup>[7]</sup>描述。材料参数见表 1。

表 1 TNT 炸药材料参数<sup>[8]</sup>

Tab. 1 Material parameters of TNT

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$D/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$p_{\text{CJ}}/\text{GPa}$	$A/\text{GPa}$
1.63	6.93	27	371
$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$
7.43	4.15	0.95	0.3
$E_0/\text{MJ}$			
0.0101			

### 2.2 钢板材料模型及参数

上下钢板均为 16 MnR 合金钢板材,数值模拟中采用 Plastic\_Kinematic 模型,随动硬化系数  $\beta = 1$ 。该模型包含了考虑弹塑性特性、材料的强化效应以及应变率变化效应,其方程为:

$$\sigma_y = \left[ 1 + \left( \frac{\bar{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_s + \beta E_p \varepsilon_p). \quad (1)$$

式中:  $\sigma_y$  为屈服强度;  $\bar{\varepsilon}$  为加载应变率;  $C$ 、 $P$  为材料应变率相关常数;  $\varepsilon_p$  为有效塑性应变;  $\beta$  为随动硬化系数;  $\sigma_s$  为材料初始屈服强度;  $E_p$  为塑性硬化模量。材料参数见表 2,  $E$  为弹性模量;  $f_s$  为失效应变。

表 2 钢板材料参数<sup>[9]</sup>

Tab. 2 Material parameters of steel plate

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E/\text{GPa}$	$\lambda$	$\sigma_s/\text{GPa}$	$C$	$P$	$\beta$	$f_s$
7850	210	0.3	0.4	40.4	5	1	0.25

### 2.3 空气材料模型及参数

计算模型中空气采用 LS-DYNA 所给出的空物质材料本构模型 Mat\_Null,状态方程形式如下:

$$p = (C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3) + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E_0. \quad (2)$$

式中:  $p$  为压力;空气密度  $\rho_0 = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ;  $C_0$ ,  $C_1$ , ...,  $C_6$  为常数;  $\mu$  为体积应变参数,  $\mu = 1/(V_0 -$

1),其中  $V_0$  为相对体积;  $E_0$  为初始能量。

### 2.4 泡沫铝材料模型及参数

泡沫铝材料采用 \*Mat\_Crushable\_Foam 本构模型,并根据平方函数模型<sup>[5]</sup>,对泡沫铝材料的弹性模量和应力平台进行计算。公式为:

$$E^*/E_s = C_1 \Phi^2 (\rho^*/\rho_s)^2 + C_1^* (1 - \Phi) (\rho^*/\rho_s). \quad (3)$$

式中:  $E^*$ 、 $\rho^*$  为泡沫金属的弹性模量和密度;  $E_s$ 、 $\rho_s$  为基体材料的弹性模量和密度;由实验确定  $C_1 = 1$ ,  $C_1^* = 3/8$ <sup>[5]</sup>;  $\Phi$  是胞体边中基体材料所占的体积分数,对于开孔泡沫金属材料,胞体只有边没有壁,取  $\Phi = 1$ ;对于闭孔泡沫金属材料,其取值可以根据胞体的微观结构来确定。

泡沫铝的应力平台主要通过式(4)确定:

$$\sigma_{\text{pl}}^*/\sigma_{ys} = C_2 \Phi^{2/3} (\rho^*/\rho_s)^{2/3} + C_2^* (1 - \Phi) (\rho^*/\rho_s). \quad (4)$$

式中:  $\sigma_{\text{pl}}^*$  为泡沫金属的应力平台;  $\sigma_{ys}$  为基体材料的屈服强度;  $C_2$ 、 $C_2^*$  由实验得出,  $C_2 \approx 0.3$ ,  $C_2^* \approx 1$ 。由于 Crushable\_Foam 本构模型没有考虑应变率效应,而实际泡沫铝在动态高应变加载下的应力平台会有明显提升<sup>[10]</sup>,根据以上理论并考虑应变率效应,推算出 3 种孔隙率的泡沫铝材料参数(表 3),其中,  $E$  为弹性模量;  $C$  为泡沫铝中的声速,  $\text{m/s}$ 。泊松比均取  $\nu = 0.3$ ,阻尼系数为 0.1。

表 3 泡沫铝参数

Tab. 3 Parameters of aluminum foam

编号	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\rho^* \cdot \rho_s^{-1}/\%$	$\Phi$	$E/\text{GPa}$	$\sigma_{\text{pl}}/\text{MPa}$	$\rho c \times 10^{-5}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$
1 <sup>#</sup>	210	92.2	0.55	1.05	3~5	4.76
2 <sup>#</sup>	330	87.8	0.50	1.86	6~8	7.83
3 <sup>#</sup>	420	84.4	0.45	2.59	9~11	10.40

## 3 计算结果和分析

### 3.1 泡沫铝中应力波传播情况分析

由于介质不同的力学特性以及应力波的相互作用,应力波在多层介质中的传播比较复杂。在碰撞或爆炸的冲击波峰值压力  $p \leq 100 \text{ MPa}$  时,用弹性波理论分析物体在冲击载荷作用下所形成的应力波的反射和透射问题,方法简单而且非常有效<sup>[11]</sup>。可以推导出界面透射应力与反射应力的计算公式:

$$\sigma_r = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \sigma_i; \quad (5)$$

$$\sigma_t = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \sigma_i = (1 + \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}) \sigma_i. \quad (6)$$

式(5)、式(6)中: $\sigma_i$  为入射波应力; $\sigma_r$  为反射波应力; $\sigma_t$  为透射波应力; $\rho_1 c_1$  为入射介质波阻抗; $\rho_2 c_2$  为透射介质波阻抗。可以看出:当  $\rho_1 c_1 > \rho_2 c_2$  时,进入钢板中的应力波只是入射波应力  $\sigma_i$  的一部分,且当  $\rho_1 c_1$  愈大时, $\sigma_i$  愈小。

图 2 为爆炸载荷作用下的应力波在泡沫铝介质中的传播过程。当  $t = 50 \mu\text{s}$  时,应力波通过钢板透射到泡沫铝介质中;当  $t = 160 \mu\text{s}$  时,应力波进入到第二层泡沫铝板中,其波阵面清晰可辨;当  $t = 230 \mu\text{s}$  时,应力波进入到第三层泡沫铝板中,其波阵面已经比较模糊。说明泡沫铝板对应力波峰值的削弱作用十分明显。泡沫铝在高应变率爆炸载荷作用下逐层压缩,其主要是以弹塑性波的形式传播。

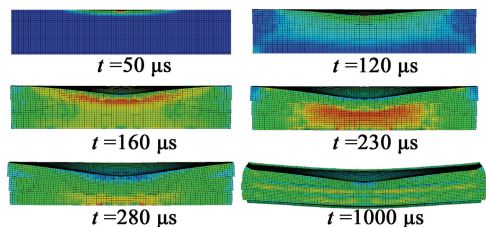
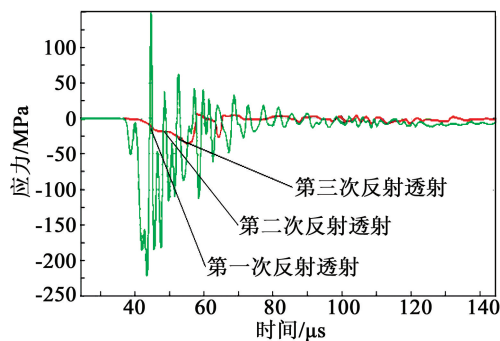


图 2 泡沫铝中应力波传播情况

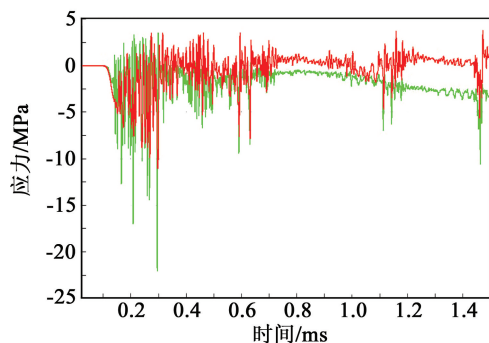
Fig. 2 Propagation of stress wave in aluminum foam

以孔隙率为 87.8% 的泡沫铝结构为例,定义 A 界面为上层钢板与泡沫铝板的接触面,B 界面为泡沫铝板之间的接触面,C 界面为下层钢板与泡沫铝板的接触面。图 3 显示了应力波在 A 界面和 C 界面的反射、透射情况,其中绿色为钢板应力时程(反射)曲线,红色为泡沫铝应力时程(透射)曲线。

如图 3(a)所示:A 界面首次入射的应力峰值为 220 MPa,可以看到一个明显的反射拉伸应力,而透射到泡沫铝介质中的应力为 9 MPa。入射应力是透射应力的 24.4 倍。根据表 3 给出的数据,泡沫铝板初始波阻抗为  $7.83 \times 10^5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,钢板的波阻抗为  $3.94 \times 10^7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ <sup>[11]</sup>,由上文提到的弹性波理论,得到入射应力是透射应力 25.6 倍,这与数值计算结果比较吻合。钢板中首次反射的拉伸应力在自由端面处反射为压应力,再次在 A 界面发生透射与反射,此时入射应力下降到 180 MPa,而透射应力却提升到 17.5 MPa。这是由于泡沫铝经过压缩之后的密度和弹性模量都有所提升,从而导致波阻抗明显增强,根据弹性波理论将有更多的入射应力透射到泡沫铝介质中。随后 A 界面发生了多次反射与透射,泡沫铝逐渐被压实,透射应力和入射应力的差距逐渐缩小。应力波在 C 界面反射和透射也符合弹性波理论。经计算应力波从泡沫铝介质透射到钢板中应力会增强 1.96 倍,如图 3(b)所示,钢板



(a) A 界面



(b) C 界面

图 3 应力波的反射和透射

Fig. 3 Reflection and transmission of stress wave

中的应力基本上是泡沫铝应力的两倍左右。

应力波在泡沫铝介质内部的传播和衰减情况如图 4 所示:单元 E、D、C、B、A 为炸药垂直三明治板方向上,泡沫铝夹层自上向下每隔 1 cm 依次所取的观测点。从图中可以看到应力峰值随着传播距离的增加出现了明显的衰减,其规律近似符合指数衰减。

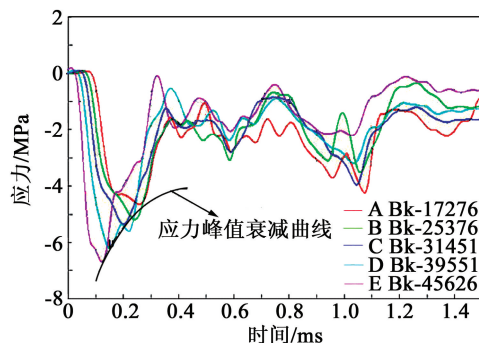


图 4 各观测点 z 方向的应力时程曲线

Fig. 4 Time history curves of z-stress for all observation points

分析表明:本文所采用的泡沫铝本构模型、材料参数都是可信的。可以比较可靠地对爆炸冲击波加载下的三明治板动态响应进行仿真计算。

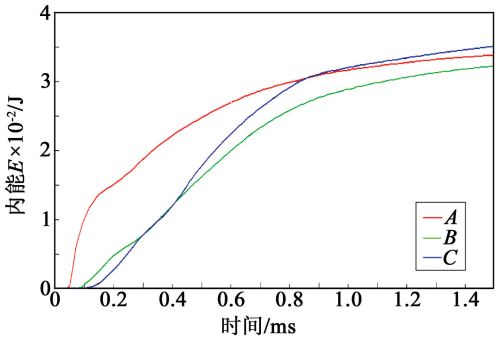
### 3.2 密度梯度结构抗爆性能分析

梯度功能材料 (functionally gradient materials)<sup>[12]</sup>中,密度梯度多孔材料的理论及实验研究目前还很少。本文对 3 种不同密度的泡沫铝板进行

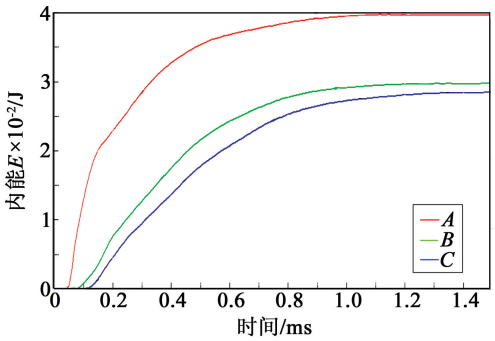


不同密度梯度组合,分别设计了“3 软(3S)”、“3 中(3M)”、“3 硬(3H)”、“软-中-硬(S-M-H)”、“硬-中-软(H-M-S)”5 种数值计算模型。对它们的吸能情况和冲击波衰减情况进行对比分析。

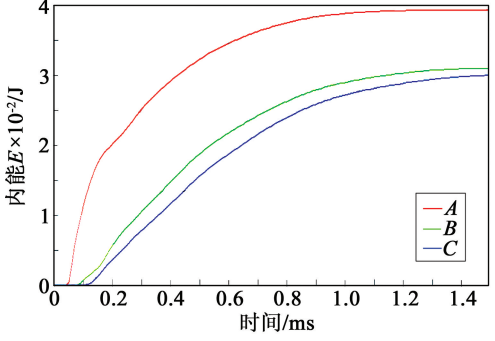
图 5 所示为 5 种结构泡沫铝吸能情况,由于计算采用的是 1/4 模型,所以纵坐标显示的能量仅是泡沫铝吸收能量的 1/4,A、B、C 3 条曲线分别为上、中、下 3 层泡沫铝的吸能时程曲线。5 种不同的组合结构呈现出不同的吸能特点:3S 结构的 3 层泡沫铝吸能比较均衡;3M 和 3H 结构上层泡沫铝吸能比较充分,而下面两层吸能效率较低;S-M-H 结构中,上层低密度泡沫铝压缩很明显,吸能也很充分,但后面两层的压缩量及吸能效率显著下降;H-M-S 结构中,上层高密度泡沫铝压缩量和吸能效率较 S-M-H 有所下降,但由于应力平台较高、质点动能较大,后面两层泡沫铝可以继续压缩吸能,最终下层泡沫铝



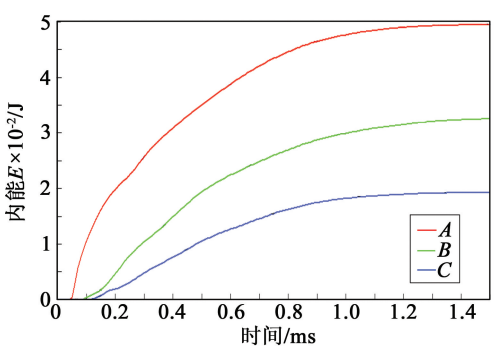
(a)3S



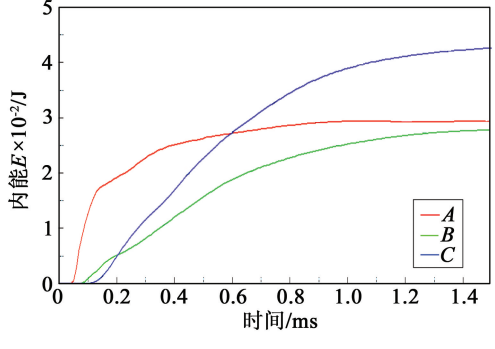
(b)3M



(c)3H



(d)S-M-H



(e)H-M-S

图 5 5 种结构泡沫铝吸能时程曲线  
Fig. 5 Time history curves of energy absorption for five aluminum foam with different structures

的吸能效率最高,总体压缩量比较均衡。泡沫铝的塑性形变是吸能的主要原因,弹性变形吸收的能量极其微小,因此维持泡沫铝夹层结构中塑性波的连续传播可以实现吸能最大化。3M、3H 和 S-M-H 结构中,后面两层泡沫铝由于密度高、阻抗大,很难维持塑性波的连续传播,导致吸能效率显著下降。从 5 种结构泡沫铝吸能情况(表 4)可以看出,密度和阻抗均最高的 3H 组合吸能最少,密度递减组合 H-M-S 结构吸能最多,在总体质量较 3H 组合下降 23.8% 的情况下,吸能量较 3H 组合提升了 4.14%。

表 4 5 种结构泡沫铝吸能情况

Tab. 4 Energy absorption of five aluminum foam with different structures

	3S	3M	3H	S-M-H	H-M-S
上层吸能	1403	1568	1584	1978	1210
中层吸能	1351	1240	1192	1294	1134
下层吸能	1275	1208	1136	750	1730
总体吸能	4029	4016	3913	4007	4074

所有结构在 1100 μs 之后基本结束吸能过程,如图 6 所示,在 1100 μs 之后,底板几何中心位置等效应变出现明显提升。仅从底板中心位置应变情况



来看,抗爆性能的排序为:3H > 3M > H-M-S > S-M-H > 3S。这个结果说明:泡沫铝板的总体密度越高,抗爆能力越强,其中 3M 结构的总体密度略高于梯度结构。但是在现代装备或防护装甲追求轻质的情况下,梯度结构就显现出了优势。另外不同波阻抗的材料改变排列次序会影响结构后的次生冲击波超压<sup>[12]</sup>。这也是梯度结构的明显优势。

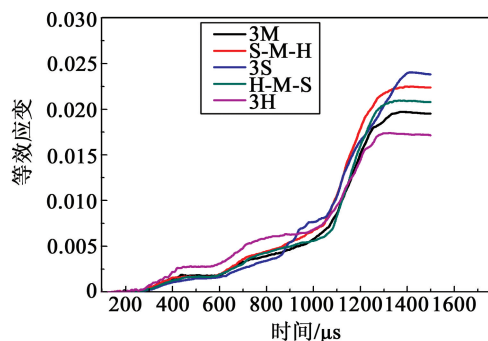
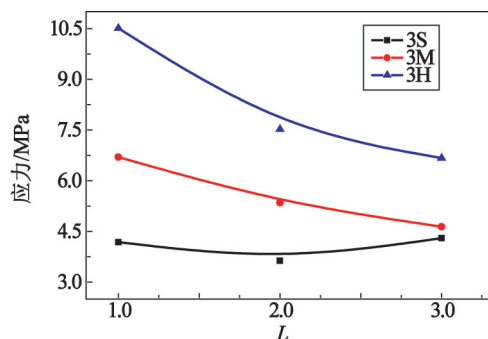


图 6 5 种结构底板几何中心位置等效应变时程曲线

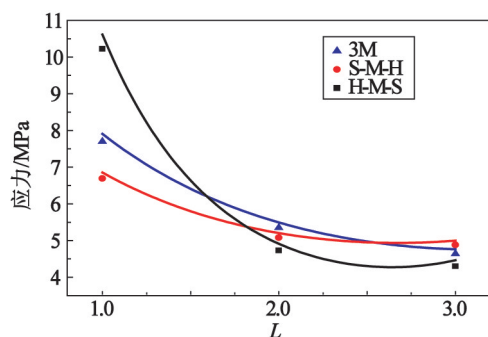
Fig. 6 Time history curves of effective strain in geometric centre of five baseboards with different structures

应力波在钢板和泡沫铝界面的透射可以用弹性波理论计算,但是塑性波在泡沫铝介质中的传播就很难进行理论计算。通过数值计算可以得到一定的规律。在炸药垂直三明治板方向上,选取各个泡沫铝板几何中心点为观测点。图 7(a)所示为应力波在无梯度泡沫铝结构中的衰减情况,横坐标  $L$  表示从上到下的泡沫铝板次序,在低密度的 3S 结构中,应力波基本没有衰减,维持在同一强度。在高密度的 3H 结构中,应力波的初始强度很高,并出现比较明显的衰减。这是因为在 3S 结构中,泡沫铝的应力平台较低,应力波的能量足以维持这种低水平的塑性波传播。而在高密度的 3H 结构中,泡沫铝的应力平台提升了一倍,应力波的能量不足以维持这种高水平、高能耗的塑性波传播,因此出现明显的衰减。但是当应力波衰减到无法达到下层泡沫铝板的应力平台时,下层泡沫铝板的吸能潜力就激发不出来。因此设计梯度泡沫铝结构有利于达到最好的缓冲效果。

图 7(b)中,S-M-H 结构使应力波维持在比较均衡的水平,S 层由于波阻抗较低,透射应力峰值较低,其自身得到充分压缩吸能,但是到达 H 层的应力波已经很难达到 H 层的应力平台,导致其压缩不充分,如图 8(a)。H-M-S 结构使应力波先出现迅速的衰减然后维持在较低水平,经过上层高密度泡沫铝衰减的应力波仍然可以在下层低密度泡沫铝中维持塑性波传播,这种结构 3 层泡沫铝的变形量更



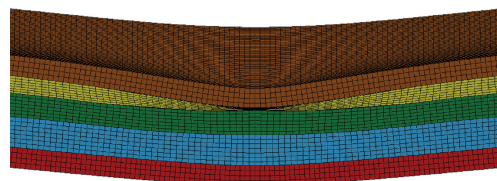
(a) 无梯度泡沫铝中



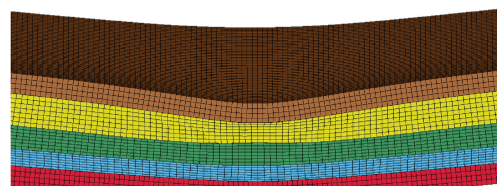
(b) 梯度泡沫铝中

图 7 泡沫铝中应力波衰减情况

Fig. 7 Attenuation of stress wave in aluminum foam



(a) S-M-H



(b) H-M-S

图 8 梯度泡沫铝压缩变形情况

Fig. 8 Compression situations of gradient aluminum foam

加均衡,如图 8(b)。所以 H-M-S 结构对应力波的衰减效果要好于 S-M-H 结构。图 6 所示结构底板几何中心位置等效应变情况也证明:H-M-S 结构的抗爆性能强于 S-M-H 结构。

#### 4 试验验证

图 9 所示为梯度泡沫铝爆炸冲击试验,其中图 9(a)为爆炸前泡沫铝板的细观结构,上层为孔隙率 84.4% 高密度泡沫铝,下面两层为孔隙率 87.8% 的低密度泡沫铝。图 9(b)为爆炸后各部位的压缩变形情况:上层高密度泡沫铝只有 0.4 cm 的表层胞体

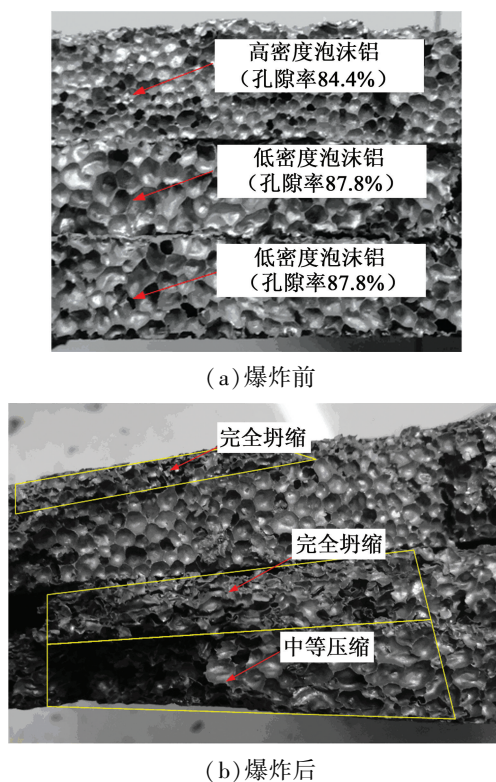


图 9 梯度泡沫铝爆炸冲击试验

Fig. 9 Explosion impact test of gradient aluminum foam

结构被压垮,下面 1.6 cm 的胞体结构没有被压垮。中层低密度泡沫铝的胞体结构基本上都被压垮,压缩变形量达到 50% 以上。下层低密度泡沫铝只有部分胞体被压垮,多数胞体只是产生了较大的变形。上层泡沫铝的压缩情况证明了逐层压缩的推断,但是爆炸冲击能量不足以维持在上层泡沫铝中的塑性波传播;上层和中层的对比说明:在低密度泡沫铝后面使用低密度泡沫铝可以实现塑性波的持续传播,从而实现持续吸能。

## 5 结论

研究了爆炸载荷作用下,应力波在泡沫铝夹层三明治板中的传播规律,得到了弹塑性应力波在不同密度、不同梯度组合泡沫铝介质中的衰减曲线。

1) 根据 Gibson 理论模型确定出的泡沫铝力学参数,在 Crushable\_Foam 本构模型中能够较好地反映应力波在不同介质界面间的反射与投射情况,与理论计算结果吻合度较高。

2) 在总体密度相同的情况下,H-M-S 梯度结构对爆炸冲击波具有更好的缓冲效果,其对应力波的持续削弱能力和爆炸冲击能量的持续吸收能力都要强于 S-M-H 梯度结构。

## 参 考 文 献

[1] Deshpande V S, Fleck N A. Isotropic constitutive models for metallic foams [J]. Journal of the Mechanics and

Physics of solids, 2000, 48(6-7): 1253-1283.

- [2] Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams[J]. Progress in Materials Science, 2001, 46(6): 559-632.
- [3] Zhu F, Wang Z H, Lu G X, et al. Some theoretical considerations on the dynamic response of sandwich structures under impulsive loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(6): 625-637.
- [4] 赵桂平, 卢天键. 多孔金属夹层板在冲击载荷作用下的动态响应[J]. 力学学报, 2008, 40(2): 194-206.  
Zhao Guiping, Lu Tianjian. Dynamic response of cellular metallic sandwich plates under impact loading [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2008, 40(2): 194-206.
- [5] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: structure and properties[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [6] 于文华, 张亚栋. 爆炸冲击波在坑道内传播规律研究[J]. 爆破器材, 2013, 42(3): 1-5.  
Yu Wenhua, Zhang Yadong. Study on propagation laws of explosion shock wave in tunnels [J]. Explosive Materials, 2013, 42(3): 1-5.
- [7] 秦入平, 顾文彬, 王振雄, 等. 不耦合系数对深水岩石钻孔爆破水中冲击波传播特性影响的数值模拟研究[J]. 爆破器材, 2013, 42(3): 11-15.  
Qin Ruping, Gu Wenbin, Wang Zhenxiong, et al. Numerical simulation study on the influence of decoupling on the propagation of shock wave in water for deep-water rock-drilling blasting [J]. Explosive Materials, 2013, 42(3): 11-15.
- [8] 李裕春, 时党勇, 赵远. ANSYS11.0/LS-DYNA 基础理论与工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 235-296.
- [9] 张祖贤, 邢宝定, 汪熹, 等. 兵器黑色金属材料手册[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1990.
- [10] 凤仪, 朱震刚, 潘艺, 等. 泡沫铝的动态力学性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(4): 544-548.  
Feng Yi, Zhu Zhen'gang, Pan Yi, et al. Dynamic mechanical properties of aluminum alloy foams [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(4): 544-548.
- [11] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [12] 田杰. 泡沫铝的冲击波衰减和抗爆震特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.  
Tian Jie. The shock wave attenuation and anti-detonation property of aluminum foam [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006.

- Lu Liming. Thermal analysis in practice[M]. Shanghai: Donghua University Press Co. Ltd, 2011.
- [8] 董海山, 胡荣祖, 姚朴, 等. 含能材料热谱集[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [9] 姬文苏. 梯黑铝混合装药分离回收技术研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2011.
- Ji Wensu. Study on the separation and retrieving technology for the high explosive of TNT, RDX and Al[D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2011.
- [10] 高大元, 董海山, 李波涛, 等. 炸药热分解动力学研究及其应用[J]. 含能材料, 2004, 12(增刊): 307-310.
- Gao Dayuan, Dong Haishan, Li Botao, et al. Research and application of thermal decomposition kinetics for explosives[J]. Energetic Materials, 2004, 12(suppl.): 307-310.
- [11] 梁磊, 王晶禹, 董军, 等. 纳米铝粉对硝胺炸药热分解催化性能的影响[J]. 火炸药学报, 2009, 32(6): 75-78.
- Liang Lei, Wang Jingyu, Dong Jun, et al. Effects of nano-Al powder on the thermal decomposition catalytic performance of nitroamine explosives[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2009, 32(6): 75-78.
- [12] 汤崧, 杨利, 乔小晶, 等. HMX 热分解动力学与热安全性研究[J]. 含能材料, 2011, 19(4): 396-400.
- Tang Zhan, Yang Li, Qiao Xiaojing, et al. On thermal decomposition kinetics and thermal safety of HMX[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(4): 396-400.
- [13] 郭红千, 孙艳馥. B 炸药使用安全性研究[J]. 科教前沿, 2010, (15): 449-450.
- Guo Hongqian, Sun Yanfu. Research on the security use of composition B[J]. Science & Technology Information, 2010, (15): 449-450.
- [14] 牛晓庆, 张建国, 冯晓军, 等. B 炸药主要组分 TNT 和 RDX 分子间相互作用的理论研究[J]. 化学学报, 2011, 69(14): 1627-1638.
- Niu Xiaoqing, Zhang Jianguo, Feng Xiaojun, et al. Theoretical investigation on intermolecular interactions between the ingredients TNT and RDX of composition B[J]. ACTA Chimica Sinica, 2011, 69(14): 1627-1638.

## Effects of TNT on the Thermal Decomposition Performance of RDX

DING Yukui<sup>①</sup>, WU Yi<sup>①</sup>, WANG Haidan<sup>①</sup>, LIU Guoqing<sup>①</sup>, JI Wensu<sup>②</sup>

①Ordnance Engineering College (Hebei Shijiazhuang, 050003)

②Wuhan Ordnance N. C. O Academy of PLA (Hubei Wuhan, 430075)

[ABSTRACT] To clarify the reasons for the disappearance of RDX melting peak DSC on the curves of some TNT-RDX explosives, DSC curves of RDX at different heating rates were analyzed to find out the experimental conditions under which the melting peak will present. TNT and RDX with mass ratios of 3 : 7 and 4 : 6 were dissolved in acetone and recrystallized to get TNT-RDX explosives. The TNT-RDX explosives were tested by DSC, and RDX melting peak can be observed at certain testing conditions. The analysis shows that the desolvation of part of RDX in fusion TNT leads to the decomposition of liquid RDX in a self-catalysis way and left shift of decomposition peak toward to lower temperature area overlapping with the melting peak. Decomposition kinetics and thermodynamics of samples were calculated and compared. The results show that the activation energy of TNT-RDX explosive is 6.02% higher than RDX, and the critical exploding temperature increases by 2.08 °C. Thermodynamics have also changed showing that TNT can improve the heat stability and security use of RDX by interaction with RDX through hydrogen bond.

[KEY WORDS] TNT-RDX explosive; thermal decomposition; DSC; melting peak

(上接第 20 页)

## Numerical Study on Propagation of Stress Wave in Aluminum Foam Sandwiched Plates

HU Yafeng, GU Wenbin, LIU Jianqing, WANG Huaixi, HUANG He, XU Jinglin

PLA University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210007)

[ABSTRACT] Mechanical parameters of aluminum foam, deduced according to Gibson theoretical model, were selected for five different density combinations in the design of numerical modeling. Propagation rules of stress wave in aluminum foam sandwiched plates were studied using nonlinear dynamics software LS-DYNA. The energy adsorption and properties of stress wave attenuation were analyzed. The results show that the mechanical parameters of aluminum foam deduced by Gibson theoretical model could well represent the reflection and transmission of stress wave in the interface between different medium in Crushable\_Foam constitutive model. And the result is coincident with elastic wave theory. In the case of equal overall density, the H-M-S gradient structure have better buffer effect under blast wave, and its sustainable capacities to weaken the stress wave and absorb explosive impact energy are better than the other structures.

[KEY WORDS] stress wave; aluminum foam; numerical simulation