

文章编号: 1001-1455(2013)02-0120-06

泡沫铝爆炸冲击特性的数值研究*

倪小军, 马宏昊, 沈兆武, 李 磊

(中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230026)

摘要: 基于流体弹塑性模型, 建立了泡沫铝在爆炸载荷下的冲击特性方程。采用 Lagrange 差分格式, 在均匀网格上对方程进行了离散。编写了数值计算程序, 进行了炸药在空中和水中爆炸的一维数值计算。爆炸场中考虑了泡沫铝密度、环境介质对泡沫铝材料冲击特性的影响。结果表明: 数值计算结果与理论解、实验实测结果基本吻合, 证明所建立的泡沫铝的流体弹塑性本构方程可以用来描述泡沫铝的冲击特性; 泡沫铝的密度越低, 泡沫铝中的压力峰值越小; 在接触爆炸条件下, 泡沫铝外侧环境介质的性质对临近环境介质端泡沫铝中的压力影响明显, 其中, 环境介质若为空气, 则临近空气端泡沫铝中的压力呈下降趋势, 若环境介质为水, 则临近水端泡沫铝中的压力呈上升趋势。

关键词: 爆炸力学; 峰值压力; 有限差分; 泡沫铝

中图分类号: O383.1

国标学科代码: 1303520

文献标志码: A

泡沫铝材料具有优良的减震、吸能、抗冲击等性能, 被广泛应用于各类结构物的抗爆耐冲击防护工程。随着数值计算技术的发展和不断完善, 它已成为泡沫铝材料研究的一个重要手段。目前, 已有一些描述泡沫铝在高速冲击和爆炸荷载下冲击特性的模型^[1]。其中, 使用比较广泛的是 Crushable-Foam 模型。S. Pattofatto 等^[2]基于该模型模拟了泡沫铝的冲击特性。而对基于流体弹塑性模型的材料和结构的动态响应问题, 尤其是高速冲击和爆炸荷载问题, 已有了大量的工作^[3-5]。由于泡沫铝材料在爆炸冲击防护设计中的重要作用, 进一步研究泡沫铝材料的冲击特性就显得尤为重要。

本文中, 采用流体弹塑性模型表征泡沫材料的冲击特性, 并基于有限差分法, 编写多介质(泡沫铝、炸药、水和空气)计算程序。通过将所编计算程序的计算结果与实验、理论计算结果进行比较, 验证计算程序的可靠性, 初步研究泡沫铝密度、环境介质对泡沫铝材料冲击特性的影响。

1 计算模型和参数

1.1 流体弹塑性模型

1.1.1 基本控制方程

一维柱对称流体弹塑性 Lagrange 格式的动量、质量和能量方程如下^[6-7]:

$$\dot{u} = -\frac{s_1 - (p + q)}{\partial m} + \frac{\partial r(s_1 - s_2)}{\partial m} \quad (1)$$

$$v = \frac{\partial r}{\partial m} \quad (2)$$

$$\dot{e} = v(s_1 \dot{\epsilon}_1 + s_2 \dot{\epsilon}_2) - (p + q)\dot{v} \quad (3)$$

式中: u 、 m 、 v 、 r 、 p 、 e 分别为速度、质量、比容、Lagrange 坐标、压力、内能; s_1 、 s_2 为偏应力; ϵ_1 、 ϵ_2 为应变; q 为人工黏性。

1.1.2 人工黏性

* 收稿日期: 2012-02-07; 修回日期: 2012-03-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51134012); 国家自然科学基金面上项目(51174183);

安徽省高等学校省级自然科学基金项目重大项目(KJ2010ZD003)

作者简介: 倪小军(1982—), 男, 博士研究生。

人工黏性的计算公式^[7]为

$$q = \frac{(C_1 \Delta u)^2}{v} + \frac{C_2 (pv)^{1/2} |\Delta u|}{v} \quad (4)$$

式中： $C_1=2, C_2=0.8$ 。

1.1.3 炸药爆轰产物状态方程

采用燃烧函数 F 联结凝固炸药和爆炸产物的状态方程^[8]，炸药及其爆炸产物状态方程为

$$p = \frac{\gamma - 1}{v} eF, \quad F = [\max(F_1, F_2)]^{n_b} \quad (5)$$

式中：

$$F_1 = \begin{cases} 0 & \text{凝固炸药区} \\ \frac{v_0 - v}{v_0 - v_1} & \text{过渡区} \\ 1 & \text{爆炸产物区} \end{cases}, \quad F_2 = \begin{cases} 0 & t < t_b \\ \frac{t - t_b}{\Delta t} & t_b \leq t < t_b + \Delta t \\ 1 & t \geq t_b + \Delta t \end{cases}$$

$v_1 = \gamma v_0 / (\gamma + 1)$ ，为 CJ 比容； t_b 为爆轰波刚到达计算网格的时间（开始燃烧）； $\Delta t = r_b \Delta x \Delta r / [D_1 \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta r)^2}]$ ； n_b 和 r_b 为可调参数，通常取 $n_b = 2 \sim 3, r_b = 3 \sim 6$ 。

1.1.4 材料状态方程

泡沫铝的状态方程^[9]为：

$$p = \frac{c_0^2 (v_0 - v)}{[v_0 - \lambda_0 (v_0 - v)]^2} \left[1 - \frac{\gamma_0 (v_0 - v)}{2v_0} \right] + \frac{\gamma_0}{v_0} e \quad v < v_0 \quad (6)$$

$$p = \frac{\gamma_0}{v_0} \left[e - \frac{c_V}{3\beta} \left(\frac{v}{v_0} - 1 \right) \right] \quad v \geq v_0 \quad (7)$$

式中： c_0, λ_0 为 Hugoniot 参数； γ_0 是 Grüneisen 系数； c_V 是定容比热； β 是线膨胀系数。

水的状态方程^[10]为

$$p = \beta_1 \mu + \beta_2 \mu^2 + \beta_3 \mu^3 \quad (8)$$

式中： $\mu = \rho / \rho_0 - 1$ ，为水的体积压缩比， $\beta_1 = 2.56 \text{ GPa}, \beta_2 = 5.53 \text{ GPa}, \beta_3 = 5.55 \text{ GPa}$ 。

空气的状态方程^[8]采用理想气体方程，其中空气的绝热指数 $\gamma = 1.4$ 。

1.1.5 偏应力

泡沫铝的屈服准则采用 Von-Mises 屈服准则，泡沫铝的偏应力增量可按弹性区和塑性区分别计算。在弹性区，有

$$\dot{s}_i = 2G[\dot{\epsilon}_i - \dot{v}/(3v)] \quad (9)$$

式中：下标 $i=1, 2, 3$ ； $\dot{\epsilon}_1 = \partial u / \partial r$ ； $\dot{\epsilon}_2 = u/r$ ； $\dot{\epsilon}_3 = 0$ 。在塑性区，有

$$s_i = \bar{s}_i \sqrt{2/3} Y \sqrt{\sum_{k=1}^3 \bar{s}_k^2} \quad (10)$$

式中： $i=1, 2, 3$ ； Y 为泡沫铝的屈服强度。 \bar{s} 根据 Hook 定律算出。

1.2 孔隙材料冲击绝热参数

基于孔穴塌缩能量理论，孔隙材料冲击绝热线的计算方程^[11]如下：

$$u^2 = u_p^2 + 5u_s u_p (\rho_s / \rho_{00} - 1) / 6 \quad (11)$$

$$u_D = p_H / (\rho_{00} u) \quad (12)$$

式中： $p_H = \rho_s u_s u_p$ ， ρ_s, u_s 和 u_p 分别为密实材料的密度、冲击波速度和粒子速度； ρ_{00}, u_D 和 u 分别为孔隙材料的初始密度、冲击波速度和粒子速度。其中，密实材料的 u_s 和 u_p 关系式为

$$u_s = c_{s0} + \lambda_{s0} u_p \quad (13)$$

式中： c_{s0}, λ_{s0} 为密实材料的 Hugoniot 参数。

材料的 Grüneisen 系数 γ 与材料的 Hugoniot 参数 λ 有近似关系^[11]

$$\gamma = 2\lambda - 1 \quad (14)$$

1.3 材料参数

炸药采用 PETN, $\rho = 0.88 \text{ g/cm}^3$, $D = 5.17 \text{ km/s}$, $p_H = 6.2 \text{ GPa}$, $\gamma = 2.5$ 。L. J. Gibson 等^[12]认为泡沫材料的热膨胀系数 β 和定容比热 c_V 与制备它们所用的固体材料近似相等, 则各密度泡沫铝 $\beta \approx 23.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $c_V \approx 850 \text{ mJ/(g} \cdot \text{K)}^{[13]}$ 。纯铝的冲击波绝热参数分别为 $c_0 = 5.328 \text{ km/s}$, $\lambda_0 = 1.34$, $\gamma_0 = 2.18^{[13]}$ 。若给定冲击波压力 p_H , 则可以根据式(11)~(13)计算各密度泡沫铝的冲击波速度 u_D 和粒子速度 u 。通过线性拟合 u_D 和 u , 得出泡沫铝的 Hugoniot 参数 c_0 、 λ 。若 λ 已知, 则可以根据式(14)计算 Grüneisen 系数 γ , 计算结果见表 1。不同密度泡沫的剪切模量 G 和屈服应力 Y 通过 MTS 材料试验机测试获得, 测试结果见表 1。

表 1 泡沫铝材料参数

Table 1 Material parameters for Al foam

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$c_0/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	λ	γ	G/MPa	Y/MPa
0.27	0.350	1.26	1.51	12.7	4.5
0.35	0.418	1.27	1.54	23.5	5.8
0.48	0.519	1.29	1.58	50.0	6.5

2 数值计算程序的验证

为求解本文中一维柱对称流体弹塑性模型方程组, 编制数值计算程序对上述方程组进行数值求解。其中, 计算格式采用具有二阶精度的交叉格式中心差分法, 网格使用均匀 Lagrange 网格。为了验证程序的可靠性, 对以下 2 个算例进行计算。

2.1 接触爆炸界面的压力与速度

以 PETN 分别与水和泡沫铝的接触爆炸为例, 用所编写的程序计算其界面的压力和速度。不同界面的压力和速度峰值的计算结果见表 2。

炸药和接触介质中冲击波压力 p 与质点速度 $u^{[14]}$ 分别为:

$$u = \frac{D}{\gamma + 1} \left\{ 1 + \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p}{p_H} \right)^{\frac{\gamma - 1}{2\gamma}} \right] \right\} \quad (15)$$

$$p = \rho(c_0 + \lambda u)u \quad (16)$$

式中: D 、 p_H 、 γ 分别为爆轰波的爆速、CJ 压力和多方指数; ρ 、 c_0 、 λ 分别为与炸药接触介质的密度、零压声速和常数。考虑到炸药和接触介质界面的速度和压力具有连续性, 联立式(15)~(16)可计算 PETN-水界面、PETN-泡沫铝界面的速度和压力, 理论解结果见表 2。

由表 2 可知, 界面的压力和速度的数值计算结果与理论解良好符合。

表 2 界面的冲击波速度和压力

Table 2 Velocities and pressures of shock wave at the interface

材料	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$u_{th}/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$u_{cal}/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$\epsilon_u/\%$	p_{th}/GPa	p_{cal}/GPa	$\epsilon_p/\%$
水	1.00	1.51	1.57	4.0	6.24	6.30	1.0
泡沫铝	0.48	2.25	2.21	1.8	3.70	3.63	1.9
泡沫铝	0.35	2.48	2.48	0	3.09	3.09	0
泡沫铝	0.27	2.66	2.66	0	2.66	2.79	4.8

2.2 PETN 药柱在泡沫铝包裹下水下爆炸的压力场

以包裹不同壁厚泡沫铝的 PETN 药柱水中爆炸为例, 具体参数和实验工况见文献[15]。其中, PETN 的密度为 0.88 g/cm^3 , 装药半径为 0.35 cm , 泡沫铝密度为 0.48 g/cm^3 , 壁厚分别为 1.15 和 2.15 cm 。距离药柱 50 cm 处的压力实测值见表 3。

表 3 距离药柱 50 cm 处的压力

Table 3 Pressures at 50 cm from the grain

h/cm	$p_{pre,1}^{[15]}/\text{MPa}$	$p_{pre,2}^{[15]}/\text{MPa}$	$p_{pre,3}^{[15]}/\text{MPa}$	$\bar{p}_{pre}^{[15]}/\text{MPa}$	p_{cal}/MPa	$\epsilon_p/\%$
1.15	3.208	2.798	2.181	2.729	2.632	3.55

2.15 0.832 0.582 0.577 0.664 0.639 3.77

用所编写的程序计算沿炸药径向水中爆炸的压力分布,见图 1。其中距离药柱 50 cm 处的压力计算结果见表 3。

由表 3 可知,距离药柱 50 cm 处压力的数值计算结果与实验测量结果良好吻合。

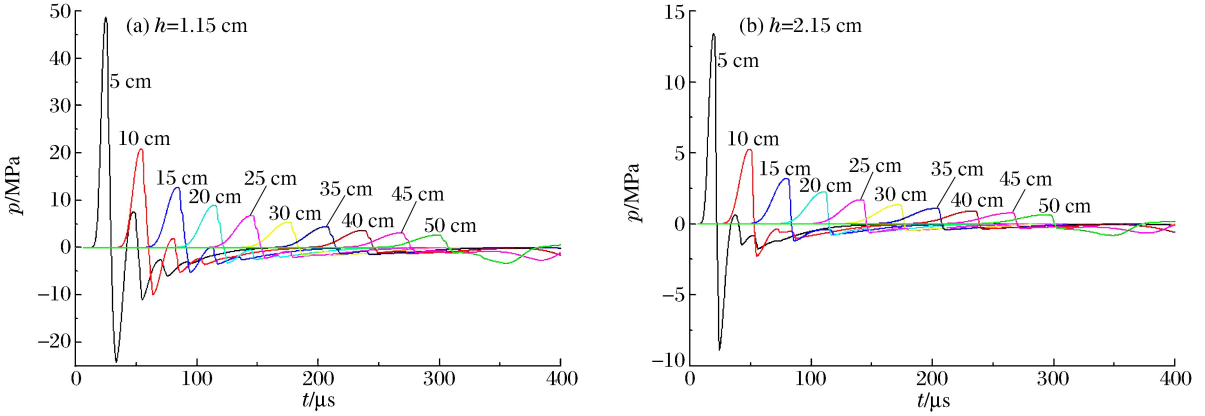


图 1 经泡沫铝后水中不同位置的压力
Fig. 1 Pressures through the Al foams

由以上 2 个例子可见,数值计算结果与理论解、实验结果均良好符合。这验证了程序的可靠性、基于流体弹塑性模型对泡沫铝材料冲击特性表征的可行性。

3 数值计算与讨论

3.1 泡沫铝密度对其冲击特性的影响

药柱和泡沫铝的结构如图 2 所示,泡沫铝密度分别为 0.27、0.35 和 0.48 g/cm³,泡沫铝圆柱壳内径 0.7 cm,外径 24 cm。用所编的程序进行数值求解,PETN 与泡沫铝界面的压力如图 3 所示。对界面的压力时程曲线积分,可获得冲量时程曲线(见图 4),冲量的计算结果见表 4。泡沫铝径向峰值压力分布的计算结果如图 5 所示。

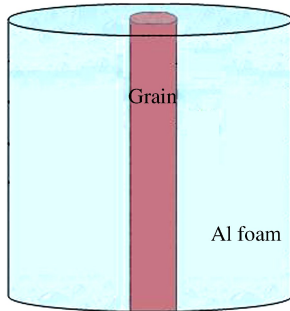


图 2 药柱和泡沫铝结构示意图
Fig. 2 Structure scheme on grain and Al foam

表 4 冲击波参数的计算结果
Table 4 The calculation results of shock wave parameters

$\rho /$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$t_0 /$ μs	$p_m /$ GPa	I /($\text{kPa} \cdot \text{s}$)
0.27	106	2.79	4.100
0.35	85	3.09	4.652
0.48	56	3.63	5.229

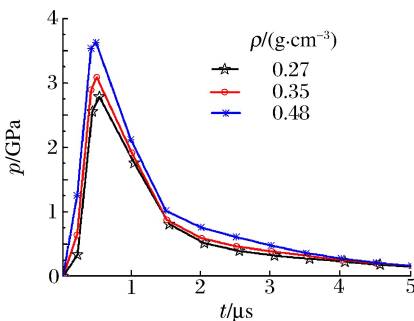


图 3 界面的压力

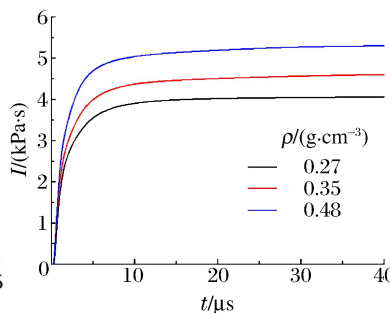


图 4 界面处的冲量

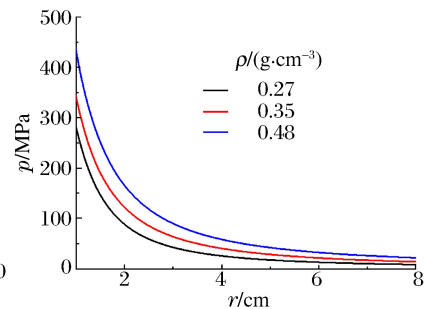


图 5 峰值压力随距离的变化

由图3~4和表4可以看出,在同等装药条件下,随着泡沫铝密度的增加,炸药爆炸传递给泡沫铝的压力峰值和冲量也增加,而作用时间减少。这是因为,3种密度的泡沫铝材料中,密度 0.48 g/cm^3 泡沫铝的波阻抗与炸药波阻抗最接近, 0.35 g/cm^3 的次之, 0.27 g/cm^3 的差距最大,则炸药透射各密度泡沫铝中的冲击波压力,由大到小对应的泡沫铝密度为 0.48 、 0.35 和 0.27 g/cm^3 。所以,对于高密度的泡沫铝,炸药能量能更快地传递给泡沫铝,炸药能量衰减得更快,即在同样装药条件下,高密度泡沫铝与低密度泡沫铝相比,爆炸加载有效作用时间较短。

3.2 环境介质对泡沫铝冲击特性的影响

药柱、泡沫铝和环境介质的结构如图6所示。炸药和泡沫铝的密度分别为 0.88 和 0.48 g/cm^3 ,外径分别为 0.35 和 3.50 cm ,水和空气层的厚度均为 4.5 cm 。图7给出了泡沫铝及其邻近介质中的压力峰值分布的计算结果。由图7可以看出,在相同的爆炸加载条件下,泡沫铝与空气界面的压力明显比泡沫铝与水界面的压力小,而内侧压力则基本一致。其中,邻近空气界面的泡沫铝,其峰值压力随距离的增加而递减;而邻近水界面的泡沫铝,其峰值压力随距离的增加而变化趋缓,甚至出现峰值压力升高的现象。由于空气的波阻抗小于泡沫铝,则冲击波在空气界面反射回泡沫铝中的波为稀疏波,进一步削弱冲击波压力;而水的波阻抗大于泡沫铝,则经水界面反射回泡沫铝的波为冲击波,增强了冲击波压力。由此可知,泡沫铝柱壳邻近介质对壳体外侧压力分布影响很大,而对壳体内侧压力分布影响很小。

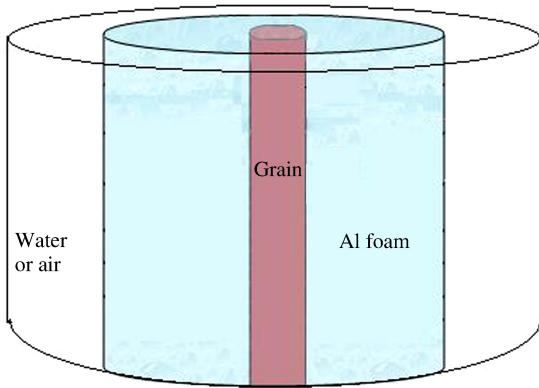


图6 水或空气中药柱和泡沫铝的结构示意图
Fig. 6 Structure scheme on grain and Al foam in water or air

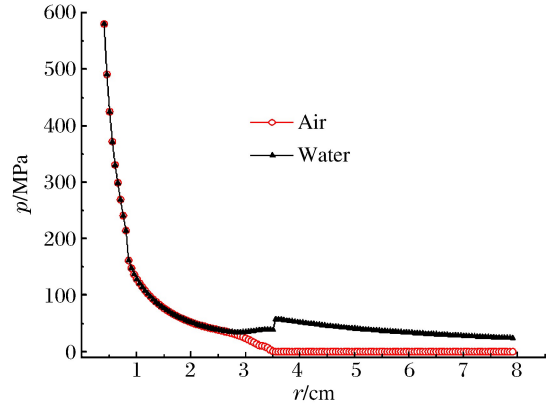


图7 水或空气中泡沫铝峰值压力分布
Fig. 7 Pressures of Al foams in water or air

4 结论

采用 Lagrange 方法描述一维流体弹塑性动力学方程,建立了一维柱对称数值模型。泡沫铝材料采用流体弹塑性本构模型。编写程序进行数值计算,重点讨论了泡沫铝冲击特性表征的正确性和程序的可靠性,以及泡沫铝密度、环境介质对泡沫铝冲击特性的影响。通过对数值计算结果的分析,表明:

(1) 数值计算结果与理论解、实验结果均良好吻合,验证了流体弹塑性模型表征泡沫铝材料冲击特性的正确性及程序的可靠性。

(2) 在同等装药条件下,随着泡沫铝密度的增加,炸药爆炸传递给泡沫铝的初始压力和冲量增加,持续作用时间减少。从压力衰减的角度来看,低密度泡沫铝的衰减效果优于高密度泡沫铝。

(3) 在爆炸载荷作用下,泡沫铝柱壳外侧邻近介质对壳体外侧附近区域内的压力分布影响很大,而对壳体内侧压力分布影响很小。

参考文献:

- [1] Hanseen A G, Hopperstad O S, Langseth M, et al. Validation of constitutive models applicable to aluminum foams[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002,44:359-406.

- [2] Pattofatto S, Elnasri I, Zhao H, et al. Shock enhancement of cellular structures under impact loading: Part II. Analysis[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2007,55:2672-2686.
- [3] Wilkins M L. Computer simulation of dynamic phenomena[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1999.
- [4] Hallquist J O. Ls-dyna theory manual[M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- [5] Wang Jing-tao, Liu Kai-xin, Zhang De-liang. An improved CE/SE scheme for multi-material elastic-plastic flows and its applications[J]. *Computers & Fluids*, 2009,38:544-551.
- [6] Wilkins M L. Calculation of elastic-plastic flow[R]. LA-7322, 1969.
- [7] Wilkins M L. Use of artificial viscosity in multidimensional fluid dynamic calculations[J]. *Journal of Computational Physics*, 1980,36(3):281-303.
- [8] 李德元. 二维非正常流体力学数值方法[M]. 北京: 科学技术出版社, 1987:95-98.
- [9] Kinslow R. High-velocity impact phenomena[M]. New York: Academic Press, 1970.
- [10] 周钟, 王肖钧, 赵凯, 等. 水饱和岩石中爆炸应力波传播的数值模拟[J]. *爆炸与冲击*, 2005,25(4):296-302.
Zhou Zhong, Wang Xiao-jun, Zhao Kai, et al. Numerical simulation for blast wave in water saturated rock[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005,25(4):296-302.
- [11] 谭华. 实验冲击波物理导引[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007:15-34.
- [12] Gibson L J, Ashby M F. 多孔固体结构性能[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [13] 汤文辉, 张若棋. 物态方程理论及计算概论[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [14] 北京工业学院八系编写组. 爆炸及其作用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [15] 倪小军, 沈兆武, 杨昌德. 泡沫铝壳对水下爆炸冲击波衰减的影响[J]. *含能材料*, 2011,19(3):315-320.
Ni Xiao-jun, Shen Zhao-wu, Yang Chang-de. Influence of aluminum foams shell on shock attenuation underwater explosions[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2011,19(3):315-320.

Numerical study on impact properties of Al foam under explosive loading*

Ni Xiao-jun, Ma Hong-hao, Shen Zhao-wu, Li Lei

(*Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China*)

Abstract: Based on the hydrodynamic-elastoplastic model, the equations were established to characterize the impact properties of the Al foams under explosive loading, which were transformed into discrete Lagrange difference forms in uniform grid. The shock responses of the Al foams in water and air were numerically calculated by the self-developed one-dimensional code, respectively. The numerical results are in agreement with the theoretical solutions and the experimental ones. Under the same explosive loading, the lower the density of the Al foam, the lower the peak pressure in it. And under a contact explosive loading, the properties of the materials surrounding the Al foam can markedly affect the pressure on its outer side. When air is outside the Al foam, the pressure in the Al foam adjacent to air takes on a downward trend. When water is outside the Al foam, the corresponding pressure takes on an upward trend.

Key words: mechanics of explosion; peak pressure; finite difference; aluminum foam

* Received 7 February 2012; Revised 28 March 2012

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51134012,51174183)

Corresponding author: Ni Xiao-jun, nixj@mail.ustc.edu.cn