

# 挠性炸药比冲量的数值模拟与实验研究

林 鹏, 王长利, 王等旺

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘 要:** 对不同厚度挠性炸药加载不同基底材料接触爆炸产生的冲量加载进行了一维数值模拟计算。采用自行研制的直线运动式冲量探头对一种 0.4 mm 厚度的挠性炸药接触爆炸产生的冲量载荷进行了测量, 得出该厚度炸药的比冲量为 1234 Pa·s, 数值模拟结果与实验结果符合较好。计算结果表明, 挠性炸药的加载冲量与其厚度成比例增加关系; 相同厚度的挠性炸药在不同波阻抗表面爆炸产生的冲量载荷不同, 波阻抗越大, 传入的冲量越大。

**关键词:** 爆炸力学; 挠性炸药; 比冲量; 数值模拟; 结构响应

中图分类号: TJ55; O347

文献标志码: A

文章编号: 1007-7812(2011)04-0030-04

## Numerical Simulation and Experimental Studies on Impulse of Flexible Explosive

LIN Peng, WANG Chang-li, WANG Deng-wang

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** One-dimensional numerical calculation is carried out to simulate the impulse produced by contact explosion of different thickness of flexible explosive (FEX) on several base materials. Experimental measurements were conducted to test the impulse of the FEX with thickness of 0.4 mm using self-made impulse probe. The measured impulse is 1234 Pa·s and agreed well with calculated results. The simulated results show that the impulse quantity of FEX increases proportionally to its thickness; the impulse quantities are sensitive to the shock wave impedance of contacted base materials, and the bigger of the shock wave impedance, the more imparted impulse.

**Key words:** explosion mechanics; flexible explosive(FEX); impulse; numerical simulation; structure response

## 引 言

挠性炸药是 20 世纪 50 年代发展起来的特种混合炸药, 即可军用又可民用, 如用于爆炸成型、焊接、切割, 特殊物质的合成等。挠性炸药爆炸加载是一个有重要理论和实际意义的课题。随着其应用范围的增加, 挠性炸药的物理力学性能已成为关注的焦点。唐桂芳<sup>[1]</sup>等通过测试拉伸性能的变化来评估 FEX-1 挠性炸药的贮存寿命; 骆兵等测试了某新型挠性炸药的拉伸强度、撕裂强度、伸长率等力学性能<sup>[2]</sup>。

空间结构遭受高空核爆 X 射线辐照时, 结构壳体单位面积上的冲量载荷(比冲量)的空间分布接近于余弦分布<sup>[3]</sup>, 工程上对这种载荷的模拟通常采用挠性炸药条爆炸加载的方法来实现<sup>[4]</sup>, 利用挠性炸药来构造这种余弦分布的冲量载荷, 首先必须要了解挠性炸药的比冲量参数。因此, 研究挠性炸药

比冲量的计算和测量方法, 具有重要的应用价值。

本研究将挠性炸药爆炸加载问题简化为一维平面应变波问题, 采用自行研制的直线运动式冲量探头, 测量了一种 0.4 mm 厚的挠性炸药爆炸产生的比冲量。数值模拟结果和实验结果符合较好, 对于冲量余弦分布的设计具有参考价值。

## 1 数值模拟

### 1.1 基本方程、本构模型和求解条件

#### 1.1.1 基本假定

基本假定:

(1) 忽略炸药和接触基底材料的侧向稀疏效应, 把爆炸冲击波作为一维平面波处理, 不考虑基底材料的损伤和断裂;

(2) 材料为各向同性, 用流体弹塑性模型描述;

(3) 忽略爆炸波中化学反应区的厚度, 采用 C—

收稿日期: 2010-12-16; 修回日期: 2011-03-24

作者简介: 林鹏(1968—), 男, 博士, 副研究员, 从事辐射热-力学效应方面的工作。

J 爆轰假定。

1.1.2 基本方程

对于宽度无限、厚度为  $h$  的炸药在厚度为  $H$  的基底材料上接触爆炸时, 在爆轰波到达基底材料后, 爆炸产物和基底材料中的一维运动可以统一用下面的封闭方程组描述<sup>[4-5]</sup>:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial(p+q)}{\partial M} - \frac{4}{3} \frac{\partial \tau}{\partial M} \quad (\text{运动方程}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial x}{\partial t} = u \quad (\text{速度定义}) \quad (2)$$

$$V = \frac{\partial x}{\partial M} \quad (\text{连续方程}) \quad (3)$$

$$p = f(V) \quad (\text{状态方程}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} = -\frac{G}{V} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (\text{弹性剪切定律}) \quad (5)$$

$$k = |\tau| - \frac{1}{2} Y \quad (\text{屈服判据}) \quad (6)$$

$$\tau = \begin{cases} \tau & k < 0 \\ \frac{Y}{2} \text{sign}(\tau) & k \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$q = \begin{cases} \frac{a}{V} \left(\frac{\partial u}{\partial M}\right)^2 \Delta M & \frac{\partial u}{\partial M} < 0 \\ 0 & \frac{\partial u}{\partial M} \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $M$  为质量坐标, 由  $\Delta M = \rho_0 dX = \rho dx$  定义;  $t$  为时间;  $x$  和  $X$  分别为纵向欧拉坐标和拉格朗日坐标;  $u$  为质点纵向速度;  $V$  和  $V_0$  分别为瞬时和初始比容;  $p$  为静水压;  $\tau$  为最大剪应力;  $q$  为人工黏性,  $G$  为剪切模量,  $Y$  为材料在简单拉伸条件下的屈服极限。

1.1.3 本构模型

炸药爆炸产物的等熵状态方程采用 BKW 状态方程进行计算:

$$\ln p = \sum_{n=0}^4 a_n \ln^n V \quad (9)$$

式中:  $p$  为压力,  $10^{11}$  Pa;  $V$  为比容,  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;  $a_n$  为常数。

挠性炸药的密度为  $1.46 \text{ g/cm}^3$ , 爆轰速度为  $7.2 \text{ km/s}$ , CJ 比容取  $0.491 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。表 1 给出了 BKW 方程  $a_n$  的值。

表 1 炸药性能参数

Table 1 The parameters of sheet explosive

$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
-3.469	-2.488	0.2467	0.02947	-0.01201

基底材料分别为橡胶、钢板和硬铝, 均采用流体弹塑性模型, 一维应变条件下轴向应力(压缩为正)为:

$$p_x = -p - \frac{4}{3} \tau \quad (10)$$

静水压采用等熵 Murnaghan 型状态方程描述:

$$p = \frac{K}{\gamma} \left[ \left( \frac{V_0}{V} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (11)$$

计算中采用的材料参数如表 2 所示。

表 2 基底材料性能参数

Table 2 Parameters of base materials

材料	橡胶	钢板	硬铝
$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.000	7.80	2.80
杨氏模量/GPa	0.4398	227.50	0.72
剪切模量/GPa	0.1507	85.30	0.28
泊松比	0.4	0.330	0.33
动态体积压缩模量/GPa	7.33	2.225	0.791
动态屈服强度/GPa	$4 \times 10^{-2}$	0.979	0.46
Murnaghan 方程指数 $\gamma$	1.0	3.7	4.35

1.1.4 初始条件

取炸药爆完时刻即  $t_0 = h/D$  时爆炸产物的状态为初始条件, 爆轰过程是自模拟的, 产物中参数  $V$ 、 $u$ 、 $p$  均为  $\eta = M/t = \rho_0 X/t$  的函数, 故有<sup>[5]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{dV}{d\eta} = \frac{V}{-V^2 \frac{d^2 p}{dV^2} - \frac{V}{C} \frac{dp}{dV} - \eta} \\ \frac{du}{d\eta} = -\eta \frac{dV}{d\eta} \\ \frac{dx}{d\eta} = \frac{Vh}{D} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $h$  为挠性片炸药厚度;  $C$  为产物的声速,  $C^2 = -V^2 dp/dV$ ;  $D$  为爆轰速度。

由爆轰波阵面上的条件  $\eta = \rho_0 D$ , 有:

$$V = V_J, u = D(1 - V_J/V_0), x = h \quad (13)$$

在此边界条件下用四阶龙格-库塔法解方程组(12), 即给出计算所用爆炸产物中的初始条件。基底材料中的初始条件为静止状态。

1.1.5 边界及接触面上的条件

爆炸产物自由飞散面上:

$$p = 0 \quad (X=0) \quad (14)$$

基底材料自由面上:

$$p_x = 0 \quad (X=h+H) \quad (15)$$

产物及基底材料接触面上:

$$\begin{cases} p(\text{产物}) = p_x(\text{基底材料}) \\ u(\text{产物}) = u(\text{基底材料}) \end{cases} \quad (16)$$

1.2 计算结果

用有限差分法对上述方程进行数值计算。计算中, 时间步长由稳定条件控制, 在光滑区, 由双曲型方程的 Courant 条件给出:

$$\Delta t = \beta \frac{V \Delta_i M}{c} \quad (0 < \beta \leq 1) \quad (17)$$

式中： $c$  为局部声速； $\Delta_i M$  为网格质量。

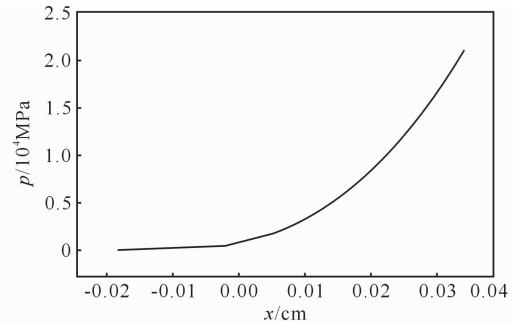
在激波区，由 Von Neumann 条件给出：

$$\Delta t = \beta \frac{V \Delta_i M}{4a |\Delta u|} \quad (0 < \beta \leq 1) \quad (18)$$

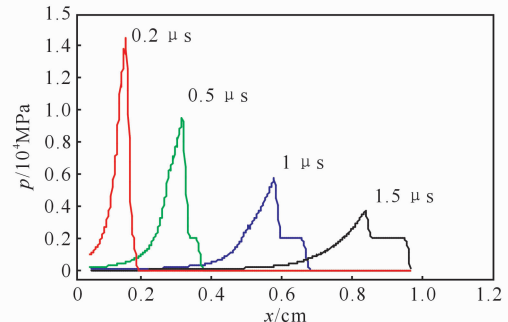
整个区域的时间间隔是逐点计算  $\Delta t$  后取其中最小值，计算中取  $\beta$  为 0.9，计算能稳定进行。

图 1 为 0.4 mm 厚度的挠性炸药在钢板表面爆炸产生的初始载荷以及不同时刻应力波在钢板中空间波形。图 1 中横坐标  $x$  表示空间坐标位置。可以看出，作用在钢板表面的载荷近似为三角形脉冲。随着应力波在钢板中的传播，应力峰值衰减，同时应力波分化为弹性前驱波和塑性加载波。

图 2 为作用在钢板界面上的应力波峰值与炸药厚度变化的关系，图 3 为作用在钢板表面上的冲量与炸药厚度的关系。可见，挠性炸药越厚，钢板表面上的应力波峰值和脉宽就越大；单位面积上的冲量与挠性炸药层厚度几乎成线性增加关系。不同药量爆炸的计算结果见表 3。



(a) 初始载荷



(b) 应力波传播

图 1 初始载荷及靶中应力波的变化

Fig. 1 Initial loads and evolution of the shock in target

表 3 不同药量在不同基底材料表面爆炸的计算结果

Table 3 Calculated results of several thickness of SE on different base materials

挠性炸药 厚度/mm	应力波峰值/ $10^4$ MPa			脉宽/ns			比冲量/(Pa·s)		
	橡胶	硬铝	钢板	橡胶	硬铝	钢板	橡胶	硬铝	钢板
0.2	0.31	1.01	1.78	92	32	21	430	546	651
0.4	0.46	1.37	2.17	112	51	37	940	1149	1327
0.6	0.55	1.59	2.33	148	65	52	1457	1751	1995
0.8	0.62	1.75	2.45	173	79	66	1967	2342	2646
1.0	0.67	1.86	2.60	198	92	78	2473	2918	3280

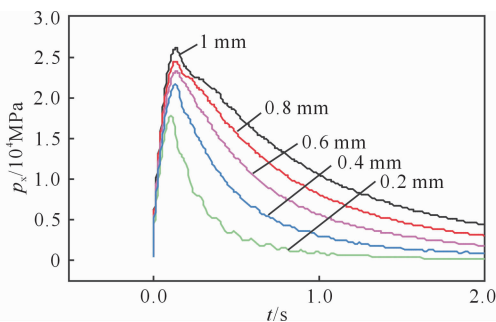


图 2 应力峰值与炸药厚度之间的关系

Fig. 2 Peak stress vs. thickness of FEX curves

从表 3 可见，挠性炸药在不同基底材料上的爆炸作用效果差异较大。基底材料的波阻抗越小，界面应力波的波形越宽，峰值压力越小，传入的比冲量也略小一些。基底材料越硬，界面应力的波峰值越大，波形越窄，传入的冲量越大。对于基底材料分别为硬铝和钢板，当挠性炸药的厚度由 0.2 ~

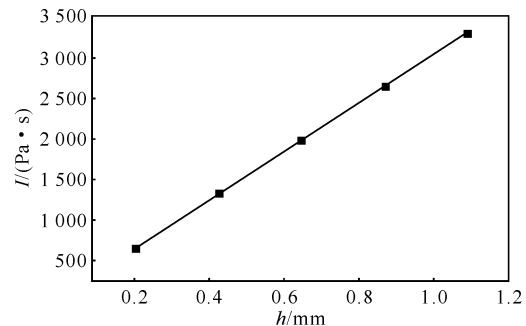


图 3 比冲量与炸药层厚度之间的关系

Fig. 3 Impulse vs. thickness of FEX curve

1.0 mm 时，比冲量的差异从 19% 下降到 12%。即挠性炸药越厚，比冲量差异就越小。根据波在不同界面的透、反射理论进一步推测，如果基底材料的波阻抗差异不大，则传入基底材料的比冲量差异也不大，在进行冲量大小设计时，只考虑挠性炸药厚度即可。

## 2 实验验证

### 2.1 测量方法

采用微型红外透光传感技术和直接测量特定时间间隔系列的探头原理间接测量冲量(见图 4)。在探头平板靶中心安有一传信杆, 在传信杆自由端传感部位有 5 组实环与空环相间的结构, 在其两侧安装两组微型红外发光二极管和光电三极管。在挠性炸药接触爆炸作用下, 平板靶—传信杆组件向后运动, 传信杆的传感部位依次通过光束区, 形成一系列与空环和实环系相对应的透光—断光交替出现的现象, 从而使探头输出电压脉冲信号系列。由此可测出靶—传信杆的运动速度, 并最终得到传递的冲量载荷。

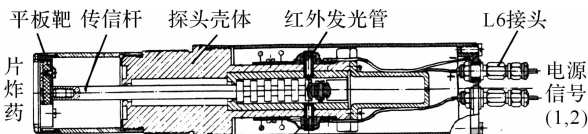


图 4 冲量测量探头原理结构图

Fig. 4 Schematic diagram of impulse probe

根据动量守恒定律, 挠性炸药的比冲量  $I$  为:

$$I = \frac{mv}{A} \quad (19)$$

式中:  $A$  为挠性炸药的面积, 为  $1.131 \text{ cm}^2$ ;  $m$  为靶—杆组件的质量;  $v$  为测量的速度。

### 2.2 结果试验

图 5 为某炮的原始记录波形, 通过判读时间

隔, 得到速度随时间的变化趋势, 如图 6 所示。表 4 为  $0.4 \text{ mm}$  厚度的片炸药的比冲量实验测量结果, 基底材料为硬铝。

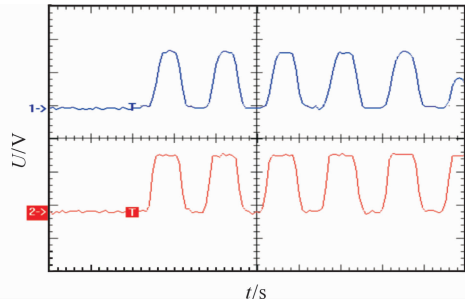


图 5 冲量的原始波形

Fig. 5 The typical original waveforms

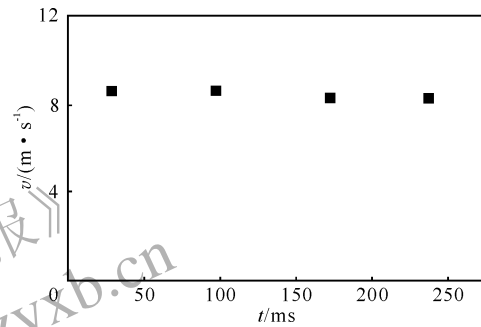


图 6 靶组件运动速度随时间的变化

Fig. 6 The velocity of target vs. time

对表 4 中冲量数据进行统计, 得出比冲量为  $(1234 \pm 33) \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。数值模拟结果为  $1149 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , 相对误差约  $7\%$ , 表明计算结果与实验结果符合较好。

表 4 比冲量的测量结果

Table 4 Test results of impulse

No.	$v_i / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$				$\bar{v} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$m / \text{g}$	$I / (\text{Pa} \cdot \text{s})$
	1	2	3	4			
I-4	8.71	8.70	8.36	8.36	8.53	16.611	1253
I-2	8.82	8.72	8.52	8.33	8.60	16.631	1265
I-6	8.31	7.94	7.94	7.82	8.00	16.666	1179
I-9	8.71	8.57	8.44	8.31	8.51	16.495	1241
I-10	8.57	8.57	8.57	8.19	8.48	16.401	1230

## 3 结 论

(1) 对于同种加载材料, 加载比冲量与挠性炸药厚度近似成线性增加关系。这说明只要改变炸药层的厚度, 就可以改变加载冲量的大小。若考虑壳体半径较大的实际情况, 平面一维问题的计算结

果就可以作为圆柱壳实际载荷的参考。若挠性炸药厚度在圆柱壳体表面随角度呈余弦分布, 就可以得到呈余弦分布的冲量载荷。

(2) 对于  $0.4 \text{ mm}$  厚度的挠性炸药, 加载硬铝的数值模拟结果与实验测量结果符合较好, 相对误差约  $7\%$ , 说明本研究的计算方法正确有效。

(下转第 48 页)

35~140 J/cm<sup>2</sup>, 随装药系数的增大而降低。

## 4 结 论

(1) 选用多层纸为靶板材料, 应用靶板效应法可方便有效地评价爆炸驱动形成的颗粒流的动能特性。评价指标包括颗粒空间数密度和颗粒速度及其分布。

(2) 该方法虽有一定的误差, 但可以得到不同距离上颗粒群的数密度和颗粒速度(最大值、平均值及速度分布)。该评价方法便于在野外应用, 结果易于处理和保存。

### 参考文献:

- [1] 谭多望, 曹仁义, 王广军, 等. 爆轰驱动对钨珠终端弹道性能的影响[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(6): 481-487.  
TAN Duo-wang, CAO Ren-yi, WANG Guang-jun, et al. Influence of detonation driving on terminal ballistic effects of tungsten spheres[J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(6): 481-487.
- [2] Akahoshi Y, Kaji M, Hata H. Measurement of mass, spray angle and velocity distribution of fragment cloud [J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 29: 845-853.

(上接第 33 页)

(3) 计算表明, 基底材料的波阻抗对冲量耦合有影响, 但如果基底材料的波阻抗差异不大, 在进行冲量载荷设计时, 只需要考虑挠性炸药厚度即可。

(4) 自行研制的直线运动式冲量探头使用方便, 可用于后续炸药爆炸比冲量的测量研究中。

### 参考文献:

- [1] 唐桂芳, 王晓峰, 衡淑云, 等. FEX-1 挠性炸药储存寿命的预估[J]. 火炸药学报, 2003, 26(2): 19.  
TANG Gui-fang, WANG Xiao-feng, HENG Shu-yun, et c. An estimation on the storage life of flexible explosive[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2003, 26(2): 19.
- [2] 骆兵, 王凤英. 某新型挠性炸药的制备工艺及性能测试[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(s): 156-159.  
LUO Bing, WANG Feng-ying. Preparation technique and performance test of one new kind of flexible explosive[J]. Journal of Safety and Environment, 2004, 4(s): 156-159.

- [3] Frost D L, Ornthalalai C, Zarei, et al. Particle momentum effects from the detonation of heterogeneous explosives[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101: 113529 (1-14).
- [4] 隋树元, 王树山. 终点效应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [5] 张国伟. 终点效应及其应用技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [6] 尹放林, 严少华, 钱七虎, 等. 弹体侵彻深度计算公式对比研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(1): 79-82.  
YIN Fang-lin, YAN Shao-hua, QIAN Qi-hu, et al. Contrast analysis on Calculation of penetration depth of projectile[J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(1): 79-82.
- [7] Jonas A, Z William P W. Explosive effects and applications[M]. New York: Springer-Verlag New York, Inc., 1998: 227-229, 247, 248.
- [8] 张宝平, 赵衡阳, 张守中, 等. 爆炸及其作用(下)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979: 44-45.
- [9] 刘保云, 李翠英. 录像技术在燃料空气炸药研究中的应用[J]. 弹道学报, 1997, 9(3): 86-90.  
LIU Bao-yun, LI Cui-ying. Application of video recording and measuring technique to the development of fuel air explosives[J]. Journal of Ballistics, 1997, 9(3): 86-90.
- [3] Longley R W, Analytical relationships for estimating the effects of X-rays on materials, AD-786926 [R]. California: McDonnell Douglas Astronautics Company, 1974.
- [4] Lindberg H E, Colton J D. Sheet explosive simulation for combined shock and structural response, AFWL-TR-69-124 [R]. California: McDonnell Douglas Astronautics Company, 1970.
- [5] 金咏梅. 动塑性本构关系研究及其在波动计算中的应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 1997.  
JIN Yong-mei. Dynamic plastic constitutive model and its application on the calculation of shock wave propagation[D]. Hefei: The USTC, 1997.
- [6] 朱兆祥, 李永池, 王肖钧. 爆炸作用下钢板层裂的数值分析[J]. 应用数学和力学, 1981, 2(4): 353-368.  
ZHU Zhao-xiang, LI Yong-chi, WANG Xiao-jun. Numerical analysis of spallation of steel target under the explosive loading[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1981, 2(4): 353-368.