

文章编号: 1006-9941(2005)04-0217-05

带壳钝感炸药非理想爆轰实验研究

赵继波, 谭多望, 赵锋, 方青, 何智, 李强, 高宁, 林俊

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: 采用光电测试的方法, 研究了钝感炸药的约束效应。实验结果表明, 增加约束不能显著提高炸药的定态爆速, 但可以使波阵面变得扁平; 在装药直径相同的情况下, 有约束和无约束的装药相比, 有约束装药波阵面上各点法向爆速提高; 约束对爆轰波波阵面的这种影响起主要作用的是约束材料的波阻抗, 随着约束波阻抗的增大, 这种影响更加显著。

关键词: 爆炸力学; 约束效应; 定态波形; 法向爆速

中图分类号: TJ55; O382.3

文献标识码: A

1 引言

目前国内外研究钝感炸药直径效应的实验, 都是在以空气作为边界的前提下进行的。然而, 大多数武器中的装药是与一定厚度的外壳直接接触。外壳作为边界约束条件之一, 对爆轰传播有一定的影响作用。对高能炸药施加惰性介质约束会改变炸药的拟定态爆速, 外壳对爆轰波传播的影响起主要作用的是材料的密度或质量。密度大的外壳, 爆炸时壳体径向移动困难, 减少径向能量的损失, 更多能量支持爆轰波的传播, 因而影响爆速和波形。

Livermore 实验室的 Tran 等^[1]研究了阻抗匹配较小的塑料管对 LX-17 的影响, 指出与不带约束的装药相比, 爆速没有得到明显提高, 但波形与设想相符, 变得扁平。Eden 等^[2]测量了带黄铜外壳的 EDC-35 (TATB/Kel-F800 = 95/5, 密度为 $1.895 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 圆杆中的定态波形。Miyake 等^[3]测量了带钢外壳的硝铵炸药的非理想爆轰的爆速。Wilson 等^[4]也验证了装药的约束条件对爆轰波的稳定传播有一定影响。

本次实验采用光电联合测试的方法, 测量了两种不同尺寸的柱形 TATB 基钝感炸药在两种阻抗差异较大的壳体下的定态爆速和波形, 确定了铝壳 (密度为 $2.77 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 和黄铜外壳 (密度为 $8.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 与对应尺寸的光杆炸药之间的差异, 说明了外界约束对炸药爆轰性能的影响。

2 实验

一般说来, 当装药直径大于临界直径时才能发生

爆轰。TATB 基炸药的临界直径约为 9 mm, 故选择了名义直径分别为 12.5 mm 和 15 mm 的两组炸药进行对比, 其实测参数见表 1。

表 1 两组炸药参数
Table 1 Parameters of charges

d/mm	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	length/mm	confinement
12.49	1.890	200.10	-
12.48	1.888	200.12	aluminium
14.95	1.889	240.12	-
14.96	1.894	240.20	brass

Stewart 和 Bdzil^[5]指出, 如果作为约束条件的惰性介质厚度大于反应区长度的一半, 则可视为无限厚。一般说来, 钝感炸药的反应区长度不超过 5 mm^[6], 为了便于机械加工, 被测药柱的约束外壳厚度均取为 4 mm。

图 1 为带黄铜外壳和带铝外壳的实验装置照片。

为了避免边侧稀疏破坏爆轰波结构, 影响定态爆速的测定, 在壳体上安放探针处贴上一层绝缘的聚酯薄膜利用起爆后壳体内产生的折射冲击波将聚酯薄膜破坏, 从而接通由探针组成的电开关。事实上, 电探针测得的时间是冲击波达到探针头的时间, 它与爆轰波达到该点的时间存在着一个时间差, 但由于壳体厚度均匀, 各电探针测得的信号均有相同的时间差, 因此可以用探针测得的数据来拟合爆速。

装置的安装过程中应该注意的是: (1) 不能将壳体上粘贴的这层聚酯薄膜刺破, 以防止探针和壳体形成闭合回路, 影响电测信号; (2) 将炸药往壳体内填充时, 炸药段之间的结合必须保持自然接触状态, 否则会影响爆轰波的稳定传播。壳体与药柱之间的缝隙必须用密封胶填满, 否则端部将会有射流出现。

收稿日期: 2004-10-31; 修回日期: 2005-02-22

作者简介: 赵继波 (1977 -), 男, 硕士, 从事爆炸力学研究。

e-mail: abcdef_z@163.com

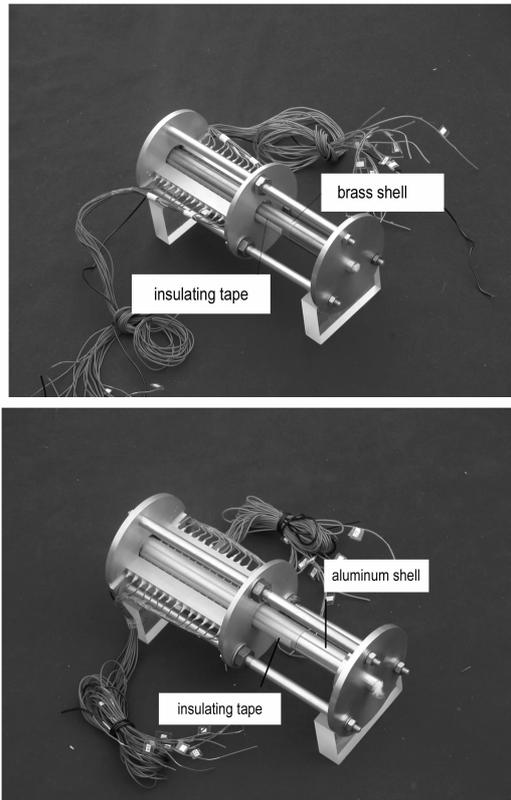


图 1 带壳钝感炸药的实验装置照片

Fig.1 Photo of experimental apparatus of IHE with confinements

3 实验结果与分析

3.1 定态爆速

根据实验结果用最小二乘法拟合探针的距离-时间关系,得到与 $\Phi 12.5$ mm 带铝外壳和 $\Phi 15$ mm 带黄铜外壳药柱对应的定态爆速分别是 $7.53 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $7.57 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。与相同直径的光杆药柱的定态爆速相比分别提高了 0.133% 和 0.265% ($\Phi 12.5$ mm 和 $\Phi 15$ mm 药柱的定态爆速分别为 $7.52 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $7.55 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$),它们的关系见图 2。

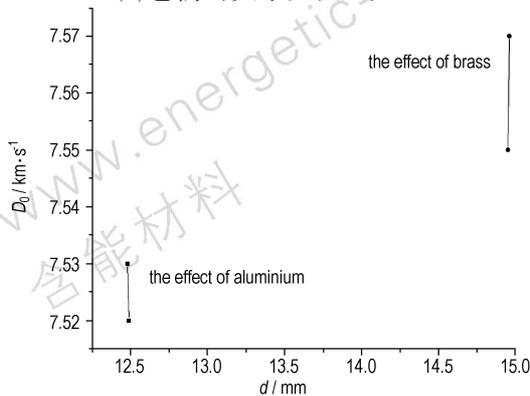


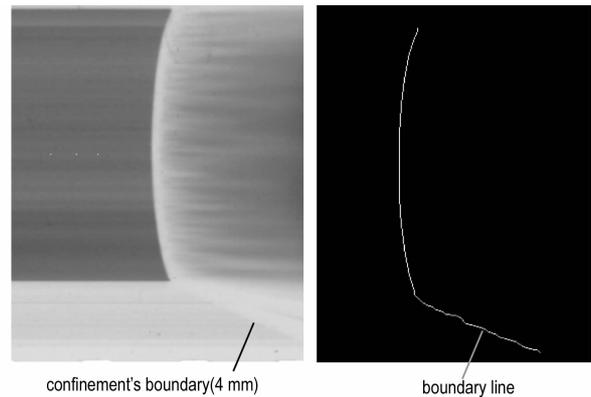
图 2 约束对定态爆速的影响

Fig.2 Effect of confinements on steady-state detonation velocity

这表明增加约束或改变约束材料有可能提高炸药的定态爆速。因为从理论上讲,对钝感炸药定态爆速产生影响的主要因素是爆轰波反应区内侧向能量的损失,而增加药柱边界材料的波阻抗(主要反映在材料的密度上),可以减小侧向稀疏的影响,加大先导冲击波对下层炸药冲击的强度,从而提高定态爆速。但从处理爆速数据的结果来看,这种提高量很小,只有数十米/秒的差异(1‰~3‰的差别),属于测试误差允许范围内,考虑到壳体的加工精度、探针安装的偏差、壳体 and 炸药的配合情况、炸药密度的不均匀性及尺寸误差、数据处理时的偏差、测试系统本身存在的误差等因素,这种提高也有可能是实验误差造成的。总体来说,加大炸药约束并不能显著提高其定态爆速。

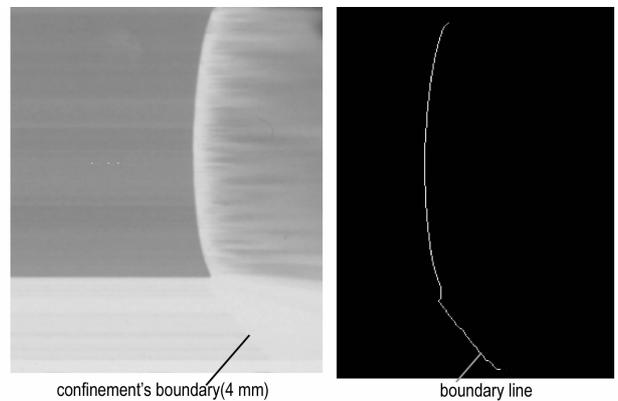
3.2 定态波形

爆轰波波型主要通过 SJZ-15 扫描相机和反光镜来测量,SJZ-15 相机转速设定为 $24 \times 10^4 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ (即 $12 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)。设定炸药爆轰传播的延迟时间,得到它们的波形和边界提取(见图 3)。



(a) 铜壳约束的波形及提取边界

(a) Wave shape and boundary with brass confinement



(b) 铝壳约束的波形及提取边界

(b) Wave shape and boundary with aluminium confinement

图 3 带有约束的波形图及边界提取

Fig.3 Wave shape and boundary with confinements

规定爆轰后外壳边界与药柱轴线的夹角为 φ ，由图 3 可以看出，铜壳约束时的 φ 远小于铝壳约束时的 φ 。这说明爆炸时，在相同厚度的情况下，铜壳的径向移动比铝壳更困难。

将图 3 中的底片数字化后可以读取波形数据，由相机扫描速度，得到爆轰波达到药柱端面的时间，乘以定态爆速即得到波阵面曲线。为了减小实验误差对记录波形带来的影响，可以通过平均轴线两边波形的方式进行处理。波阵面形状实验数据拟合的最佳形式是^[7]：

$$z(r) = - \sum_{i=1}^n \alpha_i \left(\ln \left[\cos \left(\eta \frac{\pi}{2} \frac{r}{R} \right) \right] \right)^i \quad (1)$$

式中， z 为波阵面形状， R 为装药半径， r 为波阵面上截面圆的半径， α_i 和 η 为拟合参数。根据式(1)拟合由图 3 读取的数字化数据，可以得到波阵面拟合曲线。拟合结果如图 4 所示，拟合参数见表 2。从图 4 可以看出，在相同的装药直径下，与无约束药柱相比，带约束的药柱波阵面要扁平一些；且随着约束材料波阻抗的增加，这种变化越明显，这说明波阻抗越大的约束能更有效地减小侧向稀疏的影响。结合图 3，可以从物理与化学实质上对图 4 所反映的现象作进一步地分析：在以较宽反应区为特征的钝感炸药非理想爆轰传播中，侧向稀疏对边界部分的影响尤为突出，由于爆轰产物膨胀对外做功，边界处的压力下降从而使边界部分的炸药在声速点上（反应区末端）不能完全反应，而中部（除去边界部分的其它部分）受侧向稀疏影响较小，炸药在声速点上能更充分地反应。这样的结果导致波阵面变得弯曲；增加炸药的约束或改变炸药的约束材料，则在边界处会有较大的波阻抗存在，使约束壳体不容易产生径向移动，在一定程度上阻碍爆轰产物的膨胀做功。此时波阵面边界处仍能保持相对较高的压力和温度，使该处的炸药能更充分反应，从而使波形变得更扁平。

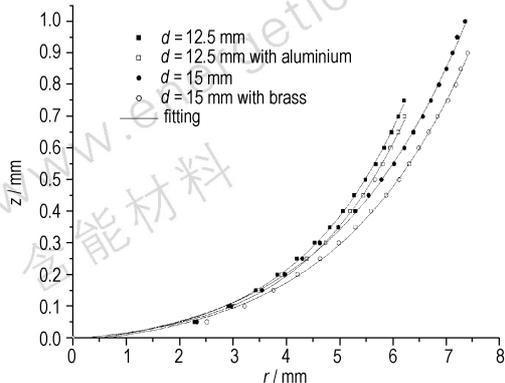


图 4 约束对爆轰波形的影响

Fig. 4 Effect of confinements on detonation wave

表 2 波阵面曲线拟合参数

Table 2 Fitting parameters of wave front

d/mm	α_1/mm	α_2/mm	α_3/mm	η/mm
12.49	0.4512	0.0855	0.0161	0.9505
14.95	0.4601	0.0970	0.0163	0.9622
12.48 (aluminium)	0.3604	0.0756	0.0155	0.9512
14.96 (brass)	0.3201	0.0930	0.0131	0.9643

3.3 不同约束条件下 $D_n(\kappa)$ 关系的标定

法向爆速 D_n 与当地曲率 κ 的关系曲线由拟定态爆速 D_0 和波阵面曲线 $z(r)$ 联立计算。波阵面法线与药柱轴线之间的夹角为 θ (θ 为波形截面圆半径 r 的函数)，由几何关系可以得到法向爆速的表达式：

$$D_n(r) = D_0 \cos \theta = D_0 / \sqrt{1 + (z')^2} \quad (2)$$

当地曲率是指平均曲率，主要由两部分组成：

$$\kappa = \frac{z''(r)}{[1 + z'(r)^2]^{3/2}} + \frac{z'(r)}{r \sqrt{1 + z'(r)^2}} \quad (3)$$

上式右端第一项为轴平面内波阵面曲线 $z(r)$ 的曲率；第二项为截平面内波阵面形成的截面圆在法向椭圆面内的投影曲线的曲率值。

D_n - κ 关系不仅同反应区有关（反映在波阵面当地曲率及直径上面），在有外界约束的条件下，还与外壳的材料性质有关。根据式(2)和式(3)计算出的两组带壳约束与其相同装药直径的 D_n - κ 关系见图 5。

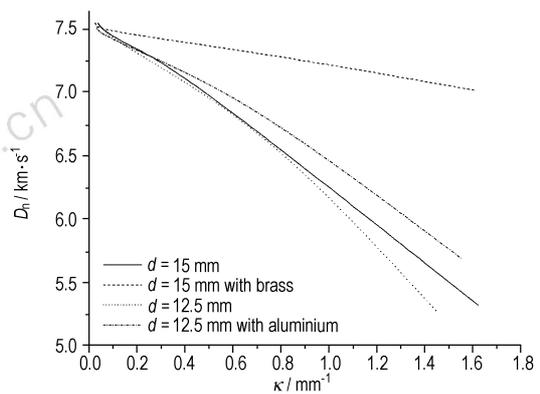


图 5 约束条件下的 $D_n(\kappa)$ 关系

Fig. 5 Relation of $D_n(\kappa)$ with confinements

当药柱带有外界约束时，在相同直径装药的相同曲率点上，有约束的法向爆速较无约束的法向爆速大；当约束材料波阻抗较大时，沿波阵面各点的法向爆速较无约束时大大增加；当约束材料波阻抗较小时，法向爆速有所增加，但增长率远低于波阻抗大的约束。这也从另一个方面反映了外壳对爆轰波传播的影响起主要作用的不是外壳的强度而是其密度。波阻抗大的

外壳,爆炸时壳体径向移动困难,可以减小径向能量的损失,以更多能量支持爆轰,进而影响到法向爆速和波形,使爆轰更趋于CJ状态。

Bdzil等^[7]归纳了不同直径钝感炸药的 D_n - κ 曲线后,提出了在 $r \leq 0.9R$ 的情况下, $D_n(\kappa)$ 的计算式:

$$\frac{D_n(\kappa)}{D_{CJ}} = 1 + A[(\kappa_f - \kappa)^\alpha - \kappa_f^\alpha] - \frac{B\kappa^\beta}{1 + C\kappa^\gamma} \quad (4)$$

式中, D_{CJ} 为爆速,取 $7.777 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 A 、 B 、 C 、 κ_f 、 α 、 β 和 γ 为拟合参数。这是目前描述 $D_n(\kappa)$ 关系较理想的形式。

根据在直径效应研究中的发现,当 κ 较小时, D_n 只与 κ 有关。由此可以作一假设,即在相同的约束条件下(包括约束材料和约束厚度),对于不同直径的装药,在 $r \leq 0.9R$ 的范围内,法向爆速 D_n 只与当地曲率 κ 有关。由 $r \leq 0.9R$ 时的 D_n - κ 关系可以拟合出在有黄铜约束和铝约束条件下的计算式(4)的参数,同时给出无约束条件下的拟合参数,见表3。

表3 三种约束条件下的拟合参数

Table 3 Fitting parameters with three different confinements

confinement	A	B	C	κ_f	α	β	γ
brass	0.092	0.300	15.041	0.577	0.439	0.539	0.915
aluminium	0.183	0.292	13.906	0.566	0.449	0.552	0.964
nonrestraint	0.135	0.392	11.220	0.556	0.669	0.744	0.973

4 带壳药柱与不带壳药柱爆轰波演化过程

应用LS方法计算了 $\Phi 15 \text{ mm}$ 钝感炸药与相应尺寸的带黄铜外壳和铝外壳钝感炸药的爆轰波传播波形,见图6和图7。

从图6中可看出,在不稳定传播阶段($t = 4 \mu\text{s}$ 和 $t = 6 \mu\text{s}$ 时),带黄铜外壳的爆轰波发展比带铝外壳和带不带外壳的爆轰波发展要快,这可能是由于黄铜外壳的阻抗较大,减少了反应区能量的损耗,有更多能量支持爆轰波的发展,使其得到更大的加速度;在进入稳定传播(即定态传播)阶段后,波形和爆速趋于稳定($t = 10 \mu\text{s}$ 和 $t = 12 \mu\text{s}$ 时)。

由图7可看出,在有外壳的情况下,爆轰波定态爆速比无外壳时的定态爆速稍快,同时波形较无外壳时扁平,且随着外壳波阻抗(即密度)的增加,定态爆轰传播的这种现象更加明显。这与实验所证明的情况相符合,即外壳约束减少了侧向稀疏波的影响,使化学反应区产生更多能量支持爆轰波的发展,此时爆轰更接近于CJ状态。

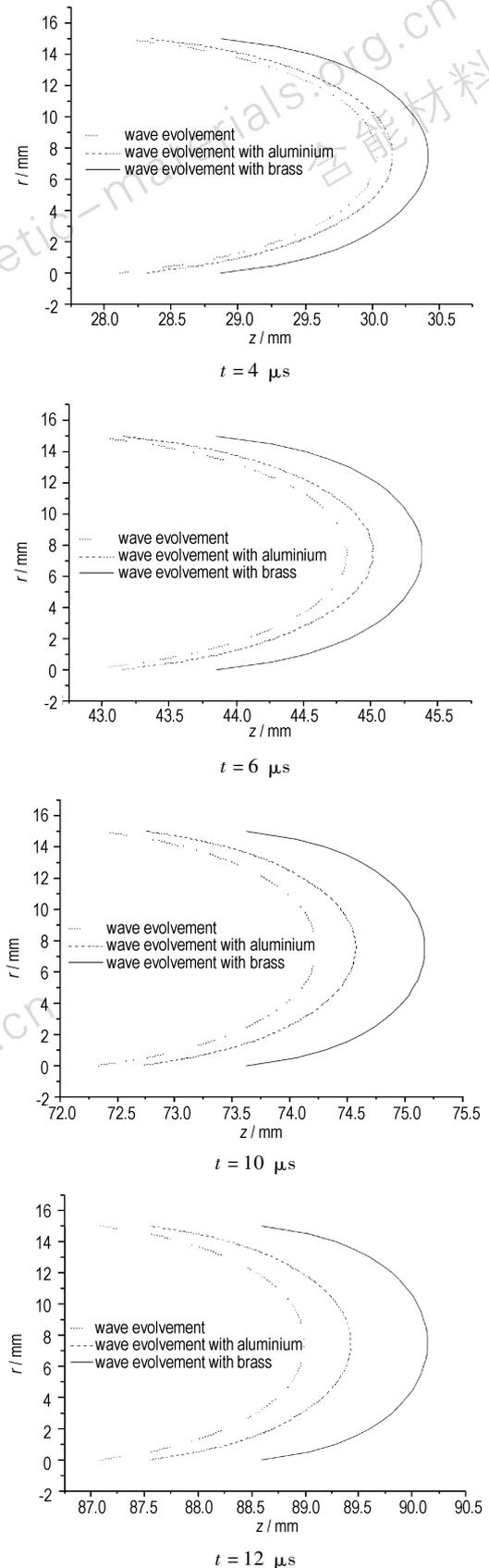


图6 不同约束的钝感炸药在不同的时刻的波形

Fig.6 Wave shape of IHE with various confinements at different time

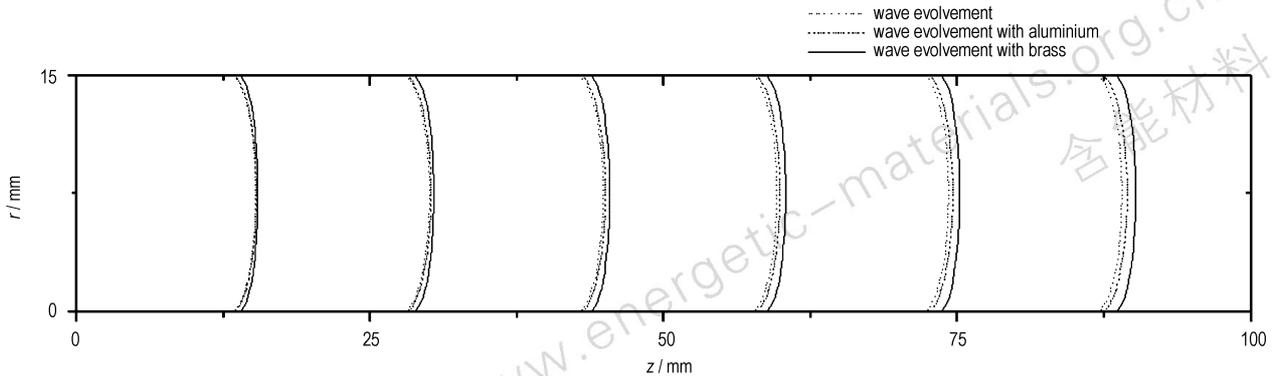


图7 几种不同约束条件下的波形演化

Fig.7 Evolvement of wave shape of IHE with different confinements

5 结论

炸药的爆轰性能与炸药所受的约束条件有关系,在装药尺寸和外壳厚度一定的情况下,壳体材料波阻抗越大,边侧稀疏波对化学反应区的影响就越小。尽管壳体对炸药定态爆速的影响较小,但由于增加约束使相同装药直径的爆轰波形变得更扁平,因此,对应于相同位置的点上,有约束的法向爆速增强,且随着约束材料波阻抗的加大,这种影响会更加显著地提高。

以上现象也可以从哈里顿原理的角度来解释。约束增强,则爆炸时壳体径向移动困难,引起稀疏波从装药侧面达到轴线的增加,从而减小了侧向能量耗散的相对影响,使爆轰的传播得到更多化学反应能的支持。

参考文献:

[1] Tran T D, Tarver C M. Characterization of detonation wave propagation in LX-17 near the critical diameter[A]. Proceedings of Twelfth Symposium (International) on Detonation [C], San Diego: 2002. 996 - 1006.

[2] Eden G, Belcher R A. The effects of inert walls on the velocity of detonation in EDC35, an insensitive high explosive [A]. Proceedings of Ninth Symposium (International) on Detonation [C], Oregon: The Naval Surface Warfare Center, 1989. 831 - 841.

[3] Miyake A, Steen A C, Kodde H H. Detonation velocity and pressure of the non-ideal explosive ammonium nitrate [A]. Proceedings of Ninth Symposium (International) on Detonation [C], Oregon: The Naval Surface Warfare Center, 1989. 560 - 565.

[4] Wilson W H, Forbes J W. Experimental study of detonation in PBXW-123, A large failure-diameter, non-ideal explosive [A]. Proceedings of Tenth Symposium (International) on Detonation [C], Boston: Office of Naval Research, 1993. 63 - 68.

[5] Stewart D S, Bdzil J B. Examples of detonation wave spread applications [A]. Proceedings of Ninth Symposium (International) on Detonation [C], Oregon: The Naval Surface Warfare Center, 1989. 773 - 783.

[6] Sheffield S A, Bloomquist D D, Tarver C M. Subnanosecond velocity interferometer measurements of detonating PBX-9502 [J]. *J Chem Phys*, 1984, 80: 3831.

[7] Bdzil J B. Steady-state two-dimensional detonation [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1981, 108: 195 - 226.

Experimental Study on the Non-ideal Detonation of IHE with Confinements

ZHAO Ji-bo, TAN Duo-wang, ZHAO Feng, FANG Qing, HE Zhi, LI Qiang, GAO Ning, LIN Jun

(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Effect of confinements on insensitive high explosive (IHE) is studied by photoelectric test. Results show that adding confinement can not enhance the steady-state detonation velocity of IHE markedly, but makes the confinement be faster than that of in-confinement mainly resulting from the wave impedance of confinement material, and the effect becomes more obvious as the wave impedance of confinement material increase.

Key words: explosion mechanics; confinement effect; steady-state wave shape; normal detonation velocity