

文章编号: 1006-9941(2005)01-0013-04

常温下钝感炸药爆轰波传播的曲率效应研究

谭多望, 方青

(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: 钝感炸药爆轰波的传播与波阵面当地平均曲率密切相关, 为研究这种爆轰波传播的非理想行为, 本文通过光电联合测试方法测量了常温下 $\Phi 10$ mm、 $\Phi 12.5$ mm、 $\Phi 15$ mm 和 $\Phi 30$ mm 的钝感药柱的定态爆速和波形, 根据拟合的爆轰波形, 分析了波阵面法向速度 D_n 与当地平均曲率 κ 之间的关系。结果表明, 定态爆速随药柱直径的增大而增大, 当波阵面当地平均曲率 κ 较小时, 法向爆速 D_n 只与 κ 有关, 而当 κ 较大时, 法向爆速 D_n 不仅与当地平均曲率 κ 有关, 而且还与药柱直径有关。

关键词: 爆炸力学; 钝感炸药; 曲率效应; 定态波形; 定态爆速

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

1 引言

在发散爆轰波中, 反应不能在波后产物流场声速点上完成, 从而爆轰波法向速度 D_n 与波阵面当地平均曲率 κ 有关, 即 $D_n = D_n(\kappa)$, 这种现象反映了爆轰波传播的非理想行为, 称为曲率效应。目前曲率效应关系 $D_n(\kappa)$ 无论从理论上还是从实践上都被认为是炸药的一种基本爆轰性能, 给定 $D_n(\kappa)$ 关系和边界条件, 在数学上就决定了爆轰波阵面传播的几何学或运动规律, 无须依赖于爆轰产物流场的计算^[1]。 $D_n(\kappa)$ 关系同反应速率密切相关, 一般反应速率形式下 $D_n(\kappa)$ 关系的理论分析非常困难。Bdzil 和 Stewart 使用爆轰反应流动的数学模拟系统得到的参考结论是^[2]:

$$\left(\frac{D_n}{D_{CJ}}\right)^2 = 1 - \frac{D_n \kappa}{(1-n)D_{CJ}} + \frac{n}{1-n} \left(\frac{D_n}{D_{CJ}} \kappa\right)^{1/n} \quad (1)$$

式中 D_{CJ} 是炸药 CJ 爆速, n 是炸药反应速率中燃耗阶数。由于采用的反应速率并不真实, 在 Bdzil 和 Stewart 得到的结论中, 有意义的只是 $D_n(\kappa)$ 的函数形式, 实际能应用的是基于此函数形式的经验关系, 常见的有^[3]

$$\frac{D_n}{D_{CJ}} = 1 - \alpha \kappa \quad (2)$$

$$\frac{D_n}{D_{CJ}} = \frac{D_f}{D_{CJ}} + \left(1 - \frac{D_f}{D_{CJ}}\right) \sqrt{1 - \frac{\kappa}{\kappa_f}} \quad (3)$$

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

这里 D_f 和 κ_f 分别代表爆轰波不能稳定传播时的失效爆轰速度和失效曲率, A, B, C, α, β 和 γ 是拟合参数。

通过精细的实验标定 $D_n(\kappa)$ 关系是研究曲面爆轰波传播的基础。标定实验主要有三类: 一是球形散心爆轰波实验, 如“洋葱皮(Onion Skin)”实验, 二是平面爆轰波在片状弧形炸药中的演化实验, 三是扁条形药柱或大长径比药柱中拟定常二维爆轰波实验^[4,5]。

钝感炸药具有良好的安全性, 受到国内外的重视, 但是, 由于反应区比较宽, 爆轰波传播的曲率效应非常明显。本文通过实验测量大长径比药柱中拟定常二维爆轰波的定态波形和速度, 研究了 JB-9014 钝感炸药爆轰波传播的非理想行为, 并确定了曲率效应参数。

2 实验方法

实验装置如图 1 所示。雷管起爆泰安导爆药柱后, 再依次起爆传爆药柱 (RDX/TNT = 65/35) 和无约束的柱形 JB-9014 钝感炸药。钝感药柱的前端用于爆轰波的演化, 演化段长度不低于直径的 6 倍, 以保证在测速段之前形成拟定态爆轰波。爆速由两组对称布置的探针测量, 探针采用半球头形状的弹簧探针, 以保证探针与炸药表面之间点接触。

采用氙灯外光源和药柱端面贴反射膜的方法, 由高速扫描相机测量药柱中的爆轰波阵面形状, 实验布局见图 2。由于药柱直径小, 在药柱与反光镜之间放置一透镜。药柱端面贴一层非常薄的反射膜, 将氙灯光反射至相机, 使胶片曝光。当爆轰波到达药柱端面, 反射膜被破坏, 氙灯光不再反射至相机, 之后产物光出现, 胶片再度曝光。氙灯光被截止的形状即为爆轰波

收稿日期: 2003-01-03; 修回日期: 2004-08-20

作者简介: 谭多望(1967-), 男, 研究员, 博士, 从事爆轰基础研究和常规战斗部设计工作。e-mail: dwtan@caep.ac.cn

阵面形状。为使波形前沿和边界清晰,药柱端面平整光滑,反射膜与药柱紧贴,氙灯照明角度尽可能小,以不影响测量为原则。相机扫描速度为 $12 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$, 扫描速度的不确定度为 0.2%。

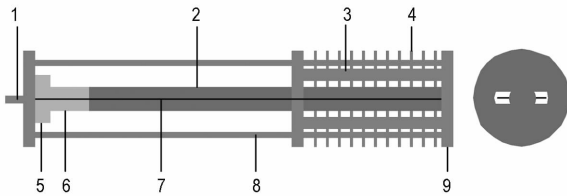


图1 实验装置示意图

1—雷管, 2—钝感药柱, 3—探针架, 4—探针, 5—导爆药柱, 6—传爆药柱, 7—接地棒, 8—连接杆, 9—铝板

Fig.1 Rate stick design

1—detonator, 2—JB-9014 charge, 3—shelf of electrical pin, 4—electrical pin, 5—PETN booster, 6—Comp. B booster, 7—grounding bar, 8—connector, 9—aluminum plate

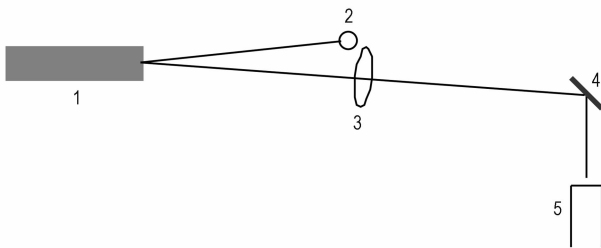


图2 实验布局

1—钝感药柱, 2—氙灯, 3—透镜, 4—反光镜, 5—扫描相机

Fig.2 Schematic diagram of experiment

1—rate stick, 2—Xenon flash, 3—lens, 4—mirror, 5—streak camera

3 实验结果及分析

3.1 定态爆速

用最小二乘法拟合探针距离(x)-时间(t)数据,得到定态爆速 D_0 , 结果见表1, 表中定态爆速是两组探针测量结果的平均值, 探针 $x-t$ 数据及其拟合曲线见图3, 图中 d 是药柱直径。

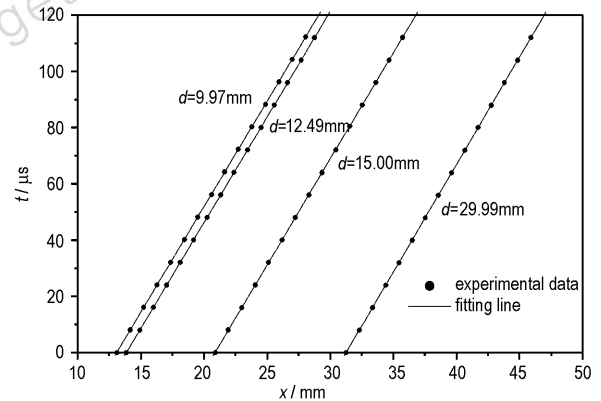
3.2 定态波形

典型的定态波形见图4, 从图中可看出, 波形前沿和边界非常清晰, 说明采用氙灯外光源和药柱端面贴反射膜的方法是可行的。底片数字化后读取波形数据, 根据相机扫描速度, 得到爆轰波到达药柱端面的时间, 再乘以定态爆速得到波阵面曲线。波阵面有轻微的不对称, 其原因可能来自炸药密度的不均匀性、数据处理的偏差, 也可能来自相机的测量误差, 因为相机反光镜的轴存在微小偏差, 导致记录波形不对称。我们通过平均轴线两边的波形得到爆轰波阵面波形。

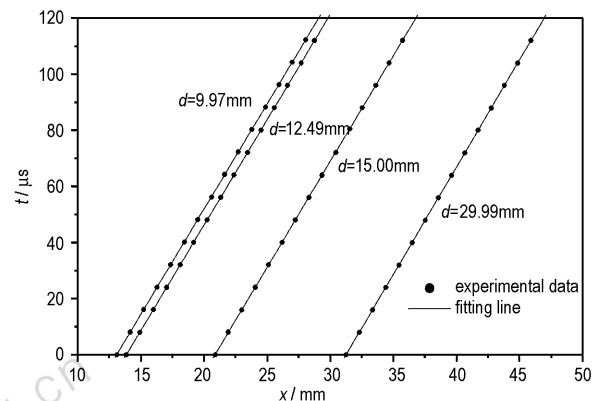
表1 定态爆速测量结果

Table 1 Steady-state detonation velocity

No.	d /mm	L /mm	ρ /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	T /°C	D_0 /($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	9.97	200	1.890	24	7.50
2	12.49	200	1.890	24	7.52
3	15.00	240	1.890	23.5	7.55
4	29.99	300	1.895	23.5	7.63



(a) the first set of electrical pins



(b) the second set of electrical pins

图3 探针距离(x)-时间(t)关系

Fig.3 $x-t$ data of electrical pins

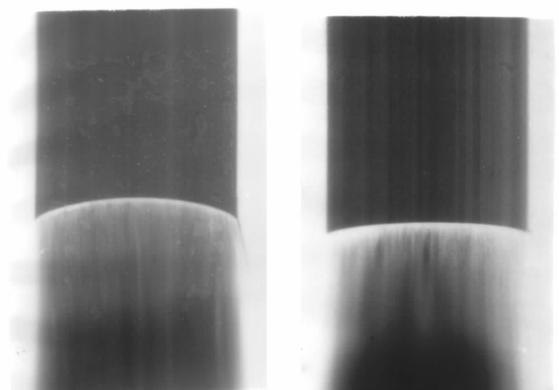


图4 典型的测量波形

Fig.4 Typical film record of streak camera

3.3 $D_n(\kappa)$ 曲线

波阵面曲线拟合形式有多种,常见有多项式、Chebyshev 多项式、 $\ln[J_0(r)]$ (J_0 为零阶 Bessel 函数) 级数和 $\ln[\cos(r)]$ 级数。这里选用由 Bdzil^[6] 提出,并被 Hill、Forbes、Lemar^[7] 等人采用的 $\ln[\cos(r)]$ 级数形式,具体的拟合形式如下:

$$z(r) = - \sum_{i=1}^n a_i \left\{ \ln \left[\cos \left(\eta \frac{\pi}{2} \frac{r}{R} \right) \right] \right\}^i \quad (5)$$

式中 $z(r)$ 是波阵面曲线, r 是径向坐标, R 是药柱半径, a_i 和 η 是拟合参数。该式具有两个明显的特点,一是它的导数是单调的,二是它能很好地表现药柱边界处急剧变化的曲率。对于所有的项, η 是相同的,当 $\eta=0$ 时,奇点在 $r = \infty$ 处,当 $\eta=1$ 时,奇点在药柱边界处。对钝感炸药,取三项就能很好地拟合波阵面曲线。拟合结果见图 5,拟合参数见表 2。

表 2 波阵面曲线拟合参数

Table 2 Fitting parameters of wave front

No.	d/mm	a_1/mm	a_2/mm	a_3/mm	η
1	9.97	0.3104	0.0443	0.0125	0.9330
2	12.49	0.3235	0.0467	0.0088	0.9529
3	15.00	0.3643	0.0748	0.0147	0.9573
4	29.99	0.8268	0.2397	0.0329	0.9757

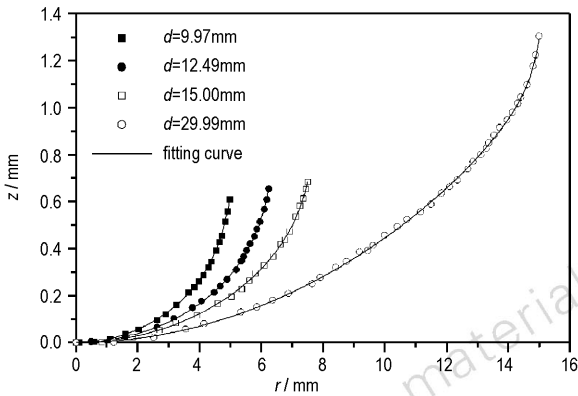


图 5 波阵面曲线拟合结果

Fig. 5 Fits of wave front data

$D_n(\kappa)$ 曲线由定态爆速 D_0 和波阵面曲线计算。记波阵面法线与药柱轴线之间的夹角为 $\theta(r)$, 则

$$D_n(r) = D_0 \cos[\theta(r)] = \frac{D_0}{\sqrt{1 + z'(r)^2}} \quad (6)$$

这里角标“'”表示对 r 求导。当地平均曲率 $\kappa(r)$ 计算式为

$$\kappa(r) = \frac{z''(r)}{[1 + z'(r)^2]^{3/2}} + \frac{z'(r)}{r[1 + z'(r)^2]^{1/2}} \quad (7)$$

当 $r=0$ 时,上式右边两项相等。联立式(6)和(7)即可画出 $D_n(\kappa)$ 曲线,见图 6。由于 $d=29.99 \text{ mm}$ 的药柱密度与其余药柱的密度不同,计算该药柱的 $D_n(\kappa)$ 曲线时,其定态爆速 D_0 根据 PBX-9502 炸药(与 JB-9014 炸药成份配比相同,粘结剂相近)的密度与爆速修正因子修正到相同密度^[8]。

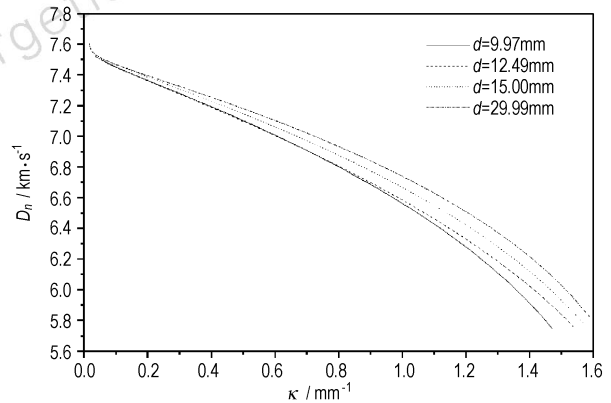


图 6 $D_n(\kappa)$ 关系

Fig. 6 $D_n(\kappa)$ curves

从图中可看出,当 κ 较小时(对应 $r \leq 0.9 R$),法向爆速 D_n 与药柱直径基本无关,只与当地平均曲率 κ 有关,当 κ 较大时,法向爆速 D_n 不仅与当地平均曲率 κ 有关,而且还与药柱直径有关。Hill 等^[7]、Aslam 等^[9] 测量了不同温度下药柱中的定态爆速和波形,研究了 $D_n(\kappa)$ 关系,得到了同样的结果。

根据 $r \leq 0.9 R$ 的 $D_n(\kappa)$ 关系拟合如式(4)所示的 $D_n(\kappa)$ 计算式。计算式(4)由 Bdzil 针对 PBX-9502 药柱提出,后来被 Hill、Collyer、David 等人采用^[3,7,10],是目前描述 $D_n(\kappa)$ 关系较理想的计算式。由四种药柱的 $D_n(\kappa)$ 数据拟合得到的结果见图 7。

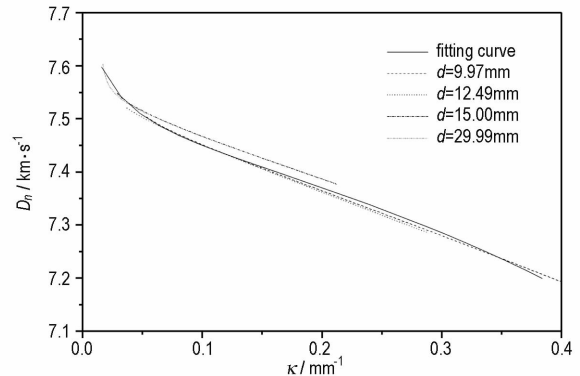


图 7 $r \leq 0.9 R$ 范围内 $D_n(\kappa)$ 关系的拟合结果

Fig. 7 Fits of $D_n(\kappa)$ curves in the region $r \leq 0.9 R$

当曲率 κ 的单位取为 mm^{-1} 时,拟合参数为: $D_{\text{Cl}} = 7.7770 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$, $\kappa_{\text{f}} = 0.5564$, $A = 0.1313$, $B = 0.3551$, $C = 13.4892$, $\alpha = 0.5360$, $\beta = 0.6078$, $\gamma = 0.8975$, 计算 $r \leq 0.9 R$ 范围内的法向爆速 D_{n} 与实验结果最大相差 $0.015 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

4 结 语

通过测量不同直径的药柱中拟定常二维爆轰波的定态波形和速度,研究了钝感炸药爆轰波传播的曲率效应,结果表明,当波阵面当地平均曲率 κ 较小时,法向爆速 D_{n} 只与 κ 有关,当 κ 较大时,法向爆速 D_{n} 不仅与当地平均曲率 κ 有关,而且还与药柱直径有关。

由于药柱边界处的爆轰波形变化非常快,要精确地测量,除提高波形和边界的清晰度外,还需提高相机的扫描速度和胶片的数字化精度,国外已用 $30 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 甚至 $100 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 的扫描速度测量药柱的爆轰波形,并在实验过程中用一定频率的激光脉冲校正扫描速度。我们的测试技术与美英等国基本相当,虽然测到了比较清晰的波形,但受到实验条件和设备的限制,本文的工作是初步的,尚需开展更精细的研究工作。

参考文献:

- [1] 孙承纬. 爆轰传播理论的解析研究方法(VI)[J]. 爆炸与冲击, 1992, 12(1): 89-96.
SUN Cheng-wei. Analytic methods in the theory of detonation propagation(VI)[J]. *Explosion and Shock*, 1992, 12(1): 89-96.
- [2] Bdzil J B, Stewart D S. Time-dependent two-dimensional detonation: The interaction of edge rarefactions with finite-length reaction zones

- [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1986, 171(1): 1-26.
- [3] David L K. Multi-valued Normal Shock Velocity versus Curvature Relationships for Highly Non-ideal Explosives[A]. Proceeding of Eleventh Symposium (International) on Detonation [C], Colorado: Office of Naval Research, 1997. 181-192.
- [4] Bdzil J B, Fickett W. Detonation shock dynamics: A new approach to modeling multi-dimensional detonation waves [A]. Proceeding of Ninth Symposium (International) on Detonation [C], Oregon: Office of Naval Research, 1989. 730-742.
- [5] Bdzil J B, Davis W C. Detonation shock dynamics (DSD) calibration for PBX 9502 [A]. Proceeding of Tenth Symposium (International) on Detonation [C], Boston: Office of Naval Research, 1993. 146-149.
- [6] Bdzil J B. Steady-state two-dimensional detonation [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1981, 108: 195-226.
- [7] Hill L G, Bdzil J B, Aslam T D. Front Curvature Rate Stick Measurements and Detonation Shock Dynamics Calibration for PBX 9502 over a Wide Temperature Range [A]. Proceeding of Eleventh Symposium (International) on Detonation [C], Colorado: Office of Naval Research, 1997. 1029-1037.
- [8] Campell A W. Diameter effect and failure diameter of a TATB-based explosive [J]. *Propellants, Explosive, Pyrotechnics*, 1984, 9: 183-187.
- [9] Aslam T D, Bdzil J B, Hill L G. Extensions to DSD theory: Analysis of PBX 9502 rate stick data [A]. Proceeding of Eleventh Symposium (International) on Detonation [C], Colorado: Office of Naval Research, 1997. 21-29.
- [10] Collyer A M, Dunnett J D, Swift D C, et al. WBL Detonation Wave Propagation for EDC35 and EDC37 [A]. Proceeding of Eleventh Symposium (International) on Detonation [C], Colorado: Office of Naval Research, 1997. 12-20.

Curvature Effect for Insensitive Explosive at Normal Atmospheric Temperature

TAN Duo-wang, FANG Qing

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

Abstract: Steady-state detonation velocities and wave shapes were measured for JB-9014 rate sticks at the temperature $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$, with diameters of 10, 12.5, 15, 30 mm respectively. Wave shape data were fit with an analytic form, by which the normal velocity $D_{\text{n}}(\kappa)$ was calculated. The data confirm that the local normal wave velocity D_{n} depends only on the local total curvature κ for small κ , but it varies with both curvature and explosive diameter in the case of big κ .

Key words: explosion mechanics; insensitive high explosive; curvature effect; steady-state wave shape; steady-state detonation velocity