

文章编号: 1001-1455(2011)04-0439-05

# HMX/TNT 炸药爆速与曲率及组分关系实验研究\*

张宏亮, Shakeel A R, 黄风雷

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 为了确定爆轰波法向速度  $D_n$  与当地曲率  $\kappa$  的定量关系, 用光电联合测试法研究质量配比分别为 60/40、50/50 及 40/60 时 HMX/TNT 炸药的  $D_n$ - $\kappa$  关系。结果表明, 爆轰波延滞距离  $z$  随 TNT 含量的增加而增大; 爆轰波延滞距离  $z$  随着炸药密度  $\rho$  的增大而减小; 随着 TNT 的含量增加,  $D_n$ - $\kappa$  曲线的斜率逐渐增大, 且斜率增大的速率为正值。为了减少实验标定费用, 引入了新变量  $R_t$ , 将  $D_n$ - $\kappa$  关系推广为  $D_n(\kappa, R_t)$  关系, 并给出相应  $R_t$ - $z$ - $r$  关系。

**关键词:** 爆炸力学; 非理想爆轰; 配比; HMX/TNT; DSD 方法

**中图分类号:** O381

**国标学科代码:** 130 · 35

**文献标志码:** A

爆轰波传播问题是爆轰物理研究的重要问题之一, 目前带反应区的爆轰波传播理论问题仍没有完全解决。20 世纪 80 年代, 在 Whitham 冲击动力学基础上, J. B. Bdzil 等<sup>[1]</sup> 提出了爆轰冲击波动力学方法, 即 DSD 方法。该方法使多维爆轰波传播研究走向实用阶段, 可解决一些工程设计问题。DSD 方法被认为是目前研究爆轰波非理想传播的可行途径, 该方法证明爆轰波法向速度  $D_n$  与当地曲率  $\kappa$  密切相关。目前  $D_n(\kappa)$  关系难以从理论上导出, 一般通过曲面爆轰波传播实验标定。在 J. B. Bdzil 之后, 针对 DSD 实验参数标定做了大量工作<sup>[2-4]</sup>, 这些工作主要集中在 PBX-9501、PBX-9502 和 EDC-35 炸药。孙承纬<sup>[5]</sup>、谭多望等<sup>[6]</sup>、赵继波等<sup>[7]</sup> 针对 JB-9014 炸药标定了大量 DSD 实验参数, 并相应开展了一系列有关 DSD 方法的研究; A. R. Shakeel 等<sup>[8]</sup> 针对 RDX/TNT 炸药开展了 DSD 方法的实验研究。目前针对 HMX/TNT 炸药的 DSD 方法研究工作还不多, 本文中, 采用光电联合测试方法测量常温下质量配比分别为 60/40、50/50 和 40/60 时 HMX/TNT 炸药的定态爆速和波形, 根据拟合的爆轰波形标定 DSD 实验参数, 并进一步分析不同炸药对比对法向速度  $D_n$  与当地曲率  $\kappa$  关系的影响。

## 1 实验方法

爆轰装置如图 1 所示, 用雷管起爆主装药 (HMX/TNT 注装炸药) 药柱, 主装药药柱长度必须足够长以保证在测速段之前形成拟定态爆轰波。实验装置布局如图 2 所示, 爆速由 2 组对称布置的电探针测量, 拟定态爆轰波形通过转镜式高速摄影相机测得, 相机扫描速度为 1 r/ms, 即 3.003 km/s。

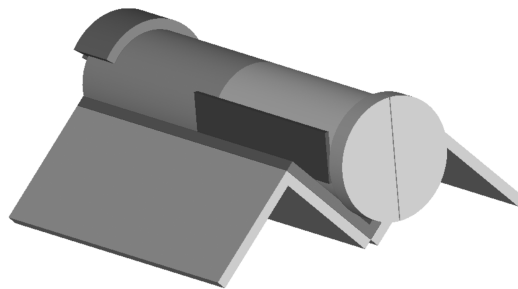


图 1 爆轰装置示意图  
Fig. 1 Rate stick design

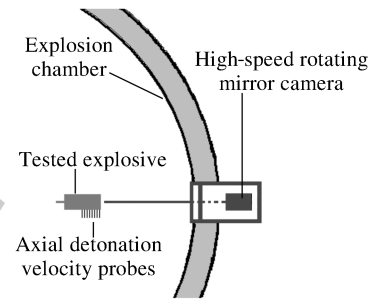


图 2 实验装置布局图  
Fig. 2 Experimental layout

\* 收稿日期: 2010-05-11; 修回日期: 2010-09-09  
基金项目: 国家自然科学基金项目(10832003)  
作者简介: 张宏亮(1984—), 男, 博士研究生。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 定态爆速及定态波形

定态爆速及药柱参数列于表 1。典型的波形测量结果如图 3 所示,底片中定态爆轰波形前沿和边界都很清晰,说明采用高速扫描相机直接从爆轰装置端部狭缝中测爆轰波形的方法是可行的。读取底片波形数据的方法如下:先根据相机的扫描速度计算爆轰波到达药柱端面的时间,将该时间乘以定态爆速  $D_0$  得到波阵面曲线波形。

常见的波阵面曲线拟合形式  $\ln(\cos(r))$  级数、 $\ln(J_0(r))$  级数( $J_0$  为零阶 Bessel 函数)和 Chebyshev 多项式。本文中采用  $\ln(\cos(r))$  级数对 DSD 实验参数进行拟合,具体表达式为

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

式中: $z(r)$  是波阵面曲线, $r$  是波阵面上的截面圆半径, $R$  是药柱半径, $a_n$  和  $b$  是拟合参数。拟合参数列于表 2,拟合结果如图 4 所示。

表 1 定态爆速及药柱参数

Table 1 Stick parameters of detonation velocity experiment

$w(\text{HMX})/w(\text{TNT})$	$l/\text{mm}$	$d/\text{mm}$	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$D_0/(\text{km}/\text{s})$
60/40	150	49.96	1.744	8.10
50/50	150	49.99	1.716	7.92
40/60	150	50.05	1.685	7.57

表 2 波阵面曲线拟合参数

Table 2 Fitting parameters of wave front

$w(\text{HMX})/w(\text{TNT})$	$a_1/\text{mm}$	$a_2/\text{mm}$	$b$
60/40	1.537	0.233 3	0.826 3
50/50	1.730	0.258 8	0.842 3
40/60	2.621	0.407 9	0.798 4

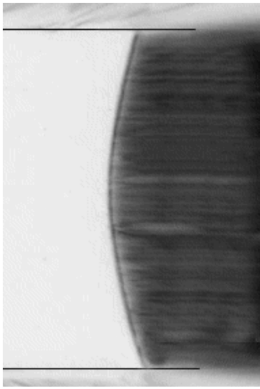


图 3 典型的爆轰波形数字底片

Fig. 3 Typical film record of detonation

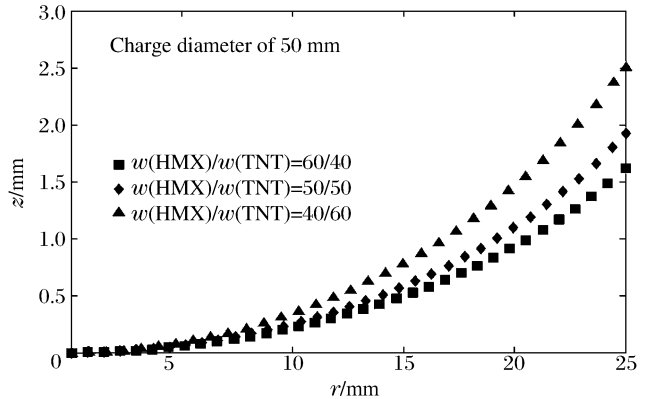


图 4 波阵面  $z-r$  曲线

Fig. 4 Wave front data of  $z-r$

### 2.2 $D_n(\kappa)$ 曲线

$D_n(\kappa)$  由定态爆速  $D_0$  和波阵面曲线  $z(r)$  计算。由几何关系可得法向爆速表达式为

$$D_n(r) = \frac{D_0}{\sqrt{1+s^2(r)}} \quad (2)$$

波阵面上当地平均曲率  $\kappa$  表达式为

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

$$D_n = D_{CJ}(1 - \alpha\kappa) \quad (4)$$

式中: $s(r) = dz/dr$ 。联立式(2)~(3)可得  $D_n(\kappa)$  关系,然后根据式(4)标定 DSD 实验参数,其中  $D_{CJ}$  和  $\alpha$  是需要实验标定的参数,拟合参数列于表 3。根据拟合结果给出  $D_n(\kappa)$  关系如图 5 所示,TNT 含量从 40% 变化到 60%, $D_n(\kappa)$  曲线的斜率逐渐增大,且斜率增大的速率为正值。

表 3  $D_n(\kappa)$  关系拟合参数

Table 3 Fitting parameters of  $D_n(\kappa)$

$w(\text{HMX})/w(\text{TNT})$	$D_{CJ}/(\text{km}/\text{s})$	$\alpha/\text{mm}$
60/40	8.166 6	0.983 8
50/50	8.006 6	1.113 0
40/60	7.747 1	1.735 6

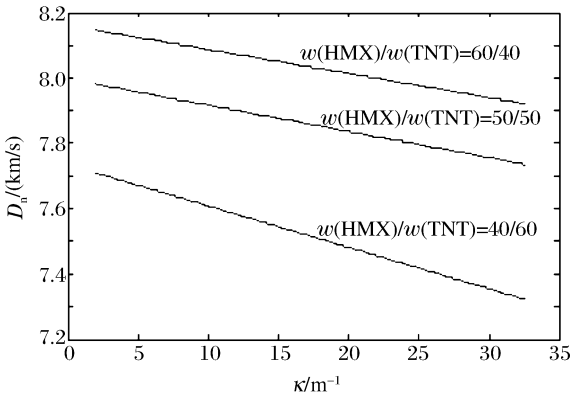


图 5  $D_n(\kappa)$ 关系图

Fig. 5 Relation curves of  $D_n(\kappa)$

### 3 广义 $D_n(\kappa)$ 关系

利用 DSD 方法研究炸药的非理想爆轰行为需要确定  $D_n(\kappa)$  的定量关系,即标定 DSD 实验参数。为了减少实验标定费用,通过分析实验数据对不同配比条件下的  $D_n(\kappa)$  关系进行了研究。

由图 4 分析知, HMX/TNT 注装炸药随着 TNT 含量增加,爆轰波延滞距离  $z$  增大,即满足

$$z \propto \omega(\text{TNT}) \tag{5}$$

随着炸药密度  $\rho$  增大,爆轰波延滞距离  $z$  减小,即满足

$$z \propto 1/\rho \tag{6}$$

炸药中 TNT 含量  $\omega(\text{TNT})$  和炸药密度  $\rho$  是影响

DSD 实验标定参数的主要因子,现引入新变量

$$R_t = \omega(\text{TNT})/\rho \tag{7}$$

通过变量  $R_t$  将实验标定的  $D_n(\kappa)$  关系推广为广义  $D_n(\kappa, R_t)$  关系,即  $D_n(\kappa, R_t)$  关系。  $D_n(\kappa, R_t)$  关系是将需要实验标定的参数  $D_{CJ}$  和  $\alpha$  通过含有  $R_t$  的函数求出,即根据式(8)和式(9)求得参数  $D_{CJ}$  和  $\alpha$ ,式(8)和式(9)是根据已有实验参数归纳拟合出的关系式。将式(8)和式(9)代入式(4)可得  $D_n(\kappa, R_t)$  关系,如式(10)所示。任意给定变量  $R_t$  就可以通过  $D_n(\kappa, R_t)$  关系得出相应未标定的  $D_n(\kappa)$  关系,进而减小实验标定费用。

已有实验数据: $w_1(\text{TNT})=40\%$ ,  $\rho_1=1.744 \text{ g/cm}^3$ ,  $R_{t1}=22.936 \text{ cm}^3/\text{g}$ ;  $w_2(\text{TNT})=50\%$ ,  $\rho_2=1.716 \text{ g/cm}^3$ ,  $R_{t2}=29.138 \text{ cm}^3/\text{g}$ ;  $w_3(\text{TNT})=60\%$ ,  $\rho_3=1.685 \text{ g/cm}^3$ ,  $R_{t3}=35.608 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。因此,该  $D_n(\kappa, R_t)$  关系最佳预测范围为  $22.936 \text{ cm}^3/\text{g} \leq R_t \leq 35.608 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。

$$D_{CJ} = c_0 + c_1 R_t + c_2 R_t^2 \tag{8}$$

$$\alpha = d_0 + d_1 R_t + d_2 R_t^2 \tag{9}$$

$$D_n = (c_0 + c_1 R_t + c_2 R_t^2) [1 - (d_0 + d_1 R_t + d_2 R_t^2) \kappa] \tag{10}$$

式中: $c_i$  和  $d_i$  是通过表 3 中实验参数拟合求得的: $c_0=8.00361$ ,  $c_1=0.03301$ ,  $c_2=-0.00113$ ;  $d_0=4.48235$ ,  $d_1=-0.289$ ,  $d_2=0.00595$ 。

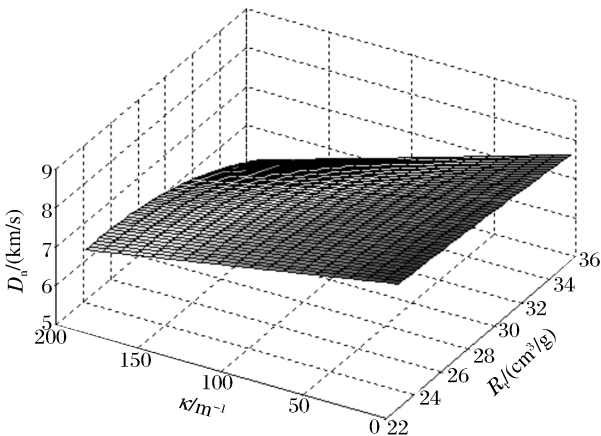


图 6  $D_n(\kappa, R_t)$ 关系图

Fig. 6 Relation curves of  $D_n(\kappa, R_t)$

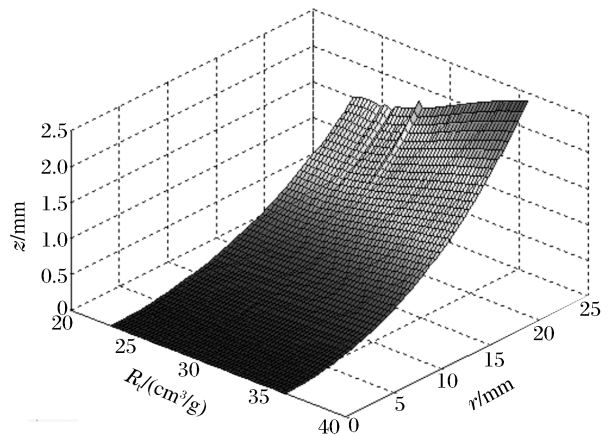


图 7  $R_t-z-r$ 关系图

Fig. 7 Relation curves of  $R_t-z-r$

根据  $D_n(\kappa, R_t)$  关系编写了相应程序,通过该程序可以在给定  $R_t$  的情况下,给出相应的  $D_n(\kappa)$  关系,根据该程序给出的  $D_n(\kappa, R_t)$  关系如图 6 所示;该程序根据  $D_n(\kappa, R_t)$  关系可进一步求出相应的  $z-r$  关系,并给出  $R_t-z-r$  关系如图 7 所示。

为验证  $D_n(\kappa, R_t)$  关系的可信性,将通过  $D_n(\kappa, R_t)$  关系预估的  $z-r$  关系与文献[9]中给出的  $z-r$  关系作对比,如图 8 所示。从图中可以看出,  $D_n(\kappa, R_t)$  关系预估结果与实验结果<sup>[9]</sup>吻合较好。该对比结果是在  $w(\text{TNT})=1, \rho=1.62 \text{ g/cm}^3, R_t=61.728 \text{ cm}^3/\text{g}$  的条件下得出的,而在  $22.936 \text{ cm}^3/\text{g} \leq R_t \leq 35.608 \text{ cm}^3/\text{g}$  范围内  $D_n(\kappa, R_t)$  关系预测精度应高于  $R_t=61.728 \text{ cm}^3/\text{g}$  的精度,故该  $D_n(\kappa, R_t)$  关系的预测效果是可信的。

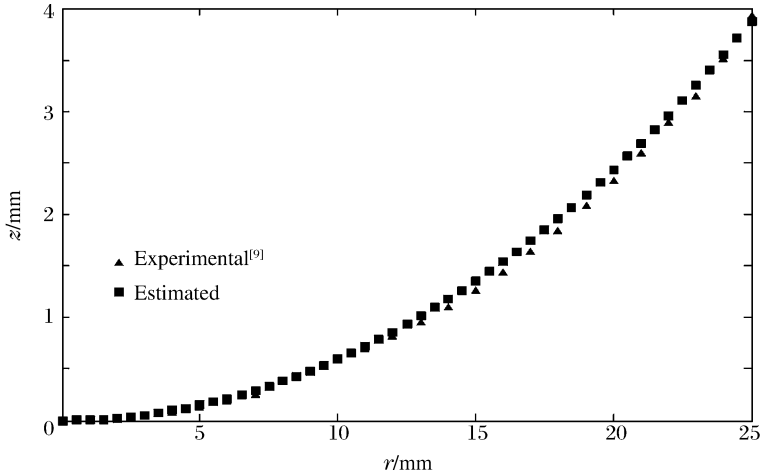


图 8  $w(\text{TNT})=1$  的条件下预估的  $z-r$  关系与实验结果的比较

Fig. 8 Comparison of estimated  $z-r$  curve with experimental result<sup>[9]</sup> at  $w(\text{TNT})=1$

## 4 结论

研究了不同配比条件下 HMX/TNT 注装炸药的  $D_n(\kappa)$  关系,爆轰波延滞距离  $z$  随 TNT 的含量增加而增大;爆轰波延滞距离  $z$  随着炸药密度  $\rho$  增大而减小;随着 TNT 含量增加  $D_n(\kappa)$  曲线的斜率逐渐增大,且斜率增大的速率为正值。还将  $D_n(\kappa)$  关系推广为  $D_n(\kappa, R_t)$  关系,在  $22.936 \text{ cm}^3/\text{g} \leq R_t \leq 35.608 \text{ cm}^3/\text{g}$  范围内,任意给定  $R_t$ ,可给出相应的  $D_n(\kappa)$  关系,并可进一步给出  $R_t-z-r$  关系,该方法可以减少实验标定次数,且有一定的准确度。

## 参考文献:

- [1] Bdzil J B, Fickett W, Stewart D S. Detonation shock dynamics: A new approach to modeling multi-dimensional detonation waves[C]//Proceedings of the 9th International Symposium on Detonation. Portland: Office of Naval Research, 1989:730-742.
- [2] Bdzil J B, Davis W C. Detonation shock dynamics (DSD) calibration for PBX9502[C]//Proceedings of the 10th International Symposium on Detonation. Boston: Office of Naval Research, 1993:146-149.
- [3] 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[C]//Proceedings of the 11th International Symposium on Detonation. Colorado: Office of Naval Research, 1997:1029-1037.
- [4] Aslam T D, Bdzil J B, Hill L G. Extensions to DSD theory: Analysis of PBX 9502 rate stick data[C]//Proceedings of the 11th International Symposium on Detonation. Colorado: Office of Naval Research, 1997:21-29.
- [5] 孙承伟. 爆轰传播理论的解析研究方法: 六[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 Waves, 1992, 12(1): 89-86.

- [6] 谭多望,方青,张光升,等. 钝感炸药直径效应实验研究[J]. 爆炸与冲击,2003,23(4):300-304.  
TAN Duo-wang, FANG Qing, ZHANG Guang-sheng, et al. Experimental study of the diameter effect for JB-9014 rate sticks[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(4):300-304.
- [7] 赵继波,谭多望,赵锋,等. 带壳钝感炸药非理想爆轰实验研究[J]. 含能材料,2005,13(4):217-221.  
ZHAO Ji-bo, TAN Duo-wang, ZHAO Feng, et al. Experimental study on the non-ideal detonation of IHE with confinements[J]. Energetic Materials, 2005,13(4):217-221.
- [8] Shakeel A R, HUANG Feng-lei. Detonation shock dynamics relations for RDX-TNT based cast explosives[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2007,17(2):138-142.
- [9] Sandstrom F W, Abernathy R L, Leone M G, et al. Diameter effect and detonation front curvature of ideal and non-ideal explosives[C]// Shock Compression of Condensed Matter-1999, 2000,505(1):826-828.

## Experimental study on relation between $D_n(\kappa)$ and composition for HMX/TNT rate sticks \*

ZHANG Hong-liang, Shakeel A R, HUANG Feng-lei  
(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,  
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Aimed at the fact that it is necessary to determine the quantitative relation between the local normal detonation wave speed  $D_n$  and the total curvature  $\kappa$  when detonation shock dynamics (DSD) is used to study nonideal detonation, steady-state detonation velocities and wave shapes were measured for HMX/TNT cast explosives at mass ratios 60/40, 50/50 and 40/60. Results show that detonation lag  $z$  increases with the increase of TNT mass percentage and it decrease with the increase of explosive density; and that with the increase of TNT mass percentage, the slopes of  $D_n(\kappa)$  curves become large and the change rates of the slopes are positive. For reducing the costs of the experiment, the general  $D_n(\kappa, R_t)$  law was induced from the relation of  $D_n(\kappa)$ , and the relation of  $R_t-z-r$  was obtained by the  $D_n(\kappa, R_t)$  law.

**Key words:** mechanics of explosion; nonideal detonation; mass ratio; HMX/TNT; DSD

\* Received 11 May 2010; Revised 9 September 2010

Supported by the National Natural Science Foundation of China (10832003)

Corresponding author: HUANG Feng-lei, huangfl@bit.edu.cn