

文章编号: 1001-1455(2012)05-0495-06

RDX/TNT、HMX/TNT 炸药 $D_n(\kappa)$ 关系研究^{*}

张宏亮, 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: 研究了不同配比 HMX/TNT 炸药的 $D_n(\kappa)$ 关系, 并与不同配比 RDX/TNT 炸药的 $D_n(\kappa)$ 关系进行了对比。结果表明, 配比相同时 HMX/TNT 炸药 $D_n(\kappa)$ 关系曲线总是在 RDX/TNT 炸药 $D_n(\kappa)$ 关系曲线上方; RDX/TNT 和 HMX/TNT 炸药的 $D_n(\kappa)$ 关系曲线随着炸药中 TNT 含量增加而下移。引入变量 R_t 分别将两种混合炸药的 $D_n(\kappa)$ 关系推广为 $D_n(\kappa, R_t)$ 关系, 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, $D_n(\kappa, R_t)$ 关系不仅可以减少实验标定次数, 并且能满足 DSD 方法计算精度要求。

关键词: 爆炸力学; $D_n(\kappa)$ 关系; 高速摄影; HMX/TNT; 非理想爆轰; 配比; DSD 方法; RDX/TNT

中图分类号: O381

国标学科代码: 1303510

文献标志码: A

爆轰是一个伴有快速化学反应和能量释放的跨声速流体动力学过程, 反应区前沿为冲击波, 反应区和冲击波构成爆轰波。目前带反应区的非理想爆轰波传播理论问题仍没有完全解决, 爆轰冲击动力学 (DSD) 方法^[1-2]是研究带反应区非理想爆轰波传播的可行途径, 利用 DSD 方法研究炸药的爆轰行为需要确定爆轰波法向速度 D_n 与当地曲率 κ 的定量关系。 $D_n(\kappa)$ 关系是炸药爆轰的基本特性, 可通过曲面爆轰波传播实验标定。T. D. Aslam 等^[3]、L. G. Hill 等^[4]针对 PBX-9502 炸药的 $D_n(\kappa)$ 关系做了大量实验标定工作。谭多望等^[5]、赵继波等^[6-7]对 JB-9014 炸药的 $D_n(\kappa)$ 关系进行了实验标定研究, A. B. Shakeel 等^[8]对 RDX/TNT 炸药的 $D_n(\kappa)$ 关系进行了研究。目前, 对 RDX/TNT 炸药及 HMX/TNT 炸药的 $D_n(\kappa)$ 关系研究工作还不多。

本文中, 通过光电联合测试法得到不同配比条件下 HMX/TNT 炸药的 $D_n(\kappa)$ 关系, 并与 RDX/TNT 炸药 $D_n(\kappa)$ 关系进行比较, 通过引入变量 R_t 分别将两种混合炸药的 $D_n(\kappa)$ 关系推广为 $D_n(\kappa, R_t)$ 关系, 结合 $D_n(\kappa, R_t)$ 关系和 DSD 方法给出两种炸药的 R_t - z - r 关系曲线。

1 实验方法

实验装置布局如图 1 所示, 拟定态爆轰波形通过转镜式高速摄影相机 (扫描速度为 1 r/ms, 即 3.003 km/s) 测得。爆轰装置如图 2 所示, 用雷管起爆主装药, 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, 楔形支架用于固定主装药药柱, 爆轰波速度由两组对称布置的电探针测量, 两组电探针由医用胶布粘贴在主装药药柱的测速段。

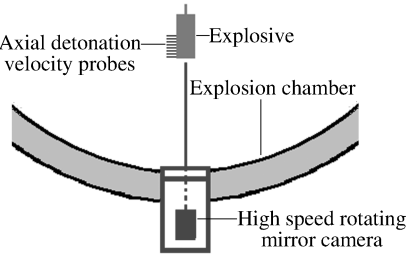


图 1 实验装置布局图
Fig. 1 Experimental layout

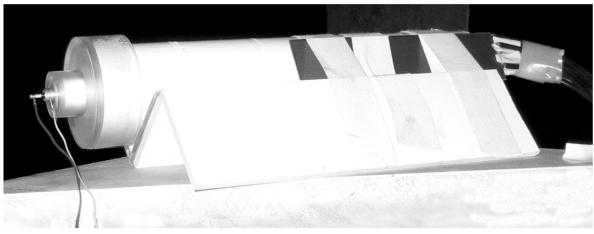


图 2 爆轰装置示意图
Fig. 2 Rate stick design

* 收稿日期: 2011-07-15; 修回日期: 2011-10-10

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

典型的波形测量结果如图 3 所示,底片中定态爆轰波形很清晰,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,爆轰波阵面曲线波形有轻微不对称,采用对轴线两边波形进行平均的方法处理数据。定态爆速 D_0 测量结果列于表 1 中。

实验测得不同混合炸药、不同配比炸药的波阵面曲线 $z(r)$ 如图 4 所示。从图中可以看出:随着混合炸药中 TNT 含量增加,两种混合炸药的密度均减小,拟定态爆轰波形均变得越来越弯曲,拟定态爆轰波延滞距离 z 逐渐增大;此外,在炸药中 TNT 含量相同条件时,RDX/TNT 炸药的拟定态爆轰波形比 HMX/TNT 炸药的拟定态爆轰波形更弯曲。

由于 $\ln(\cos(r))$ 级数拟合精度较高,且数值计算效率较高^[4],本文中采用 $\ln(\cos(r))$ 级数拟合数据,具体表达式为

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

(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_1 、 a_2 和 b 是拟合参数。拟合参数列于表 2 中。

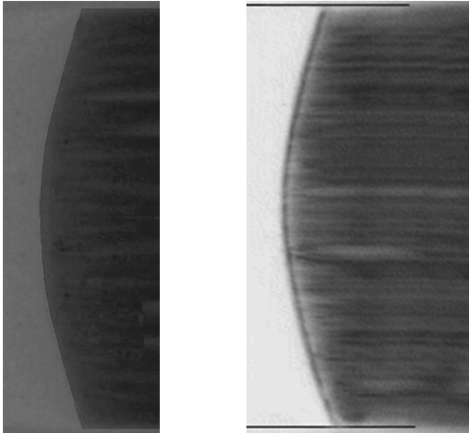


图 3 典型的爆轰波形数字底片

Fig. 3 Typical film record of detonation wave

表 1 定态爆速测量结果

Table 1 Steady-state detonation velocity

炸药	w_1/w_2	l/mm	d/mm	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$D_0/(\text{km}/\text{s})$
RDX/TNT	60/40	200	50	1.695	7.93
	50/50	200	50	1.683	7.70
	40/60	200	50	1.663	7.42
HMX/TNT	60/40	150	50	1.744	8.10
	50/50	150	50	1.716	7.92
	40/60	150	50	1.685	7.57

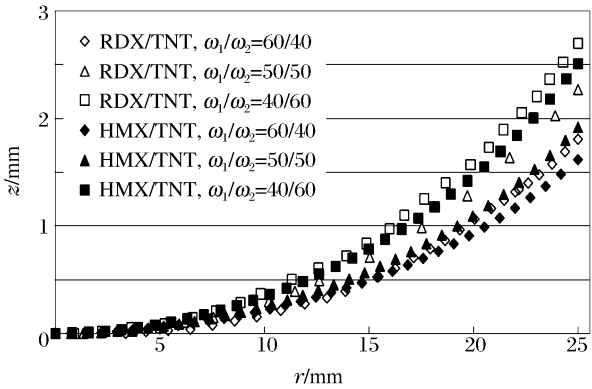


图 4 爆轰波阵面曲线

Fig. 4 The detonation wavefront data

表 2 爆轰波阵面曲线拟合参数

Table 2 Fitting parameters of detonation wavefront

炸药	w_1/w_2	a_1/mm	a_2/mm	b
RDX/TNT	60/40	2.015	9.523×10^{-9}	0.733 7
	50/50	3.455	2.398×10^{-5}	0.654 0
	40/60	3.207	0.525 6	0.762 3
HMX/TNT	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

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 D_n 表达式

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

(2)

爆轰波阵面上当地平均曲率 κ 为

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

(3)

当 $r=0$ 时,上式右边两项相等,联立式(5)~(6)可得 $D_n(\kappa)$ 关系。由于 RDX/TNT 炸药和 HMX/TNT 炸药的反应区宽度较小,最简单的线性关系 $D_n(\kappa)$ 即能满足 DSD 方法计算要求

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

(4)

根据式(4)标定 $D_n(\kappa)$,其中 D_{CJ} 和 α 是需要实验标定的参数,标定参数列于表 3 中。由表 3 可知,随着混合炸药中 TNT 配比含量的增加,RDX/TNT 炸药和 HMX/TNT 炸药的密度减小,理想爆速 D_{CJ} 逐渐减小, α 逐渐增大;RDX/TNT 炸药 D_{CJ} 减小及 α 增大的速率近似;HMX/TNT 炸药 D_{CJ} 减小的速率逐渐增大, α 增大的速率逐渐增大。

两种炸药的 $D_n(\kappa)$ 关系如图 5 所示,从中可以看出:(1)随着炸药中 TNT 含量的增加,两种炸药的 $D_n(\kappa)$ 关系曲线都逐渐下移,斜率都逐渐增大。(2)在炸药中 TNT 含量相同条件下,HMX/TNT 炸药 $D_n(\kappa)$ 关系曲线总是在 RDX/TNT 炸药 $D_n(\kappa)$ 关系曲线上方,配比为 40/60 的两种炸药 $D_n(\kappa)$ 关系曲线之间的间距明显小于另外两种配比条件下两种炸药 $D_n(\kappa)$ 关系曲线之间的间距。

表 3 $D_n(\kappa)$ 关系标定参数

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

炸药	w_1/w_2	$D_{CJ}/(\text{km/s})$	α/mm
RDX/TNT	60/40	7.989 9	0.858 6
	50/50	7.834 2	1.453 2
	40/60	7.661 8	2.161 4
HMX/TNT	60/40	8.159 7	0.898 8
	50/50	7.996 2	1.001 4
	40/60	7.734 7	1.632 8

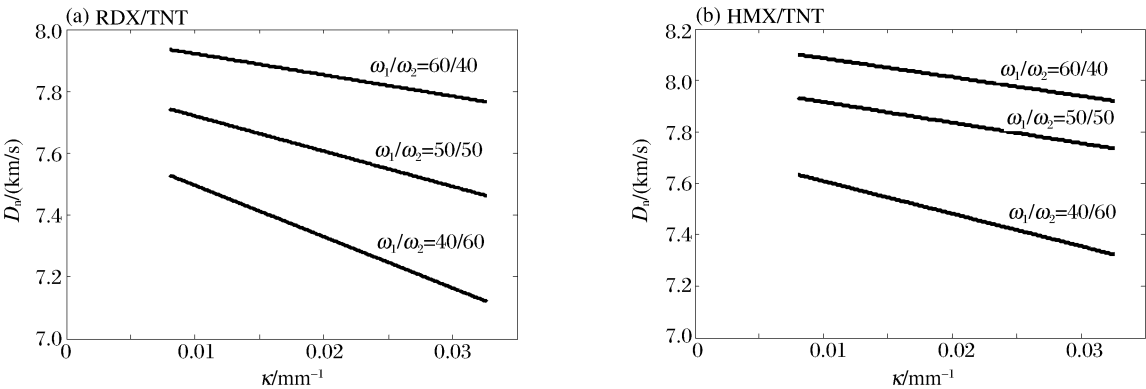


图 5 炸药的 $D_n(\kappa)$ 关系图
Fig. 5 Relation curves of $D_n(\kappa)$ for explosives

3 $D_n(\kappa, R_t)$ 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。改变 RDX/TNT 炸药或 HMX/TNT 炸药装药配比,标定参数 D_{CJ} 和 α 也变化。通过引入反应装药配比变化的新变量 R_t 将 $D_n(\kappa)$ 关系推广为 $D_n(\kappa, R_t)$ 关系

$$D_{CJ}=c_0+c_1R_t+c_2R_t^2$$

(5)

$$\alpha=d_0+d_1R_t+d_2R_t^2$$

(6)

$$D_n=(c_0+c_1R_t+c_2R_t^2)[1-(d_0+d_1R_t+d_2R_t^2)\kappa]$$

(7)

式中: R_t 为相应炸药中 TNT 质量与炸药总质量的比值,已有实验数据中 RDX/TNT 炸药和 HMX/TNT 炸药的 $R_t=0.4,0.5,0.6$ 。 $D_n(\kappa, R_t)$ 关系是将需要实验标定的参数 D_{CJ} 和 α 通过含有 R_t 的函数式(5)~(6)求出,代入式(4)可以得到式(7)。任意给定变量 R_t 可以通过 $D_n(\kappa, R_t)$ 关系得出相应未标定的 $D_n(\kappa)$ 关系,进而减少实验标定次数。

根据已有实验数据归纳拟合出的参数 c_i 和 $d_i(i=0,1,2)$ 列于表 4 中。两种炸药的 $D_n(\kappa,R_t)$ 关系最佳预测范围为: $0.4\leq R_t\leq 0.6$ 。由式(7),RDX/TNT 炸药和 HMX/TNT 炸药的 $D_n(\kappa,R_t)$ 关系如图 6 所示,结合 DSD 方法和 $D_n(\kappa,R_t)$ 关系可进一步给出相应的 R_t - z - r 关系如图 7 所示。

表 4 $D_n(\kappa,R_t)$ 关系拟合参数
Table 4 Fitting parameters of $D_n(\kappa,R_t)$

炸药	c_0 /(km/s)	c_1 /(km/s)	c_2 /(km/s)	d_0 /mm	d_1 /mm	d_2 /mm
RDX/TNT	8.445 7	-0.805 5	-0.835 0	-0.383 8	0.834 0	5.680 0
HMX/TNT	8.898 6	-1.631 7	-0.462 9	2.555 8	-9.442 7	13.020 8

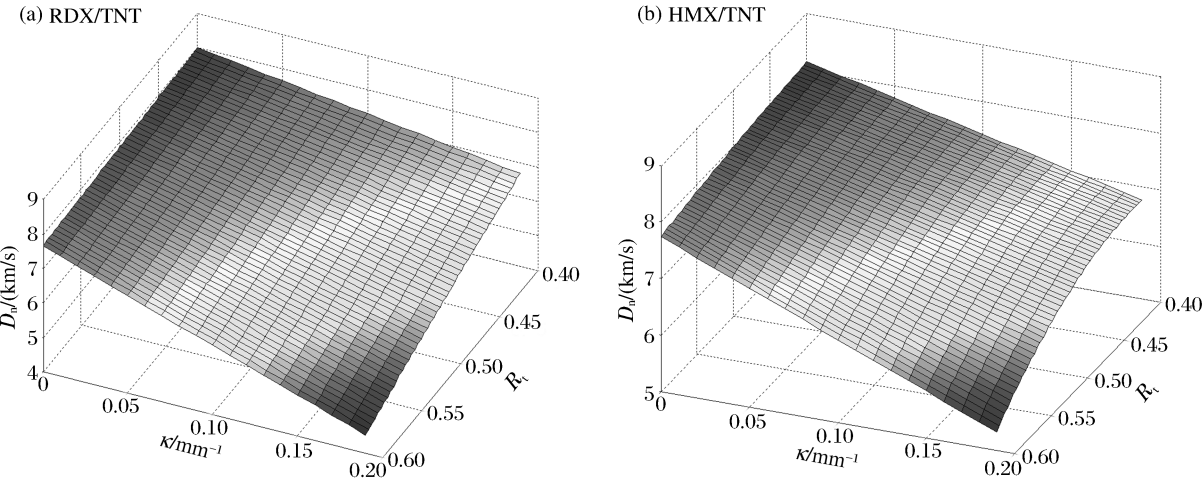


图 6 炸药的 $D_n(\kappa,R_t)$ 关系图
Fig. 6 Relation curves of $D_n(\kappa,R_t)$ for explosives

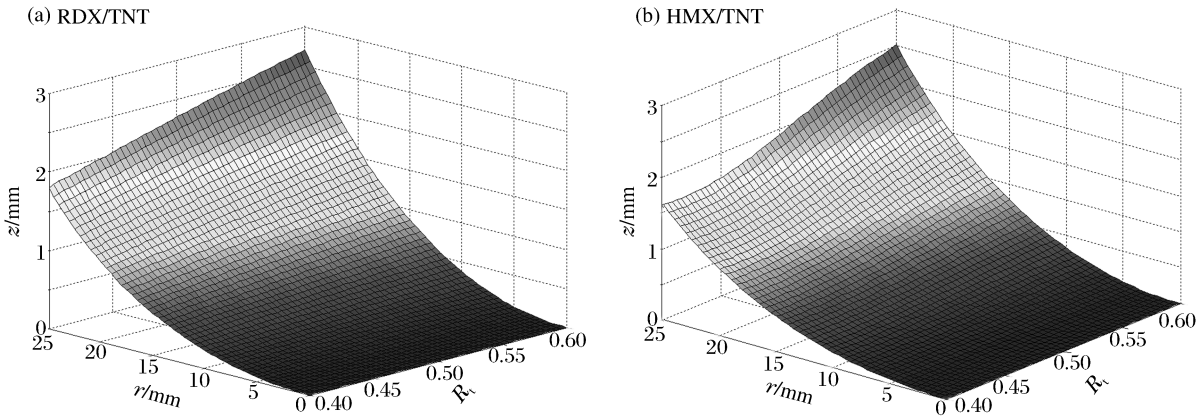


图 7 炸药的 R_t - z - r 关系图
Fig. 7 Relation curves of R_t - z - r for explosives

由于在 $0.4\leq R_t\leq 0.6$ 范围内没有已知实验数据可供验证 $D_n(\kappa,R_t)$ 关系的可信性,因此将 $D_n(\kappa,R_t)$ 关系对 TNT 炸药($R_t=1$)的预测结果与已有文献中的实验数据进行对比。RDX/TNT 炸药 $D_n(\kappa,R_t)$ 关系预测 TNT 炸药的理想爆速 $D_{CJ}=6.805\ 2\text{ km/s}$,HMX/TNT 炸药 $D_n(\kappa,R_t)$ 关系预测的理想爆速 $D_{CJ}=6.804\ 0\text{ km/s}$,而由文献[9]理想爆速 $D_{CJ}=6.942\text{ km/s}$,三者给出的理想爆速 D_{CJ} 相接近。分别利用 RDX/TNT 炸药 $D_n(\kappa,R_t)$ 关系和 HMX/TNT 炸药 $D_n(\kappa,R_t)$ 关系给出了 TNT 炸药的 $D_n(\kappa)$ 关系,选取药柱直径为 50 mm,结合 DSD 方法分别计算了两种炸药 $D_n(\kappa)$ 关系情况下的 z - r 关

系,三种情况下 $z-r$ 关系对比如图 8 所示。从图中可以看出,RDX/TNT 炸药 $D_n(\kappa,R_t)$ 关系预测的 $z-r$ 关系与 HMX/TNT 炸药 $D_n(\kappa,R_t)$ 关系预测的 $z-r$ 关系十分接近,与文献[10]中 TNT 炸药在直径 52.7 mm 条件下的 $z-r$ 关系相符。从以上两种对比情况可以看出, $D_n(\kappa,R_t)$ 关系对 TNT 炸药预测效果是可信的, $D_n(\kappa,R_t)$ 关系在 $0.4 \leq R_t \leq 0.6$ 范围内的预测精度高于 $R_t = 1$ 条件下的预测精度,因此两种炸药的 $D_n(\kappa,R_t)$ 关系预测效果是可信的。

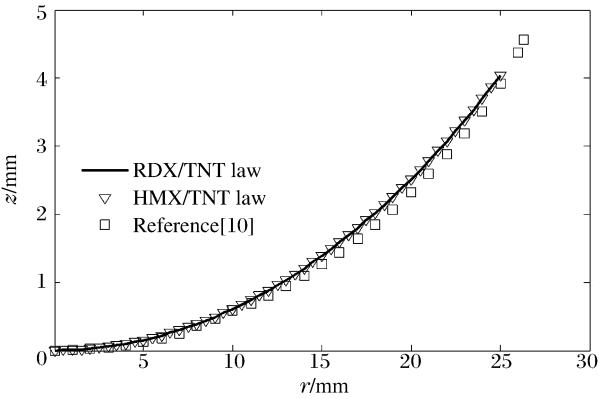


图 8 炸药的 $z-r$ 关系

Fig. 8 $z-r$ curves for explosives

4 结 论

- (1)通过实验研究了不同配比 RDX/TNT 炸药和 HMX/TNT 炸药的 $z-r$ 关系。结果表明,随着 TNT 含量增加,两种混合炸药的拟定态爆轰波形均越来越弯曲,拟定态爆轰波延滞距离 z 逐渐增大; TNT 配比相同时,RDX/TNT 炸药的拟定态爆轰波形比 HMX/TNT 炸药的拟定态爆轰波形更弯曲。
- (2)通过实验研究了不同配比 RDX/TNT 炸药和 HMX/TNT 炸药的 $D_n(\kappa)$ 关系。结果表明,TNT 含量相同时 HMX/TNT 炸药 $D_n(\kappa)$ 关系曲线总是在 RDX/TNT 炸药 $D_n(\kappa)$ 关系曲线上方,随着 TNT 含量增加,两种炸药的 $D_n(\kappa)$ 关系曲线都下移,且斜率逐渐增大。
- (3)引入变量 R_t 分别将 RDX/TNT 炸药和 HMX/TNT 炸药的 $D_n(\kappa)$ 关系推广为 $D_n(\kappa,R_t)$ 关系。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,将预估的 $D_n(\kappa)$ 关系与已有实验数据进行对比,预估结果与实验结果相符合。说明 $D_n(\kappa,R_t)$ 关系不仅可以减少实验标定次数,而且精度能满足 DSD 方法计算要求。

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 9th International Detonation Symposium. Oregon: Office of Naval Research, 1989:730-742.

[2] Lambourn B D, Swift D C. Application of Whitham's shock dynamics theory to the propagation of divergent detonation waves[C]// Proceedings of 9th International Detonation Symposium. Oregon: Office of Naval Research, 1989:784-797.

[3] Aslam T D, Bdzil J B, Hill L G. Extensions to DSD theory: Analysis of PBX 9502 rate stick data[C]// Proceedings of 11th International Detonation Symposium. Colorado: Office of Naval Research, 1998:21-29.

[4] 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 11th International Detonation Symposium. Colorado: Office of Naval Research, 1998:1029-1037.

[5] 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.

[6] 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.
- [7] 赵继波,赵锋,谭多望,等. 对钝感炸药 $D_n(\kappa)$ 关系式一种改进的探讨[J]. 高压物理学报,2006,20(3):301-307.
ZHAO Ji-bo, ZHAO Feng, TAN Duo-wang, et al. Discussion on improvement of the $D_n(\kappa)$ relation of IHE[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2006,20(3):301-307.
- [8] Shakeel A B, 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] Deal W E. Measurement of Chapman-Jouguet pressure for explosives[J]. *Journal of Chemical Physics*, 1957,27(1):796-800.
- [10] Sandstrom F W, Abernathy R L. Diameter effect and detonation front curvature of ideal and non-ideal explosives [C]//Furnish M D, Hixson R S, Chhabildas L C. *Shock Compression of Condensed Matter—1999*. American Institute of Physics, 2000:826-828.

Study on the $D_n(\kappa)$ relation for the RDX/TNT and HMX/TNT rate sticks^{*}

ZHANG Hong-liang, HUANG Feng-lei

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

Abstract: It is necessary to determine the quantitative relation between the local normal detonation wave speed D_n and the total curvature κ when detonation shock dynamics (DSD) is used to study nonideal detonation. We extended our work on the $D_n(\kappa)$ relation of HMX/TNT rate sticks from the RDX/TNT rate sticks. The $D_n(\kappa)$ relation of HMX/TNT rate sticks in the different mixing ratios was analyzed, and the $D_n(\kappa)$ relation was compared between the RDX/TNT explosives and the HMX/TNT explosives. Results show that the $D_n(\kappa)$ curves of RDX/TNT explosives were subjacent on the $D_n(\kappa)$ curves of HMX/TNT explosives at the same ratio. As the TNT percentage added, the $D_n(\kappa)$ curves of RDX/TNT and HMX/TNT explosives were moved down. The $D_n(\kappa, R_t)$ law was induced from the relation of $D_n(\kappa)$ by introducing into the variable R_t . The $D_n(\kappa, R_t)$ law could not only reduce the number of experimental calibration, but also meet the simulation precision of DSD method.

Key words: mechanics of explosion; $D_n(\kappa)$ curves; high-speed photography; HMX/TNT; nonideal detonation; mass ratio; DSD; RDX/TNT

* Received 15 July 2011; Revised 10 October 2011

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

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