

DOI:10.14077/j.issn.1007-7812.2015.01.002

CL-20 基含铝炸药爆轰波阵面法向速度与曲率的关系

沈 飞, 王 辉, 袁建飞, 任新联

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 采用高速扫描相机及电探针测速法测量了具有相同铝含量的 CL-20 基和 RDX 基含铝炸药的拟定态爆轰波形及爆速, 分析了炸药波阵面法向速度 D_n 与曲率 κ 之间的函数关系。结果表明, CL-20 基含铝炸药的爆轰波阵面较 RDX 基含铝炸药的平坦, 其法向爆速受曲率效应的影响也较 RDX 基含铝炸药的小。当 $\kappa > 0.005 \text{ mm}^{-1}$ 时, 其法向爆速的下降速率明显小于 RDX 基含铝炸药; 当 $\kappa < 0.005 \text{ mm}^{-1}$ 时, 其法向爆速的下降速率略高于 RDX 基含铝炸药。

关键词: 爆炸力学; 含铝炸药; 非理想爆轰; $D_n(\kappa)$ 关系; CL-20; 高速扫描; 拟定态波形

中图分类号: TJ55; O389

文献标志码: A

文章编号: 1007-7812(2015)01-0008-04

Relationship Between Normal Velocity and Curvature of Detonation Wave Front for CL-20-based Aluminized Explosive

SHEN Fei, WANG Hui, YUAN Jian-fei, REN Xin-lian

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: The steady state wave shapes and detonation velocities of CL-20-based and RDX-based aluminized explosives with same Al content were measured by a high speed scanning camera and electrical probe measuring velocity method. The function relationship between the normal velocity (D_n) and curvature (κ) of the detonation wave front of explosives was analyzed. Results show that the detonation wave front of CL-20-based aluminized explosive is flat than that of RDX-based aluminized explosive. The effect of curvature effect on normal detonation velocity of CL-20-based aluminized explosive is smaller than that of RDX-based aluminized explosive. When $\kappa > 0.005 \text{ mm}^{-1}$, the reduced rate of D_n of CL-20-based aluminized explosive is obviously less than that of RDX-based aluminized explosive. When $\kappa < 0.005 \text{ mm}^{-1}$, the reduced rate of D_n of CL-20-based aluminized explosive is slightly higher than that of RDX-based aluminized explosive.

Key words: explosion mechanics; aluminized explosive; non-ideal detonation; $D_n(\kappa)$ relation; CL-20; high speed scanning; steady wave shape

引 言

含铝炸药是一类高密度、高爆热和高威力的混合炸药, 由于其爆轰反应区较宽, 爆轰波的传播过程中具有明显的非理想特性, 使得在研究爆轰波绕射、爆轰波与介质相互作用、拐角效应等方面遇到了较多困难^[1]。对于这类问题, 目前主要采用爆轰冲击动力学(DSD)法进行研究。DSD法可以对爆轰反应流动方程组进行解耦处理, 即将其分解为爆轰冲击波阵面的发展方程和一维拟定态反应区动力学的常微分方程组^[2-3]。在该方法的分析过程中需要了解爆轰波阵面曲率 κ 对法向爆速 D_n 的影响

规律, 即 $D_n(\kappa)$ 关系式, 由于该关系式只与炸药的本构性质有关, 所以一般需要通过曲面爆轰波传播实验进行标定。然而, 这方面目前已有的成果主要是针对 PBX-9502^[4-6]、JB-9014^[7]、JBO-9021^[8]、RDX/TNT^[9]、HMX/TNT^[9], 对于含铝炸药 $D_n(\kappa)$ 关系的研究还较少。

本研究采用高速扫描相机及电探针测速系统分别测量拟定态条件下 CL-20 基含铝炸药的爆轰波形及爆速, 根据实验结果分析了爆轰波阵面法向速度 D_n 与曲率 κ 之间的函数关系, 并与常用的 RDX 基含铝炸药进行对比, 以期为该炸药爆轰特性的深入研究提供参考。

收稿日期: 2014-07-06; 修回日期: 2014-08-17

作者简介: 沈飞(1983—), 男, 工程师, 从事炸药爆轰性能试验与理论研究。

1 实 验

1.1 样品制备

CL-20 基及 RDX 基含铝炸药配方见表 1。采用压装工艺将两种含铝炸药压制成 $\Phi 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的药柱,药柱密度分别为 $1.96、1.75\text{ g/cm}^3$ 。

表 1 两种含铝炸药配方

Table 1 Formulations of the two aluminized explosives

炸药代号	w/%			
	CL-20	RDX	Al	黏结剂
CA-1	75		20	5
RA-1		75	20	5

待测样品由 6 节药柱粘接而成,用 JH-14 作传爆药,药柱尺寸为 $\Phi 25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$,密度为 1.67 g/cm^3 ,实验前将传爆药柱粘接在主装药一端的中心位置处。

1.2 实验装置

采用 SJZ-15 型转镜式高速扫描相机扫描主装药柱端面的拟定态爆轰波形,实验装置如图 1 所示。其中,主装药柱固定于 V 形槽内,以减小边界约束条件对爆轰波形的影响;扫描相机的光学狭缝通过反射镜对准主装药柱端面的直径,并通过一组电探针测定炸药的爆速。为了保证底片中波形的分辨率,相机的扫描速度设定为 $6\text{ mm}/\mu\text{s}$ 。

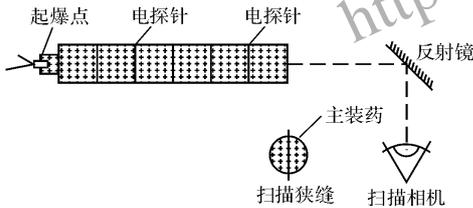


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test apparatus

2 结果与分析

2.1 拟定态波形

高速相机记录的爆轰波形如图 2 所示,横向表示装药直径,纵向表示扫描时间,从图 2 可以清晰地看出波形的前沿。由于主装药的长径比较大,可以使爆轰波演化为拟定态波形,此外,第一根电探针距离起爆端较远,此时爆速已基本稳定,探针所测得的爆速可认为是拟定态爆速。

通过对底片进行数字化判读,并结合相机的扫描速度及底片的放大比,可得到爆轰波到达药柱端面的时间,再将获得的时间点与探针测量的拟定态爆速相乘,即可获得波阵面曲线。目前,对于波阵

面曲线拟合的函数一般选择拟合精度较高的 $\ln[\cos(r)]$ 级数,同时该函数也具有较高的数值计算效率,其具体表达式为^[10]:

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

式中: r 为波阵面上截面圆的半径,mm; R 为主装药的半径,mm; $z(r)$ 为波阵面曲线,mm; a_i 及 b 均为拟合参数。

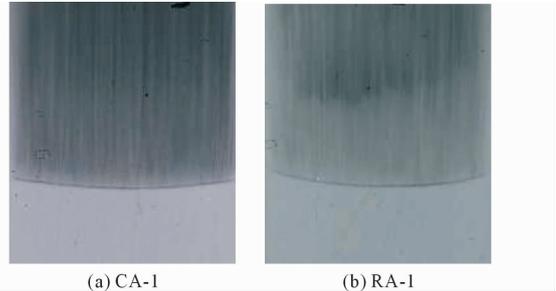


图 2 爆轰波形照片

Fig. 2 Photographs of detonation wave shape

在拟合过程中,正常 $n=2$ 时可很好地模拟波阵面曲线。两种炸药爆轰波阵面曲线的拟合效果如图 3 所示。

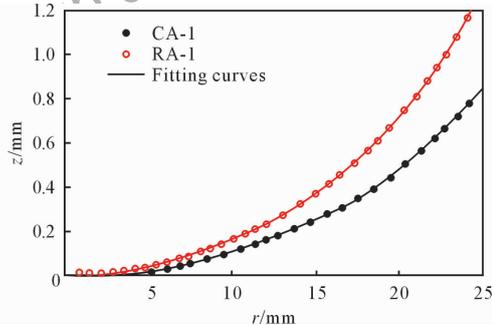


图 3 爆轰波波阵面拟合曲线

Fig. 3 Fitting curves of wave front

由图 3 可以看出,CA-1 炸药拟定态爆轰波形的弯曲程度明显小于 RA-1 炸药,在装药边界处,CA-1 炸药波阵面的 z 值约为 0.8 mm ,而 RA-1 炸药波阵面的 z 值接近 1.2 mm 。所得拟合参数值及探针测得的拟定态爆速值(D_0)均列于表 2。

表 2 波形拟合参数

Table 2 Fitting parameters of wave shape

炸药编号	$D_0 / (\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	a_1 / mm	a_2 / mm	b
CA-1	8.47	0.57690	0.09267	0.94154
RA-1	7.91	0.89237	0.13521	0.92369

2.2 爆速与曲率的关系

当爆轰波达到拟定态波形时,炸药爆轰波法向传播速度 D_n 与拟定态爆速 D_0 之间的关系如图 4 所示。

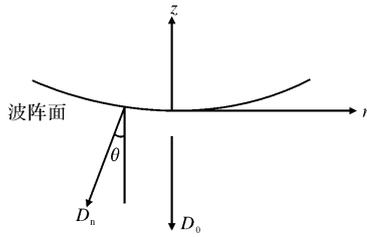


图 4 波阵面 D_n 与 D_0 关系图

Fig. 4 Relation of D_n and D_0 at wave front

根据图 4 中的几何关系,可得出:

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

式中: θ 为波阵面法向与药柱轴线方向的夹角。爆轰波阵面上的曲率 κ 用公式(3)计算:

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

当 $r=0$ 时,公式右端的两项相等。由公式(1)~(3)可计算出爆轰波阵面的 $D_n(\kappa)$ 关系曲线,结果如图5所示。

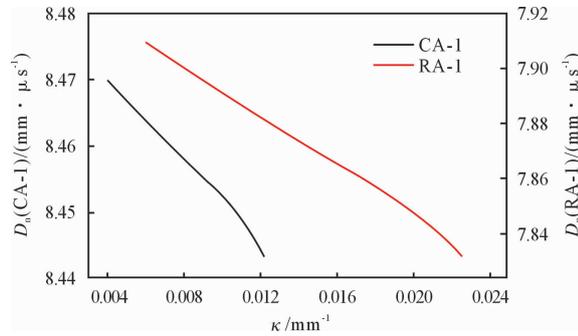


图 5 两种含铝炸药的 $D_n(\kappa)$ 关系曲线

Fig. 5 Relation curves of $D_n(\kappa)$ for the two explosives

表 3 两种含铝炸药 $D_n(\kappa)$ 关系拟合参数计算值

Table 3 Fitting parameters of $D_n(\kappa)$ relation for the two explosives

炸药代号	$D_{CJ}/(\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	C_1	C_2	C_3	f/mm^{-1}	α	β	γ
CA-1	8.489	0.039	0.127	46.3	0.0123	0.66	0.538	0.65
RA-1	7.934	0.078	0.229	50.2	0.0250	0.64	0.517	0.67

为了进一步比较 D_n 相对于 D_{CJ} 的衰减状况,设 $\eta = (D_{CJ} - D_n)/D_{CJ}$,则公式(4)可变为:

$$\eta = -C_1 [(f - \kappa)^\alpha - f^\alpha] + \frac{C_2 \kappa^\beta}{1 + C_3 \kappa^\gamma} \quad (5)$$

结合表 3 中参数,可得到 $\eta-\kappa$ 关系曲线,如图 6 所示。图 6 可看出,当 κ 小于 0.005 mm^{-1} 时,CA-1 的 η 值略高于 RA-1;当 κ 大于 0.005 mm^{-1} 时,CA-1 的 η 值明显低于 RA-1,且在 κ 达到最大值时,RA-1 的 η 值接近 1.2%,而此时 CA-1 的 η 值小于 0.5%,这说明 CA-1 炸药爆轰波在传播过程中受曲率效应的影响比 RA-1 小,这可能是由于 CL-20 的爆速和爆压较高,使得含铝炸药爆轰波传播过程中的非理

想程度得以降低,但具体的影响规律还需要进一步研究。

由图 5 可以看出,曲率 κ 从药柱轴线至边界两侧逐渐增大,且法向爆速 D_n 逐渐减小,CA-1 炸药波阵面的 κ 从 0.004 mm^{-1} 增加至 0.01 mm^{-1} 时, D_n 从 $8.47 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 降至 $8.45 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 左右, κ 继续增大时, D_n 的下降速度明显提高;RA-1 炸药波阵面的 κ 从 0.006 mm^{-1} 增加至 0.018 mm^{-1} 时, D_n 从 $7.9 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 降至 $7.86 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 左右, κ 继续增大时, D_n 的下降速度明显提高。此外,CA-1 炸药波阵面的最大曲率约为 0.012 mm^{-1} ,对应的 D_n 较 D_0 约降低 $0.03 \text{ mm}/\mu\text{s}$,而 RA-1 炸药波阵面的最大曲率约为 0.023 mm^{-1} ,对应的 D_n 较 D_0 约降低了 $0.07 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 。这是因为爆轰波阵面的弯曲程度反映了反应区能量的损耗,从 D_n 的下降幅度可以看出爆轰传播过程中沿着波阵面从轴线向两侧流动的能量大小^[2,11],因此,图 5 中的数据表明,CA-1 炸药在爆轰传播过程中沿波阵面从轴线向两侧流动的能量明显小于 RA-1 炸药。

由于难以通过理论分析获得一般反应速率形式下的 $D_n(\kappa)$ 关系,通常采用经验公式对实验数据进行拟合,而简单的线性函数又明显不适用于描述图 5 中的曲线,本研究采用一种效果较好的非线性函数形式,其具体形式为^[5,10]:

$$\frac{D_n}{D_{CJ}} = 1 + C_1 [(f - \kappa)^\alpha - f^\alpha] - \frac{C_2 \kappa^\beta}{1 + C_3 \kappa^\gamma} \quad (4)$$

式中: D_{CJ} 为炸药的 CJ 爆速; $C_1, C_2, C_3, f, \alpha, \beta, \gamma$ 均为拟合参数。通过对图 5 中的数据点进行拟合,得到两种炸药 $D_n(\kappa)$ 关系的拟合参数计算值,结果见表 3。

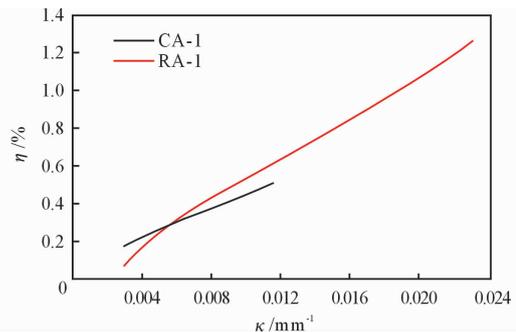


图 6 两种含铝炸药的 $\eta-\kappa$ 关系曲线

Fig. 6 Relation curves of $\eta-\kappa$ for the two explosives

3 结 论

(1) 与 RDX 基含铝炸药相比, CL-20 基含铝炸药的爆轰波阵面明显平坦, 其波阵面的最大曲率约为 0.012 mm^{-1} , RDX 基含铝炸药波阵面的最大曲率约为 0.023 mm^{-1} 。

(2) CL-20 基含铝炸药波阵面的法向爆速受到曲率效应的影响较 RDX 基含铝炸药小, 其法向爆速的最低值较拟定态爆速降低约 $0.03 \text{ mm}/\mu\text{s}$, 而 RDX 基含铝炸药法向爆速的最低值较拟定态爆速降低约 $0.07 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 。

(3) $\kappa < 0.005 \text{ mm}$ 时, CL-20 基含铝炸药法向爆速的衰减系数大于 RDX 基含铝炸药; 而 $\kappa > 0.005 \text{ mm}$ 时, CL-20 基含铝炸药法向爆速的衰减系数则小于 RDX 基含铝炸药。

参考文献:

- [1] 裴明敬, 田朝阳, 胡华权, 等. 铝粉在温压炸药爆炸过程中的响应分析[J]. 火炸药学报, 2013, 36(4): 7-12.
PEI Ming-jing, TIAN Zhao-yang, HU Hua-quan, et al. Response analysis of aluminum in the process of thermobaric explosive detonation[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2013, 36(4): 7-12.
- [2] 孙承纬, 卫玉章, 周之奎. 应用爆轰物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [3] Lambert D E, Stewart D S, Yoo S, et al. Experimental validation of detonation shock dynamics in condensed explosives[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 546: 227-253.
- [4] Bdzil J B, Davis W C. Detonation shock dynamics(DSD) calibration for PBX 9502[C]//Proceedings of Tenth Symposium (International) on Detonation. Boston: Office of Naval Research, 1993: 146-149.
- [5] 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.
- [6] 向梅, 饶国宁, 彭金华. 复合结构装药爆轰波爆速与曲率关系的数值模拟[J]. 火炸药学报, 2010, 33(4): 53-55.
XIANG Mei, RAO Guo-ning, PENG Jin-hua. Numerical simulation on the relationship between detonation velocity and curvature of composite charge structure ammunition[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2010, 33(4): 53-55.
- [7] 谭多望, 邹立勇, 张光升, 等. 低温下 JB-9014 钝感炸药 DSD 参数研究[J]. 高压物理学报, 2012, 26(4): 475-480.
TAN Duo-wang, ZOU Li-yong, ZHANG Guang-sheng, et al. Detonation shock dynamics calibration of JB-9014 explosive at low temperature[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012, 26(4): 475-480.
- [8] 汪斌, 谭多望, 赵继波, 等. 常温下 JBO-9021 高能钝感炸药直径效应实验[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(5): 490-494.
WANG Bin, TAN Duo-wang, ZHAO Ji-bo, et al. Diameter effect of JBO-9021 rate sticks at room temperature[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(5): 490-494.
- [9] 张宏亮, 黄风雷. RDX/TNT、HMX/TNT 炸药 $D_n(\kappa)$ 关系研究[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(5): 495-500.
ZHANG Hong-liang, HUANG Feng-lei. Study on the $D_n(\kappa)$ relation for the RDX/TNT and HMX/TNT rate sticks[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(5): 495-500.
- [10] Bdzil J B. Steady-state two-dimension detonation[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1981, 108: 195-226.
- [11] 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 the improvement of $D_n(\kappa)$ relation of IHE[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2006, 20(3): 301-307.