文章编号：1000-5773(2012)04-0475-06

低温下 JB-9014 钝感炸药 DSD 参数研究*

谭多望，邹立勇，张光升，何　智，姜　洋

（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：爆轰冲击波动力学(Detonation Shock Dynamics，DSD)是目前研究爆轰波非理想传播的有效途径。利用 DSD 的广义几何光学模型，研究了大长径比药柱中爆轰波非理想传播现象，根据－30 ℃下直径为 10～30 mm 药柱的直径效应实验数据，利用遗传算法确定了低温下 JB-9014 钝感炸药的 DSD 参数。由 DSD 参数计算得到了 JB-9014 药柱中的定态波形和爆速，计算结果与实验结果符合。

关键词：钝感炸药；爆轰冲击波动力学方法；定态爆速；遗传算法

中图分类号：O381　　**文献标识码**：A

1　引　言

普通高能炸药爆轰时，法向爆速 D_n 受波阵面曲率的影响很小，非常接近 CJ 爆速，这时曲面爆轰波的传播可用 Huygens 原理计算。这种方法简单实用，可解决大多数工程问题，如平面波炸药透镜、聚心球面波炸药透镜。需要注意的是：在炸药边界、爆轰波绕射的小曲率半径等区域，爆轰波传播偏离 Huygens 原理，服从力学原理，通常依靠实验或数值模拟来确定。此外，对于以 TATB 为基的钝感炸药、含铝炸药，由于反应区较宽(毫米量级)，并且反应不能在波后产物流场声速点上完成，导致反应速率和法向爆速 D_n 明显与波阵面曲率 κ 有关，Huygens 原理不再适用。这种现象称为爆轰波的非理想传播或者爆轰波传播的曲率效应，是精密装药设计所必须考虑的[1]。

爆轰波的非理想传播非常复杂，严格意义上的理论分析难以着手，高分辨率的数值模拟又因反应区宽度远小于装药尺寸、计算量巨大而变得十分困难。为此，研究者们提出了新的研究方法，如波阵面标迹(Front Tracking)方法[2]、爆轰冲击波动力学(Detonation Shock Dynamics，DSD)方法[3-5]、等位线(Level Set)方法[6]。其中，DSD 方法是 20 世纪 90 年代在 Whitham 冲击波动力学基础上建立的，经近 20 年的发展、完善，引起了研究人员的广泛注意，也取得了较好的使用效果，使多维爆轰传播研究走向实用阶段，解决了一些钝感装药工程设计问题。尽管 DSD 方法还不能解决爆轰建立、大尺度绕射、爆轰极限附近的传播等问题，但仍被认为是目前研究爆轰波非理想传播的可行途径[7-8]。

钝感炸药在实际使用过程中，会遇到不同的环境温度条件。国内外研究结果表明，钝感炸药的爆轰性能对温度敏感。国外研究主要集中在美国的 PBX-9502 炸药和英国的 EDC-35 炸药。在 PBX-9502 炸药方面，Campbell[9]测量了不同温度下的直径效应曲线。Bdzil[10-11]等人测量了－55、25 和 75 ℃下 PBX-9502 药柱中的定态爆速和波形，利用 DSD 方法研究了 $D_n(\kappa)$ 关系，结果表明：定态爆速、定态波形和 $D_n(\kappa)$ 关系均与温度相关；定态波形随温度的升高而逐渐扁平(曲率增大)，定态爆速随直径的增大而提高，但不随温度的升高而单调提高；当 κ 较小时，法向爆速 D_n 只与当地曲率 κ 有关，当 κ 较大时，法向

* **收稿日期**：2010-11-17；**修回日期**：2011-08-01

基金项目：中国工程物理研究院科学技术基金(2007B01002)，国家自然科学基金(11002129，11072228)

作者简介：谭多望(1967－)，男，博士，研究员，主要从事爆轰基础理论及常规战斗部设计研究.

E-mail：dwtan@caep.ac.cn

爆速 D_n 不仅与当地曲率 κ 有关，还与药柱直径有关（最近 Bdzil 又改变了这种观点，认为 D_n 只与 κ 有关，与炸药尺寸无关[12]）。在 EDC-35 炸药方面，Hutchinson 等人[13]测量了－40 和20 ℃下细长药柱中爆速与直径、密度之间的关系以及半球炸药中散心爆轰波传播特性，结果表明：爆速随直径的增大而提高，但不随温度的升高而单调提高，这与 Hill 等人[10]的测量结果类似；爆速先随密度的增加而升高，达到最大值 7.95 km/s 后，随密度增加迅速下降；低温下散心爆轰波的非理想传播效应更加明显。在国内，谭多望等人[14-16]研究了－30 和 24 ℃下 JB-9014 钝感炸药的直径效应，通过拟合波阵面方法分析了常温及低温下 $D_n(\kappa)$ 关系，通过广义几何光学（Generalized Geometrical Optics，GGO）模型优化确定了常温下的 DSD 参数，包括 $D_n(\kappa)$ 关系和边界角，结果表明，JB-9014 炸药的温度效应与 PBX-9502 和 EDC-35 炸药类似。从上述研究中可以看出，以 TATB 为基的钝感炸药的温度效应比较复杂。据分析：一方面，温度因热胀冷缩引起密度变化，影响爆轰波传播；另一方面，温度变化引起反应速率变化，同样影响爆轰波传播。可见，温度效应是两者共同作用的结果。

本研究在低温（－30 ℃）直径效应实验的基础上，运用 DSD 的 GGO 模型[17]，研究低温下 JB-9014 钝感炸药（TATB 炸药与粘结剂的质量分数比为 95∶5）爆轰波传播的非理想行为，运用非线性优化方法——遗传算法，确定其 DSD 参数，为钝感炸药爆轰波传播研究提供基础。

2 实验研究

低温爆轰实验布局如图 1 所示。将实验装置放置在低温箱内，并控制实验温度。JB-9014 钝感药柱起爆后，形成拟定态爆轰波，采用电探针测量定态爆速 D_0，利用扫描相机记录爆轰波形，测量方法详见文献[16]。由于药柱密度不同，定态爆速 D_0 需根据 PBX-9502 炸药（与 JB-9014 炸药的成分配比相同，粘结剂相近）的密度与爆速修正因子进行修正（使密度相同，为 1.890 g/cm^3）[9]，修正爆速记为 D_{0m}，修正结果列于表 1。表 1 中：T 为实验温度，d、L、ρ 分别为常温下药柱的直径、长度和密度。

表 1 定态爆速实验结果

Table 1 Experimental results of steady-state detonation velocity

No.	T /(℃)	d /(mm)	L /(mm)	ρ /(g/cm^3)	D_0 /(km/s)	D_{0m} /(km/s)
1	－29.9	9.96	200.15	1.886	7.48	7.45
2	－30.3	12.46	200.06	1.890	7.54	7.54
3	－30.3	14.95	240.18	1.892	7.61	7.60
4	－30.4	29.94	300.25	1.893	7.69	7.68

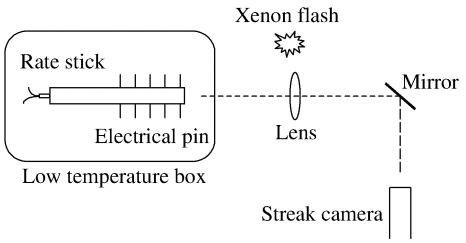


图 1 实验布局示意图

Fig. 1 Schematic of experimental arrangement

3 DSD 方法

DSD 方法的基本思想是：将爆轰反应流动方程组进行解耦处理，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；再把它们结合于流体动力学计算编码，构成一种既能反映反应区对波阵面传播的影响，又能快速计算的方法。DSD 方法主要包括 3 部分：爆轰波阵面的发展方程、爆轰反应区动力学和边界条件。

3.1 波阵面发展方程

Bdzil[3-4]、Lambourn[5]等人应用 Whitham 冲击波动力学方法，相继导出了二维爆轰波阵面发展方程；孙承纬等人[17]建立了 GGO 模型，导出了类似的波阵面发展方程。本研究采用 GGO 模型。该模型认为：爆轰波是无厚度的几何曲面，面上各点都是新的起爆点（波源），设传播速度为 D_n，则在这些新起爆点产生的许多小爆轰波包的包络就构成下一时刻的宏观爆轰波阵面，如图 2 所示。图 2 中：r 为径向坐标；z 为轴向坐标（与药柱轴线重合），也是拟定态爆轰波传播方向，$z=z(r,t)$ 表示波阵面曲线；$\boldsymbol{n}$ 为波阵面法向；t 为时间；φ 为波阵面法向 $\boldsymbol{n}$ 与 z 轴夹角。由 t 和 $t+\Delta t$ 时刻波阵面曲线之间的几何关系，得

到二维柱面爆轰波阵面发展方程,即

$$\frac{\partial z}{\partial t}=\frac{1}{\cos\varphi}\frac{\Delta n}{\Delta t}=\left[1+\left(\frac{\partial z}{\partial r}\right)^2\right]^{1/2}D_{\mathrm{n}} \tag{1}$$

式中:κ 为当地平均曲率。当 $t\to+\infty$ 时,$\partial z/\partial t=0$,波阵面形状不再变化,形成拟定常二维爆轰波,对应的波形称为定态爆轰波,传播速度称为定态爆速。

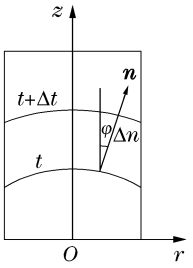


图 2 爆轰波阵面的传播

Fig. 2 Propagation of detonation front

当地平均曲率 κ 的计算式为

$$\kappa=\frac{\partial^2 z/\partial r^2}{[1+(\partial z/\partial r)^2]^{3/2}}+\frac{\partial z/\partial r}{r[1+(\partial z/\partial r)^2]^{1/2}} \tag{2}$$

当 $r=0$ 时,(2)式等号右边两项相等。

3.2 爆轰反应区动力学

对于比较平滑、变化缓慢的曲面爆轰波,利用非线性渐近方法分析反应流动 Euler 方程组,结果表明反应区的流动是局部的,对波阵面的影响主要由曲率效应关系 $D_{\mathrm{n}}(\kappa)$ 反映。$D_{\mathrm{n}}(\kappa)$ 关系与药柱几何形状和起爆方式基本无关,是炸药的一种基本爆轰性能。给定 $D_{\mathrm{n}}(\kappa)$ 关系,在数学上就决定了爆轰波阵面传播的几何学或运动规律,无须爆轰产物流场计算。$D_{\mathrm{n}}(\kappa)$ 关系与反应速率密切相关,目前不能从理论上导出,通常利用球面散心爆轰波或药柱中拟定常二维爆轰进行测量。

最早的 $D_{\mathrm{n}}(\kappa)$ 关系是根据 Eyring 等人[18]的理论和实验研究结果得到的线性关系,即

$$D_{\mathrm{n}}/D_{\mathrm{CJ}}=1-a\kappa \tag{3}$$

式中:a 为曲率系数。对于大多数凝聚态炸药,当爆轰波比较平滑、变化缓慢时,线性 $D_{\mathrm{n}}(\kappa)$ 关系近似成立。随着研究的深入,发现线性关系在小曲率情况下不再适用,并且发现 $D_{\mathrm{n}}(\kappa)$ 关系与反应速率密切相关。一般反应速率形式下,$D_{\mathrm{n}}(\kappa)$ 关系的理论分析非常困难,通常采用经验公式计算,常见的取得较好效果的经验公式为[8,19]

$$\frac{D_{\mathrm{n}}}{D_{\mathrm{CJ}}}=1-C_1\kappa\frac{1+C_2\kappa+C_3\kappa^2}{1+C_4\kappa+C_5\kappa^2} \tag{4}$$

$$\frac{D_{\mathrm{n}}}{D_{\mathrm{CJ}}}=1+A[(C_1-\kappa)^{\alpha}-C_1^{\alpha}]-B\kappa\frac{1+C_2\kappa+C_3\kappa^2}{1+C_4\kappa+C_5\kappa^2} \tag{5}$$

式中:A、B、$C_1\sim C_5$、α 为拟合参数。

3.3 边界条件

对于扁条形药柱或大长径比药柱中的拟定常二维爆轰波,边界条件即为边界点处波阵面法向与边界之间的夹角,通常由爆轰反应模型、爆轰波与介质的相互作用来分析,或者通过实验测量。

在药柱轴线,由对称性可知,$\varphi=0$,即

$$(\partial z/\partial r)\,|_{r=0}=0 \tag{6}$$

在药柱边界,设波阵面法向与边界之间的夹角为 φ_{e},药柱半径为 r_0,则

$$(\partial z/\partial r)\,|_{r=r_0}=-\tan\varphi_{\mathrm{e}} \tag{7}$$

爆轰波在均匀药柱中传播时,不论初始波形如何,经一定距离的非定常传播后,都会进入拟定常状态,此后波阵面的形状和传播速度不再变化,形成拟定常二维爆轰波。理论分析和实验结果[10,20]已证明,在拟定常二维爆轰波中,边界处波阵面法向与边界之间呈固定夹角 φ_0,称为边界角。在爆轰波非定常传播阶段,φ_{e} 是随时间 t 变化的。这个问题比较复杂,尚无较好的解决方法,在此借鉴 Lambourn 等人[5]的处理方法,即

$$\varphi_{\mathrm{e}}=\varphi_0[1-\exp(-t/t_{\mathrm{delay}})] \tag{8}$$

(8)式的意义是:初始时刻的边界角为零,随后边界角以指数形式增大并稳定在 φ_0 上,t_{delay} 反映了边界角达到稳定值的快慢程度。

(1)式、(6)式~(8)式以及 $D_{\mathrm{n}}(\kappa)$ 关系构成了研究药柱中爆轰波传播的封闭 DSD 方程组。这是一

个两点边值问题的抛物型方程组，可通过数值求解得到波阵面的传播规律，无须计算爆轰反应流场。从方程组可以看出，曲面爆轰波在其曲率和边界的力学条件控制下进行传播，因此 DSD 方法的关键在于边界条件的确定和处理以及 $D_n(\kappa)$关系的确定。

4 DSD 参数的确定

4.1 差分格式

采用古典显式中心差分格式求解 DSD 方程组。在边界点处，中心差分格式不再适用，此时的处理方法为：假设边界外一点也满足(1)式，由(1)式、(6)式(或(7)式)的中心差分式联立求解该点的值，这样空间差分精度是二阶的，时间差分精度是一阶的。为了保证格式稳定和计算精度，空间和时间步长应较小，本研究分别取空间步长为 0.1 mm 量级，时间步长为 0.001 μs 量级。

4.2 优化方法

经计算比较，(5)式的 $D_n(\kappa)$关系式具有良好的适应性，在此选用(5)式进行计算，此时需确定的参数有 D_{CJ}、A、B、$C_1\sim C_5$、α 以及边界角 φ_0。考虑到参数较多，本研究采用遗传算法优化确定。

遗传算法是一种借鉴生物界自然选择和进化机制的高度并行、随机、自适应搜索算法。它采用群体搜索技术，将种群看作一组问题解，通过对当前种群施加选择、交叉和变异等一系列遗传操作，从而产生新一代种群，逐步使种群进化，使之达到包含近似最优解的状态。由于遗传算法具有思想简单、易于实现以及全局优化性能，现已应用到许多领域，用以解决优化和搜索问题。以下为具体求解方法。

(1) 约束条件。JB-9014 炸药与 PBX-9502 炸药的成分配比相同，粘结剂相近，国内外研究结果表明，两种炸药的 CJ 爆速约为 7.77 km/s，因此 CJ 爆速 D_{CJ}取 7.77 km/s。边界角 φ_0 满足 $0°<\varphi_0<90°$。

(2) 决策变量。决策变量共 10 个，即 D_{CJ}、A、B、$C_1\sim C_5$、α、φ_0。

(3) 目标函数 f。目标函数 f 取为 4 发实验波形与计算波形之间的标准偏差和，即

$$f=\sum_{i=1}^{4}\left[\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(z_{ij,\mathrm{exp}}-z_{ij,\mathrm{cal}})^2\right]^{1/2} \tag{9}$$

式中：$z_{ij,\mathrm{exp}}$为第 i 发实验波形的第 j 个测量值，$z_{ij,\mathrm{cal}}$为与 $z_{ij,\mathrm{exp}}$对应的计算值。

(4) 适应度 F。因为目标函数 f 总是非负的，f 值越小，对应的参数越接近优化目标，因此适应度 F 可直接取为目标函数 f，即 $F=f$。

4.3 优化结果

当 κ 的量纲取 $\mathrm{mm^{-1}}$时，优化结果为：$D_{CJ}=7.8507$ km/s，$\varphi_0=47.8915°$，$A=1.0802$，$B=6.4687$，$C_1=3.3558$，$C_2=4.6227$，$C_3=1.5533$，$C_4=172.08$，$C_5=99.28$，$\alpha=0.01954$。在平面起爆条件下，计算得到的波阵面演化过程见图 3，药柱中心法向爆速变化过程见图 4。分析可知，当爆轰波的传播距离超过药柱直径的 5 倍后，波阵面形状和法向爆速基本不变，可认为进入拟定常状态。

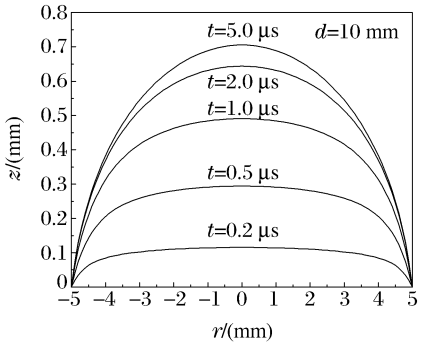


图 3 波阵面演化过程

Fig. 3 Development of the detonation front

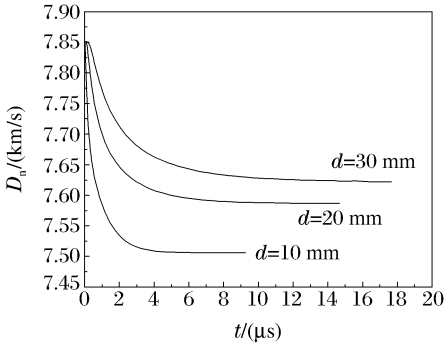


图 4 法向爆速随时间的变化

Fig. 4 Variations of normal detonation velocity with time

定态波形和爆速的计算结果与实验结果的比较如图 5、图 6 所示。从图 5、图 6 中可以看出,计算结果与实验结果基本符合,但其中一个爆速实验点(0.134 mm^{-1},7.60 km/s)明显偏离计算曲线,很可能是实验测量偏差造成的。因为已有实验结果[14]表明,r^{-1}-D_0 曲线是单调下降的,其导数曲线是单调上升的,而该实验点偏离这种趋势。另外,根据爆轰理论,定态爆速 D_0 随直径增加先快速增加,在接近极限直径时,增加变缓,并趋于 CJ 爆速。低温下,无论是本研究计算结果,还是美国、英国的实验结果均反映出该规律,是实验数据不够,还是钝感炸药不符合该规律,还有待进一步研究。

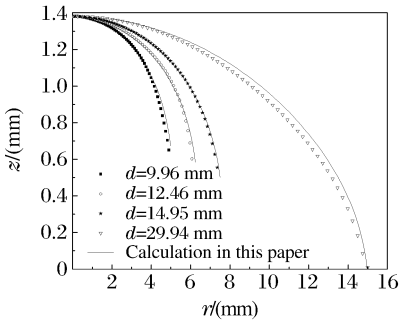


图 5　定态波形

Fig. 5　Steady-state detonation front

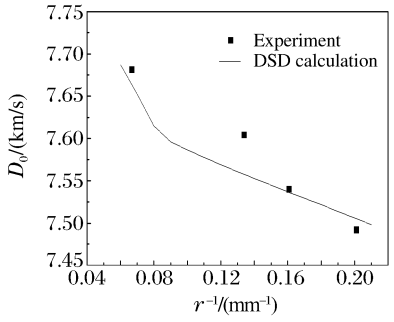


图 6　定态爆速

Fig. 6　Steady-state detonation velocity

5　结　语

根据直径效应实验结果,运用非线性优化方法,得到了－30 ℃下 JB-9014 钝感炸药爆轰波传播的 DSD 参数。采用该参数对定态波形和爆速进行计算,计算结果与实验结果符合,可为钝感炸药曲面爆轰波传播的研究提供参考。但是,DSD 理论中,边界条件是力学的,由炸药反应特性、爆轰波与边界介质的相互作用、炸药和边界介质的冲击性质等因素确定,是非常复杂的问题,目前理论和数值模拟均没有很好地解决,实验研究又由于药柱边界处的爆轰波形变化非常快,难以准确测量。国际通行的做法是,不涉及力学过程,完全由数学优化过程确定。基于力学的边界条件是 DSD 理论有效的关键之一,这还有待进一步深入研究。

References:

[1] Sun C W, Wei Y Z, Zhou Z K. Applied Detonation Physics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000: 488-493. (in Chinese)
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,2000:488-493.

[2] Chern I L, Glimm J, McBryan O, et al. Front tracking for gas dynamics [J]. J Comput Phys, 1986, 62: 83-110.

[3] Bdzil J B, Stewart D S. Modeling two-dimensional detonations with detonation shock dynamics [J]. Phys Fluids A, 1989, 1(7): 1261-1267.

[4] Bdzil J B, Fickett W, Stewart D S. Detonation shock dynamics: A new approach to modeling multi-dimensional detonation waves [A]//Proceedings of the 9th Symposium (International) on Detonation [C]. Portland, Oregon, US, 1989: 730-742.

[5] Lambourn B D, Swift D C. Application of Whitham's shock dynamics theory to the propagation of divergence detonation waves [A]//Proceedings of the 9th Symposium (International) on Detonation [C]. Portland, Oregon, US, 1989: 784-797.

[6] Osher S, Sethian J A. Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations [J]. J Comput Phys, 1988, 79(1): 12-49.

[7] Lambert D E, Stewart D S, Yoo S, et al. Experimental validation of detonation shock dynamics in condensed explosives [J]. J Fluid Mech, 2006, 546: 227-253.

[8] Aslam T D. Detonation shock dynamics calibration of PBX 9501 [J]. AIP Conf Proc, 2007, 955: 813-816.

[9] Campbell A W. Diameter effect and failure diameter of a TATB-based explosive [J]. Propell Explos Pyrot, 1984,

9(6):183-187.
[10] 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]//Proceedings of 11th International Detonation Symposium [C]. Snowmass, Colorado, US, 1997:1029-1037.
[11] Aslam T D, Bdzil J B, Hill L G. Extensions to DSD theory: Analysis of PBX 9502 rate stick data [A]//Proceedings of 11th International Detonation Symposium [C]. Snowmass, Colorado, US, 1997:21-29.
[12] Bdzil J B, Stewart D S. The dynamics of detonation in explosive systems [J]. Annu Rev Fluid Mech, 2007, 39(1):263-292.
[13] Hutchinson C D, Foan G C W, Lawn H R. Initiation and detonation properties of the insensitive high explosive TATB/Kel-F 800 95/5 [A]//Proceedings of the 9th Symposium (International) on Detonation [C]. Portland, Oregon, US, 1989:123-132.
[14] Tan D W, Fang Q, Zhang G S, et al. Experimental study on the diameter effect for JB-9014 rate sticks [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(4):300-304. (in Chinese)
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.
[15] Tan D W, Fang Q, Zhang G S, et al. Detonation shock dynamics calibration of JB-9014 explosive at ambient temperature [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009, 23(3):161-166. (in Chinese)
谭多望,方 青,张光升,等. 常温下 JB-9014 钝感炸药的 DSD 参数研究 [J]. 高压物理学报,2009,23(3):161-166.
[16] Zou L Y, Tan D W, Wen S G, et al. Experimental study on the nonideal detonation for JB-9014 rate sticks at −30 ℃ [J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(4):325-330. (in Chinese)
邹立勇,谭多望,文尚刚,等. 低温下小尺度钝感炸药非理想爆轰实验研究 [J]. 爆炸与冲击,2007,27(4):325-330.
[17] Sun C W, Zhao F, Gao W. A detonation shock dynamics approach to the diameter effect of explosive sticks [J]. Explosion and Shock Waves, 1996, 16(3):193-201. (in Chinese)
孙承纬,赵 峰,高 文. 研究爆速直径效应的爆轰冲击波动力学方法 [J]. 爆炸与冲击,1996,16(3):193-201.
[18] Eyring H, Powell R E, Duffy G H, et al. The stability of detonation [J]. Chem Rev, 1949, 45(1):69-181.
[19] Aslam T D, Bdzil J B, Hill L G. Analysis of the LANL detonation-confinement test [J]. AIP Conf Proc, 2004, 706:831-834.
[20] Bdzil J B, Davis W C. Detonation shock dynamics (DSD) calibration for PBX 9502 [A]//Proceedings of 10th Symposium (International) on Detonation [C]. Boston, US, 1993:146-149.

Detonation Shock Dynamics Calibration of JB-9014 Explosive at Low Temperature

TAN Duo-Wang, ZOU Li-Yong, ZHANG Guang-Sheng, HE Zhi, JIANG Yang

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Detonation shock dynamics (DSD) method is an effective way to study the non-ideal propagation of detonation waves. Using the generalized geometrical optics model of DSD, the non-ideal propagation of detonation waves is studied for explosive grain with high slenderness ratio. A computer code is developed to calibrate the DSD parameters for JB-9014 insensitive high explosive by genetic algorithm. Calibration data are obtained from measurements of the detonation velocities and detonation wave fronts in JB-9014 explosive at low temperature of −30 ℃, with diameters of 10-30 mm. The steady-state detonation velocities and detonation wave fronts predicted by these DSD parameters can fit the experimental data within the experimental uncertainty.

Key words: insensitive high explosive; detonation shock dynamics method; steady-state detonation velocity; genetic algorithm