DOI: 10.11883/1001-1455(2016)02-0242-06

RDX 基 PBX 的做功能力及 JWL 状态方程参数确定*

王新颖[1,2],王树山[1],徐豫新[1],胡 赛[1]
(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081;
2. 沈阳理工大学装备工程学院,辽宁 沈阳 110159)

摘要: 为研究 RDX 基 PBX 炸药的做功能力并确定其爆轰产物的 JWL 状态方程参数,对 RDX 基 PBX 炸药和 TNT 炸药进行∅50 mm 标准圆筒实验,获得了圆筒膨胀位移和速度的时程曲线,对比得出 RDX 基 PBX 炸药的做功能力明显高于 TNT 炸药;基于能量守恒对实验数据进行非线性拟合,得到 2 种炸药爆轰产物的 JWL 状态方程参数。TNT 炸药的拟合参数和通过 AUTODYN 软件计算得到的结果符合较好;将采用上述方法得到的 RDX 基 PBX 炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数用于数值模拟,计算结果与实验值吻合较好,符合数值模拟标定 JWL 状态方程参数的要求。

关键词: 爆炸力学;做功能力;圆筒实验;RDX 基 PBX;JWL 状态方程
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

RDX 基高聚物粘结炸药充分利用高能炸药的爆轰性能和高分子添加剂的力学性能,较传统的铸装炸药具有较高的能量密度和爆轰性能,在军事上广泛应用于导弹战斗部装药、推进剂、水雷、鱼雷、反坦克导弹等,工业上用于爆炸成型、石油射孔弹等[1-3]。炸药作为武器毁伤的起始能源,其做功能力是炸药的研制和战斗部装药设计以及威力评估的基础问题。炸药的状态方程是描述炸药爆轰做功的载体爆轰产物物理参数之间的关系。

目前已经有多种较为成熟的爆轰产物状态方程形式,如 γ 律状态方程、JWL、BKW、KHT 及 VLW 状态方程等,其中 JWL 状态方程能够比较精确地描述爆轰产物的膨胀驱动过程,JWL 状态方程是由 E. L. Lee 等[4]在前人工作的基础上提出的,该方程的未知参数可以通过 J. W. Kury 等[5]提出的圆筒实验来确定。圆筒实验在评估炸药做功能力中得到了广泛应用,文献[6-8]通过圆筒实验的数值模拟方法确定 JWL 状态方程参数。

本文中通过∅50 mm 标准圆筒实验,以 TNT 炸药为基础,考察 RDX 基 PBX 炸药的做功能力,并基于实验数据和能量守恒,运用 Origin 软件进行非线性拟合得出 JWL 状态方程参数,通过数值模拟对比实验数据验证参数的准确性,以期为后续研究提供依据。

1 圆筒实验及结果分析

1.1 实验模型

实验中选用压装 TNT 药柱和 RDX 基 PBX 药柱,尺寸均为∅50 mm×495 mm。TNT 药柱为压装,密度为 1.58 g/cm^3,爆速为 6 836 m/s,RDX 基 PBX 药柱为质量分数 96%的 RDX 和 4%的粘结剂压装,密度为1.67 g/cm^3,爆速为 8 279 m/s。采用的铜管为无氧铜,密度为8.9 g/cm^3,屈服强度为 200 MPa,拉伸强度为380 MPa,铜管内径为 50.10 mm,外径为 60.34 mm。实验装置如图 1 所示。狭缝位置距离起爆端 295 mm,采用 GSJ 高速转镜相机记录圆筒壁在狭缝两端的膨胀过程,扫描速度是 1.5 mm/μs,并通过固定在圆筒两端的电探针测定炸药的实际爆速。

* **收稿日期**: 2014-11-18; **修回日期**: 2015-03-10
第一作者: 王新颖(1980—),女,博士研究生,讲师,wxy801003@163.com。

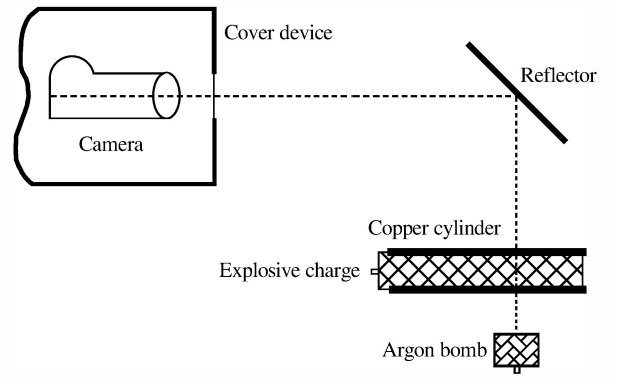



图 1　圆筒实验装置图

Fig. 1　Equipment diagram of the cylinder test

1.2　实验数据处理

实验获得的圆筒壁膨胀过程的扫描底片如图 2 所示，对底片进行判读，得到圆筒壁膨胀距离时程曲线，如图 3 所示。

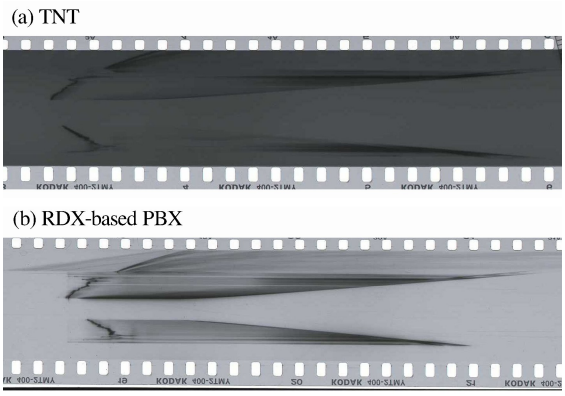

图 2　圆筒壁膨胀过程原始扫描底片

Fig. 2　Scanning films showing expansion process of cylindrical wall

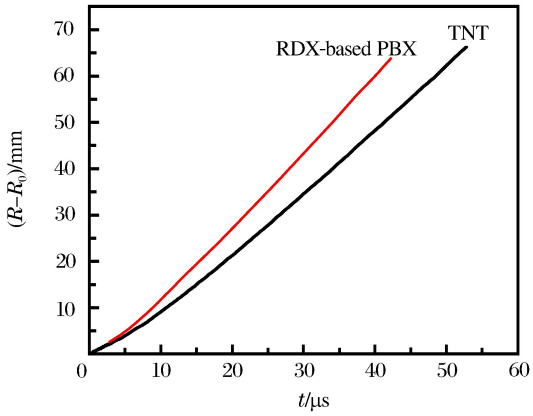

图 3　不同炸药驱动下圆筒壁膨胀距离时程曲线

Fig. 3　Radial expansion displacement of cylindrical wall generated by different explosives

实验数据处理采用文献[9]中的处理方法，认为圆筒壁在爆炸冲击波和气体膨胀产物的共同作用下发生膨胀运动。冲击波使得圆筒壁在初期膨胀速度迅速增加，但持续时间较短；而气体爆轰产物膨胀时的推动力峰值虽然偏低，但持续时间较长。圆筒壁膨胀距离 $R-R_0$ 与膨胀时间 t 有如下关系：

$$R-R_0=v_s\left[t-\tau_s\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau_s}}\right)\right]+v_g\left[\tau_2^2\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau_2}}-\tau_1^2\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau_1}}+(\tau_2-\tau_1)t+\tau_1^2-\tau_2^2\right] \tag{1}$$

式中：R 和 R_0 分别为圆筒在 t 时刻和初始时刻的半径，v_s 为冲击波驱动圆筒壁加速达到的渐进速度，τ_s 为其加速时间段；v_g 为气体爆轰产物膨胀驱动圆筒壁加速达到的渐进速度；τ_1 和 τ_2 分别为爆轰产物膨胀力波动时上升和下降的时间常数。将式(1)对时间求导，可得到圆筒壁的膨胀速度 u 的计算公式：

$$u=v_s\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau_s}}\right)+v_g\left[\tau_1\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau_1}}-\tau_2\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau_2}}+(\tau_2-\tau_1)\right] \tag{2}$$

将实验获得的 2 种炸药的圆筒壁膨胀距离和时间数据按式(1)进行拟合，其拟合系数见表 1。将表 1 中拟合系数代入式(2)中，可得到圆筒壁膨胀速度时程曲线，如图 4 所示。

表 1　圆筒壁膨胀位移曲线拟合系数

Table 1　Fitting parameters for radial expansion displacement curve of cylindrical wall

炸药	v_s/(mm·μs^{-1})	τ_s/μs	v_g/(mm·μs^{-1})	τ_1/μs	τ_2/μs
TNT	0.684 66	0.370 31	0.102 67	1.350 37	7.772 72
RDX-based PBX	0.868 95	0.186 85	0.118 26	0.839 37	7.610 43

由图 4 可以看出:在圆筒膨胀初期,圆筒壁在冲击波力的作用下,RDX 基 PBX 炸药的膨胀速度迅速增大到约 840 m/s,TNT 炸药的膨胀速度则增大到约 630 m/s;随后圆筒壁在爆轰产物作用下,膨胀速度缓慢增大,直至膨胀破裂时,速度达到最大值即破片初速 v_0,广泛适用的计算破片初速的方法为 G. W. Gurney 等[10]提出的格尼公式:

$$v_0=\sqrt{2E}\sqrt{\frac{\beta}{1+0.5\beta}} \tag{3}$$

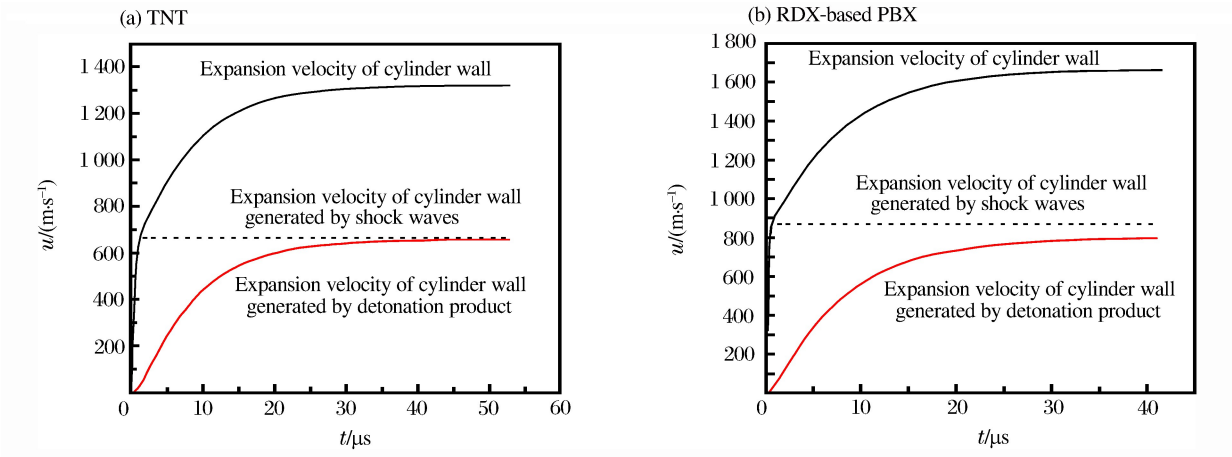

图 4 不同炸药驱动下圆筒壁膨胀速度时程曲线

Fig. 4 Radial expansion velocity of cylindrical wall generated by different explosives

式中:$\beta=C/m$ 为爆炸载荷系数,其中 C 为炸药质量,m 为金属壳体质量;$\sqrt{2E}$ 称为格尼系数,具有具有速度量纲。由实验计算得到 2 种炸药的破片初速和格尼系数如表 2 所示。可以看出,RDX 基 PBX 爆轰驱动的破片初速比 TNT 炸药高 24.3%,格尼系数高 21.1%。

表 2 破片初速及炸药格尼系数

Table 2 Initial velocity of fragment and Gurney coefficient of explosive

炸药	v_0/(m·s^{-1})	$\sqrt{2E}$/(m·s^{-1})
TNT	1 311	2 270.7
RDX-based PBX	1 630	2 749.2

2 JWL 状态方程参数

2.1 实验数据拟合法

基于能量守恒,炸药的化学能全部转化为爆轰产物气体的内能,随着爆轰产物的膨胀做功逐渐转换为爆轰产物动能和金属圆筒的动能,故有

$$E_0=E_i+E_{k,g}+E_{k,m}=E_i+E_k \tag{4}$$

式中:E_0 为炸药的质量化学能,E_i 爆轰产物膨胀做功后自身剩余内能,$E_{k,g}$ 和 $E_{k,m}$ 分别为爆轰产物动能和金属圆筒动能。

JWL 状态方程不显含化学反应,能精确描述爆轰产物的等熵膨胀过程,其形式为:

$$p_s=A\mathrm{e}^{-R_1V}+B\mathrm{e}^{-R_2V}+\frac{C}{V^{\omega+1}} \tag{5}$$

式中:p_s 为爆轰产物压力,V 为爆轰产物相对比容;A、B、C、R_1、R_2 和 ω 为 JWL 状态方程的待定参数。

由热力学关系式 $E=-\int p\,\mathrm{d}V$,可得到 JWL 状态方程的等熵内能形式:

$$E_s(V)=\frac{A}{R_1}\mathrm{e}^{-R_1V}+\frac{B}{R_2}\mathrm{e}^{-R_2V}+\frac{C}{\omega V^{\omega}} \tag{6}$$

式中:$E_s(V)$为爆轰产物等熵内能,是比容 V 的函数。炸药瞬时定容爆轰时,$V=1$,此时为驱动的初态:

$$E_0=E_s|_{V=1}=\frac{A}{R_1}\mathrm{e}^{-R_1}+\frac{B}{R_2}\mathrm{e}^{-R_2}+\frac{C}{\omega} \tag{7}$$

则膨胀过程中爆轰气体剩余的内能为：

$$E_i = E_s(V) = \frac{A}{R_1}e^{-R_1V} + \frac{B}{R_2}e^{-R_2V} + \frac{C}{\omega V^{\omega}} \tag{8}$$

将式(6)和式(7)代入式(4)，可得驱动的有效能量 E_k 为：

$$E_k(V) = E_0 - E_s(V) = \frac{A}{R_1}(e^{-R_1} - e^{-R_1V}) + \frac{B}{R_2}(e^{-R_2} - e^{-R_2V}) + \frac{C}{\omega V^{\omega}}(V^{\omega} - 1) \tag{9}$$

根据格尼公式可有驱动金属圆筒的膨胀速度 u 为[11]：

$$u = \sqrt{2E_k(V)}\sqrt{\frac{\beta}{1+0.5\beta}} \tag{10}$$

根据式(9)对∅50 mm 标准圆筒的 TNT 炸药和 RDX 基 PBX 炸药得到 $E_k(V)$-V 的关系，根据式(10)即可得到 u-V 关系曲线，如图 5 所示。

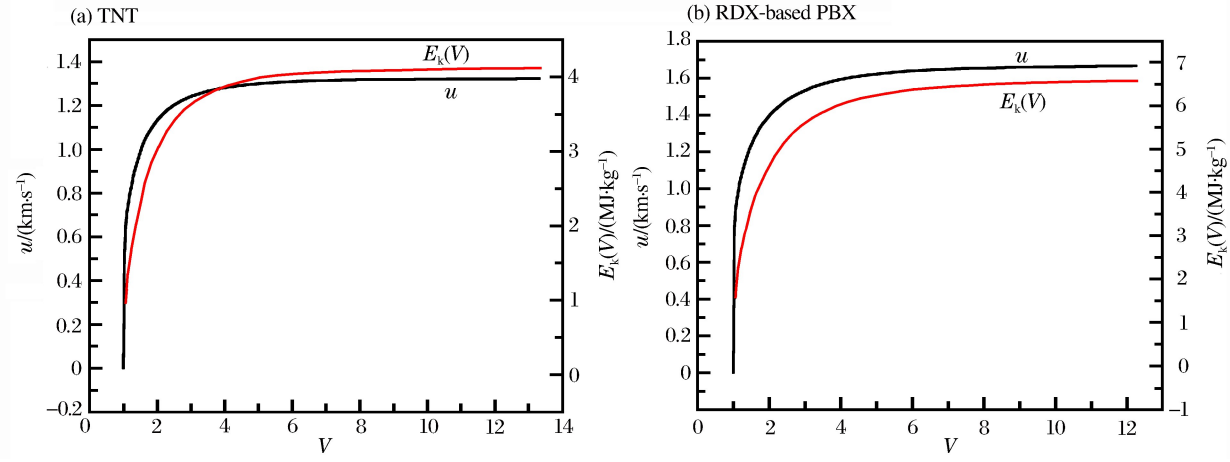

图 5 不同炸药驱动下圆筒壁 u-V 曲线和 $E_k(V)$-V 曲线

Fig. 5 u-V and $E_k(V)$-V curves of cylindrical wall generated by different explosives

根据式(9)应用 Origin 软件非线性拟合[12]即可得到 2 种炸药的 JWL 状态方程的参数，见表 3，TNT 炸药的拟合参数和 AUTODYN 软件计算的结果相比，符合较好。

表 3 爆轰产物的 JWL 状态方程参数

Table 3 Parameters in JWL state equation of detonation product

炸药	A/GPa	B/GPa	C/GPa	R_1	R_2	ω
RDX-based PBX	522.8	8.500	1.065	4.20	1.00	0.36
TNT(Origin)	363.5	3.600	0.988	4.10	0.99	0.26
TNT(AUTODYN)	371.2	3.231	1.045	4.15	0.95	0.30

2.2　圆筒实验数值模拟

为验证 RDX 基 PBX 炸药爆轰产物的 JWL 状态方程的参数，选用 AUTODYN 软件对 RDX 基 PBX 圆筒实验进行数值模拟，圆筒实验为二维轴对称模型，RDX 基 PBX 密度为 1.67 g/cm^3，爆速为8 279 m/s，采用高能炸药燃烧模型和 JWL 状态方程，JWL 状态方程参数见表 3；无氧铜采用各向同性弹塑性流体动力学模型[13]。几何模型如图 6 所示，为避免端部效应的影响，观测点选取在圆筒壁上距爆点 200～300 mm 处，并等间隔设置。

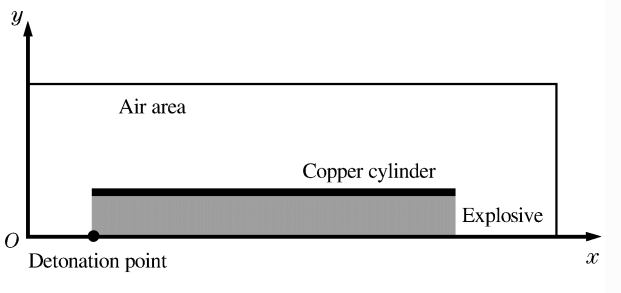

图 6 数值模拟的几何模型

Fig. 6 Geometry model of simulation

图 7 所示为数值模拟结果与实验值的对比,可以看出,基于上述能量守恒方法拟合出的 JWL 状态方程参数用于数值模拟,计算结果与实验值吻合较好,符合数值模拟标定 JWL 状态方程参数的要求。

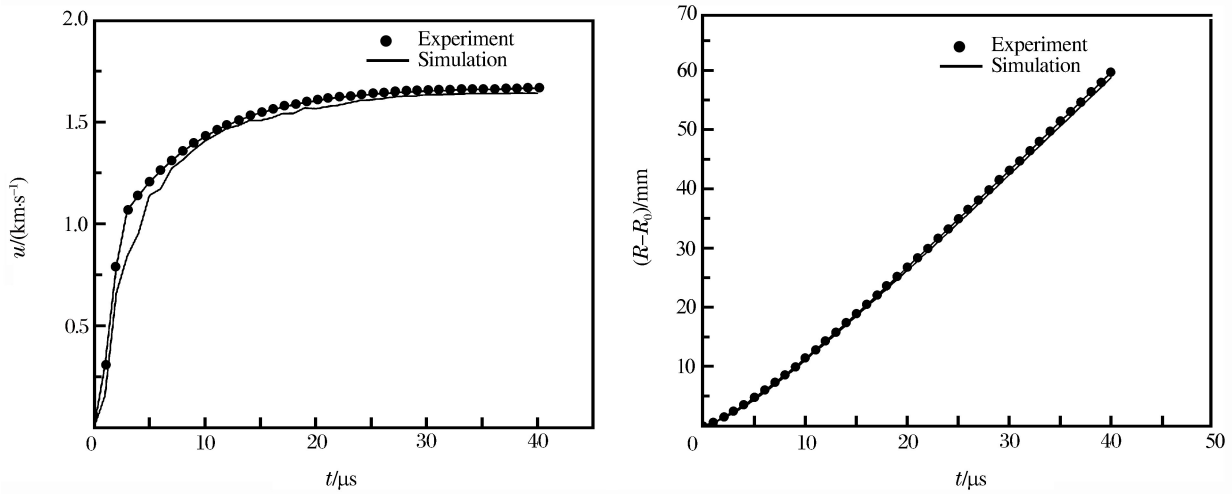

图 7 RDX 基 PBX 炸药圆筒实验的数值模拟与实验结果比较

Fig. 7 Cylinder test results of RDX-based PBX explosive compared with numerical simulation

3 结 论

通过∅50 mm 圆筒实验对 RDX 基 PBX 炸药的做功能力进行评价,并基于能量守恒,拟合 JWL 状态方程参数,得到以下结论:

(1)RDX 基 PBX 爆轰驱动的破片初速比 TNT 炸药高 24.3%,格尼系数高 21.1%,其做功能力明显强于 TNT 炸药。

(2)基于能量守恒原理,通过非线性拟合得到 2 种炸药爆轰产物的 JWL 状态方程参数,TNT 炸药的拟合参数与已知结果较符合;采用上述方法得到的 RDX 基 PBX 炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数用于数值模拟,计算结果与实验值吻合较好,符合数值模拟标定 JWL 状态方程参数的要求。

参考文献:

[1] 孙国祥. 高分子混合炸药[M]. 北京:国防工业出版社,1985:3-4.

[2] 孙华,郭志军. PBX 炸药技术特性及在水中兵器上的应用[J]. 装备指挥技术学院学报,2009,20(3):108-111.
Sun Hua, Guo Zhijun. Characteristics of PBX dynamite and its application in undersea weaponry[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2009,20(3):108-111.

[3] 孙业兵,曹新茂. 军用混合炸药[M]. 北京:兵器工业出版社,1995:10-11.

[4] Lee E L, Hornig H C, Kury J W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products: UCRL-50422[R]. San Francisco: University of California, 1968.

[5] Kury J W, Hornig H C, Lee E L. Metal acceleration by chemical explosives[C]// Proceedings of 4th Symposium on Detonation. White Oak, Maryland, 1965:3-13.

[6] 陈清畴,蒋小华,李敏,等. RDX 基高聚物黏结炸药 JWL 状态方程[J]. 含能材料,2011,19(2):213-216.
Chen Qingchou, Jiang Xiaohua, Li Min, et al. JWL equation of state for RDX based PBX[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011,19(2):213-216.

[7] 谭凯元,韩勇,罗观,等. HMX 基 PBX 的作功能力及其 JWL 状态方程[J]. 火炸药学报,2013,36(3):42-45.
Tan Kaiyuan, Han Yong, Luo Guan, et al. Power ability and JWL equation of state of a HMX-based PBX[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellant, 2013,36(3):42-45.

[8] 沈飞,王辉,袁建飞. 一种确定 JWL 状态方程参数的简易算法[J]. 振动与冲击,2013,33(9):107-110.
Shen Fei, Wang Hui, Yuan Jianfei. A simple method for determining parameters of JWL EOS[J]. Journal of Vi-

bration and Shock，2013，33(9)：107-110.

[9] Lindsay C M，Butler G C，Rumchik C G. Increasing the utility of the copper cylinder expansion test[J]. Propellants，Explosives，Pyrotechnics，2010，35(5)：433-439.

[10] Gurney G W. The initial velocities of fragments from bombs，shells and grenades[R]. Army Ballistic Research Laboratory，1943.

[11] 王新颖，王树山，徐豫新，等. 爆轰驱动金属圆筒的能量转换与破片初速模型[J]. 兵工学报，2015，36(8)：1417-1422.
Wang Xinying，Wang Shushan，Xu Yuxin，et al. The energy conversion and fragment initial velocity model of metal cylinder driven by detonation[J]. Acta Armamentarii，2015，36(8)：1417-1422.

[12] 方安平. Origin 8.0 实用指南[M]. 北京：机械工业出版社，2009.

[13] 韩勇，黄辉，黄毅民，等. 含铝炸药圆筒试验与数值模拟[J]. 火炸药学报，2009，32(4)：14-17.
Han Yong，Huang Hui，Huang Yimin，et al. Cylinder test of aluminized explosives and its numerical simulation [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants，2009，32(4)：14-17.

Power capability and parameters of JWL equation of state for RDX-based PBX

Wang Xinying[1,2]，Wang Shushan[1]，Xu Yuxin[1]，Hu Sai[1]

(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology*，*Beijing Institute of Technology*，*Beijing* 100081，*China*；
2. *School of Equipment Engineering*，*Shenyang LigongUniversity*，*Shenyang* 110159，*Liaoning*，*China*)

Abstract：In order to study the power capability of RDX-based PBX and determine the parameters of the JWL equation of state，the ∅50 mm standard cylinder test of RDX-based PBX and TNT were carried out，the expansion distance-time curve and velocity-time curve of the cylinder wall were obtained. Compared with the TNT，PBX had obviously a higher power capability. Based on the theory of energy conservation and the nonlinear fitting of the experimental data，the parameters of the JWL equation of state were obtained. Compared with the known software parameters and by numerical simulation of the cylinder test by AUTODYN，a fairly good agreement was reached between the experimental value and the actual test results，proving that this method for obtaining the JWL parameters is viable.

Key words：mechanics of explosion；power capability；cylinder test；RDX-based PBX；JWL equation of state

（责任编辑　王易难）