

文章编号: 1006-9941(2017)03-0226-06

一种 RDX 基温压炸药的 JWL-Miller 状态方程研究

田少康¹, 李席¹, 刘波², 范伟², 韩志伟¹, 王伯良¹

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 山西淮海机电有限公司, 山西 长治 046012)

摘要: 为了研究某 RDX 基温压炸药的爆炸威力, 对该温压炸药进行了 $\phi 25$ mm 圆筒试验和野外静爆试验, 采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对圆筒试验的过程进行数值模拟, 得到了该温压炸药爆轰产物的 JWL 状态方程参数。引入 JWL-Miller 模型对温压炸药在野外静爆条件下的冲击波传播过程进行数值模拟, 将模拟结果与试验结果进行对比, 确定了 Miller 模型中的铝粉二次反应速率参数。结果表明: 运用所得 JWL-Miller 模型参数模拟得到的冲击波参数与静爆试验测得数据吻合较好, 平均相对误差小于 $\pm 5\%$ 。

关键词: 爆炸力学; 温压炸药; 圆筒试验; 数值模拟; 静爆试验; 后燃效应

中图分类号: TJ55; O381

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.03.009

1 引言

温压炸药 (Thermobaric Explosive, 简称 TBE) 是一类含有高能金属粉 (如 Al) 的混合炸药, 一般还添加助燃剂 (如高氯酸铵) 使其在高能炸药爆炸后快速反应以提供后期铝粉燃烧需要的高温条件, 因而与普通含铝炸药反应过程有明显的不同^[1], 是一种典型的非理想炸药^[2]。

JWL (Jones-Wilkins-Lee) 状态方程是一种能反映炸药做功能力^[3]的半经验状态方程, 可以精确地描述爆炸加速金属过程中爆轰产物的压力-体积-能量特性^[4], 已被广泛应用于炸药爆轰产物的描述。JWL 状态方程的参数一般由圆筒试验^[5]确定。陈朗等^[6]对某含铝炸药进行了 $\phi 50$ mm 的圆筒试验, 通过圆筒试验的二维数值模拟, 标定了含铝炸药的状态方程参数; 计冬奎等^[7]利用 $\phi 25$ mm 和 $\phi 50$ mm 圆筒试验共同确定了含铝炸药 JWL 状态方程, 并得到了尺寸效应与做功能力的关系。韩勇等^[8]通过圆筒试验研究了不同尺寸含铝炸药的做功能力, 探讨了含铝炸药二次反

应的问题, 提出在对含铝炸药的圆筒实验进行数值模拟时, 必须考虑含铝炸药的反应速率方程; 裴红波^[9]等研究认为 RDX 基含铝炸药中铝粉的完全反应时间为 $50 \sim 200 \mu\text{s}$, 而圆筒试验破片加速过程中铝粉后燃能量尚未完全释放。因此, 仅靠圆筒试验确定的 JWL 状态方程不能完全描述含铝非理想炸药爆轰产物的状态, 难以满足温压炸药威力评价及数值模拟的需要。

A. L. Kuhl 等^[10-11]采用两相燃烧模型对含铝炸药的爆炸和后燃效应进行了模拟研究。Miller 等^[12]通过试验得到了含铝炸药中铝粉的反应速率方程, 得到了带有二次反应的 JWL 状态方程, 且与试验结果吻合较好。辛春亮等^[13]提出可以通过试验结果反推出 Miller 反应速率方程参数。温压炸药中铝粉含量较高, 铝粉二次反应能量的释放不可忽略。而目前国内在对于温压炸药状态方程的研究过程中, 很少考虑非理想成分铝粉的能量释放, 这难以对其爆炸能量释放过程进行全面地描述。因此, 研究确立带有二次反应的 JWL 状态方程对温压炸药爆轰性能的研究和应用具有重要的意义。基于此, 本研究对 RDX 基温压炸药 (RDX/Al/其它 = 53/35/12) 进行了 $\phi 25$ mm 圆筒试验, 获得了圆筒壁膨胀位移、速度与时间的关系, 利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件数值模拟, 确定了其爆轰产物的 JWL 状态方程参数, 在此基础上, 通过野外静爆试验与数值模拟相结合, 最终得到了带有二次反应速率的温压炸药状态方程参数, 为温压炸药爆轰产物状态方程的更深入研究提供参考。

收稿日期: 2016-06-15; 修回日期: 2016-09-08

基金项目: 江苏省自然科学基金-青年基金项目 (BK20150780); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 田少康 (1991-), 男, 硕士, 主要从事爆炸力学研究。

e-mail: 675655189@qq.com

通信联系人: 韩志伟 (1984-), 男, 讲师, 主要从事爆炸力学研究。

e-mail: hzw0821@yahoo.com.cn

2 JWL 状态方程参数的确定

2.1 圆筒试验

试验按照 GJB772A-1997 方法 705.2^[14] 进行, 采用 $\phi 25$ mm 的圆筒试验, 待测炸药为 RDX 基温压炸药, 采用压装成型工艺, 平均装药密度为 $1.966 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1}$; 圆筒材料为 1 号无氧铜, 尺寸为 $\phi 25 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ (壁厚 2.5 mm); 试验装置由高压电雷管、传爆药柱、电探针、圆筒管和爆炸光源等组成, 固定于两端的电探针与时间记录仪器相连接, 用来测量炸药爆速, 试验装置见图 1^[14]。高速摄像拍摄位置距起爆端 200 mm, 转速 $7.5 \times 10^3 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 管壁膨胀扫描图像见图 2。

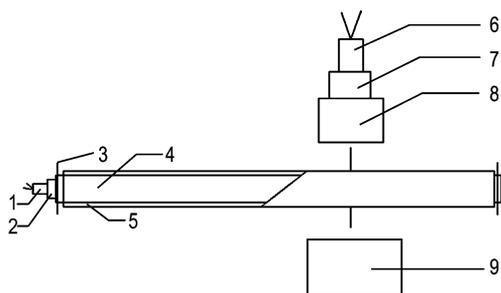


图 1 圆筒试验装置图

1,7—电雷管, 2,6—传爆药柱, 3—圆筒, 4—高速相机, 5—光源弹, 8—参试药柱, 9—电探针

Fig.1 Cylinder test setup

1,7—electric detonator, 2,6—booster, 3—cylinder, 4—high-speed camera, 5—lamp-house bomb, 8—sample, 9—electric probe



图 2 铜管膨胀扫描图像

Fig.2 Photograph of the copper cylinder expansion process

2.2 试验结果

从一侧起爆装填在圆筒内的温压炸药后, 圆筒壁会在爆轰产物作用下沿圆筒的径向和轴向做二维运动, 膨胀距离 $(R-R_0)$ 与膨胀时间 t 的关系如下式:

$$t = A + B(R - R_0) + Ce^{D(R - R_0)} \quad (1)$$

式中, $R - R_0$ 为圆筒壁膨胀距离, mm; t 为圆筒壁膨胀到某距离对应的时间, μs ; A, B, C, D 为拟合系数。根

据最小二乘法原理^[14], 对试验得到的膨胀时间 t 与膨胀距离 $(R - R_0)$ 进行拟合, 得到系数 $A = 3.2630, B = 0.6590, C = -2.4012, D = -0.12803$ 。

利用得到的 A, B, C, D 值, 圆筒壁膨胀到某一距离 $(R - R_0)$ 的壁速 u 及比动能 E , 可分别由 (2)、(3) 式计算:

$$u = \frac{d(R - R_0)}{dt} = \frac{1}{b + cde^{d(R - R_0)}} \quad (2)$$

$$E = \frac{1}{2}u^2 \quad (3)$$

对于 $\phi 25$ mm 的圆筒试验, 选取膨胀距离为 6 mm 和 19 mm 时的 u 和 E 来表征炸药的做功能力, 试验结果见表 1。

表 1 圆筒试验结果

Table 1 Cylinder test results

$R - R_0 / \text{mm}$	$t / \mu\text{s}$	$u / \text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	$E / \text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$
6	6.10	1.240 ± 0.008	0.768 ± 0.010
19	15.57	1.457 ± 0.001	1.061 ± 0.002

2.3 圆筒试验数值模拟

采用有限元动力学程序 ANSYS/LS-DYNA^[15] 对圆筒试验结果进行数值模拟, 建立 Lagrange 坐标 (R, Z, t) , 即质量的原始坐标为 (R, Z) , 计算中跟踪质量。按照试验中的实际尺寸, 建立 1/4 对称的 3D 模型, 网格单元采用六面体 SOLID164 单元, 几何模型如图 3 所示。

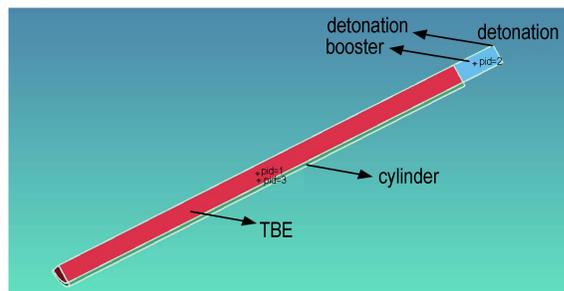


图 3 圆筒试验的几何模型

Fig.3 Cylinder test model

材料模型: 紫铜管壁材料采用 John-cook 材料模型^[16], Gruneisen 状态方程^[17-18], 其形式为:

$$p = \frac{\rho_0 C_1^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2 + (\gamma_0 + a\mu) E} \quad (4)$$

式中, C_1 是 $\mu_s - \mu_p$ (冲击波速度-质点速度) 曲线的截距,

S_1, S_2, S_3 是 $\mu_s-\mu_p$ 曲线斜率系数, a 是 Gruneisen 系数的一阶体积修正, γ_0 是 Gruneisen 系数, E 为材料内能。模拟中紫铜的参数由文献^[16] 获得, 具体数据见表 2。

表 2 紫铜的 Gruneisen 状态方程参数

Table 2 The parameters of Gruneisen equation of state of copper

$C_1 / \text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	S_1	S_2	S_3	γ_0	a
3.94	1.489	0	0	1.99	0

对于待测温压炸药, 采用 HIGH-EXPLOSIVE-BURN 材料模型和 JWL 状态方程, 其形式为:

$$p = A[1 - \omega / (R_1 v)] e^{-R_1 v} + B[1 - \omega / (R_2 v)] e^{-R_2 v} + \omega E / v \quad (5)$$

在等熵条件下, JWL 状态方程形式为:

$$p_s = A e^{-R_1 v} + B e^{-R_2 v} + C / v^{\omega+1} \quad (6)$$

式中, p 为爆轰产物的压力, GPa; p_s 为等熵条件下爆轰产物的压力, GPa; v 为爆轰产物的相对比容; E 为爆轰产物的比内能, $\text{GJ} \cdot \text{m}^{-3}$; $A, B, C, R_1, R_2, \omega$ 为六个待定参数; 一般来说先假设一组 R_1, R_2 和 ω 的值, 在给定所测炸药参数密度 ρ_0 、爆速 D_{CJ} 、爆压 p_{CJ} 和爆热 E_0 的情况下, 通过 CJ 条件和 Hugoniot 关系所得到

的 3 个关系式(等熵线过 CJ 点、Hugoniot 关系和等熵线与 Rayleigh 线相切 $-(\partial p_s / \partial v)_{v_{\text{CJ}}} = \rho_0 D_{\text{CJ}}^2$) 可求解得到 A, B, C ^[19]。

$$A e^{-R_1 v_{\text{CJ}}} + B e^{-R_2 v_{\text{CJ}}} + C v_{\text{CJ}}^{-(\omega+1)} = p_{\text{CJ}} \quad (7)$$

$$\frac{A}{R_1} e^{-R_1 v_{\text{CJ}}} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 v_{\text{CJ}}} + \frac{C}{\omega} v_{\text{CJ}}^{-\omega} = E_0 + \frac{1}{2} p_{\text{CJ}} (1 - v_{\text{CJ}}) \quad (8)$$

$$A R_1 e^{-R_1 v_{\text{CJ}}} + B R_2 e^{-R_2 v_{\text{CJ}}} + C(\omega+1) v_{\text{CJ}}^{-(\omega+2)} = \rho_0 D_{\text{CJ}}^2 \quad (9)$$

对于大多数炸药来说, R_1, R_2 和 ω 值的选取范围是 $R_1 = 4 \sim 5, R_2 = 1 \sim 2, \omega = 0.2 \sim 0.4$ 。因此, 在开始模拟计算时, 先代入一组已知的与待测温压炸药组分相近炸药的 R_1, R_2 和 ω 值^[8], 通过三个关系式计算得到相应的 A, B 和 C 值; 将得到的一组参数带入 LS-DYNA 进行模拟计算, 得到圆筒膨胀距离与时间的关系曲线, 把它与实验测得的圆筒膨胀距离时间曲线相比较, 根据它们之间的差别, 调整参数值后进行下一次计算。这样经过多次反复计算, 不断修正状态方程参数, 直到计算膨胀距离时间曲线与试验曲线间的误差小于 1% 时, 所使用状态方程参数为所要标定的参数。

按照上述方法, 最终得到圆筒膨胀距离 $R-R_0$ 与膨胀时间 t 以及膨胀速度 u 之间关系分别如图 4 所示, 圆筒膨胀过程中的计算值和试验值的相对误差已小于 1%。得到所测温压炸药爆轰产物的 JWL 状态方程参数见表 3。

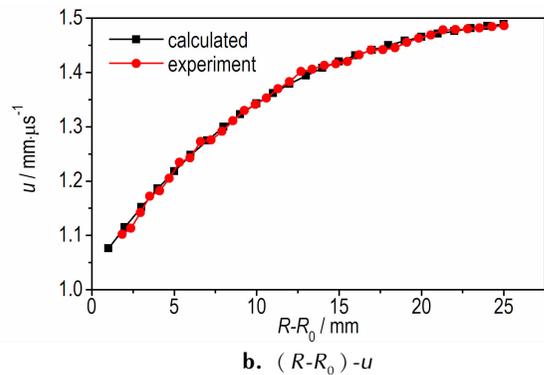
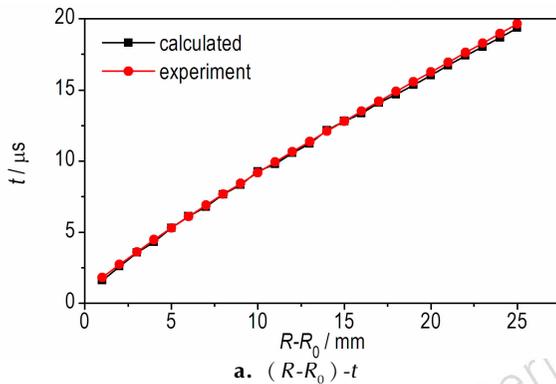


图 4 温压炸药圆筒试验中圆筒膨胀过程的计算值与测试结果

Fig. 4 Calculated and tested expansion velocity and expansion distance curves in cylinder test of TBE

表 3 温压炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数

Table 3 The parameters of the JWL equation of state of the detonation product of TBE

$\rho_0 / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$D / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$p_{\text{CJ}} / \text{GPa}$	$E_0 / \text{J} \cdot \text{g}^{-1}$	A / GPa	B / GPa	C / GPa	R_1	R_2	ω
1.966	7682	27.5	7058	752.1	18.5	1.53	4.47	1.73	0.38

3 二次反应速率方程参数确定

3.1 温压炸药野外静爆试验

对被测温压炸药进行野外静爆试验。试验场地选

择在空旷的野外, 地面平坦, 硬度适中。爆心距地面 1 m, 温压药柱药量 750 g, 直径 8 cm, 高 7.6 cm。均以钝化黑索金作为传爆药, 用 8 号电雷管上端起爆。试验采用压电式压力传感器获取冲击波参数, 以药柱

在地面上的垂直投影点为圆心,测点分布在半径为 3, 4, 5, 7 m 的圆周上,传感器分布情况如图 5 所示。试验所得 3 m 处冲击波超压曲线如图 6 所示,其中 Δp 为冲击波超压峰值, t_+ 为正压作用时间, i_+ 为正压冲量。

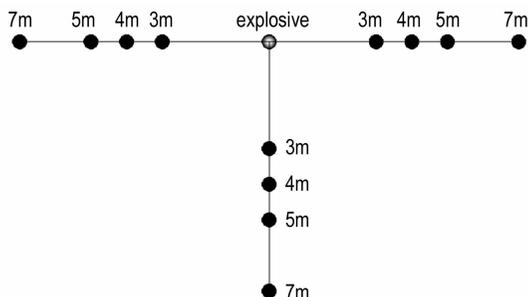


图 5 传感器分布图
Fig. 5 Sensor arrangement chart

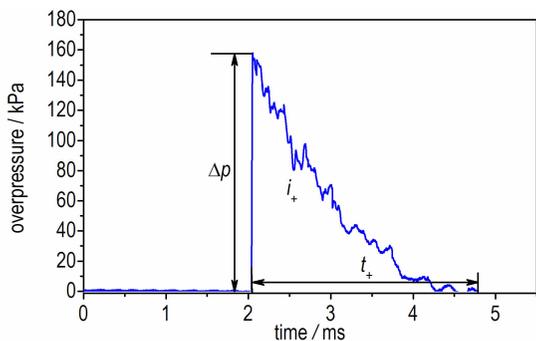


图 6 试验所得温压炸药冲击波波形
Fig. 6 Shock waves history of TBE measured by the experiment

3.2 二次反应速率方程参数

将 2.3 中得到的 JWL 方程参数带入 ANSYS/AUTODYN 有限元分析软件,对静爆试验进行模拟,建立模型如图 7 所示,采用轴对称结构,装药量、炸高以及装药尺寸均与试验一致;空气域网格尺寸为 5 mm,炸药域网格尺寸为 2 mm, AB 线段为对称轴,设置线段 BC、CD 设置为流出边界,AD 线段为刚性地面,在其 3, 4, 5, 7 m 处添加监测点。

模型中空气域采用理想气体模型,采用 AUTODYN 默认参数;爆轰产物状态方程选用带有二次反应的 JWL-Miller 模型状态方程^[13],其形式为:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v} \right) e^{-R_1 v} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v} \right) e^{-R_2 v} + \frac{\omega(E + \lambda Q)}{v} \quad (10)$$

从方程(10)中可以看出,与 JWL 方程相比, JWL-

Miller 模型方程保持了 JWL 方程参数不变,额外增加了非理想成分(如铝粉)的能量释放参数 λQ ,唯象地描述温压炸药中铝粉的二次反应对冲击波能量的补充;其中, Q 为非理想成分含有的热量, $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$; λ 为非理想成分的反应度。其能量释放速率可用(11)式来表述:

$$\frac{d\lambda}{dt} = a (1 - \lambda)^m p^n \quad (11)$$

式中, a 为能量释放常数; m 为能量释放指数; n 为压力指数,这些参数与铝粉在后燃中的特性有关。

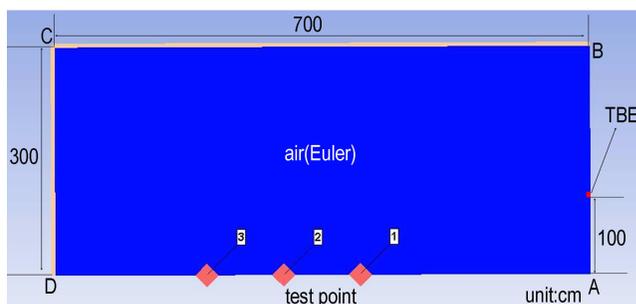


图 7 2-D 模型
Fig. 7 2-D model

在文献[20]的基础上,通过调整 a, m, n 的值改变铝粉的二次反应速率,模拟爆炸场中的压力变化情况。将超压模拟值与试验值进行比较,根据差别再次调整参数,直到模拟结果与试验结果吻合较好。图 8 为最终得到的各距离处的压力曲线图;表 4 中列出了不同距离处的冲击波超压峰值 Δp 和冲量 i_+ 的试验值和模拟计算值以及二者之间的相对误差 ε 。

温压炸药的冲击波效应主要以超压峰值与正压冲量为评判依据。与试验值相比,除 5 m 处的正压冲量的相对误差为 7.9% 外,其余测点的超压峰值与正压冲量的相对误差小于 $\pm 5\%$ 。根据此结果确定了温压炸药 JWL-Miller 模型中铝粉二次反应速率方程的参数, $a=0.14, m=0.61, n=0.15$ 。

JWL-Miller 能量释放模型中充分考虑了温压炸药中铝粉二次反应对能量释放的影响。由图 8 和表 4 中可以看出,相比于 JWL 方程, Miller 模型的加入对于超压峰值和正压冲量都有较大提高,平均提高达 25%,这也与阚金玲等^[19]的研究结果相符,说明了本研究得出参数的有效性,也表明该 JWL-Miller 模型参数在实际静爆试验的研究计算中可以较为准确地反映爆炸场压力变化情况。

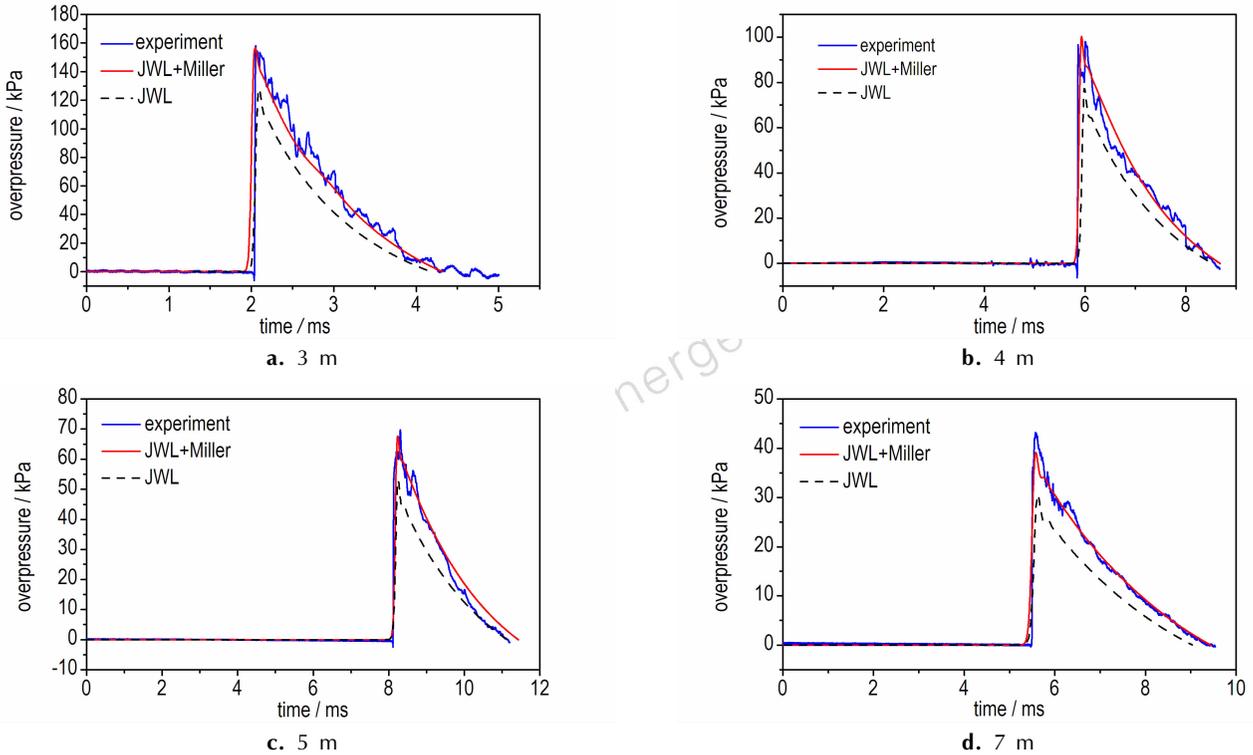


图8 试验和模拟所得的冲击波波形对比

Fig.8 Comparison between pressure-time curves of numerical simulation and that of testing

表4 试验和模拟所得冲击波参数对比

Table 4 Blast waves parameters comparison of simulation results and experiment data

d/m	3		4		5		7	
	$\Delta p/kPa$	$i_+/Pa \cdot s$						
experiment	157.6	132.5	95.5	102.1	69.7	78.9	42.4	62.1
JWL-Miller calculated	156.7	131.5	96.5	103.2	67.7	85.7	40.1	61.8
$\varepsilon_i/\%$	-0.6	-0.8	1.0	1.1	-3.1	7.9	-5.0	0.5
JWL calculated	125.6	94.2	76.5	73.1	52.4	59.1	30.2	42.9
$\varepsilon_j/\%$	-20.3	-28.9	-19.9	-28.4	-24.8	-25.1	-28.7	-30.9

Note: Δp is blast wave overpressure; i_+ is blast wave impluse; ε_i represents the error between experiment and JWL-Miller calculated; ε_j represents the error between experiment and JWL calculated.

4 结论

针对某 RDX 基温压炸药,通过圆筒试验确定了其爆轰产物的 JWL 状态方程;并通过野外静爆试验与数值模拟相结合,获得了温压炸药中铝粉二次反应速率方程参数,得出了以下结论:

(1) 通过 $\phi 25$ mm 标准圆筒试验及三维数值模拟,得到了典型温压炸药中理想成分的 JWL 状态方程参数: $A=752.1$ GPa, $B=18.5$ GPa, $C=1.53$ GPa, $R_1=4.47$, $R_2=1.73$, $\omega=0.38$ 。

(2) 对被测温压炸药进行野外静爆试验,运用

AUTODYN 有限元分析软件对其结果进行模拟,确定了 JWL-Miller 能量释放模型中铝粉二次反应速率方程参数, $a=0.14$, $m=0.61$, $n=0.15$ 。

(3) 相比于 JWL 方程的计算结果, JWL-Miller 模型计算所得的正压作用时间较长,正压冲量提高超过 25%,体现了铝粉二次反应对冲击波的能量补充,说明 JWL-Miller 模型能够更为准确合理地描述温压炸药中铝粉的后燃特性。

参考文献:

- [1] 黄菊, 王伯良, 仲倩, 等. 温压炸药能量输出结构的初步研究 [J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(2):164-168.

- HUANG Ju, WANG Bo-liang, ZHONG Qian, et al. The preliminary investigation on energy output structure of a thermobaric explosive[J]. *Explosive and Shock Waves*, 2012, 32(2): 164-150.
- [2] 恽寿榕, 赵衡阳. 爆炸力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 35-36.
- YUN Shou-rong, ZHAO Heng-yang. Explosion mechanics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 35-36. (in Chinese)
- [3] Lee E L, Hornig H C, Kury J W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products, UCR-50422[R]. Livermore; California University, 1968.
- [4] 张宝钺, 张庆明, 黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2006: 153.
- ZHANG Bao-ping, ZHANG Qing-ming, HUANG Feng-lei. Detonation Physics[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2006: 153.
- [5] Kury J W. Metal acceleration by chemical explosives[C]//4th Symp (International) on Detonation. White Oak: Office of Naval Research, 1965: 3-12.
- [6] 陈朗, 冯长根, 黄毅民. 含铝炸药圆筒试验及爆轰产物 JWL 状态方程研究[J]. 火炸药学报, 2001, 24(3): 13-15.
- CHEN Lang, HUANG Yi-min, FENG Chang-gen. The cylinder test and JWL equation of state detonation product of aluminized explosives[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2001, 24(3): 13-15.
- [7] 计冬奎, 高修柱, 肖川, 等. 含铝炸药做功能力和 JWL 状态方程尺寸效应研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(5): 552-555.
- Ji Dong-kui, GAO Xiu-zhu, XIAO Chuan, et al. Study on dimension effect of accelerating ability and JWL equation of state for aluminized explosive[J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(5): 552-555.
- [8] 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 Yi-min, et al. Cylinder test of aluminized explosives and its numerical simulation[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(4): 14-17.
- [9] 裴红波, 焦清介, 覃剑峰. 基于圆筒实验的 RDX/Al 炸药反应进程[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(5): 636-640.
- PEI Hong-bo, JIAO Qing-jie, QIN Jian-feng. Reaction process of aluminized RDX-based explosive based on cylinder test[J]. *Explosive and Shock Waves*, 2014, 34(5): 636-640.
- [10] Kuhl A L, Bell J B, Beckner V E, et al. Simulation of Aluminum Combustion and PETN Afterburning in a Confined Explosion[C]//21st International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (ICDRS). 2007: 23-27.
- [11] Kuhl A L, Bell J B, Beckner V E, et al. Numerical simulations of the thermobaric explosions[J]. *Energetic Materials*, 2007, 38.
- [12] Miller P J, Guirguis R H. Experimental study and model calculations of metal combustion in AL/AP underwater explosives[C]//MRS Proceedings. Cambridge University Press, 1992, 296: 299.
- [13] 辛春亮, 徐更光, 刘科种, 等. 含铝炸药 Miller 能量释放模型的应用[J]. 含能材料, 2008, 16(4): 436-440.
- XIN Chun-liang, XU Geng-guang, LIU Ke-zhong, et al. Application of Miller energy release model for aluminized explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(4): 436-440.
- [14] GJB772A-1997 方法 705.2. 炸药试验方法[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1997: 290-299.
- [15] ANSYS/LS-DYNA 中国技术支持中心. ANSYS/LS-DYNA 算法基础和用法[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999.
- [16] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. 1983, 21: 541-547.
- [17] Daniel J S. An equation of state for polymethylmethacrylate[R]. UCID-16982, 1975.
- [18] Lee E, Breithaupt D, Mcmillan C, et al. The motion of thin metal walls and the equation of state of detonation products, UCID-91490[R]. Livermore-Lawrence Livermore National Laboratory, 1985.
- [19] 孙承纬, 卫玉章, 周之奎. 应用爆轰物理[M]. 国防工业出版社, 2000.
- [20] 周正青, 聂建新, 郭学永, 等. 一种以 RDX 为基含铝炸药状态方程的研究[J]. 兵工学报, 2014(增刊 2): 338-342.
- ZHOU Zheng-qing, NIE Jian-xin, GUO Xue-yong, et al. Studies on equation of state of detonation product for RDX-based aluminized explosive[J]. *Acta Armamentarii*, 2014(Suppl.2): 338-342.
- [21] 阚金玲, 刘家懿. 一次引爆云爆剂的爆炸特性-后燃反应对爆炸威力影响[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(5): 404-409.
- KAN Jin-ling, LIU Jia-cong. The blast characteristic of SEFAE effect of after burning on blast power[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(5): 404-409.

Study on JWL-Miller Equation of State of RDX-based Thermobaric Explosive

TIAN Shao-kang¹, LI Xi¹, LIU Bo², FAN Wei², HAN Zhi-wei¹, WANG Bo-liang¹

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Shanxi Huaihai Machinery and Electrical Co. Ltd., Changzhi 046012, China)

Abstract: In order to study the blast power of RDX-based thermobaric explosive (TBE), the cylinder test with diameter 25 mm and static explosion experiment were carried out. The parameters of Jones-Wilkins-Lee (JWL) equation of state were obtained by simulating the cylinder test with ANSYS/LS-DYNA. JWL-Miller model was introduced to simulate the propagation process of shock waves of TBE. The parameters of secondary reacting rate of Aluminums powder were determined by adjusting the calculated results according to the test results. Results indicate that the parameters of shock waves from numerical simulation with modified JWL-Miller model can fit the experiments in free field with an average relative error less than $\pm 5\%$.

Key words: mechanics of explosion; thermobaric explosive; cylinder test; numerical simulation; static explosion experiments; afterburning reaction

CLC number: TJ55; O381

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.03.009