文章编号：1000-5773(2010)01-0055-06

钝感高能炸药爆轰产物 JWL 状态方程再研究*

孙占峰[1]，徐 辉[2]，李庆忠[1]，张崇玉[1]

(1. 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
国防科技重点实验室，四川绵阳 621900；
2. 绵阳师范学院数学与计算机科学学院，四川绵阳 621000)

摘要：对钝感高能炸药 JB-9014 的爆轰产物 JWL 状态方程进行了深入研究。利用改进的圆筒试验技术，得到了筒壁膨胀的质点速度、位移和加速度的实验结果；通过解析分析和曲线拟合相结合的方法，确定了爆轰产物 JWL 状态方程参数；采用 ANSYS/LS-DYNA3D 程序进行了数值模拟，并与实验结果进行了对比和分析，验证了状态方程参数的适用性。

关键词：钝感炸药；圆筒试验；JWL 状态方程
中图分类号：O521；O381 **文献标识码**：A

1 引 言

以 TATB 为主的钝感高能炸药具有突出的安全性能，在国内外的先进战斗部中得到了广泛应用，其爆轰性能研究是国际爆轰学术领域的热点之一。爆轰产物状态方程研究对武器设计及性能研究具有重要意义。在众多爆轰产物状态方程的形式中，JWL(Jones-Wilkins-Lee)状态方程是一种不显含化学反应、由实验方法确定参数的半经验状态方程，能比较精确地描述爆轰产物的膨胀驱动做功过程。圆筒试验是确定炸药爆轰产物 JWL 状态方程和评估炸药做功能力的标准化试验，在国内外都得到了广泛应用[1-4]。20 世纪末，于川等人[2]采用圆筒试验法研究了钝感高能炸药 JB-9014 的爆轰产物 JWL 状态方程。由于受当时实验条件、底片判读方法和数据处理方法等限制，实验数据精度不高，进而确定的 JWL 状态方程参数代入计算程序所得到的计算结果与实验结果之间存在较大偏差。

本研究采用结合高速扫描照相和 VISAR(Velocity Interferometer System for Any Reflector)联合测试的改进标准圆筒试验技术[5]，对 JB-9014 炸药的做功能力进行了深入研究。通过解析计算和曲线拟合相结合的方法确定炸药爆轰产物的 JWL 状态方程参数，对比分析数值模拟结果和实验结果，验证所确定的状态方程参数的适用性。

2 圆筒试验及结果

2.1 圆筒试验

根据 JB-9014 主炸药的不同外径，进行了∅25 mm 和∅50 mm 两种尺寸的圆筒试验。∅25 mm 圆筒试验的主炸药尺寸为∅25 mm×300 mm，圆筒内径∅25 mm，壁厚 2.5 mm，材料为紫铜。∅50 mm 圆筒试验按几何相似设计，圆筒内径∅50 mm，壁厚 5 mm。圆筒试验布局见图 1，采用狭缝扫描和 VISAR 联合测试的改进圆筒试验技术[5]。通过狭缝扫描直接记录固定空间位置处圆筒壁的径向位移-时间关系，经数据处理和修正计算后得到了质点的运动速度、位移、加速度以及相应的径向和轴向分量。

* **收稿日期**：2009-05-13；**修回日期**：2009-09-25
基金项目：国家自然科学基金(10632080)
作者简介：孙占峰(1976－)，男，硕士，助理研究员，主要从事冲击波与爆轰物理研究. E-mail：sunzf7695@163.com

狭缝扫描采用平行光后照明技术，扫描位置距起爆端 200 mm，相机转速为 6×10^4 r/min，扫描速度为 3 km/s。利用 VISAR 测试技术直接获得固定空间位置处圆筒壁的径向速度-时间关系，进而计算得到径向位移-时间关系。VISAR 光路与狭缝扫描光路以及圆筒轴线垂直；光纤探头前端距装置外表面 75 mm；测试位置与狭缝扫描位置对应，距起爆端 200 mm；采用双灵敏度，条纹常数分别为 316 m/(s·Fr)和392 m/(s·Fr)。同时，在圆筒末端的定常滑移爆轰段采用电探针法测定炸药爆速。

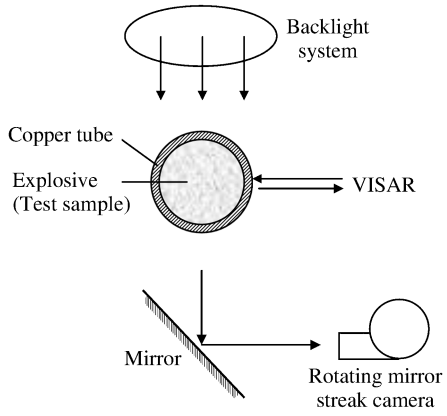


图 1 VISAR 与扫描测试布局图

Fig. 1 Layout of VISAR and streak photography

2.2 实验结果与数据处理

采用文献[5]的底片判读和数据处理方法，得到圆筒质量中心面处的径向位移-时间(r_{mj}，t_j)数据。然后按下式进行非线性最小平方拟合

$$\Delta r_{\mathrm{m}}=r_{\mathrm{m}}-r_{\mathrm{m0}}=\sum_{j=1}^{n}a_j\{b_jt_i-[1-\exp(-b_jt_i)]\} \tag{1}$$

式中：时间零点 t_i 为圆筒质量中心面开始运动时刻，且 $t_i=t+t_0$；a_j、b_j($j=1,2,\cdots,n$)、t_0 为拟合系数。$n=2$ 时的拟合结果见表 1。

表 1 圆筒膨胀曲线拟合参数

Table 1 Curve-fitting parameters of the cylinder expansion

Diameter/(mm)	a_1/(mm)	a_2/(mm)	b_1/(s^{-1})	b_2/(s^{-1})	t_0/(μs)
25	3.581 6	0.928 54	189 470	928 830	1.161 44
50	5.945 8	0.762 34	146 700	841 240	1.599 94

中心面处的径向速度 u_{r} 和径向加速度 a_{r} 为

$$u_{\mathrm{r}}=\frac{\mathrm{d}r_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}t}=\sum_{j=1}^{n}a_jb_j[1-\exp(-b_jt_{\mathrm{i}})] \tag{2}$$

$$a_{\mathrm{r}}=\frac{\mathrm{d}^2r_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}t^2}=\sum_{j=1}^{n}a_jb_j^2\exp(-b_jt_{\mathrm{i}}) \tag{3}$$

修正计算后得到的质点速度 u_{s} 为

$$u_{\mathrm{s}}=\sqrt{u_{\mathrm{rs}}^2+u_{\mathrm{as}}^2} \tag{4}$$

式中：u_{rs} 和 u_{as} 分别为质点速度的径向分量和轴向分量。

$$u_{\mathrm{rs}}=\frac{\mathrm{d}r_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}t}\cos\theta=D\sin\theta \tag{5}$$

$$u_{\mathrm{as}}=D(1-\cos\theta) \tag{6}$$

式中：D 为爆速，θ 为膨胀角，且满足

$$\tan\theta=\frac{u_{\mathrm{r}}}{D} \tag{7}$$

质点加速度为

$$a_{\mathrm{s}}=\sqrt{a_{\mathrm{rs}}^2+a_{\mathrm{as}}^2} \tag{8}$$

式中：a_{rs} 和 a_{as} 分别为质点加速度的径向分量和轴向分量。

$$a_{\mathrm{rs}}=\frac{\mathrm{d}^2r_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}t^2}\cos^4\theta \tag{9}$$

$$a_{as}=\sin\theta\cos^3\theta\frac{\mathrm{d}^2 r_m}{\mathrm{d}t^2} \tag{10}$$

3　爆轰产物 JWL 状态方程参数确定

对于爆轰波阵面后的爆轰产物,满足以下守恒方程[5-6]:

$$\rho_0 D=\rho_1(D-w_1) \tag{11}$$

$$p=\rho_0 D w_1 \tag{12}$$

$$e_1-e_0=\frac{1}{2}(p_1+p_0)(v_0-v_1)+Q \tag{13}$$

$$\gamma=-\frac{\partial\ln p}{\partial\ln v}=(1-\frac{p_0}{p_1})\frac{v_1}{v_0-v_1} \tag{14}$$

式中:ρ 为密度,D 为爆速,w 为粒子速度,p 为爆轰产物压力,e 为比内能,v 为比容,Q 为爆热,γ 为多方指数。脚标"0"对应未反应炸药,脚标"1"对应爆轰产物。对 CJ 点参数,只需将脚标"1"换为"CJ"。

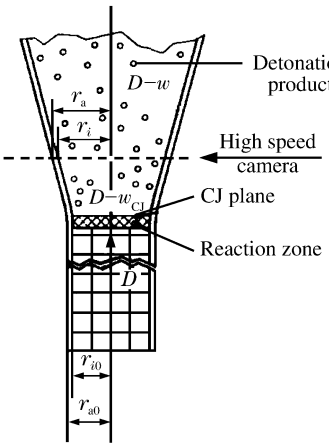


图 2　爆轰产物流动状态

Fig. 2　Flow state of detonation product

在固定于爆轰波阵面的坐标系中,爆轰产物流场和圆筒运动是定常的。设化学反应区的内径为 r_{i0},爆轰产物以速度($D-w_{CJ}$)从化学反应区开始膨胀,在半径 r_i 处速度达到($D-w$),如图 2 所示。根据质量守恒定律,同一时刻通过截面 πr_{i0}^2 和 πr_i^2 的爆轰产物量相等,即

$$\rho_0 D r_{i0}^2=\rho(D-w)r_i^2 \tag{15}$$

圆筒壁材料以恒定的速率 D 沿圆筒纵切面流动,在爆轰产物压力的作用下,运动方向发生偏转,则

$$p=m a_s/(2\pi r_i) \tag{16}$$

把 u_s 和 a_s 的表达式代入动量守恒方程,经过推算得到

$$p\left(\frac{r_i}{r_{i0}}\right)^2-p_0-\frac{1}{2}\mu\rho_0 u_s^2=\rho_0 D w \tag{17}$$

式中:μ 为圆筒与炸药的质量比,$\mu=2.081$。

爆轰产物 JWL 状态方程的标准形式为[7]

$$p=A\left(1-\frac{\omega}{R_1 v_r}\right)\mathrm{e}^{-R_1 v_r}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2 v_r}\right)\mathrm{e}^{-R_2 v_r}+\frac{\omega e}{v_r} \tag{18}$$

等熵条件下其形式为

$$p_s=A\,\mathrm{e}^{-R_1 v_r}+B\,\mathrm{e}^{-R_2 v_r}+\frac{C}{v_r^{\omega+1}} \tag{19}$$

式中:A、B、R_1、R_2、ω 为待定参数;e 为比内能;v_r 为相对比容,$v_r=V/V_0=\rho_0/\rho$。等熵形式中没有 e,而是增加了待定参数 C。待定参数的确定方法很多,有数值模拟计算法、能量守恒法、Gurny 公式法等。本研究采用另外一种确定方法:先利用实验数据计算得到 p-v 数据,然后通过曲线拟合方法确定标准形式的 JWL 状态方程(18)式的参数。实验曲线与拟合曲线的比较见图 3。由∅25 mm 圆筒试验确定的及文献[2]给出的 JB-9014 炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数见表 2。

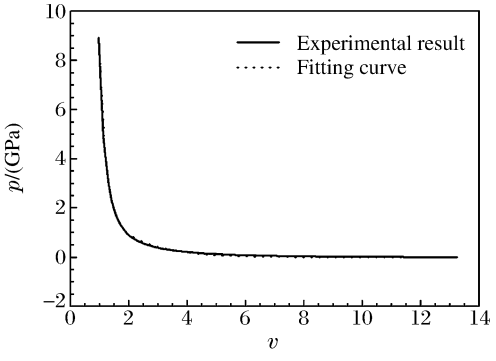


图 3　p-v 实验曲线和拟合曲线

Fig. 3　Experimental and fitting curves of p-v

表 2 中爆压 p 的值有很大的不确定性,各种测量方法的结果相差很大,这里采用如下方法进行估算[7]

$$p=\rho_0 D^2/(\gamma+1) \tag{20}$$

式中:γ 为等熵指数,近似表述为 $\gamma=1.6+0.8\rho_0$。

表 2 JB-9014 炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数

Table 2 Parameters of JWL equation of state for JB-9014 explosive

ρ_0/(g/cm^3)	p/(GPa)	D/(km/s)	A/(GPa)	B/(GPa)	C/(GPa)	R_1	R_2	ω	E_0/(GPa)
1.894[1]	26.9	7.64	666.486	5.3388		4.54827	0.79764	0.35	7
1.884[2]		7.556	545.627	8.523	1.252	4.182517	1.62	0.47	

Note: [1] The parameters used in this work;
[2] The parameters from Ref. [2].

4 数值模拟计算

应用 ANSYS/LS-DYNA3D 程序,对圆筒膨胀过程进行了数值模拟。计算模型与实验模型相同,根据旋转对称性,取 1/4 模型进行计算。在两个相互垂直的轴向切面上加固壁边界,主炸药和金属圆筒之间加滑移边界,其它位置为自由边界。计算中主炸药采用 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型和 JWL 状态方程(主要参数见表 2),一端中心点起爆。紫铜圆筒采用 * MAT_ELASTIC_PLASTIC_HYDRO 模型和 Grüneisen 状态方程,主要参数见表 3。

表 3 紫铜圆筒材料参数

Table 3 Material parameters of copper tube

Material	ρ_0/(g/cm^3)	G/(GPa)	σ_s/(MPa)	γ
T2 copper	8.96	46.4	120	2.02

图 4 是 25 mm 圆筒试验的径向膨胀速度和位移的计算结果和实验结果的比较。由图 4(a)可见,由文献[2]计算得到的速度-时间曲线明显高于实验曲线。利用本研究确定的状态方程参数计算得到的速度-时间曲线与实验(狭缝扫描和 VISAR)曲线基本相符,并且计算曲线与 VISAR 测量曲线的波动特征基本一致,但存在运动初期速度稍偏低、而运动后期速度稍偏高的现象。理论上如果能够略调高 JWL 状态方程参数中的 A 值,同时调低 ω 值,就可以使曲线很好地重合,但是,在实际确定参数的过程中,A 和 ω 的值总是协调变化的,无法完全消除这种现象。考虑到这种速度偏离并不十分严重,运动后期速度的计算值比实验值高约 1.7%,因此速度偏离对径向位移的影响并不十分明显,如图 4(b)所示,径向位移的计算曲线和实验曲线基本重合。

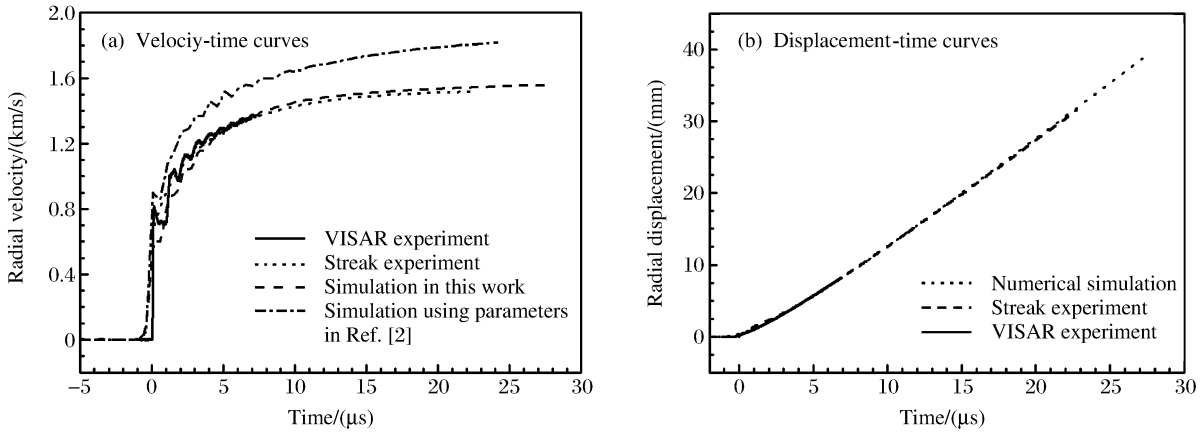


图 4 ∅25 mm 圆筒试验的计算结果与实验结果比较

Fig. 4 The comparision between simulation and experiment for ∅25 mm tube test

为了进一步验证本研究确定的炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数的适用性,对∅50 mm 圆筒试验进行了数值模拟,计算结果与实验结果如图 5 所示。由图 5(a)可见,径向速度的计算曲线与实验曲线相比,运动初期速度偏低而运动后期速度偏高的现象仍然存在。但这种速度偏离对径向位移的影响并不十分明显,如图 5(b)所示,径向位移的计算曲线与实验曲线仍然基本重合。表明由∅25 mm 圆筒实验确定的 JB-9014 炸药 JWL 状态方程参数可用于∅50 mm 圆筒试验。

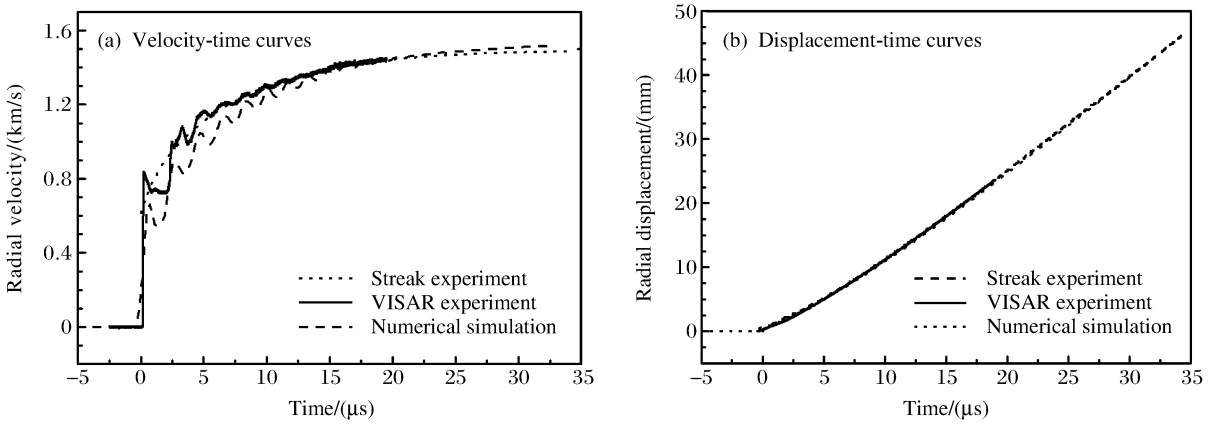


图 5　∅50 mm 圆筒试验的计算结果与实验结果比较

Fig. 5　The comparision between simulation and experiment for ∅50 mm tube test

5　结　论

对钝感高能炸药 JB-9014 的爆轰产物 JWL 状态方程进行了深入研究,利用改进的圆筒试验技术得到了质点速度、位移和加速度的实验结果,通过解析分析和曲线拟合相结合的方法,确定了爆轰产物 JWL 状态方程参数。对∅25 mm 和∅50 mm 两种尺寸圆筒试验的膨胀过程进行了数值模拟,膨胀速度和位移的模拟结果与实验(狭缝扫描和 VISAR)结果相符,证明了本研究确定的 JWL 状态方程参数是合适的。

References:

[1] Kury J W, Hornig H C, Lee E L, et al. Metal Accelaration by Chemical Explosives [A]//Proceedings of the 4th International Symposium on Detonation [C]. White Oak, Maryland, 1966: 3-13.

[2] Yu C, Liu W H, Li L Z, et al. Studies on Cylinder Test and JWL Equation of State of Detonation Product for Insensitive High Explosive [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1997, 11(3): 227-233. (in Chinese)
于　川,刘文翰,李良忠,等. 钝感炸药圆筒试验与爆轰产物 JWL 状态方程研究 [J]. 高压物理学报, 1997, 11(3): 227-233.

[3] Yu C, Li L Z, Huang Y M. Studies on JWL Equation of State of Detonation Product for Aluminized Explosive [J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(3): 274-279. (in Chinese)
于　川,李良忠,黄毅民. 含铝炸药爆轰产物 JWL 状态方程研究 [J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(3): 274-279.

[4] Chen L, Feng C G, Huang Y M. The Cylinder Test and JWL Equation of State Detontion Product of Aluminized Explosives [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2001, (3): 13-15. (in Chinese)
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, (3): 13-15.

[5] Sun Z F, Li Q Z, Sun X L, et al. Study on Standard Cylinder Test Technology and Data Processing Method [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2008, 22(2): 160-166. (in Chinese)
孙占峰,李庆忠,孙学林,等. 标准圆筒试验技术与数据处理方法研究 [J]. 高压物理学报, 2008, 22(2): 160-166.

[6] Muhamed Suceska. The Methods of Testing Explosives [M]. Translated by Shao Y B. Mianyang: Institute of Fluid Physics, CAEP, 1998: 156-166. (in Chinese)
穆哈迈德·苏塞斯卡. 炸药测试方法 [M]. 邵英斌, 译. 绵阳: 中国工程物理研究院流体物理研究所, 1998: 156-166.

[7] Sun C W, Wei Y Z, Zhou Z K. Applied Detonation Physics [M]. Beijing: National Defense Publication Company, 2000: 286-296. (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: 286-296.

Further Study on JWL Equation of State of Detonation Product for Insensitive High Explosive

SUN Zhan-Feng[1], XU Hui[2], LI Qing-Zhong[1], ZHANG Chong-Yu[1]

(1. *National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*;
2. *College of Mathematics and Computer Science, Mianyang Normal University, Mianyang* 621000, *China*)

Abstract: The JWL equation of state of detonation product for insensitive high explosive JB-9014 was further studied. The particle velocity, displacement, and acceleration of the cylinder wall were obtained from the modified standard cylinder test. The parameters of JWL equation of state were derived from analytical analysis and non-linear curve fit. The cylinder expanding process was numerical simulated using the ANSYS/LS-DYNA3D. The simulation results are consistent with the experimental results, which indicate that the parameters of JWL equation of state derived in this work are suitable and reliable.

Key words: insensitive high explosive; cylinder test; JWL equation of state