DOI: 10.11883/1001-1455(2015)01-0124-06

膨胀石墨燃爆剂 JWL 状态方程参数拟合*

许兴春,高欣宝,张俊坤
(军械工程学院,河北 石家庄 050003)

摘要:用 LS-DYNA 对膨胀石墨燃爆剂爆炸过程进行数值模拟时,需要提供膨胀石墨燃爆剂的 JWL 状态方程的参数。把凝聚炸药等熵线物态方程作为目标方程,通过差分进化法拟合得出膨胀石墨燃爆剂 JWL 状态方程的参数。通过圆筒实验对所求得的参数进行验证,结果表明,理论值与实验值最大误差不超过 3.3%,能够满足膨胀石墨燃爆剂爆炸模拟研究的需要。

关键词:爆炸力学;JWL 状态方程;LS-DYNA;膨胀石墨
中图分类号:O389;TJ5 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

可膨胀石墨受热膨胀后成为中空状粒子,形似蠕虫,漂浮在空中能够有效干扰毫米波;不同规格的可膨胀石墨膨胀后可以得到 1~8 mm 甚至更长的粒子,因此有望使用一种材料遮蔽干扰不同的波长,它在发烟剂的应用中具有很大的潜力。实验表明,爆炸法能够快速并有效地在指定空域形成膨胀石墨型气溶胶云团,但爆炸实验成本高、风险大[1-3]。

若能计算出膨胀石墨燃爆剂的 JWL[4-5] 状态方程参数,就可以用 LS-DYNA 数值模拟研究代替部分实验研究,从而达到降低实验成本、提高研究效率的目的。一般来说,JWL 状态方程参数需要通过圆筒实验及二维流体动力学程序确定。本文中提出一种 JWL 状态方程的参数近似解法,即通过凝聚炸药等熵线的物态方程推导出目标方程,通过差分进化法拟合得出膨胀石墨燃爆剂 JWL 状态方程的参数。

1 JWL 状态方程及应用

JWL 状态方程是由 J. W. Kury 等[6-7] 提出的,该方程的未知参数需要通过圆筒实验及二维流体动力学程序来确定,它不显含化学反应,能够比较精确地描述爆轰产物的膨胀驱动做功过程。JWL 状态方程的具体形式如下:

$$p=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)\mathrm{e}^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)\mathrm{e}^{-R_2V}+\frac{\omega E}{V} \tag{1}$$

式中:p 为爆轰产物的压力,V 为爆轰产物的相对比容,E 为爆轰产物的比内能。A、B、R_1、R_2、ω 为待拟合参数,也称经验(调节)常数。

在 LS-DYNA 中,对于炸药材料的定义需要输入 JWL 状态方程的 A、B、R_1、R_2、ω 等参数值。

2 膨胀石墨燃爆剂 JWL 状态方程关键参数的拟合

要拟合得到膨胀石墨燃爆剂 JWL 状态方程的参数,需要找到能够描述膨胀石墨燃爆剂爆炸时 p-V 关系的方程作为目标方程。那么对于凝聚炸药,忽略初始压力 p_0 和初始内能 E_0,凝聚炸药的质量守恒、动量守恒、能量守恒与 C-J 条件(相切条件)方程,即凝聚炸药爆轰参数方程[8]为:

$$\begin{cases} D^2=v_0^2\dfrac{p_{\mathrm{H}}-p_0}{v_0-v_{\mathrm{H}}} \\ u_{\mathrm{H}}^2=(p_{\mathrm{H}}-p_0)(v_0-v_{\mathrm{H}}) \\ e_{\mathrm{H}}-e_0=(1/2)(p_{\mathrm{H}}+p_0)(v_0-v_{\mathrm{H}})+Q_{\mathrm{v}} \\ \left(\dfrac{\partial p}{\partial v}\right)_S=-\dfrac{p_{\mathrm{H}}-p_0}{v_0-v_{\mathrm{H}}} \end{cases} \tag{2}$$

* **收稿日期**:2013-06-07;**修回日期**:2013-10-25
第一作者:许兴春(1986—),男,博士研究生,doctxu@163.com。

式中：u_0、u_H 分别表示原始爆炸物的质点速度和爆轰波反应末端介质的质点速度；p_0、T_0、ρ_0、v_0 分别表示原始爆炸物的压力、温度、密度和比容；p_H、T_H、ρ_H、v_H 分别表示爆轰波反应末端断面处的压力、温度、密度和比容；e_0、e_H 分别表示原始爆炸物和爆轰波反应末端的内能；Q_v 表示爆轰反应释放出的化学能。

凝聚炸药爆轰产物状态方程为：

$$p = A\rho^k + \frac{B}{v}T \tag{3}$$

式中：A、B、k 都是与炸药性质有关的常数。$A\rho^k$ 表示冷压强，$\frac{B}{v}T$ 表示热压强，热压强对压力的作用比冷压强小得多[9]，因此可将(3)式简化为：

$$p = A\rho^k = \frac{A}{v^k} \tag{4}$$

方程(4)为凝聚炸药爆轰产物的近似状态方程，由于其中没有温度项，该方程可近似为等熵方程，本文中称为凝聚炸药等熵线物态方程。其中，k 是等熵常数，在 CJ 点的 k 值一般为 3 左右，本文中取为 3。

那么方程组(2)可以简化成如下形式：

$$\begin{cases} \rho_H = \dfrac{k+1}{k}\rho_0 \\ p_H = \dfrac{1}{k+1}\rho_0 D^2 \\ u_H = \dfrac{1}{k+1}D \\ D = \sqrt{2(k^2-1)Q_v} \end{cases} \tag{5}$$

方程组(5)即凝聚态炸药爆轰波参数近似计算方程。

将 $p=\frac{A}{v^k}$ 中的 v 用 JWL 状态方程中的相对比容 V 来表示。令 $v=v_0V$，则

$$p = \frac{A}{(v_0V)^k} = \frac{A\rho_0^k}{V^k} = \frac{M}{V^k} \tag{6}$$

式中：$M=A\rho_0^k$ 为常数。将方程(5)代入方程(6)，得：

$$A = pv^k = p_H v_H^k = \frac{\rho_0 D^2}{k+1}\left(\frac{k}{k+1}v_0\right)^k \tag{7}$$

$$M = A\rho_0^k = \frac{\rho_0 D^2}{k+1}\left(\frac{k}{k+1}v_0\right)^k \rho_0^k = \frac{\rho_0 D^2}{k+1}\left(\frac{k}{k+1}\right)^k \tag{8}$$

那么只要已知炸药的密度 ρ_0、爆速 D，就可以根据方程(5)和方程(7)求解得到目标方程：

$$p = \frac{M}{V^k} = \frac{\dfrac{\rho_0 D^2}{k+1}\left(\dfrac{k}{k+1}\right)^k}{V^k} \tag{9}$$

式中：V 取 0～7，因为在 $V=\frac{v}{v_0}=7$ 之前圆筒实验中圆柱壳体运动规律与实验运动规律相符合，本文中取 0.5～3。然后利用 LstOpt 或 MATLAB 软件中的差分进化法拟合出 A、B、R_1、R_2、ω。

实验时采用的膨胀石墨燃爆剂配方为黑火药和可膨胀石墨的混合物，黑火药/可膨胀石墨质量之比为 3∶2，其装药密度 ρ=1.2 g/cm^3；根据经验公式[9]可计算出膨胀石墨燃爆剂的爆速 $D\approx$850 m/s。当 k=3 时，根据公式(5)和(8)，计算得到 p_H=216.8 MPa，M=0.091 5，那么拟合目标函数方程可表示为：

$$y = \frac{0.091\ 5}{x^3} \tag{10}$$

利用 LstOpt 或 MATLAB 数据处理软件，采用差分进化法和遗传算法相结合的方法，对方程(1)参数进行拟合。参数拟合结果如表 1 所示，表中 E_{max} 表示最大误差。与其对应的拟合曲线如图 1 所示。

表 1 几组拟合参数及其误差

Table 1 Several groups of fitting parameters and max error

数据组	A	B	R_1	R_2	ω	E_{max}/%
Value(a)	0.413	8.000	1.977	5.570	0.103	3.02
Value(b)	0.058	1.729	1.046	3.107	0.043	8.02
Value(c)	0.105	0.869	1.813	2.401	0.109	20.05
Value(d)	0.412	3.841	2.057	4.597	0.166	2.30

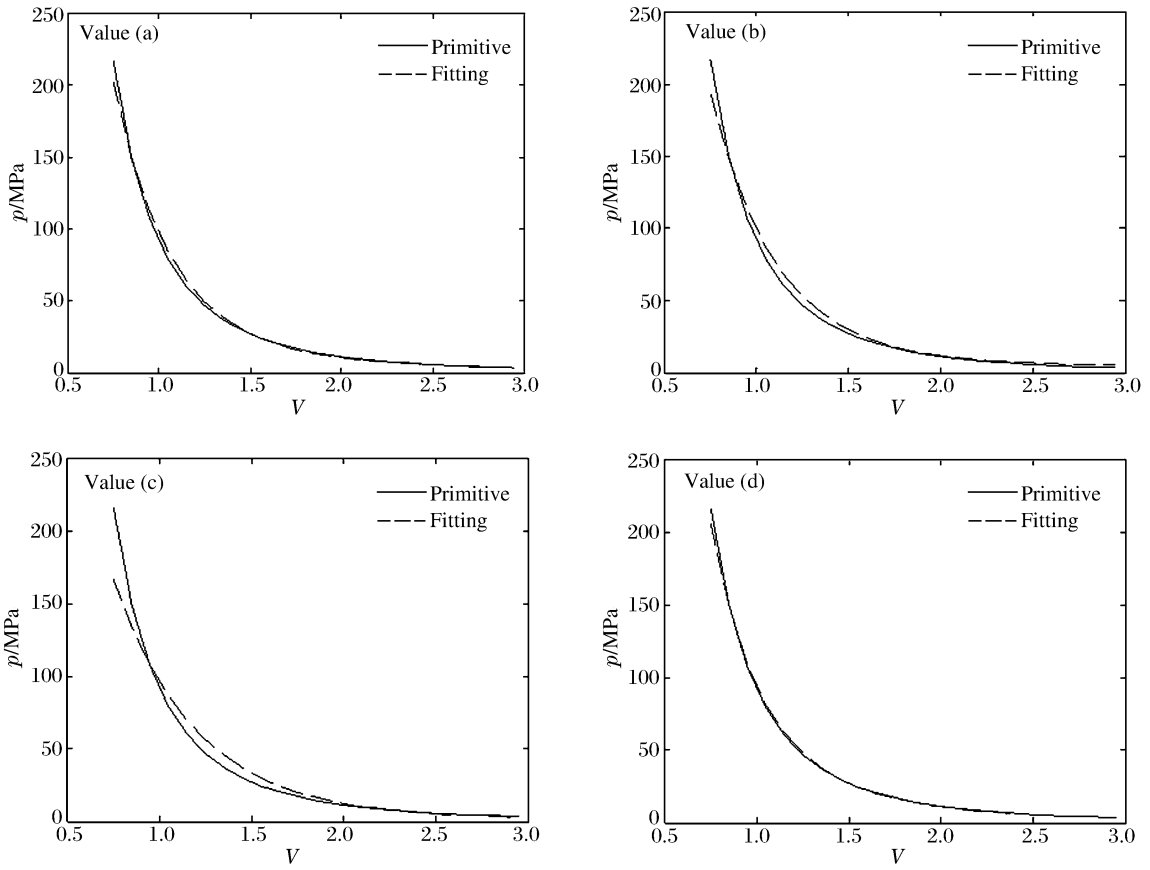

图 1 几组拟合曲线与目标曲线对比

Fig. 1 Comparison between fitting and objective curves

从表 1 中可以看出，Value(d)组数据最大误差为 2.30%，精度比较高，选取其作为最终拟合结果。当然这 5 个参数值不是确定不变的，在满足一定精度条件下，只要选取其中精度较高的一组参数即可。

3 数值模拟与分析

圆筒为轴对称结构，可在柱坐标系中建立轴对称计算模型，如图 2 所示。图 2 中 $OCDE$ 区为圆筒内混合炸药部分，$ABCD$ 区为铜管部分，在 E 点直接起爆。OE 边的长度为圆筒长度，ED 和 EA 的长度为铜管的内径和外径。JWL 参数采用 Value(d)组数据带入计算。

图 3 为圆筒初分网格图，图 4 为 45 μs 时圆筒网格变形图，此刻圆筒上端部分已经充分膨胀，炸药爆轰波继续向下传播。

利用后处理软件 LS-PREPOST，得出圆筒 A 点的 Δr-t(半径变化-时间)曲线如图 5 所示。

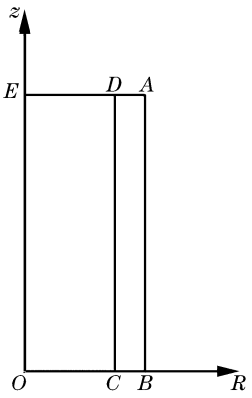

图 2 计算模型简图

Fig. 2 Diagram of model

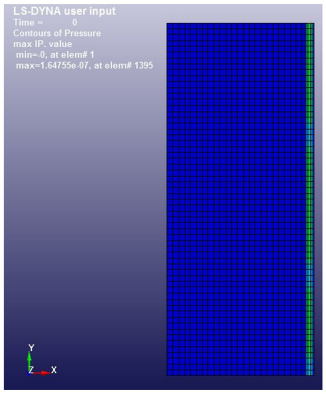

图 3 网格划分图

Fig. 3 Diagram of meshing

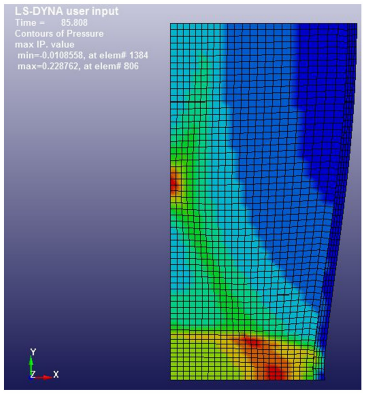

图 4 圆筒 45 μs 时网格变形图

Fig. 4 Gridding distortion at 45 μs

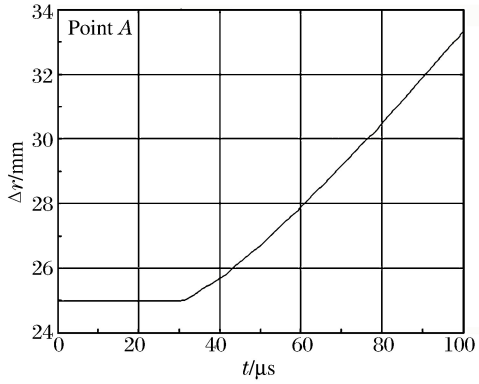

图 5 数值模拟得到的 Δr-t 曲线

Fig. 5 Simulation curve of Δr-t

4 圆筒实验验证

圆筒实验[10-11]是专门用于确定炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数和评定炸药做功的标准化实验，其实验原理图如图 6 所示，圆筒平行放置于支架上，高速扫描相机通过金属板狭缝记录燃爆剂稳定爆轰段圆筒膨胀距离。

圆筒实验数据一般被拟合成如下形式：

$$\begin{cases} t = a + b(R - R_0) + r\mathrm{e}^{d(R-R_0)} \\ v = \left[{}^{b} + rd\,\mathrm{e}^{d(R-R_0)}\right] - 1 \\ E_{\mathrm{kc}} = v_{\mathrm{c}}^2/2 \end{cases} \tag{11}$$

式中：t 为圆筒壁膨胀的时间；$(R-R_0)$ 为圆筒壁膨胀的距离，用 Δr 表示；a、b、c、d 为根据实验数据得到的拟合系数；v_{c} 为不同膨胀距离 $(R-R_0)$ 相对应的圆筒壁的速度；E_{kc} 为不同膨胀距离相对应的比动能。

实验时，圆筒半径 $R_0=25$ mm，膨胀石墨燃爆剂装药密度 $\rho_0=1.2$ g/cm^3，爆速 $D\approx850$ m/s。膨胀石墨燃爆剂圆筒实验结果如表 2 所示。

实验所得圆筒 Δr-t 曲线如图 7 所示。

分析图 5、7 中数据，可以得出模拟曲线与实验曲线符合非常好，经过 MATLAB 对 2 组数据进行分析后，得出其误差最大为 3.3%。

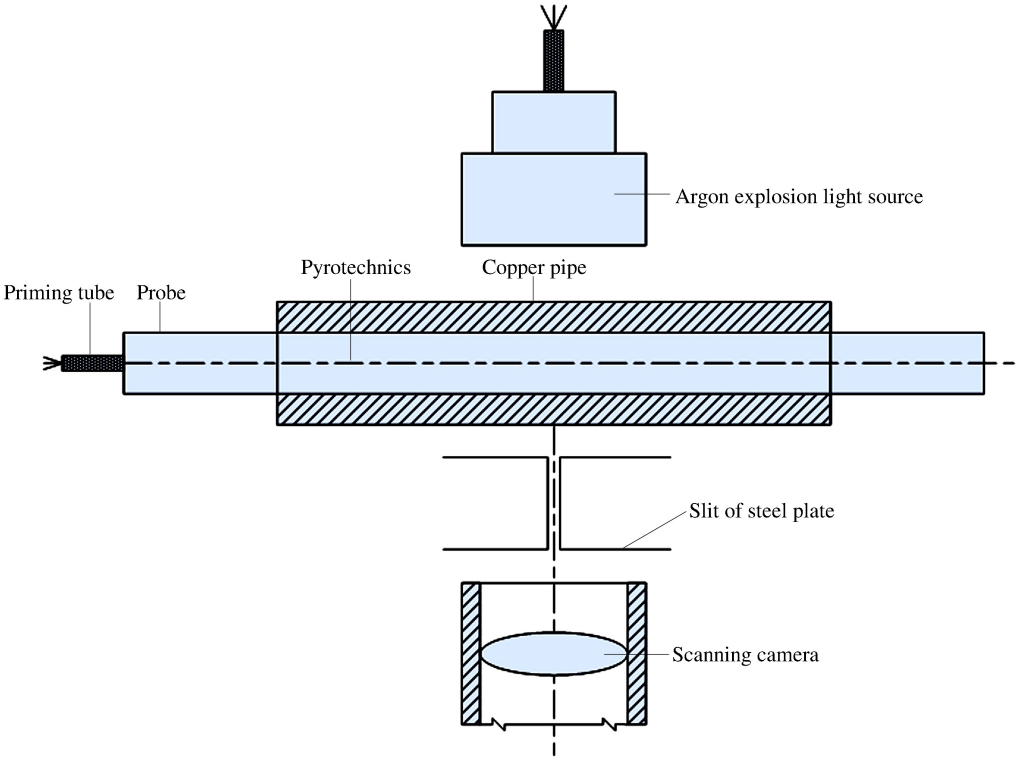

图 6 圆筒实验原理示意图

Fig. 6 Diagram of cylinder test

表 2 圆筒实验结果

Table 2 Data of cylinder test

$t/\mu s$	$(R-R_0)/mm$	$t/\mu s$	$(R-R_0)/mm$
25	0.0	65	4.0
30	0.0	70	4.5
35	0.5	75	5.0
40	1.0	80	5.5
45	2.0	85	6.0
50	2.5	90	6.6
55	3.0	95	7.2
60	3.5	100	8.5

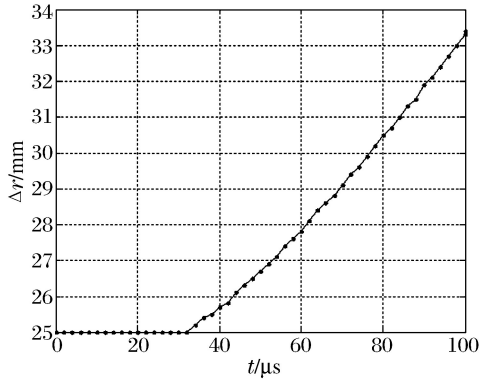

图 7 实验得到的 Δr-t 曲线

Fig. 7 Test curve of Δr-t

5 结 束 语

把凝聚炸药等熵线物态方程作为目标方程拟合出膨胀石墨燃爆剂的 JWL 状态方程的关键参数，然后利用拟合的 JWL 参数对圆筒实验模型进行数值模拟得到 Δr-t 曲线，最后用圆筒实验得出圆筒的 Δr-t 曲线。通过 MATLAB 对两组数据进行分析，得出其误差最大为 3.3%。实验结果表明：基于凝聚炸药等熵线物态方程拟合膨胀石墨燃爆剂 JWL 状态方程参数的方法可行，满足实际应用需求。

参考文献：

[1] 乔小晶，张同来，任慧，等. 爆炸法制备膨胀石墨及其干扰性能[J]. 火炸药学报，2003，26(1)：70-73.

Qiao Xiao-jing, Zhang Tong-lai, Ren Hui, et al. Preparation by explosion method and the interference function of

expanded graphite[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2003,26(1):70-73.

[2] 潘功配,关华,朱晨光,等.可膨胀石墨用作抗红外/毫米波双模发烟剂的研究[J].含能材料,2007,15(1):70-72.
Pan Gong-pei, Guan Hua, Zhu Chen-guang, et al. Study on anti-IR/millimeter wave smoke composition with expansive graphite[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007,15(1):70-72.

[3] 潘功配,杨硕.烟火学[M].北京:北京理工大学出版社,2004.

[4] 黄辉,王泽山,蒋小华,等.挤柱炸药爆轰产物 JWL 状态方程研究[J].弹道学报,2007,19(1):45-47.
Huang Hui, Wang Ze-shan, Jiang Xiao-hua, et al. Cylinder experiments and JWL EOS of detonation product for ECX[J]. Journal of Ballistics, 2007,19(1):45-47.

[5] 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):274-278.
Yu Chuan, Li Liang-zhong, Huang Yi-min. Studies on JWL equation of state of detonation product for aluminized explosive[J]. Explosion and Shock Waves, 1999,19(3):274-278.

[6] Kury J W, Hornig H C, Lee E L, et a1. Metal accelaration by chemical explosives[C]// Proceedings of the 4th International Symposium on Detonation. White Oak, Maryland, 1966:3-13.

[7] Kury J W. Metal acceleration by chemical explosives[C]// 4th Syrup (International) on Detonation. White Oak: Office of Naval Research, 1965:3-12.

[8] 奥尔连科.爆炸物理学[M].孙承纬,译.北京:科学出版社,2011.

[9] 陈智刚,赵太勇,侯秀成.爆炸及其终点效应[M].北京:兵器工业出版社,2004.

[10] 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.
Sun Zhan-feng, Li Qing-zhong, Sun Xue-lin, et al. Study on standard cylinder test technology and data processing method[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2008,22(2):160-166.

[11] 陈朗,李泽仁.激光速度干涉仪测量法在炸药圆筒试验中的应用[J].爆炸与冲击,2001,31(3):229-232.
Chen Lang, Li Ze-ren. The cylinder tests measured by VISAR interferometer[J]. Explosion and Shock Waves, 2001,31(3):229-232.

Parameters fitting for the JWL EOS of expanded graphite bums agent

Xu Xing-chun, Gao Xin-bao, Zhang Jun-kun

(*Ordnance Engineering College*, *Shijiazhuang* 050003, *Hebei*, *China*)

Abstract: The simulation of the explosion of expanded graphite bums agent requires the determination of the parameters in the JWL EOS of expanded graphite bums agent. The JWL EOS of expanded graphite bums agent are fitted through the differential evolution method taking condensed explosives isentropic line EOS as the target equation. The cylinder test results show that the maximum error between the theoretical value and experimental value is less than 3.3%, meeting the needs of the expanded graphite bums agent explosion simulation research.

Key words: mechanics of explosion; JWL EOS; LS-DYNA; expanded graphite

(责任编辑　曾月蓉)