

文章编号: 1000-5773(2009)04-0277-06

爆轰产物 JWL 状态方程应用研究*

赵 铮, 陶 钢, 杜长星

(南京理工大学动力工程学院, 江苏南京 210094)

摘要:通过对凝聚态炸药爆轰产物 JWL 状态方程的研究,提出了一种确定 JWL 状态方程参数的 γ 拟合法,即利用 γ 律状态方程来拟合 JWL 状态方程参数。这种新方法不需进行圆筒试验,与现有方法比较,具有经济、安全、方便、准确的特点。利用这种方法拟合确定了 4 种常用炸药 TNT、C-4、PETN、HMX 的 JWL 状态方程参数,通过与圆筒试验法得出的 JWL 状态方程 $p-V$ 曲线进行对比,证明 γ 拟合法具有较高的精度,完全可以满足计算爆炸力学的应用。

关键词:爆炸力学;爆轰产物;JWL 状态方程;参数拟合

中图分类号: O389 **文献标识码:** A

1 引 言

爆轰产物状态方程是炸药爆轰 C-J 状态之后的爆轰产物系统中各物理量(压力、体积、温度等)之间的关系式,它体现了炸药的做功能力,是研究计算爆炸力学问题的基础。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、BKW、LJD、JCZ 及 JWL 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,因此应用最为广泛^[1]。早期的连续介质动力学计算机编码采用 JWL 状态方程计算爆轰产物的飞散,而目前几乎所有可以进行爆炸力学问题计算的大型通用有限元软件,如 LS-DYNA、ABAQUS、MSC. Dytran、AUTODYN 等都在炸药材料模型中采用了 JWL 状态方程,使其在武器设计、工程爆破、爆炸加工等领域得到了更为广泛的应用。

JWL 状态方程是由 Lee 于 1965 年在 Jones 和 Wilkins 工作的基础上提出的,该方程的未知参数需要通过 Kury 等人提出的圆筒试验^[2]及二维流体动力学程序来确定。圆筒试验是使炸药在铜管中爆炸,利用高速扫描相机记录下管壁在爆轰产物驱动下的膨胀过程,得出圆筒半径变化的 $\Delta r-t$ 曲线。然后采用含有 JWL 状态方程的二维流体动力学程序来对圆筒试验进行数值模拟,不断修改 JWL 状态方程参数,直至数值模拟结果与圆筒试验结果相符合,从而确定最终的 JWL 状态方程参数^[3-4]。以圆筒试验结果为基础来确定 JWL 参数的方法还有解析法^[5]和线性优化法^[6]。由于圆筒试验成本较高,需要专用设备,而且二维流体动力学计算特别耗费机时,因此这类方法的应用具有很大的局限性。

目前工程计算涉及到的炸药多达上百种,不同成分甚至不同密度的炸药都有各自不同的 JWL 状态方程参数,因此在保证计算精度的前提下,经济、简便、快捷地确定 JWL 状态方程参数对计算爆炸力学具有十分重要的意义。本工作通过对 JWL 状态方程及其在爆炸力学数值计算中的实际应用进行研究,提出了一种不需要进行圆筒试验就能确定 JWL 状态方程参数的新方法—— γ 拟合法,即利用简化的爆轰产物 γ 律状态方程来拟合 JWL 状态方程参数,将拟合结果与试验结果进行了对比,结果表明, γ 拟合法得出的 JWL 状态方程参数具有较高的精度,完全能够满足工程应用的需要。

* 收稿日期: 2008-10-06; 修回日期: 2009-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(10802038); 江苏省博士后科研资助计划项目(0802019C)

作者简介: 赵 铮(1979—),男,博士,讲师,主要从事爆炸力学研究. E-mail: zhaozheng@126.com

2 JWL 状态方程及应用

1965 年 Lee 在 Jones 和 Wilkins 工作的基础上将爆轰产物的等熵线方程进行了修改,并对参数的选择进行了系统研究,给出了一系列炸药的 JWL 状态方程参数值。Lee 发现在较大的压力范围内,更好的 C-J 等熵线方程的形式是

$$p_s = Ae^{-R_1 V} + Be^{-R_2 V} + \frac{C}{V^{\omega+1}} \quad (1)$$

(1)式含有 3 项: $Ae^{-R_1 V}$ 、 $Be^{-R_2 V}$ 和 $\frac{C}{V^{\omega+1}}$, 依次在高、中、低的压力范围内起主要作用^[7]。

由热力学关系式

$$e_s = - \int p_s dV \quad (2)$$

则可得到等熵线上内能随相对比容 V 的变化为

$$e_s = \frac{A}{R_1} e^{-R_1 V} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 V} + \frac{C}{\omega V^{\omega}} \quad (3)$$

将(2)式和(3)式代入 Grüneisen 状态方程(4)式

$$p - p_s = \frac{\Gamma}{V} (e - e_s) \quad (4)$$

令 $\omega = \Gamma$, 得到 JWL 状态方程的具体形式为

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega e}{V} \quad (5)$$

式中: p 为爆轰产物的压力; V 为爆轰产物的相对比容, $V = v/v_0$, 为无量纲量, $v = 1/\rho$ 是爆轰产物的比容, v_0 是爆轰前炸药的初始比容; e 为爆轰产物的比内能, 由以下关系得出, 炸药的绝对内能 $e_a = mc_v T$, 单位为 J; 初始比内能 $e_0 = \frac{e_a}{v_0} = \frac{mc_v T}{v_0} = \rho_0 mc_v T$, 单位为 J/m³ 或 Pa; 比内能 $e = \frac{e}{v} = \frac{e_0}{V}$, 单位为 J/m³ 或 Pa; A, B, R_1, R_2, ω 为待拟合参数。在 LS-DYNA 等通用有限元软件中, 对于炸药材料模型需要输入 JWL 状态方程的 $A, B, R_1, R_2, \omega, e_0, v_0$ 7 个参数值。

3 γ 拟合法

JWL 状态方程参数可以通过爆轰产物的 γ 律状态方程拟合得出。1959 年 Baym 等人提出了一种 Grüneisen 形式的凝聚炸药爆轰产物状态方程^[8]

$$p = p_k(\rho) + f(v)T \quad (6)$$

其中冷压 $p_k(\rho)$ 取为 $K_A v^{-\gamma}$, 热压 $f(v)T = K_B T/v$, 代入(6)式得到

$$p = K_A v^{-\gamma} + K_B T/v \quad (7)$$

式中: T 为温度; K_A, K_B 和 γ 都是与炸药性质有关的常数, 其中 γ 称为炸药的绝热指数(或多方指数)。

对于实际中常用的凝聚态炸药, 其密度一般都在 1.0 g/cm³ 以上, 因此爆轰产物中的热压 $K_B T/v$ 对压力的作用相对于冷压来说要小得多, 特别是在爆轰产物膨胀的初始阶段, 热压的作用可以忽略^[9], 则(7)式可简化为

$$p = K_A v^{-\gamma} = K_A \rho^{\gamma} \quad (8)$$

(8)式即为凝聚炸药爆轰产物的 γ 律状态方程, 以下简称 γ 方程。

另外 C-J 面上的参数有如下关系

$$\rho_H = \frac{\gamma + 1}{\gamma} \rho_0 \quad (9)$$

$$v_H = \frac{\gamma}{\gamma + 1} v_0 \quad (10)$$

$$p_H = \frac{1}{\gamma + 1} \rho_0 D^2 \tag{11}$$

(8)式在爆轰波阵面同样成立,结合(9)式、(10)式和(11)式可以得出

$$K_A = p_H v_H = \frac{D^2}{(\gamma + 1) v_0} \left(\frac{\gamma v_0}{\gamma + 1} \right)^\gamma \tag{12}$$

将 v 用 JWL 状态方程参数中的相对比容 V 来表示, $v = v_0 V$ 。则 γ 方程可以表示为

$$p = \frac{K_A}{(v_0 V)^\gamma} = \frac{\gamma^\gamma}{(\gamma + 1)^{\gamma+1}} \frac{\rho_0 D^2}{V^\gamma} \tag{13}$$

只要已知某种炸药的密度 ρ_0 、爆速 D 和绝热指数 γ 3 个参数,就可以根据公式(13)绘制出炸药的 $p-V$ 曲线,进而可以采用差分进化法拟合得出 JWL 状态方程的 5 个未知参数 A, B, R_1, R_2, ω 。

表 1 为用此方法拟合出的 4 种常用炸药的 JWL 参数。表 1 中采用 γ 拟合法得出的 5 个未知参数 A, B, R_1, R_2, ω 分别与圆筒试验值比较,虽然差别较大,但不能说明拟合值不准确。因为试验值是通过二维流体动力学程序标定出来的,5 个参数值不是确定不变的,而是作为一组系数来确定 JWL 状态方程,所以拟合值的准确性需要通过 JWL 状态方程确定的 $p-V$ 曲线来判断。

采用试验值和拟合值分别绘制出公式(5)JWL 状态方程的 $p-V$ 曲线(图 1),可见对于 4 种常用炸药,拟合值的 $p-V$ 曲线和试验值的 $p-V$ 曲线基本一致,特别是在高压和低压区曲线几乎重合,虽然在中压区有所偏差,但相对误差小于 5%。另外,爆轰产物对物质的作用主要体现在高压区,中压区的微小误差对计算结果的影响很小。因此可以认为,采用 γ 拟合法来确定 JWL 状态方程参数是完全可行的,拟合值绘制的 $p-V$ 曲线具有较高的精度,完全可以满足计算爆炸力学的应用。需要注意的是 γ 拟合法只适用于装药密度 $\rho_0 > 1.0 \text{ g/cm}^3$ 的凝聚态炸药。

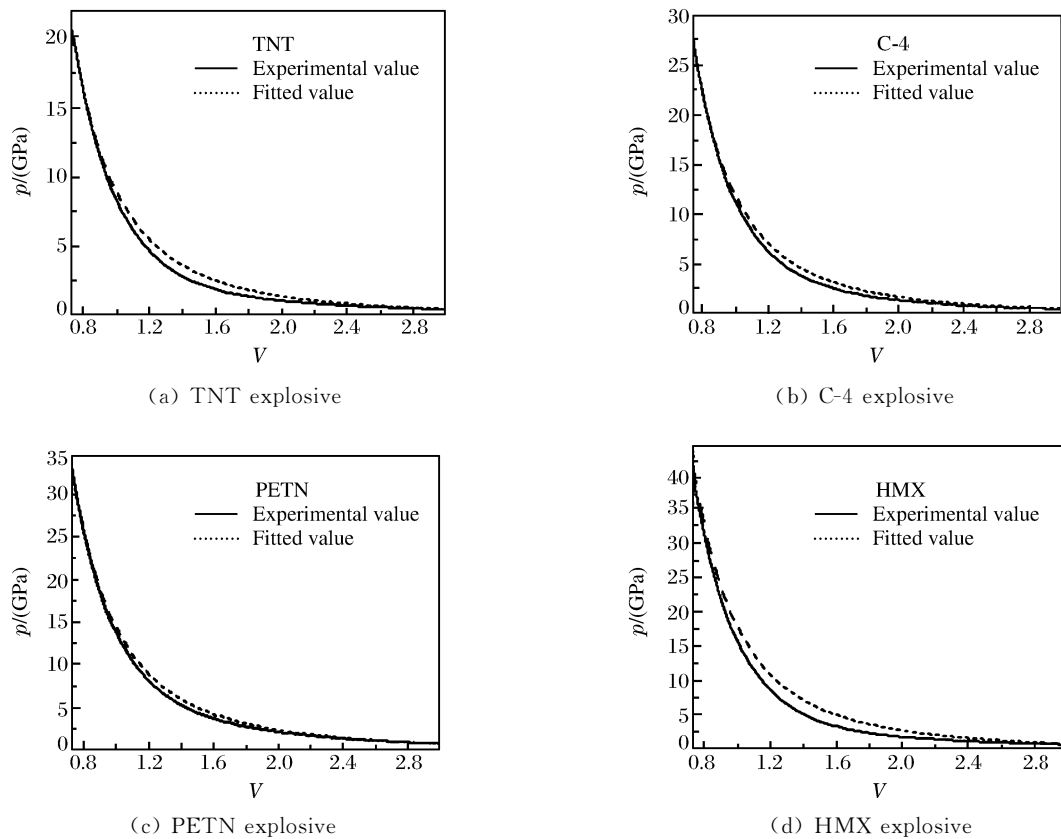


图 1 4 种炸药 JWL 状态方程 $p-V$ 曲线的拟合值与试验值比较

Fig. 1 Fitted JWL $p-V$ curve of four kinds of explosives compared with the experimental value

表 1 JWLV 状态方程拟合参数
Table 1 Fitting parameters of JWLV Equation of State

Explosive	ρ_0 /(g/cm ³)	D /(km/s)	p_{CJ} /(GPa)	γ	e_0 /(GPa)	A /(GPa)	B /(GPa)	R_1	R_2	ω
TNT ⁽¹⁾	1.630	6930	21.0	—	7.0	371.2	3.2	4.2	0.95	0.30
TNT ⁽²⁾	—	—	—	2.728	—	620.7	32.8	5.520	2.00	0.47
C-4 ⁽¹⁾	1.601	8193	28.0	—	9.0	609.8	13.0	4.5	1.40	0.25
C-4 ⁽²⁾	—	—	—	2.836	—	911.3	45.0	5.530	2.00	0.41
PETN ⁽¹⁾	1.770	8300	33.5	—	10.1	617.0	16.9	4.4	1.20	0.25
PETN ⁽²⁾	—	—	—	2.640	—	872.8	45.1	5.297	1.82	0.50
HMX ⁽¹⁾	1.891	9110	42.0	—	10.5	778.3	7.1	4.2	1.00	0.30
HMX ⁽²⁾	—	—	—	2.737	—	1000.0	45.6	4.909	1.56	0.34

Note: (1) Cylinder test data from Ref. [10]; (2) Fitted data. γ is calculated using Formula (11).

4 绝热指数 γ 的计算方法

炸药的绝热指数(也称多方指数) γ 是爆轰产物的体积和温度的函数,与炸药的成分和密度有关。有关绝热指数 γ 的计算方法很多,本文中提出了一种更简单的计算方法。

文献[9]指出,凝聚炸药爆轰产物的绝热指数可以近似地按下式确定,即

$$\frac{1}{\gamma} = \sum \frac{x_i}{\gamma_i} \quad (14)$$

式中: x_i 为爆轰产物中第*i*种成分的摩尔分数, γ_i 为爆轰产物第*i*种成分的绝热指数。爆轰产物中各主要成分的绝热指数见表2。

表 2 爆轰产物各成分的绝热指数
Table 2 Adiabatic exponent γ of detonation products components

Component	γ	Component	γ	Component	γ	Component	γ	Component	γ		
H ₂ O	1.9	CO ₂	4.5	CO	2.85	O ₂	2.45	N ₂	3.70	C	3.35

文献[11]对收集到的各种凝聚炸药爆轰产物 γ 值的试验数据进行了分析处理,提出了如下确定 γ 值的经验式

$$\gamma = K + \gamma_0(1 - e^{-0.5459\rho_0}) \quad (15)$$

式中: $K = c_p/c_v = 1.25$; ρ_0 为炸药的装药密度。

(15)式简单、准确,误差不超过5%,是计算炸药绝热指数 γ 值的常用方法。文献[12-13]给出了一些常用炸药的 γ_0 值。根据 γ_0 值,可以很方便地计算出这些常用炸药的绝热指数 γ ,大多数炸药的 γ 值在1.3~3.0之间。当对计算精度要求不高时,对高密度凝聚炸药常常近似取 $\gamma = 3.0$ 。

但是工程中经常用到的一些混合炸药,既不知道其爆轰产物成分的摩尔分数,也没有给出 γ_0 值,因此无法用(14)式和(15)式计算 γ 。我们根据前人得出的经验公式提出了一种计算绝热指数 γ 的新方法,该方法只需要知道密度 ρ_0 ,不需要知道 γ_0 值,就能够计算出CHNO型炸药的绝热指数 γ 。

1968年,康姆莱特(Kamlet)等人提出了计算CHNO型炸药爆压和爆速的半经验半理论计算公式,称为康姆莱特公式或N-M-Q公式,它适用于装药密度大于1g/cm³的情况,公式的形式为

$$\varphi = N\sqrt{MQ} \quad (16)$$

$$p_H = 1.558\varphi\rho_0^2 \quad (17)$$

$$D = 1.01\sqrt{\varphi}(1 + 1.3\rho_0) \quad (18)$$

将(17)式和(18)式联立消去 φ ,就可以得到

$$p_H = 1.558\left(\frac{\rho_0}{1.01 + 1.313\rho_0}\right)^2 D^2 \quad (19)$$

另外根据C-J面参数关系公式(11)

$$p_H = \frac{1}{\gamma + 1}\rho_0 D^2$$

联立(19)式和(11)式,可以得到

$$\gamma = \frac{(1.01 + 1.313\rho_0)^2}{1.558\rho_0} - 1 \quad (20)$$

(20)式的优点在于不需要 γ_0 就可以计算出CHNO型炸药的绝热指数 γ ,非常适合于混合炸药。本工作利用(15)式和(20)式对几种炸药的 γ 值分别进行了计算,结果见表3。通过对比计算结果发现,两个公式对TNT和RDX炸药的 γ 值计算均比较精确,误差在3%以内。但对于PETN(泰安)、B炸药和HMX(奥克托金)3种炸药,公式(15)比公式(20)更为准确。

表3 绝热指数 γ 计算结果对比
Table 3 Calculation results of adiabatic exponent γ

Explosive	$\rho_0/(g/cm^3)$	$D_{exp}/(km/s)$	γ_0	γ		
				Eq. (15)	Eq. (20)	Exp. [12]
TNT	1.00	5 097	2.856	2.45	2.46	—
TNT	1.64	6 950	2.856	2.94	2.92	3.16
TNT(Liquid)	1.45	6 580	2.857	2.81	2.76	2.64
RDX	1.00	5 981	2.650	2.36	2.46	2.48
RDX	1.80	8 754	2.650	2.91	3.06	2.98
PETN	1.67	7 980	2.240	2.59	2.94	2.55
B-explosive	1.71	8 070	2.732	2.91	2.98	2.76
HMX	1.90	9 100	2.575	2.91	3.14	3.00

5 结 论

γ 拟合法不需要进行圆筒试验,只要已知炸药的初始密度、爆速和绝热指数就可以确定爆轰产物的JWL状态方程参数。该方法适用于密度大于 $1.0 g/cm^3$ 的凝聚态炸药,具有经济、安全、方便、准确的特点,在武器设计、爆炸加工、工程爆破等爆炸力学数值模拟领域已经得到了初步应用,显示出了广阔的应用前景。

References:

- [1] 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.
- [2] Kury J W, Hornig H C, Lee E L, et al. Metal Acceleration by Chemical Explosives [A]//4th Symp(Int) on Detonation [C]. White Oak, MD, 1965.
- [3] Ding G Y, Xu G G. 2-Dimensional Modelling of Detonation in Explosives Containing Aluminium [J]. Acta Armamentar, 1994, 4: 25-29. (in Chinese)
丁刚毅, 徐更光. 含铝炸药二维冲击起爆的爆轰数值模拟 [J]. 兵工学报, 1994, 4: 25-29.

- [4] Chen L, Feng C G, Huang Y M. The Cylinder Test and JWL Equation of State Detonation Product of Aluminized Explosives [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2001, 24(3): 13-15. (in Chinese)
陈 郎, 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.
- [5] Yun S R, Tu H J, Liang D S, et al. Explosion Mechanics Calculation Method [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995. (in Chinese)
恽寿榕, 涂侯杰, 梁德寿, 等. 爆炸力学计算方法 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [6] Jiang H M, Zhang R Q. Application of Nonlinear Optimization to Parameters in JWL Equation of State [J]. Journal of Ballistics, 1998, 10(2): 25-28. (in Chinese)
江厚满, 张若棋. 确定 JWL 状态方程参数的非线性优化方法 [J]. 弹道学报, 1998, 10(2): 25-28.
- [7] Sun C W, Wei Y Z, Zhou Z K. Applied Detonation Physics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000. (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.
- [8] Baym Φ A, Sidankvich K Π , Schehgill \mathcal{B} И. Explosion Physics [M]. Translated by Zhong Z. Beijing: Science Press, 1964. (in Chinese)
鲍姆 Φ A, 斯达纽柯维奇 K Π , 谢赫捷尔 \mathcal{B} И. 爆炸物理学 [M]. 众 智, 译. 北京: 科学出版社, 1964.
- [9] Eight Department, Beijing Institute of Technology. Explosion and Its Effect [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1979. (in Chinese)
北京工业学院八系. 爆炸及其作用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [10] Dobratz B M, Crawford P C. LLNL Explosives Handbook [M]. Lawrence Livermore National Laboratory, 1985.
- [11] Shao B H, Zhang K. Explosive Welding Principle and Engineering Application [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1987. (in Chinese)
邵丙璜, 张 凯. 爆炸焊接原理及其工程应用 [M]. 大连: 大连工学院出版社, 1987.
- [12] Zhang G W, Han Y, Gou R J. Explosion Effect Principle [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
张国伟, 韩 勇, 苟瑞君. 爆炸作用原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

Application Research on JWL Equation of State of Detonation Products

ZHAO Zheng, TAO Gang, DU Chang-Xing

(College of Power Engineering, Nanjing University of
Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: By investigating the JWL equation of state of detonation products of condensed explosive, we present a method to determine JWL parameters by γ fitting. This approach does not require cylinder test and is more economical, secure, convenient and accurate than existing methods. Using this method, four kinds of common explosive, e. g., TNT, C-4, PETN and HMX have been studied. By comparing to the p - V curve of JWL equation of state given by cylinder test, we showed that the γ fitting has a high precision and meets the need of explosion mechanics application.

Key words: explosion mechanics; detonation products; JWL equation of state; parameter fit