

# 一种确定 JWL 状态方程参数的简易算法

沈 飞, 王 辉, 袁建飞  
(西安近代化学研究所, 西安 710065)

**摘 要:** 基于圆筒试验中能量守恒关系及圆筒壁在特征位置处膨胀速度的经验计算公式, 建立了一种确定 CHNO 型炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数的简易算法。该方法不仅计算量小, 而且可以仅根据炸药的密度和爆速直接确定出炸药爆轰产物的 JWL 状态方程参数, 具有经济、方便、准确的特点。采用这种方法确定了 4 种常用炸药的 JWL 状态方程参数, 并与圆筒试验结合数值仿真的方法得出的 JWL 状态方程  $P-V$  曲线进行对比, 证明该方法具有较高的精度, 可以满足工程应用的需要。

**关键词:** 爆炸力学; 爆轰产物; JWL 状态方程

中图分类号: O389

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.09.019

## A simple method for determining parameters of JWL EOS

SHEN Fei, WANG Hui, YUAN Jian-fei

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Based on the principle of energy conservation in a cylinder test and the empirical formula of a cylinder's expansion velocity at feature distances, a simple method for calculating parameters of JWL EOS of detonation products of CHNO type explosives was presented. If the density and detonation velocity of the explosive were given, the parameters of JWL EOS of detonation products could be determined with this method. It did not require a cylinder test and it was more economical, convenient and accurate. Using this method, four kinds of common explosive were studied. By comparing to the  $P-V$  curve of JWL EOS obtained with a cylinder test and numerical simulations, it was shown that this method has a higher precision and meets the needs of explosion mechanics applications.

**Key words:** explosion mechanics; detonation products; JWL EOS

爆轰产物状态方程是炸药爆轰 CJ 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, 它体现了炸药的作功能力, 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 BKW、LJD、JCZ、JWL 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, 且不显含化学反应, 因而在工程设计中应用最为广泛<sup>[1-3]</sup>。目前, 绝大多数可进行爆炸问题计算的大型通用有限元软件都在炸药材料模型中采用了 JWL 状态方程。

JWL 状态方程是由 Lee 于 1965 年在 Jones 和 Wilkins 工作的基础上提出的, 该方程的未知参数是根据圆筒试验的结果确定的。圆筒试验是指将炸药放入等壁厚的铜质圆筒中, 从圆筒的一端将其引爆, 利用高

速转镜式扫描相机记录筒壁在爆轰产物驱动下的膨胀过程。国内对于圆筒试验已经制定了相应的标准, 按照圆筒内径的不同, 分为  $\Phi 25.4$  mm 和  $\Phi 50.0$  mm 两种尺寸。以圆筒试验结果为基础, 采用数值模拟法或解析法便可确定炸药爆轰产物的 JWL 状态方程参数, 其中, 数值模拟法使用最为普遍, 即应用含有 JWL 状态方程的流体动力学程序对圆筒试验进行数值模拟, 并将计算结果与试验结果进行对比, 不断修正方程的参数, 直至计算结果与试验结果相吻合, 从而确定出准确的 JWL 状态方程参数<sup>[1]</sup>。由于圆筒试验的成本较高, 且流体动力学计算较为繁琐, 使得这类方法的应用有很大的局限性。

目前工程计算涉及到的炸药种类较多, 其中大部分为 CHNO 型单质或混合炸药, 但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、快捷地确定 JWL 状态方程参数对于计算爆炸力学具有非常重要的意义。本研究基于圆筒试验中能量的转换关系及圆筒壁在特征

位置处膨胀速度的经验计算公式,建立一种确定 CHNO 型炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数的简易算法,该算法不仅避免了较为繁琐的流体动力学计算过程,而且不需要进行圆筒试验,仅根据炸药的密度及爆速就可以直接确定出爆轰产物的 JWL 状态方程参数。文中算例的结果表明,通过该方法所获得的 JWL 状态方程参数具有较高的精度,可以满足工程应用的需要。

## 1 JWL 状态方程及参数间的关系式

爆轰产物 JWL 状态方程的标准形式为<sup>[1-2]</sup>:

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

式中: $P$  和  $V$  分别表示爆轰产物的压力和相对比容; $E$  为单位体积爆轰产物的内能; $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为待定参数。式中右端所含三项依次在高、中、低压区起主要作用。

式(1)所对应的等熵线方程为:

$$P_s = A e^{-R_1 V} + B e^{-R_2 V} + C V^{-(\omega+1)} \quad (2)$$

式中: $C$  为待定参数;下标  $s$  代表等熵过程。结合热力学关系,由式(2)可得出等熵线上的内能为:

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

根据炸药爆轰的 CJ 条件,可以得出 JWL 状态方程参数之间的三个关系式。根据 CJ 条件  $-(\partial P_s / \partial V)_{V_{CJ}} = \rho_0 D^2$  可得到

$$A R_1 e^{-R_1 V_{CJ}} + B R_2 e^{-R_2 V_{CJ}} + C(\omega + 1) V_{CJ}^{-(\omega+2)} = \rho_0 D^2 \quad (4)$$

式中: $\rho_0$  为炸药的初始密度; $D$  为炸药的爆速; $V_{CJ}$  为 CJ 点处爆轰产物的相对比容。由爆轰产物 Hugoniot 关系式得到

$$\frac{A}{R_1} e^{-R_1 V_{CJ}} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 V_{CJ}} + \frac{C}{\omega} V_{CJ}^{-\omega} = E_0 + \frac{1}{2} P_{CJ} (1 - V_{CJ}) \quad (5)$$

式中: $P_{CJ}$  为炸药的爆压; $E_0$  为单位体积炸药的初始能量。又因 CJ 等熵线通过 CJ 点,则有

$$A e^{-R_1 V_{CJ}} + B e^{-R_2 V_{CJ}} + C V_{CJ}^{-(\omega+1)} = P_{CJ} \quad (6)$$

在确定 JWL 状态方程参数的过程中,式(4)~(6)使得  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  六个待定参数仅有三个是独立的。此外,式(4)~(6)中的  $V_{CJ}$  和  $P_{CJ}$  还可表示为

$$V_{CJ} = \gamma / (\gamma + 1) \quad (7)$$

$$P_{CJ} = \rho_0 D^2 / (\gamma + 1) \quad (8)$$

式中: $\gamma$  为爆轰产物的多方指数,对于 CHNO 型炸药,可近似为  $\gamma = \rho_0 / (0.14 + 0.26\rho_0)^{[4]}$ ,  $\rho_0$  的单位是  $g/cm^3$ 。

## 2 算法的理论模型

在圆筒试验中,炸药放入等壁厚的铜质圆筒中(如

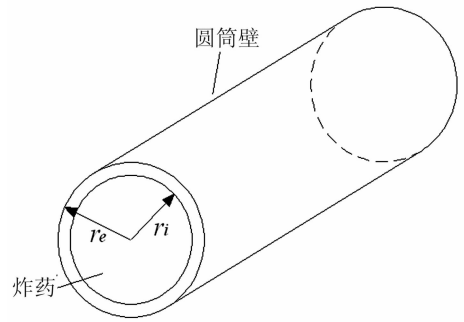


图1 圆筒试验结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the cylinder test

图1所示),从圆筒一端将炸药引爆,圆筒壁在炸药爆轰产物的驱动下发生径向膨胀,假定圆筒壁的膨胀速度为  $u$ ,则对于单位长度的圆筒,圆筒壁的动能为

$$E_w = \frac{1}{2} \rho_m \cdot \pi (r_e^2 - r_i^2) u^2 = \frac{1}{2} \rho_m \cdot \pi (r_{e0}^2 - r_{i0}^2) \cdot u^2 \quad (9)$$

式中: $r_i$  和  $r_e$  分别为圆筒壁膨胀过程中的内、外半径,其初始值分别为  $r_{i0}$  和  $r_{e0}$ ;  $\rho_m$  为圆筒材料的密度。假定爆轰产物具有相同的密度,且膨胀速度  $u_p$  沿半径  $r$  呈线性分布<sup>[5]</sup>,即

$$u_p(r) = \frac{r}{r_i} u \quad (10)$$

则爆轰产物所具有的动能为

$$E_p = \int_0^{r_i} \frac{1}{2} 2\pi \cdot r \cdot \rho_p \cdot u_p^2(r) dr = \frac{1}{4} (\pi \cdot r_i^2 \cdot \rho_p) u^2 = \frac{1}{4} (\pi \cdot r_{i0}^2 \cdot \rho_0) u^2 \quad (11)$$

式中: $\rho_p$  为爆轰产物的密度。

由式(9)和(11),可得出单位体积炸药爆炸产生的动能为

$$E_d = \frac{E_w + E_p}{\pi \cdot r_{i0}^2} = \frac{1}{2} u^2 \left[ \rho_m \left( \frac{r_{e0}^2}{r_{i0}^2} - 1 \right) + \frac{1}{2} \rho_0 \right] \quad (12)$$

根据圆筒试验中能量的守恒关系可认为,随着圆筒壁的膨胀,爆轰产物的内能不断转换为圆筒壁和爆轰产物的动能<sup>[5-6]</sup>,即

$$E_d = E_0 - E_s \quad (13)$$

其中: $E_d$  来源于圆筒试验结果,而  $E_s$  是由含待定参数的公式(3)表示的,验证一组状态方程参数是否适用于该炸药时,可将参数直接代入公式(14):

$$f(V) = E_s + E_d - E_0 = \frac{A}{R_1} e^{-R_1 V} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 V} + \frac{C}{\omega V^{-\omega}} + \frac{1}{2} u^2 \left[ \rho_m \left( \frac{r_{e0}^2}{r_{i0}^2} - 1 \right) + \frac{1}{2} \rho_0 \right] - E_0 \quad (14)$$

若在爆轰产物膨胀的各个时期, $f(V)$  的值均接近 0,则表明该组参数偏差较小或满足计算要求。然而在实际的计算过程中,一般仅需要判断  $f(2.4)$  和  $f(7.0)$  是否

接近 0 便可判断该组状态方程参数是否适用于该炸药。在  $\Phi 25.4$  mm 标准圆筒试验 ( $r_{i0} = 12.7$  mm、 $r_{e0} = 15.2$  mm) 中, 爆轰产物的相对比容为 2.4 和 7.0 时, 对应的圆筒壁膨胀距离约为 6 mm 和 19 mm, 一般也将该距离作为圆筒壁膨胀的特征距离, 文献 [7] 给出了这两个特征距离处圆筒壁膨胀速度的经验公式:

$$u_{6\text{ mm}} = \sqrt{0.1318 \cdot \varphi \rho_0^{1.8}} \quad (15)$$

$$u_{19\text{ mm}} = \sqrt{0.1854 \cdot \varphi \rho_0^{1.6}} \quad (16)$$

其中:  $\varphi = 0.4889N \sqrt{MQ}$ ;  $N$  为每克炸药的气态爆轰产物的摩尔数 (mol/g);  $M$  为气态爆轰产物的平均摩尔质量 (g/mol);  $Q$  为炸药的爆热值 (J/g);  $\rho_0$  为炸药的密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。这两个公式对于一般的 CHNO 型单质炸药或混合炸药均有较好的精度。

然而工程中经常用到的一些混合炸药, 难以具体了解其爆轰产物成分的摩尔数, 因此无法使用式 (15) 和式 (16) 计算圆筒壁的膨胀速度。由于炸药的密度和爆速一般较容易获得, 所以这里可以结合康姆莱特公式提出一种计算  $u_{6\text{ mm}}$  和  $u_{19\text{ mm}}$  的新方法, 该方法的计算过程中只需要提供炸药的密度及爆速。

60 年代末, 康姆莱特 (Kamlet) 提出了计算 CHNO 型炸药爆速的半经验计算公式:

$$D = 1.01 \sqrt{\varphi} (1 + 1.3\rho_0) \quad (17)$$

该公式适用于装药密度大于  $1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$  的情况, 一些文献的研究表明, 该公式对于含氯氟的炸药也适用<sup>[8]</sup>。将式 (17) 与式 (15)、式 (16) 联立便可消去  $\varphi$ , 则  $u_{6\text{ mm}}$  和  $u_{19\text{ mm}}$  的表达式变为:

$$u_{6\text{ mm}} = \frac{0.3594\rho_0^{0.9}D}{1 + 1.3\rho_0} \quad (18)$$

$$u_{19\text{ mm}} = \frac{0.4263\rho_0^{0.8}D}{1 + 1.3\rho_0} \quad (19)$$

对于  $E_0$  的具体值, 可以采用量热弹数据, 也可以通过热化学计算得到, 但数值模拟过程中,  $E_0$  只是能量计算的一种基准, 往往需要调整, 使其余爆轰参数符合要求<sup>[1]</sup>。对于大多数的凝聚炸药, 可以根据文献 [9] 提出的经验公式 (20) 确定其具体值:

$$E_0 = (0.204 - 0.0734\rho_0)\rho_0 D^2 \quad (20)$$

### 3 算法的流程及应用

在爆轰产物 JWL 状态方程参数的计算过程中, 由于炸药的密度和爆速通过简单的测量方法便可获得, 则可先根据公式 (18)、(19) 计算出  $u_{6\text{ mm}}$  和  $u_{19\text{ mm}}$ , 然后由公式 (7)、(8)、(20) 计算出  $V_{\text{Cl}}$ 、 $P_{\text{Cl}}$  和  $E_0$  的值。对于剩余的六个参数, 可选取一组  $R_1$ 、 $R_2$  和  $\omega$  的值, 并根据 (4)、(5)、(6) 三个方程计算出相应的 A、B 和 C, 然后由公式 (14) 进行检验, 在这样的流程下不断调整  $R_1$ 、

$R_2$  和  $\omega$  的值, 最终确定出最优的状态方程参数值。然而这需要同时搜索三个参数, 仍然稍显繁琐, 可进一步简化。文献 [10] 提出, 对于大多数 CHNO 型炸药,  $\omega$  可取 0.33, 且  $R_2 \approx 0.27R_1$ , 那么计算过程中需要搜索的参数值只有  $R_1$ , 其取值范围一般为  $4 \sim 5$ <sup>[1,9]</sup>, 而  $R_2$  和  $\omega$  的值只需进行适当调整即可, 图 2 列出了其计算流程图, 其中  $\varepsilon$  取较小的正实数。

对于密度大于  $1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$  的 CHNO 型炸药, 如果已知其密度、爆速, 则可根据公式 (18)、(19) 直接计算出圆筒壁在特征距离处的膨胀速度  $u_{6\text{ mm}}$  和  $u_{19\text{ mm}}$ 。表 1 中针对 4 种常用炸药, 计算出了相应的  $u_{6\text{ mm}}$  和  $u_{19\text{ mm}}$ , 并与试验值进行了对比, 可以看出, 两者的偏差较小, 可以用于计算爆轰产物的 JWL 状态方程参数。

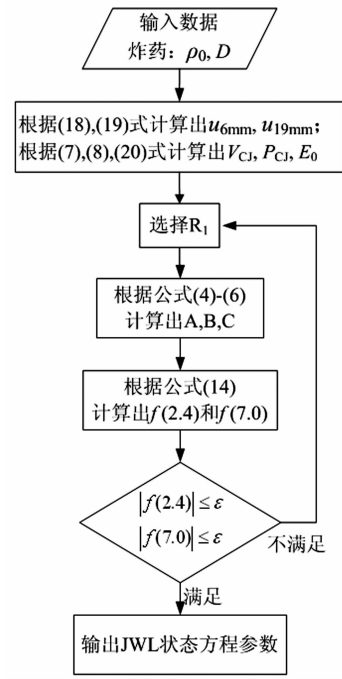


图 2 计算流程图  
Fig. 2 Calculation flowchart

表 1 特征距离处圆筒壁的膨胀速度  
Tab. 1 Cylinder expansion velocity at the feature distances

Explosive	$\rho_0/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$D/$ ( $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ )	$u_{6\text{ mm}}/$ ( $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ )		$u_{19\text{ mm}}/$ ( $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ )	
			计算值	试验值 <sup>[11]</sup>	计算值	试验值 <sup>[11]</sup>
TNT	1.63	6.93	1.240	1.212	1.400	1.396
PBX-9404	1.84	8.80	1.614	1.609	1.801	1.800
COMP B	1.717	7.98	1.443	1.439	1.622	1.631
PBX-9010	1.787	8.39	1.530	1.523	1.713	1.715

表 2 JWL 状态方程参数值  
Tab. 2 Parameters of JWL equation of state

Explosive	$E_0/\text{GPa}$	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$C/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$
TNT <sup>(1)</sup>	6.604	438.44	4.445	1.165	4.41	1.191	0.33
TNT <sup>(2)</sup>	7.0	371.2	3.231	1.045	4.15	0.95	0.30
PBX-9404 <sup>(1)</sup>	9.824	872.45	11.917	1.257	4.52	1.220	0.33
PBX-9404 <sup>(2)</sup>	10.2	852.4	18.02	1.207	4.60	1.30	0.38
COMP B <sup>(1)</sup>	8.525	657.20	8.729	1.272	4.53	1.223	0.33
COMP B <sup>(2)</sup>	8.5	524.2	7.678	1.082	4.20	1.10	0.34
PBX-9010 <sup>(1)</sup>	9.162	729.77	7.028	1.407	4.42	1.193	0.33
PBX-9010 <sup>(1)</sup>	9.0	581.4	6.801	0.234	4.10	1.00	0.35

注: (1) 采用本文的计算方法得出的参数值; (2) 文献 [11] 中根据圆筒试验结果确定的参数值。

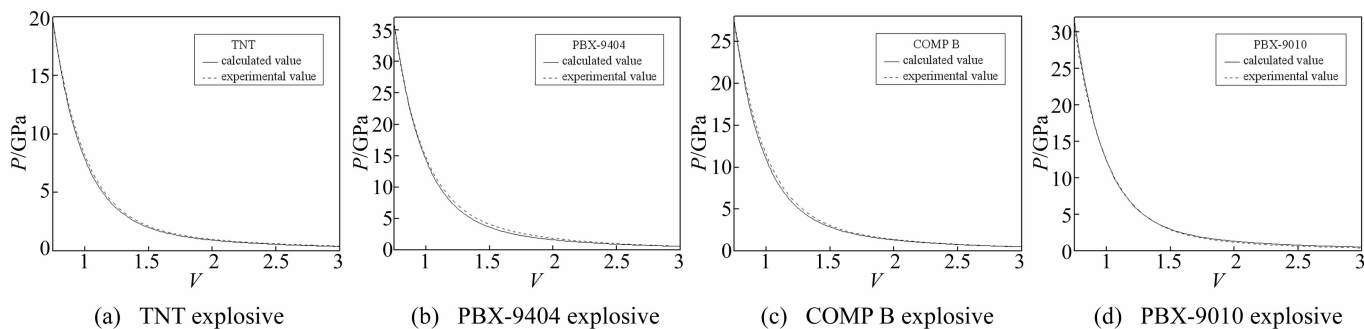
图3 4种炸药JWL状态方程的 $P-V$ 曲线Fig. 3 The  $P-V$  curves of JWL EOS for four kinds of explosives

表2中列出了这4种炸药的JWL状态方程参数的计算值,并将它们与文献[11]中的试验值进行了对比,其 $P-V$ 曲线的对比情况如图3所示。从图中可看出,对于这4种炸药,其计算值的 $P-V$ 曲线与试验值的 $P-V$ 曲线偏差较小,尤其是在高压区和低压区,两条曲线基本重合。此外,爆轰产物对物质的作用主要体现在高压区,中压区较小的误差对数值仿真结果的影响较小<sup>[12]</sup>,因此采用该方法确定的JWL状态方程参数完全可以满足计算爆炸力学的应用。

## 4 结论

本文基于圆筒试验中能量的转换关系及圆筒壁在特征位置处膨胀速度的经验计算公式,提出了JWL状态方程参数的一种简易算法,该方法不仅计算过程简单、计算量小,而且仅需要根据炸药的密度和爆速就可以确定炸药爆轰产物的JWL状态方程参数。该方法适用于密度大于 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 的CHNO型炸药,具有经济、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将有较好的应用前景。

### 参考文献

[1] 孙承纬,卫玉章,周之奎. 应用爆炸物理[M]. 北京:国防工业出版社,2000.  
 [2] 汤文辉,张若棋. 物态方程理论及计算概论[M]. 北京:高等教育出版社,2008.  
 [3] Ernest L B, Christos C, Leonard I S, et al. Accuracy and calibration of high explosive thermodynamic equations of state

[J]. Journal of Energetic materials, 2010, 28:140-153.  
 [4] Johansson C H, Persson P. Density and pressure in the Chapman Jouguet Plane as functions of initial density of explosive[J]. Nature, 1966, 212: 1230-1231.  
 [5] Reaugh J E, Souers P C. A constant-density Gurney approach to the cylinder test [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2004, 29(2): 124-128.  
 [6] Souers P C, Lauderbach L, Garza R, et al. Upgraded analytical model of the cylinder test [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2013, 38: 419-424.  
 [7] Doherty R M, Short J M. Improved prediction of cylinder test energies[J]. Combustion and Flame, 1989, 76:297-306.  
 [8] 孙业斌,惠君明,曹欣茂. 军用混合炸药[M]. 北京:兵器工业出版社,1995.  
 [9] Urtiew P A, Hayes B. Empirical estimate of detonation parameters in condensed explosives[J]. Journal of Energetic Materials, 1991, 9:297-318.  
 [10] Urtiew P A, Hayes B. Parametric study of the dynamic JWL-EOS for detonation products[J]. Combustion Explosion and Shock Waves, 1991, 27(4):504-514.  
 [11] Dobratz B M, Crawford P C. LLNL Explosives Handbook, Properties of chemical explosives and explosives simulants [R]. Report UCRL-52997, Lawrence Livermore National Laboratory USA, 1985.  
 [12] 赵铮,陶钢,杜长星. 爆轰产物JWL状态方程应用研究[J]. 高压物理学报, 2009, 23(4): 277-282.  
 ZHAO Zheng, TAO Gang, DU Chang-xing. Application research on JWL equation of state of detonation products[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009, 23(4): 277-282.