

RHT-902和Octol炸药爆轰产物 JWL状态方程研究

于川 刘文翰 李良忠 杨淑英

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 成都523信箱 610003)

摘要 本文对RHT-902和Octol两种炸药做了标准圆筒试验, 运用能量守恒原理分析处理试验结果, 用解析关系式确定了这两种炸药爆轰产物的JWL状态方程参数。这些参数与国外发表的相应参数基本一致。

关键词 RHT-902 Octol 圆筒试验 爆轰产物 JWL状态方程

1 引言

炸药爆轰产物状态方程是描述炸药爆轰C-J状态之后的爆轰产物系统各物理量(压力 p 、比容 V 、温度 T 和内能 E 等)之间的关系式。这方面的研究对爆炸力学的研究和应用具有重要的意义。

目前, 已有多种发展比较成熟的爆轰产物状态方程形式, 如BKW状态方程, JWL状态方程, JCZ-3状态方程等。其中, JWL (Jones-Wilkins-Lee) 状态方程是一种能比较精确地描述爆轰产物的膨胀驱动过程, 而且可以由试验方法确定的半经验状态方程。该方程于1965年由美国Lawrence Livermore国家实验室(LLNL)的E. L. Lee在Jones和Wilkins的工作基础上提出的。JWL状态方程参数的确定依赖于圆筒试验(Cylinder test), 测定金属圆筒在待测炸药爆轰产物驱动下的膨胀过程^[1]。

用圆筒试验结果确定JWL状态方程参数的传统方法, 是进行二维流体动力学数值模拟计算。LLNL运用这种方法已确定了几十种炸药爆轰产物的JWL状态方程参数^[2]。国内也曾有人在这方面进行过不少工作。但这方法需要花费大量的计算机机时, 且要求数值模拟计算具有很高的精确度。

本文在进行RHT-902和Octol两种炸药圆筒试验的基础上, 运用能量守恒原理分析处理试验结果, 避开了繁杂的二维数值模拟计算, 由解析关系式确定了这两种炸药爆轰产物的JWL状态方程参数。通过比较, 本文确定的参数与二维数值模拟计算确定的参数基本相符。

2 圆筒试验与测试结果

2.1 圆筒试验

本文采用25.4mm的标准圆筒试验, 试验装置和测试系统如图1所示。

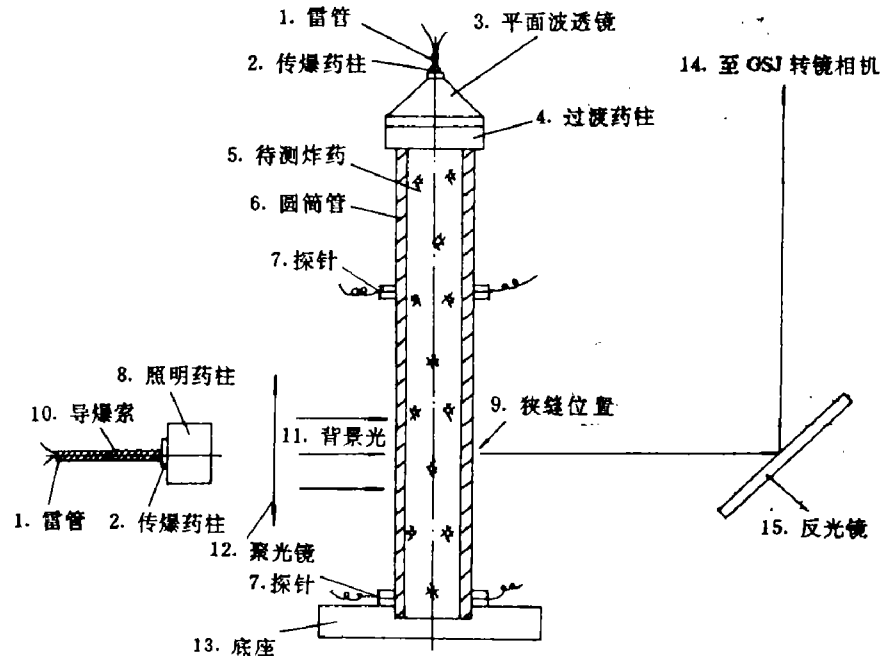


图 1 圆筒试验装置示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the cylinder test

1. Detonator; 2. Booster; 3. Plane wave generator; 4. Comp. B explosive;
 5. Explosive test sample; 6. Copper tube; 7. Pins; 8. Comp. B explosive;
 9. Observation section; 10. Detonating cord; 11. Backlight; 12. Condenser lens;
 13. Pedestal; 14. GSJ rotating mirror camera; 15. Mirror

图 1 中圆筒管是内径 25.4mm, 壁厚 2.54mm, 长 300mm 的高纯度无氧铜管(含铜 99.99%), 内装直径 25.4mm, 长 300mm 的待测炸药样品。固定于圆筒管壁的两对电探针用于测定炸药的爆速 D , 用 GSJ 高速转镜相机拍摄对应于已产生稳定爆轰的狭缝位置处的管壁膨胀过程。

2.2 测试结果

本文对配方为 TNT/RDX (35/65) 的 RHT-902 炸药和配方为 HMX/TNT (70/30) 的 Octol 炸药各做圆筒试验五发。试验测得密度 ρ_0 为 1.708g/cm³ 的 RHT-902 炸药爆速 D 为 7.87km/s; 密度 ρ_0 为 1.768g/cm³ 的 Octol 炸药爆速 D 为 8.18km/s。

由转速为 6 万转/分的 GSJ 高速转镜相机拍摄图 1 中狭缝位置处的圆筒管在爆轰产物驱动下的膨胀过程。典型的光测结果照片如图 2 所示。

设圆筒膨胀距离 $R - R_0$ 与膨胀时间 t 满足下列四阶函数关系式

$$t = a_0 + a_1(R - R_0) + a_2(R - R_0)^2 + a_3(R - R_0)^3 + a_4(R - R_0)^4 \quad (1)$$

由最小二乘法原理, 按关系式(1)对图 1 的光测圆筒膨胀过程试验数据进行曲线拟合, 得到拟合关系式系数列于表 1, 拟合曲线如图 3 所示。

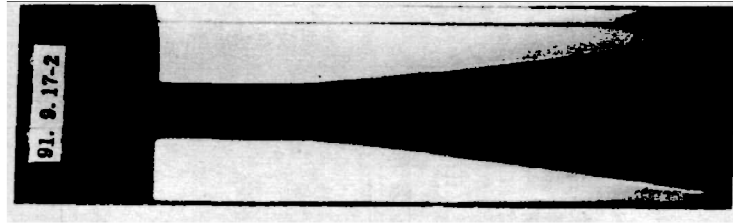


图 2 圆筒膨胀过程光测照片

Fig. 2 The photograph of the cylinder expansion

表 1 圆筒膨胀拟合曲线关系式系数

Table 1 The fitting curve parameters of the cylinder expansion

炸药	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
RHT-902	-0.959546E-02	0.107808E+01	-0.515047E-01	0.247672E-02	-0.452665E-04
Octol	-0.143822E-01	0.869440E+00	-0.217905E-01	0.763099E-03	-0.105508E-04

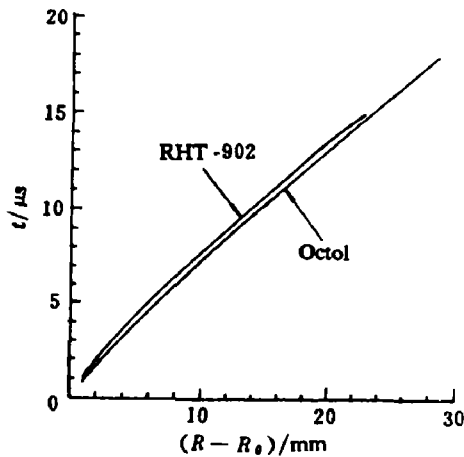


图 3 圆筒膨胀拟合曲线

Fig. 3 The fitting curves of the cylinder expansion

3 JWL 状态方程参数的确定

等熵条件下, JWL 状态方程形式为^[3]

$$p_s = Ae^{-R_1 V} + Be^{-R_2 V} + \frac{C}{V^{\omega+1}} \quad (2)$$

式中: p_s 为爆轰产物的等熵压力; V 为爆轰产物的相对比容; A, B, C, R_1, R_2 和 ω 为 JWL 状态方程的六个待定参数。

由热力学关系式

$$E_s = - \int p_s dV \quad (3)$$

则可得到 JWL 状态方程的等熵内能形式

$$E_s = \frac{A}{R_1} e^{-R_1 V} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 V} + \frac{C}{\omega V^\omega} \quad (4)$$

式中 E_s 为爆轰产物的等熵内能。

设 $E_{s|V-1}$ 为爆轰产物气体膨胀释放的有效总

能。对爆轰产物膨胀驱动过程, 将满足守恒关系

$$E_{s|V-1} = E_s + E_{sk}(V) + E_M(V) \quad (5)$$

式中: $E_{sk}(V)$ 为气体产物的动能; $E_M(V)$ 为被驱动金属的动能。

设:

$$E_g(V) = E_{sk}(V) + E_M(V) \quad (6)$$

$E_g(V)$ 为系统的 Gurney 能量。则由(5)式和(6)式得

$$E_s = E_{s|V-1} - E_g(V) \quad (7)$$

我们可以看到, $E_{s|V-1}$ 就是爆热 Q 。可由

$$E_{s|v-1} = Q = \frac{p_{C-J}}{2(\gamma-1)} = \frac{\rho_0 D^2}{2(\gamma+1)(\gamma-1)} \quad (8)$$

计算得到。式中 p_{C-J} 为 C-J 爆压; γ 为多方指数。

(7) 式中的 Gurney 能量 $E_s(V)$, 可由改进的 Gurney 公式得到

$$E_s(V) = \frac{u^2}{2} \left(\frac{m_M}{m_E} + \frac{n}{n+2} \right) \quad (9)$$

式中: m_M/m_E 为被驱动金属与炸药单位长度质量比; u 为被驱动金属的速度, 对圆筒试验, n 即为圆筒管壁膨胀速度, 可由关系式(1)式求得; n 为装药几何参数, 对圆筒试验, $n=2$, 则(9)式变为

$$E_s(V) = \frac{u^2}{2} \left(\frac{m_M}{m_E} + \frac{1}{2} \right) \quad (10)$$

为将能量守恒关系式同圆筒试验测试得到的圆筒膨胀过程联系起来, 须知相对比容 V 随膨胀距离 $(R-R_0)$ 的变化关系。LLNL 的 Wilkins 通过二维流体动力学数值模拟计算, 拟合得到一般炸药的 25.4mm 圆筒试验的关系式^[4]

$$V = 1.0146 + 0.19174(R - R_0) + 0.006178(R - R_0)^2 \quad (11)$$

这样, 由上述关系式和圆筒试验测试结果的联立方程组, 就可解析求解出 JWL 状态方程的六个参数。

JWL 状态方程(4)式的右边三项, 可分别视为高压、中压和低压三个阶段的贡献项。

在低压阶段 ($V > 6$), 可取

$$E_s = \frac{C}{\omega V^a} \quad (12)$$

通过对 $V > 6$ 阶段的试验参数进行计算, 可求解得到 C 和 ω 。

在中压阶段 ($2 < V < 5$), 可取

$$E_s = \frac{B}{R_2} e^{-R_2 V} + \frac{C}{\omega V^a} \quad (13)$$

由(12)式求解得到的 C 和 ω , 通过对该中压阶段的试验参数进行计算, 可求解得到 B 和 R_2 。

A 和 R_1 可由 C-J 参数确定。在 C-J 点, 有

$$p_{C-J} = A e^{-V_{C-J} R_1} + B e^{-V_{C-J} R_2} + \frac{C}{V_{C-J}^a} \quad (14)$$

$$\rho_0 D^2 = A R_1 e^{-V_{C-J} R_1} + B R_2 e^{-V_{C-J} R_2} + \frac{C(\omega + 1)}{V_{C-J}^{a+1}} \quad (15)$$

$$V_{C-J} = \frac{\gamma}{\gamma + 1} \quad (16)$$

由实测爆压 p_{C-J} 、爆速 D 、多方指数 γ , 和已求解出的 B 、 R_2 、 C 和 ω , 即可求得 A 和 R_1 。

按上述分析求解方法, 得到的 RHT-902 和 Octol 炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数列于表 2。

为了比较, 我们把 LLNL 用二维数值模拟计算得到的 Comp. B 和 Octol 炸药的相应参数也列于表 2。

表2 JWLV 状态方程参数

Table 2 The parameters of the JWLV equation of state

炸药	炸药密度 $\rho_0 /$ (g/cm ³)	爆速 $D /$ (km/s)	爆压 $P_{C-1} /$ GPa	多方指数 γ	$A /$ GPa	$B /$ GPa	$C /$ GPa	R_1	R_2	ω
RHT-902	1.708	7.87	28.6 ^[3]	2.83 ^[3]	6021	122.46	18.55	4.55	1.21	0.32
Comp. B ^[2]	1.717	7.98	29.5	2.706	5242	76.78	10.82	4.20	1.10	0.34
Octol	1.768	8.18	32.0 ^[3]	2.839 ^[3]	5285	26.19	13.46	3.92	1.23	0.20
Octol ^[2]	1.821	8.48	34.2	2.830	7486	133.80	11.67	4.50	1.20	0.38

由表2的数据得到的 JWLV 状态方程爆轰产物等熵压力与相对比容的 $p \sim V$ 关系如图4和图5所示。

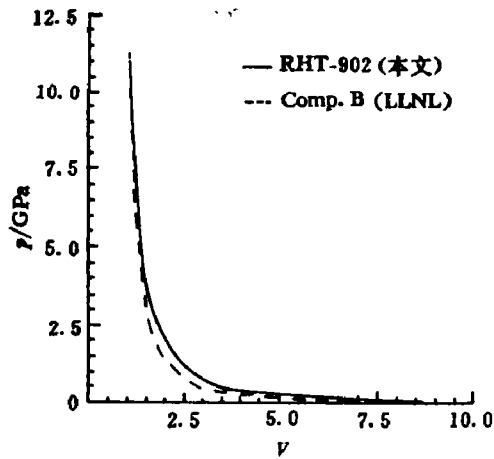


图4 RHT-902 炸药爆轰产物 JWLV 状态方程 $p \sim V$ 关系图

Fig. 4 The $p \sim V$ curves for RHT-902

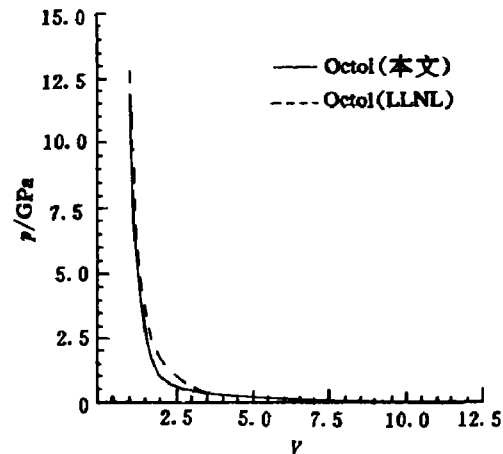


图5 Octol 炸药爆轰产物 JWLV 状态方程 $p \sim V$ 关系图

Fig. 5 The $p \sim V$ curves for Octol

4 分析

由表2和图4、图5的比较可见,本文确定的 RHT-902 炸药和 Octol 炸药爆轰产物 JWLV 状态方程参数与 LLNL 的 Comp. B 炸药和 Octol 炸药的相应参数基本相符。在图4和图5的 $p \sim V$ 关系图上,本文确定的曲线与 LLNL 的曲线略有差别,这主要是由于两者使用的炸药在配方和加工工艺方面的差别引起的。如 Octol 炸药,LLNL 使用的配方为 HMX/TNT(78/22),HMX 的含量比本文使用的含量高 8%,其相应爆轰产物的压力要略高一些,在相对比容 $1 < V < 4$ 的范围内, $p \sim V$ 曲线略高于本文确定的曲线。在 $V > 4$ 以后,两条曲线基本趋于一致。

本文的分析方法求解 JWLV 状态方程参数过程,无需繁复的二维数值模拟计算。解析

关系式虽比较简单,但抓住了圆筒膨胀过程中能量守恒的实质,由此而确定的 JWL 状态方程参数是比较可靠的。

本文的研究工作得到孙承纬研究员和王圣平副研究员的指导,高宁、李峰、马冰、王广军等参加了实验测试工作,在此致谢!

参 考 文 献

- 1 Kury J W, Hornig H C, Lee E L, et al. Metal acceleration by chemical explosives. In: Proc of 4th Symp (Int.) on Detonation. Washington D C, Office of Naval Research-Department of the NAVY, 1965.
- 2 Dobratz B M. LLNL Explosives Handbook. UCRL-52997, 1981.
- 3 Lee E L, Hornig H O, Kurg J W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products. UCRL-50422, 1968.
- 4 Miller P J, Carlson K E. Determining JWL equation of state parameters using the Gurney equation approximation. In: Proc of 9th Symp (Int.) on Detonation. Arlington, Office of the Chief of Naval Research, 1989. 498
- 5 于 川. 高能炸药冲击引爆、爆轰性能、状态方程参数汇编, (私人通讯), 1992.

STUDIES ON THE JWL EQUATION OF STATE OF DETONATION PRODUCTS FOR RHT-902 AND OCTOL

Yu Chuan, Liu Wenhan, Li Liangzhong, Yang Shuying

(Institute of Fluid Physics CAEP, P. O. Box 523, Chengdu, 610003)

ABSTRACT By using the principle of energy conservation to analyse the results of the cylinder test for RHT-902 and Octol, we obtained the parameters of the JWL equation of state of detonation products of these two explosives from some analytical relations. The results are in accord with that given by LLNL.

KEY WORDS RHT-902, Octol, cylinder test, detonation product, JWL equation of state