DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0157-07

一种与爆轰参数封闭的 JWL 方程参数确定方法*

南宇翔,蒋建伟,王树有,门建兵
(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081)

摘要: 利用数值模拟和理论计算分析了炸药 JWL 状态方程参数与爆轰参数封闭的重要性;获得了利用圆筒实验测试结果计算炸药爆轰产物绝热等熵指数和爆压的方法;建立了与爆轰参数封闭的 JWL 状态方程参数的确定方法,并依据公布的圆筒实验数据,应用于两种典型炸药 JWL 状态方程参数的确定,获得的参数与炸药爆轰参数严格封闭,数值模拟结果与实验结果一致性好,表明炸药 JWL 参数确定方法合理可靠。

关键词: 爆炸力学;参数确定;约束守恒;JWL 状态方程;圆筒实验
中图分类号: O389;TJ45 **国标学科代码**: 1303510 **文献标志码**: A

JWL 状态方程是描述炸药爆轰产物做功能力的一种形式,在炸药爆轰及爆炸驱动的数值模拟中被广泛采用[1-2],JWL 方程中含有 A、B、R_1、R_2、ω、E_0(等熵形式时为 C)等 6 个参数。J. W. Kury 等[3]首先提出应用标准圆筒实验确定炸药 JWL 方程参数的方法,并公布了典型炸药的 JWL 方程参数,这些炸药的 JWL 参数与炸药爆轰参数(爆速、爆压、爆热等)存在封闭性[4],即只要已知 JWL 的 6 个参数和密度就可获得炸药爆轰参数。JWL 状态方程参数的确定除借助圆筒实验结果外,还需 CHEETCH、CHEQ 等专用处理软件[5],关于软件方法则未见公开。叶早发等[6]采用数值模拟方法研究了 JWL 方程每个参数对圆筒壁驱动速度的影响规律,给出了已知圆筒实验和爆轰参数条件下,采用分段确定 R_1、R_2、ω 参数获得 JWL 参数的方法,该方法忽略了 3 个参数间的协调变化。《标准圆筒试验法》1991 年公布,至 1997 年有了修订版 GJB 772A-97[7],但未形成操作性强的 JWL 参数确定方法,目前主要是在圆筒实验基础上以"凑参数-数值模拟"重复循环过程为主,这种"试错法"靠经验调整 6 个参数,拟合过程复杂,参数拟合结果因人而异。一些炸药 JWL 参数[8-11]的选定注重了数值模拟的圆筒壁驱动速度曲线和膨胀位移曲线与实验结果误差控制在一定范围,忽略了 JWL 方程参数与炸药爆轰参数的封闭性,导致计算的爆速、爆压与实验误差大,显然,将直接影响数值模拟中炸药爆轰及驱动结果的可靠性。

本文中,推导并分析 JWL 状态方程与炸药爆轰参数封闭的重要性,提出基于炸药圆筒实验确定等熵指数和爆压的计算方法,建立考虑 JWL 方程参数与爆轰参数封闭的 JWL 方程参数确定方法,该方法比"试错法"增加了爆轰产物在 CJ 状态的约束条件判断,可消除人为拟合 JWL 方程参数的多样性,可有效缩短参数确定的周期。

根据典型 RDX 基及 HMX 基炸药圆筒实验结果,采用本文方法确定这两种炸药的 JWL 参数,将所得的 JWL 状态方程参数的数值模拟结果与圆筒实验结果比较,考察参数是否合理。

1 炸药 JWL 参数与爆轰参数封闭的重要性分析

常见的 JWL 方程的压力和等熵形式为[12]:

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

* **收稿日期**: 2013-07-23; **修回日期**: 2013-10-28
基金项目: 国家自然科学基金项目(11032002);国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2010CB832706);
爆炸科学与技术国家重点实验室基金项目(ZDKT-1102)
第一作者: 南宇翔(1988—),男,博士研究生,nyxbaboon@126.com。

$$p_s = A\mathrm{e}^{-R_1\bar{V}} + B\mathrm{e}^{-R_2\bar{V}} + \frac{C}{\bar{V}^{1+\omega}} \tag{2}$$

根据炸药爆轰理论,在理想爆轰时炸药爆轰产物在 CJ 状态满足约束守恒方程组[4]:

$$\begin{cases} \rho_0 D^2 = AR_1\mathrm{e}^{-R_1\bar{V}_{\mathrm{CJ}}} + BR_2\mathrm{e}^{-R_2\bar{V}_{\mathrm{CJ}}} + C(1+\omega)\bar{V}_{\mathrm{CJ}}^{-(2+\omega)} \\ p_{\mathrm{CJ}} = A\mathrm{e}^{-R_1\bar{V}_{\mathrm{CJ}}} + B\mathrm{e}^{-R_2\bar{V}_{\mathrm{CJ}}} + C\bar{V}_{\mathrm{CJ}}^{-(1+\omega)} \\ E_0 + \frac{1}{2}p_{\mathrm{CJ}}(1-\bar{V}_{\mathrm{CJ}}) = \frac{A}{R_1}\mathrm{e}^{-R_1\bar{V}_{\mathrm{CJ}}} + \frac{B}{R_2}\mathrm{e}^{-R_2\bar{V}_{\mathrm{CJ}}} + \frac{C}{\omega}\bar{V}_{\mathrm{CJ}}^{-\omega} \end{cases} \tag{3}$$

式中:$\bar{V}_{\mathrm{CJ}} = \frac{v_{\mathrm{CJ}}}{v_0} = \frac{\rho_0}{\rho_{\mathrm{CJ}}} = \frac{\gamma}{1+\gamma}$,$E_0 = \rho_0 Q_{\mathrm{e}}$,$p_{\mathrm{CJ}} = \frac{1}{\gamma+1}\rho_0 D^2$。

在已知炸药密度 ρ_0 和 JWL 方程参数 A、B、R_1、R_2、ω、E_0 下,采用 MATLAB 软件求解方程组(3),可得到炸药爆速 D、爆压 p_{CJ} 和爆热 Q_{e}。

图 1 为∅25 mm×300 mm 标准圆筒计算模型。沿炸药轴线不同位置处设置观测点 1~17,无氧铜管壁面设置观测点 18(距起爆端 200 mm)。

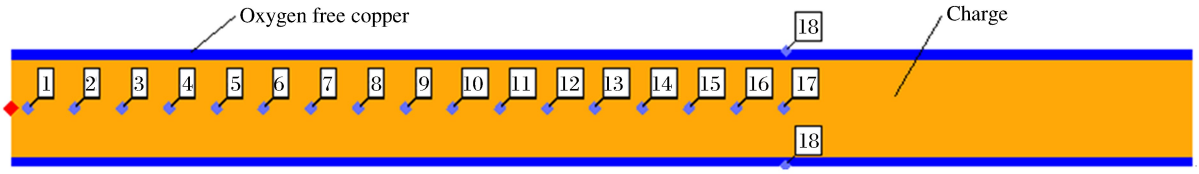

图 1 圆筒模型及测量点位置

Fig. 1 Cylinder model and gauge position

由文献[10]可知,典型 RDX 基炸药 JWL 方程参数分别为:$\rho_0 = 1.65\ \mathrm{g/cm^3}$,$D = 8.19\ \mathrm{km/s}$,$p_{\mathrm{CJ}} = 27.67\ \mathrm{GPa}$,$A = 640\ \mathrm{GPa}$,$B = 17.6\ \mathrm{GPa}$,$R_1 = 4.5$,$R_2 = 1.35$,$\omega = 0.30$,$E_0 = 11.56\ \mathrm{J/mm^3}$。将炸药的 JWL 参数代入式(3),反推得到爆速、爆压和爆热的计算值分别为:$Q_{\mathrm{e}} = 7.006\ \mathrm{kJ/g}$,$D_{\mathrm{e}} = 8.596\ \mathrm{km/s}$,$(D_{\mathrm{e}} - D)/D = 4.96\%$,$p_{\mathrm{e}} = 33.15\ \mathrm{GPa}$,$(p_{\mathrm{e}} - p_{\mathrm{CJ}})/p_{\mathrm{CJ}} = 19.80\%$。

应用 LS-DYNA 软件对圆筒的炸药爆炸驱动过程进行数值模拟,图 2 为获得的观测点 18 处圆筒壁的速度曲线,图 3 为不同位置处的爆轰压力曲线。

从图 2 可以看出,数值模拟与实验测试结果吻合较好,但在图 3 中,压力峰值大于炸药 CJ 爆压,其原因是爆轰参数计算结果与实际爆速 D、爆压 p_{CJ} 有较大的差异所致。可见,炸药 JWL 方程参数与爆轰参数不封闭会影响数值模拟计算的准确性。

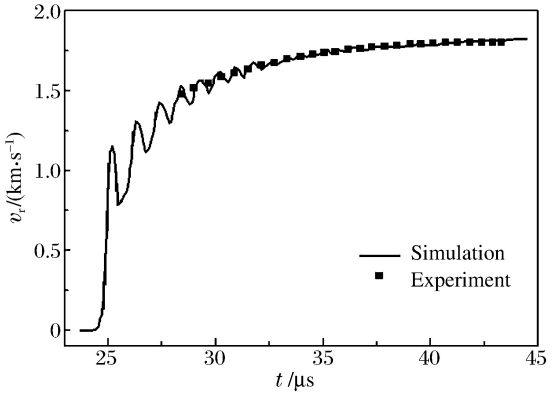

图 2 圆筒壁速度曲线

Fig. 2 Velocities of cylinder wall

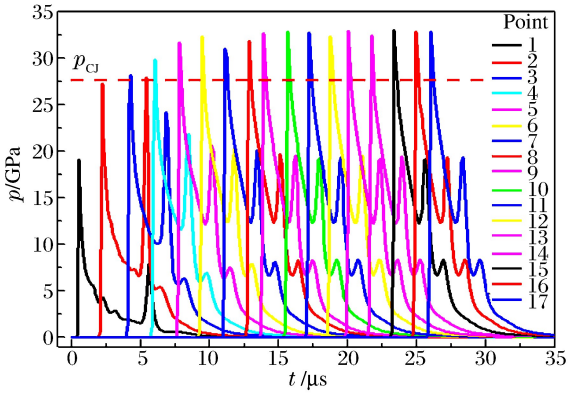

图 3 观测点压力曲线

Fig. 3 Pressures of different gauge points

2　炸药 JWL 状态方程参数确定方法

2.1　输入参数的确定

由式(3)可知，JWL 参数的确定需要已知炸药的 ρ_0、D、Q_e、γ 等作初始输入值，这些参数均可通过单独实验测量，爆速 D 也可在圆筒实验中监测[13]，理论爆热 Q_t 可应用盖斯定理等方法计算，多方指数 γ 值虽可由公式 $\frac{1}{\gamma}=\sum\frac{x_i}{\gamma_i}$[14]、$\gamma=1.9+0.6\rho_0$[14] 和 $\gamma=1.6+0.8\rho_0$[15] 估算，但准确性不高，精确的 γ 值为：

$$\gamma=\frac{\rho_0 D^2}{p_{CJ}}-1 \tag{4}$$

上式中需已知爆压 p_{CJ}，考虑爆压 p_{CJ} 测试的困难，以下提出了利用圆筒实验测试结果求解 γ 和 p_{CJ} 的计算方法。

根据炸药圆筒实验数据处理方法[13]，从圆筒实验高速摄影图像可获得筒壁膨胀位移曲线(见图 4)，拟合出圆筒壁质量中心面的多项式膨胀位移表达式：

$$r_m-r_{m0}=\sum_{j=1}^{n}a_j\{b_j t_i-[1-\exp(b_j t_i)]\} \tag{5}$$

式中：a_j、b_j 为待定系数，$t_i=t+t_0$，一般取 $n=2$。

根据质量、动量守恒可计算出爆轰产物的压力-相对比容关系(见图 5)，为 γ 律方程：

$$p=a\bar{V}^{-\gamma} \tag{6}$$

应用最小二乘法可拟合出 a、γ 值，将拟合出的 γ 值作为 CJ 状态时的 γ 值，根据式(3)就可得到 p_{CJ}。

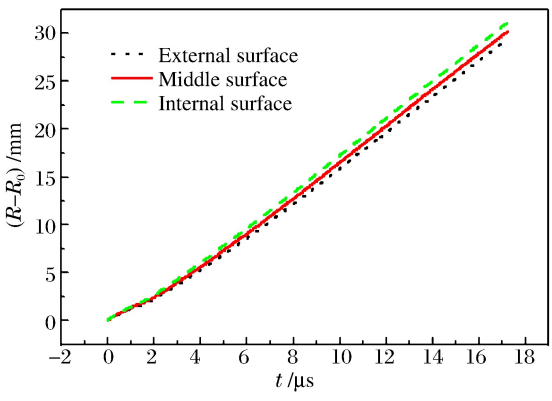

图 4　圆筒实验膨胀位移曲线

Fig. 4　Expansion displacement curves of cylinder wall

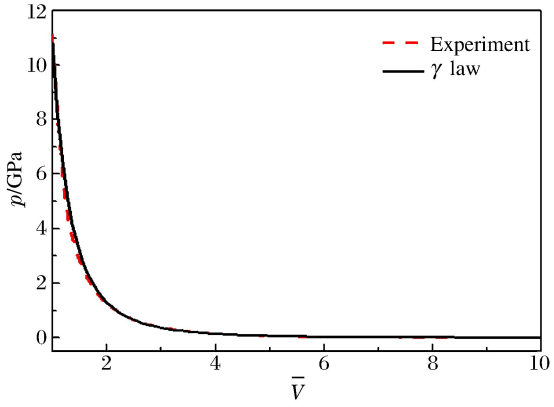

图 5　压力与相对比容的关系

Fig. 5　Pressure vs. relative volume

2.2　参数确定方法和流程

图 6 为基于圆筒实验的 JWL 方程参数确定方法总流程图，增加了 CJ 约束方程的判断，基本消除了 JWL 方程参数的多样性。主要步骤为：

(1)参数 E_0 的确定。E_0 为单位体积炸药的初始总能量，表征炸药可对外做功的总能量，$E_0=\rho_0 Q_e$，其中 Q_e 是炸药实测爆热，也可用理论爆热 Q_t 代替。

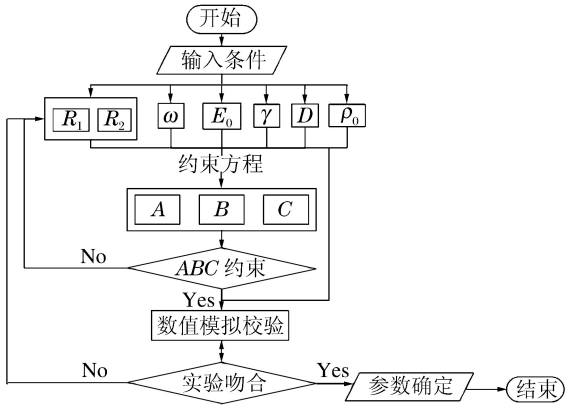

图 6　JWL 方程参数确定方法流程

Fig. 6　The methodology process for obtaining JWL parameters

(2)参数 ω 的确定。准确获取方法为[3]:通过实验及热力学计算获得爆轰产物的绝热等熵膨胀线,根据 γ 律方程 $p=C\bar{V}^{-(1+\omega)}$ 在 $10\bar{V}\sim2\,000\bar{V}$ 范围内拟合出 ω 值。在没有确定 ω 时,一般选取 $0.2\leqslant\omega\leqslant0.5$,可先设定初始 $\omega=0.3$。

(3)参数 R_1、R_2 的设定。R_1、R_2 是与爆轰产物膨胀的高压段和中压段有关的系数,是参数确定过程中可以进行调整的驱动参数。通常认为:$4\leqslant R_1\leqslant7$,$0.8\leqslant R_1\leqslant2$。一般设定初始值:$R_1=4.5$,$R_2=1.5$。

(4)参数 A、B 参数的确定。已知 ρ_0、D、γ、R_1、R_2、ω、E_0,可通过爆轰产物 CJ 态守恒方程组(3),计算 A、B、C 的值,这样 JWL 方程的 6 个参数与炸药爆轰参数之间可以形成严格封闭。A、B、C 的约束条件为:$A,B,C>0$,$A\approx(10\sim100)B$,$B\approx(10\sim100)C$。若不符合,需要先调整 R_1、R_2 值,直到符合为止,再进行下一步计算。

(5)参数的校验与调整。采用以上计算获得的 JWL 参数,使用 AUTODYN、LS-DYNA 等软件模拟标准圆筒实验。得到与实验相同观测位置处圆筒壁径向的速度和膨胀位移曲线,并对比实验结果。

当观测点处圆筒壁位移($R-R_0$)为 6、12.5、19 及 25 mm 时的比动能 E_{cu} 与实验结果相对误差大于 5%,或速度曲线首跳峰值(圆筒膨胀不稳定期)与实验误差大于 15%[4]时,调整 R_1、R_2,由式(3)可重新获得一组 A、B、C 值,重复数值模拟。调整的原则是,增大 R_1 和减小 R_2 均可增大对应点的比动能,R_1 主要影响膨胀高压段($\bar{V}\sim2\bar{V}$)、R_2 主要影响中压段($2\bar{V}\sim5\bar{V}$)。圆筒比动能 E_{cu} 计算公式为:

$$E_{cu}=\frac{1}{2}v_r^2 \tag{7}$$

若数值模拟的结果在($R-R_0$)为 19 mm 的比动能与实验结果基本一致,但($R-R_0$)为 6、12.5 及 25 mm 时比动能偏离过大,则适当调整 ω 值,再调整 R_1、R_2。ω 越大,速度曲线越陡峭。最终得到满足误差要求的 JWL 方程参数。

3 方法的应用

为验证本文确定方法的可靠性,应用文献[10]中的典型 RDX 基炸药圆筒实验数据进行 JWL 方程参数的确定。为检验本文中 JWL 参数确定方法的适用性,应用已知的圆筒实验结果确定典型 HMX 基炸药 JWL 参数。

3.1 典型 RDX 基炸药

应用本文方法,典型 RDX 基炸药的 JWL 方程参数分别为:$\rho_0=1.65$ g/cm^3,$A=937.29$ GPa,$B=16.279$ GPa,$R_1=5.2$,$R_2=1.0$,$\omega=0.43$,$E_0=8.5$ J/mm^3。

经式(3)得到爆速 D_c、爆压 p_c 和爆热 Q_c 分别为:$D_c=8.19$ km/s,$\gamma_c=3.0$,$p_c=27.67$ GPa,$Q_c=5.152$ kJ/g,与炸药实际参数严格封闭。

表 1 数值模拟与实验结果对比

Table 1 Results of experiment and simulation

($R-R_0$)/mm	$\bar{V}$	v_r/(km·s^{-1})				δ_{v_r}/%		
		实验	文献[10]	本文 1	本文 2	文献[10]	本文 1	本文 2
首跳	—	—	1.150	0.816	0.812	—	—	—
5	2.2	1.454	1.498	1.471	1.482	3.01	1.17	1.93
19	6.5	1.760	1.771	1.762	1.767	0.63	0.11	0.40
($R-R_0$)/mm	$\bar{V}$	E_{cu}/(kJ·kg^{-1})				$\delta_{E_{cu}}$/%		
		实验	文献[10]	本文 1	本文 2	文献[10]	本文 1	本文 2
首跳	—	—	66	33	33	—	—	—
5	2.2	106	112	108	110	5.66	1.89	3.77
19	6.5	155	157	155	156	1.29	0	0.65

表 1 为采用两套参数进行数值模拟获得的圆筒壁速度及比动能，其中为验证 JWL 参数对于不同计算程序的适用性，分别使用 LS-DYNA(本文 1)和 AUTODYN(本文 2)程序进行计算。图 7 为圆筒壁速度曲线和膨胀位移曲线。

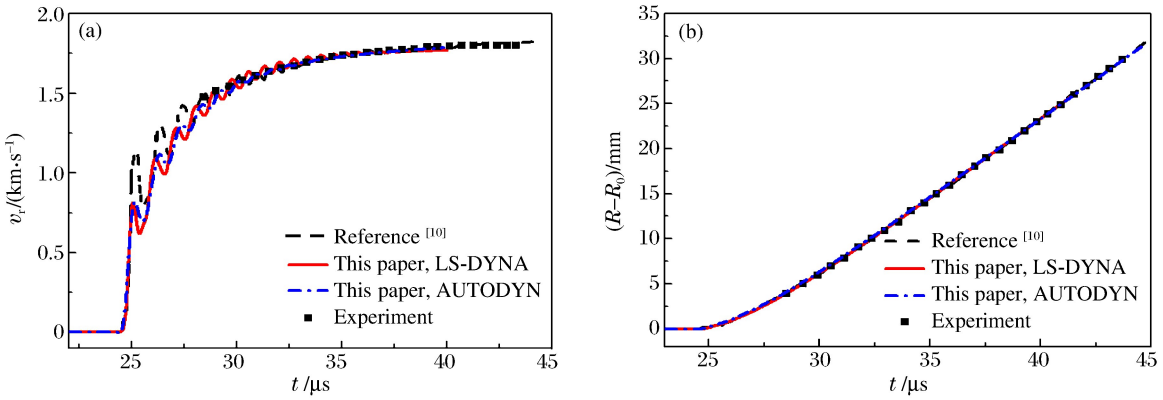

图 7　数值模拟与实验结果曲线

Fig. 7　Curves of simulation and experiment

由表 1 和图 7(a)，应用本文方法获得的参数的数值模拟结果与实验结果更接近，不同确定方法获得的参数主要影响圆筒数值模拟的初期膨胀，对比图 3(文献[10]参数)与图 8(本文方法参数)可知，爆轰波以大于炸药 CJ 爆压状态进行传播时会对圆筒壁初期膨胀产生更大的速度跳动。图 8 中模拟爆压小于 p_{CJ}的原因是数值模拟中不能计算出 $\bar{V}<1$ 时的 CJ 态爆压，本文方法获得的 JWL 参数进行数值模拟结果稳定合理，并且应用与不同计算程序获得的计算结果一致性好。

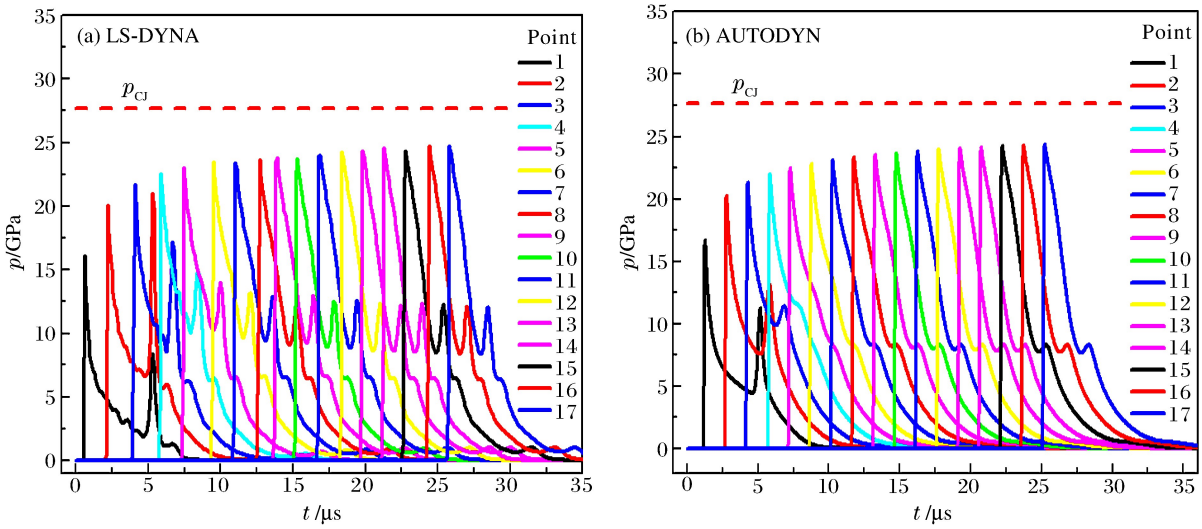

图 8　应用本文 JWL 参数的圆筒压力曲线

Fig. 8　Pressure curves of different gauge point by using new JWL parameters

3.2　典型 HMX 基炸药

已知某典型 HMX 基炸药密度为 1.831 g/cm^3，爆速为 8 740 m/s，此外仅有 25 mm 圆筒实验测试点处的圆筒壁速度和膨胀位移曲线。应用本文方法获得的 JWL 参数分别为：$\rho_0=1.831$ g/cm^3，$A=888.88$ GPa，$B=19.854$ GPa，$R_1=4.69$，$R_2=1.30$，$\omega=0.28$，$E_0=10$ J/mm^3，$D_c=8.740$ km/s，$\gamma_c=2.885$，$p_c=36.0$ GPa，$Q_c=5.461$ kJ/g，经式(3)得到的 D_c与炸药实际参数严格封闭。

表 2 为应用 LS-DYNA 和 AUTODYN 软件进行数值模拟计算的结果，与实验测试结果一致性好，均满足误差要求，获得的 JWL 参数合理可靠，这证明了本文方法确定炸药 JWL 参数的可靠性。

表 2 数值模拟与实验结果对比

Table 2 Results of experiment and simulation

$(R-R_0)$ /mm	$\bar{V}$	$v_r/(\mathrm{km\cdot s^{-1}})$			$\delta_{v_r}/\%$	
		实验	本文 1	本文 2	本文 1	本文 2
首跳	—	0.882	1.001	0.998	13.49	13.15
6	2.2	1.598	1.588	1.562	−0.63	−2.25
12.5	4.1	1.703	1.720	1.696	1.00	−0.41
19	6.5	1.762	1.756	1.760	−0.34	−0.11
25	9.0	1.783	1.784	1.786	0.06	0.17
$(R-R_0)$ /mm	$\bar{V}$	$E_{cu}/(\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}})$			$\delta_{E_{cu}}/\%$	
		实验	本文 1	本文 2	本文 1	本文 2
首跳	—	389	501	498	28.79	28.02
6	2.2	1 277	1 261	1 220	−1.25	−4.46
12.5	4.1	1 450	1 479	1 438	2.00	−0.83
19	6.5	1 552	1 542	1 549	−0.64	−0.19
25	9.0	1 590	1 591	1 595	0.06	0.31

4 结 论

通过研究典型炸药 JWL 参数对数值模拟结果的影响，分析了 JWL 参数与爆轰参数封闭的重要性；建立了一套可操作的理想爆轰的炸药 JWL 状态方程参数确定方法，该方法利用圆筒实验确定了爆轰产物绝热等熵指数和爆压，同时增加了爆轰产物 CJ 态约束守恒判断，获得的炸药 JWL 参数与爆轰参数严格封闭；应用圆筒实验结果，采用本文参数确定方法获得了 RDX 基及 HMX 基典型炸药 JWL 状态方程参数，所得参数与炸药爆轰参数严格封闭，圆筒数值模拟结果与实验一致性好。本文的炸药 JWL 参数确定方法比现有的“试错法”更准确地描述炸药爆轰及驱做功能力。此方法可为快速准确确定炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数提供参考。

参考文献：

[1] 奥尔连科. 爆炸物理学[M]. 孙承纬，译. 北京：科学出版社，2011：118-122.

[2] 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，2001，24(3)：13-15.
Chen Lang, Feng Chang-gen, Huang Yi-min. The cylinder test and JWL equation of state detonation product of aluminized explosives[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2001,24(3):13-15.

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

[4] Souers P C, Wu B, Haselman L C. Detonation equation of state at LLNL[R]. CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1996.

[5] Dobratz B M, Crawford P C. LLNL explosives handbook[R]. CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1985.

[6] 叶早发，刘汉彬，朱光馨，等. 利用 DYNA 程式进行 JWL 状态方程式之参数计算[J]. 火药技术，2004，20(1)：35-48.

[7] GJB 772A-97 标准圆筒试验法[S]. 1997.

[8] 陈清畴，蒋小华，李敏，等. HNS-IV 炸药 JWL 状态方程研究[J]. 火工品，2010(4)：21-24.

[9] 孙占峰，徐辉，李庆忠，等. 钝感高能炸药爆轰产物 JWL 状态方程再研究[J]. 高压物理学报，2010，24(1)：55-60.
Sun Zhan-feng, Xu Hui, LI Qing-zhong, et al. Further study on JWL equation of state of detonation product for insensitive high explosive[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010,24(1):55-60.

[10] 陈清畴，蒋小华，李敏，等. RDX 基高聚物粘结炸药 JWL 状态方程[J]. 含能材料，2011，19(2)：213-216.

Chen Qing-chou, Jiang Xiao-hua, Li Min, et al. JWL equation of state for RDX-based PBX[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011,19(2):213-216.

[11] 于川，刘文翰，李良忠，等. RHT-902 和 Octol 炸药爆轰产物 JWL 状态方程研究[J]. 爆炸与冲击，1993，13(2)：172-177.
Yu Chuan, Liu Wen-han, Li Liang-zhong, et al. Studies on the JWL equation of state of detonation products for RHT-902 and Octol[J]. Explosion and Shock Waves, 1993,13(2)172-177.

[12] Lee E L, Hornig H C, Kury J W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products[R]. CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1968.

[13] 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.

[14] 爆炸及其作用[M]. 北京：科学出版社，2011：130-131.

[15] 孙承纬，卫玉章，周志奎. 应用爆轰物理[M]. 北京：国防工业出版社，2000：295-296.

One parameter-obtained method for JWL equation of state considered detonation parameters

Nan Yu-xiang, Jiang Jian-wei, Wang Shu-you, Men Jian-bing

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology*, *Beijing Institute of Technology*, *Beijing* 100081, *China*)

Abstract: In this paper, the method of obtaining parameters for JWL equation of state is investigated. The importance of JWL parameters considered detonation parameters is analyzed using simulation and theoretical calculation. Isentropic adiabatic index and detonation pressure of detonation product are calculated according to cylinder test. The methodology process for obtaining JWL parameters of ideal detonation product considered detonation parameters is established. The JWL parameters of two typical explosive are obtained with the application of this method according to published cylinder experimental result. The results of numerical simulation agree with the cylinder test so that the JWL parameters are reasonable and reliable.

Key words: mechanics of explosion; parameter-obtained; self-closing constraint; JWL equation of state; cylinder experiment

（责任编辑　丁　峰）