

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.01.006

基于 ANSYS/LS-DYNA 的工业炸药 材料参数标定方法*

王鑫,张昌锁

(太原理工大学 矿业工程学院,太原 030024)

摘要: 在岩石爆破数值模拟研究中,需要准确描述爆轰产物膨胀做功过程,快速准确地确定 JWL 状态方程参数十分重要。采用了理论计算与数值模拟相结合的方法,提出一种基于 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件的工业炸药材料参数标定方法。以工程中常见的 2# 岩石乳化炸药为例,根据炸药产品说明书上的密度及爆速,应用一种简便算法计算得到 JWL 状态方程未知参数。在此基础上,对铅柱压缩实验、铅铸扩孔实验进行数值模拟,通过两种不同的实验检验计算参数的准确性。采用正交试验的方法研究了 JWL 状态方程中的 4 个重要参数 A 、 B 、 R_1 、 R_2 变化对于数值模拟结果的影响,确定了以爆力、猛度指标为标准的计算参数修正方法。参数修正后,数值模拟结果与现场实验结果误差不超过 5%,说明标定方法可行。

关键词: 工业炸药; JWL 状态方程; LS-DYNA; 数值模拟

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)01-0036-07

Parameter Calibration Method of Industrial Explosive Material based on ANSYS/LS-DYNA

WANG Xin, ZHANG Chang-suo

(School of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In the numerical simulation of rock blasting, it is very important to accurately describe the work process of expanding detonation products and to determine the parameters of JWL equation of state (Eos) quickly and accurately. A parameter calibration method of industrial explosive material is proposed which is based on ANSYS/LS-DYNA finite element software by combining theoretical calculation with numerical simulation. Taking 2# rock emulsion explosive as an example, which is common in engineering, the unknown parameters of the JWL Equation of State (Eos) were calculated by a simple algorithm according to the density and detonation velocity explosive product manual. On this basis, the numerical simulation of lead column compression experiment and lead casting reaming experiment was carried out, and the accuracy of the calculation parameters was verified by two different experiments. The influence of the changes of four important parameters A , B , R_1 and R_2 in JWL equation of state (EOS) on the results of numerical simulation was studied by means of orthogonal tests. After the parameter correction, the error between numerical simulation results and field experiment results was less than 5%, indicating that the calibration method was feasible.

Key words: industrial explosive; JWL EOS; LS-DYNA; numerical simulation

收稿日期:2021-09-19

作者简介:王鑫(1998-),男,硕士研究生,从事工程爆破研究,
(E-mail)1208808569@qq.com。

通讯作者:张昌锁(1968-),男,博士、教授、博导,从事工程爆破研究、岩土工程(E-mail)1208808569@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金(50774054)

在岩石爆破中,岩石的破坏主要是由于炸药的爆轰作用形成的应力波破坏及爆生气体的准静态作用产生破坏。其中大部分岩石破坏是因为爆生气体渗入裂缝产生的“气楔”作用^[1]。因此在数值模拟

研究中,较为准确地描述爆轰产物的膨胀做工过程是为岩土爆破设计及优化提供理论指导的关键。

JWL 状态方程能够比较地准确描述爆轰产物的膨胀过程中状态参数的变化,不含化学反应,在工程设计中应用较广^[2]。JWL 状态方程是一种通过试验与计算相结合的半经验状态方程^[3],未知参数由标准圆筒试验法确定^[4]。JWL 状态方程参数的获得较为繁琐,需要进行不断调整,并且圆筒试验中圆筒很快就会破裂,对于中后期的气体膨胀过程描述不够准确^[5]。因此很多学者常利用数值计算与数值模拟结合的方法来确定未知参数。王成利用基因遗传算法根据 CJ 条件和 Hugoniot 关系式对炸药爆轰产物 γ 律状态方程对 P-V 曲线进行拟合^[6],得到 JWL 状态方程参数,并利用数值模拟证明了方法的合理性。王言金利用贝叶斯分析方法研究了炸药的不确定参数^[7],并对状态方程进行了贝叶斯参数标定,利用标定参数对平面爆轰驱动飞片试验进行了数值模拟并取得了良好的结果。沈飞等利用圆筒中实验中能量守恒关系及圆筒壁特征位置膨胀速度经验计算公式^[8],建立了一种确定 JWL 状态方程参数的简便算法,确定了四种常用炸药的 JWL 状态方程参数,具有良好的拟合效果。李科斌利用水下爆炸实验法结合实验结果^[9],利用 Autodyna 程序测定了铵油炸药的 JWL 状态方程参数。目前,状态方程参数标定只能通过少数实验:圆筒膨胀实验、水下爆炸实验、爆轰驱动平板实验及地面挂高爆轰实验,且一种实验标定的状态方程不能用另一种实验来验证。很少文献通过两种不同的爆轰实验来验证参数的准确性,对于 JWL 状态方程参数调整没有依据。工程爆破中对于炸药要求具有一定的猛度、爆力,但在大多数爆破设计数值模拟过程中,缺少对于炸药材料爆力、猛度指标的验证。

本文基于 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件,针对工程中常用的 CHNO 型炸药,使用一种简便算法得出 JWL 状态方程的未知参数,将该参数作为原始参数。以工业炸药的爆力、猛度性能指标为标准,对铅柱压缩试验、铅铸冲孔试验进行数值模拟,通过两种不同的实验来检验计算参数的准确性并根据数值实验结果对于计算参数进行调整修正。为岩石爆破数值模拟研究提供一种快速确定工业炸药参数的方法。

1 JWL 状态方程参数计算

JWL 状态方程的标准形式及等熵形式为^[10]

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

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

式中: P 爆轰产物压力; V 为爆轰产物的相对体积; E 为爆轰产物单位体积的内能。式中共有 A 、 B 、 C 、 R_1 、 R_2 、 ω 六个未知参数。

炸药在爆轰的过程中满足 CJ 爆轰条件,可以得到一组方程式,代表 CJ 爆轰条件对于 JWL 状态方程中未知参数的约束

$$A R_1 e^{-R_1 V_{CJ}} + B R_2 e^{-R_2 V_{CJ}} + C (\omega + 1) V_{CJ}^{-(\omega+2)} = \rho_0 D^2 \quad (3)$$

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

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

式中: V_{CJ} 是 CJ 点处爆轰产物的相对体积; ρ_0 是炸药的初始密度; D 是炸药的爆速; P_{CJ} 是 CJ 点处的爆轰产物压力; E_{CJ} 为 CJ 点的爆轰产物的内能。

对于凝聚态炸药,在 CJ 点处有

$$E_{CJ} = E_0 + \frac{1}{2} P_{CJ} (1 - V_{CJ}) \quad (6)$$

$$P_{CJ} = \frac{1}{r + 1} \rho_0 D^2 \quad (7)$$

$$V_{CJ} = \frac{\rho_0}{\rho_{0J}} = \frac{r}{r + 1} \quad (8)$$

式中: ρ_J 为 CJ 点处爆轰产物的密度; r 是爆轰产物的多方指数,与炸药性质有关,对于高密度的凝聚态炸药 r 通常取 3^[11]。文献[12]提出一种适用于混合炸药的经验公式,具体形式如下

$$r = \frac{(1.01 + 1.313\rho_0)^2}{1.558\rho_0} - 1 \quad (9)$$

将式(6)、(7)、(8)分别带入到式(3)、(4)、(5)中,便可以得到未知参数 A 、 B 、 C 、 R_1 、 R_2 、 ω 同炸药密度 ρ_0 和爆速 D 之间的关系。

根据大量实验证明, R_1 、 R_2 、 ω 并非是相互独立的变量, R_1 、 R_2 、 ω 的取值范围分别为[4,7]、[0.8,2]、[0,1]^[13]。此外根据文献[14]对于 CHNO 型炸药, ω 一般取 0.33,且 R_1 与 R_2 有类线性关系, $R_2 = 0.27R_1$,所以仅需要在[4,7]的范围内选取 R_1 的值便可以对 A 、 B 、 C 进行求解。

得到一组未知参数 A 、 B 、 C 的解之后就需要对于解的正确性进行判断。选择标准圆筒试验中爆轰产物比容为 2.4 和 7.0 的函数值是否接近于零来判断解是否符合要求。

$$f(v) = \frac{A}{R_1} e^{-R_1 v} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 v} + \frac{C}{\omega v^{-\omega}} + \frac{1}{2} u^2 \left[\rho_m \left(\frac{r_{e0}^2}{r_{a0}^2} - 1 \right) + \frac{1}{2} \rho_0 \right] - E_0 \quad (10)$$

式中: u 为圆筒特征处的速度值; ρ_m 为圆筒材料的密度; $\rho_m = 8.93 \text{ g/cm}^3$; r_{i0} 和 r_{e0} 分别为圆筒的初始内外径, $r_{i0} = 12.7 \text{ mm}$, $r_{e0} = 15.2 \text{ mm}$; E_0 是能量计算中的一个基准值, 对于大多数的凝聚态炸药根据文献[15], 有

$$E_0 = (0.204 - 0.0734\rho_0)\rho_0 D^2 \quad (11)$$

对于特征处的速度值, 文献[8]提出一种较为准确的经验计算公式

$$u_{v=2.4} = \frac{0.3594\rho_0^{0.9} D}{1 + 1.3\rho_0} \quad (12)$$

$$u_{v=7.0} = \frac{0.4263\rho_0^{0.8} D}{1 + 1.3\rho_0} \quad (13)$$

计算程序图如图1所示, ϵ 为极小正实数。

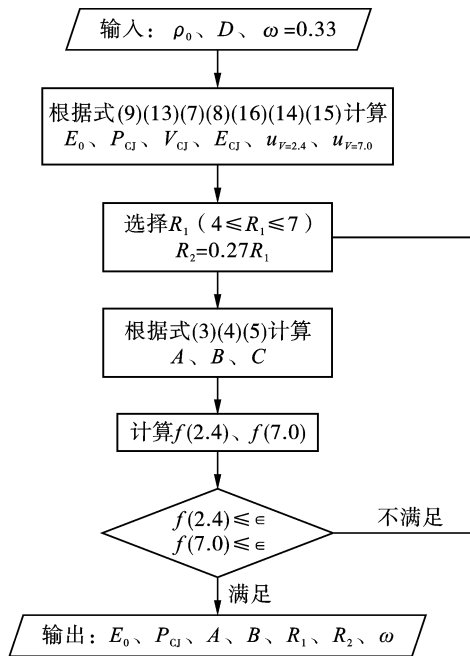


图1 计算程序图

Fig. 1 Computational Diagram

表2 2#岩石乳化炸药材料计算参数

Table 2 Material calculation parameters of 2 # rock emulsion explosive

$\rho_0/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	P/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	V_0	E_0/GPa
1.00	4200	5.73	236	0.198	4.47	1.2	0.33	1.0	4.29

表3 铅材料参数

Table 3 Lead material parameter

$\rho_0/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	E/GPa	A/GPa	B/GPa	n	C	m	T_m/K	T_r/K	γ_0	C_0	S_1
11.34	17	0.265	0.426	0.34	0.2051	1.0	760	298	2.77	3.772	0.785

2.2 数值模型建立

2.2.1 铅柱压缩实验

铅柱压缩法, 是测定炸药猛度的一种方法。在钢板中央放置 $\phi 40 \times 60 \text{ mm}$ 的铅柱, 铅柱上放置

2 数值模拟

2.1 材料参数选取

采用关键字 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 和关键字 * EOS-JWL 来描述炸药材料及爆轰产物的状态方程。对于2#岩石乳化炸药, 产品说明书主要性能指标如表1所示。采用上文中的计算方法, 利用 MATLAB 软件编写计算程序, 计算 JWL 参数, 得到的材料参数如表2所示。

铅采用 Johnson-cook 本构模型及 Gruneisen 状态方程描述, 其具体形式如下

$$\sigma = (A + B\bar{\epsilon}^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \left[1 + \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (14)$$

式中: $\bar{\epsilon}^n$ 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^*$ 为等效塑性应变率; T_m 为熔化温度; T_r 为环境温度, 其余参数均与材料性质有关。

$$p = \frac{\rho_0 C_0^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \quad (15)$$

式中: $\mu = \rho/\rho_0 - 1$; α 为 γ_0 的体积修正系数; C_0, S_i, γ_0 为状态方程中的常数。具体参数值见表3所示。

表1 2#岩石乳化炸药主要性能指标

Table 1 Main performance index of 2 # rock emulsion explosive

密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	殉爆距离/cm	爆速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	猛度/mm	爆力/mL
0.95 ~ 1.30	≥ 5	≥ 4200	≥ 16	≥ 280

$\phi 41 \times 10 \text{ mm}$ 圆钢板, 钢板上放 50 g 炸药, 包装成直径 $d = 40 \text{ mm}$ 纸筒, 放入雷管, 把药筒与钢板固定好。引爆后, 铅柱压缩的高度, 用 mm 表示的值称为该炸药的猛度^[16]。为了保证计算的准确性, 采用同

试验参数相同的设置。利用 ANSYS 软件前处理建立三维计算模型,采用 1/4 建模,模型尺寸为:铅柱 $\phi 40 \times 60 \text{ mm}$,钢板 $\phi 41 \times 10 \text{ mm}$,炸药 $\phi 40 \times 30 \text{ mm}$,装药量为 50 g。采用多物质流固耦合(ALE)算法进行模拟,空气部分 $\phi 60 \times 100 \text{ mm}$,划分网格采用均匀网格划分,网格大小为 1 mm,单元总数为 262080。起爆位置为装药中心,数值模型如图 2 所示。

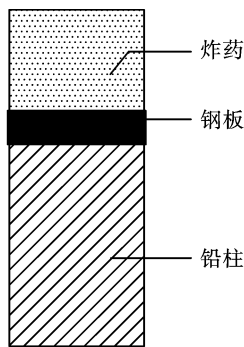


图 2 铅柱压缩计算模型图

Fig. 2 Calculation model diagram of lead column compression

2.2.2 铅铸扩孔实验

铅铸扩孔实验是测定炸药做功能力的一种方法。系将 10 g 炸药置于圆柱形铅铸中央的孔中(铅铸直径及高均为 200 mm,孔径 25 mm,深 125 mm,用细石英砂填充到孔口。引爆炸药后,爆轰产物将孔扩张为梨形,测量孔的扩张体积,以此衡量炸药的做功能力^[17]。为了保证计算的准确性,采用同试验参数相同的设置。利用 ANSYS 软件前处理建立三

维计算模型,采用 1/4 建模,模型尺寸为:铅铸 $\phi 200 \times 200 \text{ mm}$,孔径为 25 mm,孔深为 125 mm,炸药装药高度为 20 mm,装药量为 10 g。采用多物质流固耦合(ALE)算法进行模拟,空气单元设置底部大小与模型等大,高度为模型高度的 1.5 倍,划分网格采用均匀网格划分,网格大小为 2 mm,单元总数为 136540。起爆位置为装药中心,数值模型如图 3 所示。

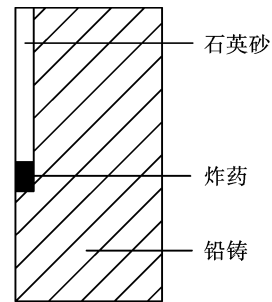


图 3 铅铸扩孔模型图

Fig. 3 Explosion power test model

2.3 数值模拟结果

2.3.1 铅柱压缩实验模拟结果

利用后处理软件 LS-PrePost 对于数值模型进行轴对称处理,铅柱压缩过程的变形云图,如图 4 所示。在炸药起爆后,爆轰波从装药中心向四周扩散。冲击波压力通过钢板传递到铅柱的上表面,铅柱开始压缩。当压力达到铅柱材料的屈服强度后,铅柱塑性变形急剧增长,由于刚性地面的作用,压力无法传递,铅柱上表面出现扩散状变形。随着压缩的进行,铅柱上表面逐渐出现“蘑菇状”卷曲。

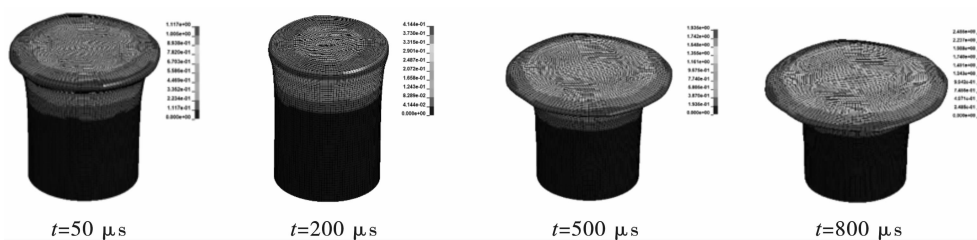


图 4 铅柱压缩过程变形云图

Fig. 4 Deformation cloud image of lead column during compression

在整个铅柱压缩过程中,钢板的变形量极小,因此在钢板的不同位置取点,记录钢板 z 方向上的位移量作为铅柱压缩量,绘制铅柱压缩量-时间曲线如图 5 所示。对应测点的 z 方向上测点的速度-时间曲线如图 6 所示。

炸药起爆后,铅柱在 40 μs 左右达到了最大压缩速度,之后随着时间的增长压缩速度逐渐减小,并在 800 μs 时接近于 0,800 μs 之后铅柱的压缩量基

本不再变化,认为铅柱压缩过程完成。

2.3.2 铅铸扩孔试验模拟结果

利用后处理软件 LS-PrePost 对于数值模型进行轴对称处理,观察铅铸扩孔过程,其变形云图如图 7 所示。随着炸药的起爆,爆生气体迅速膨胀,以近似球面的形式作用于铅铸孔壁以及堵塞材料上,早期爆腔的形状基本为球形。随着爆生气体的膨胀,爆生气体的压力也在不断减小,爆腔的扩张速度也逐

渐减慢。铅铸底部为刚性地面,且石英砂堵塞装填密度较低,铅铸内孔逐渐被扩张为梨形,上表面内孔边缘出现了一定尺寸的凸起。

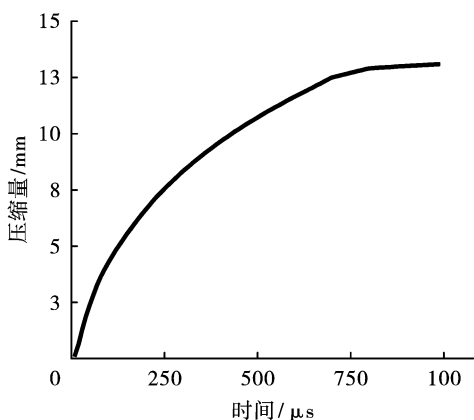


图 5 压缩量-时间曲线图
Fig. 5 Compression-time graph

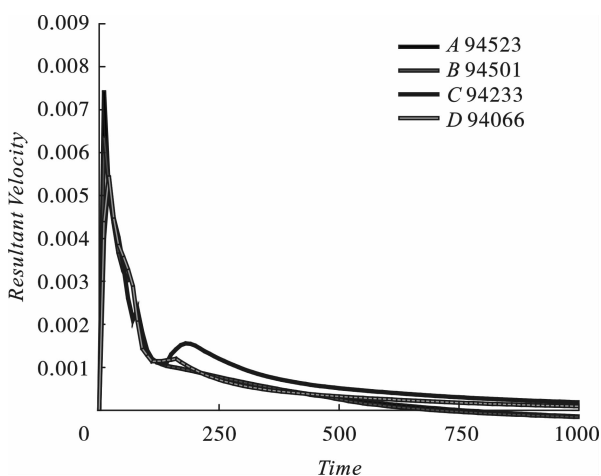


图 6 测点速度-时间曲线图
Fig. 6 Velocity-time curve of measuring point

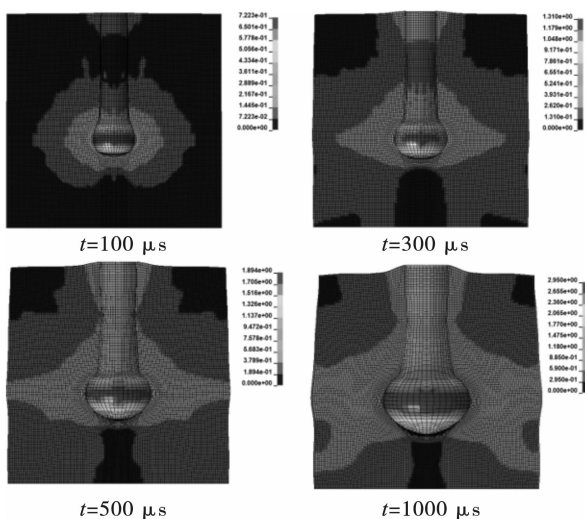


图 7 铅铸扩孔过程变形云图
Fig. 7 Explosion power test deformation nephogram

铅铸扩孔数值模拟的结果,由于后处理软件 LS-PrePost 无法对于扩孔空腔进行直接的体积测量,所以对数值实验结果进行二次处理。利用 LS-PrePost 对于铅铸扩孔结果模型沿着不同径向进行切分,输出扩孔空腔边缘各节点坐标,利用 AN-SYS 前处理软件,对于空腔进行重建,生成 K 文件,利用 LS-PrePost 测量重建空腔模型的体积。测量不同时间的空腔体积绘制空腔体积-时间曲线如图 8 所示。取空腔边缘具有代表性的测点,绘制速度-时间曲线图如图 9 所示。空腔体积的增长速度在随着时间的推移逐渐减小。在 1000 μs 左右,空腔体积基本上不再变化,扩孔过程基本完成。

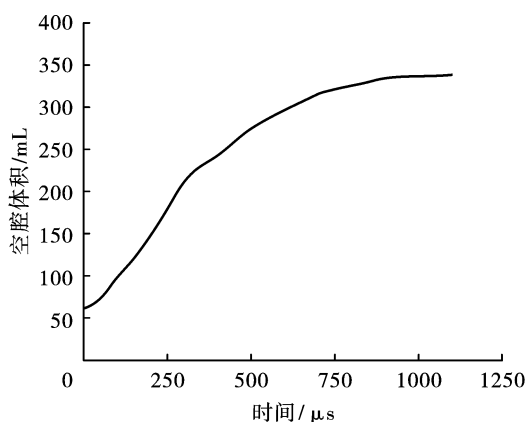


图 8 空腔体积-时间曲线
Fig. 8 Cavity volume-time curve

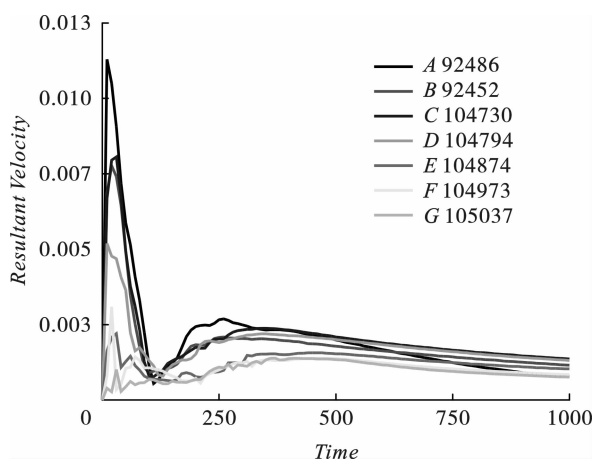


图 9 测点速度-时间曲线图
Fig. 9 Velocity-time curve of measuring point

3 数值模拟结果分析

对于不同方向上测得的空腔体积求平均值,得到铅铸扩孔数值实验的结果,测得的铅铸扩孔体积为 335.053 mL。铅铸扩孔实验测得的炸药爆力值按下式计算

$$X = (V_2 - V_1)(1 + K) - 22 \quad (16)$$

式中: X 为炸药的爆力值, mL; V_1 为起爆前铅铸内孔的体积, mL; V_2 为起爆后铅铸扩孔空腔的体积, mL; K 为温度修正系数, 实验室温为 20℃, $K = -2\%$ 。

按照 2#岩石乳化炸药说明书爆力值 280 mL, 代入式(16)中计算得, 起爆后铅铸扩孔空腔的体积为 369.51 mL, 数值模拟结果的误差为 9.3%, 满足要求。

对于铅柱压缩数值模拟结果, 铅柱压缩量可以直接通过测量钢板位移量来确定。经过测量, 铅柱压缩量为 13.08 mm。按照 2#岩石乳化炸药说明书

压缩量 16 mm 计算, 数值模拟实验结果的误差为 18.25%, 超过了 15%, 误差较大, 所以需要对参数进行修正。

$$P_s = Ae^{-R_1V} + Be^{-R_2V} + CV^{-(\omega+1)} \quad (17)$$

在 JWL 状态方程中, 第一项控制高压段, 第二项控制中压段, R_1 、 A 为高压段控制参数, R_2 、 B 为中压段控制参数。以计算的得到的 2#岩石乳化炸药 JWL 状态方程参数为原始参数集, 控制其他参数不变, 将 A 、 B 、 R_1 、 R_2 作为因素, 设置三个水平, 进行正交试验, 对这四个参数进行敏感性分析并确定相应的参数调整方向, 正交试验表及结果如表 4 所示。

表 4 正交试验表及结果

Table 4 Orthogonal numerical test scheme and results

	A /GPa	B /GPa	R_1	R_2	空腔体积/ mL	误差/%	压缩量/ mm	误差/%
1	236.0	0.1980	4.47	1.20	335.053	9.3	13.08	18.25
2	236.0	0.2178	4.67	1.32	314.650	14.8	11.10	30.60
3	236.0	0.1782	4.27	1.08	355.488	3.7	15.05	5.90
4	259.6	0.1980	4.67	1.08	325.558	11.9	12.30	23.10
5	259.6	0.2178	4.27	1.20	396.115	7.2	15.20	5.00
6	259.6	0.1782	4.47	1.32	367.741	0.4	14.30	10.60
7	212.4	0.1980	4.27	1.32	364.025	1.4	14.40	10.00
8	212.4	0.2178	4.47	1.08	318.943	13.6	12.40	22.50
9	212.4	0.1782	4.67	1.20	286.733	22.4	10.00	37.50

对正交试验结果进行方差分析(F 检验), 以起爆后空腔体积表征爆力, 铅柱压缩量表征猛度。试验因素及误差的自由度分别为 2 和 6, 当显著性水平分别为 $\alpha = 0.05$ 、 $\alpha = 0.01$ 时, 查表可知 F 临界值为 5.140、10.90; 计算得出试验因素的 F 比如表 5 所示。

表 5 试验因素 F 值表

Table 5 Test factor F value

因素	A	B	R_1	R_2
爆力	2.558	0.071	6.022	0.371
猛度	2.572	0.122	13.093	0.307

当试验因素值小于 10.90, 大于 5.140 时, 认为该因素对于结果影响比较显著; 当试验因素 F 值大于 10.90 时, 认为该因素对于结果影响十分显著; 并且 F 值越大表明对于结果的影响也就越显著。通过表 4、5 分析 JWL 状态方程中的四个参数变化对于结果的影响:

(1) 爆力对于参数 R_1 的变化较为敏感, 并且扩孔空腔体积随着参数 R_1 的减小而增大; 对于剩余的三个参数敏感性 $A > R_2 > B$, 铅铸扩孔空腔体积分

别随着参数 A 、 B 、 R_2 的增大而增大。

(2) 猛度对于参数 R_1 的变化极为敏感, 并且压缩量随着参数 R_1 的减小而增大; 对于剩余的三个参数敏感性 $A > R_2 > B$, 压缩量分别随着参数 A 、 B 、 R_2 的增大而增大。

(3) 猛度对于参数 R_1 的敏感性明显强于爆力。

猛度表征炸药对于接触介质的破坏能力, 反映的是炸药瞬间爆轰释放的能量, 主要受爆速及爆轰压力影响。但从正交试验结果来看, 猛度也与爆生气体作用有关, 体现在猛度对与 JWL 状态方程高压段参数 R_1 、 A 的敏感性上。相较于猛度, 爆力对 JWL 状态方程高压段参数 R_1 、 A 的敏感性较弱, 因为爆力反映的是爆生气体膨胀做功的能力, 受爆生气体整个膨胀过程的影响。爆生气体作用时间较长, 受 JWL 状态方程参数 A 、 B 、 R_1 、 R_2 的协同作用影响。

对于炸药材料参数的修正, 主要修正 JWL 状态方程中的四个参数 A 、 B 、 R_1 、 R_2 , 其余参数的计算公式经过前人大量的验证大多误差不超过 3%。对于 A 、 B 、 R_1 、 R_2 的修正, 结合爆力、猛度对于参数的变化关系, 先匹配猛度值, 率先确定 R_1 、 A , 再匹配爆力,

确定 R_2 、 B 的值。必要时可采用插值的方法,将爆力、猛度结果误差控制在 5% 以内。

修正后的 2# 岩石乳化炸药材料参数如表 6 所示。

表 6 修正后 2# 岩石炸药材料参数

Table 6 Modified material parameters of 2 # rock explosive

$\rho_0/(g \cdot cm^{-3})$	$D/(m \cdot s^{-1})$	P/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	V_0	E_0/GPa
1.30	4200	5.73	236	0.198	4.47	1.2	0.33	1.0	4.29

4 结论

(1) 以工业炸药产品说明书上的爆速、密度作为已知参数,以 2# 岩石乳化炸药为例,采用一种简便算法直接计算得出了 JWL 状态方程未知参数。

(2) 利用计算得到的 2# 岩石乳化炸药的 JWL 状态方程未知参数,进行铅柱压缩数值模拟和铅铸扩孔数值模拟,两种实验基本模拟出了现场试验的结果形状,对计算参数进行修正后,数值模拟结果的相对误差大大减小。

(3) 分析了爆力及猛度对 JWL 状态方程中的四个主要参数 A 、 B 、 R_1 、 R_2 的敏感性, $R_1 > A > R_2 > B$, 确定了工业炸药爆力及猛度关于 JWL 状态方程未知参数的变化关系及计算参数修正方法。为复杂组分炸药、含添加剂炸药及新型炸药的 JWL 状态方程参数的拟合提供了理论依据及参考指导。

参考文献 (References)

- [1] 王雁冰. 爆炸的动静作用破岩与动态裂纹扩展机理研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2016:4-15.
- [1] WANG Yan-bing. Study on the mechanism of rock crushing under dynamic-static effect in the explosion and dynamic crack propagation[D]. Beijing:China University of Mining & Technology, Beijing,2016:4-15. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] 王 辉. 炸药爆炸产物 JWL 状态方程参数数值计算 [D]. 西安:西安工业大学,2011:2-11.
- [3] WANG Hui. Numerical calculation of the JWL EOS parameters of explosive detonation products[D]. Xi'an:Xi'an Technological University,2011:2-11. (in Chinese)
- [4] 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,2008,84(2):160-166.
- [4] 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,2008,84(2):160-166. (in Chinese)
- [5] 孙承伟,卫玉章,周之奎. 应用爆轰物理[M]. 北京:国防工业出版社,2000.
- [6] 王 成,徐文龙,郭宇飞. 基于基因遗传算法和律状态方程的 JWL 状态方程参数计算[J]. 兵工学报,2017,38(S1):167-173.
- [6] WANG Cheng, XU Wen-long, GUO Yu-fei, Calculation of JWL equation of state parameters based on genetic algorithm and γ equation of state [J]. Acta Armamentarii, 2017,38(S1):167-173. (in Chinese)
- [7] 王言金,张树道,李 华,等. 炸药爆轰产物 Jones_Wilkins_Lee 状态方程不确定参数[J]. 物理学报,2016,65(10):245-250.
- [7] WANG Yan-Jin, ZHANG Shu-Dao, LI Hua, et al. Uncertain parameters of Jones-Wilkin-Lee equation of state for detonation products of explosive[J]. Acta Physica Sinica, 2016,65(10):245-250. (in Chinese)
- [8] 沈 飞,王 辉,袁建飞. 一种确定 JWL 状态方程参数的简易算法[J]. 振动与冲击,2014,33(9):107-110.
- [8] SHEN Fei, WANG Hui, YUAN Jian-fei. A simple method for determining parameters of JWL EOS[J]. Journal of Vibration and Shock,2014,33(9):107-110. (in Chinese)
- [9] 李科斌,董新龙,李晓杰,等. 水下爆炸实验法在工业炸药 JWL 状态方程测定中的应用研究[J]. 兵工学报,2020,41(3):488-494.
- [9] LI Ke-bin, DONG Xin-long, LI Xiao-jie, et al. Research on parameters determination of JWL EOS for commercial explosives based on underwater explosion test[J]. Acta Armamentarii,2020,41(3):488-494. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] 高尔新. 爆炸动力学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1997.
- [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.
- [12] 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. (in Chinese)