

炸药爆轰产物 Jones-Wilkins-Lee 状态方程不确定参数

王言金 张树道 李华 周海兵

Uncertain parameters of Jones-Wilkin-Lee equation of state for detonation products of explosive

Wang Yan-Jin Zhang Shu-Dao Li Hua Zhou Hai-Bing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 106401 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.106401

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.106401>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I10>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于 Thomas-Fermi-Kirzhnits 模型的物态方程研究

Study on equation of state based on Thomas-Fermi-Kirzhnits model

物理学报.2015, 64(15): 156401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.156401>

元胞方法与蒙特卡洛方法相结合的薄膜生长过程模拟

Cellular method combined with Monte Carlo method to simulate the thin film growth processes

物理学报.2015, 64(3): 038201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.038201>

结合实际刻蚀数据的离子刻蚀产额优化建模方法

An optimization method for ion etching yield modeling combined with factual etching data

物理学报.2014, 63(24): 248201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.248201>

基于刻蚀速率匹配的离子刻蚀产额优化建模方法

An optimization method for ion etching yield modeling based on etching velocity matching

物理学报.2014, 63(4): 048201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.048201>

基于压缩表示的离子刻蚀仿真三维表面演化方法

A 3D profile evolution method of ion etching simulation based on compression representation

物理学报.2013, 62(20): 208201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.208201>

# 炸药爆轰产物 Jones-Wilkins-Lee 状态方程 不确定参数\*

王言金<sup>†</sup> 张树道 李华 周海兵

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

(2016年2月1日收到; 2016年3月2日收到修改稿)

Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程是一种不显含化学反应、由实验方法确定参数的半经验状态方程, 能比较精确地描述爆轰产物的膨胀驱动做功过程. 在 JWL 状态方程中有多个未知(不确定)参数需要确定. 传统的确定 JWL 状态方程参数的方法是“调参数”, 人为因素影响较大, 无法给出参数的不确定性信息. 本文利用贝叶斯分析方法研究了炸药的不确定参数, 该方法能够基于以往的认识、实验和模拟数据标定(calibration)不确定参数. 在本文结果中, 不确定参数的后验分布均值与文献结果相符合, 基于参数标定结果的数值模拟 90% 置信区间完全包含实验数据. 数值标定结果说明贝叶斯参数标定适用于确定样品炸药的 JWL 状态方程参数. 特别是, 在本文 JWL 状态方程参数标定过程中极大地减少了人为因素的影响.

**关键词:** 炸药爆轰产物, Jones-Wilkins-Lee 状态方程, 不确定参数, 贝叶斯分析

**PACS:** 64.30.-t, 82.20.Wt, 83.85.Ns

**DOI:** 10.7498/aps.65.106401

## 1 引言

随着时代的进步, 炸药已被广泛应用于军事、航空、民用等不同领域. 在我国经济的飞速发展进程中, 炸药在国防科技和民用工程中也发挥着越来越重要的作用. 由于炸药的广泛应用, 随之而来的就是炸药装置设计的安全性和可靠性, 炸药点火、爆轰传播研究是其中的重要问题. 炸药爆轰产物状态方程是炸药做功能力的描述形式, 其研究对炸药装置设计及性能研究具有重要意义. 在众多爆轰产物状态方程的形式中, Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程<sup>[1,2]</sup>是一种不显含化学反应、由实验方法确定参数的半经验状态方程, 能比较精确地描述爆轰产物的膨胀驱动做功过程. 为了确定 JWL 状态方程参数, Kury 等<sup>[3]</sup>首先提出了应用标准圆筒实验确定其参数的方法, 这些炸药参数与炸药爆轰参数存在封闭性. 虽然后来《标准圆筒试验法》公布,

但没有形成操作性强的 JWL 状态方程参数确定方法. 目前大多还是利用“调参数”的传统做法确定参数, 也就是基于经验给出一组参数, 然后进行数值模拟, 基于数值模拟结果与实验数据的符合程度调整参数直至满足要求<sup>[4,5]</sup>. 显然这样做很难避免人为因素的干扰, 并且最后无法给出参数的概率统计信息. 另外有学者构造加权目标函数, 利用优化方法确定 JWL 状态方程系数<sup>[6]</sup>, 这样做很难把对炸药已有的认识耦合进去.

近年来, 人们发现贝叶斯方法用于估计建模与模拟中的参数往往有很好的效果. 尤为重要, 人们发现用以前的经验传统方法并不能有效地估计建模与模拟参数的时候, 贝叶斯方法常常能提供有力的帮助. Kennedy 和 O'Hagan<sup>[7]</sup>提出了基于贝叶斯方法的模型参数标定后, 越来越多的研究者关心基于贝叶斯方法的建模与模拟的模型参数标定研究. 基于贝叶斯方法的模型参数标定被用于确

\* 国家自然科学基金(批准号: 11371069, 11372052, 11472060)、北京应用物理与计算数学研究所所长基金(批准号: ZYSZ1518-13)和中国工程物理研究院科学技术发展基金(批准号: 2013A0101004)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: wang\_yanjin@iapcm.ac.cn

定模型参数.

本文针对钝感炸药JB-9014平面爆轰驱动飞片的实验开展爆轰产物的JWL状态方程不确定参数研究. JB-9014炸药是以TATB为主的钝感炸药, 与敏感炸药相比爆轰做功能力有所降低, 但因其具有突出的安全性能, 在先进武器设计中呈现出越来越重要的应用价值. 由于钝感高能炸药具有爆轰化学反应区较宽、CJ面后仍有可观放能等非理想爆轰特性, 因此对其爆轰性能的研究一直是国际爆轰学术领域的“热点”之一. 本文的实验数据来源于文献[8]. 实验装置如图1, 平面波透镜起爆JO-9159炸药, 进而起爆JB-9014主炸药, 驱动紫铜飞片. 实验测量的飞片自由面速度曲线如图2.

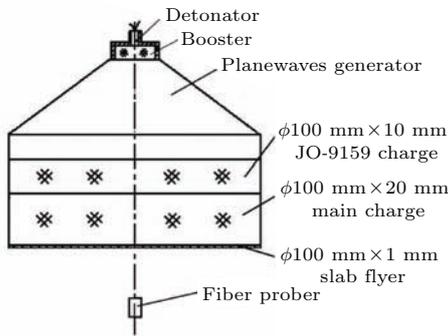


图1 爆轰驱动飞片实验装置图[8]

Fig. 1. Experimental diagram of flyer plate driven by detonation [8].

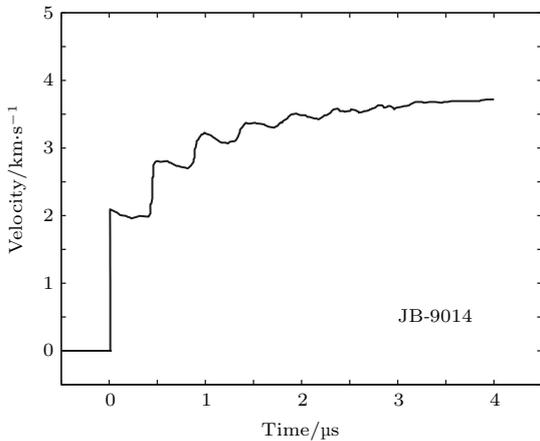


图2 飞片自由面速度实验测量曲线[8]

Fig. 2. The velocity curve of free surface of flyer plate [8].

本文主要讨论基于贝叶斯的模型参数标定方法, 给出了一个模型参数标定的基本框架. 我们利用自主研发的CHAP程序对爆轰驱动飞片实验进行数值模拟计算, 基于图2提供的实验数据对平面爆轰驱动飞片问题利用贝叶斯参数标定方法

研究了主炸药(JB-9014)的JWL状态方程的参数. JWL状态方程参数标定的后验分布均值与文献结果符合较好, 数值标定结果说明了贝叶斯参数标定方法能有效地确定JWL状态方程参数, 可以用于样品炸药的JWL状态方程参数的研究.

## 2 JWL状态方程

炸药的JWL状态方程等熵形式及其爆轰产物的JWL状态方程写成[2,9]

$$P_s = A \exp(-R_1 V) + B(\exp(-R_2 V)) + CV^{-(1+\omega)}, \quad (1)$$

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) \exp(-R_1 V) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E}{V}, \quad (2)$$

其中参数  $V = \rho_0/\rho$  为相对体积,  $E = \rho_0 e$  为初始体积能量,  $A, B, C, R_1, R_2, \omega$  为待定参数. 已知炸药的初始密度  $\rho_0$ 、爆速  $D_J$ 、爆压  $P_{CJ}$  和化学能  $E_0$ , 利用CJ条件、Hugoniot关系式和CJ等熵线通过CJ点可以得到JWL状态方程的6个待定参数满足下面的关系式[10]:

$$\begin{cases} AR_1 \exp(-R_1 v_{CJ}) + BR_2 \exp(-R_2 v_{CJ}) \\ + C(1 + \omega)v_{CJ}^{-(2+\omega)} = \rho_0 D^2, \\ \frac{A}{R_1} \exp(-R_1 v_{CJ}) + \frac{B}{R_2} \exp(-R_1 v_{CJ}) \\ + \frac{C}{\omega} v_{CJ}^{-\omega} = E_0 + \frac{1}{2} P_{CJ}(1 - v_{CJ}), \\ A \exp(-R_1 v_{CJ}) + B \exp(-R_2 v_{CJ}) \\ + C v_{CJ}^{-(1+\omega)} = P_{CJ}, \end{cases} \quad (3)$$

其中  $v_{CJ} = \gamma/(\gamma + 1)$ ,  $\gamma = \rho_0 D^2/P_{CJ} - 1$ .

根据等熵状态方程(1)可知, 为了保证压力为正, 必须有  $A \geq 0, B \geq 0, C \geq 0$ . 由声速定义有  $\partial P_s/\partial V \leq 0$ , 那么  $R_1 \geq 0$  和  $R_2 \geq 0$ . 参数  $R_1$  和  $R_2$  是与爆轰产物膨胀的高压阶段和中压阶段有关的系数. 通过实验和热力学计算获得爆轰产物的绝热等熵膨胀线, 根据  $\gamma$  律方程在一定范围内拟合出参数  $\omega$  的值, 反映炸药爆轰产物低阶段做功能力. 另外为了保证炸药爆轰产物的压力为正, 基于以上未知参数的要求, 可以得到  $\omega \geq 0$ . 通常的做法是, 给出一组  $R_1, R_2$  和  $\omega$ , 然后根据上面的约束方程(3)得到  $A, B, C$  的值.

### 3 基于贝叶斯方法的模型参数标定

在贝叶斯方法中, 我们通常假设模型的参数  $\theta$  有一个先验分布  $\pi_{\text{prior}}(\theta)$ , 这个先验分布来源于参数的已知信息. 如果记  $d$  为所得数据并假设给定参数  $\theta$  后数据的分布为  $\pi_{\text{like}}(d|\theta)$ , 则参数  $\theta$  的后验分布记为

$$\pi_{\text{post}}(\theta|d) = \frac{\pi_{\text{like}}(d|\theta) \cdot \pi_{\text{prior}}(\theta)}{\pi_{\text{data}}(d)} \quad (4)$$

这里

$$\pi_{\text{data}}(d) = \int \pi(\theta) f(d|\theta) d\theta.$$

而贝叶斯的思想就是利用参数  $\theta$  的后验均值作为参数的估计.

根据文献 [7], 实验数据和模拟数据的关系可以表示为

$$y(x_i) = M(x_i, \theta) + \delta(x_i) + \varepsilon(x_i), \quad (5)$$

这里  $y(x_i)$  是第  $i$  个基于输入  $x_i$  的实验数据,  $M(x_i, \theta)$  表示数值模拟基于输入  $x_i$  和未知参数  $\theta$  的模拟结果,  $\delta$  和  $\varepsilon$  分别表示模型形式偏差和实验观测误差. 模型形式偏差指模型与物理现象之间的差别, 一般很难描述模型形式偏差. 对于实验误差一般由实验执行者提供. 通常  $M(x_i, \theta)$  代表确定性计算, 但是由于未知参数  $\theta$  的不确定性, 基于  $\theta$  的不同的取样数值模拟给出不同的输出. 另外, 即使基于参数的最佳  $\theta$ , 物理现象一般不能准确预测. 也就是, 我们无法给出模型形式偏差  $\delta$ , 而且文献 [11] 也说明了选择不同的模型形式偏差对于未知参数  $\theta$  的标定结果影响较大. 而本文所考虑的 JWL 状态方程本身就是唯象建模, 无法准确描述模型形式偏差, 因此本文不考虑模型形式偏差, 实验数据和模拟数据的关系描述如下:

$$y(x_i) = M(x_i, \theta) + \varepsilon(x_i). \quad (6)$$

由 (6) 式知道, 在本文参数的后验分布 (4) 式右端项中数据  $d$  既包含了实验测量数据, 也包含了数值模拟数据.

现实物理现象的大部分数值模拟计算量巨大, 而  $M(x_i, \theta)$  的计算基于未知参数的抽样, 为了节省其数值模拟的计算量, Kennedy 和 O'Hagion 利用 Gaussian 过程建立数值模拟的代理模型, 具体细节参考文献 [7].

下面给出贝叶斯参数标定的基本步骤:

1) 给出模型参数的先验分布, 建立代理模型形式, 基于先验分布给出不确定参数的样本集合, 开展数值模拟计算;

2) 利用蒙特卡罗 (Monte Carlo) 方法, 基于代理模型给出不确定参数的后验分布;

3) 结合代理模型, 用蒙特卡罗方法形成参数不确定性的传播. 给出未知参数的标定结果 (一般选择后验分布的均值或者最大后验估计).

### 4 数值计算

在标定参数  $R_1$ ,  $R_2$  和  $\omega$  的样本点上进行确定性数值模拟计算采用 CHAP 一维程序 [12]. CHAP 是一个大型流体弹塑性动力学程序, 空间离散方法采用相容性拉氏计算方法, 能够准确捕捉自由面速度; 时间离散采用预报校正方法; 采用考虑子网格压力的方法解决沙漏变形问题; 为有效模拟激波传播及相互作用的问题, 采用张量人工黏性方法, 综合考虑了流体弹塑性和炸药反应过程. 大量数值模拟计算结果表明, CHAP 具有较为完整的解决工程实际问题的计算能力. 钝感炸药 JB-9014 采用点火增长三项反应率模型.

在确定性计算时用到以下主要参数 [13,14]. JO-9159 炸药的初始密度为 1.863 g/cm<sup>3</sup>, 爆速为 8.87 km/s, 爆压为 36.8 GPa, 状态方程参数  $A$  为 934.77 GPa,  $B$  为 12.723 GPa,  $R_1$  为 4.6,  $R_2$  为 1.1,  $\omega$  为 0.37. JB-9014 炸药的初始密度为 1.9 g/cm<sup>3</sup>, 爆速为 7.71 km/s, 爆压为 29.8 GPa. 飞片紫铜的材料主要参数为密度 8.93 g/cm<sup>3</sup>, 杨氏模量 136.0 GPa, 剪切模量 48.4 GPa, 屈服极限 120 MPa.

JWL 状态方程 6 个未知参数满足方程组 (3), 因此只有 3 个未知参数需要标定. 本文考虑标定参数  $R_1$ ,  $R_2$  和  $\omega$ . 我们假设关于参数  $R_1$ ,  $R_2$  和  $\omega$  的先验信息极少, 这样需要无信息先验, 也就是对参数空间中的任何一点没有偏好 (均匀分布) 的先验信息, 即

$$pdf(\theta) \sim U([a, b]),$$

其中区间  $[a, b]$  是参数空间的包络.

根据我们对问题的了解, 参数  $R_1$ ,  $R_2$  和  $\omega$  选取的相应区间为  $[4, 5]$ ,  $[1, 2]$  和  $[0, 1]$ .

利用拉丁方抽样 (Latin hypercube sample, LHS) 方法, 选取 100 组  $R_1$ ,  $R_2$  和  $\omega$ . 根据 JWL 状态方程未知参数满足的方程组 (3) 可以计算得到

100组  $A, B, C$ . 基于未知参数满足的条件, 丢弃其中13组不满足要求的参数, 有效样本数还有87个(见图3). 根据87组样本点求出的参数  $A$  和  $B$  见图4.

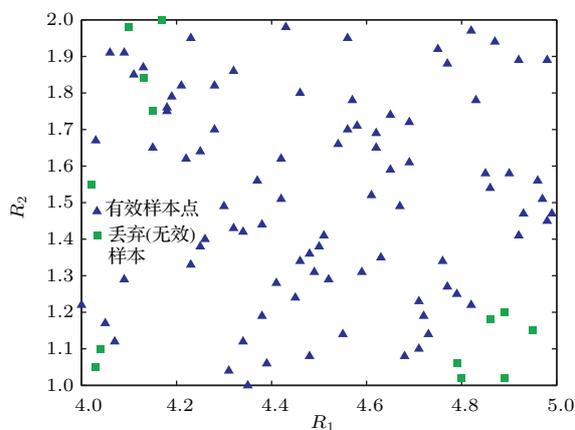


图3 标定参数  $R_1, R_2$  和  $\omega$  100组样本点在  $R_1$ - $R_2$  平面的投影

Fig. 3.  $R_1$ - $R_2$  plane projection of 100 samples of the uncertain parameters  $R_1, R_2$  and  $\omega$ .

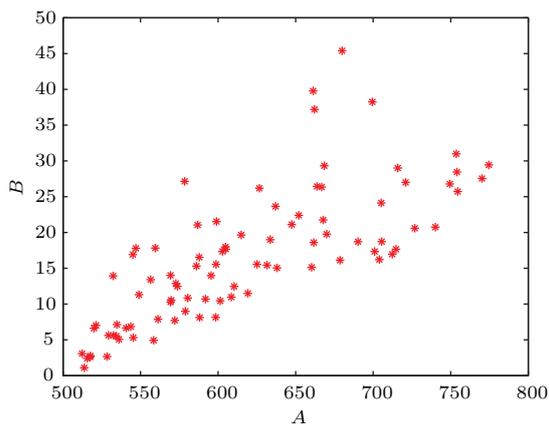


图4 基于87组有效样本点求出的参数  $A, B$

Fig. 4. The parameters  $A$  and  $B$  computing by 87 valid sample.

在87组有效样本点上我们分别计算得到飞片自由面的速度曲线. 图5给出了标定后的参数  $R_1, R_2$  和  $\omega$  后验的边际分布和二元分布. 图5中非对角线区域的各图内圈表示各参数落于该区域的概率为50%, 而外圈表示各参数落于该区域的概率为90%. 后验分布说明从实验和模拟数据得到了很多参数信息. 在表1中给出了参数后验分布的均值和标准差, 参数均值和文献中的结果符合得很好, 说明本文的参数标定抓住了数据中参数的有效信息. 参数  $R_1$  和  $\omega$  比  $R_2$  更好地与文献结果相符合, 这也反映飞片自由面速度较好地反映了炸药爆轰产物高压阶段做功能力, 炸药产物中压阶段做功能力在

飞片自由面速度中被飞片自身材料干扰较多, 当后期飞片速度稳定下来后飞片速度又能很好地反映爆轰产物低压阶段的做功能力, 这与参数的本身物理意义相符. 图6给出了参数标定前后区间的变化, 充分说明了通过贝叶斯参数标定, 能够极大地集中实验数据、模拟数据和先验信息中关于参数的一切信息, 排除了一切与参数无关的信息后得到的后验分布, 减少了参数的认知不确定性.

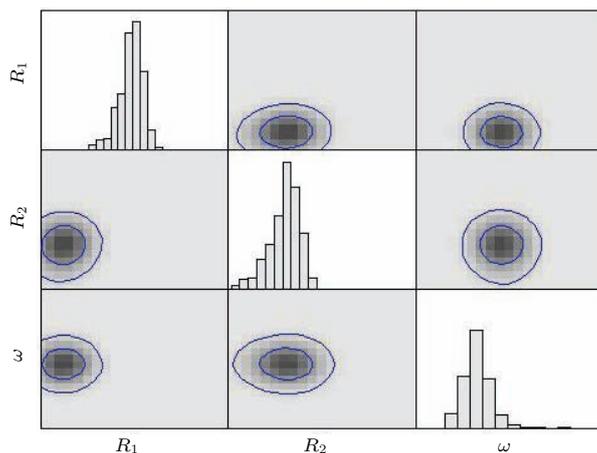


图5 标定参数  $R_1, R_2$  和  $\omega$  的单变量的后验分布和双变量的后验分布 (非对角区域的图中内圈区域概率为50%, 外圈内区域概率为90%)

Fig. 5. The single-variate and bivariate marginal posterior distributions of the three calibration parameters  $R_1, R_2$  and  $\omega$  (50% probability in inner circle and 90% probability in outer circle of off-diagonal).

表1 标定参数  $R_1, R_2$  和  $\omega$  的均值和标准差

Table 1. the mathematical means and standard deviations of posterior distributions of the parameters  $R_1, R_2$  and  $\omega$ .

标定参数	文献 [14]	后验分布均值	后验分布标准差
$R_1$	4.1	4.1197	0.01594
$R_2$	1.1	1.2804	0.10460
$\omega$	0.46	0.4606	0.00497

在图7中, 基于标定后参数的数值模拟90%置信区间完全包含了实验数据, 这说明了实验结果和基于后验分布的预测结果也符合得比较好. 黄色区域为87组标定参数样本点数值模拟结果, 虽然模拟结果变化区域较大, 但是利用实验与模拟数据标定后数值模拟结果能够符合实验数据, 极大地集中了实验数据、模拟数据和先验信息中关于参数的信息, 从而基于标定后参数的数值模拟结果与实验数据符合较好.

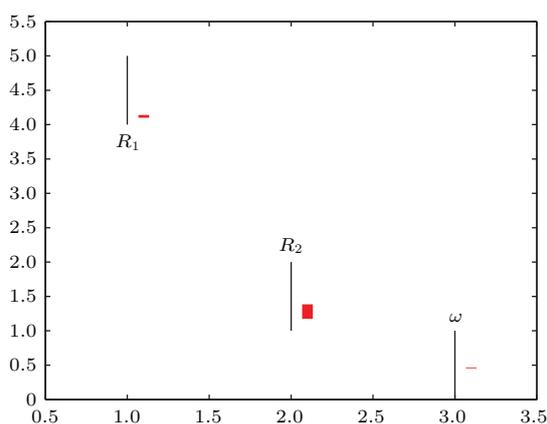


图6 标定参数  $R_1$ ,  $R_2$  和  $\omega$  先验与后验的区间对比 (黑色为先验区间; 红色为后验区间)

Fig. 6. The prior and posterior interval of the three calibration parameters  $R_1$ ,  $R_2$  and  $\omega$  (black, prior interval; red, posterior interval).

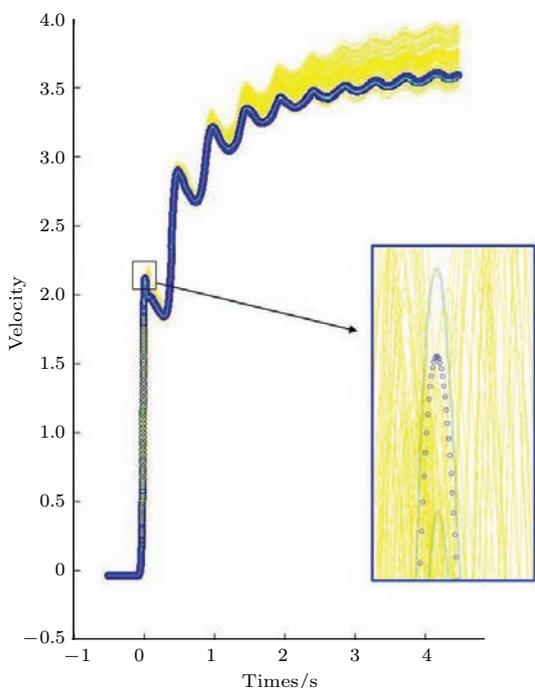


图7 标定前后的飞片自由面速度曲线 (黄色为 87 组标定参数样本点的数值模拟结果; 蓝色为实验数据; 绿色为标定后数值模拟 90% 置信区间)

Fig. 7. The velocity curves of flyer plate before and after calibration (yellow, numerical simulation at 87 samples; blue, experimental data; green, 90% confidence interval of calibrated numerical result).

## 5 结 论

本文首先介绍了贝叶斯参数标定方法, 利用该方法研究了 JWL 状态方程的 6 个未知参数. 数值结果与文献参数值符合较好, 并给出了未知参数的概率信息, 有助于分析模型预测的置信区间, 先验

分布和后验分布区间的对比说明该方法能够很好地减小认知不确定性. 基于参数标定结果的数值模拟 90% 置信区间完全包含了实验数据. 从数值结果可以看出, 利用贝叶斯方法不仅能够确定未知参数, 而且可以得到参数的概率分布. 在本文参数标定过程中极大地减少了人为因素的影响, 这是传统做法无法做到的.

炸药爆轰驱动飞片是一个较为简单的实验, 但是飞片的自由面速度不仅与主装药密切相关, 而且飞片本身的材料参数、传爆药也会对飞片的数值模拟产生较大的影响. 要准确量化炸药爆轰驱动飞片数值模拟的不确定度, 仅仅研究主装药的状态方程参数还不够. 也就是说, 需要进一步对整个过程的仔细分析所有不确定性来源, 合理表征这些不确定性, 这样才能准确把握爆轰驱动飞片数值模拟的不确定性, 认识其数值模拟结果的可信度.

另外, 文献 [15, 16] 利用广义多项式混沌方法 (generalized polynomial chaos, gPC) 对爆轰计算 JWL 状态方程不确定参数传播开展了数值模拟研究, 但是本文给出的参数后验分布显然不是传统的概率分布类型, 无法用 gPC 方法研究其不确定度传播, 因此需研究相适应的不确定度传播方法.

## 参考文献

- [1] Green L, Lee E, Mitchell A, Tipton R, van Thiel M, Finger M 1993 *UCRL-89664* CA: Lawrence Livermore National Laboratory
- [2] Ralph M 2015 *LA-UR-15-29536* Los Alamos National Laboratory
- [3] Kury J W, Hornig H C, Lee E L, McDonnell J L, Ornellas D L, Finger M, Strangl F M, Wilkins M L 1966 *Proceedings of the 4th International Symposium on Detonation* White Oak, Maryland, October 12–15, 1965 p3
- [4] Sun C W, Wei Y Z, Zhou Z K 2000 *Applied Detonation Physics* (Beijing: national defence Publication Company) p286 (in Chinese) [孙承伟, 卫玉章, 周之奎 2000 应用爆轰物理 (北京: 国防工业出版社) 第 286 页]
- [5] Zhou Z, Nie J, Guo X, Wang Q 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 016401
- [6] Jiang H M, Zhang R Q 1998 *Journal of Ballistics* **10** 25 (in Chinese) [江厚满, 张若棋 1998 弹道学报 **10** 25]
- [7] Kennedy M, O'Hagan A 2001 *J. Roy. Stat. Soc. B* **68** 425
- [8] Yu D S, Zhao F, Tan D W, Peng Q X, Fang Q 2006 *Explosion And Shock Waves* **26** 140 (in Chinese) [虞德水, 赵锋, 谭多望, 彭其先, 方青 2006 爆炸与冲击 **26** 140]
- [9] Lee E L, Hornig H C, Kury J W 1968 *UCRL-50422* CA: Lawrence Livermore National Laboratory

- [10] Souers P C, Wu B, Haselman L C 1994 *Detonation equation of state at LLNL CA*: Lawrence Livermore National Laboratory.
- [11] Ling Y, Mullins J, Mahadevan S 2014 *J. Comput. Phys.* **276** 665
- [12] Zhang S D, Zhou H B, Liu W T 2005 *GF Report No. GF-A0091252* (in Chinese) [张树道, 周海兵, 刘文韬 2005 GF 报告, 编号: GF-A0091252]
- [13] Zhang S W, Hua J S, Liu C L, Han C S, Wang D S, Sun X L, Zhang Z T 2004 *Explosion and Shock Waves* **24** 219 (in Chinese) [张世文, 华劲松, 刘仓理, 韩长生, 王德生, 孙学林, 张振涛 2004 爆炸与冲击 **24** 219]
- [14] Hallqui J O 1993 *UCRL-MA-110630 CA*: Lawrence Livermore National Laboratory, p148
- [15] Liu Q, Wang R L, Lin Z, Wen W Z 2013 *Explosion and Shock Waves* **33** 647 (in Chinese) [刘全, 王瑞利, 林忠, 温万治 爆炸与冲击 **33** 647]
- [16] Wang R L, Liu Q, Wen W Z 2015 *Explosion and Shock Waves* **35** 9 (in Chinese) [王瑞利, 刘全, 温万治 2015 爆炸与冲击 **35** 9]

## Uncertain parameters of Jones-Wilkin-Lee equation of state for detonation products of explosive\*

Wang Yan-Jin<sup>†</sup> Zhang Shu-Dao Li Hua Zhou Hai-Bing

(*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China*)

( Received 1 February 2016; revised manuscript received 2 March 2016 )

### Abstract

Equation of state of detonation products possesses various types of mathematical expressions which describe the relation between pressure and volume. Jones-Wilkin-Lee (JWL) equation of state is a widely used equation of state of detonation products because of its simplicity in hydrodynamic calculations. The JWL equation of state may accurately describe the process of expansion drive of detonation products. The JWL equation of state contains parameters, and describe the relation among the volume, energy and pressure of detonation products. These parameters may be determined by detonation experimental data and numerical method. Traditional numerical method is adjusting parameters based on experimental data and numerical experience. Obviously, artificial ingredient may affect the calibrating result in traditional method. This paper uses the Bayesian method to determine the unknown (uncertain) parameter of JWL equation of state for detonation products. The method can calibrate the uncertain parameters based on the known parameter information, the experimental and simulating data. The results of the paper are consistent with those in the reference papers. By theoretical analysis the calibration result accords with the physical signification of the parameters of JWL equation of state. The epistemic uncertainty is slightly reduced. The calibration result collects all the parameter information in the prior parameter information, experimental data and numerical results. The experimental data are totally included in a 90% confidence interval of simulation. The numerical result shows that this method can be used to study the uncertain parameter of JWL equation of state for some sample explosives. Especially, the method reduces the artificial ingredient in the parameter calibration.

**Keywords:** detonation products, Jones-Wilkin-Lee equation of state, uncertain parameters, Bayesian inference

**PACS:** 64.30.-t, 82.20.Wt, 83.85.Ns

**DOI:** 10.7498/aps.65.106401

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11371069, 11372052, 11472060), the Youth Foundation of Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, China (Grant No. ZYSZ1518-13), and the Science Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2013A0101004).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: wang\_yanjin@iapcm.ac.cn