

文章编号: 1001-1455(2013)06-0647-08

# 爆轰计算 JWL 状态方程参数的不确定度\*

刘全, 王瑞利, 林忠, 温万治

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

**摘要:** 针对爆轰计算 JWL 状态方程参数, 开展不确定度量化研究。首先从 JWL 状态方程性质出发, 结合数学、物理分析确定 JWL 状态方程中主要参数  $R_1$  的概率分布范围, 然后利用非嵌入多项式混沌展开方法对 PBX9404 炸药驱动飞层外界面速度进行了不确定度量化分析。给出的分析方法与分析流程对爆轰计算及其他工程数值模拟不确定度量化有一定参考作用。

**关键词:** 爆炸力学; 不确定度; 多项式混沌方法; JWL 状态方程

**中图分类号:** O385

**国标学科代码:** 13035

**文献标志码:** A

随着计算机技术和数值计算方法的发展, 计算流体力学数值模拟 (computational fluid dynamics, CFD) 在工程设计中起到了重要作用。现阶段进行的数值模拟都是确定性的, 即在计算中给定确定的物质材料参数、几何尺寸以及边界条件。但工程设计中, 由于存在不确定因素, 因此还需考虑数值模拟结果的精度和可信度。可信度的量化, 即为不确定度分析。总体上讲, 计算结果的不确定来源于 2 个方面: 模型不确定与模型参数不确定。模型不确定是物理模型不能准确刻画所求解问题, 数学理论上不能准确给出问题的控制方程, 因此常在近似条件下给出所需求解方程。模型参数不确定包括了在计算过程中的几何尺寸、物质材料参数以及人为参数等的不确定<sup>[1-2]</sup>。在本文中, 我们从状态方程理论出发, 结合 JWL 状态方程具体形式, 分析 JWL 参数服从的概率分布, 考查状态方程参数不确定度量化与传播和对计算结果的影响。

参数不确定度传播可采用 Monte Carlo 方法, 但该方法不易给出输出结果的敏感度分析, 同时该方法需要大量的样本, 计算量大。近十年来, 利用多项式混沌的随机谱方法 (stochastic spectral methods) 在 CFD 不确定性分析中得到了广泛应用<sup>[3-7]</sup>。多项式混沌方法可分为嵌入式 (intrusive polynomial chaos, IPC) 和非嵌入式 (non-intrusive)。非嵌入式有 3 种处理方法: (1) 非嵌入多项式混沌 (non-intrusive polynomial chaos, NIPC); (2) 随机配置 (stochastic collocation); (3) 概率配置 (probabilistic collocation method)。非嵌入式方法采用已有的数值模拟程序, 不需要对控制方程进行修改, 不需要重新编写程序。在内爆动力学数值模拟中, 爆轰为系统提供初始注入能量, 影响飞层的走时与压缩, 爆轰计算对数值结果起着重要作用。而炸药状态方程的合理选取是爆轰正确计算的前提, JWL 状态方程已广泛应用到爆轰计算和工程设计。但由于工程加工设计与计算精度等影响, 在实际计算中可能改变已经标定的参数进行计算。

本文中利用 NIPC 方法进行爆轰计算中 JWL 参数不确定度分析。首先从 JWL 状态方程的性质出发确定 JWL 状态方程做功能力强的参数, 然后确定其可能的概率分布; 给出 NIPC 不确定度量化的基本过程; 从数值模拟出发, 说明炸药波后以  $u_{cJ}$  活塞推动的爆轰只依赖于炸药的宏观参数, 在此数值模拟的人工黏性等条件下, 利用 NIPC 方法对确定的 JWL 参数进行不确定度量化分析。

## 1 JWL 状态方程参数分析

炸药的 JWL 状态方程在数值模拟与工程设计中起到了重要作用<sup>[8-9]</sup>, 其等熵方程及爆轰产物 JWL

\* 收稿日期: 2012-09-14; 修回日期: 2013-02-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(11372051, 11172050); 中国工程物理研究院科学基金项目(2013A0101004)

作者简介: 刘全(1972—), 男, 博士, 研究员。

状态方程表达式为

$$p_s = A e^{-R_1 v} + B e^{-R_2 v} + C v^{-(\omega+1)} \quad (1)$$

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v}\right) e^{-R_1 v} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v}\right) e^{-R_2 v} + \frac{\omega E}{v} \quad (2)$$

式中:  $v = \frac{\rho_0}{\rho}$  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。给定炸药初始密度  $\rho_0$ 、爆速  $D_J$ 、爆压  $p_J$  和化学能  $E_0$ , 一般先假定一组  $R_1, R_2$  和  $\omega$  的值, 通过 3 个关系式(CJ 条件、等熵线与 Rayleigh 线相切 ( $-\frac{\partial p_s}{\partial v} \Big|_{v=v_{CJ}} = \rho_0 D^2$ )、Hugoniot 关系和等熵线通过 CJ 点)求解它们形成的代数方程组得到  $A, B, C$  [8]。利用二维流体动力学程序对圆筒实验进行数值模拟, 比较计算与实验结果后重新选取一组  $R_1, R_2$  和  $\omega$ , 并计算相应的  $A, B$  和  $C$  值, 直到得到的圆筒壁速度与实验值相差不超过 1%, 定常段飞行时间相差不超过 0.5% [8]。另外有学者构造加权目标函数, 利用优化方法确定 JWL 方程系数 [9]。

由于工程因素、数值模拟精度和人为黏性等的影响, 在计算中调节 JWL 参数, 以便数值模拟结果能对准内爆实验结果, 因此需要研究参数调节所允许的范围。

接下来分析 JWL 参数可能改变的范围, 确定参数作为随机变量的分布函数。从式(1)可知, 为保证压力为正, 必须有

$$A \geq 0, \quad B \geq 0, \quad C \geq 0 \quad (3)$$

同时由于  $\frac{\partial p_s}{\partial v} \leq 0$ , 因此

$$R_1 \geq 0, \quad R_2 \geq 0 \quad (4)$$

由式(2), 为保证压力为正, 在式(3)~(4)满足的条件下, 还需有

$$\omega \geq 0 \quad (5)$$

同时注意到 JWL 状态方程表达式(2)中的  $A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v}\right) e^{-R_1 v}$ 、 $B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v}\right) e^{-R_2 v}$  两项, 进一步要求  $1 - \frac{\omega}{R_1 v} \geq 0, 1 - \frac{\omega}{R_2 v} \geq 0$ , 即  $R_1 \geq \frac{\omega}{v}, R_2 \geq \frac{\omega}{v}$ 。

由 CJ 理论, 若爆轰产物膨胀对外做功, 有  $\min v = v_{CJ}$ , 其中  $v_{CJ} = 1 - \frac{p_{CJ}}{\rho_0 D^2}$ 。因此

$$R_1 \geq \frac{\omega}{v_{CJ}}, \quad R_2 \geq \frac{\omega}{v_{CJ}} \quad (6)$$

从表达式(2)还可得到参数  $(A, R_1)$  和  $(B, R_2)$  具有轮换对称性, 即变换:  $A \rightarrow B, R_1 \rightarrow R_2$  后, JWL 状态方程形式不变。

进一步分析 JWL 状态方程中各项的大小以及做功能力, 以 PBX9404 为例。图 1 为 PBX9404 炸药爆轰产物的 CJ 等熵线以及每一项的数值曲线 ( $A = 833.38 \text{ GPa}, B = 16.59 \text{ GPa}, C = 1.29 \text{ GPa}, R_1 = 4.55, R_2 = 1.3, \omega = 0.38$ ), 其中横坐标为比容。

图 1 表明, 在高压段起作用的主要是第 1 项, 在低压段起作用的主要是第 3 项。而爆轰产物对外做功主要是高压段, 因此对 JWL 而言, 增大第 1 项中的系数  $R_1$ , 则相应地系数  $A$  增大, 做功能力增强。图 2 是 2 组不同参数的 CJ 等熵线, 其中一组为 PBX9404 标定的参数, 另一组为改变  $R_1$  的参数:  $A = 687.60 \text{ GPa}, B = 1.69 \text{ GPa}, C = 2.19 \text{ GPa}, R_1 = 4.1, R_2 = 1.3, \omega = 0.38$ 。

因  $v_{CJ} = 1 - \frac{p_{CJ}}{\rho_0 D^2} = 1 - \frac{0.37}{1.84 \times 0.88^2} = 0.7403$ , 则由式(6), 有  $R_1 \geq 1.3508\omega, R_2 \geq 1.3508\omega$ , 将  $\omega = 0.76$  代入, 有  $R_1 \geq 1.023, R_2 \geq 1.023$ 。注意到  $R_2$  的标定值为 1.3, 因此  $R_2$  的下偏差约为 -20%, 即  $1.3 - 1.3 \times 20\% = 1.04 \geq 1.023$ 。综合爆轰产物对外做功的主要项以及 JWL 状态方程系数所满足的必要条件等信息, 我们只研究参数  $R_1$  的不确定性传播。并且注意到如下事实: 当  $R_1 = 4.0, R_2 = 1.3, \omega = 0.38$  时,  $A = 660.82 \text{ GPa}, B = -2.21 \text{ GPa}, C = 2.41 \text{ GPa}$ ; 当  $R_1 = 5.4, R_2 = 1.3, \omega = 0.38$  时,  $A =$

1 254.25 GPa,  $B=36.62$  GPa,  $C=-0.01$  GPa。所以, 最终选取  $R_1$  的分布为  $[4.1, 5.3]$  上的均匀分布。在  $R_1$  分布的两端点处, 参数  $A, B, C$  均为正。

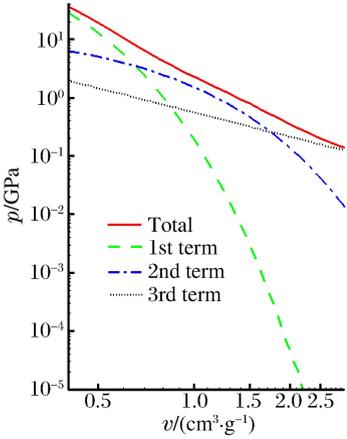


图 1 CJ 等熵线及 3 项分布曲线

Fig. 1 CJ isentropic curve and its three terms' curves

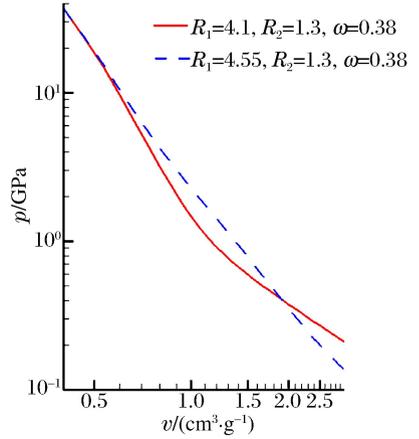


图 2 不同参数下的等熵线

Fig. 2 Isentropic curves with different parameters

## 2 NIPC 不确定度量化基本过程

NIPC 来源于随机函数的谱展开理论, 即随机函数可展成多项式混沌级数的形式。如设  $u(x, t, \xi(\theta))$  为依赖于空间  $x$ 、时间  $t$  和随机变量  $\xi$  的随机函数, 则

$$u(x, t, \xi(\theta)) = \sum_{i=0}^{\infty} \tilde{u}_i(x, t) \psi_i(\xi(\theta)) \tag{7}$$

式中:  $\tilde{u}_i(x, t)$  为确定性函数,  $\psi_i(\xi)$  为随机变量  $\xi$  的多项式,  $\{\psi_i(\xi)\}_{i=0}^{\infty}$  为正交多项式集,  $\xi$  是概率空间  $(\Omega, F, P)$  上的随机变量,  $u(x, t, \xi)$  为概率空间  $(\Omega, F, P)$  上的随机函数,  $\Omega$  为样本空间(事件集),  $F$  是  $\Omega$  上的  $\sigma$  代数,  $P: F \rightarrow [0, 1]$  是概率测度,  $\theta$  为事件,  $\theta \in \Omega$ 。不同随机变量类型对应不同多项式。例如均匀分布对应 Legendre 正交多项式; 正态分布对应 Hermite 正交多项式。从式(7)中可以看出, 假定用某种方式得到了级数中的确定性函数  $\tilde{u}_i(x, t)$ , 则可得到随机函数  $u(x, t, \xi)$ , 因此可以得到随机函数的统计信息, 用于不确定性量化, 同时  $u(x, t, \xi)$  随  $(x, t, \xi)$  的变化描述了不确定性的传播过程。在实际应用过程中, 使用有限项展开, 设

$$u(x, t, \xi(\theta)) = \sum_{i=0}^K \tilde{u}_i(x, t) \psi_i(\xi(\theta))$$

NIPC 不确定度评估的计算流程如下:

(1) 选取参数  $\lambda$  服从何种分布。

(2) 利用相应标准随机变量, 确定参数  $\lambda$  多项式混沌谱展开, 如,  $\lambda(\xi) = \lambda_0 + s\xi$ 。

(3) 对参数构成的随机变量  $\xi$  进行抽样  $\theta_1, \dots, \theta_{M+1}$ , 将其带入参数  $\lambda$  多项式混沌谱展开式中, 得到参数  $\lambda$  的抽样  $\tilde{\omega}^1, \dots, \tilde{\omega}^{M+1}$ , 对每一次抽样, 模型参数值为确定值  $\tilde{\omega}^j$ , 其中  $j = 1, \dots, M + 1$ 。

(4) 对每一抽样确定后的模型参数值, 利用“确定性程序(如 CFD 程序)”计算得到相应的数值解  $u(x, t)$ , 如第  $j$  次抽样得到解为  $(u(x, t))_j$ 。

(5) 计算  $u(x, t, \xi(\theta)) = \sum_{k=0}^K \tilde{u}_k(x, t) \psi_k(\xi(\theta))$  中的  $\tilde{u}_k(x, t)$ , 其中  $\tilde{u}_i(x, t)$  可采用众多积分公式求出,

$$\begin{aligned} \tilde{u}_i(x, t) &= \frac{\langle u(x, t, \xi), \psi_i(\xi) \rangle}{\langle \psi_i(\xi)^2 \rangle} = \frac{1}{\langle \psi_i(\xi)^2 \rangle} \int_{\Omega} u(x, t, \xi(\theta)) \psi_i(\xi(\theta)) p(\theta) d\theta = \\ &= \frac{1}{\langle \psi_i(\xi)^2 \rangle} \sum_{j=1}^M \int_{\theta_j}^{\theta_{j+1}} u(x, t, \xi(\theta)) \psi_i(\xi(\theta)) p(\theta) d\theta \quad i = 0, \dots, K \end{aligned}$$

例如,假定正交多项式归一,且采用 Latin 等概率抽样,则

$$\tilde{u}_i(x,t) = \frac{\langle u(x,t,\xi), \psi_i(\xi) \rangle}{\langle \psi_i(\xi)^2 \rangle} \approx \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M+1} (u(x,t))_m \psi_k(\theta_m) \quad i=0, \dots, K$$

(6)统计评估

数学期望(均值)  $\mu_u = \tilde{u}_0(x,t)$ , 方差  $\sigma_u^2 = \sum_{i=1}^K \tilde{u}_i(x,t)^2 \langle \psi_i^2 \rangle$ , 随机解  $u(x,t,\xi(\theta)) =$

$\sum_{k=0}^K \tilde{u}_k(x,t) \psi_k(\xi(\theta))$ , 对不同的  $\theta$  得到相应的解,因此可以刻画不确定度的传播。

### 3 爆轰计算不确定量化

利用 NIPC 方法结合二维弹塑性拉氏有限元程序分析 JWL 状态方程中参数  $R_1$  的不确定量化。注意到 CJ 爆速=CJ 声速+CJ 粒子速度,因此对于给定炸药宏观参数爆速、爆压、爆热和初始密度,则炸药爆轰产物的 CJ 声速一致。下面,我们将从数值模拟进一步说明,如果炸药宏观物理性质一致,即爆速、爆压、爆热和初始密度相同,则数值模拟结果相同,爆轰产物的数值计算不依赖于 JWL 状态方程中的参数选择。

考虑活塞以 CJ 状态粒子速度推动炸药爆轰产物的数值模拟,计算中反应函数选 Wilkins 函数,  $f = \frac{1-v}{1-v_{CJ}}$ , 并取合适的一次、二次人为黏性系数消除爆轰波后震荡。计算模型如图 3 所示,炸药厚度  $L_2 = 4.0$  cm,右端铜厚度  $L_3 = 0.2$  cm,铜采用 Grüneisen 状态方程和理想弹塑性本构方程。状态方程参数如下: $\rho_0 = 8.93$  g/cm<sup>3</sup>,  $c = 0.394$  cm/ $\mu$ s,  $s_1 = 1.489$ ,  $s_2 = 0$ ,  $s_3 = 0$ ,  $\gamma = 2.02$ ,  $a = 0.47$ , 屈服强度  $Y = 0.3$  GPa,剪切模量  $G = 46.3$  GPa,且去初压。活塞速度为波后粒子速度

$$u = D - c_{CJ} = D - \frac{\gamma}{\gamma + 1} D = \frac{1}{\gamma + 1} D = 0.2285 \text{ cm}/\mu\text{s}$$



图 3 活塞推动炸药爆轰计算模型

Fig. 3 The model of explosive controlled by itself

图 4~6 为标定 JWL 参数,计算到  $3.0 \mu$ s 的数值模拟结果,注意到爆轰波还未影响到铜,因此铜的物理量未发生改变。对其他参数的数值模拟结果完全一致,图 7~9 给出 2 套 JWL 参数的数值模拟结果比较。 $z_c$  表示物理量(压力、密度)定义在网格中心, $z$  表示物理量(速度)定义在网格节点。

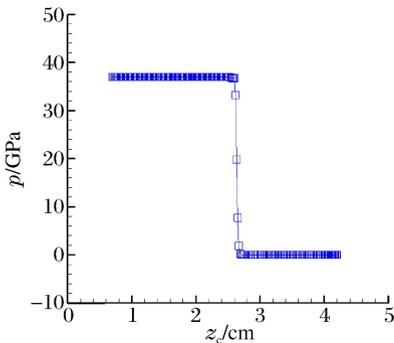


图 4(a) 压力空间分布

Fig. 4(a) Numerical result of pressure

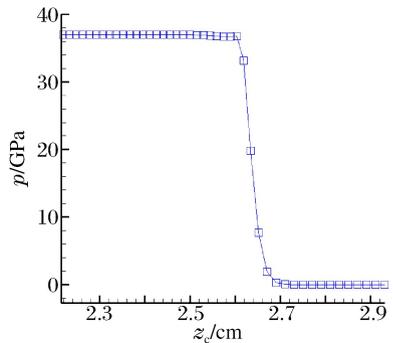


图 4(b) 爆轰波附近压力放大图

Fig. 4(b) Pressure nearby the shock

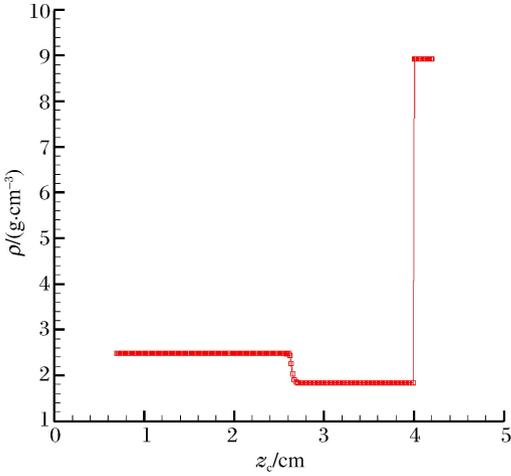


图 5(a) 密度空间分布

Fig. 5(a) Numerical result of density

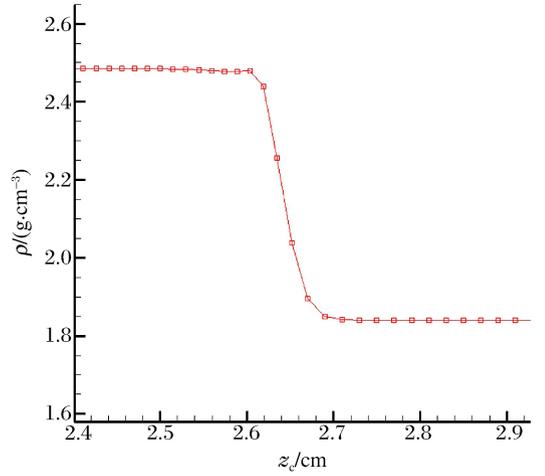


图 5(b) 爆轰波附近密度放大图

Fig. 5(b) Density nearby the shock

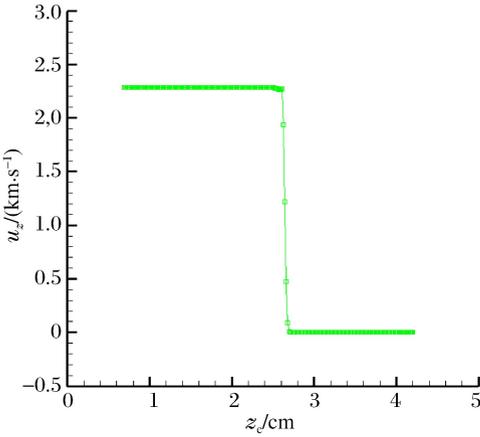


图 6(a) 速度空间分布

Fig. 6(a) Numerical result of velocity

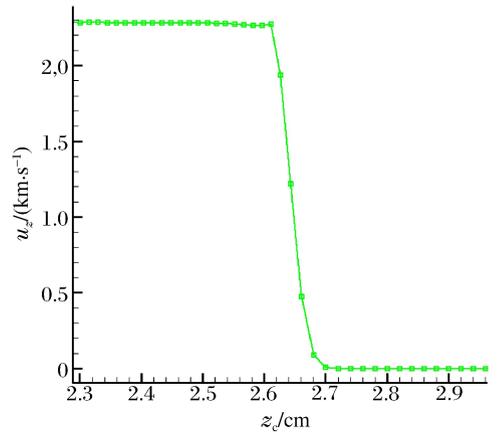


图 6(b) 爆轰波附近速度放大图

Fig. 6(b) Velocity nearby the shock

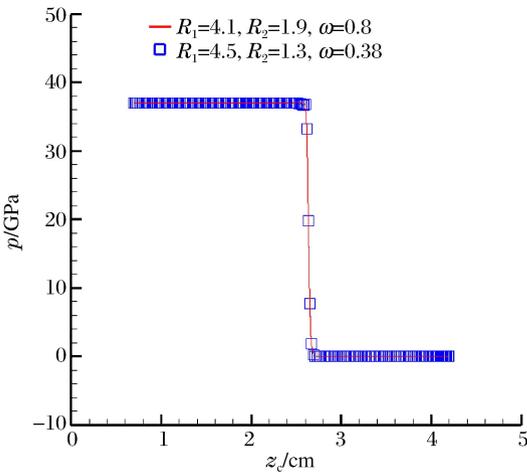


图 7 不同 JWL 参数压力空间分布

Fig. 7 Numerical result of pressure with different JWL parameters

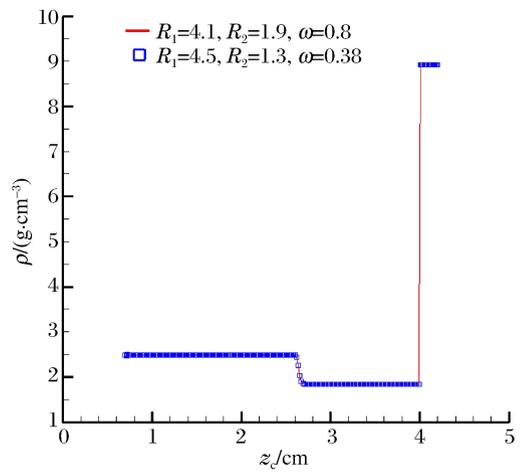


图 8 不同 JWL 参数密度空间分布

Fig. 8 Numerical result of density with different JWL parameters

接下来考虑炸药推动飞片,由JWL状态方程参数变化引起数值解的不确定度量化与传播。其计算模型如图 10,炸药厚度  $L_2=4.0\text{ cm}$ ,飞片厚度  $L_1=0.1\text{ cm}$ ,炸药左端面给起爆速度。铜左边界为自由面,铜、炸药上下表面为固壁。由于JWL状态方程中第 1 项在计算中起主要作用,因此考查  $R_1 \in [4.1, 5.3]$  时,数值解的不确定度量化与传播。利用等概率采样,共 13 个采样点,利用 3 阶 Legendre 多项式混沌展开。计算  $0\sim 3.0\ \mu\text{s}$  铜外界面的速度期望值与方差的数值模拟结果,如图 11~12 所示。从图 12 中可以看出,在第 1 次冲击波达到外界面以及爆轰形成的膨胀气体不断对外做功的过程中,外界面的速度标准方差较大。

为了进一步考查爆轰参数  $R_1 \in [4.1, 5.3]$  时对铜飞层外界面速度的影响,利用区间分析的方法,即考查  $R_1=4.1$  和  $R_1=5.3$  两个端点的行为。图 13 为  $R_1=4.1$  时铜外界面速度,图 14 为  $R_1=5.3$  时铜外界面速度,由于  $R_1=5.3$  时,炸药的做功能力强,因此  $R_1=5.3$  时铜的外界面速度在  $t=3\ \mu\text{s}$  时的速度比  $R_1=4.1$  时的速度大约增加  $(0.12-0.1)/0.1=20\%$ 。

利用 NIPC 方法给出的图 11 中的铜飞层速度期望值为  $R_1 \in [4.1, 5.3]$  的最可几速度。图 15 为在图 11 的基础上给出铜飞层外界面速度期望值的置信区间,即  $E\xi \pm \sigma$ ,其中  $E\xi$  为速度期望值,  $\sigma$  为速度标准方差。图 16 为  $R_1=4.1$  和  $R_1=5.3$  和 NIPC 方法给出的铜飞层外界面速度值的比较图。

从图 16 中可以看出,NIPC 所给出的速度期望值位于  $R_1=4.1$  和  $R_1=5.3$  的速度值中间,说明 NIPC 给出的速度期望值是可信的。图 15 给出  $\pm\sigma$  的置信区间范围,在工程实际中一般采用  $\pm 3\sigma$  作为置信区间,如图 17 所示。将图 15、17 中速度置信区间跟图 16 进行比较,可以看出仍处于  $R_1=4.1$  和  $R_1=5.3$  时速度值的中间,也说明 NIPC 给出的速度期望值是可信的。

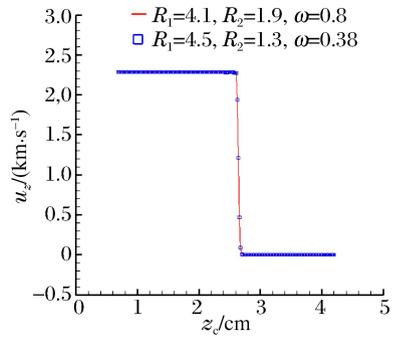


图 9 不同 JWL 参数速度空间分布

Fig. 9 Velocity with different JWL parameters



图 10 炸药推动飞片模型

Fig. 10 The model of plate pushed by explosive

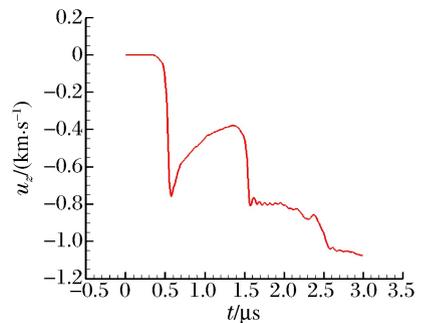


图 11 铜飞层外界面速度期望值

Fig. 11 The mean of the velocity of Cu's outer interface

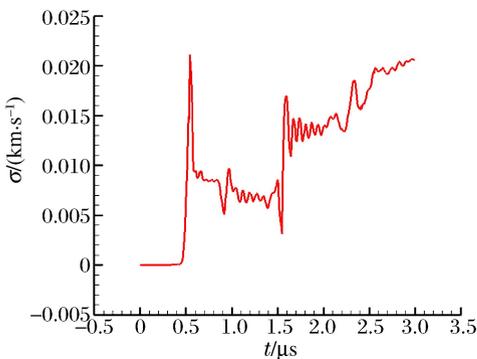


图 12 铜飞层外界面速度标准方差

Fig. 12 The standard variance of the velocity of Cu's outer interface

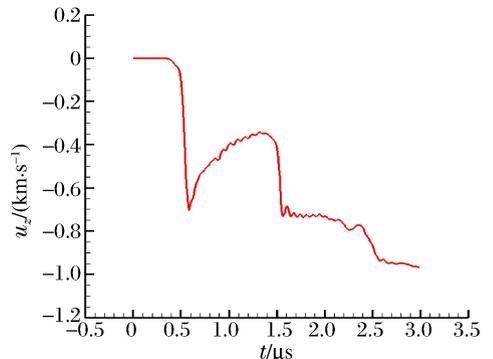


图 13  $R_1=4.1$  时铜飞层外界面速度

Fig. 13 The velocity of Cu's outer interface with  $R_1=4.1$

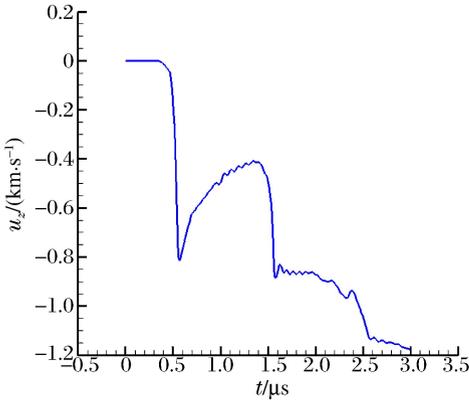


图 14  $R_1 = 5.3$  时铜飞层外界面速度

Fig. 14 The velocity of Cu's outer interface with  $R_1 = 5.3$

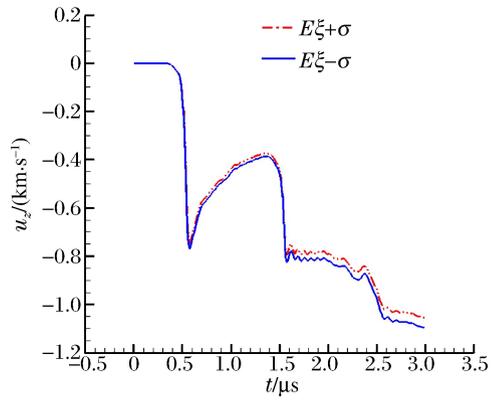


图 15 铜飞层外界面速度置信区间

Fig. 15 The confidence interval of the Cu's outer interface velocity

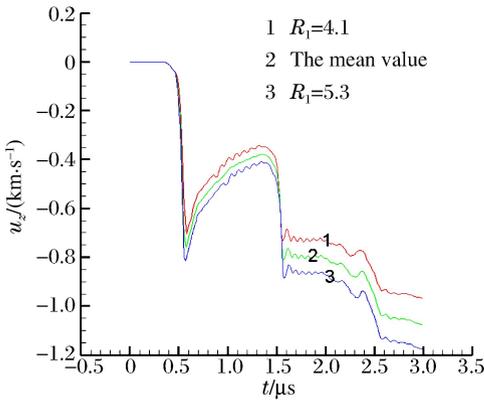


图 16 期望值及  $R_1 = 4.1, 5.3$  时铜飞层外界面速度

Fig. 16 The velocity of Cu's outer interface with  $R_1 = 4.1, 5.3$  and the mean value

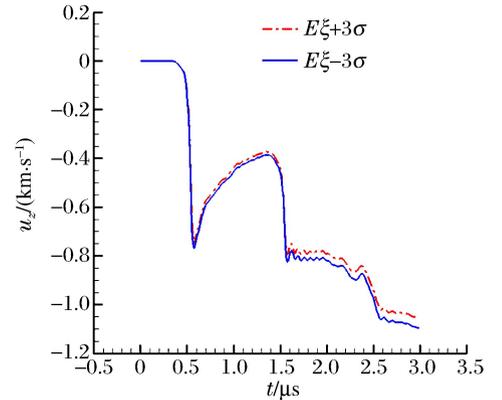


图 17 铜飞层外界面速度置信区间

Fig. 17 The confidence interval of the Cu's outer interface velocity

### 4 结 论

从 JWL 状态方程的性质出发,利用数学分析的方法确定了 JWL 状态方程中主要参数  $R_1$  的概率分布范围,利用非嵌入多项式混沌展开方法对炸药驱动飞层外界面速度进行了不确定度量化分析。对状态方程分析的数学方法及思想可用于类似问题的分析。给出的非嵌入多项式混沌方法,可用于参数不确定度量化,该方法不需修改已有应用程序代码,具有实用性。进一步工作,将利用非嵌入多项式混沌方法开展多参数的不确定度量化分析。

### 参考文献:

[1] 王晓东,康顺. 多项式混沌法求解随机 Burgers 方程[J]. 工程热物理学报,2010,31(3):393-398.  
Wang Xiao-dong, Kang Shun. Solving stochastic Burgers equation using polynomial chaos decomposition[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010,31(3):393-398.

[2] 王晓东,康顺. 多项式混沌方法在随机方腔流动模拟中的应用[J]. 中国科学:技术科学,2011,41(6):790-798.  
Wang Xiao-dong, Kang Shun. Application of polynomial chaos on numerical simulation of square cavity flow[J]. Science China: Technology Science, 2011,41(6):790-798.

[3] Xiu D B, Karniadakis G E. The Wiener-Askey polynomial chaos for stochastic differential equations[J]. SIAM Journal of Scientific Computation, 2002,24(2):619-644.

- [4] Ogura H. Orthogonal functional of the Poisson process[J]. IEEE Transaction Information Theory, 1972, IT-18: 473-481.
- [5] Kiureghian A D, Liu P L. Structural reliability under incomplete probability information[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1986, 112(1):85-104.
- [6] Hou T Y, Luo W, Rozovskii B, et al. Wiener chaos expansions and numerical solutions of randomly forced equations of fluid mechanics[J]. Journal of Computational Physics, 2006, 216(2):687-706.
- [7] Eldred M S, Burkard J. Comparison of non-intrusive polynomial chaos and stochastic collocation method for uncertainty quantification[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics Paper, 2009, 976:1-20.
- [8] 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.
- [9] 江厚满, 张若棋. 确定JWL状态方程参数的非线性优化方法[J]. 弹道学报, 1998, 10(2):25-28.  
Jiang Hou-man, Zhang Ruo-qi. Application of nonlinear optimization to parameters in JWL equation of state[J]. Journal of Ballistics, 1998, 10(2):25-28.

## Uncertainty quantification for JWL EOS parameters in explosive numerical simulation\*

Liu Quan, Wang Rui-li, Lin Zhong, Wen Wan-zhi

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

**Abstract:** The JWL EOS parameters are very important in numerical simulations on explosives, which can be affirmed from cylinder experiments. But in actual computations, these parameters may depart from the original ones. So aimed to the JWL EOS parameters, the uncertainty quantification was explored. The distribution of the main parameter  $R_1$  was given with mathematical and physical analyses. And the uncertainty quantification analysis was carried out for the velocity at the outer interface of the copper flyer driven by the PBX9404 explosive. The analysis method used in the paper is helpful for the uncertainty quantification in detonation calculations and other engineering simulations.

**Key words:** mechanics of explosion; uncertainty quantification; polynomial chaos; JWL EOS

\* Received 14 September 2012; Revised 13 February 2013

Supported by the National Natural Science Foundation of China (11372051, 11172050)

Corresponding author: Liu Quan, liuquan@iapcm.ac.cn