

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0100

TATB 基非均质炸药预冲击减敏的数值模拟*

黄奎邦^{1,2}, 刘益儒¹, 洪滔¹, 于鑫¹, 彭文扬², 舒俊翔³

(1. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094;

2. 中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088;

3. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为了对一种 TATB 基非均质炸药的预冲击起爆现象展开数值模拟研究, 将基于冲击温度及压力的 AWS D 反应率模型耦合进二维结构网格拉氏弹塑性流体力学程序。利用炸药及其产物的冲击雨贡纽实验数据校验了未反应炸药及产物的状态方程参数, 通过一维冲击起爆的模拟, 标定了反应速率模型参数。模拟了炸药在弱冲击 0.45 μs 后跟随的强冲击波的二次冲击实验, 结果表明, 受预压缩区域的炸药反应变慢, 到爆轰距离增长了约 1 mm, 与该炸药二次冲击实验减敏现象相符。模拟拐角效应时, 爆轰波经过拐角后, 在拐角附近形成稳定的不起爆区域, 与主要成分相同的 LX-17 炸药的拐角效应实验的死区特征相符。数值模拟结果表明, 基于冲击温度及压力的 AWS D 反应率模型可以较好地模拟非均质炸药预冲击减敏问题。

关键词: TATB 基; 非均质炸药; 预冲击; 减敏; AWS D 模型

中图分类号: O389

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Numerical simulation of pre-shock desensitization in TATB-based heterogeneous explosive

HUANG Kuibang^{1,2}, LIU Yiru¹, HONG Tao¹, YU Xin¹, PENG Wenyang², SHU Junxiang³

(1. *Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China;*

2. *Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China;*

3. *Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China*)

Abstract: To study and simulate the pre-shock desensitization in the TATB-based heterogeneous explosive, the impact temperature and pressure based AWS D reaction flow model was implemented in a 2D structured mesh Lagrangian elastoplastic hydrodynamics program. The reactant and product EOS parameters were calibrated against the Hugoniot experimental data. To calibrate the parameters of the reaction flow model, one-dimensional numerical simulations of the shock initiation experiments were carried out. We simulated the double-shock experiments in which a first weak shock was followed by a second strong shock with a time interval of 0.45 μs . The results indicate the reaction becomes slower in the precompressed region and the run-to-detonation distance is about 1 mm longer than that in the uncompressed region, which is consistent with the desensitization in double-shock experiments. When simulating the corner-turning, the detonation wave passes through the corner and forms a stable non-initiation region near the corner, which is consistent with the dead zone characteristics of the corner-turning experiment of the LX-17 explosive with the same main composition. The numerical simulation results show that the AWS D reaction rate model based on the impact temperature and pressure can well simulate the pre-shock desensitization of heterogeneous explosives.

* 收稿日期: 2020-04-02; 修回日期: 2020-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(11902044)

第一作者: 黄奎邦(1983—), 男, 博士研究生, 副研究员, huang_kuibang@iapcm.ac.cn

通信作者: 刘益儒(1987—), 女, 博士, 副研究员, liuyiru1987@yeah.net

Keywords: TATB-based; heterogeneous explosive; pre-shock; desensitization; AWSO model

高能炸药安全性在民用和军事领域受到广泛关注, 其中多次冲击转爆轰行为是炸药安全性研究的重要方向之一。在一些非理想起爆条件下, 炸药可能会发生预冲击压缩行为, 如隔爆、绕爆或炸药外部包裹高声速材料的复杂装置等。在弱冲击的预压缩条件下, 炸药感度会下降, 后续的强冲击压缩时, 炸药的爆轰距离变长或无法起爆形成爆轰。研究预冲击减敏问题, 对掌握多次冲击条件下装置起爆、爆轰过程或爆轰驱动的可靠性, 具有重要应用价值和意义。Campbell 等^[1]通过聚苯乙烯和铜组合层反射波产生二次冲击的楔形实验, 研究了 HMX 基黏塑性炸药在 3.9 GPa 预冲击下后续 10 GPa 的二次冲击无法实现炸药点火的现象, Campbell 等^[2]还研究了 PBX9404 炸药预冲击压力与需要的减敏时间的关系为 $p^2\tau=1\ 150$ (p 的单位为 100 MPa, τ 的单位为 μs)。对 HMX 基、RDX 基、TNT 基和 TATB 基等 PBX 炸药的减敏现象, 已开展了许多实验研究^[3-6]。通过实验及理论分析^[7-9], 认为弱冲击压缩清除了潜在热点是非均质炸药预冲击减敏的主要物理机制。因此, 非均质炸药的预冲击压缩减敏过程的合理描述, 可能需要考虑孔隙率、空穴塌陷、热点等物理机制的细观反应速率模型。但细观反应速率模型计算量大、模型中的物理参数较难确定, 难推广到工程的实际应用。在唯象反应速率模型上, 开展非均质炸药的预冲击压缩减敏研究, 仍是主要手段之一。

需要指出, 目前被广泛使用的大部分唯象反应速率模型(如 Lee-Tarver 点火增长模型^[10]、JTF 模型^[11]和 WSD 模型^[12]等), 尚不足描述非均质炸药一次冲击与多次冲击(到相同压力)时炸药状态的差异, 无法应用于减敏模拟。因此, DeOliveira 等^[13]在 Lee-Tarver 点火增长模型中引入减敏模块, 减敏进程作用于反应率模型中的点火项和增长项, 较好地模拟了 LX-17 炸药的拐角效应中的死区现象。Hussain 等^[14]、郝鹏程等^[15]也做过类似的研究, 在减敏模块方法中加入了一些经验参数来模拟炸药的减敏现象, 不改变点火增长反应率形式及参数。但是, 对于较弱冲击条件下, 点火项和增长项都被抑制, 爆轰不能正常进行。Starkenber^[16]则在 HVRB 模型^[17]中扩展了依赖冲击压力的热点密度项和依赖压力的衰退率项, 并引入表征冲击波产生的伪熵, 进一步将热点密度项修改为伪熵函数即 XHVRB 模型, 伪熵函数的引入使该模型具备模拟炸药多次冲击起爆的能力。近来逐渐发展了依赖熵或温度的唯象反应速率模型, 如 CREST 模型^[18]、WSD(T) 模型^[19]及 AWSO 模型^[20]等。这类模型无需增加减敏模块, 用熵或温度表征一次冲击与多次冲击时炸药状态的差异, 从而实现减敏的预测。

本文中, 将 AWSO 模型耦合进二维结构网格拉氏弹塑性流体力学程序, 对主要成分为 TATB 的一种 TATB 基非均质炸药的预冲击起爆现象开展数值模拟研究。利用炸药及其产物的冲击雨贡纽实验数据, 校验未反应炸药及产物的状态方程参数, 通过一维冲击起爆的模拟, 标定反应速率模型参数。然后, 模拟该炸药的二次冲击减敏问题及其他一些预冲击减敏问题, 以期为非均质炸药预冲击减敏现象的数值模拟提供参考。

1 计算方法

采用二维结构网格拉氏弹塑性流体力学程序, 它具有空间一阶离散精度和时间二阶离散精度, 动量方程和大多数状态方程与能量方程的联立求解采用显示格式, 具有较高的计算效率。以下重点介绍耦合的反应速率模型方程、未反应炸药和产物状态方程及混合法则。

1.1 反应速率模型方程

在 WSD 模型基础上, AWSO 模型中引入冲击波阵面后未反应炸药的温度 T_{SH} , 使模型同时基于冲击压力和温度, 适合模拟不同初始温度条件下的炸药冲击到爆轰及直径效应实验^[20]。总反应速率方程为:

$$\frac{d\lambda}{dt} = F_p(F_1 + F_2)F_\lambda \quad (1)$$

式中: F_p 为压力 p 的函数, 表征当地压力对反应速率的影响; F_1 和 F_2 为冲击温度 T_{SH} 的函数, 分别控制冲击起爆过程反应率以及爆轰阶段反应率; F_λ 为控制反应快结束时的慢反应项。分别为:

$$F_p = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{p_s}{p}\right)^{n_p}\right] & p > p_\zeta \\ 0 & p \leq p_\zeta \end{cases} \quad (2)$$

$$F_1 = k_1 \exp\left(-\frac{T_1}{T_{SH}}\right)(\lambda + a_1 F_p)(1 - \lambda)^{b_1} \quad (3)$$

$$F_2 = k_2 \exp\left(-\frac{T_2}{T_{SH}}\right)(1 - \lambda)^{b_2} \quad (4)$$

$$F_\lambda = f_s + 0.5(1 - f_s) \left[1 - \tanh\left(\frac{\lambda - \lambda_c}{\delta_\lambda}\right) \right] \quad (5)$$

式中: n_p 、 p_s 、 k_1 、 T_1 、 a_1 、 b_1 、 k_2 、 T_2 、 f_s 、 λ_c 和 δ_λ 为反应率参数。

1.2 状态方程及参数

1.2.1 未反应物状态方程及参数

炸药未反应物采用 Mie-Grüneisen 形式的 Davis 状态方程^[20], 以等熵线为参考线, 未反应炸药状态方程为:

$$p_s = p_i(v_s) + \frac{\Gamma_s(v_s)}{v_s} (E_s - E_i(v_s)) \quad (6)$$

式中: p_s 、 v_s 和 E_s 为未反应炸药的压强、比体积和比内能, p_i 和 E_i 为等熵线上的压强和比内能, Γ_s 为 Grüneisen 系数(当 $v_s \leq v_0$ 时, $\Gamma_s = \Gamma_{0s} + Zy$, 当 $v_s > v_0$ 时, $\Gamma_s = \Gamma_{0s}$)。Z 为用于描述 Grüneisen 系数随密度变化的经验系数, Γ_{0s} 为初始 Grüneisen 系数, $\Gamma_{0s} = \beta c_0^2 / c_{ps}$ (β 为膨胀系数, c_0 为体积声速, c_{ps} 为炸药常压比热), $y = 1 - v_s / v_0$, v_0 为初始比体积。依据冲击绝热线与其任意点开始的等熵膨胀线近似的镜像对称, 可得到^[12]:

$$p_i(v_s) = \begin{cases} \frac{A^2}{4v_0 B} [\exp(4By) - 1] & v_s > v_0 \\ \frac{A^2}{4v_0 B} \left[\sum_{j=1}^3 \frac{(4By)^j}{j!} + \frac{C(4By)^4}{4!} + \frac{y^2}{(1-y)^4} \right] & v_s \leq v_0 \end{cases} \quad (7)$$

$$E_i(v_s) = v_0 \int_0^y p_i(\bar{y}) d\bar{y} + E_0 \quad (8)$$

式中: E_0 为初始比内能, A 、 B 、 C 为根据未反应炸药冲击 Hugoniot 数据标定的常数。

未反应炸药的温度为:

$$T_s(v_s, E_s) = T_i(v_s) \left\{ \frac{1 + \alpha_{st}}{c_{vs} T_i(v_s)} [E_s - E_i(v_s)] + 1 \right\}^{1/(1+\alpha_{st})} \quad (9)$$

式中: c_{vs} 为定容比热, $c_{vs} = c_{ps}(1 + \beta \Gamma_{0s} T)^{-1}$, $T_i(v_s)$ 为沿等熵线上的温度。有:

$$T_i(v_s) = T_{0s} \exp(-Zy) \left(\frac{v_s}{v_0}\right)^{-(\Gamma_{0s} + Z)} \quad (10)$$

本文的炸药冲击雨贡纽实验数据来自文献 [21-23], 实验样品中炸药初始密度范围为 1.883~1.898 g/cm³, 炸药的 $D-u$ 关系为 $D = 2.417 \text{ km/s} + 2.141 u$ 。由文献 [24], 按实验样品炸药初始密度中间值 $\rho_0 = 1.890 \text{ g/cm}^3$ 标定参数, 标定的未反应炸药状态方程参数见表 1。

表 1 未反应 TATB 基炸药的 Davis 状态方程参数

Table 1 Davis EOS parameters of unreacted TATB-based explosive

$A/(\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	B	C	Z	Γ_{0s}	$E_0/(\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1})$	α_{st}	$c_{vs}/(\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
1.93	4.26	0.30	0	0.56	3.80	0.757 0	0.000 967

1.2.2 爆轰产物状态方程及参数

爆轰产物也采用 Mie-Grüneisen 形式状态方程^[20], 以等熵线为参考线, 爆轰产物状态方程为:

$$p_g = p_i(v_g) + \frac{\Gamma_g(v_g)}{v_g} [E_g - E_i(v_g)] \quad (11)$$

式中: p_g 、 v_g 和 E_g 分别为产物的压力、比体积和比内能, p_i 和 E_i 为等熵线上的压力和比内能, Grüneisen 系数 $\Gamma_g(v_g) = k - 1 + (1 - b)F(v_g)$ ($F(v_g) = 2av_c^{2n} / (v_g^{2n} + v_c^{2n})$, a 、 k 、 v_c 、 n 和 b 为待定参数)。

考虑低压下和高压下绝热指数的变化, 由多方气体状态方程得到过 CJ 点的等熵线为:

$$p_i = \frac{p_c [0.5(v_g/v_c)^n + 0.5(v_g/v_c)^{-n}]^{a/n} k - 1 + F(v_g)}{(v_g/v_c)^{k+a} k - 1 + a} \quad (12)$$

$$E_i = \frac{E_c [0.5(v_g/v_c)^n + 0.5(v_g/v_c)^{-n}]^{a/n}}{(v_g/v_c)^{k-1+a}} \quad (13)$$

式中: $E_c = p_c v_c / (k - 1 + a)$ 。产物温度为:

$$T_g(v_g, E_g) = T_i(v_g) + \frac{E_g - E_i(v_g)}{c_{v_g}} \quad (14)$$

等熵线上的温度 $T_i(v_g)$ 为:

$$T_i(v_g) = \frac{2^{-ab/n} p_c v_c [0.5(v_g/v_c)^{-n} + 0.5(v_g/v_c)^n]^{(a/n)(1-b)}}{k - 1 + a c_{v_g} (v_g/v_c)^{k-1+a(1-b)}} \quad (15)$$

参数 a 、 k 、 v_c 、 n 和 b 通过拟合爆轰产物冲击雨贡纽实验数据来标定。标定的原则为: (1) 等熵线必须过 CJ 点; (2) 等熵线在 CJ 点处必须与 Rayleigh 线相切; (3) 截断体积需简单地用 Gurney 能量矫正; (4) 气体产物完全膨胀时对外做的功等于化学能; (5) 在 v_g 较大时, 等效绝热指数等于理想气体的; (6) 遵循前 5 个原则确定了 a 、 k 、 v_c 、 p_c 和 n 后, 通过调整参数 b 使超压爆轰条件下产物冲击雨贡纽曲线位于炸药冲击雨贡纽曲线上方。参考实验数据^[25], 标定得到炸药产物状态方程参数见表 2。标定的未反应炸药及产物状态方程 p - v 雨贡纽曲线与实验结果的比较如图 1 所示, 在高压段, 未反应炸药 p - v 曲线低于爆轰产物 p - v 曲线。

1.2.3 混合法则

采用温度压力平衡的混合法则, 假设固体未反应炸药与气体产物之间压力平衡且温度平衡。 λ 为反应度, 有:

$$\begin{aligned} p &= p_s = p_g, & T &= T_s = T_g, & v &= (1 - \lambda)v_s + \lambda v_g, & E &= (1 - \lambda)E_s + \lambda E_g, \\ v_s &= \Phi v / [\lambda + (1 - \lambda)\Phi], & v_g &= v / [\lambda + (1 - \lambda)\Phi], & \Phi &= v_s / v_g \end{aligned} \quad (16)$$

2 一次冲击起爆数值模拟及模型参数标定

参考 AWSO 模型模拟 PBX9502 炸药的模型参数^[10], 根据本文的 TATB 基炸药冲击起爆实验数据的 POP 图^[28-29], 对个别参数进行微调。模型参数见表 3, 计算模型为长 2 cm 铝飞片以不同初始速度撞击长

表 2 TATB 基炸药产物的 Davis 状态方程参数

Table 2 Davis EOS parameters of reaction products of TATB-based explosive

A	k	$v_c / (\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	p_c / GPa	n	b	$c_{v_g} / (\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
0.835 603	1.30	0.926 85	1.485 1	4.242 66	0.85	0.001 072

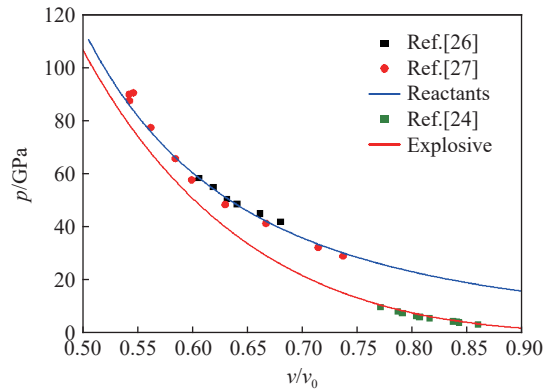


图 1 未反应炸药和产物的雨贡纽曲线

Fig. 1 Hugoniot curves of unreacted explosives and products

4 cm 炸药, 炸药初始密度为 1.890 g/cm, 一维冲击起爆实验及模拟的 POP 图见图 2。拟合得到实验的冲击压力与到爆轰距离的关系为 $\lg(p_0/\text{GPa})=(1.44\pm 0.04)-(0.34\pm 0.04)\lg(L^*/\text{mm})$, 数值模拟的冲击压力与到爆轰距离的关系为 $\lg(p_0/\text{GPa})=(1.45\pm 0.004)-(0.35\pm 0.004)\lg(L^*/\text{mm})$, 图 3 为入射压力 $p_0=12.514$ GPa 条件下, 不同位置炸药粒子速度历程曲线的模拟结果与实验结果的对比。数值模拟的爆轰增长行为与实验结果符合较好, 但是波速比实验结果偏高, 分析认为与未反应炸药冲击雨贡纽关系有关。张琪敏等^[28]统计了锰铜法、反向撞击法、电磁法及 PDV 方法测 $D-u$ 关系数据, 认为不同方法测量的实验结果存在一定差异, 采用不同类型实验数据来标定未反应炸药状态方程对模拟冲击波在炸药中的传播波速会存在偏差。

表 3 TATB 基炸药 AWS D 模型参数

Table 3 Parameters of the AWS D model for the TATB-based explosive

n_p	p_s/GPa	k_1/s^{-1}	T_1/K	a_1	b_1	b_2	k_2/s^{-1}	T_2/K	f_s	λ_c	δ_d
0.651 5	27.60	336	1 724	0.060 81	2.122	0.9	10 200	6 278	0.035 87	0.876 4	0.021 68

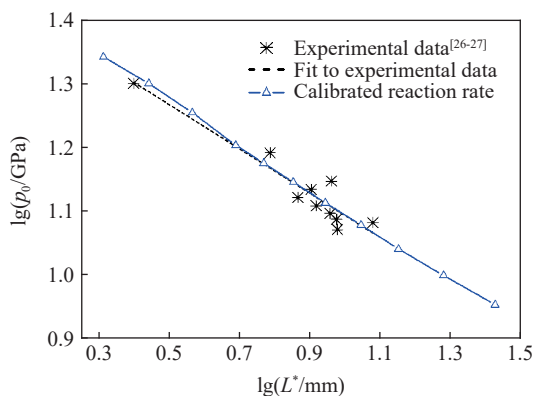


图 2 冲击压力与到爆轰距离的关系

Fig. 2 Relationships between impact pressure and run-to-detonation distance

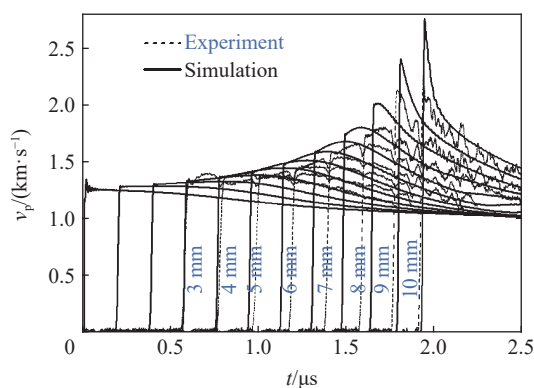


图 3 冲击起爆粒子速度曲线

Fig. 3 Particle velocity curves of shock to detonation

3 预冲击减敏现象的数值模拟

3.1 TATB 基炸药二次冲击起爆实验的数值模拟

二次压缩实验在口径 57 mm 火炮上实施, 其原理与另一种炸药的二次压缩实验^[30]相同。飞片由蓝宝石和约 1 mm 的 Kel-F 粘合而成, 由于蓝宝石波阻抗远高于 Kel-F, 撞击炸药后向 Kel-F 传入的冲击波在蓝宝石界面形成高压反射波, 反射波再入射炸药形成二次冲击压缩。典型的二次冲击压缩炸药粒子速度曲线如图 4 所示。由图 4(a) 可见: 前驱波为不会形成爆轰的弱波, 波后压力为 6.136 GPa; 前驱波入射后约 0.45 μs , 第二次入射波进入炸药, 其波后压力为 12.650 GPa。第二次压缩波未追赶上前驱波前, 炸药无明显反应增长行为。第二次压缩波在距离炸药端面约 4 mm 位置, 追上第一次入射波。从第二次压缩波进入炸药开始, 到爆轰距离为 9.85 mm, 到爆轰时间为 1.72 μs 。图 3 为入射压力 12.514 GPa 的一次冲击起爆的粒子速度曲线, 入射压力比二次加载的主波略小, 一次冲击起爆到爆轰距离为 8.54 mm, 到爆轰时间为 1.60 μs , 可以判断预冲击压缩对炸药的减敏作用。

图 5 为二次冲击起爆数值模拟结果, 当主波进入炸药后且未追赶上前驱波前, 粒子速度无增长行为, 而追上前驱波后, 反应才明显发生并发展为爆轰。表 4 为二次冲击起爆实验和数值模拟的到爆轰距离 L^* 和到爆轰时间 T^* , L^* 和 T^* 均以主波进入炸药开始计。由表 4 可见, 数值模拟结果与实验结果较好符合。图 6 为一次冲击起爆、二次冲击起爆不同位置计算单元化学反应份额的变化曲线, 二次冲击时: 距

离炸药端面 2 mm 处, 受前驱波的作用发生减敏, 反应份额的增长为一条缓慢曲线, 可以理解为受压力和温度影响的缓慢燃烧过程; 距离炸药端面 5 mm 处, 单元不受前驱波影响, 反应份额迅速增长, 理解为受冲击作用的剧烈燃烧过程。一次冲击时, 距离炸药端面 2、5 mm 的计算单元反应份额增长与二次冲击距离端面 5 mm 的单元类似, 都为迅速增长。这说明, AWSD 模型在不影响弱冲击起爆时又可以较好模拟预冲击减敏过程。图 7 为不同位置的温度变化, 多次冲击时, 炸药单元(2 mm 位置处)温升比只经过一次冲击(5 mm 位置)的温升高, 因此, 依赖于温度的 AWSD 模型可以区分多次冲击炸药状态的差异。

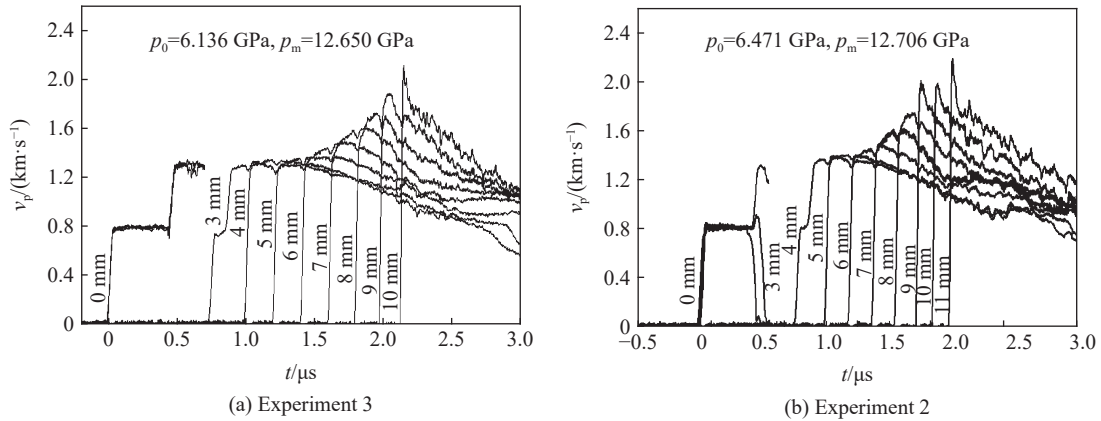


图 4 二次冲击压缩炸药粒子速度曲线的实验结果

Fig. 4 Experimental particle velocity curves of explosive by double-shock compression

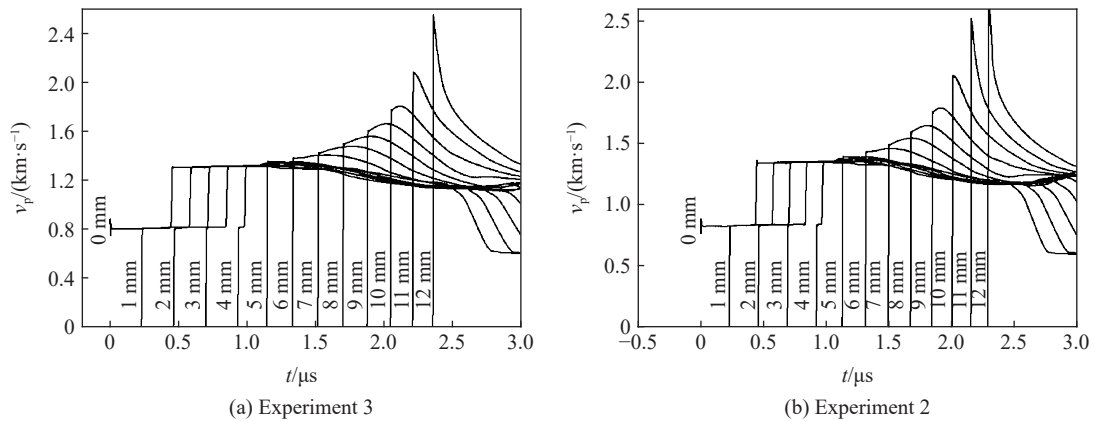


图 5 二次冲击压缩炸药粒子速度曲线的数值模拟结果

Fig. 5 Simulated particle velocity curves of explosive by double-shock compression

表 4 二次冲击起爆实验的到爆轰距离和到爆轰时间的实验和数值模拟结果

Table 4 Experimental and simulated results of distance and time of run to detonation by double-shock initiation

实验	方法	$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$v_0/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	p_0/GPa	p_m/GPa	L^*/mm	$T^*/\mu\text{s}$
3	实验	1.881	1.669	6.135 6	12.649 9	9.845	1.716
	数值模拟					10.141	1.679
2	实验	1.881	1.732	6.470 6	12.706 4	9.145	1.356
	数值模拟					9.240	1.505

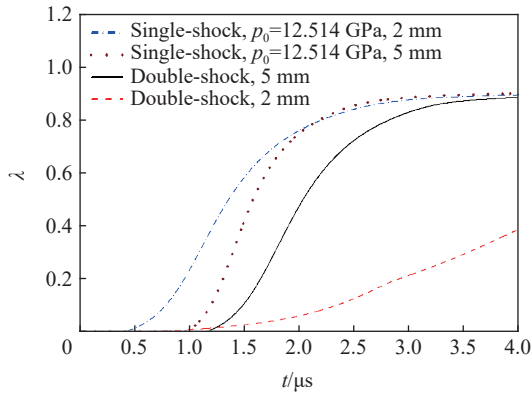


图 6 不同位置计算单元的反应份额
Fig. 6 Reaction fractions of numerical elements at different positions

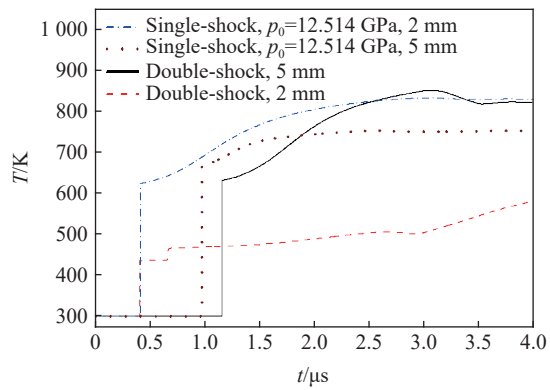


图 7 不同位置计算单元的温度
Fig. 7 Temperatures of numerical elements at different positions

3.2 TATB 基炸药拐角效应的数值模拟

钝感炸药爆轰波经过拐角后, 由于侧向稀疏作用, 爆轰波被稀疏为 5~9 GPa 范围的无法起爆炸药的弱冲击波, 使拐角附近炸药经历一次预冲击压缩; 随着后续爆轰波的发展, 也逐渐扩展到拐角区域炸药, 但受到弱波预冲击区域的炸药始终无法形成爆轰, 即为死区现象^[31]。本文中采用文献 [13, 15] 中的模拟 LX-17 炸药爆轰波过拐角的凸井实验^[32] 的相似模型。图 8 为实验图像^[32], 由于炸药比 LX-17 略微钝感, 且采用拉氏方法模拟, 完全按照凸井实验建模会出现大变形问题, 所以将模拟模型作了适当调整, 但是不改变爆轰波过拐角的爆轰过程。图 9 为计算模型, 起爆器区域给一个高压区并采用比体积起爆模拟雷管组件引爆起爆器, 其他区域炸药分别采用 AWSD 模型和 WSD 模型^[12] 模拟, 炸药起爆后爆轰波沿着金属钨滑移传播, 到达金属钨右上角后发生绕爆。网格尺度为 0.1 mm, 可以保证一个反应区内有 15 个网格。

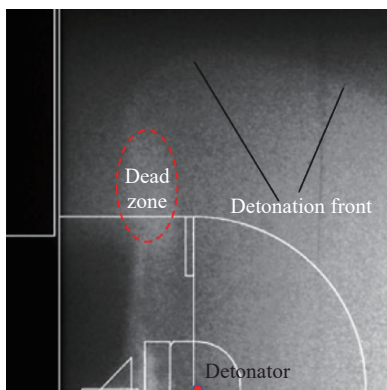


图 8 LX-17 拐角效应^[32]
Fig. 8 LX-17 corner turning effect^[32]

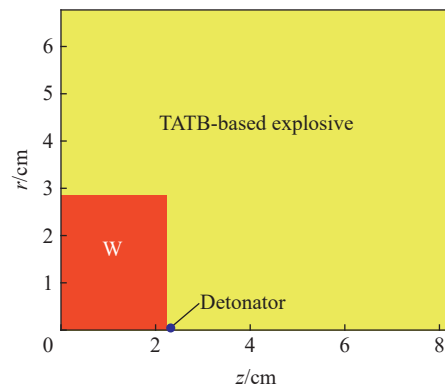


图 9 拐角效应计算模型
Fig. 9 Corner-turning numerical model

图 10 为 AWSD 模型模拟结果, 到 4 μs 时爆轰波到达拐角, 由于左边侧向稀疏作用, 爆轰波被稀疏使拐角附近炸药经历一次预冲击压缩, 随着向上的爆轰波的发展, 也逐渐扩展到左边区域炸药, 但是受到弱波预冲击区域的炸药始终无法形成爆轰, 形成了稳定的死区。死区特征与文献 [13, 31-33] 的实验和数值模拟结果相似。

图 11 为 WSD 模型模拟结果, 爆轰波过拐角后, 拐角附近炸药也经历一次预冲击压缩, 但上方的爆轰波迅速向预压缩区域发展, 约 2 μs 再次形成稳定爆轰, 预压缩区域的炸药也逐渐反应完成, 无法形成死区。对比图 10~11 可见, 依赖温度的 AWSD 模型可以较好模拟拐角效应的死区的形成过程, 而依赖压力的 WSD 模型无法模拟死区现象。

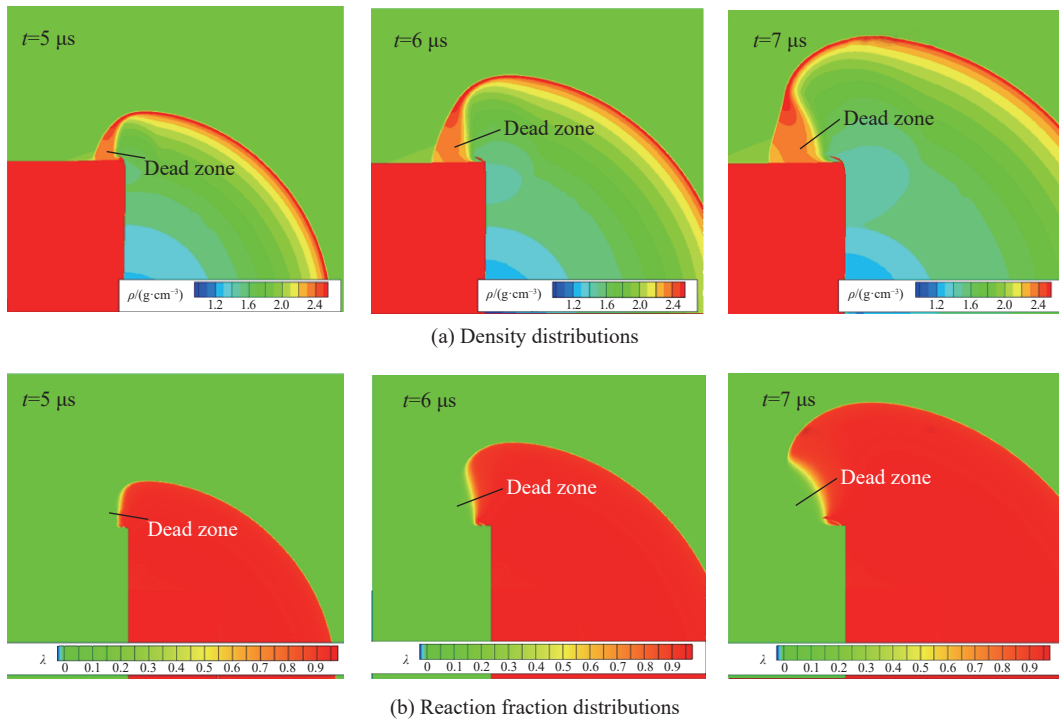


图 10 AWS 模型的拐角效应特征时刻密度和反应份额分布

Fig. 10 Density and reaction fraction distributions at character times for corner-turning by the AWS model

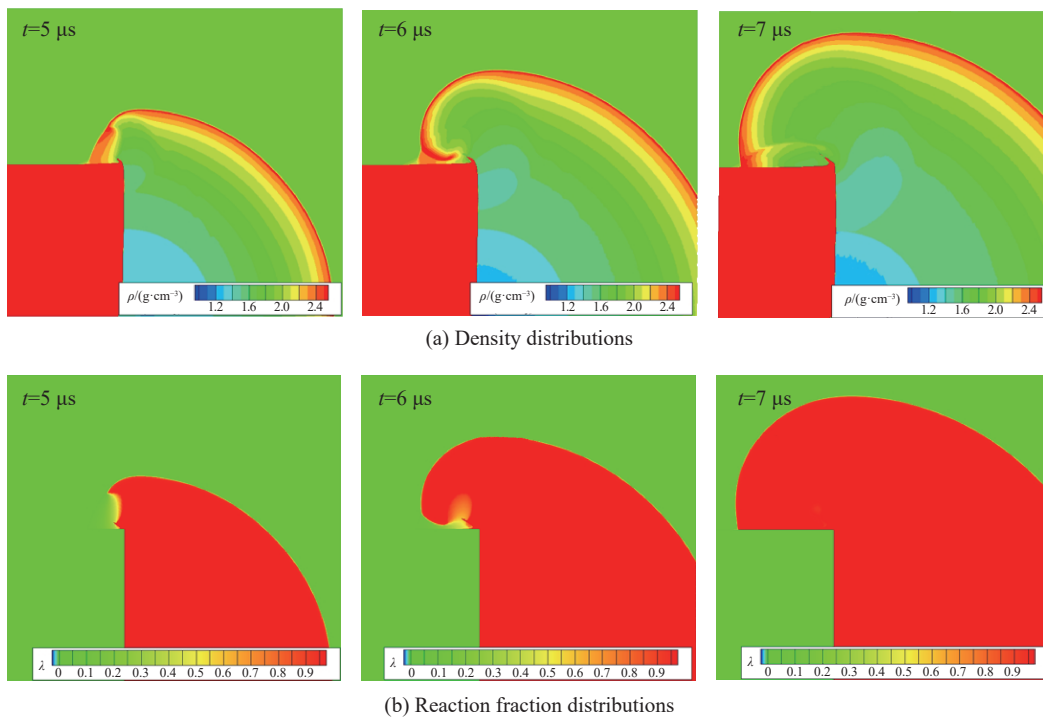


图 11 WSD 模型的拐角效应特征时刻密度和反应份额分布

Fig. 11 Density and reaction fraction distributions at character times for corner-turning by the WSD model

4 结 论

在二维结构网格拉氏弹塑性流体力学程序中, 引入基于温度和压力的 AWS 反应速率模型及未反

应炸药、产物的 Davis 状态方程。通过冲击雨贡纽实验、一维冲击起爆实验标定了状态方程参数及反应率模型参数后, 针对一种 TATB 基钝感炸药的二次冲击起爆及拐角效应等预冲击减敏问题开展数值模拟研究, 得到以下结论:

(1) 二次冲击的模拟, 受预压缩区域的炸药反应变慢, 到爆轰距离增长约为 1 mm, 与该炸药二次冲击实验减敏现象相符;

(2) 模拟拐角效应时, 爆轰波经过拐角后, 在拐角附近形成稳定的不起爆区域, 与炸药主要成分相同的 LX-17 炸药的拐角效应实验的死角特征相符;

(3) 无需引入冲击减敏模块, 依赖温度的 AWSD 模型适用于模拟预冲击减敏现象, 可以为工程中炸药预冲击减敏问题的模拟提供参考, 由于模型包含冲击温度, 后续还可以开展不同初始温度条件下的预冲击减敏的模拟研究。

参考文献:

- [1] CAMPBELL A W, DAVIS W C, RAMSAY J B, et al. Shock initiation of solid explosives [J]. *Physics of Fluids*, 1961, 4(4): 511. DOI: 10.1063/1.1706354.
- [2] CAMPBELL A W, TRAVIS J R. The shock desensitization of PBX-9404 and composition B-3 [C] // Proceedings of the 8th International Detonation Symposium. Albuquerque: Naval Surface Weapons Center, 1985: 1057–1068.
- [3] MULFORD R N, SHEFFIELD S A, ALCON R R. Preshock desensitization of PBX explosives [J]. *AIP Conference Proceedings*, 1994, 309(1): 1405–1408. DOI: 10.1063/1.46243.
- [4] TARVER C M, COOK T M, URTIEW P A, et al. Multiple shock initiation of LX-17 [C] // Proceedings of the 10th International Detonation Symposium. Boston: Office of Naval Research, 1993: 676–703.
- [5] BAT'KOV Y V, GLUSHAK B L, NOVIKOV S A. Desensitization of pressed explosive compositions based on TNT, RDX, and HMX under double shock-wave loading [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1995, 31(4): 482–485. DOI: 10.1007/BF00789372.
- [6] GUSTAVSEN R L, SHEFFIELD S A, ALCON R R, et al. Double shock initiation of the HMX based explosive EDC-37 [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2002, 620(1): 999–1002. DOI: 10.1063/1.1483706.
- [7] MADER C L. Numerical modeling of explosives and propellants [M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [8] HUSSAIN T, LIU Y, HUANG F L, et al. Modeling and simulation of preshock desensitization in heterogeneous explosives using a mesoscopic reaction rate model [J]. *Simulation*, 2015, 91(11): 980–988. DOI: 10.1177/0037549715608962.
- [9] BORDZILOVSKII S A, KARAKHANOV S M. Desensitization of pressed RDX/paraffin and HMX/paraffin compounds by multiple shock waves [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1995, 31(2): 227–235. DOI: 10.1007/BF00755754.
- [10] LEE E L, TARVER C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives [J]. *The Physics of Fluids*, 1980, 23(12): 2362–2372. DOI: 10.1063/1.862940.
- [11] JOHNSON J N, TANG P K, FOREST C A. Shock-wave initiation of heterogeneous reactive solids [J]. *Journal of Applied Physics*, 1985, 57(9): 4323–4334. DOI: 10.1063/1.334591.
- [12] WESCOTT B L, STEWART D S, DAVIS W C. Equation of state and reaction rate for condensed-phase explosives [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(5): 053514. DOI: 10.1063/1.2035310.
- [13] DEOLIVEIRA G, KAPILA A K, SCHWENDEMAN D W, et al. Detonation diffraction, dead zones and the ignition and growth model [C] // Proceedings of the 13th International Detonation Symposium. Norfolk: Office of Naval Research, 2006.
- [14] HUSSAIN T, LIU Y, HUANG F L, et al. Desensitization by pre-shocking in heterogeneous explosives and its numerical modelling [J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2016, 13(2): 357–379. DOI: 10.22211/cejem/64990.
- [15] 郝鹏程, 冯其京, 洪滔, 等. 钝感炸药点火增长模型的欧拉数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(3): 243–250. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)03-0243-08.
HAO P C, FENG Q J, HONG T, et al. Eulerian simulation on insensitive explosives with the ignition-growth reactive model [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(3): 243–250. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)03-0243-08.
- [16] STARKENBERG J. Shock-pressure and pseudo-entropic approaches to explosive initiation modeling [C] // Proceedings of the 15th International Detonation Symposium. San Francisco, 2014: 908–916.
- [17] STARKENBERG J. Modeling detonation propagation and failure using explosive initiation models in a conventional

- hydrocode [C] // Proceedings of the 12th International Detonation Symposium. Annapolis: Office of Naval Research, 2002.
- [18] HANDELEY C A. CREST reactive flow model [C] // Proceedings of the 13th International Detonation Symposium. Norfolk, 2006.
- [19] DESBIENS N, MATIGNON C, SORIN R. Temperature-based model for condensed-phase explosive detonation [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 500(15): 152004. DOI: 10.1088/1742-6596/500/15/152004.
- [20] ASLAM T D. Shock temperature dependent rate law for plastic bonded explosives [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 123(14): 145901. DOI: 10.1063/1.5020172.
- [21] 裴红波, 刘俊明, 张旭, 等. 基于反向撞击法的 JB-9014 炸药 Hugoniot 关系测量 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(5): 052301. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0395.
- PEI H B, LIU J M, ZHANG X, et al. Measurement of Hugoniot relation for unreacted JB-9014 explosive with reverse-impact method [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(5): 052301. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0395.
- [22] 刘俊明, 张旭, 裴红波, 等. JB-9014 钝感炸药冲击 Hugoniot 关系测量 [J]. *高压物理学报*, 2018, 32(3): 033202. DOI: 10.11858/gywlb.20170669.
- LIU J M, ZHANG X, PEI H B, et al. Measurement of Hugoniot relation for JB-9014 insensitive explosive [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2018, 32(3): 033202. DOI: 10.11858/gywlb.20170669.
- [23] 张旭, 池家春, 冯民贤. JB9014 钝感炸药冲击绝热线测量 [J]. *高压物理学报*, 2001, 15(4): 304–308. DOI: 10.11858/gywlb.2001.04.011.
- ZHANG X, CHI J C, FENG M X. Hugoniot relation of JB9014 insensitive high explosive [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2001, 15(4): 304–308. DOI: 10.11858/gywlb.2001.04.011.
- [24] 刘俊明. JB-9014 炸药未反应状态方程研究 [D]. 四川绵阳: 中国工程物理研究院, 2018.
- [25] 徐辉, 孙占峰. 钝感高能炸药 JB-9014 做功能力的实验研究 [J]. *高压物理学报*, 2013, 27(4): 582–586. DOI: 10.11858/gywlb.2013.04.018.
- XU H, SUN Z F. An experimental study on the capacity for work of insensitive high explosive [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2013, 27(4): 582–586. DOI: 10.11858/gywlb.2013.04.018.
- [26] 曾代朋, 陈军, 谭多望. 超压爆轰产物冲击绝热线的实验研究 [J]. *高压物理学报*, 2010, 24(1): 76–80. DOI: 10.11858/gywlb.2010.01.014.
- ZENG D P, CHEN J, TAN D W. Experiment research on the Hugoniot of JB-9014 explosive over-driven detonation product [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2010, 24(1): 76–80. DOI: 10.11858/gywlb.2010.01.014.
- [27] TANG P K, ANDERSON W W, FRITZ J N, et al. A study of the overdriven behaviors of PBX 9501 and PBX 9502 [C] // Proceedings of the 11th International Detonation Symposium. Snowmass, CO, 1998.
- [28] 张琪敏, 张旭, 赵康, 等. TATB 基钝感炸药 JB-9014 的冲击起爆反应增长规律 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(4): 041405. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0050.
- ZHANG Q M, ZHANG X, ZHAO K, et al. Law of reaction growth of shock initiation on the TATB based insensitive explosive JB-9014 [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(4): 041405. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0050.
- [29] 黄文斌, 文尚刚, 谭多望, 等. 在球面散心冲击波作用下 JB-9014 炸药冲击引爆过程实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(4): 373–376. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)04-0373-04.
- HUANG W B, WEN S G, TAN D W, et al. Experimental study on shock initiation process of JB-9014 under loading conditions of divergent spherical shock wave [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(4): 373–376. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)04-0373-04.
- [30] 瞿攀登, 陈军, 张蓉, 等. 二次压缩条件下 JOB-9003 炸药特性研究 [J]. *高压物理学报*, 2017, 31(2): 155–161. DOI: 10.11858/gywlb.2017.02.007.
- ZI P D, CHEN J, ZHANG R, et al. Characteristics of JOB-9003 in double shocks experiments [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2017, 31(2): 155–161. DOI: 10.11858/gywlb.2017.02.007.
- [31] FERM E N, MORRIS C L, QUINTANA J P, et al. Proton radiography examination of unburned regions in PBX 9502 corner turning experiments [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2002, 620(1): 966–969. DOI: 10.1063/1.1483699.
- [32] SOUERS P C, ANDRESKI H G, COOK III C F, et al. LX-17 corner-turning [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2004, 29(6): 359–367. DOI: 10.1002/prop.200400067.
- [33] WHITWORTH N J. CREST modelling of PBX 9502 corner turning experiments at different initial temperatures [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 500(5): 052050. DOI: 10.1088/1742-6596/500/5/052050.

(责任编辑 丁峰)