

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2025.02.003

# Comp. B 炸药孔洞塌缩及热点生成的数值模拟\*

王茂杰 白桥栋 韩家祥 王进平 贺全彪

南京理工大学瞬态物理全国重点实验室(江苏南京,210094)

**[摘要]** 炸药内部孔洞塌缩机制是热点生成的主要机制。采用点火增长模型,使用 S-ALE 算法,在 Comp. B 炸药中添加微孔洞结构,研究孔洞的存在和孔洞大小对炸药起爆的影响,分析孔洞塌缩和热点生成过程。结果表明,孔洞的存在使炸药内部更容易产生热点,孔洞塌缩过程形成了微射流,微射流冲击孔洞下游内壁面,动能转化为内能,造成能量局部化,导致热点的形成。塌缩过程中,粒子速度达到 7 936 m/s,最高温度接近 6 000 K。初始孔洞大小决定热点的大小,孔洞越大,热点尺寸越大;孔洞大小还会影响热点温度,小孔洞的温度升高更快,而大孔洞最终的热点温度更高。

**[关键词]** Comp. B 炸药;孔洞;塌缩机制;热点

**[分类号]** TQ560.1

## Numerical Simulation of Pore Collapse and Hot Spot Generation in Comp. B Explosives

WANG Maojie, BAI Qiaodong, HAN Jiayang, WANG Jinping, HE Quanbiao

National Key Lab of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

**[ABSTRACT]** The collapse mechanism of internal pores in explosives is the main mechanism for the generation of hotspots. The ignition and growth model was adopted, and the S-ALE algorithm was used. Micro-pore structures were added to Comp. B explosives to study the influence of the existence and size of pores on the initiation of explosives, and the processes of pore collapse and hot spot generation were analyzed. The results show that the existence of pores makes it easier to generate hot spots in explosives. During the pore collapse process, micro-jets are formed. The micro-jets impact the inner wall surface downstream of the pores, and the kinetic energy is converted into internal energy, resulting in energy localization and leading to the formation of hot spots. During the collapse process, the particle velocity reaches 7 936 m/s, and the maximum temperature is close to 6 000 K. The initial pore size determines the size of the hot spots. The larger the pores are, the larger the hot spots size will be. The pore size also affects the hot spot temperature. The temperature of small pores rises more rapidly, while the final hot spot temperature of large pores is higher.

**[KEYWORDS]** Comp. B explosive; pore; collapse mechanism; hot spot

## 0 引言

Comp. B 炸药(以下简称 B 炸药)等非均质炸药通常含有孔洞、裂纹等缺陷,在冲击载荷下,能量集中在这些缺陷附近,导致热点的形成,从而引发点火。潜在的热点产生机制包括孔洞塌缩<sup>[1]</sup>、剪切摩擦<sup>[2]</sup>、气泡绝热压缩<sup>[3]</sup>、裂纹尖端加热<sup>[4]</sup>、晶体形变<sup>[5]</sup>等。大量研究表明,孔洞塌缩是热点生成的主要机制<sup>[6]</sup>。因此,研究孔洞塌缩对炸药的生产设计和安全防护具有一定的指导意义。

为了更好地理解冲击引发孔洞塌缩的物理特性,国内外学者开展了实验研究<sup>[7-9]</sup>。虽然实验可以为验证和校准计算结果提供直接证据,但无法提供瞬态塌缩过程中的细节。通过建立晶体模型<sup>[10-12]</sup>和使用分子动力学<sup>[13-14]</sup>等方法模拟孔洞塌缩过程发现,低冲击强度下以黏塑性变形为主,高冲击强度下会形成微射流。

大规模计算往往采用流体力学代码来研究高速冲击下的微米级孔洞塌缩热点生成机制<sup>[15]</sup>。目前的研究模型主要有 Kim 单球壳模型<sup>[16-19]</sup>和 DZK 模型<sup>[20-21]</sup>。改进的点火增长模型也可用于微观结构研

\* 收稿日期:2024-12-04

第一作者:王茂杰(1997—),男,硕士研究生,研究方向为爆轰理论与应用。E-mail: wangmj@njust.edu.cn

通信作者:白桥栋(1979—),男,研究员,研究方向为爆轰理论与应用。E-mail: baiqdnj@njust.edu.cn

究。如 Yang 等<sup>[22]</sup>建立了一种新的点火增长反应速率模型,该模型仅用一组模型参数即可描述不同初始密度、不同粒径和不同加载压力下炸药的冲击起爆过程。通过数值模拟,学者也对位置、大小和形状等影响孔洞塌缩的因素进行了研究<sup>[23-25]</sup>。

目前的研究主要集中在二维单晶结构和反应速率模型的改进,但关于三维结构的孔洞塌缩和热点演化过程的研究相对较少。本文中,在 LS-DYNA 中采用点火增长模型,使用 S-ALE 算法,对冲击载荷下的孔洞塌缩过程进行数值模拟,研究了孔洞的存在和孔洞大小等因素对炸药起爆的影响,分析了孔洞塌缩和热点生成过程中温度和反应度的响应特性,从而为探索孔洞塌缩机制、提高装药安全性提供参考。

## 1 模型

### 1.1 本构模型

B 炸药的状态方程采用点火增长模型。该模型包含未反应炸药 JWL 方程、爆轰产物 JWL 方程和反应速率方程。JWL 状态方程将未反应炸药的壓力定义为

$$p_e = A e^{-R_1 V_e} + B e^{-R_2 V_e} + \omega C_V \frac{T_e}{V_e} \quad (1)$$

式中: $p_e$  为压力; $V_e$ 、 $T_e$  分别为未反应炸药的相对体积和相对温度, $V_e = \bar{v}/\bar{v}_0$ ,  $T_e = T/T_0$ ;  $A$ 、 $B$ 、 $C_V$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为常数。

同样地,爆轰产物中的压力也由式(1)中的 JWL 形式来定义。

使用混合法则来计算未反应炸药与爆轰产物的混合物,该混合物由反应度  $\lambda$  定义。

采用反应度  $\lambda$  判断炸药是否发生爆轰反应,若  $\lambda$  为 0,表示炸药未发生反应;若  $0 < \lambda < 1$ ,说明炸药发生了不完全反应,此时,固态未反应物和气态反应产物共存,两者的热力学特性分别由未反应炸药 JWL 方程和爆轰产物 JWL 方程描述;若  $\lambda$  为 1,表示炸药发生完全反应。假设温度和压力相等,相对体积是可加的,即

$$V = (1 - \lambda) V_e + \lambda V_p \quad (2)$$

式中: $V_p$  是爆轰产物的相对体积。

反应速率方程是用来描述炸药的反应速率以及反应速率和热力学状态之间的相互影响,方程式为

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1 - \lambda)^b \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x +$$

$$G_1(1 - \lambda)^c \lambda^d p^y + G_2(1 - \lambda)^e \lambda^g p^z \quad (3)$$

式中: $\rho$  为炸药密度; $I$ 、 $G_1$ 、 $G_2$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 、 $g$ 、 $x$ 、 $y$  和  $z$  均为常数。

式(3)中,等式右边第 1 项表示炸药热点点火项;第 2 项表示低压慢反应项;第 3 项表示高压快反应项。B 炸药点火增长模型所涉及的相关参数如表 1~表 3<sup>[26]</sup>所示。

表 1 B 炸药未反应炸药的 JWL 方程模型参数

Tab. 1 Model parameters of JWL equation for unreacted Compe. B explosive

$A/$ GPa	$B/$ GPa	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$C_V/$ (GPa · K <sup>-1</sup> )
77 810	-5.031	11.3	1.13	0.893 8	$2.487 \times 10^{-3}$

表 2 B 炸药爆轰产物的 JWL 方程模型参数

Tab. 2 Model parameters of JWL equation for detonation products of Comp. B explosive

$A/$ GPa	$B/$ GPa	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$C_V/$ (GPa · K <sup>-1</sup> )
524.200	7.678	4.2	1.10	0.500 0	$1.000 \times 10^{-3}$

表 3 B 炸药反应速率方程模型参数

Tab. 3 Model parameters of reaction rate equation for Comp. B explosive

$I/\mu s^{-1}$	$a$	$b$	$c$	$d$	$e$
$4 \times 10^6$	0.036 7	0.667	0.667	0.333	0.222
$g$	$x$	$y$	$z$	$G_1$	$G_2$
1.0	7.0	2.0	3.0	140	1 000

飞片采用 Johnson-Cook (J-C) 强度模型。J-C 模型用于应变率在很大范围内变化的问题,以及由于塑性加热绝热温度升高导致材料软化问题。模型具体为

$$\sigma = (A + B \bar{\epsilon}_p^n) (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) [1 - (T^*)^m] \quad (4)$$

式中: $\sigma$  为屈服强度; $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $n$ 、 $m$  为材料常数; $\bar{\epsilon}_p^n$  为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^* = \bar{\epsilon}_p/\dot{\epsilon}_0$ , 为等效塑性应变率, $\dot{\epsilon}_0$  为参考应变率; $T^* = (T - T_r)/(T - T_m)$ ,  $T_r$  与  $T_m$  分别为室温和材料的熔化温度。

飞片材料参数见表 4<sup>[27]</sup>。表 4 中: $\rho$  为材料密度; $E$  为弹性模量; $\nu$  为泊松比。

表 4 飞片材料参数

Tab. 2 Material parameters of the fly blade

材料	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$G/GPa$	$E/GPa$	$\nu$
钨	17.7	158.08	411	0.3
$A/MPa$	$B/MPa$	$n$	$C$	$m$
0	1 350	0	1.0	0.06

飞片采用 Gruneisen 状态方程:

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu [1 + (1 - \gamma_0/2)\mu - a/2 \mu^2]}{1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \mu^2 / (\mu + 1) - S_3 \mu^3 / (\mu + 1)^2 + (\gamma_0 + a\mu) E} \quad (5)$$

式中:  $\rho_0$  为初始密度;  $\mu$  为压缩度;  $c$  为物质中的声速;  $\gamma_0$  是 Gruneisen 系数;  $a$  是对  $\gamma_0$  的一阶修正;  $E$  为产物内能;  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $\gamma_0$  和  $a$  均为常数,  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  是  $u_s$ - $u_p$  曲线的 3 次拟合系数,  $u_s$  为冲击波速度,  $u_p$  为波后粒子速度。

### 1.2 计算模型

建立飞片冲击炸药过程中炸药起爆特性和热点形成过程的模型。薄圆片飞片尺寸为  $\phi 1.4 \text{ mm} \times 0.25 \text{ mm}$ , 飞片材料为钨; 圆柱形 B 炸药尺寸为  $\phi 3 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ , 密度为  $1.717 \text{ g/cm}^3$ 。坐标原点位于炸药底部中心, 孔洞位置为  $(0, 0, 1.7)$ , 尺寸分别设置为  $150$ 、 $125 \text{ }\mu\text{m}$  和  $100 \text{ }\mu\text{m}$ 。使用 S-ALE 算法, 空气域尺寸为  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。网格尺寸为  $25 \text{ }\mu\text{m}$ 。为了节省计算资源, 简化为  $1/4$  模型。  $xoz$ 、 $yoz$  面设置对称面。

图 1 为几何模型。图 2 为计算使用的  $1/4$  模型。图 3 是孔洞网格放大图。

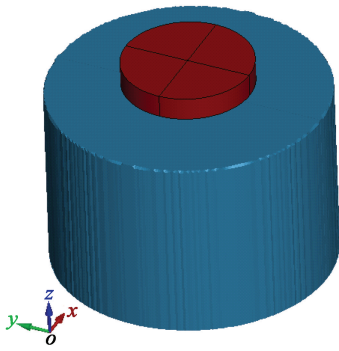
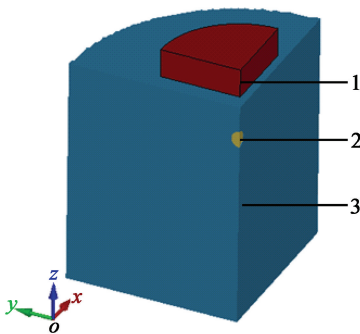


图 1 几何模型

Fig.1 Geometric model



1 - 钨飞片; 2 - 孔洞; 3 - B 炸药。

图 2 计算模型(单位: mm)

Fig.2 Computation model

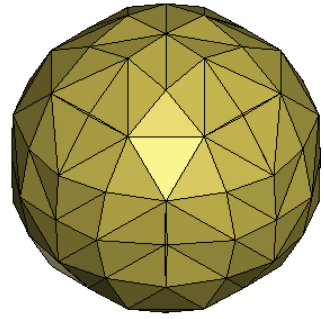


图 3 孔洞网格

Fig.3 Pore grids

## 2 仿真结果及分析

### 2.1 孔洞塌缩过程

首先, 对含  $\phi 150 \text{ }\mu\text{m}$  孔洞炸药的冲击起爆过程进行了数值模拟。改变飞片速度, 观察不同冲击载荷下炸药内孔洞的响应情况, 选择合适的冲击速度来确保孔洞塌缩且发生完全反应。冲击过程中, 孔洞处的最大压力  $p_{\text{max}}$  和最大反应度  $\lambda_{\text{max}}$  如图 4、图 5 所示。

图 4 表明, 随着飞片冲击速度的增大, 孔洞塌缩时的最大压力也随之增大, 二者基本呈线性关系。飞片速度越快, 动能越大, 冲击炸药后形成的冲击波越强, 孔洞受冲击后的塌缩速度越快, 孔洞处产生的压力越高。

由图 5 不同冲击速度下孔洞处最大反应度的变化可以推出, 随着飞片冲击速度的增加, 炸药孔洞处的反应程度增加。当飞片速度为  $2000 \text{ m/s}$  时, 炸药孔洞处的最高反应度为  $0.97$ , 接近完全反应; 飞片速度为  $2100 \text{ m/s}$  时, 孔洞处的反应度达到  $1.00$ , 此时炸药虽然未起爆, 但在局部发生完全反应, 足够观察孔洞处的塌缩和反应过程。因此, 文中飞片速度均采用  $2100 \text{ m/s}$ 。

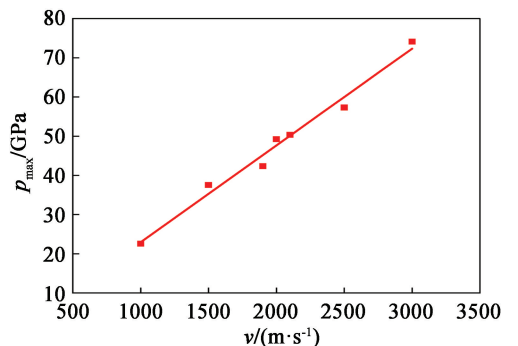


图 4 不同冲击速度下炸药孔洞处的最大压力

Fig.4 Maximum pressure at the pore of the explosive under different impact velocities

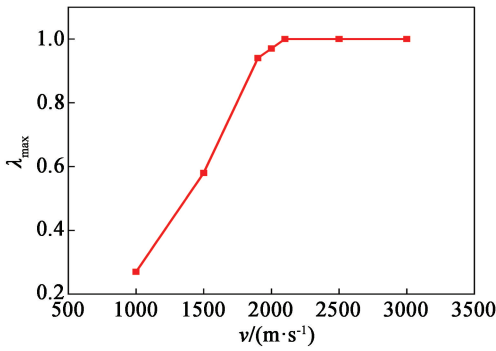


图 5 不同冲击速度下炸药孔洞处的最大反应度

Fig. 5 Maximum reactivity at the pore of the explosive under different impact velocities

对含  $\phi 150 \mu m$  孔洞炸药的冲击起爆过程进行模拟。图 6 为孔洞中的空气由于冲击波作用发生塌缩的过程,每隔  $5 ns$  选取一个孔洞变化的云图。随着时间的增加,孔洞的体积快速变小,内部的压力快速上升。孔洞完全塌缩的过程时间很短,在  $0.030 \mu s$  内完成。 $0.135 \mu s$  时,孔洞内空气的最大压力达到  $30.35 GPa$ ;而孔洞附近炸药的最大压力达到  $50.35 GPa$ 。孔洞会发生塌缩的主要原因是孔洞中空气的密度和炸药的密度相差较大,导致孔洞先被压缩。

图 7 为孔洞塌缩过程中粒子的速度场分布。 $0.110 \mu s$  前,冲击波未到达孔洞,粒子速度基本为  $2100 m/s$ ,孔洞形状保持球形; $0.110 \mu s$ ,冲击波到达孔洞上游,粒子速度迅速增加,孔洞开始塌缩;随着冲击波继续传播,孔洞变形速度加快,粒子产生向内部的汇聚流动,且速度持续增大,尤其中间位置的粒子速度增加最快;在  $0.135 \mu s$  时,粒子速度达到

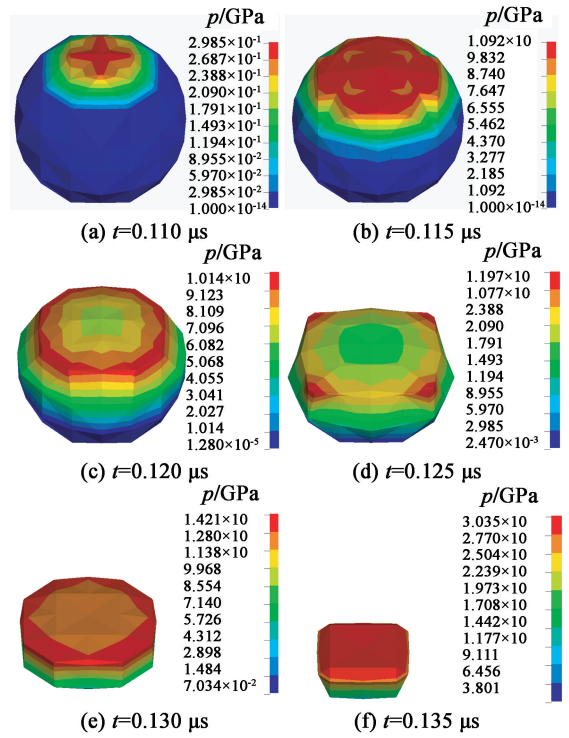


图 6 孔洞塌缩过程中孔内空气的压力变化云图

Fig. 6 Pressure changes of the air inside the pore during the process of pore collapse

最大,为  $7936 m/s$ ,形成微射流。微射流冲击孔洞下游内壁面,孔洞继续塌缩,直到孔洞完全闭合。在这个过程中,微射流携带的动能转化为内能,造成能量局部化,导致热点的形成。

图8是孔洞塌缩过程中炸药的温度分布云图。飞片以  $2100 m/s$  速度冲击炸药,冲击面正下方及周围的炸药发生反应。 $0.110 \sim 0.135 \mu s$  为孔洞塌

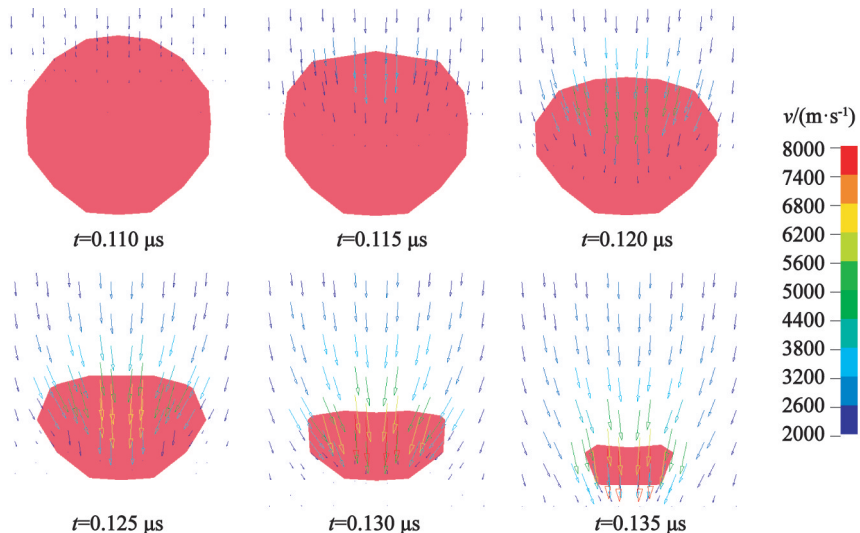


图 7 孔洞塌缩过程中的速度场

Fig. 7 Velocity field during the process of pore collapse

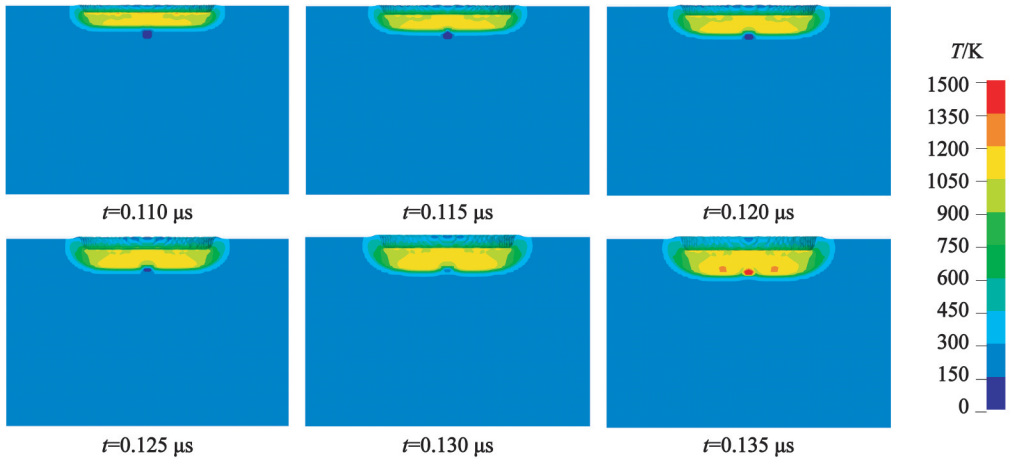


图8 孔洞塌缩过程中的温度场

Fig. 8 Temperature field during the process of pore collapse

缩阶段,温度升高到1 000 K以上;0.135  $\mu\text{s}$ 前,孔洞未完全塌缩,最高温度为1 223 K;0.135  $\mu\text{s}$ 时,孔洞已完全塌缩,能量局部化形成热点,热点温度达到5 817 K,孔洞塌缩对热点形成有显著影响。该热点温度与 Bassett 等<sup>[28]</sup>研究中微米孔洞产生的热点温度约6 000 K结论一致,说明本文中的模型和参数较为合理。

## 2.2 孔洞存在对炸药起爆的影响

在炸药轴线位置每间隔250  $\mu\text{m}$ 设置一个测点,共设置8个测点。当飞片冲击速度为2 100 m/s时,观察无孔洞炸药的起爆特性。压力在第2个测点处达到最大,最大压力为28.4 GPa。此外,在坐标(0,0,1.6)处设置一个温度测点,温度变化如图9所示。在冲击波到达前,炸药的温度基本保持298 K不变;0.13  $\mu\text{s}$ 时,温度迅速升高,在0.01  $\mu\text{s}$ 内升高到1 210 K;之后,基本维持在1 100 K以上。

在炸药模型中添加孔洞,孔洞位置(0,0,1.7),孔洞直径150  $\mu\text{m}$ ,孔中填充空气。压力在第2个测点处达到最大,最大压力为31.7 GPa。相对于无孔洞情况,压力增加了3.3 GPa,提高了11.6%。说明孔洞的存在对炸药起爆过程中的压力有较大影响。测点的温度曲线如图9所示。初期,温度保持在298 K;0.13  $\mu\text{s}$ 时,温度急剧升高,0.02  $\mu\text{s}$ 内升高到5 890 K;之后,温度降低,最终保持在1 100 K附近。相对于无孔洞情况,炸药温度显著升高,说明孔洞等缺陷使得炸药中容易产生热点。孔洞塌缩使得温度升高,导致反应速度加快;反应速度增加,导致温度进一步升高,从而引发爆炸。

无孔洞炸药反应度云图如图10所示。随着飞片冲击,炸药被压缩,接触位置附近的炸药发生一定

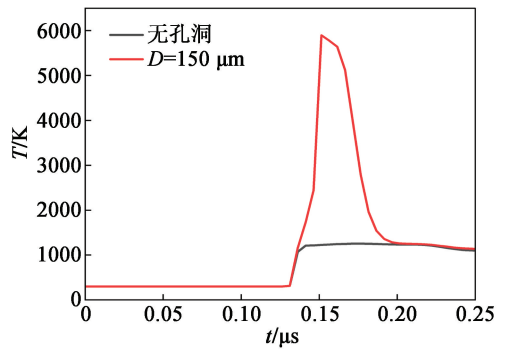


图9 无孔洞和有孔洞炸药升温对比

Fig. 9 Comparison of temperature rise between non porous explosives and porous explosives

的化学反应;随着冲击进行,反应度持续增加;在0.16  $\mu\text{s}$ 时反应度达到1,炸药发生完全反应。含 $\phi 150 \mu\text{m}$ 孔洞炸药反应度云图如图11所示。随着飞片冲击,炸药和孔洞均受到压缩,孔洞塌缩,并随着冲击逐渐向下运动。0.15  $\mu\text{s}$ 时,反应度迅速升高到接近1,相对无孔洞时反应度升高更快。在孔洞处形成一个明显的热点,逐渐扩大并与上方反应区融合。图11还可以看出,除了在孔洞处形成热点外,飞片冲击炸药,接触位置炸药的反应度也达到1。这是因为,点火增长模型属于经验模型,压缩达到一定程度即会发生点火反应。

## 2.3 孔洞大小对炸药起爆的影响

保持孔洞位置不变,将孔洞直径分别减小为125  $\mu\text{m}$ 和100  $\mu\text{m}$ ,研究孔洞大小对于炸药起爆过程的影响。当飞片速度为2 100 m/s时,测点的温度曲线如图12所示。含不同大小孔洞炸药的温度变化趋势相同。温度上升阶段,100  $\mu\text{m}$ 孔洞炸药温度升高最快,150  $\mu\text{m}$ 孔洞炸药温度升高最慢。125

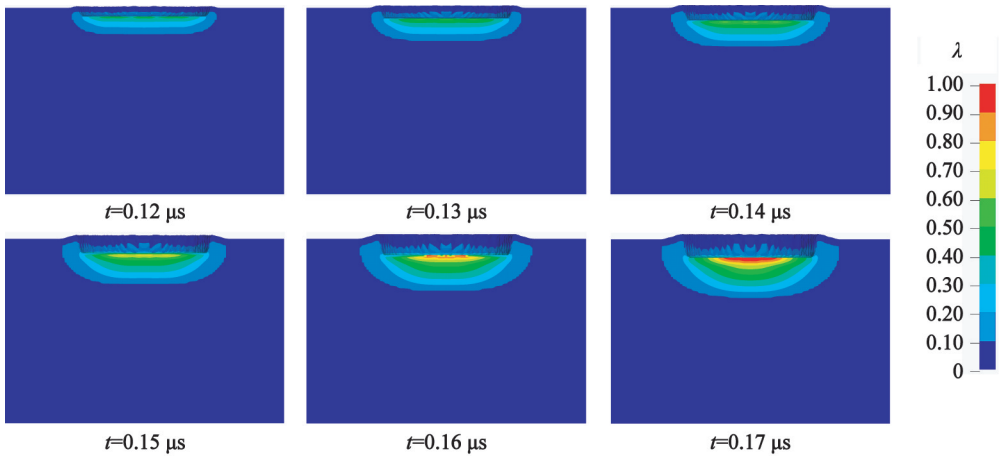


图 10 无孔洞炸药反应度云图

Fig. 10 Reactivity cloud map of non porous explosives

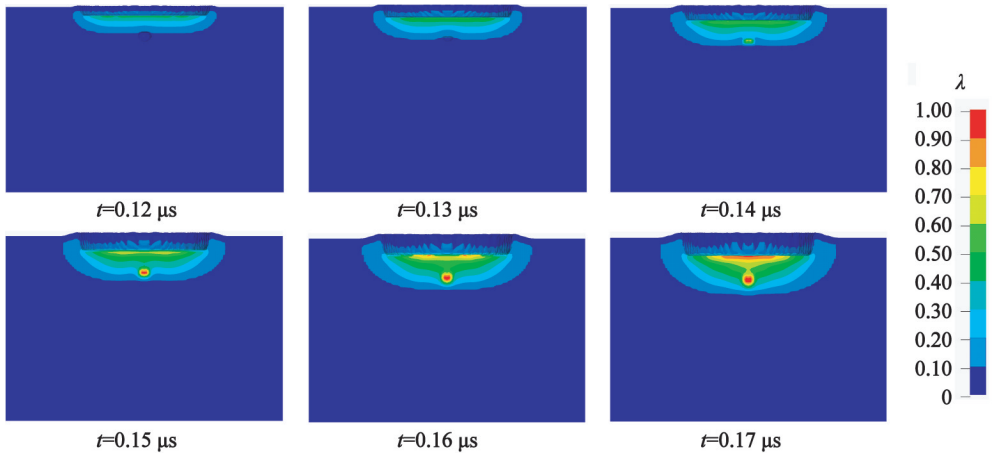


图 11 含 φ150 μm 孔洞炸药反应度云图

Fig. 11 Reactivity cloud map of explosives with a pore diameter of 150 μm

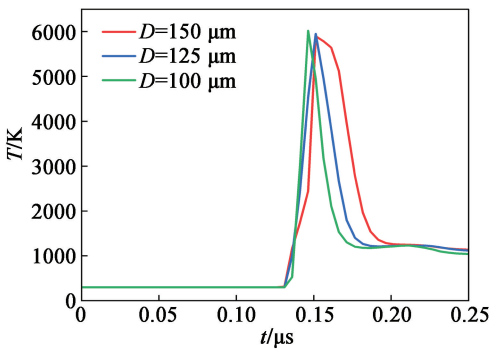


图 12 含不同孔洞炸药的升温对比

Fig. 12 Comparison of temperature rise of explosives with different pores

μm 和 150 μm 孔洞炸药最终温度为 1 100 K 左右; 而 100 μm 孔洞炸药最终温度较低, 为 1 000 K。小孔洞炸药温度升高较快, 最高温度较高, 但塌缩后的最终温度较低。这表明, 较小的孔洞使得塌缩速度较快, 从而升温较快, 但过程中的聚集流动较弱, 因

此, 最终温度较低, 相对来说更难点火。

含不同尺寸孔洞的炸药在 0.17 μs 时的热点反应度云图如图 13 所示。可以看出: 不同尺寸孔洞形成的热点尺寸不同; 随着孔洞尺寸的增大, 形成的热点尺寸也随之增大。研究表明, 初始孔洞大小决定热点大小, 即体积较大的孔洞将产生较大的热点, 这

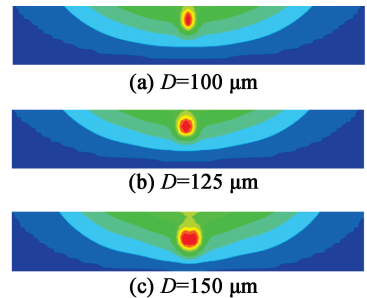


图 13 0.17 μs 不同孔洞形成的热点尺寸对比

Fig. 13 Comparison of hot spot sizes formed by different pores at 0.17 μs

将有利于炸药的点火<sup>[29]</sup>。孔洞的尺寸大,相当于装药缺陷较多,损伤程度较大,在受到冲击时更容易起爆<sup>[30]</sup>。

图 14 为含不同大小孔洞炸药起爆过程的最大反应度的变化情况。小孔洞的反应度升高更快。反应度和温度相互影响。因此,小孔洞温度升高更快,而大孔洞的最终热点温度更高。原因在于:孔洞小,塌缩速度快,温度上升快,反应度升高更快;孔洞大,塌缩过程中的汇聚流动会更剧烈,形成的微射流冲击孔洞下游壁面时有更多的动能转化为内能,从而使温度更高。

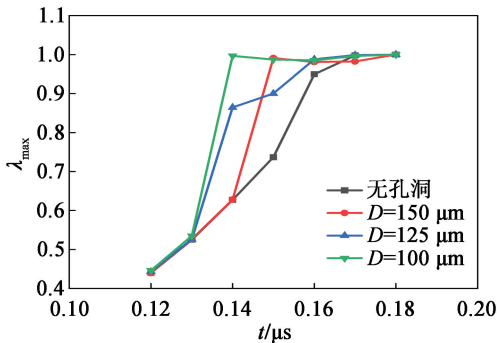


图 14 不同孔洞炸药起爆过程的最大反应度

Fig. 14 Maximum reactivity during the ignition process of explosives with different pores

### 3 结论

在 LS-DYNA 中采用点火增长模型,使用 S-ALE 算法,在 B 炸药中添加微孔洞结构,研究孔洞的存在和孔洞大小对炸药起爆的影响,分析了孔洞塌缩和热点生成过程,得到以下结论:

1) 比较了无孔洞和含孔洞炸药冲击起爆过程中温度和反应度等参数的变化,无孔洞炸药最高温度为 1 200 K,而含孔洞炸药最高温度接近 6 000 K。观察反应度云图,在孔洞位置形成了一个明显的热点。相对于无孔洞情况,孔洞处温度和反应度明显升高,孔洞等缺陷使得炸药中容易产生热点。

2) 比较了不同尺寸孔洞对炸药起爆的影响。发现初始孔洞的大小决定了热点的大小,即体积较大的孔洞将产生较大的热点,这将有利于炸药的点火。孔洞的大小也会影响热点温度,小孔洞的温度升高更快,而大孔洞时最终热点温度更高。原因在于:孔洞小,塌缩速度快,温度上升快;孔洞大,塌缩过程中的汇聚流动会更剧烈,形成的微射流冲击孔洞下游壁面时有更多的动能转化为内能,从而使温度更高。

### 参考文献

- [1] MENIKOFF R. Pore collapse and hot spots in HMX [J]. AIP Conference Proceedings, 2004, 706(1): 393-396.
- [2] DIENES J K, ZUO Q H, KERSHNER J D. Impact initiation of explosives and propellants via statistical crack mechanics [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2006, 54(6): 1237-1275.
- [3] MILNE A M, BOURNE N K. Experimental and numerical study of temperatures in cavity collapse [J]. AIP Conference Proceedings, 2002, 620(1): 914-917.
- [4] YU C, PANDOLFI A, ORTIZ M, et al. Three-dimensional modeling of intersonic shear-crack growth in asymmetrically loaded unidirectional composite plates [J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39(25): 6135-6157.
- [5] ZHANG X, OSKAY C. Plastic dissipation sensitivity to mechanical properties in polycrystalline  $\beta$ -HMX subjected to impact loading [J]. Mechanics of Materials, 2019, 138: 103079.
- [6] 赵东, 屈可朋, 董泽霖. 凝聚相炸药损伤-点火特性的研究进展[J]. 爆破器材, 2024, 53(3): 1-9, 16. ZHAO D, QU K P, DONG Z L. Research progress on damage and ignition characteristics of condensed phase explosives [J]. Explosive Materials, 2024, 53(3): 1-9, 16.
- [7] DUARTE C A, HAMED A, DRAKE J D, et al. Void collapse in shocked-HMX single crystals: simulations and experiments [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2020, 45(2): 243-253.
- [8] ESCAURIZA E M, DUARTE J P, CHAPMAN D J, et al. Collapse dynamics of spherical cavities in a solid under shock loading [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 8455.
- [9] JIANG C, CAI S, MAO L, et al. Effect of porosity on dynamic mechanical properties and impact response characteristics of high aluminum content PTFE/Al energetic materials [J]. Materials, 2020, 13(1): 140.
- [10] AUSTIN R A, BARTON N R, REAUGH J E, et al. Direct numerical simulation of shear localization and decomposition reactions in shock-loaded HMX crystal [J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(18): 185902.
- [11] NELMS M D, KROONBLAWD M P, AUSTIN R A. Pore collapse in single-crystal TATB under shock compression [J]. AIP Conference Proceedings, 2020, 2272(1): 050001.
- [12] WANG X J, DUAN Z L, BAI Z L, et al. Crystal-scale modelling of pore collapse in cyclotetramethylene tetra-

- nitramine (HMX) under different shock strengths [J]. *Mechanics of Materials*, 2022, 174: 104457.
- [13] EASON R M, SEWELL T D. Molecular dynamics simulations of the collapse of a cylindrical pore in the energetic material  $\alpha$ -RDX [J]. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2015, 1(4): 423-438.
- [14] GALITSKIY S, MISHRA A, DONGARE A M. Modeling shock-induced void collapse in single-crystal Ta systems at the mesoscales [J]. *International Journal of Plasticity*, 2023, 164: 103596.
- [15] 钟凯, 刘建, 王林元, 等. 含能材料中“热点”的理论模拟研究进展[J]. *含能材料*, 2018, 26(1): 11-20.  
ZHONG K, LIU J, WANG L Y, et al. Lssue of ‘hot-spot’ in energetic materials: recent progress of modeling and calculations [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2018, 26(1): 11-20.
- [16] 田占东, 张震宇. PBX-9404 炸药冲击起爆细观反应速率模型[J]. *含能材料*, 2007, 15(5): 464-467.  
TIAN Z D, ZHANG Z Y. A mesomechanic model of shock initiation in PBX-9404 explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2007, 15(5): 464-467.
- [17] 成丽蓉, 施惠基, 贺元吉, 等. 复杂受力环境下非均质炸药孔洞塌缩热点生成机理[J]. *含能材料*, 2016, 24(2): 171-176.  
CHENG L R, SHI H J, HE Y J, et al. Hot-spot forming mechanism of holes collapse in heterogeneous solid explosives under complicated stress environment [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2016, 24(2): 171-176.
- [18] LI X, FENG Z, LIU J. An analytic investigation of “hot-spot” formation in compressible energetic materials [J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2017, 14(4): 806-820.
- [19] 覃锦程, 裴红波, 李星翰, 等. 弹黏塑性热点模型的冲击起爆临界条件[J]. *高压物理学报*, 2018, 32(3): 115-120.  
QIN J C, PEI H B, LI X H, et al. Shock initiation thresholds of heterogeneous explosives with elastic-viscoplastic hot spot model [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2018, 32(3): 115-120.
- [20] 温丽晶, 段卓平, 张震宇, 等. 弹粘塑性双球壳塌缩热点反应模型[J]. *高压物理学报*, 2011, 25(6): 493-500.  
WEN L J, DUAN Z P, ZHANG Z Y, et al. A elastic/viscoplastic pore collapse model of double-layered hollow sphere for hot-spot ignition in shocked explosives [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2011, 25(6): 493-500.
- [21] BAI Z, DUAN Z, WEN L, et al. Embedded manganin gauge measurements and modeling of shock initiation in HMX-based PBX explosives with different particle sizes and porosities [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45(6): 908-920.
- [22] YANG Y, DUAN Z P, LI S R, et al. A new ignition-growth reaction rate model for shock initiation [J]. *Defence Technology*, 2023, 23(5): 126-136.
- [23] KAPAHI A, UDAYKUMAR H S. Dynamics of void collapse in shocked energetic materials: physics of void-void interactions [J]. *Shock Waves*, 2013, 23(6): 537-558.
- [24] KAPAHI A, UDAYKUMAR H S. Three-dimensional simulations of dynamics of void collapse in energetic materials [J]. *Shock Waves*, 2015, 25(2): 177-187.
- [25] 王洪波, 王旗华, 卢永刚, 等. PBX 炸药细观孔洞缺陷对其冲击点火特性的影响[J]. *火炸药学报*, 2015, 38(5): 31-36.  
WANG H B, WANG Q H, LU Y G, et al. Effect of meso-defect holes on the shock-to ignition characteristics of PBX explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2015, 38(5): 31-36.
- [26] 王新征, 张松林, 张庆明, 等. 铝热剂反应性冲击热点分析[J]. *高压物理学报*, 2012, 26(6): 665-673.  
WANG X Z, ZHANG S L, ZHANG Q M, et al. Analysis of reactive hot spot for thermiter under shock waves [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2012, 26(6): 665-673.
- [27] 黄炳耀, 白桥栋, 王茂杰, 等. 累积损伤对 B 炸药冲击起爆影响的仿真研究[J]. *爆破器材*, 2024, 53(2): 13-21.  
HUANG B Y, BAI Q D, WANG M J, et al. Simulation study on the effect of cumulative damage on the shock initiation of composition B [J]. *Explosive Materials*, 2024, 53(2): 13-21.
- [28] BASSETT W P, JOHNSON B P, NEELAKANTAN N K, et al. Shock initiation of explosives: high temperature hot spots explained [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(6): 061902.
- [29] LITTLEFIELD D L, ANDERSON C E, PARTOM Y, et al. The penetration of steel targets finite in radial extent [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(1): 49-62.
- [30] 尚海林, 赵锋, 王文强, 等. 冲击作用下炸药热点形成的 3 维离散元模拟[J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(2): 131-137.  
SHANG H L, ZHAO F, WANG W Q, et al. Three-dimensional discrete element simulation of hot spots in explosives under shock loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(2): 131-137.