

文章编号:1006-9941(2020)10-0975-09

典型压装与浇注 PBX 炸药缝隙挤压损伤-点火响应

杨 昆¹, 吴艳青¹, 金朋刚², 黄风雷¹

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 2. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 为探究动态挤压载荷作用下典型装药结构在壳体裂缝周围的点火响应过程, 采用高聚物粘结炸药(Polymer bonded explosives, PBX)微裂纹-微孔洞力热化学耦合细观模型, 对缝隙挤压载荷作用下 PBX 药柱与缝隙结构相互作用、炸药宏观力热化学响应、以及损伤-点火细观机理进行了研究, 对比分析了压装 PBX-5 与浇注 GOFL-5 两类炸药损伤-点火响应的差异性。结果表明, 200 m·s⁻¹ 挤压速度下压装 PBX-5 炸药表现为脆性破坏, 60 μs 时挤压前沿距缝隙表面 3 mm, 在缝隙位置处形成应力集中, 与挤压位置成 45° 方向区域内微裂纹发生快速扩展; 相同撞击条件下, 浇注 GOFL-5 炸药在缝隙位置处发生快速流动, 大量材料被挤入缝隙, 60 μs 时挤压前沿距缝隙表面 9 mm。两种炸药在缝隙周围均形成了潜在点火位置, 剪切裂纹热点为压装炸药点火主导机制; 局部剪切塑性耗散机制为浇注炸药潜在的点火主导机制。

关键词: PBX 炸药; 缝隙挤压; 微裂纹-微孔洞模型; 损伤-点火

中图分类号: TJ55; O341

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2020170

1 引言

高聚物粘结炸药(Polymer bonded explosives, PBX)作为武器战斗部系统的重要威力来源, 其安全性是保障整个武器系统稳定有效运行的关键^[1]。然而, 装药壳体在生产运输或服役过程中形成的局部裂缝会成为 PBX 装药安全性带来严峻挑战。动态挤压载荷作用下炸药在缝隙周围会受到较强剪切作用, 该区域内炸药可能会被挤入缝隙, 形成快速剪切流动, 或者发生剪切破碎现象, 进而促进能量局域化并诱发炸药点火。因此研究缝隙挤压作用下炸药变形-损伤-点火行为及其细观机理, 对于评价壳体局部存在裂缝的装药安全性具有重要意义。

近年来, 国内外学者建立了多种炸药撞击安全性

试验^[2-4], 用于研究各种机械刺激(如跌落、针刺、挤压、剪切载荷等)作用下炸药发生的意外点火起爆现象, 包括跌落试验, Susan 试验, Steven 试验等。经典的 Susan 试验用于模拟研究炸药受到冲击挤压载荷作用下点火情况^[2]; Steven 试验则主要用于撞击-剪切载荷作用下炸药撞击安全性评价^[3]。缝隙挤压作为一种典型的三向压缩-剪切并存的复合载荷形式, 目前对于该种载荷作用下 PBX 点火起爆问题的研究关注较少。近年来国内西安近代化学研究所^[5]率先设计了缝隙挤压试验, 采用一级轻气炮对完全约束以及剪切流动(下端开孔)的浇注药柱进行加载, 发现剪切流动载荷作用下装药相比于完全约束的装药更容易发生反应。但受限于当前试验观测手段, 缝隙挤压试验还难以捕捉到炸药点火起爆过程中的一些细节变化, 因此仍需采用数值模拟方法对 PBX 炸药点火机理进行研究。

显式细观建模与隐式宏细观模型为 PBX 炸药损伤-点火细观机理研究常用的数值方法^[6-14]。显式细观方法对炸药各组分材料相、界面、缺陷等细观要素分别建立几何模型及材料模型, 如 Baura 等^[7-9]采用内聚力有限元法(cohesive finite element method, CFEM)定量分析了 PBX 内粘结剂粘弹性变形、颗粒-粘结剂脱粘、颗粒破碎以及裂纹摩擦等多种能量耗散机制对热

收稿日期: 2020-07-04; 修回日期: 2020-08-09

网络出版日期: 2020-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(11872119); 博士后创新人才支持计划(BX20200046)

作者简介: 杨昆(1993-), 男, 博士后, 主要从事高能炸药力热化学耦合响应研究。e-mail: ykbit123@163.com

通信联系人: 吴艳青(1974-), 女, 教授, 主要从事含能材料安全性研究。e-mail: wuyqing@bit.edu.cn

引用本文: 杨昆, 吴艳青, 金朋刚, 等. 典型压装与浇注 PBX 炸药缝隙挤压损伤-点火响应[J]. 含能材料, 2020, 28(10):975-983.

YANG Kun, WU Yan-qing, JIN Peng-gang, et al. Damage-ignition Simulation for Typical Pressed and Casted PBX under Crack-extruded Loading[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2020, 28(10):975-983.

点形成的贡献。虽然细观计算可以显式考虑细观响应过程,但受限于当前计算能力,该方法还无法扩展应用于描述复杂载荷作用下大型结构装药的力学-点火响应。隐式宏细观模型基于均匀化理论,通过构建代表性细观要素热力学演化模型,以及细观局域化行为与宏观响应之间的反馈法则,可同时获取宏细观尺度材料热力学响应规律,在工程尺度炸药安全性评价及其细观机理研究方面具有显著优势。典型如 Dienes^[10-12]发展的各向异性统计裂纹模型(Statistical crack mechanics, SCRAM),该模型考虑了微裂纹起裂、成长、聚合,剪切裂纹表面摩擦生热、熔化、点火、快速燃烧等物理行为。Liu 和 Chen 等^[13]将 Visco-SCRAM 模型用于预测 Steven 安全性试验中炸药的点火响应,并分析了药柱尺寸变化对点火响应的影响。由于该类模型仅考虑了剪切裂纹热点等单一缺陷机制的细观力热响应过程,在复杂载荷条件下不同类型 PBX 炸药损伤-热点主导机制的自判断-自适应等方面,模型还需要进一步改进。

本研究应用前期发展的 PBX 炸药微裂纹-微孔洞力热化学耦合细观模型(Combined Microcrack and Microvoid Model, CMM),考虑微裂纹-微孔洞两种细观缺陷演化对炸药损伤-热点形成的影响,对缝隙挤压作用下 PBX 药柱与壳体缝隙结构相互作用、宏观力热化学响应、以及损伤-点火细观机理开展研究。考虑不同类型炸药在初始缺陷、力学性能、点火机制等方面表现出的多样性,基于两类典型炸药(压装 PBX-5 与浇注 GOFL-5)压缩力学性能测试数据,标定得到了两类炸药模型参数,对比分析了相同缝隙挤压载荷下两类炸药损伤-点火响应的差异性。

2 PBX 微裂纹-微孔洞力热化学耦合细观模型

PBX 炸药微裂纹-微孔洞力热化学耦合细观模型(CMM)中考虑了五种微裂纹演化模式,包括拉伸张开,剪切张开,纯剪切,剪切摩擦,摩擦自锁;以及微孔洞坍塌与扭曲变形两种演化模式,同时囊括剪切裂纹热点与孔洞坍塌热点子模型,具有复杂应力状态-微缺陷演化模式自判断能力,以及两种微缺陷热点自启动能力。CMM 模型中总体应力、应变分别分解为偏量部分与体量部分,依次建立微裂纹相关偏量本构关系与微孔洞相关体量本构关系,二者通过 Gurson 屈服准则进行耦合,通过微裂纹、微孔洞演化方程更新相关变量,建立剪切裂纹摩擦热点与孔洞坍塌热点子模型,模

型细节与算法实现详见文献[15-16]。

2.1 偏量本构关系

将总体偏应变(\mathbf{e})分解为粘弹性应变(\mathbf{e}^e),塑性应变(\mathbf{e}^p),以及由于微裂纹扩展所引起的微裂纹应变(\mathbf{e}^c)三部分,分别描述 PBX 炸药内粘结剂基体材料所表现出的粘弹性变形,塑性变形,以及由于晶内微裂纹扩展对材料力学行为的影响。

PBX 炸药粘弹性变形由广义 Maxwell 模型描述^[17],微裂纹张开/剪切扩展引起的裂纹应变由 SCRAM 模型描述^[7],材料的偏量本构关系可表示为:

$$\dot{\mathbf{s}} = 2GA \cdot (\dot{\mathbf{e}} - \dot{\mathbf{e}}^p) - B \cdot (\mathbf{s} + C) \quad (1)$$

式中, \mathbf{s} 为应力偏量,Pa; G 为剪切模量,Pa; A 、 B 、 C 表示为

$$A = \frac{1}{1 + \frac{\alpha^e}{3} (\bar{c}/a)^3}, \quad B = \frac{\alpha^e (\bar{c}/a)^2 \bar{c}/a}{1 + \frac{\alpha^e}{3} (\bar{c}/a)^3}, \quad (2)$$

$$C = \frac{\sum_{n=1}^N \mathbf{s}^{(n)}/\tau^{(n)}}{\alpha^e (\bar{c}/a)^2 \bar{c}/a}$$

其中, \bar{c} 为微裂纹平均尺寸,m; a 为微裂纹初始特征尺寸, $a^{-3}=6G\beta$,m; $\mathbf{s}^{(n)}$ 和 $\tau^{(n)}$ 为广义粘弹性体元中第 n 个 Maxwell 粘弹性单元中的偏应力和松弛时间,单位分别为 Pa 和 s。

$$\alpha^e = \begin{cases} 3, p \geq 0 \\ 5 - \nu, p < 0 \end{cases}, \beta = \frac{64\pi(1-\nu)N_0}{15(2-\nu)G} \quad (3)$$

式中, p 为压力,Pa; N_0 为初始裂纹密度, m^{-3} ; ν 为泊松比。

2.2 体量本构关系

为描述材料内微孔洞演化所发生的不可逆损伤对于 PBX 炸药体积变形的影响,采用孔隙率相关状态方程,

$$p(\rho, e, f) = (1-f) \left[\frac{\rho_s c_0^2 \eta_s}{(1-s\eta_s)^2} \left(1 - \frac{\Gamma_s \eta_s}{2} \right) + \Gamma_s \rho_s e_s \right] \quad (4)$$

式中, f 为孔隙率; ρ 为孔隙材料密度, $g \cdot cm^{-3}$; e 为比内能, $J \cdot g^{-1}$;密实材料对应的 $\rho_s = \rho/(1-f)$, $e_s = e$, $\eta_s = 1 - \rho_{s0}/\rho_s = -\varepsilon_v$; Γ_s 为 Grüneisen 系数; $c_0/m \cdot s^{-1}$, s 为材料参数。

2.3 Gurson 屈服准则

含孔隙 PBX 材料的塑性变形采用经典 Gurson 模型描述,模型中材料屈服面与 von-Mises 等效应力 σ_e 和压力 p 相关,

$$F(\sigma_e, p, f) = \left(\frac{\sigma_e}{Y_M} \right)^2 + 2f \cosh \left(-\frac{3p}{2Y_M} \right) - f^2 - 1 = 0 \quad (5)$$

考虑动态加载下材料硬化效应与应变率效应,密

实材料($f=0$)的屈服强度 Y_M 可表示为,

$$Y_M = \left(\sigma_0 + h(\bar{\epsilon}_M^p)^n \right) \left[1.0 + C \cdot \ln(1 + \dot{\epsilon}^*) \right] \quad (6)$$

式中, σ_0 为 $\dot{\epsilon}_0=10 \text{ s}^{-1}$ 加载下材料的屈服应力, MPa; $\bar{\epsilon}_M^p$ 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ 为等效应变率; h 为硬化模量, MPa; n 与 C 为材料参数。

2.4 主裂纹扩展方程

基于 Griffith 能量释放率裂纹扩展准则, 微裂纹扩展方程可表示为,

$$\bar{c} = \dot{c}_{\max} \left[1 - \frac{2\bar{\gamma}}{g_{\text{dom}}(\sigma, \bar{c})} \right] \quad (7)$$

式中, \dot{c}_{\max} 为最大扩展速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; $\bar{\gamma}$ 为比表面能, $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$; $g_{\text{dom}}(\sigma, \bar{c})$ 为主裂纹对应的能量释放率。

由于材料内微裂纹方向分布具有随机性, 存在临界微裂纹方向对应于能量释放率最大值, 即该方向微裂纹在最小施加应力下最先发生失稳扩展, 因此定义为主裂纹。主裂纹方向的确定与当前应力状态相关 ($\sigma_1-\sigma_3$ 平面), 主裂纹方向及相应能量释放率的确定详见文献[11-12]。微裂纹扩展对应的材料整体损伤度定义为 $d_{cr} = \bar{c}^3/(a^3 + \bar{c}^3)$ 。

2.5 孔隙率演化方程

考虑孔洞坍塌引起的孔隙率减小 (\dot{f}_{vc}), 以及孔洞扭曲引起的孔隙率增加 (\dot{f}_{vd}) 两种变形机制, 孔隙率演化方程可表示为,

$$\dot{f} = (1 - \dot{f}) \dot{\epsilon}_v^p + f k_w \omega(\sigma) \frac{s_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p}{\sigma_e} \quad (8)$$

式中, $\dot{\epsilon}_v^p = \dot{\epsilon}_{kk}^p/3$ 为塑性体积应变率, s^{-1} ; k_w 为剪切相关材料参数; ω 与应力状态相关, 取值范围为 $0 \leq \omega \leq 1$ 。

$$\omega(\sigma) = 1 - \left(\frac{27J_3}{2\sigma_e^3} \right)^2 \quad (9)$$

式中, J_3 为应力张量的第三不变量, MPa^3 。

2.6 微裂纹热点温升

采用一维热传导方程来描述剪切裂纹表面及其周围区域摩擦生热、熔化、点火与传热等热力学过程,

$$\rho c_v \dot{T}_{hs} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T_{hs}}{\partial x} \right) + \rho Q_r Z e^{-T_a/T_{hs}} + f_m \mu_v \dot{\epsilon}^2 \quad (10)$$

式中, x 为沿微裂纹法向的坐标轴, 等式右端三项分别表示热传导项、化学反应释放热量、以及熔化区域 ($T_{hs} \geq T_m$) 液相粘性流动生热; T_{hs} 为微裂纹热点温度, K; c_v 为比热容, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; k 为热传导系数, $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; Q_r 为单位质量化学反应放热, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$; Z 和 T_a 为 Arrhe-

nius 反应速率方程参数, s^{-1}, K ; $f_m (0 \leq f_m \leq 1)$ 为熔化百分数; μ_v 为熔化区域粘性系数; $\dot{\epsilon} = f v_c / l$ 为熔化区域剪切应变率, s^{-1} ; v_c 为微裂纹滑动速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; l 为熔化区域宽度, m 。

2.7 微孔洞热点温升

微孔洞周围材料温度 (T_{vo}) 分布情况由一维球形热传导方程进行描述:

$$\rho c_v \dot{T}_{vo} = k \left[\frac{\partial^2 T_{vo}}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_{vo}}{\partial r} \right] + \dot{W}_{vp}^* + \rho Q_r Z e^{-T_a/T_{vo}} \quad (11)$$

式中, 孔洞周围单位体积粘塑性功生成速率可表示为:

$$\dot{W}_{vp}^*(r) = \frac{-2Y_M \dot{\epsilon}_v^p}{r^3} \frac{1-f_0}{1-f_{vc}} b_0^3 + \frac{4\eta (\dot{\epsilon}_v^p)^2}{r^6} \left(\frac{1-f_0}{1-f_{vc}} \right)^2 b_0^6 \quad (12)$$

式中右边两项分别表示基体材料的塑性效应与粘性效应所产生的功率; b_0 为微孔洞初始外径, μm ; η 为微孔洞周围基体材料相关的粘性系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

2.8 整体温升计算

PBX 炸药材料的整体温升 (T_{bulk}) 速率由外界功计算得到:

$$\rho c_v \dot{T}_{bulk} = k \nabla^2 T + \vartheta (\dot{W}_{ve} + \dot{W}_p + \dot{W}_{cr} + \dot{W}_{pr}) + \rho Q_r \dot{\lambda}_{bulk} \quad (13)$$

式中, \dot{W}_{ve} , \dot{W}_p , 和 \dot{W}_{cr} 分别表示粘性效应, 塑性效应, 以及裂纹扩展所引起的非弹性功率, W ; \dot{W}_{pr} 为绝热压缩加热功率, W ; ϑ 为非弹性功生热转换效率。

为进一步对比研究压装类 PBX-5 与浇注类 GOFL-5 两种炸药的缝隙挤压流动响应差异, 首先根据两种炸药压缩应力应变试验曲线进行模型参数标定, 模拟与试验测得不同应变率下的应力应变曲线如图 1 所示, 标定得到两种炸药材料参数如表 1 所示, 微裂纹-微孔洞热点模型参数如表 2 所示。

3 计算结果分析

3.1 有限元模型

PBX 炸药缝隙挤压加载示意图如图 2 所示, 预定飞行速度弹丸正面撞击击柱 ($\Phi 30 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$), $\Phi 30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 炸药药柱放置于钢材料套筒中 (套筒侧向厚度 10 mm , 底板厚度 20 mm), 在药柱下方开有直径 5 mm 圆柱形通孔, 装药受挤压后流入缝隙内并发生快速流动。

炸药药柱采用 0.25 mm 三角形网格进行有限元网格划分, 击柱与钢套筒采用 0.5 mm 四边形网格进行划分。击柱与药柱之间采用自动接触算法, 在模型中心

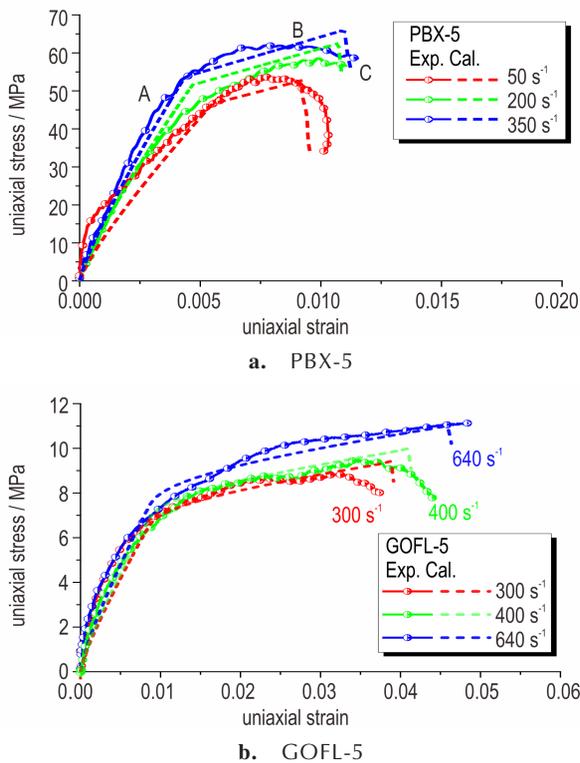


图1 两类炸药计算与试验得到的不同应变率下应力应变曲线
Fig.1 Calculated and experimental stress-strain curves at different strain rates for PBX-5 and GOFL-5

表1 GOFL-5与PBX-5炸药参数列表

Symbol	GOFL-5	PBX-5
$\rho_0/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1734	1820
G/GPa	0.55	8.25
ν	0.3	0.3
$G^{(1)}, G^{(2)}, G^{(3)}$	167, 30.45, 90.03	1940, 1175, 1521
$G^{(4)}, G^{(5)}/\text{MPa}$	185.6, 120.0	1909, 1688
$1/\tau^{(1)}, 1/\tau^{(2)}, 1/\tau^{(3)}$	0, 5.00×10^3 , 5.00×10^4	0, 9.00×10^3 , 9.00×10^4
$1/\tau^{(4)}, 1/\tau^{(5)}/\text{s}^{-1}$	5.00×10^5 , 2.00×10^6	9.00×10^5 , 2.00×10^6
σ_v^0/MPa	2.0	40.0
C	0.6	0.1
h/MPa	4.5	1500
n	0.45	1.0
$\bar{c}_0/\mu\text{m}$	30	30
N_0/cm^{-3}	3	300
$\bar{\gamma}/\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$	0.75	1.4
$\dot{\gamma}_{\text{max}}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	300	300
μ	0.3	0.5
f_0	0.01	0.01
k_w	2.0	2.0
$c_0/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1000	2500
s	0.46	2.26
Γ	0.894	1.50

表2 微裂纹-微孔洞热点模型参数

Table 2 Parameters for microcrack-microvoid hotspot sub-model

$c_v/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	1
$\mu_v/\text{Pa}\cdot\text{s}$	0.2
$k/\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	0.406
$Q_r/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	2.09×10^6
T_a/K	26522
Z/s^{-1}	5.0×10^{19}
$b_0/\mu\text{m}$	46.5
$\eta/\text{Pa}\cdot\text{s}$	100
ϑ	0.9

线位置施加二维轴对称边界条件。计算初始时刻给定击柱 200 m·s⁻¹初速度,计算时间步长约为 $\Delta t=5\times 10^{-9}$ s。为分析药柱内应力波传播情况,初始时刻在药柱中心线(L1)上等间隔选取A、B、C位置,各位置距药柱顶端的距离分别为0, 7 mm,与14 mm。由D、E两位置确定直线L2(z=6.0 cm),用于分析各状态变量沿L2的分布情况及其随时间演化情况。

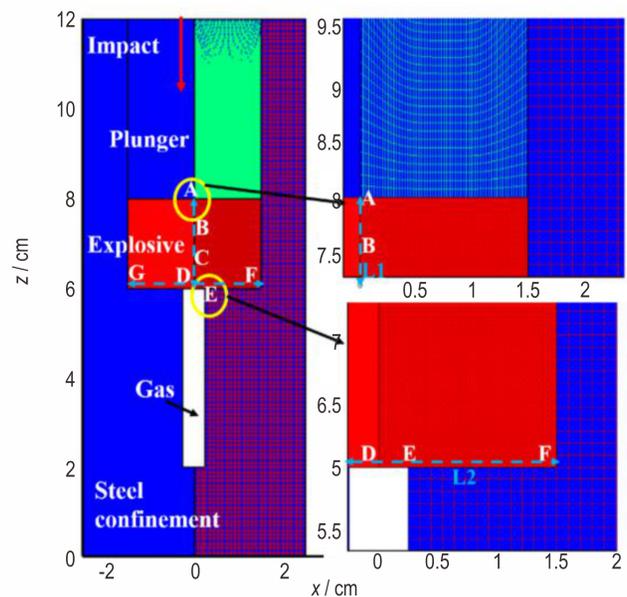


图2 PBX缝隙挤压试验有限元模型示意图

Fig.2 The finite element model for crack-extruded PBX

3.2 压缩与剪切应力状态

图3a和图3b分别为压装(PBX-5)与浇注炸药(GOFL-5)内A~C位置处压力变化曲线。由图3a,入射压缩波S1于5 μs到达C位置,随后传播至药柱下边界处发生反射,并与入射波叠加形成反射压缩波R1(1.1 GPa),R1波到达药柱上表面后发生二次反射形成S2(1.35 GPa),32 μs时C位置受到卸载波R2影响。对比图3a和图3b可知,相同撞击速度下GOFL-5

内压缩波 S1 强度 (0.4 GPa) 与波速 ($\sim 1.3 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$) 均小于 PBX-5 (0.6 GPa; $\sim 2.6 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$)。

不同时刻压装、浇注药柱内压力云图演化分别如图 4a 和图 4b 所示。由图 4a, 随撞击时间增加, PBX-5 药柱受到挤压, 其上表面距参考面 ($z=6.0 \text{ cm}$) 的距离逐渐减小 ($d_5 > d_{10} > d_{20} > d_{30}$), 同时, 药柱下表面缝隙周围材料被挤入缝隙中, 缝隙内材料前沿随时间而增大 ($b_{10} < b_{20} < b_{30}$)。由于材料强度较高, 抵抗变形能力较强, 30 μs 后材料挤压变形达到平衡态, 缝隙内材料前沿基本保持不变 ($b_{30} \approx b_{50} \approx b_{60}$)。由图 4b, GOFL-5 药柱受挤压后变形程度要高于 PBX-5 (GOFL-5, $d_{30}=1.49 \text{ cm}$; PBX-5, $d_{30}=1.55 \text{ cm}$), 同时 GOFL-5 炸药挤入缝隙后材料的流动性高于 PBX-5 (GOFL-5, $b_{60}=0.9 \text{ cm}$; PBX-5, $b_{60}=0.3 \text{ cm}$)。

图 5a 和图 5b 分别表示压装、浇注药柱内最大剪应力 ($\tau_{\max}=(\sigma_1-\sigma_3)/2$) 演化云图。由图 5a, 30 μs 时 PBX-5 内 τ_{\max} 较高区域集中分布在缝隙周围材料处, 表明该区域内受到较强的剪切作用, 且可能形成局部高温区并诱点火, 为点火危险位置。35~45 μs 阶段内

剪切作用较强的区域由缝隙周围逐渐向药柱内部传播, 同时形成三角形阵面。由图 5b, 由于浇注药柱受到上下表面及侧边界四个方向的挤压作用, 药柱内 τ_{\max} 较高的区域主要集中在缝隙两侧以及侧边界位置。随着加载时间增加, 药柱内剪切流动较高的区域逐渐由边界位置向药柱中心处扩散。

两类药柱内最大剪应力与剪切应变率沿 L2 线 ($x=-0.25\sim 0.25 \text{ cm}$) 变化曲线如图 6a 和图 6b 所示。由图 6a 和图 6b 可知, 两类药柱内缝隙周围材料的最大剪应力与剪切应变率均出现极大值。相同撞击速度下, 压装 PBX-5 炸药在缝隙边界处最大剪应力数值高于浇注 GOFL-5 炸药 (20 μs , PBX-5: 280 MPa; GOFL-5: 240 MPa), 但压装 PBX-5 炸药剪切应变率 (20 μs , $0.9 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$) 小于浇注 GOFL-5 炸药 (20 μs , $2.3 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$), 表明相对于压装炸药, 浇注炸药抗剪切能力较弱, 但其流动性较强。

3.3 微缺陷损伤演化

图 7a 和图 7b 分别为压装、浇注药柱内微裂纹相关损伤 (d_{cr}) 演化情况。由图 7a, 由于压装药柱缝隙周

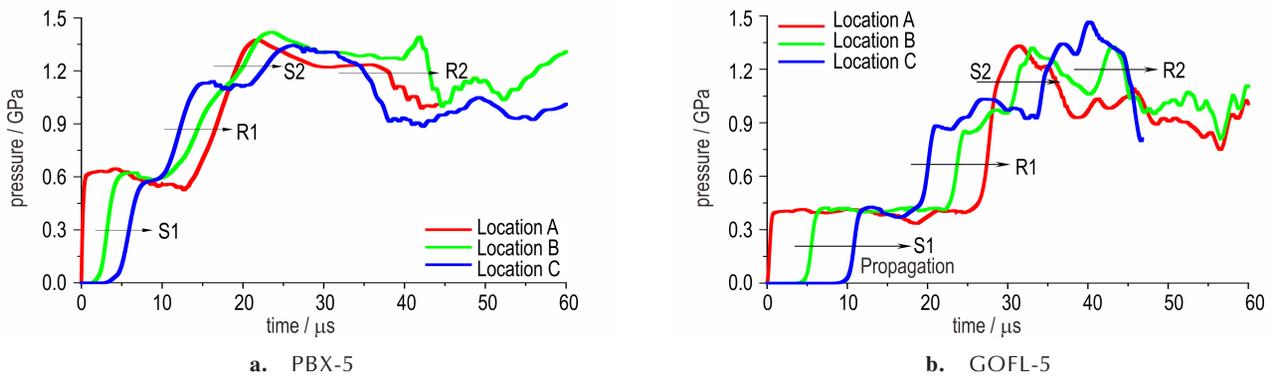


图 3 典型压装与浇注炸药不同位置压力曲线图

Fig.3 Pressure evolution curves at different locations for PBX-5 and GOFL-5

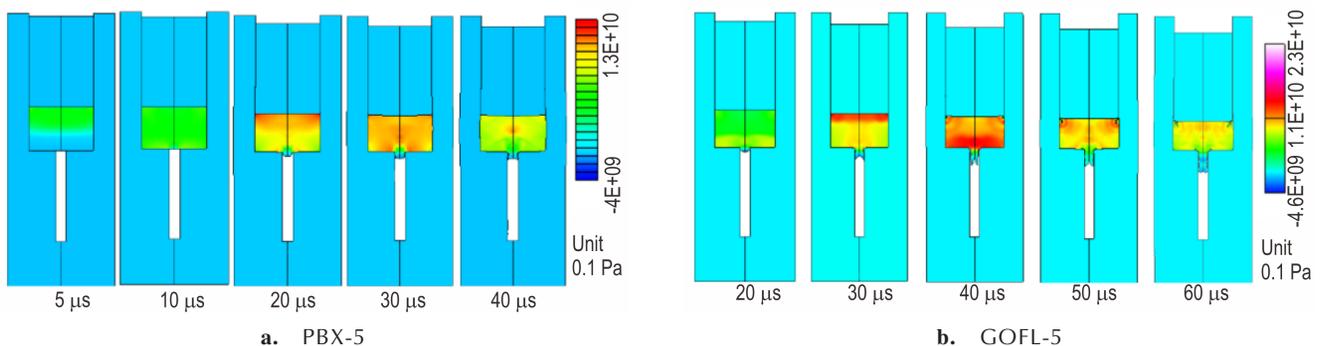


图 4 不同时刻两类炸药压力云图

Fig.4 Pressure contours for PBX-5 and GOFL-5

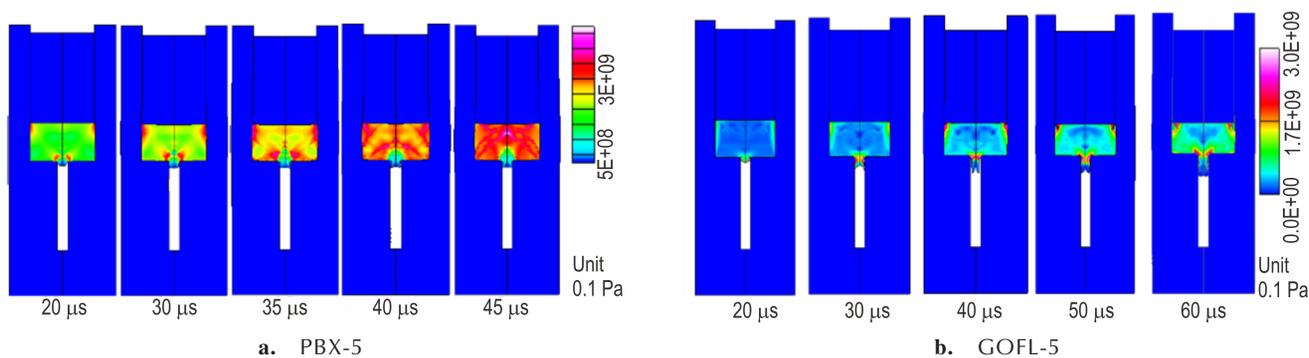


图5 不同时刻两类炸药最大剪应力演化云图
Fig.5 Maximum shear stress contours for PBX-5 and GOFL-5

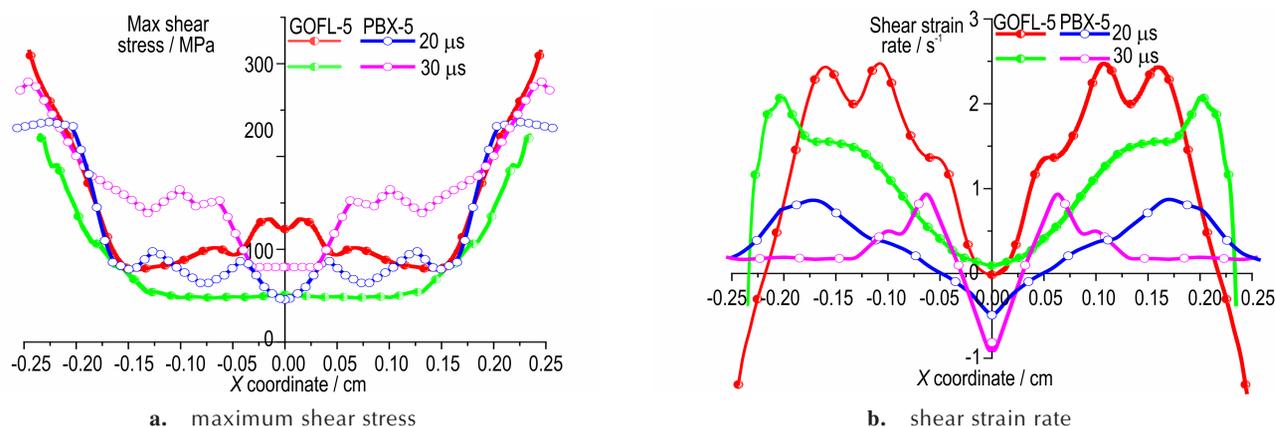


图6 PBX-5炸药20, 30 μ s时刻最大剪应力与剪切应变率沿L2线变化曲线
Fig.6 Maximum shear stress and shear strain rate evolution curves along L2 at 20, 30 μ s for PBX-5

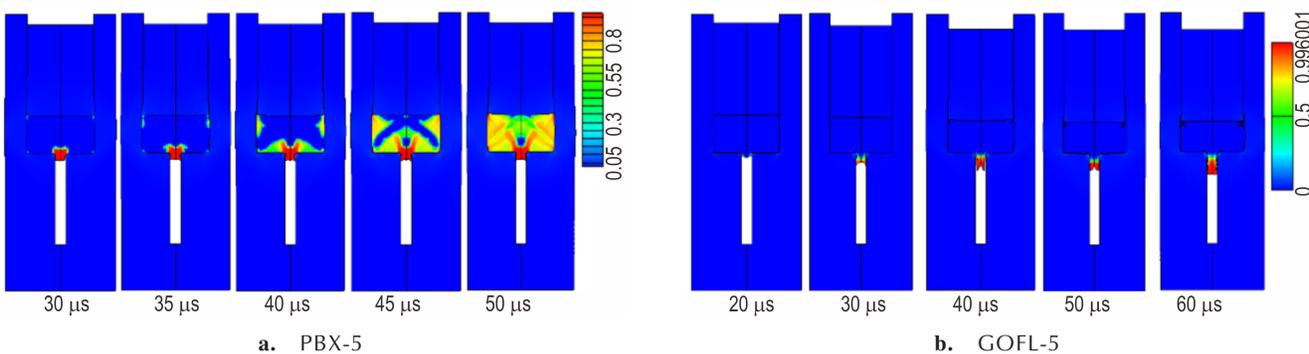


图7 不同时刻压装PBX-5与浇注GOFL-5微裂纹损伤云图
Fig.7 Microcrack-related damage contours for PBX-5 and GOFL-5

围材料受到较强的剪切作用,该区域内材料的微裂纹扩展速度较快。30 μ s时微裂纹损伤严重区域主要集中于挤入缝隙中的材料;40 μ s时,炸药同时受到上下表面与侧边界挤压作用,缝隙周边区域以及药柱侧边界处微裂纹扩展速率加快,微裂纹损伤区域沿与下表面呈45°方向传播。

由图7b,挤入缝隙的浇注炸药侧边界受到较强的剪切作用,该区域内微裂纹发生快速的剪切扩展。相

较于压装炸药,浇注GOFL-5炸药承载能力较弱,表现出较强的流动性,因此炸药内微裂纹损伤严重区域主要集中在缝隙内挤入的材料中,而缝隙上方的药柱内未发生明显的剪切裂纹扩展行为。

压装PBX-5药柱内微裂纹与微孔洞相关损伤沿L2线方向分布曲线分别如图8a和图8b所示。由图8a,30~50 μ s内微裂纹损伤区域由缝隙周围逐渐向外增大(30 μ s, $x=0.25$ cm;40 μ s, $x=0.7$ cm),对应于

三角形损伤区域形成。由图 8b, 相对于微裂纹扩展时间尺度 (~10 μs), 微孔洞坍塌时间尺度较小 (~1 μs)。6 μs 时沿 L2 线材料内孔隙率未发生变化; 7 μs 时缝隙

中心线周围材料内微孔洞发生坍塌, 孔隙率减小, 而缝隙边界处微孔洞发生扭曲变形; 8 μs 时孔洞扭曲变形区域由边界向中心位置扩散。

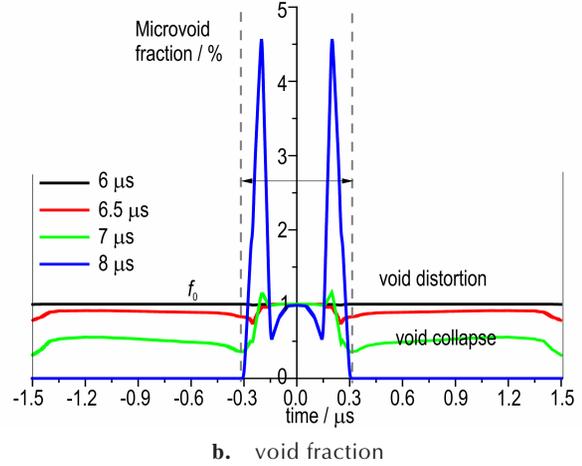
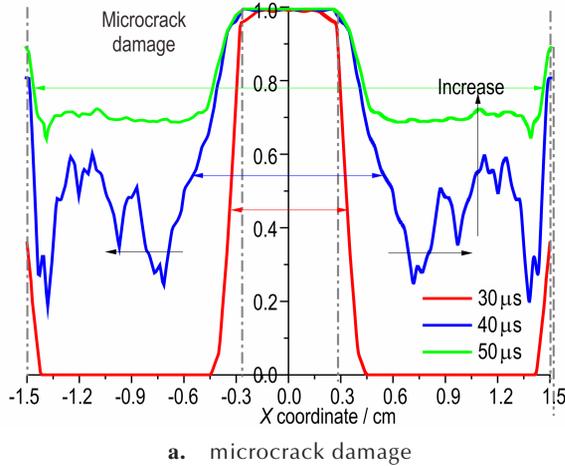


图 8 PBX-5 炸药微裂纹损伤与孔隙率沿 L2 线变化曲线

Fig.8 Microcrack damage and void fraction evolution curves along L2 for PBX-5

3.4 点火响应分析

压装炸药内微裂纹与微孔洞热点温度沿 L2 线分布曲线分别如图 9a 和图 9b 所示。由图 9a, 30~50 μs 内微裂纹热点形成区域由缝隙周围逐渐向外增大 (30 μs, x=0.48 cm; 4 μs, x=0.65 cm)。由图 9b, 6 μs 材料内微孔洞随入射压缩波传播而发生坍塌, 7 μs 时缝隙周围材料受到剪切作用, 孔洞发生扭曲变形, 材料整体强度降低, 引起坍塌孔洞周围粘塑性功速率加快。6~8 μs 时孔洞坍塌热点温升较高区域集中分布在缝隙周围, 且温升极值点随着加载时间增大而增加。由于入射波强度较小, 坍塌孔洞周围粘塑性功引起的温升较小 (~10 K), 因此不足以诱发材料点火。

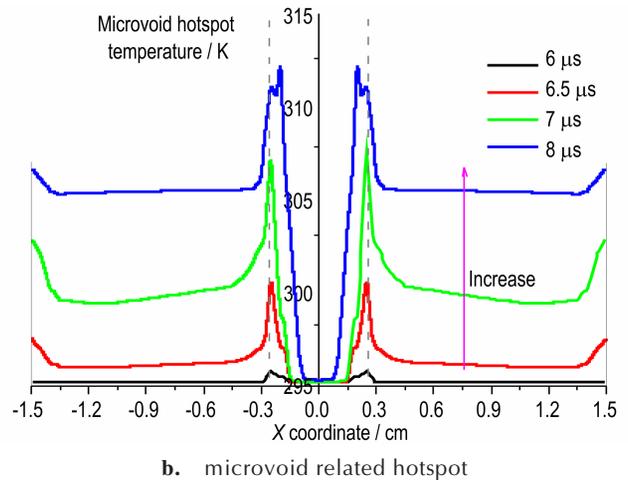
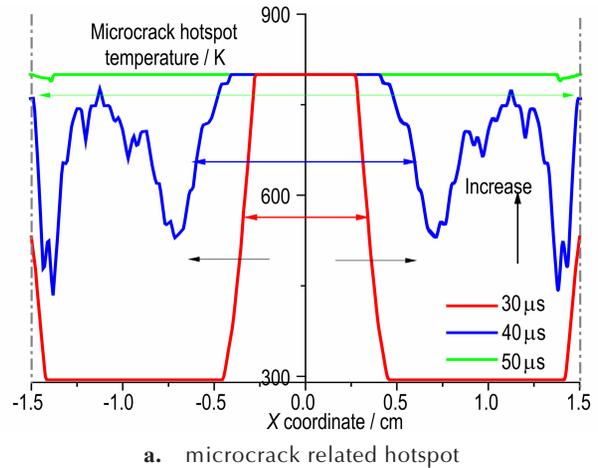


图 10a 和图 10b 分别为压装、浇注药柱内微裂纹相关热点温度演化情况。由图 10a, 30 μs 时压装炸药缝隙周围区域内微裂纹扩展模式为剪切摩擦, 裂纹表面快速摩擦生热进一步诱发材料率先发生点火; 40 μs 时炸药同时受到上下表面以及侧边界挤压作用, 缝隙周边区域以及药柱侧边界处微裂纹摩擦生热速率加快, 材料点火区域沿与下表面呈 45° 方向传播。

由图 10b, 不同于压装药柱, 挤压作用下浇注炸药缝隙上方药柱内处于压力主导的应力状态, 微裂纹处于摩擦自锁状态而未发生明显的剪切裂纹扩展行为。同时, 由于浇注炸药内初始微裂纹密度较小, 挤入缝隙内的材料虽然形成了剪切裂纹热点, 但考虑到热点密度较小可能引起的热点湮灭现象, 微裂纹热点可能并非为浇注炸药主导点火机制, 与材料内局部强剪切作

图 9 PBX-5 炸药不同时刻微裂纹与微孔洞相关热点温度沿 L2 线变化曲线

Fig.9 Microcrack and microvoid related hotspot temperature evolution curves along L2 for PBX-5

用相关的能量耗散机制,如局部剪切带,可能为主导材料点火的热点机制。

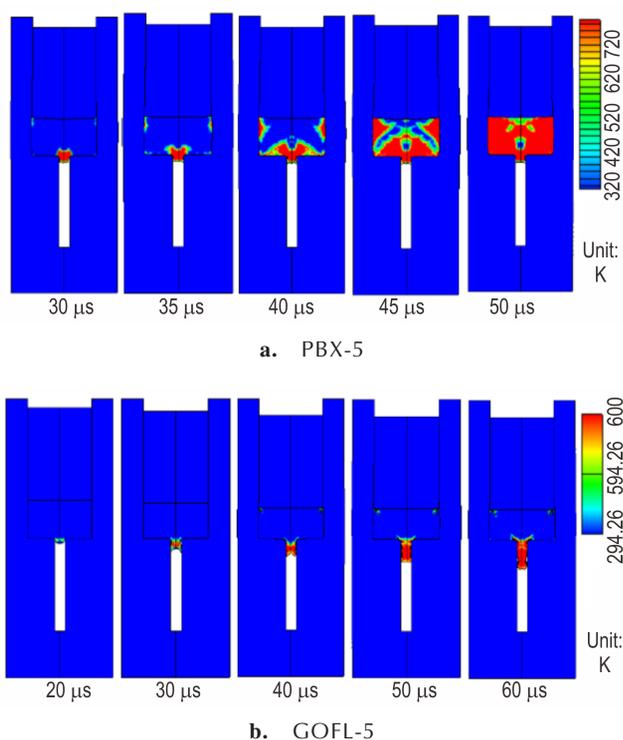


图10 不同时刻两类炸药微裂纹相关热点演化云图
Fig.10 Microcrack-related hotspot temperature contours for PBX-5 and GOFL-5

为建立材料内局部塑性功累积与炸药点火响应的关联性, Ma等^[18]提出了比塑性功率 $P_{st}(W \cdot m^{-3})$ 、有效塑性功 $\overline{W}_{st}(J \cdot m^{-3})$ 相关的双点火准则。如式(14)~式(15), 当 P_{st} 大于临界值 P_0 时, 炸药内生热速率大于热能散失速率, 此时塑性功 W_{st} 开始转化为热能(即有效塑性功 \overline{W}_{st})。当有效塑性功积累到临界值 W_0 时, 假定局部温度升高至点火临界温度, 炸药发生点火反应。

$$P_{st}(t) = \sigma_e(t) \cdot \dot{\epsilon}_{pl}(t) \geq P_0 \quad (14)$$

$$\overline{W}_{st}(t) = \int_{t_1}^t P_{st}(t) dt; \quad W_0 = \overline{W}_{st}(t_{ig}) \quad (15)$$

式中, $\dot{\epsilon}_{pl}$ 为等效塑性应变率, s^{-1} ; t_1 与 t_{ig} 分别表示塑性功开始累积时刻与点火发生时刻, s 。

图11为由双点火准则判断的浇注炸药GOFL-5点火演化情况, 其中 P_0 取值 $0.4 \times 10^{13} W \cdot m^{-3}$, W_0 取值 $5.5 \times 10^6 J \cdot m^{-3}$ 。由于炸药受到上下表面与侧向的挤压作用, 20 μs 时塑性功累积区域率先发生在药柱两侧挤压区域以及缝隙周围剪切流动较强区域, 随着加载时间增加, 50 μs 时点火区域由圆孔边界逐渐向侧边

界与上表面扩展, 随后70 μs 时点火区域由边界区域逐渐向药柱中心位置扩展。

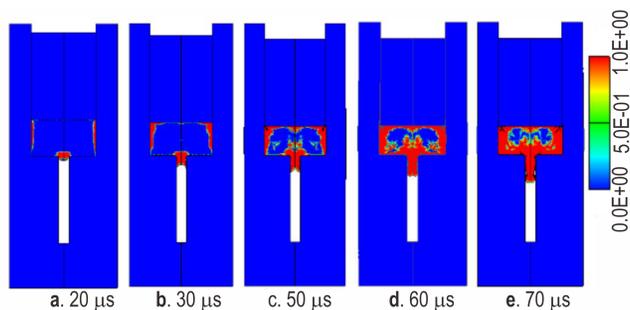


图11 双点火准则判定的GOFL-5炸药点火演化云图
Fig.11 Ignition contours for GOFL-5 determined by Dual Ignition Criterion

4 结论

本研究应用PBX炸药微裂纹-微孔洞力热化学耦合细观模型, 研究了缝隙挤压载荷作用下药柱与壳体缝隙结构相互作用、炸药宏观力热化学响应、以及损伤-点火细观机理。对比分析了压装PBX-5与浇注GOFL-5两类炸药的响应差异:

(1) 压装PBX-5表现出脆性破坏行为, 在缝隙位置处形成应力集中, 少量材料被挤出(60 μs 时挤压前沿距缝隙表面3 mm), 与挤压位置成45°方向区域内微裂纹发生快速扩展。

(2) 相同撞击条件下, 浇注GOFL-5压缩波强度与波速均小于PBX-5, 流动性较好, 在挤压位置处发生快速流动, 大量材料被挤入缝隙(60 μs 时挤压前沿距缝隙表面9 mm)。

(3) 两种炸药在缝隙周围均形成了潜在点火位置, 压装炸药剪切裂纹热点为点火主导机制, 局部剪切塑性耗散机制为浇注PBX潜在的点火主导机制。

参考文献:

[1] Asay B W. Shock wave science and technology reference library (Volume5): Non-Shock initiation of explosives[M]. Berlin: Springer, 2010.
[2] Dai X G, Wen Y S, Zhang HB, et al. Projectile impact ignition and reaction violent mechanism for HMX-based PBXs at high temperature [J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2017, (42):799-808.
[3] 代晓淦, 韩敦信, 向永, 等. 苏珊试验中弹体形变的测量和模拟计算[J]. *含能材料*, 2004, 12(4):48-51.
DAI Xiao-gan, HAN Dun-xin, XIANG Yong, et al. The measurement and numerical simulation of the projectile deformation in Susan Test[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*. 2004, 12(4): 48-51.

- [4] Chidester S K, Green L G, Lee C G. A frictional work predictive method for the initiation of solid high explosives from low pressure impacts [C]//10th International Detonation Symposium, Boston, MA, 1993: 785-792.
- [5] 陈鹏, 屈可朋, 李亮亮, 等. PBX炸药剪切流动点火性能的实验研究[J]. 火炸药学报, 2020, 43(1): 69-73.
CHEN Peng, QU Ke-peng, LI Liang-liang, et al. Experimental study on shear-flow ignition performance of PBX explosive [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*. 2020, 43(1): 69-73.
- [6] Tan H, Huang Y, Liu C, et al. The Mori - Tanaka method for composite materials with nonlinear interface debonding[J]. *International Journal of Plasticity*, 2005, 21(10): 1890-1918.
- [7] Barua A, Kim S, Horie Y, et al. Ignition criterion for heterogeneous energetic materials based on hotspot size temperature threshold [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113: 064906.
- [8] Kim S, Wei Y, Horie Y, et al. Prediction of shock initiation thresholds and ignition probability of polymer-bonded explosives using mesoscale simulations[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2018, 114: 97-116.
- [9] Wei Y, Kim S, Horie Y, et al. Quantification of probabilistic ignition thresholds of polymer-bonded explosives with microstructure defects[J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124(16): 165110.
- [10] 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.
- [11] Zuo Q H, Dienes J K. On the stability of penny-shaped cracks with friction: the five types of brittle behavior[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2005, 42(5-6): 1309-1326.
- [12] Zuo Q H, Addessio F L, Dienes J K, et al. A rate-dependent damage model for brittle materials based on the dominant crack[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2006, 43(11-12): 3350-3380.
- [13] Liu R, Chen P W. Modeling ignition prediction of HMX-based polymer bonded explosives under low velocity impact[J]. *Mechanics of Materials*, 2018, 124: 106-117.
- [14] Labarbera D A, Zikry M A. Heterogeneous thermo-mechanical behavior and hot spot formation in RDX-Ethane energetic aggregates [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2015, 62: 91-103.
- [15] Yang K, Wu Y Q, Huang F L. Damage and hotspot formation simulation for impact-shear loaded PBXs using combined microcrack and microvoid model [J]. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2020, 80: 103924.
- [16] Yang K, Wu Y Q, Huang F L. Microcrack and microvoid dominated damage behaviors for polymer bonded explosives under different dynamic loading conditions[J]. *Mechanics of Materials*, 2019, 137: 103130.
- [17] Bennett J G, Haberman K S, Johnson J N, et al. A constitutive model for the non-shock ignition and mechanical response of high explosives [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1998, 46(12): 2303-2322.
- [18] Ma D, Chen P, Zhou Q, et al. Ignition criterion and safety prediction of explosives under low velocity impact[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(11): 113505.

Damage-ignition Simulation for Typical Pressed and Casted PBX under Crack-extruded Loading

YANG Kun¹, WU Yan-qing¹, JIN Peng-gang², HUANG Feng-lei¹

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: When polymer-bonded explosives (PBX) charges are rapidly extruded in a crack in the warhead's case, it's required to accurately predict unexpected ignition of cased PBX for safety reasons. Using the combined microcrack and microvoid model (CMM), damage-ignition responses of crack-extruded PBX are investigated in three aspects: (i) interactions between crack and extruded PBX; (ii) mechanical-thermal-chemical responses of PBX at the macroscale; and (iii) underlying mechanisms of damage-ignition at the mesoscale. Meanwhile, the difference between two typical PBXs (pressed PBX-5 and casted GOFL-5) in response to crack-extruded loading is compared. The results show that, under $200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ extruded velocity, pressed PBX-5 exhibits brittle failure (extruded 3 mm at $60 \mu\text{s}$) and shows a stress concentration near the crack; microcrack shows a rapid growth along the 45° angle with the extruded surface. In contrast, under the same extruded condition, casted GOFL-5 exhibits a rapid flow rate near the crack; large quantities of material are extruded (extruded 9 mm at $60 \mu\text{s}$). Both pressed and casted PBXs show an ignition near the crack. Shear-crack hotspot is the dominated ignition mechanism for PBX-5, while locally plastic dissipation is a possible dominated ignition mechanism for GOFL-5.

Key words: PBX explosive; crack-extruded loading; microcrack-microvoid; damage-ignition

CLC number: TJ55; O341

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2020170

(责编:高毅)