

文章编号:1006-9941(2022)12-1259-07

加载速率和加载位置对炸药缝隙扩展过程影响的数值模拟

楼建锋,张树道

(北京应用物理与计算数学研究所,北京 100094)

摘要: 为研究弱载荷作用下炸药起裂、裂缝扩展过程,分析加载条件对缝隙扩展的影响规律,研究基于钝感炸药的三点弯曲试验,采用考虑了材料的拉压异性、应变率效应,以及损伤失效的本构模型,开展了炸药起裂和裂缝演化过程的数值模拟研究,拟合了主要的计算参数,计算结果与试验数据符合较好,校验了计算模型及其适用性;数值模拟获得了炸药样品中裂缝产生和扩展过程的典型特征图像,分析了加载速率和加载位置对炸药裂缝扩展演化规律的影响。研究表明,初始裂缝尺寸越大,起裂越早;随着加载速率增大,起裂荷载也增大,反映了炸药样品的应变率效应;加载位置偏离初始裂缝位置时,对于不同加载速率情况,样品中的裂缝扩展演化路径差异很大,存在4种破坏模式。

关键词: 裂缝扩展;初始裂缝;加载速率;炸药三点弯曲试验

中图分类号: TJ55; O34

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2021219

0 引言

高能炸药是由炸药颗粒、黏结剂等构成的非均质复合材料,力学性能受加工工艺和制备过程的影响,动力学响应行为还依赖于使用环境、结构约束和加载条件等因素^[1-5]。炸药部件在制备成型和使用过程中都可能会产生裂纹,影响其力学性能和爆轰性能。外界刺激下炸药的动力学响应,特别是弱载荷作用下炸药的损伤断裂等行为,不仅影响炸药非冲击点火行为,也会影响点火后反应演化过程及其反应剧烈程度,是目前炸药安全性研究领域关注的重点之一。

为了研究弱载荷作用下炸药的损伤断裂行为,通常是开展准静态或动态力学性能实验,例如三点弯曲试验、霍普金森压杆实验、巴西试验等,在实验中获得材料的应力应变关系、动态破坏强度等特征量,并进一步构建材料本构模型来预测材料的动力学响应^[6-12]。随着计算方法的发展,细观损伤模型及其数值模拟方法已成为炸药损伤研究的热点^[13-16],然而真实炸药材料的微细观建模比较困难,这些方法很难应用于复杂

结构工程试验的模拟,实际工程问题的分析还得依赖于宏观唯像模型。

由于高能复合炸药与混凝土类材料在结构组成上存在一定的相似性,高能炸药主要由高能炸药颗粒和黏结剂等基体构成,而混凝土材料由骨料和砂浆组成,在常温常压下都是脆性材料,两者的破坏强度也比较接近(几十兆帕),因此,本研究尝试采用混凝土类材料的宏观本构模型^[17]来描述高能炸药的动力学响应。

对于炸药材料,由于实验加载过程中存在反应放能的风险,能较好描述炸药损伤断裂演化规律的实验很难开展,系统分析加载条件、结构约束等因素对裂缝产生机制和扩展规律影响的工作很少。因此,本研究针对钝感炸药的裂缝起裂和扩展过程开展了数值模拟研究,着重分析了加载速率和加载位置对断裂模式及裂缝演化过程的影响规律。

1 数值模拟方法及算例验证

三点弯曲试验是材料弯曲断裂行为研究及其力学性能测试的重要试验,在金属材料的弯曲性能研究和岩石、混凝土等脆性材料的断裂力学性能研究中都有广泛应用,近年来该试验也逐渐被应用于含能材料的动力学响应分析^[6-7]。三点弯曲试验中,给炸药试件施

收稿日期:2021-08-17;修回日期:2021-09-27

网络出版日期:2022-07-14

作者简介:楼建锋(1980-),男,博士,研究员,主要从事弹药安全与毁伤评估研究。e-mail:jflou@iapcm.ac.cn

引用本文:楼建锋,张树道.加载速率和加载位置对炸药缝隙扩展过程影响的数值模拟[J].含能材料,2022,30(12):1259-1265.

LOU Jian-feng, ZHANG Shu-dao. Numerical Study on the Effect of Loading Rate and Loading Position on the Crack Evolution of Explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2022, 30(12):1259-1265.

加载荷 P , 会发生局部应力集中现象, 一旦超过材料破坏强度就会逐渐发生断裂破碎, 结构示意图如图 1 所示。要准确描述这个过程, 需要有合理的失效断裂模型和参数。为此, 本研究使用有限元程序 LS-DYNA 建模^[18-19], 采用拉氏算法, 在充分考虑网格收敛性后, 选取网格单元尺寸为 0.1mm。通过 Riedel-Hiermaier-Thoma (RHT) 本构模型和侵蚀算法来开展钝感炸药三点弯曲试验断裂现象的数值模拟, 分析炸药起裂行为和裂缝演化过程及其影响因素; 加载部件钢柱使用刚体本构模型 (*MAT_RIGID)。

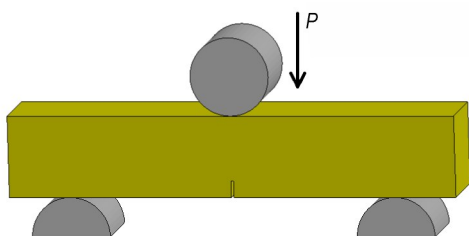


图 1 三点弯曲试验装置结构示意图

Fig.1 Configuration of three-point bending test

国内外对混凝土的材料本构模型开展了大量有效的研究工作, 其中, Riedel^[17] 通过改进 Holmquist-Johnson-Cook (HJC) 模型提出了 RHT 模型。该模型引入了偏应力张量第三不变量对破坏面的影响, 引入三个强度极限面概念^[17, 19], 即弹性极限面、失效面和残余强度面, 它们分别描述材料的初始屈服强度、失效强度及残余强度的变化规律, 该模型能综合反映材料的拉压异性、应变率效应、应变硬化、软化与失效等现象, 更全面地反映材料在不同应力状态下的动态力学行为。当材料强度达到失效面的极限强度时, 损伤开始累积; 对塑性应变进行积分获得材料损伤值。RHT 模型中包含了弹性、线性强化和损伤软化 3 个阶段, 30 余个参数。

RHT 模型中, 失效面对应的失效函数 Y_{fail} 表示为:

$$Y_{\text{fail}} = Y_{\text{TXC}}(p) R_3(\theta) F_{\text{RATE}}(\dot{\varepsilon}) \quad (1)$$

式(1)中, $Y_{\text{TXC}}(p)$ 为压缩子午线:

$$Y_{\text{TXC}}(p) = A \left[\frac{p}{F_C} - \frac{p_{\text{spall}}}{F_C} F_{\text{RATE}}(\dot{\varepsilon}) \right]^N F_C \quad (2)$$

$R_3(\theta)$ 代表任意应力角对应的子午线半径和压缩子午线半径之比:

$$R_3(\theta) = \frac{2(1-Q_2^2)\cos\theta + (2Q_2-1)[4(1-Q_2^2)\cos^2\theta + 5Q_2^2 - 4Q_2]^{\frac{1}{2}}}{4(1-Q_2^2)\cos^2\theta + (1-2Q_2)^2} \quad (3)$$

式(3)中,

$$\theta = \frac{1}{3} \cos^{-1} \left(\frac{3\sqrt{3}J_3}{2J_2^{3/2}} \right), \quad 0 \ll \theta \ll \frac{\pi}{3} \quad (4)$$

$$Q_2 = Q_0 + B \frac{p}{F_C} \quad (5)$$

$F_{\text{RATE}}(\dot{\varepsilon})$ 为应变率强化因子:

$$F_{\text{RATE}}(\dot{\varepsilon}) = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^\alpha, & p > \frac{F_C}{3} \\ \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^\delta, & p < \frac{F_C}{3} \end{cases} \quad (6)$$

以上各式中, p_{spall} 是层裂强度, MPa; F_C 是抗压强度, MPa; J_2 和 J_3 分别是偏应力张量第二和第三不变量; A , N , α , δ , Q_0 和 B 是材料系数, $\dot{\varepsilon}_0 = 3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。

弹性极限面的方程为:

$$Y_{\text{elastic}} = Y_{\text{fail}} F_{\text{elastic}} F_{\text{CAP}}(p) \quad (7)$$

式(7)中, F_{elastic} 是材料弹性强度与极限强度之比, $F_{\text{CAP}}(p)$ 是盖帽函数。

失效面和弹性极限面之间的状态通过插值得到,

$$Y = Y_{\text{elastic}} + \frac{\varepsilon_{\text{eq}}^{\text{pl}}}{\varepsilon_{\text{eq}}^{\text{pl, hard}}} (Y_{\text{fail}} - Y_{\text{elastic}}) \quad (8)$$

式(8)中, $\varepsilon_{\text{eq}}^{\text{pl}}$ 和 $\varepsilon_{\text{eq}}^{\text{pl, hard}}$ 分别是当前失效面和最大失效面对应的塑性应变。

残余强度面的方程为:

$$Y_{\text{residual}} = A_i \left(\frac{p}{F_C} \right)^{N_i} F_C \quad (9)$$

式(9)中, A_i 和 N_i 分别是残余强度面的系数和指数。

失效面和残余强度面之间的状态也是通过插值得到,

$$Y = Y_{\text{fail}} - D(Y_{\text{fail}} - Y_{\text{residual}}) \quad (10)$$

式(10)中, 损伤度 D 的方程是:

$$D = \int_{\varepsilon_{\text{eq}}^{\text{pl, hard}}}^{\varepsilon_p} \frac{d\varepsilon_p}{D_1 \left(\frac{p}{F_C} - \frac{p_{\text{spall}}}{F_C} \right)^{D_2}} \quad (11)$$

式(11)中, D_1 和 D_2 是材料损伤系数, ε_p 为塑形应变。

本研究通过设置合理的拉伸破坏强度、压缩破坏强度和最大等效应变, 构建了多种模式组合的失效判据, 并利用侵蚀算法处理大变形网格单元, 实现了材料失效断裂的仿真模拟。针对文献[6]中的三点弯曲试验开展了大量数值模拟, 结合试验数据分析了计算模

型的参数敏感性,进一步标定了主要的计算参数(见表1)。其中,压缩强度、拉伸强度和剪切模量参考了文献[8]的实验结果,屈服面和损伤相关的模型参数主要是通过数值模拟进行拟合,经过对比模型曲线中弹性段、线性强化段以及损伤软化段的变化规律,结合参数敏感性分析再不断优化。

表1 LX-17炸药的主要计算参数
Table 1 Main parameters of LX-17

ρ_0 /g·cm ⁻³	G /MPa	EPSF	B_0	B_1	T_1	Q_0	B	A	N
1.905	1200	0.2	0.32	0.32	0.3	0.2405	0.0105	1.2	0.41
F_c / MPa	F_s^*	F_t^*	G_c^*	G_t^*	ξ_i	D_1	D_2	A_f	N_f
30	0.35	0.25	0.4	0.48	0.25	0.01	1.0	1.2	0.61

本研究对文献[6]中的三点弯曲试验进行了数值模拟,获得了炸药起裂和裂缝演化过程的特征图像。计算模型中样品的初始裂缝长度是2 mm,宽度是0.3 mm,加载速率是 $2.54 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。炸药样品中的应力变化云图和裂缝演化过程的特征图像如图2所示,可以看到,在外载荷作用下,首先在裂缝尖形成较大的应力集中状态(图2a),随着外载荷的增加,应力集中区域不断地从裂缝尖附近向周围扩展,当裂缝尖的拉应力超过材料拉伸破坏强度时,就产生了新的裂缝(图2b),而随着应力继续在裂缝尖聚集,缝隙会进一步向加载位置扩展(图2c),最后使得样品断裂形成两段(图2d)。数值模拟得到了荷载随样品位移变化的曲线,跟试验测试曲线的对比情况如图3所示,荷载峰值和变化趋势都互相符合较好。

图4显示了不同初始裂缝尺寸情况下荷载随样品位移变化的曲线,并且将计算结果与试验结果进行了对比,实线是数值模拟结果,虚线是相应的试验结果。表2列出了计算获得的起裂荷载与试验结果的对比情况,两者符合较好,这些结果进一步校验了计算模型和失效判据的有效性。同时,还可以看出,在三点弯曲试验中,对于不同初始裂缝尺寸的样品,起裂荷载随着初始裂缝尺寸的增加而减小。

2 炸药裂缝扩展过程的影响因素分析

在服役环境中,复杂装药结构中炸药受结构约束的影响,外界刺激引起的炸药受力状态很复杂,与约束结构密切相关,进而裂缝的产生及其扩展问题非常复杂,特别是三维结构内的损伤破坏机制和演化规律很

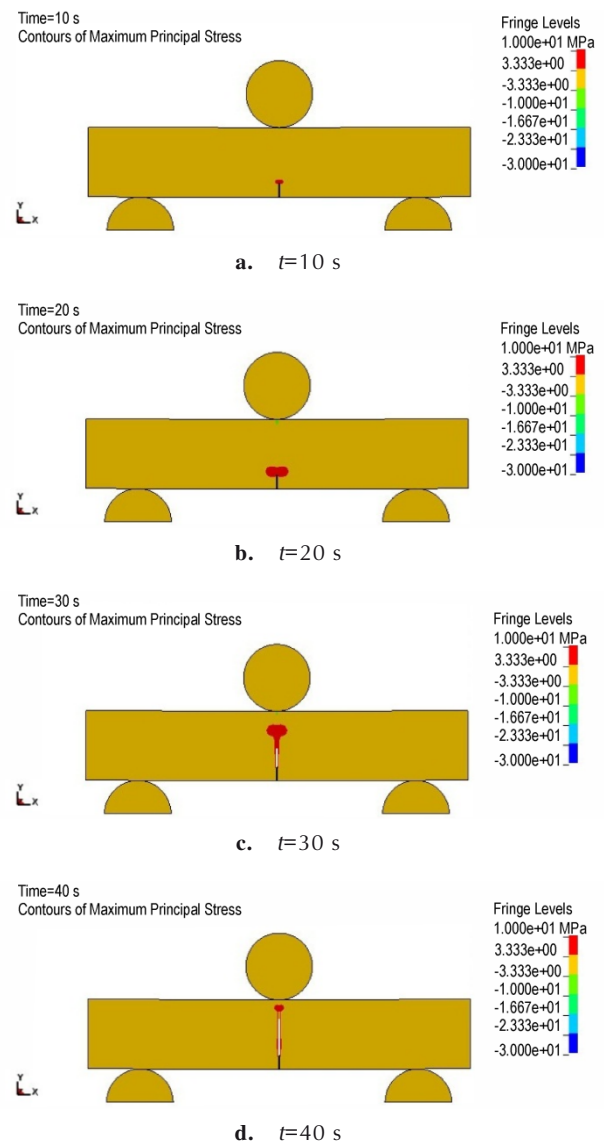


图2 初始裂缝长度2 mm,炸药样品中的应力变化云图和裂缝演化过程

Fig.2 Contours of principal stress and crack in explosives with an initial crack length of 2 mm

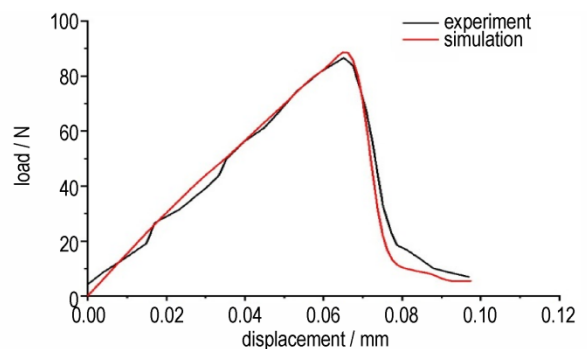


图3 初始裂缝长度2 mm,荷载随炸药样品位移变化曲线

Fig.3 Load-displacement curve for specimen with an initial crack length of 2 mm

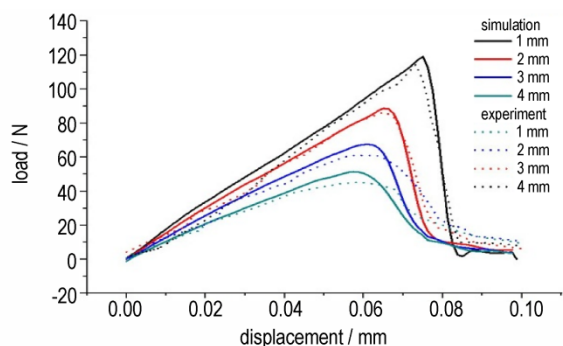


图4 不同初始裂缝尺寸,荷载随炸药样品位移变化曲线对比

Fig.4 Load-displacement curves for specimens with different initial crack lengths

表2 起裂荷载计算值与试验结果^[6]比较

Table 2 Comparison of load magnitude predictions with experiments

initial crack size / mm	predicted value of initial cracking load / N	experimental value of initial cracking load / N
1	119	115
2	89	87
3	67	61
4	51	45

难分析,因为炸药是非透明材料,无法直接观察其内部的裂缝扩展情况。因此,本研究选取三点弯曲试验作为对象,重点开展加载条件的影响规律分析,一方面可以简化约束结构,另一方面在支撑柱位置又能反映局部应力集中现象,从而更清晰地认识裂缝产生和扩展机制。

通过大量的数值模拟工作,我们认识到加载速率和加载位置等关键因素,对炸药裂缝扩展演化过程存在较大的影响。为了分析这些重要因素的影响,设计了一系列计算模型,获得了样品起裂荷载等物理量的变化曲线,裂缝产生和演化过程的图像,着重分析了加载速率和加载位置对裂缝扩展和断裂模式的影响。

2.1 加载速率和加载位置与起裂荷载之间的关系

在前文,载荷施加位置和初始预制裂缝都是在样品梁中间,样品起裂和裂缝扩展过程都发生在样品中间。为了进一步分析加载位置和加载速率对样品裂缝扩展演化过程的影响,将加载圆柱体移动至初始预制裂缝与支柱中间的位置,加载方向不变,设计了不同加载速率的计算模型进行数值模拟分析。为此,研究分别针对加载位置在样品中间和偏离初始裂缝位置的情况,考察了加载速率对起裂荷载的影响,计算模型中样品的初始裂纹长度为1 mm,加载速率 v 为1.0, 2.5, 5.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和10.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,模拟结果如图5、6所示。图5为样品起裂荷载随加载速率变化曲线,模型1对应加

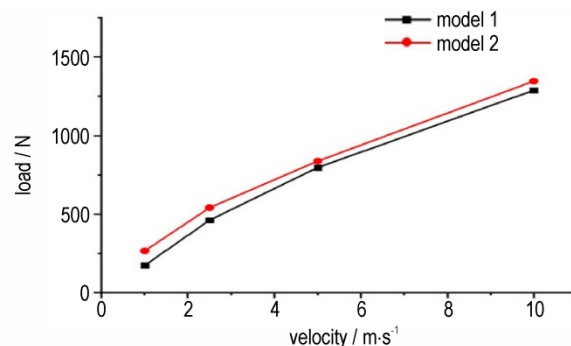


图5 样品起裂荷载随加载速率变化曲线

Fig.5 Load magnitude variation curves for different loading rates

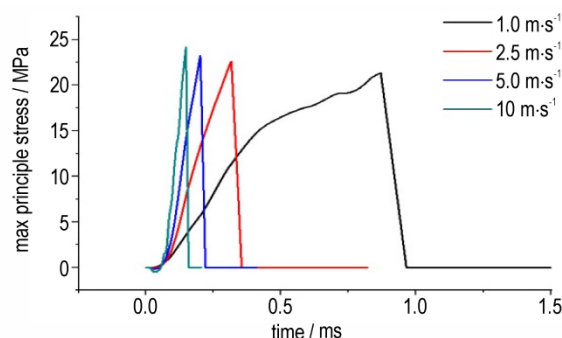


图6 不同加载速率下,炸药裂缝尖位置最大主应力的变化过程

Fig.6 Curves of maximum principal stress at the crack tip for different loading rates

载位置位于样品梁中间,模型2对应加载位置在初始预制裂缝和支柱的中间。由图5的数值计算结果表明,随着加载速率增大,起裂荷载也不断增大;而对于同一加载速率情况,加载位置在样品中间时,起裂荷载相对较小,这是因为支柱的支撑力在裂缝位置产生了更大的力矩作用。

图6为模型1中裂缝尖位置最大主应力的变化过程,当加载速率是1.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,裂缝尖位置的应变率约6000 s^{-1} ,而加载速率是10.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,应变率约28000 s^{-1} ,可以看出,随着加载速率的增加,应变率增大,样品中的最大主应力逐渐增大,这反映了PBX炸药样品存在应变率效应。

2.2 加载速率和加载位置对炸药裂缝扩展演化过程的影响

为深入分析炸药裂缝扩展演化过程与加载速率和加载位置之间的关系,针对加载位置在初始预制裂缝与支柱中间的情况(即偏离初始裂缝位置的情况),数值模拟了一系列典型加载速率下裂缝扩展演化过程。图7a~7d显示了不同加载速率情况下炸药样品中损

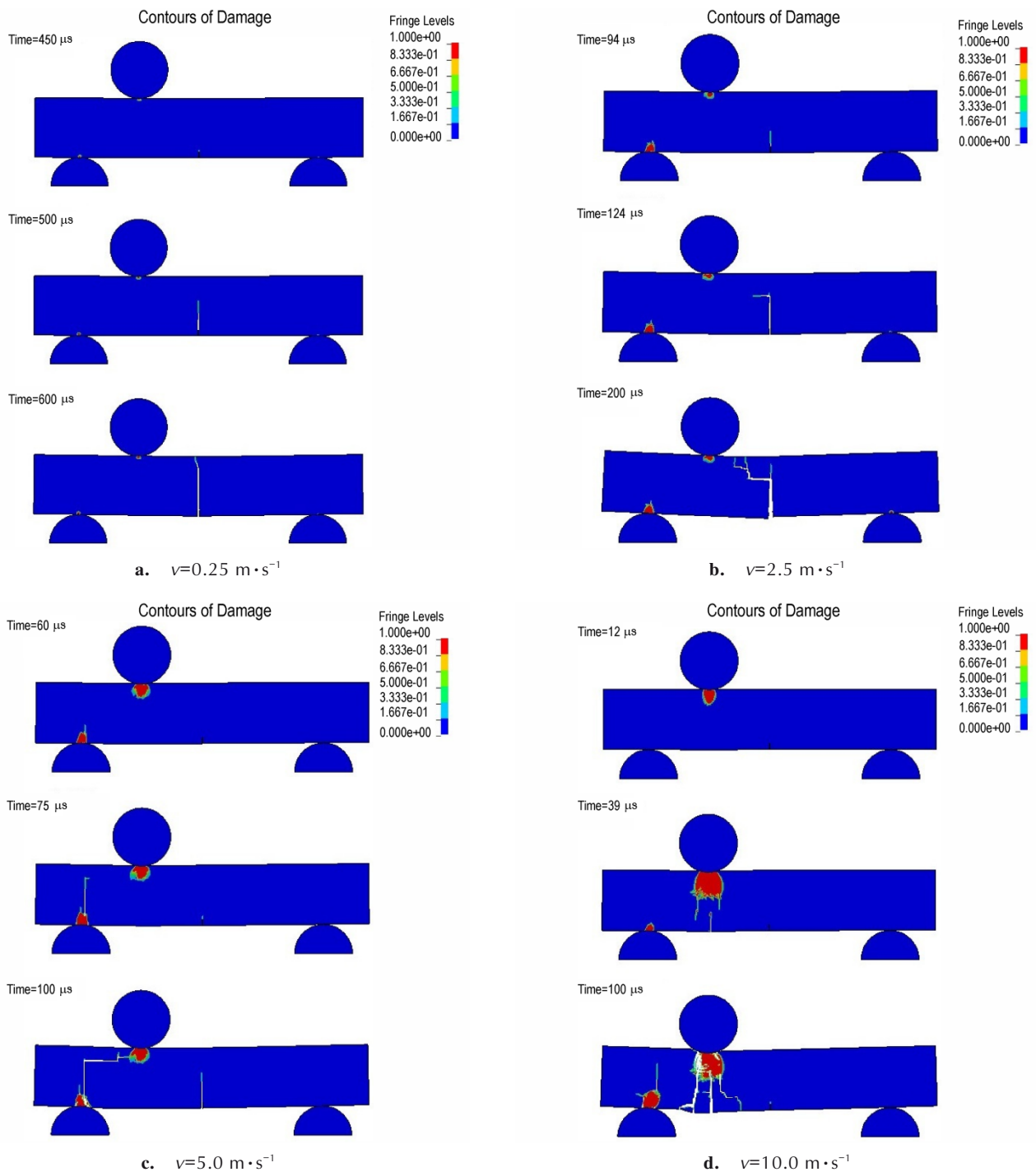


图7 不同加载速率情况,炸药样品起裂和裂缝扩展演化过程

Fig.7 Evolution process of crack initiation and development in specimens for different loading rates

伤和裂缝扩展过程的数值模拟图像,图7a~7d依次表示加载速率 v 为0.25, 2.5, 5.0 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和10.0 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的数值模拟图像。由图7可以看出,加载位置偏离初始裂缝位置时,初始裂缝位置、加载位置和支撑位置都会产生应力集中效应,容易发生塑性变形、失效损伤或断裂破碎,但是对于不同加载速率情况,样品中的裂缝扩

展演化过程差异很大,产生了4种破坏模式:

(A) 当加载速率0.25 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,较低时(图7a),样品上受到的荷载较小,由于初始裂缝位置的拉应力先达到了抗拉强度,产生拉伸破坏,能量释放主要沿着初始裂缝进行,于是裂缝也在这位置沿着原方向继续扩展,即加载速率较低时候,初始缝隙等因素起主导作用,产

生拉伸开裂模式;

(B) 随着加载速率增大至 $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 7b), 加载位置的应力也增加, 使得裂缝扩展方向会向加载位置偏移, 产生裂缝路径弯曲扩展模式;

(C) 进一步增大加载速率, 至 $5.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 7c), 样品与支撑圆柱接触位置由于受到较大的压应力作用, 会达到抗压强度而产生压缩破坏, 同时这个位置附近也受到较强的拉应力而发生拉伸破坏, 因此除了在样品中间初始裂缝位置扩展外, 在支柱位置也会产生新的损伤和裂缝, 即在约束条件和初始缝隙共同作用下, 产生多裂缝扩展模式, 初始裂缝位置继续拉伸开裂, 强约束位置发生压缩破碎后产生新的裂缝扩展;

(D) 加载速率更大的情况, 为 $10.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 7d), 除了支柱位置产生新的裂缝扩展外, 由于加载位置受到了较强的冲击载荷作用, 该位置附近的拉压应力也会迅速超过破坏强度, 发生断裂破碎、产生新裂缝, 并且迅速扩展直至样品断裂, 即加载速率较高时, 外载荷和强约束起主导作用, 产生动态断裂破碎模式, 大部分能量释放主要发生在加载位置和强约束位置附近的局部区域。

上述现象体现了在内因(系统结构)和外因(加载速率)竞争情况下, 典型动力学系统的响应特征演化和模式演化。在较低的加载速率范围内, 系统响应呈现内因主导模式, 即模式 A, 准静力学响应特征明显, 从预制的初始裂缝处开始动态扩展过程, 裂缝轨迹基本不变。而在较高的加载速率下, 系统响应呈现外因主导的强动力学响应模式(模式 D), 伴随较高的加载速率, 系统的能量急剧增加、超过承受阈值, 此时需要更快的能量释放模式, 主要特征: 一是局域性, 体现在加载位置处样品的破碎, 而预制的初始裂缝不会扩展; 二是灾变性, 在加载位置处呈现多条裂缝同时扩展的断裂现象, 产生与外因主导强动载、系统能量激增相匹配的能量快速释放机制。

模式 B 和模式 C 为过渡模式, 内因和外因均发挥不可忽略的作用, 体现了内因主导模式 A 和外因主导模式 D 的混合特征。在模式 B 中, 裂缝扩展具有模式 A 的“记忆”效应, 早期阶段裂缝扩展从预制裂缝处开始, 沿着内因主导的预定轨迹扩展, 后期阶段裂缝偏离预定轨迹, 向着加载点方向演化, 裂缝扩展呈现弥散特点。在模式 C 中, 除了内因主导的初始预制裂缝扩展外, 外因主导在左支撑点和加载点两个位置处产生了新的应力集中点, 两个位置处产生的裂缝不断扩展、直至贯通, 是能量的主要释放过程, 而初始裂缝最终停止

扩展, 较好地体现了模式 C 是由早期的主导模式 A 向后期的主导模式 D 过渡的演化特征。

总的说来, 加载速率较小时, 初始裂缝对材料断裂破坏过程的影响较大, 而随着加载速率增加, 初始裂缝的影响减弱, 加载条件和约束条件的影响增强。

3 结论

本研究围绕加载条件对炸药缝隙扩展过程影响问题, 基于钝感炸药的三点弯曲试验, 采用 RHT 材料模型, 结合多种模式组合的失效判据, 开展了炸药起裂和裂缝演化过程的数值模拟研究, 拟合标定了主要的计算参数, 校验了计算模型及其适用性。

数值模拟分析了初始裂缝尺寸、加载速率和加载位置对炸药裂缝扩展演化规律的影响, 研究结果表明:

(1) 随着加载速率增大, 起裂荷载增大, 而初始裂缝尺寸和加载位置对炸药裂缝扩展演化的影响减小;

(2) 加载位置偏离初始裂缝位置时, 对于不同加载速率情况, 样品中的裂缝扩展演化过程差异很大, 随着加载速率的增加, 样品的破坏存在 4 种模式, 从准静态裂缝拉伸开裂向动态断裂破碎模式转变, 这反映了初始裂缝等内因主导模式向约束和载荷等外因主导模式演化的动力学响应特征。

另外, 本研究针对工程应用的研究需求开展建模分析, 获得不同加载速率下的裂缝扩展路径, 主要反映了定性规律, 而真实的裂缝情况更加复杂, 也跟材料非均质的微结构相关。

参考文献:

- [1] 牛国涛, 金大勇, 王亲会, 等. 装药结构对大尺寸熔铸炸药裂纹的影响[J]. 火工品, 2015(1): 30-33.
NIU Guo-tao, JIN Da-yong, WANG Qin-hui, et al. Effect of charge structure on charge quality of large size melt-cast explosive[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2015(1): 30-33.
- [2] 杨宝刚, 兰琼, 陈学平, 等. 高能压装炸药部件裂纹损伤及防治措施[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(2): 119-123.
YANG Bao-gang, LAN Qiong, CHEN Xue-ping, et al. Cause and prevention measurements of cracks damage of high explosives compacts[J]. *Sichuan Ordnance*, 2015, 36(2): 119-123.
- [3] 刘瑞鹏, 王世英, 王淑萍. 环境温度对含铝炸药装药裂纹的影响研究[J]. 火工品, 2012(3): 30-33.
LIU Rui-peng, WANG Shi-ying, WANG Shu-ping. Analysis of environmental temperature on crack damage of aluminized explosive charge[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2012(3): 30-33.
- [4] 杨宝刚. 高能压装炸药部件裂纹损伤研究进展. 中国国防科技报告. GF-A0183841G, 2013.
YANG Bao-gang. Research progress on cracks damage of high performance explosives compacts[R]. GF-A0183841G, 2013.
- [5] 李明, 张珏, 李敬明, 等. 高聚物粘结炸药压缩破坏的细观力学实

- 验研究[J]. 含能材料, 2005, 13(2): 79-83.
- LI Ming, ZHANG Jue, LI Jing-ming, et al. Experimental investigation to the damage localization of PBX mechanical failure at mesoscale[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(2): 79-83.
- [6] LOUIS F J, GAGLIARDI F J, CUNNINGHAM B J, VANDERSALL K S. Measure of quasi static toughness and fracture parameters for mock explosive and insensitive high explosive LX-17 [C]. In: *Proceeding of 14th international detonation symposium*, 2010, pp. 580-587.
- [7] 肖盼, 杨占锋, 杜宇. 单轴压缩及三点弯曲加载下的TATB基PBX声发射特征研究[R]. 中国国防科技报告, GF-A9018458G, 2017.
- XIAO Pan, YANG Zhan-feng, DU Yu. Acoustic emission behavior of TATB based PBX during uniaxial compression and three-point bending deformation[R]. GF-A9018458G, 2017.
- [8] GROVES S, CUNNINGHAM B. Tensile and Compressive Mechanical Properties of Billet Pressed LX17-1 as a Function of Temperature and Strain Rate [R]. LLNL report, UCRL-ID-137477, 2000.
- [9] HACKETT R M, BENNETT J G. An implicit finite element material model for energetic particulate composite materials[J]. *Int. J. Numer. Meth. Engng* 2000, 49: 1191-1209.
- [10] 李俊玲. PBX炸药装药的力学性能及损伤破坏研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- LI Jun-ling. Study on PBX's mechanical behavior and damage feature[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [11] 唐维. TATB基PBX炸药的准静态本构模型与强度准则[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- TANG Wei. Constitutive models and strength criterions of a TATB-based PBX under quasi-static loading [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2016.
- [12] 孙文旭, 罗智恒, 唐明峰, 等. PBX-1炸药的力学性能和本构关系[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(7): 072301-1-7.
- SUN Wen-xu, LUO Zhi-heng, TANG Ming-feng, et al. Compressive mechanical properties and constitutive relations of PBX-1 [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39 (7) : 072301-1-7.
- [13] 楼建锋, 洪滔, 朱建士. PBX炸药损伤本构模型研究现状[R]. 中国国防科技报告, GF-A9018458G, 2010.
- LOU Jian-feng, HONG Tao, ZHU Jian-shi. Present study state of damage constitutive model of PBX [R]. GF-A9018458G, 2010.
- [14] 黄西成, 李尚昆, 魏强, 等. 基于XFEM与Cohesive模型分析PBX裂纹产生与扩展[J]. 含能材料, 2017, 25(8): 694-700.
- HUANG Xi-cheng, LI Shang-kun, WEI Qiang, et al. Analysis of crack initiation and growth in PBX energetic material using XFEM-based cohesive method[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(8): 694-700.
- [15] 李潘. 近场动力学损伤断裂模拟方法及其在PBX炸药裂纹扩展中的应用[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2018.
- LI Pan. Peridynamic damage simulation method and its application on crack propagation analysis of PBX energetic materials [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2018.
- [16] 沈迎咏. PBX裂纹扩展的细观及宏细观耦合数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- SHEN Ying-yong. Numerical simulation study of mesoscopic and macro-mesoscopic coupling of PBX crack propagation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [17] RIEDEL W, THOMA K, HIERMAIER S, et al. Penetration of reinforced concrete by BETA2B2500 numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes [C]//9th International Symposium, Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Berlin-Strausberg: IBMAC, 1999: 315-322.
- [18] HALLQUIST J O. Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA *Theoretical Manual*, 1998.
- [19] Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA *Keyword User's Manual R11*, 2018.

Numerical Study on the Effect of Loading Rate and Loading Position on the Crack Evolution of Explosive

LOU Jian-feng, ZHANG Shu-dao

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

Abstract: In order to study the law of crack initiation, growth and evolution of explosives under weak load. The numerical simulation of crack initiation and evolution of explosives was carried out by using the material model considering the phenomena of tensile and compressive anisotropy with strain rate effect. The numerical results are in good agreement with the test data, and the applicability of the numerical model is verified. The typical characteristic images of crack generation and evolution of explosives were obtained through a series of numerical simulations, and the effects of initial crack size, loading rate and loading position on the crack propagation process of explosives were also analyzed, which can provide reference for the analysis of damage and fracture process as well as the dynamic response of explosives.

Key words: crack growth and evolution; initial crack; loading rate; explosive three-point bending test

CLC number: TJ55; O34

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2021219

(责编: 姜梅)