

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.06.005

两次冲击作用下压装炸药损伤规律研究^{*}

张萌昭 屈可朋 周 涛 沈 飞 胡雪焱
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 针对装药在多次冲击作用下易产生结构损伤,进而形成热点,引起战斗部提前点火甚至起爆的问题,采用一级轻气炮为加载源,设计了冲击加载模拟实验装置,分别开展了单个 10 mm、单个 12 mm、两个 10 mm 和两个 12 mm 厚端盖 4 种工况的冲击加载试验。结合仿真模拟和扫描电子显微镜(SEM),获取了装药内部应力分布规律及损伤特征,分析了加载次数对装药损伤的影响。结果表明:与单次冲击加载相比,炸药在连续两次冲击加载条件下损伤模式仍以拉伸断裂为主;但试样表面裂纹条数增多、分布范围更广、拉伸波叠加以及损伤演化速率提高等因素使得二次冲击加载时炸药内部微裂纹更易发展成为宏观裂纹。

[关键词] 冲击;压装炸药;微观损伤;轻气炮;损伤演化

[分类号] TJ55

Research on the Damage Law of Pressed Explosives under Double-Pulse Loading

ZHANG Mengzhao, QU Kepeng, ZHOU Tao, SHEN Fei, HU Xueyao
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] The charge is prone to structural damage under the action of multiple impacts, and then form hot spots causing the warhead to pre-ignite or even detonate. An impact loading simulation experimental installation was designed using the one-stage gas gun. Impact loading tests were carried out under four working conditions of a single 10 mm, a single 12 mm two 10 mm and two 12 mm thick end caps. Combined with simulation and scanning electron microscope (SEM), internal stress distribution law and damage characteristics of the charge were obtained, and the influence of loading time on the damage of the charge was analyzed. The results show that, compared with single loading, the damage mode of explosive under the condition of two consecutive loadings is still mainly tensile fracture. However, factors such as increase of the number of cracks on surface of the sample, wider distribution range, superposition of tensile waves and the increase of damage evolution rate make it easier for the internal microcracks of the explosive to develop into macroscopic cracks during the secondary loading.

[KEYWORDS] shock; pressed explosives; microscopic damage; gas gun; damage evolution

引言

高速侵彻弹药是打击海上、地下高价值目标的主要手段。随着撞击速度的不断提高,侵彻弹装药的抗过载安定性已成为关注的重点。尤其是侵彻多层目标靶时,装药需要承受两次或多次冲击载荷作用,受力过程更为复杂和苛刻,极易产生结构损伤而形成热点,使得战斗部提前点火甚至起爆^[1-2]。因此,研究装药在多次连续冲击作用下的损伤规律具

有重要意义。

国内外针对单次冲击作用下的装药损伤做了大量工作,主要采用实验的方法进行研究,也有学者结合模拟实验对损伤的演化进行分析。蔡宣明等^[3]利用Hopkinson压杆实验,对高应变率下的含能材料的动态力学性能及微观损伤进行研究。王芳芳等^[4]对高温加速老化下的浇注炸药在高速冲击下的损伤模式进行研究,得到了不同老化时间下的失效应变,并比较了微观损伤形式。杨昆等^[5]仿真研究了两种不同装药在缝隙挤压条件下的损伤点火机

^{*} 收稿日期:2021-03-23
基金项目:国家安全重大基础研究专项;西安近代化学研究所开放合作创新基金(SYJJ-41)
第一作者:张萌昭(1997-),女,硕士研究生,主要从事装药损伤的研究。E-mail:zmz_15@163.com
通信作者:周涛(1979-),男,研究员,主要从事爆炸力学及战斗部设计研究。E-mail:pep2968@163.com

理,发现剪切裂纹易引发炸药点火。张馨予等^[6]对弹体侵彻混凝土薄靶过程进行模拟发现,加载初期装药头部承受较大压力,而尾部则需承受拉伸波作用与壳体表面碰撞,损伤易发生于装药的头部和尾部。也有科研人员设计不同实验以模拟装药在多次脉冲条件下的受力情况,进而分析损伤特点与点火机理。李亮亮等^[7]采用夹心弹结构,在分离式 Hopkinson 压杆实验装置上实现了对炸药的双脉冲加载,发现应变率越大,炸药晶体损伤越严重。聂少云等^[8]设计多层落锤撞击压缩试验装置,对比了不同工况下装药结构安定情况,发现多种工况下装药表面均出现破碎,但未发生点火反应。上述研究都是基于装药的最终损伤情况进行讨论,而关于装药在多次脉冲载荷下的损伤发展过程及演化规律研究报道较少。

本文中,以一级轻气炮为加载源,采用自行设计的模拟冲击加载装置,对典型奥克托今(HMX)基浇注聚合物黏结炸药(PBX)的压装炸药进行了冲击加载试验,获取了单次和两次脉冲载荷下装药的损伤特性。结合扫描电子显微镜(SEM)分析了损伤模式,对比单次及两次冲击加载条件下装药损伤的发展变化规律,以期对侵彻弹药装药选型及设计提供参考。

1 实验

1.1 实验样品

HMX、PBX 由西安近代化学研究所提供,配方(质量分数)为:65% HMX、30% 铝粉和 5% 黏结剂。试样采用模具压制成型,尺寸 $\varnothing 30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$,密度 1.85 g/cm^3 。将药柱装入外径 40 mm 、内径 30 mm 、长度为 30 mm 的套环内,用两个直径 40 mm 、厚 5 mm 的聚乙烯塑料(PE)垫片密封药柱两个端面,以模拟装药的真实受力环境。

1.2 实验装置设计及计算分析

压装炸药受到子弹冲击时,由于上、下两侧受力不均产生剪切力,端盖容易断裂。设计双端盖结构,实现对装药的连续两次冲击作用(图 1~图 2)。通过增减端盖厚度及端盖数量调整加载方式。

为选定合适的端盖厚度,对产生装药损伤的最小临界应力进行计算分析。参考文献[9-10],基于 Nicholson 提出的能量模型^[11]对炸药脱黏应力进行计算,求得脱黏应力为 0.6 MPa ;利用晶体断裂强度理论计算方法^[12]求得晶体颗粒断裂临界应力为 80.8 MPa 。在实验中,加载于端盖的作用力 f 为:

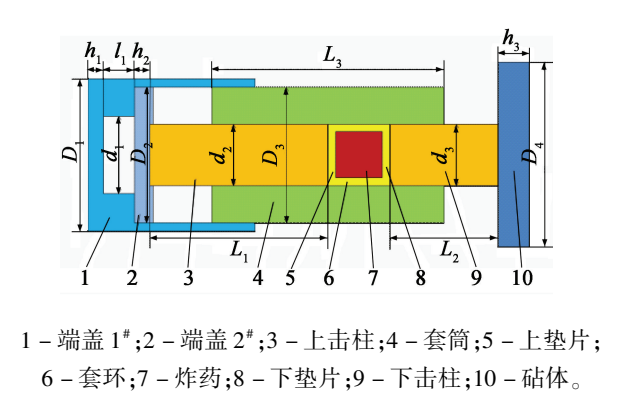


图 1 加载示意图
Fig. 1 Loading schematic

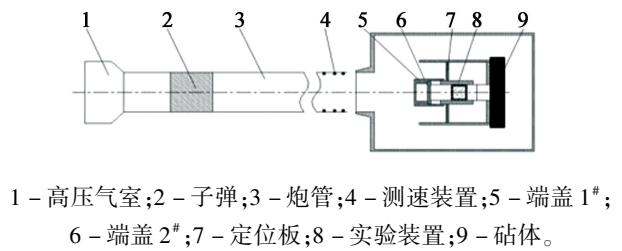


图 2 实验装置示意图
Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

$$f = \pi d h \tau \tag{1}$$

式中: d 为击柱直径,min; h 为端盖厚度,mm; τ 为端盖剪切强度,MPa。

端盖材料 45# 钢的动态剪切强度约为 360 MPa 。如端盖厚度为 10 mm ,击柱直径为 40 mm ,则所得作用力 f 约为 $4.52 \times 10^5\text{ N}$;炸药的直径为 30 mm ,则作用于装药的应力(加载强度)约为 640 MPa ,远大于晶体颗粒断裂临界应力,在该应力作用下,药柱表面可出现宏观损伤。同时,选用 12 mm 厚端盖以对比观测更强冲击作用下材料的损伤情况,此时加载强度提升 1.2 倍,为 768 MPa 。

在口径为 130 mm 的一级轻气炮上完成实验。子弹撞击速度由激光测速仪及示波器测算,示波器采样率为 $5 \times 10^6\text{ s}^{-1}$ 。设计实验装置尺寸如下:盖板 1# 直径 D_1 为 99 mm ,厚度 h_1 为 $10、12\text{ mm}$,内径 d_1 为 60 mm ;盖板 2# 直径 D_2 为 88 mm ,厚度 h_2 为 $10、12\text{ mm}$;两个盖板间隔 l_1 为 20 mm ,材料均为 45# 钢。上击柱直径 d_2 为 40 mm ,长度 L_1 为 115 mm ;下击柱直径 d_3 为 40 mm ,长度 L_2 为 70 mm 。套筒内直径与击柱直径相同,外直径 D_3 为 88 mm ,长度为 150 mm ;砧体直径 D_4 为 120 mm ,厚度 h_3 为 20 mm ;上下击柱、套筒及砧体材料均为 T10 钢。

1.3 实验方法

单次冲击加载时,仅使用端盖 2#,厚度为 10 mm 或 12 mm 。连续两次冲击加载时,端盖 1# 和端盖 2#

的厚度均为 10 mm 或均为 12 mm。2.5 kg 塑料弹丸经高压气室驱动,以 400 m/s 速度撞击端盖 1#,应力波通过端盖 2#及上击柱作用于炸药,实现对装药的第 1 次压缩加载。端盖 2#因受力不均匀在凹槽处剪切断裂,装药受力卸载。子弹推动端盖 1#继续向前,当端盖 1#与端盖 2#接触时,产生的应力波通过上击柱对药柱再次压缩加载,直至端盖 1#剪切断裂。两次加载强度分别与端盖 1#、端盖 2#剪切强度相关。通过增减端盖 1#和端盖 2#之间的距离,调整两次冲击载荷的时间间隔。每次实验后,用压机将药柱压出。对回收药柱进行 SEM 扫描。

为确保实验能满足设计要求,利用 LS-Dyna 软件模拟冲击加载过程,并观测炸药内部受力情况。考虑模型的对称性,为提高计算效率,建立 1/4 模型。网格大小约为 1 mm × 1 mm。模型见图 3。

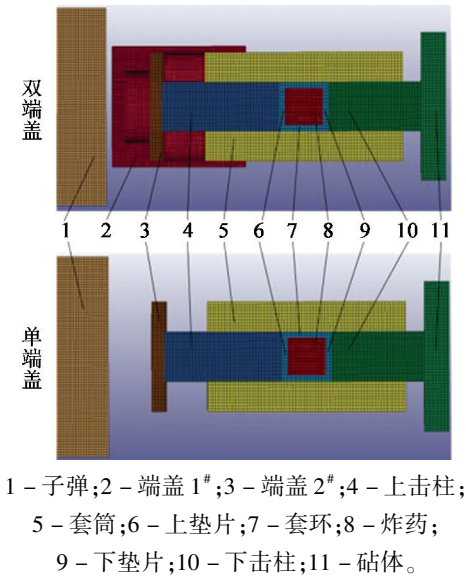


图 3 仿真模型

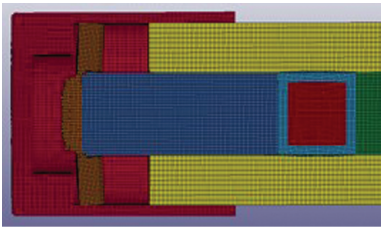
Fig. 3 Simulation models

对弹丸施加初始速度 400 m/s,下击柱右端使用固定边界,计算中均使用 * Mat_Plastic_Kinematic 模型。材料参数见表 1。表 1 中: ρ 为密度; E 为弹性模量; ν 为泊松比; σ_y 为屈服强度; C_p 为热容。

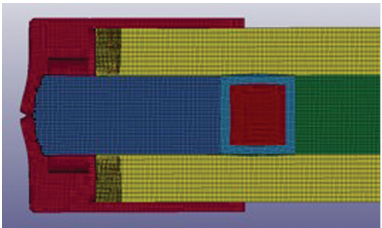
仿真模拟得到的实验过程如图 4 所示。仅使用

表 1 仿真模拟材料参数

Tab. 1 Material parameters of simulation models					
材料	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	E/GPa	ν	σ_y/MPa	$C_p/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
PE	0.95	1.10	0.42	14	
45#钢	7.85	2.06	0.30	355	0.465
Ti10 钢	7.85	2.07	0.30	1 620	0.434
PBX	1.85	4.36	0.31		1 150.000



(a) 端盖 2# 剪切断裂



(b) 端盖 1# 剪切断裂

图 4 仿真模拟实验过程

Fig. 4 Simulation of the experiment

端盖 2# 时,在子弹冲击作用下,端盖 2# 剪切断裂。同时使用端盖 1# 和端盖 2# 时,子弹运动过程中,端盖 2# 首先受到剪切力作用断裂,对装药施加第 1 次压缩加载;子弹继续以一定速度推动端盖 1# 向前运动,至上击柱处断裂,对装药施加第 2 次压缩脉冲。

从图 5 等效应力曲线可见,仅有 1 个端盖时,药柱受到 1 次冲击加载,脉冲持续时间(脉宽)约为 100 μs ,峰值约为 530 MPa。使用两个端盖时,药柱受到两次脉冲,脉宽较短,峰值高,冲量大,两次脉冲峰值均在 450 MPa 左右,第 1 个脉宽约为 100 μs ,第 2 个脉宽约为 80 μs ,两个脉宽之间间隔为 120 μs ,与端盖 1# 与端盖 2# 的间隔相关。与实验设计原理相符。

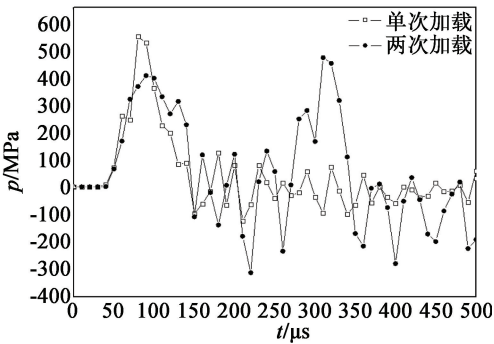


图 5 试样等效应力曲线

Fig. 5 Equivalent stress curves of specimens

2 结果与讨论

2.1 单次和两次冲击加载后装药宏观损伤特性

试验装置中不同厚度的端盖都被剪断。药柱在

加载过程中均未发生燃烧或反应,回收药柱完整。在不同冲击加载条件下,药柱损伤情况存在差异。连续两次冲击作用下,套筒内部出现少量炸药残渣。

冲击加载后,4 节药柱基本保持完好,未出现塌边现象。试样宏观损伤情况如图 6 所示。单次加载条件下,端盖厚度分别为 10、12 mm 时,试样表面均出现了一条裂纹,裂纹居于试样中部。随着端盖厚度增加,即增加脉冲峰值后,试样裂纹宽度略微增加。炸药经过连续两次冲击加载后,当两个端盖厚度为 10 mm 时,试样表面出现 3 条明显裂纹;两个端盖厚度为 12 mm 时,试样表面出现 3 条明显裂纹及多条细小裂纹,裂纹分布范围更加集中于药柱一端。与单次冲击相比,两次冲击后裂纹数量明显增多,分布范围更加广泛,且裂纹出现较多分支。

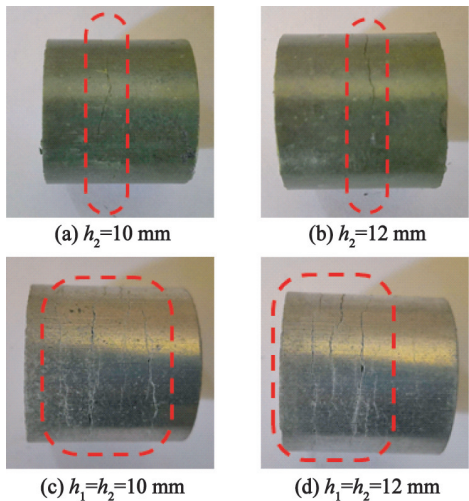


图 6 不同加载条件下试样损伤图

Fig. 6 Damage of specimens under different loading conditions

2.2 单次和两次冲击加载后装药微观损伤特性

为了确定 HMX 基压装炸药在单次和两次冲击后的微观损伤状态,采用 JSM5800 扫描电子显微镜 (SEM) 对试样进行了微观形貌观察,结果见图 7。

由图 7(a) 可见,PBX 晶体颗粒与黏结剂紧密连接,未见明显界面脱黏等缺陷,晶体颗粒大小较为均匀。由图 7(b) 可见,当冲击强度为单次 10 mm 厚端盖时,可以看出突出的炸药颗粒和颗粒拔出后留下的凹坑,损伤形式主要为晶粒与黏结剂脱黏造成的沿晶断裂。随端盖厚度增加至 12 mm,晶粒与黏结剂脱黏更为严重,见图 7(c)。而连续两次冲击后,主要断裂方式仍以界面脱黏为主,但出现少量颗粒断面,表明有炸药颗粒出现了穿晶断裂,见图 7(d);随着两次冲击加载强度增加,虽然界面脱黏仍占主导,晶粒尺寸不均匀现象更为明显,见图 7(e)。这可能与单次加载后炸药晶体微损伤的扩展有关。

2.3 冲击加载次数对装药损伤的影响

首先从微观角度对微裂纹的发展进行讨论。冯西桥等^[12]采用等效介质方法对炸药进行脆性微观理论分析,假设初始微裂纹的分布为各向同性,并且忽略微裂纹之间的相互作用。Lu 等^[13]采用损伤度对炸药进行描述:

$$D = AN_0 c^3 = (\frac{c}{a})^3. \tag{2}$$

忽略成核效应,得到损伤的演化方程:

$$\dot{D} = 3AN_0 c^2 \dot{c} = \frac{3c^2 \dot{c}}{a^3}. \tag{3}$$

式中: D 为损伤度函数; \dot{D} 为损伤演化函数; A 为常数; N_0 为初始裂纹分布; c 为裂纹平均半径; \dot{c} 为裂纹扩展速率; a 为初始常数。

可以看出,裂纹的损伤演化与裂纹半径及裂纹扩展速率相关。裂纹的初始半径与扩展后半径的计算方法主要以统计分析为主,Dienes 等^[14-15]提出了微裂纹分布函数 $N(c, \Omega, t)$,用来表示体系内裂纹半径为 c 、裂纹取向为 Ω 的裂纹数量。其中,初始裂纹尺寸的分布为

$$N_0 = \frac{1}{Aa^3}. \tag{4}$$

在此主要讨论微裂纹扩展速率对材料损伤演化的影响。Dienes^[16]提出应力强度因子相关概念,将准脆性材料与经典动态断裂理论进行类比,认为当应力强度因子大于材料极限值时,裂纹失稳扩展,且其增长速率与应力强度因子相关。Gross 等^[17]与 Evans^[18]分别提出了微裂纹在高应力、低应力条件下扩展速度的经验公式,对其进行连续性处理,得到裂纹扩展公式如下:

$$\begin{cases} \dot{c} = v_R (\frac{K}{K_I})^m, & K < K_0 \sqrt{1 + \frac{2}{m}}; \\ \dot{c} = v_R [1 - (\frac{K_0}{K})^2], & K \geq K_0 \sqrt{1 + \frac{2}{m}}; \\ K_I = K_0 \sqrt{1 + \frac{2}{m}} (1 + \frac{2}{m})^{\frac{1}{m}}. \end{cases} \tag{5}$$

式中: v_R 为 Rayleigh 波速,近似取 300 m/s; K_0 为起裂韧度; m 为微裂纹速度扩展因子; K 为含微裂纹的等效应力强度因子; K_I 为常数。

从式(5)可以看出,微裂纹扩展速率随应力强度因子的增大而提高。在初始裂纹随机各向同性分布的假设条件下,可将材料中微裂纹的受力简化为受远场均匀分布应力 σ 的作用,如图 8 所示。

利用 Westergaard 函数对微裂纹强度因子进行分析,同时考虑材料的损伤特性,得到等效强度因子

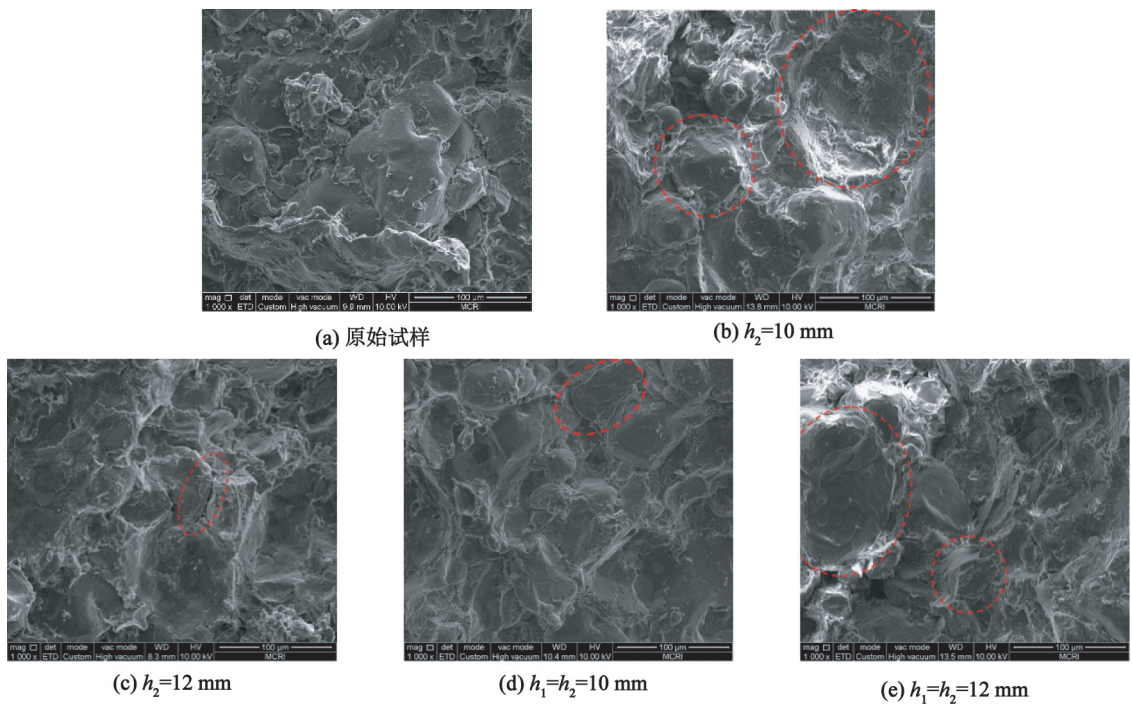


图 7 不同加载条件下试样微观形貌扫描电镜图

Fig. 7 SEM images of micromorphology of specimens under different loading conditions

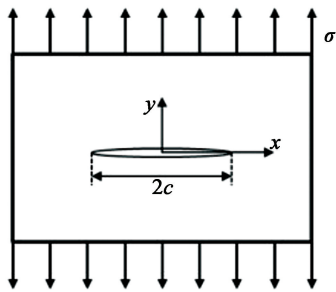


图 8 微裂纹受力示意图

Fig. 8 Stress diagram of microcrack

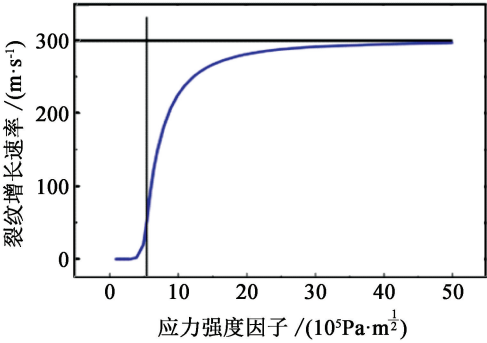


图 9 微裂纹增长速率与应力强度因子的关系

Fig. 9 Relationship between growth rate of microcrack and stress intensity factor

的表达式：

$$K^2 = \frac{3}{2} \pi c S_{ij} \cdot S_{ij} \quad (6)$$

式中： S_{ij} 为偏应力张量。

对比发现,当等效应力强度因子增加时,参考微裂纹参数^[19],裂纹增长速度先快速提高,而后趋近于 Rayleigh 波速。裂纹增长速率与应力强度因子的关系如图 9^[20]所示。

而等效应力强度因子与裂纹的半径呈正相关。炸药在制作过程中不可避免地会存在初始损伤。因此,在单次冲击加载下,初始微裂纹扩展生长,同时药柱内产生新的微裂纹,使得单次加载条件下裂纹平均半径增大,进而等效强度因子数值增大。同样,外力条件下,二次冲击加载时裂纹尖端扩展速率更快,损伤演化速率提高,较单次冲击加载更易生成宏

观裂纹。从图 6 也可以看出,单次与两次冲击加载后产生的裂纹数量并非简单的叠加关系,连续两次冲击加载产生的裂纹条数明显增多。

从宏观角度分析,在单次冲击加载条件下,药柱被垫片及套环包裹,药柱的受力可视为围压条件下的压缩过程,此时裂纹的产生与拉压应力相关。参考 SEM 图可以发现,单次及两次冲击加载条件下损伤模式并未明显改变。单次冲击加载条件下,药柱表面出现一条裂纹。压缩应力波在药柱右端面发生反射形成拉伸波,当卸载后在药柱左端面产生拉伸波,两次拉伸波叠加在药柱中部形成拉伸损伤。当二次冲击加载时,虽然药柱外部存在的套环限制了裂纹处的剪切滑移,但压缩应力波传播至裂纹处会

产生反射形成拉伸波。卸载后的拉伸波与裂纹处、右端面反射形成的拉伸波叠加,形成多处拉伸波叠加,因此,连续两次冲击作用下药柱表面裂纹明显地增多。

3 结论

- 1)设计实验装置可实现对药柱在不同冲击强度下的单次冲击加载、连续两次冲击加载。加载强度与盖板厚度相关。
- 2)当通过增加盖板厚度将加载强度由 640 MPa 提高为 768 MPa 时,装药的晶粒脱黏现象更加明显,损伤加重。
- 3)与单次冲击加载相比,二次冲击加载下装药的破坏模式未发生明显变化。加载速度为 400 m/s,加载强度分别为 640 MPa 及 768 MPa 时,单次加载的条件下,损伤以黏结剂脱黏为主;而连续两次加载冲击作用下,晶粒与黏结剂之间缝隙更加明显,缝隙沿晶粒扩展。且单次冲击加载后,由于拉伸波叠加作用与损伤演化速率提高等因素,使得二次冲击加载时微裂纹更易发展成为宏观裂纹。因此,需要对多次冲击加载下装药的动态力学行为进行深入研究,避免发生炸药装药提前起爆。

参 考 文 献

[1] WEN L J, DUAN Z P, ZHANG L S, et al. Effects of HMX particle size on the shock initiation of PBXC03 explosive[J]. International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation, 2012, 13(2): 189-194.

[2] BAKER W A, UNTAROIU C D, CRAWFORD D M, et al. Mechanical characterization and finite element implementation of the soft materials used in a novel anthropometric test device for simulating underbody blast loading[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2017, 74: 358-364.

[3] 蔡宣明,张伟,范志强,等. 高应变率下导弹战斗部装药动态力学响应及细观损伤模式[J]. 火炮发射与控制学报,2019,40(3): 94-98.

CAI X M, ZHANG W, FAN Z Q, et al. Dynamic mechanical response and mesoscopic damage model of missile warhead charge under high strain rate[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2019,40(3): 94-98.

[4] 王芳芳,王琼,于思龙,等. 利用分离式 Hopkinson 压杆技术研究浇注 PBX 炸药的老化性能[J]. 爆破器材, 2019,48(3): 23-28.

WANG F F, WANG Q, YU S L, et al. Application of

split Hopkinson pressure bar technique in aging properties study on casting polymer bonded explosives[J]. Explosive Materials,2019,48(3): 23-28.

[5] 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 K, WU Y Q, JIN P G, et al. Damage-ignition simulation for typical pressed and casted PBX under crack-extruded loading[J]. Chinese Journal of Energetic Materials,2020, 28(10): 975- 983.

[6] 张馨予,吴艳青,黄风雷. PBX 装药弹体侵彻混凝土薄板的数值模拟[J]. 含能材料,2018,26(1): 101-108.

ZHANG X Y, WU Y Q, HUANG F L. Numerical simulation on the dynamic damage of PBX charges filled in projectiles during penetrating thin concrete targets[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(1): 101-108.

[7] 李亮亮,屈可朋,沈飞,等. 基于霍普金森压杆的 RDX 基含铝炸药装药双脉冲加载实验[J]. 火炸药学报, 2018,41(1): 52-56.

LI L L, QU K P, SHEN F, et al. Double-pulse loading experiment of RDX based aluminized explosive charge based on hopkinson pressure bar[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants,2018,41(1): 52-56.

[8] 聂少云,薛鹏伊,代晓淦. 模拟多层穿靶过程装药安全性评价方法[J]. 火炸药学报,2020,43(5): 537-542.

NIE S Y, XUE P Y, DAI X G. Method of evaluating the safety of charging in a multi-layer penetration process [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2020, 43(5): 537-542.

[9] 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, 80.

CHEN P, QU K P, LI L L, et al. Experimental study on shear-flow ignition performance of PBX explosive [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2020, 43(1): 69-73,80.

[10] 蔡宣明,张伟,高玉波,等. 三轴向冲击载荷作用下 RDX 基 PBX 炸药损伤模式与表征[J]. 振动与冲击, 2019,38(5): 86-91.

CAI X M, ZHANG W, GAO Y B, et al. Damage mode and characterization of RDX-based PBX explosive under tri-axial impact loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(5): 86-91.

[11] NICHOLSON D W. On the detachment of a rigid inclusion from an elastic matrix[J]. Journal of Adhesion, 1979,10(3): 255-260.

[12] 冯西桥,余寿文. 准脆性材料细观损伤力学[M]. 北京:高等教育出版社,2002.

- [13] LU Y, XU K. Modeling the dynamic behavior of concrete materials under blast loading[J]. *International Journal of Solid Structures*, 2004, 41(1): 131-143.
- [14] DIENES J K, KERSHNER J D. Multiple-shock initiation via statistical crack mechanics[C] // *Proceedings of the 11th International Detonations Symposium*. Snowmass, CO, US, 1998: 717-724.
- [15] DIENES J K, KERSHNER J D. Crack dynamics and explosive burn via generalized coordinates[J]. *Journal of Computer Aided Materials Design*, 2001, 7(3): 217-237.
- [16] DIENES J K. A unified theory of flow, hot spots, and fragmentation with an application to explosive sensitivity[M] // *DAVISON L, GRADY D E, SHAHINPOOR M. High pressure shock compression of solid II: Dynamic fracture and fragmentation*. Springer Nature, 1996: 366-398.
- [17] GROSS D, SEEL G. *Dynamic fracture mechanics*[M]. New York: Springer, 2011: 207-228.
- [18] EVANS A G. Slow crack growth in brittle materials under dynamic loading conditions[J]. *International Journal of Fracture*, 1974, 10(2): 251-259.
- [19] 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.
- [20] 曹雷. 含能材料损伤本构模型的数值模拟研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- CAO L. Numerical simulation study on constitutive model with damage of energetic materials[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- ~~~~~
- (上接第 29 页)
- drying characteristics of RDX and TNT[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010.
- [16] 郝顺利, 王新, 崔银芳, 等. 纳米粉体制备过程中粒子的团聚及控制方法研究[J]. *人工晶体学报*, 2006, 35(2): 342-346.
- HAO S L, WANG X, CUI Y F, et al. Investigation on the agglomerate mechanism and controlling method in nano-particle powder preparation[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2006, 35(2): 342-346.
- [17] 杨利, 李泓润, 宋乃孟, 等. 喷雾干燥法制备亚微米鞣酸铁/硝胺炸药复合微球及其催化性能[J]. *含能材料*, 2020, 28(2): 145-150.
- YANG L, LI H R, SONG N M, et al. Preparation and catalytic properties of submicron iron tannate/nitramine explosive composite microspheres from spray drying process[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2020, 28(2): 145-150.
- [18] 刘慧云. 超临界流体技术细化 CL-20 研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- LIU H Y. Supercritical fluid technology refine CL-20[D]. Taiyuan: North University of China, 2016.
- [19] 陶厚永, 曹伟. 多项式回归与响应面分析的原理及应用[J]. *统计与决策*, 2020, 36(8): 36-40.
- TAO H Y, CAO W. Principle and application of polynomial regression and response surface analysis[J]. *Statistics and Decision*, 2020, 36(8): 36-40.
- [20] 朱明星, 杨伟兵. 食品真空冻干传热差异性研究[J]. *淮海工学院学报(自然科学版)*, 2017, 26(02): 79-83.
- ZHU M X, YANG W B. Study on heat transfer difference of vacuum freeze-drying of food[J]. *Journal of Huaihai Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 26(2): 79-83.
- [21] 宿时, 李宗泽, 王贺. 响应面法优化黑蒜片真空冷冻工艺研究[J]. *中国调味品*, 2019, 44(10): 55-58.
- SU S, LI Z Z, WANG H. Study on optimization of vacuum freeze-drying process of black garlic slices by response surface methodology[J]. *China Condiment*, 2019, 44(10): 55-58.
- [22] 包建强, 杨永明. 青蒜真空冷冻升华干燥技术的研究[J]. *制冷*, 2003, 22(4): 6-9.
- BAO J Q, YANG Y M. Study on the vacuum freeze-drying technics of green-garlic[J]. *Refrigeration*, 2003, 22(4): 6-9.
- [23] 张么玄. 黑索金制造过程中固液分离过程的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- ZHANG Y X. Research on the process for solid-liquid separation in the manufacturing process of RDX[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.