

文章编号:1006-9941(2024)12-1343-09

## 多脉冲加载下结构装药非线性放大效应及其点火实验

仲苏洋,廖深飞,胡秋实,李涛,傅华

(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川绵阳621900)

**摘要:**为认识侵彻多层靶过程中装药意外点火的潜在机理,提出了基于多层嵌套子弹及双向限位设计思路,建立了一种连续多次冲击加载下结构装药非线性放大效应实验方法,验证了该方法的有效性,分析了非线性响应放大的内在机制,开展了多脉冲加载下结构非线性响应装药点火行为的影响研究。结果表明:该实验方法能够针对装药进行灵活可控的多脉冲加载,加载应力峰值达百兆帕量级、脉宽达亚毫秒量级。一旦加载载荷的特征频率接近结构装药的固有频率,将产生结构非线性放大效应,装药应力幅值逐渐放大。在子弹速度、质量均相同的前提下,仅改变载荷频率,如果结构非线性响应发生放大,则PBX-3装药可能发生点火;反之则不会发生点火。可见,结构非线性放大效应是导致装药点火的一个重要因素。

**关键词:**结构装药;多脉冲;非线性放大;点火

中图分类号:TJ55

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2023245

### 0 引言

侵彻多层靶过程中,弹体受到连续多次冲击载荷作用,内部装药经历反复传播的压缩波和拉伸波,装药内部应力峰值在十兆帕到百兆帕量级,脉宽在亚毫秒到毫秒量级<sup>[1-4]</sup>。由于弹体壳体和内部装药的阻抗差别较大,导致应力波作用下两者的变形和运动状态不同,侵彻过程中装药尾部与壳体之间将发生多次碰撞<sup>[5]</sup>,装药尾部经历多次加卸载反复交替状态,容易发生拉伸、压剪变形和损伤破坏<sup>[6]</sup>。尤其当侵彻载荷与武器装药结构的响应发生耦合,产生结构非线性响应放大效应,可能会出现“小载荷大响应”的情况,导致装药出现显著的局域化变形和温升,引发装药的点火反应<sup>[1]</sup>。因此,研究侵彻多层靶过程中的装药响应行为对于认识实际侵彻武器装药意外点火机理及提升武器装药的侵彻安定性具有重要意义。

实际侵彻多层靶实验中,弹体内部装药响应过程

较为复杂,且在壳体封闭条件下难以对装药的响应进行有效诊断,除了传统的加速度传感器和高速摄影,难以应用其他诊断测试手段,存在实验费用高、可获取数据少等问题。鉴于此,发展能够模拟侵彻多层靶过程中装药响应行为且具备便于测试和良好经济性特点的实验方法十分必要。分离式Hopkinson压杆(SHPB)技术是一种研究材料在高应变率下的动态力学性能的重要实验手段<sup>[7]</sup>,当样品与子弹的波阻抗有较大差异时,可产生对样品逐渐衰减的多次加载<sup>[8-10]</sup>。但采用SHPB技术难以控制加载的幅值和加载次数。李飞胤等<sup>[11-12]</sup>设计了一种旋转式连续高冲击实验装置,通过高速旋转圆盘上的冲击组件实现了对试样达一万倍重力加速度量级的连续冲击加载,其冲击频率可调,满足了短间隔高幅值连续冲击试验的技术需求。李亮亮等采用夹心弹代替SHPB技术中的实心子弹<sup>[13]</sup>和大型落锤模拟加载装置<sup>[14]</sup>,对压装炸药进行了双脉冲加载,研究了连续两次冲击加载条件下装药的应变率变化、损伤状态以及点火响应行为。聂少云等<sup>[15]</sup>基于加速跌落平台设计了一种多次冲击加载实验装置,研究了压装炸药在多次冲击压缩载荷下的响应特性。

目前研究人员关注重点在于发展连续多次加载的实验方法,而对结构装药与外部载荷耦合响应下的装药点火行为鲜有研究。本研究建立了一种连续多次冲

收稿日期:2023-11-20;修回日期:2023-12-25

网络出版日期:2024-04-23

作者简介:仲苏洋(1986-),男,助理研究员,主要从事化爆安全性研究。e-mail:zhongsuyang@caep.cn

通信联系人:傅华(1978-),男,研究员,主要从事化爆安全性研究。e-mail:fmyfuhua@163.com

引用本文:仲苏洋,廖深飞,胡秋实,等.多脉冲加载下结构装药非线性放大效应及其点火实验[J].含能材料,2024,32(12):1343-1351.

ZHONG Su-yang, LIAO Shen-fei, HU Qiu-shi, et al. Nonlinear Amplification Effect and Ignition Experiments of Confined Charges under Multiple Impacts Loading [J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(12):1343-1351.

击加载下结构装药响应非线性放大实验方法, 实现了针对装药的应力峰值百兆帕量级、脉宽亚毫秒量级、应力幅值逐渐放大的多脉冲加载, 分析了响应非线性放大的规律及内在机制, 获得了非线性响应放大对PBX-3装药点火行为的影响规律, 以期为理解实际侵彻多层靶过程中的装药意外点火机理提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 方法原理

一个弹性杆两端受到限位约束, 其中一端含有可对该弹性杆进行冲击加载的圆孔, 如图1所示。

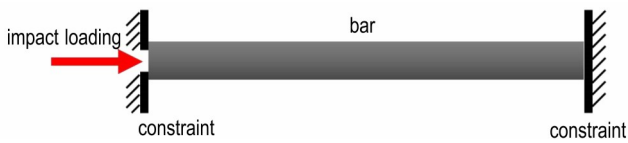


图1 双向限位约束结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the bidirectional limited structure

假设图1中的弹性杆受到连续多次冲击加载, 每次冲击加载的幅值和脉宽一致, 第一次冲击加载开始和结束时间分别为  $t_{h1}$ 、 $t_{h1}$ 。为避免第二次冲击加载和第一次冲击加载叠加成为单脉冲, 两次加载的时间间隔  $\Delta t$  应满足:

$$\Delta t > t_{h1} - t_{h1} \quad (1)$$

第一次冲击加载应力波在弹性杆中传播的空间位置-时间( $X-t$ )图如图2所示, 在弹性杆中, 由于两端受到刚性约束, 脉宽为  $t_{h1} - t_{h1}$  的压缩波从左端面向右端面传播。随后, 这个压缩波在右端面反射, 形成一个向左传播的压缩波。在这个过程中, 弹性杆右端受压的总时长为  $t_{h2} - t_{h2}$ 。当该压缩波再次传播到左端面, 此时左端面已脱离限位约束, 处于自由表面状态, 它会向右反射一个拉伸波。当这个拉伸波在  $t_{h4}$  时刻传播到右端面, 弹性杆恰好回到原始位置。值得注意的是, 如果  $t_{h4}$  时刻之前, 第二次冲击加载尚未开始, 那么弹性杆将受到左端限位约束作用, 从而在杆中形成一个新的向右传播的压缩波。若在此右行压缩波形成之后第二次冲击加载开始, 将会再次形成一个右行压缩波, 这两个右行压缩波叠加将形成幅值更大的压缩波。若第二次冲击加载在  $t_{h4}$  时刻之前开始, 那么弹性杆中将无法获得幅值更大的压缩波。综上所述, 第二次冲击加载开始时间对第二个压缩脉冲影响显著, 如果想要获得更高幅值的加载效果, 两次加载的时间间隔  $\Delta t$  应满足:

$$\Delta t > t_{h4} - t_{h1} \quad (2)$$

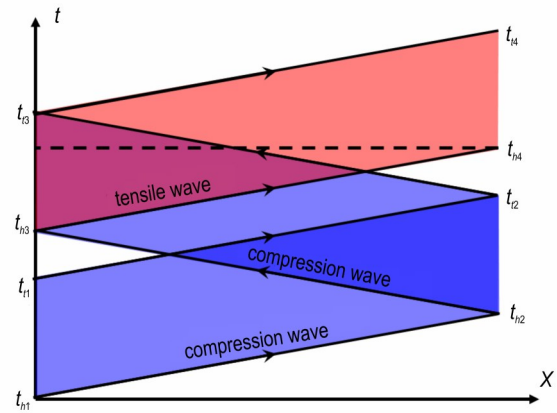


图2 第一次冲击加载弹性杆中应力波传播  $X-t$  图

Fig.2  $X-t$  diagram of stress wave propagation in elastic bar under the first impact load

以上分析表明, 通过调控两次对弹性杆的冲击加载时间间隔, 能够实现第二次冲击加载的压缩波幅值比第一次冲击加载更大, 即实现响应放大。

### 1.2 实验装置与样品

基于图1中的原理结构, 并采用高压气体驱动相同质量的多层嵌套子弹实现连续多次冲击加载, 设计了多脉冲加载下结构装药响应非线性放大实验装置, 如图3所示。其加载部分主要部件为高压气室、控制阀门、子弹1、子弹2、子弹3、发射管等。子弹1~3的质量相等, 三者为多层嵌套结构, 子弹2和子弹3为中空圆筒, 子弹1托住子弹2和子弹3同步加速运动, 因此撞击前三个子弹的动量、能量均相等。子弹1和子弹2撞击反弹后都对后续子弹撞击无影响。装药结构包括质量块1、传力杆、约束筒、样品、底座和质量块2。装药样品以外各个部件材质均为高强度钢, 质量块1和质量块2起限位约束作用, 限制样品和传力杆的运动空间, 约束筒和底座给予样品强围压作用。

实验共采用两种样品, 验证实验选用聚四氟乙烯 (PTFE) 材料样品, 应用实验选用PBX-3炸药样品。PTFE样品由深圳恩欣龙特种工程塑料有限公司生产, 密度为  $2.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 弹性模量为  $1.6 \text{ GPa}$ , 压缩强度约为  $22 \text{ MPa}$ 。PTFE样品尺寸为  $\Phi 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。PBX-3炸药样品主要成分为奥克托今 (HMX)、三氨基三硝基苯 (TATB) 和粘结剂, 材料密度为  $1.85 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 样品尺寸为  $\Phi 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ , 自制。

### 1.3 结构装药响应非线性放大验证实验

为研究实验方法的有效性, 设计了结构装药响应非线性放大验证实验。实验装置实物如图4所示, 其

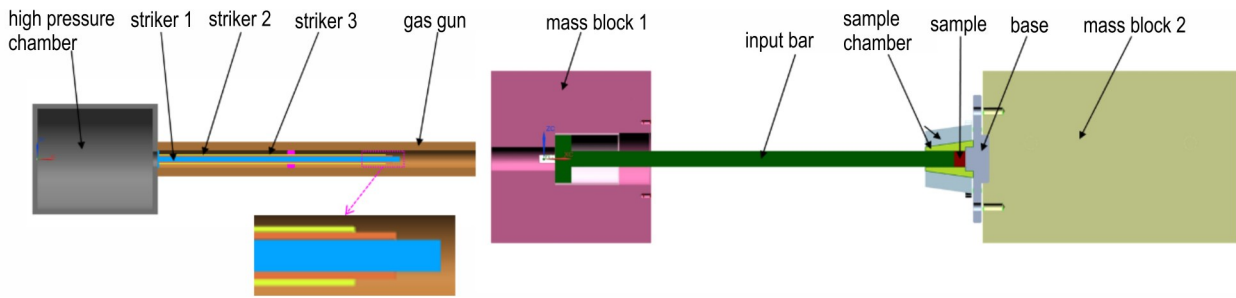


图3 多脉冲加载下结构装药响应非线性放大实验装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of nonlinear amplification experimental device for charges under continuous multiple impacts

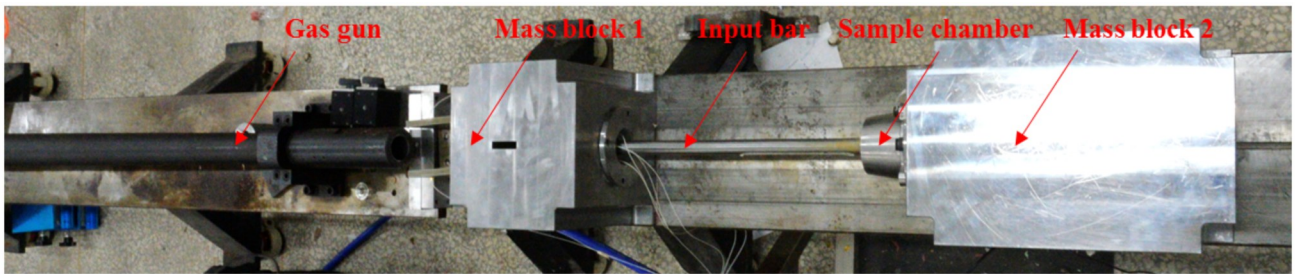


图4 多脉冲加载下结构装药响应非线性放大实验装置实物图

Fig.4 Image of nonlinear amplification experimental device for charges under continuous multiple impacts

中传力杆尺寸为  $\Phi 20\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ , 子弹1的长度为500 mm。实验前子弹预先推入发射管底部, 实验中高压氮气充入高压气室, 打开控制阀门, 高压氮气驱动子弹1、子弹2、子弹3同步加速运动, 最终以相同的速度通过质量块1的左侧圆孔依次撞击装药结构中的传力杆端面, 撞击形成的应力波透过传力杆作用到样品上, 对样品形成多脉冲加载。

实验中通过调节充入高压气室气压来控制子弹入射速度, 通过调节子弹2和子弹3的长度来控制子弹碰撞端面间距, 子弹间距如图5所示。综合调控子弹入射速度和碰撞端面间距, 实现对子弹碰撞传力杆时间间隔的调节。实验通过聚偏氟乙烯(PVDF)薄膜压力计测定样品与底座接触压力情况来表征样品压力历程, 采用高速摄影拍摄装药点火发光过程。

同时, 为了验证实验中是否存在第二个和第三个

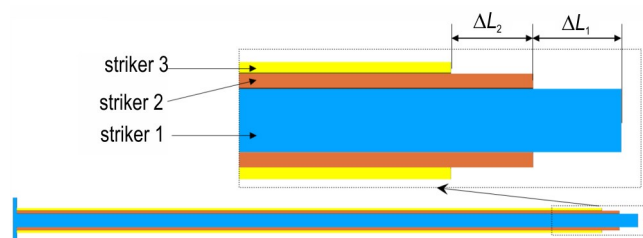


图5 三个子弹相对位置关系示意图

Fig.5 Schematic diagram of the relative position relationship of three strikers

压力脉冲幅值明显大于第一个的现象, 本研究开展不同子弹入射速度和不同碰撞端面间距条件下实验, 验证建立的实验方法能否实现响应非线性放大。具体的实验条件如表1所示, 其中编号1-1#~1-6#子弹入射速度为

表1 子弹入射速度和碰撞端面间距实验条件

Table 1 Test conditions of incident velocities and impact surface spacings of strikers

number	velocity / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\Delta L_1$ / mm	$\Delta L_2$ / mm
1-1#	12.4	10	10
1-2#	12.4	12	12
1-3#	12.4	13	13
1-4#	12.4	14	14
1-5#	12.4	16	16
1-6#	12.4	18	18
2-1#	14.1	13	13
2-2#	14.1	15	15
2-3#	14.1	16	16
2-4#	14.1	17	17
2-5#	14.1	18	18
2-6#	14.1	20	20
3-1#	15.9	12	12
3-2#	15.9	14	14
3-3#	15.9	16	16
3-4#	15.9	17	17
3-5#	15.9	18	18
3-6#	15.9	20	20



$12.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 2-1#~2-6#子弹入射速度为  $14.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 3-1#~3-6#子弹入射速度为  $15.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

#### 1.4 PBX-3装药响应非线性放大应用实验

为研究实验方法对于装药的应用效果,设计了PBX-3装药响应非线性放大应用实验。在实验装置装药结构设计中,炸药样品底面由钢垫块支撑,钢垫块的中心预设 $\Phi 5.5 \text{ mm}\times 8 \text{ mm}$ 的圆孔,如图6所示。子弹速度及碰撞端面间距如表2所示,其中编号4-1#~4-3#子弹入射速度为  $24.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,4-4#子弹入射速度为  $27.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

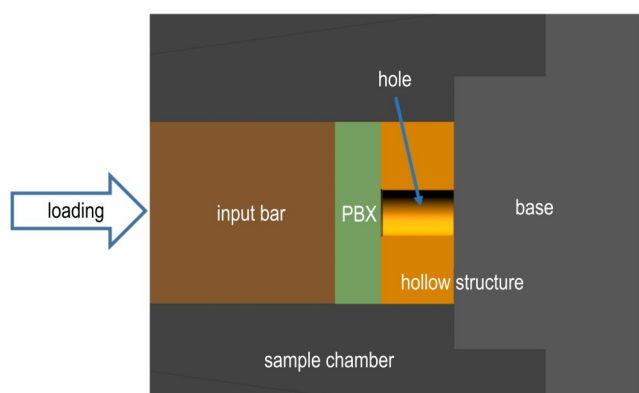


图6 炸药样品安装位置局部截面示意图

Fig.6 Schematic diagram of the local cross section of charge sample installation position

表2 PBX-3装药实验子弹入射速度和碰撞端面间距条件

Table 2 Test conditions of incident velocities and impact surface spacings of strikers for PBX-3

number	velocity / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\Delta L_1$ / mm	$\Delta L_2$ / mm
4-1#	24.2	18	17
4-2#	24.2	18	18
4-3#	24.2	14	12
4-4#	27.6	14	15

## 2 结果与讨论

### 2.1 实验方法验证

图7详细展示了在子弹速度为  $12.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  条件下,不同子弹间距对PTFE样品压力历程的影响。整体来看,每种实验情况均呈现三个压力脉冲,第一个压力脉冲的波形基本保持一致,峰值约为175 MPa,脉宽约0.6 ms,而第二个和第三个脉冲峰值和脉宽等特征则呈现明显的差异。在1-1#,当 $\Delta L_1=\Delta L_2=10 \text{ mm}$ 时,第二和第三个脉冲压力峰值呈现逐渐下降趋势;而在1-4#,当 $\Delta L_1=\Delta L_2=14 \text{ mm}$ 时,第二、第三个脉冲压力峰值逐渐升高,响应呈现放大趋势;进一步地,1-6#,当 $\Delta L_1=\Delta L_2=18 \text{ mm}$ 时,第二、第三个脉冲呈现多峰结构,压力脉冲峰值无明显变化。由此可见,在保持子弹速

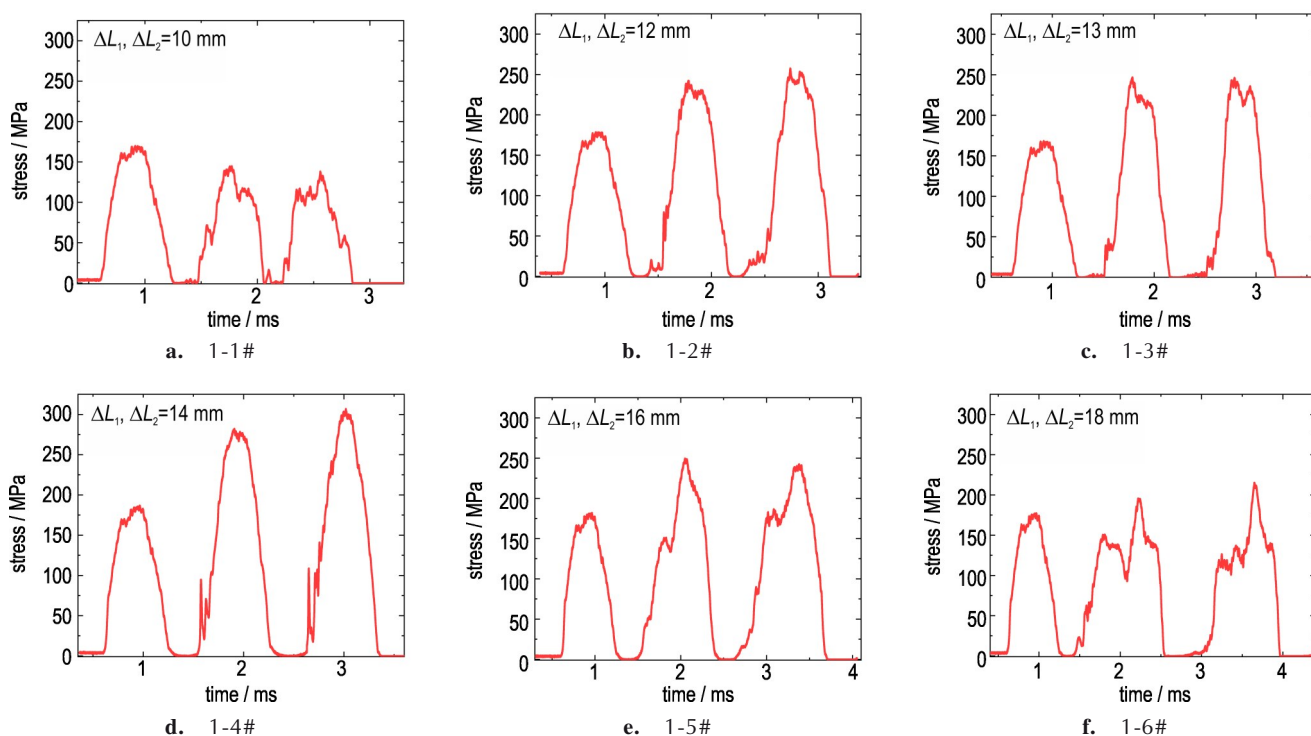


图7 子弹速度  $12.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、不同子弹间距条件下PTFE样品压力历程

Fig.7 Stress histories of PTFE samples with striker velocity of  $12.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  and different striker spacings

度不变的情况下,通过调整子弹间距,可以显著影响样品在第二次和第三次加载过程中的压力响应。存在压力脉冲幅值逐渐放大的情况,这证明了本研究所建立

的实验方法能够有效地实现非线性响应的放大。

类似地,图8和图9分别展示了子弹速度  $14.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $15.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,不同子弹间距条件下 PTFE 样品压力

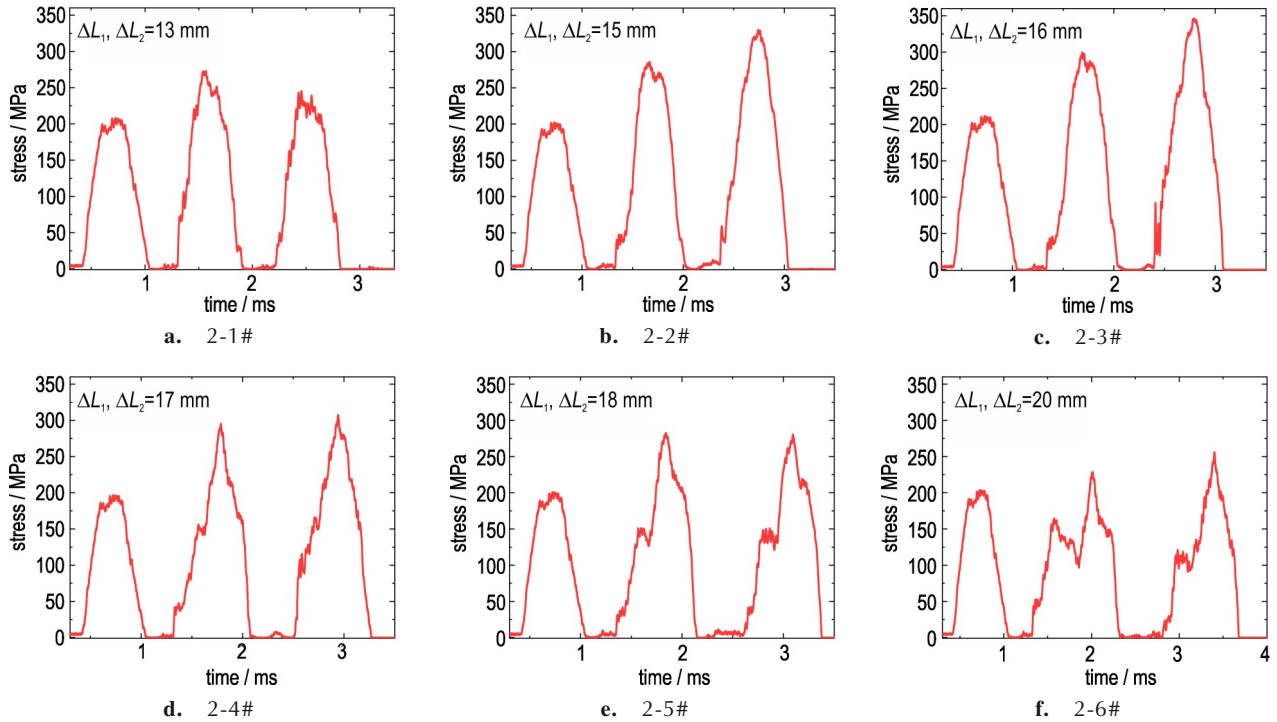


图8 子弹速度  $14.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  和不同子弹间距条件下 PTFE 样品压力历程

Fig.8 Stress histories of PTFE samples with striker velocity of  $14.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  and different striker spacings

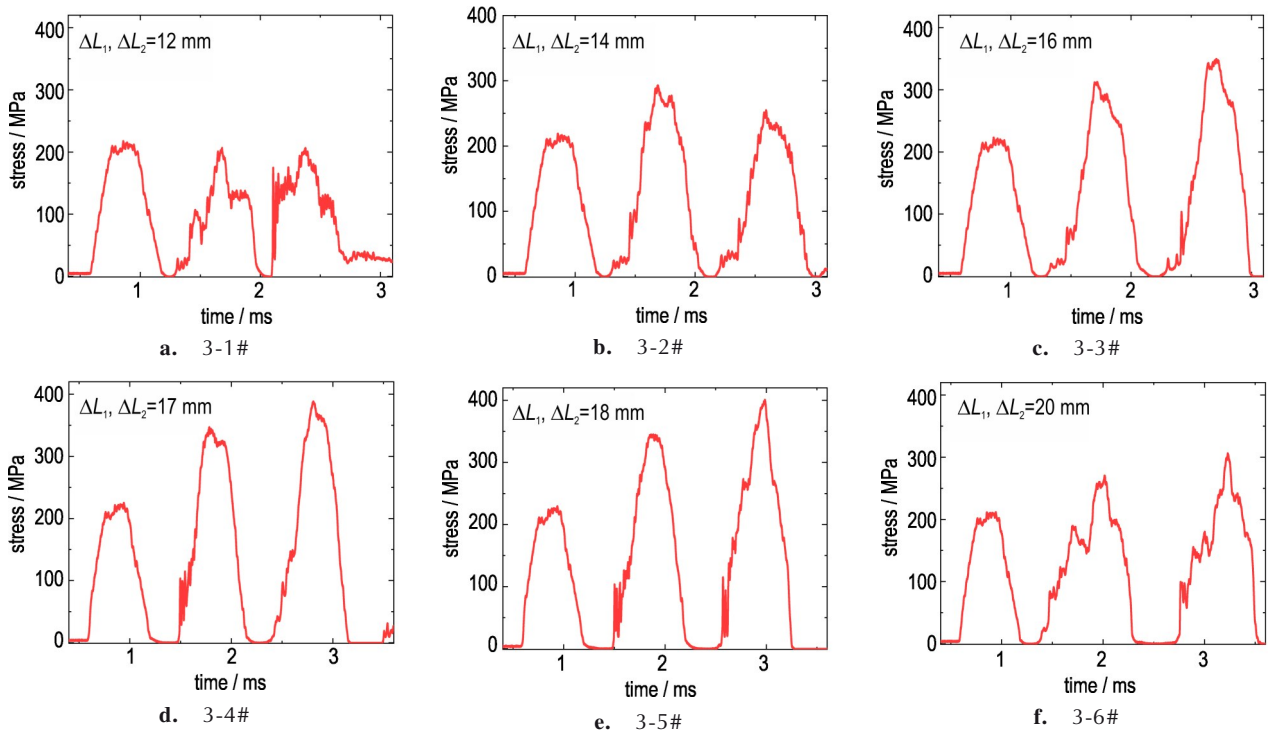


图9 子弹速度  $15.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  和不同子弹间距条件下 PTFE 样品压力历程

Fig.9 Stress histories of PTFE samples with striker velocity of  $15.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  and different striker spacings

历程。这些实验结果的特征和子弹速度为  $12.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的情况相似, 总体上每种实验条件下呈现三个压力脉冲。其中, 第一个压力脉冲的形态基本相同, 而第二个和第三个脉冲峰值特征则呈现明显的差异, 有的峰值低于第一压力脉冲, 有的则逐渐放大。例如, 在 2-3# 实验中, 子弹速度为  $14.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  且  $\Delta L_1 = \Delta L_2 = 16 \text{ mm}$  时, 第二、第三个脉冲压力峰值呈现放大趋势。同样地, 在 3-5# 实验中, 子弹速度为  $15.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  且  $\Delta L_1 = \Delta L_2 = 18 \text{ mm}$  时, 也观察到第二、第三个脉冲压力峰值逐渐放大的现象。这些实验结果中脉冲峰值不断升高趋势, 进一步证明了所建立的实验方法能够有效实现非线性响应放大。

### 2.2 非线性响应放大机制分析

为分析非线性响应放大机制, 定义放大倍数  $n = p_3/p_1$  ( $p_i$  为第  $i$  个脉冲压力峰值)、子弹平均间距  $\Delta L = (\Delta L_1 + \Delta L_2)/2$ 。通过提取图 7~9 中各情况下的峰值压力数值, 获得了不同子弹速度情况下压力峰值放大倍数  $n$  随子弹平均间距  $\Delta L$  变化关系, 如图 10 所示。观察图 10, 可以发现, 随着子弹间距不断增大, 每种速度情况下的放大倍数  $n$  均呈现先增加后减小的变化趋势。值得注意的是, 这三者曲线的极值点并不相同, 随着子弹速度的增加, 它们放大倍数极值点对应的平均间距  $\Delta L$  也在不断增加。

基于子弹速度、长度以及弹性波速等特征参数, 可计算出每个子弹与传力杆碰撞作用时序。进一步的采用快速傅里叶变换方法 (FFT) 对多脉冲加载作用时序进行数据处理, 获得了不同子弹速度情况下加载载荷的一阶特征频率, 如图 11 所示。由图 11 可见, 在子弹速度不变情况下, 对传力杆加载的一阶特征频率随着  $\Delta L$  的增加而单调减小; 相同  $\Delta L$  情况下, 子弹速度越大, 加载

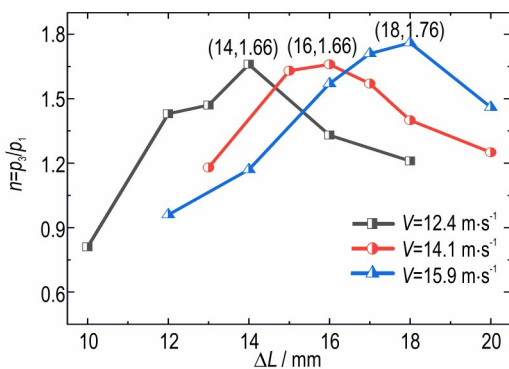


图 10 不同子弹速度情况下压力峰值放大倍数  $n$  随子弹平均间距  $\Delta L$  变化关系

Fig.10 Relationship between the peak stress magnification  $n$  and average spacing  $\Delta L$  of strikers with different velocities

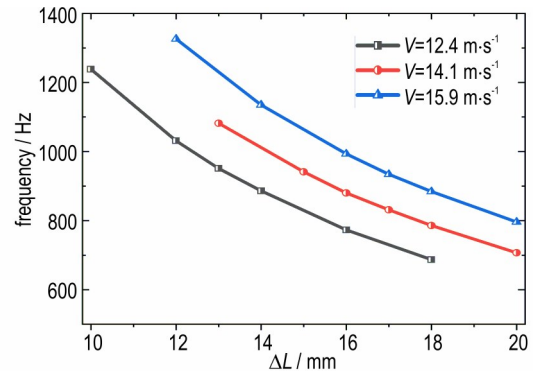


图 11 不同子弹速度情况下加载载荷一阶特征频率随子弹平均间距  $\Delta L$  变化关系

Fig.11 Relationship between the first-order characteristic frequency of loading and the average spacing  $\Delta L$  of strikers with different velocities

的一阶特征频率越高。

由图 10 和图 11 可进一步获得加载载荷的一阶特征频率和压力峰值放大倍数  $n$  的关系, 如图 12 所示。由图 12 可见, 随着加载载荷频率的增加, 放大倍数  $n$  呈现先增加后减小的变化趋势。在三种不同的子弹速度情况下, 放大倍数  $n$  的峰值对应的加载载荷一阶特征频率大小相近, 平均约为 883 Hz。这一结果表明, 加载的特征频率是响应放大的关键影响因素。

根据振动理论<sup>[16]</sup>, 当加载的频率特征和系统的固有频率接近时, 会引发共振现象, 从而导致响应的放大。可以推测, 由质量块 1、质量块 2、传力杆和样品等部件组成的结构装药系统, 其纵向固有特征频率之一应当接近 883 Hz。随着加载载荷的一阶特征频率逐渐趋近于系统固有频率, 响应幅值的放大倍数也会相应增加。

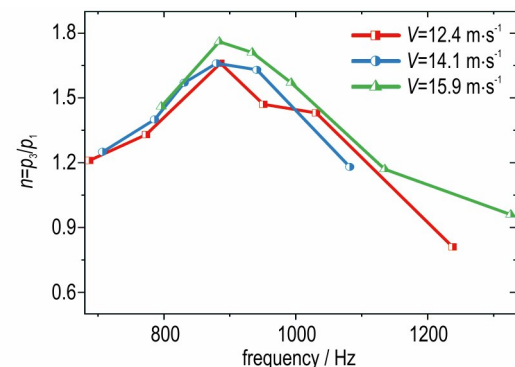


图 12 不同子弹速度情况下压力峰值放大倍数  $n$  随加载一阶特征频率变化关系

Fig.12 Relationship between the peak stress amplification factor  $n$  and the first-order characteristic frequency of loading with different striker velocities

### 2.3 非线性响应放大对PBX-3装药点火行为的影响

图13展示了表2中不同子弹速度、间距条件下PBX-3装药样品底面压力历程的实验结果。实验4-1#中,在子弹速度 $24.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,间距 $\Delta L_1=18\text{ mm}$ , $\Delta L_2=17\text{ mm}$ 条件下,压力脉冲峰值呈现逐渐放大的趋势。高速摄影图像显示 $t=6.85\text{ ms}$ 时装药底部的钢垫块位置出现明显亮光,表明装药发生了点火。此时,压力幅值约为 $623\text{ MPa}$ ,放大倍数约为1.7倍。实验4-2#中,在子弹速度 $24.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,间距 $\Delta L_1=18\text{ mm}$ , $\Delta L_2=18\text{ mm}$ 条件下,压力脉冲峰值同样呈现逐渐放大的趋势,放大倍数约为1.85。三个脉冲结束后,传力杆回弹碰撞到质量块1,随后再次压缩装药时,PBX-3装药发生点火。

实验4-3#中,在子弹速度 $24.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,间距 $\Delta L_1=14\text{ mm}$ , $\Delta L_2=12\text{ mm}$ 条件下,压力峰值并未出现放大现象,第二和第三脉冲都呈现双峰结构,且炸药未发生

点火反应。回收的炸药样品残骸表现出明显的剪切滑移主导的局域化响应特征。实验4-4#中,当子弹速度提升至 $27.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,间距 $\Delta L_1=14\text{ mm}$ , $\Delta L_2=15\text{ mm}$ 时,压力峰值逐渐减小,第二和第三脉冲也呈现双峰结构,且炸药并未发生点火反应。

采用快速傅里叶变换方法,对图13中实验数据进行处理,获得了装药压力峰值放大倍数 $n$ 与载荷一阶特征频率变化关系,如图14所示。结合图13和14,可以观察到4-1#和4-2#的加载频率大小接近,平均值约为 $1367\text{ Hz}$ ,PBX-3装药响应均呈现放大趋势,第3个压力脉冲峰值均超过了 $600\text{ MPa}$ ,最终都发生了点火反应。在4-3#和4-4#实验中,加载频率显著提升,但是响应都未放大,最大压力脉冲峰值分别为 $384\text{ MPa}$ 和 $431\text{ MPa}$ ,装药未发生点火反应。值得注意的是,4-4#的子弹速度为 $27.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,高于4-1#~4-3#的

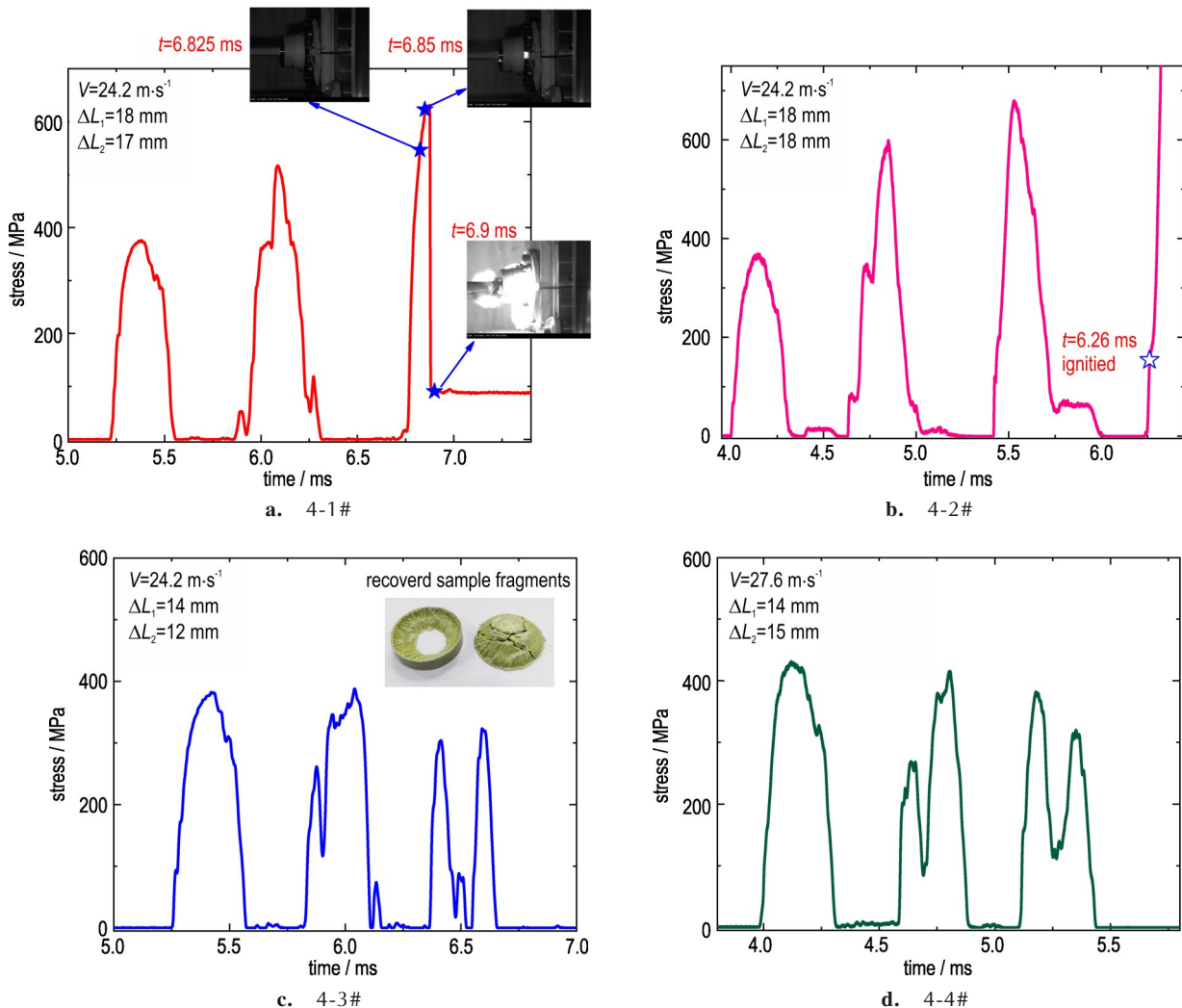


图13 不同子弹速度、间距条件下PBX-3装药样品压力历程

Fig.13 Stress histories of PBX-3 charge samples under the conditions different velocities and spacings of strikers



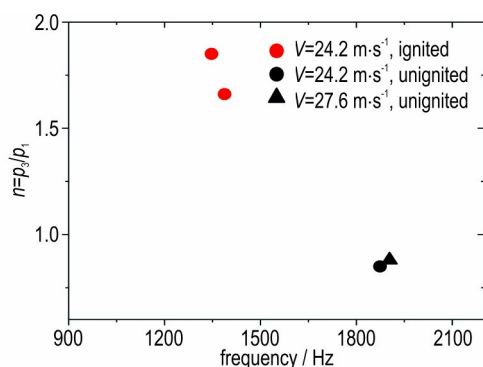


图14 PBX-3装药压力峰值放大倍数 $n$ 与加载载荷一阶特征频率变化关系

Fig. 14 Relationship between the peak stress amplification factor  $n$  of PBX-3 charges and the first-order characteristic frequency of loading

$24.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,但依然未能引发点火反应。由此可见,响应放大更容易导致PBX-3装药发生点火。

由以上分析可以推测装药结构纵向固有频率之一接近1367 Hz,这与图12中的装药结构特征频率存在一定差异。这种差异主要源于样品材料、样品尺寸、样品底部钢垫块结构特征的显著变化。

综上所述,建立的实验方法实现了PBX-3装药响应的非线性放大。在响应放大情况下,PBX-3装药更容易发生点火反应。即使子弹速度增加,如果未发生响应放大,装药也并不容易发生点火反应。因此,非线性响应放大是引发装药点火的一个重要诱因。

### 3 结论

本研究提出了多层嵌套子弹设计和双向限位结构设计思路,建立了一种多脉冲加载下结构装药响应非线性放大实验方法,开展了一系列验证实验和PBX-3装药响应非线性放大应用实验。得出了如下结论:

(1) 建立的多脉冲加载下结构装药响应非线性放大实验方法能够实现脉宽达到亚毫秒量级、峰值高达百兆帕量级、逐渐放大的连续多次冲击加载。

(2) 加载载荷的频率特征是影响结构装药响应非线性放大的关键物理量。当载荷频率接近装药结构的固有频率时,会产生明显的响应放大现象,当载荷频率远离装药结构的固有频率时,响应不放大,甚至可能逐渐减小。

(3) 在 $24.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 子弹速度条件下,当响应非线性放大时,PBX-3装药发生点火反应,反之,则不点火。载荷频率接近装药结构特征频率引发的响应非线性放大效应是导致装药点火的一个重要因素之一。

### 参考文献:

- [1] 刘仓理. 装药化爆安全性[M]. 北京: 科学出版社, 2021. LIU Cang-li. Explosive safety of charge [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [2] 成丽蓉, 汪德武, 贺元吉. 侵彻单层和多层靶时战斗部装药损伤及热点生成机理研究[J]. 兵工学报, 2020, 41(1): 32-39. CHENG Li-rong, WANG De-wu, HE Yuan-ji. Research on the damage and hot-spot generation in explosive charges during penetration into single or multi-layer target[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(1): 32-39.
- [3] 张萌昭, 周涛, 郭洪福, 等. 侵彻多层间隔靶板装药损伤特性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(12): 92-97. ZHANG Meng-zhao, ZHOU Tao, GUO Hong-fu, et al. Experimental study of charge damage in multi-layer target penetration process [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(12): 92-97.
- [4] 毕超, 郭翔, 屈可朋, 等. 斜侵彻靶板过程中装药损伤的数值模拟[J]. 火炸药学报, 2022, 45(3): 383-387. BI Chao, GUO Xiang, QU Ke-peng, et al. Numerical simulation of charge damage during oblique penetration[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2022, 45(3): 383-387.
- [5] LI X, LIU Y, SUN Y. Dynamic mechanical damage and non-shock initiation of a new polymer bonded explosive during penetration[J]. *Polymers*, 2020, 12(6): 1342.
- [6] 张琪林, 段卓平, 孟凡星, 等. 浇注炸药PBX-1侵彻安定性试验与数值模拟[J]. 含能材料, 2021, 29(2): 107-113. ZHANG Qi-lin, DUAN Zhuo-ping, MENG Fan-xing, et al. Experiments and numerical simulations of penetration stability of cast charge PBX-1 [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(2): 107-113.
- [7] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. WANG Li-li. Foundation of stress waves [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [8] 邓国强, 王安宝, 周布奎, 等. SHPB试验一次冲击中多次加载原因浅析[C]//第22届全国结构工程学术会议. 2013: 108-111. Deng Guo-qiang, Wang An-bao, Zhou Bu-kui, et al. Analysis on the causes of multiple loads in one impact of SHPB test [C]//22nd National Symposium on Structural Engineering, 2013: 108-111.
- [9] 吴帅峰, 张青成, 李胜林, 等. 花岗岩冲击力学特性及损伤演化模型[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2756-2763. WU Shuai-feng, ZHANG Qing-cheng, LI Sheng-lin, et al. Impact mechanical characteristics and damage evolution model of granite [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(11): 2756-2763.
- [10] 张斐, 黄群涛, 郭盛雨, 等. 多次强动载荷下某船用钢力学性能试验研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(3): 281-285. ZHANG Fei, HUANG Qun-tao, GUO Sheng-yu, et al. Experimental research on mechanical property of marine steel under multiple strong dynamic loads [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(3): 281-285.
- [11] 李飞胤, 马少杰, 张合. 连续高冲击试验装置动态作用过程仿真研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(1): 255-259. LI Fei-yin, MA Shao-jie, ZHANG He. Simulation research on dynamic action process of continuous high impact experimental equipment [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(1): 255-259.



- [12] LI Fei-yin, MA Shao-jie. Simulation and experimental research of continuous high impact test equipment [J]. *Materials Science and Engineering*, 2018, 428(1): 012015.
- [13] 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 Liang-liang, QU Ke-peng, Shen Fei, et al. Double-pulse loading experiment of RDX based aluminized explosive charge based on hopkinson pressure bar [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2018, 41(1): 52-56.
- [14] 李亮亮, 孙兴昀, 付改侠, 等. 两次脉冲加载条件下炸药装药的安全性实验技术[J]. 爆破器材, 2022, 51(2): 31-35. LI Liang-liang, SUN Xing-yun, FU Gai-xia, et al. Experimental technology of safety of explosive charge under two pulse loading conditions[J]. *Explosive Materials*, 2022, 51(2): 31-35.
- [15] 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: 537-542. NIE Shao-yun, XUE Peng-yi, DAI Xiao-gan. Method of evaluating the safety of charging in a multi-layer penetration process [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2020, 43: 537-542.
- [16] 刘延柱, 陈立群, 陈文良. 振动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2019. LIU Yan-zhu, CHEN Li-qun, CHEN Wen-liang. *Mechanics of vibrations* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2019.

## Nonlinear Amplification Effect and Ignition Experiments of Confined Charges under Multiple Impacts Loading

ZHONG Su-yang, LIAO Shen-fei, HU Qiu-shi, LI Tao, FU Hua

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China*)

**Abstract:** In order to study the potential mechanism of unexpected ignition of confined charge in the process of penetrating multi-layer target, by integrating the designs of multi-layer nested strikers and bidirectional limited structure, a nonlinear amplification experimental method of confined charges under continuous multiple impacts loading was established. The effectiveness of the experimental method, and the intrinsic mechanism of nonlinear response amplification were analyzed. The influence of nonlinear response of charges under multiple impacts loading on ignition behaviors was studied. The results show that the experimental method can implement multiple impacts loading with sub-millisecond pulse width, and 100 MPa-scale peak stress value. When the characterized frequency of loading is close to the intrinsic frequency of confined charges, structural nonlinear response amplification emerges, and the stress amplitude increases gradually. For the same striker velocity and mass, while varying frequency of loading, the PBX-3 charges could be ignited if structural nonlinear response is amplified and could not be ignited if structural nonlinear response is not amplified. It is found that the structural nonlinear response amplification effect is an important factor leading to charge ignition.

**Key words:** confined charge; continuous multiple impacts; nonlinear amplification; ignition

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2023245

(责编: 高毅)