

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.02.005

# 两次脉冲加载条件下炸药装药的安全性实验技术<sup>\*</sup>

李亮亮 孙兴昀 付改侠 肖 玮 屈可朋  
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 为获得炸药装药在多次脉冲载荷条件下的安全性,基于大型落锤模拟加载装置,设计了两次脉冲实验装置,建立了两次脉冲载荷条件下炸药装药安全性实验方法。研究了 CL-20 基含铝炸药在两次脉冲载荷条件下的安全性。结果表明:所用的实验装置可以对 CL-20 基含铝炸药装药实现两次脉冲,实验原理可行。锤头高度为 1.0 m 时,炸药装药在两次脉冲载荷作用下未发生点火;锤头高度超过 1.2 m 后,炸药装药在第二次脉冲载荷作用时发生点火。

[关键词] 炸药装药;多次脉冲;安全性;实验技术

[分类号] V512+.2; TJ55

## Experimental Technology of Safety of Explosive Charge under Two Pulse Loading Conditions

LI Liangliang, SUN Xingyun, FU Gaixia, XIAO Wei, QU Kepeng  
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] In order to obtain the safety of explosive charges under multiple-pulse loading conditions, based on a large drop weight simulation loading device, two-pulse experimental devices were designed, and the experimental technology of explosive charge safety under two-pulse loading conditions was established. The safety of CL-20-based aluminum-containing explosives under two-pulse loading conditions was investigated. Results show that the device used in the experiment can achieve two pulses to CL-20-based aluminum-containing explosive charge, and the experimental principle is feasible. When the hammer height is 1.0 m, the explosive charge does not ignite under two-pulse loading. But when the hammer height exceeds 1.2 m, the explosive charge ignites at the second pulse loading.

[KEYWORDS] explosive charge; multiple-pulse; safety; experimental technique

## 引言

炸药装药的安全性研究一直是炸药装药应用领域的热点及难点之一。炸药装药的安全性涉及炸药的感度、装药和壳体的结构匹配性及装药所处的力学环境等。比如,侵彻弹侵彻多层靶板时,装药就处在复杂的、快速的多次脉冲加载环境中(多频次的拉伸-压缩加载),可能引起装药出现裂纹甚至宏观破碎现象,在摩擦作用下极易点火。因此,需要对炸药装药在多次脉冲加载条件下的安全性进行研究。

国内外多采用分离式霍普金森压杆(SHPB)、落锤等装置获取多次脉冲实验的参数。其中,SHPB

因设备操作简单,样品需求量较小,产生了诸多研究成果。邓国强等<sup>[1]</sup>采用 SHPB 设备分析了一次冲击过程中的多次加载原因,并探讨了消除方法。李地元等<sup>[2]</sup>利用 SHPB 进行了多次循环冲击压缩实验,发现花岗岩冲击后的损伤变化量增大。Zi 等<sup>[3]</sup>采用一维飞片冲击实验对 HMX 基 PBX 炸药(JOB-9003)进行了两次冲击;该实验中,采用低阻的蓝宝石和高阻的 Kel-F 材料进行组合加载,产生两次脉冲,在 SHPB 压杆系统上连续多次冲击加载前、后子弹加载系统和内外子弹加载系统,炸药装药最高得到两次连续脉冲。此外,大量学者通过 SHPB 获得了材料在多次加载条件下的力学特性及动态参量<sup>[4-9]</sup>。林大能等<sup>[10-11]</sup>采用落锤设备对大理石进行

<sup>\*</sup> 收稿日期:2021-02-09  
基金项目:国防基础预研项目  
第一作者:李亮亮(1983-),男,高级工程师,主要从事战斗部及安全性研究。E-mail: pep2968@163.com

多次冲击,得出在围压和冲击冲量的共同作用下,围压能够提高岩石抗冲击破坏的能力,并建立了不同围压下冲击损伤与冲击次数的函数。综上所述,针对炸药装药在多次加载条件下的安全性研究还鲜见报道。这主要是因为 SHPB 的样品量较小,目前无法在多次加载条件下对炸药进行点火;落锤装置的样品量较大。

本文中,基于大型落锤模拟加载装置,设计了一种专用装置。在锤头碰撞时,该装置可分成两次加载,进而对炸药装药实现两次脉冲加载。利用该测试技术,以 CL-20 基含铝炸药为例,研究炸药装药的安全性,为侵彻战斗部或其他武器装备的炸药装药多脉冲加载下的安全性研究提供技术支持。

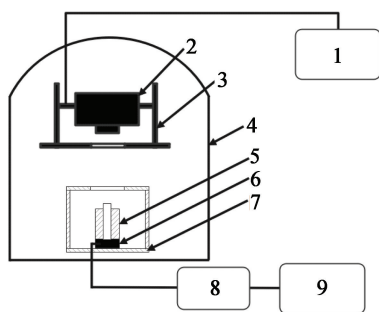
## 1 实验部分

### 1.1 样品制备

样品为压装 CL-20 基含铝炸药,密度为  $1.80 \text{ g/cm}^3$ ,炸药端面尺寸为  $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ,药量约  $90 \text{ g}$ ,由西安近代化学研究所提供。

### 1.2 实验设备

落锤模拟加载装置,锤头质量  $400 \text{ kg}$ ,时间脉冲为毫秒量级加载,应力加载可达吉帕量级,西安近代化学研究所自研。装置组成如图 1 所示。



1 - 控制系统;2 - 落锤;3 - 轨道;4 - 防护掩体;5 - 弹体;  
6 - 压力传感器;7 - 防护盒;8 - 信号放大器;9 - 数据采集处理系统。

图 1 落锤装置组成及实验样弹示意图

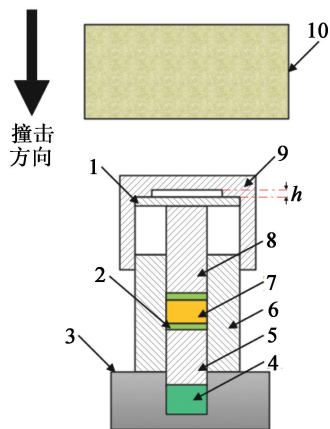
Fig. 1 Diagrammatic sketch of drop hammer device and bomb sample

落锤模拟加载装置由落锤、轨道、防护盒、样弹、防护掩体、压力传感器、控制系统、信号放大器及数据采集处理系统等组成。实验时,某一质量的落锤被提升到一定高度,以自由落体方式下降并撞击样弹,压力传感器捕获样弹所受的应力加载波形,通过信号放大器放大后,从数据采集处理系统中可直接读出应力及加载时间。此装置最大加载应力达  $1.5$

GPa,上升前沿约为  $2 \sim 3 \text{ ms}$ ,加载速率为毫秒量级。

### 1.3 两次脉冲实验原理及模具

落锤实验中,锤头直接撞击药柱前端的击柱,给予炸药试样一次脉冲;基于此,在击柱前端设置某一装置,使锤头达到间接撞击和直接撞击击柱的目的,进而给予炸药两次脉冲,达到两次加载的目的。两次脉冲技术的实现如图 2 所示。



1 - 1#板;2 - 塑料垫片;3 - 砧板;4 - 压力传感器;  
5 - 下击柱;6 - 弹体;7 - 炸药;8 - 上击柱;9 - 2#板;  
10 - 落锤。

图 2 两次脉冲实验装置

Fig. 2 Two-pulse test device

1#板与2#板的材质均为 45#钢,两层板的间距  $h$  为  $30 \text{ mm}$ 。在锤头碰撞过程中,主动实现两次破坏,从而达到应力的两次加载-卸载,形成两次脉冲,模拟实际中侵彻两层靶板的工况。在冲击过程中,锤头冲击整个装置,压缩整个端盖按锤头速度方向前进,因击柱固定(整个实验弹固定),故击柱对 1#板进行冲击,形成第 1 次脉冲加载,该脉冲对装药实现第 1 次加载;待 1#板破坏后,应力释放,击柱经一定距离的位移后,再对 2#板进行冲击,装药得到第 2 次脉冲加载。

在其他条件不变时,1#板厚度越大,其破坏时所需能量越大,给予炸药试样的第 1 次应力脉冲越大;故实验中可通过调节 1#板的材质、厚度等参数来改变应力峰值。在落锤高度等其他条件一定时,上击柱通过 1#板和 2#板的速度一定,两次脉冲的时间间隔与 1#板和 2#板的距离  $h$  成正比;故仅调节 1#板与 2#板的间距,即可改变两个应力峰值之间的时间。

## 2 结果与讨论

### 2.1 两次冲击载荷下的炸药装药响应曲线

采用两次脉冲实验装置,在受试弹壳体中装入

模拟炸药,将锤头提高到不同高度,落锤撞击药柱的数据如表 1 所示。表 1 中, $t_1$ 、 $t_2$  分别表示第 1 个和第 2 个峰的时间; $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  分别表示第 1 个和第 2 个峰的应力。每次实验重复 3 发,若应力误差在 10% 以内,认为数据真实。

表 1 模拟实验获得的应力和时间

Tab.1 Stress and time obtained from simulation					
序号	$H/\text{m}$	$t_1/\text{ms}$	$\sigma_1/\text{MPa}$	$t_2/\text{ms}$	$\sigma_2/\text{MPa}$
1 <sup>#</sup>	0.5	0.92	204	13.60	426
2 <sup>#</sup>	1.0	1.12	287	11.20	605
3 <sup>#</sup>	1.5	1.21	350	9.56	742
4 <sup>#</sup>	2.0	1.28	404	9.43	858

所获得的两次典型冲击响应曲线如图 3 所示(落锤高度为 1.0 m)。

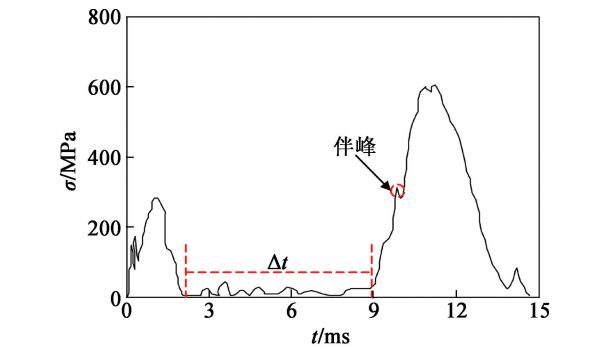


图 3 两次典型冲击响应曲线

从表 1 和图 3 可以看出,400 kg 锤头从 1.0 m 的高度冲击时,该装置发生了两次应力加载-卸载过程。其中,第 1 次加载应力峰值 287 MPa ( $t = 1.12$  ms),第 2 次加载应力峰值为 605 MPa ( $t = 11.20$  ms),板的两次破坏时间间隔  $\Delta t = 6.92$  ms。

假设重锤做自由落体运动,开始碰撞时的锤头速度  $v_1$  为:

$$v_1 = \sqrt{2gH}.$$

(1)

式中: $g$  为加速度,10 m/s<sup>2</sup>;  $H$  为落锤高度。

式(1)中代入  $H = 1.0$  m 可知,碰撞时的锤头速度为 4.47 m/s。两层板的间距  $h$  为 30 mm,假定 1<sup>#</sup> 板的破坏不占用两层隔板间的距离,且锤头在破坏 1<sup>#</sup> 板的过程中速度不变,则锤头在两板间的运动时间  $\Delta t'$  为:

$$\Delta t' = \frac{h}{v_1}.$$

(2)

代入相关数据,计算可得  $\Delta t' = 6.71$  ms。估算的时间间隔 ( $\Delta t' = 6.71$  ms) 略低于响应曲线上直

接获得的数值 ( $\Delta t = 6.92$  ms),两者的相对误差为 2.96%。这是因为假定所导致的;实际中,在 1<sup>#</sup> 板破坏时会降低重锤的速度,进而增加  $\Delta t'$ ,两者数值符合预期。这说明,本实验装置可以实现对材料的两次脉冲加载,原理正确,方法可行。

## 2.2 两次冲击载荷下的炸药装药安全性

实验时,将已有的相同炸药体系或类似体系未点火时的落锤高度作为第 1 发的落锤高度  $H$ 。仅改变落锤高度,其他条件(如 1<sup>#</sup> 板与 2<sup>#</sup> 板的材质、距离、弹体壁厚等)不变。若实验结果为未点火,重复实验后依然未点火,则升高  $H$ ,直至点火;反之亦然。

对某 CL-20 基含铝炸药装药进行两次脉冲加载实验。获得的应力和时间数据如表 2 所示;典型点火曲线(落锤高度 1.2 m)如图 4 所示;实验前、后的照片如图 5 所示。

由表 2 及图 4 可以看出:落锤高度小于 1.0 m 时,炸药在经历两次脉冲载荷作用后未发生点火;继续增加锤头高度( $H = 1.2$  m)后,炸药装药第 1 次应力峰值 318 MPa 出现在  $t = 1.17$  ms,并在第 2 次应力曲线上升阶段出现点火。从图 5 实验前、后的图片可以看出:首先,装置在冲击过程中破裂;其次,实验样弹的套筒及装置均发黑,但套筒整体完好;说明装药发生燃烧。实验再次证明了该方法的可行性。

表 2 脉冲加载实验获得的应力和时间

Tab.2 Stress and time obtained from pulse loading experiment						
序号	$H/\text{m}$	$t_1/\text{ms}$	$\sigma_1/\text{MPa}$	$t_2/\text{ms}$	$\sigma_2/\text{MPa}$	结果
1 <sup>#</sup>	0.5	0.81	213	14.1	434	无点火
2 <sup>#</sup>	1.0	1.10	279	12.0	589	无点火
3 <sup>#</sup>	1.2	1.17	318			点火
4 <sup>#</sup>	1.5	1.18	300			点火

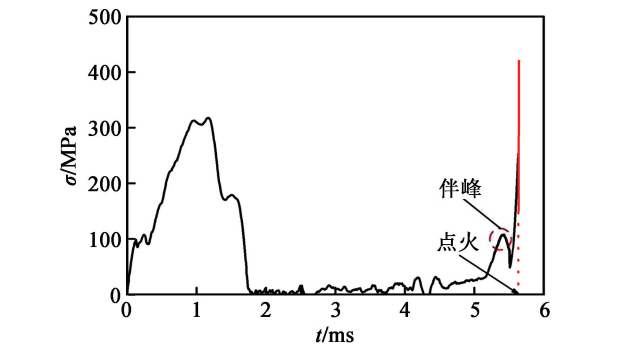
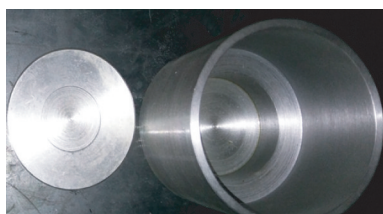


图 4 锤头高度 1.2 m 时炸药装药的响应曲线

Fig.4 Response curve of explosive charge at drop height of hammer of 1.2 m



(a) 实验前



(b) 实验后

图 5 装置在实验前、后的对比照片

Fig. 5 Comparative photos of the device before and after experiment

将图 3 与图 4 对比可以发现,第 2 次应力曲线在上升阶段均有小的伴峰出现。在第 1 次冲击过程中,装药经历应力波的压缩及稀疏波的拉伸,压缩时炸药试样内部原有的微裂纹闭合,而拉伸时可能出现新的微裂纹;随着锤头高度的增加,稀疏波的拉伸作用增大,微裂纹的数量增多、尺寸增大。同时,锤头高度较低时,因两次脉冲的时间间隔较长,新产生的微裂纹可能发生闭合;而锤头高度较高时,因两次脉冲的时间间隔较短,新产生的微裂纹可能来不及闭合就承受第 2 次冲击。再次,图 3 中锤头高度较低时,伴峰的应力峰值虽大,但其峰值相对于此峰的起始点数值为 47 MPa,且伴峰的持续时间为 0.190 ms;而增加锤头高度后,伴峰的应力峰值相对于此峰的起始点数值为 54 MPa,同时伴峰的持续时间为 0.315 ms。说明锤头高度较低时,经历第 1 次应力冲击后所产生的微裂纹在第 2 次冲击时产生闭合;而锤头高度较高时,第 1 次冲击后产生的新裂纹可能产生汇聚,形成大裂纹,从而导致第 2 次冲击时,这些大裂纹在闭合过程中由于摩擦、剪切等作用而产生热点,进而导致点火。

### 3 结 论

1) 设计的两次脉冲加载装置可实现对装药的两次加载,原理正确,方法可行。

2) 采用两次脉冲加载装置。对 CL-20 基含铝炸药进行了加载。锤头高度低于 1.0 m 时为两次加载,炸药未反应;锤头高度超过 1.0 m 后,炸药装药仅承受 1 次应力加载,并于第 2 次加载时发生点火。锤头高度为 1.2 m 时,第 1 次应力峰值的时间为

1.17 ms,应力峰值为 318 MPa,并于第 2 个应力峰的上升阶段发生点火。

### 参 考 文 献

- [1] 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论文集. 乌鲁木齐:新疆大学出版社,2013:108-111.
- [2] 李地元,孙小磊,周子龙,等. 多次冲击载荷作用下花岗岩动态累积损伤特性[J]. 实验力学,2016,31(6): 827-835.  
LI D Y, SUN X L, ZHOU Z L, et al. On the dynamic accumulated damage characteristics of granite subjected to repeated impact load action[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016,31(6):827-835.
- [3] ZI P D, CHEN J, ZHANG R, et al. Double shock experiments on PBX explosive JOB-9003[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2017,42:784-790.
- [4] 韩靖. 强动载荷连续多次冲击加载下的煤岩体力学特性研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2017.  
HAN J. Study on mechanical properties of coal rock under multiple dynamic impact load[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2017.
- [5] 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 S F, ZHANG Q C, LI S L, et al. Impact mechanical characteristics and damage evolution model of granite[J]. Journal of China Coal Society, 2016,41(11): 2756-2763.
- [6] 张吉勇. 逐级加载冲击载荷作用下的岩石力学特性及累积损伤规律研究[D]. 赣州:江西理工大学,2018.  
ZHANG J Y. Study on rock mechanics characteristics and law of cumulative damage under step impact loading[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2018.
- [7] 谭玉叶,汪杰,宋卫东,等. 循环冲击下胶结充填体动载力学特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019,36(1):184-190,197.  
TAN Y Y, WANG J, SONG W D, et al. Experimental study on mechanical properties of cemented tailings back fill under cycle dynamic loading test[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2019,36(1): 184-190, 197.
- [8] 朱晶晶,李夕兵,宫凤强,等. 单轴循环冲击下岩石的动力学特性及其损伤模型研究[J]. 岩土工程学报, 2013,35(3):531-539.  
ZHU J J, LI X B, GONG F Q, et al. Dynamic charac-

- 

teristics and damage model for rock under uniaxial cyclic impact compressive loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(3): 531-539.

- evolution law of rock under cyclical impact loadings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(22): 4094-4098.

- [11] 林大能,陈寿如,刘优平. 岩石循环冲击损伤演化围压效应的实验研究[J]. 矿冶工程, 2005, 25(4): 12-15.
- LIN D N, CHEN S R, LIU Y P. Experimental study on confining pressure effect of rock damage under cyclical impact loading[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2005, 25(4): 12-15.