

## 碎化炸药缝隙挤压点火模拟实验

胡秋实, 何杨, 仲苏洋, 傅华, 廖深飞

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 采用造型粉模拟因碰撞过程极度碎化的压装炸药, 研究了 PBX 造型粉缝隙挤压点火行为。基于射弹撞击的方式设计实验, 为保证样品在设计缝隙之外无其他流动空间, 在样品表面覆盖垫层及涂抹油脂进行密封, 采用高速摄影记录了造型粉挤入缝隙的运动及反应情况。改变缝隙面积和样品截面积的比例, 研究了压实效应对点火的影响。结果表明, 对于无油脂密封的情况, 加载开始后 PBX 造型粉先经历颗粒破碎和压实, 随后压实的造型粉从垫层附近的间隙挤出, 挤出过程中发生点火, 点火位置在炸药与垫层界面。对于有油脂密封的情况, PBX 造型粉在压实后的一段时间内未发生点火, 当压头行进到一半行程时, “楔形”滑移区形成, 高速相机照片可见明显的滑移区-死区界面, 随后变形模式从“单楔形”滑移区向“双楔形”滑移区演化, 滑移区-死区界面剪切效应未引发点火。加载后期压头行进到接近缝隙表面, “楔形”滑移区消失, 炸药在压头与缝隙发生碰撞的前后时刻分别发生一次点火, 第一次点火发生在缝隙入口处, 第二次点火发生在压头边角处。压实效应对点火行为有重要影响, 造型粉压实后点火速度阈值明显降低, 撞击速度仅 4.5 m/s 即可导致点火。

**关键词:** 碎化; 造型粉; 高聚物粘结炸药; 缝隙挤压; 撞击; 点火

中图分类号: TJ55, O38

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

## Simulation experiment of ignition response of fragmented explosive under gap extrusion loading

HU Qiushi, He Yang, Zhong Suyang, Fu Hua, LIAO Shenfei

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract:** Modeling powder is used to simulate the pressed explosive which is extremely fragmented due to collision, and the gap extrusion ignition behavior of PBX modeling powder is studied. Experiments were designed based on the way of projectile impact. In order to ensure that there is no other flow space except the designed gap, the surface of the sample was covered with cushion and coated with grease for sealing, and the movement and reaction of molding powder squeezing into the gap were recorded by high-speed photography. By changing the ratio of gap area to sample cross-sectional area, the influence of compaction on ignition was studied. The results show that in the absence of grease seal, PBX molding powder undergoes particle crushing and compaction, and then the compacted molding powder is extruded from the clearance near the cushion, and ignition occurs in the extrusion process. The ignition position is at the interface between explosive and cushion. In the case of grease seal, PBX molding powder does not ignite for a period of time after compaction. When the indenter moves halfway, a “wedge-shaped” slip zone is formed, and a slip-dead zone interface could be seen in high-speed camera photos. Then the

\*收稿日期: \_\_\_\_\_; 修回日期: \_\_\_\_\_;

基金项目: 中国工程物理研究院院长基金自立项目(YZJJZL2023014);

第一作者: 胡秋实(1984—), 男, 博士, 助理研究员. E-mail: qiushihu@126.com

通信作者: 廖深飞(1985—), 男, 博士, 副研究员. E-mail: sliao@foxmail.com

带格式的: 字体: 三号

带格式的: 字体: 小四

deformation mode evolves from “single wedge” slip zone to “double wedge” slip zone, and the shear effect of slip-dead zone interface does not cause ignition. At the later stage of loading, the indenter travels close to the gap surface, and the “wedge-shaped” slip zone disappears. Before and after the collision between the indenter and the gap, the explosive ignites once, respectively. The first ignition occurs at the entrance of the gap, and the second ignition occurs at the corner of the indenter. Compaction effect has an important influence on ignition behavior. After compaction, the threshold value of ignition speed is obviously reduced, and the impact speed causing ignition is only 4.5 m/s.

**Keywords:** fragmentation; molding powder; polymer bonded explosive; gap extrusion; impact; ignition

武器装药中, 含能部件通常由金属腔体和被填充在金属腔体中的装药组成。外载荷的作用下, 金属腔体容易发生变形及破裂, 形成缝隙。PBX (Polymer Bonded Explosive) 炸药通常呈现出脆性<sup>[1-5]</sup>, 在同缝隙的碰撞过程中容易发生破裂及碎化, 炸药碎化后其宏观结构呈现出颗粒集合的特征。采用造型粉模拟因碰撞过程极度碎化的炸药<sup>[6,7]</sup>, 在外载荷的持续作用下, 造型粉颗粒将挤入缝隙, 形成摩擦及剪切效应, 可能引发点火。因此, 研究 PBX 造型粉缝隙挤压加载下的点火响应行为, 对评价装药碎化后的撞击安全性具有重要意义。

关于缝隙挤压加载下炸药的安全性研究, 杨昆等<sup>[8,9]</sup>采用基于裂纹扩展、孔隙演化的本构模型, 考虑粘性流动、裂纹摩擦等机制对温升的贡献, 对炸药缝隙挤压加载下的点火行为进行了数值模拟。陈鹏等<sup>[10]</sup>研究了下端开缝隙 PBX 装药撞击加载点火行为, 发现炸药是否发生反应不仅同剪切速率相关, 还同单位时间炸药挤入缝隙的流量有关。胡秋实等<sup>[11]</sup>研究了 PBX-3 炸药缝隙挤压加载下的破裂模式, 分析了局域化温升的来源, 为认识缺陷条件下炸药的安全性提供了借鉴。

撞击载荷作用下炸药发生破裂及碎化, 碎化后的颗粒状结构可用造型粉进行模拟。关于机械载荷下炸药造型粉的安全性研究, 董军等<sup>[12]</sup>采用水悬浮法制备了 LLM-105/EPDM 造型粉, 发现与原料 LLM-105 相比, LLM-105/EPDM 造型粉的机械感度有一定程度降低, 其  $H_{50}$  升高了 4.6 cm, 摩擦感度从 10% 降低为 4%。牛磊等<sup>[13]</sup>采用梯次控温冷却法工艺制备得到含  $\alpha\text{-AlH}_3$  的凝聚相炸药造型粉, 测试了不同配比造型粉的撞击感度和摩擦感度, 给出了贮存时间对造型粉机械感度的影响规律。刘意等<sup>[14]</sup>制备了 HNS 基球形化造型粉, 研究了球形造型粉的机械感度。朱玉宇等<sup>[15]</sup>以 RDX 为主体炸药, 以 NC、 $\text{F}_{2602}$  为粘接剂, 采用膜乳化技术制备出窄粒度分布的复合微球, 显著提升了 RDX 基造型粉的包覆效果, 降低了其撞击感度。

本文设计了 PBX 造型粉缝隙挤压实验装置, 使用射弹撞击的方式进行加载, 采用高速摄影记录了造型粉缝隙挤压过程中的变形及反应情况, 对加载过程中的应力、速度进行了实时测量。通过调控缝隙面积和样品截面积的比例控制样品的流量, 研究了压实效应对造型粉点火阈值的影响。

## 1 实验方法

缝隙挤压实验装置如图 1(a)所示, 装置由盖帽、圆盘、传力杆、限位板、蓝宝石玻璃和压力/速度测试系统组成。盖帽设计成可拆卸, 该设计一方面可便于聚偏氟乙烯 (Polyvinylidene Fluoride, PVDF) 压力传感器<sup>[16]</sup>的安装, 另一方面也便于撞击变形后顶部盖帽的更换。传力杆由 3 段组成, 第 1、2 段为圆柱形, 第 3 段为长方体。第 1 段直径最大, 同盖帽接触; 第 2 段圆柱体的侧面同限位板之间为滑动配合, 用于保持运动过程中的定位和准直; 第 3 段长方体作压头用, 用于挤压造型粉样品。为获取传力杆的运动情况, 在第 1 段传力杆外围焊接一直径 60 mm 的圆盘, 采用光子多普勒测速 (Photonic Doppler Velocimetry, PDV)<sup>[17]</sup>探头对准圆盘底部可记录传力杆运动速度。实验中填充 PBX 造型粉颗粒的样品腔为长方体, 在样品腔的其中一个壁面开凿缝隙, 该壁面形状为正方形, 边长为  $L$ , 缝隙截面形状为矩形, 宽度为  $d$ , 长度为  $L$ , 如图 1(b)所示。缝隙向前延伸一段距离后宽度逐渐增大, 整体成喇叭口状 (Bell mouth), 底部保留一定空间用于点火后的泄压<sup>[18]</sup>。实验样品为 PBX-3 造型粉颗粒, 在

样品腔中填充尺寸为 $L \times L \times H$ ，其中 $L=7\text{ mm}$ ，为样品腔边长， $H=8\text{ mm}$ ，为加载方向填充长度，缝隙宽度为 $d=0.6\text{ mm}$ 。

在样品和缝隙正面安装蓝宝石玻璃窗口，方便高速相机实时捕捉样品挤入缝隙的过程图像，高速相机帧频为 $1.3 \times 10^5\text{ fps}$ 。在造型粉样品和压头之间增加了垫层，以避免加载过程中样品挤入压头和侧壁、蓝宝石玻璃之间的间隙中。为防止点火后的爆炸损坏高速相机镜头，将高速相机放置在防护箱内，用防护玻璃将相机镜头和实验装置隔开。

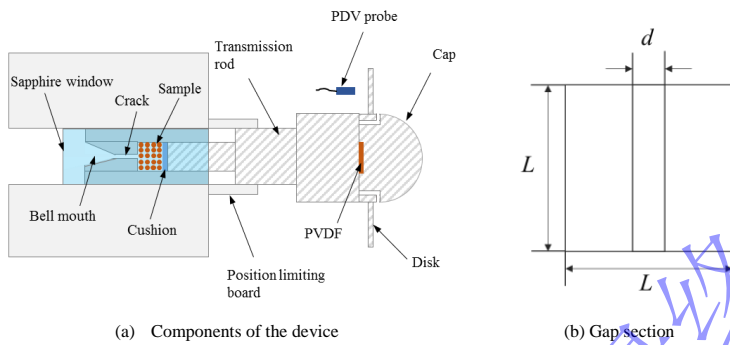


图1 实验装置  
Fig.1 Experimental device

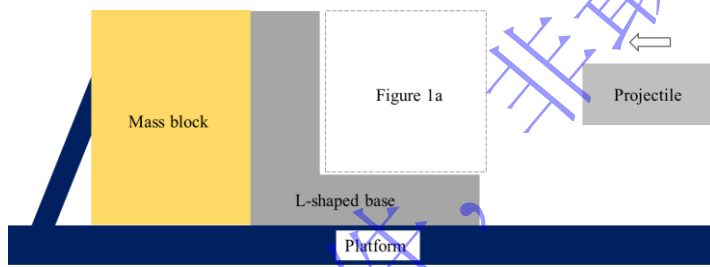


图2 加载方法示意图  
Fig.2 Schematic diagram of loading method

实验的加载方法如图2所示，在金属平台上安装一L型底座(L-shaped base)，图1(a)中实验装置通过螺栓连接到L型底座上(见图2中虚线框)，该底座的后方为大质量块(Mass block)，用于防止撞击过程中实验装置发生刚体运动。实验中，圆柱形射弹在高压气室内加速到一定速度，从发射管中飞出对实验装置进行撞击加载。射弹材料为钢，尺寸为 $\phi 37\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ ，质量约 $1.3\text{ kg}$ ，入射速度为 $13.2\text{ m/s}$ 。

## 2 实验结果

开展了2发PBX-3造型粉缝隙挤压实验，两发实验的加载条件相同，但造型粉样品的安装条件不同。第1发实验(No.1)直接将聚四氟乙烯垫层(Cushion)安装在造型粉颗粒和压头之间，无油脂密封；第2发实验(No.2)在垫层与压头之间涂抹凡士林油脂进行密封，两发实验结果如图3和图4、5所示。从图3看出，加载开始后，PBX造型粉颗粒先发生压实，颗粒之间的空隙变小，随后靠近压头的造型粉颗粒发生破碎，远离压头的颗粒之间空隙进一步减小(图3(b))。当 $t=346\text{ }\mu\text{s}$ ，所有颗粒之间已经看不

到空隙，压实过程结束，样品在  $t=546 \mu\text{s}$  时发生点火，点火位置在炸药与垫层界面附近(图 3(e))。

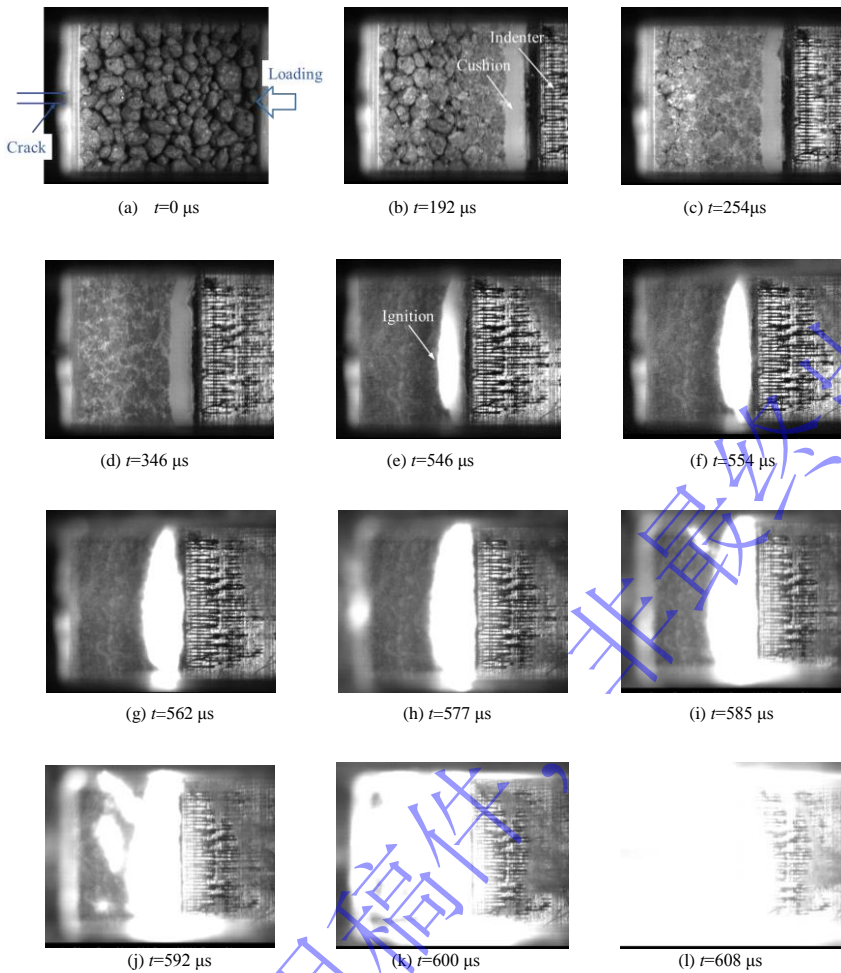


图 3 No.1 实验高速摄影  
Fig.3 High-speed photography of No. 1 experiment

由于压头还在继续运动，样品腔内部压力得以维持，点火发生持续。在  $t=546 \mu\text{s} \sim 577 \mu\text{s}$  的  $31 \mu\text{s}$  时间内，点火发光区域向四周持续扩大，当  $t=585 \mu\text{s}$ ，燃烧进入到样品边侧裂纹及压头与壁面之间的缝隙中。随着加载的进行，样品损伤程度加剧，当  $t=592 \mu\text{s}$ ，燃烧火焰进入到样品内部多条裂纹中，燃烧表面积迅速增大，反应烈度加剧，燃烧火光在数十微秒的时间范围内即布满整个视场(图 3(l))，实验现场听到剧烈声响。由于实验的点火位置起源于在炸药与垫层界面附近(图 3(e))，判断部分炸药进入到了垫层与壁面或发生破碎的垫层内部间隙中，点火机制为碎化炸药的剪切摩擦升温。

爆炸与冲击  
Explosion and Shock Waves

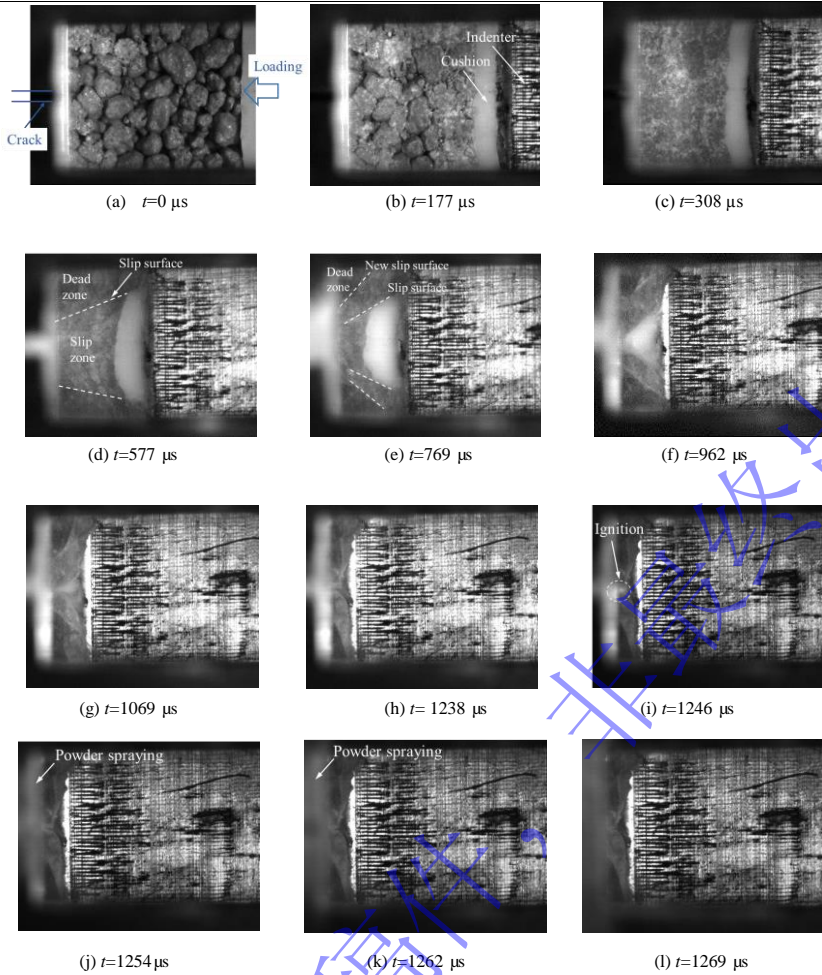


图4 No.2实验一次点火高速摄影  
Fig.4 High-speed photography of No. 2 experiment first ignition

有油脂密封时 PBX-3 造型粉缝隙挤压过程中发生了两次点火，实验过程的高速摄影图像分别如图 4、5 所示。从图 4 看出，加载开始后，PBX 造型粉颗粒同样先发生压实，颗粒之间的空隙随着加载的进行逐渐变小，在  $t=308 \mu\text{s}$  时所有颗粒之间已经看不到空隙，压实过程结束。由于实验过程中在垫层与压头之间涂抹了凡士林油脂，一定程度上堵住了造型粉的流动通道，导致样品在  $t=500\sim 600 \mu\text{s}$  时间区间内未发生点火。随着加载的进行，在  $t=577 \mu\text{s}$  时(图 4(d))形成典型的“楔形”滑移区(Slip zone)，滑移区周围为死区(Dead zone)<sup>[19]</sup>(此处死区特指缝隙挤压过程中不发生流动的区域，区别于爆轰领域描述爆轰波传播行为的死区<sup>[20, 21]</sup>)，两区之间的界面为滑移面(Slip surface)。死区固定不动，与滑移区之间存在速度差，两区之间的剪切摩擦是局域升温的重要来源。当  $t=769 \mu\text{s}$ ，滑移区内炸药向缝隙内部快速流动，死区内部炸药在压头的挤压下不再保持静止，死区内部靠近压头的一部分炸药向缝隙附近



流动, 远离压头的一部分炸药依然保持静止, 导致死区范围缩小, 新的滑移面形成(图 4(e)中 New slip surface), 呈现出“双楔形”滑移区的流动模式(图 4(e)、(f)、(g))。新、旧滑移面两侧炸药均存在速度差, 可能造成局域温升。当  $t=1238 \mu\text{s}$ , 压头已经前进到较大深度, “楔形”滑移区基本消失, 两侧炸药在向中间缝隙流动的过程中发生碰撞摩擦, 当  $t=1246 \mu\text{s}$ , 在缝隙入口处看到点火亮光(图 4(i)), 随后点火发生持续, 反应增压导致粉末向前方发生喷射(Powder spraying), 缝隙及样品腔底面轮廓被喷射出来的粉末遮挡, 变得模糊不清。

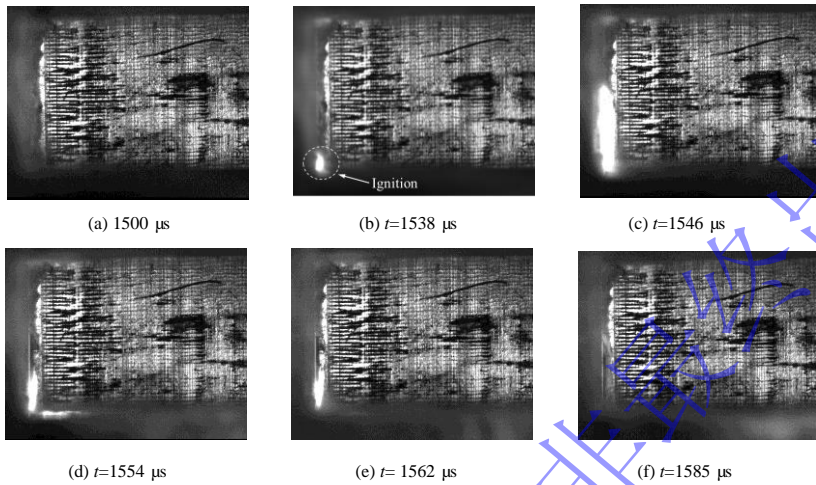


图 5 No.2 实验二次点火高速摄影

Fig.5 High-speed photography of No. 2 experiment second ignition

从图 5 看出, 当  $t=1500 \mu\text{s}$  时, 压头与缝隙发生接触碰撞, 残留在缝隙外部的炸药在碰撞力的作用下发生二次点火, 点火位置在压头侧面角点处(图 5(b))。二次点火后反应持续增长了  $8 \mu\text{s}$ , 随后燃烧进入压头与壁面之间的间隙, 导致泄压, 反应烈度减弱, 点火在  $t=1585 \mu\text{s}$  熄灭(图 5(f))。

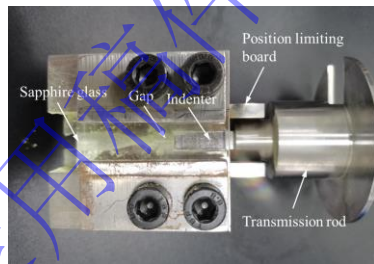


图 6 回收实验装置

Fig.6 Recovery experimental device

图 6 显示了 No.2 实验的回收情况, 从图中看出, 实验结束后压头行进到与缝隙发生接触, 在限位板的作用下压头未发生歪斜, 大部分样品进入到缝隙底部的空腔中, 蓝宝石玻璃窗口未发生破碎, 玻璃窗口靠近缝隙附近的部分可见明显粉末喷射痕迹。

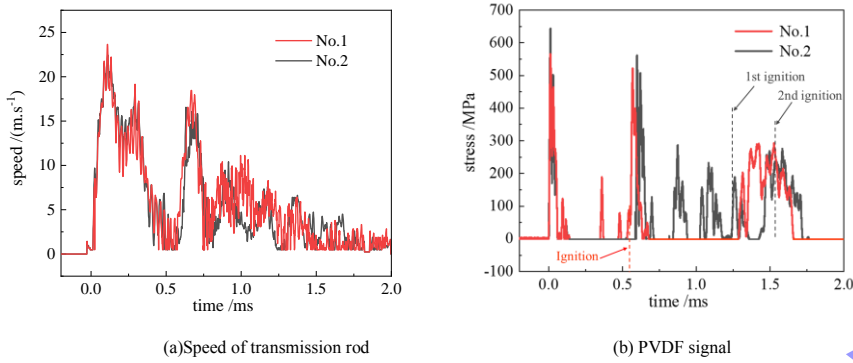


图7 实验中的速度和压力信号  
Fig.7 Experimental velocity and stress signals

图7给出了实验过程中的传力杆速度和PVDF压力信号。从图7中看出,速度、应力各历经2次大的跳跃,第一次发生在加载开始时( $t=0$  us),表明此时盖帽来自射弹的撞击力传递给传力杆,速度在 $80\ \mu\text{s}$ 内上升到 $20\ \text{m/s}$ ,应力在 $10\ \mu\text{s}$ 内上升到 $500\ \text{MPa}$ 。随后由于传力杆和盖帽发生分离,PVDF应力计不再承载,其信号值迅速下降到 $0\ \text{MPa}$ ,接着位于传力杆前端的压头对造型粉样品进行惯性压缩,压缩时间持续约 $0.4\ \text{ms}$ ,传力杆速度在 $t=0.5\ \text{ms}$ 附近下降到 $0$ ,此时射弹和盖帽还在运动,会对停下来的传力杆发生追赶。当 $t=0.55\ \text{ms}$ 附近,盖帽再一次与传力杆发生撞击,此时速度、应力曲线发生第二次大的跳跃,速度从 $0\ \text{m/s}$ 上升到 $15\ \text{m/s}$ ,应力从 $0\ \text{MPa}$ 上升到 $400\ \text{MPa}$ ,对比图3、图7发现,第1发实验在第二次跳跃过程中发生点火。

当 $t=0.7\ \text{ms}$ 时,传力杆和盖帽再次发生分离,PVDF应力计信号下降到 $0\ \text{MPa}$ ,传力杆前端压头再次对样品进行惯性压缩,在 $t=0.8\ \text{ms}$ 附近第二次惯性压缩结束,压头停止运动。随后由于射弹及盖帽动能的降低,速度和压力信号不再发生大的跳跃,在 $0.8\ \text{ms}$ 以后速度信号发生数次小的跳跃,且每一次的跳跃幅值逐渐减低。对第2发实验而言,应力信号在 $t=1.25\ \text{ms}$ 附近发生第5次跳跃,应力幅值约 $150\ \text{MPa}$ ,样品在此次跳跃过程中发生第1次点火(图4(i))。大约在 $200\ \mu\text{s}$ 后,压头与缝隙发生接触碰撞,应力发生第6次跳跃,幅值约 $200\ \text{MPa}$ ,样品在本次跳跃过程中发生第2次点火。

### 3 压实效应

从前面的分析看出,两发实验的点火都发生在 $t>500\ \mu\text{s}$ ,即造型粉压实之后,在造型粉压实之前,仅靠颗粒之间的挤压摩擦不足以引发点火。为研究压实效应对点火的影响,需要降低样品进入缝隙的流量,即减小缝隙面积同样品腔截面积的比值(定义为 $s$ )<sup>[22]</sup>,使样品在压实之前不至于大量挤入缝隙。从图1(b)看出,对于矩形缝隙, $s=d/L$ 为线性关系,由于加工精度的限制,缝隙宽度 $d$ 值在小于 $0.2\ \text{mm}$ 后会出现加工困难,因此矩形缝隙难以获得小的 $s$ 值。对于图1(b)实验而言, $s=0.6/7=8.6\%$ 。

为进一步降低 $s$ 的值,设计了圆形缝隙及样品,如图8(a)所示。从图中看出,缝隙直径为 $\varphi$ ,造型粉样品填充半径为 $R$ ,缝隙面积和样品截面积的比值为 $s=(\varphi/2R)^2$ ,为平方关系。结合图1(b)看出,对于同样大小的样品( $L=2R$ )和缝隙尺寸( $d=\varphi$ ),图8(a)可以获得比图1(b)小得多的 $s$ 值。为避免实验中样品从压头侧面的缝隙挤出,在样品侧面包裹一聚四氟乙烯套环,图8(b)显示了造型粉样品在套环内的填充情况,套环内径为 $2R$ ,高度为 $H$ 。

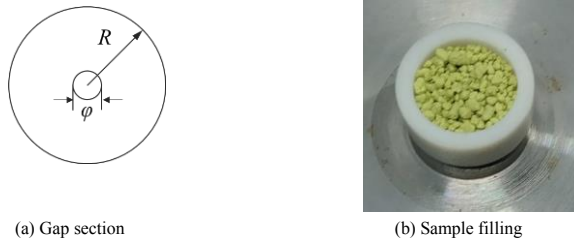


图 8 样品安装情况  
Fig.8 Sample installation

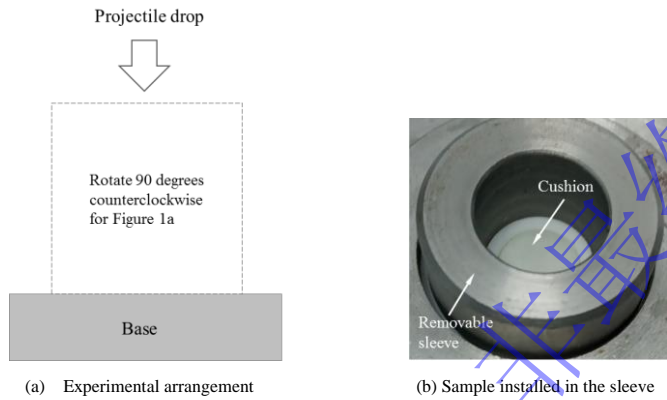


图 9 射弹跌落加载实验  
Fig.9 Projectile drop loading experiment

为保证压实效果，实验中增加了射弹质量和尺寸，加载采用吊装跌落<sup>[23-25]</sup>的方式进行，实验装置如图 9(a)所示。从图 9(a)看出，底座(Base)与地面固接，将图 1(a)装置逆时针旋转 90°，通过螺栓将其与底座连接，实验装置上方为吊装好的射弹。本实验中由于缝隙和样品变成了圆柱形，对图 1(a)实验装置进行了一定改进，传力杆从 3 段变为 2 段，第 1 段保持不变，第 2 段直径减小变为圆柱形压头，无第 3 段。为方便拆卸，造型粉样品(图 8(b))不直接放进样品腔，而是在样品腔内部安装一可拆卸的金属套筒(Removable sleeve)，造型粉样品安装在金属套筒内，套筒内径略大于压头直径，样品表面覆盖厚度 1 mm 的聚四氟乙烯垫层(Cushion)(图 9(b))，装置的其余部分保持不变。

实验中，样品安装尺寸为  $R=5\text{ mm}$ ， $H=6\text{ mm}$ ，由于样品表面垫层厚度为 1 mm，因此造型粉实际填充高度为 5 mm，缝隙尺寸  $\varphi=1\text{ mm}$ 。射弹材料为钢，尺寸为  $\varphi 90\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ ，质量约 10 kg，射弹跌落高度为 1 m，撞击速度约为 4.5 m/s，实验结果如图 10 所示。从图 10 中看出，在挤压应力的作用下，造型粉仅发生压实变形，未发生点火反应，样品未从缝隙中挤出，传力杆表面未见炸药粉末溅射痕迹。





图 10 实验回收情况  
Fig.10 Recovery of experiment

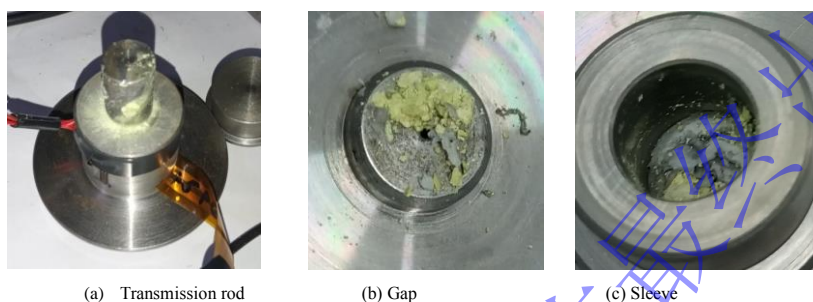


图 11 样品二次加载回收情况  
Fig.11 Recovery of sample after secondary loading

不对图 10 中的回收套筒和样品进行拆卸,而是进行二次装载,开展再加载实验,射弹跌落高度和缝隙尺寸不变,实验结果如图 11 所示。从图 11 看出,二次加载下样品发生点火,压头上可见炸药粉末溅射痕迹,缝隙附近无块状残留炸药,仅存少许炸药碎片,聚四氟乙烯环和垫层发生扭曲大变形(图 11(c)),表面可见烧蚀痕迹,颜色发黑,实验现场听到剧烈爆炸声响。

对比图 3、图 7(a)和图 11 的结果可以看出,图 3 中造型粉在  $t=346 \mu\text{s}$  压实后,压头处于减速阶段,随后压头速度降低为 0,在  $t=550 \mu\text{s}$  附近压头速度发生第二次跳跃,跳跃速度在 15 m/s 水平,样品在该阶段发生点火。图 11 中,使压实后造型粉发生点火的射弹撞击速度仅 4.5 m/s,不足图 7(a)中速度二次跳跃峰值的 1/3,这说明,压实效应对造型粉的点火具有重要影响,缝隙挤压加载下,压实后造型粉的点火速度阈值明显低于压实前。事实上,造成点火的内在原因是单位时间能量局域化,用数学公式表达是  $dW/dt=FV$ ,其中  $W$  是能量,  $t$  是时间,  $F$  是作用力,  $V$  是速度。压实效应通过减小颗粒之间的空隙使平均作用力  $F$  显著增加,乘积  $FV$  也随之增大,从而引发点火。

#### 4 结论

本文采用造型粉模拟因碰撞过程极度碎化的压装炸药,开展了 PBX 造型粉缝隙挤压加载实验。采用涂抹油脂和垫层包裹的方式对样品进行密封,避免除缝隙外样品存在其他流动通道,通过聚偏氟乙烯(PVDF)压力传感器和光子多普勒测速(PDV)获得了加载过程中的应力和速度历程,采用高速摄影记录了造型粉缝隙挤压过程中的反应情况。通过调控缝隙面积和样品截面积的比例控制样品的流量,研究了压实效应对点火的影响。主要结论如下:

(1) 对于无油脂密封的情况,加载开始后 PBX 造型粉先历经颗粒破碎和压实,压实的造型粉在同垫层

的相互作用过程中发生点火, 点火位置在炸药与垫层界面。

- (2) 对于有油脂密封的情况, 样品压实后形成“楔形”滑移区, 滑移区外围为死区, 两区之间为滑移面。随后变形模式从“单楔形”滑移区演化为“双楔形”滑移区, 滑移区-死区界面剪切效应未引发点火。当压头行进到接近缝隙表面时, “楔形”滑移区消失, 炸药因剪切摩擦效应在缝隙入口处发生点火。加载后期压头与缝隙发生碰撞, 残留在缝隙外部的炸药在碰撞力的作用下发生二次点火, 点火位置在压头边角处。
- (3) 缝隙挤压加载下, PBX 造型粉的点火速度阈值随压实程度的增加而降低, 本工作试验条件下, 压实后的造型粉在 4.5 m/s 撞击速度下即可导致点火。

## 参考文献

- [1] 刘晨. 基于数字图像相关方法的 PBX 断裂行为研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2016  
LIU C. Study on fracture behavior of PBX based on digital image correlation method [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2016
- [2] 巩天元. 冲击载荷下 PBX 损伤与断裂行为研究 [D]. 太原: 中北大学, 2023  
GONG T Y. Research on the damage and fracture behavior of PBX under impact load [D]. Taiyuan: North University of China, 2023
- [3] 杨存丰, 田勇, 张伟斌, 等. 基于 X 射线显微 CT 的 PBX 热冲击损伤特征[J]. 含能材料, 2022, 30(9):959-965. DOI: 10.11943/CJEM2021247.  
YANG C F, TIAN Y, ZHANG W B, et al. Thermal shock damage characteristics of Polymer Bonded Explosive based on X-ray micro-computed tomography [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2022, 30(9):959-965. DOI: 10.11943/CJEM2021247
- [4] 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 J L. Study on PBX's mechanical behavior and damage feature [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012
- [5] 高霞, 赵天波, 郑保辉, 等. 不同壁材石蜡微胶囊与 HTPB 型黏结剂的表界面研究 [J]. 火炸药学报, 2020, 43(2):161-166. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.201905012  
GAO X, ZHAO T B, ZHENG B H, et al. Surface and interface study on the MePWs with different shells and HTPB-type binder [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2020, 43(2):161-166. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.201905012
- [6] 陈世雄, 钱华, 芮久后, 等. 高品质 RDX 的抗压性能研究 [J]. 爆破器材, 2023, 52(6):1-8. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2023.06.001  
CHEN S X, QIAN H, RUI J H, et al. Research on the compressive performance of H-RDX [J]. Explosive Materials, 2023, 52(6):1-8. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2023.06.001
- [7] 张催. 基于 CT 成像的炸药造型颗粒集特征参量表征方法: ZWCF-2021-050 [R]. 绵阳: 中国工程物理研究院化工材料研究所, 2022  
ZHANG C. Characterization method of characteristic parameters of explosive modeling particle set based on CT imaging: ZWCF-2021-050 [R]. Mianyang: Institute of Chemical Materials, CAEP, 2022
- [8] 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. DOI: 10.11943/CJEM2020170  
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. DOI: 10.11943/CJEM2020170
- [9] YANG K, DONG L Y, WU Y Q. Viscous shear flow and heating of impact-extruded composite energetic materials [J].

- International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 258:108588. DOI: [10.1016/j.ijmecsci.2023.108588](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108588)
- [10] 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. DOI: [10.14077/j.issn.1007-7812.201901003](https://doi.org/10.14077/j.issn.1007-7812.201901003)  
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 & Propellants, 2020, 43(1): 69-73. DOI: [10.14077/j.issn.1007-7812.201901003](https://doi.org/10.14077/j.issn.1007-7812.201901003)
- [11] 胡秋实, 尚海林, 吴兆奎, 等. PBX 炸药缝隙挤压加载下的破裂模式及点火响应 [J]. 兵工学报, 2024, 45(9): 3135-3146. DOI: [10.12382/bgxb.2023.0809](https://doi.org/10.12382/bgxb.2023.0809)  
HU Q S, SHANG H L, WU Z K, et al. Fracture mode and ignition response of PBX explosives under crack extrusion loading [J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(9): 3135-3146. DOI: [10.12382/bgxb.2023.0809](https://doi.org/10.12382/bgxb.2023.0809)
- [12] 董军, 王晶禹, 梁磊, 等. LLM-105/EPDM 造型粉的制备及性能 [J]. 火炸药学报, 2009, 32(5): 14-17. DOI: [10.3969/j.issn.1007-7812.2009.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-7812.2009.05.005)  
DONG J, WANG J Y, LIANG L, et al. Preparation and properties of LLM-105/EPDM molding powders [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2009, 32(5): 14-17. DOI: [10.3969/j.issn.1007-7812.2009.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-7812.2009.05.005)
- [13] 牛磊, 曹少庭, 金大勇, 等. 含  $\alpha$ -AlH<sub>3</sub> 的 HMX 基凝聚相炸药的安全性和爆轰性能[J]. 含能材料, 2021, 29(10): 957-963. DOI: [10.11943/CJEM2021079](https://doi.org/10.11943/CJEM2021079)  
NIU L, CAO S T, JIN D Y, et al. Safety and detonation performance of HMX-based condensed phase explosives containing  $\alpha$ -AlH<sub>3</sub> [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(10): 957-963. DOI: [10.11943/CJEM2021079](https://doi.org/10.11943/CJEM2021079)
- [14] 刘意, 朱瑞, 时嘉辉, 等. 液滴微流控技术制备亚微米级 HNS 基 PBX 复合微球[J]. 含能材料, 2023, 31(2): 121-129. DOI: [10.11943/CJEM2022184](https://doi.org/10.11943/CJEM2022184)  
LIU Y, ZHU R, SHI J H, et al. Preparation of submicron HNS-based PBX composite microspheres by droplet microfluidics [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2023, 31(2): 121-129. DOI: [10.11943/CJEM2022184](https://doi.org/10.11943/CJEM2022184)
- [15] 朱玉宇, 霍宏彪, 王杰超, 等. NC/F<sub>2602</sub>/RDX 复合微球悬浮组装成型及其性能研究 [J]. 火工品, 2023(1): 58-62. DOI: [10.3969/j.issn.1003-1480.2023.01.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-1480.2023.01.012)  
ZHU Y Y, HUO H B, WANG J C, et al. The suspension assembly and properties of NC/F<sub>2602</sub>/RDX composite microspheres [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2023(1): 58-62. DOI: [10.3969/j.issn.1003-1480.2023.01.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-1480.2023.01.012)
- [16] 谢林, 刘迎彬, 范志强, 等. 基于复合压电效应的 PVDF 传感器测量性能调控 [J]. 高压物理学报, 2023, 37(4): 043401. DOI: [10.11858/gywlyxb.20230645](https://doi.org/10.11858/gywlyxb.20230645)  
XIE L, LIU Y B, FAN Z Q, et al. Measurement performance regulation of PVDF sensor based on composite piezoelectricity [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(4): 043401. DOI: [10.11858/gywlyxb.20230645](https://doi.org/10.11858/gywlyxb.20230645)
- [17] 刘昊. 基于光纤干涉降频技术的高速测量系统研究 [D]. 太原: 中北大学, 2023  
LIU H. Research on high-speed measurement system based on fiber optic interference frequency reduction technology [D]. Taiyuan: North University of China, 2023
- [18] 王琦, 智小琦, 肖游, 等. 基于 UCM 模型的 B 炸药慢烤泄压结构的作用分析 [J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(4): 042301. DOI: [10.11883/bzycj-2021-0253](https://doi.org/10.11883/bzycj-2021-0253)  
WANG Q, ZHI X Q, XIAO Y, et al. Analysis of the effect of a venting structure on slow cookoff of Comp-B based on a universal cookoff model [J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(4): 042301. DOI: [10.11883/bzycj-2021-0253](https://doi.org/10.11883/bzycj-2021-0253)
- [19] 王平. 金属塑性成形力学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006  
WANG P. Mechanics of metal plastic forming [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006
- [20] 郝鹏程, 冯其京, 洪滔, 等. 钝感炸药点火增长模型的欧拉数值模拟 [J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(3): 243-250. DOI: [10.3969/j.issn.1001-1455.2012.03.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1455.2012.03.004)  
HAO P C, FENG Q J, HONG T, et al. Eulerian simulation on insensitive explosives with the ignition-growth reactive model [J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(3): 243-250. DOI: [10.3969/j.issn.1001-1455.2012.03.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1455.2012.03.004)
- [21] 孙承纬. 应用爆轰物理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.

- SUN C W. Applied detonation physics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000.
- [22] WEN H N, TANG X F, JIN J S. Effect of extrusion ratios on microstructure evolution and strengthening mechanisms of a novel P/M nickel-based superalloy [J]. Materials Science & Engineering A, 2022, 847:143356. DOI: [10.1016/j.msea.2022.143356](https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143356)
- [23] NEWHALL K A, DURIAN D J. Projectile-shape dependence of impact craters in loose granular media [J]. Physical Review E, 2003, 68: 060301. DOI: [10.1103/PhysRevE.68.060301](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.68.060301)
- [24] EGAWA K, KATSURAGI H. Bouncing of a projectile impacting a dense potato-starch suspension layer [J]. Physics of Fluids, 2019, 31: 053304. DOI: [10.1063/1.5095678](https://doi.org/10.1063/1.5095678)
- [25] DINOVIETZER H A, LARONCHE A, ALBERT J. Fiber Bragg Grating high impact force sensors with adjustable sensitivity and dynamic range [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(14):5670-5679. DOI: [10.1109/JSEN.2019.2907867](https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2907867)

录用稿件，

非最终出版稿