

# 一种 PETN 基超薄片炸药的爆轰性能及比冲量特性\*

郭志昀, 卢强, 丁洋, 张亮永, 李进

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘要:** 薄片炸药加载技术是实验室考核 X 射线辐照下空间结构动态响应的重要手段。为实现新型空间飞行器结构考核所需的超低比冲量化爆加载载荷, 研制了以 PETN 为主炸药、以高聚物橡胶为黏结剂的超薄片炸药。薄片炸药的 PETN 质量分数为 90%~92%, 厚度范围为 0.15~0.50 mm, 密度范围为 1.63~1.68 g/cm<sup>3</sup>, 爆速范围为 7.44~7.71 km/s。基于炸痕法的爆轰性能实验结果表明: 厚度为 0.15~0.50 mm 的薄片炸药可由装药线密度为 0.2 g/m 的柔爆索可靠引爆, 厚度为 0.20~0.50 mm 的炸药条均能可靠传爆。利用冲击摆测量装置对不同直径、不同厚度薄片炸药的比冲量特性进行了测试研究, 结合理论分析, 给出薄片炸药比冲量和厚度成正比, 比例系数为 3418.56 Pa·s/mm, 成功实现了厚 0.2 mm、约 680 Pa·s 超薄片炸药的研制。

**关键词:** 超薄片炸药; PETN; 柔爆索; 爆轰性能; 比冲量

中图分类号: O389

国标学科代码: 13035

文献标识码: A

## Detonation performance and specific impulse characteristics of a PETN-based ultra-thin sheet explosive

GUO Zhiyun, LU Qiang, DING Yang, ZHANG LiangYong, LI Jin

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China)

**Abstract:** The sheet explosive loading technology is the main method to evaluate the dynamic response of the space structure under the X-ray radiation in laboratory. In order to realize the explosive loading with ultra-low specific impulse for structural examination of new space vehicles, the sheet explosive using PETN as the main explosive and polymer rubber as the binder has been developed. The mass fraction of PETN is 90%~92%, the thickness range is 0.15~0.20 mm, the density range is 1.63~1.68 g/cm<sup>3</sup> and the explosive velocity range is 7.44~7.71 km/s. In order to verify the high-impact initiation sensitivity of the sheet explosive, three rounds of verification experiments were designed based on the blast marketing method. In the experiment, the sheet explosive was directly applied to the effect plate or a certain air gap was reserved between the sheet explosive and the effect plate. By observing the explosive marks formed after the explosion on the effect plate, it is judged whether the explosive is detonated. The experimental results show that: the sheet explosive with thickness of 0.15~0.50 mm can be reliably detonated by the mild detonating fuse with a charge line density of 0.2g/m, explosive strips with thickness of 0.20~0.50 mm can reliably transmit detonation. The specific impulse characteristic of the sheet explosive with different diameter and thickness was measured and studied by the impact pendulum measuring device. The specific impulse calculation model of sheet explosive was used to perform polynomial fitting on the specific impulse direct measurement data of sheet explosives with thicknesses of 0.2 mm, 0.3 mm, 0.4 mm and 0.5 mm, respectively. The specific impulse values of sheet explosives with four thicknesses were

\*收稿日期: 2024-05-13; 修回日期: 2024-09-23;

第一作者: 郭志昀 (1985-), 男, 硕士, 助理研究员. E-mail: guozhiyun@nint.ac.cn;

通信作者: 卢强 (1984-), 男, 博士, 副研究员. E-mail: luqiang@nint.ac.cn.

obtained and linearly fitted. The results show that: the specific impulse of the sheet explosive is proportional to the thickness and the ratio coefficient is 3418.56 Pa·s/mm. The development of ultra-thin sheet explosive with a thickness of 0.2 mm and a specific impulse of about 680 Pa·s has been successfully realized.

**Keywords:** ultra-thin sheet explosive; PETN; mild detonating fuse; detonation performance; specific impulse

当强脉冲 X 射线作用到空间飞行器结构表面时, 会导致表层材料熔化、汽化, 产生物质反冲喷射现象, 继而形成作用在飞行器结构表面的反向喷射冲量载荷, 引起结构的动态响应<sup>[1-2]</sup>。在缺少大型 X 射线模拟源的情形下, 利用化爆加载技术产生冲量载荷对结构进行冲击加载, 是实验室考核 X 射线辐照下空间结构动态响应的重要手段之一<sup>[3]</sup>。目前公开报道的文献中, 化爆加载技术主要包括柔爆索<sup>[4-6]</sup>、薄片炸药<sup>[7-13]</sup>和光敏炸药<sup>[14-17]</sup>等加载手段, 其中薄片炸药加载是由布设在试件表面的炸药条或炸药片爆炸产生冲量载荷, 具有加载灵活、实施简便、成本低等优点, 在国内外得到了广泛的应用。

Alzheimer 等<sup>[7]</sup>、Lindberg 等<sup>[8]</sup>和 Franklin<sup>[9]</sup>通过在结构表面附近布设离散的炸药条阵列, 开展了典型壳体结构动态响应的实验研究。毛勇建等<sup>[10-12]</sup>用 19 个炸药条阵列设计了余弦载荷, 对典型圆柱壳开展了系统的数值模拟研究和验证实验, 对比了标准余弦载荷和设计载荷下圆柱壳结构响应的一致性, 证明了离散薄片炸药条阵列的加载设计满足结构抗强脉冲 X 射线考核的要求。丁洋等<sup>[13]</sup>为解决传统炸药条滑移爆轰加载存在的问题, 基于柔爆索引爆薄片炸药的方法, 采用十字形药条离散群同步起爆实现了低比冲量的高同步性、高均匀度加载, 结果表明各十字形药条起爆同步性误差小于 1 μs; 与炸药条滑移爆轰加载方式相比, 布药空间均匀度提高 76.7%。

随着新型空间飞行器防护技术的发展, 强脉冲 X 射线在飞行器结构表面沉积大幅降低, 使得结构表面产生的冲击载荷强度降低, 需发展新的超低比冲量载荷加载考核技术, 以满足新型飞行器抗 X 射线的结构优化设计及指标考核需求。为进一步降低和精密调控载荷强度, 可通过改变薄片炸药配方, 调整黏结剂、增塑剂等添加剂含量, 研制新型爆轰性能良好、比冲量低的挠性超薄片炸药, 以满足低比冲量载荷环境的设计要求。

在薄片炸药研制及性能研究方面, 刘瑶等<sup>[18]</sup>以 PETN 为主炸药、以硫化硅橡胶为黏结剂研制了临界厚度为 0.4 mm 的薄片炸药 (厚 0.6mm 片炸药爆速为 6.85 km/s), 重点开展了机械感度和爆速测定。黄亨建等<sup>[19]</sup>以 PETN 为主炸药、以聚氨酯和硅橡胶为黏结剂, 采用碾压成型方法获得了临界传爆厚度为 0.3 mm、可靠传爆厚度为 0.38 mm 的薄片炸药, 其爆速为 7.15 km/s、比冲量为 1200 Pa·s, 并用最小二乘法拟合得到比冲量  $I$  与厚度  $d$  的线性变化经验公式为  $I = 360.8 + 2107.8d$ 。林鹏等<sup>[20]</sup>对不同厚度薄片炸药加载不同基底材料接触爆炸的冲量加载进行了一维数值模拟计算, 并采用自行研制的直线运动式冲量探头测得一种 0.4 mm 厚度薄片炸药的比冲量为 1234 Pa·s, 计算结果表明薄片炸药比冲量与厚度成比例增加关系。岳晓红等<sup>[21]</sup>采用自行研制的摆锤结构测得 0.36 mm、0.38 mm 厚度薄片炸药的比冲量分别为 1072.4 Pa·s 和 1130.4 Pa·s。卢强等<sup>[22]</sup>采用数值模拟技术, 研究了柔爆索单点起爆下薄片炸药比冲量的分析方法, 给出尺寸效应和边界稀疏效应对薄片炸药比冲量测试的影响, 提出了薄片炸药比冲量与炸药直径的经验拟合公式。

从上述调研结果看, 目前薄片炸药的比冲量大都在 1000Pa·s 以上。为研制更低比冲量的薄片炸药, 本文通过优化炸药配方和压制工艺, 研制了可由装药线密度为 0.2 g/m 的柔爆索可靠引爆的超薄片炸药 (厚度最小至 0.15 mm), 并就薄片炸药的基本性质、爆轰性能和比冲量特性进行了详细测试和研究, 为实现空间结构抗强脉冲 X 射线毁伤能力考核提供重要加载工具。

## 1 薄片炸药配方及基本性质

为研制出爆轰性能良好的超薄片炸药，选用常见单质炸药中感度较高的 PETN 作为主炸药。为进一步提高薄片炸药的冲击起爆感度，采用重结晶法对 PETN 原料进行细化提纯，得到平均粒度为 5  $\mu\text{m}$ 、纯度超过 99.9% 的超细 PETN 粉体，并用作超薄片炸药的主炸药。

在选择黏结剂时，探索了氟橡胶、硅橡胶及高聚物橡胶等三种黏结剂配方的挠性炸药，PETN 含量为 90%~92%。氟橡胶由于黏结性能较差，压制的薄片炸药难以成型，炸药分层现象较为突出；硅橡胶由于强度较低、黏结性能较差，压制的薄片炸药弹性不够且强度较低；高聚物橡胶由于具有良好的弹性、强度和黏结性能，对炸药颗粒的包覆性能也较好，压制的薄片炸药具有良好的曲挠性和强度，因此，最终选择高聚物橡胶作为黏结剂。同时，通过加入一种分散性和润滑性均较好的高分子材料作为增强剂，进一步提升了薄片炸药成品的强度。

超薄片炸药经过“称量、塑炼、溶胶、混合、压制、晾干”等多道工序制备而成，厚度范围为 0.15~0.50 mm，受限于开炼机辊轮宽度，目前最大宽度为 33 cm，长度最长可达 2 m，炸药成品如图 1 所示。该薄片炸药具有良好的强度和曲挠性，可任意弯曲并可用普通裁纸刀或单面刀片任意切割成柔软的条状、片状以及其它特异形状。

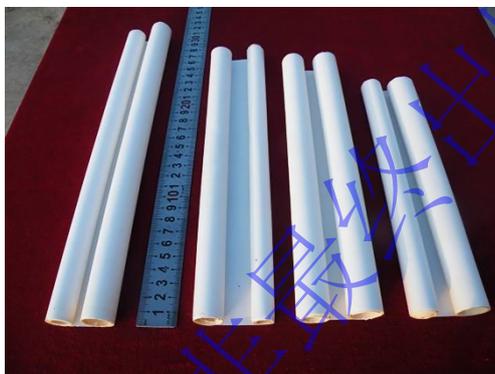


图 1 薄片炸药

Fig.1 The sheet explosive

从某次制备的两种整片超薄片炸药（PETN 含量分别为 90% 和 92%）中，随机选择不同位置切割 5 片  $\Phi 50\text{ mm}$  的圆片，利用精密天平测量质量，得到炸药的密度数据如表 1 所示。由表 1 可知，超薄片炸药的密度范围为 1.63~1.68  $\text{g}/\text{cm}^3$ ，密度变化与炸药厚度和 PETN 含量密切相关，整体上呈现随炸药厚度减小而增大、随 PETN 含量增加而增大的趋势。这是由于薄片炸药厚度越小，需要压制的次数越多，用于溶解橡胶的溶剂挥发越充分，炸药越密实。

表 1 超薄片炸药密度测量数据

Table 1 The density measurement data of sheet explosive

| PETN 含量/<br>% | 炸药厚度<br>/mm | 测量密度 1<br>/ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | 测量密度 2<br>/ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | 测量密度 3<br>/ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | 平均密度<br>/ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) |
|---------------|-------------|--|--|--|--------------------------------------|
| 90            | 0.20        | 1.67                                   | 1.65                                   | 1.66                                   | 1.66                                 |
|               | 0.30        | 1.65                                   | 1.64                                   | 1.64                                   | 1.64                                 |
|               | 0.40        | 1.63                                   | 1.64                                   | 1.63                                   | 1.63                                 |
| 92            | 0.20        | 1.68                                   | 1.69                                   | 1.67                                   | 1.68                                 |
|               | 0.30        | 1.66                                   | 1.66                                   | 1.65                                   | 1.66                                 |
|               | 0.40        | 1.64                                   | 1.64                                   | 1.63                                   | 1.64                                 |

对上述两种炸药，每种厚度都进行了爆速测量。测量时将薄片炸药裁成约 2 mm 宽、1000mm 长的条状，贴敷在铝板上，每隔约 200mm 设置一个电探针，共 4 个测点，获得 3 个间隔内炸药的爆速，结果如表 2 所示。由表 2 可知，研制的薄片炸药爆速范围为 7.44~7.71  $\text{km}/\text{s}$ ；在同一厚度下，3

个间隔内炸药爆速基本一致，说明炸药条发生了稳定的爆轰传播。根据炸药爆轰的基本规律<sup>[23]</sup>，受尺寸效应影响，同密度下炸药越薄其爆速越低；同类炸药的密度越大，爆速越高。表 2 给出的炸药条爆速随着炸药厚度的增加而减小，这和基本规律不符，主要原因是炸药爆速同时受炸药厚度和炸药密度的影响，本文情况下，密度大对炸药爆速的提升效应大于厚度小对炸药爆速的减弱作用。

表 2 超薄片炸药爆速测量数据

Table 1 The detonation velocity measurement data of sheet explosive

| PETN 含量/<br>% | 炸药厚度<br>/mm | 测量爆速 1<br>/ (km/s) | 测量爆速 2<br>/ (km/s) | 测量爆速 3<br>/ (km/s) | 平均爆速<br>/ (km/s) |
|---------------|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| 90            | 0.20        | 7.63               | 7.61               | 7.65               | 7.63             |
|               | 0.30        | 7.55               | 7.53               | 7.54               | 7.54             |
|               | 0.40        | 7.41               | 7.43               | 7.47               | 7.44             |
| 92            | 0.20        | 7.69               | 7.68               | 7.75               | 7.71             |
|               | 0.30        | 7.65               | 7.63               | 7.68               | 7.65             |
|               | 0.40        | 7.53               | 7.52               | 7.54               | 7.53             |

需要说明的是，薄片炸药的 PETN 含量越低，黏结剂及增强剂含量越高，薄片炸药的曲挠性、弹性及强度等力学性能越好，且更易实现低比冲量加载载荷，故重点对 PETN 含量为 90% 的薄片炸药爆轰性能和比冲量特性开展了研究。

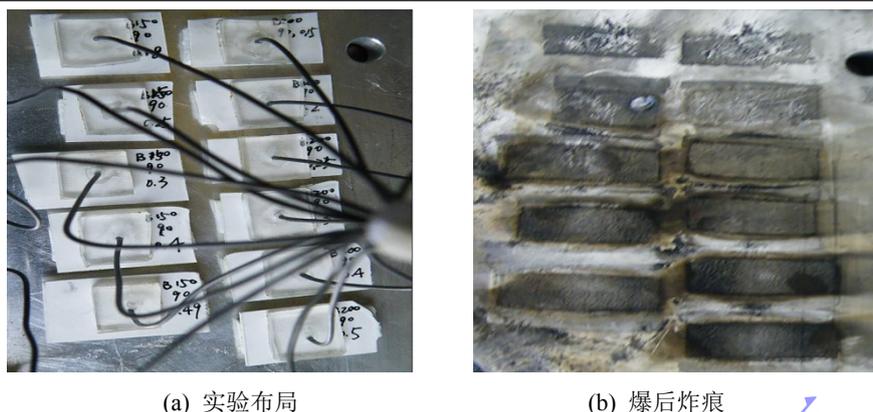
## 2 爆轰性能实验研究

### 2.1 起爆性能实验研究

为验证 PETN 基超薄片炸药的高冲击起爆感度，基于炸痕法设计了三轮次验证实验。实验采用柔爆索直顶并起爆薄片炸药（柔爆索由简易有机玻璃座固定），起爆方式分两种：贴缚加载方式起爆和悬空加载方式起爆。贴敷加载方式下，首先用双面胶将薄片炸药粘贴于铝板表面，两者之间未留空气间隙，然后将连接有柔爆索的有机玻璃座通过双面胶与薄片炸药相连，该情形下柔爆索与薄片炸药安装工艺相对简单且连接较为紧密、不易分离；悬空加载方式下，薄片炸药两端用有机玻璃固定支撑，薄片炸药中间部分与铝板之间留有约 3 mm 的空气间隙，安装工艺相对较为复杂，且由于炸药中间部分自由度较大，易导致柔爆索与炸药连接不够紧密甚至出现脱离的情形。再者，与悬空加载方式相比，贴敷加载方式下铝板的约束和爆轰波反射更强，故从能量和柔爆索安装工艺的角度分析，贴缚加载方式下炸药比较容易起爆，而悬空加载方式下炸药起爆的难度将大大增加。

实验中，通过观察效应板上爆后形成的炸痕判断该处炸药是否起爆。实验选用装药线密度分别为 0.2 g/m 和 0.3 g/m 的  $\Phi 1$  mm 定制铅皮柔爆索，其装药为 RDX；薄片炸药的 PETN 含量为 90%，厚度范围为 0.15~0.50 mm，长度范围为 2~3 cm，宽度范围为 1~1.5 cm。

图 2 为贴缚加载方式下炸药起爆性能第一次验证实验的布局及爆后炸痕情形。炸药的厚度范围为 0.15~0.50 mm，共 11 片炸药，均直接贴敷在铝板上。炸药均由装药线密度为 0.3 g/m 的柔爆索引爆。由图 2 (b) 的爆后炸痕情况可看出，所有的炸药均被引爆。



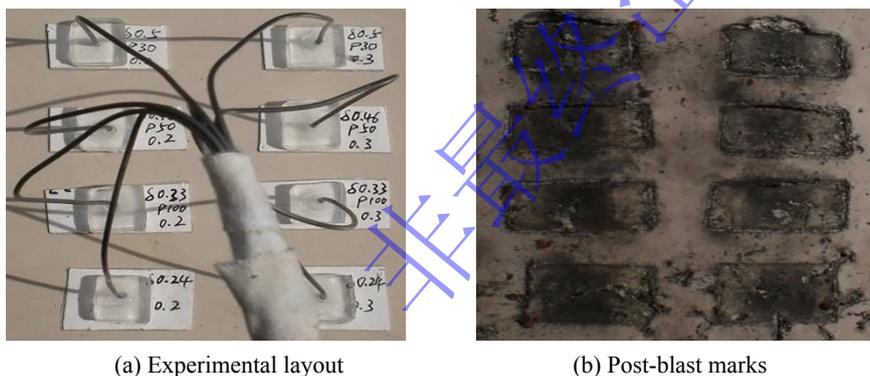
(a) 实验布局

(b) 爆后炸痕

图2 薄片炸药起爆性能第一次实验

Fig.2 The first experiment on the initiation properties of sheet explosive

图3为贴缚加载方式下薄片炸药起爆性能第二次验证实验的布局及爆后炸痕情形。炸药的厚度分别为0.24 mm、0.33 mm、0.46 mm及0.50 mm，每种厚度各2片，共8片炸药，所有炸药均直接贴敷在真空橡胶板上。图3(a)中左右两排的炸药分别由装药线密度为0.2 g/m和0.3 g/m的柔爆索引爆。由图3(b)的爆轰炸痕情况可看出，所有的炸药均被引爆。



(a) Experimental layout

(b) Post-blast marks

图3 薄片炸药起爆性能第二次实验

Fig.3 The second experiment on the initiation properties of sheet explosive

图4为悬空加载方式下柔爆索引爆薄片炸药的实验布局及爆后炸痕情形。薄片炸药的厚度分别为0.33 mm、0.42 mm及0.50 mm，每种厚度各2片，共6片炸药。实验中，每片炸药的两端都粘贴在有机玻璃块上，炸药与底板之间留有约3 mm的空气间隙。图4(a)中左右两排的炸药分别由装药线密度为0.2 g/m和0.3 g/m的柔爆索引爆。由图4(b)的爆后炸痕情况可看出，所有的炸药均被引爆。



(a) Experimental layout

(b) Post-blast marks

图4 薄片炸药起爆性能第三次实验

Fig.4 The third experiment on the initiation properties of sheet explosive

炸药起爆性能验证实验结果表明,所有薄片炸药(共计25片)均被引爆,引爆率为100%,说明装药线密度0.2 g/m和0.3 g/m的柔爆索能可靠引爆厚度为0.15~0.50 mm的薄片炸药,本文研制的PETN基薄片炸药具有较好的冲击起爆感度。

## 2.2 传爆性能实验研究

为保证薄片炸药具有良好的挠性和强度,制备时需加入黏结剂和增强剂,继而影响薄片炸药的感度和临界爆轰尺寸,同时也决定着炸药的传爆性能。为验证薄片炸药具有良好的传爆性能,开展了条状和异形炸药传爆性能验证实验。

条状炸药传爆性能验证实验中,取PETN含量为90%,厚度分别为0.2 mm、0.3 mm、0.4 mm及0.5 mm的薄片炸药,并将其用单面刀片裁成宽度为2 mm的炸药条,长度分别为1.4 m、1.2 m、0.9 m及0.75 m。将裁好的炸药条贴敷在效应板(简易木板)上,在炸药的一端由装药线密度为0.2 g/m的柔爆索同时引爆,如图5(a)所示。爆后炸痕结果如图5(b)所示,通过对比爆后形成的炸痕与爆前炸药条的布局可看出,所有炸药条都被引爆且都传爆至末端。



(a) Experimental layout

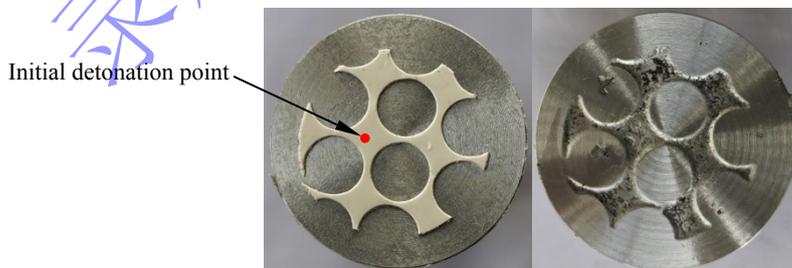


(b) Post-blast marks

图5 薄片炸药传爆性能第一次实验

Fig.5 The first experiment on the detonation propagation performance of sheet explosive

图6显示了异形炸药传爆性能验证实验情形。实验中,在 $\Phi 26$  mm、厚度为0.2 mm、PETN含量为90%的薄片炸药上,用 $\Phi 8$  mm的圆形裁刀将其裁成如图6(a)所示的异形形状,用装药线密度为0.2 g/m的柔爆索将其引爆。图6(b)为爆后炸痕情况,从图中可看出,异形炸药被引爆并传爆至各个尖端。



(a) Experimental layout (b) Post-blast marks

图6 薄片炸药传爆性能第二次实验

Fig.6 The second experiment on the detonation propagation performance of sheet explosive

两次传爆性能实验结果表明，研制的 PETN 基超薄片炸药具有良好的传爆性能。该薄片炸药具有的高冲击起爆感度和良好传爆性能，为实现基于柔爆索引爆薄片炸药的大面阵多点同步起爆加载奠定了基础，已应用于超低比冲量化爆加载实验<sup>[13]</sup>。

### 3 薄片炸药比冲量特性研究

利用薄片炸药加载模拟强脉冲 X 射线辐照空间飞行器结构响应时，需将炸药裁成条状或片状并按一定方式离散布设，方可实现超低比冲量加载，故薄片炸药的比冲量特性是化爆加载实验的关键技术参数，开展薄片炸药的比冲量特性研究，是精确设计化爆载荷分布的前提。

为测量薄片炸药比冲量，研制了基于旋转编码器的冲击摆冲量测量装置，主要由靶组件、摆杆、转轴和旋转编码器组成。系统装配示意图如图 7 所示，具体的测试技术和原理可参考文<sup>[24]</sup>。

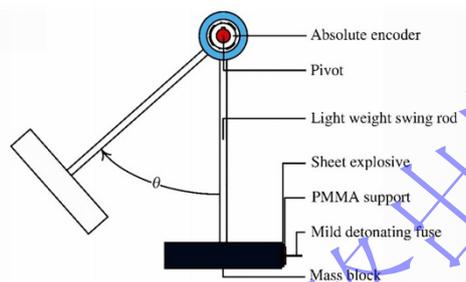


图 7 薄片炸药冲量测量装置<sup>[22]</sup>

Fig.7 Impulse measurement apparatus for sheet explosive<sup>[22]</sup>

实验中，薄片炸药均由装药线密度为 0.2 g/m 的  $\Phi 1$  mm 铅皮柔爆索引爆，柔爆索与薄片炸药由特制的有机玻璃基座连接，并保持每次实验中连接基座均相同，柔爆索、连接基座及薄片炸药装配示意图如图 8 所示。影响比冲量测试精度的主要因素包括柔爆索爆炸、连接基座反射及薄片炸药边界稀疏效应，其中柔爆索爆炸和连接基座反射起到增强效果，薄片炸药边界稀疏效应起到减弱效果<sup>[22]</sup>。

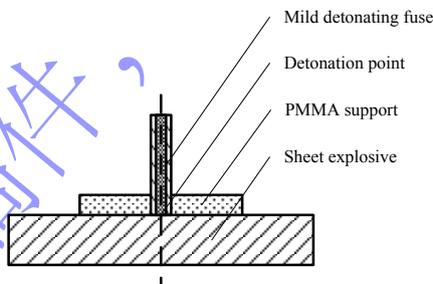


图 8 柔爆索、连接基座及薄片炸药装配示意图<sup>[22]</sup>

Fig.8 Assembly diagram of mild detonating fuse, connecting base and sheet explosive<sup>[22]</sup>

采用 PETN 含量为 90%、0.20~0.50 mm 不同厚度的薄片炸药，共进行了 26 发冲量测量实验，表 3 给出了未消除柔爆索爆炸、连接基座反射和边界稀疏效应影响的比冲量直接测量数据，即冲击摆测得的冲量值与炸药面积的比值。从表 3 中可看出，相同厚度、相同面积的薄片炸药冲量测量值一致性较好，最大偏差仅为 3.2%，表明研制的薄片炸药均匀度及冲量测试系统稳定性均较好。

表 3 薄片炸药比冲量直接测量数据

Table 3 The specific impulse direct measurement data of the sheet explosive

| 实验编号 | 炸药厚度/mm | 炸药直径/mm | 比冲量/(Pa·s) | 比冲量平均值/(Pa·s) |
|------|---------|---------|------------|---------------|
| 1    | 0.20    | 8       | 923.4      | 917.4         |
| 2    | 0.20    | 8       | 911.3      |               |
| 3    | 0.20    | 10      | 762.0      | 762.0         |

爆 炸 与 冲 击  
Explosion and Shock Waves

|    |      |    |        |        |
|----|------|----|--------|--------|
| 4  | 0.20 | 10 | 762.0  |        |
| 5  | 0.20 | 15 | 642.2  | 639.6  |
| 6  | 0.20 | 15 | 637.0  |        |
| 7  | 0.30 | 8  | 1279.9 | 1285.9 |
| 8  | 0.30 | 8  | 1291.8 |        |
| 9  | 0.30 | 10 | 1138.6 | 1134.3 |
| 10 | 0.30 | 10 | 1129.9 |        |
| 11 | 0.30 | 15 | 1024.6 | 1008.7 |
| 12 | 0.30 | 15 | 992.8  |        |
| 13 | 0.36 | 10 | 1434.2 | 1434.2 |
| 14 | 0.36 | 15 | 1280.3 | 1280.3 |
| 15 | 0.40 | 8  | 1639.3 | 1652.3 |
| 16 | 0.40 | 8  | 1665.2 |        |
| 17 | 0.40 | 10 | 1527.9 | 1527.9 |
| 18 | 0.40 | 10 | 1527.9 |        |
| 19 | 0.40 | 15 | 1425.5 | 1419.3 |
| 20 | 0.40 | 15 | 1413.1 |        |
| 21 | 0.50 | 8  | 2027.7 | 2027.7 |
| 22 | 0.50 | 8  | 2027.7 |        |
| 23 | 0.50 | 10 | 1937.5 | 1910.5 |
| 24 | 0.50 | 10 | 1883.4 |        |
| 25 | 0.50 | 15 | 1788.9 | 1792.0 |
| 26 | 0.50 | 15 | 1795.0 |        |

从表 3 还可看出，相同厚度、不同面积的薄片炸药比冲量值并不相同，比冲量随薄片炸药面积的增加有减少的趋势，这实际上反映了柔爆索爆炸、连接基座反射及薄片炸药边界稀疏效应的影响。为进一步提高薄片炸药比冲量测试精度，结合文[22]数值模拟结果，开展了薄片炸药比冲量特性分析。

文[22]通过薄片炸药边界稀疏和连接基座反射对冲量耦合作用的影响相互独立的假定，基于有限元模拟技术给出了特定厚度薄片炸药比冲量的计算模型满足下式：

$$i(\delta, D) = i_0(\delta) - \frac{k(\delta)}{D} + \frac{A(\delta)}{D^2} \quad (1)$$

式中， $i(\delta, D)$  和  $i_0(\delta)$  分别为比冲量测量值和薄片炸药自身比冲量值； $\delta$  和  $D$  分别为薄片炸药的厚度和直径，单位：mm； $k$  和  $A$  是与  $\delta$  相关并在同一  $\delta$  下保持不变的参数。

利用 (1) 式对表 3 中厚度分别为 0.2mm、0.3mm、0.4 mm 和 0.5 mm 薄片炸药比冲量直接测量数据进行多项式拟合，可得出四种厚度的薄片炸药比冲量分别为 685.1 Pa·s、1019.4 Pa·s、1398.4 Pa·s 和 1684.5 Pa·s，拟合结果如图 9 所示。

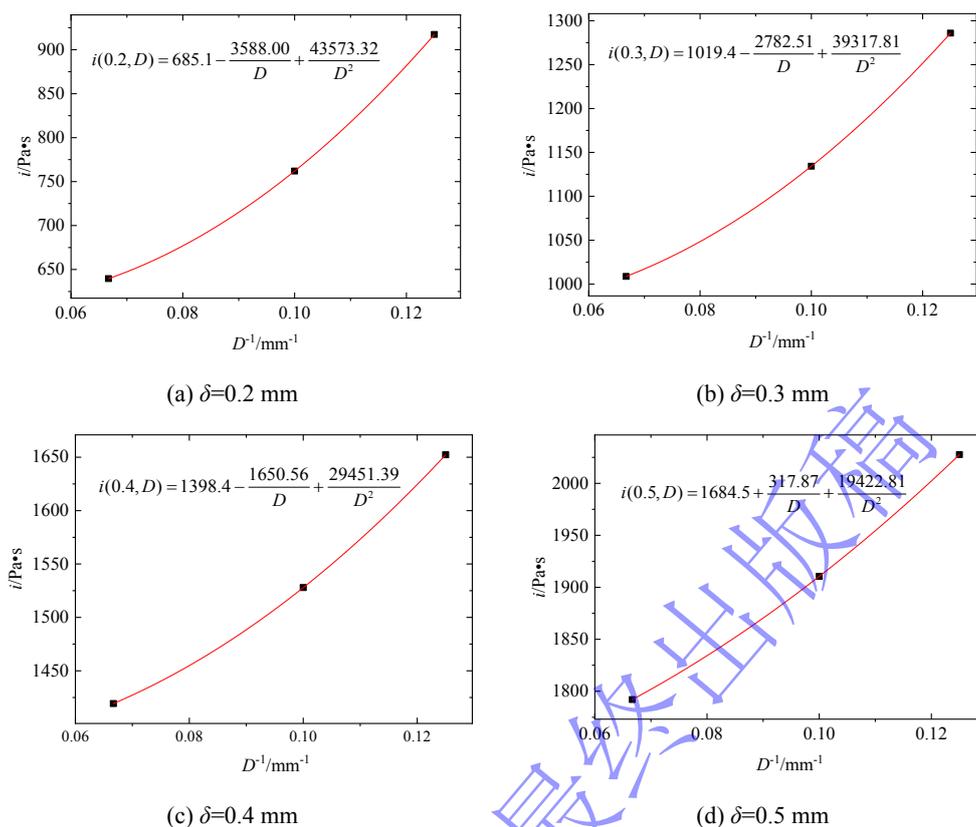


图9 薄片炸药比冲量拟合结果

Fig.9 Fitting results of specific impulse of the sheet explosive

在炸药密度和爆速变化不大时，可近似认为  $i_0(\delta)$  与  $\delta$  成正比，即：

$$i_0(\delta) = \lambda\delta, \quad \lambda \text{ 为常数} \quad (2)$$

利用 (2) 式对 0.2mm、0.3mm、0.4 mm 和 0.5 mm 厚度的比冲量值进行线性拟合（设定截距为 0），拟合结果如图 10 所示，可得  $\lambda$  值为 3415.65，即 (2) 式可表达为：

$$i_0(\delta) = 3415.65\delta \quad (3)$$

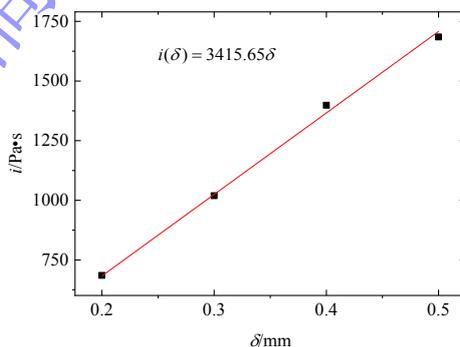


图 10 薄片炸药比冲量随厚度的变化关系

Fig.10 The relationship between the specific impulse and thickness of the sheet explosive

表 4 给出了本文测得的薄片炸药比冲量数据与文[22]数值模拟结果的对比。由表 4 可知，本文三种厚度的薄片炸药比冲量测试数据与文[22]数值模拟结果相对偏差均低于 5%，两者吻合度很高、相互印证，表明比冲量测试结果具有较高的可信度，(3) 式可较为准确地描述薄片炸药比冲量随厚度的变化关系。

表 4 比冲量测试数据与数值模拟结果对比

Table 6 Comparison between specific impulse test data and numerical simulation results

| 炸药厚度/mm | 测试比冲量值/(Pa·s) | 数值模拟比冲量值/(Pa·s) | 相对偏差/% |
|---------|---------------|-----------------|--------|
| 0.20    | 685.1         | 700.2           | 2.2    |
| 0.30    | 1019.4        | 1059.6          | 3.8    |
| 0.50    | 1684.5        | 1770.4          | 4.9    |

## 4 结论

研制了以 PETN 为主炸药、以高聚物橡胶为黏结剂的薄片炸药，对薄片炸药的基本性质、爆轰性能和比冲量特性进行了测试和研究，主要结论如下：

(1) 研制的薄片炸药具有良好的强度和曲挠性，可任意弯曲并可用普通裁纸刀或单面刀片任意切割成条状、片状以及其它特异形状；薄片炸药的 PETN 含量为 90~92%，厚度为 0.15~0.50 mm，密度范围为 1.63~1.68 g/cm<sup>3</sup>，爆速范围为 7.44~7.71 km/s；

(2) 爆轰性能实验结果表明，厚度为 0.15~0.50 mm 的薄片炸药可由装药线密度为 0.2 g/m 的  $\Phi 1$  mm 柔爆索可靠引爆，本文研制的 PETN 基薄片炸药具有较好的冲击起爆感度；厚度范围为 0.20~0.50 mm、宽 2 mm 的炸药条均能可靠传爆；

(3) 比冲量测试结果表明，研制的薄片炸药均匀度及冲量测试系统稳定性均较好，柔爆索爆炸、有机玻璃支座反射和边界稀疏效应对比冲量测试影响较大；

(4) PETN 含量为 90% 的薄片炸药比冲量与厚度的变化关系为  $i_0(\delta) = 3415.65\delta$ 。

本文成功研制了厚 0.2mm、约 680 Pa·s 的超薄片炸药，为实现构型复杂、高同步性和超低比冲量的化爆加载载荷奠定了基础。基于柔爆索引爆薄片炸药的技术思路，通过改变柔爆索长度、薄片炸药布药形状，可简便、快捷实现大面阵、特定空间构型、特定时序的爆炸加载载荷。

## 参考文献

- [1] 周南, 乔登江. 脉冲束辐照材料动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 9-12.
- [2] Longley R W. Analytical relationships for estimating the effects of X-rays on materials: AD-786926 [R]. USA: McDonnell Douglas Astronautics Company, 1974.
- [3] 毛勇建, 邓宏见, 何荣建. 强脉冲软 X 光喷射冲量的几种模拟加载技术[J]. 强度与环境, 2003, 30(2): 55-64. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3919.2003.02.008.  
MAO Y J, DENG H J, HE R J. Several simulation techniques of blow-off impulses by intense pulsed cold X-rays [J]. Structure and Environment Engineering, 2003, 30(2): 55-64. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3919.2003.02.008.
- [4] LINDBERG H E, MURRAY Y. Calibration and analysis of the SPLAT (spray lead at target) impulse simulation technique: DNA-TR-81-333 [R]. USA: Aptek Inc., 1983.
- [5] LINDBERG H E. Deformation ripple from the SPLAT (spray-lead-at-target) impulse simulation technique: AD-A190-861 [R]. USA: Aptek Inc., 1987.
- [6] 赵国民, 张若棋, 彭常贤, 等. 铅壳柔爆索冲量作用下圆柱壳体结构响应实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(2): 126-131. DOI: 10.11883/1001-1455(2002)02-0126-6.  
ZHAO G M, ZHANG R Q, PENG C X, et al. Experimental studies of the structural response of cylindrical shells under mild detonating fuse impulse [J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(2): 126-131. DOI: 10.11883/1001-1455(2002)02-0126-6.

- [7] Alzheimer W E, Forrestal M J. Response of a circular elastic shell to moving and simulations loads [J]. *AIAA Journal*, 1970, 8(5): 970-971.
- [8] LINDBERG H E, Colton J D. Sheet explosive simulation for combined shock and structural response: AFWL-TR-69-124 [R]. USA: Air Force Weapons Laboratory, 1970.
- [9] Franklin B W. Development of a high-energy flexible sheet explosive: AD-786510 [R]. USA: NTIS, 1974.
- [10] 毛勇建, 李玉龙, 陈颖, 等. 炸药条加载圆柱壳的数值模拟(I): 流固耦合模拟[J]. *高压物理学报*, 2012, 26(2): 155-162. DOI: 10.11858/gywlb.2012.02.006.  
MAO Y J, LI Y L, CHEN Y, et al. Numerical simulation of cylindrical shell loaded by explosive rods (I): fluid-structure interaction simulation [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2012, 26(2): 155-162. DOI: 10.11858/gywlb.2012.02.006.
- [11] 毛勇建, 李玉龙, 陈颖, 等. 炸药条加载圆柱壳的数值模拟(II): 解耦分析与试验验证[J]. *高压物理学报*, 2013, 27(1): 76-82. DOI: 10.11858/gywlb.2013.01.011.  
MAO Y J, LI Y L, CHEN Y, et al. Numerical simulation of cylindrical shell loaded by explosive rods (II): decoupling analysis and experimental validation [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2013, 27(1): 76-82. DOI: 10.11858/gywlb.2013.01.011.
- [12] 毛勇建, 李玉龙, 陈颖, 等. 炸药条加载圆柱壳的数值模拟(III): 对 X 射线力学效应的模拟等效性分析[J]. *高压物理学报*, 2013, 27(5): 711-718. DOI: 10.11858/gywlb.2013.05.009.  
MAO Y J, LI Y L, CHEN Y, et al. Numerical simulation of loading cylindrical shell by explosive rods (III): fidelity for simulating X-ray mechanical effect [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2013, 27(5): 711-718. DOI: 10.11858/gywlb.2013.05.009.
- [13] 丁洋, 卢强, 李进, 等. 用十字形超细药条离散群同步起爆实现超低比冲量加载[J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(5): 054101. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0314  
DING Y, LU Q, LI J, et al. Realization of ultra-low specific impulse loading by synchronous initiation of discrete group of cross ultra-fine explosive rods [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(5): 054101. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0314
- [14] Benham R A. Preliminary experiments using light-initiated high explosive for driving thin flyer plates: SAND79-1847 [R]. USA: Sandia National Laboratories, 1980.
- [15] Rivera W G, Benham R A, Duggins B D, et al. Explosive technique for impulse loading of space structures: SAND99-3175C [R]. USA: Sandia National Laboratories, 1999.
- [16] 徐海斌, 杨军, 许可, 等. 光辐射起爆乙炔银-硝酸银光敏炸药同步性能[J]. *兵工学报*, 2022, 43(11): 2791-2797. DOI: 10.12382/bgxb.2021.0611  
XU H B, YANG J, WU K, et al. Simultaneous initiation of light-initiated explosive silver acetylide-silver nitrate [J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(11): 2791-2797. DOI: 10.12382/bgxb.2021.0611
- [17] 随亚光, 陈博, 徐海斌, 等. 光敏炸药加载实验中的电磁干扰防护技术[J]. *现代应用物理*, 2019, 10(2): 021203. DOI: 10.12061/j.issn.2095-6223.2019.021203  
SUI Y G, CHEN B, XU H B, et al. Electromagnetic interference protection technology in loading experiment of light-initiated explosive [J]. *Modern Applied Physics*, 10(2): 021203. DOI: 10.12061/j.issn.2095-6223.2019.021203
- [18] 刘瑶, 王建华, 刘玉存, 等. 薄片橡胶炸药的研制及性能研究[J]. *爆破器材*, 2014(2): 24-28. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2014.02.006  
LIU Y, WANG J H, LIU Y C, et al. Preparation and performance study of thin rubber explosive [J]. *Explosive Materials*, 2014(2): 24-28. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2014.02.006
- [19] 黄亨建, 张明, 韩超, 等. 一种低比冲量片状挠性炸药[C]//中国工程物理研究院科技年报. 2003: 363.
- [20] 林鹏, 王长利, 王等旺. 挠性炸药比冲量的数值模拟与实验研究[J]. *火炸药学报*, 2011(4): 30-33. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2011.04.002

- LIN P, WANG C L, WANG D W. Numerical simulation and experimental studies on impulse of flexible explosive [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2011(4): 30-33. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2011.04.002
- [21] 岳晓红, 毛勇建, 何荣建, 等. 片状炸药的比冲量标定技术[C]//2002 全国火炸药技术及钝感弹药学术研讨会论文集. 绵阳: 中国工程物理研究院化工材料研究所, 2002: 396-398.
- [22] 卢强, 王占江, 刘晓新, 等. 薄片炸药与固体靶冲量耦合的计算模型[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(1): 84-91. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0084-08
- LU Q, WANG Z J, LIU X X, et al. A computational model for impulse coupling between sheet explosive and target [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(1): 84-91. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0084-08
- [23] 张宝平, 张庆明, 黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2009: 185-187.
- [24] 门朝举, 王占江, 郭志昫, 等. 基于冲击摆的片炸药比冲量测量技术[C]//第七届全国爆炸力学实验技术学会会议论文集. 杭州: 中国力学学会爆炸力学专业委员会, 2012: 49-53

(责任编辑 爆炸与冲击)