

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0314

用十字形超细药条离散群同步起爆 实现超低比冲量加载*

丁洋, 卢强, 李进, 郭志昀, 王占江
(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 余弦分布载荷的化爆加载技术是高空核爆软 X 射线辐照下空间结构动态响应考核的主要手段。为适应新型空间飞行器结构考核的复杂构型、高同步性和低比冲量载荷设计要求, 提出了一种用十字形超细药条离散群同步起爆实现超低比冲量加载的方法。实验结果验证表明: (1) 所制作的十字形超细药条, 最小截面尺寸为 0.33 mm×0.5 mm, 传爆性能稳定, 并可通过直径 0.5 mm 的柔爆索直接起爆; (2) 与相同布药密度的条状布药方式相比, 布药空间均匀度提高了 76.7%; (3) 所采用的 21 点柔爆索同步起爆网络, 起爆率达 100%, 起爆不同步性小于 1 μs。进一步建立了离散片炸药加载数值计算模型, 分析了离散片炸药群同步起爆加载的比冲量空间分布和匀化规律, 将匀化过程分为扩散段、叠加段和均匀段 3 个阶段; 对比了方形、十字形、短条形 3 种形状药片阵列的比冲量演化过程, 发现十字形药片所需匀化距离最短、均匀度最高, 仅需约 0.8 倍布药间距即可使比冲量均匀度偏差降至 10% 以下。

关键词: 核爆 X 射线; 片炸药; 平面波; 同步起爆; 比冲量

中图分类号: O383 国标学科代码: 1303520 文献标志码: A

Realization of ultra-low specific impulse loading by synchronous initiation of discrete group of cross ultra-fine explosive rods

DING Yang, LU Qiang, LI Jin, GUO Zhiyun, WANG Zhanjiang
(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China)

Abstract: The loading technology of cosine distributed load by chemical explosion is the main method for evaluating the dynamic response of space structures under the irradiation of high-altitude nuclear explosions with soft X-rays. A loading method of discretely-distributed sheet explosives synchronously detonated by a mild detonating fuse (MDF) network was proposed to meet the design requirements of complex configuration, high synchronicity and low specific impulse load in the structural assessment of new space vehicles. In terms of experimental study, the cross-shaped sheet explosive made by stacking explosive strips with a cross-sectional size of 0.33 mm×0.5 mm can be directly detonated by a mild detonating fuse with the diameter of 0.5 mm. Compared with strip distribution, the space uniformity of cross distribution is improved by 76.7%. A high-speed camera was used to record the shock wave luminescence during the detonation process. The results show that the detonation ratio of the 21-point MDF detonation network reaches 100%, and the detonation asynchrony is less than 1 μs. In terms of numerical simulation, a numerical model for the explosion of sheet explosives was established based on the multi-material arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) algorithm. The numerical model has strong grid sensitivity, and the results by it tend to converge when the mesh size reaches 0.5 mm, with the deviation from the measured specific impulse results within 5%. Based on the numerically-simulated results, the following conclusions can be drawn. (1) Under the periodic discrete

* 收稿日期: 2022-07-19; 修回日期: 2023-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(12072290)

第一作者: 丁洋(1992—), 男, 博士研究生, 助理研究员, dingyang@nint.ac.cn

通信作者: 王占江(1961—), 男, 博士, 研究员, wangzhanjiang@nint.ac.cn

distribution condition, the peak specific impulse is determined by the surface density of the explosive, and the evolution process of the peak specific impulse is determined by the spacing. (2) The homogenization process of specific impulse can be divided into three stages: diffusion stage, superposition stage and uniform stage. The specific impulse is homogenized through free diffusion of shock wave in the diffusion stage, and through shock wave superposition and collision in the superposition stage, and finally enters the uniform stage with relatively uniform distribution. (3) The homogenization distance into the uniform stage required by the arrays of square and short rod explosives is about equal to the spacing of the explosives, while the arrays of cross explosives only need about 0.8 times the spacing, and the degree of homogenization in the uniform stage is higher, so the cross explosive has a greater advantage in the case of plane explosive loading. (4) The loading mode of synchronous initiation of discrete explosive group not only improves the load synchronization, but also improves the load uniformity, compared with the slip detonation loading of rod distributed charge. The structural response distortion caused by the excessive additional mass of rubber can also be avoided by using the air layer between the sheet explosives and the structure to homogenize the load.

Keywords: nuclear explosion X-ray; sheet explosive; plane wave; synchronous initiation; specific impulse

飞行器结构表面被高空核爆产生的软 X 射线辐照, 瞬时沉积大量能量, 导致结构表层材料发生熔化、气化等现象。这些熔化或气化的表层材料背离结构面向外喷射, 导致结构表面受到物质喷射时的反作用冲量作用, 引起结构动态响应^[1]。在缺少大型 X 射线模拟源的情况下, 化爆模拟技术是目前研究空间结构在软 X 射线辐照下动态响应的重要技术手段^[2]。

核爆软 X 射线辐照在飞行器表面形成的冲量载荷具有典型的余弦分布特征, 余弦分布载荷的化爆模拟技术所使用的加载源一般有柔爆索、光敏炸药和薄片炸药等。Lindberg 等^[3-4]和赵国民等^[5]发展了柔爆索加载模拟技术, 按照一定的优化设计实现了近似余弦分布的爆炸载荷。20 世纪 70 年代, Benham 等^[6]建立了光敏炸药加载模拟技术, 通过在全尺寸再入弹头上喷涂一定厚度的光敏炸药来模拟它在大气层外软 X 射线作用下的动态响应。Rivera 等^[7-9]和 Covert 等^[10]进一步发展了光敏炸药驱动飞片加载壳体的实验技术, 同时对光敏炸药的喷涂系统^[11]和测试系统^[12]进行了升级改进。近几年, 光敏炸药加载技术在炸药合成技术、喷涂技术、起爆技术和冲量标定技术方面也取得了重要进展^[13-17]。薄片炸药加载技术在 20 世纪 70 年代发展起来^[18], 此技术把炸药条按照一定规则离散并放置在壳体表面一定距离处, 在炸药条和壳体之间放置泡沫橡胶等软材料对爆炸载荷进行匀化, 以实现在壳体表面施加近似余弦分布的脉冲载荷^[19-21]。薄片炸药由于加工简便、安全性高、起爆可靠, 已经成为飞行器抗软 X 射线辐照考核的重要加载手段。

近年来, 随着抗 X 射线防护技术的发展, 相同辐照环境下, 软 X 射线在新型空间飞行器结构表面的沉积量大幅降低, 这对飞行器抗软 X 射线辐照考核技术提出了新的要求, 即高均匀度、高同步性和低比冲量。对于传统炸药条加载, 它的条状排布、滑移爆轰和橡胶匀化的加载方式, 难以满足新型飞行器考核的需求, 原因包括: (1) 炸药条排布间距越小, 总条数越多, 均匀性越好, 但比冲量越大, 难以同时满足高均匀度和低比冲量的要求; (2) 一端起爆、滑移爆轰加载, 导致结构不同部位加载时间不同步, 难以满足高同步性的要求; (3) 在壳体质量较小或刚度较低时, 采用泡沫橡胶进行载荷匀化, 引入的附加质量容易引起结构响应的失真; (4) 飞行器结构较复杂时, 条状布药缺乏设计灵活性。

本文中, 为适应新型空间飞行器结构考核的复杂构型、高均匀度、高同步性和低比冲量载荷设计要求, 针对传统炸药条加载方式的不足, 提出用十字形超细药条离散群同步起爆实现超低比冲量的加载方式; 基于自研的太安基薄片炸药, 制作最小截面为 0.50 mm×0.33 mm 的系列炸药条, 并压制组装精密的十字形离散片炸药组件; 通过平面多点同步起爆离散片炸药实验, 验证该加载方式的可靠性和同步性。通过离散片炸药爆炸流场数值模拟, 分析平面布药条件下比冲量空间分布特征和传播演化规律, 以期为基于薄片炸药离散群的余弦载荷设计提供参考。

1 实验方法

1.1 十字形超细药条组件制备

为实现基于炸药条的低比冲量加载, 需减小药条的宽度, 但药条宽度越小, 可稳定传爆的难度越大。通过改进压药和裁剪工艺, 制作了可稳定爆轰的厚度为 0.33 mm、长度为 10 mm、宽度分别为 0.5、0.75、1.0、1.25 mm 的炸药条, 如图 1 所示。每 2 根药条与 1 根直径为 0.5 mm 的银皮柔爆索(线装药密度为 0.09 g/m)通过模具压制成十字形片炸药组件, 制作过程和实物如图 2 所示: 首先将柔爆索与金属支架固定, 然后将 2 根短炸药条垂直交叉, 通过模具压紧在金属支架上, 从而实现柔爆索起爆端与片炸药中心的无缝连接。

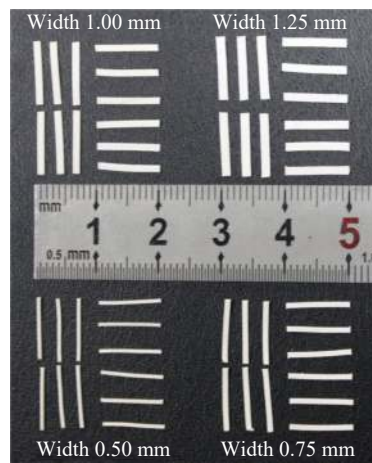


图 1 不同宽度片炸药条

Fig. 1 Sheet explosive rods with different widths

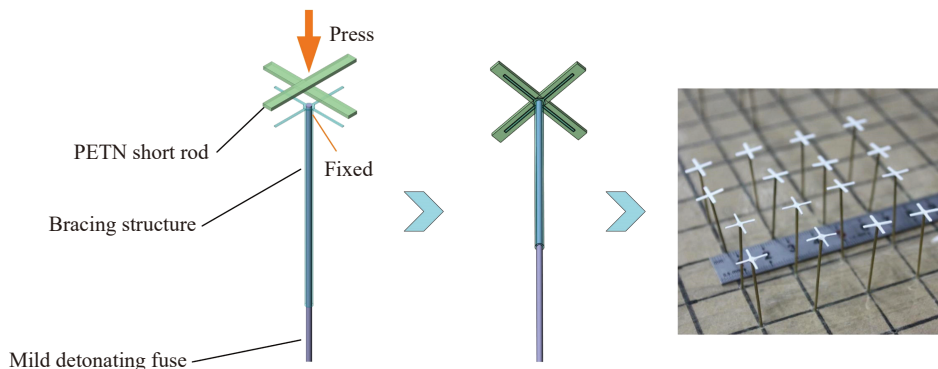


图 2 十字形片炸药组件及其制作过程

Fig. 2 Cross sheet explosive components and their manufacturing process

1.2 分布式布药方法

为了实现给定空间构型加载, 将十字形炸药布设在特定形状的定位板上, 定位板的形状决定了载荷的初始空间构型。对于平面加载, 定位板形状为平面壳; 对圆柱壳进行加载时, 定位板形状为圆柱壳。定位板上预制与片炸药分布相同的定位孔, 将柔爆索穿过定位孔, 并将片炸药粘贴在定位板上, 即可实现片炸药的空间定位。

使用平面加载构型, 共使用 21 支十字形片炸药组件, 布药间距 $d=25$ mm, 如图 3 所示。若以截面尺寸相同的 0.5 mm 宽炸药条按滑移爆轰加载方式条状排布, 则相同布药面密度下的条状布药间距为 15.625 mm。为对比 2 种布药方式的均匀度, 用能够连续排布并铺满整个二维平面的正方形将布药平面分割成 M 个布药单元, 将可使每个布药单元内的含药量都相同的最小正方形称作最小布药单元。因此, 可以用单位长度内的最小布药单元数来衡量布药均匀度。如图 4 所示, 十字药条排布情况下, 最小布药单元边长

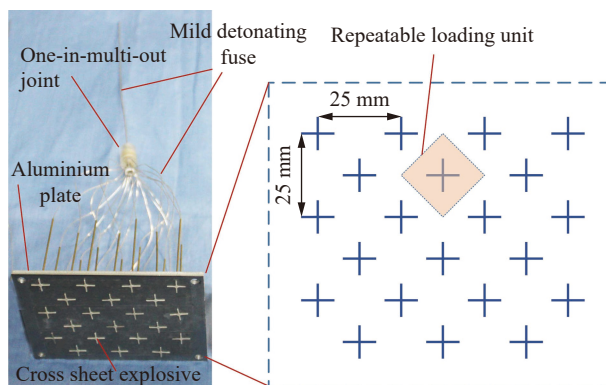


图 3 十字形片炸药离散起爆阵列

Fig. 3 Cross sheet explosive array for discrete detonation

为 8.838 8 mm, 布药均匀度为 113.1 m⁻¹; 条状排布情况下的最小布药单元边长与布药间距相同, 即 15.625 mm, 布药均匀度为 64 m⁻¹。因此, 相比条状布药, 十字布药的空间均匀度提高了 76.7%。

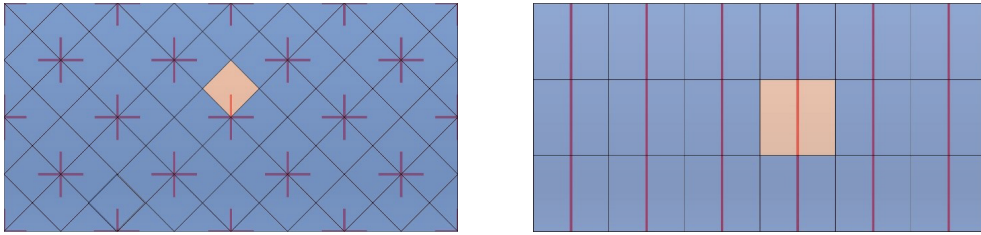


图 4 十字形布药与条状布药的均匀度对比

Fig. 4 Comparison of the evenness between cross and strip distributions

为提高加载的时间同步性, 分布式布药采用多点同步起爆的方式。21 根柔爆索汇聚至 1 个一入多出的传爆接头, 并由 1 根直径 1.0 mm 的铅皮柔爆索(线装药密度为 0.2 g/m)同步起爆, 降低了传统滑移爆轰加载一端起爆的时间不同步性。该传爆模式可逐级扩展, 最终实现由 1 根导爆索逐级同步起爆成百上千个薄片炸药组件, 从而应用于大型结构的加载。

1.3 测试系统

主要测试包括基于电探针的起爆同步性测试、起爆过程的高速摄影以及加载比冲量测试, 测试控制系统如图 5~6 所示。由于爆炸在微秒级的瞬间完成, 测试系统需高度的时间同步。

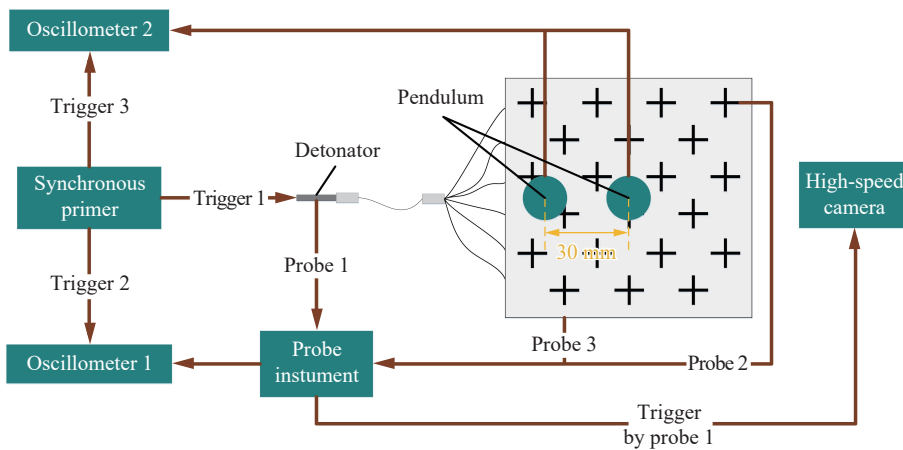


图 5 测试系统原理图

Fig. 5 Schematic diagram of test system

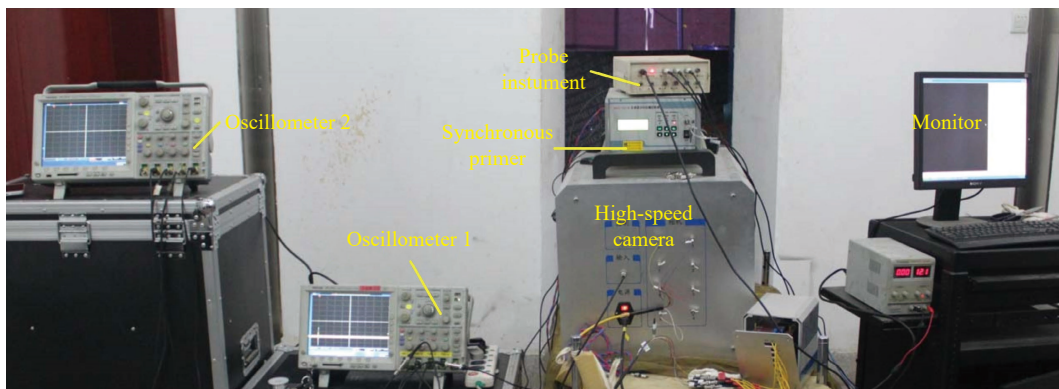


图 6 测试系统实物图

Fig. 6 Physical photo of test system

由同步起爆器发出 3 路 ns 级同步控制信号: 第 1 路用于起爆雷管, 并依次引爆 1 根一级柔爆索、21 根二级柔爆索、21 片十字形片炸药; 第 2 路用于触发一号示波器并记录 3 路探针信号, 其中 1 路探针贴于雷管外壁, 用于触发高速相机, 其余 2 路探针贴于片炸药阵列两对角处, 用于衡量起爆同步性; 第 3 路用于触发二号示波器并记录冲量摆测量系统的输出信号。

高速相机为自研八通道分幅高速相机, 用于捕捉爆炸瞬间图像。高速相机各通道曝光时间为 $0.5 \mu\text{s}$, 最多记录时长为 $4.0 \mu\text{s}$ 。高速相机由雷管起爆导通电探针产生的电信号触发, 雷管起爆时刻距离薄片炸药起爆时刻间隔着柔爆索传爆时间。2 级柔爆索总长度为 300 mm, 以爆速 6.7 km/s 估算, 传爆总时间约 $44.7 \mu\text{s}$ 。因此, 设置高速相机触发后延迟 $44 \mu\text{s}$ 曝光。

冲量摆测量系统^[22-23]用于测定爆炸产生的比冲量, 摆锤放置于距片炸药垂直距离 40 mm 处, 两摆锤平行放置, 一个正对药片阵列中心, 另一个中心偏左 30 mm。

图 3 所示的定位板通过顶角处的 4 个安装孔固定于一块中心开孔的立板中心, 立板尺寸约 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$, 中心开孔尺寸略小于定位板尺寸。立板的一侧分布起爆组件, 包括雷管、导爆索; 立板的另一侧分布测试系统(见图 6~7), 包括比冲量测试系统、高速摄影测试系统和同步探针测试系统等。立板垂直固定于地面, 用于隔绝雷管和柔爆索的爆炸能量对比冲量测试的影响。

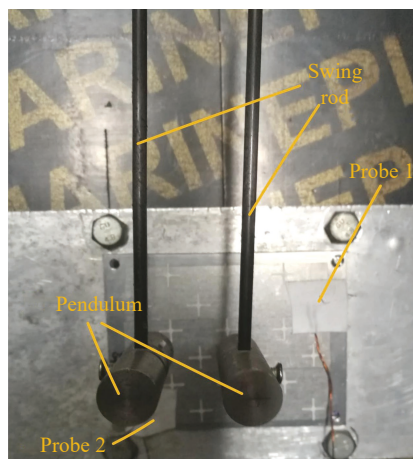


图 7 起爆阵列的安装方式

Fig. 7 Installation mode of the explosive array

2 实验结果及分析

2.1 多点起爆同步性

实验中 21 根十字形片炸药组件全部起爆, 起爆率 100%。如图 8 所示, 出于超低比冲量的设计要求, 所用药量很小, 起爆能量极低, 金属支架的十字支撑端(见图 2)仅在铝合金材质的定位板上产生了微米级极浅压痕, 部分位置由于与定位板贴合不够紧密, 压痕甚至不甚明显。

图 9 为高速相机捕捉到的起爆瞬间, 亮斑即为冲击波发光, 光斑阵列中的圆形及条状阴影为冲量摆锤及摆杆遮光所致。在第 3 个通道曝光时间内, 亮斑开始出现; 在第 4 个通道曝光时间内, 21 个亮斑完全出现。各通道的曝光时间均为 $0.5 \mu\text{s}$, 说明起爆的不同步性小于 $1 \mu\text{s}$ 。左下角的黑色阴影为固定探针所用胶带的影响。

探针信号给出了系统各事件的发生时间, 如图 10 所示。以起爆器发出的触发信号为零时, 探针 1 的信号时刻为 $7\,578.96 \mu\text{s}$, 即雷管起爆延迟时间, 与所用雷管性能相符; 探针 2 与探针 1 信号时刻相差 $45.02 \mu\text{s}$, 即两级柔爆索传爆所需总时间, 与事先估算的 $44.7 \mu\text{s}$ 基本一致; 直接表征起爆同步性的探针 2 与探针 3 的信号时差为 $0.38 \mu\text{s}$, 与高



图 8 实验后定位板样貌

Fig. 8 Appearance of the positioning plate after experiment

速摄影同步性判读结果映证。导致起爆同步性误差的原因包括: (1) 柔爆索与片炸药连接点情况, 影响起爆过程; (2) 柔爆索长度误差及柔爆索爆速的不稳定性, 影响从雷管到片炸药的传爆过程。

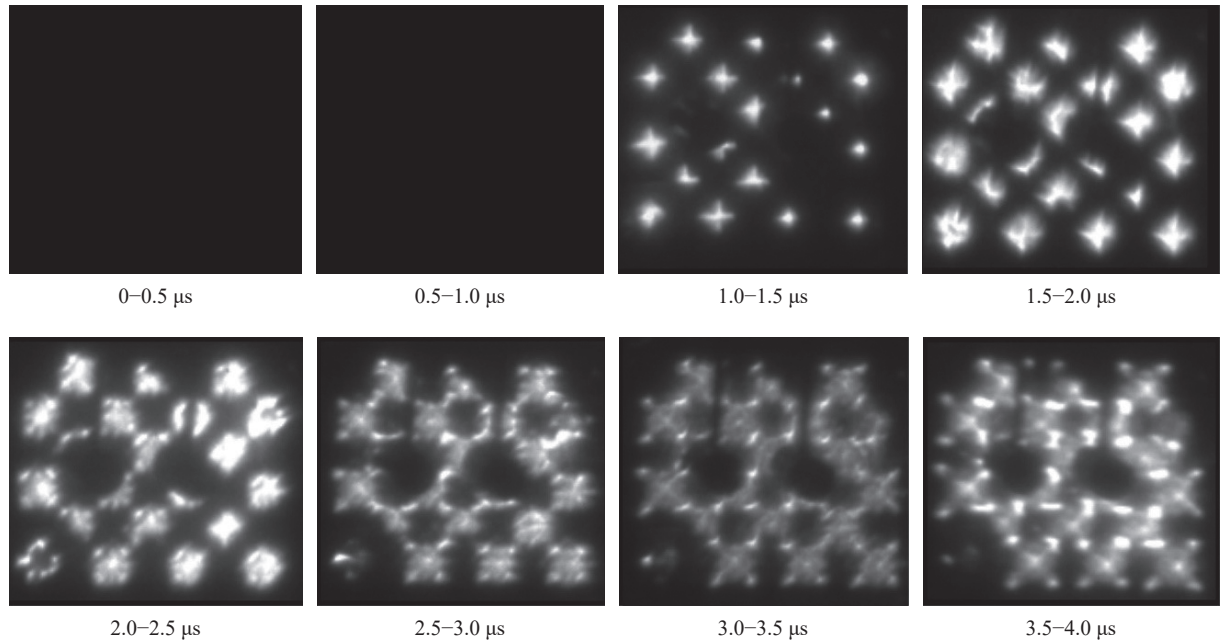


图 9 高速摄影捕捉爆炸瞬间

Fig. 9 Explosion moment captured by high-speed photography

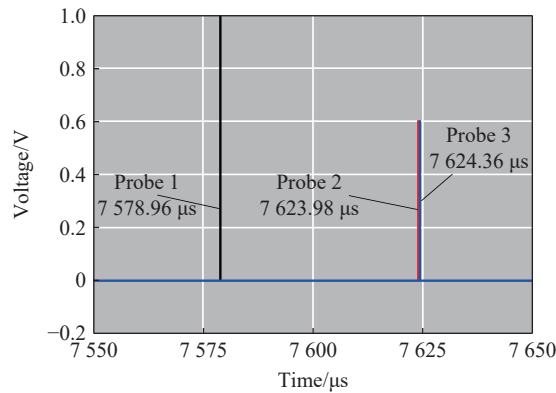


图 10 探针信号

Fig. 10 Signals of probes

2.2 比冲量测试结果

由动量矩定理、机械能守恒定律, 可推出冲量摆的比冲量计算公式为:

$$I = \frac{J}{SL} \frac{2\pi}{T_0} \sqrt{2(1 - \cos\theta_m)}, \quad \frac{2\pi}{T_0} = \sqrt{\frac{mgl}{J}} \quad (1)$$

式中: I 为待测比冲量, S 为载荷作用面积, L 为载荷对转轴的力臂, J 为冲量摆系统对转轴的转动惯量, T_0 为冲量摆系统固有周期, θ_m 为冲量摆最大摆角, m 和 l 分别为冲量摆系统质量和质心距, g 为重力加速度。

本系统摆锤测量面直径约为 15 mm, 中心和左侧摆锤质量分别为 68.9 和 69.1 g, 摆杆长 200 mm, 摆杆质量为 2.3 g。图 11 为实测冲量摆系统输出的电压信号, 满量程 ± 2.5 V 对应 $\pm 180^\circ$ 摆角。综合考虑系统各部件转动惯量, 计算得出中心冲量摆所测比冲量为 79.9 Pa·s, 左侧冲量摆所测比冲量为 61.4 Pa·s, 左侧

冲量较小是由边侧稀疏效应造成的。测试误差可由下式计算:

$$\frac{dI}{I} = \frac{dJ}{J} - \frac{dS}{S} - \frac{dL}{L} - \frac{dT_0}{T_0} + \frac{1}{2} \frac{\sin \theta_m}{1 - \cos \theta_m} d\theta_m \quad (2)$$

通过简化, 认为转动惯量 J 、摆杆长度 L 和摆锤面积 S 引入的不确定度可以忽略, 则式 (2) 可以写为:

$$\left| \frac{dI}{I} \right| \approx \left| -\frac{dT_0}{T_0} + \frac{1}{2} \frac{\sin \theta_m}{1 - \cos \theta_m} d\theta_m \right| \leq \left| \frac{dT_0}{T_0} \right| + \left| \cot \frac{\theta_m}{2} d\theta_m \right| \quad (3)$$

所用编码器为 12 位绝对编码器, 其角度分辨率为 0.00153° , 时间分辨率为 0.01 s ; 2 个冲量摆测得的最大摆角为 8.65° , 冲量摆周期为 0.9 s , 则 $\left| \frac{dI}{I} \right| < 3.1\%$, 该误差忽略了系统阻尼的影响。

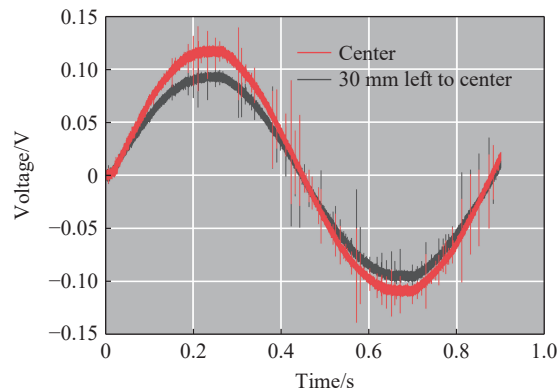


图 11 冲量摆系统输出信号

Fig. 11 Output voltage signals of the impulse pendulum system

3 数值模型及验证

实验测试可以给出有限区域的比冲量信息, 但很难给出比冲量在空间上的分布及其传播演化规律, 更丰富的信息可通过数值计算获得。为此, 依据实验建立了如图 12 所示的数值模型。由于实验中定位板仅产生了微米级的极浅压痕, 加载过程可近似为理想反射加载; 从实测结果看, 冲量摆的固有周期为 0.9 s , 远长于爆炸加载过程(约几十微秒), 且金属靶亦未发生塑性变形, 应力波在靶体中的传播过程可忽略。因此, 模型忽略定位板和金属靶中的应力波效应, 将其简化为刚体, 采用 Lagrange 单元描述; 炸药和空气采用 ALE 单元, 以共节点形式实现物质传输, 并与 Lagrange 单元在空间位置有重合, 以便程序自动搜索流固耦合边界; 空气域四周为无反射边界。

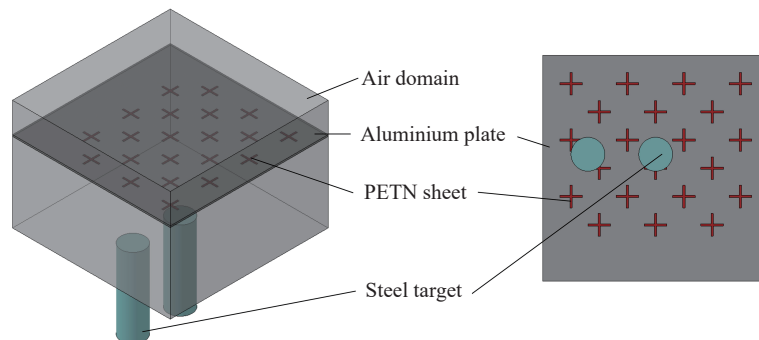


图 12 数值计算模型

Fig. 12 The numerical model according to the experiment

空气采用多项式状态方程描述:

$$p = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E \tag{4}$$

式中: p 为空气压力, γ 为比热比, ρ 和 ρ_0 分别为密度和初始密度, E 为空气比内能。取值分别为: $\gamma=1.4$, $\rho_0=1.29 \text{ kg/m}^3$, $E=2.5 \text{ MPa}$ 。

炸药爆轰产物采用 JWL 状态方程描述:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \tag{5}$$

式中: p 为爆轰产物压力, V 为爆轰产物相对比容, E 为爆轰产物比内能, A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为常数。参数取值参考手册 UCRL-52997 中 PETN 1.77^[24], 分别为: $A=617 \text{ GPa}$, $B=17 \text{ GPa}$, $R_1=4.4$, $R_2=1.2$, $\omega=0.25$; 初始比内能为 10.1 GPa ; 初始相对比容为 1。炸药其余参数取值为: 密度 $\rho=1770 \text{ kg/m}^3$, 爆速 $D=8300 \text{ m/s}$, CJ 爆轰压力 $p_{CJ}=33.5 \text{ GPa}$ 。

模型的布局 and 尺寸与实验一致, 并做了 2 处简化:

(1) 简化了冲量摆系统。将它等效为等尺寸的金属质量块, 以质量块速度信息计算比冲量。

(2) 简化了片炸药尺寸。由于片炸药短边尺寸仅有 0.5 mm , 则片炸药与周边网格尺寸需小于 0.5 mm , 这将使模型的单元数量变得非常巨大而降低计算效率, 因此, 在此将炸药短边尺寸变为 1 mm , 同时调整药片厚度为 0.174 mm , 使总药量相同。

在爆炸加载问题中, 网格尺寸对计算结果往往有较大影响, 且所需的网格尺寸与炸药当量关系较大^[25-26]。为此, 建立了网格尺寸分别为 2.0 、 1.0 和 0.5 mm 的模型(见图 13), 炸药厚度方向均设置两层网格。计算直至质量块速度 v 趋于恒定, 则质量块局部比冲量为 $I=\rho v l$, ρ 、 l 分别为质量块的密度和长度。

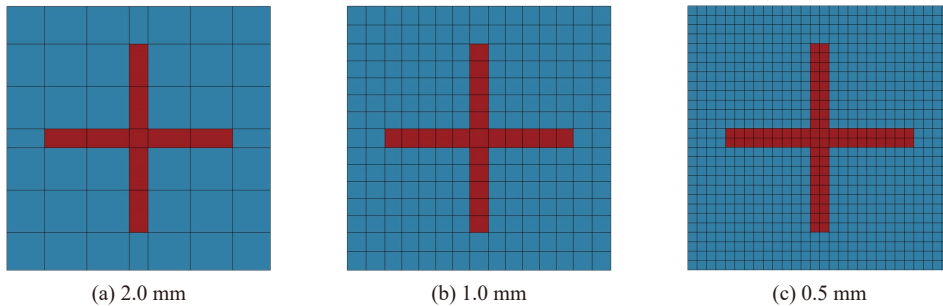


图 13 三种网格尺寸

Fig. 13 Three types of mesh sizes

3 种网格尺寸下的总 ALE 单元数分别为 564 万、75.3 万、7.73 万, 随网格尺寸减小, 计算耗时几何增长, 而计算结果越来越趋近实测值(见图 14)。当网格尺寸为 2.0 mm 时, 计算结果比实测值大 $30\% \sim$

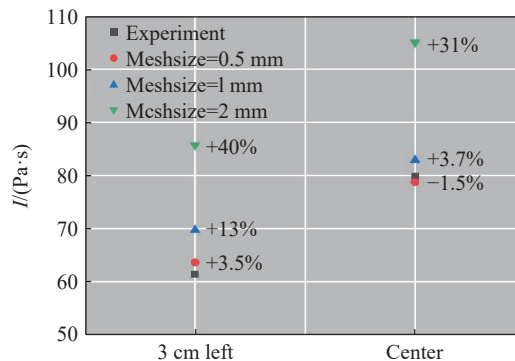


图 14 不同网格尺寸的计算结果与实测值的对比

Fig. 14 Comparison of experimental and numerical results under various mesh sizes

40%; 当网格尺寸为 1.0 mm 时, 误差小于 15%; 当网格尺寸为 0.5 mm 时, 误差小于 5%。由此可知, 网格尺寸偏大会使计算比冲量偏大, 在该尺寸薄片炸药计算中, 应当选取 0.5 mm 的网格尺寸。

4 比冲量特性分析

4.1 数值模型和评价方法

为探究比冲量在空间的分布和传播演化规律, 建立了如图 15 所示的数值模型, 图中黑色网格标记部分为代表性压力监测单元, 模型网格尺寸为 0.5 mm, 布药间距 d 分别为 20、25 和 30 mm, 其余参数与图 12 中模型一致。由于药片布设具有周期性, 在忽略边侧稀疏波影响的前提下, 代表性压力监测单元可表征布药阵列的比冲量匀化过程。

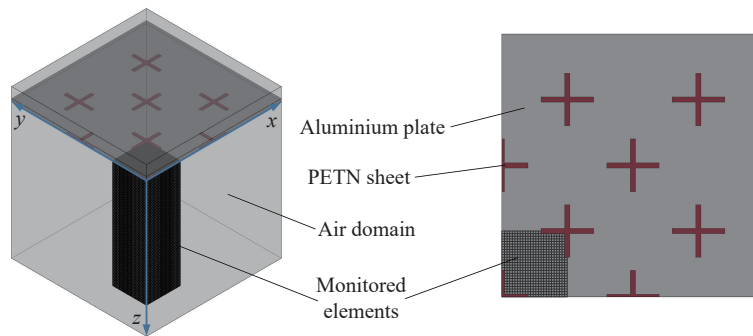


图 15 比冲量演化规律研究数值模型

Fig. 15 The numerical model for studying the evolution of specific impulse

不同 z 向距离处的峰值比冲量 $I(z)$ 和比冲量均匀度偏差 $U(z)$ 分别为:

$$I(z) = \frac{1}{N} \sum_i^N I_i(z), \quad U(z) = \frac{1}{N} \sum_i^N \frac{|I_i(z) - I(z)|}{I(z)} \quad (6)$$

式中: N 为 z 层(单元中心 z 坐标为 z) 监测单元总数, $I_i(z)$ 为 z 层第 i 个监测单元的峰值比冲量。 $U(z)$ 越小, 代表均匀度越高。

4.2 比冲量匀化特性

图 16 为布药间距为 25 mm 时不同 z 层峰值比冲量的分布。在同一层监测单元内, 峰值比冲量分布关于 2 个对角线具有较好的对称性, 这与布药方式的几何对称性一致。 z 较小时(以 $z=2$ mm 为例), 峰值比冲量分布与初始布药位置相对应, 药片附近的峰值比冲量较大, 其余位置峰值比冲量较小; 随 z 的增大(以 $z=15$ mm 为例), 由于冲击波在传播过程中的相互碰撞、叠加, 峰值比冲量发生了重新分布, 呈现中心大、四周小的形态; 随 z 继续增大(以 $z=30$ mm 为例), 冲击波在多次碰撞、叠加后进一步匀化, 峰值比冲量的分布已较均匀。

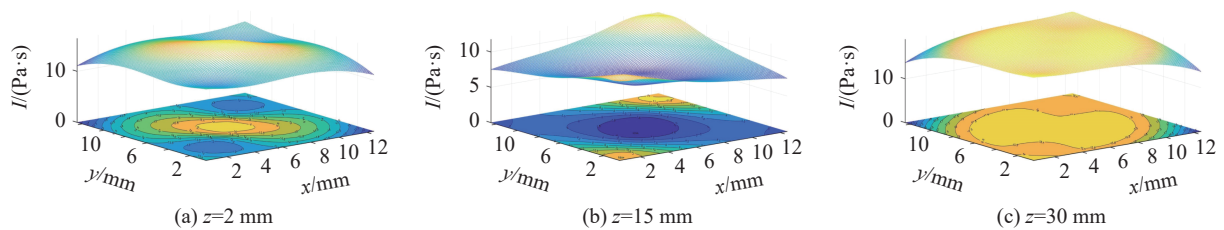


图 16 布药间距 25 mm 时比冲量空间分布及演化规律

Fig. 16 Spatial distribution and evolution of specific impulse with a spacing of 25 mm

各层峰值比冲量的计算结果如图 17(a) 所示, 考虑匀化过程与布药间距有关, 横坐标采用无量纲量 $z'=z/d$ 表示; 峰值比冲量与布药面密度 α 相关, 纵坐标以 $I'=I/\alpha^{1/3}$ 表示。此时, 不同布药面密度的峰值比冲量演化曲线几乎重合。这表明, 在该周期性离散布药条件下, 峰值比冲量由布药面密度决定, 峰值比冲量随传播距离的演化过程由布药间距决定。

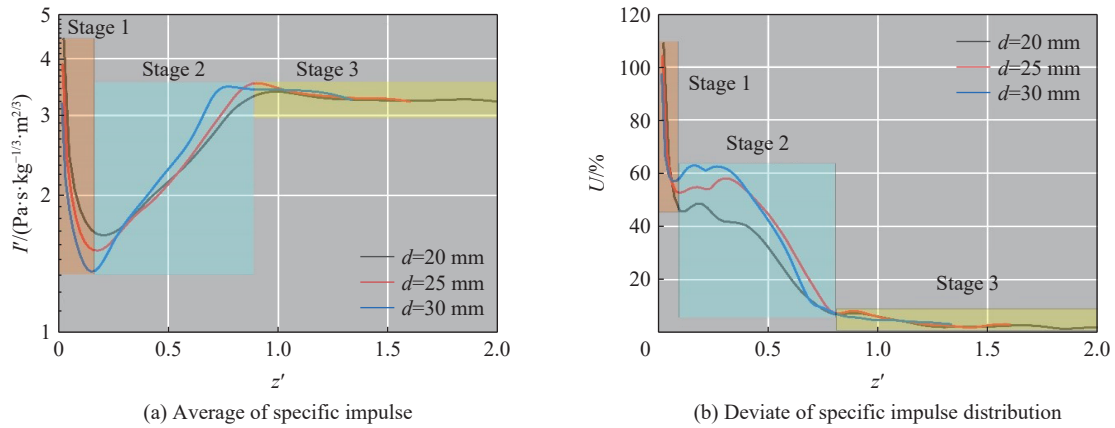


图 17 不同药片间距下比冲量演化规律

Fig. 17 Evolution of specific impulse under different spacings of sheet explosive

各层峰值比冲量的均匀度偏差如图 17(b) 所示, 横坐标同样采用无量纲量 $z'=z/d$ 表示。从均匀度偏差的演化特征看, 匀化过程可大致分为 3 个阶段: 第 1 阶段为扩散段, 距离起爆点较近, 受离散布药的影响, 均匀度偏差较大, 主要通过冲击波自由扩散匀化, 匀化速度最快; 第 2 阶段为叠加段, 约起始于 0.1 倍布药间距附近, 通过冲击波叠加、碰撞进行匀化, 此时均匀度偏差仍然较高, 匀化速度慢于扩散段; 第 3 阶段为均匀段, 起始于 0.8 倍布药间距附近, 峰值比冲量的分布已达到较高的均匀度, 均匀度偏差小于 10%。回看图 17(a), 峰值比冲量的演化过程亦可对应分为 3 个阶段, 峰值比冲量在扩散段迅速降低, 在叠加段逐渐增大, 在均匀段逐渐趋于稳定。

4.3 药片形状对匀化过程的影响

如前所述, 峰值比冲量与布药面密度相关, 匀化过程与布药间距相关。若要实现给定比冲量加载, 在相同的布药面密度下, 布设点数越多, 匀化越快, 但同时会带来制作难度增高、熄爆点出现概率增大的问题。因此, 主要讨论在相同布药面密度和布设点数下, 药片形状对匀化过程的影响, 此时单个药片的表面积不变(药片厚度恒定)。

十字形药片的特点是在 4 个方向上各有一个分支, 因此, 从分支数量和分支长度 2 个维度来考虑药片形状的改变。如图 18 所示, 一种方法是增加分支数量, 减小分支长度, 极限情况是, 分支数无限多, 形成圆形药片。为方便划分网格, 数值模型中将药片设计为方形。另一种方法是减少分支数量, 增大分支长度, 极限情况是, 分支数只有一个, 形成短条形药片。图 19 为 3 种类型药片的数值模型: 方形、十字形和短条形。3 种模型的布药面密度相同, 图中黑色网格标记处为代表性压力监测单元。

如图 20 所示, 与十字形药片类似, 方形和短条形药片阵列的峰值比冲量和均匀度偏差演化过程亦可大致分为 3 个阶段, 此为阵列式布药的共性特征。由于布药面密度相同, 三者的峰值比冲量曲线较接近, 但匀化过程差异较大。扩散段, 3 种阵列初始均匀度偏差基本相同, 由于形状的差异, 方形药片阵列最快进入叠加段, 短条形最慢, 十字形处于二者之间。叠加段, 方形均匀度偏差最大; 短条形均匀度偏差最小, 但起伏较大, 进入均匀段的速度与方形相当, 均在 1 倍布药间距附近; 十字形均匀度偏差起伏较小, 最快进入均匀段, 约在 0.8 倍布药间距处。均匀段, 短条形和方形均匀度偏差相当, 曲线几乎重合, 十字形均匀度偏差最小。以进入均匀段的速度和均匀段的匀化程度来看, 十字形最优, 方形和短条形接近。

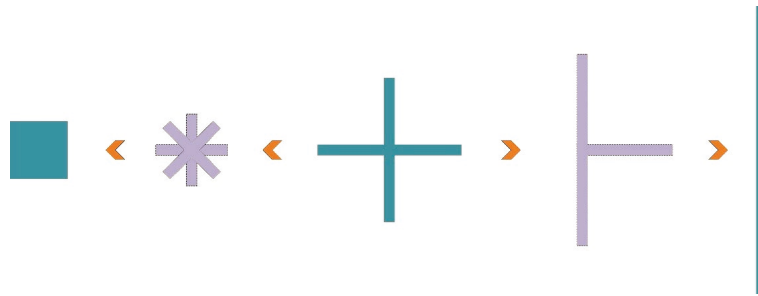


图 18 不同形状药片的设计思路

Fig. 18 Design ideas for sheet explosives with different shapes

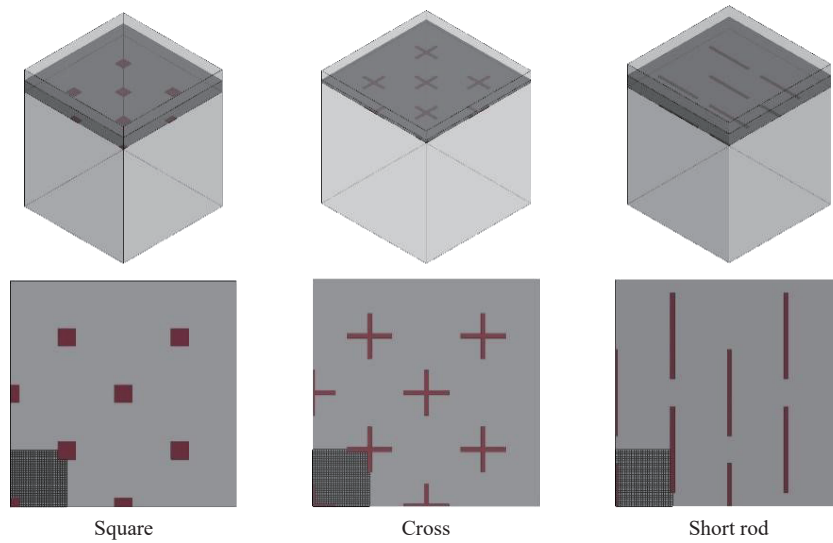


图 19 不同药片形状的数字模型

Fig. 19 Numerical models of different shapes of sheet explosive

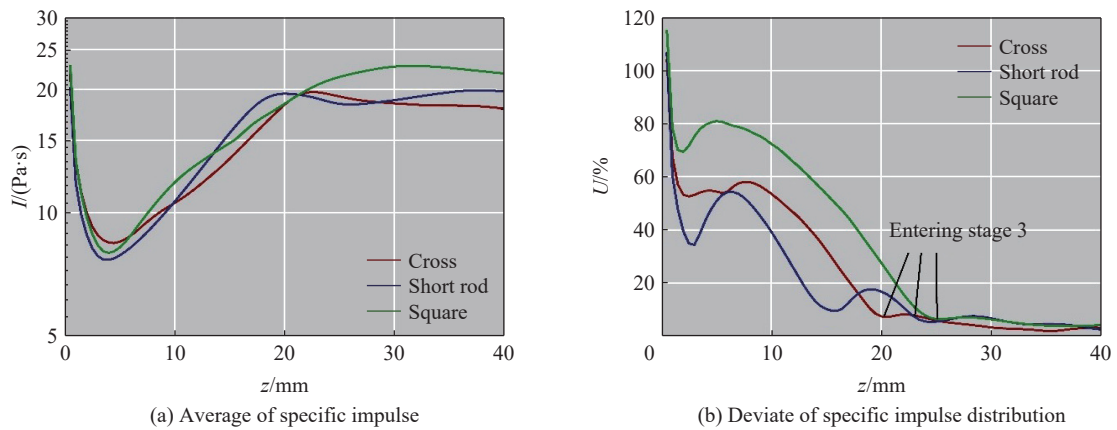


图 20 不同形状药片阵列的峰值比冲量和均匀度偏差演化过程

Fig. 20 Evolution of peak specific impulse and uniformity deviation of sheet explosive arrays with different shapes

同理, 进一步开展与传统条状排布滑移爆轰加载形式的对比分析。在保持布药面密度、药条宽度和厚度相同的前提下, 该加载方式的布药间距为 15.625 mm。如图 21(a) 所示, 在药条一端起爆, 选取紧邻 $y=0$ 平面的一层单元作为代表性压力监测单元。不考虑滑移爆轰所带来的时间不同步性, 如图 21(b) 所示, 条形布药匀化过程与短条形较类似, 但由于布药间距较大, 均匀度偏差起伏较大, 进入均匀段较晚,

且偏差值高于短条形和十字形。由此可见, 相比传统条状排布滑移爆轰加载, 使用十字形药条离散群同步加载, 不仅提高了时间同步性, 而且提高了载荷均匀性。

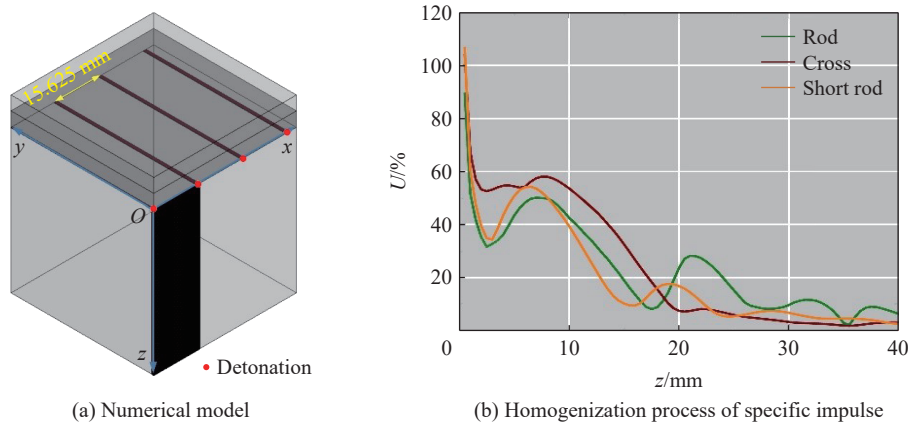


图 21 条状布药滑移爆轰加载数值模型和比冲量匀化过程

Fig. 21 The numerical model and homogenization process of specific impulse under sliding detonation loading of explosive rods

5 结 论

使用十字形超细药条离散群同步起爆的方法, 实现了高同步性、高均匀度、低比冲量平面加载。验证实验的结果表明: (1) 同步性方面, 各十字形片炸药起爆同步性误差小于 $1 \mu\text{s}$; (2) 均匀度方面, 相比炸药条滑移爆轰加载模式, 布药空间均匀度提高了 76.7%; (3) 比冲量方面, 实测比冲量低至几十帕秒量级。在此基础上, 保证了起爆的可靠性, 起爆率达到 100%。

为进一步明确该加载方式下载荷比冲量演化特性, 建立了离散薄片炸药加载数值模型, 模型可靠性得到了比冲量实测结果的验证; 选取了代表性压力监测单元进行比冲量匀化过程分析, 得出以下结论。

(1) 在周期性离散布药条件下, 峰值比冲量由布药面密度决定, 峰值比冲量的演化过程由布药间距决定。

(2) 比冲量匀化过程可分为 3 个阶段, 即扩散段、叠加段和均匀段, 扩散段通过冲击波自由扩散匀化, 叠加段通过冲击波叠加、碰撞匀化, 最终进入比冲量分布较为均匀的均匀段。

(3) 方形和短条形药片阵列进入均匀段所需的匀化距离约为 1 倍布药间距, 而十字形药片阵列仅需约 0.8 倍布药间距, 且在均匀段的匀化程度更高, 因而在平面布药加载情况下, 十字形药片具有较大优势。

(4) 离散炸药群同步起爆的加载方式, 相比条状布药滑移爆轰加载, 不仅提高了载荷同步性, 而且提高了载荷均匀度; 利用片炸药和结构之间的空气层对载荷进行匀化, 可避免橡胶附加质量过大带来的结构响应失真。

本文中仅以平面同步加载作为原理性验证, 若进一步改变各薄片炸药所对应柔爆索的长度、改变定位板的形状, 可实现特定空间构型、特定时序的爆炸加载, 从而应用于复杂形状、复杂工况下的爆炸加载考核。

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.
 - [2] 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.

- [3] LINDBERG H E, MURRAY Y. Calibration and analysis of the SPLAT (spray lead at target) impulse simulation technique: DNA-TR-81-333 [R]. San Jose, CA: Aptek Inc. , 1983.
- [4] LINDBERG H E. Deformation ripple from the SPLAT (spray-lead-at-target) impulse simulation technique: AD-A190-861 [R]. San Jose, CA: Aptek Inc. , 1987.
- [5] 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. 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.
- [6] BENHAM R A, 褚桂敏. 用光引爆炸药模拟 X 射线喷溅脉冲对全尺寸再入弹头的作用 [J]. 导弹与航天运载技术, 1984(1): 96–103.
- [7] RIVERA W G. Cosine distributed impulsive loading of a thin aluminum ring by a light initiated high explosive driven flyer plate: SAND2007-1161C [R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2007.
- [8] RIVERA W G. Light initiated high explosive driven flyer plate design, implementation, and performance: SAND2004-5236C [R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2004.
- [9] RIVERA W G. Light initiated high explosive driven flyer plate impulse technique for combined material and structural response: SAND2006-6699C [R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2006.
- [10] COVERT T D, RIVERA W G. Light initiated high explosive driven flyer plate motion and impact dynamics: SAND2007-1424C [R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2007.
- [11] COVERT T T. Staubli TX-90XL robot qualification at the LLIHE: SAND2010-7222 [R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2010.
- [12] COVERT T T. VISAR validation test series at the light initiated high explosive (LIHE) facility: SAND2007-0779 [R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2007.
- [13] 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, 2019, 10(2): 021203. DOI: 10.12061/j.issn.2095-6223.2019.021203.
- [14] 徐海斌, 裴明敬, 张德志, 等. 酸性乙炔银制备方法及其表征 [J]. 火工品, 2019(4): 40–43. XU H B, PEI M J, ZHANG D Z, et al. Synthesis and characterization of silver acetylide-silver nitrate [J]. Initiators and Pyrotechnics, 2019(4): 40–43.
- [15] 徐海斌, 裴明敬, 张德志, 等. 乙炔银-硝酸银合成工艺优化及其性能测试 [J]. 火炸药学报, 2018, 41(6): 573–577. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2018.06.007. XU H B, PEI M J, ZHANG D Z, et al. Optimization of synthesis process and property test of silver acetylide-silver nitrate [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2018, 41(6): 573–577. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2018.06.007.
- [16] 裴明敬, 徐海斌, 王等旺, 等. 酸性乙炔银的光起爆特性 [J]. 高压物理学报, 2017, 31(6): 813–819. DOI: 10.11858/gywlb.2017.06.017. PEI M J, XU H B, WANG D W, et al. Detonation characteristics of light-initiated explosive silver acetylide-silver nitrate [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2017, 31(6): 813–819. DOI: 10.11858/gywlb.2017.06.017.
- [17] 杨军, 裴明敬, 王等旺, 等. 基于光子多普勒测速仪的冲量传感器 [J]. 兵工学报, 2017, 38(S1): 150–154. YANG J, PEI M J, WANG D W, et al. Impulse sensor based on photonic doppler velocimetry [J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(S1): 150–154.
- [18] RIVERA W G, BENHAM R A, DUGGINS B D, et al. Explosive technique for impulse loading of space structures: SAND 99-3175C [R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 1999.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [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] 文明, 洪延姬, 王军, 等. 冲击摆冲量测量的原理及精度分析 [J]. *装备指挥技术学院学报*, 2005, 16(6): 110–113. DOI: 10.3783/j.issn.1673-0127.2005.06.026.
- WEN M, HONG Y J, WANG J, et al. The principle and accuracy analysis of impulse measurement with impact pendulum [J]. *Journal of the Academy of Equipment Command and Technology*, 2005, 16(6): 110–113. DOI: 10.3783/j.issn.1673-0127.2005.06.026.
- [24] DOBRATZ B M, CRAWFORD P C. LLNL explosives handbook: properties of chemical explosives and explosives and explosive simulants: UCRL-52997 [R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1981.
- [25] 张社荣, 李宏璧, 王高辉, 等. 空中和水下爆炸冲击波数值模拟的网格尺寸效应对比分析 [J]. *水利学报*, 2015, 46(3): 298–306. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2015.03.006.
- ZHANG S R, LI H B, WANG G H, et al. Comparative analysis of mesh size effects on numerical simulation of shock wave in air blast and underwater explosion [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(3): 298–306. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2015.03.006.
- [26] SHI Y C, LI Z X, HAO H. Mesh size effect in numerical simulation of blast wave propagation and interaction with structures [J]. *Transactions of Tianjin University*, 2008, 14(6): 396–402. DOI: 10.1007/s12209-008-0068-9.

(责任编辑 张凌云)