

# 四类脉冲加载装置的设计及其加载性能\*

翟华涛, 叶文康, 富明慧, 胡玲玲

中山大学航空航天学院, 广东 深圳 518107

**摘要:** 现有低应变率动态加载装置普遍结构复杂、成本较高, 且除压缩外的脉冲加载形式尚不成熟。针对上述问题, 本文提出了拉伸、压缩、拉压混合及撞击加载形式的新型低应变率脉冲加载装置, 系统阐明了其工作原理。并通过实验验证了四类装置的脉冲加载性能, 分析总结了脉冲波形的调控规律。结果表明: 1) 四类装置均可实现相应的脉冲加载, 输出的拉伸脉冲幅值与重物下落高度、脉宽与细绳弹性成正比; 2) 四类装置输出的压缩及拉压混合脉冲幅值与激振器电压成正比, 同时脉宽与工作频率成反比; 3) 四类装置输出的撞击脉冲速度与弹簧压缩量成正比。研究成果丰富了低应变率动态加载装置的类型, 为相关领域的研究提供了低成本、精准可调的实验手段。

**关键词:** 低应变率; 动态加载; 脉冲加载装置; 加载性能; 脉冲波形调控

中图分类号: O38 文献标志码: A 文章编号: 2097-0137(XXXX)XX-0001-08

## Design and loading performance of four types of pulse loading devices

Zhai Huatao, Ye Wenkang, Fu Minghui, Hu Lingling

School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China

**Abstract:** Existing low-strain-rate dynamic loading devices are generally characterized by complex structures and high costs, while pulse loading modes other than compression remain underdeveloped. To address these issues, this paper proposes four novel low-strain-rate pulse loading devices, which cover tensile, compressive, tensile-compressive mixed, and impact loading modes. Their working principles are systematically elaborated, the pulse loading performance of the four types of devices is verified through experiments, and the regulation laws of pulse waveforms are analyzed and summarized. The results demonstrate that: 1) All four devices can achieve the corresponding pulse loading; the amplitude of the output tensile pulse is proportional to the falling height of the weight, and the pulse width is proportional to the elasticity of the thin string; 2) The amplitudes of the output compressive and tensile-compressive mixed pulses of the four devices are proportional to the exciter voltage, while the pulse width is inversely proportional to the operating frequency; 3) The impact pulse velocity output by the four devices is proportional to the spring compression amount. This research enriches the types of low-strain-rate dynamic loading devices and provides a low-cost, precise, and adjustable experimental method for research in related fields.

**Key words:** low strain rate; dynamic loading; pulse loading device; loading performance; pulse waveform regulation

在实际工程中, 碰撞 (孙洋等, 2025)、爆炸 (Patel et al., 2025) 等强冲击动态载荷和振动 (Xie et

\* 收稿日期: 2026-03-22

录用日期: 2026-04-22

网络首发日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金 (12502466, 12472400); 深圳市科技计划 (JCYJ20241202130001002)

作者简介: 翟华涛 (2000 年生), 男; 研究方向: 冲击动力学; E-mail: zhait3@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 胡玲玲 (1980 年生), 女; 研究方向: 力学超结构; E-mail: hulingl@mail.sysu.edu.cn

全文阅读



ZR20260069

al., 2026)、制动(王靖岳等, 2023)等低速动态载荷, 均会使材料与结构的力学行为显著异于静态载荷时。研究材料和结构在动态载荷作用下的力学响应, 对结构安全和性能优化有着重要意义。通过动态加载实验装置模拟真实工况, 已在多领域广泛应用。比如: 各类材料在不同应变率下的力学性能以及损伤失效实验(刘志明等, 2022)、防护结构的抗爆抗冲击性能实验、单兵防护装备的动态响应测试(屈可朋等, 2019; Baranovskyi et al., 2025)、动力电池抗冲击性能设计等(魏和光等, 2025)。

依据应变率范围, 动态加载可划分为四类: 低应变率动态加载( $10^{-4} \sim 100 \text{ s}^{-1}$ )、中应变率加载( $1 \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ )、高应变率加载( $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ )和超高速加载( $> 10^4 \text{ s}^{-1}$ ) (邹慧辉等, 2022; Prameela et al., 2024)。其中, 低应变率动态加载可复现低速冲击、生物生理动态载荷等实际工况, 为柔性材料与生物软组织等低强度材料的动态力学特性表征和研发提供了关键支撑(岳文基等, 2023; Salih et al., 2024)。

针对低应变率动态加载, 国内外学者开展了大量研究。Huang et al. (2019)和曹增强等(2021)的电磁式脉冲加载装置依托高频响应的电磁驱动原理, 可实现精准可控的脉冲载荷输出。Zhang et al. (2019)和Jiang et al. (2020)的电液伺服动态试验机通过伺服阀调节液压驱动单元的输出力, 能够完成拉伸、压缩、弯曲等多种形式的低应变率加载。Li et al. (2015)和Beharic et al. (2018)的落锤冲击试验机将锤头重力势能转化为冲击动能, 通过调节下落高度实现可控的低速冲击加载。Rahmat et al. (2019)提出了整合高速伺服液压加载架、过渡段应变片载荷校准与数字图像相关(DIC)全场测量的标准化方案, 实现了局部应变的精准捕捉。张云鹏等(2023)通过修正 Rayleigh-Love 杆件理论, 建立了可耦合切径向横波干扰与横向惯性效应的应变波传播解析模型, 优化了信号接收与叠加方法。

尽管取得了这些进展, 低应变率动态加载装置在实际应用中仍存在局限性。一方面, 主流装置普遍结构复杂, 购置和使用成本较高, 难以满足实验室快速部署与低成本试验的需求(白春玉等, 2015; Agirre et al., 2021)。另一方面, 现有研究多聚焦于压缩脉冲加载的优化设计, 商用的电磁式脉冲加载装置与落锤冲击试验机仅能实现压缩脉冲的加载。尽管电液伺服动态试验机可完成低应变率拉伸加

载(Nieto-fuentes et al., 2025), 但其他脉冲加载形式却缺乏成熟的实现方案。为此, 本文提出了一种低应变率拉伸、压缩、拉压混合及撞击脉冲加载装置, 深入阐释其工作原理。而且, 通过实验验证了其加载性能, 并探讨了装置的适用范围与应用优势。

## 1 四类脉冲加载装置设计与原理

### 1.1 四类典型脉冲的波形特征

在动态加载中, 脉冲信号常作为核心输入载荷, 以真实模拟各类动载环境。典型的拉伸脉冲、压缩脉冲、混合脉冲和撞击脉冲波形如图1所示。其中, 压缩和拉伸脉冲为施加压力和拉力载荷的脉冲, 主要用于表征材料的动态压缩和拉伸性能; 混合脉冲指兼具拉压应力分量的复合脉冲, 用于模拟复合拉压动载环境; 撞击脉冲为物体撞击产生的窄脉宽、幅值较高的瞬态脉冲, 用于模拟低速冲击、碰撞等瞬态工况

拉伸脉冲、压缩脉冲和混合脉冲的主要特征参数为脉宽和幅值。脉宽指脉冲载荷有效作用的持续时间, 用于表征脉冲载荷的作用时长。幅值指脉冲载荷在时域内所能达到的最大力, 用来表征脉冲载荷的作用强度。这三类脉冲信号的脉宽  $A$  和幅值  $H$ , 共同决定了脉冲信号的波形特征。

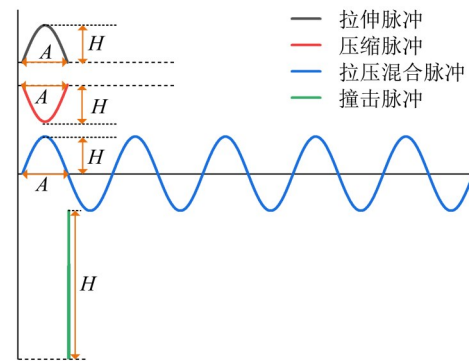


图1 四类典型脉冲的波形

Fig. 1 Waveforms of four typical pulses

动态加载实验中, 由于测试仪器的高频响应能力不足, 撞击脉冲精准测量难度较大。因此, 本文选取撞击块速度作为特征参数, 其速度越大, 对应的撞击脉冲作用强度越高。

### 1.2 四类脉冲加载装置及其工作原理

本文利用重物-滑轮装置来产生拉伸脉冲。装置由重物、小质量块、V型槽滑轮、滑轮支架、细线及1对磁铁组成, 如图2所示。滑轮支架由2个套筒与

1 根细杆构成, 将套筒固定于导杆上, 细杆穿过滑轮后与套筒连接, 完成滑轮的固定安装。将小质量块通过细线与 1 块磁铁连接, 细线跨置滑轮后, 使该磁铁与固定于试件输入端中心的另 1 块磁铁吸附, 并保持小质量块自然下垂。最终, 将带孔的重物穿入细线, 从一定高度释放重物, 即可对试件施加拉伸脉冲载荷。

该装置的工作理是通过滑轮将重物的重力势能转化为磁铁间的瞬态拉力, 当拉力超过磁铁吸力时磁铁分离, 进而在试件输入端生成拉伸脉冲。脉冲幅值和脉宽可由重物下落高度及细线的弹性决定。

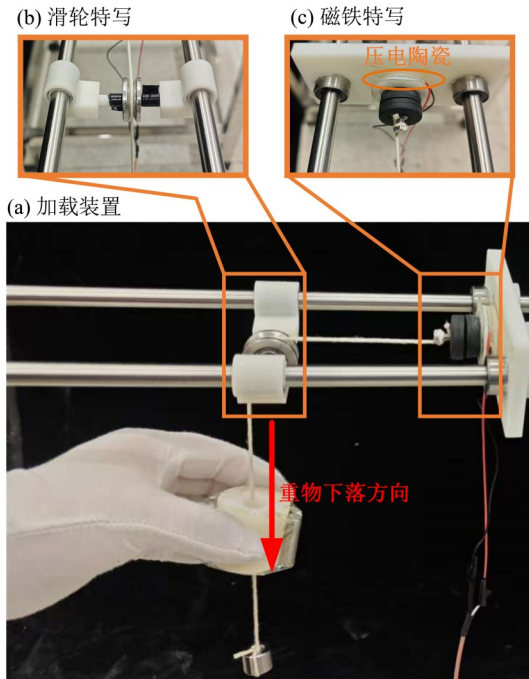


图 2 拉伸脉冲加载装置

Fig. 2 Tensile pulse loading device

本文采用 JZQ-50 型激振器作为核心动力源, 结合定制的机械结构与激振器控制系统实现压缩脉冲和混合脉冲的精准加载。激振器的作用是将电信号转化为机械振动信号, 为系统提供基础动力。如图 3(a) 所示, 激振器控制系统由扫频信号发生器和功率放大器组成, 可通过调节电压和频率实现对机械信号的调控。定制的机械结构则将激振器输出的机械信号转化为实验所需的加载脉冲。

定制了延长杆以实现压缩脉冲加载。具体来说, 是将延长杆与激振器激振头用螺母刚性连接, 并在杆和试件之间夹 1 个额外质量块, 如图 3(b) 所示。当激振器处于压缩行程时, 额外质量块会对试件施加压缩脉冲; 进入拉伸行程时, 质量块与试件分离并掉落, 由此将激振器的周期振动转化为单一的压缩脉冲。

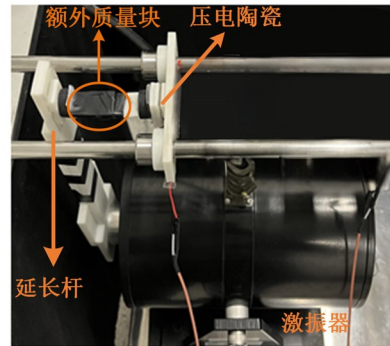
如图 3(c) 所示, 将延长杆与试件通过强力磁铁固定连接, 即可实现拉压混合脉冲加载。此时激振器的振动信号可通过打印杆完整传递至试件, 产生周期性的混合脉冲信号。

本文设计了一种由弹簧发射器、撞击板及磁铁组成的撞击脉冲发生装置。弹簧发射器由压缩弹簧与发射板组成, 压缩弹簧一端固定于支座, 另一端与发射板固连。采用导杆穿过发射板与撞击板, 确保二者仅沿导杆方向运动。在撞击板一面粘贴磁铁, 试件的对应面粘贴另 1 块磁铁, 如图 4 所示。实验时, 将撞击板与发射板贴合, 压缩弹簧后释放, 撞击板将以一定初速度与试件发生碰撞。碰撞后 2 块磁铁迅速吸合, 使撞击板与试件共同运动。该装置将弹簧发射器的弹性势能转化为撞击板的动能, 通过调节弹簧压缩量实现对撞击初速度的调控。

(a) 扫频信号发生器和功率放大器



(b) 压缩加载装置



(c) 混合加载装置

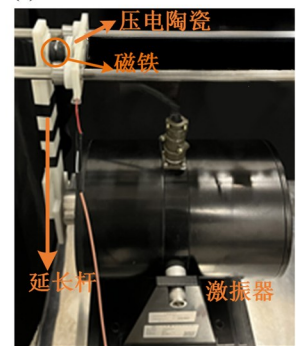


图 3 压缩与拉压混合脉冲加载装置

Fig. 3 Compression and tension-compression hybrid pulse loading device

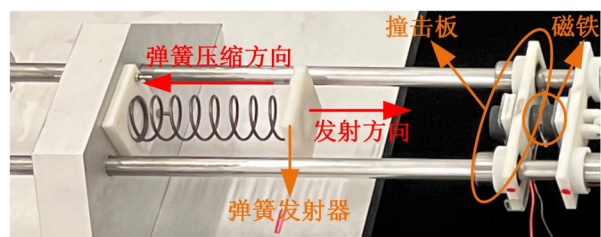


图4 撞击脉冲加载装置

Fig. 4 Impact pulse loading device

### 1.3 测量系统与数据采集

为了测量加载装置产生的脉冲信号,本文设计2类测量系统:1)力信号测量系统,用于拉伸脉冲、压缩脉冲及拉压混合脉冲的力信号采集;2)速度测量系统,用于撞击脉冲的速度信号测量。

力信号测量系统由压电陶瓷传感器、KD5008C型电荷放大器及Tektronix TDS 2014C型示波器组成,其组装流程为:首先将压电陶瓷粘贴于脉冲加载位置;再通过导线依次连接压电陶瓷传感器、电荷放大器与示波器。压电传感器将机械载荷转化为电荷信号,电荷放大器对微弱电荷信号进行放大,并将其转换为电压信号,示波器则用于实现电压信号的时域波形可视化。根据传感器压电系数(200 pC/N),对电荷放大器以及示波器的参数进行配置,就可以通过示波器采集到各加载脉冲的时域波形。将示波器采集到的电压信号,通过放大器的标定参数,代入下式还原成真实的力值,即:力=输出电压(V)灵敏度倍率×量程(mV/N),其中灵敏度倍率在实验中设置为1,量程设置为1000 mV/N。

速度测量系统主要由高速摄像机、专用笔记本电脑及DIC分析软件构成。首先在撞击板侧面画上红色标记点,然后将高速摄像机架设于正对标记点的水平位置,并配备补光光源以提升拍摄亮度,最后将高速摄像机与专用笔记本电脑连接。通过高速摄像机拍摄标记点的高速运动,再将所采集的影像导入DIC软件进行分析,可以得到标记点的速度-时间曲线。

## 2 装置的性能试验与分析

### 2.1 拉伸脉冲装置的加载性能

本节通过实验探讨了拉伸脉冲装置的加载性能,重点分析了脉冲波形的调控规律与加载稳定性。首先,研究重物的高度以及细绳材料对输出波形的影响。实验设置3组重物下落高度(30、20和

10 cm),均采用棉线作为细绳。图5(a)表明,装置可输出类正弦脉冲,峰值力随重物高度增大显著提升:30 cm高度的峰值力约为18 N,20 cm高度的峰值力约为15 N,10 cm高度下的峰值力约为11 N;且3种高度对应的波形脉宽基本相同。因此,通过改变重物下落高度可实现对输出波形幅值的解耦调控。

保持重物下落高度为20 cm,分别采用高分子绳、棉线、水晶线及棉线+弹力线开展对比实验,结果如图5(b)所示。图5(b)中,不同绳材的脉冲波形峰值力基本相同,而脉宽存在显著差异。高分子绳脉宽最短,约为0.01 s;棉线的脉宽约为0.015 s,水晶线的脉宽约为0.05 s;棉线+弹力线的脉宽最大,约为0.08 s。结果表明,更换细绳材料可实现对输出波形脉宽的解耦调控。

为了验证脉冲加载的稳定性,在细绳采用棉线、重物下落高度设置为20 cm的条件下,开展了3次重复实验。如图6所示,3次实验的力曲线的上升

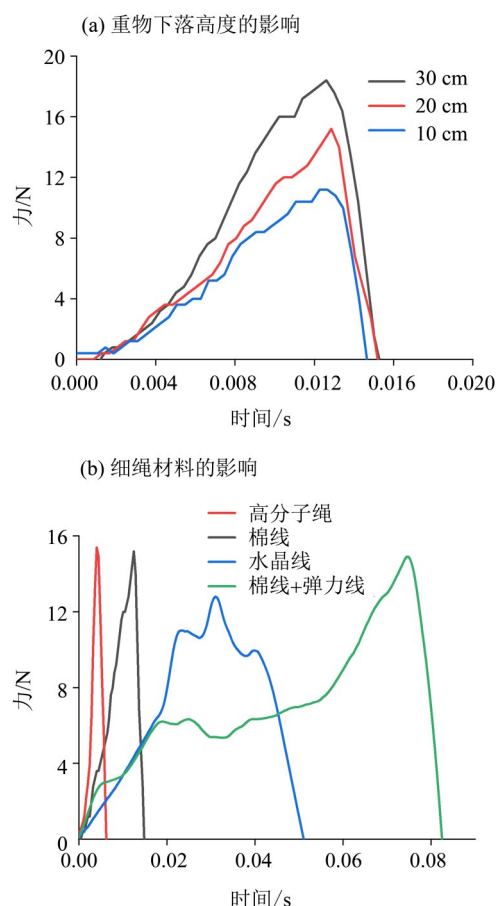


图5 不同参数对拉伸脉冲装置输出波形的影响

Fig. 5 The influence of different parameters on the output waveform of the tensile pulse device

沿、峰值位置及下降沿基本重合。3次实验的峰值力分别约为15、14.8和15.2 N,偏差小于2%;峰值时间均集中在0.012 s左右,时间偏差小于0.001 s。上述结果表明,该装置的重复加载一致性优异,脉冲输出稳定性良好。

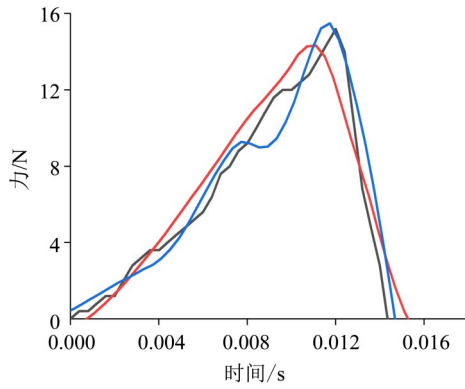


图6 拉伸脉冲装置重复加载稳定性实验

Fig. 6 Repeated loading stability experiment of the tensile pulse device

## 2.2 压缩与拉压混合脉冲装置的加载性能

设定激振器工作频率为10 Hz,分别施加2.5、4.0、5.0 V的驱动电压,并测量压缩脉冲装置的输出波形。如图7(a)所示,脉冲幅值随电压升高而增大,3种驱动电压下的峰值力分别约为5、8、10 N。为便于观测,已将压缩脉冲的负值力信号转换为正值显示。且,3种驱动电压下的脉宽基本一致。

在驱动电压为2.5 V的条件下,将激振器的工作频率设置为5、10 Hz,研究频率对压缩脉冲装置输出波形的影响。如图7(b)所示,2种频率工况下的波形峰值基本一致,脉宽分别约为0.1 s和0.05 s,这表明压缩脉冲波形的脉宽与激振器的工作频率呈负相关。

在电压为2.5 V、工作频率为10 Hz的条件下,开展了3组压缩脉冲加载重复试验。如图8所示,3次实验的峰值力分别约为5.3、5.1和4.9 N,峰值力最大偏差为0.4 N,相对偏差小于8%;峰值时间均集中在0.04 s左右,时间偏差小于0.002 s。结果表明,压缩脉冲装置具备良好的加载重复性与脉冲输出稳定性。

设定激振器的工作频率为10 Hz,分别施加1.5、2.5、3.5 V的驱动电压,得到拉压混合脉冲加载装置的输出波形,如图9所示。从图9可以看出,脉冲幅

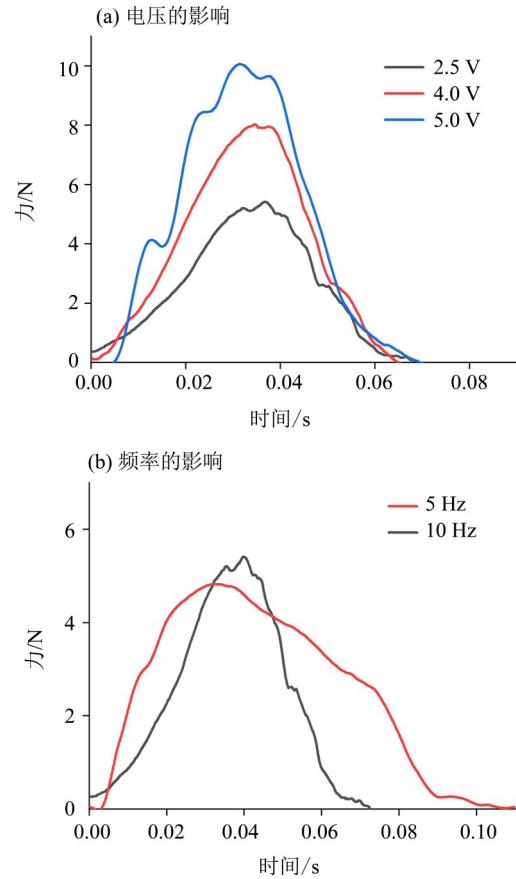


图7 电压与频率对压缩脉冲装置输出波形的影响

Fig. 7 Effects of voltage and frequency on the output waveform of the compression pulse device

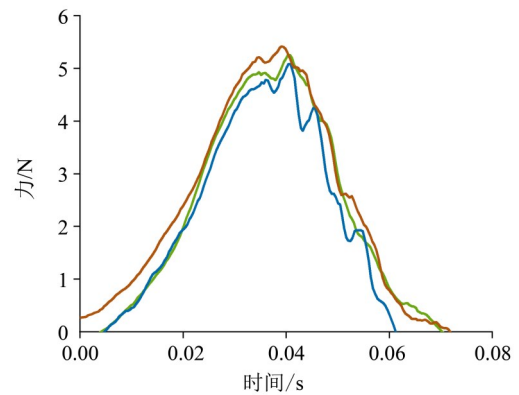


图8 压缩脉冲装置重复加载稳定性实验

Fig. 8 Repeated loading stability experiment of the compressive pulse device

值随电压升高而增大;在1.5、2.5、3.5 V的条件下,拉伸与压缩峰值分别约为4.0、6.0、7.5 N。各工况下,输出波形的周期基本一致,均在0.1 s左右。该变化规律与压缩脉冲加载装置的基本相同。同理,可通过调节激振器的工作频率实现对拉压混合脉冲周期的调控。

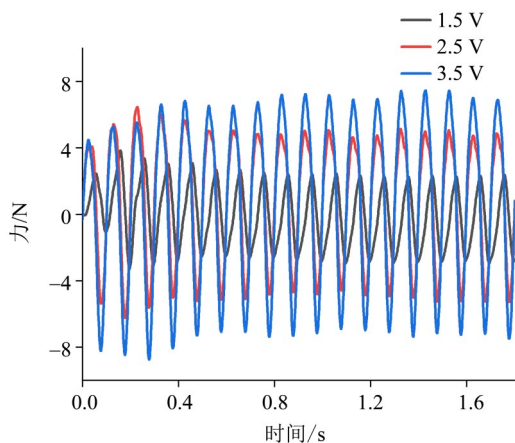


图9 电压对拉压混合脉冲装置输出波形的影响  
Fig. 9 Effect of voltage on the output waveform of the tension-compression hybrid pulse device

在电压为 2.5 V、工作频率为 10 Hz 的条件下,开展了 3 组混合脉冲加载重复试验。如图 10 所示,3 次实验的拉伸与压缩峰值力分别约为 4.4、4.5 和 4.7 N,峰值力最大偏差为 0.3 N,相对偏差小于 6.8%;周期均稳定在 0.1 s 左右,周期偏差小于 0.002 s。结果表明,混合脉冲装置输出的脉冲重复性良好。

### 2.3 撞击脉冲装置的加载性能

设定弹簧压缩量为 8、9、10 cm,开展撞击脉冲加载实验。如图 11 所示,撞击板速度随弹簧压缩量增大而提升,3 种压缩量下的撞击板速度分别为 0.8、0.9、1.0 m/s,且速度受摩擦作用存在小幅衰减。

从能量转化角度分析,弹簧压缩储存的弹性势能将转化为撞击板的动能,据此可推导得到撞击板速度与弹簧压缩量的关系为  $v = \sqrt{k/m} \cdot \Delta x$ 。其中, $v$

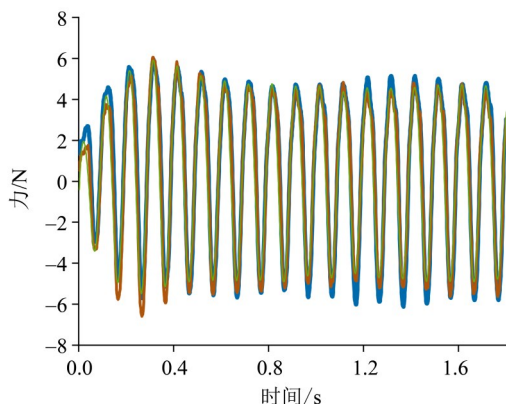


图10 拉压混合脉冲装置重复加载稳定性实验  
Fig. 10 Repeated loading stability experiment of the tensile-compressive mixed pulse device

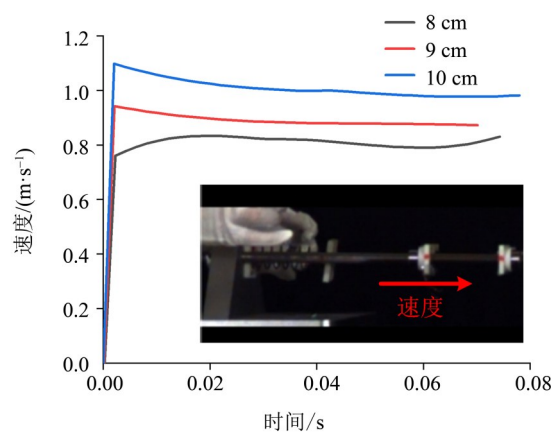


图11 弹簧压缩量对撞击脉冲装置输出信号的影响  
Fig. 11 Influence of spring compression on the output signal of the impact pulse device

是撞击板速度, $m$ 是撞击板质量, $k$ 是弹簧刚度系数, $\Delta x$ 是弹簧压缩量。由上式可知,撞击板的速度与弹簧压缩量成正比。

在弹簧压缩量为 10 cm 的条件下,开展了三组撞击脉冲加载重复试验。如图 12 所示,三次实验的稳定速度分别在 0.94、0.98 和 1.00 m/s,稳定速度最大偏差为 0.06 m/s,相对偏差小于 6%,结果表明,撞击脉冲装置输出稳定性良好。

## 3 装置的适用场景与优势分析

### 3.1 适用场景

本文设计了四种脉冲加载装置,可分别输出拉伸、压缩、拉压混合及撞击四类脉冲载荷,实验测得的加载波形汇总于图 13。由图 13 可见,输出脉冲具有幅值低、频率低的特点,适用于低强度、小尺度材

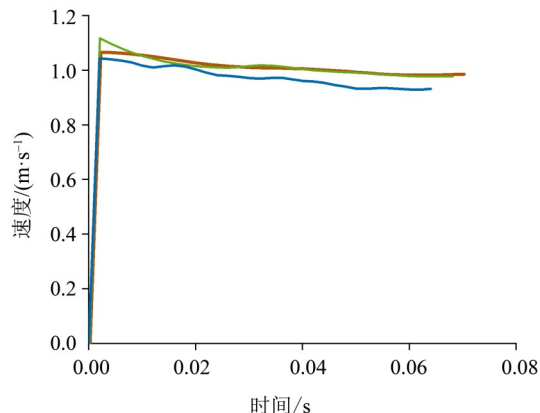


图12 撞击混合脉冲装置重复加载稳定性实验  
Fig. 12 Repeated loading stability experiment of the impact pulse device

料的动态力学性能测试,比如:软质材料与精密器件的动态性能表征。

各装置输出波形的幅值、脉宽或能量等参数可调,具体调控范围为:拉伸脉冲主要与重物的重力势能和细绳材料有关,大致能实现脉冲幅值从 0~30 N、脉宽从 0.01~0.1 s 的连续调控;压缩脉冲与混合脉冲主要由激振器系统的工作范围决定,该系统的输入电压范围为 0.1~5 V,工作频率为 0.1~2 000 Hz,对应的脉冲幅值范围为 0~15 N,理想的脉宽范围为 0.000 25~5 s。撞击脉冲主要与弹簧发射器的可储存弹性势能有关,当前系统可实现冲击能量 0.025~0.225 J,撞击速度 0.5~1.5 m/s 的调控。

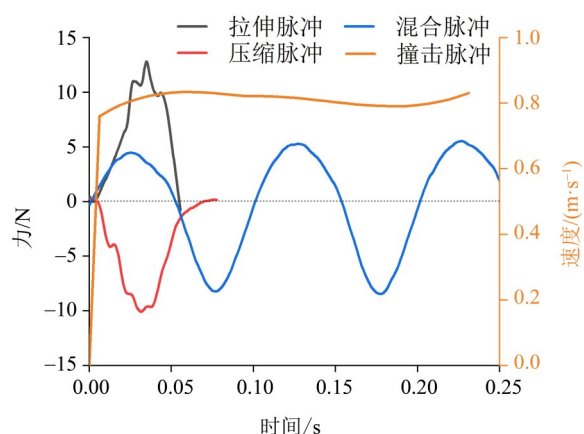


图 13 四种加载装置输出的脉冲波形

Fig. 13 Output pulse waveforms of the four pulse loading devices

为明确本文装置的适用应变率范围,采用工程上通用的近似应变率计算公式  $\dot{\epsilon} = F/(E_A t_w)$ 。其中,  $F$  为脉冲幅值,  $E_A$  为试件轴向刚度,取适配小载荷工况的试件轴向刚度值  $E_A = 20\ 000\ \text{N}$ ,  $t_w$  为脉冲作用时间(脉宽)。

由装置可调幅值与脉宽区间,可估算出拉伸脉冲加载装置的适用应变率范围为  $0.015\sim 0.15\ \text{s}^{-1}$ ,而压缩脉冲加载装置的适用应变率范围为  $1.5\times 10^{-4}\sim 3\ \text{s}^{-1}$ ,几乎都处于低应变率区间( $1\ \text{s}^{-1}$ 以下)。撞击脉冲加载装置可提供更大的冲击能量,其适用应变率范围估算值为  $50\sim 150\ \text{s}^{-1}$ ,处于中高应变率区间。

### 3.2 优势分析

本文不仅实现了拉伸、压缩脉冲加载,还能输出拉压混合脉冲与撞击脉冲,形成了较完整的动态加载体系,可满足大部分低应变率动态力学实验需求。与现有低应变率加载装置相比,本文装置在结构、成本、调控性能方面具备多重优势:

1) 拉伸脉冲与撞击脉冲加载装置以简易机械结构为主,无需复杂电控模块;压缩与混合脉冲加载装置也仅采用小型激振器与控制器,整体装配简便,大幅降低了实验装置的搭建难度。

2) 装置的核心部件多为标准化件或 3D 打印件,无需昂贵设备,有效控制了搭建与使用成本。本文拉伸脉冲与撞击脉冲装置整体成本远低于同类型自制拉伸装置的成本(Salih et al., 2024),也低于市面自制简易低应变率落锤装置的成本,经济性优势突出。

3) 在加载性能方面,本文装置可实现脉冲幅值与脉宽独立连续调节,且可调范围广;而多数低应变率装置参数相互耦合,无法单独调控。同时,本文装置具有优异的低应变率适配能力,拉伸、压缩、撞击脉冲加载装置的适用应变率范围分别为  $0.015\sim 0.15\ \text{s}^{-1}$ 、 $1.5\times 10^{-4}\sim 3\ \text{s}^{-1}$  和  $50\sim 150\ \text{s}^{-1}$ ,低于落锤装置(Li et al., 2015)和气动冲击装置(Agirre et al., 2021)的适用应变率范围(分别为  $2\sim 125\ \text{s}^{-1}$  和  $100\sim 300\ \text{s}^{-1}$ )。

## 4 结 论

本文设计了新型的低应变率拉伸、压缩、拉压混合及撞击脉冲加载装置,系统阐明了各装置的工作原理。通过实验验证了各装置的脉冲加载性能,并总结出了脉冲波形的调控规律。主要结论如下:1) 拉伸脉冲的幅值与重物下落的高度成正比,脉宽与细绳材料的弹性成正比。2) 压缩脉冲与拉压混合脉冲的幅值与激振器的电压成正比,脉宽与激振器的工作频率成反比。3) 撞击块的运动速度与弹簧压缩量成正比。基于以上调控规律,本文明确了各装置的适用范围。研究成果丰富了低应变率动态加载装置的类型,并为柔性材料、生物医用器件等的动态性能测试提供了经济高效的方案。

## 参考文献:

- 白春玉,刘小川,周苏枫,等,2015.中应变率下材料动态拉伸关键参数测试方法[J].爆炸与冲击,35(4):507-512.
- 曹增强,刘广通,左杨杰,2021.利用脉冲电磁力加载的螺接/铆接接头冲击性能测试装置及力加载方法[J].航天器环境工程,38(4):466-471.
- 刘志明,陈静芬,毛欢,等,2022.基于率相关三维弹塑性损伤模型的复合材料渐进失效分析[J].复合材料学报,39(5):2482-2494.
- 屈可朋,赵志江,沈飞,等,2019.高速破片撞击下带壳装药响应及防护的试验研究[J].火炸药学报,42(2):185-190.
- 孙洋,黄建,赵振强,等,2025.二维三轴编织碳纤维复合材料的冲击响应及冲击后压缩行为[J].材料工程,53(1):211-218.
- 王靖岳,王同义,吕坤,等,2023.盘式制动系统摩擦动力学研究进展[J].科技导报,41(10):106-114.
- 魏和光,周名哲,朱瑞卿,等,2025.受冲击荷载后未失效电池力学性能和电性能的劣化[J].爆炸与冲击,45(2):27-38.
- 岳文基,余守骏,阮越,等,2023.基于可编程摩擦电原理的晃动式脉冲发生器[J].集成技术,12(2):64-74.
- 张云鹏,吴文兵,2023.基于修正Rayleigh-Love杆件模型的桩基低应变测试中应变波三维传播分析[J].岩石力学与工程学报,42(S2):4310-4319.
- 邹慧辉,李明,段建,等,2022.钢筋动态本构模型及模型参数研究[J].兵器装备工程学报,43(8):193-202.
- Agirre J, Erice B, Abedul D, et al, 2021. A laboratory-scale instrumented forging hammer as an intermediate strain rate testing device[J]. EPJ Web Conf, 250:01002.
- Baranovskyi D, Drahobetskyi V, Bulakh M, et al, 2025. Improving the energy and physical-mechanical characteristics of armor-protective elements of a new design[J]. Mater Des: 115263.
- Beharic A, Rodriguez Egui R, Yang L, 2018. Drop-weight impact characteristics of additively manufactured sandwich structures with different cellular designs [J]. Mater Des, 145: 122-134.
- Huang W, Chen G, Hu M, et al, 2019. A miniature multi-pulse series loading Hopkinson bar experimental device based on an electromagnetic launch[J]. Rev Sci Instrum, 90(2): 025110.
- Jiang Z, Gao G, Wang X, et al, 2020. Strain rate and porosity effect on mechanical characteristics and depolarization of porous poled PZT95/5 ceramics [J]. Materials, 13(21): 4730.
- Li G, Liu D, 2015. Low strain rate testing based on drop weight impact tester[J]. Exp Tech, 39(5): 30-35.
- Nieto-Fuentes J C, Wihardja A, Stovall P, et al, 2025. A new drop weight tensile testing system for soft matter at intermediate strain rates [J]. Eur J Mech A-Solids, 111: 105507.
- Patel M, Patel S, 2025. Dynamic behavior analysis of steel, aluminum, and composite plates under extreme air blast loadings[J]. Mech Adv Mater Struct, 32(23): 5830-5846.
- Prameela E S, Walker C C, Dimarco C S, et al, 2024. High-throughput quantification of quasistatic, dynamic and spall strength of materials across 10 orders of strain rates [J]. PNAS Nexus, 3(5): 148.
- Rahmat M, Backman D, Desnoyers R, 2019. Intermediate strain rate material characterization with digital image correlation[J]. JoVE, 145: e59168.
- Salih A, Roth N, Buganim O, et al, 2024. A low-cost open-source uniaxial tensile system for soft tissue testing [J]. Hardware, 2(4): 292-305.
- Xie X, Yao W X, Wu T, et al, 2026. The first-order inherent frequency decrease model of FRP considering damage evolution under random vibration load [J]. J Reinf Plast Compos, 45(7/8): 1987-1993.
- Zhang X, Shi Y, Li Z X, 2019. Experimental study on the tensile behavior of unidirectional and plain weave CFRP laminates under different strain rates [J]. Compos Part B: Eng, 164: 524-536.

(责任编辑 王海蓉)