

基于电爆炸冲击波的测试系统动态特性研究

王浩先¹, 王 玉², 赖富文³, 王文廉^{1*}

(1. 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;

3. 中国人民解放军 63853 部队, 吉林 白城 137000)

摘要: 针对爆炸场景下对测试系统动态响应能力快速确认的需求, 提出一种基于金属丝电爆炸的测试系统动态特性评估方法。该方法以电爆炸冲击波为激励, 通过标准系统和被测系统同步采集压力信号, 并提取超压峰值、上升时间、持续时间、冲量等4个关键特征参量进行了对比分析。同时, 基于该方法研制了一套便携式电爆炸冲击波测试系统。电爆炸冲击波重复性实验结果表明, 6次实验所得冲击波超压峰值在20 kPa附近, 持续时间在1.2ms附近, 电爆炸冲击波重复性误差 $<5\%$, 满足现场动态测试需求; 对比测试发现被测系统峰值衰减约10%, 表明其前端调理或传感器灵敏度较低; 上升时间延迟约10.6%, 说明动态响应速度和带宽不足; 持续时间与冲量略高, 在10%误差范围内, 与标准系统呈现一致性。该方法为爆炸环境中测试系统的动态特性的快速评估与可用性确认提供了一种有效补充手段, 拓展了测试系统动态评估方法的适用范围。但是, 由于管道传播存在整形效应, 评估结果偏重相对性能判定, 以及激励能量尺度受限, 其更适用于现场快速动态性能筛查, 而非替代高精度实验室标定方法。

关键词: 电爆炸冲击波; 动态特性评估; 现场诊断; 冲击波测试系统; 同步采集

中图分类号: TJ06 文献标识码: A doi: 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.12.0005

引用格式: 王浩先, 王玉, 赖富文, 等. 基于电爆炸冲击波的测试系统动态特性研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2026, 47(2): 184-191.

WANG Haoxian, WANG Yu, LAI Fuwen, et al. Dynamic characteristics analysis of test systems based on electro-explosive shock waves[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2026, 47(2): 184-191.

Dynamic Characteristics Analysis of Test Systems Based on Electro-Explosive Shock Waves

WANG Haoxian¹, WANG Yu², LAI Fuwen³, WANG Wenlian^{1*}

(1. School of Instrumentation and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. 63853 Unit of People's Liberation Army of China, Baicheng 137000, China)

Abstract: To address the requirement for rapid verification of a test system's dynamic response capability in explosive scenarios, a method for evaluating the dynamic characteristics of test systems based on metal wire electro-explosive testing was proposed. An electro-explosive shock wave was employed as the excitation source, and pressure signals were synchronously collected from both the standard system and the sys-

收稿日期: 2025-12-02

作者简介: 王浩先(1996—), 男, 硕士生, 主要从事动态测试技术与智能仪器仪表设计的研究。

* 通信作者: 王文廉(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事测试系统与仪器、信号与信息处理等领域的研究。E-mail: wangwenlian@nuc.edu.cn。

tem under test. Four key characteristic parameters, i. e., overpressure peak, rise time, duration and impulse, were extracted for comparative analysis. Based on this methodology, a portable electro-explosive shock wave test system was developed. Repeatability tests of the electro-explosive shock wave demonstrate that the peak overpressure values are consistently around 20 kPa and the duration values around 1.2 ms across six trials, with a repeatability error less than 5%, which satisfies the requirements of field dynamic testing. Comparative tests reveal that the system under test exhibits an approximately 10% peak attenuation, indicating potential limitations in front-end signal conditioning or sensor sensitivity. The rise time of the system under test shows a delay of approximately 10.6%, which suggests insufficient dynamic response speed and bandwidth. The duration and impulse remain within the 10% error margin, demonstrating good consistency with the standard system. This methodology provides an effective supplementary approach for the rapid assessment and usability verification of the dynamic characteristics of test systems in explosive environments, expanding the applicability of dynamic evaluation techniques. However, due to the shaping effect during pipeline propagation, the emphasis on relative performance evaluation, and the limitation in excitation energy scale, it is more suitable for rapid dynamic performance screening in the field rather than replacing high-precision laboratory calibration methods.

Key words: electro-explosive shock wave; dynamic characteristic evaluation; field testing; shockwave test system; synchronous acquisition

0 引 言

爆炸冲击波测试系统的动态特性表征是爆炸力学、含能材料、毁伤效应、国防工程和爆炸安全工程领域的核心科学问题之一^[1-2]。在实验室环境中,激波管和正弦压力标定机产生的标准化激励波形具备高可控性与良好重复性。激波管可输出阶跃波形,广泛应用于传感器和测试系统的动态标定。正弦压力标定机输出可控频率的周期信号,用于系统频响和幅频特性研究^[3-4]。国内外大量研究依托激波管和正弦压力标定机这类装备开展测试,例如:杨凡等^[5]基于激波管研究冲击波压力传感器动态特性校准,丰雷^[6]分析了影响激波管动态压力校准精度的关键问题,这些研究共同完善了实验室条件下的标准化动态评价体系。

随着新型含能材料、金属燃烧材料及空气爆炸混合物等研究的发展,实际爆炸环境呈现出更强的非理想特征,其压力波形在上升沿陡度、能量释放过程及频谱结构等方面均明显复杂化^[7-8]。在此背景下,针对复杂爆炸载荷条件下测试系统动态响应能力的评估需求逐渐增强。研究这一问题最直接的方法是自由场爆炸实验,该方法贴合真实情况,但爆炸现场环境恶劣,成本高,可重复性差,难以开展精确测量^[9]。这对现场冲击波测试系统的动态特性研究提出新要求,若能有一种

可在现场条件下快速确认测试系统动态特性的方法,将更便于开展对爆炸现场的测试系统的直观研究。

金属丝电爆炸技术是当高密度电流脉冲通过金属丝时,金属丝会在微秒尺度内经历熔化、气化并形成高温高压等离子体,最终产生类似真实爆炸的冲击波场^[10]。Mellor等^[11]搭建了电爆炸平台,通过高速摄影得到了电爆炸产生的爆炸冲击波波形;刘奔等^[12]搭建了电爆炸实验平台,研究了电爆炸冲击波与放电参数之间的关系;邹梦宇^[13]通过改变铜丝质量丝阵数、气压、环境等参数,研究了微秒级铜丝电爆炸的物理特性。上述研究表明,电爆炸产生的冲击波波形结构接近真实爆炸,且放电电压与峰值超压呈正相关关系;金属丝材料与直径则与能量释放速率密切相关。但是,这些研究并未对金属丝电爆炸产生的可控冲击波加以应用。

本文针对现场条件下快速确认测试系统动态特性这一需求提出基于一种基于电爆炸冲击波的测试系统动态特性研究方法,根据该方法研制了一套微型化便携式电爆炸冲击波测试系统,开展了一系列实验并分析了结果,以期测试系统在复杂爆炸环境中的测试系统动态特性的快速评估与可用性确认提供一种有效补充手段,从而拓展测试系统动态评估方法的适用范围。

1 评估方法总体设计

评估方法总体设计思路是将金属丝电爆炸在微秒时间内转化电能而产生的可控、可重复爆炸冲击波作为激励输入,并将同一爆炸冲击波作用

于标准系统与被测系统,对比分析两个系统的超压峰值、上升时间、持续时间与冲量等4个关键特征量。评估方法总体流程包括电爆炸激励生成、双系统同步采集、信号预处理(滤波+基线校正)、特征量提取、对比分析及系统动态特性评估6个步骤,具体如图1所示。

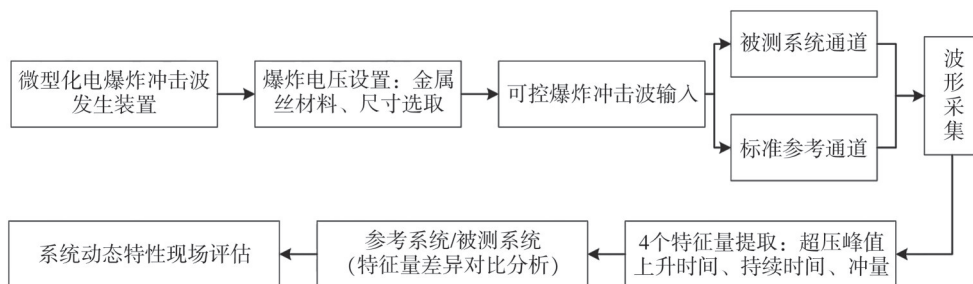


图1 评估方法总体流程框图

Fig. 1 Overall flowchart of the system methodology

该评估方法的显著特征为以电爆炸作为激励源,产生的爆炸冲击波物理上更接近真实爆炸过程;通过标准系统与对被测系统对同一爆炸冲击波进行同步采集,由对比分析直接获得4个特征量:超压峰值、上升时间、持续时间与冲量;以4个特征量作为评价指标,均能直接对应冲击加载的作用机理变化,避免了复杂模型耦合及参数反演,提高了结果解释性,利于现场快速决策。基于此评估方法研制的便携式电爆炸冲击波测试系统无需大型激波设施,适合新型含能材料研究、爆炸场景测试及现场即时确认。

2 理论基础

2.1 超压峰值

超压峰值是指冲击波传播到测点位置时,瞬时压力相对于环境静压的最大增量,反映的是爆炸冲击波在到达测点瞬间产生的最大冲击强度,表示为

$$\Delta p_{\text{peak}} = p_{\text{max}} - p_0, \quad (1)$$

式中: p_{max} 为冲击波作用下测得的最大瞬时压力; p_0 为环境静压。

超压峰值主要受以下系统动态特性的影响:当系统带宽不足时,高频成分衰减,导致峰值被“削顶”,出现幅值低估现象;当传感器灵敏度偏低或调理电路增益不足时,测得峰值整体偏低;当在高幅冲击下系统存在非线性压缩或饱和效应时,会造成峰值测量失真。因此,峰值偏差通常反映系统的幅值传递能力与高频响应能力。

2.2 上升时间

上升时间为冲击波从初始压力升高到最大超压的时间间隔。为了提高鲁棒性,常采用10%~90%峰值法。算法步骤:滤波→峰值检出 p_{peak} → 计算阈值 $0.1p_{\text{peak}}$, $0.9p_{\text{peak}}$ → 求对应时刻差。

$$T_{\text{rise}} = t_{90\%} - t_{10\%}, \quad (2)$$

式中: $t_{10\%}$ 与 $t_{90\%}$ 分别为波形第一次超过峰值的10%与90%的时刻(基线以冲击前稳态平均值为零点)。

上升时间与测试系统的响应速度和系统带宽特性密切相关,是评价系统动态响应能力的关键指标之一。系统带宽与等效上升时间近似满足反比关系,带宽越低,系统响应越慢,测得的上升时间越长;若系统固有响应时间较长,则无法及时跟踪快速压力变化,导致前沿展宽和时间延迟。

2.3 持续时间

持续时间为冲击波正相位(超压)作用的有效持续时间。常用正相位窗口法,即从信号首次超过阈值 p_{th} 到最后一次回落到阈值的时间,表示为

$$T_{\text{duration}} = t_{\text{end}} - t_{\text{start}}, \quad (3)$$

式中: t_{start} 为冲击波到达时间; t_{end} 为正相结束时间。取阈值 $p_{\text{th}} = 0.05 \times p_{\text{peak}}$ (5%峰值),或根据需求选用相关时间尺度。

持续时间更多反映系统的低频保持能力与整体波形保真度。若系统低频响应良好,则测量结果较为稳定。若系统存在高频衰减导致波形整体展宽,则持续时间可能被拉长。

2.4 冲量

冲量为冲击波与被测系统的作用力积累,通常通过积分压力波形得到。数值实现采用离散积分(矩形或梯形积分),并减去基线偏置,单位 $\text{kPa}\cdot\text{s}$ 。

$$I = \int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} \Delta p(t) dt, \quad (4)$$

式中: $\Delta p(t)$ 为冲击波超压。

冲量是表征冲击波对系统总能量作用的指标,反映系统的整体能量保持能力与频率响应综合特性,其受多种动态特性耦合的影响:若高频

成分衰减但低频保持良好,冲量可能变化不大;若峰值明显衰减或持续时间改变,则冲量会产生累积误差;若存在幅值压缩或非线性响应,冲量计算将产生系统性偏差。

3 实验与讨论

3.1 微型化电爆炸冲击波测试装置设计

整套实验装置由电爆炸装置、电爆炸实验管道和信号采集装置三部分构成,测试装置的原理如图 2 所示,测试装置实物图如图 3 所示。

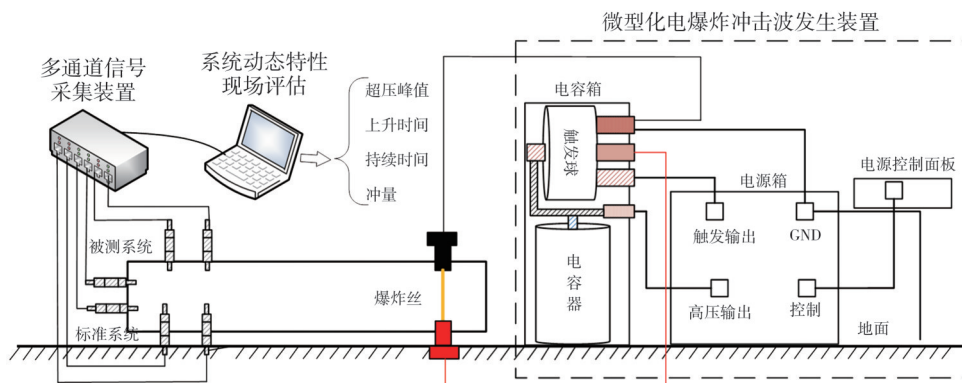


图 2 微型化电爆炸冲击波测试装置原理图

Fig. 2 Schematic diagram of a miniaturised electro-explosive shock wave testing device

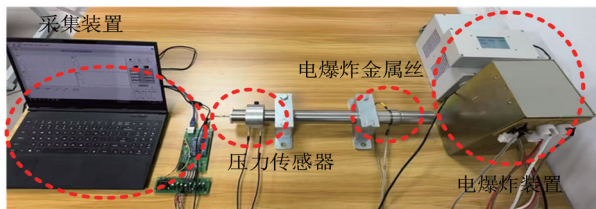


图 3 微型化电爆炸冲击波测试装置实物图

Fig. 3 Photograph of the miniaturised electrical explosion shock wave testing device

电爆炸装置由高压电源、电源控制面板、高压电容器组以及爆炸丝组成。高压电源装置采用谐振型高压电源架构,其输出电压可在 $8\sim 17\text{ kV}$ 范围内调节,调节精度为 0.1 kV ,电源控制面板可根据实验需求设置电压大小、输出频率以及输出模式;高压电容组、电阻、触发球等组件被集成到电容箱内。该装置将金属丝电爆炸在微秒时间内转化电能而产生的可控、可重复爆炸冲击波作为激励输入,通过调节充电电压实现冲击波峰值超压的调节;通过改变金属丝材料与直径,对能量释放速率进行调控,从而间接影响冲击波上升时间与作用时间等关键波形参数,为测试系统动态特性评估提供了稳定、可复现的激励条件。

实验管道选择管道外径为 45 mm ,内径为 39 mm 的无缝钢管,管道一端封闭,另一端开放,其中封闭端长度固定为 400 mm ,开口端长度为 100 mm ,二者通过螺纹连接,电爆炸金属丝放置在螺纹连接处,在不同位置安装压力传感器,并通过信号线与数据采集装置连接,从而测量冲击波在不同位置的压强。采集装置由压力传感器、多通道冲击波超压采集装置和上位机软件组成。压力传感器选用 PCB 公司的 IEPE 压电式传感器;多通道冲击波超压采集装置最高采样频率为 1 MHz ,采样频率可通过编程控制,支持 8 路信号同步采集,其采集原理为压力传感器将采集到压力信号输出为毫伏级的电压信号,经过信号调理电路放大滤波后,调节至 A/D 转化电路的有效区间,装置具有采集和存储的功能,数据最终通过上位机软件读取。主要技术指标见表 1。

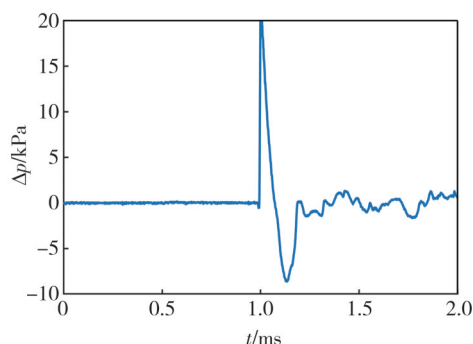
表 1 主要技术指标

Tab. 1 Main technical parameters

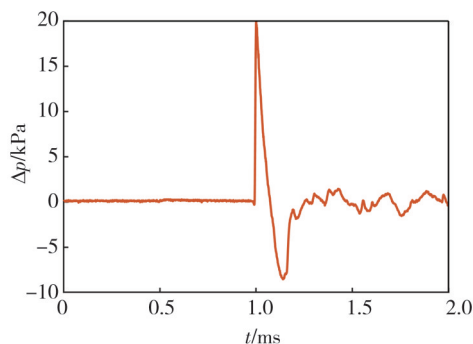
指标	范围
上升时间/ μs	≤ 10
触发阈值	可设置、可调节
采样频率/ MHz	1
采样精度/bit	12
存储数据容量/ MB	1

3.2 电爆炸冲击波重复性实验

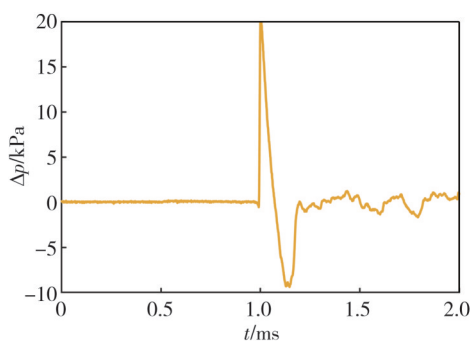
本实验是为了验证电爆炸装置产生爆炸冲击波的重复性与稳定性,选取长度为10 cm、直径为0.20 mm的铜丝作为电爆炸丝,放电电压为17 kV,压力传感器置于距爆源轴向20 cm处。在此基础上开展6次重复性实验,每次实验都在相同环境温度、压力和触发条件下进行。图4为6次实验中爆炸丝冲击波的压力-时间曲线。对上述实验数据进行处理,得到6次实验的综合曲线如图5(a)所示,可以看出,电爆炸冲击波在上升段快速陡升,随后是正压作用和负压作用过程,与典型的爆炸冲击波波形(图5(b))相似,表明本文冲击波曲线符合真实爆炸条件。



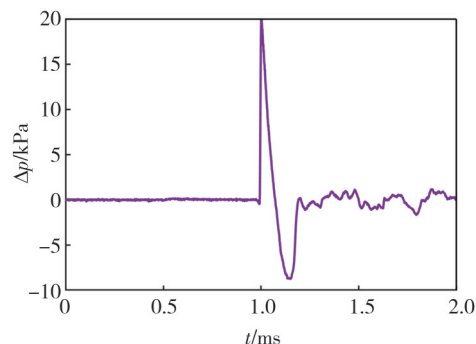
(a) 第一次实验



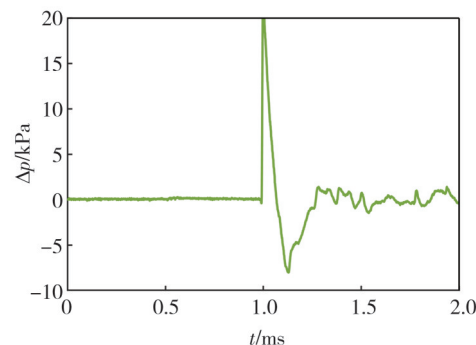
(b) 第二次实验



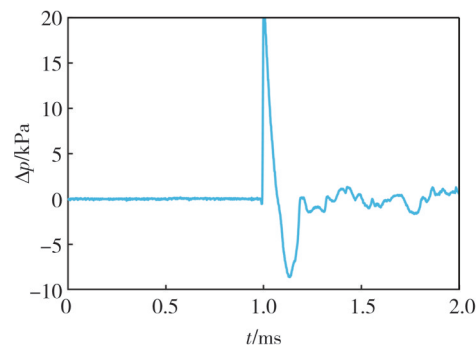
(c) 第三次实验



(d) 第四次实验



(e) 第五次实验

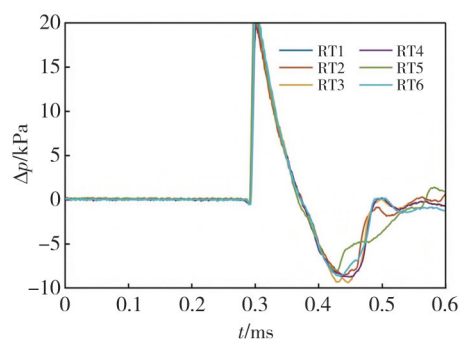


(f) 第六次实验

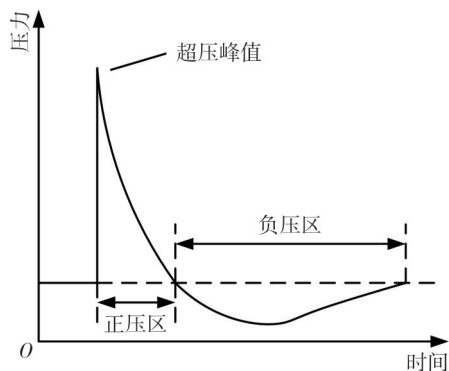
图4 6次重复性实验的冲击波压力-时间曲线

Fig. 4 Pressure-time curves of shock waves from six replicate experiments

6次实验所得冲击波超压峰值在20 kPa附近,持续时间在1.2 ms附近,不同实验中存在一定波动但整体变化范围较小,波形形态及上升沿一致性好,满足现场动态测试的需求。



(a) 爆炸丝冲击波超压-时间重复性曲线



(b) 典型爆炸冲击波超压-时间曲线

图 5 典型爆炸冲击波波形与爆炸丝重复波形比较

Fig. 5 Comparison of typical detonation shock waveform with detonating cord repetitive waveform

3.3 电爆炸冲击波动态特性评估实验

本节实验的目的是利用金属丝电爆炸产生的可控爆炸冲击波输入,对冲击波测试系统的动态特性进行现场评估与验证,在相同电爆炸冲击波激励条件下对标准系统与被测系统进行同步对比测试,重点识别两者在上升沿响应、波形畸变及高频衰减特征方面的相对差异,而非冲击波高频细节的高保真重建。

在该应用场景下,采样率主要影响高频细节恢复能力,但对系统动态响应相对评价的影响有限。为验证采样率设置的合理性,本文对采样率与冲击波频谱匹配关系进行了分析。根据奈奎斯特采样定理,1 MHz 采样率对应的奈奎斯特频率为 500 kHz,即系统可无混叠采集 500 kHz 以内的信号频率成分。外场爆炸冲击波虽具有微秒量级上升沿,但其主要能量频带通常集中在几十 kHz 至数百 kHz 范围,高于 MHz 量级的频率成分能量占比较低,并且冲击波在传播过程中易受到介质耗散以及因测试链路带宽的限制而衰减。因此,从主导能量频带角度看,1 MHz 采样率能够覆盖典型工程爆炸冲击波的有效频谱范围。同时,该采样配置适用于微秒量级冲击波动态性能评估。

实验前将金属丝(长度 10 cm、直径 0.20 mm 的铜丝)固定安装于金属管内部结构中,并与高压电源连接。标准测试系统选择 RIGOL 公司的 DHO1000 系列的示波器,其采样率最高为 1 GHz,带宽为 500 MHz,支持两个通道的信号同时输入,支持多种触发模式,适合处理具有快速上升沿的冲击波信号。待测系统为多通道超压采集装置,实验中设置其采样频率为 1 MHz,采样精度为 12 bit。

实验过程中标准测试系统与待测系统分别与压力传感器进行连接,通过施加 17 kV 的高压,驱动金属丝发生电爆炸,产生的可控爆炸冲击波沿管道传播后作用于管内各测点,形成压力时域响应,标准系统与待测系统同时记录冲击波响应。实验结束后关闭高压电源,停止采样。

为保证特征量的可重复性,对采集到的超压信号进行处理。在管道约束传播条件下,冲击波前沿由冲击波、壁面反射压缩波及前驱扰动叠加形成复合波阵面,使前沿呈现多波峰特征而非理想单跃迁结构。本文以上升沿首个主波峰到达时刻作为统一判据进行统计。首先使用零相位二阶巴特沃斯带通滤波器对原始采样信号进行滤波,滤波器采用双向滤波以消除相位延迟;在峰值前向搜索找到第一个超过 0.1 倍峰值与第一个超过 0.9 倍峰值的采样点,二者时差即上升时间,若噪声导致多次跨越,则取第一次连续超过条件的时间;以 0.05 倍峰值为阈值,将首次超过阈值与最后一次回落的时间差作为持续时间,若存在次级脉冲时间间隔小于 0.5 ms,则合并为同一脉冲;以触发前 1 ms 的平均值作为基线,整体信号减去该基线,采用梯形积分法对去基线压力波形积分,积分区间取首次超过基线 5% 到最后回落到基线的 5% 的时刻。标准系统与待测系统在相同输入冲击波作用下的响应差异如图 6 所示。

对被测系统的 4 个特征量与标准系统对应的特征量进行差异度分析。由 6 组对比实验测得的标准系统与待测系统的动态响应对比结果见表 2。

表 2 标准系统与待测系统动态响应对比

Tab. 2 Comparison of dynamic response between standard system and tested system

类型	压力/kPa	上升时间/ μ s	持续时间/ms	冲量/(Pa·s)
标准系统	225.6 $\pm$ 8.2	8.5 $\pm$ 0.5	0.49 $\pm$ 0.06	40.3 $\pm$ 4.1
被测系统	203.0 $\pm$ 7.9	9.4 $\pm$ 0.6	0.48 $\pm$ 0.08	36.0 $\pm$ 6.8

注:表中数值为 6 次实验的均值 $\pm$ 标准差。

通过标准系统与待测系统的动态响应对比可以看出,电爆炸冲击波在管道内传播时会受到边界约束,相较于自由场球扩散,其横向扩展受限,轴向能量集中。该约束效应对部分参量产生影响,如轴向峰值增强,正压作用时间延长,同时管道内多次反射及边界效应会使前沿出现振荡,表现为上升沿抖动。对比标准系统与待测系统可知,前者带宽更高,能够解析出复合前沿细节;而被测系统对高频成分存在衰减,导致上升沿被平滑化并呈现一定频率特

征丢失。因此,图中上升沿变缓及抖动现象为管道传播效应与系统带宽限制的耦合结果。但是,本文在构建的相同激励源与传播路径条件下,管道传播带来的系统性偏差对标准系统与测试系统具有一致性,不影响测试系统动态响应的相对评估结果。结果表明:电爆炸冲击波在上升沿形态及整体压力历程上仍保持典型爆炸波特征。标准系统峰值均值约225.6 kPa,被测系统衰减约10%,均值为203.0 kPa,

说明其前端调理或传感器灵敏度较低。标准系统上升时间均值为8.5 μs ,被测系统延迟约10.6%,均值为9.4 μs ,反映被测系统动态响应速度慢于标准系统,表明其响应带宽略低;待测系统的持续时间和冲量在10%误差范围内,与标准系统呈现一致性。该结果表明被测系统的动态响应特性与标准系统高度匹配,证明被测系统具备准确复现或测量冲击波的关键力学参数,满足测试需求。

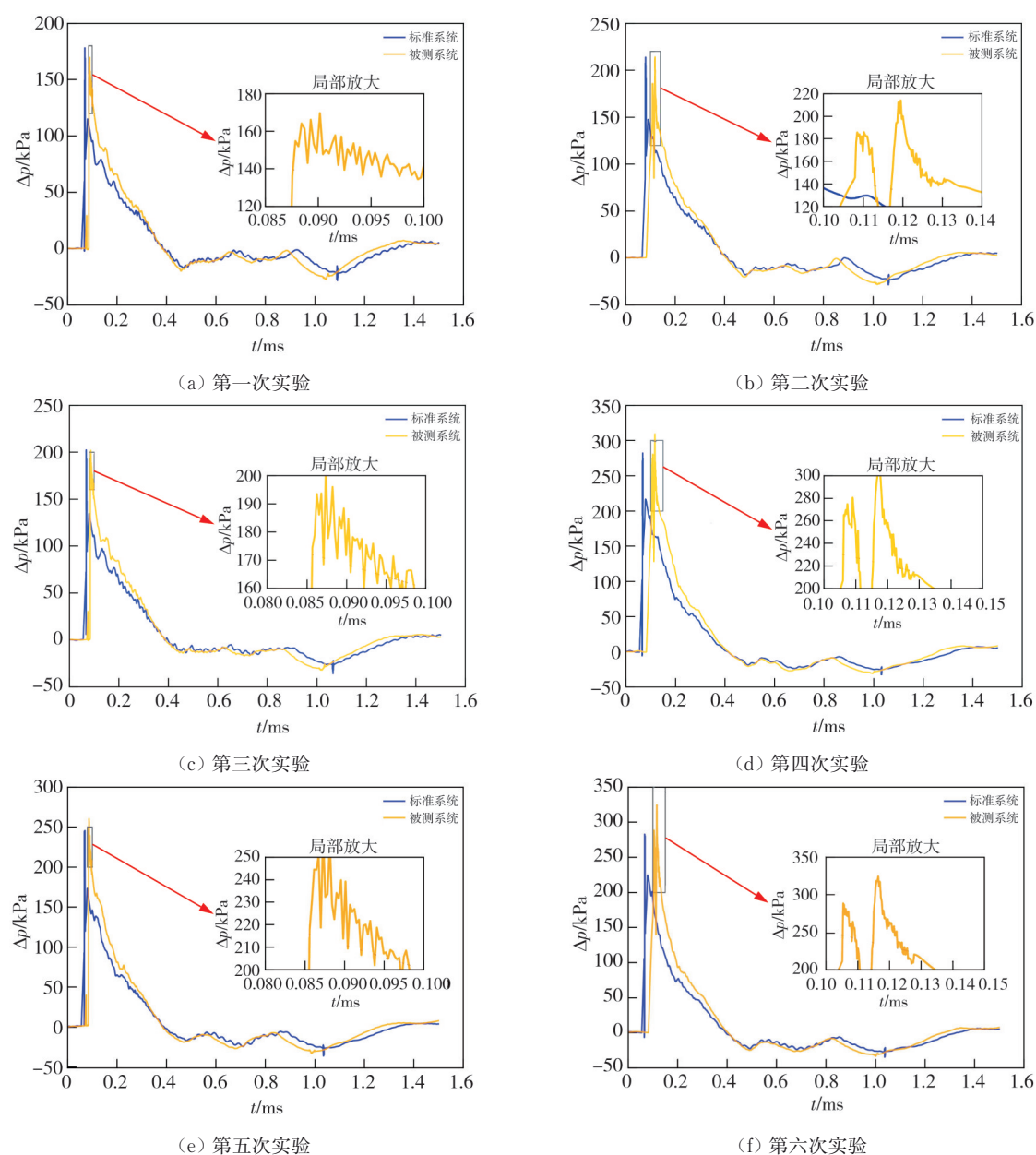


图6 标准系统与测试系统的动态响应对比曲线

Fig. 6 Dynamic response comparison curve between standard system and test system

4 结论

本文提出了一种基于电爆炸冲击波的测试系统动态特性研究方法,基于此方法研制了一套便携式

电爆炸冲击波测试系统,并开展了电爆炸冲击波重复性实验和动态特性评估实验,所得结论如下:

1) 该方法直接分析冲击波测试系统输出信号的4个关键特征量(超压峰值、上升时间、持续时

间与冲量), 并通过与标准系统对比分析实现对测试系统整体动态响应的现场诊断与特征量评估。

2) 在固定参数条件下, 爆炸丝冲击波实验系统具备良好的稳定性与可靠性, 所产生的冲击波重复性高, 能够保证实验结果的可信度, 满足实际应用中的可重复性要求。

3) 所研制的便携式电爆炸冲击波测试系统体积小, 可现场部署, 并支持标准系统与被测系统同步采集, 可实现复杂现场爆炸条件下测试系统动态特性的快速评估及系统可用性的现场确认。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献:

- [1] 崔海涛, 刘庆明. 冲击波压力传感器测试系统的动态标定[J]. 流体力学实验与测量, 2004(1): 92-96.
CUI Haitao, LIU Qingming. Dynamic calibration of shock wave pressure measurement system[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2004 (1): 92-96. (in Chinese)
- [2] 祖静, 马铁华, 范锦彪, 等. 新概念动态测试[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [3] 张琨, 付宇, 李鹏飞, 等. 一种冲击波动态压力测量仪校准方法[J]. 兵工自动化, 2025, 44(6): 52-55.
ZHANG Kun, FU Yu, LI Pengfei, et al. Calibration method for shock wave dynamic pressure measurement instrument[J]. Ordnance Industry Automation, 2025, 44 (6): 52-55. (in Chinese)
- [4] 于大洋, 刘业路, 孔庆有, 等. 正弦动态压力校准装置的建立与应用[J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(4): 85-86.
YU Dayang, LIU Yelu, KONG Qingyou, et al. Establishment and application of sinusoidal dynamic pressure calibration device [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2023, 13(4): 85-86. (in Chinese)
- [5] 杨凡, 孔德仁, 姜波, 等. 基于激波管校准的冲击波压力传感器动态特性研究[J]. 南京理工大学学报, 2017, 41(3): 330-336.
YANG Fan, KONG Deren, JIANG Bo, et al. Dynamic characteristic of shock wave pressure sensor based on shock tube calibration[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2017, 41(3): 330-336. (in Chinese)
- [6] 丰雷. 影响激波管动态压力校准精度的关键问题研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [7] 韩磊, 方展翔, 叶腾钊, 等. 爆炸冲击下氟壳铝释能特性试验研究[J]. 北京理工大学学报, 2025, 45(5): 444-452.
HAN Lei, FANG Zhanxiang, YE Tengke, et al. Experimental study on the energy release characteristics of fluorine shell aluminum under blast impact [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2025, 45(5): 444-452. (in Chinese)
- [8] 张蓓蓓, 程扬帆, 蒋八运, 等. 典型金属粉末对FAE冲击波效应和热毁伤性能的影响[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(10): 123-135.
ZHANG Beibei, CHENG Yangfan, JIANG Bayun, et al. Influence of typical metal powders on the shock wave effects and thermal damage performance of FAE [J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(10): 123-135. (in Chinese)
- [9] NING Y L, ZHOU Y G. Shock tubes and blast injury modeling[J]. Chinese Journal of Traumatology, 2015, 18 (4): 187-193.
- [10] 张永民, 姚伟博, 邱爱慈, 等. 金属丝电爆炸现象研究综述[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2668-2680.
ZHANG Yongmin, YAO Weibo, QIU Aici, et al. Review of wire electrical explosion phenomena[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45 (8): 2668-2680. (in Chinese)
- [11] MELLOR W, LAKHANI E, VALENZUELA J C, et al. Design of a Multiple exploding wire setup to study shock wave dynamics [J]. Experimental Techniques, 2020, 44(2): 241-248.
- [12] 刘奔, 王德国, 郭岩宝, 等. 水环境下铜丝电爆炸特性及其冲击波行为[J]. 高电压技术, 2018, 44(12): 4038-4044.
LIU Ben, WANG Deguo, GUO Yanbao, et al. Discharge characteristics and shock waves behaviors of underwater copper wire explosion [J]. High Voltage Technology, 2018, 44(12): 4038-4044. (in Chinese)
- [13] 邹梦宇. 微秒级铜丝电爆炸物理特性研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2025.