

基于聚氨酯波形整形器的霍普金森杆脉宽拓展试验方法

李祥宇¹, 赵锐^{1*}, 石云波¹, 陈玉楠², 张鹏¹, 陈亮¹, 郭涛¹

(1. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051; 2. 山西机电职业技术学院, 山西 长治 046011)

摘要: 传统霍普金森杆冲击试验中子弹与入射杆之间以瞬态弹性碰撞为主, 导致入射应力脉冲脉宽调控范围有限, 难以满足百微秒量级力学过载冲击加载的试验需求。本文以8800M型聚氨酯作为波形整形器的材料, 提出一种可控脉宽拓展冲击试验方法。该方法通过在子弹与入射杆接触界面引入聚氨酯波形整形器, 调制初始接触条件与应力波形成过程, 使子弹-入射杆之间的瞬态弹性碰撞转变为接触历程显著延长、过程可控的非瞬态接触行为, 从而实现入射脉冲上升沿的平缓化及脉宽的有效拓展。基于有限元方法建立子弹-整形器-入射杆有限元模型, 系统分析了整形器厚度(1~10 mm)、子弹初速度(14~20 m·s⁻¹)等关键参数对脉冲峰值与脉宽的影响规律, 明确了厚度为脉宽调控的主导参数, 并且在波形整形器直径为10 mm时脉宽拓展的线性有效区间为1~5 mm。仿真与试验结果表明: 采用聚氨酯波形整形器后, 重复性试验中脉冲脉宽的相对标准偏差为3.28%, 可在保证脉冲波形稳定性的前提下实现脉宽的显著拓展; 不同工况下试验获得的脉冲平均脉宽与仿真结果具有良好的一致性, 最大相对误差为3.25%, 从而验证了所建立模型及研究方法的有效性。

关键词: 霍普金森杆; 脉宽-峰值; 聚氨酯; 波形整形; 力学过载

中图分类号: O347.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2026.01.0009

引用格式: 李祥宇, 赵锐, 石云波, 等. 基于聚氨酯波形整形器的霍普金森杆脉宽拓展试验方法[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2026, 47(4): 457-463.

Li Xiangyu, Zhao Rui, Shi Yunbo, et al. Hopkinson bar pulse width extension test method based on polyurethane wave shaper[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2026, 47(4): 457-463.

Hopkinson Bar Pulse Width Extension Test Method Based on Polyurethane Wave Shaper

Li Xiangyu¹, Zhao Rui^{1*}, Shi Yunbo¹, Chen Yunan², Zhang Peng¹, Chen Liang¹, Guo Tao¹

(1. Key Laboratory of Electronic Testing Technology, North China University of Technology, Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Changzhi 046011, China)

Abstract: In traditional Hopkinson bar impact tests, the interaction between the projectile and the bar primarily involves transient elastic collisions. This limits the controllable range of the incident stress pulse width, making it difficult to meet the testing requirements for mechanical overload impacts at the hundred-microsecond scale. This paper proposes a controlled pulse width expansion impact testing method using 8800M polyurethane as the waveform shaper material. This method introduces a polyurethane waveform

收稿日期: 2026-01-14

作者简介: 李祥宇(2001—), 男, 硕士生, 主要从事高过载冲击脉冲脉宽拓展的研究。

* **通信作者:** 赵锐(1988—), 男, 副教授, 博士, 主要从事MEMS技术、微惯性技术的研究。E-mail: zhaorui@nuc.edu.cn。

shaper at the bullet-impact rod interface to modulate initial contact conditions and stress wave formation. This transforms the transient elastic collision into a non-transient contact behavior with significantly extended duration and controllable process, thereby achieving a smoother rise of the impact pulse and effective pulse width expansion. A finite element model of the bullet-shaper-impact rod system was established using the finite element method. Key parameters such as shaper thickness (from 1 to 10 mm) and bullet initial velocity (from 14 to 20 m·s⁻¹) were systematically analyzed to investigate their influence on pulse peak and width. Thickness was identified as the dominant parameter for pulse width control, with a linear effective range of from 1 to 5 mm for pulse width expansion when the waveform shaper diameter is 10 mm. Simulation and experimental results demonstrate that the polyurethane waveform shaper achieves a relative standard deviation of 3.28% in pulse width during repeatability tests, enabling significant pulse width expansion while maintaining stable waveform characteristics. The average pulse widths obtained under various operating conditions exhibit excellent consistency with simulation results, with a maximum relative error of 3.25%, thereby validating the established model and research methodology.

Key words: Hopkinson bar; pulse width-peak; polyurethane; waveform shaping; mechanical overload

0 引 言

在爆炸冲击、火工品激发以及高速发射等工程场景中,结构与器件往往承受持续时间为百微秒量级的瞬态冲击载荷^[1-2]。为了在实验室条件下可控地再现此类过载冲击环境,自由式霍普金森杆因其应力波质量高、加载条件可重复等优势,被广泛应用于高应变率材料表征及冲击响应测试^[3-5]。然而,在传统结构下,冲击脉冲的持续时间主要由子弹长度与材料声学参数所决定,其可调范围较为有限,使得输出载荷的时间尺度难以灵活匹配复杂过载冲击工况及结构器件的测试需求,这在一定程度上制约了霍普金森杆在精细化冲击加载方面的应用^[6-9]。

为突破上述限制,波形整形技术被引入霍普金森杆系统,通过在子弹与入射杆之间布置可压缩介质,使入射应力波在起始阶段经历受控的加载与展开过程,从而实现脉冲持续时间与波形特性的调节^[10-11]。刘卫^[12]采用了硬铝和钢等波形整形器,通过霍普金森杆试验实现了加速度脉宽和峰值的可控预测与调整,然而脉宽仍然未达到预期。方幸^[13]通过引入紫铜、聚氨酯及泡沫铝波形整形器,成功将过载加速度脉冲的持续时间由约 28 μs 拓展至近 1 ms,然而该研究框架基于空气炮加载体系,其方法在霍普金森杆高应变率冲击场景下的适用性仍有待进一步验证。

针对上述不足,本文提出一种基于聚氨酯波形整形器的霍普金森杆脉宽拓展试验方法。利用

聚氨酯材料在高速压缩过程中表现出的黏弹性耗能特征与可设计的本构响应^[14],通过构建不同厚度的整形器,在保持子弹速度与系统边界条件恒定的前提下,实现冲击脉冲持续时间的可控调节,系统揭示聚氨酯非线性接触-压缩过程对应应力波时程的调制机理,并建立整形器参数与输出脉宽之间的定量关系,从而为高过载冲击试验提供一种稳定、可扩展的加载手段。

1 霍普金森杆冲击试验方法

霍普金森杆测试系统通过设定气仓的气压值将空气压缩来加速子弹,子弹与霍普金森入射杆碰撞而产生一个近似半正弦形的压缩应力脉冲,并传播至霍普金森杆末端,通过激光多普勒采集电压信号,并解算为加速度信号。

对传统霍普金森杆测试系统的子弹速度与气仓气压的关系进行测试。在霍普金森杆测试系统中,采用光电门对子弹速度进行测量,光电门由光源与光敏接收器构成,二者相对布置形成一条稳定的光束通道,如图 1 所示。

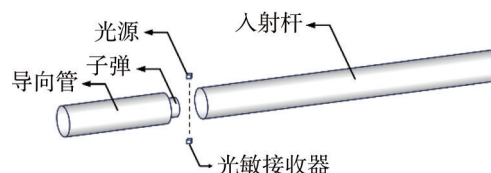


图 1 光电门测速示意图

Fig. 1 Schematic diagram of photoelectric gate speed measurement

当子弹以轴向运动通过光电门时,会遮挡光束使接收端信号从低电平变为高电平,当子弹穿

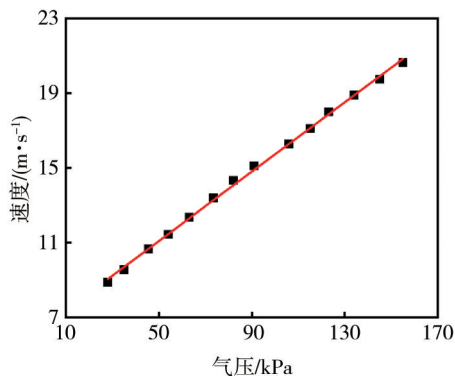
过光电门接收端信号从高电平变为低电平,从而产生清晰的触发时间信号。

结合光电门遮挡时间的上升沿与下降沿的时刻确定子弹被气仓加速后的速度:

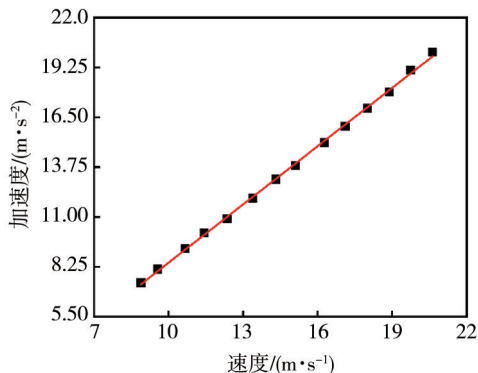
$$v = \frac{L}{t_2 - t_1}, \quad (1)$$

式中: L 为子弹的长度; t_1 、 t_2 分别为上升沿与下降沿的时间。

调节气仓气压的大小,并根据光电门测得的时间参数及式(1)对相应工况下子弹的运动速度进行测量。子弹速度随气仓气压变化的关系曲线、加速度与子弹速度关系的曲线如图 2 所示。可以看出,在所研究的加速度范围内,气仓气压与子弹速度呈现正相关,加速度随子弹速度的增大呈现出良好的线性增长趋势,这为后续冲击载荷的可控调节及试验重复性分析提供了依据。



(a) 子弹速度随气仓气压变化的关系曲线



(b) 加速度峰值与子弹速度关系的曲线

图 2 霍普金森杆初始测试数据

Fig. 2 Initial test data for Hopkinson bar

对于霍普金森杆而言,入射波的脉宽主要由子弹的长度及材料中的纵波传播速度确定,脉宽与子弹长度成正比、与材料纵波波速成反比:

$$T \propto \frac{L_p}{c_p}, \quad (2)$$

式中: L_p 为子弹的长度; c_p 为材料的波速。因此,在不改变子弹长度、材料参数及边界条件的情况下,试验中获得的应力脉冲脉宽具有较好的稳定性和重复性。

特别地,入射波的上升时间对加速度脉宽具有显著影响。所谓入射波上升时间,是指应力波从初始作用到达到峰值所经历的时间间隔,其长短决定了加载的陡峭程度。当上升时间较短时,冲击力几乎瞬间作用于入射杆,导致脉冲持续时间短、峰值高;而当上升时间增大时,冲击力逐渐施加,相当于延长了加载过程,从而实现了加速度脉宽的拓宽。在实际试验中,可通过调整子弹长度或在子弹与入射杆之间加入波形整形器等手段,有效延长入射波的上升时间。这种方法无需改变系统整体结构的几何尺寸,通过控制波形特性即可实现脉宽的可控拓展,从而满足不同加速度加载需求。

2 聚氨酯波形整形器拓展脉宽仿真

相较于软金属(如紫铜,其阻抗较高,脉宽拓展有限)与泡沫金属(如泡沫铝,其塑性坍塌不可逆,重复性差),高弹体(如聚氨酯、橡胶)因兼具低波阻抗与高可压缩性而成为更优的选择^[15]。其中,聚氨酯相较于其他弹性体,在高速冲击下展现出更卓越的综合性能:其强粘弹性导致的高阻尼能有效平滑应力波上升沿;其显著的应变率敏感性有助于在拓展脉宽的同时维持足够的加载强度。若以极高的弹性恢复和抗疲劳性能为首要考量,橡胶等其他弹性体亦可作为特定需求的备选方案。

在霍普金森杆冲击过程中,当子弹首先与聚氨酯波形整形器接触时,由于其声阻抗与金属入射杆之间存在明显失配,应力波在界面处发生多次反射与透射,使得原本陡峭的冲击载荷得以平缓加载,显著延缓入射应力波的上升沿。此外,聚氨酯在冲击过程中可发生较大的可恢复变形,其变形过程显著延长了子弹与入射杆之间的接触时间,使得入射应力脉冲的持续时间得到有效拓展。

在仿真模型中,对霍普金森杆装置的各部分进行精确建模。入射杆轴向未施加任何约束,使其保持轴向自由运动状态,仅在入射杆选取一参考节点约束横向位移以消除刚体漂移对计算稳定性的影响。仿真试验的模型如图 3 所示,其具体尺寸参数如表 1 所示。

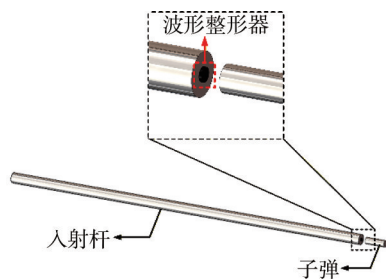


图3 仿真试验模型

Fig. 3 Simulation test model

表1 模型参数

Tab. 1 Model parameter

模型名称	直径/mm	长度/mm
入射杆	30	1 100
子弹	19	60
聚氨酯波形整形器	10	1~10

入射杆的材料选用TC4,子弹的材料选用18Ni马氏体钢,波形整形器选用聚氨酯。具体材料参数如表2所示。

表2 材料参数

Tab. 2 Material parameter

材料名称	材料属性参数		
	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
钛合金TC4	4 430	110	0.33
马氏体钢	8 000	200	0.3
聚氨酯	1 350	1.5	0.4

在未加入波形整形器时分别设置子弹速度为14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,检测霍普金森杆末端加速度曲线如图4所示,使用峰值加速度的10%作为阈值来确定加速度脉宽,可以发现子弹速度的大小对加速度的峰值的影响较大,对脉宽影响不明显。

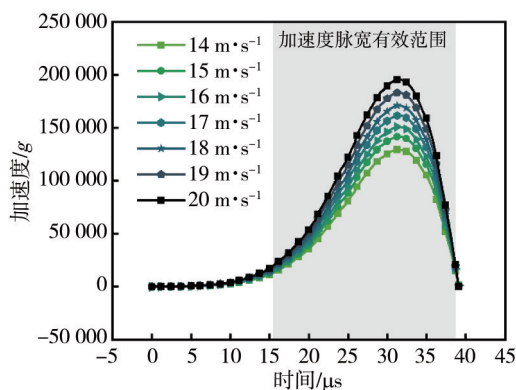


图4 未加入波形整形器时不同入射速度条件下的加速度曲线

Fig. 4 Acceleration curves under different incident velocity conditions without adding a waveform shaper

仿真研究了相同直径下,不同厚度(1~10 mm)的聚氨酯波形整形器对加速度参数的影响规律。设置子弹初速度为14 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,只改变波形

整形器的厚度,提取加速度波形的峰值脉宽,其变化如图5所示。

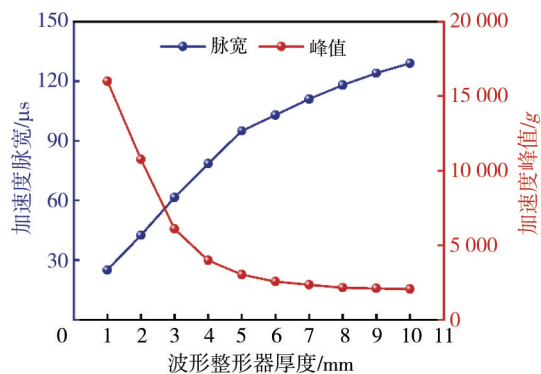


图5 10 mm直径聚氨酯波形整形器厚度对加速度波形特征值的影响

Fig. 5 Effect of thickness on acceleration waveform characteristics for 10 mm-diameter polyurethane waveform shapers

随着波形整形器厚度从1 mm增加到10 mm,脉宽呈现非线性增长:在厚度较小时(1~5 mm),脉宽随厚度几乎线性增加,而在厚度较大(6~10 mm)时,脉宽增幅明显减小,呈现增长趋缓趋势。其主要原因在于:在低厚度区间,整形器处于未充分压缩状态,新增厚度可显著增加材料的黏弹性变形行程,从而有效延长冲击加载时间;而在较大厚度条件下,聚氨酯逐渐进入充分压缩,其有效可压缩行程增长有限,导致单位厚度对脉宽拓展的贡献逐渐降低,最终表现为脉宽增长速率减小并出现拐点。加速度峰值随厚度变化呈快速下降后逐渐趋于平缓的特征。这一趋势反映了波形整形器通过延长冲击波持续时间降低峰值加速度的作用,当厚度超过一定值时,材料压缩能力和能量吸收趋于饱和,使峰值加速度下降幅度减小,这一规律为试验时波形整形器的选择提供了重要的参考。

根据图5可以观察到在波形整形器厚度1~5 mm的线性范围内包含试验所需要的所有脉宽,为确定波形整形器在对应脉宽下的厚度,对波形整形器厚度1~5 mm范围进行线性拟合分析得到

$$y = 17.6x + 7.7, \quad (3)$$

式中: x 为波形整形器的厚度; y 为产生脉冲脉宽的长度。拟合结果表明,决定系数为0.999 39,该线性模型具有较高的拟合优度。根据式(3)计算脉冲脉宽为40.0, 60.0, 80.0和100.0 μs 时波形整形器的厚度分别为1.84, 2.97, 4.11和5.24 mm。在实际试验过程中,受限于波形整形器的加工精度以及试验可重复性要求,整形器厚

度通常选取为整数毫米值。因此,试验中采用与理论厚度最接近的整数厚度作为实际参数。试验各个脉冲脉宽产生的条件如表 3 所示。

表 3 试验各个脉冲脉宽产生的条件

Tab. 3 Conditions generated by each pulse width in the experiment

脉冲脉宽/ μs	波形整形器厚度/mm
40.0	2.00
60.0	3.00
80.0	4.00
100.0	5.00

3 试 验

本文采用由 A、B 两组分构成的 8800M 型聚氨酯材料作为波形整形器的制备材料。为充分去除器件表面及内部可能残留的水分,在浇注前首先对相关器件进行预处理,将其置于温度约为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的电热恒温干燥箱中保持 $1\sim 2\text{ h}$ 。随后,采用电子天平按照质量比 $1:4$ 精确称量 A、B 两组分,并对其进行充分搅拌混合。在完成混合后,将聚氨酯混合料置于真空脱泡机中进行真空脱泡处理,降低内部孔隙缺

陷对波形整形器动态力学响应的影响。最后,将混合料缓慢浇注至预先制备好的硅胶模具中进行成型,并在常温条件下静置固化 24 h ,以保证材料反应充分、结构稳定。硅胶模具内腔直径保持一致,通过改变模具腔体高度来控制试样厚度,从而制备得到一系列直径相同而厚度不同的聚氨酯波形整形器试样如图 6 所示。

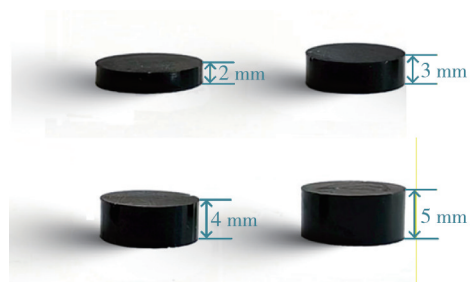


图 6 聚氨酯波形整形器实物图

Fig. 6 Physical diagram of the polyurethane waveform shaper

使用厚度为 2.00 , 3.00 , 4.00 和 5.00 mm 的聚氨酯试样作为整形器,在子弹速度为 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的条件下产生的脉冲信号如图 7 所示。

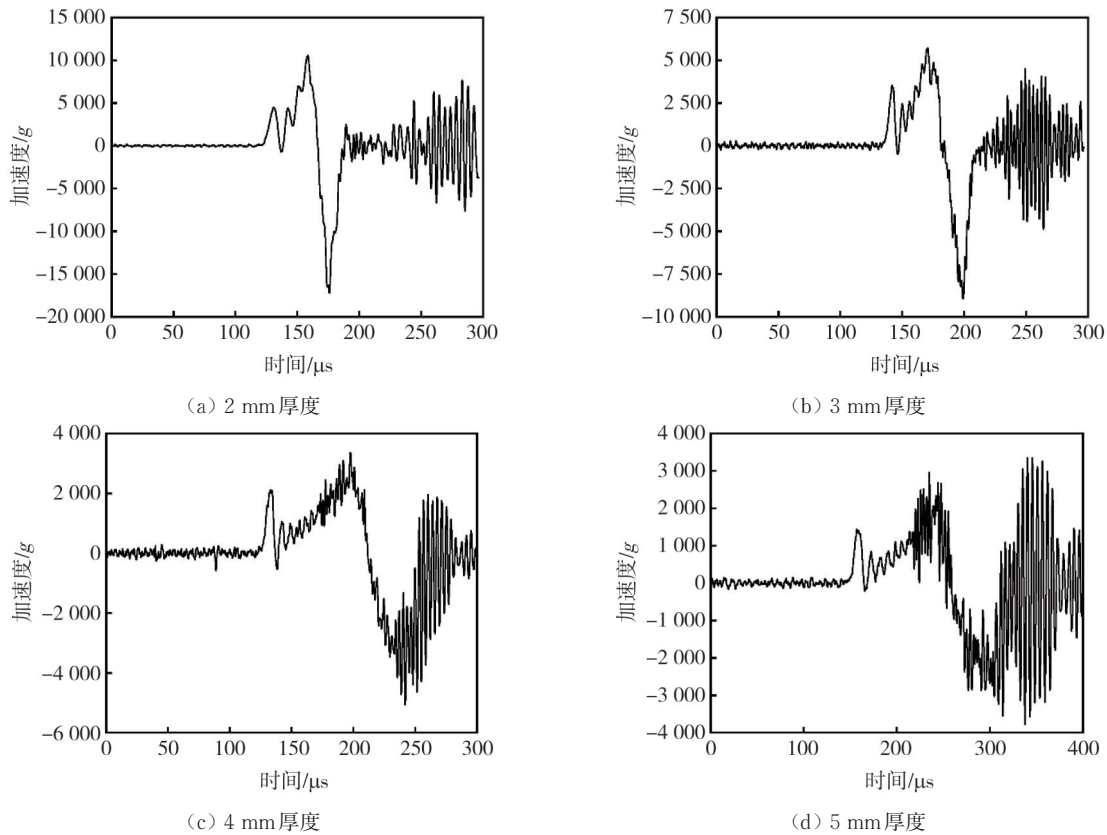


图 7 加入聚氨酯波形整形器及子弹速度为 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下产生的脉冲信号

Fig. 7 Increased pulse signal generated by the polyurethane waveform shaper at a bullet velocity of $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

由图 7 可以发现加速度波形均不可避免地存在一定程度的波动,这主要由聚氨酯材料自身的黏弹

性特性所致。该波动主要集中于主峰附近,其幅值相对于主峰加速度较小,未对脉冲的整体形态及有

效脉宽产生实质性影响,且在多次重复试验中波形特征具有良好的一致性(如表4所示)。

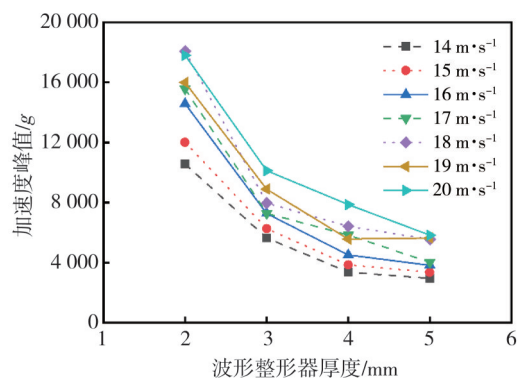
在子弹初速度保持为14, 15, 16, 17, 18, 19和 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的条件下进行了多组试验,获取了不同波形整形器在不同子弹速度作用下的加速度响应曲线。以子弹初速 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、整形器厚度3.00 mm的工况为例,重复试验获得的加速度脉冲波形参数如表4所示。

表4 子弹初速 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和整形器厚度3.00 mm的冲击结果

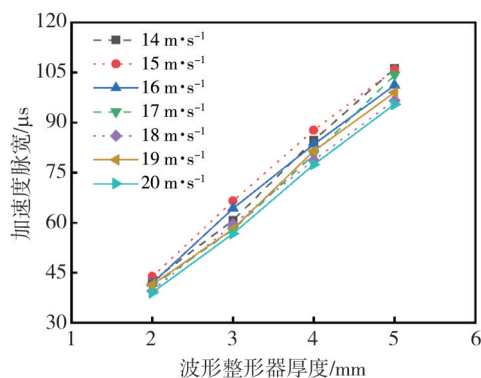
Tab. 4 Impact results with a bullet initial velocity of $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and a shaper thickness of 3.00 mm

试验	峰值/g	脉宽/ μs
1	5489.56	62.7
2	5571.47	61.8
3	5644.78	60.7
4	5820.34	58.1

在子弹初速为 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,整形器厚度为3.00 mm的试验条件下,脉冲脉宽的相对标准偏差为3.28%,表明本试验方法具有良好的可重复性。统计分析不同波形整形器厚度、与不同子弹速度条件下加速度参数的影响如图8和图9所示。



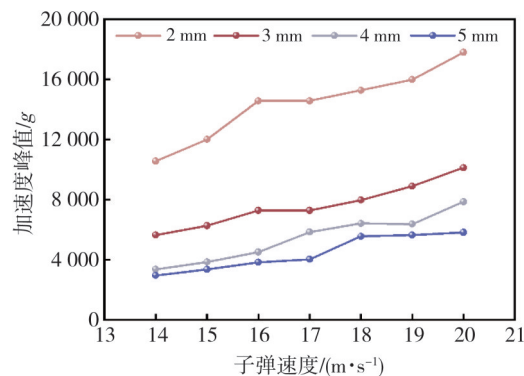
(a) 波形整形器厚度对加速度峰值的影响



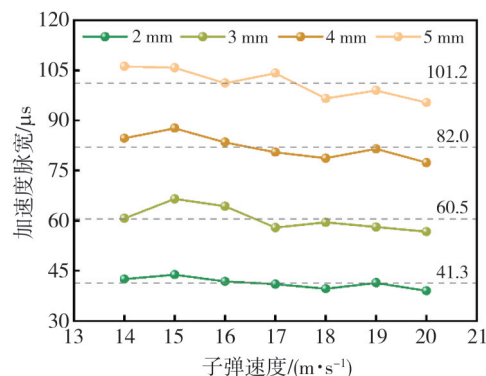
(b) 波形整形器厚度对加速度脉宽的影响

图8 波形整形器厚度对加速度参数的影响

Fig. 8 Effect of waveform shaper thickness on acceleration parameters



(a) 子弹速度对加速度峰值的影响



(b) 子弹速度对加速度脉宽的影响

图9 子弹速度对加速度参数的影响

Fig. 9 Effect of bullet velocity on acceleration parameters

由图8可知,随着波形整形器厚度的增加,加速度峰值呈现单调的下降趋势,而对应的脉宽近似线性增长。波形整形器厚度增加有效削弱了冲击载荷的峰值幅值,且子弹高速工况下峰值绝对值更大,但其随厚度变化的衰减规律保持一致。与此同时,脉宽随厚度增加表现出良好的线性一致性,不同子弹速度曲线间仅存在轻微偏移,表现出对初始冲击速度的低敏感性的特点。

由图9可知,在波形整形器厚度相同的条件下,随着子弹速度的增加,加速度峰值近似线性上升,表明增加波形整形器后不影响子弹速度与加速度峰值之间的基本正比关系。而加速度脉宽随子弹速度增加仅在小幅度范围内波动,且有微小的下降趋势,这说明加速度的脉宽对子弹速度变化相对不敏感,发生下降趋势是因为随着子弹速度的增加导致应力波脉冲在波形整形器内的传播与能量耗散过程被加速,从而引起脉宽收缩。

计算试验脉冲平均脉宽与仿真脉宽的误差以及试验结果,如表5所示。可以看出,试验脉冲平均脉宽与仿真脉宽的误差最大为3.25%。

表 5 试验结果分析

Tab. 5 Analysis of test results

整形器厚度/mm	平均脉宽/ μs	误差/%
2.00	41.3	3.25
3.00	60.5	0.83
4.00	82.0	2.50
5.00	101.2	1.20

4 结 论

本文提出并验证了一种基于聚氨酯波形整形器的霍普金森杆脉宽试验方法,用于实现高冲击载荷下加速度脉冲的精确调制。通过建立子弹-整形器-入射杆系统,并结合仿真与试验研究揭示了波形整形器厚度、子弹速度与脉冲峰值-脉宽特征之间的关系。仿真结果表明,在子弹速度保持恒定的条件下,随着聚氨酯整形器厚度增加,加速度脉宽呈显著增长趋势,而加速度峰值同步降低;相同直径下在 1~5 mm 厚度区间内,脉宽与厚度表现出高度线性的响应关系。进一步的试验结果表明,重复性试验中脉冲脉宽的相对标准偏差为 3.28%。不同子弹速度条件下,脉宽-厚度关系保持高度一致,而峰值-速度关系仍维持近似线性,试验与仿真的最大误差为 3.25%。上述结果说明,该方法能在不破坏冲击峰值可调性的前提下实现脉宽的独立精确调控。

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] 齐国飞,雷婧宇,梁争峰. 典型爆炸及冲击载荷作用下钢筋混凝土结构毁伤行为综述[J]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(11): 282-294.
- Qi Guofei, Lei Jingyu, Liang Zhengfeng. A review of damage behavior of reinforced concrete structures under typical explosive and impact loads[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2025, 46 (11): 282-294. (in Chinese)
- [2] 杨霖,李洪伟,梁昊,等. 爆炸冲击作用对电子雷管引火药头损伤及发火时间的影响[J]. 高压物理学报, 2025, 39(6): 87-98.
- Yang Lin, Li Hongwei, Liang Hao, et al. Effect of explosive impact on ignition head damage and ignition time of electronic detonator[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(6): 87-98. (in Chinese)

- [3] Zou G, Shen X, Guo C, et al. Propagation behavior of the stress wave in a hollow Hopkinson transmission bar[J]. Shock Waves, 2018, 28(2): 163-173.
- [4] 高波,冯家臣,彭刚,等. 基于激光干涉测量的霍普金森杆动态应变校准技术[J]. 中国测试, 2022, 48(S2): 128-132.
- Gao Bo, Feng Jiachen, Peng Gang, et al. Calibration technology of Hopkinson bar dynamic strain based on laser interferometric measurement[J]. China Measurement & Test, 2022, 48(S2): 128-132. (in Chinese)
- [5] 谢灵肯,王可慧,赵生伟,等. 高应变率下开孔泡沫铝压缩性能仿真研究[J]. 测试技术学报, 2025, 39(4): 388-396.
- Xie Lingken, Wang Kehui, Zhao Shengwei, et al. Simulation study on compression performance of open cell aluminum foam under high strain rate[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(4): 388-396. (in Chinese)
- [6] Zhao K, Li Y, Zhao F. Dynamic deformation of Al under shock loading[J]. Computational Materials Science, 2022, 209: 111406.
- [7] 刘俊,孟芷靖,曹慧亮,等. 抗高过载 MEMS 惯性器件及测试设备概述[J]. 导航与控制, 2025, 24(S1): 13-39.
- Liu Jun, Meng Zhijing, Cao Huiliang, et al. Overview of anti-high-overload MEMS inertial devices and test equipment[J]. Navigation and Control, 2025, 24(S1): 13-39. (in Chinese)
- [8] 刘启明,樊铮炎,李涛,等. 高过载环境下弹载电子封装焊点失效机理[J]. 兵工学报, 2025, 46(9): 160-170.
- Liu Qiming, Fan Zhengyan, Li Tao, et al. Failure mechanism of solder joints of projectile-borne electronic package under high overload environment[J]. Acta Armamentarii, 2025, 46(9): 160-170. (in Chinese)
- [9] 韩昊东,张嘉易,郝永平,等. 高过载下环氧树脂保护作用分析[J]. 机械工程与自动化, 2024, 53(4): 10-12.
- Han Haodong, Zhang Jiayi, Hao Yongping, et al. Analysis of protective effect of epoxy resin under high overload [J]. Mechanical Engineering and Automation, 2024, 53(4): 10-12. (in Chinese)
- [10] Lü N, Wang H B, Rong K, et al. The numerical simulation of large diameter split Hopkinson pressure bar and Hopkinson bundle bar of concrete based on mesoscopic model [J]. Construction and Building Materials, 2022, 315: 125728.

(下转第 481 页)