

文章编号: 1001-1455(2009)05-0555-06

侵彻过载测试信号的数据处理方法^{*}

黄家蓉¹, 刘瑞朝¹, 何翔¹, 孙桂娟^{1,2}, 徐鹏³

(1. 洛阳水利工程技术研究所, 河南 洛阳 471023;

2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

3. 中北大学电子工程系, 山西 太原 030051)

摘要: 研究了实测侵彻过载数据分析处理方法, 提出了对试验弹及测试装置进行模态分析和实测数据频谱分析相结合的方法, 选择低通滤波截止频率对测试数据进行滤波, 获得相应的刚体过载。用该方法对实测数据进行分析处理得到的刚体过载与柱形空腔膨胀理论(CCET)计算结果吻合较好; 对滤波后的刚体过载进行积分得到的弹体侵彻速度和位移与实测结果吻合较好。

关键词: 爆炸力学; 侵彻过载; 截止频率; 模态分析; 滤波; 频谱分析

中图分类号: O385

国标学科代码: 130·3530

文献标志码: A

1 引言

弹体侵彻靶体过程中的减加速度通常被称为侵彻过载。研究弹体侵彻各种试验靶体的过载特性不仅关系到钻地武器的侵彻机理和侵彻性能, 而且与防护材料、防护结构的优化设计和合理构筑密切相关^[1]。目前, 测量侵彻过载的主要手段为使用弹载存储测试记录仪^[2-3], 其测量方法是在发射弹体前, 将调试好的存储式测试记录仪安装在弹体内, 试验完毕回收弹体后, 取出记录仪, 通过数据接口读取数据, 并进行波形分析处理。

弹体侵彻靶体时, 其过程相当复杂, 作用在弹体上的各种振动信号非常丰富。所测侵彻过载波形中除弹体本身的刚体过载信号外, 不可避免地会叠加上其他信号。而过载特性研究中主要关心的是弹体本身的刚体过载。要想从复杂的测试信号中获取刚体过载, 必须按一定的原则对所测得的信号进行处理, 去除非刚体过载频率成分的信号, 保留刚体过载信号。数据处理的关键就是滤波频率的选择, 滤波频率选择偏高或偏低, 都不能获得真实的刚体过载。

侵彻效应试验过载滤波频率的选择目前还存在争议。美国桑迪亚实验室^[4]用 1 kHz 作为实测信号截止滤波频率, 其试验弹直径为 95.2 mm, 用 152 mm 滑膛炮发射, 发射弹速为 280 m/s, 靶体为砂土, 在试验弹内不同位置安装 2 个加速度计, 数据分析处理时, 把这 2 个测试点的过载波形从高到低按一定的频率步长逐渐滤波, 滤波频率到 1 kHz 时, 2 条过载曲线没有差别, 此时, 即认为所得波形为刚体侵彻过载。美国工程兵水道试验站^[5]采用 4 kHz 频率滤波, 试验弹直径为 85.1 mm, 用 105 mm 榴弹炮发射, 弹速为 205 m/s, 但文献中没有阐述用 4 kHz 滤波的理由。

本文中拟用试验中实测波形为例, 介绍一种模态分析和频谱分析相结合的选择滤波频率的方法。

2 弹载存储测试记录仪结构与安装

测试系统由 4 部分组成: 传感器部分、存储记录部分、接口读数部分和数据处理部分^[6]。存储记录仪见图 1, 记录仪在试验弹内的装配见图 2。试验前, 根据试验过载预报峰值, 设置记录仪量程和触发电平, 使记录仪处于待触发工作状态, 通过支撑筒将记录仪安装于弹体内并固定。弹体发射着靶后, 过载

* 收稿日期: 2008-03-25; 修回日期: 2009-02-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(10672186)

作者简介: 黄家蓉(1965—), 女, 硕士, 高级工程师。

达到设置触发电平时,记录仪自动触发并记录设置时间范围内的过载信号。试验后,将记录仪从弹体取出,计算机通过接口读数部分读取测试数据,进行数据分析处理。该记录仪采样率为 250 kHz,记录总时间长度为 1.048 s,既可采集到侵彻过载,也可采集到膛内发射过载。读数完成后,系统重新复位,即可进行第 2 次采集记录。

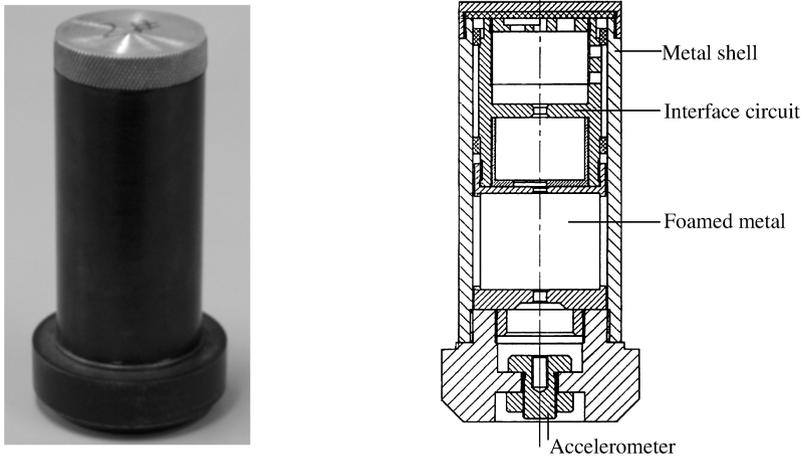


图 1 存储记录仪照片及示意图

Fig. 1 A photo and schematic diagram of the memory recorder

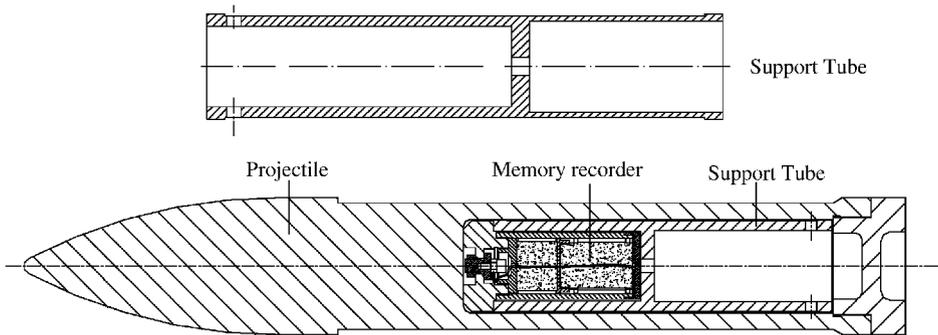


图 2 存储记录仪与弹体装配

Fig. 2 Assembly drawing

3 模态分析

为了说明侵彻弹的工作状态,以 $\varnothing 71$ mm 试验弹为例进行模态分析。为了较真实地模拟弹体实际工作状态,利用 ANSYS 模态分析软件建立了弹体、测试装置及支撑筒的有限元模型进行模态分析,得到了弹体侵彻靶体的各阶模态对应的频率,见表 1。图 3 是一、二阶模态所对应的振型。一阶模态为轴向振动,是弹体侵彻过程中主要受力方向,直接作用在加速度传感器上,对测试信号做主要贡献,但它并不是弹体的刚体过载。二阶模态主要是弹体空腔部分径向振动,对测试信号的影响不大,同样,其他频率成分的信号对过载测试信号影响很小。因此,为分析弹体侵彻过程的刚体过载,可采用一阶模态对应频率作为截止频率进行滤波。

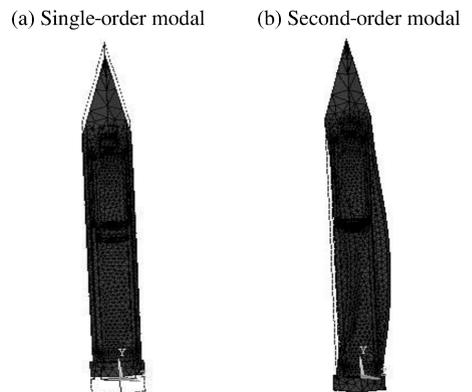


图 3 弹体一、二阶模态振型

Fig. 3 Modal analysis of projectiles

表 1 试验弹各阶模态对应频率

Table 1 Frequencies of modal analysis for projectiles

试验弹各阶模态		测试装置、铝压筒各阶模态	
模态阶次	对应频率/Hz	模态阶次	对应频率/Hz
1	4 531.4	1	2 134.8
2	6 106.4	2	8 113.2
3	6 933.2	3	8 775.2
4	7 656.0	4	10 479.0
5	8 477.8	5	12 570.0
6	8 823.6	6	12 688.0
...
...	...	13	22 931.0
...
23	22 003.0

4 一阶模态频率选择

不同弹体有不同的结构响应频率,且弹体和测试仪装配过程所使外力及各部件间的配合等都会存在一定差异,所以每发弹在实际侵彻过程中的模态也会有差异。对于不同弹体和炮次的试验,统一使用一个固定频率进行数据滤波是不科学的。本文的方法是结合模态分析和对每个实测侵彻过载信号进行频谱分析,判断出实际的第一阶模态频率为截止频率进行滤波。在此以一种试验弹侵彻混凝土靶体的实测信号为例进行说明。

图 4(a)曲线是 $\varnothing 71$ mm 试验弹侵彻抗压强度为 18 MPa 素混凝土靶体的一发实测侵彻过载波形,弹速为 569 m/s。图 4(b)、(c)是它的频谱分析及 2~5 kHz 范围的展开图。上节模态分析已知试验弹的一阶模态频率为 4.53 kHz,在图 4(c)中 4.53 kHz 附近选取幅值最高点对应的频率作为实际一阶结构响应频率,其值为 3.73 kHz。另外,在信号与系统和数字信号处理原理中,周期信号的幅度谱是线谱,非周期信号的幅度谱是一个连续谱,信号所占有的频率是一个频率范围即一定频率宽度。根据该原理,由图 4(c)可看出,实测信号的一阶模态频宽为 3.60~3.97 kHz,为有效地滤掉非刚体过载信号,将数据的滤波截止频率选取在一阶模态频宽起点处,对应的频率为 3.60 kHz,用这个频率点进行低通滤波可以将非刚体本身的高频信号全部滤掉。如果选择大于频宽起点的频率进行滤波,那么就会有一些其他频率成分的振动信号保留下来,使滤波结果仍包含有非刚体过载信号。

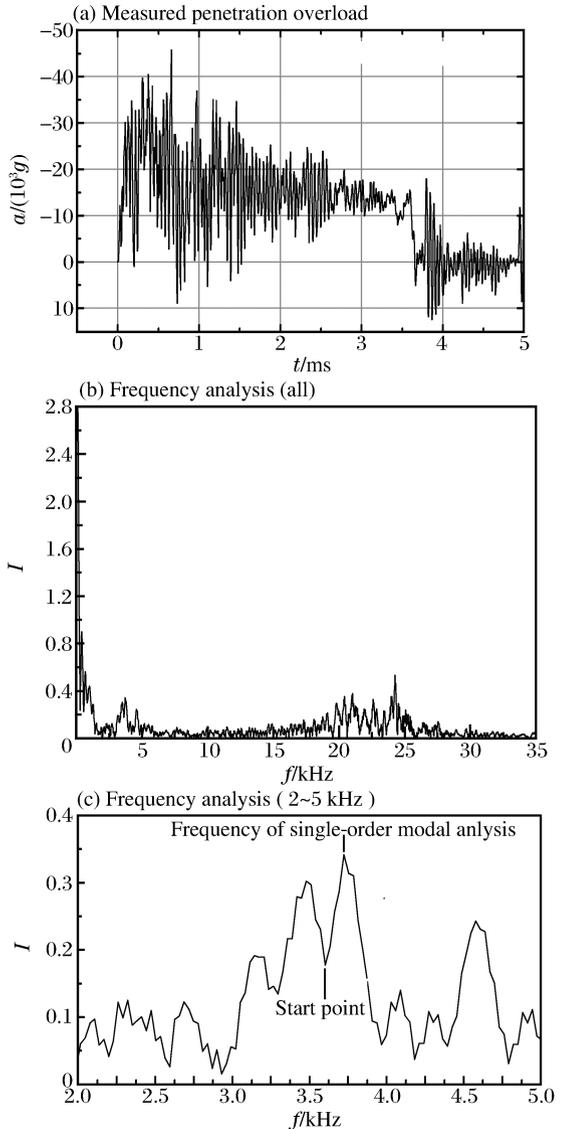


图 4 侵彻过载频谱分析图例

Fig. 4 Frequency analysis of the penetration overload for concrete C-5 with the compression strength of 18 MPa

5 滤波信号及数据分析比较

对实测过载信号进行合理滤波可获得试验弹的刚体过载,对其进行一次、二次积分可分别得到试验弹的侵彻速度、侵彻位移。采用上节所述滤波频率选择原则对试验中的测试数据进行了滤波处理,获得了较好的效果。用不同的方法对上节所述实测信号进行分析处理,并把数据处理结果与实测侵彻速度、位移进行了比较,具体如图5所示。图5(a)中曲线0是试验中实测侵彻过载信号,曲线1是利用CCET(柱形空腔膨胀理论)计算方法得到的理论预估侵彻过载,曲线2是结合模态分析和实测信号频谱分析选择滤波截止频率进行滤波得到的侵彻过载,曲线3是选择1 kHz滤波频率^[4]滤波后的侵彻过载。图5(b)、(c)是对图5(a)中曲线2、3、4积分所得的侵彻速度、侵彻位移曲线。图6~8是部分试验的过载波形数据处理结果实例。表2列出了结合模态分析和实测信号频谱分析选择滤波截止频率进行滤波的部分试验数据处理结果与实测侵彻速度 v_m 、侵彻位移 d_m 的比较和误差计算, D 为弹丸直径。

从图5~8和表2可以看出,用模态分析和实测信号频谱分析相结合选择滤波截止频率的方法,对侵彻过载实测信号滤波后,积分得到的侵彻速度 v_i 和位移 d_i 与实测速度和位移吻合较好,速度最大误差 ϵ_v 为5.5%,位移最大误差 ϵ_d 为12.7%。从图5可以看出,本文中的滤波方法得到的侵彻过载与CCET计算值吻合较好,如果用文献[4]中的1 kHz滤波,过载积分的侵彻速度严重不归零、侵彻位移明显偏离实测值,这说明模态分析和实测信号频谱分析相结合对测试信号进行数据处理的方法是合理的。

表2 滤波后过载积分的侵彻速度、位移和实测侵彻速度、位移数据比较

Table 2 Penetration velocities and displacements intergraded from the filtered overloads compared with the corresponding measured values

靶体	D/mm	$v_m/(\text{m/s})$	$v_i/(\text{m/s})$	$\epsilon_v/\%$	$d_m/(\text{m/s})$	$d_i/(\text{m/s})$	$\epsilon_d/\%$
素混凝土 C-1	71	389	403	3.6	0.757	0.764	0.9
素混凝土 C-5	71	569	582	2.3	1.102	0.975	-11.1
素混凝土 C-6	71	556	566	1.8	0.601	0.581	-3.2
沥青混凝土	71	473	478	1.1	1.210	1.190	-1.7
钢筋混凝土	100	452	477	5.5	0.960	1.082	12.7
分层介质靶-1	71	589	558	-5.3	4.680	4.988	6.6
分层介质靶-2	90	391	412	5.2	0.517	0.517	2.5
岩石	300	299	300	0.3	0.800	0.770	-3.8

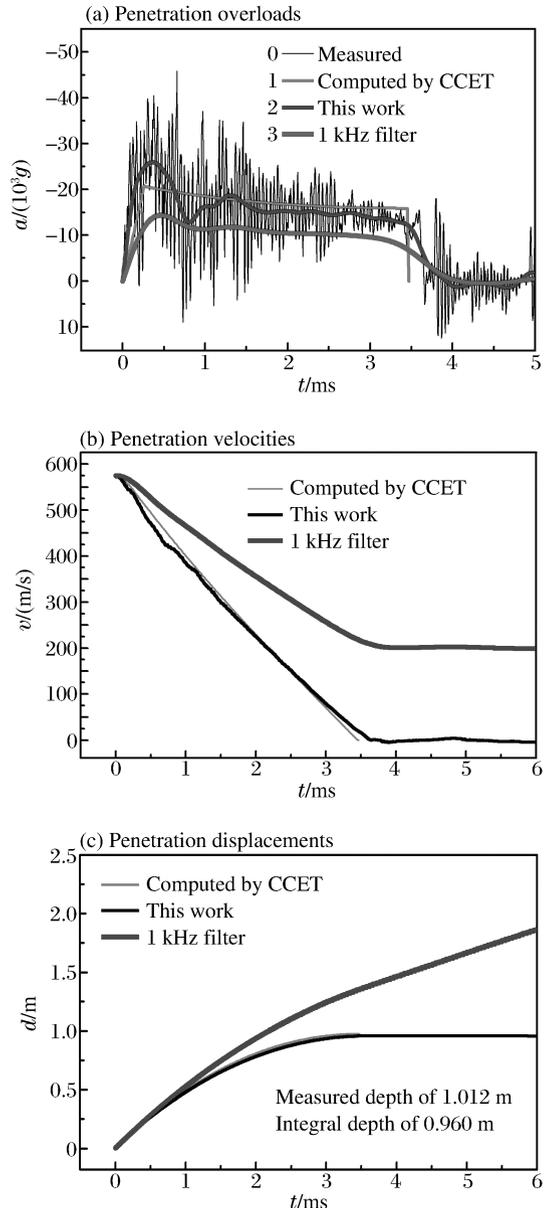


图5 不同滤波方法数据处理比较

Fig. 5 Different data processing techniques for concrete C-5 with the compression strength of 18 MPa

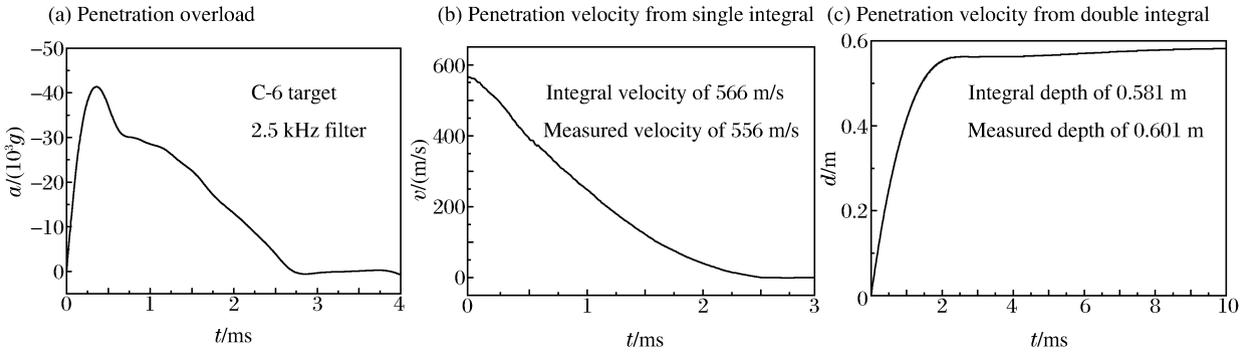


图 6 $\varnothing 71$ mm 弹侵彻素混凝土过载波形及积分曲线

Fig. 6 Data processing for $\varnothing 71$ mm projectile penetrating concrete

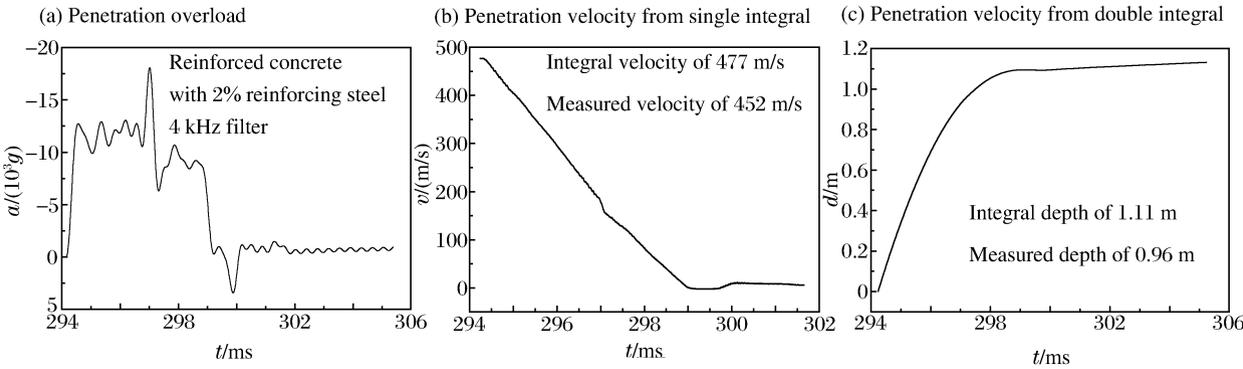


图 7 $\varnothing 100$ mm 弹侵彻钢筋混凝土过载波形及积分曲线

Fig. 7 Data processing for $\varnothing 100$ mm projectile penetrating reinforced concrete

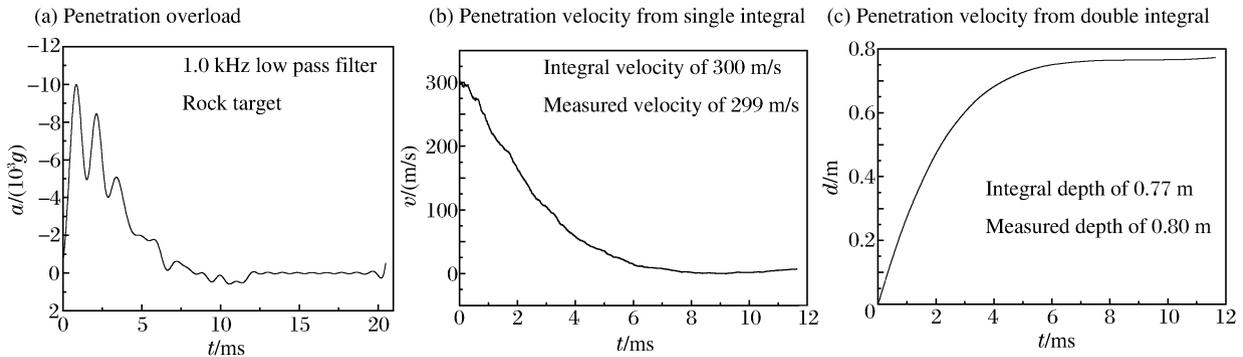


图 8 $\varnothing 300$ mm 弹侵彻岩石过载波形及积分曲线

Fig. 8 Data processing for $\varnothing 300$ mm projectile penetrating rock target

6 结 论

刚体侵彻过载是动能弹和钻地弹设计的重要环境载荷工作参数,试验实测过载数据是弹体刚体过载和弹体及测试装置结构振动的复合信号,对测量数据进行合理的分析处理才能得到弹体本身的刚体过载。文中采用模态分析和频谱分析相结合的方法,选择实测侵彻过载的滤波截止频率,对三种试验弹实测过载数据进行滤波处理,获得的刚体过载与柱形空腔膨胀理论(CCET)计算结果吻合较好;对滤波后的刚体过载进行一次积分和二次积分得到的侵彻速度和位移与实测结果吻合较好。本研究提供了一种实测侵彻过载信号分析处理方法。本文中只对 3 种弹型的实测过载数据进行了分析处理,试验子样还不够多,其应用范围还需更多的试验子样数据来验证。

参考文献:

- [1] 任辉启,何翔,刘瑞朝,等.弹体侵彻混凝土过载特性研究[J].土木工程学报,2005,38(1):110-116.
REN Hui-qi, HE Xiang, LIU Rui-chao, et al. A study on the overload characteristics of projectile penetrating concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2005,38(1):110-116.
- [2] 余尚江,杨吉祥,李科杰.射弹侵彻过载测试发展综述[J].防护工程,2005,10(5):75-79.
YU Shang-jiang, YANG Ji-xiang, LI Ke-jie. A review of measuring technique research on the projectile penetration overload[J]. Protective Engineering, 2005,10(5):75-79.
- [3] 李晓军.常规武器破坏效应与工程防护技术[M].洛阳:洛阳水利工程技术研究所,2001.
- [4] Forrestal M J, Luk V K. Penetration into soil targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1992,12(3):427-444.
- [5] Franco R A, Ingram J K. A very high shock data recorder[C]//Proceedings of the IEEE South East Conference, 1991:503-507.
- [6] 黄家蓉,范锦彪,金栋梁,等.弹体侵彻过载测试中相关问题试验研究[J].防护工程,2006,28(4):41-45.
HUANG Jia-rong, FAN Jing-biao, JIN Dong-liang, et al. Experimental study on problems related to measuring the projectile deceleration[J]. Protective Engineering, 2006,28(4):41-45.

A new data processing technique for measured penetration overloads

HUANG Jia-rong^{1*}, LIU Rui-chao¹, HE Xiang¹, SUN Gui-juan^{1,2}, XU Peng³

- (1. *Luoyang Institute of Hydraulic Engineering Technology, Luoyang 471023, Henan, China;*
2. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*
3. *Department of Electronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China*)

Abstract: This paper studied the analysis and processing method for the measured penetration deceleration data, proposed a new method which combining the modal analysis of the test projectile and test equipment with spectrum analysis of the measured data, and obtained corresponding penetration deceleration of the rigid body by selecting low pass cutoff frequency to filter the measured data. The obtained penetration deceleration of the rigid body determined from the measured data by the method presented in this paper shows a good agreement with the calculated results by the cylindrical cavity expansion theory, and the projectile penetration velocity and displacement obtained from integrating the penetration deceleration of the rigid body after filtering also shows a good agreement with the measured results.

Key words: mechanics of explosion; penetration overload; cutoff frequency; modal analysis; filtering; frequency analysis

* Corresponding author: HUANG Jia-rong

E-mail address: hjr6511@126.com

(责任编辑 张凌云)