

文章编号: 1001-1455(2013)06-0608-05

# 弹体高过载硬回收测量技术的实验探讨<sup>\*</sup>

何丽灵<sup>1</sup>,高进忠<sup>2</sup>,陈小伟<sup>1</sup>,孙远程<sup>2</sup>,姬永强<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所,四川 绵阳 621999;

2. 中国工程物理研究院电子工程研究所,四川 绵阳 621999)

**摘要:** 为提供引信服役的力学参数,达到引战配合目的,弹体过载(减速度)的测量十分必要。采用硬回收法测量了高速侵彻混凝土的先进钻地弹缩比弹过载时间历程。实验弹最大直径 48 mm,计及过载测量装置,弹体质量约 1.8 kg,撞击速度 1 142 m/s。过载测试系统模块化和集成化设计,包括过载测量模块、电路模块、信号存储模块、电源模块和外部计算机模块,传感器为压阻式。量程在 $(-8\sim 21)\times 10^4 g$ ,可测量过载幅值约  $20\times 10^4 g$ 。

**关键词:** 爆炸力学;先进钻地弹缩比弹;高速侵彻;硬回收法;过载;压阻式过载传感器

**中图分类号:** O385

**国标学科代码:** 13035

**文献标志码:** A

为达到引战配合目的,需保证引信在达到目的位置之前结构不破坏且功能正常。然而,侵彻过程中弹体过载(减速度)通常较高,弹载引信需承受强冲击载荷,在达到目的位置之前,就可能出现引信结构破坏或失效,因此侵彻过程中弹体过载的测量十分必要。

另一方面,武器装备化一般要先后经历缩比实验和全尺寸实验阶段,合理设计的缩比实验可有效控制武器开发成本。然而,在穿甲动力学研究中,缩比弹体的过载将显著大于全尺寸弹体:小尺寸弹体的侵彻时间短,侵彻深度小,但过载大;对于缩比尺寸接近或大于 10 的小尺寸弹体,其过载甚至可比真实弹体大一个量级<sup>[1]</sup>,因此相同侵彻速度时,弹体尺寸越小,过载幅值越大。若被测试缩比弹减速度幅值达  $10\times 10^4 g$  以上,要求弹载过载测量装置量程足够大、精度和采样率足够高、环境耐受力足够强且体积足够小等。

目前有 2 种过载测量方法:信号同步传输法和硬回收法。

信号同步传输法结合无线电技术,实时传递侵彻过程中弹体过载信息。以文献[2]为例,将加速度传感器和无线电发射盒安装在弹体上,开展了 300 m/s 弹体对湖底的侵彻实验;过载传感器测量侵彻过程中弹丸过载,并通过无线电发射盒将数据传递给地面接收站。然而,无线发射的信号易受干扰,且高冲击荷载下,保持信号发射连续性的技术难度较大。

硬回收法是将过载传感器测量的数据存储在弹载测量装置的记忆芯片内,从回收实验弹的存储设备中获得过载信息。这是目前常用的实验室测量弹体过载方法。圣地亚国家实验室是硬回收法研究的前驱。M. J. Forrestal 等<sup>[3]</sup>开展了 280 m/s 弹体垂直侵彻半无限土壤的实验,利用硬回收法测得了侵彻过程中弹体的过载-时间历程。由于土壤质软,过载幅值小。M. J. Forrestal 等<sup>[4]</sup>和 D. J. Frew 等<sup>[5]</sup>分别采用弹载单点过载测量装置获得 13 kg 钢弹在 500 m/s 以下的弹体过载-时间历程,测量幅值在  $8\times 10^3 g$  以下。R. J. Franco 等<sup>[6]</sup>研制了代号为“迷你钢笔(Minipen)”的集成弹载过载测量装置,量程为  $\pm 3.5\times 10^4 g$ 。它可以较准确地测量幅值在  $2\times 10^4 g$  左右的过载时间历程,记录整个侵彻过程中弹体的过载变化。靶厚为 5.5 m、撞击速度为 1 km/s 时,测试的弹体穿靶过载曲线如图 1 所示。该装置集成度高,体积相对较小。

基于近期开展的高速侵彻混凝土先进钻地弹缩比弹的过载硬回收测量实验,本文中将探讨实验采用

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2012-07-04; 修回日期: 2013-01-06

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(11225213);国家自然科学基金面上项目(11172282)

作者简介: 何丽灵(1984—),女,博士。

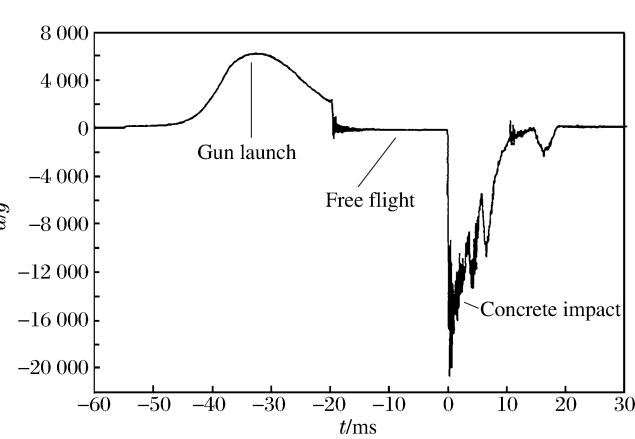


图 1 “迷你钢笔”测试的弹体加速度曲线

Fig. 1 Acceleration history of projectile obtained by Minipen

的硬回收法的测量原理,并对过载测量结果进行分析。

1 硬回收法测量过载的原理

采用模块化和集成化的设计思想,过载测试系统由 5 个模块组成:过载测量模块、电路模块、信号存储模块、电源模块和外部计算机模块,前 4 个模块集成为过载测量装置,装填入待测试弹体<sup>[7]</sup>。过载测量装置的原理框图和实物如图 2 所示。

过载测量模块是过载测试系统的核心模块,其基本原理是利用惠斯通电桥,将承受冲击载荷时压阻式加速度传感器的电阻变化转变为电压信号,并送入电路模块。

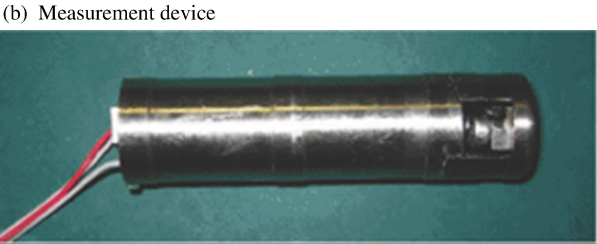
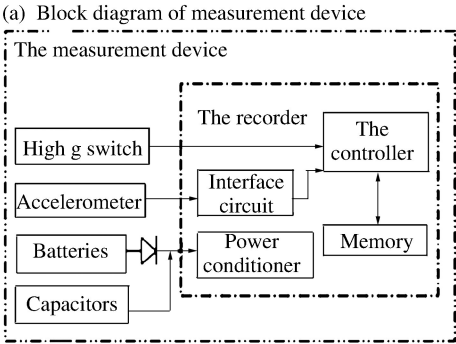


图 2 过载测量装置

Fig. 2 Measurement device

电路模块的重要部件之一是控制器。当过载达到阈值时,控制器发出指令,开始存储信号。电路模块还有连接过载测量模块、信号存储模块和电源模块的功能,并提供信号存储模块与外部计算机连接的通道。信号存储模块的外形如图 3 所示。



图 3 信号存储模块

Fig. 3 Memory module

电源模块采用锂离子电池和电容组合的方式,以保持电池被冲击破坏后,电容仍能持续为测试装置供电。

待侵彻结束后,回收过载测量装置,并利用计算机读取数据,进行数据处理,获得弹体的过载时间历程。为保证侵彻后过载测量装置的完整性,需采用强度足够高的外壳材料。

基于惠斯通电桥原理测量运动过程中弹载加速度传感器的电阻变化。电桥采用直流电源;2 个桥臂电阻(R1 和 R3)相等;在试验前,将可变电阻(R2)设置成与压阻式加速度传感器阻值相同,使电桥保持平衡,即电路无输出电压。承受过载时,压阻式加速度传感器的电阻将发生变化,电桥失去平衡而输出电压值。

2 过载测量

2.1 实验概述

基于前期积累的实验技术及理论分析基础<sup>[1,9-15]</sup>,采用硬回收法测量了高速侵彻混凝土的先进钻地弹缩比弹过载时间历程。

依据图 4 设计加工了最大直径 48 mm 的先进钻地弹缩比弹。弹体壳体段空心,以装填过载测量装置。后盖拧紧,以保证过载测量装置与弹体刚性连接。过载测量装置直径约 25 mm,明显比“迷你钢笔”(直径 50.8 mm<sup>[6]</sup>)小。计入弹载装置,弹体质量约 1.8 kg,撞击速度为 1 142 m/s。3 个无筋混凝土圆柱间隔串联,组成靶体,间隔距离为 300 mm。

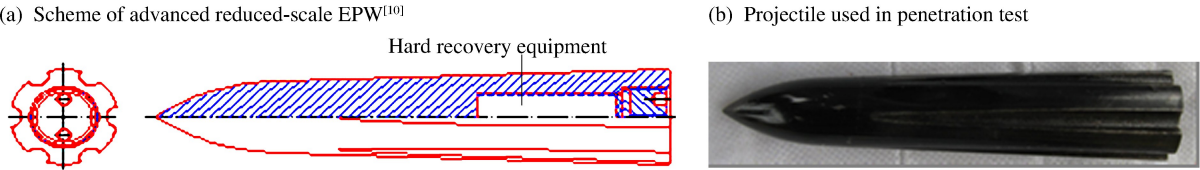


图 4 实验弹的结构示意图及外形  
Fig. 4 Advanced reduced-scale EPW

2.2 实验结果

实验采用的过载测量装置设计量程为 $(-8\sim21)\times10^4\text{ g}$ ,以压为正。通过前级引信测量回收软件将过载测量装置测得的电压信号转变为弹体过载。在整个发射-侵彻过程中,弹体主要经历火炮膛内加速段、中间匀速飞行段和靶中减速段,因设置以压为正,弹体在膛内加速时过载测量值为负。

图 5 展示了一发实验弹过载时间历程的测量结果,过载幅值在 $20\times10^4\text{ g}$ 左右。图 5(a)为整个发射-侵彻过程的过载时间历程:膛内、匀速飞行和侵彻阶段;图 5(b)为侵彻阶段的过载曲线,靶体由 3 个混凝土圆柱间隔串联组成,各靶分区明显。第 1 和第 2 靶的过载值递减,趋势与理论预期吻合;第 3 靶过载大于第 1 和第 2 靶,与理论预期不符。在早期实验中也观察到类似的趋势(图 6)。

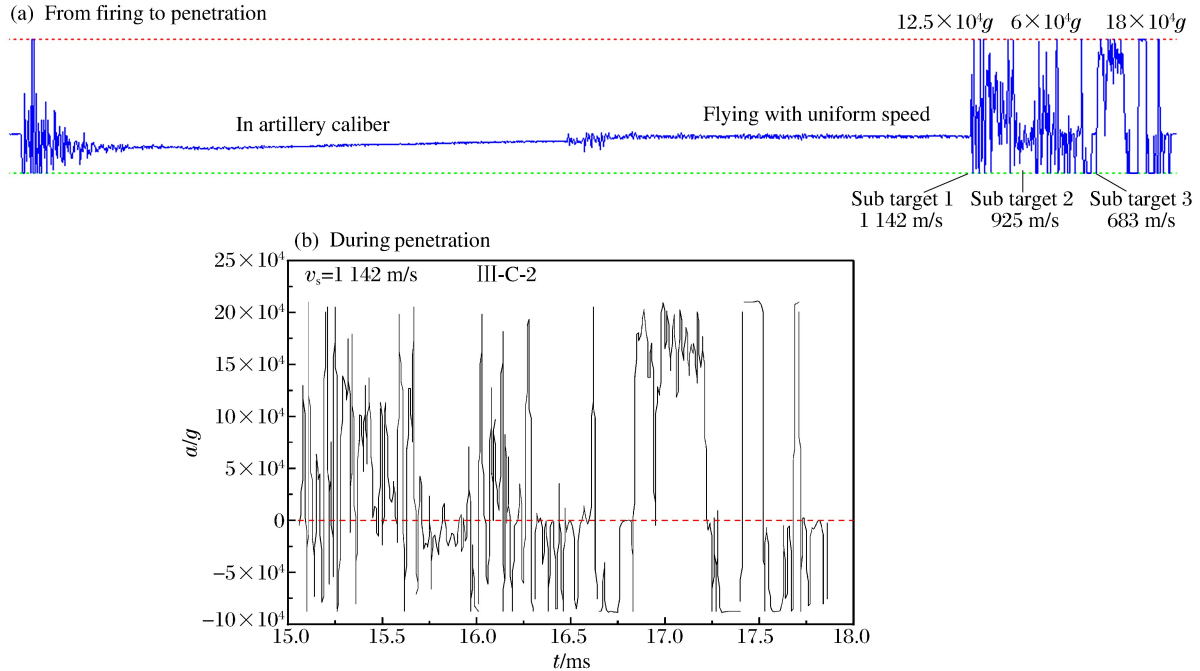


图 5 测试的实验弹过载-时间历程  
Fig. 5 Acceleration history of projectile

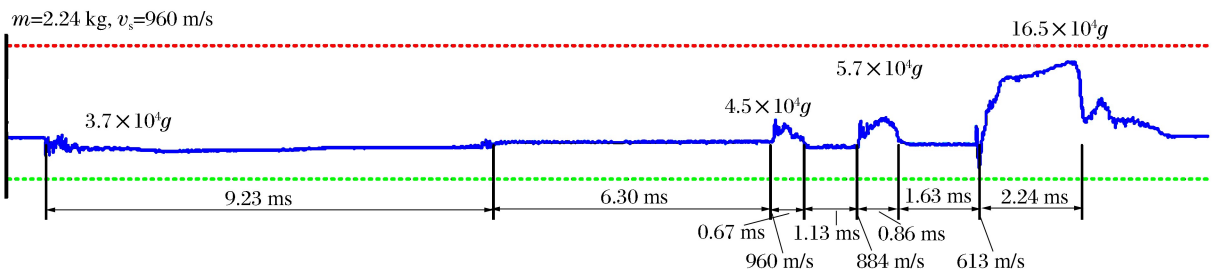


图 6 早期测试的实验弹过载-时间历程

Fig. 6 Acceleration history of projectile obtained previously

3 讨论与结论

与图 1、6 对比发现,图 5 的过载曲线存在较多高频信号,如弹体发射阶段和侵彻阶段,这可能因为过载测量装置与弹体的连接未达到完全刚性连接,测量装置在发射和侵彻过程中与弹体可能频繁撞击,产生高频信号。在未来工作中,将对过载测量装置与弹体的连接方式进行进一步研究。

在图 5~6 中均存在第 3 靶过载增加的现象,这与理论预期存在显著偏离。初步分析可能原因是采用了单向加速度传感器,而实际侵彻过程中,弹体运动并非直线(见图 7),因此弹体过载方向可能显著偏离传感器压阻方向,无法准确测量弹道轨迹发生偏转时弹体的过载。然而,通过简单分析可知,上述原因将导致弹体过载测量值下降,而非上升。产生的原因仍在进一步探讨之中。

弹头附近为过载测量最佳位置。然而,在弹头放置测量设备有 2 个缺点:空心弹头降低了弹体结构稳定性;弹头几何尺寸小,对过载测量设备要求更高。权衡利弊后,将弹载过载测量装置仍放置在弹体壳体段内,保证弹头为实心结构,适当增加过载测量装置的容纳空间(图 4(a))。

总之,采用硬回收法测量了高速侵彻混凝土的先进钻地缩比弹过载时间历程。弹体质量约 1.8 kg,撞击速度为 1 142 m/s。基于模块化设计和集成化思想,采用压阻式加速度传感器,设计了弹载过载测量装置,包括过载测量模块、电路模块、信号存储模块、电源模块和外部计算机模块,其量程在  $(-8 \sim 21) \times 10^4 g$ ,可测量过载幅值在  $20 \times 10^4 g$  左右。



图 7 III-C-2 第 3 靶的弹道轨迹偏转

Fig. 7 Ballistic trajectory deflection of projectile in sub target 3, III-C-2

参考文献:

[1] 陈小伟. 穿甲/侵彻问题的若干工程研究进展[J]. 力学进展, 2009, 39(3): 316-351.  
Chen Xiao-wei. Advances in the penetration/perforation of rigid projectiles[J]. Advances in Mechanics, 2009, 39(3): 316-351.

[2] Byers R K, Yarrington P, Chabai A J. Dynamic penetration of soil media by slender projectiles[J]. International Journal of Engineering Science, 1978, 16(11): 835-844.

[3] Forrestal M J, Luk V K. Penetration into soil targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1992, 12(3): 427-444.

[4] Forrestal M J, Frew D J, Hickerson J P, et al. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(5): 479-497.

[5] Frew D J, Forrestal M J, Cargile J D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(10): 1584-1594.

[6] Franco R J, Platzbecker M R. Miniature penetrator acceleration recorder development and test[R]. Conf-981013, San Diego, 1998.

- [7] Gao J Z, Sun Y C, Du L M, et al. Present research and development on measurement technology of penetrating into hard target with hard recovery recorder[C]// Proceedings of the 25th International Symposium on Ballistics, Beijing, 2010:1187-1192.
- [8] 黄正平. 爆炸与冲击电测技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2006.
- [9] Chen X W, He L L, Yang S Q. Modeling on mass abrasion of kinetic energy penetrator[J]. European Journal of Mechanics—A/Solids, 2010, 29(1):7-17.
- [10] 陈小伟, 高海鹰, 梁斌. 高侵彻能力的先进钻地弹的结构分析[J]. 防护工程, 2007, 29(3):6-9.
- [11] 陈小伟, 梁斌, 姬永强, 等. 高侵彻能力的先进钻地弹的次口径实验研究[C]//第六届全国工程结构安全防护学术会议. 洛阳, 2007:1-6.
- [12] He L L, Chen X W. Analyses of the penetration process considering mass loss[J]. European Journal of Mechanics—A/Solids, 2011, 30(2):145-157.
- [13] He L L, Chen X W, He X. Parametric study on mass loss of penetrators[J]. Acta Mechanica Sinica, 2010, 26(4):585-597.
- [14] 何丽灵, 陈小伟, 夏源明. 侵彻混凝土弹体磨蚀的若干研究进展[J]. 兵工学报, 2010, 31(7):950-966.  
He Li-ling, Chen Xiao-wei, Xia Yuan-ming. A review on the mass loss of projectile[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(7):950-966.
- [15] 梁斌, 陈小伟, 姬永强, 等. 先进钻地弹概念弹的次口径高速深侵彻实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(1):1-9.  
Liang Bin, Chen Xiao-wei, Ji Yong-qiang, et al. Experimental study on deep penetration of reduced-scale advanced earth penetrating weapon[J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(1):1-9.

## Experimental study on measurement technology for projectile deceleration<sup>\*</sup>

He Li-ling<sup>1</sup>, Gao Jin-zhong<sup>2</sup>, Chen Xiao-wei<sup>1</sup>, Sun Yuan-cheng<sup>2</sup>, Ji Yong-qiang<sup>1</sup>

(1. *Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China;*

2. *Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China*)

**Abstract:** To provide the reliable mechanical parameters of the fuses during penetration, it is necessary to study the deceleration of the projectiles. The penetration test was carried out for a reduced-scale advanced earth penetration warhead (EPW) into concrete. The deceleration-time curve of the projectile was obtained by a hard recovery technique. The testing system for deceleration is highly modularized, including a testing module, a circuit module, a memory module, a power-supply module and a periphery computer module for data processing. In the testing module, the piezoresistive accelerometer is fabricated by the MEMS technique and it works in a Wheatstone bridge. The projectile mass is about 1.8 kg, including the deceleration testing equipment loaded in it. The maximum diameter of the projectiles is 48 mm, and the striking velocity is 1 142 m/s. The deceleration magnitude obtained by the experiment is approximately  $20 \times 10^4 g$ .

**Key words:** mechanics of explosion; reduced-scale advanced EPW; high-speed penetration; hard recovery technique; deceleration; piezoresistive accelerometer

<sup>\*</sup> Received 4 July 2012; Revised 6 January 2013

Supported by the National Natural Science Foundation of China (11225213, 11172282)

Corresponding author: He Li-ling, 401hell@caep.cn