

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0086

非等比例缩比侵彻/贯穿相似规律研究*

刘 源¹, 皮爱国¹, 杨 荷², 冯吉奎¹, 黄风雷¹

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

2. 中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 高速侵彻弹体的弹载部件/关键元器件的生存性与可靠性考核是引战系统研制领域的热点与难点问题, 受原型试验的成本限制, 利用缩比弹体搭载原型引信部件开展非等比例缩比试验研究是可行途径。针对传统等比例缩比方案无法满足弹体刚体过载相似性要求的情况, 研究了非等比例缩比侵彻/贯穿相似规律, 提出了非等比例缩比侵彻试验设计方法。数值计算结果表明: 侵彻半无限厚混凝土靶条件下, 非等比例缩比弹刚体过载的脉宽、幅值均可实现与原型弹刚体过载一致的加载条件; 贯穿多层薄靶的条件下, 通过调节靶板布置及弹体初速等试验工况, 合理设计缩比弹体结构, 可使非等比例缩比试验的弹体刚体过载峰值和脉宽覆盖原型试验。通过缩比模型试验得到的刚体过载特性可以为弹体及引信部件抗过载防护设计提供可靠的参考依据。

关键词: 非等比例缩比; 侵彻/贯穿; 刚体过载; 弹载引信; 数值计算

中图分类号: O385 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Study on similarity law of non-proportionally scaled penetration/perforation test

LIU Yuan¹, PI Aiguo¹, YANG He², FENG Jikui¹, HUANG Fenglei¹

(1. State Key Laboratory of Explosive Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

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

Abstract: Survivability and reliability assessment of components/key components on high-speed penetrating projectiles is a hot and difficult issue in the field of EPW development. Due to the cost limitation of prototype test, it is feasible to carry out non-proportionally scale experimental research by carrying prototype fuze components on scaled projectiles. Through the analysis of the process mechanism of a projectile penetrating concrete target, the analytic solution of rigid-body deceleration when the projectile penetrating the semi-infinite thick concrete target and the multi-layer thin concrete target are discussed respectively. From the point of view of similarity of rigid-body deceleration, the non-proportionally reduced-scale criterion of projectile is proposed when the traditional scaling scheme can not meet the requirements of similarity. The numerical results show that under the condition of penetrating semi-infinite thick concrete target, the rigid-body deceleration of the non-proportionally reduced-scale projectile can achieve the same conditions as which of the prototype projectile from the point of view of pulse width and amplitude; under the condition of penetrating multi-layered thin target, through reasonably setting the scale factor and adjusting the layout of the target plate and the initial velocity of the projectile. The pulse width and amplitude of the rigid-body deceleration in the reduced scale test can cover them in the prototype test. The rigid body deceleration characteristics obtained from scaled model test can provide reliable overload environment reference for missile projectile design.

Keywords: non-proportionally scaled; penetration/perforation; rigid-body deceleration; rocket-borne detonator; numerical simulation

* 收稿日期: 2019-03-25; 修回日期: 2019-04-27

第一作者: 刘 源(1994—), 男, 硕士研究生, lymoxing@163.com

通信作者: 皮爱国(1977—), 男, 博士, 副教授, aiguo_pi@bit.edu.cn

黄风雷(1965—), 男, 博士, 教授, huangfl@bit.edu.cn

动能侵彻战斗部是打击多层建筑和深层地下掩体等硬目标的利器,随着动能侵彻武器向高速、反高强度和反多层复杂介质方向的发展,其弹载的引信部件等关键器件的生存性与可靠性受到严峻挑战。为解决此问题,需进行大量试验获得弹体侵彻过程中弹载引信等关键元器件的承载环境数据。但在针对原型弹体的研制和试验中,由于试验条件和试验成本的限制,很难开展全尺寸规模的机理试验研究,缩比试验技术便成为研究预测原型试验结果的重要方法^[1]。对于以考核引信等关键部件的实际承载性能为目标的缩比试验,由于引信等部件为原型件,而搭载的平台弹体为缩比模型,因此提出合适的缩比准则,使缩比试验中被试品的承载环境能模拟原型试验具有重要研究意义。

弹体侵彻/贯穿试验中物理场信号主要由引信通过探测和敏感技术获得,其中侵彻加速度信号尤能准确反映硬目标侵彻过程的环境特征和目标特性,弹体侵彻硬目标时的过载环境特性不仅决定了引信的起爆控制方式,而且对弹体及弹载部件在动载环境下的结构响应行为有重要影响^[2]。因此如何从侵彻加速度信号中准确、客观地提取引信可识别的弹体过载环境数据广受研究者关注,已有大量研究。

Forestal等^[3]、Frew^[4]、Xu等^[5]很早开始对弹体过载进行试验研究,主要利用弹载存储过载测试系统,积累了大量钻地弹侵彻混凝土试验的实测弹体过载数据,并以此为基础得到弹体对不同介质的侵彻机理及规律。Lundgeren^[6]提出测试得到的侵彻加速度信号是由刚体过载、侵彻体结构响应和传感器结构响应及高频噪声组成的;刘小虎等^[7]通过低速侵彻试验证实了弹体减加速度中的高频成分可能是弹体结构响应的推测;杨明等^[8]通过建立加速度计的力学模型和动力学方程推导出了加速度计的输出信息成分的解析表达式;Zhang等^[9]、徐鹏等^[10]和何丽灵等^[11]在高速冲击下弹载存储测试装置的研制方面发表了很多重要成果,提出采用抗高过载测试技术一方面可有效地降低弹载部件高频响应对测试效果的影响,另一方面可实现对峰值达 10^4g 以上的过载测试。上述研究对弹体侵彻加速度信号的滤波处理和弹体过载特性分析提供了重要的参考依据,因此弹体加速度信号处理方法及应用已有广泛研究^[12-16],特别地,侵彻加速度信号中的弹体刚体过载作为弹体撞击靶板时承受冲击力载荷大小的标准量度,代表弹体针对不同硬目标的侵彻环境,决定弹体在靶板材料内的运动特性,成为研究的主要对象。基于此,在本文缩比试验与原型试验的过载环境相似性的研究工作中,将弹体刚体过载作为重要对照参量。

在常规的缩比弹体侵彻/贯穿问题相似律研究中,众多研究以 Π 定理为理论依据,在弹靶关系等比例几何缩放的条件下,确定了如表1所示不同基本量的缩比因子。通过选取合适的基本量推导出一系列表征问题中关键因素的无量纲数 $\pi_1 \dots \pi_n$,当原型与模型试验中的无量纲数存在相等关系,即 $\pi_p = \pi_m$ 时,则认为模型与原型针对此因素存在相似规律。例如,Haldar等^[17]提出了以无量纲数 $I = MNV^2/D^3 f_c$ (其中 M 、 N 、 V 、 D 分别为弹体质量、头部系数、速度以及直径, f_c 为混凝土压缩强度)表示的冲击因子,使得在冲击因子相同的条件下原型与模型的无量纲侵深 x/D 相同,基于此结合试验数据得到了计算侵深的经验公式。除此之外,文献[18-24]通过对缩比弹在侵彻能力(无量纲侵深、余速等)相似律方面的研究,总结出了经过大量试验验证的经验公式,可较好预估弹丸的终点效应。但以弹体过载为参量进行量纲分析时,将特征尺寸 l 、时间 t 及质量 M 的量纲表示为 L 、 T 、 M ,并有密度 ρ 、应力 σ 、过载 a 、速度 V 的量纲通过基本量纲推导得到,原型与模型相同物理量通过下标 p 、 m 区分,在表1所表示的传统几何缩比方式使得缩比试验中弹体过载幅值放大、脉宽变窄,无法等效模拟弹载部件承受的过载环境,所得结果难以作为弹体设计时的有效参考数据。因此通过合理设计非等比例缩比试验,以期获得与原型弹体相似的侵彻/贯穿过载环境,具有重要意义和工程应用价值。

非等比例缩比模型的试验研究在管道、船舶以及桥梁等大型结构的破坏强度及振动分析

表1 模型和原型物理量缩比因子

Table 1 Scaling factors of physical quantities between model and prototype

变量	量纲	原型与模型参量比	缩比因子
特征尺寸	L	l_p/l_m	n
时间	T	t_p/t_m	n
质量	M	M_p/M_m	n^3
密度	ML^{-3}	ρ_p/ρ_m	1
应力	$ML^{-1}T^{-2}$	σ_p/σ_m	1
过载	LT^{-2}	a_p/a_m	$1/n$
速度	LT^{-1}	V_p/V_m	1

中已有大量工作,而根据模型试验的目的不同,可提出不同的相似要求^[25]。如Mai等^[26]在对管道和板状弹性结构中裂纹的扩展形式研究中,认为结构的所有特征尺寸缩放因子不必相同,而裂纹扩展规律主要与1到2个几何缩放因子相关;在天线或高耸建筑等大型结构的振动分析中,由于主要考察弹性恢复力相似关系,对于纵向、弯曲和扭转振动可以只保持某一长度方向的几何相似,另外保持原型与模型的截面惯性矩相等即可。相关试验结果及其与理论模型/仿真计算结果的对比表明,在等比例缩比试验难以实施的条件下,非等比例缩比研究方法具有明确的可行性和重要的应用价值^[25]。

基于以上讨论,可以针对弹体侵彻半无限混凝土厚靶以及贯穿多层混凝土薄靶的过程中,刚体过载这一典型特征参量,通过侵彻/贯穿机理分析并建立数值计算模型,结合数值模拟方法研究非等比例缩比试验中的相似规律。

1 弹体几何缩比的参数表示

不失一般性,本文主要针对尖卵形头部空心弹丸侵彻/贯穿混凝土靶标的缩比规律进行研究,如图1给出了弹体特征长度,其中忽略装药空腔头部形状,取空腔长度简化为圆柱型长度。对于尖卵形头部,定义其头部弧形系数 $\eta_{CRH}=R/D$,可推导得到此弹型的质量为:

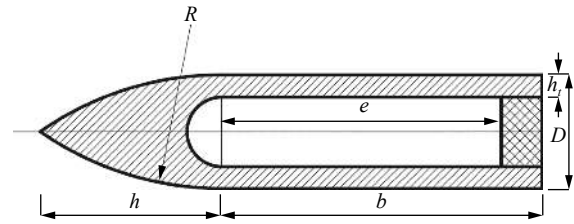


图1 典型尖卵形侵彻弹体尺寸

Fig. 1 Sizes of a typical ogiven projectile

$$M = \rho \frac{\pi D^2}{4} (b + \beta D) - \rho \frac{\pi D^2 (1 - 2\xi)^2}{4} e \quad (1)$$

式中: β 为弹头体积系数,由头部弧形系数计算得到,头部弧形系数最小取1时,弹体头部为半球形, $\beta=1/3$; $\xi=h_t/D$ 为无量纲壁厚; ρ 为弹体密度。

原型弹(prototype)与缩比模型弹(model)在质量、直径、弹身长度及装药空腔长度的缩比系数可表示为:

$$\lambda_M = \frac{M_p}{M_m}, \quad \lambda_D = \frac{D_p}{D_m}, \quad \lambda_l = \frac{b_p}{b_m}, \quad \lambda_e = \frac{e_p}{e_m} \quad (2)$$

将其代入式(1),则可得模型弹的结构参数与缩比系数间存在以下关系:

$$\lambda_M (b_m/D_m + \beta_m) - \lambda_D^2 \lambda_b b_m/D_m - \beta_m \lambda_D^3 - (1 - 2\xi_m)^2 \varphi_m (\lambda_M - \lambda_D^2 \lambda_e) = 0 \quad (3)$$

式中: $\varphi_m = e_m/D_m$ 定义为缩比弹的无量纲空腔长度, β_m 为缩比弹的弹头体积系数。若已确定式中所有缩比系数的取值,则可利用上式对缩比弹的结构尺寸进行设计,例如:针对等比例缩比准则要求的 $\lambda_D = \lambda_b = \lambda_e$,且 $\lambda_M = \lambda_D^3$,代入上式可满足条件。另一方面,考虑缩比试验条件对缩比弹尺寸的限制条件,可根据上式调节缩比系数范围。

针对弹体侵彻过程中刚体过载相似性关系,结合侵彻/贯穿物理过程分析,可进一步得到缩比系数间的关系,以及对弹靶参数进行非等比例缩放的约束条件。

2 非等比例相似弹体侵彻/贯穿混凝土靶的过载等效条件

2.1 弹体侵彻半无限厚靶

2.1.1 侵彻过载理论模型

Forrestal等^[27]基于球形空腔膨胀理论将弹体侵彻过程的减加速度形式具体表示为分段的两项式:

$$a = \begin{cases} \frac{CH}{M} & 0 < H < 2D \\ \frac{\pi D^2}{4M} (R + N\rho v^2) & H > 2D \end{cases} \quad (4)$$

式中: H 为侵彻深度, c 为基于试验结果假设的经验常数, R 、 N 分别表示混凝土强度参数和弹体头部系数, 头部形状函数 N 为用坐标积分表示的弹头广义形状因子 N^* 的函数, v 为弹体侵彻速度。

Forrestal 半经验公式经过了大量试验验证, 通过此公式预估得到的弹体侵彻半无限混凝土靶的刚体过载与试验数据吻合较好(如图 2 所示), 使得该公式有较高的可信度和适用性。

2.1.2 非等比例缩比过载等效条件

对于深侵彻问题, 忽略开坑区对侵彻过载的影响, 在计算过程中仅考虑隧道区的作用。在缩比试验环境中要实现过载环境的等效, 应有:

$$\lambda_a = \frac{a_p}{a_m} = 1 \tag{5}$$

代入式(4)有:

$$\frac{\lambda_D^2}{\lambda_M} = \frac{(R + N_m \rho_m v_m^2)}{(R + N_p \rho_p v_p^2)} \tag{6}$$

若缩比弹与原型弹头部系数相同、侵彻初速度相同、靶板参数保持一致, 要获得相似的刚体过载条件, 则应满足缩比关系:

$$\lambda_M = \lambda_D^2 \tag{7}$$

将其代入式(3)得:

$$\beta_m (\lambda_D - 1) + b_m / D_m (\lambda_b - 1) = (1 - 2\xi_m)^2 \varphi_m (\lambda_e - 1) \tag{8}$$

上式表明, 缩比弹头部形状以及无量纲壁厚确定时, 弹径缩比系数 λ_D , 弹长缩比系数 λ_b 以及空腔长度缩比系数 λ_e 三者中需要确定两个缩比系数的取值, 才能求解得到另外一个缩比系数。因此, 各结构参数的缩比系数不同取值, 导致了弹体结构的非等比例缩比。

通常弹体设计中, 弹头弧形系数 η_{CRH} 、全弹长径比 $(h+b)/D$ 、无量纲空腔长度 φ 、无量纲壁厚 ξ 的取值范围分别为:

$$\begin{cases} 2.5 \leq \eta_{CRH} \leq 4.5 \\ 5 \leq (h+b)/D \leq 10 \\ 0 < \varphi < 8 \\ 0.1 \leq \xi \leq 0.15 \end{cases} \tag{9}$$

特别地, 针对 $\eta_{CRH}=3, 3.5, 4, \xi=0.11, \varphi=6, (h+b)/D=8$ 的原型弹体, 其弹径缩比系数 λ_D 与弹身长度缩比系数 λ_b 、空腔长度缩比系数 λ_e 应如图 3 所示对应关系。

计算结果表明, 在以上非等比例相似条件下, 针对同一原型弹进行缩比设计时, 弹径缩比系数变化范围最大, 弹长缩比系数变化范围最小, 另外, 不同的 η_{CRH} 仅对弹长缩比系数的取值范围有影响。因此, 在缩比设计中, 应针对特定的试验条件及发射平台, 选取合适的缩比范围, 后面将结合具体算例进行计算验证。

2.2 弹体贯穿薄靶过载分析

2.2.1 贯穿理论模型

与侵彻半无限厚靶相比, 贯穿多层薄靶过程的影响因素相对复杂。Ma 等^[28]建立了弹体斜侵彻混凝土薄靶理论分析模型, 弹体姿态角、贯穿时间以及刚体过载等参量的数值计算结果与实验结果吻合较

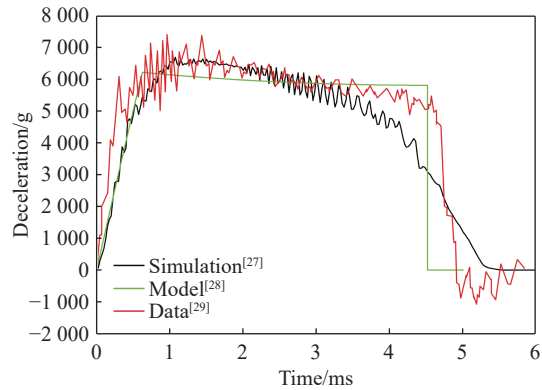


图 2 弹体 SNL-00-02 侵彻 23 MPa 混凝土时的刚体过载曲线比较

Fig. 2 Comparison of rigid-body deceleration curves for projectiles (SNL-00-02) penetrating 23 MPa concrete

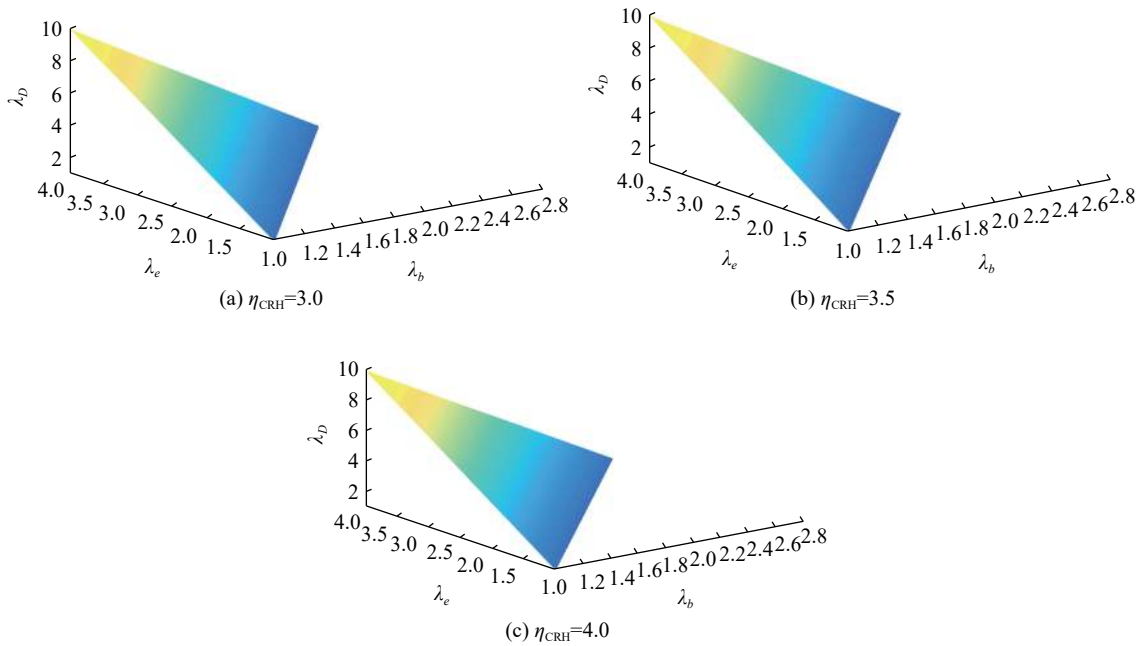


图 3 弹径缩比系数 λ_D 与弹长缩比系数 λ_b 、空腔长度缩比系数 λ_e 的对应关系

Fig. 3 Corresponding relationships among the diameter scaling coefficient λ_D , the length scaling coefficient λ_b and the cavity length scaling coefficient λ_e

好, 本文中基于此提出弹体侵彻多层薄靶的非等比例缩比条件, 得到刚体过载的相似关系, 并结合缩比弹贯穿多层薄靶的具体算例进行计算。

一般地, 弹体贯穿薄靶过程包括 2 个阶段: 不完全开坑阶段和剪切冲塞阶段, 贯穿过程如图 4 所示, 倾斜角为零时, 理论可退化成垂直侵彻薄靶情况。

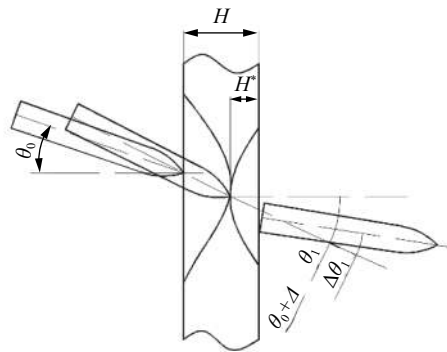


图 4 弹体侵彻薄靶的偏转过程示意图

Fig. 4 Deflection trajectory of a projectile penetrating into a thin target

在不完全开坑结束时刻, 弹体加速度 a_1 表达式如下:

$$a_1 = -v_0 \sqrt{c_1/M} \sin(\sqrt{c_1/M}t_1) \tag{10}$$

式中: t_1 为第一阶段结束的时间, c_1 为弹体轴向阻力系数, 通过边界条件联立求解, 得到

$$c_1 = \frac{\pi d}{4k} \left(\frac{N^* \rho v_0^2 + S f_c}{1 + (\pi k D^3 / (4M)) N^* \rho} \right) \tag{11}$$

式中: N^* 为弹头广义形状因子, S 是通过对较大质量弹体的试验数据标定得到的经验常数。

初始开坑阶段结束后, 剪切冲塞阶段开始, 根据试验观察假设冲塞块形状为锥形圆台形状。在剪切冲塞阶段弹体加速度表达式为:

$$a_2 = \frac{c_2}{M} \left(v_1 \sqrt{\frac{M}{4c_2} - \frac{F_{n1}}{2c_2}} \right) e^{t\sqrt{\frac{c_2}{M}}} - \frac{c_2}{M} \left(\frac{F_{n1}}{2c_2} + v_1 \sqrt{\frac{M}{4c_2}} \right) e^{-t\sqrt{\frac{c_2}{M}}} \quad (12)$$

式中: c_2 表示剪切冲塞阶段的阻力常数。剪切冲塞阶段的时间为 t_2 。

冲塞阶段结束后, 弹体贯穿薄靶的总时间历程 t 可表示为:

$$t = t_1 + t_2 = \frac{\arccos(v_1/v_0)}{\sqrt{c_1/M}} + \frac{1}{2\sqrt{c_2/M}} \ln \left[\frac{v_1 \sqrt{M/(4c_2)} + F_{n1}/(2c_2)}{v_1 \sqrt{M/(4c_2)} - F_{n1}/(2c_2)} \right] \quad (13)$$

基于以上物理过程分析, 结合文献 [28-29] 的试验结果, 将弹体贯穿薄靶的过载形式等效为三角形脉冲形式, 则可通过脉冲峰值 a_{\max} 和脉宽 τ 描述弹体的刚体过载特性。

与弹体侵彻有限厚靶不同, 一定速度下, 弹体贯穿薄靶时承受的冲击作用主要受靶厚、冲塞块厚度以及冲塞块形成时间等因素的影响。而冲塞块厚度 H^* 为打靶速度 v_0 、弹径 D 、靶板强度 f_c 以及靶板密度 ρ_t 的函数, 假设 H^* 可表示为

$$H^* = Av_0 D / \sqrt{f_c / \rho_t} \quad (14)$$

式中: A 为常数。因此过载峰值 a_{\max} 可写为弹体质量 M 、靶板阻力系数 Sf_c 、靶厚 H 、冲塞块厚度 H^* 、弹体倾角 β_0 以及弹头形状因子 N^* 的函数, 即

$$a_{\max} = f(M, H^*, \theta_0, Sf_c, H, N^*) \quad (15)$$

而过载脉宽主要是弹体初速 v_0 、弹体倾角 β_0 、靶板厚度 H 、弹头长度的函数, 即

$$\tau = g(v_0, \theta_0, H, h) \quad (16)$$

2.2.2 非等比例缩比过载等效条件

基于以上理论分析, 结合量纲分析方法, 以 H 、 M 、 Sf_c 为基本量, 则过载脉冲峰值函数可写为

$$a_{\max} = HH^* Sf_c / (Mf(\theta_0, N^*)) = Av_0 DHS \sqrt{f_c / \rho_t} / [(Mf(\theta_0, N^*))] \quad (17)$$

另外针对过载脉宽函数, 则有无量纲相似关系:

$$\frac{\tau v_0}{H} = g \left(\theta_0, \frac{l_0}{H} \right) \quad (18)$$

当弹体头部弧形系数 η_{CRH} 及弹体倾角 θ_0 固定不变, 混凝土靶板材料密度确定时, 由式(17)中过载峰值函数关系得到各弹靶参数的缩比系数间关系为:

$$\lambda_a = \lambda_{v_0} \lambda_H \lambda_D \sqrt{\lambda_{f_c}} / \lambda_M \quad (19)$$

另外, 由式(18)中过载脉宽相似关系得到各弹靶参数的缩比系数间关系为:

当 $\lambda_h = \lambda_H$ 时, 有

$$\lambda_\tau = \lambda_H / \lambda_{v_0} \quad (20)$$

式(19)说明, 缩比试验中若保持弹体初速、靶板厚度以及靶板强度和原型试验一致, 即 $\lambda_{v_0} = \lambda_H = 1$ 时, 则若要实现缩比弹刚体过载峰值与原型弹一致的条件, 应保证 $\lambda_D = \lambda_M$, 将其代入式(3)后可对弹体进行非等比例缩比设计。例如, 针对 $\eta_{\text{CRH}} = 3.5$, $\xi = 0.11$, $\varphi = 6$, $(h+b)/D = 8$ 的原型弹体, 其弹身长度缩比系数 λ_b 、弹径缩比系数 λ_D 和空腔长度缩比系数 λ_c 应具有图5所示的对应关系。可以看出: 弹身长度缩比系数和空腔长度缩比系数可选取范围很小, 这可能会造成缩比弹长径比过大或质心位置无法满足要求。另一方面,

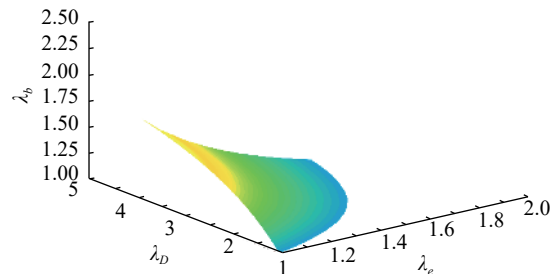


图5 弹身长度缩比系数 λ_b 与弹径缩比系数 λ_D 、空腔长度缩比系数 λ_c 的对应取值

Fig. 5 The corresponding range of the length reduction coefficient of projectile body λ_b , the diameter reduction coefficient λ_D and the cavity length reduction coefficient λ_c

如果对弹体初速、靶板布置等参数综合进行缩比设计,则可放宽弹体结构缩比范围。

式(20)说明,要达到相同的过载脉宽,靶厚缩比系数与初速缩比系数须保持一致。在实际试验中,为保证缩比弹体贯穿多层薄靶过程的稳定性,并降低弹体在贯穿多层靶过程中的随机不可控偏转,应适当减小弹长且保持较高的碰靶速度。

综上,对于贯穿多层薄靶的缩比试验,要实现其过载环境在过载峰值和脉宽方面与原型试验完全一致,对缩比系数的选取有很大限制,很难得到适用于缩比试验平台的缩比模型。若综合考虑弹体初速、靶厚、靶强以及弹体结构的非等比例缩比,调节合适的缩比范围,确保缩比弹的过载幅值和脉宽能覆盖原型弹,即满足下式:

$$a_m \geq a_p, \quad \tau_m \geq \tau_p \quad (21)$$

则可认为缩比试验过载环境能够模拟原型试验,并达到通过更严酷的冲击载荷对弹载器件进行加严考核的目的。

3 非等比例缩比弹模型算例

针对以上弹体非等比例缩比理论准则,本文结合具体侵彻/贯穿靶标试验条件,对缩比试验与原型试验的过载相似性进行验证。

3.1 弹体侵彻厚靶的过载相似性算例

不失一般性,本文针对500、1000 kg级战斗部进行缩比弹试验的设计与计算,其弹形为尖卵形头部空心弹体,下文中将500 kg与1000 kg级原型弹分别称为I型弹、II型弹,两种原型弹的弹靶参数列在表2中。

表2 原型弹的弹靶参数

Table 2 Experimental parameters of prototype projectiles and targets

弹型	D/mm	M/kg	l/mm	η_{CRH}	$v_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\rho_t/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	f_c/MPa
I	250	500	2000	3.5	450	2420	45
II	380	1200	2500	3.5	850	2420	45

根据式(11)~(12)的非等比例缩比条件,对2种原型弹进行缩比设计,取弹径缩比系数对应的质量缩比系数如表3所示。

表3 缩比系数表

Table 3 Scaling parameters of prototype projectiles

缩比弹序号	λ_D	λ_M	λ_b	λ_e
1	1.50	2.25	1.20	1.20
2	2.00	4.00	1.30	1.20
3	2.50	6.25	1.50	1.20
4	3.00	9.00	1.60	1.20

通过数值计算得到不同弹径缩比系数下,缩比侵彻试验与原型试验的弹体侵彻深度随弹体初速变化曲线,如图6所示。图6表明,缩比弹侵深略小于原型弹,但最大差距为1.9%,可忽略。由此则可确保不同弹径非等比例缩比相似。

缩比侵彻试验与原型试验的弹体刚体过载关系,如图7所示。图7说明,在不同的弹径缩比系数下,只要符合式(10)~(11)的非等比例缩比条件,缩比弹刚体过载的峰值及过载持续时间均能与原型弹刚体过载保持一致,缩比弹刚体过载峰值比原型弹稍高,且弹径缩比系数越大对应的缩比弹刚体过载上升阶段越快。综上所述,本文给出的非等比例缩比条件在侵彻过载方面满足缩比试验的相似性要求。

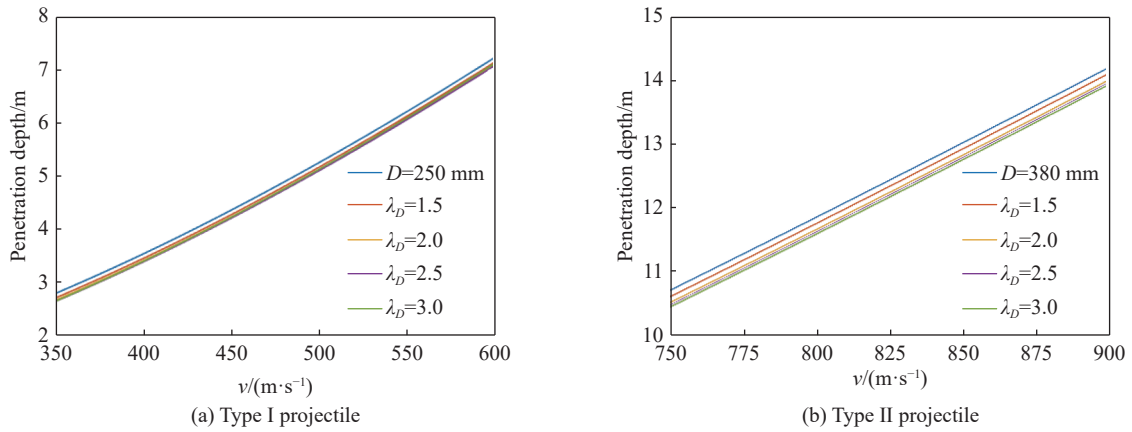


图6 原型试验和缩比弹试验弹体侵深

Fig. 6 Penetration depth of prototype projectile and reduced scale projectile for two types projectile

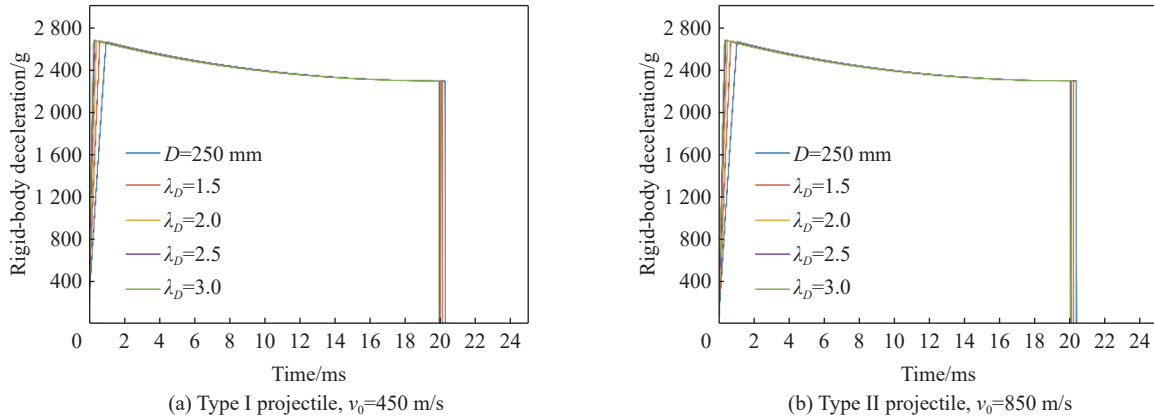


图7 原型试验和缩比弹试验刚体过载对比

Fig. 7 Rigid-body decelerations of prototype projectiles and reduced scale projectiles for two types projectiles

3.2 弹体贯穿多层薄靶过载相似性算例

由于侵彻机理的区别,弹体侵彻半无限厚靶板的刚体过载环境与贯穿多层薄靶的过载环境有较大差异,尽管国内外学者对弹体贯穿混凝土靶开展了大量的试验研究,但都局限于小尺寸缩比弹试验(弹体质量小于10 kg,弹径不大于100 mm),而对大尺寸弹体贯穿多层混凝土薄靶的试验开展较少,因此缺少相关试验的弹体刚体过载数据。本文基于155火炮为发射平台,针对表2中II型弹侵彻多层薄靶的原型试验进行缩比试验设计,并通过数值计算得到弹体贯穿过程的过载曲线。

原型试验的弹靶参数及其在缩比试验中的缩比系数列在表4中,缩比试验保持了与原型试验相同的弹体初速,适当减小了缩比试验中的靶厚和靶间距。

通过数值计算得到弹体贯穿过程的过载曲线,原型弹和缩比弹贯穿10层混凝土薄靶试验的过载曲线对比如图8所示。

表4 II型(1 000 kg级)弹原型试验及对应的缩比试验参数

Table 4 Prototype test and corresponding scaling test parameters of type II (1 000 kg) projectile

量	原型试验	缩比试验	相关缩比系数
M/kg	1 200	80	$\lambda_M=15$
l/mm	2 500	890	$\lambda_l=2.8$
D/mm	380	150	$\lambda_D=2.5$
η_{CRH}	3	3	
$v_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	850	850	$\lambda_{v_0}=1$
$\theta_0/(\text{°})$	0/10/15	0/10/15	
H/mm	300+180×9	300+140×9	$\lambda_H=1$ 和1.35
z/mm	3 000	2 900	$\lambda_z=0.97$
$\sigma_{\text{bc}}/\text{MPa}$	40	30	$\lambda_{\sigma_{\text{bc}}}=0.75$

注: z 为靶间距; σ_{bc} 为靶材料抗压强度。

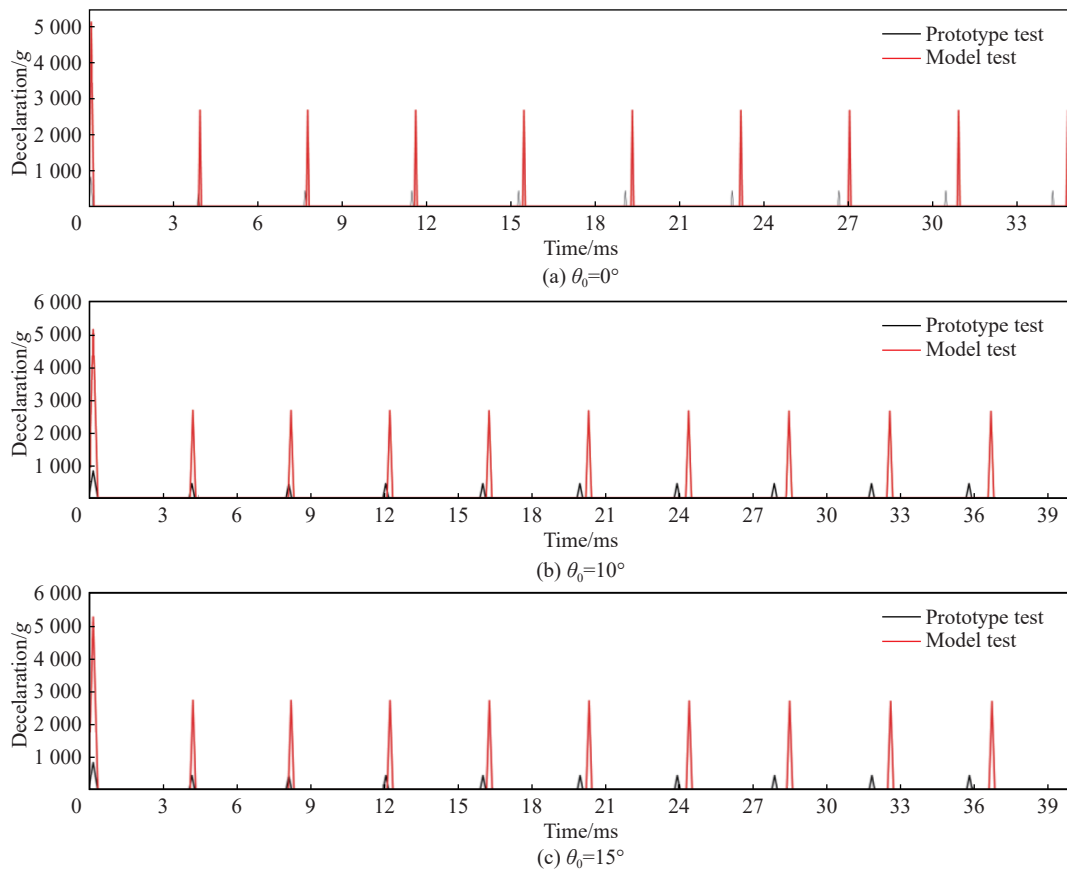


图 8 1 000 kg 级原型弹与缩比弹侵彻 10 层混凝土靶板的刚体过载

Fig. 8 Rigid-body decelerations of 1 000 kg prototype projectiles and reduced scale projectiles penetrating ten-layer concrete target

综合来看,对于侵彻多层薄靶的情况,可认为初速相同时,缩比弹侵彻薄靶时刚体过载峰值大于原型弹,此算例中缩比弹过载峰值是原型弹的 6.8 倍,与通过式(19)计算得到的过载峰值相似关系一致。在过载脉宽方面,由于姿态角有较大影响,为了保证弹体偏转姿态改变较小,提高弹道稳定性,应确保较高初速,调节质心位置。同时适当调节靶厚及靶间距有利于控制脉宽差别,可使缩比弹刚体过载脉宽的减小量在 10% 以内。

3.3 弹体贯穿多层薄靶数值模拟的过载信号有效性分析

为了验证数值计算结果的有效性,进一步反映实际的过载曲线。本文基于显式动力学软件 LS-DYNA 对表 3 中 1 000 kg 级弹体的缩比弹垂直贯穿 10 层靶的工况进行数值模拟。同时,由于模拟得到的弹体减速度信号不仅包含刚体过载,也包含结构的高频响应,合适的减速度信号滤波处理方法对得到有效弹体刚体过载曲线有重要影响。因此本文针对非等比例缩比弹刚体过载信号的数值模拟研究,对非等比例缩比贯穿试验中加速度传感器及其防护结构的设计,以及加速度信号的处理有参考价值。

3.3.1 弹体有限元模型的模态分析

原型弹与缩比弹中不同的弹体结构响应,不仅对试验中采用传感器的类型尺寸以及相匹配的传感器防护系统有很大影响^[18],也对数值模拟中刚体过载结果的提取方法提供依据。因此,有必要首先对非等比例缩比弹进行模态分析,考察缩比弹和原型弹的主要影响振型和频率的关系。

1 000 kg 级弹体原型弹与非等比例缩比弹的模型图如图 9 所示,基于有限元分析软件 ANSYS 中的模态分析模块求解得到原型弹和缩比弹在自由状态下的前 20 阶模态,由于前 6 阶模态为刚体的平动和转动,对应频率为 0,表 5 仅列出之后 14 阶振型频率。表 5 说明同种振型下缩比弹的模态频率均比原型弹大,其中缩比弹各阶模态频率在 1 kHz 以上,在原型弹模态频率中,运动方向与传感器敏感方向一致的

拉伸振型(如图 10 所示)对应的最低模态频率为 1 085.9 Hz。基于此,分别对原型弹与缩比弹搭载的引信输出的过载信号进行低通滤波处理,取截止频率为 1 kHz 时,可排除弹体结构和引信安装结构的高频振动响应,得到有效的刚体过载曲线。

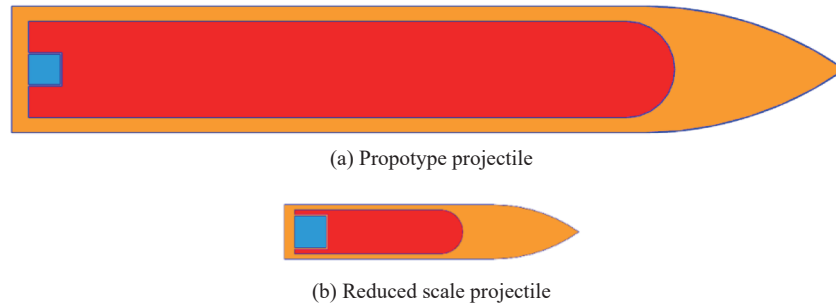


图 9 1 000 kg 级原型弹与缩比弹的有限元模型对比

Fig. 9 Models of 1 000 kg class prototype projectile and reduced scale projectile



图 10 缩比弹自由状态下初始形状与第 12 阶拉伸模态振型的位移云图对比

Fig. 10 Tensile mode shapes of the 12th order modes of scale projectiles in free state

表 5 1 000 kg 级原型弹及其缩比弹自由状态下前 20 阶模态频率

Table 5 Top 20 modal frequencies of 1 000 kg class prototype projectile and reduced scale projectile in free state

模态序号	模态频率/Hz		模态序号	模态频率/Hz	
	原型弹	缩比弹		原型弹	缩比弹
7	335.67	1 159.2	14	1 416.2	4 670.5
8	335.67	1 159.2	15	1 453.2	4 670.5
9	716.72	2 132.5	16	2 012.8	6 291.2
10	833.99	2 708.3	17	2 012.8	6 291.2
11	833.99	2 708.3	18	2 200.1	6 463.9
12	1 085.9	3 196.4	19	2 236.0	7 044.5
13	1 416.2	4 563.3	20	2 633.9	8 244.7

3.3.2 弹体贯穿多层薄靶数值模拟结果

针对弹体侵彻 10 层混凝土靶的原型试验和缩比试验建立有限元模型,其中缩比模型如图 11 所示,由于现有的相关数值模拟工作表明^[30],准确的数值模拟参数设置和材料模型的选取,能使模拟结果真实反映试验结果。本文数值模拟中采用的弹体以及靶板材料与文献 [28] 一致。其中弹体外壳采用线弹塑性材料模型,在弹体结构中建立简化的弹载测试装置模型,混凝土采用 TCK 拉伸损伤材料模型,忽略靶板边界效应。弹体与混凝土之间用侵蚀接触算法。

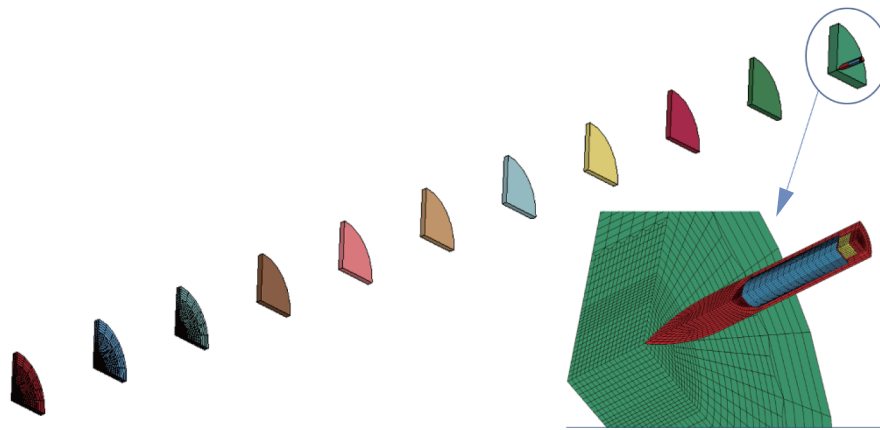


图11 弹体侵彻十层靶板 1/4 有限元模型

Fig. 11 1/4 finite element model of a projectile penetrating a ten-layer target plates

图12给出了基于上节滤波处理方法得到的原型弹和缩比弹贯穿靶板的刚体过载时程曲线,可看到模拟结果与数值计算结果一致,证明本文设计的非等比例缩比弹刚体过载峰值和脉宽均能覆盖原型弹。

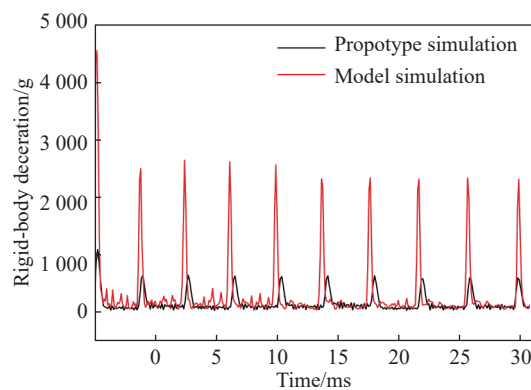


图12 原型弹和缩比弹贯穿10层薄靶过程刚体过载时程曲线

Fig. 12 Rigid-body deceleration curve of a prototype projectile and a scale projectile while penetrating 10 layers of thin target

4 结论

本文针对被测部件为原型件、搭载侵彻弹为缩比模型的试验设计要求,建立了非等比例缩比试验设计方案,实现缩比试验的过载环境能模拟原型试验。

(1)针对弹体侵彻厚靶试验,在初速、靶板强度、弹体头部形状系数等因素不变的条件下,调整了缩比弹和原型弹弹径和弹体质量的缩比系数,当 $\lambda_M = \lambda_D^2$ 时,弹体的刚体过载幅值和脉宽均能满足相似过载环境。

(2)针对弹体贯穿多层薄靶的缩比试验方案,得到过载峰值的相似关系为: $\lambda_a = \frac{\lambda_{v0} \lambda_H \lambda_D \sqrt{\lambda_{fc}}}{\lambda_M}$;过载脉宽的相似关系为: $\lambda_\tau = \lambda_H / \lambda_{v0}$ 。在一定的缩比弹发射平台下,很难协调各参量的缩比系数以实现过载峰值及脉宽的严格相似,只要确保缩比试验和原型试验刚体过载间的关系满足 $(a_m - a_p)(\tau_m - \tau_p) \geq 0$,则可模拟比原型试验更严格的过载环境,从而达到了严加考核的目的:一方面调节非等比例缩比试验中弹体初速、靶板厚度、间隔距离,另一方面对弹体结构从调节质心位置、控制适当长径比的角度进行缩比设计,可实现缩比试验的弹体刚体过载峰值及脉宽应完全覆盖原型弹的要求。

(3)过载测试装置的结构和安装方式对过载信号有重要影响,缩比试验中,应采用与原型相同的传

感器防护结构及安装方式;通过对贯穿多层靶板缩比弹结构模态分析得到,缩比弹主要模态频率比原型弹高,采用合适的低频传感器或对过载信号进行低通滤波处理,可以得到较准确的刚体过载。

本文结论已用于某工程产品的缩比试验开展并得到验证,实际效果良好。在此基础上有待于进一步研究应力波效应下的结构响应及其等效特性。

参考文献:

- [1] 王树有,顾晓辉,赵有守. 混凝土侵彻试验相似准则验证分析[J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2005, 29(5): 43–46. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9830.2005.05.011.
WANG S Y, GU X H, ZHAO Y H. Experimental analysis of similarity criteria for concrete penetration [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science)*, 2005, 29(5): 43–46. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9830.2005.05.011.
- [2] 王世虎. 硬目标侵彻中的加速度信号研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2010: 5–30.
- [3] 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. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00108-2.
- [4] 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. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.01.012.
- [5] XU Y, KEER L M, LUK V K. Elastic-cracked model for penetration into un-reinforced concrete targets with ogival nose projectiles [J]. *International Journal Solids Structures*, 1997, 34(12): 1479–1491. DOI: 10.1016/S0020-7683(96)00099-6.
- [6] LUNDGREN. A strain gage based projectile health monitor and salvage indicating circuit for kinetic energy penetrating projectiles [C] // 53th NDIA Fuze Conferenc. Florida: NDIA, 2009.
- [7] 刘小虎,刘吉,王乘,等. 弹丸低速垂直侵彻钢筋混凝土的实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 1999, 19(4): 323–328.
LIU X H, LIU J, WANG C, et al. Experimental studies on the projectile penetrating normally into a plain concrete [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1999, 19(4): 323–328.
- [8] 杨明,杨志刚,林祖森. 加速度计输出信号的信息组成[J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2000, 21(1): 44–46. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3193.2000.01.012.
YANG M, YANG Z G, LIN Z S. Information compositions of the output signal of accelerometers [J]. *Journal of North China Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2000, 21(1): 44–46. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3193.2000.01.012.
- [9] ZHANG W, CHEN L, XIONG J, et al. Ultra-high g deceleration-time measurement for the penetration into steel target [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(3): 436–447. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.01.008.
- [10] 徐鹏,祖静,范锦彪. 高速动能弹侵彻硬目标加速度测试技术研究[J]. *振动与冲击*, 2007, 26(11): 118–122. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2007.11.028.
XU P, ZU J, FAN J B. Study on acceleration test technique of high velocity kinetic energy projectile penetrating into hard target [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, 26(11): 118–122. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2007.11.028.
- [11] 何丽灵,高进忠,陈小伟,等. 弹体高过载硬回收测量技术的实验探讨[J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(6): 608–612. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)06-0608-0612.
HE L L, GAO J Z, CHEN X W, et al. Experimental study on measurement technology for projectile deceleration [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(6): 608–612. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)06-0608-0612.
- [12] 周宁,任辉启,沈兆武,等. 侵彻钢筋混凝土过程中弹丸过载特性的实验研究[J]. *实验力学*, 2006, 21(5): 572–578. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4888.2006.05.005.
ZHOU N, REN Q H, SHEN Z W, et al. Experimental study on overload characteristics of projectile penetrating reinforced concrete [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2006, 21(5): 572–578. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4888.2006.05.005.
- [13] 黄家蓉,刘瑞朝,何翔,等. 侵彻过载测试信号的数据处理方法[J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(5): 555–560. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)05-0555-0560.
HUANG J R, LIU R C, HE X, et al. A new data processing technique for measured penetration overloads [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(5): 555–560. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)05-0555-0560.
- [14] 赵生伟,初哲,李明. 抗侵彻过载战斗部装药安定性实验研究[J]. *兵工学报*, 2010, 31(S1): 284–287.
ZHAO S W, CHU Z, LI M. Experiment investigation on stability of explosive in anti-overload warhead [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(S1): 284–287.

- [15] 张会锁, 罗旭, 张远高. 弹体过载记录仪安装方式对侵彻过载峰值的影响分析 [J]. *中北大学学报 (自然科学版)*, 2014, 35(3): 252–257. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3193.2014.03.006.
ZHANG H S, LUO X, ZHANG Y G. Research on the influence of the missile overload recorder installation style on penetration acceleration peak value [J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2014, 35(3): 252–257. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3193.2014.03.006.
- [16] 李计林, 徐文崢, 王晶禹, 等. 侵彻过程中弹载火工品过载特性数值模拟 [J]. *火工品*, 2009(6): 30–34. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2009.06.010.
LI J L, XU W J, WANG J Y, et al. The numerical simulation for overload characteristic of initiating explosive device on missile during penetration [J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2009(6): 30–34. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2009.06.010.
- [17] HALDAR A, HAMIEH H A. Local effect of solid missiles on concrete structures [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1984, 110(5): 948–960. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:5(948).
- [18] 徐建波. 长杆射弹对混凝土的侵彻特性研究 [D]. 湖南: 国防科学技术大学, 2001: 23–56.
- [19] 杨超, 赵宝荣, 付克勤, 等. 缩比件弹体侵彻混凝土过程相似律研究 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2003(5): 3–7. DOI: 10.3969/j.issn.1004-244X.2003.05.001.
YANG C, ZHAO B R, FU K Q, et al. Research on similarity law of penetration concrete of equiscale projectile [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2003(5): 3–7. DOI: 10.3969/j.issn.1004-244X.2003.05.001.
- [20] 武海军, 黄风雷, 陈利, 等. 动能弹侵彻钢筋混凝土相似性分析 [J]. *兵工学报*, 2007, 28(3): 276–280. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2007.03.005.
WU H J, HUANG F L, CHEN L, et al. Similarity law analyses of penetration behavior in reinforced concrete [J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(3): 276–280. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2007.03.005.
- [21] 陈小伟, 张方举, 杨世全, 等. 动能深侵彻弹的力学设计 (III): 缩比实验分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(2): 105–114. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)02-0105-0114.
CHEN X W, ZHANG F J, YANG S Q, et al. Mechanics of structural design of epw (III): investigations on the reduced-scale tests [J]. *Explosion And Shock Waves*, 2006, 26(2): 105–114. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)02-0105-0114.
- [22] MEBAR Y. A method for scaling ballistic penetration phenomena [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(9): 821–829. DOI: 10.1016/S0734-743X(97)00020-1.
- [23] YOUNG C W. Equations for predicting earth penetration by projectiles: an update: SAND88-0013 [R]. USA: Sandia National Laboratories, 1988.
- [24] LI Q M, CHEN X W. Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28(1): 93–116. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00037-4.
- [25] 朱彤. 结构动力模型相似问题及结构动力试验技术研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
- [26] MAI Y W, ATKINS A G. Crack propagation in non-proportionally scaled elastic structures [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1978, 20(7): 437–449. DOI: 10.1016/0020-7403(78)90033-4.
- [27] FORRESTAL M J, TZOU D Y. A spherical cavity-expansion penetration model for concrete targets [J]. *International Journal of Solids Structure*, 1997, 34(31-32): 4127–4146. DOI: 10.1016/S0020-7683(97)00017-6.
- [28] MA Z F, DUAN Z P, OU Z C, et al. The experimental and theoretical research on attitude of projectile obliquely penetrating into thin concrete target [J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(S1): 248–252. DOI: 10.15918/j.tb1001-0645.2016.10.003.
- [29] 王冰. 大长径比弹体侵彻混凝土的数值模拟研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2012: 5–30.
- [30] PENG Y, WU H, FANG Q, et al. Residual velocities of projectiles after normally perforating the thin ultra-high performance steel fiber reinforced concrete slabs [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 97(11): 1–9. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.06.006.

(责任编辑 王小飞)