

截锥形动能弹低速侵彻装甲靶过载研究

肖艳文^{1,2}, 王向东³, 吴峰贤², 余庆波¹, 王海福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. 总装备部武汉军事代表局驻襄樊地区军事代表室, 湖北襄阳 441021
3. 晋西工业集团有限公司, 太原 030027

摘要 基于空穴膨胀理论, 建立了截锥形动能弹低速侵彻靶板过载计算模型, 获得了着速、弹头锥度及靶板材料强度等因素对过载的影响特性。计算结果表明, 在截锥形动能弹低速侵彻条件下, 着速对侵彻过载影响显著, 但对过载作用时间影响不大; 弹头锥度和靶板材料强度对侵彻过载及过载作用时间有重要影响, 侵彻过载和作用时间随弹头锥度及靶板材料强度减小而降低。最后, 通过实验验证了计算结果的正确性。

关键词 过载; 侵彻; 动能弹

中图分类号 TJ410.33

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.17.004

Acceleration of Truncated-conical Projectile Penetrating Armor at Low Speed

XIAO Yanwen^{1,2}, WANG Xiangdong³, WU Fengxian², YU Qingbo¹, WANG Haifu¹

1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
2. Military Representative Office in Xiangfan, General Armament Department, Xiangyang 441021, Hubei Province, China
3. Jinxi Industry Group LLC, Taiyuan 030027, China

Abstract A calculation model based on the cavity expansion theory is developed to predict the overloading on the truncated-conical projectile penetrating into finite thickness metallic plates at low speed. The influences of the velocity of the projectile, the projectile taper and the strength of the target material on the overloading are analyzed. The results show that the velocity of the projectile has a noticeable effect on the magnitude of overloading but a much less important effect on the period of the overloading; both the projectile taper and the strength of the target material have a significant effect on the magnitude and the period of the overloading, the magnitude and the period decrease as the taper and the velocity decrease. The predicted results are in good agreement with experimental results, which has validated the model.

Keywords acceleration; penetration; projectile

0 引言

高过载是反硬目标弹药研制面临的重大关键技术之一, 它对装药、引信、弹体结构强度及弹载电子元器件等抗过载设计提出了严峻的挑战。2008年, 韩学平等^[1]基于小波理论, 对引信腔内过载进行研究, 用该方法进行引信过载测试与直接测试方法得到的数据基本吻合。2009年, 张伟东等^[2]运用数值模拟方法研究了多模式 AC/DC 控制芯片的过载行为。目前,

侵彻过载主要通过无线电遥测技术对全尺寸侵彻试验进行测量获得, 其试验费用高、周期长、难度大, 且存在测量过载范围较小的缺点, 如中北大学最新提出的一种新型过载测试装置, 其测试范围最高也仅为 $16 \times 10^4 g$ 。理论分析不仅适用范围广、成本低, 而且耗时短, 对侵彻过载研究具有指导意义。本文基于空穴膨胀理论, 就截锥形动能弹侵彻靶板过程中着速、头部锥度及靶板材料强度对过载的影响特性进行研究。

收稿日期: 2012-04-19; 修回日期: 2012-05-11

作者简介: 肖艳文, 博士研究生, 研究方向为火炮、自动武器与弹药工程, 电子信箱: ieeeq-1225@163.com; 王海福(通信作者), 教授, 研究方向为新概念弹药与高效毁伤技术、空间攻防技术, 电子信箱: wanghf@bit.edu.cn

1 模型与算法

1.1 侵彻模型

为便于问题分析,假设弹体在侵彻过程中为刚体,即在整个侵彻过程中弹体不发生变形,并忽略靶后边界对侵彻的影响。任意弹头形状动能弹侵彻靶板行为见图 1。动能弹侵彻靶板过程可分为两个阶段,第一阶段指弹体头部完全侵入靶板前,第二阶段指弹体头部完全侵入靶板后。基于动态空穴膨胀理论,两个阶段弹丸头部的侵彻阻力可表述为^[3-12]

$$\begin{cases} F_1(x) = \pi y^2 (A \bar{N}_1 \sigma_y + B \rho \bar{N}_2 V^2) \\ F_2(x) = \frac{\pi d^2}{4} (A N_1 \sigma_y + B \rho N_2 V^2) \end{cases} \quad (1)$$

其中, σ_y 为靶板材料的屈服应力; ρ 为靶板材料的密度; d 为弹体直径; y 为弹体头部母线; V 为弹体在侵彻过程中的瞬时速度; A 、 B 为无量纲数,取决于靶板材料; $N_1(\bar{N}_1)$ 、 $N_2(\bar{N}_2)$ 为取

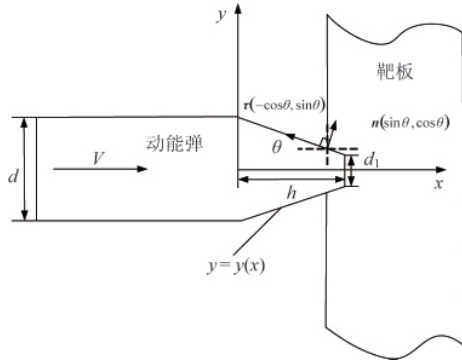


图 1 弹靶侵彻示意

Fig. 1 Schematic diagram of bullet-target penetration

决于弹体头部形状和摩擦系数的无量纲数。

对于截锥形头部弹丸,其头部母线满足如下函数关系:

$$\begin{aligned} y &= -\frac{d-d_1}{2h}x + \frac{d}{2} \\ y' &= -\tan\theta = -\frac{d-d_1}{2h} \end{aligned}$$

其中, d_1 为截锥顶部直径; θ 为截圆锥母线与弹轴之间的夹角。

由此,即可解出靶板作用于弹丸头部的阻力 $F(x)$ 。弹丸侵彻过程中损失的动能等于作用于弹丸上的阻力做的功,即

$$\Delta E = -F_x(x) \Delta x \quad (2)$$

动能弹的初始动能为

$$E_k = \frac{1}{2} M V_0^2 \quad (3)$$

其中, M 为动能弹质量; V_0 为动能弹初始速度。

1.2 计算方法

侵彻深度 x_p 可由式(1)一式(3)求出,但直接求解比较困难,一般采用数值计算方法来求解。假设 Δx 为侵彻深度步长,则第 i 步侵深为

$$x_i = i \Delta x$$

$$\Delta E_i = -F_x(x) \Delta x = -\Delta x \left[\frac{F(x_{i-1}) + F(x_i)}{2} \right] = \frac{1}{2} M (V_i^2 - V_{i-1}^2)$$

且

$$\begin{cases} F_1(x_i) = \pi y_i^2 (A (\bar{N}_1)_i \sigma_y + B (\bar{N}_2)_i \rho V_i^2) \\ F_2(x_i) = \frac{1}{4} \pi d^2 (A (N_1)_i \sigma_y + B (N_2)_i \rho V_i^2) \end{cases} \quad (4)$$

由此可得两个阶段的速度分别为

$$V_{1i} = \sqrt{\frac{0.5 M V_{i-1}^2 - 0.5 \Delta x [\pi y_i^2 A (\bar{N}_1)_i \sigma_y + \pi y_i^2 A (\bar{N}_1)_{i-1} \sigma_y + \pi y_i^2 B (\bar{N}_2)_i \rho V_{i-1}^2]}{0.5 \pi y_i^2 B (\bar{N}_2)_i \rho \Delta x + 0.5 M}} \quad (5)$$

$$V_{2i} = \sqrt{\frac{0.5 M V_{i-1}^2 - 0.5 \Delta x [\frac{\pi d^2}{4} A (N_1)_i \sigma_y + \frac{\pi d^2}{4} A (N_1)_{i-1} \sigma_y + \frac{\pi d^2}{4} B (N_2)_i \rho V_{i-1}^2]}{2 \pi d^2 B (N_2)_i \rho \Delta x + 0.5 M}} \quad (6)$$

于是两个阶段的加速度 a 可表示为

$$\begin{cases} a_{1i} = \frac{\Delta V_{1i}}{\Delta t_i} = \frac{V_i - V_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \\ a_{2i} = \frac{\Delta V_{2i}}{\Delta t_i} = \frac{V_i - V_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \end{cases} \quad (7)$$

2 计算结果及分析

2.1 着速对过载的影响

计算采用的截锥形动能弹结构如图 2 所示,半锥角 α 为

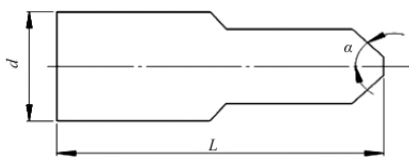


图 2 实验弹结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental bullet structure

35°, 质量 6kg。实验用弹弹体材料为超高强度合金钢,靶板为装甲板,弹靶主要材料列于表 1。

表 1 弹靶材料参数

Table 1 Principal parameters of projectile and target

材料	密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	屈服强度 Y/MPa
动能弹	7850	200	0.3	1500
装甲板	7850	200	0.3	750

针对上述弹靶材料参数及试验弹结构,对不同着速的侵彻过载情况进行数值计算,获得 150, 180 及 210m/s 着速下的过载时间曲线如图 3 所示,过载随着速变化曲线如图 4 所示。从图 3、图 4 可以看出,着速对侵彻过载影响显著,过载随着速增加迅速上升,但着速对过载作用时间影响并不明显。

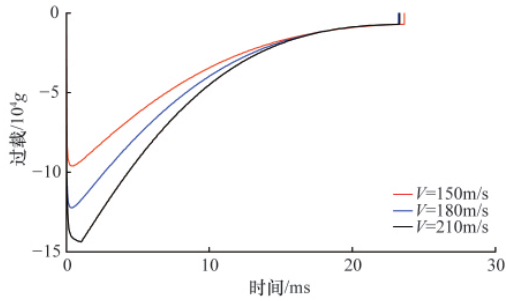


图 3 过载-时间曲线

Fig. 3 Overload-time curve

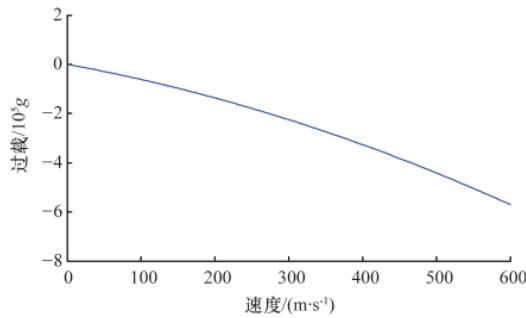


图 4 过载-速度曲线

Fig. 4 Overload-speed curve

2.2 靶板强度对过载的影响

按试验使用的弹体材料及结构,在着速 150m/s 下,对不同屈服强度的靶板进行侵彻过载分析,获得了靶板屈服强度分别为 900,1100 及 1500MPa 时的过载随时间变化曲线如图 5 所示,过载随靶板屈服强度变化曲线如图 6 所示。从图 5、

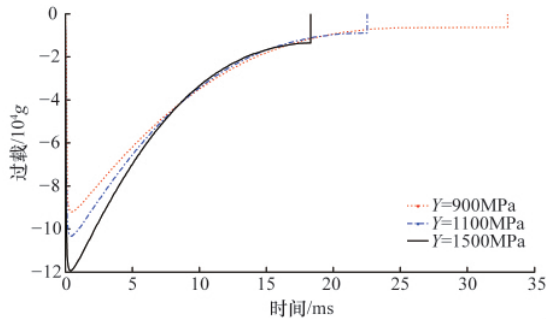


图 5 过载-时间曲线

Fig. 5 Overload-time curve

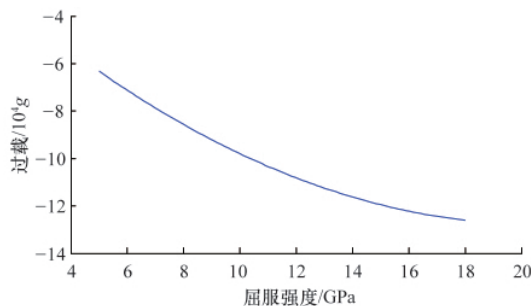


图 6 过载-靶板屈服强度曲线

Fig. 6 Overload-target board strength curve

图 6 可以看出,侵彻过载随靶板强度的增加而增加,过载作用时间随靶板强度的增加而缩短。

2.3 锥度对过载的影响

在 100m/s 速度下,对不同头部半锥度 α 的动能弹侵彻屈服强度为 900MPa 装甲靶板的过载进行数值计算。其中,54.5°、46.4°以及 35° 3 种不同半锥度动能弹侵彻装甲靶板产生的过载随时间变化曲线如图 7 所示,过载随动能弹头部半锥度 α 变化曲线如图 8 所示。从图 7、图 8 可以看出,过载随动能弹锥角增大而增大,即动能弹头部越钝过载越大。另外,从过载时间曲线上看,动能弹半锥角对过载作用时间也有一定影响,过载作用时间随锥度减小而延长,这主要是由于侵彻的深度随着弹头锥度的减小而增加。

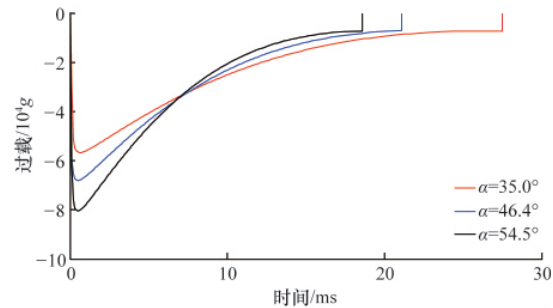


图 7 过载-时间曲线

Fig. 7 Overload-time curve

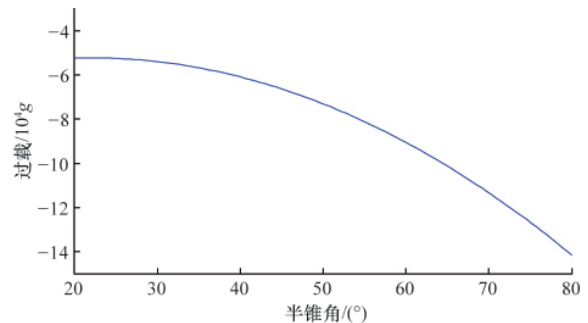


图 8 过载-头部半锥度曲线

Fig. 8 Overload-head half taper curve

3 验证实验

基于上述理论计算,加工了半锥度为 35°的截锥形实验弹,并通过炮射实验测试了动能弹侵彻靶板的过载情况,高速摄影仪测得的着靶速度为 180m/s,试验照片如图 9 所示,试验测得的过载曲线如图 10 所示,采用 10kHz 滤波处理后的侵彻加速度曲线如图 11 所示,数值计算获得的加速度曲线如图 12 所示。

从图 9—图 12 可以看出,计算的过载曲线与实验测得的过载吻合较好,尤其与滤波处理后的过载曲线峰值非常吻合。数值计算中未考虑弹体在侵彻过程中产生的反向速度,

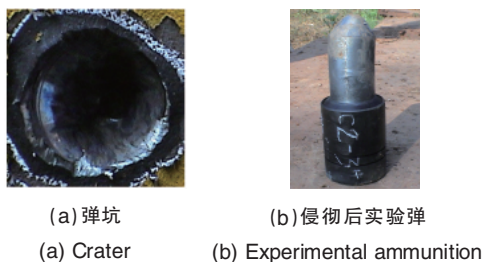


图 9 试验照片

Fig. 9 Experiment photos

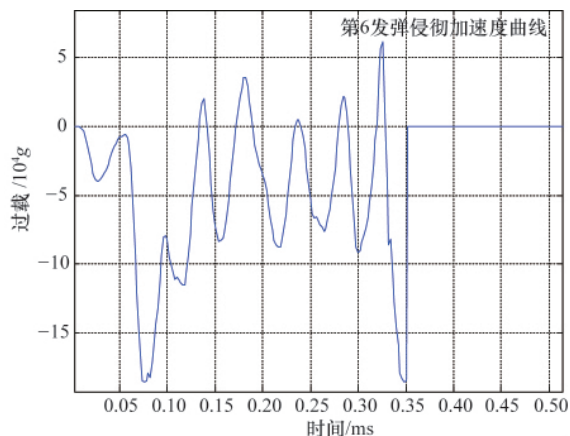


图 10 实验测得的过载曲线

Fig. 10 Overload curve measured in experiment

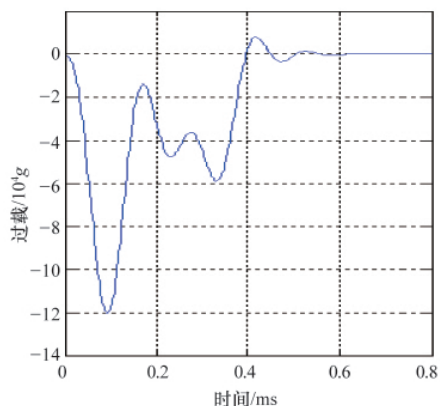


图 11 10kHz 滤波处理后的过载曲线

Fig. 11 Overload curve after filtering process

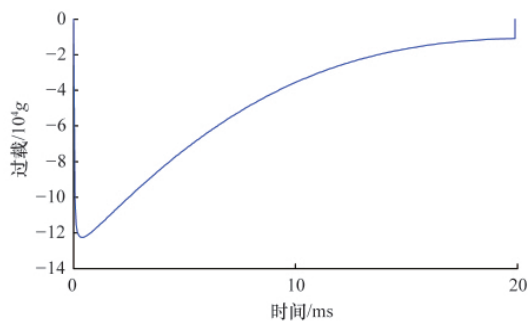


图 12 数值计算的过载曲线

Fig. 12 Overload curve after calculation

因此获得的过载曲线不会产生和试验曲线一样的反向波动。实际上,在引信设计时,通常关心的是峰值过载及其作用时间,因此通过本数值计算方法可以较好地计算出动能弹侵彻靶板的过载。

4 结论

本文基于空穴膨胀理论建立了侵彻过载计算模型,并通过该模型对截锥形动能弹低速侵彻装甲靶板作用行为进行计算分析,得到结论如下。

- (1) 通过试验对建立的侵彻过载计算模型的正确性进行了验证,结果表明计算结果与试验结果吻合较好。
- (2) 着速对过载影响显著,过载随着速的增加而显著提高,但着速对过载作用时间影响并不明显。
- (3) 靶板强度及弹头锥度对侵彻过载有重要影响,过载随靶板强度及弹头锥度的减小而降低。

参考文献 (References)

- [1] 韩学平, 芮筱亭, 王国平, 等. 基于小波的弹性弹丸腔内引信过载研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(13): 3496-3499.
Han Xueping, Rui Xiaoting, Wang Guoping, et al. Journal of System Simulation, 2008, 20(13): 3496-3499.
- [2] 张伟东, 丁扣宝, 何杞鑫, 等. 多模式 AC/DC 控制芯片的过载研究[J]. 电子器件, 2009, 32(1): 28-30.
Zhang Weidong, Ding Koubao, He Qixin, et al. Chinese Journal of Electron Devices, 2009, 32(1): 28-30.
- [3] Li Q M, Weng H J, Chen X W. A modified model for the penetration into moderately thick plates by a rigid, sharp-nosed projectile [J]. Int J Impact Eng, 2004, 30(2): 193-204.
- [4] Macek R W, Duffey A D. Finite cavity expansion method for near surface effects and layering during earth penetration [J]. Int J Impact Eng, 2000, 24(3): 239-258.
- [5] Luk V K, Forrestal M J, Amos D E. Dynamics spherical cavity expansion of strain-hardening materials[J]. Trans ASME J Appl Mech, 1991, 58(1): 1-6.
- [6] Forrestal M J, Luk V K. Penetration into soil targets[J]. Int J Impact Eng, 1992, 12(3): 427-441.
- [7] Forrestal M J, Altman B S, Cargile J D, et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets [J]. Int J Impact Eng, 1994, 15(4): 395-405.
- [8] Forrestal M J, Tzou D Y, Askari E, et al. Penetration into ductile metal targets with rigid spherical-nose rods[J]. Int J Impact Eng, 1995, 16(15): 699-710.
- [9] Li Q M, Chen X W. Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile [J]. Int J Impact Eng, submitted for publication.
- [10] Jones S E, Rule W K. On the optimal nose geometry for a rigid penetrator, including the effects of pressure-dependent friction[J]. Int J Impact Eng, 2000, 24(4): 403-415.
- [11] Qian L X, Yang Y B, Liu T. A semi-analytical model for truncated-ogive-nose projectiles penetration into semi-infinite concrete targets[J]. Int J Impact Eng, 2000, 24(9): 947-955.
- [12] Qian L X. Empirical prediction model for truncated-ogive-nose projectile penetration into runway target [J]. Explosion Shock Waves, 1997, 2: 109-119.

(责任编辑 马宇红,代丽)