

椭圆截面弹体侵彻多层混凝土靶的数值仿真

薛颖杰^{1,2}, 陈智刚², 杨芮¹, 崔晋³, 康彦姝⁴, 付建平²

(1. 中北大学 机电工程学院, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 地下目标毁伤技术国防重点学科实验室, 山西 太原 030051;

3. 国营803厂, 陕西 西安 710043; 4. 晋西工业集团有限公司, 山西 太原 030027)

摘要: 为研究椭圆截面弹体侵彻多层间隔混凝土靶的稳定性是否优于传统等截面的圆截面尖卵形弹体, 采用优化后的椭圆截面弹体与对照弹(圆截面尖卵形弹体)以初速为700~1100 m/s侵彻5层混凝土靶板, 分析其过载与弹体所受的应力大小, 并提取两种弹形的出靶姿态角与攻角以及速度变化作为判据。结果表明: 两种弹形在各工况下的应力均未超过弹体材料的强度极限, 弹体未发生弯曲变形。各工况下圆截面尖卵形弹体在Z轴方向上的侵彻过载均大于椭圆截面弹体, 其峰值过载约为椭圆截面弹体的1倍。两种弹形在各个初速下, 出5层靶的速度均相近。弹体初始速度为700和800 m/s时, 两种弹的姿态角、攻角相近, 侵彻多层混凝土靶的能力相当。初始速度为900, 1000和1100 m/s时, 椭圆截面弹体比圆截面弹体的出靶姿态角减小63.59%, 攻角减小75.29%。在900~1100 m/s的速度下, 弹体质量侵蚀率小于5%, 椭圆截面弹体侵彻多层混凝土靶的稳定性优于圆截面弹体, 侵彻性能较好。最后通过计算公式验证了仿真结果的准确性。

关键词: 侵彻弹药; 多层混凝土靶; 椭圆截面弹体; 姿态角; 攻角

中图分类号: O385

文献标识码: A

doi: 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2024.01.0005

引用格式: 薛颖杰, 陈智刚, 杨芮, 等. 椭圆截面弹体侵彻多层混凝土靶的数值仿真[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(1): 35-44.

XUE Yingjie, CHEN Zhigang, YANG Rui, et al. Numerical simulation of elliptical cross-section projectile penetrating into multi-layer concrete target[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2025, 46(1): 35-44.

Numerical Simulation of Elliptical Cross-Section Projectile Penetrating into Multi-Layer Concrete Target

XUE Yingjie^{1,2}, CHEN Zhigang², YANG Rui¹, CUI Jin³, KANG Yanshu⁴, FU Jianping²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. National Defense Key Laboratory of Underground Target Damage Technology,

North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. No. 803 Factory, Xi'an 710043, China; 4. Jinxi Industries Group Co., Ltd., Taiyuan 030027, China)

Abstract: In order to investigate whether the stability of the elliptical cross-section projectile penetrating a multi-layer spaced concrete target is better than that of the traditional sharp ogival-nose projectile with equal cross-section, the optimized elliptical cross-section projectile and the control projectile (sharp ogival-nose projectile) were used to penetrate a five-layer concrete target plate with an initial velocity from 700

收稿日期: 2024-01-03

作者简介: 薛颖杰(1998—), 男, 硕士生, 主要从事高效毁伤战斗部的研究。

通信作者: 陈智刚(1963—), 男, 教授, 博士, 主要从事高效毁伤战斗部的研究。E-mail: cyc@nuc.edu.cn.

m/s to 1 100 m/s, and the overloads and the stresses of the projectile were analyzed. Meanwhile, the target attitude angle, angle of attack and the velocity change of two kinds of projectile were extracted as the judgement. The results show that the stresses of two kinds of projectile shapes do not exceed the strength limit of the projectile material under each working condition, and the projectile body does not undergo bending deformation. The penetration overload in the Z -axis direction of the sharp ogival-nose projectile is larger than that of the elliptical projectile under all working conditions, and its peak load is double that of the elliptical projectile. The velocities of two kinds of projectile shapes out of the five-layer target are similar at all initial velocities. When the initial velocities of the projectile are 700 m/s and 800 m/s, the attitude angle and angle of attack of two kinds of projectile are similar, and the ability to penetrate the multi-layer concrete target is comparable. At initial velocities of 900 m/s, 1000 m/s and 1100 m/s, the elliptical cross-section projectile's attitude angle out of the target decreases by 63.59% and the angle of attack decreases by 75.29% compared with that of the circular cross-section projectile. At the velocity from 900m/s to 1100m/s, the mass erosion rate of the projectile is less than 5%, and the stability of the elliptical cross-section projectile penetrating the multi-layer concrete target is better than that of the circular cross-section projectile, which verifies the better penetration performance of the elliptical cross-section projectile. And the accuracy of the simulation results is verified by the calculation formula.

Key words: penetrating ammunition; multi-layer concrete target; elliptical cross-section projectile; attitude angle; attack angle

0 引言

混凝土是现代军事工程和人防工程的重要建筑材料,动能弹侵彻混凝土也成为了国内外研究的重点问题。关于传统圆形侵彻体的研究已经发展了近300年,相关的侵彻理论趋于成熟,例如,动态空腔膨胀理论^[1-2]。国内外学者也提出了圆截面尖卵形弹体侵彻混凝土的各种经验与半径公式,例如,Petry公式、Young公式^[3]、Forrestal公式^[4]等。想要获得更大程度的侵彻性能,弹体外形也应成为考虑的原因之一。随着电磁炮、机载滑翔武器和天基动能武器等新型发射平台的发展,出现了非旋转对称的异型侵彻体^[5-6]。椭圆截面弹体是非旋转对称异型侵彻体的典型结构,具有大装填比,飞行过程升力较高以及纵向稳定等优点,近年来也逐渐被用于侵彻弹。王文杰等^[7]通过侵彻素混凝土靶的实验发现,椭圆截面弹体长短轴参数的改变对侵彻性能的影响较为显著且横截面面积是影响椭圆截面弹体侵彻性能的重要因素,横截面面积小的断面比动能大,从而侵深更大,该结论为椭圆截面弹体的弹形设计提供了参考。针对椭圆形截面弹体短轴部分的壁厚较小,导致其弹体短轴部分易发生弯曲变形的情况,谭远深等^[8]对已有的椭圆截面弹体的抗弯性

能进行了优化,引入了无量纲壁厚系数,并改进了椭圆截面弹体参数化表达式。魏海洋等^[9]通过斜侵彻铝合金靶板实验发现,椭圆截面弹体绕弹轴旋转角度对侵彻弹道的影响非常显著,弹体侵彻过程中的旋转会降低椭圆截面弹体的稳定性。刘子豪等^[10]对圆形及等截面积不同长短轴之比的椭圆截面弹体侵彻混凝土过程进行了数值模拟,提出了关于椭圆截面弹体侵彻混凝土的侵深公式。

综合以上关于椭圆截面弹体的研究可以发现,椭圆形截面弹体由于自身的结构特性(短轴部分的抗弯曲能力较弱)容易发生弯曲变形而导致其侵彻能力大幅降低,因此,采用高强度合金钢材料,可以避免弹体结构发生较大变化。本文通过对圆截面尖卵形弹体以及等截面的椭圆截面弹体在不同初速下侵彻多层混凝土靶板的仿真试验,以弹体的姿态角、攻角与速度的变化情况为依据,探究椭圆截面弹体侵彻多层混凝土靶板的稳定性。研究结果对改进动能弹侵彻多层混凝土的弹形设计具有参考意义。

1 仿真模型及材料参数

目前,常规的椭圆形截面弹体^[11-13]相较于同等壁厚的圆截面弹体,短轴部分的惯性距与静距较小,

侵彻钢板容易发生弯曲断裂变形。因此, 本文的椭圆形截面弹体采用优化后的椭圆截面弹形(见图 1), 此椭圆截面弹体相较于同等面积的内外轮廓均为椭圆截面的弹体具有更大的惯性矩、静矩以及更好的抗弯性能。由于优化后的椭圆截面弹的壁厚并非处处相等, 所以引入等效无量纲截面面积系数 ζ' , 定义为截面实心面积与外轮廓椭圆面积之比。 A 、 B 为椭圆截面弹体外轮廓的长半轴与短半轴的长度, a 、 b 为内轮廓的长半轴与短半轴的长度, h 为内腔翼缘高度, θ 为内轮廓翼缘交点与长半轴的夹角, ρ 为圆形截面弹体头部子午线的曲率半径。

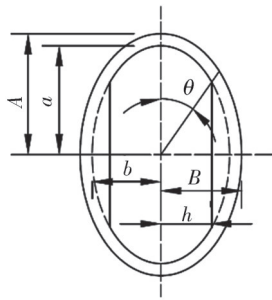


图 1 椭圆截面弹体形状参数

Fig. 1 The shape parameters of a projectile with elliptical cross-section

内轮廓面积推导公式为

$$S_1 = 4 \int_0^b y dx = 4ab \int_0^\theta \cos^2 t dt = ab(2\theta + \sin 2\theta), \quad (0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ), \quad (1)$$

$$S_2 = \frac{2h^2}{\tan \theta}. \quad (2)$$

外轮廓椭圆面积

$$S_0 = \pi AB. \quad (3)$$

等效无量纲截面面积系数

$$\zeta' = \frac{S_0 - (S_1 + S_2)}{S_0} = \frac{\pi AB - ab(2\theta + \sin 2\theta) - \frac{2h^2}{\tan \theta}}{\pi AB}. \quad (4)$$

1.1 仿真模型的建立

椭圆截面弹体外轮廓长半轴的长度为 9 mm, 短半轴的长度为 6 mm, 等效圆形截面外轮廓半径约 7.35 mm。弹体曲径比 (CRH) 为 2.4, 长径比为 7, 等效无量纲截面面积系数为 0.254。圆形截面弹体的直径 D 为 14.7 mm, 长度 L 为 102.9 mm。两种弹的质量 m 相等, 均为 66 g 左右。两种弹形的弹体初速为 700~1 100 m/s, 间隔 100 m/s。

混凝土靶的规格为 200 mm × 200 mm × 30 mm,

一共为 5 层靶, 靶与靶之间的间隔为 150 mm, 对齐排列为一排, 如图 2 所示。混凝土靶的抗压强度为 35 MPa, 密度为 2.21 g/cm³。弹体头部计算网格大小为 1.5 mm, 靶板中心的计算网格大小为 1 mm。

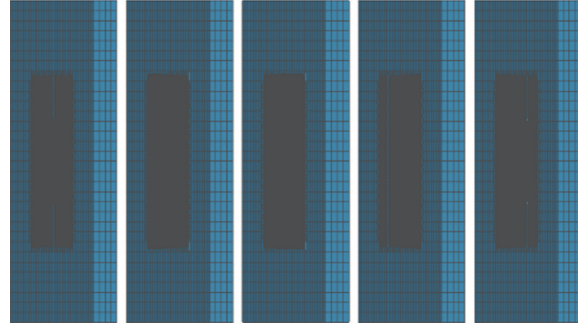


图 2 5 层混凝土靶

Fig. 2 Five-layer concrete target

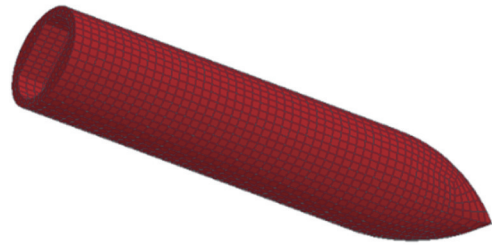


图 3 椭圆截面弹体

Fig. 3 Elliptical cross-section projectile

1.2 材料模型参数

仿真采用 LS-DYNA 有限元软件, 采用 Lagrange 算法, 单位为 cm-g- μ s。弹体材料为 30CrMnSi, 模型采用 Johnson-Cook 本构材料模型, 材料参数见表 1。其中: ρ 为密度; E 为弹性模量; G 为剪切模量; A 为屈服应力; B 为硬化系数; n 为硬化指数; C 为应变率系数; M 为温度系数; T_m 融化温度; $D_1 \sim D_5$ 为影响材料变形的失效参数。通过万能拉伸试验机与霍普金森杆获取常温与不同温度时材料在准静态与动态条件下的应力-应变曲线, 并拟合曲线获取材料 JC 模型参数。

表 1 30CrMnSi 的 Johnson-Cook 模型参数

Tab. 1 Johnson-Cook model parameters for 30CrMnSi

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/GPa	G/GPa	ν	A/MPa
7.8	210	121	0.29	1 350
B/MPa	n	C	M	T_m/K
1 875	0.232	0.001 2	1.06	1 795
D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
0.1	0.76	1.57	0.005	-0.84

仿真试验采用的钢筋混凝土的抗压强度为 35 MPa, 采用 Johnson-Holmquist-Cook 定义材料模型, 材料参数见表 2。

表 2 混凝土的 HJC 模型参数

Tab. 2 Parameters of HJC model for concrete

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	A	B	C	N
2.31	0.79	1.6	0.007	0361
f_c/MPa	T/N	p_c/MPa	U_c/s^{-1}	
35	3500	23	0.35	

表 2 中, A 为材料归一化内聚强度, B 为归一

化压力硬化系数, N 为压力硬化指数, C 为应变率硬化系数, f_c 为准静态单轴压缩强度, T 为静水压力, p_c 为破碎压力, U_c 为压碎体积应变。

2 仿真结果分析

2.1 弹体表面的应力分析

对 10 组工况进行仿真后, 选取两种弹形以 900 m/s 的初速侵彻 5 层混凝土靶的结果进行分析, 出靶后的应力变化如图 4 所示。

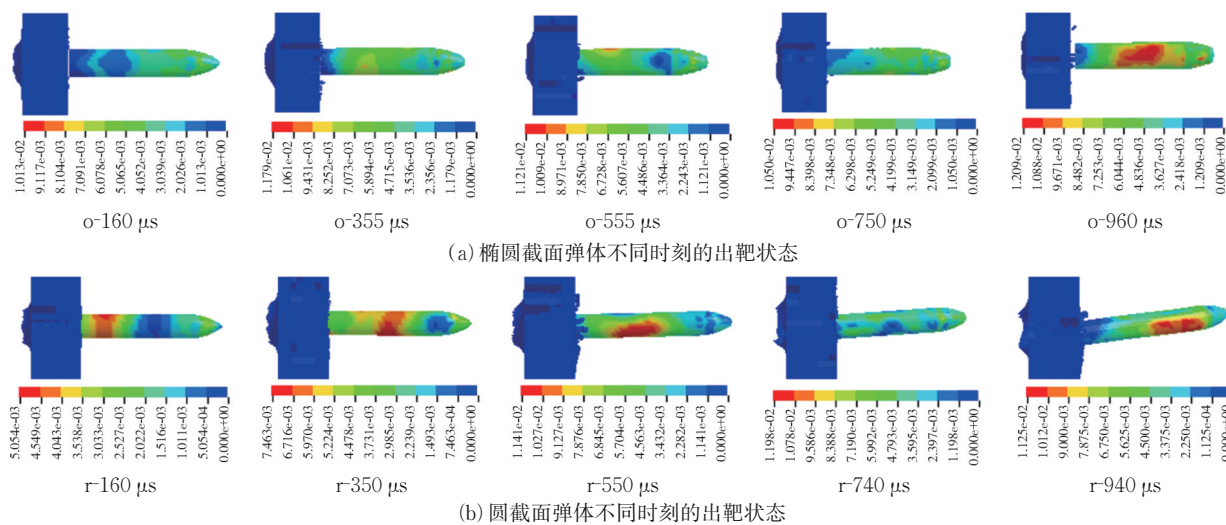


图 4 两种弹体 900 m/s 初速侵彻 5 层靶时的应力变化

Fig. 4 Stress diagram of two kinds of projectile penetrating a five-layer target at an initial velocity of 900 m/s

图 4 中, o 代表椭圆截面弹体, r 代表圆截面弹体, 后面的数字表示时间。可以看出, 两种弹体在穿透第 3 层混凝土靶后, 弹体姿态开始出现较明显的偏转, 弹体下侵。侵彻第 4 层、第 5 层靶板时, 两种弹体中间的背部都受到靶板的横向载荷作用, 出现应力较大的现象, 但均未超过弹体材料准静态条件下的强度极限(1 750 MPa), 两种弹体均未发生较大弯曲变形和断裂。侵彻前 2 层靶板时, 两种弹体姿态相当, 椭圆截面弹体的头部阻力大, 速度损失率较大。侵彻后 3 层靶时, 由于圆截面弹体的姿态偏转变大, 侵彻阻力增大, 速度损失率加大。总体上, 圆截面弹体出第 5 层靶的时间略小于椭圆截面弹体的出靶时间。但是, 其出靶时的角度偏转明显大于椭圆截面弹体。

2.2 弹体侵彻过载分析

本文侵彻为弹体在 XZ 平面内的运动, 初始侵彻方向沿 X 轴方向。为分析侵彻过程中弹体偏转程度与 Z 轴方向上过载的关系, 提取两种弹形在

不同速度下的过载随时间变化的曲线结果如图 5 和图 6 所示。

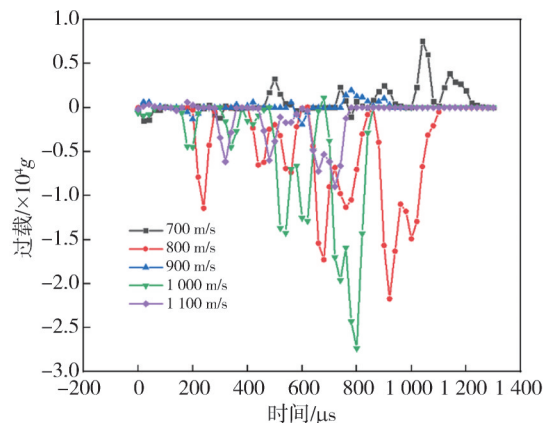


图 5 椭圆截面弹体 Z 轴过载的变化

Fig. 5 Variation of Z -axis overload of projectile with elliptical cross-section

由图 5 和图 6 可知, 两种弹形在 Z 轴上的峰值过载都呈现随侵彻靶板数的增加而变大的规律, 与提取出的姿态角的变化情况相符。整体来看, 两种弹形的峰值过载也未随初速的变大而增

大。两种弹形的峰值过载都在初速为 1 000 m/s, 侵彻第 5 层靶板时出现最大值。两种弹形的出靶最大姿态角均出现在初速 800 m/s 出第 5 层靶板的时候。由于在各初速下, 圆截面弹体的出靶姿态角都大于椭圆截面弹体的出靶姿态角, 其侵彻第 5 层靶板的峰值过载也约为椭圆截面的 1 倍。

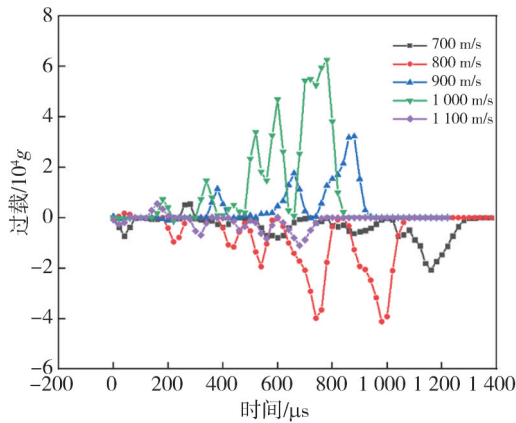


图 6 圆截面弹体 Z 轴过载的变化

Fig. 6 Variation of Z-axis overload of projectile with circular cross-section

2.3 弹体侵彻能力分析

分析弹体的姿态稳定性时需要明确弹体侵彻过程中的姿态角^[14]、攻角以及速度变化的情况。弹体姿态角 β 为弹体轴线与竖直方向之间的夹角; 倾角 γ 为速度方向与竖直方向之间的夹角。弹体攻角 α 为弹体轴线与速度方向的夹角, 即 $\beta - \gamma$ 。根据仿真结果对弹体以不同速度侵彻靶板前后的速度、攻角和姿态角进行分析。

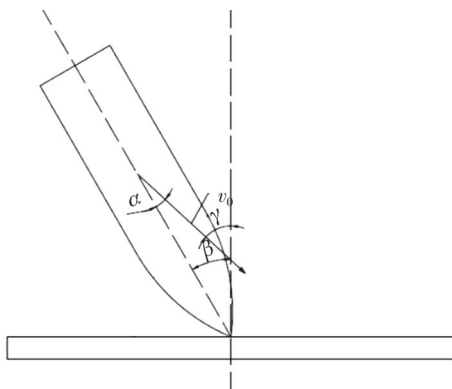


图 7 弹体侵彻姿态示意

Fig. 7 Schematic diagram of the penetration attitude of the projectile

2.3.1 弹体的姿态角分析

椭圆截面弹体与圆截面弹体以速度 700~1 100 m/s, 侵彻 5 层混凝土靶时姿态角的变化如表 3 所示。工况编号 $o_1 \sim o_2$ 为椭圆截面, $r_1 \sim r_5$ 为圆

截面弹体(尖卵形弹体), 字母后面的数字 1~5 表示初速为 700~1 100 m/s。

表 3 弹体侵彻混凝土穿靶后的姿态角

Tab. 3 Attitude angle after projectile penetrating the concrete into the target

工况编号	姿态角/(°)				
	第 1 层靶	第 2 层靶	第 3 层靶	第 4 层靶	第 5 层靶
o_1	3.34	0.77	1.02	3.90	10.38
o_2	0.40	1.16	4.68	10.88	21.45
o_3	0.06	0.29	0.73	1.83	4.50
o_4	0.08	1.09	2.57	5.57	11.06
o_5	0.11	0.25	1.17	2.75	5.30
r_1	1.09	2.67	3.83	6.42	11.22
r_2	0.29	0.91	6.34	14.40	23.55
r_3	0.08	0.19	3.31	9.35	20.75
r_4	0.04	0.89	3.70	9.16	21.48
r_5	0.31	0.64	3.12	6.91	14.70

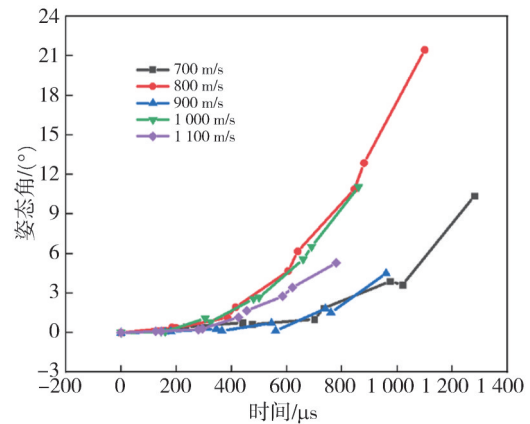


图 8 椭圆截面弹体姿态角的变化情况

Fig. 8 Variation of attitude angle of elliptical cross-section projectile

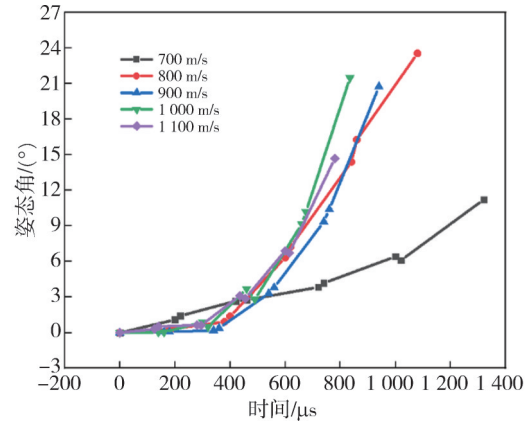


图 9 圆形截面弹体姿态角的变化情况

Fig. 9 Variation of attitude angle of projectile with circular cross-section

由图 8 和图 9 可以看出: 椭圆形截面弹体以速度 700~1 100 m/s 侵彻多层混凝土靶时, 在每层出靶后的姿态角均小于圆形截面弹体的姿态角。两种弹初始速度为 800 m/s 时, 在穿透第 5 层靶后均出现最大姿态角。结合表 3 中的数据可知: 椭圆形截面

弹体只有在800 m/s时,穿透第5层靶后的姿态角大于20°,而圆形截面弹体在速度为800,900,1000 m/s时穿透第5层靶后的姿态角均大于20°。若后续要穿透第6层靶时,弹体会因为倾斜过大而使弹体表面与混凝土靶接触面过多,可以认为弹体的侵彻基本结束。总体来看,椭圆形截面弹体以800~1100 m/s的速度穿透第5层,出靶后的平均姿态角比圆形截面弹体的平均姿态角小41.43%。两种弹体均出现姿态修正的现象,原因是在侵彻过程中,弹体在力矩作用下产生角速度,使得弹体出靶后出现姿态修正效果。

2.3.2 弹体的攻角分析

两种弹形的弹体侵彻混凝土靶板前后的攻角变化如表4所示。工况编号o₁~o₅为椭圆截面弹体, r₁~r₅为圆截面弹体(尖卵形弹体)。

表4 弹体侵彻混凝土靶后的攻角

Tab.4 Angle of attack after projectile penetrating the concrete into the target

工况编号	攻角/(°)				
	第1层靶	第2层靶	第3层靶	第4层靶	第5层靶
o ₁	0.28	0.68	1.05	4.16	11.42
o ₂	0.41	0.78	3.60	9.80	15.75
o ₃	0.08	0.27	0.73	1.79	4.60
o ₄	0.05	0.93	2.23	4.10	7.42
o ₅	0.12	0.26	1.03	2.38	4.32
r ₁	0.81	2.35	2.62	4.16	5.45
r ₂	0.34	0.59	4.58	8.95	12.91
r ₃	0.08	0.16	3.64	10.66	24.95
r ₄	0.03	1.03	4.40	12.72	31.02
r ₅	0.26	0.73	3.03	6.43	13.61

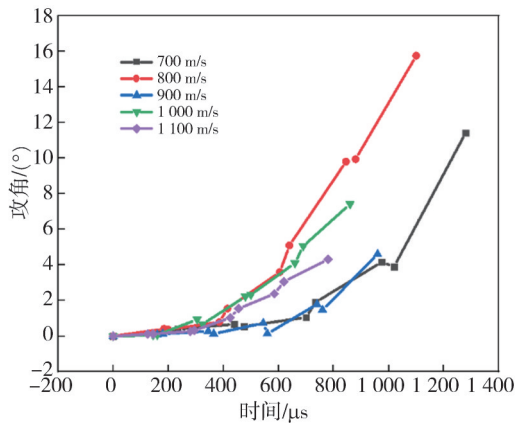


图10 椭圆截面弹体攻角的变化情况

Fig.10 Variation of the angle of attack of an elliptical cross-section projectile

由图10和图11可以看出:不同速度下,两种弹在侵彻前2层靶时,攻角的变化较小,在侵彻完第3层靶板后,两种弹体的攻角都开始明显增加。以700和800 m/s速度侵彻出第5层靶后,圆

截面弹体比椭圆截面弹体的攻角小38.15%。以900,1000和1100 m/s的速度侵彻出第5层靶后,椭圆截面弹体比圆截面弹体的攻角小75.29%。攻角增大弹体姿态偏转角度增大,弹体的姿态角逐渐变大。若增大靶板间距,弹体会因为姿态角过大而不再具备穿透后续靶板的能力。

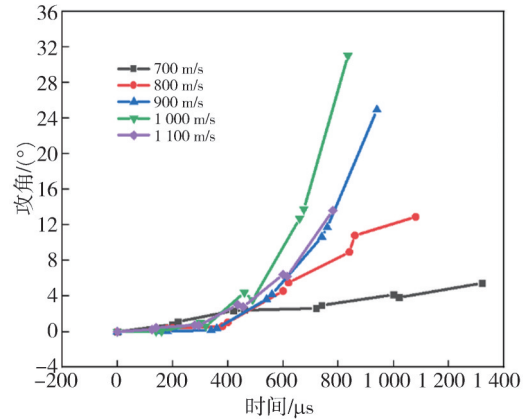


图11 圆截面弹体攻角的变化情况

Fig.11 Variation of angle of attack of circular section projectile

2.3.3 弹体的侵彻速度变化分析

两种弹体在速度为700~1100 m/s时侵彻5层混凝土靶的速度损失情况如表5所示。

表5 弹体侵彻每层靶的速度损失率

Tab.5 Velocity loss rate of the projectile penetrating each layer of the target

工况编号	速度损失率/%				
	第一层靶	第2层靶	第3层靶	第4层靶	第5层靶
o ₁	5.48	7.11	6.70	7.21	9.18
o ₂	5.08	6.07	6.38	7.50	9.16
o ₃	3.92	5.47	5.76	6.07	7.88
o ₄	3.80	4.92	5.94	7.43	10.56
o ₅	3.66	4.31	4.81	6.47	9.16
r ₁	5.48	8.10	7.26	8.55	9.81
r ₂	3.63	5.05	6.49	7.20	8.89
r ₃	3.33	4.39	5.87	6.55	9.94
r ₄	3.20	4.10	5.10	6.67	9.54
r ₅	3.47	4.38	4.99	6.34	7.20

由图12和图13可以看出,两种弹体侵彻5层混凝土靶的速度变化情况基本相似。结合表5中数据可知,圆形截面弹体侵彻5层靶后的速度只比椭圆形截面弹体的平均速度高0.71%。因此,可以认为穿透5层靶后两种弹的余速一致。随着侵彻层数的增加,两种弹的速度损失率整体上开始递增,这是由于弹体姿态角变大,弹靶接触面积扩大,穿靶所需的动能也增大。两种弹体的速度损失率也基本持平,最大偏差为1.96%。

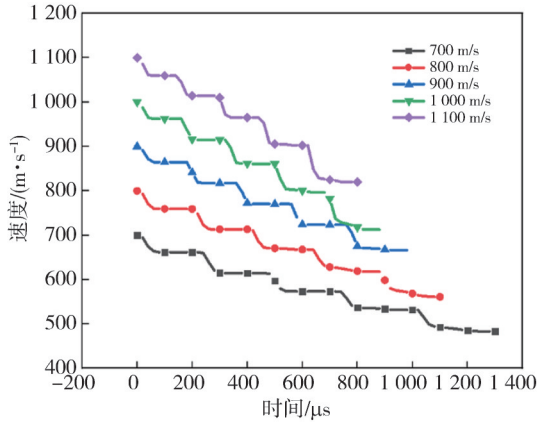


图 12 椭圆截面弹体侵彻速度的变化

Fig. 12 Variation of penetration velocity of elliptical cross-section projectile

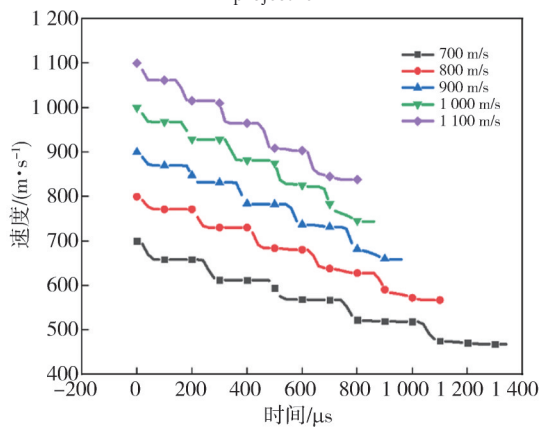


图 13 圆截面弹体侵彻速度的变化

Fig. 13 Variation of penetration velocity of projectile with circular cross-section

3 理论计算与分析

3.1 姿态角与速度的理论分析

由于目前国内外并未探究出椭圆形截面弹体侵彻混凝土靶板过程中与姿态变化相关的理论计算公式^[15-16],因此,本文仅以现有的圆截面弹体侵彻混凝土靶板的理论公式来验证仿真规律的可信度。

弹体侵彻靶板按照在侵彻过程中是否存在隧道区分为薄靶和非薄靶,并定义临界靶厚 H^* 。弹体侵彻薄靶仅有开坑阶段与剪切充塞阶段。再根据弹体侵彻靶板出现的隧道区长度 x 与 H^* 的大小区分中厚靶与厚靶。本文椭圆截面弹体侵彻多层靶没有出现隧道区,可以认为是侵彻薄靶板。本文试验模型中侵彻后的所有弹体的质量侵蚀率均小于5%,可以认为是刚性弹体^[17],且弹体出多层靶板的姿态变化较小,以头部受力为主,靶板也为素混凝土。这与段卓平等^[9]的刚性尖卵形弹体

侵彻素混凝土的理论研究具有相似性。计算弹体出靶的姿态角与速度,可以采用其理论公式。

刚性弹体侵彻混凝土靶会存在一个锥形弹坑,深度为 $k_c d$,常数 k_c 的范围为 $1.5 < k_c < 2.5$ ^[18], d 为弹体直径。以下未注明的参数公式可在文献^[8]中查询到。

阻力常数

$$c = \frac{\pi d}{4k} \frac{N^* \rho V_i^2 + S f_c}{1 + \frac{\pi k_c d^3}{4m} N^* \rho}, \quad (5)$$

$$k = \left(0.707 + \frac{H}{d} \right), \quad (6)$$

式中: k 为表面凹坑控制的无量纲穿透深度,不同形状弹体的 k 取值不同^[19],对于卵形弹体, $CRH=3$ 时, $k=2.367$, $CRH=4.5$ 时, $k=2.77$; H 为弹头高度; m 为弹体质量; d 为弹径; f_c 为混凝土的抗压强度; N^* 为弹头的形状因子; S 为混凝土无约束抗压强度经验常数。

$$S = 82.6 f_c^{-0.544}. \quad (7)$$

弹体绕垂直弹道平面且穿过质心的转轴的转动惯量

$$J_c = m(L^2 + d^2)/12. \quad (8)$$

弹体在开坑阶段后的速度与姿态角变化分别为

$$v_1 = v_{01} \cos(\sqrt{c_1/m} T_1), \quad (9)$$

$$\Delta\beta_1 =$$

$$\frac{m l_c v_{01}}{J_c} \frac{\sqrt{m}}{\sqrt{c_1}} \sin B_{01} \left[\arccos\left(\frac{v_1}{v_{01}}\right) - \sqrt{1 - \left(\frac{v_1}{v_{01}}\right)^2} \right], \quad (10)$$

式中: l_c 为弹体质心距弹尖的距离; v_{01} 为弹体开坑速度即弹体初速; T_1 为开坑所用时间; B_{01} 为弹体开坑前的姿态角,即弹体碰靶前的姿态角。

剪切充塞阶段:

剪切冲塞块形成瞬时弹体所受的轴向合力

$$F_{ns} = \frac{1}{\sqrt{3}} f_c \pi d H^* \left[1 + \frac{H^*}{d} \tan \alpha \cos(\beta_0 + \Delta\beta_1) \right]. \quad (11)$$

剪切充塞阶段弹体的姿态偏转与初始开坑阶段相反,弹体姿态角的变化为

$$\Delta\beta_2 = - \frac{\sin B_{02} \frac{m v_{02}^2}{2} - F_{ns} v_{02} \sqrt{m/4c_2}}{J_c \frac{c_2}{m}} \cdot e^{\sqrt{c_2/m} (T_3 - T_2)} - \frac{m v_{02}^2 / 2 - F_{ns}^2 / 2c_2 + F_{ns} l_c}{c_2 / m}$$

$$\left(\frac{mv_{02}^2}{2} - \frac{F_{ns}^2}{2c_2}\right) \frac{(T_3 - T_2)^2}{2} + ml_c v_{02} (T_3 - T_2). \quad (12)$$

式中: v_{02} 为弹体剪切冲塞开始时速度; T_2 为剪切冲塞开始的时间; T_3 为剪切冲塞结束的时间; B_{02} 为弹体剪切冲塞前的姿态角。

3.2 攻角随时间变化的理论计算

采用 Chen 等^[20] 提出的弹体侵彻时的攻角公式, 弹丸撞击不规则介质后的攻角为

$$\alpha = \arctan \left| \frac{(\sin \delta + \mu \cos \delta)}{(\cos \delta - \mu \sin \delta)} \right| \cdot \left| \frac{\int_0^{T_c} f_n(t) dt - mv_0 \sin \gamma}{\int_0^{T_c} f_n(t) dt + mv_0 \cos \gamma_0} \right| - \gamma_0 + \alpha_0, \quad (13)$$

式中: μ 为动摩擦系数; δ 为不规则物体底面中心与弹体接触点连线与水平面之间的夹角, 本文弹体侵彻的靶板为规则的矩形靶, δ 值为 0; T_c 为弹塑性压缩和弹性回弹的总接触时间。

法向力随时间变化的公式为

$$f_n(t) = \begin{cases} \left[\delta_n^* \sin \left(\pi \frac{t}{2t_{ep}} \right) \right]^{\frac{3}{2}} \times \frac{2e_n^2}{1+e_n^2} \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} & (0 < t \leq t_{ep}), \\ \left[\delta_n^* \sin \left(\pi \frac{T_c - t}{2t'_e} \right) \right]^{\frac{3}{2}} \times \frac{2e_n^2}{1+e_n^2} \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} & (t_{ep} < t \leq T_c), \end{cases} \quad (14)$$

相对杨氏模量

$$E^* = \left[\frac{1 - \nu_p^2}{E_p} + \frac{1 - \nu_b^2}{E_b} \right]^{-1}, \quad (15)$$

式中: E_p 和 E_b 分别为弹体与靶板的杨氏模量; ν_p 和 ν_b 分别为弹体与靶板的泊松比; δ_n^* 为最大法向压缩力; e_n 为法向弹性系数;

弹塑性压缩和弹塑性回弹的总接触时间

$$T_c = T_{ep} + T'_e, \quad (16)$$

$$t_{ep} = 1.4716 \left(\frac{5m^*}{4k_1} \right)^{\frac{2}{5}} \left(\frac{1}{v_{n0}} \right)^{\frac{1}{5}}, \quad (17)$$

$$t'_e = 1.4716 \left(\frac{15m^*}{16E^* \sqrt{R^*}} \right)^{\frac{2}{5}} \left(\frac{1}{e_n v_{n0}} \right)^{\frac{1}{5}}. \quad (18)$$

最大法向压缩率

$$\delta_n^* = \left(\frac{5m^*}{4k_1} v_{n0}^2 \right)^{\frac{2}{5}}, \quad (19)$$

式中: m^* 为等效质量; $k_1 = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \frac{2e_n^2}{1+e_n^2}$, R^* 为等效相对曲率半径。

3.3 理论计算结果

根据 3.1 节的公式可以求得尖卵形弹体侵彻混凝土靶后的姿态角与余速, 其穿透 5 层混凝土靶后的姿态角与余速见表 6。

$$\text{相对误差} = \frac{|\text{仿真值} - \text{计算值}|}{\text{计算值}} \times 100\%. \quad (20)$$

表 6 弹体出靶姿态角与余速的计算值与仿真值

Tab. 6 Calculated and simulated values of attitude angle and residual velocity of the projectile out of the target

工况编号	仿真余速/ (m·s ⁻¹)	计算余速/ (m·s ⁻¹)	仿真 姿态角/(°)	计算 姿态角/(°)
t-700	468	487	11.22	12.41
t-800	567	598	23.55	22.94
t-900	659	686	20.75	22.26
t-1000	744	788	21.48	20.97
t-1100	838	892	14.7	13.98

从表 6 中的数据可以得出: 穿透 5 层靶后的余速仿真值与计算值的最大相对误差为 6.05% (速度为 1100 m/s 时); 穿透 5 层靶后的姿态角仿真值与计算值的最大相对误差为 9.59% (速度为 700 m/s 时); 可以认为仿真得到的余速和姿态角与计算值相近。

根据 3.2 节的公式可以求得尖卵形弹体侵彻混凝土靶后的攻角, 其穿透 5 层混凝土靶后计算出的攻角见表 7。

表 7 弹体出靶攻角的计算值与仿真值

Tab. 7 Calculated and simulated values of the angle of attack of the projectile out of the target

工况编号	仿真攻角/(°)	计算攻角/(°)	相对误差/%
t-700	5.45	5.93	8.09
t-800	12.91	13.98	7.65
t-900	24.95	22.87	9.09
t-1000	31.02	28.92	7.26
t-1100	13.61	12.83	6.08

从表 7 中的数据可以得出, 穿透 5 层靶后的攻角仿真值与计算值的最大相对误差为 9.09%, 可以认为仿真得到的攻角与计算值相近。

4 结 论

本文利用 LS-DYNA 软件进行了椭圆截面弹体与对比弹(圆截面弹体)在不同速度下侵彻 5 层混凝土靶的仿真,并采用公式计算验证了仿真的可靠性。结合仿真结果分析了两种弹的过载、姿态角、攻角以及侵彻后的速度变化情况。得到以下结论:

1) 椭圆截面弹体以 800~1 100 m/s 的速度穿透第 5 层靶后的平均姿态角比圆形截面弹体的平均姿态角减小了 41.43%。椭圆截面弹体侵彻多层靶的姿态优于圆截面弹体。

2) 5 种速度下,椭圆截面弹体的出靶攻角比圆截面弹体平均减少了 56.72%。因此,可以认为理想正侵彻条件下,椭圆截面弹体的稳定性较强,更具备侵彻较大间距混凝土靶的能力。

3) 圆形截面弹体侵彻 5 层靶后的平均速度只比椭圆形截面弹体的平均速度提高了 0.71%。因此,可以认为:在相同质量、弹体质量侵蚀率小于 5% 的情况下,椭圆截面弹体侵彻多层混凝土间隔靶的能力要优于圆截面弹体,在速度较高的情况下更加明显。

参考文献:

[1] 陈小伟. 穿甲/侵彻力学的理论建模与分析(上册) [M]. 北京: 科学出版社, 2019.

[2] PETRY L. Monographies de systemes d' Artillerie [M]. Brussels: Cans Et Compagnie Publisher, 1910.

[3] YOUNG C W. Penetration equations: SAND97-2426[R]. Albuquerque: Sandia Labs, 1997.

[4] FORRESTAL M J, TZOU D Y. A spherical cavity-expansion penetration model for concrete targets [J]. International Journal of Solids and Structures, 1997, 34(31/32): 4127-4146.

[5] 杜忠华, 朱建生, 王贤治, 等. 异型侵彻体垂直侵彻半无限靶板的分析模型[J]. 兵工学报, 2009, 30(4): 403-407.

DU Zhonghua, ZHU Jiansheng, WANG Xianzhi, et al. Analytical model on non-circular penetrator impacting semi-infinite target perpendicularly[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(4): 403-407. (in Chinese)

[6] 王皓, 高旭东. 类椭圆截面战斗部侵彻混凝土弹道特性研究[J]. 兵工自动化, 2020, 39(5): 68-72.

WANG Hao, GAO Xudong. Study on ballistic characteristics of concrete penetrating into elliptical section

warhead [J]. Ordnance Industry Automation, 2020, 39(5): 68-72. (in Chinese)

[7] 王文杰, 张先锋, 邓佳杰, 等. 椭圆截面弹体侵彻砂浆靶规律分析[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(1): 164-173.

WANG Wenjie, ZHANG Xianfeng, DENG Jiajie, et al. Analysis of projectile penetrating into mortar target with elliptical cross-section [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(1): 164-173. (in Chinese)

[8] 谭远深, 黄风雷, 皮爱国. 椭圆截面侵彻弹体结构优化设计与结构响应[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(6): 69-82.

TAN Yuanshen, HUANG Fenglei, PI Aiguo. Structural optimization design and structural response of elliptical-section penetration projectiles [J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(6): 69-82. (in Chinese)

[9] 魏海洋, 张先锋, 熊玮, 等. 椭圆截面弹体斜侵彻金属靶体弹道研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(2): 90-102.

WEI Haiyang, ZHANG Xianfeng, XIONG Wei, et al. Oblique penetration of elliptical cross-section projectile into metal target [J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(2): 90-102. (in Chinese)

[10] 刘子豪, 武海军, 高旭东, 等. 椭圆截面弹体侵彻混凝土阻力特性研究[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(2): 135-141.

LIU Zihao, WU Haijun, GAO Xudong, et al. Study on the resistance characteristics of elliptical cross-section projectile penetrating concrete [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(2): 135-141. (in Chinese)

[11] 刘均伟, 张先锋, 刘闯, 等. 椭圆截面弹体侵彻性能的影响因素分析[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(9): 155-166.

LIU Junwei, ZHANG Xianfeng, LIU Chuang, et al. Influencing factors of penetration performance of an elliptical cross-section projectile [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(9): 155-166. (in Chinese)

[12] 王浩, 潘鑫, 武海军, 等. 椭圆截面截卵形刚性弹体正贯穿加筋板能量耗散分析[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(10): 69-80.

WANG Hao, PAN Xin, WU Haijun, et al. Energy dissipation analysis of elliptical truncated oval rigid projectile penetrating stiffened plate [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(10): 69-80. (in Chinese)

[13] 岳胜哲, 陈利, 张晓伟, 等. 非对称类椭圆截面弹体斜贯穿铝靶数值模拟研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(4): 127-133.

- YUE Shengzhe, CHEN Li, ZHANG Xiaowei, et al. Numerical simulation of oblique penetration of shaped elliptical cross section projectile through aluminum target[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(4): 127-133. (in Chinese)
- [14] 朱超, 张晓伟, 张庆明, 等. 弹体斜侵彻双层钢板的结构响应和失效研究[J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(9): 138-152.
- ZHU Chao, ZHANG Xiaowei, ZHANG Qingming, et al. Structural response and failure of projectiles obliquely penetrating into double-layered steel plate targets[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(9): 138-152. (in Chinese)
- [15] WU H J, DENG X M, DONG H, et al. Three-dimensional trajectory prediction and analysis of elliptical projectile[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 174: 1-23.
- [16] VAYIG Y D, ORNAI D. Dependencies on the center of mass location of rigid ogive-nosed projectiles impacting metallic targets at non-normal conditions[J]. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2023, 9(2): 158-166.
- [17] 刘子豪. 椭圆截面异型弹体高速侵彻混凝土特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
- [18] 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.
- [19] 段卓平, 李淑睿, 马兆芳, 等. 刚性弹体斜侵彻贯穿混凝土靶的姿态偏转理论模型[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(6): 67-74.
- DUAN Zhuoping, LI Shurui, MA Zhaofang, et al. Analytical model for attitude deflection of rigid projectile during oblique perforation of concrete targets [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(6): 67-74. (in Chinese)
- [20] CHEN W X, ZHANG Y Y, GUO Z K, et al. Penetration of rigid projectile into concrete target with effect of attack angle: Theory and experiment[J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2017, 17(8): 1750080.