

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0096

# 椭圆类截面弹体侵彻多层间隔钢靶的弹道特性\*

杨士林<sup>1</sup>, 高旭东<sup>1</sup>, 张先锋<sup>1</sup>, 王晓锋<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 为了研究椭圆类截面弹体侵彻多层间隔钢靶的弹道特性, 开展了典型弹体侵彻多层间隔 Q355B 钢靶试验, 基于 LS-DYNA 软件开展有限元仿真研究, 得到了弹体在侵彻过程中的姿态偏转和弹道参数, 分析了弹体的偏转机制, 获得了截面形状、截面压缩系数、初速、滚转角和着角等弹靶参数对椭圆类截面弹体侵彻弹道特性和姿态偏转特性的影响规律。研究表明: 滚转角为 0° 时, 圆截面弹体侵彻弹道稳定性优于椭圆类截面弹体; 弹体截面压缩系数越大, 弹体侵彻弹道稳定性越好; 弹体初速越大, 弹体姿态偏转越小, 侵彻弹道越平稳; 滚转角为 90° 时, 椭圆截面和非对称椭圆截面弹体在入射平面内的侵彻弹道最稳定, 并且两种弹体在水平面内的弹道偏移量分别在滚转角为 45° 和 90° 时达到最大, 非对称椭圆截面弹体在滚转角为钝角时的侵彻弹道稳定性优于锐角时的情况; 弹体着角在 [0°, 50°] 范围内时, 侵彻弹道稳定性随着角的增大先减弱后增强, 着角在 30° 左右时姿态偏转和弹道失稳最严重; 弹体以较正姿态贯穿薄钢靶时, 在弹头部侵彻阶段就已经与靶体分离; 弹体以较大攻角贯穿薄钢靶时, 弹靶接触主要发生在弹体的上表面。

**关键词:** 椭圆类截面弹体; 多层间隔钢靶; 侵彻弹道; 姿态偏转

中图分类号: O385 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

## Trajectory characteristics of elliptical cross-section projectile penetrating multi-layer spaced steel targets

YANG Shilin<sup>1</sup>, GAO Xudong<sup>1</sup>, ZHANG Xianfeng<sup>1</sup>, WANG Xiaofeng<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** An experimental investigation of typical projectiles penetrating multi-layer spaced Q355B steel targets was conducted to study the trajectory characteristics of elliptical cross-section projectiles penetrating multi-layer spaced steel targets. Numerical simulations were performed on LS-DYNA finite element software and typical results obtained were validated by experimental results. The attitude and trajectory parameters in the penetration process and the deflection mechanism of the projectile were obtained. The influence of cross-section shape, the minor-to-major axis length ratio of the projectile cross-section, initial velocity, rotation angle, and incident angle on the penetration trajectories and attitude deflection was investigated. The research results show that the penetration trajectory stability of the circular cross-section projectile is better than the elliptical and asymmetric elliptical cross-section projectiles when the rotation angle is 0°. As the minor-to-major axis length ratio increases, the trajectory is more stable. The trajectory deflection reduces with a higher initial velocity. When the rotation angle is 90°, the penetration trajectory of both symmetric and asymmetric elliptical cross-section projectiles in the incident plane is the most stable, and the trajectory deflection of the two projectiles in the horizontal plane reaches its maximum at rotation angles of 45° and 90°, respectively. The trajectory stability of an asymmetric elliptical projectile, when the rotation angle is obtuse, is better than that at the acute angle. When the incident angle is in the range of [0°, 50°], the

\* 收稿日期: 2024-04-07; 修回日期: 2024-09-05

第一作者: 杨士林(2000—), 男, 博士研究生, [avatar0128@163.com](mailto:avatar0128@163.com)

通信作者: 高旭东(1975—), 男, 博士, 副研究员, [dong930211@163.com](mailto:dong930211@163.com)

trajectory instability and attitude deflection of the projectile increase with the increase of incident angle and then decrease, and both reach the largest when the incident angle is about  $30^\circ$ . It is also found that the projectile will separate from the target during the penetration stage of the projectile nose when penetrating a thin steel target in a stable attitude. When the projectile penetrates a thin steel target at a large attack angle, the attachment of the projectile and target mainly occurs on the upper surface of the projectile.

**Keywords:** elliptical cross-section projectile; multi-layer spaced steel target; penetration trajectory; attitude deflection

高超声速武器是未来发展的重点方向之一, 开展与其结构特点相适应的异型截面侵彻类战斗部研究, 是当前高超声速武器发展与应用的强烈需求。椭圆类截面是区别于传统圆截面的一种弹体结构设计, 能提高发射平台的空间利用率, 与武器平台的空间适配具有更高的灵活性。由于其特殊的结构, 在侵彻目标过程中, 侵彻弹道的偏转与失稳特性、弹靶作用机制、靶体的破坏机制等, 都与传统圆截面弹体存在极大差异。目前对于椭圆截面弹体侵彻多层间隔靶的弹道特性和偏转机制尚缺乏理论认知, 限制了其发展和应用。

在传统圆截面弹体和异型类截面弹体侵彻典型目标的弹道特性方面已开展了大量的研究工作。在圆截面弹体研究方面, Li 等<sup>[1]</sup>、Gao 等<sup>[2]</sup> 基于刚体动力学和微分面力法, 计算了不同形状弹体侵彻深层介质的运动轨迹, 发现弹体质心的相对位置( $L_c/L$ , 即弹尖到质心的距离与弹长之比)是影响弹体偏转和弹道稳定性的关键。薛建锋等<sup>[3]</sup> 通过对弹体斜侵彻过程的数值仿真和试验, 得到不同工况下弹体偏转角、加速度随时间的变化情况, 以及弹体速度和靶体倾斜角对侵彻深度的影响。姜剑生等<sup>[4]</sup>、高旭东等<sup>[5]</sup> 研究了弹体质心位置、弹尾形状和弹体长细比对斜侵彻混凝土弹道偏转的影响, 发现弹体质心越靠后, 弹道稳定性越差; 弹体长细比越大, 弹道稳定性越好。杜华池等<sup>[6-7]</sup> 开展了卵形弹体和头部非对称刻槽弹体以不同入射角侵彻多层间隔混凝土靶和钢靶的试验, 并利用数值仿真方法研究了弹体入射角、弹体速度、靶体厚度及弹体变形对侵彻弹道特性的影响规律。李鹏程等<sup>[8]</sup> 开展了尖卵形弹体侵彻间隔混凝土靶试验, 研究了攻角与入射角联合作用对靶后偏转角以及弹体侵彻间隔靶板弹道轨迹的影响规律。Iqbal 等<sup>[9]</sup>、袁家俊<sup>[10]</sup> 开展了弹体斜撞击单层、多层、双层间隔靶数值模拟研究, 发现倾角导致弹丸在贯穿多层靶时发生了明显的弹道偏转。Dong 等<sup>[11]</sup> 基于弹靶分离方法, 建立了等截面弹体、变截面弹体和变截面弹身刻槽弹体的运动轨迹预测模型, 分析了部分弹形参数和着靶条件对后 2 类特殊弹体弹道稳定性的影响。在椭圆截面弹体研究方面, Wu 等<sup>[12]</sup> 基于刚性动力学和微分面力法建立了椭圆截面弹体侵彻半无限混凝土靶的弹道计算模型, 发现椭圆截面弹体在长轴方向抗偏斜能力较好, 在短轴方向抗偏斜能力较弱。魏海洋等<sup>[13]</sup>、Wei 等<sup>[14]</sup> 开展了圆截面弹体和椭圆截面弹体侵彻铝合金靶体试验与理论研究, 基于空腔膨胀理论及局部相互作用模型, 建立了弹体在靶中的运动轨迹模型, 并在此基础上进一步分析了椭圆截面弹体长短轴之比、滚转角、弹体撞击速度等对侵彻弹道的影响规律。岳胜哲等<sup>[15]</sup> 开展了 5 种非对称椭圆截面弹体斜贯穿铝靶的数值模拟研究, 发现弹体偏转角度、角速度均随不对称度的增大而增大。胡雪垚等<sup>[16]</sup> 利用有限元软件分析了 D 字形弹体侵彻 3 层间隔钢靶的弹道偏转规律, 发现减小着角或增大侵彻速度均能提高弹体的弹道稳定性。田泽等<sup>[17]</sup> 通过分析钢靶的破坏形式, 结合虚功原理和能量守恒定律建立了变截面椭圆截面弹体侵彻双层间隔钢靶姿态偏转理论模型。邓希旻等<sup>[18]</sup> 开展了上下非对称结构异型弹体正/斜贯穿多层间隔 921A 钢靶试验和数值模拟研究, 发现上下非对称结构异型弹体具有维持弹体姿态稳定的特点。魏海洋<sup>[19]</sup> 建立了椭圆截面弹体斜侵彻多层间隔金属靶侵彻弹道模型, 分析了倾角、撞击速度及靶板间距对椭圆截面弹体侵彻弹道的影响规律。

综上所述, 当前针对椭圆类截面弹体侵彻多层间隔钢靶的弹道特性研究, 仅对弹体着角、速度等部分条件展开, 缺乏对多种影响因素的系统性研究。同时, 现有研究靶板层数较少, 对弹体侵彻目标过程中的弹靶分离效应和非正侵彻后期出现的大攻角姿态偏转研究较少, 缺乏足够多的试验研究为其理论模型、高效数值模拟方法的发展提供支撑。

为深入研究椭圆类截面弹体在不同弹靶条件下侵彻多层间隔钢靶的弹道特性和偏转规律, 本文中

开展 4 种截面弹体在不同弹靶条件下侵彻四层间隔 Q355B 钢靶试验, 利用 LS-DYNA 软件建立椭圆类截面弹体侵彻多层间隔钢靶的有限元仿真模型, 研究多种因素对椭圆类截面弹体弹道偏转规律的影响。

## 1 试验研究

### 1.1 弹体设计

设计了 4 种不同截面弹体, 如图 1 所示, 包括圆截面弹体(C1)、对称椭圆截面弹体(E1)和两种非对称椭圆截面弹体(NE1 和 NE2)。弹体材料为 35CrMnSiA, 热处理后硬度 HRC 为 50~52, 弹体上装配有尼龙前托和铝合金+尼龙底推实现发射助推。

弹体主要尺寸参数见表 1。其中  $\lambda$  为椭圆截面压缩系数(短长轴之比),  $a$ 、 $b$  分别为椭圆长、短半轴长, CRH 为弹体长轴所在平面的头部曲径比,  $m$  为弹体质量。

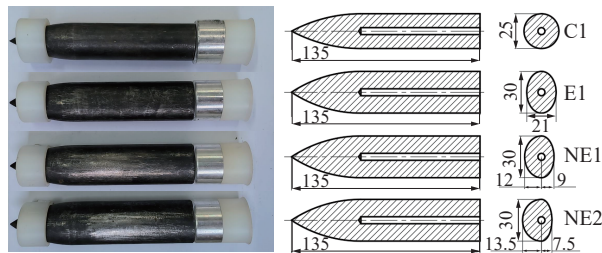


图 1 试验用弹体(单位: mm)

Fig. 1 Projectiles used in experiments (unit: mm)

表 1 4 种弹体的主要几何参数

Table 1 Main geometry parameters of the four projectiles

弹体类型	$\lambda$	$a/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	CRH	$m/\text{g}$
C1	1.0	12.5	12.5	4.19	389
E1	0.7	15.0	10.5	3.00	389
NE1	0.8/0.6	15.0	12.0/9.0	3.00	389
NE2	0.9/0.5	15.0	13.5/7.5	3.00	389

### 1.2 试验布置

试验现场布置如图 2 所示, 共设计了  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$  等 3 组不同角度的靶架, 安装有 4 层靶板, 靶板材料使用 Q355B 合金钢, 尺寸为  $375\text{ mm} \times 375\text{ mm}$ , 厚度为 2 mm, 相邻两层靶板的垂直间隔为 400 mm。采用高速摄像机记录弹体侵彻过程中的姿态和偏移, 同时使用 5 个平面镜分别放置于每块钢靶的靶前和靶后弹体运动轨迹的正上方, 与水平面呈  $45^\circ$  夹角, 通过测量弹体在入射平面(即竖直平面)和水平面的姿态和位置变化, 得到弹体的剩余速度、运动轨迹和姿态偏转。



图 2 试验现场布置

Fig. 2 Experimental setup

### 1.3 试验结果

为了获取弹体截面形状、撞击速度、着角和滚转角对侵彻弹道特性和弹体姿态偏转的影响规律, 共开展了 10 发试验, 其中 C1 弹体 1 发, E1 弹体 7 发, NE1 弹体 1 发, NE2 弹体 1 发。

图 3(a) 是弹体侵彻条件示意图, 图中  $v$  为弹体速度, 箭头指向为弹体速度方向, 弹体速度方向与靶板法向的夹角为着角  $\alpha$ , 弹体速度方向与弹体轴线方向的夹角为攻角  $\beta$ , 弹体轴线方向与靶板法向的夹角为姿态角  $\phi$ 。定义弹体轴线方向转到靶板法向为顺时针时姿态角为正, 弹体轴线方向转到靶板法向为逆时针时姿态角为负; 定义弹体轴线转到弹体速度方向为顺时针时攻角为正, 弹体轴线转到弹体速度方

向为逆时针时攻角为负, 如图 3(b) 所示。滚转角  $\gamma$  是指弹体绕自身弹轴旋转的角度, 对于对称椭圆截面弹体, 定义短轴沿铅垂方向时为  $0^\circ$ , 从弹底向前看, 顺时针旋转为正, 如图 4(a) 所示; 对于非对称椭圆截面弹体, 定义短轴较长的半椭圆在正上方时为  $0^\circ$ , 从弹底向前看, 顺时针旋转为正, 如图 4(b) 所示。

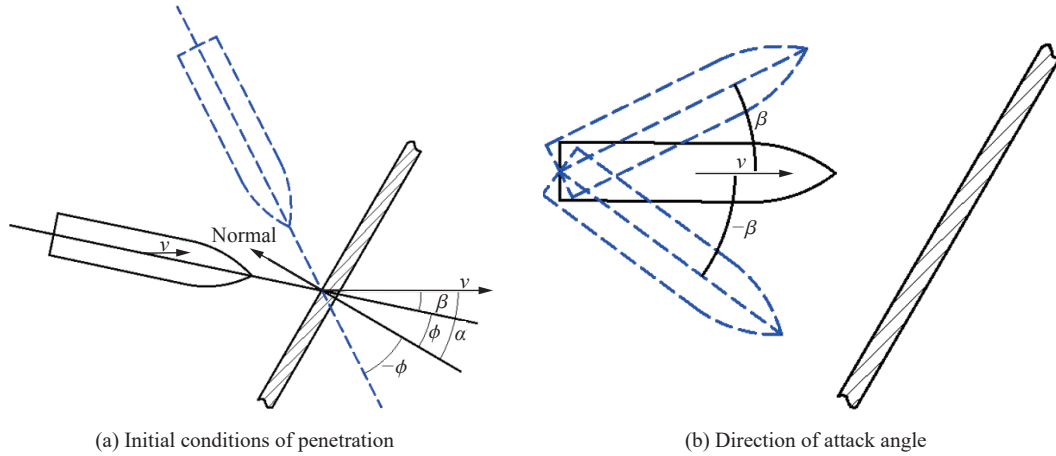


图 3 弹体侵彻条件示意图

Fig. 3 Schematic representation of conditions of projectile penetration

图 5 为不同初始条件下弹体贯穿多层间隔钢靶的试验结果。其中下标 0、1、2、3、4 分别代表弹体入靶前、贯穿第 1、2、3、4 层靶板后的弹道参数, 图中弹体下方的标注为弹轴线与水平线的夹角, 弹体低头时为负值, 抬头时为正值。

试验弹体速度在  $610.5 \sim 1000 \text{ m/s}$  范围, 斜侵彻多层间隔钢靶过程中逐渐向下偏转, 攻角和偏转角均呈逐渐增大趋势, 弹体贯穿第 3、4 层靶板后的姿态偏转显著。由于靶板偏转力矩作用, 导致弹体获得了旋转角速度, 边旋转边前进, 如图 5(i) 所示, NE1 弹体穿过第 4 层钢靶后偏转角仍在增大。

试验弹体侵彻每一层钢靶前后的弹体姿态参数见表 2, “—” 代表未观测到弹体姿态。

从高速录像照片和弹道参数可以看出, 在  $[0^\circ, 30^\circ]$  范围内, 着角越大, 弹体侵彻弹道稳定性越差。观察着角为  $0^\circ$  时, E1 弹体的侵彻弹道轨迹如图 5(a) 所示, 虽然弹体姿态在复杂因素影响下出现了偏转, 但质心运动轨迹基本呈水平直线, 说明弹体正侵彻多层间隔钢靶时, 弹体质心几乎不会发生偏移。

对比试验 E1-3、E1-4、E1-5 可以看出, 随着弹体初速的增大, 弹体姿态偏转越来越小, 侵彻弹道更加平稳。当初速增加时, 弹靶接触时间缩短, 偏转力矩作用时间减少, 弹体侵靶姿态偏转幅度减小。弹体贯穿后在入射平面内的姿态角分别为  $-7.9^\circ$ 、 $-34.3^\circ$  和  $12.5^\circ$ , 相邻速度间的姿态角差值分别为  $26.4^\circ$  和  $20.4^\circ$ , 表明速度对偏转角的影响幅度随速度增加呈减小趋势。

当椭圆截面弹体以不同滚转角侵彻多层间隔钢靶时, 滚转角越大, 弹体在入射平面内的姿态偏转越小。如表 2 中 E1-7 所示, 当滚转角为  $90^\circ$  时, 弹体贯穿 4 层钢靶后在入射平面内的  $\Delta\phi$  只有  $4.4^\circ$ , 滚转角的增大抑制了弹体在入射平面内偏转角的增大。当滚转角为  $45^\circ$  时, 可以看到, 弹体在水平面的姿态角由负变正, 如表 2 中 E1-6 所示, 此时弹体受到了靶板横向偏转力矩的作用, 说明滚转角介于  $0^\circ \sim 90^\circ$  之间时, 偏转角会出现小幅度的水平分量, 但弹体偏转仍主要发生在入射平面内。

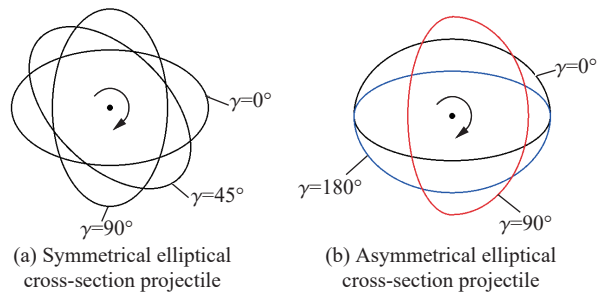


图 4 滚转角示意图

Fig. 4 Schematic representation of rotation angle



图 5 不同初始条件下的侵彻弹道偏转

Fig. 5 Penetration trajectory deflection under different initial conditions

对比图 5(c)、(h)~(j) 中弹体侵彻弹道结果, 当滚转角为  $0^\circ$  时, 截面压缩比减小和非对称度的增大均会放大弹体侵彻多层间隔钢靶的姿态偏转和弹道的不稳定, 不同截面弹体侵彻弹道稳定性由大到小依次为: 圆截面、对称椭圆截面、非对称椭圆截面。

图 6 为各层靶板的典型破坏形式, 当椭圆截面弹体正侵彻单层钢靶时, 在靶板弹孔与弹体长轴两端和短轴两端的接触位置产生 4 条张开型裂纹, 每 2 条裂纹间形成 1 个花瓣, 因此, 靶板背面形成了 4 个主花瓣, 每个主花瓣尖端又开裂成 2~3 个小花瓣, 但这些小花瓣对弹体几乎没有力的作用; 当弹体以较正的姿态斜侵彻前 2 层钢靶时, 靶板出现非对称破坏, 弹体上方的靶板材料受弹体挤压向前翘曲, 在靶板正面形成 1 个前花瓣, 背面形成 2 个小花瓣和开孔下侧的 1 个大花瓣; 弹体侵彻到第 3~4 层靶板时, 由于发生较大姿态偏转, 靶板在弹体撞击作用下被撕裂, 形成一个长条孔, 并在靶板背面形成一圈环向花瓣。

图 7 为试验后回收到的部分试验弹体, 可以看出, 弹体斜侵彻多层间隔钢靶后, 除发生少量磨损以

及弹尖被削去 2~3 mm 外, 弹头部和弹身基本没有发生明显变形。回收后的弹体质量损失约为 0.51%, 因此, 在本试验范围内弹体可视为刚体。

表 2 弹体侵彻每层钢靶前后的弹道参数

Table 2 Trajectory parameters of the projectile before and after penetrating each steel plate

试验 编号	$v_0/$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$\beta_0/$ ( $^\circ$ )	$\beta_1/$ ( $^\circ$ )	$\beta_2/$ ( $^\circ$ )	$\beta_3/$ ( $^\circ$ )	$\beta_4/$ ( $^\circ$ )	$\phi_0/$ ( $^\circ$ )		$\phi_1/$ ( $^\circ$ )		$\phi_2/$ ( $^\circ$ )		$\phi_3/$ ( $^\circ$ )		$\phi_4/$ ( $^\circ$ )	
							水平面	入射平面	水平面	入射平面	水平面	入射平面	水平面	入射平面	水平面	入射平面
E1-1	809.1	1.6	—	2.5	—	10.6	1.8	2.0	—	—	0.9	4.0	—	—	11.5	13.4
E1-2	790.6	2.4	-2.8	-3.3	-9.3	-22.8	0	16.1	0	14.8	0.9	11.9	3.0	-2.0	4.3	-19.4
E1-3	610.5	0	-0.8	-7.9	-20.6	-44.2	-0.9	30	-2.5	27	—	14.0	—	-1.1	-6.5	-34.3
E1-4	799.7	1.5	-1.1	-5.4	-13.8	-31.5	0	31.5	0	28.7	0	21.2	0	7.3	0	-7.9
E1-5	1000.0	0.9	-0.4	-4.3	—	-14.4	0.2	30.9	1.0	30.0	1.9	27.5	—	—	4.0	12.5
E1-6	807.3	-0.8	-1.6	-6.3	-10.2	-24.6	-1.5	29.2	-1.3	27.2	0	23.9	0	16.9	4.8	2.1
E1-7	802.4	0	-0.2	-0.3	-0.3	-3.7	0	30.0	0	29.0	0	27.9	0	27.6	0	25.6
C1-1	796.3	0	0	-0.3	-2.4	-10.4	0	30.0	0	30.0	0	28.8	0	25.9	0	16.9
NE1-1	807.2	0.5	—	—	—	-46.7	—	29.5	—	—	—	—	—	-2.1	—	-24.9
NE2-1	798.7	0	-2.9	-12.6	-33.3	-53.2	5.3	30.0	6.6	26.4	9.8	9.1	22.4	-9.0	51.3	-38.3

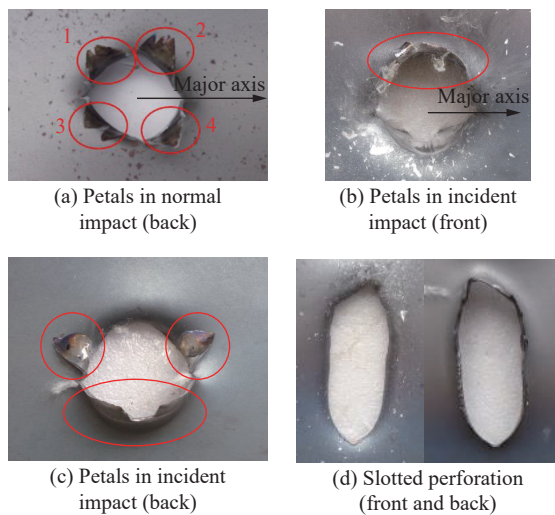


图 6 靶板典型破坏形式  
Fig. 6 Typical destruction types of targets



图 7 回收到的 4 发弹体(左 1~4)和原始弹体(右 1)  
Fig. 7 The recovered four residual projectiles (1st to 4th from left) and original projectile (1st from right)

从回收到的弹体磨蚀情况来看, 弹体头部表层有少量磨蚀痕迹, 而弹身只有一面出现了相对明显的划痕和磨蚀痕迹, 另一面较为光滑, 接近原始状态。说明弹体在贯穿钢靶过程中, 并未一直与靶体接触, 弹体以较正姿态侵彻时, 与靶板的接触主要发生在弹头侵彻阶段, 弹头部完全贯穿或未完全贯穿靶板时, 就已经与靶体分离, 这与 Paul 等<sup>[21]</sup>的研究结论一致, 如图 8 所示。随着弹体向下偏转, 弹体逐渐以倾斜姿态撞上靶板, 使得弹体上表面逐渐与靶板接触, 下表面未与靶板接触。

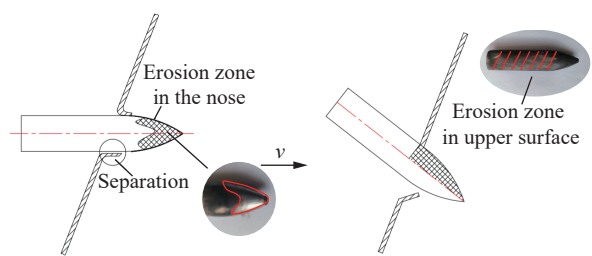


图 8 弹体磨蚀示意图  
Fig. 8 Schematic representation of projectile erosion

## 2 仿真模型及验证

### 2.1 仿真模型及材料参数

采用 LS-DYNA 有限元软件对侵彻过程进行模拟, 使用 1 号拉格朗日算法; 弹体与靶板接触区的网格尺寸均为 0.75 mm 左右, 并对靶板侵彻区网格进行加密处理, 非侵彻区网格进行稀疏处理, 以节省处理器计算时间, 弹靶网格模型如图 9 所示; 弹靶接触方式为侵蚀面接触, 忽略弹靶间的摩擦作用; 考虑到靶板失效以及弹体偏转的非对称性, 采用三维全模型计算。

弹体材料采用 MAT\_RIGID 刚体模型, 钢靶采用 MAT\_JOHNSON\_COOK 材料模型和 EOS\_GRÜNEISEN 状态方程, 具体材料参数见表 3, 其中  $\rho$ 、 $E$  和  $\mu$  分别为材料的密度、弹性模量和泊松比,  $A$ 、 $B$ 、 $n$ 、 $c$ 、 $m$  分别为参考应变率下的屈服强度、应变硬化系数、应变硬化指数、应变率强化系数和温度软化指数,  $D_1 \sim D_4$  为材料的损伤参数。

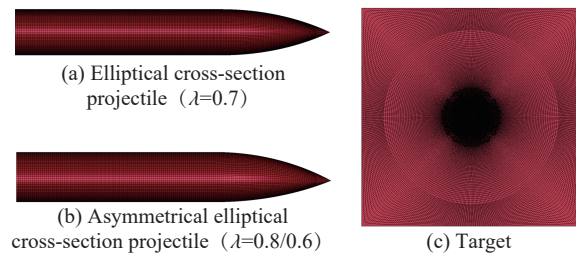


图 9 有限元模型示意图

Fig. 9 Finite element model

表 3 材料参数

Table 3 Material parameters

材料	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$E/\text{GPa}$	$\mu$	$A/\text{MPa}$	$B/\text{MPa}$	$n$	$c$	$m$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$
35CrMnSiA	7.85	210	0.30									
Q355B <sup>[20]</sup>	7.85	210	0.28	339.5	620.0	0.403	0.02	0	0.820	6.047	-7.09	-0.003

### 2.2 仿真模型验证

从弹体剩余速度、入射平面内的姿态角与攻角变化、侵彻弹道轨迹 3 个方面验证有限元仿真模型的有效性。弹体穿过各层靶板后剩余速度的试验与仿真结果如表 4 所示。从表 4 中可以看出, 试验与仿真结果的误差最高为 2.19%, 说明在弹体速度衰减上仿真结果与试验结果比较接近。

表 4 部分典型工况弹体剩余速度试验与仿真结果的对比

Table 4 Comparison between simulations and experiments for residual velocity of projectiles

试验编号	靶板层数	剩余速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )		误差/%
		试验结果	仿真结果	
E1-4	1	794.2	795.4	0.15
	2	782.5	789.2	0.86
	3	762.7	779.2	2.16
	4	737.9	754.1	2.19
E1-6	1	801.0	802.2	0.14
	2	789.9	794.5	0.58
	3	780.8	783.1	0.29
	4	764.6	760.1	-0.59
NE2-1	1	792.7	793.6	0.11
	2	783.4	783.6	0.02
	3	751.5	759.5	1.06
	4	681.4	689.9	1.24

弹体在入射平面内的姿态角、攻角变化试验与仿真结果如图 10 所示, 试验与仿真结果呈现出相同的变化趋势。试验结果选取了 500、1000、1500 和 2000  $\mu\text{s}$  等 4 个时间点的数据和仿真结果曲线进行对比, 姿态角绝对误差为 0~9.7°, 攻角绝对误差为 0.9°~5.8°, 均在 10° 以内。

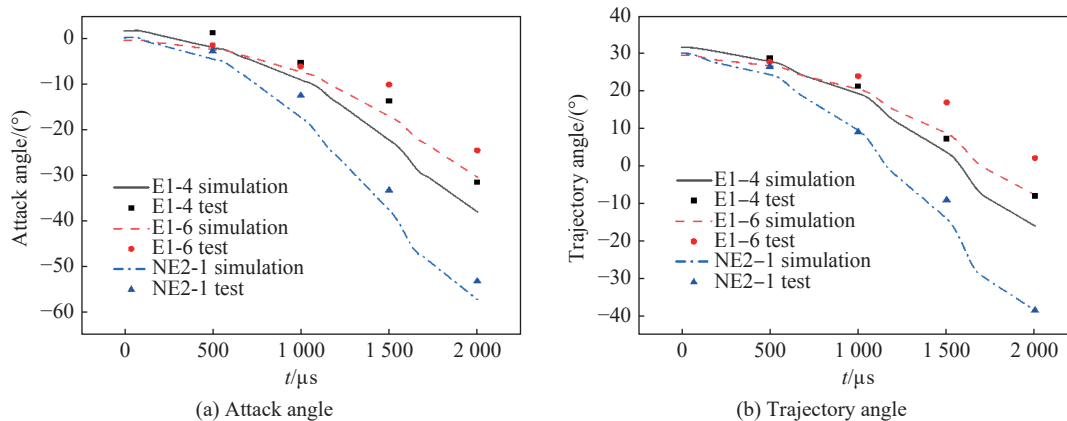


图 10 姿态角、攻角变化试验与仿真结果的对比

Fig. 10 Comparison between simulations and experiments for trajectory angle and attack angle

图 11 为弹体运动轨迹试验与仿真结果的对比。弹体斜贯穿多层间隔钢靶后整体弹道向下偏转, 试验结果与仿真结果一致性较好。

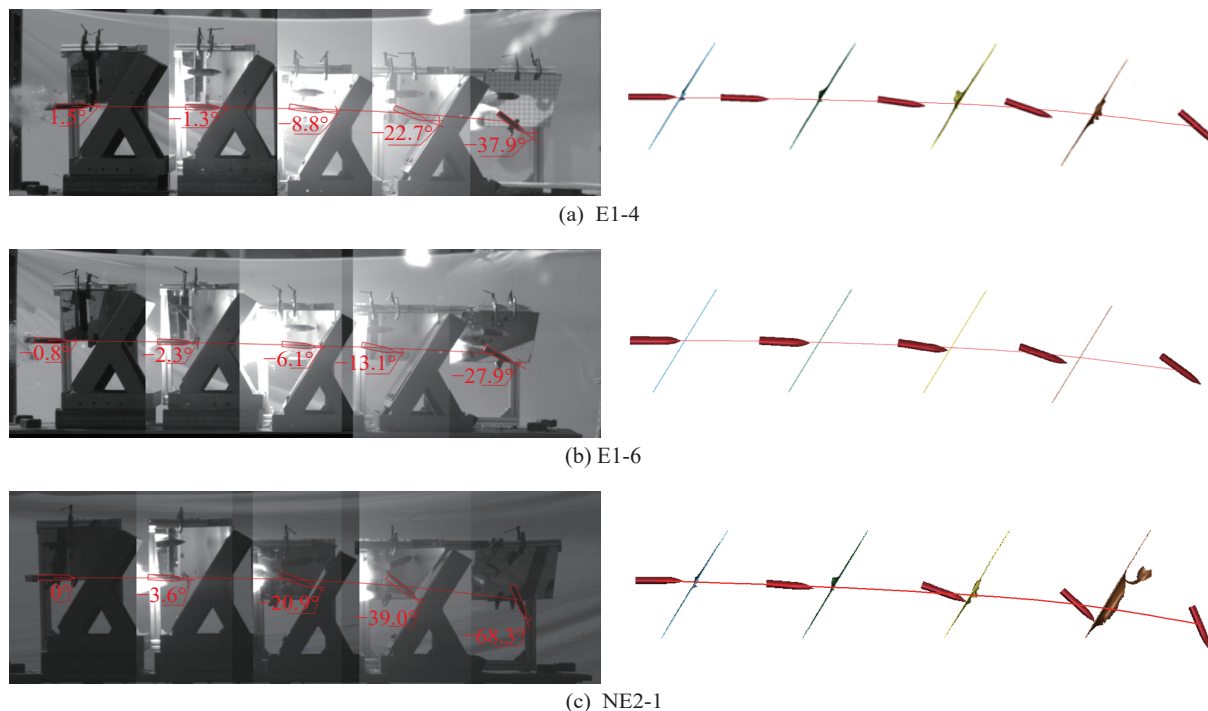


图 11 侵彻弹道试验与仿真结果的对比

Fig. 11 Comparison between simulations and experiments for penetration trajectory

### 3 椭圆类截面弹体侵彻多层间隔钢靶弹道特性

#### 3.1 偏转机制

弹体偏转角加速度曲线如图 12 所示, 侵彻过程可以分为 4 个阶段, 各阶段均主要由一段正值曲线



和负值曲线组成,且随着侵彻推进曲线峰值逐渐增大。图 13 是弹体侵彻单层钢靶过程的受力分析,假设靶体作用力沿弹体表面法向。分析角加速度变化趋势和曲线不同位置点对应的侵彻时刻,可以总结出弹体的 4 种偏转模式。

(1)模式 I。弹体斜侵彻靶板初始阶段,弹头下表面先与靶板接触,如图 13(a)所示,靶体偏转力作用位置在质心前面,偏转力矩方向为逆时针,因此,角加速度先负向增长,持续时间约为  $15 \mu\text{s}$ ;当弹体侵彻第 3、4 层靶板时,由于偏转角的产生,使弹头上表面先与靶板接触,此时在角加速度曲线中没有出现负值阶段(弹体偏转角度较小时仍会出现)。

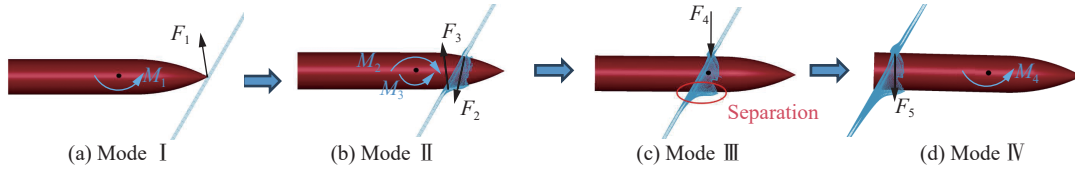


图 13 侵彻过程中的 4 种偏转模式

Fig. 13 Four deflection modes in penetration process

(2)模式 II。在经过短暂的负值阶段后,弹头部上表面开始接触靶板,偏转力矩  $M_2 > M_3$ ,如图 13(b)所示,曲线迅速正向增长变为正值,在弹头部未穿出靶板时曲线到达峰值。

(3)模式 III。当弹体质心运动到靶板位置时,角加速度下降为零,且从图 13(c)中可以看出,弹体下表面已经与靶板分离。

(4)模式 IV。如图 13(d)所示,在弹体贯穿钢板的后期,靶体力作用位置来到质心后面,并对弹体偏转产生了修正作用,偏转力矩方向为逆时针,角加速度开始负向增长,在接近弹底位置时到达峰值,随后弹体穿过靶板,角加速度减小到零。

弹体侵彻第 2、3、4 层靶板过程类似,随着偏转角的增大,与靶板的接触面积增大,因此偏转力矩增大,角加速度曲线峰值变高。弹体偏转是由于不同位置 and 不同时间的靶体偏转力共同作用的结果,斜侵彻靶板过程中弹体上表面是主要受力面,质心到弹尖部分穿靶阶段对弹体偏转有促进作用,质心到弹尾部分穿靶阶段对弹体偏转有抑制作用,整个侵彻过程的合力矩使弹体沿顺时针方向旋转。

### 3.2 截面压缩系数对弹体姿态偏转和侵彻弹道特性的影响

为研究椭圆截面弹体截面压缩系数对侵彻弹道特性的影响,在 E1 弹体基础上设计了质量、弹长、截面面积相同,压缩系数分别为 0.9、0.8 和 0.6 的 3 种弹体,研究在  $0^\circ$  滚转角、 $30^\circ$  着角、800 m/s 初速下,弹体姿态偏转和侵彻弹道轨迹的变化规律,如图 14 所示。

图 15(a) 为不同截面压缩系数弹体在入射平面内的偏转角速度时程曲线,其中角速度方向为  $x$  轴正方向。分析图中角速度变化趋势可知:(1)不同截面压缩系数下,弹体偏转角速度随时间变化的趋势一致,但曲线的幅值随着压缩系数的增大逐渐减小;(2)弹体侵彻各层钢靶的偏转角速度均由一段上升曲线和下降曲线组成,表现出角速度先正向增大后减小的变化模式。图 15(b) 为偏转角加速度时程曲线,与图 15(a) 呈现出了相似的变化规律。各阶段曲线正值部分对应角速度的上升,负值部分对应角速度的下降。随着截面压缩系数的增大,弹体在纵对称面内的转动惯量增大,曲线幅值逐渐减小。

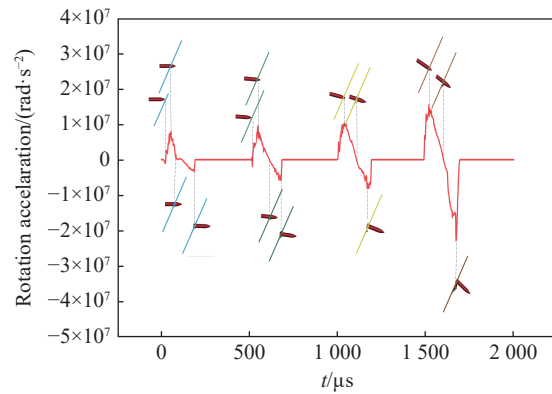


图 12 弹体偏转角加速度曲线和对应侵彻过程

Fig. 12 Rotation acceleration curve and corresponding penetration process

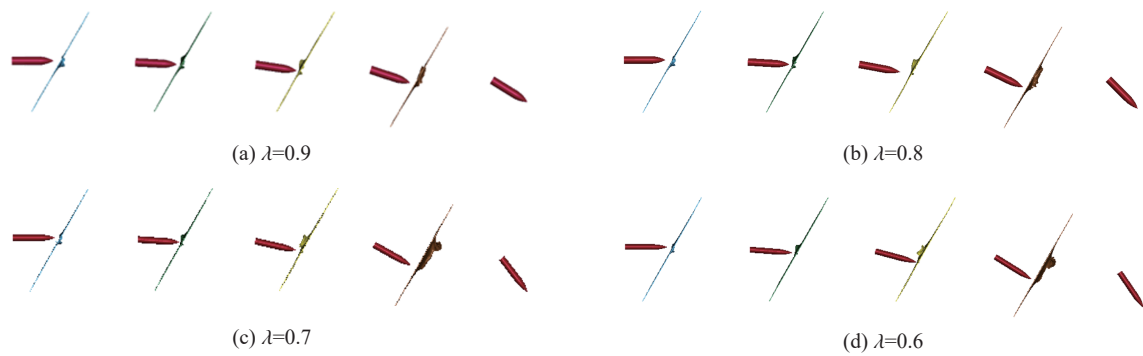


图 14 不同截面压缩比下弹体侵彻弹道的仿真结果

Fig. 14 Penetration trajectory simulation results of projectiles under different  $\lambda$

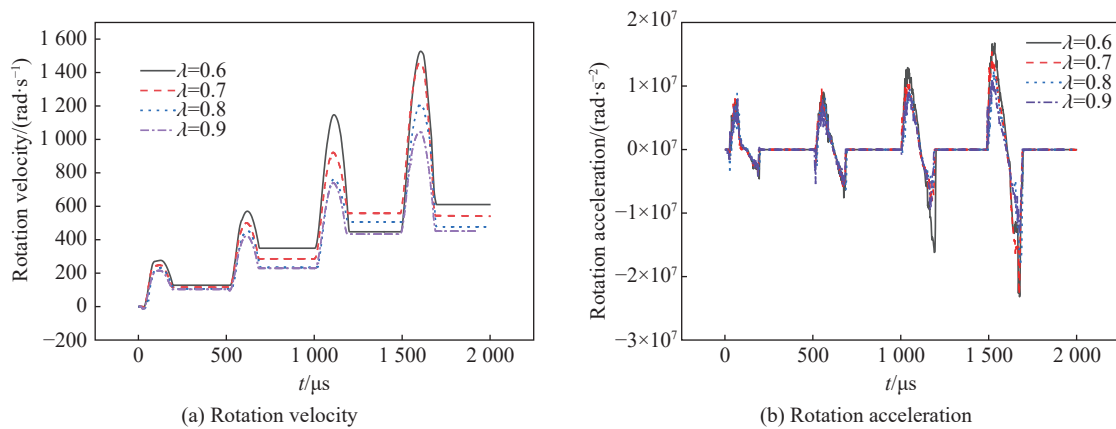


图 15 不同截面压缩系数弹体偏转角速度和角加速度时程曲线

Fig. 15 Time history curves of angular velocity and angular acceleration under different  $\lambda$

不同压缩系数弹体在入射平面内的攻角、姿态角时程曲线如图 16 所示。从图中可以看出, 弹体攻角和姿态角在整个侵彻过程中的变化趋势一致。当  $\lambda=0.9$  时, 攻角和姿态角变化趋势最平缓, 随着截面压缩系数减小, 曲线变化幅度逐渐增大, 弹体姿态偏转越来越显著。图 17 为弹体质心运动轨迹, 可以看出, 随着压缩系数减小, 弹体侵彻多层间隔钢靶弹道偏移逐渐增大, 侵彻弹道稳定性逐渐下降。

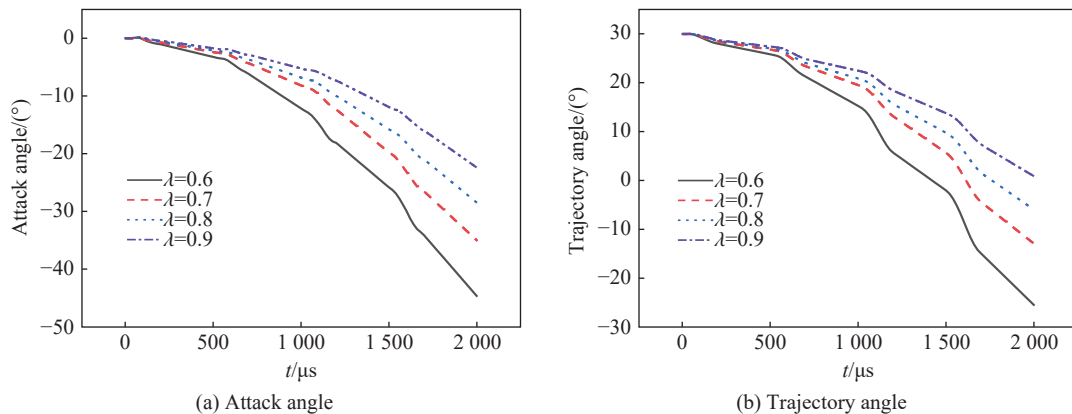


图 16 不同截面压缩系数弹体攻角和姿态角时程曲线

Fig. 16 Time history curves of attack angle and trajectory angle under different  $\lambda$

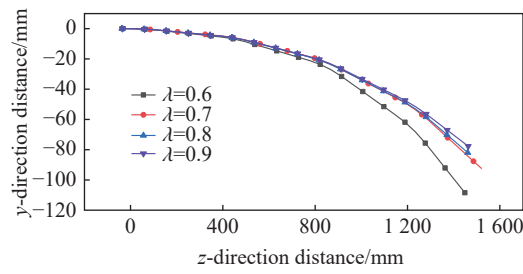


图 17 不同截面压缩系数弹体侵彻弹道轨迹

Fig. 17 Penetration trajectories under different  $\lambda$ 

### 3.3 滚转角对弹体姿态偏转和侵彻弹道特性的影响

为研究滚转角  $\gamma$  对侵彻弹道特性的影响规律, 以 E1 和 NE1 弹体为对象, 分别计算了  $\gamma$  在  $0^\circ \sim 90^\circ$ 、 $0^\circ \sim 180^\circ$  范围内弹体的侵彻弹道结果, 如图 18~19 所示, 分析弹体在  $0^\circ$  攻角、 $30^\circ$  着角和 800 m/s 初速下弹体姿态偏转和侵彻弹道轨迹。

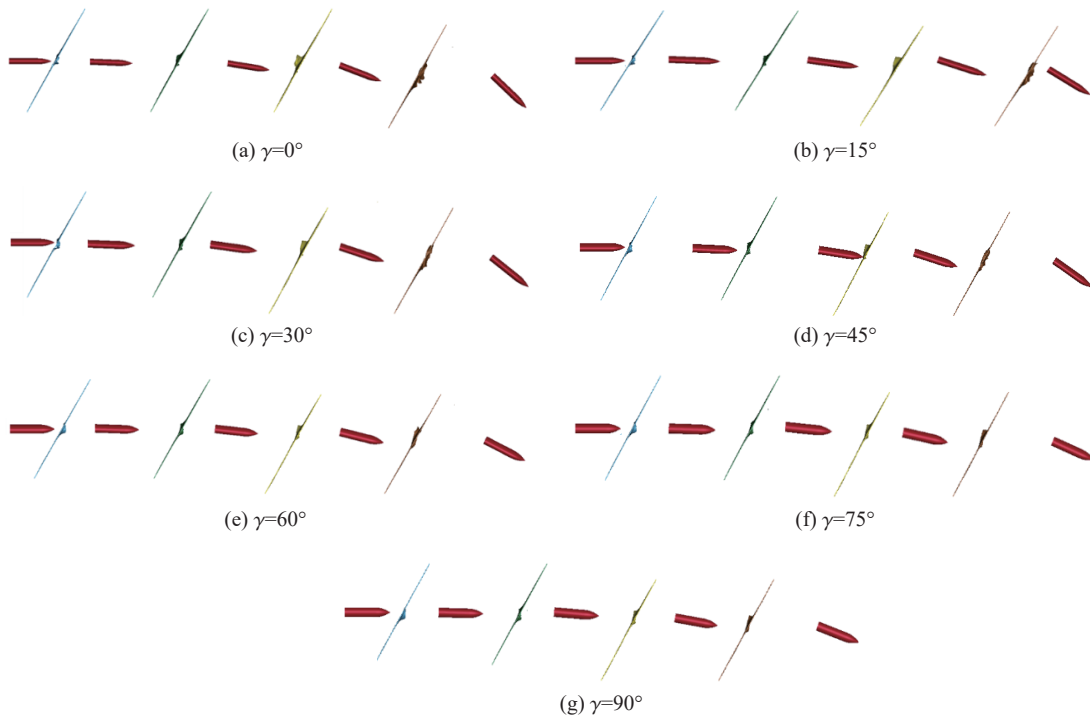


图 18 不同滚转角下 E1 弹体侵彻弹道仿真结果

Fig. 18 Penetration trajectory simulation results of E1 projectile under different rotation angles

对于对称椭圆截面弹体, 随着滚转角增大, 弹体在纵向的转动惯量越大, 抵抗旋转运动的能力越强, 弹体姿态更稳定, 姿态角和攻角变化幅度均逐渐减小; 对于非对称椭圆截面弹体, 短轴长的一半与靶板接触面积大, 短轴短的一半与靶板接触面积小, 当滚转角大于  $90^\circ$  后, 短轴更长的一半转到下方, 下半部分弹体的受力增大, 由图 13(b) 偏转模式 II 可知, 对弹道偏转起到了抑制作用。

图 20 为 2 种弹体侵彻过程中的攻角变化曲线。弹体在靶板不对称作用力的影响下逐渐向下“低头”, 导致轴线方向与速度方向间的夹角逐渐增大。E1 和 NE1 弹体分别在滚转角为  $45^\circ$  和  $90^\circ$  时, 攻角增长幅度最小, 随着滚转角的继续增大, 弹体攻角变化幅度又逐渐增大。

如图 21 所示, 对于 E1 弹体, 当  $\gamma=0^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $90^\circ$  时, 弹体在水平面的姿态最稳定, 姿态角都在  $0^\circ$  附近波动;  $\gamma=15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  时, 弹体在水平面内出现小幅度的姿态偏转, 在  $\gamma=45^\circ$  时偏转角最大, 但不超

过 3°。弹体逐渐向下偏斜, 弹轴线与靶板法线间的夹角逐渐减小; 当  $\gamma=0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$  时, 弹体轴线在入射平面内与靶板法线平齐后继续偏转, 因此, 姿态角变化曲线又出现了负增长趋势。总体来看, 弹体在入射平面内的姿态角与滚转角呈正相关, 滚转角越大, 弹体姿态越稳定。

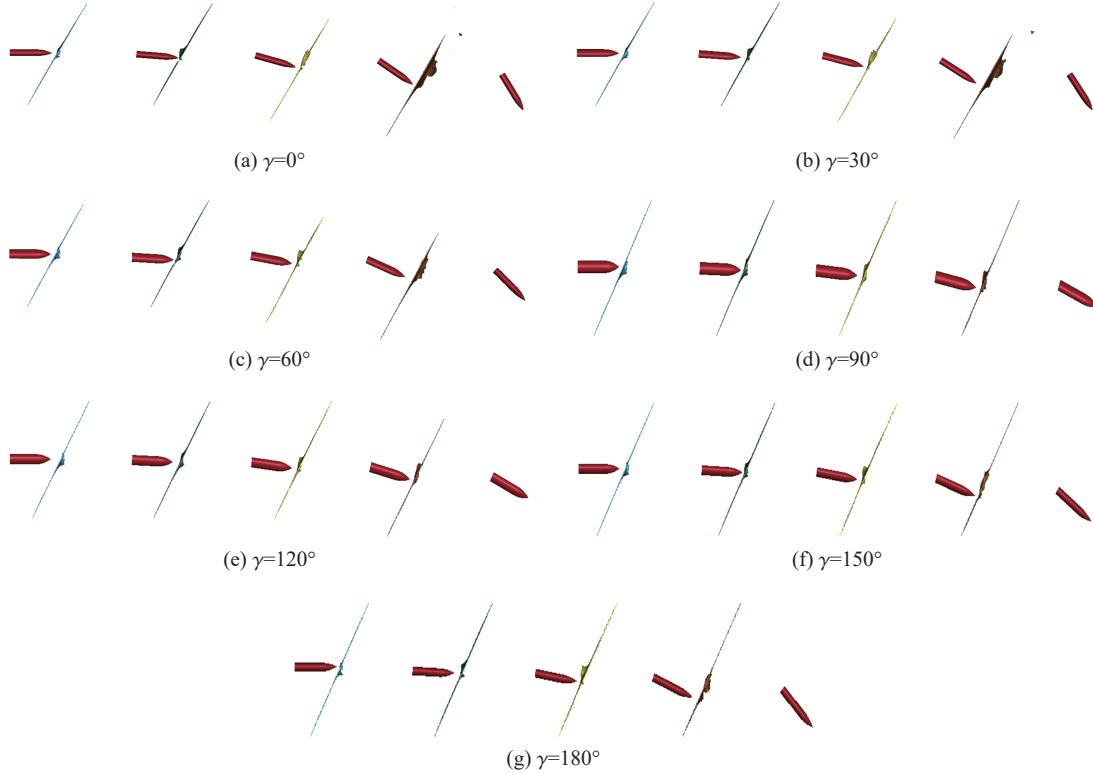


图 19 不同滚转角下 NE1 弹体侵彻弹道仿真结果

Fig. 19 Penetration trajectory simulation results of NE1 projectile under different rotation angles

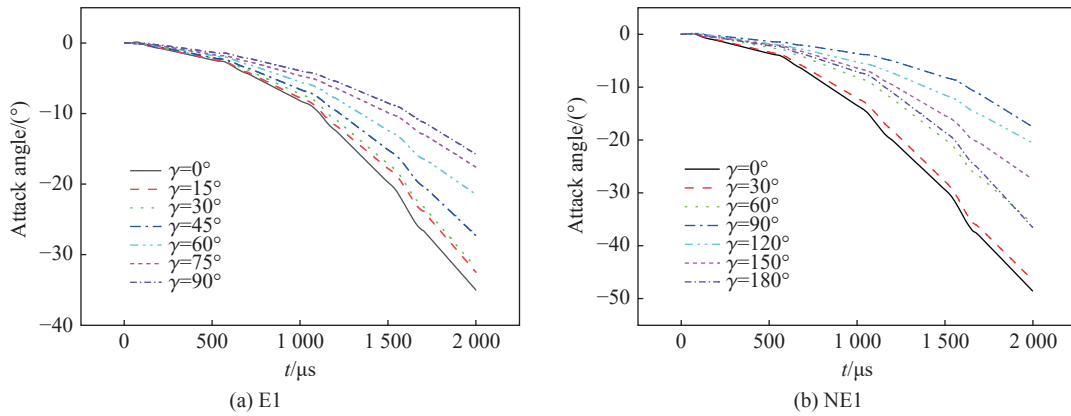


图 20 不同滚转角下 E1 和 NE1 弹体攻角变化

Fig. 20 Changes in the attack angle of E1 and NE1 projectiles under different rotation angles

对于 NE1 弹体, 当  $\gamma > 90^\circ$  时, 弹体在水平面的姿态最稳定, 姿态角都在  $0^\circ$  附近波动;  $0^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$  时, 弹体在水平面内姿态偏斜更严重, 在  $\gamma=60^\circ$  时弹体偏转角达到最大。弹体在入射平面内的姿态角变化幅度随滚转角的增大呈先减小后增大趋势, 在滚转角为  $90^\circ$  时, 侵彻姿态最稳定。

从图 22 中可知, E1 弹体侵彻弹道稳定性随滚转角的增大而增强, 弹体在 y 方向上终点偏移量随滚

转角的增大而减小; 当  $0^\circ < \gamma < 90^\circ$  时,  $x$  方向上出现了位移分量, 当  $\gamma=45^\circ$  时, 弹体在  $x$  方向的终点偏移量最大。从图 23 中可知, NE1 弹体在水平面内的弹道偏转随滚转角的增大先增大后减小, 在  $\gamma=90^\circ$  时横向偏转达到最大; 在入射平面内侵彻弹道稳定性随滚转角的增大先上升后下降。因此, 当非对称椭圆截面弹体滚转角为钝角时, 其侵彻弹道的稳定性要优于滚转角为锐角的情况。

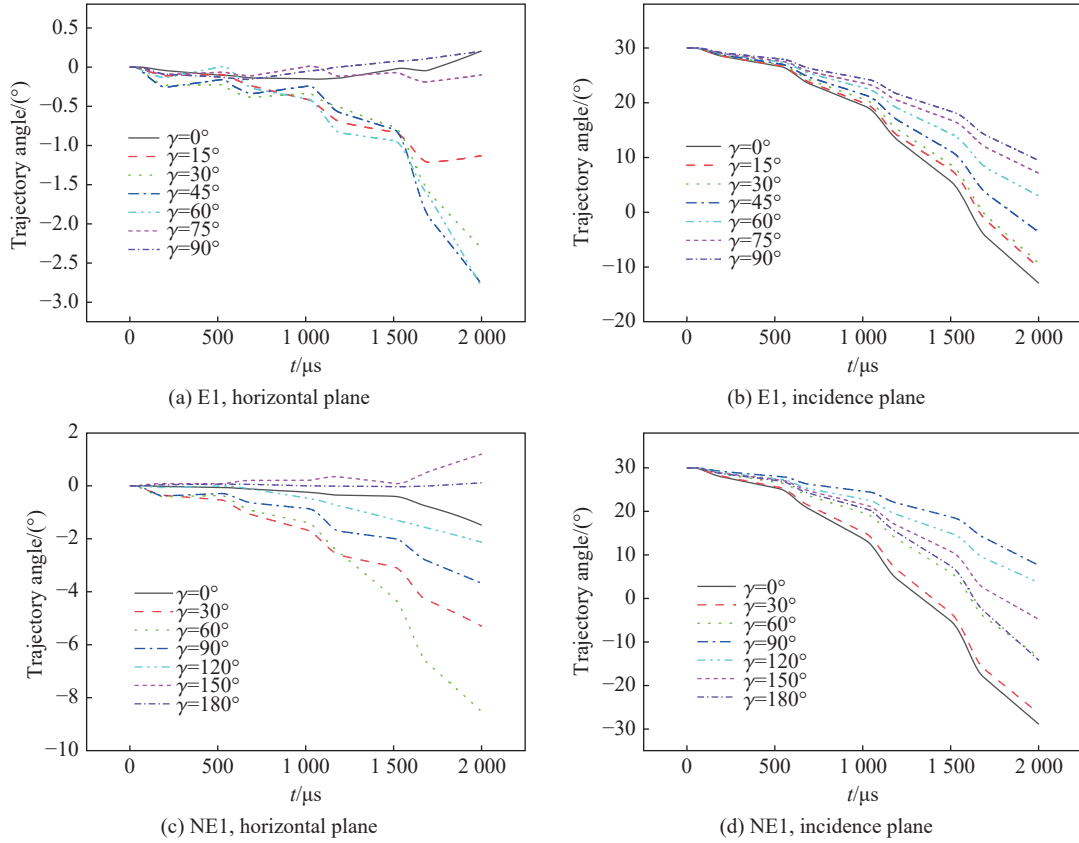


图 21 不同滚转角下 E1 和 NE1 弹体在水平面和入射平面内的姿态角变化

Fig. 21 Changes in the trajectory angle of E1 and NE1 projectiles under different rotation angles

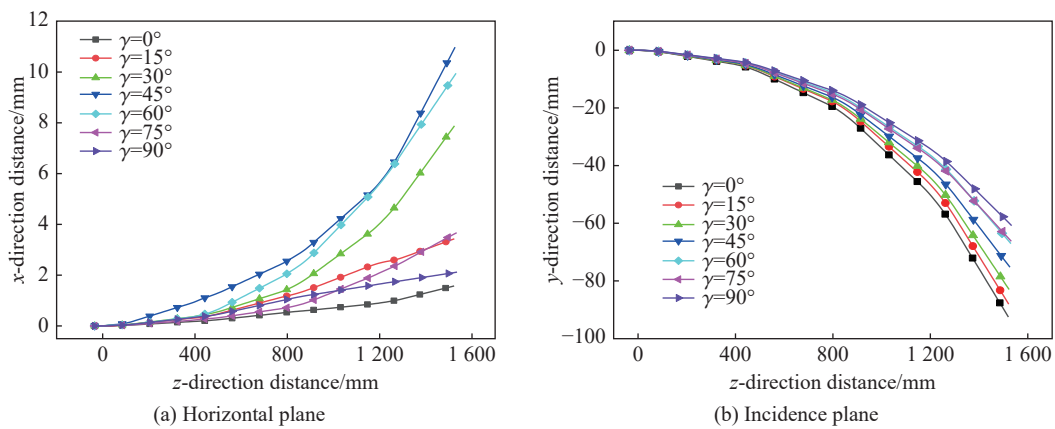


图 22 不同滚转角下 E1 弹体在 2 个平面的侵彻弹道轨迹

Fig. 22 Penetration trajectories of E1 projectile in different rotation angles (horizontal plane and incidence plane)

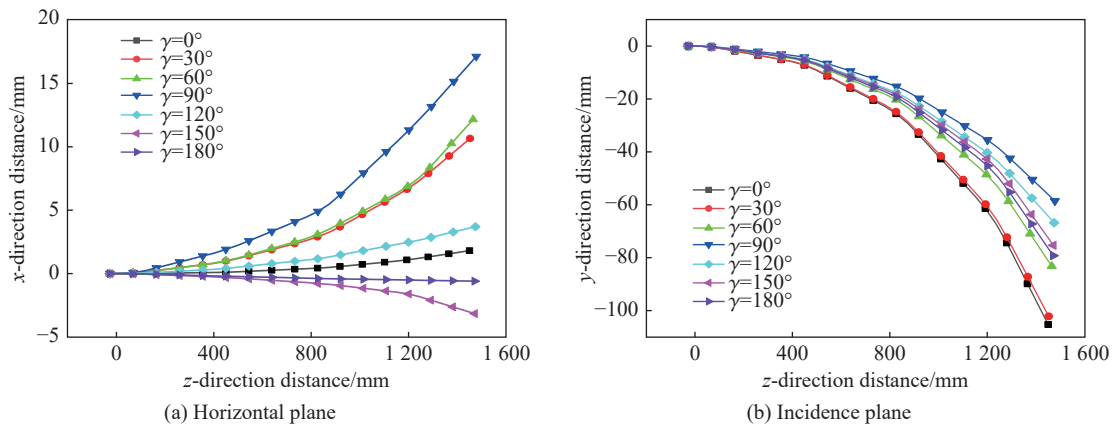


图 23 不同滚转角下 NE1 弹体在 2 个平面内的弹道轨迹

Fig. 23 Penetration trajectories of E1 projectile in different rotation angles (horizontal plane and incidence plane)

### 3.4 着角对弹体姿态偏转和侵彻弹道特性的影响

为研究着角  $\alpha$  对椭圆类截面弹体侵彻弹道特性的影响, 计算了  $\alpha$  在  $0^\circ \sim 50^\circ$  范围内的侵彻弹道结果, 如图 24 所示。

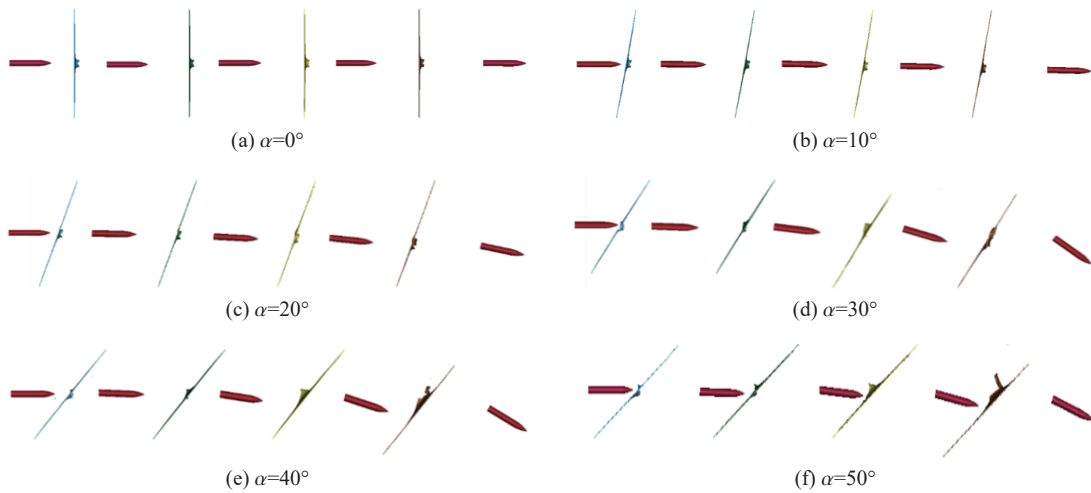


图 24 不同着角下 E1 弹体侵彻弹道仿真结果

Fig. 24 Penetration trajectory simulation results of E1 projectile with different incident angles

弹体在不同着角下侵彻 4 层间隔钢靶的攻角、姿态角时程曲线如图 25 所示, 为便于分析比较, 不同着角下弹体姿态角变化曲线的起点均放在图中坐标系的同一位置。从曲线中可以明显看出, 随着着角的增大, 弹体攻角和姿态角变化幅度呈先增长后下降的趋势。在以上 6 个计算工况中,  $\alpha=0^\circ$ 、 $10^\circ$  时, 弹体姿态一直保持稳定,  $\alpha>20^\circ$  后开始出现明显偏转,  $\alpha=30^\circ$  时弹体姿态偏转最严重,  $\alpha>30^\circ$  后弹体姿态偏转程度又逐渐减小。

为了分析着角对弹体运动轨迹的影响, 结合弹体受力情况对 E1 弹体弹道偏转机制进行分析。图 26 是弹体不同着角侵彻过程中在竖直方向上受到的合力曲线,  $y$  轴正方向竖直向上。  $y$  轴负向各阶段曲线主要由左右 2 个相连的波形组成, 左波对应质心到弹尖侵彻阶段, 右波对应质心到弹底侵彻阶段。  $\alpha=0^\circ$  时, 由于弹体受力对称, 曲线基本都在零值附近波动; 随着着角的增大, 弹体受到不对称力的作用开始偏转并挤压上侧靶体, 下侧花瓣在惯性作用下逐渐与弹体分离, 因此, 弹体受力主要沿  $y$  轴负方向;  $\alpha>30^\circ$  时, 弹体下侧与靶板的接触面积增大, 受到靶板向上的力也逐渐增大, 且从图中可以看出, 侵彻初期靶体作用力逐渐增大, 因此, 合力在  $y$  轴负方向的增量减小, 弹道向下偏转越来越小。弹体在不同着角

下侵彻多层间隔钢靶的弹道轨迹如图 27 所示, 弹体在  $y$  方向上的终点偏移量随着角的增大先增大后减小, 侵彻弹道稳定性随着角的增大先减弱后增强。当  $\alpha=30^\circ$  时, 椭圆类截面弹体侵彻弹道偏转最严重, 弹道稳定性最差。

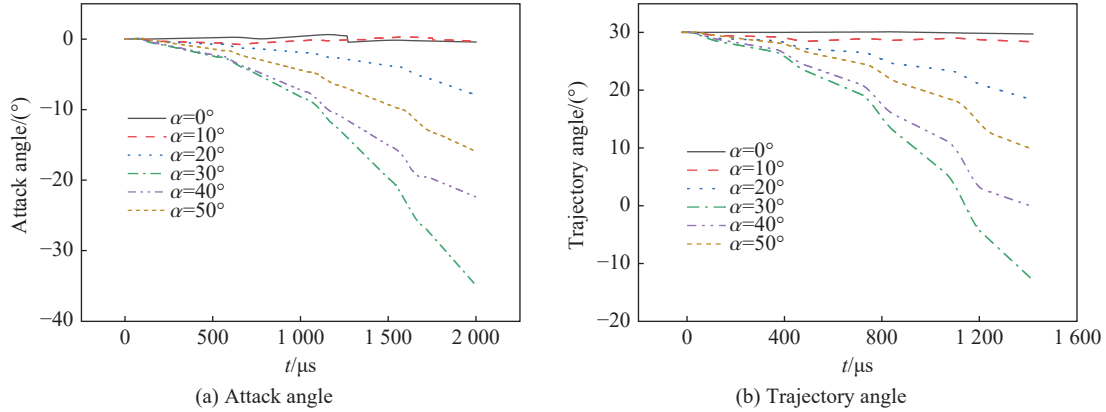


图 25 不同着角下 E1 弹体攻角和姿态角时程曲线

Fig. 25 The time history curves of attack angle and trajectory angle at different incident angles

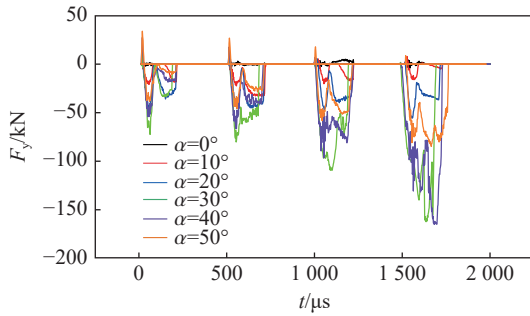


图 26 弹体在  $y$  方向上的合力

Fig. 26 Resultant force of projectile in  $y$  direction

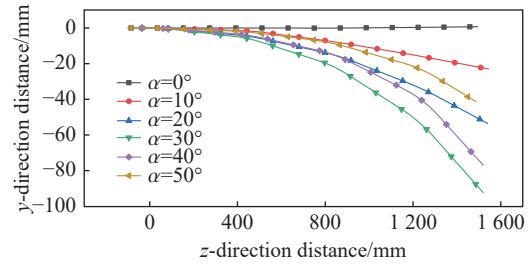


图 27 不同着角下的侵彻弹道轨迹

Fig. 27 Penetration trajectories under different incident angles

## 4 结 论

开展了椭圆类截面弹体侵彻多层间隔钢靶试验和仿真研究, 分析了弹体在侵彻过程中的弹道偏转机制和不同弹靶参数对侵彻弹道特性和姿态偏转特性的影响, 得到的主要结论如下。

(1) 当滚转角为  $0^\circ$  时, 弹道稳定性由强到弱依次为圆截面弹体、对称椭圆截面弹体、非对称椭圆截面弹体, 且椭圆截面压缩系数与侵彻弹道稳定性呈正相关, 压缩系数越大, 侵彻弹道稳定性越好。

(2) 弹体初速是影响侵彻弹道稳定性的重要因素, 随着初速增大, 侵彻弹道越来越稳定, 姿态偏转也越来越小。

(3) 对于椭圆截面弹体, 随着滚转角的增大, 弹体在入射平面内的姿态偏转逐渐减小, 侵彻弹道越来越稳定。当滚转角不为  $0^\circ$  时, 弹体在水平面内会出现横向偏转, 且滚转角为  $45^\circ$  时, 横向偏转最大。对于非对称椭圆截面弹体, 入射平面内的姿态偏转随滚转角增大呈先减小后增大的趋势,  $90^\circ$  滚转角时姿态最稳。当滚转角为钝角时, 其弹体侵彻弹道稳定性优于锐角时的情况。

(4) 在本文弹靶条件下, 椭圆类截面弹体侵彻弹道稳定性随着角的增大出现先减弱后增强的规律, 在  $30^\circ$  着角时弹道偏转最大, 并不是着角越大稳定性越差。

(5) 弹体以较正姿态正/斜侵彻薄钢靶时, 与靶板的接触主要发生在弹头侵彻阶段; 弹体以倾斜姿态侵彻靶板时, 与靶板接触主要在弹体上表面, 下表面在弹体未完全贯穿靶板时就已与靶体分离, 此时靶体对弹体的阻力作用变为零。

## 参考文献:

- [1] LI Q M, FLORES-JOHNSON E A. Hard projectile penetration and trajectory stability [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(10): 815–823. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.05.005.
- [2] GAO X D, LI Q M. Trajectory instability and convergence of the curvilinear motion of a hard projectile in deep penetration [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, 121: 123–142. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.12.021.
- [3] 薛建锋, 沈培辉, 王晓鸣. 考虑自由表面效应的弹体斜侵彻混凝土弹道的研究 [J]. *高压物理学报*, 2016, 30(2): 135–141. DOI: 10.11858/gywlxb.2016.02.008.
- XUE J F, SHEN P H, WANG X M. Ballistics study of projectile obliquely penetrating into concrete with free-surface effect [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2016, 30(2): 135–141. DOI: 10.11858/gywlxb.2016.02.008.
- [4] 姜剑生, 何雨, 张小庆, 等. 斜侵彻薄靶板过程中弹体偏转的姿态修正方法 [J]. *兵工学报*, 2021, 42(S1): 68–73. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.S1.009.
- JIANG J S, HE Y, ZHANG X Q, et al. Correcting method of projectile deflection after obliquely penetrating into a thin target plate [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(S1): 68–73. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.S1.009.
- [5] 高旭东, 李庆明. 弹体结构特征对混凝土斜侵彻弹道偏转的影响分析 [C]//第六届全国强动载效应及防护学术会议暨 2014 年复杂介质/结构的动态力学行为创新研究群体学术研讨会论文集. 北京: 中国力学学会爆炸力学专业委员会, 安全与防护协同创新中心, 爆炸科学与技术国家重点实验室, 2014: 408–415.
- [6] 杜华池, 张先锋, 刘闯, 等. 弹体斜侵彻多层间隔钢靶的弹道特性 [J]. *兵工学报*, 2021, 42(6): 1204–1214. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.06.010.
- DU H C, ZHANG X F, LIU C, et al. Trajectory characteristics of projectile obliquely penetrating into steel target with multi-layer space structure [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(6): 1204–1214. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.06.010.
- [7] 杜华池. 头部非对称刻槽弹体斜侵彻典型靶体弹道特性研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2020: 26–49. DOI: 10.27241/d.cnki.gnjgu.2021.000770.
- [8] 李鹏程, 张先锋, 刘闯, 等. 攻角和入射角对弹体侵彻混凝土薄靶弹道特性影响规律研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(11): 113302. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0435.
- LI P C, ZHANG X F, LIU C, et al. Study on the influence of attack angle and incident angle on ballistic characteristics of projectiles penetration into thin concrete targets [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(11): 113302. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0435.
- [9] IQBAL M A, SENTHIL K, MADHU V, et al. Oblique impact on single, layered and spaced mild steel targets by 7.62 AP projectiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 110: 26–38. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.04.011.
- [10] 袁家俊. 卵形头弹斜侵彻铝合金双层靶板的轨迹变化规律分析 [J]. *机械强度*, 2020, 42(6): 1509–1514. DOI: 10.16579/j.issn.1001.9669.2020.06.034.
- YUAN J J. Analysis of trajectory change regulation of ogival-nosed projectiles obliquely penetrating double-layer aluminum alloy targets [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2020, 42(6): 1509–1514. DOI: 10.16579/j.issn.1001.9669.2020.06.034.
- [11] DONG H, WU H J, LIU Z H, et al. Penetration characteristics of pyramidal projectile into concrete target [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 143: 103583. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103583.
- [12] 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: 104497. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104497.
- [13] 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): 023304. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0291.
- WEI H Y, ZHANG X F, XIONG W, et al. Oblique penetration of elliptical cross-section projectile into metal target [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(2): 023304. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0291.
- [14] WEI H Y, ZHANG X F, LIU C, et al. A three-dimensional penetration trajectory model for ogive-nosed projectile into metal targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 157: 103998. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.103998.
- [15] 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. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2022.04.021.
- YUE S Z, CHEN L, ZHANG X W, 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. DOI: 10.11809/



- bqzbgcxb2022.04.021.
- [16] 胡雪垚, 屈可朋, 肖玮. D 字异型弹体斜侵彻多层钢靶弹道研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43(8): 95–100. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2022.08.014.  
HU X Y, QU K P, XIAO W. Study on trajectory of D-shaped projectile oblique penetrating multiple-layered steel targets [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(8): 95–100. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2022.08.014.
- [17] 田泽, 王浩, 武海军, 等. 椭圆变截面弹体斜贯穿薄靶姿态偏转机理 [J]. *兵工学报*, 2022, 43(7): 1537–1552. DOI: 10.12382/bgxb.2021.0367.  
TIAN Z, WANG H, WU H J, et al. Attitude deflection mechanism of projectiles with variable elliptical cross-sections obliquely perforating thin targets [J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(7): 1537–1552. DOI: 10.12382/bgxb.2021.0367.
- [18] 邓希旻, 田泽, 武海军, 等. 上下非对称结构弹体侵彻金属薄板的特性及薄板破坏形式 [J]. *兵工学报*, 2023, 44(12): 3836–3850. DOI: 10.12382/bgxb.2022.0724.  
DENG X M, TIAN Z, WU H J, et al. Penetration characteristics and plate failure modes of asymmetrically shaped projectiles penetrating thin metal targets [J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(12): 3836–3850. DOI: 10.12382/bgxb.2022.0724.
- [19] 魏海洋. 椭圆截面弹体斜侵彻金属靶体弹道特性研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2022: 102–117. DOI: [10.27241/d.cnki.gnjgu.2022.000186](https://doi.org/10.27241/d.cnki.gnjgu.2022.000186).  
WEI H Y. Research on the characteristics of penetration trajectory of elliptical cross-section projectile into metal targets [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2022: 102–117. DOI: [10.27241/d.cnki.gnjgu.2022.000186](https://doi.org/10.27241/d.cnki.gnjgu.2022.000186).
- [20] 林莉, 黄博, 肖新科, 等. Q355B 钢动态材料性能研究 [J]. *振动与冲击*, 2020, 39(18): 231–237. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.18.031.  
LIN L, HUANG B, XIAO X K, et al. Behavior of dynamic material Q355B steel based on the Johnson-Cook model [J]. *Journal of Vibration and shock*, 2020, 39(18): 231–237. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.18.031.
- [21] PAUL B, ZAID M. Normal perforation of a thin plate by truncated projectiles [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 1958, 265(4): 317–335. DOI: 10.1016/0016-0032(58)90627-6.

(责任编辑 曾月蓉)