

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0571

撞击姿态对构型弹体非正侵彻多层间隔钢靶 弹道特性的影响规律*

杨 璞^{1,2}, 李继承^{1,2}, 陈建良^{1,2}, 张 斌^{1,2}, 何丽灵^{1,2}, 陈 刚^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999;
2. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为深入认识构型弹体非正侵彻多层间隔靶板的弹道偏转规律, 结合数值模拟和理论分析, 研究了构型弹体在不同撞击姿态下侵彻多层间隔钢靶的弹道特性, 其中引入弹体侧向接触力和侧向偏转力矩等参量, 着重分析撞击着角和攻角对弹道特性的影响规律。结果表明: 构型弹体非正侵彻过程中, 在纵向发生阶梯式速度衰减, 但变化较小; 同时, 由于穿靶过程中受到侧向接触力及其偏转力矩的作用, 在侧向产生显著弹道偏转。撞击着角决定弹体所受外载荷的非对称程度, 着角越大, 弹体偏转越严重; 撞击攻角则主要影响弹肩穿靶时的径向速度和弹尾穿靶时的触靶位置, 二者共同影响弹道轨迹, 因而存在使弹体偏转程度发生转折的临界攻角。相比于侵彻单层靶, 构型弹体非正侵彻多层间隔靶板的显著特点为弹道偏转存在累积效应, 且侵彻前一靶板的弹道偏转情况显著影响到侵彻后一靶板时的弹靶作用特征, 进而导致弹道偏转与弹靶接触力互相耦合。相关研究对预测构型弹体侵彻多层间隔靶板性能、优化弹体构型和撞击姿态等具有较好的指导价值。

关键词: 构型弹体; 多层间隔钢靶; 非正侵彻; 弹道偏转; 撞击姿态

中图分类号: O385 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Influence rule of impact attitude on trajectory characteristics of warhead's non-normally penetration into multi-layer spaced steel target

YANG Pu^{1,2}, LI Jicheng^{1,2}, CHEN Jianliang^{1,2}, ZHANG Bin^{1,2}, HE Liling^{1,2}, CHEN Gang^{1,2}

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

2. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang 621999, Sichuan, China)

Abstract: In order to deeply investigate the trajectory deflection characteristics of a warhead during the non-normal penetration into the multi-layer spaced target, the trajectories under different impact attitudes are analyzed with combined numerical simulation and theoretical analysis, in which finite element method (FEM) simulations on the penetration process under various impact conditions are conducted systemically, and the deformation and failure morphologies of warhead and target as well as the interaction characteristics between them are discussed in detail. Besides some feature parameters, lateral contact force and angular moment, are introduced in the theoretical analysis. Furthermore, the influence rules of oblique angle and attacking angle on the trajectory deflection characteristics are investigated in detail. Related results indicate that during the non-normal penetration into multi-layer spaced target, the warhead behaves as small staged axial velocity decay combined with obvious lateral trajectory deflection, and the trajectory deflection is mainly derived from the lateral contact force as well as the

* 收稿日期: 2022-12-29; 修回日期: 2023-05-30

基金项目: 四川省自然科学基金杰出青年基金(2023NSFSC1913); 中国工程物理研究院创新与发展基金(CX20210031)

第一作者: 杨 璞(1989—), 女, 硕士, 助理研究员, yangp_caep@sina.com

通信作者: 李继承(1984—), 男, 博士, 副研究员, lijc401@caep.cn

corresponding angular moment, and the lateral contact force mainly makes its effect during three periods, i.e., when the nose, shoulder and tail of warhead pass through the target, respectively. The oblique angle mainly affects the degree of external load asymmetry exerting on the warhead with increase of the oblique angle, the downward lateral contact force as well as the corresponding angular moment exerting on the warhead all increase, thus the trajectory deflection becomes more severe. Comparatively, the attacking angle determines two factors, one is the radial velocity of warhead at the time when its nose passes through the target, and another is the contact position between the warhead and target when the warhead tail passes through the target. These two factors determine the trajectory simultaneously, so different attacking angles make the lateral contact force and the corresponding angular moment differing from each other during the process of the warhead tail passing through the first target, leading to a critical attacking angle at which the evolution trend of trajectory deflection would turn the other way round. Compared to the penetration into a single layer target, a remarkable feature in the penetration of a warhead into the multi-layer spaced target is that the trajectory deflection shows a cumulative effect, and the situation in the penetration into the former target plate significantly affects the interaction condition between the warhead and the latter target plates, and this further results in a coupling effect between the trajectory deflection and the contact force. The present investigation is of good significance in the practical engineering application, e.g., predicting the penetrating ability of a warhead into the multi-layer spaced target, and optimizing the warhead structure and its impact attitude, etc.

Keywords: warhead; multi-layer spaced steel target; non-normal penetration; trajectory deflection; impact attitude

侵爆战斗部的攻击特点为利用自身动能穿透防御工事之后在预定位置引爆其内部装药。随着各国防御工事、舰艇防护结构等的不断进步,战斗部常需要侵彻多层间隔目标,例如地面房屋和地下指挥中心等建筑的主要特征为间隔多层板结构,航母等大型舰船也多采用多层甲板、多舱室结构^[1],因此战斗部在侵彻过程中常承受多次间隔冲击脉冲载荷作用。特别地,由于在战斗部撞靶之前的飞行阶段中弹道容易发生改变,最终撞靶时的姿态多为非正侵彻,且着角和攻角常同时存在。非正侵彻时构型弹体将受到靶板的非对称作用力,容易导致后续弹道轨迹发生偏转^[2],进而影响战斗部的侵彻性能和装药安定性。在非正侵彻多层间隔靶板条件下,战斗部的弹道偏转特性以及内部装药变形和损伤演化特征更加复杂。因此,研究相应侵彻条件下的弹道特性具有重要的理论意义和工程价值。

长期以来,针对弹体非正侵彻的研究多集中在单层靶侵彻情形,相关工作获得了较丰富的试验数据和数值模拟结果,且总结了相对完备的理论公式,给出了弹体侵彻深度、速度衰减、质量磨蚀或侵蚀、偏转角度等参量的预测模型^[2-7]。相对来说,针对弹体非正侵彻多层间隔靶板的研究较少,随着近年来在工程上日益引起关注,学者们逐渐开展了相关研究,较活跃的研究机构有印度理工学院以及我国北京理工大学、南京理工大学、西安近代化学研究所和火箭军研究院等。初期主要是通过数值模拟手段开展相关分析^[8-14],近期也开展了部分试验工作^[15-21],相关研究分析了弹体头形、撞击速度、撞击着角和攻角、靶板厚度和靶板间距等因素对侵彻过程的影响,讨论了不同参数变化对弹道特性的作用规律。总体来说,此前相关研究多侧重于宏观描述弹道现象,主要涉及弹靶变形和破坏形貌、弹道轨迹形态和最终弹体偏转角度等。针对参数影响的结论相对分散,且鲜见针对参量影响规律的统一认识。此外,相关工作多基于小尺寸简化结构弹体,针对原型尺寸弹体的分析较少。因此,对弹体非正侵彻多层间隔靶板弹道特性的相应物理机制仍缺乏深入而系统的分析,有必要综合宏观弹道现象与内变量演化特征(如弹靶载荷等),全面分析不同因素的作用机制,并归纳总结其影响规律;同时,需要针对原型弹靶结构的侵彻弹道特征开展研究,进而为实际工程应用中的弹靶结构设计和撞击条件提供直接指导。

本文中,将基于实际战斗部构型弹体(包含壳体、尾盖和装药等主要部件的原型弹体),对弹体非正侵彻多层间隔钢靶的弹道特性开展深入分析,并基于侧向接触力和侧向偏转力矩等概念,系统分析弹道偏转物理过程。鉴于实际工程应用中弹靶构型和撞击速度等相对固定,而撞击姿态容易发生变化,主要分析撞击姿态对弹道特性的影响规律及其物理机制,并重点关注撞击着角和攻角 2 个因素。

1 数值模拟模型

1.1 几何模型

构型弹体借鉴 BLU-109 系列战斗部^[22-24], 并对结构进行合理简化。弹体总长为 2 244 mm, 外径为 368.3 mm, 质心距弹尖 1 249 mm。弹体结构主要包含壳体、尾盖和装药等部件, 相应的有限元几何模型及尺寸如图 1(a) 所示。弹体非正侵彻钢靶的整体有限元几何模型如图 1(b) 所示, 其中 4 层间隔钢靶尺寸均为 2 000 mm × 2 500 mm × 40 mm, 靶板之间的水平间距均为 3 200 mm。弹体和靶板模型均利用八节点六面体单元划分网格, 弹体网格和靶板中弹靶作用区域的网格尺寸约为 5 mm, 其中弹体模型共包含约 21 万个单元, 靶板模型包含约 107 万个单元。靶板四周边界设置为固定约束, 弹体中壳体与尾盖之间设为共节点处理, 装药与壳体/尾盖之间、弹体与靶板之间均设置为面-面侵蚀接触。

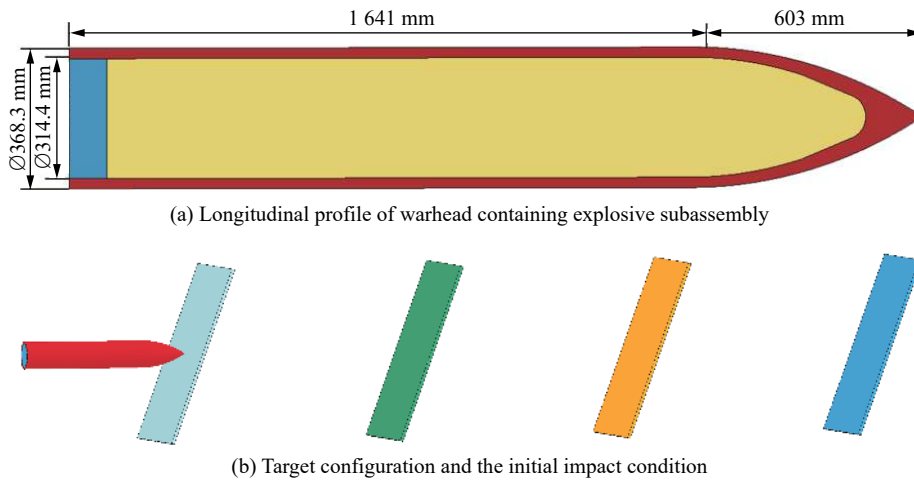


图 1 构型弹非正侵彻 4 层间隔钢靶有限元几何模型

Fig. 1 Finite element model of warhead non-normal penetration into four layers spaced steel targets

1.2 材料本构模型

构型弹体的壳体材料为 G50 钢, 尾盖材料为 TC4 钛合金, 金属靶材料为 921A 钢, 弹体侵彻过程中, 这类金属材料将呈现应变率效应和温度效应等特征。本文中, 采用能体现材料应变率效应和温度效应的 Johnson-Cook 本构模型^[25]并结合累积损伤失效模型^[26]来描述相应材料的力学行为, 同时利用 Grüneisen 状态方程^[27]描述冲击过程中的压力状态。结合相关材料力学性能研究和数值模拟工作^[24, 28-32], 得到的模型参数列于表 1 中。表 1 中: ρ 为密度, E 为弹性模量, μ 为泊松比, c_v 为定容比热容, T_r 为室温,

表 1 材料 Johnson-Cook 模型参数

Table 1 Johnson-Cook model parameters of materials

材料	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	μ	$c_v/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	T_r/K	T_m/K	$\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$	A/MPa	B/MPa	n	C
G50钢	7 620	205	0.28	469.0	300	1 765	1	1 445	1 326	0.356	0.005
TC4钛	4 428	110	0.31	560.0	300	1 878	1	1 098	1 092	0.930	0.014
921A钢	7 850	205	0.28	400.9	300	1 765	1	760	500	0.530	0.014
PBX	1 900	12	0.30	1 559.0	300	540	1	15	10	1.000	0.200
材料	m	S_1	a	$c_\theta/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	γ_0	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	
G50钢	1.12	1.990	0.46	4 280	2.00	0.10	0.76	1.57	0	0	
TC4钛	1.10	1.028	0.90	5 130	1.23	-0.09	0.76	0.48	0.014	3.87	
921A钢	1.13	1.990	0.46	4 280	2.00	1.20	0.27	0	0	0	
PBX	0.60	2.380	0	2 565	1.10	0	0	0	0	0	

T_m 为熔化温度, $\dot{\epsilon}$ 为应变率, A 为 $\dot{\epsilon}=1 \text{ s}^{-1}$ 时的屈服应力, B 和 n 为应变硬化系数, C 为应变率敏感系数, m 为温度敏感系数, $D_1 \sim D_5$ 为与材料破坏应变相关的材料参数, c_0 为冲击波速度-质点速度曲线的截距, S_1 为曲线斜率的系数, γ_0 为 Grüneisen 系数, a 为 γ_0 的一阶体积修正。张斌等^[24] 和李继承等^[31-32] 开展的数值模拟工作显示, 相应模型及参数可较好地体现金属材料在冲击条件下的主要变形和破坏特征。

构型弹体内部装药材料在未发生化学反应时, 其变形特性也呈现与温度和应变率相关的黏性流动特征^[33-34]。与张斌等^[24] 的工作类似, 本文中也选取 Johnson-Cook 本构模型, 结合累积损伤失效模型和 Grüneisen 状态方程来描述装药结构的力学行为, 具体材料参数也列在表 1 中。

1.3 撞击工况

主要关注弹体撞击着角和撞击攻角两方面因素对弹道特性的影响规律, 其中着角 α 定义为弹体速度与靶板表面外法线之间的夹角, 攻角 β 定义为弹体速度与弹体轴线之间的夹角, 弹体向上俯仰(抬头)时 β 取正值, 向下俯仰(低头)时 β 取负值, 如图 2 所示。值得注意的是, 从外弹道角度来看, 弹体在飞行过程中存在周向 360° 的章动角, 但从弹体非正侵彻靶板的终点效应方面, 当章动角处于经过外法线的靶板纵截面内(如图 2 中的纸平面)时, 最大(向上俯仰)和最小(向下俯仰)攻角取值状态是 2 个极端状态, 其影响将分别体现攻角对弹道偏转的最大抑制或促进作用, 其他方位攻角状态的影响将处于这 2 个极端状态的包络之内, 因此针对攻角的相关讨论将集中在该平面内, 后续针对弹道偏转的分析也限于该平面内的弹道变化。弹体初始撞击速度方向设为水平向右, 为方便直观理解, 在后续分析中将水平方向统一叙述为纵向(无攻角时的弹体轴线方向), 而垂直方向统一称为侧向(无攻角时垂直于弹体轴线方向)。

结合实际工程应用, 同时为便于讨论, 撞击速度 v 统一设置为 800 m/s; 在着角影响分析中, 攻角 β 取固定值 0°, 着角 α 取值为 10°、20° 和 30°; 在攻角影响分析中, 着角 α 取固定值 20°, 攻角 β 从 -4°~4° 之间逐渐变化, 具体侵彻工况如表 2 所示, 后续相关讨论及规律总结也限于表 2 中的姿态范围。

2 弹道特性表征

构型弹体在 20° 着角、0° 攻角条件下非正侵彻 4 层间隔钢靶(工况 2)穿靶过程的有限元模拟结果如图 3(a) 所示, 可以看出, 弹体逐渐向垂直靶标方向偏转, 且随着侵彻靶板层数的增加, 偏转程度逐渐增大。为便于直观理解, 本文中, 将弹体向垂直靶标方向(顺时针)的偏转定义为弹道向下偏转, 反之, 逆时针则定义为弹道向上偏转; 同时, 靶板正面被弹体撞击开坑, 靶板背面则撕裂为花瓣状, 且靶板开孔随着层数的增加而增大(开孔纵向尺寸依次为 426、468、505 和 579 mm)。相关弹体非正侵彻多层间隔钢靶的实验结果也呈现相同的特征, $\varnothing 30 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ 小尺寸钢质弹体在 680 m/s 撞击速度、20° 着角和 0° 攻角条件下, 侵彻间距为 400 mm、尺寸为 300 mm \times 300 mm \times 10 mm 的 4 层 Q235 钢靶的弹道变化高速摄影图像如图 3(b) 所示^[18]。尽管实验中弹靶尺寸均相对较小且弹靶材料互不相同, 同时由于撞击条件等方面的差异, 在弹靶变形和破坏细节、弹体偏转程度等方面与图 3(a) 中的数值模拟结果存在差异, 然而

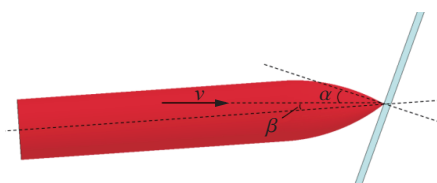


图 2 构型弹体非正侵彻着角和攻角的定义

Fig. 2 Definition of oblique angle and attacking angle in the non-normal penetration

表 2 构型弹体撞击工况

Table 2 Warhead impact cases

工况	分析要素	着角/(°)	攻角/(°)	撞击速度/(m·s ⁻¹)
1	着角	10	0	800
2	着角	20	0	800
3	着角	30	0	800
4	攻角	20	-4	800
5	攻角	20	-3	800
6	攻角	20	-2	800
7	攻角	20	-1	800
8	攻角	20	1	800
9	攻角	20	2	800
10	攻角	20	3	800
11	攻角	20	4	800

侵彻过程中, 弹道轨迹连续向下偏转, 弹轴与初始水平轴线的夹角、弹头偏移量等都随穿靶层数的增加而逐渐增大, 靶板开孔也随着层数的增加而增大。因此, 相关实验观测表明, 数值模拟结果可体现弹体非正侵彻间隔钢靶的主要弹道特征, 以下将基于工况 2 的数值模拟结果, 具体讨论相关弹道特性及其变化规律。

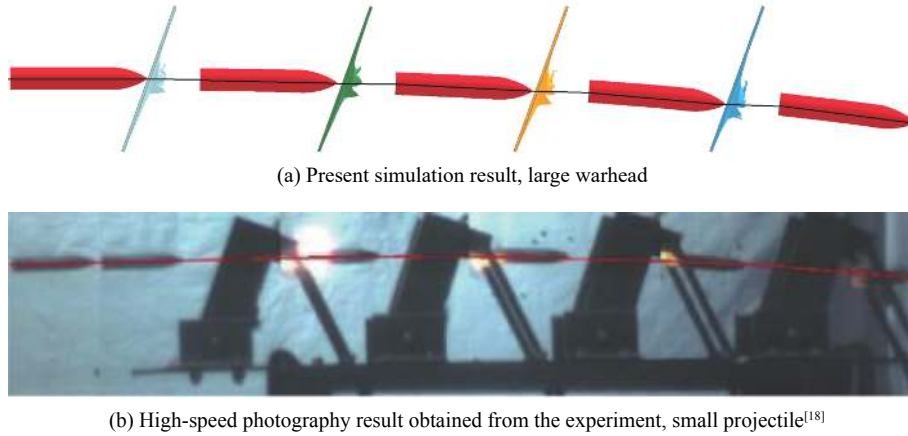


图 3 弹体非正侵彻多层间隔钢靶的弹道偏转过程

Fig. 3 Trajectory deflection process during the non-normal penetration into multi-layer spaced steel target

2.1 纵向速度衰减

按弹靶相互作用关系, 弹体侵彻每层靶板的过程可分解为弹体穿靶和靶间飞行 2 个阶段。构型弹体在侵彻过程中的速度变化历程如图 4(a) 所示, 其中弹体穿过靶 1 阶段为 T1, 依此类推。从图 4(a)

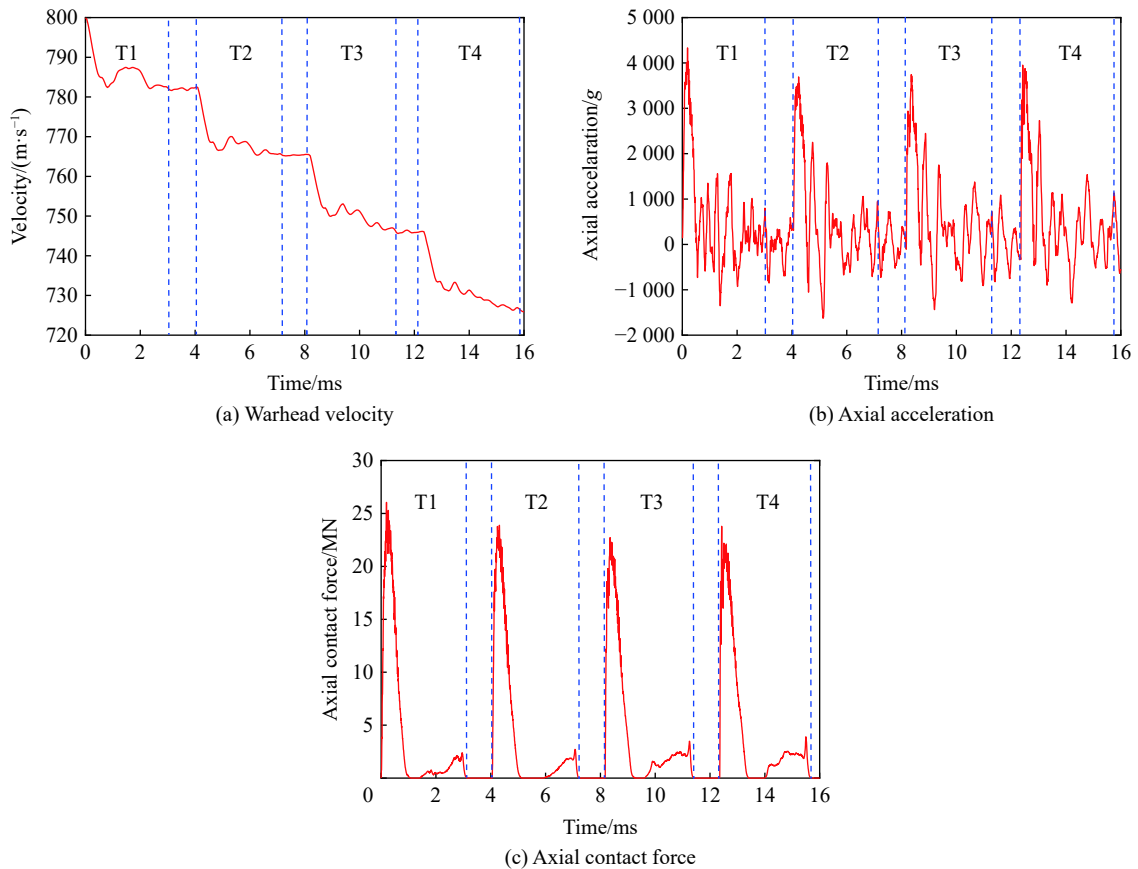


图 4 构型弹体运动和载荷参数的变化历程

Fig. 4 Variation of motion and load parameters of the warhead during penetration

中可以看出, 弹体在每个穿靶阶段速度都有所衰减, 而在靶间飞行阶段, 弹体维持穿过上一层靶板之后的速度。总体来说, 弹体穿过每层靶板后速度下降均相对较小, 穿过 4 层靶板后速度降至约 725 m/s。

构型弹体的纵向加速度和弹体所受靶板纵向接触力的变化历程分别如图 4(b) 和 (c) 所示, 相应的加速度曲线与小型弹体实验实测曲线^[20] 变化特性符合较好, 再次表明数值模拟结果可以体现弹体非正侵彻间隔钢靶的主要响应特征。由图 4(b)~(c) 可以看出, 弹体在撞击每层靶板初期, 加速度和接触力均急剧升高到较高幅值, 此时对应于弹体头部穿靶扩孔阶段, 弹头穿过靶板之后, 在弹身和弹尾穿靶过程中, 加速度和接触力幅值显著降低。此外, 弹体撞击第 1 层靶板时, 加速度和接触力幅值相对较大, 这源于高速撞击导致的高冲击力; 在撞击后续靶板过程中, 相应幅值逐渐增大, 这主要是由于弹道偏转程度逐渐增大(见图 3(a)), 使得弹靶作用面积增大, 进而导致靶板阻力升高。从图 4(c) 中还可发现, 在穿过每一层靶的过程中, 靶板作用力在弹头撞击过程中迅速升高, 而在弹身穿靶过程中迅速减小, 后期由于弹体偏转导致弹尾与靶板发生撞击, 作用力又有所增强, 但幅值显著小于弹体头部撞击期间的作用力; 弹体穿过靶板飞行过程中, 靶板作用力降为零。

2.2 侧向弹道偏转

如图 3(a) 所示, 弹体侵彻过程中在侧向上还产生弹道偏转。将弹体轴线与水平方向的夹角定义为偏转角, 则偏转角的变化量可表征弹体侧向偏转程度, 相应偏转角的变化历程如图 5 所示。可以看出, 对于每层靶板的穿靶阶段, 弹体都在撞击靶板初始时刻稍微向上偏转, 在后续穿靶过程中则持续向下偏转, 因此, 弹体在穿过每层靶板之后均向下偏转一定角度, 待穿过第 4 层靶板时共向下偏转约 7° 。

对图 5 中的偏转角求导, 可以得到弹体偏转角速度的变化历程, 如图 6 所示, 其中曲线正值对应于弹体向上偏转, 负值对应于弹体向下偏转。可以看出, 在每层靶板的穿靶阶段, 正值均发生在初期短时段内, 这对应于弹头穿靶阶段, 之后迅速下降变为负值且持续较长时间, 这对应于弹身穿靶阶段。从图 6 还可以看出, 对于所有穿靶阶段, 角速度正值曲线所形成的波峰的幅值和脉宽均远小于负值曲线所形成的波谷情形, 因此弹体穿过靶板之后总体发生向下偏转(见图 5); 随着弹体依次穿靶, 波谷幅值逐渐增大, 因此弹道偏转趋势越来越明显; 此外, 弹体在穿靶过程中甚至可能仅发生向下偏转, 如图 5~6 中穿过靶 3 时(T3)的情形所示。

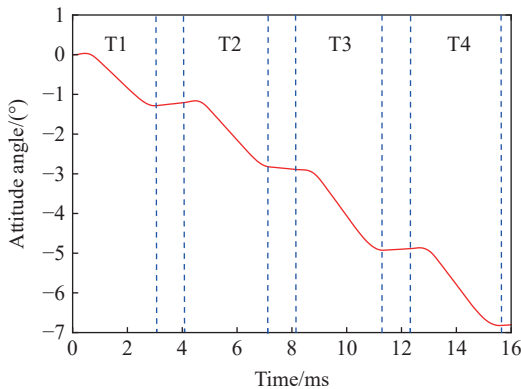


图 5 构型弹体偏转角度的变化历程

Fig. 5 Variation of attitude angle of warhead during the penetration

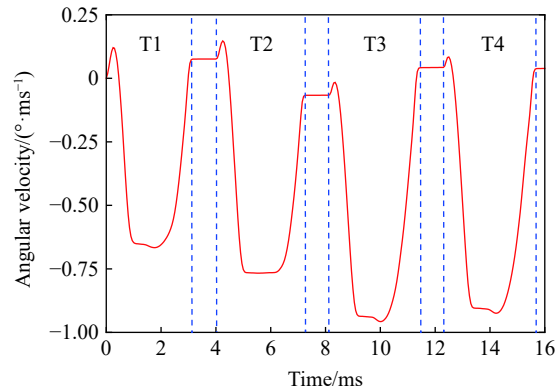


图 6 构型弹体偏转角速度的变化历程

Fig. 6 Variation of angular velocity of warhead during the penetration

同样地, 弹体侵彻过程中壳体所受的侧向接触力如图 7 所示, 其中正值表示作用力向上, 负值表示作用力向下。可以看出, 在侵彻每层靶板过程中, 侧向作用力曲线均形成 1 个正值波峰和 2 个负值波谷。以穿过靶 1 过程为例, 将波峰极值点($t=0.1$ ms)和波谷极值点($t=0.6, 3.0$ ms)所对应时刻的弹体穿靶状态列出, 如图 8 所示, 可以看出, 3 个极值点分别对应于弹头端部撞靶、弹肩穿靶末期和弹尾穿靶末期 3 个阶段。由于靶板倾斜放置, 在初始撞击时刻, 弹头端部底面最先触靶, 弹体受到向上的侧向接触力,

在靶板材料发生破坏之前($t=0.1\text{ ms}$)达到最大值;之后弹头下方的靶板材料发生花瓣形撕裂,与弹头之间的相互作用减弱,弹肩穿靶过程中,弹头主要受到上方靶板材料的挤压作用,因此侧向作用力方向一直向下,且由于弹头触靶区域逐渐变宽,作用力幅值逐渐增大,在弹肩即将完全穿过靶板时刻($t=0.6\text{ ms}$)达到最大值;在后续弹身穿靶过程中,由于靶板扩孔已相对充分,弹靶接触作用相对较小,侧向作用力又逐渐减小;后期弹尾穿靶过程中,由于弹体发生向下偏转,弹体尾部与上方靶板材料发生相互作用,受到向下的侧向作用力,且作用力幅值随弹体偏转程度的增大而升高,在弹尾即将完全穿过靶板时刻($t=3.0\text{ ms}$)达到极大值,但其幅值相对于弹肩穿靶阶段的极大值($t=0.6\text{ ms}$)明显减小。在后续弹体穿过靶 2~4 的过程中,侧向作用力均发生相似的演变特征,但由于弹体速度和弹体偏转程度的改变,使得作用力幅值存在一定差异。

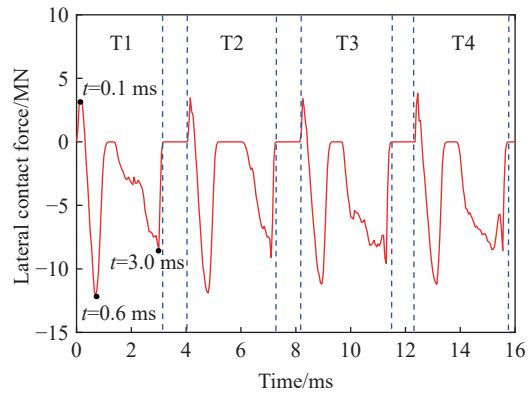


图 7 构型弹体壳体侧向接触力的变化历程
Fig. 7 Variation of lateral contact force on the warhead shell during penetration

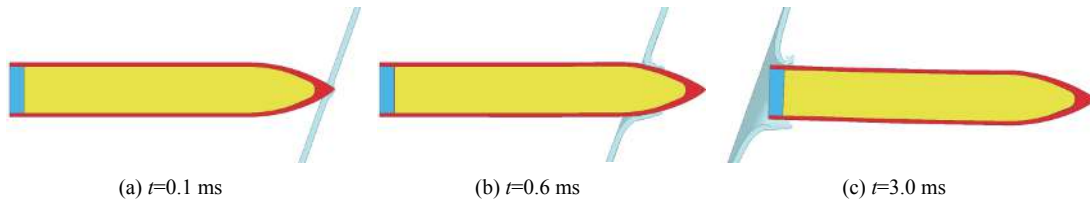


图 8 构型弹体侵彻靶 1 过程中不同时刻的弹靶作用状态

Fig. 8 Interaction condition between warhead and target at different moments during the penetration process into the first target plate

结合图 7~8 可知,在极值点 $t=0.6\text{ ms}$ 和 $t=3.0\text{ ms}$ 时刻,尽管侧向作用力的方向均向下,但由于作用位置不同,导致弹体偏转方向正好相反,其中 $t=0.6\text{ ms}$ 时弹体将向下偏转(图 8(b)),而 $t=3.0\text{ ms}$ 时弹体将向上偏转(图 8(c))。这是由于侧向作用力的效果还与其作用位置相关,其综合作用通过侧向偏转力矩来体现。侧向偏转力矩可通过壳体所受的侧向接触力(见图 7)乘以其作用点与弹体质心之间的位移求得,其中侧向力作用点与弹体质心之间的位移示意图如图 9 所示。计算得到的弹体侧向偏转力矩的变化历程如图 10 所示,其中曲线正值对应于逆时针偏转力矩,使得弹体产生向上偏转的趋势;负值对应于顺时针偏转力矩,使得弹体产生向下偏转的趋势。从图 10 中可以看出,在侵彻每层靶板过程中,力矩曲线均形成 2 个波峰和 1 个波谷,图中 0.1、0.6 和 3.0 ms 时刻分别对应于图 8 中弹头端部触靶、弹肩穿靶和弹尾穿靶 3 个阶段。

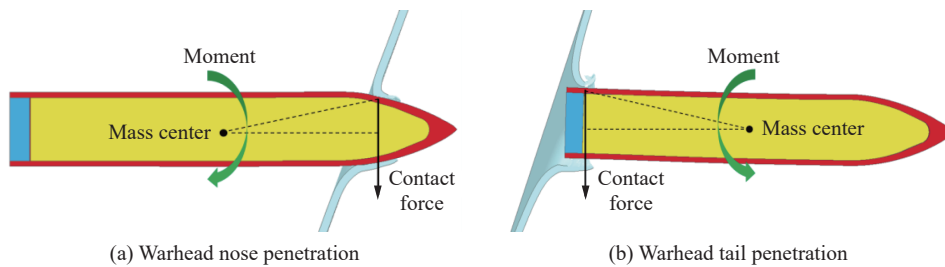


图 9 弹体侧向接触力作用点与弹体质心之间的位移示意图

Fig. 9 Schematic diagram of displacement between the load position of lateral contact force and the warhead centroid

结合图 7~10 可知, 弹头端部触靶时, 弹体所受的侧向接触力方向向上, 且载荷作用点位于质心之前, 相应力矩为逆时针方向, 导致弹体向上偏转; 在弹肩穿靶过程中, 弹体所受的侧向接触力向下, 载荷作用点也位于质心之前, 相应力矩为顺时针方向, 导致弹体向下偏转; 而在弹体尾部穿靶过程中, 侧向接触力方向也向下, 但其作用点位于弹体质心之后, 因而相应力矩为逆时针方向, 导致弹体向上偏转。因此, 弹体在侵彻每层靶板过程中, 仅在弹肩穿靶阶段产生向下偏转的趋势, 在弹头端部触靶和弹尾穿靶过程中, 弹体均发生向上偏转, 但是由于顺时针方向力矩幅值显著大于逆时针方向力矩(见图 10), 因此弹体穿过靶板之后, 总体呈现出向下偏转的弹道特征。随着弹体依次撞击靶板, 弹体偏转效应逐渐累积, 偏转程度逐渐增大。

通过以上分析可知, 构型弹体在非正侵彻多层间隔钢靶过程中, 在纵向上发生阶梯式速度衰减, 这主要源于靶板所施加的纵向阻力; 同时, 在侧向上产生显著的弹道偏转, 主要体现在弹体偏转角的变化, 偏转机制则主要源于弹体所受侧向接触力及其导致的偏转力矩作用, 随着弹体依次撞击靶板, 弹体偏转呈现逐渐累积的特征。

3 撞击姿态对弹道特性的影响

由第 2 节中的分析可知, 构型弹体在非正侵彻多层间隔钢靶的过程中, 在纵向发生阶梯式速度衰减, 而在侧向产生弹道偏转。以下将从侧向接触力和侧向偏转力矩等方面具体讨论撞击着角和攻角对弹道偏转特性的影响规律。

3.1 撞击着角的影响

工况 1~3($\alpha=10^\circ\sim 30^\circ$, $\beta=0^\circ$)中, 不同撞击着角条件下弹体偏转角度的变化历程如图 11 所示, 可以看出, 弹体均向下偏转, 且着角越大, 弹体偏转程度越大, 在 $\alpha=30^\circ$ 条件下, 弹体最终向下偏转约 10° 。类似地, 3 种工况下弹体的侧向接触力和侧向偏转力矩的变化历程如图 12 所示。从图 12 可以看出, 弹体侵彻每层靶过程中, 侧向接触力和偏转力矩的幅值均随 α 增大而有所增加, 表明弹靶之间的相互作用逐渐增强; 此外, 随着 α 增大, 弹身穿靶阶段接触力取为非零值的时长逐渐增加, 说明弹身与靶板之间的接触时间有所延长, 但作用载荷显著弱于弹头和弹尾触靶时的情形; 特别地, 侧向偏转力矩波谷幅值的增加量明显高于 2 个波峰幅值的增加量(图 12(b)), 因此导致弹体向下偏转程度逐渐增大(图 11)。

通过 2.2 节的分析可知, 弹体向下偏转的趋势主要源于弹肩穿靶过程中所受的向下的侧向接触力及相应的偏转力矩, 以下将重点分析该侵彻阶段侧向接触力的变化特征。对于特定的撞击着角 α , 弹肩穿靶阶段的弹体速度及其分解速度方向如图 13 所示, 即弹体速度 v 可分解为垂

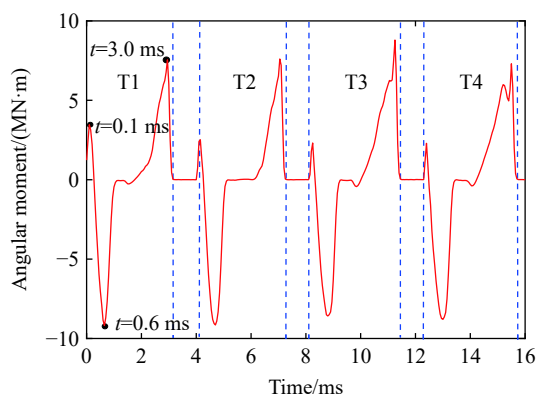


图 10 构型弹体壳体侧向偏转力矩的变化历程

Fig. 10 Variation of angular moment on the warhead shell during penetration

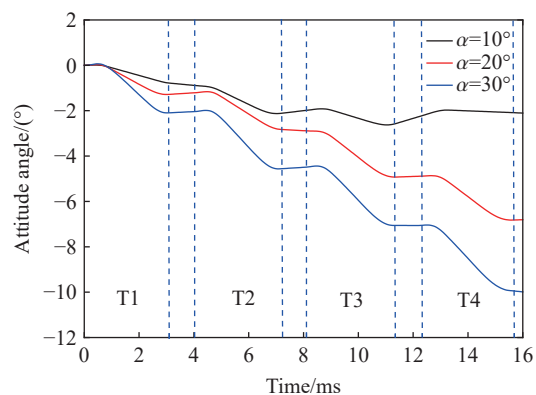


图 11 不同撞击着角条件下构型弹体偏转角度的变化历程

Fig. 11 Variation of attitude angle of warhead during penetration under different oblique angles

直于靶板的速度分量 v_{\perp} 和平行于靶板的速度分量 v_{\parallel} [35]。可以看出, 此时 v_{\perp} 方向向下而 v_{\parallel} 方向向上。以弹肩即将穿过靶 1 时刻为例, 数值模拟结果显示, 3 种着角条件下弹体速率均下降至约 783 m/s (见图 4(a)), 可计算得到不同着角条件下的速度分量 v_{\perp} 和 v_{\parallel} , 如表 3 所示, 由表 3 可以看出, 随着撞击着角 α 增大, v_{\perp} 幅值逐渐减小, 因此弹体下侧所受的作用力也减小; 相对应地, v_{\parallel} 幅值则逐渐增大, 进而导致弹体上侧所受的作用力增大。两侧作用力叠加导致弹体所受的向下的接触合力随撞击着角增大而显著增大, 相应地, 弹体向下偏转的程度逐渐增大。

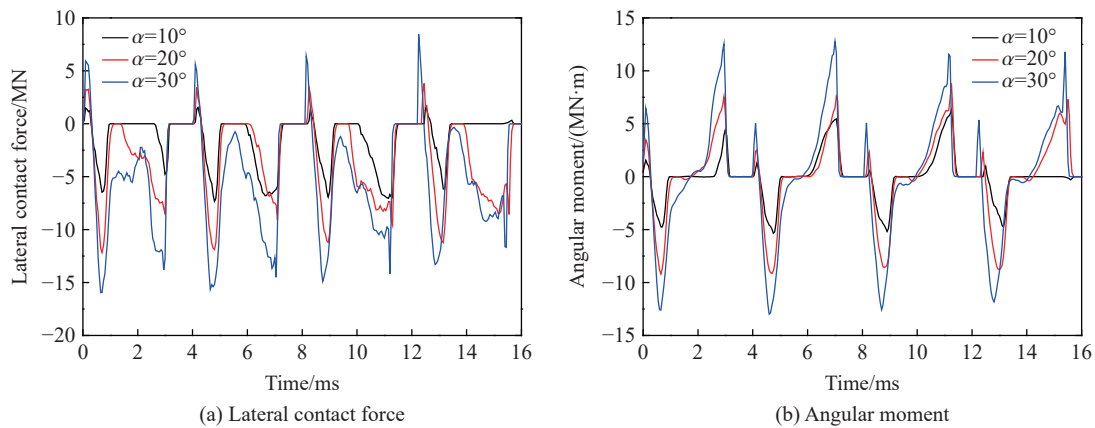


图 12 不同撞击着角条件下构型弹体侧向接触力和侧向偏转力矩变化历程

Fig. 12 Variations of lateral contact force and the corresponding angular moment on the warhead during the penetration under different oblique angles

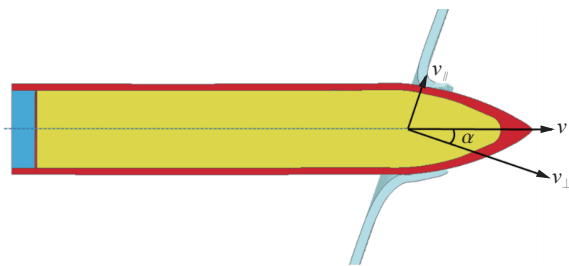


图 13 斜侵彻靶板时的弹体速度分解示意图

Fig. 13 Schematic diagram of warhead velocity decomposition during the penetration process

表 3 不同撞击着角条件下弹肩即将穿过靶 1 时刻弹体的速度分量大小

Table 3 Velocity component values at the moment when the warhead nose passes through the first target plate under different oblique angles

着角/(°)	$v_{\perp}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_{\parallel}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
10	771.1	136.0
20	735.8	267.8
30	678.1	391.5

另外, 弹体在侵彻每层靶板过程中, 侧向作用力均呈现同样的变化规律(见图 12), 导致弹体的偏转角度逐渐累积放大, 因此, 不同着角条件下, 弹体侵彻多层间隔靶板后, 其弹道偏转程度的差异越来越大(见图 11)。

3.2 撞击攻角的影响

不同撞击攻角条件下(工况 4~12, $\alpha=20^\circ$, $\beta=-4^\circ\sim 4^\circ$), 弹体完全穿过 4 层靶板时刻的最终偏转角取值如图 14 所示。从图 14 可以看出, 对于各种攻角条件, 弹体均向下偏转, 偏转角处于 $7^\circ\sim 18^\circ$ 范围内。然而, 随着初始攻角从负值(弹体低头)向正值(弹体抬头)变化, 弹体偏转角度并不呈现单调变化特征, 而是存在变化趋势发生转变的临界攻角, 且其取值并非为零, 从图 14 可推知, 临界攻角约为 1° 。

具体分析不同攻角条件下弹体偏转角变化历程。攻角 β 为 0° 、 1° 和 2° 时弹体偏转角的变化曲线如图 15 所示。可以看出, 3 条曲线在弹体穿过靶 1 后($t=3.2\text{ ms}$)发生交叉, 在此之前, β 取值越大, 弹体向下偏转程度越小, 之后偏转特征则正好相反。

3 种攻角条件下, 穿靶过程中弹体所受的侧向接触力和偏转力矩的变化历程如图 16 所示。从图 16(a) 可以看出, 弹体头部穿过靶 1 时所受的侧向接触力差别较小, 而弹体尾部穿过靶 1 时则存在明显

差异: $\beta=0^\circ$ 时, 弹体所受接触力方向向下; $\beta=1^\circ$ 时, 接触力基本为零; $\beta=2^\circ$ 时, 接触力方向向上。此外, 3 种攻角条件下, 弹尾穿过靶 2~4 时弹体所受的侧向接触力方向均向下, 这是由于弹体穿过靶后均向下偏转, 且在后续穿靶过程中均逐渐进一步向下偏转(见图 15), 因此弹体撞击靶 2~4 的过程相当于以负攻角姿态撞击, 弹尾穿靶阶段均为上侧触靶, 但由于弹体穿过靶 1 之后偏转程度的差异, 在后续弹头穿靶和弹尾穿靶期间的接触力幅值均有所差别, 且随着弹体依次穿靶, 差异逐渐增大。相应地, 弹尾穿靶阶段所受的侧向接触力方向的不同导致了侧向偏转力矩的差异, 如图 16(b) 所示。可知弹尾穿过靶 1 时, $\beta=0^\circ$ 时, 弹体所受力矩为逆时针方向; $\beta=1^\circ$ 时, 力矩基本为零; $\beta=2^\circ$ 时, 力矩则为顺时针方向。而在后续弹尾穿过靶 2~4 时, 偏转力矩均为逆时针方向, 且幅值也存在差异。由此可知, 不同攻角条件下, 弹体最终偏转情况的差异主要源于穿过第 1 层靶板阶段弹尾所受的侧向接触力及其偏转力矩方向的不同。

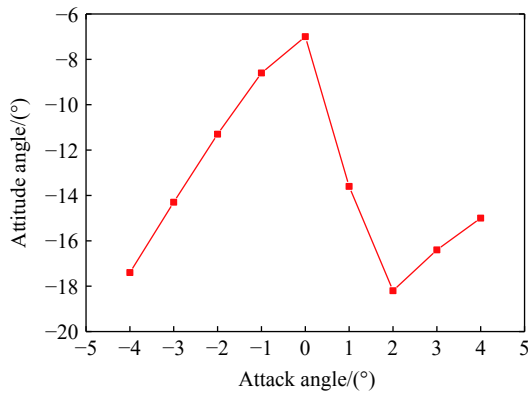


图 14 不同撞击攻角条件下构型弹体最终偏转角度

Fig. 14 Final attitude angle values of the warhead under different oblique angles

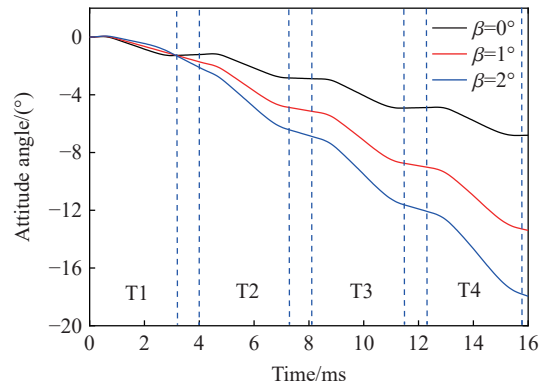
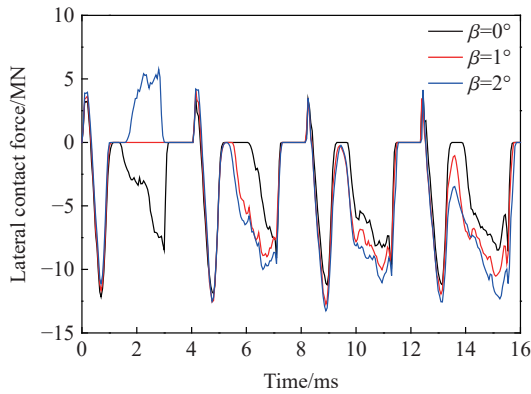
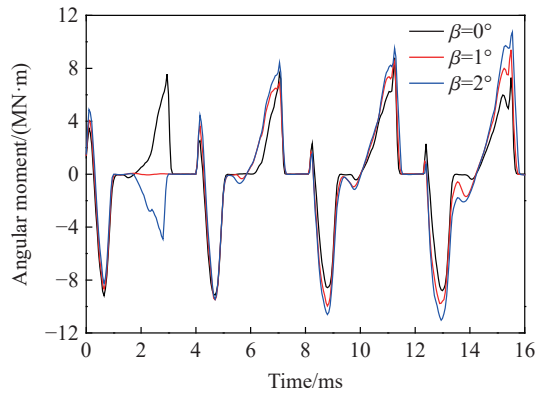


图 15 不同撞击攻角条件下构型弹体偏转角的变化历程

Fig. 15 Variation of attitude angle of warhead during the penetration under different attacking angles



(a) Lateral contact force



(b) Angular moment

图 16 不同撞击攻角条件下构型弹体所受侧向接触力及其偏转力矩的变化历程

Fig. 16 Variations of lateral contact force and the corresponding angular moment on the warhead during the penetration under different attacking angles

具体分析 3 种攻角条件下的弹靶相互作用状态。弹尾穿过靶 1 时的弹靶状态如图 17 所示, 结合图 16 的偏转力矩变化历程可以看出, $\beta=0^\circ$ 时, 弹尾上侧触靶, 所受的侧向接触力方向向下, 形成绕质心的逆时针偏转力矩; $\beta=1^\circ$ 时, 弹体上下侧均未触靶, 相应的侧向接触力及其力矩均为零; $\beta=2^\circ$ 时, 弹尾下侧触靶, 所受的侧向接触力方向向上, 形成绕质心的顺时针偏转力矩。在弹体侵彻后续靶板过程中, 弹尾穿靶阶段均为弹尾上侧触靶, 其中穿过靶 2 的弹靶相互作用状态如图 18 所示, 此时弹体所受的侧向作用力方向均向下, 仅由于靶板破坏形貌的差异导致作用力大小存在差别(见图 16)。因此可知, 初始攻角主要影响弹尾穿过靶 1 时与靶板发生接触和相互作用的位置, 进而影响侧向接触力及其偏转力矩的方向; 接触力

及其力矩影响弹体穿过靶板时的偏转角度, 偏转角度又反过来影响弹体侵彻后续靶板时的接触位置, 二者相互耦合并交叉影响, 导致弹体依次穿靶过程中的弹道偏转效应逐渐累积, 这也是弹体非正侵彻多层间隔靶板与侵彻单层靶板之间弹道特性的最大差别。

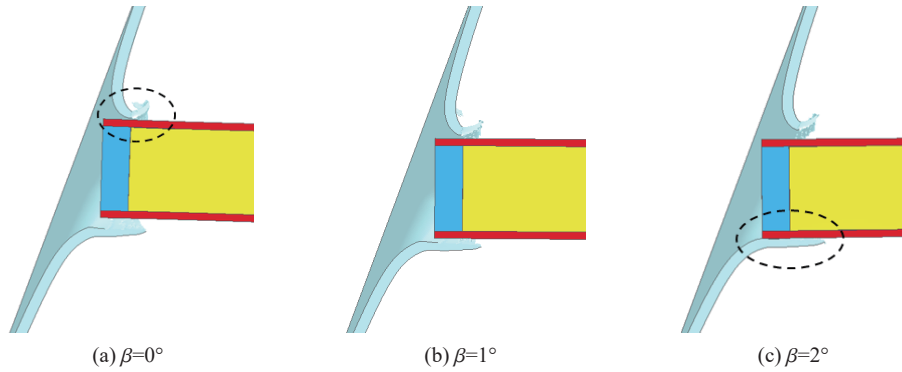


图 17 不同撞击攻角条件下构型弹体侵彻靶 1 时弹尾与靶板相互作用状态的对比

Fig. 17 Comparison of the interaction condition between warhead tail and target during penetration process into the first target plate under different attacking angles

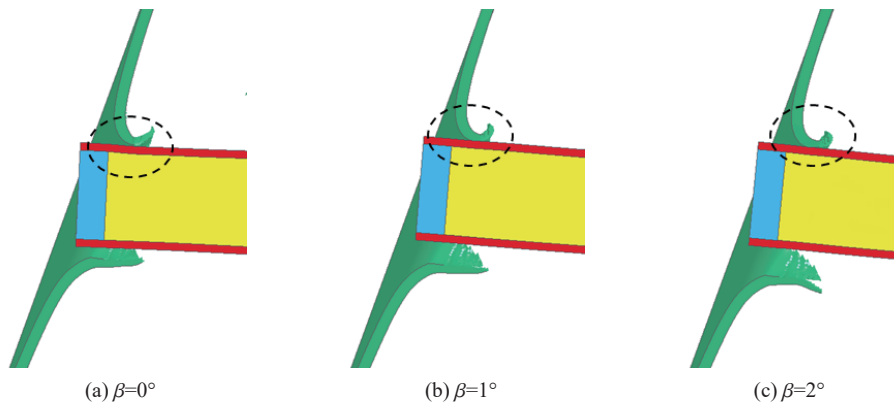


图 18 不同撞击攻角条件下构型弹体侵彻靶 2 时弹尾与靶板相互作用状态的对比

Fig. 18 Comparison of the interaction condition between warhead tail and target during penetration process into the second target plate under different attacking angles

进一步分析更大攻角条件下构型弹体的偏转情况, 相应偏转角的变化历程如图 19 所示, 可以看出, 初始攻角越大(抬头越高), 弹体向下偏转的程度越小。3 种攻角条件下, 弹体所受的侧向接触力和偏转力矩的变化历程如图 20 所示, 可以看出, 相关参量的演变特性相似, 但随着攻角增大, 在弹肩穿靶阶段弹体所受的侧向接触力及其偏转力矩均有所减小; 在弹身穿过靶 1 阶段, 与靶板接触的时长则有所增加, 且接触力幅值有所增强; 在弹尾穿靶阶段, 侧向接触力及其偏转力矩也有所增大。在 3 个穿靶阶段的侧向接触力及其偏转力矩综合作用下, 弹体偏转程度有所降低(见 图 19)。

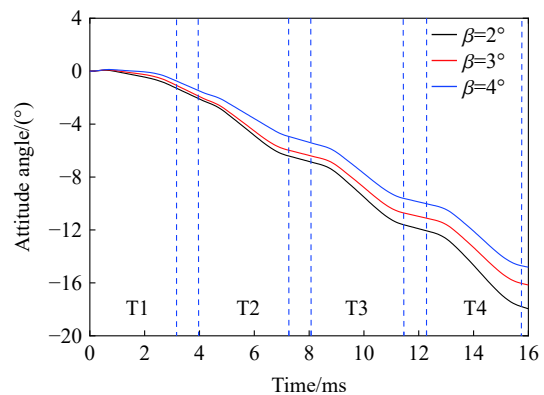


图 19 正攻角条件下构型弹体偏转角的变化历程

Fig. 19 Variation of attitude angle of warhead during the penetration under positive attacking angles

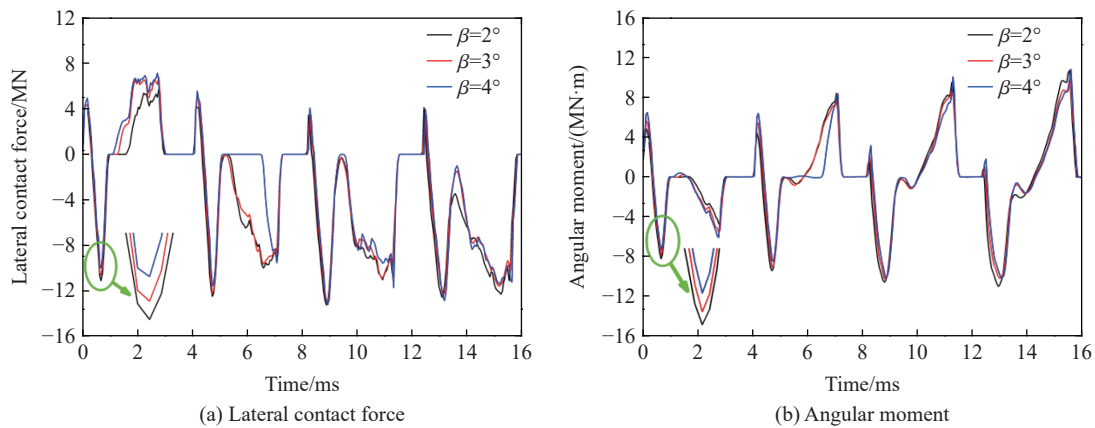


图 20 正攻角条件下构型弹体所受侧向接触力及其偏转力矩的变化历程

Fig. 20 Variations of lateral contact force and the corresponding angular moment on the warhead during the penetration under positive attacking angles

如前所述, 弹肩穿靶阶段, 弹体所受的接触力为其向下偏转的主要原因, 与图 13 情形类似, 再以弹体侵彻靶 1 情形具体分析侧向接触力的变化特征。对于特定着角 α 和正攻角 β , 弹肩穿靶阶段的弹体速度及其分解速度方向如图 21 所示, 弹体速度 v 沿水平方向, 可将其分解为沿弹轴的速度分量 v_x 和垂直于弹轴的径向速度分量 v_r , v_x 与 v 之间的夹角等于攻角 β , v 与靶板法线之间的夹角为着角 α 。

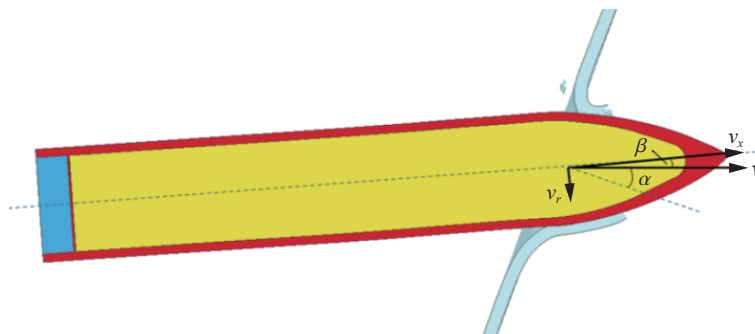


图 21 正攻角条件下弹肩穿靶阶段速度分解示意图

Fig. 21 Schematic diagram of warhead velocity decomposition during penetration process of warhead nose under a positive attacking angle

弹肩穿过靶 1 时的弹体速度 v 约为 783 m/s, 此时不同攻角条件下的 v_x 和 v_r 取值如表 4 所示, 可见 v_r 取值之间的差异远大于 v_x 情形, 可将 v_x 近似视为相同取值。 v_x 与弹轴方向一致而与靶板法线不一致, 相关效应类似于 3.1 节中的着角影响, 因此, 撞击攻角的影响可分解为沿弹体轴向的着角影响和垂直于弹体轴向的速度影响两方面。对于沿弹体轴向的着角影响, 着角之间的最大差值仅为 2° , 其所导致的作用力差异较小, 可忽略 v_x 的影响, 即撞击攻角的影响主要由 v_r 决定。正撞击攻角时, v_r 方向向下且随着初始攻角的增大而增大, 即弹体下侧受到的向上的侧向接触力逐渐增大, 因此弹体所受的向下的合力减小, 进而导致弹体偏转程度降低(见图 19)。

表 4 正攻角条件下弹肩穿靶阶段弹体的速度分量
Table 4 Velocity component values at the moment when the warhead nose passes through the target plate under positive attacking angles

攻角/ $^\circ$	$v_x/(m \cdot s^{-1})$	$v_r/(m \cdot s^{-1})$
2	782.5	27.3
3	781.9	41.0
4	781.1	54.6

弹体在侵彻每层靶板过程中的侧向作用力也呈现相同的变化规律(见图 20), 导致不同攻角条件下

弹体侵彻多层靶板之后的弹道偏转程度的差异逐渐越大(见图 19), 即弹体偏转也呈现累积特征。

针对负攻角和零攻角条件下构型弹体的偏转情况, 相应的偏转角、弹体的侧向接触力和偏转力矩等参量的变化历程如图 22~23 所示。可以看出, 初始攻角的绝对值越大(低头越严重), 弹体向下偏转程度越大; 同时, 5 种工况下的参量演变特性也相似, 但随着攻角绝对值增大, 在弹肩穿靶阶段弹体所受的侧向接触力及其偏转力矩均有所增大; 在弹身穿靶阶段, 与靶板接触的时长有所增加, 接触力幅值也有所增强, 但总体相对较小; 在弹尾穿靶阶段, 侧向接触力及其偏转力矩也有所增大, 其变化量与弹肩穿靶阶段情形相近。最终在 3 个穿靶阶段的侧向接触力及其偏转力矩的综合作用下, 弹体偏转程度逐渐增大(见图 22)。

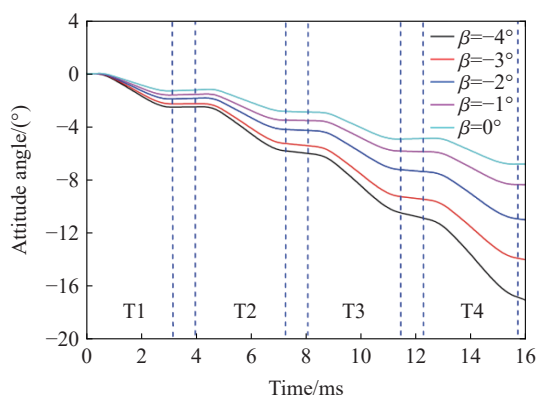


图 22 负攻角和零攻角条件下构型弹体偏转角的变化历程
Fig. 22 Variation of attitude angle of warhead during penetration under negative attacking angles and with no attacking angle

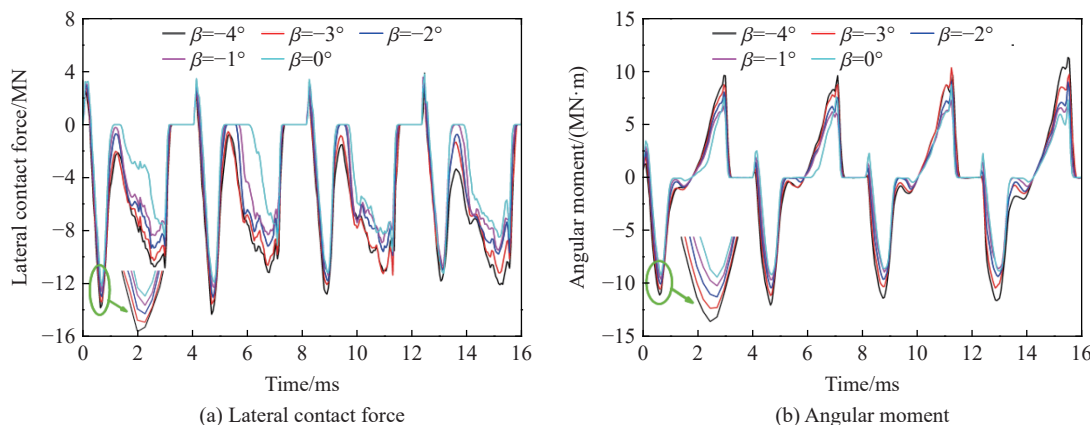


图 23 负攻角和零攻角条件下构型弹体所受侧向接触力及其偏转力矩的变化历程

Fig. 23 Variations of lateral contact force and the corresponding angular moment on the warhead during the penetration under negative attacking angles and with no attacking angle

针对负攻角条件下的弹体速度分解特征, 对于特定着角 α 和负攻角 β , 弹肩穿靶阶段的弹体速度及其分解速度方向如图 24 所示, 弹肩穿过靶 1 时的弹体速度分量 v_x 和 v_r 的取值如表 5 所示。从图 24 可以看出, 负攻角条件下, v_r 方向向上且随着初始攻角绝对值的增大而增大, 因此弹体上侧受到的向下的侧向接触力逐渐增大, 进而导致所受的向下的合力增大(见图 23), 最终弹体的偏转程度增大(见图 22)。此外, 随着弹体依次侵彻每层靶板, 弹道偏转也呈现逐渐累积特征。

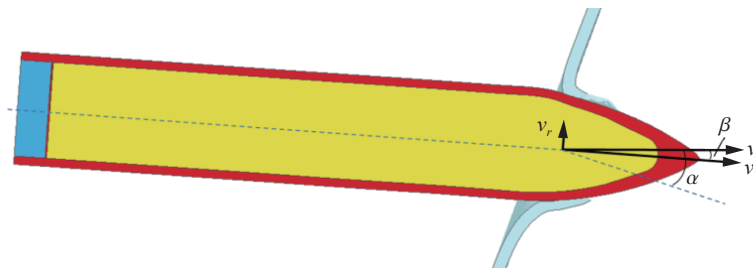


图 24 负攻角条件下弹肩穿靶阶段速度分解示意图

Fig. 24 Schematic diagram of warhead velocity decomposition during penetration process of warhead nose under a negative attacking angle

表 5 负攻角和零攻角条件下弹肩穿靶阶段弹体速度分量

Table 5 Velocity component values at the moment when the warhead nose passes through the target plate under negative attacking angles and with no attacking angle

攻角/(°)	$v_x/(m \cdot s^{-1})$	$v_y/(m \cdot s^{-1})$
-4	781.1	54.6
-3	781.9	41.0
-2	782.5	27.3
-1	782.9	13.7
0	783.0	0

由本节分析可知, 撞击攻角对构型弹体弹道偏转的影响较复杂, 既影响到弹肩穿靶阶段弹体径向速度分量的方向和大小, 也影响到弹尾穿靶阶段弹靶之间的接触位置和弹体所受的侧向接触力的方向和大小。随着弹体依次侵彻后续靶板, 弹体偏转产生累积效应, 且累积偏转角反过来又影响到后续穿靶过程中弹体的侧向接触力, 二者之间相互耦合作用, 其综合效应影响最终的弹道偏转特征。

4 结 论

针对战斗部构型弹体非正侵彻多层间隔钢靶开展了数值模拟分析, 深入研究了相关弹道特性, 基于侧向接触力和侧向偏转力矩等内变量的演变特征, 系统分析了弹道偏转的物理过程, 详细讨论了撞击着角和攻角对弹道特性的影响规律, 得到如下主要结论。

(1) 构型弹体在非正侵彻多层间隔钢靶的过程中, 在纵向上发生阶梯式速度衰减, 最终穿靶时速度衰减约 10%; 同时在侧向上产生弹道偏转, 且随着弹体依次侵彻靶板, 弹道偏转呈现逐渐累积特征。

(2) 构型弹体非正侵彻每层靶板过程中, 所受的侧向接触力及其偏转力矩呈现相同的变化规律。侧向接触力作用的主要阶段为弹头端部触靶、弹肩穿靶和弹尾穿靶 3 个阶段, 其中弹头端部触靶和弹尾穿靶 2 个阶段的偏转力矩导致弹体向上偏转, 而弹肩穿靶过程中的力矩导致弹体向下偏转, 在三者的综合效应下, 弹体穿靶之后总体呈现向下偏转的弹道特征。

(3) 随撞击着角增大, 弹体所受的向下的侧向接触力及其偏转力矩显著增大, 进而导致弹体向下偏转程度逐渐增大, 在 30°着角条件下, 弹体穿过 4 层靶板后, 最终偏转角可达 10°。

(4) 撞击攻角的影响规律较复杂。首先, 不同攻角条件下, 弹尾穿过第 1 层靶时所受的侧向接触力及其偏转力矩方向存在差异, 进而导致存在一个弹道偏转规律发生转折的临界攻角, 其取值约为 1°; 再者, 攻角还影响到弹肩穿靶阶段中弹体径向速度的方向和大小, 正攻角撞击时, 弹体所受的向下的侧向合接触力随初始攻角增大而减小, 而负攻角撞击时, 向下的侧向合接触力随初始攻角绝对值增大而逐渐增大, 在 $\beta = -4^\circ$ 和 2° 攻角条件下, 弹体偏转角相对较大, 约为 18°。

(5) 随着弹体依次非正侵彻多层间隔靶板, 弹体偏转将产生累积效应, 且累积偏转角又反过来影响到后续穿靶过程的侧向接触力, 二者之间相互耦合作用, 其综合效应决定弹道具体偏转特征。

值得注意的是, 本文中分析以及总结的相关规律限于所研究的弹靶构型及对应的撞击速度。尽管相应侵彻工况可作为实际工程应用中常见情形的典型代表, 从系统性总结参数影响规律方面而言, 当撞击速度、靶板厚度等弹靶参量发生显著变化时, 相应的弹道特征以及撞击姿态的影响规律等将可能出现差异, 有必要在后续研究中开展更全面和深入的分析。

参考文献:

- [1] 徐峰, 周心桃, 李德聪, 等. 国外典型航母目标特性探析 [J]. 舰船科学技术, 2018, 40(9): 151-157. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2018.09.030.
XU F, ZHOU X T, LI D C, et al. Analysis of the target characteristics of foreign typical aircraft carrier [J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(9): 151-157. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2018.09.030.

- [2] GOLDSMITH W. Review non-ideal projectile impact on targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1999, 22: 95–395. DOI: 10.1016/S0734-743X(98)00031-1.
- [3] ANDERSON J C. Analytical models for penetration mechanics: a review [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 108: 3–26. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.03.018.
- [4] 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): 063302. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0411.
- DUAN Z P, LI S R, MA Z F, et al. Analytical model for attitude deflection of rigid projectile during oblique perforation of concrete targets [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(6): 063302. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0411.
- [5] WU H, PENG Y, KONG X Z. Notes on projectile impact analyses [M]. Singapore: Springer Press, 2020. DOI: 10.1007/978-981-13-3253-1.
- [6] 陈小伟. 穿甲/侵彻力学的理论建模与分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [7] 刘泓甫, 黄风雷, 白志玲, 等. 刚性弹体带攻角斜侵彻贯穿混凝土靶板的理论模型研究 [J]. *兵工学报*, 2023, 44(8): 2381–2390. DOI: 10.12382/bgxb.2022.0423.
- LIU H F, HUANG F L, BAI Z L, et al. Analytical model research on penetration of rigid projectile into concrete target with oblique and attacking angle [J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(8): 2381–2390. DOI: 10.12382/bgxb.2022.0423.
- [8] 董永香, 冯顺山, 段相杰. 弹丸斜侵彻多层金属间隔靶特性研究 [J]. *中北大学学报 (自然科学版)*, 2010, 31(3): 221–226. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3193.2010.03.004.
- DONG Y X, FENG S S, DUAN X J. Oblique penetration characteristics of multi-layered spaced targets by steel projectiles [J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2010, 31(3): 221–226. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3193.2010.03.004.
- [9] 王金涛, 余文力, 王涛, 等. SPH 算法在长杆弹侵彻多层间隔靶中的应用 [J]. *爆炸与冲击*, 2011, 31(5): 533–539. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)05-0533-07.
- WANG J T, YU W L, WANG T, et al. Smoothed particle hydrodynamics algorithm applied in numerical simulation of layered metal targets impacted by long-rod projectile [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(5): 533–539. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)05-0533-07.
- [10] 黄岐, 周彤, 白洋, 等. 弹丸变攻角侵彻间隔靶弹道极限研究 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(S2): 251–257.
- HUANG Q, ZHOU T, BAI Y, et al. Ballistic performance of projectile penetrating large-spaced multi-layer plates at variable angle-of-attack [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(S2): 251–257.
- [11] IQBAL M, 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.
- [12] 程伟, 熊国松, 李伟兵, 等. 俯仰角速度对弹丸侵彻多层靶弹道影响 [J]. *含能材料*, 2021, 29(12): 1192–1198. DOI: 10.11943/CJEM2021033.
- CHENG W, XIONG G S, LI W B, et al. Influence of the pitch angular velocity on the ballistic trajectory of projectiles penetrating into multi-layered target [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2021, 29(12): 1192–1198. DOI: 10.11943/CJEM2021033.
- [13] 张立建, 郭洪卫, 吕永柱, 等. 两种侵彻载荷下装药结构动态响应特性数值模拟 [J]. *现代防御技术*, 2021, 49(5): 111–117. DOI: 10.3969/j.issn.1009-086x.2021.05.015.
- ZHANG L J, GUO H W, LV Y Z, et al. Numerical simulation of dynamic response characteristic of charge structure under two types of penetration loads [J]. *Modern Defence Technology*, 2021, 49(5): 111–117. DOI: 10.3969/j.issn.1009-086x.2021.05.015.
- [14] 成丽蓉, 汪德武, 贺元吉, 等. 弹体斜侵彻多层间隔混凝土薄靶姿态偏转机理研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2022, 42(10): 1009–1016. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2021.299.
- CHENG L R, WANG D W, HE Y J, et al. Effect of projectile oblique penetrating into multi-layered thin concrete slabs on attitude deflection [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2022, 42(10): 1009–1016. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2021.299.
- [15] 马兆芳, 段卓平, 欧卓成, 等. 弹体斜侵彻多层间隔混凝土靶实验和数值模拟 [J]. *北京理工大学学报*, 2016, 36(10): 1001–1005. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2016.10.003.

- MA Z F, DUAN Z P, OU Z C, et al. Experimental and simulative research on projectile oblique penetration into concrete targets with multi-layered space structure [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2016, 36(10): 1001–1005. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2016.10.003.
- [16] 吴普磊, 李鹏飞, 董平, 等. 攻角对弹体斜侵彻多层混凝土靶弹道偏转影响的数值模拟及试验验证 [J]. *火炸药学报*, 2018, 41(2): 202–207. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2018.02.017.
- WU P L, LI P F, DONG P, et al. Numerical simulation and experimental verification on the influence of angle of attack on ballistic deflection of oblique penetrating multi-layer concrete targets for projectile [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2018, 41(2): 202–207. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2018.02.017.
- [17] 李鹏飞, 吕永柱, 周涛, 等. 弹头形状对侵彻多层靶弹道的影响 [J]. *含能材料*, 2021, 29(2): 124–131. DOI: 10.11943/CJEM2020291.
- LI P F, LV Y Z, ZHOU T, et al. Influence of warhead shape on the trajectory of penetrating multilayer target [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2021, 29(2): 124–131. DOI: 10.11943/CJEM2020291.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] HANG Y, SHANG F, GAO S, et al. A miniature and low-power-consumption stress measurement system for embedded explosive in multilayer target penetration [J]. *Shock and Vibration*, 2020: 5294607. DOI: 10.1155/2020/5294607.
- [21] 张萌昭, 周涛, 郭洪福, 等. 侵彻多层间隔靶板装药损伤特性研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42(12): 92–97. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2021.12.013.
- ZHANG M Z, ZHOU T, GUO H F, et al. Experimental study of charge damage in multi-layer target penetration process [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(12): 92–97. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2021.12.013.
- [22] Jane's IHS Markit. BLU-109/B penetrator [J]. *Jane's Air-Launched Weapons*, 2019.
- [23] 邓佳杰, 张先锋, 陈东东, 等. 串联随进弹侵彻预开孔靶弹道轨迹的数值模拟 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(5): 808–816. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.05.006.
- DENG J J, ZHANG X F, CHEN D D, et al. Numerical simulation of the trajectory of travelling projectile penetrating into pre-drilled target [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(5): 808–816. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.05.006.
- [24] 张斌, 李继承, 陈建良, 等. 构型弹体跌落冲击载荷及结构响应特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(3): 033201. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0098.
- ZHANG B, LI J C, CHEN J L, et al. Loading characteristics and structural response of warhead during the drop impact [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(3): 033201. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0098.
- [25] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperature [C] // *Proceedings of the Seventh International Symposium of Ballistics*. Hague, Netherlands: International Ballistics Committee, 1983: 541–547.
- [26] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31–48. DOI: 10.1016/0013-7944(85)90052-9.
- [27] 王礼立, 胡时胜, 杨黎明, 等. 材料动力学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2017.
- [28] 田杰, 胡时胜. G50 钢动态力学性能的实验研究 [J]. *工程力学*, 2006, 23(6): 107–109. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2006.06.019.
- TIAN J, HU S S. Research of dynamic mechanical behaviors of G50 steel [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(6): 107–109. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2006.06.019.
- [29] 陈刚, 陈忠富, 陶俊林, 等. TC4 动态力学性能研究 [J]. *实验力学*, 2005, 20(4): 605–609. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4888.2005.04.019.

- CHEN G, CHEN Z F, TAO J L, et al. Study on plastic constitutive relationship parameters of TC4 titanium [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2005, 20(4): 605–609. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4888.2005.04.019.
- [30] MEYER JR H W, KLEPONIS D S. Modeling the high strain rate behavior of titanium undergoing ballistic impact and penetration [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 26: 509–521. DOI: 10.1016/S0734-743X(01)00107-5.
- [31] 李继承, 陈小伟, 陈刚. 921A 钢纯剪切帽状试件在 SHPB 试验中的动态变形 [J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(3): 239–246. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)03-0239-08.
- LI J C, CHEN X W, CHEN G. Dynamic deformations of 921A steel pure shear hat-shaped specimen in SHPB tests [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(3): 239–246. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)03-0239-08.
- [32] 李继承, 陈小伟, 陈刚. 921A 钢纯剪切帽状试件绝热剪切变形的数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(4): 361–369. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)04-0361-09.
- LI J C, CHEN X W, CHEN G. Numerical simulations on adiabatic shear deformations of 921A steel pure shear hat-shaped specimens [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(4): 361–369. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)04-0361-09.
- [33] 魏强, 黄西成, 陈刚, 等. 高聚物粘结炸药动态损伤破坏的数值刻画 [J]. *兵工学报*, 2019, 40(7): 1381–1389. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.07.007.
- WEI Q, HUANG X C, CHEN G, et al. Numerical characterization of dynamic damage of PBX explosive [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(7): 1381–1389. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.07.007.
- [34] 胡偲, 吴艳青, 黄风雷. 高温下带金属壳 PBX 炸药低速撞击敏感性数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(4): 041403. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0254.
- HU C, WU Y Q, HUANG F L. Numerical simulation of confined PBX charge under low velocity impact at high temperature [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(4): 041403. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0254.
- [35] 陈小伟, 李维, 宋成. 细长尖头刚性弹对金属靶板的斜侵彻/穿甲分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(5): 393–399. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)05-0393-07.
- CHEN X W, LI W, SONG C. Oblique penetration/perforation of metallic plates by rigid projectiles with slender bodies and sharp noses [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(5): 393–399. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)05-0393-07.

(责任编辑 蔡国艳)