DOI：10.11883/bzycj-2025-0129

入射角与攻角对弹体侵彻混凝土薄靶偏转特性的影响*

梁俊宣[1]，刘　闯[1]，李鹏程[2]，沈陶然[1]，张先锋[1]

（1. 南京理工大学机械工程学院，江苏 南京 210094
2. 西南科技大学土木工程与建筑学院，四川 绵阳 621000）

摘　要：为探究入射角与攻角对弹体侵彻混凝土薄靶偏转特性的影响，基于多层混凝土薄靶侵彻试验数据，通过对比弹体速度、姿态及弹道偏转等参数对数值模拟方法进行了验证。在此基础上，将弹体沿轴向分为 6 个区段，系统分析了不同入射角(5°~30°)与攻角(-6°~6°)单独及联合作用下弹体各部分的受力特征与整体的运动特性。研究结果表明：侵彻过程中弹身受力方向在不同着靶条件下保持稳定，弹头受力方向反转和弹身向前运动引起的偏转力矩方向变化共同造成了弹体的偏转；正入射角条件下弹道轨迹表现为向上偏转，若带有攻角，当负攻角小于 2°且入射角大于 20°时，弹道的偏转方向由入射角主导，其余情况则由攻角主导；同方向的入射角与攻角会使弹体的姿态角在出靶后先减小后反向增大；两者方向相反时，较小的攻角会使弹体出靶后姿态角持续增大，此时较大的入射角会使弹体在侵彻过程中经历三次偏转，攻角大于 2°则会使弹体出靶后姿态角先减小后反向增大。

关键词：弹体；混凝土靶；侵彻；偏转特性；入射角；攻角

中图分类号：O385　　**国标学科代码：**13035　　**文献标识码：**A

Influence of trajectory and pitch angle on the deflection characteristics of projectiles into thin concrete targets

LIANG Junxuan[1]，LIU Chuang[1]，LI Pengcheng[2]，SHEN Taoran[1]，ZHANG Xianfeng[1]

(*1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;*
2. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Sichuan Mianyang 621000, China)

Abstract: To investigate the influence of trajectory angle and pitch angle on the deflection characteristics of a projectile penetrating concrete thin targets, numerical simulation methods were validated by comparing parameters such as projectile velocity, attitude, and trajectory deflection with experimental data from multi-layered concrete thin-target penetration tests. This verification methodology ensured the accuracy and reliability of the numerical model for subsequent parametric studies.Based on this validation, the projectile was divided into six axial segments (the nose section comprising 2 segments and the body section divided into 4 segments) to systematically analyze the force distribution characteristics and overall motion behavior under both individual and combined effects of different trajectory angles (ranging from 5° to 30°) and pitch angles (ranging from -6° to 6°).The results show that the direction of the resultant force acting on the projectile body maintains stability across all tested impact conditions, demonstrating consistent patterns regardless of angle variations.While the reversal of the force direction on the projectile nose and the change in the deflection moment caused by the forward motion of the projectile body jointly contribute to the projectile's deflection. Under a positive trajectory angle, the trajectory exhibits an upward deflection. When a pitch angle

*收稿日期：2025-04-29；　修回日期：2025-07-08；
基金项目：国家自然科学基金(12202205, U2441209)；中央高校基本科研业务费专项资金资助(30924010901)；
第一作者：梁俊宣（2000－ ），男，硕士研究生，19834040698@163.com；
通信作者：刘闯（1990－ ），男，博士，讲师，chuang.liu@njust.edu.cn。

is introduced, the deflection direction is dominated by the trajectory angle if the negative pitch angle is less than 2° and the trajectory angle exceeds 20°; otherwise, the pitch angle determines the deflection direction. When the trajectory angle and pitch angle are in the same direction, the projectile's attitude angle first decreases after exiting the target and then reverses to increase. When they are in opposite directions, a small pitch angle causes the attitude angle to continuously increase after exiting the target, while a larger trajectory angle induces three deflection reversals during penetration. If the pitch angle exceeds 2°, the attitude angle initially decreases after exiting the target before reversing to increase.

Key words: projectile; concrete targets; penetration; deflection characteristics; trajectory angle; pitch angle

现代战争中地面多层建筑作为动能侵彻弹打击的重点目标，普遍采用单层厚度较薄的多层间隔混凝土结构形式。由于动能侵彻弹常以非正侵彻状态(即带有攻角与入射角)撞击目标[1]，导致弹体在侵彻过程中上下表面所受阻力分布不均，由此产生的偏转力矩驱动弹体轴线绕质心发生偏转，最终造成弹道的偏转[2]，严重影响弹体的结构强度[3]、装药安定性[4]以及侵彻性能[5]。因此，研究弹体非正侵彻混凝土薄靶偏转特性对优化侵彻战斗部结构设计、提升侵彻效率具有重要的工程应用价值。

近年来，国内外学者在弹体斜侵彻混凝土薄靶动态特性研究方面取得了重要进展，但相关试验数据[6-8]较为有限。李鹏程等[9]通过双层混凝土薄靶侵彻试验获得了不同工况下弹体在靶后相同位置处的偏转角，分析了攻角与入射角对弹体弹道特性的耦合影响。但受限于现有观测技术，试验主要依赖于弹体侵彻前后的宏观参数(如速度、弹体姿态等)，难以深入分析侵彻过程中的受力机理。理论模型研究方面，Chen 等[10]基于动态空腔膨胀理论[11]与冲塞破坏假设将刚性弹斜侵彻贯穿有限厚混凝土靶过程分为开坑、隧道以及剪切冲塞三个阶段，并指出在薄靶侵彻中不包括隧道阶段且弹体仅在开坑阶段发生偏转。马兆芳等[12]和 Duan 等[13]在三阶段模型[10]基础上考虑了弹体在冲塞阶段的偏转，但认为靶体对弹体的阻力仅作用在弹头部，忽略了弹身受力对弹体偏转的影响。然而从试验后回收的弹体[8]可以看出弹体在侵彻过程中弹头与弹身均受到了较大的靶体阻力。刘泓甫等[14]在 Chen 等[10]的基础上构建了刚性弹体带攻角斜侵彻贯穿混凝土靶理论模型，研究了在特定倾角下，攻角对弹体侵彻贯穿混凝土靶体姿态偏转的影响规律，但同样未考虑弹身受力的作用。李鹏程[15]结合弹靶弱分离模型[16]，综合考虑弹身受力特性以及斜贯穿过程中非对称开坑和崩落效应的影响，建立了椭圆截面弹体斜贯穿混凝土靶的弹道预测模型。数值模拟方法为深入探究侵彻机理提供了重要手段，研究者采用了多元化的评价指标体系。成丽蓉等[17]基于试验与数值模拟，从弹体整体受力角度系统阐释了斜侵彻过程中的偏转机制。吴普磊等[18]与程伟等[19]采用弹道偏移位移作为评价指标，结合数值模拟与试验揭示了攻角、着角以及俯仰角速度对弹道偏转的影响规律。冯杰[20]通过分析单位侵彻深度上弹体姿态的变化研究了弹体侵彻混凝土薄靶弹道偏转的影响因素。刘世鑫[21]、李江涛[22]、张帅[23]等以弹体偏转角为评价指标研究了攻角、入射角对弹体斜贯穿单层与多层混凝土薄靶姿态偏转的影响规律。

综上所述，当前对于弹体非正侵彻混凝土薄靶靶后姿态分析较为深入，但对侵彻过程中偏转机理的分析相对匮乏。一方面，现有研究多局限于单一参数(仅考虑入射角或攻角)的影响分析，而对两者耦合作用下的弹体偏转行为缺乏系统性研究，且普遍仅关注弹头受力而忽略弹身受力作用，难以全面反映弹体实际受力状态；另一方面，由于弹体出靶后仍存在角速度，其姿态角会持续变化，若仅通过靶后姿态角来评估偏转情况，既无法准确反映攻角对偏转的抑制或促进作用，也难以直接表征弹道偏转特性。因此，本文通过数值模拟方法综合分析弹体姿态角、角速度与径向速度的变化规律，并同时考虑弹头与弹身的受力特性，系统研究了不同入射角与攻角对弹体侵彻混凝土薄靶偏转行为的影响机制。

1 弹体侵彻混凝土薄靶数值模拟方法

1.1 弹靶有限元模型及材料参数

基于李鹏程等[9]开展的 30mm 弹体以不同初始攻角、入射角及速度侵彻 2 层间隔混凝土靶试验对数值模拟方法进行可靠性验证。假设侵彻过程中弹体仅作平面运动，建立 1/2 模型以提高计算效率，

弹体与靶体均划分为六面体网格，采用拉格朗日算法。弹体网格尺寸设置为 1.5mm，试验弹体参数如表 1 所示。混凝土靶体直径为 700mm，厚度为 100mm，抗压强度为 40MPa。靶体与弹体作用的中心区域网格划分较为密集，网格尺寸为 1.5mm×1.5mm×1.5mm，远离中心区域的网格尺寸逐渐增大，密集区和稀疏区的交界区域采用蝴蝶网格进行过渡。2 层靶体网格密集区域分别为 6 倍与 12 倍弹体直径，弹靶有限元模型如图 1 所示。弹体和 2 层混凝土靶体之间设置面-面侵蚀接触，对称面设置对称边界条件，靶体周向设置固定边界条件和无反射边界条件以保证数值模拟与试验初始条件的一致性。

表 1 试验弹体参数[9]

Table 1 Experimental projectile parameter[9]

材料	直径/(mm)	长度/(mm)	CRH	质心与弹尖距离/(mm)
30CrMnSiNi2A	30	180	4	94

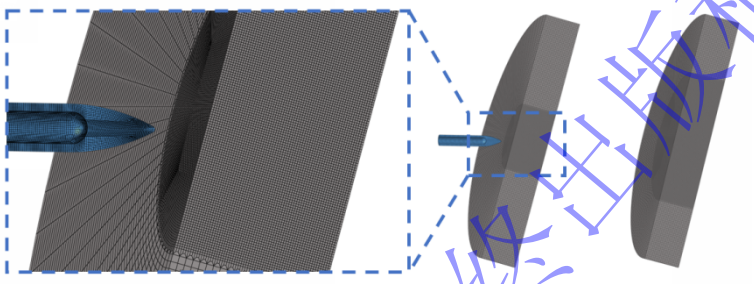


图 1 有限元模型

Fig.1 Finite element model

弹体材料选用随动硬化模型(Plastic-Kinematic)，参数如表 2 所示。混凝土靶体选用 RHT(Riedel-Hiermaier-Thoma)本构模型[25]，RHT 模型考虑了应变率效应对屈服面和损伤演化的影响，在 HJC(Holmquist-Johnson-Concrete)模型的基础上引入最大失效面、弹性屈服失效面和残余失效面 3 个控制破坏面，将材料的应力发展分为弹性阶段、线性强化阶段和损伤软化阶段 3 个阶段，能够较好描述混凝土等脆性材料的动态响应行为。通过添加*MAT_ADD_EROSION 关键字并采用最大主应变准则(单元删除的应变阈值为 0.4)来控制靶体网格的失效[26]，靶体材料参数如表 3 所示。

表 2 弹体材料参数[24]

Table 2 Projectile material parameters[24]

密度 ρ/(g·cm^{-3})	杨氏模量 E/GPa	泊松比 υ	屈服强度 A/MPa	硬化参数
7.85	210	0.3	1314	1

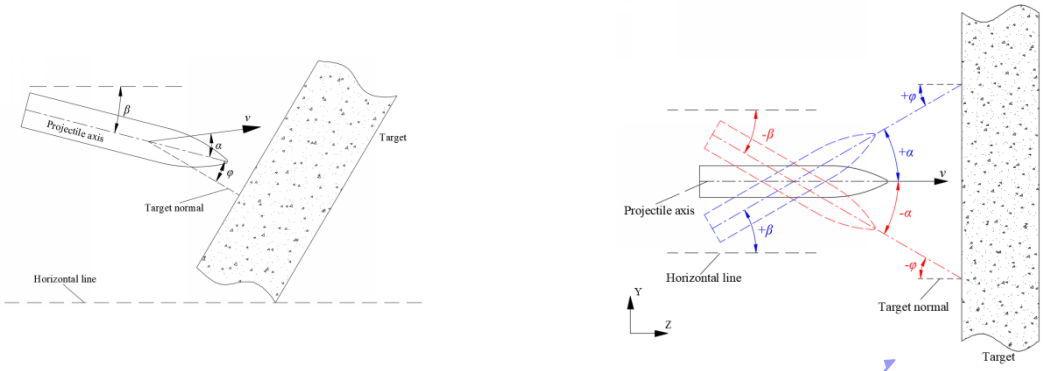
表 3 靶体材料参数[27]

Table 3 Target material parameters[27]

密度 ρ/(g·cm^{-3})	剪切模量 G/GPa	损伤参数 D_1	损伤参数 D_2	残余应力强度参数 A_f
2.4	21.9	0.04	1.0	1.6
压缩屈服比 g_c*	拉伸屈服比 g_t*	抗压强度 f_c/MPa	失效面指数 N	残余应力强度指数 n_f
0.53	0.7	40	0.76	0.27

1.2 数值模拟方法的验证与确认

图 2 为弹体侵彻条件示意图，其中弹体姿态角 β 为弹体轴线与水平线之间的夹角，当弹头方向位于水平线上方时 β 为正；攻角 α 为弹体轴线与速度方向之间的夹角，当弹头方向位于速度方向上方时 α 为正；入射角 φ 为弹体轴线与靶体迎弹面法线之间的夹角，当弹头方向位于靶体迎弹面法线方向上方时 φ 为正。此外，规定弹体受力方向向上和向右时为正，弹体偏转角速度逆时针方向时为正。



(a) Initial condition of penetration　　(b) Definition of angle direction

图 2 侵彻条件示意图[9]

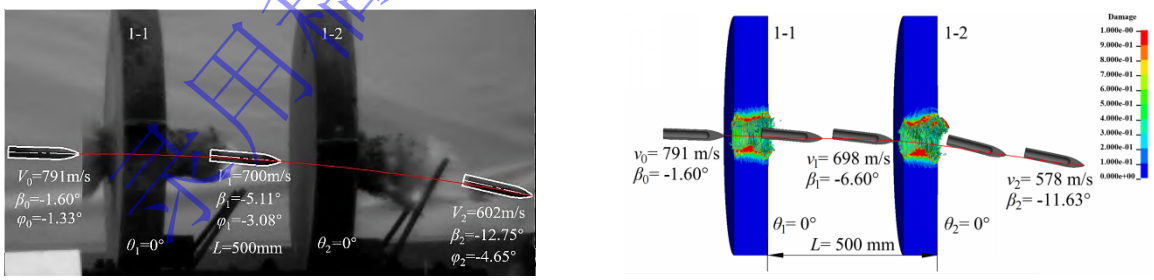
Fig.2 Condition of penetration[9]

由表 4 可以看出，各工况下弹体剩余速度模拟值与试验值的相对误差均在±10%以内，弹体姿态角模拟值与试验值的绝对误差均不超过 2°。图 3 对比了各工况下数值模拟与试验的弹道轨迹，结果显示两者吻合较好。图中可见数值模拟得到的靶体开坑区与崩落区深度均接近靶体厚度的一半，与试验观测结果一致。上述对比分析表明本文建立的数值模拟方法可靠，可用于研究不同入射角与攻角对弹体侵彻混凝土薄靶偏转特性的影响规律。

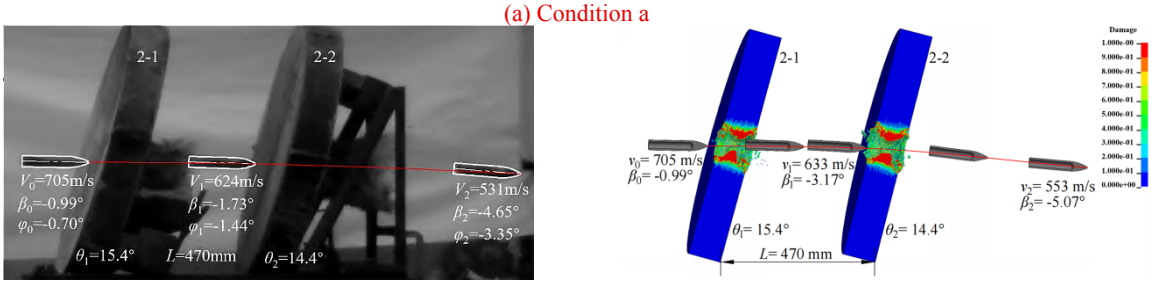
表 4 模拟与试验结果对比

Table 4 Comparison of simulations and experimental results

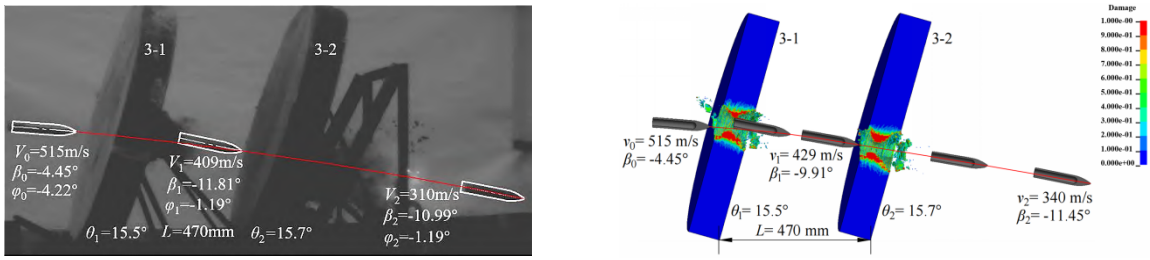
靶体编号	剩余速度 v_r/(m/s)			靶后弹体姿态角 β/°		
	试验结果[9]	数值模拟结果	相对误差/%	试验结果[9]	数值模拟结果	绝对误差/°
1-1	700	698	-0.29	-5.11	-6.60	1.49
1-2	602	578	-3.99	-12.75	-11.63	-1.12
2-1	624	633	1.44	-1.73	-3.17	1.44
2-2	531	553	4.14	-4.65	-5.07	0.42
3-1	409	429	4.89	-11.81	-9.91	-1.90
3-2	310	340	9.68	-10.99	-11.45	0.46
4-1	428	420	-1.87	-3.36	-5.31	1.95
4-2	263	288	9.51	-5.37	-6.70	1.33
5-1	576	613	6.42	-4.69	-5.65	0.96
5-2	472	516	9.32	-9.46	-9.30	-0.16



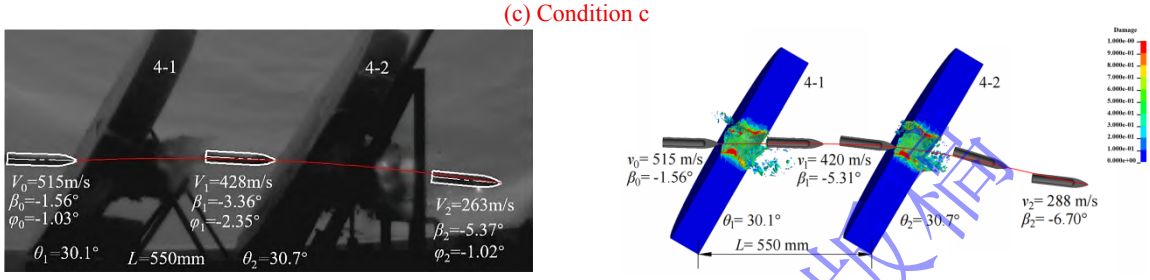
(a) Condition a



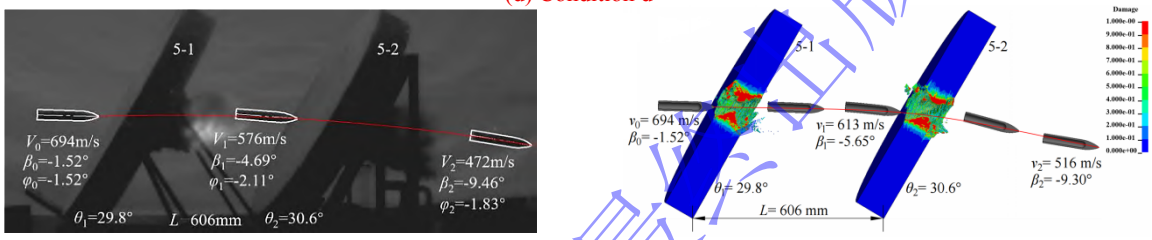
(b) Condition b



(c) Condition c



(d) Condition d



(e) Condition e

图 3 弹道轨迹对比[9]

Fig.3 Comparison of ballistic trajectories[9]

2 入射角与攻角对弹体侵彻混凝土薄靶偏转特性的影响

目前钻地武器的撞击速度通常在 1~2Ma 范围内，一般不超过 3Ma[28,29]。在常规速度范围(小于 800m/s)内侵彻混凝土类目标时弹体可视为刚体[29-31]。本文旨在揭示撞击姿态(入射角与攻角)对弹体偏转行为的影响机制，为结合实际工程应用并便于讨论，数值模拟中将撞击速度统一设置为 700 m/s。弹体在侵彻过程中所受靶体阻力可分解为沿弹体轴线方向的轴向阻力 F_z 与垂直于弹轴方向的径向阻力 F_y，其中径向阻力会对弹体偏转产生显著影响。为明确弹体各部位的受力特性，首先建立完整弹体的有限元模型并进行共节点处理，随后依据结构特征将弹体轴向划分为六个区域(头部 2 段、弹身 4 段)如图 4 所示，并将各区域网格分别定义为独立 Part。定义每个 Part 与靶体的侵蚀接触关系后提取接触力数据，从而获得弹体各部分在全局坐标系下 y 向和 z 向接触合力(F_y' 和 F_z')。基于弹体姿态角变化曲线得到各部分在垂直于弹轴方向的阻力分量(F_{y1} 和 F_{y2})如图 5 所示，通过矢量合成求得各部分总径向阻力。结合弹体各分段受力与整体过载特性系统分析弹体在侵彻过程中的偏转原因。

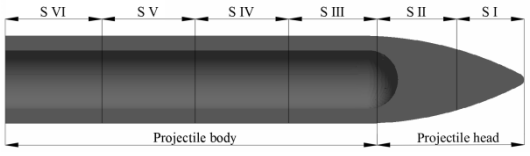


图 4 弹体分段图

Fig.4 Diagram of projectile segments

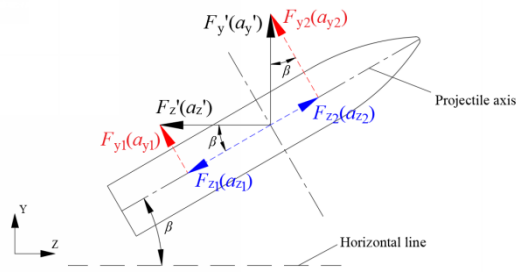
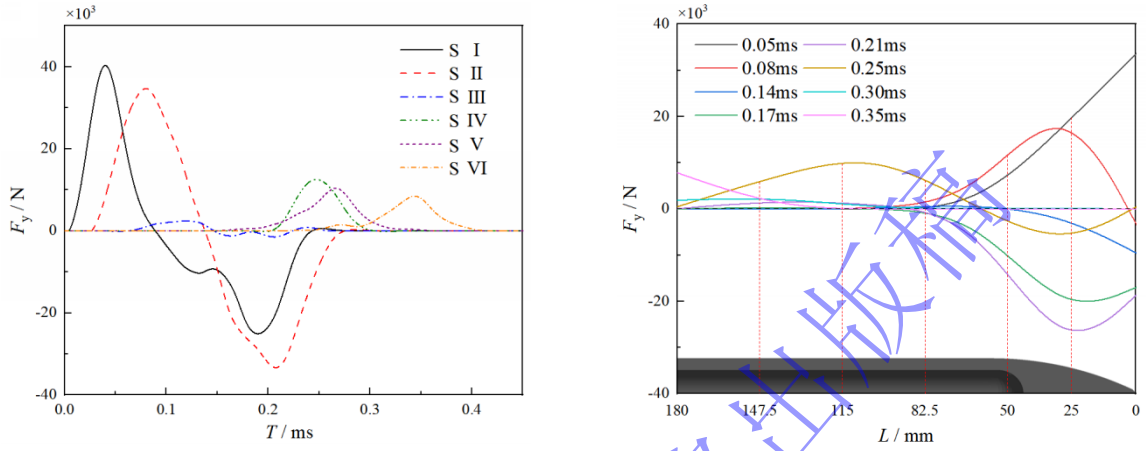


图 5 弹体受力图

Fig.5 Force diagram of the projectile

2.1 入射角对弹体偏转特性的影响

弹体以 30°入射角侵彻混凝土薄靶受力情况如图 6 所示，从图 6(a)弹体各分段所受径向力随时间变化曲线及图 6(b)典型时刻各分段所受径向力大小分布曲线可以看出侵彻初期弹头受力向上，随着侵彻的进行弹头部受力方向发生改变，同时弹身开始受力，但其径向力峰值仅为弹头的 1/3 左右，且作用时间较短，说明弹体仅以入射角侵彻混凝土薄靶时弹头受力方向反转是导致弹体偏转的主要原因。

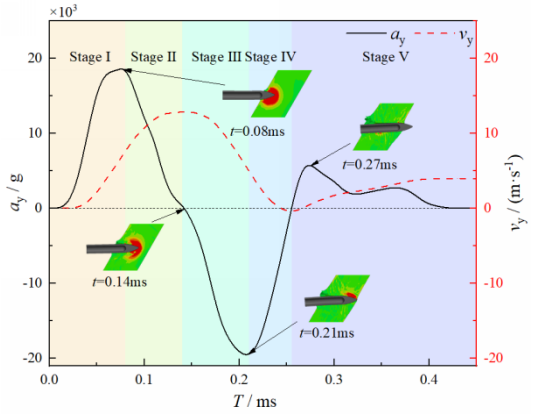


(a) Radial force of projectile segments　　(b) Radial force of the projectile at typical moment

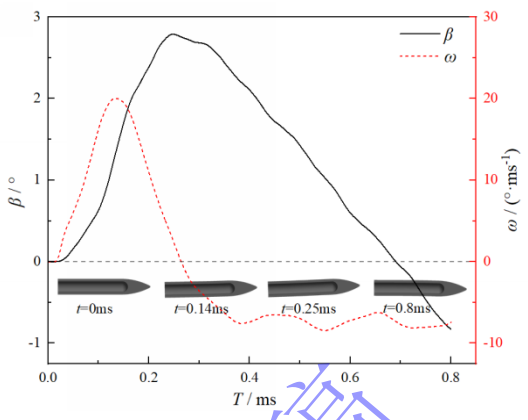
图 6 φ=30°时弹体受力

Fig.6 Force on the projectile at φ=30°

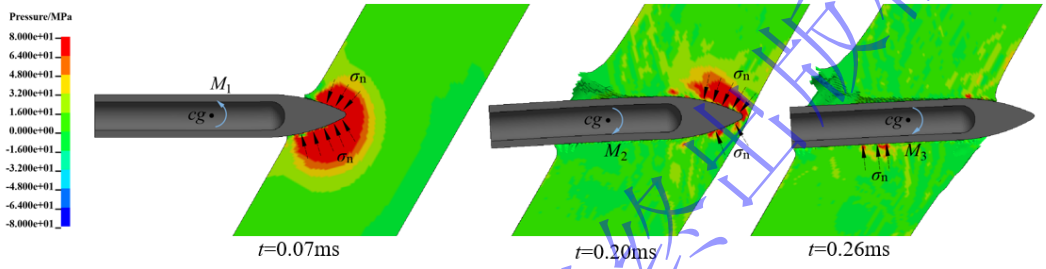
结合图 6 与图 7 可将侵彻过程分为五个阶段。在阶段Ⅰ(弹头下侧侵入阶段)，由于入射角的存在，弹头下侧首先侵彻，上侧混凝土在拉伸波与压缩波相互作用下发生非对称破坏，使得靠近自由面的弹靶实际接触面积小于另一侧，弹头法向应力分布不均，弹体径向过载正向增大并在弹头下侧完全侵入靶体时达到最大值，径向速度随之增大。此时弹头所受合力指向质心上方，在质心处产生逆时针方向偏转力矩，使得弹体角速度和姿态角持续增大。进入阶段Ⅱ(弹头完全侵入阶段)，弹头上侧与靶体接触面积增大，同时拉伸波与压缩波相互作用导致下侧混凝土强度退化[32]，弹头受力的非对称性减弱，径向过载逐渐减小为 0，径向速度增长趋缓，弹体角速度与姿态角继续正向增大。在阶段Ⅲ(弹头靶内运动阶段)中，弹头下侧混凝土首先被完全破坏，弹头法向应力重新分布。径向过载转为负向增长并在质心处产生的顺时针方向偏转力矩，弹体径向速度与角速度逐渐减小，姿态角增长趋缓。在阶段Ⅳ(弹头出靶阶段)，随着弹头逐渐贯穿靶体，弹靶接触面积减小使得非对称力作用减弱。径向过载逐渐降低为 0，径向速度减小趋缓；角速度减小为 0，姿态角逐渐达到最大值。进入阶段Ⅴ(弹尾出靶阶段)，弹体带有的顺时针方向角速度导致尾部对下侧靶体形成挤压，弹体径向过载再次正向增长并在质心处产生顺时针方向偏转力矩，弹体径向速度与角速度再次增大，姿态角逐渐减小。在后续侵彻过程中弹靶之间的相互作用逐渐消失，弹体径向速度与角速度逐渐稳定，弹体出靶后在向上运动的同时姿态角减小至 0 后反向增大。



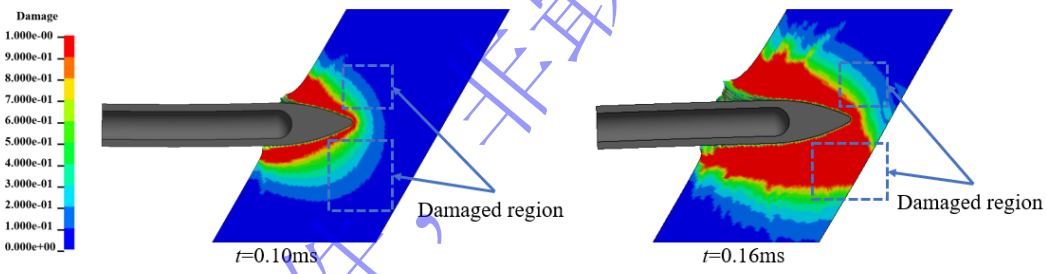
(a) Radial deceleration and radial velocity



(b) Attitude angle and angular velocity



(c) Force on the projectile at typical moment

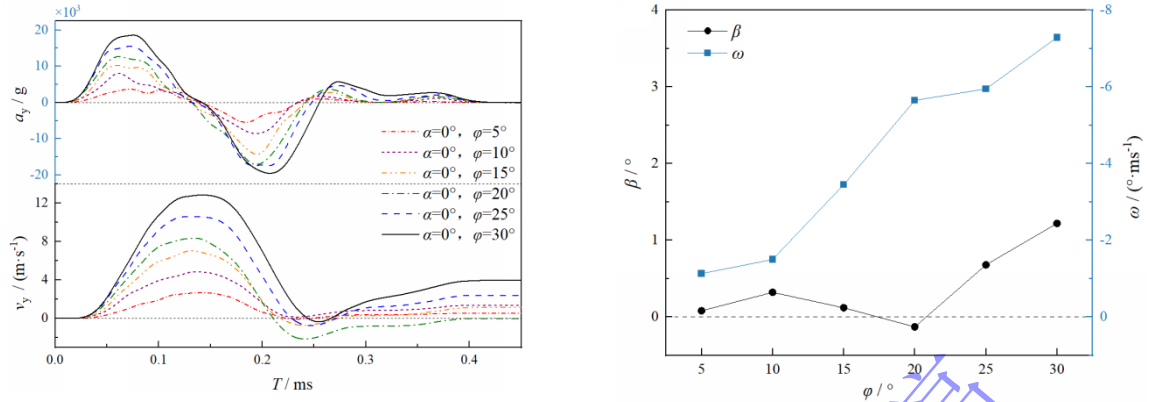


(d) Damage cloud diagram of the target at typical moments

图 7 φ=30°时弹体侵彻过程

Fig.7 Penetration process of the projectile at φ=30°

综上可知阶段Ⅰ与阶段Ⅱ和阶段Ⅲ、阶段Ⅳ与阶段Ⅴ产生的偏转力矩方向相反，使弹体先后经历两次偏转。由图 8(a)可以看出，入射角较小时，弹头所受非对称力较弱，阶段Ⅰ和阶段Ⅲ的径向过载峰值相对较低，径向速度变化不明显。此时弹体在阶段Ⅴ中的角速度较小，对下侧靶体挤压力有限，径向过载的二次正向增大表现微弱。随着入射角增大，阶段Ⅰ与阶段Ⅱ和阶段Ⅲ与阶段Ⅳ的持续时间及过载峰值几乎相同，但弹体在阶段Ⅴ中角速度的增大加强了弹尾对下侧靶体的挤压力，使得径向过载的二次正向增大逐渐显著。表明增大入射角主要增强了弹体在阶段Ⅴ中的偏转，入射角越大，阶段Ⅴ的贡献越大，顺时针方向偏转力矩影响越明显。此外弹体径向剩余速度随着入射角增大呈递增趋势且均为正值，弹体出靶后弹道轨迹呈现向上偏转的趋势，入射角越大弹道偏转越显著。由图 8(b)可知，随着入射角增大弹体靶后姿态角先增大后减小再增大，而角速度则持续增大且均为负值，表明在侵彻过程中顺时针方向偏转力矩影响更显著。



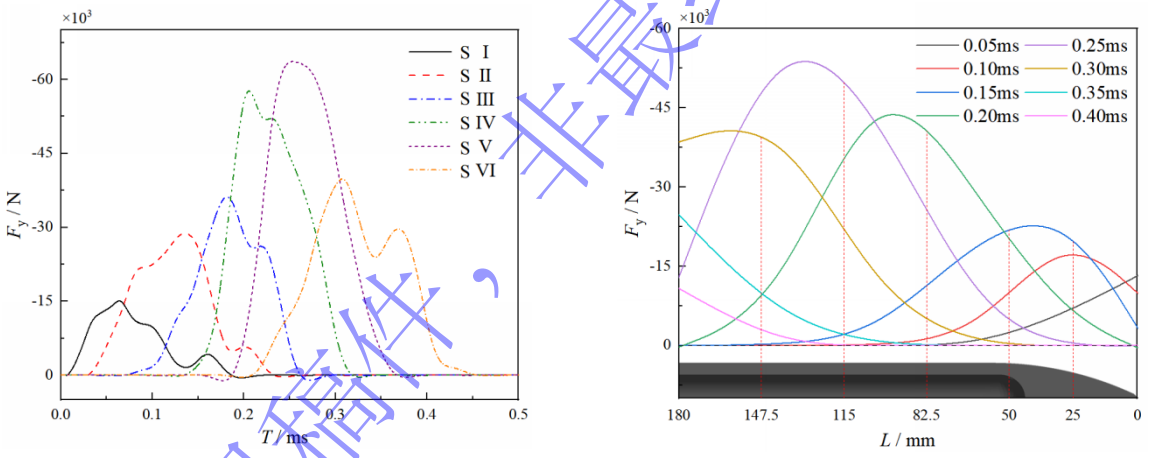
(a) Radial deceleration and radial velocity (b) Post-target attitude angle and angular velocity

图 8 不同入射角下弹体动态特性

Fig.8 Dynamic characteristics of the projectile at different trajectory angles

2.2 攻角对弹体偏转特性的影响

弹体以-6°攻角侵彻混凝土薄靶受力情况如图 9 所示，可以看出在整个侵彻过程中弹体受力方向保持恒定，但受力区域随着侵彻的进行由弹头逐渐向弹身转移，且弹身所受径向力峰值与持续时间几乎达到弹头的 2 倍，说明在纯攻角侵彻条件下弹头和弹身的非对称受力共同导致了弹体的偏转，且弹身的影响占主导地位。

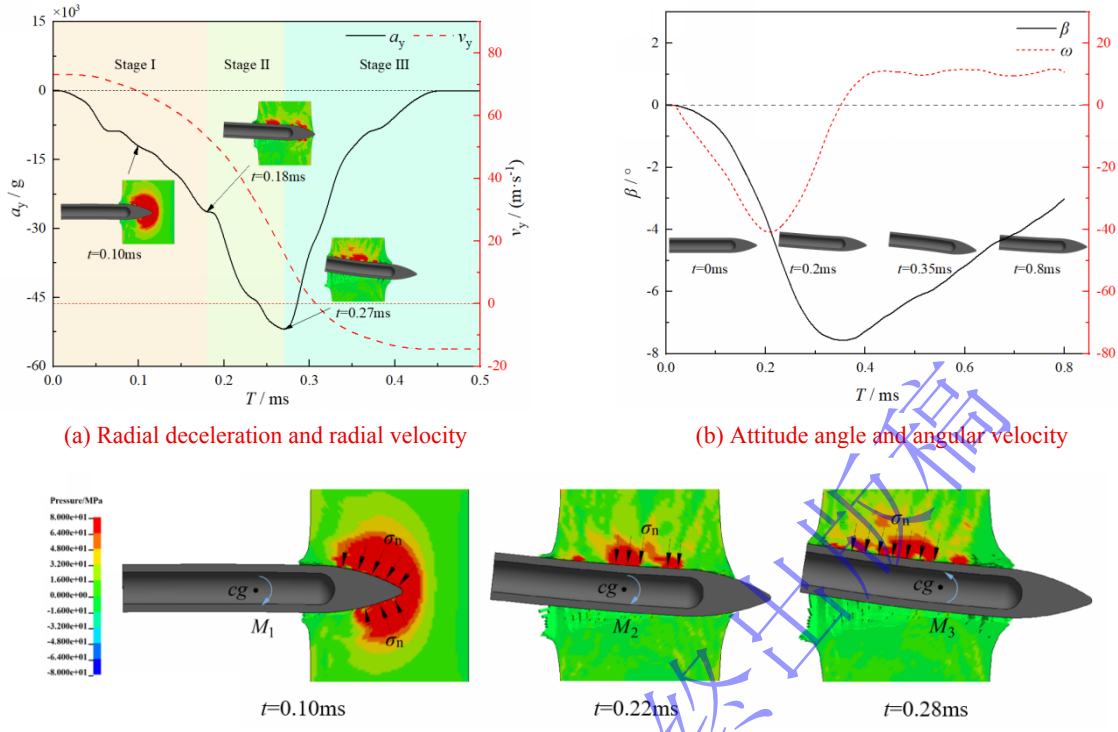


(a) Radial force of projectile segments (b) Radial force of the projectile at typical moment

图 9 α= -6°时弹体受力

Fig.9 Force on the projectile at α= -6°

结合图 9 与图 10 可将侵彻过程分为三个阶段。在阶段Ⅰ(弹头侵入阶段)，由于攻角的存在，弹头沿垂直于弹轴的径向速度挤压上侧靶体，弹头法向应力分布不均使得径向过载负向增大并产生顺时针方向偏转力矩，弹体径向速度逐渐减小，角速度与姿态角持续负向增大。进入阶段Ⅱ(弹头出靶阶段)，顺时针方向角速度与径向速度加剧了弹身对上侧靶体的挤压，弹体负向径向过载迅速增长，当弹头完全贯穿靶体时达到最大值，径向速度显著减小。在此过程中弹体所受合力仍指向质心下方，但由于弹身向前运动使得顺时针方向偏转力矩逐渐减小并转为逆时针，弹体角速度逐渐减小，姿态角增大趋缓。在阶段Ⅲ(弹身出靶阶段)，随着弹身逐渐贯穿靶体，弹靶接触面积减小使得非对称力作用减弱，径向过载逐渐降低，径向速度降低趋缓。此时弹体所受合力仍指向质心下方，在质心处产生逆时针方向偏转力矩，角速度逐渐减小并反向增大，姿态角逐渐减小。在后续侵彻过程中弹靶之间的相互作用逐渐消失，弹体径向速度与角速度逐渐稳定，弹体出靶后在向下运动的同时姿态角不断减小。



(a) Radial deceleration and radial velocity

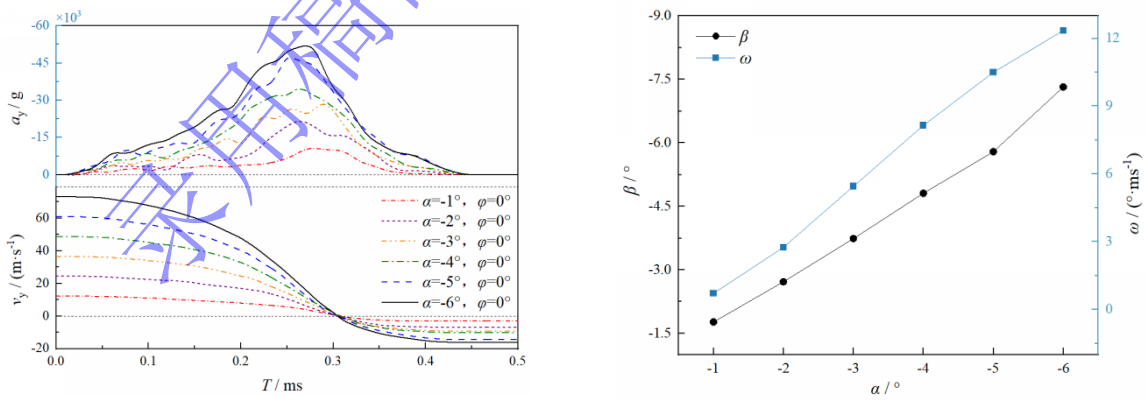
(b) Attitude angle and angular velocity

(c) Force on the projectile at typical moment

图 10 α= -6°时弹体侵彻过程

Fig.10 Penetration process of the projectile at α= -6°

综上可知阶段Ⅰ与阶段Ⅱ前期和阶段Ⅱ后期与阶段Ⅲ产生的偏转力矩方向相反，使弹体先后经历两次偏转。由图 11(a)可以看出，攻角较小时，弹体径向分速度较低，侵彻过程中所受非对称力较小，因此阶段Ⅱ的径向过载峰值也相对较小，弹体径向速度变化不明显。随着攻角增大，弹体对上侧靶体的挤压作用显著增强，弹体径向速度下降量逐渐增大并最终均稳定为负值，弹体出靶后弹道轨迹呈现向下偏转的趋势，攻角越大弹道偏转越显著。由图 11(b)可知，攻角增大使弹体的角速度与姿态角均逐渐增大，且角速度均为正值，表明在侵彻过程中逆时针力矩主导弹体偏转姿态。



(a) Radial deceleration and radial velocity

(b) Post-target attitude angle and angular velocity

图 11 不同攻角下弹体动态特性

Fig.11 Dynamic characteristics of the projectile at different pitch angles

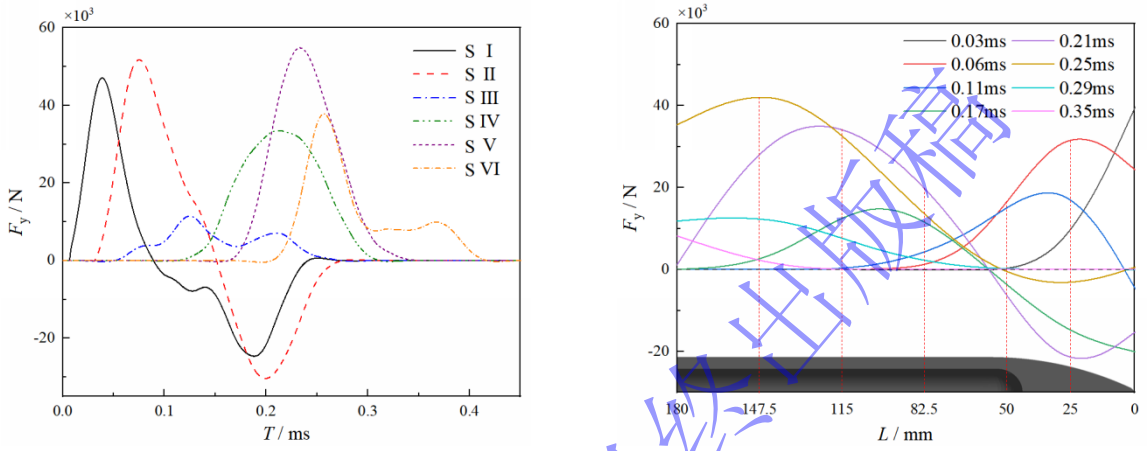
2.3 入射角与攻角联合作用对弹体偏转特性的影响

前两节分析表明，弹体分别以正入射角和负攻角侵彻混凝土薄靶时均经历了两次偏转，但偏转顺

序却存在显著差异：正入射角导致弹体先逆时针后顺时针偏转，负攻角则恰好相反。因此有必要对入射角和攻角联合作用下弹体侵彻混凝土薄靶的偏转特性进行分析。

2.3.1 同方向入射角与攻角对弹体偏转特性的影响

弹体以 30°入射角与 3°攻角侵彻混凝土薄靶受力情况如图 12 所示，可以看出侵彻初期弹头受力向上，随着侵彻的进行弹头开始反向受力，同时弹身开始受力且与弹头受力方向相反，两部分所受径向力峰值与持续时间相差较小，说明在以相同方向的入射角与攻角侵彻混凝土薄靶时弹头部和弹身部受力的不对称性共同导致了弹体的偏转。

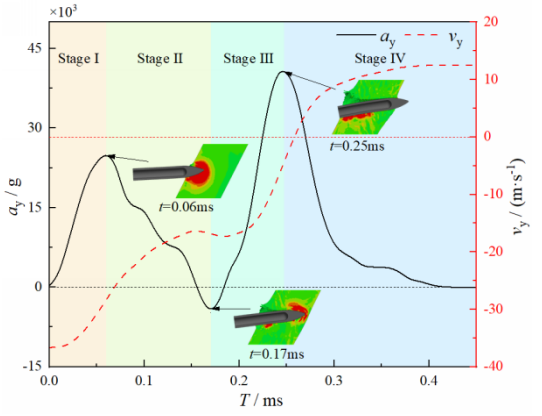


(a) Radial force of projectile segments　　(b) Radial force of the projectile at typical moment

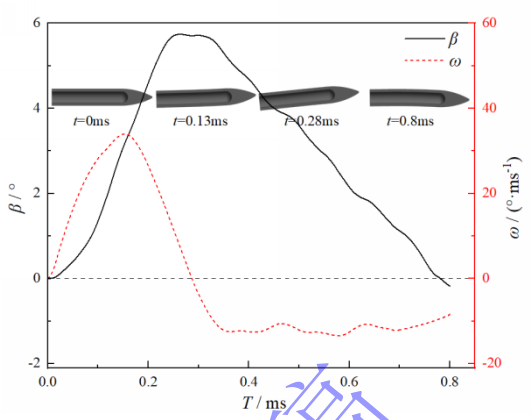
图 12 α=3°、φ=30°时弹体受力

Fig.12 Force on the projectile at α=3° and φ=30°

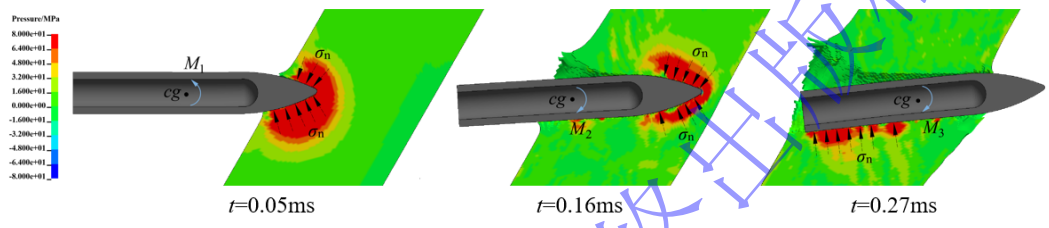
结合图 12 与图 13 可将侵彻过程分为四个阶段。在阶段Ⅰ(弹头下侧侵入阶段)，由于入射角与攻角同时存在，上侧靶体非对称破坏效应与下侧挤压效应使弹头法向应力分布不均，所受合力指向质心上方并产生逆时针方向的偏转力矩。弹体径向过载正向增大并在弹头下侧完全侵入靶体时达到最大值，径向速度随之降低，角速度和姿态角持续增大。进入阶段Ⅱ(弹头完全侵入阶段)，因弹靶接触面积增大和下侧混凝土强度弱化，加之径向速度降低使得弹头对下侧靶体挤压力减小，导致弹体所受非对称力逐渐减弱，径向过载减小为 0 后反向增大，径向速度降低趋缓后又有所增大。在此过程中弹头所受合力方向逐渐转为质心下方并产生顺时针方向偏转力矩，弹体角速度增大趋缓，姿态角持续增大。在阶段Ⅲ(弹头出靶阶段)，弹身下侧沿径向速度挤压靶体使得径向过载再次正向增长并在弹头下侧完全出靶时达到最大值，径向速度继续减小。弹体所受合力虽然指向质心上方，但随着弹身向前运动偏转力矩仍保持为顺时针，角速度开始减小，姿态角增大趋缓。进入阶段Ⅳ(弹身出靶阶段)，弹靶接触面积减小使得弹体径向过载逐渐减小至 0，径向速度反向增大趋缓并稳定为正值。在此过程中弹体所受合力仍指向质心上方产生顺时针方向的偏转力矩，弹体角速度持续减小后反向增大并稳定为顺时针方向，姿态角不断减小。



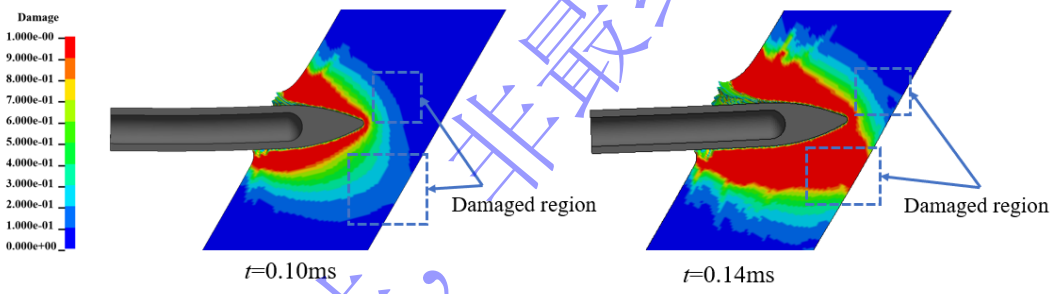
(a) Radial deceleration and radial velocity



(b) Attitude angle and angular velocity



(c) Force on the projectile at typical moment

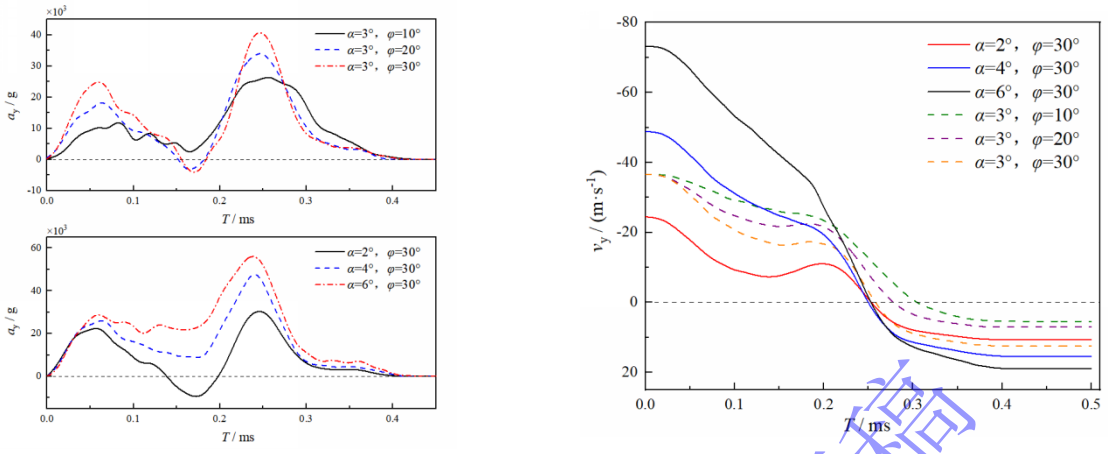


(d) Damage cloud diagram of the target at typical moments

图 13 α=3°、φ=30°时弹体侵彻过程

Fig.13 Penetration process of the projectile at α=3° and φ=30°

综上可知阶段Ⅰ和阶段Ⅱ、阶段Ⅲ与阶段Ⅳ产生的偏转力矩方向相反，使弹体先后经历两次偏转。由图 14(a)可以看出，相同攻角下，增大入射角仅改变各阶段过载峰值，而对偏转过程的基本特征影响有限。入射角相同时，随着攻角增大，弹体对下侧靶体的挤压增强，导致阶段Ⅱ中径向过载下降趋势明显减弱。由图 14(b)可知，随着攻角与入射角的增大弹体径向剩余速度逐渐增大且均为正值，表明弹体出靶后弹道轨迹偏上，偏转程度随攻角与入射角的增大而增强。

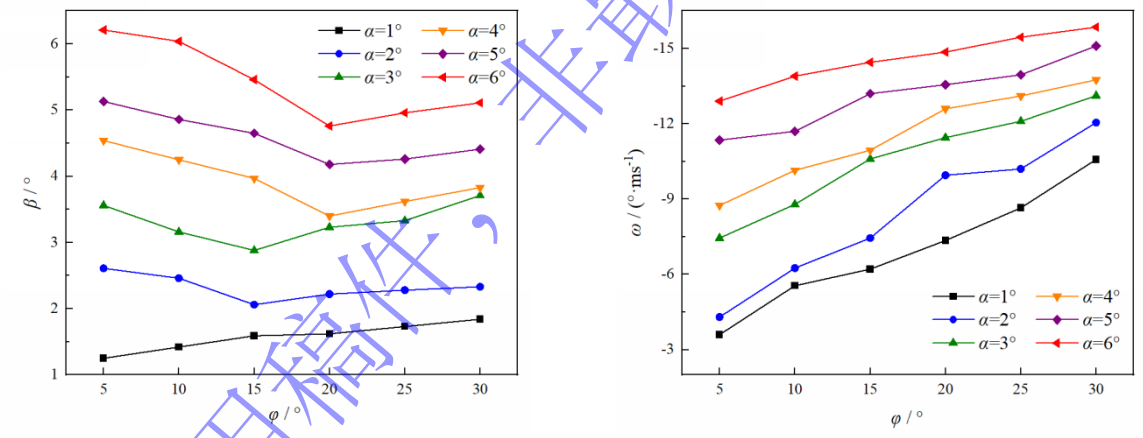


(a) Radial deceleration　　(b) Radial velocity

图 14 入射角与攻角方向相同时弹体径向过载与径向速度随时间变化

Fig.14 Radial deceleration and radial velocity of the projectile with the same direction of the trajectory and pitch angle

由图 15(a)可以看出，相同攻角下，弹体靶后姿态角随入射角的增大呈现先减小后增大的趋势，且临界点随攻角的增大逐渐向大入射角方向偏移；相同入射角下，靶后姿态角随攻角的增大而增大。从图 15(b)可知，弹体靶后角速度随入射角与攻角的增大而增大且均为负值，表明顺时针方向偏转力矩在侵彻过程中占主导地位，且随着攻角与入射角的增大其相对于逆时针力矩的强度优势进一步扩大。



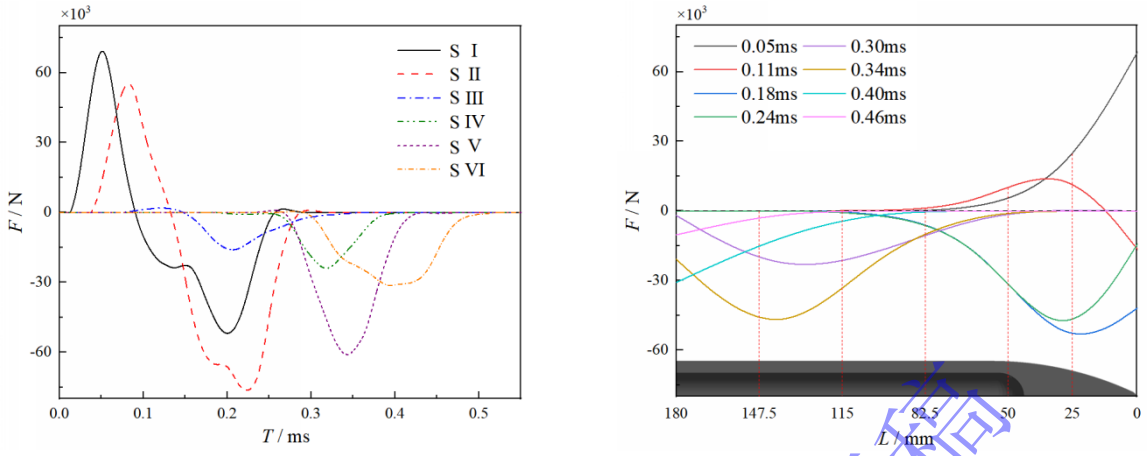
(a) Post-target attitude angle　　(b) Post-target angular velocity

图 15 入射角与攻角方向相同时弹体靶后姿态角与角速度

Fig.15 Post-target attitude angle and angular velocity of the projectile with the same direction of the trajectory and pitch angle

2.3.2 反方向入射角与攻角对弹体偏转特性的影响

弹体以 30°入射角与-3°攻角侵彻混凝土薄靶受力情况如图 16 所示，可以看出侵彻初期弹头受力向上，随着侵彻的进行弹头出现反向受力，同时弹身开始受力且与弹头受力方向相同，但其所受径向力峰值及持续时间略低于弹头部，说明在以相反方向的入射角与攻角侵彻混凝土薄靶时弹头部和弹身部的受力不对称共同影响弹体的偏转行为，且弹头的影响较大。

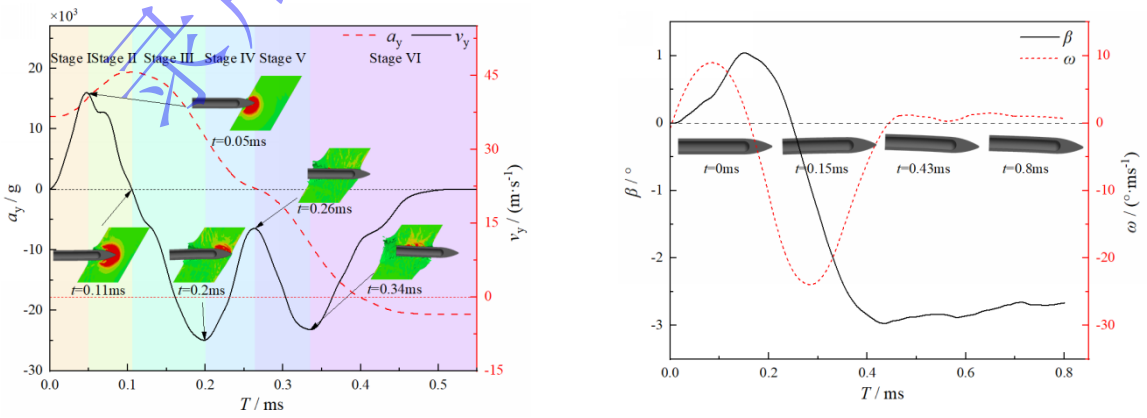


(a) Radial force of projectile segments　　(b) Radial force of the projectile at typical moment

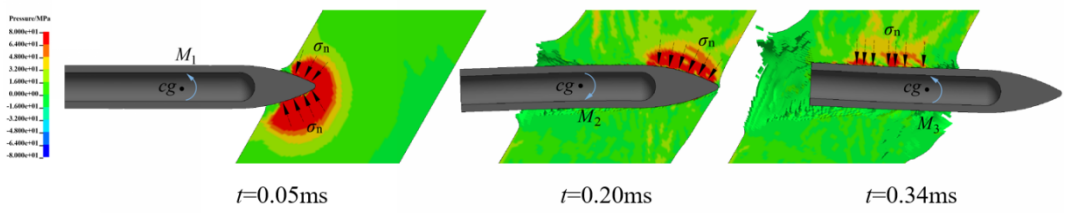
图 16 α= -3°、φ=30°时弹体受力

Fig.16 Force on the projectile at α= -3° and φ=30°

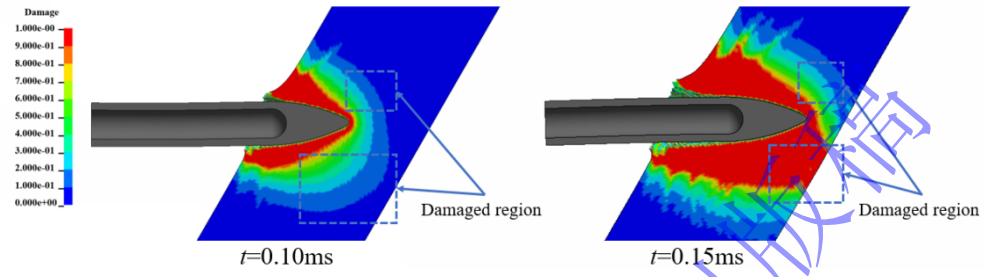
结合图 16 与图 17 将可侵彻过程分为六个阶段。在阶段 Ⅰ (弹头下侧侵入阶段)，入射角主导的非对称开坑效应比攻角引起的上侧挤压效应影响更为显著，弹头所受合力指向质心上方并产生逆时针方向偏转力矩。弹体径向过载正向增大并在弹头下侧完全侵入靶体时达到最大值，但其峰值显著低于同向相同角度工况，径向速度随之增大，角速度和姿态角持续增大。进入阶段 Ⅱ (弹头完全侵入阶段)，随着弹靶接触面积的增大以及弹头对上侧靶体的持续挤压非对称力逐渐减弱。正向径向过载减小为 0，径向速度增长趋缓；角速度正向增大趋缓，姿态角持续正向增大。在阶段Ⅲ(弹头靶内运动阶段)，弹头下侧混凝土逐渐被完全破坏，此时弹头继续挤压上侧靶体，所受合力方向逐渐转变为质心下方产生顺时针方向偏转力矩。弹体径向过载开始负向增大并在弹头即将穿透靶体时达到最大值，径向速度逐渐减小；角速度减小为 0 后反向增大，姿态角增大趋缓后减小。在阶段Ⅳ(弹头出靶阶段)，弹靶接触面积的减小使得非对称力作用减弱，负向径向过载开始减小，径向速度降低趋缓；角速度持续负向增大，姿态角逐渐减小为 0 后反向增大。进入阶段 Ⅴ (弹尾靶内运动阶段)，弹体带有的顺时针方向角速度以及较大的径向速度使其尾部对上侧靶体形成挤压，此时弹体所受合力仍指向质心下方，但由于弹身向前运动使得顺时针方向偏转力矩逐渐减小并转为逆时针，负向径向过载出现二次增大，径向速度继续减小；角速度逐渐减小，姿态角负向增大趋缓。在阶段Ⅵ(弹尾出靶阶段)，弹靶之间的相互作用逐渐消失，径向过载逐渐降低为 0，径向速度降低至 0 后反向增大为负值。在此过程中弹体所受合力仍指向质心下方并产生逆时针方向的偏转力矩，弹体角速度逐渐减小后反向增大并稳定为逆时针方向，姿态角不断减小，弹体发生第三次偏转。



(a) Radial deceleration and radial velocity　　(b) Attitude angle and angular velocity



(c) Force on the projectile at typical moment

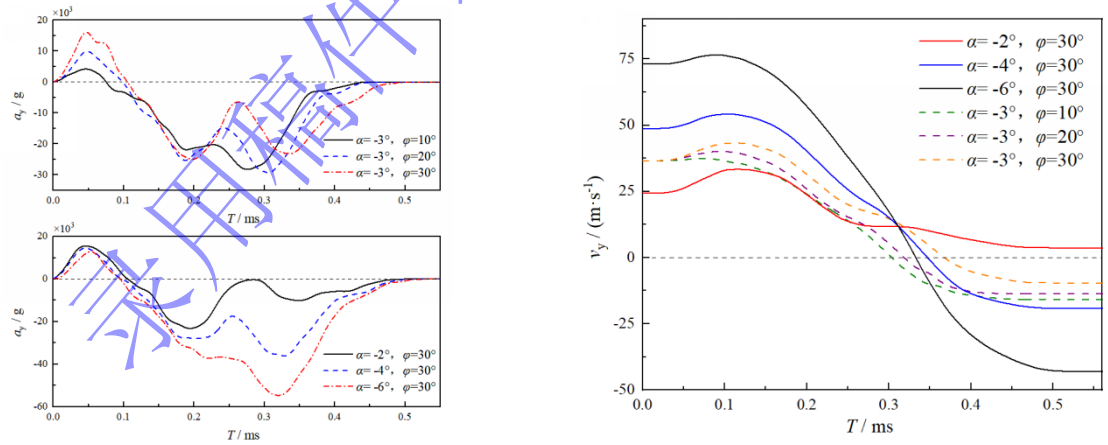


(d) Damage cloud diagram of the target at typical moments

图 17 α= -3°、φ=30°时弹靶作用过程

Fig.17 Penetration process of the projectile at α= -3° and φ=30°

综上可知阶段Ⅰ、阶段Ⅱ与阶段Ⅴ、阶段Ⅵ和阶段Ⅲ与阶段Ⅳ产生的偏转力矩方向相反，使弹体先后经历三次偏转。由图 18(a)可以看出，入射角较小时，弹体侵彻过程主要受攻角主导，仅侵彻初期出现径向过载的小幅上升。随着入射角增大，其对阶段Ⅰ和阶段Ⅵ偏转特性的影响逐渐增强。入射角相同时，随着攻角增大入射角对弹体在阶段Ⅰ的偏转影响几乎不变，阶段Ⅵ逐渐消失，整体偏转模式趋近于纯攻角工况。由前文分析可知，正入射角导致弹体弹道轨迹偏上而负攻角导致弹道轨迹偏下，当二者同时作用时，其影响相互竞争，共同决定弹体的最终偏转方向。从图 18(b)可知，入射角较大时(φ>20°)，较小的攻角影响较弱，此时入射角成为影响弹道轨迹的主要因素。负攻角超过 2°后弹道轨迹偏转方向不再受入射角影响，始终保持向上偏转，但偏转程度随着入射角的增大逐渐降低。



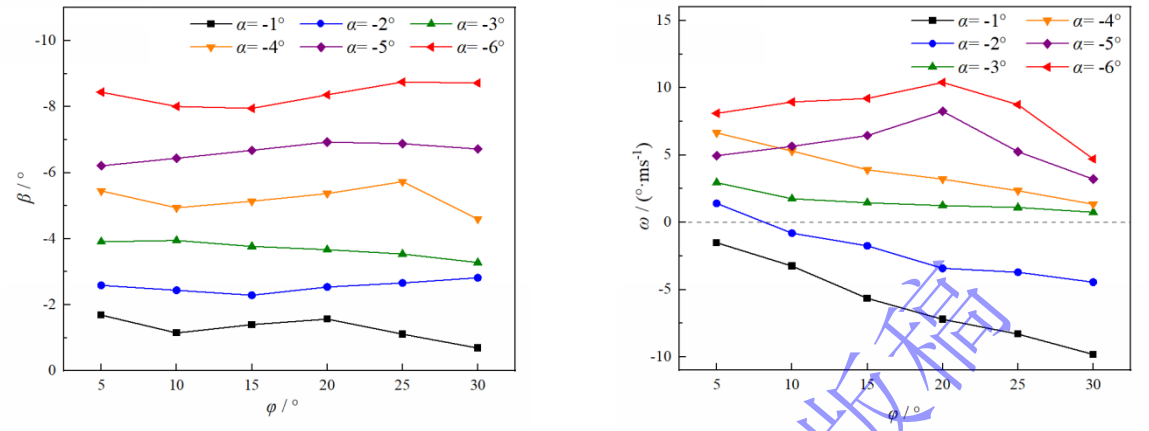
(a) Radial deceleration (b) Radial velocity

图 18 入射角与攻角方向相反时弹体径向过载与径向速度随时间变化

Fig.18 Radial deceleration and radial velocity of the projectile with opposite direction of the trajectory and pitch angle

由图 19(a)可知弹体靶后姿态角随攻角的增大而增大，而入射角的影响较为有限。从图 19(b)可以看出，负攻角小于 2°时弹体靶后角速度随着入射角的增大逐渐由正值转为负值，此时入射角的影响大于攻角；负攻角大于 2°后靶后偏转角速度保持为正值，攻角的影响开始占主导地位；当负攻角大

于 4°时，靶后角速度随入射角增大呈现先增大后减小的趋势，反映出角度影响的动态转换过程：在小入射角范围(φ<20°)内攻角影响为主导，而大入射角(φ>20°)条件下入射角的影响重新开始显现。



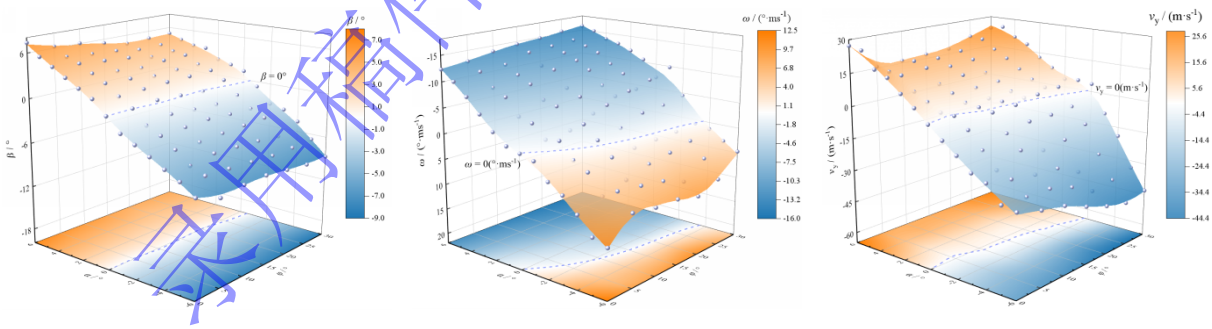
(a) Post-target attitude angle　　(b) Post-target angular velocity

图 19 入射角与攻角方向相反时弹体靶后姿态角与角速度

Fig.19 Post-target attitude angle and angular velocity of the projectile with opposite direction of the trajectory and pitch angle

2.4 弹体靶后姿态行为分析

基于前文所开展的数值模拟研究，图 20 给出了弹体以 700m/s 速度侵彻混凝土薄靶时不同入射角与攻角组合下弹体的姿态变化。可以看出，攻角与入射角方向一致时，弹体出靶瞬间的偏转角速度方向与姿态角方向相反，使得弹体在靶后飞行过程中姿态角持续减小直至改变方向，而弹道轨迹的偏转方向则与攻角和入射角的方向一致。攻角与入射角方向相反时，攻角与入射角的影响呈现较为激烈的竞争关系：弹体刚出靶姿态角均为负，负攻角小于 2°时，弹体靶后角速度为负，导致较小的出靶姿态角随弹体运动不断增大；随着攻角增大，出靶姿态角逐渐增大，但角速度转为正值，使得弹体在靶后飞行过程中姿态角持续减小。负攻角小于 2°且入射角大于 20°时，弹道的偏转方向由入射角主导，其余情况则由攻角主导。因此非正侵彻混凝土薄靶时存在特定的入射角与攻角组合使弹体在靶后某一位置处达到最佳姿态。



(a) Post-target attitude angle　　(b) Post-target angular velocity　　(c) Post-target radial velocity

图 20 不同入射角与攻角下弹体靶后姿态角、角速度与径向速度

Fig.20 Post-target attitude angle,angular velocity and radial velocity of the projectile with different trajectory and pitch angles

3 结论

针对弹体低速斜侵彻单层混凝土薄靶的偏转特性开展了数值模拟研究，通过弹体侵彻混凝土薄靶试验验证了数值模拟方法的可靠性。在此基础上系统研究了不同入射角(5°~30°)与攻角(-6°~6°)单独及联合作用下弹体的受力特性与偏转行为，得到以下主要结论。

(1) 弹体以入射角侵彻时弹头会发生单次受力方向反转，而弹身受力方向在不同着靶条件下保持

稳定，当弹体带攻角侵彻时，弹身不对称受力对偏转的贡献显著。弹头受力方向变化与弹身向前运动引起的偏转力矩方向变化共同造成了弹体的偏转。

(2) 弹体在单一角度(仅入射角或攻角)或同向角度组合作用下侵彻混凝土薄靶时会发生两次偏转，当入射角较大且与攻角方向相反时则会发生三次偏转。

(3) 弹体以正入射角侵彻混凝土薄靶时，弹道轨迹表现为向上偏转；若带有攻角，当负攻角小于2°且入射角大于20°时，弹道的偏转方向由入射角主导，其余情况则由攻角主导。

(4) 同方向的入射角与攻角会使弹体的姿态角在出靶后先减小后反向增大；入射角与攻角方向相反时，较小的攻角会使弹体出靶后姿态角持续增大，攻角大于2°则会使弹体出靶后姿态角先减小后反向增大。

参考文献

[1] Goldsmith W. Non-ideal projectile impact on targets [J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 22(2-3): 95-395. DOI: 10.1016/S0734-743X(98)00031-1.

[2] 何丽灵, 郭虎, 陈小伟, 等. 结构变形对深侵彻弹体偏转的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(09): 76-90. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0068.
HE L L, GUO H, CHEN X W, et al. Influence of structural deformation on the deflection of penetrator into concrete targetwith deep penetration [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(9): 76-90. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0068.

[3] 王一楠, 黄风雷, 段卓平. 小攻角条件下动能弹体高速侵彻混凝土靶的弹体弯曲 [J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(06): 598-606. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)06-0598-09.
WANG Y N, HUANG F L, DUAN Z P. Bending of projectile with small angle of attack during high-speed penetration of concrete targets [J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(6): 598–606. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)06-0598-09.

[4] 成丽蓉, 汪德武, 贺元吉. 侵彻单层和多层靶时战斗部装药损伤及热点生成机理研究 [J]. 兵工学报, 2020, 41(01): 32-39. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.01.004.
CHENG L R, WANG D W, HE Y J. Research on the damage and hot-spot generation in explosive charges during penetration into single- or multi-layer target [J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(1): 32–39. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.01.004.

[5] 王可慧, 宁建国, 李志康, 等. 高速弹体非正侵彻混凝土靶的弹道偏转实验研究 [J]. 高压物理学报, 2013, 27(04): 561-566. DOI: 10.11858/gywlxb.2013.04.015.
WANG K H, NING J G, LI Z K, et al. Ballistic Trajectory of High-Velocity Projectile Obliquely Penetrating Concrete Target [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(4): 561-566. DOI: 10.11858/gywlxb.2013.04.015.

[6] 武海军, 黄风雷, 王一楠. 高速弹体非正侵彻混凝土试验研究 [C] // 第八届全国爆炸力学学术会议论文集. 江西吉安: 中国力学学会爆炸力学专业委员会, 2007: 488−494.

[7] 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.

[8] 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(02): 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.

[9] 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): 92-104. 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.

[10] CHEN X W, FAN S C, LI Q M. Oblique and normal perforation of concrete targets by a rigid projectile [J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(6): 617-637. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2003.08.003.

[11] Luk V, Forrestal M, Amos D. Dynamic spherical cavity expansion of strain-hardening materials [J]. J Appl Mech, 1991, 58(1).

[12] 马兆芳，段卓平，欧卓成，等. 弹体斜侵彻贯穿薄混凝土靶姿态变化实验和理论研究 [J]. 兵工学报, 2015, 36(S1): 248-254. DOI: CNKI:SUN:BIGO.0.2015-S1-039.
MA Z F, DUAN Z P, OU Z C, et al. The experimental and theoretical research on attitude of projectile obliquely penetrating into thin concrete target [J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(S1): 248–254. DOI: CNKI:SUN:BIGO.0.2015-S1-039.

[13] DUAN Z P, LI S R, MA Z F, et al. Attitude deflection of oblique perforation of concrete targets by a rigid projectile [J]. Defence Technology, 2020, 16(3): 596-608. DOI: 10.1016/j.dt.2019.09.009

[14] 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 [J]. 兵工学报, 2023, 44(08): 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.

[15] 李鹏程. 椭圆截面弹体侵彻混凝土靶弹道特性研究 [D]. 南京理工大学, 2024: 40-53.

[16] Dong H, Zhang X, Wu H, et al. Trajectory prediction of the tapered projectile and grooved projectile in deep penetration [J]. International Journal of Impact Engineering, 2022, 170: 104337.

[17] 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.

[18] 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(02): 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.

[19] 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.

[20] 冯杰. 弹体非正侵彻混凝土薄靶姿态偏转数值模拟研究 [D]. 北京理工大学, 2016: 30-53.

[21] 刘世鑫. 非正侵彻混凝土薄靶弹体姿态变化的数值模拟研究 [D]. 北京理工大学, 2014: 27-41.

[22] 李江涛. 弹体侵彻多层间隔混凝土靶的弹道特性研究 [D]. 南京理工大学, 2017: 16-34.

[23] 张帅. 弹丸侵彻钢筋混凝土多层靶板的数值模拟分析 [D]. 南京理工大学, 2018: 20-45.

[24] 李磊，张先锋，吴雪，等. 不同硬度 30CrMnSiNi2A 钢的动态本构与损伤参数 [J]. 高压物理学报, 2017, 31(03): 239-248. DOI: 10.11858/gywlxb.2017.03.005.
LI L, ZHANG X F, WU X, et al. Dynamic constitutive and damage parameters of 30CrMnSiNi2A steel with different hardnesses [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2017, 31(3): 239–248. DOI: 10.11858/gywlxb.2017.03.005.

[25] Riedel W, Thoma K, Hiermaier S, et al. Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500 numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes [C] // Proceedings of the 9th International Symposium on the Effects of Munitions with Structures. Berlin-Strausberg Germany, 1999, 315: 315-322.

[26] 吴昊, 岑国华, 程月华, 等. 基于战斗部侵彻动爆一体化效应的遮弹层设计 [J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(05): 90-105. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0244.
WU H, CEN G H, CHENG Y H et al. Design of shield based on integrated effect of penetration and moving charge explosion of warheads [J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(05): 90-105. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0244.

[27] 聂铮玥, 彭永, 陈荣, 等. 侵彻条件下岩石类材料 RHT 模型参数敏感性分析 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(14): 108-116. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.14.015.
NIE Z Y, PENG Y, CHEN R, et al. Sensitivity analysis of RHT model parameters for rock materials under penetrating condition [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(14): 108-116. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.14.015.

[28] 何翔, 徐翔云, 孙桂娟, 等. 弹体高速侵彻混凝土的效应实验 [J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(1): 1-6. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)01-0001-06.
HE X, XU X Y, SUN G J, et al. Experimental investigation on projectiles' high-velocity penetration into concrete targets [J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(1): 1-6. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)01-0001-06.

[29] 陈小伟, 张方举, 杨世全, 等. 动能深侵彻弹的力学设计(Ⅲ): 缩比实验分析 [J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(2): 105-114. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)02-0105-10.
CHEN X W, ZHANG F J, YANG S Q, et al. Mechanics of structural design of EPW(Ⅲ): investigation on the reduced-scaletests [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(2): 105-114. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)02-0105-10.

[30] Frew D J, Forrestal M J, Hanchak S J. Penetration experiments with limestone targets and ogive-nose steel projectiles [J]. Journal of Applied Mechanics, 2000, 67(4): 841-845. DOI: 10.1115/1.1331283.

[31] Feng J, Song M, Sun W, et al. Thick plain concrete targets subjected to high speed penetration of 30CrMnSiNi2A steel projectiles: tests and analyses [J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 122: 305-317. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.09.005.

[32] Jena P K, Jagtap N, Kumar K S, et al. Some experimental studies on angle effect in penetration [J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(5): 489-501. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.11.009.

（责任编辑　爆炸与冲击）