

文章编号:1006-9941(2026)01-0026-11

多弹体错位序贯侵彻半无限混凝土靶侵彻深度的研究

许宝文,张丁山,张博,全嘉林,吕永柱

(西安近代化学研究所,陕西西安710065)

摘要: 为研究多弹体错位序贯侵彻半无限靶过程中弹径与错位距离对后续弹体侵彻深度及偏转行为的影响规律,建立了多弹错位序贯侵彻混凝土靶侵彻深度理论模型及数值仿真模型,开展了多弹错位侵彻试验以验证模型的可靠性。结果表明:理论模型和数值模型计算得出的弹体侵彻深度、偏转角度与试验结果的最大偏差分别为6.7%和9.0%;多弹侵彻的错位距离存在一个区间,其下限为后续弹体发生偏转但不进入前序弹道的最大错位距离 L_1 ,上限为后续弹体几乎不受前序弹体影响的最小错位距离 L_2 。该区间内,错位序贯侵彻可以有效增加后续弹体的侵彻深度,且前序弹体对后续弹体的运动轨迹具有导向作用;前序弹体对后续弹体的影响与错位距离呈负相关关系。在弹体以 $600\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度侵彻80 MPa混凝土靶的工况下,57 mm弹体第二发侵彻深度较第一发增加约30%,第三发侵彻深度较第二发增加可以达到25%;57,80,100 mm弹径弹体对应的 L_1 分别为2倍、3倍、3.5倍弹径, L_2 分别为7倍、10倍、14倍弹径。

关键词: 错位侵彻;侵彻深度;数值仿真;多弹体

中图分类号: TJ55;O315

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2025211

0 引言

追求更高的侵彻深度始终是侵彻战斗部技术发展的核心目标。在现代战争中,随着敌方重点防护工事不断加固,传统单发侵彻战斗部受限于动能和材料强度,难以实现贯穿此类目标,导致毁伤效果降低,直接影响作战任务的达成。因此如何有效提升弹体侵彻深度,已成为侵彻武器领域亟待突破的关键技术难题。多弹体侵彻技术^[1]为应对这一挑战提供了新途径。多弹体侵彻在空间维度主要分为同孔序贯侵彻与错位序贯侵彻,其中错位序贯侵彻通过控制后续弹体与前一发弹体的弹着点具有一定的错位距离,有助于避免弹体之间发生碰撞,提高后续弹体的侵彻深度。多弹错位序贯侵彻的研究不仅能够提高战斗部侵彻深度,还能为实际作战中多弹打击战术提供理论支撑,具有重

要的军事应用价值。

邓国强等^[2-3]通过试验和数值仿真对多弹侵爆岩体进行研究,发现同孔序贯侵彻时,后续弹体的侵彻深度增加但由于弹体金属破片的影响存在侵彻深度极限值,未深入探讨错位序贯侵彻工况;左魁等^[4]基于相似准则,应用量纲分析得出某型钻地弹侵爆岩石介质的二次侵彻公式,但该模型的普适性有待验证,且仅适用于同孔序贯侵彻;Gomez等^[5]对混凝土进行了多组同孔序贯侵彻试验,修正了靶标强度因子 S ,提出了弹体同孔二次侵彻半无限靶的经验公式;赖建中等^[6]在Gomez等研究的基础上,对复合材料靶标的强度因子 S 进行了修正,也仅适用于同孔序贯侵彻;吴平等^[7]对二次打击超高韧性水泥基复合材料与纤维混凝土组合靶进行了错位侵彻试验研究,得到了二次打击的间距对该组合靶体抗侵彻性能的影响,未深入研究弹体的侵彻弹道特性以及两发以上的弹体侵彻;王志亮等^[8]通过数值仿真研究了弹体同孔序贯侵彻花岗岩靶板,明确了打击次数和速度等参数对于弹体侵彻过程的影响规律,研究未涵盖错位侵彻工况。

目前,国内外学者普遍采用试验与数值仿真结合

收稿日期:2025-09-25;修回日期:2025-10-27

网络出版日期:2025-12-11

作者简介:许宝文(2001-),男,硕士研究生,主要从事战斗部侵彻技术研究。e-mail:1097209536@qq.com

通信联系人:张丁山(1984-),男,研究员,主要从事侵彻战斗部技术研究。e-mail:dingshan19840103@sohu.com

引用本文:许宝文,张丁山,张博,等.多弹体错位序贯侵彻半无限混凝土靶侵彻深度的研究[J].含能材料,2026,34(1):26-36.

XU Bao-wen, ZHANG Ding-shan, ZHANG Bo, et al. Penetration Depth of Dislocated Sequential Penetration by Multiple Projectiles into a Semi-infinite Concrete Target[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2026, 34(1):26-36.

的方法研究同孔序贯侵彻和错位二次侵彻工况,对多弹体错位序贯侵彻工况研究较少,缺乏理论研究支撑。因此,本研究采用理论建模、试验验证与数值仿真相结合的研究方法,围绕多发弹体错位序贯侵彻半无限靶的过程进行研究。首先,在单发弹体侵彻模型基础上,引入空腔膨胀理论及应力波导致的靶体裂纹扩展机制,对侵彻后混凝土靶体的强度进行修正,从而建立适用于多弹侵彻的侵彻深度计算模型。其次,分析弹体间错位距离、弹径等关键参数对后续弹体侵彻深度、弹道偏转等特性的影响规律。最后,综合侵彻深度与弹体偏转等计算结果,明确能够有效提升后续弹体侵彻深度的错位距离区间。

1 理论模型

1.1 理论建模

建立多弹错位侵彻半无限靶侵彻深度理论模型,深入研究了错位距离、弹径等关键参数对次发弹体弹道特性的影响机制。为简化问题并确保模型的合理性,提出以下基本假设:

- 弹体在侵彻过程中视为刚体;
- 混凝土靶为半无限靶,忽略边界效应;
- 忽略重力、弹体旋转阻力和阻力矩的影响;
- 弹体在侵彻过程中的速度变化在微小时段 dt 内呈线性;
- 隧道区径向尺寸与弹体直径近似相等;
- 多弹侵彻同一靶板时,各弹体的开坑深度与成坑角具有一致性。

根据 Chen 等^[9-10]的研究结果,将弹体侵彻半无限靶过程分为开坑-隧道两个阶段。考虑到不同阶段混凝土的损伤累积效应存在显著差异,本研究通过分别修正开坑、隧道阶段的混凝土抗压强度,建立了更为准确的弹体阻力模型,推导了后续弹体的运动轨迹方程,实现了对侵彻深度和偏转角度的计算。

(1) 开坑阶段分析

综合前期研究者关于开坑深度大量的试验研究成果^[11],确定开坑深度 x_1 与弹径 d 的定量关系为 $x_1=2d$,成坑角 α 的统计平均值为 24.7° 。通过几何分析可得开坑直径 $D=8.7d$,开坑侧面与水平面的夹角 β 约为 27.45° 。在开坑阶段,弹头与靶体初始接触的区域面积非常有限。基于空腔膨胀理论的分析:弹体高速冲击靶体时,在弹头接触区会激发球面压缩波,造成该区域混凝土发生粉碎性破坏。该球面压缩波在均匀介质

中以相同波速沿径向传播,使得空腔壁面所受的径向力呈圆周均匀分布,从而在极短时间内形成近似轴对称的空腔扩展行为。此外,考虑到开坑阶段本身持续时间极短,尽管理论上存在因不对称接触而产生的径向力分量,但其在量级上远小于轴向冲击阻力,因此在理论模型中将阻力简化为沿轴线方向,合理假设弹体在该阶段不发生显著偏转。示意图如图 1 所示。

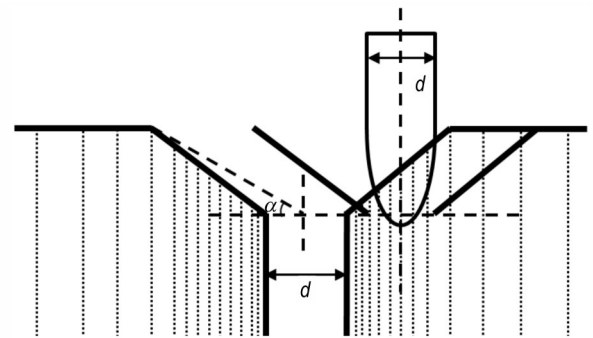


图 1 后续弹体错位序贯侵彻开坑叠加机制示意图

Fig. 1 Schematic of the crater superposition mechanism of sequential penetration by subsequent projectiles

根据 Forrestal 公式^[12],弹体开坑阶段的侵彻阻力 $F_1=c_1H_y$,其中 c_1 为侵彻阻力系数, $c_1 = \frac{\pi d}{8} \frac{(S_1 f_c + N^* \rho V_0^2)}{(1 + (2\pi d^3/4m)N^* \rho)}$; H_y 表示瞬时侵彻深度, m ; S 为靶标强度参数,与 f_c 相关, $S_1 = 72.0f_c^{-0.5}$, MPa; m 为弹体质量, kg; V_0 为弹体初始速度, $m \cdot s^{-1}$; ρ 是混凝土靶的密度, $kg \cdot m^{-3}$; 对于卵形、钝头弹头 $N^*=1/[1+4(h/d)^2]$ 、对于半球形弹头 $N^*=1/3(h/d)-1/24(h/d)^2$, h 为弹体头部长度, m 。

在开坑阶段,弹体侵彻所需克服的阻力,直接来自于其挤压、破碎并排开弹头前方混凝土体积所做的功。当后续弹体在前一发弹开坑区的位置侵彻时,其弹头前方需要被压缩和破碎的混凝土体积,由于前一发弹体侵彻开坑的存在而部分缺失。因此我们基于开坑面积的减少来表征混凝土靶“材料缺失”导致的强度下降,定义开坑修正参数为 λ :

$$f_{c1} = (1 - \lambda)f_c = \left(1 - \frac{A_{\text{overlap}}}{A_0}\right)f_c$$

$$= \left(1 - \frac{1}{90} \arccos\left(\frac{L}{D}\right) + \frac{2L}{\pi D^2} \sqrt{D^2 - L^2}\right)f_c \quad (1)$$

式中, λ 物理上代表了混凝土强度被缺失区域削弱的相对比例。 f_c 为混凝土靶初始抗压强度, MPa; A_0 为单发弹体侵彻完整靶标时的理论开坑面积, m^2 ; A_{overlap} 为

后续弹体侵彻时,其开坑区与已有开坑区发生重叠的面积。

根据动能定理^[13]可得第二发弹体开坑阶段侵彻速度 V_{r1} 变化计算公式如式(2)所示:

$$H_y = V_0 \sqrt{\frac{m}{c}} \sin \sqrt{\frac{c}{m}} t; \quad V_{r1} = V_0 \cos \sqrt{\frac{c}{m}} t \quad 0 \leq H_y \leq 2d \quad (2)$$

式中, t 为弹体侵彻过程的持续时间, s 。在数值求解过程中,我们通过设定积分步长,在 MATLAB 中对时间域进行离散,从而获取弹体运动状态(如速度、位移)随时间变化的数值解。

(2)隧道阶段分析

弹体在侵彻隧道区过程中头部受到的轴向阻力 $F_2 = \frac{\pi d^2}{4} (S_2 f_{c2} + N^* \rho V_{r2}^2)$ 。式中, V_{r2} 为第二发弹体侵彻隧道区时的瞬时速度, $m \cdot s^{-1}$ 。在弹体侵彻混凝土靶体的过程中,巨大的冲击动能会在隧道区周边产生强烈的应力波。该应力波向四周传播,其能量被混凝土材料吸收并耗散,宏观上表现为隧道区外围径向裂纹的扩展与延伸。因此,本研究将隧道区周边的裂纹扩张视为应力波能量在靶板内部传播与衰减的宏观表现形式。

将由应力波传播导致材料强度衰减,与应力波在传播过程中的能量衰减联系起来。应力波波阵面面积随距离增大而扩张,致单位面积上的波能量密度下降,造成的材料损伤程度也相应减弱,弹体应力波传播示意图如图 2 所示。应用经典应力波衰减理论对混凝土靶抗压强度进行修正得出 f_{c2} :

$$f_{c2} = (1 - e^{-A_2/A_1}) f_c = (1 - e^{-\frac{32\delta L^2 V_0^2}{m\pi d^2 V^2 [1 - \cos(180\delta/\pi)]}}) f_c \quad (3)$$

式中, A_1 为初始波面面积, $A_1 = m\pi d^2 V^2 / 4V_0^2, m^2$; V 为弹体侵彻实时速度, $m \cdot s^{-1}$; A_2 为距离第一发弹体水平距离 L 处的锥形波波面面积, $A_2 = 8\delta L^2 [1 - \cos(180\delta/\pi)]$,

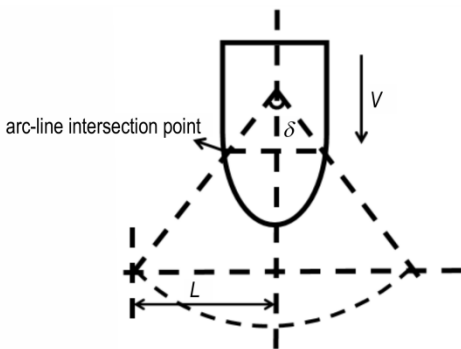
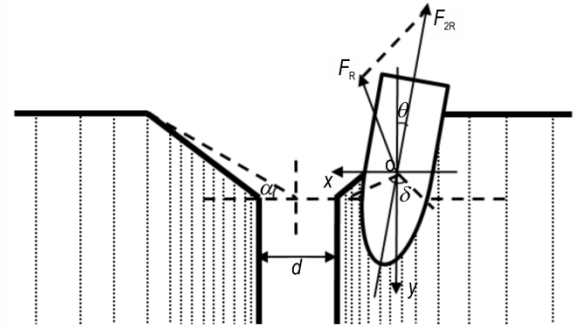


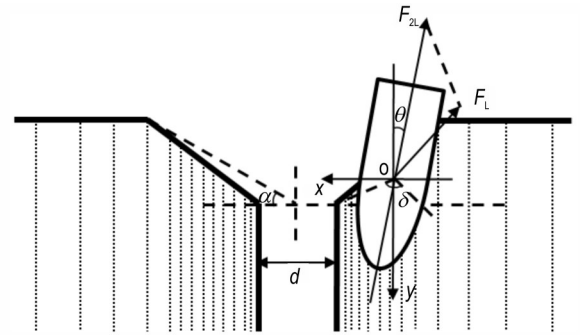
图 2 弹体侵彻应力波传播示意图^[14]

Fig.2 Schematic of the propagation of stress waves from projectile penetration

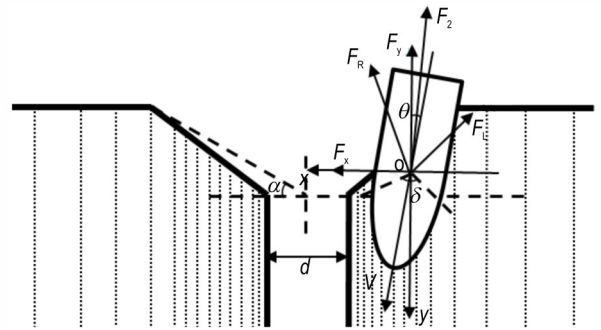
m^2 ; δ 为弹体质心和弹体头部两个弧直交界点连接的夹角, rad 。隧道阶段弹体受力分析如图 3 所示。



a. force on the left side of the projectile



b. force on the right side of the projectile



c. total force on the projectile

图 3 弹体隧道区侵彻过程中两侧及总受力分析图

Fig.3 Sidewall and total force analysis in a projectile penetrating tunnel area

弹体在隧道区的侵彻会在靶标内部形成裂纹,导致混凝土靶的强度下降且向四周呈递减趋势,因此多弹侵彻时,后一发弹体进入隧道区后,由于弹体轴线两侧混凝土靶强度不同导致弹体在侵彻过程中发生偏转。后一发弹体进入隧道区侵彻时的总阻力 F 是 F_R 与 F_L 的合力, F_R 与 F_L 近似为弹体侵彻无损伤混凝土靶时轴向总阻力沿质心与弹体头部弧直交界点连接线的法向分力。根据几何关系及侵彻隧道阶段轴向总阻力公式^[12]可得:

$$F_R = \frac{\pi d^2 (S_{2R} f_{cR} + N^* \rho V_{r2}^2)}{8 \cos \frac{\delta}{2}} \quad (4)$$

$$F_L = \frac{\pi d^2 (S_{2L} f_{cL} + N^* \rho V_{r2}^2)}{8 \cos \frac{\delta}{2}} \quad (5)$$

式中,将 F_R 与 F_L 中的靶标强度等效分别为距离前一发弹体隧道区中心线 $L+d/2$ 与 $L-d/2$ 处的强度,即 $f_{cR} =$

$$(1 - e^{-\frac{32\delta(L+d/2-H_0^0)^2 V_0^2}{m\pi d^2 V^2 [1 - \cos(180\delta/\pi)]}}) f_{c0}, f_{cL} = (1 - e^{-\frac{32\delta(L-d/2-H_0^0)^2 V_0^2}{m\pi d^2 V^2 [1 - \cos(180\delta/\pi)]}}) f_{c0}$$

对 F_R 和 F_L 在 xoy 平面上进行分解得出水平方向偏转力 F_x 与竖直方向阻力 F_y 分别为:

$$F_x = F_R \cos(\frac{\delta}{2} + \theta) - F_L \cos(\frac{\delta}{2} - \theta) \quad (6)$$

$$F_y = F_R \sin(\frac{\delta}{2} + \theta) + F_L \sin(\frac{\delta}{2} - \theta) \quad (7)$$

对弹体在隧道区的侵彻过程进行微元化处理:

$$H_x^{n+1} = H_x^n + \Delta H_x^n \quad (8)$$

$$H_y^{n+1} = H_y^n + \Delta H_y^n \quad (9)$$

$$\theta^{n+1} = \theta^n + \Delta\theta, \quad \Delta\theta = \frac{\Delta H_y^n}{\Delta H_x^n} \quad (10)$$

初始条件:

$$H_x^0 = 0; H_y^0 = 0; \theta^0 = 0; V_x^0 = 0; V_y^0 = V_1$$

根据刚体运动方程^[13]以及牛顿第二定律可得隧道阶段弹体侵彻深度与速度变化公式:

$$H_y = V_1 t - \frac{F_y t^2}{2m} \quad H_y \geq 2d \quad (11)$$

$$V_{r2} = V_1 - \frac{F_y t}{m} \quad (12)$$

式中, V_1 为弹体进入隧道区时的速度,即当式(2)中 $H_y=2d$ 时, $V_{r1}=V_1$ 。

综上所述,结合开坑阶段与隧道阶段弹体侵彻深度与速度变化公式,利用MATLAB程序进行编程,设定一定的时间步长进行迭代计算直到速度为零,最终

得到弹体侵彻深度、速度变化的曲线图。

1.2 错位侵彻工况

基于多弹体错位侵彻混凝土靶的弹道偏转特性,可将后续弹体的侵彻行为归纳为以下三种典型工况:(1)弹体在侵彻过程中由于靶标裂纹分布不均导致的强度差异,发生显著偏转,最终进入前序弹体的侵彻弹道。该工况下,后续弹体可能与前弹体发生碰撞或侵彻路径重叠,导致侵彻深度受限;(2)弹体在侵彻过程中虽发生偏转,但未与前弹体道交汇,而是形成独立侵彻通道。该工况下,由于前弹体已削弱靶体局部强度,次发弹体侵彻深度通常较单发侵彻显著提升;(3)弹体侵彻过程中偏转程度甚微,基本保持直线运动。该工况下,前弹对后续弹体的影响可忽略,侵彻行为近似为单发弹体独立侵彻。

针对上述三种工况,定义弹体弹着点之间的错位距离为 L ,发生第一种工况的最大错位距离为 L_1 ,当 $L < L_1$ 时,次发弹体必然偏转并汇入前弹体道,侵彻深度受限;发生第三种工况的最小错位距离为 L_2 ,当 $L > L_2$ 时,后续弹体偏转可忽略,近似独立侵彻,侵彻深度与单发弹体相近;当 $L_1 < L < L_2$ 时,发生第二种工况,次发弹体偏转但不汇入前弹体道,受前弹体损伤影响,侵彻深度显著提升。多弹体侵彻情形示意图如图4所示。

2 试验验证

2.1 试验设计

结合现有试验条件,选用57 mm口径火炮作为试验平台、以80 MPa混凝土靶为试验靶标,开展多弹错位序贯侵彻试验研究。根据理论分析,在弹径57 mm弹体以 $600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 初速度错位序贯侵彻80 MPa混凝土靶过程中,后续弹体发生偏转但不进入前一发弹

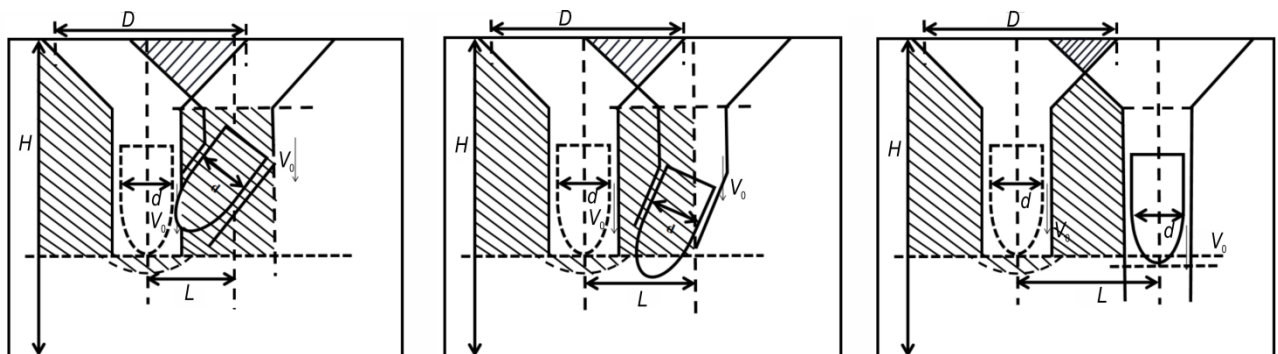


图4 多弹错位侵彻工况示意图

Fig.4 Schematic of multi-projectile dislocated penetration conditions

道的最大错位距离 L_1 为 2 倍弹径 ($2d$), 后续弹体侵彻行为不受前一发弹体影响的最小错位距离 L_2 为 7 倍弹径 ($7d$)。基于此, 设计以下两组试验方案:

第一组试验旨在研究前序弹体对后续弹体侵彻深度和偏转角度的影响。三发弹着点呈线性排列: 第一发为基准弹, 第二发偏移 $2d$, 第三发偏移 $5d$, 且第二与第三发间距为 $7d$, 如图 5a 所示。由于弹道轴线平行, 为了便于弹坑形态准确观测和侵彻轨迹的二维对称分析, 第一组试验采用方形靶标。

第二组试验重点考察前两发产生的累积损伤对第三发弹体侵彻行为的影响。前两发位置与第一组相同, 第三发则布置于以第一发为圆心、半径 $5d$ 的圆弧上, 且与第一、二发弹着点呈约 120° 夹角, 如图 5b 所示。

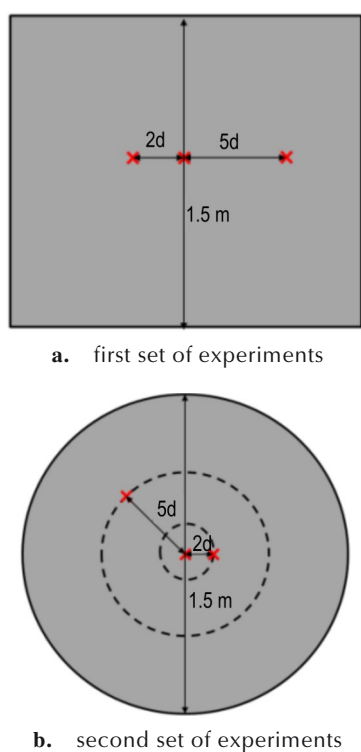


图 5 弹体预着点示意图

Fig.5 Pre-set hitting point diagram for projectiles

表 1 理论计算结果与试验结果对比

Table 1 Comparison of theoretical calculation results with experimental results

test	distance from the first projectile / m	distance from the second projectile / m	initial velocity / $m \cdot s^{-1}$	tested depth / m	theoretical depth / m	tested deflection angle / ($^\circ$)	theoretical deflection angle / ($^\circ$)
1	-	-	582.2	0.45	0.48	0	0
2	0.12(2.4d)	-	584.3	0.57	0.59	24.7	26.7
3	0.26(5.2d)	0.37(7.4d)	588.6	0.63	0.65	8.9	6.3
4	-	-	583.5	0.46	0.48	0	0
5	0.11(2.2d)	-	587.5	0.60	0.63	24.4	26.1
6	0.25(5d)	0.27(5.4d)	589.1	0.75	0.76	10.3	10.2

示。为减小角落造成的应力集中, 有利于评估累积损伤的分布特性及弹体偏转行为, 第二组试验选用圆柱形靶。

试验均采用弹径 57 mm, 全长 250 mm, 弹重 3.4 kg 的弹体, 三发弹体依次侵彻, 弹体始终保持在靶体内。根据理论模型计算, 两组试验中最大侵深(第二组的第三发弹)约为 0.78 m, 为规避冲塞现象且忽略边界影响, 第一组试验采用 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 的立方体靶标, 第二组试验采用直径 1.5 m, 厚 1.5 m 的圆柱形靶。试验前在靶面标记预定弹着点位置, 每发弹侵彻后均采集弹体着靶速度、着靶攻角、弹坑形貌、弹体偏转情况以及侵彻深度等参数。

2.2 试验结果与分析

图 6 为试验后混凝土靶标的破坏形态。从图中可见, 多弹体侵彻导致靶面发生大面积剥落, 并形成明显的径向裂纹。两组试验中, 后两发弹体的侵彻轨迹均出现偏转现象。第一组试验的后两发弹体及第二组试验的第二发弹体均朝第一发弹体的弹道方向偏转; 而第二组试验的第三发弹体则朝第一发与第二发弹道之间的中间位置偏转。该结果表明, 前序弹体对后续弹体的侵彻轨迹具有导向作用, 且第三发弹体的偏转行为受到前两发弹体造成的累积损伤效应的影响。具体试验结果及相应的理论计算结果见表 1。



图 6 侵彻试验图像

Fig.6 Penetration test image

根据表1的结果,我们分析如下:

(1)侵彻深度变化规律分析:第一组试验中,第二发弹体侵彻深度较第一发增加26.6%,第三发较第二发进一步增加10.5%;第二组试验中,第二发较第一发增加30.4%,第三发较第二发增加25%。上述结果表明,错位序贯侵彻能够有效提升后续弹体的侵彻深度,但随着错位距离增大,侵深增幅呈减小趋势。该现象可从损伤累积与应力波传播共同作用的角度进行解释。具体而言,前序弹体侵彻过程中产生的应力波沿弹道向四周传播,导致弹道周围裂纹扩展、胶凝材料断裂、骨料-砂浆界面脱粘,形成损伤区^[15]。后续弹体侵彻时,该区域动态抗侵彻强度显著降低,弹体所受侵彻阻力减小,从而侵深增加。损伤区强度衰减程度与错位距离呈负相关关系,应力波传递距离越远,强度越低,损伤区强度衰减程度越小,因此随着错位距离增加,侵深增幅减小;

(2)弹体偏转行为分析:在第二发弹体错位2倍弹径侵彻条件下,其偏转角度约为24°;第三发弹体与第一发错位5倍弹径侵彻时,偏转角度约为10%。结果表明,弹体偏转角度随错位距离的增加而逐渐减小。该现象可归因于前序弹体形成的损伤区对后续弹体运动轨迹具有导向作用。由于损伤在空间上呈非对称分布,靠近前序弹道一侧材料强度较低,远离一侧强度较高,形成阻力差并产生使弹体向前序弹道偏转的力矩。偏转角度随错位距离增大而减小的趋势,同样反映了损伤程度与错位距离之间的负相关关系,符合连续介质损伤力学中损伤变量的衰减规律。

(3)理论模型验证分析:侵彻深度的理论计算结果普遍高于试验值,最大偏差为6.7%。尽管存在一定高估,理论模型与试验结果整体吻合良好,验证了本文所建立的考虑损伤累积与应力波传播的理论模型的有效性。理论值偏高的主要原因在于模型未能完全涵盖侵彻过程中的多项能量耗散机制,例如弹体与靶体间的摩擦能耗、弹头磨损引起的动能损失,以及质量侵蚀导致的动能耗散等^[16]。这些在实际侵彻中不可忽略的能量损失机制在理论模型中尚未充分体现,从而导致理论预测值系统性偏高。

3 数值仿真计算

3.1 仿真模型

采用LS-DYNA数值模拟软件^[17]建立了多弹体错

位序贯侵彻半无限混凝土靶仿真模型,基于多弹错位序贯侵彻过程中弹体先后依次侵彻的时序特性,结合重启动技术进行计算。重启动技术可有效处理多弹侵彻中的先后时序关系,实现在同一模型中动态响应继承与分阶段计算,显著提高计算效率并保证物理过程的连续性。弹体采用MAT_RIGID模型。为了准确表征混凝土材料在高应变载荷下的力学响应,包括强度下降、裂纹扩张等行为,混凝土靶采用RHT本构模型。弹体与混凝土靶材料参数分别见表2。

表2 弹体与混凝土材料参数^[18-19]

Table 2 Material parameters of the projectile and concrete^[18-19]

material	$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	E / GPa	ν	f_c / MPa
projectile	7.85	210	0.3	-
concrete	2.30	16.7	-	80

RHT模型在模拟极端变形时存在一定的局限性^[20],该模型的材料损伤演化通过损伤变量D进行描述,当D趋近于1时,材料强度虽退化至极低的残余值,但该单元并未被自动移除,而是仍保留在计算网格中继续参与力学计算。此时,单元已几乎丧失承载能力,但在强烈冲击或压缩载荷下仍会发生进一步的大变形,导致单元产生严重的畸变引发负体积问题,造成计算终止。为解决该问题,在RHT模型中引入附加的单元失效准则MAT_ADD_EROSION作为后处理判据^[21],该准则通过为单元定义合理的失效阈值(如最大主应变),能够将模型中达到临界损伤状态、已丧失承载能力的单元及时从计算网格中删除。一方面避免了已失效单元在极端变形下产生严重畸变,从而有效防止了因此引发的负体积等数值问题,确保了计算的稳定性;另一方面,通过主动移除材料,它也更能真实地模拟混凝土等材料在冲击载荷下发生的开裂、剥落与破碎等物理现象。

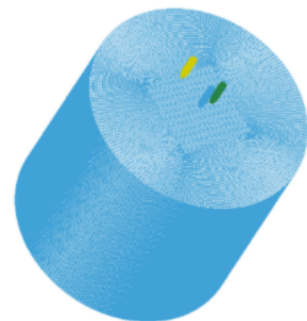


图7 错位序贯侵彻仿真模型

Fig.7 Simulation model of the dislocated sequential penetration

3.2 模型验证

为验证所建立的多弹体错位序贯侵彻仿真模型的准确性,利用试验结果与理论模型计算结果进行了对比分析。首先,表3展示了相同工况下仿真计算结果与试验结果的对比,可见两者最大偏差为9.0%,可以

满足工程设计的需要^[22];其次,图8对比了数值仿真图像与理论模型计算迹线,可见两者弹体侵彻路径相似。这证明了模型能够准确模拟侵彻过程。综上结果均表明,本研究采用的仿真模型可靠性较高,可用于后续分析。

表3 仿真计算结果与试验结果对比

Table 3 Comparison of simulation calculation results with experimental results

test	distance from the first / m	distance from the second / m	tested depth / m	simulated depth / m	error / %	tested angle / (°)	simulated angle / (°)	error / %
1	-	-	0.45	0.46	4.6	0	0	0
2	0.12(2.4d)	-	0.57	0.62	3.0	24.7	23.6	4.5
3	0.26(5.2d)	0.37(7.4d)	0.63	0.67	5.0	8.9	8.1	9.0
4	-	-	0.46	0.46	4.4	0	0	0
5	0.11(2.2d)	-	0.60	0.62	1.6	24.4	23.2	4.9
6	0.25(5d)	0.27(5.4d)	0.75	0.77	1.3	10.3	10.8	4.9

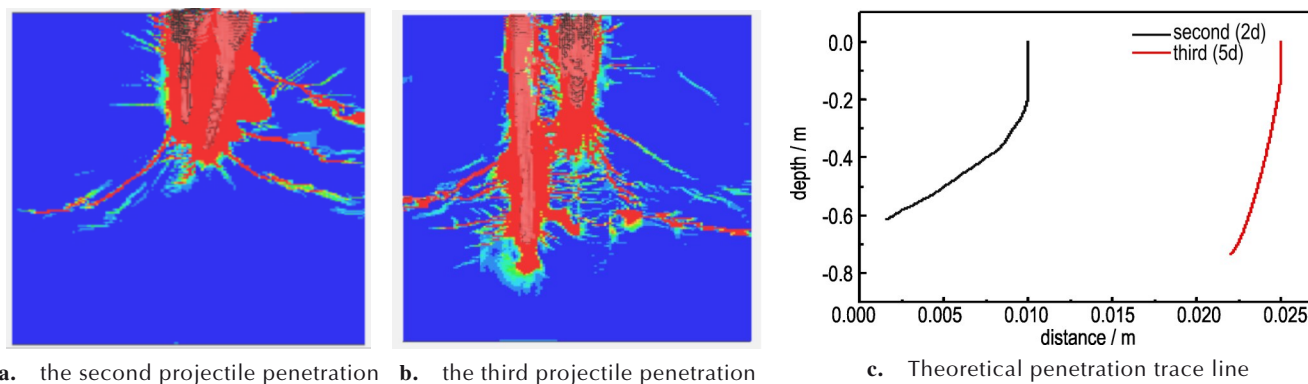


图8 仿真图像与理论侵彻迹线对比

Fig.8 Comparison of simulated images with theoretical penetration trajectory

3.3 仿真工况

为探究多弹体错位序贯侵彻过程中弹体直径、错位距离两因素对后续弹体侵彻深度及弹体偏转的影响规律,选取特定弹体速度 $600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、靶标强度 80 MPa 开展了不同工况下的数值仿真计算,采用的弹体参数分别为:(1)弹径 57 mm ,弹长 285 mm ,质量 3.4 kg ;(2)弹径 80 mm ,弹长 400 mm ,质量 12.8 kg ;(3)弹径 100 mm ,弹长 500 mm ,质量 24.6 kg 。仿真工况主要为:

(1)两弹体错位序贯侵彻:通过改变两发弹体错位距离,计算不同弹径弹体对应的最大与最小错位距离,旨在揭示弹径、错位距离对第二发弹体侵彻深度与偏转行为的影响规律,如图9a所示;

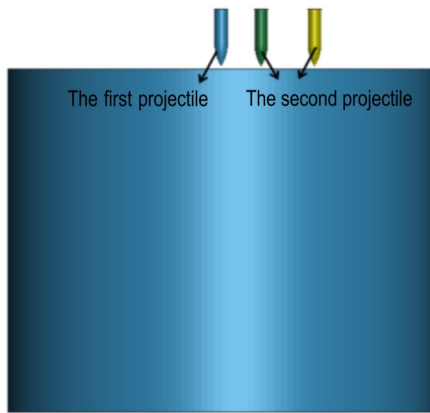
(2)三弹体错位序贯侵彻:在固定第二、第三发与第一发错位距离的基础上,将第一发与第二发错位距离设为最小错位距离,第三发与第二发相距最

远时(即三发弹体处于同一水平线且第二发与第三发位于第一发异侧)的距离为最大错位距离,通过改变第三发相对位置,分析前两发弹体造成的累积损伤效应对第三发侵彻深度与偏转角度的影响规律,如图9b所示。

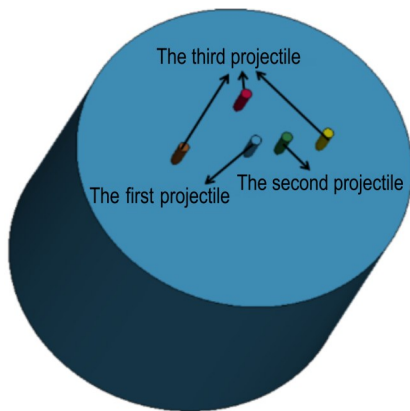
3.4 结果与分析

对不同工况的错位序贯侵彻过程进行了数值仿真,获得了弹体的侵彻深度曲线。分析发现,错位序贯侵彻能显著提升后续弹体的侵彻深度。在弹体偏转行为方面,弹体在侵彻过程中呈现出朝向前一发弹道的偏转。

通过对不同弹径弹体在较小错位距离下侵彻过程的仿真分析,观察第二发弹体的侵彻图像,如图10所示,可以得出 $57, 80, 100 \text{ mm}$ 弹径弹体偏转但不进入前一发弹体弹道的最大错位距离 L_1 分别为2倍,3倍,3.5倍弹径;进一步,通过对比比较大错位距离条件下第



a. sequential penetration with dislocated two projectiles



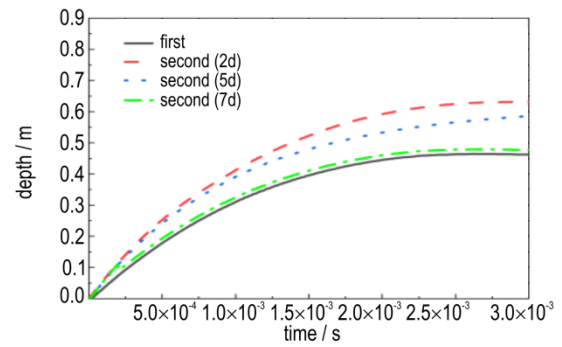
b. sequential penetration with dislocated three projectiles

图9 多弹体错位序贯侵彻工况图

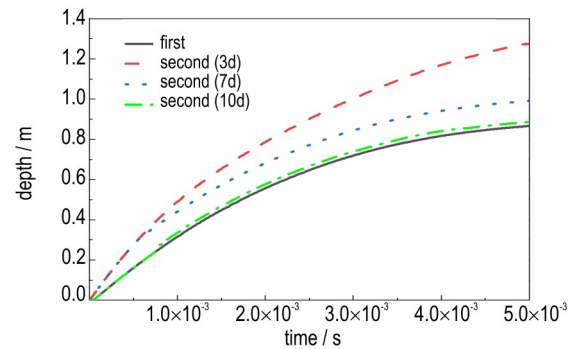
Fig.9 Operating condition diagram of multi-projectile dislocated sequential penetration

二发与第一发弹体的侵彻速度,如图10所示,可以得出错位序贯侵彻不产生影响的最小错位距离 L_2 分别为7倍,10倍,14倍弹径。该结果表明,前序弹体侵彻所造成的损伤对后续弹体产生影响的区间与弹体直径呈正相关关系。当后续弹体错位距离处于该区间时,随着错位距离增加,错位侵彻对后续弹体侵深增幅逐渐减弱,同时弹体的偏转角度也相应降低。在两发弹体错位序贯侵彻工况下,57,80,100 mm弹径弹体的第二发侵彻深度的最大增幅分别为30.4%、38.6%、27.9%。两发弹体错位序贯侵彻仿真计算结果如图11所示。

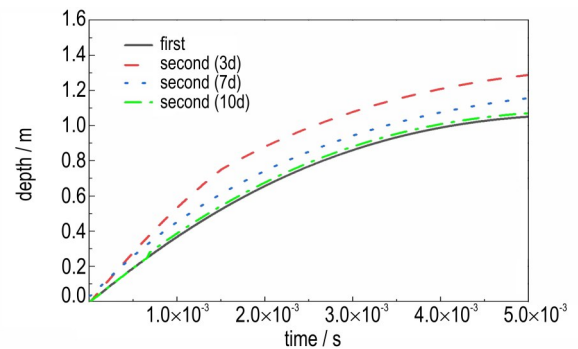
在第三发弹体错位序贯侵彻过程中,随着其与第二发弹体的错位距离减小,第三发弹体的侵彻深度增加,但增加幅度呈现逐渐减小的趋势。该现象表明,前两发弹体在靶标内部产生的累积损伤效应有助于提升第三发弹体的侵彻深度。同时第二发弹体在侵彻过程中由于受第一发残余应力场及材料



a. 57 mm



b. 80 mm



c. 100 mm

图10 两发弹体错位侵彻同一靶标仿真结果

Fig.10 Simulation results of two projectiles' displaced penetration into the same target

非对称破坏的影响,产生向第一发弹道方向的宏观偏转。当侵彻至临界深度时,其实际位置与预设弹着点位置形成显著偏差。在此条件下,当第三发弹体以较小错位距实施侵彻时,第二发弹体侵彻所造成的损伤对其影响减弱。导致第三发弹体侵彻深度的增幅降低。

通过对比两发弹体的侵彻结果发现,当第一与第二发错位距离相同,且第三发与第二发之间相距最小错位距离 L_2 时,第三发弹体的侵彻深度显著大于第二发弹体在相同错位距离条件下的侵彻深度。这一结果

表明,前两发弹体的累积侵彻效应增加错位序贯侵彻的影响区间。分析可知,第二发弹体对靶标造成损伤时,靶标内残余的应力场会引导后续裂纹的扩展路径,使得损伤区范围增加,同时第二发弹体的偏转侵彻也进一步扩展了损伤边界。不同弹径第三发弹体的仿真计算结果如图 11 所示。

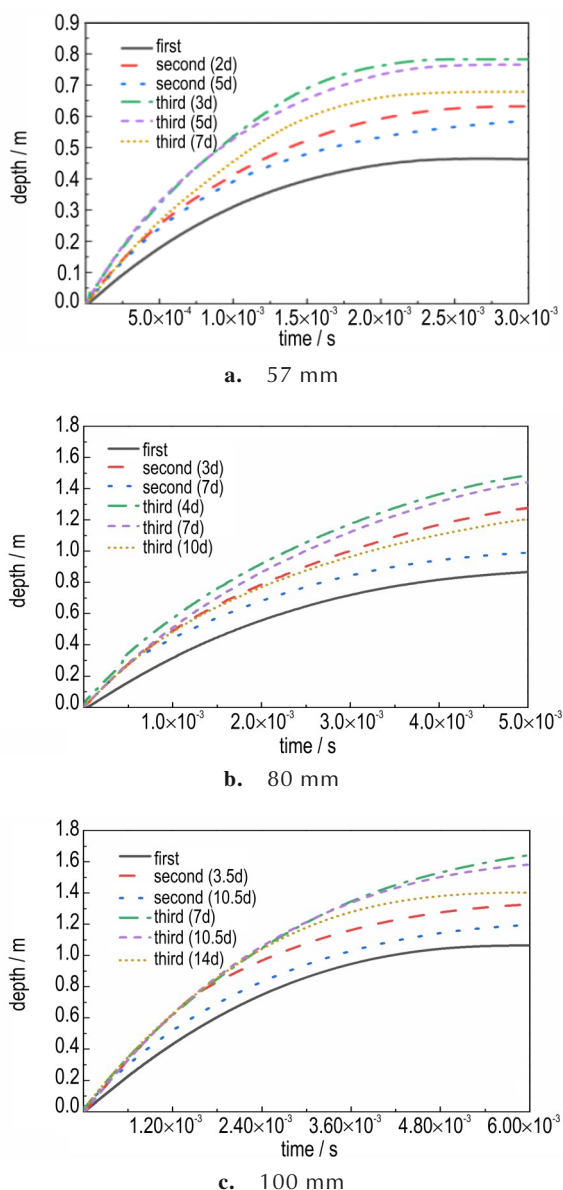


图 11 三发错位侵彻同一靶标仿真结果图像

Fig. 11 Simulation results of three projectiles' dislocated penetration into the same target

4 结束语

通过理论建模、试验验证以及数值仿真三者相结合的方法,研究了多弹体错位序贯侵彻过程中,弹径、

错位距离对后续弹体侵彻深度及弹体偏转的影响规律。结合空腔膨胀理论与应力波传播造成靶标裂纹扩展机理,建立了多弹体错位序贯侵彻深度理论模型。研究结果表明:

(1)多弹错位序贯侵彻过程存在后续弹体偏转但不进入前一发弹道的最大错位距离 L_1 和不受前序弹体影响的最小错位距离 L_2 。对于弹体以 $600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度侵彻 80 MPa 混凝土靶, 57, 80, 100 mm 弹径弹体的最大错位距离分别为 2 倍、3 倍、3.5 倍弹径, 最小错位距离分别为 7 倍、10 倍、14 倍弹径。该区间内, 错位序贯侵彻可以有效增加后续弹体的侵彻深度, 增加幅度随着错位距离的增加而减小;

(2)多弹错位序贯侵彻过程中, 前序弹体对后续弹体的运动轨迹具有导向作用。在影响区间内, 随着错位距离的增加, 后续弹体偏转角度逐渐减小;

(3)对于多弹体以 $600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 错位序贯侵彻混凝土靶的工况, 本文建立的理论模型计算出的侵彻深度、偏转角度与试验结果最大偏差为 6.7%, 仿真模型计算结果与试验结果最大偏差为 9.0%, 均吻合较好, 可靠。

本研究对多弹侵彻问题提供了理论参考, 对实际作战过程中的战术应用与毁伤评估具有重要指导意义。对于弹体速度、弹体时序性等对多弹错位侵彻的影响将在后续工作中进一步研究。

参考文献:

- [1] ANTOUN T H, LOMOV I N, GLENN L A. Simulation of the penetration of a sequence of bombs into granitic rock[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 29 (1-10): 81-94.
- [2] 邓国强, 杨秀敏. 钻地弹重复打击效应现场试验研究[J]. *防护工程*, 2012, 34(5): 1-5.
DENG Guo-qiang YANG Xiu-min. Experimental investigation into damage effects of repeated attacks of precision-guided penetration weapons [J]. *Protective Engineering*, 2012, 34 (5): 1-5.
- [3] 邓国强, 杨秀敏. 工程岩体中多弹重复打击效应的数值模拟分析[J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(3): 361-366.
DENG Guo-qiang, YANG Xiu-min. Numerical simulation of the effect of multiply EPW into engineering rock[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(3): 361-366.
- [4] 左魁, 曾宪明, 王启睿, 等. 钻地模型弹对岩石模拟材料二次侵彻试验[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2007, (06): 626-629.
ZUO Kui, ZENG Xian-ming, WANG Qi-ru, et al. Second time penetration of earth-penetrating model projectile in rock medium[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*,

- 2007,(06):626-629.
- [5] GOMEZ J T, SHUKLA A. Multiple impact penetration of semi-infinite concrete [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 25:965-979.
- [6] 赖建中,朱耀勇,徐升,等.超高性能水泥基复合材料抗多次侵彻性能研究[J].爆炸与冲击,2013,33(6):601-607.
LAI Jian-zhong, ZHU Yao-yong, XU Sheng, et al. Resistance of ultra-high-performance cementitious composites to multiple impact penetration [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(6): 601-607.
- [7] 吴平,周飞,李庆华,等.超高韧性水泥基复合材料—纤维混凝土组合靶体抗两次打击试验研究[J].爆炸与冲击,2022,42(3):166-178.
WU Ping, ZHOU Fei, LI Qing-hua, et al. Experimental study on the resistance of the ultra high toughness cementitious composites material-fiber concrete composite targets subjected to twice projectiles impact [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(3): 166-178.
- [8] 王志亮,李允忠,黄佑鹏.JH-2模型参数确定及花岗岩重复侵彻数值分析[J].哈尔滨工业大学学报,2020,52(11):127-136.
WANG Zhi-liang, LI Yun-zhong, HUANG You-peng. Parameter determination of JH-2 model and numerical analysis of repeated penetration of granite [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(11): 127-136.
- [9] 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*, 2003, 30(2004): 617-637.
- [10] CHEN X W, LI X L, HUANG F L, et al. Normal perforation of reinforced concrete target by rigid projectile [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(2008): 1119-1129.
- [11] 王杰,武海军,周婕群,等.长杆弹超高速侵彻半无限混凝土靶实验研究及开坑分析[J].爆炸与冲击,2020,40(9):54-65.
WANG Jie, WU Hai-jun, ZHOU Jie-qun, et al. Influence factors on penetration efficiency for long-rod projectile vertically penetrating semi-infinite target and its rules [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(9): 54-65.
- [12] FORRESTAL M J, LUK V K. Penetration into soil targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1992, 12 (3) : 427-444.
- [13] 许香照.混凝土/钢筋混凝土的侵彻破坏行为研究[D].北京:北京理工大学,2018.
XU Xiang-zhao. Research on failure behavior of concrete/reinforced concrete subjected to the penetration loading [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018
- [14] 周鑫,冯彬,陈力,等.活性射流侵彻-内爆作用下半无限混凝土靶中应力波效应[J].含能材料,2025,33(7):689-702.
ZHOU Xin, FENG Bin, CHEN Li, et al. Stress wave effect in semi-infinite concrete targets subjected to penetration-implosion action of reactive jet [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2025, 33(7): 689-702.
- [15] 檀日晶,任会兰,李涛.混凝土中裂纹起裂和损伤演化的离散元模拟[J/OL].兵工学报,1-12[2025-09-15].
TAN Ri-jing, REN Hui-lan, LI Tao. Discrete element simulation of crack initiation and damage evolution in concrete [J/OL]. *Acta Armamentarii*, 1-12[2025-09-15].
- [16] 刘均伟,张先锋,刘闯,等.考虑摩擦因数变化的弹体高速侵彻混凝土质量侵蚀模型研究[J].爆炸与冲击,2021,41(8):114-124.
LIU Jun-wei, ZHANG Xian-feng, LIU Chuang, et al. Study on mass erosion model of projectile penetrating concrete at high speed considering variation of friction coefficient [J]. *Explosion And Shock Waves*, 2021, 41(8): 114-124.
- [17] 王银,孔祥振,方秦,等.弹体对混凝土材料先侵后爆炸损伤破坏效应的数值模拟研究[J].爆炸与冲击,2022,42(1):60-73.
WANG Yin, KONG Xiang-zhen, FANG Qin, et al. Numerical investigation on damage and failure of concrete targets subjected to projectile penetration followed by explosion [J]. *Explosion And Shock Waves*, 2022, 42(1): 60-73.
- [18] 邓勇军,陈小伟,钟卫洲,等.弹体正侵彻钢筋混凝土靶的试验及数值模拟研究[J].爆炸与冲击,2020,40(2):26-36.
DENG Yong-jun, CHEN Xiao-wei, ZHONG Wei-zhou, et al. Experimental and numerical study on normal penetration of a projectile into a reinforced concrete target [J]. *Explosion And Shock Waves*, 2020, 40(2): 26-36.
- [19] 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.
NIE Zheng-yue, PENG Yong, CHEN Rong, 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.
- [20] 赛冬拉·马学义,崔激,江志安,等.考虑损伤效应的塑性混凝土本构模型构建及数值实现[J].水利学报,2025,56(7):920-932.
SAI Dong-la·MA Xue-yi, CUI Wei, JIANG Zhian, et al. Development and numerical implementation of a constitutive model for plastic concrete incorporating damage effects [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2025, 56(7): 920-932.
- [21] 任根茂,吴昊,方秦,等.普通混凝土HJC本构模型参数确定 [J].振动与冲击,2016,35(18):9-16.
REN Gen-mao, WU Hao, FANG Qin, et al. Determinations of HJC constitutive model parameters for normal strength concrete [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35 (18) : 9-16.
- [22] 吴焕龙,杜明章,杨超,等.射孔弹聚能射流侵彻钢靶的数值仿真与实验分析[J].爆破器材,2012,41(2):30-33.
WU Huan-long, DU Ming-zhang, YANG Chao, et al. Numerical simulation and experimental analysis of shaped charge jet penetrating into steel target [J]. *Explosive Materials*, 2012, 41(2): 30-33.

Penetration Depth of Dislocated Sequential Penetration by Multiple Projectiles into a Semi-infinite Concrete Target

XU Bao-wen, ZHANG Ding-shan, ZHANG Bo, Quan Jia-lin, LV Yong-zhu

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: To investigate the effects of projectile diameter and dislocation distance on the penetration depth and deflection behavior of subsequent projectiles during multi-projectile dislocated sequential penetration into a semi-infinite target, a theoretical model and numerical simulation model for the penetration depth of concrete targets under dislocated sequential penetration by multiple projectiles were established. Experimental tests on multi-projectile dislocated sequential penetration were conducted to validate the reliability of the models. The results show that the penetration depth and deflection angles calculated from theoretical and numerical models agree well with experimental data, with maximum deviations of 6.7% and 9.0%, respectively. There exists a range of dislocation distances for multi-projectile penetration, where the lower limit L_1 represents the maximum dislocated distance at which subsequent projectiles deflect without entering the preceding projectile's trajectory, and the upper limit L_2 denotes the minimum dislocated distance at which subsequent projectiles are almost unaffected by the preceding ones. Within this range, dislocated sequential penetration significantly enhances the penetration depth of subsequent projectiles, with preceding projectiles guide the trajectories of the subsequent ones. The influence of preceding projectiles on subsequent ones is negatively correlated with the dislocation distance. Under the condition where projectiles penetrate a 80 MPa concrete target at a velocity of $600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the penetration depth of the second 57mm projectile increases by approximately 30% compared to the first, while the third projectile's penetration depth increases by up to 25% compared to the second. For projectiles with diameters of 57, 80, and 100 mm, the corresponding L_1 values are 2, 3, and 3.5 times the projectile diameter, respectively, and the L_2 values are 7, 10, and 14 times the diameter, respectively.

Key words: dislocated penetration; penetration depth; numerical simulation; multiple project

CLC number: TJ55;O315

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2025211

(责编:姜梅)