

弹体正贯穿混凝土靶开坑崩落的破坏效应*

李鹏程^{1,2,5}, 刘闯², 陈昌金³, 邓勇军^{4,5}, 张先锋²

(1. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010;

2. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094;

3. 中国兵器工业第五八研究所, 四川绵阳 621000;

4. 西南科技大学 航空航天学院, 四川 绵阳 621010;

5. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621010;)

摘要: 为深入分析弹体贯穿混凝土靶的破坏效应及其对侵彻过程的影响, 开展了系统性理论研究工作。基于弹体正贯穿混凝土靶的崩落破坏现象, 建立了崩落效应模型, 并结合开坑效应模型与靶体阻力函数, 构建了综合考虑开坑效应和崩落效应的侵彻理论模型, 进而分析了靶厚、撞击速度对侵彻过程及靶体破坏参数的影响规律。研究结果表明: 随着混凝土厚度减小或撞击速度增大, 崩落效应对侵彻阻力及剩余速度的影响程度减弱, 崩落阶段飞溅区占比增大, 飞溅效应成为影响崩落阶段阻力的主导因素; 当靶厚大于 4.5 倍弹径时, 崩落效应对靶后剩余速度的影响超过 10%, 不可忽略; 开坑深度随厚度增大先线性增加 (厚度小于等于 4 倍弹径) 后趋于稳定, 崩落深度随厚度增大先线性增加 (厚度小于等于 6.9 倍弹径) 后线性减小; 在线性增大阶段, 开坑深度与崩落深度均约为靶厚的一半; 与薄靶相比, 撞击速度变化对厚靶的开坑深度与崩落深度影响更为显著。所建模型能有效表征了混凝土靶的破坏效应, 可为混凝土靶侵彻分析与防护设计提供理论依据。

关键词: 弹体; 正侵彻; 混凝土靶; 开坑效应; 崩落效应

中图分类号: O385 国际学科代码: 130.35 文献标志码: A

Damage effects of projectiles perforating finite-thickness concrete targets

LI Pengcheng^{1,2,5}, LIU Chuang², CHEN Changjin³, DENG Yongjun^{4,5}, ZHANG Xianfeng²,

(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 621010, China;

3. No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China;

4. School of Aeronautics and Astronautics, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

5. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang 621010, Sichuan, China;)

Abstract: To further analyze the damage effects of projectile penetration into concrete targets and their influence on the penetration process, a spalling effect model for normal projectile penetration was established, based on the observed spalling damage phenomena. Subsequently, by integrating the target resistance function, a theoretical penetration model was developed.

*收稿日期: 2025-12-29; 修回日期: 2026-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(12502456, U2441209, U2541240); 中央引导地方科技发展项目 (2025ZYDF014)

第一作者: 李鹏程(1996-), 男, 博士研究生, 987323971@qq.com;

通信作者: 张先锋(1978-), 男, 教授, 博士生导师, lynx@njust.edu.cn。

The cratering effect and the spalling effect were considered in the presented model. The reliability of the theoretical penetration model was verified using experimental data on crater depth, spalling depth, and residual velocity. Finally, based on this presented model, the influence of the concrete target thickness and initial impact velocity on the penetration process and the damage parameters of concrete targets were discussed. As the thickness increases, the influence of spalling damage on penetration resistance and the residual velocity becomes more pronounced, while the proportion of the splashing zone decreases during the spalling stage. When the thickness is less than $3d$, the spalling zone is a splash zone. When the concrete thickness exceeds $4.5d$, the influence of the spalling effect on the residual velocity exceeds 10%, rendering the spalling effect non-negligible. With increasing impact velocity, the influence of the spalling effect on penetration resistance and residual velocity decreases. Concurrently, the proportion of the splashing zone within the spalling stage gradually expands, causing the splashing effect to become the dominant factor governing resistance variations during spalling. With increasing concrete target thickness, the crater depth first increases linearly ($\text{thickness} \leq 4d$) and then stabilizes, while the spalling depth initially exhibits a linear increase ($\text{thickness} \leq 6.9d$) followed by a linear decrease. During the linear growth phase, both the crater depth and the spalling depth approximate half of the concrete target thickness. Compared to thin concrete targets, variations in impact velocity exhibit a more pronounced influence on the crater depth and spalling depth during the penetration of thick concrete targets.

Keywords: impact dynamics; projectile; penetration; concrete targets; cratering effect; spalling effect

随着防御系统的发展,地面建筑、地下防御设施等建造形式普遍采用有限厚混凝土结构^[1]。钻地武器(以下简称弹体)贯穿该类混凝土目标的终点效应一直是新概念武器研发和工程防护领域关注的热点问题^[2]。无论是混凝土厚靶还是混凝土薄靶,当遭受弹体贯穿时,迎弹面和背面均会产生显著的开坑效应和崩落效应。开坑深度和崩落深度占比较大,开坑阶段和崩落阶段成为整个贯穿过程的重要组成部分^[3,4]。特别对于混凝土薄靶,整个侵彻过程仅有开坑阶段和崩落阶段。此时开坑破坏范围和背面崩落破坏范围将直接反应弹体的侵彻毁伤能力和混凝土结构的防护能力。因此,研究弹体贯穿混凝土靶的开坑、崩落破坏效应,对于全面掌握弹体贯穿作用过程以及定量分析开坑、崩落破坏范围均具有十分重要意义,可为工程防护设计及弹体结构优化研究提供参考。

针对混凝土靶的开坑问题,国内外学者通过试验手段获得了丰富的数据^[3,5-14],提出了不同的开坑阻力理论计算模型^[2,15-19],建立了开坑直径、深度等参数的经验公式^[20],但适用范围有限。同时,不同于混凝土厚靶,弹体贯穿薄靶时,开坑效应还受到背部崩落的影响,基于混凝土厚靶开坑破坏建立的经验公式不再适用。另一方面,针对混凝土靶的贯穿崩落问题,目前研究相对较少。刘志林等^[21]和 Xing 等^[22]通过数值模拟和试验表明混凝土靶崩落阶段伴随着混凝土介质的损伤和飞溅。Sjøll 等^[23]、刘志林等^[24]忽略崩落损伤和飞溅的影响,基于自由面效应模型,建立了崩落阶段阻力预测模型。Peng 等^[25]通过试验数据分析,认为厚靶崩落区高度约为 2.5 倍的弹径,而薄靶则约为 0.5 倍靶体厚度,但该结论缺乏理论依据,且与 Li 等^[4]获得的试验数据存在差异。Chen 等^[26]基于剪切冲塞理论,建立了背部崩落区范围计算公式和弹体剩余速度计算方法。在此基础上,Peng 等^[25]引入崩落区飞溅效应,改进了基于能量守恒的弹体剩余速度计算方法。Xing 等^[22]进一步考虑崩落区介质的拉伸损伤效应,改进了背部崩落区厚度及弹体剩余速度计算方法。由于以上三种方法均主要用于评估弹体靶后剩余速度,能否有效预测崩落区范围还需试验数据验证。此外,洪智捷等^[27]假设背部崩落区形成机制为拉伸损伤,改进了弹体剩余速度和崩落区深度的计算模型。崩落区计算结果与厚靶试验数据吻合较好,但模型能否预测薄靶的破坏效应还需验证分析。综上所述,针对有限厚混凝土靶的贯穿,混凝土靶崩落的破坏形成机制及其对侵彻阻力的影响有待进一步分析;同时,弹靶条件对开坑、崩落区范围的影响规律也有待更为系统的研究。

为深入分析混凝土靶破坏效应及其对侵彻过程的影响,基于弹体正贯穿混凝土靶的崩落破坏现象,建立弹体正贯穿混凝土靶崩落效应模型,随后结合开坑效应模型和靶体阻力函数,构建考虑开坑效应和崩落效应的侵彻理论模型,分析混凝土厚度、撞击速度对侵彻作用过程及混凝土靶开坑、

崩落破坏参数的影响规律。

1. 弹体正贯穿混凝土靶崩落效应模型

1.1 弹体正贯穿混凝土靶崩落过程分析及基本假设

刘志林等^[21]开展了弹体正贯穿有限厚混凝土靶数值模拟研究，获得了弹体贯穿混凝土靶过程中混凝土靶背部介质破坏过程，如图 1(a)所示。其中，混凝土采用 RHT 模型和 SPH 算法进行描述，能够反映背部崩落效应对弹体侵彻的影响；损伤云图中红色代表材料完全损伤，蓝色代表未损伤。

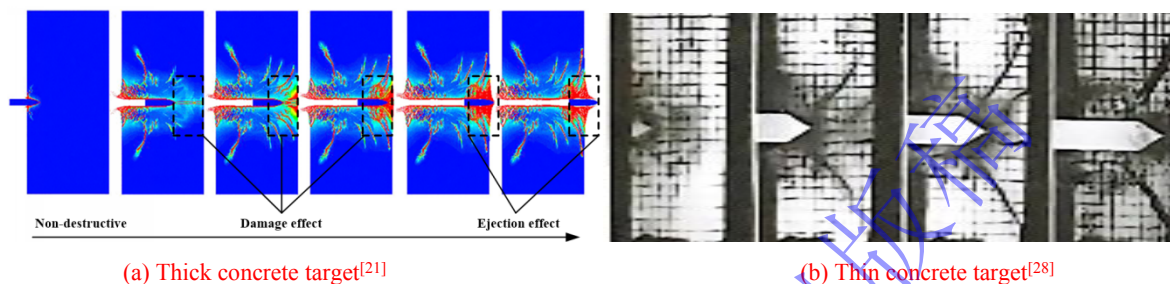


图 1 弹体贯穿混凝土靶崩落破坏过程^[21,28]

Fig. 1 Spalling failure process of a projectile through concrete target ^[21,28]

结合图 1(a)-图 1(b)可知，弹体贯穿混凝土靶过程中存在背部介质损伤效应和飞溅效应。当弹体侵彻到一定深度后，靶体背部自由面到弹尖之间的区域出现损伤，且损伤范围及程度随着弹体到靶背的距离缩短而增大。当弹尖快接近靶体背部自由面时，弹体四周混凝土介质完全损伤，且损伤效应转化为飞溅效应。

由于损伤效应与飞溅效应存在显著差异，使得两者对弹体侵彻阻力影响是不同的。其中，损伤效应使得崩落区介质在弹体未直接冲击作用前发生损伤，减小混凝土强度，从而减小弹体在崩落区运动时的弹靶间作用力。飞溅效应使弹体前方崩落区介质发生脱离，减小弹靶有效接触面积，从而减小弹靶间作用力。

目前，混凝土靶背部崩落效应的形成机制仍然存在争议。Li 等^[29]认为崩落区形成机理为弹体侵彻下的剪切冲塞效应，即震塌块与靶体界面的剪应力达到材料剪切强度破坏。而武海军等^[30]、邓国强等^[31]则认为崩落区形成机理为压缩波在靶体后自由表面反射产生拉伸波引起的层裂拉伸破坏。结合图 1(a)-(b)可知，弹体贯穿混凝土薄靶时，背部崩落区破坏形式倾向于剪切破坏；弹体贯穿混凝土厚靶时，混凝土靶背部崩落区破坏形式倾向于拉伸破坏。

基于弹体正贯穿混凝土靶崩落破坏效应分析，假设损伤效应与飞溅效应是影响弹体崩落阶段受力的主要因素。为描述崩落阶段损伤效应与飞溅效应对弹体侵彻阻力的影响，简化弹靶相互作用和材料性能的变化形式，如图 2 所示，做出以下基本假设：

- (1) 弹体为刚体，在贯穿混凝土靶过程中不发生变形；
- (2) 混凝土薄靶崩落破坏机制为剪切冲塞，而混凝土厚靶的崩落破坏机制为拉伸破坏；
- (3) 崩落区混凝土单轴抗压强度随着弹尖到靶体背面距离的缩短而线性减小，当弹体刚进入崩落区时混凝土强度等于初始混凝土单轴抗压强度，而当弹尖接触到靶体背面时，崩落区混凝土单轴抗压强度为零；
- (4) 崩落区介质发生飞溅时，飞溅介质在崩落区内的运动近似为沿固定流线运动，不同流线上的介质互不干扰，并在靶体背面发生飞溅；
- (5) 崩落区介质发生飞溅时，弹体表面微元应力为 0。

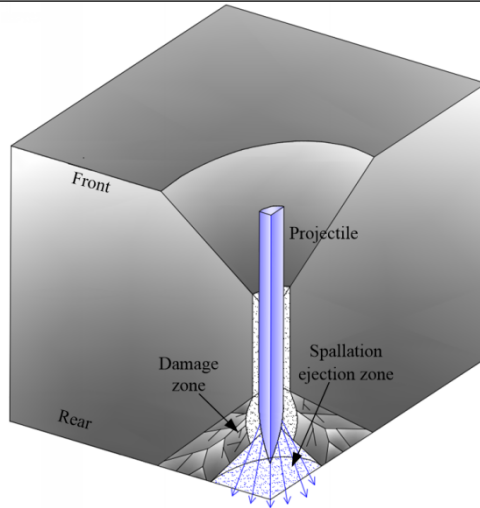


图 2 弹体贯穿混凝土靶的崩落效应

Fig.2 Spalling effect in concrete targets subjected to projectile penetration

1.2 弹体进入崩落区的判据

弹体贯穿混凝土靶过程中，确定弹体何时进入崩落区是分析弹体后续受力的关键。刘泓甫等^[32]、Duan 等^[33]忽略时间效应，将弹体进入崩落区的判据简化为剪切冲塞块的形成^[26]。当弹体侵彻阻力等于冲塞块形成的临界阻力时，弹体进入崩落区，开始受到崩落效应的影响。洪智捷等^[27]认为混凝土背部崩落区的形成机制为拉伸破坏，将剪切冲塞判据^[26]中的剪切强度改为拉伸强度，建立了崩落区形成的拉伸判据。基于基本假设(2)、Duan 等^[33]和洪智捷等^[27]的临界阻力判据，弹体进入混凝土薄靶和厚靶崩落区的判据分别为：

$$F_z = F_b = \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_{cf}\right)A_s \cos \vartheta_s \quad (\text{剪切破坏判据}) \quad (1)$$

$$F_z = F_b = \sigma_{tf}A_s \sin \vartheta_s \quad (\text{拉伸破坏判据}) \quad (2)$$

其中， F_z 为弹体轴向阻力， F_b 为冲塞块形成的临界阻力， A_s 为冲塞块侧面积， ϑ_s 为崩落区锥角(如图 3 所示)， σ_{cf} 为混凝土的单轴抗压强度， σ_{tf} 为混凝土的拉伸强度。

崩落区侧面积表示为^[22]：

$$A_s = \frac{1}{\cos \vartheta_s} [2\pi r H_s + \pi H_s^2 \tan \vartheta_s] \quad (3)$$

由图 3 可知，崩落区形状与开坑区形状类似，均接近圆台形，崩落区直径表示为：

$$D_s = 2(H_s \tan \vartheta_s + r) \quad (4)$$

其中， H_s 为崩落区高度(如图 3 所示)。

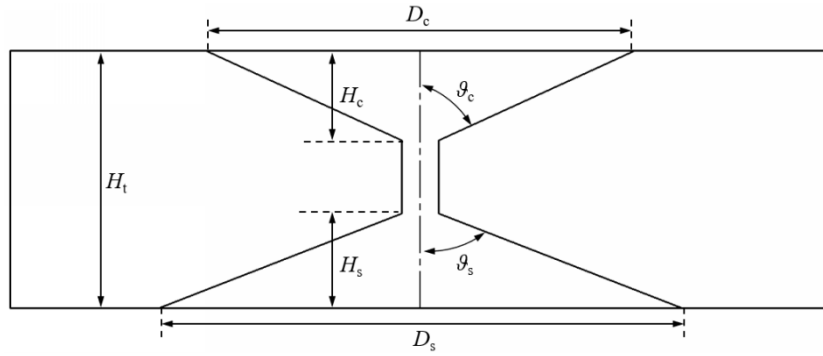


图 3 混凝土靶的破坏形貌示意图

Fig.3 Damage morphology of concrete targets

1.3 崩落损伤效应与飞溅效应的表征

基于假设(3)，弹体在崩落区运动过程中损伤混凝土强度为：

$$\sigma_{cf}^* = \sigma_{cf} - (L_m/H_s)\sigma_{cf} \quad (5)$$

其中， σ_{cf}^* 为崩落区损伤混凝土强度， L_m 为弹尖到靶背的距离。

另一方面，由试验现象可知，弹体贯穿混凝土靶时破碎介质的运动方向与弹体运动方向相同^[22]。基于点源飞溅流线场框架^[2]和基本假设(4)，建立混凝土靶背部崩落流线场，如图 4 所示。假设背部介质飞溅时，介质沿着以崩落区顶点 O 为中心，过弹体表面微元的直线运动。则弹体表面微元对应的崩落飞溅流线方程为：

$$L_e = \sqrt{(x_{p1} - x_{e1})^2 + (y_{p1} - y_{e1})^2 + (z_{p1} - z_{e1})^2} \quad (6)$$

其中， (x_{p1}, y_{p1}, z_{p1}) 为 $x_1o_1y_1z_1$ 坐标系中弹体表面微元坐标，而 (x_{e1}, y_{e1}, z_{e1}) 为 $x_1o_1y_1z_1$ 坐标系中弹体表面微元对应的飞溅流线靶面飞溅坐标。

由图 4 可知，由于弹体表面微元较小，崩落飞溅流线体积可近似等于高度为 (L_e+L_s) 的小棱锥体积与高度为 L_s 的小棱锥体积之差。因此，结合流线方程(6)，崩落飞溅流线体积方程表示为：

$$V_{\text{tube}} = \frac{1}{3}[(L_e + L_s)^3 - L_s^3]\Delta\chi\Delta\theta \quad (7)$$

$$L_s = \sqrt{x_{p1}^2 + y_{p1}^2 + z_{p1}^2} \quad (8)$$

其中， L_s 为微元到 $x_1o_1y_1z_1$ 坐标原点的距离， $\Delta\chi$ 为流线微元在竖直方向上的夹角， θ 为弹体表面微元所在半径与 x_1 坐标轴之间的夹角， $\Delta\theta$ 为弹体表面微元对应圆心角。

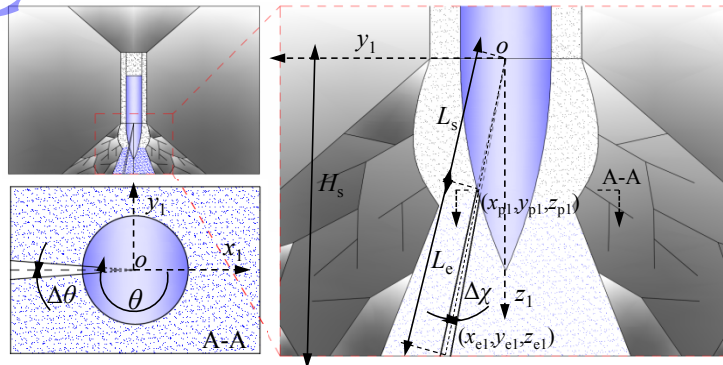


图 4 崩落飞溅阶段弹体表面微元飞溅流线

Fig.4 Ejecta streamlines during spallation ejection phase

结合式(8)和飞溅流线强度能^[2]定义, 飞溅流线强度能方程为:

$$E_{\text{strength}} = \frac{1}{3} \varepsilon \sigma_{\text{cf}}^* [(L_e + L_s)^3 - L_s^3] \Delta \chi \Delta \theta \quad (9)$$

Li 等^[34]给出了输入弹体表面微元对应流线的动能方程:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} Q_1 \int_{\varphi-\Delta\varphi}^{\varphi} \int_{\theta-\Delta\theta}^{\theta} \int_0^l (R+w)(\rho+w \sin \varphi)(v_w)^2 dw d\theta d\varphi \quad (10)$$

其中, Q_1 为极限密度, 其求解方法见参考文献[34], ρ 为弹体头部任意截面半径, R 为弹体头部曲率半径, φ 为弹体表面微元法向角, $\Delta\varphi$ 为弹体表面微元对应法向角的改变量, l 为波阵面到弹体表面的距离, w 为不同位置法向压缩介质到弹体表面的距离, w 的取值范围为 $[0, l]$, v_w 为不同位置法向运动介质的速度。

由式(9)和式(10)可知, 崩落飞溅流线的剩余动能为:

$$E_{\text{sre}} = E_{\text{kin}} - E_{\text{strength}} \quad (11)$$

结合式(11)和基本假设(5), 崩落阶段弹体表面法向应力为:

$$\sigma_n = \begin{cases} \sigma_r(\sigma_{\text{cf}}^*) & E_{\text{sre}} < 0 \\ 0 & E_{\text{sre}} \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中, σ_n 为弹体表面法向应力, σ_r 为空腔表面径向应力。

弹体进入崩落区后, 若弹体表面微元对应的流线发生飞溅, 则表面微元应力为 0。若弹体表面微元对应的流线不发生飞溅, 则仅考虑崩落区混凝土强度的衰减。

2. 考虑正贯穿开坑效应和崩落效应的侵彻理论模型

2.1 弹体正侵彻混凝土靶开坑效应模型

弹体侵彻混凝土靶开坑阶段是整个侵彻过程中的初始阶段, 对于混凝土靶的贯穿不可忽略。李鹏等^[2]建立了考虑混凝土飞溅过程影响的开坑阻力计算模型, 能够合理预测开坑阻力及开坑深度。本文采用该模型描述弹体开坑作用过程, 开坑阶段弹体表面应力为^[2]:

$$\sigma_n = \begin{cases} \sigma_r & E_{\text{cre}} < 0 \\ 0 & E_{\text{cre}} \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

其中, E_{cre} 为开坑飞溅流线剩余动能。

弹体贯穿半无限混凝土靶或混凝土厚靶时, 破坏区由开坑区、隧道区和崩落区组成, 开坑深度为^[2]:

$$H_c = L_n + H_{\text{emax}} \quad (14)$$

弹体贯穿混凝土薄靶时, 破坏区由开坑区和崩落区组成, 开坑深度为:

$$H_c = H_t - H_s \quad (15)$$

其中, H_{emax} 为飞溅区深度, H_t 为混凝土靶厚度, H_s 为崩落深度, H_c 为开坑深度, 如图 3 所示, L_n 为弹头长度。

除开坑深度以外, 开坑直径也是开坑破坏范围的重要指标。考虑到开坑形状接近圆台形, 开坑深度和开坑直径满足正切关系, 结合图 3 和式(14)-(15), 混凝土靶开坑直径为:

$$D_c = 2(H_c \tan \vartheta_c + r) \quad (16)$$

其中, D_c 为开坑直径, r 为弹身直径, ϑ_c 为开坑锥角, 如图 4 所示。由 Li 等^[4]和戴湘晖等^[35]试验结果可知, 弹体贯穿普通低强度混凝土时, 开坑锥角与混凝土强度及撞击速度相关性小, 开坑锥角平均值为 56.6° 。

2.2 侵彻阻力模型及弹体运动方程

弹体正侵彻混凝土时, 弹体受到的侵彻阻力主要来源于弹头。因此, 本文仅考虑侵彻过程中弹头的受力情况。柱坐标系下卵形弹头表面形状函数表示为^[2]:

$$\rho = (R - r) - \sqrt{R^2 - (L_h + z)^2} \quad (17)$$

基于球形空腔膨胀^[16], 作用于弹/靶界面的法向应力表示为:

$$\sigma_n = R_t + Q_0 v_n^2 \quad (18)$$

其中, R_t 为静阻力项, Q_0 为混凝土初始密度。

考虑弹身直径效应^[36]、弹头形状以及骨料直径的影响, 静阻力项表示为^[37]:

$$R_t = S_t \sigma_{cf} = [82.6 \sigma_{cf}^{-0.544} (2rCRH/7.77d_a)^{-0.43}] \sigma_{cf} \quad (19)$$

其中, S_t 为靶体目标经验强度参数, d_a 为最大骨料直径, CRH 为弹头形状系数。

此外, 考虑弹/靶间摩擦力的影响, 根据库伦摩擦定律, 弹头表面微元摩擦应力表示为:

$$\sigma_\tau = \mu \sigma_n \quad (20)$$

其中, μ 为弹靶间滑动摩擦因数, 为了尽量减小侵彻过程求解的复杂性, 滑动摩擦系数取为常数。

结合式(18)、式(20)以及弹体表面几何关系, 弹体表面微元在侵彻方向上的合应力表示为:

$$\sigma_z = \sigma_n (\cos(\varphi) + \mu \sin(\varphi)) \quad (21)$$

进一步对侵彻过程中有效弹靶接触面积积分, 即可得到弹体侵彻过程中所受轴向合阻力:

$$F_z = \iint_{\Sigma} (\cos(\psi) + \mu \sin(\psi)) \sigma_n ds \quad (22)$$

其中, Σ 为侵彻过程中有效弹靶接触面积, ds 为弹体表面微元面积。

弹体表面微元面积为:

$$ds = \sqrt{R^2 / (R^2 - (\rho + R - r)^2)} \rho d\varphi d\rho \quad (23)$$

基于刚性弹假设, 结合式(22), 侵彻过程中弹体的运动方程为:

$$Ma_z = -F_z \quad (24)$$

其中, a_z 为弹体运动加速度。

模型的计算流程如图 5 所示。首先, 根据弹头几何参数对弹头表面进行离散化处理。然后, 基于撞击速度, 给出弹体表面微元的速度、位移等, 并判断弹体表面微元是否进入目标。接下来, 依次调用开坑效应模型(式 13-17)、靶体阻力模型(式 18-19)和背部崩落理论模型(式 1-12), 确定弹体运动参数(式 20-24)。

若开坑阶段满足背部崩落条件(式 1-2), 则该厚度混凝土靶仅有开坑区和崩落区, 对弹体而言为薄靶; 开坑区深度等于混凝土厚度与崩落块高度之差; 随后的侵彻过程中同时考虑崩落效应和开坑效应对侵彻阻力的影响, 当弹体头部完全贯穿混凝土靶或弹体速度为 0 时停止运算。

若开坑阶段不满足背部崩落条件(式 1-2), 且速度并未降为 0, 则弹体进入隧道侵彻阶段。

进入隧道阶段后，继续判断侵彻过程是否满足崩落条件(式 1-2)。若隧道侵彻过程中不满足崩落条件(式 1-2)，且弹体运动速度降为 0，则该混凝土靶仅有开坑区和隧道区，不受崩落效应的影响，对于弹体而言为半无限厚靶。若隧道侵彻过程中满足崩落条件(式 1-2)，则该厚度混凝土靶同时具有开坑区、隧道区和崩落区，则对于弹体而言为混凝土厚靶；开坑深度等于弹头完全嵌入靶体的侵彻深度，崩落区深度等于崩落块高度；随后的侵彻计算中仅考虑崩落效应的影响，当弹体头部完全贯穿混凝土靶或弹体速度为 0 时停止运算。

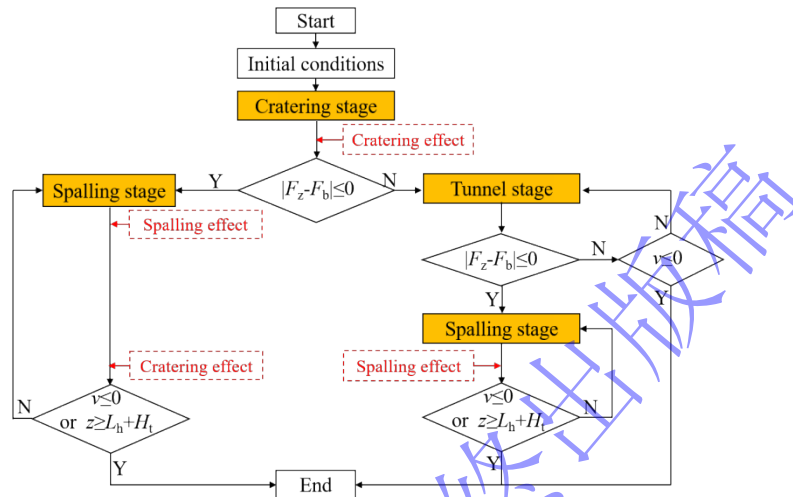


图 5 弹体贯穿混凝土靶计算流程

Fig.5 The calculation process of projectile penetrating concrete target

3. 弹体正贯穿混凝土靶理论模型验证

为验证弹体正贯穿混凝土靶理论模型的正确性，结合文献[3]、[4]中弹体剩余速度数据和开坑、崩落区破坏参数对理论模型进行验证。文献中的弹靶主要参数如表 1 所示。

表 1 弹/靶参数

Table 1 Projectile and target parameters

文献	$v_0/(m \cdot s^{-1})$	d_a/mm	r/mm	CRH	M/g	σ_{cf}/MPa	H_t/mm
Wu 等 ^[3]	400~800	10	12.65	3	428	41	100/150/200
Li 等 ^[4]	400.8/415.4	15	32	3	5052/5304	34.26	400/500

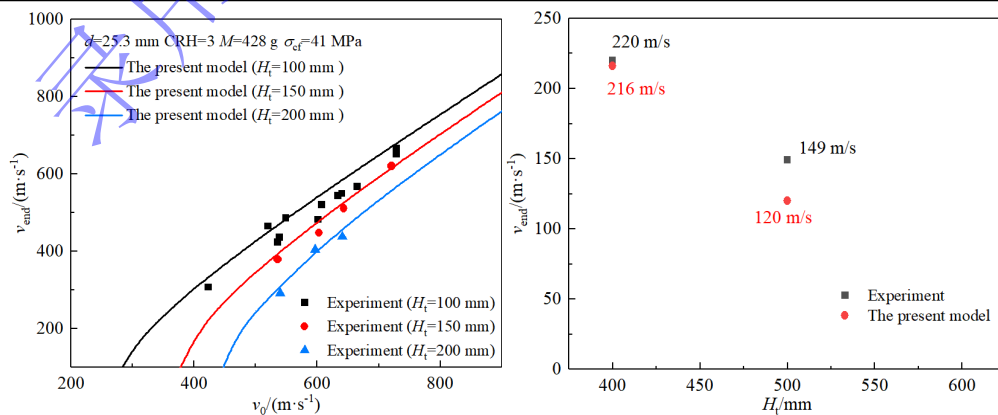


图 6 弹体贯穿混凝土靶的剩余速度计算结果与试验结果^[3,4]

Fig.6 Comparison of calculated and experimental residual velocities^[3,4]

由于文献[3]未给出崩落锥角，本文参考文献[27]取为 65° ；文献[4]则取试验平均值 57° 。文献[27]中表明两组试验^[3,4]的抗拉强度与抗压强度比值分别为 0.090 和 0.094，均接近 0.1，因此在本文研究范围内，采用 0.1 倍抗压强度近似描述混凝土抗拉强度。此外，弹靶界面滑动摩擦系数参考文献[38]取为 0.05，极限密度参考文献[34]取为 2.55 g/cm^3 。图 6 为弹体贯穿混凝土靶的剩余速度计算结果与试验结果对比，其中 v_{end} 表示弹体靶后剩余速度。从图 6 可知，模型计算结果与试验结果吻合较好，本文建立的贯穿计算模型能够合理的预测弹体的靶后剩余速度。

表 2 开坑深度、崩落深度计算结果与试验结果^[3,4]

Table 2 Comparison of calculated and experimental results for crater depth and scabbing depth^[3,4]

文献	编号	$v_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	H_t/mm	模型计算结果		试验结果		
				H_c/mm	H_s/mm	H_c/mm	H_s/mm	
Wu 等 ^[3]	1	423	100	54	46	50	50	
	2	520	100	53	47	50	50	
	3	536	100	53	47	50	50	
	4	539	100	53	47	35	40	
	5	549	100	53	47	50	50	
	6	601	100	53	47	45	55	
	7	607	100	53	47	50	50	
	8	634	100	53	47	50	50	
	9	640	100	100	52	48	50	50
	10	665	100	100	52	48	50	50
	11	729	100	100	52	48	50	50
	12	536	150	150	54	74	50	65
	13	603	150	150	58	75	50	60
	14	643	150	150	56	76	50	50
	15	721	150	150	57	77	50	55
	16	540	200	200	54	72	50	65
	17	597	200	200	58	74	55	70
	18	641	200	200	56	75	60	65
Li 等 ^[4]	19	400.8	400	147	206	136	182	
	20	415.4	500	143	203	166	245	

表 2 为弹体贯穿混凝土靶的开坑深度、崩落深度计算结果与试验结果对比。图 7 为文献[4]中混凝土靶的破坏形貌试验结果和预测结果对比。图 7 中的红色和黑色轮廓分别代表模型预测结果和试验结果。由表 2 和图 7 可知，本本文模型能够合理表征弹体贯穿混凝土靶后的靶体主要破坏参数。

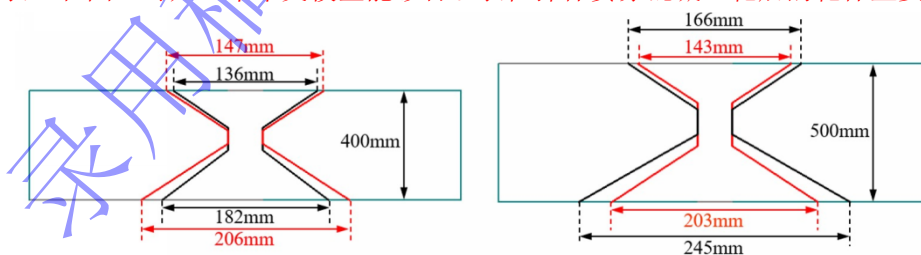


图 7 弹体贯穿混凝土靶的靶体典型破坏形貌计算结果与试验结果^[4]

Fig.7 Comparison of calculated and experimental residual velocities^[4]

4. 弹体贯穿混凝土靶影响因素分析

研究表明^[3,4,22]，弹/靶参数的改变将对开坑、崩落阶段的阻力及混凝土靶破坏范围产生显著影响。因此，为进一步系统讨论弹体贯穿有限厚混凝土靶的开坑、崩落过程，下面将讨论靶厚、撞击速度对弹体侵彻过程和靶体破坏范围的影响规律。

4.1 靶体厚度的影响

为研究靶体厚度对弹体贯穿混凝土靶的影响规律，基于表1中 $r=12.65$ mm 的弹体，开展靶体厚度范围为 50 mm~350 mm 弹体贯穿混凝土靶理论计算。弹体撞击速度为 700 m/s，混凝土强度为 41 MPa。

图8分别为弹体贯穿不同厚度混凝土靶过载和剩余速度变化曲线， η 表示忽略崩落效应的弹体剩余速度相较本文模型计算结果的误差， H_D 表示崩落阶段仅受到损伤效应影响的深度， H_E 表示崩落阶段受到飞溅效应和损伤效应共同影响的深度。图9为飞溅区深度和仅有损伤效应影响深度占比变化。从图8(a)可知，当混凝土厚度小于4倍弹体直径时，弹体贯穿混凝土靶过程中仅有开坑、崩落阶段；该厚度的混凝土靶相对于弹体而言为薄靶，反之为厚靶。

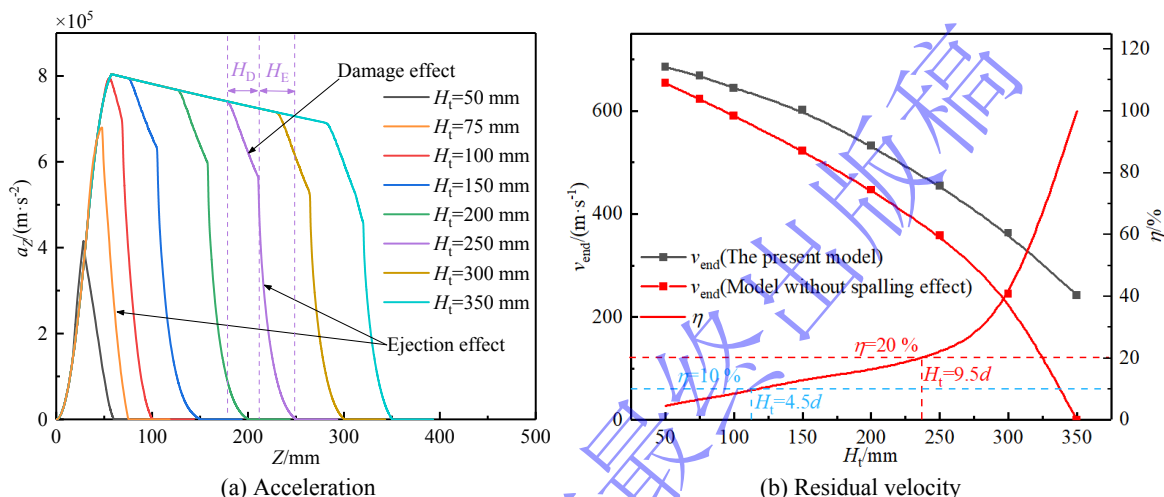


图8 弹体贯穿混凝土靶的过载和剩余速度

Fig.8 Acceleration and residual velocity of the projectile penetrating concrete targets

同时，由图8(a)可知，弹体贯穿混凝土靶崩落阶段存在仅受到损伤效应影响的区域，和同时受到飞溅效应和损伤效应影响的区域；仅受损伤效应影响区域内阻力衰减速率明显小于飞溅效应和损伤效应共同影响区域。结合图8(a)和图9可知，当靶体厚度小于3倍弹体直径时，弹体进入崩落区后即刻发生飞溅效应；随着靶体厚度的增大，崩落飞溅区占比逐渐减小，飞溅效应对靶体阻力的影响减小，损伤效应的影响逐渐增大。当靶体厚度大于11.5倍弹体直径时飞溅效应影响区域小于仅有损伤效应影响的区域。

此外，由图8(b)可知，随着靶体厚度的增大，崩落效应对剩余速度的影响逐渐增大；当靶体厚度小于4.5倍弹体直径时，忽略崩落效应的模型计算结果与本文模型计算结果误差小于10%；此时，靶厚的影响大于崩落效应，可近似忽略崩落效应对靶体阻力的影响。而当靶体厚度大于9.5倍弹体直径时，忽略崩落效应的模型计算结果与本文模型计算结果误差大于20%，崩落效应对靶体阻力影响显著。

图10分别为不同厚度混凝土靶开坑深度和崩落深度变化规律。从图10可知，随着靶体厚度的增大，混凝土靶的开坑深度先线性增大后趋于稳定，崩落深度先线性增大后线性减小。当混凝土靶为薄靶(厚度小于4倍弹体直径)时，混凝土靶开坑深度、崩落深度计算结果均接近混凝土靶厚度的一半，该计算结果与Wu等^[3]、戴湘晖等^[35]所得到的试验现象一致。

当混凝土靶为厚靶(厚度大于4倍弹体直径)时，开坑深度稳定为2.32倍的弹体直径，与Chen等^[26]的经验公式计算结果(2.36倍的弹体直径-图10中蓝色线段)相近。同时，弹体侵彻厚靶时，靶体厚度从4倍弹体直径增大到6.9倍弹体直径，崩落深度也接近线性增大且接近靶体厚度的一半；靶体厚度大于6.9倍弹体直径后，随着厚度的增大，混凝土靶发生崩落效应时的轴向阻力变小，崩落深度线性减小。

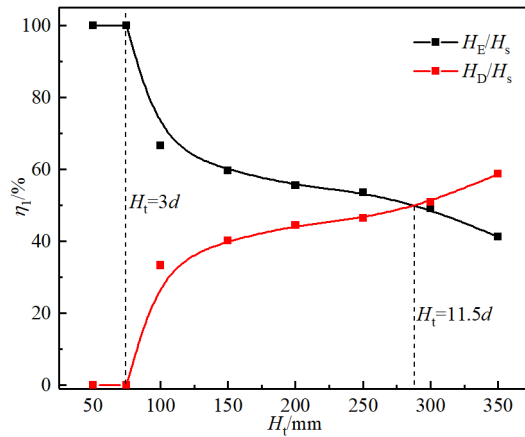
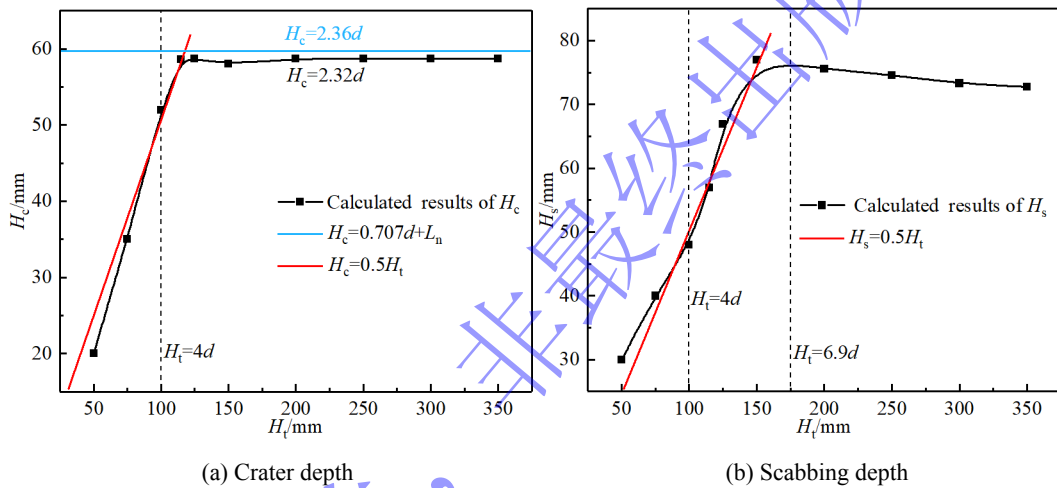


图 9 飞溅效应区域深度和仅有损伤效应区域深度占比

Fig.9 Proportion of ejection effect zone depth and damage-only effect zone depth



(a) Crater depth

(b) Scabbing depth

图 10 混凝土靶的开坑深度和崩落深度

Fig.10 Crater depth and spalling depth of concrete targets

4.2 撞击速度的影响

为研究撞击速度对弹体贯穿混凝土靶的影响规律，基于表 1 中 $r=12.65$ mm 的弹体，开展不同速度弹体正贯穿混凝土薄靶和厚靶的理论计算。其中，弹体撞击速度范围为 500 m/s~1100 m/s，混凝土靶厚度分别为 75 mm 和 200 mm，混凝土强度为 41 MPa。

图 11 分别为弹体贯穿混凝土薄靶、厚靶的过载曲线。图 12 为飞溅区深度占比。图 13 为弹体贯穿混凝土薄靶、厚靶的剩余速度。由式(14)和式(22)可知，增大撞击速度，弹体轴向阻力和输入流线的动能增大。因此，结合图 11(a)可以看出，弹体贯穿混凝土薄靶(厚度为 75 mm)时，飞溅效应是影响崩落阶段侵彻阻力变化的主要因素，随着撞击速度的增大，崩落区(飞溅区)范围增大，飞溅效应对崩落阶段侵彻阻力的影响越明显，靶体阻力衰减速率增大。同时，结合图 11(a)和图 12 可知，弹体贯穿混凝土厚靶时，随着撞击速度的增大，崩落区范围及飞溅区占比均增大，飞溅效应逐渐成为影响崩落阶段靶体阻力变化的主要因素。

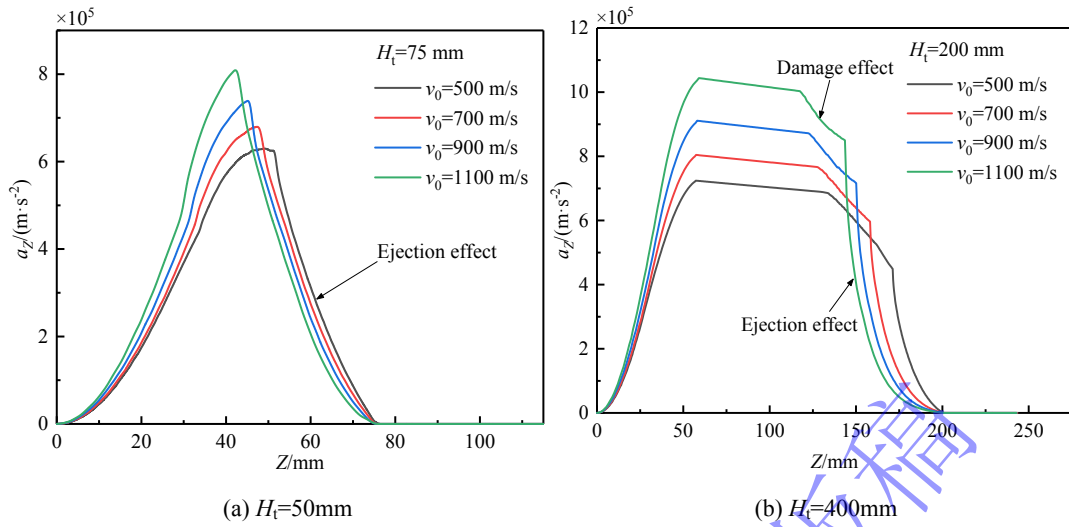


图 11 弹体贯穿 75 mm 和 200 mm 厚混凝土靶的过载

Fig.11 Acceleration of the projectile penetrating concrete targets

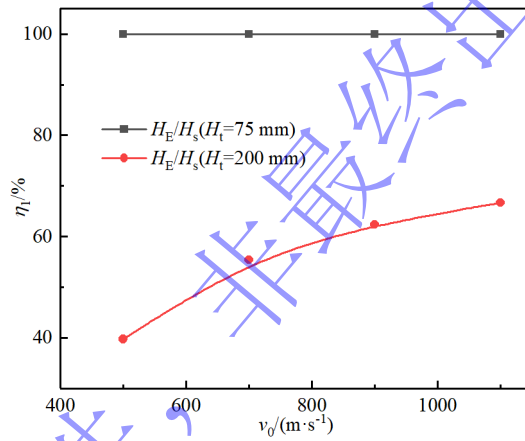


图 12 飞溅效应区域深度占比

Fig.12 Proportion of ejection effect zone depth

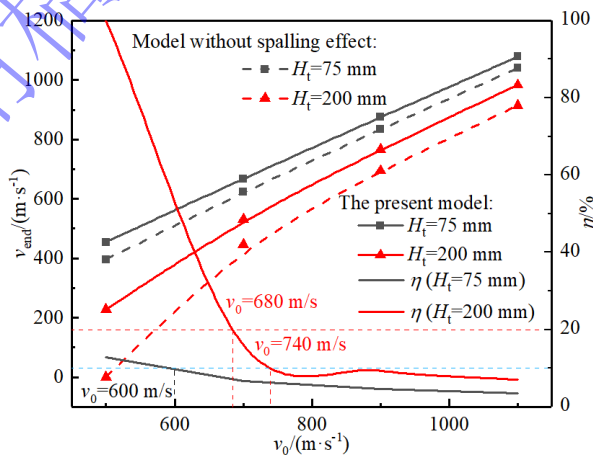


图 13 弹体贯穿 75 mm 和 200 mm 厚混凝土靶的剩余速度

Fig.13 Residual velocity of the projectile penetrating concrete targets

此外，由图 13 可知，随着撞击速度的增大，崩落效应对弹体剩余速度的影响逐渐减小。弹体以

不同速度贯穿混凝土薄靶时，忽略崩落效应的模型计算结果与本文模型计算结果误差均小于 20 %；当撞击速度大于 600 m/s 时，两者误差小于 10 %，基本可以忽略崩落效应的影响。另一方面，弹体以小于 680 m/s 速度贯穿混凝土厚靶时，忽略崩落效应的模型计算结果与本文模型计算结果误差大于 20 %；弹体以大于 740 m/s 速度贯穿混凝土厚靶时，忽略崩落效应的模型计算结果与本文模型计算结果误差小于 10 %。因此，与弹体贯穿混凝土薄靶相比，撞击速度的改变对弹体贯穿混凝土厚靶的过载变化及靶后剩余速度影响更为明显。

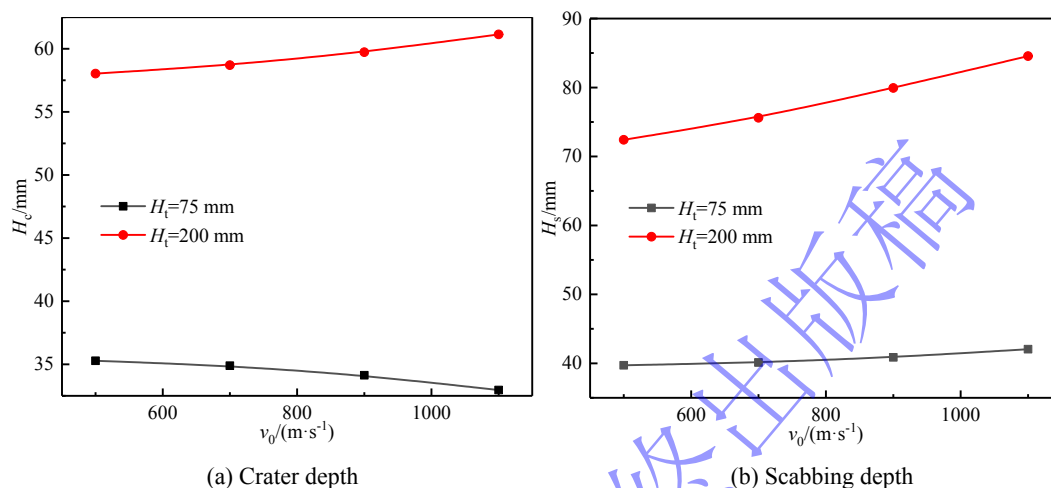


图 14 混凝土靶的开坑深度和崩落深度

Fig.14 Crater depth and spalling depth of concrete targets

图 14 分别为弹体以不同速度贯穿混凝土薄靶、厚靶的开坑深度、崩落深度变化规律。从图 14 可知，弹体贯穿混凝土薄靶时，随着撞击速度的增大，开坑深度减小，崩落深度增大。撞击速度从 500m/s 增大到 1100m/s 时，开坑深度仅减小了 8.5 %，崩落深度仅增大了 5.8 %。弹体贯穿混凝土厚靶时，随着撞击速度的增大，开坑深度和崩落深度均增大。撞击速度从 500 m/s 增大到 1100 m/s 时，开坑深度增大了 5.2 %，崩落深度增大了 16.9 %。因此，与弹体贯穿混凝土薄靶相比，撞击速度对弹体贯穿混凝土厚靶的开坑深度和崩落深度的影响较大。此外，随着撞击速度的增大，弹体贯穿混凝土薄靶和厚靶的开坑深度、崩落深度变化趋势均接近线性。

5 结论

本文基于弹体正贯穿混凝土靶开坑效应和崩落效应，建立弹体正贯穿混凝土靶侵彻理论模型，并进一步分析了混凝土厚度、撞击速度对弹体侵彻性能及混凝土靶破坏参数的影响规律。主要结论如下：

(1) 弹体贯穿混凝土靶崩落阶段存在损伤效应和飞溅效应，两者共同影响崩落阶段的靶体阻力；随着靶厚减小或撞击速度增加，飞溅区占比增大，飞溅效应逐渐成为影响崩落阶段阻力变化的主要因素；靶厚小于 3 倍弹径时，整个崩落区均为飞溅区，崩落阶段阻力变化由飞溅效应主导。

(2) 混凝土靶厚度小于 4 倍弹体直径为薄靶。随着靶体厚度的增大，开坑深度先线性增大后趋于稳定，崩落深度先线性增大后线性减小；线性增大阶段，开坑深度、崩落深度均接近混凝土厚度的一半。

(3) 撞击速度对开坑深度、崩落深度的影响均呈近似线性关系；与弹体贯穿薄靶相比，撞击速度对弹体贯穿混凝土厚靶的影响更为显著。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李鹏程, 张先锋, 王桂吉, 等. 弹体正侵彻混凝土靶动态开坑作用过程[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(9): 091402. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0512.
LI P C, ZHANG X F, WANG G J, et al. Dynamic cratering process during penetration of rigid projectile into concrete target[J]. Explosion And Shock Waves, 2023, 43(9): 091402. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0512.
- [3] WU H, FANG Q, PENG Y, et al. Hard projectile perforation on the monolithic and segmented RC panels with a rear steel liner[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 76(feb.): 232-250. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.10.010.
- [4] LI JZ, LV ZJ, ZHANG H S, et al. Perforation experiments of concrete targets with residual velocity measurements[J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 57: 1-6. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.01.007.
- [5] LIU C, ZHANG X F, CHEN H H, et al. Experimental and theoretical study on steel long-rod projectile penetration into concrete targets with elevated impact velocities [J], International Journal of Impact Engineering, 2019, 138:103482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.103482>.
- [6] YANG Y L, QING M Z, YI J X, et al. Hypervelocity penetration of concrete targets with long-rod steel projectiles: experimental and theoretical analysis [J], International Journal of Impact Engineering, 2021, 148:103742. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103742>.
- [7] 周宁, 任辉启, 沈兆武, 等. 弹丸侵彻混凝土和钢筋混凝土的实验 [J]. 中国科学技术大学学报, 2006, 36(10): 1021-1027. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2778.2006.10.001.
ZHOU N, REN H Q, SHEN Z W, et al. Experimental on the projectile penetration concrete targets and reinforced concrete targets [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2006, 36(10): 1021-1027. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2778.2006.10.001.
- [8] 周宁, 任辉启, 沈兆武, 等. 卵形头部弹丸侵彻钢筋混凝土的工程解析模型 [J]. 振动与冲击, 2007, 26(4): 73-76. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2007.04.017.
ZHOU N, REN H Q, SHEN Z W, et al. Engineering analytical model for ogive-nose projectiles to penetrate into semi-infinite reinforced concrete targets [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(4): 73-76. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2007.04.017.
- [9] 黄民荣, 顾晓辉, 高永宏. 刚性弹丸侵彻钢筋混凝土的实验和简化分析模型 [J]. 实验力学, 2009, 24(4): 283-290. DOI: CNKI:SUN:SYLX.0.2009-04-002.
HUANG M R, GU X H, GAO Y H. Experiment and simplified analytical model for penetration of rigid projectile in reinforced concrete target [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(4): 283-290. DOI: CNKI:SUN:SYLX.0.2009-04-002.
- [10] WU H J, WANG Y N, HUANG F L. Penetration concrete targets experiments with non-ideal & high velocity between 800 and 1100 m/s [J]. International Journal of Modern Physics B, 2008, 22(9-11): 1087-1093. DOI: 10.1142/S0217979208046360.
- [11] 吕映庆, 陈南勋, 武海军, 等. 弹体高速侵彻超高性能混凝土靶机理 [J]. 兵工学报, 2022, 43(01): 37-47. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2022.01.005.
LU Y Q, CHEN N X, WU H J, et al. Mechanism of high-velocity projectile penetrating into ultra-high performance concrete target [J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(1): 37-47. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2022.01.005.
- [12] 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(09): 54-65. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0439.

- WANG J, WU H J, ZHOU J Q, et al. Experiment research and crater analysis of long rod hypervelocity penetration into concrete [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(9): 093301. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0439.
- [13] 张雪岩, 武海军, 李金柱, 等. 弹体高速侵彻两种强度混凝土靶的对比研究 [J]. *兵工学报*, 2019, 40(02): 276-283. DOI: CNKI:SUN:BIGO.0.2019-02-007.
- ZHANG X Y, WU H J, LI J Z, et al. Comparative study of projectiles penetrating into two kinds of concrete targets at high velocity [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(2): 276-283. DOI: CNKI:SUN:BIGO.0.2019-02-007.
- [14] 闪雨. 弹体非正侵彻混凝土质量侵蚀与运动轨迹研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- SHAN Y. Investigation on the mass abrasion and motion of the projectile non-normal penetrating into concrete [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015: 55-80.
- [15] TELAND J A, SJØL H. Penetration into concrete by truncated projectiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, 30(4): 447-464. DOI: 10.1016/S0734-743X(03)00073-3.
- [16] FORRESTAL M.J, FREW D.J, HICKERSON J.P, et al. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements [J], *International Journal of Impact Engineering*, 2003(5): 28. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(02\)00108-2](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(02)00108-2).
- [17] DAVID Y, VLADIMIR F. The embedment of a high velocity rigid ogive nose projectile into a concrete target [J], *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 144: 103631. DOI: 0734-743X, <http://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103631>.
- [18] 柴传国, 皮爱国, 武海军, 等. 卵形弹体侵彻混凝土开坑区侵彻阻力计算 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(5): 630-635. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)05-0630-06.
- CHAI C G, PI A G, WU H J, et al. A calculation of penetration resistance during cratering for ogive-nose projectile into concrete [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(5): 630-635. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)05-0630-06.
- [19] 王丽梅, 邓国强, 王安宝. 长杆卵形弹正入射半无限靶侵彻阻力的计算 [C]// 全国结构工程学术会议. 2013.
- WANG L M, DENG G Q, WANG A B. Calculation of penetration resistance of long rod oval projectile into semi-infinite targets under normal incidence [C] // National Academic Conference on Structural Engineering. 2013.
- [20] 李明, 王可慧, 邹慧辉, 等. 弹体侵彻厚混凝土靶迎弹面成坑效应 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(08): 84-92. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0294.
- LI M, WANG K H, ZOU H H, et al. Crater morphology of a projectile penetrating a thick concrete target [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(8): 083302. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0294.
- [21] 刘志林, 王晓鸣, 李文彬, 等. 靶板厚度对卵形弹丸垂直贯穿中等厚度混凝土靶的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(5): 1083-1090. doi: 10.11883/bzycj-2017-0078.
- LIU Z L, WANG X M, LI W B, et al. Numerical and experimental study of an ogival projectile vertical perforating a medium thickness concrete target [J]. *Explosion And Shock Waves*, 2018, 38(5): 1083-1090. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0078.
- [22] XING H Z, ZHAO J, WU G, et al. Perforation model of thin rock slab subjected to rigid projectile impact at an intermediate velocity [J]. *International journal of impact engineering*, 2020. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103536.
- [23] SJØL H, TELAND J A. *Perforation of concrete targets [R]. Norwegian Defence Research Establishment, 2003.*
- [24] 刘志林, 乔良, 徐坤, 等. 考虑靶背自由面效应的中等厚度混凝土介质侵彻工程模型 [J]. *弹道学报*, 2022(002):034. DOI: 10.12115/j.issn.1004-499X(2022)02-007.
- LIU Z L, QIAO L, XU K, et al. Engineering Penetration Model of Medium Thickness Concrete Targets Based on the Effect of Target Rear Free Surface [J]. *Journal of Ballistics*, 2022, 34(02): 47-51. DOI: 10.12115/j.issn.1004-499X(2022)02-007.
- [25] PENG Y, WU H, FANG Q, et al. A note on the deep penetration and perforation of hard projectiles into thick targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 85: 37-44. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.06.013.

- [26] 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.
- [27] 洪智捷, 杨耀宗, 孔祥振, 等. 刚性弹侵彻/贯穿混凝土靶体的工程实用化计算模型[J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(8):65-78. DOI:10.11883/bzycj-2022-0482.
- HONG Z J, YANG Y Z, KONG X Z, et al. Practical engineering calculation models for rigid projectile penetrating and perforating into concrete target[J]. *Explosion And Shock Waves*, 2023, 43(8): 083302. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0482.
- [28] V. VELDANOV, A. DAURSKIKH, D. DUDIK. Experimental and Analytical Results of High-speed Projectile Interaction with Concrete [C]//proceeding of 2013 international forum on special equipment and engineering mechanics, 2013:26-29.
- [29] LI Q M, REID S R, AHMAD-ZAIDI A M. Critical impact energies for scabbing and perforation of concrete target [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2006, 236(11): 1140-1148. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2005.10.017.
- [30] 武海军, 黄风雷, 金乾坤, 等. 弹体贯穿钢筋混凝土数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(6): 545-550. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1455.2003.06.011.
- WU H J, HUANG F L, JIN Q K, et al. Numerical simulation on perforation of reinforced concrete targets [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(6): 545-550. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1455.2003.06.011.
- [31] 邓国强, 董军, 杨秀敏. 弹丸冲击下钢筋混凝土板的局部破坏形态分析 [J]. *工程力学*, 2004, 28-31.
- DENG G Q, DONG J, YANG X M. Local damage shape analysis on reinforced concrete slab under projectile impacting [J]. *Engineering Mechanics*, 2004, 28-31.
- [32] 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(8): 2381-2390. DOI: 10.12382/bgxb.2022.0423.
- LIU H F, HUANG F L, BAI Z L, et al. Theoretical Model of Oblique Penetration of Rigid Projectiles into Concrete Targets at Attack Angles[J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(8): 2381-2390. DOI: 10.12382/bgxb.2022.0423.
- [33] DUANA Z P, LIA 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):13. DOI: 10.1016/j.dt.2019.09.009.
- [34] LI P C, ZHANG X F, LIU C, et al. Trajectory characteristics of oblique penetration of projectile into concrete targets considering cratering effect[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 185: 104864. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104864.
- [35] 戴湘晖, 段建, 周刚等. 低速弹体贯穿钢筋混凝土多层靶的破坏特性[J]. *兵工学报*, 2018, 39(4): 698-706. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.04.009.
- DAI X H, DUAN J, ZHOU G, et al. Damage Effect of Low Velocity Projectile Perforating into Multi-layered Reinforced Concrete Slabs[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(4): 698-706. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.04.009.
- [36] FORRESTAL M J, FREW D J, HICKERSON J P, et al. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28(5): 479-497. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00108-2.
- [37] FENG J, SUN W-W, LI B-M. Numerical study of size effect in concrete penetration with LDPM [J]. *Defence Technology*, 2018, 14(5): 560-9. DOI: 10.1016/j.dt.2018.07.006.
- [38] WU H, FANG Q, ZHANG Y D, et al. Semi-theoretical analyses of the concrete plate perforated by a rigid projectile [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2012, 28(6): 1630-1643. DOI: 10.1007/s10409-012-0201-9.