

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0512

弹体正侵彻混凝土靶动态开坑作用过程*

李鹏程¹, 张先锋¹, 王桂吉², 刘 闯¹, 刘均伟¹, 邓宇轩¹, 盛 强¹

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为了进一步研究弹体侵彻混凝土靶的开坑作用过程, 基于开坑破坏过程分析对开坑阶段进行划分, 结合弹体头部形状函数、Z 模型流线场分布以及法向膨胀理论, 建立考虑混凝土飞溅过程影响的开坑阻力计算模型, 并运用文献中试验数据验证模型的可靠性。在此基础上, 进一步分析了典型弹靶参数对弹体侵彻混凝土靶动态开坑作用过程的影响规律。研究表明: 弹体开坑飞溅区范围随弹体头部形状系数和混凝土强度的增大而减小; 飞溅区范围达到稳定的时间和动态开坑作用时间随初速和混凝土强度的增大而缩短, 随弹体头部形状系数的增大而增大; 相较于弹体头部形状系数和混凝土强度, 初始撞击速度对动态开坑作用过程的影响更显著。

关键词: 弹体; 侵彻; 混凝土靶; 动态开坑

中图分类号: O385

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Dynamic cratering process during penetration of rigid projectile into concrete target

LI Pengcheng¹, ZHANG Xianfeng¹, WANG Guiji², LIU Chuang¹, LIU Junwei¹, DENG Yuxuan¹, SHENG Qiang¹

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

2. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

Abstract: In order to study the cratering stage in the dynamic penetration process of projectiles into the concrete targets, the cratering stage is further divided into two phases according to the damage of the projectile during penetration. Combined with the shape function of projectile head, streamline field of the Z model and normal expansion theory (NET), an analytical and calculation model of penetration resistance during the cratering stage is established, which considers the influence of concrete ejection process. Reliability of penetration resistance model during the cratering stage is then verified by test data taken from published papers. The advantages of the present model compared with the existing classical model are analyzed, while the influences of initial impact velocity of projectile, the caliber-radius-head and uniaxial compressive strength of concrete on the dynamic process during the cratering stage are analyzed. With the increase of the initial impact velocity of projectile, the diameter and depth of the ejection region gradually increase, the time of the ejection region to reach the maximum size is gradually shortened, and the time of the dynamic process during the cratering stage is also shortened. With the increase of the caliber-radius-head of the projectile, the diameter and depth of the ejection region gradually decrease, the time of the ejection region to reach the maximum size gradually increases, and the time of the dynamic process during the cratering stage increases, too. With the increase of uniaxial compressive strength of concrete, the diameter and depth of the ejection region are gradually reduced, the time of the ejection region to reach the maximum size is gradually shortened, and the time of the dynamic process during the cratering stage is also shortened. The velocity has the greatest influence on the dynamic process during the cratering

* 收稿日期: 2022-11-13; 修回日期: 2022-12-19

基金项目: 国家自然科学基金 (12202205, 12141202); 中央高校基本科研业务费专项资金 (30919011401)

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, 博士, 教授, 博士生导师, lynx@njust.edu.cn

stage of the projectile penetration into the concrete target, followed by the caliber-radius-head of the projectile and uniaxial compressive strength of concrete.

Keywords: projectile; penetration; concrete target; dynamic cratering

随着防御系统的不断发展,混凝土作为防护结构材料广泛应用于军事及民用领域,其中地面多层建筑物、地下军事设施(如指挥所,导弹发射井等)依靠复杂的混凝土复合结构而具有优良的防护性能。钻地武器侵彻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^[1]。无论是混凝土厚靶还是薄靶,当受到弹体撞击时,迎弹面均会产生明显的开坑破坏效应。迎弹面开坑阶段是完整侵彻过程的初始阶段,对于混凝土薄靶的贯穿,迎弹面开坑阶段更是整个贯穿过程中的重要组成部分^[2],此时开坑破坏效应将直接反应弹体的侵彻毁伤能力。因此,研究弹体侵彻混凝土的开坑作用过程,对于全面掌握弹体侵彻作用过程以及定量分析开坑破坏效应均具有十分重要的意义,可为弹体非正侵彻混凝土靶的开坑作用过程研究提供参考。

针对弹体侵彻混凝土介质的开坑问题,学者们主要对弹体侵彻混凝土介质的开坑破坏最终形貌进行了深入研究,获得了丰富的试验数据^[3-12],建立了可计算最终开坑直径、深度、体积等参数的经验公式^[13-20]、理论模型^[21]和数值模拟方法^[22-25],能够分析弹靶初始条件对开坑破坏最终形貌的影响规律。而在弹体侵彻混凝土靶的开坑作用过程方面,Liu等^[26]、Yu等^[27]、Feng等^[28]开展了弹体侵彻混凝土靶试验,获得了连续的弹体侵彻混凝土靶的开坑作用过程;Forrestal等^[14]认为弹体在侵彻混凝土靶的开坑作用过程中,靶体阻力线性增长,基于开坑深度等于两倍弹体直径假设,建立了开坑阻力线性增长模型,该模型只能得到弹体开坑过程的合阻力,不能给出弹体表面的应力形式;Warren^[29]为了能够在弹靶分离计算方法中反映开坑作用过程,基于开坑深度等于两倍弹体直径假设,结合空腔膨胀理论应力表达式和应力逐层增大法建立了开坑阻力数值计算方法,该方法能够对开坑阻力进行数值计算分析;Rosenberg等^[30]以二维数值模拟计算结果为基础,建立了开坑阶段靶体阻力解析模型,但该模型不能反映弹体的开坑作用过程;Yankelevsky等^[31]认为在弹体侵彻混凝土靶的开坑作用过程中可以忽略材料破碎行为、裂纹扩展和自由面效应的影响,开坑深度等于弹体头部长度,并结合空腔膨胀理论建立了开坑阻力计算模型,该模型能够计算开坑过程的靶体阻力;柴传国等^[32]基于高速录像记录的弹体速度随开坑深度的变化关系,采用最小二乘法拟合得到了开坑过程中弹头表面的应力形式;薛建锋等^[2]根据开坑过程中阻力做功的等效关系得到了新阻力模型,并分析了弹体侵彻半无限混凝土靶的侵彻性能,但该方法不能反映弹体侵彻开坑的作用过程;王丽梅等^[33]忽略开坑破坏过程的影响,基于混凝土靶的最终破坏形貌,结合滑移线理论和冲量定理推导了开坑阻力计算公式,计算结果与试验在变化趋势和持续时间上一致。综上所述,学者们针对混凝土侵彻初始阶段的研究多关注开坑破坏的最终形貌,较少关注动态开坑的作用过程,在理论分析和工程模型中多采用简化等效处理方法,缺乏弹体侵彻混凝土动态开坑作用过程的分析和讨论。

为进一步分析弹体侵彻混凝土靶的动态开坑作用过程,本文中基于开坑破坏过程分析对开坑阶段进行划分,分析各阶段对弹体侵彻的影响;结合弹体头部形状函数、Maxwell的Z模型^[34]流线场分布以及法向膨胀理论^[35],建立考虑混凝土飞溅过程影响的开坑阻力分析计算模型,研究典型弹靶参数对动态开坑作用过程的影响规律。

1 考虑混凝土飞溅过程影响的开坑阻力计算模型

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,也是整个侵彻过程中力学分析最困难和被研究最少的阶段。本文中基于试验^[26]得到的开坑破坏过程对弹体侵彻混凝土靶开坑阶段进行划分,分析各阶段对弹体侵彻的影响;结合弹体头部形状函数、Z模型^[34]流线场分布、法向膨胀理论^[35]等,建立考虑混凝土飞溅过程影响的开坑阻力分析计算模型。

1.1 开坑阶段的划分与基本假设

Liu等^[26]、Yu等^[27]、Feng等^[28]开展了大量的弹体侵彻混凝土靶试验研究,并利用高速录像记录了弹

体侵彻混凝土靶的开坑作用过程。图 1 为 Liu 等^[26] 拍摄的弹体侵彻混凝土靶的开坑作用过程, 从图 1(a)~(b) 中均能看出, 弹体侵入混凝土靶的开坑过程中, 弹着点附近存在明显的混凝土介质粉碎飞溅现象, 从 100 μs 到 300 μs , 弹体完全进入靶内, 粉碎介质按一定角度从靶面飞溅, 粉碎飞溅区域增大, 靶面隆起较小, 未见明显靶面裂纹扩展; 300 μs 以后, 混凝土靶迎弹面介质破坏形式发生改变, 靶面隆起和裂纹扩展现象逐渐明显, 伴随有混凝土块剥落飞出现象。通过高速录像可以发现, 发生剥落现象的区域大于粉碎飞溅区域, 剥落飞出的混凝土块尺寸明显大于粉碎飞溅的混凝土介质尺寸; 混凝土介质粉碎飞溅现象和大块剥落现象存在明显的时间先后顺序, 粉碎飞溅现象发生在弹体入靶过程中, 而混凝土大块剥落现象发生在弹体完全入靶后。结合弹体侵彻混凝土靶开坑作用过程中的破坏现象, 依据混凝土介质破坏形式的不同, 可将开坑过程分为两个不同的阶段: 粉碎飞溅成坑阶段 (particle ejection) 和大块层裂成坑阶段 (spallation), 如图 2 所示。

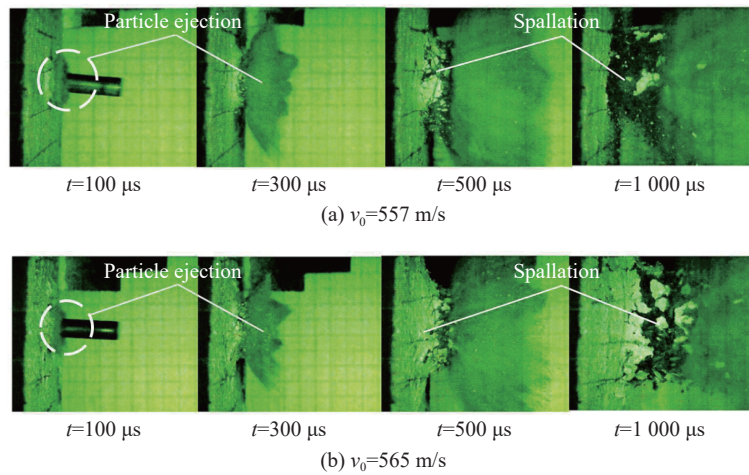


图 1 弹体侵彻混凝土靶动态开坑过程^[26]

Fig. 1 The dynamic process during the cratering stage of a projectile penetrating into a concrete target^[26]

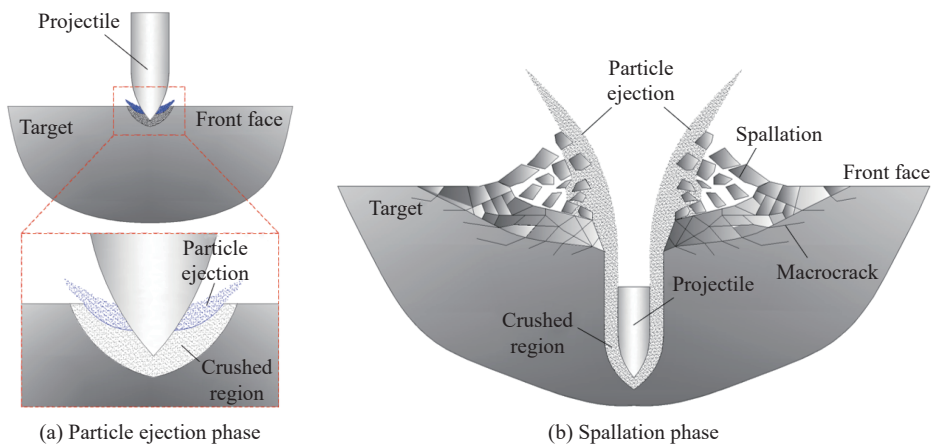


图 2 弹体侵彻混凝土靶开坑阶段划分

Fig. 2 Two phases in the cratering stage during projectile penetration into concrete target

粉碎飞溅成坑阶段发生在弹头侵入混凝土靶过程中, 由混凝土介质破碎流动形成^[36], 如图 2(a) 所示。在由于弹头高速挤入混凝土介质产生的剪切和高压作用下, 弹着点附近混凝土发生粉碎性破碎^[16], 并在弹头挤压以及迎弹面拉伸波作用下, 粉碎介质从靶体内部向靶面流动, 在靶面发生飞溅, 飞溅方向与弹体侵彻方向相反并成一定夹角; 随着弹头不断侵入混凝土靶, 粉碎性飞溅成坑区域逐渐增大, 当弹头侵入混凝土靶一定深度后, 粉碎飞溅成坑区域范围趋于稳定, 随后进入大块层裂阶段。

大块层裂成坑阶段由混凝土靶内部裂纹扩展以及迎弹面附近残余拉伸波作用形成,如图 2(b) 所示;混凝土介质是典型的脆性材料,受弹体高速冲击的影响,弹靶接触面附近粉碎区以外一定范围内,混凝土介质会经历较大的剪切变形,形成大量微裂纹,随着时间的推移,微裂纹逐渐扩展并相互贯通形成宏观裂纹^[16];受自由面效应的影响,迎弹面附近靶体内部宏观裂纹逐渐向更容易扩展的迎弹面运动,当裂纹扩展到迎弹面时,受靶体内部残余拉伸波的影响,混凝土介质发生隆起,伴随大块的层裂剥落现象,形成最终的弹坑。此外,对于开坑阶段裂纹扩展,Xu 等^[25]开展了弹体侵彻混凝土的数值模拟,分析指出,当弹体已经侵彻大约 3 倍弹丸直径的深度(约 135 μs)时,才可以观察到早期的裂纹扩展,这些裂纹后来发展成完整弹坑。Yankelevsky 等^[31]分析认为,开坑区裂纹扩展是一个耗时的过程,取决于混凝土材料的低裂缝扩展速度、沿裂缝表面发展的抗剪能力。结合图 1 所拍摄的弹体入靶过程也可以看出,当弹体完全进入混凝土靶后才出现明显的层裂剥落现象。因此,与弹体在大块层裂区的运动时间尺度相比,大块层裂区混凝土介质发生宏观裂纹扩展并形成层裂是一个相对缓慢且滞后的过程,在出现宏观拉伸裂纹扩展时,弹体已经通过该区域,进入隧道区^[31]。

结合混凝土靶开坑阶段分析以及弹体运动相对位置可知,混凝土粉碎飞溅发生在弹头侵入混凝土靶的过程中,这将直接影响弹靶实际接触面积的大小变化,从而影响弹体侵彻的阻力;而混凝土大块层裂主要发生在弹头通过开坑区以后,该阶段存在明显的时间滞后效应,对弹体侵彻影响小^[25,31]。因此,假设弹头侵入混凝土靶的开坑过程仅受飞溅效应的影响,弹头侵入开坑阶段靶体的响应区分别为飞溅区、压实区^[35]和未扰动区,飞溅区与压实区均为粉碎区,如图 3 所示。飞溅区对弹体的侵彻阻力为零,开坑过程中弹体所受阻力由压实区提供,忽略自由面对压实区的影响,压实区介质对弹体的阻力可采用描述隧道区阻力形式的法向膨胀理论对弹靶压实接触面积积分近似求解;当弹头侵入混凝土靶的开坑过程不受飞溅效应的影响时,飞溅区达到最大,随后弹头侵彻的开坑过程仅为简单的弹头嵌入压实区过程;当弹头表面与混凝土靶压实区完全接触时,弹体开坑阶段结束^[31],随后进入稳定侵彻阶段。对于开坑飞溅现象,Maxwell^[34]于 1977 年建立了描述该现象的 Z 模型。该模型认为,撞击发生后,靶体介质内瞬时形成一簇以撞击点为中心的流线。在撞击过程中,靶体内的飞溅介质依次沿固定流线运动,且不同流线上的材料颗粒相互之间不存在干扰,并在靶面沿固定角度飞溅^[37]。因此,为了能够评估开坑过程中飞溅区的大小,结合弹体头部形状函数、Z 模型流线场分布,对开坑飞溅效应进行分析。为了简化问题,做出如下几点假设:

- (1) 弹体开坑作用过程中,弹头不发生变形或侵蚀,即为刚性弹体;
- (2) 弹体开坑作用过程中,粉碎区介质在靶体内部运动时可视为密度为混凝土极限压缩密度^[35]的不可压缩流体;
- (3) 弹体开坑作用过程中,粉碎区介质不发生飞溅现象时,介质沿弹体表面法线方向运动;当粉碎区介质发生飞溅现象时,介质改变运动方向,沿着 Z 模型的流线运动,弹头的侵入不改变飞溅介质的运动方向;
- (4) 飞溅效应主要由粉碎介质所受的拉伸波和压缩波共同决定,拉伸波仅改变粉碎介质的运动方向,不改变介质的动能,且作用时间短,作用速度快。

1.2 弹体头部形状函数

弹体正侵彻混凝土靶时,所受的阻力主要来自弹体头部与混凝土接触的表面。因此,忽略弹身的影

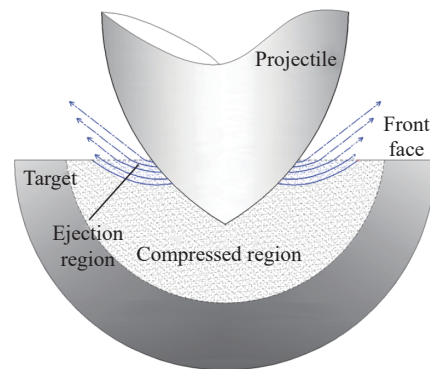


图 3 弹体侵彻混凝土靶的开坑过程
Fig. 3 The process of projectile penetration into concrete target

响, 基于局部相互作用理论, 引入局部笛卡尔坐标系描述尖卵形弹体的头部形状, 如图 4 所示。图中, r 为弹体半径, L_m 为弹体头部长度, R 为头部曲率半径, ψ 为弹头表面法向角, J 为弹体头部曲率半径 R 与弹体直径 $2r$ 的比值, 即弹体头部形状系数。因此, 尖卵形弹体头部形状函数在局部笛卡尔坐标系中可表示为:

$$\sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{R^2 - z^2} - (R - r) \quad 0 \leq z \leq L_m \quad (1)$$

考虑到尖卵形弹体为旋转对称弹体, 为便于分析计算, 将弹体头部形状函数转换至柱坐标系下。借助柱坐标系与笛卡尔坐标系间的转换关系:

$$\begin{cases} x = \rho \cos \varphi \\ y = \rho \sin \varphi \\ z = z \end{cases} \quad (2)$$

式 (1) 可以转换为:

$$\rho = \sqrt{R^2 - z^2} - (R - r) \quad 0 \leq \rho \leq r \quad (3)$$

式中: ρ 为极半径, φ 为极角。

1.3 开坑飞溅流线场基本方程

基于以上假设, 结合 Z 模型^[34] 流线场分布以及弹体头部形状函数, 建立弹体开坑过程中弹头表面微元对应的飞溅流线极坐标方程^[34]:

$$L = L_f(1 - \cos \varphi)^{\frac{1}{K-2}} \quad L_0 \leq L \leq L_f, \quad \varphi_0 \leq \varphi \leq \pi/2 \quad (4)$$

飞溅流线极坐标方程与弹体结构的关系如图 5 所示。其中, h 为弹体侵彻深度; L_0 为撞击点 O (极坐标原点) 到弹头表面微元的直线长度; L 为撞击点 O 到流线任意位置的极半径; ϕ_0 为撞击点 O 到弹头表面微元直线与弹体轴线的夹角; ϕ 为极半径 L 与弹体轴线的夹角; L_f 为弹头表面微元对应的流线靶面飞溅位置到撞击点 O 的直线距离; K 为冲击波衰减相关系数, 与靶面飞溅角 γ_e 有关, γ_e 为介质飞溅方向与迎弹面的夹角。为了简化问题分析, Z 模型中假设任意流线介质靶面飞溅角均相同。靶面飞溅角为 0° 时, $K=2$; 靶面飞溅角为 45° 时, $K=3$; 靶面飞溅角为 65° 时, $K=4$ 。 L_0 、 ϕ_0 、 L_f 与弹体结构特性的关系如下:

$$L_0 = \sqrt{(h - L_m + \sqrt{R^2 - (R - r + \rho)^2})^2 + \rho^2} \quad (5)$$

$$\phi_0 = \arctan \left(\rho / \left(h - L_m + \sqrt{R^2 - (R - r + \rho)^2} \right) \right) \quad (6)$$

$$L_f = \frac{L_0}{(1 - \cos \phi_0)^{\frac{1}{K-2}}} \quad (7)$$

结合流线极坐标方程 (4)~(7), 得到球坐标系 (球坐标中心与极坐标中心 O 重合, 如图 5 所示) 中弹体表面微元对应的流管体积方程和质量方程:

$$V_{\text{tube}} = \iiint L^2 \sin \phi dL d\phi d\varphi = \int_{\varphi - \Delta\varphi}^{\varphi} \int_{L_f - \Delta L_f}^{L_f} \int_{\phi_0}^{\pi/2} L^2 \sin \phi dL d\phi d\varphi \quad (8)$$

$$M_{\text{tube}} = Q_1 \int_{\varphi - \Delta\varphi}^{\varphi} \int_{L_f - \Delta L_f}^{L_f} \int_{\phi_0}^{\pi/2} L^2 \sin \phi dL d\phi d\varphi \quad (9)$$

式中: Q_1 为粉碎区混凝土的极限压缩密度, $\Delta\varphi$ 为弹体表面微元对应的圆心角。如图 5 所示, 弹体表面微元弧长为 Δb , 弹体表面微元对应的流管积分区间为 $[L_f, L_f + \Delta L_f]$, ΔL_f 可近似表示为流管截面宽度^[38],

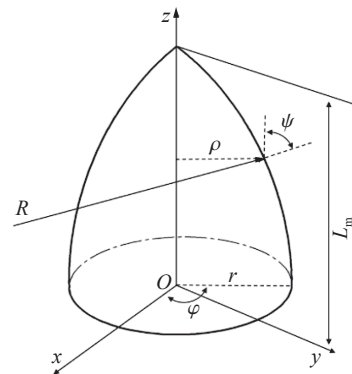


图 4 弹体头部形状的结构参数示意图
Fig. 4 Structural parameters of projectile

Kurosawa 等^[38]认为 $\Delta L_f = 10^{-4}r$, 由于 Δb 和 ΔL_f 均为极小的微元量, 本文中假设 $\Delta L_f = \Delta b$, 则 ΔL_f 可以表示为:

$$\Delta L_f = \Delta b = \sqrt{R^2 / (R^2 - (\rho + R - r)^2)} d\rho \quad (10)$$

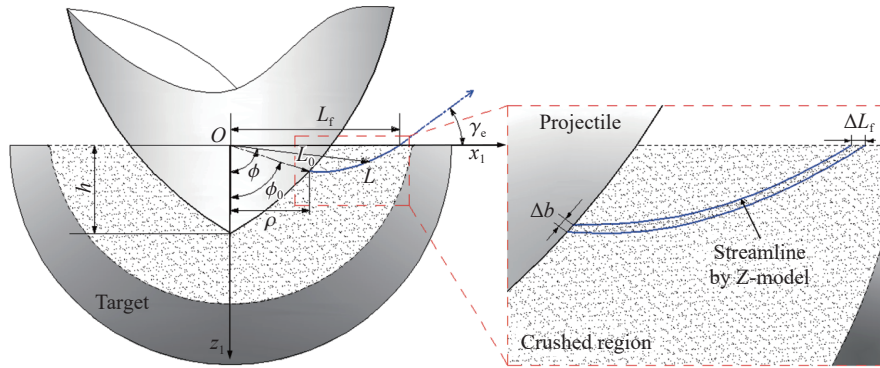


图 5 基于极坐标的飞溅流线方程

Fig. 5 Ejection streamline equation in polar coordinates

1.4 开坑飞溅流线场能量方程

建立开坑飞溅流线场是确定飞溅区大小的基础, 而判断流管是否发生飞溅的能量关系是确定飞溅区大小的关键。Kurosawa 等^[38]认为, 冲击开坑过程中介质发生飞溅主要由流管本身的强度能、重力势能以及输入流管的动能决定, 当输入流管的动能大于流线强度能和重力势能时, 介质沿流管发生飞溅。参考 Kurosawa 等^[38]的工作, 忽略重力势能的影响, 结合流管体积方程 (8) 以及混凝土材料的强度特性, 建立弹体表面微元对应流管的强度能方程:

$$E_{\text{strength}} = \int_{\varphi-\Delta\varphi}^{\varphi} \int_{L_r-\Delta L_f}^{L_r} \int_{\phi_0}^{\pi/2} \varepsilon \sigma_{cf} L^2 \sin\phi dL d\phi d\varphi \quad (11)$$

式中: ε 为混凝土介质完全压实对应的体应变, σ_{cf} 为混凝土抗压强度。

冲击开坑过程中, 弹靶接触面附近粉碎区介质飞溅所需的能量主要由该区域产生的压缩波和拉伸波做功提供, 压缩波和拉伸波的作用过程存在明显的先后顺序^[39]。弹头侵彻靶体介质时, 弹靶接触面附近介质发生粉碎性破坏, 压缩波和粉碎介质均沿着弹体表面微元法线方向运动^[31, 35]; 随后撞击点附近自由面产生的拉伸波对粉碎介质做功, 改变介质运动方向, 介质在拉伸波和压缩波的共同作用下发生飞溅运动^[39]。结合基本假设 (4), 则输入流管的动能等于弹体表面微元对应的法向运动介质压缩动能。法向膨胀理论^[35]充分考虑了混凝土的材料行为、空腔膨胀理论和压缩介质波传播的影响, 能够计算压缩波作用后弹体表面微元对应法向运动介质的动能。因此, 忽略自由面效应的影响, 弹体表面微元对应的法向运动介质动能采用法向膨胀理论进行计算, 则输入弹体表面微元对应流管的动能方程为^[35]:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} Q_1 \int_0^l (R+w)(\rho+x \sin\psi) v_w^2 d\varphi dw \quad (12)$$

式中: l 为响应介质波相对于弹体表面的传播距离, w 为靶体介质到弹体表面微元的法向距离, w 的取值范围为 $[0, l]$, v_w 为距离弹头表面微元的法向距离为 w 处的介质的法向运动速度, 其与弹体表面法向速度的关系为^[35]:

$$v_w = v_n / ((1+w/R)(1+l \sin\psi/w)) \quad (13)$$

式中: v_n 为弹体表面的法向速度。

联立式 (11)~(12), 即可得到输入流线的动能克服强度能后的剩余动能为:

$$E_{\text{re}} = E_{\text{kin}} - E_{\text{strength}} \quad (14)$$

联立式 (4)~(14), 结合 Kurosaua 等^[38] 建立的飞溅能量关系可知, 弹体开坑过程中, 当弹头表面微元对应流线剩余动能小于零时, 介质不发生飞溅; 当弹头表面微元对应流线剩余动能大于零时, 介质沿对应流线发生飞溅; 当弹体表面微元对应流线剩余动能等于零时, 则该微元对应流线为飞溅区边界, 结合式 (4) 可得, 弹体开坑过程中飞溅区的直径、深度分别为:

$$D_e = \frac{2L_e}{(1 - \cos \phi_e)^{\frac{1}{k-2}}} \quad (15)$$

$$H_e = L_e \cos \phi_e \quad (16)$$

式中: L_e 为撞击点到飞溅区边界弹体表面微元的直线长度, ϕ_e 为撞击点到飞溅区边界弹体表面微元的直线与弹体轴线的夹角, D_e 为飞溅区直径, H_e 为飞溅区深度。式 (15)~(16) 中相关参数定义如图 6 所示。

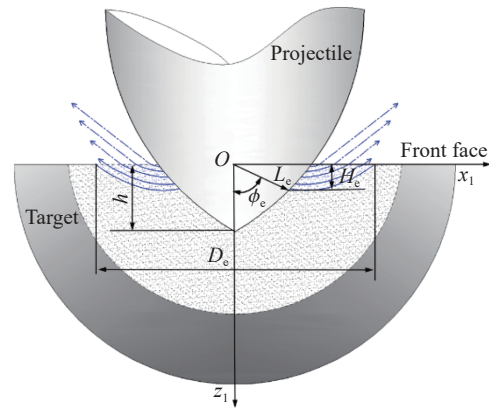


图 6 开坑飞溅区示意图

Fig. 6 Schematic diagram of ejection region

1.5 开坑阻力计算方法

开坑飞溅区的大小直接影响开坑阻力的求解, 由式 (15)~(16) 即可得到弹体开坑过程中飞溅区范围变化关系, 则弹体开坑过程中弹头表面微元所受的应力表达式为^[35]:

$$\sigma_n = \begin{cases} 0 & 0 \leq z_1 < H_e \\ \sigma_d + \frac{Q_1 Q_0}{Q_1 - Q_0} \lambda(l) v_n^2 + Q_1 \frac{dv_n}{dt} l & H_e \leq z_1 \leq h \end{cases} \quad (17)$$

$$\sigma_d = \sigma_{cf} [1 + 1.6(p_{lock}/\sigma_{cf})^{0.61}] [1 + 0.007 \ln(0.1v_0)] \quad (18)$$

$$\lambda(l) = \frac{R\rho}{(R+l)(\rho+l\sin\psi)} \quad (19)$$

式中: σ_d 为混凝土的动态压缩极限应力, Q_0 为混凝土材料的初始密度, $\lambda(l)$ 为波阵面相关系数, p_{lock} 为混凝土材料的锁定压力, v_0 为弹体初始速度。

弹体开坑过程中, 弹头表面微元应力可分解为垂直于微元法线的法向应力 σ_n 和沿微元切线方向的切向应力 σ_τ 。根据库伦摩擦定律, 开坑过程中弹头表面微元摩擦应力为:

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

式中: μ 为弹靶间的滑动摩擦因数, 弹体侵彻混凝土靶时的滑动摩擦因数具有一定的速度依赖性, 为了尽量减小开坑过程求解的复杂性, 滑动摩擦因数可取为常数^[40], 本文中取 $\mu=0.01$ ^[41]。

侵彻过程中, 弹体表面微元在侵彻方向上的合应力为:

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

结合式 (21), 将弹体表面微元在侵彻方向上的合应力 σ_z 对开坑过程中压实区的弹靶接触面积积分, 即可得到弹体开坑过程中所受的轴向合力:

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

式中: Σ 为开坑阶段压实区弹靶接触面积, ds 为弹体表面微元面积。有:

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

基于刚性弹假设, 结合式 (21), 开坑阶段弹体在局部坐标系下的运动方程为:

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

式中: M 为弹体总质量, a 为弹体运动加速度。由于式 (22)、(24) 为非线性微分方程, 对于开坑过载、弹体速度以及侵彻深度的计算没有简单的解析解, 因此开坑过程采用数值方法迭代求解。弹体开坑过程计算流程如图 7 所示, 当弹靶接触面积刚好等于弹头表面积时, 跳出循环, 开坑阶段结束。此时弹靶刚好完全接触, 接触深度为:

$$H_c = L_m + H_{\text{emax}} \quad (25)$$

式中: H_c 为弹靶完全接触深度, H_{emax} 为飞溅区最大深度。

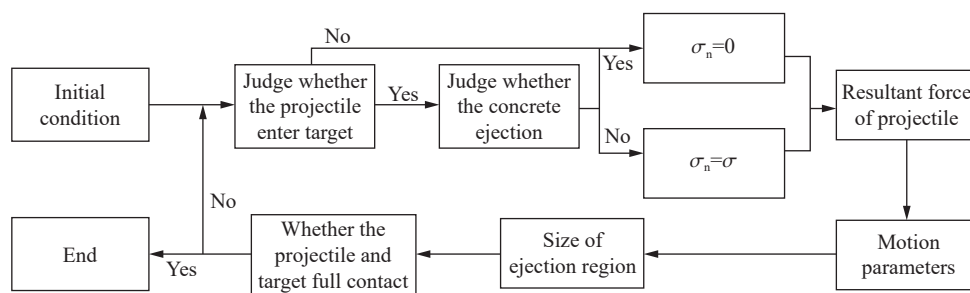


图 7 弹体侵彻混凝土靶体的开坑效应计算流程

Fig. 7 Calculation process of crater effect of projectile penetrating concrete target

开坑结束后, 弹体进入弹靶完全接触的稳态侵彻阶段, 为了保证开坑阶段和稳态侵彻阶段阻力的连续性, 稳态侵彻阶段阻力可直接采用文献 [35] 中的方法计算。

基于图 7 的流程计算典型尖卵形弹体 ($r=38.1 \text{ mm}$, $J=3$, $M=13 \text{ kg}$, $v_0=500 \text{ m/s}$) 侵彻半无限混凝土靶 ($\sigma_{cf}=39 \text{ MPa}$) 的动态开坑过程。如图 8 所示, 为了简化飞溅区的形状绘制, 图 8 中粉碎飞溅区形状曲线是由式 (15)~(16) 得到的飞溅区边界流线对应的起点 (弹体表面与飞溅区边界相交点)、终点 (靶面临界飞溅位置) 以及两点之间的中间点所建立的样条曲线, 能够直观反映开坑过程中飞溅区的直径和深度的变化规律, 不代表真实的粉碎飞溅区形状。从图 8 可以看出, 随着弹头的侵入, 粉碎飞溅区逐渐增大, 这与 Liu 等 [26]、Yu 等 [27]、Feng 等 [28] 在试验中观察到的现象相同; 此外, 如图 8 所示, 与 Forrestal 等 [14] 建立的开坑阻力线性增长模型、Yankelevsky 等 [31] 建立的弹头简单嵌入模型相比, 本文中建立的考虑混凝土飞溅过程的开坑阻力分析模型能够计算开坑阻力的同时, 还能进一步描述弹体侵彻混凝土靶动态开坑过程中飞溅区的大小变化过程。

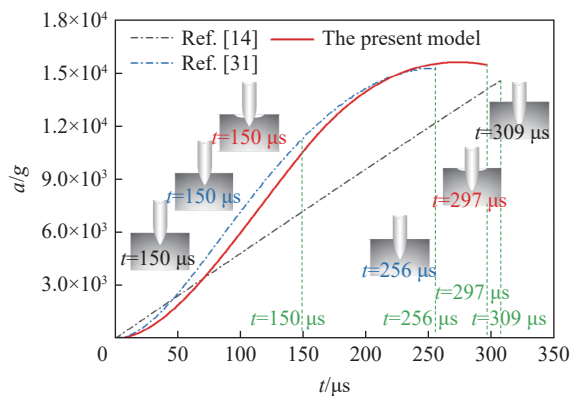


图 8 弹体侵彻混凝土靶开坑过程的计算结果对比

Fig. 8 Comparison of calculation results of penetration process during the cratering stage

2 考虑混凝土飞溅过程影响的开坑阻力计算模型可靠性验证

2.1 开坑阻力计算可靠性验证

为了验证考虑混凝土飞溅过程影响的开坑阻力计算模型的正确性, 采用文献中的过载试验数据 [14] 和弹体入靶过程中速度随侵彻深度的变化试验数据 [32] 对理论模型进行验证。文献中的弹靶主要参数如表 1 所示。

由于上述文献中均未给出混凝土的极限密度 Q_1 以及混凝土材料的锁定压力 p_{lock} , 参考文献 [35], 取混凝土极限密度 $Q_1=2\ 640 \text{ kg/m}^3$, 混凝土材料的锁定压力 p_{lock} 与混凝土强度 σ_{cf} 的比值为 16.7, 用于上文

理论模型的计算;此外,上述文献也并未给出开坑粉碎飞溅的飞溅角度且不具有可便于测量飞溅角度的高速录像照片,结合 Liu 等^[26]、Yu 等^[27]、Feng 等^[28]的试验对开坑飞溅过程中的飞溅角进行测量,得到平均飞溅角分别为 37.50°、39.12°、47.78°。因此,可以看出,弹体结构对开坑飞溅角度的影响较小,不同试验飞溅角均接近 45°,式(4)中冲击波衰减相关系数 K 可取为 3。随后,将表 1 中 Forrestal 等^[14]的试验弹靶参数分别代入本文开坑阻力计算模型、阻力线性增长模型^[14]以及忽略开坑飞溅影响的阻力计算模型,得到弹体开坑过程中过载的计算结果。结合文献中的试验数据对考虑飞溅过程影响的开坑阻力计算模型的可靠性进行验证,并与其他模型进行对比分析。其中,阻力线性增长模型中取混凝土靶的静阻力为 360 MPa^[14,31]。

弹体侵彻混凝土靶开坑过载计算结果与试验结果的对比如图 9~10 所示。从图 9~10 中可以看出,

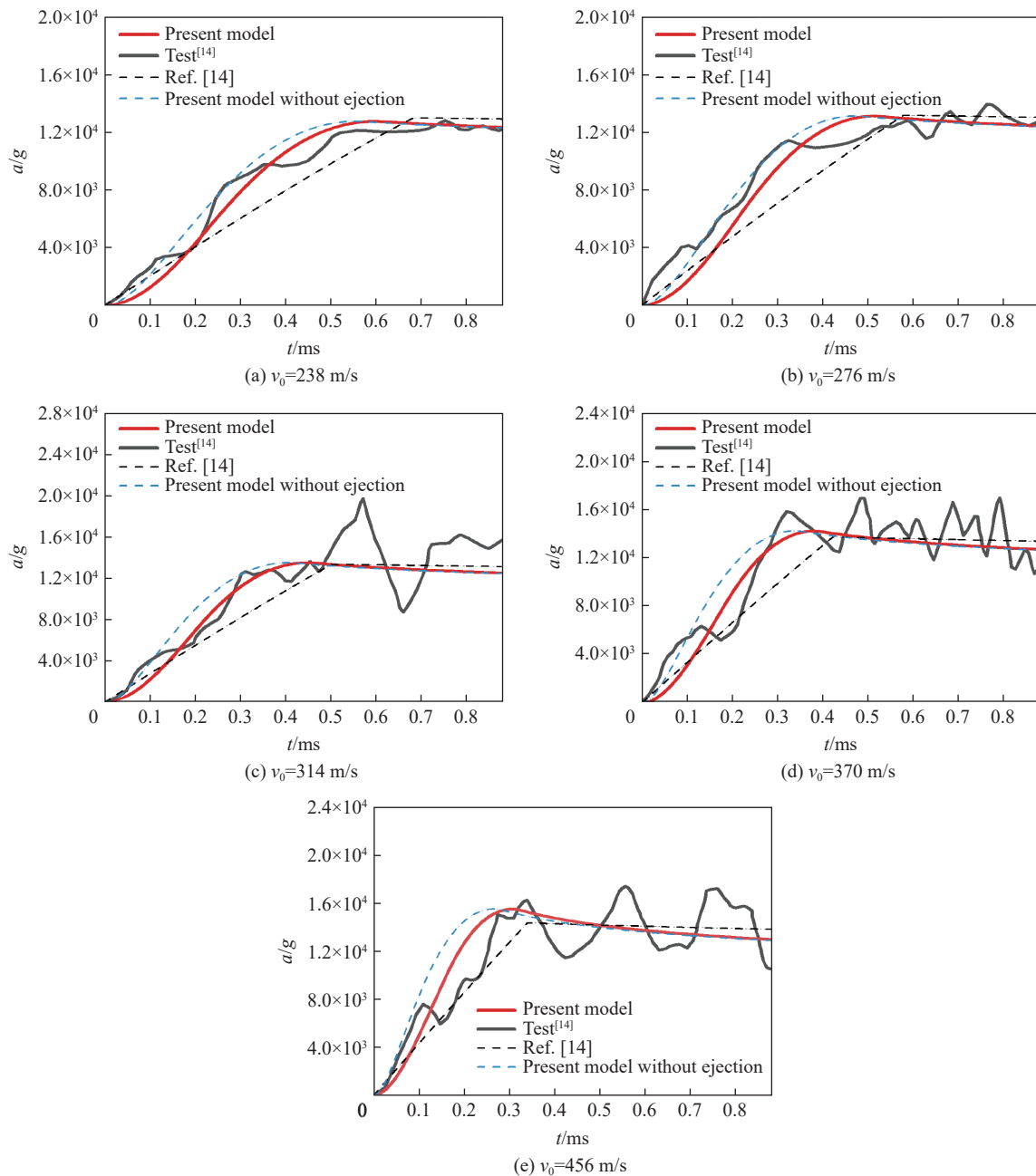


图 9 弹体头部形状系数为 3 时开坑过载计算结果与试验对比

Fig. 9 Comparison of acceleration between calculated and test results during the cratering stage of $J=3$

考虑飞溅效应影响的开坑阻力模型的过载计算结果与试验结果均吻合较好;若开坑阶段采用阻力线性增长模型^[14]计算开坑阻力,弹体头部形状系数为 3 时,计算结果与试验结果相比明显偏低,而弹体头部形状系数为 6 时,计算结果与试验结果相比存在偏高的现象;此外,从图 9(c)~(d)以及图 10(b)可以看出,若开坑阶段忽略飞溅效应的影响,计算结果将过高的估计开坑阶段的靶体阻力。

表 1 弹靶主要参数

Table 1 Parameters of projectiles and targets

| 文献 | r/mm | J | M/kg | L_m/mm | $Q_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | σ_{ci}/MPa |
|----------------------------|---------------|------|---------------|-----------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Forrestal等 ^[14] | 38.1 | 3 | 13 | 126 | 2250 | 39 |
| | 38.1 | 6 | 13 | 183 | 2250 | 39 |
| 柴传国等 ^[32] | 20 | 2 | 1.4 | 53 | 2240 | 18.5 |
| | 20 | 4.55 | 1.4 | 83 | 2240 | 18.5 |

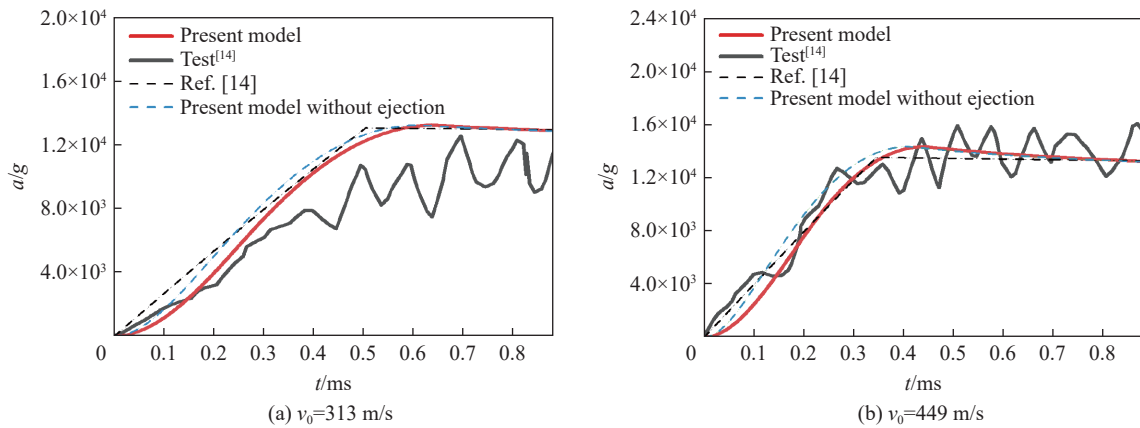


图 10 弹体头部形状系数为 6 时开坑过载计算结果与试验对比

Fig. 10 Comparison of acceleration between calculated and test results during the cratering stage of $J=6$

此外,将表 1 中柴传国等^[32]的试验弹靶参数代入考虑开坑飞溅过程影响的阻力模型中,得到速度随侵彻深度变化的计算结果。图 11 为弹体入靶过程中速度随侵彻深度变化的计算结果与试验结果的对比情况。从图 11 可以看出,模型计算的开坑阶段速度随侵彻深度变化的计算结果与试验结果吻合较好,进一步说明了模型能够可靠地预测开坑过程中的靶体阻力。

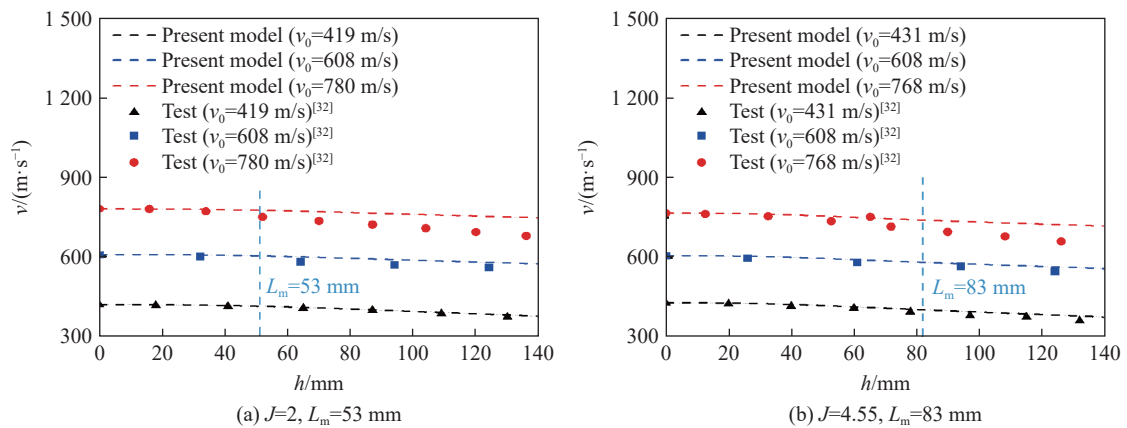


图 11 弹体入靶过程中速度衰减的计算结果与试验结果的对比

Fig. 11 Comparison of velocity change between calculation results and test results

2.2 开坑飞溅区参数计算可靠性验证

为了进一步验证考虑混凝土飞溅过程影响的开坑阻力计算模型的可靠性,对文献 [26-27] 中高速录像拍摄的开坑过程照片进行处理,由于文献中高摄录像照片数量有限且不能观测到飞溅区深度的变化过程,因此主要通过高速录像获得了未发生明显大块层裂和靶面隆起前的开坑直径作为飞溅区的最大直径,用于验证模型计算的有效性,飞溅区最大直径的测量方法如图 12 所示。

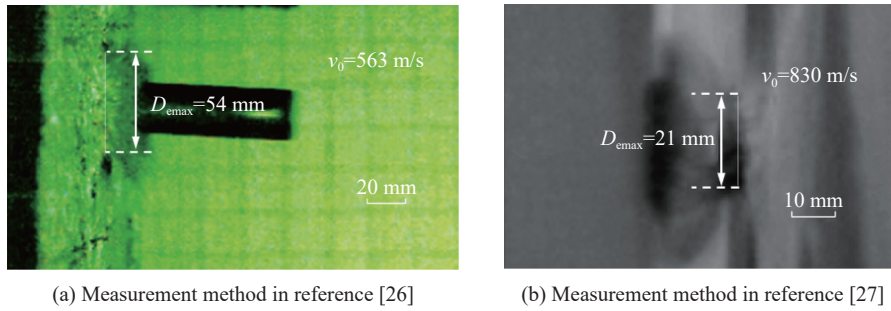


图 12 飞溅区最大直径的测量方法^[26-27]

Fig. 12 Measurement method^[26-27] for maximum diameter of ejection region

忽略文献 [26-27] 中混凝土所含纤维等复合材料对开坑过程的影响,将文献中弹靶参数分别代入考虑飞溅过程影响的开坑阻力计算模型,得到弹体开坑过程中最大飞溅区直径,结合文献中的试验数据对模型的可靠性进行验证。计算结果与试验数据对比如表 2 所示。从表 2 中可以看出,理论计算最大飞溅区直径与试验数据吻合较好,考虑飞溅过程影响的开坑阻力计算模型能够表征弹体侵彻混凝土靶动态开坑过程中的飞溅区大小。

表 2 文献中弹靶参数及飞溅区最大直径

Table 2 Parameters of projectile and target and maximum diameter of ejection region

| 来源 | r/mm | J | M/g | $Q_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | σ_{cf}/MPa | $v_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | $D_{\text{emax}}/\text{mm}$ | |
|----------------------|---------------|-----|--------------|-------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|-----------------------------|----|
| | | | | | | | 实验 | 计算 |
| Liu等 ^[26] | 3.81 | 3 | 9.5 | 2210 | 130 | 830 | 21 | 15 |
| | 3.81 | 3 | 9.5 | 2210 | 130 | 830 | 23 | 15 |
| Yu等 ^[27] | 12.65 | 3 | 330.0 | 2400 | 94 | 563 | 54 | 40 |
| | 12.65 | 3 | 330.0 | 2400 | 141 | 557 | 51 | 33 |

3 动态开坑作用过程分析

弹体侵彻混凝土靶动态开坑过程受多种因素的影响,包括弹体初始撞击速度、弹体头部形状系数、弹体直径、混凝土强度等。为了进一步研究弹体侵彻混凝土靶的动态开坑作用过程,下面讨论初始撞击速度、弹体头部形状系数、混凝土强度对动态开坑作用过程的影响。

3.1 初始撞击速度的影响

基于已验证过的理论模型和 2.1 节中 Forrestal 等^[14] 的弹靶参数 ($r=38.1\text{ mm}$, $J=3$, $M=13\text{ kg}$, $\sigma_{cf}=39\text{ MPa}$) 开展撞击速度分别为 200、400、600 和 800 m/s 的理论计算,获得了不同撞击速度下弹体侵彻混凝土靶的动态开坑作用过程。撞击速度为 400、800 m/s 的动态开坑作用过程如图 13(a) 所示;图 13(b)~(c) 为不同撞击速度下飞溅区直径和深度随侵彻深度的变化过程,图 13 中 t_1 为飞溅区直径和深度最大时刻, t_2 为弹体侵彻开坑结束时刻。

由图 13 可知,初始撞击速度范围为 200~800 m/s 时,飞溅区最大直径约为 $2r\sim 7r$,最大深度约为 $0.2r\sim 0.7r$;随着撞击速度的增大,飞溅区增大,动态开坑作用时间以及飞溅区范围达到稳定的时间均缩短,而飞溅区范围达到稳定的时间占动态开坑作用时间的比例增大;初始撞击速度从 200 m/s 增大到 800 m/s 时,飞溅区直径增大了 264%,飞溅区深度增大了 238%,而飞溅区范围达到稳定的时间缩短了 54%,动态开坑作用时间缩短了 73%。撞击速度对弹体侵彻混凝土靶的开坑作用过程影响显著。

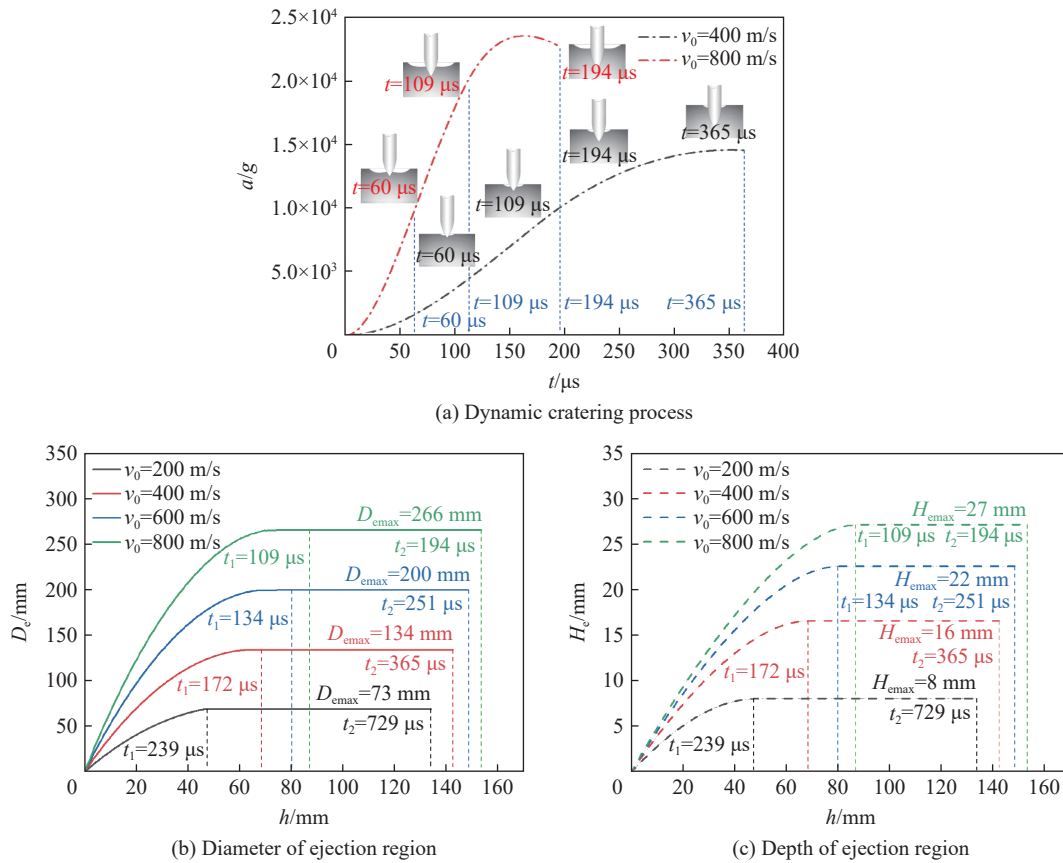


图 13 不同撞击速度下混凝土靶的动态开坑作用过程

Fig. 13 Cratering process of concrete under different impact velocities

结合式 (1)~(16) 可知, 弹体头部结构和混凝土强度相同时, 开坑过程中弹头表面对应的流线强度能相同; 而输入流线的动能主要由弹靶相互作用过程中弹靶接触面上的压力做功提供, 初始撞击速度越大, 弹靶作用压力越大, 弹体输入混凝土介质的流线动能越大。因此, 随着初始撞击速度的增大, 流线动能克服强度能后的剩余动能越大, 弹体侵彻混凝土靶动态开坑作用过程中的飞溅区越大。

3.2 弹体头部形状系数的影响

以 Forrestral 等^[14] 的试验弹体结构 ($r=38.1$ mm, $M=13$ kg) 为基础, 保持弹体直径、质量相同, 设计 3 种头部形状系数分别为 2、4、6 的尖卵形弹体。随后基于理论模型, 获得了撞击速度为 600 m/s 时, 3 种弹体侵彻 39 MPa 混凝土靶的动态开坑作用过程。图 14(a) 为弹体头部形状系数分别为 2 和 6 时弹体动态开坑作用过程; 图 14(b)~(c) 为不同头部形状系数弹体动态开坑过程中飞溅区直径和深度随侵彻深度的变化过程。

改变弹体头部形状系数对弹体头部结构影响较大。由式 (1)~(10) 可知, 混凝土强度相同时, 增大弹体头部形状系数, 弹头长细比增大, 开坑过程中弹头表面对应的流线体积增大, 从而导致流线强度能增大; 另一方面, 开坑飞溅区的扩大主要发生在弹头侵入初期, 时间小于 118 μs 时, 如图 14(b)~(c) 所示, 此时弹头均未完全进入混凝土靶; 弹头侵入深度相同时, 弹体头部形状系数越大, 弹头进入混凝土靶部分的表面积越小; 此外, 由式 (12)~(13)、(17)~(18) 可知, 撞击速度相同时, 增大弹体头部形状系数, 弹头表面法向角增大, 弹靶接触压力减小, 从而使得弹体输入混凝土靶介质的流线动能减小。

因此, 结合图 14 可知, 由于流线强度能的增大, 弹体输入流线的动能减小, 流线动能克服强度能后的剩余动能减小, 随着弹体头部形状系数的增大, 飞溅区减小, 动态开坑作用时间以及飞溅区范围达到稳定的时间逐渐增大, 飞溅区范围达到稳定的时间占动态开坑作用的时间比例减小; 弹体头部形状系数

从 2 增大到 6 时, 飞溅区直径减小了 36%, 深度减小了 28%, 而飞溅区范围达到稳定的时间增加了 36%, 动态开坑作用时间增加了 60%。弹体头部长度是影响整个开坑作用时间和飞溅区范围达到稳定时间的主要因素, 随着弹体头部形状系数的增大, 弹头长度增大, 开坑作用时间增大^[31], 飞溅区范围达到稳定的时间也增大。与初始撞击速度对弹体侵彻混凝土靶动态开坑作用过程的影响相比, 弹体头部形状系数的改变对动态开坑作用过程的影响较小。

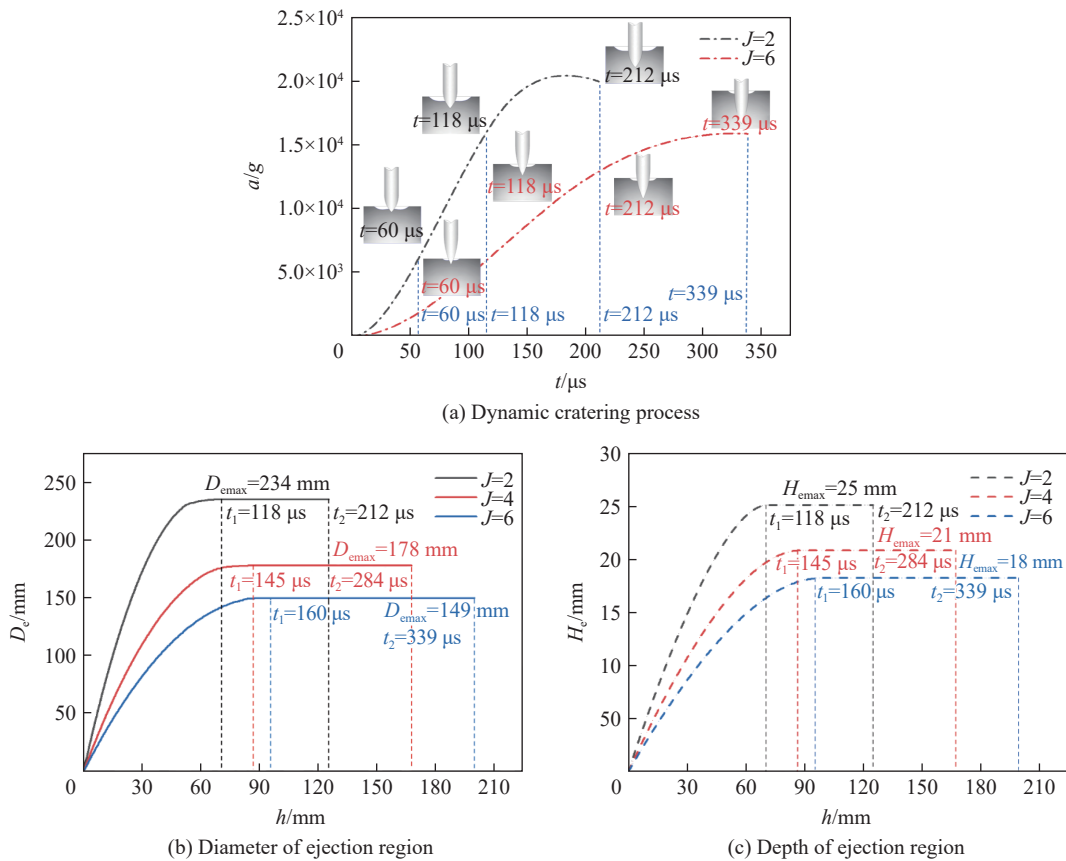


图 14 不同头部形状弹体撞击混凝土靶的动态开坑作用过程

Fig. 14 Cratering process of concrete under impact of projectile with different ogive nose shapes

3.3 混凝土强度的影响

基于 Forrester 等^[14] 的试验弹体结构质量参数 ($r=38.1\text{ mm}$, $J=3$, $M=13\text{ kg}$, $v_0=600\text{ m/s}$), 开展弹体侵彻单轴抗压强度分别为 20、40、60 和 80 MPa 混凝土靶的理论计算。图 15(a) 为弹体侵彻单轴抗压强度为 40、80 MPa 混凝土靶的动态开坑作用过程, 图 15(b)~(c) 为弹体侵彻不同强度混凝土靶动态开坑过程中飞溅区直径和深度随侵彻深度的变化过程。

弹体撞击速度相同时, 混凝土强度越高, 弹体侵彻混凝土靶的粉碎区越小。由式 (12)、(16) 可知, 混凝土强度增大, 开坑作用过程中弹头表面对应的流线强度能和弹靶接触面压力也随之增大。两者的增大对开坑飞溅区大小的影响相反, 流线强度能越大, 飞溅区越小, 而弹靶接触面压力越大, 粉碎介质获得的动能越大, 飞溅区越大。由于开坑粉碎区的减小, 且流线强度能增大效应大于流线输入动能增大效应, 结合图 15(b)~(c) 可知, 随着混凝土强度的增大, 飞溅区减小, 动态开坑作用时间以及飞溅区范围达到稳定的时间缩短, 而飞溅区范围达到稳定的时间占动态开坑作用时间的比例增大。混凝土强度从 20 MPa 增大到 80 MPa 时, 飞溅区直径减小了 49%, 深度减小了 39%, 而飞溅区范围达到稳定的时间缩短了 22%, 动态开坑作用时间缩短了 6%。因此, 混凝土强度改变对于飞溅区大小以及飞溅区范围达到稳

定的时间影响较大,对动态开坑作用时间的影响较小。此外,结合 3.1~3.2 节分析可知,撞击速度对弹体侵彻混凝土动态开坑作用过程影响最明显,其次为弹体头部形状系数和混凝土强度。

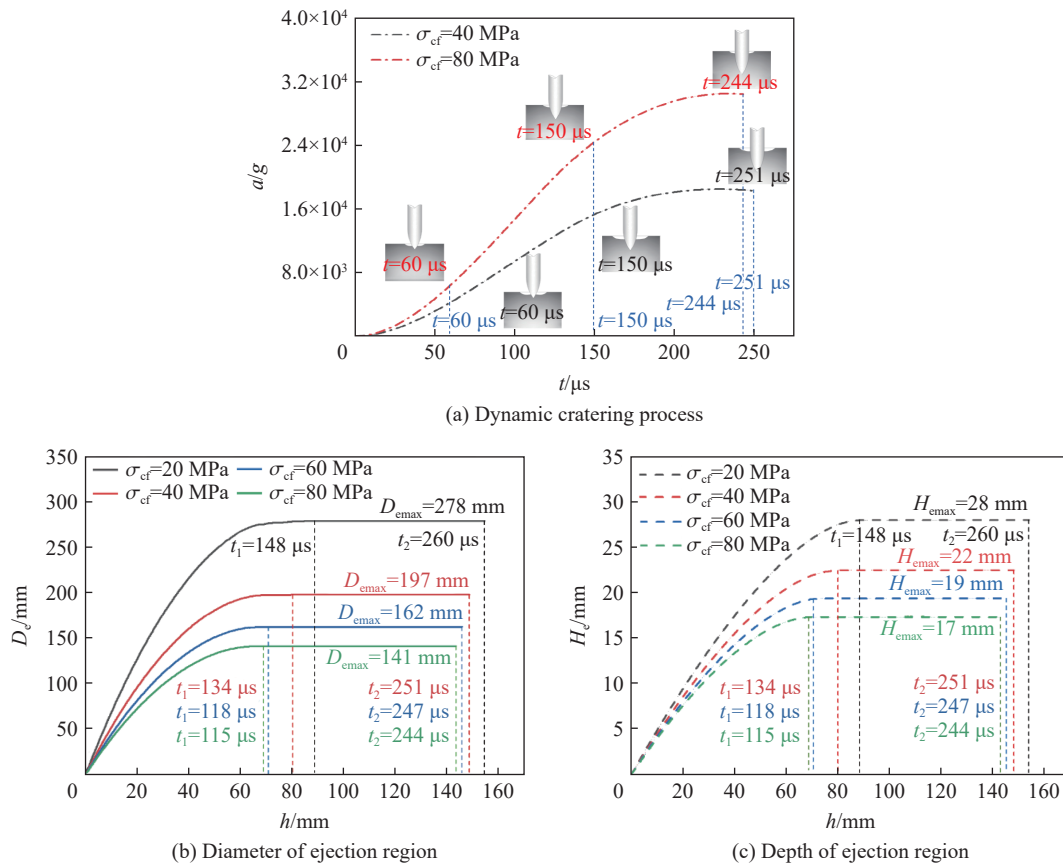


图 15 弹体撞击不同强度混凝土靶的动态开坑作用过程

Fig. 15 Cratering process of concrete with different compressive strength of target

4 结 论

结合弹体头部形状函数、Z 模型流线场分布以及法向膨胀理论,建立了考虑混凝土飞溅过程影响的开坑阻力计算模型,分析了典型弹靶参数对混凝土靶动态开坑过程的影响规律,主要结论如下。

(1) 侵彻过程中,混凝土靶粉碎飞溅对弹靶接触面积影响较大,进而影响开坑阻力,大块层裂主要发生在弹头通过开坑区以后,对弹体开坑过程影响小。

(2) 与开坑阻力线性增长模型、弹头简单嵌入模型相比,考虑混凝土飞溅过程影响的开坑阻力模型在能够准确计算开坑阻力的同时,还能进一步描述弹体动态开坑过程中飞溅区大小的变化过程。

(3) 弹体开坑飞溅区范围随弹体头部形状系数和混凝土强度的增大而减小;飞溅区范围达到稳定的时间和动态开坑作用时间随初速和混凝土强度的增大而缩短,随弹体头部形状系数的增大而增大;相较于弹体头部形状系数和混凝土强度,初始撞击速度对动态开坑作用过程影响更为显著。

参考文献:

[1] 吴昊,方秦,龚自明,等.应用改进的双剪强度理论分析岩石靶体的弹体侵彻深度[J].工程力学,2009,26(8):216-222.
WU H, FANG Q, GONG Z M, et al. Analysis on penetration depth of projectiles into rock targets based on the improved twin shear strength theory [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(8): 216-222.

[2] 薛建锋,沈培辉,王晓鸣.弹体侵彻混凝土开坑阶段阻力的计算[J].高压物理学报,2016,30(6):499-504. DOI:

- 10.11858/gywlb.2016.06.010.
- XUE J F, SHEN P H, WANG X M. Resistance during cratering for projectile penetrating into concrete target [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2016, 30(6): 499–504. DOI: 10.11858/gywlb.2016.06.010.
- [3] 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*, 2020, 138: 103482. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103482.
- [4] LU Y Y, ZHANG Q M, XUE Y J, 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: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103742.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- HUANG M R, GU X H, GAO Y H. Experiment and simplified analytical model for penetration of rigid projectile in a reinforced concrete target [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2009, 24(4): 283–290.
- [8] 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(9/10/11): 1087–1093. DOI: 10.1142/S0217979208046360.
- [9] 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(1): 37–47. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2022.01.005.
- LV 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.
- [10] 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): 093301. DOI: 10.11883/bzyej-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/bzyej-2019-0439.
- [11] 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(2): 276–283. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.02.007.
- 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: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.02.007.
- [12] 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.
- [13] FORRESTAL M J, LUK V K. Penetration into soil targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1992, 12(3): 427–444. DOI: 10.1016/0734-743X(92)90167-R.
- [14] 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.
- [15] QIAN L X, YANG Y B, LIU T. A semi-analytical model for truncated-ogive-nose projectiles penetration into semi-infinite concrete targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24(9): 947–955. DOI: 10.1016/S0734-743X(00)

- 00008-7.
- [16] 吴祥云, 李永池, 何翔, 等. 细长弹体侵彻混凝土的机理研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(11): 1817–1822. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2003.11.013.
WU X Y, LI Y C, HE X, et al. On mechanism of slender projectile penetrating into concrete [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11): 1817–1822. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2003.11.013.
- [17] 温志鹏, 王玉祥, 吕本明, 等. 弹体垂直侵彻混凝土介质开坑深度的计算方法 [J]. *常州工学院学报*, 2005, 18(S1): 82–84. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0436.2005.z1.016.
- [18] 刘海鹏, 高世桥, 金磊. 弹丸侵彻混凝土靶板成坑实验及量纲分析 [C]//第十届全国冲击动力学讨论会论文集. 太原: 中国力学学会爆炸力学专业委员会冲击动力学专业组, 2011.
- [19] 刘海鹏, 高世桥, 金磊. 弹侵彻混凝土靶面成坑机理分析 [C]//第六届全国强动载效应及防护学术会议暨 2014 年复杂介质/结构的动态力学行为创新研究群体学术研讨会论文集. 北京: 中国力学学会爆炸力学专业委员会, 2014.
- [20] 李明, 王可慧, 邹慧辉, 等. 弹体侵彻厚混凝土靶迎面成坑效应 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(8): 083302. 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] 刘海鹏, 高世桥, 金磊, 等. 弹侵彻混凝土靶面成坑的分阶段分析 [J]. *兵工学报*, 2009, 30(S2): 52–56.
LIU H P, GAO S Q, JIN L, et al. Phase analysis on crater-forming of projectile penetrating into concrete target [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(S2): 52–56.
- [22] ZHANG S B, KONG X Z, FANG Q, et al. Numerical prediction of dynamic failure in concrete targets subjected to projectile impact by a modified kong-fang material model [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 144: 103633. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103633.
- [23] ABDEL-KADER M. Modified settings of concrete parameters in RHT model for predicting the response of concrete panels to impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 132(10): 103312. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.06.001.
- [24] SHIN W, PARK H, HAN J. Improvement of the dynamic failure behavior of concrete subjected to projectile impact using user-defined material model [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 332: 127343. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127343.
- [25] XU L Y, XU H, WEN H M. On the penetration and perforation of concrete targets struck transversely by ogival-nosed projectiles—a numerical study [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 125: 39–55. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.11.001.
- [26] LIU J, LI J, FANG J G, et al. Ultra-high performance concrete targets against high velocity projectile impact—a state-of-the-art review [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 160: 104080. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.104080.
- [27] YU R, SPIESZ P, BROUWERS H J H. Energy absorption capacity of a sustainable ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) in quasi-static mode and under high velocity projectile impact [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2016, 68: 109–122. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.02.012.
- [28] FENG J, GAO X D, LI J Z, et al. Penetration resistance of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete under projectile multi-impact [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 202: 341–352. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.038.
- [29] WARREN T L. Simulations of the penetration of limestone targets by ogive-nose 4340 steel projectiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 27(5): 475–496. DOI: 10.1016/s0734-743x(01)00154-3.
- [30] ROSENBERG Z, DEKEL E. The deep penetration of concrete targets by rigid rods-revisited [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2010, 1(1): 125–144. DOI: 10.1260/2041-4196.1.1.125.
- [31] YANKELEVSKY D, FELDGUN V. The embedment of a high velocity rigid ogive nose projectile into a concrete target [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 144: 103631. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103631.
- [32] 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.

- [33] 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]//第 22 届全国结构工程学术会议论文集. 乌鲁木齐: 中国力学学会, 2013.
- [34] MAXWELL D E. Simple Z model for cratering, ejection, and the overturned flap [M]//RODDY D J, PEPIN R O, MERRILL R B. *Impact and Explosion Cratering*. New York: Pergamon Press, 1976: 1003–1008.
- [35] GAO S Q, LIU H P, JIN L. A fuzzy model of the penetration resistance of concrete targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(4): 644–649. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.03.008.
- [36] 王明洋, 邱艳宇, 李杰, 等. 超高速长杆弹对岩石侵彻、地冲击效应理论与实验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(3): 564–572. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1348.
- WANG M Y, QIU Y Y, LI J, et al. Theoretical and experimental study on penetration in rock and ground impact effects of long rod projectiles of hyper speed [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(3): 564–572. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1348.
- [37] 李国旺. 主带彗星砾石堆组构造动能侵彻效应研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2020.002205.
- LI G W. Research on the kinetic penetrating effects in the main-belt comet rubble pile structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2020.002205.
- [38] KUROSAWA K, TAKADA S. Impact cratering mechanics: a forward approach to predicting ejecta velocity distribution and transient crater radii [J]. *Icarus*, 2019, 317: 135–147. DOI: 10.1016/j.icarus.2018.06.021.
- [39] KUROSAWA K, OKAMOTO T, GENDA H. Hydrocode modeling of the spallation process during hypervelocity impacts: implications for the ejection of Martian meteorites [J]. *Icarus*, 2018, 301: 219–234. DOI: 10.1016/j.icarus.2017.09.015.
- [40] FU H, GAO S Q, JIN L, et al. Research on the acceleration phenomenon of projectile leaving the target when penetrating thick concrete target [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 164: 104191. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104191.
- [41] 王文杰, 张先锋, 邓佳杰, 等. 椭圆截面弹体侵彻砂浆靶规律分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(1): 164–173. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0020.
- WANG Wenjie, ZHANG Xianfeng, DENG Jiajie, et al. Analysis of projectile penetrating into mortar target with elliptical cross-section [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(1): 164–173. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0020.

(责任编辑 曾月蓉)