

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0482

刚性弹侵彻/贯穿混凝土靶体的工程 实用化计算模型*

洪智捷, 杨耀宗, 孔祥振, 方 秦

(陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007)

摘要: 准确计算钻地弹对混凝土材料的侵彻深度和临界贯穿厚度是防护工程领域重点关注的问题。现有侵彻深度计算公式对于大口径钻地弹的预测精度较差, 且临界贯穿厚度的计算方法缺乏理论依据。针对上述问题, 基于 145 组刚性卵弹侵彻混凝土试验数据和 32 组贯穿混凝土试验数据, 对刚性卵弹侵彻和贯穿混凝土靶体的实用化计算模型进行了研究。首先基于对刚性弹侵彻混凝土靶体的阻力分析, 提出线性上升-恒定的两阶段阻力模型, 建立了考虑尺寸效应影响的侵彻深度实用化计算模型, 通过与 15 组大口径、大长径比的侵彻试验数据及 ACE 和 NDRC 公式的对比分析, 验证了提出公式的可靠性和优越性; 然后基于后坑由拉伸破坏引起的基本假定, 给出了临界贯穿厚度、弹道极限和残余速度的计算模型; 最后通过与现有的贯穿试验数据对比分析, 验证了计算模型的正确性。

关键词: 刚性弹; 混凝土靶; 侵彻; 贯穿

中图分类号: O385

国标学科代码: 1303530

文献标志码: A

Practical engineering calculation models for rigid projectile penetrating and perforating into concrete target

HONG Zhijie, YANG Yaozong, KONG Xiangzhen, FANG Qin

(State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact,
PLA Army Engineering University, Nanjing 210007, Jiangsu, China)

Abstract: Accurate predictions of the penetration depth and critical perforation thickness of earth penetration weapons into concrete materials are key issues in the field of protective engineering. However, the widely-used formulas have limited predictive accuracy for penetration depth when earth penetration weapons have a large diameter and a high aspect ratio, and are lack of theoretical basis for critical perforation thickness. To resolve the two issues above, the engineering calculation models of rigid ogive-nose shape projectile penetrating and/or perforating into concrete targets are investigated in this paper on the basis of 145 sets of penetration data and 32 sets of perforation data. Firstly, based on the resistance analysis of rigid projectile penetrating into concrete target, a two-stage resistance model is proposed, and then a practical calculation model of penetration depth with the consideration of scaling effect is proposed. The reliability of the proposed model is verified by comparing it with 15 sets of penetration data with large diameter and high aspect ratio as well as the predictions by widely-used ACE formula and NDRC formula. The results show that the average errors of the proposed formula, ACE formula and NDRC formula are 5.5%, 15.7% and 24.9%, respectively. Secondly, based on the assumption that the scabbing is caused by the tensile failure of concrete, a formula for the scabbing height is derived based on the force equilibrium between the stress produced by the projectile and the tensile strength of concrete target. Then, the formulas for the critical perforation thickness, ballistic limit

* 收稿日期: 2022-11-01; 修回日期: 2023-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(52178515)

第一作者: 洪智捷(1998—), 女, 硕士研究生, hzy3416699639@163.com

通信作者: 孔祥振(1988—), 男, 博士, 副教授, ouckxz@163.com

and residual velocity are deduced, which are validated by the relevant experimental data. Besides, the coefficients of concrete targets in preventing perforation for four typical earth penetration weapons are compared and analyzed. The accuracy of proposed calculation models for penetration depth and critical perforation thickness shows a great improvement, providing reliable reference for engineering design.

Keywords: rigid projectile; concrete target; penetration; perforation

随着常规武器的迅速发展, 钻地弹的命中精度和侵彻能力均有了较大提高, 对我国重要军事工程及关键基础设施带来了严峻威胁。准确计算钻地弹的侵彻破坏效应是工程防护设计的基础, 也是防护工程领域关心的热点问题。

钻地弹对混凝土材料的侵彻深度是工程防护设计关注的首要问题。针对该问题, 国内外学者进行了大量的研究工作, 建立了侵彻深度的预测公式, 主要可分为两类。一类是以理论模型为基础确定弹体侵彻过程中靶体阻力函数, 然后通过试验数据确定或修正相关系数, 最终得到预测侵彻深度的半解析模型, 如空腔膨胀模型^[1-3]、速度场模型^[4]等。上述理论模型虽然能较好描述侵彻过程中的关键物理机制, 但一般形式较为复杂, 不便于工程应用, 且大部分模型是通过小口径缩比弹试验进行拟合和验证的, 因此是否能推广到大口径原型弹值得商榷。另外一类是目前在防护工程设计中广泛使用的经验公式。当前国内外有关钻地弹对介质侵彻深度的计算公式有几十种, 但是随着钻地弹武器的发展, 新型钻地弹具有弹头尖锐、长径比大等特点, 因此上述经验公式的适用性和准确性还有待进一步验证。Li 等^[5]、王安宝等^[6]、张爽^[7]和程月华等^[8]从公式形式、适用范围和预测精度对已有侵彻深度的经验公式进行了较为全面的评述, 主要有两个结论: 一是经验公式形式简单, 但量纲不协调, 经验系数无明显物理意义; 二是不同的经验公式往往只适用于特定的弹头形状、质量以及靶体强度, 尺寸效应突出导致多数经验公式对大口径钻地弹的预测精度较差, 难以为防护设计提供可靠参考。因此, 目前仍缺乏具有一定物理基础、预测精度较高且形式简单的新型钻地弹侵彻深度的工程实用化计算模型。

靶体的侵彻不贯穿厚度(或临界贯穿厚度)是防护工程设计关注的另外一个主要问题, 可为遮弹层设计提供参考。现有临界贯穿厚度的公式形式都较为简单, 大多通过对试验数据直接拟合得到。龚自明等^[9]通过开展贯穿试验, 得到钢筋混凝土的临界不贯穿厚度为 1.3 倍的侵彻深度; 修正的 Petry 公式^[10]中临界贯穿厚度为侵彻深度的 2 倍; 而 ACE 公式^[11]和 NDRC 公式^[12]中的临界贯穿厚度则与侵彻深度呈简单的一次关系式。这些取值或关系式都缺乏理论基础, 因此可能导致对临界贯穿厚度的预测误差较大。Li 等^[13]和 Chen 等^[14-15]基于试验现象提出了弹体贯穿混凝土的三阶段模型, 并认为临界贯穿厚度应等于弹体侵彻深度和靶背冲塞块高度之和, 同时给出了计算冲塞块高度的计算公式, 但缺乏足够的试验数据对该公式进行验证。Peng 等^[16]基于对贯穿试验后坑高度的试验数据分析, 认为厚靶冲塞块高度约为 2.5 倍的弹径, 而薄靶则约为 0.5 倍靶体厚度, 但缺乏一定的理论依据。因此, 目前仍缺乏考虑弹体及靶体材料性质的临界贯穿厚度的工程实用化计算模型。

为解决上述问题, 本文中基于对刚性弹侵彻贯穿混凝土靶体的阻力和过程分析, 分别建立相关的计算模型, 给出侵彻深度和临界贯穿厚度的工程实用化计算公式, 并通过 145 组侵彻试验和 32 组贯穿试验数据对计算模型进行了验证。

1 刚性弹侵彻混凝土靶体的计算模型

首先对刚性弹侵彻混凝土靶体的阻力进行分析, 提出线性上升-恒定的两阶段阻力模型, 并基于此建立侵彻深度的计算公式; 然后基于大量试验数据, 通过引入弹径修正系数提高计算公式的预测精度; 最后基于大口径、大长径比的弹体侵彻试验数据, 验证提出公式的可靠性。

1.1 侵彻阻力

刚性弹侵彻过程中, 弹体所受阻力是建立侵彻深度计算模型的基础。基于空腔膨胀模型, Forrestal 等^[17]、Chen 等^[18]给出刚性弹侵彻阻力 F 的一般形式为:

$$F = \frac{\pi d^2}{4} (A f_c N_1 + B \rho v^2 N_2) \quad (1)$$

式中: d 为弹径, f_c 为靶体单轴压缩强度, ρ 为靶体密度, A 和 B 为与靶体材料相关的常数, v 为侵彻过程中弹体瞬时速度, N_1 和 N_2 为与弹头几何形状及弹靶摩擦相关的无量纲数。从式(1)可看出, 弹体所受阻力由两部分组成: 一是准静态阻力项, 主要与材料强度相关; 二是动态阻力项(惯性项), 主要与速度相关。

注意到式(1)为侵彻稳定阶段的弹体阻力(弹体加速度), 而实际侵彻过程中弹体加速度的变化较为复杂。Forrestal 等^[19]、Rosenberg 等^[20-23]、Yankelevsky 等^[24-25]、陈小伟等^[26]和 Kong 等^[2, 27]针对上述问题提出了不同的观点。Forrestal 等^[19]基于弹载加速度试验数据, 发现弹体加速度分为两个阶段: 第一阶段为线性上升段, 对应于侵彻的初始阶段; 第二阶段为缓慢下降的平台段, 对应于侵彻的隧道阶段。Rosenberg 等^[20-23]通过开展弹体侵彻金属靶体的二维数值模拟, 发现弹体侵彻金属靶体的加速度几乎为一个定值, 进一步结合弹体侵彻混凝土靶体的试验数据, 认为恒定加速度的模型可以推广到混凝土靶体中, 并忽略了弹体侵彻过程中初始阶段加速度的变化(图 1 中橘色线)。但是陈小伟等^[26]认为速度较低时, 惯性项影响可忽略; 而当速度较高时, 惯性项和材料强度项相当, 不可忽略。Yankelevsky 等^[24]也指出, 恒定加速度模型没有物理意义, 认为 Forrestal 等^[19]提出的两阶段侵彻阻力模型(图 1 红线)较为可靠, 并在此基础上提出了改进的二阶段加速度线性下降模型(图 1 中绿线)。Kong 等^[27]与 Forrestal 等^[19]、陈小伟等^[26]和 Yankelevsky 等^[24]的看法相似, 即隧道阶段的弹体加速度与速度相关, 只是在低速情况下动态阻力项的贡献较小。

综上所述, 针对刚性弹侵彻混凝土靶体过程中的侵彻阻力/弹体加速度主要存在以下两点争议, 一是初始阶段侵彻阻力的变化是否需考虑, 二是隧道阶段侵彻阻力中的惯性项是否需考虑。首先, 本文主要研究的是浅侵彻问题, 因此初始阶段的侵彻阻力变化不可忽略。其次, 根据 Forrestal 等^[19]和 Frew 等^[28]开展的混凝土侵彻试验发现在其试验速度范围内(<460 m/s)惯性项的影响非常小, Rosenberg 等^[20]也对 Frew 等^[29]开展的小直径尖卵形刚性弹侵彻混凝土靶体试验开展分析, 发现在 $400 \sim 1\,200$ m/s 范围内, 惯性项的影响同样可忽略。而钻地弹着靶速度通常不超过 400 m/s, 因此为便于解决工程问题, 隧道区采用恒定阻力(即不考虑惯性项)是合理的, 这也与 Peng 等^[16]提出的平均阻力模型一致, 因此可采用线性上升-恒定的两阶段侵彻阻力模型, 如图 1 中蓝色实线所示。

目前针对上述两阶段的界限仍存在分歧, Forrestal 等^[1]和 Chen 等^[18]认为混凝土靶体的开坑深度即为初始阶段的侵入深度, 同时分别假定开坑深度为 $2d$ 和 $0.707d+l$ (l 为弹头长度)。而 Teland 等^[30]假设尖卵形弹体侵彻过程中弹体受力面积近似线性增加, 因此认为初始阶段侵彻阻力线性上升。图 2 则给出了尖卵形弹体侵入混凝土靶体的高速摄像^[29], 从图中可以看出弹体头部侵入靶体后, 混凝土仍未产生飞溅, 因此认为侵彻阻力随着受力面积增加而线性上升的描述是合理的。故本文中采用 Teland 等^[30]的假设, 即认为初始阶段侵彻深度为弹头长度 l , 同时忽略弹靶界面的摩擦效应, 则侵彻阻力表达式为:

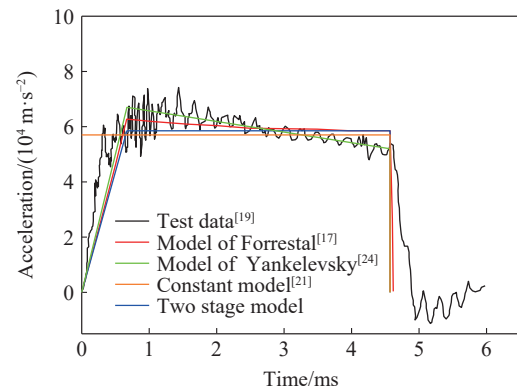


图 1 弹体加速度历程曲线

Fig. 1 Acceleration-time history curves of projectile

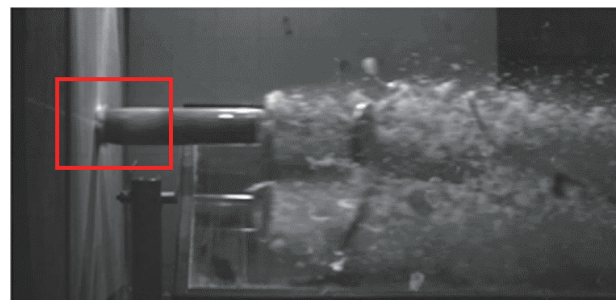


图 2 弹体侵入混凝土靶体图像^[31]

Fig. 2 Photograph of projectile penetrating concrete target^[31]

$$F = \begin{cases} ch' & 0 \leq h' \leq l \\ \frac{\pi d^2}{4} A f_c & l < h' \leq h \end{cases} \quad (2)$$

式中: h' 为当前侵彻深度, h 为最终侵彻深度, c 为初始阶段 $F-h$ 曲线斜率。靶体材料参数 A 可采用 Forrestral 等^[29,32] 的建议, 即 $A = 82.6 f_c^{-0.544}$ 。

1.2 计算模型

基于上述讨论, 刚性弹侵彻过程中所受阻力如图 3 所示, 其中 F_m 为隧道区恒定阻力。

依据能量守恒定律, 弹体动能全部转化为阻力做功, 即:

$$\frac{1}{2} F_m l + F_m (h-l) = \frac{1}{2} m v_0^2 \quad (3)$$

式中: m 为弹体质量, v_0 为弹体着靶速度, 联立式 (2)~(3) 可求得侵彻深度 h 计算公式为:

$$\frac{h}{d} = \frac{2}{\pi} \frac{m v_0^2}{A f_c d^3} + \frac{l}{2d} \quad (4)$$

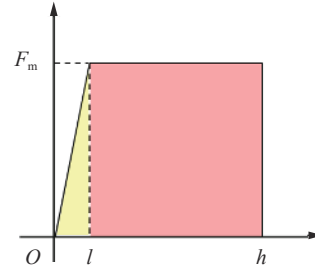


图 3 线性上升-恒定的侵彻阻力模型

Fig. 3 A linear increasing-constant penetration resistance model

引入 Li 等^[3,5] 提出的无量纲冲击因子 $I = m v_0^2 / (d^3 Y)$, 其中 $Y = A f_c$, 式 (4) 可简化为:

$$\frac{h}{d} = \frac{2}{\pi} I + \frac{l}{2d} \quad (5)$$

需要指出的是, 由于 A 是 Forrestral 等^[29,32] 基于试验数据反向拟合得到, 式 (5) 仍是一种半经验公式。注意到确定 A 值大多是基于缩比试验数据, 弹体口径较小, 使得式 (5) 的适用范围有限, 若要将其推广应用到大口径钻地弹则必须考虑尺寸效应的影响。

1.3 尺寸效应系数

尺寸效应可简单地表述为几何相似的弹体侵彻同一混凝土靶体时, 无量纲侵彻深度不相等。吴飏等^[33] 开展了 7 种不同比尺的弹体以 450 m/s 的速度分别侵彻 C40 和 C60 混凝土靶体的试验研究, 结果表明, 无量纲侵彻深度 h/d 随弹径的增加而增加。Wu 等^[34] 认为造成尺寸效应的主要原因是混凝土中粗骨料的粒径, 即按照弹体比例缩放靶体模型时, 粗骨料的粒径没有进行相应缩比。而后彭永等^[35] 基于混凝土靶体的细观有限元模型, 开展了相应数值模拟研究, 验证了上述结论。Canfield 等^[36] 开展的侵彻试验中对粗骨料粒径进行了相应地缩比 (也即保证弹径与粗骨料粒径比不变), 结果表明无量纲侵彻深度满足相似律, 进一步验证了上述结论。但是, 从量纲分析可知, 影响尺寸效应还有材料的应变率和断裂能等^[37-38]。总之, 目前尚未完全揭示弹体侵彻的尺寸效应的作用机制。为此, 本文中采用已有大口径试验数据修正的方法考虑尺寸效应。即在式 (5) 的基础上引入弹径修正系数 λ_d :

$$\frac{h}{d} = \lambda_d \left(\frac{2}{\pi} I + \frac{l}{2d} \right) \quad (6)$$

为确定弹径修正系数 λ_d 的取值, 收集了 145 组刚性卵弹侵彻混凝土靶体的试验数据^[1, 8, 19, 28-29, 32-34, 39-48], 弹径范围为 10~400 mm, 弹体初速度范围为 100~700 m/s, 通过以下方法对弹径修正系数 λ_d 进行确定。

首先, 采用未修正的式 (5) 对收集到的试验数据进行计算, 并求得式 (5) 与试验值的误差; 然后, 根据弹体直径分阶段分析误差数据, 求得每种分类下的平均误差, 如图 4 中红点所示。可以看出, 平均误差可分为 3 个阶段: 当弹径在 10~50 mm 时, 式 (5) 计算值大于试验值, 且平均误差约在 10%; 当弹径在 50~130 mm 时, 式 (5) 计算值小于试验值, 且随着弹径增加, 平均误差逐渐增大; 而当弹径大于 130 mm 时, 式 (5) 计算值小于试验值, 且误差稳定在约 35%。

根据上述规律, 可得出弹径修正系数 λ_d 的取值如表 1 所示, 分为 3 个阶段: 当弹径小于 40 mm 时, λ_d 取 0.95; 当弹径在 40~130 mm 之间时, λ_d 在 0.95~1.55 之间线性插值; 当弹径大于 130 mm 时, λ_d 取

1.55。经过弹径修正系数的修正之后,对平均误差重新进行计算,如图 4 中黑点所示,发现式(6)预测不同弹径的侵彻深度的平均误差大多约在±10%。

图 5 给出了考虑弹径修正系数的式(6)预测的侵彻深度和试验数据的对比(试验数据按照 l/d 的取值分为 3 类)。图中红色实线为式(5)中无量纲侵彻深度 h/d 与无量纲因子 I 之间关系,淡红色点为原始试验数据,而黑色点则为经过弹径修正系数倒数 $1/\lambda_d$ 逆修正后的试验数据。通过比较可以发现,式(6)预测值与试验数据吻合较好,经过弹径修正系数的修正,原来较为弥散的试验数据进一步靠近红色实线,说明提出的弹径修正系数有效提高了侵彻深度的预测精度。

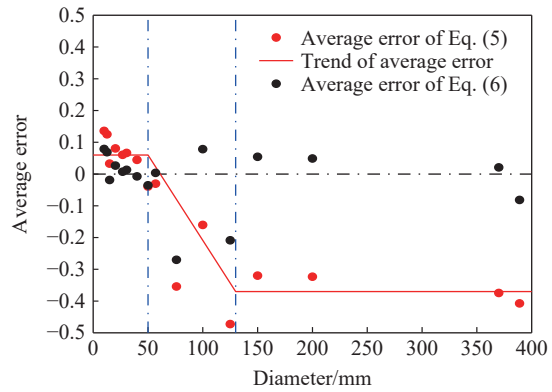


图 4 预测侵彻深度的平均误差

Fig. 4 Average error of predicted penetration depth

表 1 弹径修正系数取值表

Table 1 Correction factor for projectile diameter

弹径/mm	<40	60	80	100	>130
λ_d	0.95	1.05	1.15	1.25	1.55

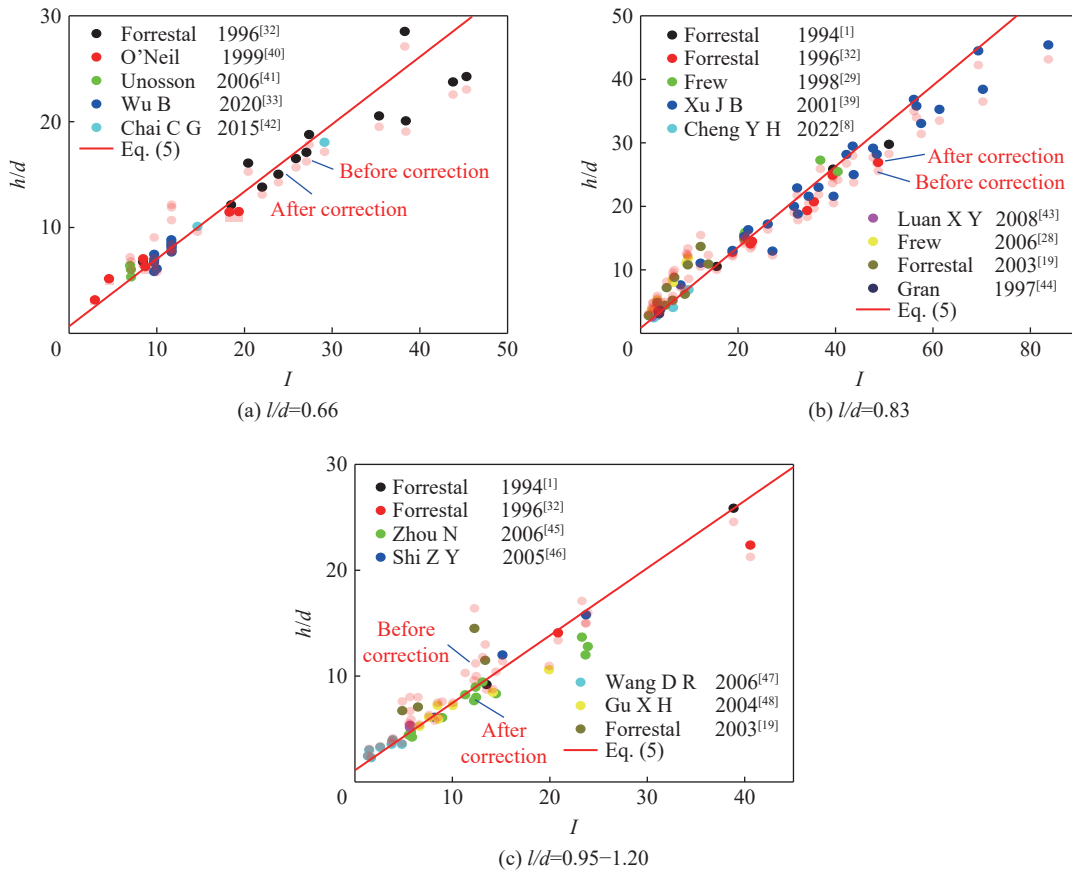


图 5 式(5)预测值和试验值的对比

Fig. 5 Comparison of penetration depth predicted by Eq. (5) with test data

1.4 与已有经验公式的对比分析

选取目前广泛使用的 ACE 公式^[11]和 NDRC 公式^[12]进行对比分析, ACE 公式为:

$$\frac{h}{d} = \frac{3.5 \times 10^{-4}}{\sqrt{f_c}} \left(\frac{m}{d^3} \right) d^{0.215} v_0^{1.5} + 0.5 \quad (7)$$

NDRC 公式为:

$$\frac{h}{d} = \begin{cases} 2G^{0.5} & G \leq 1 \\ G+1 & G > 1 \end{cases} \quad G = 3.8 \times 10^{-5} \frac{N^* m}{d \sqrt{f_c}} \left(\frac{v_0}{d} \right)^{1.8} \quad (8)$$

式中: N^* 为弹头形状系数, 对于平头、半球、钝头和尖头弹体分别取 0.72、0.84、1.00 和 1.14。

主要关注大口径弹体的中低速刚性侵彻, 因此选取了周宁等^[45]、程月华等^[8]、吴飏等^[33]和王德荣等^[47]开展的弹径 100 mm 及以上的 15 组大口径弹体侵彻混凝土靶体的试验数据与本文中提出公式、ACE 公式和 NDRC 公式进行对比分析, 试验工况及各公式预测误差如表 2 所示。可以看出, 本文中提出公式计算得到的预测值与试验值的平均误差为 5.5%, 具有较高的预测精度。而 ACE 公式和 NDRC 公式的预测值与试验值相比有较大的差异, ACE 公式平均误差约为 15.7%, NDRC 公式的平均误差约为 24.9%, 且两者计算得出的侵彻深度均小于试验侵彻深度, 对防护工程设计来说是偏于危险的。

表 2 大口径弹体侵彻混凝土靶体试验数据及各公式预测误差

Table 2 Test data and formulas error for projectile penetrating into concrete targets with large projectile diameters

来源	弹重/kg	弹径/mm	弹头长/mm	强度/MPa	初速度/(m·s ⁻¹)	试验侵深/mm	公式误差/%		
							ACE	NDRC	本文公式
周宁等 ^[45]	25	100	193.6	35	456	1000	-7.21	-19.41	11.09
	25	100	193.6	35	310	590	-8.13	-23.32	-1.95
	25	100	193.6	35	387	750	-1.82	-16.62	11.20
	25	100	193.6	35	455	1100	-15.91	-26.99	0.60
	25	100	193.6	35	468	1190	-19.10	-29.44	-2.21
程月华等 ^[8]	17.3	100	165.0	40	503	860	-17.64	-24.98	3.18
	17.3	100	165.0	100	357	350	-14.59	-18.28	3.79
	20.1	105	162.0	40	325	515	-19.10	-28.29	-9.88
	145.0	203	335.4	100	360	870	-19.71	-25.81	6.56
	874.0	370	571.0	100	325	1400	-11.27	-19.78	2.07
吴飏等 ^[33]	25.62	100	132.3	40	450	1070.0	-18.23	-28.90	-5.40
	25.62	100	132.3	60	450	906.0	-20.13	-29.42	-5.59
	89.99	152	201.1	40	450	1810.3	-19.99	-31.27	5.41
	214.35	203	268.5	40	450	2468.5	-16.88	-29.17	3.23
王德荣等 ^[47]	307	300	540	176	320	740	-25.99	-21.24	9.92

2 刚性弹贯穿混凝土厚靶的计算模型

首先对刚性弹贯穿混凝土厚靶的 3 个阶段进行细致分析, 提出靶背震塌坑破坏形成的条件, 进一步建立后坑高度的计算模型; 在此基础上给出临界贯穿厚度、弹道极限以及残余速度的计算模型, 并通过试验数据的验证; 最后分析 4 种典型钻地弹的侵彻不贯穿系数。

2.1 震塌坑形成条件

基于大量的贯穿试验^[12, 31, 49-52], 对于防护工程主要关注的厚靶而言, 贯穿过程可分为前开坑、隧道区和后震塌坑(简称后坑)3 个典型阶段, 如图 6 所示。

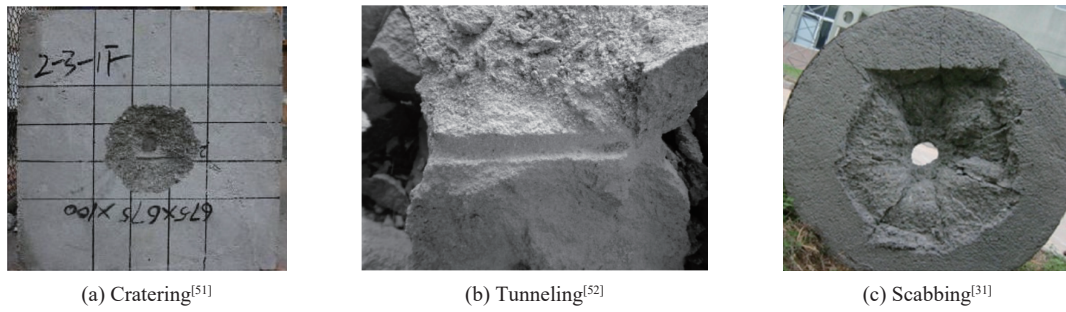


图 6 弹体贯穿混凝土厚靶的 3 个阶段试验照片

Fig. 6 Post-test pictures of three stages for projectile penetrating into thick concrete target

前开坑通常认为是由弹体冲击下靶体材料发生剪切及拉伸(上自由表面反射的拉伸波引起)破坏造成的,隧道区主要由混凝土材料发生内部孔隙压实破坏所致^[53-54]。而对于后坑的形成,目前仍有争议,主要有下述两种观点。Li 等^[12]认为后坑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^[55]、邓国强等^[56]则认为后坑破坏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。Zhang 等^[53]和 Wang 等^[54]基于综合考虑剪切损伤、拉伸损伤和体积压缩损伤的 Kong-Fang 模型^[57]对弹体贯穿混凝土靶体机理进行了精细化数值模拟分析,发现后坑主要由拉伸破坏引起,如图 7(b)所示。

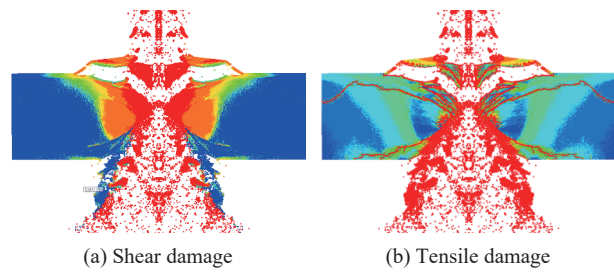


图 7 数值模拟得到的弹体贯穿混凝土靶体的损伤云图^[53]

Fig. 7 Damage contour in concrete subjected to projectile penetration obtained from numerical simulation^[53]

2.2 临界贯穿厚度

根据图 7 的数值模拟结果可判断后坑的形成机制主要为拉伸破坏,基于 Chen 等^[14-15]贯穿公式的推导过程可建立临界贯穿厚度的相关计算模型,如图 8 所示,其中 x_r 和 x_r 分别为开坑和后坑高度, f_t 为混凝土拉伸强度, α 为锥形后坑的半锥角, A_s 为后坑的表面积, h_{bal} 为临界贯穿厚度。

临界贯穿厚度是指弹体侵彻不贯穿时靶体的最小厚度,此时后坑块体形成但速度为零,由力的平衡条件可得:

$$\frac{\pi d^2}{4} A f_c = F_m = A_s f_t \sin \alpha \quad (9)$$

锥形后坑的表面积 A_s 可表示为:

$$A_s = \frac{\pi}{\sin \alpha} [dx_r \tan \alpha + (x_r \tan \alpha)^2] \quad (10)$$

联立式(9)~(10)可得

$$\frac{x_r}{d} = \frac{\sqrt{1 + A f_c / f_t} - 1}{2 \tan \alpha} \quad (11)$$

则临界贯穿厚度的无量纲形式可写为:

$$\frac{h_{bal}}{d} = \frac{h}{d} + \frac{x_r}{d} \quad (12)$$

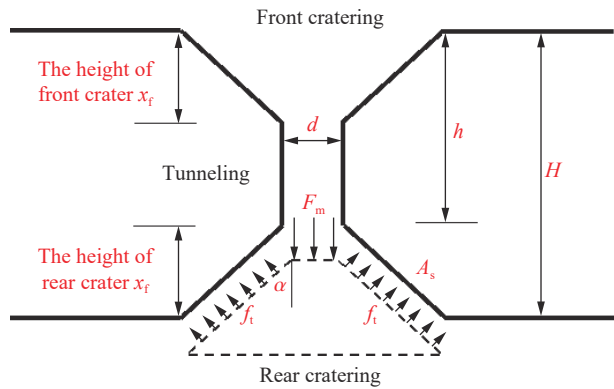


图 8 弹体临界贯穿模型示意图

Fig. 8 Schematic diagram of critical penetration

式中: 侵彻深度 h 由式(6)计算得到。

从式(11)中可以看出, 无量纲后坑高度主要与混凝土压拉强度比、阻力系数 A 和锥形后坑半锥角 α 等 3 个参数相关, 其中最关键的参数为 α 。已有刚性卵弹贯穿混凝土靶体试验中, 仅有少数关注了锥形后坑的半锥角。其中 Dancygier 等^[49] 测量了普通混凝土和高强混凝土后坑半锥角的平均值分别为 66.1° 、 76.3° , Li 等^[31] 试验测得 C35 混凝土靶体的后坑半锥角平均值为 67.6° , Wu 等^[51] 试验测得 C40 混凝土靶体后坑半锥角平均值为 64.6° 。可以看出, 对于普通混凝土, 后坑半锥角的测量值均在约 65° , 而高强混凝土的后坑半锥角的试验数据有限, 后文为便于分析, 后坑半锥角统一取 65° 。

为验证后坑高度式(11)的可靠性, 选取 Hanchak 等^[50]、Li 等^[31] 和 Wu 等^[51] 的实测数据进行对比分析, 对比结果如表 3 所示。可以看出, 公式预测结果与试验结果较为接近, 且大部分无量纲后坑高度均在 $2d \sim 3d$ (d 为弹体直径) 之间, 这与 Peng 等^[16] 基于大量试验数据拟合得到的后坑高度 $2.5d$ 一致。

表 3 后坑高度预测值和试验值的对比
Table 3 Comparison of scabbing depth predicted by Eq. (11) with test data

来源	靶体厚度/mm	靶体抗压强度/MPa	靶体抗拉强度/MPa	阻力系数	后坑角度/ $^\circ$	无量纲后坑高度		
						试验值	公式(11)	误差/%
Hanchak等 ^[50]	178	48	4	10.06	65	2.33d	2.34d	0.43
	178	140	5	5.62		2.33d	2.70d	-15.88
	200					2.57d		8.95
	200					2.37d		1.27
	200					1.98d		-18.18
Wu等 ^[51]	200	41	3.71*	10.96	65	2.17d	2.34d	-7.83
	150					2.57d		8.95
	150					2.77d		15.52
	150					2.57d		8.95
	150					2.37d		1.27
Li等 ^[31]	300					2.03d		-19.21
	400					2.84d		14.79
	500	34.26	3.22*	12.08	65	3.83d	2.42d	36.81
	600					4.77d		49.27
	700					4.25d		43.06

注: *表示在试验中未实际测量靶体的抗拉强度, 是通过规范^[58]估计得到。

2.3 弹道极限和残余速度

弹道极限 v_{bal} 即在给定靶体厚度 H 的情况下, 弹体不贯穿靶体的最大速度, 可通过联立式(6)、(11)~(12)求得为:

$$v_{\text{bal}} = \sqrt{\frac{\pi A f_c d^2 [2(H - x_i) - \lambda_d l]}{4 \lambda_d m}} \quad (13)$$

当弹体初速度大于弹道极限时, 弹体贯穿靶体, 并仍有残余速度 v_{res} , 基于能量守恒得:

$$\frac{1}{2} m v_0^2 = \frac{1}{2} m v_{\text{bal}}^2 + \frac{1}{2} m v_{\text{res}}^2 + E_0 \quad (14)$$

式中: E_0 为锥形后坑块飞散的动能。震塌块飞散速度按照彭永等^[16] 的建议取为 $0.2v_{\text{res}}$, 则:

$$E_0 = \frac{1}{2} m_c (0.2v_{\text{res}})^2 \quad (15)$$

式中: m_c 为锥形后坑块的质量, 可表示为:

$$m_c = \frac{\rho_c \pi x_r}{12} [3d^2 + 6dx_r \tan \alpha + (2x_r \tan \alpha)^2] \quad (16)$$

式中: ρ_c 为混凝土密度。联立式(14)~(15)可求得弹体残余速度为:

$$v_{res} = \sqrt{\frac{v_0^2 - v_{bal}^2}{1 + 0.04m_c/m}} \quad (17)$$

为验证式(13)和(17)的可靠性, 选取 Hanchak 等^[50]、Wu 等^[51] 和薛建锋等^[52] 进行的弹体贯穿混凝土靶体试验进行验证, 注意到 Hanchak 等^[50] 开展的试验既有贯穿又有未贯穿, 可同时验证式(13)和(17)。公式预测与试验对比如图 9 所示, 可以看出式(17)预测的残余速度与试验吻合较好, 且式(13)预测的弹道极限与 Hanchak 等^[50] 试验数据相吻合(图 9 中粉红色标注处)。

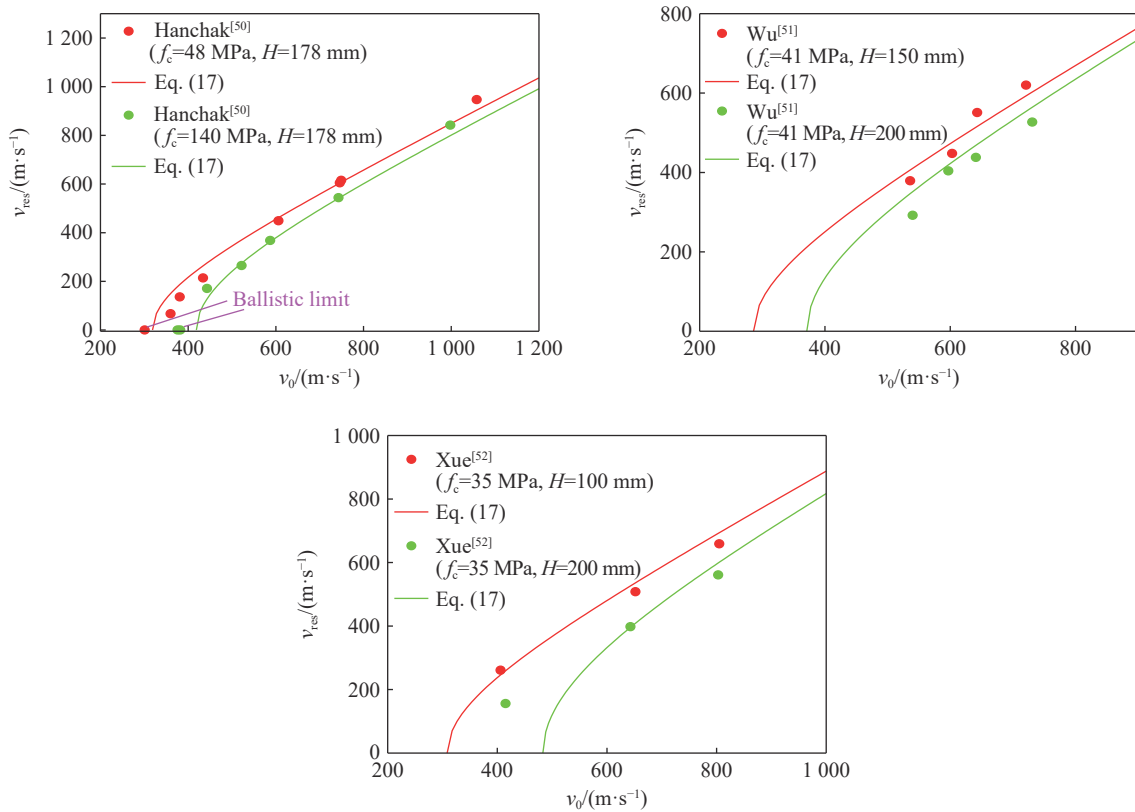


图 9 残余速度和弹道极限的预测结果和试验数据的对比

Fig. 9 Comparison of residual velocity and ballistic limit between predictions and test data

2.4 典型钻地弹的侵彻不贯穿系数

侵彻不贯穿系数可为防护结构的遮弹层设计提供直接参考, 侵彻不贯穿系数 K_g 为在临界贯穿状态下, 临界贯穿厚度与弹体侵彻深度的比值, 即:

$$K_g = h_{bal}/h \quad (18)$$

结合式(12)可得:

$$K_g = 1 + x_r/h \quad (19)$$

因此, 根据本文中提出的侵彻深度计算式(6)和后坑高度计算式(11)即可快速得到侵彻不贯穿系数。通过对式(19)简单分析可知, K_g 的大小主要取决于后坑高度与侵彻深度的比值, 比值越大, 侵彻不贯穿系数也就越大, 反之则越小。根据 2.2 节分析, 后坑高度的大小虽与靶体强度相关, 但不同强度靶体的后坑高度差异不大, 均在 $2d \sim 3d$ 之间。因此, 侵彻不贯穿系数 K_g 的大小主要取决于弹体侵彻能力的

强弱, 即弹体侵彻能力越弱, K_g 越大, 反之则越小。

图 10 给出了 BLU-109/B、BLU-122/B、WDU-43/B 和 SDB 等 4 种典型战斗部以 200~500 m/s 初速度侵彻 C40、C80、CF120(强度为 120 MPa 的纤维增强超高性能混凝土)的侵彻不贯穿系数, 其中 4 种战斗部的公开资料参见文献 [59-60]。由图 10 可以看出几点规律: 随着弹体侵彻速度的增加, 后坑高度与侵彻深度的比值减小, 侵彻不贯穿系数逐渐减小并趋近于 1; 随着靶体强度的增加, 侵彻深度减小, 后坑高度与侵彻深度的比值变大, 侵彻不贯穿系数小幅增加, 但变化不明显; 4 种战斗部当中, BLU-109/B 的侵彻不贯穿系数最大, 其余 3 种战斗部相差不大, 主要由于 BLU-109/B 的侵彻能力较弱。当以 300 m/s 的速度侵彻 C80 混凝土时, 4 种战斗部的无量纲侵彻深度分别为 3.75、6.80、7.52 和 6.86, 侵彻不贯穿系数分别为 1.63、1.35、1.31 和 1.34。

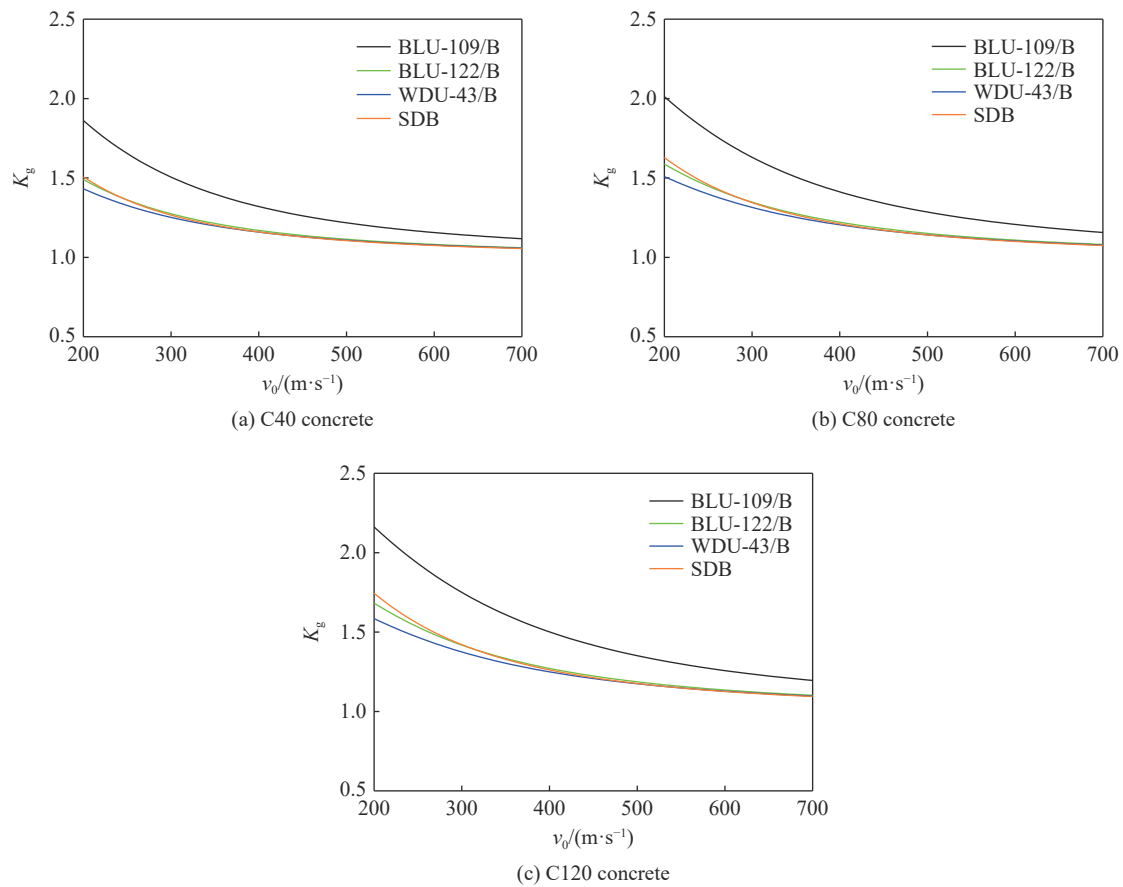


图 10 四种典型战斗部的侵彻不贯穿系数

Fig. 10 Coefficients of concrete targets in preventing perforation for four typical warheads

3 结 论

为解决现有弹体对混凝土靶体侵彻深度计算公式预测精度不高、形式复杂, 以及临界贯穿厚度缺乏理论基础等问题, 基于已有大量的试验数据, 对弹径为 10~100 mm、弹速为 100~700 m/s 情况下刚性卵弹垂直正侵彻/贯穿混凝土靶体的实用化计算模型进行了研究, 主要结论如下。

(1) 通过对刚性弹侵彻混凝土靶体的阻力分析, 提出线性上升-恒定的两阶段阻力模型, 并基于此建立侵彻深度的计算公式, 然后根据大量的试验数据, 引入考虑尺寸效应影响的弹径修正系数, 大幅提高了计算公式的预测精度。

(2) 基于 15 组弹径在 100 mm(包含)以上的侵彻试验, 对本文中提出公式及已有常用公式进行了对

比分析,发现本文中公式预测结果的平均误差约为 5.4%,而 ACE 和 NDRC 公式的平均误差约为 15.7% 和 24.9%,验证了本文中公式预测大口径、大长径比的弹体侵彻深度的可靠性和优越性。

(3)基于后坑由拉伸破坏引起的基本假定,得到了后坑高度的计算公式,并给出了临界贯穿厚度、弹道极限和残余速度的计算模型,通过与现有的试验数据对比分析,验证了上述模型的可靠性。

(4)对 4 种典型钻地弹战斗部的侵彻不贯穿系数讨论分析发现,侵彻不贯穿系数随着侵彻速度的增加会逐渐减小但始终大于 1,随着靶体的强度的增加会有较小幅的增大。

参考文献:

- [1] FORRESTAL M J, ALTMAN B S, CARGILE J D, et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1994, 15(4): 395–405. DOI: 10.1016/0734-743X(94)80024-4.
- [2] KONG X Z, WU H, FANG Q, et al. Rigid and eroding projectile penetration into concrete targets based on an extended dynamic cavity expansion model [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 100: 13–22. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.10.005.
- [3] LI Q M, CHEN X W. Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28(1): 93–116. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00037-4.
- [4] YARIN A L, RUBIN M B, ROISMAN I V. Penetration of a rigid projectile into an elastic-plastic target of finite thickness [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, 16(5/6): 801–831. DOI: 10.1016/0734-743X(95)00019-7.
- [5] LI Q M, REID S R, WEN H M, et al. Local impact effects of hard missiles on concrete targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 32(1/2/3/4): 224–284. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.04.005.
- [6] 王安宝, 邓国强, 张磊, 等. 混凝土侵彻公式的合理性分析 [J]. *防护工程*, 2020, 42(6): 1–7. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1854.2020.06.001.
WANG A B, DENG G Q, ZHANG L, et al. Analysis on the rationality of concrete penetration formula [J]. *Protective Engineering*, 2020, 42(6): 1–7. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1854.2020.06.001.
- [7] 张爽. 弹体侵彻/贯穿钢筋混凝土靶机理与弹道轨迹研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2018. DOI: 10.26948/d.cnki.gbjlu.2018.000162.
ZHANG S. Investigation on the mechanism and trajectory of projectile penetrating / perforating reinforced concrete target [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018. DOI: 10.26948/d.cnki.gbjlu.2018.000162.
- [8] 程月华, 姜鹏飞, 吴昊, 等. 考虑尺寸效应的典型钻地弹侵彻混凝土深度分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(6): 063302. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0373.
CHENG Y H, JIANG P F, WU H, et al. On penetration depth of typical earth-penetrating projectiles into concrete targets considering the scaling effect [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(6): 063302. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0373.
- [9] 龚自明, 方秦, 张亚栋, 等. 混凝土靶体侵彻不贯穿系数的试验研究 [J]. *兵工学报*, 2009, 30 (9): 1181–1186. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2009.09.006.
GONG Z M, FANG Q, ZHANG Y D, et al. Experimental investigation into coefficients of concrete targets to prevent perforation [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30 (9): 1181–1186. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2009.09.006.
- [10] WALTER T A, WOLDE-TINSAE A M. Turbine missile perforation of reinforced concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1984, 110(10): 2439–2455. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:10(2439).
- [11] ACE. Fundamentals of protective structures: report AT120 AT1207821[R]. Office of the Chief of Engineers, Army Corps of Engineers, 1946.
- [12] NDRC. Effects of impact and explosion. summary technical report of division 2, vol. 1[S]. Washington D C: National Defence Research Committee, 1946.
- [13] 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.
- [14] CHEN X W, LI X L. Modeling of normal perforation of reinforced concrete slabs by a rigid projectile [J]. *Transactions of Tianjin University*, 2006, 12 (S1): 107–111.

- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] FORRESTAL M J, TZOU D Y. A spherical cavity-expansion penetration model for concrete targets [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1997, 34(31/32): 4127–4146. DOI: 10.1016/S0020-7683(97)00017-6.
- [18] CHEN X W, LI Q M. Deep penetration of a non-deformable projectile with different geometrical characteristics [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 27(6): 619–637. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00005-2.
- [19] 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.
- [20] ROSENBERG Z, DEKEL E. The penetration of rigid long rods—revisited [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(4): 551–564. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.06.001.
- [21] 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.
- [22] ROSENBERG Z, DEKEL E, KOSITSKI R. A comment on “constant deceleration approach for the penetration analysis of rigid projectiles into concrete targets” [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2020, 11(3): 411–414. DOI: 10.1177/2041419620939117.
- [23] ROSENBERG Z, KOSITSKI R, DEKEL E. Comment on: “rigid and eroding projectile penetration into concrete targets based on an extended cavity expansion model” [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 100(104): A1–A3. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.03.004.
- [24] YANKELEVSKY D Z, FELDGUN V R. Constant deceleration approaches for penetration analysis of rigid projectile into concrete [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2020, 11(4): 515–532. DOI: 10.1177/2041419620914646.
- [25] YANKELEVSKY D Z, FELDGUN V R. Response and closure to: a comment on “Constant deceleration approach for the penetration analysis of rigid projectiles into concrete targets” [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2020, 11(3): 415–420. DOI: 10.1177/2041419620939106.
- [26] 陈小伟, 李继承. 刚性弹侵彻深度和阻力的比较分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(6): 584–589. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)06-0584-06.
- CHEN X W, LI J C. Analysis on the penetration depth and resistive force in the deep penetration of a rigid projectile [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(6): 584–589. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)06-0584-06.
- [27] KONG X Z, WU H, FANG Q, et al. Response to: comment on “rigid and eroding projectile penetration into concrete targets based on an extended cavity expansion model” by Kong et al. *Int. J. Impact Eng.* 2017 by Z. Rosenberg et al [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 100(104): 150–153. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.03.003.
- [28] FREW D J, FORRESTAL M J, CARGILE J D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32(10): 1584–1594. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.01.012.
- [29] FREW D J, HANCHAK S J, GREEN M L, et al. Penetration of concrete targets with ogive-nose steel rods [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1998, 21(6): 489–497. DOI: 10.1016/S0734-743X(98)00008-6.
- [30] 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.
- [31] LI J Z, LV Z J, 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.
- [32] FORRESTAL M J, FREW D J, HANCHAK S J, et al. Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1996, 18(5): 465–476. DOI: 10.1016/0734-743X(95)00048-F.
- [33] 吴飏, 任辉启, 陈力, 等. 弹体侵彻混凝土尺度效应试验研究与理论分析 [J]. *防护工程*, 2020, 42(2): 1–10. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1854.2020.02.001.
- WU B, REN H Q, CHEN L, et al. Experimental study and theoretical analysis of size effect on projectile penetrating concrete [J]. *Protective Engineering*, 2020, 42(2): 1–10. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1854.2020.02.001.
- [34] WU H, LI Y C, FANG Q, et al. Scaling effect of rigid projectile penetration into concrete target: 3D mesoscopic analyses [J].

- Construction and Building Materials*, 2019, 208: 506–524. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.040.
- [35] 彭永, 卢芳云, 方秦, 等. 弹体侵彻混凝土靶体的尺寸效应分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(11): 113301. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0402.
PENG Y, LU F Y, FANG Q, et al. Analyses of the size effect for projectile penetrations into concrete targets [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(11): 113301. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0402.
- [36] CANFIELD J A, CLATOR I G. Development of a scaling law and techniques to investigate penetration in concrete [M]. United States Naval Weapons Laboratory, 1966.
- [37] ANDERSON JR C E, MULLIN S A, KUHLMAN C J. Computer simulation of strain-rate effects in replica scale model penetration experiments [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, 13(1): 35–52. DOI: 10.1016/0734-743X(93)90107-I.
- [38] HUANG X, KONG X, HU J, et al. Scaling the failure of concrete gravity dam subjected to underwater explosion shock loading [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 261: 112176. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112176.
- [39] 徐建波. 长杆射弹对混凝土的侵彻特性研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2001. DOI: 10.7666/d.y480203.
XU J B. Investigations on long projectiles penetrating into concrete targets [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2001. DOI: 10.7666/d.y480203.
- [40] O'NEIL E F, NEELEY B D, CARGILE J D. Tensile properties of very-high-strength concrete for penetration-resistant structures [J]. *Shock and Vibration*, 1999, 6(5/6): 237–245. DOI: 10.1155/1999/415360.
- [41] UNOSSON M, NILSSON L. Projectile penetration and perforation of high performance concrete: experimental results and macroscopic modelling [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32(7): 1068–1085. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2004.11.003.
- [42] 柴传国. 异形头部弹体对混凝土靶的侵彻效应研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014. DOI: CNKI:CDMD:1.1014.086790.
CHAI C G. Study on the mechanism of penetration into concrete of nose headed projectile [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.
- [43] 栾晓岩, 贺虎成, 耿忠, 等. 弹丸侵彻混凝土的试验与仿真 [J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(13): 3571–3573. DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2008.13.016.
LUAN X Y, HE H C, GENG Z, et al. Simulation and experiment of projectile penetrating into concrete [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(13): 3571–3573. DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2008.13.016.
- [44] GRAN J K, FREW D J. In-target radial stress measurements from penetration experiments into concrete by ogive-nose steel projectiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(8): 715–726. DOI: 10.1016/S0734-743X(97)00008-0.
- [45] 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.
- [46] 石志勇, 汤文辉, 赵国民, 等. 混凝土靶中侵彻深度的相似性研究 [J]. *弹道学报*, 2005, 17(1): 62–66. DOI: 10.3969/j.issn.1004-499X.2005.01.012.
SHI Z Y, TANG W H, ZHAO G M, et al. Similarity study of the penetration depth for the concrete targets [J]. *Journal of Ballistics*, 2005, 17(1): 62–66. DOI: 10.3969/j.issn.1004-499X.2005.01.012.
- [47] 王德荣, 葛涛, 周泽平, 等. 钢纤维超高强活性混凝土 (RPC) 抗侵彻计算方法研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(4): 367–372. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)04-0367-06.
WANG D R, GE T, ZHOU Z P, et al. Investigation of calculation method for anti-penetration of reactive power steel fiber concrete (RPC) [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(4): 367–372. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)04-0367-06.
- [48] 顾晓辉, 王晓鸣, 陈惠武, 等. 动能侵彻体垂直侵彻半无限厚混凝土靶的试验研究 [J]. *实验力学*, 2004, 19(1): 103–108. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4888.2004.01.019.
GU X H, WANG X M, CHEN H W, et al. Experimental study on the kinetic energy penetrations against semi-infinite concrete targets at normal incidence [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2004, 19(1): 103–108. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4888.2004.01.019.
- [49] DANCYGIER A N. Rear face damage of normal and high-strength concrete elements caused by hard projectile impact [J].

- Structural Journal*, 1998, 95(3): 291–304. DOI: 10.14359/547.
- [50] HANCHAK S J, FORRESTAL M J, YOUNG E R, et al. Perforation of concrete slabs with 48 MPa (7 ksi) and 140 MPa (20 ksi) unconfined compressive strengths [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1992, 12(1): 1–7. DOI: 10.1016/0734-743X(92)90282-X.
- [51] 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: 232–250. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.10.010.
- [52] 薛建锋, 张鹏, 刘涛, 等. 不同靶板厚度对混凝土靶的抗侵彻性能研究 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2017, 40(5): 59–63. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20170907.005.
- XUE J F, ZHANG P, LIU T, et al. Penetrating performance of concrete target with different thickness [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2017, 40(5): 59–63. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20170907.005.
- [53] ZHANG S B, KONG X, 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.
- [54] WANG Y, KONG X, FANG Q, et al. Modelling damage mechanisms of concrete under high confinement pressure [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 150: 103815. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.103815.
- [55] 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.
- 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.
- [56] 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 [C]/第十三届全国结构工程学术会议, 2004.
- [57] KONG X, FANG Q, CHEN L, et al. A new material model for concrete subjected to intense dynamic loadings [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 120: 60–78. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.05.006.
- [58] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50107-2010, 混凝土强度检验评定标准 [S].
- [59] 甄建伟, 曹凌宇, 孙福. 弹药毁伤效应数值仿真技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018.
- [60] 严平, 谭波, 苗润, 等. 战斗部及其毁伤原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.

(责任编辑 王易难)