

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0439

长杆弹超高速侵彻半无限混凝土靶 实验研究及开坑分析*

王杰^{1,2}, 武海军¹, 周婕群³, 石啸海³, 李金柱¹, 皮爱国¹, 黄风雷¹

1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;
2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999;
3. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 随着超高速动能武器的发展, 长杆弹超高速侵彻混凝土靶机理成为当前的研究热点。为了探究长杆弹超高速侵彻混凝土靶的侵彻机理和开坑规律, 本文中开展了 TU1 铜、Q235 钢两类长杆弹以初速度 1.8~2.4 km/s 正侵彻强度 26.5、42.1 MPa 混凝土靶的超高速实验。结合文献和本文中的实验数据, 对开坑直径和开坑体积进行量纲分析, 基于开坑截面的弓形形貌几何关系, 得到了开坑深度预测公式。结果表明: 靶面开坑尺寸明显大于中低速侵彻时的靶面开坑尺寸, 在分析侵彻机理的过程中不能忽略开坑阶段; 弹体发生严重的长度缩短, 直至最后完全侵蚀, 弹洞半径明显大于弹体半径, 说明长杆弹超高速侵彻半无限混凝土靶属于半流体侵彻机制。另外, 在超高速侵彻条件下: 弹体长度是影响侵彻深度的最主要参数; 侵彻深度随弹体长度和密度的增大而增大, 受弹体强度影响不大。

关键词: 长杆弹; 超高速侵彻; 混凝土; 开坑

中图分类号: O385

国标学科代码: 1303530

文献标志码: A

Experiment research and crater analysis of long rod hypervelocity penetration into concrete

WANG Jie^{1,2}, WU Haijun¹, ZHOU Jiequn³, SHI Xiaohai³, LI Jinzhu¹, PI Aiguo¹, HUANG Fenglei¹

1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China;
3. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

Abstract: With the development of hypervelocity kinetic energy weapons, the mechanism of long rod hypervelocity penetration into concrete target was a research highlight. To study the penetration mechanism and the crater law of long rod hypervelocity penetration into concrete, two kinds of long rods, TU1 and Q235, hypervelocity penetration into concrete with initial velocity of 1.8–2.4 km/s were experimented. Dimensional analyses of crater diameter and crater volume were performed based on the experiment data from this paper and references. Prediction formula of crater depth was derived from the bowl shape contour of crater section. The crater size of hypervelocity penetration was obviously larger than that of low and medium velocity penetration, and so the crater phase was non-negligible during the penetration mechanism researches. The length of the long rod was severely shortened until the long rod was completely eroded, the radius of the hole was obviously larger than that of long rod, and these results can be used to verify that the mechanism of long rod hypervelocity penetration into concrete was semi-fluid penetration. At the same time, it can be seen from the experimental results that the length of the long rod was the

* 收稿日期: 2019-11-19; 修回日期: 2020-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(11572048, 11521062);

国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金(U1730128)

第一作者: 王杰(1993—), 男, 博士, 工程师, wjbit0129@126.com

通信作者: 武海军(1974—), 男, 博士, 教授, wuhj@bit.edu.cn

most important parameter affecting the penetration depth. The penetration depth increased with the increase of the length and density of the projectile, but was not affected by the strength of the long rod.

Keywords: long rod; hypervelocity penetration; concrete; crater

近年来,对于动能弹侵彻混凝土等硬材料的研究重点已由中低速侵彻转向高速/超高速侵彻。对中低速侵彻混凝土靶的开坑尺寸规律已有大量研究,而长杆弹超高速侵彻混凝土靶的实验研究较少,对弹体超高速侵彻混凝土靶开坑特性的研究仍处于初步阶段。Forrestal等^[1-2]、Qian等^[3]进行了一系列动能弹中低速侵彻混凝土的实验,基于实验数据给出了开了坑深度为4倍弹体直径的经验公式。吴祥云等^[4]进行了弹体以初速300和400 m/s分别侵彻C25和C30靶体的实验,基于实验结果,拟合得到了弹体侵彻半无限混凝土靶板的漏斗状弹坑深度和直径的经验公式。温志鹏等^[5]利用吴祥云等^[4]的实验数据进行参数拟合,得到了弹坑深度的经验公式。刘海鹏等^[6-7]进行了一系列的截卵形头部弹体中低速侵彻有限厚混凝土靶的实验,并对实验结果进行量纲分析,得到了弹体侵彻混凝土靶时的靶面无量纲开坑直径和无量纲开坑深度的表达式。刘海鹏等^[8]基于实验数据,还从裂纹扩展和靶体破碎角度出发,计算了漏斗形弹坑尺寸。闪雨^[9]开展了一系列弹体以初速度1.0~1.3 km/s侵彻混凝土靶的实验,并结合Wu等^[10]的实验数据,得到了无量纲开坑深度与弹体初速度的线性拟合关系。薛建锋等^[11]基于应力波在混凝土靶自由表面斜反射形成层裂的原理,获得了破碎区径向尺寸和开坑深度的计算公式,并开展弹体斜侵彻混凝土实验对相关分析进行了验证。周宁等^[12-13]、黄民荣等^[14]分别开展了一系列弹体中低速侵彻35 MPa混凝土和钢筋混凝土的实验,记录了相应的开坑直径和开坑深度的实验数据,并分析了侵彻过程。张爽^[15]针对刚性弹体中低速侵彻钢筋混凝土的开坑过程和整个侵彻/贯穿过程,开展了系统的实验和理论研究。

目前,在超高速侵彻开坑的研究领域,研究对象主要为天体物理中的陨石撞击开坑。Melosh^[16]总结了1980年之前陨石撞击开坑实验研究成果,并对开坑过程进行分阶段量纲分析。Holsapple^[17]基于陨石撞击开坑的实验数据,拟合得到了开坑直径无量纲数与靶体材料强度无量纲数的关系。Dufresne等^[18]、Poelchau等^[19]总结了MEMIN(multidisciplinary experimental and modeling impact research network)研究中心的超高速撞击石灰岩靶实验研究成果,研究了开坑深度、直径和体积随撞击初速、弹靶密度、靶体孔隙率等参数的变化规律。Antoun等^[20]、Wünnemann等^[21]、Kenkmann等^[22]、邓国强等^[23]针对开坑机理进行了数值模拟研究,给出了开坑直径无量纲数与靶体材料强度无量纲数的关系。

另外,也有长杆弹超高速侵彻半无限混凝土靶方面的研究工作。Dawson等^[24]开展了钨合金、铝长杆弹以速度1.5~2.2 km/s贯穿中厚度混凝土靶的实验,记录了靶面开坑形貌(见图1),并采用CTH对实验进行了数值模拟。Gold等^[25-26]开展了铜、钨长杆弹以速度1.475~1.875 km/s侵彻混凝土厚靶的实验,并分别采用固体材料和多孔材料状态方程计算超高速侵彻条件下混凝土材料的力学响应,结果表明采用多孔材料状态方程的计算结果与实验结果更吻合。钱秉文等^[27]开展了钨合金短圆柱弹体以速度1.8~4.0 km/s撞击混凝土靶的实验(见图2),并基于实验结果对超高速撞击条件下开坑特性进行了量纲分析,得到了开坑体积和开坑直径的计算公式。Kong等^[28]开展了45钢圆柱弹体以速度0.510~1.855 km/s撞击砂浆靶的实验,结果显示的规律性与钱秉文等^[27]的一致,并采用侵蚀弹体模型对侵彻深度、剩余弹体长度等进行了计算。

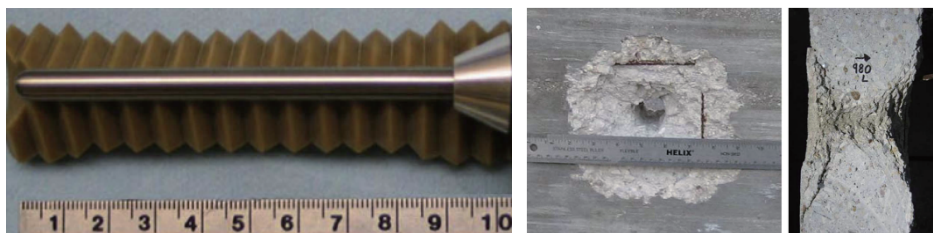


图1 钨合金长杆弹和混凝土靶的破坏^[24]

Fig. 1 Tungsten long rod and failure of concrete target^[24]

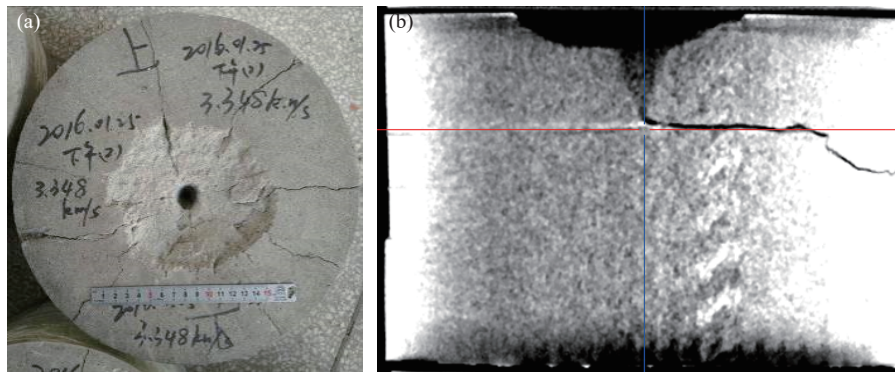


图 2 超高速侵彻混凝土靶的开坑形貌和开坑截面 CT 扫描^[27]

Fig. 2 Crater and CT scanning of crater section of long rod hypervelocity penetration into concrete^[27]

综上所述, 目前对长杆弹超高速侵彻混凝土靶的开坑研究仍处于初步阶段, 相关实验数据还不充分。本文中, 参照文献 [25] 中的实验研究, 开展 TU1 无氧铜和 Q235 钢长杆弹超高速侵彻半无限混凝土靶的实验, 结合以往文献和本文实验的数据对长杆弹超高速侵彻半无限混凝土靶的开坑直径和开坑体积进行量纲分析, 基于弓形开坑截面几何关系获得开坑深度的预测公式。

1 侵彻实验

利用二级轻气炮发射平台, 精确控制长杆弹超高速正侵彻混凝土靶, 进行不同初始速度、不同弹靶材料的对比实验。在侵彻过程结束后, 测量开坑直径和深度、侵彻深度, 为开坑尺寸量纲分析提供实验数据。向弹洞灌装明胶, 待明胶冷却凝固后, 剖开靶体测量弹洞半径, 得到最终侵彻深度和弹洞半径等实验数据。

1.1 弹体、靶体参数

文献 [25] 中, 长杆弹以初速 1.626~1.875 km/s 超高速侵彻 C35 混凝土靶, 铜长杆弹长径比为 14.6、10.8。为了对比和补充, 本文实验中采用长杆弹长径比也为 14.6、10.8, 弹体初速为 1.8~2.4 km/s, 弹体材料分别为 TU1 无氧铜和 Q235 钢, 弹体的结构和材料参数见表 1。长杆弹实物如图 3 所示。

表 1 弹体的结构和材料参数

Table 1 Geometric and material parameters of long rods

长度/mm	直径/mm	长径比	材料	强度/MPa	密度/(g·cm ⁻³)	质量/g
146	10	14.6	TU1 无氧铜	120	8.89	102.43
108	10	10.8	TU1 无氧铜	120	8.89	69.80
146	10	14.6	Q235 钢	235	7.83	89.85
108	10	10.8	Q235 钢	235	7.83	61.60

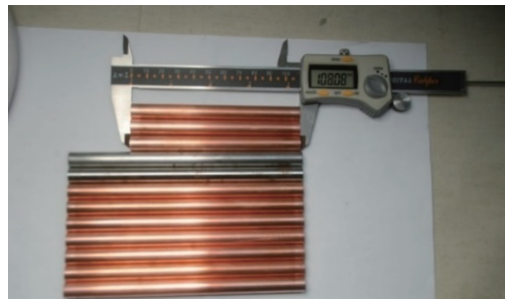


图 3 长杆弹实物

Fig. 3 Photo of long rods

靶体为骨料尺寸不超过 5 mm 细骨料素混凝土圆柱体, 尺寸为 $\varnothing 800 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$, 外层用厚 2 mm 钢管包裹以提供围压。实测混凝土单轴抗压强度分别为 26.5、42.1 MPa, 靶体实物如图 4 所示。



图 4 混凝土靶体实物

Fig. 4 Photos of concrete targets

1.2 发射和测试

实验加载装置为 $\varnothing 30 \text{ mm}$ 二级轻气炮, 在出炮口处经磁测速系统和激光遮断测速系统 (all fiber optical beam breakout, OBB) 测量弹体初速。长杆弹由弹托加底推构成, 外部由聚碳酸酯 (PC) 包裹, 长杆弹与底部聚乙烯 (PE) 底座之间加装 HR2 钢片底推板, 防止加载过程中应力过大导致的聚乙烯 (PE) 底座破碎。发射结构、尺寸如图 5 所示, 实物如图 6 所示。

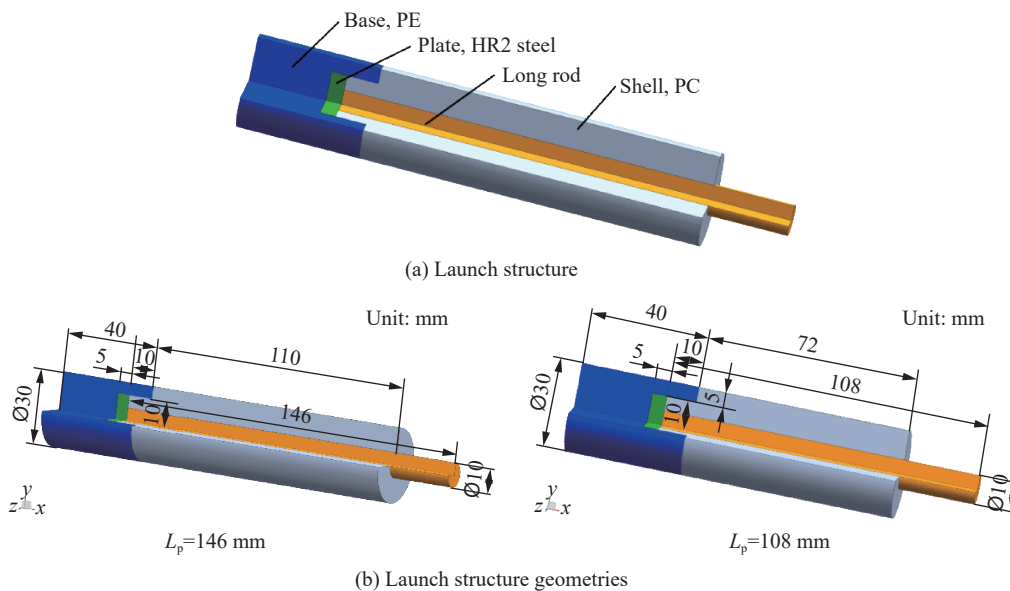


图 5 发射结构及其尺寸

Fig. 5 Launch structures and their geometries

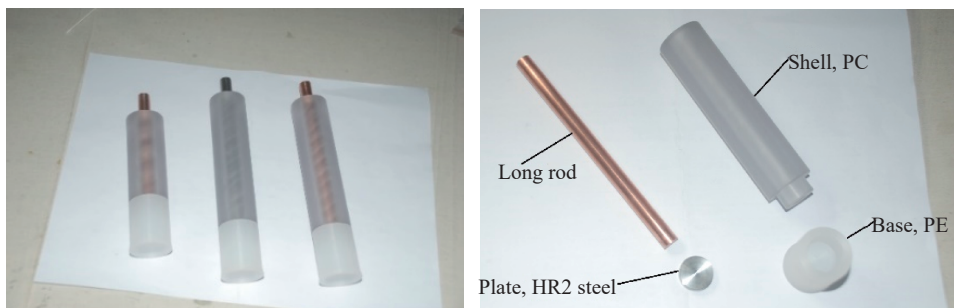


图 6 发射结构实物

Fig. 6 Photos of launch structures

为了准确说明弹体飞行时的上下俯仰和左右偏转状态为稳定飞行, 同时在竖直和水平方向采用激光遮断测速系统 OBB 测量弹体初速, 二者数值相同则说明弹体出炮口为正侵彻方向。OBB 测速装置中的前后两组探头间距 100 mm, 每组的两对探头均水平和竖直放置, 每对探头包括一个发射探头和一个接收探头。在实验过程中, 长杆弹头部经过探头中间位置时会对光路产生遮断, 使接收探头无法接收激光束, 此时接收探头连接的示波器记录遮断信号。然后, 读取示波器上记录的竖直和水平两个方向前后两组遮断信号时间差, 换算为发射速度, 即弹体初速。激光遮断测速系统 OBB 如图 7~8 所示。采用闪光照相系统拍摄弹体出炮口飞行姿态, 受拍摄窗口尺寸限制, 只能拍摄从弹体头部开始约 7 cm 长度的弹体飞行过程。X 射线结果如图 9 所示。

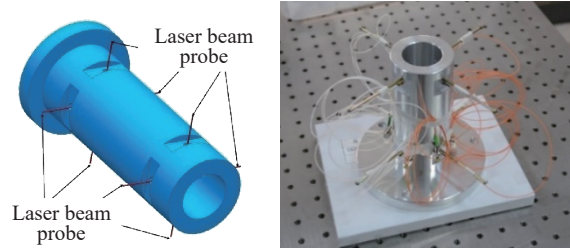


图 7 OBB 测速装置

Fig. 7 OBB velocity measure device

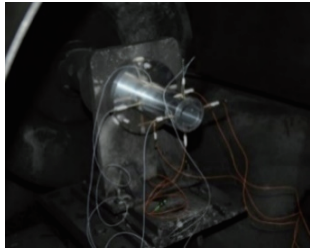


图 8 测速装置实物

Fig. 8 Photo of velocity measure device

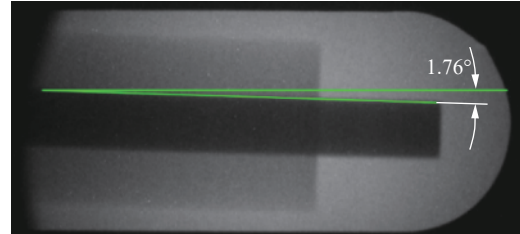


图 9 X 射线照片

Fig. 9 X-ray flash photo

靶室内部已有对正炮口的放置平台, 实验中将靶体置于特制靶架, 并通过靶架下部螺栓限位孔可微调靶体位置使靶面垂直于出炮口, 靶架实物和靶体放置情况分别如图 10~11 所示。实验后, 回收弹洞中剩余弹体发现, 6 发实验中的长杆弹均全部侵彻, 弹洞底部仅存在部分弹体碎屑, 如图 12 所示。其中, 弹体碎屑一侧表面光滑, 另一侧表面粘连了混凝土材料, 表明弹体头部出现了蘑菇头变形。随后, 取出靶体, 采用卷尺测量靶面开坑直径、开坑深度, 并计算开坑体



图 10 靶架实物

Fig. 10 Photo of target holder



图 11 靶体放置

Fig. 11 Photo of target placement

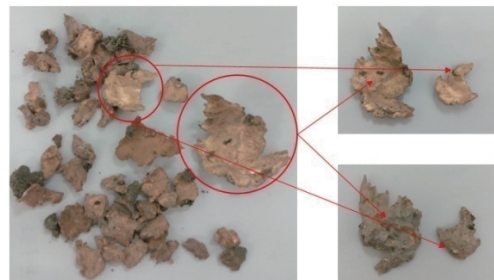


图 12 实验回收的弹体碎渣

Fig. 12 Recovered debris of long rod after experiment

积,如图13所示。向弹洞内灌装明胶,明胶冷却48 h成型后,剖靶观测开坑底部截面和弹洞段的弹洞直径和侵彻深度,如图14所示。



图13 靶面开坑
Fig. 13 Crater of target surface

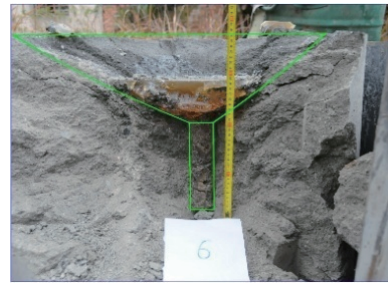


图14 剖靶后的开坑和弹洞截面
Fig. 14 Crater and hole after cutting target

1.3 实验结果

共进行了6发实验,弹体初速范围为1.8~2.4 km/s。实验条件和结果见表2~3。由图14和图2(b)可以看出,长杆弹超高速侵彻混凝土靶的靶体破坏主要包括弓形截面开坑和柱形弹洞两个部分。弓形截面开坑部分的开坑直径较大,为弹体直径的约60倍;开坑深度也相对较深,为弹体直径的12~17倍,达到侵彻深度的1/3~1/2,而动能弹中低速侵彻混凝土靶时开坑深度仅为两倍弹体直径。

由实验结果可以看出,弹体完全侵彻,弹体头部出现较大变形,符合半流体侵彻特征。另外,实验4弹洞直径在弹洞末段出现了减小,且在弹洞底部还有几乎没有变形的HR2钢底推片,表明实验4出现了HR2钢底推片的随进侵彻。与其他实验结果比较,实验4的弹洞直径实验结果在弹洞直径几乎没有变化的部分具有良好的规律性。还有,由于本文实验中未对发射组件进行脱弹托处理,使开坑尺寸明显大于脱壳弹体状况的,对它的数据处理方法见第2节。

表2 长杆弹超高速侵彻半无限混凝土靶的实验条件

实验	弹体材料	L_p/D_p	发射结构质量/g	靶体强度/MPa	速度/($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	TU1	14.6	222.65	26.5	2.337 5
2	TU1	14.6	222.62	42.1	2.157 5
3	Q235	14.6	210.29	42.1	2.157 5
4	TU1	10.8	166.10	26.5	2.041 0
5	Q235	10.8	157.11	26.5	2.014 0
6	TU1	14.6	222.65	26.5	1.841 0

表3 长杆弹超高速侵彻半无限混凝土靶的实验结果

实验	开坑直径/mm	开坑体积/L	开坑深度/mm	侵彻深度/mm	弹洞直径/mm
1	714	30.46	171	450	63.11
2	572	15.53	120	370	49.50
3	608	23.18	162	350	42.51
4	615	16.81	116	310	52.46
5	610	20.71	144	288	46.19
6	595	20.02	142	361	46.94

1.4 与其他文献实验对比

本文主要目的是得到长杆弹超高速侵彻半无限混凝土靶的开坑规律。与比较成熟的球形弹丸超高速撞击混凝土靶相比, 相同撞击速度条件下, 本文实验中弹体截面动能 (弹体初始动能与弹体横截面积之比) $2m_p v_0^2 / (\pi D_p^2)$ 更大, 靶面开坑尺寸规律与球形弹丸超高速撞击混凝土靶时不同。本文实验中长杆弹长径比与文献 [26] 的一致, 而文献 [26] 中并未给出相应的靶面开坑尺寸, 仅能从给出的靶面破坏图测量其中一发实验的开坑直径。仅文献 [24, 27-28] 中给出了柱形弹体超高速侵彻/贯穿混凝土靶时靶面开坑的相关实验结果。其中, 文献 [24] 中实验为超高速贯穿混凝土厚靶实验, 文献 [27] 中实验弹体长径比为 3.04, 文献 [28] 中实验靶体材料为砂浆靶, 均与长杆弹超高速侵彻半无限混凝土靶有所不同。但是, 这 3 篇文献中的实验结果均可观察到混凝土的靶面开坑和开坑段结束后的弹洞段, 与长杆弹超高速侵彻半无限混凝土靶时的靶体破坏形式一致。因此, 本文实验可补充长杆弹超高速侵彻混凝土靶的开坑数据, 结合本文实验和文献 [24, 27-28] 中的靶面开坑数据, 可对长杆弹超高速侵彻半无限混凝土靶的靶面开坑尺寸规律进行探讨。另外, 由于本文实验中采用的长杆弹长径比与文献 [26] 中的一致, 因此可与文献 [26] 中实验比较, 并对整个侵彻过程的侵彻机制进行说明。对比本文和文献 [26] 中实验结果可知, 长杆弹超高速侵彻混凝土靶时, 弹体长度发生严重的长度缩短, 甚至最后完全侵蚀, 弹洞半径明显大于弹体半径。这说明, 此时出现了明显的蘑菇头变形, 属于半流体侵彻机制。弹体长度是影响侵彻的最主要因素, 侵彻深度随弹体长度的增大而增大。侵彻深度随弹体材料密度的增大而增大, 而弹体材料强度对侵彻深度的影响不大。

2 开坑效应

2.1 开坑尺寸量纲分析

由于混凝土材料为脆性材料, 在长杆弹超高速撞击混凝土时, 靶面产生了明显的开坑现象。而长杆弹超高速侵彻混凝土靶开坑过程包含了复杂的物理机制, 在理论上难以建立相应的分析模型。量纲分析作为探讨科学规律、解决科学和工程问题的一个有效工具, 可用来对长杆弹超高速侵彻混凝土靶的开坑形貌开展分析, 探讨开坑尺寸和弹靶相关参数之间的关系。现有文献中长杆弹超高速侵彻混凝土靶的开坑深度数据很少, 本文实验数据点也相对较少, 因此, 无法直接对开坑深度进行量纲分析。本文中, 对开坑尺寸的量纲分析主要针对开坑直径和开坑体积两方面进行。

长杆弹超高速侵彻混凝土靶的开坑过程涉及很多弹靶参数, 包括: 弹体的长度 L_p 、直径 D_p 、质量 m_p 、密度 ρ_p 、强度 σ_p 、弹性模量 E_p 、剪切模量 G_p , 靶体的密度 ρ_t 、直径 D_t 、厚度 H_t 、抗压强度 f_c 、弹性模量 E_t 、剪切模量 G_t 、抗拉强度 σ_{ct} 、抗剪强度 σ_{st} , 弹体的碰撞初速 v_0 、倾角 α 、攻角 β 等。

本文实验中, 靶体直径和厚度足够大且外围采用钢板包裹提供围压, 因此可将靶体等效为半无限靶体, 可以略去 D_t 和 H_t 两个物理量; 剪切模量和强度相关, 且不同强度的钢弹性模量相差不大, 因此可略去 E_p 、 G_p 、 E_t 、 G_t 、 σ_{ct} 、 σ_{st} 等物理量; 本文实验中, 所有靶体的破坏效果均接近图 1 中的情况, 由实验后侵彻弹道均呈直线的结果, 可知本文实验为正侵彻, 因此可略去 α 和 β 两个物理量; 弹体质量是和弹体密度、长度、直径相关联的量, 因此可略去物理量 ρ_p 。本文实验中, 为保证长杆弹的飞行稳定, 没有对它作脱弹托处理。碰撞开始时, 只有长杆弹与靶面发生碰撞, 而聚碳酸酯包裹层并没有与靶面接触, 因此, 在对开坑过程进行量纲分析时, 将弹体质量取为发射结构总质量, 弹体直径仍取长杆弹直径。综上, 靶体开坑直径 D_c 和开坑体积 V_c 与各参数的关系可以写成:

$$D_c = f(L_p, D_p, m_p, \sigma_p, \rho_t, f_c, v_0) \quad (1)$$

$$V_c = g(L_p, D_p, m_p, \sigma_p, \rho_t, f_c, v_0) \quad (2)$$

从上述两式可以看出, 所有出现的物理量的量纲只涉及到 L、M 和 T 等 3 类量纲。因此, 根据 Π 定理, 取 D_p 、 f_c 、 ρ_t 为量纲基本量。超高速侵彻条件下, 材料更接近流体、弹靶强度影响明显变小, 惯性效应 (密度、速度) 是主要影响因素, 因此, 可以忽略混凝土的不均匀性、黏性和应变率效应和弹靶强度之比

的影响。将其他物理量无量纲化,整理可得到:

$$\frac{D_c}{D_p} = f\left(\frac{L_p}{D_p}, \frac{m_p}{\rho_t D_p^3}, v_0 \sqrt{\frac{\rho_t}{f_c}}\right) \quad (3)$$

$$\frac{V_c}{D_p^3} = g\left(\frac{L_p}{D_p}, \frac{m_p}{\rho_t D_p^3}, v_0 \sqrt{\frac{\rho_t}{f_c}}\right) \quad (4)$$

为了得到较简便的开坑预测公式,对量纲分析进行进一步简化。陨石撞击天体的大量实验研究^[16-19,22]表明,球形弹丸超高速撞击岩石的成坑形貌主要受弹丸动能影响,而弹丸强度对成坑形貌的影响很小。Holsapple^[17]研究了球形弹丸超高速碰撞行星表面岩石问题,通过对弹体动能或动量开三次方,即考虑弹体所具有的体积能量或动量,提出了一个组合自变量 $C = D_p \nu^\mu \rho_p^\nu$,其中 $\nu=1/3$,当 $\mu=2/3$ 时表示撞击过程由弹体动能决定,当 $\mu=1/3$ 时表示撞击过程由弹体动量决定。与钱秉文^[27]在研究短圆柱体超高速侵彻混凝土靶的结果时一样,本文中也参考 Holsapple^[17]的方法,即对长杆弹的体积动能或动量开三次方,得到相应的包含长径比的组合自变量 $C = k_p^{1/3} D_p \nu^\mu \rho_p^\nu$,其中 $k_p=L_p/D_p$ 为弹体长径比,取 $k_p^{1/3} D_p \nu^\mu \rho_p^\nu$ 、 f_c 、 ρ_t 为量纲基本量,与文献^[17]一样,无量纲化弹靶参量,处理过程中忽略重力影响,并要求 v_0 的幂次为 μ 、 ρ_p 的幂次为 ν ,即可导出无量纲的开坑直径和开坑体积分别为:

$$\frac{D_c}{D_p} = C_1 \left(\frac{\rho_p}{\rho_t}\right)^\nu \left(\frac{m_p v_0^2}{D_p^3 f_c}\right)^{\mu/2} \quad (5)$$

$$\frac{\rho_t V_c}{m_p} = C_2 \left(\frac{m_p v_0^2}{k_p D_p^3 f_c}\right)^{3\mu/2} \left(\frac{\rho_p}{\rho_t}\right)^{3\nu-1} \quad (6)$$

定义 $\pi_E = \frac{m_p v_0^2}{D_p^3 f_c}$ 为无量纲动能, $\pi_D = \frac{D_c}{D_p}$ 为无量纲开坑直径, $\pi_V = \frac{\rho_t V_c}{m_p}$ 为无量纲开坑体积。令 $\nu=1/3$,则式(5)~(6)可表示为:

$$\pi_D \left(\frac{\rho_p}{\rho_t}\right)^{-1/3} = C_1 \pi_E^{\mu/2} \quad (7)$$

$$\pi_V = C_2 \left(\frac{\pi_E}{k_p}\right)^{3\mu/2} \quad (8)$$

结合本文和文献^[24-25,27-28]中的实验数据,对式(7)~(8)进行拟合(见图15~16),可得:

$$\frac{D_c}{D_p} = 1.12 \left(\frac{\rho_p}{\rho_t}\right)^{1/3} \left(\frac{m_p v_0^2}{D_p^3 f_c}\right)^{0.39} \quad (9)$$

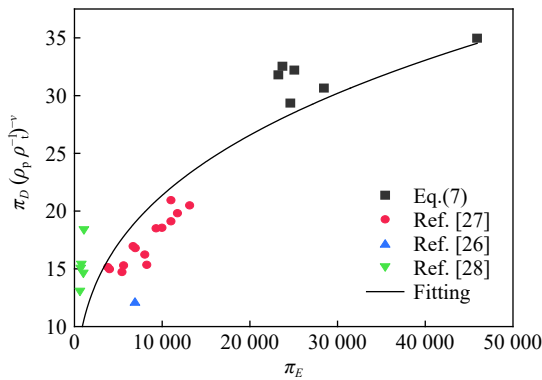


图 15 开坑直径与动能的实验数据和拟合
Fig. 15 Fitting of crater diameter and kinetic energy experimental data

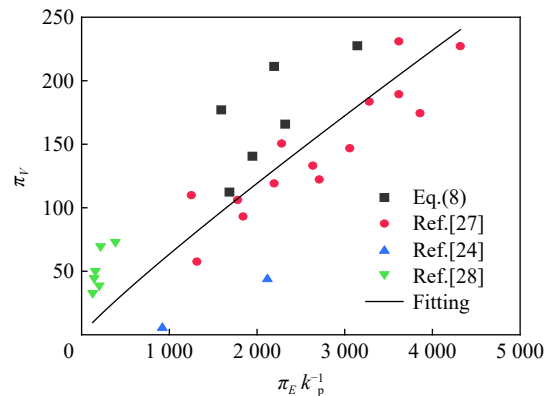


图 16 开坑体积与动能的实验数据和拟合
Fig. 16 Fitting of crater volume and kinetic energy experimental data

$$\frac{\rho_t V_c}{m_p} = 0.19 \left(\frac{m_p v_0^2}{k_p D_p^3 f_c} \right)^{0.91} \quad (10)$$

对比式 (5)~(6) 和拟合结果式 (9)~(10) 可知, 待定系数 μ 分别为 0.78 和 0.61, 二者的平均值为 0.69, 即 $\mu \approx 2/3$ 。由此可知, 长杆弹超高速侵彻混凝土靶的开坑过程主要受弹体动能影响, 并可在以后的分析中令 $\mu=2/3$, 以使分析过程更简便。

2.2 开坑深度预测公式

上述量纲分析结果表明, 可取 $\mu=2/3$ 、 $\nu=1/3$ 对开坑尺寸进行分析。因此, 将 $\mu=2/3$ 、 $\nu=1/3$ 代入式 (5)~(8), 可得开坑直径和开坑体积的预测公式为:

$$\frac{D_c}{D_p} = C_3 \left(\pi_E \frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{1/3} \quad (11)$$

$$\frac{\rho_t V_c}{m_p} = C_4 \frac{\pi_E}{k_p} \quad (12)$$

依据式 (11)~(12) 对实验数据进行处理, 拟合结果如图 17~18 所示, 开坑直径和开坑体积的具体预测公式为:

$$D_c = 0.96 D_p \left(\pi_E \frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{1/3} \quad (13)$$

$$V_c = 0.057 \frac{m_p \pi_E}{\rho_t k_p} \quad (14)$$

由拟合结果可知, 无量纲开坑直径与发射组件无量纲动能的立方根成正比, 无量纲开坑体积与发射组件无量纲动能成正比。

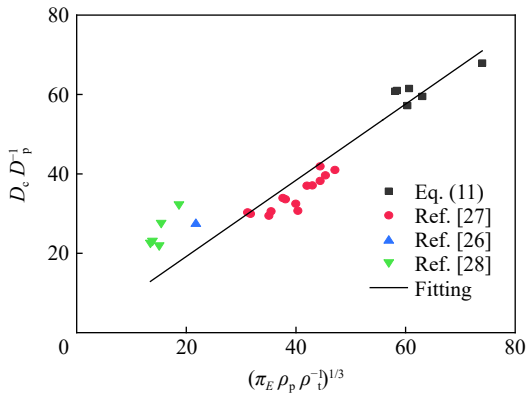


图 17 开坑直径的拟合
Fig. 17 Fitting of crater diameter

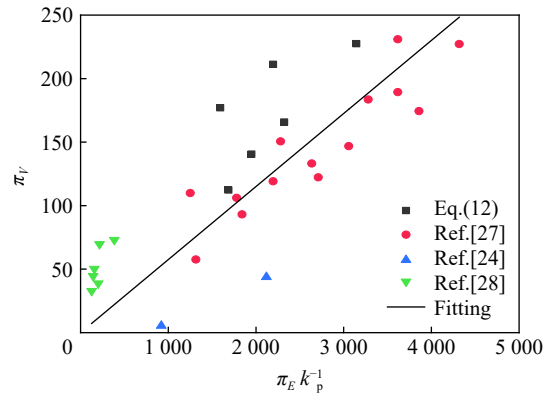


图 18 开坑体积的拟合
Fig. 18 Fitting of crater volume

混凝土材料的非均匀性较强, 且实验中弹体直径较小, 实验结果中对开坑尺寸进行无量纲化处理会带来较大实验误差, 因此实验结果数据比较分散, 但是整体结果还是具有一定的规律性, 开坑直径和开坑体积的预测公式具有一定的预测价值。

从剖靶截面形貌 (见 图 14) 和文献 [27] 中通过 CT 扫描得到的开坑截面形貌 (见 图 2(b)) 可以看出, 超高速侵彻混凝土靶的开坑截面形貌可以近似为弓形。根据弓形开坑截面的形貌几何关系, 利用上述开坑直径和开坑体积的预测公式可计算开坑深度。开坑截面形貌如图 19 所示。

以坑底中心为原点构建直角坐标系, R_b 是弓形弧线半径, H_c 是开坑深度, 则开坑截面的右半部轮廓曲线为:

$$x = \sqrt{2R_b y - y^2} \quad (15)$$

对式 (15) 积分, 可得到开坑体积:

$$V_c = \pi \int_0^{H_c} x^2 dy = \pi R_b H_c^2 - \frac{\pi}{3} H_c^3 \quad (16)$$

由几何关系可知:

$$H_c = R_b - \sqrt{R_b^2 - \frac{D_c^2}{4}} \quad (17)$$

将式 (17) 代入式 (16), 可得:

$$V_c = \frac{\pi}{8} D_c^2 H_c + \frac{\pi}{6} H_c^3 \quad (18)$$

解方程可得开坑深度预测公式:

$$H_c = \left(\frac{3V_c}{\pi} + \sqrt{\left(\frac{3V_c}{\pi} \right)^2 + \frac{D_c^6}{64}} \right)^{1/3} + \left(\frac{3V_c}{\pi} - \sqrt{\left(\frac{3V_c}{\pi} \right)^2 + \frac{D_c^6}{64}} \right)^{1/3} \quad (19)$$

利用式 (19) 对本文实验开坑深度进行预测, 计算结果和实验结果对比见表 4, 其中另 6 个实验数据取自文献 [28] 中倾角小于 3° 的侵蚀弹体对应实验。本文实验和文献 [28] 中的计算结果小于实验结果, 这是因为在对开坑实验数据进行拟合时, 本文实验和文献 [28] 中开坑体积明显大于拟合结果, 而开坑直径与拟合结果相差不大, 导致了采用开坑深度预测公式得到的结果小于实验结果, 但它仍然具有一定的预测价值。

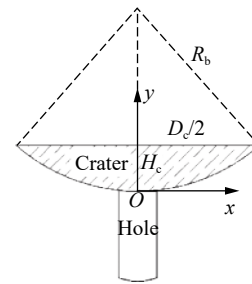


图 19 弓形开坑截面

Fig. 19 Section of bow-shaped crater

表 4 开坑深度预测结果

Table 4 Prediction of crater depths

本文 实验	开坑深度/mm		相对误差/%	文献[28] 实验	开坑深度/mm		相对误差/%
	实验	预测			实验	预测	
1	171	119.40	-30.18	01	31.5	20.33	-38.76
2	120	96.99	-19.17	25	22.7	17.15	-24.43
3	162	93.38	-42.36	04	21.5	16.79	-21.92
4	116	97.87	-15.63	24	24.7	15.60	-36.85
5	144	94.31	-34.51	29	21.0	15.21	-27.58
6	142	101.79	-28.32	02	21.5	14.64	-31.92

3 结 论

对比文献 [25] 中相关实验, 开展了初速 1.8~2.4 km/s 的 TU1 铜、Q235 钢长杆弹超高速正侵彻 26.5、42.1 MPa 混凝土靶的实验, 基于本文实验和以往文献中相关实验结果对侵彻机制进行了说明, 对混凝土靶面的开坑直径和开坑深度进行了量纲分析, 将开坑截面近似为弓形, 给出长杆弹超高速侵彻混凝土靶时开坑深度预测公式。主要结论如下。

(1) 长杆弹超高速侵彻混凝土靶过程中, 弹体长度发生严重的长度缩短, 直至最后完全侵蚀, 弹洞半径明显大于弹体半径, 说明侵彻过程中弹体出现了明显的蘑菇头变形, 属于半流体侵彻机制。弹体长度是影响侵彻深度的最主要参数, 侵彻深度随弹体长度和密度的增大而增大, 受弹体强度影响不大。

(2) 相比于中低速侵彻条件下靶面锥形漏斗状开坑, 长杆弹超高速侵彻条件下混凝土靶的开坑截面近似为弓形。无量纲开坑体积与发射组件无量纲动能成正比。靶面开坑直径较大, 为长杆弹直径的约 60 倍, 无量纲开坑直径与发射组件无量纲动能的立方根成正比。

(3) 长杆弹超高速侵彻混凝土靶的靶面的开坑深度为弹体直径的 12~17 倍, 达到总侵彻深度的 1/3~1/2, 明显大于动能弹中低速侵彻混凝土靶条件下仅有两倍弹体直径的开坑深度。本文开坑深度预

测公式中考虑了以往文献中不同弹靶条件的实验结果,虽然得到的结果小于实验结果,但它仍然具有一定的预测价值。

对中国工程物理研究院流体物理研究所在实验测试中的大力支持和帮助和郝龙助理研究员对实验研究的帮助和指导,表示感谢。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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学术会议论文摘要集. 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.
- [7] 刘海鹏, 高世桥, 金磊. 弹丸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.
- [8] 刘海鹏, 高世桥, 金磊, 等. 弹丸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.
- [9] 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.
- [10] WU H J, WANG Y N, HUANG F L. Penetration concrete targets experiments with non-ideal & high velocity between 800 and 1 100 m/s [J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2008, 22(9-11): 1087-1093.
- [11] 薛建锋, 沈培辉, 王晓鸣. 弹体斜侵彻混凝土靶面的开坑阶段分析 [J]. *南京理工大学学报*, 2016, 40(1): 72-76, 83. DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2016.40.01.012.
XUE J F, SHEN P H, WANG X M. Analysis on crater-forming of projectile obliquely penetrating into concrete target [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2016, 40(1): 72-76, 83. DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2016.40.01.012.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.

- [15] 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.
- [16] MELOSH H J. Cratering mechanics-observational, experimental, and theoretical [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1980, 8: 65–93. DOI: 10.1146/annurev.ea.08.050180.000433.
- [17] HOLSAPPLE K A. The scaling of impact processes in planetary sciences [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1993, 21: 333–373. DOI: 10.1146/annurev.ea.21.050193.002001.
- [18] DUFRESNE A, POELCHAU M H, KENKMANN T, et al. Crater morphology in sandstone targets: the MEMIN impact parameter study [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2013, 48(1): 50–70. DOI: 10.1111/maps.12024.
- [19] POELCHAU M H, KENKMANN T, THOMA K, et al. The MEMIN research unit: scaling impact cratering experiments in porous sandstones [J]. *Meteoritics and Planetary Science*, 2013, 48(1): 8–22. DOI: 10.1111/maps.12016.
- [20] ANTOUN T H, GLENN L A, WALTON O R, et al. Simulation of hypervelocity penetration in limestone [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 33(1–12): 45–52. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.09.009.
- [21] WÜNNEMANN K, COLLINS G S, MELOSH H J. A strain-based porosity model for use in hydrocode simulations of impacts and implications for transient crater growth in porous targets [J]. *Icarus*, 2006, 180(2): 514–527. DOI: 10.1016/j.icarus.2005.10.013.
- [22] KENKMANN T, WÜNNEMANN K, DEUTSCH A, et al. Impact cratering in sandstone: the MEMIN pilot study on the effect of pore water [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2011, 46(6): 890–902. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2011.01200.x.
- [23] 邓国强, 杨秀敏. 超高速武器对地打击效应数值仿真 [J]. *科技导报*, 2015, 33(16): 65–71. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.16.010.
- DENG G Q, YANG X M. Numerical simulation of damage effect of hyper velocity weapon on ground target [J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(16): 65–71. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.16.010.
- [24] DAWSON A, BLESS S, LEVINSON S, et al. Hypervelocity penetration of concrete [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(12): 1484–1489. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.07.069.
- [25] GOLD V M, VRADIS G C, PEARSON J C. Concrete penetration by eroding projectiles: experiments and analysis [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1996, 122(2): 145–152. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1996)122:2(145).
- [26] GOLD V M, VRADIS G C. Analysis of penetration resistance of concrete [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(3): 328–338. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:3(328).
- [27] 钱秉文, 周刚, 李进, 等. 钨合金弹体超高速撞击混凝土靶成坑特性研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2018, 38(10): 1012–1017. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2018.10.004.
- QIAN B W, ZHOU G, LI J, et al. Study of the crater produced by hypervelocity tungsten alloy projectile into concrete target [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2018, 38(10): 1012–1017. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2018.10.004.
- [28] KONG X Z, WU H, FANG Q, et al. Projectile penetration into mortar targets with a broad range of striking velocities: test and analyses [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 106: 18–29. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.02.022.

(责任编辑 丁峰)