

高压物理学报

高速弹体对钢筋混凝土靶的侵彻/贯穿效应实验研究

戴湘晖 周刚 沈子楷 李鹏杰 初哲 王可慧 段建 胡玉涛 杨慧

Experimental Study of High-Speed Projectile Penetration/Perforation into Reinforced Concrete Targets

DAI Xianghui, ZHOU Gang, SHEN Zikai, LI Pengjie, CHU Zhe, WANG Kehui, DUAN Jian, HU Yutao, YANG Hui

引用本文:

戴湘晖, 周刚, 沈子楷, 等. 高速弹体对钢筋混凝土靶的侵彻/贯穿效应实验研究[J]. 高压物理学报, 2019, 33(5):055101. DOI: 10.11858/gywlb.20180672

DAI Xianghui, ZHOU Gang, SHEN Zikai, et al. Experimental Study of High-Speed Projectile Penetration/Perforation into Reinforced Concrete Targets[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(5):055101. DOI: 10.11858/gywlb.20180672

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180672>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

焊接薄壁弹体侵彻多层钢筋混凝土靶实验研究

Welding Thin-Walled Projectiles for Penetrating Multi-Layered Reinforced Concrete Targets

高压物理学报. 2017, 31(4): 469 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.04.016>

考虑自由表面效应的弹体斜侵彻混凝土弹道的研究

Ballistics Study of Projectile Obliquely Penetrating into Concrete with Free-Surface Effect

高压物理学报. 2016, 30(2): 135 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2016.02.008>

冲击载荷下钢筋混凝土力学行为的研究

Mechanical Behavior of Reinforced Concrete under Dynamic Loading

高压物理学报. 2016, 30(2): 109 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2016.02.004>

高速侵彻混凝土弹体在横向非对称作用下的动态响应

Dynamic Response of High-Speed Projectiles Penetrating into Concrete Target by Asymmetric Load

高压物理学报. 2017, 31(1): 73 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.01.011>

钢筋混凝土平板冲剪强度的无量纲公式

Dimensionless Formulae for Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs

高压物理学报. 2016, 30(4): 291 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2016.04.005>

动能弹对混凝土靶侵彻深度的PSO-SVM预测

Prediction of Penetration Depth of Projectiles into Concrete Targets Based on PSO-SVM

高压物理学报. 2018, 32(2): 025102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170577>

高速弹体对钢筋混凝土靶的侵彻/贯穿效应实验研究

戴湘晖, 周刚, 沈子楷, 李鹏杰, 初哲, 王可慧, 段建, 胡玉涛, 杨慧

(西北核技术研究所强动载与效应实验室, 陕西 西安 710024)

摘要: 为了研究高速弹体对钢筋混凝土靶的侵彻/贯穿效应, 以 100 mm 口径滑膛炮作为发射平台, 驱动 10 kg 级卵形弹体以 820~1195 m/s 速度撞击强度为 31.0~43.6 MPa 的钢筋混凝土靶, 获得了弹体侵彻/贯穿钢筋混凝土靶的终点弹道实验数据, 并对弹体的侵彻/贯穿深度、靶板侧面自由面效应、弹体的变形进行了详细分析。结果表明: 弹体的侵彻/贯穿深度为 2.2~2.8 m, 部分经验公式预估的侵彻/贯穿深度与实验结果吻合较好; 当靶面相对尺寸较小且弹速较高时, 靶板侧面自由面效应比较明显; 当弹速达到 1195 m/s 时, 弹体开始由刚体向半流体转变。

关键词: 高速; 弹体; 钢筋混凝土; 侵彻; 贯穿; 自由面效应

中图分类号: O385

文献标识码: A

钢筋混凝土结构广泛应用于各类国防与民用土木工程(如指挥所、机库、核电站、大坝、桥梁、港口等), 这些具有重要战略价值的目标一直是弹体设计及防护工程领域的研究重点。随着高速飞行器的发展, 弹体末端速度不断提高, 高速弹体对钢筋混凝土的侵彻问题逐渐成为研究热点, 相关研究可为弹体设计及防护工程提供技术支持。

弹体对钢筋混凝土的侵彻/贯穿效应是评价弹体毁伤能力的重要指标。学者们通过实验和理论方法, 开展了深入细致的研究工作, 并推导出一系列非常有用的计算侵深的经验及半经验公式。Petry 最早于 1910 年提出了侵深的经验公式, 而后对其进行修正, 该公式是最早的普遍应用的计算公式^[1]; 美国圣地亚国家实验室 Young 等^[2-5] 在 3000 多次实验的基础上, 通过统计分析获得预估钻地弹侵彻深度的经验公式, 并不断进行修正, 得到了侵彻土、岩石、混凝土统一的经验公式, 该经验公式广泛应用于工程实际中, 可信度较高; 美国圣地亚国家实验室 Forrestal 等^[6-10] 先后开展了几次比较系统的尖卵形弹体侵彻实验, 速度介于 277~1225 m/s 之间, 并基于空腔膨胀模型推导出侵深的半经验公式, 相关实验及理论模型被广泛应用; Chen 等^[11-13] 基于 Forrestal 理论和无量纲分析, 提出了两个无量纲参数(侵彻函数 I 和弹体几何函数 N), 进一步简化了侵深的经验公式; 何翔等^[14-15] 基于 20 余个侵彻经验公式, 在无量纲分析的基础上, 给出了岩石侵深经验公式; 此外, 学者们还相继提出 BRL 公式^[1, 16-17]、ACE 公式^[16, 18]、NDRC 公式^[16, 19]、别列赞公式^[20-21]、Kar 公式^[16, 22]、Ammann-Whitney 公式^[16]、Whiffen 公式^[16, 23], 并在工程实际中得到广泛应用, Kennedy^[1]、Li 等^[16]、Fang 等^[20]、武海军等^[21] 对这些经验公式进行了综述和评价。同时, 学者们还对小尺寸弹体高速侵彻混凝土靶进行了实验及机理方面的研究^[24-34], 得到了一系列有用的结论。

尽管研究人员对小尺寸弹体高速侵彻混凝土靶开展了大量的实验和理论研究工作, 但是大尺寸弹体侵彻/贯穿钢筋混凝土靶的实验数据很少见诸公开报道, 而这些实验数据对于理论模型及经验公式的验证具有很好的参考作用。为了对前人工作进行补充, 本研究开展了 10 kg 级弹体高速侵彻/贯穿钢筋混凝土靶实验, 以获得终点弹道实验数据, 并对弹体的侵彻/贯穿深度、靶板侧面自由面效应、弹体的变形等因素进行详细分析。

* 收稿日期: 2018-10-29; 修回日期: 2018-12-21

作者简介: 戴湘晖(1986—), 男, 博士研究生, 工程师, 主要从事冲击动力学研究。

E-mail: daixianghui@nint.ac.cn

通信作者: 周刚(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事爆炸与冲击动力学研究. E-mail: gzhou@nint.ac.cn

1 实验方案

1.1 实验弹体设计

弹体为卵形头部、圆柱弹身结构,由壳体、内部装填物和尾盖组成,如图1所示,其中 d 为弹体直径, L 为长度。壳体和尾盖材料均为30CrMnSiNi2MoVE 高强钢,内部装填物为石蜡与石英砂的混合物。

设计并加工了4种不同尺寸的弹体,1[#]、2[#]弹体参数相同。4种弹体的CRH(头部弧形曲径比)分别为3.0、3.0、4.0和4.5,弹体直径 d 为67.0~74.5 mm,长度为436.4~477.3 mm,弹体质量 m 为8.0~11.09 kg,如表1所示。

壳体力学性能参数通过检测随炉热处理试件获得。为了准确获得壳体的力学性能,对于每批次弹体,采用3组标准试件分别绑在壳体的不同位置,与壳体随炉进行热处理,试件的检测结果真实地反映了壳体的力学性能。按GB/T 228-2010《金属材料室温拉伸试验方法》规定,在MTS810材料实验机上进行拉伸试验,检测试件的强度和延伸率;按GB/T 229-2007《金属夏比缺口冲击试验方法》规定,在摆锤式电子测力冲击试验机上进行冲击试验,检测试件的冲击吸收功。表2为随炉试件力学性能检测结果, $R_{p0.2}$ 代表屈服强度, R_m 为抗拉强度, Z 为延伸率, A_s 为断面收缩率, A_{ku2} 为冲击功,表2中数据为每批次3组随炉试件检测结果的平均值。在这5发弹体中,1[#]、2[#]弹体为同一批次,3[#]、4[#]弹体为同一批次。由表2可见,壳体的抗拉强度为1626.3~1719.8 MPa,冲击功为68.7~73.7 J。

1.2 实验方案设计

实验采用100 mm口径滑膛炮次口径发射,整个实验系统包括发射装置、测速装置、高速相机和回收装置,实验布局如图2所示。滑膛炮、铜丝网靶、靶板中心基本位于同一水平线上,炮口距靶面的距离为8 m;靶板放置在回收舱中,以确保实验安全;靶板后方布置0.5 m厚的木材堆,木材堆后布置1 m厚的素混凝土靶,以保证在弹体穿透靶板的情况下对其进行软回收。弹体由100 mm口径滑膛炮发射,依次撞击铜丝网靶和钢筋混凝土靶;通过调整发射药的质量来控制弹体撞靶速度;采用高速相机记录

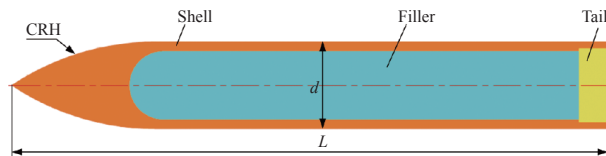


图1 弹体结构示意图

Fig. 1 Schematic of the projectile composition

表1 弹体参数

Table 1 Parameters of the projectiles

Projectile No.	CRH	d /mm	L /mm	m /kg
1 [#] , 2 [#]	3.0	67.0	450.0	8.00
3 [#]	3.0	72.7	477.3	10.72
4 [#]	4.0	74.5	436.4	9.96
5 [#]	4.5	66.7	460.0	11.09

表2 随炉试件力学性能检测结果

Table 2 Mechanical properties of heat-treated specimens

Projectile No.	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	Z /%	A_s /%	A_{ku2} /J
1 [#] , 2 [#]	1322.2	1719.8	13.9	52.8	73.7
3 [#] , 4 [#]	1291.3	1626.3	12.2	53.3	71.6
5 [#]	1269.0	1636.5	11.5	48.5	68.7

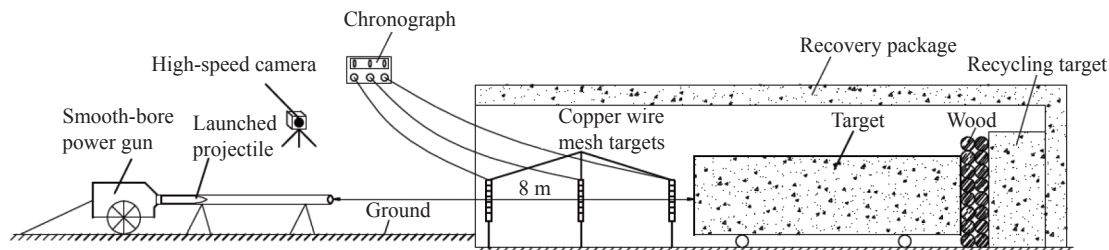


图2 实验现场布局示意

Fig. 2 Layout of projectile penetration experiment

弹体飞行和撞靶过程, 计时仪记录弹体撞击铜丝网靶的瞬态时间。通过铜丝网靶间距及弹体撞击铜丝网靶的时间差获取弹体的撞靶速度; 采用高速相机获取弹体撞靶前的姿态, 并辅助判读弹体的撞靶速度。

发射弹体由适配器和弹体组成, 适配器分为弹托、底板和闭气环 3 部分, 如图 3 所示。弹托和闭气环采用高强尼龙材料, 底板采用超硬铝材料。弹托的最大外径为 100 mm, 通过刻槽减少“消极”重量; 闭气环前端为 $\varnothing 100$ mm 的圆柱形, 厚度为 70 mm, 尾部带有 8.7° 锥角, 质量为 0.6 kg; 底板尺寸为 $\varnothing 100$ mm $\times$ 20 mm, 质量为 0.4 kg。弹托为三瓣结构, 装配时采用强力胶将三瓣粘接成整体, 在炮管中对弹体起支撑作用; 底板用于助推弹体; 闭气环起密闭并传递火药高压的作用。

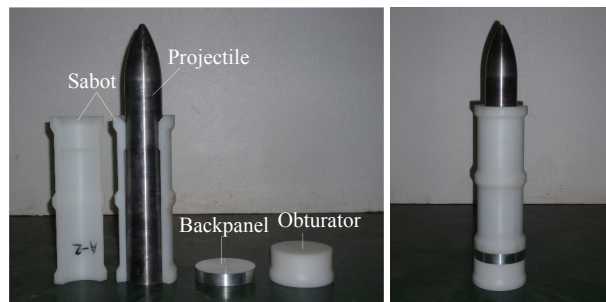


图 3 发射弹体

Fig. 3 Launching projectile

1.3 实验靶板设计

实验前, 采用经验公式对弹体的侵彻能力进行预估, 根据预估结果开展靶板设计。1[#]~4[#]靶为方形钢筋混凝土 (Reinforced Concrete, RC) 靶, 5[#]靶为圆柱形钢筋混凝土靶, 如图 4 所示。

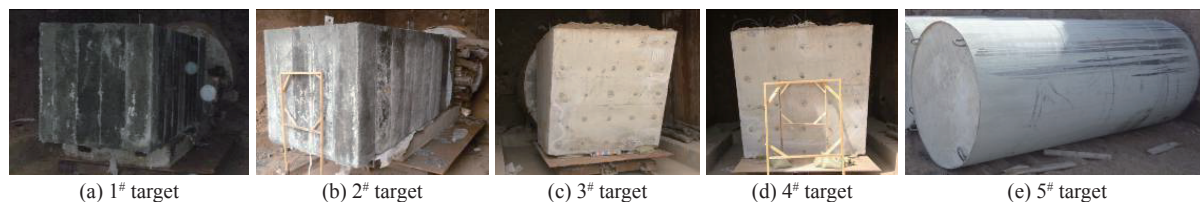


图 4 实验用钢筋混凝土靶板

Fig. 4 Layout of RC targets

表 3 列出了 5 块钢筋混凝土靶的具体参数, 其中: f_c 为混凝土无围压抗压强度, r_c 为钢筋的体积配筋率, d_1 为钢筋直径, α 为靶板的倾角, η 为靶面相对尺寸 (靶面边长或直径与弹径之比)。靶板的实测强度为 31.0~43.6 MPa; 钢筋网格尺寸为 100 mm $\times$ 100 mm, 最中间网格的中心与靶面中心重合, 4[#]靶的体积配筋率为 0.3%, 其余靶均为 0.6%; 1[#]靶和 2[#]靶分别由 2.3 m 厚和 0.5 m 厚的靶板叠加而成; 3[#]靶和 4[#]靶的倾角为 20° , 厚度 2.4 m 指靶板中心水平线长度; 靶面相对尺寸为 20.1~33.0。浇注前制作模板, 并在模板内编织好钢筋网格, 在实验前 28 d 进行混凝土浇注并自然养护, 按照国家标准 GB/T 50081-2002 《普通混凝土力学性能试验方法》设计检测试件, 并在实验前 1 d 对试件进行性能检测, 获得靶板的实际抗压强度。

表 3 钢筋混凝土靶参数

Table 3 Parameters of RC targets

No.	f_c /MPa		r_c /%	Size of target	Size of rebar grid/ (mm $\times$ mm)	d_1 /mm	$\alpha/(^\circ)$	η
	Designed	Measured						
1 [#]	40	43.6	0.6	1.4 m $\times$ 1.4 m $\times$ 2.8 m (2.3 m + 0.5 m)	100 $\times$ 100	10	0	20.1
2 [#]	40	43.6	0.6	1.4 m $\times$ 1.4 m $\times$ 2.8 m (2.3 m + 0.5 m)	100 $\times$ 100	10	0	20.1
3 [#]	40	39.2	0.6	2.4 m $\times$ 2.4 m $\times$ 2.4 m	100 $\times$ 100	12	20	33.0
4 [#]	30	32.3	0.3	2.4 m $\times$ 2.4 m $\times$ 2.4 m	100 $\times$ 100	12	20	32.2
5 [#]	30	31.0	0.6	$\varnothing 1.5$ m $\times$ 3.5 m	100 $\times$ 100	10	0	22.5

2 实验结果与分析

2.1 适配器气动分离情况

高速相机拍摄频率为4000帧每秒,记录下了弹体撞靶前的飞行过程。本研究给出了3[#]、5[#]弹体撞靶前的高速录像,如图5所示,弹体在撞靶之前的姿态较正,攻角可以忽略。

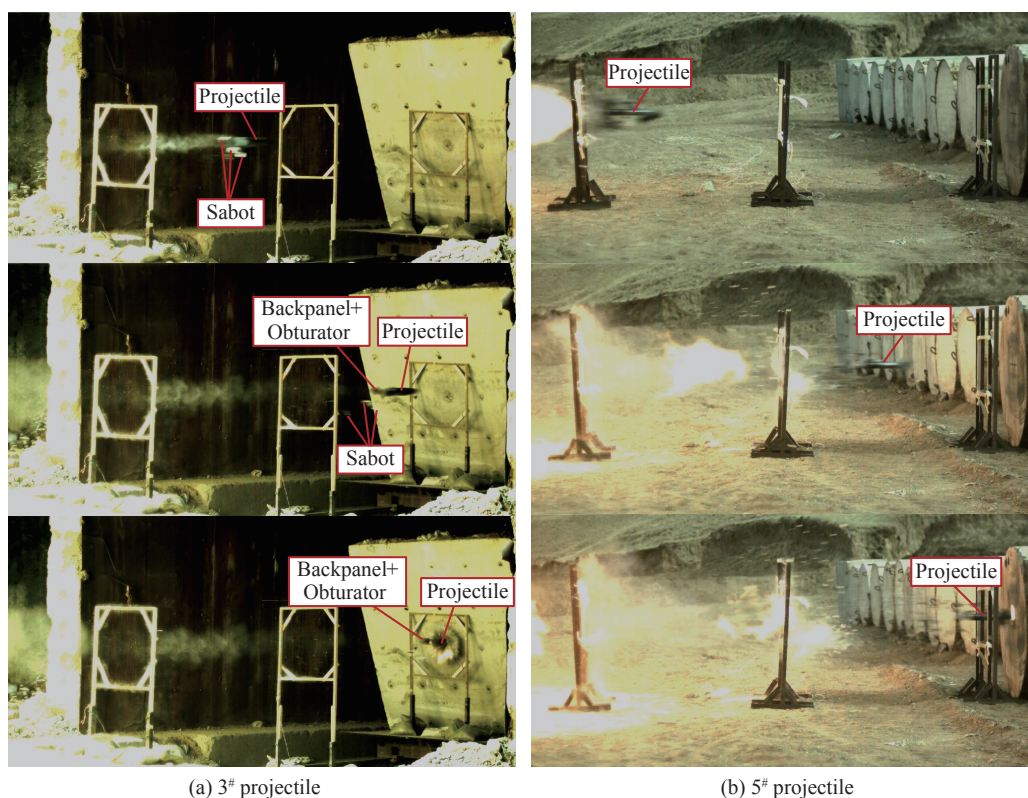


图5 弹体撞靶前高速录像

Fig. 5 Typical photographs before projectiles impacting from high-speed camera

由于弹托、底板和闭气环的外径比弹体直径大,且质量相对弹体较轻,空气阻力导致的减速度大于弹体,只要炮口到靶面的距离合适,在弹体撞靶之前,适配器在空气阻力作用下会剥离弹体。如图5(a)所示,弹托在第1、2层网靶之间开始剥离,底板+闭气环在轴向与弹体拉开了一定距离;撞靶前,底板+闭气环沿轴向基本脱离弹体,且在径向发生了一定的错位(可能由随机的非对称力导致),弹托已完全剥离;当弹体完全进入混凝土靶时,底板+闭气环距靶面还有一定距离,即使底板+闭气环在弹体撞靶减速过程中追上,并作为附加质量(约1 kg)跟随弹体一起侵彻,影响区域也仅在开坑区,这是因为当底板+闭气环进入隧道区后,由于其外径大于弹洞直径(和弹体直径相当),会与钢筋混凝土发生撞击后急剧减速并迅速脱离弹体,试验后在弹洞中发现底板+闭气环的残骸。图5(b)中,弹体在到达第1层网靶(距炮口约4 m)前就已实现和适配器的分离。基于以上分析,可以认为适配器实现了气动分离,对侵彻/贯穿深度的影响基本可以忽略。

2.2 弹体对钢筋混凝土靶的侵彻/贯穿深度

图6为弹体对钢筋混凝土靶的侵彻/贯穿情况。1[#]弹体贯穿2.3 m厚的靶板后,弹头扎在第2块0.5 m厚的靶板上,深度约0.14 m;2[#]弹体贯穿2.8 m(2.3 m+0.5 m)厚的靶板后,扎在回收木材堆中;3[#]弹体贯穿靶板后,弹头扎在素混凝土回收靶中,深度约0.04 m;4[#]弹体刚好贯穿靶板,将背面混凝土崩落层扒开后,弹头露出;5[#]弹体未穿透靶板,停留在靶板中,最终通过破靶将其取出。测量靶板弹洞发现:1[#]、2[#]、

5#靶板的前后弹洞基本位于同一水平线上; 3#、4#靶板前后弹洞中心连线与水平线的夹角分别为 5.6° 和 3.9° , 说明弹道的偏转并不十分明显, 20° 的倾角对高速弹体侵彻姿态的影响几乎可以忽略。

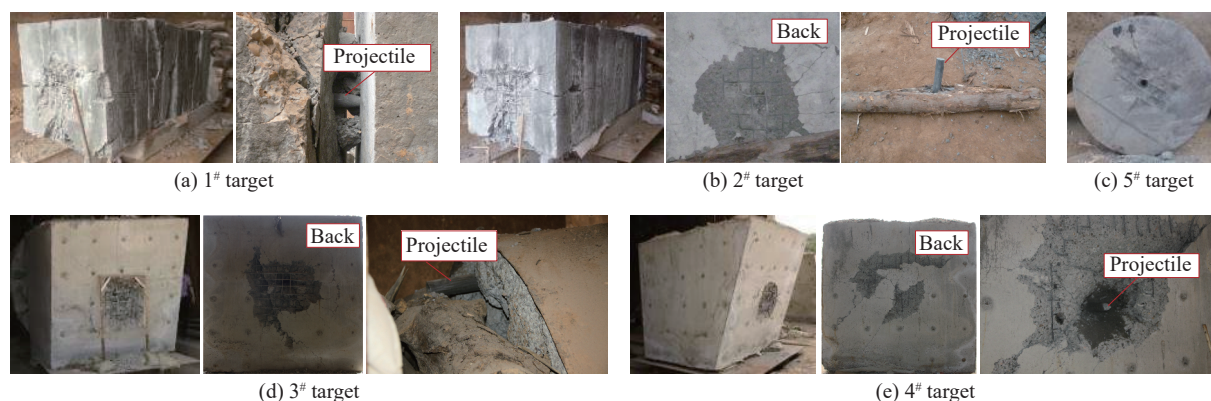


图 6 弹体对钢筋混凝土靶的侵彻/贯穿情况

Fig. 6 Post-test photographs of projectiles penetration/perforation into RC targets

实验结果如表 4 所示。按照 Li 等^[16]对弹体侵彻效应的定义, 1#~4#弹体的侵彻效应类型为极限贯穿, 5#弹体的侵彻效应类型为半无限侵彻。

表 4 侵彻/贯穿深度实验结果

Table 4 Experimental results of penetration/perforation depth

Projectile No.	Velocity/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Depth/m	Type of penetration
1#	1019	2.44	Limit perforation
2#	1195	2.80	Limit perforation
3#	1020	2.44	Limit perforation
4#	840	2.20	Limit perforation
5#	820	2.30	Semi-infinite penetration

2.3 靶板自由面效应影响

从图 6 可以看出: 1#~5#靶板的正面均形成了锥形漏斗坑, 并沿靶面产生了大量径向裂纹, 从弹着点向外延伸至靶板侧面, 靶面破坏区域为弹径的 10~12 倍; 1#~4#靶板背面有大面积混凝土崩落。对于 1#、2#靶板, 有多条较宽的裂纹辐射至侧面, 侧面裂纹在宽度和深度上都较为明显; 3#、4#、5#靶板正面的裂纹数量较少, 且宽度较窄, 侧面仅发现少量的微裂纹。

Warren 等^[35]、孔祥振等^[36]认为, 如果靶面尺寸不够大, 弹体侵彻过程中靶板侧面将产生明显的裂纹, 此时不能将侧面看作半无限边界, 弹体阻力需乘以一个衰减系数, 该衰减系数与靶板强度、空腔膨胀速度等因素相关, 且得出了自由面效应影响距离随着空腔膨胀速度增大而增大的结论。根据他们的观点, 结合对本实验靶板侧面裂纹的分析进行判断: 1#、2#靶板侧面的自由面效应明显, 3#、4#、5#靶板侧面的自由面效应较为微弱。

分析 1#、2#、3#靶板的破坏情况可以得出: 在靶板强度约 40 MPa、弹速超过 1 km/s 的初始条件下, 靶面相对尺寸为 20.1 时自由面效应明显, 靶面相对尺寸达到 33.0 时自由面效应基本可以忽略。通过分析 4#、5#靶板的破坏情况可以得出, 在靶板强度约 30 MPa、弹速约 800 m/s 的初始条件下, 靶面相对尺寸为 22.5 时自由面效应基本可以忽略。对比 1#、2#、5#靶板的破坏情况可以得到, 弹速越高, 需要更大的靶面相对尺寸来消除自由面效应的影响, 与孔祥振等^[36]的结论一致。考虑到靶板侧面对弹体阻力的自由面衰减效应, 1#、2#弹体的贯穿深度实验值将高于理想情况(半无限侧面靶板)。

2.4 回收弹体变形

回收弹体如图7所示。5发弹体结构基本保持完整, 2#弹体的侵蚀较为严重, 且头部墩粗变钝明显, 其他弹体表面只有轻微的侵蚀和擦伤。分析认为, 在弹体高速撞击钢筋混凝土靶的过程中, 弹靶界面形成了高温高压区域, 弹体表面金属呈半流体状态, 在冲击压力、高温软化和摩擦力的综合作用下, 弹体表面被侵蚀, 头部墩粗, 而且速度越高, 侵蚀和墩粗现象越明显。本实验中, 1195 m/s 速度可认为是弹体由刚体向半流体转变的一个拐点。另外, 当弹体未穿透靶板时, 由于弹体表面处于高温软化状态, 冷却过程中部分混凝土颗粒会粘在弹体表面, 如4#、5#弹体表面的白色颗粒状物质。



图7 回收弹体

Fig. 7 Recovered projectiles

2.5 弹体侵彻/贯穿深度

通过研究文献中20多个侵深经验公式的适用范围, 选取修正的Petry公式、ACE公式和BRL公式计算极限贯穿深度, 并增加Young公式、Forrestal公式、工程兵三所公式、别列赞公式、修正的NDRC公式和Healey and Weissman公式进行半无限侵深计算。

图8显示了侵彻/贯穿深度与侵彻速度的关系。对于极限贯穿深度, BRL公式计算值较实验值略高, 修正的Petry公式和ACE公式的计算值较实验值略低, 计算值与实验值的相对偏差为10%~20%; 考虑自由面效应的影响, 1#、2#弹体的贯穿深度实验值更接近Petry公式和ACE公式的计算值。对于半无限侵深, Young公式、Forrestal公式、Healey and Weissman公式的计算精度较高, 与实验值的相对偏差分别为2.6%、5.2%和1.7%; 而修正的Petry公式、别列赞公式与实验值的相对偏差较大, 达到43.5%和

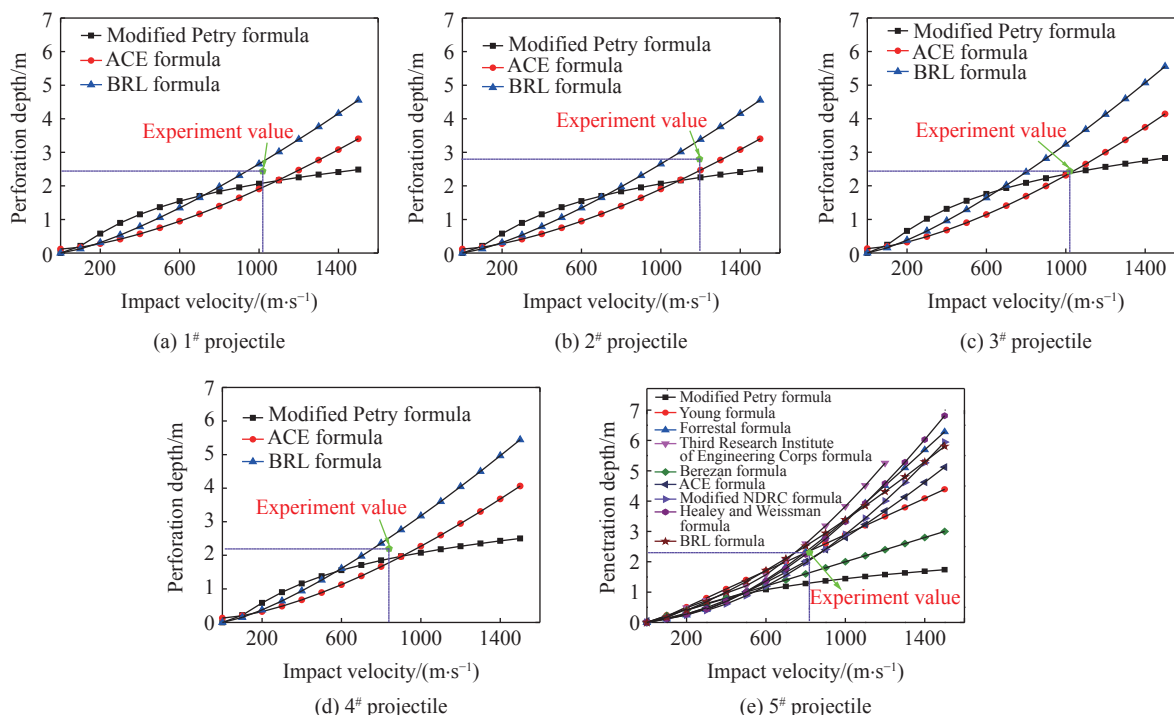


图8 侵彻/贯穿深度与速度关系

Fig. 8 Penetration/perforation depth versus impact velocity

26.7%, 分析认为, 这是由于这两个公式未考虑混凝土强度和钢筋配筋率所致。

本研究选用的经验公式都将弹体视为刚体, 未考虑弹体表面侵蚀对侵彻/贯穿深度的影响。由于 1195 m/s 为弹体由刚体向半流体转变的拐点, 当弹体速度低于 1195 m/s 时, 半流体特征不明显, 采用经验公式计算的 2[#]弹体贯穿深度与实验值的偏差基本处于可接受范围之内; 当弹体速度超过 1195 m/s、表面发生明显侵蚀的情况下, 以上经验公式均不适合计算侵彻/贯穿深度。以上分析结果可用于指导工程实际中高速弹体对钢筋混凝土侵彻/贯穿深度的预估。

3 结 论

采用 100 mm 口径滑膛炮开展了高速弹体侵彻/贯穿钢筋混凝土靶实验, 得到了终点弹道实验数据, 并对弹体的侵彻/贯穿深度、靶板侧面自由面效应、弹体的变形等进行详细分析, 得出如下主要结论。

(1) 高速弹体对钢筋混凝土靶的侵彻/贯穿深度为 2.2~2.8 m, 由于自由面效应的影响, 1[#]、2[#]弹体的贯穿深度高于理想情况; BRL 公式、修正的 Petry 公式、ACE 公式计算的极限贯穿值与实验值的相对偏差基本在 10%~20% 范围之内; Young 公式、Forrestal 公式和 Healey and Weissman 公式计算的半无限侵深值与实验值较为吻合。

(2) 在靶板强度约 40 MPa、弹速超过 1 km/s 的初始条件下, 靶面相对尺寸为 33.0 时, 靶板侧面自由面效应基本可以忽略; 在靶板强度约 30 MPa、弹速约 0.8 km/s 的初始条件下, 靶面相对尺寸为 22.5 时, 靶板侧面自由面效应也可以忽略; 弹速越高, 靶板侧面自由面效应越明显。

(3) 弹速在 820~1020 m/s 范围内时, 弹体表面有轻微的侵蚀和擦伤, 结构变形很小, 弹体可视为刚体; 当弹速达到 1195 m/s 时, 弹体表面侵蚀和头部墩粗变钝现象较为明显, 开始由刚体向半流体转变。

感谢西北核技术研究所唐仕英研究员给予指导性意见, 同时感谢西北核技术研究所侵彻力学项目组古仁红、李明、吴海军、王长利、柯明在实验过程中提供帮助!

参考文献:

- [1] KENNEDY R P. A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1976, 37(2): 183–203.
- [2] YOUNG C W. The development of empirical equation for predicting depth of an earth penetrating projectile: SC-DR-67-60 [R]. Albuquerque, NM, US: Sandia National Laboratories, 1967.
- [3] YOUNG C W. Depth prediction for earth-penetrating projectiles [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1969, 95(3): 803–818.
- [4] YOUNG C W. Equations for predicting earth penetration by projectiles: an update: SAND88-0013 [R]. Albuquerque, NM, US: Sandia National Laboratories, 1988.
- [5] YOUNG C W. Penetration equations: SAND97-2426 [R]. Albuquerque, NM, US: Sandia National Laboratories, 1997.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] CHEN X W, FAN S C, LI Q M. Oblique and normal penetration/perforation of concrete target by rigid projectiles [J]. [International Journal of Impact Engineering](#), 2004, 30(6): 617–637.
- [14] 金栋梁, 何翔, 刘瑞朝, 等. 岩石侵彻深度经验公式 [C]//第五届全国工程结构安全防护学术会议. 南京: 中国力学学会爆炸力学专业委员会, 2005.
- [15] 何翔, 刘瑞朝, 吴飏, 等. 现场岩体侵彻实验研究及侵彻深度经验公式的提出 [C]//第四届深部岩体力学与工程灾害控制学术研讨会. 北京: 中国岩石力学与工程学会软岩工程与深部灾害控制分会, 2009.
- [16] 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): 224–284.
- [17] BETH R A. Penetration of projectiles in concrete [R]. Washington DC: PPAB Interim Report, 1941.
- [18] ACE. Fundamentals of protective structures [R]. Army Corps of Engineers, Office of the Chief of Engineers, 1946.
- [19] NDRC. Effects of impact and explosion. Summary technical report of division 2 [R]. Washington DC: National Defense Research Committee, 1946.
- [20] FANG Q, WU H. Concrete structures under projectile impact [M]. Singapore: Springer, 2017.
- [21] 武海军, 张爽, 黄风雷. 钢筋混凝土靶的侵彻与贯穿研究进展 [J]. [兵工学报](#), 2018, 39(1): 182–208.
- WU H J, ZHANG S, HUANG F L. Research progress in penetration/perforation into reinforced concrete targets [J]. [Acta Armamentarii](#), 2018, 39(1): 182–208.
- [22] KAR A K. Local effects of tornado-generated missiles [J]. [Journal of the Structural Division](#), 1978, 104(5): 809–816.
- [23] WHIFFEN P. UK Road Research Laboratory Note No [M]. MOS/311, 1943.
- [24] NELSON R W. Low-yield earth-penetrating nuclear weapons [J]. [Science and Global Security](#), 2002, 10(1): 1–20.
- [25] DAVIS R N, NEELY A M, JONES S E. Mass loss and blunting during high-speed penetration [J]. [Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers: Part C](#), 2004, 218(9): 1053–1062.
- [26] MU Z C, ZHANG W. An investigation on mass loss of ogival projectiles penetrating concrete targets [J]. [International Journal of Impact Engineering](#), 2011, 38(8/9): 770–778.
- [27] 王可慧, 耿宝刚, 初哲, 等. 弹体高速侵彻钢筋混凝土靶的结构变形及质量损失的实验研究 [J]. [高压物理学报](#), 2014, 28(1): 61–68.
- WANG K H, GENG B G, CHU Z, et al. Experimental studies on structural response and mass loss of high-velocity projectiles penetrating into reinforced concrete targets [J]. [Chinese Journal of High Pressure Physics](#), 2014, 28(1): 61–68.
- [28] 王可慧. 高速弹体侵彻混凝土靶研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2011.
- WANG K H. Study of high velocity projectile penetrating concrete target [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2011.
- [29] 赵南, 王可慧, 李明, 等. 薄壁弹体高速侵彻钢筋混凝土实验研究 [J]. [实验力学](#), 2017, 32(4): 573–579.
- ZHAO N, WANG K H, LI M, et al. Experimental study of high speed penetration of thin-wall projectile in steel reinforced concrete [J]. [Journal of Experimental Mechanics](#), 2017, 32(4): 573–579.
- [30] 武海军, 黄风雷, 王一楠, 等. 高速侵彻混凝土弹体头部侵蚀终点效应实验研究 [J]. [兵工学报](#), 2012, 23(1): 48–55.
- WU H J, HUANG F L, WANG Y N, et al. Experimental investigation on projectile nose eroding effect of high-velocity penetration into concrete [J]. [Acta Armamentarii](#), 2012, 23(1): 48–55.
- [31] 王一楠. 动能弹体高速侵彻混凝土机理研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2010.
- WANG Y N. The mechanism of high-speed kinetic energy projectile penetration into concrete [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2010.
- [32] 肖玲, 梁仕发. 超高速穿甲弹对钢筋混凝土靶板的毁伤作用研究综述 [C]//第六届全国工程结构安全防护学术会议. 洛阳: 中国力学学会爆炸力学专业委员会, 2007.
- [33] 宋梅利, 王晓鸣, 赵希芳, 等. 弹体高速侵彻混凝土靶侵彻效应影响因素分析 [J]. [南京理工大学学报](#), 2014, 38(3): 390–395.
- SONG M L, WANG X M, ZHAO X F, et al. Influencing factors of penetration efficiency for projectiles' high-speed penetration into concrete targets [J]. [Journal of Nanjing University of Science and Technology](#), 2014, 38(3): 390–395.
- [34] 宋梅利, 李文彬, 王晓鸣, 等. 弹体高速侵彻效率的实验和量纲分析 [J]. [爆炸与冲击](#), 2016, 36(6): 752–758.
- SONG M L, LI W B, WANG X M, et al. Experiments and dimensional analysis of high-speed projectile penetration efficiency

- [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(6): 752–758.
- [35] WARREN T L, HANCHAK S J, POORMON K L. Penetration of limestone targets by ogive-nosed VAR 4340 steel projectiles at oblique angles: experiments and simulations [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, 30: 1307–1331.
- [36] 孔祥振, 方秦, 吴昊. 考虑靶体自由表面和开裂区影响的可变形弹体斜侵彻脆性材料的终点弹道分析 [J]. *兵工学报*, 2014, 35(6): 814–821.
- KONG X Z, FANG Q, WU H. Terminal ballistics study of deformable projectile penetrating brittle material targets for free-surface and crack region effects [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(6): 814–821.

Experimental Study of High-Speed Projectile Penetration/Perforation into Reinforced Concrete Targets

DAI Xianghui, ZHOU Gang, SHEN Zikai, LI Pengjie, CHU Zhe,
WANG Kehui, DUAN Jian, HU Yutao, YANG Hui

(*Laboratory of Intense Dynamic Loading and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

Abstract: The penetration/perforation effects of high-speed ogive-nosed projectiles on reinforced concrete (RC) targets were experimentally investigated. The projectiles with a mass of approximately 10 kg were launched by a 100 mm power gun to striking velocities between 820 and 1195 m/s and impacted on the RC targets with the unconfined cylinder compressive strength from 31.0 MPa to 43.6 MPa. The end-point trajectory data of projectiles penetrating/perforating into RC targets are obtained. The penetration/perforation depths and deformations of high-speed projectiles, free surface effects of RC targets were analyzed. The results show that the penetration/perforation depths of high-speed projectiles ranges from 2.2 m to 2.8 m. The predicted penetration/perforation depths by some empirical formulas were in good agreement with the experimental data. Furthermore, those targets with smaller relative surface size and the projectile with higher velocity, the free surface effects were more significant. In addition, the projectile behaves from rigid to semi-fluid mechanism when the striking velocity reaches to 1195 m/s.

Keywords: high-speed; projectile; reinforced concrete; penetration; perforation; free surface effects