

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0463

弹体高速侵彻钢筋混凝土靶试验研究*

王可慧, 周刚, 李明, 邹慧辉, 吴海军, 耿宝刚, 段建, 戴湘晖, 沈子楷, 李鹏杰, 古仁红
(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 为研究结构弹体对钢筋混凝土靶的高速侵彻破坏效应, 利用口径 35 mm 弹道炮开展了 1 030~1 520 m/s 速度范围内的高速侵彻试验, 获得了弹体的撞击速度、破坏形态、剩余长度、剩余质量和靶体中的侵彻深度及成坑尺寸等试验数据, 分析了侵彻深度和侵彻机理随速度的变化关系。结果表明: 在 1 030~1 390 m/s 的速度范围内, 弹体头部磨蚀, 磨蚀程度随侵彻速度增加而加剧, 侵彻深度随撞击速度近似线性增大; 撞击速度在 1 390~1 480 m/s 范围内, 弹体头部严重磨蚀, 侵彻深度随撞击速度增加而减小; 撞击速度大于 1 480 m/s 后, 弹体严重破碎, 侵彻深度急剧下降。针对结构弹体高速侵彻过程中的破坏特点, 将侵彻速度划分为刚体侵彻区、准刚体侵彻区、侵蚀体侵彻区和破碎体侵彻区, 可为钻地弹结构设计提供参考。

关键词: 结构弹体; 高速侵彻; 钢筋混凝土; 结构响应; 速度分区

中图分类号: O385 国标学科代码: 1303520 文献标志码: A

Experimental research on the mechanism of a high-velocity projectile penetrating into a reinforced concrete target

WANG Kehui, ZHOU Gang, LI Ming, ZOU Huihui, WU Haijun, GENG Baogang, DUAN Jian,
DAI Xianghui, SHEN Zikai, LI Pengjie, GU Renhong
(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the high-speed penetration effect of a structural projectile on a reinforced concrete target, tests of structural projectiles with high velocity penetrating into reinforced concrete target were carried out by using a 35mm-caliber ballistic gun as a launching tool, and the penetration velocity of the projectiles ranges from 1 030 m/s to 1 520 m/s. The test data of the deformation and failure form, remaining length and remaining mass of the projectiles were obtained through detailed measurement of the recovered projectile. The macro-damage of the targets, the penetration depth and crater size of the target bodies were also obtained. Based on the experimental data, the changes of the projectile structure response, penetration of the dimensionless crater depth, and dimensionless crater diameter with penetration velocity were analyzed. According to the deformation and destruction of the projectiles during the penetration process, the penetration depth and penetration mechanism change with penetration velocity were analyzed, and the partition of the penetration velocity was discussed. The results show that, in the penetration velocity ranges from 1 030 m/s to 1 390 m/s, the heads of the projectiles are eroded, and the degree of erosion increases with the increase in penetration velocity, and the penetration depth increases approximately linearly with the penetration velocity. When the penetration velocity is in the range of 1 390–1 480 m/s, the heads of the projectiles are severely eroded, and the penetration depth decreases as the penetration velocity increases. When the impact velocity is higher than 1 480 m/s, the projectile bodies are severely broken, and the penetration depth decreases sharply as the penetration velocity increases. According to the damage characteristics of the structural projectiles during high-speed penetration, the penetration velocity is divided into rigid body penetration zone, quasi-rigid body penetration zone, eroded body penetration zone and broken body

* 收稿日期: 2020-10-15; 修回日期: 2021-06-17

第一作者: 王可慧(1975—), 女, 博士, 研究员, wangkehui@nint.ac.cn

通信作者: 周刚(1962—), 男, 博士, 研究员, gzhou@nint.ac.cn

penetration zone, which can provide a reference for the structural design of ground-penetrating projectile.

Keywords: structural projectile; high-velocity penetration; reinforced concrete target; experimental research; velocity partition

为了增加对坚固化目标的快速打击能力, 美国、英国和俄罗斯等国家均开展了新一代高超音速和超高速动能武器的研制工作, 弹体侵彻速度也逐渐由中低速(300~1 000 m/s)向高速(1 000~1 500 m/s)发展^[1-2]。研究表明^[3], 在常规速度范围(小于 800 m/s)内对混凝土类目标侵彻弹体可视为刚体, 随着侵彻速度的增加, 侵彻机理逐渐由刚体侵彻向半流体侵彻转变, 弹体不能单纯地作为刚体处理。动能弹高速侵彻钢筋混凝土靶体的终点弹道效应研究十分复杂, 涉及到中低速刚性侵彻、中高速变形非侵蚀侵彻以及高速和超高速侵蚀侵彻等多个阶段, 是国防战略技术储备和交叉学科前沿探索的迫切需求。

美国在混凝土目标的超高速侵彻研究方面起步较早, Gold 等^[4]进行了 1 500~1 900 m/s 速度下脱氧高导(oxygen-free high conductance, OFHC)铜和钽长杆弹侵彻半无限混凝土靶和半无限等效钢筋混凝土靶之间的实验研究和简化理论分析。Lundegren 等^[5]将整个高速侵彻过程分为三个区域(刚性弹体区、变形/侵蚀区及超高速流体区)的假设, 当弹体速度超过一定的速度限, 弹体由刚体阶段进入流体阶段, 弹体的侵彻深度随速度的增加反而减小。Forrestal 等^[6]随后进行了 64 g 弹体在 400~1 400 m/s 速度下侵彻混凝土靶的实验, 对高速侵彻条件下的弹体侵蚀进行了分析。Chen 等^[7]研究了处于不同速度范围的弹体侵彻机理, 发现随着侵彻速度增加, 侵彻机理由刚性弹体侵彻向半流体动力学侵彻的转变。随着实验技术的发展, 国内在弹体高速侵彻混凝土实验研究方面逐渐增多。何翔等^[8]进行了 150 g 实心弹丸在 800~1 470 m/s 速度下侵彻素混凝土靶的实验, 以及不同条件下弹体高速侵彻混凝土系列实验, 揭示了混凝土中半流体侵彻阶段的典型特征: 刚体侵彻深度上限和对应的刚体侵彻初速、弹道弯曲、弹体严重侵蚀且伴随弯曲/断裂等。梁斌等^[9]进行了 1 200 m/s 的弹体侵彻素混凝土靶的缩比实验研究, 对高速条件下弹体的结构响应及质量侵蚀进行了讨论。杨建超等^[10]进行了 800~1 500 m/s 速度侵彻不同强度混凝土实验, 根据试验结果拟合出了既定材料弹体质量侵蚀同侵彻速度之间的对应关系。

上述研究大多数是针对实心弹丸开展的, 而针对结构弹体的高速侵彻钢筋混凝土机理研究相对较少。为此, 本文设计一种新型钻地弹结构, 利用口径 35 mm 的弹道炮开展 1 030~1 520 m/s 速度范围内结构弹体对钢筋混凝土靶的高速侵彻试验研究, 分析弹体质量磨蚀、靶体成坑尺寸以及侵彻深度和侵彻机理随速度的变化规律, 以期对弹体结构设计和高速侵彻试验提供参考。

1 试验概况

1.1 弹体设计

试验设计了如图 1 所示的弹体结构。弹体结构采用锥形变壁厚扩尾设计, 六花瓣均匀刻槽。其中, 扩尾设计提高弹体弹身和尾部结构的强度和刚度。而刻槽设计可以减轻弹体尾部重量, 也便于侵彻过程中靶材排出。另外, 带锥度弹形有助于降低高速弹道的偏转, 提高侵彻弹道的稳定性。考虑到高速侵彻过程中弹体会部分侵蚀, 试验弹体的头部厚度和弹体壁厚较通常设计的弹体均有所增加。

弹体长 100 mm, 最大弹径为 22 mm。弹体头部采用实心尖卵形头部, 弹头曲径比(caliber radius head, CRH)值为 4.5。弹体材料采用 30CrMnSiNi2MoVE 高强度钢, 热处理后弹体材料屈服强度为 1 356 MPa, 拉伸强度为 1 682 MPa, 断后伸长率为 11.1%, 断面收缩率为 45%, 断裂韧性为 106 MPa·m^{1/2}。弹体内部填充由砂和石蜡配制的模拟装药, 密度为 1.65 g/cm³, 弹体总质量为 150 g。



图 1 弹体

Fig. 1 Projectile

1.2 靶体设计

钢筋混凝土靶采用直径为 800 mm、厚 1 100 mm 的圆柱形靶。为了减小横向边界效应, 靶板外围采用 3 mm 厚的钢圈加固; 靶板厚度大于侵彻深度估算值, 可视为厚靶。靶板内钢筋直径为 4 mm, 每层钢

筋网格大小为 50 mm×50 mm, 两层钢筋网格间距为 200 mm。混凝土实测单轴抗压强度为 36.3 MPa。图 2 给出了钢筋混凝土靶的配筋图和实物图。

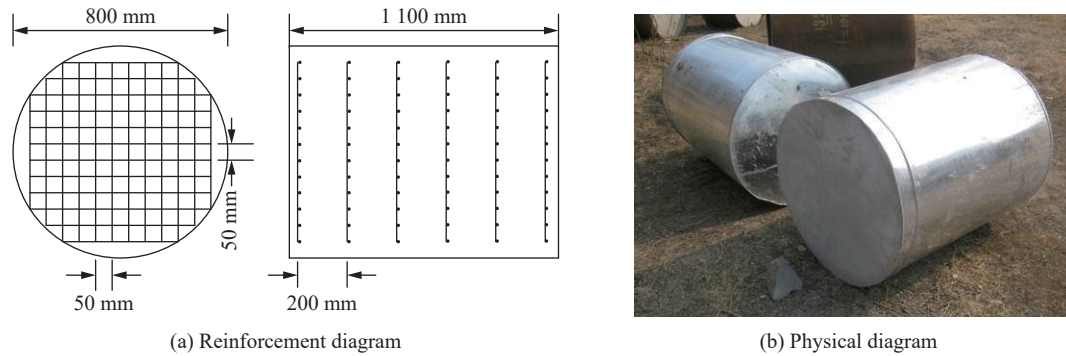


图 2 钢筋混凝土靶

Fig. 2 Reinforced concrete target

1.3 发射与测试

图 3 给出了试验现场布置。试验采用 35 mm 口径高速弹道炮作为发射工具。该炮在次口径发射弹体有效质量为 0.25 kg 时, 初速可达到 1 600 m/s。为防止跳弹, 在炮口与靶板之间布置防护仓, 激光测速靶位于防护仓内, 弹体由弹道炮发射后进入防护仓, 分别通过火炮后效气体过滤装置和激光测速靶, 最后撞击混凝土靶板。

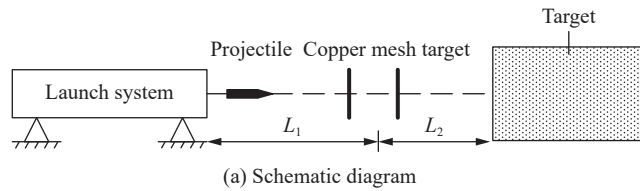


图 3 试验系统

Fig. 3 Test set up

2 试验结果

2.1 试验测量结果

试验共进行了 9 炮次, 速度在 1 030~1 520 m/s 之间, 详细测量了弹体剩余长度和质量、靶体中的侵彻深度和成坑尺寸等试验数据, 表 1 给出了侵彻试验的主要测量结果。

2.2 弹体破坏情况

图 4 为试验后回收的弹体破坏形态。从图中可以看出, 在 1 030~1 463 m/s 速度范围内, 弹体主要表现为不同程度的头部磨蚀, 随着侵彻速度的增加, 弹体头部磨蚀程度加剧; 弹体头部形状随侵彻速度的增加由尖卵形逐渐向半球形转变, 并逐渐出现蘑菇头墩粗现象; 撞击速度超过

表 1 侵彻试验结果

Table 1 Penetration test results

| 工况 | 速度/ (m·s ⁻¹) | 侵深/ mm | 开坑深度/ mm | 剥落区 面积/mm | 剩余弹体 长度/mm | 剩余弹体 质量/g |
|----|-----------------------------|-----------|-------------|--------------|---------------|--------------|
| 1 | 1 030 | 455 | 69 | 230×230 | 96.6 | 130.5 |
| 2 | 1 210 | 595 | 70 | 300×310 | 94.3 | 127.4 |
| 3 | 1 352 | 698 | 73 | 290×280 | 91.7 | 122.4 |
| 4 | 1 390 | 741 | 75 | 300×290 | 89.8 | 126.2 |
| 5 | 1 438 | 674 | 90 | 300×320 | 90.7 | 127.8 |
| 6 | 1 463 | 730 | 70 | 310×330 | 89.7 | 125.4 |
| 7 | 1 480 | 310 | 80 | 350×300 | 0.0 | 0.0 |
| 8 | 1 505 | 270 | 95 | 330×330 | 0.0 | 0.0 |
| 9 | 1 520 | 267 | 92 | 300×330 | 0.0 | 0.0 |

注: 工况 7、8、9 的弹体完全破碎, 可认为此时弹体的有效长度和有效质量均为零。

1438 m/s 以后, 弹体头部的磨蚀显著加剧, 由于侵彻过程中非对称作用力增大, 弹身开始产生塑性变形, 出现轻微弯曲; 撞击速度达到 1480 m/s 后, 弹体结构解体, 仅收集到部分残余弹体碎片。

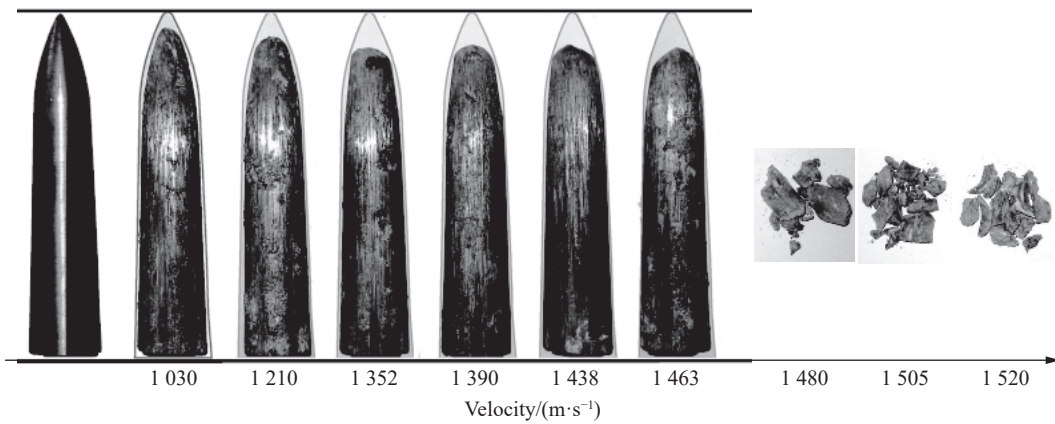


图 4 试验后弹体破坏情况

Fig. 4 Residual projectiles after penetration

2.3 靶体破坏情况

图 5 为靶体的典型破坏形态。从图 5 中可以看出, 钢筋混凝土靶面产生约 1/4~1/3 靶体直径范围的剥落面积, 靶面形成浅碟形漏斗坑; 随着侵彻深度的增加, 开坑区尺寸增大, 开坑深度增加, 在速度增加到 1520 m/s 时, 靶心的钢筋网外露, 如图 5(c) 所示; 靶面布有清晰可见的贯通径向裂纹, 并随着侵彻速度的增加, 靶面裂纹数量增多, 宽度增大。

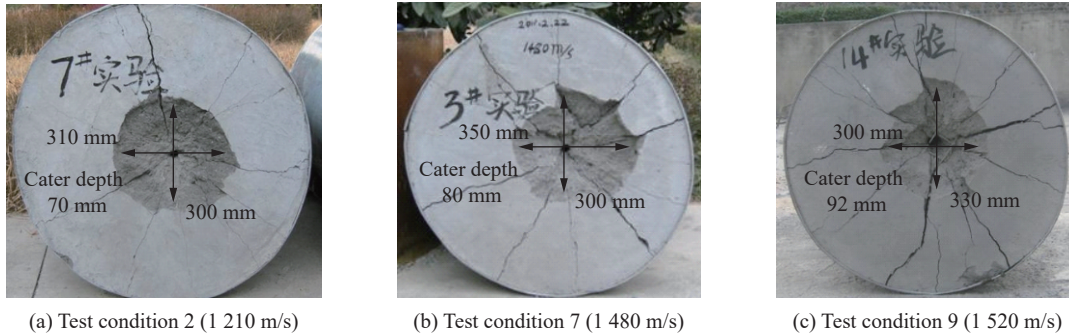


图 5 靶体典型破坏形态

Fig. 5 Damage results of reinforced concrete targets

3 试验结果分析与讨论

3.1 弹体结构响应分析

高速侵彻与中低速侵彻的显著区别之一就是高速侵彻弹体的磨蚀程度更加严重, 弹体头部磨蚀将改变弹体的头形, 进而影响弹体的侵彻性能; 侵蚀过程将显著影响弹道稳定性, 或导致弹体破坏及失效。

图 6 给出了弹体长度损失率随侵彻速度变化的关系。从图 6 中可以看出, 侵彻速度在 1030~1463 m/s 速度范围内, 弹体长度损失率随速度增加而增加近似线性增加; 侵彻速度超过 1480 m/s 后, 由于弹体结构解体破碎, 可认为弹体有效长度为零, 长度损失率达 100%。

相比于弹体长度损失, 研究者更关心弹体高速侵彻过程中的质量损失。Silling 等^[11] 和陈小伟等^[14] 建立了弹体质量侵蚀的经验模型, 认为弹体质量损失量与初始动能存在线性关系, 给出质量损失率的表达式:

$$\delta = \frac{\Delta m}{m_0} = \begin{cases} kv^2/2 & v \leq 1000 \text{ m/s} \\ C = k/2 & v > 1000 \text{ m/s} \end{cases} \quad (1)$$

式中: Δm 为弹体质量损失量, m_0 为弹体初始质量, v 为初始侵彻速度, k 和 C 为常数。

武海军等^[12]则认为弹体的质量损失量 Δm 与初始动量 $m_0 v$ 存在线性关系, 质量损失率的表达式为:

$$\delta = \frac{\Delta m}{m_0} = p_1 v + p_2 \quad (2)$$

式中: p_1 和 p_2 为拟合参数。

由于 Silling 模型^[11, 14]中 1000 m/s 的适用速度上限的确定主观性较强, 缺乏物理基础; 因此, 在本文的 1030~1463 m/s 速度范围内, 仍采用 $\delta = kv^2/2$ 进行拟合。图 7 给出了质量损失率的试验值和模型计算值的对比结果。从图 7 中可以看出, 在弹体仅发生磨蚀的速度范围内, 弹体的质量损失率与侵彻速度近似线性相关, 与武海军等^[12]得到的弹体质量损失量与其初动量近似线性关系的结论更为吻合。

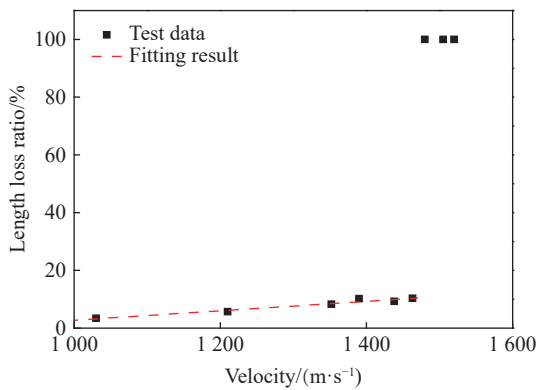


图 6 弹体长度损失率对比

Fig. 6 Comparison of length loss ratio of projectiles

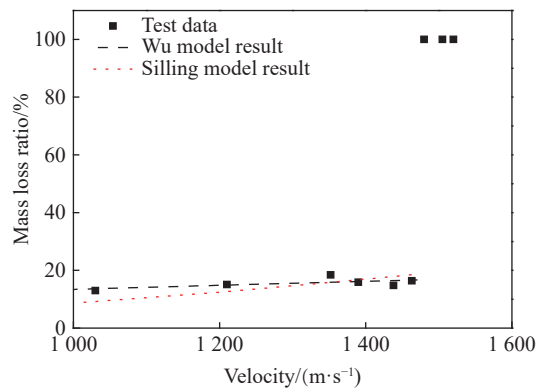


图 7 弹体质量损失率对比

Fig. 7 Comparison of mass loss ratio of projectiles

3.2 侵彻弹坑与弹道分析

图 8 和图 9 分别为无量纲弹坑深度 (弹坑深度 H_1 与弹径 D 之比) 和无量纲弹坑直径 (弹坑直径 D_1 与弹径 D 之比) 随撞击速度的变化规律。从图 8 中可以看出, 无量纲弹坑深度随撞击速度的增加呈非线性增加, 高速侵彻条件下, 成坑深度为 3~5 倍弹径, 大于一般弹速条件下的 2 倍弹径^[1,6]。从图 9 中可以看出, 无量纲弹坑直径随撞击速度增加近似线性增加, 成坑直径为 11~17 倍弹径, 大于 Forrestal 等^[6]在一般弹速条件下得出 2~8 倍弹径的结果。这表明, 高速侵彻条件下的成坑范围大于一般弹速条件下的成坑范围。

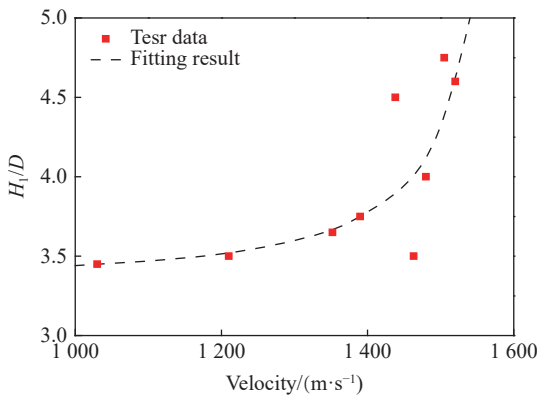


图 8 无量纲弹坑深度(H_1/D)随撞击速度的变化规律

Fig. 8 Variation of dimensionless crater depth (H_1/D) with impact velocity

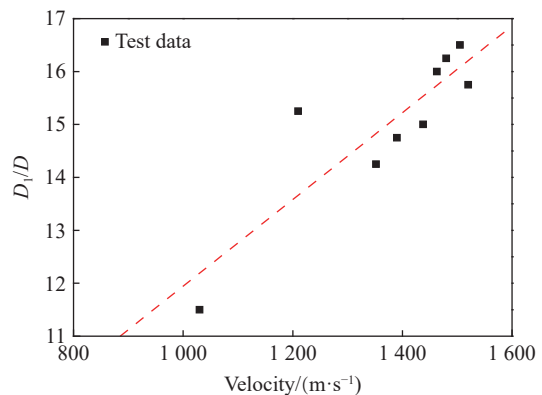


图 9 无量纲弹坑直径(D_1/D)随撞击速度的变化规律

Fig. 9 Variation of dimensionless crater diameter (D_1/D) with impact velocity

3.3 侵彻深度分析

图 10 给出了试验速度范围内弹体在钢筋混凝土靶中侵彻深度随撞击速度的变化规律。从图 10 中可以看出, 随撞击速度的增加, 弹体侵彻深度呈现先近似线性增加后缓慢减小再急剧下降的变化趋势。在撞靶速度为 1050~1390 m/s 的范围内, 侵彻深度近似线性增加, 撞击速度为 1390 m/s 时, 侵彻深度达到最大值 741 mm; 在 1390~1463 m/s 的撞靶速度范围内, 随撞击速度的增加, 侵彻深度开始减小; 撞击速度达 1480 m/s 后, 侵彻深度急剧下降至 310 mm, 相比于最大侵彻深度, 降低幅度达 60%。

在图 10 中的上升区, 弹体侵彻过程中头部发生质量侵蚀, 弹体结构仍保持完整, 侵彻深度随速度的增加而增加; 在下降 I 区, 弹体头部磨损严重, 弹体结构处于不稳定状态, 弹体侵彻能力下降, 最终侵彻深度随速度的增加而减小; 在下降 II 区, 弹体结构完全破碎, 弹体侵彻能力大幅下降, 最终侵彻深度随速度的增加而急剧减小。

3.4 侵彻速度分区

在动能侵彻中, 伴随弹体侵彻速度的增加, 由于弹体变形和侵蚀将出现侵深递减现象, 表明弹体经历着不同的侵彻机理。根据弹体不同的侵彻机理, Chen 等^[7]将速度分为刚性弹侵彻区、半流体侵彻区和流体侵彻区 3 个区; 李杰等^[13]综合考虑了侵彻过程中弹体和靶体的力学状态, 将速度分为刚性弹固体侵彻区、侵蚀弹固体侵彻区、拟流体侵彻区和流体动力侵彻区。但二者的侵彻速度分区均针对实心弹, 未考虑钻地弹的内部结构特性。钻地弹在高速侵彻条件下除发生弹头磨蚀、变形外, 钻地弹内部的薄壁结构会出现结构屈曲失稳等失效现象^[14], 弹体结构失稳后将迅速发展为弹体结构解体破碎, 侵彻过程为破碎体侵彻。在一定速度范围内, 弹体破碎后的侵彻机理不同于实心弹的半流体侵彻和流体侵彻; 且对装药的结构弹而言, 弹体结构破坏意味着弹体侵彻能力的失效。因此, 将弹体破碎后的侵彻区间统称为破碎体侵彻区。根据本文结构弹的试验结果, 可将速度分为刚体侵彻区、准刚体侵彻区、侵蚀体侵彻区和破碎体侵彻区, 如图 11 所示, 其中 H 为侵彻深度, H_{\max} 最大侵彻深度。

在图 11 中, 当撞击速度低于刚性侵彻速度上限 v_g 时, 弹体在侵彻靶板过程中无明显侵蚀钝化, 可视为刚体侵彻。当撞靶速度超过刚体侵彻速度上限 v_g 后, 弹靶作用力增大, 弹体头部产生宏观上较为明显的侵蚀; 由于撞靶速度对侵彻深度的贡献大于头部侵蚀对侵彻深度的消减效应, 与刚体侵彻阶段类似, 该阶段弹体的侵彻深度随撞靶初速的增加仍呈近似线性增加, 因此, 称为准刚体侵彻区。随着侵彻速度的继续增加, 弹体头部材料较大区域处于塑性流动状态, 头部产生明显的侵蚀和墩粗, 撞靶速度越高, 侵蚀与墩粗越严重。此时弹头侵蚀/墩粗对侵彻深度的消减效应大于撞靶速度对侵彻深度的贡献, 随撞靶速度的增加, 侵彻深度开始下降, 称为侵蚀体侵彻区。该阶段在整个速度区间上范围较窄, 弹体侵彻过

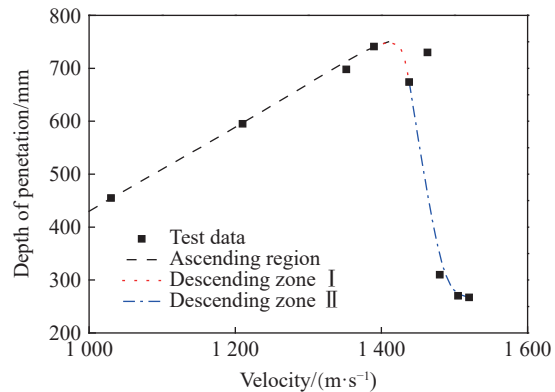


图 10 侵彻深度随撞击速度的变化关系

Fig. 10 Variation of penetration depth with impact velocity

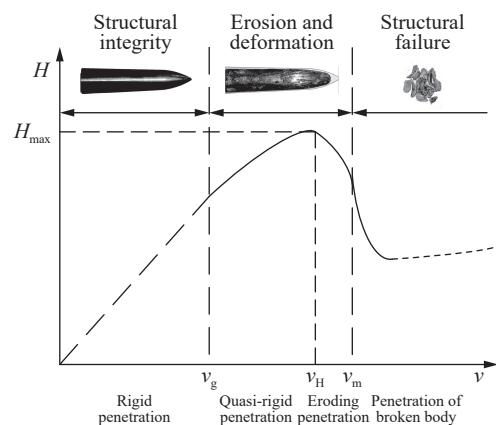


图 11 结构弹的侵彻速度分区

Fig. 11 Partition of penetration speed for structural projectiles

程中能够保持结构的基本完整, 侵彻深度-撞靶初速曲线下下降趋势相对较缓。准刚体侵彻区向半流体侵彻区的转变速度定义为准刚体侵彻速度上限 v_H , 撞击速度在该速度时弹体侵彻深度达最大值 H_{\max} 。当撞靶速度达到结构生存极限速度 v_m 时, 侵彻过载超过弹体结构强度承受能力, 弹体结构发生破碎, 侵彻深度大幅降低, 侵彻深度-撞靶速度曲线在结构生存极限速度 v_m 后下降的趋势更为陡峭。

3.5 讨论

论文主要针对结构弹体开展了高速侵彻钢筋混凝土靶试验, 试验结果既展现了与实心弹体高速侵彻试验结果相似的规律, 也有诸多不同之处。下面从侵彻速度分区、弹体极限速度和弹体结构设计等方面讨论结构弹体高速侵彻钢筋混凝土靶的特点。

(1) 针对结构弹体高速侵彻过程中的破坏特点, 将侵彻速度划分为刚体侵彻区、准刚体侵彻区、侵蚀体侵彻区和破碎体侵彻区(图 11)。其中, 将速度上升区(图 10)细分为刚体侵彻区和准刚体侵彻区, 是由于准刚体侵彻区的侵彻深度显然不能从刚体弹的侵彻公式线性外推得到; 同时, 更重要的是结构弹体往往内部装药, 对弹体的整体变形情况更为敏感, 将速度段细分更有利于钻地弹的结构设计。采用“侵蚀体侵彻区”和“破碎体侵彻区”, 是为了表明结构弹体在侵深递减后的侵彻机理将不同于实心弹体的侵彻机理, 不同主要归因于结构弹体在高速侵彻条件下, 除了会发生的弹体质量侵蚀外, 还会因弹体结构的承载力不足而发生解体破碎。

(2) 刚性侵彻速度上限 v_g 、准刚体侵彻速度上限 v_H 和弹体结构生存极限速度 v_m 的具体大小同弹体材料、弹体结构设计和靶体材料力学性能等因素相关。根据试验结果, 本文设计的 30CrMnSiNi2MoVE 试验弹的刚体侵极限速度 v_g 低于 1 050 m/s, 准刚性侵彻速度区间介于 1 050~1 390 m/s 之间, 在该速度段侵彻深度达到最大值; 弹体的结构生存极限速度 v_m 在 1 463~1 480 m/s 之间。

(3) 弹体的生存极限速度大于准刚体侵彻速度上限, 表明在弹体结构在破碎前的侵蚀体侵彻阶段弹体材料强度仍主导侵彻过程中弹体的结构响应。在 1 400 m/s 速度下, 弹体头部虽然发生大量磨蚀外, 弹体结构基本保持完整, 表明在 1 400 m/s 速度下采用钻地弹打击坚固目标是可行的。同时, 合理进行弹体结构设计和材料选型, 提高弹体结构的承载能力, 可提高弹体的准刚体侵彻速度上限和生存极限速度, 从而提高弹体的侵彻能力。

4 结 论

本文利用 35 mm 口径弹道炮, 开展了结构弹体在 1 050~1 520 m/s 速度范围内侵彻钢筋混凝土靶的试验, 对结构弹体侵彻钢筋混凝土靶进行了机理性研究, 得到如下结论:

(1) 在试验速度范围内, 侵彻深度呈现先随撞击速度近似线性增大后减小再急剧下降的规律; 速度在 1 030~1 463 m/s 的速度范围内, 弹体头部磨蚀, 并随侵彻速度增加磨蚀程度加剧; 速度大于 1 480 m/s 后, 弹体严重破碎, 侵彻深度迅速下降;

(2) 根据结构弹体高速侵彻过程中的破坏特点, 将速度分为刚体侵彻区、准刚体侵彻区、侵蚀体侵彻区和破碎体侵彻区;

(3) 30CrMnSiNi2MoVE 试验弹的准刚体侵彻速度上限 v_H 介于 1 390~1 438 m/s 之间, 弹体结构生存极限速度 v_m 在 1 463~1 480 m/s 之间, 可为钻地弹结构设计提供参考。

参考文献:

- [1] 任辉启, 穆朝民, 刘瑞朝, 等. 精确制导武器侵彻效应与工程防护 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
REN H Q, MU C M, LIU R C, et al. Penetration effects of precision guided weapons and engineering protection [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [2] 杨秀敏, 邓国强. 常规钻地武器破坏效应的研究现状和发展 [J]. 后勤工程学院学报, 2016, 32(5): 1-9. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7843.2016.05.001.
YANG X M, DENG G Q. The research status and development of damage effect of conventional earth penetration weapon [J].

- Journal of Logistical Engineering University*, 2016, 32(5): 1–9. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7843.2016.05.001.
- [3] 赵晓宁. 高速弹体对混凝土侵彻效应研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [4] 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).
- [5] LUNDEGREN R G. High-velocity penetrators: SAN D94-2724C [R]. Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratories, 1994.
- [6] 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.
- [7] CHEN X W, LI Q M. Transition from nondeformable projectile penetration to semihydrodynamic penetration [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(1): 123–127. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:1(123).
- [8] 何翔, 徐翔云, 孙桂娟, 等. 弹体高速侵彻混凝土的效应实验 [J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(1): 1–6. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)01-0001-06.
- HE X, XU X Y, SUN G J, et al. Experimental investigation on projectiles' high-velocity penetration into concrete targets [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(1): 1–6. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)01-0001-06.
- [9] 梁斌, 陈小伟, 姬永强, 等. 先进钻地弹概念弹的次口径高速深侵彻实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(1): 1–9. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)01-0001-09.
- LIANG B, CHEN X W, JI Y Q, et al. Experimental study on deep penetration of reduced-scale advanced earth penetrating weapon [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(1): 1–9. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)01-0001-09.
- [10] 杨建超, 左新建, 何翔, 等. 弹体高速侵彻混凝土质量侵蚀实验研究 [J]. *实验力学*, 2012, 27(1): 122–127.
- YANG J C, ZUO X J, HE X, et al. Experimental study of projectile mass loss in high velocity penetration of concrete target [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2012, 27(1): 122–127.
- [11] SILLING S A, FORRESTAL M J. Mass loss abrasion from abrasion on ogive-nose steel projectiles that penetrate concrete targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(11): 1814–1820. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.10.008.
- [12] 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, 33(12): 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, 33(12): 48–55.
- [13] 李杰, 程怡豪, 徐天涵, 等. 岩石类介质侵彻效应的理论研究进展 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(8): 081101. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0286.
- LI J, CHENG Y H, XU T H, et al. Review on theoretical research of penetration effects into rock-like material [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(8): 081101. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0286.
- [14] 陈小伟, 张方举, 徐艾民, 等. 细长薄壁弹体的屈曲和靶体等效分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2007, 27(4): 296–305. DOI: 10.11883/1001-1455(2007)04-0296-10.
- CHEN X W, ZHANG F J, XU A M, et al. Buckling analysis of earth penetrating warhead and equivalent conditions of targets [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(4): 296–305. DOI: 10.11883/1001-1455(2007)04-0296-10.

(责任编辑 王小飞)