

两种材料结构弹体高速侵彻钢筋混凝土靶实验研究*

王可慧, 孟龙, 李明, 邹慧辉, 吴海军, 戴湘晖, 段建, 周刚

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 设计了两种不同材料的结构弹, 利用 203 mm 平衡炮为发射平台, 开展了 11 kg 级弹体在 1400 m/s 速度段侵彻钢筋混凝土靶的实验研究。基于试验结果, 对侵彻弹体进行了宏微观结构表征, 探究了不同材料弹体在高速侵彻下的侵蚀机理, 分析了壳体材料对弹体侵彻效应的影响。结果表明: 在实验速度段, 弹体材料主导弹体的侵蚀变形, 材料强度越高, 抗冲击压缩性能越强, 弹体头部的侵蚀越小; 材料的抗剪和耐磨性越好, 弹身的磨损越少。高速侵彻条件下, 锥形结构弹体的质量损失主要集中在弹身部分。弹体头部的侵蚀和墩粗会一定程度上降低弹体的侵彻深度, 弹体头部侵蚀程度越小, 侵彻深度越高, 其中, DT1900 实验弹的极限侵彻深度可达 9 倍弹长。

关键词: 结构弹体; 高速侵彻; 钢筋混凝土; 侵蚀; 侵彻深度

中图分类号: TJ012.4

国标学科代码: XXXXX

文献标识码: A

Experimental study on high-speed penetration of reinforced concrete targets by two materials structural projectiles

WANG Kehui, MENG Long, LI Ming, ZOU Huihui, WU Haijun, DAI Xianghui,
DUAN Jian, ZHOU Gang

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xian 710024, Shanxi, China)

Abstract: Two kinds of structural projectiles of different materials were designed in this paper, and an experimental study of 11kg projectiles penetrating the reinforced concrete target at 1400m/s was carried out by a 203mm Davis gun. Based on the experimental results, the structural response, penetration ability and related engineering issues of the projectile are discussed. The results show that when the reinforced concrete target is penetrated at a velocity of 1400 m/s, the heads of projectiles made from two different materials experienced erosion and developed a mushrooming effect. This was caused by high temperatures resulting from friction between the projectile and the concrete during penetration, which significantly softened the projectile's surface. Furthermore, the contact pressure between the two exceeded the yield strength of the projectile's surface, causing the shell material to enter a state of plastic flow, ultimately leading to the erosion and mushrooming of the projectile head. Additionally, the surface material of the shell was stripped from the projectile due to the cutting action of the hard aggregates in the concrete, resulting in severe abrasion of the projectile body. When comparing the structural responses of projectiles made from different materials, it was evident that material properties influenced their behavior. Compared to 30CrMnSiNi2MoVE, DT1900—known for its higher strength, hardness, and better resistance to impact compression—showed less erosion at the projectile head. However, its inferior shear resistance and wear resistance led to more severe abrasion on the projectile body. The mass loss patterns under high-speed penetration for conical structure projectiles differed from those of solid long-rod

*收稿日期: 2024-07-01; 修回日期: 2025-02-07;

基金项目: 国家自然科学基金 (11772269、11402213);

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

通信作者: 周刚 (1964—), 男, 博士, 研究员. E-mail: springaround@163.com.

projectiles, with mass loss primarily concentrated in the projectile body. The conical flared tail design, while suppressing ballistic deflection, increased the contact area between the projectile body and the target, enhancing the abrasive and cutting actions of aggregates and steel. Moreover, under high-speed penetration conditions, the erosion and mushrooming of the projectile head could reduce the penetration depth to some extent; the less erosion at the head, the greater the penetration depth. In experiments, the maximum penetration depth of DT1900 projectiles could reach up to nine times the length of the projectile.

Keywords: structural projectile; high-speed penetration; reinforced concrete; eroding; penetration depth

钢筋混凝土材料由于其良好的力学性能被广泛应用于各类军事建筑与防御工事中（如指挥所、机库、油库等），这些具有重要战略价值的目标一直是作战打击及工程防护的研究重点^[1-6]。为了对地面加固及地下深埋目标进行有效的毁伤打击，各国都在开展高速钻地弹的相关研究。

目前，国内外学者针对弹体侵彻混凝土靶开展了大量的实验研究工作^[7-11]。Forrestal等^[12,13]对尖卵形弹体开展了较为系统的侵彻实验，撞靶速度为277~1225 m/s，同时基于空腔膨胀模型推导出侵彻深的半经验公式，该经验公式被广泛应用。武海军^[14]等对五种不同材料的卵型头部实心弹体开展了500~1500 m/s速度段的素混凝土靶侵彻实验，分析了弹体头部侵蚀的原因，发现弹体的质量损失与初始动量间存在于弹体材料强度相关的线性关系。何翔^[15]等对素混凝土靶开展了较为系统的侵彻实验研究，对撞靶速度为800~1470 m/s区间内实心弹的侵蚀/变形情况和侵彻能力进行了总结和分析。戴湘晖^[16]等设计并开展了卵型头部结构弹体在820~1195 m/s速度段的钢筋混凝土侵彻实验，对结构弹体的侵彻/贯穿深度以及弹体的变形进行了详细的讨论。Feng等^[17]对30CrMnSiNi2A高强钢弹体进行了素混凝土厚靶侵彻试验，打击速度为841m/s~1872 m/s。探究了卵型头部及双卵型头部对弹体侵彻效应的影响。郭磊^[18]等在800~1800 m/s范围内针对卵型头部实心弹体开展了较为系统的研究，发现在相同侵彻条件下，提高弹体材料的动态屈服强度可减小弹体头部的侵蚀，并且提高其侵彻深度。在结构弹体方面，梁斌^[19]等针对带锥度结构弹体进行了1200 m/s速度下的高速侵彻试验，验证了锥形侵彻弹体的结构强度和高侵彻能力，并对1400~1700 m/s速度区间其弹体的侵彻深度进行了预测。Zhao等^[20]基于弹腔动态膨胀理论，提出了一种计算动能穿甲弹侵彻深度的修正模型，并通过不同的实验数据对模型进行了验证。

综上所述，目前弹体侵彻实验研究集中于素混凝土靶，对于钢筋混凝土靶的高速侵彻实验研究相对较少，同时，高速侵彻条件下的相关实验由于受到弹体材料性能及实验条件的限制，其侵彻速度一般不超过1300 m/s。此外，实验测试弹多为卵型头部圆柱形实心弹体，针对较为复杂的结构弹体开展的相关实验较少。因此，为探究新型高强钢材料在高速侵彻武器领域的应用，验证新型结构弹体的侵彻能力，本文开展了两种材料大尺寸结构弹体高速侵彻钢筋混凝土靶实验，分析结构弹体高速侵彻条件下的结构响应及侵彻能力，剖析弹体的侵蚀变形响应机制，为钻地弹的材料设计及结构优化提供相关理论及试验依据。

1 实验概况

1.1 弹体设计

设计并加工了两种不同材料的实验弹，如图1所示，弹体材料分别为30CrMnSiNi2MoVE高强度钢和DT1900高强度钢。实验弹头部为尖卵形，弹身为锥形变壁厚扩尾设计，锥形角度为3°，弹体尾部设置有6个花瓣形均匀刻槽。实验弹长度为453 mm，头部弧形曲径比（CRH）为4.5，最大弹径为90 mm，最小无量纲厚度（弹体壁厚与弹径之比）为0.18。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，装药后实验弹质量约为11 kg。

弹体材料的力学性能参数通过检测随炉热处理试件获得。实验前，将3组标准试件分别绑在弹体的不同位置，随实验弹体一起进行热处理，试件的检测结果可反映弹体真实的力学性能^[16]。表1展

示了两种弹体材料热处理后的力学性能，其中， $\sigma_{0.2}$ 为屈服强度， σ_b 为拉伸强度， δ 为断后伸长率， ψ 为断面收缩率， K_{IC} 为断裂韧性。可以看到，两种材料的断裂韧性相差较小，均为 $110 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 左右，但 DT1900 的强度比 30CrMnSiNi2MoVE 更高，其屈服强度和拉伸强度分别达到了 1790 MPa 和 2000 MPa。



图 1 实验弹

Fig.1 Experimental projectile

表 1 热处理后弹体材料的力学性能

Table 1 Mechanical properties of projectile material after heat treatment

材料	序号	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ /%	ψ /%	K_{IC} / (MPa·m ^{1/2})	洛氏硬度 (HRC)
30CrMnSiNi2MoVE	1	1326	1656	12.8	45	110	48.6
	2	1356	1680	10.9	45	107	48.5
	3	1390	1713	10.5	43	101	48.8
DT1900	1	1770	1960	14.0	64.5	118	52.5
	2	1790	1970	14.0	69.0	110	51.6
	3	1770	2000	14.0	65.5	103	52.2

1.2 靶板设计

实验靶板为钢筋混凝土靶，设计强度为 30 MPa。靶板内钢筋直径为 6 mm，每层钢筋网格大小为 $150 \text{ mm}\times 150 \text{ mm}$ ，两层钢筋网格间距为 150 mm。其中，1#靶为方形靶，厚度为 3.3 m；2#靶和 3#靶为圆柱形靶，厚度为 5.5 m（3.5 m 厚圆柱形靶板和 2 m 厚挡靶叠加）。此外，为减小横向边界效应，圆柱形靶板外围采用 3 mm 厚的钢圈进行加固。以 3.5 m 厚圆柱形钢筋混凝土靶为例，图 2 展示了靶板配筋图及实物图。



图 2 圆柱形钢筋混凝土靶

Fig.2 Cylindrical reinforced concrete target

1.3 发射与测试

实验系统由发射装置、测速装置、靶板及弹体回收装置组成，实验现场布局如图 3 所示。平衡炮、铜丝网靶及靶板中心基本处于同一水平线；靶板放置于回收舱中，防止意外跳弹带来的安全问题；靶板后设置由沙袋构筑的弹体回收装置，避免回收过程中弹体受到二次损伤从而影响实验结果；弹体发射后依次撞击铜丝网靶和钢筋混凝土靶板，计时器记录通过各铜丝网靶的时间，通过网靶间距及时间差计算实验弹的撞靶速度。

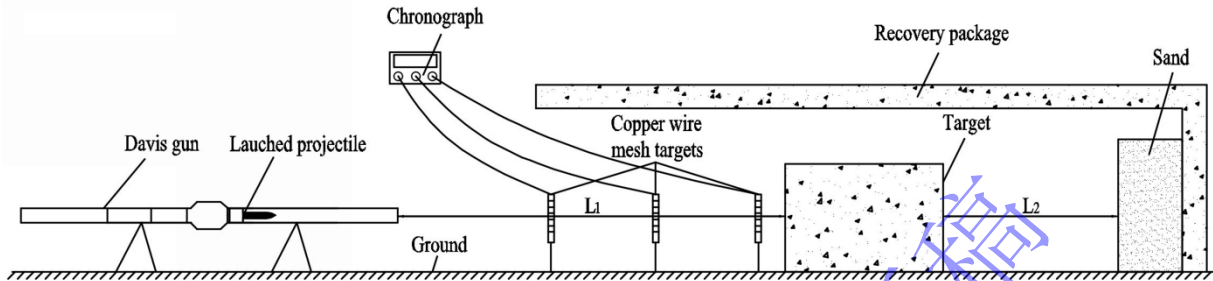


图 3 实验现场布置示意图

Fig.3 Layout of projectile penetration experiment

实验弹采用 203 mm 口径平衡炮次口径发射，发射装置如图 4 所示。平衡炮炮管内径为 203 mm，炮管长度为 8 m，最大可承受膛压为 300 MPa。由于实验弹质量较大，根据平衡炮的发射能力需要，为减轻发射质量，提高发射速度，采用高强尼龙作为弹托材料。同时，考虑到底座在发射过程中需承受火药气体推力，采用高强钢作为底座材料，并通过热处理使其强度达到 1700 MPa 以上。装配后的发射弹体如图 5 所示。



图 4 203mm 口径平衡炮
Fig.4 203mm Davis gun

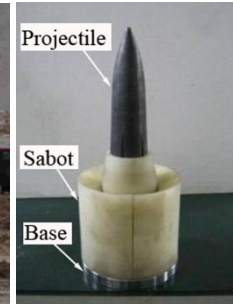


图 5 发射弹体
Fig.5 Launching projectile

2 实验结果

课题组前期利用 30 mm 弹道炮开展了大量小尺寸结构弹体高速侵彻混凝土靶实验，结果表明^[21]，相关结构弹体在 1400 m/s 速度段侵彻深度达到极限，该速度段为弹体侵彻效应的转折点，其机理及效应研究对高速钻地弹的工程设计具有实际意义，因此，本文针对该速度段进行了大尺寸结构弹体侵靶实验。

表 2 实验结果

Table 2 Test results

弹体 编号	弹体质量 m/kg	靶板强度 f_c/MPa	撞靶速度 $V_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	侵彻深度 H/m	剩余弹体尺寸/mm		剩余弹体质量/kg
					长度	直径	
1#*	11.27	32.5	1418	3.6	415.85	87.03	10.18
2#	11.30	30.7	1433	3.8	432.16	86.04	10.11

3#	11.40	30.7	1407	4.2	433.07	86.04	10.29
----	-------	------	------	-----	--------	-------	-------

注：1#实验弹体材料为 30CrMnSiNi2MoVE，其余为 DT1900。

实验共进行了 3 炮次，弹体撞靶速度分别为 1418 m/s、1433 m/s 和 1407 m/s。详细测量了弹体的侵彻深度、剩余长度、剩余直径、剩余质量等实验数据，如表 2 所示。其中，1#实验弹的弹体材料为 30CrMnSiNi2MoVE，实验弹穿透 3.3 m 厚钢筋混凝土方靶后在沙袋中侵彻 2 m；2#和 3#实验弹的弹体材料为 DT1900，弹体穿透 3.5 m 厚圆柱形钢筋混凝土靶后分别在挡靶中侵彻 0.3 m 和 0.7 m。

依据空腔膨胀理论^[12,13]，在低速条件下，相同弹体以相同速度侵彻两种不同靶材，其侵深比为：

$$\frac{\bar{x}_1}{\bar{x}_2} = \frac{A_2 Y_2}{A_1 Y_1} \quad (1)$$

其中， x 为侵彻深度， Y 为靶体抗压强度， A 为靶体材料参数，其数值可通过式 (2) 计算得到。

$$A = (1 - \lambda / 3) \left(\frac{2}{\alpha \lambda} \varepsilon^{-\alpha \lambda} - \frac{1}{\lambda} \right) \quad (2)$$

其中， $\lambda = \tan \varphi$, $\alpha = 6 / (3 + 2\lambda)$, $\varepsilon = \sqrt[3]{\frac{Y(3 - \lambda)}{2E}}$ ， E 为杨氏模量， φ 为摩擦角。

表 3 给出了本文采用沙和混凝土的各项材料参数。

表 3 靶体材料参数

Table 3 Material parameter of target

靶体材料	E/GPa	$\varphi/^\circ$	Y/MPa	A
沙	0.75	3	7	3.68
混凝土	30	5	30	5.74

因此，低速侵彻下，沙的侵彻深度与混凝土侵彻深度的比约为 6.42，1#实验弹穿透 3.3 m 厚钢筋混凝土靶后，其剩余侵彻能力可由 2 m 厚的沙袋折算为 0.3 m 厚的 C30 混凝土。

图 6 展示了撞靶速度为 1433 m/s 时，靶板的破坏情况。可以看到，靶板正面在弹着点处形成漏斗状开坑，并沿靶面向四周辐射出大量径向裂纹，部分裂纹延伸至靶板侧面。此外，靶板正面和背面弹洞基本处于靶面的中心位置，可见弹体在圆柱形混凝土靶中未发生明显的弹道偏转。

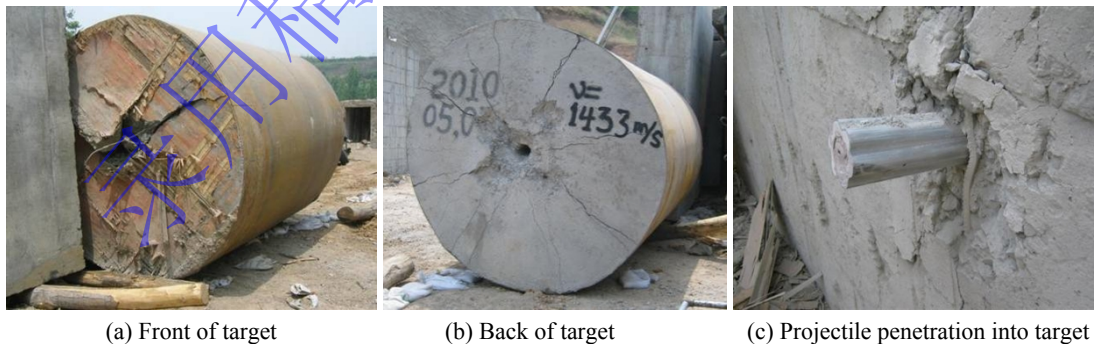


图 6 靶板破坏情况 ($V_0=1433$ m/s)

Fig.6 Damage of target ($V_0=1433$ m/s)

实验完成后将弹体进行回收，如图 7 所示。通过与实验前弹体进行对比，发现两种材料的结构弹体在 1400 m/s 撞靶速度下均表现出头部侵蚀/墩粗和侧壁磨蚀的破坏特征。

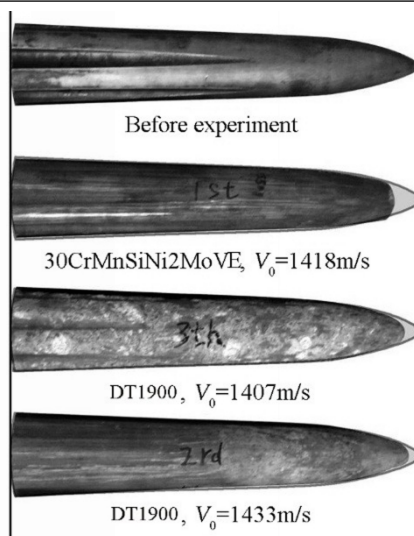


图7 回收弹体
Fig.7 Recovered projectiles



图8 侵蚀区的蘑菇头墩粗
Fig.8 Mushroom capitate erosion deformation

3 实验结果分析

3.1 弹体结构侵蚀变形

3.1.1 宏观描述

已有研究表明, 侵彻速度低于 800 m/s 时, 对于混凝土类目标的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^[1]。在刚体侵彻区, 弹体表面无明显侵蚀变形; 而在半流体侵彻区, 弹靶间的强烈相互作用使弹体发生明显的侵蚀现象, 并且随着侵彻速度的提高, 弹体头部变形和侵蚀情况也更加严重。

由实验结果可知, 实验弹体在 1400 m/s 速度段侵彻钢筋混凝土后, 弹体头部产生一定程度的侵蚀, 弹体长度减小, 且侵蚀区有明显的蘑菇头墩粗现象, 如图 8 所示。分析认为, 弹体头部侵蚀以及蘑菇头墩粗变形的产生主要由两方面原因造成。一方面, 高速侵彻的弹体与混凝土靶剧烈摩擦, 产生的热量传入弹体, 使得弹体表面熔化并在骨料的切削作用下剥离弹体; 另一方面, 弹体撞靶后处于高温高压的热力学环境中, 材料发生温升软化效应, 弹体头部区域所受压力超过材料的动态屈服强度, 进入塑性流动状态, 最终形成蘑菇头墩粗变形。

撞靶后实验弹从外观看弹身结构基本完好, 弹身表面沿轴向有明显的磨蚀痕迹。经测量, 实验弹体侧壁均发生一定厚度的磨蚀, 弹身外径较实验前有所减小, 这是由于弹体与钢筋混凝土靶的相对运动过程中, 弹壁受到了钢筋及粗骨料的剪力与摩擦所致。

此外, 由于 3#实验弹完全侵入挡靶中, 高温使弹体表面融化的金属材料与弹道周围粉碎的混凝土粉末混合并粘接在一起, 在弹体表面形成混凝土包裹层。实验后去除包裹层, 发现弹体表面的金属光泽已完全消失, 同时弹体表面出现局部融化和磨损。

对比 3 发实验弹的头部侵蚀程度可以发现, 弹体材料不同, 弹体的侵蚀变形情况也有所不同。DT1900 材料由于强度更高, 实验弹头部的侵蚀程度较 30CrMnSiNi2MoVE 实验弹更小, 蘑菇头墩粗变形较小。

3.1.2 微观分析

采用扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 对 1#实验弹和 2#实验弹的弹体表面和截面进行微观形貌分析, 选取弹尖、弹头、弹身及弹尾处进行对比, 选点示意图如图 9 所示。

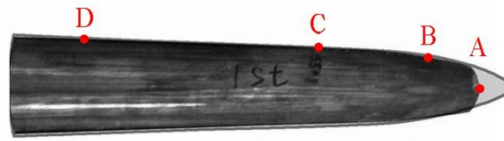


图9 扫描电镜选点示意图

Fig.9 Point position of SEM

(1) 弹体表面分析

图10为弹体表面微观形貌照片。在弹尖(Point A)和弹头(Point B)区域,DT1900和30CrMnSiNi2MoVE弹体均存在明显的熔融和犁沟现象。说明弹体侵彻过程中,由于弹体变形和弹靶间摩擦引起的高温,加剧了弹体表面的软化,二者间的接触压力超过弹体表面的屈服强度,造成弹体的热熔化,产生明显的熔融变形,同时在硬质颗粒的切削作用下,弹尖区域出现显著的犁切。弹体头部的熔融和犁沟现象与3.1.1节中对于弹体头部侵蚀和蘑菇头墩粗现象形成原因的分析相吻合。此外,DT1900弹尖区域的犁沟数量和深度明显多于30CrMnSiNi2Mo弹体,且DT1900弹体表面的犁沟较为粗大杂乱,未发生明显的塑性流动。可见DT1900材料在高温下仍具有良好的抗塑性变形能力,在高速侵彻过程中主要承受骨料颗粒的犁切。

在弹身(Point C)和弹尾(Point D)区域,两种材料弹体均呈现大量密集犁沟,判断为混凝土切削痕迹,且局部位置存在少量熔融态石英砂颗粒。由于混凝土靶板的石英砂硬度高于弹体表面,在高速侵彻过程中,弹身承受高速摩擦和塑性变形小于弹体头部,导致其接触区域的温升低于弹体头部。但在高温作用下弹身的强度和硬度仍有所降低,使得硬质颗粒更加容易犁切,最终在弹身形成密集的犁沟。

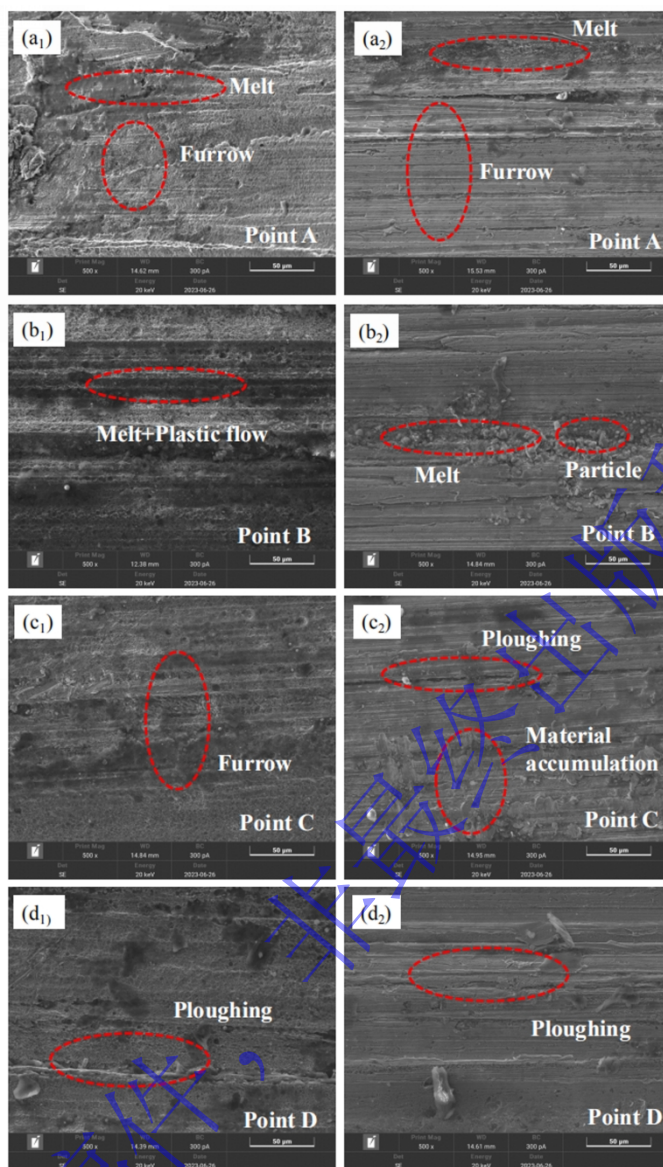
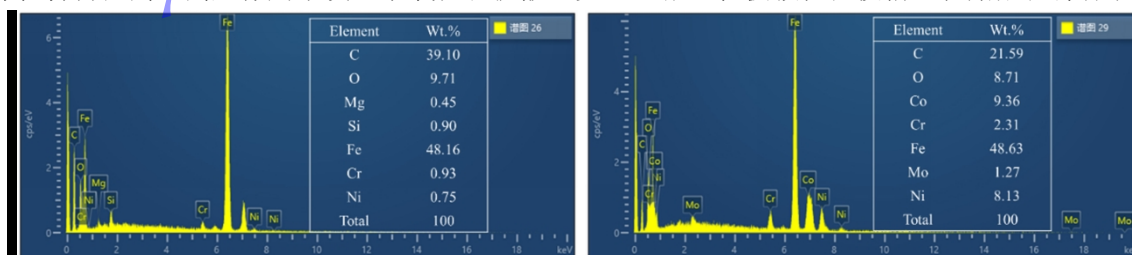


图 10 1#弹体 (a₁, b₁, c₁, d₁) 和 2#弹体 (a₂, b₂, c₂, d₂) 表面微观形貌照片

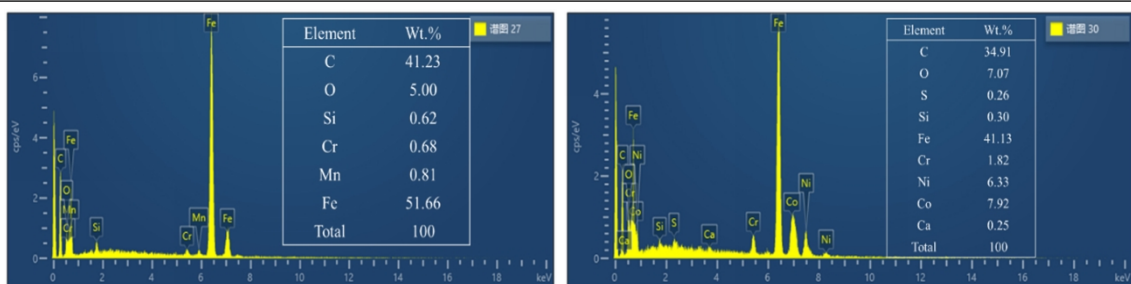
Fig.10 The SEM of projectile 1# (a₁, b₁, c₁, d₁) and projectile 2# (a₂, b₂, c₂, d₂)

图 11 为 1#实验弹和 2#实验弹在测点 B 和测点 C 区域 X 射线能谱 (energy dispersive X-ray spectrometer, EDS) 结果。除了检测到 DT1900 和 30CrMnSiNi2MoVE 的元素种类, 还包含 Mg、Ca 等微量元素, 同时 C、Si 元素 (混凝土中的典型元素) 含量明显增高, 而 Fe 元素含量明显降低, 说明弹靶材料在高温高压作用下发生了氧化和扩散, 少量混凝土靶板颗粒在侵彻过程熔融在弹体表面。



(a) Point B of projectile 1#

(b) Point B of projectile 2#



(c) Point C of projectile 1#

(d) Point C of projectile 2#

图 11 不同测点处 DT1900 和 30CrMnSiNi2MoVE 弹体的 EDS 谱图

Fig.11 The EDS of projectile 1# and projectile 2# at different point

(2) 弹体截面分析

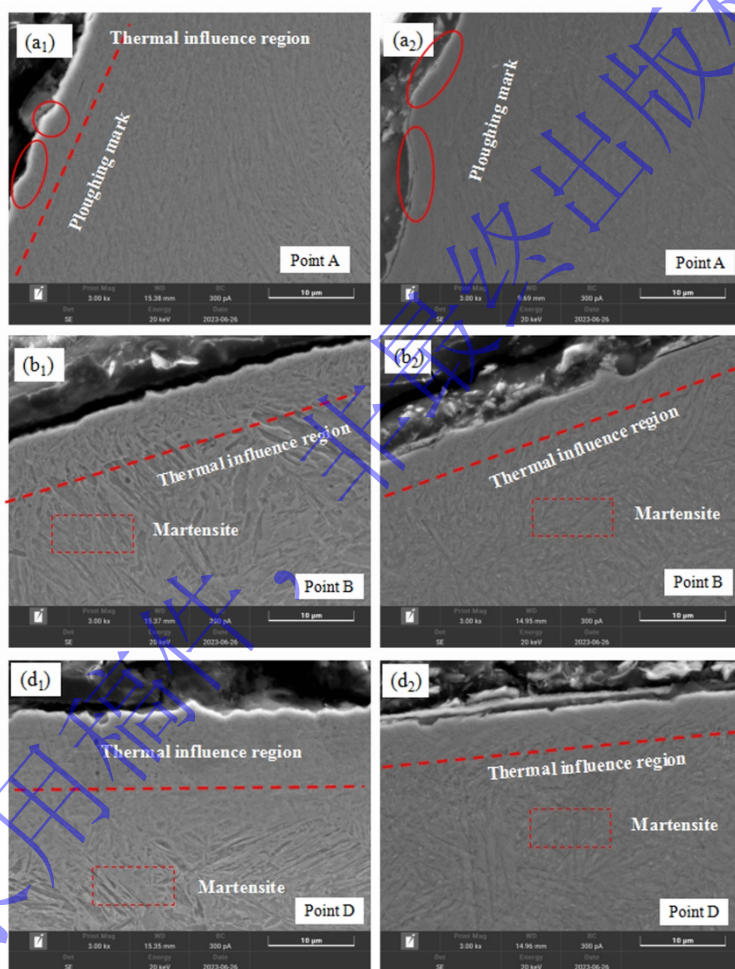


图 12 1#弹体 (a₁, b₁, d₁) 和 2#弹体 (a₂, b₂, d₂) 截面轮廓 SEM 照片

Fig.12 The section profile SEM of projectile 1# (a₁, b₁, d₁) and projectile 2# (a₂, b₂, d₂)

图 12 为两发弹体的截面显微组织形貌。高速侵彻过程中，弹体与靶相互作用产生的热量和冲击压力作用于弹体表面。由于受到热影响程度和冲击压力的不同，弹体不同区域呈现出不同的形貌。其中，在弹体头部外边界呈锯齿状，说明在犁切和碰撞作用下，弹头区域承受长时间的侵蚀与挤压作用，最终在弹头表面形成了明显的锯齿状脱落。对比发现，30CrMnSiNi2MoVE 弹头的脱落现象比 DT1900 更加严重。

在弹头至弹尾区域，两种材料弹体表面均形成一层微米级厚度的热影响层。在硝酸酒精溶液的腐蚀作用下，表层显现出具有一定取向的致密变形层，这是由于侵彻过程中弹体表层金属受到挤压力的作用，产生强烈的塑性变形，使晶格细化。但这种致密变形层在高温作用下，极易发生回火软化，从而导致表面硬度降低。对比发现，DT1900 弹体表面形成的热影响区的厚度小于 30CrMnSiNi2MoVE 弹体。另一方面，两发实验弹的弹头至弹尾区域基体均呈现板条状马氏体，可见高速侵彻作用下高强度钢弹身基体并未受到热量的影响。

3.2 外形尺寸变化及质量损失

由 3.1.1 节可知，高速侵彻过程中弹体的侵蚀变形由头部侵蚀及弹身磨蚀两部分组成，因此弹体总质量损失等于头部侵蚀质量与弹身磨蚀质量之和。根据实验弹体的侵蚀长度 ΔL ，可大致估算头部侵蚀区体积 ΔV_t 和头部侵蚀质量 Δm_t ，弹体总质量损失 Δm 与头部侵蚀质量 Δm_t 的差值即为弹身磨蚀质量 Δm_b 。将实验弹的几何尺寸变化及质量损失进行归一化处理，汇总于表 4。其中， L 、 D 分别为实验前弹体长度和最大直径， ΔD 为弹体最大直径变化量， $\Delta L/L$ 为弹长侵蚀率； $\Delta D/D$ 为弹径磨蚀率； $\Delta m_t/m$ 、 $\Delta m_b/m$ 、 $\Delta m/m$ 为弹头质量侵蚀率、弹身质量磨蚀率和总质量损失率。

表 4 实验弹的几何尺寸变化及质量损失

Table 4 The variation of the projectile size and mass

弹体材料	V_0 (m/s)	$\Delta L/L$ (%)	$\Delta D/D$ (%)	$\Delta m_t/m$ (%)	$\Delta m_b/m$ (%)	$\Delta m/m$ (%)
30CrMnSiNi2MoVE	1418	8.2	3.3	2.13	7.56	9.69
DT1900	1407	4.4	4.4	0.31	9.43	9.74
	1433	4.6	4.4	0.32	10.20	10.52

对比表 4 中数据可知，在 1400 m/s 撞靶初速段，不同的弹体材料由于其抗冲击压缩性能、抗剪性能、耐磨性能及热力学性能不同，弹体侵彻后的尺寸变化及质量损失也不同。

DT1900 材料由于强度和硬度较高，冲击压缩破坏抗力强，其弹长侵蚀率不超过 5%，较 30CrMnSiNi2MoVE 实验弹明显降低。在弹径的缩减程度上，DT1900 实验弹较 30CrMnSiNi2MoVE 实验弹略有增加，这种差异主要是由材料的抗剪和耐磨性能不同导致（DT1900 冲击压缩破坏抗力强，但抗剪和耐磨性能较差）。

在弹体的质量损失方面，相关学者对卵型头部长杆弹高速侵彻后的剩余质量进行了较为系统的研究，发现弹体质量损失随撞靶速度的增加而增大，且质量损失主要发生在弹体头部^[1,14]。图 13 显示了实验后各弹体的弹头质量侵蚀率和弹身质量磨蚀率对比。可以发现，本文设计锥形结构弹体的质量损失规律与卵型头部长杆弹表现出明显不同。由图 13 可知，3 发实验弹的弹头质量侵蚀率分别为 2.13%、0.31% 和 0.32%，仅占总质量损失的 21.98%、3.18% 和 3.04%，头部侵蚀质量占比较小，而弹身磨蚀质量占比较大。分析可知，实验弹的锥形扩尾设计增大了弹身与靶体的接触面，使得弹身在侵彻过程中持续受到骨料和钢筋等物质的磨蚀和削减，弹体表面金属不断剥落并顺着弹尾刻槽排出，因而弹体的质量损失主要发生在弹身部分。

此外，对比不同材料实验弹的弹头质量侵蚀率可知，DT1900 实验弹的弹头质量损失较小，约为 30CrMnSiNi2MoVE 实验弹的 1/7，弹体头部结构较为完整。综上，结合不同材料弹体的结构侵蚀变形、外形尺寸变化和质量损失情况可知，在实验撞靶速度段，弹体材料在弹体的侵蚀变形中占主导因素。

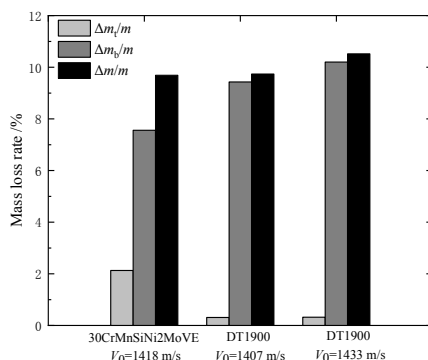


图 13 质量损失率对比

Fig.13 Comparison of mass loss rate

3.3 侵彻能力分析

弹体对钢筋混凝土的侵彻深度是评价弹体毁伤能力的重要指标。常规钻地弹受弹体材料选型及结构设计所限，其生存速度通常不超过 900 m/s，侵彻深度一般不超过 4 倍弹长。本文在进行实验弹设计时，考虑到弹体在高速冲击过载下的结构生存，在弹体材料及结构设计上进行了优化，有效提高了弹体的生存极限速度。

表 5 列出了不同材料实验弹在 1400 m/s 速度段的无量纲侵彻深度 H/L (L 为实验弹长度)。分析实验数据可知，高速撞靶条件下，11 kg 级结构弹体贯穿钢筋混凝土靶板的厚度超过 9 倍弹长，侵彻能力较常规钻地弹提高一倍；其次，对比两种材料实验弹的侵蚀变形及侵彻深度可以发现，弹体头部的侵蚀和墩粗会一定程度上降低弹体的侵彻深度，速度相当的情况下，弹体头部侵蚀程度越小，侵彻深度越高（DT1900 实验弹的头部侵蚀程度较 30CrMnSiNi2MoVE 实验弹小，侵彻深度有所增加）。

表 5 实验弹的无量纲侵彻深度

Table 5 Dimensionless penetration depth of experimental projectile

弹体材料	V_0 (m · s ⁻¹)	f_c /MPa	靶板厚度	H/L
30CrMnSiNi2MoVE	1418	32.5		7.95
DT1900	1407	30.7	有限靶	9.27
	1433	30.7		8.39

已有研究表明，对于结构弹体，侵彻深度随侵彻速度的增加呈现出先增后减的侵彻规律，具体可分为刚体侵彻区、准刚体侵彻区、侵蚀体侵彻区和破碎体侵彻区四个阶段^[21]。其中，准刚体侵彻区和侵蚀体侵彻区的临界速度 V_H 对应弹体的最大侵彻深度，由文献[21]可知，撞靶速度为 1400 m/s 左右时，30CrMnSiNi2MoVE 实验弹达到最大侵彻深度。结合本文实验数据可知，DT1900 实验弹在相同速度段的侵彻深度较 30CrMnSiNi2MoVE 实验弹提高了 16.6%，其侵彻能力明显提高；同时，当撞靶速度由 1407 m/s 提升至 1433 m/s 后，其无量纲侵彻深度由 9.27 下降至 8.39，由此可判断 DT1900 实验弹的临界速度 V_H 同样为 1400 m/s 左右，且 1433 m/s 已处于侵蚀体侵彻区，随着撞靶速度继续增加，弹体的侵彻深度将逐渐降低。

国内外许多学者在大量实验的基础上，分析并建立了钢筋混凝土靶的侵彻深度经验公式，如 Petry 公式、别列赞公式、CEA-EDF 公式、UKAEA(Barr)公式、Young 公式、总参工程兵科研三所公式、BRL 公式等。结合本文实验工况，选择 Young 公式、总参工程兵科研三所公式和 BRL 公式^[22-23]与实验结果进行对比，如图 14 所示。对比可知，三种经验公式计算结果与实验结果间均存在一定误

差，但 Young 公式计算结果与实验结果间误差相对较小，且均小于 5%。因此，在 1400 m/s 撞靶速度段，可使用 Young 公式对本文设计结构弹体的侵彻深度进行预测。

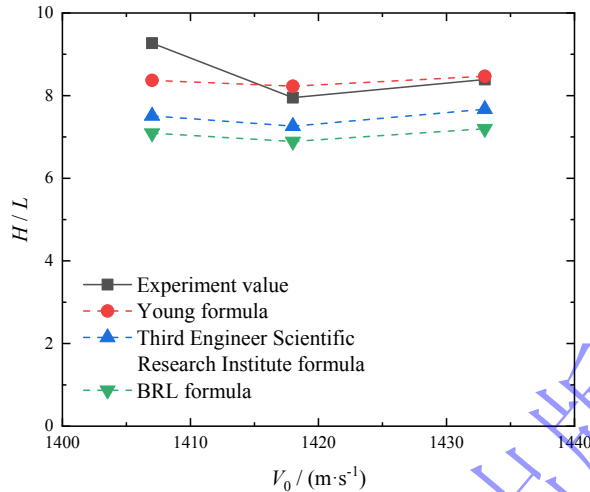


图 14 实验结果与经验公式对比

Fig.14 Comparison of experimental value and empirical formula

4 讨论

本文设计了两种不同材料的高速侵彻结构弹，实验结果表明，与常规实心弹体相比，结构弹体在高速侵彻条件下的侵蚀变形和侵彻能力有较大区别。下面基于研究结果，从工程应用出发，对高速钻地弹的可行性、弹体材料选型以及结构设计需求等相关问题进行初步探讨。

(1) 高速条件下，弹体的侵彻深度较常规钻地弹可提高一倍，体现了高速钻地弹的强侵彻能力。实验结果表明：在 1400 m/s 速度下，实验弹头部出现侵蚀和质量损失，弹身除部分磨蚀外无可见变形，整体结构保持完整。其中，DT1900 实验弹头部侵蚀程度很小，不足以对弹整体结构带来任何威胁。因此，在 1400m/s 速度段，对于常规钢筋混凝土深层目标，钻地弹打击模式是可行的。

(2) 材料选型对钻地弹设计至关重要。由实验结果可知，两种不同性能的材料对应了不同程度的弹体侵蚀变形，表明在实验速度段材料强度仍主导弹体结构的侵蚀变形。与 30CrMnSiNi2MoVE 相比，DT1900 由于具有更高的强度和硬度，结构侵蚀变形程度较小，更适合作为高速钻地弹的弹体材料。

(3) 合理进行钻地弹结构设计，加强弹体的结构强度，可提升钻地弹的侵彻能力。高速条件下，弹体头部会发生明显侵蚀，是导致弹体结构破坏的主要因素，另外，由于头部侵蚀的不对称会使得弹道偏转加剧，造成弹尾结构破坏^[21,24]。因此，在进行高速钻地弹结构设计时，需充分考虑弹头和尾端的设计强度。值得注意的是，课题组前期针对锥形结构弹体开展了弹道偏转实验研究，发现锥形扩尾结构设计能够有效抑制弹体侵彻过程中的弹道偏转^[25]，同时，锥形扩尾会增加弹身部分的磨蚀，整体质量损失较大，后续将针对性开展相关理论及实验研究，确定最有利于提高弹体的侵彻深度的扩尾角度和刻槽深度。

5 结论

本文采用 203 mm 平衡炮对两种不同材料结构弹体开展了 1400 m/s 速度段的钢筋混凝土靶侵彻实验,得到了相关终点弹道实验数据,对弹体的**侵蚀变形情况**及侵彻能力进行了详细分析,得出以下结论:

1、在 1400 m/s 速度段,弹体材料对弹体的**侵蚀变形**占主导作用,材料性能不同,弹体的**侵蚀变形**不同。相较于 30CrMnSiNi2MoVE, DT1900 由于强度和硬度更高,抗冲击压缩性能更强,弹体头部的侵蚀更小,但由于其抗剪和耐磨性能较差,导致弹身的磨蚀情况更为严重。

2、锥形结构弹体在高速侵彻下的质量损失规律与实心长杆弹不同,质量损失主要集中在弹身部分。**锥形扩尾设计增大了弹身与靶体的接触面,使骨料和钢筋等物质的磨蚀和削减作用更加明显。**

3、高速侵彻条件下,弹体的头部侵蚀和墩粗会一定程度上降低弹体的侵彻深度,弹体头部侵蚀程度越小,侵彻深度越高。其中,DT1900 实验弹的极限侵彻深度可达 9 倍弹长。

参考文献

- [1] 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.
- [2] DONG H, LIU Z H, WU H J, et al. Study on penetration characteristics of high-speed elliptical cross-sectional projectiles into concrete [J]. International Journal of Impact Engineering, 2019(132): 103311. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.05.025.
- [3] ZHANG X Y, WU H J, ZHANG S, et al. Projectile penetration of reinforced concrete considering the effect of steel reinforcement: Experimental study and theoretical analysis [J]. International Journal of Impact Engineering, 2020(144): 103653. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103653.
- [4] WANG J, WU H J, DONG H, et al. Flow field analysis of long rod hypervelocity penetration into semi-infinite concrete target [J]. Mechanics of Materials, 2023(179): 104564. DOI: 10.1016/j.mechmat.2023.104564.
- [5] GUO L, HE Y, ZHANG X F, et al. Thermal-mechanical analysis on the mass loss of high-speed projectiles penetrating concrete targets [J]. European Journal of Mechanics - A/Solids, 2017(65): 159-177. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2017.03.011.
- [6] GUO L, HE Y, ZHANG X F, et al. Study mass loss at microscopic scale for a projectile penetration into concrete[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014(72): 17-25. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.05.001.
- [7] 周忠彬,马田,赵永刚,等.不同材料弹体超声速侵彻钢筋混凝土靶的结构破坏对比实验[J].高压物理学报,2020,34(2): 025101. DOI: 10.11858/gywlxb.20190841.
ZHOU Z B, MA T, ZHAO Y G, et al. Comparative experiment on structural damage of supersonic projectiles with different metal materials penetrating into reinforced concrete targets [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(2): 025101. DOI: 10.11858/gywlxb.20190841.
- [8] DENG Y J, CHEN X W, SONG W J, et al. Dynamic cavity-expansion penetration model of elastic-cracked-crushed response for reinforced-concrete targets [J]. International Journal of Impact Engineering, 2021(157): 103981. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.103981.
- [9] LU Y Y, ZHANG Q M, XUE Y J, et al. Hypervelocity penetration of concrete targets with long-rod steel projectiles: experimental and theoretical analysis [J]. International Journal of Impact Engineering, 2021(148): 103742. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103742.
- [10] KAMAL I M, ELTEHEWY E M. Projectile penetration of reinforced concrete blocks: Test and analysis [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2012, 60(1): 31-37. DOI: 10.1016/j.tafmec.2012.06.005.

- [11] MU Z C, ZHANG W, WANG W, et al. Revising the penetration behavior of concrete-like and metal-like materials against the rigid projectile impact [J]. *Mechanics of Materials*, 2020(142): 103274. DOI: 10.1016/j.mechmat.2019.103274.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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(1): 48–55. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2012.01.009.
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(1): 48–55. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2012.01.009.
- [15] 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 target [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(1): 1–6. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)01-0001-06.
- [16] 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/gywlx.20180672.
DAI X H, ZHOU G, SHEN Z K, 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/gywlx.20180672.
- [17] FENG J, SONG M L, SUN W W, et al. Thick plain concrete targets subjected to high speed penetration of 30CrMnSiNi2A steel projectiles: Tests and analyses [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018(122): 305-317. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.09.005.
- [18] 郭磊, 何勇, 潘绪超, 等. 高速侵彻弹体表层侵蚀效应理论计算 [J]. *振动与冲击*, 2018, 35(15): 51-58. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.15.007.
GUO L, HE Y, PAN X C, et al. Theoretical calculation for surface abrasion effect of projectiles penetrating in to concrete targets with a high speed [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 35(15): 51-58. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.15.007.
- [19] 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.
- [20] ZHAO J, CHEN X W, JIN F N, et al. Depth of penetration of high-speed penetrator with including the effect of mass abrasion [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(9): 971-979. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.03.008.
- [21] 王可慧, 周刚, 李明, 等. 弹体高速侵彻钢筋混凝土靶试验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(11): 1–8. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)01-0001-06.
WANG K H, ZHOU G, LI M, et al. Experimental research on the mechanism of a high-velocity projectile penetrating into a reinforced concrete target [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(11): 1–8. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)01-0001-06.
- [22] 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(01): 182-208. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.01.020.
WU H J, ZHANG S, HUANG F L. Research progress in penetration/perforation into reinforced concrete targets [J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(07): 182-208. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.01.020.

- [23] GWALTNEY R C. Missile generation and protection in light-water-cooled power reactor plants: ORNL-NSIC-22 [R]. Oak Ridge, USA: Oak Ridge National Laboratory, 1968.
- [24] 邓佳杰, 张先锋, 刘闯等. 头部非对称刻槽弹体侵入混凝土目标性能研究 [J]. 兵工学报, 2018, 39(07): 1249–1258. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.07.001.
DENG J J, ZHANG X F, LIU C, et al. Research on penetration of asymmetrically grooved nose projectile into concrete target [J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(07): 1249–1258. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.07.001.
- [25] 王可慧, 段建, 李明, 等. 降低终点弹道偏转效应弹体结构设计 [J]. 弹箭与制导学报, 2015, 35(03): 50-52+98. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2015.03.014.
WANG K H, DUAN J, LI M, et al. Penetrator design to reduce trajectory deflexion effect. [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2015, 35(03): 50-52+98. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2015.03.014.

录用稿件，
非最终出版稿