

# 高速自锐侵彻战斗部引信动力学 响应与磁场特征研究

邵志豪<sup>1, 2</sup>, 梁灏鸿<sup>1, 2</sup>, 梁斌辉<sup>1, 2</sup>, 李彩芳<sup>1, 2</sup>, 张珂<sup>1, 2</sup>

(1. 机电动态控制重点实验室, 西安 710065; 2. 西安机电信息技术研究所, 西安 710065)

**摘要:** 在当今军事技术的快速发展中, 高速自锐侵彻战斗部在毁伤深埋高价值硬目标与多层建筑时, 具有巨大的战略价值; 文章通过建立动力学响应和磁场分析模型, 深入研究自锐战斗部侵彻 6 m C40 混凝土靶板和多层钢筋混凝土靶板时引信的力学与磁场响应特性, 为提高侵彻自锐战斗部毁伤精度提供支撑; 在引信动力学响应的研究中, 战斗部侵彻混凝土靶板历程, 侵彻后的靶板呈现出漏斗形状, 随着战斗部侵彻的深入, 应力波的稀疏效应逐渐减弱, 战斗部的速度线性衰减, 并在最终进入稳定侵彻模式的过程中, 速度下降约 52%; 由于应力波在战斗部内部的传递与叠加导致引信位置检测的过载信号较为震荡; 在引信磁场分析的研究中, 地磁倾角为 90°、地磁偏角为 0° (即地磁场垂直于靶板中心线) 时, X、Y 轴磁通密度幅值小、信号无规律、穿层特征不明显; Z 轴磁通密度幅值大、信号规则、穿层特征明显; 地磁场强度越大, 钢筋半径越大, 地磁倾角越大, 侵彻靶板层信号特征越明显。而 Z 轴磁通密度不受地磁偏角影响。

**关键词:** 高速侵彻; 自锐战斗部; 侵彻引信; 动力学响应; 磁场特性

## Research on Fuze Dynamic Response and Magnetic Field Features for High Speed Self-Sharpening Penetration Warhead

SHAO Zhihao<sup>1, 2</sup>, LIANG Haohong<sup>1, 2</sup>, LIANG Jianhui<sup>1, 2</sup>, LI Caifang<sup>1, 2</sup>, ZHANG Ke<sup>1, 2</sup>

(1. Science and Technology on Electromechanical Dynamic Control Laboratory, Xi'an 710065, China;

2. Xi'an Institute of Electromechanical Information Technology, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** With the rapid development of current military technology, it is of enormous strategic value for high-speed self-piercing warheads in destroying deeply buried high-value hard targets and multi-layer buildings. This article presents dynamic response and magnetic field analysis models to deeply study the mechanical and magnetic field response characteristics of the fuses, with self-piercing warheads penetrating 6mC40 concrete targets and multi-layer reinforced concrete targets, which provides a support for improving the damage accuracy of self piercing warheads. In the dynamic response of fuses, during the process of the warhead penetrating a concrete target, the eroded target presents a funnel shape. As the warhead penetrates deeper, the sparse effect of stress waves gradually weakens, and the velocity of the warhead linearly decays. In the final process of entering a stable penetration mode, the velocity decreases by about 52%. Due to the transmission and superposition of stress waves within the warhead, it causes the oscillation of the overload signal detected by the fuse position. In the fuse magnetic field analysis, with a geomagnetic inclination angle of is 90° and geomagnetic declination angle of 0° (i. e. the geomagnetic field is perpendicular to the centerline of the target plate), the amplitude of the X and Y axis magnetic flux density is small, the signal is irregular, and the interlayer characteristics are not obvious; The Z-axis magnetic flux density has the characteristics of large amplitude, regular signal, and obvious interlayer. The stronger the geomagnetic field, the larger the radius of the steel bar, the greater the geomagnetic inclination angle, and the more obvious the signal characteristics of penetrating the target layer will be. And the Z-axis magnetic flux density is not affected by the geomagnetic declination angle.

**Keywords:** high speed penetration; self-sharpening warhead; penetration fuze; dynamic response; magnetic field feature

## 0 引言

随着硬目标攻防双方的对抗加剧, 高价值硬目标的防护能力越来越强。重点打击的高价值目标从地面转移到地下。随着侵彻弹药的毁伤威力的不断提高, 地下基地、机库等重要的军事建筑物防御也不断地加固, 在深层高价值目标的上面往往覆盖着高强度的钢筋混凝土加强防护, 或

者在花岗岩的山体里建造重要的地下基地。

为了穿透复杂、高强度的高价值硬目标, 大幅度提高动能弹的侵彻速度、提升弹药的侵彻能力已成为提高武器系统打击能力的必然手段<sup>[1-8]</sup>。受侵彻目标结构各向异性、材料非均匀性和侵彻工况复杂性综合影响, 侵彻过程弹体多物理场响应是复杂的力学、电磁学、磁学、热力学等动

收稿日期: 2023-08-11; 修回日期: 2023-12-08。

作者简介: 邵志豪(1981-), 男, 硕士, 副研究员。

引用格式: 邵志豪, 梁灏鸿, 梁斌辉, 等. 高速自锐侵彻战斗部引信动力学响应与磁场特征研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(4): 135-142.

态变化过程,对超高速侵彻过程研究缺乏,使得侵彻引信准确识别层数和侵彻深度误判严重。侵彻速度的大幅度提高,对引信的结构强度提出了更高的要求,同时也导致多重结构中的应力波往复传递、叠加、震荡,使得引信无法准确辨识目标层,而且战斗部易发生明显的质量损失情况,引起侵彻战斗部头部钝化甚至结构破坏失效,严重影响战斗部的侵彻能力<sup>[9-16]</sup>。当弹体以超过 700 m/s 速度侵彻多层目标时,通过传感器采集的过载信号往往会受到大量振荡信号的影响。特别是,震荡信号在传感器输出中引起干扰,将目标层信息完全淹没。中、低速下原来清晰的目标层过载变得难以分辨,引信无法准确地辨识目标层,计层精度下降。

研究人员发现在高速侵彻过程中,贫铀合金和钨基合金弹体表现出自锐化现象。这一现象的根本原因在于材料本身具有较强的剪切失稳性和变形局部化敏感性。在侵彻的极端环境中,这些材料更容易形成绝热剪切带和裂纹,导致弹体头部不断削尖,呈现出自锐化的特征<sup>[17]</sup>。该材料的自锐特性可以显著降低弹体冲击接触面,较尖锐的弹头形状能够有效减小侵彻阻力,使弹体更为有效地穿透目标,增强其侵彻性能。

文献 [18] 中研究人员发现钨纤维复合材料在侵彻试验过程中呈现出绝热剪切自锐行为。进一步突显了复合材料在高速冲击环境下的独特性质。对钨纤维金属玻璃复合材料的研究,文献 [19] 系统总结了这些材料在压缩剪切变形和断裂特性方面的进展。文献 [20] 中对钨纤维增强金属玻璃复合材料分段弹体的研究提供了深入的实证分析,为了解这种复合材料的弹体行为提供了重要的科学数据。这有助于未来设计更优越的复合材料弹体。文献 [21] 通过试验与仿真验证弹体头部自锐化现象可以保持较小的侵彻阻力,从而提高弹体的侵彻能力,在军事应用中显现出更高的效能。

在高速侵彻钢筋混凝土目标的复杂环境中,目标内部的钢筋受到地磁磁化,自锐战斗部引信位置的磁场环境也会发生变化。使用磁性探测传感器可以有效检测动态侵彻过程中的磁场变化信号,进而通过磁场特征判断自锐战斗部侵入的目标信息。基于地磁场的磁异信号检测技术可以有效识别且不易受到外界干扰信号的影响,该优势促进了磁异信号检测技术在军事应用领域的深入研究和广泛应用。

国外研究者们通过多年的实践和理论探索,在地磁探测领域取得了显著的成果。这些成果既包括对地磁探测技术的基本原理的深刻理解,也涉及到创新性的方法研究。文献 [22] 提出的新型磁异信号检测方法标志着地磁探测技术的新里程碑;文献 [23] 提出了一种铁磁性目标的检测新方法,该方法注重对磁信号能量的归一化处理,旨在通过精准的能量分析来提高目标检测的准确性;文献 [24] 中的研究者使用熵滤波器为探测铁磁目标提供了一种新的手段。

当前,我国在自锐侵彻战斗部高速自锐侵彻钢筋混凝土中的磁异信号检测领域正处于初步探索的阶段。这一新兴领域的研究目前主要集中在理论探讨和试验验证两方面,力图揭示高速自锐侵彻过程中磁场变化的规律。文献 [25]

中研究者通过建立弱磁物体在地磁场中磁化作用下的感应磁场矢量场模型,为后续研究提供了有力的理论支持。该研究注重全张量磁场梯度探测法和目标物体定位算法的研究,尤其在矢量探测和磁场梯度技术的应用上取得了一系列前沿突破。这种方法的提出为磁异信号检测技术的研究提供了新的视角。文献 [27] 中研究者针对在复杂战场环境下激光、红外和无线电引信探测识别精度不高的问题,提出了基于动态阈值的目标检测和模糊推理的磁探测引信目标识别算法。我国各大高校和科研机构积极参与磁异信号检测技术的研究,从不同侧面深入研究了磁场变化与目标检测的关系。

战斗部在高速自锐侵彻过程中引信动力学响应和磁场特征会发生显著变化,可为高速自锐侵彻战斗部引信设计提供参考。目前,对高速自锐侵彻战斗部尚缺少引信动力学响应与磁场响应特征研究。本文基于高速自锐战斗部侵彻坚固厚靶和多层混凝土靶板典型硬目标场景,分别构建了包含自锐战斗部、引信、装药、引战连接、混凝土靶标等的动力学响应和磁场响应分析模型,本文旨在解决传统方法中弹体结构振荡引起的引信部位加速度过载信号难以清晰辨认的问题。磁异信号探测技术的引入,可以有效提高信号的清晰度和可辨识度。通过在引信部位安装磁传感器,充分利用地磁场信号的变化,实现对侵彻过程中钢筋混凝土靶板周围环境的精准探测。为侵彻目标识别的实现提供了重要的数据基础。与传统方法相比,融合了磁信号检测的方法不受战斗部长径比和层间距变化的限制。该方法具有较好的鲁棒性和稳定性,研究的高速自锐侵彻状态下引信的动力学响应和磁场特征,可以为高速自锐侵彻战斗部引信起爆控制策略提供设计参考和理论支撑。

## 1 数值计算方法

本文选用 600 kg 大型自锐战斗部在高速动态侵彻 6 m 混凝土靶模型,旨在揭示自锐战斗部在冲击下对坚固目标引信位置力学响应特性。600 kg 战斗部侵彻 6 m C40 混凝土厚靶的三维模型如图 1 所示。有限元单元网格划分如图 2 所示。对于 6 m 混凝土靶板,靶板抗压强度 C40,靶标厚度 6 m,靶板幅面 2 m×2 m。考虑到模型求解效率以及侵彻过程中模型的对称性,建立 1/2 模型进行仿真计算,在不影响仿真精度的前提下对战斗部进行几何简化清理,删除引信及战斗部模型的倒角及不影响应力传递的结构。为了提高有限元仿真精度,采用六面体单元剖分方法进行有限元划分,六面体网格可以在求解过程中,更准确地表达应力梯度变化较大位置的形变。对靶板的侵彻部位进行有限元单元加密保证侵彻数值仿真的正确性。对单元进行光顺处理以提升整体单元质量,保持战斗部的不同部件连接处单元密度一致以减小数据传递插值误差。

侵彻动力学模型中为兼顾计算精度与计算效率,在应力变化平缓且对整体模型影响不大的部位布置较为稀疏的网格,在战斗部侵彻钢筋混凝土目标的穿孔部位布置密集

的网格, 通过设计划分钢筋混凝土迎弹面, 靶板边缘网格单元尺寸与穿孔位置单元尺寸比为 8 : 1, 对比常规网格划分方式, 单元数量下降约 2~3 倍。



图 1 600 kg 战斗部侵彻 6 m C40 混凝土厚靶板模型

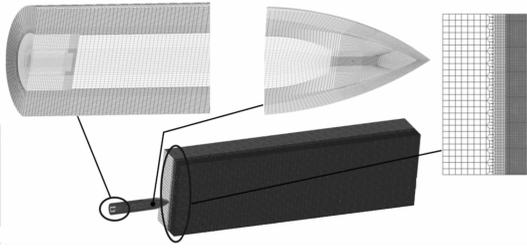


图 2 有限元单元划分示意图



图 3 钢筋混凝土靶板网格细化

战斗部外壳材料为 G50 高强度钢。战斗部头部材料为钨基合金。引战连接结构和引信为 TC4 钛合金材料。表 1 给出战斗部各组件材料模型参数。混凝土靶板选用 HJC 材料模型, 采用 kg-m-s 单位制的材料模型参数和失效模型参数如表 2 和表 3 所示。

表 1 战斗部组件材料模型参数

战斗部组件	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	杨氏模量 $E / \text{GPa}$	屈服强度 $\sigma_s / \text{MPa}$	泊松比 $\mu$
战斗部外壳	7 830	209	1 448	0.300
战斗部头部	17 630	324	600	0.303
炸药	1 500	5	50	0.330
引战连接结构	4 650	110	1 006	0.300
侵彻引信	4 650	110	1 006	0.300

表 2 混凝土靶板材料模型参数

MID	RO	G	A	B	C	N	FC
901	2440	$1.486 \times 10^{10}$	0.79	1.60	0.007	0.61	$4.8 \times 10^7$
T	EPS0	EFMIN	SFMAX	PC	UC	PL	UL
$4 \times 10^6$	$1 \times 10^{-6}$	0.01	7	$1.6 \times 10^7$	0.001	$8 \times 10^8$	0.1
D1	D2	K1	K2	K3	FS		
0.04	1	$8.5 \times 10^{10}$	$-1.71 \times 10^{11}$	$2.08 \times 10^{11}$	0.8		

靶板边缘设置固定约束, 约束 X/Y/Z 三方向的移动与转动自由度, 综合考虑靶板边界效应影响与文件求解效率,

在不影响求解精度前提下, 合理控制靶板靶面尺寸, 使用 NON\_REFLECTING 命令施加无反射边界条件模拟无限大空间靶板。

表 3 混凝土靶板材料失效模型参数

MID	EXCL					
901	1 234					
PFALL	SIGP1	SIGVM	EPSP1	EPSSH	SIGTH	IMPULSE
1 234	1 234	1 234	0.2	1 234	1 234	1 234

战斗部外壳与引战连接结构、引战连接结构和引信之间采用固连方式连接。战斗部外壳与炸药、炸药与引战连接结构、炸药与引信之间采用面一面连接方式, 可以承受压力, 承受拉力时面一面分离。战斗部与混凝土靶板之间采用面一面侵蚀接触模型, 战斗部侵彻混凝土靶板时会删除达到失效标准的混凝土单元, 战斗部与删除单元后的新表面形成面一面侵蚀接触。采用缩减积分算法进行显示动力学积分运算以加快计算速度, 进行沙漏控制减小沙漏能输出。大型战斗部以 1 700 m/s 速度高速侵彻混凝土厚靶, 设置输出应力、应变以及单元节点等数据结果。

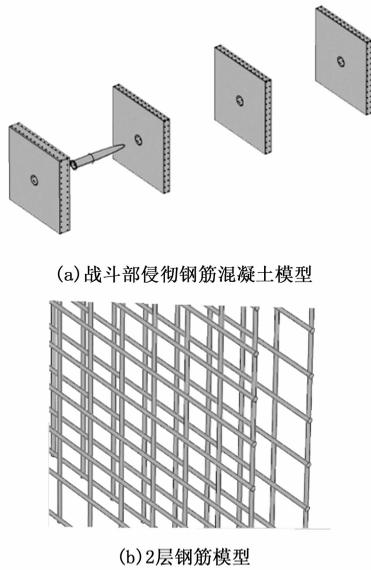
研究中采用了 COMSOL 软件进行建模仿真, 建立战斗部动态侵彻多层钢筋混凝土靶板模型, 进行侵彻战斗部侵彻目标的磁特征数值仿真, 对磁信号特征分析, 分析战斗部与引信周围磁场特性。磁场模型中自锐战斗部引信位置可实时探测侵彻穿靶过程中的磁异信号, 忽略战斗部侵彻钢筋混凝土过程中的力学响应, 仅考虑磁场特性。

多层建筑物目标的主要结构材料包括: C40 混凝土; HPB300 钢筋, 强度设计值  $f_y = 270 \text{ N/mm}^2$ 。基于现实多层建筑物的钢筋混凝土材料参数, 开展战斗部侵彻 4 层钢筋混凝土靶板磁场仿真, 建立靶板几何模型, 如图 4 所示。靶板面积为  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ , 首层靶厚度为 0.3 m, 其它层靶板厚度为 0.18 m, 目标内层钢筋, 钢筋直径为 16 mm, 横竖交织组成网络边长为 150 mm 的钢筋网格, 首层靶板布置两层钢筋, 钢筋距离靶板表面 0.05 m, 两层钢筋网结构间隔 0.2 m, 其它层靶板钢筋距离靶板表面 0.03 m, 两层钢筋网结构间隔 0.12 m。

钢筋混凝土由水泥、沙和不同规格比例的石粒组成, 上述材质不存在磁性, 相对磁导率为 1, 钢筋相对磁导率为 700。空间分析域材料为空气, 模拟靶板周围环境<sup>[26]</sup>。设定的域中地磁场强度为  $5.5 \times 10^{-5} \text{ T}$ 。磁倾角为 1.570 8 rad, 磁偏角为 0 rad, 由于弹体为高强度钢材, 因此设置弹体相对磁导率为 50。

在钢筋混凝土靶板结构中, 钢筋网属于高导磁率的材料, 会很大削弱流经靶板内部的磁场大小。磁场在弱导磁材料的空气环境与高导磁材料两个不同介质间传输, 由于传输介质界面的不连续性, 使得麦克斯韦电磁方程组的微分关系不再适用, 但依然满足积分关系<sup>[26]</sup>:

$$\int_s D \cdot dS = \int_v D \cdot dV \quad (1)$$



(a) 战斗部侵彻钢筋混凝土模型

(b) 2层钢筋模型

图 4 混凝土靶板磁场仿真模型

$$\oint_s E \cdot dl = \int_v \frac{\partial B}{\partial t} dS \quad (2)$$

$$\oint_s B \cdot dS = 0 \quad (3)$$

$$\oint_s H \cdot dl = \int_v \frac{\partial D}{\partial t} dS + \oint_s J \cdot dS \quad (4)$$

## 2 自锐侵彻引信动力学响应特性

自锐战斗部侵彻 6 m C40 混凝土靶板对应打击地下深埋坚固目标作战场景。随着侵彻战斗部速度的不断提高，在高速侵彻中，弹体明显经历磨蚀。磨蚀作用于弹体表面，引发弹体性能变化。侵彻可能导致弹体结构性破坏，甚至失效。在超高速侵彻条件下，弹体表面经历高温高压很短时间内发生了磨蚀。高速磨蚀同时伴生材料融化、相变、金属屑氧化以及与靶板粒子间化学反应。

在高速侵彻过程中，弹体与靶板接触界面上所产生的冲击压力不可忽视。这一冲击压力远远超越了材料的强度极限，从而引起了弹体和靶板的破碎。图 5 展示了弹体高速侵彻厚混凝土靶板的结果。仿真结果验证了动态空腔膨胀理论和冲塞机理在弹体高速侵彻中的适用性。随着弹体不断深入，侵彻过程逐渐过渡到稳定模式。这一阶段的特征是弹坑处材料流动的困难，同时伴随着战斗部头部前方混凝土的持续侵蚀，弹坑和扩孔效应逐渐形成。在高速侵彻的极端环境中，弹体头部表层自锐材料经历了绝热过程，导致温度的急剧升高。这一现象引发了材料的熔化和软化，进而形成绝热剪切带。自锐材料的头部在侵彻过程中产生绝热剪切带和裂纹，这一自锐化现象导致弹体头部不断削尖，保持小面积接触，显著提升了侵彻能力。

图 6 给出了自锐战斗部以 1 700 m/s 速度垂直侵彻 6 米厚 C40 混凝土靶板的速度时间曲线，整个侵彻过程穿孔时间约为 6 ms，战斗部速度大致呈线性衰减，残余速度为

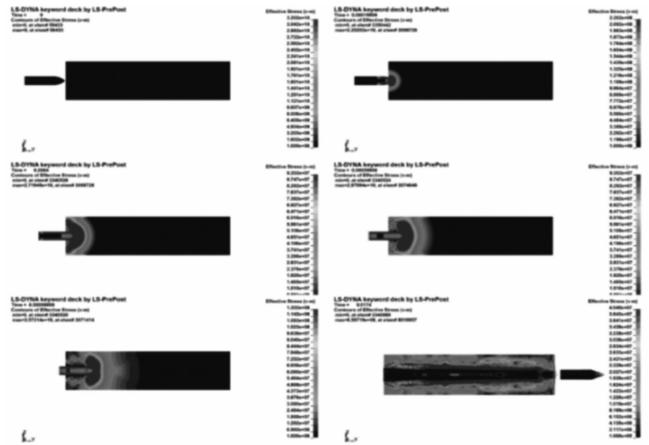


图 5 自锐战斗部侵彻混凝土靶板毁伤破坏时历过程

820 m/s 左右，下降幅度为 52%。

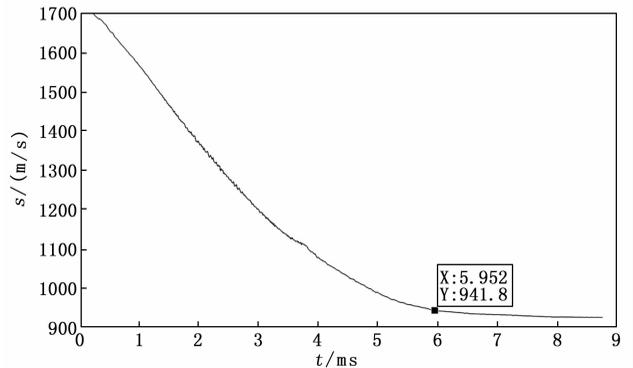


图 6 自锐战斗部穿靶速度时历曲线

图 7 给出自锐战斗部多个位置的侵彻应力时间曲线。曲线 1 为战斗部头部自锐材料受到的应力时间曲线，在 1 ms 时刻，该点的应力峰值达到  $3.11 \times 10^9$  Pa，极大地超过了自锐材料的强度极限，随后该点在侵彻过程中失效，剥离战斗部。曲线 2 为战斗部尾部受到的应力时间曲线，在 4.9 ms 时刻，应力峰值达到  $3.701 \times 10^7$  Pa；曲线 3 为引信位置弹轴方向应力时间曲线，4.3 ms 时刻，应力峰值达到  $5.347 \times 10^7$  Pa。在自锐战斗部动态侵彻厚目标钢筋混凝土

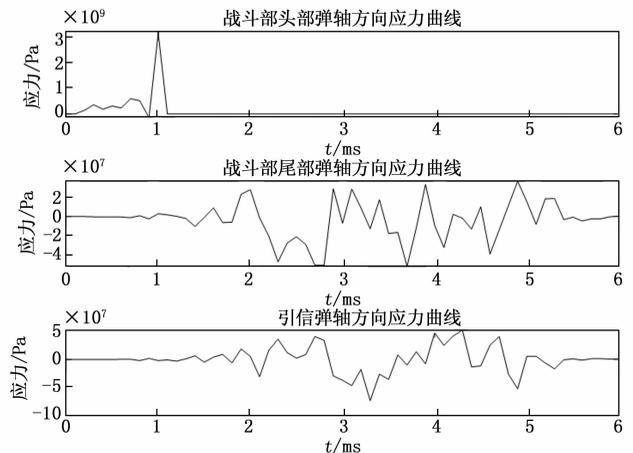


图 7 战斗部各位置应力时间曲线

过程中, 战斗部头部受到的应力约为尾部的 84 倍, 约为引信位置应力的 58.16 倍。头部钨基合金材料在极端恶劣侵彻环境下可形成绝热剪切带, 弹头在高压下不断削尖使得弹、靶冲击接触面积小, 从而侵彻阻力减小, 极大增强了弹体侵彻能力。

图 8 给出了自锐战斗部在以 1 700 m/s 高速条件动态侵彻钢筋混凝土目标过程中战斗部质量损失曲线, 战斗部原总质量为 600 kg, 0.48~1.44 ms 时间曲线内, 战斗部由 600 kg 下降至 503 kg, 此时质量下降速率约为 101.04 kg/ms; 1.44~1.8 ms 时间区间内, 战斗部质量由 503 kg 下降至 476.5 kg, 此时质量下降速率约为 73.61 kg/ms; 1.8~2.16 ms 时间区间内, 战斗部质量由 476.5 kg 下降至 458.5 kg, 此时质量下降速率约为 50 kg/ms; 2.16~3.6 ms 时间区间内, 战斗部质量由 458.5 kg 下降至 411.8 kg, 此时质量下降速率约为 32.43 kg/ms; 3.6~6 ms 时间区间内, 战斗部质量由 458.5 kg 下降至 411.8 kg, 此时质量下降速率约为 24.25 kg/ms。

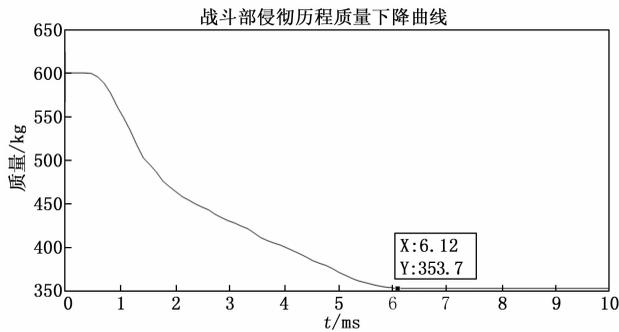


图 8 战斗部质量下降曲线

图 9 给出自锐战斗部引信加速度过载曲线。由图 9 引信过载数据可知, 传感器测得的过载峰值约为 52 100 g, 高速撞击厚混凝土靶板时, 由于靶板侵彻阻力, 战斗部受到冲击过载, 激发应力波在弹体内传播并反复振荡, 由靶板到侵彻过载卸载到 0 历时 6 ms 左右。

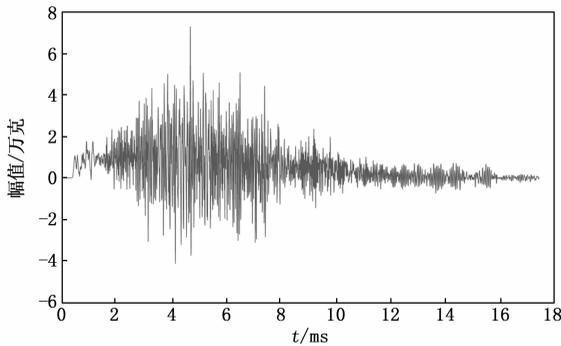


图 9 自锐战斗部引信加速度过载曲线

### 3 自锐侵彻引信磁场响应特性

磁探测技术的核心是通过监测磁场的微小变化来推断目标的存在和信息。军事领域中的地上多层目标或地下坚

固目标建筑广泛使用铁磁性钢筋作为建筑基材以提高建筑的整体强度和抗冲击爆炸性能。这为磁探测技术的应用提供了前提。相关研究表明, 在自锐侵彻战斗部中携带磁体探测传感器, 能够在目标打击过程中实现对铁磁性坚固目标的高效定位和感知。地磁场探测作为一种实时探测目标的手段, 在侵彻引信领域有着广泛的应用前景。磁场探测技术可以作为侵彻层数和侵彻深度等参数的精准测量手段。通过对地磁场强弱变化的分析, 可以获取目标关键的参数信息, 从而提高侵彻引信起爆控制能力和炸点精度。新型磁传感器的小型化与在极端环境下优良的抗冲击能力为磁探测技术在大型自锐侵彻战斗部侵彻引信目标感知与炸点控制的应用奠定了基础。

超高速自锐战斗部引信磁场响应研究, 是对弹丸侵彻目标过程中引信敏感磁场变化的研究。采用数值仿真技术, 建立弹体和目标的模型, 进行侵彻战斗部侵彻目标的磁特征数值仿真, 对磁信号特征分析。

钢筋混凝土靶板受地磁场磁化如图 10 所示, 可以看出钢筋受地磁场作用时, 钢筋内原子和分子的磁矩会根据地磁场的方向重新排列、变得大致相同, 钢筋被磁化, 两端对外界显示出较强的磁作用, 形成磁极, 其 N 极为地磁场投影在钢筋正方向。

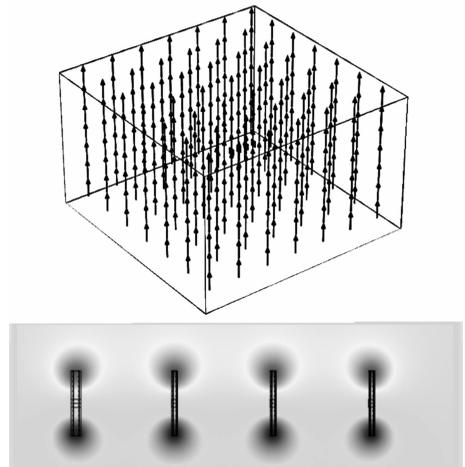


图 10 钢筋混凝土靶板受地磁场磁化示意图

磁场从空气进入钢筋混凝土靶板内部时, 钢筋的相对磁导率远大于空气的相对磁导率, 使大部分磁力线积聚于钢筋中<sup>[26]</sup>。图 11 为磁化后钢筋产生的磁场分布, 图 12 为钢筋混凝土靶板受地磁场磁化后磁场分布。钢筋被磁化后具有磁性, 产生如图 11 所示的磁场, 影响其周围磁感应强度(磁通密度)如图 12 所示, 可以看出由于磁化后钢筋的 N-S 极与地球磁极相反, 所以钢筋周围磁场方向与地磁场方向相反, 钢筋内部磁场方向与地磁场方向相同, 因此钢筋周围磁感应强度降低, 钢筋处磁感应强度增大。

仿真计算得到钢筋混凝土靶板中心线的 X、Y、Z 轴磁通密度如图 13 所示, 可以看出当地磁倾角为 90°、地磁偏角为 0°(即地磁场垂直于靶板中心线)时, X、Y 轴磁通密

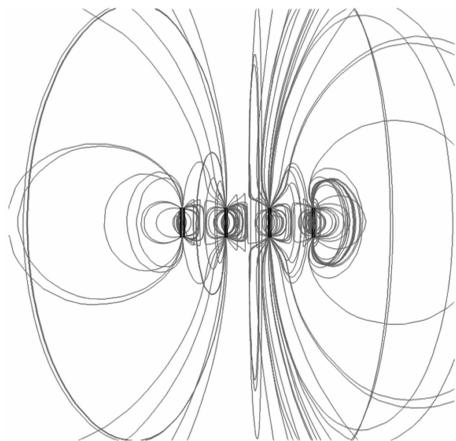


图 11 磁化后钢筋产生的磁场分布图

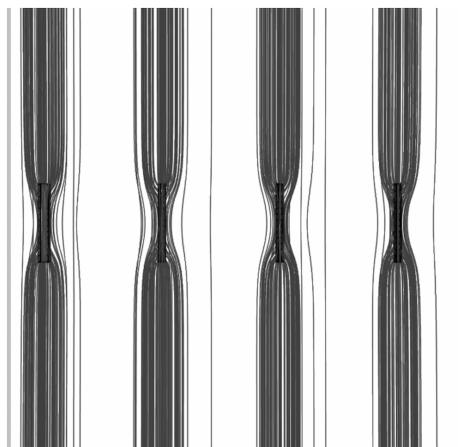


图 12 钢筋混凝土靶板受地磁场磁化后磁场分布图

度幅值小、信号无规律、穿层特征不明显；Z 轴磁通密度幅值大、信号规则、穿层特征明显；靶板表面磁通密度急速下降，钢筋处急剧上升；首层靶板的两层钢筋架间隔较大，侵入靶板过程中 Z 轴磁通密度出现两个幅值较小的尖峰；其余靶板的两层钢筋架间隔较小，侵入靶板过程中 Z 轴磁通密度出现一个幅值较大的尖峰。因此选用 Z 轴磁通密度进一步分析侵入过程磁场影响因素。

图 13 给出多层钢筋磁感应强度。在高速自锐战斗部侵入靶板的过程中，磁场的动态变化与钢筋的聚磁作用密切相关。这种作用导致了靶板中心轴线上磁场强度的不均匀分布。钢筋的磁屏蔽效应影响下，靶板中的磁场强度逐渐减小，在自锐战斗部穿越两层靶板之间时，引信位置磁场强度得以恢复。

将地磁场强度以 5 000 nT 间隔从 30 000 nT 递增至 60 000 nT，钢筋混凝土靶板中心线的 Z 轴磁通密度如图 14 所示，可以看出地磁场强度越大，Z 轴磁通密度幅值越大。侵入靶板层信号特征越明显。

地磁倾角以 10° 间隔从 0° 递增至 90°，钢筋混凝土靶板中心线的 Z 轴磁通密度如图 15 所示，可以看出当地磁倾角为 0°（地磁场与靶板中心线平行）时，Z 轴磁通密度幅值为

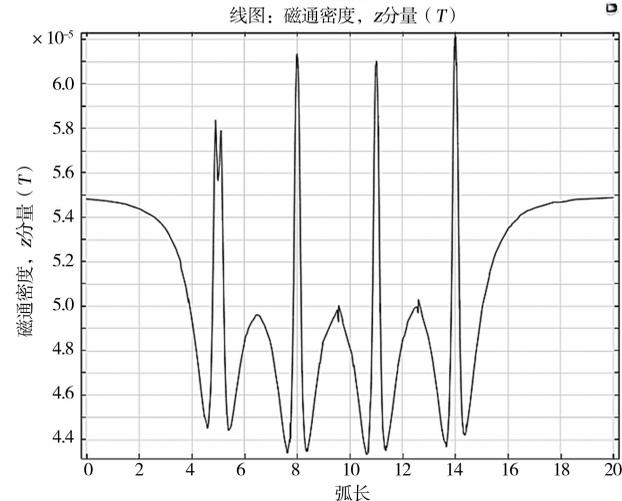
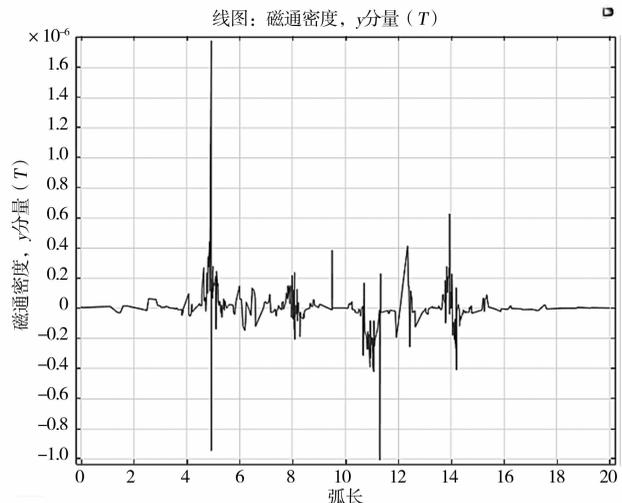
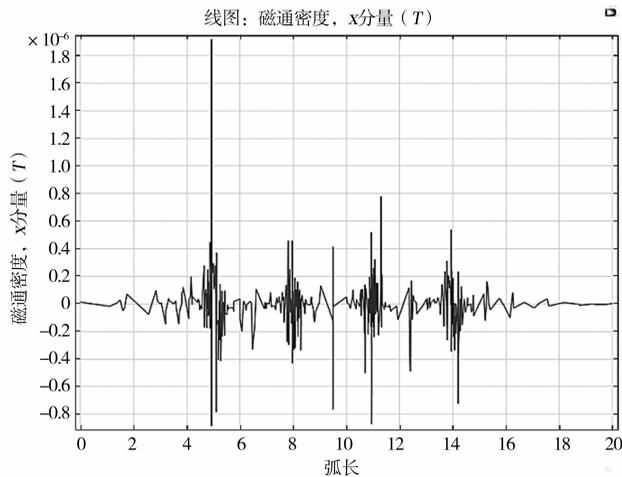


图 13 钢筋混凝土靶板中心线的 X、Y、Z 轴磁通密度

0；地磁倾角越大，钢筋被磁化后的磁性越强，靶板表面磁通密度下降幅度越大，侵入靶板层信号特征越明显。由地磁场分布与磁化原理可知，Z 轴磁通密度不受地磁偏角影响。

将钢筋半径以 1 mm 间隔从 6 mm 递增至 9 mm，钢筋混凝土靶板中心线的 Z 轴磁通密度如图 16 所示，可以看出

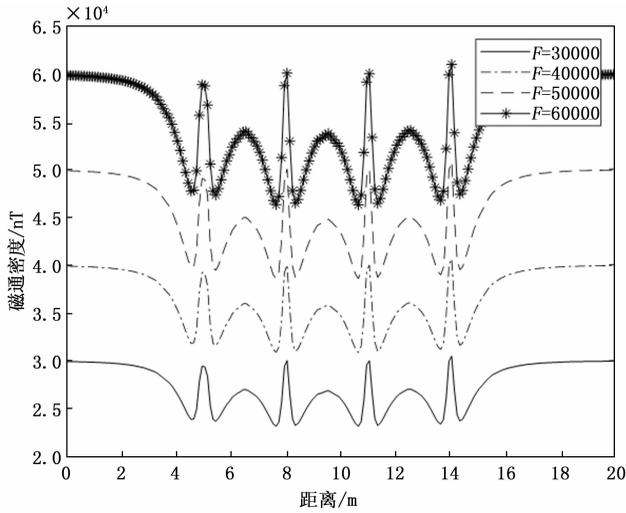


图 14 不同地磁场强度下靶板中心线的 Z 轴磁通密度

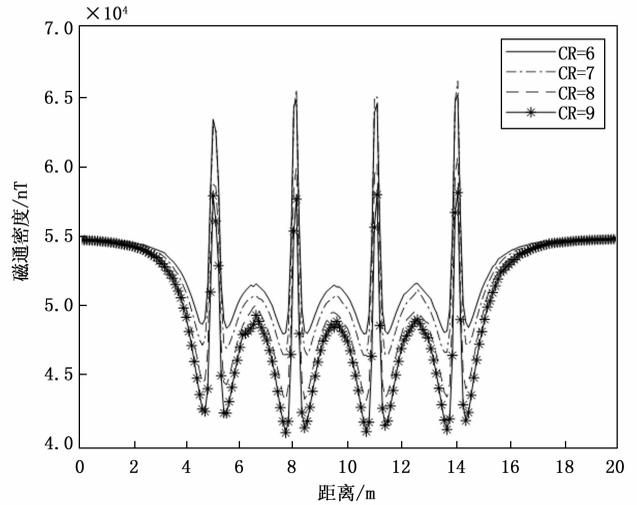


图 16 不同钢筋直径下靶板中心线的 Z 轴磁通密度

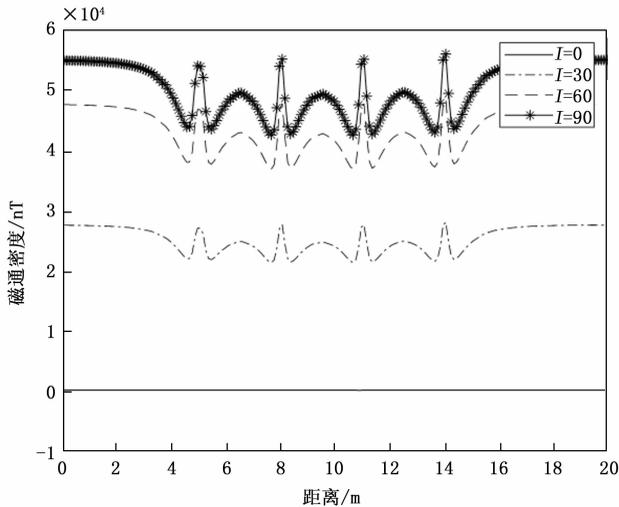


图 15 不同地磁倾角下靶板中心线的 Z 轴磁通密度

钢筋半径越大，钢筋被磁化后的磁性越强，靶板表面磁通密度越低，侵彻靶板层信号特征越明显。

### 4 数值结果验证

本文以某型战斗部侵彻多层混凝土靶板平衡炮动态试验为基础，通过建立有限元仿真模型，进行数值计算验证。试验提供了仿真模型的基准，使研究能够在试验基础上进行准确的数值验证。

在高速侵彻试验中，通过侵彻引信加速度传感器获取加速度过载信息，侵彻引信依据采集到的加速度信息提取信号特征，用于进行目标识别与炸点控制。为后续的数值计算提供了试验数据和侵彻引信算法的关键参数。研究采用侵彻动力学数值仿真方法，按照平衡炮动态试验工况建立 1:1 比例的三维模型。

在数值计算中，选取侵彻过载峰值和层间持续时间作为评价指标。这两个指标可以作为仿真数据的验证基准参数，能够综合反映侵彻过程中的动态特性，为试验与仿真

结果的对比提供了有力的验证手段。

图 17 和图 18 给出的侵彻过载峰值和层间持续时间对比结果验证了数值计算方法的正确性，两者的一致性可以有效评估数值计算在模拟实际试验中的准确性。

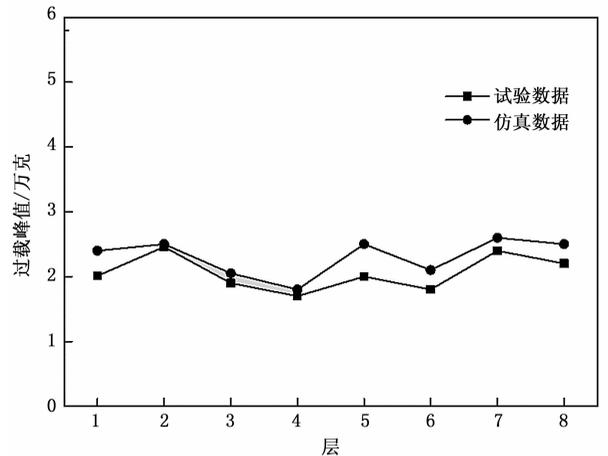


图 17 战斗部侵彻多层混凝土靶板引信过载峰值

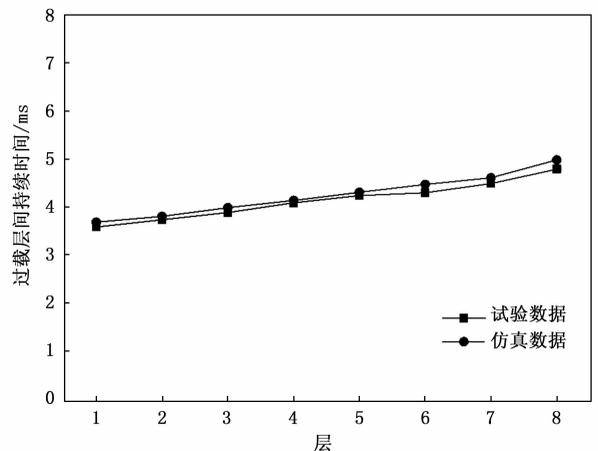


图 18 战斗部侵彻多层混凝土靶板引信过载层间持续时间

可以看到,利用本文有限元仿真方法进行数值计算可以准确地对自锐战斗部侵彻多层混凝土及引信过载特征进行描述,本文计算结果和研究结论具有参考性。

## 5 结束语

本文选取自锐侵彻战斗部打击多层混凝土靶板和坚固厚靶的硬目标作为研究的工况,旨在深入研究高速自锐战斗部侵彻引信在不同工况条件下的侵彻响应特性。建立了 600 公斤级自锐侵彻战斗部高速动态侵彻坚固厚目标的动力学模型与侵彻 4 层目标的磁场响应模型,通过建模和仿真,探索了在高速侵彻状态下引信的动力学响应和磁场特征。主要研究结论如下:

在引信动力学响应的研究中,建立的自锐战斗部侵彻 6 m C40 混凝土靶板模型,战斗部侵彻混凝土靶板历程,侵蚀后的靶板呈现出漏斗形状,随着战斗部侵彻的深入,应力波的稀疏效应逐渐减弱,战斗部的速度线性衰减,并在最终进入稳定侵彻模式的过程中,速度下降约 52%。由于应力波在战斗部内部的传递与叠加导致引信位置检测的过载信号较为震荡。整个侵彻过程穿孔时间约为 6 ms,战斗部速度大致呈线性衰减,残余速度为 820 m/s 左右,下降幅度为 52%。由于靶板侵彻阻力,战斗部受到冲击过载,激发应力波在弹体内传播并反复振荡,碰到靶板到侵彻过载卸载到 0 历时 6 ms 左右。在自锐战斗部动态侵彻厚目标钢筋混凝土过程中,战斗部头部受到的应力最大,在极端恶劣侵彻环境下可形成绝热剪切带,在弹体头部发生自锐化效应,从而增强弹体侵彻能力。对于自锐战斗部侵彻多层钢筋混凝土靶板,由于钢筋对磁力线的聚磁作用,在靶板附近的磁场强度发生变化,并且在钢筋混凝土边缘附件磁场最大。当给靶板施加沿 Z 轴的地磁场时,磁力线主要途经钢筋内,导致钢筋网格内磁场强度减小。地磁场强度越大,Z 轴磁通密度幅值越大。地磁倾角越大,钢筋被磁化后的磁性越强,靶板表面磁通密度下降幅度越大,侵彻靶板特征越明显。钢筋半径越大,钢筋被磁化后的磁性越强,靶板表面磁通密度越低,侵彻靶板特征越明显。

## 参考文献:

- [1] 吕映庆,陈南勋,武海军,等. 弹体高速侵彻超高性能混凝土靶机理 [J]. 兵工学报, 2022, 43 (1): 37-47.
- [2] 李 蓉,戴黎红,吴敏忠,等. 超高速侵彻引信多层目标过载层间粘连机理 [J]. 探测与控制学报, 2020, 42 (2): 1-4.
- [3] 王艳艳,孙 浩,柯 文,等. 大当量战斗部综合参数测试无线传输系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (11): 3687-3689.
- [4] 王振宁,尹建平,李旭东,等. 有限厚钢筋混凝土参数对破片侵彻性能的影响 [J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44 (5): 180-185.
- [5] 崔天宁,秦庆华. 轻质多孔夹芯结构的弹道侵彻行为研究进展 [J]. 力学进展, 2023, 53 (2): 395-432.
- [6] 花俊琦,李 蓉,郜王鑫,等. 带有横梁结构的多层目标侵彻过

- 载特征 [J]. 探测与控制学报, 2023, 45 (1): 61-66.
- [7] 朱 擎,李述涛,陈叶青. 配筋对超高性能混凝土抗侵彻性能的影响 [J]. 工程力学, 2023, 40 (s1): 62-73.
- [8] 祝奔霆,吴国民. 侵彻数值仿真中网格密度对单元失效应变影响分析 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18 (1): 199-204.
- [9] 李 蓉,陈 侃,康兴国,等. 硬目标侵彻引信炸点控制方法综述 [J]. 探测与控制学报, 2010, 32 (6): 1-4.
- [10] 陈小伟. 穿甲/侵彻力学的理论建模与分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [11] 杜忠华,杜成鑫,朱正旺,等. 钨丝/铅基非晶复合材料长杆体弹芯穿甲试验研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45 (5): 1308-1313.
- [12] 王 杰,陈小伟,韦利明,等. 80%钨纤维增强锆 (Zr) 基块体金属玻璃复合材料长杆弹体侵彻钢靶试验研究 [J]. 试验力学, 2014, 29 (3): 279-285.
- [13] 雷 波,黄德武,杨明川,等. 钨纤维复合材料穿甲弹芯自锐行为的试验研究 [J]. 沈阳理工大学学报, 2008 (1): 72-76.
- [14] 许瑞准,胡秀章,胡时胜. 预扭钨弹侵彻厚钢靶的三维数值模拟 [J]. 弹道学报, 2002 (1): 32-36.
- [15] 姜 涛,呼陟宇,高雪云,等. 钨丝增强铜锌复合材料侵彻过程的数值模拟 [J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52 (4): 1296-1302.
- [16] 胡会娥,孔小东,苏小红. 穿甲弹弹芯用非晶复合材料研究进展 [J]. 材料开发与应用, 2017, 32 (3): 109-113.
- [17] 曲禹同. 基于绝热剪切机制的细晶钨合金弹芯自锐行为研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2022.
- [18] 荣 光,黄德武. 钨纤维复合材料穿甲弹芯侵彻时的自锐现象 [J]. 爆炸与冲击, 2009, 29 (4): 351-355.
- [19] 李继承,陈小伟. 块状金属玻璃及其复合材料的压缩剪切特性和侵彻/穿甲“自锐”行为 [J]. 力学进展, 2011, 41 (5): 480-518.
- [20] 陈建良,李继承. 钨纤维增强金属玻璃复合材料分段弹体侵彻性能研究 [J]. 爆炸与冲击, 2020, 40 (6): 57-68.
- [21] 邹敏明,郭 珉,柴东升,等. 钨丝增强锆基非晶材料弹芯侵彻弹坑特征研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2021, 44 (4): 56-60.
- [22] SHEINKER A, SHKALIM A, SALOMONSKI N, et al. Processing of a scalar magnetometer signal contaminated by  $1/f_\alpha$  noise [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 138 (1): 105-111.
- [23] GINZBURG B, FRUMKIS L. Processing of magnetic scalar gradiometer signals using orthonormalized functions [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2002, 102 (1-2): 67-75.
- [24] SHEINKER A, SALOMONSKI N, GINZBURG B, et al. Magnetic anomaly detection using entropy filter [J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19 (4): 045205.
- [25] 谢启源. 弱磁物体矢量探测系统研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2023.
- [26] 王益利,李长生,王 鑫,等. 基于磁异探测的侵彻引信计层方法研究 [J]. 兵工学报, 2024, 45 (3): 695-704.