

# 护套密度对钨丝集束弹芯侵彻性能的影响

周峰<sup>1</sup>, 刘安博<sup>2</sup>, 杜忠华<sup>1,3</sup>, 杜成鑫<sup>1</sup>, 何俊<sup>4</sup>

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 安徽理工大学化工与爆破学院, 安徽淮南 232001;  
3. 沈阳理工大学装备工程学院, 沈阳 110159; 4. 安徽机电职业技术学院, 安徽芜湖 241002)

**摘要:** 为探明钨丝/锆基非晶(WF/Zr-MG)(简称“钨丝集束”)弹芯护套材料的密度对其侵彻性能的影响, 选取2024Al、Q235钢和HMn55-3-1Cu三种同强度、不同密度的典型材料作为钨丝集束弹芯的护套, 通过弹道试验与仿真模拟系统分析三种典型护套弹芯在侵彻C45钢板时的破坏模式及侵彻性能。结果表明: 2024Al护套因自身熔点较低, 在侵彻过程中易发生严重的侵蚀与汽化, 导致复合结构弹芯以“单独侵蚀”的方式发生破坏, 在侵彻过程中护套未对钨丝集束材料提供径向约束作用; 因2024Al护套质量偏轻, 该复合结构弹芯侵彻存速能力较弱, 侵彻效率为Q235钢、HMn55-3-1Cu护套弹芯的0.86倍和0.98倍; Q235钢与HMn55-3-1Cu护套弹芯在侵彻过程中均表现为“共同侵蚀”的破坏模式, 但因HMn55-3-1Cu密度更大, 弹芯材料在侵蚀过程中的径向流动更加剧烈, 其弹坑平均直径为Q235钢护套弹芯的1.04倍, 弹丸的侵彻阻力更大, 其侵彻能力仅为Q235钢护套弹芯的0.88倍。合理选择护套材料可有效提升钨丝集束弹芯的侵彻性能, 本文结论可为护套钨丝集束穿甲杆的结构设计与优化提供理论支撑。

**关键词:** 护套密度; 钨丝集束弹芯; 破坏模式; 侵彻性能

中图分类号: TJ414+.2 文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1003-1251.2026.04.012

## The Influence of Density of Jacket Materials on the Penetration Performance of WF/Zr-MG Rods

ZHOU Feng<sup>1</sup>, LIU Anbo<sup>2</sup>, DU Zhonghua<sup>1,3</sup>, DU Chengxin<sup>1</sup>, HE Jun<sup>4</sup>

(1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China; 4. Anhui Technical College of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhu 241002)

**Abstract:** To investigate the influence of density of jacket materials on the penetration performance of tungsten fibre/Zr-based bulk metallic glass (WF/Zr-MG) rod, three typical materials with the same strength but different densities are adopted in this study, namely 2024Al, Q235 steel, and HMn55-3-1Cu, as the jacket for composite-structured rod projectiles. Through ballistic experiments and simulation, the failure modes and penetration performance differences of the three types of rod projectiles when penetrating C45 steel target plates were analyzed. The results show that due to the relatively low melting point, the 2024Al jacket material is mostly eroded and vaporized during the penetration process, leading to a “separate erosion” failure mode of the composite penetrator. In this process, the cladding fails to provide radial constraint to the tungsten fibre bundle. Due to the relatively light weight of 2024Al, the penetration velocity retention capability of the composite structure

rod is weak, and the penetration depth is only 0.86 times and 0.98 times that of the Q235 steel-jacketed and HMn55-3-1Cu-jacketed rod, respectively. Both the Q235 steel-jacketed and HMn55-3-1Cu-jacketed rods exhibit a “Co-erosion” failure mode during penetration. However, due to its higher density, HMn55-3-1Cu intensifies the radial flow of the rod material during the erosion process, and the average diameter of its crater is 1.04 times that of the Q235 steel-jacketed rod. It increases the penetration resistance and reduces its penetration capability to 0.88 times that of the Q235 steel jacketed penetrator. This study confirms that rational selection of jacket materials can significantly enhance the penetration performance of WF/Zr-MG. The conclusions in this study can provide theoretical support for the structural design and optimization of armor-piercing penetrators made of jacketed WF/Zr-MG.

**Key words:** density of jacket materials; WF/Zr-MG rod; failure mode; penetration performance

以钨丝/锆基非晶(WF/Zr-MG)(简称“钨丝集束”)材料作为弹芯制成的穿甲弹具有侵彻“自锐”特性,在相同着靶条件下,其侵彻能力较传统钨合金穿甲弹提升10%以上<sup>[1-2]</sup>,钨丝集束是现阶段最有望替代传统钨合金制造穿甲弹的主要材料之一<sup>[3-4]</sup>。但目前单向纤维增强钨丝集束材料难以调和径向与轴向强度之间的矛盾关系,导致钨丝集束穿甲弹常因径向强度不足而发生劈裂等“非理想”侵彻现象,严重影响其侵彻性能,限制了该材料在穿甲弹领域的实际应用<sup>[5-6]</sup>。针对上述问题,国内外学者提出在钨丝集束弹体外侧包覆低密度、高弹性模量的护套,以增强弹丸整体刚度,并进一步强化其“自锐”特性,提升其侵彻性能。

周峰等<sup>[7]</sup>和 Zhou 等<sup>[8]</sup>通过细观-微观多尺度分析发现,只有当护套与弹芯以“共同侵蚀”的方式发生协同破坏时,才能有效提升钨丝集束弹芯的结构刚度,抑制其在侵彻过程中发生劈裂等“非理想”侵彻现象,提升弹芯的侵彻性能。杜成鑫<sup>[9]</sup>提出在钨丝集束弹芯外表面包覆一层厚度为1 mm的C45护套,利用护套与弹芯在侵彻过程中的“共同侵蚀”破坏方式,强化钨丝集束弹芯侵彻过程中的“自锐”化效应,降低侵彻阻力,提升钨丝集束弹芯的侵彻性能。在上述研究基础上,Zhou 等<sup>[10]</sup>进一步从微观角度证实,护套不仅能增强钨丝集束弹芯的径向强度,强化其侵彻“自锐”效应,还可改变弹靶间的作用机制,降低弹靶材料间的摩擦阻力,使钨丝集束材料具有结构“自锐化”和“自润滑”性能,从而提升弹丸的侵彻性能。现有对护套钨丝集束复合结构弹芯(下文简称“复合结构弹芯”)的研究多聚焦于护套强度对弹芯侵彻性能的影响,而由文献[11-12]的研究结果可知,护套材料的密度同样是影响复合结构弹芯侵彻性能

的关键因素,但目前关于护套密度对复合结构弹芯侵彻性能的影响机制、影响规律及优化方法的研究鲜有报道。因此,系统开展护套材料密度对复合结构弹芯侵彻性能的影响研究、深入探索其内在作用机理,不仅对推动钨丝集束材料的工程化应用具有重要的现实意义,也是该领域亟待填补的研究空白。

本文通过弹道试验和数值仿真方法研究三种同强度、不同密度的护套材料(2024Al、Q235钢和HMn55-3-1Cu)对复合结构弹芯侵彻性能的影响。通过弹道试验对比复合结构弹芯侵彻性能差异;通过仿真模拟复现三种弹芯在典型冲击速度下的侵彻过程,阐明其破坏模式,揭示护套密度对其侵彻性能的影响规律。

## 1 侵彻试验

### 1.1 试验材料及现场布置

本试验采用25 mm口径的滑膛弹道炮作为加载平台,对图1所示复合结构弹芯进行弹道试验。如图1(a)所示,试验所用弹丸包括铝制弹托、底推、垫块、护套(材料分别为2024Al、Q235钢和HMn55-3-1Cu)及钨丝集束核心侵彻体(弹芯)。如图1(b)所示,护套为空心圆柱结构,其内径为7 mm、外径为9 mm、长为38 mm,内嵌钨丝集束核心部分长度( $L$ )为33 mm、直径( $D$ )为7 mm,两者通过过盈配合进行装配。鉴于本文中三种典型护套材料强度、密度较低,对靶板侵彻深度贡献有限,认为复合结构弹芯的侵彻深度主要由内嵌钨丝集束材料决定,基于该前提,复合结构弹芯的长径比可按钨丝集束核心部分的尺寸计算。本文所用靶板材料为C45钢,其尺寸为300 mm×300 mm×60 mm。

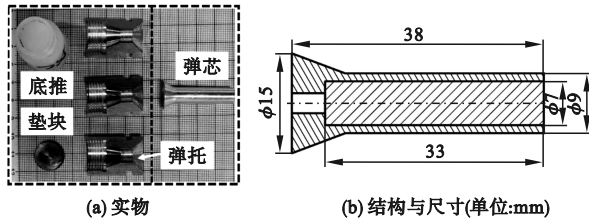


图 1 试验所用复合结构弹芯

Fig. 1 Composite structured rod projectile for experiment

试验现场布置如图 2 所示。为保证弹芯能垂直冲击靶板,消除着靶角度对侵彻结果的影响,将炮口与靶板迎弹面距离设置为 10 m。在距离靶板迎弹面 2 m 位置处设置一组间距为 2 m、时间测量精度为 1 μs 的通断靶,用于测量弹丸着靶速度。高速摄影相机架设于测速后靶与目标靶板之间,用于记录弹体飞行与撞击姿态。本文有效试验数据为 6 组(6 发弹丸),其中 2024Al、Q235 钢和 HMn55-3-1Cu 护套弹芯各 2 发,试验所用发射药牌号为 4/7。各工况初始参数如表 1 所示。

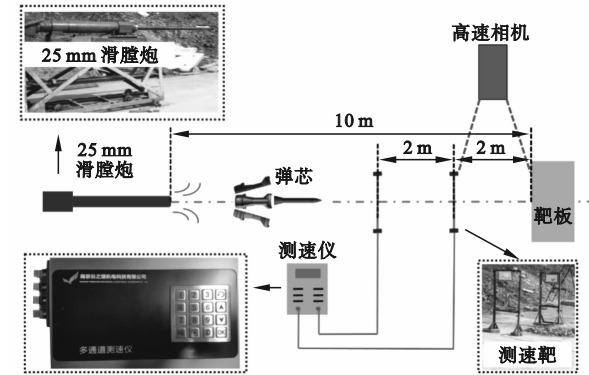


图 2 试验现场布置

Fig. 2 Experimental set-up

1.2 试验结果

图3所示为典型工况下复合结构弹芯在不同

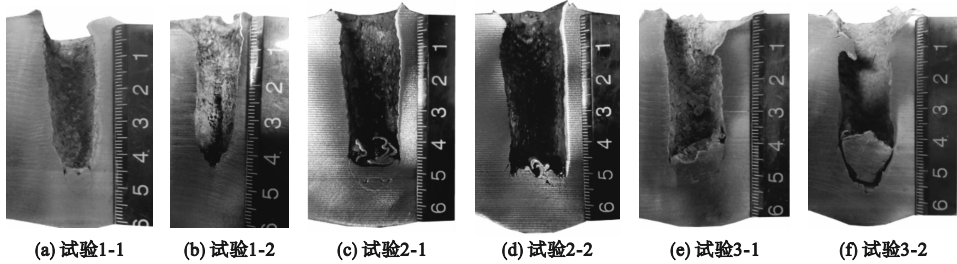


图 4 采用三种典型护套材料的复合结构弹芯侵彻试验结果

Fig. 4 Penetration test results of composite structural rods with three typical sheath materials

观察图 4 中各工况下残余弹体的宏观形貌,由图 4(c) ~ 4(f) 可见残留部分复合结构弹体,且该四种典型工况下残留的复合结构弹芯材料基本侵蚀殆尽,剩余的很少一部分弹芯与大变形护套

表 1 试验参数

Table 1 Experimental parameters

试验编号	护套材料	弹芯质量/g	全弹质量/g	弹芯初速/(m·s <sup>-1</sup> )
1-1	2024Al	26.3	70.5	1 634.6
1-2		26.2	70.4	1 733.2
2-1	Q235 钢	33.7	75.1	1 730.2
2-2		33.8	75.0	1 887.0
3-1	HMn55-3-1Cu	34.6	78.8	1 679.2
3-2		34.8	79.0	1 769.0

时刻飞行及着靶姿态的高速摄影组图。由图 3 可见:复合结构弹芯出膛后,弹托在空气阻力的作用下快速与弹芯脱离;复合结构弹芯外弹道飞行平稳,姿态稳定;在复合结构弹芯着靶瞬间,弹芯的速度矢量方向基本与靶板迎弹面垂直。

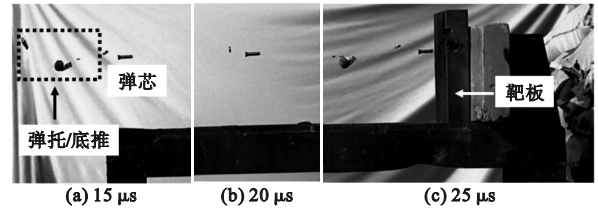


图 3 复合结构弹芯在不同时刻飞行及着靶姿态

Fig. 3 Flight and targeting attitudes of composite structured rod projectile at different times

图 4 所示为采用三种典型护套材料的复合结构弹芯侵彻结束后靶板材料终态毁伤形貌。将各工况复合结构弹芯侵彻深度、弹坑直径等试验数据汇总,结果见表 2,表中复合结构弹芯的侵彻效率采用弹芯侵彻深度( $P$ )与内嵌钨丝集束材料初始长度( $L$ )之比( $P/L$ )表示。为直观反映侵彻结果之间的差异,采用三种护套材料的复合结构弹芯侵彻效率示于图 5 中。

材料通过翻转、回流,黏附在弹坑底部。由表 2 可知:在试验速度范围内,Q235 钢复合结构弹芯侵彻效率最高(均在 1.50 以上),HMn55-3-1Cu 次之(为 1.40 ~ 1.42),2024Al 最差(为 1.38 ~ 1.40);三

表2 侵彻威力参量  
Table 2 Penetration power data

试验编号	护套材料	着靶速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	侵彻深度/mm	弹坑直径/mm	侵彻效率	平均弹坑直径/mm
1-1	2024Al	1 634.6	46.34	15.29	1.40	14.20
1-2		1 733.2	45.57	13.10	1.38	
2-1	Q235 钢	1 730.2	51.50	18.10	1.56	17.61
2-2		1 887.0	54.24	17.12	1.64	
3-1	HMn55-3-1Cu	1 679.2	46.28	18.58	1.40	18.47
3-2		1 769.0	47.10	18.36	1.42	

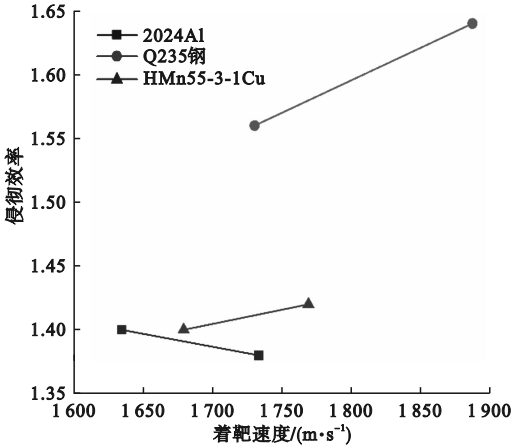


图5 采用三种护套材料的复合结构弹芯的侵彻效率

Fig. 5 The penetration efficiencies of composite structural rods with three sheath materials

种护套弹芯的平均弹坑直径由小到大分别为 14.20 mm (2024Al)、17.61 mm (Q235 钢) 和 18.47 mm (HMn55-3-1Cu)。上述结果与文献[7]中得到的侵彻效率与平均弹坑直径关系存在较大差别。根据文献[8-9]的研究结果可知, 2024Al 复合结构弹芯的侵彻破坏模式与 Q235 钢和 HMn55-3-1Cu 复合结构弹芯存在一定差异, 导致

2024Al 复合结构弹芯与其他两种复合结构弹芯的侵彻能量转换方式不同, 进而影响了弹芯的侵彻性能。因此, 为系统分析各工况下复合结构弹芯侵彻性能存在差异的原因, 通过仿真软件对典型工况下复合结构弹芯侵彻过程进行模拟, 分析弹芯侵彻过程中的破坏、失效模式。

## 2 数值仿真

### 2.1 仿真模型

侵彻试验只能通过弹、靶材料终态毁伤形貌反向推导侵彻过程中弹、靶材料的破坏模式和变形机制, 试验结果具有一定局限性。为直观准确地揭示本文中三种不同密度的典型护套材料对复合结构弹芯侵彻性能的影响机制, 进一步通过数值仿真复现整个侵彻过程, 分析三种复合结构弹芯的侵彻破坏模式及失效机制。

采用 ANSYS 软件中 LS-DYNA 显示动力学计算模块进行数值仿真。为节省计算成本、提高计算效率, 建立弹靶 1/2 结构模型, 如图 6 所示。设置弹丸侵彻方向为 Y 轴负方向, 设置弹靶关于 XY 平面对称; 各工况模型中, 钨丝、铅基非晶(钨

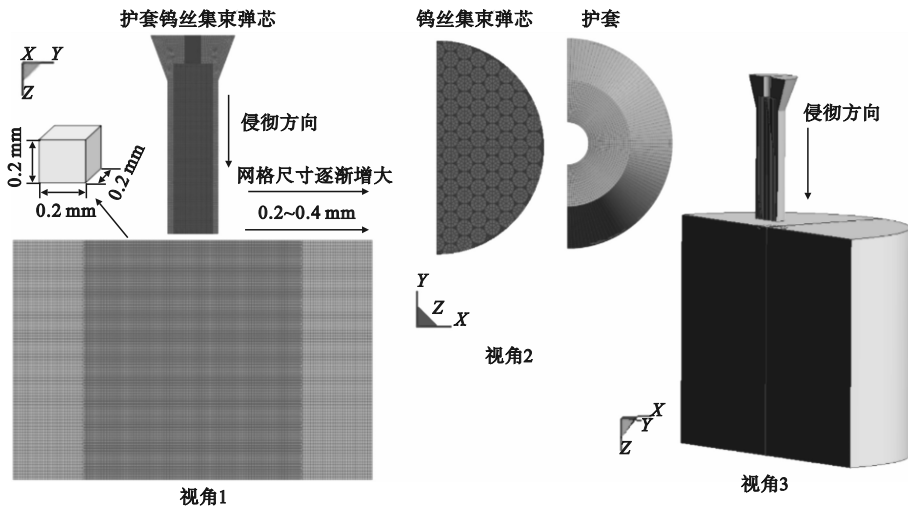


图6 有限元模型

Fig. 6 FE model

丝集束粘结相材料)、护套及靶板均采用六面体结构化网格进行建模,并采用拉格朗日求解器进行计算求解;设置钨丝与非晶材料的本构模型为塑性随动硬化模型,设置靶板、护套的本构模型为 Johnson-Cook 模型。各组分的材料参数设置分别

如表 3 和表 4 所示。表中: $\rho$  为密度; $E$  为弹性模量; $\nu$  为泊松比; $\sigma_{0.2}$  为屈服强度; $\varepsilon_b$  为断裂应变; $\sigma_b$  为抗拉强度; $A$  为材料屈服强度; $B$  为硬化常数; $n$  为应变硬化指数; $c$  为应变常数; $m$  为热软化指数; $D_1 \sim D_5$  为失效参数。

表 3 钨丝及锆基非晶合金仿真参数

Table 3 Simulation parameters for WFs and Zr-MG

材料	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$E / \text{GPa}$	$\nu$	$\sigma_{0.2} / \text{MPa}$	$\varepsilon_b / \%$	$\sigma_b / \text{MPa}$
钨丝 <sup>[13]</sup>	19.22	390	0.28	1 687	1.3	2 002
锆基非晶合金 <sup>[14]</sup>	6.68	96	0.36			1 000

表 4 2024Al、Q235 钢、HMn55-3-1Cu 和 C45 钢仿真参数

Table 4 Simulation parameters for 2024Al, Q235 steel, HMn55-3-1Cu and C45 steel

材料	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$A / \text{MPa}$	$B / \text{MPa}$	$n$	$c$	$m$
2024Al <sup>[15]</sup>	2.70	240	426	0.34	0.015 0	1.000
Q235 钢 <sup>[16]</sup>	7.85	235	46	0.36	0.039 2	0.757
HMn55-3-1Cu <sup>[17]</sup>	8.50	240	275	0.42	0.009 0	1.090
C45 钢 <sup>[18-19]</sup>	7.85	496	320	0.28	0.064 0	1.060

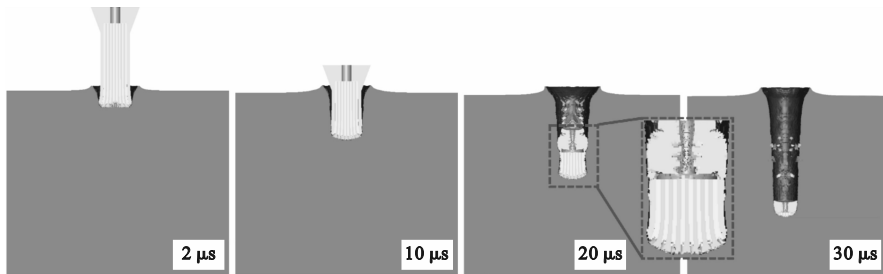
  

材料	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$
2024Al <sup>[15]</sup>	1	0	0	0	0
Q235 钢 <sup>[16]</sup>	43.408	44.608	-0.016	0.0145	0.046
HMn55-3-1Cu <sup>[17]</sup>	1.6	0	0	0	0
C45 钢 <sup>[18-19]</sup>	0.1	0.76	1.57	0.005	-0.84

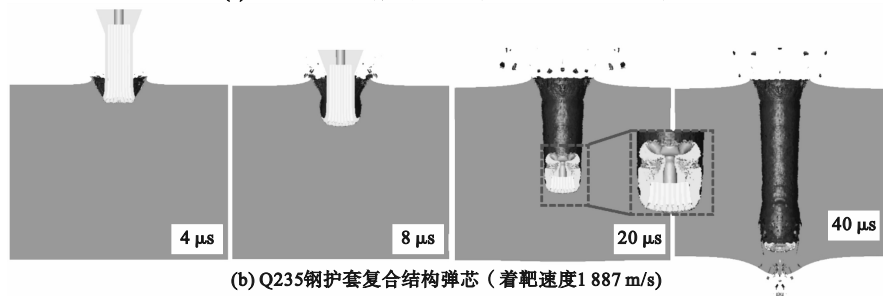
2.2 仿真结果分析

三种复合结构弹芯侵彻过程仿真结果如图 7 所示,仿真结果与试验结果对比汇总于表 5 中。侵彻试验与数值仿真结果均显示,2024Al 护套弹芯的侵彻效率及形成的弹坑直径明显小于其他两

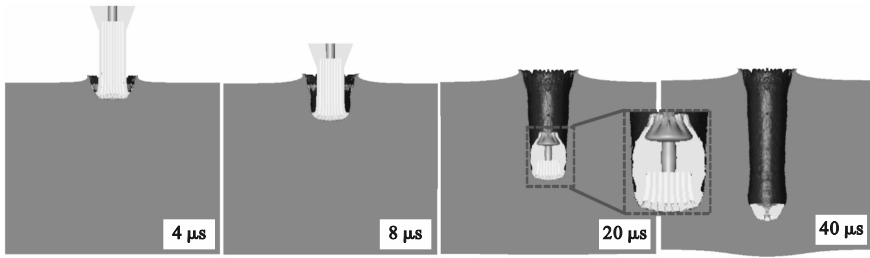
种护套弹芯,仿真结果与试验结果之间的误差均小于 7%,且仿真得到的弹、靶材料终态形貌与试验结果较为接近,因此认为仿真结果基本符合复合结构弹芯真实侵彻情况。



(a) 2024Al 护套复合结构弹芯 (着靶速度 1 733.2 m/s)



(b) Q235 钢护套复合结构弹芯 (着靶速度 1 887 m/s)



(c) HMn55-3-1Cu护套复合结构弹芯 (着靶速度1769 m/s)

图7 三种复合结构弹芯侵彻过程

Fig. 7 Penetration process of three types of composite structural rods

由图7(a)可见,在侵彻时间为20 μs时,钨丝集束弹芯表面的2024Al护套已基本侵蚀殆尽。造成上述现象的主要原因是,2024Al护套材料的强度、密度、熔点均较低,在侵彻过程中,其不仅不具备侵彻能力,还会在弹靶界面的高温区(温度在1500℃以上)<sup>[10]</sup>迅速熔化、汽化,失去对钨丝集束弹芯的束缚。在侵彻过程中,2024Al护套既未参与侵彻扩孔,也未与弹芯材料共同侵彻,仅尾部残余部分随弹芯在侵彻的弹坑内部移动。该复合结构弹芯侵彻过程中护套与钨丝集束材料之间的破坏模式为“分别侵蚀”中一种特殊且极限的情况,即内嵌钨丝集束弹芯的“单独侵蚀”。

观察图7(b)和图7(c)发现, HMn55-3-1Cu

与Q235钢护套复合结构弹芯侵彻破坏模式类似。在侵彻过程中, Q235钢和HMn55-3-1Cu两种典型护套材料紧紧依附在钨丝集束弹芯表面,护套材料与钨丝集束弹芯以“共同侵蚀”的方式发生协同破坏,在整个侵彻过程中护套为钨丝集束弹芯提供径向约束,抑制钨丝集束材料在侵彻过程中发生劈裂等“非理想”侵彻现象,提升复合结构弹芯的侵彻性能。此外,观察两种典型工况下复合结构弹芯的流变行为发现,失效的护套及弹芯材料在复合结构弹芯两侧向弹芯轴线方向翻转、回流,使得弹体头部形成一个“蘑菇头”,此后弹体头部形状不再发生变化,直至钨丝集束弹芯侵蚀殆尽,侵彻过程结束。

表5 仿真结果与试验结果对比

Table 5 Comparison between simulation results and experimental results

试验编号	护套材料	弹坑直径/mm			侵彻效率		
		试验值	仿真值	误差/%	试验值	仿真值	误差/%
1-2	2024Al	13.10	13.89	6.03	1.38	1.33	3.60
2-2	Q235钢	17.12	18.10	5.72	1.64	1.65	0.60
3-2	HMn55-3-1Cu	18.36	18.90	2.94	1.42	1.46	2.81

提取图7中各工况下的速度-时间数据,绘制三种复合结构弹芯各组分的侵彻速度-时间曲线,如图8所示。由图8(a)可见,在20 μs后,2024Al护套与钨丝集束材料速度均开始明显下降,且两者

速度差逐渐增大,2024Al护套在30 μs后速度不再下降,保持900 m/s的速度直至侵彻过程结束。结合前文仿真与试验结果分析可知,2024Al护套在20 μs时开始熔化、汽化,失去了对钨丝集束弹

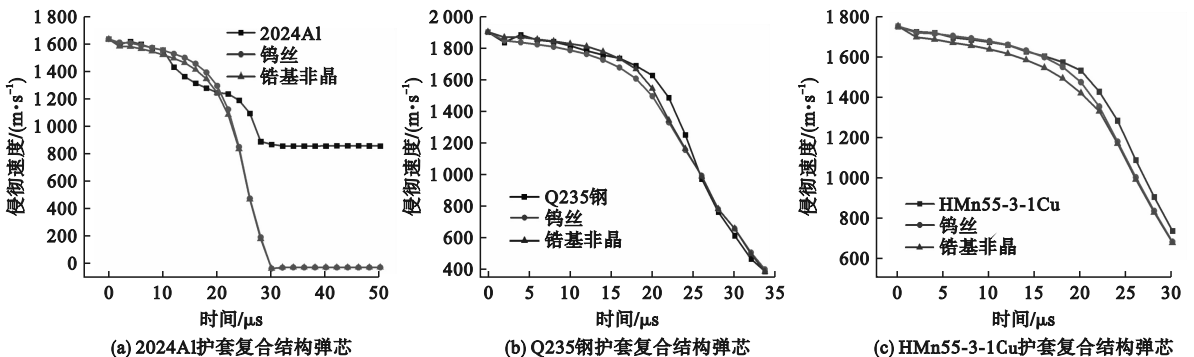


图8 三种复合结构弹芯各组分的侵彻速度-时间曲线

Fig. 8 The velocity reduction of each part of three types of composite structural rods

芯的束缚,仅尾部存在的一部分护套材料随弹芯运动,并未参与对靶板材料的侵彻作用。在上述过程中,护套未受侵彻阻力作用,因此在30 μs后护套材料的速度不再下降,这也证实了该复合结构弹芯在侵彻过程中的破坏模式为“分别侵蚀”。观察图8(b)和图8(c)发现,在侵彻过程中,Q235钢和HMn55-3-1Cu两种护套与钨丝集束材料的速度降低趋势基本一致,且两者的速度差别不大。结合前文试验与仿真结果可知,在侵彻过程中两种护套材料与钨丝集束弹芯以“共同侵蚀”方式发生破坏,且在该破坏方式下护套材料的密度越大,复合结构弹芯的速度降低幅度也越大。分析其主要原因为:在相近的侵彻条件下,护套密度对钨丝集束弹芯侵彻性能的影响主要体现在侵彻过程中弹芯头部材料的径向流动,护套材料密度越大,被侵蚀弹芯材料的径向流动越显著,即复合结构弹芯的头部尺寸越大,弹坑平均直径也越大,弹芯的侵彻深度越小。

根据文献[20]的研究结果对文中破坏模式为“共同侵蚀”的Q235钢和HMn55-3-1Cu两种护套复合结构弹芯侵彻性能进行分析。假设弹芯在侵彻过程中对靶板施加的作用力保持恒定,由能量守恒可得弹芯对靶板所做的功为<sup>[20]</sup>

$$E_t = FH = \frac{1}{4} \pi d_c^2 p H \quad (1)$$

式中: $E_t$ 为弹芯对靶板所做的功; $F$ 为弹芯侵彻过程中所受阻力; $H$ 为侵彻深度; $d_c$ 为弹坑直径; $p$ 为侵彻过程中弹靶界面处的压力,由波动力学相关成果可知, $p$ 仅与弹芯着靶速度有关,因此在本文中认为弹靶界面处的压力 $p$ 为定值。

假设在侵彻过程中弹丸的初始动能全部转换为弹坑的横向拓展及纵向延伸所需的能量,进而形成侵彻通道。以试验2-1和试验3-2为例,两者着靶速度相近,因此初始动能处于同一水平。由仿真与试验结果可知,在“共同侵蚀”的情况下,护套材料密度与弹坑直径呈正相关,即护套密度越大,最终形成的弹坑直径越大。将两种复合结构弹芯的侵彻结果相关数据代入式(1)中计算可得,HMn55-3-1Cu护套弹芯在侵彻过程中的侵彻阻力为Q235钢护套弹芯的1.02倍。该结果表明弹坑直径与弹芯所受侵彻阻力呈正相关:弹坑直径越大,弹芯侵彻过程中承受的阻力越大,导致复合结构弹芯的初始动能消耗更显著,最终表现为侵彻性能下降。从能量耗散机制来看,弹芯侵彻过程中能量在横向(弹坑拓展)的耗散越严重,可用于

纵向侵彻(通道延伸)的能量占比就越小,侵彻性能随之变差。综合上述分析可知,本文研究的复合结构弹芯类型中Q235钢护套复合结构弹芯的侵彻性能最优。

### 3 结论

本文通过试验与数值仿真对比分析了2024Al、Q235钢和HMn55-3-1Cu三种典型同强度、不同密度护套复合结构弹芯破坏模式差异及侵彻性能的优劣,得到如下结论。

1)2024Al护套因强度、密度及熔点较低,在侵彻过程中迅速熔化、汽化,失去了对钨丝集束弹芯的束缚,弹芯的破坏模式为“单独侵蚀”,其弹坑直径最小(为Q235钢与HMn55-3-1Cu护套弹芯的0.8倍和0.76倍),侵彻效率最低(为Q235钢与HMn55-3-1Cu护套弹芯的0.86倍和0.98倍)。

2)Q235钢与HMn55-3-1Cu护套弹芯以“共同侵蚀”模式发生破坏,但因HMn55-3-1Cu密度更大,加剧了弹芯材料侵彻过程中的径向流动,其侵彻阻力为Q235钢护套弹芯的1.02倍,侵彻性能更弱,说明“共同侵蚀”模式下护套材料密度与弹芯侵彻性能呈负相关。

3)仅当护套与钨丝集束弹芯以“共同侵蚀”的方式发生破坏时,护套结构才能提升钨丝集束弹芯的侵彻性能;当护套与钨丝集束弹芯以“分别侵蚀”方式发生破坏时,护套对钨丝集束弹芯的侵彻性能没有提升作用。

4)在垂直侵彻条件下,采用Q235钢护套的复合结构弹芯侵彻性能最佳。

### 参考文献(References):

- [1] Chen X W, Wei L M, Li J C. Experimental research on the long rod penetration of tungsten-fiber/Zr-based metallic glass matrix composite into Q235 steel target [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 79: 102 - 116.
- [2] 吴烁罡, 杜成鑫, 周峰, 等. 钨丝/锆基非晶复合材料与93W合金弹芯侵彻靶板的损伤特征[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(4): 111 - 121.  
Wu S G, Du C X, Zhou F, et al. Damage characteristic of target penetrated by WF/Zr-MG and 93W rods [J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(4): 111 - 121. (in Chinese)
- [3] Zhou F, Du C X, Du Z H, et al. Penetration gain study of a tungsten-fiber/Zr-based metallic glass matrix composite [J]. Crystals, 2022, 12(2): 284.
- [4] Zhou F, Du C X, Cheng C, et al. Penetration performance and fragmentation mechanism behind target of tungsten fibre/zirconium-based bulk metallic glass matrix composite rod [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2023, 112: 106160.

- [5] 杜成鑫,杜忠华,朱正旺. 着靶速度和钨丝直径对钨丝/锆基非晶复合材料弹芯侵略性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2017,46(6):1632-1637.  
Du C X, Du Z H, Zhu Z W. Effect of impact velocity and diameter of tungsten fiber on penetration ability of W<sub>f</sub>/Zr-based metallic glass composite penetrator[J]. Rare Metal Materials and Engineering,2017,46(6):1632-1637. (in Chinese)
- [6] Du C X, Du Z H, Wang K H, et al. Effect of tungsten fiber diameter on the dynamic compression properties of tungsten fiber/Zr-based bulk metallic glasses matrix composite[J]. International Journal of Impact Engineering,2022,164:104185.
- [7] 周峰,李立国,邢炳楠,等. 护套强度对钨丝集束弹芯侵略性能的影响[J]. 兵工学报,2025,46(7):295-306.  
Zhou F, Li L G, Xing B N, et al. The influence of strength of jacket materials on the penetration performance of WF/Zr-MG rods[J]. Acta Armamentarii,2025,46(7):295-306. (in Chinese)
- [8] Zhou F, Cheng C, Xing B N, et al. Investigation on the influence of strength and density of jacket materials on the penetration performance of jacketed rods[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures,2025,32(7):1534-1548.
- [9] 杜成鑫. Wf/Zr 基非晶复合材料杆弹准观侵略机理及优化设计[D]. 南京:南京理工大学,2020.
- [10] Zhou F, Du C X, Cheng C, et al. Penetration of a jacketed tungsten fibre/Zr-based bulk metallic glass matrix composite rod into semi-infinite targets[J]. International Journal of Impact Engineering,2024,189:104966.
- [11] Tang K, Wang J X, Song H P, et al. Investigation on the penetration of jacketed rods with striking velocities of 0.9~3.3 km/s into semi-infinite targets[J]. Defence Technology,2022,18(3):476-489.
- [12] Wen H M, He Y, Lan B. A combined numerical and theoretical study on the penetration of a jacketed rod into semi-infinite targets[J]. International Journal of Impact Engineering,2011,38(12):1001-1010.
- [13] Terentyev D, Riesch J, Lebediev S, et al. Mechanical properties of as-fabricated and 2 300 °C annealed tungsten wire tested up to 600 °C[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials,2017,66:127-134.
- [14] Lu J, Ravichandran G, Johnson W L. Deformation behavior of the Zr<sub>41.2</sub>Ti<sub>13.8</sub>Cu<sub>12.5</sub>Ni<sub>10</sub>Be<sub>22.5</sub> bulk metallic glass over a wide range of strain-rates and temperatures[J]. Acta Materialia,2003,51(12):3429-3443.
- [15] Wang X D, Yuan M N, Miao Y Z, et al. Stress wave propagation characteristics and impact resistance of laminated composites under impact loading[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures,2024,31(8):1822-1831.
- [16] 陈刚,陈小伟,陈忠富,等. A3 钢钝头弹撞击 45 钢板破坏模式的数值分析[J]. 爆炸与冲击,2007,27(5):390-397.  
Chen G, Chen X W, Chen Z F, et al. Simulations of A3 steel blunt projectiles impacting 45 steel plates[J]. Explosion and Shock Waves,2007,27(5):390-397. (in Chinese)
- [17] Kim Y A, Kim Y, Park S H, et al. Empirical and numerical study on Roma Plastilina #1 ballistic clay under various drop impact tests[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures,2023,30(18):3699-3709.
- [18] Cheng C, Fu Y Q, Du C X, et al. Oblique penetration law of short-rod projectile into thin metal target[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures,2024,31(9):2029-2040.
- [19] Xu L Z, Gao G F, Wang X D, et al. A model to characterize the lateral expansion of a cylinder containing a polymer filler subjected to compression[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures,2021,28(1):102-109.
- [20] Du C X, Wang P, Xing B N, et al. Deformation patterns of steel targets against long rod penetration[J]. Defence Technology,2025,50:272-287.

(责任编辑:宋颖韬)