

Microstructures and Heat Effect Analysis of Back-Jet Fragments Collected Before Armor Penetrated by Amorphous Composite Projectile

Kaiwen Tian¹, Quanzhao Zhang¹, Wei Huang¹, Weiming Huang¹, Minming Zou²

¹Ningbo Branch of Chinese Academy of Ordnance Science, Ningbo Zhejiang

²Zhejiang Business Technology Institute, Ningbo Zhejiang

Email: nbtkw@126.com

Received: Aug. 28th, 2019; accepted: Sep. 17th, 2019; published: Sep. 24th, 2019

Abstract

The back-jet fragments of W fiber reinforced Zr-based amorphous composite projectile penetrating steel target plate were collected by "salt chamber" recovery method. The microstructure and composition of the fragments were analyzed by scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS) and X-ray diffractometer, and the heat effect of the penetration process was analyzed by combining the above analysis results. The results show that, compared with tungsten alloy, the size of the back-jet fragments of amorphous composite is more uniform and smaller. Penetration by amorphous composite projectile is accompanied by stronger heat effects, and the heat generated during the penetration process can melt the amorphous matrix.

Keywords

Amorphous Composite, Microstructure, Heat Effect

非晶复合材料高速侵彻下反喷碎片的微观组织和侵彻热效应初步分析

田开文¹, 张全孝¹, 黄伟¹, 黄伟明¹, 邹敏明²

¹中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波

²浙江工商职业技术学院, 浙江 宁波

Email: nbtkw@126.com

收稿日期：2019年8月28日；录用日期：2019年9月17日；发布日期：2019年9月24日

摘要

采用“盐箱”回收方法，对钨丝增强锆基非晶复合材料弹芯侵彻钢靶板的反喷弹芯碎片进行收集，利用扫描电子显微镜、能谱仪和X射线衍射仪对反喷碎片断口的微观组织、相成分和反喷物的成分进行分析。研究表明钨丝增强复合材料弹芯侵彻钢靶板的反喷碎片的宏观形貌和尺寸较钨合金弹芯有很大不同，尺寸更均匀更细小；反喷碎片中的非晶基体呈熔融状态，非晶复合材料弹芯的侵彻中伴随着更强烈的热效应。

关键词

非晶复合材料，微观组织，热效应

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钨丝增强锆基非晶复合材料是一种以低熔点亚稳态锆基非晶合金为基体，高熔点晶态金属钨为增强相的复合材料，这种材料结合了钨合金和非晶合金的优点，其最大理论密度与钨合金和贫铀合金接近，压缩强度高于钨合金和贫铀合金，而且具有极高的动态压缩屈服强度和良好的自锐性能，是一种具有高穿甲威力、高毁伤后效等特点的战斗部材料。

国内外的模拟穿甲弹靶试结果均表明[1][2][3][4]，钨丝增强锆基非晶复合材料弹芯穿甲威力优于钨合金，与贫铀合金相当。传统穿甲弹用钨合金材料在侵彻过程中弹芯头部易发生塑性变形，弹芯头部呈“蘑菇头”形状，侵彻开坑阻力大，弹孔整体较粗，而钨丝增强锆基非晶复合材料弹芯在侵彻过程中，弹芯头部出现“自锐”特征，侵彻效率高，弹孔细长。此外，非晶复合材料穿甲弹由于基体中含有锆、钛等活性元素，在高速侵彻过程中易于燃烧[5][6]，因此在穿甲侵彻中会伴随着比钨合金穿甲弹更强的热效应。产生的热效应一方面可使靶板软化，降低穿甲弹的侵彻阻力，进一步提高非晶复合材料弹芯的穿甲侵彻效率；另一方面可以提高弹芯的毁伤后效。

研究穿甲弹侵彻威力和机制的手段通常是从分析靶板中残余弹芯的微观组织入手，研究弹芯在“三高”（高温、高压、高应变率）弹靶作用下的失效行为[7][8][9]。本文采用“盐箱”穿甲模拟靶试试验对非晶复合材料弹芯侵彻钢靶板的弹芯反喷碎片进行回收，研究靶前残余弹芯反喷碎片的微观组织和热效应，从靶前分析的角度探讨钨丝增强非晶复合材料侵彻性能优于钨合金的原因。由于以这种方法回收的穿甲弹反喷碎片是没有经过装甲板后续长时间加热的材料，其微观组织的研究可以更真实更客观地反映在“三高”弹靶相互作用下的钨丝增强锆基非晶复合材料的失效模式及产生的热效应。

2. 实验方法

实验所用的非晶复合穿甲弹材料为钨丝密排增强锆基非晶复合材料，图1为这种复合材料的横向截面（垂直于钨丝拉拔方向）的SEM形貌。深颜色区域为锆基非晶，圆形浅颜色的为钨丝，试样中钨丝都均匀排布，非晶相均完全填充于钨丝之间的空隙，可以看到在SEM分辨率范围内，没有发现其它晶体相。

“盐箱”穿甲模拟靶试试验的发射装置采用25/30弹道炮，靶板选用钢靶板。非晶复合材料模拟弹

芯高速垂直侵彻钢靶板。靶板的布置如图 2 所示, 将厚钢靶板放置在一个箱子内, 紧靠箱子的后壁, 然后在钢靶板前放置一个装满普通食盐的收集箱用来收集弹芯和靶板的反喷碎片。试验中的食盐一方面可以起到阻挡弹芯反喷碎片飞溅并抑制容易自燃的铅基非晶合金热表面氧化的作用, 另一方面食盐易溶于水, 方便将反喷碎片从中分离出来。在靶试结束后, 将靶板前的食盐倒在一个容器中, 经多次水洗去除盐分并滤出其中的反喷碎片(包括靶板和非晶复合材料弹芯的反喷碎片), 然后用磁铁的磁性将非晶弹芯碎片和钢靶板碎片进行分离, 最终得到非晶复合材料弹芯反喷碎片。

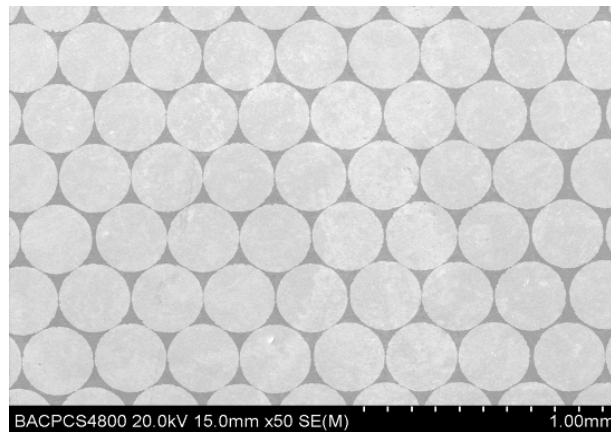


Figure 1. SEM image of amorphous composite

图 1. 非晶复合材料横截面的 SEM 形貌

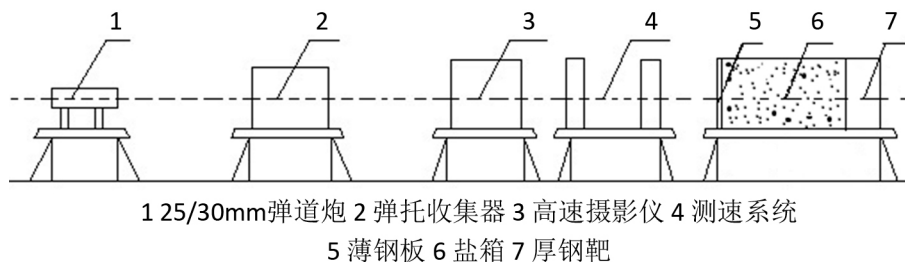


Figure 2. Target plate layout for salt chamber collecting back-jet fragments

图 2. 盐箱收集反喷物的靶板布置图

3. 试验结果与讨论

图 3(a)和图 3(c)分别为相同侵彻参数下, 靶试后收集到的非晶复合材料弹芯和钨合金弹芯的反喷碎片照片。钨合金反喷碎片中由于含大量的铁元素, 经过水洗去盐后有生锈现象。

从图 3 中的(a)和(c)可以看到, 与钨合金弹芯的反喷碎片相比, 非晶复合材料弹芯的反喷碎片尺寸更均匀更细小, 该特点对开展非晶复合材料侵彻后效研究非常有意义。因为这种材料穿靶后残弹中的破片质量小但破片数量多, 而且能够呈较大散射角射出, 具有优良的二次毁伤后效; 同时, 复合材料基体非晶合金的主要成分为铅、钛等易燃元素, 在高速冲击下易于燃烧, 具有优良的引燃、引爆功能。

采用 Rigaku D/max-2500/PC 型 X 射线衍射仪分别对非晶复合材料和钨合金反喷碎片进行 XRD 分析的结果如图 3(b)和图 3(d)所示。由图 3(b)可知, 反喷碎片的组成主要为 Ti_xW_{1-x} 相, 由于复合材料是由纯钨丝及 ZrTiCuNiBe 非晶合金组成, 并无 Ti_xW_{1-x} 相, 所以, 该相应是液态的反喷碎片冷却后形成的, 据 W-Ti 二元相图可知, Ti_xW_{1-x} 相形成的最低温度为 1670°C ($x = 1$), 最高温度为 3310°C ($x = 0$)。因此, 复合材料弹芯侵彻钢靶板时, 弹靶作用界面的温度低限应该为 1670°C 。

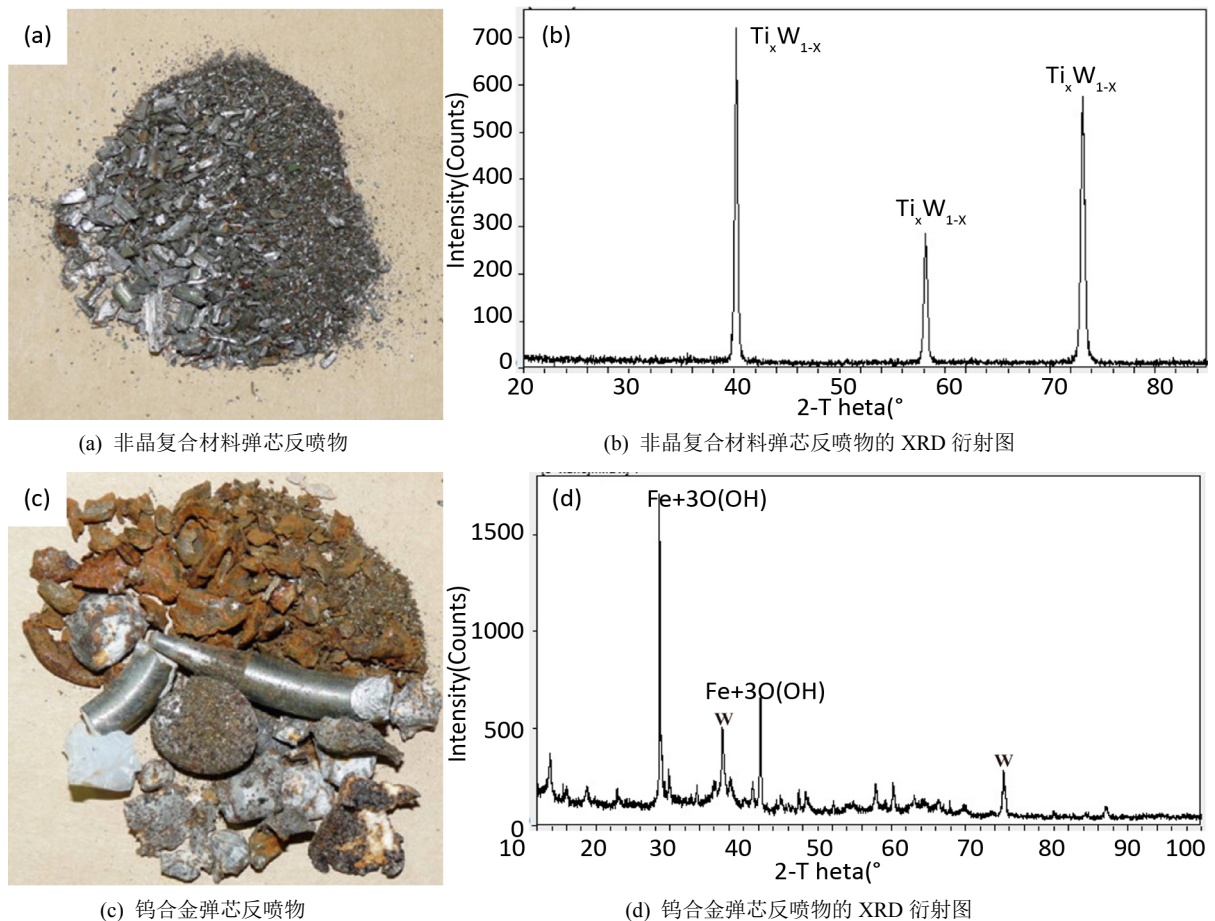


Figure 3. Picture of back-jet fragments of different projectiles and XRD pattern
图 3. 不同弹芯侵彻过程的反喷物及其 XRD 衍射图

钨合金弹芯侵彻反喷物中含有 W 相及 Fe 化合物相, 其中 W 相来自于弹芯与靶板相互作用时产生的碎片, 而来自靶板中 Fe 的化合物相在非晶复合材料弹芯侵彻反喷物中应该也存在, 只是在磁性分离过程中被去除了。

采用 FEI Quanta250 FEG 型扫描电镜和能谱仪对收集到的反喷碎片的微观组织和相成分进行进一步观察和分析, 非晶复合材料弹芯反喷碎片的断口形貌如图 4 所示。

由图 4 可以看到, 钨丝增强复合材料弹芯反喷物的断裂形貌, 在断裂的钨丝束表面各处都附着大量的熔融非晶。断裂贯穿钨丝和非晶两相, 形成断裂层(如图 4(a)), 其中的钨丝有少量撕裂现象(如图 4(b)), 而非晶基体呈现剪切断裂, 如图 3c 的脉状花样。Zr 基非晶合金基体受到剪切作用后变成粘滞流体将钨丝覆盖, 在剪切面所形成的粘性流体层的温度很高, 促使断口形貌表现出熔融状态(如图 4(c)所示), 甚至产生了宽度在 30 μm 的非晶熔融带(如图 4(d)), 对该熔融带进行进一步的能谱分析(如图 4(e)), 发现熔融的非晶中含有钨。

对非晶复合材料弹芯反喷碎片的表面形貌的进一步观察发现, 复合材料弹芯反喷碎片表面有球形物质(10 μm 左右)该球形物明显具有熔化痕迹, 能谱分析结果表明该球中钨元素含量为 100%, 表明此球为纯钨球, 如图 5 所示。这说明复合材料弹芯高速侵彻过程中, 在高应变率、高温、高压条件下, 弹靶作用界面有某些位置的温度有可能已经达到可以使钨丝熔化的温度。下一步准备设计更多的实验或模拟计算证实该实验结果。

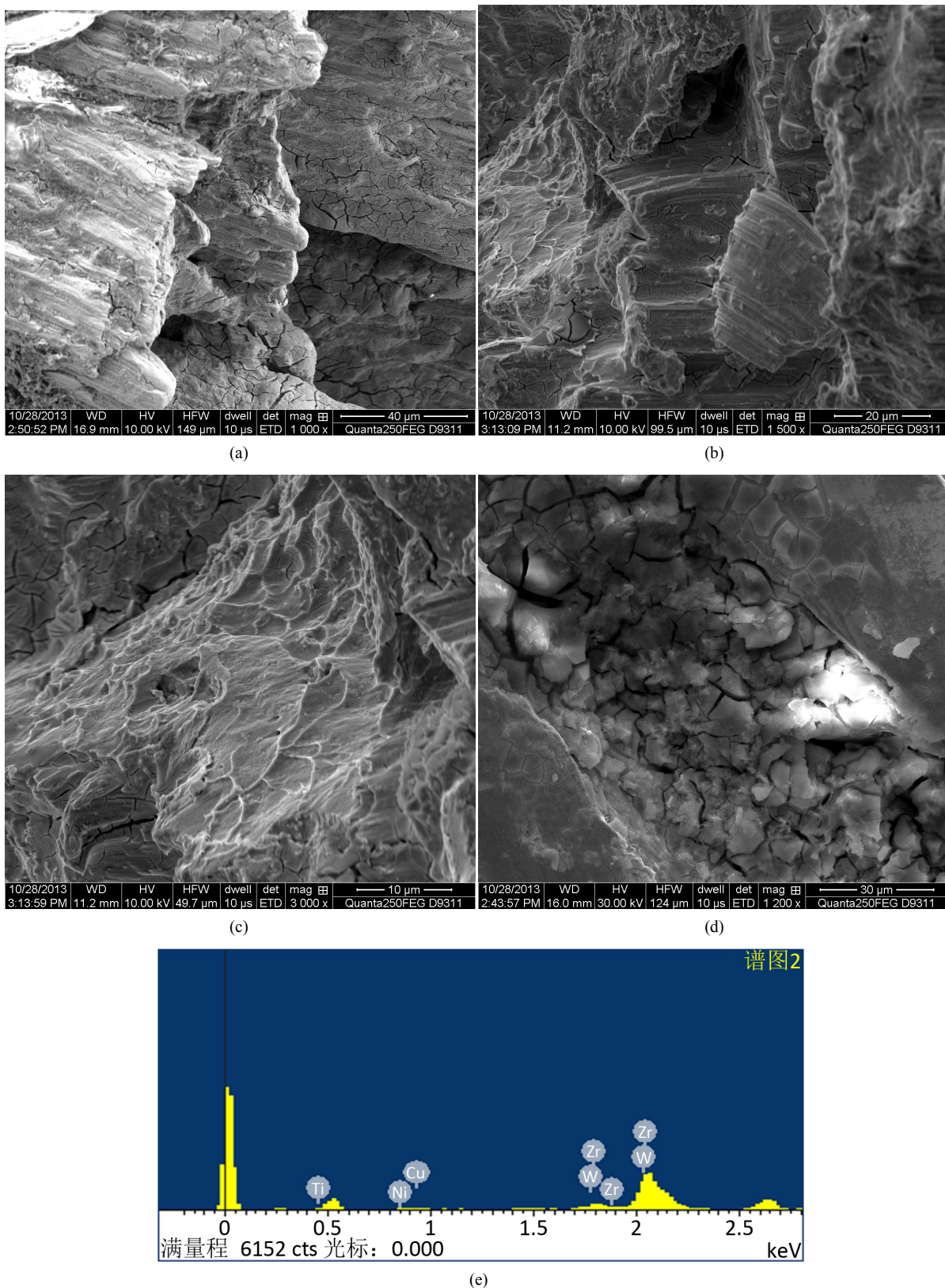


Figure 4. SEM images of back-jet fragments and EDS pattern of melted amorphous band
图 4. 反喷碎片的 SEM 形貌和非晶熔融带的能谱分析

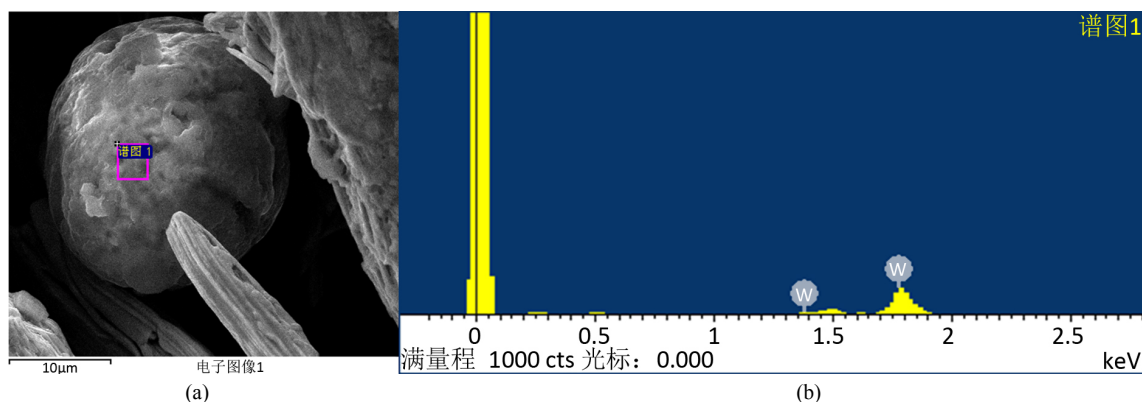


Figure 5. SEM image of pure tungsten sphere in back-jet fragments and its EDS pattern

图 5. 反喷碎片中的纯钨球和其能谱分析

非晶复合材料侵彻过程伴随着较钨合金更强烈的热效应，这一点在对非晶复合材料弹芯侵彻后的钢靶板组织和硬度分析中亦有发现，非晶复合材料侵彻后弹坑附近的钢靶板组织发生了马氏体转变且靶板中高硬度层的厚度比钨合金弹侵彻后靶板中的高硬度层的厚度高一倍多[10]。

4. 结论

1) 钨丝增强非晶复合材料弹芯侵彻钢靶板后的碎片，尺寸均匀细小且成分中含有引燃引爆功能的元素，今后可以有针对性地开展该材料的毁伤后效应用研究。

2) 盐箱回收弹芯反喷物的微观组织和成分分析表明，在高应变率、高温、高压的弹靶作用条件下产生的热可使非晶发生熔化，甚至有可能某些位置的温度已经达到可以使钨丝熔化的温度。

非晶复合材料弹芯侵彻过程表现出了较钨合金弹芯更加显著的热效应，这有利于降低靶板对弹芯的抗力，减小弹芯前进的摩擦阻力，最终使弹芯穿深提高。因此非晶复合材料弹芯侵彻性能优于钨合金，除了非晶复合材料本身具有较高的自锐性能外，热效应对穿深性能的提高也有一定贡献。

参考文献

- [1] 张晓立, 王金相, 孙宇新, 等. 钨丝增强块体非晶复合材料的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(8): 1323-1328.
- [2] 张兴超, 陈晓华, 张勇, 等. 超高强度及塑性的钨丝增强 ZrTiCuNiBeNb 金属玻璃复合材料[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(增刊 4): 786-789.
- [3] 刘岩, 黄德武, 王猛, 等. 超细晶钨基材料穿甲弹芯侵彻靶板的试验研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2008, 27(6): 5-8.
- [4] Conner, R.D., Dandliker, R.B., Scrugg, S.V., et al. (2000) Dynamic Deformation Behavior of Tungsten-Fiber/Metallic Glass Matrix Composites. *International Journal of Impact Engineering*, **24**, 435-444. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(99\)00176-1](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(99)00176-1)
- [5] 陈德民, 王刚, 孙剑飞, 等. 高应变速率下钨丝增强钨基块体非晶合金复合材料的变形行为[J]. 金属学报, 2006, 42(9): 1003-1008.
- [6] 邱克强, 王爱民, 张海峰, 等. 钨丝增强 ZrAlNiCuSi 块体非晶复合材料及其塑性行为[J]. 金属学报, 2002, 38(10): 1091-1096.
- [7] 杨超, 张宝平, 李灿波, 等. 侵彻过程中穿甲弹温升机制的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2003, 26(1): 29-31.
- [8] 杨超, 赵宝荣, 付克勤, 等. 钨合金穿甲弹侵彻钢装甲过程对弹坑附近靶板性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2003, 26(4): 10-13.
- [9] 杨超, 田时雨, 付克勤. 毁伤过程中弹板破坏机制的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2002, 25(2): 3-6.
- [10] 田开文, 祝理君, 刘晋渤, 等. 不同弹芯材料侵彻钢装甲对靶板硬度的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2014(1): 47-50.