

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0312

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*

吴烁罡, 杜成鑫, 周峰, 高光发, 吕文争, 陈曦
(南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094)

摘要: 为研究钨丝/锆基非晶复合材料(WF/Zr-based bulk metallic glass matrix composite, WF/Zr-MG)及93W合金两种弹芯材料对于45钢靶板的侵彻特征机理与损伤特征, 利用上述两种弹芯进行对比开展侵彻试验, 在宏观和微观层面对侵彻结果进行分析, 其中, 宏观量化表征量采用等效直径进行研究, 微观层面利用扫描电镜、光学显微镜、XRD衍射仪与显微维氏硬度仪对靶板的微观形貌、相变及硬度特征进行表征。试验结果表明, WF/Zr-MG弹芯完全贯穿靶板, 而93W合金弹芯残留于靶板之中, 其等效扩孔直径分别为16.7和18.4 mm, 前者较后者低10.18%, WF/Zr-MG弹芯的穿甲能力高于93W合金弹芯。在微观角度, WF/Zr-MG与93W合金弹芯侵彻后弹坑细晶层晶粒长径比分别为4.5和7.3, 其维氏硬度HV的峰值分别为249和287, 其中高硬度层宽度分别为10.2和8.9 mm。前者对应靶板高硬度层更宽的原因是Zr基非晶合金在侵彻过程中持续释放热量, 使其温度影响区较大, 因此硬度提升的区域大。侵彻过程中, 后者的靶板强度明显高于前者的, 其主要原因为WF/Zr-MG弹芯发生屈曲回流, 而93W合金弹芯产生蘑菇头现象, 使得WF/Zr-MG弹芯对于靶板的挤压变形更小, 晶粒拉长效果减弱, 硬度峰值提升变小, 靶板单位长度的能量损耗小, 从而增强WF/Zr-MG复合材料弹芯的穿甲能力。

关键词: WF/Zr-MG复合材料; 93W; 微观分析; 硬度分析; 损伤特征

中图分类号: O385 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Damage characteristic of target penetrated by WF/Zr-MG and 93W rods

WU Shuogang, DU Chengxin, ZHOU Feng, GAO Guangfa, LYU Wenzheng, CHEN Xi

(Department of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: In order to compare and analyze the characteristic and mechanism of damaging on 45 steel target plate penetrated by the WF/Zr-MG and 93W rod, a penetration experiment under hypervelocity impact was carried out. The analysis of penetration was performed at both macro and micro levels, in which the macroscopic quantitative characterization quantity was studied by equivalent diameter of reamer, and the microscopic morphology, phase transition and hardness characteristics of the target plate were obtained by scanning electron microscopy, optical microscope, X-ray diffraction and microhardness tester. The experimental results indicate that the WF/Zr-MG rod completely penetrated the target plate, while the 93W rod remained in the target plate. The armor-piercing capacity of WF/Zr-MG rod is higher than that of 93W rod with equivalent reaming diameter of 16.7 mm and 18.4 mm respectively, and the former is 10.18% lower than the latter. From the microscopic perspective, the aspect ratios of the fine grain layer after penetrated by the WF/Zr-MG rod and the 93W rod are 4.5 and 7.3, respectively. In addition, the width of the high-hardness layer are 10.2 mm and 8.9 mm, with Vickers hardness HV peaks at

* 收稿日期: 2023-08-28; 修回日期: 2024-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(12102201)

第一作者: 吴烁罡(2000—), 男, 硕士研究生, wushuogang@njjust.edu.cn

通信作者: 陈曦(1984—), 女, 博士, 副研究员, chenxi@njjust.edu.cn

249 and 287, respectively. The wider high-hardness layer observed in the former case can be attributed to the continuous burning of the Zr-based amorphous alloy during the penetration process, resulting in a larger temperature affected zone and consequently a greater area of hardness enhancement. On the other hand, in the latter case, the strength of the target plate during penetration is significantly higher due to the buckling and backflow of the WF/Zr-MG rod, while the 93W alloy core exhibits a "mushroom head" phenomenon. This reduces extrusion deformation on the target plate, thereby weakening the effect of grain elongation, reducing the increase in hardness peak value, and minimizing energy loss per unit length of the target plate. Ultimately, it enhances the armor-piercing capability of the WF/Zr-MG rod.

Keywords: WF/Zr-MG; 93W; micro analysis; hardness analysis; damage characteristic

高速侵彻问题是极为复杂的非线性问题, 不仅涉及侵彻与侵蚀过程中的非稳态特性, 还需要考虑弹芯和靶板的损伤特征、加工硬化与不同失效机制等因素, 因此高速穿甲侵彻问题仍然是当下的研究热点^[1-5]。深入研究这些问题, 不仅有利于提高弹芯的侵彻能力, 也可以帮助防御结构提高抵抗侵彻的能力。目前, 研究人员对于高速侵彻问题的研究方法主要分为理论分析、数值模拟和试验研究 3 类, 受试验方法与测试技术限制, 在弹芯高速侵彻靶板的试验数据较为有限, 而靶板上弹坑周边材料的损伤会记录弹丸的侵彻过程, 因此研究侵彻后靶板的损伤特征可以更加深入地了解弹芯侵彻靶板的作用机理。

目前, 国内外对于侵彻过程的研究已有一定进展。李明锐等^[5]利用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)与金相显微镜观察侵彻后 Q235 钢靶板微观组织及成分, 深入分析了穿甲弹对于薄靶板的损伤特征及侵彻过程。高华等^[6]采用金相显微镜与背向散射电子衍射技术(electron back scatter diffraction, EBSD)分析了复合靶板中装甲钢弹坑的微观组织成分, 结合硬度仪器研究了弹坑表面的硬度分布规律, 探讨了侵彻过程中弹体对于靶板的塑性变形行为与微观组织特征的影响规律。同样地, 罗荣梅等^[7]、邹敏明等^[8]与 Wang 等^[1]也主要通过 SEM、透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM)或 EBSD 等对于弹坑微观形貌进行表征以分析弹芯侵彻装甲钢靶板的过程。在射流侵彻靶板行为的研究中, 也可以通过表征孔道的微观形貌及周边硬度状态分布, 来分析射流侵彻靶板的穿孔过程^[9]。晁振龙等^[10]对于铝基复合材料的防护性能中, 结合微观损伤与数值模拟, 深入探究了铝基复合材料侵彻过程中的宏微观损伤机制; 针对钛基合金复合材料的损伤机制及绝热剪切行为, 黄竣皓等^[11]、李明兵等^[12]与苏冠龙等^[13]基于弹坑表面的微观形貌, 分析了钛基合金材料在抗弹性能及被动防护方面的优势; 张博等^[14]在镁合金变形机制的研究中, 结合微观损伤表征结果与宏观损伤特征, 揭示了高速冲击下镁合金弹坑组织的分布规律。上述学者们在研究弹靶作用时都是通过观察弹坑宏观形貌与微观组织, 分析了靶板在高速撞击下的损伤行为与变形机制, 揭示靶板在弹芯高速冲击下的侵彻过程^[15-16]。上述研究不仅记录了靶板在侵彻中的损伤行为与变形特征, 同时为提高靶板抗侵彻能力及弹芯侵彻能力的后续研究提供了试验依据。在钨丝/锆基非晶复合材料(WF/Zr-based bulk metallic glass matrix composite, WF/Zr-MG)弹芯侵彻钢制靶板的研究中, 夏龙祥^[17]与 Zhou 等^[4,18]在 WF/Zr-MG 残余弹芯的研究基础上, 结合弹坑的硬度对于侵彻过程进行了分析, 但是并未分析弹坑附近的微观组织。由于侵彻过程极为复杂, 在微秒级的侵彻过程中, 弹芯与靶板之间发生了剧烈的变形与破坏, 试验条件与测试手段目前仍然难以达到可以详细记录试验过程的要求。而弹芯侵彻靶板后留下的弹坑是弹芯与靶板在侵彻过程中相互作用的产物, 弹靶交互界面处的晶体组织会保留侵彻过程中弹靶相互作用的信息, 因而研究靶板微观组织对于侵彻过程的探索至关重要。

本文中通过对比 WF/Zr-MG 和 93W 合金两种弹芯材料侵彻 45 钢靶板, 从宏微观与硬度角度分析其损伤特征, 使用光学显微镜与显微维氏硬度仪分别研究弹坑周围硬度及高硬度区的金相特征, 综合分析 45 钢在 93W 合金弹芯侵彻后的硬度分布及金相特征, 比较在两种弹芯材料相同着靶条件下, 对 45 钢靶板损伤特征的影响。

1 侵彻试验

1.1 试验材料

弹芯分别采用 WF/Zr-MG 和 93W 合金两种材料制备。WF/Zr-MG 由钨丝与锆基非晶合金组成, 用渗流法铸造制备, 直径 0.3 mm 的钨纤维作为增强相均匀嵌入基体, 其中基体金属玻璃相的化学成分为 $Zr_{41.25}Ti_{13.75}Ni_{10}Cu_{12.5}Be_{22.5}$, 钨丝的体积分数约为 82%。经测量, WF/Zr-MG 的密度为 $(17.00\pm 0.20) g/cm^3$ 。93W 合金主要成分为 $W_{93}Ni_3Fe_4$, 用粉末冶金法制备, 其密度为 $(17.60\pm 0.15) g/cm^3$ 。

试验弹丸如图 1 所示, 弹丸包括弹芯、弹托及底推。图 1(a) 所示为已完成装配的尾翼稳定脱壳穿甲弹的试验用弹, 其零件组成如图 1(b) 所示。为了获得更良好的弹道性能, 将两种材料制成 $\varnothing 10 mm \times 92 mm$ 的尖头弹芯, 末端为 20 mm 长的钢制尾翼, 图 1(c) 为弹芯实物图。目标靶板则是采用 45 钢制成 $400 mm \times 500 mm \times 60 mm$ 的中厚靶板, 并在其后放置支撑板。靶板的正常微观基体组织如图 2 所示, 由白色块状和网状铁素体及深色细片状珠光体组成, 其中珠光体约占视场面积的 70%, 靶板晶粒尺寸为约 $50 \mu m$ 的等轴晶粒。

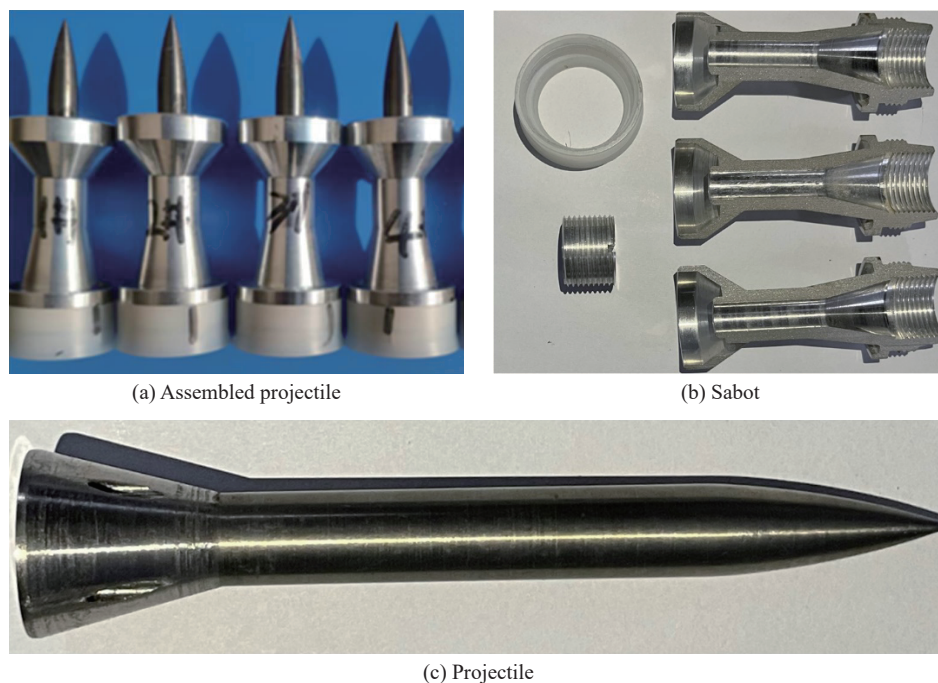


图 1 试验用弹图

Fig. 1 Projectiles used in test

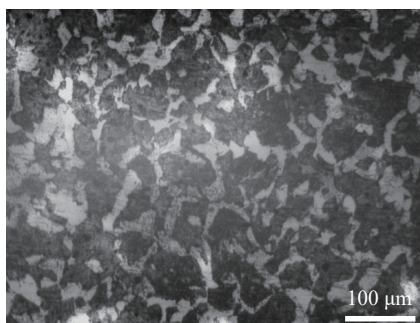


图 2 45 钢靶板基体微观组织

Fig. 2 Matrix microstructure of 45 steel target

1.2 试验与测试

试验布置如图 3 所示, 在距离目标靶板 16 m 处使用 37 mm 滑膛炮平台发射两种弹芯侵彻靶试进行对比。在目标靶板前方 2 和 4 m 处放置测速靶板, 利用药筒装药量调节弹芯发射时的初速, 并通过多通道数据采集系统对穿甲弹弹芯的速度进行测量, 如表 1 所示。

待侵彻完成后, 回收试验试样, 用线切割机切出包含有弹坑的靶板试样, 将试样沿弹孔轴向切开, 用砂纸打磨, 经机械抛光、5% 硝酸酒

精腐蚀后,制成观测剖面,并对弹坑进行拍摄记录,再利用金相显微镜与 SEM 对靶板高硬度区域进行微观组织分析。随后沿着侵彻方向与侵彻法线方向间隔 0.2 mm 以矩阵的形式取测试点,利用 HMV-G21 显微维氏硬度计对靶板不同测试点进行硬度测试。

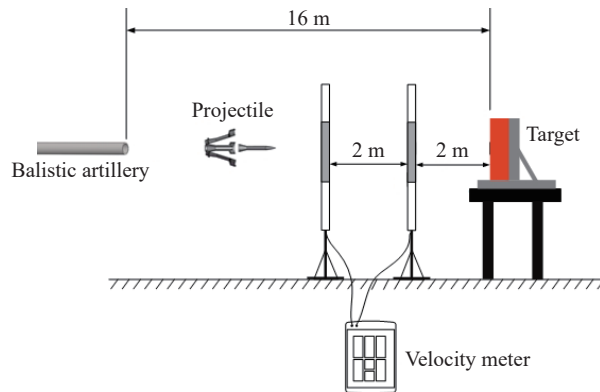


图 3 试验布局
Fig. 3 Test layout

表 1 试验弹芯主要参数及状态

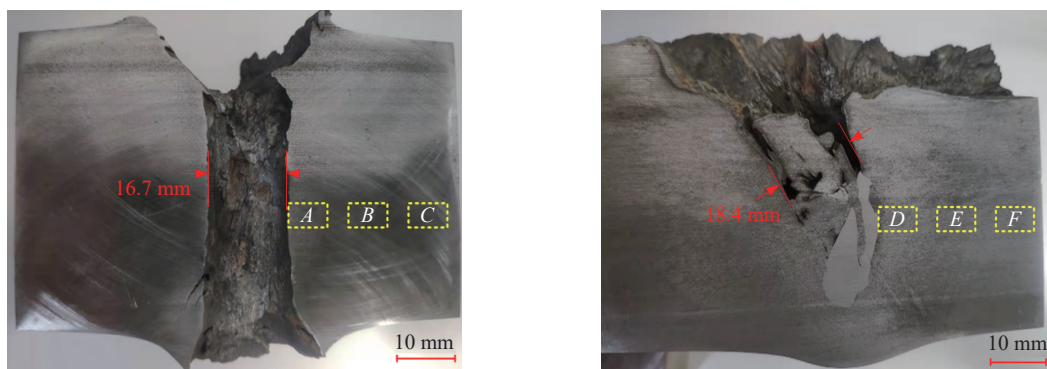
Table 1 Main parameters and test states of all projectiles used in the test

工况	材料	质量/g	侵彻速度/(m·s ⁻¹)
1	93W	122.6±0.1	1558±50
2	WF/Zr-MG	121.9±0.1	1543±50

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

图 4 为两种弹芯材料侵彻钢靶试验后弹坑的宏观形貌。对比发现,WF/Zr-MG 弹芯完全贯穿靶板,其侵彻深度大于 60 mm,如图 4(a)所示,在受到强冲击载荷作用下,靶板上的穿透弹孔是由弹坑逐步延伸和扩展,最后冲塞形成。弹坑开坑处有翻边,出口处出现翻唇,在稳定侵彻阶段整体状态趋于笔直,等效扩孔直径为 16.7 mm,弹坑表面凹凸不平且产生沿侵彻方向的细小沟槽,这是由于 WF/Zr-MG 高速侵彻过程中,急速升高的温度使得弹芯中的非晶合金材料先一步烧蚀和气化,随后钨纤维直接侵蚀靶板造成的^[17]。93W 合金弹芯侵彻弹坑截面如图 4(b)所示。93W 合金弹芯有一定的着靶角度,引起弹道偏转。靶板尚未完全贯穿,等效扩孔直径为 18.4 mm,在靶板背部出现鼓包,弹芯残留在靶板内部,其头部外观呈蘑菇头状。虽然 93W 合金弹芯在侵彻过程中发生了弹道偏转,但是由于目标靶板材料为均质材料,因此正侵彻与斜侵彻对靶板变形破坏模式以及后续的微观分析与硬度分析并无影响。



(a) Longitudinal profile of the plate penetrated by the WF/Zr-MG rod (b) Longitudinal profile of the plate penetrated by the 93W rod

图 4 靶板纵向剖面图

Fig. 4 The macroscopic states of the target plates

2.2 试验结果分析

2.2.1 宏观特征分析

相比于 93W 合金弹芯, WF/Zr-MG 弹芯侵彻靶板过程中, 靶板的变形量较小, 因此靶板变形消耗的能量更小。根据文献 [18] 可知 WF/Zr-MG 弹芯弹体总动能为 1.467×10^5 J, 侵彻深度为 95 mm, 而 93W 合金弹芯总动能为 1.543×10^5 J, 侵彻深度为 110 mm。

$$A = \frac{E}{l} \quad (1)$$

式中: A 为单位侵彻深度条件下靶板消耗能量, E 为弹体总动能, l 为侵彻深度。

结合式 (1) 可得, 单位侵彻深度条件下 WF/Zr-MG 弹芯消耗的能量 A_1 为 1333 J/mm, 单位侵彻深度条件下 93W 合金弹芯侵彻靶板消耗能量 A_2 为 1624 J/mm, 因此 A_1 比 A_2 小 18%。

根据 Walker^[19] 的研究可知, 穿甲弹以 1500 m/s 的速度侵彻靶板时, 靶板塑性变形所消耗的能量约占弹体总动能的 71%。因此, 根据能量守恒, 单从靶板耗能角度分析, WF/Zr-MG 弹体的侵彻深度将比 93W 合金弹体大 12.78%。而在试验中, WF/Zr-MG 弹芯侵彻产生的弹坑趋于笔直, 其等效扩孔直径可达 16.7 mm, 93W 合金弹芯的弹坑等效扩孔直径达 18.4 mm。从宏观侵彻结果数据分析, 93W 合金的扩孔直径将比 WF/Zr-MG 的大 10.18%。

2.2.2 微观特征分析

如图 4(a) 所示, 紧邻弹坑周边分别间隔 25 mm 取 A 、 B 与 C 这 3 处分析位置, 在分析位置处取 $8 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的分析样片。图 5 为 WF/Zr-MG 侵彻后弹坑 A 、 B 、 C 位置样片的微观组织形貌。其中 A 点区域组织出现细晶层与形变层, 细晶层区域沿侵彻方向晶粒拉长至破碎, 利用 SEM 对于细晶层区域进行进一步分析, 得出细晶层晶粒等效纵向长度 L 与等效横向宽度 D 分别为 77 和 17 μm , 其中, 长径比 (L/D) 为 4.5。因此弹靶交界面在 WF/Zr-MG 弹芯侵彻过程中产生了较大的变形。紧邻细晶层的形变层, B 点与 C 点区域的形变层晶粒形变大小依据弹坑距离而不同, 距离弹坑越远, 晶粒形变越小, 直至 C 点区域晶粒大小趋于正常基体组织。

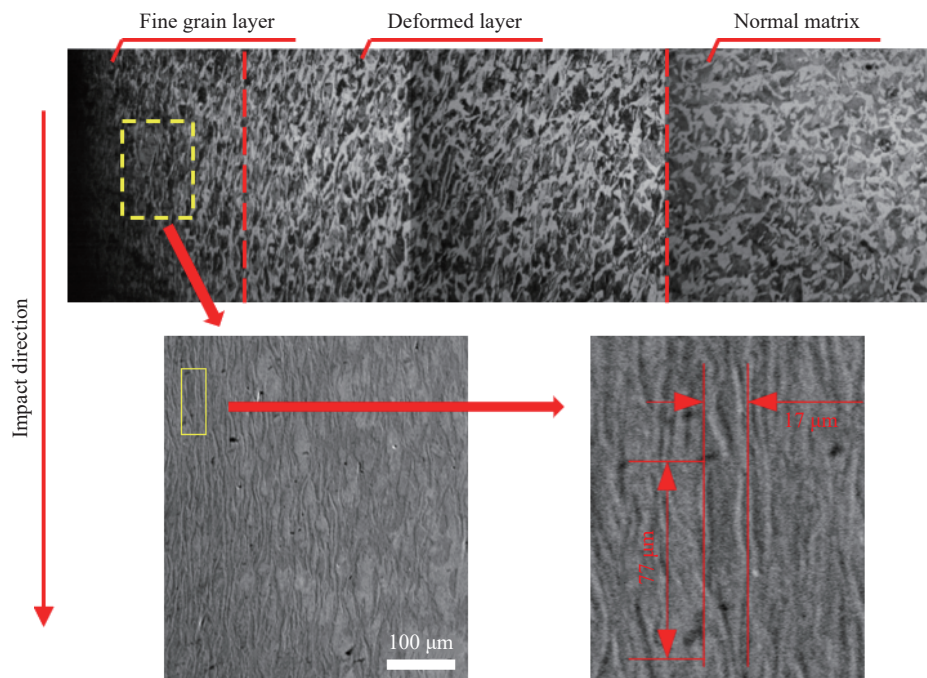


图 5 WF/Zr-MG 弹芯侵彻后靶板的微观组织

Fig. 5 Microscopic crystalline phase of the 45 steel plate penetrated by the WF/Zr-MG rod

同样地, 紧邻 93W 合金侵彻弹坑周边分别间隔 25 mm 取 *D*、*E* 与 *F* 这 3 处分析位置, 如图 4(b) 所示, 在分析位置处取 8 mm×5 mm×1 mm 的分析样片。图 6 则为 93W 合金侵彻后弹坑 *D*、*E*、*F* 位置样片的微观组织形貌。*D* 点区域组织同样出现细晶层与形变层, 其中细晶层区域沿侵彻方向各晶粒方向趋于一致, 产生较为明显的形变织构, 变形量越大, 择优取向越强, 表现出形变织构越强, 弹坑附近靶板晶粒被拉长甚至断裂形成一定的流线形。在 *D* 点附近组织生成细晶层, 利用 SEM 对于细晶层区域进行进一步分析, 得出细晶层晶粒等效纵向长度与等效横向宽度分别为 102 和 14 μm, 长径比为 7.3。而紧邻细晶层的形变层, *D* 点与 *E* 点区域的形变层晶粒形变大小同样依据弹坑距离而不同, 距离弹坑越远, 晶粒形变越小, 直至 *F* 点区域晶粒大小趋于正常基体组织。

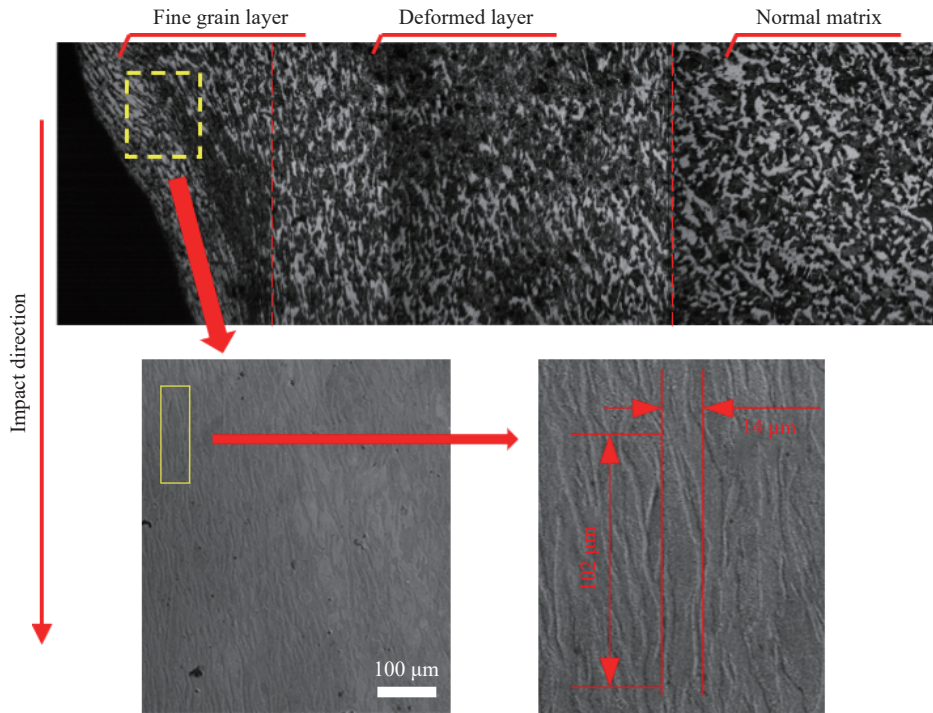


图 6 93W 弹芯侵彻后靶板微观组织

Fig. 6 Microscopic crystalline phase of the 45 steel plate penetrated by the 93W rod

通过计算靶板不同位置区域晶粒长径比, 绘制晶粒长径比随位置变化对比图, 如图 7 所示。靶板经高速侵彻后, 原本细晶层的等轴晶粒在弹芯侵彻挤压下沿金属流动方向变形, 随着变形量的增大, 晶粒拉长程度提高。对比两种不同弹芯侵彻后弹坑附近 *A* 与 *D* 点微观组织, 其晶粒都呈现不同程度的纵向拉伸。其中 WF/Zr-MG 弹芯在侵彻中细晶层内的大部分晶粒变形更小, 晶粒平均长径比约为 4.5, 随着距弹坑位置的距离增加, 靶板晶粒长径比缓慢减小; 而 93W 合金弹芯侵彻后的细晶层大部分晶粒纵向拉伸效果更加明显, 细晶层晶粒平均长径比约为 7.3, 靶板晶粒长径比在距弹坑 5 mm 内快速下降, 但总体上其长径比更高。说明在侵彻过程

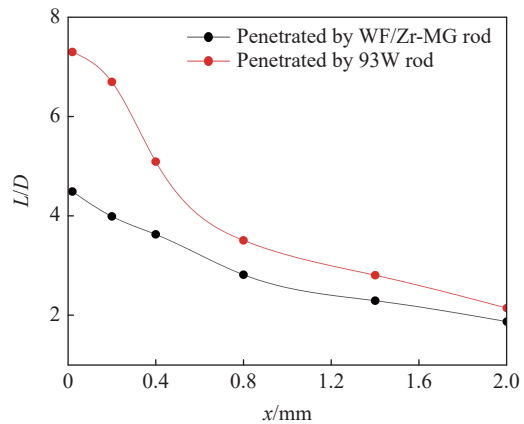


图 7 靶板不同位置长径比变化曲线

Fig. 7 Grain size variation curves at different positions of the target plate

中, 93W 合金弹芯对靶板的挤压程度更大, 因此弹坑周边靶板晶粒变形更大。

研究表明, 93W 合金弹芯在侵彻过程中会产生蘑菇头现象。从靶板晶粒的变形情况可以发现, 93W 合金弹芯侵彻过程中的蘑菇头对靶板弹坑周围造成更大的挤压变形, 微观层面表现为弹坑周围靶板晶粒变形程度大, 晶粒纵向拉伸程度明显。这与前文两种弹芯侵彻靶板的扩孔直径相互印证。试验中由于 WF/Zr-MG 弹芯穿透靶板, 弹芯未回收成功。由参考文献 [18] 可知, 在侵彻过程中弹芯的破坏模式为钨丝的屈曲回流, 如图 8(a) 所示。在弹芯侵彻的初始阶段与 93W 弹芯发生类似的墩粗变形, 与之区别的是, 弹芯内置钨丝随后弯曲为扫帚状, 如图 8(b) 所示; 弹芯高速穿透靶板时, 由于热软化效应占据主导地位, 大大降低弹芯基体组织对钨丝的约束能力, 因此随着侵彻深度的增加, 弹芯表现出钨丝的动态屈曲、断裂与回流现象, 弹芯头部不断被磨尖, 使得其对于靶板弹坑周围造成的挤压变形相较于 93W 更小, 在侵彻 45 钢的过程中造成弹坑细晶层靶板晶粒变形程度更小。

为分析侵彻过后靶板的微观组织相变, 取图 4 中 A、D 点样片与原始样片对于 93W 合金侵彻后状态、WF/Zr-MG 复合材料侵彻后状态以及靶板原始状态进行 XRD 衍射图谱分析, 结果如图 9 所示。XRD 衍射图谱结果表明, 在侵彻前后原始 45 钢靶板组织、WF/Zr-MG 弹芯侵彻后的 45 钢靶板组织和 93W 合金弹芯侵彻后的 45 钢靶板组织峰值位置相同, 因此两种材料弹芯在侵彻靶板过程中, 弹坑周围晶粒并未发生相变。

金相结果表明靶板弹坑晶粒在微观上表现出晶粒细化及细晶强化的现象, 以此吸收高速飞行的弹芯侵彻靶板时的部分能量。93W 合金弹芯产生的弹坑变形层的晶粒拉长程度更高, 这是由于 93W 合金在侵彻中产生蘑菇头, 使其对靶板挤压变形更大, 靶板协调变形的能量更多, 因此弹坑细晶层晶粒拉长效果也更加显著; 而 WF/Zr-MG 弹芯在侵彻过程中由于其自身的断裂特性不同于 93W 合金弹芯, 使其对靶板挤压变形更小, 靶板协调变形的能量更少, 晶粒拉长效果相对较弱, 同时其弹体损失能量更低, 因此其侵彻深度更深, 这与宏观分析中两种弹芯材料的穿深相互印证。

2.2.3 硬度分析

侵彻过后弹坑的硬度主要由于侵彻过程中弹芯对靶板的高温高压造成, 而侵彻过程中的高温高压来源于弹芯的侵彻动能, 侵彻过后弹坑周边靶板的硬度可以反映侵彻过程中靶板中的能量耗散机制, 因此对弹坑周边靶板的硬度进行分析可以间接分析弹芯的侵彻过程。由于弹芯速度约为 1550 m/s, 侵彻过程中弹靶以半流体的状态相互作用, 且在侵彻结束后, 靶板冷却阶段的温度变化对于靶板周围硬度峰值的影响较小, 冷却后靶板的硬度参数仍然具有相当的参考价值 [20], 因此为进一步研究 WF/Zr-MG 和

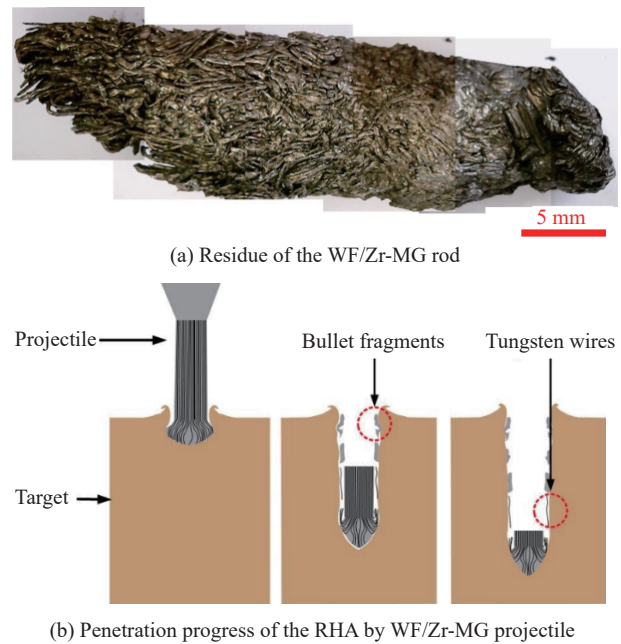


图 8 残留的 WF/Zr-MG 复合材料弹芯^[18]

Fig. 8 Residue of the WF/Zr-MG rods^[18]

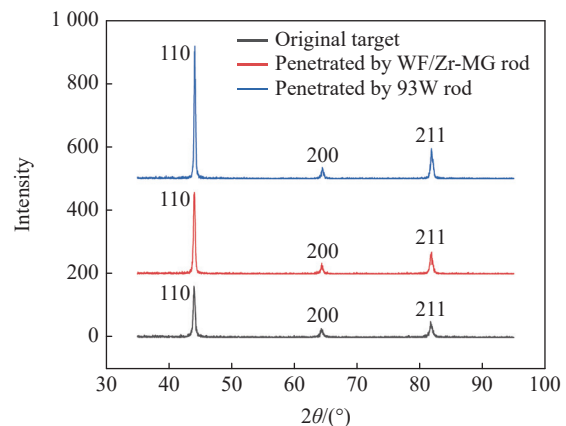


图 9 XRD 衍射图谱

Fig. 9 X-ray diffraction pattern

93W 合金弹芯侵彻后弹坑附近靶板变化情况, 对侵彻后的靶板进行硬度分析。

将靶板切块, 利用显微维氏硬度计对靶板不同测试点进行硬度测试, 将所得原始数据绘制出云图, 如图 10 所示。侵彻后距离弹坑越近, 靶板的硬度越高, 但是 WF/Zr-MG 和 93W 合金弹芯侵彻过后弹坑附近靶板硬度变化不同。图 10(a) 为 WF/Zr-MG 侵彻后弹坑附近靶板的硬度, 维氏硬度 HV 的峰值为 249, 较原始层(维氏硬度 HV 为 185)提高了约 34%, 高硬度层(高于原始硬度层区域)宽度平均约为 10.2 mm; 图 10(b) 为 93W 合金弹芯侵彻后弹坑附近靶板的硬度, 细晶层维氏硬度 HV 的峰值达到 287, 较原始层提高了 55%, 高硬度层平均宽度约为 8.9 mm。

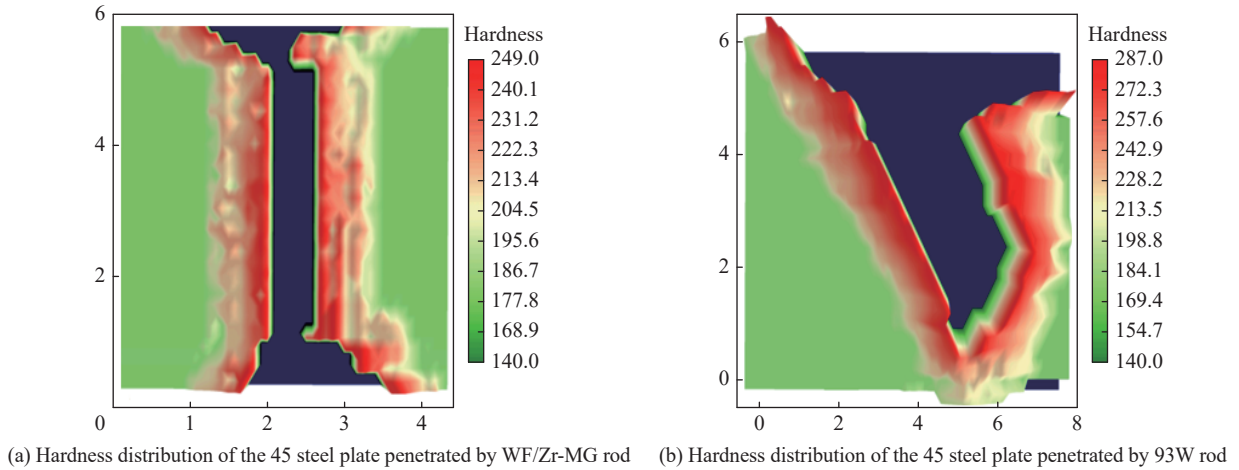


图 10 靶板硬度对比

Fig. 10 Comparison of target hardness distributions

侵彻过程中, 弹坑产生硬度变化的主要原因是弹体对靶板的挤压变形造成的加工硬化与弹坑局部温升产生的硬化。由于靶板吸收弹芯侵彻时的能量产生塑性变形, 因此在微观上导致晶粒细化, 位错密度增大。由于晶界是位错运动的障碍, 根据 Hall-Petch 公式^[21], 靶板弹坑周围晶粒组织细化后, 晶界相对面积增加, 因而位错障碍变多, 导致材料屈服强度上升, 弹坑周围硬度提高。在侵彻过程中, 靶板吸收弹芯损失的部分能量转化为热量, 导致侵彻瞬间产生局部温升。随着侵彻结束, 靶板空冷至室温, 弹坑表层组织产生内应力, 在冷却的同时, 弹坑周围发生硬化。因此靶板硬度从弹坑边缘向基体内部衰减。

参考文献 [22] 可知, 变形能 90% 将转化为热能:

$$\Delta T = \frac{0.9}{\rho c_p} \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon \quad (2)$$

式中: ΔT 为靶板温升, ρ 为密度, ε 为塑性应变, c_p 为定压热容。

$$\sigma = (\sigma_0 + B\varepsilon^n) \left(1 + C\varepsilon^* \ln \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_0^*} \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right) \quad (3)$$

式中: ρ 为 7800 kg/m^3 , c_p 为 $480 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, 初始屈服强度 $\sigma_0=496 \text{ MPa}$, 室内温度 T_r 为 293 K , 熔化温度 T_m 为 293 K , 硬化常数 B 为 434 MPa , 应变率常数 C 为 0.0084 , 初始平均应变率 ε_0^* 为 1 s^{-1} , 硬化系数 n 为 0.307 , 热软化系数 m 为 0.804 。

结合金相结果、45 钢应变率效应和温度效应^[22-23], 绘制 93W 弹芯侵彻靶板后距弹坑 2 mm 范围钢板温升曲线, 如图 11 所示, 其中 WF/Zr-MG 侵彻靶板温升曲线为示意图。

WF/Zr-MG 弹芯高硬度层区域较 93W 合金弹芯更宽的原因是前者在高速侵彻过程中, 弹芯基体发生了燃烧^[17], 这一点由图 4(a) 弹坑上出现的细小沟槽可以很好地证实。Zr 基非晶合金基体自侵彻开始直至侵彻结束之后一段时间会持续燃烧^[24], 对弹坑周围温度影响区域大, 如图 11 所示。靶板温升曲线在距弹坑一定距离之后, 靶板温度相对较高。在侵彻结束后, 靶板硬度在冷却过程中会有小幅的提

升^[25]。而 93W 合金弹芯在侵彻开始时温度瞬间升高, 高温持续时间极短, 随后弹靶立刻进入冷却阶段, 冷却速率相对较快, 因此对弹坑侧壁硬度的影响区域较小。

而 WF/Zr-MG 弹芯侵彻过后靶板内硬度峰值提升低于 93W 合金弹芯, 主要是由于 WF/Zr-MG 材料弹芯在侵彻过程中由于发生屈曲回流, 而 93W 合金弹芯在侵彻过程中产生蘑菇头。在微观分析中, 93W 合金弹芯侵彻后的细晶层大部分晶粒纵向拉伸效果更加明显, 细晶层晶粒平均长径比约为 7.3, 而 WF/Zr-MG 弹芯在侵彻中细晶层内晶粒平均长径比约为 4.5; 前者的靶板周围晶粒平均直径相对较大, 晶粒平均拉长程度低, 其屈服强度提升较小; 对于弹坑周围硬度峰值提升程度较低, 而 WF/Zr-MG 弹芯侵彻过后靶板硬度峰值提升低, 因此其靶板单位长度的能量损耗小, 弹芯的侵彻深度更深, 硬度分析结论与微观分析相互印证。

3 结 论

通过研究 WF/Zr-MG 与 93W 合金侵彻靶板的损伤特征, 可以得出如下结论。

(1) WF/Zr-MG 弹芯在侵彻过程中钨丝发生屈曲回流, 使弹芯对靶板挤压变形更小, 靶板协调变形的能量更少, 晶粒拉长效果相对较弱; 而 93W 合金弹芯产生的弹坑细晶层的晶粒拉长程度更高, 这是由于 93W 合金在侵彻中产生蘑菇头, 使其对靶板挤压变形更大, 靶板协调变形的能量更多, 弹坑细晶层晶粒拉长效果更加显著, 其对应屈服强度提高, 增强了靶板的抗侵彻能力。

(2) WF/Zr-MG 弹坑周围靶板晶粒拉长程度低, 导致弹坑侧壁硬度峰值更低; 而 93W 合金弹坑周围靶板晶粒拉长程度高, 因此弹坑侧壁硬度峰值更高, 单位长度靶板损耗能量大幅提高, 弹芯侵彻深度降低。除此之外, WF/Zr-MG 弹芯侵彻瞬间 Zr 基非晶合金燃烧持续放热, 其温度影响区域更广, 在冷却过程中导致前者高硬度层区域更宽。

参考文献:

- [1] WANG H K, LI Z Z, ZHANG Z H, et al. Microstructure evolution of 6252 armor steel under hypervelocity impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 170(12): 104356. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104356.
- [2] HE Y, ZHANG Z, YANG S, et al. Deformation and fracture mechanism of Ti-6Al-4V target at high and hyper velocity impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 169(12): 104312. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104312.
- [3] ZHENG Z, ZHU D, DING X, et al. Hypervelocity impact damage and microstructure evolution of woven Ti6Al4V fabric reinforced aluminum matrix composites [J]. *Materials & Design*, 2016, 108(10): 86–92. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.06.075.
- [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(4): 106160. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2023.106160.
- [5] 李名锐, 冯娜, 蔡青山, 等. 93W 杆式弹超高速撞击多层 Q345 钢靶毁伤及微观分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(2): 021408. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0303.
LI M R, FENG N, CAI Q S, et al. Damage of a multi-layer Q345 target under hypervelocity impact of a rod-shaped 93W projectile [J]. *Explosion And Shock Waves*, 2021, 41(2): 021408. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0303.
- [6] 高华, 熊超, 殷军辉. 弹丸侵彻多层异质复合靶板中装甲钢变形细观和微观机理研究 [J]. *兵工学报*, 2018, 39(8):

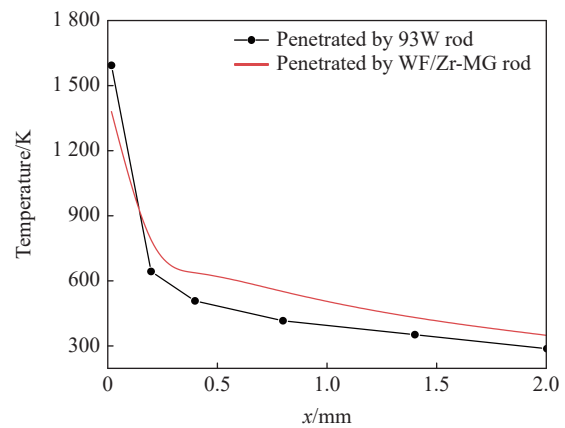


图 11 靶板不同位置温升曲线

Fig. 11 Temperature rise curves at different positions of the target plate

- 1565–1575. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.08.013.
- GAO H, XIONG C, YIN J H. Research on macroscopic and microscopic mechanisms of deformation of armor steel in multilayer heterogeneous compositetarget subjected to projectile [J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(8): 1565–1575. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.08.013.
- [7] 罗荣梅, 黄德武, 杨明川, 等. 杆式穿甲弹侵彻靶板时弹坑表面熔化快凝层研究 [J]. *兵工学报*, 2015, 36(7): 1167–1175. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2015.07.003.
- LUO R M, HUANG D W, YANG M C, et al. Research on melted and rapidly solidified layer on the surface of crater penetrated by long tungsten rod [J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(7): 1167–1175. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2015.07.003.
- [8] 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. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20210514.009.
- ZOU M M, GUO M, CHAI D S, et al. Morphological characteristics of penetration crater of tungsten wire reinforced zirconium based amorphous matrix composite [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2021, 44(4): 56–60. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20210514.009.
- [9] 侯杰, 陈曦, 杜忠华, 等. W-Cu-Zr 基非晶粉末药型罩射孔弹侵彻行为研究 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2022, 45(4): 12–17. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20220701.004.
- HOU J, CHEN X, DU Z H, et al. Penetration behavior of W-Cu-Zr amorphous powder liner [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2022, 45(4): 12–17. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20220701.004.
- [10] 晁振龙, 姜龙涛, 陈圣朋, 等. 55%B₄C/7075Al 复合材料抗弹性能与损伤行为研究 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2020, 43(3): 1–7. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20200115.005.
- CHAO Z L, JIANG L T, Chen S P, et al. Ballistic property and damage behavior of 55% B₄C/7075Al composites [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2020, 43(3): 1–7. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20200115.005.
- [11] 黄竣皓, 王琳, 刘小品, 等. Ti-6321 钛合金力学性能和抗弹性能 [J]. *兵工学报*, 2021, 42(1): 124–132. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.01.014.
- HUANG J H, WANG L, LIU X P, et al. Mechanical properties and ballistic performance of Ti-6321 alloy [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(1): 124–132. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.01.014.
- [12] 李明兵, 王新南, 商国强, 等. 双态组织 TC32 钛合金的抗弹性能及损伤机制 [J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(2): 365–372. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37761.
- LI M B, WANG X N, SHANG G Q, et al. Ballistic properties and failure mechanisms of TC32 titanium alloy with bimodal microstructure [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(2): 365–372. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37761.
- [13] 苏冠龙, 龚煦, 李玉龙, 等. TC4 在动态载荷下的剪切行为研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(4): 527–535. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)04-0527-09.
- SU G L, GONG X, LI Y L, et al. Shear behavior of TC4 alloy under dynamic loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(4): 527–535. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)04-0527-09.
- [14] 张博. 高速撞击条件下镁合金损伤行为及变形机制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 1–25. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2020.001729.
- [15] 陈海华, 张先锋, 刘闯, 等. 高熵合金冲击变形行为研究进展 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(4): 041402. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0414.
- CHEN H H, ZHANG X F, LIU C, et al. Research progress on impact deformation behavior of high-entropy alloys [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(4): 041402. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0414.
- [16] 高玉魁, 陶雪菲. 高速冲击表面处理对金属材料力学性能和组织结构的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(4): 041401. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0342.
- GAO Y K, TAO X F. A review on the influences of high speed impact surface treatments on mechanical properties and microstructures of metallic materials [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(4): 041401. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0342.
- [17] 夏龙祥. 钨纤维增强块体金属非晶复合材料侵彻行为研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2014: 11–22. DOI: 10.7666/d.Y2520745.
- [18] ZHOU F, DU C X, DU Z, et al. Penetration gain study of a tungsten-fiber/zr-based metallic glass matrix Composite [J].

- Crystals*, 2022, 12(2): 284. DOI: 10.3390/cryst12020284.
- [19] WALKER J. Hypervelocity penetration modeling: momentum vs. energy and energy transfer mechanisms [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 26(1-10): 809–822. DOI: 10.1016/S0734-743X(01)00134-8.
- [20] ELSHENAWY T, ELBEIH A, LI Q. Influence of target strength on the penetration depth of shaped charge jets into RHA targets [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 136: 234–242. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2017.12.041.
- [21] HALL E O. The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results [C]// *Proceedings of the Physical Society. Section B*. London, UK: Institute of Physics and the Physical Society, 1951: 747. DOI: 10.1088/0370-1301/64/9/303.
- [22] 陈昊, 陶钢. 铜射流侵彻后 45#钢穿孔处的微观组织分层研究 [J]. *南京理工大学学报*, 2011, 35(4): 498–501. DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2011.04.001.
- CHEN H, TAO G. Microstructure's delamination on bore of 45# steel penetrated by copper jet [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2011, 35(4): 498–501. DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2011.04.001.
- [23] 胡昌明, 贺红亮, 胡时胜. 45 号钢的动态力学性能研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(2): 188–192.
- HU C M, HE H L, HU S S. Study on dynamic mechanical properties of No. 45 steel [J]. *Explosion And Shock Waves*, 2003, 23(2): 188–192.
- [24] 尚春明, 施冬梅, 张云峰等. Zr 基非晶合金的燃烧释能特性 [J]. *含能材料*, 2020, 28(6): 564–568. DOI: 10.11943/CJEM2019219.
- SHANG C M, SHI D M, ZHANG Y F, et al. Combustion and energy release characteristics of zr-based amorphous alloys [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2020, 28(6): 564–568. DOI: 10.11943/CJEM2019219.
- [25] LI D F, DONG H Y, WU K M, et al. Effects of cooling after rolling and heat treatment on microstructures and mechanical properties of Mo-Ti microalloyed medium carbon steel [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2020, 773(C): 138808. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138808.

(责任编辑 王易难)