

文章编号: 1001-4888(2014)03-0279-07

80% 钨纤维增强锆(Zr)基块体金属玻璃 复合材料长杆弹侵彻钢靶实验研究^{*}

王杰¹, 陈小伟^{1,2}, 韦利明², 雷劲松¹

(1. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川绵阳 621010;

2. 中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川绵阳 621999)

摘要: 本文在 765~1766m/s 速度范围内, 对钨纤维体积分数为 80% 的增强锆(Zr)基块体金属玻璃复合材料长杆弹进行侵彻 Q235 钢靶的穿甲试验, 对残余弹体进行宏、细观观测, 研究弹体材料的失效破坏模式。穿甲试验表明, 在大于 1000m/s 速度侵彻时, 钨纤维非晶弹拥有头形自锐能力, 表现出优秀的侵彻能力。弹材变形和破坏主要发生于弹体头部边缘层, 呈局域化和尖锐化特点, 而且边缘层厚度在整个高速穿甲过程中保持动态平衡。由于非晶基体作用, 弹体材料易发生剪切断裂等破坏, 通过流动形成质量侵蚀并导致弹体头部边缘层形成自锐。

关键词: 钨纤维增强锆(Zr)基块体金属玻璃复合材料; 长杆弹; 穿甲; 自锐; 宏细观分析; 金相分析

中图分类号: O385

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-13-076

0 引言

穿甲弹(armor piercing projectile)是一种典型的动能弹, 其特点为初速高、直射距离大、射击精度高, 主要依靠弹丸强度、重量和速度穿透装甲, 是坦克炮和反坦克炮的主要弹种。目前国外普遍采用钨、贫铀合金作穿甲弹弹芯材料。钨合金弹芯在穿甲过程中易钝粗形成蘑菇头, 从而降低其穿甲性能。贫铀弹高速撞击靶板可保持较好的“自锐”而有较高穿甲性能, 但因为对人员和环境有放射性危害而为国际社会所不齿。国际上, 兵器同行正在寻找更好的弹芯材料, 其中, 钨纤维增强金属玻璃基复合材料就是一种可行选择^[1,2]。

块体金属玻璃(bulk metallic glass, 简称 BMG), 是合金液体深度过冷到玻璃转变温度 T_g 时结构突然“冻结”而形成的非晶态合金材料^[3]。金属玻璃材料具有优异的力学、物理和化学性能。在玻璃转变温度以下($T < T_g$)以及高应力或高应变率条件下变形时, 金属玻璃极易发生局域剪切带, 具有类似贫铀合金的高剪切敏感性和剪切“自锐”(self-sharpening)现象^[4]。而钨材料具有高密度、高强度和良好韧性等特点。两者复合, 可保证复合材料既具有高强度、高硬度以及剪切“自锐”等特性, 同时也降低了整体脆性, 并显著增加材料密度, 可满足穿甲动能弹的要求, 大大提高穿甲弹的侵彻性能。

在前人工作基础上^[2,5-8], 本文利用钨纤维体积分数为 80% 的增强锆(Zr)基块体金属玻璃复合材料长杆弹进行侵彻 Q235 钢靶的穿甲试验, 对残余弹体进行宏、细观观测, 研究弹体材料的失效破坏模式。与前人的研究工作所不同的是: 文中的弹靶均已较接近实际应用, 针对穿甲弹的着靶速度, 给出了

^{*} 收稿日期: 2013-05-14; 修订日期: 2013-08-20

基金项目: 本项目得到国家自然科学基金委员会—中国工程物理研究院联合基金重点资助项目 NSAF (10976100)的支持。

通讯作者: 陈小伟(1967—), 男, 研究员, 博士生导师。主要从事冲击动力学研究。E-mail: chenxiaoweintu@yahoo.com

较宽速度范围(765~1766m/s)的实验结果,使得穿甲速度、侵彻深度等终点效应分析将更具有应用指导价值;通过失效模式分析,得出钨纤维非晶弹穿甲侵彻钢靶存在一优化速度范围;对钨纤维非晶弹体“自锐”分析表明,头部边缘层呈局域化和尖锐化特点,且在整个高速穿甲过程中保持动态平衡。

1 穿甲实验描述

利用 H100 滑膛火炮开展针对 Q235 钢靶的钨纤维增强锆(Zr)基块体金属玻璃复合材料长杆弹(以下简称钨纤维非晶弹)的高速“自锐”穿甲实验研究。钨纤维非晶弹体材料密度约为 $16.7\text{g}/\text{cm}^3$,其中钨纤维体积分数为 80%,钨纤维与弹轴平行,弹材基体为锆(Zr)基合金金属玻璃。穿甲实验的速度范围为 765~1766m/s。柱形长杆弹形状如图 1 所示,头部为半球头形,弹径 19.0mm,平均弹长 206.2mm,弹体质量平均为 958.9g。由于弹体直径远小于火炮口径,需借助弹托进行次口径发射。

靶板为厚 125mm 或 250mm Q235 钢靶,后者由两层焊接叠合而成,几何尺寸为 $1000\text{mm}\times 300\text{mm}$,后背顶靠于混凝土基座以保证其固定,通过在钢架上平移可实现 3~4 次撞击实验。实验场地和靶板设置如图 2 所示,其中,钢靶与 H100 滑膛火炮口的距离为 5m。



图 1 实际弹体照片

Fig. 1 Photograph of the long rods used in the tests



图 2 实验场地及钢靶设置

Fig. 2 Experimental site and steel target frame

2 侵彻宏观分析

图 3(a-f)分别给出 6 发典型的钨纤维非晶弹以不同速度撞击 Q235 靶后的弹孔剖面照片。

在撞击速度为 765m/s 时,钨纤维非晶弹未能形成有效侵彻而发生靶前破坏或跳飞。在撞击速度为 828m/s 和 939m/s 时,钨纤维非晶弹侵彻深度分别约为 100mm 和 125mm,弹孔形状不规则,弹孔表面起伏较大且发生鼓胀,弹道发生偏转,弹材表现为流动形变而少有侵蚀特征,并充满整个弹道。弹孔底端部钝粗但相对平滑。在 939m/s 时,钨纤维非晶弹几乎已侵彻穿透第 1 层钢靶,但靶板背面没有隆起现象。以上现象表明,钨纤维非晶弹不适合用于小于 1000m/s 速度范围的侵彻。

而在更高速度侵彻时,钨纤维非晶弹表现出非常优秀的侵彻能力。其中,速度 1766m/s 的钨纤维非晶弹完整穿透两层总厚 250mm 的 Q235 钢靶;1313m/s 的钨纤维非晶弹临近穿透两层靶板,第 2 层靶背面已现显著隆起;速度 1177m/s 的钨纤维非晶弹未穿透第 2 层靶板。由于靶板弹着点有显著弯曲变形,1313m/s 和 1177m/s 的钨纤维非晶弹实际侵彻深度分别为 270mm 和 225mm,前者大于靶厚,如图 3 所示。总体而言,在大于 1000m/s 侵彻时,钨纤维非晶弹侵彻隧道都非常笔直,全弹孔孔径约为 40mm,几乎形成近似等直径通道,但在弹孔底部附近其孔径沿侵彻方向逐渐变小。弹孔表面淬火发蓝,并有弹材侵蚀后回流痕迹,表明弹孔表面温度高于 1000°C ,显示了在高速条件下绝热高温摩擦特征。钨纤维非晶弹头部在侵彻过程中始终维持尖削形,即拥有头形自锐能力,将有利于提高其侵彻能力。

钨纤维非晶弹在较低速度(如 765m/s)时不形成有效侵彻,这与其纤维束集的材料特性有关,表现为钨纤维与非晶基体的粘接失效而分离,弹体在靶前破坏或跳飞。虽然在 828m/s 和 939m/s 时弹体形成有效侵彻,但在弹道内侧表现为流动形变而少有侵蚀特征,呈现失稳特性,类似为变形弹侵彻。在

1000m/s 以上, 钨纤维非晶弹侵彻表现为头部边缘层局域化和尖锐化变形破坏, 杆体呈刚性, 整体上仍可用长杆弹侵彻近似; 陈小伟等的研究结果证明, 其根本原因在于钨纤维材料在非晶基体作用下, 发生剪切而形成自锐^[8]。这从材料特性表明, 钨纤维非晶弹在 1000m/s 以上更利于侵彻。



图3 不同速度下钨纤维非晶弹侵彻 Q235 钢靶的靶孔剖面

Fig. 3 Profiles of the ballistic holes of Q235 steel targets penetrated by tungsten fiber/BMG rods at different velocities

3 钨纤维残余弹体细观分析

这里主要选取侵彻速度为 1177m/s 及 1313m/s 的钨纤维非晶弹残余弹体及靶体进行金相分析和细观观察, 分析其侵彻特征。

图 4 分别给出撞击速度为 1177m/s 和 1313m/s 的钨纤维非晶弹残余弹体前段纵剖面金相照片,从图中可以看出两者弹孔直径相当,钨纤维非晶残弹长度分别约为 50mm 和 40mm。显然,1313m/s 时钨纤维弹侵蚀较 1177m/s 时更严重,这符合长杆弹侵彻的基本特性。尚未侵蚀的残余弹体实际就是钨纤维非晶长杆弹的尾部,残弹尾部轮廓清晰可见,与原型弹相比无任何变化。

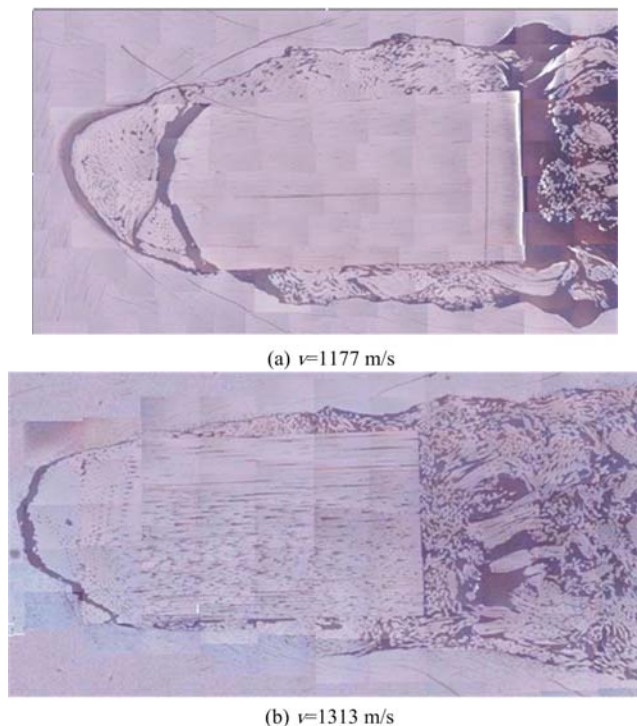


图 4 钨纤维残余弹体前段纵剖面照片

Fig. 4 Metallographic analysis on the residual rods

材料侵蚀后沿隧道回流遇凝固形成的残渣物堆积在未变形残弹后面,且填满未变形残弹与弹孔之间的间隙,该部分钨纤维呈无序状分布。从大量散乱的钨纤维分布,以及断裂和熔化可推断钨纤维非晶弹体在高速冲击过程中产生了大量热,致使非晶基体软化甚至熔化,导致钨纤维束分离。

钨纤维非晶残弹实际包括杆体和弹尖两部分。杆体与原型弹一致,钨纤维密致纵向排布且无明显塑性变形,基体材料也未发生明显的损伤或破坏,头部呈近似半球头形。1313m/s 和 1177m/s 的钨纤维残弹杆体最大长度分别约为 30mm 和 40mm。

弹尖部分头形尖削近似为 60° 角,高度约 10mm。这表明,钨纤维非晶弹在侵彻 Q235 钢靶过程中,初始的半球头形因为高速侵蚀变为尖头构形,也即发生“自锐”。弹体头部“自锐”有效锐化了弹芯头部,提高了弹体的侵彻能力。

由图 4 可以看到,两种速度下的钨纤维非晶弹体头部“自锐”形成尖削形弹尖,但其形状稍有轻微不对称,这是由于质量侵蚀不均而导致。另外,两者“自锐”形成的尖削形弹尖与杆体间分别呈现断开和连接的区别。其中,速度为 1177m/s 的钨纤维残弹弹尖与杆体之间存在一条宽约 1~2mm 的裂缝,而速度为 1313m/s 的钨纤维残弹弹尖与杆体之间有明显的分界,但没有出现裂缝。显然,钨纤维残弹的弹尖部分可以附着在杆体头部,也可与之分离。其判据即是塑性大变形的弹尖中钨纤维强度是否可承受穿甲过程中的强冲击载荷。若弹尖中的钨纤维塑性变形过大,可承受的最大冲击载荷阈值变小,则易发生与杆体的断裂分离。因此,由实验表明,钨纤维残弹头部的弹尖和杆体两部分存在明显的界限。可定义弹尖部分为钨纤维残弹头部的边缘层。

高速侵彻过程中钨纤维非晶弹的变形和破坏主要发生于弹体头部边缘层,呈局域化和尖锐化特点,而且边缘层厚度在整个高速穿甲过程中保持动态平衡。

4 弹体材料失效破坏模式分析

陈小伟等^[8]利用 H25 火炮开展了 7.5mm 小直径的钨纤维增强锆(Zr)基金属玻璃复合材料弹体撞击 45# 钢靶的穿甲实验,利用金相分析对材料失效模式进行了较系统的识别和分类,可知至少有四种弹体材料失效和破坏模式:穿钨纤维内部的剪切断裂;穿钨纤维的脆性断裂;金属玻璃基体的剪切破坏;钨纤维和金属玻璃基体的熔融破坏。除穿钨纤维的脆性断裂之外,其余三种均同局部的绝热升温有关。另外,钨纤维束宏观上易出现剪切断裂、脆性劈裂和弯折屈曲变形等破坏模式。

本文进一步针对钨纤维非晶弹头部边缘层开展金相观察,对钨纤维增强锆(Zr)基块体金属玻璃复合材料弹体材料失效和破坏模式进行细观分析。

图 5(a)、(b)是比较典型的钨纤维非晶弹头部边缘层外沿的金相图,局部熔融,纤维按头形方向排列并流动变形,甚至发生钨纤维颈缩现象。在其内部,纤维有弯折屈曲变形。

图 6(a)、(b)则是钨纤维非晶弹头部杆体与边缘层分界处的金相图,分别对应于 1177m/s 和 1313m/s 两种情形。明显地,钨纤维排向的突兀显示存在间断面,杆体头部纤维表现出剪切流动趋势从而导致纤维方向发生改变。所不同的是,前者杆体与边缘层断裂分开,而后者仍联系在一起,但已有局部起裂分离的间隙,且裂纹起裂在钨纤维排向的间断面位置。

在钨纤维非晶弹侵彻钢靶过程中,由于非晶基体的作用,钨纤维增强非晶复合材料发生了较复杂的断裂破坏行为。图 7 给出了钨纤维增强非晶复合材料的几种典型断裂破坏模式:图 7(a)显示钨纤维破坏包括横向断裂与纤维间纵向脆性劈裂两种破坏模式,其中横向断裂包括脆性断裂和 45°剪切破坏;图 7(b)显示钨纤维内部发生劈裂破坏,同时,图 7(c)给出穿钨纤维的内部断裂图;而 7(d)则清晰可见裂纹在基体中产生并沿钨纤维与基体交界面传播,裂纹可止于基体,也可进入纤维形成纤维断裂。

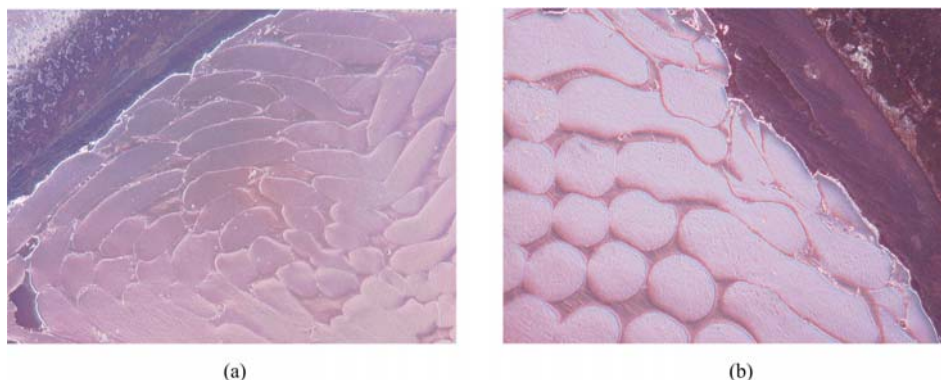


图 5 钨纤维非晶弹头部边缘层外沿的金相图

Fig. 5 Metallographic photos of the fringe area of the edge layer of rod head

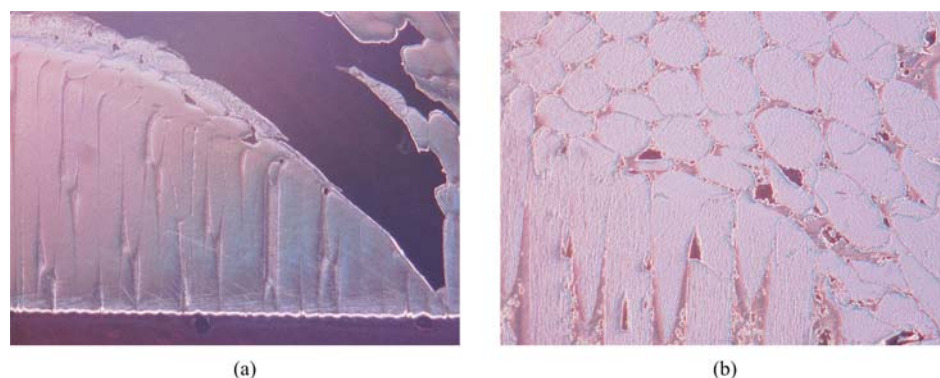


图 6 钨纤维非晶弹头部杆体与边缘层分界处金相图

Fig. 6 Metallographic photos of the interface between the edge layer of rod head and the residual rod

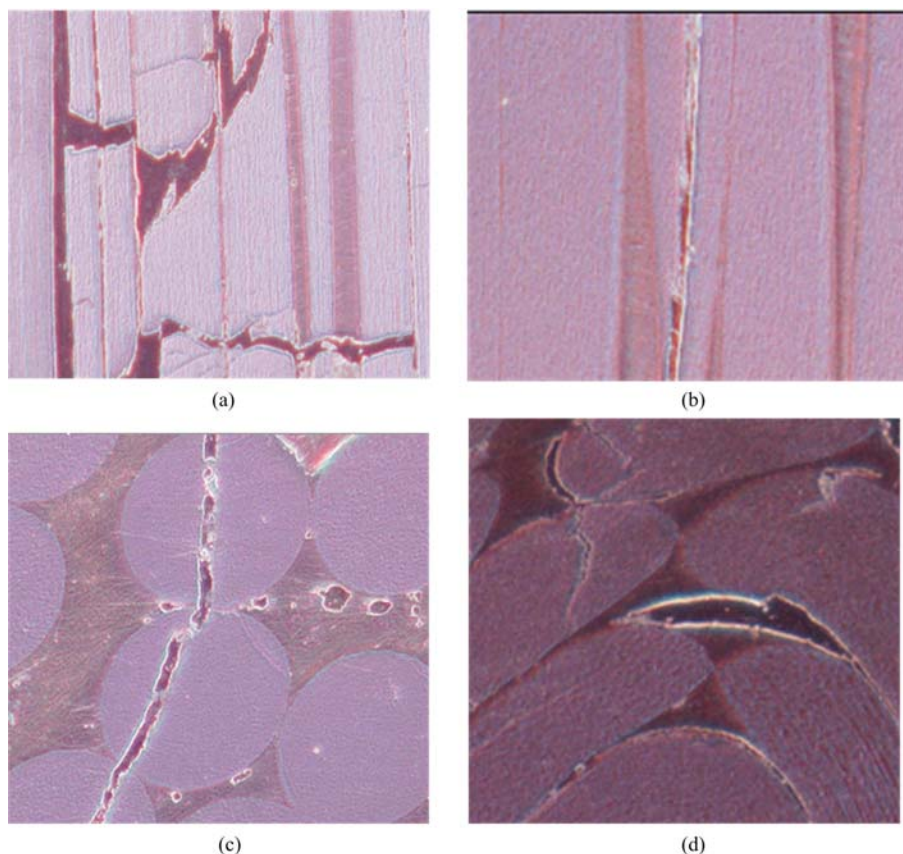


图 7 侵彻后弹体材料的断裂破坏模式

Fig. 7 Fracture failure modes of the rod material after penetration

5 结论

本文对钨纤维体积分数为 80% 的增强锆(Zr)基块体金属玻璃复合材料长杆弹进行侵彻 Q235 钢靶的穿甲试验,通过对残余弹体的宏、细观观测,研究弹体材料的失效破坏模式。

穿甲实验表明钨纤维非晶弹不适于 1000m/s 以下速度的穿甲,但在 1000m/s 以上速度侵彻 Q235 钢靶时表现出非常优秀的侵彻能力。需指出的是,该临界速度与弹几何及靶材料特性相关。

高速侵彻钢靶时,钨纤维非晶弹拥有头形自锐能力,弹体“自锐”发生在头部边缘层。在穿甲侵彻过程中,弹体头部钨纤维将发生弯折或者断裂,并导致其方向重排。头部边缘层的钨纤维分布有一定规律。另外,钨纤维的断裂、弯折、劈裂、熔融等及非晶基体的断裂、破碎和熔融等均发生在头部边缘层。弹材变形和破坏呈局域化和尖锐化特点,而且边缘层厚度在整个高速穿甲过程中保持动态平衡。

致谢 本项目得到国家自然科学基金委员会—中国工程物理研究院联合基金重点资助项目 NSAF(10976100)的支持。

参考文献:

- [1] Conner R D, Dandliker R B, Conner R D, Dandliker R B, Johnson W L. Mechanical properties of tungsten and steel fiber reinforced $Zr_{41.25}Ti_{13.75}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ metallic glass matrix composites[J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(17): 6089—6102.
- [2] Conner R D, Dandliker R B, Scruggs V, Johnson W L. Dynamic deformation behavior of tungsten-fiber/metallic-glass matrix composites[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24:435—444.
- [3] Choi-Yim H, Conner R D, Szuets F, Johnson W L. Quasistatic and dynamic deformation of tungsten reinforced $Zr_{57}Nb_5Al_{10}Cu_{15.4}Ni_{12.6}$ bulk metallic glass matrix[J]. *Scripta Materialia*, 2001, 45:1039—1045.

- [4] Dai L H, Bai Y L. Basic mechanical behaviors and mechanics of shear banding in BMGs[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 34:704—716.
- [5] Rong G, Huang D W, Wang J. Research on penetration mechanism of tungsten fiber composite reinforced penetrators[C]//In: 25th International Symposium on Ballistics. Editors: Wang Z Y, Zhang X B and AN Y D. Beijing, China, 2010:1180—1186.
- [6] 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 (Rong Guang, Huang Dewu. Self-sharpening phenomena of tungsten fiber composite material penetrators during penetration[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(4):351—355(in Chinese))
- [7] 王志华. W_t/Zr 基块体金属玻璃复合材料及其高速冲击行为(博士论文)[D]. 南京理工大学, 2006 (Wang Zhihua. W_t/Zr -based bulk metallic glass composites and its high-velocity impact behavior[D]. Nanjing University of Science and Technology, 2006(in Chinese))
- [8] 陈小伟, 李继承, 张方举, 陈刚. 钨纤维增强金属玻璃复合材料弹穿甲钢靶的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(4):346—354 (Chen Xiaowei, Li Jicheng, Zhang Fangju, Chen Gang. Experimental research on the penetration of tungsten-fiber/metallic glass-matrix composite material penetrator into steel target [J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(4):346—354(in Chinese))

Experimental Research on Steel Target Penetration of Long Rod Projectile Made of 80% W-fiber/Zr-based BMG

WANG Jie¹, CHEN Xiao-wei^{1,2}, WEI Li-ming², LEI Jin-song¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest University of Science & Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China;

2. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

Abstract: Within velocity range from 765m/s to 1766m/s, Q235 steel target penetration experiment of long rod projectile made of reinforced tungsten fiber with 80% volume fraction/Zr-based bulk metallic glass (BMG) composite material was carried out. The residual projectiles were observed and analyzed by integrated macro-meso metallographic analysis, the failure mode of shell composite material was studied. Penetration experiments show that when the penetration velocity is greater than 1000 m/s, amorphous Tungsten fiber presents a head shape self-sharpening ability and displays excellent penetration performance. Shell material deformation and damage occur mainly at the shell head edge layer with characteristics of localization and sharpening. The edge thickness of rod head maintains dynamic equilibrium in the whole process of high-speed penetration. Due to the amorphous matrix, shell material is prone to shear failure and forms mass erosion by the flow, which results in self-sharpening in the shell head edge layer.

Keywords: W-fiber/Zr-based bulk metallic glass (BMG) composite; long rod projectile; armour piercing; self-sharpening; macro-meso analysis; metallographic analysis