

文章编号: 1001-1455(2009)04-0351-05

钨纤维复合材料穿甲弹芯侵彻时的自锐现象*

荣光¹, 黄德武²

(1. 南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094;

2. 沈阳理工大学装备工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要: 对钨合金穿甲弹和钨纤维/Zr合金金属玻璃基复合材料穿甲弹进行了靶场对比侵彻实验。穿甲弹侵彻过程中, 钨合金弹芯头部形成蘑菇头、头部晶粒被径向压扁; 钨纤维复合材料弹芯头部在侵彻过程中, 发生了绝热剪切破坏, 具有自锐行为, 且在弹芯头部形成很薄的边缘层, 仅在这层中金属玻璃基体破碎, 钨纤维断裂, 温度升高, 质量消蚀。钨纤维复合材料穿甲弹的侵彻能力明显高于钨合金穿甲弹。

关键词: 爆炸力学; 自锐现象; 侵彻实验; 钨纤维复合材料弹芯; 蘑菇头; 边缘层

中图分类号: O385; TJ413.2

国标学科代码: 130·3530

文献标志码: A

1 引言

目前, 常用的穿甲弹芯材料为高密度钨合金和贫铀合金等2种。一般贫铀合金弹芯的侵彻能力在同等情况下比钨合金弹芯的高10%~15%^[1]。实验表明, 2者的主要区别在于贫铀合金材料的临界绝热剪切应变率和临界绝热剪切应变值较低, 易于发生绝热剪切断裂, 具有自锐效应, 即穿甲侵彻过程中残余弹体头部不出现蘑菇头, 而是越来越尖; 而钨合金弹芯在轴向侵彻力作用下, 头部呈蘑菇状, 导致侵彻阻力增大, 侵彻能力降低^[2]。但是, 由于贫铀弹中所含的 U_{238} 是放射性元素, 当贫铀弹撞击靶板时, 由于着速高, 与靶板的相互作用造成温度急剧升高引起 U_{238} 气化, 导致放射性危害^[3-5]。

近年来, 开发具有绝热剪切敏感性的新型钨合金材料, 提高钨合金弹的自锐效应, 使其穿甲威力提高到贫铀合金的侵彻水平已成为研究的重点。本文中对一种新型的钨纤维/Zr合金金属玻璃基复合材料^[6-7]穿甲弹芯和钨合金穿甲弹进行靶场侵彻对比实验。通过对靶板及残余弹芯的微观结构分析, 讨论钨纤维复合材料穿甲弹芯侵彻威力提高的原因。

2 靶场实验

对钨纤维复合材料弹芯和钨合金弹芯进行了靶场对比侵彻实验, 靶板材料为603装甲钢(30CrMnMo钢), 靶板尺寸是400 mm×500 mm×50 mm。使用的火炮是海37 mm弹道炮, 炮弹为次口径穿甲弹。固定弹芯的弹托由3块120°扇形卡瓣组成, 如图1所示。发射时空气阻力作用在卡瓣前的迎风槽内, 产生外侧力使弹托分离。

实验中用到的所有弹芯几何尺寸完全一样, 弹芯长为88 mm, 弹芯前端直径为8 mm, 弹芯尾端螺纹处直径为7.76 mm, 如图2所示。弹芯材料有2种, 1种是钨纤维复合材料弹芯, 另1种是95W钨合金。钨合金弹芯的密度为17.96 g/cm³, 钨纤维复合材料弹芯密度为14.97 g/cm³, 钨纤维弹芯的质量低约12.5%。钨纤维弹芯中的基体为Zr合金金属玻璃, 内包钨丝束, 较均匀地分布在弹芯截面上, 并且与弹芯纵轴平行排列, 钨丝在钨纤维弹芯中所占体积约为3/4。



图1 弹芯及弹托结构
Fig. 1 Penetrator and sabot



图2 弹芯几何尺寸
Fig. 2 Geometry size of penetrator

* 收稿日期: 2008-03-14; 修回日期: 2008-07-08

基金项目: 国防科技重点实验室基金项目(51453030305 QT2802)

作者简介: 荣光(1978—), 女, 博士, 讲师。

3 结果分析

3.1 侵彻能力分析

共进行实验 33 发,其中钨纤维弹 19 发、钨合金弹 14 发。垂直穿甲时,未透嵌入的 11 发,击穿靶板的 8 发;斜侵彻 14 发,其中无效弹 1 发。通过调整火药量,无论是垂直还是斜侵彻,从低速到高速,钨合金和钨纤维弹的穿甲实验都是在速度近似相等下每 2 发对比进行,以便于比较和分析,相关实验结果见表 1。表中, m_p 为穿甲弹质量, m_c 为火药量, v_0 为初速, E_0 为初动能, P 为侵彻深度。表中实验着角 θ 均为 0。

对比实验 4、5,实验 4 的弹质量即动能比实验 5 小 12.5%,而穿深却比实验 5 大 72%;对比实验 11、12,实验 11 靶板被击穿,而实验 12 靶板未被击穿,残余弹芯嵌入,靶板背面有鼓包,如图 3 所示。

通过 2 种弹芯的靶场对比实验发现,在初速、着角、装药量、弹形相同的情况下,尽管钨纤维复合材料弹芯的质量小于钨合金穿甲弹,但其侵彻能力却明显高于钨合金穿甲弹芯。

表 1 2 种弹芯靶场实验对照

Table 1 Contrastive results of two kinds of penetrators

实验	穿甲弹	m_p/g	m_c/g	$v_0/(m/s)$	E_0/kJ	P/mm	侵彻效果
4	钨纤维	64.2	140.0	811.2	21.1	35.8	嵌入,靶板背面有相变痕记, $\varnothing 7$
5	钨合金	73.4	140.0	804.9	23.8	20.8	嵌入,靶板背面有相变痕记, $\varnothing 6$
11	钨纤维	68.8	215.0	1066.3	39.1	—	击穿,靶板背面翻唇
12	钨合金	74.0	215.0	1076.2	42.9	47.7	嵌入,靶板背面鼓包

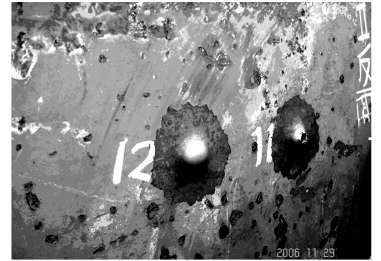


图 3 实验 11、12 的靶板背面
Fig. 3 The back of the target plate for Experiments 11,12

3.2 2 种残余弹芯嵌入弹孔内的宏观形貌

图 4(a)为实验 5 钨合金弹弹孔的纵剖面图,从图中可以看到沿侵彻方向的弹孔直径不断增大,弹孔表面粗糙不光滑,留有高速、高温、摩擦、质量消耗的痕迹。图 4(b)为实验 5 弹孔中残余的钨合金弹芯,从中可以看出,其残余弹芯头部有蘑菇头形成。侵彻前弹芯直径为 8 mm,而残余弹芯蘑菇头直径为约 14.8 mm,与侵彻前相比增大 1.85 倍,而尾部直径没有明显变化。

如图 5,与钨合金弹芯相比,实验 4 钨纤维弹芯头部直径没有明显增大,并且头部有自锐现象产生,明显提高了穿甲侵彻能力。弹孔为等直径弹孔,受到的靶板阻力减小,并且弹芯头部质量消蚀也较少。这是由于钨纤维复合材料弹芯的基体是非晶材料 Zr 合金(体积比占全弹约 26%),其机械性能类似玻璃,又称金属玻璃,是脆性材料,密度仅有 5.9 g/cm³,做穿甲弹芯密度太低。更主要是太脆,弹芯一碰靶就可能整体破碎。但因其是非晶材料,微结构中没有晶粒,不存在钨合金弹芯头部晶粒被压扁和产生塑性变形问题,不能形成蘑菇头。当基体中加入大量钨纤维,制成钨纤维/Zr 基金属玻璃复合材料时,其性能就发生了根本的变化,既保持了 Zr 基金属玻璃的脆性,不出现蘑菇头,又因大量钨纤维的强化,使材料出现了良好的韧性,不会出现整体断裂,并且密度可达 15 g/cm³,足够做穿甲弹芯。

(a) Elevation profile



(b) Residue



图 4 实验 5 弹孔纵剖面和残余弹芯

Fig. 4 Elevation profile of penetrated hole and residue of the tungsten alloy penetrator for Experiment 5

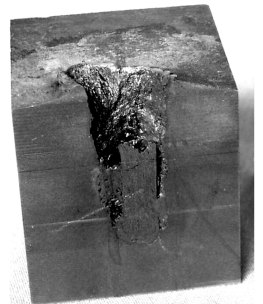


图 5 实验 4 钨纤维弹芯及弹孔纵剖面

Fig. 5 Elevation profile of the penetrated hole for Experiment 4

靶场实验中回收的实验 11 钨纤维残余弹芯如图 6 所示,其中长的是侵彻前弹芯原始状态,短的是穿透靶板后回收的残余弹芯,残余弹芯长为约 28 mm,弹芯被轻微墩粗,但并不明显,残余弹芯中部钨丝直径与其头部钨丝直径近似相等,不存在钨丝被墩粗问题,金属玻璃基体又是脆性材料,所以残余弹芯头部没有蘑菇头产生,具有自锐行为。

3.3 2 种残余弹芯微观结构分析

高速侵彻冲击作用下,穿甲弹芯顶端主要受到靶板的轴向挤压,弹芯头部材料经历了变形、断裂、破碎、摩擦、温升、熔化和质量消蚀等一系列过程。图 7 为图 8 中 A、B、C、D 处的扫描电镜照片,图 8 为实验 5 钨合金残余弹芯的扫描电镜照片,弹芯经过了切断、打磨后做成的。可以看到明显的蘑菇头,A、B 在“蘑菇”的头部,C、D 在“蘑菇”的茎部。

图 7(a)中,A 处晶粒经强碰撞后变形为长约 80 μm、宽约 12 μm、长细比约 6.7;图 7(b)中,B 处晶粒长约 64 μm、宽约 16 μm、长细比约 4。而侵彻前弹芯晶粒尺寸约 30~35 μm,近似等轴晶粒。说明 A 处和 B 处的晶粒被径向压扁,长轴方向近似与侵彻方向垂直,拉长的钨颗粒间紧密相连,呈纤维状,但钨颗粒没有破碎,从微结构上看,晶粒在最大剪应力方向出现了位错移动,导致晶粒出现塑性变形。这说明钨合金在高速侵彻下表现出了良好的塑性,且 A 处较 B 处明显。

图 7(c)中,C 处晶粒长约 36 μm、宽约 18 μm、长细比约 2;图 7(d)中,D 处晶粒长约 32 μm、宽约 20 μm、长细比约 1.6。C、D 处的微观组织与侵彻前弹芯相比也略有变化,但晶粒横向伸长轻微,“蘑菇”茎部与头部相比塑性变形不明显。

从图 7 中可以观察到,A 处晶粒的塑性变形最大,其次是 B 处,C 处再次之,而 D 处变形最小,晶粒塑性变形不明显,与侵彻前弹芯近似。这说明穿甲过程中残余弹芯的变形和质量消耗主要发生在头部的蘑菇头区域内,其余部位晶粒结构没有明显变化。这也体现了塑性变形的局部化效应。

再来研究钨纤维复合材料弹芯的电镜扫描照片。将实验 4 钨纤维残余弹芯沿直径纵向切开为 I、II 等 2 个部分,如图 9 所示。在 A、B、C 范围内观察弹芯微结构变化,发现其变化仅局限在头部约 2.98 mm 高的狭小区域内,其他地方无变化,随着弹芯头部质量消蚀,微结构变化区域逐渐向下延伸。

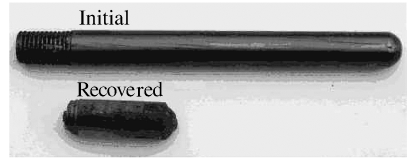


图 6 实验 11 钨纤维残余弹芯
Fig. 6 Residue of tungsten fiber penetrator for Experiment 11

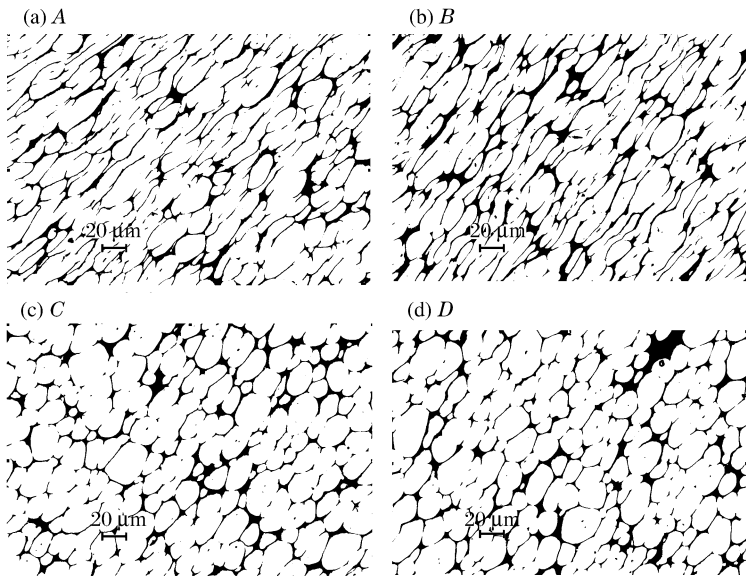


图 7 实验 5 钨合金残余弹芯各处 SEM 照片

Fig. 7 SEM micrographs of the residual tungsten alloy penetrator for Experiment 5

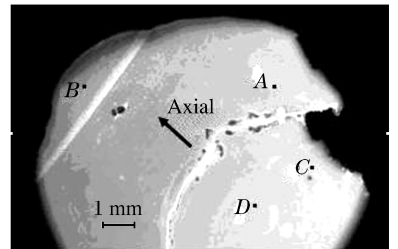


图 8 实验 5 残余钨合金弹芯 SEM 照片
Fig. 8 SEM micrographs of the residual tungsten alloy penetrator for Experiment 5

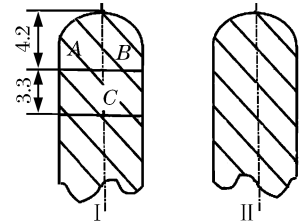


图 9 实验 4 钨纤维残余弹芯纵剖面示意图
Fig. 9 The elevation profile of the residual tungsten-fiber penetrator for Experiment 4

由实验 4 钨纤维残余弹芯头部 A 区扫描电镜照片(见图 10(a))可以看出,在曲面 mm' 与 nn' 之间,钨丝剖面大小不均匀。说明这个区域钨丝已经大角度弯曲变形,和原来钨纤维的排列方向差不多成 90° 角,还有些钨丝发生断裂、劈裂,这个区域内金属玻璃基体也在高速碰撞作用下发生断裂或破碎。定义这个薄层为侵彻时钨纤维复合材料弹芯头部的边缘层,该层主要特征是头部细长钨纤维大角度弯曲变形,金属玻璃基体破碎,钨纤维断裂,温度升高,基体软化,且破碎基

体和断裂钨丝在高速冲击和摩擦下不断从弹芯头部脱离,即质量消蚀。边缘层体现了复合材料蜕化和破坏的局部化效应。在边缘层以下的弹芯基体中(曲面 mm' 以下),弹芯中的钨丝轻微墩粗,塑性变形不明显。钨丝较均匀分布在弹芯纵截面上,并且与弹芯纵轴平行排列,说明这部分钨纤维和基体微结构与原始状态相比变化不大。断面 nm' 与弹芯轴向的夹角为约 45° 。

实验4钨纤维弹芯头部A、B两侧不对称。如图10(b)所示,在弹芯头部B侧,边缘层仅在 aa' 以外的狭小薄层内,而其余部分钨丝剖面大都变成了椭圆,说明钨丝已在穿甲侵彻过程中发生了一定的横向弯曲,不再与轴线平行。断面 aa' 与弹芯的轴向所形成的夹角为约 45° 。这样,弹芯头部的2个断面 nm' 面与 aa' 面形成约 90° 的夹角,有效锐化了弹芯头部(其宏观形貌如图6所示),提高了弹芯的侵彻能力。A区的边缘层较厚,最大约2.8 mm,如图10(a),B区的边缘层较薄,约0.3 mm,如图10(b),这说明钨纤维弹芯头部边缘层一般是连续的,但薄厚分布不均匀。

图10(c)~(d)为实验4钨纤维残余弹芯C区局部扫描电镜照片,从图中可以看出,钨纤维残余弹芯中部钨丝直径与侵彻前相比,变化较小。从图10(c)中可以看到,钨丝与弹芯纵轴平行排列,且存在少许断裂的钨丝,这是由于钨纤维弹芯在制备过程中有些钨丝没有被完全拉直,导致其在金相试样制备过程中被切断。图10(d)为钨纤维弹芯横截面扫描电镜照片,钨丝较均匀地分布在弹芯截面上,并且与弹芯纵轴平行排列。由此可见,钨丝的断裂、弯折、劈裂等变化及非晶基体的断裂和破碎均发生在弹芯的头部边缘层内,残余弹芯的中、后部,即图9中C区以下微结构没有明显变化。

4 结 论

(1)在弹重、弹形、装药量、初速、着角相似的情况下,钨纤维复合材料弹芯的侵彻深度大于钨合金弹芯约72%。钨合金穿甲弹在侵彻过程中,形成的弹孔直径不断增大,降低了穿甲侵彻能力。钨纤维复合材料穿甲弹,在侵彻过程中形成狭窄弹孔,即产生自锐效应,提高了穿甲弹的侵彻能力。

(2)钨合金穿甲弹在侵彻过程中,弹芯头部有蘑菇头产生,弹芯头部晶粒被径向拉长。头部不同部位,变化程度也不同,钨纤维复合材料弹芯在侵彻过程中产生自锐行为,没有蘑菇头产生。在复合材料弹芯中,弹芯基体是Zr合金非晶材料,即金属玻璃,侵彻中可以断裂和破碎,但不会发生塑性变形和墩粗。加入的钨纤维可以增加弹芯的密度及韧性,提高了材料的断裂强度,有效地阻碍了弹芯的突然断裂,增加了穿甲弹的侵彻威力。

(3)钨纤维复合材料弹芯在穿甲侵彻中,非晶金属玻璃基体的破碎和钨纤维的大角度弯曲及断裂都局限在弹芯头部的局部狭小区域内,称为边缘层。因冲击和摩擦引起的温升及软化,质量消蚀也发生在这一层内,对于本次实验的钨纤维弹,该层厚度最大为约2.8 mm,且厚度分布不均匀。残余弹芯内边缘层以外的部分,基体和钨纤维的微结构没有明显变化。这意味着钨纤维复合材料弹芯的质量消蚀是由弹头部至尾部按边缘层逐层连续进行。

4 结 论

(1)在弹重、弹形、装药量、初速、着角相似的情况下,钨纤维复合材料弹芯的侵彻深度大于钨合金弹芯约72%。钨合金穿甲弹在侵彻过程中,形成的弹孔直径不断增大,降低了穿甲侵彻能力。钨纤维复合材料穿甲弹,在侵彻过程中形成狭窄弹孔,即产生自锐效应,提高了穿甲弹的侵彻能力。

(2)钨合金穿甲弹在侵彻过程中,弹芯头部有蘑菇头产生,弹芯头部晶粒被径向拉长。头部不同部位,变化程度也不同,钨纤维复合材料弹芯在侵彻过程中产生自锐行为,没有蘑菇头产生。在复合材料弹芯中,弹芯基体是Zr合金非晶材料,即金属玻璃,侵彻中可以断裂和破碎,但不会发生塑性变形和墩粗。加入的钨纤维可以增加弹芯的密度及韧性,提高了材料的断裂强度,有效地阻碍了弹芯的突然断裂,增加了穿甲弹的侵彻威力。

(3)钨纤维复合材料弹芯在穿甲侵彻中,非晶金属玻璃基体的破碎和钨纤维的大角度弯曲及断裂都局限在弹芯头部的局部狭小区域内,称为边缘层。因冲击和摩擦引起的温升及软化,质量消蚀也发生在这一层内,对于本次实验的钨纤维弹,该层厚度最大为约2.8 mm,且厚度分布不均匀。残余弹芯内边缘层以外的部分,基体和钨纤维的微结构没有明显变化。这意味着钨纤维复合材料弹芯的质量消蚀是由弹头部至尾部按边缘层逐层连续进行。

参考文献:

- [1] 郭瑞萍. 钨纤维增强金属-玻璃基复合材料弹芯的动态变形[J]. 弹药信息, 2001, 4: 18-21.
GUO Rui-ping. Dynamic deformation of tungsten fiber metal glass matrix composite material penetrator[J]. Ammunitions Information, 2001, 4: 18-21.
- [2] 丛美华, 黄德武, 段占强, 等. 小口径穿甲实验靶板弹孔和残余弹体显微组织研究[J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(5): 594-598.
CONG Mei-hua, HUANG De-wu, DUAN Zhan-qiang, et al. Microstructural analysis of the target surface and the

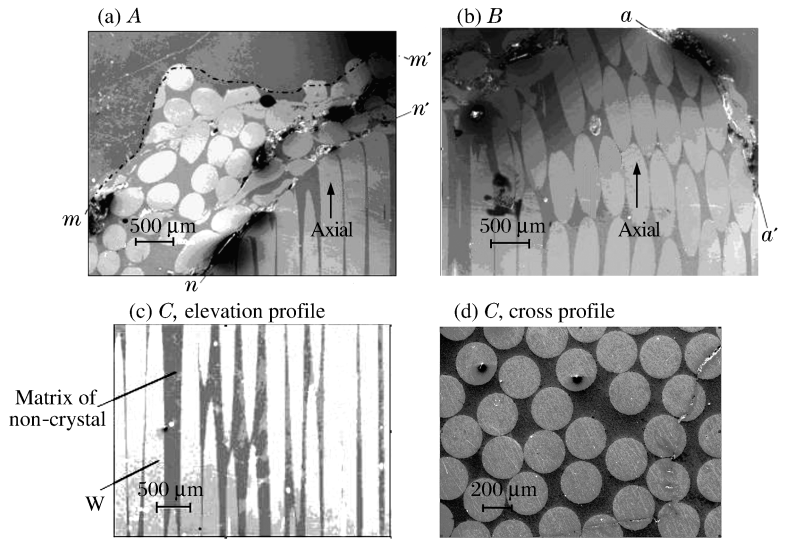


图10 实验4钨纤维弹残余弹芯SEM照片
Fig. 10 SEM micrographs of the residual tungsten fiber penetrator for Experiment 4

- residual projectile in an experimental penetration of small diameter[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Natural Science Edition), 2002,22(5):594-598.
- [3] Zhang H, Zhang Z F, Wang Z G, et al. Fatigue damage and fracture behavior of tungsten fiber reinforced Zr-based metallic glassy composite[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006,418:146-154.
- [4] 白新德,姜作中,林伟,等. 贫铀武器发展状况及其前景[J]. 稀有金属材料与工程, 2003,2(6):412-416.
BAI Xin-de, JIANG Zuo-zhong, LIN Wei, et al. Review on the development and prospect of DU munitions[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003,2(6):412-416.
- [5] 姜志保,郑波,赵广宁. 贫铀弹的作用机理及其危害与防护[J]. 大学物理, 2005,24(2):52-55.
JIANG Zhi-bao, ZHENG Bo, ZHAO Guang-ning. Principle harm and protection of depleted uranium weapons[J]. College Physics, 2005,24(2):52-55.
- [6] 王志华,陈光,姜斐. Wf/Zr 基非晶复合材料的弯曲断裂行为[J]. 金属热处理, 2006,31(4):9-11.
WANG Zhi-hua, CHEN Guang, JIANG Fei. Bending fracture behavior of Wf/Zr based amorphous composites[J]. Heat Treatment of Metals, 2006,31(4):9-11.
- [7] 王志华,陈光,姜斐,等. 体积分数对 Wf/Zr 基非晶复合材料准静态压缩特性的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2006,35(10):1568-1571.
WANG Zhi-hua, CHEN Guang, JIANG Fei, et al. Effect of volume fraction on quasistatic compressive characteristics of tungsten fiber/Zr-based bulk metallic glass matrix composites[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006,35(10):1568-1571.

Self-sharpening phenomena of tungsten fiber composite material penetrators during penetration

RONG Guang^{1*}, HUANG De-wu²

(1. National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

2. School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, Liaoning, China)

Abstract: Two kinds of the penetrating rods, which were made of tungsten heavy alloy and tungsten-fiber-reinforced Zr-based metallic glass composite material, respectively, were used to penetrate the 30CrMnMo steel target plates in the penetration experiments. In the penetration process, the tungsten heavy alloy rod head formed as a mushroom head and the grains in the head were radially compressed. But in the head of the tungsten-fiber-reinforced Zr-based metallic glass composite rod, the failure along the adiabatic shear bands was observed, which indicated that the tungsten-fiber-reinforced penetrators took on self-sharpening behaviors. A thin edge layer² was developed in the tungsten-fiber-reinforced penetrator head and only in this layer the metallic base was broken, the tungsten fibers were ruptured, the temperature increased and the mass was wasted. Evidently, the penetration ability of the tungsten-fiber-reinforced composite material penetrator is evidently greater than that of the tungsten alloy one.

Key words: mechanics of explosion; self-sharpening; penetration experiment; tungsten fiber composite material penetrator; mushroom head; edge layer

* Corresponding author; RONG Guang

E-mail address: rongg@mail.njust.edu.cn