

# 钨丝直径对锆基复合非晶材料穿甲性能的影响

杜成鑫<sup>1</sup>, 杜忠华<sup>1</sup>, 朱正旺<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学, 江苏 南京 210094)

(2. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016)

**摘要:** 针对 4 种不同直径钨丝/锆基非晶复合材料弹芯, 在  $(1270 \pm 40)$  m/s 撞击速度, 开展了侵彻均质半无限装甲钢板实验研究, 并与普通钨合金进行了对比。研究发现, 在相同的制备工艺条件下, 钨丝直径对该复合材料弹芯侵彻效果影响较大, 主要表现: (1) 在理想侵彻的条件下, 钨丝直径对该种材料的侵彻性能影响较大, 弹丸侵彻深度和钨丝直径关系曲线是凸的,  $\Phi 0.7$  mm 钨丝方案丸侵彻深度最大, 最大侵彻深度为 55 mm, 相对于钨合金材料威力提高了 25%, 其根本原因是  $\Phi 0.7$  mm 钨丝方案在侵彻过程中呈现与轴合金类似的绝热剪切破坏特征, 弹坑底部呈现  $90^\circ$  的自锐角。(2) 钨丝直径对弹芯在高速条件下的侵彻体头部破坏形式有着重要的影响, 随着钨丝直径的增加, 其头部的破坏模式随直径变化存在一个从变形+劈裂+弯曲+断裂的复合破坏模式到绝热剪切破坏演变过程, 然后又从绝热剪切向复合模式破坏转变。

**关键词:** 钨丝直径; 锆基非晶复合材料; 侵彻; 绝热剪切

中图分类号: TB333

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)04-1080-06

钨丝/锆基非晶复合材料作为动能穿甲弹芯具有高强度、高密度、高速侵彻的自锐特性,是近些年研究的热点<sup>[1-5]</sup>。作为一种新的动能穿甲材料,在不同的速度段对其性能和组分有着不同的要求,尤其在高速(火炮速度范围)阶段,必须了解其在高速侵彻条件下弹丸和靶板的侵蚀机理及破坏特征,这样才有助于材料的成分、性能和结构设计,更好地发挥材料的性能。目前,在钨丝/锆基非晶复合材料弹芯高速侵彻研究领域,对钨丝/锆基非晶复合材料高应变条件下的力学特性的研究主要集中在撞击速度小于 1000 m/s<sup>[1,2,6,7]</sup>,对该速度下该复合材料的破坏机理进行了细观分析,认为该材料在侵彻过程中弹体的破坏方式主要表现为局部化的剪切变形和断裂。而当速度大于 1000 m/s 时,弹芯的破坏形态将发生很大改变,文献[8]给出了该材料呈现先后发生非晶气化、弹芯外侧钨丝屈曲和弯曲断裂、钨丝回流现象,使弹芯在侵彻过程中保持自锐。针对该材料,钨丝作为这种复合材料的主要成分,其性能和几何参数对侵彻行为有着重要的影响,尤其是钨丝直径,它决定弹芯的密度、强度和韧性、侵彻特性。文献[9]针对 4 种不同直径钨丝(1, 0.7, 0.5, 0.2 mm)/锆基非晶复合材料的准静态和动态压缩试验表明,准静态压缩时,钨丝/锆基非晶复合材料的强度和钨丝直径呈递减关系;动态压缩试验时,钨丝/锆基非

晶复合材料的强度和钨丝直径关系曲线是凸的,在钨丝直径 0.5 mm 时,材料强度呈现最大值<sup>[9]</sup>。而对于高速侵彻条件下,钨丝直径的影响鲜见报道。为此,本研究针对不同直径的钨丝制备的钨丝/锆基非晶复合材料弹芯,在  $(1270 \pm 40)$  m/s 撞击速度,开展了其侵彻半无限均质装甲钢板实验研究,并与相同质量、长度和结构的普通钨合金进行了对比。通过研究获得一些重要的发现,得到了有价值的结论,对后续材料的研发具有重要参考价值。

## 1 实验

实验装置采用 25 mm 高速滑膛弹道炮,靶板采用 80 mm 均质装甲板。实验弹丸的各零部件照片如图 1 所示,弹丸结构采用底推式,可以确保弹丸的发射强度,同时可以避免加工对钨丝的破坏。飞行弹芯的结构及尺寸见图 2,实验的复合材料弹芯的长度 54 mm、直径  $\Phi 10$  mm,长径比为 5.4,复合材料的密度为  $17 \text{ g/cm}^3$ ,头部铝合金风帽的长度为 33 mm,后部铝合金尾翼的长度为 8.2 mm。针对钨丝/锆基非晶复合材料,采用 4 种尺寸的钨丝直径,直径分别为 0.3、0.5、0.7 和 1.0 mm,如图 3 所示。为了和钨合金侵彻威力进行对比,还准备了相同结构、相同尺寸的 93 钨合金弹芯。首先 2 发采用钨合金弹芯,采用由 1 个装药量,在距离靶板 12 m

收稿日期: 2016-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(11372142); 爆炸科学与技术国家重点实验室(北京理工大学)开放基金(KFJJ12-9M)

作者简介: 杜成鑫,男,1990年生,硕士生,南京理工大学,江苏 南京 210094, E-mail: duchengxin4324@163.com

处进行测速, 确定弹丸的实际着靶速度范围为(1270±40) m/s; 然后将靶板移到距离炮口 3 m 处进行穿甲实验, 避免弹丸飞行章动影响侵彻实验效果。

## 2 结果及分析

### 2.1 理想侵彻分析

靶板穿孔的实验照片如图 4 所示, 从照片可以看出, 弹丸着靶姿态大部分为垂直侵彻, 部分存在着靶攻角。实验后将靶板沿着弹坑口部中间进行线切割, 获得弹坑的形状及侵彻深度, 钨合金弹芯线切割照片如图 5 所示, 钨丝直径  $\Phi 1.0$  mm 到  $\Phi 0.3$  mm 线切割照片如图 6~图 9 所示, 实验有效数据 20 发, 每种方案 4 发, 具体的实验结果如表 1 所示。

#### 2.1.1 理想侵彻实验分析

从图 6~图 9 的线切割图可以看出, 不同钨丝直径方案的最大穿深的弹坑多相对平直, 如图 6c、图 7c、图 8c 和图 9c, 是理想侵彻。为更好理解 2 种材料的侵彻特征, 将 5 种方案的每 4 发弹丸的侵彻深度对弹丸实验发数从小到大会成折线图, 如图 10 所示。由图 10 可出, 非晶复合材料弹芯最大穿深均大于 93 钨合金, 且弹坑相对平直, 按照最大穿深计算, 直径为  $\Phi 0.3$  mm 非晶材料

Fig.1 Picture of penetrators

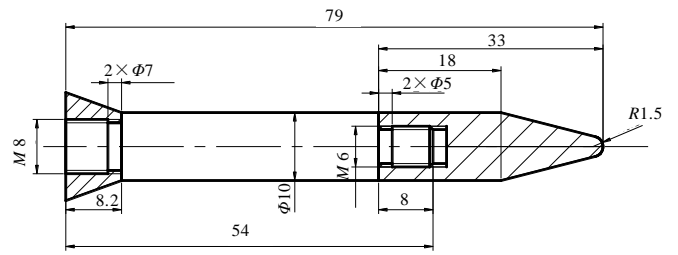


图 2 飞行弹芯结构图

Fig.2 Dimension of the penetrator

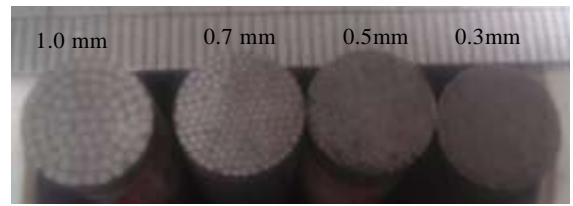


图 3 不同钨丝直径复合材料截面图

Fig.3 Cross-section of different diameters of W fiber/Zr based BMG composites



图 1 弹丸照片



图 4 实验靶板的照片

Fig.4 Picture of the target

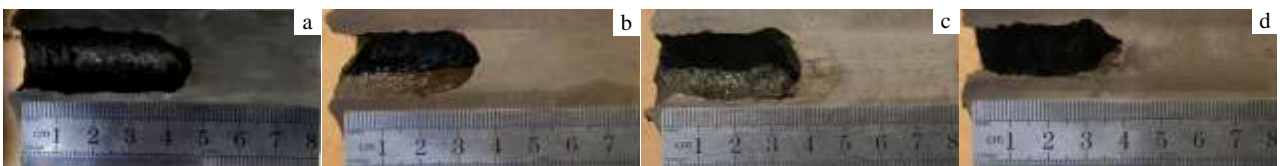


图 5 93 钨合金材料侵彻弹孔

Fig.5 Crater cross-sections of 93W: (a) 3#, (b) 4#, (c) 5#, and (d) 6#

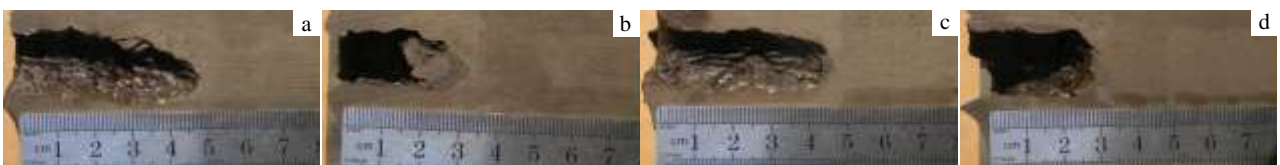


图 6  $\Phi 1.0$  mm 钨丝非晶复合材料弹芯侵彻弹孔

Fig.6 Crater cross-sections of  $\Phi 1.0$  mm W fiber/Zr based BMG composite: (a) 7#, (b) 8#, (c) 9#, and (d) 10#

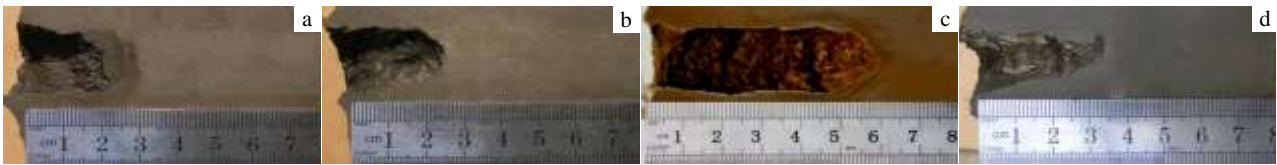


图 7  $\Phi 0.7$  mm 钨丝非晶复合材料弹芯侵彻弹孔

Fig.7 Crater cross-sections of  $\Phi 0.7$  mm W fiber/Zr based BMG composite: (a) 11#, (b) 12#, (c) 13#, and (d) 14#

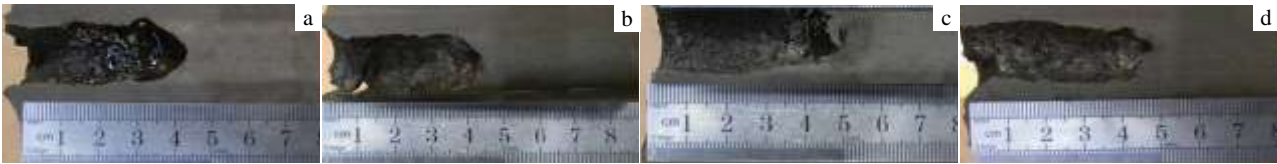


图 8  $\Phi 0.5$  mm 钨丝非晶复合材料弹芯侵彻弹孔

Fig.8 Crater cross-sections of  $\Phi 0.5$  mm W fiber/Zr based BMG composite: (a) 15#, (b) 16#, (c) 17#, and (d) 18#

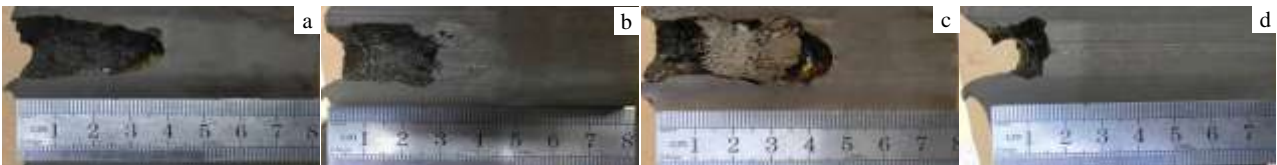


图 9  $\Phi 0.3$  mm 钨丝非晶复合材料弹芯侵彻弹孔

Fig.9 Crater cross-sections of  $\Phi 0.3$  mm W fiber/Zr based BMG composite: (a) 19#, (b) 20#, (c) 21#, and (d) 22#

表 1 不同弹丸的实验结果数据

Table 1 Contrastive results of different penetrators

Penetrator No.	Diameter of W fiber/mm	Material	Mass of bullet/g	Mass of propellant/g	Penetration depth/mm
3#	—	93W	118	155	44
4#	—	93W	118	155	36
5#	—	93W	118	155	44
6#	—	93W	117	155	40
7#	1.0	Composite	113	155	48
8#	1.0	Composite	109	155	32
9#	1.0	Composite	109	155	47
10#	1.0	Composite	113	155	31
11#	0.7	Composite	115	155	27
12#	0.7	Composite	114	155	25
13#	0.7	Composite	116	155	55
14#	0.7	Composite	117	155	43
15#	0.5	Composite	113	155	43
16#	0.5	Composite	113	155	40
17#	0.5	Composite	115	155	45
18#	0.5	Composite	116	155	49
19#	0.3	Composite	118	155	39
20#	0.3	Composite	118	155	41
21#	0.3	Composite	118	155	46
22#	0.3	Composite	116	155	17

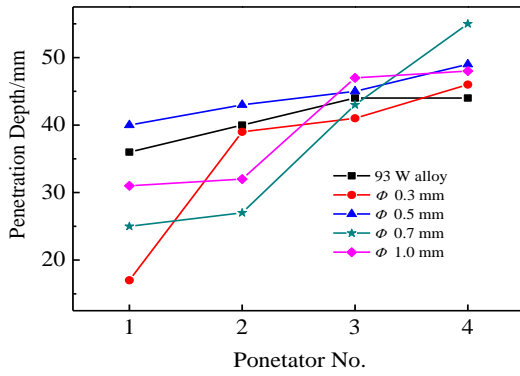


图 10 93 钨合金及不同直径钨丝非晶复合材料弹孔深度折线图

Fig.10 Bullet penetration depth of 93W alloy and W fiber/Zr based BMG composites of different diameters

弹芯的侵彻深度相对 93 钨合金威力增益在 4.5% 以上，直径为  $\Phi 0.5$  mm 的方案威力增益为 11.3% 以上，直径为  $\Phi 0.7$  mm 的方案威力增益为 25%，直径为  $\Phi 1.0$  mm 的方案威力增益为 9%，其威力增益从大到小的次序为  $\Phi 0.3$  mm <  $\Phi 1.0$  mm <  $\Phi 0.5$  mm <  $\Phi 0.7$  mm，最大威力增益与最小威力增益差值在 20% 以上。由此看出，在高速条件下，钨丝直径对弹芯的侵彻体头部破坏形式有着重要的影响。可进行综合对比。

对于同种材料，图 7c 中  $\Phi 0.7$  mm 最深的弹坑平直，尤其前面的弹坑底部呈  $90^\circ$  的锐角，说明该直径弹芯材料侵彻体头部呈现钨合金的绝热剪切破坏模式，在侵彻过程中始终保持很好的自锐。从形成的沟槽看：直径  $\Phi 1.0$  mm 的弹坑侧壁表面出现规则的连续钨丝划痕沟槽，说明钨丝的破坏呈现冲击压缩、弯曲及拉伸或剪切破坏；而直径  $\Phi 0.7$  mm 弹芯材料形成的弹坑侧壁印痕既不同于钨合金光泽波浪形侧壁，也不同于直径  $\Phi 1.0$  mm 和  $\Phi 0.3$  mm 的复合材料，弹坑侧壁呈现多个短纤维钨丝的离散划痕，说明钨丝呈剪切断裂。

另外，由于钨丝直径的不同，造成非晶合金与钨丝的接触面的面积不同，工艺也会造成界面结合力的差异，钨丝越细，越易形成裂纹间隙，而复合材料断裂方式取决于界面结合状态和钨丝直径<sup>[10]</sup>。因此，当钨丝直径较细、界面结合力较弱时，在高速冲击的条件下更容易发生动态纵向劈裂破坏方式；随着钨丝直径增加，抵抗弯曲变形能力增强，同时界面结合力也增强，复合材料在冲击压缩下形成的剪切力可以使钨丝剪断，导致非晶合金复合材料为剪切断裂方式，出现了绝热剪切的破坏模式；当钨丝直径继续增大，冲击压缩形成的剪切力不足以使钨丝断裂时，钨丝变为

弯曲变形与劈裂破坏形式。因此， $\Phi 0.3$  mm 钨丝的复合材料侵彻体头部破坏模式呈变形+劈裂+弯曲+断裂的复合模式， $\Phi 0.5$  mm 和  $\Phi 1.0$  mm 钨丝的复合材料侵彻体头部破坏模式呈复合模式+绝热剪切模式的混合破坏；非晶复合材料侵彻体头部的破坏模式随直径变化存在一个演变过程，钨丝直径从  $\Phi 0.3$  mm 到  $\Phi 0.7$  mm 侵彻体头部破坏从复合模式到绝热剪切模式转变， $\Phi 0.7$  mm 到  $\Phi 1.0$  mm 又从绝热剪切转变为复合型。

为进行比较，将图 7c、图 5b 和文献[7]的线切割图片放到一起进行对比，如图 11 所示。 $\Phi 0.7$  mm 弹芯材料与普通钨合金对比（如图 11a 和图 11b），发现其头部自锐角度约为  $90^\circ$ ，明显没有出现蘑菇头形状，出现了与钨合金极为相似的圆锥形头部侵彻形状和机理；与相同材料低速条件下对比（如图 11c），图 11c 的弹坑底部底凹呈半球形，而图 11a 的头部成圆锥形，其头部自锐效果更明显，在高速条件下，其自锐效果明显好于低速情况下。

### 2.1.2 理想侵彻阻力理论计算

从图 11 中可以看出， $\Phi 0.7$  mm 钨丝/钨基非晶复合材料弹芯理想侵彻的弹坑头部呈圆锥形，根据吴群彪<sup>[11]</sup>所研究的头部形状侵彻效率可知：

$$P_{wf} = \frac{\pi D^2}{4} (AY_t + \frac{B\rho_t u^2 D^2}{4b^2 + D^2}) \quad (1)$$

而钨合金弹芯弹坑头部形状为球形，则：

$$P_w = \frac{\pi D^2}{4} (AY_t + \frac{1}{2} B\rho_t u^2) \quad (2)$$

式中： $P$  为靶板阻力； $D$  为弹坑直径； $Y_t$  为靶板材料的动态屈服强度； $\rho_t$  为靶板密度； $u$  为侵彻速度； $A$ 、 $B$  为空腔膨胀模型计算靶体阻力的 2 个常数。

令  $g = P_{wf} - P_w$ ，将 (1) 和 (2) 带入其中：

$$g = \frac{\pi D^2 B\rho_t u^2}{4} (\frac{D^2}{4b^2 + D^2} - \frac{1}{2}) \quad (3)$$

经过测量，图 11a 中钨丝/钨基非晶复合材料的弹坑直径为 16 mm，而图 11b 中钨合金的弹坑直径为 15.3 mm，两者相差 4.4%~5%，所以将两者看成相同弹坑直径。为方便计算，取弹坑直径为相同的  $D=16$  mm，而图 11a 中圆锥形头部长度  $b=15$  mm，代入 (3) 式中可得  $g < 0$ ，所以  $\Phi 0.7$  mm 钨丝/钨基非晶复合材料弹芯在侵彻过程中侵彻阻力小于钨合金，表现为侵彻深度明显大于钨合金。

### 2.2 非理想侵彻分析

从 93 钨合金弹芯侵彻弹坑（图 5）、钨丝/钨基非晶复合材料弹芯（图 6~图 9）线切割剖面对比图及表 1 的



侵彻深度数据可以发现: 93 钨合金在侵彻过程中非常稳

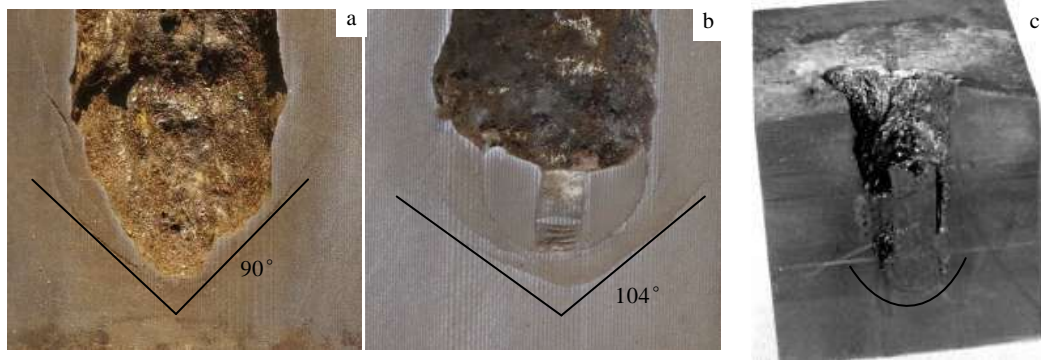


图 11  $\Phi 0.7$  mm 钨丝/非晶复合材料弹芯、93W 弹芯与文献[7]侵彻弹坑的对比图

Fig.11 Bottom of  $\Phi 0.7$  mm W/Zr-based composite (a), 93W crater (b), and picture from Ref.[7] (c)

定, 弹坑很直, 侵彻深度相差不大。而钨丝/锆基非晶复合材料在侵彻过程中不是很稳定, 只有  $\Phi 0.5$  mm 钨丝/锆基非晶复合材料弹芯侵彻稳定性相对较好, 其它的非晶复合材料弹芯波动较大。显然, 此种弹丸结构, 钨丝/锆基非晶复合材料的侵彻稳定性还是不如钨合金。钨丝/锆基非晶复合材料弹芯的高速侵彻过程中大部分存在明显的弹道弯曲现象, 其侵彻过程认为是非理想侵彻过程。作为非理想侵彻, 其在弹坑剖面的主要表现为: (1) 在弹丸侵彻路径方向发生偏转; (2) 弹坑直径不均匀, 会出现波动; (3) 弹坑侧壁沟槽明显; (4) 弹坑钨丝大量残留。

造成弹道弯曲的根本原因: (1) 弹丸的着靶姿态不正, 同时弹丸材料本身的工艺性及缺陷, 在冲击载荷作用下会发生裂纹动态传播的速度增韧性<sup>[12]</sup>, 同时多个在1条线上的裂纹会快速闭合<sup>[13]</sup>, 损伤面积瞬间加大, 使复合材料弹芯发生动态劈裂; (2) 钨丝/锆基非晶复合材料作为各向异性材料, 在垂直于纤维方向上的抗力远弱于平行纤维方向, 在冲击载荷作用下更容易发生劈裂和弯曲, 尤其在弹芯横截面发生劈裂的位置具有随机性, 因此会造成靶板抗力的不对称, 侵彻弹道会发生偏转、分叉和弹坑直径不均匀等现象;

(3) 在极端状况下, 撞击产生的高温高压有可能使非晶合金燃烧, 非晶合金全部燃烧后留下的没有侵彻能力的多孔的钨丝残留在弹坑中, 如图9c, 而且这种燃烧速度随着弹丸着靶速度提高而增加, 非晶的燃烧将大大降低钨丝界面的结合强度和弹芯整体刚度, 进而会造成弹道弯曲。

### 3 结 论

1) 随着复合材料中钨丝直径的增加, 复合材料弹

芯的破坏方式呈现出纤维增强体动态劈裂、绝热剪切断裂以及 2 种情况同时出现的多种破坏方式。

2) 复合材料的断裂方式受到增强体 W 纤维直径、界面结合状态、材料缺陷、材料的性能组分、弹丸的着靶速度、长径比和尺寸效应、靶板条件、着靶角度等种因素控制。只有将该种材料性能、组分和几何尺寸、工艺条件等众多因素与高速侵彻自锐机理相结合开展研究, 才能扬长避短, 充分发挥各向异性材料性能优势性能, 对材料研究和弹芯设计都具有重要的推动作用。

### 参考文献 References

- [1] Conner R D, Dandliker R B, Scruggs V *et al.* *Int J Impact Eng*[J], 2000, 24(5): 435
- [2] Choi-Yim H, Conner R D, Szuecs F *et al.* *Scripta Mater*[J], 2011, 45(9): 1039
- [3] Li Jicheng(李继承), Chen Xiaowei(陈小伟). *Advances in Mechanics(力学进展)*[J], 2011, 41(5): 480
- [4] Qiu Keqiang(邱克强), Wang Aimin(王爱民), Zhang Haifeng(张海峰) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2002, 38(10): 1091
- [5] Deng S T, Diao H, Chen Y L *et al.* *Scripta Materialia*[J], 2011, 64(1): 85
- [6] Chen Xiaowei(陈小伟), Li Jicheng(李继承), Zhang Fangju(张方举) *et al.* *Explosion and Shock Waves(爆炸与冲击)*[J], 2012, 32(4): 346
- [7] Rong Guang(荣光), Huang Dewu(黄德武). *Explosion and Shock Waves(爆炸与冲击)*[J]. 2009, 29(4): 351
- [8] Duzhonghua(杜忠华), Du Chengxin(杜成鑫), Zhu Zhengwang(朱正旺) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金*

- 属材料与工程)[J], 2016, 45(9): 2359
- [9] Zhang Bo(张波), Fu Huameng(付华萌), Zhu Zhengwang(朱正旺) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2013, 49(10): 1191
- [10] Wang Meiling(王美玲), Yang Bin(杨斌). *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2012, 33(10): 7
- [11] Wu Qunbiao(吴群彪), Shen Peihui(沈培辉), Liu Rongzhong(刘荣忠) *et al.* *Ordnance Material Science and Engineering* (兵器材料科学与工程)[J], 2014, 37(3): 80
- [12] Zhu Zheming(朱哲明), Wang Yuan(汪元), Zhou Zhangtao(周章涛) *et al.* *Journal of Sichuan University*(四川大学学报)[J], 2008, 40(5): 13
- [13] Zhang Zhenya(张振亚), Duan Zhong(段忠), Zhou Fenghua(周风华). *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*(力学学报)[J], 2013, 45(5): 729

## Effect of Tungsten Fiber Diameter on Penetration Ability of Zr-based Metallic Glass Composites

Du Chengxin<sup>1</sup>, Du Zhonghua<sup>1</sup>, Zhu Zhengwang<sup>2</sup>

(1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

(2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**Abstract:** Penetration experiments were conducted for Zr-based metallic glass composites containing tungsten fibers with different diameters of 0.3, 0.5, 0.7, 1.0 mm to perforate homogeneous armor steel at velocity of  $(1270 \pm 40)$  m/s. Meanwhile their characteristics and depths of penetration were compared with those of tungsten alloy. Results demonstrate that under the same preparation condition, the diameter of the tungsten fiber is a critical parameter for penetration ability. Firstly, the curve of the diameter of the tungsten with the penetration depth is convex when it perforates ideally and the composite containing 0.7 mm tungsten fiber obtains the maximum penetration depth of 55 mm which is increased by 25% compared with that of tungsten alloy because the failure mode is adiabatic shear failure during the penetration similar to that of the depleted uranium alloy exhibiting a crater of  $90^\circ$  at bottom. Secondly, the diameter of tungsten fiber influences the failure mode of the head of the composites significantly. With the increasing of the tungsten fiber diameter, the failure mode ranges from a composite failure mode that includes deformation, splitting, bending and crack to adiabatic shear failure and then it turns to composite failure mode again.

**Key words:** tungsten fiber diameter; Zr-based metallic glass composites; penetration; adiabatic shear

---

Corresponding author: Du Chengxin, Candidate for Master, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, P. R. China, E-mail: duchengxin4324@163.com