

着靶速度和钨丝直径对钨丝/锆基非晶复合材料弹芯侵彻性能的影响

杜成鑫¹, 杜忠华¹, 朱正旺²

(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: 为了研究高速撞击条件下含不同直径钨丝/锆基非晶复合材料弹芯的侵彻特性, 使用含有 4 种不同直径钨丝的复合材料弹芯在 1000~1600 m/s 的速度区间进行穿甲实验。研究发现: 钨丝/锆基非晶复合材料弹坑直径比钨合金小 10% 以上, “自锐”效果明显; 理想侵彻时, 存在一个阈值速度, 钨丝/锆基非晶复合材料弹芯在低于该速度侵彻时, 其侵彻过程中的破坏模式为类似于贫铀合金的绝热剪切破坏, 而高于该阈值速度时, 破坏模式变成钨丝的屈曲、回流, 而且该阈值速度随着复合材料中钨丝直径的增加而增加; 钨丝/锆基非晶复合材料弹芯中钨丝的直径会影响其侵彻过程中的稳定性, 钨丝直径越大, 该复合材料弹芯在侵彻过程中越容易出现劈裂等破坏, 导致弹道偏转等。

关键词: 钨丝/锆基非晶复合材料; 钨丝直径; 自锐; 着靶速度; 破坏机理

中图分类号: TJ414.⁺²

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)06-1632-06

钨丝/锆基非晶复合材料是一种新型复合材料, 以锆基非晶合金为粘结相, 钨丝为增强相。该材料不仅强度高, 而且密度大。大量研究表明, 含有 80% 体积分数的钨丝的复合材料的动态压缩强度超过 2500 MPa, 比钨合金高 60%, 而密度也不低于 17 g/cm³[1-3]。在高应力或高应变率条件下变形时, 该复合材料极易发生局部剪切, 具有类似贫铀合金的高剪切敏感性和剪切自锐现象[4]。因此钨丝/锆基非晶复合材料受到国内外材料工作者的广泛关注, 进行了大量的研究。R. D. Conner^[5,6]、荣光^[7]以及杜忠华等^[8,9]在 1000~1700 m/s 着靶速度范围内对钨丝/锆基非晶复合材料弹芯进行了穿甲实验研究。结果证明, 该复合材料弹芯在侵彻过程中“自锐”效果明显, 侵彻能力强于钨合金, 平均侵彻深度比钨合金高 10%。张波等^[10]和杜成鑫等^[11]又进一步研究了复合材料中所包含的钨丝的直径对该复合材料弹芯的性能的影响。实验证明, 在准静态加载条件下, 复合材料的压缩强度随钨丝直径的增加而减小, 动态加载时钨丝直径和动态压缩强度并不成直线关系。4 种复合材料中(分别含有直径 1, 0.7, 0.5, 0.2 mm 钨丝), 含有 Φ 0.5 mm 钨丝的复合材料的动态压缩强度最大; 而穿甲实验中, 在 1270 m/s 着靶速度下, 含有 Φ 0.7 mm 钨丝的复合材料弹芯的穿甲能力最强。

本实验结合文献[11], 在 1000~1600 m/s 着靶速度下分析含有直径 1.0, 0.7, 0.5 和 0.3 mm 钨丝的复合材料弹芯的穿甲能力, 研究了着靶速度和钨丝直径对钨丝/锆基非晶复合材料弹芯的侵彻性能的影响。

1 实验

实验弹丸采用 25 mm 底推式脱壳模拟弹。底推式弹丸应用在小口径弹道炮时能保证发射强度, 加工简单, 而且不需要加工环形齿, 保留了钨丝/锆基非晶复合材料弹芯中的钨丝的完整性, 有利于侵彻。实验所用弹芯材料为钨合金以及含有直径 1.0、0.7、0.5、0.3 mm 钨丝的钨丝/锆基非晶复合材料。弹芯的长度 54 mm、直径 10 mm, 长径比为 5.4。复合材料的密度为 17 g/cm³。实验使用火炮为 25 mm 滑膛弹道炮, 炮管长为 150 倍口径 (3.75 m)。实验用靶板为 603 装甲钢 (30CrMnMo 钢), 厚 80 mm, 垂直放置。实验中通过控制装药量控制弹丸着靶速度, 距炮口 7 m 左右使用锡箔纸靶测速。

2 结果及分析

实验 18 发, 其中有效数据 14 发, 具体数据如表 1 所示。弹丸侵彻弹坑剖面图如图 1~图 5 所示。实验

收稿日期: 2016-05-11

基金项目: 国家自然科学基金 (11372142, 11472008, 11202206); 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, 博士生, 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094, 电话: 025-84304059, E-mail: duchengxin4324@163.com

表 1 5 种弹芯材料实验结果

Table 1 Contrastive results of five kinds of penetrators

Penetrator No.	Diameter of the W fiber/mm	Mass of bullet/g	Velocity/m s ⁻¹	Penetration depth/mm	Diameter of crater/mm	Remark
1	W fiber-free	115	1247	48	18	
2	W fiber-free	114	1447	55	19	
3	W fiber-free	115	1604	58	19	
4	W fiber-free	114	1443	—	—	Miss
5	0.3	113	1426	60	—	Splitting
6	0.3	112	1560	60	17	
7	0.3	113	1523	63	17	
8	0.3	114	1413	53	20	
9	0.5	112	1435	52	16	
10	0.5	113	1612.5	52	16	
11	0.7	112	1475	54	19	
12	0.7	113	1361.5	64	16	
13	0.7	111	1641	—	—	Miss
14	0.7	111	1671	—	—	Miss
15	1.0	111	1480	52	18	
16	1.0	111	959	50	15	
17	1.0	111	1173	48	—	
18	1.0	111	1253	—	—	Miss

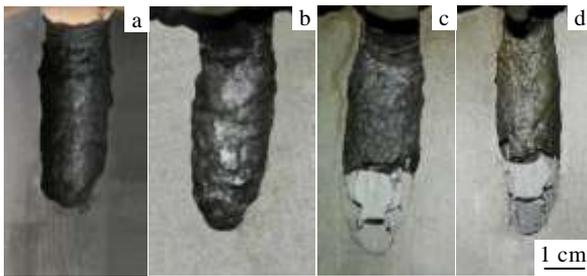


图 1 93W 钨合金弹芯侵彻弹坑剖面图

Fig.1 Pictures of crater cross-section of 93W: (a) $v=1270$ m/s^[11], (b) $v=1247$ m/s, (c) $v=1447$ m/s, and (d) $v=1604$ m/s

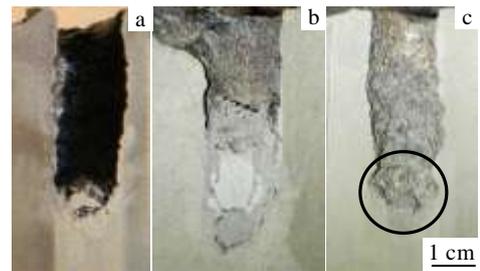


图 3 含 $\Phi 0.5$ mm 钨丝/铅基非晶复合材料弹芯侵彻弹坑剖面图

Fig.3 Pictures of crater cross-section of $\Phi 0.5$ mm of W fiber/Zr based BMG composite: (a) $v=1270$ m/s^[11], (b) $v=1435$ m/s, and (c) $v=1612$ m/s

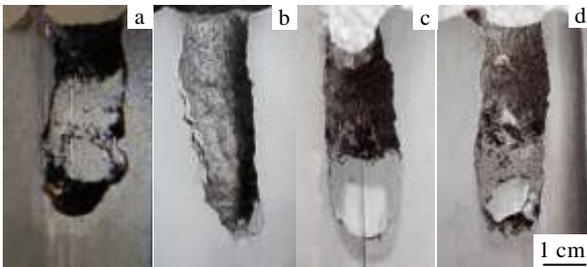


图 2 含 $\Phi 0.3$ mm 钨丝/铅基非晶复合材料弹芯侵彻弹坑剖面图

Fig.2 Pictures of crater cross-section of $\Phi 0.3$ mm of W fiber/Zr based BMG composite: (a) $v=1270$ m/s^[11], (b) $v=1426$ m/s, (c) $v=1560$ m/s, and (d) $v=1523$ m/s

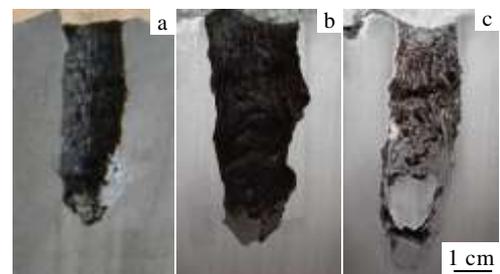


图 4 含 $\Phi 0.7$ mm 钨丝/铅基非晶复合材料弹芯侵彻弹坑剖面图

Fig.4 Pictures of crater cross-section of $\Phi 0.7$ mm of W fiber/Zr based BMG composite: (a) $v=1270$ m/s^[11], (b) $v=1475$ m/s, and (c) $v=1361$ m/s

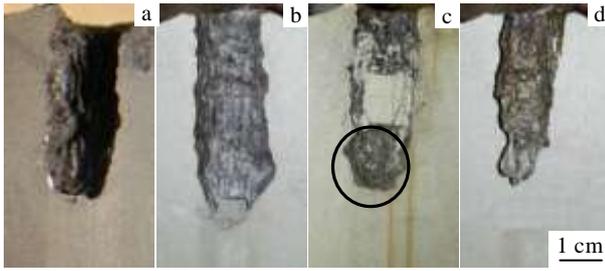


图 5 含 $\Phi 1.0$ mm 钨丝/铅基非晶复合材料弹芯侵彻弹坑剖面图
Fig.5 Pictures of crater cross-section of $\Phi 1.0$ mm of W fiber/Zr based BMG composite: (a) $v=1270$ m/s^[11], (b) $v=1480$ m/s, (c) $v=959$ m/s, and (d) $v=1173$ m/s

着靶速度-侵彻深度曲线如图 6 所示。由于本实验中所用弹丸的主要侵彻体部分和文献[11]中相同，所以引用文献[11]中的有效侵彻的数据也包含在图 1~图 6 中，以示对比(第 8 发弹坑切偏，弹坑截图未列出)。

2.1 “自锐”特性分析

图 7 给出了钨合金、含 $\Phi 0.7$ mm 钨丝的复合材料弹芯和含 $\Phi 0.3$ mm 钨丝的复合材料弹芯的弹坑直径。从图中可以直观地看出，钨合金弹丸在稳定侵彻阶段弹坑直径为 19 mm，如图 7a。而含 $\Phi 0.7$ mm 钨丝的复合材料弹芯在稳定侵彻阶段弹坑直径为 16 mm，含 $\Phi 0.3$ mm 钨丝的复合材料弹芯稳定侵彻阶段弹坑直径为 17 mm，比钨合金小 10%~15%，如图 7b 和 7c。根据空穴膨胀理论^[12]，弹丸侵彻过程中弹丸所受到的轴向抗力为：

$$F_z = \int_{z=0}^{z=l_h} [p_s + p_t(\eta)] \sin(\eta) dA(\eta) \quad (1)$$

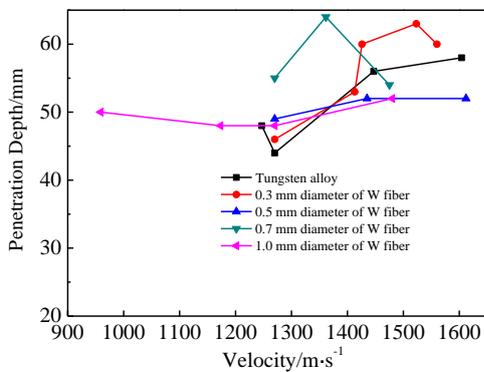


图 6 5 种材料弹芯着靶速度-侵彻深度图

Fig.6 Penetration depth-velocity of five kinds of penetrators

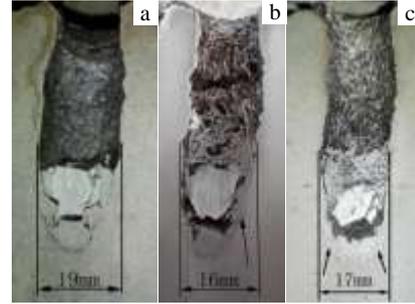


图 7 弹坑直径

Fig.7 Diameter of crater: (a) 93 W, $v=1447$ m/s, (b) $\Phi 0.7$ mm W fiber/BMG, $v=1361$ m/s, and (c) $\Phi 0.3$ mm W fiber/BMG, $v=1523$ m/s

其中， p_s 为静抗压力，只与靶板的材料性质有关，对于线性硬化材料，其值为：

$$p_s = \frac{2}{3} \sigma_{sc} (1 + \ln \frac{2E}{3\sigma_{sc}}) + \frac{2}{27} \pi^2 E_t \quad (2)$$

式中， σ_{sc} 为靶板的屈服应力， E 为靶板的弹性模量， E_t 为靶板的硬化模量。

$p_t(\eta)$ 为过弹头弧形母线圆心，于垂直于轴线平面 η 角度一点的动抗压力，如图 8 所示：

$$p_t = \rho_t (B_1 \frac{d \cdot x''}{2} + B_2 v_p^2) \quad (3)$$

式中， ρ_t 为靶板密度， d 为弹坑直径， x'' 为弹丸的负加速度， B_1 、 B_2 为惯性系数， v_p 为靶中邻近弹表面的质点速度。而表面微元 $dA(\eta)$ 为：

$$dA(\eta) = \frac{\pi d^2 (\cos \eta - \cos \phi) [(\cos \phi - \cos \eta) \cos^2 \eta - \cos \eta]}{(1 - \cos^2 \phi) \cos \eta} d\eta \quad (4)$$

由于实验所用为同一块靶板，所以靶板的静抗压力 p_s 相等，而动抗压力 p_t 中 ρ_t 相等。假设在开坑结束时钨合金弹丸的和钨丝/铅基非晶复合材料弹芯的着靶速度相同，则 v_p 也相等。而对于不可压缩材料， $B_1=1$ ，

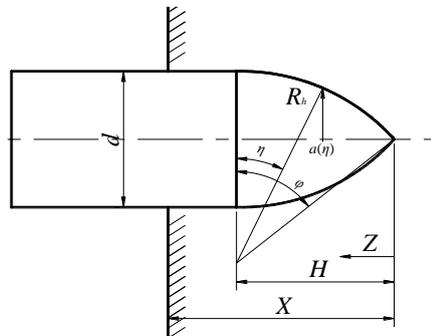


图 8 空穴膨胀理论示意图

Fig.8 Schematic diagram of cavity expansion theory^[12]

$B_2=3/2$ 。假设在开坑结束时两种弹丸的加速度相同,而弹坑形状相同条件下,图8中的角度 η 和 ϕ 也随弹坑直径改变而改变, p_1 和 $dA(\eta)$ 都是只与弹坑直径 d 相关的增函数,则轴向抗力 F_z 也是关于弹坑直径 d 的增函数,所以

$$d_w > d_c \quad (5)$$

$$F_{zw} > F_{zc} \quad (6)$$

其中, d_w 和 F_{zw} 分别代表钨合金弹丸的弹坑直径、动抗压力以及轴向抗力, d_c 和 F_{zc} 则分别代表钨丝/锆基非晶复合材料弹芯的弹坑直径、动抗压力以及轴向抗力。

因此, $\Phi 0.7$ mm钨丝复合材料弹芯所受到的轴向抗力要小于钨合金,所以在理想侵彻时其侵彻深度要高于钨合金。而其他直径钨丝/锆基非晶复合材料弹芯的弹坑直径同样小于钨合金,如图7所示,这就是钨丝/锆基非晶复合材料弹芯的“自锐”特性,所以钨丝/锆基非晶复合材料弹芯在理想侵彻时侵彻深度高于钨合金。

2.2 破坏机理分析

首先,在低速侵彻过程中,如图4a所示,弹坑直径比较均匀,弹坑底部呈圆锥形,弹坑壁为鱼鳞状,与贫铀合金弹丸所形成的弹坑相似。由此可知,在1270 m/s着靶速度下,含 $\Phi 0.7$ mm钨丝的复合材料弹芯在侵彻过程中的破坏机理为类似于贫铀合金的绝热剪切断裂。而在高速撞击时,弹坑呈“八”字形开口,弹坑底部为卵形,上半弹坑壁有钨丝的划痕,下半弹坑壁有弹芯材料附着,弹坑底部有未侵蚀完全的弹芯材料的残体,如图7b和图7c。说明在高速侵彻时,钨丝/锆基非晶复合材料弹芯的破坏机理为钨丝的屈曲、回流。

造成钨丝/锆基非晶复合材料弹芯侵彻过程中破坏机理改变的原因是:在低速侵彻过程中,弹芯材料受到的撞击力相对较小,钨丝/锆基非晶复合材料弹芯只有最头部边缘层发生破坏,并且被不断剥离,这种现象已经被证明,如图9所示^[7]。而在高速侵彻时,出现挂壁现象主要是因为高速侵彻过程中,由于高温高压,锆基非晶材料迅速气化,导致侵彻体前端钨丝没有束缚。由于高速撞击产生的冲击波在钨丝中传播,当应力高于钨丝的动态屈曲的临界值时,钨丝产生动态屈曲、回流,而回流的钨丝会有部分附着在弹坑壁上。而2种破坏模式的宏观区别可以直接通过弹坑形状看出,当低速侵彻时,破坏模式为绝热剪切破坏,弹坑上下比较平均,如图4a所示,因为这种破坏模式不会使弹头直径明显增加。而当破坏模式转变为钨丝的屈曲、回流以后,开坑结束以后弹头直径会有一些的增加,所以弹坑会呈现“八”字形开口,如图2c,非常明显。所以按此标准可以非常容易地判断弹芯的破坏模式。

钨丝/锆基非晶复合材料弹芯在侵彻过程中材料破坏模式由绝热剪切破坏转变钨丝的屈曲、回流的主要原因是侵彻过程中所受压力的变化,宏观表现为着靶速度的变化,即存在一个阈值速度。当侵彻速度低于该阈值速度时,其破坏机理为绝热剪切破坏,而当侵彻速度高于该阈值时,钨丝/锆基非晶复合材料的破坏模式为钨丝的屈曲、回流。而且该阈值速度与复合材料中所包含的钨丝的直径有关,钨丝直径越大,使其屈曲所需要的应力越大,则阈值速度也应该越大。通过图2~图5分析可知,含 $\Phi 0.3$ mm钨丝的复合材料弹芯和含 $\Phi 0.5$ mm钨丝的复合材料弹芯的阈值速度低于1270 m/s,因为在1270 m/s时其侵彻已经呈现钨丝的动态屈曲;含 $\Phi 0.7$ mm钨丝的复合材料弹芯的阈值速度应该介于1361 m/s和1475 m/s之间;而含 $\Phi 1.0$ mm钨丝的复合材料弹芯的阈值速度高于1480 m/s,因为在1480 m/s时含 $\Phi 1.0$ mm钨丝复合材料弹芯侵彻也没有呈现钨丝的屈曲、回流状态。

需要说明的是,塑性金属材料弹芯在高速侵彻中也会出现“挂壁”现象,如图10为钢杆侵彻钢靶时出现的“挂壁”现象^[13]。但是塑性材料主要是因为侵彻过程中前端塑性变形区材料的回流导致“挂壁”,而钨丝/锆基非晶复合材料弹芯在侵彻过程中主要是外围一层钨丝回流,如图11为南京理工大学杜忠华课题组实验后回收的残余弹体^[8]及含 $\Phi 0.7$ mm钨丝的复合材料弹芯侵彻弹坑底部图。所以钨丝/锆基非晶复合材料弹芯侵彻时并不会出现“蘑菇头”,而且头部呈小于 90° 的自锐,这也解释了为什么钨丝/锆基非晶复合材料弹芯侵彻弹坑直径小于钨合金,也进一步证明了该材料在侵彻过程中的自锐特性。

2.3 侵彻稳定性分析

如图6,综合分析实验中几种钨丝/锆基非晶复合材料弹芯的侵彻结果,含 $\Phi 0.3$ mm钨丝的复合材料弹

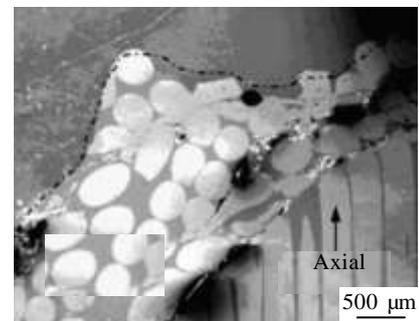


图9 钨丝/锆基非晶复合材料弹芯残体 SEM 照片

Fig.9 SEM micrograph of the residual tungsten fiber penetrator^[7]

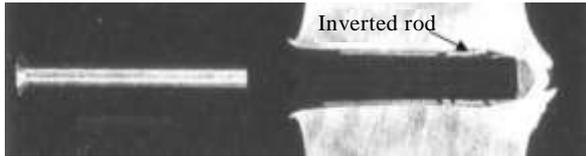


图 10 钢杆撞击钢靶时的弹坑剖面图

Fig.10 Crater and bulge in a steel target impacted by a steel rod^[13]

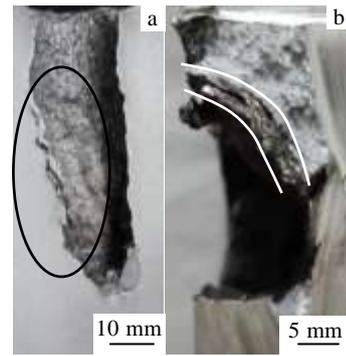


图 12 包含有弹芯劈裂后残体的弹坑

Fig.12 Picture of crater containing split residual of penetrator: (a) longitudinal section and (b) cross section

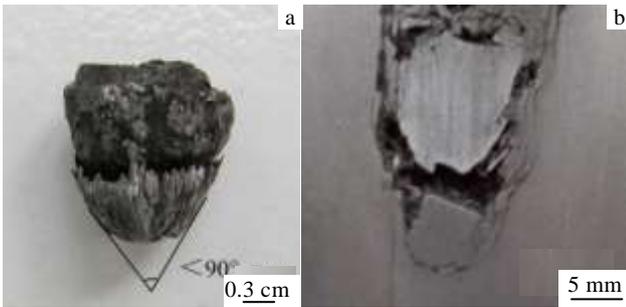


图 11 弹芯残体照片^[8]及含 $\Phi 0.7$ mm 钨丝的复合材料弹坑底部图

Fig.11 Pictures of penetrator residual^[8] and the bottom of the crater of W fiber/Zr based BMG composite containing $\Phi 0.7$ mm W fiber

芯的侵彻性能最好，因为平均侵彻深度最深，侵彻最稳定。含 $\Phi 0.3$ mm 钨丝的复合材料弹芯的侵彻性能最好的原因是随着钨丝直径的减小，复合材料中钨丝的体积分数增加，而且复合材料中钨丝和非晶合金的接触面积也增加，二者之间粘接强度也更高，能够有效抑制裂纹的传播，所以在 1420~1560 m/s 侵彻速度范围内，含 $\Phi 0.3$ mm 钨丝的复合材料弹芯的侵彻效果最稳定。

2.4 非理想侵彻结果分析

仔细分析弹丸侵彻结果和弹坑照片发现，有一些侵彻结果不理想现象。图 2b、图 2d 和图 4c 中弹坑明显偏转，图 3c 和图 5c（图中圆圈内所示）弹坑底部出现“急转”。这 2 种现象在钨合金弹坑中都没有出现，而弹坑“急转”现象在低速侵彻时也有出现（图 5c）。

弹坑偏转主要是由于材料的特性造成的。因为钨丝/锆基非晶复合材料是单向纤维复合材料，拥有明显的各向异性，其垂直于钨丝方向上的强度比平行于钨丝方向小得多。另外复合材料在撞击时非常容易产生裂纹^[11,14]，而由于钨丝/锆基非晶复合材料的横向抗拉强度有限，所以一旦在撞击时产生裂纹，裂纹就会快速扩展，造成弹芯材料的整体劈裂，所以靶板的左右抗力不对称就会造成弹道的偏转。如图 12 所示为 6#

试样弹坑的剖面图和横截面图。图 12a 中黑色椭圆中和图 12b 中两条白色曲线之间即为弹芯材料劈裂后残留物，厚 1 mm。正是由于这种劈裂导致弹道向右偏转比较严重。而钨合金弹芯是均质材料，不容易产生裂纹，所以弹道很正。而弹坑底部的“急转”现象主要是因为是在侵彻末期，弹芯材料剩余长度小于 $1D$ (D 为弹芯直径) 时，由于非晶合金燃尽，钨丝处于无约束状态，则会出现左右摇摆现象，则弹道会出现“急转”的现象。

而且，虽然本次实验中所用的弹芯的主要侵彻体——钨丝/锆基非晶复合材料和文献[11]中相同，但是尾翼要比文献[11]中长，所以在侵彻过程中尾翼会对钨丝/锆基非晶复合材料弹芯起到推动作用，如果钨丝/锆基非晶复合材料中已经有裂纹存在，则尾翼的推动会加速钨丝/锆基非晶复合材料的劈裂。

3 结 论

1) 在相同着靶速度下，钨丝/锆基非晶复合材料弹芯的“自锐”效果明显，其弹坑直径比钨合金弹坑小 10% 以上，而相同着靶速度下，直径小的弹坑侵彻阻力更小。所以在正常侵彻时钨丝锆基/非晶复合材料弹芯的侵彻深度比钨合金大。

2) 钨丝/锆基非晶复合材料弹芯在侵彻过程中存在一个阈值速度，当侵彻速度低于此阈值时，钨丝/锆基非晶复合材料弹芯的破坏模式呈现类似于贫铀合金的绝热剪切破坏，当侵彻速度高于阈值时，其破坏模式变成钨丝的屈曲、回流，会出现“挂壁”现象，而且该阈值速度随着钨丝直径的增加而增加。

3) 由于钨丝直径越小，钨丝所占体积分数越高，钨丝和非晶合金间的接触面积越大，而且钨丝本身的强度也越高，所以钨丝越细，其在高速侵彻时越稳定。

4) 钨丝/锆基非晶复合材料作为单向纤维复合材料, 高压下容易劈裂导致弹道偏转, 影响侵彻效果。

参考文献 References

- [1] Cheng Huanwu(程焕武), Cai Hongnian(才鸿年), Wang Lu(王鲁) *et al.* *Ordnance Material Science and Engineering*(兵器材料科学与工程)[J], 2008, 31(2): 23
- [2] Ma Weifeng(马卫锋), Kou Hongchao(寇宏超), Li Jinshan(李金山) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2008, 18(6): 1045
- [3] Wang Lu(王鲁), Wang Fuchi(王富耻), Cheng Huanwu(程焕武) *et al.* *Transactions of Beijing Institute of Technology*(北京理工大学学报)[J], 2003, 23(2): 165
- [4] 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
- [5] Conner R D, Dandliker R B, Scruggs V *et al.* *Int J Impact Eng*[J], 2000, 24: 435
- [6] Choi-Yim H, Conner R D, Szuets F *et al.* *Scr Mater*[J], 2011, 45: 1039
- [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] Du Zhonghua(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(5): 1308
- [9] Du Zhonghua(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
- [10] 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
- [11] Du Chengxin(杜成鑫), Du Zhonghua(杜忠华), Zhu Zhengwang(朱正旺). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(4): 1080
- [12] Zhao Guozhi(赵国志). *Engineering Mechanics of Penetration*(穿甲工程力学)[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1992: 45
- [13] Zvi Rosenberg, Erez Dekel. Translated by Zhong Fangping(钟方平). *Terminal Ballistics*(终点弹道学)[M], Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 183
- [14] Tang Liqun(汤立群), Zhu Zhaoxiang(朱兆祥). *Explosion and Shock Waves*(爆炸与冲击)[J], 1998, 18(2): 97

Effect of Impact Velocity and Diameter of Tungsten Fiber on Penetration Ability of W_f/Zr-based Metallic Glass Composite Penetrator

Du Chengxin¹, Du Zhonghua¹, Zhu Zhengwang²

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

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

Abstract: W_f/Zr-based metallic glass composites containing four kinds of tungsten fiber with different diameters were prepared. Penetration experiments were taken to perforate homogeneous armor steel at velocity from 1000 m/s to 1600 m/s. The results demonstrate that both the diameters of the tungsten fiber and the impact velocity are critical parameters for penetration ability. Firstly, the crater diameter of W_f/Zr-based metallic glass composites is more than 10% smaller than that of tungsten, which illustrates that the W_f/Zr-based metallic glass composite keeps self-sharpening during the penetration process. Next, the failure mechanism of W_f/Zr-based metallic glass composite changes from adiabatic shear failure to the tungsten fiber buckling and back-flow due to the impact velocity increasing. The smaller the diameter of tungsten fiber is, the more stable the penetration process would be, because the stability of penetration is affected by the diameter of the tungsten fiber.

Key words: W_f/Zr-based metallic glass composite; diameter of tungsten fiber; self-sharpening; impact velocity; failure mechanism

Corresponding author: Du Zhonghua, Professor, School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, P. R. China, Tel: 0086-25-84304059, E-mail: duzhonghua@aliyun.com