

钨丝/锆基非晶复合材料长杆体弹芯 穿甲实验研究

杜忠华¹, 杜成鑫¹, 朱正旺², 夏龙祥¹

(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: 针对体积分数为 80% 的钨丝/ $Zr_{38}Ti_{17}Cu_{10.5}Co_{12}Be_{22.5}$ 非晶复合材料长杆体弹芯, 开展了在 1300~1700 m/s 撞击速度下侵彻 30CrMnMo 钢板的实验研究, 并与普通钨合金弹芯进行了对比。研究发现, 由这种材料制成的弹芯在高速侵彻时形成完全不同于钨合金和贫铀合金的侵彻特性, 主要表现在: (1) 在高速撞击条件下, 钨丝/锆基非晶复合材料弹芯先后发生非晶气化、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, 并且其侵彻能力高于普通 93 钨合金; (2) 这种复合材料在高速侵彻过程中, 由于非晶气化, 一方面会造成钨丝的动态屈曲与劈裂、弹芯刚度降低、侵彻分叉, 会使侵彻过程中靶板抗力不对称, 产生弹道弯曲等现象, 相对减弱自锐性效果; 另一方面, 非晶气化导致回流的钨丝在弹坑侧壁产生沟槽划痕, 气化形成的高压气体作用在弹坑划痕沟槽处易形成贯穿性裂纹, 利于二次杀伤。

关键词: 钨丝; 锆基非晶复合材料; 高速侵彻; 自锐

中图分类号: TB333; TJ413.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)05-1308-06

高速动能穿甲应用的主要材料是钨合金和贫铀合金两大类。普通钨合金材料具有比重大、综合强度高和侵彻性能好的特点, 在国内外大、中、小口径动能弹芯中得到广泛应用, 但主要缺点是钨合金弹芯侵彻过程中头部钝化为“蘑菇头”形状, 侵彻阻力增大, 侵彻能力增加有限^[1]。贫铀合金除具有高密度和强度特点外, 还具有高剪切敏感性, 易产生局部绝热剪切带, 发生绝热剪切断裂, 呈现出“自锐”行为。在同等条件下, 贫铀合金弹芯较钨合金弹芯侵彻深度有 10% 左右的提高。但贫铀合金具有放射线危害, 限制了其应用。杆式动能弹的威力提升一直是穿甲的发展方向。近些年来, 国内外学者开展了钨丝/锆基非晶复合材料研制工作, 通过在非晶中引入第二相钨丝, 既保证了复合材料具有高硬度、高强度和高密度, 同时又增加了整体塑性^[2-4]。因此钨丝/锆基非晶复合材料受到了广泛的关注。为了研究钨丝/锆基非晶复合材料在高应变率条件下的力学特性, 一些学者对钨丝/锆基非晶复合材料进行了高速侵彻实验^[1,5-7]。例如, Conner 通过对钨丝/锆基非晶复合材料侵彻 6061 T651 铝和 4130 钢的研究, 发现撞击速度低于 1000 m/s 时, 复合材料弹芯的侵彻深度较钨合金弹芯增加了 10%~

20%^[1]。目前对钨丝/锆基非晶复合材料在高应变率条件下的力学特性研究主要集中在撞击速度小于 1000 m/s 的情况, 对于更高撞击速度下复合材料的力学特性研究较少^[1,5-7]。本研究对钨丝/锆基非晶复合材料制备的弹芯, 在撞击速度为 1300~1700 m/s 下开展了高速侵彻 30CrMnMo 钢板实验, 研究复合材料在更高撞击速度下的力学特性, 并与相同实验条件下 93W 合金弹芯进行对比。为后续材料的设计与研发提供参考。

1 实验

实验用钨丝/锆基非晶复合材料中以 $Zr_{38}Ti_{17}Cu_{10.5}Co_{12}Be_{22.5}$ 作为非晶粘结相, 以体积分数为 80% 直径 0.3 mm 的钨丝作为增强相均匀地分布在非晶中。图 1 为复合材料的截面^[8], 材料密度为 17.3 g/cm³。

侵彻实验采用 25 mm 次口径穿甲弹结构。钨丝/锆基非晶复合材料和钨合金弹芯均被设计成直径 6 mm, 长 110 mm, 长径比为 18.3, 头部形状为截锥形, 锥角 15°。固定弹芯的弹托采用 3 块 120°扇形卡瓣组成。通过 25 mm 弹道炮发射, 垂直侵彻 30CrMnMo 钢半无限靶板。飞行过程中, 弹托受到空气阻力后, 与弹芯分离。为了保证侵彻时弹芯和弹托能够分离,

收稿日期: 2015-05-13

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: 杜忠华, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094, 电话: 025-84304059, E-mail: duzhonghua@aliyun.com

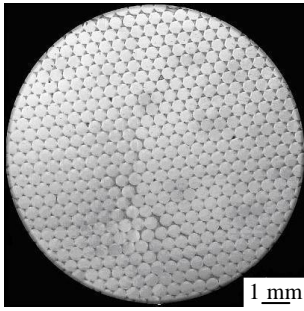


图 1 体积分数 80% 的钨丝/锆基非晶复合材料的横截面
Fig.1 Cross-section of 80% (volume fraction) W fiber/Zr based BMG composite

将靶板放置据炮口 12 m 远处。弹芯的撞击速度可由距离炮口 7 m 处的电子测时仪测出，精度可达到 1 μ s。通过 2 种不同材料弹芯的侵彻结果对比，研究钨丝/锆基非晶复合材料的侵彻特性。

为了验证钨丝/锆基非晶复合材料弹芯在侵彻过程中的破坏特性，一方面，利用该弹芯进行了对有限厚（100 mm 装甲钢）靶板穿透特性分析，弹芯的着靶速度为 1542 m/s；另一方面，为完整回收这种材料在高速撞击后的弹芯残体，使用带套的弹芯，采用底推式方案，弹丸着靶速度约为 1600 m/s。

2 结果与分析

2.1 钨丝/锆基非晶复合材料弹芯侵彻机理分析

2.1.1 侵彻阶段分析

长杆体弹芯对半无限均质靶板的侵彻分为 2 个阶段，即开坑阶段和稳定侵彻阶段，而对于有限厚靶板的侵彻又多了穿透阶段。为全面分析这种材料的侵彻机理，本研究将侵彻过程按照 3 个阶段，从 3 个方面的实验现象分析弹丸的侵彻特征：（1）该材料弹芯侵彻半无限靶板特性，并同钨合金的侵彻进行对比；（2）该弹芯材料对有限厚靶板的穿透特性；（3）回收该材料弹芯的残体实验。

（1）开坑阶段

弹芯在着靶瞬间，在弹靶撞击界面受碰撞的高压作用下实现开坑。在开坑过程中，一方面因弹丸头部为截锥形，使弹丸的入孔较小；另一方面，非晶相在高压下发生快速气化，降低了钨丝束间的结合强度，钨丝束在撞击力作用下发生变形、弯曲、横向运动和回流。随着侵彻进行，弯曲变形的钨丝聚集增加，使弹丸的穿孔横向加大，因此开坑阶段出现了“八”字型。如图 2、3 和 4 所示。开坑的长度约为弹径的 1.5 倍，

开坑结束时的最大弹坑直径约为弹坑直径的 2.5 倍。而

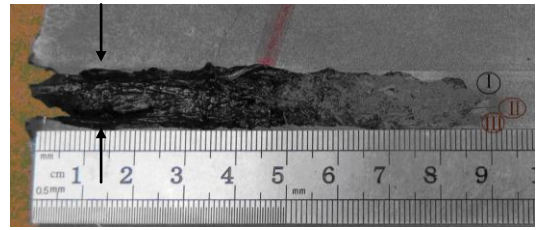


图 2 1#弹(复合材料)孔的线切割剖面照片
Fig.2 Picture of cross-section of 1# (composite, $v=1383.4$ m/s)



图 3 3#弹(复合材料)孔的线切割剖面照片
Fig.3 Picture of cross-section of 3# (composite, $v=1507.5$ m/s)



图 4 7#弹(复合材料)孔的线切割剖面照片
Fig.4 Picture of cross-section of 7# (composite, $v=1634.8$ m/s)

钨合金材料在开坑阶段不具有这种现象（图 5，6）。

（2）稳定侵彻阶段

在开坑结束后，进入稳定侵彻阶段。回流的汇聚钨丝运动可能发生多种情况，这与材料的工艺条件、性能参数、弹丸结构和弹丸的着靶速度等因素相关。针对当前的研究情况，在稳定侵彻过程中钨丝束的回流会发生 2 种情况：

一种是回流不畅通，随着侵彻过程的回流钨丝束汇集，达到一定程度时会在回流过程中发生部分堵塞，这就会使弹芯在后续侵彻过程中形成的气体压力骤然升高，利于回流钨丝束运动，周而复始，因此在弹坑上留下波纹状的沟槽划痕。从图 2、3、和 4 复合材料弹坑与图 5、6 的钨合金弹坑对比可以发现：一方面，沿着侵彻方向，复合材料弹孔的直径基本没有变化，

保持在 10 mm 左右,但表面过渡不平滑,出现波纹状;

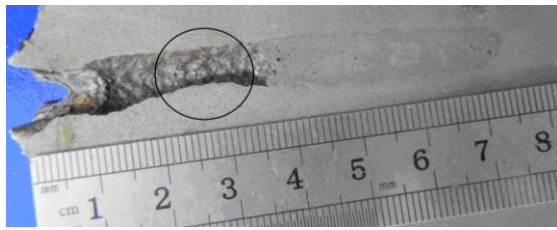


图 5 2#弹(93 钨合金)孔的线切割剖面照片

Fig.5 Picture of cross-section of 2# (93W, $v=1459.9$ m/s)



图 6 4#弹(93 钨合金)孔的线切割剖面照片

Fig.6 Picture of cross-section of 4# (93W, $v=1542.4$ m/s)

另一方面,弹孔表面沿着侵彻方向留下许多细小的沟槽,说明钨丝在侵彻过程中发生失稳、弯曲、断裂,在高速回流过程中聚集的钨丝在弹坑侧壁产生条形沟状划痕;此外,钨合金非晶气化形成的高压作用在靶板沟槽划痕上,容易使靶板形成径向贯穿裂纹,如图 7 所示。

另一种情况,回流通畅,弹坑相对平直,不会形成波纹和裂纹,如图 4 所示。此外,结合弹芯残体的回收实验,钨丝/锆基非晶复合材料弹芯残体头部呈小于 90° 的自锐,如图 8 所示,钨丝呈现弯曲变形,说明在弹芯高速侵彻过程中,弹芯侧壁的非晶更容易气化、钨丝束弯曲和断裂,使弹芯头部尖锐,可以减小侵彻弹道阻力,提高侵彻威力。

锆基非晶复合材料弹芯在高速撞击靶板的过程中

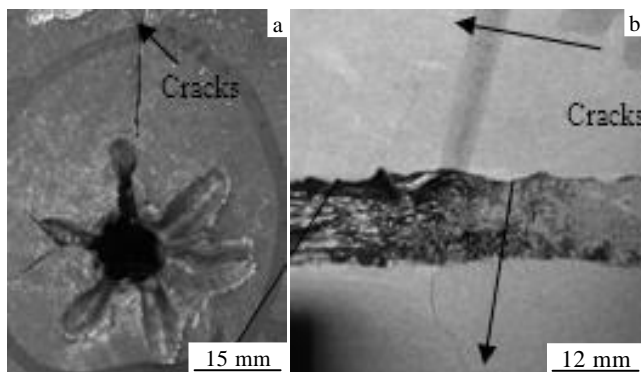


图 7 1#弹穿甲正面及线切割剖面照片

Fig.7 Pictures of front (a) and cross-section (b) of 1#

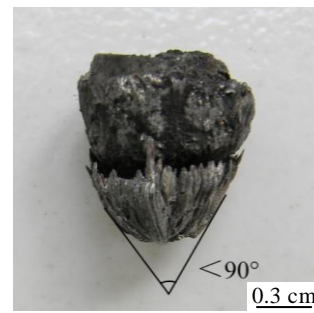


图 8 弹芯残体照片

Fig.8 Picture of penetrator residual

经历了非晶气化—侵彻—弹芯外侧钨丝动态屈曲的阶段。非晶气化的优点是弹芯在高速侵彻过程中产生自锐,使侵彻能力提升,缺点是容易造成靶板抗力不对称和弹杆的整体刚度下降,产生弹道弯曲。从图 3 可以看出,存在一定的弹道偏转。这一现象与 Conner 研究钨丝/锆基非晶复合材料侵彻 4130 钢的结果相同^[1]。

(3) 穿透阶段

由于在稳定侵彻阶段弹芯出现了非晶气化,弹芯侧壁钨丝出现了弯曲、断裂、劈裂和回流等现象,使弹芯材料在侵彻后期的直径减小,头部保持尖锐,对有限厚靶板,出现了其穿孔直径显著减小的情况,如图 9 所示,其穿透的出口直径大约为弹坑直径的 1/2。对于钨合金弹芯,出口直径大于弹芯直径,孔径约为弹丸直径的 1.5 倍,或略大。同时,背表面出现鼓包。因此,对有限厚靶板穿透的出口形状也说明了这种材料弹芯不同于贫铀合金的绝热剪切自锐性的特点。

2.1.2 弹丸和靶板界面特征分析

图 10 为图 6 中 4# (93W) 弹坑 I 区域的扫描电镜照片。从图中可以看出,4# (93W) 残留弹芯头部呈现整体的塑性变形,其与靶板分界线较为光滑,其他部位塑性变形并不明显。

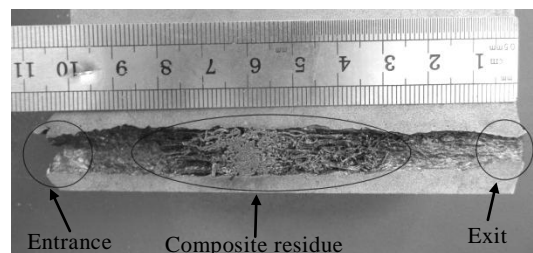


图 9 在 $v=1542$ m/s 时穿透 100 mm 钢板的弹孔线切割剖面照片

Fig.9 Picture of cross-section of penetrated 100 mm 30CrMnMo steel plate at velocity 1542 m/s

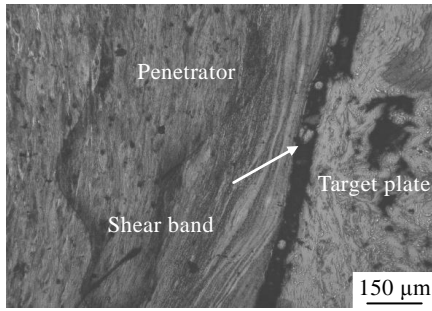


图 10 图 6 中 4# (93W)残留弹芯的 SEM 照片
Fig.10 SEM image of 4# (93W) residual in Fig.6

图 11 为图 2 中 1# (复合材料)弹坑II、III区域的扫描电镜照片。从图 11a 和 11b 可以看出，在残留弹芯头部的侧边缘，钨丝发生破碎和弯曲断裂。这个区域内，钨丝之间金属玻璃基体基本消耗殆尽，验证了宏观形貌中残留弹芯呈现疏松多孔的形貌特征，间接证实了高速侵彻过程中，金属玻璃基体由于温度过高，发生气化的侵彻机理。同时在钨丝破碎和弯曲断裂的区域，靶板变形流线分布更为密集，说明侵彻过程中这些区域所受应力应变较大，造成钨丝破碎和弯曲断裂，靶板变形较大。从破坏机制上说明了铅基非晶复合材料在高速侵彻中是呈现非晶的气化、钨丝的弯曲断裂与回流过程，不同于贫铀合金的绝热剪切自锐过程。

图 11b 对应于图 2 中 II 区域，可以看出，钨丝出现墩粗和断裂。在图中椭圆区域还可以观察到侵彻过程中部分钨丝发生了扭曲，这与之前一些学者研究钨丝复合材料的现象类似。靶板与残留弹芯接触处，几乎没有金属玻璃基体，呈现锯齿形。从图中虚线以上区域，可以看出侵彻过程中，由于在高温高压和摩擦等因素的作用下，钨丝及金属玻璃基体不断地从弹芯头部剥离，材料内部的热软化效应超过应变硬化和应变率硬化，导致材料塑性沿非常狭窄的区域局部失稳，形成绝热剪切带，其与侵彻方向的夹角约为 45°，使得复合材料头部不断锐化。同时可发现，绝热剪切带附近的靶板由于塑性变形较大，变形流线分布更为密集。

2.1.3 侵彻深度的分析

从图 2 到图 6 中可以看出 93 钨和铅基非晶复合材料的侵彻深度。但是 2 种材料的密度不同，因此弹芯质量也有差异。为了研究在相同动能下的侵彻中，材料对无限靶板的侵彻深度，把能量进行归一化处理，给出的曲线如图 12 所示。通过图 12 分析可看出，复

合材料的侵彻能力优于 93W，侵彻威力增益在 7%以上。说明这种非晶复合材料在高速侵彻过程中的特殊的自锐机理有利于减小弹丸在侵彻靶板中的抗力，利

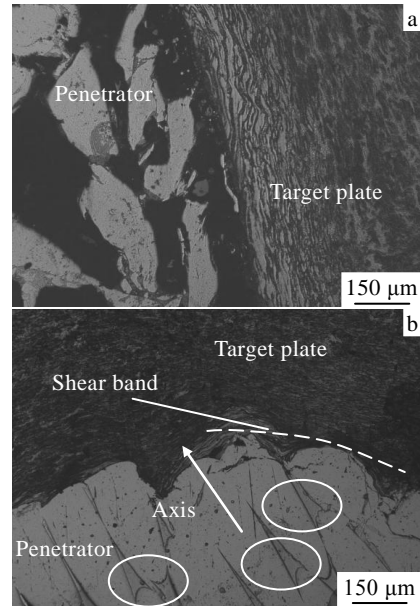


图 11 图 2 中 1# (复合材料)弹坑底部残留弹芯的 SEM 照片
Fig.11 SEM micrographs of 1# (composite) residual penetrator in Fig.2: (a) side of plate and (b) front of plate

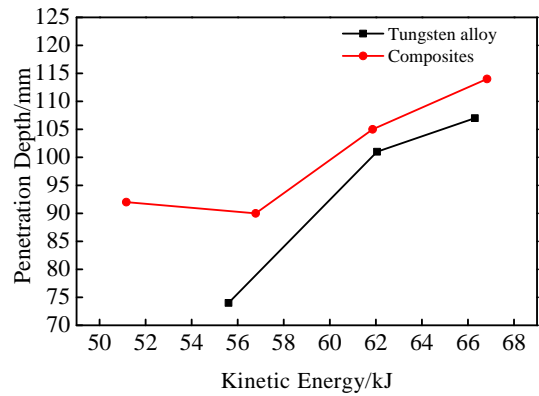


图 12 2 种材料侵彻深度和着靶动能的关系曲线
Fig.12 Relation curves of kinetic energy and penetration depth of both projectiles

于提高侵彻性能。侵彻深度的波动是由于弹芯侵彻过程中产生的气化、劈裂、弯曲等因素，致使侵彻过程中产生弹坑横截面的分叉、靶板抗力不对称、弹芯刚度下降等，造成弹道偏转。这些因素可以通过调整材料参数、工艺、结构等方法克服。

2.2 侵彻过程中钨丝材料的劈裂现象

通过观察弹坑的横剖面和纵剖面 (图 13) 可以发现，铅基非晶复合材料弹芯高速侵彻时弹坑的纵、横

剖面为不规则形状,在弹坑侧壁出现了多处分叉现象。而普通钨合金侵彻的弹坑横截面形状为圆形,说明钨基非晶复合材料弹芯在高速侵彻靶板过程中由于非晶

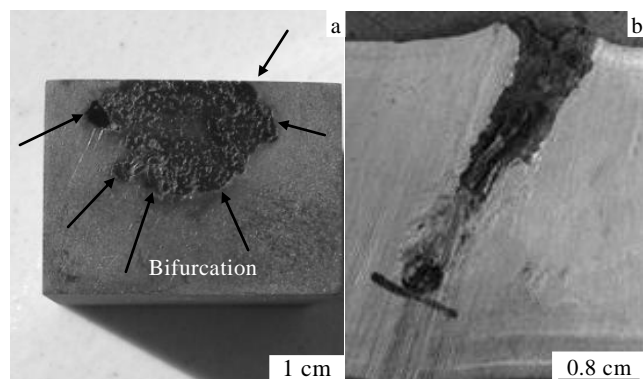


图 13 非晶复合材料弹芯侵彻钢靶的横截面和纵截面

Fig.13 Cross section (a) and longitudinal section (b) of the composite material penetrator penetrating steel target

的气化,造成了钨丝之间的粘接强度减弱,同时非晶与靶板高速撞击气化形成的高压气体作用于钨丝束的界面会造成钨丝劈裂,因此弹坑的横截面形状会出现分叉现象,造成能量的损耗,严重时会造成侵彻失稳。

2.3 非晶气化现象分析

由图 5、6 可以看出,钨合金材料的侵彻弹坑呈现金属光泽的细小波纹状表面,从图 2、3、4 可看出,复合材料侵彻的弹坑表面呈“烟熏火燎”状态。这是非晶钨合金在高速撞击条件下发生快速燃烧和气化造成的。另外从残余弹芯状况可以看出,钨合金材料除了变形之外,没有发生其它化学变化,而钨基非晶复合材料弹芯残体整体变成团聚、发黑的钨丝,非晶基本完全燃烧。表 1 为 $Zr_{38}Ti_{17}Cu_{10.5}Co_{12}Be_{22.5}$ 非晶和钨的一些物理特性。从表 1 的数据及图 2、3、4 中复合材料形成的弹坑及残留弹芯的宏观形貌,可以推断出,由于复合材料在高速侵彻靶板的过程中,弹芯与靶板高速摩擦,巨大的动能转化为内能,使得弹芯和靶板的温度急剧升高,而 $Zr_{38}Ti_{17}Cu_{10.5}Co_{12}Be_{22.5}$ 非晶合金其导热系数远小于钨丝的导热系数,使得钨基非晶合金的热量不能及时向周围传播,造成其温度进一步升高。另一方面,钨基非晶合金的各个组分的气化温度较低,急剧升高的温度很容易达到其气化温度,而钨丝的气化温度远高于此。正是由于这两方面原因,复合材料在侵彻靶板的过程中,由于温度过高,使得钨基非晶合金气化,残留弹芯基本只剩下弯曲断裂的钨丝,整体呈现疏松多孔的形貌特征。此外,由于钨基金属玻璃气化产生的气体进入侵彻过程中靶板产生的

微裂纹,巨大的气体压力使得裂纹快速扩展,类似于爆生气体使岩石产生劈裂的作用机制^[9,10],造成靶板形成劈裂,产生径向裂纹,如图 7 所示。

表 1 钨和 $Zr_{38}Ti_{17}Cu_{10.5}Co_{12}Be_{22.5}$ 非晶的热力学性质

Table 1 Thermo-physical properties of $Zr_{38}Ti_{17}Cu_{10.5}Co_{12}Be_{22.5}$ BMG and W

Parameter	Value
Melt temperature of amorphous/K	948
Melt temperature of W/K	3573
Heat conductivity of amorphous/W (m K) ⁻¹	8.15 (473 K)
Heat conductivity of W/W (m K) ⁻¹	79 (478 K)

3 结 论

1) 钨丝/钨基非晶复合材料长杆体弹芯,在 1300~1700 m/s 的着靶速度下,弹芯先后发生非晶气化、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,其侵彻能力优于 93W 合金。

2) 钨丝/钨基非晶复合材料长杆体弹芯在高速侵彻时,由于非晶气化,会明显降低钨丝束之间的结合强度,使钨丝束发生动态屈曲与弯曲,也易使钨丝束发生劈裂现象,降低了弹芯的刚度,造成靶板抗力不对称,产生弯曲力矩,导致弹芯在侵彻弹道上发生分叉和弹道偏转,削弱了其侵彻能力。

3) 弯曲的钨丝束在侵彻过程中易发生分段汇聚,会使弹坑表面出现波纹状沟槽。非晶气化形成的高压气体使得裂纹快速扩展,使靶板形成穿透性裂纹,利于二次杀伤。

参考文献 References

[1] Conner R D, Dandliker R B, Scruggs V *et al.* *International Journal of Impact Engineering*[J], 2000, 24: 435

[2] 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

[3] Deng S T, Diao H, Chen Y L *et al.* *Scripta Materialia*[J], 2011, 64: 85

[4] Wu Xiaofeng(武晓峰), Zhang Haifeng(张海峰), Hu Zhuangqi(胡壮麒). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2005, 34(6): 863

[5] Choi-Yim H, Conner R D, Szuvecs F *et al.* *Scr Mater*[J], 2011, 45: 1039

[6] Lei Bo(雷波), Huang Dewu(黄德武), Yang Mingchuan(杨明川) *et al.* *Transactions of Shenyang Ligong University(沈阳理工大学学报)*[J], 2008, 27(1): 72

[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] Zhang H F, Li H, Wang A M *et al. Intermetallics*[J], 2009, 17: 1070
- [9] Yang Xiaolin(杨小林), Wang Mengshu(王梦恕). *Explosion and Shock Waves*(爆炸与冲击)[J], 2001, 21(2): 111
- [10] Chen Lijing(陈莉静), Li Ning(李 宁), Wang Junqi(王俊奇). *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*(岩石力学与工程学报)[J], 2006, 25(11): 2369

An Experimental Study on Perforation Behavior of Pole Penetrator Prepared from W_F/Zr -Based Bulk Metallic Glass Matrix Composite

Du Zhonghua¹, Du Chengxin¹, Zhu Zhengwang², Xia Longxiang¹

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

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

Abstract: An experimental study was conducted for $W/Zr_{38}Ti_{17}Cu_{10.5}Co_{12}Be_{22.5}$ composite pole penetrators perforating 30CrMnMo steel plates at velocities between 1300 m/s and 1700 m/s, and the penetrators were compared with the tungsten alloy pole penetrators. It is found that the penetration characteristics of the composites are different from those of the tungsten alloy and the depleted uranium alloy. Firstly, under the high velocity penetration, the composites have the phenomena of the amorphous alloy gasification, the tungsten fiber outside of the penetrator buckling and fracture, and the backflow of part of tungsten fiber during the penetration process, so the penetrator keeps self-sharpening, and the penetration is deeper than that of the tungsten alloy. Secondly, because of the amorphous gasification, the tungsten fiber outside dynamic buckling and splitting occur, the stiffness of the penetrator declines, and the penetration bifurcates, so the resistance of the plate is asymmetric, and the ballistic bending appears, which reduce the depth of the penetration. Meanwhile, the backflow of tungsten fiber gashes the sidewall of ballistic, and then the high pressure gas from the amorphous gasification impacts the scratch, which will produce the perfoliate cracks, so it is beneficial to the second damage.

Key words: tungsten fiber; Zr-based amorphous composites; high velocity penetration; self-sharpening

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