

分段结构的钨丝/锆基非晶复合材料弹芯穿甲实验研究

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: 为了研究不同结构和材料弹芯的侵彻能力, 采用 80%体积分数的钨丝/锆基非晶复合材料 (钨丝直径 0.3 mm) 弹芯, 在 1450~2100 m/s 速度范围内, 对不同结构方案的弹芯垂直侵彻均质靶板进行了实验研究。结果表明: (1) 材料的性能和结构都可以影响弹丸的侵彻效率, 突破了传统认识, 为复合材料杆式穿甲弹设计提供了重要依据; (2) 弹芯结构不同, 其侵彻深度-着靶速度变化曲线也不同, 对于两段和三段结构弹芯其侵彻曲线变化是凸的, 其侵彻深度峰值分别出现在着靶速度 1750~1800 m/s 和 1850 m/s 附近, 最大侵彻穿深均为 $x=1.7L$; 对于未分段弹芯, 其侵彻深度-速度变化曲线呈渐近线变化, 在速度大于 1850 m/s 时接近于流体动力学极限穿甲深度 $L(\rho_p/\rho_i)^{1/2}$, 约为 1.5L; (3) 结合单向纤维复合材料的动态破坏特点、动态裂纹传播和弹芯高速撞击的侵蚀速度特性, 给出了最优分段概念, 分析了 (2) 中发现的问题的原因, 为分段弹芯结构设计提供了参考。

关键词: 分段; 钨丝/锆基非晶复合材料; 高速侵彻; 侵彻效率

中图分类号: TB333; TJ413⁺.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)09-2359-07

新型钨丝/锆基非晶复合材料通过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^[1]。但钨丝/锆基非晶复合材料属于单向纤维增强复合材料, 在高速撞击条件下, 承受高温、高压复杂载荷作用, 在纤维方向受压时容易发生纤维屈曲、基体屈曲、基体微裂和部分脱胶等现象, 所以这种复合材料弹芯高速侵彻时发生动态劈裂、弯曲断裂、气化烧蚀、绝热剪切等破坏形式^[2-5]。通过前期的研究发现, 钨丝/锆基非晶复合材料弹芯的侵彻特性与弹芯的着靶速度^[4]、钨丝的直径^[6]、复合材料界面的强度^[7]、长径比、纤维体积分数、尺寸、靶板条件、着靶角度、结构效应等多种因素相关联, 在不同的条件下具有不同的破坏形式。比如, 高速侵彻会像贫铀合金一样出现“自锐”现象, 也会出现动态气化、破碎、弯曲和断裂破坏现象, 还会出现动态劈裂、分叉和侵彻弹道弯曲等多种现象。在弹芯结构方面, 带护套弹芯的侵彻特性研究的论文主要结合钨合金弹芯开展^[8-13], 体现在侵彻开坑特性、理论模型、数值模拟和实验研究等方面。研究表明, 这种弹芯结构与同等条件钨合金相比具有一定的穿甲优

势。在分段弹芯研究方面, 1981 年 Kucher^[14]提出了分段杆式侵彻体的概念, 文献[15]对早期有关分段杆的研究进行了比较详尽的综述。研究中发现: 杆体侵彻效率随着杆体的长径比的增大而减小; 另一方面, 在撞击速度和长径比达到一定值时, 长杆式侵彻体的侵彻深度将会会有一个极限值。这种结构没有得到具体应用的主要原因是: (1) 受弹丸装填空间的限制, 不可能把弹丸的长度设计太长; (2) 在现有火炮速度范围内, 其侵彻深度增益不明显, 甚至没有增益。钨丝/锆基非晶复合材料在高速撞击下形成了不同于钨合金的侵彻特点, 如果将材料组分结构、性能、高速侵彻的破坏机理研究有机结合, 扬长避短, 有可能实现威力增益。为此, 本实验在前期研究的基础上^[6,16], 对于钨丝/锆基非晶复合材料弹芯, 在 1500~2100 m/s 速度范围内, 开展了分段结构弹芯侵彻特性研究。

1 实验

钨丝/锆基非晶复合材料使用 $Zr_{38}Ti_{17}Cu_{10.5}Co_{12}Be_{22.5}$ 作为非晶粘结相, 用体积分数 80%、直径 0.3 mm 的钨丝作为增强相均匀分布在非晶合金中。材料密度

收稿日期: 2015-09-25

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

为 17.3 g/cm^3 。实验的弹丸采用底推式结构，弹丸为次口径穿甲弹，固定弹芯的弹托由 3 块 120° 扇形卡瓣组成。弹芯的具体结构有 7 种，其中套筒直径为 9 mm，套筒材料为 45#钢，具体方案见表 1。为了对比侵彻特性和研究钨丝/锆基非晶复合材料动态劈裂特性，也对同长度钨合金方案（方案 6）、钨丝/锆基非晶复合材料弹芯（方案 7）进行了实验，侵彻杆体的长度为 30 mm，直径为 8 mm，长径比 $\lambda=3.75$ 。靶板材料为 603 装甲钢，垂直侵彻，使用 25 mm 滑膛弹道炮发射。

2 结果及分析

2.1 分段结构弹芯的侵彻特性分析

方案 1~方案 6 侵彻深度随弹丸着靶速度的变化曲线见图 1。如图 1 所示，当着靶速度在 1750 m/s 以下时，结构弹芯的侵彻深度变化趋势是方案 4、方案 5 好于方案 2、方案 3 和方案 1。说明随着分段数的增加，其侵彻能力得到了提升，尤其在低速 1500 m/s 条件下，分段结构弹芯侵彻深度好于未分段结构弹芯，其威力

表 1 不同弹芯结构方案

Table 1 Pictures of different kinds of penetrators

Type No.	Description	Mass of penetrator/g	Structure of the penetrator
1	One segment screwed into steel carrier tube	29	
2	Two segments screwed into steel carrier tube with no space	28.2	
3	Two segments screwed into steel carrier tube filled with nylon	28.7	
4	Three segments screwed into steel carrier tube with no space	27.8	
5	Three segments screwed into steel carrier tube filled with nylon	29	
6	Monolithic penetrator of tungsten alloy	26	
7	Monolithic penetrator of BMG	24	

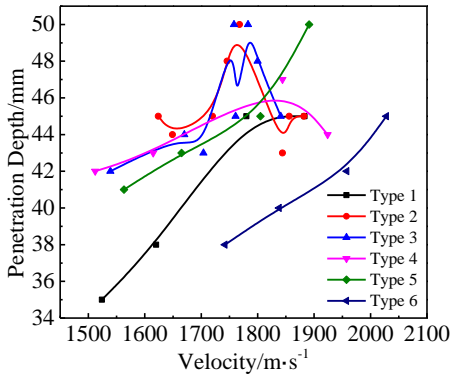


图 1 方案 1~方案 6 侵彻-速度曲线

Fig.1 Penetration depth-velocity of type 1 to type 6

增益在 10% 以上，它随着速度增加而减小，但整体的侵彻能力远高于钨合金。说明这种弹芯结构可以充分发挥其材料和结构效应，共同实现威力增益。在低速条件下，分段钨丝/铅基非晶复合材料结构弹芯更容易发挥其强度、绝热剪切自锐和结构特性。另外，从方案 4 和方案 5 的侵彻深度随速度的变化趋势可以看出，在着靶速度低于 1750 m/s 的条件下，方案 4 未加装尼龙间隔材料的侵彻能力好于方案 5 加装尼龙间隔材料，说明加装分段间隔材料影响了后续非晶复合材料弹杆的侵彻行为，导致侵彻深度下降。但是，随着速度的提高，2 种方案的侵彻能力接近，说明间隔材料对侵彻行为的影响逐渐减小。图 1 中当速度在 1900 m/s 附近时，方案 5 的侵彻能力好于方案 4。从图 2 的照片显示，在 $v=1924$ m/s 时，方案 4 弹坑并不平直，弹道弯曲。主要由于弹芯着靶攻角而导致穿深大幅下降。所以，综合所述，当侵彻速度小于 1750 m/s 时，段与段之间添加尼龙材料会使弹芯侵彻能力下降；当速度增大时，段与段之间添加的尼龙材料，对其侵彻深度影响减小。说明弹芯材料和分段结构是影响侵彻深度的主要因素。

由图 1 可以看出，对于分段结构钨丝/铅基非晶复合材料弹芯，不同的分段方案其侵彻规律相差较大。



图 2 方案 4 弹丸侵彻弹坑剖面图

Fig.2 Cross-section of crater penetrated by type 4

由于分段，侵彻深度随速度的变化曲线具有凸性，存在峰值，最大值约为 $1.7L$ (L 为弹芯长度)。对于不同的分段方案，其峰值出现的速度值不同，方案 2 和方案 3 是两段的方案，其峰值出现在 1760 m/s 附近，而三段方案峰值出现 1890 m/s。出现最大值的幅值相同。最终随着速度增加，趋于固定值，其固定值 $x=L(\rho_p/\rho_t)^{1/2}$ 。对于方案 1 未分段复合材料弹芯，不存在峰值，曲线随着速度提高呈渐近线变化，最终趋于最大值 $x=L(\rho_p/\rho_t)^{1/2}$ ，约为 $1.5L$ 。

从侵彻效率方面考虑，用弹坑长径比 P/D 来衡量孔洞的狭长程度 (P 、 D 分别为侵彻深度和弹坑平均直径)，它可以反映弹芯材料在穿甲过程中的利用效率。从这一角度来看，并非穿甲弹的着靶速度越高越好，而是随着着靶速度提高而相对穿深 P/D 存在一个最大值，即能量利用率存在一个最佳的范围。从文献[17]知，对于杆式动能弹高速侵彻，侵彻效率最高所需的弹丸着速主要由材料的密度决定，对长径比变化不敏感。对于钨合金材料，对应最大侵彻效率的弹丸着靶速度在 2000~2400 m/s。而本研究有一个重要发现，对于钨丝/非晶铅基复合材料，如图 1 所示，未分段（方案 1）和两段（方案 2 和方案 3）最大侵彻效率的着靶速度出现在 1750 m/s 左右，而三段方案最大侵彻效率对应的着靶速度大约为 1850 m/s，钨丝/铅基非晶复合材料 3 种结构弹芯的最大侵彻效率对应的着靶速度均小于钨合金；另外，对于材料相同、结构不同的弹芯，其最大侵彻效率对应的着靶速度差异也较大，这说明材料的性能和弹芯结构均可以影响最佳侵彻效率所需的速度值。因此，对于给定的火炮速度范围，基于该种复合材料，可以设计高效率的结构弹芯，使弹芯着靶速度能够达到最佳侵彻效率。

针对未加护套的钨丝/铅基非晶复合材料的小长径比弹芯（方案 7）与钨合金（方案 6）结构完全相同，其侵彻深度随弹芯着靶速度的变化曲线如图 3 所示。由图 3 的侵彻深度对比发现，在相同的着靶速度范围内，钨合金的侵彻深度随弹芯着靶速度成线性变化，而钨丝/铅基非晶复合材料的侵彻深度随速度变化是波动的，而且深度远小于钨合金。而文献[18]表明，大长径比钨丝/铅基非晶复合材料弹芯，在 1300~1700 m/s 的着靶速度下，其侵彻深度大于相同条件下的钨合金。分析其原因为：钨丝/铅基非晶复合材料属于单向纤维增强复合材料，在纤维方向受压时容易发生如图 4 所示的破坏形式。在高速撞击条件下，单向纤维的破坏形式很容易从图 4 的破坏形式演化成动态劈裂，这种动态劈裂破坏形式对长径比和结构较敏感，尤其对小长径比、单向纤维钨丝/铅基非晶复合材料就

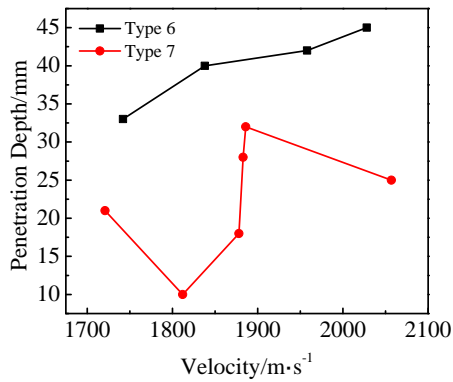


图 3 方案 6 和方案 7 侵彻-速度曲线

Fig.3 Penetration depth-velocity of type 6 and type 7

更容易发生动态劈裂，进而出现侵彻深度大幅下降和波动。

2.2 复合材料分段结构弹芯侵彻机理分析

2.2.1 复合材料未分段结构弹芯侵彻机理分析

文献[18]表明，大长径比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，形成了不同于铀合金的绝热剪切自锐机理。对于小长径比复合材料弹芯，容易发生动态劈裂而影响其侵彻性能，因此，采取在单向纤维复合材料外加装钢护套结构的技术方案，可以较好地抑制钨丝的动态压缩条件下出现如图 4 所示的破坏形式，保持侵彻弹道稳定。方案 1 的小长径比结构弹芯就是外加护套的方案，通过穿甲实验发现，侵彻深度出现较大增加，而且其侵彻深度高于相同质量和长度的钨合金，侵彻深度随速度变化曲线呈渐近线变化，如图 1 所示，同时，出现最大侵彻深度的着靶速度在 1750 m/s 左右，低于钨合金的 2000 m/s，而且在相同的速度条件下其侵彻能力高于 93W 合金 10% 以上，说明护套结构较好地抑制了材料的动态劈裂和发挥了材料特性。另外，通过回收弹芯残体

(如图 5 所示)发现，钨丝/铅基非晶复合材料弹芯残体头部呈小于 90° 的自锐，钨丝呈现弯曲变形，说明在弹芯高速侵彻的过程中，弹芯护套侵蚀速度大于非晶材料，使弹芯头部尖锐，可以减小侵彻弹道阻力，提高侵彻威力，该项实验结果也被文献[16]的仿真结果所验证。

2.2.2 复合材料分段结构弹芯侵彻机理分析

单向纤维材料加护套的结构弹芯(方案 1)，在稳定侵彻过程中形成图 5 所示较尖锐的头部形状，保持自锐侵彻特性，同时伴随着动态裂纹的传播。如果动态裂纹传播速度较快，传播到后续未侵彻弹芯，会造成后续侵彻体的刚、强度降低，影响后续侵彻体的侵彻能力和弹道稳定性，偶尔会出现弹道偏转，如图 6 中的 $v=1620$ m/s 和 $v=1780$ m/s 的两个侵彻弹坑末段出现一定偏转。为了克服侵彻过程中的动态裂纹传播的不利和利用动态裂纹传播实现扬长避短和威力增益，采用了分段方案。采用分段方案的好处：一方面可利用分段的优势抑制动态裂纹的快速传播，起到止裂作用，充分发挥后段材料在侵彻过程中材料性能的优势；另一方面，利用动态裂纹传播速度大于弹芯侵蚀速度，

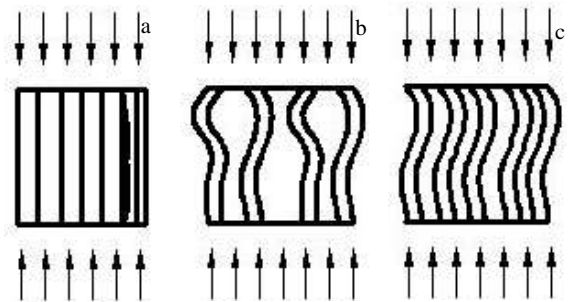


图 4 单向纤维复合材料在压缩条件下破坏示意图

Fig.4 Schematic diagram of unidirectional fiber reinforced composite materials under compression: (a) transverse tensile failure, (b) fiber buckling failure, and (c) shear failure

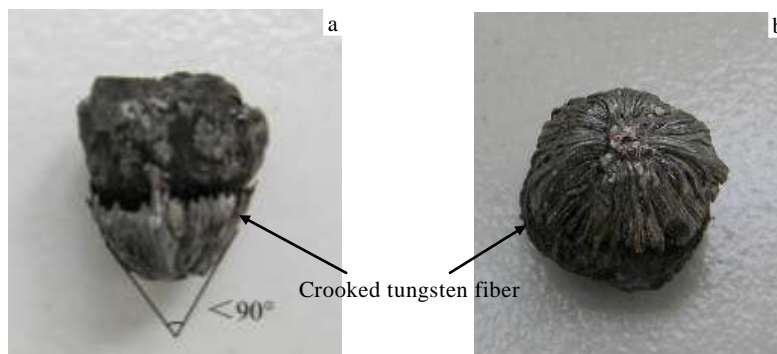


图 5 弹芯残体照片

Fig.5 Pictures of penetrator residual: (a) front and (b) side



图 6 方案 1 弹丸侵彻弹坑剖面图

Fig.6 Cross-section of crater penetrated by type 1: (a) $v=1620$ m/s, $P=38$ mm and (b) $v=1780$ m/s, $P=45$ mm

使前一段弹芯材料在侵彻后期快速分离, 减少对后段侵彻的影响, 使弹芯在侵彻过程中始终保持较好的自锐。从图 1 的威力对比曲线可以发现, 分段方案侵彻威力明显好于未分段方案, 也发现了分段结构导致侵彻深度曲线呈现凸性, 弹芯最优侵彻效率所对应的着靶速度明显小于钨合金, 而且分段长度影响着彻深度最大值所对应的弹丸着靶速度值。

单向纤维复合材料在高速撞击条件下, 材料的破坏主要受动态裂纹的传播速度和距离、套筒材料的侵蚀速度及复合材料弹芯材料的侵蚀速度、破坏机理和弹芯着靶速度等多方面因素影响。上述的实验已经证明, 单向纤维复合材料在高速撞击条件下因动态裂纹的快速传播而发生动态劈裂, 且动态裂纹的传播速度随着着靶速度的提高而增加, 在一定幅值范围内呈波动上升趋势, 这也与文献[6]相符合。动态裂纹的传播距离和速度与加载大小、材料特性等息息相关。一般动态裂纹的传播发生在撞击初始阶段, 其传播速度为^[19]:

$$V = BC_s \left(1 - \frac{a_0}{a}\right) \quad (1)$$

式中, B 为常数, 经实验测定, 在金属中常数 B 为 0.2~0.37; a_0 为裂纹初始尺寸, a 为裂纹传播后扩展尺寸; C_s 为金属材料的声速, 对于钨丝材料, 其 C_s 大约为 4200 m/s, 钨合金的 C_s 约为 3800 m/s。因此动态裂纹传播速度在 800~1550 m/s 之间。一般在稳定侵彻的条件下, 弹芯的侵蚀速度为:

$$\frac{dl}{dt} = -(v - u) \quad (2)$$

式中, l 为弹芯长度, v 为弹芯着靶速度, u 为侵彻速度。弹芯的侵蚀速度绝对值呈从最大值 $\rightarrow 0$ 的递减变化^[17]。尽管动态裂纹的传播速度随着载荷增加而增加, 但是增加的幅度和传播距离是有限度的, 按照式 (1) 给出的动态裂纹传播速度变化范围, 假定在一定的撞击速度范围内动态裂纹按照固定的速度范围和幅值线性变化, 结合弹芯的动态侵蚀变化, 将动态裂纹不同的传播速度和不同撞击速度下弹芯侵蚀速度随时间的变化放到同一个坐标系中, 给出的变化趋势如图 7 所示。通过速度对时间的积分分别可以得到裂纹传播距离和弹芯的侵蚀长度, 下面分不同情况加以讨论:

$V < dl/dt$ 时, 则裂纹的传播不会影响弹芯的侵彻。但是当单向纤维材料存在多个裂纹缺陷, 在撞击瞬间形成的冲击波会加速多个裂纹传播, 多个裂纹会发生快速闭合, 则会影响弹芯的侵彻。

$V = dl/dt$ 时, 如图 7 所示 2 条曲线相交, 裂纹传播速度与弹芯的侵蚀速度相同, 但是裂纹的传播距离仍然小于弹芯的侵蚀长度。只有当 $V > dl/dt$ 时, 必须再经历一段时间, 达到弹芯的侵蚀长度与裂纹的传播距离相同, 这时弹芯侵彻时间定义为 t_d , 相应侵蚀掉的弹芯长度定义为 l_d , 具体的值可以用速度 V 在 t_d 时间内积分求解。可以把 l_d 称作最佳分段长度, 即动态裂纹的传播距离正好不影响前段弹芯侵彻的长度, 同时利于后段弹芯侵彻。方案 2 和方案 3 出现的最大侵彻深度值就是最好的验证。对于同样弹芯, 也可根据分段的长度确定出现侵彻深度最大值。对于同等长度弹芯, 当分段数目增多时, 意味着 l_d 减小, 同样 t_d 时间也会变短, 只有增加弹芯的着靶速度和侵蚀速度, 才能够使侵彻深度达到最大值, 因此分成 3 段的方案 4 和方案 5 的最大值要大于 2 段, 如图 1 所示。反之, 分段数减少时, 意味着 l_d 增大, 同样 t_d 时间也会变长, 弹芯较低的着靶速度就可以实现最大侵彻深度, 2 段方案最大侵彻深度对应弹芯的着靶速度值的减小就是很好的验证。

换一个角度分析, 如图 7 所示, 对于一定分段长度为 l_d 的分段弹芯, 其侵彻深度最大值相对应的着靶速度为 v_d , 当着靶速度 $v_2 < v_d$ 时, 在 t_d 时间内, 裂纹已经传播了长度 l_d , 但是弹芯侵蚀长度小于 l_d , 因此影响了前一段分段弹芯的后续侵彻, 依次类推, 对后续分段弹芯的侵彻影响逐渐加大; 当着靶速度 $v_1 > v_d$ 时, 在小于 t_d 时间内弹芯已经侵蚀了 l_d , 裂纹传播距离小于 l_d , 裂纹不影响弹芯的侵彻行为, 类似整体弹

芯侵彻，因此，在方案 2~方案 5 中，如图 1 所示，当着靶速度大于最大侵彻深度对应的速度值以后，侵彻深度趋于稳定值 $L (\rho_p/\rho_t)^{1/2}$ 。

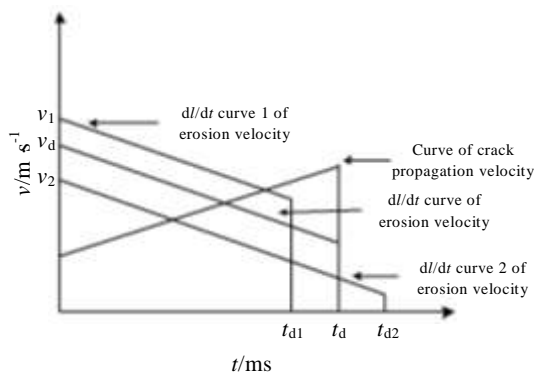


图 7 2 种传播速度示意图

Fig.7 Schematic diagram of two propagation velocities

3 结 论

1) 对于钨丝/铅基非晶复合材料，通过采取分段结构设计，其垂直穿深随着着靶速度的变化曲线是凸的，使侵彻效率最大值所对应的着靶速度减小，而且侵彻深度远高于同等条件下的钨合金材料。这种材料的最佳侵彻效率对应的着靶速度在 1750 m/s 左右，远低于钨合金材料。

2) 针对钨丝/铅基非晶复合材料，在一定速度范围内，综合考虑材料性能、弹芯结构、发射强度等多方面因素，结合实验与机理分析，可以获得最佳侵彻深度的分段弹芯结构。

3) 通过在钨丝/铅基非晶复合材料外增加护套，使得弹芯在侵彻过程中能够充分发挥自锐特性，增加侵彻深度；同时限制了复合材料的劈裂，消除了因为劈裂而使侵彻深度下降的影响。

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] Deng S T, Diao H, Chen Y L *et al.* *Scripta Materialia*[J], 2011, 64: 85
 [3] 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
 [4] Rong Guang(荣光), Huang Dewu(黄德武). *Explosion and*

Shock Waves(爆炸与冲击)[J]. 2009, 29(4): 351
 [5] Zhang H F, Li H, Wang A M *et al.* *Intermetallics*[J], 2009, 17: 1070
 [6] 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
 [7] Zhao J X, Wu F F, Qu R T *et al.* *Acta Materialia*[J], 2010, 58: 5420
 [8] Wen H M, He Y, Lan B. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2011, 38: 1001
 [9] Lan B, Wen H M. *Sci China Ser E*[J], 2010, 53(5): 1364
 [10] Cullis I G, Lynch N J. *14th International Symposium on Ballistics*[C]. Quebec: National Defence Research Establishment, 1993: 271
 [11] Lehr H F, Wollman E, Koerber G. *International Journal of Impact Engineering*[J], 1995, 17: 517
 [12] Sorensen B R, Kimsey K D, Zukas J A. *International Journal of Impact Engineering*[J], 1999, 22: 71
 [13] Pedersen B A, Bless S J, Cazamias J U. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2001, 26: 603
 [14] Kucher V. *Multiple Impacts on Monolithic Steel ARBRL-TR-02406*[R]. Maryland: US Army Armament Research and Development Command Ballistic Research Laboratory, 1981
 [15] William S. Rosset D. *An Overview of Novel Penetrator Technology ARL-TR-2395*[R]. Maryland: Army Research Laboratory, 2001
 [16] 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
 [17] Zhao Guozhi(赵国志), Wang Xiaoming(王晓鸣), Pan Zhengwei(潘正伟) *et al.* *Design Theory of rod Penetrator*(杆式穿甲弹设计理论)[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2006: 45
 [18] 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
 [19] Zhang Mingrong(张命荣). *Journal of Chengdu University*(成都大学学报)[J], 1983(1): 22

An Experimental Study on Perforation Behavior of Segmented 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: In the velocity range from 1450 m/s to 2100 m/s, the penetrators prepared by Zr-based metallic glass composites with tungsten fiber of 80% volume fraction and 0.3 mm diameter were used to perforate 30CrMnMo steel plates. Results are as follows. (i) The penetration efficiency is influenced by properties and structure of the material, which is helpful to design the rod penetrator of composite material. (ii) For the different structures of the penetrator, curves of penetration depth with velocity are different. The curves of the penetrator with two segments and three segments structures are convex, and at 1750~1800 m/s and 1850 m/s they arrive to the maximums which are both $1.7L$. For the monolithic penetrator, however, the curve is asymptote, and above 1850 m/s the penetration depth approaches to the hydrodynamic limit which is $L(\rho_p/\rho_t)^{1/2}$, about $1.5L$. (iii) According to the dynamic damage characteristics of the unidirectional fiber reinforced composite materials, the characteristics of dynamic crack propagation and erosion velocity of impact, the optimal segmentation is defined, and the problem in (ii) is solved, providing a reference for structure design of segment penetrators.

Key words: segment; W_f/Zr-based metallic glass composites; high velocity penetration; penetration efficiency

Corresponding author: Du Zhonghua, Ph. D., 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