

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0189

# 活性无序合金冲击的释能特性及 在毁伤元中应用研究进展\*

侯先苇<sup>1</sup>, 张先锋<sup>1</sup>, 熊 玮<sup>1</sup>, 谈梦婷<sup>1</sup>, 刘 闯<sup>1</sup>, 戴兰宏<sup>2,3</sup>

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094;  
2. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190;  
3. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 101408)

**摘要:** 无序合金是一种新型金属材料, 突破了传统的合金设计理念, 表现出不同于传统合金的优异力学性能、冲击释能及剪切自锐特性, 在高温、高压、高应变率等环境具有良好的应用前景。分析活性无序合金的冲击释能特性对其应用于军事领域有着重要的指导作用, 能为弹药战斗部的设计提供参考。本文阐述了静动态力学实验中典型无序合金的反应释能现象; 总结了撞击速度与活性无序合金释能超压、释能效率之间的关系; 讨论了撞击速度、材料破碎程度及靶标特征等因素对活性无序合金释能机理的影响; 归纳了制备工艺及元素类型对活性无序合金释能特性的调控效果。进一步, 本文梳理了活性无序合金在破片、穿甲弹芯和聚能装药战斗部三个方向的应用研究进展, 分析了活性无序合金毁伤元的侵彻行为和作用机制。最后, 针对活性无序合金材料未来的发展趋势和需求进行了展望。

**关键词:** 无序合金; 活性金属; 冲击释能特性; 高效毁伤

中图分类号: O385 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

## Research progress on impact energy release characteristics of reactive disordered alloy and its application in kill elements

HOU Xianwei<sup>1</sup>, ZHANG Xianfeng<sup>1</sup>, XIONG Wei<sup>1</sup>, TAN Mengting<sup>1</sup>, LIU Chuang<sup>1</sup>, DAI Lanhong<sup>2,3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;  
2. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
3. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

**Abstract:** Disordered alloy is a new kind of reactive material, which breaks through the design concept of traditional alloy and exhibits excellent mechanical properties, impact energy release characteristics and adiabatic shear sensitivity, showing good application prospects in high temperature, high pressure, high strain rates and other application environments. Analyzing the impact energy release characteristics of reactive disordered alloy has an important guiding role for its development in the military field and can provide the basis for the design and application of warheads for ammunition. In this paper, the impact energy release characteristics of reactive disordered alloys are introduced from four aspects, including the energy release phenomenon of chemical reaction, the energy release law induced by impacting, the energy release mechanism and the regulation of the energy release behaviors. The chemical reaction showing energy release phenomenon in static and dynamic mechanical experiments is described. The relationship between impact velocities and the energy release overpressures or the efficiency of energy release of reactive disordered alloys is obtained. The effect between impact velocities and crushing degree

\* 收稿日期: 2023-05-24; 修回日期: 2023-08-28

基金项目: 国家自然科学基金 (11790292, 12141202, 12002170)

第一作者: 侯先苇 (1997—), 女, 博士研究生, 18260081681@163.com

通信作者: 张先锋 (1978—), 男, 博士, 教授, lynx@njust.edu.cn

of the reactive disordered alloys or characteristics of the target on the energy release mechanism is discussed. At the same time, the regulation effects of preparation process and the kinds of element on energy release effect of disordered alloy materials are summarized. This kind of alloy own good impact energy release characteristics, presented an ideal energetic structural material. Furthermore, the research progress of reactive disordered alloys applied to warheads in military area is summarized from three directions, including fragment, armor-piercing core and shaped charge liner. The macro and micro penetration behavior and mechanism of warheads of reactive disordered alloys are analyzed under high-speed loading conditions. Via the design of the structure, the good penetration and damage performance benefit from the self-sharpening and energy release characteristics of the material. Finally, the further development trend and demands of reactive disordered alloy are prospected.

**Keywords:** disordered alloy; reactive metal; impact energy release characteristics; high efficiency damage

根据合金中组成原子的排列方式, 可以将其大体分为有序合金和无序合金两大类。其中, 有序合金是指两种及两种以上组元合金化形成的原子呈周期性和平移对称性排列的晶体相, 而无序合金的“无序”是相对单主元晶态合金而言, 是通过调制材料结构“序”或“熵”这一全新的理念合成的, 颠覆了传统金属材料的设计理念, 为合金的性能调控提供了广阔空间。无序合金通常包含两大类, 一类是拓扑和化学无序的非晶合金(也称金属玻璃), 另一类是化学无序的多主元高熵合金, 这些合金往往具有高强度、高弹性、高韧塑性等优异的性能<sup>[1-5]</sup>。此外, 具有冲击释能特性的无序合金是一种典型的活性材料, 又称为活性无序合金, 其在高速冲击过程中表现的冲击释能<sup>[6-7]</sup>及剪切自锐特性<sup>[8-10]</sup>, 能够大幅增强武器的侵彻毁伤威力, 在军事领域<sup>[11-14]</sup>具有重要的应用前景。

随着空天目标、坦克装甲及地面工事等军事装备及设施防护性能不断地提升, 对弹药的毁伤性能也提出了更高的要求<sup>[15]</sup>。弹药战斗部毁伤主要研究毁伤能量释放和控制、与目标的相互作用等, 以力、热及其耦合作用为主实现对目标材料、功能或结构的有效破坏, 是现代武器装备完成作战使命的终极目标。近年来, 毁伤技术向着以能量富集为核心的高能毁伤、以能量优化控制为核心的高效毁伤方向发展。由于以活性无序合金为代表的活性毁伤元材料具有独特的耦合毁伤作用, 其能量释放控制、精准可控毁伤是推进毁伤技术发展的重要方法和途径。

为更好地开发利用活性无序合金这一独特优异的活性材料, 本文将对典型活性无序合金材料在不同应变率下的冲击破坏特性进行综述。从材料的变形破碎及化学反应特性, 阐述其冲击释能行为, 介绍不同元素及加工工艺对材料力学性能和释能特性的调控效果, 并总结活性无序合金材料在破片、穿甲弹芯及聚能装药方面的研究现状。结合相关领域的研究进展, 提出活性无序合金材料发展所面临的主要问题及未来发展方向。

## 1 活性无序合金冲击释能特性

探索活性无序合金材料的冲击释能特性对其在军事领域的发展具有重要意义, 是未来活性毁伤元开发设计与应用的重要依据。为了阐明冲击加载下活性无序合金的冲击释能特性, 需要分析材料在冲击过程中复杂的力-热-化耦合问题。目前, 关于活性无序合金冲击释能反应的研究大多采用实验手段, 基于实验数据分析材料的释能机理及效果, 进而对其力学性能及释能特性进行调控。下面就典型无序合金材料的冲击释能特性进行阐述。

### 1.1 反应释能现象

具有一定力学强度的活性无序合金受到外界作用后会发生变形破碎, 局部高温诱发化学反应释放能量, 形成明亮火光区。

早期, Inoue 等<sup>[16-17]</sup>和 Yokoyama 等<sup>[18]</sup>通过室温拉伸和压缩实验表征了锆基非晶合金的力学性能: 其断裂强度为 1.4 ~ 2.0 GPa, 杨氏模量在 80 ~ 100 GPa 之间, 拉伸伸长率可达 2%, 表现出优异的力学性能。随后, 在室温准静态拉伸条件下, Liu 等<sup>[19]</sup>首先发现锆基非晶合金材料失效瞬间伴随着火花四溅的释能现象, 如图 1 所示。

Gilbert 等<sup>[20]</sup> 在室温空气和氮气环境中采用摆锤冲击装置对  $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$  材料进行动态断裂试验, 摆锤速度为 3.5 m/s, 实验现象如图 2 所示。从图 2(b) 相机捕获的实验照片中发现, 空气环境中材料在断裂过程产生剧烈的火光。如图 3 所示, 通过分子轨道能级谱分析发现, 空气和氮气环境中材料断裂的温度分别为 3 175 和 1 400 K。如图 4 所示, 进一步, 采用扫描电子显微镜对空气和氮气环境下材料断裂产生的断面进行观测, 发现材料断裂表面发生了局部熔化。Gilbert 等<sup>[20]</sup> 提出空气中出现火光的原因是材料断裂形成新自由面, 同时释放弹性能, 导致局部温度升高, 进而发生氧化反应燃烧释能, 初步揭示了典型无序合金的燃烧反应现象。

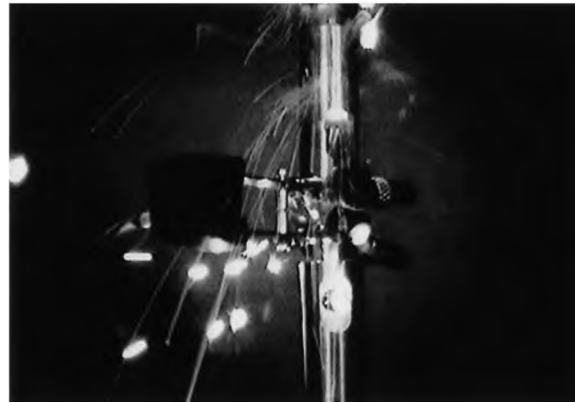


图 1 室温下空气中测试的锆基非晶合金试样断裂瞬间<sup>[19]</sup>

Fig. 1 Moment of fracturing a BAA specimen tested at room temperature in air<sup>[19]</sup>

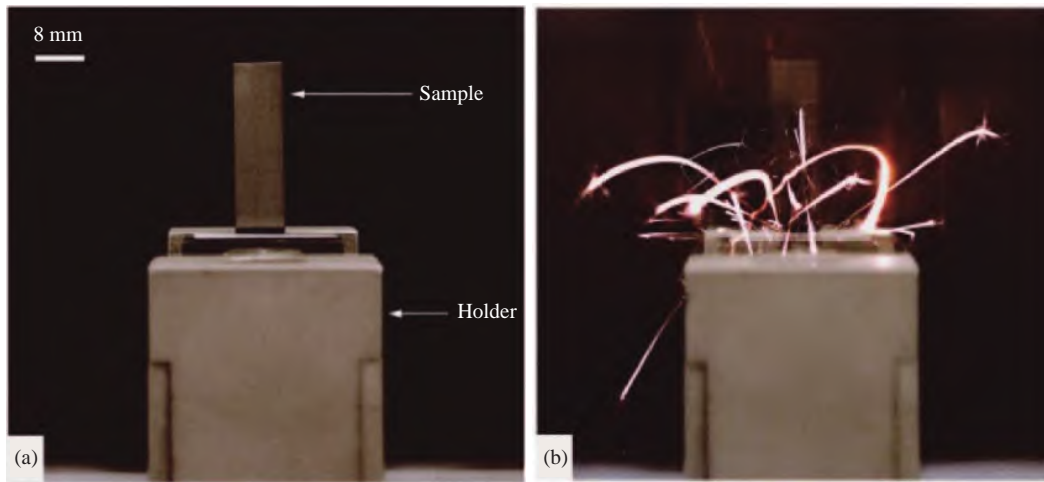


图 2 摆锤冲击试验装置及空气环境中试验现象<sup>[20]</sup>

Fig. 2 Pendulum impact test device and test phenomena in air environment<sup>[20]</sup>

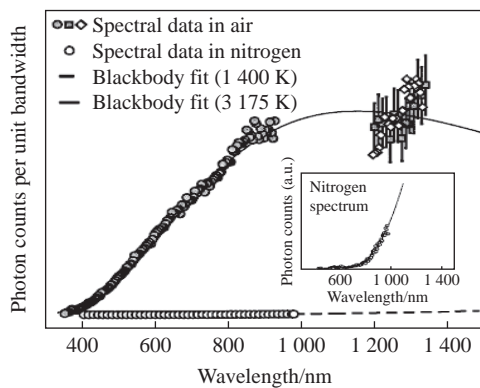


图 3  $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$  分子轨道能级谱<sup>[20]</sup>

Fig. 3 Molecular orbital energy spectrum of  $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ <sup>[20]</sup>

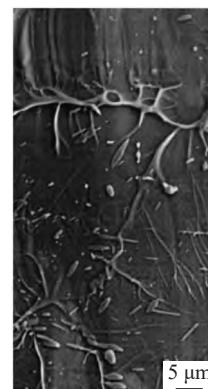


图 4 氮气环境中断裂后断口扫描电镜照片<sup>[20]</sup>

Fig. 4 Scanning electron microscope photos of fracture surface of the specimen fracturing in nitrogen environment<sup>[20]</sup>

潘念侨<sup>[21]</sup>对锆基非晶合金材料的静动态力学性能及化学释能行为开展了进一步的研究。准静态压缩下, 锆基非晶合金具有较大的弹性应变和较高的屈服强度, 塑性变形阶段出现与应变硬化相反的应变软化现象。动态压缩条件下, 材料的屈服强度、塑性应变低于对应的静态压缩数据, 且随着应变率的提高, 材料的弹性模量基本保持不变, 不具有应变率效应。当应变率超过  $1050 \text{ s}^{-1}$  时, 试验中观察到“火花”现象。在进一步的密闭容器释能实验研究中, 冲击波超压值、高速摄影拍摄的火光明亮程度及实验后靶板的扩孔效应, 说明了更高应变率下锆基非晶合金的冲击释能特性。

针对  $\text{HfZrTiTa}_{0.53}$  高熵合金材料, Zhang 等<sup>[22]</sup>也开展了不同应变速率下材料的力学性能及含能特性研究。准静态压缩下,  $\text{HfZrTiTa}_{0.53}$  高熵合金的屈服强度、抗压强度和断裂应变分别为  $786 \text{ MPa}$ 、 $1314 \text{ MPa}$  和  $13.5\%$ ; 加载应变率大于  $950 \text{ s}^{-1}$  时, 可以清楚地观察到火光, 合金断裂发生释能反应致使断裂试样表面出现明显的熔化现象。无序合金表现的反应释能特性为其应用为活性毁伤元奠定了基础。

## 1.2 冲击释能规律

冲击反应过程中, 活性无序合金材料的释能行为与材料的成分、结构, 冲击质量及撞击速度等因素相关。为表征活性材料冲击释能过程中相关物理量, Ames<sup>[23-24]</sup>率先提出了活性材料在冲击作用下能量释放特性评估方法, 实验装置如图 5(a) 所示<sup>[25]</sup>, 装置主体为一个圆柱形密闭容器。其中, 容器前端固定有金属薄板, 弹体以一定速度撞击前端薄板, 发生破碎后进入容器内, 对后置的后效靶板进行二次撞击, 发生释能反应。通过在容器侧壁安装传感器测量容器内冲击释能反应造成的温度、压力变化(图 5(b) 所示为典型超压时程曲线), 进而对活性材料的冲击释能规律进行研究。

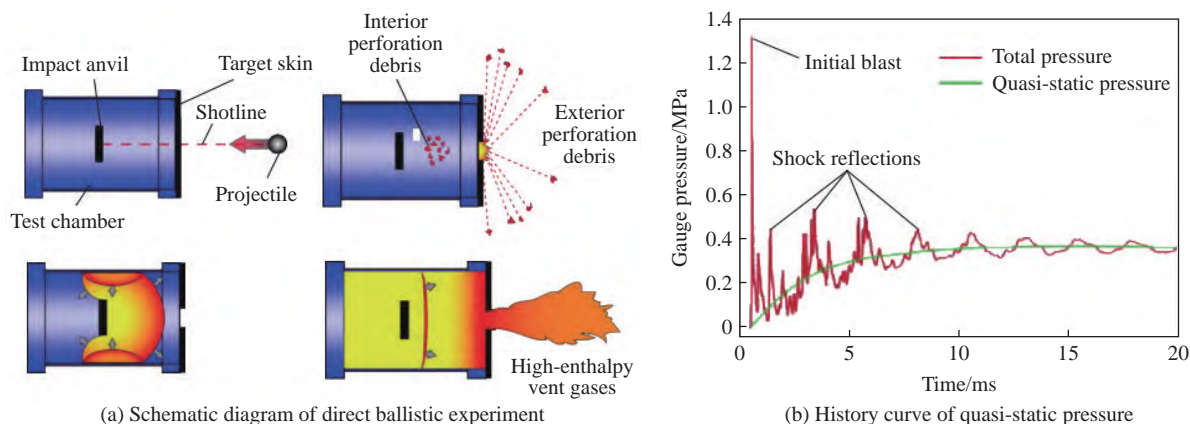
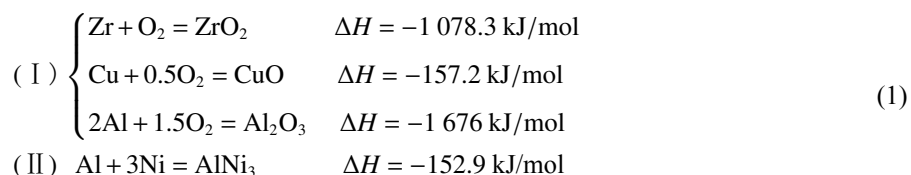


图 5 准密闭容器试验<sup>[25]</sup>

Fig. 5 Quasi-sealed chamber test<sup>[25]</sup>

Wang 等<sup>[26]</sup>率先采用准密闭容器装置开展了无序合金材料的冲击释能行为研究, 结果如图 6 所示, 可以看出, 相比于惰性的钢破片, 锆基非晶合金破片撞击容器后产生明显的喷射现象, 且随着撞击速度的增大, 火光喷射程度加剧。通过扫描电镜和能谱分析得到, 如图 7 所示, 试验回收反应产物由球状颗粒和不规则形状的碎片组成, 产物元素以  $\text{Zr}$ 、 $\text{O}$  为主, 证明锆基非晶合金在撞击过程中发生了氧化反应。结合相关研究<sup>[27-31]</sup>, 无序合金冲击过程中化学释能主要来自两个过程: (I) 合金组成元素与氧气发生反应, 常见的锆、钛、铝等元素与氧气较为亲和<sup>[32]</sup>, 容易发生氧化反应, 生成较大的焓, 释放能量较多; (II) 合金组成元素之间或者合金元素与中间产物发生反应, 但金属间反应速度较慢, 化学释能不明显。具体的:



为更好地了解无序合金材料的冲击释能行为, 侯先苇等<sup>[33]</sup>对两种典型高熵合金材料进行了冲击释能特性试验研究。结果表明, 一定撞击速度范围内, 随着撞击速度的增加, 两种典型高熵合金破片冲击释能反应加剧, 容器内气体受到释能反应影响, 压力上升, 进而超压峰值上升。如图 8 所示, 超压峰值和撞击速度呈正相关特性。

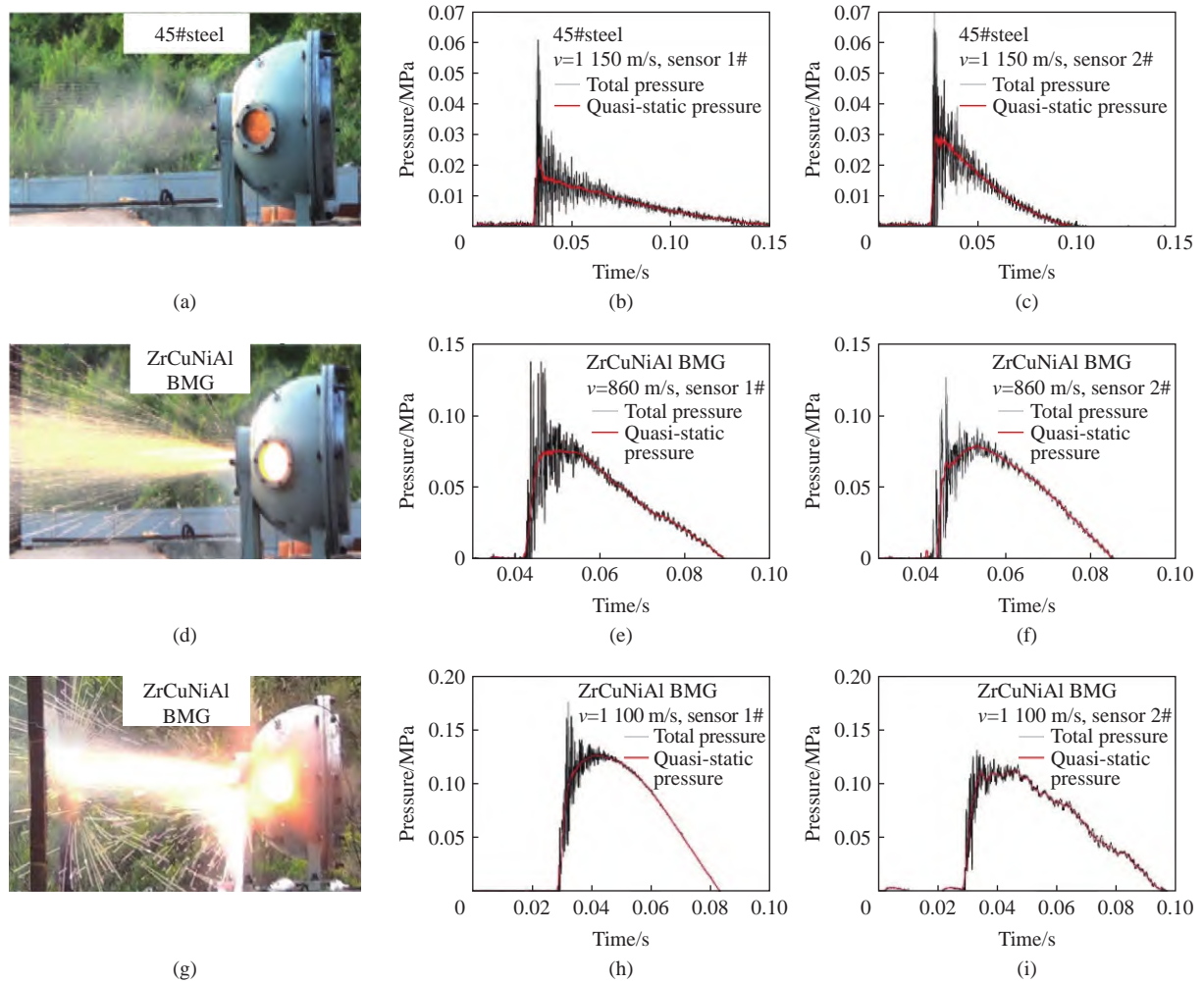


图 6 高速摄影图片及容器内超压时程曲线<sup>[26]</sup>

Fig. 6 Video frames and pressure curves inside the chamber<sup>[26]</sup>

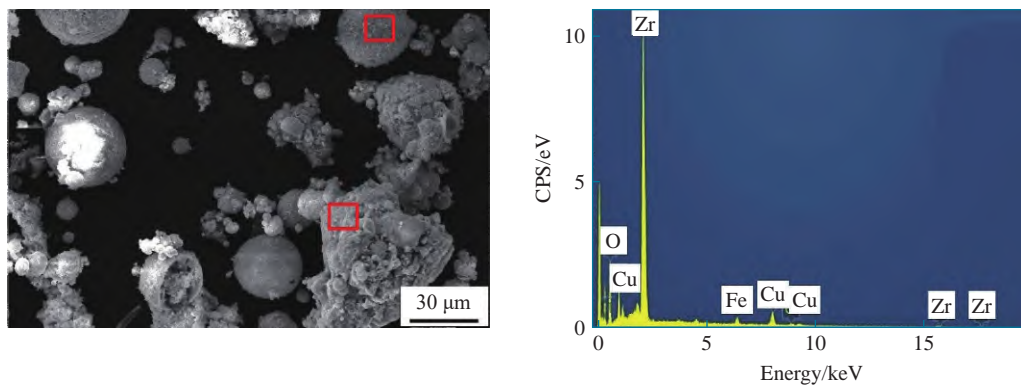


图 7 破片撞击靶板后反应产物形貌与成分<sup>[26]</sup>

Fig. 7 Morphology and composition of the reaction products of fragment after impacting target<sup>[26]</sup>

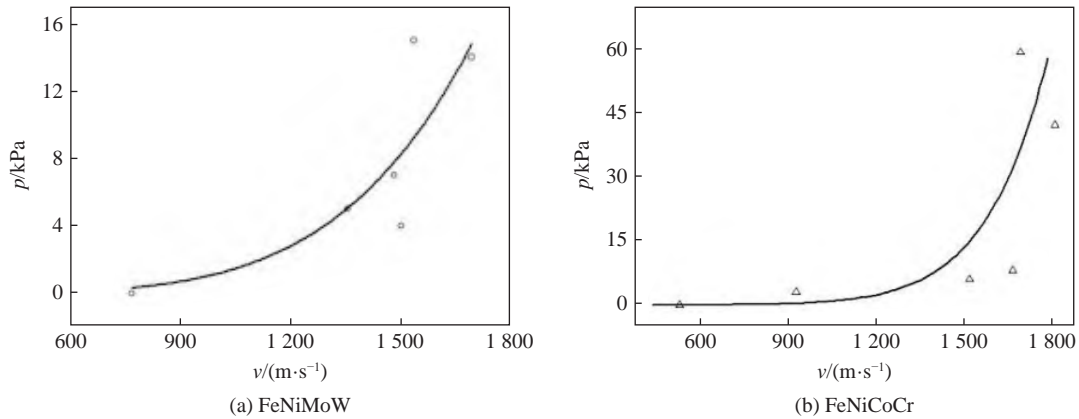


图 8 高熵合金破片不同撞击速度下压力峰值<sup>[33]</sup>

Fig. 8 Peak overpressures at different impact velocities of the high-entropy alloy fragments<sup>[33]</sup>

张云峰等<sup>[34]</sup>对锆基非晶合金材料的研究(图 9)显示,在 600~1 600 m/s 撞击速度范围内,材料的反应效率随速度的增加而增加。当撞击速度为 1 485 m/s 时,锆基非晶合金材料的最大冲击释能反应效率达 42.13%,单位质量能量密度达 3.83 kJ/g,单位体积能量密度达 0.026 kJ/mm<sup>3</sup>。与几种 Al/Ni 系、Zr/W 系活性材料相比,高速冲击状态下锆基非晶合金的能量密度较高,具有应用为活性毁伤元的潜力。

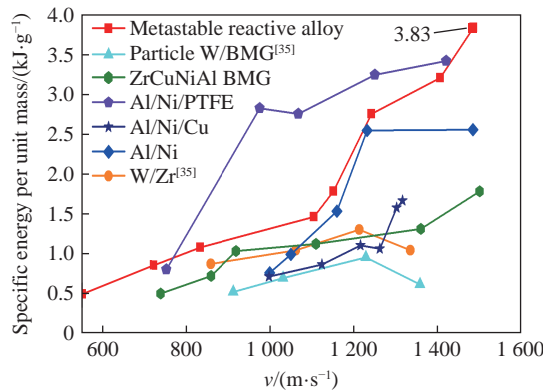


图 9 多种活性材料的单位质量能量密度<sup>[34]</sup>

Fig. 9 Specific energy per unit mass of various reactive materials<sup>[34]</sup>

### 1.3 冲击释能机理

材料的冲击释能过程中涉及到较为复杂的力-热-化耦合问题,为了更好地理解和掌握其机理,国内外学者主要采用实验研究、理论分析及数值模拟方法,研究活性无序合金材料内部化学反应的热力学和动力学规律及其与机械响应之间的关系。

根据 Luo 等<sup>[35]</sup>对 W/Zr 合金和 W/Zr 基非晶合金两种不同性质活性材料冲击释能反应的研究,得到 W/Zr 合金破片反应与冲击能量有关,而冲击能量受撞击速度、破片材料和靶板厚度等因素的影响。因此,Chen 等<sup>[36]</sup>通过冲击实验,研究了撞击速度和靶板厚度对锆基非晶合金破片撞击化学反应行为的影响,实验结果见表 1,可以看出:实验条件范围内,撞击速度越大、板厚越薄,化学反应越剧烈,冲击波超压和能量释放率越高。由于侵彻过程中释放的化学能,径向扩孔效应明显。文中基于实验结果,结合理论分析,建立了冲击波压力  $p_0$  和挠度  $w_0$  的工程模型:

$$w_0 = \frac{k}{\pi} \sqrt{\frac{[p_0/(2\rho_0c_0) + W_G + W_M + W_L]}{\sigma_y h_t}} \quad (2)$$

式中:  $k$  为修正系数,与靶板周围的约束条件有关;  $\rho_0$ 、 $c_0$  分别为波前空气的初始密度和声速;  $\sigma_y$ 、 $h_t$  分

别为靶板的屈服强度和厚度;  $W_G$ 、 $W_M$ 、 $W_L$  分别为破片侵彻靶板过程中受到的惯性力、摩擦力和损失的能量。

表 1 锆基非晶合金的冲击化学反应行为<sup>[36]</sup>

Table 1 Impact-induced chemical reaction behavior of ZrTiNiCuBe<sup>[36]</sup>

射击序号	靶板厚度/mm	撞击速度/(m·s <sup>-1</sup> )	超压峰值/MPa	扩孔半径/mm	挠度/mm
1	3	1450	0.02	7~10	10~15
2	3	1560	0.04	10~15	15~20
3	2	1348	0.05	20~25	20~25
4	2	1218	0.024	8~12	10~15
5	4.5	1630	0.021	7~10	8~10

Chen 等<sup>[36]</sup> 计算结果与实验数据误差在 15% 以内, 吻合较好, 可为评估锆基非晶合金材料的冲击响应和能量释放提供可靠依据。

Tu 等<sup>[31]</sup> 以锆基非晶合金为研究对象, 开展冲击释能试验获得了材料的反应程度、冲击压力与温度的关系。结合冲击温升模型和反应动力学模型, 修正了反应动力学模型参数, 得到了冲击过程中压力和温度的变化规律。

张云峰等<sup>[37]</sup> 结合高速摄影、差示扫描热分析仪及扫描电镜等, 获得了锆基非晶合金的 JH-2 本构参数、失效瞬间宏观细观形貌及化学反应热力学参数, 并对材料动态失效过程进行有限元数值模拟(图 10~11), 结合数值模拟和试验结果得到结论, 在  $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$  应变率范围内, 该材料的释能机理为材料破碎释放的弹性势能导致材料局部金属间化合物反应释能, 其释能强度与破碎程度呈正相关特性。

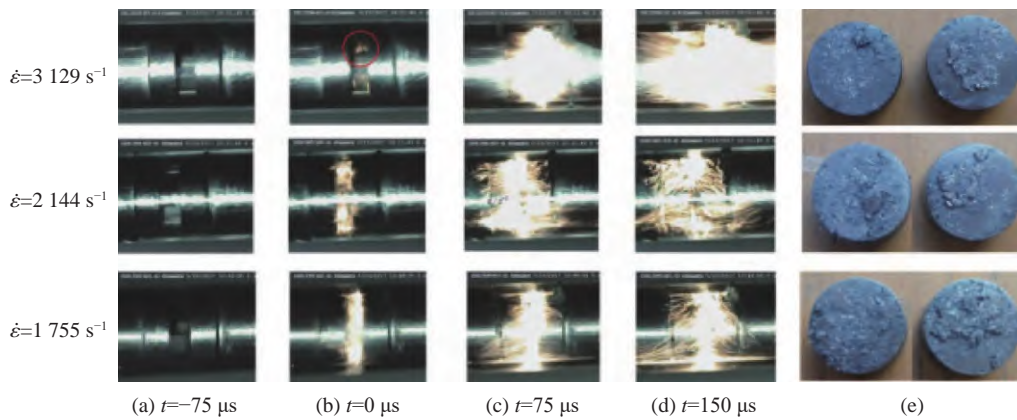


图 10 锆基非晶合金动态压缩高速摄影图像<sup>[37]</sup>

Fig. 10 High-speed photography of Zr-based amorphous alloy under dynamic compression<sup>[37]</sup>

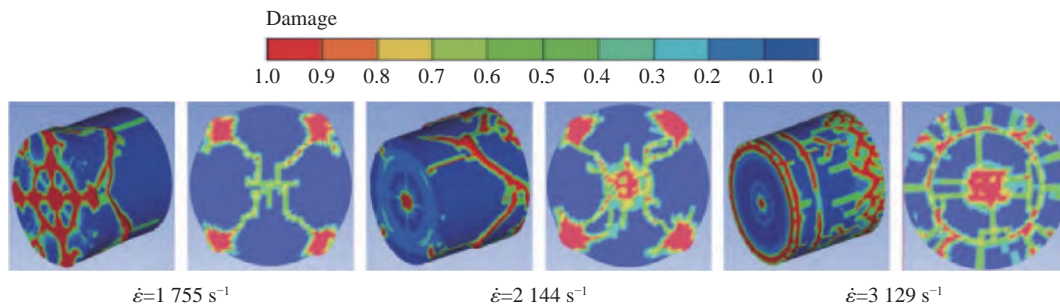


图 11 锆基非晶合金动态压缩模拟损伤云图<sup>[37]</sup>

Fig. 11 Simulational damage contours of Zr-based amorphous alloy under dynamic compression<sup>[37]</sup>

进一步, Ji 等<sup>[38]</sup>研究了锆基非晶合金在高速冲击下的反应行为和动态破碎。将锆基非晶合金试样以不同速度发射到充满空气或氩气的准密闭容器中, 回收试验后产生的碎片进行细观观测。从空气和氩气环境下回收的碎片反应状态得出, 破片是先破碎到临界反应尺寸之后才发生的氧化反应。其中, 临界反应尺寸为 20 μm。氩气环境下锆基非晶合金破片破碎累积质量服从幂函数分布<sup>[39]</sup>, 如图 12 所示。结合破片的动态破碎分布和 Ames<sup>[23-24]</sup>的能量释放评估方法, 预测了不同撞击速度下材料化学释能反应后在密闭容器内产生的准静态压力。

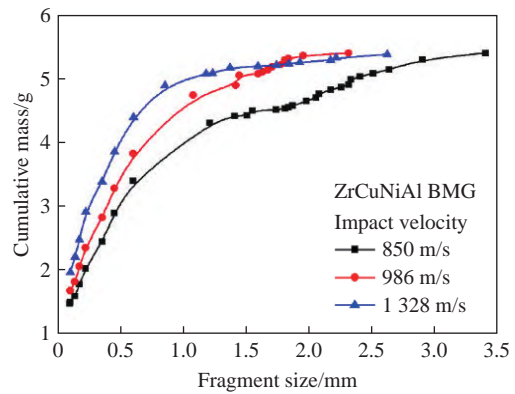


图 12 氩气中不同撞击速度下动态破碎锆基非晶合金累积质量分布试验数据<sup>[38]</sup>

Fig. 12 Experimental data of cumulative mass distribution for Zr-based amorphous alloy after dynamic fragmentation at different impact velocities in argon atmosphere<sup>[38]</sup>

关于高熵合金的冲击释能特性, Ren 等<sup>[40]</sup>选取了理论燃烧热高、混合密度较低的 TiZrNbV 高熵合金为研究对象, 探究其在不同应变率下的力学响应及释能特性。在准静态压缩下, 合金表现出明显的弹塑性力学特性, 屈服强度为 1009 MPa。但在动态加载下, 材料表现出明显的应变率效应和脆性断裂行为。结合合金试样动态压缩变形后的轴向截面背散射电子成像照片(图 13<sup>[40]</sup>)可以看出, 合金中存在高度局部化变形的绝热剪切带和剧烈的组织变形, 变形带中存在大量的裂纹和空洞。同时, 绝热剪切带(图 13(e))发生了严重的局部变形和位错的快速增殖, 并在边界(图 13(d))形成了应力集中。当应力超过某些位置晶粒的强度时, 晶粒就会在该处断裂。在宏观尺度上, 绝热剪切使高熵合金表现出软化行为, 沿绝热剪切带发生脆性断裂。

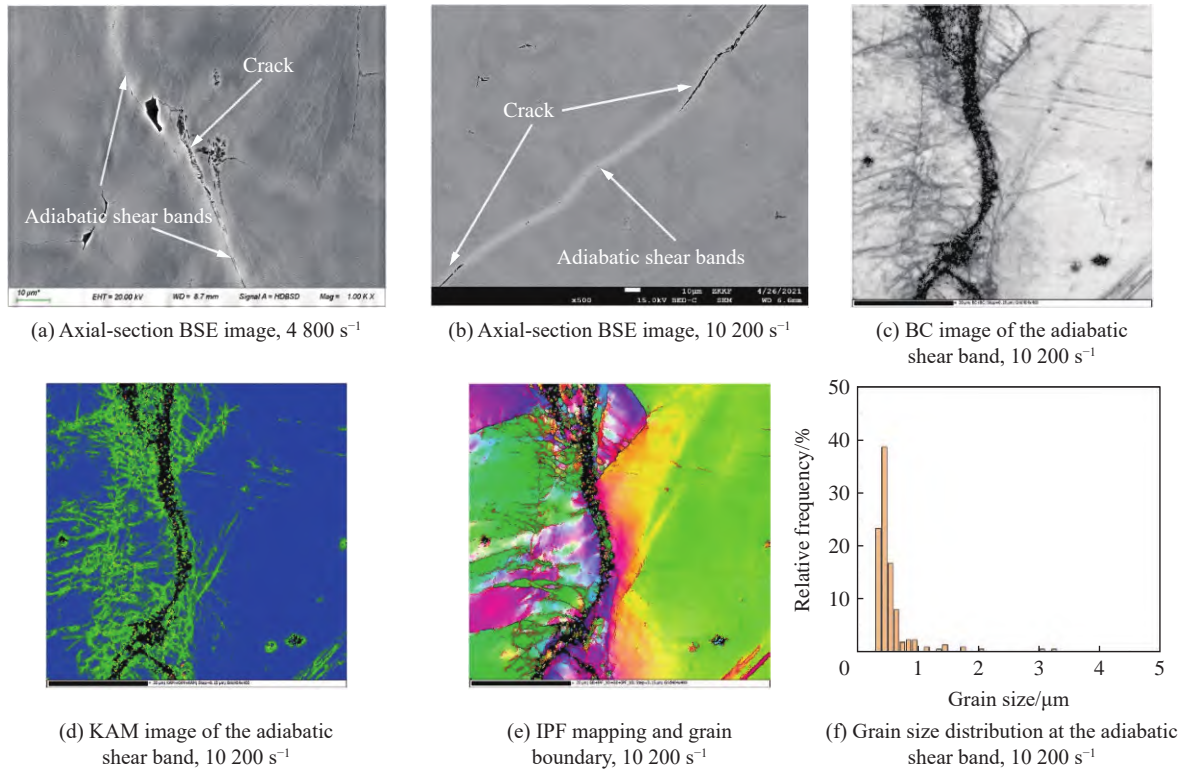


图 13 TiZrNbV 高熵合金动态压缩背散射电子成像结果<sup>[40]</sup>

Fig. 13 BSE result of TiZrNbV high entropy alloy after dynamic compression<sup>[40]</sup>



如图 14<sup>[40]</sup> 所示, 从高熵合金破片冲击释能实验回收观测结果可以看出, 剪切带与化学能的释放有着密切的关系。剪切带演变而来的裂纹轮廓表现出典型的高温特征, 高温轮廓诱导的氧化反应导致了冲击载荷下的化学能释放, 舱内温度和压力急剧上升, 材料的能量释放随着撞击速度的增加而增加。但在 Zhang<sup>[22]</sup> 等所报道的研究提出的是, 绝热剪切带的出现导致材料在高速撞击后无法均匀破碎, 降低了能量释放效率。因此, 有待进一步开展无序合金的破碎释能机理研究工作。

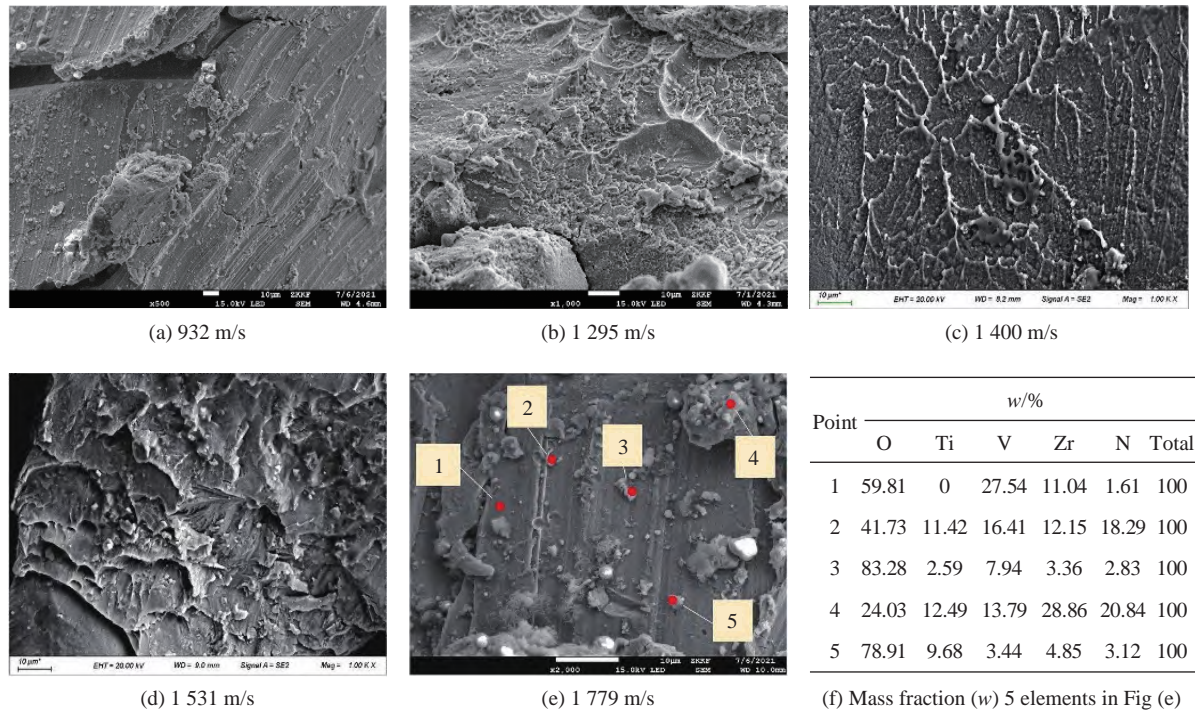


图 14 不同撞击速度下回收试样的断口形貌<sup>[40]</sup>

Fig. 14 Fracture morphology of recovered specimen at different impact velocities<sup>[40]</sup>

#### 1.4 冲击释能特性调控

活性材料的能量释放控制是引领毁伤技术发展的重要方法。通过调整活性无序合金材料的组成、结构及性质等因素, 能够改变其晶体结构、孔隙结构及破坏形式等, 调节材料的性能及响应能力, 进而提高材料的毁伤能力。

尽管新型活性无序合金材料具有优异的力学性能和释能特性, 但大尺寸、高质量难以制备的困难限制了其应用<sup>[41-42]</sup>。由于大块体非晶合金冷却速率较低, 容易发生部分晶化, 晶相的存在不可避免地影响了大块体非晶合金的性能<sup>[43]</sup>。因此, 黄彩敏等<sup>[44-45]</sup>研究了原位晶化相对  $Zr_{55}Ni_5Al_{10}Cu_{30}$  块体非晶合金力学性能和能量释放行为的影响, 分析了原位析出的脆性相对材料变形行为和冲击释能的影响规律。研究表明, 元素组成相同、制备方法不同的合金具有不同的晶相含量。晶相含量对  $Zr_{55}Ni_5Al_{10}Cu_{30}$  合金力学行为的影响主要源于非晶相和晶相的不同变形机制。其中, 含有非晶相的锆基非晶合金表现为纯剪切断裂, 而完全晶化的锆基非晶合金表现为解理断裂。如图 15<sup>[45]</sup> 所示, 高速冲击载荷条件下, 完全晶化的锆基非晶合金的断裂行为受晶相脆性的影响, 形成相对更小的碎块。因此, 合金与空气接触的面积增加, 提高了能量释放效率, 大块体非晶合金制备工艺带来的晶化有利于该材料发生化学释能反应。

在材料强度和释能潜力方面都满足活性材料要求的情况下, 无序合金很难同时满足不同服役阶段的塑性要求。相变诱发塑性效应<sup>[46-49]</sup> 的提出实现了塑性提高的同时保持材料强度, 为解决 BCC 结构高熵合金中强度-塑性的矛盾提供了新的思路。王睿鑫<sup>[50]</sup> 提出在单相均匀亚稳态的 NbZrTiTa 高熵合金中原位诱发相变可产生增塑效应, 并基于此对不同工艺下合金结构的形成及其在静动态加载下的组织结构、力学性能和释能特性的演变规律等方面进行了研究。结果表明, 铸态 NbZrTiTa 高熵合金在静动态

加载下都出现了相似的结构转变, 进而引发了相变诱发塑性效应, 使得合金材料发生晶界、晶粒强化, 从而抑制合金的韧-脆性转变, 确保材料具有良好的冲击韧性<sup>[51]</sup>。如图 16<sup>[50]</sup> 和图 17<sup>[50]</sup> 所示, 结合回收合金弹丸冲击释能后的碎片及其细观观测结果可以得到, 高塑性和低绝热剪切敏感性的 NbZrTiTa 高熵合金在动态加载下发生沿晶断裂, 产生均匀小尺寸碎片, 使得材料的反应速率提升。这一结论与上述黄彩敏等<sup>[44-45]</sup> 对非晶合金材料破碎释能机理的研究结果一致。

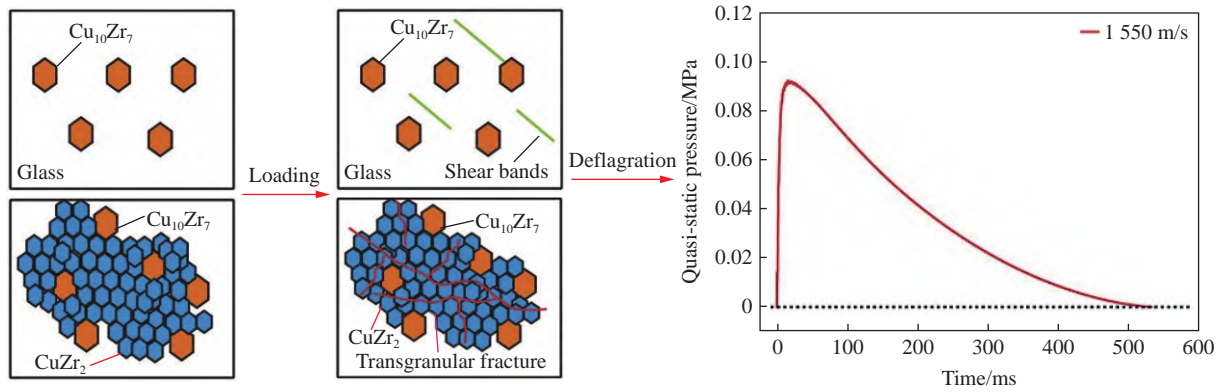


图 15 原位晶化对锆基非晶合金能量释放行为的影响<sup>[45]</sup>

Fig. 15 Effect of *in-situ* crystalline phases on the energy release behaviors of Zr-based amorphous alloy<sup>[45]</sup>

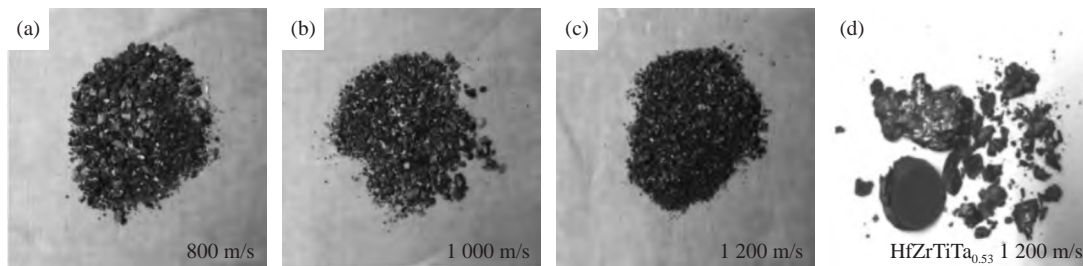


图 16 NbZrTiTa 高熵合金和 HfZrTiTa<sub>0.53</sub> 合金弹丸在不同速度下撞击靶箱后的碎片<sup>[50]</sup>

Fig. 16 The fragments of NbZrTiTa high-entropy alloy and HfZrTiTa<sub>0.53</sub> high-entropy alloy projectiles impacting the target at different velocities<sup>[50]</sup>

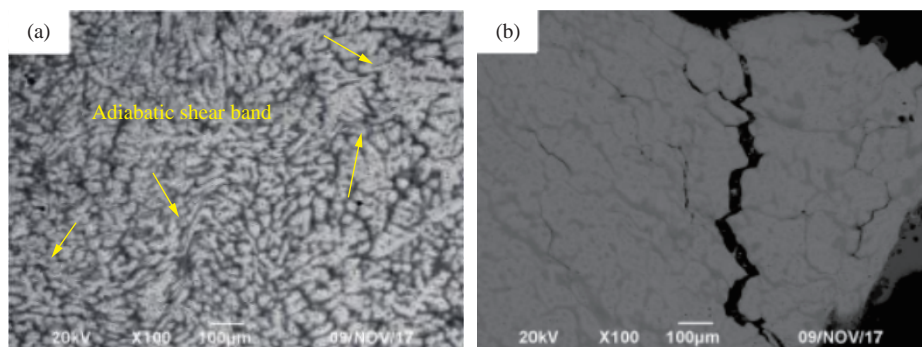


图 17 1200 m/s 速度下 NbZrTiTa 高熵合金弹丸碎片的截面背散射电子成像<sup>[50]</sup>

Fig. 17 Cross-section BSE photos of NbZrTiTa high-entropy alloy projectile at 1200 m/s<sup>[50]</sup>

此外, 无序合金高度局域化的剪切断裂特征严重限制了其作为工程材料的应用<sup>[52-54]</sup>。研究发现, 非晶合金基体中加入韧性金属纤维或颗粒可以阻止剪切带的扩展并促进新的剪切带增殖, 在不降低非晶合金强度的同时, 复合材料具有较高的塑性<sup>[55-58]</sup>。钨是一种力学性能优异的晶态金属, 按照空间拓扑结构的不同, 钨增强锆基非晶合金复合材料可分为钨颗粒增强型、钨纤维增强型和钨骨架增强型三种。其

中, 钨骨架能够防止非晶合金内部剪切带的快速扩展, 非晶合金对钨骨架中的裂纹具有阻碍作用, 两相材料能够很好地相互抑制, 且钨骨架具有高比重、耐高温高压、抗热冲击震动等特点<sup>[59]</sup>。因此, 张云峰等<sup>[60]</sup> (图 18~图 21) 采用准密闭实验容器研究了不同撞击速度下 W/Zr 基非晶合金材料的冲击释能特性及盖板厚度对材料释能超压的影响。结合 Arrhenius 模型和 Avrami-Erofeev 方程, 讨论了反应效率与冲击压力及冲击温度的关系。结果表明, 在一定的撞击速度范围内, 准静态压力峰值与破片撞击速度呈正相关。容器内反应效率随着冲击压力及温度的升高而增大。当冲击压力为 40 GPa 时, 理论反应效率达到 61.5%, 材料并未完全发生化学反应。特定速度下, 存在一个最优的盖板厚度使得板后超压最大。与锆基非晶合金相比<sup>[33]</sup>, W/Zr 基非晶合金释能反应阈值速度更高, 临界压力更大。

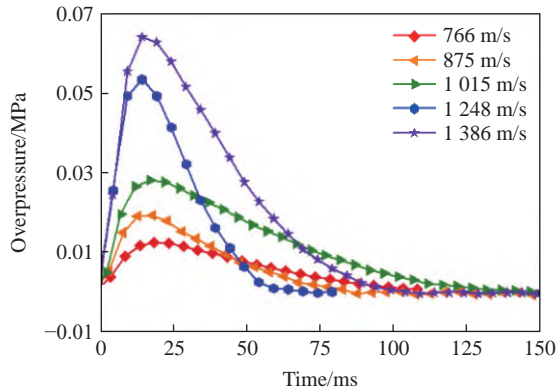


图 18 0.5 mm 厚的盖板下破片不同撞击速度对应的压力-时间的曲线<sup>[60]</sup>

Fig. 18 Pressure as a function of time for a 0.5 mm cover target thicknesses<sup>[60]</sup>

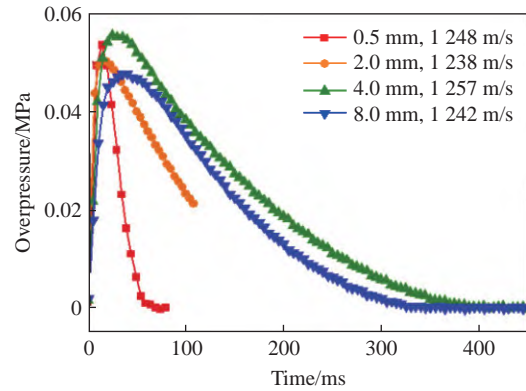


图 19 不同靶板厚度下不同撞击速度对应的超压-时间曲线<sup>[60]</sup>

Fig. 19 Overpressure as a function of time for different cover plate at different impact velocities<sup>[60]</sup>

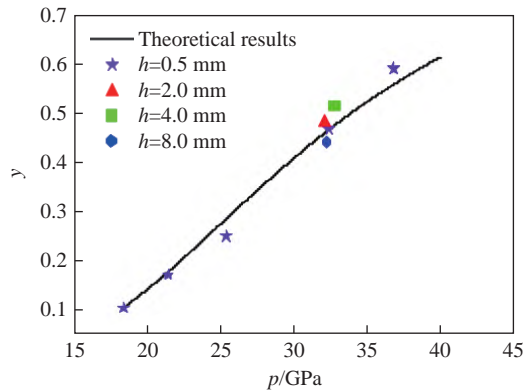


图 20 超压-反应速率曲线<sup>[60]</sup>

Fig. 20 Reaction efficiency as a function of shock pressure<sup>[60]</sup>

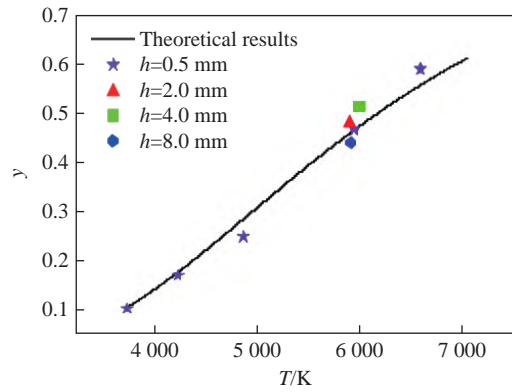


图 21 冲击温度-反应速率曲线<sup>[60]</sup>

Fig. 21 Reaction efficiency as a function of shock temperature<sup>[60]</sup>

王睿鑫<sup>[50]</sup> 还探索了 Al 元素的添加对铸态 NbZrTiTa 高熵合金的组织结构和释能特性的影响。Al 元素相较于基体元素具有更高的燃烧热值, 相容性也相差较大。因此, 添加少量的 Al, 有望使铸态 NbZrTiTa 高熵合金热力学稳定性更低且能量密度更高, 进而提升破片的破碎率和释能反应效率。结果显示, Al 元素的加入使合金塑性减小, 均匀性下降。且随着 Al 元素含量的增加, 合金动态加载下破碎率增加, 但 Al 元素氧化后会生成一层致密的氧化膜阻碍合金进一步的化学反应。因此, Al 元素的加入并没有对 NbZrTiTa 高熵合金的冲击释能效率有所提升。

同样地, Ma 等<sup>[61-62]</sup> 基于 Nb、Zr、Ti、Ta 组成的合金材料, 尝试引入 Al 元素调控材料的强度和密度, 引入 Ce 元素调控材料的能量释放特性。根据动态压缩和冲击释能试验结果显示,  $\text{Al}_{0.5}\text{NbZrTi}_{1.5}\text{Ta}_{0.8}\text{Ce}_x$  高熵合金具有优良的压缩力学性能和能量特性。Ce 元素的掺入使得基质为 BCC 结构的合金出现

FCC 组织和位错区。随着 Ce 原子含量的增加, 材料的动态抗压屈服强度和极限抗压强度呈下降趋势。同时, 材料释能反应延迟时间缩短, 反应程度加剧。

除此之外, 魏祥赛<sup>[63]</sup>设计了 Ni、Ti、Zr、Nb、Ta、Mo、W 七种高燃烧焓值元素的新型高熵合金活性材料, 通过改变组元 Ni 元素的含量调控合金的性能, 从宏观层面对高熵合金活性材料进行了服役条件预测。随着组元 Ni 元素含量的增加, Ni<sub>5</sub>W<sub>5</sub>、Ni<sub>10</sub>W<sub>5</sub>、Ni<sub>15</sub>W<sub>5</sub>、Ni<sub>25</sub>W<sub>5</sub> 等合金的延伸率提高, Ni<sub>20</sub>W<sub>5</sub>、Ni<sub>32</sub>W<sub>5</sub>、Ni<sub>35</sub>W<sub>5</sub> 等合金的延伸率下降。其中, Ni<sub>5</sub>W<sub>5</sub>、Ni<sub>10</sub>W<sub>5</sub>、Ni<sub>15</sub>W<sub>5</sub>、Ni<sub>20</sub>W<sub>5</sub>、Ni<sub>25</sub>W<sub>5</sub> 等合金动态断裂模式均为解理断裂, Ni<sub>20</sub>W<sub>5</sub>、Ni<sub>25</sub>W<sub>5</sub> 合金动态断口处出现了裂纹和熔化痕迹, 展现出良好的释能效果。Ni<sub>32</sub>W<sub>5</sub>、Ni<sub>35</sub>W<sub>5</sub> 合金断口处出现了裂纹和熔化痕迹, 断裂模式为准解理断裂。在冲击载荷作用下, 合金的弹性模量和损伤变量成正比。Ni<sub>20</sub>W<sub>5</sub> 高熵合金综合了高燃烧焓值、高密度、高硬度等优点, 具有应用为活性毁伤元的潜力。

同一体系下, 高人奎等<sup>[64]</sup>、Chen 等<sup>[65]</sup>和 Tang 等<sup>[66]</sup>选择高速撞击下能够发生氧化反应放出大量热能的 Hf、Ti、Zr 三种元素作为基体元素, 添加性能各异的其他元素, 探究各元素对高熵合金化学反应释能强度的影响。研究结果显示, TiZrHfCu<sub>0.3</sub> 的反应释能能力最强, TiZrHfAl<sub>0.3</sub> 次之, TiZrHfNi<sub>0.3</sub> 最弱。

综合上述, 近年来的研究工作加深了对无序合金材料化学释能机理的认识。该类材料具有高强度及化学反应特性, 是一类较为理想的活性毁伤元材料。材料的冲击释能特性与其性能、撞击速度、破碎程度及靶标特征等因素有关, 亟待探索冲击变形、化学反应释能行为及其对目标毁伤的耦合作用机制。

## 2 活性无序合金破片侵彻毁伤威力

1976 年, Montgomery 等<sup>[67]</sup>在专利中首次提出活性破片的概念。传统的惰性破片主要依靠动能对目标作用, 较小直径的战斗部装药质量较低, 无法将破片加速到实现动能杀伤所需的速度<sup>[68]</sup>。而活性破片撞击目标时能够发生化学释能反应, 引燃甚至引爆靶标, 实现对靶标的高效毁伤<sup>[69-70]</sup>。但常见的金属-氟聚合物、金属-氧化物及金属-金属型复合活性材料强度大多无法满足破片加载及侵彻作用时的极端环境要求。因此, 研究者逐渐将目光转向力学性能优异的活性无序合金材料。

### 2.1 活性无序合金破片反应释能现象

高速撞击目标时, 活性无序合金破片发生塑性变形破碎。由于材料受到冲击压缩及剪切作用, 机械能转化为热能形成局部热点, 促使碎片与氧气结合发生化学释能反应产生显著的燃烧现象。

针对 Zr<sub>55</sub>Cu<sub>30</sub>Ni<sub>5</sub>Al<sub>10</sub> 非晶合金材料, 郭磊等<sup>[71]</sup>开展了破片撞击间隔靶板试验研究。如图 22 所示, 通过高速摄影观察到, 非晶合金破片撞击第一层靶板后部分破碎发生反应形成明亮火光区, 残余破片作用第二层靶板瞬间光圈范围扩大, 进一步的破碎化学反应对后效靶板的穿孔毁伤增强, 形成稳定鱼尾形火光区, 保持一段时间后逐渐衰弱熄灭。

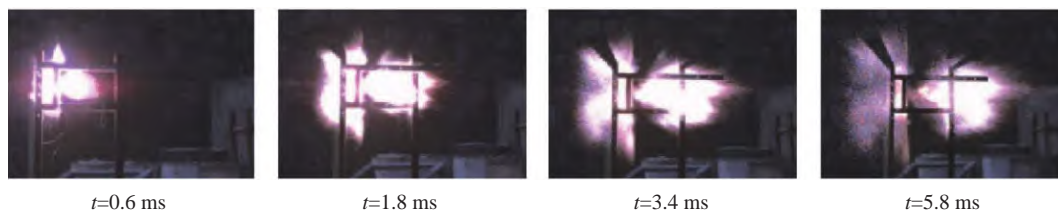


图 22 Zr<sub>55</sub>Cu<sub>30</sub>Ni<sub>5</sub>Al<sub>10</sub> 非晶合金破片典型速度撞击间隔靶板高速摄影图片<sup>[71]</sup>

Fig. 22 High-speed photographs of Zr<sub>55</sub>Cu<sub>30</sub>Ni<sub>5</sub>Al<sub>10</sub> amorphous fragments impacting spacing targets at typical velocity<sup>[71]</sup>

### 2.2 活性无序合金破片侵彻能力

具备高密度和高强度的活性无序合金破片在高速撞击目标时能够对目标实现穿甲和放热双重毁伤效果, 有望大幅度提高战斗部毁伤目标的能力。

陈海华等<sup>[72]</sup>采用传统的钨合金材料进行对比, 研究了 WFeNiMo 高熵合金破片对薄钢靶的侵彻性能。如图 23<sup>[72]</sup>所示, 随着撞击速度的增加, 高熵合金破片撞击靶板反应释能效率提升。从实验后回收的残余破片(图 24<sup>[72]</sup>)可以看出, 穿透靶板后破片呈锯齿状, 具有较好的剪切冲塞效果, 弹尖处形貌较为粗

糙, 出现明显的重熔现象。由于这种高熵合金具有不同硬软相, 变形过程中容易引起较高应变梯度, 进而形成剪切带<sup>[9]</sup>。在穿甲变形中后期, 强烈的剪切变形造成较高的温升。高燃烧热带来的含能特性, 使其不是依靠单一的“动能侵彻”机理对目标进行低效的“机械贯穿”毁伤, 而是通过“动能侵彻”和“化学能释放”毁伤耦合作用, 表现出更强的侵彻毁伤能力。

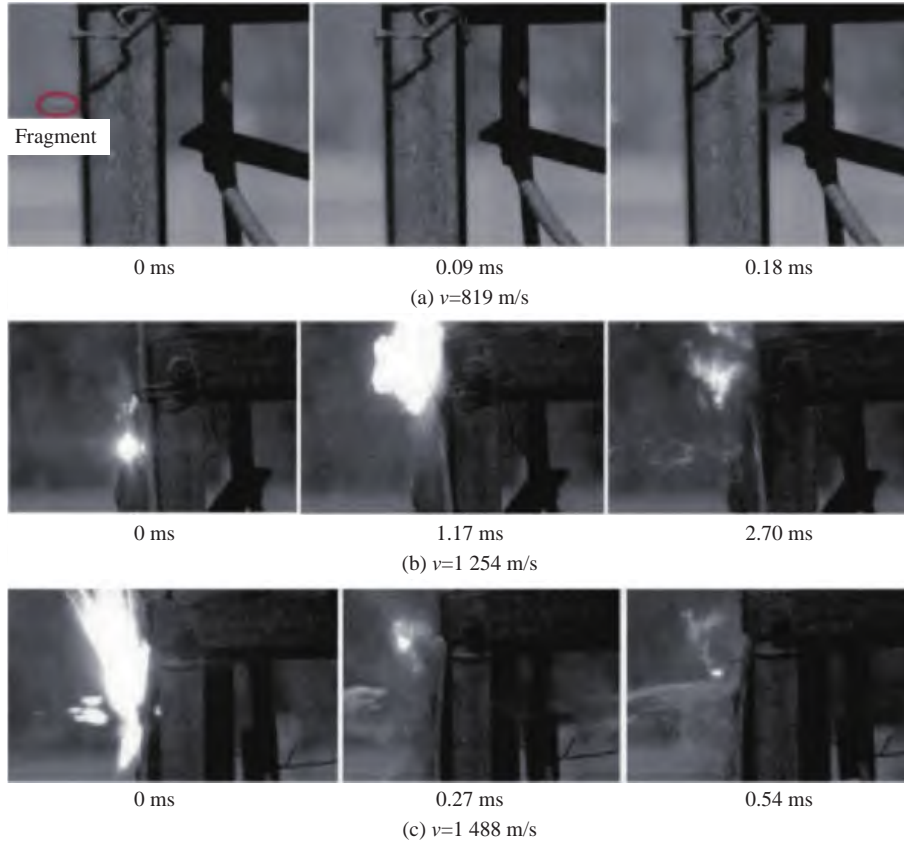


图 23 WFeNiMo 高熵合金在不同速度下穿靶燃烧过程的高速摄影<sup>[72]</sup>

Fig. 23 High-speed video frames of combustion process of WFeNiMo HEA at different speeds<sup>[72]</sup>

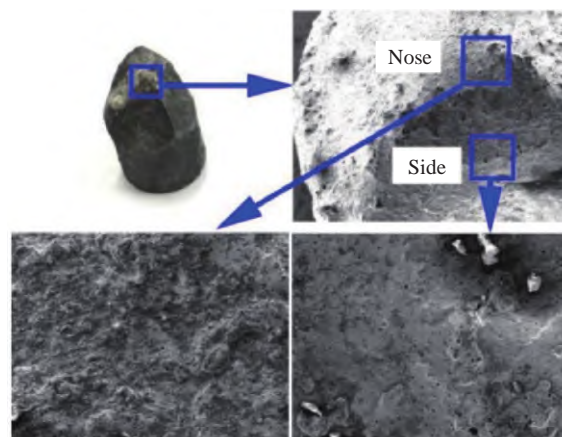


图 24 高速撞击后高熵合金回收破片微观结构<sup>[72]</sup>

Fig. 24 Microstructure of high-entropy alloy fragments after high speed impact<sup>[72]</sup>

### 2.3 活性无序合金破片侵彻毁伤后效

高速撞击下, 活性无序合金破片撞击靶板破碎诱发化学释能反应, 靶后碎片云对靶标产生高温、高

压耦合毁伤作用形成毁伤区, 能够增强对目标的毁伤效果。

杨林等<sup>[73]</sup>研究了  $Zr_{77.1}Cu_{13}Ni_{9.9}$  非晶合金破片侵彻 LY12、TC4 靶板及其后效毁伤特性。结合实验数据与数值模拟计算定量地确定了破片破碎程度、飞散角及毁伤后效等关键信息, 如图 25<sup>[73]</sup> 所示。由于 TC4 靶板等效应力的最大值约为 LY12 靶板的 3 倍, 破片穿透 TC4 靶板后残余破片的剩余速度相对较低, 使得破片的破碎程度更高、形成的碎片云分布范围更广, 从而延长了对后效靶的撕裂损伤阶段, 增强了碎片的后效毁伤能力。

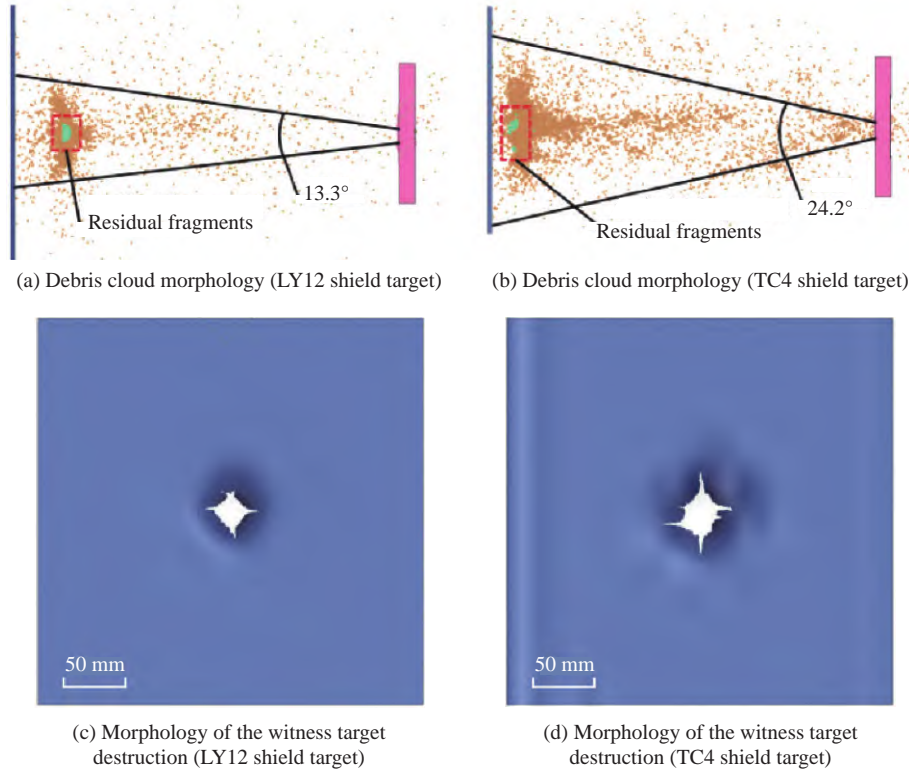


图 25 非晶破片毁伤后效仿真结果<sup>[73]</sup>

Fig. 25 Simulation results of amorphous fragmentation damage aftermath<sup>[73]</sup>

虽然锆基非晶合金的能量密度高, 但其低密度与脆性特性限制了其在破片上的直接应用。利用 W/Zr 基非晶合金复合材料的大密度、高强度及释能特性, 张玉令等<sup>[11]</sup> 设计了如图 26 和图 27 示的 W/Zr



图 26 W/Zr 基非晶合金预制破片<sup>[11]</sup>

Fig. 26 W/Zr-based amorphous alloy fragments<sup>[11]</sup>

基非晶合金榴弹预制破片, 并进行了爆炸毁伤试验。从图 28<sup>[11]</sup> 中典型时刻高速摄影图片可以看出, 弹丸爆炸后, 预制破片飞散撞击和贯穿不同距离处靶板, 产生强烈的火光, 充分表现了锆基非晶合金的释能特性。如图 29 和图 30 所示, 根据预制破片和自然破片的破坏特性, 可以发现, 靶板上形状大小相近的穿孔为非晶合金破片所致, 非晶合金破片侵彻靶板后产生的高温产物能够引燃靶后油箱。侵彻能力强、单位体积能量密度高的 W/Zr 基非晶合金复合材料破片在预制战斗部上表现出很好的应用前景。

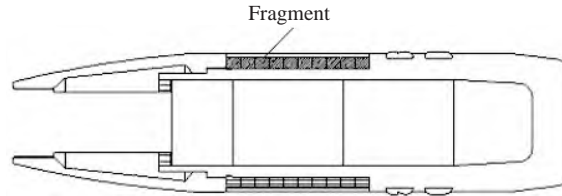
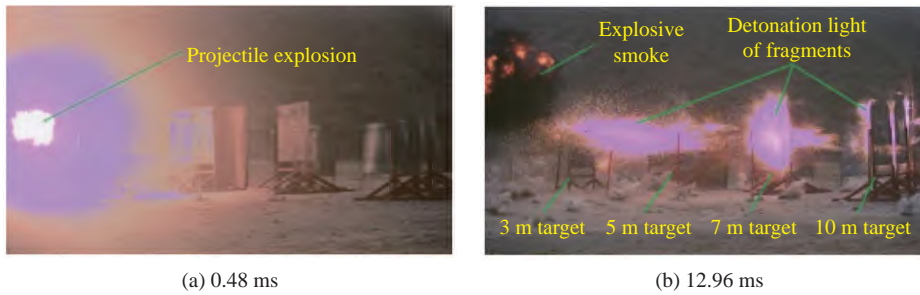


图 27 预制破片布置方式<sup>[11]</sup>

Fig. 27 Arrangement of performed fragments<sup>[11]</sup>



(a) 0.48 ms

(b) 12.96 ms

图 28 典型时刻高速摄影图片<sup>[11]</sup>

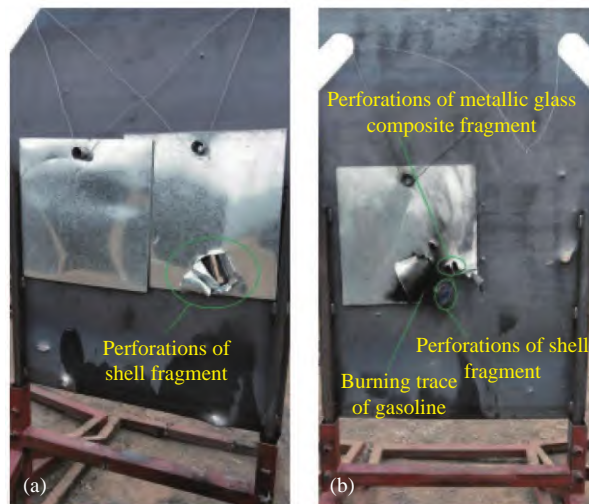
Fig. 28 High-speed photographs at typical moments<sup>[11]</sup>



图 29 棉被和油箱毁伤情况<sup>[11]</sup>

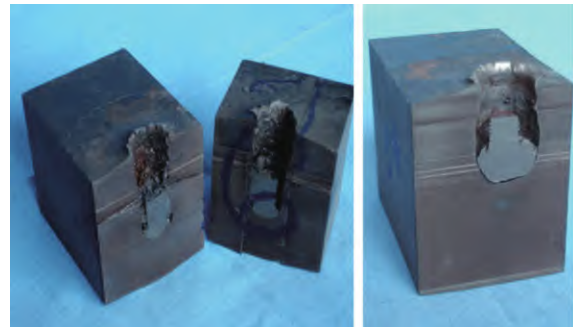
Fig. 29 The damage of quilts and fuel tanks<sup>[11]</sup>

无序合金作为破片材料, 主要依赖其高强度以及冲击释能特性。在高速加载条件下, 破片撞击目标诱发化学释能反应, 产生高温高压的毁伤效果对目标侵彻穿孔, 表现出优异的侵彻毁伤能力。

图 30 破片侵彻后油箱<sup>[11]</sup>Fig. 30 The oil tank penetrated by fragments<sup>[11]</sup>

### 3 活性无序合金穿甲弹芯侵彻特性

随着各装甲及防护结构的不断提升,弹靶对抗日益激烈。为保证动能武器在对抗中的优势地位,亟待提升杆式穿甲弹的威力。弹体长径比和弹芯材料是影响弹体穿甲威力的主要因素,但增大长径比会使弹体在发射、飞行等过程中出现断裂、弯曲、屈曲等一系列问题<sup>[74-75]</sup>。常用的弹芯材料主要有高密度的钨合金和贫铀合金,但钨合金杆弹在侵彻过程中容易变形形成“蘑菇头”增大侵彻过程的阻力,进而影响弹体的侵彻性能;贫铀合金的侵彻自锐虽然表现出比钨合金优秀的侵彻性能,但其具有辐射有害性,很难推广应用<sup>[76]</sup>。为进一步增强穿甲弹芯穿甲威力,学者们的目光逐渐转向性能优异的新型材料。如图 31<sup>[77]</sup>所示,具有高密度、高强度及剪切自锐性的钨丝增强非晶合金复合材料是其发展的重要方向之一<sup>[78]</sup>。

图 31 复合材料弹芯的“自锐”和钨合金弹芯的“墩粗”<sup>[77]</sup>Fig. 31 “Self-sharpening” of composite core and the “upsetting” of tungsten alloy core<sup>[77]</sup>

#### 3.1 活性无序合金弹芯侵彻行为宏观分析

绝热剪切是材料剧烈变形过程中一个较为普遍的现象。活性无序合金材料具备高密度、高强度及绝热剪切特性<sup>[79-82]</sup>,是一种潜在的良好穿甲弹芯材料。穿甲过程中,弹靶接触区域升温快,更易形成绝热带并发展成裂纹,使得弹芯头部材料不断剥落形成尖锐的头部,进而减少弹体侵彻阻力,形成较大穿深。

如图 32<sup>[82]</sup>所示,在侵彻过程中,钨丝/锆基非晶合金复合材料弹体头部能够发生侵彻自锐,减小弹体受到阻力从而增强对靶板的穿甲效果。与相同条件下的钨合金相比,钨丝/锆基非晶合金复合材料弹芯的侵彻能力能够提升 10% 以上。因此,学者们针对不同结构钨丝/锆基非晶合金复合材料,分析了弹芯的侵彻性能与弹芯的着靶速度<sup>[83]</sup>、钨丝的直径<sup>[84]</sup>、复合材料界面的强度<sup>[85]</sup>及弹芯的长径比等因素的关联关系。

图 33 给出了弹芯的侵彻性能与着靶速度(动能)及之间的关系。随着撞击速度的增加,弹芯侵彻深度逐渐增大。四种长径比杆弹中,除长径比为 1.11 的护套结构钨丝/锆基非晶合金复合材料杆弹外,其余三种长径比的钨丝/锆基非晶合金复合材料杆弹侵彻效率都高于钨合金杆弹。



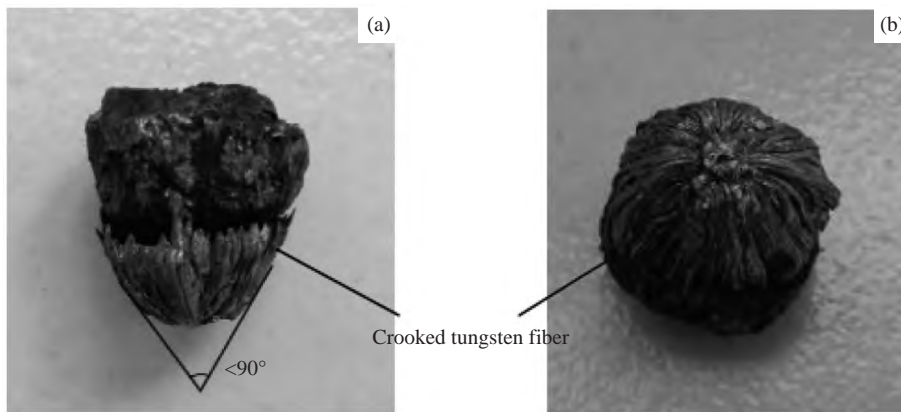


图 32 弹芯残体照片<sup>[82]</sup>

Fig. 32 Pictures of penetrator residual<sup>[82]</sup>

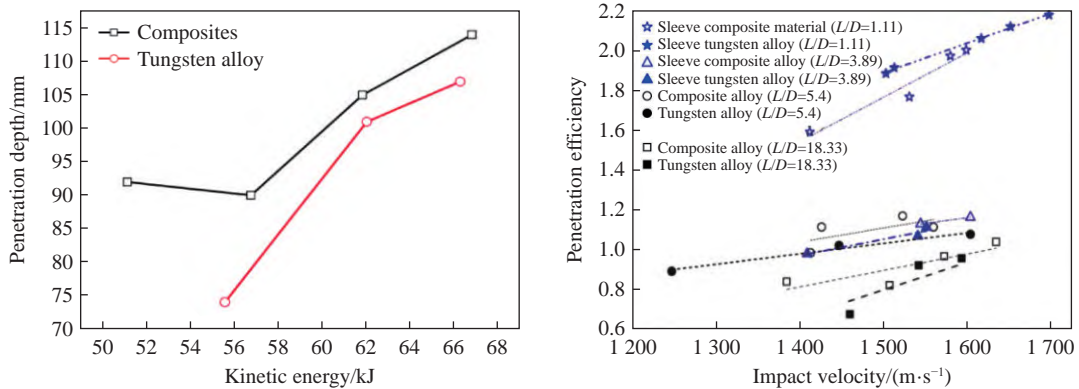


图 33 钨丝/锆基非晶复合材料侵彻深度与着靶动能及长径比的关系曲线<sup>[80, 86]</sup>

Fig. 33 Curves of kinetic energy and penetration depth of Wf/Zr-MG and WHA rods<sup>[80, 86]</sup>

图 34<sup>[86]</sup> 给出了弹芯直径影响靶板侵彻深度的实验结果: 侵彻速度高于 1400 m/s 后, 选择含有 0.3 mm 钨丝的复合材料更合适; 侵彻过程中, 当钨丝直径过大时, 钨丝/锆基非晶复合材料杆弹容易出现弹道偏转等不稳定情况; 而钨丝直径过小时, 高速侵彻时会出现小“蘑菇头”侵彻模式, 容易在侵彻孔道中残留钨丝残体造成堵塞。因此, 杜成鑫等<sup>[86]</sup> 设计了三种含有多组分的钨丝/锆基非晶复合材料, 如图 35 所示。实验结果表明, 三种结构杆弹在侵彻过程中都展现了显著的侵彻“自锐”特性。由于第一组结构中钨合金

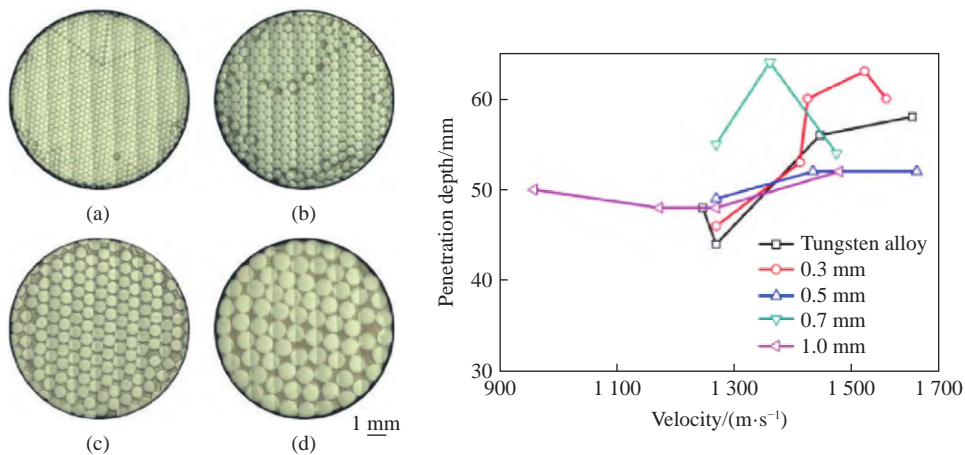


图 34 不同直径钨丝/锆基非晶复合材料着靶速度-侵彻深度关系<sup>[86]</sup>

Fig. 34 Relationship between penetration depth and impact velocities of different Zr-based composite materials<sup>[86]</sup>

材料在侵彻过程中塑性变形较大, 导致其头部形状和均质钨合金杆弹头部形状相似。第二种结构外侧  $\varnothing 0.3$  mm 的钨丝失去钨基非晶合金基体的限制后在杆弹和弹坑壁之间弯曲、回流, 堆积在杆弹后方; 随后  $\varnothing 0.5$  mm 的钨丝变形时将包裹在  $\varnothing 0.3$  mm 钨丝已回流的外部弯曲、回流, 残留在弹坑内部, 同理, 依次堆积, 所以第二种结构杆弹侵彻弹坑残留的钨丝较多。而第三种结构杆弹侵彻弹坑几乎没有钨丝残留, 这种结构杆弹头部保持圆锥形状, 形成一种结构“自锐”, 即第三种结构杆弹的侵彻“自锐”效果最优。

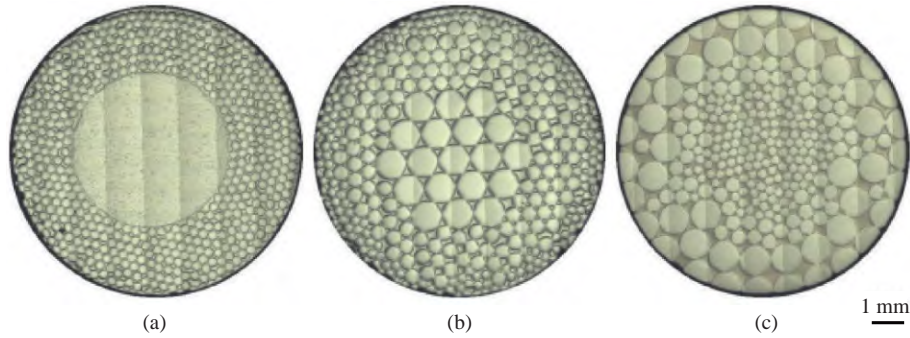


图 35 多组分钨丝/钨基非晶合金复合材料杆弹横截面<sup>[86]</sup>

Fig. 35 The cross section of multi-component Wf/Zr-based amorphous composite rod projectiles<sup>[86]</sup>

为抑制小长径比弹芯侵彻过程中的劈裂现象, 杜成鑫等<sup>[86]</sup>还设计了一种护套结构, 结合分段弹侵彻增益原理<sup>[87]</sup>增加了隔片结构, 有效地阻止了材料的劈裂现象且提高了弹芯侵彻能力(如图 36 所示)。

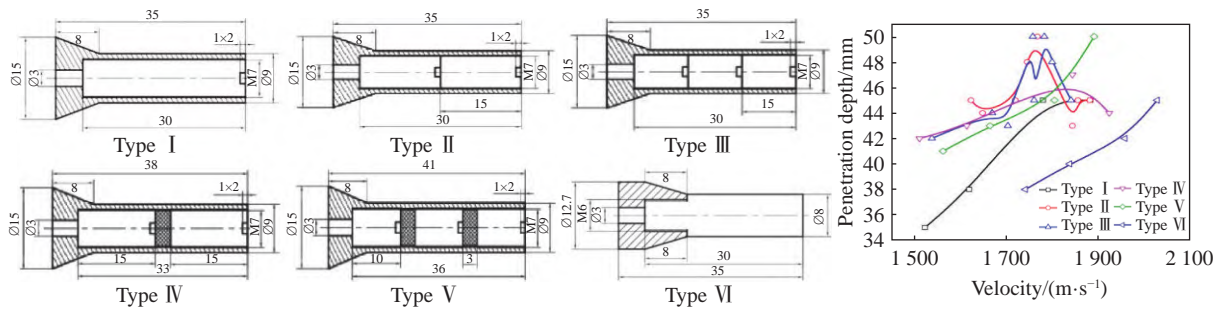


图 36 分段式钨丝/钨基非晶合金复合材料杆弹及侵彻结果(单位: mm)<sup>[86]</sup>

Fig. 36 Segmented Wf/Zr-based amorphous composite rod projectiles and penetration results (unit: mm)<sup>[86]</sup>

此外, 针对典型无序合金材料的冲击释能特性, 林琨富等<sup>[88]</sup>以钨基非晶合金为夹芯, 钨合金为套筒, 设计了钨基非晶-钨合金夹芯结构长杆弹, 讨论了非晶夹芯弹体能量释放特性对弹体侵彻毁伤能力的影响。如图 37<sup>[88]</sup>所示, 钨基非晶合金材料在侵彻过程中发生释能反应, 使得靶板孔道内温度、压力上升,

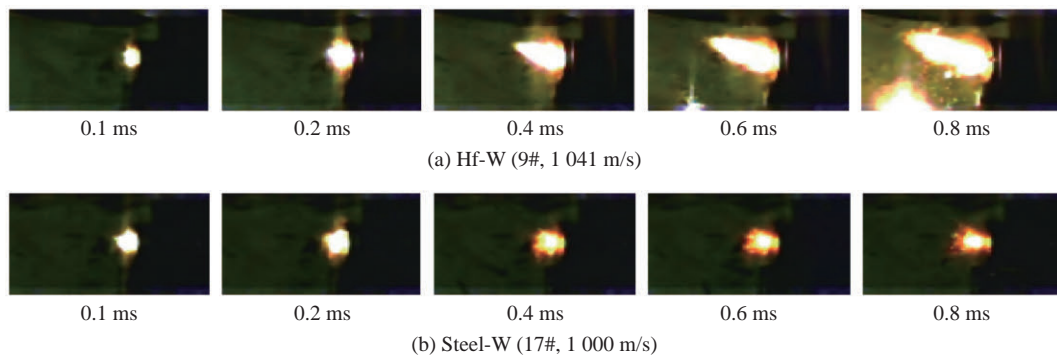


图 37 弹体侵彻靶体的高速摄像<sup>[88]</sup>

Fig. 37 High-speed video photographs of the projectiles penetrating the targets<sup>[88]</sup>

靶板在高压作用下形成不规则沟槽。如图 38<sup>[88]</sup> 和图 39<sup>[88]</sup> 所示, 相比于惰性钢-钨合金夹芯长杆弹, 钎基非晶-钨合金夹芯长杆弹相同动能下侵彻深度最大增幅为 13.1%, 侵彻弹孔体积最大增幅达 54.3%。

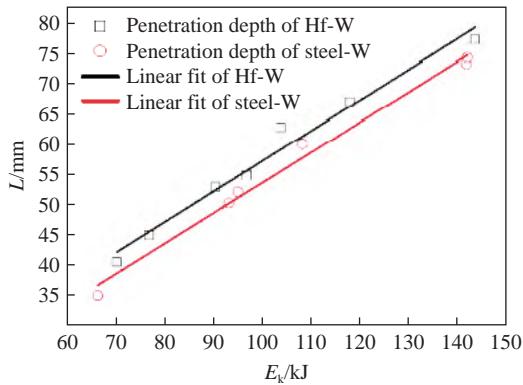


图 38 长杆弹侵彻深度和撞击动能的关系<sup>[88]</sup>

Fig. 38 Relation between penetration depth and kinetic energy of long rod projectiles<sup>[88]</sup>

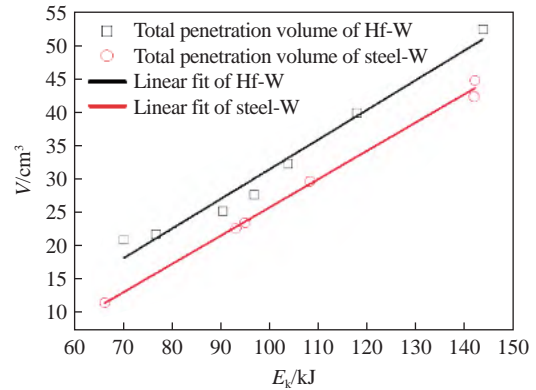
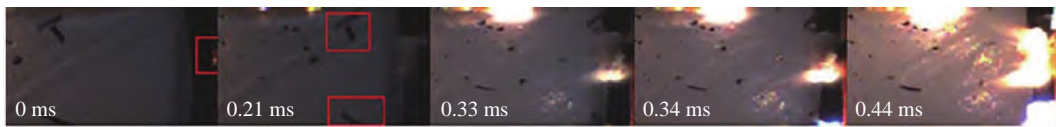


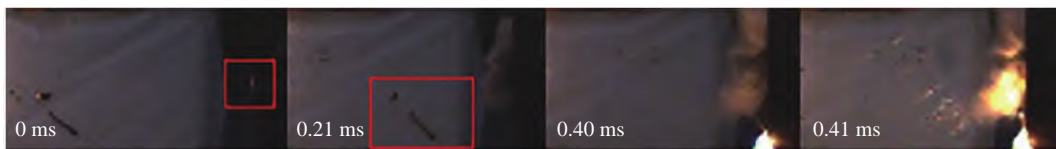
图 39 长杆弹弹孔体积和撞击动能的关系曲线<sup>[88]</sup>

Fig. 39 Relation between total penetration volume and kinetic energy of long rod projectiles<sup>[88]</sup>

同样地, 相比于惰性钢-钨合金夹芯长杆弹, 钎基非晶合金-钨合金夹芯长杆弹撞击混凝土靶体时发生化学释能反应出现明显火光<sup>[89]</sup>。释能反应引起了高温高压的气体膨胀, 对受损的混凝土靶体产生抛掷作用, 造成了大量混凝土碎屑和坍塌, 如图 40<sup>[89]</sup> 所示。实验结果(图 41<sup>[89]</sup>)表明: 与惰性钢-钨合金夹芯长杆弹相比, 钎基非晶合金-钨合金夹芯长杆弹对混凝土靶体的侵彻深度和开坑体积均大幅度提升, 钎基非晶合金-钨合金夹芯弹可有效提升其侵彻毁伤能力。



(a) Hf-based amorphous alloy-W alloy jacketed LRP ( $v=1\ 415\ \text{m/s}$ )



(b) Steel-W alloy jacketed LRP ( $v=1\ 372\ \text{m/s}$ )

图 40 弹体侵彻靶板典型过程<sup>[89]</sup>

Fig. 40 Typical frames of the projectiles penetrating the targets<sup>[89]</sup>



(a) Hf-based amorphous alloy-W alloy jacketed LRP ( $v=1\ 415\ \text{m/s}$ )

(b) Steel-W alloy jacketed LRP ( $v=1\ 372\ \text{m/s}$ )

(c) Steel jacketed LRP ( $v=1\ 372\ \text{m/s}$ )

图 41 弹体侵彻后靶板表面毁伤效果<sup>[89]</sup>

Fig. 41 The targets damaged surface after the projectiles penetrating<sup>[89]</sup>

### 3.2 活性无序合金弹芯侵彻行为细观分析

随着材料观测技术的发展,从细观角度对材料的行为特征进行分析越发受到重视,有助于揭示弹体侵彻变形机理。高应变率载荷下,活性无序合金穿甲弹芯细观组织的变化对其冲击变形行为的影响显著。

荣光等<sup>[79]</sup>和陈小伟等<sup>[81]</sup>对钨丝/锆基非晶合金复合材料残余杆弹的细观分析发现,在 500~1100 m/s 的撞击速度范围内,弹体的破坏形式主要为局域化的剪切变形和断裂,呈现 4 种“自锐”剪切失效模式:模式 1,穿钨丝内部剪切断裂,(图 42(a));模式 2,穿钨丝的脆性断裂,(图 42(b));模式 3,Zr 基非晶合金基体的剪切破坏,(图 42(c));模式 4,钨丝和 Zr 基非晶合金基体的熔化破坏,(图 42(d))。如图 43 所示,由于钨丝/锆基非晶合金复合材料属于单向纤维增强复合材料,高速冲击下,材料受到高温、高压作用,纤维方向容易发生纤维屈曲、纤维回流、基体微裂等行为,表现为动态劈裂、弯曲断裂、气化烧蚀等破坏形式<sup>[77]</sup>。综合上述,钨丝/锆基非晶合金复合材料杆弹的侵彻“自锐”机理解释为杆弹侵彻过程中发生塑性变形,由于钨丝抗剪切性能较差,塑性变形部分被剪断形成锐化的头部形状。

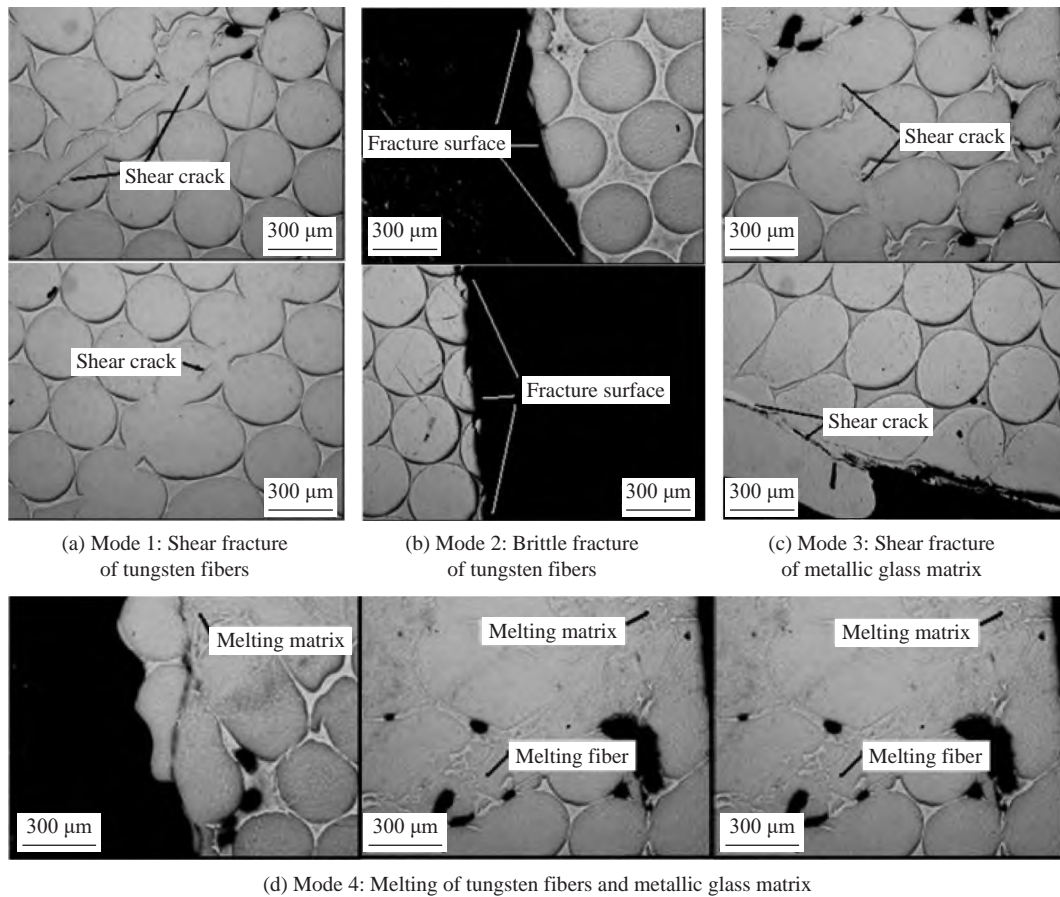


图 42 钨丝/锆基非晶合金复合材料自锐剪切失效的 4 种模式<sup>[81]</sup>

Fig. 42 Four modes of self-sharpening shear failure of Wf/Zr-based amorphous composites material<sup>[81]</sup>

Hou 等<sup>[90]</sup>通过实验研究,从细观角度观察了不同热处理后 FeNiCoCr 高熵合金长杆弹侵彻半无限钢靶后残余弹体的变形情况,如图 44<sup>[90]</sup>~图 45<sup>[90]</sup>所示。侵彻过程中,沿弹体侵彻方向的头部到尾部,弹体细观变形形式不同,孪晶/滑移带逐渐减少。当 FCC 结构高熵合金受到极端变形条件下的冲击载荷时,孪晶是一种主要的塑性变形模式(如图 44(a)选区电子衍射图案中红色的圆圈所示)。图 45 中多重孪晶和等轴超细晶粒的出现可以促成材料更高的强度进而提升弹体侵彻能力<sup>[51]</sup>。

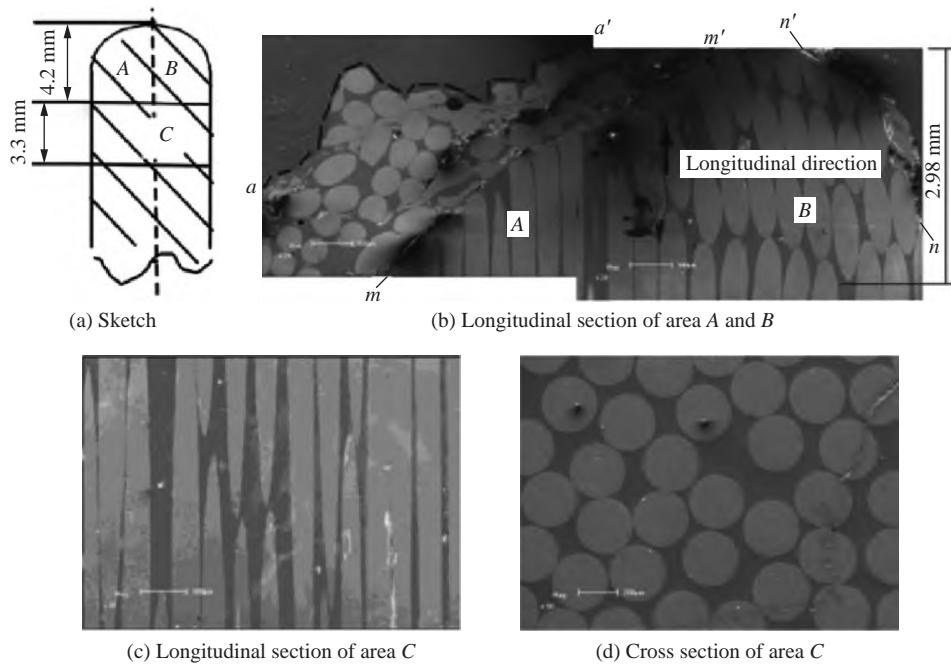


图 43 钨丝增强金属玻璃复合材料弹体残余弹体头部及其附近位置 SEM 图像<sup>[79]</sup>

Fig. 43 SEM images of tungsten wire reinforced metal glass composite residual projectile head and its vicinity<sup>[79]</sup>

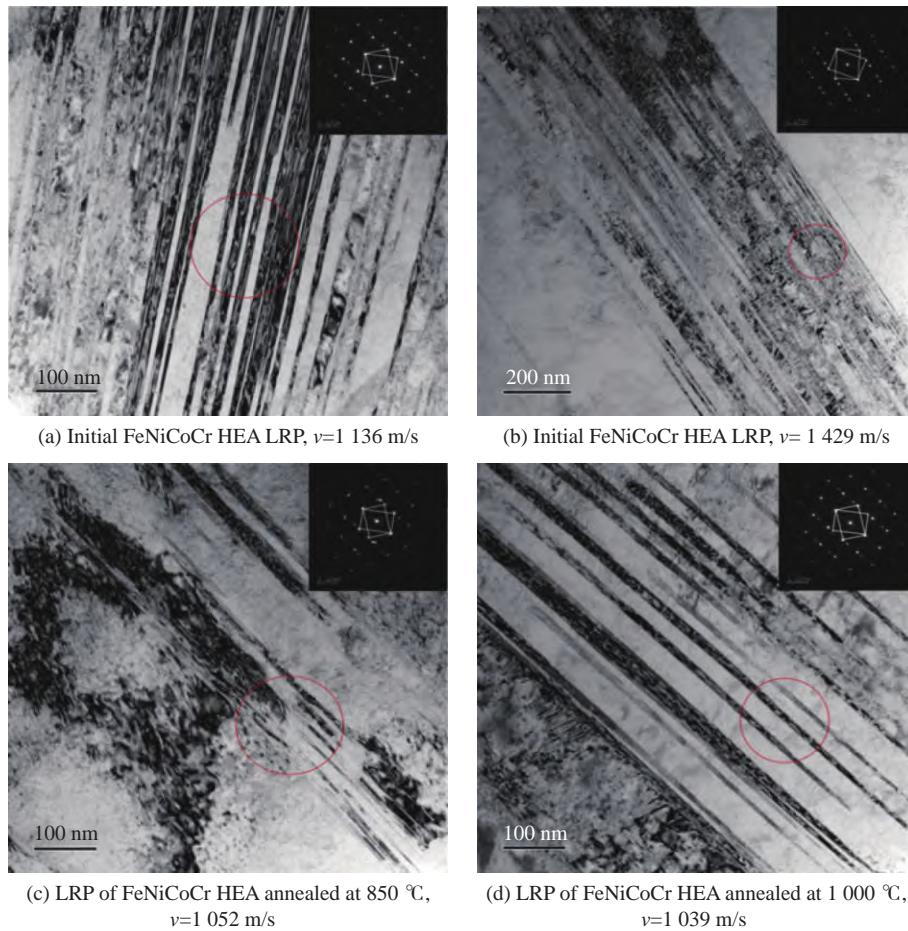
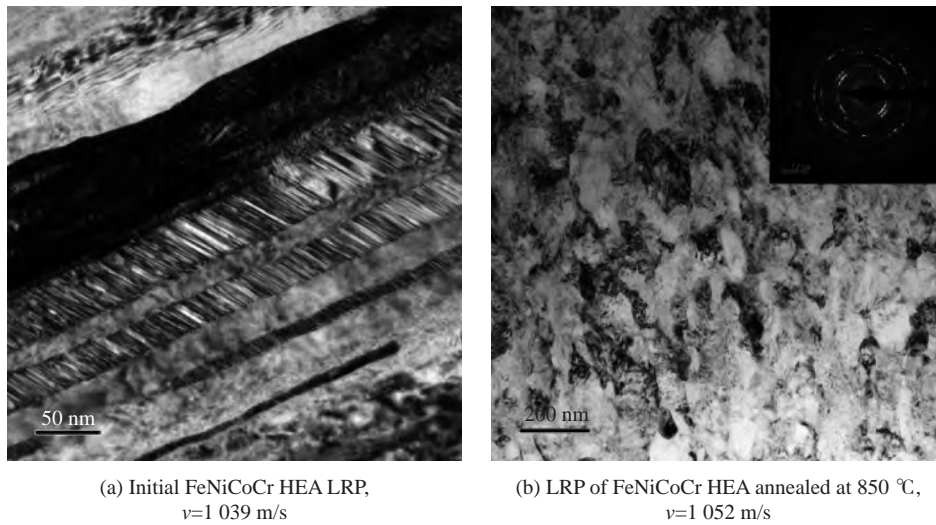


图 44 回收弹体 TEM 测试结果<sup>[90]</sup>

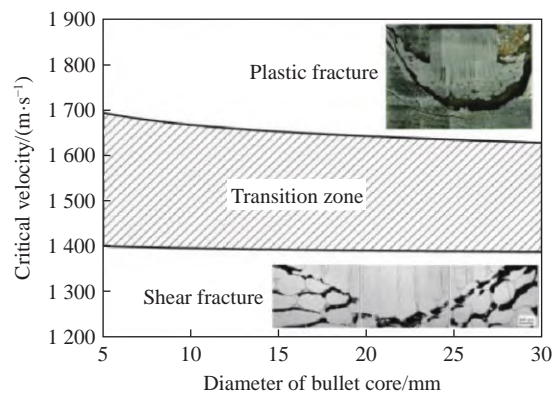
Fig. 44 Transmission electron microscope (TEM) bright-field images of LRP after impact<sup>[90]</sup>

图 45 回收弹体 TEM 明图中的变形孪晶和堆叠断层<sup>[90]</sup>Fig. 45 TEM results showing the multiple deformation twins and the stack faults<sup>[90]</sup>

### 3.3 活性无序合金弹芯侵彻作用机制

关于活性无序合金弹芯侵彻作用机制, 学者们根据弹芯侵彻靶板实验数据, 建立了理论模型。结合回收弹芯细观分析, 通过宏观参数描述了侵彻过程中弹芯变形与细观结构之间的关联机制。

为进一步探索钨丝/锆基非晶合金复合材料杆弹侵彻作用机制, 杜成鑫等<sup>[86]</sup>通过理论分析计算了材料温升和着靶速度之间的关系, 结合弹体侵彻宏观特性, 得到弹体断裂模式如图 46<sup>[86]</sup>所示。低速侵彻时, 锆基非晶合金发生非均匀脆性破坏, 导致钨丝/锆基非晶合金复合材料杆弹的断裂模式为绝热剪切断裂; 高速侵彻时, 锆基非晶合金为均匀的牛顿流体式的超塑性变形, 杆弹头部变形区的钨丝失去锆基非晶合金基体的约束, 导致钨丝/锆基非晶合金复合材料杆弹的断裂模式变成塑性断裂。在上述两种变形模式之间的速度区是钨丝/锆基非晶合金复合材料杆弹从绝热剪切破坏到塑性破坏的中间过渡态。

图 46 钨丝/锆基非晶合金复合材料杆弹不同着靶速度下的侵彻断裂模式<sup>[86]</sup>Fig. 46 Fracture modes of Wf/Zr-based amorphous composite projectile at different impact velocities<sup>[86]</sup>

Liu 等<sup>[9]</sup>设计了一种新型的自锐高熵合金材料(WFeNiMo), 开展了不同撞击速度下 WFeNiMo 高熵合金和 93W 弹体侵彻钢靶实验研究。其中, 高熵合金材料由 BCC 枝晶相和镶嵌在连续 FCC 基体中的  $\mu$  相组成, 具有优异的强度(1.9 GPa)和延展性(29%)。如图 47<sup>[9]</sup>所示, 相同单位体积动能下, WFeNiMo 高熵合金对靶体的侵彻深度较钨合金有明显的提升。侵彻过程中, 超高硬度的拓扑密排  $\mu$  相析出物的存在, 促进了合金非均匀变形, 使析出物与 FCC 基体之间产生了较大的应变梯度。储存的能量表现出与应变梯度相关的高密度位错, 驱动动态再结晶软化, 导致剪切带的形成和由此产生的侵彻自锐行为, 提升弹体侵彻能力。

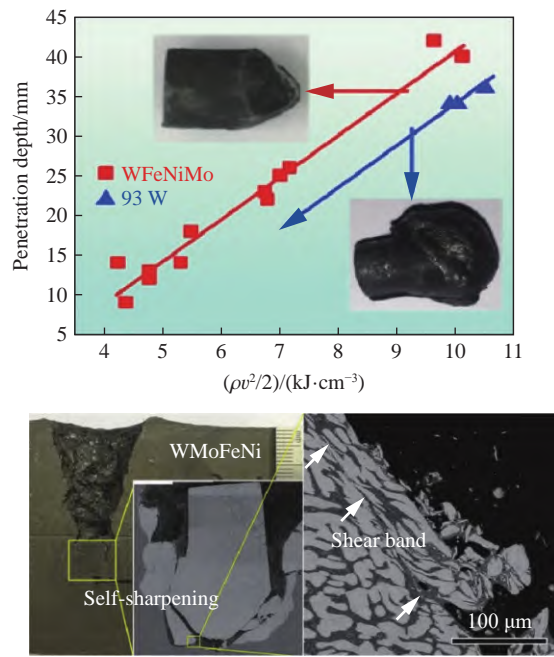


图 47 WFeNiMo 和 93W 长杆弹对靶体的侵彻深度与动能关系<sup>[9]</sup>

Fig. 47 Depth of WFeNiMo rod and 93W rod penetrating targets versus kinetic energy<sup>[9]</sup>

进一步,陈海华等<sup>[91]</sup>探究了 WFeNiMo 高熵合金弹体在侵彻过程中宏观变形行为与材料微观结构之间的联系。对两相流动模型进行简化建立了考虑软、硬相密度,流速以及浓度差异的等截面直管两相流动演化模型,如图 48<sup>[91]</sup>所示。提出表征材料浓度演化速率的流动稳定系数,对比了钨铜合金(W<sub>70</sub>Cu<sub>30</sub>)弹体微观结构演化行为。如图 49<sup>[91]</sup>所示,结果表明,总体上硬相浓度分布表现出“中心浓、边缘稀”的特点;硬相的浓度越高,密度越大,驱动速度越快,因此流动稳定系数  $t/l_{\text{length}}$  ( $t$  为时间,  $l_{\text{length}}$  为硬相长度)值越小,侵彻过程中弹体的流动稳定性增强,弹体头部材料更加容易形成连续的塑性流动带。等截面直管两相流动演化模型可用于描述侵彻过程中弹体头部材料的流动稳定性,揭示了侵彻过程中弹体头部变形与两相结构之间的关联机制。

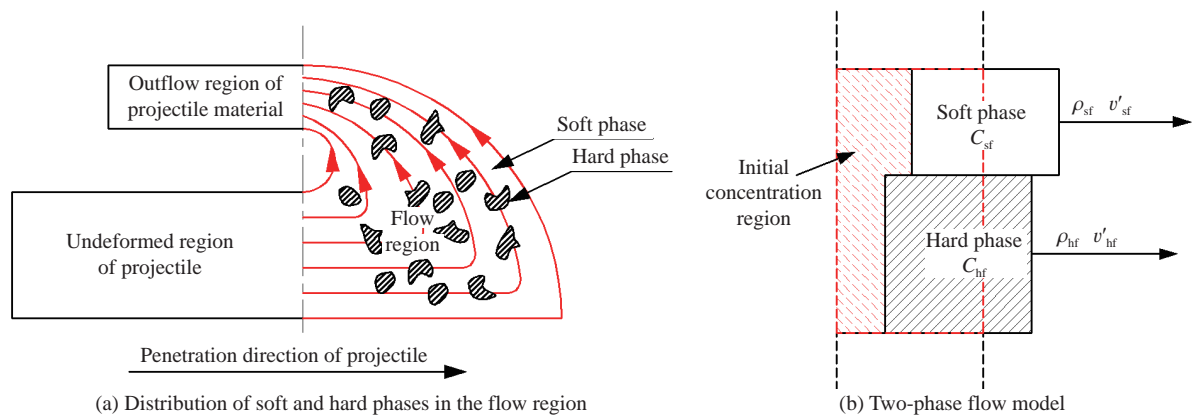


图 48 等截面直管内两相的流动模型<sup>[91]</sup>

Fig. 48 Model of two-phase flow in a straight pipe with equal cross section<sup>[91]</sup>

综上,通过弹体结构设计,分析侵彻过程中材料的宏观破坏特征以及关联机制,活性无序合金应用为穿甲弹芯表现出较为明显的优势。材料的剪切自锐和释能特性可使弹芯具有良好的侵彻穿透及毁伤性能,为穿甲材料的选取提供了技术路径。

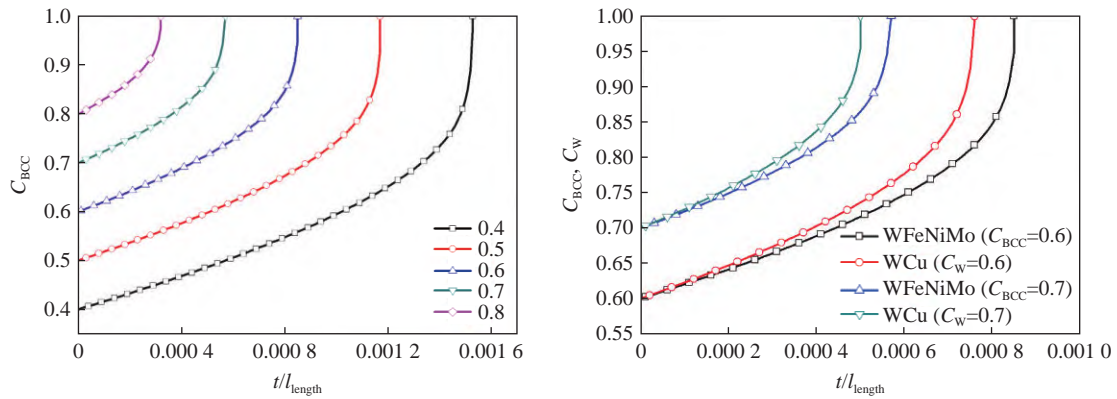


图 49 不同初始浓度及密度对硬相浓度演化的影响<sup>[91]</sup>

Fig. 49 Effect of initial concentration on concentration evolution of hard phase<sup>[91]</sup>

### 4 活性无序合金药型罩射流成型及侵彻特性

药型罩是聚能装药的关键部件, 药型罩材料是影响射流成型及其侵彻性能的重要因素。为了形成高侵彻能力的连续射流, 药型罩材料要求具有高密度、高声速、塑性好等特性<sup>[92]</sup>。与普通金属药型罩相比, 活性药型罩在满足动能侵彻的同时能够发生化学反应释能, 从而增强对目标的毁伤效果<sup>[93-94]</sup>。

#### 4.1 活性无序合金药型罩射流成型特性

高应变率加载下, 材料的宏观力学性能能够反映其射流拉伸成型能力。射流成型与稳定性是药型罩材料选取的重要依据, 较好凝聚性与稳定性的射流的侵彻性能会更好。具备高密度、高声速及化学释能特性的典型无序合金, 表现出应用于聚能装药药型罩材料的巨大潜力。

锆基非晶合金材料性能参数与传统的紫铜药型罩相差不大, 加上其具有释能特性, 因此, 2006 年美国陆军研究实验室武器和材料研究中心首次开展了  $Zr_{57}Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al_{10}Nb_5$  非晶合金药型罩的成型及侵彻试验研究<sup>[95]</sup>。如图 50 所示, 射流从右向左拉伸, 与传统射流形状相似。但射流放大图可以看出, 射流呈离散状态。Shi 等<sup>[96-97]</sup>在探讨材料宏观力学性能对射流性能的影响中, 也提出了锆基非晶合金射流成型的飞散特性, 如图 51 所示。

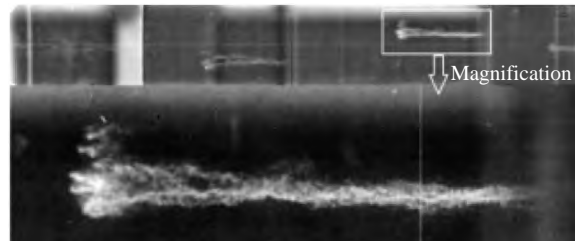


图 50  $Zr_{57}Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al_{10}Nb_5$  非晶合金射流成型形态<sup>[95]</sup>

Fig. 50 Shape of  $Zr_{57}Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al_{10}Nb_5$  jet forming<sup>[95]</sup>

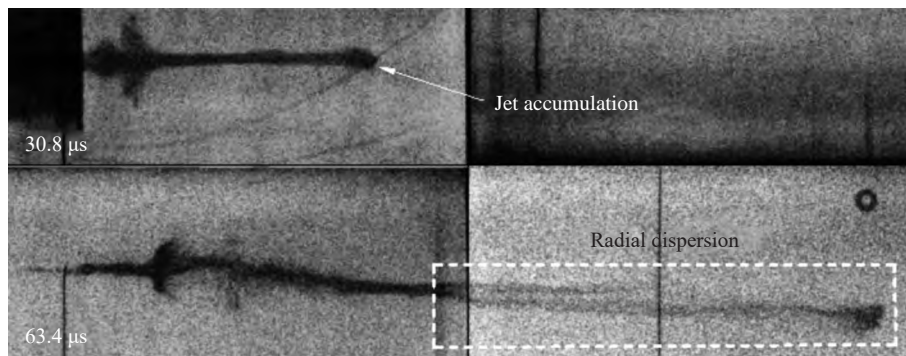


图 51  $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$  非晶合金射流成型形态<sup>[96]</sup>

Fig. 51 Shape of  $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$  jet forming<sup>[96]</sup>



考虑材料加工工艺对射流运动参数的影响, Cui 等<sup>[98]</sup> 分别采用真空压铸和过冷液相高流变两种方法制备锆基非晶合金药型罩, 进行对比实验。在力学性能方面, 真空压铸制备的锆基非晶合金衬板表现出脆性, 而过冷液相高流变制备的锆基非晶合金衬板表现出更好的室温塑性。在射流成型实验中, 铜箔靶测速得到塑性药型罩(H6)形成的射流速度比脆性药型罩(S10)高 7.0%。且从图 52<sup>[98]</sup> 中射流成型结果来看, 塑性药型罩射流的凝聚性比脆性药型罩的射流更好。

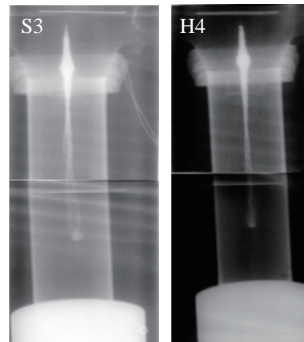


图 52 塑性和脆性药型罩形成的射流<sup>[98]</sup>

Fig. 52 Jets by plastic and brittle liner<sup>[98]</sup>

相对于锆基非晶合金, 周秉文等<sup>[99]</sup> 认为, Cu 基非晶合金容易制备, 成本低, 且具有高强度、高硬度等优异的力学性能, 作为药型罩材料具有良好的应用前景。采用 Linear 状态方程和 Drucker-Prager 本构模型, 建立二维仿真模型表征了 Cu 基非晶合金杆式射流特性。模拟结果(图 53<sup>[99]</sup>)显示, 与紫铜材料相比, Cu 基非晶合金具有良好的杆式射流成形性, 在成形过程中不易出现颈缩现象, 且较长时间内不被拉断, 具有优异的延展性。

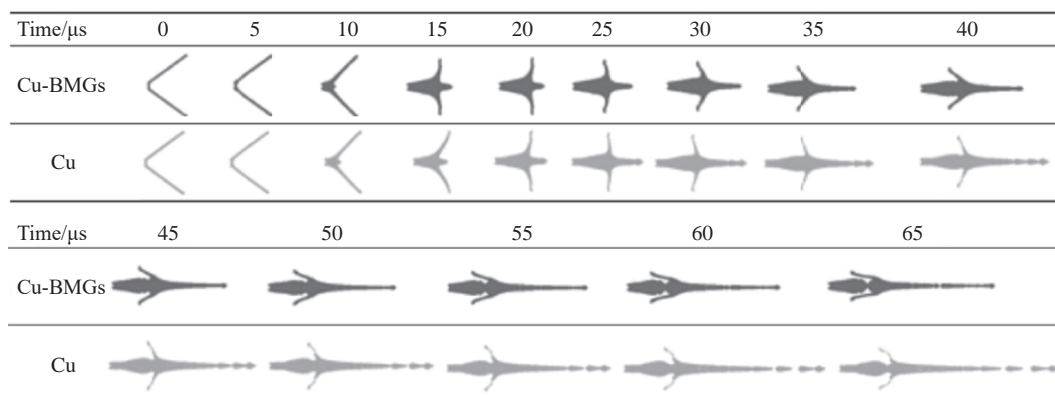


图 53 两种材料杆式射流不同时刻下的成形状态<sup>[99]</sup>

Fig. 53 Shape of rod jets about two materials at different times<sup>[99]</sup>

基于强塑性、高声速的 CrMnFeCoNi 五元高熵合金, 鄢阿敏等<sup>[100]</sup> 探索了无序合金射流成型及稳定性。开展动态压缩实验得到了材料的 Johnson-Cook (J-C) 动态本构模型参数, 利用流动速度与临界压垮角关系建立了高熵合金射流流动速度与临界压垮角关系, 结合数值仿真研究, 验证了射流形成边界的合理性, 如图 54<sup>[100]</sup> 和图 55<sup>[100]</sup> 所示。进一步, 探索了高熵合金材料动态强度对射流断裂时间的影响规律。由图 56<sup>[100]</sup> 可知, 随着材料硬化指数逐渐增大, 射流断裂时间逐渐减小然后趋于稳定, 与郑哲敏<sup>[101-102]</sup> 和 Chou 等<sup>[103]</sup> 从理论上给出的结论一致。这说明压垮过程中材料强度会随着塑性应变、应变率及温度发生动态变化, 当材料动态强度增大, 将会引起射流断裂时间下降。

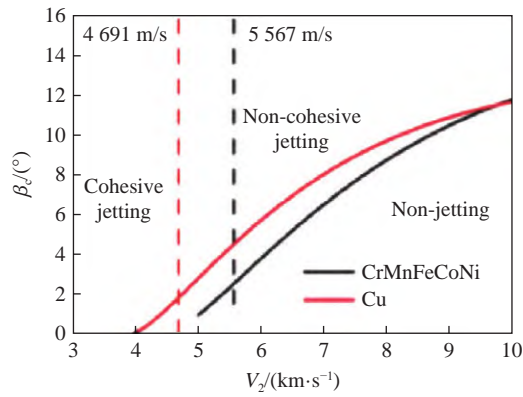


图 54 CrMnFeCoNi 与紫铜材料流动速度 ( $V_2$ ) 与临界压垮角 ( $\beta_c$ ) 关系<sup>[100]</sup>

Fig. 54 Relationship between flow velocity ( $V_2$ ) and critical crushing angle ( $\beta_c$ ) of CrMnFeCoNi and copper<sup>[100]</sup>

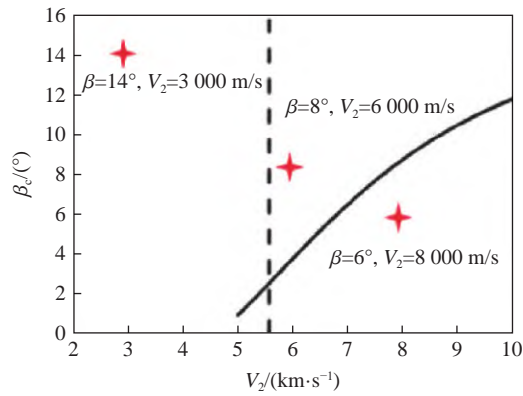


图 55 材料流动速度 ( $V_2$ ) 与临界压垮角 ( $\beta_c$ ) 曲线不同取值位置有限元仿真结果<sup>[100]</sup>

Fig. 55 Finite element simulation results of value positions of flow velocity ( $V_2$ ) and critical crushing angle ( $\beta_c$ ) curve<sup>[100]</sup>

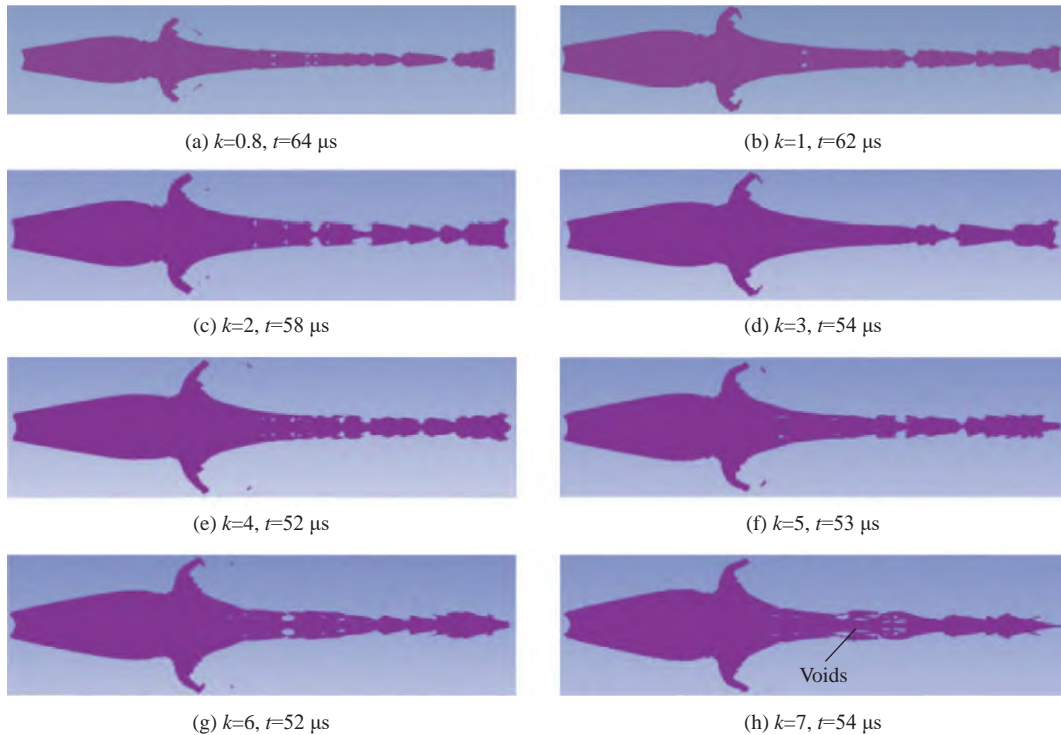


图 56 不同硬化指数  $k$  下射流形态对比<sup>[100]</sup>

Fig. 56 Comparison of jet shape under different hardening index ( $k$ )<sup>[100]</sup>

## 4.2 宏观因素对活性无序合金射流参数的影响

与惰性金属药型罩一样, 活性无序合金药型罩聚能装药结构及实验条件也是影响聚能装药性能的关键因素<sup>[104]</sup>, 不同装药结构及药型罩参数影响着射流的成型形态及稳定性。

Cui 等<sup>[105]</sup>以锆基非晶合金为药型罩材料, 对比研究了不同炸高对该类药型罩射流参数的影响。相同条件下, 随着炸高的增加, 锆基非晶合金药型罩对靶板的侵彻深度先缓慢增加后急剧减小, 其变化曲线如图 57<sup>[105]</sup>所示。最佳炸高约为 3.5 倍装药直径, 活性药型罩对 45 钢板最大侵彻深度约为装药直径的 2.68 倍。值得注意的是, 锆基非晶合金药型罩的射流侵彻深度小于铜药型罩, 而穿孔面积相反。在最佳炸高(3.5 倍装药直径)下, 前者侵彻深度约为后者的 55.7%, 但前者穿孔面积约为后者的 2.8 倍。结合 AUTODYN 软件数值模拟研究, Cui 等还讨论了锥角<sup>[106]</sup>、壁厚<sup>[106]</sup>、药型罩结构<sup>[107]</sup>等重要因素对该类药型罩射流参数的影响; 芦永进等<sup>[108]</sup>针对 Cu 基非晶合金设计了一种双层药型罩聚能装药结构, 通过数值仿真探究了 4 种 Cu 基非晶合金双层药型罩结构的射流成型及侵彻能力。

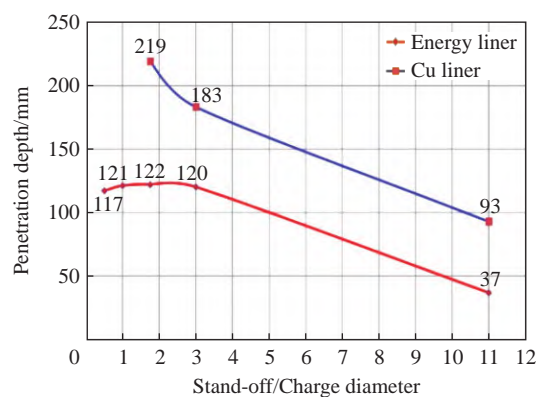


图 57 不同炸高下药型罩侵彻深度<sup>[105]</sup>

Fig. 57 Penetration depths of liners under different stand off<sup>[105]</sup>

Han 等<sup>[12]</sup>创新性地提出了一种 W/Zr 基非晶合金圆台段和铜球形段组合的复合药型罩, 如图 58<sup>[12]</sup>所示。复合药型罩的成型方式与常规一体化药型罩不同, 既有球形药型罩的成型机理, 又有锥形药型罩的成型机理。由于酚醛树脂强度较弱, 可等效为无壳内衬。装药起爆后, 爆轰波首先到达球形段顶部, 球形段被挤压加速, 与爆炸成型弹丸(EFP)翻转成形机制相似。此时, 球形段顶端微元的速度仅由爆轰波驱动。爆轰波继续向前传播。当爆轰波移动到圆台后, 圆台获得一个抛掷速度。此后, 圆台挤压球体段向轴线收敛, 球体段顶部的微元被二次加速形成射流尖端, 类似于经典锥形药型罩的射流成型过程。最终成型射流由带裙翼的梢部、刺状的中部和纺锤状的尾部组成, 根据药型罩结构及射流成型特性, 尖端由铜球段形成, 中间和尾部由 W/Zr 基非晶合金圆台形成。

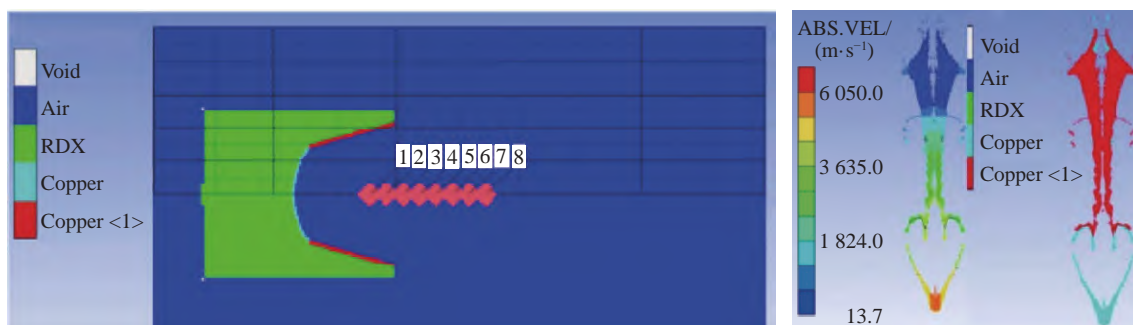
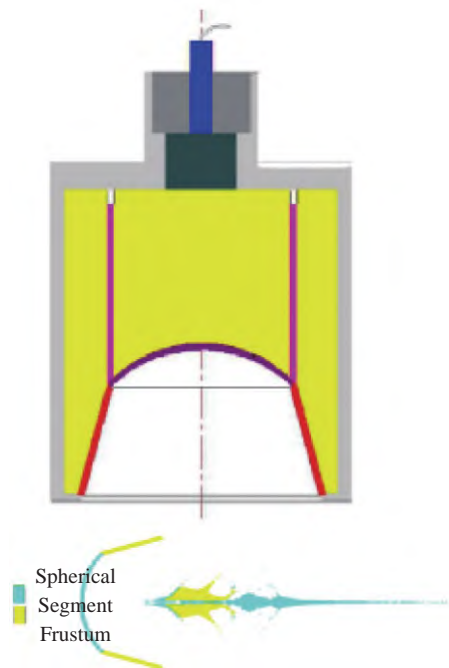


图 58 数值模拟模型及成型射流<sup>[12]</sup>

Fig. 58 Model and jet structure of numerical simulation<sup>[12]</sup>

基于上述结构, Han 等<sup>[109]</sup>进一步设计了一种内嵌约束筒的新型 W/Zr 基非晶合金复合药型罩。如图 59 所示, 内约束筒将装药分为内、外两个同轴柱, 改变了药型罩内材料的流动方式, 提高了炸药装药的利用率。对于球形段和圆台段, 可以设置为不同的材料, 使药型罩同时具有两种材料的优点, 获得所需性能的射流。其中, 圆台段结构相对简单, 降低了对材料可加工性的要求, 促进了新型材料在衬套中的应用。实验中 W/Zr 基非晶合金对靶板有很强的热效应和后效超压, 具有穿孔深度大、无杵体和后效高的优点。与铜射流相比, 使用 W/Zr 基非晶合金作为药型罩材料产生的射流对靶板的极限穿透深度增加了 66.35%, 并在穿透 100 mm 靶板后形成 0.24 MPa 的超压峰值, 而铜射流在穿透靶后形成小于 0.01 MPa 的扰动。

图 59 聚能装药结构<sup>[109]</sup>Fig. 59 Shaped charge<sup>[109]</sup>

### 4.3 活性无序合金射流侵彻行为微观分析

高温、高压及高应变率加载条件下, 无序合金射流与靶板之间的相互作用对其侵彻威力有直接影响。射流侵彻时靶板的微观组织演变对射流的侵彻行为有着重要影响。

为探究无序合金射流侵彻靶标作用机制, Han 等<sup>[12]</sup>回收了 W/Zr 基非晶合金圆台段复合药型罩射流侵彻后靶板, 对其横截面轮廓进行了微观观测。如图 60<sup>[12]</sup>所示。靶板截面从右到左分为四个区域<sup>[110-111]</sup>(图 60(b)): (I) W/Zr 基非晶合金残余区; (II) 马氏体区; (III) 剧烈变形区; (IV) 原始组织。孔壁的硬度与远离孔壁的位置有关, 反映了靶板的组织变化<sup>[112]</sup>。结合 XRD(图 61<sup>[12]</sup>)和 SEM(图 62<sup>[12]</sup>)的观测结果可以得出, 非晶喷射残留物区域检测到 Fe、W、ZrN 和非晶相, 而铜射流残余区域主要发现 Cu 和 Fe 相, 证明 W/Zr 基非晶合金在撞击靶板后发生相变和化学释能反应。所以, W/Zr 基非晶合金药型罩射流尖端速度低于铜药型罩射流尖端速度, 但前者能产生更大的穿孔和更高的后效超压。

Chen 等<sup>[113]</sup>国际上率先开展了具有优异韧塑性的 CrCoNi 中熵合金药型罩射流侵彻特性研究, 回收靶板观测出现明显分区, 如图 63<sup>[113]</sup>所示: 虚线表示区域 a1 和 a2 之间的边界, 白色实线表示钢靶(区域 a3)和残余射流(区域 a1 和 a2)的边界。在侵彻过程中, 射流与靶板侧壁相互作用引起射流的变形, 变形区的宽度反映了射流与靶板横向相互作用的强度以及射流能量<sup>[111,114]</sup>的横向耗散。残余射流中明显的动态再结晶现象导致晶粒尺寸严重减小。细化的晶粒结构能够适应聚能射流剧烈塑性变形中的大应变。为了进一步研究 CoCrNi 聚能装药药型罩在爆轰变形过程中的微观组织变化, 对残余射流的再结晶晶粒进行了高倍背散射电子(BSE)成像, 结果如图 64(a)所示, 可以观察到晶粒呈等轴状, 晶粒尺寸小于

1  $\mu\text{m}$ 。此外, 对一个完整的晶粒和两个晶界进行线扫描, Cr、Co、Ni 元素分布如图 64(b) 所示, 其中虚线用于标记晶界的位置。如图 65 所示, 与初始 CoCrNi 聚能装药药型罩中 Cr、Co、Ni 均匀分布不同, Cr 在晶界处的分布显著增加, Co 和 Ni 明显减少。Cr 在晶界的富集促进了聚能射流中相分解和富 Cr 的 BCC 相的形成<sup>[115]</sup>, 成为晶界移动的障碍, 阻碍裂纹沿晶界萌生, 这可能是 CoCrNi 成型射流的延展性和穿透能力不足的主要原因。

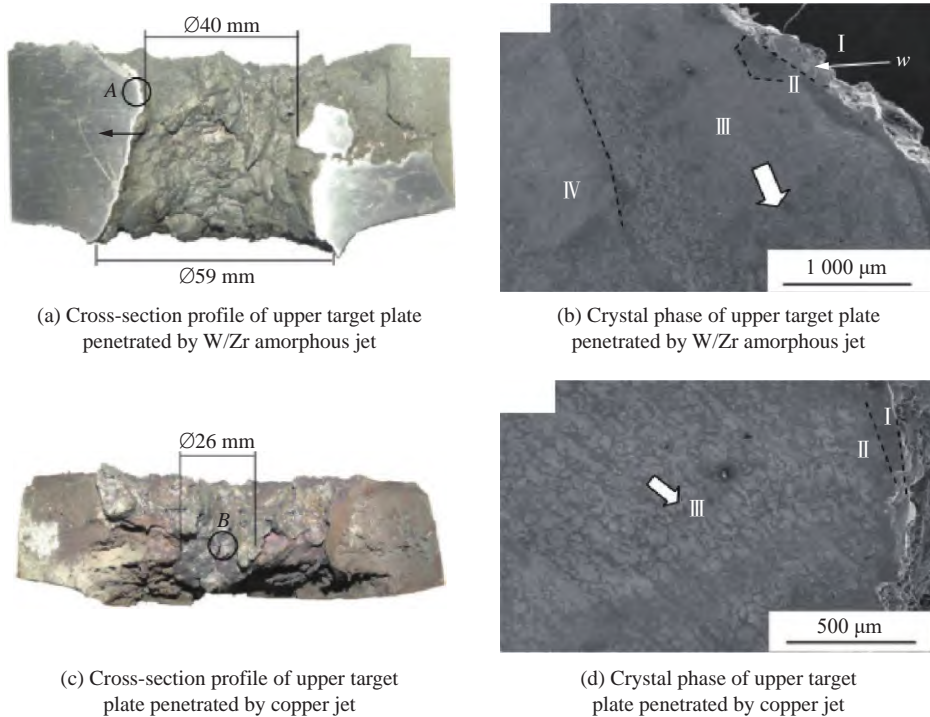


图 60 靶板截面形貌和晶相<sup>[12]</sup>

Fig. 60 Cross-section profile and crystal phase of target plate<sup>[12]</sup>

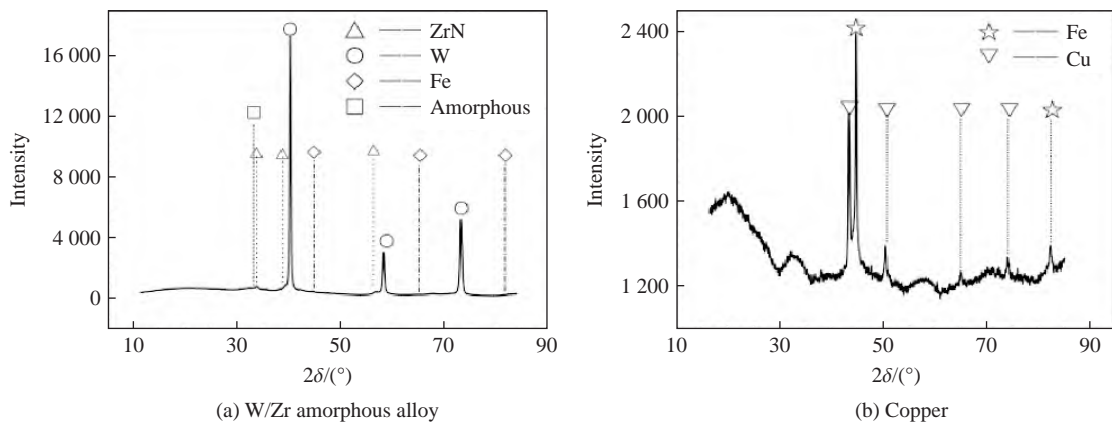


图 61 残余射流区的 XRD 谱<sup>[12]</sup>

Fig. 61 XRD spectrum of residual zone<sup>[12]</sup>

作为药型罩材料, 活性无序合金应保证在复杂的高温高压作用环境下能够形成高速稳定射流, 运动拉伸后对目标造成高效毁伤破坏。与传统的铜药型罩相比, 活性无序合金药型罩成型射流对炸高较为敏感, 容易形成离散粒子流。针对壁厚、锥角、炸高以及药型罩结构等关键因素的优化设计, 活性无序合金射流具有良好的存速、侵彻穿透及释能扩孔效果。

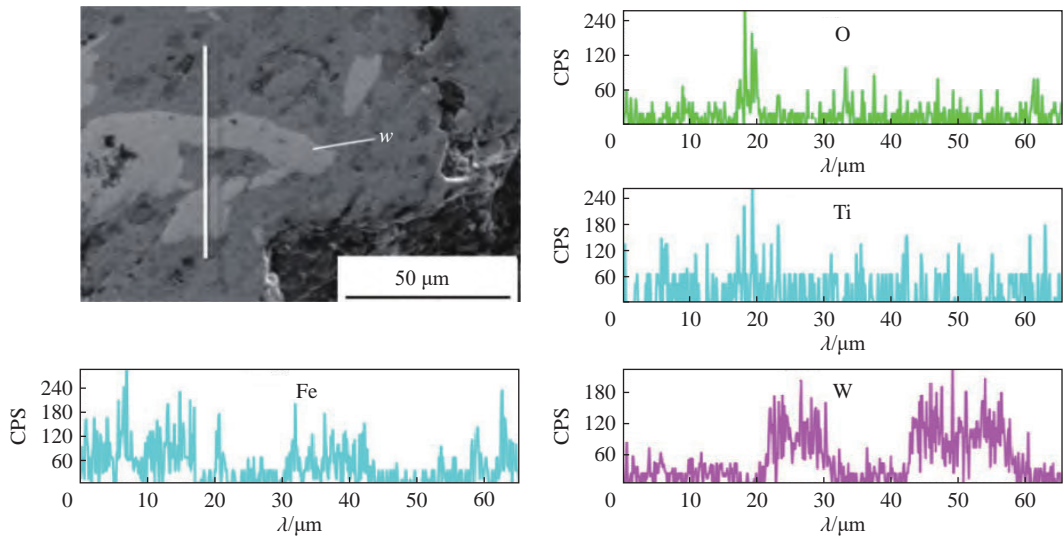


图 62 残余射流区的 EDS 谱<sup>[12]</sup>

Fig. 62 EDS spectrum of residual zone<sup>[12]</sup>

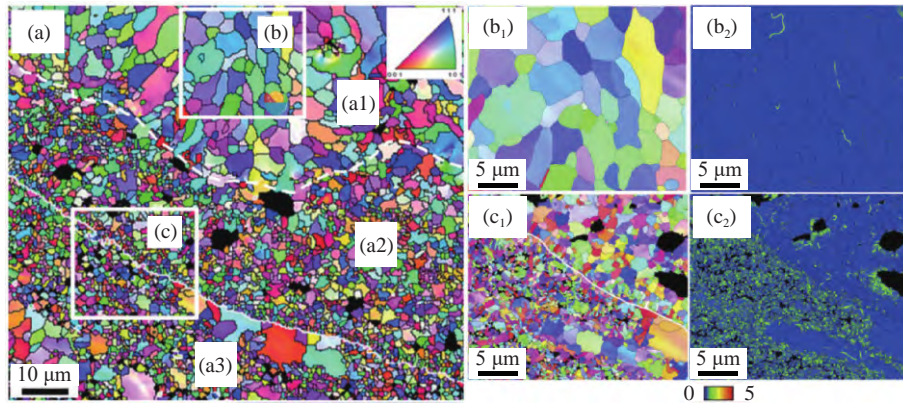


图 63 射流侵入后靶板的 EBSD 细观分析: (a) 变形区 IPF 图; (a) 中区域 b 的 (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>) IPF 图和对应的 KAM 图; (a) 中区域 c 的 (c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>) IPF 图和对应的 KAM 图<sup>[113]</sup>

Fig. 63 Microstructural analysis of the residual jet after penetration via EBSD: (a) IPF map of deformation zone; (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>) IPF map and corresponding KAM map of region b in (a); (c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>) IPF map and corresponding KAM map of region c in (a)<sup>[113]</sup>

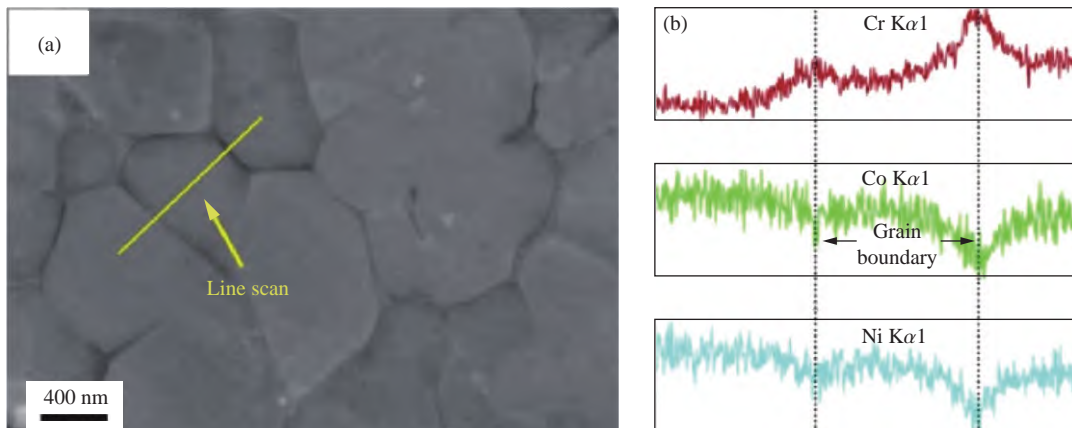


图 64 再结晶区的高倍 BSE-SEM 图像 (a) 及线扫描分析 (b): 在 (a) 中显示的两个晶界上进行线扫描, 其对应的位置在 (b) 中用虚线标记<sup>[113]</sup>

Fig. 64 High-magnification BSE-SEM images (a) and line scan analysis (b) of the recrystallization region: a line scan was conducted across two grain boundaries as displayed in (a), the corresponding locations of which are labeled with dashed lines in (b)<sup>[113]</sup>

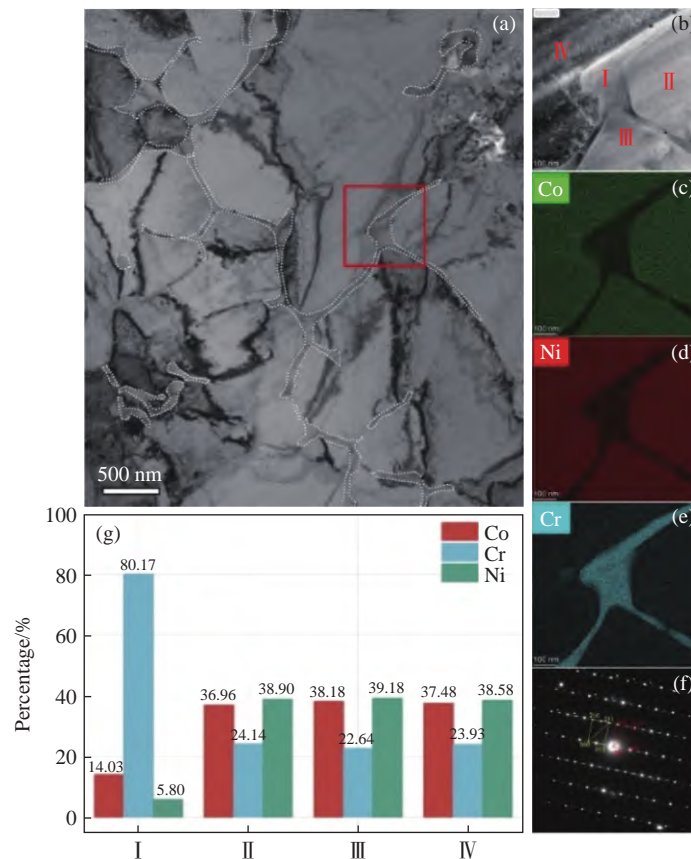


图 65 CoCrNi 残余射流侵彻后的 TEM 组织分析: (a) CoCrNi 残余射流的 TEM 照片, 其中的白色虚线标记了沿晶界的纳米尺寸沉淀; (b) 降水(图 (a) 中的红色矩形区域)的 HAADF-TEM 照片; (c~e) 图 (b) 中对应的 Co、Cr、Ni 元素分布; (f) 降水 SAED 图(区域 I(b)), (g) 图 (b) 中 I、II、III、IV 区域 Co、Cr、Ni 元素含量<sup>[113]</sup>

Fig. 65 Microstructural analysis of CoCrNi residual jet after penetration by TEM: (a) TEM images of CoCrNi residual jet, where the white dashed line marks the nanosized precipitations along grain boundaries; (b) HAADF-TEM image of the precipitation (red rectangle region in (a)); (c~e) Corresponding element distributions of Co, Cr, and Ni in (b); (f) SAED pattern of precipitation (region I in (b)); (g) Element content of Co, Cr, and Ni in region I, II, III, IV in (b)<sup>[113]</sup>

## 5 结论与展望

近年来,关于活性无序合金冲击释能特性的研究,主要通过实验观察了活性无序合金材料在宽应变率范围内的变形行为、化学反应释能作用过程及基本现象与特性,分析了撞击速度、材料组成元素及靶标特征等因素对材料冲击释能特性的影响规律。对于破片、穿甲弹芯和聚能装药三个方向,研究者们主要关注活性无序合金毁伤元的侵彻行为及作用机制,材料冲击变形力学行为、剪切自锐及冲击释能特性,为其应用于先进战斗部等重要领域提供了关键支撑。通过对相关文献的梳理、总结与归纳,得到的主要结论和建议如下:

(1) 活性无序合金材料主要具有作为结构件的高强度及发生破碎时化学反应特性;关于活性无序合金的冲击释能行为,已从材料组成元素、制备工艺、细观组织及破碎特性方面开展了大量实验研究,获得了冲击释能过程的基本现象和作用规律;结果表明,合金的成分、结构能够改变其性能与破坏形式,进而影响材料的冲击反应释能特性;现有结果大多是通过试验火光持续时间与终态结果反映的相关力学参数来推断活性无序合金的化学反应进程,缺乏对材料高速冲击下化学反应行为为高时空分辨率的直接观测,亟待发展实时诊断技术获取材料变形与冲击反应及损伤演化的时空耦合作用图像;

(2) 活性无序合金的冲击释能特性与材料性能、撞击速度、破碎程度及靶标特征等因素有关;基于试验结果考虑热力学模型的数值模拟方法,加深了对材料冲击化学反应行为的理解;下一步研究需重点关

注各因素耦合作用下活性材料的力-热-化耦合作用过程及其主控因素, 发展描述活性无序合金材料冲击诱发化学反应行为的微观、细观尺度数值模拟方法;

(3) 作为破片和穿甲弹芯的活性无序合金材料应具有高强度特性, 以保证其穿靶能力及穿靶后对目标的有效毁伤; 作为药型罩的活性无序合金材料则关注其拉伸成型后射流凝聚稳定性, 满足侵彻能力的同时具有化学反应释能特性, 能够提升对目标的穿孔能力或后效毁伤效果; 目前缺乏针对毁伤元作用特性的活性无序合金材料性能设计与评估手段, 亟待发展结合破片、穿甲弹芯及药型罩等毁伤元作用环境要求的材料设计与制备、冲击释能与控制的理论与方法。

## 参考文献:

- [1] 汪卫华. 非晶态物质的本质和特性 [J]. 物理学进展, 2013, 33(5): 177–351.  
WANG W H. The nature and properties of amorphous matter [J]. *Progress in Physics*, 2013, 33(5): 177–351.
- [2] FALK M L, KANGER J S. 类固体非晶态材料的变形与失效 [J]. *力学进展*, 2021, 51(2): 406–426. DOI: 10.6052/1000-0992-21-034.  
FALK M L, KANGER J S. Deformation and failure of amorphous, solidlike materials [J]. *Advances in Mechanics*, 2021, 51(2): 406–426. DOI: 10.6052/1000-0992-21-034.
- [3] 乔吉超, 张浪涛, 童钰, 等. 基于微观结构非均匀性的非晶合金力学行为 [J]. *力学进展*, 2022, 529(1): 117–152. DOI: 10.6052/1000-0992-21-038.  
QIAO J C, ZHANG L T, TONG Y, et al. Mechanical properties of amorphous alloys: in the framework of the microstructure heterogeneity [J]. *Advances in Mechanics*, 2022, 529(1): 117–152. DOI: 10.6052/1000-0992-21-038.
- [4] LIU D, YU Q, KABRA S, et al. Exceptional fracture toughness of CrCoNi-based medium-and high-entropy alloys at 20 Kelvin [J]. *Science*, 2022, 378(6623): 978–983. DOI: 10.1126/science.abp8070.
- [5] 卜叶强, 王宏涛. 多主元合金中的化学短程有序 [J]. *力学进展*, 2021, 51(4): 915–919. DOI: 10.6052/1000-0992-21-027.  
BU Y Q, WANG H T. Short-range order in multicomponent alloys [J]. *Advances in Mechanics*, 2021, 51(4): 915–919. DOI: 10.6052/1000-0992-21-027.
- [6] 陈曦, 杜成鑫, 程春, 等. Zr 基非晶合金材料的冲击释能特性 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2018, 41(6): 44–49. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20180717.002.  
CHEN X, DU C X, CHENG C, et al. Impact energy releasing characteristics of Zr-based amorphous alloy [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2018, 41(6): 44–49. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20180717.002.
- [7] 张周然. HfZrTiTa<sub>x</sub> 高熵合金含能结构材料的组织结构与力学性能研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2017: 80–84. DOI: 10.27052/d.cnki.gzjgu.2017.000221.  
ZHANG Z R. Microstructure and mechanical properties of HfZrTiTa<sub>x</sub> high-entropy alloys energetic structural materials [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017: 80–84. DOI: 10.27052/d.cnki.gzjgu.2017.000221.
- [8] 李继承, 陈小伟. 块体金属玻璃及其复合材料的压缩剪切特性和侵彻/穿甲“自锐”行为 [J]. *力学进展*, 2011, 41(5): 480–518. DOI: 10.6052/1000-0992-2011-5-lxjzJ2011-056.  
LI J C, CHEN X W. Compressive-shear behavior and self-sharpening of bulk metallic glasses and their composite materials [J]. *Advances in Mechanics*, 2011, 41(5): 480–518. DOI: 10.6052/1000-0992-2011-5-lxjzJ2011-056.
- [9] LIU X F, TIAN Z L, ZHANG X F, et al. “Self-sharpening” tungsten high-entropy alloy [J]. *Acta Materialia*, 2020, 186: 257–266. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.01.005.
- [10] LIU T W, LI T, DAI L H. Near-equiatom  $\mu$  phase in self-sharpening tungsten-based high-entropy alloy [J]. *Metals*, 2022, 12(7): 1130. DOI: 10.3390/met12071130.
- [11] 张玉令, 施冬梅, 张云峰, 等. W 骨架/Zr 基非晶合金复合材料破片侵彻能力与后效研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(5): 053301. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0063.  
ZHANG Y L, SHI D M, ZHANG Y F, et al. Investigation of penetration ability and aftereffect of Zr-based metallic glass reinforced porous W matrix composite fragments [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(5): 053301. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0063.



- [12] HAN J L, CHEN X, DU Z H, et al. Application of W/Zr amorphous alloy for shaped charge liner [J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(11): 115209. DOI: 10.1088/2053-1591/ab47d7.
- [13] CONNER R D, DANDLIKER R B, SCRUGGS V, et al. Dynamic deformation behavior of tungsten-fiber/metallic-glass matrix composites [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24(5): 435–444. DOI: 10.1016/s0734-743x(99)00176-1.
- [14] SCHROERS J, JOHNSON W L. Highly processable bulk metallic glass-forming alloys in the Pt-Co-Ni-Cu-P system [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(18): 3666–3668. DOI: 10.1063/1.1738945.
- [15] 胡宏伟, 宋浦, 邓国强, 等. 温压炸药的特性及发展现状 [J]. *力学进展*, 2022, 52(1): 53–78. DOI: 10.6052/1000-0992-21-021. HU H W, SONG P, DENG G Q, et al. Characteristics of thermobaric explosives and their advances [J]. *Advances in Mechanics*, 2022, 52(1): 53–78. DOI: 10.6052/1000-0992-21-021.
- [16] INOUE A, ZHANG T, MASUMOTO T. Preparation of bulky amorphous Zr-Al-Co-Ni-Cu alloys by copper mold casting and their thermal and mechanical properties [J]. *Materials Transactions, JIM*, 1995, 36(3): 391–398. DOI: 10.2320/matertrans1989.36.391.
- [17] INOUE A, AMIYA K, KATSUYA A, et al. Mechanical properties and thermal stability of Ti- and Al-based amorphous wires prepared by a melt extraction method [J]. *Materials Transactions, JIM*, 1995, 36(7): 858–865. DOI: 10.2320/matertrans1989.36.858.
- [18] YOKOYAMA Y, INOUE A. Solidification condition of bulk glassy  $Zr_{60}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}Pd_5$  alloy by unidirectional arc melting [J]. *Materials Transactions, JIM*, 1995, 36(11): 1398–1402. DOI: 10.2320/matertrans1989.36.1398.
- [19] LIU C T, HEATHERLY L, HORTON J A, et al. Test environments and mechanical properties of Zr-base bulk amorphous alloys [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1998, 29(7): 1811–1820. DOI: 10.1007/s11661-998-0004-6.
- [20] GILBERT C J, AGER III J W, SCHROEDER V, et al. Light emission during fracture of a Zr-Ti-Ni-Cu-Be bulk metallic glass [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 74(25): 3809–3811. DOI: 10.1063/1.124187.
- [21] 潘念侨. Zr 基非晶合金材料动态本构关系及其释能效应研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 36–54. DOI: 10.7666/d.Y3046370.
- PAN N Q. Dynamic Zr based amorphous alloy material constitutive relation and release energy effect reserch [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016: 36–54. DOI: 10.7666/d.Y3046370.
- [22] ZHANG Z R, ZHANG H, TANG Y, et al. Microstructure, mechanical properties and energetic characteristics of a novel high-entropy alloy  $HfZrTiTa_{0.53}$  [J]. *Materials & Design*, 2017, 133: 435–443. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.08.022.
- [23] AMES R. Vented chamber calorimetry for impact-initiated energetic materials [C]// Proceedings of the 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 2005: 279. DOI: 10.2514/6.2005-279.
- [24] AMES R G. Energy release characteristics of impact-initiated energetic materials [J]. *MRS Online Proceedings Library*, 2005, 896(1): 308. DOI: 10.1557/PROC-0896-H03-08.
- [25] 汪德武, 任柯融, 江增荣, 等. 活性材料冲击释能行为研究进展 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(3): 031408. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0337.
- WANG D W, REN K R, JIANG Z R, et al. Shock-induced energy release behaviors of reactive materials [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(3): 031408. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0337.
- [26] WANG C T, HE Y, JI C, et al. Investigation on shock-induced reaction characteristics of a Zr-based metallic glass [J]. *Intermetallics*, 2018, 93: 383–388. DOI: 10.1016/j.intermet.2017.11.004.
- [27] GILBERT C J, AGER III J W, SCHROEDER V, et al. Mechanism for light emission during fracture of a Zr-Ti-Cu-Ni-Be bulk metallic glass: temperature measurements in air and nitrogen [J]. *MRS Online Proceedings Library*, 1998, 554(1): 191–196. DOI: 10.1557/PROC-554-191.
- [28] WEI H Y, YOO C S. Kinetics of small single particle combustion of zirconium alloy [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(2): 023506. DOI: 10.1063/1.3677789.
- [29] WEI H Y, YOO C S. Dynamic responses of reactive metallic structures under thermal and mechanical ignitions [J]. *Journal of Materials Research*, 2012, 27(21): 2705–2717. DOI: 10.1557/jmr.2012.302.
- [30] 尚春明, 施冬梅, 李文钊, 等. Zr 基非晶合金燃烧热测试方法 [J]. *兵器装备工程学报*, 2019, 40(8): 193–197. DOI: 10.

- 11809/bqzbgcxb2019.08.038.
- SHANG C M, SHI D M, LI W Z, et al. Study on combustion heat method of Zr-based amorphous alloy [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(8): 193–197. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2019.08.038.
- [31] TU J, QIAO L, SHAN Y, et al. Study on the impact-induced energy release characteristics of  $Zr_{68.5}Cu_{12}Ni_{12}Al_{7.5}$  amorphous alloy [J]. *Materials*, 2021, 14(6): 1447. DOI: 10.3390/ma14061447.
- [32] 尚春明, 施冬梅, 张云峰, 等. Zr 基非晶合金的燃烧释能特性 [J]. *含能材料*, 2020, 28(6): 564–568. DOI: 10.11943/CJEM2019219.
- SHANG C M, SHI D M, ZHANG Y F, et al. Combustion and energy release characteristics of Zr-based amorphous alloys [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2020, 28(6): 564–568. DOI: 10.11943/CJEM2019219.
- [33] 侯先苇, 熊玮, 陈海华, 等. 两种典型高熵合金冲击释能及毁伤特性研究 [J]. *力学学报*, 2021, 53(9): 2528–2540. DOI: 10.6052/0459-1879-21-327.
- HOU X W, XIONG W, CHEN H H, et al. Impact energy release and damage characteristics of two high-entropy alloys [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(9): 2528–2540. DOI: 10.6052/0459-1879-21-327.
- [34] 张云峰, 刘国庆, 李晨, 等. 新型亚稳态合金材料冲击释能特性 [J]. *含能材料*, 2019, 27(8): 692–697. DOI: 10.11943/CJEM2018170.
- ZHANG Y F, LIU G Q, LI C, et al. Shock energy release characteristics of novel metastable alloy materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2019, 27(8): 692–697. DOI: 10.11943/CJEM2018170.
- [35] LUO P G, WANG Z C, JIANG C L, et al. Experimental study on impact-initiated characters of W/Zr energetic fragments [J]. *Materials & Design*, 2015, 84: 72–78. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.107.
- [36] CHEN X, DU C X, CHENG C, et al. Impact-induced chemical reaction behavior of ZrTiNiCuBe bulk metallic glass fragments impacting on thin plates [J]. *Materiali in Tehnologije*, 2018, 52(6): 737–743. DOI: 10.17222/mit.2018.089.
- [37] 张云峰, 罗兴柏, 施冬梅, 等. 动态压缩下 Zr 基非晶合金失效释能机理 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(6): 063101. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0114.
- ZHANG Y F, LUO X B, SHI D M, et al. Failure behavior and energy release of Zr-based amorphous alloy under dynamic compression [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(6): 063101. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0114.
- [38] JI C, HE Y, WANG C T, et al. Effect of dynamic fragmentation on the reaction characteristics of a Zr-based metallic glass [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2019, 515: 149–156. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2019.04.022.
- [39] GRADY D E. Fragment size distributions from the dynamic fragmentation of brittle solids [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(12): 1557–1562. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.07.042.
- [40] REN K R, LIU H Y, CHEN R, et al. Compression properties and impact energy release characteristics of TiZrNbV high-entropy alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 827: 142074. DOI: 10.1016/j.msea.2021.142074.
- [41] LOU H B, WANG X D, XU F, et al. 73 mm-diameter bulk metallic glass rod by copper mould casting [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(5): 051910. DOI: 10.1063/1.3621862.
- [42] INOUE A, ZHANG T. Fabrication of bulk glassy  $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$  alloy of 30 mm in diameter by a suction casting method [J]. *Materials Transactions, JIM*, 1996, 37(2): 185–187. DOI: 10.2320/matertrans1989.37.185.
- [43] DONG W B, ZHANG H F, CAI J, et al. Enhanced plasticity in a Zr-based bulk metallic glass containing nanocrystalline precipitates [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, 425(1/2): L1–L4. DOI: 10.1016/j.jallcom.2006.01.021.
- [44] 黄彩敏. 金属型含能结构材料的组织调控与力、热特性研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2020. DOI: 10.27052/d.cnki.gzjgu.2020.000084.
- HUANG C M. Research on preparation, mechanical and thermal characteristics of metallic energetic structural materials [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2020. DOI: 10.27052/d.cnki.gzjgu.2020.000084.
- [45] HUANG C M, BAI S X, LI S, et al. Effect of *in-situ* crystalline phases on the mechanical properties and energy release behaviors of  $Zr_{55}Ni_5Al_{10}Cu_{30}$  bulk metallic glasses [J]. *Intermetallics*, 2020, 119: 106720. DOI: 10.1016/j.intermet.2020.106720.
- [46] HUANG H L, WU Y, HE J Y, et al. Phase-transformation ductilization of brittle high-entropy alloys via metastability engineering [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(30): 1701678. DOI: 10.1002/adma.201701678.

- [47] SUH D W, RYU J H, JOO M S, et al. Medium-alloy manganese-rich transformation-induced plasticity steels [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2013, 44(1): 286–293. DOI: 10.1007/s11661-012-1402-3.
- [48] LI Z M, PRADEEP K G, DENG Y, et al. Metastable high-entropy dual-phase alloys overcome the strength–ductility trade-off [J]. *Nature*, 2016, 534(7606): 227–230. DOI: 10.1038/nature17981.
- [49] LI X, CHEN L Q, ZHAO Y, et al. Influence of manganese content on  $\varepsilon$ -/ $\alpha'$ -martensitic transformation and tensile properties of low-C high-Mn TRIP steels [J]. *Materials & Design*, 2018, 142: 190–202. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.01.026.
- [50] 王睿鑫. NbZrTiTa 高熵合金的组织结构演变及结构释能特性研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2018. DOI: 10.27052/d.cnki.gzjgu.2018.001416.  
WANG R X. Microstructure evolution and energetic structural properties of NbZrTiTa high-entropy alloy [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018. DOI: 10.27052/d.cnki.gzjgu.2018.001416.
- [51] TANG Y, WANG R X, XIAO B, et al. A review on the dynamic-mechanical behaviors of high-entropy alloys [J]. *Progress in Materials Science*, 2023, 135: 101090. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2023.101090.
- [52] 黄劲松, 刘咏, 陈仕奇, 等. 锆基非晶合金的研究进展与应用 [J]. *中国有色金属学报*, 2003, 13(6): 1321–1332. DOI: 10.3321/j.issn:1004-0609.2003.06.001.  
HUANG J S, LIU Y, CHEN S Q, et al. Progress and application of Zr-based amorphous alloys [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, 13(6): 1321–1332. DOI: 10.3321/j.issn:1004-0609.2003.06.001.
- [53] 马卫锋, 寇宏超, 李金山, 等. W 纤维增强 Zr 基非晶复合材料的界面研究现状 [J]. *材料导报*, 2006, 20(4): 64–66. DOI: 10.3321/j.issn:1005-023X.2006.04.018.  
MA W F, KOU H C, LI J S, et al. The present status of interface study of W fiber reinforced Zr-based amorphous matrix composite [J]. *Materials Reports*, 2006, 20(4): 64–66. DOI: 10.3321/j.issn:1005-023X.2006.04.018.
- [54] INOUE A. Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys [J]. *Acta Materialia*, 2000, 48(1): 279–306. DOI: 10.1016/s1359-6454(99)00300-6.
- [55] QIU K Q, WANG A M, ZHANG H F, et al. Mechanical properties of tungsten fiber reinforced ZrAlNiCuSi metallic glass matrix composite [J]. *Intermetallics*, 2002, 10(11/12): 1283–1288. DOI: 10.1016/s0966-9795(02)00136-x.
- [56] 武晓峰, 邱克强, 张海峰, 等. SiC 颗粒对  $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$  非晶形成能力和热稳定性的影响 [J]. *金属学报*, 2003, 39(4): 414–418. DOI: 10.3321/j.issn:0412-1961.2003.04.016.  
WU X F, QIU K Q, ZHANG H F, et al. Effect of SiC<sub>p</sub> on the glass forming ability and thermal stability of  $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$  bulk metallic glass [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2003, 39(4): 414–418. DOI: 10.3321/j.issn:0412-1961.2003.04.016.
- [57] XU Y K, XU J. Ceramics particulate reinforced  $Mg_{65}Cu_{20}Zn_5Y_{10}$  bulk metallic glass composites [J]. *Scripta Materialia*, 2003, 49(9): 843–848. DOI: 10.1016/s1359-6462(03)00447-0.
- [58] 寇生中, 郑宝超, 李娜, 等. 不同元素掺杂对 Zr 基非晶形成能力及力学性能的影响 [J]. *金属功能材料*, 2011, 18(2): 1–5. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1005-8192.2011.02.009.  
KOU S Z, ZHENG B C, LI N, et al. Effects of additional different element on glass forming ability and mechanical properties of bulk Zr-based amorphous alloys [J]. *Metallic Functional Materials*, 2011, 18(2): 1–5. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1005-8192.2011.02.009.
- [59] 张云峰, 罗兴柏, 施冬梅, 等. W 骨架/Zr 基非晶合金复合材料微观胞元重构 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2019, 48(1): 137–142.  
ZHANG Y F, LUO X B, SHI D M, et al. Reconstruction of meso-cells of Zr-based metallic glass reinforced porous W matrix composite [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2019, 48(1): 137–142.
- [60] 张云峰, 罗兴柏, 刘国庆, 等. W 骨架/Zr 基非晶合金复合材料破片的冲击释能特性 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49(8): 2549–2556.  
ZHANG Y F, LUO X B, LIU G Q, et al. Shock-induced reaction characteristics of porous W/Zr-based metallic glass composite fragments [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(8): 2549–2556.
- [61] MA Y S, ZHOU L, ZHANG K C, et al. Effects of cerium doping on the mechanical properties and energy-releasing behavior of high-entropy alloys [J]. *Materials*, 2022, 15(20): 7332. DOI: 10.3390/ma15207332.
- [62] MA Y S, HE J Y, ZHOU L, et al. Mechanical properties and impact energy release characteristics of  $Al_{0.5}NbZrTi_{1.5}Ta_{0.8}Ce_{0.85}$

- high-entropy alloy [J]. *Materials Research Express*, 2022, 9(11): 116510. DOI: 10.1088/2053-1591/ac9f04.
- [63] 魏祥赛. Ni-M 系高熵合金含能结构材料设计与力学性能 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022: 16–73. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2022.000524.
- WEI X S. Design and mechanical properties of Ni-M high entropy alloy energetic structural materials [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022: 16–73. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2022.000524.
- [64] 高人奎. TiZrHf 系高熵合金的冲击动力学特性及反应释能评价 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2022: 51–72. DOI: 10.27323/d.cnki.gsgyc.2022.000486.
- GAO R K. Impact dynamics properties and reaction energy release evaluation of TiZrHf based high entropy alloys [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2022: 51–72. DOI: 10.27323/d.cnki.gsgyc.2022.000486.
- [65] CHEN C, GAO R K, GUO K, et al. Quantitative determination of impact release energy for TiZrHfX<sub>0.3</sub> multicomponent materials in vacuum environment [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2022, 133: 105958. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.105958.
- [66] TANG W Q, ZHANG K, CHEN T Y, et al. Microstructural evolution and energetic characteristics of TiZrHfTa<sub>0.7</sub>W<sub>0.3</sub> high-entropy alloy under high strain rates and its application in high-velocity penetration [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 132: 144–153. DOI: 10.1016/j.jmst.2022.05.043.
- [67] MONTGOMERY JR H E. Reactive fragment: US3961576 [P]. 1976-06-08.
- [68] TRUITT R M, NIELSON D B, ASHCROFT B N, et al. Weapons and weapon components incorporating reactive materials: US11512058 [P]. 2006-08-29.
- [69] WILLIAM J F. Reactive fragrant warhead for enhanced neutralization of mortar, rocket, and missile threats: ONR-SBIR, N04-903 [R]. 2005.
- [70] REN S Y, ZHANG Q M, WU Q, et al. Influence of impact-induced reaction characteristics of reactive composites on hypervelocity impact resistance [J]. *Materials & Design*, 2020, 192: 108722. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108722.
- [71] 郭磊, 王传婷, 何勇, 等. Zr<sub>55</sub>Cu<sub>30</sub>Ni<sub>5</sub>Al<sub>10</sub> 活性破片对间隔防护结构破坏特性研究 [J]. *航天器环境工程*, 2020, 37(6): 582–588. DOI: 10.12126/see.2020.06.008.
- GUO L, WANG C T, HE Y, et al. The failure characteristics of spacing protective structures impacted by Zr<sub>55</sub>Cu<sub>30</sub>Ni<sub>5</sub>Al<sub>10</sub> active fragments [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2020, 37(6): 582–588. DOI: 10.12126/see.2020.06.008.
- [72] 陈海华, 张先锋, 熊玮, 等. WFeNiMo 高熵合金动态力学行为及侵略性能研究 [J]. *力学学报*, 2020, 52(5): 1443–1453. DOI: 10.6052/0459-1879-20-166.
- CHEN H H, ZHANG X F, XIONG W, et al. Dynamic mechanical behavior and penetration performance of WFeNiMo high-entropy alloy [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(5): 1443–1453. DOI: 10.6052/0459-1879-20-166.
- [73] 杨林, 于述贤, 范群波. Zr<sub>77.1</sub>Cu<sub>13</sub>Ni<sub>9.9</sub> 非晶合金破片侵入 LY12 铝合金及 TC4 钛合金靶板毁伤后效及机理对比研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2023, 43(4): 417–428. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2022.092.
- YANG L, YU S X, FAN Q B. Damage effect and mechanism of Zr<sub>77.1</sub>Cu<sub>13</sub>Ni<sub>9.9</sub> bulk metallic glasses fragment penetrating LY12 aluminum alloy and TC4 titanium alloy target plate [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2023, 43(4): 417–428. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2022.092.
- [74] LEHR H F, WOLLMAN E, KOERBER G. Experiments with jacketed rods of high fineness ratio [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, 17(4/5/6): 517–526. DOI: 10.1016/0734-743x(95)99876-s.
- [75] BACKMAN M E. Terminal ballistics: AD-A021 833 [R]. China Lake, California: Naval Weapons Center, 1976.
- [76] CHEN X W, WEI L M, LI J C. Experimental research on the long rod penetration of tungsten-fiber/Zr-based metallic glass matrix composite into Q235 steel target [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 79: 102–116. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.11.007.
- [77] RONG G, HUANG D W, YANG M C. Penetrating behaviors of Zr-based metallic glass composite rods reinforced by tungsten fibers [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2012, 58(1): 21–27. DOI: 10.1016/j.tafmec.2012.02.003.
- [78] 张明星, 黄晓霞. 钨合金穿甲弹芯材料强化技术及材料技术国外研究分析 [J]. *四川兵工学报*, 2015, 36(12): 114–117. DOI: 10.11809/scbgxb2015.12.028.

- ZHANG M X, HUANG X X. Foreign research and analysis on strengthening technology and material technology of tungsten alloy piercing projectile [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2015, 36(12): 114–117. DOI: 10.11809/scbgxb.2015.12.028.
- [79] 荣光, 黄德武. 钨纤维复合材料穿甲弹芯侵彻时的自锐现象 [J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(4): 351–355. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)04-0351-05.
- RONG G, HUANG D W. Self-sharpening phenomena of tungsten fiber composite material penetrators during penetration [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(4): 351–355. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)04-0351-05.
- [80] 杜忠华, 杜成鑫, 朱正旺, 等. 钨丝/锆基非晶复合材料长杆体弹芯穿甲实验研究 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2016, 45(5): 1308–1313.
- DU Z H, DU C X, ZHU Z W, et al. An experimental study on perforation behavior of pole penetrator prepared from W<sub>f</sub>/Zr-based bulk metallic glass matrix composite [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(5): 1308–1313.
- [81] 陈小伟, 李继承, 张方举, 等. 钨纤维增强金属玻璃复合材料弹穿甲钢靶的实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(4): 346–354. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)04-0346-09.
- CHEN X W, LI J C, ZHANG F J, et al. Experimental research on the penetration of tungsten-fiber/metallic glass-matrix composite material penetrator into steel target [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(4): 346–354. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)04-0346-09.
- [82] 杜忠华, 杜成鑫, 朱正旺, 等. 分段结构的钨丝/锆基非晶复合材料弹芯穿甲实验研究 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2016, 45(9): 2359–2365.
- DU Z H, DU C X, ZHU Z W, et al. An experimental study on perforation behavior of segmented W<sub>f</sub>/Zr-based bulk metallic glass matrix composite [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(9): 2359–2365.
- [83] 杜成鑫, 杜忠华, 朱正旺. 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 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(6): 1632–1637.
- DU C X, DU Z H, ZHU Z W. Effect of impact velocity and diameter of tungsten fiber on penetration ability of W<sub>f</sub>/Zr-based metallic glass composite penetrator [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(6): 1632–1637.
- [84] 杜成鑫, 杜忠华, 朱正旺. 钨丝直径对锆基复合非晶材料穿甲性能的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(4): 1080–1085.
- DU C X, DU Z H, ZHU Z W. Effect of tungsten fiber diameter on penetration ability of Zr-based metallic glass composites [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(4): 1080–1085.
- [85] JIANG F, CHEN G, WANG Z H, et al. Mechanical properties of tungsten fiber reinforced (Zr<sub>41.2</sub>Ti<sub>13.8</sub>Cu<sub>12.5</sub>Ni<sub>10</sub>Be<sub>22.5</sub>)<sub>100-x</sub>Nb<sub>x</sub> bulk metallic glass composites [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 40(2): 206–208. DOI: 10.1016/S1875-5372(11)60016-7.
- [86] 杜成鑫. Wf/Zr 基非晶复合材料杆弹准细观侵彻机理及优化设计 [D]. 南京: 南京理工大学, 2020: 39–62. DOI: 10.27241/d.cnki.gnjgu.2020.000070.
- DU C X. Research on penetration mechanism and optimization design of Wf/Zr-based bulk metallic glass matrix composite rod [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2020: 39–62. DOI: 10.27241/d.cnki.gnjgu.2020.000070.
- [87] SORENSEN B R, KIMSEY K D, SILSBY G F, et al. High velocity penetration of steel targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1991, 11(1): 107–119. DOI: 10.1016/0734-743X(91)90034-D.
- [88] 林琨富, 张先锋, 陈海华, 等. Hf 基非晶合金夹芯结构长杆弹的侵彻行为 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(2): 023301. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0181.
- LIN K F, ZHANG X F, CHEN H H, et al. Penetration behaviors of Hf-based amorphous alloy jacketed rods [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(2): 023301. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0181.
- [89] HOU X W, ZHANG X F, XIONG W, et al. Study on energy release characteristics and penetration effects to concrete targets of Hf-based amorphous alloys [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2022, 581: 121438. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2022.121438.
- [90] HOU X W, ZHANG X F, LIU C, et al. Effects of annealing temperatures on mechanical behavior and penetration characteristics of FeNiCoCr high-entropy alloys [J]. *Metals*, 2022, 12(11): 1885. DOI: 10.3390/met12111885.

- [91] 陈海华, 张先锋, 赵文杰, 等.  $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$  高熵合金高速侵彻微观结构演化特性 [J]. *力学学报*, 2022, 54(8): 2140–2151. DOI: 10.6052/0459-1879-22-128.  
CHEN H H, ZHANG X F, ZHAO W J, et al. Effect of microstructure on flow behavior during penetration of  $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$  high-entropy alloy projectile [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(8): 2140–2151. DOI: 10.6052/0459-1879-22-128.
- [92] 赵腾, 罗虹, 贾万明, 等. 药型罩材料技术基本要素探讨 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2007, 30(5): 77–82. DOI: 10.3969/j.issn.1004-244X.2007.05.022.  
ZHAO T, LUO H, JIA W M, et al. Discussion on the basic elements of shaped charge liner material [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2007, 30(5): 77–82. DOI: 10.3969/j.issn.1004-244X.2007.05.022.
- [93] 张雪朋. 活性射流作用钢靶侵彻爆炸联合毁伤效应研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016: 1–6.  
ZHANG X P. Research on penetration and blast combined damage effects of reactive material jet against steel target [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016: 1–6.
- [94] 张雪朋, 肖建光, 余庆波, 等. 活性药型罩聚能装药破甲后效超压特性 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(8): 1388–1394. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.08.007.  
ZHANG X P, XIAO J G, YU Q B, et al. Armor penetration aftereffect overpressure produced by reactive material liner shaped charge [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(8): 1388–1394. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.08.007.
- [95] WALTERS W P, KECSKES L J, PRITCHETT J E. Investigation of a bulk metallic glass as a shaped charge liner material [R]. Aberdeen Proving Ground: Army Research Laboratory, 2006.
- [96] SHI J, HUANG Z X, ZU X D, et al. Experimental and numerical investigation of jet performance based on Johnson-Cook model of liner material [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 170: 104343. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104343.
- [97] SHI J, HUANG Z X, ZU X D, et al. Experimental investigation of Zr-Based amorphous alloy as a shaped charge liner [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2022, 47(11): e202200063. DOI: 10.1002/prop.202200063.
- [98] CUI P, GAO X B, XU J Q, et al. Simulation and experimental study on jet velocity of Zr-based amorphous alloy liner [J]. *Metals*, 2022, 12(6): 978. DOI: 10.3390/met12060978.
- [99] 周秉文, 孟凡迪, 张全孝, 等. 铜基非晶合金的动态性能及杆式射流仿真研究 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2020, 43(6): 1–5. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20200612.001.  
ZHOU B W, MENG F D, ZHANG Q X, et al. Dynamic properties and rod jet simulation of copper-based bulk metallic glasses [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2020, 43(6): 1–5. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20200612.001.
- [100] 鄢阿敏, 乔禹, 戴兰宏. 高熵合金药型罩射流成型与稳定性 [J]. *力学学报*, 2022, 54(8): 2119–2130. DOI: 10.6052/0459-1879-22-274.  
YAN A M, QIAO Y, DAI L H. Formation and stability of shaped charge liner jet of CrMnFeCoNi high-entropy alloy [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(8): 2119–2130. DOI: 10.6052/0459-1879-22-274.
- [101] 郑哲敏. 聚能射流的稳定性问题 [M]// 郑哲敏. 郑哲敏文集. 北京: 科学出版社, 2004: 12.
- [102] 郑哲敏. 关于射流侵彻的几个问题 [J]. *兵工学报*, 1980(1): 13–22.  
ZHENG Z M. Several problems on jet penetration [J]. *Acta Armamentarii*, 1980(1): 13–22.
- [103] CHOU P C, CARLEONE J. The stability of shaped-charge jets [J]. *Journal of Applied Physics*, 1977, 48(10): 4187–4195. DOI: 10.1063/1.323456.
- [104] CUI P, SHI D M, XU J Q, et al. Investigation of explosion simulation on jet forming of ZrCuNiAlAg amorphous alloy liner with eccentric sub-hemisphere structure [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 964: 012020. DOI: 10.1088/1757-899x/964/1/012020.
- [105] CUI P, WANG D S, SHI D M, et al. Investigation of penetration performance of Zr-based amorphous alloy liner compared with copper [J]. *Materials*, 2020, 13(4): 912. DOI: 10.3390/ma13040912.
- [106] CUI P, SHI D M, ZHANG Y L, et al. Numerical simulation and experimental study on jet forming and penetration performance of Zr-based amorphous alloy liner [J]. *Engineering Letters*, 2021, 29(1): 151–157.
- [107] CUI P, SHI D M, XU J Q, et al. Numerical simulation on jet forming and penetration performance of several amorphous

- energetic alloy liner with typical structures [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1948: 012186. DOI: 10.1088/1742-6596/1948/1/012186.
- [108] 芦永进, 梁增友, 邓德志, 等. 铜基非晶合金双层药型罩射流形成及侵彻性能 [J]. *火炮发射与控制学报*, 2022, 43(1): 14–20, 28. DOI: 10.19323/j.issn.1673-6524.2022.01.003.
- LU Y J, LIANG Z Y, DENG D Z, et al. Jet formation and penetration performance of a Cu-based amorphous alloy double-layer charge liner [J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2022, 43(1): 14–20, 28. DOI: 10.19323/j.issn.1673-6524.2022.01.003.
- [109] HAN J L, CHEN X, DU Z H, et al. Design and penetration of a new W-particle/Zr-based amorphous alloy composite liner [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020, 42(7): 364. DOI: 10.1007/s40430-020-02359-6.
- [110] LÜ J X, ZHANG J L, SHEK C. Corrosion of glassy  $(\text{Ni}_8\text{Nb}_5)_{99.5}\text{Sb}_{0.5}$  alloy and stability of passive film [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42(3): 447–451. DOI: 10.1016/S1875-5372(13)60045-4.
- [111] ZHAO Z Y, LIU J X, GUO W Q, et al. Effect of Zn and Ni added in W-Cu alloy on penetration performance and penetration mechanism of shaped charge liner [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2016, 54: 90–97. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2015.07.022.
- [112] BAI X, LIU J X, LI S K, et al. Effect of interaction mechanism between jet and target on penetration performance of shaped charge liner [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 553: 142–148. DOI: 10.1016/j.msea.2012.06.003.
- [113] CHEN J, LIU T W, CAO F H, et al. Deformation behavior and microstructure evolution of CoCrNi medium-entropy alloy shaped charge liners [J]. *Metals*, 2022, 12(5): 811. DOI: 10.3390/met12050811.
- [114] GUO W Q, LIU J X, XIAO Y, et al. Comparison of penetration performance and penetration mechanism of W-Cu shaped charge liner against three kinds of target: pure copper, carbon steel and Ti-6Al-4V alloy [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2016, 60: 147–153. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2016.07.015.
- [115] ZHANG S C, JIANG Z H, LI H B, et al. Precipitation behavior and phase transformation mechanism of super austenitic stainless steel S32654 during isothermal aging [J]. *Materials Characterization*, 2018, 137: 244–255. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.01.040.

(责任编辑 王小飞)