

两种典型高熵合金冲击释能及毁伤特性研究¹⁾侯先苇* 熊玮*,²⁾ 陈海华* 张先锋* 汪海英[†] 戴兰宏**

*(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

[†](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)

**(中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要 为研究 FeNiMoW 和 FeNiCoCr 两种典型高熵合金材料的冲击释能规律, 利用 $\Phi 14.5$ mm 弹道枪发射装置和准密闭试验容器系统开展了两种典型高熵合金破片在不同速度下冲击释能效应试验。进一步, 利用该试验平台开展两种高熵合金破片侵彻多层目标的毁伤特性研究。通过改变准密闭试验容器前置钢靶厚度, 研究了两种高熵合金破片对后续多层靶板的侵彻毁伤规律。研究发现: FeNiMoW 和 FeNiCoCr 高熵合金破片分别在 1356 m/s 和 1217 m/s 出现能量释放现象。低于该撞击速度未发生化学反应。撞击速度对两种高熵合金破片释能有显著的影响, 随着速度的增加, 两种高熵合金破片冲击释能反应加剧, 超压峰值上升加快。在 1600 m/s 左右的撞击速度下, 随着试验容器前置钢靶厚度从 1 mm 增加至 5 mm, FeNiMoW 破片超压峰值整体上呈上升趋势, FeNiCoCr 破片超压峰值呈下降趋势。在两种高熵合金破片侵彻多层靶标过程中, 其释能反应程度的降低对破片穿孔能力的增强有一定贡献, 而容器前置钢靶厚度的进一步增大将降低破片对后续多层铝靶的穿孔毁伤能力。另一方面, 随着前置钢靶厚度的增大, 破片对第一层铝靶的毁伤面积先增大后减小。

关键词 准密闭反应容器, 冲击释能特性, 多层靶, 毁伤特性

中图分类号: O381 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-21-327

IMPACT ENERGY RELEASE AND DAMAGE CHARACTERISTICS OF TWO HIGH-ENTROPY ALLOYS¹⁾

Hou Xianwei* Xiong Wei*,²⁾ Chen Haihua* Zhang Xianfeng* Wang Haiying[†] Dai Lanhong**

*(Department of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

[†](State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**(School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to explore the impact energy release characteristics regularities of two typical high-entropy alloy materials, using the $\Phi 14.5$ mm ballistic gun launcher, the quasi-sealed test chamber system, two typical high-entropy alloy fragments, the FeNiMoW and the FeNiCoCr, were carried out the release energy effect tests at different impact velocities. Furthermore, the test platform was used to study the penetration and damage effect of two high-entropy alloy fragments to multi-layered targets, which were placed to the bottom of the test chamber. By changing the thickness of the steel target fixed in front of the test chamber, the impact release energy characteristics and damage regularities of two

2021-07-08 收稿, 2021-08-18 录用, 2021-08-19 网络版发表。

1) 国家自然科学基金(11790292, 12002170), 中央高校基本科研业务费专项资金(30920021108)和中国空气动力研究与发展中心超高速碰撞研究中心开放基金(20200106)资助项目。

2) 熊玮, 讲师, 主要研究方向: 冲击动力学, 高效毁伤与防护。E-mail: wei.xiong@njust.edu.cn

引用格式: 侯先苇, 熊玮, 陈海华, 张先锋, 汪海英, 戴兰宏. 两种典型高熵合金冲击释能及毁伤特性研究. 力学学报, 2021, 53(9): 2528-2540
Hou Xianwei, Xiong Wei, Chen Haihua, Zhang Xianfeng, Wang Haiying, Dai Lanhong. Impact energy release and damage characteristics of two high-entropy alloys. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(9): 2528-2540

high-entropy alloy fragments to the subsequent multi-layered targets were studied. The study found that FeNiMoW and FeNiCoCr high-entropy alloy fragments began to react releasing chemical energy at around 1356 m/s and 1217 m/s, respectively. There was no chemical reaction reacted below this velocity. It was obvious that the impact velocities had a great influence to the release energy of the two high-entropy alloy fragments. As the velocity increased, the energy release response of the fragments became more intense, the peak overpressure showed a rising trend and the rising velocity became faster. As the thickness of the front steel target increased from 1 mm to 5 mm at an impact velocity of approximately 1600 m/s, it could be seen that the peak overpressures of FeNiMoW fragments showed a rise trend, and the peak overpressures of FeNiCoCr fragments showed a downward trend. In the process of the fragments perforating the front steel target and penetrating the multi-layered aluminum targets, the reduction of the release energy reaction degree will contribute to the enhancement of the penetration effect of the fragments, and the more increasing thickness of the front steel target will reduce the penetration and damage effect of the fragments to the multi-layered aluminum targets. On the other hand, as the thickness of the front steel target increases, the area of the first layer of aluminum target damaged by the fragments first increases and then decreases.

Key words quasi-sealed test chamber, energy release characteristics, multi-layered target, damage characteristics

引言

目前传统合金的性能开发趋于饱和, 高熵合金颠覆性的合金设计理论引起了学术界极大的关注, 相关的研究得到了快速发展^[1]. 学者们对于高熵合金的研究成果主要归纳为五大效应, 即热力学上的高熵效应、动力学上的迟滞扩散效应、结构上的晶格畸变效应、性能上的“鸡尾酒”效应及组织上的高稳定性^[2-6]. 具有高强度、高硬度、良好塑性和耐腐蚀性等优异的综合性能^[7-11]. 高熵合金优异的性能为材料开发、医疗器械、工业部件等多个领域带来了极大的突破, 极具应用潜力.

2017年, Zhang等^[12]首次提出, 采用难熔高熵合金替代传统的惰性破片作为结构释能材料. 通过准静态力学试验、分离式霍普金森压杆试验及弹道试验^[13], 得到了 HfZrTiTa_{1.29} 和 HfZrTiTa_{1.00} 合金具有高强度、高密度、高含能和高绝热剪切敏感性等特点, 可实现对目标的高效毁伤. 王睿鑫^[14]提出在单相均匀亚稳的 NbZrTiTa 高熵合金中原位诱发相变增塑 (TRIP) 效应, 对合金亚稳单相固溶体结构的形成规律及其在不同加载速率下的组织结构、力学性能和释能特性的演变规律等方面进行研究, 得到铸态 NbZrTiTa 高熵合金的动态高塑性和高绝热剪切带产生应变率阈值, 避免了高速侵彻过程中的提前破碎并积累大量的应变能, 实现了高破碎率和高释能率, 且在 1200 m/s 侵彻速度下, 铸态 NbZrTiTa 高熵合金释能超压峰值可实现对人员的有效杀伤.

当前, 学者们已经开发研究的高熵合金主要是以 FeNiCoCr 系为代表的面心立方 (face-centered cubic, FCC) 高熵合金和以 NbMoTaW 系为代表的体心立方 (body-centered cubic, BCC) 高熵合金^[15], 本文的研究对象为 FCC 高熵合金类中的 FeNiCoCr 和 FeNiMoW 两种典型高熵合金材料. FeNiCoCr, FeNiMoW 两种典型高熵合金现有的相关工作大都是针对其微观结构、调整组织成分等来改善材料力学性能等^[16-19]. 在准静态和动态加载条件下, 张团卫等^[20]研究了 FeNiCoCr 在准静态 ($1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$) 和动态 ($1000 \sim 6000 \text{ s}^{-1}$) 拉伸下的变形响应. 修正了位错密度演化模型, 引入泰勒硬化模型, 捕捉了 FeNiCoCr 的硬化行为; 陈海华等^[21]针对 FeNiMoW 高熵合金进行了准静态压缩、动态压缩及破片冲击试验, 研究了 FeNiMoW 高熵合金在不同应变率下的变形行为、微观变形机制及侵彻性能, 指出 FeNiMoW 破片在对靶板侵彻时存在释能现象.

本文采用准密闭试验容器测试系统, 研究 FeNiMoW, FeNiCoCr 两种典型高熵合金破片在 500 ~ 1800 m/s 速度范围内的冲击反应释能行为. 同时, 利用该冲击释能特性测试装置, 开展高熵合金破片侵彻不同厚度靶板后对多层目标的毁伤特性研究, 在相同撞击速度下, 探讨厚度范围为 1 ~ 5 mm 的前置钢靶对后续多层铝板毁伤效果的影响机制, 为高熵合金的工程化应用提供技术支撑.

1 两种高熵合金制备与试验方案

1.1 两种高熵合金材料制备

本文所用高熵合金材料为 FeNiMoW 和 FeNiCoCr, 均由四种合金元素氧化物去除氧化皮、隔离清洗、打磨后按等摩尔比制备而成. 制备工艺流程如图 1 所示. 其中, FeNiMoW 是基于电磁悬浮熔炼技术, 在惰性气体环境中采用水冷法在铜坩埚上制备^[21-22]; FeNiCoCr 则是在氩气保护的真空环境下感应熔炼

制成. 制备过程中, 至少经过五次翻转熔炼使得金属原料间得到充分混合. 为保证两种合金的均匀性, 对铸锭进行缓慢加热至 1200 °C 后进行氩气保温保护 24 小时, 然后空冷. FeNiCoCr 热锻开胚时, 采用大于等于 4 锻造比开胚, 终锻温度大于等于 900 °C. 最终制备的 FeNiMoW 和 FeNiCoCr 高熵合金密度分别为 12.7 g/cm³ 和 8.2 g/cm³, 通过线切割工艺切取试验样品. 如图 2 所示, 试验中两种高熵合金破片呈圆柱形, 尺寸大小为 $\Phi 7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$.

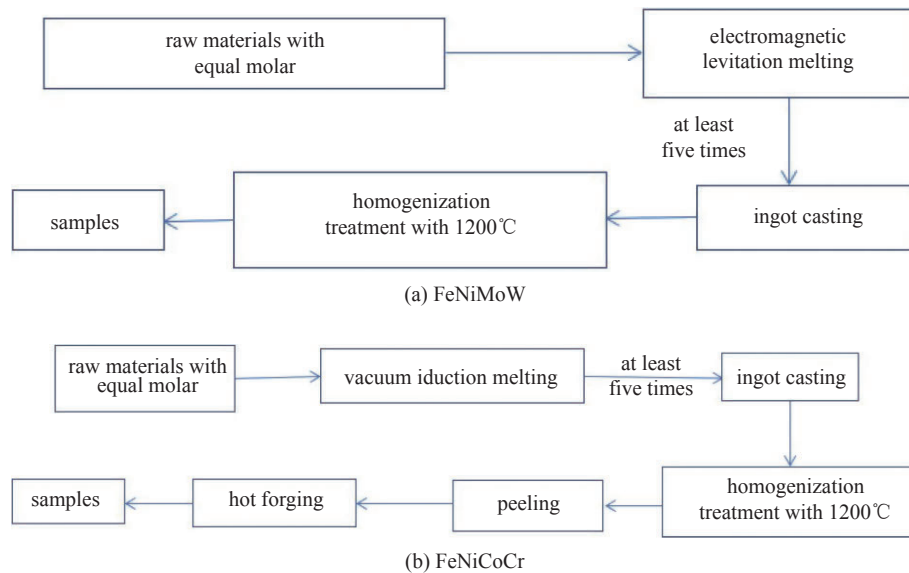


图 1 测试样品制备流程

Fig. 1 The preparation process of test samples

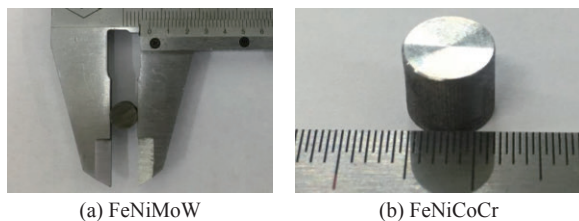


图 2 测试破片

Fig. 2 The test fragments

1.2 试验装置及方法

1.2.1 典型高熵合金冲击释能特性测试

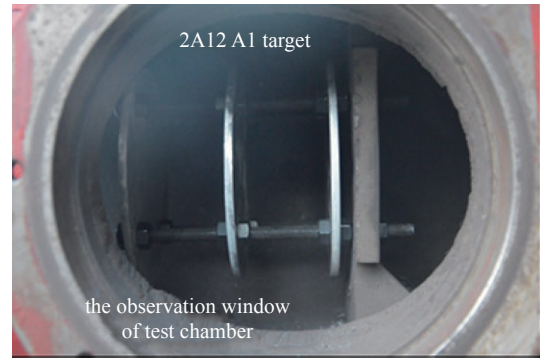
为了研究两种典型高熵合金材料在不同撞击速度下的冲击释能特性, 采用 $\Phi 14.5 \text{ mm}$ 弹道枪、准密闭试验容器、测压装置及高速摄影等测试系统开展了 FeNiMoW 和 FeNiCoCr 两种高熵合金破片的冲击释能试验. 试验布局如图 3 所示, 其中, 准密闭

试验容器近似圆柱型, 长 630 mm, 内径 270 mm, 容器体积约为 35.2 L; 压阻式压力传感器型号为 CYG145, 量程为 2 MPa, 灵敏度为 2.5 V/MPa; 高速摄像型号为 FASTCAM Mini AX200 type 200K-C-16 GB, 拍摄速度为 43 200 帧/s.

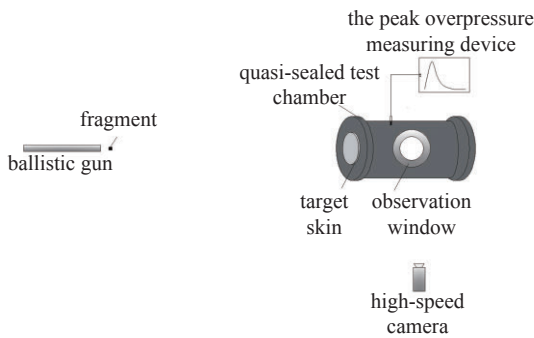
试验时, 通过 $\Phi 14.5 \text{ mm}$ 弹道枪发射平台赋予两种高熵合金破片初速, 通过改变发射装药药量控制破片发射速度在 500 ~ 1800 m/s 范围内. 破片撞击容器前端 0.5 mm 厚的铁皮, 发生破碎后进入容器内对 15 mm 厚的后效钢靶进行二次撞击, 发生释能反应. 在容器壁安装的压阻式压力传感器另一端通过与 TPP 便携式数据采集仪连接, 通过设置 2.5 mV 的触发电平、1 MHz 的采样频率来启动测试系统并记录容器内部冲击释能反应造成的压力变化. 通过试验容器侧面的透明玻璃观测窗, 采用高速摄影记录破片释能反应过程.



(a) 实物图
(a) Physical map



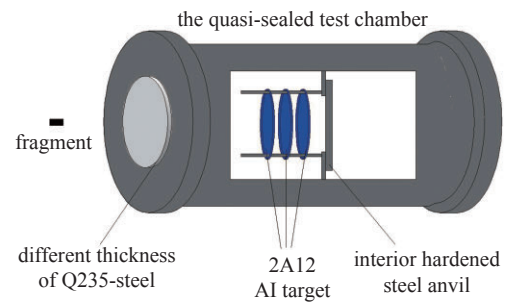
(a) 实物图
(a) Physical map



(b) 示意图
(b) Schematic diagram

图 3 试验布局图

Fig. 3 The test layout



(b) 示意图
(b) Schematic diagram

图 4 破片侵入不同厚度钢靶后对多层靶板毁伤测试布局图

Fig. 4 Layout of multi-layered plates after fragments penetrate into steel-target with different thicknesses

1.2.2 典型高熵合金侵入多层目标毁伤效应测试

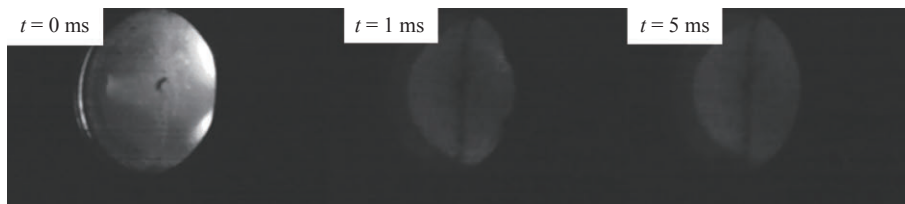
为探索相同撞击速度下, FeNiMoW 和 FeNiCoCr 两种高熵合金破片侵入不同厚度钢靶后的释能行为对多层铝板的毁伤效应, 本文基于冲击释能特性测试系统, 进行了两种高熵合金侵入多层目标毁伤效应测试试验, 并与撞击 0.5 mm 前置钢靶后进入容器内撞击后效钢靶的情况进行对比. 容器前端使用不同厚度 (1 ~ 5 mm) 的 Q235 钢靶, 内部分别间隔 60 mm 放置三层厚度为 5 mm 的铝板作为后靶, 各层铝板通过长螺栓链接, 使用螺母进行固定定位, 如图 4 所示. 试验中, 控制撞击速度在 1600 m/s 左右. 通过容器侧面观察窗, 用高速摄影观察破片穿过前

置钢靶并撞击容器内多层铝板释能毁伤过程及现象; 同时, 通过测压装置测试容器内冲击反应超压变化情况.

2 两种高熵合金高速冲击反应特性研究

2.1 冲击反应释能现象

图 5 ~ 图 7 为高速摄影记录的两种高熵合金破片和 45 钢破片在典型速度下撞击试验容器时冲击释能反应现象. 将破片撞到容器内后置钢靶瞬间设为 $t = 0$. 从图 5 中可以看出, 与两种高熵合金破片相近质量、速度的 45 钢破片撞击到后置钢靶后, 容器



(a) 钢破片, $v = 1278 \text{ m/s}^{[23]}$
(a) Steel fragment, $v = 1278 \text{ m/s}^{[23]}$

图 5 典型破片进入容器内的试验现象

Fig. 5 The impact reaction of typical fragments in the chamber

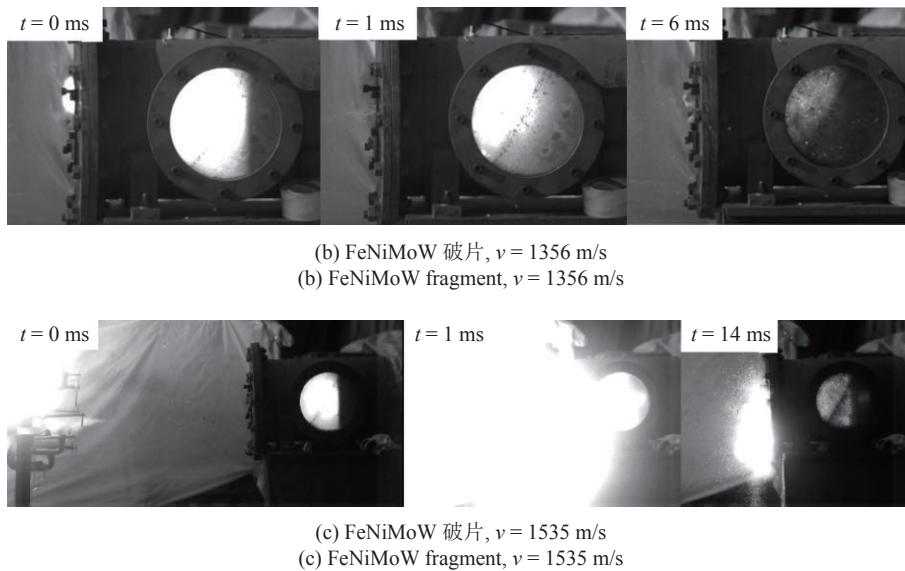


图 5 典型破片进入容器内的试验现象 (续)

Fig. 5 The impact reaction of typical fragments in the chamber (continued)

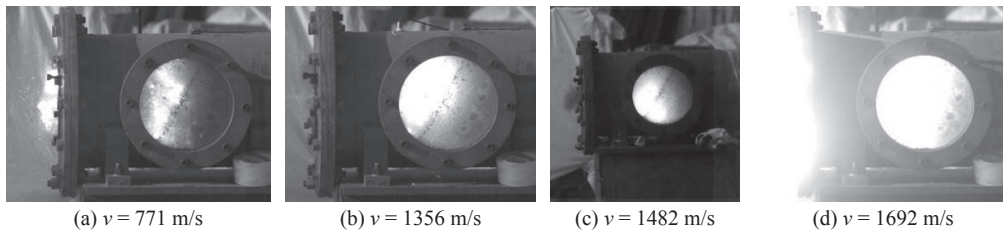


图 6 FeNiMoW 破片典型速度冲击反应现象

Fig. 6 Typical velocities impact reaction of FeNiMoW fragments

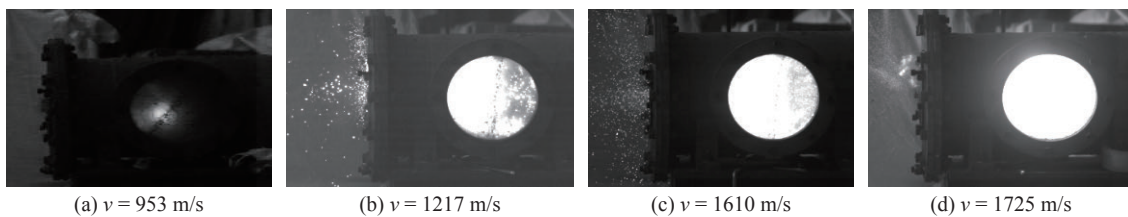


图 7 FeNiCoCr 破片典型速度冲击反应现象

Fig. 7 Typical velocities impact reaction of FeNiCoCr fragments

内产生微弱的火光并迅速衰减甚至消失^[23], 总时长小于 1 ms. 而 FeNiMoW 破片在相近速度下撞击后置钢靶瞬间火光明明显增强并持续一段时间, 说明发生了化学反应, 释放了能量. 且随着撞击速度的增大, FeNiMoW 破片撞击后效钢靶产生的火光增强, 持续时间变长. 从图 6 和图 7 可以看出, 典型撞击速度下 FeNiCoCr 火光变化情况与 FeNiMoW 一致, 说明在一定撞击速度范围内, 两种高熵合金破片部分发生化学反应, 且随着撞击速度的增加, 材料发生化学反应增强, 释放更多的化学能.

2.2 准密闭容器内准静态超压曲线分析

处理压阻式压力传感器所测信号, 得到两种高熵合金破片典型撞击速度下容器内的压力变化情况, 如图 8 所示. 表 1 为破片在不同撞击速度下的容器内压力峰值. 由图表可得, FeNiMoW 在 771 m/s 的速度下, 未测到超压信号, 即超压峰值为 0 MPa; 在 1356 m/s 的速度下, 发生微弱反应, 产生 5 kPa 的超压峰值. FeNiCoCr 破片在 953 m/s 的速度下, 超压峰值为 0; 速度为 1217 m/s 时, 超压峰值为 3 kPa, 释能反应微弱. 当撞击速度增大时, 两种高熵合金破片超

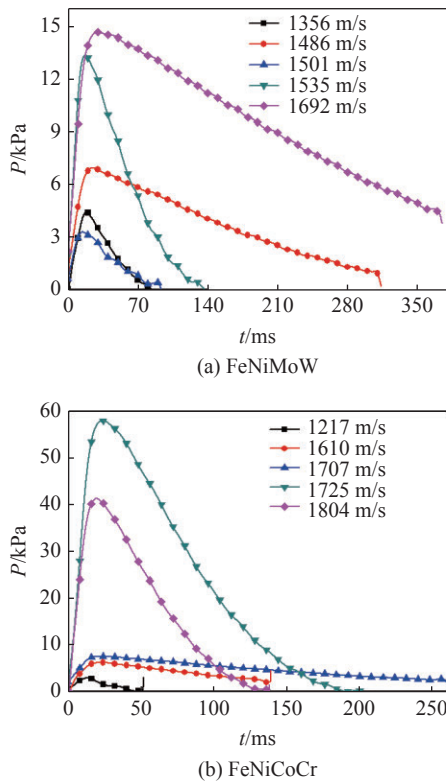


图 8 不同破片在典型速度下的压力-时程曲线
Fig. 8 $P-T$ curves of different fragments at typical velocities

表 1 两种高熵合金破片不同撞击速度下超压峰值变化情况
Table 1 Different peak overpressures of two high-entropy alloy fragments at different impact velocities

Shots	Material	m/g	$v/(m \cdot s^{-1})$	P/kPa
1		3.40	771	0
2		3.40	1356	5
3	FeNiMoW	1.84	1482	7
4		1.87	1501	4
5		3.29	1535	15
6		2.22	1692	14
7		1.88	953	0
8		1.88	1217	3
9	FeNiCoCr	1.87	1610	6
10		1.83	1707	8
11		1.86	1725	59
12		1.87	1804	42

压峰值显著增强. 1356 m/s, 1217 m/s 可以分别视为 FeNiMoW, FeNiCoCr 两种高熵合金材料发生释能反应的阈值速度. 在 500 m/s ~ 1800 m/s 的撞击速度范围内, 随着撞击速度的增加, FeNiMoW 破片压力峰值不断增大, 压力卸载时间先增大后减小. 撞击速度

较低时, FeNiMoW 破片没有发生充分反应, 压力峰值较小, 随着撞击速度的增加, 释能反应增强, 反应产物增加, 容器内压力峰值变大, 前端铁皮穿孔处卸载产物时间增加; 当破片速度增至 1692 m/s, 反应加剧, 超压峰值明显增大, 大量产物喷出, 容器内压力快速下降, 压力卸载时间减少. FeNiCoCr 破片压力峰值和超压持续时间整体上均随撞击速度的增大而增大.

2.3 冲击释能规律分析

2.3.1 超压峰值变化规律

不同撞击速度下, 两种高熵合金破片在试验容器内反应的超压峰值拟合曲线如图 9 所示. 在 500 m/s ~ 1800 m/s 的速度范围内, 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. 超压峰值和撞击速度呈正相关, 与图 6, 图 7 中破片冲击反应现象吻合.

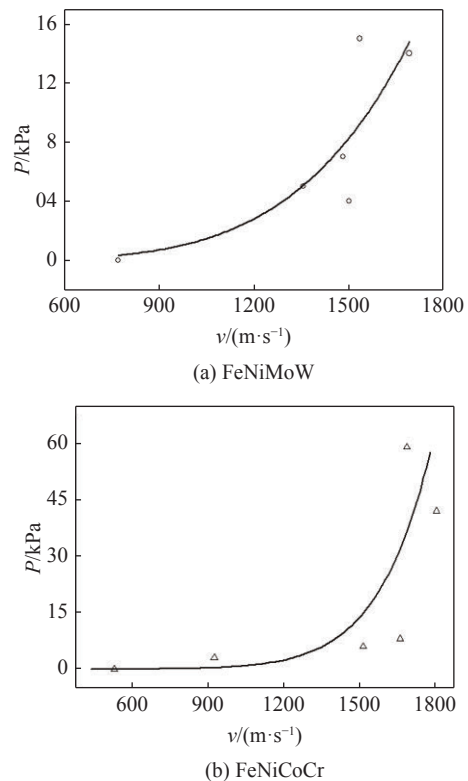


图 9 两种高熵合金破片不同速度下压力峰值变化规律
Fig. 9 The peak overpressures at different speeds of two high-entropy alloy fragments

2.3.2 冲击释能特性分析

THOR 方程可用于预估破片对间隔装甲的连续侵入, 破片撞击前层靶板后剩余质量作为侵入下层靶板初始质量, 直到破片剩余质量为零. 本文利用该

方程计算破片撞击前端靶板后进入容器的剩余质量, 即破片发生反应释能质量 M_r ^[24-25]

$$M_r = M - 6.48 \times 10^{R_1} \times (61023.75hA)^{R_2} \times (15432.1M)^{R_3} \times (\sec\theta)^{R_4} \times (3.28084v)^{R_5} \quad (1)$$

其中, h 为靶板厚度; v 为破片速度; θ 为破片与靶板之间夹角, 本文取 $\theta = 0^\circ$; A 和 M 分别为破片碰撞面积和破片初始质量; $R_1 \sim R_5$ 为根据靶板材料所取常数, 本文取 $R_1 = -2.507$, $R_2 = 0.138$, $R_3 = 0.853$, $R_4 = 0.143$, $R_5 = 0.761$.

破片进入容器内, 撞击后端靶板时一部分动能 E_k 转换成热能, 对超压峰值有一定贡献. 容器内增加的总能量 ΔQ 由破片发生反应释放的化学能 E_r 与破片动能 E_k 转换的热能组成^[26]. 根据 Ames 等^[26-28] 理论分析, 两种高熵合金破片发生冲击释能反应时容器内超压峰值与增加的总能量之间的关系

$$P = \frac{\gamma_a - 1}{V_E} \Delta Q \quad (2)$$

式中, γ_a 为容器内空气的比热比, 假设为定值 1.4, V_E 为密闭容器体积, P 为试验所测准静态压力峰值.

由于 FeNiMoW, FeNiCoCr 熔点较高, 所以本文不考虑容器中破片动能 E_k 贡献的能量.

单位质量破片释放的化学能为

$$e_r = \frac{\Delta Q}{M_r} \quad (3)$$

其中, M_r 为破片剩余质量, g.

根据试验所测超压峰值计算得到不同撞击速度下两种高熵合金破片单位质量释放的比化学能 e_r , 并进行非线性拟合, 如图 10 所示. 从图中可以看出, FeNiMoW, FeNiCoCr 破片在释能反应临界速度时, 两种高熵合金破片单位质量释放的比化学能极小, 接近于 0. 撞击速度在 500 m/s ~ 1800 m/s 内逐渐增加, 单位质量两种高熵合金破片释放的比化学能 e_r 不断增大, 其中, FeNiMoW 最大释能 $Q = 0.58$ kJ/g, FeNiCoCr 最大释能 Q 至少为 2.085 kJ/g.

含能结构材料发生冲击释能反应时的反应类型, 主要归纳为 3 种: 金属氧化反应、金属合金化反应及铝热反应. 参照 Fischer 和 Grubelich^[29] 研究的金属合金化反应表、金属燃烧反应表, 两种高熵合金材料组成元素各金属间较难发生反应, 各金属元素发生氧化反应及释能情况如下

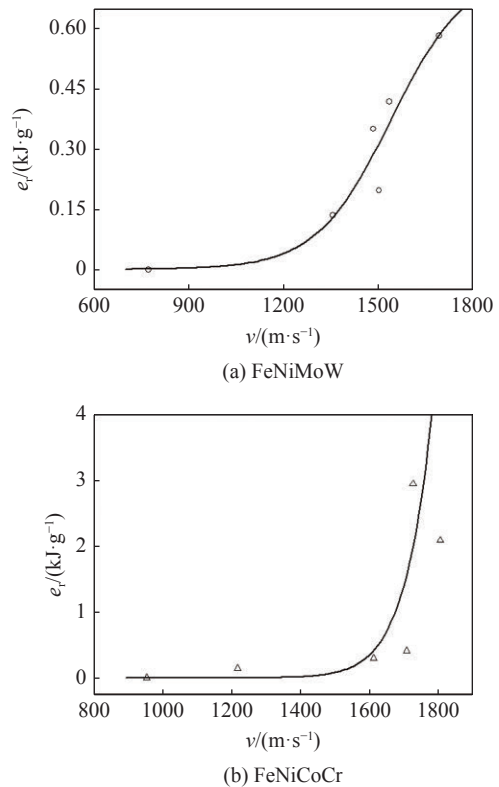
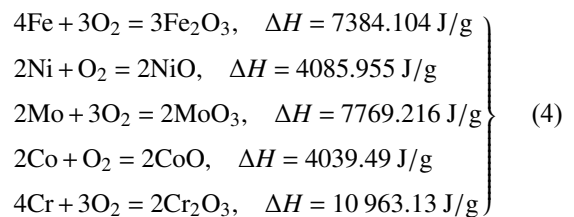


图 10 不同撞击速度下两种高熵合金破片单位质量的释能特性
Fig. 10 The energy release characteristics per unit mass of two high-entropy alloy fragments at different impact velocities



其中, W 元素氧化反应所需温度较高, 本文不考虑其发生氧化反应.

根据两种高熵合金组成元素氧化反应产物, 结合铝热反应表^[29], 假设 Fe, Ni, Co, Cr, Mo, W 与氧化反应中生成的氧化物不发生二次反应.

表 2、表 3 分别为 FeNiMoW 和 FeNiCoCr 各组成元素的质量比、摩尔比及摩尔质量比. 试验中, 假设破片能够充分与氧气接触, 发生完全氧化反应. 根据表 2、表 3 所列两种高熵合金材料组成元素质量

表 2 FeNiMoW 各组分的典型配比

Table 2 Typical proportions of FeNiMoW components				
	Fe	Ni	Mo	W
$W_i/\%$	14.16	14.88	24.33	46.63
$n/\%$	25	25	25	25
$M/(\text{g}\cdot\text{mol}^{-1})$	55.85	58.69	95.95	183.86

表 3 FeNiCoCr 各组分的典型配比

Table 3 Typical proportions of FeNiCoCr components				
	Fe	Ni	Co	Cr
$W_i/\%$	24.77	26.03	26.14	23.06
$n_i/\%$	25	25	25	25
$M/(g \cdot mol^{-1})$	55.85	58.69	58.933	51.996

分数, 结合式 (4), 计算出单位质量两种典型高熵合金氧化反应释放能量. 单位质量 FeNiMoW 完全发生化学反应释放的总化学能 Q 为 3.54 kJ, 单位质量 FeNiCoCr 完全发生化学反应释放的总化学能 Q 为 6.48 kJ.

不同撞击速度情况下, 单位质量两种高熵合金破片释能效率 y

$$y = \frac{e_r}{Q} \quad (5)$$

根据式 (5) 计算所得释能效率数值, 进行非线性拟合, 如图 11 所示, 单位质量两种高熵合金破片的

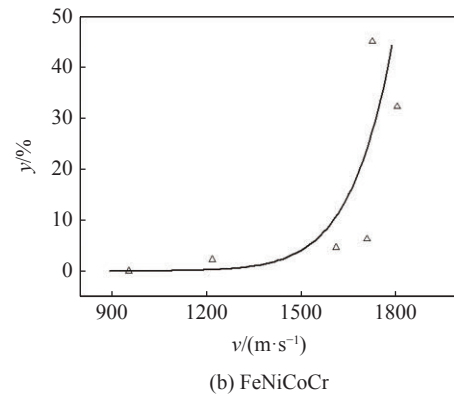
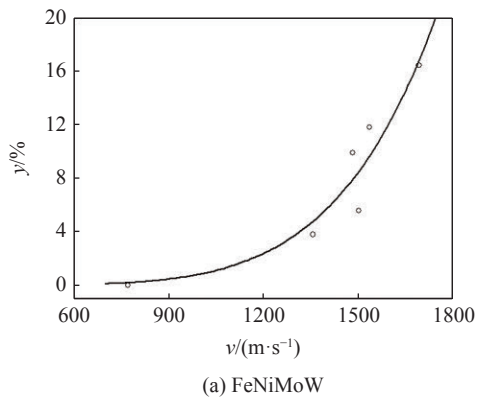


图 11 不同撞击速度下两种高熵合金破片单位质量的释能效率
Fig. 11 The energy release efficiency per unit mass of two high-entropy alloy fragments under different impact velocities

释能效率与撞击速度呈正相关, 与其他学者^[30-31]对含能结构材料释能行为的研究规律一致. 在 500 m/s ~ 1800 m/s 的速度范围内, FeNiMoW 破片单位质量最大释能效率为 16.47%, FeNiCoCr 破片单位质量最大释能效率至少为 32.18%.

3 两种典型高熵合金侵彻典型多层靶板毁伤特性

3.1 高熵合金侵彻多层靶板释能特性分析

3.1.1 释能现象

图 12 为 FeNiMoW, FeNiCoCr 破片侵彻不同厚度钢靶后进入密闭容器内对多层铝板的释能现象. 其中, 0.5 mm 前置钢靶对应的后效靶为前述冲击释

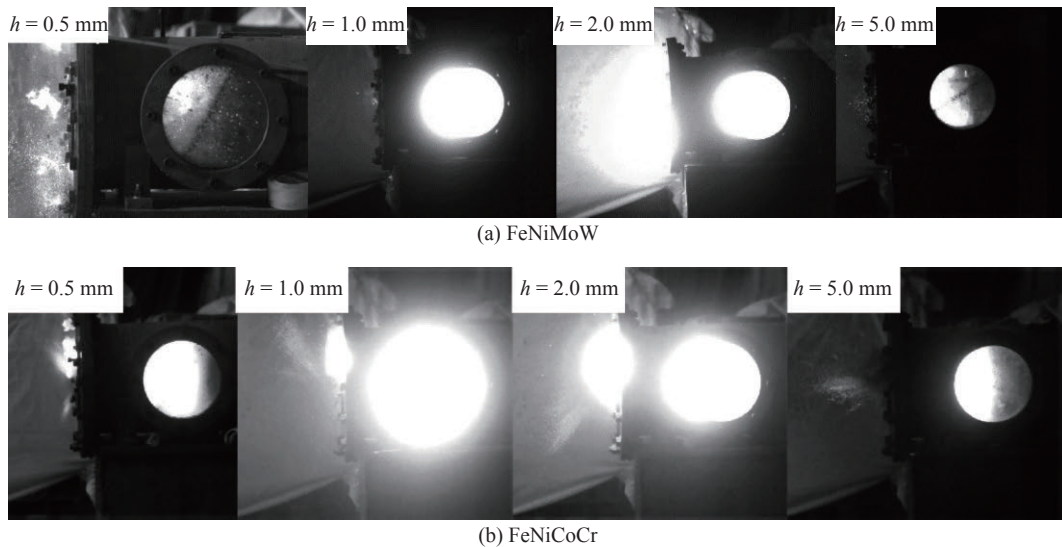


图 12 两种高熵合金破片在不同靶厚下的冲击反应试验现象

Fig. 12 The experimental phenomenon of impacting of two high-entropy alloy fragments under the targets of different thickness

能测试试验中的厚钢板, 这里用来进行对比分析. 撞击速度在 1600 m/s 左右时, 随着钢靶厚度 (0.5 ~ 2 mm) 的增加, FeNiMoW 破片在容器内反应火光增强明显, 光圈扩大, 且撞击 2 mm 厚的前置钢靶后有产物喷出, 但撞击 5 mm 厚的前置钢靶时 ($v = 1344$ m/s) 释能反应现象减弱. FeNiCoCr 破片在撞击前置钢靶时, 随着钢靶厚度 (0.5 ~ 1 mm) 的增加, 破片的释能反应增强, 且容器前端铁皮穿孔处有产物喷出, 钢靶厚度为 1 ~ 5 mm 时, 容器内火光逐渐减弱, 反应变弱.

3.1.2 准密闭容器内反应准静态压力特性

如图 13、图 14 所示为两种高熵合金破片穿透不同靶厚铁皮后, 对多层铝板毁伤释能时超压变化情况. 撞击速度在 1600 m/s 左右时, 随着前置钢靶厚度 (0.5 ~ 2 mm) 的增加, FeNiMoW 超压峰值上升, 当前置钢靶厚度为 5 mm 时 ($v = 1344$ m/s), 超压峰值有所下降; 前置钢靶厚度为 0.5 mm ~ 1 mm 时, FeNiCoCr 超压峰值增加, 前置钢靶厚度增加至 2 mm ~ 5 mm 时, 超压峰值逐渐下降. 与图 11 中两种高熵合金侵彻不同靶厚钢靶后进入容器内毁伤多

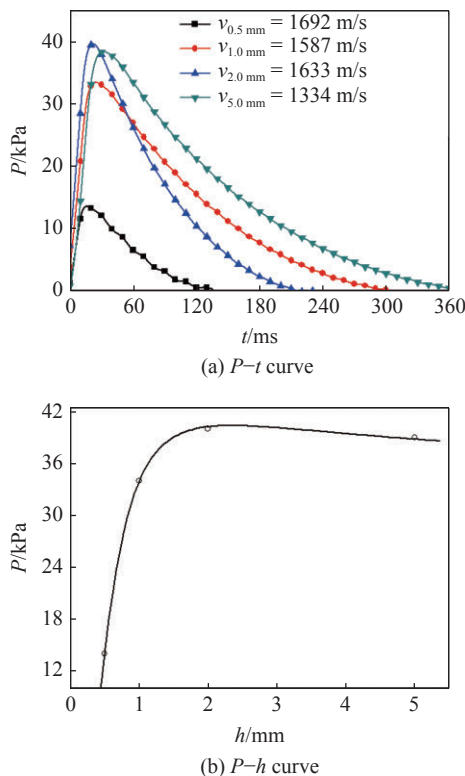


图 13 FeNiMoW 破片在不同靶厚下的超压峰值变化情况

Fig. 13 The peak overpressures of FeNiMoW fragments under the targets of different thickness

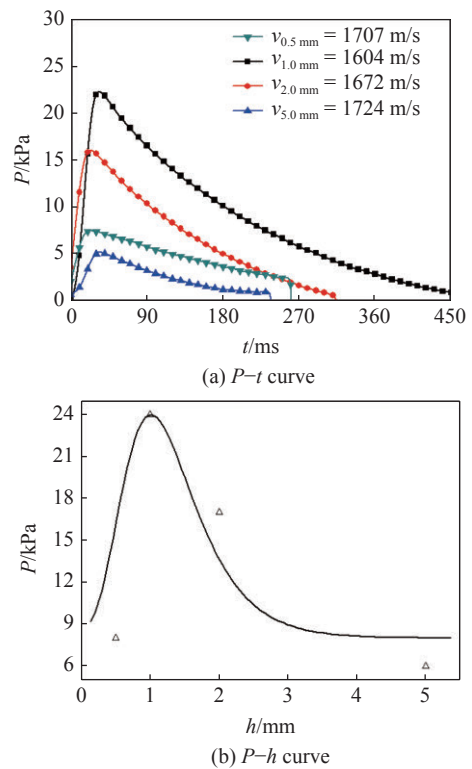


图 14 FeNiCoCr 破片在不同靶厚下的超压峰值变化情况

Fig. 14 The peak overpressures of FeNiCoCr fragments under the targets of different thickness

层铝板的试验现象规律吻合. 当撞击速度为 1600 m/s 左右, 前端靶板厚度为 0.5 ~ 5 mm 时, FeNiMoW 和 FeNiCoCr 最大超压峰值分别为 40 kPa 和 24 kPa.

3.1.3 两种高熵合金破片侵彻多层靶板过程释能特性分析

结合式 (1) ~ 式 (5), 得到 FeNiMoW 和 FeNiCoCr 侵彻 0.5 mm ~ 5 mm 前置钢靶后的比化学能-靶厚曲线和释能效率-靶厚曲线如图 15 和图 16 所示. 撞击速度在 1600 m/s 左右时, 前置钢靶厚度在 0.5 ~ 2 mm 内, 单位质量 FeNiMoW 破片比化学能及释能效率逐渐增大. 当前置钢靶厚度为 5 mm 时, 破片速度 ($V = 1344$ m/s) 相对 1600 m/s 较小, 单位质量 FeNiMoW 破片比化学能及释能效率有所下降, 但下降不明显, 所以, 当前置钢靶厚度大于 1 mm 时, 单位质量 FeNiMoW 破片比化学能及释能效率整体上呈上升趋势. 前置钢靶厚度在 0.5 ~ 1 mm 内, 单位质量 FeNiCoCr 破片比化学能及释能效率增大, 当前置钢靶厚度大于 1 mm 时, 单位质量 FeNiCoCr 破片比化学能及释能效率呈下降趋势. 两种高熵合金一定速度下侵彻不同厚度靶板释能规律与 Zhang 等^[32]

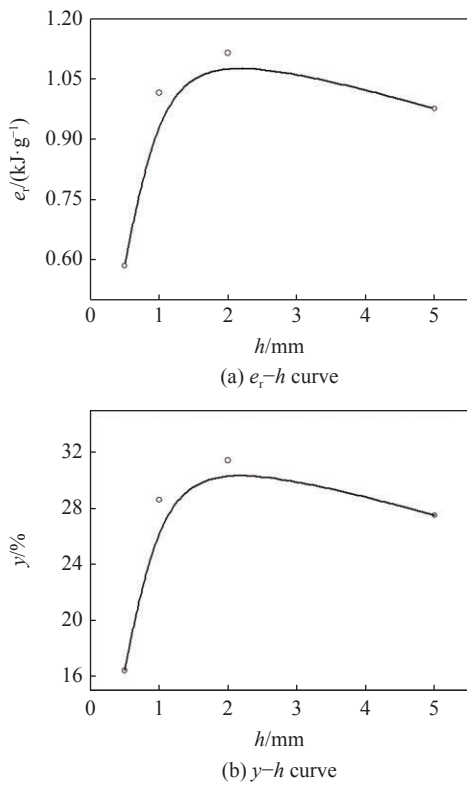


图 15 FeNiMoW 材料的毁伤特性

Fig. 15 Damage characteristics of FeNiMoW

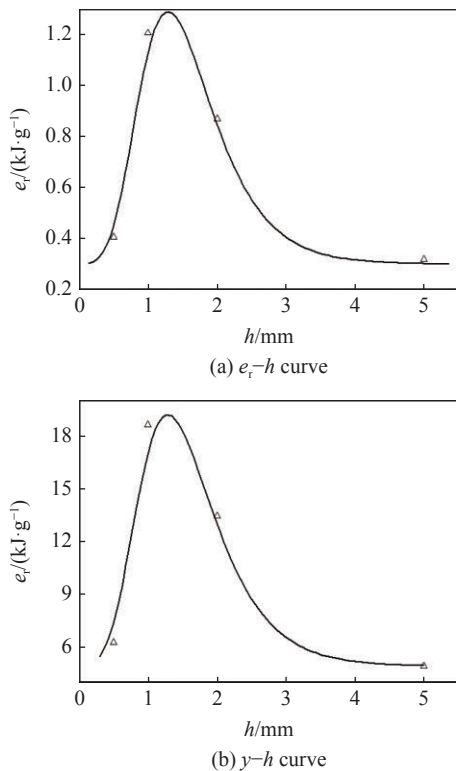


图 16 FeNiCoCr 材料的毁伤特性

Fig. 16 Damage characteristics of FeNiCoCr

对活性含能材料侵彻不同厚度靶板的释能规律相似。当撞击速度为 1600 m/s 左右, 前端靶板厚度为

0.5 ~ 5 mm 时, 单位质量 FeNiMoW 与 FeNiCoCr 最大释能分别为 1.1 kJ 和 1.2 kJ, 最大释能效率分别为 31.4% 和 18.6%.

3.2 高熵合金破片侵彻多层靶板毁伤特性分析

FeNiMoW 和 FeNiCoCr 破片侵彻不同厚度钢靶后进入密闭容器内对多层铝板的毁伤作用如图 17 所示. 相同撞击速度下, 破片撞击容器前端不同厚度铁皮后发生不同程度破碎, 进入容器撞击多层铝板发生释能反应, 对靶板进行侵彻毁伤作用, 反应产物从前端铁皮穿孔处喷出.

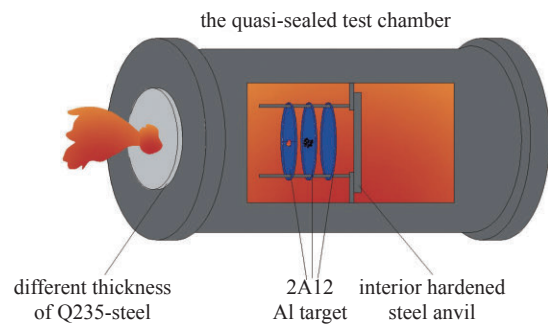


图 17 高熵合金破片对多层铝板的毁伤示意图

Fig. 17 Schematic diagram of damage of high-entropy alloy fragments to multi-layered aluminum plates

图 18 为 FeNiMoW 破片侵彻不同厚度钢靶后对多层铝板的毁伤效果, 表 4 为铝板毁伤面积具体情况. 撞击速度在 1600 m/s 左右时, FeNiMoW 侵彻 1 mm 前置钢靶后, 对第一层铝板造成较大穿孔, 铝

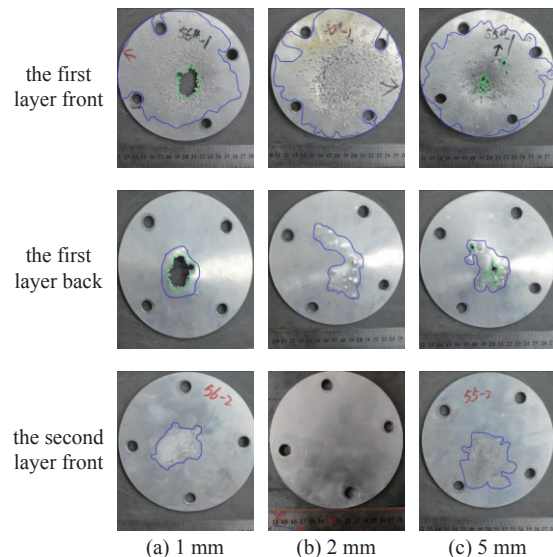


图 18 FeNiMoW 材料侵彻不同厚度钢靶后对多层铝板的毁伤效果
Fig. 18 The damage of FeNiMoW on the multi-layered aluminum plate after penetrating the different thickness of steel-targets

表 4 FeNiMoW 侵彻不同厚度钢靶后对多层铝板的毁伤面积
Table 4 The damaged areas of FeNiMoW on the multi-layered aluminum plates after penetrating the diferent thickness of steel-targets

Thickness of front steel target/mm	Damaged areas of LY12 Al targets/mm ²		
	first layer front	second layer front	third layer front
1	14452	1809	0
2	16468	0	0
5	15205	3169	0

板背面穿孔周围隆起,而在第二层铝板上留下碎片痕迹.侵彻 2 mm 前置钢靶后,铝板背面出现凸起但未造成穿孔,说明破片对第一层铝板的穿孔毁伤效果降低.进一步,随着前置钢靶厚度增大至 5 mm,对铝板的穿孔毁伤相对侵彻 2 mm 前置钢靶时增加.由图 15 可知,随着前置钢靶厚度从 1 mm 增大至 5 mm,其反应程度先增大后降低,与该试验中破片穿孔能力相反.这是由于 FeNiMoW 氧化反应后生成的产物强度降低所致,反应程度越高,破片对铝靶的穿孔毁伤能力越弱.另一方面,从表 4 可知,随着前置钢靶厚度从 1 mm 增大至 2 mm,FeNiMoW 破碎程度增强,对铝板毁伤面积增大.当前置钢靶厚度继续增大至 5 mm 时,毁伤面积减小,该现象是由破片靶外质量损失增大导致.

图 19 为 FeNiCoCr 破片侵彻不同厚度钢靶后对多层铝板的毁伤效果,表 5 为铝板毁伤面积具体情况.撞击速度在 1600 m/s 左右时,FeNiCoCr 侵彻 1 mm 前置钢靶后,穿过第一、二层铝板形成单个穿孔,而在第三层靶板上形成弹坑.侵彻 2 mm 前置钢靶后,破片发生破碎并在第一层铝板上形成多个穿孔,其对铝靶的穿孔毁伤效果增强.进一步,当钢靶厚度增加至 5 mm 时,破片对第一层铝板的穿孔毁伤减弱.由图 16 可知,随着前置钢靶厚度从 1 mm 增大至 2 mm,其反应程度呈下降趋势,与该试验中破片穿孔能力相反.这是由于 FeNiCoCr 氧化反应后生成的产物强度降低所致,反应程度越低,破片对铝靶的穿孔毁伤能力越强.另一方面,从表 5 可知,随着前置钢靶厚度从 1 mm 增大至 2 mm,FeNiMoW 破碎程度增强,对铝板毁伤面积增大.当前置钢靶厚度继续增大至 5 mm 时,毁伤面积及穿孔毁伤程度减小,该现象是由破片靶外质量损失增大导致.

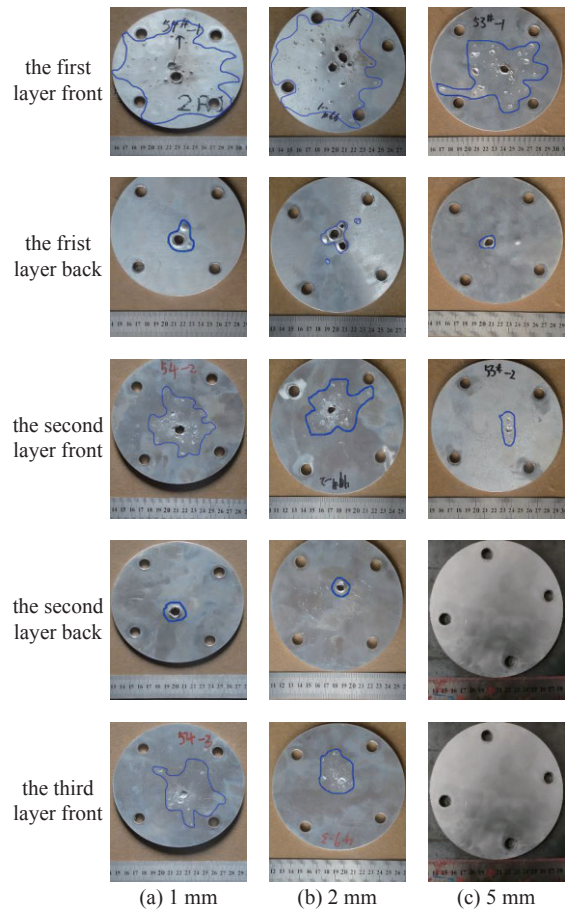


图 19 FeNiCoCr 材料侵彻不同厚度钢靶后对多层铝板的毁伤效果
Fig. 19 The damage of FeNiCoCr on the multi-layered aluminum plate after penetrating the diferent thickness steel-targets

表 5 FeNiCoCr 侵彻不同厚度钢靶后对多层铝板的毁伤面积
Table 5 The damaged areas of FeNiCoCr on the multi-layered aluminum plates after penetrating the diferent thickness of steel-targets

Thickness of front steel target/mm	Damaged areas of LY12 Al targets/mm ²		
	first layer front	second layer front	third layer front
1	8394	3290	3413
2	10557	2688	1618
5	5035	544	0

4 结论

本文通过冲击释能特性测试装置开展了 500 m/s ~ 1800 m/s 速度范围内两种典型高熵合金破片冲击释能特性试验,分析了两种典型高熵合金破片释能过程、超压变化及释能规律,并基于该试验系统进行了两种典型高熵合金破片侵彻不同厚度靶板后对多

层目标的毁伤特性研究, 讨论了不同厚度靶板对两种典型高熵合金破片的冲击释能、释能效率及毁伤后效的影响, 得到如下结论:

(1) FeNiMoW 和 FeNiCoCr 破片释能反应阈值速度分别为 1356 m/s 和 1217 m/s, 达到反应阈值后, 撞击速度的增加对两种高熵合金冲击释能反应及释能效率显著增强. 在 500 m/s ~ 1800 m/s 速度范围内, 单位质量 FeNiMoW 破片冲击反应最大释能效率为 16.47%, 单位质量 FeNiCoCr 破片冲击反应最大释能效率至少为 32.18%.

(2) 在 1600 m/s 左右的撞击速度下, 随着前置钢靶厚度从 1 mm 增加至 5 mm, FeNiMoW 超压峰值呈先上升再下降趋势, FeNiCoCr 超压峰值呈下降趋势. 单位质量 FeNiMoW 在撞击 2 mm 前置钢靶时达到最大释能效率 (31.4%); 单位质量 FeNiCoCr 在撞击 1 mm 前置钢靶时达到最大释能效率 (18.6%).

(3) 在 1600 m/s 左右的撞击速度下, 随着前置钢靶厚度从 1 mm 增加至 5 mm, FeNiMoW 破片释能反应整体上呈上升趋势, FeNiCoCr 破片释能反应呈下降趋势. 破片在侵彻多层靶标过程中, 释能反应的降低对靶标的穿孔毁伤增强有一定贡献. 当前置钢靶厚度进一步增大时, 破片对铝靶的穿孔毁伤能力降低. 另一方面, 随着前置钢靶厚度的增大, 破片对第一层铝靶毁伤面积先增大后减小.

参 考 文 献

- 吕昭平, 雷智锋, 黄海龙等. 高熵合金的变形行为及强韧化. 金属学报, 2018, 54(11): 1553-1566 (Lü Zhaoping, Lei Zhifeng, Huang Hailong, et al. Deformation behavior and toughening of high-entropy alloys. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(11): 1553-1566 (in Chinese))
- 张勇, 陈明彪, 杨潇. 先进高熵合金技术. 北京: 化学工业出版社, 2017 (Zhang Yong, Chen Mingbiao, Yang Xiao. *Advanced High-entropy Alloy Technology*. Beijing: Chemical Industry Press, 2017 (in Chinese))
- Miracle DB, Senkov ON. A critical review of high-entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 2017, 122: 448-511
- Chou HP, Chang YS, Chen SK, et al. Microstructure, thermophysical and electrical properties in $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ ($0 \leq x \leq 2$) high-entropy alloys. *Materials Science and Engineering-B*, 2009, 163(3): 184-189
- Tsai KY, Tsai MH, Yeh JW. Sluggish diffusion in Co-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloys. *Acta Materialia*, 2013, 61(13): 4887-4897
- Gludovatz B, Hohenwarter A, Catoor D, et al. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications. *Science*, 2014, 345(6201): 1153-1158
- 杨铭, 刘雄军, 吴渊等. 高熵非晶合金研究进展. 中国科学: 物理学 天文学, 2020, 50(6): 21-33 (Yang Ming, Liu Xiongjun, Wu Yuan, et al. Research progress on high-entropy bulk metallic glasses. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50(6): 21-33 (in Chinese))
- 温晓灿, 张凡, 雷智锋等. 高熵合金中的第二相强韧化. 中国材料进展, 2019, 38(03): 242-250 (Wen Xiaocan, Zhang Fan, Lei Zhifeng, et al. Second phase strengthening in high-entropy alloys. *Materials China*, 2019, 38(03): 242-250 (in Chinese))
- Zhang WR, Liaw PK, Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*, 2018, 61(1): 2-22
- 张勇, 周云军, 惠希东等. 大块金属玻璃及高熵合金的合金化作用. 中国科学 (G 辑: 物理学 力学 天文学), 2008(4): 439-448 (Zhang Yong, Zhou Yunjun, Hui Xidong, et al. Alloying effect of bulk metallic glass and high-entropy alloy. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2008(4): 439-448 (in Chinese))
- 李建国, 黄瑞瑞, 张倩等. 高熵合金的力学性能及变形行为研究进展. 力学学报, 2020, 52(2): 333-359 (Li Jianguo, Huang Ruirui, Zhang Qian, et al. Mechanical properties and behaviors of high-entropy alloys. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(2): 333-359 (in Chinese))
- Zhang Z, Hong Z, Yu T, et al. Microstructure, mechanical properties and energetic characteristics of a novel high-entropy alloy $\text{HfZrTiTa}_{0.53}$. *Materials & Design*, 2017, 133: 435-443
- 张周然. HfZrTiTa_x 高熵合金含能结构材料的组织结构与力学性能研究. [硕士学位论文]. 长沙: 国防科技大学, 2017 (Zhang Zhouan. *Microstructure and mechanical properties of HfZrTiTa_x high-entropy alloys energetic structural materials*. [Master's Thesis]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017 (in Chinese))
- 王睿鑫. NbZrTiTa 高熵合金的组织结构演变及结构释能特性研究. [硕士学位论文]. 长沙: 国防科技大学, 2018 (Wang Ruixin. *Microstructure evolution and energetic structural properties of NbZrTiTa high-entropy alloy*. [Master's Thesis]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018 (in Chinese))
- 李甲, 冯慧, 陈阳等. 高熵合金强韧化理论建模与模拟研究进展. 固体力学学报, 2020, 41(2): 93-108 (Li Jia, Feng Hui, Chen Yang, et al. Progress in theoretical modeling and simulation on strengthening and toughening of high-entropy alloys. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2020, 41(2): 93-108 (in Chinese))
- Chu C, Chen W, Chen Z, et al. Microstructure and mechanical behavior of FeNiCoCr and FeNiCoCrMn high-entropy alloys fabricated by powder metallurgy. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2021, 34(4): 445-454
- Xu J, Kong X, Chen M, et al. High-entropy FeNiCoCr alloys with improved mechanical and tribological properties by tailoring composition and controlling oxidation. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 82: 207-213
- Wu P, Gan K, Yan D, et al. A non-equiatomic FeNiCoCr high-entropy alloy with excellent anti-corrosion performance and strength-ductility synergy. *Corrosion Science*, 2021, 183: 109341
- Lin WT, Chen D, Dang CQ, et al. Highly pressurized helium nanobubbles promote stacking-fault-mediated deformation in FeNiCoCr high-entropy alloy. *Acta Materialia*, 2021, 210: 116843
- Zhang TW, Ma SG, Zhao D, et al. Simultaneous enhancement of strength and ductility in a NiCoCrFe high-entropy alloy upon dynamic tension: micromechanism and constitutive modeling. *International Journal of Plasticity*, 2020, 124: 226-246
- 陈海华, 张先峰, 熊玮等. WFeNiMo 高熵合金动态力学行为及侵彻性能研究. 力学学报, 2020, 52(5): 1443-1453 (Chen Haihua,

- Zhang Xianfeng, Xiong Wei, et al. Dynamic mechanical behavior and penetration performance of WFeNiMo high-entropy alloy. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(5): 1443-1453 (in Chinese)
- 22 Liu XF, Tian ZL, Zhang XF, et al. "Self-sharpening" tungsten high entropy alloy. *Acta Materialia*, 2020, 186: 257-266
- 23 熊玮, 张先锋, 陈亚旭等. 冷轧成型 Al/Ni 多层复合材料力学行为与冲击释能特性研究. *爆炸与冲击*, 2019, 39(5): 130-138 (Xiong Wei, Zhang Xianfeng, Chen Yaxu, et al. Mechanical properties and shock-induced chemical reaction behaviors of cold-rolled Al/Ni multi-layered composites. *Explosion And Shock Waves*, 2019, 39(5): 130-138 (in Chinese))
- 24 宋鸿武, 陈岩, 程明等. 异种金属层状复合材料累积叠轧工艺的研究进展. *材料导报*, 2011, 25(19): 7-12 (Song Hongwu, Chen Yan, Cheng Ming, et al. Progresses in the accumulative roll-bonding of clad bimetals. *Materials Review*, 2011, 25(19): 7-12 (in Chinese))
- 25 Lynch DD, Kunkel RW, Juarascio SS. An analysis comparison using the vulnerability analysis for surface targets (VAST) computer code and the computation of vulnerable area and repair Time (COV-ART III) computer code: ARL-MR-341. USA: Army Research Laboratory, 1997
- 26 Ames RG. Vented chamber calorimetry for impact-initiated energetic materials//43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2005
- 27 Ames RG. Energy release characteristics of impact-initiated energetic materials//MRS Online Proceedings Library (OPL), 2005: 896
- 28 Ames RG, Waggener SS. Reaction efficiencies for impact-initiated energetic materials//Proceedings of the 32nd International Pyrotechnics Seminar, Karlsruhe, Germany. 2005: 28
- 29 Fischer S, Grubelich M. A survey of combustible metals, thermites, and intermetallics for pyrotechnic applications//32nd Joint Propulsion Conference and Exhibit. 1996: 3018
- 30 Wang CT, He Y, Ji C, et al. Investigation on shock-induced reaction characteristics of a Zr-based metallic glass. *Intermetallics*, 2018, 93: 383-388
- 31 陈曦, 杜成鑫, 程春等. Zr 基非晶合金材料的冲击释能特性. *兵器材料科学与工程*, 2018, 41(6): 44-49 (Chen Xi, Du Chengxin, Cheng Chun, et al. Impact energy releasing characteristics of Zr-based amorphous alloy. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2018, 41(6): 44-49 (in Chinese))
- 32 Zhang YF, Luo XB, Liu GQ, et al. Shock-induced reaction characteristics of porous W/Zr-based metallic glass composite fragments. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(8): 2549-2556