

文章编号: 1003-1480 (2022) 02-0020-05

Cu-Ni-Al药型罩成分变化对靶板毁伤性能影响研究

刘文赫, 刘迎彬, 胡晓艳, 王兴杰

(中北大学环境与安全工程学院, 山西 太原, 030051)

摘要: 为了研究 Cu 含量对 Cu-Ni-Al 反应射流侵彻性能的影响, 采用粉末冶金法制备了 Cu 含量为 30%、50% 和 70% 的 Cu-Ni-Al 粉末药型罩并对其进行静破甲试验。结果表明: 随着 Cu 含量增加, Cu-Ni-Al 反应射流的穿深增大, 平均扩孔孔径减小, 侵彻孔容先增大后减小, 在 50%Cu 时达到最大值, 相比 30%Cu 和 70%Cu 时孔容分别提升了 5% 和 15%; 聚能射流侵彻阶段孔径衰减随着 Cu 含量的增加而减小。研究结果可为评估反应材料药型罩聚能装药战斗部的毁伤效应提供参考。

关键词: 药型罩; 反应射流; Cu-Ni-Al; 侵彻性能

中图分类号: TJ410.3+33 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.02.005

Study on the Effect of Cu-Ni-Al Reactive Liner Composition Change on the Damage Performance of Target

LIU Wen-he, LIU Ying-bin, HU Xiao-yan, WANG Xing-jie

(School of Environmental and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan, 030051)

Abstract: In order to study the effect of Cu content on the penetration performance of Cu-Ni-Al reactive jet, the Cu-Ni-Al powder liners with Cu content of 30%, 50% and 70% were prepared by powder metallurgy method, and the static armor test was carried out. The results show that with the increase of Cu content, the penetration depth of the Cu-Ni-Al reaction jet increases gradually, the average entrance diameter decreases gradually, and the penetration volume increases first and then decreases. The maximum value is reached at 50%Cu, and the pore volume increases by 5% and 15% respectively compared with that of 30%Cu and 70%Cu. The entrance diameter attenuation of shaped charge jet decreases with the increase of Cu content. The research results can provide a certain reference for evaluating the damage effect of the reactive material liners shaped charge warhead.

Key words: Liner; Reactive jet; Cu-Ni-Al; Damage performance

含能结构材料 (energetic structural materials, ESM)^[1]是一种具有能量和结构双重功能的金属基材料,因其良好的化学能和动能^[2-4]已成为近年来的研究热点。其中, Ni-Al 反应材料在高速冲击下可以发生化学反应并释放与 TNT 相当的热量^[5],并且具有理想的机械性能、物理性能、高强度重量比及高能量释放能力等优点,是国内外学者研究的重点之一。当 Ni-Al 含能材料作为药型罩时,可将传统的惰性药型罩动能侵彻效果和反应药型罩自身发生化学反应所释放的

能量紧密结合在一起,更好地对目标实施打击。Thadhani^[6]系统分析了 Ni-Al 粉末的冲击诱发化学反应 (shock-induced chemical reaction, SICR)。Xiong^[7]分析了 Cu/PTFE 对 Ni-Al 反应材料 SICR 和能量释放特性的影响,研究结果表明:在相同的冲击条件下, Cu 可以提高 SICR 的临界冲击压力,降低反应效率;将 PTFE 添加到 Ni-Al 含能材料中,降低了引发 SICR 的临界冲击条件,并通过参与反应提高了化学反应效率。张度宝^[8]以摩尔比 1:1 的 Ni 粉和 Al 粉为原料,采

收稿日期: 2021-11-16

作者简介: 刘文赫 (1998-), 男, 硕士研究生, 从事弹药毁伤与防护技术研究。

用冷压-烧结法制备了 Ni-Al 含能结构材料, 研究表明其在高速冲击碰撞作用下能够发生剧烈化学反应并释放出大量能量, 且随着冲击引发速度的提高, 能量输出率增大, 反应剧烈程度增加。Sun 等^[9]对比研究了 Ni-Al 和 Cu-Ni-Al 反应药型罩的侵彻性能并进行了微观分析, 试验表明 Cu-Ni-Al 反应药型罩穿深比 Ni-Al 反应药型罩增加了 42%。黄炳瑜等^[10]设计了一种基于 K 装药结构的 Ni/Al-Cu 双层反应药型罩聚能装药结构, 其内层罩为无氧铜, 外层罩为 Ni-Al 含能结构材料, 与 Cu-Cu 罩相比, Ni/Al-Cu 双层反应药型罩在靶中形成射流堆积更少, 对钢靶的侵彻深度和侵彻体积分别提高了 20.1% 和 23.0%; 对混凝土靶的侵彻深度和侵彻体积分别提高了 17.2% 和 45.6%。张超霞等^[11]对比研究了 Cu 和 Cu-Ni-Al 反应药型罩的侵彻性能并进行了微观分析, 研究表明 Cu-Ni-Al 反应射流对 45# 钢的穿深与 Cu 射流相比明显降低, 但其平均入口孔径提高了 33.3%。目前国内外对 Cu-Ni-Al 药型罩的侵彻性能已有一定研究, 但多为 Cu-Ni-Al 与其他类型药型罩的横向对比, 而对于 Cu 含量对 Cu-Ni-Al 药型罩侵彻性能的影响研究还是空白。

为了研究不同比例 Cu-Ni-Al 的侵彻性能, 本文采用粉末冶金法制备了 3 种不同配比的 Cu-Ni-Al 反应药型罩并进行侵彻试验, 对孔径进行分析, 为 ESM 的应用提供了一定的参考。

1 试验方案

1.1 药型罩制备

试验材料: Cu 粉, 南宫市鑫盾合金焊材喷涂有限公司; Ni 粉, 双赢合金材料有限公司; Al 粉, 济南康正铝业有限公司。具体参数如表 1 所示。

表 1 粉末属性

| 粉末 | 密度/(g·cm ⁻³) | 形状 | 粒径/μm | 纯度/% |
|----|--------------------------|----|-------|------|
| Ni | 8.90 | 球形 | 18~39 | 99.9 |
| Al | 2.69 | 球形 | 10~18 | 99.9 |
| Cu | 8.96 | 球形 | 20~45 | 99.9 |

为使药型罩产生的射流释能最大化, 将 Ni 粉和 Al 粉始终按 1:1 混合^[12], 再与不同比例的 Cu 粉混合。加入 3‰ 的石墨和机油进行润滑和粘结。把粉末

放入 YXQM 系列行星式球磨机正反转运行, 单向运行时间为 1min, 球磨机转速为 180r/min, 混粉时间为 20min, 将混合均匀的粉末放入真空干燥箱干燥 24h。采用粉末冶金法制备反应药型罩, 成型药型罩见图 1。



图 1 Cu-Ni-Al 反应药型罩

Fig.1 Cu-Ni-Al reactive liner

药型罩形状为圆锥形, 锥角为 47°, 采用阿基米德排水法测量药型罩的实际密度 ρ_{AMD} 。药型罩的理论密度 ρ_{TMD} 为:

$$\rho_{TMD} = \left(\frac{W_1}{\rho_1} + \frac{W_2}{\rho_2} + \dots + \frac{W_n}{\rho_n} \right)^{-1} \quad (1)$$

式 (1) 中: W_1, W_2, \dots, W_n 为各组分的质量分数; $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ 为各组分的理论密度。具体参数见表 2。

表 2 聚能粒子流的侵彻试验参数

| 编号 | W _{Cu} :W _{Ni} :W _{Al} | 质量/g | 密度/(g·cm ⁻³) | 高度/mm | 壁厚/mm |
|-----|---|------|--------------------------|-------|-------|
| A-1 | 30:35:35 | 32 | 4.7 | 46 | 1.9 |
| A-2 | 30:35:35 | 32 | 4.7 | 46 | 1.9 |
| A-3 | 30:35:35 | 32 | 4.7 | 46 | 1.9 |
| B-1 | 50:25:25 | 37 | 5.4 | 46 | 1.9 |
| B-2 | 50:25:25 | 37 | 5.4 | 46 | 1.9 |
| B-3 | 50:25:25 | 37 | 5.4 | 46 | 1.9 |
| C-1 | 70:15:15 | 39 | 6.2 | 46 | 1.8 |
| C-2 | 70:15:15 | 39 | 6.2 | 46 | 1.8 |
| C-3 | 70:15:15 | 39 | 6.2 | 46 | 1.8 |

表 2 中所用药型罩跳动量均小于 0.05mm, 聚能装药采用 8701 炸药, 炸药参数见表 3, 装药量为 38g, 压药压力为 10MPa, 装药直径 (CD) 和药型罩直径 (LD) 均为 44mm。图 2 为药型罩的聚能装药结构。

表 3 8701 炸药组分及含量

| 组分 | RDX | C ₇ H ₆ N ₂ O ₄ | 其它 |
|------|-----|---|----|
| 含量/% | 95 | 3 | 2 |

1.2 静破甲试验

试验在露天靶场进行, 采用雷管激发聚能装药, 炸高为 60mm, 靶板材料为 45# 钢, 厚度为 200mm, 半径为 40mm, 具体参数见表 4。每种试验重复 3 次,

试验装置如图3所示。试验后对靶板进行回收和清洁,采用DK7732电火花数控线切割机沿钢靶弹道穿孔中心线进行纵向切割。

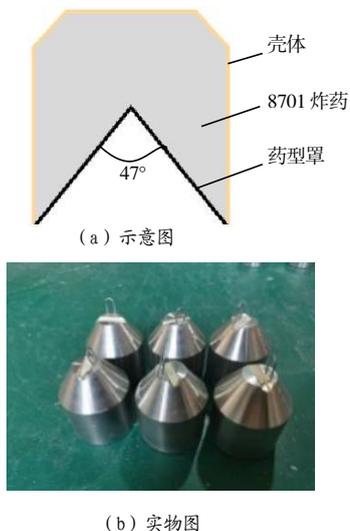


图2 聚能装药结构

Fig. 2 Shaped charge structure

表4 45#钢的化学成分及含量

| 化学成分 | C | Si | Mn | Cr | Ni |
|------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|
| 含量/% | 0.42~0.50 | 0.17~0.37 | 0.50~0.80 | ≤0.25 | ≤0.30 |

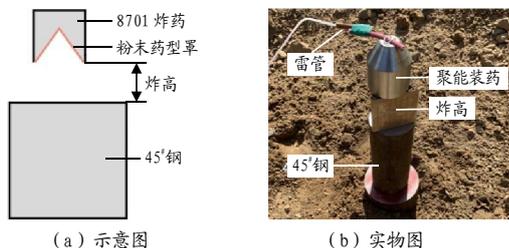


图3 侵彻试验装置

Fig. 3 Penetration test device

2 结果与分析

2.1 侵彻深度分析

图4为3种Cu-Ni-Al反应药型罩侵彻后靶板的宏观特征图。

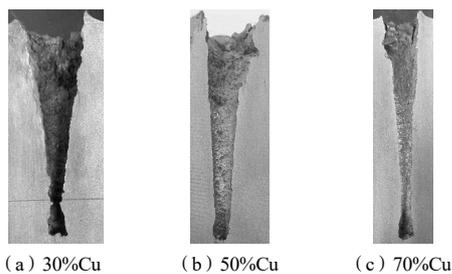


图4 钢靶的孔洞形貌

Fig. 4 The hole morphology of the steel target

如图4所示,靶板孔洞为喇叭型,弹坑孔壁清洁无杵体。Cu-Ni-Al反应药型罩的钢靶孔壁粗糙程度从大到小依次为30%Cu、50%Cu、70%Cu。射流与靶板反应越剧烈,孔壁越粗糙,Cu可以减少射流与靶板反应^[13],故Cu含量越多,靶板孔壁越光滑。表5为3种Cu-Ni-Al反应药型罩的侵彻试验数据。

表5 3种反应药型罩穿深及孔径
Tab.5 penetration depth and entrance diameter of three kinds of liners

| 编号 | 穿深/mm | 平均穿深/mm | 孔径/mm | 平均孔径/mm | 孔容/cm ³ | 平均孔容/cm ³ |
|-----|-------|---------|-------|---------|--------------------|----------------------|
| A-1 | 76 | | 25×27 | | 15.3 | |
| A-2 | 92 | 85 | 27×28 | 26×28 | 17.9 | 16.8 |
| A-3 | 87 | | 25×28 | | 17.2 | |
| B-1 | 108 | | 25×27 | | 18.6 | |
| B-2 | 107 | 105 | 25×26 | 25×26 | 18.1 | 17.7 |
| B-3 | 100 | | 24×26 | | 16.4 | |
| C-1 | 120 | | 20×20 | | 15.2 | |
| C-2 | 124 | 120 | 19×22 | 20×20 | 15.6 | 15.3 |
| C-3 | 116 | | 20×20 | | 15.1 | |

由表5可见,不同配比的Cu-Ni-Al反应药型罩侵彻深度从大到小依次为70%Cu、50%Cu、30%Cu,其扩孔孔径从大到小依次为:30%Cu、50%Cu、70%Cu。在射流侵彻过程中,射流与靶板的相互作用是影响其侵彻性能的重要因素^[14]。Cu在射流侵彻过程中可以有效减少射流与靶板间相互作用,防止能量横向耗散^[15],使射流更容易穿透靶板。故Cu含量越高,扩孔孔径越小,穿深越大。

随着Cu含量增加,药型罩的穿深逐渐增大,扩孔孔径逐渐减小,孔容先增大后减小,在50%Cu时达到最大值,相较30%Cu和70%Cu时孔容分别提升了5%和15%。

根据侵彻流体动力学理论,射流侵彻深度与射流长度和药型罩材料密度的平方根成正比^[16]。由Hill-Mott-Pack^[17]公式:

$$P = L \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_t}} \quad (2)$$

式(2)中: P 为侵彻深度; L 为射流长度; ρ_j 为射流密度; ρ_t 为靶板密度。

聚能粒子流的侵彻深度与其有效长度、射流密度及靶板材料密度有关。材料密度越大,聚能粒子流的伸长量越长,连续性越好,侵彻效果也越好。且在靶材相同的情况下,低密度材料在侵彻初始阶段单位侵彻深度下的能量沉积越多,侵深越低,高密度材料能使更多的能量进入靶板,提高侵彻深度^[18]。

2.2 侵彻孔容分析

聚能射流侵彻过程耦合动能和化学能作用目标靶板。Cu-Ni-Al 聚能射流中 Ni-Al 会发生反应,基本与 Cu 不反应^[9]。当药型罩中 Cu 含量增大时, Ni-Al 含量降低,进入靶材后反应能量逐渐减小,射流的横向毁伤性能也越小,对靶板的扩孔作用也就越小。

3种不同配比 Cu-Ni-Al 反应药型罩的侵彻孔径随侵彻深度的变化曲线见图 5。

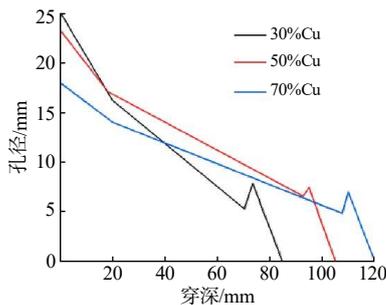


图 5 3种配比 Cu-Ni-Al 反应药型罩的侵彻孔径随侵彻深度的变化曲线

Fig. 5 The curve of the penetration entrance diameter with the penetration depth of three kinds of Cu-Ni-Al reactive liners

由图 5 可见,在聚能射流侵彻靶板开始时,30%Cu 反应药型罩在侵彻深度 20mm 范围内的孔径减小很快,从口部直径约为 25mm 下降至 16mm,这是在开坑阶段形成的,侵彻深度约为总侵深的 23%,此后,在准定常侵彻阶段中,孔径从 16mm 均匀下降到 4mm,这部分的侵彻深度为总侵深的 63%。孔下部出现一小段葫芦形,说明此处射流已断。最后终止阶段孔径呈袋形略微增加,后续射流无法推开前面的射流残渣,使其堆积在孔底,此阶段占总侵深的 14%。50%Cu 反应药型罩在侵彻深度 18mm 范围内的孔径减小很快,从入口直径 24mm 下降至 17mm,侵彻深度约为总侵深的 17%。此后,孔径从 17mm 均匀下降到 7mm,侵彻深度约为总侵深的 72%。最后,孔径略微增加的袋形孔底占总侵深的 11%。70%Cu 反应药型罩在侵彻深度 20mm 范围内的孔径减小很快,从入口直径约为 19mm 下降至直径约为 14mm,占总侵彻深度的 16%。此后,孔径从 14mm 均匀下降到 4mm,侵彻深度约为总侵深的 70%。最后终止阶段占总侵深的 14%。

由图 5 可见,在开坑阶段和准定常阶段 Cu 含量

越多,孔径衰减越慢。Cu 在射流与靶板之间起润滑作用^[13],减少射流与靶板间相互反应,防止能量横向耗散,所以 Cu 含量越多孔径衰减越慢。终止阶段靶板孔径衰减情况基本相同。在终止阶段,由于后续射流不能推开前面的射流残渣,使其堆积在孔底,因此后续射流不是直接与靶板材料作用^[19]。

3 结论

本文通过粉末冶金法制备 3 种不同配比的 Cu-Ni-Al 反应药型罩,进行静破甲试验,结合孔径分析,对比了 3 种药型罩的特征差异,得出以下结论:

(1) Cu 含量为 30%、50%和 70%时 Cu-Ni-Al 反应药型罩对 45#钢的侵彻深度分别为 85mm、105mm 和 120mm。相比于 30%Cu 的药型罩,50%Cu 和 70%Cu 药型罩的侵彻深度分别提升了 23.5%和 41.1%,表明通过增加 Cu-Ni-Al 药型罩中 Cu 含量可有效改变射流质量来提升侵彻深度。

(2)随着 Cu 含量增加,Cu-Ni-Al 药型罩的扩孔能力逐渐降低,侵彻孔容先增大后减小,在 50%Cu 时达到最大值,相较于 30%Cu 和 70%Cu 时孔容分别提升了 5%和 15%。

(3)随着 Cu 含量增加,在聚能射流侵彻开坑阶段和准定常阶段,靶板孔径衰减变慢,在终止阶段孔径衰减不变。

参考文献:

- [1] Zhang X F, Shi A S, Qiao L, et al. Experimental study on impact-initiated characters of multifunctional energetic structural materials[J]. Journal of Applied Physics,2013, 113(8): 2 129-1 156.
- [2] Hastings D L,Dreizin E L.Reactive structural materials: preparation and characterization[J].Advanced Engineering Materials, 2018, 20(3): 1-20.
- [3] Zhou Q, Hu Q W, Wang B, et al. Fabrication and characterization of the Ni-Al energetic structural material with high energy

- density and mechanical properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020(832): 154-894.
- [4] 张先锋,赵晓宁.多功能含能结构材料研究进展[J].*含能材料*, 2009,17(06): 731-739.
- [5] Wang YZ, Yu QB, Zheng YF, et al. Formation and penetration of jets by shaped charges with reactive material liners[J]. *Propellants Explos. Pyrotech.*, 2016, 41(4): 618-622.
- [6] Thadhani, N.N. Shock-induced chemical reactions and synthesis of materials[J]. *Prog. Mater. Sci.*, 1993, 37(2): 117-226.
- [7] Xiong W, Zhang X, Tan M, et al. The energy release characteristics of shock-induced chemical reaction of Al/Ni composites[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2016, 120(43): 24 551-24 559.
- [8] 张度宝,汪涛,鱼银虎,等. Ni-Al 含能结构材料冲击释能行为研究[J].*稀有金属*, 2017, 41(01): 40-44.
- [9] Sun Miao, Li Chao, Zhang Xuguang, et al. Reactivity and penetration performance Ni-Al and Cu-Ni-Al mixtures as shaped charge liner materials[J]. *Materials*, 2018, 11(11): 2 267.
- [10] 黄炳瑜,熊玮,张先锋,等. 双层含能药型罩 K 装药射流成型及侵彻性能试验[J].*含能材料*, 2021, 29(02): 149-156.
- [11] 张超霞,刘迎彬,胡晓艳,等. Cu-Ni-Al 和 Cu 聚能射流侵彻后钢靶的毁伤特征[J]. *高压物理学报*, 2021, 35(03): 141-148.
- [12] Dunbar E, Thadhani N N. High pressure shock activation and mixing of nickel aluminum powder mixtures[J]. *Journal of Materials Science*, 1993(28): 2 903-2 914.
- [13] 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 Engineering A*, 2012, 553(15): 142-148.
- [14] 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 & Hard Materials*, 2016(60): 147-153.
- [15] 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 & Hard Materials*, 2016(54): 90-97.
- [16] 马雪亚,王迎春,程兴旺,等. 玻璃及玻璃/钨复合材料药型罩的静破甲特性研究[J].*北京理工大学学报*, 2021, 41(04): 439-444.
- [17] Birkhoff G, Macdougall D P, Pugh E M, et al. Explosives with lined cavities[J]. *Journal of Applied Physics*, 1948, 19(6): 563-582.
- [18] 张超霞. 镍铝反应药型罩聚能粒子流的侵彻性能研究[D]. 太原:中北大学, 2021.
- [19] 黄正祥. 聚能装药理论与实践[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2014.