

文章编号: 1003-1480 (2021) 01-0027-04

W-Ni-Al 反应射流成分变化对靶板毁伤性能影响研究

张增, 刘迎彬, 刘天生, 胡晓敏, 张超霞, 薛瑞峰

(中北大学环境与安全工程学院, 山西太原, 030051)

摘要: 为了探究不同成分 W-Ni-Al 反应射流对 45[#]钢的毁伤性能, 采用模压法制备了 W 含量为 50%和 70%的 W-Ni-Al 粉末药型罩并进行静破甲试验。试验结果表明: W 含量为 50%和 70%的 W-Ni-Al 药型罩射流平均穿深分别为 103mm 和 120mm, 相比 Ni-Al 反应射流穿深分别增加了 35.5%和 57.9%, 且 W 含量为 50%的反应射流在靶板表面形成更多的横向裂纹。光学显微镜观测结果表明: 随着射流中 Ni-Al 含量升高放热量增加, 射流横向扩散加剧, 射流对靶板反向冲刷作用增强, 造成孔壁边缘变形程度增大, 提升了射流横向毁伤性能。

关键词: 药型罩; 反应射流; 侵彻性能; 横向毁伤

中图分类号: TJ410.3⁺33 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2021.01.008

Study on the Influence of Composition Change of W-Ni-Al Reaction Jet on the Damage Performance of Target Plate

ZHANG Zeng, LIU Ying-bin, LIU Tian-sheng, HU Xiao-min, ZHANG Chao-xia, XUE Rui-feng

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

Abstract: In order to investigate the damage performance of W-Ni-Al reactive jet with different composition on 45[#] steel, W-Ni-Al powder liner with W content of 50% and 70% was prepared by mould pressing method, and static armor penetration experiment was carried out. The experimental results show that the average penetration depth of jet with 50% W and 70% W is 103mm and 120mm respectively, which is 35.5% and 57.9% higher than that of Ni-Al reaction jet, and the reaction jet with 50% W content forms more transverse cracks on the target surface. The results of optical microscope observation show that with the increase of Ni-Al content in the jet, the heat release increases, the transverse diffusion of the jet is intensified, and the reverse scouring effect of the jet on the target plate is enhanced, which result in the increase of the deformation degree of the hole wall edge, and the improvement of lateral damage performance.

Key words: Liner; Reaction jet; Penetration performance; Transverse damage

具有一定强度和能量释放特性的含能结构材料是一种高密度和低感度的多功能复合材料, 在含能破片、导弹战斗部、反应装甲和石油射孔弹方向有很大的应用前景^[1]。近几年 Al-PTFE 反应材料以其高能量密度和容易制备受到了学者的广泛关注^[2], 但其低密

度和低强度限制了应用范围。学者们通过在 Al-PTFE 中添加 W^[3]、Ni^[4]等高密度金属有效提高了材料密度, 但依然难以提高材料结构强度, 因而氟基反应材料在大多数场合依然被认为是含能材料而不能作为含能结构材料。研究表明通过模压-烧结、冷压和爆炸压

收稿日期: 2020-09-14

作者简介: 张增 (1995 -), 男, 硕士, 主要从事弹药毁伤与防护研究。

基金项目: 国家自然科学基金 (11802274)。

实能够制备高强度高密度的含能结构材料^[5]。模压烧结制备的 Ni-Al 反应材料抗拉和抗压强度分别达到为 66.0MPa 和 294.6MPa^[6]。Wei 等^[7]通过爆炸压实制备的 Al 基反应材料密度几乎能达到理论密度，动态抗压强度达到 350~750MPa。

钨具有高的密度和良好的声速^[8]，将钨用于反应材料可在保留反应材料释能特性的基础上提升射流密度，提高射流侵彻性能。吕翠翠等^[9]研究表明 W-Ni-Fe 合金药型罩射流与靶板剧烈作用形成硬质相，增加了射流能量横向耗散，造成射流穿深降低，孔径增大。宋丹丹^[10]对不同比例 W-Ni-Al 反应材料经不同温度烧结后的反应产物进行了 XRD 分析。陈元建^[11]、陈进^[12]、张会华^[13]等对 W-Ni-Al 反应材料力学性能和破片毁伤性能进行了研究。本文通过模压法制备了 W-Ni-Al 反应材料药型罩，结合静破甲实验和显微分析对 W-Ni-Al 反应射流毁伤性能进行了研究，为反应材料射流研究与应用提供参考。

1 侵彻试验

本文通过模压法制备 W-Ni-Al 反应材料药型罩，采用 45# 钢作为靶板，结合静破甲试验对 W-Ni-Al 反应材料药型罩毁伤性能进行研究。

1.1 药型罩制备

本文所用 W 粉、Ni 粉、Al 粉平均粒径分别为 12 μm 、5 μm 、10 μm ，粉末具体参数如表 1 所示。按质量比为 $w_{\text{W}}: w_{\text{Ni}}: w_{\text{Al}}=3:2:1$ 和 7:2:1 进行混粉，并添加 3% 的石墨和机油制备金属粉。利用行星式球磨机进行混粉，球料比为 1:1，球磨机转速为 180r/min，混粉时间为 10min，正反式运行，单向运行时间为 1min。将混合均匀的粉末放入真空干燥箱干燥 24h。

表 1 粉末具体参数

Tab.1 Specific powder parameters

| 材料 | 形状 | 尺寸 / μm | 纯度 /% | 理论密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 来源 |
|------|------|-----------------------|----------|--|-----------------|
| W 粉 | 不规则形 | 10~15 | 99.9 | 19.35 | 中冶鑫盾合金有限公司 |
| Ni 粉 | 类球形 | 2~6 | 99.9 | 8.90 | 南京市鑫盾合金材料技术有限公司 |
| Al 粉 | 球形 | 6~15 | 99.9 | 2.70 | 济南康正铝业有限公司 |

采用模压法制备 W-Ni-Al 反应材料药型罩。压制压力为 16MPa，保压 30s，所得药型罩如图 1 所示。药型罩锥角为 47°，底部直径 44mm，利用厚度计测

量药型罩壁厚，壁厚跳动量小于 0.04mm。



图 1 模压成型 W-Ni-Al 反应材料粉末药型罩

Fig.1 Molding W-Ni-Al reactive material powder cover

由阿基米德法测量药型罩密度：

$$\rho_{\text{AMD}} = \frac{m_{\text{空}}}{(m_{\text{空}} - m_{\text{水}}) / \rho_{\text{水}}} \quad (1)$$

式(1)中： ρ_{AMD} 为真实材料密度； $m_{\text{空}}$ 、 $m_{\text{水}}$ 分别为药型罩在空气和水中的质量； $\rho_{\text{水}}$ 为水的密度。根据公式(2)~(3)计算药型罩孔隙率：

$$\rho_{\text{TMD}} = \frac{1}{w_{\text{W}}/\rho_{\text{W}} + w_{\text{Ni}}/\rho_{\text{Ni}} + w_{\text{Al}}/\rho_{\text{Al}}} \quad (2)$$

$$P = (1 - \frac{\rho_{\text{AMD}}}{\rho_{\text{TMD}}}) \times 100\% \quad (3)$$

式(2)~(3)中： w_{W} 、 w_{Ni} 、 w_{Al} 分别为 W、Ni、Al 质量分数； ρ_{W} 、 ρ_{Ni} 、 ρ_{Al} 分别为 W、Ni、Al 理论密度； ρ_{TMD} 为药型罩理论密度。药型罩参数如表 2 所示。

表 2 W-Ni-Al 反应材料药型罩参数

Tab.2 Parameters of W-Ni-Al reactive material liner

| 编号 | $w_{\text{W}}/\%$ | 空气中 质量/g | 水中 质量/g | 真实 密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 壁厚 /mm | 孔隙 率 /% | 跳动 量 /mm |
|----|-------------------|-------------|------------|--|-----------|---------------|----------------|
| A1 | | 33.82 | 27.04 | 4.99 | 1.92 | 16.3 | 0.02 |
| A2 | 50 | 34.09 | 27.29 | 5.01 | 1.90 | 16.0 | 0.10 |
| A3 | | 35.52 | 28.49 | 5.05 | 2.21 | 15.3 | 0.01 |
| B1 | | 40.19 | 34.64 | 7.24 | 1.76 | 12.2 | 0.02 |
| B2 | 70 | 40.60 | 34.95 | 7.19 | 1.78 | 12.8 | 0.03 |
| B3 | | 40.92 | 35.29 | 7.26 | 1.77 | 12.0 | 0.03 |

1.2 静破甲试验

采用钝化黑索今作为主装药，装药压力为 10MPa，保压时间为 15s。装药密度为 1.72 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，装药质量为 38g，装药直径为 44mm，壳体采用 45# 钢，厚度为 4mm。采用电雷管激发聚能装药。试验炸高为 60mm 的试验装置如图 2 所示。

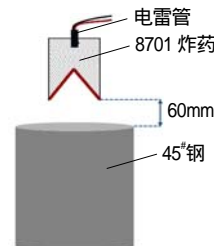


图 2 静破甲试验装置

Fig.2 Static armor penetration test device

对侵彻后的靶板进行回收。利用电火花线切割机沿射流侵彻方向对靶板进行切割。射流侵彻孔道如图

3所示。为统计 W-Ni-Al 反应射流横向毁伤性能，在距靶板上表面 30mm 处沿垂直侵彻方向切割靶板，结果如图 4 所示。在距靶板上表面 35mm 处对孔壁周围组织区域进行取样，试样尺寸 10mm × 10mm × 10mm。对平行于侵彻方向的平面进行打磨、抛光并用 4%硝酸酒精溶液进行腐蚀，制备微观测试样。



图 3 W-Ni-Al 反应射流侵彻 45# 钢
Fig.3 W-Ni-Al reaction jet penetrating 45# steel

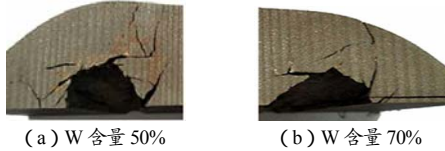


图 4 侵彻后的靶板裂纹
Fig.4 Target crack after penetration

2 试验结果与分析

2.1 侵彻性能

通过模压法制备的 W-Ni-Al 粉末药型罩侵彻结果表 3 所示。

表 3 W-Ni-Al 反应材料药型罩侵彻结果

Tab.3 Penetration results of W-Ni-Al reactive material liner

| 编号 | w _w /% | 孔径/mm | 平均孔径/mm | 穿深/mm | 平均穿深/mm |
|----|-------------------|---------|---------|-------|---------|
| A1 | 50 | 25 × 28 | 25 × 29 | 103 | 103 |
| A2 | | 26 × 28 | | 103 | |
| A3 | | 25 × 30 | | 104 | |
| B1 | 70 | 28 × 29 | 29 × 29 | 118 | 120 |
| B2 | | 28 × 30 | | 120 | |
| B3 | | 29 × 29 | | 121 | |

由表 3 可见，钨含量为 50%的 W-Ni-Al 反应射流对 45#钢靶平均穿深为 103mm，开孔孔径为 25mm × 29mm，钨含量为 70%的 W-Ni-Al 反应射流对 45#钢靶平均穿深为 120mm，开孔孔径为 29 × 29mm。统计靶板横向裂纹长度和数目，结果如图 5 所示，A 组裂纹总长度为 104 mm，平均裂纹长度为 8.7mm，B 组裂纹总长度为 35.5mm，平均裂纹长度为 7.1mm。

表 3 表明模压法制备了性能均匀的 W-Ni-Al 粉末药型罩。W-Ni-Al 反应材料射流 W 含量由 50%提高到 70%，射流对 45#钢平均穿深由 103mm 提高到 120 mm，且入孔孔径也有所提升。与文献[14]研究结果相

比，在 Ni-Al 反应材料射流中添加 50%和 70%的 W，射流穿深分别提高了 35.5%和 57.9%，表明通过在镍铝反应材料射流中添加 W 粉提高射流密度可有效提高射流穿深。

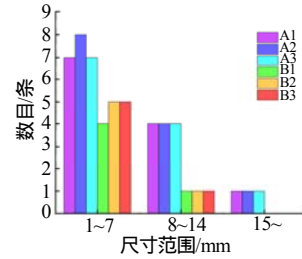


图 5 裂纹尺寸和数目
Fig.5 Crack size and number

2.2 显微观测

如图 4~5 所示，相同裂纹长度区间内 A 组射流产生的裂纹数目大于等于 B 组，且 A 组平均裂纹长度和裂纹总数均大于 B 组。为探究此种现象产生的原因，对孔壁周围组织采用 AXIO 光学显微镜进行显微观测，结果如图 6 所示，对图 6 中 a 和 b 区域观测，结果如图 7 所示。

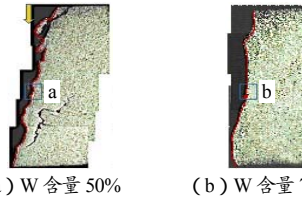


图 6 W-Ni-Al 反应射流侵彻后靶板孔壁金相结构图
Fig.6 Metallographic structure of target plate hole wall after W-Ni-Al reactive jet penetration

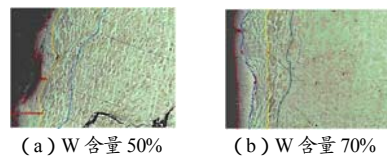


图 7 W-Ni-Al 反应射流侵彻孔壁微观图(腐蚀)
Fig.7 Micrograph of W-Ni-Al reaction jet penetrating hole wall (corrosion)

从图 6~7 可以看出，A、B 两组射流侵彻后的孔壁边缘均表现为凹凸不平的形貌，且 A 组孔壁变形程度明显大于 B 组。如图 7(a)所示，A 组射流侵彻后的靶板孔壁周围组织可以分为 3 个区域：剪切带、变形区和基体组织区，且上凸区域剪切带宽度(88μm)大于下凹区域剪切带宽度(18μm)。如图 7(b)所示 B 组射流侵彻后靶板孔壁周围组织可以分为 4 个区域：残余射流、剪切带、变形区和基体组织区，外层残余射流厚度大约为 10μm，上凸区域剪切带宽度(81μm)也大于下凹区域剪切带宽度(38μm)，但剪切带厚度变化程度

小于 A 组。文献[10]指出, W、Ni 和 Al 3 种物质混合物在加热到 800℃ 后主要产物为 Ni_2Al_3 和少量 Al_4W , 且 Ni_2Al_3 反应放热量为 1 967J/g, Al_4W 反应放热量为 568.6 J/g, 仅为 Ni_2Al_3 放热量的 28.9%, 故可忽略 Al_4W 反应放热量对反应射流放热量的影响, W-Ni-Al 反应材料射流放热量主要由镍铝反应生成 Ni_2Al_3 产生。射流放热对靶板产生的热软化效应超过射流侵彻造成靶板应变硬化效应, 使孔壁周围组织出现塑性变形, 在局部区域形成剪切带^[15]。随着镍铝含量增加, 射流放热量增大, A 组射流横向扩散加剧, 侵彻时射流对靶板的反向冲刷作用增强, 造成 A 组射流侵彻后靶板孔壁边缘下凹程度大于 B 组。A 组射流侵彻后靶板在剪切带区后的变形区宽度大约为 54 ~ 127 μm , B 组射流侵彻后靶板变形区宽度大约为 30 ~ 64 μm , 从变形区宽度也可证明随着镍铝含量增加, W-Ni-Al 射流横向毁伤能力增强。

3 结论

本文通过制备 W-Ni-Al 反应材料药型罩, 进行静破甲实验, 结合显微分析, 得出如下结论: (1) 钨含量为 50% 和 70% 的 W-Ni-Al 反应材料药型罩对 45# 钢靶穿深分别为 103mm、120mm。相比 Ni-Al 反应射流穿深分别提高了 35.5% 和 57.9%。通过在镍铝药型罩中添加 W 提高射流密度可有效提高射流侵彻性能。(2) W-Ni-Al 反应材料射流侵彻过程中, 由于射流反向冲刷使剪切带厚度变小, 造成靶板孔壁周围区域呈现凹凸不平的形貌。(3) W-Ni-Al 反应射流侵彻过程中, 随着镍铝含量增加反应放热量增加, 射流横向扩散加剧, 提高了射流反向冲刷作用, 增强了射流横向毁伤性能。

参考文献:

- [1] HASTINGS D L, DREIZIN E L. Reactive structural materials: preparation and characterization [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2018, 20(3): 1-20.
- [2] WU J, WANG H, FANG X, et al.. Investigation on the thermal behavior, mechanical properties and reaction characteristics of Al-PTFE composites enhanced by Ni particle [J]. *Materials (Basel)*, 2018, 11(9): 1-10.
- [3] ZHANG X F, ZHANG J, QIAO L, et al.. Experimental study of the compression properties of Al/W/PTFE granular composites under elevated strain rates [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013(581): 48-55.
- [4] WANG H X, LI Y C, FENG B, et al.. Compressive properties of PTFE/Al/Ni composite under uniaxial loading [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26(5): 2 331-2 336.
- [5] ZHOU Q, HU Q, 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.
- [6] 张度宝. Ni-Al 金属反应材料的制备和性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [7] WEI C T, VITALI E, JIANG F, et al.. Quasistatic and dynamic response of explosively consolidated metalaluminum powder mixtures[J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(3):1 418-1 432.
- [8] 韩欢庆, 陈飞雄, 甘乐, 等. 钨在药型罩中的应用[J]. *中国钨业*, 2004(1): 30-32.
- [9] 吕翠翠, 刘金旭, 李树奎, 等. W-Ni-Fe 合金药型罩的破甲特性[J]. *稀有金属材料与工程*, 2013, 42(11): 2 337-2 340.
- [10] 宋丹丹. Ni-Al-W 活性复合材料组织与性能关系研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [11] 陈元建, 陈进, 王军, 等. Al-Ni-W 活性材料动力学行为及其释能特性[J]. *兵器材料科学与工程*, 2018, 41(4): 71-75.
- [12] 陈进, 曹召勋, 郭双锋, 等. Al-Ni-W 活性材料组织性能及毁伤效应研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2020, 43(4): 29-35.
- [13] 张会华, 梁栋, 刘桂涛, 等. 烧结工艺对 Ni/Al/W 含能反应材料性能的影响[J]. *兵器材料科学与工程*, 2017, 40(2): 114-117.
- [14] SUN M, LI C, ZHANG X, et al.. Reactivity and penetration performance Ni-Al and Cu-Ni-Al mixtures as shaped charge liner materials[J]. *Materials (Basel)*, 2018, 11(11): 2 267.
- [15] [美]MAM. 材料的动力学行为[M]. 张庆明, 等, 译. 北京: 国防工业出版社, 2006.