

文章编号: 1003-1480 (2024) 05-0028-07

Ni-Cu预合金爆炸箔电化学制备及电爆性能研究

申子安, 曾鑫, 朱艳丽, 赵婉君, 焦清介

(北京理工大学机电学院 爆炸科学与安全防护全国重点实验室, 北京, 100081)

摘要: 为探究电爆等离子体引发合金反应的点火机理, 进一步降低爆炸箔发火电压、提高能量利用率, 采用电化学方法在铜爆炸箔表面原位可控沉积 Ni-Cu 预合金薄膜。进行了预合金爆炸箔微观形貌、成分构成和电爆特性等实验研究, 结合电爆炸反应过程监测探究了电爆合金化反应路径和释能机理。研究表明: 采用电化学恒电位方法沉积金属 Cu 和 Ni, 当应用电位分别为 -0.2 V 和 -0.8 V, 反应时间均为 2 700 s 时, 沉积的 Ni-Cu 预合金材料呈 5 μm 的立方体结构且分布均匀, 无明显氧化物生成。所制备的 Ni-Cu 预合金爆炸箔在 2 000 V 充电电压下的能量利用率是 Cu 爆炸箔的 2.11 倍, 在电爆发生 50 μs 后可观察到明显的合金化反应发生, 等离子体膨胀范围和火花持续时间均明显大于 Cu 爆炸箔, 更有利于等离子体直接点火。

关键词: 预合金爆炸箔; 电化学制备; 合金化反应; 电爆性能; 等离子体

中图分类号: TJ450.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.05.004

Electrochemical Synthesis and Explosion Performance Study of Ni-Cu Pre-Alloy Exploding Foils

SHEN Zi-an, ZENG Xin, ZHU Yan-li, ZHAO Wan-jun, JIAO Qing-jie

(State Key Laboratory of Explosion Science and Safety Protection, School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081)

Abstract: In order to explore the ignition mechanism of alloy reactions induced by electric explosion plasma, further reduce the ignition voltage and increase the energy utilization efficiency of the exploding foil (EF), an electrochemical method was proposed in this study to in-situ deposit Ni-Cu pre-alloy films on the surface of Cu EF. The morphology, composition and electric explosion characteristics were investigated systematically, then the alloy reaction path and energy release mechanism were explored combined with electric explosion reaction monitoring. The results show that the electrochemical potentiostatic method can be used to deposit Cu and Ni, the prepared Ni-Cu pre-alloy microcube are evenly distributed with the size of 5 μm , when the applied potentials are -0.2 V and -0.8 V, reaction time are both 2 700s, respectively and there is no obvious oxide formation. The energy utilization efficiency of prepared Ni-Cu pre-alloy exploding foil under 2 000V charging voltage is 2.11 times higher than that of Cu exploding foil, the alloying reaction can be observed clearly after electric explosion occurred 50 μs later, the plasma expansion range and spark duration time are all significant larger than those of the traditional Cu EF, indicating its excellent electric explosion performance.

Key words: Pre-alloy explosion foil; Electrochemical synthesis; Alloy reaction; Electric explosion performance; Plasma

爆炸箔起爆器采用高压放电, 通过桥区材料温度瞬时升高、汽化引发物理爆炸, 产生高温等离子体^[1-2]。

爆炸箔通常使用的材料为铜箔, 其起爆输入能量低、引发电爆时间短、可靠性高, 但能量转换效率偏低、

收稿日期: 2024-01-30

作者简介: 申子安 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事金属材料的电化学制备及其在先进火工品技术中的应用研究。

通讯作者: 曾鑫 (1994-), 女, 助理研究员, 主要从事金属材料的电化学制备及其在先进火工品技术中的应用研究。

基金项目: 应用物理化学重点实验室开放课题基金 (No.6142602220102)。

引用本文: 申子安, 曾鑫, 朱艳丽, 等. Ni-Cu 预合金爆炸箔电化学制备及电爆性能研究[J]. 火工品, 2024(5): 28-34.

能量输出不高,难以满足起爆系统提出的更小体积和更高可靠性的要求^[9]。因此,研究人员开展包括氧化反应薄膜桥和合金化反应薄膜桥的含能爆炸箔的相关研究,以期提高爆炸箔换能效率,降低起爆阈值。

氧化反应薄膜桥一般由金属和金属氧化物构成,反应过程中释放化学能。在研究纳米反应多层膜制备工艺及材料性能的基础上,利用薄膜工艺和微机电系统(Micro-Electromechanical System, MEMS)技术,将金属-金属氧化物集成在金属薄膜桥上^[4-8]。利用金属薄膜桥电爆炸产生的高温等离子体与纳米反应多层膜的自蔓延反应共同作用,提升其能量转换效率和能量输出。Zhang K L等^[9]采用MEMS技术将Al/CuO集成到Au/Pt/Cr微型加热薄膜点火桥上,制备了Pt-Al/CuO薄膜换能元,其电爆反应过程中喷溅出大量高温产物,反应温度可达2 000 K,输出能量约60 mJ,发火成功率为98%,可应用于间隙点火。沈瑞琪等^[10-12]针对Al/CuO、Al/MoO₃、Zr/CuO、Mg/CuO等含能复合薄膜在火工品技术方面的应用进行了系列研究,研究发现在电激发条件下金属-金属氧化物之间会发生氧化还原反应,产生化学反应热,从而使电爆炸反应的产物形成高温等离子体,实现输出能量倍增。朱朋等^[13-14]在金属Cr薄膜桥上集成Al/CuO膜,制备了“介电式”薄膜换能元,该课题组针对Al/MoO₃薄膜桥^[15]的研究也表明其能量输出效率、电爆等离子体火花面积和等离子体温度都远高于半导体薄膜桥。然而氧化反应薄膜桥仍存在发火电压低、安全性差等问题。

合金化反应薄膜桥一般由两种或两种以上的不同金属或非金属构成,利用金属箔电爆炸激发预合金材料发生合金化反应,形成等离子体点燃标准点火药,目前大部分研究集中于Al/Ni^[16-17]、B/Ti^[18-19]体系。C.J. Morries等^[20-21]在铜爆炸箔上集成了Al/Ni反应多层膜,测试结果表明Al/Ni合金化反应释放的能量可在一定程度上有效提升飞片速度。C.Yang等^[22]采用高速摄影技术测得了Al、Ni和Al/Ni含能爆炸箔电爆炸过程的等离子体形态演变,结果表明几种调制周期的Al/Ni含能爆炸箔的等离子体喷发剧烈程度均远高于Al、

Ni单金属爆炸箔,证明Al/Ni的合金化反应有助于提升爆炸箔的电爆性能。王丽玲等^[23]采用磁控溅射方法将B/Ti反应多层膜沉积到Ti薄膜桥上,测试结果表明该薄膜换能元的火花溅射距离最高可达30 nm,并可成功实现对起爆药柱的0.1 mm距离间隙点火。上述合金化反应薄膜桥的等离子体膨胀范围和输出能量都有所提高,但发火电压仍较高。可能的原因有两个:一是研究较多的Al/Ni、B/Ti等薄膜材料合金化反应温度较高(>1 500 K),导致其发火电压超过2 000 V;二是传统磁控溅射等方法制备的含能薄膜层间界面单一,导致反应物接触面积受限,降低反应速率,且层间原子在强电/磁场作用下产生的高浓度电子易导致合金化反应提前发生,降低其后续反应活性。

综上,为探究电爆等离子体引发合金反应点火机理,进一步降低爆炸箔发火电压,提高能量利用率,本文采用电化学方法在铜爆炸箔表面原位可控沉积Ni-Cu预合金薄膜,并开展相应预合金爆炸箔微观形貌、组成成分和电爆特性等实验研究,结合电爆性能表征探索其合金化反应路径和电爆释能机理,提出发火电压低、能量转换效率高的Ni-Cu预合金爆炸箔制备的新方法。

1 预合金爆炸箔制备

基于Cu、Ni的氧化还原动力学差异,采用电化学恒电位沉积方法,实现双金属在铜爆炸箔表面的分步沉积,原位制备预合金爆炸箔。电化学采用三电极系统,其中以铜爆炸箔作为自支撑工作电极。为提高制备效率,首先对工作电极进行机械加工形成阵列式排布,一方面使工作电极成为铜爆炸箔基底的载体,另一方面在基底周围形成电场实现金属/半金属在其表面的原位沉积。工作电极的具体加工过程采用光刻-剥离技术:首先,在基片上涂覆光刻胶,经过曝光、显影之后,使光刻胶成为具有一定图形的掩膜;然后,采用电化学方法进行双金属原位沉积;最后,利用去胶液或丙酮溶液将光刻胶及其上的薄膜材料一起剥离去除,获得预合金爆炸箔,制备流程如图1所示。

在电化学具体制备过程中, 以上述阵列式装配模板为自支撑工作电极, 铂丝为对电极, Ag/AgCl 为参比电极。以弱酸性溶液为电解质 ($\text{pH}=2$), 在电解质中分散 20 mM CuCl_2 和 50 mM NiCl_2 分别作为 Cu 源和 Ni 源, 构造电化学三电极系统, 实验装置如图 2 所示。

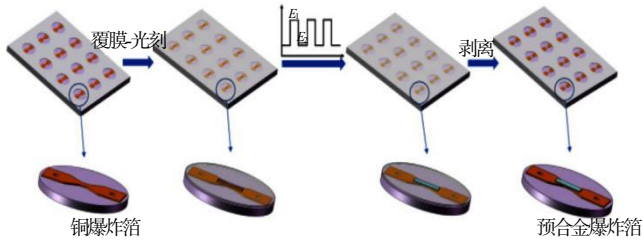


图 1 预合金爆炸箔制备流程图

Fig.1 Preparation flow chart of the pre-alloy exploding foil

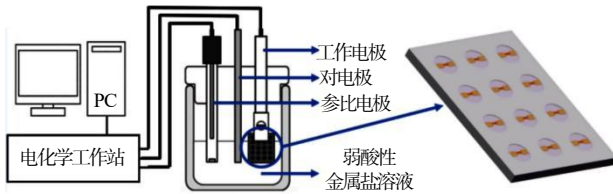


图 2 电化学三电极系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of the electrochemistry three-electrode system

实验开始前, 将工作电极在丙酮、乙醇和双重蒸馏水中依次超声清洗 15 min, 以去除其表面可能存在的氧化物和吸附的杂质, 保证基底与镀液的充分接触。利用循环伏安方法 (CV) 在 $-1.2 \sim 0 \text{ V}$ 的电压区间进行多圈扫描, 扫描速率为 10 mV/s , 获得 Cu 和 Ni 的还原电位分别为 -0.2 , -0.8 V 。以该电压为应用电位分别进行 Cu 和 Ni 的电化学恒电位沉积, 沉积时间均为 2 700 s, 制备总时间为 5 400 s, 沉积顺序为先 Ni 后 Cu。制备完成后用双重蒸馏水冲洗以去除表面杂质, 获得 Ni-Cu 预合金爆炸箔。

2 样品表征

2.1 形貌成分表征

在成功制备预合金爆炸箔的基础上, 利用扫描电子显微镜 (SEM) 表征预合金形貌结构和颗粒尺寸, 利用 X 光电子能谱仪 (EDS) 表征预合金元素组成和合金化反应程度。

2.2 电爆性能测试

预合金爆炸箔电爆性能测试系统如图 3 所示, 采用高压直流电源 (输出电压为 $0 \sim 4 \text{ kV}$, 精度为 1%) 给高压脉冲电容器 (型号规格为 CT41L/0.2 μF /3.0 kV) 充电; 采用输出 $0 \sim 3 \text{ kV}$ 可调脉冲电压、脉冲上升时间不大于 100 ns、脉冲下降时间不大于 $1 \mu\text{s}$ 的脉冲触发直流电源, 为高压开关 (冷阴极触发管, 型号规格为 RQ-8001) 提供触发信号, 使得高压开关闭合时, 高压脉冲电容器 C 对爆炸箔进行放电, 回路中的放电电流曲线 $I(t)$ 与爆炸箔两端的电压变换曲线 $U(t)$ 采用罗氏线圈 (型号规格为 5008C) 和衰减 1 000 倍的高压探头进行测量, 数据采用数字存储示波器 (采样速率不低于 $1 \text{ GS} \cdot \text{s}^{-1}$) 进行读取。采用以上系统表征不同充电电压下预合金爆炸箔和铜爆炸箔的爆发时间、爆发电压、爆发电流、临界爆发能量及其变化规律。同时, 利用高速摄像机记录预合金爆炸箔在不同充电电压下的电爆反应过程, 拍摄频率为 200 000 帧/s, 观察等离子体火花膨胀范围、喷射高度、形态和持续时间。

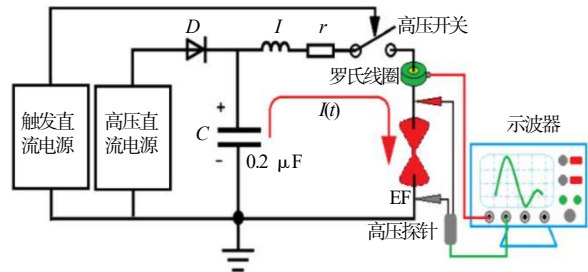


图 3 电爆性能测试系统

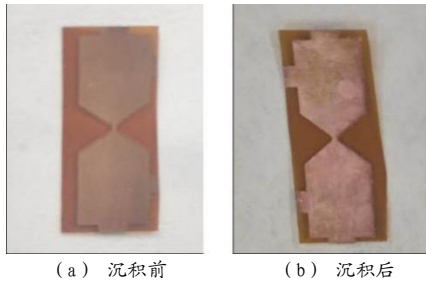
Fig.3 The measurement system of electric explosion performance

3 结果与讨论

3.1 预合金沉积形貌和成分

采用电化学恒电位方法沉积金属 Cu 和 Ni, 应用电位分别为 -0.2 , -0.8 V , 反应时间均为 2 700 s, 反应过程中工作电极表面可观察到明显物质沉积, 同时对电极表面有气泡产生。获得的 Ni-Cu 爆炸箔沉积前后的实物图如图 4 所示, 由图 4 可见在 Cu 爆炸箔表面有明显的红褐色沉积层, 对应于 Ni-Cu 预合金薄膜的

沉积。沉积的 Ni-Cu 预合金材料表面形貌如图 5 (a) ~ (d) 所示。图 5 (a) 低分辨率 SEM 表征结果表明材料表面整体较为平整, 图 5 (b) ~ (c) 高分辨率 SEM 结果表明沉积的 Ni-Cu 预合金材料呈 $5 \mu\text{m}$ 尺寸的立方体形貌。图 5 (d) 表明材料具有一定的核壳结构, 在立方体内有大量纳米尺度的立方体颗粒, 且其尺寸分布较为均匀, 形貌统一, 尺度较小。对 Ni-Cu 预合金材料表面进行 EDS 能谱分析, 如图 5 (e) 所示, 材料内可观察到 Ni, Cu 和少量 O 的存在。



(a) 沉积前 (b) 沉积后

图 4 爆炸箔实物图

Fig.4 Exploding foil

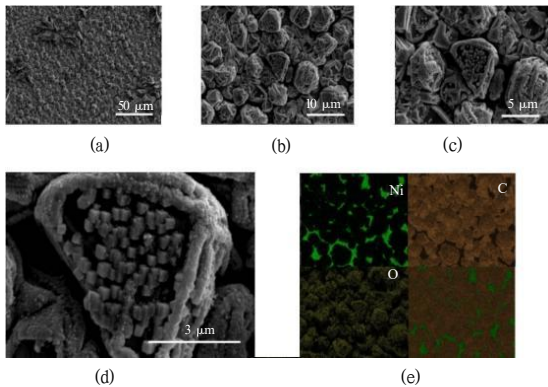


图 5 Ni-Cu 预合金爆炸箔表面 SEM 图和 EDS 图

Fig.5 SEM image and EDS image of Ni-Cu pre-alloy exploding foil

由于电化学制备为分步沉积过程, 首先沉积的 Ni 材料主要集中在下层, 分布较为均匀, 而后沉积的 Cu 表现为分布在上层的立方体结构, 并伴随少量 O 的沉积 ($< 10\%$)。EDS 表征结果表明, 该 Ni-Cu 预合金材料具有较明显的分层结构, 但 Cu 与 Ni 之间接触面积较传统层状结构有明显提高。主要原因是采用电化学制备方法的材料表面动力学行为较丰富, 金属阳离子可根据工作电极基底形貌可控沉积, 微米立方体结构铜颗粒的形成有利于提高双金属接触面积, 进而提高其反应活性。此外, 电化学制备方法中工作电

极直接作为反应发生的场所, 参与电子转移, 可一定程度影响沉积金属材料的颗粒排布。因此, 该原位制备方法下的双金属薄膜与基底相容性较好, 表现为更高的物理稳定性, 可在常温下长期放置不发生明显氧化和脱落。双金属间丰富的界面结构和较大的接触面积有利于提高相应薄膜材料反应活性和反应速率, 进而提高相应爆炸箔电爆炸性能和能量利用率。

3.2 电爆炸性能

对 Cu 爆炸箔、Ni-Cu 预合金爆炸箔在充电电压为 1 500, 1 800, 2 000, 2 200, 2 500 V 的电爆炸测试数据进行采集, 测试得到的电流、电压随时间变化曲线如图 6 所示。

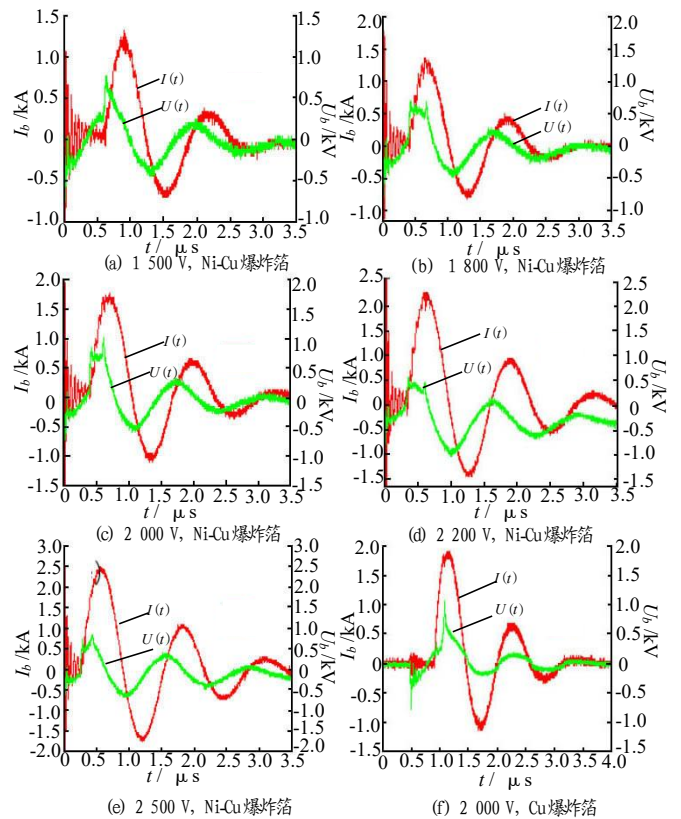


图 6 Ni-Cu 预合金爆炸箔、Cu 爆炸箔在不同充电电压下伏安特性曲线

Fig.6 Voltage and current curves of the Ni-Cu pre-alloy exploding foil and Cu exploding foil under different charging voltages

定义峰值电压时刻为爆炸箔爆发时刻, 其爆发电流密度、爆发功率、沉积能量、输入总能量和能量利用率的计算方法如式 (1) ~ (5):

$$\rho_b = \frac{I_b}{h \times w \times d} \quad (1)$$

$$P_b = U_b \times I_b \quad (2)$$

$$E = \int_{t_0}^{t_r} U(t)I(t)dt \quad (3)$$

$$E_0 = \frac{1}{2}CU^2 \quad (4)$$

$$\eta = \frac{E}{E_0} \quad (5)$$

式(1)~(5)中: ρ_b 为爆发电流密度, $\text{MA} \cdot \text{cm}^{-3}$; I_b 为爆发电流, A; h , w , d 分别为爆炸箔的长、宽和厚度, 分别为 0.5, 0.5 mm 和 4 μm ; P_b 为爆发点峰值功率, MW; U_b 为爆发电压, kV; E 为沉积能量, mJ; t_r 为爆发时间, ns; E_0 为输入总能量, mJ; C 为高压电容器电容容量, 0.2 μF ; U 为电容器充电电压, V; η 为能量利用率, %。上述电爆炸测试数据如表 1 所示。

表 1 Cu 爆炸箔、Ni-Cu 预合金爆炸箔电爆炸测试数据
Tab.1 Electric explosion parameters of the Cu exploding foil and Ni-Cu pre-alloy exploding foil

U kV	爆炸 箔	U_b kV	I_b /A	P_b /MW	t_r /ns	E /mJ	E_0 /mJ	η /%
1500	Ni-Cu	771.2	248.8	0.19	632	46	225	20.4
1800	Ni-Cu	690.1	1327.4	0.92	666	132	324	40.7
2000	Ni-Cu	1014.7	1658.9	1.68	612	186	400	46.5
2200	Ni-Cu	446.5	2032.2	0.91	601	171	484	35.4
2500	Ni-Cu	852.4	1866.3	1.59	435	135	625	21.6
2000	Cu	1058.8	1755.1	1.88	1087	88	400	22.0

由图 6 (a)~(e) 及表 1 可以看出, Ni-Cu 爆炸箔和 Cu 爆炸箔在上述充电电压下均发生了电爆炸。随着充电电压的升高, 爆发电流总体呈上升趋势, 爆发电压、爆发功率和能量利用率先升高后下降, 在 2000 V 时达到最大。在充电电压为 1500, 1800 V 时, 爆发电流和爆发电压均随充电电压的提高而提高, 但由于爆发电压出现时刻先于爆发电流, 电爆炸发生后多余的能量被浪费在回路之中, 导致能量利用率较低, 分别为 20.4%和 40.7%。当充电电压为 2000 V 时, 爆发电压达到最大值, 且爆炸电流和爆发电压出现时刻较为接近, 说明该充电电压与起爆回路匹配性较高, 能量利用率高达 46.5%, 是相同充电电压下 Cu 爆炸箔能量利用率的 2.11 倍。而当充电电压分别为 2200, 2500 V 时, 由于初始能量较高, 导致能量利用率较低, 分别为 35.4%和 21.6%。此外, 随着充电电压的

升高, Ni-Cu 预合金爆炸箔的爆发时间逐步提前, 这是因为充电电压的升高加快了爆炸箔汽化电离生成等离子体的过程, 加速电爆炸反应发生。

图 6 (a) 为充电电压为 1500 V 时, Ni-Cu 预合金爆炸箔的伏安特性曲线。相较于图 6 (b)~(e), 图 6 (a) 中 Ni-Cu 预合金爆炸箔爆发时刻的电压曲线是一个尖峰, 表明在低电压下, Cu 的电爆无法快速引发 Ni-Cu 合金化反应的发生, 表现为最低的能量利用率和相对平和的电爆反应过程。图 6 (c) 和图 6 (f) 分别为充电电压为 2000 V 时, Ni-Cu 预合金爆炸箔和 Cu 爆炸箔的伏安特性曲线。图 6 (c) 中 Ni-Cu 预合金爆炸箔的电压曲线有一个平台期, 而图 6 (f) 中 Cu 爆炸箔爆发时刻的电压曲线是一个尖峰, 表明在该充电电压下 Ni-Cu 预合金爆炸箔中 Cu 电爆炸反应放出的热量成功引发 Ni-Cu 预合金发生合金化反应, 表现为电压平台期后可观察到的二次上升现象。相同充电电压下, Ni-Cu 预合金爆炸箔的爆发电压和爆发功率与 Cu 爆炸箔接近, 这是因为上述两种爆炸箔电爆炸反应均起始于 Cu 的电爆。而 Ni-Cu 预合金爆炸箔相较于 Cu 爆炸箔的爆发时间更早, 这是由于 Ni-Cu 预合金薄膜在 Cu 表面的沉积使预合金爆炸箔初始电阻高于 Cu 爆炸箔, 电爆过程中焦耳热效应更剧烈, 且预合金爆炸箔中 Ni-Cu 合金化反应产生的合金热可进一步催化电爆反应发生, 使爆发时间提前。此外, Cu 的电爆成功引发 Ni-Cu 合金化反应的发生, 可有效提高 Ni-Cu 爆炸箔的输出能量, 使其电爆持续时间更长, 能量利用率更高, 在 2000 V 的充电电压下, 能量利用率是传统 Cu 爆炸箔的 2.11 倍。

本文中提出的电化学制备方法可根据实际应用需求, 通过改变电化学参数 (应用电位和应用时间) 对爆炸箔成分和电阻值进行进一步调控, 且可调控范围较大, 制备时间较短, 设备要求较低, 可满足多种应用需求, 具备较高的应用价值。

3.3 电爆炸反应过程

基于上述预合金爆炸箔的成功制备和电爆炸性能测试, 采用高速摄像机对 Ni-Cu 预合金爆炸箔和 Cu 爆炸箔的电爆炸反应过程进行进一步表征, 结果如图 7~8 所示。

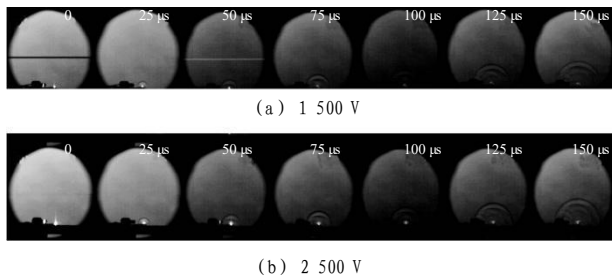


图7 Ni-Cu 预合金爆炸箔在不同充电电压下的电爆炸过程高速摄影图像

Fig.7 High-speed photography images of the electrical explosion process of Ni-Cu pre-alloyed exploding foil under different charging voltages

图7为Ni-Cu预合金爆炸箔在不同充电电压下的电爆炸反应过程高速摄影图像,以电爆炸反应发生时刻为起始时刻。从图7(a)中可以观察到,在充电电压为1 500V时,开关触发后Ni-Cu预合金爆炸箔成功发生电爆炸,产生剧烈火花并伴随等离子体的扩散。电爆炸发生75 μs后,火花消失,电爆炸反应过程基本结束。从图7(b)中可以观察到,在2 500 V的充电电压下,由于单位时间内加载到Ni-Cu预合金爆炸箔上的电能增大,电爆炸反应更加剧烈,相比图7(a)中的反应过程火花更亮,等离子体膨胀范围更大,且持续时间更久,电爆炸发生75 μs后仍能观察到明显的火花。

图8(a)和图8(b)分别为Cu爆炸箔和Ni-Cu预合金爆炸箔在2 500 V下电爆炸反应过程的高速摄影图像。

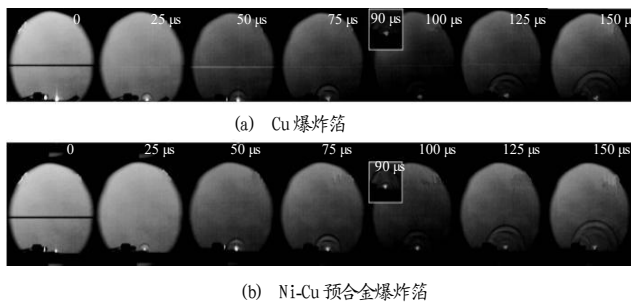


图8 不同爆炸箔在2 500 V下的电爆炸过程高速摄影图像
Fig.8 High-speed photography images of electric explosion process of different exploding foils at 2 500 V

由图8可见,在2 500 V充电电压下,Cu爆炸箔和Ni-Cu预合金爆炸箔均可成功发生电爆炸反应。相比Cu爆炸箔,Ni-Cu预合金爆炸箔的起始火花亮度较暗,对应其较低的爆发电流,但其火花亮度在电爆

炸发生50 μs后突然升高,表明Ni-Cu预合金膜的合金化反应在此时发生并伴随大量等离子体的产生,进一步提高电爆炸反应的剧烈程度。如图8中的插图所示,电爆炸发生90 μs后,Ni-Cu预合金爆炸箔仍可观察到较明显的等离子体火花,而Cu爆炸箔上火花已经完全消失,表明Ni-Cu预合金爆炸箔的火花持续时间比Cu爆炸箔更久,Ni-Cu合金化反应的发生可有效延长电爆炸反应的作用时间。此外,图8中Ni-Cu预合金爆炸箔的等离子体膨胀范围在50 μs后明显增加,整体比Cu爆炸箔等离子体的膨胀范围大,说明Ni-Cu合金化反应的发生可提高电爆炸过程中的等离子体浓度,扩大等离子体膨胀范围。

综上,高速摄影图像表明Ni-Cu预合金爆炸箔可成功发生电爆炸反应。其反应过程分为两步:首先,底层Cu发生电爆产生等离子体;然后,Cu电爆产生的高温等离子体成功引发其表面Ni-Cu预合金薄膜进一步发生合金化反应。该两步反应过程可有效提高电爆炸反应的剧烈程度并加速能量释放,表现为高速摄影图中观察到的Ni-Cu预合金爆炸箔等离子体火花的二次增强现象,以及Ni-Cu爆炸箔在相同充电电压下明显优于Cu爆炸箔的等离子体膨胀范围和火花持续时间。

4 结论

本文采用电化学方法制备出Ni-Cu预合金爆炸箔,并对其微观形貌、组成成分、电爆炸性能、合金化反应机理等进行了系统研究。结果表明:

(1) 通过电化学方法可成功制备Ni-Cu预合金爆炸箔,SEM/EDS表征结果表明该预合金爆炸箔表面沉积颗粒呈5 μm的立方体结构且分布均匀,无明显氧化物生成,预合金薄膜反应活性较高,制备过程可重复性高。

(2) 通过电爆炸性能测试系统对Ni-Cu预合金爆炸箔和Cu爆炸箔进行电爆性能测试。结果表明Ni-Cu预合金爆炸箔中Cu的电爆可成功引发Ni-Cu发生合金化反应,进一步提高爆炸箔能量输出并延长

电爆反应时间。在 2 000 V 充电电压下, Ni-Cu 预合金爆炸箔的能量利用率是 Cu 爆炸箔的 2.11 倍, 且电爆持续时间也明显长于 Cu 爆炸箔。

(3) 利用高速摄像机记录了 Ni-Cu 预合金爆炸箔和 Cu 爆炸箔的电爆反应过程。相比于 Cu 爆炸箔, Ni-Cu 预合金爆炸箔在电爆发生 50 μ s 后可观察到明显的合金化反应发生, 表现为等离子体火花二次增强和等离子体膨胀范围扩大。在相同充电电压下, Ni-Cu 爆炸箔的等离子体膨胀范围和火花持续时间均明显大于 Cu 爆炸箔。

参考文献:

- [1] 温玉全. 军用工品设计技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [2] 陈清畴, 马弢, 李勇, 等. 爆炸箔起爆器作用机理研究进展[J]. 含能材料, 2019, 27(1): 79-88.
- [3] 沈瑞琪, 叶迎华. 含能材料特种效应与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.
- [4] 王述剑, 彭泓铮, 张文超, 等. MEMS 用含能薄膜研究现状及进展[J]. 含能材料, 2012, 20(2): 234-239.
- [5] Yan Y C, Shi W, Jiang H C, et al. Characteristics of the energetic igniters through integrating Al/NiO nanolaminates on Cr film bridge[J]. Nanoscale Research Letters, 2015, 10(1): 504.
- [6] Zhang Y X, Jiang H C, Zhao X H, et al. Characteristics of the energetic micro-initiator through integrating Al/Ni nanomultilayers with Cu film bridge[J]. Nanoscale Research Letters, 2017, 12(1): 38.
- [7] 任炜, 赵玉龙, 褚恩义, 等. 微机电火工品薄膜结构换能元[J]. 光学精密工程, 2018, 26(9): 2 319-2 325.
- [8] 郑焕. 基于 MEMS 工艺的微型金属桥膜点火器件研究[D]. 北京: 北京大学, 2013.
- [9] Zhang K L, Rossi C, Petrantoniet M, et al. A nano initiator realized by integrating Al/CuO-based nanoenergetic materials with a Au/Pt/Cr microheater[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2008, 17(4): 832-836.
- [10] 李家宽, 马小霞, 胡艳, 叶迎华, 沈瑞琪. KNO₃/GO 复合含能材料的制备与表征[J]. 爆破器材, 2016, 45(2): 1-5.
- [11] 金晓云, 胡艳, 沈瑞琪, 叶迎华. Al/Ni 纳米复合含能材料的制备及其激光点火性能研究[J]. 爆破器材, 2012, 41(3): 12-15.
- [12] 周兵, 江晓红, 沈瑞琪, 陆路德, A.V. Rogachev. 电子束蒸发沉积金属-TiO₂ 薄膜的结构和光学性质[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2010, 34(4): 547-552.
- [13] Zhou X, Shen R Q, Ye Y H, et al. Influence of Al/CuO reactive multilayer films additives on exploding foil initiator[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(9): 945 05.
- [14] Zhu P, Jiao J, Shen R Q, et al. Energetic semiconductor bridge device incorporating Al/MoO_x multilayer nanofilms and negative temperature coefficient thermistor chip[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(19): 194 502.
- [15] 付帅, 朱朋, 叶迎华, 等. 基于 Al/MoO_x 纳米复合薄膜的含能半导体桥研究[J]. 爆破器材, 2013(6): 1-6.
- [16] 王涛, 曾庆轩, 李明愉, 等. Al/Ni 反应多层膜的电爆炸及驱动性能研究[J]. 火工品, 2016(5): 1-5.
- [17] Duckham A, Spey S J, Wang J, et al. Reactive nanostructured foil used as a heat source for joining titanium[J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(4): 2 336-2 342.
- [18] 蔡贤耀, 蒋洪川, 闫裔超, 等. (B/Ti)_n/TaN 薄膜点火桥的制备及点火性能[J]. 含能材料, 2015, 23(3): 265-269.
- [19] Zhang Y X, Wang Y, Ai M T, et al. Reactive B/Ti nano-multilayers with superior performance in plasma generation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018 (10): 21 582-21 589.
- [20] Morris C J, Mary B, Zakaret E, et al. Rapid initiation of reactions in Al/Ni multilayers with nanoscale layering[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2010, 71(2): 84-89.
- [21] Morris C J, Wilkins P, Mayet C, et al. Streak spectrograph temperature analysis from electrically exploded Ni/Al nanolaminates [J]. Thin Solid Films, 2011, 520(5): 1 645-1 650.
- [22] Wang Y, Sun X J, Jiang H C, et al. Investigation of electrically heated exploding foils in reactive Al/Ni multilayer[J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2018, 43(9): 923-928.
- [23] 王丽玲, 王亮, 蒋小华, 等. Ti/B 多层结构含能点火元件的制备与表征[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(4): 138-140.