

文章编号:1006-9941(2019)10-0830-07

一种 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件的制备及性能

杨腾龙¹,沈云¹,代骥¹,郑国强²,王成爱¹,叶迎华¹,沈瑞琪¹

(1. 南京理工大学化工学院,江苏 南京 210094; 2. 中国电子科技集团公司第四十三研究所,安徽 合肥 230031)

摘要: 为了提高 Ni-Cr 薄膜发火件的安全性和点火能力,使用磁控溅射技术将 Al/CuO 含能薄膜与 Ni-Cr 薄膜发火件复合,制备了一种新型的 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件。该 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件既可以用作换能元,又可以作为最简单的电点火元件,从而简化点传火序列,适应弹药微型化的发展需求。测试其 1A1W5min 安全性、电发火感度和点火能力。结果表明,Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件满足 1A1W5min 安全性要求;50 ms 临界发火电流为 3.08 A,最小全发火电流为 3.18 A,最大不发火电流为 2.98 A,安全裕度较高;在相同条件下,Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件可以点燃硼/硝酸钾,并且可实现 1 mm 的间隙点火,而 Ni-Cr 薄膜发火件不能成功点燃硼/硝酸钾。

关键词: 复合含能点火元件;Ni-Cr 薄膜发火件;磁控溅射;恒流激励;间隙点火;硼/硝酸钾

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2019103

1 引言

近年来武器弹药的更新迭代,传统的桥丝式火工品已不能满足现在火工品所需的快速响应、可靠发火、安全钝感的更高性能要求^[1-3]。随着 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技术的快速发展,利用物理气相沉积技术可获得尺寸易调节,满足特殊形状设计需求的金属薄膜发火件,它是一种可将电能转换成热能的换能元,与传统火工品相比具有响应更快、一致性更好、点火可靠性更高的优点。与金属 Pt、Cr、Ti 及复合金属等薄膜相比^[4-5],镍铬薄膜由于具有机械性能优良,电阻率高,与药剂相容性好,取材方便和电阻系数小等优点,其制备方法和性能已被广泛研究^[6-9]。但是金属薄膜发火件存在输出能量低的问题^[10-12],利用物理气相沉积技术或化学气相沉积技术将含能反应薄膜与金属薄膜发火件复合,可提高输出能量。含能反

应薄膜一般分为合金化薄膜和化学反应薄膜,化学反应薄膜能释放更高的热量^[13-14]。Al/CuO 化学反应薄膜相对于 Zr/CuO、Mg/CuO 和 Al/MoO₃ 三种薄膜,它能放出更多的热量,发生更强烈的电爆反应,显著提升反应的输出能量^[15-20]。

为了增强 Ni-Cr 薄膜发火件的点火能力,本研究通过磁控溅射技术,将 Al/CuO 含能薄膜集成于 Ni-Cr 薄膜发火件上,制备了一种新型的 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件。采用 SEM 与 DSC 表征了 Al/CuO 含能薄膜的物理化学性能,研究了 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件 1A1W5min 安全性、电发火感度和点火能力,并和 Ni-Cr 薄膜发火件的性能形成对比,以期能将 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件作为换能元和最简单的电点火元件,简化点传火序列,适应弹药微型化发展需求。

2 实验部分

2.1 试剂与仪器

试剂:金属 Al 靶材,直径 76 mm,厚 5 mm,纯度 99.99%,中诺新材料科技有限公司;CuO 靶材,直径 76 mm,厚 4 mm,纯度 99.99%,中诺新材料科技有限公司;GJB6217-2008 硼/硝酸钾点火药,使用压药模具

收稿日期:2019-04-18;修回日期:2019-08-10

网络出版日期:2019-09-05

基金项目:航天创新基金资助(批准号:CASC150710)

作者简介:杨腾龙(1994-),男,在读硕士,主要从事微点火研究。

e-mail: yangtl@njjust.edu.cn

通信联系人:叶迎华(1962-),女,研究员,主要从事先进火工品研究。

e-mail: yyinghua@njjust.edu.cn

引用本文:杨腾龙,沈云,代骥,等.一种 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件的制备及性能[J].含能材料,2019,27(10):830-836.

YANG Teng-long, SHEN Yun, DAI Ji, et al. Fabrication and Characterization of a Ni-Cr@Al/CuO Insensitive Energetic Element[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(10):830-836.

将 30 mg 药粉压制成直径 6 mm, 厚度 0.7 mm, 密度 $(1.52 \pm 0.22) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的圆形药片;

仪器: 智能激光冷水机(深圳东露阳实业有限公司); MS550 多功能通用镀膜机(沈阳科友真空技术公司); Sirion2000 场发射扫描电子显微镜(荷兰 FEI 公司); NETZSCH STA 449 C 型同步热分析仪(德国); Fotric 红外热像仪; 火工品感度试验用便携式计算装置(中国兵器工业第 213 研究所); Agilent E3634A 恒流稳压源; HG-100K 高速摄影(REDLAKE 公司); DPO 5054B 型号示波器; 内径 6 mm, 外径 10 mm 的玻璃管; 内径 3 mm, 外径 5 mm, 高度分别为 1 mm 和 2 mm 的两种绝缘垫片。

2.2 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件的设计与制备

Ni-Cr 薄膜设计为蝶形, 两侧 V 字形开口的角度为 60° , 膜厚为 $1.3 \mu\text{m}$, 设计电阻为 0.9Ω 。将制备的 Ni-Cr 薄膜与陶瓷塞进行集成, 得到 Ni-Cr 薄膜发火件。利用磁控溅射技术将 Al/CuO 含能薄膜与 Ni-Cr 薄膜发火件复合, 得到 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件, 其结构如图 1 所示, 实物如图 2 所示。

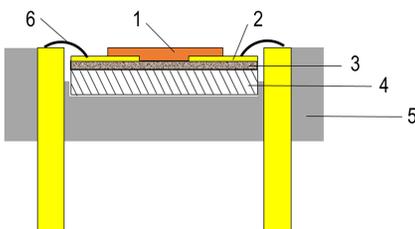


图 1 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件结构示意图

1—Al/CuO 含能薄膜, 2—Cu 焊盘, 3—Ni-Cr 薄膜(80/20), 4—基片, 5—陶瓷塞, 6—硅铝丝

Fig.1 Sketch of Ni-Cr@Al/CuO insensitive energetic element 1—Al/CuO energetic thin film, 2—copper film, 3—Ni-Cr (80/20) thin film, 4—substrate, 5—ceramic electrode, 6—silicon aluminum wire

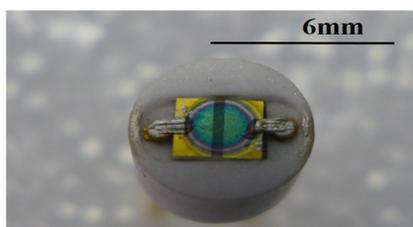


图 2 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件样品图

Fig.2 Sample of Ni-Cr@Al/CuO insensitive energetic element

磁控溅射原理如下: 在高真空中通入一定量的惰性气体, 利用气体分子在强电场作用下发生电离, 发生辉光放电, 从而产生了带正电的离子, 由于正交磁场的

作用形成高能离子流撞击在靶材上, 导致靶材原子或分子飞溅出来, 沉积到样品基片上形成薄膜。磁控溅射原理如图 3 所示。

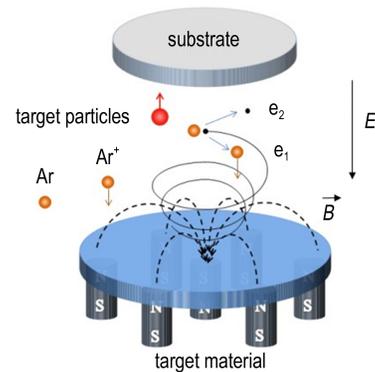


图 3 磁控溅射原理图

Fig.3 Schematic diagram of magnetron sputtering

根据 Al 与 CuO 薄膜发生铝热反应的化学反应式: $2\text{Al} + 3\text{CuO} = \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{Cu}$, 将薄膜密度近似于靶材的密度 (Al: $2.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, CuO: $6.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), 由镀膜参数可知, 制备得到的含能薄膜中的 Al 和 CuO 的调制比为 1/2, 根据计算得到含能薄膜中的 Al 和 CuO 化学摩尔质量比为 2:3, 与反应式理论化学计量比一致, 因此 Al/CuO 含能薄膜组成的反应体系的氧平衡状态处于零氧平衡, 计算得到该反应体系的反应生成热为 $-1209.6 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。镀膜参数设置如表 1 所示。

表 1 Al/CuO 含能薄膜参数

Table 1 Parameters of Al/CuO energetic thin film

	component	depositionrate/nm·min ⁻¹	thickness/nm	cycle
Al/CuO	Al	45	25	40
	CuO	27	50	

2.3 性能测试

采用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscopy, SEM)分析 Al/CuO 含能薄膜样品的断面形貌; 采用差式扫描量热分析(Differential Scanning Calorimetry, DSC)对 Al/CuO 含能薄膜进行研究, 测试条件: 取样量 1.5 mg, 气体氛围为氩气, 气体流量 $20 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 升温区间 $30 \sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, 升温速率 $10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

对 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件的安全性能、电发火感度及点火能力等进行了研究。电阻测试: 测试温度为 $(25 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$; 按照 GJB5309.11-2014^[21] 测试其 1A1W5min 下的安全性能, 同时使用红外热像仪记录 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件的表面温度变化, 样品数量为 10 发; 利用 D-最优化法进行发火感度试验^[22], 测

试 50 ms 临界发火电流,开展两组平行试验,样品数量分别为 13 发和 14 发;通过不同间隙点火硼酸钾实验测试点火能力,当无间隙时,药片紧贴在 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件表面,实验装置如图 4 所示,使用绝缘垫片实现药片和 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件 1 mm 和 2 mm 的间隙距离,示意图如图 5 所示。

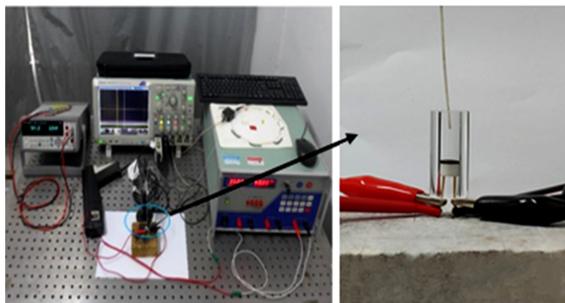


图 4 点火装置实物图
Fig.4 Device of ignition test

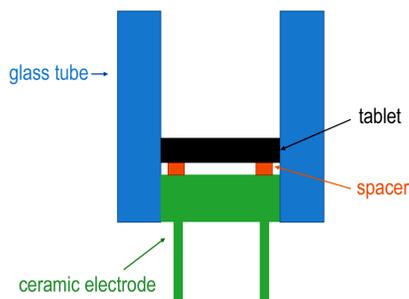


图 5 间隙点火示意图
Fig.5 Schematic diagram of gap ignition

3 结果和分析

3.1 Al/CuO 含能薄膜表征

Al/CuO 含能薄膜样品的调制周期为 75 nm,调制比为 1:2,膜厚为 3 μm 。图 6 为 Al/CuO 含能薄膜样品断面形貌图,可见 Al/CuO 含能薄膜为层状结构,层间结合紧密,成膜质量良好。DSC 测试结果如图 7 所示,在 295.6 $^{\circ}\text{C}$ 附近,DSC 曲线上出现较小的放热峰,此时 CuO 发生分解反应生成 Cu_2O ;在温度为 626.5 $^{\circ}\text{C}$ 时,出现第二个主放热峰,Al 的熔点为 660 $^{\circ}\text{C}$,放热峰出现在 Al 融化之前,表明此时 Al 与 CuO 发生固固相反应,放出热量。

3.2 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件的电阻

选用 Ni/Cr(80:20)合金材料作为薄膜材料,材料确定后薄膜的电阻值仅与其长宽比有关。蝶形 Ni-Cr 薄膜的几何参数有长度 l 、宽度 w 、V 形角度 θ ,最窄宽度 w_{\min} 以及厚度 d ,其截面积随着长度 l 变化而变化。

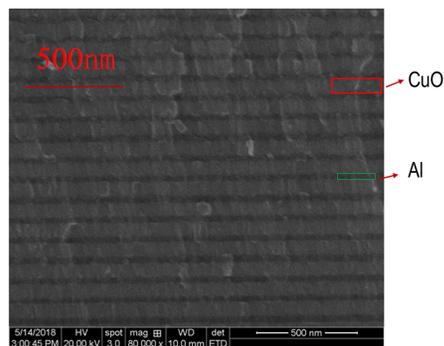


图 6 Al/CuO 含能薄膜 SEM 表征图
Fig.6 SEM photographs of Al/CuO energetic thin film

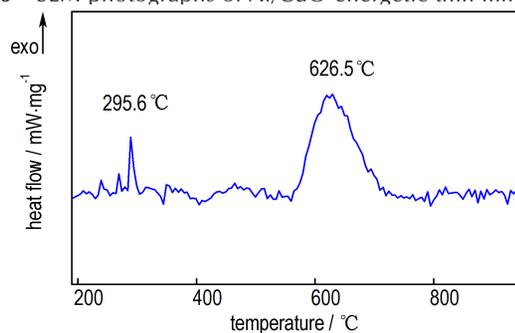


图 7 Al/CuO 含能薄膜的 DSC 曲线
Fig.7 DSC curve of Al/CuO energetic thin film

实验设计所用 Ni-Cr 薄膜为蝶形,其中桥区几何尺寸为 1 mm(w) \times 0.35 mm(l) \times 1.3 μm (d),V 形角度 θ 为 60 $^{\circ}$,桥区最窄处宽度 w_{\min} 为 0.35 mm,制备的 Ni-Cr 薄膜样品和桥区尺寸如图 8 所示。

通过横截面积恒定的长方体型薄膜电阻阻值计算模型^[23]可得 Ni-Cr 薄膜电阻为 0.9 Ω ,实测电阻平均值为 0.848 Ω ,标准偏差为 0.053 Ω ;Ni-Cr 薄膜发火件实测电阻平均值为 0.948 Ω ,标准偏差为 0.012 Ω ,Ni-Cr 薄膜发火件的阻值稍大于 Ni-Cr 薄膜阻值;Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件实测电阻平均值为 1.022 Ω ,标准偏差为 0.015 Ω ,与 Ni-Cr 薄膜发火件相差不大。表 2 为 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件电阻测试结果,从表 2 可以看出,制备的 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件一致性好,加工工艺稳定可靠。

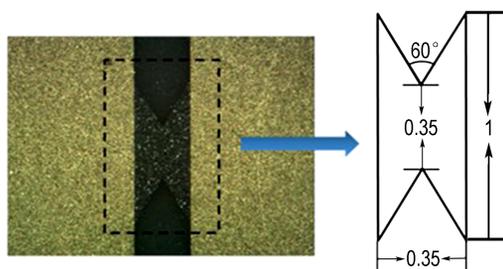


图 8 Ni-Cr 薄膜样品和桥区尺寸
Fig.8 Sample of Ni-Cr thin film and bridge area size

表 2 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件电阻测试

Table 2 Resistance measurement of Ni-Cr@Al/CuO insensitive energetic element

	measured resistance / Ω										average	standard
											resistance / Ω	deviation / Ω
Ni-Cr film	0.767	0.811	0.852	0.905	0.850	0.761	0.901	0.852	0.872	0.911	0.848	0.053
Ni-Cr thin film igniter	0.957	0.954	0.935	0.951	0.942	0.930	0.954	0.964	0.956	0.935	0.948	0.012
Ni-Cr@Al/CuO energetic insensitive element	1.020	1.010	1.006	1.012	1.004	1.041	1.040	1.020	1.040	1.030	1.022	0.015

3.3 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件的安全电流

为了研究 Al/CuO 含能薄膜复合到 Ni-Cr 薄膜发火件上的热安全性,对 Ni-Cr 薄膜发火件和 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件通以 1 A 恒流激励,图 9 是红外热像仪记录的 Ni-Cr 薄膜发火件和 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件表面的最高温度随时间变化曲线。从图 9 可知,Ni-Cr 薄膜发火件表面温度从 0.002 s 秒开始上升,上升速率较快,240 s 时达到最高温度(205±1) °C,随后保持不变;Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件表面温度从 0.001 s 秒开始上升,上升速率较慢,300 s 时达到最高温度(169±1) °C,之后保持不变。图 10 是 Ni-Cr 薄膜发火件和 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件在 300s 时的红外热像图,图 10 显示 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件表面温度 169.4 °C 低于 Ni-Cr 薄膜发火件的表面温度 205.5 °C,说明在 Ni-Cr 薄膜发火件上复合 Al/CuO 含能薄膜提高了其热安全性。

按照 GJB5309.11-2014^[21]测试了 Ni-Cr@Al/CuO

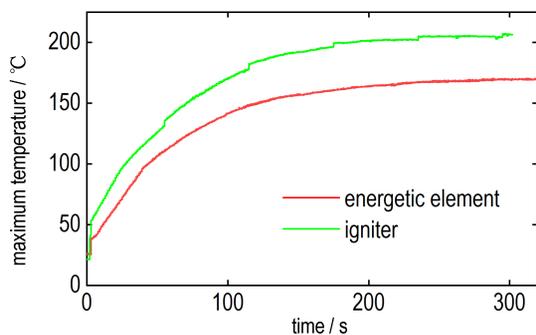


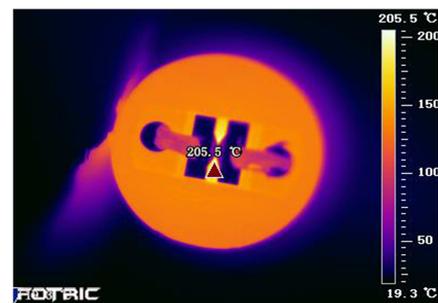
图 9 不同换能元的表面最高温度随时间变化曲线
Fig.9 Surface maximum temperature variation curve of different transducer elements

表 3 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件的 50 ms 电发火感度

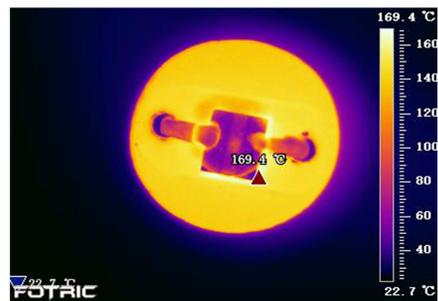
Table 3 Electrical firing sensitivity test results of Ni-Cr@Al/CuO insensitive energetic element at 50 ms

sample	account	50% firing current / A	99.9% firing current / A	0.1% firing current / A
Ni-Cr insensitive and high-energy igniter	13	3.079	3.193	2.964
	14	3.080	3.174	2.987
average		3.08	3.18	2.98

钝感含能元件 1A1W5min 安全性,样品数量为 10 发。10 发 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件在规定的时间内都未发火,表明它满足 1A1W5min 不发火的安全性要求。



a. Ni-Cr thin film igniter



b. Ni-Cr@Al/CuO insensitive energetic element

图 10 不同换能元在 300 s 时的红外热像图
Fig.10 Infrared thermography of different transducer elements at 300 s

3.4 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件的发火感度

为研究 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件在恒定电流激励下的临界爆发性,根据 D-最优化法^[22]对 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件进行 50 ms 临界发火电流的测试,其结果如表 3 所示。

Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件的 50 ms 临界发火电流值为 3.08 A, 最小全发火电流为 3.18 A, 最大不发火电流为 2.98 A。文献^[10]钝感 Ni-Cr 薄膜换能元(阻值为 $(1.04 \pm 0.09) \Omega$) 的最小全发火电流 2.47 A, 与之相比, Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件的 50 ms 临界发火电流更高, 发火感度更低, 安全性能更好。图 11 为 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件发火后实物图。从图 11 中可见, Al/CuO 含能薄膜全部发生反应, 桥区完全炸断, 发火后桥区两端烧蚀区域不对称, 发火区域大小与电流方向有关^[24]。图 12 为 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件 3.18 A 发火高速摄影图, 可知 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件的火焰空间尺寸较大, 有利于对下一级装药的能量传递。

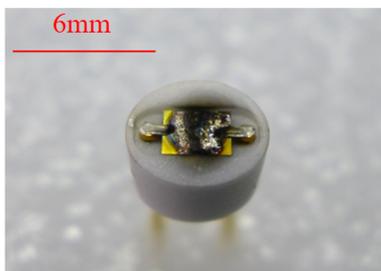


图 11 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件发火后实物图

Fig.11 Ni-Cr@Al/CuO insensitive energetic element after firing

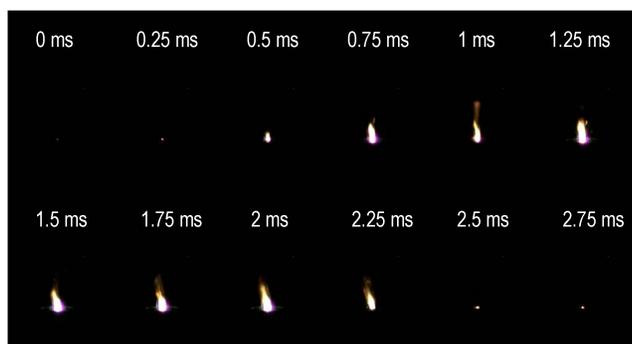


图 12 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件 3.18 A 发火高速摄影图

Fig.12 High-speed photographs of Ni-Cr@Al/CuO insensitive energetic element under constant current 3.18 A

图 13 是 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件在 3.5 A 激励下的电压-电流-电阻 ($V-I-R$) 曲线, 结果表明, 通电后桥区温度升高, 加热其上的 Al/CuO 含能薄膜, 15.9 ms 时 Al/CuO 含能薄膜开始燃烧, 可以探测到光信号, 此时电阻变为 5Ω , 17.2 ms 时电流变为 0, Ni-Cr 薄膜发火件电阻为开路状态。这说明在 3.5 A 恒流激励下, Ni-Cr 薄膜发火件通过热积累, 薄膜表面温度达到 Al/CuO 含能薄膜的着火点, 含能薄膜发火。

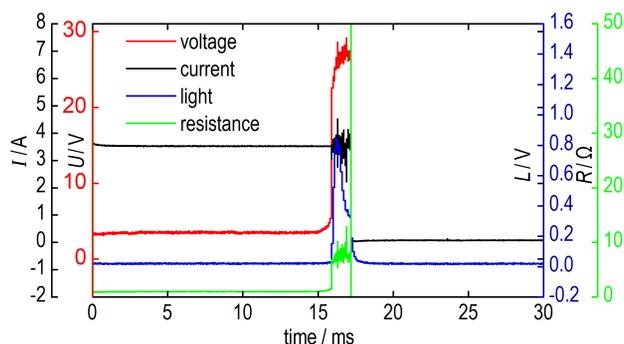


图 13 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件在 3.5 A 激励下 $V-I-R$ 曲线图

Fig.13 $V-I-R$ curves of Ni-Cr@Al/CuO insensitive energetic element under 3.5 A

3.5 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件的点火能力

在恒流激励下, 通过点燃硼/硝酸钾实验比较 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件和 Ni-Cr 薄膜发火件的点火能力。

在 3.5 A 恒流激励下, Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件成功点燃点火药硼/硝酸钾, 硼/硝酸钾燃烧过程的高速摄影记录如图 14 所示。从图 14 可以看出, Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件首先在 10 ms 时发火, 20 ms 时硼/硝酸钾被点燃, 火焰迅速扩散, 直至 190 ms 时, 硼/硝酸钾基本燃烧结束, 燃烧过程持续约 169.7 ms。而 Ni-Cr 薄膜发火件不能成功点燃硼/硝酸钾。分析认为, Ni-Cr 薄膜发火件在恒流激励下产生的热量积累不足以直接点燃硼/硝酸钾, 而 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件由于集成了 Al/CuO 含能薄膜, Al/CuO 含能薄膜在 Ni-Cr 薄膜的焦耳热作用下被点燃, 发生化学反应, 产生大量的高温燃烧产物, 从而能够点燃硼/硝酸钾, 说明 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件较 Ni-Cr 薄膜发火件具有更好的点火能力。

3.6 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件的间隙点火能力

为了进一步测试 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件的

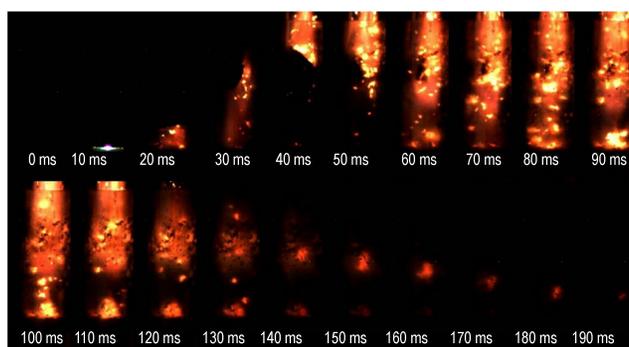


图 14 无间隙点火硼/硝酸钾发火的高速摄影图

Fig.14 High-speed photographs of burning of B/KNO₃ with no gap

点火性能,在常压下以 3.5 A 恒流激励,间隙距离分别为 1 mm 和 2 mm,采用高速摄影记录 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件间隙点燃硼/硝酸钾的发火过程,实验结果如图 15a 和图 15b 所示。

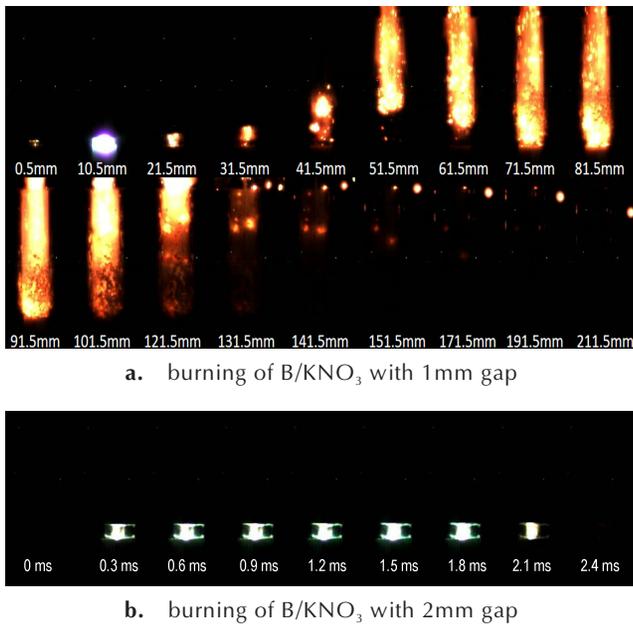


图 15 不同间隙点火硼/硝酸钾发火的高速摄影图
Fig.15 High-speed photographs of burning of B/KNO₃ with different gaps

由图 15a 可知, Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件在 1 mm 间隙点火硼/硝酸钾测试中, Ni-Cr 薄膜在 0.5 ms 内发火, Al/CuO 含能薄膜在 10.5 ms 发火, 火焰向上扩散, 在硼/硝酸钾药片形成热点, 21.5 ms 药剂部分发火, 随着时间持续和热量积累, 41.5 ms 完全点燃药剂, 硼/硝酸钾被成功点燃。从图 15b 可以看出, 在 2 mm 间隙点火测试中, Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件发火, 硼/硝酸钾未被点燃。

4 结论

(1) 使用磁控溅射技术将 Al/CuO 含能薄膜与 Ni-Cr 薄膜发火件复合, 制备出 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件, 其中 Al/CuO 含能薄膜调制周期为 75 nm, 调制比为 (Al: 25 nm; CuO: 50 nm), 总膜厚 3 μm。SEM 表征得 Al/CuO 含能薄膜成膜均匀致密, 截面分层明显, 且 Al/CuO 含能薄膜反应有明显的放热性。

(2) Ni - Cr@Al/CuO 钝感含能元件满足 1A1W5min 安全性要求; 利用 D - 最优化法测试 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件的 50 ms 临界发火电流

为 3.08 A, 制备的 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件具有良好的安全性。

(3) Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件可以点燃硼/硝酸钾点火药, 并且能实现 1 mm 间隙点火, 而 Ni-Cr 薄膜发火件不能点燃硼/硝酸钾点火药, 说明在 Ni-Cr 薄膜发火件上复合 Al/CuO 含能薄膜能提高其点火能力。

参考文献:

- [1] 周庆, 焦清介. Ni-Cr 桥丝式电火工品发火规律[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(4):144-147.
ZHOU Qing, JIAO Qing-jie. Study on firing property of Ni-Cr electric hot wire initiating devices [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2015, 36(4):144-147.
- [2] 焦清介, 周庆, 臧充光, 等. 塑料与玻璃基体 Ni-Cr 桥丝爆发规律研究[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(10):1009-1013.
JIAO Qing-jie, ZHOU Qing, ZANG Chong-guang, et al. Explosive property of Ni-Cr bridge wire with plastic and glass plug [J]. *Transactions of Bei Jing Institute of Technology*, 2012, 32(10):1009-1013.
- [3] 张彬, 褚恩义, 任炜, 等. MEMS 火工品换能元的研究进展[J]. 含能材料, 2017, 25(5):428-436.
ZHANG Bin, CHU En-yi, REN Wei, et al. Research progress in energy conversion components for MEMS initiating explosive device [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(5):428-436.
- [4] Kazi I H, Wild P M, Moore T N, et al. Characterization of sputtered nichrome (Ni-Cr 80/20 wt.%) films for strain gauge applications[J]. *Thin Solid Films*, 2006, 515(4):2602-2606.
- [5] Eom T H, Han J I. The effect of the nickel and chromium concentration ratio on the temperature coefficient of the resistance of a Ni-Cr thin film-based temperature sensor[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2017, 260:198-205.
- [6] 颜志红, 谢贵久, 景涛, 等. 低能量发火 Ni-Cr 薄膜桥制备及性能分析[J]. 火工品, 2011(5):29-32.
YAN Zhi-hong, XIE Gui-jiu, JING Tao, et al. Preparation and properties of Ni-Cr thin film bridge with low firing energy [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2011(5):29-32.
- [7] 解瑞珍, 薛艳, 任小明, 等. 桥区参数对 Ni-Cr 薄膜换能元发火性能的影响[J]. 火工品, 2012(1):18-20.
XIE Rui-zhen, XUE Yan, REN Xiao-ming, et al. Effect of bridge parameters on the firing sensitivity of Ni-Cr alloy thin film transducer elements [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2012(1):18-20.
- [8] 解瑞珍, 任小明, 王可暄, 等. Ni-Cr 桥膜换能元的制备[J]. 含能材料, 2011, 19(5):584-587.
XIE Rui-zhen, REN Xiao-ming, WANG Ke-xuan, et al. Fabrication of Ni-Cr film bridge resistor [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(5):584-587.
- [9] 解瑞珍, 任小明, 王可暄, 等. Ni-Cr 薄膜换能元刻蚀工艺研究[J]. 火工品, 2010(6):20-22.
XIE Rui-zhen, REN Xiao-ming, WANG Ke-xuan, et al. Study on etching techniques of Ni-Cr film firing resistor [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2010(6):20-22.
- [10] 王科伟, 杨正才, 刘海旭, 等. 钝感 Ni-Cr 金属桥膜换能元的制备及性能[J]. 含能材料, 2014(6):819-823.

- WANG Ke-wei, YANG Zheng-cai, LIU Hai-xu, et al. Preparation and characterization of insensitive Ni-Cr metal film igniting Component [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014(6):819-823.
- [11] 杨正发. 一种姿态控制发动机点火装置简介[J]. 固体火箭技术, 2000, 23(1):9-12.
YANG Zheng-fa. Brief description of an ignition device for attitude control motors[J]. *Journal of Solid Rocket Technologys* [J]. 2000, 23(1):9-12.
- [12] 王广海. 薄膜桥火工品的制备与性能研究[J]. 含能材料, 2008, 16(5):543-546.
WANG Guang-hai. Preparation and properties of thin film bridge EED [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(5):543-546.
- [13] Dutro G M, Yetter R A, Risha G A, et al. The effect of stoichiometry on the combustion behavior of a nanoscale Al/MoO₃, thermite [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2):1921-1928.
- [14] Plantier K B, Pantoya M L, Gash A E. Combustion wave speeds of nanocomposite Al/Fe₂O₃: the effects of Fe₂O₃, particle synthesis technique[J]. *Combustion & Flame*, 2005, 140(4):299-309.
- [15] Tai Y, Xu J, Wang F, et al. Experimental and modeling investigation on the self-propagating combustion behavior of Al-MoO₃ reactive multilayer films[J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 123(23): 235-302.
- [16] Xu J, Tai Y, Ru C, et al. Tuning the ignition performance of a microchip initiator by integrating various Al/MoO₃ reactive multilayer films on a semiconductor bridge [J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2017, 9(6): 5580-5589.
- [17] 董能发. 铝-氧化铜可反应性膜的制备和性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
DONG Neng-fa. Preparation and properties of aluminum-copper oxide reactive film[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [18] 崔庆华. 氧化铜-锆的制备与性能表征研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
CUI Qing-hua. Preparation and characterization of copper oxide-zirconium [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.
- [19] 朱朋. 微推进器发火件阵列制作及性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
ZHU Peng. Fabrication and performance study of micro-thruster ignition array [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [20] Fischer S H, Grubelich M C. Theoretical energy release of thermites, intermetallics, and combustible metals[J]. *Office of Scientific & Technical Information Technical Reports*, 1998.
- [21] GJB5309.11-2004. 火工品试验方法-第11部分: 1A1W5min 不发火试验[S].
GJB5309.11-2004. Test methods initiating explosive devices-Part 11: 1A1W5min No-fire test[S].
- [22] 张蕊, 付东晓, 白颖伟, 等. 火工品感度试验用便携式计算装置[J]. 火工品, 2009(1): 35-39.
ZHANG Rui, FU Dong-xiao, BAI Ying-wei, et al. A Calculation instrument for the sensitivity test of initiating Explosive Device[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2009(1):35-39.
- [23] 汝承博. 固体化学微推进系统的设计、制作及性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
RU Cheng-bo. Design, fabrication and characterization of solid propellant micropropulsion system [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [24] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 312-313.
LIU En-ke, ZHU Bing-sheng, LUO Jin-sheng. The physics of semiconductors[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 312-313.

Fabrication and Characterization of a Ni-Cr@Al/CuO Insensitive Energetic Element

YANG Teng-long¹, SHEN Yun¹, DAI Ji¹, ZHENG Guo-qiang², WANG Cheng-ai¹, YE Ying-hua¹, SHEN Rui-qi¹

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. The 43th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to improve the safety and ignition ability of Ni-Cr thin film igniter, a new Ni-Cr@Al/CuO insensitive energetic element was fabricated by combining Al/CuO energetic thin film with Ni-Cr thin film bridge by magnetron sputtering. The Ni-Cr@Al/CuO insensitive energetic element can be used both as the energy transducer element and as the simplest electrical ignition elements. It simplified the point fire transmission sequence and adapt to the development needs of ammunition miniaturization. The safety of Ni-Cr@Al/CuO was tested at the loading condition of 1A1W5min, and its electric ignition sensitivity and ignition capability were tested. The results show that the 50 ms critical ignition current of the insensitive nucleus Ni-Cr igniter is 3.08 A, 99.9% firing current is 3.18 A, 0.1% firing current is 2.98 A. Under the same conditions, Ni-Cr@Al/CuO insensitive energetic element can ignite B/KNO₃, besides, it can achieve 1mm gap ignition, while Ni-Cr thin film igniter can not successfully ignite B/KNO₃.

Key words: composite energetic igniter; Ni-Cr thin film igniter; magnetron sputtering; constant current excitation; gap ignition; B/KNO₃

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019103