

油墨含能 NiCr 桥电爆换能规律 及间隙点火性能研究

张江涛^{1,2}, 许建兵^{1,2}, 程健^{1,2}, 张泽华^{1,2}, 李福伟^{1,2},
杨腾龙³, 叶迎华^{1,2}, 沈瑞琪^{1,2}

(1.南京理工大学 化学与化工学院, 南京 210094; 2.微纳含能器件工业与信息化部重点实验室,
南京 210094; 3.南京电子设备研究所, 南京 210007)

摘要: **目的** 针对低功耗换能元点火能力不足的问题, 采用油墨直写技术制备一种油墨含能 NiCr 桥换能元。**方法** 以 Al/CuO 为主体含能材料, 完成含能油墨的制备, 并将其集成到 NiCr 桥上, 形成油墨含能 NiCr 桥。对油墨含能 NiCr 桥换能元进行电爆实验和间隙点火实验, 验证油墨含能 NiCr 桥的非接触式点火能力。**结果** 在 24 V/100 μ F 条件下, 油墨装药量为 2.9 mg 时, 油墨含能 NiCr 桥可以在 5 mm 间隙下点燃 B/KNO₃ 装药, 在间隙为 1 mm 条件下, 油墨含能 NiCr 桥能够成功引发装药为硝酸胍镍的雷管。**结论** 含能油墨的引入能够增强 NiCr 桥的点火起爆能力, 有望在工程实践中进行应用。

关键词: Al/CuO; 含能油墨; 电爆点火; 间隙点火; 含能 NiCr 桥; 点火增强

中图分类号: TJ450 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2022)12-0019-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.12.004

Energy Exchange Law and Gap Ignition Performance of Energetic Ink NiCr Bridge

ZHANG Jiang-*tao*^{1,2}, XU Jian-bing^{1,2}, CHENG Jian^{1,2}, ZHANG Ze-hua^{1,2}, LI Fu-wei^{1,2},
YANG Teng-long³, YE Ying-hua^{1,2}, SHEN Rui-qi^{1,2}

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;
2. Micro-Nano Energetic Devices Key Laboratory of MIIT, Nanjing 210094, China;
3. Nanjing Electronic Equipment Institute, Nanjing 210007, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare an energetic ink NiCr bridge igniter by ink direct writing technology to solve the problem of insufficient ignition ability of low energy igniter. Energetic ink was fabricated with Al/CuO nanothermite as the main energetic material, and then integrated on the NiCr bridge to fabricate the energetic ink NiCr bridge igniter. Electro-explosion

收稿日期: 2022-11-24; 修订日期: 2022-12-12

Received: 2022-11-24; Revised: 2022-12-12

基金项目: 航天创新基金 (CASC150710)

Fund: Space Innovation Fund (CASC150710)

作者简介: 张江涛 (2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 MEMS 含能器件。

Biography: ZHANG Jiang-*tao* (2001-), Male, Postgraduate, Research focus: MEMS energetic device.

通讯作者: 叶迎华 (1962—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为 MEMS 先进火工品技术。

Corresponding author: YE Ying-hua (1962-), Female, Doctor, Researcher, Research focus: MEMS advanced pyrotechnic technology.

引文格式: 张江涛, 许建兵, 程健, 等. 油墨含能 NiCr 桥电爆换能规律及间隙点火性能研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(12): 019-025.

ZHANG Jiang-*tao*, XU Jian-bing, CHENG Jian, et al. Energy Exchange Law and Gap Ignition Performance of Energetic Ink NiCr Bridge[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(12): 019-025.

experiment and gap ignition experiment were carried out on the energetic ink NiCr bridge igniter to verify the non-contact ignition ability of energetic ink NiCr bridge. The energetic ink NiCr bridge igniter could ignite the B/KNO₃ charge at a gap of 5 mm under the condition of 24 V/100 μ F and ink charging amount of 2.9 mg. At a gap of 1 mm, the energetic ink NiCr bridge igniter could successfully initiate a detonator charged with nickel hydrazine nitrate. The introduction of energetic ink can enhance the ignition and detonation ability of NiCr bridge, which is expected to be applied in engineering practice.

KEY WORDS: Al/CuO; energetic ink; electro-explosion ignition; gap ignition; energetic NiCr bridge; ignition enhancement

火工品是武器和弹药中的首发元件,在武器和弹药中的点火、起爆、分离、开舱和抛撒等领域应用广泛,其安全性、可靠性和作用精度直接影响武器和弹药的安全性、可靠性和效能^[1-3]。随着信息化先进武器的发展,火工技术迎来了诸如微型化、智能化、灵活化的发展趋势,同时还要兼顾高可靠性、低成本的要求^[4-6]。低能非线性桥箔式点火桥换能元(半导体桥、金属 Pt、NiCr 等薄膜桥)采用电爆炸形式输出能量,与传统桥丝式火工品相比,具有功耗低,发火时间迅速、体积小等优点^[7-9]。然而随着微纳火工含能器件的发展,非线性换能元虽兼顾了安全性和可靠性的要求,但仍然面临着器件小型化以后点火能力不足的问题^[10]。在微纳火工含能器件中,桥箔式点火桥换能元和装药尺寸在毫米或亚毫米量级,受限于桥区质量和激励能量,桥箔式点火桥换能元点火起爆的输出能量较小,更难以可靠点燃毫米级的装药^[11]。因此,如何提高桥箔式点火桥换能元的点火输出能力是今后微纳含能器件发展中的主要问题之一。

含能材料通常由氧、燃料和功能添加剂组成,在外界的能量刺激下,可以发生快速燃烧,在有限的空间内释放出大量的反应热,具有极高的能量释放速率以及体积能量密度^[12-15]。将高能量密度的含能材料与点火桥芯片集成,制备成含能发火件,可以利用含能材料释放的化学反应弥补点火桥点火能力不足的问题,实现降低点火桥功耗的目的。近年来,国内外研究学者采用各种技术实现含能材料与换能元的集

成,主要包括 3D 打印增材制造技术^[16-18]、磁控溅射方法^[19-22]、静电喷射法^[23-24]。磁控溅射方法能够精确控制含能材料内部的结构组成,实现能量释放的精确调控,但是其制备成本高,沉积的薄膜厚度在 10 μ m 以下,并且需要增加光刻工艺实现图形化。静电喷射法可以实现含能材料的厚膜沉积,制备效率更高,但是依旧需要制备额外掩膜,才可以形成特定的形状。3D 打印技术已被广泛应用于快速、低成本地制作物体原型和图形,在能源、电子、工程复合材料、微流体和生物技术等领域都有广泛的应用,将其应用于含能材料领域可以实现复杂药柱的制备^[25-27]。

基于此,本文基于油墨直写技术制备含能 NiCr 桥,实现含能油墨在 NiCr 桥换能元上的集成,研究含能 NiCr 桥换能元的电爆特性,在不改变含能 NiCr 桥输出能力的情况下,实现降低其功耗的目的。设计了间隙点火实验,来验证油墨含能 NiCr 桥的非接触式点火能力。期望通过本研究对该类含能点火器的实际应用提供相应的实验与技术支持,并为智能化弹药的发展起到积极的推动作用。

1 含能油墨与油墨含能 NiCr 桥的制备

1.1 含能油墨的制备与性能研究

含能油墨主体由 Al/CuO 纳米铝热剂组成,硝化棉(NC)作为含能粘结剂,乙酸丁酯作为含能油墨的溶剂。实验使用的药品及试剂见表 1。

表 1 配制含能油墨所选用的材料
Tab.1 Materials used in the preparation of energetic ink

试剂	规格	生产厂家
Al 粉	100 nm, 纯度为 99.9%	皓田纳米科技有限公司
CuO 粉	100 nm, 纯度为 99.9%	皓田纳米科技有限公司
乙酸丁酯	分析纯, 质量分数为 99.0%	上海阿拉丁生化科技股份有限公司
硝化棉	氮的质量分数不小于 13.15%, 醇醚的溶解度不大于 15%	南京理工大学自制

在制备含能油墨时,考虑到 Al 粉中有效 Al 的质量分数约为 68%,计算得到的配方: NC 作为粘结剂,固体质量分数为 2.5%,乙酸丁酯作为溶剂,在配制油墨时,固定固体质量浓度为 200 mg/mL。首先将 15 mg NC 溶解于 3 mL 乙酸丁酯中,磁力搅拌 1 h,

形成 NC 溶液,如图 1 所示。分别称取 128.1 mg 纳米 Al 粉和 456.9 mg CuO,依次加入溶解好的 NC 溶液中,在 500 W、40 kHz 条件下超声 1 h,使团聚的纳米颗粒充分分散,形成 Al/CuO 悬浮液。然后使用磁力搅拌 6 h,以形成混合均匀的含能油墨。

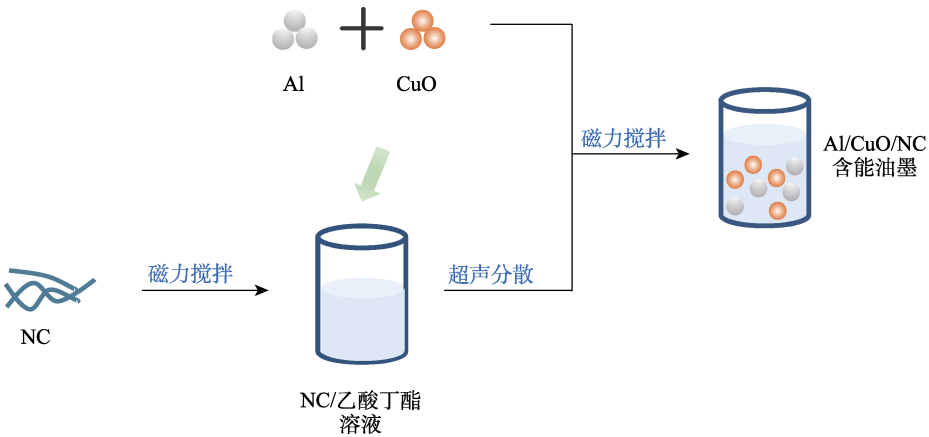


图 1 含能油墨制备过程
Fig.1 Energetic ink preparation process

NC 是一种含能材料,可以释放能量,并产生气体,它也可以作为粘结剂,组装纳米颗粒。采用热分析研究了含能油墨的反应特性及能量释放特性,热分析曲线如图 2 所示,为了对比,增加了普通混合的 Al/CuO 热分析曲线。从图 2 中可以看出,180~220 ℃ 内的放热为 NC 的热分解放热,500~630 ℃ 内出现的放热峰为纳米 Al 与 CuO 的反应。普通混合的 Al/CuO 没有 NC 的放热峰。对 DSC 曲线放热峰进行积分可以获得 2 种样品的 DSC 放热量,结果见表 2。结果表明,NC 对 Al/CuO 的能量释放具有一定的促进作用。当 NC 的质量分数为 2.5%时,通过适量 NC 的粘结作用,能够促进纳米 Al 颗粒与纳米 CuO 紧密结合,放热量为 1 179.5 J/g,高于 Al/CuO 的放热量(730.9 J/g),能量输出提高了 61.4%。

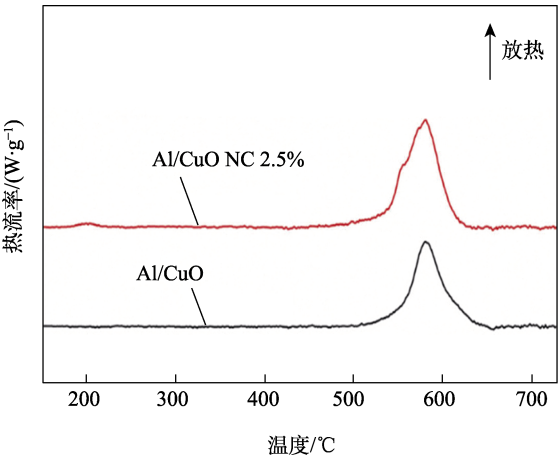


图 2 含能油墨 DSC 曲线
Fig.2 DSC curve of energetic ink

表 2 NC 对纳米 Al/CuO 反应放热的影响 Tab.2 Effect of NC on exothermic reaction of nano Al/CuO		
样品	放热量/(J·g ⁻¹)	反应峰值温度/℃
Al/CuO	730.9	581.6
Al/CuO@NC(2.5%)	1 179.5	581.6

1.2 NiCr 桥的制备

镍铬桥膜的制作采用的是微机电系统技术 (MEMS) 加工工艺,主要包括磁控溅射、紫外光刻以及湿法刻蚀等。首先在 Al₂O₃ 陶瓷基底上通过磁控溅射沉积一层厚度为 1.3 μm 的镍铬合金薄膜,光刻、显影之后,电镀上 1 μm 金焊盘。再次通过光刻、显影和湿法刻蚀将点火桥的形状转移到基底上,与此同时,焊盘也成形了。最后通过激光划片机划片,得到了单个镍铬薄膜点火桥,制作流程如图 3a 所示。桥型尺寸如图 3b 所示,中间为 60° V 形尖角,桥区大小为 1 mm (长)×0.35 mm (宽)。

为了方便样品的使用,将镍铬薄膜点火桥和陶瓷塞进行集成封装。封装采用的是具有良好导热性的陶瓷塞,封装时,使用环氧树脂胶将点火桥固定在陶瓷塞上脚线之间的小凹槽内,随后使用硅铝丝将桥膜焊盘和金属的连接脚线键合在一起,再通过导电银浆包覆硅铝丝,从而提高换能元的可靠性和安全性。测量换能元的电阻,镍铬薄膜换能元实测的电阻平均值为 0.948 Ω,标准偏差为 0.012 Ω,镍铬薄膜换能元的阻值与点火桥阻值相差不大。由此可知,镍铬桥膜加工工艺稳定可靠,一致性较好。

1.3 油墨含能 NiCr 桥的制备

含能油墨在 NiCr 桥上的打印示意图见图 4。将配好的含能油墨放入针管内,再设置好点胶机的气动压强和软件参数,含能油墨便会通过针孔打印到 NiCr 桥表面上,从而制备成含能 NiCr 桥。通过控制点胶机的压强和 3D 打印机的运动路径,便可以精确控制油墨的打印量。

当油墨在 NiCr 桥写入之后,将半成品油墨含能 NiCr 桥小心地置于烘箱中,在 80 ℃ 条件下,烘干 2 h,使得其中的溶剂挥发干净,得到可以使用的油墨含能 NiCr 桥。烘干后的成品如图 5 所示。从图 5 中可以看出,含能油墨完全覆盖在 NiCr 桥表面,说明采用 3D 打印方法可以方便地实现含能油墨与 NiCr 桥的集成。

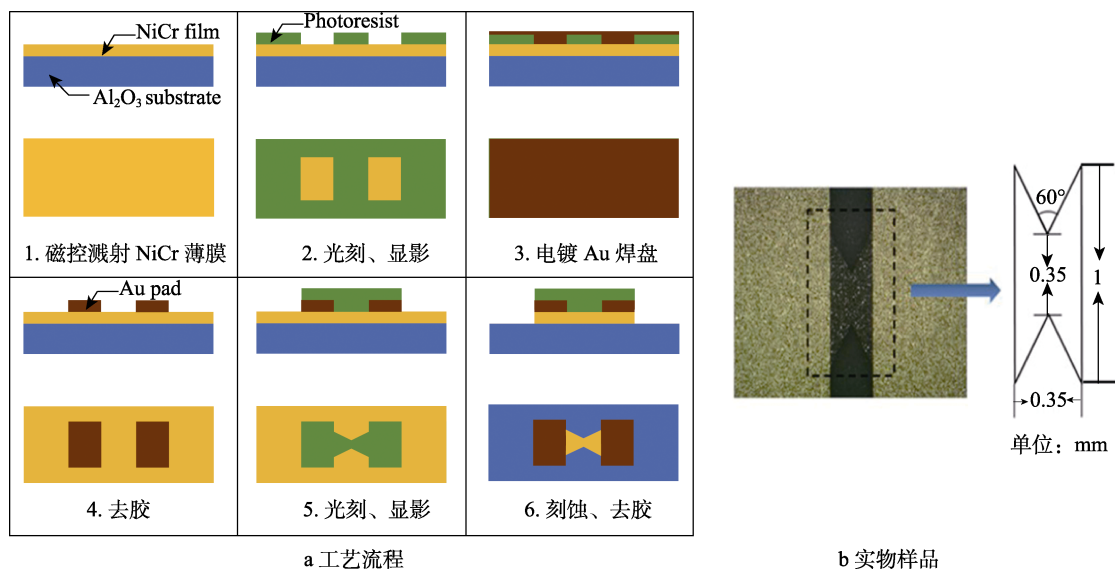


图 3 NiCr 桥工艺流程以及实物样品
Fig.3 NiCr bridge (a) process flow chart and (b) physical samples

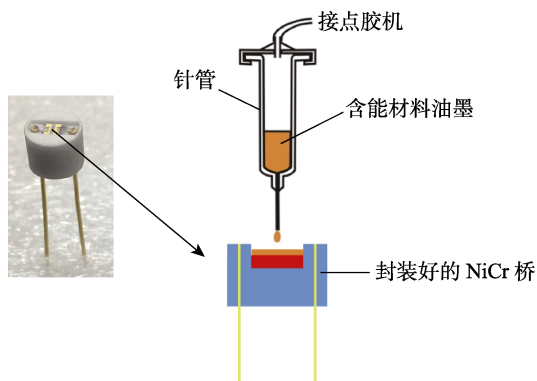


图 4 含能油墨在 NiCr 桥上打印示意图
Fig.4 Schematic diagram of energetic ink printing on NiCr bridge

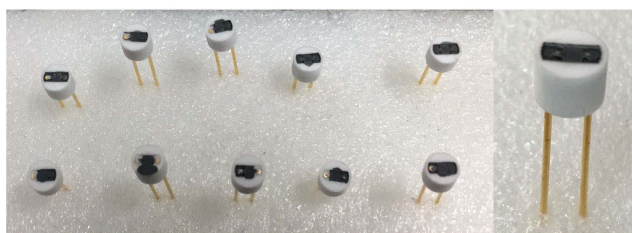


图 5 制备完成的油墨含能 NiCr 桥
Fig.5 Finished energetic ink NiCr bridge

2 实验验证

2.1 油墨含能 NiCr 桥电爆实验

在 24 V/100 μ F 点火条件下,采用电容放电方式,对油墨含能 NiCr 桥进行电爆点火实验。油墨含能 NiCr 桥的油墨装药情况见表 3,可以看出,油墨分布较为均匀,大部分装药量在 0.2~0.6 mg。油墨含能 NiCr 桥电爆电流电压 (U - I) 曲线如图 6 所示。定义从开始点火到电压达到最大值时所用的时间为临界

爆发时间,从开始点火到电压峰值后稳定时所用的时间为总爆发时间。相关的电爆情况见表 4,可以看出,油墨装药量在 0.2 mg 时, NiCr 桥在 24 V/100 μ F 下能成功点燃含能油墨, 临界爆发时间为 17~20.25 μ s, 发火时间为 1.98~2.64 ms。油墨含能 NiCr 桥电爆发火图见图 7,可以看出, 含能 NiCr 桥的电爆火焰高度可达 11 mm,表明 NiCr 桥能可靠地点着含能油墨。

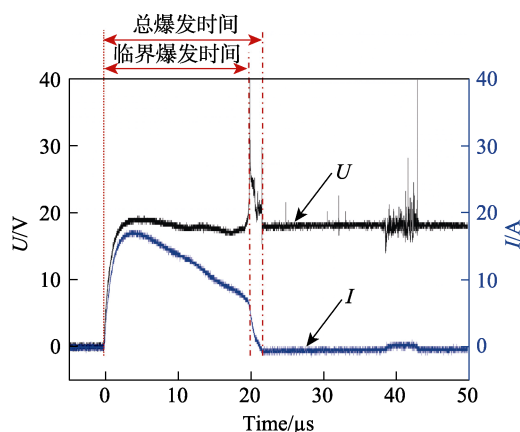


图 6 油墨含能 NiCr 桥电爆 U - I 曲线
Fig.6 Electro-explosion U - I curve of energetic ink NiCr bridge

表 3 油墨含能 NiCr 桥装药量记录
Tab.3 Energetic ink NiCr bridge charging record

编号	装药量 /mg	编号	装药量 /mg	编号	装药量 /mg	编号	装药量 /mg
1	0.2	8	0.3	15	1.0	22	0.6
2	0.2	9	0.3	16	0.2	23	0.3
3	0.3	10	0.3	17	0.3	24	0.3
4	0.4	11	0.2	18	0.1	25	0.9
5	0.2	12	0.2	19	0.3		
6	0.2	13	0.6	20	2.9		
7	0.8	14	0.2	21	0.4		

表 4 油墨含能 NiCr 桥电爆情况
Tab.4 Electro-explosion situation of energetic ink NiCr bridge

编号	装药量/mg	电压/V	电阻/ Ω	加线电阻/ Ω	发火情况	临界爆发时间/ μ s	电爆总时间/ μ s	发火时间/ms
1	0.2	24	1.00	1.14	发火	20.25	22.14	1.98
2	0.2	24	0.98	1.18	发火	17.00	18.49	2.64

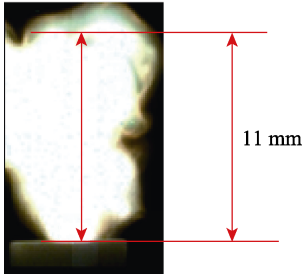


图 7 油墨含能 NiCr 桥电爆发火图
Fig.7 Electro-explosion image of energetic ink NiCr bridge

2.2 油墨含能 NiCr 桥间隙点火实验

在 24 V/100 μ F 条件下, 用玻璃垫片作为间隙, 采用制备的油墨含能 NiCr 桥对 B/KNO₃ (药片) 进行点火实验。首先, 对没有装药的 NiCr 桥进行点火实验, 发现 NiCr 桥均不能点燃 B/KNO₃ 装药。然后, 对油墨含能 NiCr 桥进行点火实验, 实验结果见表 5。间隙点火实验装置如图 8a 所示, 间隙点火实验现象如图 8b 所示。

表 5 油墨含能 NiCr 桥发火情况
Tab.5 Ignition performance of energetic ink NiCr bridge

编号	装药量/mg	电压/V	电阻/ Ω	发火情况
0-1	0	24	1.1	间隙 0 mm, 未发火
0-2	0	24	1.1	间隙 0 mm, 未发火
0-3	0	24	1.2	间隙 0 mm, 未发火
8	0.3	24	1.1	间隙 5 mm, 发火
9	0.3	24	1.15	间隙 5 mm, 未发火
10	0.3	24	1.1	间隙 5 mm, 未发火
11	0.2	24	1.1	间隙 5 mm, B/KNO ₃ 被弹飞, 未点燃药品, 药片有烧蚀痕迹
12	0.2	24	1.1	间隙 5 mm, 未点燃油墨, 未点燃 B/KNO ₃
20	2.9	24	1.1	间隙 5 mm, 点燃 B/KNO ₃ , 燃烧剧烈

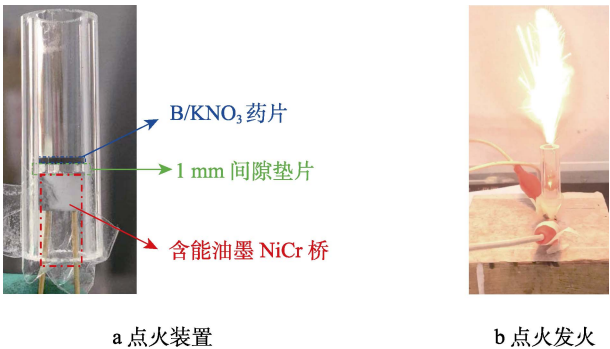


图 8 间隙点火装置以及间隙点火发火图
Fig.8 (a) Gap ignition device and (b) gap ignition

结果表明,在间隙 5 mm 条件下,装药量小(0.2 mg)的油墨含能 NiCr 桥点火不稳定,难以发火,装药量大(2.9 mg)的油墨含能 NiCr 桥点火时燃烧状况良好。说明足够的装药量是油墨含能 NiCr 桥稳定发火的必要条件。单纯的 NiCr 桥不能点燃 B/KNO₃ 装药,说明在 NiCr 桥上添加一层含能油墨可以有效增强其点火能力。

2.3 基于油墨含能 NiCr 桥的电雷管起爆实验

上述实验结果表明,油墨含量为 2.9 mg 的 NiCr

含能桥在间隙 5 mm、24 V/100 μ F 条件下能够点燃 B/KNO₃ 装药,说明采用油墨含能 NiCr 桥相比较于 NiCr 桥,具有更强的点火能力。为了进一步验证油墨含能 NiCr 桥的点火能力,制作了基于油墨含能 NiCr 桥的工程电雷管,验证在 24 V/100 μ F、间隙 1 mm 条件下,油墨含能 NiCr 桥能否起爆硝酸胍镍,实验记录见表 6。由实验结果可知,油墨含能 NiCr 桥在 24 V/100 μ F、间隙为 1 mm 条件下,能够成功起爆装药为硝酸胍镍的雷管。

表 6 油墨含能 NiCr 桥起爆雷管实验记录
Tab.6 Experiment record of energetic ink NiCr energetic bridge igniting detonator

编号	桥电阻/ Ω	间隙/mm	发火情况
1	1.04	0.89	发火
2	1.03	0.98	发火
3	1.04	0.97	发火
4	1.03	0.95	发火
5	1.04	0.98	发火
6	1.01	0.99	发火
7	1.02	1.03	发火
8	0.95	1.01	发火
9	0.95	1.05	发火

3 结论

通过将含能油墨集成到 NiCr 桥换能元上形成油墨含能 NiCr 桥, 并对油墨含能 NiCr 桥进行点火性能实验的研究, 可以得到以下结论:

1) 以 Al/CuO 作为基本含能材料、硝化棉 (NC) 作为粘结剂、乙酸丁酯作为溶剂的含能油墨, 通过 NC 的粘结作用, 能够促进纳米 Al 颗粒与纳米 CuO 的紧密结合, 放热量为 1 179.5 J/g, 高于 Al/CuO 的放热量 (730.9 J/g), 能量输出提高了 61.4%。

2) 油墨含能 NiCr 桥在 24 V/100 μ F 条件下, 当油墨装药量为 2.9 mg 时, 油墨含能 NiCr 桥可以在 5 mm 间隙下点燃 B/KNO₃ 装药。在 24 V/100 μ F、间隙为 1 mm 条件下, 油墨含能 NiCr 桥能够成功起爆装药为硝酸胍镍的雷管, 表明油墨含能 NiCr 桥的点火起爆能力得到了增强。

参考文献:

- [1] 叶迎华. 火工品技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [2] 沈瑞琪, 叶迎华, 戴实之. 数字化火工技术的概念和应用[J]. 火工品, 2000(2): 36-38.
- [3] 孔俊峰, 李兵. 新一代火工技术及其应用[J]. 国防技术基础, 2010(7): 40-43.
- [4] 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.
- [5] 钟杰华, 姜依志, 张沂. 新型火工品技术在未来武器系统的应用分析[J]. 科技创新与应用, 2018(13): 33-34.
- [6] 褚恩义, 贺爱锋, 任西, 等. 火工品集成技术的发展机遇与途径[J]. 含能材料, 2015, 23(3): 205-207.
- [7] BENSON D A, BICKES R W, BLEWER R S, et al. Tungsten Bridge for the Low Energy Ignition of Explosive and Energetic Materials: US4976200[P]. 1990-12-11.
- [8] MARTINEZ-TOVAR B, FOSTER M. Titanium Semiconductor Bridge Igniter: US20070056459[P]. 2007-03-15.
- [9] MARTINEZ-TOVAR B, MONTOYA J A. Semiconductor Bridge Device and Method of Making the Same: US6133146[P]. 2000-10-17.
- [10] 徐禄, 张琳, 冯红艳, 等. 降低药剂 SCB 点火能量的研究进展[J]. 含能材料, 2008, 16(5): 639-646.
- [11] 卢斌, 洪志敏, 任小明, 等. SCB 换能元应用于微型固体推进器中的研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(S2): 305-307.
- [12] DAI Ji, WANG Fei, RU Cheng-bo, et al. Ammonium Perchlorate as an Effective Additive for Enhancing the Combustion and Propulsion Performance of Al/CuO Nanothermites[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2018, 122(18): 10240-10247.
- [13] ZHANG Kai-li, ROSSI C, PETRANTONI 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.
- [14] ZHENG Guo-qiang, ZHANG Wen-chao, SHEN Rui-qi, et al. Three-Dimensionally Ordered Macroporous Structure Enabled Nanothermite Membrane of Mn₂O₃/Al[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 22588.
- [15] WANG Yue-ting, XU Jian-bing, SHEN Yun, et al. Fabrication of Energetic Aluminum Core/Hydrophobic Shell Nanofibers via Coaxial Electrospinning[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 427: 132001.
- [16] 汝承博, 张晓婷, 叶迎华, 等. 用于喷墨打印微装药方法的纳米铝热剂含能油墨研究[J]. 火工品, 2013(4): 33-36.
- [17] STROHM G, SON S, BOUCHER C. Performance Characterization of Nanoscale Energetic Materials on Semiconductor Bridges (SCBS)[C]//48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando: AIAA, 2010.
- [18] TATON G, LAGRANGE D, CONEDERA V, et al. Micro-Chip Initiator Realized by Integrating Al/CuO Multilayer Nanothermite on Polymeric Membrane[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2013, 23(10): 105009.
- [19] ZHU Peng, SHEN Rui-qi, YE Ying-hua, et al. Charac-

- terization of Al/CuO Nanoenergetic Multilayer Films Integrated with Semiconductor Bridge for Initiator Applications[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(18): 184505.
- [20] ZHU Peng, GUAN Zhen, FU Shuai, et al. Firing and Initiation Characteristics of Energetic Semiconductor Bridge Integrated with Varied Thickness of Al/MoO₃ Nanofilms[J]. *Materials Science*, 2018, 24(2): 143-147.
- [21] XU Jian-bing, ZHOU Yu-xuan, SHEN Yun, et al. Characteristics of Micro Energetic Semiconductor Bridge Initiator by Depositing Al/MoO₃ Reactive Multilayered Films on Micro Bridge with Different Bridge Size[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 336: 113406.
- [22] XU Jian-bing, TAI Yu, RU Cheng-bo, 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.
- [23] DAI Ji, WANG Chen-gai, WANG Yue-ting, et al. From Nanoparticles to On-Chip 3D Nanothermite: Electrospray Deposition of Reactive Al/CuO@NC Onto Semiconductor Bridge and Its Application for Rapid Ignition[J]. *Nanotechnology*, 2020, 31(19): 195712.
- [24] ZHANG Ze-hua, CHENG Jian, WANG Yue-ting, et al. Coaxial Electrospinning Fabrication of Core-Shell Energetic Fibers and In-Situ Integration with SCB Exhibiting Superior Non-Contact Ignition[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 451: 138361.
- [25] 彭翠枝. 含能材料增材制造技术——新兴的精密高效安全制备技术[J]. *含能材料*, 2019, 27(6): 445-447.
- PENG Cui-zhi. Additive Manufacturing for Energetic Materials: Emerging Precision Loading & Efficient and Safe Preparation Technology[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2019, 27(6): 445-447.
- [26] 宋长坤, 安崇伟, 叶宝云, 等. 含能油墨微流动直写沉积三维数值模拟[J]. *火工品*, 2017(4): 28-32.
- SONG Chang-kun, AN Chong-wei, YE Bao-yun, et al. Three-Dimensional Numerical Simulation of Microflow Direct Write Technology of Energetic Ink[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2017(4): 28-32.
- [27] 韩瑞鑫, 陶泽, 曾鹏飞, 等. 含能材料 3D 打印系统及控制技术研究[J]. *成组技术与生产现代化*, 2017, 34(2): 24-29.
- HAN Rui-xin, TAO Ze, ZENG Peng-fei, et al. Study on 3D Printing System and Control Technology of Energetic Materials[J]. *Group Technology & Production Modernization*, 2017, 34(2): 24-29.

责任编辑: 刘世忠