

文章编号: 1003-1480 (2024) 04-0055-07

火工药剂微装药技术现状及后续发展思考

王燕兰, 张方, 张松, 韩瑞山, 卢飞朋, 李少群, 王早

(陕西应用物理化学研究所 瞬态化学效应与控制全国重点实验室, 陕西 西安, 710061)

摘要: 相比传统火工品, MEMS 火工品的结构、尺寸及制造工艺发生了颠覆性变化, 对火工药剂提出了低能输入、高能输出、小尺寸装药、小尺寸传播及与 MEMS 工艺相兼容等新要求。为了适应 MEMS 火工品的发展, 原位叠氮化反应装药技术、增材制造装药技术、物理气相沉积薄膜装药技术等微装药技术受到广泛关注和研究。本文介绍了适合于 MEMS 火工品的几种微装药技术的国内外研究现状, 并提出了后续发展思路。

关键词: 微装药; 原位叠氮化反应; 增材制造; 物理气相沉积

中图分类号: TJ450.3; TQ560.7 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.04.007

The Current State and Future Development of Micro-Charge Technology of Pyrotechnics

WANG Yan-lan, ZHANG Fang, ZHANG Song, HAN Rui-shan, LU Fei-peng, LI Shao-qun, WANG Zao

(State Key Laboratory of Transient Chemical Effects and Control, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061)

Abstract: Compared to traditional pyrotechnics, MEMS pyrotechnics have undergone revolutionary changes in structure, size, and manufacturing process, which have put forward new requirements for pyrotechnic agents such as low-energy input, high-energy output, small-size charges, small-size propagation, and compatibility with MEMS processes. In order to adapt to the development of MEMS pyrotechnics, micro charge technologies such as in situ azide reaction charge technology, additive manufacturing charge technology, and physical vapor deposition thin film charge technology have received widespread attention and research. This article introduces the research status of several micro-charge technologies suitable for MEMS pyrotechnics at home and abroad, and proposes future development ideas.

Key words: Micro-charge; In situ azide reaction; Additive manufacturing; Physical vapor deposition

MEMS 火工品是将 MEMS 技术、微纳米材料技术与火工品技术相结合的产物。与传统火工品的管状结构不同, MEMS 火工品具有平面化结构, 其装药及核心元件尺寸均在亚毫米级, 且其功能器件采用薄膜、半导体和 MEMS 等加工技术, 装药工艺与 MEMS 工艺相兼容, 因此可实现火工品的高度集成、超大规模制造和自主安全, 在微小型作战平台、智能弹药等领域有广阔的应用前景^[1-3]。MEMS 火工品装药是其制造过程中的核心环节, 装药性能对 MEMS 火工品

的爆炸性能、输出性能有直接影响。相较于传统火工品装药技术, MEMS 火工品装药技术存在以下特征: (1) 小尺寸装药: 装药直径从 3 mm 以上降低至 1.5 mm 以内; (2) 高精度装药: 装药量从 20 mg 以上降低至 5 mg 以内, 甚至到亚毫克量级, 对称量精度、装药精度要求高; (3) 高安全装药: 为满足小型化弹药低载荷要求, 给 MEMS 火工品提供的发火能量有限, 因此 MEMS 火工品通常采用比叠氮化铅更为敏感的火工药剂, 如叠氮化铜, 对装药安全性要求高。

收稿日期: 2024-04-28

作者简介: 王燕兰 (1983-), 女, 研究员, 主要从事微纳结构火工药剂及微含能器件技术研究。

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No. 22205023)。

引用本文: 王燕兰, 张方, 张松, 等. 火工药剂微装药技术现状及后续发展思考[J]. 火工品, 2024(4): 55-61.

传统火工品装药采用模具压装工艺,即称取一定量的火工药剂粉末,装在固定形状、尺寸的壳体内,以一定的密度压制成形,其称量精度、装药精度、装药安全性及一致性无法满足 MEMS 火工品的装药需求;并且其装药形状有限,通常为圆柱形,不能满足异质异形装药等设计需求。此外,一些爆炸性能优异的新型微米级火工药剂受流散性差等限制,难以实现工业化应用。例如叠氮化铜,虽然具备低极限起爆药量、高输出能量、绿色环保等优势,但其感度过高,限制了工业化应用。

为了适应 MEMS 火工品的发展,新型微装药技术应运而生,与传统火工品装药的“称、装、压”工艺不同,该技术是在火工品关键元器件的目标位置(如换能元、作动机构、金属飞片等)上直接制备指定形状、指定厚度及指定密度的火工药剂微装药,或是在装药腔体内直接形成自支撑结构的微装药,可有效实现火工品微型化和集成化。

1 技术发展现状及存在问题

目前,适合于 MEMS 火工品的微装药技术包括以下几种:(1)原位叠氮化反应装药技术,以多孔金属为前驱体,通过原位反应,将其局部或全部转化为含能材料,形成所需微装药;(2)增材制造装药技术,基于喷墨打印、微控直写等技术,通过将火工药剂配制成含能油墨,然后通过液滴喷射或高压挤注等方式沉积在基板上,形成所需微装药;(3)物理气相沉积薄膜装药技术,基于磁控溅射等技术,通过在基板上交替沉积指定厚度及层数的金属或金属氧化物薄膜,形成所需纳米含能薄膜微装药;(4)其它技术。

1.1 原位叠氮化反应装药技术

原位叠氮化反应装药技术的研究对象主要是以叠氮化铜为主的金属叠氮化物起爆药。该技术首先在火工品关键元器件的目标位置上直接制备指定形状、厚度及密度的纳米铜,形成多孔纳米铜前驱体微装药,也可在装药腔体内直接形成自支撑结构的前驱体铜微装药;然后借助气-固原位化学反应,在原位生成叠氮化铜的同时,实现叠氮化铜微装药,其技术原

理如图 1 所示。

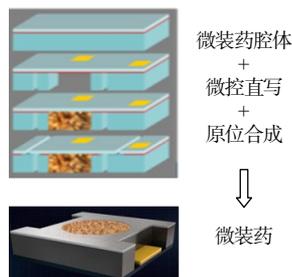


图 1 原位叠氮化反应装药技术原理图

Fig.1 Principle diagram of in situ azide reaction charge technology

该技术具有原位反应的特点,一方面可获得比表面积和反应活性极高的火工药剂,实现高能量密度、低极限起爆药剂的可控及原位合成;另一方面,可最大程度地减小操作者和起爆药剂之间的接触,从根本上改变敏感松散起爆药在制备及勤务处理过程带来的安全问题。并且,该技术可与 MEMS 工艺相兼容,为器件的低成本、小型化、集成化奠定了基础。

国外对原位叠氮化反应装药技术的研究较早。1999 年, J.Urban 小组^[4]实现了在多孔纳米铜基体上原位合成叠氮化铜。2004 年以来,美国先后公布了多孔金属叠氮化物原位合成的制备、集成工艺、应用及相关测试;此外,基于多孔金属叠氮化物设计了微雷管,并应用于引信上^[5-8]。相关微装药及微器件样品如图 2 所示。

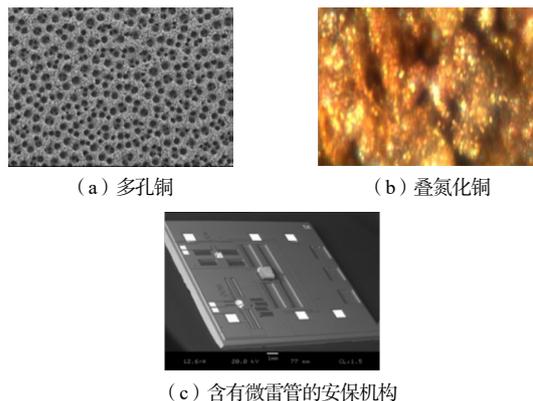


图 2 原位叠氮化反应装药技术制备的微装药及微器件
Fig.2 Micro charges and micro devices based on in situ azide reaction charge technology

国内研究者以效能调控及安全性能提升为目的,在叠氮化铜原位叠氮化反应装药方法、微观结构构筑等方面开展了大量研究。2012 年,陕西应用物理化学研究所^[9]基于电化学沉积结合气固原位叠氮化技术,

利用电化学沉积制备的纳米多孔铜的纳米晶体结构和三维孔道产生的大比表面积,与叠氮化气体充分接触,实现了毫克量级叠氮化铜的原位合成制备。随后,氢气泡模版法^[10-11]、粉末烧结法^[12]、阳极氧化铝模版法^[13]、静电纺丝法^[14]、微控直写法^[15-17]等技术被引入前驱体纳米多孔铜的制备中,旨在通过调控前驱体粒径及孔隙率,提升叠氮化铜原位装药效率。其中,微

控直写结合气固反应的原位装药方法,极限起爆药量低至 1.67 mg,较传统叠氮化铅起爆药降低 1 个数量级;在 100 μF 电容、发火电压不大于 3 V 条件下,能够可靠起爆 CL-20 传爆药。其技术原理及微装药样品分别如图 3 和图 4 所示。相关研究表明,该方法具有工艺简单、产物结构稳定、自动化效率高、密度及厚度高度可调等优势,具有广阔应用前景。

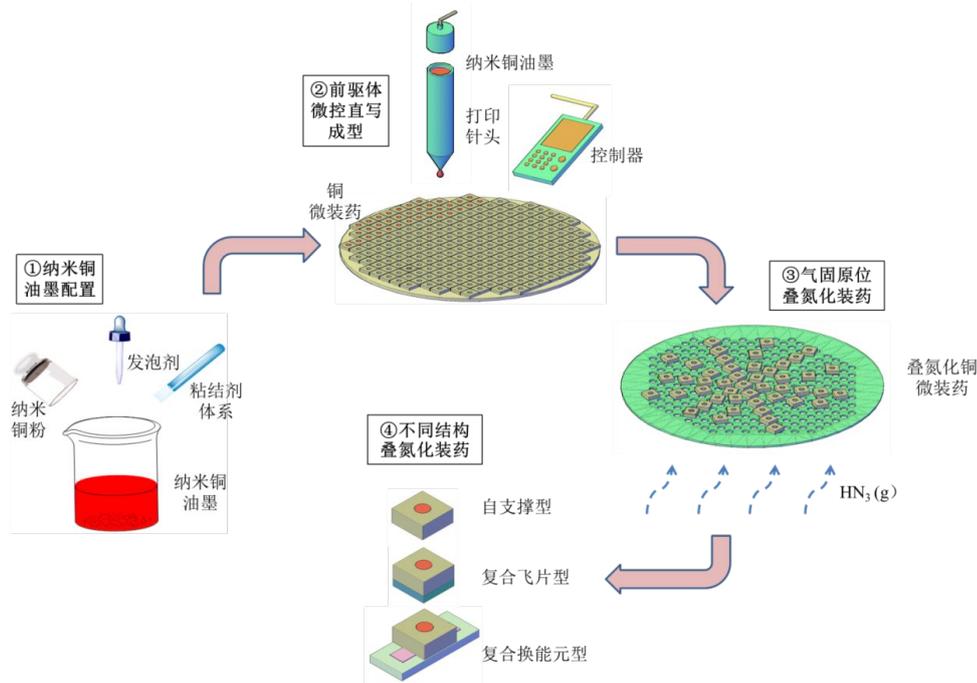


图 3 基于微控直写的原位叠氮化反应装药技术原理图

Fig.3 Principle diagram of in situ azide reaction charge technology based on micro controlled direct writing



图 4 基于微控直写的微纳结构叠氮化铜微装药样品

Fig.4 Micro nano structured copper azide micro charge samples based on micro controlled direct writing

此外,南京理工大学^[18-19]基于电化学原位叠氮化技术,以氧化铜纳米棒阵列和多孔铜薄膜为前驱体,原位合成叠氮化铜。北京理工大学^[20]利用快速固液原位叠氮化技术,在水合苯甲酸水溶液中将氢氧化铜原位转化为叠氮化铜。上述两种技术相较于气固原位叠氮化技术,在反应时间上极具优势,但存在固液反应对器件的耐腐蚀性要求高、叠氮化铜装药结构强度不

足等问题,应用场景受限。

在微观结构构筑方面,研究人员利用各类碳材料(碳纳米管^[10,21]、石墨烯^[16])的高导热性、结构有序特性,金属有机骨架(MOFs)材料^[14,22]的高导电导热、金属源限域均匀分布特性,聚多巴胺^[23]等仿生材料的核壳结构包覆降感特性,设计了各种叠氮化铜复合结构,并对其感度性能进行了研究。

综合来看,原位叠氮化反应装药的优势在于:该技术可实现起爆药小尺寸精确装药(装药尺寸 0.5 ~ 2 mm,装药高度 $h \leq 2$ mm,装药量为亚毫克~毫克级),装药结构可图形化设计,制造工艺与 MEMS 工艺兼容,适用于 MEMS 火工品装药。同时,该项技术仍存在问题:(1)目前获得的叠氮化铜感度虽远低于传统叠氮化铜,但与叠氮化铅相比没有明显优势,后续仍需要在高能与低感之间寻求统一,以获得最佳

性能。(2)原位叠氮化反应装药技术对前驱体的装药密度控制要求严苛,一方面,需要前驱体具备疏松的三维多孔结构,即高孔隙率和大比表面积才能确保叠氮酸气体与孔隙内部的纳米铜反应完全;另一方面,需要产物达到一定密度要求,进而满足高能输出要求,因此,需要控制前驱体密度在一个最佳范围,在该范围内既能保证原位叠氮化反应装药过程反应充分,也能获得最高的输出能量;(3)原位叠氮化反应装药技术的装药品种及功能受限,仅适用于适合部分金属叠氮化物的微装药,而不是一项通用性技术。

1.2 增材制造装药技术

增材制造装药技术是以数字模型为基础,并通过软件与数控系统将专用火工药剂浆料/油墨逐层累加成实体物品的数字化制造技术,具有设计灵活、按需打印、成本低、安全性好、研发周期短等特点。与火工药剂压装等传统减材加工模式不同,火工药剂增材制造一方面可应用于快速精密制备常规结构的火工药剂微装药,另一方面也可用于制备复杂结构、能量密度递变等装药,实现微小用量微纳结构火工药剂的精密装药。

目前,在火工药剂领域,增材制造装药技术的研究对象主要包括以 CL-20 基为代表的传爆药油墨,以及以 Al/CuO 等为代表的纳米铝热剂油墨装药。国外从 2005 年开始,对 CL-20 基炸药油墨进行了系统研究,设计出一系列 EDF (Explosive Development Facility Formulation) 配方。其中,EDF-11 炸药油墨配方已在 MEMS 的规模组件上进行了图形化,得到任意形状的传爆药线,如图 5 所示。并以 EDF-11 作为传爆药,制作了微爆炸序列,实现了微尺度下的可靠传爆,如图 6 所示,其爆速可达 $7\,150\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,爆速偏差为 $\pm 50\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,稳定爆轰的临界尺寸为 $86\text{ }\mu\text{m}$ (0.51 mm 厚度),目前已经成为美国 MEMS 火工品中的主要传爆装药。该药剂已经通过了美军传爆药资格认证,形成了美国军用标准 ARMY-MIL-DTL-3287,具有较高的技术成熟度^[24-25]。

国内以中北大学等科研院所为主,开展了悬浮型油墨微笔直写装药技术和全溶型炸药喷墨打印直写装药技术研究^[26-31],目前已基本实现了 CL-20 基传爆

药的油墨配方设计及增材制造装药,获得了性能规律、工艺规律,并形成了相应的安全性可靠性评价方法。增材制造成型的 CL-20 基传爆药照片如图 7 所示,经测试,其平均爆速为 $8\,088.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,临界尺寸为 0.153 mm ,起爆药书写一致性为 99%。

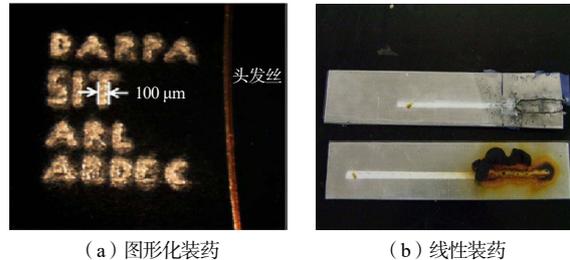


图 5 采用增材制造装药技术制备的不同形状装药
Fig.5 Different shaped charges prepared by additive manufacturing charge technology

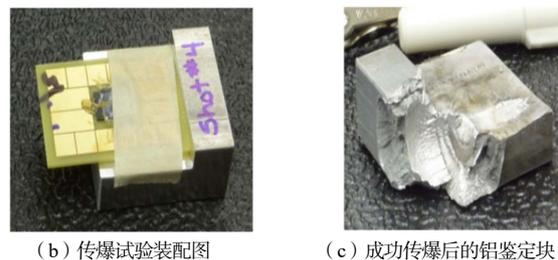
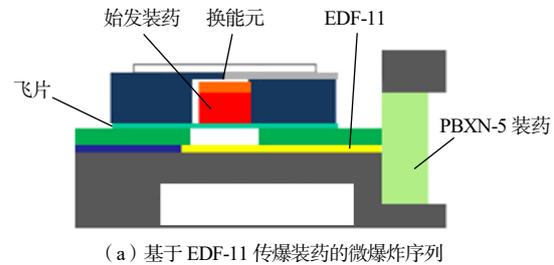


图 6 基于 EDF-11 的微爆炸序列及传爆试验照片
Fig.6 Micro explosion sequence and explosion transmission test photos based on EDF-11

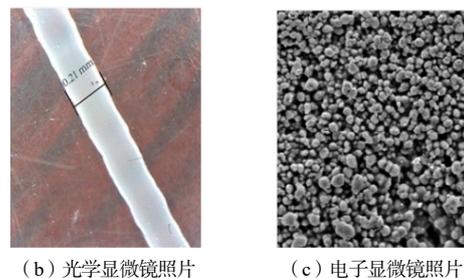
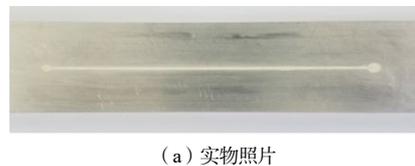


图 7 采用增材制造装药技术制备的 CL-20 基传爆药
Fig.7 CL-20 based booster explosive prepared by additive manufacturing charge technology

在纳米铝热剂方面,国内学者也初步开展了含能油墨配方设计、增材制造装药等研究工作。2015年,南京理工大学^[32]将喷墨打印装药和湿法压装2种方法结合,显著提高了装药密度和一致性。

综合来看,增材制造装药技术优势在于:该技术可实现传爆药小尺寸精确装药(装药线宽 $w \geq 0.15$ mm,装药量为毫克级),装药结构可图形化设计,制造工艺与MEMS工艺兼容,适合MEMS火工品装药,该技术是一种通用性技术。同时,该项技术仍存在一些问题需要解决:(1)增材制造过程油墨配方设计非常关键,需要通过配方设计,实现输出性能与书写特性之间的平衡。此外,相较于模具压装法装药,增材制造装药的装药密度有限,需要添加粘结剂体系来增强密度及力学性能,但其输出性能也会受到影响,因此,输出性能与力学性能的平衡,也是需要持续关注的重点;(2)增材制造装药成型精度及效率的提升。基于微控直写的装药技术在微尺度下的装药精度及表面质量尚有待提高;而基于喷墨打印的装药技术的打印精度相对较高,但其打印效率相对较低。(3)目前,增材制造装药聚焦于小批量科研试制,对安全性评估的研究较少,在后续工程化应用过程中,应加强安全性评估研究。

1.3 物理气相沉积薄膜装药技术

多层复合薄膜是基于磁控溅射等技术,通过在基板上交替沉积指定厚度及层数的金属或金属氧化物薄膜,形成所需纳米含能薄膜微装药,其技术原理如图8所示。该技术根据反应类型可以分为2类体系:一类是合金化反应薄膜,利用的是含能膜的晶格能热,如B/Ti、Pd/Al膜等;另一类是氧化还原反应薄膜,利用的是含能膜的化学反应热,如Al/CuO、Al/Fe₂O₃膜等。多层复合薄膜具有极强的反应活性和高能量密度,同时,容易实现微型化、平面化并与MEMS工艺兼容。

1999年,Gavens等^[33]通过真空磁控溅射制备出了厚度为11 μm的Al-Ni纳米薄膜(Al、Ni交替沉积),并测量了其反应速率和放热量。随后,法国国家科学研究中心系统分析与架构实验室、美国洛斯阿拉莫斯国家实验室、美国海军水面武器中心、陆军工程师研

究与发展中心等以多层复合薄膜体系(如Al/Fe₂O₃、Al/MoO₃、Al/CuO、Al/Bi₂O₃)为研究对象,对其燃烧反应机理、集成制备方法、改性及应用等开展了广泛探索研究,并成功将其应用于微起爆器、微点火器、微推冲器等点火单元^[34-35],如图9所示。国内近年来已基本掌握多层复合薄膜技术,形成微点火器件、微起爆器件等样机,并完成实验室条件下的典型模拟环境测试^[36-37]。

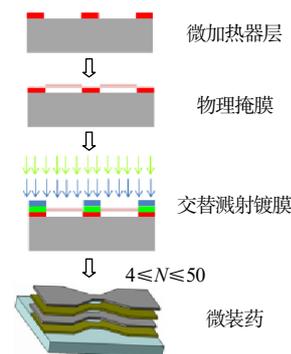


图8 物理气相沉积薄膜装药技术原理图

Fig.8 Principle diagram of physical vapor deposition thin film charge technology

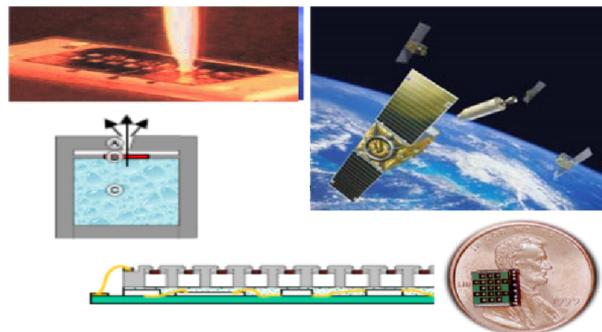


图9 基于物理气相沉积薄膜装药技术的典型微推冲器

Fig.9 A typical micropusher based on physical vapor deposition thin film charge technology

物理气相沉积薄膜装药技术存在的问题主要有:多层复合薄膜技术通常在磁控溅射设备中进行,形成的微装药为平面膜状结构的亚稳态分子间复合物,可进行任意图形化设计,但受限于磁控溅射效率,一般情况下膜厚 $d \leq 15$ μm,装药量小于1 mg,输出有限,一般用于增强点火;小尺寸下装药精度高,工艺与MEMS工艺兼容,但由于具有高活性的金属,存在活性控制问题。

1.4 其他技术

除了上述3种微装药技术,研究者还在持续探索新的微装药技术。如2006年,Daniel等^[38]采用注射

压装的方式实现了斯蒂芬酸铅、CL-20等含能材料的装药。2013年,美国公布了一项使用微流控技术原位制备叠氮化银 MEMS 起爆器的方法^[39]。此外,静电喷涂工艺、溶液自组装、机械压装等技术也有用于微装药领域。但上述技术基本处于技术探索阶段,技术成熟度不高。

2 后续发展思路

综上所述,为了适应新型火工品技术的发展,火工药剂的选用、制备以及微装药技术等均发生了巨大变化。在火工药剂微装药方面,传统的手工/机械粉末压装技术的成型质量不能满足新型火工品的应用需求,逐步衍生出了原位合成工艺、增材制造装药工艺等新技术,可直接在火工品关键元器件的目标位置(如换能元、作动机构、金属飞片等)上制备指定形状、厚度及密度的火工药剂微装药。

为解决目前新型火工品微装药工艺缺乏、自动化程度低、无法在线监测等问题,后续应进一步开展基于功能调控的复杂装药结构设计及精密微装药技术研究,突破微纳药剂精密微装药、装药过程安全性评估等关键技术,并开展微装药集成化器件技术及应用研究。通过上述研究,形成系统的微装药工艺体系,满足新型火工品对微装药原位合成、高精密度、高一致性等需求,推动火工系统的微型化—集成化—信息化—智能化进程。

参考文献:

- [1] 褚恩义, 张方, 张蕊, 等. 第四代火工品部分概念初步探讨[J]. 火工品, 2018(1): 1-5.
- [2] 褚恩义, 张方, 陈建华, 等. 第四代火工品概念补充探讨[J]. 火工品, 2020(6): 1-4.
- [3] 褚恩义, 刘卫, 韩瑞山, 等. MEMS 火工品设计方法探讨[J]. 火工品, 2023(6): 1-7.
- [4] J.Urban, B Michael, L Gerald, et al. MEMS microdetonator/initiator apparatus for a MEMS fuze: US, 7490552B1[P]. 2009-02-17.
- [5] H. Chopin. Low cost MEMS initiator[C]//NDIA 54th Annual Fuze Conference, 2010.
- [6] E. Fowler. Naval air systems command fuzing overview[C]//45th Annual Fuze Conference, 2001.
- [7] D. Jean. MEMS micro-detonator based fuzing[C]//The 53rd Annual Fuze Conference, 2009.
- [8] V. Pelletier, S. Bhattacharyya, I. Knoke, et al. Copper azide confined inside templated carbon nanotubes[J]. Adv. Funct. Mater., 2010(20): 3 168-3 174.
- [9] Zhang F, Wang Y, Bai Y, et al. Preparation and characterization of copper azide nanowire array[J]. Materials Letters, 2012(89): 176-179.
- [10] 王燕兰, 张方, 张蕾, 等. 原位反应法制备填充叠氮化铜的碳纳米管阵列[J]. 含能材料, 2016, 24(4): 386-392.
- [11] 张植栋, 张方, 王燕兰, 等. 多孔铜叠氮化物的原位合成及性能表征[J]. 火工品, 2015(2): 26-28.
- [12] 李兵, 曾庆轩, 李明愉, 等. 多孔铜尺度对其叠氮化反应的影响[J]. 含能材料, 2016, 24(010): 995-999.
- [13] 王燕兰, 张方, 张蕾, 等. 两种不同结构纳米叠氮化铜的含能特性研究[J]. 火工品, 2018(1): 32-35.
- [14] Wang Q, Han J, Zhang Y, et al. Fabrication of copper azide film through metal-organic framework for micro-initiator applications[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019(11): 8 081-8 088.
- [15] Zhang L, Zhang F, Wang Y, et al. In-situ preparation of copper azide by direct ink writing[J]. Materials Letters, 2018(238): 130-133.
- [16] Zhang L, Yang L, Zhang F, et al. In situ synthesis of three-dimensional graphene skeleton copper azide with tunable sensitivity performance[J]. Materials Letters, 2020(279): 128 466.
- [17] 张方, 陈建华, 王燕兰, 等. MEMS 平面微起爆器的原位构筑及性能[J]. 含能材料, 2022, 30(4): 356-362.
- [18] Yu C, Zhang W, Guo S, et al. A safe and efficient liquid-solid synthesis for copper azide films with excellent electrostatic stability[J]. Nano Energy, 2019(66): 104 135.
- [19] Yu C, Zheng Z, Zhang W, et al. Sustainable electrosynthesis of

- porous CuN_3 films for functional energetic chips[J]. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 2020(8): 3 969-3 975.
- [20] Lei G, Cheng W, Zhang T, et al. A highly effective liquid-solid reaction for in situ preparation of copper azide[J]. *Inorg. Chem.*, 2022, 61(49): 20 105-20 110.
- [21] 魏海, 刘旭文, 胡艳, 等. 硅基 $\text{Cu}(\text{N}_3)_2$ @CNTs 复合含能薄膜的制备与表征[J]. *含能材料*, 2020, 28(6): 557-563.
- [22] Wang Q, Feng X, Wang S, et al. Metal-organic framework templated synthesis of copper azide as the primary explosive with low electrostatic sensitivity and excellent initiation ability[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(28): 5 766-5 766.
- [23] 耶金, 杨娜, 程彦飞, 等. PDA@ $\text{Cu}(\text{N}_3)_2$ 核壳结构起爆药的制备及表征[J]. *火工品*, 2020(6): 26-29.
- [24] Andrew Ihnen, et al. Inkjet printing of nanocomposite high-explosive materials for direct write fuzing[C]//54th Annual Fuze Conference. Kansas: NV, 2010.
- [25] Monteil-Rivera F, Paquet L, Deschamps S, et al. Physico-chemical measurements of CL-20 for environmental applications[J]. *Journal of Chromatography A*, 2004, 1 025(1): 125-132.
- [26] H Guo, S Xu, H Gao. CL-20 based ultraviolet curing explosive composite with high performance[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2019, 44(8): 935-940.
- [27] Q Li, C An, J Peng. Formulation of CL-20-based explosive ink and its detonating transfer performance in micro-size charge[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2019, 44(11): 1 432-1 439.
- [28] Q Li, C An, X Han. CL-20 based explosive ink of emulsion binder system for direct ink writing[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2018, 43(6): 533-537.
- [29] 韩瑞山, 张蕊, 张方, 等. 溶剂对微控直写含能油墨的性能影响[J]. *火工品*, 2017(1): 18-21.
- [30] 徐传豪. 微纳结构含能复合物的喷墨打印成型及应用基础研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.
- [31] 李春燕. CL-20 基微纳结构传爆药剂设计及 3D 微喷成型技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2022.
- [32] 沈龙生, 代骥, 叶迎华, 等. 含能油墨配方设计及其在微孔装药中的应用[J]. *爆破器材*, 2015, 44(5): 1-4.
- [33] Gavens A, Heerden D, Mann A, et al. Effect of intermixing on self-propagating exothermic reaction in Al/Ni nanolaminate foil[J]. *Journal of Applied Physical*, 2000, 87(3): 1 255-1 263.
- [34] Thomas A. Baginski, Steven L. Taliaferro, Wm. David Fahey. Novel electroexplosive device incorporating a reactive laminated metallic bridge[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17(1): 184-185.
- [35] D. Ni, P. Dang, G. Yu. An initiator integrated the Al/MoO₃ multilayer nanothermite and bridge-wire electrode plug[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1 507(4): 042 011.
- [36] 倪德彬, 党鹏阳, 徐栋, 等. 调制周期对 Al/MoO₃ 反应薄膜热性能风和发火性能的影响[J]. *含能材料*, 2020, 28(2): 105-111.
- [37] 倪德彬, 于国强, 史胜楠, 等. 基于 Al/CuO 复合薄膜半导体桥间隙点火性能研究[J]. *含能材料*, 2019, 27(2): 149-154.
- [38] Daniel S, Gartung C, Brian E, et al. Methods for making and using high explosive fills for very small volume applications: US, 07052562B1[P]. 2006-05-30.
- [39] Claridge R P, Combes D J. MEMS detonator: GB, 2491225B[P]. 2013-05-01.