

文章编号: 1003-1480 (2020) 06-0001-04

第四代火工品概念补充探讨

褚恩义, 张 方, 陈建华, 王燕兰, 薛 艳, 解瑞珍

(陕西应用物理化学研究所 应用物理化学重点实验室, 陕西 西安, 710061)

摘 要: 在本刊 2018 年第 1 期“第四代火工品概念初步探讨”一文的基础上, 结合近几年 MEMS 火工品技术研究进展, 对典型 MEMS 火工品结构组成中的概念进行进一步的修正和完善, 重新梳理和定义了微作动机构、微火工装置、微火工序列、低极限药量起爆药等概念, 初步建立了从组件、器件、装置到序列等的 MEMS 火工品概念框架, 为未来第四代火工品设计开发奠定基础。

关键词: 第四代火工品; 概念框架; 组件; MEMS

中图分类号: TJ450.1 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2020.06.001

Supplementary Discussion of Concepts of the 4th Generation Pyrotechnics

CHU En-yi, ZHANG Fang, CHEN Jian-hua, WANG Yan-lan, XUE Yan, XIE Rui-zhen

(Science and Technology on Applied Physical Chemistry Laboratory, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061)

Abstract: Based on the article *Preliminary Discussion of New Concepts of the 4th Generation Pyrotechnics* in the first issue of 2018, the concepts of the typical MEMS pyrotechnics were further revised and refined, combining with the research progress in MEMS pyrotechnics technology in recent years. Four concepts of micro-actuator, micro-pyrotechnics devices, micro-pyrotechnics train, primer explosive with very small quantity to initiate other explosives, were defined. The conceptual framework of MEMS pyrotechnics from components, chips, devices to trains has been initially established, to support the development of the 4th generation pyrotechnics in the future.

Key words: The 4th generation pyrotechnics; Conceptual framework; Component; MEMS

2018 年笔者在文献[1]中, 针对第四代火工品的典型结构组成, 首次系统梳理和定义了 MEMS 火工品、微结构换能元、微纳结构药剂、微含能芯片、原位装药技术、直写墨水药剂和微起爆序列 7 个第四代火工品的基本概念和内涵。近两年随着相关研究的推进和深入, 对以上概念的理解也在不断修正和完善。

本文在文献[1]的基础上, 对涉及的几个概念及其相关介绍进行了进一步的修正和完善, 给出了概念之间的相互关系图。另外, 补充定义了 4 个与第四代火工品技术有关的概念, 包括: 微作动机构、微火工装

置、微火工序列、低极限药量起爆药等, 为未来第四代火工品设计开发奠定基础。

1 MEMS 火工品技术概念框架

MEMS 技术与火工品技术的结合, 使 MEMS 火工品在设计方法、研究途径乃至概念内涵上都产生了革命性的变化。为了更为清晰地界定和描述这些概念, 笔者将 MEMS 火工品按组件、器件、装置、序列进行了分类, 如图 1 所示。

收稿日期: 2020-11-05

作者简介: 褚恩义 (1965-), 男, 研究员, 主要从事先进火工品技术研究。

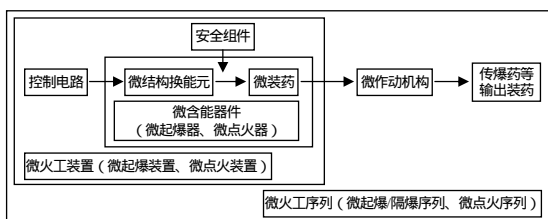


图1 MEMS 火工品概念框架图

Fig.1 The conceptual framework of MEMS pyrotechnics

组件 (Component) 是指若干个零件的组合。例如, 典型微结构换能元由基底层、金属桥箔层和焊盘层组成^[2-4], 典型微装药由微纳结构药剂和装药腔体组成^[5-9], 典型微作动机构由滑块、弹簧、卡锁、基板等组成^[10-12], 它们是组成 MEMS 火工品的最基本功能单元, 制造过程均需要使用集成装配工序, 因此, 笔者将其定义为组件。

微结构换能元组件与微装药组件经集成、装配等工序可组成微含能器件^[1]。根据功能, 微含能器件分为微起爆器、微点火器等。

微火工装置是由微含能器件与控制电路集成封装而成。根据功能将微火工装置分为微起爆装置、微点火装置等。部分微火工装置根据装配、测试或引信设计等安全性需求, 在微结构换能元与微纳结构火工药剂之间设计安全组件, 具备安全保护功能。

微火工装置、微作动机构、输出装药共同组成微火工序列, 用于产生、传递和输出点火、爆轰能量, 安全、可靠地引爆、引燃主装药, 同样, 根据功能分为微起爆/隔爆序列和微点火序列等。

2 MEMS 火工品概念补充与修正

2.1 微作动机构

微作动机构 (Micro-actuator) 是 MEMS 火工品的重要组件, 通过接收环境信号 (如发射过载等) 或电信号, 驱动解锁机构动作, 实现微起爆或点火序列中能量传递通道打开或闭合, 满足起爆或隔爆的需求^[13-14]。美军从 1996 年起已开始了微起爆序列同微安保机构的集成研究^[13]。美国海军表面武器中心 (NSWC) 推出鱼雷 MEMS 安保装置, 通过集成加速度传感器和流量传感器, 性能大幅度提高, 但其体积却减少了 87%^[14]。目前, 按制作工艺, 微作动机构可分为

硅基微作动机构 (Silicon-based micro-actuator) 和非硅基微作动机构 (Non-silicon-based micro-actuator) 2 类。

典型非硅基微作动机构主要基于镍以及铜材料, 加工工艺一般采用 LIGA 或者 UV-LIGA (紫外光刻-微电铸) MEMS 工艺制造, 以实现微起爆序列中传爆/隔爆状态的切换。图 2 为一种典型的滑齿型非硅微作动机构^[15]。非硅基微作动机构的特点是制造成本较低, 可制造较高深宽比的结构, 可以直接感知不同的环境力, 甄别解保条件, 技术成熟度较高。缺点是不能一体化加工, 还存在需要二次装配的问题。

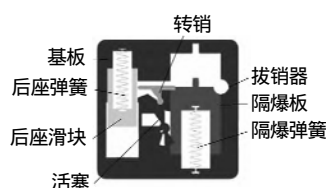


图2 非硅微作动机构结构示意图

Fig.2 The structure of the representative non-silicon-based micro-actuator

硅基作动机构采用微纳加工方式制作, 在硅片上集成驱动机构与隔断机构。图 3 为典型的硅基作动机构, 其作用原理是通过电热执行器驱动产生微小位移, 依靠变形的齿轮齿条以及棘爪棘轮机构, 柔性杠杆机构运动, 实现对微小位移的不断积累来最终实现大位移的输出^[16]。硅基加工一般采用 ICP (深硅反应离子刻蚀) 工艺, 其优点是微电子工艺有很好的兼容性, 可实现与微电子以及微火工品一体化加工。结合传感器技术, 将环境力触发的被动驱动方式变为电驱动信号控制的主动驱动方式, 实现在复杂战场环境下的信息识别与发火控制, 但目前国内技术成熟度较低, 硅材料的抗冲击性能较差。

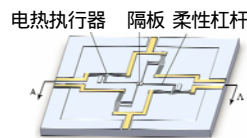


图3 硅基微作动机构结构示意图

Fig.3 The structure of the representative silicon-based micro-actuator

2.2 微火工装置

微火工装置 (Micro-pyrotechnics devices) 包括微起爆装置 (Micro-explosive devices) 和微点火装置 (Micro-ignition devices), 其以硅或玻璃基底为载体, 采用 MEMS 工艺在载体上实现微结构换能元、微纳

结构火工药剂与微安全机构一体化集成设计、装配、封装,形成起爆/点火装置。图4为一种装填纳米多孔叠氮化铜起爆药的微起爆装置。其作用原理为:通电后,换能元产生热量引发含能薄膜,微动作机构动作实现换能元与药剂的对准,含能薄膜产生的能量通过对准的间隙孔传递到微起爆装药,形成爆轰输出。该系统不作用时换能元与药剂隔离,作用时换能元与药剂实现间隙起爆,提高了微起爆器的安全性。

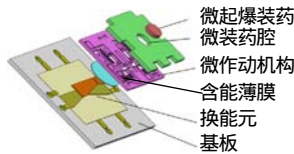


图4 典型微起爆装置结构示意图

Fig.4 The structure of the representative micro-explosive devices

微点火装置以硅基底等为载体,采用光刻-磁控溅射等MEMS工艺在硅基底上制备微结构换能元(或复合短路保护电路),将换能元与短路保护电路与微纳结构点火药的装药层集成封装,形成点火装置。图5为典型微点火装置示意图。其作用原理为:微点火器通电后,短路保护装置炸断短路引线接通换能元发生点火作用,引燃B/KNO₃点火药,实现点火功能^[17]。该装置的特点是具有安全保护结构。

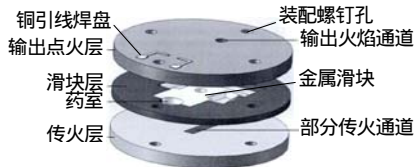


图5 典型微点火装置结构示意图

Fig.5 The structure of the representative micro-ignition devices

2.3 微火工序列

微火工序列(Micro-pyrotechnics train)包括微起爆/隔爆序列(Micro-explosive train)和微点火序列(Micro-ignition train),其采用MEMS工艺,通过一体化设计和集成,将微控制电路、微含能器件和微动作机构、输出装药等结合在一起,实现起爆、隔爆、传爆等功能。该系统可以将输入的电等刺激能量,通过微结构换能元引发微起爆器上的微纳结构药剂,通过能量传递、放大,形成能量增长的序列,实现起爆或点火的目的。目前,典型的微起爆/隔爆序列通常采用微结构换能元引发微纳结构药剂、驱动飞片作为能量放大主要形式。2010年美国引信年会报道了一种

微起爆序列^[18],如图6所示,该序列的作用过程为:通过半导体桥换能元作为微结构换能元,引发AgN₃微装药,驱动钛飞片,钛飞片撞击直写墨水药EDF-11传爆药线,形成爆轰输出,引爆PBXN-5传爆药,完成整个序列的能量引发、传递与放大过程。

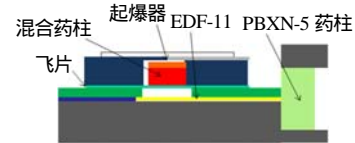


图6 典型微火工序列结构示意图

Fig.6 The structure of the representative micro-pyrotechnics train

2.4 原位合成与原位装药

在文献[1]中,“原位装药(In-situ Formed Energetics)”定义为“MEMS火工品中,在微结构换能元表面或硅基装药腔体等指定的装药位置,采用与MEMS工艺兼容的物理或化学方法,直接生成起爆(点火)装药的技术”,本文修订为“MEMS火工品中,在微结构换能元表面或微装药腔体等指定的装药位置,采用原位合成的方法,直接生成起爆(点火)装药的技术”。此处原位装药方法强调的是一种化学方法,过程中涉及化学反应,如沉淀、晶体的生长等反应过程中形成的装药。MEMS火工品的装药也可以用直写的方法来实现,而直写是一种物理方法。原位装药避免了传统装药的溶液合成、清洗、干燥、称量、压装等过程,是一种安全的装药技术。

2.5 低极限药量起爆药

MEMS火工品对火工药剂提出了小尺寸装药、小尺寸传爆、低极限起爆药量、低发火能量以及与MEMS工艺兼容等要求。极限起爆药量是评价火工药剂输出性能的一个重要指标。“极限起爆药量”定义为:当起爆药以一定的压药压力压装,或以一定方式装药,能够完全引爆规定起爆装置的最小药量^[19]。而极限药量明显小于现役起爆药的药剂就称为低极限药量起爆药(Primer explosive with very small quantity to initiate other explosives)。例如叠氮化铜起爆太安的极限药量为0.4mg,远低于叠氮化铅的极限药量(2.5mg),则叠氮化铜是一种低极限药量起爆药。在具备相应起爆功能的同时,低极限药量起爆药可明显减小单兵武器中敏感药剂的携带量。

2.6 微含能器件与微含能芯片

笔者在提出“微含能芯片”这一概念时,直接沿用其英文名称“Micro-energetics-on-a-chip”(芯片上的微含能材料)。“Chip”的英文原义是“薄片”,也可翻译为“芯片”。“Micro-energetics-on-a-chip”的组成主要包括3个部分,即换能元、微装药腔体和微装药,有的研究团队将制作在基底上的含能薄膜也称为“Micro-energetics-on-a-chip”,其中并不包含换能元。由于中文中“芯片”所包含的意义远远不止对一种形状的描述,而是涵盖了几乎整个半导体元器件所涉及的最主要技术,尤其是芯片中包括了集成电路,因此,笔者认为将“微含能芯片”修正为“微含能器件”更为贴切。

3 结论

对第四代火工品技术中另外4个概念进行了补充探讨,初步构成了微火工组件、微火工器件、微火工装置以及微火工序列的体系化概念,并且修正了文献[1]中定义不够准确的概念。同时,为了更为清晰地界定和描述这些概念,给出了概念之间相互关系框图。相关研究仍在不断深入和推进,部分技术已具备了相当的成熟度,距离实际应用也越来越近。在装备应用要求的考验下,各项技术必然经历不断的迭代和更新,相应的概念及关系框架也将不断修正和完善。

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,刘卫,薛艳,等.微桥膜换能元结构设计及电阻计算方法[J].火工品,2017(6):1-5.
- [3] 陈晓勇,董帅,熊继军.MEMS微发火器件研究现状[J].微纳电子技术,2016,53(6):381-386.
- [4] 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,2014,22(6):819-823.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 解瑞珍,刘兰,任小明,等.硅基微雷管的原位装药及性能研究[J].兵工学报,2014(12):1972-1977.
- [8] Laid Gerald. Integrated thin film explosive micro detonator: US, 7739953[P]. 2008-01-29.
- [9] 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.
- [10] James L, Zunino III, Donald R, et al.. Reliability testing and analysis of safing and arming devices for army fuzes[C] // Memes & Nanofabrication. International Society for Optics and Photonics, 2008.
- [11] Rossi C, Esteve D, Bourrier D, et al.. Design, fabrication and characterization of a MEMS safe pyrotechnical igniter integrating arming, disarming and sterilization functions[J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2006, 16(1): 92-100.
- [12] Rossi C. Micropyrotechnics, a new technology for making energetic microsystems: review and prospective[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2005, 120(2): 297-310.
- [13] 冯鹏洲,朱继南,吴志亮.美国典型MEMS引信安全保险装置分析[J].探测与控制学报,2007,29(5):26-30.
- [14] Robinson C H, Wood R H, Hong T Q. Development of inexpensive, ultra-miniature MEMS-based safety and arming (S&A) device for small-caliber munition fuzes[M]. US: Army Tank Automotive Command (TACOM) Armament Research, Development and Engineering Center (ARDEC) Fuze Division, 2002.
- [15] 张继桃.基于MEMS的安全解除保险机构的设计与试验研究[D].沈阳:沈阳理工大学,2012.
- [16] Hu T, Zhao Y, Li X, et al.. Integration design of MEMS electro-thermal safety-and-arming devices[J]. Microsystem Technologies, 2017(23):953-958.
- [17] 王儒文.隔断式平面点火序列设计与性能研究[D].南京:南京理工大学,2017.
- [18] Chopin H. Low cost MEMS initiators[C] // 54th Annual Fuze Conference, 2010.
- [19] 劳允亮,盛涤伦.火工药剂学[M].北京:北京理工大学,2011.