

基于 MEMS 工艺的电极塞换能元一体化集成技术

陈建华, 刘 兰, 任小明, 解瑞珍, 刘 卫, 薛 艳

(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: 针对传统电火工品桥丝焊接存在虚焊、人工效率低等问题, 开展了基于 MEMS 工艺的电极塞换能元一体化集成技术研究。提出了电极塞换能元一体化集成设计的方案, 通过传统电极塞中引入 MEMS 工艺, 形成了一体化集成的电极塞换能元。所设计的电极塞换能元具有平面结构、无人工焊接、批量化等特点, 在 $10\mu\text{F}/15\text{V}$ 条件下能够可靠作用。本研究为新一代电火工品设计提供技术支撑。

关键词: 换能元; 电极塞; MEMS 技术; 集成

中图分类号: TJ450.3⁺2 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2020.06.005

Integrated Technology of Electrode Plug and Micro-heater Based on MEMS Process

CHEN Jian-hua, LIU Lan, REN Xiao-ming, XIE Rui-zhen, LIU Wei, XUE Yan

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

Abstract: Aiming at the problems of cold solder joint and low manual efficiency in the traditional pyrotechnics bridge wire welding, the integrated technology of electrode plug and micro-heater based on MEMS technology was developed. The integrated design scheme of electrode plug and micro-heater was proposed, and an integrated electrode plug and micro-heater was formed, by embedding the MEMS process in the traditional electrode plug. The study show the integrated transducer has characters of planar structure, no need of manual welding and mass production, which provides technical support to the design of new generation pyrotechnics.

Key words: Micro-heater; Electrode plug; MEMS process; Integration

随着微型航天器、微型卫星、微型弹药等新一代信息化武器装备的发展, 火工品作为武器装备系统初始能源, 在姿态控制、点火分离、弹道修正以及安全保险等功能中应用日益广泛, 并面临点火可靠性高、作用时间短、集成化程度高、体积小、智能化等更高要求^[1-2]。传统的桥丝式电火工品利用电能使焊接在两个电极间的桥丝高速气化而爆炸, 从而引爆装药。然而桥丝焊接质量对操作人员的经验水平依赖性高, 在较强的震动环境下桥丝径向存在拉伸作用, 同时, 残留的焊剂易导致桥丝腐蚀, 这些因素均会影响火工品

的安全性可靠性, 不能满足现代武器装备对火工品机械强度、长贮性能的要求^[3-4]。近年来, 国内开展了通过磁控溅射工艺制备金属桥膜, 以替代传统桥丝的相关研究。王科伟等^[5]通过磁控溅射方法在半导体桥电极塞上形成 SCB-Al/MoO₃ 发火元件。阿苏那等^[6]用磁控溅射方法将镍铬溅射在切割好的陶瓷片上, 通过与电极塞组装形成一体化发火组件。目前的研究以独立制作换能元与电极塞为主, 后期通过焊接工艺完成组装。

本文提出了一种基于电极塞换能元的一体化集

成设计技术方案,通过传统电极塞中引入 MEMS 工艺,批量化形成电极塞换能元,并对其表面形貌及发火感度进行了测试。

1 电极塞换能元一体化集成

为了在传统电极塞上制作一体化换能元,在电极塞制作工艺基础上引进磁控溅射工艺,以减免人工焊接操作,解决传统桥丝焊接存在的虚焊问题。电极塞换能元一体化工艺与传统电极塞焊桥工艺不同,不仅通过一次操作可以完成多个电极塞换能元一体化集成,而且可以通过掩膜版层调整换能元结构图形,满足不同电阻性能要求。电极塞换能元一体化的工艺原理为:首先完成电极塞座、电极塞、掩膜版层一体化装配,将其固定安装在磁控溅射载片区,然后采用磁控溅射方法,将金属靶材离子透过掩膜版直接将图形溅射在电极塞上,如图 1 所示。

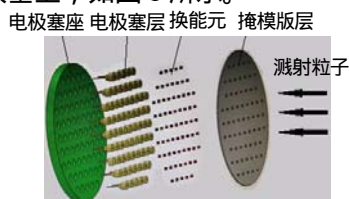


图 1 电极塞换能元一体化工艺原理图
Fig.1 Schematic diagram of the integrated process of electrode plug and micro-heater

在电极塞换能元一体化工艺中,由于掩膜版层放入磁控溅射腔体中会经受高温高压及粒子轰击,因此,掩膜版层设计中需要考虑其耐温耐压以及抗腐蚀能力。由于不锈钢材料具有较低的热膨胀系数,较好的抗腐蚀能力,并且溅射后可用酸进行清洗,易加工、可反复使用,结合工艺原理和工艺特性,选用不锈钢材料作为掩膜版材料。

电极塞换能元的图形尺寸通过控制掩膜版层厚度、图形尺寸来实现,设计中需要考虑掩膜版层的图形尺寸、厚度以及加工工艺精度。根据掩膜版层的图形尺寸和加工精度的要求,选择精细线切割慢走丝加工方法。同时,鉴于掩膜版层厚度过薄易引起加工变形,厚度过厚易引起溅射图形发生衍射,结合设计要求以及加工工艺要求,确定掩膜版层厚度为 0.5mm,以满足溅射粒子从中间镂空处沉积到下边的电极塞

层上,形成一体化图形的要求。

电极塞座的主要作用是将溅射装置连接到磁控溅射机上,同时定位电极塞层及固定上层掩膜版层。为了方便加工及满足磁控溅射环境的要求,电极塞座采用不锈钢制作,在其表面可根据需要制作的电极塞层的尺寸,进行阵列布设。

2 MEMS 工艺的电极塞换能元集成制作

结合磁控溅射工艺和电极塞工艺要求,本文为外径 5.7mm 的电极塞设计制作了电极塞座和掩膜版层,分别如图 2、图 3 所示。

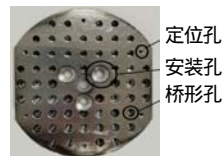


图 2 电极塞座
Fig.2 Electrode plug holder

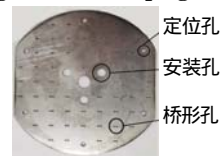


图 3 掩膜版层
Fig.3 The picture of mask

电极塞换能元一体化集成制作主要包括电极塞的准备及换能元的制作。电极塞的准备过程:(1)研磨电极塞表面;(2)超声波清洗;(3)氮气吹扫干燥。电极塞换能元的制作过程:(1)将清洗干净的电极塞放置到电极塞座中,电极塞中心位置与电极塞座和掩膜版层对准;掩膜版层与电极塞座的定位孔对准,掩膜版层覆盖在电极塞座表面;通过安装孔将电极塞座和掩膜版层固定在磁控溅射载片区上,进行溅射;(2)超声波清洗;(3)氮气吹扫干燥。通过该电极塞座可 1 次完成 57 个电极塞换能元的制作。一体化集成的单个电极塞换能元结构如图 4 所示。

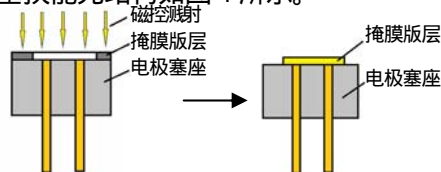


图 4 电极塞换能元一体化集成结构图
Fig.4 Structure diagram of the integrated process of electrode plug and micro-heater

根据褚恩义、任小明等^[7-8]对金属桥膜的研究结

果,结合发火性能、工艺要求,换能元材料选择氮化钽合金,换能元桥区参数为 $0.25\text{mm} \times 0.25\text{mm} \times 0.9\mu\text{m}$,桥区形状如图 5 所示。

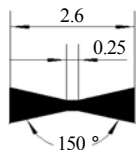


图 5 桥区形状示意图
Fig.5 Schematic of bridge area

溅射工艺条件：磁控溅射机，意大利 KENOSISTEC 公司 KS60VR；靶材材料，氮化钽合金，纯度 99.9%；工艺参数：真空度 $5 \times 10^{-6}\text{Pa}$ ，溅射功率 200W，溅射时间 50min，氩气流量 30sccm。一体化集成制作的电极塞换能元如图 6 所示。



图 6 基于电极塞的一体化薄膜
Fig.6 The integrated film based on electrode plug

3 MEMS 工艺的电极塞换能元表征及性能测试

通过奥林巴斯激光共聚焦显微镜 OLS5000、安捷伦 5500 原理力显微镜、美国维易科 DEKTAK150 台阶仪对一体化电极塞换能元进行分析，形貌、粗糙度、厚度性能测试结果如图 7 所示。

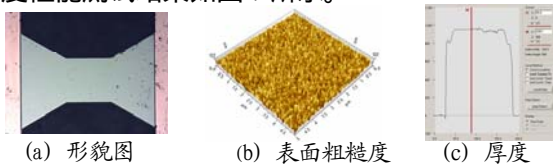


图 7 一体化换能元形貌表征图
Fig.7 The morphology of integrated transducer

由图 7 可见，电极塞换能元图形清晰、边缘规整，具有一定的致密性，中心发火区域尺寸为 $251.2\mu\text{m} \times 250.6\mu\text{m}$ ；表面粗糙度最小仅为几个纳米，最大不超过 35nm，表面颗粒均匀，表面粗糙度平均值为 15.1nm；厚度为 $0.954\mu\text{m}$ ，符合设计要求，工艺具有一定的稳定性。

依据 GJB/Z377A-94 感度试验用兰利法，试验数据分布假设为正态分布，选用刺激下限为 5V，刺激上限为 25V，点火装药采用斯蒂芬酸铅。将 34 发样品分成 2 组，感度测试结果如表 1 所示。

表 1 感度试验测试结果

Tab.1 Sensitivity test result

样品量	发火电容 / μF	刺激量 上限/下限/V	发火电压 均值/V	99.9%发火 电压/V
18	10	25/5	9.3	12.59
16	10	25/5	10.17	12.76

由表 1 可知通过磁控溅射方法获得的一体化电极塞换能元在发火电容 $10\mu\text{F}$ 的条件下，全发火电压小于 15V，满足某型号产品的发火性能要求。

4 结论

(1) 本文提出了一种电极塞换能元一体化集成工艺方法，具有工艺简单、批量化的特点。所制作的电极塞换能元在 $10\mu\text{F}/15\text{V}$ 条件下能够可靠作用，满足发火性能要求。

(2) 本文所提出的工艺方法可以根据需求设计出不同的掩膜形状，制备出不同外形结构换能元，满足不同电阻性能要求。同时可一次批量化制作几十至上百个换能元，无人工焊接工艺，提高工作效率，为新一代电火工品的设计制作提供了新思路。

参考文献：

- [1] 薛艳,卢斌,等. MEMS 火工品及微起爆器发展综述[C]//中国兵工学会火工烟火专业第十三届学术年会. 昆明: 中国兵工学会火工烟火专业分会, 2005.
- [2] 王述剑,彭泓铮,等. MEMS 用含能薄膜研究现状[J]. 含能材料, 2012(2): 234-239.
- [3] 侯苹. 我国电火工品桥丝焊接工艺的现状与发展[J]. 火工品, 1994(2): 22-26.
- [4] 吴涛. 桥丝式电火工品锡焊工艺分析与研究[J]. 科技尚品, 2015(10): 1-3.
- [5] 王科伟,杨正才,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.
- [6] 阿苏娜. 薄膜桥黄能点火(起爆)器件研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2008.
- [7] 褚恩义,刘卫,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.
- [8] 任小明,苏谦,等. 氮化钽换能元的制备工艺研究[J]. 火工品, 2020(1): 26-28.