

文章编号: 1003-1480 (2020) 06-0014-04

# 碳膜桥作为点火装置的设计与可行性

沈佳驰, 易镇鑫, 张琳, 朱顺官, 李燕

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京, 210094)

**摘 要:** 通过采用气溶胶辅助化学气相沉积、激光切割、微笔直写等技术, 制备了一种类石墨碳膜换能元。以正己烷为碳源, 在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基底上沉积了一层厚度约  $2\text{ }\mu\text{m}$  的碳薄膜, 利用激光切割对碳膜形状进行控制以及微笔直写形成银电极, 构成双 V 型碳膜桥换能元。利用扫描电子显微镜 (SEM)、原子力显微镜 (AFM) 以及拉曼光谱 (Raman) 对碳膜的形貌及结构进行了表征, 并对碳膜桥换能元的发火性能进行了研究。结果表明: 碳膜桥的成型工艺简单有效, 其发火区间窄, 抗静电能力强, 作用时间长, 安全性可靠性高, 能够实现钝感药剂的点火。

**关键词:** 碳膜桥; 换能元; 化学气相沉积; 激光切割; 微笔直写

中图分类号: TJ450.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2020.06.004

## Design and Feasibility of Carbon Film Bridge Used as Ignition Device

SHEN Jia-chi, YI Zhen-xin, ZHANG Lin, ZHU Shun-guan, LI Yan

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094)

**Abstract:** By use of aerosol-assisted chemical vapor deposition, laser cutting and micro writing methods, a type of graphitic carbon film used as energy conversion component was prepared. Through adopting n-hexane as the carbon source, a carbon film with thickness about  $2\text{ }\mu\text{m}$  was deposited on the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  substrate. The shape of the carbon film was controlled by laser cutting and the silver electrode was formed by micro-direct writing, then double V-shaped carbon film bridge energy conversion component was formed. The morphology and structure of the carbon film were characterized by scanning electron microscopy (SEM), atomic force microscopy (AFM) and Raman spectroscopy (Raman), and the ignition performance of the carbon film bridge energy conversion component was studied. The results show that the forming process of the carbon film bridge is simple and effective, the carbon film bridge has a narrow firing range, strong antistatic ability and long ignition time, which show it has high safety and high reliability, meanwhile, it can realize the ignition of insensitive agents.

**Key words:** Carbon film bridge; Energy conversion component; Chemical vapor deposition; Laser cutting; Micro writing

换能元作为电火工品的核心部件, 其性能很大程度上决定了火工品的性能。随着科学技术的发展和电磁环境恶劣程度加强, 对火工品的性能提出了更高的要求, 包含抗静电、射频能力, 以及低发火能量和微型化<sup>[1-2]</sup>。然而随着换能元的微型化, 带来了换能元作用速度过快, 药剂与换能元的界面匹配性要求高的问题, 这些问题降低了火工品的可靠性<sup>[3]</sup>。而当前常用

的镍-铬、多晶硅材料由于材料及尺寸限制等原因, 输出能量有限且作用速度过快, 出现换能元熔断后药剂仍未发火的情况, 降低了发火可靠性。因此, 开展新型换能元材料的研究对于兼顾火工品的安全性与可靠性而言具有重要研究意义。

碳材料具有化学稳定性高、熔点高且电阻率可调等优点, 大量研究表明其与含能材料有很好的相容性

收稿日期: 2020-10-10

作者简介: 沈佳驰(1995-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事火工品换能元研究。

[4], 并且具有良好的抗静电能力[5]。早期曾将碳材料用于制造点火桥, 其中涂膜式雷管[6]采用石墨与聚合物粘结剂涂抹在电极上, 固化形成半导体薄膜, 该方法获得的碳膜电阻较高(700~14 000  $\Omega$ ), 需要很高的电压(100~300 V)才能产生足够的热量以引燃药剂。为了利用碳材料高熔点、安全性等特性, 本文采用一种化学气相沉积制备碳膜的新方法, 所制备的碳膜电阻可调(2~10  $\Omega$ ), 并通过将激光切割和微笔直写技术相结合, 设计加工出一种工艺简单、产品性能良好的碳膜桥换能元。

## 1 实验

将约 500 mL 正己烷的碳源溶液置于前体容器中, 利用氮气(99.9%)将正己烷溶液吹入 1 100 的管式炉中反应 2h, 在面积为 21mm×21mm 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基底上沉积一层 2 $\mu\text{m}$  厚的碳膜。然后通过激光切割技术在每片基底上制造出 8×10 个图案, 桥区尺寸为 600 $\mu\text{m}$ ×200 $\mu\text{m}$  (宽×长), 通过微笔直写在每个图案上做出 1.8mm×0.6mm 的矩形 Ag 电极, 然后将其切成单独的芯片装入陶瓷塞中, 最后被加工成碳膜桥点火器。碳膜桥实物图如图 1 所示。



图 1 碳膜桥实物图

Fig.1 Physical picture of carbon film bridge

采用扫描电子显微镜(SEM, JSM-IT500HR)对碳膜的形貌和截面厚度进行表征; 显微共焦拉曼光谱仪(HORIBA Jobin-Yvon Lab RAM Aramis)用于分析非晶碳膜的结构特性; 采用原子力显微镜(AFM, Solver P47)对非晶态碳膜的表面粗糙度进行测量; 四点探针(RTS-8, 广州)来研究非晶碳膜的电学性能。

## 2 结果与讨论

### 2.1 碳膜的表征

#### 2.1.1 表面形貌与截面厚度

通过化学气相沉积制备得到的碳膜的 SEM 和

AFM 图片如图 2 所示。由 SEM 图片可以看出碳膜由微米级大小的碳颗粒堆积而成, 表面平滑, 碳膜厚度约为 2 $\mu\text{m}$ ; 由 AFM 图可以得知碳膜的表面粗糙度为 1.42 nm。

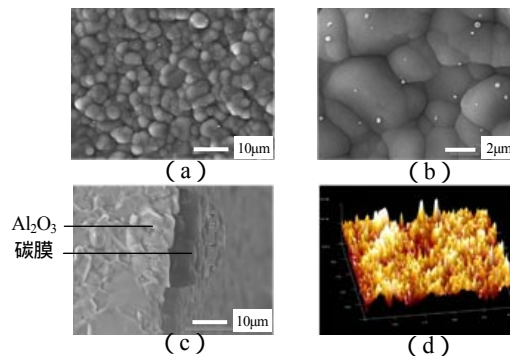


图 2 碳膜的 SEM 图及 AFM 图

Fig.2 SEM and AFM images of carbon film

#### 2.1.2 碳膜的拉曼光谱

图 3 显示了在 900~1 000 之间生长, 沉积时间为 2h 的碳膜拉曼光谱。由图 3 可以清楚观察到 1 350  $\text{cm}^{-1}$  附近的 D 峰和 1 580  $\text{cm}^{-1}$  附近的 G 峰, 这表明沉积的碳薄膜都是非晶态的。D 和 G 峰的强度之比( $I_D/I_G$ )和 G 峰的半峰宽(FWHMG)分别给出关于非晶碳膜的无序度和  $\text{sp}^2/\text{sp}^3$  的含量比的信息。随着生长温度从 900 升高到 1 100,  $I_D/I_G$  增加, G 峰向上移动, 表明非晶碳膜中的  $\text{sp}^2$  含量增加。而且, 在较高的温度下可获得非晶碳膜更小的 FWHMG, 这意味着更高的石墨化度。

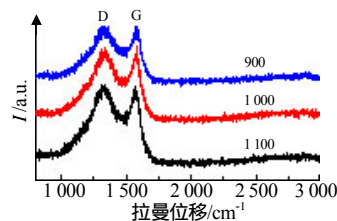


图 3 不同温度条件下沉积碳膜的拉曼光谱

Fig.3 Raman spectra of carbon film grown at different temperatures

#### 2.1.3 碳膜的电学性质

表 1 显示了沉积温度与碳膜性质的关系, 由表 1 可知, 随着温度的升高, 碳膜厚度不断增加, 方阻及电阻率不断降低, 而电阻率的降低与拉曼中  $I_D/I_G$  的升高、FWHMG 的减小相对应。

表 1 沉积温度与碳膜性质的关系

Tab.1 Relationship between deposition temperature and carbon film properties

温度/ °C	$I_D/I_G$	FWHMG	方阻/( $\Omega\text{sq}^{-1}$ )	厚度/ $\mu\text{m}$	电阻率/( $\Omega\mu\text{m}$ )
900	1.09	93.87	78.78	1.407	110.84
1 000	1.16	92.72	16.91	1.864	31.52
1 100	1.17	90.84	2.26	2.268	5.13

2.2 碳膜桥的点火特性

2.2.1 不同电阻碳膜桥的点火性能

采用 Neyer's D-最优化法，在蘸有斯蒂芬酸铅 (LS) 药剂的条件下，对不同阻值的碳膜桥进行 50% 发火电流和 50% 发火电压的试验，试验结果如表 2 ~ 3 所示。由表 2 ~ 3 可知，相比于 2 的碳膜桥，9 的碳膜桥 50% 发火电压增大，而 50% 发火电流减小。这是由于电阻的焦耳效应造成的，恒流刺激下，发火感度随着电阻的增大而增大。全发火电压和不发火电压以及全发火电流与不发火电流的区间很小，散布精度高，这有利于提高点火可靠性和安全性。

表 2 电阻对碳膜桥脉冲电压发火感度的影响

Tab.2 Voltage ignition sensitivity of CFB with different resistances

起爆药	碳膜桥电阻/ $\Omega$	50%发火电压/V	0.1%发火电压/V	99.9%发火电压/V	标准差
LS	2.0	15.39	14.23	16.22	0.38
	9.0	16.52	17.86	18.18	0.43

表 3 电阻对碳膜桥恒流发火感度的影响

Tab.3 Current ignition sensitivity of CFB with different resistances

起爆药	碳膜桥电阻/ $\Omega$	50%发火电流/mA	0.1%发火电流/mA	99.9%发火电流/mA	标准差
LS	2.0	621	595	547	8.4
	9.0	288	269	307	6.3

2.2.2 碳膜桥的安全性

(1) 安全电流：参照 GJB 5309.10-2004 电火工品不发火验证实验进行碳膜桥安全电流测定，对蘸有 LS 的 2 的碳膜桥进行了安全电流测试，每组样品测试 10 发，通电 5 min，测试表明蘸 LS 的碳膜桥安全电流为 300 mA。

(2) 脚-脚间抗静电能力：参照火工品静电放电测试标准 GJB 5309.14-2004 对火工品进行脚-脚间静电感度测试，测试电容 500pF，串联电阻 5 000  $\Omega$ 。选择阻值为 2 及 9 的碳膜桥，对蘸有 LS 的碳膜桥进行测试，在 30kV 的静电电压下，每组样品 20 发均未发火，抗静电能力优于传统桥丝 (17kV) 和钝感 SCB (23kV) [7]，在使用过程中安全性更好。

2.3 碳膜桥的发火过程研究

2.3.1 碳膜桥的脉冲作用过程

对阻值为 9 的碳膜桥在电容为 47 $\mu$ F，放电电压为 20V、30V、40V、50V 的条件下进行测试，以研究其作用特性，所得电压电流曲线如图 4 所示。由图 4 可以看出，碳膜桥在不同放电条件下存在 4 种情况：(a) 桥区无相变；(b) 桥区部分发生相变；(c) 桥区完全气化；(d) 桥区完全气化并产生等离子体。前

3 种情况均为电热过程，第 4 种为情况为电爆。由图 4 可以看出碳膜桥作用时间长，点火可靠性高，有望实现钝感药剂点火。

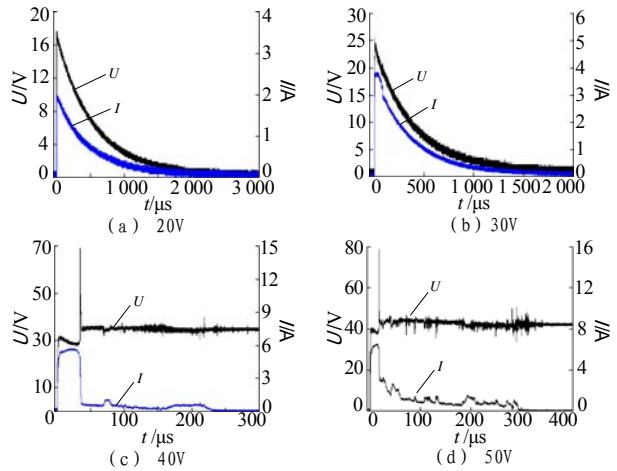


图 4 碳膜桥的 U/I 曲线图

Fig.4 U/I curves of carbon film bridge

采用高速摄影拍摄 2 蘸药 LS 的碳膜桥在 47 $\mu$ F/50V 脉冲放电条件下的发火过程，由图 5 可知，在该发火条件下，发火时间约为 1.3ms。

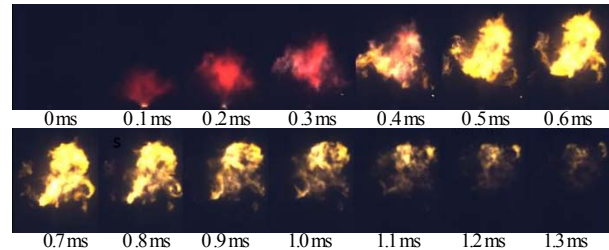


图 5 碳膜桥蘸药 LS 发火过程的高速摄影图

Fig.5 High-speed images of the firing process of carbon film bridge with LS

2.3.2 碳膜桥与半导体桥脉冲作用过程比较

为了比较碳膜桥与半导体桥作用时间，分别采用 2 $\Omega$  碳膜桥和 1 $\Omega$  半导体桥在相同脉冲条件下进行测试，结果如表 4 所示。表 4 结果表明在相同的能量作用下，由于碳膜桥高熔点的特性，碳膜桥发生熔断的时间更长，即电流作用时间更长，对药剂的加热时间更长，点火更可靠。。

表 4 CFB 与 SCB 脉冲作用断桥时间对比

Tab.4 Comparison of bridge break time between CFB and SCB under pulse action

起爆药	脉冲条件	CFB 断桥时间	SCB 断桥时间
LS	47 $\mu$ F/30V	68	14
	47 $\mu$ F/50V	82	21

2.4 钝感药剂的点火

选取 2 种钝感药剂通过碳膜桥来进行点火试验，一种是高能钝感纳米铝热剂 Al/CuSO<sub>4</sub> · 5H<sub>2</sub>O，另一种是安全气囊中常用的气体发生剂叠氮化钠。

采用 2 的碳膜桥,称取 20mgAl/CuSO<sub>4</sub>,采用恒流源对碳膜桥提供 500mA 直流电,通电 100ms,药剂被点燃;同时采用 2 的碳膜桥,对 NaN<sub>3</sub> 进行蘸药,采用恒流源对碳膜桥提供 500mA 直流电,通电 100ms,NaN<sub>3</sub> 被成功点燃。

### 3 结论

本文采用化学气相沉积的方法,制备了膜厚约为 2 μm、表面粗糙度为 1.42nm 的碳膜,并通过激光切割和微笔直写技术工艺,整合设计加工成一种工艺简单的碳膜桥换能元器件。对碳膜桥换能元的点火特性及发火过程进行测试研究,结果表明:

(1) 碳膜桥不发火和全发火区间小,散布精度高。

(2) 碳膜桥可以耐 30 kV、串联 5 000 Ω、500 pF 的静电放电,抗静电能力好。

(3) 碳膜桥熔点高,发火作用时间长,可靠性高。

(4) 碳膜桥能实现对钝感药剂的点火。

#### 参考文献:

- [1] 钟杰华, 娄依志, 张沥. 新型火工品技术在未来武器系统的应用分析[J]. 科技创新应用, 2018(13): 33-34.
- [2] 任晓雪, 柏席峰, 彭翠枝, 等. 国外新型火工药剂安全技术研究进展[J]. 爆破器材, 2013, 42(05): 43-47.
- [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(05): 428-436.
- [4] Yan Q L, Gozin M, Zhao F Q, et al.. Highly energetic compositions based on functionalized carbon nanomaterials[J]. Nanoscale, 2016, 8(9): 4 799-4 851.
- [5] 钟经德, 邓宝祥, 陈仁芳. 抗静电碳系/聚酰亚胺复合薄膜的制备及表征[J]. 化工新型材料, 2016, 44(09): 225-227.
- [6] Philip N. Martin. US. R. Electric actuated explosion detonator: US, 6497180B1[P]. 2002-12-24.
- [7] 陈飞. SCB 火工品静电、射频损伤机理及其加固技术的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.