

文章编号: 1006-9941(2008)05-0543-04

## 薄膜桥火工品的制备与性能研究

王广海, 李国新, 阿苏娜

(北京理工大学宇航科学技术学院爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 为了提高火工品的安全性及点火可靠性, 采用掩模法, 利用磁控溅射技术制备了一种蝶形金属薄膜桥, 在薄膜桥表面涂 15~20 mg 斯蒂芬酸铅(LTNR), 进行了安全电流试验、抗静电试验及与桥丝的对比试验, 研究了其安全性能和点火性能, 并利用红外热成像技术验证其发火时桥区的热分布。结果表明, 这种金属薄膜桥有良好的抗静电性能、点火性能和机械性能; 薄膜桥通电时其中心最窄处热量较集中。

**关键词:** 军事化学与烟火技术; 金属薄膜桥; 磁控溅射; 火工品; 抗静电

中图分类号: TJ450.1

文献标识码: A

### 1 引言

在现代日益复杂的电磁环境下, 传统金属桥丝火工品的机械性能、安全性能越来越难以满足新型武器弹药的高安全、高可靠性要求。因此, 人们开始寻求新的技术途径对火工品进行改进。薄膜桥火工品就是随着薄膜技术的发展而发展起来的一类火工品<sup>[1-2]</sup>。它是通过物理气相沉积的方法, 将半导体、金属等材料沉积到绝缘基片上制得的一类火工品, 其主要包括半导体桥、金属薄膜桥、爆炸薄膜桥等类型。与桥丝式火工品相比, 其突出的优点是外形结构可以依据性能要求设计成多层复合式结构或特殊形状以满足不同的功能, 并且具有良好的安全性和点火可靠性<sup>[3]</sup>。

近年来, 金属薄膜桥火工品逐渐成为火工品领域研究的热点。20 世纪 80 年代以来德国、瑞典等国利用物理气相沉积(PVD)和化学气相沉积(CVD)技术研制了多种以金属复合薄膜桥为发火元件的点火器和雷管。如瑞典 Sven-Erik 等人申报的美国专利 US4335653<sup>[4]</sup>和 4409898<sup>[5]</sup>介绍了电磁辐射和杂电钝感的金属复合膜桥点火器。英国皇家军械研究院和标准电信试验有限公司<sup>[6]</sup>联合研制了一种双层金属薄膜桥雷管, 其特点是发火安全可靠, 作用时间快。

本课题组采用掩模法, 利用磁控溅射技术制备了一种中间有对称 V 字形缺口的金属薄膜桥(蝶形薄膜桥), 并研究了其安全性和点火性能。

### 2 金属薄膜桥的结构设计与制备

金属薄膜桥主要是根据实际需要进行形状和结构

的设计<sup>[7-9]</sup>, 其结构设计如图 1 所示。结构主要分三层: 第一层为基层, 选用 95%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷为基底。因为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷有着良好的绝缘性和较低的热膨胀系数保证了薄膜不会蜷曲也不易龟裂。同时它还有较好的附着性能使得薄膜与基底间结合牢固, 主要是作为载体支撑上层薄膜。第二层为 Ni-Cr(80/20) 合金, 厚度约为 1  $\mu\text{m}$ 。在陶瓷基底上进行溅射镀膜, 主要作用是能量转换。在通电之后它可将电能转换为热能进而点燃起炸药。第三层为 Cu 层。铜具有较低的电阻率和良好的导热性能, 因此选用铜为焊盘, 主要作用是连接脚线、导通和散热。

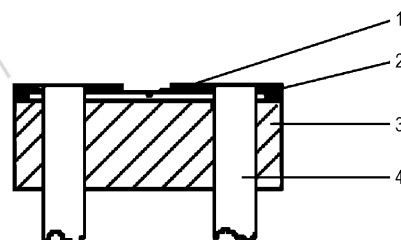


图 1 金属薄膜桥结构示意图

1—桥膜, 2—铜膜, 3—基底, 4—引线

Fig. 1 Sketch of metal film bridge structure

1—film bridge, 2—copper film, 3—substrate, 4—down-lead

对桥区采用蝶形设计, 两侧 V 字形开口的角度为  $60^\circ$ , 如图 2 所示。金属薄膜桥的制备工艺主要包括: 基片材料清洗、掩模安装、抽真空、充入惰性气、开启溅射电源、按预定时间溅射。

首先将基片放入丙酮溶液中浸泡 10 min, 再在乙醇中浸泡, 然后烘干, 确保基片表面油污去除干净<sup>[9]</sup>。将掩模安放在清洗好的陶瓷基片上, 保证中心位置对正。将覆有掩模的陶瓷基片放于溅射源正下方, 使溅

收稿日期: 2008-07-16; 修回日期: 2008-09-12

作者简介: 王广海(1982-), 男, 在读博士研究生, 研究方向为军事化学与烟火技术。e-mail: wangguanghai6666@163.com

射辉光刚好照在基片上。然后关闭钟罩,打开电源进行预抽真空,真空度达到 5 Pa 时,开动分子泵抽高真空。真空度达到  $5 \times 10^{-3}$  Pa 时,开启惰性气体,惰性气体用氩气,溅射气压设定在 0.6 Pa,溅射电压400 V,溅射电流 0.3 A。溅射一定时间后,溅射粒子沉积在基片上掩模中镂空的部位,形成薄膜图形。溅射完毕,关闭电源,冷却一段时间后,再开启钟罩将金属薄膜桥取出,换上焊盘掩模,重复以上过程,继续溅射。

溅射完成后的金属薄膜桥外形如图 2 所示。

### 3 金属薄膜火工品性能试验结果及分析

#### 3.1 金属薄膜桥性能试验

用金属 Ni-Cr 合金薄膜电桥作为发火样品,薄膜桥表面涂 15~20 mg 斯蒂芬酸铅(LTNR)。依照电火工品

测试标准中有关试验程序对 19 发样品进行了测试。

用薄膜电桥进行了安全电流试验(1 A、5 min)、抗静电试验(电容 500 pF,充电电压 25 kV,串联 5 kΩ 电阻对电桥进行放电)和 5 A 发火试验,结果见表 1。

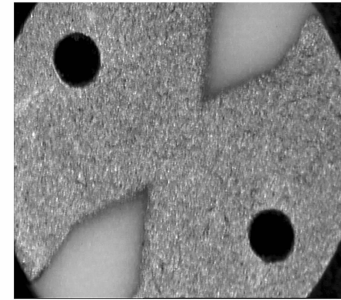


图 2 磁控溅射制备样品图

Fig.2 Sample made by magnetron sputtering

表 1 薄膜点火头试验结果

Table 1 Testing results of the thin film ignition

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
resistance/ $\Omega$	0.76	0.76	0.85	0.88	0.95	0.96	1	1	1.1	1.14	1.17	1.29	1.3	1.43	1.44	1.54	1.9	2.1	2.2
safe current/A									19 all passed										
antistatic									19 all passed										
5 A fire									19 all firing										

从表 1 可以看出,19 发样品在安全电流(1 A、5 min)试验、抗静电试验中均合格,说明此型金属薄膜桥在安全电流及抗静电性能方面性能优良。5 A 发火试验也全部发火,说明了其在一定能量作用下发火可靠性是较高的。发火后的金属薄膜桥如图 3 所示。

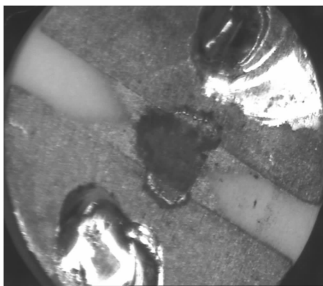


图 3 发火后蝶形金属薄膜桥

Fig.3 Papilionaceous film bridge after firing

上述试验结果可由下面的理论分析得到验证。

蝶形金属薄膜桥不同截面处的电阻值为:

$$R = \rho \frac{L}{Wd} \quad (1)$$

式中, $R$  为电阻值, $\Omega$ ;  $\rho$  为材料的电阻率, $\Omega \cdot m$ ;  $L$  为长度,mm;  $W$  为宽度,mm;  $d$  为厚度,mm。

取桥区左边中心点为原点,电流流向(即薄膜桥

电阻长度方向)为  $x$  轴,宽度方向为  $y$  轴,做直角坐标如图 4 所示。

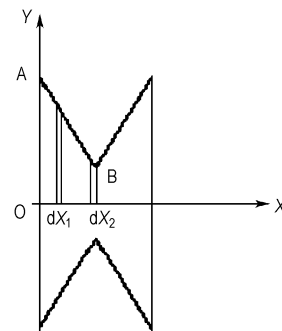


图 4 不同截面电阻分析图

A—电阻截面最大处, B—电阻截面最小处

Fig.4 Resistance of different sections

A—maximum section of resistance, B—minimum section of resistance

取电阻长度  $x$  方向左边缘一微元  $dx_1$ ,中心点一微元  $dx_2$ ,对公式(3)两边取微分,并用  $y$  替换  $W$ ,  $x$  替换  $L$ ,  $h$  替换  $d$  得:

$$dR_1 = \rho \frac{dx_1}{y_1 \cdot h} \quad (2)$$

$$dR_2 = \rho \frac{dx_2}{y_2 \cdot h} \quad (3)$$

其中,  $dx_1 = dx_2$ , 式(2)与式(3)之比:

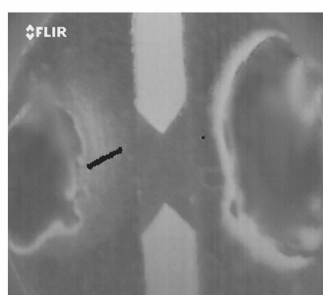
$$\frac{dR_1}{dR_2} = \frac{1}{1 + \sqrt{3}} \quad (4)$$

所以,金属薄膜桥中心微元处电阻与边缘微元处电阻关系为:

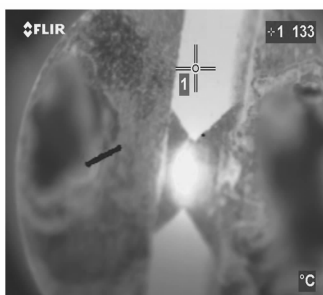
$$dR_2 = (1 + \sqrt{3}) dR_1 \quad (5)$$

金属薄膜桥中心微元处电阻值是边缘微元处电阻值的2.7倍。由式(5)可知,蝶形金属薄膜桥电阻在薄膜桥中心处电阻值最大。通电后该处电流密度最高,因此电能产生的焦耳热在此处也为最大。此处膜桥升温最快,易形成突破口,同时会因缺口的存在,容易形成热量聚集区利于点火。因此,V字形缺口保证了薄膜桥有良好的点火性能。

为了进一步验证薄膜桥通电时的热量分布,利用FLIR SYSTEMS公司红外热像仪A40-M对金属薄膜桥进行红外热像测试,薄膜桥通电前后热像图如图5所示。从图5b可以验证中心带有V字形缺口<sup>[11]</sup>的金属薄膜桥通入电流时,在V字形缺口处易形成能量聚集区。此处薄膜桥升温最快易形成突破口。



a. before electrifying



b. after electrifying

图5 金属薄膜桥红外热像图

Fig. 5 Infrared thermal imaging of thin film

### 3.2 力学、环境试验

将金属薄膜桥装配成电发火管,按照电火工品的相关测试程序对29发样品进行测试分别进行了加速度、振动、温度冲击、高低温等力学及环境试验。试验条件按照《SQDG-6钝感点发火管技术条件》执行,结

果见表2。结果表明,经过上述测试的金属薄膜桥电阻无变化。这表明磁控溅射法制备的金属薄膜桥具有良好的机械性能和热稳定性。

表2 力学、环境试验结果

Table 2 Results of mechanics and environment testing

No.	testing item	amount	results
1	acceleration	29	passed
2	impact	29	passed
3	oscillation	29	passed
4	temperature impact	29	passed
5	high and low temperature	29	passed

### 3.3 桥丝和薄膜桥火工品性能对比试验

金属Ni-Cr合金薄膜电桥、直径为23 μm的桥丝样品,薄膜桥表面涂15~20 mg LTNR。两种电点火头分别从一定电压值开始逐步加大直至发火,进行对比试验。10发样品的试验结果见表3和表4。

表3 桥丝点火头发火电压实验结果

Table 3 Firing voltage results of the wire bridge ignition

No.	charge voltage /V	resistance /Ω	load voltage /V	load current /A	results
1	5	1.4	3.4	2.4	unfired
2	7	1.2	5.2	4.3	unfired
3	10	1.4	7.8	5.6	unfired
4	13	1.4	10.6	7.6	firing
5	16	1.4	12.8	9.1	firing
6	19	1.4	16.5	11.8	firing
7	22	1.2	19.6	16.3	firing
8	25	1.1	22.3	20.3	firing
9	28	1.2	25.4	21.2	firing
10	31	1.2	28.5	23.7	firing

表4 薄膜桥点火头发火电压实验结果

Table 4 Firing voltage results of the thin film bridge ignition

No.	charge voltage /V	resistance /Ω	load voltage /V	load current /A	results
1	30	1.7	21.2	12.5	unfired
2	33	2.1	24.4	11.6	unfired
3	36	2.3	27.4	11.9	unfired
4	39	2.0	30.1	15.1	unfired
5	42	1.9	32.1	16.9	unfired
6	45	2.0	34.5	17.3	firing
7	48	2.2	37.0	16.8	firing
8	51	1.9	39.7	20.9	firing
9	54	2.1	43.0	20.5	firing
10	57	1.8	45.8	25.4	firing

由表3和表4可以看出,桥丝在加载电压为10.6 V左右时开始发火,而金属薄膜桥在加载电压为34.5 V左右开始发火。所以,这种金属薄膜桥的安全性具有明显优势。表中加载电压是指电容放电时测得的电火工品两端起始电压值。

上述结果可从下面的理论分析得到验证。

试验用薄膜桥桥区几何尺寸分别为,桥长  $l_1 = 1000 \mu\text{m}$ ,桥最窄处宽度  $w = 1000 \mu\text{m}$ ,桥膜厚度  $h = 1 \mu\text{m}$ ,夹角  $\theta = 60^\circ$ 。桥丝的几何尺寸为  $\phi = 23 \mu\text{m}$ ,长度  $l_2 = 610 \mu\text{m}$ 。

通过计算得薄膜桥的体积  $V_1 = 2 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ ,表面积  $S_{s1} = 3.12 \times 10^6 \mu\text{m}^2$ 。桥丝的体积  $V_2 = 2.53 \times 10^5 \mu\text{m}^3$ ,表面积  $S_{s2} = 4.4 \times 10^4 \mu\text{m}^2$ 。

薄膜电桥的静电感度试验依据 GJB 736.11-90<sup>[12]</sup> 进行。模拟人体带电条件,按脚脚放电连接引线。

静电放电时间常数  $\tau$  符合如下关系式:

$$\tau = RC \quad (6)$$

静电在桥膜上产生的热量:  $Q = I^2 R \tau$  (7)

将式(6)带入式(7)计算后得到静电通过串联电阻后在不同阻值桥膜上产生的热量为  $1.25 \times 10^{-2} \sim 5 \times 10^{-2} \mu\text{J}$ ,薄膜桥单位面积上的热量为  $2 \times 10^{-7} \sim 8 \times 10^{-7} \mu\text{J}/\mu\text{m}^2$ 。采用相同电阻值相同材料的桥丝在进行静电实验时,其单位面积上的热量约为  $3.5 \times 10^{-6} \mu\text{J}/\mu\text{m}^2$ ,约为薄膜桥单位面积热量的10倍。薄膜桥大表面积的结构有利于热量及时地散出,同时也使静电产生的焦耳热作用于药剂上的能量大量减少,因此能起到抗静电的作用。由于金属薄膜桥有较大的散热面积,因此其在安全电流方面性能优良。

## 4 结 论

(1) 通过安全电流、抗静电试验及薄膜桥与桥丝的对比试验结果可以看出:金属薄膜桥火工品有良好的安全性。动力、环境试验结果则说明其具有良好的机械性能。

(2) 磁控溅射法制备的蝶形金属薄膜桥,结构设计上桥中间具有对称的两个V字形缺口,通电后缺口处电流密度最高,此处薄膜桥升温最快,易形成突破口,同时会因缺口的存在,容易形成能量聚集区进而

点火。通过5A发火试验可以得出V字形缺口保证了薄膜桥有良好的点火能力。

## 参考文献:

- [1] 阿苏娜. 薄膜桥换能点火(起爆)器件研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2008.
- [2] 祝逢春, 徐振相, 陈西武, 等. 半导体桥火工品研究新进展[J]. 兵工学报, 2003, 24(1): 106-107.  
ZHU Feng-chun, XU Zhen-xiang, CHEN Xi-wu, et al. Progress on semiconductor bridge initiator[J]. *Acta Armamentarii*, 2003, 24(1): 106-107.
- [3] 叶迎华. 火工品技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007: 110-111.
- [4] Brattl G E. Electric igniter with conductive bodies and thin connector; United States Patent, US4335653[P], 1982.
- [5] Blix K C. Electric igniter; United States Patent, US4409898[P], 1983.
- [6] Peter G S, Frank M E. Electric igniter; UK Patent, GB2191566[P], 1987.
- [7] Toshiyuki Tsuchiya. Mechanical reliability evaluation and its standardization of thin films used in MEMS[D]. Kyoto: Kyoto University, 2004.
- [8] Jongdae K, Tae M R, Kyoung K C, et al. Optical characteristics of silicon semiconductor bridges under high current density conditions [J]. *Transaction on Electron Device*, 2001, 48(5): 201-202.
- [9] Hyo-Tae Choo, Suk-Hwan Yoon, Chong-Ook Park. Comparison of plasma generation behaviors between a single crystal semiconductor bridge (single-SCB) and a poly-silicon semiconductor bridge (poly-SCB)[J]. *Sensors and Actuators*, 2004, 115(1): 104-108.
- [10] 徐超, 李兆泽, 万红, 等. MEMS 固体微推进器中 Cr 薄膜点火电阻研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(5): 1413-1414.  
XU Chao, LI Zhao-ze, WAN Hong, et al. Research on the Cr membrane igniting resistance in MEMS solid propellant micro-thruster[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(5): 1413-1414.
- [11] 胡建书, 焦清介. 恒流作用下V型半导体桥电热特性研究[J]. 煤矿爆破, 2004, 71(4): 4-5.  
HU Jian-shu, JIAO Qing-jie. A study on the galvanothermy of V type semiconductor bridge under constant current[J]. *Coal Mine Blasting*, 2004, 71(4): 4-5.
- [12] GJB736.11-90. 国防科学技术委员会. 火工品试验方法-电火工品静电感度试验[S].

## Preparation and Properties of Thin Film Bridge EED

WANG Guang-hai, LI Guo-xin, A Su-na

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Department of School of Aerospace Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to improve the fire safety and reliability of an explosive device, a butterfly metal film bridge was prepared by adopting a magnetron sputtering technology with a mask. The bridge surface was smeared by 15-20 mg lead styphnate (LTNR). The current safety testing, antistatic testing and the bridge wire comparative testing were used to study its properties of safety and ignition. Infrared thermal imaging technology was used to verify the heat distribution of the thin film bridge. The results show that the metal film bridge has good anti-static, ignition and mechanical performances. The heat is concentrated in the narrowest part of the center.

**Key words:** military chemistry and pyrotechnics; metal film bridge; magnetron sputtering; explosive device; antistatic