

# Ni-Cr 合金薄膜桥结构的安全设计与性能研究\*

阿苏娜, 李国新, 王广海

(北京理工大学宇航科学技术学院, 北京 100081)

**摘要** 金属薄膜电桥结构是影响发火与安全性能的决定因素, 通过磁控溅射方法设计制备了2种不同结构的薄膜电桥, 并对其发火与安全性能进行了分析和测试。具有良好热散失性能的蝶形电桥结构抗静电能力强、具有良好的安全性能, 是一种安全型的电发火器件。

**关键词** 金属薄膜桥 磁控溅射 静电感度 安全性 焦尔热

## Security Design and Study of Characteristics Study of Ni-Cr Alloy Film Bridge

Asuna, LI Guoxin, WANG Guanghai

(Department of Mechatronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

**Abstract** The structure of the metal film bridge is the important decisive factor to in influencing the firing function and safety function. The two different film bridges were are produced by the magnetron sputtering, and the firing function and safety function were are tested and analyzed. The papilionaceous film bridge with the better hot heat dissipation ability can resist the static electricity and has the better security, and is the a kind of secure electrical igniter.

**Key words** metal film bridge, magnetron sputtering, static sense electrostatic sensitivity, security, joule hot heat

薄膜桥是新型桥类火工品, 它包括应用日益广泛的半导体桥, 爆炸桥膜等<sup>[1-3]</sup>。金属薄膜桥的电性能、安全性能一直是人们关切的问题。薄膜桥可以通过改变结构形状来改变其特性, 诸如发火能量、安全电流等, 以适应不同用途的需要。本文采用镍铬材料, 依据提高点火器件点火安全性的要求设计制备了两种不同形状的金属薄膜电桥, 并对其进行了安全电流试验、抗静电试验、发火电流试验等。实验结果表明, 带有良好热散失性能的蝶形薄膜电桥具有较高的安全性, 可以用于安全型发火器件。

### 1 金属薄膜桥的设计

#### 1.1 桥膜结构的确定

由波尔兹曼方程计算有尺寸效应的薄膜电阻:

$$\frac{\rho_{\infty}}{\rho} = 1 - \frac{3}{8} \frac{\lambda}{d} \quad (1)$$

为电子平均自由程,  $d$  为膜厚,  $\rho$  为膜电阻率,  $\rho_{\infty}$  为体电阻率。

可知, 薄膜较厚时 ( $\frac{d}{\lambda} \gg 1$ ),  $\frac{\rho_{\infty}}{\rho} \approx 1$ , 而自由电子平均自由程都是几十纳米量级, 当  $d > 200\text{nm}$  时, 视  $\rho$  与  $\rho_{\infty}$  一致<sup>[4]</sup>。在实际薄膜制备过程中, 由于薄膜存在的各种缺陷的原因, 使得  $\rho$  是  $\rho_{\infty}$  的 1.3~2 倍。

在电火工品的发火电路中, 火工品产生的焦尔热与电阻成正比。为了得到较好的火工品不发火性能, 即安全性, 桥膜电阻小一些较为有利, 但太小又不利于发火, 通过实验表明, 镍铬合金在特定配比条件下, 一般电阻  $R$  取 1.5 左右为好。由

$$R = \rho \frac{L}{Wd} \quad (2)$$

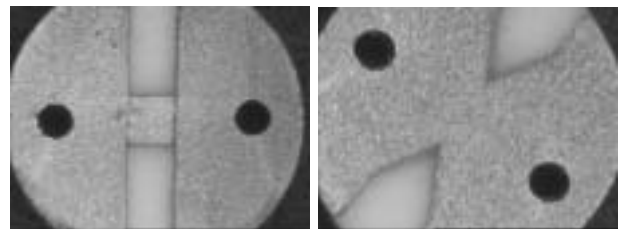
其中,  $L$  为桥长,  $W$  为桥宽,  $d$  为桥膜厚度, 得出:

$$\frac{W}{L} = \frac{\rho}{Rd} \quad (3)$$

对于桥区尺寸的选择, 除受 1.5 电阻大小限制外, 还与安全电流及临界能量有关。在临界发火能量与桥横截面积试验中, 临界发火能量随着桥的横截面积增大而增大。而临界发火能量:

$$E = I^2 Rt \quad (4)$$

对于火工品, 一般以临界发火能低些为好, 所以, 横截面积小一些为好。此外, 火工品平面面积也不宜太大, 面积大使加热药剂面积增大而不易发火或发火时间增长。这就要求桥膜厚些好。有关研究表明<sup>[5]</sup>, 一般厚度  $d$  取  $0.5 \mu\text{m}$  左右为宜。依据以上条件设计了两种不同形状的薄膜桥, 如图 1 所示。



(a) 长方形金属薄膜桥

(b) 蝶形金属薄膜桥

图 1 金属薄膜桥放大照片

Fig.1 amplificatory picture of metal film bridge

实验表明, 图 1(b) 中蝶形金属薄膜桥发火区域更集中于中部, 发火能量更集中, 本试验采取图 1(b) 所示金属薄膜桥进行实验。

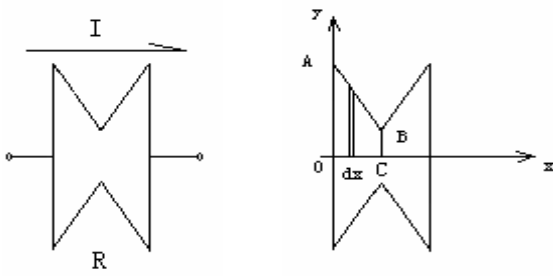
#### 1.2 金属薄膜桥电阻分析

采用积分法对图 1(b) 所示蝶形金属薄膜桥电阻随桥长

\* 973 项目

阿苏娜: 女, 1978 年出生, 博士

的变化进行分析。电流在薄膜桥电阻中的流向如图 2 (a)所示。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 2(b)所示。



(a)金属桥膜电阻电流流向图 (b)电阻分析图

图 2 金属薄膜桥电阻计算

Fig.2 the resistance count of the metal film bridge

$$\frac{1+\sqrt{3}}{2}$$

图 2(b)中已知 A 点坐标(0,  $\frac{1+\sqrt{3}}{2}$ ), B 点坐标(0.5, 0.5), C 点坐标(0.5, 0), 则可知直线 AB 方程为:

$$y = -\sqrt{3}x + \frac{1+\sqrt{3}}{2} \tag{5}$$

取电阻长度  $x$  方向一微元  $dx$ , 对公式(2)两边取微分, 并用  $y$  替换  $W$ ,  $x$  替换  $L$ ,  $h$  替换  $d$  得:

$$dR = \rho \frac{dx}{y \cdot h} \tag{6}$$

将公式(5)带入公式(6), 取积分:

$$\int dR = \int_0^x \rho \frac{dx}{(-\sqrt{3}x + \frac{1+\sqrt{3}}{2})h} \tag{7}$$

对式(7)积分得:

$$R = -\frac{\sqrt{3}\rho}{3h} \ln \left| x - \frac{1+\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} \right| + \frac{\sqrt{3}\rho}{3h} \ln \frac{1+\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} \tag{8}$$

由电阻串联特性可知, 整个桥区电阻大小等于区域 OABC 所围面积电阻大小。因此, 式(8)所得电阻值即为金属薄膜桥电阻值。其中,  $h$  为薄膜厚度取  $0.5 \mu\text{m}$ , 取体电阻率的 1.5 倍, 约为  $150 \mu$ 。电阻  $R$  随薄膜桥长度  $x$  变化的关系图如图 3 所示。

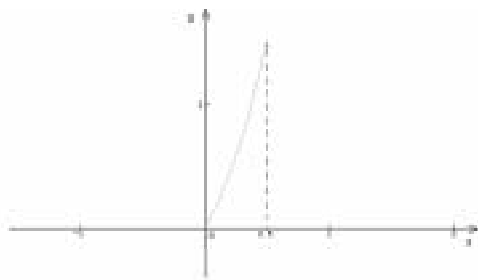


图 3 电阻随长度变化关系图

Fig. 3 resistance-length curve

电阻随薄膜桥长度成对数规律变化, 由式(8)可知, 电

阻值在  $x=0.5\text{mm}$  处达到最大值, 约为 1.6。

对蝶形金属薄膜桥不同截面处的电阻值进行分析计算, 电流流向如图 2(a)所示。取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。

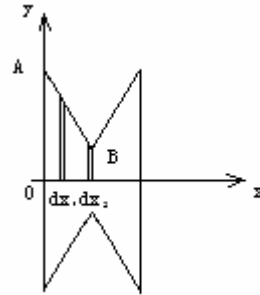


图 4 不同截面电阻分析图

Fig.4 the resistance of the difference section

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(2)两边取微分, 并用  $y$  替换  $W$ ,  $x$  替换  $L$ ,  $h$  替换  $d$  得:

$$dR_1 = \rho \frac{dx_1}{y_1 \cdot h} \tag{9}$$

$$dR_2 = \rho \frac{dx_2}{y_2 \cdot h} \tag{10}$$

其中,  $dx_1=dx_2$ , 式(9)比式(10)得:

$$\frac{dR_1}{dR_2} = \frac{1}{1+\sqrt{3}} \tag{11}$$

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:

$$dR_2 = (1+\sqrt{3})dR_1 \tag{12}$$

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(8)和式(12)可知, 蝶形金属薄膜桥电阻在薄膜桥中心处电阻值最大, 因此电能产生的焦耳热在此处也为最大。

对长方形金属薄膜电桥采用相同的方法进行计算, 得:

$$R = 2\rho \frac{x}{h} \tag{13}$$

电阻随长度增加呈线性变化。电阻  $R$  随薄膜桥长度  $x$  变化的关系图其变化趋势如图 5 所示。

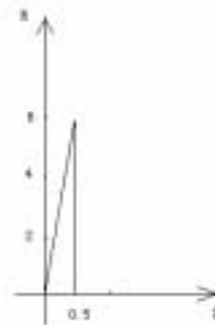


图 5 长方形薄膜桥电阻随长度变化关系图

Fig.5 the resistance of the rectangle film bridge and length curve

长方形金属薄膜桥横截面未发生变化, 因此电阻值随

横截面积也未发生变化。

由以上分析计算可知,蝶形金属薄膜桥由于其横截面积的变化,在整个桥区中心横截面处存在极大电阻值,而长方形金属薄膜桥由于横截面积在整个桥区未发生变化,不存在极大电阻值。所以,电流在蝶形金属薄膜桥区中心产生的焦耳热比在长方形金属薄膜桥区产生的焦耳热更为集中,更能有效地利用电能使药剂发火。

## 2 发火与安全性试验

### 2.1 试验条件及试验结果

金属薄膜电桥共 19 发,上涂 15~20mg 敏感药。依照抗静电,安全电流,发火的试验程序进行测试。

薄膜电桥 19 发进行了安全电流试验(1A、5min)、抗静电试验(电容 500pF,充电电压 25000V,串联 5k 电阻对电桥进行放电)和 5A 发火试验,薄膜电桥全部正常发火。实验结果见表 1,发火后金属薄膜桥如图 6,爆炸区域在薄膜桥中心半径 0.5mm 范围内。

表 1 薄膜点火头试验结果

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
电阻/	0.76	0.76	0.85	0.88	0.95	0.96	1	1	1.1	1.14
序号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
电阻/	1.17	1.29	1.3	1.43	1.44	1.54	1.9	2.1	2.2	
安全电流/A	19 发全合格									
抗静电	19 发全合格									
5A 发火	19 发全发火									



图 6 发火后蝶形金属薄膜桥

Fig. 6 the papilionaceous film bridge after firing

### 2.2 实验结果分析

从试验结果可以看出,金属薄膜桥电阻在 0.76~2.21 的变化范围内均通过抗静电、安全电流、发火试验,具有较高的安全性和点火可靠性。

薄膜电桥的静电感度试验依据 GJB 736.11-90 进行。模拟人体带电条件,按脚部放电连接引线。

静电放电时间常数  $\tau$  符合如下关系式<sup>[6]</sup>:

$$\tau = RC \tag{14}$$

静电在桥膜上产生的热量:

$$Q = I^2 R \tau \tag{15}$$

将式(14)带入式(15)计算后得,静电通过串联电阻后在不同阻值桥膜上产生的热量在  $(1.25 \sim 5) \times 10^{-5} \text{mJ}$  之间,桥膜单位面积上的热量为  $(0.83 \sim 3.3) \times 10^{-5} \text{mJ/mm}^2$  到。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为  $33 \times 10^{-5} \text{mJ/mm}^2$  左右,是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,从而有效地实现了抗静电的功效。

金属桥膜火工品较高的安全性与其结构有很大关系。在进行结构设计时,应从桥膜表面积、散热面积、桥膜厚度等几个角度来考虑。一般情况下,表面积大、散热面积大的桥膜安全电流高,这是因为散热面积大的薄膜桥热损失系数较大,有利于将电流在薄膜桥区产生的焦耳热散失出去,减少热量的积累,使热量达不到药剂发火的能量,从而提高薄膜桥火工品的安全性。

## 3 结论

由本次试验可得出如下结论:

(1)蝶形金属薄膜桥由于其横截面积的变化,在整个桥区中心横截面处存在极大电阻值,而长方形金属薄膜桥由于横截面积在整个桥区未发生变化,不存在极大电阻值。所以,电流在蝶形金属薄膜桥区中心产生的焦耳热比在长方形金属薄膜桥区产生的焦耳热更为集中,更能有效地利用电能使药剂发火。

(2)薄膜桥火工品的安全性与桥的结构有很大关系。设计具有良好热散失性能的蝶形散热面积大的桥区结构有利于静电的释放,从而使火工品达到防静电的功效。同时对提高薄膜桥安全性有很大关系。散热面积大,热损失系数大,电流在桥膜上产生的焦耳热可以通过薄膜表面及时散失出去,从而可以提高薄膜桥火工品的安全性。

## 参考文献

- 1 Toshiyuki Tsuchiya. Mechanical Reliability Evaluation and Its Standardization of Thin Films Used in MEMS. Kyoto University, Kyoto, Japan, 2004. 606
- 2 Jongdae Kim, Tae Moon Roh, Kyoung-IK Cho, et al. Optical characteristics of silicon semiconductor bridges under high current density conditions. IEEE Trans on Electron Devices, 2001, 48(5): 852
- 3 Hyo-Tae Choo, Suk-Hwan Yoon, Chong-Ook Park. Comparison of plasma generation behaviors between a single crystal semiconductor bridge (single-SCB) and a polysilicon semiconductor bridge (poly-SCB). Sensors and Actuators, A: Physical, 2004, 15(1): 104
- 4 王力衡. 薄膜技术. 北京: 清华大学出版社, 1991
- 5 张丙辰编译. 半导体技术与火工品译文集. 西安: 213 所, 1991. 56
- 6 杨有启. 静电安全技术. 北京: 化学工业出版社, 1983. 9