

文章编号:1006-9941(2009)05-0616-03

## 光谱辐射测量金属薄膜桥电爆炸温度

王广海, 李国新, 焦清介, 刘桂林

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:**采用光谱辐射法测量了 Ni-Cr 金属薄膜桥的电爆炸温度。通过六通道瞬态光学高温计测量金属薄膜桥电爆炸时在 514 nm、631 nm、692 nm、715 nm、910 nm、1068 nm 波长处的辐射强度,根据黑体辐射理论计算温度值。研究表明,金属薄膜桥在 50 V、100  $\mu$ F 条件下电爆炸时的最高温度在 5000 K 左右,4000 K 以上持续时间为 300 ns。

**关键词:**军事化学与烟火技术; Ni-Cr 薄膜; 电爆炸; 光谱

**中图分类号:**TJ450.1

**文献标识码:**A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.05.027

### 1 引 言

金属薄膜桥电爆炸温度是研究薄膜桥点火(起爆)机理的重要参数。由于薄膜桥电爆炸温度高持续时间长,因此给测试带来一定难度。采用温度传感器测量很难实现,而光学辐射法是研究瞬态发光物质温度的有效途径。其特点是响应时间快,测量准确<sup>[1]</sup>。

南京理工大学冯红艳等<sup>[2]</sup>利用原子发射光谱双谱线法测量半导体桥等离子体温度。吴俊英等<sup>[3]</sup>用光学辐射法研究了金属电爆炸等离子体辐射温度。文献[4-5]也利用此方法分别测量了金属冲击波温度和氩气等离子体温度。其原理是采用多通道光学辐射高温计测量发光物质不同波长下的辐射谱线。根据普朗克黑体辐射定律,可把在不同波长下的光谱辐射亮度转化成相应发光物质的辐射温度,这为本研究提供了思路。

但有关 Ni-Cr 金属薄膜桥电爆炸温度的研究尚未见报道。本实验采用六通道瞬态光学高温计测量系统研究了 Ni-Cr 金属薄膜桥在 50 V、100  $\mu$ F 条件下的电爆炸温度。

### 2 实 验

实验系统主要由电火工品点火装置和光学高温计两部分构成,图 1 为整个测试系统简图。光学高温计工作波长复盖范围为 514~1068 nm,可测温度范围为 2000~9000 K,响应时间为 20 ns,测量温度的均方根相对误差为 3%。

试验前需对测温系统进行标定,以获得标准信号,

作为确定待测薄膜桥辐射度的尺度。该高温计的标定是在高频加热钨灯上进行的。钨灯在一定功率下的辐射温度是一定的,标定后的系统为样品的准确测量提供了依据。

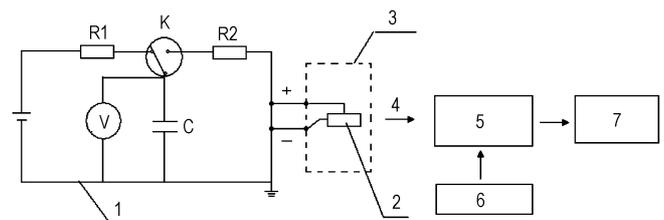


图 1 多波段光学高温计测温示意图

- 1—脉冲点火装置, 2—金属薄膜桥, 3—爆炸箱,  
4—光纤, 5—多波段光学高温计, 6—电源,  
7—示波器, V—静电电压表, R<sub>1</sub>—充电电阻,  
R<sub>2</sub>—串联放电电阻, K—高压开关, C—电容器

Fig. 1 Diagram of multi-band optical temperature measurement  
1—ignition pulse power, 2—metal film bridge, 3—explosive box,  
4—optical fibre, 5—multi-band optical temperature measurement,  
6—power supply, 7—oscillograph, V—static voltmeters,  
R<sub>1</sub>—charging resistor, R<sub>2</sub>—series discharging resistance,  
K—high-voltage switch, C—capacitor

试验用金属桥膜如图 2 所示,电阻为 3  $\Omega$ ,尺寸为 1 mm  $\times$  1 mm,厚度为 1  $\mu$ m。点火电压为 50 V,电容量为 100  $\mu$ F。测试是在常温、金属薄膜桥不装药的条件下进行的。当火工品点火装置的开关闭合时,储能电容器对金属薄膜桥瞬时放电,形成脉冲大电流,桥膜在焦耳热的作用下迅速升温、气化或电离并发出光亮直至烧断。发光物质的辐射信号由光纤接收耦合,传输到高温计各通道,干涉滤光片对辐射光谱进行选择,选择波长在各通道半波宽内的光信号通过,光电倍增管将光信号转换成电信号,并放大,由示波器记录。

收稿日期:2009-02-26;修回日期:2009-03-30

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

### 3 金属薄膜桥发光辐射温度计算

光学高温计只能直接记录到辐射体的辐射强度随时间变化曲线。要得到辐射体温度，通常假设辐射体满足黑体辐射定律。这样对于温度为  $T$  的辐射体，光谱分布强度应遵循普朗克公式<sup>[6]</sup>：

$$I_{gre}(\lambda, T) = \varepsilon I_{pl}(\lambda, T) \quad (1)$$

$$I_{pl}(\lambda, T) = \varepsilon C_1 \lambda^{-5} [e^{c_2/\lambda T} - 1]^{-1} \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为波长, nm;  $T$  为温度, K;  $C_1 = 1.1910 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ , 为第一辐射常数;  $C_2 = 1.438 \times 10^{-12} \text{ m} \cdot \text{K}$ , 为第二辐射强度;  $I_{gre}$  和  $I_{pl}$  分别为灰体辐亮度和 Planck 辐亮度;  $\varepsilon$  为灰体发射率。根据样品光谱辐照亮度实验采用最小二乘法就可计算电爆炸时的光谱辐射温度  $T$ 。

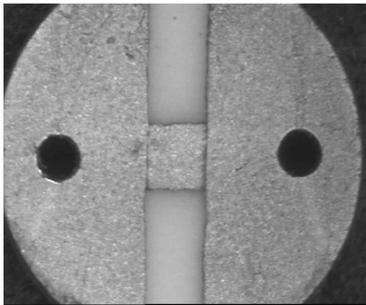


图 2 金属薄膜桥样品照片

Fig. 2 Photograph of metal thin film bridge sample

多通道高温计的每个观测通道实质上相当于工作于不同波长下的一个辐射能量测量计。它们各自的测量精度是不同的。对同一温度  $T$  进行观测时, 根据 Planck 辐射定律, 每个通道测得的  $I_{exp}$  是不等精度的。因此, 在进行数据处理时, 文献[7]给出了不等权最小二乘法拟合方法。其拟合结果为：

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{\lambda} \frac{I_{exp}}{I_{pl}} \quad (3)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dT} = -\frac{1}{n} \sum_{\lambda} \frac{C_2}{C_1} \left[ \lambda^4 e^{c_2/\lambda T} \frac{I_{exp}}{T^2} \right] \quad (4)$$

### 4 试验结果及分析

图 3 是利用六通道瞬态光学高温计测得的 Ni-Cr 金属薄膜桥光谱辐射强度随时间变化的示波器记录信号。分别记录 514 nm、631 nm、692 nm、715 nm、910 nm、1068 nm 六个工作波长处的辐照强度。从图 3 中可以看出金属薄膜桥在 50 V、100  $\mu\text{F}$  的条件下电爆炸, 其光谱辐射强度在 514 nm 波长通道的幅度值最大, 信号幅度峰值达到 0.035 V。在 631 nm 波长处光谱辐射强度也较大。最小的是 1068 nm 波长处信号幅

度值不足 0.005 V。另外从时间上来看持续时间基本在 800 ns 左右。

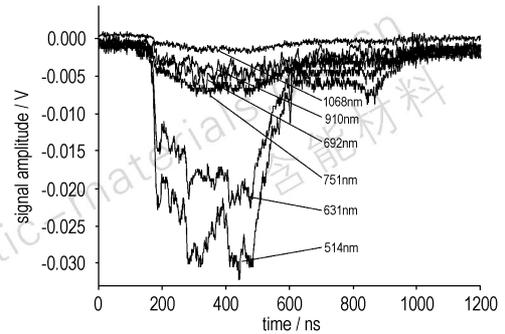


图 3 辐照高温计测量信号记录

Fig. 3 Signal records of radiation pyrometer

根据图 3 中测得的光谱辐照强度随时间变化数据, 将六通道所测得的光谱辐照强度进行叠加拟合。利用式(4)并采用辐照测量系统所带的计算机软件进行计算, 得出辐照温度随时间变化, 如图 4 所示。从图 4 中可以看出, Ni-Cr 金属薄膜桥电爆炸时光谱辐照最高温度接近 5000 K, 桥膜电爆炸后温度迅速达到最高值然后降低, 温度在 4000 K 左右的持续时间约为 300 ns, 然后迅速降低到 1500 ~ 2000 K。

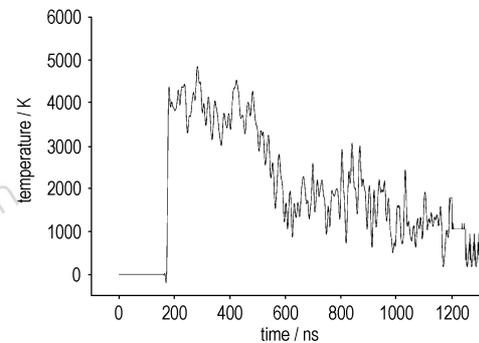


图 4 Ni-Cr 金属薄膜电爆炸温度时间曲线

Fig. 4  $T-t$  curve of electrical explosion of Ni-Cr thin film bridge

Ni-Cr 金属薄膜桥电爆炸最高温度接近 5000 K, 对比半导体桥电爆炸温度 2829 ~ 7981 K<sup>[7]</sup>, 说明在电爆炸时可能产生了等离子体。从文献[8]中可知 Ni-Cr(80/20)合金的熔化温度 1728 K, 气化温度为 3000 K, 因此无论是熔化还是气化, 其最高温度也就在 3000 K 左右。由此可见, 金属薄膜桥在 50 V、100  $\mu\text{F}$  条件下电爆炸机理与普通桥丝的热传导和热辐射原理可能会有所不同, 从温度分布和时间分布判断, 具有等离子体电爆炸的特征。并且从文献[9]中还可以得到电弧等离子体的温度 5000 ~ 50000 K 属于低温等离子体。因此, 根据本试验测量结果分析, 薄膜桥在一定刺

激能量下,应考虑用等离子体动力学和能量辐射原理研究其电爆炸机理。

## 5 结 论

根据光学测温法原理,利用六通道光学高温计测量了金属薄膜桥电爆炸时的温度,实验证明光谱辐射法测量瞬态高温物质是可行的。

研究表明,Ni-Cr 合金薄膜桥在 50 V,100  $\mu$ F 条件下电爆炸最高温度接近 5000 K,高温持续时间小于 300 ns,为进一步研究金属薄膜桥与含能材料作用机理提供了重要的参数。

### 参考文献:

- [1] 李春芳. 光学测温技术及其新进展[J]. 武汉科技学院学报, 2002,18(7): 66-67.  
LI Chun-fang. Optical temperature measurement technology and its new progress [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Engineering*, 2002,18(7): 66-67.
- [2] 冯红艳,李艳,张琳等. 原子发射光谱双谱线法测量半导体桥(SCB)等离子体温度[J]. 含能材料,2007,15(2): 135-136.  
FENG Hong-yan, LI Yan, ZHANG Lin, et al. Measurement of the semiconductor bridge (SCB) plasma temperature by the double line of atomic emission spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2007,15(2): 135-136.
- [3] 伍俊英,冯长根,陈朗,等. 金属电爆炸等离子体辐射温度测量[J]. 战术导弹技术,2006,9(5): 31-33.  
WU Jun-ying, FENG Chang-gen, CHEN Lang, et al. Plasma radiation temperature measurement of metal explosion [J]. *Tactical Missile Technology*, 2006,9(5): 31-33.
- [4] 谭华. 金属的冲击波温度测量[J]. 高压物理学报,1994,8(4): 254-263.  
TAN Hua. Shock temperature measurements for meatal [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1994,8(4): 254-263.
- [5] 王藩侯,经福谦. 应用高温计测量氩等离子体温度[J]. 原子与分子物理学报,2002,19(4): 443-445.  
WANG Pan-hou, JING Fu-qian. Application of high-temperature measurements of argon plasma temperature [J]. *Chinese Journal of Atomic and Molecular Physics*, 2002,19(4): 443-445.
- [6] 彭利军. 光学测温中的物理原理[J]. 物理测试,2006,24(5): 74.  
PENG Li-jun. Physical principles in technology of optical temperature measurement physics [J]. *Examination and Testing*, 2006,24(5): 74.
- [7] 张文超,周斌,王文,等. 半导体桥等离子体温度的原子发射光谱测量[J]. 原子与分子物理学报,2008,25(2): 313-315.  
ZHANG Wen-Chao, ZHOU Bin, WANG Wen, et al. Measurement of semiconductor bridge plasma temperature using spectroscopic method [J]. *Journal of Atomic and Molecular Physics*, 2008,25(2): 313-315.
- [8] 王振东,宫元生. 电热合金[M]. 北京: 化学工业出版社,2006.
- [9] 韦福水. 电弧等离子体温度的光谱测量技术[J]. 电焊机,1981,2(1): 20-21.  
WEI Fu-sui. Temperature of plasma spectroscopy measurement technologies [J]. *Electric Welding Machine*, 1981,2(1): 20-21.

## Electrical Explosion Temperature of Metal Thin Film Bridge Measured by Spectrum Radiation Method

WANG Guang-hai, LI Guo-xin, JIAO Qing-jie, LIU Gui-lin

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

**Abstract:** The electrical explosion temperature of Ni-Cr thin film bridge was studied by the spectrum radiation method. The radiation intensity was measured at wavelength of 514 nm, 631 nm, 692 nm, 715 nm, 910 nm, 1068 nm via six-channel instantaneous optical pyrometer, respectively, when metal thin film bridge fired, and then the ignition temperature was calculated based on blackbody radiation theory. Results shows that when metal thin film bridge is exploded in the conditions of 50 V and 100  $\mu$ F, the maximum temperature is around 5000 K, and the duration time which the temperature is maintained above 4000 K is 300 ns.

**Key words:** military chemistry and pyrotechnic engineering; Ni-Cr thin film bridge; electrical explosion; spectrum