

# 基于光纤荧光的电火工品电磁脉冲危害的测试研究

刘兰书<sup>1,2</sup> 杜 翀<sup>3\*</sup> 张文松<sup>1</sup> 何亮明<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049  
<sup>3</sup> 中国科学院嘉兴无线传感网工程中心, 浙江 嘉兴 300381

**摘要** 用荧光光纤测温法对电火工品的电磁脉冲危害进行测试。从荧光测温的理论和实验两方面证明了该方法的可行性。根据不同温度下受激荧光材料发出的荧光的寿命不同, 确定电火工品的温度, 进而得到感应电流, 最后完成电火工品的电磁脉冲危害测试。实验数据表明, 本文方案可以精确、实时地对电火工品电磁脉冲危害进行测试, 对研究电火工品的安全性与可靠性具有一定的意义。

**关键词** 电火工品; 电磁脉冲危害; 荧光寿命; 感应电流

**中图分类号** TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100203

## Measurement Research on Electromagnetic Pulse Hazard for Electroexplosive Device Based on Optical-Fiber Fluorescence

Liu Lanshu<sup>1,2</sup> Du Chong<sup>3</sup> Zhang Wensong<sup>1</sup> He Liangming<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>3</sup> Jiaxing Wireless Sensor Networks Engineering Center, Chinese Academy of Sciences, Jiaxing, Zhejiang 300381, China

**Abstract** An optical-fiber fluorescence temperature detect system was proposed for hazard analysis and measurement of electromagnetic pulse of the electroexplosive devices (EED). The feasibility of the method was investigated in both theory and experiment. Different temperatures of EED can be obtained through different fluorescence lifetime, then the induced current is obtained, and finally the hazard of electromagnetic pulse of EED is measured. Experiment results show the system can analyze and measure the hazard of electromagnetic pulse of EED accurately and real-timely, so it is helpful to the research of security and reliability of EED.

**Key words** electroexplosive device; hazard of electromagnetic pulse; fluorescent lifetime; induced current

**OCIS codes** 060.2370; 230.0040; 040.5160

## 1 引 言

电火工品(EED)在火箭、导弹、引信上有着广泛的应用,其中灼热桥丝式电火工品最为常见。当桥丝及天线回路置于交变的磁场中,此回路中会产生感应电流,如果桥丝内的感应电流过大,就会引起意外发火和引爆<sup>[1]</sup>。因此测量处于交变磁场中的电火

工品的感应电流,从而测试电火工品的电磁脉冲危害这很有必要。

通常不直接测量电火工品电磁辐射下的感应电流,而是通过测量电火工品桥丝的温度,依据温度与输入电流的关系来确定桥丝上的感应电流。传统方法大多采用热电偶和热敏电阻等来对桥丝的温度进

收稿日期: 2010-08-23; 收到修改稿日期: 2010-11-02

基金项目: 国家 973 计划资助课题。

作者简介: 刘兰书(1985—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: lixiuyun120@126.com

导师简介: 张文松(1979—),男,硕士,副研究员,主要从事光纤器件方面的研究。E-mail: zhangwensong@opt.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: duc@mail.sim.ac.cn

行测量,但是在电磁环境下,测量电路本身会产生感应电流发热升温从而使测量结果有很大的误差<sup>[2]</sup>,结论的可靠性不高;同时这种方法的另一个缺点是系统的响应时间较慢。本文提出的荧光光纤测温法具有抗电磁干扰、稳定可靠、高精度、高灵敏度、响应速度快和适应性好等特点,非常适合于电磁环境下的温度监测<sup>[3]</sup>。

## 2 原 理

荧光物质在受到一定波长(受激谱)的光辐射后,电子吸收光子从低能级跃迁到激发态高能级,从高能级返回到低能级的辐射跃迁中发出荧光。激励停止后,受激发荧光通常是按指数方式衰减的,荧光衰减曲线如图 1 所示。

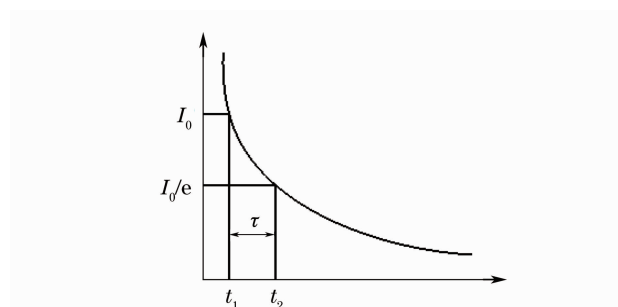


图 1 荧光衰减曲线

Fig. 1 Fluorescent decay curve

在激励脉冲终止后,取荧光指数衰落曲线上两个特定的强度值,激励脉冲终止时间  $t_1$ ,衰落信号的强度值为  $I_0$ ,当衰落信号达到第二个值  $I_0/e$  时,时间为  $t_2$ 。 $t_1$  和  $t_2$  的间隔就是指数衰落信号的时间常数  $\tau$ ,时间常数  $\tau$  可以用来测量荧光寿命。

研究证明,在不同的环境温度下,荧光寿命也不同。荧光寿命与温度的关系可表示为<sup>[4]</sup>

$$\tau_F(T) = \frac{1 + \exp[\Delta E/(kT)]}{R_E + R_T \exp[\Delta E/(kT)]}, \quad (1)$$

式中  $R_E, R_T, k, \Delta E$  均为常数,  $T$  为绝对温度。

因此通过测量荧光寿命的长短,就可以得知当前的环境温度。

通过理论计算,电火工品桥丝电流与温度的关系可表示为<sup>[5]</sup>

$$T = T_0 + \frac{I^2 R l^2}{m C_p 8 D}, \quad (2)$$

式中  $I$  是桥丝内的电流,  $R, l$  和  $m$  分别是桥丝的电阻、长度和质量,  $D$  是桥丝的热扩散系数,  $C_p$  是桥丝的比热,  $T_0$  为室温。即对于一已知桥丝,电流和温度的关系可写为

$$T = T_0 + C I^2, \quad (3)$$

式中  $C$  为由桥丝材料和尺寸决定的常量。

通过(1)~(3)式可以看出,荧光寿命  $\tau$  是温度  $T$  的函数,  $T$  与电流的平方成线性关系。利用电火工品的桥丝温度和电流的对应关系,通过荧光光纤测温法测量出桥丝的温度,就可以实现对桥丝电流的测量。

## 3 实验过程

实验中用的光源是发射中心波长为 575 nm 的绿色超高亮发光二极管(LED);滤光片对 575 nm 波长的光全部反射,对荧光全部透射,光源发出的光经滤光后,其成分主要是中心波长为 575 nm 的绿光;耦合选用的是塑料凸透镜,其作用是将绿光耦合进光纤;光纤是 1 mm 的多模粗光纤,用来传输绿光进入传感头;传感头中的温敏材料用的是红宝石晶体,在 575 nm 的绿光激励下,将激发出幅度随时间衰减的 690 nm 的荧光,这种携带温度信息的荧光经滤波片透射、透镜耦合,由光纤送到光电转换部分。经转换得出的电流,送到信号处理系统进行数据处理。通过对采集的大量数据进行最小二乘法拟合分析处理得出荧光余辉寿命  $\tau$ ,进一步运算便可得出相应温度值。同时通过显示部分显示出实时温度值及整个测试过程中的温度变化趋势<sup>[6]</sup>。温度-荧光寿命特性曲线如图 2 所示,实验装置如图 3 所示。

为了提高测量精度,探头要精确对准桥丝<sup>[7]</sup>。采用一种自行设计的支座来保证桥丝与探头插入孔严格同轴,这样探头贴着桥丝中部,就更易测得桥丝中部最高温度。整个支座采用聚四氟乙烯,为非金属材料,它对桥丝的电流以及周围的电磁场没有影响,保证了测量结果的准确性。图 4 为桥丝和支撑装置示意图。

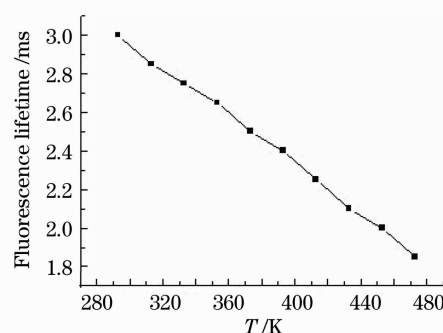


图 2 荧光寿命与温度之间的关系

Fig. 2 Relationship between fluorescence lifetime and temperature

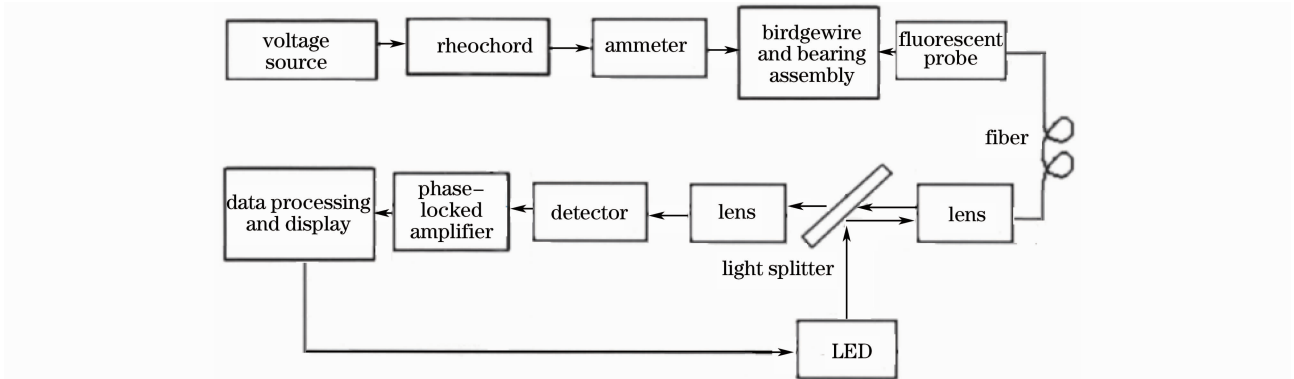


图 3 实验装置

Fig. 3 Experimental setup

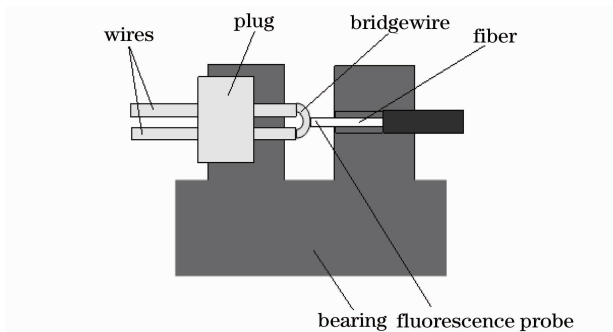


图 4 桥丝和支撑装置

Fig. 4 Bridgewire and bearing setup

实验中 LED 发出的光经分光片被反射进入光纤，从而传输到探头激发荧光，被激发的荧光经温度调制后同样经过光纤由分光片透射，经透镜会聚到探测器上。分光片上镀有增透增反膜，对 LED 发出的特定波长的光反射，对荧光透射，并且分光片的放置有严格的角速度控制，从而保证了探测器接收到的光不被 LED 的光干扰，信噪比大大提高。

#### 4 实验结果和讨论

实验时，给电火工品输入电流，系统平衡后读出一对电流与温度变化值。调节电流调节器，以约 5 mA 为步长递增，给桥丝输出 0~80 mA 的电流。实验中所用桥丝电阻为 5.7 Ω，直径 12 μm，长 10 mm，得到的数据如表 1 所示。

所得数据经拟合后得到输入电流与温度变化平方根的关系曲线，如图 5 所示。

对于该电火工品，用荧光光纤测温法测出在电磁脉冲干扰的情况下其桥丝的温度变化，再根据图 5 的拟合曲线，便可得到这种电火工品在这样的电磁脉冲情况下的感应电流  $I$ 。

表 1 桥丝输入电流与传感器输出温度变化数据表  
Table 1 Response temperature variation for different currents in bridgewire

Groups	$I / \text{mA}$	$\Delta T / ^\circ\text{C}$
1	0	0
2	5	0.11
3	10	0.68
4	15	1.65
5	20	3.03
6	25	4.70
7	30	6.89
8	35	10.37
9	40	13.26
10	45	16.81
11	50	20.83
12	55	24.67
13	60	30.00
14	65	34.30
15	70	41.37
16	75	46.87
17	80	52.94

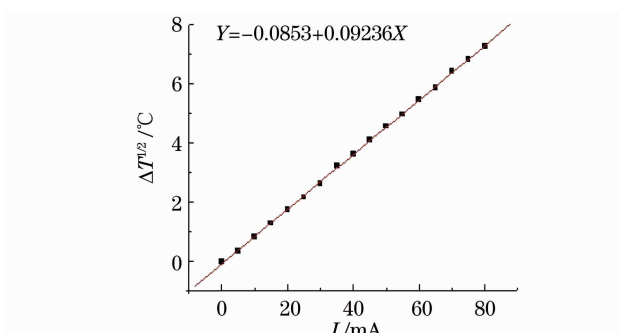


图 5 桥丝的输入电流与温度变化平方根间的拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of current  $I$  and the square root of temperature variation  $\Delta T^{1/2}$

系统的精确度和不确定度测量分析如下:

取电火工品的输入电流为 50 mA, 测量系统的精确度和不确定度。实验测得的温度变化值如表 2 所示。

表 2 电火工品输入电流为 50 mA 时测得的温度变化数据表

Table 2 Temperature variations when the input current of the EED is 50 mA

Groups	$\Delta T / ^\circ\text{C}$	$u_i$
1	20.79	-0.05
2	20.83	-0.01
3	20.86	+0.02
4	20.83	-0.01
5	20.88	+0.04

测量值的算术平均值为

$$\Delta\bar{T} = \frac{(20.79 + 20.83 + 20.86 + 20.83 + 20.88)}{5} = 20.84. \quad (4)$$

剩余误差用公式  $u_i = \Delta T_i - \Delta\bar{T}$  计算, 数据如表 2 所示。

在测量中通常用标准差  $\sigma$  来说明测量数据的分散程度, 在有限次测量中, 可计算为

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n T_i^2 - n\bar{T}^2}{n-1}} = 0.32, \quad (5)$$

式中  $\hat{\sigma}$  小, 表示测量值集中。

通常把等于  $3\sigma$  或  $3\hat{\sigma}$  的误差称为极限误差或随机不确定度, 用  $\lambda$  表示,  $\lambda = 3\sigma$  或  $\lambda = 3\hat{\sigma}$ 。

在测量中, 如果出现大于  $3\sigma$  的误差, 则可以认为该次测量值是坏值, 应予删除。如果测量次数较少, 其结果不一定可靠。这时采用格拉布斯准则, 若有剩余误差(绝对值)  $|u_i| > G\hat{\sigma}$  的值, 则认为该  $u_i$  相对应的测量数据  $\Delta T_i$  是坏值, 应剔除不用。式中  $G$  为格拉布斯系数, 可查表获得, 此处为  $G = 1.67$ , 则不确定度为

$$\lambda = 1.67 \times \hat{\sigma} = 1.67 \times 0.32 = 0.534, \quad (6)$$

算术平均值的标准差为

$$\hat{\sigma}_u = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} = \frac{0.32}{\sqrt{5}} = 0.14. \quad (7)$$

由于测量次数较少, 取概率  $P=95\%$ , 用  $t$  分布

求出置信系数  $t_\alpha$ , 经查表得  $t_\alpha=0.36$ , 则不确定度为

$$\lambda_u = 0.14 \times 0.36 \approx 0.05. \quad (8)$$

由  $t_\alpha$  的值可以看出, 测量结果只能精确到百分位, 其标准偏差为  $0.14 ^\circ\text{C}$ , 当  $P=95\%$  时不可能超过  $0.05 ^\circ\text{C}$ , 即整套系统的测量精度为  $\pm 0.05 ^\circ\text{C}$ 。

## 5 结 论

采用荧光光纤测温法测量出电火工品桥丝在电磁环境下温度的变化, 依据桥丝温度和感应电流的关系, 测量出桥丝上的感应电流, 从而对电火工品电磁脉冲危害进行测试。这种方法稳定性好, 抗电磁干扰能力强, 精度高, 很好地解决了其他测量方法在电磁辐射场中引入误差、灵敏度和稳定性等问题, 是电火工品电磁脉冲危害测试的一种新的方法。

## 参 考 文 献

- Li Jingrong. Electromagnetic hazard analyze for electroexplosive device [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 1992, (4): 24~25  
李锦荣. 电火工品电磁危害分析[J]. *火工品*, 1992, (4): 24~25
- Qi Xinglin, Liu Shanghe. Influences of progress in fuze electromagnetic environmental test to technical support [J]. *Modern Fuze*, 1996, (3): 14~19  
齐杏林, 刘尚合. 引信电磁环境试验的进展对技术保障的影响[J]. *现代引信*, 1996, (3): 14~19
- Hu Chunhai, Zou Xiaohong, Wang Yutian. Research on optical fiber temperature sensor based on fluorescence lifetime for online temperature monitoring for high voltage equipment [J]. *Industrial Instrumentation & Automation*, 2004, (5): 53~54  
胡春海, 邹晓红, 王玉田. 光纤荧光温度传感器用于高压设备温度在线监测的研究[J]. *工业仪表与自动化装置*, 2004, (5): 53~54
- Sun Shenghe, Wang Yanyun, Xu Ying. Optical Fiber Measurement and Sensing Technology [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2000. 169~170  
孙圣和, 王廷云, 徐影. 光纤测量与传感技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000. 1
- Barry T. Neyer. Bridgewire heating [C]. Proceedings of the Sixteenth Symposium on Explosives and Pyrotechnics, Essington, PA, 1997
- D. P. Jia, W. Lin. The realization of multi-channel fluorescent temperature measuring system [C]. *SPIE*, 2000, **4077**: 264~267
- Qi Xinglin, Wang Shaoguang, Shi Lirong. Safety measurement of electric ignition system in EMR[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2004, (4): 11~14  
齐杏林, 王韶光, 施利荣. 电点火系统在电磁辐射下的安全裕度测量[J]. *火工品*, 2004, (4): 11~14