

# 微波加热用的高阻导线温度传感器

张立儒 魏建国 董惠芳

(天津大学自动化系,天津 300072)

本文介绍了一种可用于高频电磁场中测量温度的新型无扰温度传感器。该传感器是由炭质线和高阻值的微型半导体热敏电阻构成,并采用四线接法以消除炭质线阻值不稳所造成的影响。文中还用对比的方法,有力地证明了在强电磁场中应用时,这种温度传感器比常规的热电偶和热电阻有明显的优越性。

## 一、设计思想

电磁场对电子仪器的干扰是人所共知的,但有效地消除它的影响是非常困难的,尤其是在强电磁场中进行测量时,单纯靠屏蔽和滤波来解决干扰几乎是不可能得到令人满意的结果。

新型的高阻导线温度传感器是作为微波加热治疗恶性肿瘤(热疗法),测量肿瘤温度而设计的。对热疗法来说,温度是决定疗效最重要的因素,但是用以加热肿瘤的能源是微波,它是一种高频电磁波。若使用传统的,金属制的热电偶和热电阻等温度传感器来测量肿瘤温度,那么在传感器金属中形成的感应电流和涡流势必给测量带来很大的影响,甚至还会破坏加热用电磁场的分布而造成肿瘤加热不均匀和局部组织(肿瘤附近)烧伤。为此,寻求一种精确、稳定、可靠和价廉的,用非金属制造的温度传感器就是本研究课题的出发点。

## 二、传感器的结构原理

高阻导线温度传感器是由高阻值的半导体热敏电阻做感温器,四根高阻值的炭质线做引出线,两者之间再用特制的导电胶粘接起来,然后在其外套一个用聚四氟乙烯做成的保护套管构成的,从而最大限度地避开了使用金属材料。

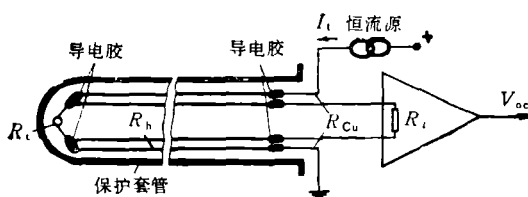


图1 高阻导线温度传感器的原理图

图1是这种传感器的原理图。图1中,半导体热敏电阻 $R_t$ 为NTC型,其直径为0.3mm,25℃时的阻值为1MΩ左右。高阻值炭质线 $R_h$ 是用直径0.1mm的介质材料做基线,在其上通过炭被膜和热处理工艺后,再覆以绝缘层制成的,其值为十几个MΩ/m。上述 $R_t$ 经四根炭质线 $R_h$ ,再经四根普通的铜导线 $R_{Cu}$ ,然后与后边的放大器相连,其中 $R_t$ 与 $R_h$ 和 $R_h$ 与 $R_{Cu}$ 用导电胶粘接起来。工作时,通过恒流源和二根 $R_h$ 向 $R_t$ 供给零点几微安的恒定电流,电流在 $R_t$ 两端产生的压降通过另外二根 $R_h$ 送高输入阻抗放大器。在此,电流不能大以防电流在 $R_t$ 上产生的焦耳热会导致不能忽略的误差。

为了克服因高阻炭质线阻值不够稳定、电阻温度系数大以及四根线的阻值做得不易相等而引起的误差,传感器采用四根炭质线配一高输入阻抗放大器的电路方案(参看图1)。只要放大器的输入电阻 $R_i$ 取得足够高,即能满足 $R_i \gg R_t + 2R_h$ ,那么放大器的输出 $V_{oc}$ 就由下式表示:

$$V_{oc} = I_t \cdot \frac{R_i \cdot R_t}{R_i + 2R_h + R_t} \approx I_t \cdot R_t \quad (1)$$

由于  $R_t$  与温度有确定的函数关系

$$R_t = R_0 \cdot \exp \left[ B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (2)$$

式中  $R_0$  是  $T_0 = 298\text{K}$  时热敏电阻的阻值,  $B$  是热敏指数, 故有

$$V_{oc} = I_t R_0 \cdot \exp \left[ B \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]. \quad (3)$$

(3)式表明,只要满足  $R_i \gg R_t + 2R_h$ , 放大器的输出就只与温度  $T$  有关,而与  $R_h$  无关了。

### 三、传感器性能分析与比较

在高频电磁场中高阻导线温度传感器与金属制的热电偶和热电阻相比,有许多优点。

#### 1. 电磁干扰误差

由于半导体热敏电阻和高阻炭质线的电导率远远小于金属的电导率,因此在同样电磁场强下,在传感器中形成的感应电流和涡流而导入电子线路中所造成的误差,前者将远远小于后者。虽然在前者中热敏电阻引线仍为金属丝,导电胶中也含有金属微粒,但金属丝直径极细,长度也取得很短,且导电胶中金属含量甚少(高阻导电胶),胶层又薄,故高阻导线温度传感器由此项引入的误差可减小至允许的程度。

#### 2. 自热误差

感应电流和涡流在金属制的传感器中产生的焦耳热,会造成数值大且无法克服的示值误差,同时趋肤效应又加剧了上述热能的转换。若传感器用介质材料制造,介质在电场中析出的热功率  $P$  为

$$P = \omega \varepsilon E^2 \tan \varphi_c, \quad (4)$$

式中  $\omega$  是高频电场的角频率,  $E$  是电场强度,  $\varepsilon$  是介电常数,  $\varphi_c$  是损耗角。

基于上述理论,高阻导线传感器的保护套管选用  $\varphi_c$  甚小的聚四氟乙烯来制造,同时炭质线和半导体热敏电阻的  $\varphi_c$  也比较小,故此项误差可做到忽略不计的程度。

#### 3. 传感器对人射电磁场的影响

物理

人射电磁场的分布形状是专门为加热用而设计的。测量时,由于传感器对人射电磁场能量的反射而破坏了加热场的均匀性。显然,金属的反射系数最大,它在微波频率下接近于1。对于介质材料,其反射系数  $F$  可表示为

$$F = \left( \frac{1 - \sqrt{\varepsilon_r}}{1 + \sqrt{\varepsilon_r}} \right)^2, \quad (5)$$

式中  $\varepsilon_r$  是材料的相对介电常数,  $\varepsilon_r$  越小,  $F$  越小。若取  $\varepsilon_r = 2$  代入(5)式,可计算出  $F = 0.029$ , 它远远小于金属的反射系数。

我们进一步把高阻导线温度传感器、热电偶和普通热敏电阻(铜信号传输线)温度传感器置于电磁加热场中,进行对比实验。方法是,用一种介电常数与被加热介质近似的材料做成模型,然后在其中分别放入上述三种温度传感器,经短时间加热之后,迅速移走温度传感器,同时



图2 电磁加热场模型图

- (a) 带高阻导线温度传感器的模型热场分布图;
- (b) 带热电偶的模型热场分布图;
- (c) 带普通热敏电阻(铜引线)的模型热场分布图

用热像仪拍摄它们的热场分布,如图 2(a), (b) 和 (c) 所示。图中以颜色深浅表征温度的高低。显然,图 2(a) 所示的温度分布自中心向外呈辐射状减小且近于对称,这说明高阻导线温度传感器的存在,基本上没有破坏加热电磁场的分布。图 2(b) 和图 2(c) 所示的加热场被明显扭向一边,这说明两种常规温度传感器的存在破坏了原设计的加热电磁场的均匀性,从而导致被加热物的某些区域温度过高,而另一些区域则加热温度不够。

#### 四、传感器的特点及其应用

高阻导线温度传感器具有测量精度高、性能稳定可靠、抗电磁干扰性好和比光导纤维传感器便宜等优点。它适用于:微波或射频波加热治癌中测量肿瘤温度;微波加热干燥炉内测量物体温度;大功率电器设备,如在大电机、大变压器中测量绕组的温升以及在周围有强大电磁设备的环境中测量物体温度等。

### 分子系统动力学的新进展

在过去的十年,超短脉冲的发展开辟了直接探测分子系统基础动力学现象的途径。随着处理多体系统的计算机模拟技术以及分子理论的发展,超短激光脉冲使我们能够探讨相互作用动力学的问题。我们的目标是在一个较高的层次上对一个处于大范围无序环境中的分子系统作出动力学方面的预测,然而为达到这一目的所采用的方法,即为研究分子动力学的基本观点所采用的方法,则是多种多样,因人而异的。

目前分子动力学观点,特别是与化学反应和分子输运相关的理论牵涉的工作面很广,它不是本专辑[见 *Phys. Today*, 43-5(1990).]的主要议题。本专辑献给大家的是对当前分子理论和实验研究的回顾,它帮助我们对分子系统动力学有一个全面的了解。这里的每一篇文章各侧重于一个不同的化学环境来研究分子系统的动力学行为,而它们的共同点则是每个化学系统中的无序的分子。

在 M.Gruebele 和 A. H. Zewail 的文章中,他们致力于气相分子束快速相互作用动力学的研究,他们向读者提供了反应时间为  $10 \times 10^{-15} - 10 \times 10^{-12}$ s 的快速化学反应的例子,并强调了化学反应中过渡态的重要性。

在 G.R.Fleming 和 P. G. Wolynes 的文章中,他们研究了液体中的化学动力学过程,作者回顾了液相化学反应以及最近在实验技术、理论研究和计算机模拟方面的发展。值得一提的是,他们的研究揭示出四个影响溶液动力学性质的参数:摩擦、激活、动力学过程以及电子转移过程。

在 J. M. Drake 等人的文章中,读者可以看到有关气相及液相分子系统的研究成果。这种分子系统被局限在多孔玻璃这样的微环境中,最新的结果把约束空间和分子系统的动力学以及热力学行为有机地联系起来。

在 D.Haarer 和 R.Silbey 的文章中,他们探讨了熔于玻璃中的分子双光子烧孔光谱,作者通过分析玻璃态的结构及其动力学性质,阐述了玻璃主体中均匀增宽的大小与温度之间的关系。

我们希望这里的几篇文章能够为致力于分子动力学研究的学者提供一个共同探讨、相互了解的机会。这几篇文章仅仅是分子系统动力学领域的一个快照,由于激光及计算机的快速发展,理论和实验物理学家们可以从中看到最新的成果并得到新的启发。

(张革译自 *Phys Today* 1990 年第 5 期第 23 页)