

文章编号:1001-9014(2004)02-0157-04

# 采用谐振腔法研究透波材料的高温介电性能

黎义<sup>1,2</sup>, 李建保<sup>1</sup>, 何小瓦<sup>2</sup>

(1. 清华大学新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室, 北京 100084;

2. 先进功能复合材料技术国防科技重点实验室, 北京 100076)

**摘要:**根据  $H_{01n}$  模可加热圆柱谐振腔磁场分量及电场分量的特性, 利用谐振腔中活塞的滑动接触不损害谐振器的质量因素的谐振腔法, 研究介电常数不大于 200 和介电损耗角正切不大于 0.05 的固体电介质在高温下及 9 ~ 10GHz 频率范围内的  $\epsilon$  和  $\text{tg}\delta$ , 并对影响电介质高温介电性能测试精度的设备因素、计算方法和实验结果的应用等进行了分析与讨论。

**关键词:**谐振腔法; 质量因子; 透波材料; 高温介电性能

**中图分类号:** O441.4 **文献标识码:** A

## STUDY ON HIGH TEMPERATURE DIELECTRIC PROPERTIES OF MAGNETIC WINDOW MATERIALS BY CAVITY RESONATOR METHOD

LI Yi<sup>1,2</sup>, LI Jian-Bao<sup>2</sup>, HE Xiao-Wa<sup>1</sup>

(1. The State-key Laboratory on New Ceramics and Fine Processing, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. National Key Laboratory of Advanced Functional Composite Materials, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The dielectric properties of the solid materials with  $\epsilon$  below 200 and  $\text{tg}\delta$  below 0.05 were studied in high temperature and 9 ~ 10GHz frequencies. Several problems associated with the equipment facts which affected measurement precision, calculation method, and the application of test results were discussed.

**Key words:** cavity resonator; quality factor; magnetic window materials; high temperature dielectric properties

### 引言

目前在航空航天工程应用中主要采用天线传输法在对材料进行单面加热时测量材料的动态高温透波率, 因为存在界面场效应和辐射效应, 该方法的测量结果准确性低. 目前国内尚未测量出透波材料在 500℃ ~ 1200℃ 温度范围内较准确的介电性能变化及准确值<sup>[1]</sup>. 本文介绍采用具有可加热  $H_{01n}$  模圆柱谐振腔的高温介电性能测试技术进行不同温度模拟环境下材料的介电性能研究<sup>[2,3]</sup>, 并讨论相应的理论分析过程及实验方法.

### 1 测量原理

谐振腔法的基本思想是观察在测量网络中放有

被测材料试样时网络电气参数值(谐振频率、质量因素)的变化. 可以根据进行试验测量点频率, 通过解麦克斯韦方程获得将材料的介电常数与谐振频率及质量因子联系起来的公式. 该方法的基本出发点是场的纵向分量是磁场的分量, 电场分量是横向的, 在腔壁的法向没有电场交流, 这样就可以采用具有理想传导表面的滑动活塞的谐振腔, 把材料试样放在谐振腔的活塞上, 调整移动活塞, 寻找谐振位置与频率, 活塞的滑动接触不会损害谐振器的质量因素.

设未扰谐振腔内充满的电介质的介电常数为  $\epsilon$ , 体积为  $V$ , 其固有角频率, 电场为  $\omega_0, E_0$ . 扰动后的谐振腔是在腔中引入体积为  $\Delta V$  的另一种电介质, 其介电率为  $\epsilon + \Delta\epsilon$ , 于是给出麦克斯威尔关系式<sup>[4]</sup>

收稿日期: 2003-03-04, 修回日期: 2003-12-04

Received date: 2003-03-04, revised date: 2003-12-04

作者简介: 黎义(1960-), 男, 海南文昌人, 研究员, 博士生. 从事航天功能复合材料研究.

$$\frac{\Delta\omega_0}{\omega} = -K \frac{\int \Delta\epsilon EE^* dV}{2 \int \epsilon EE^* dV}, \quad (1)$$

式(1)中  $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ —加入电介质时的频率变化;  
 $K$  由实验法或准静态法确定;

$2 \int \epsilon EE^* dV = W$ —谐振器中的能量.

空谐振器的质量因子用下式表示

$$Q_0 = \frac{\omega_0 W}{P}. \quad (2)$$

式(2)中  $\omega_0 W$  为储藏在腔体中的能量,  $P$  为腔体中的能量损耗.

加入电介质样品后, 由于  $\omega_0 W$  和  $P$  的小的变化, 质量因子发生变化, 装入试样的谐振器的质量因子采用下面的公式(3)表示

$$Q_1 = \frac{(\omega_0 + \Delta\omega_0)(W + \Delta W)}{P + \Delta P}, \quad (3)$$

式(3)与式(2)相减, 得

$$\left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0}\right)\omega_0 W = \frac{P + \Delta P}{\left[1 + \frac{\Delta\omega_0}{\omega_0}\right]\left[1 + \frac{\Delta W}{W}\right]} - P. \quad (4)$$

如果加入的电介质的体积远小于谐振器的体积, 则式(4)中略去频率及储存能的变化, 可以认为

$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} \ll 1; \frac{\Delta W}{W} \ll 1$ , 从而给出

$$\left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0}\right)\omega_0 W = \Delta P. \quad (5)$$

式(5)中,  $\Delta P$  为因加入电介质引起的能量损耗的变化.

利用可加热的  $H_{01n}$  圆形谐振器, 可以使用直径较大的试样来研究具有相当大损耗 ( $\text{tg}\delta < 0.5$ ) 的材料而不存在场干扰的危险. 根据在电介质—空气界面上是连续场、在谐振器壁上的电场等于零的约定, 在试样很薄时, 可以利用小于扰法得到将  $\epsilon$  和  $\text{tg}\delta$  与被测值(谐振频率和质量因子变化)建立起关系的公式

$$\text{tg}\delta = A(10^{\frac{N}{20}} - \eta), \quad (6)$$

$$\epsilon = \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{临界}}}\right) + \left(\frac{\chi\lambda}{2\pi d}\right)^2. \quad (7)$$

式中  $\lambda$  为测量频率的波长 (mm),  $\lambda_{\text{临界}}$  为临界波长 (mm),  $d$  是试样厚度 (mm),  $N$  为由电介质产生的衰减 (dB),  $A$  值按下式计算

$$A = \frac{\varphi(\chi)}{\epsilon} \cdot \frac{L_0}{d} \cdot \frac{1}{Q_0}, \quad (8)$$

$$\varphi(\chi) = \frac{n^2 + \text{tg}^2\chi}{1 + \text{tg}^2\chi - \frac{\text{tg}\chi}{\chi}}, \quad (9)$$

$$n^2 = \left(\frac{\chi}{\beta_0 d}\right)^2. \quad (10)$$

$L_0$  为不带电介质试样的谐振器的谐振长度 (mm),  $Q_0$  为不带电介质试样的谐振器的载荷质量因素,  $\eta$  为有电介质试样的谐振器的壁损失与无试样的谐振器的壁损失的比值.  $\chi$  为无因次长度, 按下式计算

$$\frac{\text{tg}\chi}{\chi} - \frac{\text{tg}\beta_0(L+d)}{\beta_0 d} = 0. \quad (11)$$

式(11)中  $\beta_0$  为相位常数 (1/mm),  $\beta_0 = 2\pi/\lambda_B$ ,  $\lambda_B$  为谐振器内的波长, 由实验测定;  $L$  为谐振器的共振长度 (mm),  $L = L_0 - L_\epsilon$ ,  $L_\epsilon$  为带电介质试样的谐振器的谐振长度 (mm).

## 2 实验

### 2.1 设备仪器

俄罗斯 ипд—高温介电性能测试仪参数:

测试温度:  $15^\circ\text{C} \sim 1200^\circ\text{C}$ , 工作频率  $f = 9 \sim 10\text{GHz}$ ;

测试方法: 圆筒式谐振腔法,  $N_2$  保护气氛;

测量参数: (1) 谐振腔的质量因素; (2) 带材料试样谐振腔的共振长度 ( $L$ ).

### 2.2 实验材料

选择典型的石英编织物增强二氧化硅基复合材料, 对其加热状态下的介电性能进行测试与研究.

试样尺寸:  $\Phi = 49.8 (\pm 0.1)\text{mm}$ , 厚度为  $1 \sim 16\text{mm}$  的平面平行圆片, 最佳试样厚度按下式求出

$$d = m \cdot \lambda_\delta, \quad (12)$$

$$\lambda_\delta = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{临界}}}\right)^2}}. \quad (13)$$

式(12)中  $\lambda_\delta$  根据已知的室温介电常数求出, 系数  $m$  与样品材料在室温条件下的损耗角正切值有关.

### 2.3 实验过程

先在室温条件下把测试设备调试正常, 将 NP 谐振曲线调整致峰高一致, 将样品放置在活塞上升至腔体加热区, 在  $N_2$  保护气体中开始加热, 当温度升至设定温度时, 保温 20min, 并通过调整活塞调整谐振曲线, 记录下谐振腔体的共振长度、示数线变化值、谐振波长等测量参数, 然后再把温度升至下一设定温度. 把测试参数代入根据设备参数修正的计算公式和程序计算材料不同温度下的  $\epsilon$  和  $\text{tg}\delta$ .

### 3 结果与讨论

#### 3.1 温度对设备参数的影响

由于谐振器的质量因子、活塞材料、样品材料等在温度场和电磁场作用下都有一定的变化,试验结果需要经过多方面的处理与修正.在试验设备方面,温度对谐振器的固有质量因子( $Q$ )及开始衰减变化(db)的影响如图1所示,在谐振器内波长( $\lambda_B$ )及谐振器活塞位移位置与温度的关系如图2所示.

#### 3.2 温度对材料介电性能的影响

对透波复合材料高温介电性能有较大影响的因素包括如下几个方面:1)材料体系;2)材料物性变化;3)复合工艺及防潮工艺;4)使用温度与频率;5)温度梯度等,采用该方法可对上述因素进行较深入的研究.图3和图4是温度对织物增强二氧化硅复合材料介电性能的影响变化实验结果.

从介质材料的介电性能随温度的变化曲线可看出,在温度作用下材料的介电性能出现明显变化,从冷却跟踪测试结果分析,这种变化是不可逆的.利用透波材料的升温—介电性能曲线和降温—介电性能曲线可了解到透波材料在实际使用过程中的一些关键的物性变化,如先把材料加热至水份挥发温度,再跟踪测试冷却时的介电性能,可得到材料不含吸附水或结构水时的介电性能.

#### 3.3 温度梯度

在飞行器高速飞行过程中,外表面被急剧加热,沿材料的厚度方向存在极大的温度梯度,同时存在相应的 $\epsilon$ 和 $\text{tg}\delta$ 梯度.图5是材料在受热时沿厚度方向的温度梯度和电磁场的示意图.在材料的隔热—承载性能一定时,透波介质的厚度由电气决定,式

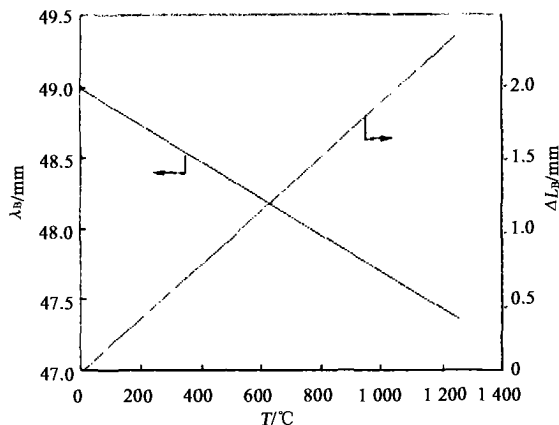


图2 谐振器内波长( $\lambda_B$ )及谐振器活塞位移位置与温度的关系

Fig.2 Wavelength( $\lambda_B$ ) in resonator and moving position of resonant piston as a function of temperature

(14)是半波长天线罩的理论电气厚度

$$d = N \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}} \quad (14)$$

式(14)中 $\lambda$ 为雷达波长; $\epsilon$ 为罩体材料的介电常数; $\theta$ 为雷达波束的有效入射角; $N$ 为正整数(1,2,3).从图3和图4可看出,透波材料在室温与高温时的介电常数差别较大,不同 $\epsilon$ 值的材料其最佳电气厚度不同,在相同的罩壁厚度下, $\epsilon$ 值的变化对罩体的电气性能产生较大影响,甚至不能工作.在这种情况下,可以根据计算精度要求和实际掌握的材料性能数据,将材料视为由多层构成,每层具有不同的温度和与其温度相对应的 $\epsilon$ 和 $\text{tg}\delta$ 值,并可采用该方法实际测量各不同温度层材料的 $\epsilon$ 和 $\text{tg}\delta$ 值.区别

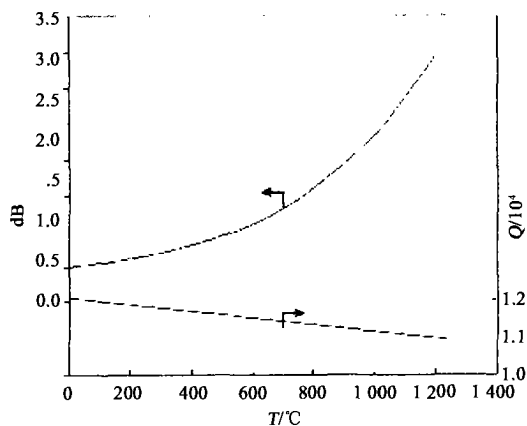


图1 温度对谐振器的固有质量因子( $Q$ )及开始衰减变化(db)的影响

Fig.1 Quality factor( $Q$ ) and attenuation (dB) as a function of temperature

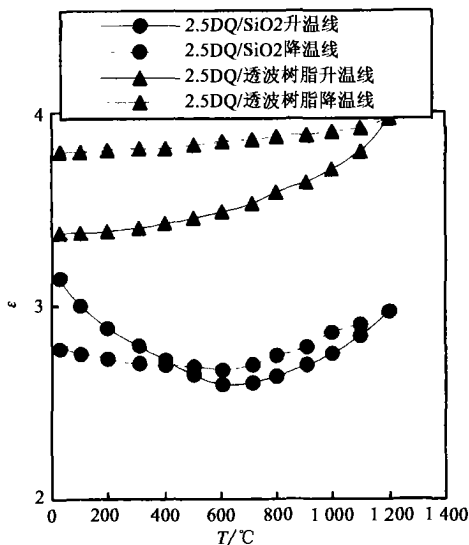


图3 温度对材料介电常数 $\epsilon$ 的影响

Fig.3 Dielectric constant  $\epsilon$  of the materials as a function of temperature

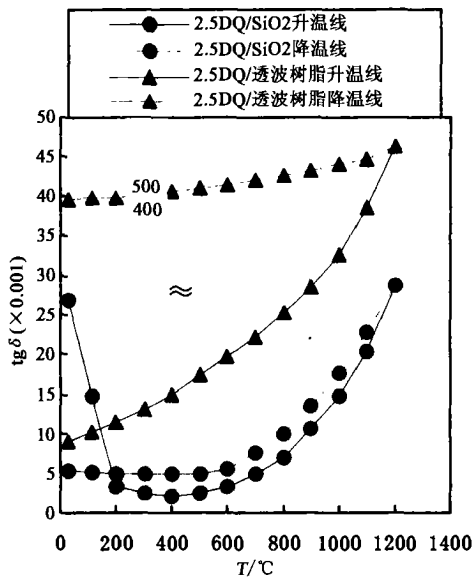


图4 温度对材料损耗角正切  $tg\delta$  的影响  
Fig.4 Loss tangent  $tg\delta$  of the materials as a function of temperature

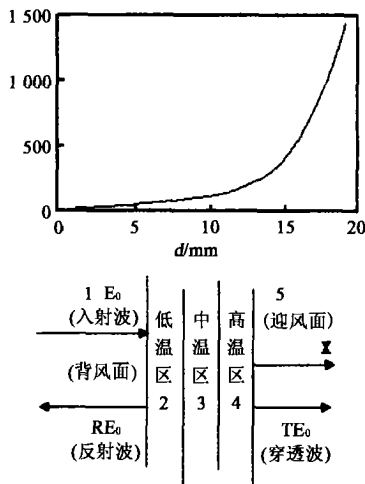


图5 电磁场与材料的温度梯度  
Fig.5 Temperature degradation in materials and the magnetic field

不同温度的层数愈多,计算精确度愈高.采用多层壁(板)的透射系数( $T$ )计算公式对具有温度梯度的透

波材料进行归一化处理,可以获得单面加热材料的电磁波透过特性,经过实验修正和飞行修正,可找到有效的理论与经验公式,这对高速飞行器电气设计与材料应用研究具有重要意义.

#### 4 结论

在高温下测量电介质的  $\epsilon$  和  $tg\delta$  的任务比在常温下的复杂得多,由于  $H_{01n}$  模圆柱谐振腔在给定条件下没有电流从谐振器端面的表面通过,在高温条件下用活塞进行重新调整时,活塞滑动接触不会损害谐振器的质量因素,是一种研究高温介电性能有效的方法.组成谐振器的零件在相应的温度下技术参数的变化、材料放气产生的热电子发射效应、样品尺寸变化所引起的缝隙变大和最佳电厚度变化、谐振腔体的加热均匀性等因素对测量精度都有影响,在试验结果处理时应把上述因素对谐振器  $Q$  值的影响和材料高温介电性能变化对  $Q$  值的影响区别开.飞行器高速飞行时壳体被外表面加热,应进行不同温度下材料的介电性能测量,并进行归一化处理 and 实验修正,才能获取具有温度梯度材料的高温介电性能.

#### REFERENCES

[1] LI Yi. Analysis for high-temperature dielectrics of radome & antenna materials [J]. *Aerospace materials and technology* (黎义. 航天透波复合材料的高温介电性能研究. *宇航材料工艺*), 2001; 6: 4—9

[2] Baysar A, Kuester J L. Dielectric property measurements of materials using the cavity technique [J]. *IEEE Trans.*, 1992, MTT- 40(11):2108—2110

[3] Solid dielectrics. Method for the determination of dielectric constant and dielectric power factor from 9 to 10 GHz [S]. State standard of russian 12723—67

[4] ZHANG Ke-Xin, LI De-Jie. *Electromagnetic Theory of Photo Electronics and Microwave* [M]. Beijing: Publishing house of electron industry (张克潜, 李德杰. *微波与光电子学中的电磁理论*. 北京: 电子工业出版社), 1994, 214—216