

# 高温高 Q 腔法介电性能测试系统稳定性研究

何凤梅<sup>1</sup> 李恩<sup>2</sup> 李仲平<sup>1</sup> 张大海<sup>1</sup> 陈聪慧<sup>1</sup>

(1 航天材料及工艺研究所先进功能复合材料技术国防科技重点实验室,北京 100076)

(2 电子科技大学,成都 610054)

**文 摘** 经测试原理分析,证明了高温空腔(测试腔体内无样品)特性(主要指谐振频率和品质因数)的准确性和稳定性是保证样品高温介电性能测试结果准确性和稳定性的必要条件。进行了室温~1 600℃定点温度下恒温时间为 3、5 和 8 min、7~18 GHz 的空腔特性测试,结果表明谐振频率相互之间相对偏差 $\pm 0.05\%$ ,品质因数相互之间相对偏差 $< \pm 5\%$ ,验证了恒温时间为 3 min 时可获得准确的高温空腔特性数据。还在不同时间不同季节多次对空腔进行了室温~1 600℃、7~18 GHz 空腔特性测试,结果表明谐振频率之间相对误差 $\ll \pm 0.04\%$ ,品质因数之间的相对误差 $< \pm 5\%$ ,进一步验证了该测试系统可获得准确稳定的测试结果。

**关键词** 高 Q 腔法,高温,介电性能,测试系统,稳定性

## Stability for High Q Cavity Method for High Temperature Dielectric Measuring System

He Fengmei<sup>1</sup> Li En<sup>2</sup> Li Zhongping<sup>1</sup> Zhang Dahai<sup>1</sup> Chen Conghui<sup>1</sup>

(1 National Key Laboratory of Advanced Functional Composite Materials, Aerospace Research

Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

(2 University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054)

**Abstract** The veracity and stability of high temperature dielectric properties were mainly controlled by the veracity and stability of high temperature cavum (without sample in the testing cavity) properties (mainly resonance frequency and quality factor) through testing principle analyzing. The cavum properties were tested under frequencies between 7 and 18 GHz and temperatures between room temperature and 1 600℃ in which each temperature keeping constant for 3, 5 or 8 minutes. The results indicate that the relative windages of resonance frequencies is less than  $\pm 0.05\%$  and the relative windages of quality factors is far less than  $\pm 5\%$ . So it validates that keeping constant temperature for 3 minutes is the right choice. It is also proved that the testing system can obtain exact and stable results by cavum measuring at high temperature in different time and different seasons for many times.

**Key words** High Q cavity method, High temperature, Dielectric properties, Measurement system, Stability

### 1 引言

材料高温介电性能数据是热透波机理研究和热透波材料选材与研制的关键依据,国外很早就从原理、方法、设备和技术等多方面开展过相关研究工作<sup>[1~4]</sup>,其中以美国和俄罗斯处于领先地位。

在测试方法选择方面,美国 ASTM1995 年制订、修改了微波频段温度达 1 650℃的材料高温介电性能测试标准<sup>[5]</sup>,所采用的方法有终端短路法和微扰法

两种,俄罗斯和德国采用高 Q 腔法,英国 NPL 采用终端开路法。在查阅到的资料中,指南性内容占多数,技术细节较少。国内首创宽频点高温介电性能测试系统是由航天材料及工艺研究所先进功能复合材料技术国防科技重点实验室和电子科技大学合作研究的成果,其最高测试温度可达 1 600℃,频率覆盖 1~18 GHz,其中 7~18 GHz 采用高 Q 腔法。

由于空腔的谐振频率和品质因数及其稳定性是评

收稿日期:2008-09-20

作者简介:何凤梅,1965 年出生,高级工程师,主要从事材料的性能测试与评价。E-mail: fengmeihe@163.com

定高Q腔法高温介电性能测试系统测试结果准确性和稳定性的关键要素,是解决测试腔体研制中遇到的关键技术问题,本文研究的目标正是解决此关键技术问题。

## 2 高温高Q腔法测试原理

在某一固定模式( $TE_{0mn}^0$ )下,圆柱型高品质因数测试腔,其初始空腔谐振频率为 $f_0$ ,固有品质因数为 $Q_0$ ,如图1(a)所示。在此测试腔内放入厚度为 $d$ 的圆片状样品后,如图1(b)所示:由于样品的介电常数 $\epsilon'$ 大于1,因此放置有样品的那段测试腔的相位常数将增大。在固定谐振腔长度 $l_0$ 的条件下,其谐振频率必将降低为 $f_s$ ;同时由于介质样品将引入附加的介质损耗,导致测试腔的固有品质因数下降为 $Q_s$ 。

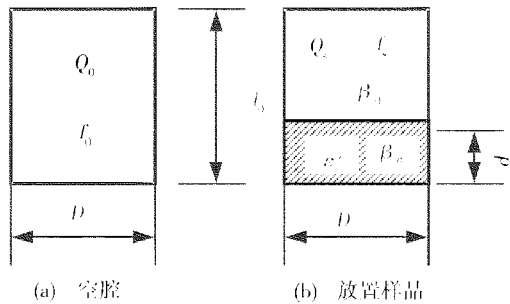


图1 定长度变频物理模型

Fig.1 Testing model of definite length and changing frequencies

根据放入样品前后测试腔体的谐振频率和品质因数,可以分别计算出样品的介电常数 $\epsilon'$ 和介质损耗角正切 $\tan\delta$ 。

对于上述测试物理模型,根据麦氏方程和边界条

件,针对图1(a),有:

$$(f_0 D)^2 = \left(\frac{c}{\pi} X_{0m}\right)^2 + \left(\frac{cn}{2}\right)^2 \left(\frac{D^2}{l_0}\right) \quad (1)$$

式中: $c$ 为真空中光速, $D$ 为测试腔直径, $l_0$ 为空腔时 $TE_{0mn}^0$ 模式下测试腔的谐振长度, $X_{0m}$ 为贝塞尔函数的根, $m$ 和 $n$ 分别为 $TE_{0mn}^0$ 测试腔径向和轴向谐振模式号数。

对图1(b),有

$$\beta_s^2 = [(2\pi f_s/c)^2 \epsilon' - (2X_{0m}/D)^2] \quad (2)$$

$$\beta_0^2 = [(2\pi f_s/c)^2 - (2X_{0m}/D)^2] \quad (3)$$

$$\frac{\tan\beta_s d}{\beta_s} + \frac{\tan\beta_0(l_0 - d)}{\beta_0} = 0 \quad (4)$$

式中: $f_s$ 为放置样品后,模式下测试腔的的谐振频率, $\beta_s$ 为测试腔放置介电常数为 $\epsilon'$ 的样品后,其 $TE_{0mn}^0$ 波在 $f_0$ 频率下的传输相位常数, $\beta_0$ 为测试腔填充空气(或真空)后,其 $TE_{0mn}^0$ 波在 $f_s$ 频率下的传输相位常数。

从式(1)~式(4)可以看出,样品 $\epsilon'$ 的准确性和稳定性与测试腔尺寸的测量准确性和尺寸稳定性有关。由于测试腔尺寸测量的分辨率要远小于频率测量的分辨率,且根据式(1)可以由空腔的谐振频率反算出测试腔的尺寸。所以,样品 $\epsilon'$ 的准确性和稳定性实际是与空腔谐振频率的测量准确性和稳定性相关。

根据场的储能和耗能关系,可以得到:

$$\tan\delta = \left(1 + \frac{u}{pv\epsilon'}\right) \left(\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_0}\right) \quad (5)$$

其中:

$$\frac{1}{Q'_0} = \frac{1}{Q_0} \left(\frac{f_0}{f_s}\right)^{\frac{5}{2}} \frac{\left[\left(\frac{2X_{0m}}{D}\right)^2 (pv + u) + D(p\beta_s^2 + \beta_0^2)\right]}{(pv\epsilon' + u) \left[\left(\frac{2X_{0m}}{D}\right)^2 \left(1 - \frac{D}{l_0}\right) + \left(\frac{2\pi f_0}{c}\right)^2 \frac{D}{l_0}\right]} \quad (6)$$

$$p = \left\{ \frac{\sin[\beta_0(l_0 - d)]}{\sin(\beta_s d)} \right\}^2 \quad (7)$$

$$u = 2(l_0 - d) - \frac{\sin[2\beta_0(l_0 - d)]}{\beta_0} \quad (8)$$

$$v = 2d - \frac{\sin(2\beta_s d)}{\beta_s} \quad (9)$$

式中: $Q_s$ 为放置样品后测试腔的无载品质因数, $Q'_0$ 为放置理想的无耗样品后测试腔的无载品质因数, $Q_0$ 为空腔时测试腔的无载品质因数。

为使式(8)、式(9)的形式简洁起见,设置了三个代数符号 $p$ 、 $u$ 、 $v$ 。

$Q_0$ 和 $Q_s$ 分别由它们的有载品质因数 $Q_{L0}$ 和 $Q_{Ls}$ 计算得到,见公式(10)和(11)。

$$Q_0 = Q_{L0} \left(1 + \frac{|S_{21}|_0}{1 - |S_{21}|_0}\right) \quad (10)$$

$$Q_s = Q_{Ls} \left(1 + \frac{|S_{21}|_s}{1 - |S_{21}|_s}\right) \quad (11)$$

式中: $Q_{L0}$ 为空腔时测试腔的有载品质因数, $Q_{Ls}$ 为放置样品后测试腔的有载品质因数, $|S_{21}|_0$ 为空腔测试时,谐振频率 $f_0$ 对应的传输系数, $|S_{21}|_s$ 为置入样品后,谐振频率 $f_s$ 对应的传输系数。

空腔时的有载品质因数 $Q_{L0}$ 由“半功率”( $\alpha = 3.01$  dB)点的频宽 $\Delta f_0$ 和 $f_0$ 决定,放置样品时的 $Q_{Ls}$ 由放置样品后“半功率”点的 $\Delta f_s$ 和 $f_s$ 决定,见公式(12)和(13)。

$$Q_{L0} = f_0 / \Delta f_0 \quad (12)$$

$$Q_{Ls} = f_s / \Delta f_s \quad (13)$$

从式(5)~式(13)可以看出,样品的损耗角正切测量准确性和稳定性与空腔谐振频率和有载品质因数的测量准确性和稳定性相关。

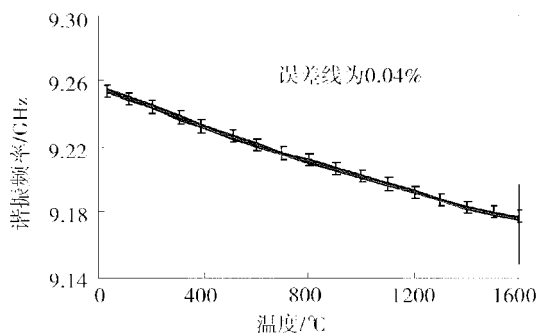
有载品质因数和无载品质因数的主要区别在于:测试腔是否连接耦合装置,接有耦合装置的测试腔,测量得到的品质因数称为有载品质因数,否则为无载品质因数。本文试验结果中的品质因数均为有载品质因数。

### 3 结果与讨论

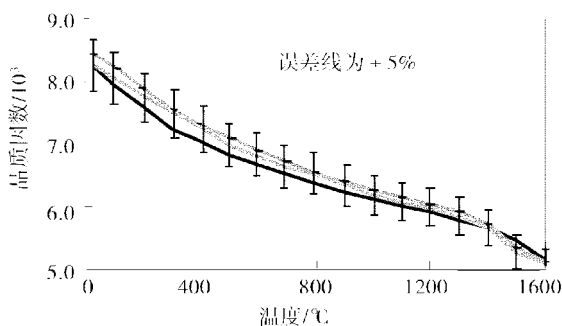
#### 3.1 不同恒温时间空腔特性测试结果

由于空腔的谐振频率和有载品质因数与其尺寸和表面电阻关系密切,而空腔尺寸和表面电阻随温度升高一直在变化,空腔腔体温度的稳定性及其温度分布直接影响空腔的谐振频率和有载品质因数的测量稳定性和准确性。因此,恒温时间越长越有利于测试结果的稳定和准确。但高温下长时间恒温,既延长了测试总时间,又缩短了测试腔体、加热器件等使用寿命。因此,需要对恒温时间的长短进行研究,以确定适宜的恒温时间。本文选定的恒温时间为3、5和8 min,图2中列举了部分频点从室温~1600℃的空腔谐振频率和品质因数测试结果。

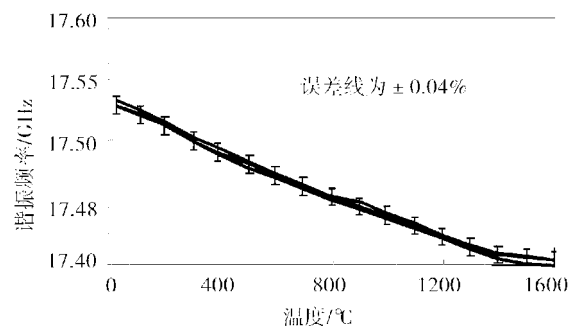
由图2可以看出,室温~1600℃恒温时间为3、5和8 min,其空腔谐振频率之间和品质因数之间的测试结果都非常接近,其中谐振频率之间相互偏差小于±0.05%,品质因数之间相互偏差小于±5%。这样的偏差水平可保证样品介电常数和损耗角正切的测试准确性要求。因此,选择恒温时间3 min,既可以满足测试系统测试结果准确性的要求,又能节省时间、降低对系统破坏风险,是适宜的恒温时间。



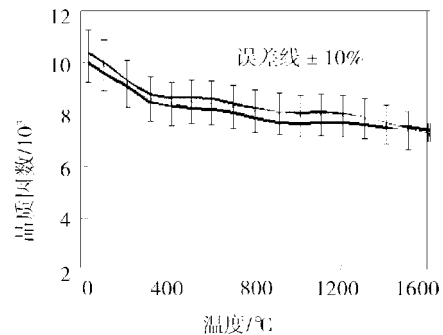
(a) 9.2 GHz 谐振频率



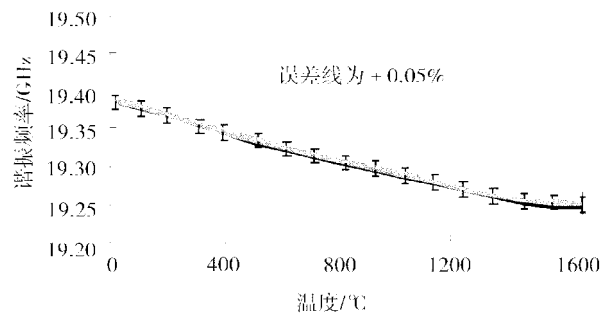
(b) 9.2 GHz 品质因数



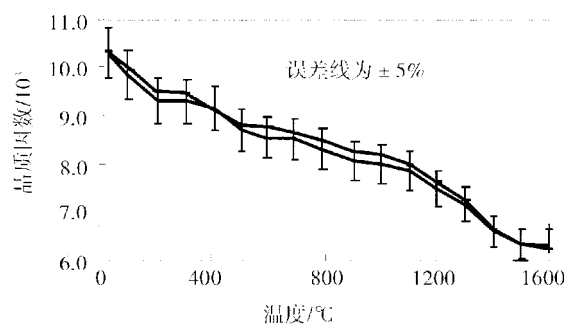
(c) 17.5 GHz 谐振频率



(d) 17.5 GHz 品质因数



(e) 19.0 GHz 谐振频率



(f) 19.0 GHz 品质因数

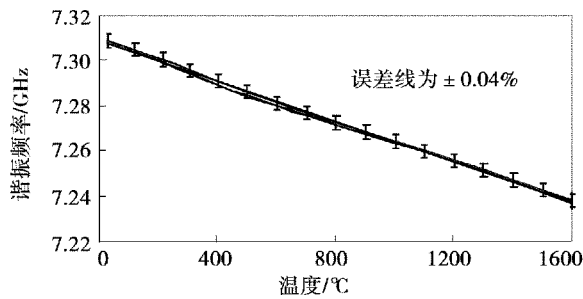
图2 不同恒温时间高温空腔特性测试结果

Fig.2 Cavum properties of high temperature in constant temperature time

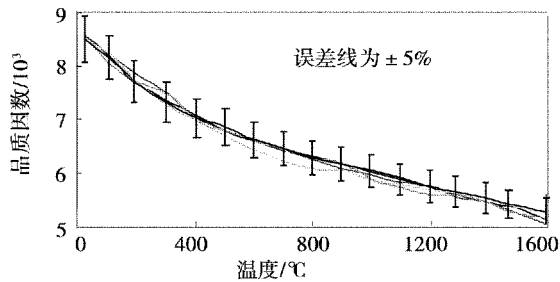
#### 3.2 不同时间季节空腔特性测试结果

在确定了恒温时间的基础上,分不同时间不同季节多次对空腔进行了室温~1600℃、7~18 GHz的空

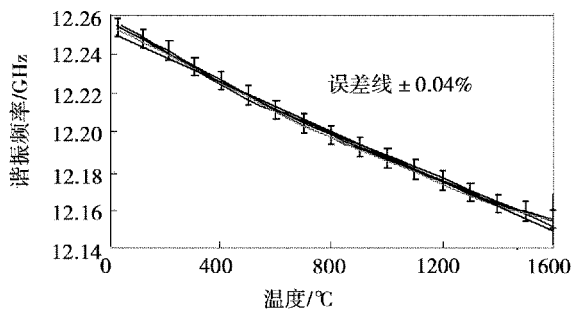
腔谐振频率和品质因数测试,其中部分频点的测试结果见图3。



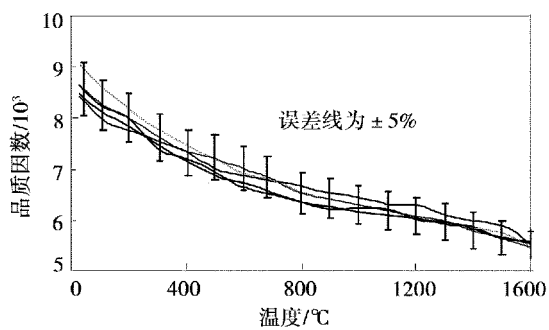
(a) 7.2 GHz 谐振频率



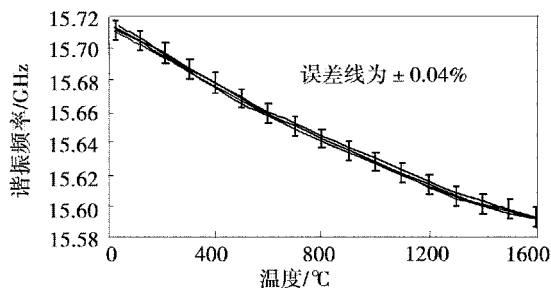
(b) 7.2GHz 品质因数



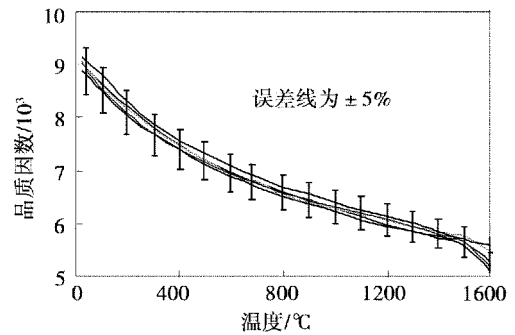
(c) 12.0 GHz 谐振频率



(d) 12.0 GHz 品质因数



(e) 15.4 GHz 谐振频率



(f) 15.4 GHz 品质因数

图3 不同时间不同季节高温空腔特性测试结果

Fig.3 Cavum properties of high temperature in different time and different seasons

由图3可以看出,不同时间不同季节谐振频率和品质因数的多次测试结果一致性较好,其中谐振频率之间相互偏差同样可达到小于 $\pm 0.04\%$ ,品质因数之间相互偏差同样可达到小于 $\pm 5\%$ 。表明该系统空腔特性稳定。

#### 4 结论

(1)通过对高温高Q腔法介电性能测试系统的测试原理分析,验证了高温空腔特性的准确稳定是保证样品高温介电性能测试系统测试结果准确性和稳定性的必要条件。

(2)通过对室温 $\sim 1600^\circ\text{C}$ 、7~18 GHz定点温度下恒温时间为3、5和8 min的空腔特性测试,结果表明恒温时间选用3 min可满足测试系统测试结果准确性的要求。

(3)通过对不同时间不同季节多次对空腔进行室温 $\sim 1600^\circ\text{C}$ 、7~18 GHz空腔特性测试,结果进一步说明了该测试系统可获得准确稳定的测试结果。

#### 参考文献

- Westphal W B. Dielectric constant and loss data, laboratory for Insulation research massachusetts institute of technology cambridge, MA 02139, AD A121008;1~84
- Westphal W B, Iglesias J. Dielectric measurements on high-temperature materials. Air Force Materials Laboratory, AD873038;1~52
- Gilreath M C et al. High-temperature dielectric properties of candidate space-shuttle thermal-protection-system and antenna-window materials. NASA Langley Research Center, 1974;1~52
- Anderson B L et al. Highly parallel optical true time delay device for phased array antennas. In: Proceedings of the sixth annual ARPA symposium on photonic systems for antenna applications, Montney, CA, March 7, 1996
- ASTM D2520 - 95, Standard test methods for complex permittivity (dielectric constant) of solid electrical Insulating materials at microwave frequencies and temperatures to 1650°C

(编辑 吴坚)