

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.07.002

圆柱腔复介电常数高温测试系统^{*}

张云鹏^{1,2} 李恩^{1,2} 余承勇^{1,2} 郑虎^{1,2} 张婧^{1,2}

(1. 电子科技大学电子工程学院 成都 611731; 2. 国家电磁辐射控制材料工程技术研究中心 成都 610054)

摘要:围绕微波介质材料复介电常数高温测试关键技术进行系统设计,利用圆柱腔精确场解法实现材料介电性能变温特性测试。设计了 TM_{010} 模圆柱谐振腔,采用快速移动平台和感应加热技术,搭建了变温测试系统,实现了915 MHz,最高1 400 ℃的复介电常数快速自动化测试。针对测试系统受热后对测试结果的影响,提出了实时变温校准技术,减小了夹具介电波动引入的误差。以熔融石英为例进行重复性测试并与已有文献作对比,结果表明介电常数和损耗角正切高温下测试偏差分别在2%和6%以内。

关键词:复介电常数;圆柱谐振腔;精确场解;变温测试;校准

中图分类号: TM931 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 430.25

Cylindrical cavity high-temperature measurement system for complex permittivity

Zhang Yunpeng^{1,2} Li En^{1,2} Yu Chengyong^{1,2} Zheng Hu^{1,2} Zhang Jing^{1,2}

(1. School of Electronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. National Engineering Research Center of Electromagnetic Radiation Control Materials, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The systematic design around the key technology of high-temperature complex permittivity measurement of microwave medium is presented. Dielectric property test at variable temperature is realized by the exact field theory solution. A TM_{010} mode cylindrical resonant cavity is designed and variable-temperature test system is constructed by using rapid specimen movement platform and induction heating technology. The system can realize the complex permittivity test automatically at 915 MHz and up to 1 400 ℃. For the influence caused by the heating of the test system, the real-time calibration technology is presented to reduce the error from the fluctuation of dielectric property of the fixture. The repeated variable-temperature measurements of the complex permittivity of fused quartz sample are done, and the test data is compared with published data. The results indicate that the test deviations of permittivity and loss tangent at high temperature is less than 2% and 6% respectively.

Keywords: complex permittivity; cylindrical resonant cavity; exact field theory solution; variable-temperature testing; calibration

1 引言

微波介质材料普遍应用于军事、医疗以及航空航天等各个领域。对介质材料性能指标的准确测试能够评判

材料性能的优劣,对材料的生产和研发具有重要指导意义^[1-4]。微波材料的介电性能主要用复介电常数来表征,其测试方法分网络参数法和谐振腔法两大类^[1]。目前关于复介电常数的测试大多是在常温条件下^[2-6],针对变温测试的系统还不是很多,而复介电常数与温度之间表征

出的是非线性关系^[7],这会对电磁波的传输产生很大的影响。另外,随着微波加热、催化、干馏等微波处理技术的发展,了解材料的介电性能,尤其是损耗随温度的变化规律,对微波处理过程的控制技术至关重要^[8]。因此,建立一套能够在变温条件下准确表征材料介电性能的测试系统,获得复介电常数随温度的变化关系,对于相关领域的研究具有重要意义。

虽然高温下任何方法的测量原理都与室温相同,但当样品温度升高时会出现许多技术难题。高温环境增加了参数的不确定性,使得测量精度随着温度的增加而降低。高温测试在系统稳定性、集成性和操作性上要求更高,不仅需要改进校准技术,更需要提供一个安全、可靠和自动化的测试环境。

在各测试方法中,圆柱腔谐振法由于其较高的测试精度而在材料变温复介电常数测试领域得到了应用。美国 ASTM 在 2001 年制定了室温 ~1 650 °C 的微扰法变温测试标准^[9],测试频率覆盖了 0.5 ~ 50 GHz,在不同的频段选择不同的测试腔体。Hutcheon 等人^[10-11]采用 TM_{0n0} 模圆柱腔,提出加热和测试分离的复介电常数变温测试技术,实现了 0.05 ~ 3 GHz、温度高达 1 400 °C 的复介电常数测试。该测试系统自动化程度不高,样品冷却作用引入的误差较大。Meng 等人^[12]采用将圆柱腔整体加热的方法,实现了 2 ~ 20 GHz、20 °C ~ 1 000 °C 复介电常数变温测试。该系统腔体需在真空炉中加热,因此对腔体材料要求较高,测试夹具损耗严重,且高温下需对腔体电导率和尺寸进行修正。Canos 等人^[13]基于圆柱谐振腔 TM₀₁₀ 单一模式,采用微波加热与红外测温,在 2.45 GHz 实现最高 450 °C 的材料复介电常数测试。Catalá-Civera 等人^[14]设计了双模圆柱谐振腔,利用加热模式 TE₁₁₁ 和测试模式 TM₀₁₀ 实现了最高 1 000 °C 的变温复介电常数测试。然而,利用微波加热进行测试的方法均只采用单一频点,且对样品的损耗有一定的要求,当待测样品为低损耗材料时难以提高测试温度。利用圆柱腔进行高温复介电常数测试的技术已经发展了几十年,但仍面临很多挑战,如误差控制、系统稳定性、测试精度等。

本文采用圆柱谐振腔作为测试夹具,考虑到样品高温长时测试的需要,采用加热和测试分离的测试技术,利用精确场解法推导出考虑了空气间隙层的 4 层介质加载特征方程。针对介质导管在高温热传导作用下其介电波动问题,提出了实时变温校准技术,进一步减小了测试误差。针对 ISM (industrial scientific medical) 频段之一的 915 MHz 设计了圆柱腔,并与测试、加热及传动模块进行集成,搭建了相应的变温测试系统,实现室温 ~1 400 °C 范围内对介质材料复介电常数的快速自动化测试,为微波材料的变温测试以及高温应用提供了相关的技术支撑。

2 测试原理

2.1 圆柱腔精确场解法

利用圆柱腔进行复介电常数测试时,有微扰法和精确场解法两种方法^[15]。微扰法是一种测试精度较高的方法,通过把待测样品放置于腔体中电场或者磁场最强的地方,根据微扰前后谐振频率的偏移和品质因数 Q 的变化,推导出复介电常数或复磁导率。由于该测试方法是基于介质微扰理论,因此适用于低损耗和低介电材料的测试。对于高损耗或高介电材料,其产生的扰动太大,从而使得微扰法测试精度降低。精确场解法是利用麦克斯韦方程和边界条件对加载介质后的场进行求解,从而推算出待测材料的复介电常数。相比于微扰法,精确场解法对较高损耗、较高介电材料的计算精度要高一些^[16]。在变温测试过程中,由于材料复介电常数随温度变化规律不明确,因此精确场解法更适合变温复介电常数的测试。

本文采用加载介质导管的圆柱谐振腔进行测试,加热区与测试区分离,待测样品在加热后通过介质导管导入测试区,因此在样品与介质管之间会存在空气间隙,样品不能完全填充在介质导管内。为减小测试误差,本文考虑了空气间隙的影响,建立了 4 层介质加载样品的物理模型,将圆柱腔划分为相对复介电常数分别为 ϵ_{ri} ($i=1,2,3,4$) 的 4 个区域,如图 1 所示。选用 TM₀₁₀ 模作为工作模

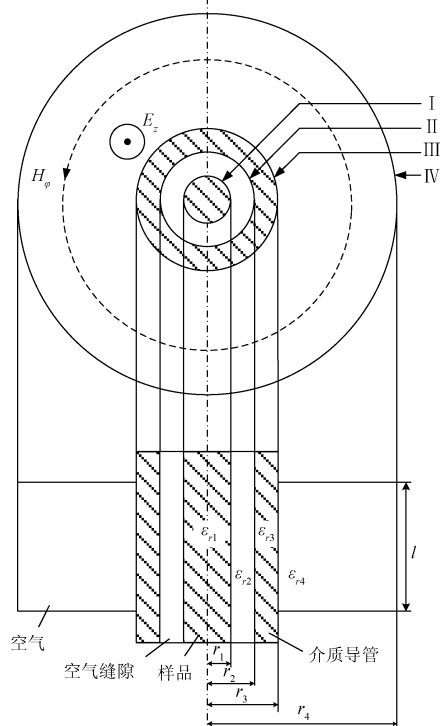


图1 多层介质加载的 TM₀₁₀ 模圆柱谐振腔

Fig. 1 Schematic diagram of the TM₀₁₀ mode cylindrical cavity loaded with the multilayer mediums

式,该模式的场分量只有 E_z 和 H_ϕ , E_z 集中在轴线附近。

根据电磁场标量波函数理论^[17],在圆柱坐标系中, TM_{0n0} 模式的场形式为:

$$E_z = K_1 J_0(kr) + K_2 N_0(kr) \quad (1)$$

$$H_\phi = j \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} [K_3 J_1(kr) + K_4 N_1(kr)] \quad (2)$$

式中: $r = r_i$ ($i = 1, 2, 3, 4$) 为各层介质半径, J_i ($i = 0, 1$) 为第 1 类 i 阶贝塞尔函数, N_i ($i = 0, 1$) 为第 2 类 i 阶贝塞尔函数, 系数 K_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 为常数, 传播常数 $k = k_0 \sqrt{\varepsilon_{ri}}$, 且有:

$$k_0 = 2\pi f^* \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \quad (3)$$

在式(3)中, 频率 f^* 是复频率, 它与圆柱腔谐振频率 f 及品质因数 Q 具有如下关系^[18]:

$$f^* = f \left(1 + \frac{j}{2Q} \right) \quad (4)$$

联合式(1), 应用 E_z 在边界 I、II、III 上的电场边界条件, 可获得如下等式:

$$J_0(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r1}} r_1) = A_1 J_0(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r2}} r_1) + A_2 N_0(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r2}} r_1) \quad (5)$$

$$A_1 J_0(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r2}} r_2) + A_2 N_0(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r2}} r_2) = A_3 J_0(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r3}} r_2) + A_4 N_0(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r3}} r_2) \quad (6)$$

$$A_3 J_0(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r3}} r_3) + A_4 N_0(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r3}} r_3) = A_5 J_0(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r4}} r_3) + A_6 N_0(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r4}} r_3) \quad (7)$$

联合式(2), 应用 H_ϕ 在边界 I、II、III 上的磁场边界条件, 可获得如下等式:

$$\sqrt{\varepsilon_{r1}} J_1(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r1}} r_1) = \sqrt{\varepsilon_{r2}} A_1 J_1(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r2}} r_1) + \sqrt{\varepsilon_{r2}} A_2 N_1(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r2}} r_1) \quad (8)$$

$$\sqrt{\varepsilon_{r2}} A_1 J_1(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r2}} r_2) + \sqrt{\varepsilon_{r2}} A_2 N_1(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r2}} r_2) = \sqrt{\varepsilon_{r3}} A_3 J_1(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r3}} r_2) + \sqrt{\varepsilon_{r3}} A_4 N_1(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r3}} r_2) \quad (9)$$

$$\sqrt{\varepsilon_{r3}} A_3 J_1(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r3}} r_3) + \sqrt{\varepsilon_{r3}} A_4 N_1(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r3}} r_3) = \sqrt{\varepsilon_{r4}} A_5 J_1(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r4}} r_3) + \sqrt{\varepsilon_{r4}} A_6 N_1(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r4}} r_3) \quad (10)$$

其中, 所有系数 A_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) 均为常数。

应用空气介质与金属在 IV 处的边界条件, 有:

$$E_z = -Z_m H_\phi \quad (11)$$

其中 Z_m 为表面阻抗, 表达式为:

$$Z_m = (1 + j) \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}} \quad (12)$$

其中 ω 为角频率, σ 为金属电导率, 可获得如下等式:

$$A_5 J_0(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r4}} r_4) + A_6 N_0(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r4}} r_4) = (1 - j) \sqrt{\frac{\omega \varepsilon_{r4} \varepsilon_0}{2\sigma}} [A_5 J_1(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r4}} r_4) + A_6 N_1(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r4}} r_4)] \quad (13)$$

式(5)~(10)和(13)可写为如下的矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_4 & c_5 & c_6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_7 & c_8 & c_9 & c_{10} & 0 & 0 \\ 0 & c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{15} & c_{16} & c_{17} & c_{18} \\ 0 & 0 & 0 & c_{19} & c_{20} & c_{21} & c_{22} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{23} & c_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式(14)可进一步简化为 $[\mathbf{0}] = [\mathbf{C}] [\mathbf{A}_i]$ ($i = 0, 1, \dots, 6$) 的形式, 其中 $A_0 = 1$, $[\mathbf{C}]$ 为由系数 c_i ($i = 1, 2, \dots, 24$) 构成的方阵。

式(14)要有非零解 $[\mathbf{A}_i]$, 则 $[\mathbf{C}]$ 的行列式需为 0, 得到如下特征方程:

$$\det \mathbf{C} [r_1, r_2, r_3, r_4, \varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}, \varepsilon_{r3}, \varepsilon_{r4}, \sigma, f^*] = 0 \quad (15)$$

其中, 腔壁电导率 σ 和仅有空气填充时的空腔品质因数 Q_c 的关系如下:

$$\sigma = \frac{[Q_c (1/r_4 + 1/l)]^2}{\pi f u_0} \quad (16)$$

另外, 由于上下壁开孔的影响, r_4 不能用实际物理尺寸代入, 而是通过式(17)获得其等效值。

$$\frac{c}{f_0} = \frac{2\pi r_4}{u_{0n}} \quad (17)$$

式中: c 为自由空间光速, f_0 为仅有空气填充时的空腔谐振频率, u_{0n} 为第一类贝塞尔函数的第 n 个根, n 的取值与谐振模式有关。

实际测试中, 加载介质的半径 r_1 、 r_2 、 r_3 及腔体高度 l 为已知, ε_{r2} 和 ε_{r4} 恒为 1, ε_{r3} 可通过实时校准获得, σ 和 r_4 分别由式(16)和(17)通过测得的谐振参数求得, 则加载待测柱状样品后解式(15)便可得到样品的相对复介电常数 ε_{r1} 。本文使用数学编程软件 MATLAB 对式(15)进行求解, 由于贝塞尔函数的根值存在多值性, 需要设定根的求解范围, 因此需要预先知道待测样品复介电常数的大致范围以方便求解。

2.2 实时变温校准

由于介质导管连接加热区与测试区, 加热过程中的热传导作用使腔内的介质导管有一定的升温, 同时高温样品插入圆柱腔后也会对腔内介质导管进行加热, 尤其在 1 000 °C 以上的长时测试过程中热传导更为明显。介质导管受热后其复介电常数将发生变化, 进而影响样品变温测试精度。因此本文针对研制的测试系统提出一种实时校准技术, 能够对变温下介质导管的相对复介电常数 ε_{r3} 进行精确测定。

由于系统加热区和测试区分离, 当样品位于加热区进行加热时, 圆柱腔内仅加载介质导管, 即 $\varepsilon_{r1} = 1$, 因此 ε_{r3} 可由式(15)求得。实际测试中, 当样品被加热到测试

温度后,在移动样品进入测试腔体前,先测得腔体的谐振频率和品质因数,结合式(15)~(17)得到当前状态下介质导管的实时相对复介电常数值,并存储于测试软件中。下一时刻当样品进入圆柱腔后可代入该值进行计算。利用这种方法,每次测试前介质导管的相对复介电常数得到了校准,测试精度更高。

3 测试系统

3.1 TM₀₁₀模圆柱谐振腔设计

针对复介电常数变温测试系统,本文设计了一个圆柱谐振腔。采用耐高温、低损耗、热稳定性好的刚玉管作为介质导管,其外径 $2r_3=10\text{ mm}$,内径 $2r_2=7\text{ mm}$,相对复介电常数约为 $8-j0.05$ 。对于 TM_{010} 模,其谐振频率跟腔体半径 r_4 和刚玉导管介电常数有关。由测试频率,根据式(17),取 $n=1$,可反算出腔体半径 r_4 。而品质因数与 r_4 、腔体高度 l 及刚玉导管介电损耗有关。综合考虑谐振腔 Q 值大小和加工成本,通过仿真优化,最终确定腔体半径为 124 mm ,腔体高度为 19 mm 。此外,开于腔体中央的样品孔直径为 10.5 mm ,稍大于刚玉导管外径。由于构成了截止圆波导,样品孔对腔体性能影响不是很大。谐振腔通过上壁的耦合环激励起相应的模式。利用HFSS仿真软件(采用本征模式)对圆柱谐振腔建模得到 TM_{010} 模场分布,如图2所示。仿真得到的谐振频率和 Q 值分别为 916 MHz 和 $6\,410$ 。

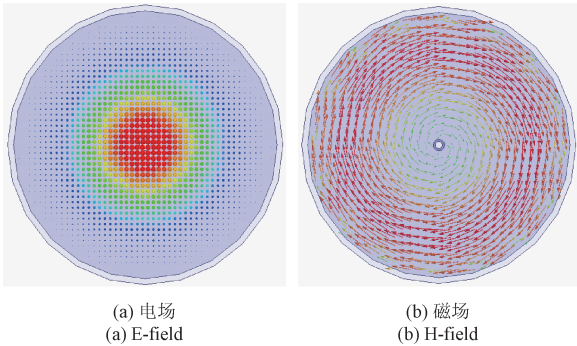


图2 圆柱腔TM010模场分布图

Fig.2 Field distribution of the cylindrical cavity TM010 mode

实际加工中腔体材料采用45号钢,内表面镀银来提高电导率,以减小导体损耗,进而提高 Q 值。腔盖周围均匀分布18个螺钉,使腔盖和腔体紧密衔接。上盖的耦合环通孔直径为 2 mm ,采用SMA接头和同轴线制作耦合环,其大小为所需频率波长的 $1/8\sim 1/10$,这样可获得合适的耦合量。加工的实物如图3所示。

3.2 变温测试系统设计

为实现快速自动化测试,本系统集成测试模块

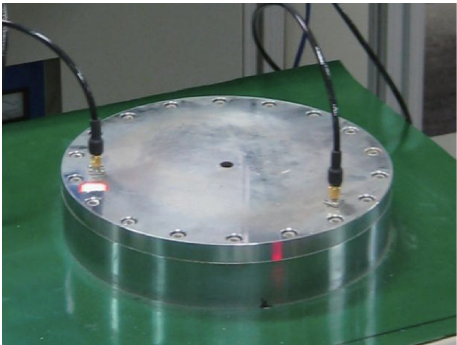


图3 圆柱谐振腔加工实物

Fig.3 Picture of the cylindrical cavity

(圆柱谐振腔、矢量网络分析仪(VNA)、计算机),加热模块(感应加热设备、热电偶、温控仪、石墨发热体、隔热砖套筒、水冷循环机)和传动模块(气泵、气缸、传动平台、接近开关)。各模块均连接到计算机,由软件实现自动化控制。系统框图及实物如图4、5所示。

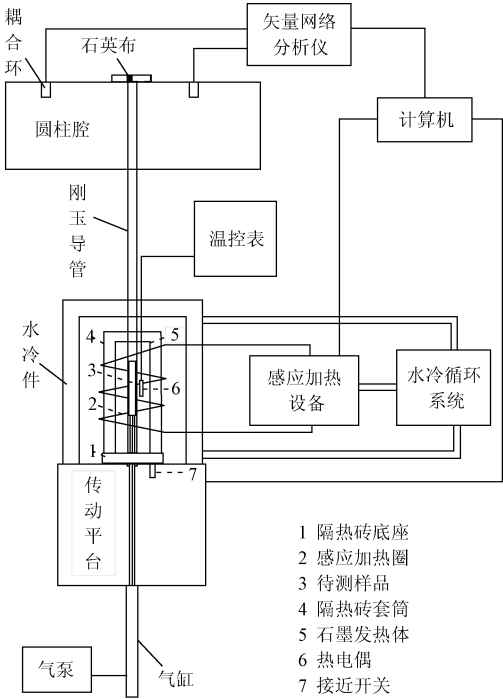


图4 圆柱腔复介电常数变温测试系统

Fig.4 Block diagram of the cylindrical cavity complex permittivity variable-temperature measurement system

系统使用感应加热设备对发热体进行加热,其安全可靠,成本低、加热效率高。选用石墨作为发热体,感应线圈对石墨加热后,热量传递给置于刚玉导管内的待测样品,同时石墨周围包裹隔热砖套筒,起到保温与隔热作用。使用B型热电偶作为温度传感器,插入石墨套筒中与样品同一高度处并紧靠刚玉导管,这样可认为样品温



图 5 圆柱腔复介电常数变温测试系统实物
Fig. 5 Picture of the cylindrical cavity complex permittivity variable-temperature measurement system

度基本等于热电偶处温度。通过与热电偶连接的温控仪实时显示样品的加热温度。

本系统由于加热与测试分离,样品由加热区移动到测试区过程中温度会有所下降,造成温度测量误差。本文针对该问题,研制了气动装置并由计算机控制。当温度到点后,软件控制感应加热装置暂停加热,同时气动阀门向气缸内注入压缩气体,推动传动平台将样品快速抬升至腔体中测试位置。刚玉导管末端的石英布能够遮挡样品,避免其飞出腔体。接近开关检测到样品到位后,触发 VNA 对腔体谐振频率和品质因进行测量并记录,整个过程可在 1 s 内完成,实现了快速自动化测试。测试完成后 VNA 给出反馈信号,控制气动装置使样品快速回到加热区继续进行加热。由于快速测试技术的引入,减小了

温度测量误差,保证了一定的样品温度稳定性,也使得高温样品对测试区刚玉导管的热传导作用减弱,减小了刚玉导管复介电常数变化对谐振参数测量的影响,提高了样品测试精度。

4 测试结果

4.1 空腔测试结果

把加载了刚玉导管的圆柱腔作为整体来测量空腔的谐振频率和品质因数,本文使用 E8363B 矢量网络分析仪进行空腔测试,其谐振频率和品质因数分别为 917 MHz 和 5 967。与仿真结果相比,谐振频率基本吻合,而品质因数由于腔体中央开孔及腔壁的有限电导率,有一定的降低,但也在允许范围之内。

4.2 常温测试结果

为验证本测试系统的准确性和稳定性,进行了常温重复性测试。样品为圆杆状,对于样品直径的选取,太小会增大样品的倾斜和偏心程度,影响测试精度;太大会造成样品滑动时与刚玉导管的摩擦增大,影响系统稳定性。样品高度要求大于 30 mm,以保证样品在纵向完全填充圆柱腔,与电场充分作用。本文分别对直径均为 6 mm 的聚四氟乙烯、蓝宝石和熔融石英(图 6)进行了常温重复性测试,测试结果列于表 1。从表中可以看出,3 种样品的测试结果均比较稳定,测试值与参考值比较吻合,表明本文的测试原理和所设计的圆柱腔稳定可靠。

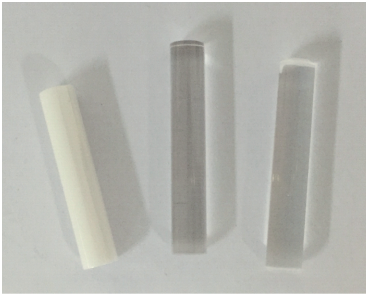


图 6 被测样品
Fig. 6 Specimens under test

表 1 聚四氟乙烯、熔融石英、蓝宝石常温重复性测试结果

Table 1 Repeatability test results of Teflon, quartz and sapphire in room temperature

测试 次数	聚四氟乙烯		熔融石英		蓝宝石	
	ϵ_r'	$\tan\delta$	ϵ_r'	$\tan\delta$	ϵ_r'	$\tan\delta$
1	2.067	4.98×10^{-4}	3.821	4.99×10^{-4}	10.010	9.26×10^{-4}
2	2.077	4.97×10^{-4}	3.831	5.00×10^{-4}	10.066	9.02×10^{-4}
3	2.055	5.02×10^{-4}	3.811	5.01×10^{-4}	10.026	9.22×10^{-4}
4	2.063	5.11×10^{-4}	3.820	4.92×10^{-4}	9.974	9.14×10^{-4}
5	2.065	5.27×10^{-4}	3.801	5.03×10^{-4}	10.104	9.17×10^{-4}
参考值 ^[7,14]	2.066	7.00×10^{-4}	3.850	3.33×10^{-4}	9.900	1.00×10^{-3}

4.3 变温测试结果

本文对直径 6 mm 的熔融石英样品进行变温测试,以 100 ℃ 为间隔,温度到点后恒温 3 min,从室温到 1 400 ℃ 进行了 3 次重复性测试。每一温度点测试前均对空腔进行了实时校准。由于石英的热膨胀系数小于

$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,因此其半径随温度的变化可忽略不计。石英加载后谐振频率为 915 MHz,测试结果列于表 2。由于没有 915 MHz 熔融石英变温复介电常数的相关文献数据,本文将所测数据与 MIT^[19] 和 CRC^[20] 分别在 8.52 和 9.4 GHz 的数据进行了对比,如图 7 所示。

表 2 石英 915 MHz 重复性变温测试结果
Table 2 Repeatability test results of quartz at 915 MHz in variable-temperature

温度/℃	ε_r			$\tan\delta$		
	测试 1	测试 2	测试 3	测试 1	测试 2	测试 3
25	3.818	3.829	3.801	4.99×10^{-4}	5.11×10^{-4}	4.85×10^{-4}
100	3.823	3.835	3.842	5.26×10^{-4}	5.83×10^{-4}	5.09×10^{-4}
200	3.83	3.839	3.827	5.12×10^{-4}	5.78×10^{-4}	5.36×10^{-4}
300	3.84	3.857	3.831	5.20×10^{-4}	5.96×10^{-4}	6.19×10^{-4}
400	3.852	3.881	3.848	5.76×10^{-4}	5.38×10^{-4}	5.53×10^{-4}
500	3.859	3.89	3.872	5.42×10^{-4}	5.74×10^{-4}	5.89×10^{-4}
600	3.874	3.903	3.87	5.59×10^{-4}	6.12×10^{-4}	5.96×10^{-4}
700	3.908	3.875	3.867	6.15×10^{-4}	5.64×10^{-4}	5.80×10^{-4}
800	3.898	3.95	3.916	5.76×10^{-4}	6.77×10^{-4}	6.49×10^{-4}
900	3.941	3.932	3.922	5.92×10^{-4}	5.51×10^{-4}	6.89×10^{-4}
1000	3.928	3.959	3.971	6.53×10^{-4}	6.14×10^{-4}	6.34×10^{-4}
1100	3.937	3.974	3.992	6.25×10^{-4}	6.35×10^{-4}	6.66×10^{-4}
1200	3.965	3.982	3.979	6.99×10^{-4}	7.42×10^{-4}	7.21×10^{-4}
1300	3.958	3.985	3.998	7.25×10^{-4}	7.17×10^{-4}	7.88×10^{-4}
1400	3.941	4.035	3.989	8.58×10^{-4}	7.89×10^{-4}	8.69×10^{-4}

从表 2 和图 7 可以看出,3 次变温测试结果趋于一致,1 400 ℃ 时 ε_r 和 $\tan\delta$ 测试偏差分别在 2% 和 6% 以内,系统稳定性良好。石英相对介电常数和损耗角正切值随着温度升高均呈现出增大的趋势,符合变温测试复介电常数的变化规律^[21]。所测相对介电常数随温度的变化值与 MIT 和 CRC 的数据基本一致;损耗角正切随温度变化值与 MIT 数据基本一致,但与 CRC 数据相比要小很多,尤其在高温。分析原因,一方面是由于所测石英纯度有所不同,另一方面,也是最主要的,是因为本文和 MIT 均使用谐振法进行测试,相比于 CRC 使用的终端短路法,谐振法对于低损耗材料具有更高的测试精度。经实际测量,本测试系统复介电常数测量范围为 $\varepsilon_r' = 1 \sim 30$, $\tan\delta = 1 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-2}$ 。

4.4 测试误差分析

根据圆柱腔精确场解原理,可知复介电常数的求解与谐振频率、品质因数、腔体尺寸及其电导率、介质导管尺寸及其复介电常数、样品尺寸及其位置等有关,这些参数的测量不确定度构成了测试结果的不确定度,因此对上述参数的精确测量至关重要。此外,腔体中央开孔使得实际模型与理论模型不完全吻合,这也引入了一定的误差。另外,在加热过程中,热膨胀效应会使样品体积发生变化,导致样品半径增大;在移动过程中,样品温度会

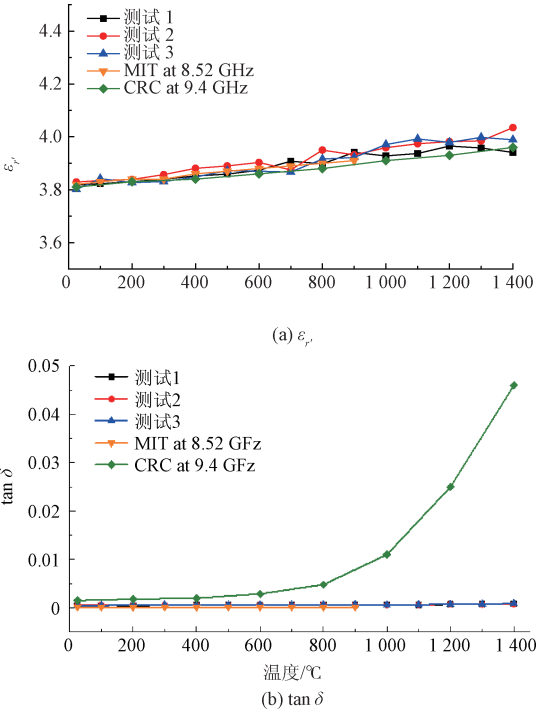


图 7 熔融石英变温测试结果对比

Fig. 7 Comparison of variable-temperature test results of fused quartz

有一定的降低。这些因素均会造成测试误差。为获得更高的测试精度,需引入样品的热膨胀系数及冷却系数,对样品半径和实时测试温度进行修正,以减小变温测试误差。本文由于采用了快速测试技术,使得样品移动和测试时间很短,可忽略样品冷却过程,同时每一温度点测试前的实时校准,也进一步提高了测试精度。

5 结 论

本文基于 TM_{010} 模圆柱腔精确场解法求解材料复介电常数,设计了一个工作在 915 MHz 的圆柱谐振腔,组建了一套能实现常温 $\sim 1\,400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的复介电常数变温测试系统。考虑了样品和介质导管间的空气间隙,完善了测试原理。研制了样品快速移动平台、优化了快速测试程序,针对变温环境对测试夹具的影响,提出了实时校准技术,进一步提高了变温测试精度。对熔融石英样品进行了重复性变温测试,得到高温下介电常数和损耗角真切偏差分别在 2% 和 6% 以内,验证了本系统的稳定性,同时测试值和已出版文献数据也具有良好的一致性,系统测试精度较高。

为使系统趋于完善,今后的工作主要是扩展测试温度范围、增加测试频点、提高腔体性能,并针对样品位置偏移和腔体开孔等引入的不确定性进行更为深入的分析。

参考文献

- [1] 何小瓦,李恩,张其劭,等. 介质材料复介电常数变温测量技术综述[J]. 宇航材料工艺, 2005, 35(1): 20-23.
HE X W, LI EN, ZHANG Q SH, et al. Review of variable temperature measurement technique for complex permittivity of dielectric materials [J]. Aerospace Materials & Technology, 2005, 35(1): 20-23.
- [2] 辛文辉,曹忠鲁,辛亚娟,等. 植入式医学装置电场耦合式电能传输新方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8):1816-1821.
XIN W H, CAO ZH L, XIN Y J, et al. Novel wireless power transfer method based on electrical-field coupling for implantable medical devices [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(8):1816-1821.
- [3] 朱红青,辛邈,常明然,等. 煤介电常数测量技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(9):6-12.
ZHU H Q, XIN M, CHANG M R, et al. Research progress on measuring technology of coal dielectric constant [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(9): 6-12.
- [4] 任水生. 微波板材介电常数 ε 的测量方法[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(3):38-41.
REN SH SH. Method about how to measure ε of

- microwave printed board [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(3): 38-41.
- [5] 黄云志,郑亮,汪蓓蓓. 多波长边缘电场传感器介电测量系统的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(6):853-859.
HUANG Y ZH, ZHENG L, WANG B B. Research on permittivity measurement for multi-wavelength fringing electric field sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(6): 853-859.
- [6] 张康,武彤,滕俊恒. 开口同轴探头横电磁波模型法测量液体复介电常数[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(7):945-952.
ZHANG K, WU T, TENG J H. Transverse electromagnetic model based open-ended coaxial probe technique for liquid complex dielectric constant measurement [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(7): 945-952.
- [7] 李恩,透波材料介电性能高温宽频测试技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2009.
LI EN. Study of high temperature and broadband measurements of dielectric properties of microwave transparent materials [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.
- [8] 刘晨辉. 基于冶金物料介电特性的微波加热应用新工艺研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2014.
LIU CH H. New processing research on microwave heating based on dielectric property of metallurgical materials [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014.
- [9] ASTM D 2520. Standard test methods for complex permittivity (dielectric constant) of solid electrical insulating materials at microwave frequencies and temperatures to 1650°C [S]. 2010.
- [10] HUTCHEON R, JONG M D, ADAMS F. A system for rapid measurements of RF and microwave properties up to 1400°C . I: Theoretical development of the cavity frequency-shift data analysis equations [J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 1992, 27(2): 87-92.
- [11] HUTCHEON R, JONG M D, ADAMS F, et al. A system for rapid measurements of RF and microwave properties up to 1400°C . II: Description of apparatus, data collection techniques and measurements on selected materials [J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 1992, 27(2): 93-102.
- [12] MENG B, BOOSKE J, COOPER R. A system to measure complex permittivity of low loss ceramics at

- microwave frequencies and over large temperature range [J]. Review of Scientific Instruments, 1995, 66(2): 1068-1071.
- [13] CANÓS A J, PENARANDA-FOIX F L, CATALA-CIVERA J M, et al. Measurement of dielectric properties at high temperatures in real-time with cylindrical cavity [C]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 2010: 1044-1047.
- [14] CATALÁ-CIVERA J M, CANÓS A J, PLAZA-GONZÁLEZ P, et al. Dynamic measurement of dielectric properties of materials at high temperature during microwave heating in a dual mode cylindrical cavity [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015, 63(9): 2905-2914.
- [15] 栗政. 冶金材料微波介电性能变温测试技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2013.
- LI ZH. Study of microwave dielectric properties of metallurgy materials at variable temperature [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [16] LI S, AKYEL C, BOSISIO R G, et al. Precise calculations and measurements on the complex dielectric constant of lossy materials using TM010 cavity perturbation technique [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1981, 29(10): 1041-1047.
- [17] RIEGERT R J, MEHDIZADEH M. Microwave/RF applications and probes for material heating, sensing and plasma generation a design guide [M]. Amsterdam: Elsevier, 2010: 340-342.
- [18] KANPAN P, KHANSALEE E, PUANGNERNMAK N, et al. TM010 mode cylindrical cavity for complex permittivity measurement of liquid using field analysis technique [C]. Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2012: 1-4.
- [19] WESTPHAL W B, IGLESIAS J. Dielectric measurements on high-temperature materials [R]. Massachusetts Inst of tech Cambridge lab for insulation research, 1970.
- [20] SHACKELFORD J F, ALEXANDER W. Materials science and engineering handbook [M]. New York: CRC Press, 2001: 301-302.
- [21] CHEN L F, ONG C K, NEO C P, et al. Microwave electronics: Measurement and materials characterization. Microwave electronics: measurement and materials [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2004: 493.

作者简介



张云鹏, 1990 年出生, 2013 年于电子科技大学获得学士学位, 现为电子科技大学博士研究生, 主要研究方向为微波测量、天线理论及技术。

E-mail: zyp_ee@163.com

Zhang Yunpeng was born in 1990, received B. Sc. from University of Electronic Science and Technology of China in 2013. He is a Ph. D. candidate in University of Electronic Science and Technology of China now. His main research interests include microwave measurement, antenna theory and technology.



李恩(通讯作者), 1974 年出生, 分别在 1997、2003、2009 年于电子科技大学获得学士、硕士、博士学位, 现为电子科技大学教授、博士生导师, 主要从事微波测量、微波电路、微波遥感理论及应用等方面的研究工作。

E-mail: lien@uestc.edu.cn

Li En (Corresponding author) was born in 1974, received B. Sc., M. Sc. and Ph. D. all from University of Electronic Science and Technology of China in 1997, 2003 and 2009, respectively. He is a professor and Ph. D. tutor in University of Electronic Science and Technology of China now. His main research interests include microwave measurement, microwave circuit, microwave remote sensing and application.