

文章编号: 1671-7449(2024)06-0610-08

高温环境下低损耗材料电磁参数测试系统设计

李 龙, 姚金杰*, 杨志良, 白建胜, 王文凯, 高旭文

(中北大学 信息探测与处理山西省重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 为了准确评估低损耗材料在1200℃高温环境下的电磁性能, 基于波导传输反射法构建低损耗材料电磁参数测试系统, 实现宽频带变温特性的测试。采用磁控管微波加热技术快速且精准控制变温环境, 通过精确测量波导中电磁波的传输特性, 实现了对低损耗材料在高温环境下宽频带介电常数和磁导率的准确测量。高温实验以熔融石英为被测件得到的介电常数和磁导率相比标准值的测试误差小于2%, 损耗角正切测试误差小于 $0.003 + 10\% \tan \sigma_e$, 结果表明所设计系统具有高测量精度、强抗干扰能力和鲁棒性, 能够实现对低损耗材料的高温电磁参数性能测试。

关键词: 高温测试; 低损耗材料; 电磁参数测试系统; 传输反射法

中图分类号: TP27

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-7449.2024079

引用格式: 李龙, 姚金杰, 杨志良, 等. 高温环境下低损耗材料电磁参数测试系统设计[J]. 测试技术学报, 2024, 38(6): 610-617.

LI Long, YAO Jinjie, YANG Zhiliang, et al. Design of electromagnetic parameter test system for low loss materials under high temperature environment[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(6): 610-617.

Design of Electromagnetic Parameter Test System for Low Loss Materials Under High Temperature Environment

LI Long, YAO Jinjie*, YANG Zhiliang, BAI Jiansheng, WANG Wenkai, GAO Xuwen

(Shanxi Provincial Key Laboratory of Information Detection and Processing, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to accurately evaluate the electromagnetic properties of low-loss materials at 1200℃, the electromagnetic parameter testing system of low-loss materials based on the waveguide transmission reflection method is constructed to test the wide-band temperature variable characteristics. The magnetron microwave heating technology is used to quickly and accurately control the temperature-changing environment. By accurately measuring the transmission characteristics of electromagnetic waves in the waveguide, the wide band dielectric constant and permeability of low-loss materials under high temperature environments are accurately measured. In high temperature experiments, the test error of dielectric constant and permeability obtained by using fused quartz as the measured component is less than 2% compared with the standard value, and the test error of loss Angle tangent is less than $0.003 + 10\% \tan \sigma$. The results show that the designed system has high measurement accuracy, strong anti-interference ability and robustness, and can realize the performance test of electromagnetic parameters at high temperature for low-loss materials.

收稿日期: 2024-02-06

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(JCKY2021210B073, JCKY2022209A001)

作者简介: 李 龙(2000-), 男, 硕士生, 主要从事电磁参数测量、信号检测处理研究。E-mail: li001180@163.com。

* 通信作者: 姚金杰(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要从事位置服务、微波与毫米波技术研究。E-mail: yyyjinjie@163.com。

Key words: high temperature test; low loss materials; electromagnetic parameter test system; transmission reflection method

0 引言

随着科技的发展,低损耗材料在航空航天、雷达通信等领域的应用越来越广泛^[1-2]。在高温和复杂环境下,低损耗材料的电磁性能对于保障电子设备的稳定运行至关重要。准确测量这些材料在高温下的介电常数和磁导率,对于材料的应用和优化具有重要意义^[3-4]。

目前,低损耗材料根据测试原理主要分为谐振法与网络参数法两种^[5-9],谐振法的主要优点在于其测试精度较高,测试结构相对简单,易于实现,但是局限性是测试频率范围较窄且需要采取相应的措施校准测试模式以提高测试精度;网络参数法的优点在于可以实现宽带扫频测试^[8],测试夹具结构简单,样品易于加工,但该方法对测试环境要求高。

对于研究材料在高温环境下的介电性能和磁性能,需要根据具体的测试条件和需求选择恰当的测试方法。波导传输线法属于网络参数法的一种,它能提供高精度的测量结果,误差较小,可以在较宽的频率范围内进行测试,能够适应不同频率下的电磁参数测量需求,具有抗干扰能力强、可重复性好和可扩展性强等优点^[10]。国外相关学者研制了一种微波腔体和加热系统,用改进的谐振腔微扰法动态测量介电材料在室温至 1 000 °C 的复介电常数,测试误差小于 5%^[11]。随后, Li 等^[12]采用自由空间法在 4~18 GHz 频率范围内测试了复合材料的吸波性能,测试温度为室温至 800 °C。国内,孙珊珊等^[13]利用双同轴及神经网络训练的测试方法,最终测得 2~2.8 GHz,室温至 500 °C 下材料的复介电常数;徐银芳等^[14]通过短路波导法,在室温到 1 600 °C 对电磁窗常用透波材料的高温复介电常数进行了测试;冀元等^[15]采用微带线法完成了介质材料在 1~40 GHz 频率范围内室温至 300 °C 介电常数测量,并对测量结果的不确定度进行评估。关于电磁参数测量,国内外已有不少研究,但大部分集中在方法研究,关于专门针对高温测试系统相关研究较少,且已有测试系统测试误差精度不高。

本文旨在研究低损耗材料在 X 波段、室温至 1 200 °C 高温环境下的电磁参数测试,设计了一种

利用波导传输反射法的低损耗材料高温电磁参数性能测试系统,以熔融石英为被测件得到的介电常数和磁导率相比标准值的测试误差小于 2%。

1 测试原理

基于波导传输反射法搭建的测试系统,核心在于准确采集样品两端的散射参数和透射参数,再通过此参数根据电磁学的基本知识反演出各个电磁参数。使用波导传输法进行电磁参数测试时,需要将待测材料放入波导中,并确保波导的两端与矢量网络分析仪的两个端口相连接。通过这种方式可以激励电磁波在波导的空腔中传输,当遇到待测介质材料时,部分电磁波会发生反射,而其余的则会透射,在这个过程中,电磁波的幅值和相位都会发生变化。Nicolson 差分算法是利用矩形波导测量电磁参数的经典方法,通过测量矩形波导中的传输和反射系数来提取材料的电磁参数。这种方法基于传输线理论,并结合了差分算法来求解材料的介电常数或磁导率。

矩形波导传输反射法的整个传输线内部可等效为互易对称的二端口网络。由于空气介质面与被测材料存在不连续性,电磁波传输至样品表面时发生多次反射和透射,电磁波在样品表面 A 和 B 之间的反射参数和传输参数如图 1 所示。

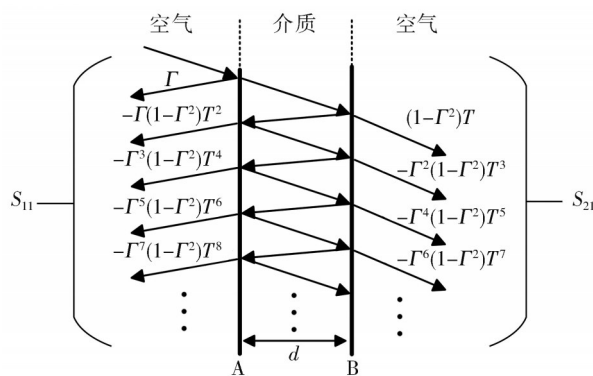


图 1 矩形波导内样品的电磁波传输

Fig. 1 Electromagnetic wave propagation of samples in a rectangular waveguide

用 V_1 表示入射电压, V_R 表示反射总电压, V_T 表示透射总电压, 则各个电压变化之间的关系为

$$V_R = S_{11}V_1, \tag{1}$$

$$V_T = S_{21}V_1. \tag{2}$$

若使源波电压 $V_1=1$, 则 S_{11} 表示总反射电压 V_R , S_{21} 表示总透射电压 V_T 。根据 Nicolson 差分算法, 设定

$$\begin{cases} V_1 = S_{21} + S_{11}, \\ V_2 = S_{21} - S_{11}, \\ K = \frac{1 - V_1 V_2}{V_1 - V_2}. \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)和式(2)可得

$$K = \frac{1 + S_{11}^2 - S_{21}^2}{2S_{11}}. \quad (4)$$

根据电磁波传输特性可推导出样品的反射系数 Γ 和传输系数 T 为

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1}, \quad (5)$$

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma}. \quad (6)$$

综合式(4)~式(6)可得被测样品材料的复磁导率 μ_r 和复介电常数 ϵ_r 为

$$\begin{cases} \mu_r = \frac{1 + \Gamma}{\Delta(1 - \Gamma) \sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}}, \\ \epsilon_r = \frac{\left(\frac{1}{\Delta^2} + \frac{1}{\lambda_c^2}\right) \lambda_0^2}{\mu_r}, \end{cases} \quad (7)$$

式中: d 为波导中被测样品片的厚度; Δ 为被测样品的衰减量, 表示为

$$\frac{1}{\Delta} = \pm j \frac{1}{2\pi d} \ln \frac{1}{T}. \quad (8)$$

通过矢量网络分析仪测量待测样品表面的 S_{11} 和 S_{21} 两个参数, 利用它们进一步计算出被测样品与空气介质交界面处的透射系数和反射系数。随后, 结合 NRW 算法求得被测样品本身的电磁参数。

在实际测试材料电磁参数的过程中, 由于高温测试时波导管等设备的存在, 还需将散射参数采集的参考面校准至样品两端。具体校准操作如图 2 所示, 首先进行矢量网络分析仪内部校准, S 参数的测量参考面会被校准至矢网端口位置, 在此基础上进行 TRL (Through-Reflect-Line) 校准, 使得矢网的测量参考端面可以从转接电缆接口的两个端面校准至更加贴近被测材料片的开孔夹具两侧表平面; 在完成上述步骤后, 还需进行去嵌入措施, 这一措施将矢网测量的 S 参数参考端面从开孔夹具的整体表面转换至夹具开腔内被测样品两端的表面, 进一步提高了测量的准确性和可靠性。



图 2 校准操作流程图

Fig. 2 Calibration operation flow chart

2 系统组成及各部件结构设计

2.1 系统组成

本文所介绍的测试系统主要由温控加热装置 (WBMW-RZ2)、测试波导 (BJ100)、矢量网络分析仪 (ZVA 40·VECTOR NETWORK ANALYZER) 和测试软件 (高温材料测试平台) 等部分组成。图 3 展示了波导法在高温测试中的应用系统结构。

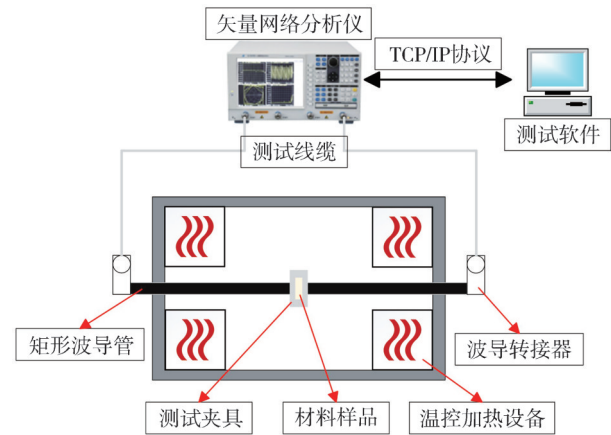


图 3 波导传输法系统结构

Fig. 3 System structure of waveguide transmission method

2.2 部分结构设计

2.2.1 高温波导管

为了保障在 $1200\text{ }^\circ\text{C}$ 高温条件下传输微波信号, 高温波导管采用碳纤维材质。碳纤维具有出色的耐高温性能、良好的热电导性, 能够在高温环境下保持稳定的性能。此外, 碳纤维材质更轻便, 更易于安装和使用。波导管实物与连接如图 4 所示。波导管和夹具通过定位销钉固定连接。按照频率范围 $8\sim 12\text{ GHz}$ 划分, 采用 BJ100 标准波导件。高温时波导 BJ100 插入损耗小于 5 dB 。

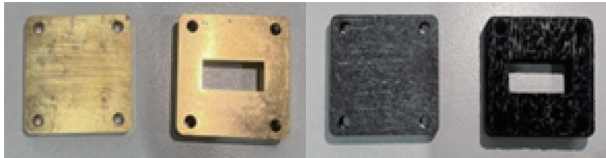


图 4 高温波导管实物与连接图

Fig. 4 High temperature waveguide and connection diagram

2.2.2 测试夹具

测试夹具不仅有固定样品的作用,也是进行TRL校准的工具。测试夹具实物如图5所示,金属板用作室温校准和室温测试,碳纤维传输板用作室温校准和高温测试,碳纤维短路板用作室温校准过程中的反射板。



(a) 金属板 (b) 碳纤维传输板

图5 校准夹具实物图

Fig. 5 Calibration fixture physical drawing

2.2.3 加热腔

保温加热腔是一种设备的内部结构,通常由保温材料制成,实物如图6所示,用于保持加热被测件和其周围环境的温度在一个设定范围内。它的主要作用是减少热量损失,提高热效率,并保证设备的稳定运行。



(a) 设备内部结构 (b) 设备俯视图

图6 加热腔实物图

Fig. 6 Heating chamber physical picture

2.2.4 温控加热装置

为满足快速且精准的温度变化需求,测试系统中的加热装置微波马弗炉(WBMW-RZ2)采用磁控管微波加热的方式。磁控管微波加热具有快速加热、精准控制变温环境、安全可靠、易于操作和环保健康等优点。加热装置外形结构如图7所示,相关参数如表1所示。

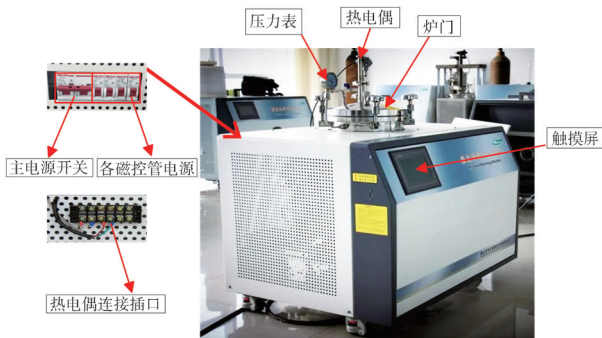


图7 高温炉

Fig. 7 High temperature furnace

表1 微波马弗炉相关参数说明

Tab. 1 Microwave Muffle furnace related parameters description

指标	参数
可加热材料	非易燃易爆的任何材料
加热方式	纯微波加热、传统电加热、混合加热
升温速率	0~1 000 °C/min 可任意设定, 可编程、分段控
工作温度	1 200 °C
长期工作温度	≤1 150 °C
测温方式	微波场专用传感器 (K型热电偶): 室温~1 200 °C
保护气体	氮气或其它惰性气体
外型尺寸(L×W×H)	730 mm×610 mm×700 mm

2.3 系统测试软件

在构建高温环境下低损耗材料电磁参数测试系统的过程中,开发了一套专用的系统测试软件。该软件具备高效的数据采集、处理与分析功能,能够精确测量并实时反馈材料的介电和磁性能参数。通过集成该软件,显著提升了测试系统的测试效率和测试结果的准确性。测试软件的模块结构图如图8所示,系统测试软件界面如图9所示。

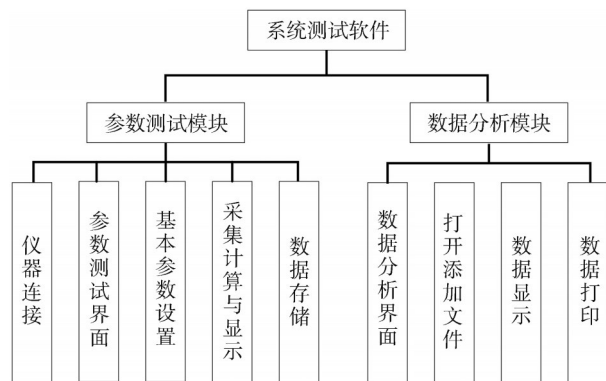


图8 测试软件结构框图

Fig. 8 Test software structure block diagram

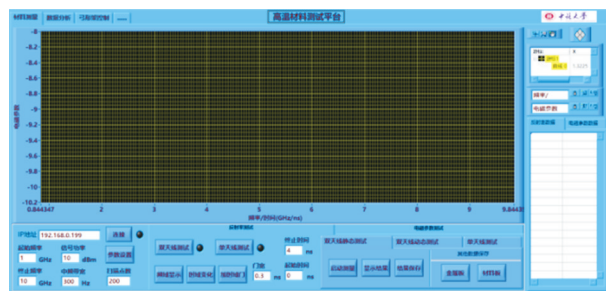


图9 系统测试软件界面

Fig. 9 System test software interface

3 测试结果分析

熔融石英作为一种介质材料,在高温环境、特定频率范围内可以表现出较低损耗的特性,具有很高的稳定性和可靠性,可以被归为低损耗材

料,故被选作高温测试系统的标样。低损耗材料并非仅指石英,还包括其他具有类似特性的材料。通过对熔融石英的介电性能及磁性能进行测试验证本文测试系统精度,温度值选择为室温、400℃、800℃和1200℃。采用控制变量法,首先在相同温度下进行流通氩气和稳定氩气实验环境测试效果对比分析;其次在稳定空气和稳定氩气

实验环境下,进行不同温度下熔融石英的介电性能及磁性能测试。

3.1 流通-稳定氩气环境下熔融石英测试结果

流通-稳定氩气实验环境下设定温度1000℃,熔融石英介电常数和磁导率测试结果如图10所示。

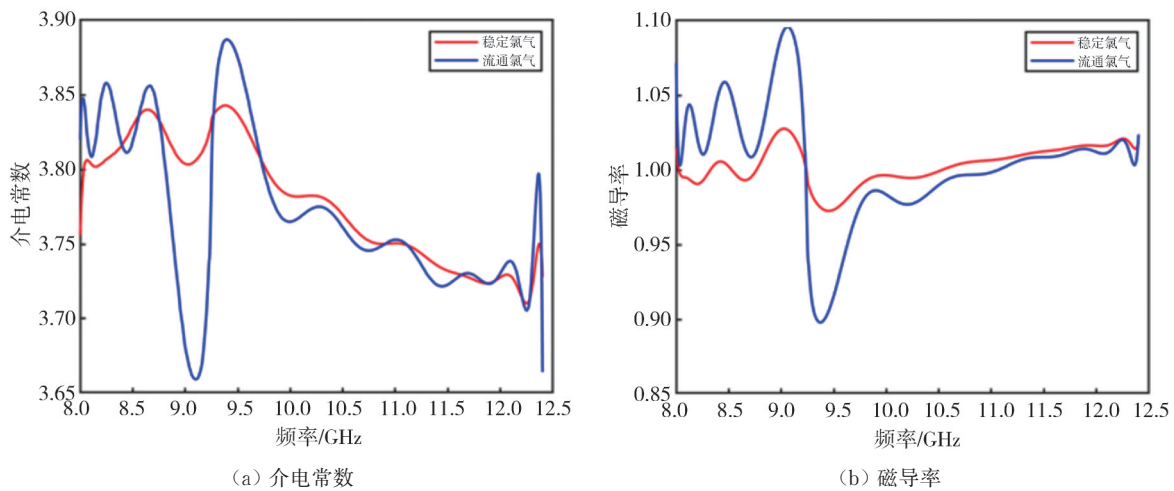


图10 测试结果
Fig. 10 Test result

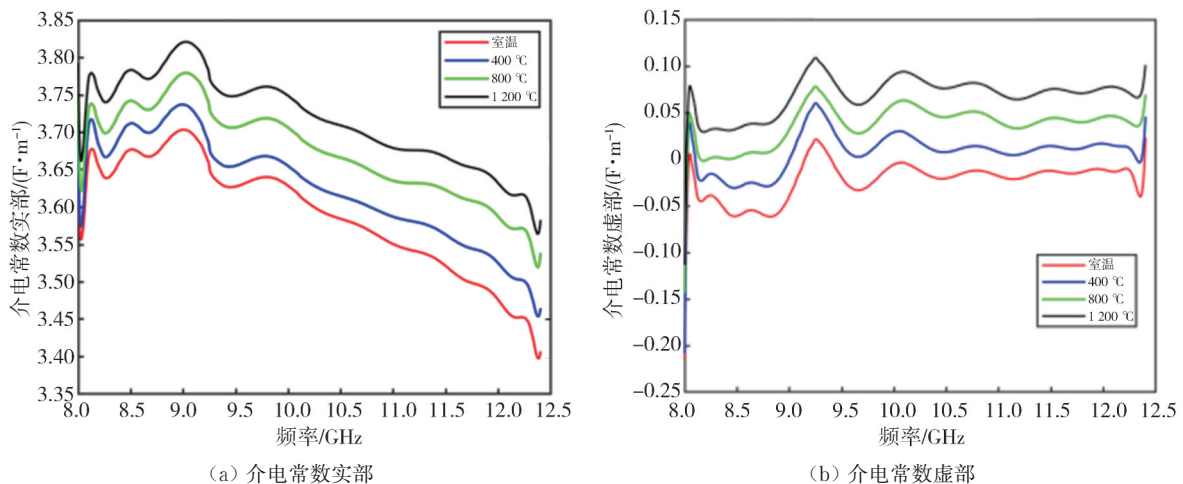
在稳定氩气环境下经过100次重复性实验求取实验均值,测试结果表明,被测件的介电常数和磁导率的波形波动相比流通氩气实验环境的效果更好,表明稳定氩气状态下对熔融石英玻璃的参数反演误差可以降到最小,故选择稳定氩气状态作为实验环境继续进行测试。

400℃、800℃、1200℃)的测试,经过100次重复性实验求取实验均值,熔融石英介电性能和介质磁性能测试结果如图11所示,选择部分频点的数值与标准值进行对比结果,如表2所示。

3.2 稳定空气熔融石英测试结果

分析上述测试结果,表明稳定空气环境下随着实验温度的上升,熔融石英介电性能和介质磁性的相关参数和温度呈正相关,和理论分析结果规律一致。

在稳定空气环境下,进行不同温度(室温、



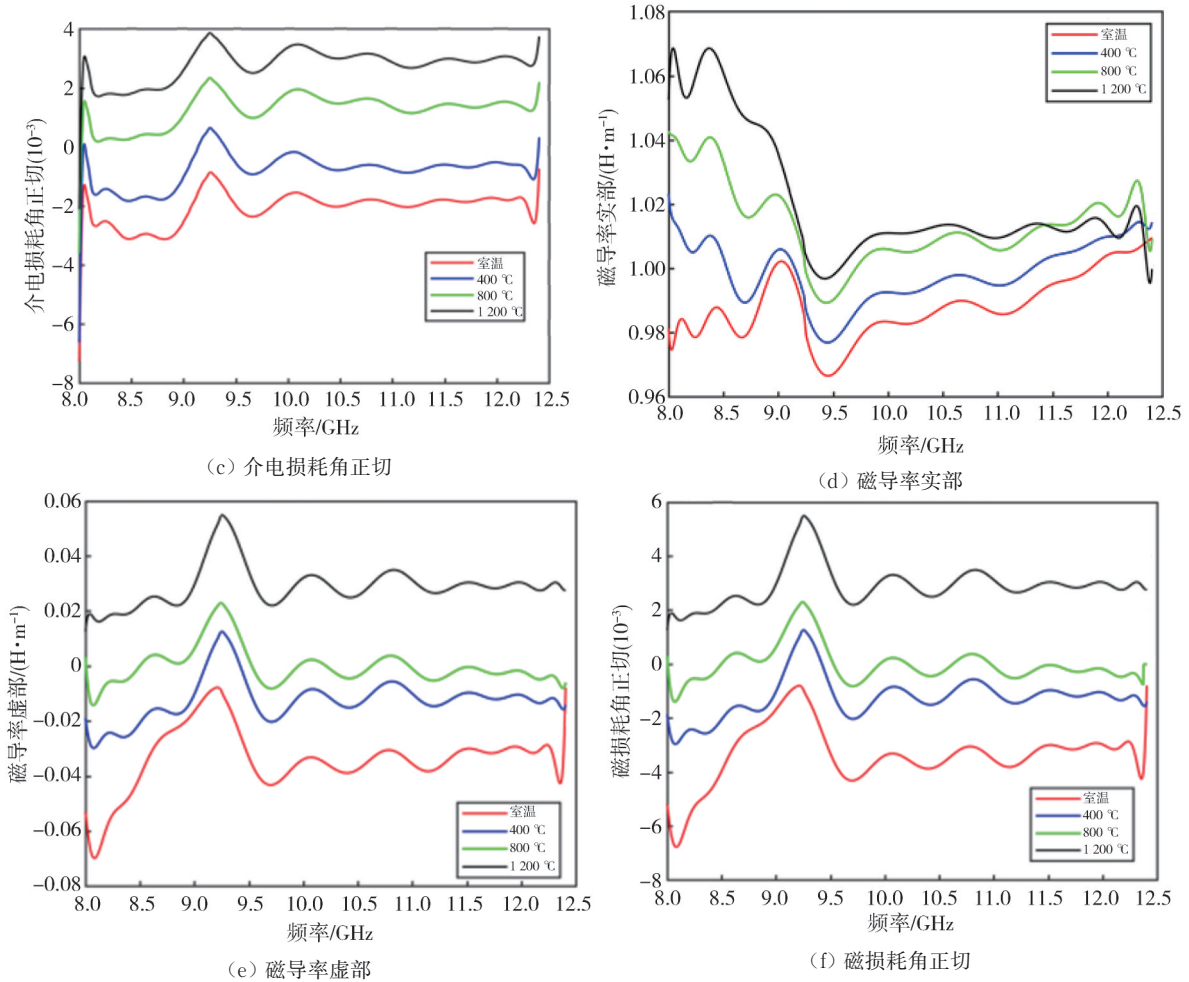


图 11 稳定空气测试结果

Fig. 11 Stabilized air test results

表 2 稳定空气测熔融石英结果对比表

Tab. 2 Comparison table of results of steady air measurement of fused quartz

频率/GHz	温度/°C	介电常数实部		
		标准值	测量值	误差/%
10	室温	3.690	3.628	1.68
	400 °C	3.730	3.655	2.01
	800 °C	3.770	3.706	1.70
	1 200 °C	3.810	3.749	1.60
频率/GHz	温度/°C	磁导率实部		
		标准值	测量值	误差/%
10	室温	1	0.984	1.60
	400 °C	1	0.993	0.70
	800 °C	1	1.006	0.60
	1 200 °C	1	1.011	1.10

表 3 稳定氩气测熔融石英结果对比表

Tab. 3 Comparison table of results of stable argon measurement of molten quartz

频率/GHz	温度/°C	介电常数实部		
		标准值	测量值	误差/%
10	室温	3.690	3.722	0.86
	400 °C	3.730	3.767	0.91
	800 °C	3.770	3.803	0.87
	1 200 °C	3.810	3.850	1.06
频率/GHz	温度/°C	磁导率实部		
		标准值	测量值	误差/%
10	室温	1	0.994	0.6
	400 °C	1	0.997	0.3
	800 °C	1	1.003	0.3
	1 200 °C	1	1.008	0.8

表 4 损耗角正切结果对比表

Tab. 4 Loss Angle tangent results comparison table

频率/GHz	温度/°C	损耗角正切		
		标准值	测量值	$ \Delta $
10	室温	2.6E-04	2.7E-3	2.4E-3
	400	3.2E-04	7.5E-4	4.3E-4
	800	3.8E-04	1.4E-3	1.0E-3
	1 200	4.4E-04	2.4E-3	1.9E-3

3.3 稳定氩气熔融石英测试结果

在稳定氩气环境下,进行不同温度(室温、400 °C、800 °C、1 200 °C)的测试,经过100次重复性实验求取实验均值,熔融石英介电性能和介质磁性能测试结果如图 12 所示,选择部分频点的数值与标准值进行对比,如表 3、表 4 所示。

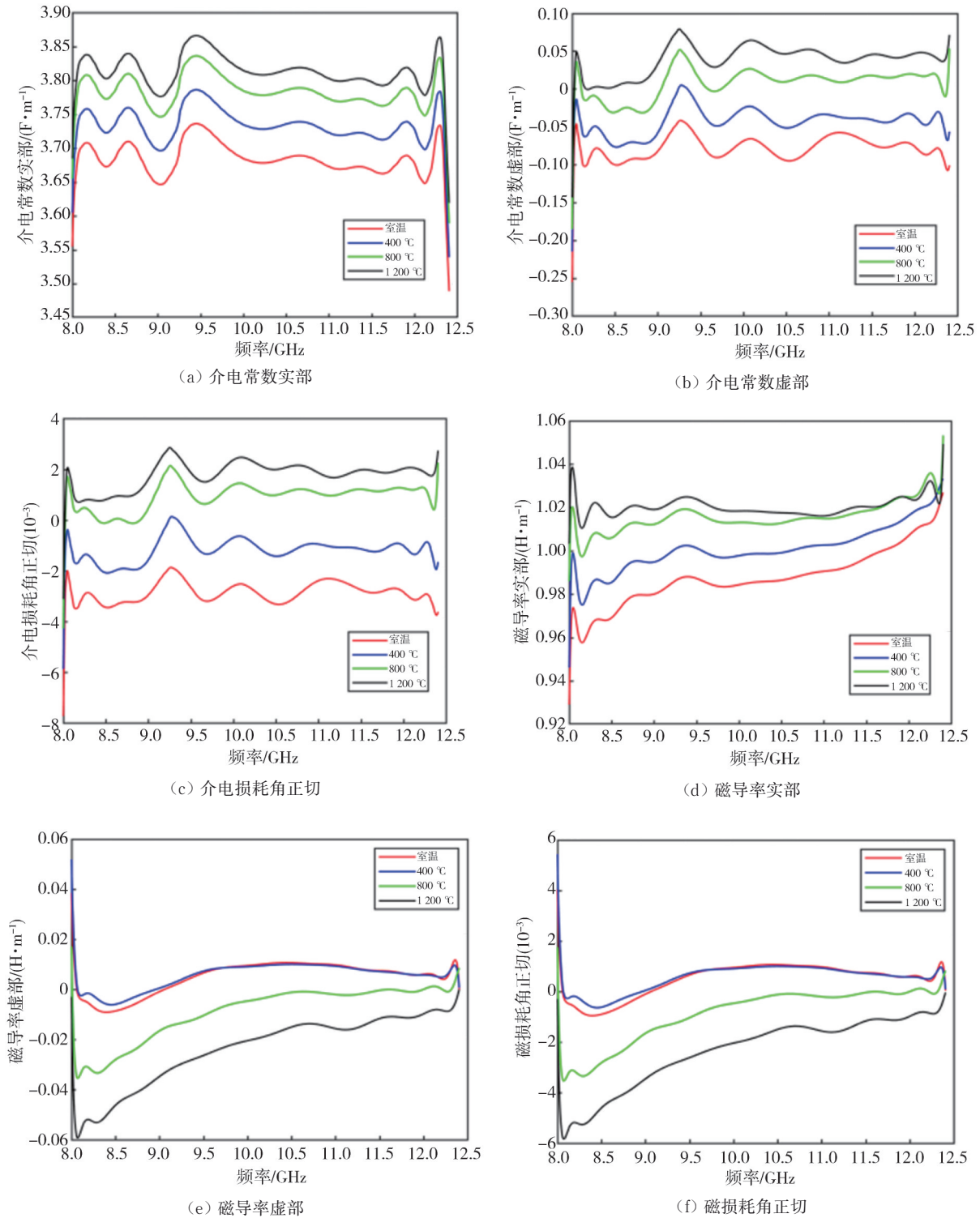


图 12 稳定氩气测试结果

Fig. 12 Stabilized argon test results

本文 3.2 和 3.3 节在室温、400 °C、800 °C 和 1 200 °C 时分别进行测试, 分析表 2、表 3 和表 4 结果得出, 相比稳定空气环境, 在稳定氩气环境下被测件的电磁参数结果波动更为平坦。通过本文所设计系统对熔融石英进行测试, 得到的介电

常数和磁导率与标准值进行了对比, 测试误差小于 2%, 损耗角正切测试误差小于 $0.003 + 10\% \tan \sigma_{\epsilon}$ 。对比不同测试系统, 如表 5 所示, 表明本系统的测试精度较高, 能够满足实际应用需求, 可以用来评估微波材料的电磁属性。

表 5 不同系统结果对比

Tab. 5 Results of different systems are compared

名称	温度范围	系统测试误差/%
高温介电性能测试系统	室温~1 000 °C	波导法<5 谐振法<2
微波腔体和加热系统	室温~1 000 °C	谐振腔微扰法<5
本测试系统	室温~1 200 °C	波导法<2

4 结 论

本文所提基于波导传输反射法的低损耗材料电磁参数测试系统克服了传统测量方法在高温环境下的局限性,该系统在室温至 1 200 °C 的环境下能够对宽频带内低损耗材料的介电常数、磁导率进行准确测量,且具有高测量精度、强抗干扰能力和鲁棒性。此外,所提系统还可应用于其他低损耗透波材料的电磁参数测量,该研究结果对低损耗透波材料的优化设计、高温应用和可靠性评估具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 何春梅, 田文艳. 基于 BP 神经网络的液体复介电系数反演计算[J]. 测试技术学报, 2023, 37(2): 146-151.
HE Chunmei, TIAN Wenyan. Inversion calculation of liquid complex permittivity based on BP neural network [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2023, 37(2): 146-151. (in Chinese)
- [2] 查俊伟, 黄文杰, 杨兴, 等. 本征耐高温电极化储能聚合物电介质研究进展[J]. 高电压技术, 2023, 49(3): 1055-1066.
ZHA Junwei, HUANG Wenjie, YANG Xing, et al. Research progress of intrinsic high temperature polymer dielectrics with high energy storage by electric polarization [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1055-1066. (in Chinese)
- [3] 路晓, 言行果, 张勇. 一种新型介电常数传感器的设计仿真[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(11): 82-84.
LU Xiao, YAN Xingguo, ZHANG Yong. Design and simulation of a novel dielectric constant sensor [J]. Sensors and Microsystems, 2023, 42(11): 82-84. (in Chinese)
- [4] LIU C J, MU Z, WU X S, et al. Research on temperature sensing characteristics of microdisk resonators [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2020, 11(3): 285-289.
- [5] 王佩佩, 王群, 唐章宏, 等. 高温微波材料电磁参数测量方法综述[J]. 物理化学进展, 2018, 7(2):

86-94.

WANG Peipei, WANG Qun, TANG Zhanghong, et al. Review on measurement methods of electromagnetic parameters of high temperature microwave materials [J]. Progress in Physical Chemistry, 2018, 7(2): 86-94. (in Chinese)

- [6] 王益, 张翠翠, 王建忠, 等. 闭式谐振腔法微波介质陶瓷介电常数测量[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(10): 2500-2507.

WANG Yi, ZHANG Cuicui, WANG Jianzhong, et al. Permittivity measurement of microwave dielectric ceramics using shielded-cavity method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(10): 2500-2507. (in Chinese)

- [7] SMITH C S, JULIUS A, ARBEENY C, et al. Additively manufactured rectangular waveguides for the electromagnetic characterization of materials using the transmission/reflection line method [J]. Rapid Prototyping Journal, 2024, 30(2): 270-276.

- [8] 郭子康, 张凯, 刘振涛, 等. 一种石英纤维增强二氧化硅基复合材料介电性能分析方法[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(5): 32-37.

GUO Zikang, ZHANG Kai, LIU Zhentao, et al. A method for analysis of dielectric properties of silica matrix composites reinforced by quartz fiber [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2023, 45(5): 32-37. (in Chinese)

- [9] 方陈剑, 陆云龙, 黄季甫. 基于传输线法的微波频段海水复介电常数测量[J]. 无线通信技术, 2020, 29(1): 54-58.

FANG Chenjian, LU Yunlong, HUANG Jifu. Complex permittivity measurement of seawater in microwave frequency based on transmission line method [J]. Wireless Communication Technology, 2020, 29(1): 54-58. (in Chinese)

- [10] PENG Z H, FAN B W, MIAO W, et al. A novel method for the measurement of superconducting transmission lines at terahertz frequencies [J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(11): 114703.

- [11] 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.

(下转第 626 页)