

透波材料高温介电性能评价表征

陈聪慧¹ 何凤梅¹ 李恩² 李琦¹

(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 概述了透波材料高温介电性能评价表征的研究意义及相关的基本概念、测试方法;介绍了国内外发展现状,以高 Q 腔法为例阐述了高温测试中关键共性技术,并对典型测试结果进行了分析;展望了透波材料高温介电性能评价表征的发展及应用前景。

关键词 透波材料,高温测试,介电性能

Evaluation and Characterization on High Temperature Dielectric Properties of Microwave-Transmitting Materials

Chen Conghui¹ He Fengmei¹ Li En² Li Qi¹

(1 National Key Laboratory of Advanced Functional Composites Materials Technology, Aerospace

Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

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

Abstract Study significance and relative basic concept and testing method of evaluation and characterization of high temperature dielectric properties of microwave-transmitting materials is summarized, development is introduced, and also the common key technology in high temperature testing of high Q cavity method is expatiated, future development and applications are put forward.

Key words Microwave-transmitting materials, High temperature testing, Dielectric properties

0 引言

雷达波(主要在 1-18 GHz)是当今各类高速、高超声速精确制导导弹重要的通讯、探测与制导频段。透波材料作为高速飞行的航天飞行器头部天线罩(窗)材料,主要功能是实现遥测天线、制导寻的导引头、实时引爆引信天线等电气性能正常制导和通信不受飞行条件下的高温高速气流影响,其复介电性能数据是评价该材料透波性能、确保天线系统及制导系统正常工作的重要依据,而复介电性能中,介电常数和损耗角正切是表征透波材料性能的主要参数。

1 基本概念及测试方法

介电常数 ε 是反映电介质材料极化行为的物理量。复介电常数 ε^* 为

$$\varepsilon^* = \varepsilon_r^* \varepsilon_0 = \varepsilon_0(\varepsilon' - j\varepsilon'') \quad (1)$$

式中, ε_r^* 为复数相对介电常数; ε_0 为真空介电常数。

损耗角正切 $\tan\delta$ 用以表征材料的介质损耗性能,为相对介电常数的虚部 ε'' 和实部 ε' 之比:

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2)$$

影响透波材料 ε 及 $\tan\delta$ 的因素除了材料本身,还有环境的温度、湿度、频率和电场强度等。

材料介电性能测试方法主要分为两大类:网络参数法、谐振法。

网络参数法通过测定加载样品前后传输系统(波导传输或同轴传输)的网络参数来计算复介电常数,包括波导终端短路法、同轴终端开路法和自由空间法等,可以实现宽频变温测试。其中自由空间法由于开放环境的特殊要求,一般不采用。

谐振法通过测试谐振腔体加载样品前后的谐振频率及品质因数来计算复介电常数,包括高 Q 腔法、

微扰法、带状线谐振腔法、介质谐振器法、准光腔法等,适用于宽频变温低损耗材料复介电常数测试。

2 国内外研究现状

美国军方在 20 世纪 70-80 年代委托麻省理工学院空气动力材料实验室完成了对当时几乎所有热透波候选材料(包括氧化物、非氧化物以及部分有机材料)在不同频段、最高约 1 800℃ 的高温介电性能测试,并建立起相关材料介电性能数据库。该实验室首先采用阻抗参数法,测试频率从 100 Hz-14 GHz,最高测试温度为 1 500℃,对低频率段的介电性能参数进行了测试。然后利用网络参数法和谐振法获得了 1、3、8、10 及 14 GHz 频率点频工作模式下,最高测试温度为 1 800℃ 的介电性能数据。NASA LRC(兰利研究中心)对所有透波窗口候选材料进行了 1 200℃ 的介电性能测试评价,通过文献[1]图片分析认为该中心采用的测试方法是终端短路法,微波传输线采用矩形波导。文献虽报道了选用铂铑合金制作微波器件,但未进行测试误差分析。美国 NIST 很早就开展了材料在常温下介电性能测试方法的研究,后根据材料变温测试的要求,也研究了介电性能变温测试技术,其频率为 1-70 GHz,所采用的方法主要有高 Q 腔法、介质谐振器法、带状线法、传输/反射法等,进行了 -50-300℃ 的变温测试,并进行了测试误差分析。

西欧其他国家也进行了介质材料高温介电性能测试技术研究,并建立了相应的测试系统。英国 NPL 利用终端短路法研制了微波频段材料介电性能参数的变温测试系统。英国利用石墨制作矩形波导分频段覆盖 7.5-40 GHz 对材料进行室温-2 000℃ 复介电常数测试技术研究^[1]。德国利用矩形波导谐振腔微扰法在 S 波段及 X 波段研制了 1 200℃ 的窄频复介电常数测试系统,并利用终端开路法研制了最高温度达到 1 200℃ 的复介电常数宽频测试系统。加拿大 R. M. Hutcheon 从 1989 年以来,采用微扰法利用 TM_{0n0} 圆柱谐振腔进行室温-1 500℃ 复介电常数测试系统及技术研究,其频率为 500 MHz-3 GHz。

俄罗斯在 20 世纪 80 年代初期就利用高 Q 腔法建立了 X 波段、1 200℃ 的材料复介电常数测试系统^[2]。

日本在材料介电性能测试技术及系统研究方面也开展了多种测试方法的研究,如高介电常数材料测试用的介质谐振器法、毫米波段用的准光腔法等。在变温测试技术方面,采用高 Q 腔法及介质谐振器法研制了介质材料在 1-60 GHz、-50-600℃ 的介电性能测试系统,并采用矩形波导法分频段完成 2-40 GHz、室温-600℃ 材料电磁参数变温测试的测试系

统。

国内很早就建立了 X 波段、Ku 波段等定频介电性能测试手段,在透波材料研究和生产中发挥了重要作用^[3-12]。

在低于 10 MHz 的介电性能测试中,主要采用阻抗参数法,国内已有多家单位配备了 Agilent 公司提供的 -50-250℃ 的测试系统及其测试软件,西安交通大学研制了 1 200℃ 低频介电性能测试系统,并发现了在低频下材料的一些温度特性。西北工业大学在“八五”期间就开展了常温到 800℃ 吸波材料电磁参数测试技术研究,但未能建立起有效的测试系统,后于 2005 年利用准光腔法建立了室温-1 200℃ 透波材料 Ku 波段复介电常数变温测试系统。北京环境特性研究所利用同轴传输线法开展了室温-300℃ 高损耗材料电磁参数测试技术及系统研究,利用矩形波导开展了室温-1 000℃ 高损耗材料电磁参数测试技术及系统的研究,利用自由空间法开展了室温-1 200℃ 高损耗材料电磁参数测试技术及系统的研究,并建立了相应的测试系统。“九五”期间,电子科技大学研制了室温-250℃、X 波段高损耗材料电磁参数测试系统和低损耗材料复介电常数测试系统。航天材料及工艺研究所与电子科技大学联合开展了 2-18 GHz、室温-1 200℃ 低损耗材料介电性能宽频带测试技术及系统的研究,采用谐振腔法;“十五”末期至今,通过国防 973 项目的支持,航天材料及工艺研究所和成都电子科技大学再次合作研制了 2-18 GHz、室温-1 600℃ 介电性能测试系统,采用谐振腔法和微扰法,该系统已投入到科研和生产中。

3 高温测试中的关键共性技术

高温条件下,室温的测试物理模型、校准方法、元器件就不适用了^[13]。但常用的测试方法的高温测试关键技术有相同之处,下面以高 Q 腔法为例,介绍这些共性的关键技术。

3.1 高温测试物理及计算模型的建立

高温下腔体会因高度方向温度梯度而导致的变形,电子科技大学建立了一腔多模的锥腔测试物理模型和分段计算的计算模型,保证了介电性能的准确测试。

当测试腔体处于均匀的温度场时,可以采用室温等直径和固定腔体长度的测试物理模型及算法。但实际高温测试时,高温谐振腔要通过耦合装置逐步过渡到冷端的传输转换器件,在腔体上下端存在较大的温度梯度。因此,基于测试腔体沿高度方向存在温度梯度的实际情况,建立了高温锥形腔体测试物理模型(图 1),并为解决高温腔体尺寸(直径 D 、长度 L)和微波表面电阻计算的难题,提出了相应的分段计算模型。

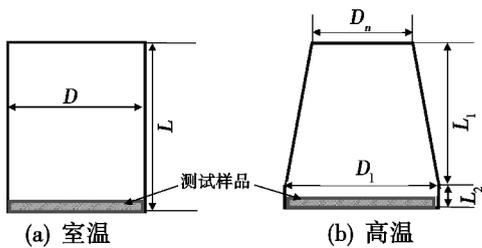


图1 室温与高温测试物理模型

Fig. 1 Physical test model under room temperature and high temperature

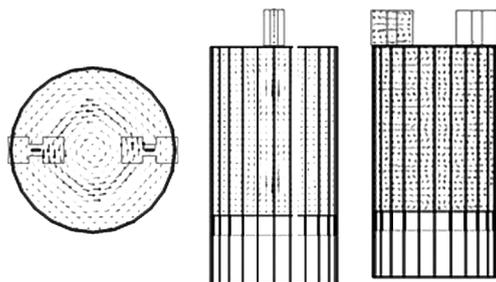


图3 仿真的电磁场三维分布图

Fig. 3 Emulational 3D fig of electromagnet field

3.2 高温腔体的校准方法

高温腔体的校准采用同直径、高度略有差别(1.5~3 mm)的两个样品台,高Q腔法变温校准模型见图2,分别测量同模式下两个等温区高度的空腔谐振频率,根据谐振频率与腔体尺寸之间的计算公式和分段计算算法,分别求解获得腔体的长度和直径随温度变化的比例系数。由两个同模式的空腔品质因数测试结果,计算得到腔体微波表面电阻随温度变化的比例系数。

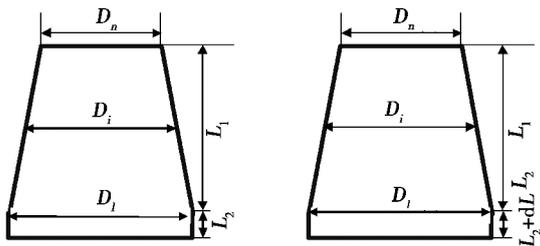


图2 高Q腔法变温校准模型

Fig. 2 Calibration model with changing temperature of high Q cavity method

为了消除腔体温度波动带来的随机误差,采用多点温度测试,实时获得腔体不同位置的温度及分布,进行不同温度下腔体尺寸及微波表面电阻动态响应校准,以提高测试结果重复性和准确性。

3.3 高温微波关键器件的选材与研制

高温微波关键器件包括高温腔体及传输线、隔热及冷却传输线、微波真空密封窗口等。

高温关键元器件选材必须具有高温化学稳定性和强度,并能保证测试的电磁稳定性和测试精度要求。目前国内外使用的耐高温元器件候选材料主要有:金属钼、石墨、铂铑和铱等。

高温关键元器件的研制需要考虑形状结构和微波表面电阻率的热稳定性,为使它能在高温使用过程中满足测试需求,可以利用 Ansoft HFSS 和 CST 等电磁场仿真软件和 matlab 等计算工具事先进行仿真优化设计。图3是采用 Ansoft HFSS 8.0 仿真腔体的电磁场分布图。

3.4 测试系统的集成

高温介电性能测试系统一般由微波网络分析仪、微波传输系统、高温腔体、高温真空炉与控温系统、移动定位装置等组成,图4为高Q腔法的系统组成。

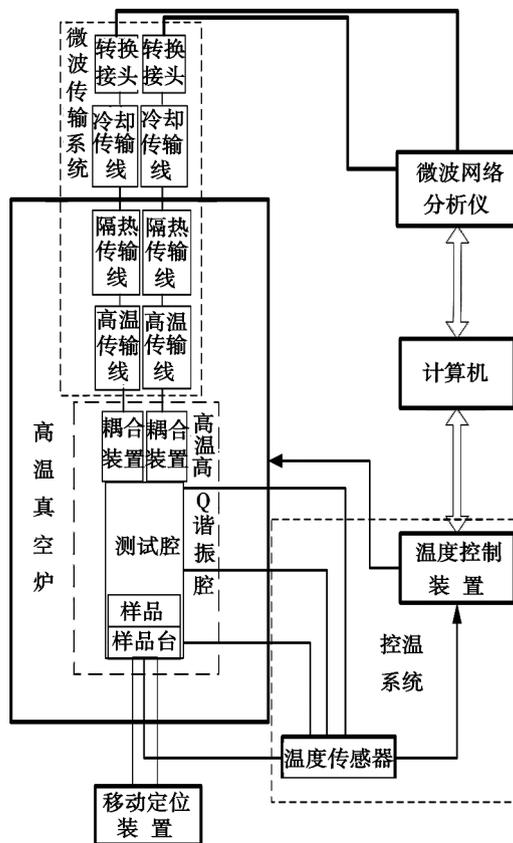


图4 高Q腔法测试系统组成框图

Fig. 4 Testing system skeleton diagram of high Q cavity method

4 典型测试结果分析

4.1 石英玻璃

石英玻璃在1 200℃以下介电性能稳定,常被选作介电性能测试系统的标样。1 300℃介电性能测试前后样品外形基本上没有变化,图5是7~18 GHz测试结果, ϵ 随着温度的升高略有增加, $\tan\delta$ 基本上保持平稳。

显变形,测试数据不可用。分析可见 $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 复合材料在 1 300℃ 以下有较好的介电性能。

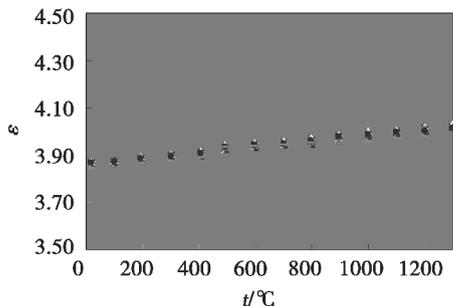
5 结语

随着军事及民用对透波材料的迫切需求,对透波材料的介电性能评价表征具有重要的意义及广泛的应用前景。其测试技术和方法必将朝着更宽频带、更高测试温度、使用方便和全方位自动化等方面发展。所建立的测试方法、物理模型及高温介电性能测试系统,相关硬件技术可推广应用于更高温度的透波材料测试系统中,为电介质材料热行为规律理论模型验证、热透波材料设计选材与预先研究提供重要的地面考核方法和手段,并且可推广应用于航空、航天、民用等各个领域的电介质材料高温电性能测试中。

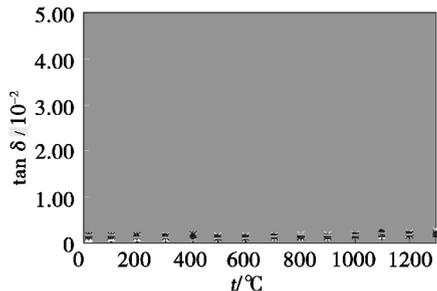
参考文献

- [1] 李金刚. 国外透波材料高温电性能研究进展[J]. 材料工程,2005,2(1):59-62
- [2] 胡连成. 俄罗斯航天透波材料现状考察[J]. 宇航材料工艺,1994(1):48-52
- [3] 张恒庆. 超高速导弹天线罩电性能评价[J]. 制导与引信,2005,26(1):37-42
- [4] 李振兴. 天线罩介电损耗的精确测量. 现代雷达,2002,24(1):81-83
- [5] 秦顺友,张文静. 大型天线罩小损耗测量的一种新方法[J]. 电子测量与仪器学报,2005,19(3):18-21
- [6] 倪必红,肖志红. 复合陶瓷天线罩表面防潮性能的研究[J]. 航天制造技术,2006(1):13-16
- [7] 夏文干,韩养. 高功率高透波材料的研究[J]. 高科技纤维与应用,2003,28(2):39-42
- [8] 孙宝华. 影响玻璃纤维/不饱和聚酯树脂复合材料透波性能因素的研究[J]. 纤维复合材料,2002,19(2):13-16
- [9] 杜耀惟. 天线罩电信设计方法[M]. 北京:国防工业出版社,1993
- [10] 张煜东. 高温透波材料研究现状和展望[J]. 飞航导弹,2006(3):56-58
- [11] 韩桂芳. 高温透波材料研究进展[J]. 航空材料学报,2003,23(1)(5):57-61
- [12] 张谟杰. 超音速导弹天线罩及其设计[J]. 制导与引信,2001,22(1):1-7
- [13] 张恒庆. 温度变化对天线罩传输功率的影响[J]. 制导与引信,2002,23(3):45-48
- [14] Lewis D, Spann Jr. Assessment of new radome material as replacement for pyroceram 9690 [C]// Proceedings of the 16th Symposium on Electro-Magnetic Windows Washington DC, Naval Research Laboratory, 1982(1):429-436
- [15] Frederick H S, Juris V. Controlled density silicon nitride material [C]// Huddareston G K ed. Proceeding of the 16th Symposium on Electromagnetic Windows [C]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 1982:82-86
- [16] 姚俊杰. $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 天线窗材料的介电性能研究[J]. 功能材料与仪器学报,1996,2(2):65-70

(编辑 吴坚)



(a) ϵ



(b) $\tan \delta$

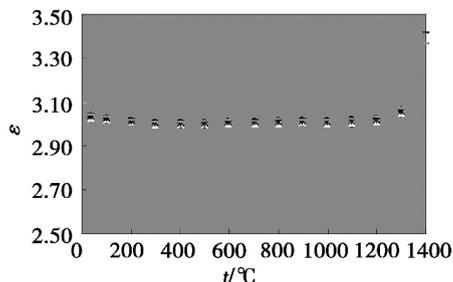
图5 石英玻璃 1 300℃ 介电性能测试结果

Fig. 5 Dielectric properties testing result of quartz glass under 1 300℃

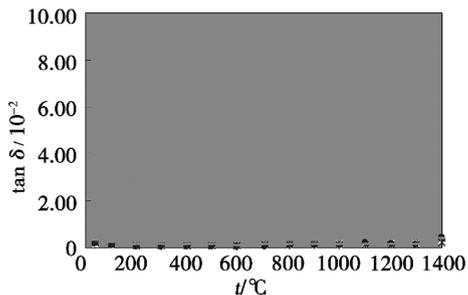
4.2 $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 复合材料

$\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 复合材料具有低热导率及优良的介电性能等,而成为国内外高温透波材料研究的重点^[14-16]。

样品升温到 1 300℃ 后,样品外形变化不大,密度稍微变大。图 6 是 7-18 GHz 测试结果。



(a) ϵ



(b) $\tan \delta$

图6 $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 1 400℃ 介电性能测试结果

Fig. 6 Dielectric properties testing result of $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ under 1 400℃

因样品容易受潮,200℃ 以前 ϵ 和 $\tan \delta$ 逐渐减小,200-1 300℃, ϵ 变化较小(总变化量 $\leq 3\%$), $\tan \delta$ 随着温度的升高逐渐增大;1 400℃ 以后,由于样品明