发 布

中国电子元件行业协会

20XX—XX—XX实施

2024—XX—XX发布

ICS 71.040.40

CCS G 13;G 14

团 体 标 准

T/CECA XXX-202X

微波介质用陶瓷粉体 介电性能的测试方法

Microwave dielectric ceramic powder—Test method of dielectric properties

（在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持文件一并附上）

（征求意见稿）

目  次

[前 言 I](#_Toc167887839)

[引 言 II](#_Toc167887840)

[1 范围 1](#_Toc167887841)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc167887842)

[3 术语和定义 1](#_Toc167887843)

[4 符号和缩略语 1](#_Toc167887844)

[5 原理 2](#_Toc167887845)

[6 测试环境条件 3](#_Toc167887846)

[7 仪器设备 3](#_Toc167887847)

[8 样品 4](#_Toc167887848)

[9 测试步骤 4](#_Toc167887849)

[10 结果报告 6](#_Toc167887850)

[参考文献 7](#_Toc167887851)

[附录A 8](#_Toc167887852)

前 言

本文件按照 GB/T 1.1－2020 《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》和GB/T1.2－2020《标准化工作导则 第 2 部分：以 ISO/IEC 标准化文件为基础的标准化文件起草规则》给出的规则编写。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件的附录A为规范性附录。

本文件由中国电子元件行业协会电子陶瓷及器件分会提出。

本文件由中国电子元件行业协会电子陶瓷及器件分会归口。

本文件主要起草单位：武汉理工大学、电子科技大学、佛山蓝谱达科技有限公司、浙江嘉康电子股份有限公司、嘉兴佳利电子有限公司、中国电子科技集团公司第二十六研究所、华为技术有限公司、淄博宇海电子陶瓷有限公司、武汉佰力博科技有限公司、江苏灿勤科技股份有限公司、山东国瓷功能材料股份有限公司、成都恩驰微波科技有限公司、天津大学、山东同方鲁颖电子有限公司、寿光市飞田电子有限公司、江苏江佳电子股份有限公司、厦门松元电子股份有限公司

本文件主要起草人：

本文件为首次发布。

引 言

微波介质用陶瓷粉体作为电子元器件的关键材料，被广泛应用于微波介质复合基材、介质谐振器、介质滤波器以及介质天线等电子元器件中。随着通信技术的发展，5G通信的普及以及对6G通信的展望，对各种射频微波元器件也提出了更高要求，以陶瓷及其复合材料为介质的器件被大量应用。目前对于各种微波介质陶瓷的介电性能测试标准体系已日趋完善，但对于粉体材料尤其微波介质陶瓷粉体介电性能的检测标准亟待制定。微波介质陶瓷粉体介电性能检测标准的建立，将有助于微波介质陶瓷粉体介电性能测试技术的规范化与标准化，推动微波介质陶瓷粉体的开发、应用及复合板材、微波射频元器件全产业链条的产品升级与技术发展。

本团体标准供各成员单位自愿采用，提请各使用单位注意，采用本团体标准时，应根据各自产品特点，确认本团体标准的适用性。

微波介质用陶瓷粉体 介电性能的测试方法

1. 范围

本文件规定了微波介质陶瓷粉体介电性能测试的测试原理、测试步骤和计算方法。

本文件适用于在频率范围*f*为0.7 GHz~30 GHz，温度范围*T*为-65℃~125℃内，对介电常数*εr*′为2.0~100.0、介电损耗角正切tan*δ*为1.0×10-4~1.0×10-2、粒径*D*50为0.1 μm~20 μm的微波介质用陶瓷粉体进行介电性能测试。

1. 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2036-1994 印制电路术语

GB/T 2421-2020 环境试验概述和指南

GB/T 21354-2008  粉末产品 振实密度测定通用方法

1. 术语和定义

GB/T 2036-1994界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

介电常数 （*εr*′ ）dielectric constant

规定形状电极之间填充电介质获得的电容量与相同结构电极间以真空或空气介质时的电容量之比。

[来源：GB/T 2036-1994，6.3.6]

介电损耗角正切 （tan*δ*）dielectric dissipation factor

对电介质施加正弦波电压时，通过介质的电流相量超前于电压相量间的相角的余角称为损耗角，对该损耗角取正切函数值，即为介电损耗角正切值。

[来源：GB/T 2036-1994，6.3.7]

1. 符号和缩略语

*ε*0: 真空介电常数，1/(36π)×10-9 F/m

*εr*′: 待测样相对介电常数，简称介电常数，同义词：*Dk*

*εrt*′: 料管介电常数

*μ*0: 真空磁导率，4π ×10-7 H/m

tan*δ*: 待测样介电损耗角正切

tan*δt*: 料管介电损耗角正切

*c*: 真空中光速，2.9979×108m/s

*r*1: 料管内半径，m

*r*2: 料管外半径，m

*a*: 圆柱谐振腔内侧壁等效半径，m

*l*: 圆柱谐振腔上、下内壁间距，m

*σ*:圆柱谐振腔内壁等效电导率，S/m

*f*0: 圆柱谐振腔空腔谐振频率，Hz

*ft*: 加载空料管时圆柱谐振腔谐振频率，Hz

*fp*: 加载装填有待测样料管时圆柱谐振腔谐振频率，Hz

*Q*0: 圆柱谐振腔空腔品质因数

*Qt*: 加载空料管时圆柱谐振腔品质因数

*Qp*: 加载装填有待测样料管时圆柱谐振腔品质因数

*S*21: 圆柱谐振腔两端口间的传输系数

*u0n*: 第一类0阶贝塞尔函数的第*n*个根

*ρ*: 待测样的振实密度，单位g/cm3

*TCDk*:介电常数温度系数，单位10-6/℃

*TCDf*:介电损耗角正切温度系数，单位10-6/℃

*T*1、*T*2: 测试温度，℃

*Dk*(*T*1): *T*1温度下的介电常数

*Dk*(*T*2): *T*2温度下的介电常数

*Df*(*T*1): *T*1温度下的介电损耗角正切

*Df*(*T*2): *T*2温度下的介电损耗角正切

1. 原理

本文件介电性能的测试为复介电常数测试，包括介电常数（*εr*′）和介电损耗角正切（tan*δ*），介电性能温度系数的测试包括介电常数温度系数（*TCDk*）和介电损耗角正切温度系数（*TCDf*）。

本文件采用圆柱谐振腔作为测试夹具，圆柱谐振腔采用双端口同轴耦合环进行耦合，同轴耦合环安装于圆柱谐振腔上壁，环面沿圆柱谐振腔径向，如图1所示。介电常数为*εr*′、介电损耗角正切为tan*δ*的待测样置于低介电常数（＜4）、低损耗角正切（＜5×10-4）的平底圆柱料管中，料管穿过两个料管限位座的通孔贯穿置于圆柱谐振腔中心。料管限位座为金属材质，其朝向腔内的一侧分别与圆柱谐振腔上、下壁内侧齐平。料管限位座的通孔直径小于工作频率的二分之一波长，通孔长度大于通孔直径，以保证料管限位座通孔中为良好的截止状态。

本文件采用TM0n0（*n*为正整数）谐振模式进行测试建模，其电场极化方向沿料管轴向。圆柱谐振腔分为3个区域，沿径向朝外各区域复介电常数依次为*εr*1、*εr*2和*εr*3，半径依次为*r*1、*r*2和*a*，如图1所示。由各区域TM0n0模式的电场和磁场分布，结合区域之间的边界条件建立如式(1)所示的特征方程，其中*σ*为圆柱谐振腔内壁等效电导率，*f* \*为复谐振频率。通过测量无料管、加载空料管和加载装填有待测样料管时圆柱谐振腔的谐振频率*f*0、*ft*、*fp*和品质因数*Q*0、*Qt*、*Qp*，根据特征方程计算得到待测样复介电常数，详细计算过程见附录A。



图1 圆柱谐振腔加载待测样示意图

 ………………………………………（1）

1. 测试环境条件

除非另有规定，测试在GB/T 2421中4.3规定的测量和试验用标准大气条件下进行。

1. 仪器设备

矢量网络分析仪：频率范围覆盖所需测试频率，动态范围大于80 dB；

圆柱谐振腔：工作模式为TM0n0，工作模式频率范围覆盖所需测试频率；

高温干燥箱：温度范围为常温～150℃，温度波动度为 ±5℃；

高低温试验箱：温度范围为-60℃~150℃，温度波动度为 ±0.5℃；

内径千分尺：测量范围为2 mm ~6 mm，精度为0.004 mm；

外径千分尺：测量范围为4 mm ~10 mm，精度为0.004 mm。

1. 样品

待测的陶瓷粉体粒径应满足*D*50=0.1μm ~20 μm。

样品预处理：

a）将待测微波介质陶瓷粉置于高温干燥箱中，温度设定在105 ℃~125 ℃范围，烘干处理2 h，然后将烘干后的粉体放入 25 ℃±2 ℃的干燥皿中冷却至常温，冷却后尽快装填到料管中并进行测试。

b）按GB/T 21354-2008中“6.3 ”对待烘干后的陶瓷粉进行振实并测量其振实密度*ρ*；

c）将烘干后的待测微波介质陶瓷粉装填入料管，料管内半径为1 mm ~3 mm，外半径为2 mm ~5 mm（具体视*εr*′、tan*δ*以及测试频率范围而定）。粉体装填深度应保证料管置入谐振腔后，料管内粉体的上、下端面相比谐振腔上/下壁内侧均向外延伸出至少10 mm。

1. 测试步骤

9.1 介电常数与介电损耗角正切测试

微波介质陶瓷粉介电常数和介电损耗角正切的测试步骤如下：

a）仪器准备

测试系统包括矢量网络分析仪、圆柱谐振腔、程控计算机等，如图2所示。将圆柱谐振腔的两个同轴耦合环连接到矢量网络分析仪，并将矢量网络分析仪开机预热至少 30 min，使仪器达到稳定。



图2 圆柱谐振腔测试系统连接框图

b）谐振腔选型

根据测试频率选择对应工作频率范围的圆柱谐振腔，可采用TM010单模谐振腔，也可采用TM0n0（*n*为正整数且≤6）多模谐振腔。6 GHz以上频段推荐采用多模谐振腔，且多模谐振腔需具有杂模抑制结构。谐振腔谐振频率与腔体尺寸的关系见公式(2)

… …………………………………………（2）

推荐的圆柱谐振腔内侧壁等效半径与上、下内壁间距比（）为5.5~6.5，具体尺寸设计以及*n*的选取以TM0n0模式不受干扰杂模的影响为原则。对于多模谐振腔，可分两个频段覆盖0.7~30 GHz，其中0.7~5 GHz推荐圆柱谐振腔内侧壁设计半径为165 mm，采用TM010~ TM060模式进行测试；5~30 GHz推荐圆柱谐振腔内侧壁设计半径为22.5 mm，采用TM010~ TM050模式进行测试。

c）空腔和料管的测试

安装料管限位座，使用自动测量软件测试TM0n0模式的谐振频率*f*0和品质因数*Q*0，并计算圆柱谐振腔内侧壁等效半径*a*及内壁等效电导率*σ*。

用内径千分尺和外径千分尺分别测量空料管内、外半径（*r*1、*r*2），将空料管从料管限位座中贯穿插入圆柱谐振腔，使用自动测量软件测试TM0n0模式的谐振频率*ft*和品质因数*Qt*，并计算料管的介电常数*εrt*′和介电损耗角正切tan*δt*。

d）样品测试

将装填有待测样的料管安装在料管限位座上并贯穿插入圆柱谐振腔，利用耦合调节装置调节TM0n0模式谐振峰峰值S21至-40 dB（±2 dB），使用自动测量软件测量TM0n0模式的谐振频率*fp*和品质因数*Qp*，并计算待测样的介电常数*εr*′和介电损耗角正切tan*δ*。介电常数保留2位小数，介电损耗角正切采用科学计数法，保留3位有效数字。

重复该步骤至少3次，取其算数平均值为测定结果。

9.2 介电常数温度系数与介电损耗角正切温度系数测试

微波介质陶瓷粉介电常数温度系数和介电损耗角正切温度系数的测试步骤如下：

a）仪器准备

将圆柱谐振腔整体置于高低温试验箱中，将微波电缆穿过试验箱上的法兰连接谐振腔同轴耦合环和矢量网络分析仪。测试前矢量网络分析仪开机预热 30 min以上。

b）谐振腔选型

同9.1 b）。

c）空腔和料管的变温测试

安装料管限位座，设定高低温试验箱温度分别为*T*1和*T*2。当温度达到设定温度值后，稳定时间不少于10 min；使用自动测量软件测试TM0n0模式的谐振频率*f*0和品质因数*Q*0，分别计算*T*1和*T*2温度下圆柱谐振腔内侧壁等效半径*a*及内壁等效电导率*σ*。完成后将高低温试验箱温度恢复至常温。

用内径千分尺和外径千分尺分别测量空料管内、外半径（*r*1、*r*2），将空料管从料管限位座中贯穿插入圆柱谐振腔；设定高低温试验箱温度分别为*T*1和*T*2，当温度达到设定温度值后，稳定时间不少于10 min；使用自动测量软件测试TM0n0模式的谐振频率*ft*和品质因数*Qt*，分别计算*T*1和*T*2温度下料管的介电常数*εrt*′和介电损耗角正切tan*δt*。完成后将高低温试验箱温度恢复至常温。

d）样品变温测试

将装填有待测样的料管安装在料管限位座上并贯穿插入圆柱谐振腔。利用耦合调节装置调节频带内TM0n0模式谐振峰峰值S21至-40 dB（±2 dB）；设定高低温试验箱温度分别为*T*1和*T*2，当温度达到设定温度值后，稳定不少于10 min；使用自动测量软件测量TM0n0模式的谐振频率*fp*和品质因数*Qp*，并计算*T*1和*T*2温度下待测粉体的介电常数*Dk*(*T*1)、*Dk*(*T*2)和介电损耗角正切*Df*(*T*1)、 *Df*(*T*2)。

重复该步骤至少3次，取其算数平均值为测定结果。

按公式(3)和公式(4)分别计算介电常数温度系数*TCDk*和介电损耗角正切温度系数*TCDf*。

 （3）

 （4）

其中*T*2＞*T*1。

1. 结果报告

10.1 基本信息

结果报告中包括：委托单位信息、样品信息、仪器设备信息、测试条件、样品预处理条件、振实密度、测试频率、检测方法（依据标准）、检测结果、检测人、检测日期等。

* 1. 测试结果的表述

常温测试需列出测试频率下待测样的介电常数和介电损耗角正切的三次测量值及平均值。

温度系数测试需列出测试温度（*T*1、*T*2）、测试温度（*T*1、*T*2）下待测样的介电常数*Dk*(*T*1)、*Dk*(*T*2)和介电损耗角正切*Df*(*T*1)、 *Df*(*T*2)、测试频率下待测样介电常数温度系数*TCDk*和介电损耗角正切温度系数*TCDf*的计算值。

介电常数结果保留2位小数，介电损耗角正切计算结果采用科学计数法，保留3位有效数字。

# 参考文献

[1] Yunpeng Zhang, En Li, Jing Zhang, Chengyong Yu, Hu Zheng, Gaofeng, Guo. A broadband variable-temperature test system for complex permittivity measurements of solid and powder materials. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(2): 024701.

[2] 张云鹏, 李恩, 余承勇, 郑虎, 张婧. 圆柱腔复介电常数高温测试系统. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(7): 994-1001

# 附录A

（规范性）

介电常数和介电损耗角正切计算

A.1 空腔参数测量

由空腔（未加载料管及待测样）TM0n0模式的谐振频率*f*0和品质因数*Q*0确定圆柱谐振腔内侧壁等效半径*a*和内壁等效电导率*σ*。其中*a*由测量的谐振频率确定，使用公式（A.1）：

…………………………………………… （A.1）

*σ*由测量的品质因数决定，使用公式（A.2）：

……………… …………………（A.2）

测试时，输入参数*l*和*n*，运行软件测量TM0n0模式的谐振频率*f*0和品质因数*Q*0，由软件计算获得对应模式下的*a*和*σ。*

A.2 特征方程建立

圆柱谐振腔分区如图1所示，分为三个区域，沿径向朝外各区域复介电常数依次为*εr*1、*εr*2和*εr*3，半径依次为*r*1、*r*2和*a*。

根据电磁场标量波函数理论，在圆柱坐标系中，TM0n0模式的场形式为：

…………………………………（A.3）

公式（A.3）中，*Ji*(*i*=0,1)为第一类*i*阶贝塞尔函数，*Ni*(*i*=0,1)为第二类*i*阶贝塞尔函数，*Ki*(*i*=1,2,3,4)为系数常数，*r、εr*和*μr*分别为各区域的半径、复介电常数和复磁导率，(*i*=1,2,3)为各区域中的传播常数，其中，为复谐振频率。

根据式（A.3），应用*Ez*在边界Ⅰ和Ⅱ上的边界条件，获得如下等式：

…………………（A.4）

应用*Hφ*在边界Ⅰ和Ⅱ上的边界条件，获得如下等式：

……………（A.5）

公式（A.5）中，所有系数*Ai*(*i*=1,2,…,4)均为常数。

应用介质和导体在边界III上的边界条件（其中为表面阻抗），获得如下等式：

 ……………………（A.6）

式（A.4）-（A.6）可写为如下矩阵形式：

 …………………………（A.7）

式（A.7）可进一步简化为[**0**]**=**[***C***][***A*i**]（*i*=0,1,…,4）的形式，其中*A0*=1，[***C***]为由系数*ci*（*i*=1,2,…,16）构成的方阵。式（A.7）要有非零解[***A*i**]，则[***C***]的行列式需为零，得到如下特征方程（A.8）：

 ……………………… ……（A.8）

A.3 料管复介电常数计算

由加载空料管下测得的谐振腔TM0n0模式的谐振频率*ft*和品质因数*Qt*，构成复谐振频率，结合料管内半径*r*1、外半径*r*2、圆柱谐振腔内侧壁等效半径*a*和内壁等效电导率*σ*，并令*εr*1=*εr*3=1，求解式(A.8)获得*εr*2，此即为料管的复介电常数*εrt*，有*εrt* =*εrt*′×(1-jtan*δt*)。

A.4 待测样复介电常数计算

由加载料管和待测样下测得的谐振腔TM0n0模式的谐振频率*fp*和品质因数*Qp*，构成复谐振频率，结合料管内半径*r*1、外半径*r*2、圆柱谐振腔内侧壁等效半径*a、*内壁等效电导率*σ*和料管复介电常数*εrt*（=*εr*2），并令*εr*3=1，求解式(A.8)获得*εr*1，此即为待测样的复介电常数*εr*，有*εr* =*εr*′×(1-jtan*δ*)。