

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

(报批稿)

2024—XX—XX 发布

20XX—XX—XX 实施

中国电子元件行业协会

发 布

目 次

前 言.....	I
引 言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 原理.....	1
5 测试环境条件.....	3
6 仪器设备.....	3
7 样品.....	3
8 测试步骤.....	3
9 测试报告.....	7
附录 A（规范性）介电常数和介电损耗角正切计算.....	9
参考文献.....	13

中电元协团体标准报批公示稿

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》的规定起草。

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专利的责任。

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：周静、祁琰媛、沈杰、张云鹏、黄冠龙、吴伟杰、胡元云、鲜晓军、周彦昭、孙兆海、方辉、朱汇、杨爱民、陈雪飞、马卫兵、陈月光、袁燕飞、张益勇、杨和成

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用陶瓷粉体介电性能的检测标准亟待制定。微波介质用陶瓷粉体介电性能检测标准的建立，将有助于微波介质用陶瓷粉体介电性能测试技术的规范化与标准化，推动微波介质用陶瓷粉体的开发、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。

本文件供各成员单位自愿采用，提请各使用单位注意，采用本文件时，请根据各自产品特点，确认本文件的适用性。

中电元协团体标准报批单

微波介质用陶瓷粉体 介电性能的测试方法

1 范围

本文件描述了微波介质用陶瓷粉体介电性能测试的测试原理，规定了样品制备和测试步骤。

本文件适用于频率范围 f 为 0.7 GHz~30 GHz，温度范围 T 为 -65℃~125℃，介电常数 ϵ_r' 为 1.0~60.0、介电损耗角正切 $\tan\delta$ 为 1.0×10^{-4} ~ 1.0×10^{-2} 、粒径 D_{50} 为 0.1 μm ~20.0 μm 的微波介质用陶瓷粉体的介电性能测试。

2 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

3 术语和定义

GB/T 2036-1994 界定的术语和定义适用于本文件。

4 原理

本文件介电性能的测试为相对复介电常数测试，包括相对介电常数（简称介电常数）和介电损耗角正切。介电性能温度系数（ $TCDk$ ）的测试为介电常数温度系数测试和介电损耗角正切温度系数测试。

本文件待测样品为纯净粉体和空气的混合物，其相对复介电常数记为 ϵ_m ，包括介电常数 ϵ_m' 和介电损耗角正切 $\tan\delta_m$ 。纯净粉体为待测样品扣除空气后的固体部分，其相对复介电常数记为 ϵ_r ，包括介电常数 ϵ_r' 和介电损耗角正切 $\tan\delta$ 。

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(a)所示。待测样品置于低介电常数（在测试频率范围内小于 4）、低损耗角正切（在测试频率范围内小于 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，如图 1(b)所示。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。

本文件采用 TM_{0n0} （ 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，如图 1(a)所示。由各区 TM_{0n0} 模式的电场和磁场分布，结合各区之间的边界条件建立如式(1)所示的特征方程。通过分别测量无料管、加载空料管和加载装填有待测样品料管时圆柱谐振腔的谐振频率

和品质因数，根据特征方程计算得到待测样品的相对复介电常数，再根据两相混合公式计算得到纯净粉体的相对复介电常数，按照附录 A 的方法计算。

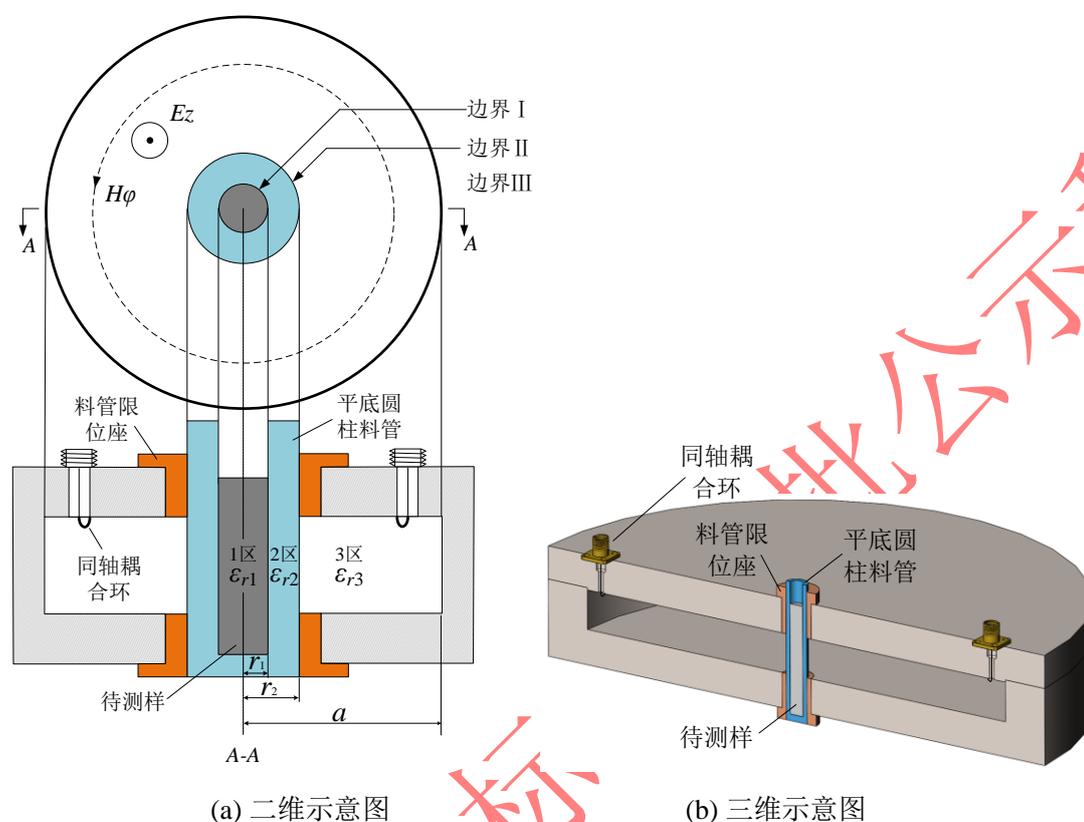


图 1 圆柱谐振腔加载待测样品示意图

$$\det C[r_1, r_2, a, \varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}, \varepsilon_{r3}, \sigma, f^*] = 0 \dots \dots \dots (1)$$

式中：

r_1 ——1 区半径，即料管内半径，单位为米（m）；

r_2 ——2 区半径，即料管外半径，单位为米（m）；

a ——3 区半径，即圆柱谐振腔内侧壁等效半径，单位为米（m）；

ε_{r1} ——1 区媒质（待测样品）的相对复介电常数；

ε_{r2} ——2 区媒质（料管）的相对复介电常数；

ε_{r3} ——3 区媒质（空气）的相对复介电常数；

σ ——圆柱谐振腔内壁等效电导率，单位为西门子/米（S/m）；

f^* ——复谐振频率，有 $f^* = f[1 + j/(2Q)]$ ，其中 j 为虚数单位， f 为谐振频率，单位为赫兹（Hz）， Q

为品质因数，无量纲。

5 测试环境条件

除非另有规定，测试在 GB/T 2421-2020 中 4.3 规定的测量和试验用标准大气条件下进行。

6 仪器设备

试验所用的仪器和设备如下：

- a) 矢量网络分析仪：频率范围应覆盖样品的测试频率，动态范围大于 80 dB；
- b) 圆柱谐振腔：工作模式为 TM_{0n0} ，工作模式频率范围覆盖样品的测试频率；
- c) 高温干燥箱：温度范围为室温~150℃，温度波动度不超过 $\pm 5^\circ\text{C}$ ；
- d) 高低温试验箱：温度范围为-65℃~125℃，温度波动度不超过 $\pm 1^\circ\text{C}$ ；
- e) 内径千分尺：分辨率为 0.001 mm；
- f) 外径千分尺：分辨率为 0.001 mm。

7 样品

待测的陶瓷粉体粒径 D_{50} 的范围为 0.1 μm ~20.0 μm 。

样品预处理程序：

a) 样品干燥

将待测微波介质用陶瓷粉体置于高温干燥箱中，温度设定范围为 105 $^\circ\text{C}$ ~125 $^\circ\text{C}$ ，放置时间为 2 h；将烘干后的样品放入 25 $^\circ\text{C}$ \pm 2 $^\circ\text{C}$ 的干燥皿中冷却至室温，冷却后应尽快装填到料管中，料管内半径为 1 mm~3 mm，外半径为 2 mm~5 mm。

b) 振实密度测试

将料管中的待测样品按 GB/T 21354-2008 中 6.3 的方法振实，振实后料管内粉体的高度应保证料管置入谐振腔后，粉体上、下端面相距谐振腔上、下壁内侧向外延伸长度不小于 10 mm；按 GB/T 21354-2008 第 7 章的方法计算料管内样品的振实密度 ρ （单位为 g/cm^3 ）。

8 测试步骤

8.1 介电常数与介电损耗角正切测试

微波介质用陶瓷粉体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、计算机，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。

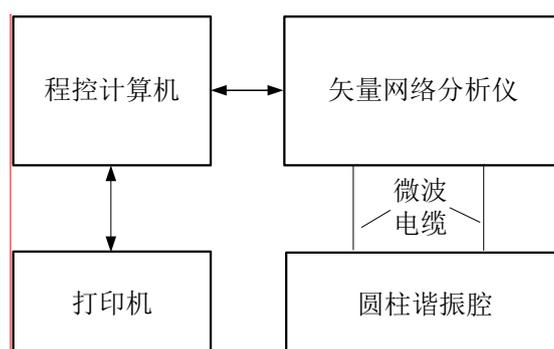


图2 圆柱谐振腔测试系统连接框图

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 TM_{010} 单模谐振腔，也可采用 TM_{0n0} (n 为正整数且 ≤ 6) 多模谐振腔。6 GHz 以上频段宜采用多模谐振腔，多模谐振腔应具有杂模抑制结构。

谐振腔谐振频率与腔体尺寸的关系见公式(2)

$$f(TM_{0n0}) = \frac{cu_{0n}}{2\pi a} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

c ——真空中光速，等于 2.9979×10^8 m/s；

u_{0n} ——第一类 0 阶贝塞尔函数的第 n 个根；

a ——圆柱谐振腔内侧壁等效半径，单位为米 (m)。

圆柱谐振腔的尺寸设计以及 n 的选取以 TM_{0n0} 模式不受干扰杂模的影响为原则。

对于多模谐振腔，宜分为两个频段，其中 0.7 GHz ~ <5 GHz 频段的圆柱谐振腔内侧壁等效半径为 165 mm，内侧壁等效半径与上、下内壁间距之比 a/l 为 5.5~6.5，选用 TM_{010} ~ TM_{050} 模式进行测试； ≥ 5 GHz ~30 GHz 频段的圆柱谐振腔内侧壁等效半径为 23 mm， a/l 为 3~4，选用 TM_{010} ~ TM_{050} 模式进行测试。

推荐的圆柱谐振腔频段-尺寸-工作模式谐振频率对照如表 1 所示。

表 1 推荐的圆柱谐振腔频段-尺寸-工作模式谐振频率对照表

频段范围	a	a/l	工作模式	空腔工作模式谐振频率 (GHz)
0.7 GHz ~<5 GHz	165 mm	5.5~6.5	TM ₀₁₀	0.6954
			TM ₀₂₀	1.5963
			TM ₀₃₀	2.5024
			TM ₀₄₀	3.4098
			TM ₀₅₀	4.3176
≥5 GHz ~30 GHz	23 mm	3~4	TM ₀₁₀	4.9888
			TM ₀₂₀	11.4514
			TM ₀₃₀	17.9521
			TM ₀₄₀	24.4615
			TM ₀₅₀	30.9741

c) 空腔和料管测试

测试步骤如下:

- 1) 安装料管限位座;
- 2) 调节耦合装置使 TM_{0n0} 模式谐振峰值 S_{21} (圆柱谐振腔两端口间的传输系数) 至 -40 dB ±2 dB;
- 3) 测试空腔下 TM_{0n0} 模式的谐振频率 f_0 和品质因数 Q_0 ;
- 4) 按式(A.1)和式(A.2)分别计算圆柱谐振腔内侧壁等效半径 a 及内壁等效电导率 σ ;
- 5) 采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 和 r_2 ;
- 6) 将空料管从料管限位座中贯穿插入圆柱谐振腔, 重复步骤 2);
- 7) 测试空料管加载下 TM_{0n0} 模式的谐振频率 f_i 和品质因数 Q_i ;
- 8) 按式(A.8)计算料管的介电常数 ϵ_r' 和介电损耗角正切 $\tan\delta_i$ 。

d) 样品测试

测试步骤如下:

- 1) 将装填有待测样品的料管从料管限位座中贯穿插入圆柱谐振腔;
- 2) 调节耦合装置使 TM_{0n0} 模式谐振峰值 S_{21} 至 -40 dB ±2 dB;
- 3) 测试待测样品置入圆柱谐振腔后 TM_{0n0} 模式的谐振频率 f_p 和品质因数 Q_p ;
- 4) 按式 (A.8) 计算待测样品的相对复介电常数, 并按式 (A.5) 计算纯净粉体的相对复介电常数;
- 5) 重复步骤 1) ~ 4) 至少 3 次, 取其算数平均值为测试结果。

8.2 介电常数温度系数与介电损耗角正切温度系数测试

8.2.1 总则

待测样品的温度范围及范围内的测量温度点按产品规格书的规定, 按附录 A 的方法计算介电常数和介电损耗角正切。

8.2.2 测试步骤

微波介质用陶瓷粉体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

按照 8.1 b) 的方法选取。

c) 空腔和料管的温度变化测试

测试步骤如下：

1) 安装料管限位座；

2) 调节耦合装置使 TM_{0n0} 模式谐振峰值 S_{21} 至 $-40 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB}$ ；

3) 根据 8.2.1 的规定，在所需温度范围内选取 M 个温度点，其温度记为 T_m ($m=1, 2, \dots, M$)；

4) 设定高低温试验箱温度为 T_m ，当温度达到设定值后稳定时间不少于 10 min；

5) 测试 T_m 温度下空腔 TM_{0n0} 模式的谐振频率 f_0 和品质因数 Q_0 ；

6) 按式 (A.1) 和式 (A.2) 计算 T_m 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 ；

7) 重复步骤 4) ~ 6)，获得 M 个温度点下圆柱谐振腔内侧壁等效半径及内壁等效电导率；

8) 将高低温试验箱温度恢复至室温；

9) 采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 和 r_2 ；

10) 将空料管从料管限位座中贯穿插入圆柱谐振腔；

11) 调节耦合装置使 TM_{0n0} 模式谐振峰值 S_{21} 至 $-40 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB}$ ；

12) 设定高低温试验箱温度为 T_m ，当温度达到设定值后稳定时间不少于 10 min；

13) 测试 T_m 温度下空料管加载时 TM_{0n0} 模式的谐振频率 f_i 和品质因数 Q_i ；

14) 按式 (A.8) 计算 T_m 温度下料管的介电常数 ϵ_{rr}' 和介电损耗角正切 $\tan \delta$ ；

15) 重复步骤 12) ~ 14)，获得 M 个温度点下料管的相对复介电常数；

16) 将高低温试验箱温度恢复至室温。

d) 样品的温度变化测试

测试步骤如下：

1) 将装填有待测样品的料管从料管限位座中贯穿插入圆柱谐振腔；

2) 调节耦合装置使 TM_{0n0} 模式谐振峰值 S_{21} 至 $-40 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB}$ ；

3) 设定高低温试验箱温度为 T_m ，当温度达到设定值后稳定时间不少于 10 min；

4) 测试 T_m 温度下待测样品加载时 TM_{0n0} 模式的谐振频率 f_p 和品质因数 Q_p ；

5) 按式 (A.8) 计算 T_m 温度下待测样品的相对复介电常数，并按式 (A.5) 计算纯净粉体的相对复介电常数；

6) 重复步骤 3) ~ 5)，获得 M 个温度点下纯净粉体的介电常数 $Dk(T_m)$ 和介电损耗角正切 $Df(T_m)$ ；

7) 根据应用需求在 T_m 中选取至少一组温度，温度的选取根据陶瓷粉体温度系数线性度进行细化规定。选取的每组温度包含 2 个温度点，记为 T 和 T_{ref} 。按公式 (3) 和公式 (4) 计算纯净粉体在 T 和 T_{ref} 之间的介电常数温度系数 $TCDk$ 和介电损耗角正切温度系数 $TCDf$ ；

$$TCDk = \frac{Dk(T) - Dk(T_{ref})}{(T - T_{ref}) \times Dk(T_{ref})} \times 10^6 \dots\dots\dots (3)$$

$$TCDf = \frac{Df(T) - Df(T_{ref})}{(T - T_{ref}) \times Df(T_{ref})} \times 10^6 \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$TCDk$ ——介电常数温度系数，单位为 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ （百万分之一每摄氏度）；

$TCDf$ ——介电损耗角正切温度系数，单位为 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ （百万分之一每摄氏度）；

T ——目标温度，单位为摄氏度（ $^{\circ}\text{C}$ ）；

T_{ref} ——基准温度，单位为摄氏度（ $^{\circ}\text{C}$ ）；

$Dk(T)$ —— T 温度下的介电常数；

$Dk(T_{ref})$ —— T_{ref} 温度下的介电常数；

$Df(T)$ —— T 温度下的介电损耗角正切；

$Df(T_{ref})$ —— T_{ref} 温度下的介电损耗角正切。

9 测试报告

9.1 基本信息

测试结果应填写测试报告。测试报告的内容至少应包括：

——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(烘干温度和时间)；

——样品振实密度；

——纯净粉体的固体密度；

——检测方法（标准编号和名称）；

——测试结果；

——检测单位

——检测人；

——检测日期。

9.2 测试结果的表述

常温测试应给出：

- 测试频率；
- 测试频率下待测样品的介电常数的三次测量值及平均值，纯净粉体介电常数的计算值；
- 测试频率下待测样品介电损耗角正切的三次测量值及平均值，纯净粉体介电损耗角正切的计算值。

温度系数测试应列出：

- 测试温度；
- 测试温度及测试频率下待测样品和纯净粉体的介电常数；
- 测试温度及测试频率下待测样品和纯净粉体的介电损耗角正切；
- 测试频率下纯净粉体介电常数温度系数；
- 测试频率下纯净粉体介电损耗角正切温度系数。

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。

中电元协团体标准报批公示稿

附录 A

(规范性)

介电常数和介电损耗角正切计算

A.1 空腔参数计算

由空腔（未加载料管及待测样品） TM_{0n0} 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 ，公式为：

$$a = \frac{cu_{0n}}{2\pi f_0} \dots\dots\dots (A.1)$$

$$\sigma = \frac{[Q_0(1/a + 2/l)]^2}{\pi f_0 \mu_0} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

c ——真空中光速，等于 $2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ ；

u_{0n} ——第一类 0 阶贝塞尔函数的第 n 个根；

f_0 ——圆柱谐振腔空腔谐振频率，单位为赫兹（Hz）；

Q_0 ——圆柱谐振腔空腔品质因数；

l ——圆柱谐振腔上、下内壁间距，单位为米（m）；

μ_0 ——真空磁导率，等于 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。

测试时，输入参数 l 和 n ，测量 TM_{0n0} 模式的谐振频率 f_0 和品质因数 Q_0 ，即可计算对应模式下的 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，沿径向朝外各区域相对复介电常数依次为 ϵ_{r1} 、 ϵ_{r2} 和 ϵ_{r3} ，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， TM_{0n0} 模式的电场 E_z 和磁场 H_φ 为：

$$\begin{cases} E_z = K_1 J_0(kr) + K_2 N_0(kr) \\ H_\varphi = j\sqrt{\frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\mu_r \mu_0}} [K_3 J_1(kr) + K_4 N_1(kr)] \end{cases} \dots\dots\dots (A.3)$$

式中：

J_0 ——第一类 0 阶贝塞尔函数；

J_1 ——第一类 1 阶贝塞尔函数；

N_0 ——第二类 0 阶贝塞尔函数；

N_1 ——第二类 1 阶贝塞尔函数；

K_i ——系数常数， $i=1,2,3,4$ ；

r ——各区域场点位置的半径，单位为米（m）；

ϵ_r ——各区域媒质的相对复介电常数；

μ_r ——各区域媒质的相对复磁导率；

k ——各区域媒质中的波数，有 $k = k_0 \sqrt{\varepsilon_r}$ ，单位为弧度/米 (rad/m)；

k_0 ——空气中的波数，有 $k_0 = 2\pi f^* \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ ，单位为弧度/米 (rad/m)；

ε_0 ——真空介电常数，等于 $1/(36\pi) \times 10^{-9}$ F/m；

μ_0 ——真空磁导率，等于 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m；

f^* ——复谐振频率，有 $f^* = f[1 + j/(2Q)]$ ，其中 j 为虚数单位， f 为谐振频率，单位为赫兹 (Hz)， Q

为品质因数，无量纲。

根据式 (A.3)，应用 E_z 和 H_ϕ 在边界 I、II 和 III 上的电磁场边界条件，获得如下等式：

$$\begin{cases} J_0(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r1}} r_1) = A_1 J_0(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r2}} r_1) + A_2 N_0(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r2}} r_1) \\ A_1 J_0(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r2}} r_2) + A_2 N_0(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r2}} r_2) = A_3 J_0(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r3}} r_2) + A_4 N_0(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r3}} r_2) \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

$$\begin{cases} \sqrt{\varepsilon_{r1}} J_1(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r1}} r_1) = \sqrt{\varepsilon_{r2}} A_1 J_1(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r2}} r_1) + \sqrt{\varepsilon_{r2}} A_2 N_1(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r2}} r_1) \\ \sqrt{\varepsilon_{r2}} A_1 J_1(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r2}} r_2) + \sqrt{\varepsilon_{r2}} A_2 N_1(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r2}} r_2) = \sqrt{\varepsilon_{r3}} A_3 J_1(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r3}} r_2) + \sqrt{\varepsilon_{r3}} A_4 N_1(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r3}} r_2) \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

$$A_3 J_0(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r3}} a) + A_4 N_0(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r3}} a) = (1-j) \sqrt{\frac{\pi f \varepsilon_{r3} \varepsilon_0}{\sigma}} [A_3 J_1(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r3}} a) + A_4 N_1(k_0 \sqrt{\varepsilon_{r3}} a)] \quad (\text{A.6})$$

式中：

A_i ——系数常数， $i=1,2,3,4$ ；

r_1 ——1区半径，即料管内半径，单位为米 (m)；

r_2 ——2区半径，即料管外半径，单位为米 (m)；

a ——3区半径，即圆柱谐振腔内侧壁等效半径，单位为米 (m)；

ε_{r1} ——1区媒质（待测样品）的相对复介电常数；

ε_{r2} ——2区媒质（料管）的相对复介电常数；

ε_{r3} ——3区媒质（空气）的相对复介电常数；

σ ——圆柱谐振腔内壁等效电导率，单位为西门子/米 (S/m)；

f ——谐振频率，单位为赫兹 (Hz)。

式 (A.4) - (A.6) 可写为如下矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & 0 & 0 \\ c_4 & c_5 & c_6 & 0 & 0 \\ 0 & c_7 & c_8 & c_9 & c_{10} \\ 0 & c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ 0 & 0 & 0 & c_{15} & c_{16} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

式 (A.7) 可进一步简化为 $[0]=[C][A_i]$ ($i=0,1,\dots,4$) 的形式，其中 $A_0=1$ ， $[C]$ 为由系数 c_i ($i=1,2,\dots,16$) 构成的方阵。式 (A.7) 应有非零解 $[A_i]$ ，则 $[C]$ 的行列式需为零，得到如下特征方程 (A.8)：

$$\det C[r_1, r_2, a, \varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}, \varepsilon_{r3}, \sigma, f^*] = 0 \quad (\text{A.8})$$

式中：

r_1 ——1区半径，即料管内半径，单位为米（m）；

r_2 ——2区半径，即料管外半径，单位为米（m）；

a ——3区半径，即圆柱谐振腔内侧壁等效半径，单位为米（m）；

ε_{r1} ——1区媒质（待测样品）的相对复介电常数；

ε_{r2} ——2区媒质（料管）的相对复介电常数；

ε_{r3} ——3区媒质（空气）的相对复介电常数；

σ ——圆柱谐振腔内壁等效电导率，单位为西门子/米（S/m）；

f^* ——复谐振频率，有 $f^* = f[1+j/(2Q)]$ ，其中 j 为虚数单位， f 为谐振频率，单位为赫兹（Hz）， Q 为品质因数，无量纲。

A.3 料管相对复介电常数计算

由加载空料管下测得的谐振腔 TM_{0n0} 模式的谐振频率 f_t 和品质因数 Q_t ，构成复谐振频率 $f^* = f_t[1+j/(2Q_t)]$ ，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 $\varepsilon_{r1}=\varepsilon_{r3}=1$ ，求解式(A.8)获得 ε_{r2} ，此即为料管的相对复介电常数 ε_{rt} ，有 $\varepsilon_{rt}=\varepsilon_{rt}' \times (1-j\tan\delta_t)$ 。

A.4 待测样品相对复介电常数计算

由加载料管和待测样品下测得的谐振腔 TM_{0m0} 模式的谐振频率 f_p 和品质因数 Q_p ，构成复谐振频率 $f^* = f_p[1+j/(2Q_p)]$ ，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 和料管相对复介电常数 ε_{rt} ($=\varepsilon_{r2}$)，并令 $\varepsilon_{r3}=1$ ，求解式(A.8)获得 ε_{r1} ，此即为待测样品的相对复介电常数 ε_r ，有 $\varepsilon_{rm}=\varepsilon_r' \times (1-j\tan\delta_m)$ 。

A.5 纯净粉体相对复介电常数计算

由于待测样品为纯净粉体和空气的混合物，需基于待测样品的相对复介电常数进一步计算纯净粉体的相对复介电常数。以空气为基体相，纯净粉体为填充相，通过两相混合公式计算纯净粉体的相对复介电常数。式（A.9）~（A.12）为常用的4个相对复介电常数两相混合计算公式：

$$\text{Lichtenecker: } \varepsilon_{rm} = \varepsilon_r^{\frac{V_p}{\varepsilon_r}} \varepsilon_0^{\frac{V_0}{\varepsilon_r}} \dots \dots \dots \quad (\text{A.9})$$

$$\text{Bruggeman: } V_0 \frac{\varepsilon_{r0}-\varepsilon_{rm}}{\varepsilon_{r0}+2\varepsilon_{rm}} + V_p \frac{\varepsilon_r-\varepsilon_{rm}}{\varepsilon_r+2\varepsilon_{rm}} = 0 \dots \dots \dots \quad (\text{A.10})$$

$$\text{Silberstein: } \varepsilon_r = \varepsilon_r^{\frac{V_p}{\varepsilon_r}} + \varepsilon_0^{\frac{V_0}{\varepsilon_r}} \dots \dots \dots \quad (\text{A.11})$$

$$\text{EMT: } \varepsilon_{r m} = \varepsilon_{r 0} \left[1 + \frac{V_p \varepsilon_r - \varepsilon_r \varepsilon_{r 0} + s \cdot V_0 \varepsilon_r - \varepsilon_r \varepsilon_{r 0}}{\varepsilon_{r 0}} \right] \quad (\text{A.12})$$

式中 $\varepsilon_{r m}$ ， ε_r 和 $\varepsilon_{r 0}$ 分别为待测样品、纯净粉体和空气的相对复介电常数，其中 $\varepsilon_{r 0}=1$ ； V_p 和 V_0 分别为纯净粉体和空气的体积占比。根据待测样品的振实密度 ρ 和纯净粉体固体密度 ρ_0 可以计算出 $V_p = \frac{\rho}{\rho_0}$ ， $V_0=1-V_p$ 。因此，通过测试得到的 $\varepsilon_{r m}$ 以及已知的 $\varepsilon_{r 0}$ 、 V_p 、 V_0 可计算出纯净粉体的相对复介电常数 ε_r 。混合公式的选择与纯净粉体的介电常数有关。对于 $1 < \varepsilon_r' \leq 4$ 的粉体，推荐使用式（A.9）进行计算；对于 $4 < \varepsilon_r' \leq 10$ 的粉体，推荐使用式（A.10）进行计算；对于 $10 < \varepsilon_r' \leq 30$ 的粉体，推荐使用式（A.11）进行计算；对于 $\varepsilon_r' > 30$ 的粉体，推荐使用式（A.12）进行计算。

中电元协团体标准报批征求意见稿

参考文献

- [1] GB/T 11310-1989 压电陶瓷材料性能测试方法 相对自由介电常数温度特性的测试.
- [2] GB/T 43801-2024 微波频段覆铜箔层压板相对介电常数和损耗正切值测试方法 分离介质谐振器法.
- [3] 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.
- [4] 张云鹏, 李恩, 余承勇, 郑虎, 张婧. 圆柱腔相对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
-

中电元协团体标准报批公示稿