

T/CWDPA

团 体 标 准

T/CWDPA XXXX—XXXX

5G/6G 通信用高频 FEP 树脂介电性能测试规范

Test specification for dielectric properties of high-frequency FEP resin for 5G and 6G communication

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国西部开发促进会 发布

目 录

前 言	III
1 范围	4
2 规范性引用文件	4
3 术语和定义	4
4 测试条件	5
4.1 温度	5
4.2 湿度	5
4.3 电磁屏蔽	5
4.4 振动与洁净度	5
5 测试原理	5
6 仪器设备	5
6.1 核心测试设备	6
6.2 辅助设备	6
6.3 设备校准与维护	6
7 样品要求	7
7.1 样品制备	7
7.2 样品预处理	7
7.3 样品储存	7
8 测试步骤	7
8.1 测试前准备	7
8.2 空载参数测量	7
8.3 负载参数测量	8
8.4 测试后处理	8
9 数据处理与结果表示	8
9.1 数据计算	8
9.2 重复性要求	8
9.3 结果表示	8
10 测试报告	8

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这些专利的责任。

本文件由中国西部开发促进会提出。

本文件由中国西部开发促进会归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

5G/6G 通信用高频 FEP 树脂介电性能测试规范

1 范围

本文件规定了采用谐振腔法测试5G/6G通信用高频FEP树脂介电性能的术语和定义、测试原理、环境条件、仪器设备、样品要求、测试步骤、数据处理、不确定度评定、试验报告及注意事项。

本文件适用于5G/6G通信系统中使用的高频FEP树脂，用于测定其在1GHz~6GHz频段相对介电常数实部和介质损耗角正切，为材料选型、产品质量控制及性能评价提供技术依据。

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 31838.6 固体绝缘材料 介电和电阻特性 第6部分：介电常数（相对电容率）和介质损耗因数的测定

GB/T 43801 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

GB/T 7265.1 固体电介质微波复介电常数的测试方法 第1部分：谐振腔法

IEC 62562:2010 低损耗介质板复介电常数测试 谐振腔法 (Test method for complex permittivity of low-loss dielectric sheets using a resonant cavity)

ASTM D150-2021 固体电介质介电常数（相对电容率）和介质损耗因数的试验方法 (Standard Test Methods for AC Loss Characteristics and Permittivity of Solid Electrical Insulation)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

FEP 树脂 perfluorinated ethylene-propylene resin

聚全氟乙丙烯树脂，一种热塑性含氟聚合物，具有低介电常数、低损耗、高化学稳定性和宽温度适用性。

3.2

介电常数 dielectric constant

规定形状电极之间填充电介质获得的电容量与相同电极之间为真空时的电容量之比，无量纲。

[来源：GB/T 2036—1994，6.3.6，有修改]

3.3

介质损耗角正切 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，即为介质损耗角正切值，也称为损耗因数，无量纲。

[来源：GB/T 2036—1994，6.3.7，有修改]

3.4

谐振腔法 resonant cavity method

基于电磁谐振原理，通过测量样品加载前后谐振腔的谐振频率偏移量和品质因数变化量，结合样品几何参数计算介电性能参数的测试方法，适用于低损耗介质材料的高精度测试。

3.5

品质因数 quality factor, Q

表征谐振腔储存电磁能量与损耗能量比值的参数，分为空载品质因数和负载品质因数，是计算介质损耗角正切的关键参数。

4 测试条件

4.1 温度

测试环境温度为 $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，测试全过程温度波动应 $\leq \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ；样品预处理及平衡温度与测试环境应一致。

4.2 湿度

相对湿度为45% RH~55% RH，湿度波动应 $\leq \pm 3\%$ RH；禁止在高湿环境下处理样品，避免吸湿影响测试结果。

4.3 电磁屏蔽

测试区域应设置电磁屏蔽室，屏蔽效能：1GHz~6GHz 频段 $\geq 80\text{dB}$ ；屏蔽室内无大功率电磁辐射源（如无线通信设备、高频电源）。

4.4 振动与洁净度

4.4.1 振动

测试平台振动加速度 $\leq 0.1\text{g}$ ，采用隔振垫或气垫隔振装置。

4.4.2 洁净度

测试区域空气洁净度 ≥ 1000 级，避免粉尘附着样品或腔体表面。

5 测试原理

采用 TE_{011} 模式分离式圆柱谐振腔，基于电磁耦合与介质极化理论开展测试：

- 空载状态下，谐振腔在1GHz~6GHz频段内产生固有谐振频率 f_0 和空载品质因数 Q_0 ，此时腔体内部形成稳定的电磁驻波场；
- 将FEP树脂样品垂直置于谐振腔中心电场集中区域，样品极化作用改变腔体等效介电常数，导致谐振频率偏移至 f_s ，同时样品的介质损耗使腔体能量损耗增加，品质因数降至 Q_s ；
- 基于双层介质（空气+样品）电磁模型，结合样品几何尺寸（厚度 t 、直径 d ）和腔体结构参数（内径 D 、长度 L 、束腰半径 W_0 ），通过频率偏移量 $\Delta f=f_0-f_s$ 和品质因数变化量 $\Delta Q=1/Q_s-1/Q_0$ ，利用以下公式计算介电参数：

相对介电常数实部：

$$\varepsilon_r' = \left(\frac{c}{2\pi f_s}\right)^2 \cdot \left(\frac{\pi n}{L}\right)^2 + \frac{1}{w_0^2} \cdot \frac{\Delta f \cdot D^2}{2f_0 \cdot t} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

c ——真空中光速（ $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ）；

n ——谐振模式阶数（ TE_{011} 模式 $n=1$ ）。

介质损耗角正切：

$$\tan \delta = \frac{\Delta Q}{\varepsilon_r' \cdot k_0} + \tan \delta_c \dots\dots\dots (2)$$

式中：

k_0 ——自由空间波数（ $k_0 = 2\pi f_0 / c$ ）；

$\tan \delta_c$ ——腔体自身损耗修正项。

6 仪器设备

6.1 核心测试设备

6.1.1 矢量网络分析仪 (VNA)

- a) 频率范围: 0.1GHz~20GHz, 频率精度 $\leq\pm 0.001\%$;
- b) 动态范围: $\geq 100\text{dB}$ (1GHz~6GHz), 方向性 $\leq 50\text{dB}$, 输入驻波比 ≤ 1.2 ;
- c) Q 值测量: 支持自动 Q 值计算, 测量精度 $\leq\pm 1\%$, Q 值测量范围 $100\sim 10^6$;
- d) 数据采集: 支持连续扫描, 采样点数 ≥ 1000 点 / 频段, 具备数据导出功能(格式: CSV/Excel)。

6.1.2 分离式圆柱谐振腔

- a) 工作频段: 1GHz~6GHz, 连续可调, 频率分辨率 $\leq 100\text{Hz}$;
- b) 空载品质因数: $Q_0 \geq 40000$ (2GHz 时), 5GHz 时 $Q_0 \geq 35000$;
- c) 结构参数: 内径 $D=30\text{mm}\sim 80\text{mm}$, 长度 $L=50\text{mm}\sim 150\text{mm}$, 同轴度误差 $\leq 0.01\text{mm}$, 平面度 $\leq 0.005\ \mu\text{m}$;
- d) 腔体材料: 无氧铜 (Cu-ETP, 纯度 $\geq 99.99\%$), 内表面镀银 (厚度 $\geq 5\ \mu\text{m}$), 镀层粗糙度 $R_a \leq 0.05\ \mu\text{m}$ 。

6.1.3 样品夹持装置

- a) 定位精度: $\leq \pm 0.002\text{mm}$, 位移分辨率 $\leq 0.1\ \mu\text{m}$;
- b) 夹持材料: 聚四氟乙烯 (PTFE) 或氮化铝 (AlN), 介电常数稳定且无电磁干扰;
- c) 调节功能: 支持样品高度微调, 确保样品与腔体端面贴合无气隙 (气隙 $\leq 0.001\text{mm}$)。

6.2 辅助设备

6.2.1 厚度测量仪

- a) 测量范围: $0\sim 5\text{mm}$, 测量精度 $\leq \pm 0.001\text{mm}$, 重复性 $\leq \pm 0.0005\text{mm}$;
- b) 测量方式: 支持五点法 (中心 + 四象限) 自动测量, 测量压力 $\leq 0.05\text{N}$ (避免样品变形)。

6.2.2 环境控制系统

- a) 恒温恒湿箱: 温度控制精度 $\leq \pm 0.2^\circ\text{C}$, 湿度控制精度 $\leq \pm 3\% \text{RH}$, 容积 $\geq 50\text{L}$;
- b) 温湿度记录仪: 测量精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ (温度)、 $\pm 1\% \text{RH}$ (湿度), 记录间隔 $\leq 10\text{min}$ 。

6.2.3 标准校准样品

- a) 材质: 高纯度氧化铝 (Al_2O_3 , 纯度 $\geq 99.9\%$);
- b) 介电参数 (2GHz): $\epsilon_r' = 9.8 \pm 0.02$, $\tan \delta \leq 1 \times 10^{-5}$;
- c) 几何尺寸: 直径 $d=30\text{mm}/50\text{mm}$ (可选), 厚度 $t=1\text{mm}/2\text{mm}$ (可选), 平整度 $\leq 0.005\text{mm}$, 平行度 $\leq 0.003\text{mm}$;
- d) 校准周期: 每年 1 次, 由具备 CNAS 资质的机构校准并提供校准证书。

6.2.4 样品预处理设备

- a) 真空干燥箱: 温度范围 $50^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$, 控温精度 $\pm 2^\circ\text{C}$, 真空度 $\leq 10\text{kPa}$;
- b) 超声波清洗机: 功率 $\geq 100\text{W}$, 频率 40kHz , 用于样品表面清洁。

6.3 设备校准与维护

6.3.1 校准周期

- a) 谐振腔 + 网络分析仪系统: 每 6 个月校准 1 次, 使用标准校准样品验证, ϵ_r' 测量误差 $\leq \pm 0.02$, $\tan \delta$ 测量误差 $\leq \pm 5 \times 10^{-6}$;
- b) 厚度测量仪: 每年校准 1 次, 测量误差 $\leq \pm 0.001\text{mm}$;
- c) 环境控制系统: 每年校准 1 次, 温湿度控制精度符合 6.2.2 要求。

6.3.2 维护要求

- a) 谐振腔：每次测试后用无水乙醇擦拭内表面，避免指纹、粉尘残留；每 3 个月检查镀层完整性，若出现氧化需重新镀银；
- b) 网络分析仪：每月进行自检，定期清洁射频端口，避免接触不良。

7 样品要求

7.1 样品制备

7.1.1 几何尺寸

- a) 形状：圆形薄片，直径 d 与谐振腔内径 D 匹配 ($d=D\pm 0.1\text{mm}$ ，避免边缘效应)；
- b) 厚度： $t=0.5\text{mm}\sim 3\text{mm}$ ，推荐 $t=1\text{mm}\sim 2\text{mm}$ ($t/D\leq 0.05$)；同一批次样品厚度偏差 $\leq\pm 0.01\text{mm}$ ；
- c) 形位公差：平整度 $\leq 0.005\text{mm}$ ，平行度 $\leq 0.003\text{mm}$ ，无翘曲、变形。

7.1.2 制备工艺

- a) 未填充型 FEP 树脂：热压成型，温度 $260^{\circ}\text{C}\sim 280^{\circ}\text{C}$ ，压力 $2\text{MPa}\sim 5\text{MPa}$ ，保温时间 $10\text{min}\sim 30\text{min}$ ，自然冷却至室温；
- b) 改性 FEP 树脂：按配方混合填料后，采用注塑 + 机加工工艺，确保填料均匀分散（分散度 $\leq 5\mu\text{m}$ ）；
- c) 表面处理：样品上下表面经抛光处理，表面粗糙度 $R_a\leq 0.1\mu\text{m}$ ，无划痕、气泡、杂质（杂质粒径 $\leq 50\mu\text{m}$ ，数量 ≤ 3 个 / 样品）。

7.1.3 样品数量

每批次样品制备 3 个平行样，若测试结果变异系数超出 9.2 要求，需追加 2 个平行样。

7.2 样品预处理

- a) 清洁：用超声波清洗机（无水乙醇）清洗样品表面，去除油污、粉尘，清洗时间 5min，然后用氮气吹干；
- b) 干燥：将清洁后的样品放入真空干燥箱， $107^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 干燥 2h，去除微量水分；
- c) 平衡：干燥后将样品转移至测试环境中，平衡 24h，使样品温度、湿度与测试环境一致；
- d) 记录：改性 FEP 树脂需记录填料类型（如 SiO_2 、 AlN ）、填充量（质量分数 / 体积分数）、制备工艺参数（如混合温度、成型压力）。

7.3 样品储存

- a) 预处理后未测试样品：密封于铝箔袋中，放入干燥器（硅胶干燥剂）储存，储存时间 $\leq 72\text{h}$ ；
- b) 测试后样品：密封保存，保存期限 ≥ 1 年，用于复检或追溯。

8 测试步骤

8.1 测试前准备

- a) 环境准备：开启恒温恒湿箱和电磁屏蔽室，调节温度至 $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $45\% \text{RH}\sim 55\% \text{RH}$ ，稳定 1h 以上；
- b) 设备准备：启动网络分析仪和谐振腔，预热 30min，进行仪器自检（射频端口、频率稳定性、Q 值测量功能）；
- c) 系统校准：将标准校准样品放入夹持装置，按 8.2~8.3 步骤测量，验证 ϵ_r' 和 $\tan\delta$ 与校准证书一致（误差 $\leq\pm 0.02$ 和 $\pm 5\times 10^{-6}$ ），若不一致需调整谐振腔束腰半径 w_0 重新校准；
- d) 样品准备：取出预处理后的样品，用厚度测量仪进行五点法测量，记录各点厚度 $t_1\sim t_5$ ，计算平均厚度 $t=(t_1+t_2+t_3+t_4+t_5)/5$ ，精确至 0.001mm 。

8.2 空载参数测量

- a) 谐振腔空载（无样品），设置网络分析仪测试参数：
 - 1) 频率范围：1GHz~6GHz，扫描步长：1MHz（谐振峰附近调整为 0.1MHz）；
 - 2) 测量参数：谐振频率 f_0 、品质因数 Q_0 ；
- b) 启动扫描，搜索并记录 TE₀₁₁ 模式的固有谐振频率 f_0 和空载品质因数 Q_0 ，连续测量 3 次，每次测量间隔 ≥ 1 min，取平均值 (f_{0_avg} 、 Q_{0_avg})，精确至 1kHz (f_0) 和 1 (Q_0)；
- c) 若 3 次测量的 f_0 变异系数 $> 0.01\%$ 或 Q_0 变异系数 $> 1\%$ ，需检查设备稳定性并重新测量。

8.3 负载参数测量

- a) 将样品小心放入夹持装置，确保样品中心与谐振腔中心对齐（同轴度误差 ≤ 0.01 mm），样品与腔体端面无气隙；
- b) 保持网络分析仪参数不变，启动扫描，记录加载样品后的谐振频率 f_s 和负载品质因数 Q_s ，连续测量 3 次，取平均值 (f_{s_avg} 、 Q_{s_avg})；
- c) 按上述步骤完成所有平行样的测试，测试过程中禁止触碰谐振腔、夹持装置及网络分析仪射频线缆；
- d) 若某一样品的 f_s 偏移量 $> 5\% f_0$ ，需检查样品尺寸是否与腔体匹配，或更换合适厚度的样品。

8.4 测试后处理

- a) 取出样品，密封保存，记录样品状态；
- b) 用无水乙醇擦拭谐振腔内部和夹持装置，去除残留杂质；
- c) 关闭仪器电源（先关网络分析仪，再关谐振腔），导出测试数据并备份；
- d) 填写设备使用记录，包括测试日期、样品批次、校准情况、设备状态。

9 数据处理与结果表示

9.1 数据计算

- a) 按公式 (1) 和 (2) 计算每个平行样的 $\epsilon_{r'}$ 和 $\tan \delta$ ，计算过程保留 6 位有效数字；
- b) 计算 3 个平行样的平均值 ($\epsilon_{r'_avg}$ 、 $\tan \delta_{avg}$)、标准差 (s_ϵ 、 $s_{\tan \delta}$) 和变异系数 (CV_ϵ 、 $CV_{\tan \delta}$)：

$$CV = \frac{s}{\text{平均值}} \times 100\% \dots \dots \dots (3)$$

- c) 若追加平行样，按 4~5 个样品计算平均值和变异系数。

9.2 重复性要求

- a) 相对介电常数实部：变异系数 $CV_\epsilon \leq 2\%$ ；
- b) 介质损耗角正切：变异系数 $CV_{\tan \delta} \leq 5\%$ ；
- c) 若超出上述范围，需排查样品均匀性、设备稳定性或测试操作规范性，重新制备样品并测试。

9.3 结果表示

- a) 特征频率点：分别列出 1GHz、2GHz、3GHz、4GHz、5GHz、6GHz 六个频率点的 $\epsilon_{r'}$ 和 $\tan \delta$ 数值（保留 2 位小数 ($\epsilon_{r'}$)、6 位小数 ($\tan \delta$)）；
- b) 频段平均值：计算 3GHz~6GHz 频段（5G/6G 核心频段）的 $\epsilon_{r'}$ 平均值和 $\tan \delta$ 平均值，作为核心评价指标；
- c) 特性曲线：绘制 $\epsilon_{r'}$ -频率曲线（横坐标：频率 / GHz，纵坐标： $\epsilon_{r'}$ ）和 $\tan \delta$ -频率曲线（横坐标：频率 / GHz，纵坐标： $\tan \delta$ ），曲线需标注数据点、误差棒（ \pm 扩展不确定度）；
- d) 结果判定：若用户有技术要求，需明确样品是否符合要求（如 $\epsilon_{r'} \leq 2.10$ ， $\tan \delta \leq 5 \times 10^{-4}$ ）。

10 测试报告

试验报告应至少包含以下内容，格式符合 GB/T 20001.4 要求：

- a) 报告基本信息：报告编号、测试日期、测试地点、委托单位、测试单位、测试人员、审核人员、批准人员；
 - b) 样品信息：样品名称、规格型号、生产厂家、批次号、制备工艺、填料类型及含量（改性样品）、样品数量、几何尺寸（平均厚度、直径）、预处理条件；
 - c) 测试依据：本文件编号及名称（如 T/XX XXXX-202X 《5G/6G 通信用高频 FEP 树脂介电性能测试规范 谐振腔法》）；
 - d) 测试条件：环境温度、相对湿度、测试频率范围、谐振腔型号及参数（内径 D、长度 L）、网络分析仪型号、校准样品信息（型号、校准证书编号）；
 - e) 测试结果：
 - 1) 各平行样在 6 个特征频率点的 ϵ_r' 、 $\tan \delta$ 数值；
 - 2) 3GHz~6GHz 频段平均值、标准差、变异系数；
 - 3) ϵ_r' - 频率曲线和 $\tan \delta$ - 频率曲线（含误差棒）；
 - f) 不确定度评定结果：合成标准不确定度 (u_c)、扩展不确定度 (U)、置信因子 (k)；
 - g) 异常情况说明：测试过程中出现的异常现象（如频率漂移、Q 值波动）、原因分析及处理措施；
 - h) 结论：明确样品介电性能是否符合 5G/6G 通信用高频 FEP 树脂的技术要求（若有）；
 - i) 备注：其他需要说明的事项（如样品储存建议、测试限制条件）；
 - j) 附件（可选）：校准证书复印件、样品照片、测试原始数据。
-