

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.04.11

毫米波频段液体及粉末的介电常数测试技术研究

王梦慧*, 邹翘, 周治鑫, 董继刚, 王亚海, 赵锐

(中电科思仪科技股份有限公司, 山东 青岛 266555)

摘要: 为准确测试毫米波频段液体及粉末材料的介电常数, 提出基于波纹传输线的测试方法, 利用聚四氟乙烯材质的特制容器搭建测试系统, 结合矢量网络分析技术开展测试。首先通过时域门控-反射-传输线(Gated-Reflect-Line, GRL)方法进行校准, 降低容器与待测材料间多次信号反射、散射产生的误差影响, 之后放入待测液体或粉末材料, 采用矢量网络分析仪获取反射参数 S , 进而计算得出介电常数。以固体聚四氟乙烯为标准样品进行测试, 验证了该系统的应用可行性; 对石英粉末及二甲基合成硅油进行测试, 在75 ~ 110 GHz频段内, 测试结果偏离平均值的最大误差仅为5%, 说明该测试方法具有较高准确性, 为食品加工、生物医学等领域中毫米波频段液体及粉末材料的介电常数测量提供了重要技术借鉴。

关键词: 毫米波频段; 介电常数; 测试方法; 矢量网络分析; 波纹传输线; 聚四氟乙烯; 门控-反射-传输线校准; 自由空间法

中图分类号: TB971; TN06; TQ325 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795 (2026) 04-0148-08

Millimeter-wave dielectric constant measurement techniques for liquids and powders

WANG Menghui*, ZOU Qiao, ZHOU Zhixin, DONG Jigang, WANG Yahai, ZHAO Rui

(Ceyear Technologies Co., Ltd., Qingdao 266555, China)

Abstract: To achieve accurate dielectric constant measurement of liquid and powder materials in the millimeter-wave band, this paper proposes a measurement method based on corrugated transmission lines. A dedicated test system was built using a customized polytetrafluoroethylene (PTFE) container and matched with vector network analysis technology for experimental testing. The Gated-Reflect-Line (GRL) calibration technique was adopted to mitigate measurement errors arising from multiple signal reflections and scattering between the container structure and the test samples. Following calibration, liquid or powder samples were loaded into the container, and the reflection S -parameters captured by a vector network analyzer were utilized to calculate the sample dielectric constant. Solid PTFE was tested as a standard sample to verify the feasibility and reliability of the established test system. Further experiments were conducted on quartz powder and dimethyl synthetic silicone oil within the frequency range of 75 ~ 110 GHz. The test results show that the maximum deviation of measured data from the average value is merely 5%, which verifies the superior accuracy of the proposed method. This study offers a crucial technical reference for millimeter-wave dielectric constant measurement of

收稿日期: 2026-04-24; 修回日期: 2026-07-29; 录用日期: 2026-07-30; 发表日期: 2026-08-28

基金项目: 国家重点研发计划重点专项项目(2023YFF0718301)

引用格式: 王梦慧, 邹翘, 周治鑫, 等. 毫米波频段液体及粉末的介电常数测试技术研究[J]. 计测技术, 2026, 46(4): 148-155.

Citation: Wang Menghui, Zou Qiao, Zhou Zhixin, et al. Millimeter-wave dielectric constant measurement techniques for liquids and powders [J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(4): 148-155.



liquid and powder materials, supporting technical development in food processing, biomedicine and other related fields.

Key words: millimeter-wave band; dielectric constant; measurement method; vector network analysis; corrugated transmission line; polytetrafluoroethylene (PTFE); Gated-Reflect-Line (GRL) calibration; free-space method

0 引言

介电常数用来描述材料在电场作用下存储电能的能力。目前毫米波段固体材料介电常数测试方法已较为成熟,但在农业监测、食品加工检测、生物学分析等领域中,还需要测试液体及粉末的介电常数,以判断材料的组成物质及分子结构等。常用的毫米波段粉末及液体介电常数测试方法包括同轴探头法、斜孔脊波导法、准光学谐振腔法和自由空间法等。

同轴探头法基于标准短路负载、空气、去离子水进行校准,该方法可用于测试不同含水量土壤或其他待测液体的介电常数^[1-2],但其测试频率通常在 18 GHz 以下,且在测试过程中同轴探头直接与被测对象接触,会产生污染;斜孔脊波导法通过人工神经网络计算待测液体的介电常数,但只能测试窄频范围,且计算较为复杂^[3];准光学谐振腔法的腔体耦合装置能够产生谐振峰值与高 Q (Q 为品质因数)值,通过测试空腔与加载液体前后谐振峰值与 Q 值的变化,计算液体材料的介电常数与损耗角正切值,但该方法仅适用于测试低损耗材料^[4];自由空间法通过直通-反射-传输线(Thru-Reflect-Line, TRL)校准,然后利用分层算法计算复合材料介电常数。测试时,首先将测试端面校准至传输线两侧,然后测试装载材料夹具的介电常数,再将复合材料加入夹具中,测试整体等效介电常数,最后通过分层算法求解复合材料介电常数。该方法计算过程较复杂、对测试样品表面平整度要求较高、测试校准中忽略了夹具与待测材料之间的多次反射产生的测试误差,且较难应用于高频测试领域^[5-6]。

针对上述问题,本文提出基于波纹传输线的毫米波段液体及粉末介电常数测试方法。首先利用时域门控-反射-传输线(Gated-Reflect-Line, GRL)方法进行校准,将测试端面校准至夹具内壁两侧,并降低容器与待测材料间多次信号反射、

散射产生的误差影响,然后在测试系统中放入待测液体或粉末材料,通过矢量网络分析仪得到反射参数 S 。建立误差项分析模型,基于实际测试数据对方向性误差、跟踪误差、隔离误差、负载匹配误差、源匹配误差进行具体修正,之后采用自由空间算法计算得到介电常数。利用石英粉末及二甲基合成硅油开展介电常数测试,验证该方法的应用效果。

1 校准及测试原理

1.1 GRL 校准

在波纹传输线测试过程中,反射参数 S 的测量准确度直接影响测试结果的准确度,本文通过 GRL 校准 12 项误差,以准确获取真实 S 参数值。GRL 校准基于时域分析技术,通过准确设置时域门能够有效过滤无效信号,并对测试夹具及测试设备(包括矢量网络分析仪等)进行系统误差分析与修正,求解得到该系统误差准确值。

波纹传输线测试中使用 2 端口矢量网络分析仪,误差项产生示意图如图 1 所示,其中, a_{1M} 、 b_{1M} 、 b_{2M} 分别为矢量网络分析仪端口 1 入射波、端口 1 反射波、端口 2 传输波, a_{2M} 、 b_{2M} 、 b_{1M} 分别为矢量网络分析仪端口 2 入射波、端口 2 反射波、端口 1 传输波, a_{1A} 、 a_{2A} 分别为待测件容器外端口 1 的入射波、待测件容器外端口 2 的入射波, b_{1A} 、 b_{2A} 分别为待测件容器外端口 1 的反射波、待测件容器外端口 2 的反射波, a_{1A} 、 a_{2A} 分别为待测件与容器内壁端口 1 的入射波、待测件与容器内壁端口 2 的入射波, b_{1A} 、 b_{2A} 分别为待测件与容器内壁端口 1 的反射波、待测件与容器内壁端口 2 的反射波, S_{11A} 、 S_{22A} 、 S_{21A} 、 S_{12A} 为校准后的实际 S 参数。误差项名称及含义如表 1 所示。方向性误差(E_{DF} 、 E_{DR})的成因:非理想状态下,定向耦合器提取信号时,将未进入待测件的入射信号作为反射信号提取。源匹配误差(E_{SF} 、 E_{SR})的成因:非理想状态下,信号源与电缆、夹具间阻抗不匹配,导致在信号

源与待测件输出端产生多次反射信号。负载匹配误差(E_{LF} 、 E_{LR})的成因:非理想状态下,接收端端口不完全匹配,导致传输测试时,负载与待测件之间多次反射传输信号。传输跟踪误差(E_{TF} 、 E_{TR})的成因:在传输测试时,幅度相位会随频率变化而变化,导致出现此类误差;反射跟踪误差(E_{RF} 、 E_{RR})的成因:在反射测试时,幅度相位会随频率变化而变化,导致出现此类误差;隔离误差(E_{XF} 、 E_{XR})的成因:非理想状态下,外部信号进入接收机中产生此类误差^[7-8]。

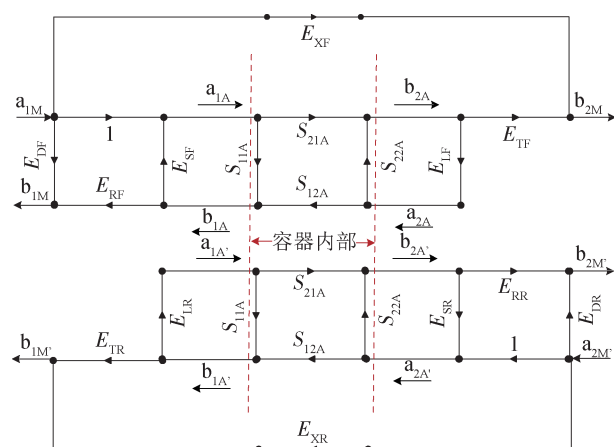


图1 误差项产生示意图

Fig.1 Twelve error terms model

表1 误差项名称及含义

Tab.1 Names and physical definitions of twelve error terms

物理量符号	含义
E_{DF}	前向方向性误差
E_{DR}	反向方向性误差
E_{XF}	前向隔离误差
E_{XR}	反向隔离误差
E_{LF}	前向负载匹配误差
E_{LR}	反向负载匹配误差
E_{TF}	前向传输跟踪误差
E_{TR}	反向传输跟踪误差
E_{RF}	前向反射跟踪误差
E_{RR}	反向反射跟踪误差
E_{SF}	前向源匹配误差
E_{SR}	反向源匹配误差

将文献[9]中的GRL校准误差项方法应用于波纹传输线测试系统,并通过十二误差项修正得到准确的S参数。假设理想状态下, E_{DF} 、 E_{DR} 、 E_{SF} 、 E_{SR} 、 E_{LF} 、 E_{LR} 、 E_{XF} 、 E_{XR} 都为0,而 E_{RF} 、 E_{RR} 与 E_{TF} 、 E_{TR} 在理想条件下幅度不衰减,相位不随频率变化而变化,即传输系数为1,因此 E_{RF} 、 E_{RR} 与 E_{TF} 、 E_{TR} 初始化值为 $1+0 \times i$ ^[9]。参考文献[10-11]中的S参数修正公式逐一求解误差项。 S_{11M} 、 S_{22M} 、 S_{21M} 、 S_{12M} 为矢量网络分析仪测量值, S_{11X} 、 S_{22X} 、 S_{21X} 、 S_{12X} 为修正后实际值。将金属板放置于夹具中测试,可得反射值 S_{11R} 、 S_{22R} 、 S_{21R} 、 S_{12R} ;取出金属板,直通状态下测试值为 S_{11T} 、 S_{22T} 、 S_{21T} 、 S_{12T} 。可得中间量 S'_{11} 、 S'_{21} 、 S'_{12} 、 S'_{22} 为

$$S'_{11} = \frac{S_{11M} - E_{DF}}{E_{RF}} \quad (1)$$

$$S'_{21} = \frac{S_{21M} - E_{XF}}{E_{TF}} \quad (2)$$

$$S'_{12} = \frac{S_{12M} - E_{XR}}{E_{TR}} \quad (3)$$

$$S'_{22} = \frac{S_{22M} - E_{DR}}{E_{RR}} \quad (4)$$

计算得到

$$S_{12X} = \frac{S'_{12} [1 + S'_{11} (E_{SF} - E_{LR})]}{(1 + S'_{11} E_{SF})(1 + S'_{22} E_{SR}) - S'_{12} S'_{21} E_{LR} E_{LF}} \quad (5)$$

$$S_{21X} = \frac{S'_{21} [1 + S'_{22} (E_{SR} - E_{LF})]}{(1 + S'_{11} E_{SF})(1 + S'_{22} E_{SR}) - S'_{12} S'_{21} E_{LR} E_{LF}} \quad (6)$$

$$S_{11X} = \frac{S'_{11} (1 + S'_{22} E_{SR}) - S'_{12} S'_{21} E_{LR} E_{LF}}{(1 + S'_{11} E_{SF})(1 + S'_{22} E_{SR}) - S'_{12} S'_{21} E_{LR} E_{LF}} \quad (7)$$

$$S_{12X} = \frac{S'_{22} (1 + S'_{11} E_{SF}) - S'_{12} S'_{21} E_{LR} E_{LF}}{(1 + S'_{11} E_{SF})(1 + S'_{22} E_{SR}) - S'_{12} S'_{21} E_{LR} E_{LF}} \quad (8)$$

首先进行方向性误差校准,以 E_{DF} 误差项计算为例进行说明:通过 S_{11R} 在时域上的陡峭信号特征判断校准面的位置,根据 S_{11R} 在时域上的时间位置,截取 S_{11T} 中的有效时域信号以实现 E_{DF} 误差项的获取,所得 E_{DF} 中去除了从金属板端面至矢量网络分析仪端口的杂波,故其仅为该测试系统中反射误差,无其他信号干扰。同理校准得到 E_{DR} 。在已知 E_{DF} 、 E_{DR} 误差项的基础上,计算 E_{RF} 、 E_{RR} 误差项,首先对 S_{11T} 和 S_{22T} 进行基于 E_{DF} 、 E_{DR} 误差项的修正,排除耦合器提取反射信号的影响,之后基于 E_{DF} 、 E_{DR} 计算得到 S_{11X} 和 S_{22X} ,进而得出 E_{RF} 、

E_{RR} 。对 S_{11R} 和 S_{22R} 进行处理, 去除 E_{DF} 、 E_{DR} 、 E_{RF} 、 E_{RR} 误差项产生的信号后, 即可得到由于端口阻抗不匹配产生的误差项, 即 E_{SF} 、 E_{SR} 。基于 E_{DF} 、 E_{DR} 、 E_{RF} 、 E_{RR} 、 E_{SF} 、 E_{SR} , 对 S_{11T} 和 S_{22T} 进行校准, 去除误差影响, 即可得到 E_{LF} 、 E_{LR} 。测试时, 认为金属板可以全反射信号, 即反射系数为 1, 测试得到的 S_{21R} 和 S_{12R} 即分别为误差项 E_{XF} 、 E_{XR} 。本研究中进行波纹传输线直通校准时空气线长度为 0 mm, 因此不需要考虑对应的相位延迟等。基于上述误差项校准 S_{21T} 和 S_{12T} , 得到 E_{TF} 、 E_{TR} ^[9, 12]。根据上述计算过程, 将最终误差模型写入矢量网络分析仪, 完成校准。

1.2 波纹传输线与夹具设计

根据上述误差项产生原因及计算过程可发现: 如果通过自由空间法进行分层测试, 校准 E_{SF} 、 E_{SR} 的过程中会忽略待测样品与已知介电的容器之间的多次反射信号, 多次反射信号被误认为有效信号进行计算, 导致产生较大误差, 且在多次测试过程中空气线的厚度会难以避免地引入误差, 这也会影响最终的测试结果。本方法的优势在于: 校准时加入了特制容器, 校准后的端面为特制容器内表面, 显著减小了校准 E_{SF} 、 E_{SR} 时的误差; 校准时将夹具厚度直接设置为特制容器的缝隙厚度, 测试中液体或粉末完全充满特制容器, 显著减小了样品厚度与空气线长度产生的影响。

如图 2 所示, 波纹传输线装置由波纹喇叭天线与一平行段拼接而成。波纹喇叭天线既可以用作馈源天线, 也可以用作直通传输的传输线, 为尽可能减小模型误差, 需要在输出口添加平行段结构。添加平行段波纹后, 可以认为输出波束稳定且具有平面波相位特性。在校准与测试过程中, 需要两个特制容器(一个空的特制容器用于校准使用, 另一个装载测试样品的特制容器用于测试使用), 这两个特制容器形状、大小、材质完全一致, 反复夹紧/松开特制容器进行测量。特制容器的制作材料为低损耗的聚四氟乙烯, 其对测试信号的透射效果较好, 反射较低, 对于测试的影响较小, 且化学性质稳定, 不易与粉末或液体相融或发生其他化学反应^[13]。将波纹传输线装置固定

在滑轨上, 保证前、后、左、右完全对齐在同一水平面上, 在操作过程中通过旋钮移动滑轨, 可避免因为手动操作导致错位产生较大误差^[14]。

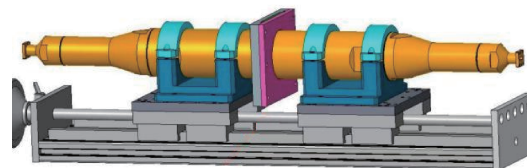


图2 波纹传输线装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of corrugated transmission line device

1.3 测试原理

波纹传输线法计算介电常数的过程属于网络参数法中的一种, 无需进行复杂分层算法反演。将波纹传输线-特制容器夹层-波纹传输线的电磁波路径等效为一段填充了样品介质的均匀传输线, 在测试过程中, 由矢量网络分析仪源发射电磁波, 经电缆波导口传输至波纹传输线, 之后经波纹传输线平行段结构转化为平面波, 垂直入射至待测样品表面, 在不连续的材料表面产生多次反射与透射, 反射与透射信号由矢量网络分析仪接收。分别计算得到反射系数与透射系数。在测试过程中, 通过波纹传输线将矢量网络分析仪发射的电磁波转化为平面波, 因此本文基于平面波入射模型进行计算^[15]。

设介质表面的入射电压为 V_i , 总的反射电压和透射电压分别为 V_R 和 V_T , 其与散射参数 S_{11} 、 S_{21} 的关系满足

$$V_R = S_{11}V_i \quad (9)$$

$$V_T = S_{21}V_i \quad (10)$$

结合菲涅尔定理, 考虑电磁波在媒质中的实际传播特性, 可得到如图 3 所示的原理示意图。由于本研究在校准阶段已将测试端面直接校准至特制容器内表面, 因此容器中虚线所示的反射干扰已被有效消除。 Γ 为材料无限长时在界面 A 处的反射系数, 根据对称性可知, 界面 B 处的反射系数为 $-\Gamma$; T 为有限长材料中的透射系数。基于此, 总反射电压 V_R 和总透射电压 V_T 的表达式为

$$V_R = \Gamma - \{ \Gamma(1 - \Gamma^2)T^2 + \Gamma^3(1 - \Gamma^2)T^4 + \cdots + \Gamma^{2n-3}(1 - \Gamma^2)T^{2(n-1)} + \cdots \} = \Gamma - [(1 - \Gamma^2)/\Gamma] \quad (11)$$

$$V_T = (1 - \Gamma^2)T - \Gamma^2(1 - \Gamma^2)T^3 + \cdots + \Gamma^{2n}(1 - \Gamma^2)T^{2n+1} + \cdots = (1 - \Gamma^2)T - (1 - \Gamma^2)T \sum_{n=1}^{\infty} \Gamma^{2n} \Gamma^{2n} \quad (12)$$

令入射电压 $V_i = 1$ ，则散射参数分别与 V_R 和 V_T 相对应，即

$$S_{11} = \frac{\Gamma(1 - T^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (13)$$

$$S_{21} = \frac{T(1 - \Gamma^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (14)$$

令参数 $K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}}$ ，可得

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (15)$$

式(15)中需满足 $|\Gamma| < 1$ ， $\pm$ 号根据此条件进行选择。

根据等效二端口网络理论，可得

$$\Gamma = \frac{\eta_r - 1}{\eta_r + 1} \quad (16)$$

$$T = e^{-\gamma d} \quad (17)$$

式中： η_r 为待测材料的归一化特性阻抗， γ 为电磁波在介质中的传播常数， d 为待测样品厚度。

可得

$$\eta_r = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (18)$$

$$\gamma = -\frac{\ln(T)}{d} \quad (19)$$

测试系统的工作模式为横电磁模(Transverse Electromagnetic Mode, TEM)，即电、磁场垂直于电磁波传播方向的模式，因此， η_r 、 γ 与介质电磁参数满足关系

$$\eta_r = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \quad (20)$$

$$\gamma = j2\pi f \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \quad (21)$$

式中： μ_r 为复相对磁导率， ε_r 为复相对介电常数， j 为虚数单位， f 为电磁波的工作频率。则

$$\varepsilon_r = \frac{\gamma}{\gamma_0} \left(\frac{1 - \Gamma}{1 + \Gamma} \right) \quad (22)$$

式中： γ_0 为自由空间中的传播常数， $\gamma_0 = j2\pi/\lambda_0$ (λ_0 为自由空间中电磁波的波长)，推导得到相应介质的介电常数为^[16]

$$\varepsilon_r = \varepsilon'_r - \varepsilon''_r \quad (23)$$

式中： ε'_r 为介电常数实部， ε''_r 为介电常数虚部。

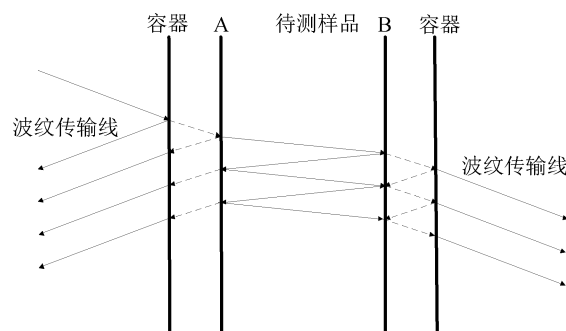


图3 波纹电磁波传播原理示意图

Fig.3 Schematic of propagation principle of electromagnetic waves excited by corrugated transmission line

1.4 测试步骤

基于上文描述的GRL校准及测试原理，通过编程将GRL校准计算过程与介电常数计算过程相结合，并对系统进行封装，在实际测试场景中仅需要以下操作过程即可实现完整测试：通过测试电缆将矢量网络分析仪与扩频模块(75 ~ 110 GHz)连接，将2个波纹传输线分别连接至左右2个扩频模块，通过固定滑轨移动波纹传输线实现同一水平面的左右移动，移动滑轨夹紧特制容器，完成测试系统搭建。校准时，通过测试软件采集空载和放置金属板状态下的S参数，输入对应时域门宽度，调用GRL算法即可完成校准。测试时，将装入待测样品的特制容器夹紧，测试软件读取S参数并调用计算介电常数算法，显示测试结果。通过波纹传输线法测试液体和粉末介电常数操作过程较为简单，无需进行复杂设备调试，效率较高。空腔时测试图、石英粉测试图分别如图4、图5所示。

2 测试结果及误差分析

2.1 测试结果

开展对比实验，验证本方法的准确性。波纹传输线法测试固体样品介电常数的准确性已在其他参考文献中得到验证^[14]，且聚四氟乙烯的介电常数较稳定，已有许多相关文献记录^[17]。波纹传输线法仅对中高损耗样品(损耗角正切值>0.001)

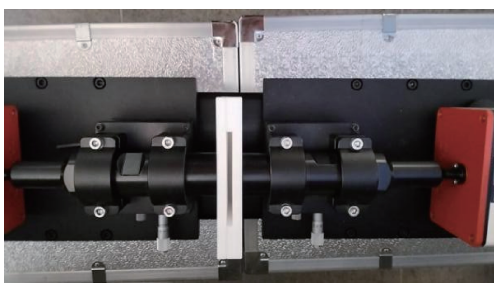


图4 空腔时测试图

Fig.4 Physical photo of the measurement system with empty cavity

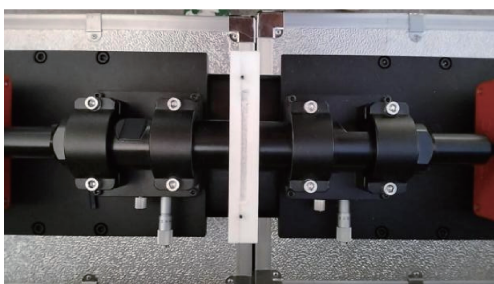


图5 石英粉测试图

Fig.5 Physical photo of measurement system filed with quartz powder

的介电常数虚部测量较为准确, 本文测试样品为低损耗样品, 因此不在本文中描述介电常数虚部的计算结果, 而是重点给出介电常数实部的计算结果。通过波纹传输线法测试固体厚度为 5 mm 的聚四氟乙烯, 结果如图 6 中黑色曲线所示, 测试结果与文献中记录结果基本一致。装载特制容器后, 通过 GRL 校准方法, 将测试端面校准至特制容器内壁两端, 将刚刚测试过的厚度为 5 mm 的聚四氟乙烯放置于特制容器中, 测试数据如图 6 中红色曲线所示。图 6 中两条曲线最大偏离误差为 2.2%, 证明了本文所提出的测试方法的有效性与准确性。

更换特制容器中的材料, 测试 3 000 目石英粉与二甲基合成硅油。固体石英的介电常数约为 3.8, 而石英粉中存在空气缝隙, 不同密度的石英粉末测试结果不同。空气缝隙越大, 等效介电常数越小, 因此在测试粉末中不能过于松散。本次测试前, 将石英粉末材料手工压实, 并进行烘干处理, 排除因石英粉末材料吸水对介电参数测试的影响。石英粉介电常数测试结果如图 7 所示, 其介电常数均值为 1.98, 偏离平均值的最大误差为 3%。

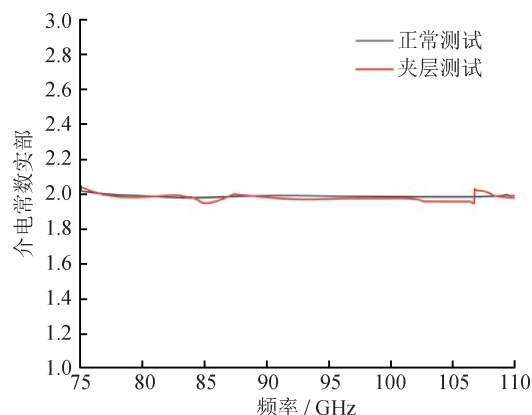


图6 固体聚四氟乙烯测试对比数据

Fig.6 Comparative permittivity curves of solid PTFE

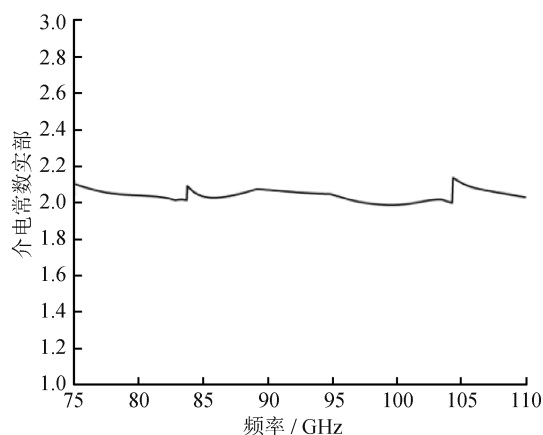


图7 石英粉介电常数

Fig.7 Permittivity curve of quartz powder

沿容器边缘缓慢注入二甲基合成硅油, 减少气泡对介电参数测试的影响。二甲基合成硅油介电常数测试结果如图 8 所示, 其介电常数均值为 2.04, 偏离平均值的最大误差为 5%。

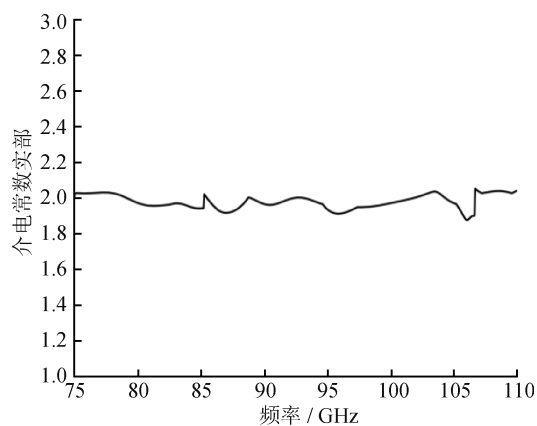


图8 二甲基合成硅油介电常数

Fig.8 Permittivity curve of dimethyl silicone oil

不同方法测试结果对比如表2所示。同轴探头法多用于50 GHz以下液体或粉末测试,对探头精度要求较高,且探头直接接触待测样品易引入污染。利用自由空间法进行75~110 GHz频段测试时,夹具周围易产生天线绕射,且计算过程较为复杂。本文方法与上述两种方法相比精度更高。

表2 不同方法测试结果对比

Tab.2 Comparison of test results obtained using different methods

测试方法	测试样品类型	测试频段/GHz	测试误差/%
本文方法	液体及粉末	75~110	5
同轴探头法	液体及粉末	1~50	8
自由空间法	粉末	75~110	6

2.2 误差分析

图6中红色曲线和图7、图8中测试曲线显示出现不同尖锐起伏或毛刺震荡,下面分析产生这些现象的原因:对于图6而言,固体聚四氟乙烯与特制容器并非完全贴合,由于平整度不同,测试时两者之间存在微小缝隙,电磁波会在改缝隙中进行多次反射、散射;对于图7而言,石英粉堆积不均匀,电磁波在颗粒间隙间也会多次反射、散射;对于图8而言,液面倾斜等会导致电磁波斜入射,这些影响会导致曲线随机形成局部微型尖锐起伏或毛刺。

聚四氟乙烯为柔性材料,在测试过程中由于波纹传输线装置挤压,夹具可能会产生轻微变形,导致厚度发生变化,进而产生误差。石英粉末中存在空气缝隙,根据测试场景可将其简化为石英粉-空气两相体系,通过Bruggeman有效介质模型分析测试时的孔隙率,可得

$$V_1 \cdot \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{\text{eff}}}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_{\text{eff}}} + V_2 \cdot \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_{\text{eff}}}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_{\text{eff}}} = 0 \quad (24)$$

式中: V_1 、 V_2 分别为空气和石英粉在特制容器中的体积占比, ε_1 为空气的介电常数, ε_2 为固体石英的介电常数, ε_{eff} 为等效介电常数(本文测试结果平均值为1.98)。可计算出 $V_1 \approx 0.5374$,即粉体孔隙率约为53.74%。测试石英粉前已测试固体聚四氟乙

烯标准样品,且测试结果准确性较好,证明测试系统满足要求,校准带来的误差可忽略。

3 总结

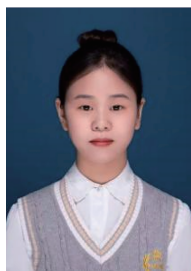
本文提出了基于波纹传输线的毫米波频段液体及粉末材料介电常数测试方法,并搭建了相应的测试系统。利用该系统对固体聚四氟乙烯标准样品进行测试,验证了其应用可行性;之后利用该系统对石英粉末及二甲基合成硅油进行测试,在75~110 GHz频段内,测试结果偏离平均值的最大误差仅为5%,验证了其应用准确性。基于波纹传输线的介电常数测试方法具有精度高、操作便捷、计算复杂度低等优点,为农业、食品加工、生物学检测等领域中毫米波频段液体及粉末材料的介电常数测量提供了重要技术参考。

参考文献

- [1] 刘晗. 基于单端同轴探头法的土壤复介电常数研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2024.
Liu Han. Study of soil complex dielectric constant based on single-ended coaxial probe method[D]. Xi'an: Xidian University, 2024.
- [2] 乔杰, 徐立, 王浩. 基于终端开路同轴的宽频带液体介电常数测量[C]// 2025年全国微波毫米波会议报告集, 2025: 1-2.
Qiao Jie, Xu Li, Wang Hao. Broadband measurement of liquid dielectric constant using open-ended coaxial probe [C]// Proceedings of 2025 International Conference on Microwave and Millimeter Wave, 2025: 1-2.
- [3] 苟明艺, 陈倩, 黄卡玛, 等. 一种斜孔脊波导的介电常数测量装置[J]. 应用技术, 2023, 50(1): 113-116.
Gou Mingyi, Chen Qian, Huang Kama, et al. A permittivity measurement device for oblique aperture ridge waveguide [J]. Journal of Technology, 2023, 50(1): 113-116.
- [4] 沈荣华. W波段液体材料介电性能准光腔法测试技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2025.
Shen Ronghua. Research on quasi-optical resonator-based testing methodology for complex permittivity characterization of liquid materials in the W-band[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2025.
- [5] Kumar S B, Raveendranath U, Mohanan P, et al. A simple

- free-space method for measuring the complex permittivity of single and compound dielectric materials [J]. *Micro-wave and Optical Technology Letters*, 2000, 26 (2) : 117-119.
- [6] Ghodgaonkar D K, Varadan V V, Varadan V K. A free-space method for measurement of dielectric constants and loss tangents at microwave frequencies[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1989, 37 (3): 789-793.
- [7] 张涛. 基于误差网络映射模型的矢量网络分析仪校准算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
Zhang Tao. Research on calibration algorithm of vector network analyzer based on error network mapping model [D]. Xi'an: Xidian University, 2023.
- [8] 朱晓亮. 矢量网络分析仪测量信号功率及相位校正技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
Zhu Xiaoliang. Research on signal power and phase correction technology of vector network analyzer [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [9] Bartley P G, Begley S B. A new free-space calibration technique for materials measurement [C]// *Proceedings of IEEE International Conference*, 2012. DOI: 10. 1109/ I2MTC. 2012. 6229351.
- [10] 卢俊峰. 微波平面电路网络S参数测试校准方法的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
Lu Junfeng. Research on testing and calibration method of S-parameters of microwave planner circuit network [D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- [11] 张魁才. 60 GHz 碳化钛复合材料毫米波吸波性能与自由空间法测试系统[D]. 广州: 广东工业大学, 2024.
Zhang Kuicai. MMW absorbing properties of TiC composites and free-space method test system at 60 GHz band [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2024.
- [12] Agilent technologies. Free space materials measurement semina[Z]. 2005.
- [13] 中电科思仪科技股份有限公司. 一种传输反射法的液体及粉末材料测量系统及校准方法: CN202510474421. 6 [P/ OL]. 2025-07-11. <https://m. tianyancha. com/zhuanli/02921e3826714871cadee24e2289e376>.
Ceyear Technologies Co., Ltd. Transmission - reflection method for liquid and powder material measurement systems and calibration: CN202510474421. 6 [P/ OL]. 2025-07-11. <https://m. tianyancha. com/zhuanli/02921e3826714871cadee24e2289e376>.
- [14] 周治鑫, 邹翹, 陈超婵, 等. 使用波纹传输线的材料介电常数测量方法[J]. *上海计量测试*, 2025(4): 5-7, 11.
Zhou Zhixin, Zou Qiao, Chen Chaochan, et al. Research on measurement method of dielectric parameters using corrugated transmission line [J]. *Shanghai Measurement and Testing*, 2025(4): 5-7, 11.
- [15] 张娜. THz 复介电常数自由空间法测试技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
Zhang Na. Free space test technology of THz complex permittivity [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [16] 王娟. 自由空间法微波参数测试技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
Wang Juan. Free space measurement of complex permittivity and complex permeability at microwave frequencies [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [17] 潘晨. 聚四氟乙烯材料介电和导热性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2012.
Pan Chen. Study on the dielectric and thermal conductive properties if polytetrafluoroethylene materials [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2012.

(本文编辑: 刘圣晨 李成成)



第一/通信作者: 王梦慧(2000—), 女, 助理工程师, 主要研究方向为材料测试。