

微扰法测量干燥岩矿样品复介电常数

郑永春¹, 欧阳自远^{1,2}, 王世杰², 李春来¹, 冯俊明²

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100012

2. 中国科学院地球化学研究所, 贵州贵阳 550002

摘要: 微扰法是测量微波频率下介质材料复介电常数的简单易行的方法, 尤其对低 ϵ' 和低 $\tan\delta$ 介质的测量很灵敏, 至今仍在广泛应用. 但大部分岩矿样品的 ϵ' 和 $\tan\delta$ 超出了微扰法的量程范围, 无法用该方法直接测量. 本文提出了基于微扰法测量干燥岩矿样品复介电常数的新方法. 先将干燥岩矿研磨成粉, 并与 ϵ' 和 $\tan\delta$ 较小且介电性质稳定的聚乙烯粉末以一定体积百分比混合, 热压成型制样; 用微扰法测量岩塑混合物的复介电常数. 两相混合体系的介电性质与其中每相的关系可以用 Lichtenecker 混合公式描述, 由于聚乙烯的复介电常数已知, 因此, 岩矿样品的复介电常数可由岩塑混合物的复介电常数计算得到. 测量结果表明, 9 370 MHz 时, 同一试样用矩形谐振腔微扰法、圆形谐振腔微扰法和传输反射法的测量结果一致, 并提供了部分干燥岩石和矿物的复介电常数测量数据.

关键词: 微扰法; 稀释法; Lichtenecker 公式; 复介电常数; 岩石和矿物.

中图分类号: P631.3; P584

文章编号: 1000-2383(2006)06-0867-06

收稿日期: 2006-03-09

Measurement of Complex Permittivity of Dry Rocks and Minerals with Perturbation Method at 9 370 MHz

ZHENG Yong-chun¹, OUYANG Zi-yuan^{1,2}, WANG Shi-jie², LI Chun-lai¹, FENG Jun-ming²

1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

Abstract: Resonant cavity perturbation method, widely used as an easy and fast method for determining dielectric properties of materials at microwave frequencies, is very sensitive to the measurement of the materials with low ϵ' and $\tan\delta$ values. However, it is not suitable to measure a majority of rocks and minerals whose ϵ' and $\tan\delta$ values are beyond the measurement range using the perturbation method. This paper proposes the polythene dilution method, a new perturbation-based method, to measure complex dielectric permittivity of dry rocks and minerals over 9 370 MHz. At first, the dry rocks and minerals are ground into powder, and then they are mixed in a given proportion with polythene powder, both with relatively low ϵ' and $\tan\delta$ and with stable dielectric property, and then hot-pressed into fine granular specimens. The perturbation method is used to measure the complex dielectric permittivity of the rock and plastic mixture. The dielectric property of the two-phase mixed system and its relation to either of the two phases can be obtained with Lichtenecker mixture formulae. Since the complex dielectric permittivity of the polythene is known, the complex dielectric permittivity of the rock samples can be calculated from that of the rock and mineral samples. At 9 370 MHz, as shown by the measurement results, the measurement of the same testing sample produced the same result with either of the perturbation method of rectangular or round resonant cavities, or of the transmission reflectometry, and provided us with the complex dielectric permittivity data measured from part of the dry rocks and minerals.

Key words: resonant cavity perturbation method; polythene dilution method; Lichtenecker's mixture formulae; complex dielectric permittivity; rocks and minerals.

复介电常数($\epsilon_r = \epsilon_r' - i\epsilon_r''$, $i = \sqrt{-1}$)是微波遥感和电磁波传输理论中重要的物理参数,强烈影响物质吸收电磁波的能力,并影响着电磁波能量的反射率,对其进行深入研究,既有理论意义,又有应用价值。岩石和矿物是自然界中分布最广泛的天然地物,其在微波频率下的复介电常数测量,是地球物理、岩石学、矿物学、微波材料和微波技术研究的一项基础工作,对开辟主、被动微波遥感的潜在应用前景具有重要意义。

许多学者曾采用不同方法测量干燥岩矿样品复介电常数(Howell and Cicastro, 1961; Griffin, 1974; Ahmad and Zihlif, 1990; Ulaby *et al.*, 1990; Rust *et al.*, 1999; Wang *et al.*, 1999; Zheng *et al.*, 2005),但岩矿样品本身的一些固有特征限制了对其复介电常数的准确测量。对矿物而言,样品形状不规则,且通常为细颗粒,某些矿物又很稀少,不能像陶瓷、塑料等介质材料一样磨制成精确尺寸进行测量。而且,矿物中存在解理、断口、裂面等宏观缺陷和包裹体、双晶等微观缺陷,并非均匀介质,这使其介电性质的准确测量比较困难。对岩石而言,天然岩石多为不均一材质,不同部位的化学成分和矿物分布也不均一,并存在孔隙(大小、形状和分布等)、结构构造等特征。

微扰法测量介质材料的复介电常数始于 20 世纪 60 年代早期(Courtney, 1970)。该方法根据介质样品置入谐振腔前后的腔体谐振频率和品质因数的改变量计算出介质试样的复介电常数。这种非接触式测量技术具有操作相对简单、所需样品量少、测量精度高、应用范围广等优点,尤其适合于低损耗介质的测量(中华人民共和国国家标准, 1987; Kobayashi *et al.*, 1994),至今仍被广泛采用。

微扰法依据的微扰理论的基本假设前提是:(1)介质试样引入导致的腔体谐振频率的相对变化量很小;(2)除介质试样附近外,试样置入腔体引起腔内电磁场结构的变化量很小。为满足腔体“微扰”的前提条件,微扰法仅能适用于小体积试样的测量,即试样体积要远小于腔体体积,而且待测试样的 ϵ' 和 $\tan\delta$ 不能过大。因此,将微扰法用于干燥岩矿样品的复介电常数测量,存在的问题首先是岩矿样品本身的固有特征使小体积试样制作存在困难,如 X 波段(8~12 GHz)的介电测量要求矩形杆状样品的厚度和宽度均为 1~2 mm 之间(ASTM, 1977);其次,各类干燥岩矿样品的复介电常数差异很大, ϵ' 和 $\tan\delta$ 的变化范围甚至相差几个数量级,使大多数干燥岩矿

样品的复介电常数超出微扰法的量程而无法测量。

为解决微扰法用于岩矿样品复介电常数测量存在的困难,本文提出了一种新的测量方法。通过将研磨成粉的岩矿样品与聚乙烯粉末以一定的体积百分比混合并热压成型,成型后的压片再切割磨制成微扰法测量所要求的样品尺寸,我们把这种试样制作方法称为“聚乙烯稀释法”。而后,用微扰法测量岩塑混合物的复介电常数。由于聚乙烯的复介电常数已知,且多相混合物的复介电常数与其中各相之间的关系可以用 Lichtenecker 介电混合公式描述,因此可以从混合物的复介电常数计算得到岩矿样品的复介电常数。

1 微扰法测量原理和装置

1.1 微扰法的测量原理

谐振腔在所确定的工作模式下,谐振频率为 f_0 ,固有品质因数为 Q_0 。当在谐振腔中部平行于电场方向(即谐振腔中电场最大值位置)置入一根细长介质杆时,有耗介质试样将扰动腔内电磁场分布,从而使谐振频率降为 f_1 ,固有品质因数降为 Q_1 ,谐振频率和品质因数的改变量决定于该介质的复介电常数和试样体积。如果试样体积比腔体体积小得多,那么这种扰动将是微弱的,因而腔体参量的变化也是微弱的。根据试样扰动导致的谐振频率变化量($\Delta f = f_0 - f_1$)和品质因数改变量($\Delta Q = Q_0 - Q_1$),应用微扰理论可分别计算出介质样品的复介电常数 ϵ' 和 $\tan\delta$ (ASTM, 1977)。因此,应用微扰法测量介质的复介电常数可归结为对谐振腔在置入试样前、后的谐振频率和固有品质因数的测量。实际应用中,当频率高时用一段标准波导构成一个矩形 H_{10n} 型谐振腔比较方便,频率较低时则常用圆柱型 E_{010} 腔。

微扰法的理论基础已完全建立,采用的公式(即谐振频率和品质因数改变量与介质试样的复介电常数和复磁导率的关系)是由麦克斯韦方程和边界条件根据样品具体形状作一些近似导出的。根据微扰理论,矩形介质杆试样的复介电常数可以由以下公式计算得到(ASTM, 1977):

$$\epsilon' = 1 + \frac{\Delta f}{2f_0} \times \frac{V_0}{V_s} = 1 + \frac{aL}{2\pi d} \times \frac{f_0 - f_1}{f_0}, \quad (1)$$

$$\epsilon'' = \frac{V_0}{4V_s} \left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0} \right) = \frac{aL}{4\pi d} \left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0} \right), \quad (2)$$

$$\tan\delta = \epsilon''/\epsilon'. \quad (3)$$

式中: ϵ' 、 ϵ'' 、 $\tan\delta$ 分别为介质试样复介电常数的实

部、虚部、介电损耗角正切; f_0 和 f_1 分别为试样置入前后的腔体谐振频率, $\Delta f = f_0 - f_1$; Q_0 和 Q_1 分别为试样置入前后的品质因数; V_s 为介质试样的体积, V_0 为腔体体积, 且 V_s 远小于 V_0 ; a, L 分别为腔体的宽和长(单位: mm); w, d 分别为介质试样横截面的宽和长(单位: mm); 若待测试样为圆形介质杆, 则将上式中的 $w d$ 变成 πr^2 (即介质试样的截面积)即可。

1.2 微扰法的测量装置

测试系统主要由工作在 X 波段、 H_{10n} 模式的矩形波导谐振腔和 AV3616X 型射频/微波标量网络分析仪组成。其中, 测试腔腔体由黄铜制成, 其宽(a)、长(L)、高(h)分别为 22.86 mm × 246.4 mm × 10 mm; 空腔谐振频率 $f_0 = 9\,370$ MHz, 品质因数 $Q_0 = 3\,000$ 。因此, 该腔体对低损耗介质的测量是固有灵敏的。

2 介质试样的制备和复介电常数计算

2.1 试样制备

试样制备过程: 第一步, 将岩矿样品研磨成细颗粒粉末, 过 150~200 目筛网, 并用比重计测量岩矿样品颗粒的相对密度。由于研磨和过筛过程中金属的混入将对样品的复介电常数产生重要影响, 所以样品研磨需在陶瓷或玛瑙研钵中进行, 过筛的筛网要求是非金属的聚酯尼龙纱筛; 第二步, 将岩矿样品粉末放入温度为 110 °C 烘箱中, 连续烘烤 24 h 以去除样品中含有的水分; 第三步, 趁热取出并称量一定质量的岩矿样品粉末与聚乙烯粉末以一定的体积比混合; 第四步, 将岩矿样品粉末与聚乙烯粉末在研钵中研磨, 使其充分混合均匀。称取 2 g (2 g 样品压制的薄片厚度一般为 1~2 mm 左右) 混合物样品放入直径为 30 mm 的不锈钢活塞圆筒, 盖上塞子, 放入加热炉, 调节温控装置, 加热至 130~150 °C 并保持 5~8 min, 使聚乙烯粉末全部熔融; 第五步, 从加热炉中取出活塞, 放入加压装置, 垂直加压 (1 000 kg/cm²) 直至活塞自然冷却至室温后释放压力, 从活塞中取出圆形压片。制成后的压片应色泽均匀, 无斑点、气孔, 无明显沉淀分层现象; 最后, 从压片过圆心处切取宽度为 2 mm 左右的矩形介质杆试样, 用千分尺在矩形介质杆试样活化长度 (样品在波导中的长度) 的上、中、下 3 个位置测量矩形杆状样品截面的长 (d) 和宽 (w) 并取平均值, 计算出矩形介质杆的截面积。

从 Lichtenecker 介电混合公式的角度考虑, 岩

矿样品可以以任意体积比与聚乙烯混合。但试样制备过程中发现, 一方面, 岩矿样品在混合物中所占的体积百分比不能太高, 以免热压成型制成的压片强度不够而很难加工成符合测量要求的矩形介质杆; 另一方面, 岩矿样品的体积百分比又不能太低, 如果岩塑混合物中岩矿含量太低, 将导致热压过程中产生明显的沉淀分层现象, 从而影响测量结果的准确性。经验表明, 当岩矿样品粉末的体积占混合物总体积的 30% 时, 热压成型制成的压片既具有较强的可塑性, 又不会产生沉淀分层。因此, 在岩塑混合物配比时, 一般将混合物中岩矿样品粉末与聚乙烯粉末的体积百分比配成 3:7, 混合物总重为 10 g, 这样做的目的同时也是为了不同次测量结果之间具有可比性。混合物中岩矿质量 m_R 和聚乙烯质量 m_P 计算如下式:

$$\left(\frac{m_R}{\rho_R}\right) / \left(\frac{m_P}{\rho_P}\right) = x / (1-x), \quad (4)$$

$$m_P + m_R = 10 \text{ g}. \quad (5)$$

式中: x 为混合物中岩矿样品所占的体积百分比, 大多数情况下取 30%。但对于钛铁矿、金红石等高介电常数的矿物, 体积百分比一般配成 15%、10% 不等, 目的是降低混合物的复介电常数, 使之符合微扰法的量程范围; ρ_R, ρ_P 分别为岩矿样品和聚乙烯的相对密度, 本文中所用聚乙烯粉末的标称相对密度 $\rho_P = 0.95$ 。

2.2 岩塑混合物的复介电常数测量

开启电源, 使微波发生器工作频率稳定在 9 370 MHz 附近, 得到通过式谐振腔的谐振曲线。空腔谐振频率 f_0 用波长计测量谐振曲线峰顶所对应的频率得到; 然后, 把谐振曲线调到适当大小测出比峰顶电平小 3 dB 处的 2 个频率, 即半功率频率和 f_0' 及 f_0'' , 由此可以得到空腔的品质因数。把矩形介质试样 (岩塑混合物) 置入谐振腔中央的样品孔, 测出此时谐振腔的谐振频率 f_1 和品质因数 Q_1 。然后根据公式 (1)、(2)、(3) 得到矩形介质杆的 $\epsilon', \epsilon'', \tan\delta$ 。

2.3 岩矿样品的复介电常数计算

多相混合物的介电性质与其中每相的介电性质之间的关系可用 Lichtenecker 介电混合公式描述。这一公式由 Lichtenecker (1926)、Lichtenecker and Rother (1931) 提出, 并被许多学者证明和应用 (Wallin, 1985; Hook and Livingston, 1995; Seyfried and Murdock, 1996; Zakri and Laurent, 1998; Zheng *et al.*, 2005)。Zakri 已经证明 Lichtenecker 公式不仅是基于实验数据基础上的经验公式, 同时也是基于有效介质理论基础上的理论模型

(Zakri *et al.*, 1998).

当岩矿样品与聚乙烯的两相混合物制成的矩形介质试样的复介电常数测得后,利用 Lichtenecker 介电混合公式,就可以根据公式(6)、(7)计算出混合物中岩矿样品的复介电常数:

$$x \log \epsilon_R' = \log \epsilon' - (1-x) \log \epsilon_P', \quad (6)$$

$$x \tan \delta_R = \tan \delta - (1-x) \tan \delta_P, \quad (7)$$

式中: ϵ_R' 、 $\tan \delta_P$ 为岩矿样品的介电常数和介电损耗角正切; ϵ' 、 $\tan \delta$ 为岩塑混合物的介电常数和介电损耗角正切; ϵ_P' 、 $\tan \delta_P$ 为聚乙烯的介电常数和介电损耗角正切. 本文采用聚乙烯的标称值 $\epsilon_P' = 2.35$, $\tan \delta_P = 5 \times 10^{-4}$; x 为矩形介质试样中岩矿样品的体积百分数.

3 测量质量控制

3.1 标准物质测量

标准物质的测量是验证系统测量精度最可靠和最常用的方法. 我们采用本谐振腔系统测量了 6 种标准物质的复介电常数(表 1), 表中同时列出了这

表 1 9 370 MHz 微扰法对标准物质复介电常数测量结果及其与标称值的比较

Table 1 Comparison between complex dielectric permittivity and loss tangent of six standard materials measured by cavity perturbation method and its criterion values at 9 370 MHz

样品名称	ϵ'	ϵ_{std}'	误差(%)	$\tan \delta$	$\tan \delta_{\text{std}}$	相对密度
聚乙烯	2.35	2.350	0	1.3×10^{-3}	5×10^{-4}	0.95
聚四氟乙烯	2.02	2.050	1.46	4×10^{-3}	5×10^{-4}	2.05
有机玻璃	2.62	2.580	1.55	1.8×10^{-2}	1.24×10^{-2}	1.18
熔融石英	3.71	3.780	1.85	9×10^{-4}	1×10^{-4}	2.20
天然石英	4.30	4.305	0.12	6×10^{-4}	5×10^{-4}	2.65
Al ₂ O ₃ 基片	8.79	8.900	1.24	1.6×10^{-4}	4×10^{-4}	3.85

ϵ' 、 $\tan \delta$ 为测量值; ϵ_{std}' 、 $\tan \delta_{\text{std}}$ 为标称值.

6 种标准物质复介电常数的标称值(Arthar, 1954; Von Hippel, 1954; Metaxas and Meredith, 1983; Wang *et al.*, 1999).

结果表明,采用本系统测量试样的介电常数 ϵ' 的测量误差 $< 2\%$; 当试样 $1 \times 10^{-3} \leq \tan \delta \leq 1 \times 10^{-1}$ 时, $\tan \delta$ 系统测量误差约为 $20\% \sim 30\%$; 当试样 $\tan \delta < 1 \times 10^{-3}$ 时, 即极低损耗介质, 测量误差随之增大, 但测量结果与标称值基本仍为同一数量级; 当试样 $\tan \delta > 1 \times 10^{-1}$, 即较高损耗介质, 试样引入谐

振腔对腔体的扰动超过微扰要求, 系统难以直接测量, 此时需采用聚乙烯稀释法来降低试样的介电损耗角正切, 使试样的 $\tan \delta$ 处于本系统可精确测量的范围.

3.2 矩形腔微扰法、圆形腔微扰法以及传输/反射法测量结果之间的比较

复介电常数不是设备直接测量得到的参数, 而是通过测量其他电磁参数计算得到的结果. 复介电常数的测量误差与测试环境(温度、湿度、电磁干扰等)、测量人员的测量习惯等因素有较大关系, 各个实验室之间的测量结果常常存在一定误差. 因此, 为验证本系统测量数据的可靠性, 我们测量了部分矿物和岩石粉末与聚乙烯粉末的混合物压片及聚乙烯的复介电常数, 并将同一压片用圆形谐振腔微扰法和传输/反射法(T/R)进行测量, 测量结果见表 2.

结果表明, 矩形谐振腔微扰法、圆形谐振腔微扰法和传输/反射法这 3 种测量方法对同一介质试样 ϵ' 的测量结果基本一致, 标准偏差 $< 4\%$.

3.3 岩矿样品直接测量和采用聚乙烯稀释法间接测量结果之间的比较

当待测介质试样是结构致密且质地均匀的岩石或矿物样品时, 且岩矿样品的复介电常数处于微扰法的量程范围内, 可将岩矿样品磨制成矩形介质杆试样, 采用本谐振腔系统直接测量. 岩矿样品直接测量与采用聚乙烯稀释法间接测量的复介电常数进行比较, 是验证聚乙烯稀释法测量准确度的直接有效手段. 为此, 我们采用前述的聚乙烯稀释法进行样品制备, 并从岩塑混合物的复介电常数计算出岩矿样品的复介电常数, 将测量结果与采用岩矿样品磨制的杆状试样直接测量结果进行比较(表 3).

结果表明, 岩矿样品杆状试样直接测量与聚乙烯稀释法得到的测量结果相比, 无论是介电常数还是损耗角正切均存在一定差异. 而且, 测量结果也表明, 矿物颗粒越细小、结构越致密的样品, 聚乙烯稀释法间接测量和杆状岩矿样品直接测量结果之间的偏差就越小, 如金伯利岩、玄武岩. 反之, 则测量结果之间的偏差就越大, 如斜长岩、钾长岩. 而其中又以斜长岩的斑晶最粗大, 测量结果的偏差也最大. 这说明, 岩矿样品中结构构造和物质分布不均匀对测量结果有较大影响, 使岩矿样品局部直接测量的结果难以代表岩矿样品整体的介电性质.

我们还利用聚乙烯稀释法结合谐振腔微扰法测量了部分岩石和矿物样品的复介电常数(表 4).

表 2 9 370 MHz 谐振腔微扰法和传输/反射法对部分岩矿样品及聚乙烯复介电常数测量结果

Table 2 Complex dielectric permittivity of some rocks, minerals and polythlene measured by cavity perturbation method and transmission reflection method at 9 370 MHz respectively

样品	ϵ'_{\square}	ϵ'_{\circ}	$\epsilon'_{T/R}$	$\tan\delta_{\square}$	$\tan\delta_{\circ}$	$\tan\delta_{T/R}$
30%橄榄石/70%聚乙烯	3.40	3.48	3.36	2.31×10^{-3}	1.93×10^{-3}	5.5×10^{-3}
30%斜长石/70%聚乙烯	3.34	3.17	3.35	3.18×10^{-3}	1.71×10^{-3}	2.7×10^{-3}
30%玄武岩/70%聚乙烯	3.49	3.52	3.54	1.60×10^{-2}	3.40×10^{-2}	1.6×10^{-2}
30%辉橄岩/70%聚乙烯	3.46	3.46	3.33	6.00×10^{-3}	2.85×10^{-2}	2.7×10^{-3}
30%辉长岩/70%聚乙烯	3.79	3.63	3.69	2.40×10^{-2}	9.47×10^{-4}	1.8×10^{-2}
100%聚乙烯	2.35	2.29	2.34	1.30×10^{-3}	2.20×10^{-5}	4×10^{-3}

□. 矩形谐振腔微扰法测量,由郑永春、冯俊明完成;○. 圆形谐振腔微扰法测量,由华东师范大学物理系储雪子完成;

T/R. 传输/反射法测量,由西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室田步宁、唐家明完成。

表 3 聚乙烯稀释法间接测量与杆状岩矿试样直接测量的复介电常数比较

Table 3 Complex dielectric permittivity of some rocks and minerals measured by polythene dilution method indirectly and using rocks and minerals specimen directly

样品	$\epsilon'_{indirec}$	ϵ'_{direc}	S. D. (%)	$\tan\delta_{indirec}$	$\tan\delta_{direc}$	相对密度
金伯利岩	7.60	7.38	2.94	1.18×10^{-1}	1.08×10^{-1}	2.71
玄武岩	7.55	7.82	-3.51	7.44×10^{-2}	8.30×10^{-2}	2.81
钾长石	5.12	4.75	7.50	2.15×10^{-3}	9.35×10^{-3}	2.59
斜长岩	6.23	6.21	30.21	7.80×10^{-3}	1.40×10^{-2}	2.61
石英二长岩	5.03	5.02	0.20	1.22×10^{-2}	9.10×10^{-3}	2.62
闪长岩	6.91	6.59	4.74	1.35×10^{-2}	1.08×10^{-2}	2.79
碧玉	5.51	5.76	-4.44	2.95×10^{-2}	3.05×10^{-2}	2.60
辉绿岩	6.88	7.08	-2.86	1.60×10^{-2}	1.42×10^{-2}	2.89
玄武岩	7.86	8.11	-3.13	5.60×10^{-2}	4.91×10^{-2}	2.81

表 4 部分岩矿样品的复介电常数

Table 4 Complex dielectric permittivity of some rocks and minerals

样品	ϵ'	$\tan\delta$	$\rho(g/cm^3)$
二长花岗岩	4.84	2.88×10^{-2}	2.62
钾长花岗岩	5.27	3.84×10^{-2}	2.67
斜闪煌斑岩	6.7	4.13×10^{-2}	2.86
福建角闪辉长岩	6.74	4.96×10^{-2}	2.86
加拿大黑色斜长岩	7.02	1.8×10^{-2}	2.76
福建辉长岩	7.95	5×10^{-2}	2.84
福建辉橄岩	8.495	1.8×10^{-2}	3.30
斜长岩中斜长石	6.34	2.2×10^{-2}	2.67
玄武岩中斜长石	6.56	4.9×10^{-2}	2.65
玄武岩中辉石	7.91	5.7×10^{-2}	2.95
橄榄石	8.05	7.2×10^{-3}	3.30
斜长岩中辉石	10.2	1.59×10^{-1}	3.18
铬铁矿	5.73	1.0×10^{-2}	4.70
攀枝花钛铁矿	54.3	6.0×10^{-1}	4.39
攀枝花钒钛磁铁矿	343	1.7×10^{-1}	4.40

介电常数较高,超出微扰法的量程范围,聚乙烯粉末的混入起到了降低介电试样复介电常数的作用,使岩塑混合物的复介电常数处于微扰法的量程范围,解决了微扰法不能测量复介电常数较高的岩矿样品的困难.适当增加岩塑混合物中聚乙烯的体积百分含量,就可以达到测量高介电常数和损耗介质的目的.

岩矿样品难以直接制作成符合微扰法测量要求的小尺寸样品,聚乙烯作为一种热塑性粉末材料,与岩矿样品混合制成的压片具有较强的可塑性,易于制成符合微扰法测量要求的小尺寸样品.

由于天然岩矿样品多为不均质体系,使得岩矿样品某一部分测量或小尺寸样品测量的结果难以代表岩矿样品整体的介电性质.本方法破坏了岩矿样品的固有结构构造,测量结果体现的是岩矿样品整体的介电性质,且只反映物质组成对岩矿样品复介电常数的影响,消除了结构构造和物质分布不均对岩矿样品复介电常数的影响.

标准物质测量的结果表明,采用本系统测量试样的介电特性时, ϵ' 的测量误差 $<2\%$;当试样 $1 \times 10^{-3} \leq \tan\delta \leq 1 \times 10^{-1}$ 时, $\tan\delta$ 系统测量误差约为 $20\% \sim 30\%$;当试样 $\tan\delta < 1 \times 10^{-3}$ 时,即极低损耗

4 讨论

聚乙烯是实体塑料中复介电常数最小的($\epsilon'_P = 2.35, \tan\delta_P = 5 \times 10^{-4}$),而且介电性质稳定,随温度和外加电场频率的变化很小.相当部分岩矿样品的复

介质,测量误差随之增大,但测量结果与标称值仍为同一数量级;当试样 $\tan\delta > 1 \times 10^{-1}$,即较高损耗介质,试样引入对腔体的扰动超过微扰要求,微扰法难以直接测量. 9 370 MHz 时,同一试样用矩形谐振腔微扰法、圆形谐振腔微扰法和传输/反射法在不同实验室由不同实验人员得到的测量结果基本一致.

将岩矿样品直接磨制成矩形介质杆,采用本谐振腔测量系统直接测量的结果与采用聚乙烯稀释法测得的岩矿样品的复介电常数之间存在一定的差异.而且,细粒致密结构且质地均匀的岩石的测量误差小于具有斑晶结构的岩石,这说明岩矿样品的结构构造对其介电性质起着重要的控制作用,聚乙烯稀释法制备样品破坏了岩矿样品的原有结构构造,测量的复介电常数反映的是只受岩矿样品物质组成控制的岩矿整体的介电性质,消除了岩矿样品结构构造和物质分布不均对介电性质的影响,测量结果较之岩矿样品直接测量更能反映岩矿整体的介电性质.

References

- Ahmad, M. S., Zihlif, A. M., 1990. Some magnetic and electrical properties of basalt rocks. *Materials Letters*, 10(4-5): 207-214.
- Arthar, V., 1954. Dielectric materials and applications. The M. I. T. Press, Cambridge, 1-361.
- ASTM D2520-01., 1977. Standard test methods for complex permittivity (dielectric constant) of solid electrical insulating materials at microwave frequencies and temperatures to 1 650 °C. *ASTM International*, 613-634.
- Courtney, W. E., 1970. Analysis and evaluation of a method of measuring the complex permittivity and permeability of microwave insulators. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 18(8): 476-485.
- Griffin, R. E., 1974. Dielectric constants and dissipation factors of simulated lunar rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics (Abstracts)*, 11(11): A222.
- Hook, W. R., Livingston, N. J., 1995. Errors in converting time domain reflectometry of propagation velocity to estimates of soil water content. *Soil Science Society of America Journal*, 59: 35-41.
- Howell, B. F., Cicastro, P. H., 1961. Dielectric behavior of rocks and mineral. *American Mineralogist*, 46(3): 269-288.
- Kobayashi, Y., Tamura, H., Round, R., 1994. Test on a dielectric resonator method for measuring complex permittivity at microwave frequency. *IEICE Transactions*, E77(6): 882-887.
- Lichtenecker, K., 1926. Die dielektrizitäts konstante natürlicher und künstlicher mischkörper. *Physikalische Zeitschrift*, 27: 115-158.
- Lichtenecker, K., Rother, K., 1931. Die Herleitung des logarithmischen Mischungsgesetzes aus allgemeinen Prinzipien der stationären Strömung. *Physikalische Zeitschrift*, 32: 255-260.
- Metaxas, A. C., Meredith, R. J., 1983. Industrial microwave heating. IEEE Power Engineering Series 4. Peter Peregrinus Limited, London, 1-313.
- National Standard of China, 1987. Test method for complex permittivity of solid dielectric materials at microwave frequencies—Perturbation method, GB 7265. 1-87. The Standard Publishing House of China, Beijing, 13-20 (in Chinese).
- Rust, A. C., Russell, J. K., Knight, R. J., 1999. Dielectric constant as a predictor of porosity in dry volcanic rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 91: 79-96.
- Seyfried, M. S., Murdock, M. D., 1996. Calibration of time domain reflectometry for measurement of liquid water in frozen soils. *Soil Science*, 161: 87-98.
- Ulaby, F. T., Bengal, T. H., Dobson, M. C., et al., 1990. Microwave dielectric properties of dry rocks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(3): 325-336.
- Von Hippel, A., 1954. Dielectrics and waves. John Wiley and Sons Inc., New York, 1-73.
- Wallin, S. R., 1985. Dielectric properties of heterogeneous media [Dissertation]. University of Wyoming, 46-106.
- Wang, X. Y., Guo, H. D., Wang, C., et al., 1999. Relative dielectric constant of dry rocks. *Chinese Science Bulletin*, 44(24): 2286-2292.
- Zakri, T., Laurent, J. P., 1998. Time domain reflectometry techniques for water content measurement. *High Temp-High Pressures*, 30: 19-23.
- Zakri, T., Laurent, J. P., Vauclin, M., 1998. Theoretical evidence for Lichtenecker's mixture formulae' based on the effective medium theory. *Journal of Physics D Applied Physics*, 31: 1589-1594.
- Zheng, Y. C., Wang, S. J., Feng, J. M., et al., 2005. Measurement of the complex permittivity of dry rocks and minerals: Application of polythene dilution method and Lichtenecker's mixture formulae. *Geophysical Journal International*, 163(3): 1195-1202.

附中文参考文献

- 中华人民共和国国家标准, 1987. GB 7265. 1-87: 固体电介质微波复介电常数的测试方法——微扰法. 北京: 中国标准出版社, 13-20.