

微矩形谐振腔微扰法测量岩石矿物复介电常数*

李雄耀¹, 冯俊明¹, 王世杰¹, 郑永春²

(1 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;

2 中国科学院国家天文台, 北京 100012)

摘要 详细介绍了矩形谐振腔微扰法的基本原理; 通过对比标准物质的测量结果发现, 矩形谐振腔微扰法测量复介电常数具有比较高的测量精度, 且使用样品少。通过对样品进行混合稀释等预处理, 能将该方法应用于岩石矿物复介电常数的测量, 并能很好地降低岩石矿物成分分布不均以及结构缺陷所引起的测量误差, 更准确地反映岩石矿物的整体介电性质。

关键词 复介电常数 微扰法 测量 岩石 矿物

Complex Permittivity of Rock and Mineral Measured by Rectangular Cavity Perturbation Method

LI Xiongyao¹, FENG Junming¹, WANG Shijie¹, ZHENG Yongchun²

(1 State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002; 2 The National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

Abstract Rectangular cavity perturbation theory is described in detail. By comparing the theoretical and measured results, we find that the rectangular cavity perturbation method has relative high precision in complex permittivity. This method can be used to measure the complex permittivity of rock or minerals, after a pretreatment of mixing and diluting the samples. Measurements would reflect the dielectric property of the whole rock or whole mineral exactly, by lower the error arising from the non-uniformity of the mineral components and from structural defects.

Key words complex permittivity, perturbation method, measurement, rock, mineral

0 引言

复介电常数强烈地影响着物质吸收电磁波的能力, 并影响着电磁波能量的反射率。岩石和矿物作为自然界中分布最广泛的天然地物之一, 对其在微波频率下的复介电常数的研究是地球物理、岩石学、矿物学、微波材料和微波技术研究的一项基础工作。介质材料微波介电性质通常采用时域法、频域传输线技术(包括传输/反射法)、微波闭腔法(包括谐振腔微扰法)、开式谐振腔法、微波自由空间法等进行测量^[1~3]。其中, 谐振腔微扰法测量介质的复介电常数始于20世纪60年代早期, 是微波测量中的一种非常重要的常用方法。该方法根据介质样品放入金属谐振腔前后腔体谐振频率和品质因数的变化推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、所需的介质样品少、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^[4~6], 至今仍被广泛采用。对岩石和矿物的复介电常数, 很多学者曾用不同的方法进行测量^[7~12]。但岩石和矿物本身的一些特征限制了对其复介电常数的准确测量。对于矿物而言, 矿物样品形状不规则, 且通常为细颗粒, 某些矿物又很稀少, 不

能像陶瓷和塑料等电介质一样制成一定的形状来进行测量。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, 使得其介电性质的准确测量比较困难。对于岩石而言, 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(孔隙度的大小、孔隙的形状、分布方式等)、矿物斑晶、结构、构造等特征^[13,14]。因此, 即使是同一岩石块, 不同部位的测量结果往往也存在较大差别。鉴于岩石矿物复介电常数测量所面临的形状不规则、某些矿物样品量少、成分分布不均、结构构造缺陷等困难以及谐振腔微扰法测量的特点, 本文提出岩石矿物复介电常数测量的矩形谐振腔微扰法, 并对该测量方法的原理和方法应用进行了详细阐述。

1 矩形谐振腔的微扰理论

谐振腔的微扰现象, 大部分研究者认为是由于试样引入引起谐振腔中电磁场的微小扰动造成, 其频移基本方程可表示为^[15]:

$$\frac{\delta f}{f} = \frac{\iiint_v [(E_1 \cdot D_0 - E_0 \cdot D_1) - (H_1 \cdot B_0 - H_0 \cdot B_1)] \cdot dV}{\iiint_v [E_0 \cdot (D_0 + D_1) - H_0 \cdot (B_0 + B_1)] \cdot dV} \quad (1)$$

* 国家自然科学基金项目(No.40473036; No.40673053)资助

李雄耀: 男, 1978年生, 博士 E-mail: lixiongyao@vip.skleg.cn

王世杰: 通讯作者, 男, 1966年生, 研究员 E-mail: wangshijie@vip.skleg.cn

式中： E_0, H_0 分别为未扰动时谐振腔中的电场和磁场； E_1, H_1 分别为引入试样后的附加电场和磁场； D_0, B_0 分别为未扰动时谐振腔中的电感应和磁感应强度； D_1, B_1 分别为引入试样后的附加电感应和磁感应强度。

根据微扰的前提条件可知，在腔体绝大部分体积中 $D_1 \ll D_0, B_1 \ll B_0$ ，因此，式(1)可以近似为：

$$\frac{\delta f}{f} = \frac{\iiint_V [(E_1 \cdot D_0 - E_0 \cdot D_1) - (H_1 \cdot B_0 - H_0 \cdot B_1)] \cdot dV}{\iiint_V (E_0 \cdot D_0 - H_0 \cdot B_0) \cdot dV} \quad (2)$$

对于矩形谐振腔(图1)，谐振腔中的电磁场可以分别表示为：

$$E_z = \sin \frac{\pi x}{w} \sin \frac{n\pi y}{d} \quad (3)$$

$$H_x = \frac{j\omega\epsilon_0 n\pi}{wk^2} \sin \frac{n\pi y}{d} \cos \frac{\pi x}{w} \quad (4)$$

$$H_y = -\frac{j\omega\epsilon_0 n\pi}{dk^2} \cos \frac{n\pi y}{d} \sin \frac{\pi x}{w} \quad (5)$$

$$E_x = E_y = H_z = 0 \quad (6)$$

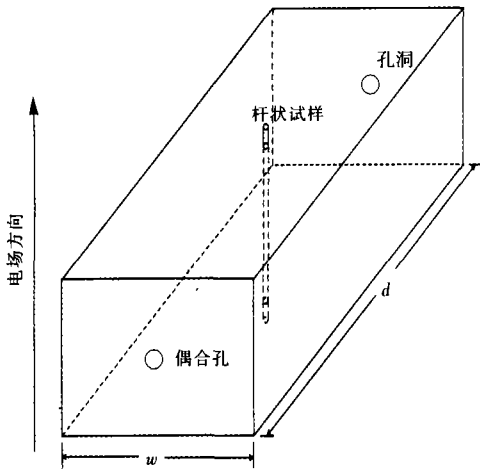


图1 TE_{10n} 模矩形谐振腔

Fig.1 TE_{10n} mode rectangular cavity

由于样品位于谐振腔中心(电场最强处)，样品对腔体电场的扰动可以近似看成只发生在样品处，所以 $H_1 B_0 - H_0 B_1 \approx 0$ ；且电场平行样品轴线，样品内外电场相等，即 $E_1 = 0$ ；对于 D_1 则有 $D_0 + D_1 = \epsilon_0 \epsilon (E_0 + E_1) = \epsilon_0 \epsilon E_0$ ，又因 $D_0 = \epsilon_0 E_0$ ，故 $D_1 = \epsilon_0 E_0 (\epsilon - 1)$ 。因此，对式(2)积分后频移方程可简化为：

$$\frac{\delta f}{f} = \frac{2(\epsilon - 1)V_s}{V_0} \quad (7)$$

对损耗媒介，其复介电常数的实部和虚部可分别表示为：

$$\epsilon' = 1 + \frac{1}{2} \frac{V_0}{V_s} \frac{\delta f}{f} \quad (8)$$

$$\epsilon'' = \frac{1}{4} \frac{V_0}{V_s} \left(\frac{1}{Q_0} - \frac{1}{Q_s} \right) \quad (9)$$

ϵ' 和 ϵ'' 分别为媒介复介电常数的实部和虚部； V_0 为谐振腔体积； V_s 为样品体积； Q_0 为空腔品质因子； Q_s 为带样品时谐振腔的品质因子。

2 复介电常数测量

矩形谐振腔微扰法测量一般电介质材料时，通常把介质样品制成一定形状放入谐振腔内进行测量，再根据式(8)和(9)计

算得到介质的复介电常数。但对矿物样品，往往因为颗粒细小，不能制成规定的形状，从而难以进行测量；而对岩石样品，往往由于成分分布不均和结构构造缺陷，引起测量结果的较大误差。同时，微扰法要求所测试样引起的频移较小，即要求样品的体积要远远小于腔体的体积，而且试样的 ϵ' 和 ϵ'' 不能过大。为克服以上问题，本文利用聚乙烯对样品进行混合稀释后压制成型，再用矩形谐振腔微扰法测量其复介电常数，具体如下：

(1)将岩石或矿物研磨成细颗粒粉末，过150~200目筛网，并用相对密度瓶测量岩石或矿物颗粒的相对密度。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筛。

(2)将岩石和矿物粉末放入温度为110℃烘箱中，连续烘烤24h以去除样品中含有的水分。

(3)称取一定质量的岩石和矿物粉末与聚乙烯粉末，以一定的体积比混合，研磨均匀。称取2g(2g样品压制的薄片厚度一般为1~2mm左右)混合物样品放入不锈钢模具(直径为30mm)，放入加热炉，调节温控装置，加热至130~150℃并保持20min。随后取出模具，放入加压装置，垂直加压9800 kg/cm²并保持约10min。当不锈钢模具自然冷却至室温时，释放压力，从模具中取出圆形压片。制成后的压片应色泽均匀，无斑点，无气孔，无明显沉淀分层现象。过压片圆心处切取宽度为2mm左右的矩形介质杆试样。

(4)将被测试样插入调试好的测量系统进行测量。按式(8)和(9)计算出矩形介质杆的 ϵ' 和 ϵ'' ，进一步根据多相体系的混合公式计算出岩石或矿物的复介电常数。

$$-\log \epsilon_{\max} = \sum_{i=1}^N V_i \log \epsilon_i \quad (10)$$

式中： ϵ_{\max} 为 N 个相的混合体系介电常数， V_i 和 ϵ_i 分别为第 i 个相的体积分数和介电常数。

3 测量结果与误差

采用上述测量方法测量了室温下(25℃)6种标准物质的复介电常数(表1)。与这6种标准物质复介电常数的标称值^[11,16-18]进行比较发现，采用本文矩形谐振腔微扰法测量标准物质的复介电常数时， ϵ' 的测量误差 <2%；介电损耗在 $1 \sim 9 \times 10^{-2}$ 范围的测量误差相对较小，约为20%；当介电损耗小于 5×10^{-3} 时误差略大，其主要与矩形谐振腔腔体的 Q_0 值有关。由于大部分岩石矿物样品的介电损耗大于 5×10^{-3} ，因此本文设计的测量方法适用于大多数岩石矿物样品的复介电常数测量。

此外，由于岩石样品存在成分分布不均以及各种结构构造缺陷，为了进一步了解其对复介电常数测量的影响。本文对部分粗粒状结晶矿物和细粒致密结构且质地均匀的岩石样品进行了研究，分别利用第三节中的方法和直接磨制成矩形介质杆进行测量(表2)。测量结果表明，矿物颗粒越细小、结构越致密的样品，如金伯利岩、玄武岩，两种测量结果之间的偏差就越小；反之越大，如斜长岩、钾长岩。而其中又以斜长岩的斑晶最粗大，偏差也最大。这说明，岩石和矿物本身的结构构造和物质分布不均质对测量结果有较大的影响，对岩石和矿物某一部位测量或小尺寸样品测量得到的结果难以代表岩石和矿物整体的介电性质。利用本文的方法能很好地降低岩石矿物自身特点所引起的测量

误差,使测量结果更能体现岩石矿物的整体介电性质。

表1 9370 MHz 时标准物质复介电常数矩形谐振腔微扰法测量结果与比较

Table 1 Complex permittivity of standard materials measured with rectangular cavity perturbation method in 9370MHz and comparing to criterion values

样品	ϵ'		误差/%	$\tan\delta=\epsilon''/\epsilon'$		相对密度
	测量值	标称值		测量值	标称值	
HDPE ¹	2.35	2.35	0	1.3×10^{-3}	5×10^{-4}	0.95
PTFE ²	2.02	2.05	1.46	4×10^{-3}	5×10^{-4}	2.05
有机玻璃	2.62	2.58	1.55	1.8×10^{-2}	1.24×10^{-2}	1.18
熔融石英	3.71	3.78	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 介质基片	8.79	8.90	1.24	1.6×10^{-4}	4×10^{-4}	3.85

注: ¹HDPE (High density polythene): 高密度聚乙烯; ²PTFE (Polytetra- flouroethylene, Teflon): 聚四氟乙烯; 相对密度表示相对于4℃条件下纯水的密度

表2 样品稀释法与岩石杆状试样直接测量的复介电常数比较

Table 2 Comparison of complex permittivity measured with sample dilution method and direct measurement of pole-shaped sample

样品	ϵ'		标准差/%	$\tan\delta=\epsilon''/\epsilon'$	
	样品稀释法	直接测量		样品稀释法	直接测量
金伯利岩	7.60	7.38	2.94	1.18×10^{-1}	1.08×10^{-1}
玄武岩	7.55	7.82	-3.51	7.44×10^{-2}	8.3×10^{-2}
钾长石	5.12	4.75	7.50	2.15×10^{-3}	9.35×10^{-3}
斜长岩	6.23	6.21	30.21	7.8×10^{-3}	1.4×10^{-2}
石英二长岩	5.03	5.02	0.20	1.22×10^{-2}	9.1×10^{-3}
闪长岩	6.91	6.59	4.74	1.35×10^{-2}	1.08×10^{-2}
碧玉	5.51	5.76	-4.44	2.95×10^{-2}	3.05×10^{-2}
辉绿岩	6.88	7.08	-2.86	1.6×10^{-2}	1.42×10^{-2}

4 结论

通过对标准物质和部分岩石矿物复介电常数的实际测量发现,矩形谐振腔微扰法测量复介电常数具有较高的测量精度,通过对样品进行混合稀释等预处理,能将该方法应用于岩石矿物复介电常数的测量,并能很好地降低岩石矿物成分分布不均以及结构缺陷所引起的测量误差,更准确地反映岩石矿物的整体介电性质。

参考文献

- Ni E H, Ni U Q. Extra-cavity perturbation method for the measurement of dielectric resonator materials. Rev Sci Instrum, 1997, 68: 2524
- Aregba D, Gay J, Maze-Merceur G. Modelling multiport using a three-dimensional coupled analytical/finite element method application to microwave characterization of material. IEEE Trans Microwave Theory Techn, 1994, 42: 590
- Coccioli R, Pelosi G, Selleri S. Characterization of dielectric materials with the finite-element method. IEEE Trans Microwave Theory Techn, 1999, 47: 1106
- Klein O, Donovan S, Dressel M, et al. Microwave cavity perturbation technique. Int J Infrared Millimeter Waves, 1993, 14(12): 2423

- Kobayashi Y, Tamura H, Round R. Test on a dielectric resonator method for measuring complex permittivity at microwave frequency. IEICE Trans, 1994, E77(6): 882
- 中华人民共和国国家标准. GB7265, 2-87: 固体电介质微波复介电常数的测试方法—“开式腔”法. 北京: 中国标准出版社, 1987. 13
- Ahmad M S, Zihlif A M. Some magnetic and electrical properties of basalt rocks. Mater Lett, 1990, 10(4-5): 207
- Nguyen B L, Bruining J, Slob E C. Measurement of dielectric parameters of rock cores at 300kHz to 3GHz frequencies. Proceedings of the International Oil & Gas Conference and Exhibition in China, 1998. 639
- Rust A C, Russell J K, Knight R J. Dielectric constant as a predictor of porosity in dry volcanic rocks. J Volcanology Geothermal Res, 1999, 91: 79
- Ulaby F T, et al. Microwave dielectric properties of dry rocks. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(3): 325
- Wang X Y, Guo H D, Wang C, et al. Relative dielectric constant of dry rocks. Chinese Sci Bull, 1999, 44(24): 2286
- Zheng Y C, Wang S J, Ouyang Z Y, et al. Measurement of the

(下转第 183 页)

当 $\theta=0$ 时,其最大值为:

$$E_{\rho\max} = \frac{j8E_0 ab}{r\pi} e^{-jkr} \quad (23)$$

同理将 $a, b, \pi, r, k, E_{\rho\max}$ 的值代入得: $E_0=0.1244(\text{V/m})$ 。

所以:

$$\vec{E}=0.1244\cos\left(\frac{\pi x}{2a}\right)\hat{y} \quad (24)$$

从而可求得

$$J_m=-0.2487\cos\left(\frac{\pi x}{2a}\right) \quad (25)$$

同理对 E, H 各分量进行数值积分,用同样方法可求得平均功率密度为:

$$\vec{S}=(-3.2760\times 10^{-21})x+(-1.1449\times 10^{-20})y+2.3881\times 10^{-4}z \quad (26)$$

同前一种情况一样,也是在 Z 轴方向上平均功率密度比 X 和 Y 轴方向大得多,其大小为:

$$S_z=2.3381\times 10^{-4}(\text{W/m}^2)=2.3381\times 10^{-5}(\text{mW/cm}^2)$$

可见,在这两种情况下计算出来的结果都比 GB5959.6-87 的泄漏标准(5mW/cm^2)小得多。

因此对于 915Hz 频段以上的微波加热设备,如果要满足 GB4824-2001 标准(即在距离该设备 10m 处辐射场强不大于 $47\text{dB}(\mu\text{V/m})$),则在距离该设备 0.05m 处微波泄漏的平均功率密度必须小于 $(1.0471\sim 2.3381)\times 10^{-5}(\text{mW/cm}^2)$ (在其它口径场分布时,其值会不同,但不会有几个数量级的变化)。

可见 GB4824-2004 标准要求的微波泄漏辐射限值远远低于 GB5959.6-87 标准的要求,即达到 GB5959.6-87 标准的设备不一定能达到 GB4824-2004 标准,而达到 GB4824-2004 标准的微波泄漏辐射限值要求的设备是可以达到 GB5959.6-87 标准的要求的。

2 取消 915MHz 作为 ISM 微波设备使用频段引出的问题及建议

2.1 问题

通过上述计算分析结果表明:GB4824-2004 标准对微波辐射的要求比 GB5959.6-87 标准要求严格得多,以前按 GB5959.6-87 生产的 915MHz 以上频段微波加热设备是不能满足 GB4824-2004 标准关于该频段电磁骚扰限值的要求的。实际上已发生多起移动电话运营商由于受到 915MHz 频段 ISM 微波设备的干扰而产生纠纷,也验证了上面的结论。

照常理,既然 GB4824-2004 标准中没有将 915MHz 频段列入 ISM 微波设备使用的频段内,就只需对 ISM 微波设备的 915MHz 频段的微波设备禁用禁产即可,但在实际中却有诸多欠妥之处。

(上接第 180 页)

- dielectric properties of volcanic scoria and basalt at 9370 MHz. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(2): 801
- 13 Best M G. Igneous and Metamorphic Petrology. Malden, MA: Blackwell, 2003
- 14 Winter J D. An introduction to igneous and metamorphic petrology. New Jersey: Prentice Hall, Upper Saddle River, 2001
- 15 王国金. 微扰法在微波谐振腔中的应用研究. 宁夏大学学报

首先,ISM 设备中 915MHz 频段微波设备早在 GB4824-2004 标准及其前版 GB4824-1996 标准实施前就已生产和使用,其微波辐射标准以国标 GB5959.6-87 为依据,该类设备在国内已得到广泛的生产和使用,生产厂家和用户单位也很多。如果简单地对该类设备加以禁产禁用,势必给相关厂家和用户带来巨大的经济损失,对我国的微波应用行业也将是一个沉重的打击。

其次,早在 20 世纪 60 年代国际微波应用协会就建议将 915MHz 频段用在 ISM 微波设备中。而仅从加热效果来说,915MHz 频段在处理大的被加热物体时,其微波穿透深度比 2450MHz 频段优越得多,不是 2450MHz 或 5800MHz 频段所能简单替代的,这在工业应用上也是非常需要的。

2.2 建议

基于上述原因,我们有以下看法:

(1)有关行政部门在对微波频率的划分使用上,若能与使用相关频段的生产厂家、用户,相关行业部门、微波应用协会等专业群众团体进行广泛交换意见,兼顾各方面的利益,得出来的标准将更符合实际,也更合理些。

(2)不要简单禁止 915MHz 频段在 ISM 微波设备中使用,这样带来的经济效益会更大些。

(3)对 915MHz 频段的微波加热设备产生的电磁骚扰问题可以通过适当提高电磁骚扰标准来加以约束,加强对设备的安装要求,使其不对无线电业务造成影响。

3 结语

915MHz 以上频段 ISM 微波设备在满足 GB5959.6-87 标准的前提下,并不一定能满足 GB4824-2004 标准关于该频段电磁骚扰限值的要求,而达到 GB4824-2004 标准的微波加热设备是能够满足 GB5959.6-87 标准对微波辐射的要求的;建议保留 915MHz 频段在 ISM 微波设备中使用,其产生的电磁骚扰问题可通过适当措施加以解决。

参考文献

- 国家标准局.《电热设备的安全:第六部分:对工业微波加热设备的特殊要求》.(GB5959.6-87),1988
- 国家质量监督检验检疫总局.工业、科学、医疗(ISM)射频设备电磁骚扰特性的测量方法和限值.(GB4824-2004),2004
- 康行健.天线原理与设计.北京:国防工业出版社,1995.184
- 王宝志.微波技术与工程天线.北京:人民邮电出版社,1991.264
- 杜耀惟.天线罩电信设计方法.北京:国防工业出版社,1993.434
- 苏晓生.MATLAB6.0 及其工程应用.北京:科学出版社,2001.184
- (自然科学版),2002,23(1):50
- Progelhof R C, Throne J L. Polymer engineering principles: properties, processes, and tests for design. Munich: Hanser Publishers, 1993. 918
- Ward R W. The constants of alpha quartz Proc. 14th Piezoelectric Devices Conference and Exhibition, 1992, 2, EIA: 14
- Misra D K, Fenske K. Dielectric materials at microwave frequencies. Appl Microwaves and Wireless, 2000, 12(12): 92