

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209271

基于微波干涉理论的岩石介电常数测试方法*

翟超宇 刘善军 郭嘉兴

(东北大学资源与土木工程学院 沈阳 110819)

摘要: 岩石的介电常数是表征其电磁辐射特性的重要参数,对于遥感对地观测具有重要意义。然而,现有的介电常数测定方法通常对样品的形状和尺寸有特定要求,且所测得的介电常数只能代表岩石局部小区域的介电特性,无法表征岩石整体的介电特性。为此,本文基于微波干涉理论,首先研究并提出了一种利用微波辐射计来测试岩石介电常数的新方法。然后,基于该方法并利用C波段微波辐射计对花岗岩和砂岩的介电常数进行了测试。为验证测试结果的正确性,利用AET开口同轴谐振腔方法对该结果进行了对比验证。结果表明,利用新方法测得的花岗岩和砂岩的介电常数分别为3.89和5.71,与AET开口同轴谐振腔法测量结果相比,相对误差分别为3.2%和2.7%,误差较小。研究结果初步表明了新方法的可行性,对于目前的点式介电常数测试方法不失为一种有益的补充。

关键词: 岩石;介电常数;微波干涉;微波辐射计

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Rock dielectric constant test method based on microwave interference theory

Zhai Chaoyu Liu Shanjun Guo Jiaxing

(College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The dielectric constant of rock is an important parameter to characterize its electromagnetic radiation characteristics, which is of great significance to remote sensing observation of the Earth. However, the existing methods for measuring dielectric constant usually have specific requirements on the shape and size of samples, and the measured dielectric constant can only represent the dielectric characteristics of local small areas of rocks, but cannot characterize the dielectric characteristics of rocks as a whole. Therefore, based on the theory of microwave interference, a new method for measuring the dielectric constant of rock by microwave radiometer is studied and proposed in this paper. Then, based on this method, the dielectric constants of granite and sandstone are measured by C-band microwave radiometer. In order to verify the correctness of the test results, the AET open coaxial resonator method is used to compare and verify the results. The results show that the dielectric constants of granite and sandstone measured by the new method are 3.89 and 5.71 respectively, and the relative errors are 3.2% and 2.7%, respectively, compared with those measured by AET open coaxial resonant cavity method. The research results show the feasibility of the new method, which is a useful supplement to the current point dielectric constant measurement method.

Keywords: rock; dielectric constant; microwave interference; microwave radiometer

0 引言

岩石的介电特性是表征其电磁辐射特性的重要指标,而介电常数作为介电特性的核心物理参数,表征了介质对电磁波的影响。微波遥感在开展地质勘探以及岩矿识别时,所接收到的地球表面岩石微波信号与岩石的介电常数密切相关。因此,测定岩石的介电常数对于了解岩石微波

辐射特性进而正确应用微波遥感技术具有重要意义。

传统的材料介电常数测试方法主要包括平行板法、探头法、传输线法和谐振腔法等^[1-2]。平行板法^[3]是将加工成规则形状的材料放入介电测试器中,通过测量由两个电极板组成的电容器之间的电容改变量来计算材料介电常数。探头法^[4]是通过测量金属探头端部电场的反射信号来计算样品的介电常数。传输线法^[5]是利用矢量网络分析仪分析

收稿日期:2022-03-14

* 基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1509202)、国家自然科学基金重点项目(41930108)资助

传输线的反射信号和传输信号反算出材料的介电常数。谐振腔法^[6]是根据材料对腔体谐振频率和品质因数的微小扰动,利用介电特性与谐振频率和品质因数的关系来确定介质介电常数。基于传统测试方法,赵才军等^[7]又提出了改进的同轴传输/反射法测量材料介电常数;张康等^[8]提出开口同轴探头横电磁波模型法并测量了盐水介电常数;Jung 等^[9]利用开口同轴探头法测量了生物组织溶液的介电常数;王益等^[10]提出了闭式谐振腔介电常数测量法;Guihard 等^[11]提出了改进的开口同轴探头法,并测量了混凝土的介电常数,此外也有学者提出了微波辐射法^[12]和半波长法^[13]等。

基于上述方法,一些研究者也开展了岩石矿物的介电常数测试,如吴俊军等^[14]利用开口同轴法得到了多种矿物的介电频谱特征;Huang 等^[15]利用开口同轴探头法测量了大理岩等岩芯试样的介电常数;Mao 等^[16]利用谐振腔法测量了石英、斜长石和钾长石等矿物的介电常数。Guo 等^[17]利用平行板电容法测量得到了花岗岩、砂岩和页岩等岩石的介电常数。然而上述测试方法多属点式测试方法,对待测岩样的形状、尺寸要求较高。此外,由于岩石由多种矿物成分构成,试样不同区域的矿物分布往往存在差异,导致点式测试方法测得的介电常数只能代表试样局部小区域的介电特性,而无法反映岩石整体的介电特性。为此,本文基于微波干涉理论,研究了岩石介电常数与观测亮温随厚度变化的周期性关系,提出了一种利用微波遥感手段来测试岩石介电常数的新方法,并进行了实验验证。

1 基于微波干涉的岩石介电常数测试方法

1.1 微波干涉发生条件

根据电磁场与电磁波理论,理想介质中由场矢量 $E_x(z)$ 和 $H_y(z)$ 构成一组沿 Z 方向传播的电磁波可由式(1)形式的方程表示:

$$E = A \cos(\omega t - kz) \quad (1)$$

式中: A 代表振幅, ω 为角频率, k 为相位常数。

对于空间内的任意两列电磁波,当两列波满足下列条件:1)频率相同;2)相位差恒定;3)振动方向相同。此时两列波将会发生干涉。

当两列波在某点处相位差为 $\Delta\varphi = 2k\pi$ ($k=0,1,2,\dots$) 时,在干涉作用下两列波叠加,叠加后的波振幅达到最大,该点称为干涉极大值点;当两列波在某点处的的相位差 $\Delta\varphi = (2k+1)\pi$ ($k=0,1,2,\dots$) 时,在干涉的作用下,两列波叠加后合振幅达到最小,该点称为干涉极小值点。如果是同源辐射出的两列波时,干涉条件可简化为两列波的波程差为波长的偶数倍时,为干涉极大值点;波程差为波长的奇数倍时,为干涉极小值点。

1.2 基于微波干涉的岩石介电常数测试方法原理

对于岩石来说,假定岩石在垂直方向是均质等温介质,则可将岩石层分为无限多的薄层,各薄层的介电常数和温

度均相等,岩石层整体的辐射可等效成岩石层中心水平面上各点的微波辐射(如图 1 所示)。此时,岩石层向上辐射(辐射 1)和向下辐射(辐射 2)经强反射面(铝板)反射最终透射出岩石层后的微波满足干涉形成的条件。

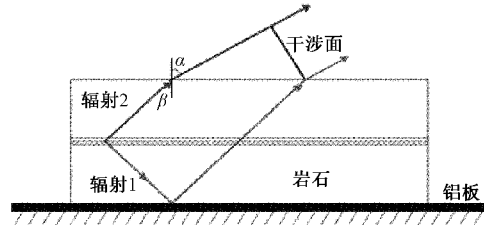


图 1 岩石微波辐射干涉示意图

根据微波干涉理论,对于空气中的一系列波来说,相位改变量 φ 与此列波对应时间内所传播的距离 x 之间存在的关系为:

$$\varphi/2\pi = x/\lambda_0 \quad (2)$$

设定 φ_1 表示上行辐射波从岩石上表面到干涉面的传播相位, φ_2 表示下行辐射波从反射面到干涉面的传播相位,其中:

$$\varphi_1 = \frac{2\pi d \tan\beta \sin\alpha}{\lambda_0} \quad (3)$$

$$\varphi_2 = \frac{2\pi d}{\lambda \cos\beta} \quad (4)$$

则两列波的相位差为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda \cos\beta} - \frac{2\pi d \tan\beta \sin\alpha}{\lambda_0} \quad (5)$$

式中: λ_0 为微波在空气中的波长, λ 为微波在岩石中的波长, α 为观测角度, β 为折射角。

波在不同介质中的传输波长与介质的介电常数有关,即:

$$\lambda_0 = \lambda \sqrt{\epsilon} \quad (6)$$

根据菲涅尔定律,观测角 α 与折射角 β 的关系为:

$$\sqrt{\mu_{\text{空气}} \epsilon_{\text{空气}}} \sin\alpha = \sqrt{\mu_{\text{岩石}} \epsilon_{\text{岩石}}} \sin\beta \quad (7)$$

式中: μ 为磁导率, ϵ 为介电常数。在微波范围内,对于包括水在内的大多数地球上的物质磁导率为 1,空气介电常数为 1。

当两列波发生干涉时,即:

$$\frac{2\pi d}{\lambda \cos\beta} - \frac{2\pi d \tan\beta \sin\alpha}{\lambda_0} = k\lambda, k = 0,1,2,\dots \quad (8)$$

将式(6)、(7)代入式(8),进一步化简得:

$$\frac{2d \sqrt{\epsilon - \sin^2\alpha}}{\lambda_0} = k, k = 0,1,2,\dots \quad (9)$$

由于岩石的介电常数为定值,由式(9)可以看出,当观测角度一定时,通过改变岩石层厚度,在干涉条件作用下,此时微波亮温将会出现周期变化,观测亮温的极值点便是岩石发生干涉的极值点。相邻两个干涉极大值点对应的岩石厚度改变量为:

$$\Delta d = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon - \sin^2\alpha}} \quad (10)$$

由式(10)可知,通过计算相邻两个干涉极值点对应的岩石厚度改变量,便可得到岩石的介电常数,即:

$$\epsilon = \lambda_0^2 / (2\Delta d)^2 + \sin^2\alpha \quad (11)$$

2 方法实验验证

2.1 实验试样及实验设备

选择地表常见的砂岩和花岗岩制作岩石试样。砂岩主要成分为石英、斜长石和粘土类矿物,颜色为浅红色,粗砂结构。花岗岩主要成分为石英、斜长石、钾长石和黑云母。将花岗岩加工成平面为 400 mm × 300 mm、厚度 18 ~ 52 mm 的长方体,砂岩加工为 450 mm × 450 mm、厚度 8 ~ 29 mm 的长方体,相邻试样厚度间隔一般为 2 mm。试样的厚度信息如表 1、2 所示,花岗岩试样如图 2 所示。

表 1 砂岩试样信息

| 编号 | 厚度/mm | 编号 | 厚度/mm | 编号 | 厚度/mm |
|------|-------|------|-------|-------|-------|
| sy-1 | 8 | sy-5 | 16 | sy-9 | 25 |
| sy-2 | 10 | sy-6 | 18 | sy-10 | 27 |
| sy-3 | 12 | sy-7 | 20 | sy-11 | 29 |
| sy-4 | 14 | sy-8 | 23 | | |

表 2 花岗岩试样信息

| 编号 | 厚度/mm | 编号 | 厚度/mm | 编号 | 厚度/mm |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| hg-1 | 18 | hg-7 | 31 | hg-13 | 41 |
| hg-2 | 20 | hg-8 | 34 | hg-14 | 42 |
| hg-3 | 24 | hg-9 | 35 | hg-15 | 44 |
| hg-4 | 26 | hg-10 | 36 | hg-16 | 49 |
| hg-5 | 29 | hg-11 | 38 | hg-17 | 51 |
| hg-6 | 30 | hg-12 | 40 | hg-18 | 52 |



图 2 花岗岩试样

实验使用中国科学院东北地理与农业生态研究所研制的 C 波段微波辐射计进行岩石辐射亮温的测量,其频率为 6.6 GHz,中频带宽 400 MHz,温度灵敏度为 0.1 K,稳定性为 0.15 K/day,工作环境温度 -22 °C ~ 55 °C,采样速率为 1 fps。

2.2 实验方法

为避免室内强辐射背景干扰,本次实验选在平坦空旷、晴朗少云的户外,保证岩石试样上方观测环境为天空冷背景。将微波辐射计垂直岩石表面放置,根据 C 波段微波辐射计观测区域的实验测定结果^[18],调整观测高度,保证观测区域集中在岩石表面。

实验开始前首先对微波辐射计进行定标。选取定标的目标为室温和液氮温度下的微波吸收材料(黑体),定标线性相关系数大于 0.99,定标精度为 0.2 ~ 1 K。

将不同厚度的岩石板状试样放置在一升降台上,在岩石下面铺设薄层铝板。然后,对表 1、2 中的不同厚度的试件分别进行观测,并保证岩石中心与微波辐射计喇叭天线中心对齐,记录每个试样的微波亮温,直至所有试件全部测量完毕(如图 3 所示)。测试过程中,为避免人员的辐射干扰,每次测试时人员远离试样。



图 3 实验现场图

2.3 实验结果

图 4、5 为砂岩和花岗岩亮温观测结果,其中图中的黑点为每个厚度观测的亮温值,虚线为经 Fourier 非线性拟合处理的结果。从图中看出,拟合后的曲线可以反映岩石微波亮温随厚度的周期性变化。而且,随着厚度的增加,亮温总体呈上升趋势。

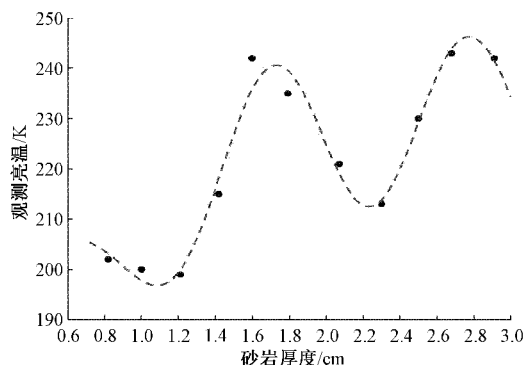


图 4 砂岩亮温观测结果

根据微波辐射传输理论,岩石层向外辐射的总能量 T_B 为:

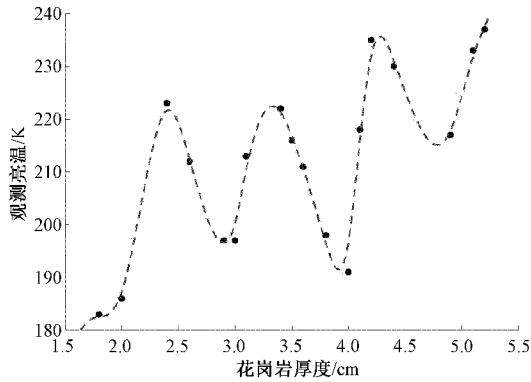


图 5 花岗岩亮温观测结果

$$T_B = T(1 - 1/L_2) \quad (12)$$

式中: T 为岩石热力学温度, L_2 为岩石的损耗因子, 可由下式获得:

$$L_2 = e^{k_{e_2} d \sec \theta} \quad (13)$$

式中: k_{e_2} 为消光系数, 是岩石自身特有性质。

根据上式可知, 随着厚度增加, 岩石向外辐射能量(即亮温)呈递增趋势, 同时考虑微波在岩石内部传输产生的周期干涉现象, 因此, 在一定观测厚度范围内, 观测到的微波亮温极值点应呈现周期性递增趋势。

由图 4、5 看出, 实验结果与理论分析结果基本一致, 但由于岩石在加工过程中厚度存在一定的加工误差, 同时也难以保证整块岩石的厚度一致, 导致一些厚度试样的观测结果与理论有一定的偏差。但总体上观测亮温数据随厚度的周期性变化特征比较明显。

根据拟合后得到的亮温随厚度变化曲线, 提取拟合曲线的极值点(极大值点和极小值点), 计算岩石辐射亮温相邻两个极大或极小值对应的岩石厚度差值平均值, 结果显示砂岩为 1.15 cm, 花岗岩为 0.95 cm。代入式(11)计算得, 砂岩介电常数为 3.89, 花岗岩介电常数为 5.71。

为验证实验结果的正确性, 本文利用 AET 开口同轴谐振腔微波介电测试仪^[19]对同样岩石样品进行了介电常数测试, 该仪器标称的频率范围为 800 M~18 GHz, 介电常数的测量范围为 1~15, 准确度为 ±1%。根据国家标准《固体电介质微波复介电常数的测试方法微扰法》(标准号: GB/T 7265.1-1987), 准确度达到 2% 可满足介电常数的测试精度要求。因此, 可以使用该测试方法进行实验结果的对比验证。

为使得 AET 开口同轴谐振腔法测得的结果与实验结果具有可比性, 测试时在待测岩石表面均匀选取 30 个测试点, 覆盖了微波辐射计观测区域, 取全部测试点的均值作为待测岩石的介电常数值(如图 6 所示)。

测试结果显示, 利用开口同轴谐振腔法测定的砂岩和花岗岩的介电常数分别为 3.77 和 5.56, 如表 3 所示。该结果与本文提出的方法测试结果基本一致。如前所述, 将谐振腔法测定的结果视为真实值, 计算得砂岩测量结果相对

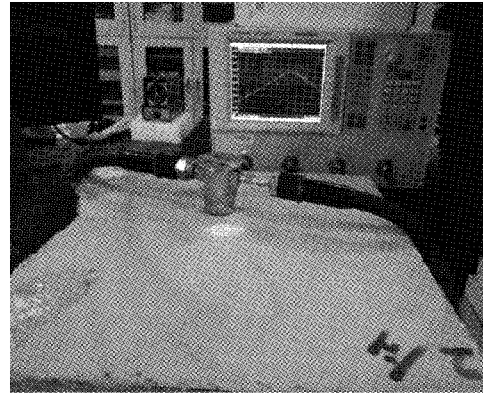


图 6 使用 AET 开口同轴谐振腔方法的测试图

误差为 3.2%, 花岗岩测量结果相对误差为 2.7%, 二者相差较小。

表 3 两种方法的岩石介电常数测试结果比较

| 岩石种类 | 干涉法 | 开口同轴法 | 相对误差/% |
|------|------|-------|--------|
| 砂岩 | 3.89 | 3.77 | 3.2 |
| 花岗岩 | 5.71 | 5.56 | 2.7 |

3 结 论

本文基于微波干涉理论, 研究提出了一种利用微波辐射计来测试岩石介电常数的新方法。然后, 利用 C 波段微波辐射计对该方法进行了实验验证。实验结果显示, 利用新方法测得的花岗岩和砂岩的介电常数分别为 3.89 和 5.71, 与 AET 开口同轴谐振腔介电常数测试系统测量结果相比, 相对误差分别为 3.2% 和 2.7%, 表明了新方法具有可行性。该方法由于可以测试岩石的整体介电常数, 对于目前的点式介电常数测试方法不失为一种有益的补充。

需要指出, 该方法在制作样品时需要将岩石切割成不同厚度的薄板, 整个工序还较为不便, 后期可以考虑固定岩石厚度、通过改变微波辐射计的观测角度来实现微波干涉, 从而实现介电常数的测试。

参考文献

- [1] 王政平, 任维赫. 材料复介电常数测量方法研究进展[J]. 光学与光电技术, 2011, 9(1): 93-96.
- [2] XIONG G, MENG Y, LI J, et al. Precise measurements of the permittivity of microwave absorbing materials at microwave frequencies [J]. Journal of Materials Science-Materials in Electronics, 2020, 31(12): 9904-9910.
- [3] 陈颖光, 肖丹. 基于平行板电容传感器的地沟油检测研究[J]. 电子测量技术, 2013, 36(4): 84-86, 120.
- [4] 许景辉, 邵明焯, 李晓斌, 等. 基于准静态同轴探头模型的土壤复介电测量方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 271-277.

- [5] 方陈剑, 陆云龙, 黄季甫. 基于传输线法的微波频段海水复介电常数测量[J]. 无线通信技术, 2020, 29(1): 54-58, 62.
- [6] 薛冰, 纪奕才. 基于同轴谐振腔法的材料电参数测量[J]. 电子测量技术, 2017, 40(4): 43-46.
- [7] 赵才军, 蒋全兴, 景莘慧. 改进的同轴传输/反射法测量复介电常数[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3): 695-700.
- [8] 张康, 武彤, 滕俊恒. 开口同轴探头横电磁波模型法测量液体复介电常数[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(7): 945-952.
- [9] JUNG J, CHO J, KIM S. Accuracy enhancement of wideband complex permittivity measured by an open-ended coaxial probe [J]. Measurement Science and Technology, 2016, DOI: 10.1088/0957-0233/27/1/015011.
- [10] 王益, 张翠翠, 王建忠, 等. 闭式谐振腔法微波介质陶瓷介电常数测量[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(10): 2500-2507.
- [11] GUIHARD V, TAILLADE F, BALAYSSAC J P, et al. Permittivity measurement of cementitious materials with an open-ended coaxial probe [J]. Construction and Building Materials, 2020, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116946.
- [12] 马红章, 柳钦火, 王合顺, 等. 基于微波干涉技术的土壤介电特性测量[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 159-163.
- [13] 任水生. 微波板材介电常数 ϵ 的测量方法[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(3): 38-41.
- [14] 吴俊军, 刘四新, 董航, 等. 基于开口同轴法的岩矿石样品介电常数测试[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 457-465.
- [15] HUANG X, SONG F, CHEN T, et al. Fixed low-frequency electrical parameter measurement on rock cores with the coaxial probe method [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2017, 31(16): 1746-1754.
- [16] MAO W F, WU L X, QI Y. Impact of compressive stress on microwave dielectric properties of feldspar specimen [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(2): 1398-1408.
- [17] GUO C, LIU R, CHEN X, et al. An ultra-wideband measurement method for the dielectric property of rocks [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(6): 874-878.
- [18] GAO X, LIU S J, WU L X, et al. The variation in microwave brightness temperature of granite pressed under weak background radiation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(2): 1369-1381.
- [19] INOUE R, ODATE Y, TANABE E, et al. Data analysis of the extraction of dielectric properties from insulating substrates utilizing the evanescent perturbation method [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(2): 522-532.

作者简介

翟超宇, 硕士研究生, 主要研究方向为遥感-岩石力学。

E-mail: chaoyu_zhai@163.com

刘善军(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为遥感-岩石力学、矿山环境遥感、灾害遥感等。

E-mail: lisjdr@126.com

郭嘉兴, 博士研究生, 主要研究方向为遥感-岩石力学。

E-mail: 1910383@stu.neu.edu.cn