

基于微波辐射计的建筑材料介电特性及含水量影响研究

朱安魁¹, 刘金生², 刘善军¹, 敖萌¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳城市建设学院 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110167)

摘要: 为解决传统接触式点频法难以准确反映大尺寸样品整体介电特性的问题,采用微波介电测试系统,对常见建筑材料的介电特性进行研究.结果表明:极化能力是决定材料介电特性差异的关键因素.木材和塑料主要由弱极性的共价键构成,介电常数较低;橡胶和大理石分别含有强极性的碳碳双键与离子键,介电常数偏高;砂岩、花岗岩和玻璃主要成分均为二氧化硅,但玻璃的非晶态结构影响了内部电荷分布和极化行为,导致介电常数较高.对于同种材料,含水量对介电常数的影响最显著,为进一步研究含水量对介电常数的影响,建立了渗透水含水量介电模型.结果表明:当木材含水量处于0~30%、砂岩含水量处于0~0.5%时,水分以结构水或吸附水形式存在,对介电常数影响较小;含水量上升后,水分子以自由水形式分布于样品孔隙内部,对介电常数影响显著;当岩石表面存在附着水时,介电常数会大幅增加.

关键词: 建筑材料;介电常数;微波辐射;含水量;介电模型

中图分类号: P 237

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2025)09-0126-09

Study on Dielectric Properties and Influence of Water Content of Building Materials Based on Microwave Radiometer

ZHU An-kui¹, LIU Jin-sheng², LIU Shan-jun¹, AO Meng¹

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. College of Civil Engineering, Shenyang Urban Construction University, Shenyang 110167, China. Corresponding author: AO Meng, E-mail: aomeng@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Traditional contact-based dot frequency methods fail to accurately characterize bulk dielectric properties of large-scale samples. Therefore, a microwave dielectric testing system was utilized to investigate the dielectric properties of common building materials. The results show that polarization capability is the primary determinant of dielectric property variations. Wood and plastics are mainly composed of weak polar covalent bonds with a low dielectric constant. Rubber and marble demonstrate elevated dielectric constants due to their strongly polar carbon-carbon double bonds and ionic bonds, respectively. Although sandstone, granite, and glass share silica as their primary constituent, the amorphous structure of glass modifies charge distribution and polarization behavior, yielding a higher dielectric constant. For the same material, water content constitutes the most significant factor governing dielectric properties. Therefore, the influence of water content on dielectric constant was further studied, and the dielectric model of water content in permeable water was established. The results show that when the water content of wood is 0~30% and that of sandstone is 0~0.5%, the water exists in the form of structural water or adsorbed water, which has little effect on the dielectric constant. After the water content increases, the water molecules are distributed in the pores of the sample in the form of free water, which has a significant effect on the dielectric constant. The presence of surface-attached water

收稿日期: 2024-02-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41930108); 国家重点研发计划项目(2019YFC1509202); 国家自然科学基金青年基金资助项目(52304168); 核工业北京地质研究院遥感信息与图像分析技术国家级重点实验室基金资助项目(6142A01210407).

作者简介: 朱安魁(2000—),男,江苏徐州人,东北大学硕士研究生; 刘善军(1965—),男,河北涿鹿人,东北大学教授,博士生导师.

induces significant dielectric constant amplification in rock specimens.

Key words: building materials; dielectric constant; microwave radiation; water content; dielectric model

微波遥感凭借全时段、全天候的数据获取能力,广泛应用于灾害监测、环境保护和气候变化监测等领域.介电常数作为表征电磁波与物质相互作用特性的核心参数,反映了介质对电磁波的反射、散射、吸收及透射等特性,直接影响电磁波在介质中的传播^[1].因此,深入研究不同材料的介电特性对科学利用微波遥感技术具有重要意义.

传统的介电常数测试方法主要包括平行板法^[2]、终端短路法^[3-5]、传输线法^[6]和谐振腔法^[7-10].Parkhomenko等^[11]、Guo等^[12]和Xiong等^[13]通过改进谐振腔法和平行板电容法,提高了测量精度,实现了对小尺寸材料介电常数的精确测量.为进一步深入研究材料的介电特性,Thakur等^[14]在纳米复合材料的研究中发现,利用纳米结构工程能够提高材料的介电常数.Tu等^[15]通过实验表明,使用二维过渡金属碳化物/氮化物(MXene)作为填充材料时,能够在与基体之间的界面处形成电荷积累,进而产生微观电偶极子以增大物质介电常数.此外,众多学者指出,材料自身的介电特性是由其性质与周围环境共同决定的物理量.肖金凯^[16]通过大量研究指出,频率、成分、密度、变质程度、地质产状、水分和结构等因素都会影响岩石介电特性,其中水分的影响最为显著.早在1976年,Ulaby等^[17]就利用主动微波遥感数据反演地表水分,研究了土壤含水量与雷达参数的关系.为定量分析土壤湿度与介电常数之间的关系,Oh等^[18]基于微波散射特性和实验观测数据,将共极化比和交叉极化比用粗糙度和土壤介电常数清晰描述,建立了不同极化数据下后向散射系数与地表粗糙度以及土壤水分与介电常数的经验模型.Fernandez-Galvez^[19]总结了9种依赖于介电特性的土壤水分反演模型,并对土壤水分和介电特性之间的不确定性引起的误差进行量化.Lu等^[20]分析了不同异质性土壤模型的介电常数和电导率对探地雷达早期信号的影响,通过数值模拟和现场试验,验证了利用探地雷达早期信号估算土壤含水量空间分布的实用性.

目前,针对材料的介电特性前人已经开展了大量研究,但仍存在一些不足:首先,传统的介电常数测量方法以接触式点频测量为主,而遥感监测的地物常为大尺寸目标,使用传统点频测试方法无法直接获取地表大尺寸目标的介电特性;其

次,当前介电特性的研究以对材料介电特性的调控与提升为主,严重缺乏针对地表地物介电特性的深入研究,这在一定程度上影响了微波遥感对地观测的应用;最后,针对遥感应用的地物介电特性研究主要集中在土壤方面,已有关于介电常数与含水量关系的研究也主要用于监测土壤含水量,而针对其他地物的研究较少.鉴于此,本文采用微波介电测试系统,针对微波遥感观测中常见的多种地表建筑材料开展介电常数测试研究,并进一步分析含水量对材料介电特性的影响,以弥补该领域研究的不足,为微波遥感地物识别和影像分类等应用奠定基础.

1 基于微波辐射计的微波介电测试方法

本文采用的微波介电特性测试系统^[21]具有非接触和面式测量的优势:一方面,其测量结果为微波辐射计视场范围内全部目标的介电常数,即能够直接获取大尺寸材料的介电常数;另一方面,该方法对待测样品表面粗糙度与干燥程度要求较低,因此可实现含水样品介电常数的测试.

微波介电特性测试系统以电磁波在介质中的辐射传输理论为基础,构建“环境-样品-铝板”3层介质和“环境-样品-黑体”3层介质两种条件下的微波辐射传输模型(图1),进而建立微波亮温值与介电常数实部和虚部的函数关系式,并通过微波辐射计实测两种模型的不同辐射亮温值,从而实现对样品介电常数实部和虚部的有效反演.

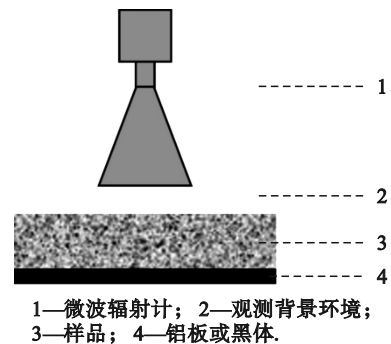


图1 微波介电测试系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of microwave dielectric testing system

以“环境-样品-黑体”模型为例,微波辐射计所接收到的能量由 3 部分组成(如图 2 所示):第 1 部分能量来自环境层,包括背景环境辐射经“环境-样品”边界直接反射及透射进入样品内部后经多次衰减和反射,最终被微波辐射计所接收的能量;第 2 部分能量来自样品层,即其内部某一薄层自身向上和向下辐射的能量,经多次衰减、反射和透射后被微波辐射计所接收的能量;第 3 部分能量来自黑体层,即黑体自身辐射的能量经“样品-黑体”边界透射入样品内部后多次衰减和反射,最终透过“环境-样品”边界被微波辐射计所接收的能量.综上,在“环境-样品-黑体”观测模型中,微波辐射计所接收到的亮温 $T_{\text{BH}}(\theta, p)$ 由 3 项组成:

$$T_{\text{BH}}(\theta, p) = T_{\text{BH}_1}(\theta, p) + T_{\text{BH}_2}(\theta, p) + T_{\text{BH}_3}(\theta, p). \quad (1)$$

式中: $T_{\text{BH}_1}(\theta, p)$ 表示环境层的微波亮温贡献; $T_{\text{BH}_2}(\theta, p)$ 表示样品层的微波亮温贡献; $T_{\text{BH}_3}(\theta, p)$ 表示黑体层的微波亮温贡献; θ 为观测角度; p 为微波的极化方式.

$$T_{\text{BH}}(\theta, p) = \frac{\Gamma_1(L_2^2 - \Gamma_1\Gamma_2) + \Gamma_2(1 - \Gamma_1)^2}{L_2^2 - \Gamma_1\Gamma_2} T_1 + \frac{\left(1 + \frac{\Gamma_2}{L_2}\right)(1 - \Gamma_1)\left(1 - \frac{1}{L_2}\right)}{1 - \frac{\Gamma_1\Gamma_2}{L_2^2}} T_2 + \frac{(1 - \Gamma_2)(1 - \Gamma_1)}{L_2(1 - \frac{\Gamma_1\Gamma_2}{L_2^2})} T_3, \quad (2)$$

$$T_{\text{BL}}(\theta, p) = \frac{\Gamma_1 L_2^2 - 2\Gamma_1 + 1}{L_2^2 - \Gamma_1} T_1 + \frac{\left(1 + \frac{1}{L_2}\right)(1 - \Gamma_1)\left(1 - \frac{1}{L_2}\right)}{1 - \frac{\Gamma_1}{L_2^2}} T_2. \quad (3)$$

式中: Γ_1, Γ_2 分别为模型中岩石上、下边界的反射率; L_2 为岩石衰减因子; Γ_1, Γ_2, L_2 皆是与介质介电常数实部 ε' 和虚部 ε'' 相关的函数; T_1 为环境亮温; T_2 为样品物理温度; T_3 为黑体物理温度; $T_{\text{BH}}(\theta, p)$, $T_{\text{BL}}(\theta, p)$ 均为已知或可观测值.因此,方程组仅包含介电常数实部 ε' 和虚部 ε'' 两个未知量,进而建立了样品介电常数的反演公式.

2 介电常数测试实验

2.1 实验系统

实验系统包括一台微波辐射计、一台高精度温度测试仪和一个恒温干燥烘箱.其中, K 波段地基微波辐射计用于模型微波亮温的测量,其频率为 18.7 GHz,温度灵敏度为 0.1 K,每秒可采集 2 组数据.试件和黑体温度变化监测采用多路温度测试仪,其精度为 $\pm 0.3\% \text{ rdg} + 1^\circ\text{C}$,分辨率为 0.1°C ,采样频率为 2 Hz.此外,试件烘干采用 DHG-

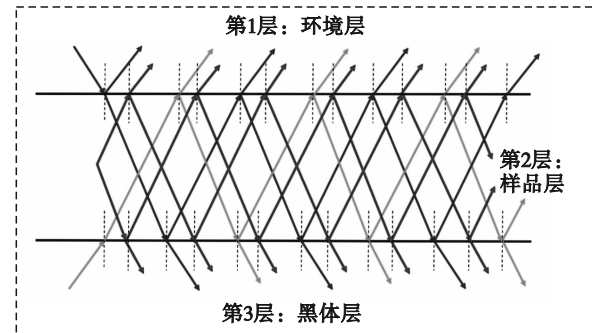


图 2 “环境-样品-黑体”模型微波辐射传输示意图
Fig. 2 Schematic diagram of microwave radiation transfer for “environment-sample-blackbody” model

与“环境-样品-黑体”模型类似,在“环境-样品-铝板”模型中,由于铝板的全反射性质,微波辐射计所接收到的亮温 $T_{\text{BL}}(\theta, p)$ 来自环境层和样品层两部分.因此,由“环境-样品-黑体”模型和“环境-样品-铝板”模型分别建立 2 种不同状态下的微波亮温辐射传输公式,即可联立求解介电常数.

9053A 型电热恒温鼓风干燥箱,控温范围为室温 (RT) + 10~200 $^\circ\text{C}$,分辨率为 0.1°C ,波动度为 $\pm 1.0^\circ\text{C}$.

2.2 实验样品

目前,针对微波遥感常见的土壤等地物已经开展了大量的介电特性测试研究,而将建筑物作为遥感目标的研究较少.因此,本文选取建筑材料开展实验,主要包括 9 种材料:桐木、松木和杉木是传统木质建筑的主要原料;玻璃、塑料、砂岩、花岗岩和大理岩普遍应用于墙体外部与屋顶等部位;橡胶用作防水材料,常见于建筑顶层.

为此,本文开展了 2 组实验.实验 1:自然状态下建筑材料介电常数测试.为确保微波辐射计天线 (6.5 cm \times 5 cm) 接收的亮温全部来自样品层,同时使反演结果尽可能代表样品整体介电常数,样品加工制备成质地均匀、结构稳定的大尺寸板状(见图 3),参数如表 1 所示.

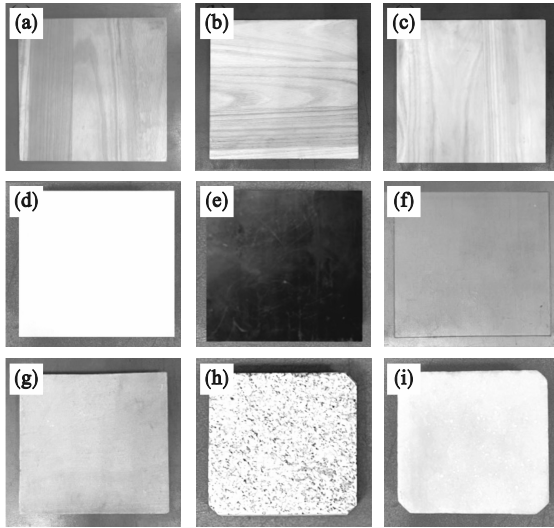


图 3 实验材料

Fig. 3 Experimental materials

(a)—桐木; (b)—杉木; (c)—松木; (d)—塑料;
(e)—橡胶; (f)—玻璃; (g)—砂岩; (h)—花岗岩;
(i)—大理岩.

表 1 实验材料参数统计

Table 1 Parameter statistics of experimental materials

实验样品	尺寸/cm(长×宽×厚)
桐木	50×50×1.5
杉木	40×40×1.5
松木	40×40×1.5
塑料	50×50×1.5
橡胶	50×50×0.5
玻璃	40×40×0.5
砂岩	30×30×2.0
花岗岩	25×25×2.0
大理岩	25×15×2.0

实验 2:不同含水状态下材料介电常数测试. 本文选取木材(桐木、杉木和松木)和岩石(砂岩、花岗岩和大理岩)这 2 类常见建筑材料开展研究. 实验开始前,对烘干后样品进行浸泡处理,制备饱水样品;然后根据实验设计含水量(由样品干重和设计的含水量计算),将样品烘干至不同质量以制备不同含水量样品^[22]. 对于花岗岩、大理岩,因其吸水能力差,本文研究这 2 种岩石表面有无附着水状态(图 4)下介电常数的变化.

2.3 实验环境测试

为避免室内强辐射背景环境的干扰,实验选在平坦空旷、晴朗少云的户外进行,保证上方观测环境为天空背景^[23]. 然而,白天和夜间环境差异较大,对实验结果的影响尚不清楚. 为此,在正式实验前以桐木、塑料、玻璃和花岗岩为样品,分

别在晴朗无云的白天和夜间进行实验(图 5),探究观测环境对反演结果的影响.

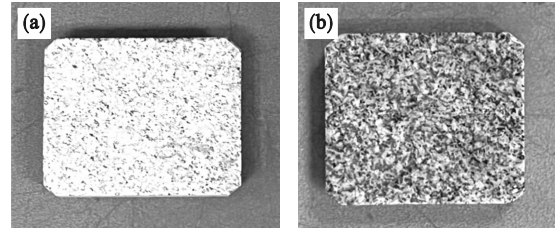


图 4 干燥与附着水状态样品图

Fig. 4 Sample diagrams of dry state and attached water state

(a)—花岗岩表面干燥状态;
(b)—花岗岩表面附着水状态.

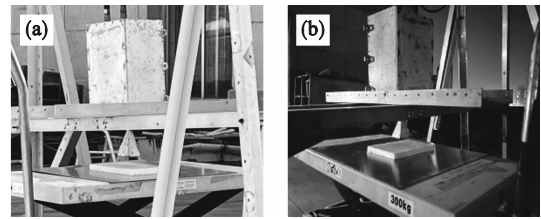


图 5 实验现场图

Fig. 5 Experimental site diagrams

(a)—白天实验现场图; (b)—夜间实验现场图.

实验结果(见表 2)显示,白天的介电常数测试结果普遍低于夜间,其主要原因:白天材料因太阳辐射温度升高,分子或原子的热运动加剧,使得极化过程受到干扰,导致介电常数偏小. 此外,在白天实验时,“环境-样品-黑体”模型的辐射亮温值波动较大,对观测结果存在影响. 因此,为确保反演结果的准确性和稳定性,实验选择在晴朗无云的夜间进行.

表 2 不同观测环境下介电常数实部反演结果

Table 2 Inversion results of real part of dielectric constant under different observation environments

环境	桐木	塑料	玻璃	花岗岩
白天	1.369 9	1.417 1	4.395 6	2.376 1
夜间	1.493 9	1.529 7	5.114 0	2.420 7

2.4 实验方法

实验采用垂直观测方式,位置选在楼顶天台开阔区域. 首先,将铝板置于升降台表面并调整台面高度,使铝板距辐射计天线 5 cm,记录辐射计示数 T_1 . 由于铝板具有强反射性,所以 T_1 可作为背景亮温值,即环境亮温. 然后,使用温度测试仪测量样品温度 T_2 ,并将样品置于铝板上,构建“环境-样品-铝板”模型,记录辐射计示数 T_3 . 将黑体

置于升降台上,搭建“环境-样品-黑体”模型,记录辐射计示数 T_4 ,同步测量黑体温度 T_3 ,最后,根据式(2)和式(3),计算获得材料介电常数。

3 实验结果及理论分析

3.1 不同类型建筑材料介电常数测试

3.1.1 实验结果

实验结果如表3所示,木材和塑料的介电常数较低,橡胶和玻璃的介电常数较高。在不同种类的岩石样品中,测得的岩石介电常数由低到高分别为:砂岩<花岗岩<大理岩。

表3 介电常数反演结果

Table 3 Dielectric constant inversion results

实验样品	介电实部	介电虚部
松木	1.121 6	0.235 8
杉木	1.264 2	0.204 3
桐木	1.494 0	0.134 2
塑料	1.529 7	0.000 1
橡胶	3.902 9	0.075 0
玻璃	5.114 0	0.222 7
砂岩	1.617 3	0.500 5
花岗岩	2.332 0	0.036 3
大理岩	5.591 0	0.012 9

为验证上述实验采用的微波介电测试系统测量结果的准确性,本文选取表面平整、状态稳定的同一块大理岩作为样品,使用开口同轴谐振腔微波介电测试仪开展介电常数测量,并与微波介电测试系统结果进行对比验证。为保证开口同轴谐振腔测量结果的准确性,共开展3组测量实验,每组实验均匀选择大理岩表面不同位置作为测试点,以平均值作为各组测定结果,最后再将3组结果取平均作为大理岩的最终测定数据。结果显示,利用开口同轴谐振腔法测定大理岩介电常数分别为5.560 7,5.806 5,5.416 2,则最终大理岩介电常数取值为5.594 5(3次测量平均值),与本文采用的微波介电测试系统结果(5.591 0)基本一致,相对误差低于1%,验证了基于微波介电测试系统实验方案的可行性。

3.1.2 理论分析

不同材料介电特性间的差异显著,其主要原因为:木材和塑料的组成元素以碳(C)、氢(H)、氧(O)为主,是通过共价键结合形成的聚合物,内部不具备强电性的官能团,因此整体结构呈现弱极性,介电常数较低^[24-25];橡胶中的碳碳双键结

构、大理岩中的金属元素钙(Ca)和离子键在电场作用下易发生极化现象,形成电偶极子并产生感应电荷,因此具有较高的介电常数^[26]。

玻璃、花岗岩和砂岩的主要成分均为二氧化硅(SiO_2),但由于3种材料在结构上的差异,使得介电常数存在显著区别。玻璃是无定形的非晶态材料,其中硅氧化物形成了三维无序的网络结构。这种无序结构导致玻璃中的硅氧键分布均匀,没有明显的晶体结构,从而影响其电荷分布和极化行为,使得玻璃具有相对较高的介电常数^[27]。相比之下,花岗岩和砂岩由压实的石英颗粒组成,具有明显的晶体结构,其中硅氧键排列有序。这种有序结构降低了石英颗粒间的电荷分布不均匀性,所以其介电常数相对较低。

综上所述,通过对材料介电常数反演结果的分析可知,不同材料间介电特性的差异本质上是其自身极化特性调控的结果。其中,金属元素借助离子极化增强电荷响应,离子键促进电偶极子形成,无序分子结构则通过影响电荷分布提升极化效率。这些机制均能够显著提高物质的介电常数。

3.2 不同含水状态材料介电常数测试

自然环境中,受雨露、降雪等因素影响,材料含水量会发生变化。由于水具有强极性,其介电常数远大于一般材料,当材料接触或吸收水分后,其介电特性会受到显著影响,进而影响遥感目标识别的效果。

对于木材、砂岩等材料,其结构相对松散,内部存在大量孔隙,因此具有良好的吸水性,水分可以渗透进入材料内部形成渗透水。而对于大理岩、花岗岩等材料,其颗粒之间排列密集,结构紧凑,限制了水分的渗透和吸收,因此水分会附着在材料表面形成水膜,即附着水。为此,本文以水的存在形式为标准,分别开展了材料介电常数对渗透水和附着水的响应研究。

3.2.1 渗透水状态材料介电常数实验结果

如表4和图6实验结果所示,不同含水量下桐木、杉木、松木和砂岩的介电常数呈现出相似的变化趋势。首先,第一阶段为木材含水量0~30%、砂岩含水量0~0.5%,该阶段含水量对介电特性影响较小,介电常数呈稳定趋势;其次,第二阶段为木材含水量30%以上、砂岩含水量0.5%以上,该阶段材料介电特性对水分十分敏感,介电常数随着含水量的增加而显著增大。此外,由于砂岩表面较粗糙,存在微小的凸起和凹陷,因此在含水量2.5%~2.64%时,部分水分子会直接附着在

岩石表面,对砂岩整体的介电常数影响较大(见 3.2.2 节).

表 4 桐木、杉木、松木和砂岩不同含水量下的介电常数

Table 4 Dielectric constants of Paulownia wood, fir wood, pine wood and sandstone under different water contents

桐木		杉木		松木		砂岩	
含水量/%	介电常数	含水量/%	介电常数	含水量/%	介电常数	含水量/%	介电常数
0	1.000 0	0	1.000 0	0	1.000 0	0	1.610 1
11.2	1.000 0	8.9	1.000 0	11.1	1.000 0	0.37	1.626 1
20.0	1.000 0	19.7	1.000 0	20.0	1.000 0	0.65	1.683 1
25.5	1.105 4	26.0	1.000 0	30.7	1.000 3	1.05	1.764 6
38.8	1.902 8	33.1	1.276 2	41.4	1.263 1	1.46	1.959 7
47.3	3.449 0	38.1	1.310 2	51.2	2.048 4	1.95	2.018 0
59.1	4.693 5	43.2	1.771 0	63.4	2.584 2	2.16	2.055 7
62.0	5.533 5	48.5	2.580 3	75.3	4.036 9	2.29	2.075 0
78.6	7.037 6	53.4	4.567 9	86.9	4.999 5	2.50	2.130 6
—	—	61.3	6.129 6	98.5	5.425 0	2.64	2.362 7
—	—	—	—	112.2	5.980 4	—	—

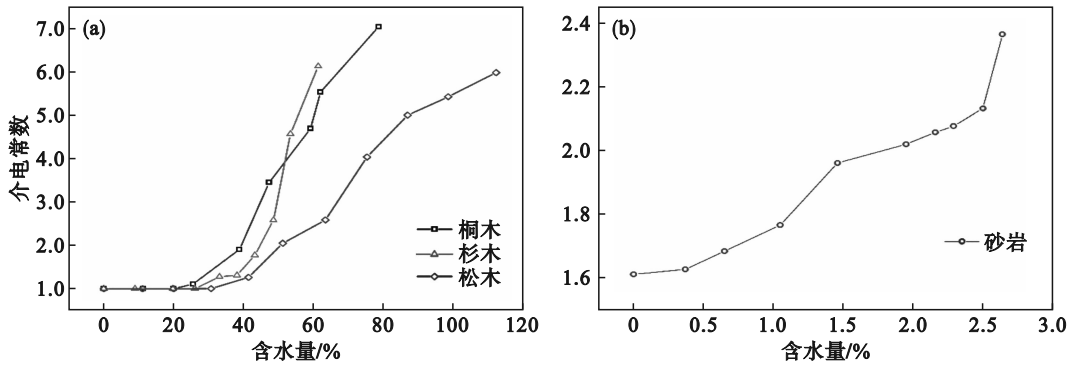


图 6 不同含水量材料的介电常数

Fig. 6 Dielectric constant of materials under different water contents

(a)—木材介电常数; (b)—砂岩介电常数.

3.2.2 附着水状态材料介电常数实验结果

针对附着水对岩石介电特性的影响,本文采用喷淋法模拟自然条件下岩石表面积水状态,使岩石表面形成一层水膜,即附着水(图4),并分别反演表面干燥岩石的介电常数和“岩石-附着水”系统整体的介电常数(表5).

表 5 不同状态介电常数反演结果

Table 5 Inversion results for dielectric constant at different water state

岩石表面状态	花岗岩	大理岩
干燥状态	2.332 0	5.591 0
附着水状态	4.399 7	7.435 2

3.2.3 理论分析及含水量介电模型建立

1) 渗透水.渗透水对材料介电特性的影响主要分为两个阶段:结构水或吸附水阶段和自由水阶段.其中,结构水(或吸附水)对材料介电特性影响较小,自由水则影响显著.

当桐木、杉木和松木含水量为0~30%时,水的主要存在形式为结构水.水分子中的氧原子(O)会与木质纤维中的羟基氢原子(H)发生氢键相互作用.这种氢键结合使得水分子与木质纤维之间形成稳定的结构水合物,水分子在外部电场的作用下不能自由旋转,此时木材整体的极性受水分子影响较小,仍取决于木材内部极性基团的取向运动,介电常数主要受木材特性控制,随含水量变化不显著^[28].当砂岩含水量为0~0.5%时,水的主要存在形式为吸附水.水分子会吸附在砂岩颗粒表面,水分子和矿物颗粒处于紧束缚状态,此时水表现出类似于冰(介电常数为3~4)的性质,对岩石介电特性的影响不明显^[29].

随着水分的不断渗入,水分子会代替空气填充材料的内部孔隙,表现为自由水的性质.由于水具有强极性,此时桐木、杉木、松木和砂岩的极性受水分子影响显著,因此含水量对材料的介电

特性影响显著.

2) 附着水. 在附着水状态下, 花岗岩和大理石的介电常数均出现明显增大. 由于岩石介电常数较低, 当岩石表面存在一层附着水时, 水分子的电荷会与岩石表面电磁场相互作用, 有效极化其电磁场, 从而增大岩石的介电常数^[30]. 此外, 水的介电常数远大于岩石, 当水分子附着在岩石表面时, “岩石-附着水”系统整体的介电常数受高介电常数水分子的影响而增大. 因此相较于干燥状态, “岩石-附着水”系统的整体介电常数显著增加. 该实验结果也进一步解释了上述砂岩含水量实验中, 在含水量 2.5%~2.64% 区间内介电常数出现急剧上升现象的原因(图 6).

为进一步探究材料渗透水含量与介电常数的关系, 实现从含水量的角度推算材料介电特性的变化规律, 本文采用线性拟合法对不同含水量下的介电常数实测值进行处理, 建立了桐木、杉木和

松木的含水量介电模型. 此外, 根据表 4 实验结果, 当桐木、杉木和松木含水量低于 30%、砂岩含水量低于 0.5% 时, 水分对介电特性影响较小; 当砂岩含水量达到 2.5% 以上时, 附着水影响显著. 因此, 本文构建的含水量介电模型不考虑这些阶段.

$$\varepsilon_{\text{桐}} = 0.128\theta_m - 2.788, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\text{杉}} = 0.184\theta_m - 5.556, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\text{松}} = 0.068\theta_m - 1.314, \quad (6)$$

$$\varepsilon_{\text{砂}} = 0.226\theta_m + 1.566. \quad (7)$$

式中: ε 为样品介电常数; θ_m 为含水量.

为减小模型复杂度和提高模型泛化性能, 本文采用一次线性方程建立含水量介电模型. 式(4)为桐木含水量介电模型, R^2 (决定系数) 为 0.979; 式(5)为杉木含水量介电模型, R^2 为 0.907; 式(6)为松木含水量介电模型, R^2 为 0.977; 式(7)为砂岩含水量介电模型, R^2 为 0.977. 拟合结果如图 7 所示.

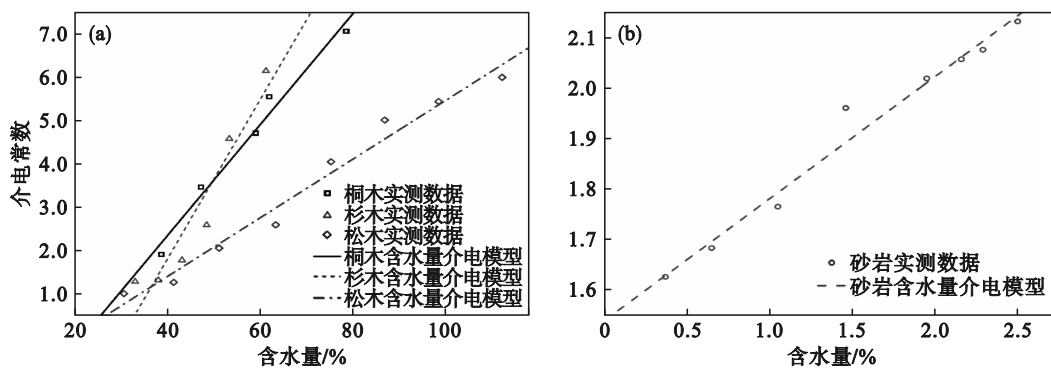


图 7 含水量介电模型

Fig. 7 Dielectric model of water content

(a) —木材介电模型; (b) —砂岩介电模型.

4 讨 论

为探究材料介电特性对合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 信号的影响规律, 本文选取吸水性良好、用途广泛的桐木作为材料制作角反射器 (1 m×1 m×1 m), 并将其布设在空旷的低散射背景环境中 (如草地), 利用 Sentinel-1B 卫星数据开展研究, 角反射器布设情况如图 8 所示.

实验共设计 3 组角反射器, 材质分别为干燥木板、浸水木板和“木板+铝板”组合. 每隔 12 d 开展一组实验并收集 Sentinel-1B 数据, 经预处理后识别角反射器, 提取其散射强度 (α) 信息, 结果如图 9 所示.



图 8 角反射器摆放图

Fig. 8 Arrangement diagram of corner reflector

图 9 中, 白圈处为角反射器摆放位置, 左侧较强信号为金属火箭模型, 由于其尺寸较大且为金

属材质,具有较强的后向散射特性.如图9a所示,架设干燥木质角反射器后,白圈区域后向散射信号强度未出现明显变化.主要原因在于:一是制造角反射器的桐木介电常数偏低,对微波信号的反射能力较弱;二是木质厚度较薄(1.5 cm),微波信号可以穿透木板到达地面.在图9b中,木板经24 h浸泡(含水量35%~40%),此时水增加了木板整体的介电常数,根据前文实验可知,当木板含

水量较低时,水分主要以结构水的形式存在于木板中,对介电常数影响较小,因此后向散射信号强度仅有小幅提升.在图9c中,当木板和铝板组合使用时,角反射器后向散射强度有大幅提升.这说明铝板等金属材质对微波信号的反射作用更为明显,也间接证明金属材质的火箭模型一直维持较强的后向散射特性.

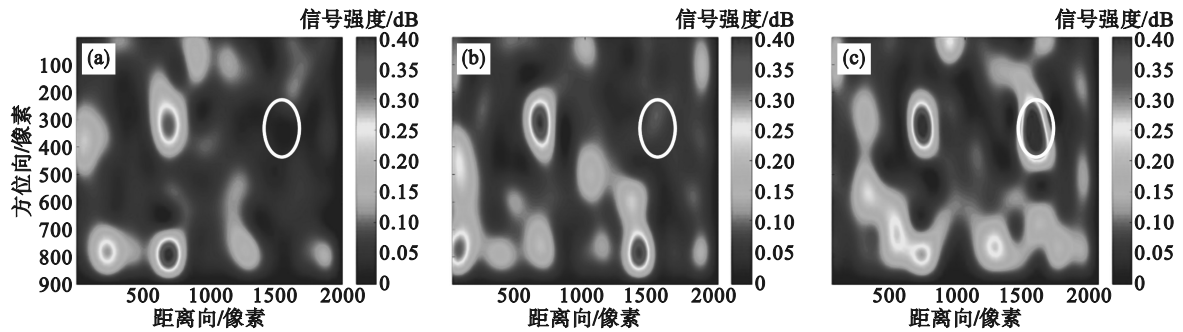


图9 角反射器识别结果

Fig. 9 Recognition results of corner reflectors

(a)—干燥木板; (b)—浸水木板; (c)—“木板+铝板”组合.

综上所述,材料后向散射信号的强度与其介电常数具有较强的相关性.然而,由于实验采用的木质角反射器介电常数偏低,且尺寸(1 m×1 m×1 m)远小于哨兵卫星20 m×5 m的空间分辨率;而SAR信号每一分辨单元内的信号为该分辨单元内所有地物后向散射信号的矢量和,因此角反射器信号容易受到周围草地、道路、行人等干扰因素的影响,导致结果不理想.建议后续研究采用岩石等高介电常数材质组成的角反射器,以分析介电特性和SAR后向散射信号的关系.

5 结 论

1) 本文基于微波介电测试系统,搭建了“环境-样品-铝板”3层介质和“环境-样品-黑体”3层介质两种不同实验条件下的微波辐射传输模型,通过获取模型的微波亮温数据,实现了对大尺寸建筑材料介电常数的准确反演.

2) 极化能力是决定材料介电特性差异的关键因素.木材和塑料等以碳、氢和氧为主要元素,内部含有大量弱极性的共价键,因此介电常数偏低;橡胶中的碳碳双键结构、大理岩中的金属元素钙和离子键在电场作用下易发生极化现象,所以介电常数较高;玻璃、花岗岩和砂岩的主要成分均为二氧化硅,但由于玻璃的非晶态结构影响

了内部电荷分布和极化行为,其介电常数明显大于花岗岩和砂岩.在遥感目标识别中,可以根据不同材料间介电特性的差异辅助遥感影像判断,并预判区域内目标识别的可行性.

3) 结构水和吸附水对材料的介电特性影响较小,自由水对材料的介电特性影响较大.桐木、杉木和松木在30%以下含水量时,水分子会与样品功能基团结合相互作用,主要以结构水形式存在;砂岩在0.5%以下含水量时,水分子会吸附在砂岩分子周围,主要以吸附水形式存在,此时材料介电常数相对稳定.随着含水量的持续增加,水分会充斥在样品内部孔隙中,以自由水的形式存在,显著提高介电常数.此外,当花岗岩、大理岩材料表面含有附着水时,水分子中的电荷会与岩石表面电磁场相互作用,“岩石-附着水”系统出现整体介电常数约为2的大幅增加.因此,在遥感目标识别时,考虑由目标含水量变化产生的信号强度差异,可改善识别效果.

参考文献:

- [1] Ulaby F T. Microwave response of vegetation[J]. *Advances in Space Research*, 1981, 1(10): 55-70.
- [2] Protopopov O, Bulycheva N, Kolyasnikov V. Dielectric characteristics of pulverised Nazarovo brown coal [J]. *Thermal Engineering (English Translation of Teploenergetika)*, 1972, 19(1): 120-122.
- [3] Roberts S, Von Hippel A. A new method for measuring

- dielectric constant and loss in the range of centimeter waves [J]. *Journal of Applied Physics*, 1946, 17(7): 610–616.
- [4] Iglesias T P, Seoane A, Rivas J. A contribution to the measurement of permittivity with the short-circuited line method [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1994, 43(1): 13–17.
- [5] 杨长保, 吴梦红, 张晨曦, 等. 岩石化学成分及复介电常数与光谱特征的关系探究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(10): 3103–3109.
(Yang Chang-bao, Wu Meng-hong, Zhang Chen-xi, et al. Relationship exploration of chemical content, complex dielectric constant and spectral features of rocks [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(10): 3103–3109.)
- [6] Zhao D S, Rietveld G, Teunisse G M. A multistep approach for accurate permittivity measurements of liquids using a transmission line method [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2011, 60(7): 2267–2274.
- [7] Li L, Chen X M, Ni L, et al. Evaluation of microwave dielectric properties of giant permittivity materials by a modified resonant cavity method [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(9): 092906.
- [8] Shimizu T, Kojima S, Kogami Y. Accurate evaluation technique of complex permittivity for low-permittivity dielectric films using a cavity resonator method in 60 GHz band [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2015, 63(1): 279–286.
- [9] 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.
- [10] Pereira V M, Hardt L G, Lima L S C, et al. Experimental characterization of borosilicate glasses fabricated from rice husk ash using the resonant cavity method [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2023, 287: 116138.
- [11] Parkhomenko M P, Kalenov D S, Fedoseev N A, et al. The improved resonator method for measuring the complex permittivity of materials [J]. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2017, 62(7): 759–764.
- [12] Guo C, Liu R, Chen X L, 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.
- [13] Xiong G, Meng Y F, Li J Z, 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.
- [14] Thakur Y, Zhang T, Lacob C, et al. Enhancement of the dielectric response in polymer nanocomposites with low dielectric constant fillers [J]. *Nanoscale*, 2017, 9(31): 10992–10997.
- [15] Tu S B, Jiang Q, Zhang X X, et al. Large dielectric constant enhancement in MXene percolative polymer composites [J]. *ACS Nano*, 2018, 12(4): 3369–3377.
- [16] 肖金凯. 矿物和岩石的介电性质研究及其遥感意义[J]. *环境遥感*, 1988(2): 135–146.
(Xiao Jin-kai. Dielectric properties of minerals and rocks and their application in remote sensing [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 1988(2): 135–146.)
- [17] Ulaby F T, Batlivala P P. Optimum radar parameters for mapping soil moisture [J]. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 1976, 14(2): 81–93.
- [18] Oh Y, Sarabandi K, Ulaby F T. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(2): 370–381.
- [19] Fernandez-Galvez J. Errors in soil moisture content estimates induced by uncertainties in the effective soil dielectric constant [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(11): 3317–3323.
- [20] Lu Q, Liu K X, Zeng Z F, et al. Estimation of the soil water content using the early time signal of ground-penetrating radar in heterogeneous soil [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(12): 3026.
- [21] 张立振. 基于微波辐射计的岩石介电常数反演方法研究与应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2020.
(Zhang Li-zhen. Research and application of rock dielectric constant inversion method based on microwave radiometer [D]. Shenyang: Northeastern University, 2020.)
- [22] Zhou Z L, Cai X, Cao W Z, et al. Influence of water content on mechanical properties of rock in both saturation and drying processes [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(8): 3009–3025.
- [23] Liu S J, Xu Z Y, Wei J L, et al. Experimental study on microwave radiation from deforming and fracturing rock under loading outdoor [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(9): 5578–5587.
- [24] 罗莎, 高伟, 沈佳斌, 等. 碱处理对聚偏二氟乙烯结构与介电性能的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2020, 36(5): 42–48.
(Luo Sha, Gao Wei, Shen Jia-bin, et al. Influence of alkali treatment on the structure and dielectric properties of polyvinylidene fluoride [J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2020, 36(5): 42–48.)
- [25] 王洋, 牟建新, 祝存生, 等. 新型低介电常数聚芳醚酮的合成及性能研究[J]. *高等学校化学学报*, 2005, 26(3): 586–588.
(Wang Yang, Mu Jian-xin, Zhu Cun-sheng, et al. Synthesis and properties of a novel kind of PEAK (poly aryl ether ketone) with lower dielectric constant [J]. *Chemical Research in Chinese Universities*, 2005, 26(3): 586–588.)
- [26] Yang C B, Liu N, Kuai K F. Research on relationship between spectral characteristics, physical parameters and metal elements of rocks in Xingcheng area [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(9): 2953–2965.
- [27] Feng Q, Liu X Y, Chen G H, et al. Dielectric, ferroelectric and energy storage properties of $(1-x)\text{Bi}_{0.47}\text{Na}_{0.47}\text{Ba}_{0.06}\text{TiO}_{3-x}\text{BaZrO}_3$ glass ceramics [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2016, 27(6): 6282–6291.
- [28] Xu C, Chai H J, Cao T Y, et al. Detection of dielectric constant of *Pinus sylvestris* var *mongolica* and its influencing factors [J]. *BioResources*, 2019, 14(2): 4532–4542.
- [29] 肖金凯. 矿物的成分和结构对其介电常数的影响[J]. *矿物学报*, 1985, 5(4): 331–337.
(Xiao Jin-kai. The effects of mineral composition and structure on dielectric constants [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1985, 5(4): 331–337.)
- [30] 杨泽前, 柴肇云, 张海洋, 等. 电场对高岭石表面水分扩散特性的影响[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(sup1): 222–230.
(Yang Ze-qian, Chai Zhao-yun, Zhang Hai-yang, et al. Influence of electric field on the diffusion of water on the surface of kaolinite [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(sup1): 222–230.)