

岩石和土壤的三分微波复介电常数的研究

肖金凯 赖兆生 冯俊明

在三分波段,利用谐振腔微扰法,先后对近300个岩石样品和近200个土壤样品的微波复介电常数(ϵ)的实部(ϵ')和虚部(ϵ'')进行了系统地测量和研究,同时还对部分有关矿物也进行了测量。结果表明:各类矿物之间其微波复介电常数差异很大, ϵ' 达两个数量级, ϵ'' 达5—6个数量级。近70%的矿物的 ϵ' 和 ϵ'' 都不太大,大的只占10%。硫化物和硫酸盐矿物的 ϵ' 和 ϵ'' 变化最大,氧化物类矿物次之,在大量的硅酸盐和含氧盐矿物中,绝大多数的矿物 ϵ 和 ϵ'' 都较小。

在火成岩中,不论侵入岩还是喷出岩,从超基性、基性岩到中性、酸性岩, ϵ' 和 ϵ'' 都是逐渐降低的,这与它们的岩石化学成分和矿物成分的变化规律是一致的,即随岩石中的Si、Na、K的增加和Fe、Mg、Mn、Ti、Ca的减少而降低,反映在矿物成分上,就是暗色矿物多的岩石 ϵ' 和 ϵ'' 高,暗色矿物少的岩石 ϵ' 和 ϵ'' 低。因为暗色矿物的 ϵ' 和 ϵ'' 一般高于浅色矿物的 ϵ' 和 ϵ'' 。例如 ϵ' ,石英(3.85)、斜长石(5.59)、正长石(6.01)、橄榄石(7.22)、角闪石(7.27)、斜方辉石(7.23)、单斜辉石(7.29)、黑云母(8.27)、钛铁矿(31.2)。沉积岩和变质岩的 ϵ' 和 ϵ'' 的变化趋势与火成岩类似,并更为复杂,主要受成分、变质条件、沉积环境等因素影响。在各类岩石中,灰岩、大理岩、白云岩和砂卡岩的 ϵ' 最高。

近200个土壤样品采自26个省、市、自治区的30多个土壤类型。所测的土壤样品为干燥土壤,同时扣除了其中空气对介电常数所造成的影响,因而,它只代表土壤固相的微波复介电常数。绝大多数土壤类型的干燥土壤 ϵ' 均在4—6之间, ϵ'' 在0.016—0.381之间,差别比 ϵ' 大, ϵ'' 大的土壤有黄土(0.381)、黑土(0.313)和暗棕壤(0.224)等。

影响岩石土壤的微波复介电常数的因素有成分(或类型)、湿度、温度、孔隙度、密度、频率等。其中,最主要的因素是成分和水分。对土壤而言,水分的影响尤为明显,随水分含量的增加, ϵ' 按指数律递增,其实验模型为:

$$\epsilon' = e^{p \ln \epsilon'_0 + S_w \ln \epsilon'_w}$$

式中 ϵ'_0 :干燥时土壤固相或岩石的复介电常数的实部,即岩石土壤类型对 ϵ' 的影响项; p :土壤孔隙度或岩石密度; S_w :水分含量(体积比); ϵ'_w :水的复介电常数的实部,在我们的实验条件下($\lambda = 3.27$ 厘米, $T = 20^\circ\text{C}$)为61.5。各类岩石土壤 ϵ' 增加的梯度($d \ln \epsilon' / d S_w$)都相等,等于 $\ln \epsilon'_w = 4.12$ 。这个实验模型与文献中所报道的一些混合物介电常数公式相比,它与实验值更为吻合。

一个物体亮度温度(T_A)的高低直接决定于它的发射率(δ)大小,即 $T_A = \delta T$ (T :物体温度)假定能量守恒,一个非磁的、各向同性的,具有光滑平坦表面的、半无限延展的物体,它的发射率等于吸收率,并可用反射系数(R)来表示,即 $\delta = 1 - R$;而 R 可由费涅尔(Fresnel)反射系数公式给出。

$$R_h = \left| \frac{\cos \theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}} \right|^2$$

$$R_v = \left| \frac{\epsilon \cos \theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}{\epsilon \cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}} \right|^2$$

式中 $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$, θ : 入射角, h.v.: 极化状态。这样, 由 ϵ' 和 ϵ'' 值可计算出各类岩石土壤在各种入射角情况下垂直极化和水平极化时的微波发射率。垂直极化发射率最大值所对应的角度为最佳观察角 (θ_B)、各类土壤的 θ_B 值为 $63.8-68.5^\circ$, 峰值为 65° , 随水分而变化的经验公式为:

$$\theta_B = \tan^{-1} e^{Pln\epsilon'} + 35.55S_w$$

岩石的 θ_B 值比较分散, 70% 的岩石 θ_B 值为 $64-68$ 。

80% 以上的土壤零度时的垂直极化发射率 (δ_{v_0}) 均在 $0.85-0.88$ 之间, 并且随水分含量的不同而有规律地变化。70% 的岩石 δ_{v_0} 值为 $0.85-0.90$, 灰岩、大理岩、砂卡岩和白云岩的 δ_{v_0} 值最小。

依据电磁波理论, 对有损介质的传播常数 (γ) 的计算公式为:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1 \right]} \quad (\text{奈贝/米})$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} + 1 \right]} \quad (\text{弧度/米})$$

$\gamma = \alpha + i\beta$; α : 衰减常数; β : 相移常数, $\delta = 1/\alpha$ 称为穿透深度。计算结果表明: 整个土壤的 α 峰值为 $0.02-0.04$, 最大达 0.17 (黄土)。 β 的峰值为 $4.0-4.2$, 最大达 4.929 (紫色土)。岩石的 α 和 β 值无特别明显的峰值。它们都随水分含量不同而明显变化。

土壤的电磁波穿透深度随水分含量而变化曲线表明: 它们存在一个拐点, 约在 $S_w = 0.13$ (重量百分比约 6%) 附近, 在拐点之前, δ 下降特别快, 降低 $80-90\%$, 在拐点之后, 下降缓慢。说明少量水的存在, 大大降低了雷达波在土壤岩石中的穿透深度。

对每类岩石和土壤 (或每个样品), 我们除了测得它们的微波复介电常数外, 同时还获得了不同角度下的微波发射率和反射系数、最佳观察角、衰减常数、相移系数和穿透深度等一系列微波特性参数。这些参数在研究电磁波与岩石土壤的相互作用, 雷达对地物的探测和微波辐射图象的解释等方面都具有重要的意义。

例如, 依据各类岩石土壤不同角度下微波发射率之间的差异, 可以得出:

(1) 水体、地面的铁矿体和铅锌矿体在微波辐射图象上是特别明显的“冷区”, 很容易识别。

(2) 在一般情况下, 灰岩、大理岩、白云岩和砂卡岩容易与其他岩类相区别。在所有岩石中, 它们的高温最低。而它们之间的相互区分, 利用单一的三公分微波辐射计则难以实现。提高仪器分辨率, 还能把玄武岩、页岩等从其他岩类中识别出来。而像花岗岩和花岗片麻岩、砂岩和流纹岩、碳质页岩和煤层等一些岩石化学成分相近的岩石, 利用单波段的微波辐射计也难以识别。

(3) 对地质构造断裂带, 由于本身较破碎, 水分含量比围岩高, 介电常数大, 发射率低, 因而在微波辐射图象上表现为线状的“冷区”, 也能识别。

(4) 利用高分辨率的微波辐射计, 有可能把柏油路面、水泥跑道、大面积的水泥屋顶建筑等与周围的岩石土壤相区别, 但难以区分碳酸岩地区的这些地物。

(5) 土壤湿度的探测, 依照土壤复介电常数、发射率和亮度温度随水分含量而变化的规律, 可利用微波辐射图象推测土壤湿度。

以上结论, 许多已为哈密、长春净月潭等地区的微波遥感试验结果所证实。

MICROWAVE COMPLEX DIELECTRIC CONSTANTS OF ROCKS AND SOILS IN A 3-cm WAVE BAND

Xiao Jinkai Lai Zhaosheng Fen Junming

Abstract

Microwave complex dielectric constants of nearly 300 rock samples and 200 soil samples have been determined by the cavity perturbation method in a 3-cm wave band. Described in this paper are the dielectric properties, emissive characteristics and attenuational properties of various types of rock and soil as well as the factors which influence these parameters and their applications in microwave remote sensing.