

矿物和岩石的介电性质研究 及其遥感意义

肖金凯

(中国科学院地球化学研究所)

1987年2月24日收稿

摘 要

本文依据实验室的测量结果讨论了各类矿物岩石的介电特征。在微波段,矿物的 ϵ' 差值达2个数量级, ϵ'' 达4个数量级。在低频段,这种差值更大。硫化物矿物的 ϵ' 和 ϵ'' 变化最大,其次为氧化物矿物。在火成岩中,随着从基性超基性岩到中性酸性岩的过渡, ϵ' 和 ϵ'' 逐渐降低。沉积岩和变质岩的介电性质与火成岩类似,但更为复杂。

实验表明,矿物的结构水对介电特性影响不大。吸附水和 ϵ' 之间有 $\epsilon' = \epsilon_0^2 \epsilon_w'$ 关系。离子类型、离子半径、离子极化率的差异,可引起 ϵ' 和 ϵ'' 有规律的变化,晶体结构方向、原子配位数、键型、密度、变质程度、地质产状等也对介电性质有很大影响。

文中分析了介电常数在微波遥感中的应用。指出了岩石或土壤的介电常数 (ϵ' 和 ϵ'') 与地物的亮度温度和 SIR-A 图像的灰度之间存在明显的相关性。

关键词 介电常数 介电损耗 矿物 岩石 微波遥感

微波遥感由于具有全天候和一定的穿透能力等优点,成为当前遥感技术大力开发研究的重点。微波遥感图像除是传感器(微波辐射计、雷达和散射计等)本身参数的函数外,也是地物的几何形态和电学性质(介电常数与电导率)的函数。矿物和岩石是分布很广的两类物质,因而研究它们的介电特性的变化规律,也就成为微波遥感中的一项重要的基础研究。

一、矿物岩石介电常数的范围

1. 矿物

自然界的矿物种类繁多,成分复杂,其介电性质变化也很大。目前低频 ($\leq 10^6$ Hz) 已有不少报道^[1-5],但微波段的却很分散^[4-6]。我们利用谐振腔微扰法对100多种天然矿物测量表明^[1],在微波段 ($\lambda = 3.2$ cm), ϵ' 和 ϵ'' 的变化范围为2到4个数量级。在低频段,它们的变化范围更大,而在光频段的变化则变小(表1)。这主要是由介电常数的色散

1) 关于利用谐振腔微扰法测量矿物岩石的微波介电常数的理论分析,测量系统和方法,误差分析等我们曾有专文作过论述^[7]。误差来源于样品体积的测量准确度,频率测量, θ 值测量以及公式对实际样品的近似程度。总的误差一般在10%以内,通常为5%左右;对个别 ϵ'' 较大的样品可达20%。文中各表所列实验测量的误差均在此范围之内。

效应所决定的。在所有频段,介电常数变化最大的是两类矿物——硫化物类矿物和氧化物类矿物。并且在同一阳离子化合物中,硫化物矿物比氧化物矿物具有更大的介电常数。在大量的硅酸盐和含氧盐中,除少数几种层状硅酸盐和含铅与铁锰矿物外,它们的介电常数都比较低。

表 1 矿物的介电常数
Table 1 Dielectric Constants of Minerals

矿物类别	低 频	微 波		光 频
		ϵ'	ϵ''	
自然元素及互化物	3.75—781	4.15—20.0	0.025—0.384	3.725—5.894
硫化物	6.00—450	4.44—600	0.025—90.0	4.567—15.304
氧化物	4.50—173	4.17—150	0.025—4.04	1.712—10.368
卤化物	4.39—12.3	5.37—18.0	0.025—0.110	1.764—5.108
硅酸盐	4.30—25.4	3.58—24.8	0.025—0.901	2.170—4.219
含氧盐	4.90—26.8	3.84—44.0	0.025—0.365	1.774—5.827

注: 本文所用低频 ($\leq 10^6$ Hz) 资料均取自文献 [1—5]; 微波段数据均为作者所测, 光频资料依据文献 [8—10] 所列出的折光率,按 $\epsilon = N^2$ 计算所得。以下各表概同此。

2. 岩石

数百块岩石样品的测量结果表明,在火成岩中,不论侵入岩还是喷出岩,从基性超基性岩到中性、酸性岩, ϵ' 和 ϵ'' 都是逐渐降低的。这与它们的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, K, Na 的增加和 Fe, Mg, Mn, Ti, Ca 的降低而减小。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。沉积岩和变质岩的介电常数变化情况与火成岩类似,并更为复杂,主要受成分、变质条件、沉积环境等因素影响。表 2 为某些岩石的实测值。

表 2 某些岩石的微波介电常数
Table 2 Microwave Dielectric Constants of Some Rocks

岩石名称	ϵ' 变化范围	ϵ' 平均值	ϵ'' 变化范围	ϵ'' 平均值
基性超基性岩	3.76—7.99	5.65	0.024—0.534	0.142
中性岩	3.58—7.46	5.27	0.020—0.387	0.109
酸性岩	3.45—5.97	4.64	0.020—0.322	0.050
碱性岩	3.96—5.08	4.46	0.020—0.141	0.103
砂 岩	3.94—7.01	5.04	0.020—0.378	0.066
灰 岩	6.02—8.53	6.91	0.020—0.148	0.032
片麻岩	4.30—5.89	5.50	0.020—0.185	0.073
大理岩	5.22—8.15	6.52	0.020—0.163	0.041
砂卡岩	5.68—8.62	7.18	0.023—0.488	0.117
板 岩	4.34—5.92	5.39	0.026—0.286	0.111

二、影响矿物岩石介电特性的因素

影响矿物岩石介电特性的因素很多，有频率、成分、结构、水分含量、温度、压力、孔隙度、地质产状、变质程度等等。

1. 频率

理想的介电-频率特性关系式为

$$\epsilon' = \epsilon_{\infty} + (\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) \int_0^{\infty} \frac{F(\tau) d\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (1)$$

$$\epsilon'' = (\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) \int_0^{\infty} \frac{F(\tau) d\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (2)$$

式中

$$\int_0^{\infty} F(\tau) d\tau = 1$$

为弛豫时间分布函数； ϵ_s 为静态介电常数； ϵ_{∞} 是频率为高频时的介电常数。自然界的矿物和岩石由于存在各种杂质和缺陷，往往偏离这种理想的情况。图 1 和图 2 分别绘出了某些实测的矿物和岩石的介电色散曲线，说明不同类型的矿物和岩石有不同的介电色散关系。

2. 水分

水是一种具有较高介电常数的极性液体。20°C， $\lambda = 3.23\text{cm}$ 时， $\epsilon' = 61.5, \epsilon'' = 31.4^{[1]}$ 。但大量的矿物(70% 以上)和全部岩

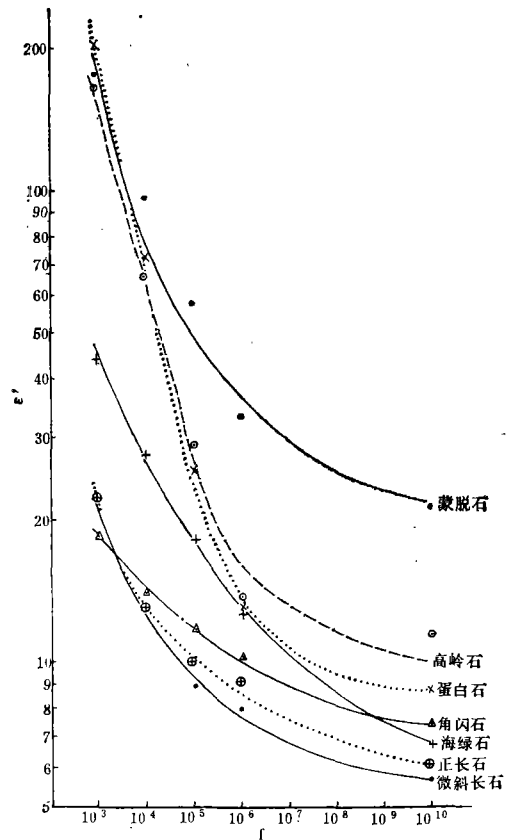
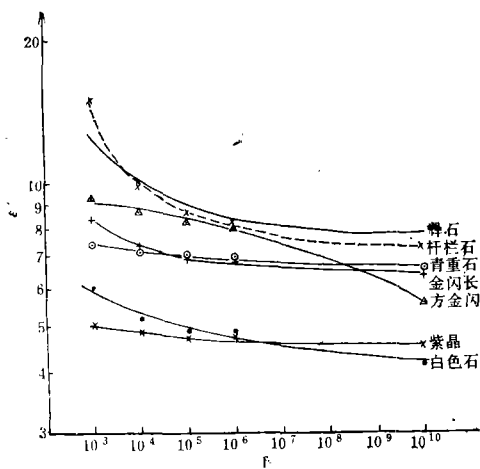


图 1 某些矿物的介电色散曲线

Fig. 1 Dielectric Chromatic Dispersion of Some Minerals

石的 ϵ' 只为 4—10， ϵ'' 只为 0.02—0.50 (在 $\lambda = 3.2\text{cm}$)。因而，只要矿物和岩石中混入

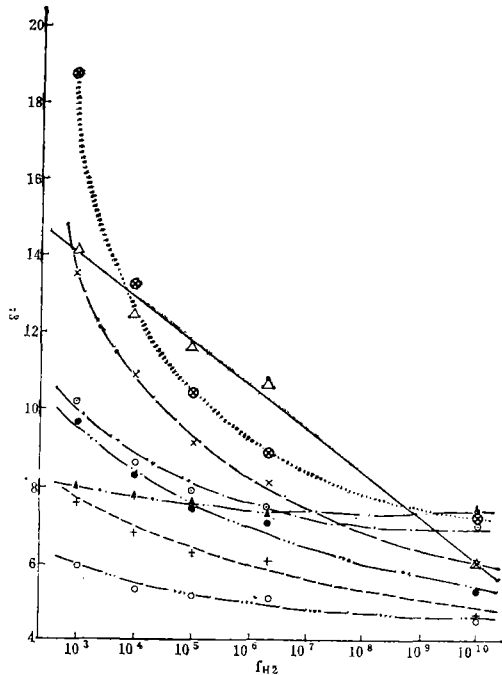


图 2 某些岩石的介电色散曲线

△ 玄武岩; × 安山岩; ■ 板岩; + 花岗岩; ⊗ 页岩; ○ 灰岩; ▲ 白云岩; □ 石英岩。

Fig. 2 Dielectric Chromatic Dispersion of Some Rocks

△ Basalt; × andesite; ■ slate; + granite ⊗ shale; ○ limestone; ▲ dolomite; □ quartzite.

少量的水分,介电性质就要发生很大的变化。然而,水在矿物中有两种存在形式——结构水和吸附水。实验表明,结构水对矿物的介电特性影响不大(表 3)。吸附水则严重干扰矿物岩石的介电特性。极少量的吸附水,如在矿物岩石颗粒表面的几个水分子层,水与矿物岩石颗粒表面处于紧束缚状态,水表现为冰的性质,此时 $\epsilon' = 3.2$, $\epsilon'' = 0.1$, 对其介电特性影响不大。当吸附水增加到一定量, Wang (1980) 认为当吸附水和颗粒表面之间的吸力为 15bar 以后^[12], 水表现为自由水的性质,对介电性质的影响异常明显。实验表明^[13,14]: 矿物岩石—水系统的 ϵ' 和吸附水的体积百分含量 S_w 的关系为

$$\epsilon' = \epsilon'_0 \rho \epsilon'_w S_w \quad (3)$$

式中 ρ ——矿物岩石的孔隙度; ϵ'_0 ——干燥状态下孔隙度为零时矿物岩石的复介电常数实部; ϵ'_w ——水的复介电常数实部。此式表明了矿物岩石类型、孔隙度、水分含量和介电特性之间的相关性。 ϵ'' 也随吸附水含量增加而呈指数律增加。

3. 成分

介电常数是综合反映物质电极化行为的重要宏观物理量。电极化又有电子极化、离子极化、分子极化、固有电矩的转向极化和界面极化等。因而,构成矿物的阴阳离子类型、离子半径和离子极化率的大小直接决定了它们的极化强度,从而也影响了介电常数的高低。表 4 列出几组异质同象矿物的介电常数测量结果。由表可知,矿物的 ϵ' 和 ϵ'' 都随阳离子的改变而有规律的变化。

表 3 某些含结构水矿物的低频介电常数
Table 3 Low frequency Dielectric Constants of Some Minerals with Structure water

矿物名称	分子式	ϵ'	矿物名称	分子式	ϵ'
三水铝矿	$\text{Al}(\text{OH})_3$	8.4	胆矾	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	6.50
水镁石	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	8.6	皓矾	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	6.20
硅孔雀石	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	13.1	蓝铁矿	$\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	6.07—7.7
硅硼钙石	$\text{CaBSiO}_4 \cdot \text{OH}$	7.2—7.5	硬硼钙石	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	12.5—13.5
水硅钙石	$\text{Ca}_3(\text{SiO}_3 \cdot \text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	9.2	硼钠钙石	$\text{NaCa}[\text{B}_3\text{O}_7(\text{OH})_2] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	5.8
埃洛石	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	7.9	硼砂	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	5.3
泻利盐	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	5.46	镍华	$\text{Ni}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	5.5—6.6

表 4 几组异质同象矿物的微波介电常数
Table 4 Microwave Dielectric Constants of Several Groups of Homomorphous Minerals

矿物	分子式	晶系	空间群	α/r^3	$1/\theta^*$	ϵ'	ϵ''
菱镁矿	MgCO_3	三方	$D_{3d}^6-R_{3c}$	0.240	1.7241	6.65	0.030
冰洲石	CaCO_3	三方	$D_{3d}^6-R_{3c}$	0.440	1.5468	7.90	0.030
菱锌矿	ZnCO_3	三方	$D_{3d}^6-R_{3c}$		1.4797	10.40	0.030
菱铁矿	FeCO_3	三方	$D_{3d}^6-R_{3c}$		1.3847	9.97	0.043
菱镉矿	CdCO_3	三方	$D_{3d}^6-R_{3c}$	0.88	1.3348		
菱锰矿	MnCO_3	三方	$D_{3d}^6-R_{3c}$		1.2101	13.80	0.050
文石	CaCO_3	斜方	$D_{2h}^{16}-P_{mcn}$	0.440	1.5468	8.31	0.036
毒重石	BaCO_3	斜方	$D_{2h}^{16}-P_{mcn}$	0.579	1.3952	8.95	0.040
白铅矿	PbCO_3	斜方	$D_{2h}^{16}-P_{mcn}$	1.89	1.1788	21.1	0.030
钾盐	KCl	立方	$O_h^5-F_{m\bar{3}m}$	0.382	2.6933	5.73	0.046
石盐	NaCl	立方	$O_h^5-F_{m\bar{3}m}$		1.2477	6.33	0.033
方铅矿	PbS	立方	$O_h^5-F_{m\bar{3}m}$	1.89	1.3168	71.6	0.43
锡石	SnO_2	四方	$D_{4h}^{14}-P4_2/mnm$		0.3354	81.7	0.033
金红石	TiO_2	四方	$D_{4h}^{14}-P4_2/mnm$	1.04	0.3023	100	0.040

* α ——离子极化率; r ——离子半径; α/r^3 ——离子体极化率; $1/\theta$ ——键参数函数; $\theta = \frac{r_a}{r_c} \left(\frac{z^*}{z_{cor}} \right)_A$; z^*/z_{cor} ——阳离子有效电荷与共价半径之比; r_c , r_a 分别为阴阳离子半径。 θ 是一个表征化合物离子性的参数, $1/\theta$ 与偶极矩有较好的对应关系^[13]。

矿物中的类质同象置换、杂质和缺陷对其介电性质也有相当大的影响。正常格点上的离子被价态比它高或比它低的离子取代或为空位, 必存在固有电偶极矩。当矿物中存在另一相(当然另相浓度很小)时, 则相与相之间必存在界面极化。这些都会使介电常数发生变化。表 5 的实验数据就说明了这一点。

当一个矿物为铁电体时, 掺杂成分量的多少对铁电体的介电特性起着关键作用^[16]。

4. 结构

矿物的结构对介电特性的影响比较复杂, 可用以下实验资料说明。

表 5 类质同象系列矿物的微波复介电常数

Table 5 Microwave Dielectric Constants of Some Isomorphic Minerals

矿 物	分 子 式	ϵ'	ϵ''
萤石	CaF_2	7.08—9.10	0.089—0.108
钇萤石	$(\text{Ca}, \text{Y})(\text{F}, \text{O})_2$	17.95	0.11
镁橄榄石	Mg_2SiO_4	7.00	0.067
镁铁橄榄石	$(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$	8.36	0.104
铁橄榄石	Fe_2SiO_4	12.33	0.130

表 6 矿物不同结构方向上的介电常数^[2-4]

Table 6 Dielectric Constant of Some Minerals in Different structural Orientations

矿 物	结构方向	$f(\text{Hz})$	ϵ'	矿 物	结构方向	$f(\text{Hz})$	ϵ'
磷灰石	⊥光轴	3×10^8	9.50	红宝石	⊥光轴	10^4	13.27
	//光轴		7.41		//光轴		11.28
方解石	⊥光轴	10^4	8.5	金红石	11a	10^6	86
	//光轴		8.0		11b		170
白云石	⊥光轴	10^8	8.0	文 石	11a	10^6	6.46
	//光轴		6.8		11b		9.72
电气石	⊥光轴	10^4	7.10	绿帘石	11a	10^6	7.60
	//光轴		6.30		11c		15.30
蓝宝石	⊥光轴	10^4	8.6	石 膏	11b	10^6	12.0
	//光轴		10.55		11c		5.4

表 7 同质多象矿物组的微波介电常数

Table 7 Microwave Dielectric Constants of Some Polymorphic Minerals

矿 物	分子式	晶 系	空间群	结构特征	ϵ'	ϵ''
金刚石 石墨	C	立方	$O_h^1 - F_{d3m}$	结构模式和原子配位数不同	5.40	0.030
		六方	$D_{4h}^1 - P6_3/mmc$		>200	—
金红石 锐钛矿	TiO_2	四方	$D_{4h}^1 - P4_2/mnm$	结构模式不同原子配位数相同	10.0	0.040
			$D_{4h}^1 - I4_1/amd$		42.6	0.174
磁赤铁矿 赤铁矿	Fe_2O_3	立方	$O_h^1 - F_{d3m}$	结构类型不同, 部分原子配位数不同	99.8	0.23
		三方	$D_{3d}^6 - R\bar{3}c$		20.6—55.2	0.40—4.07

(1) 同一矿物的不同结构方向, 由于原子的排列和键型的差异, 其介电常数明显不同(表 6)。

(2) 同质多象矿物, 由于结构或原子配位数的不同, 它们也有不同的介电常数(表 7)。

(3) 具金属键的矿物导电性好, 存在电子导电, 它们的介电常数和介电损耗一般都比较大。具纯离子键和纯共价键的矿物存在杂质导电, 它们的介电常数和介电损耗都较低。实验表明, 在硫化物矿物中, 随着金属键成分的增加, 微波段的 ϵ' 和 ϵ'' 都逐渐增大 (表 8)。

表 8 某些硫化物矿物的微波介电常数
Table 8 Microwave Dielectric Constants of Some Sulfide Minerals

矿 物	分子式	$\rho(\Omega/\text{cm})$	$\phi(g)^*$	ϵ'	ϵ''
雄黄	AsS	$10^{11}-10^{15}$	17.194	6.58	0.028
辰砂	HgS	10^9-10^{11}		16.8	0.028
淡红银矿	Ag_3AsS_3	10^9		22.4	0.033
辉铋矿	Sb_2S_3	$10^{-2}-10^2$	15.978	49.0	0.098
辉铋矿	Bi_2S_3	$3.0-5.7 \times 10^2$	15.498	62.8	0.33
方铅矿	PbS	$2.0-3 \times 10^6$	14.270	71.8	0.43
斑铜矿	$\text{Cu}_2\text{S}(\text{Fe}, \text{Cu})\text{S}$	$8 \times 10^{-2}-1.6 \times 10^{-6}$		92.5	0.62
黄铜矿	CuFeS_2	$8.3-3.0 \times 10^{-9}$		99.9	0.53
辉铜矿	Cu_2S	$4.2 \times 10^{-2}-5 \times 10^{-3}$	13.785	313.1	1.50

* 为金属键参数 $\phi(g) = \Sigma \frac{\alpha}{r_k} + 18(\Delta x - 0.7)^3 - 8.0$; Δx ——阴阳离子电负性的差值, r_k ——原子的真实半径。 $\phi(g)$ 愈小, 金属键愈强^[13]。

5. 密度

同一种矿物或岩石, 如果密度不同, 会有不同的介电常数。例如作者依据 Olhoeft (1981) 的资料整理得到的夏威夷玄武岩的介电常数 ϵ' 和其密度 d 之间的关系为

$$\ln \epsilon' = 0.839 + 0.542d \quad (4)$$

其相关系数为 0.94 (图 3)。值得指出的是矿物的介电常数和其真比重之间不存在任何相

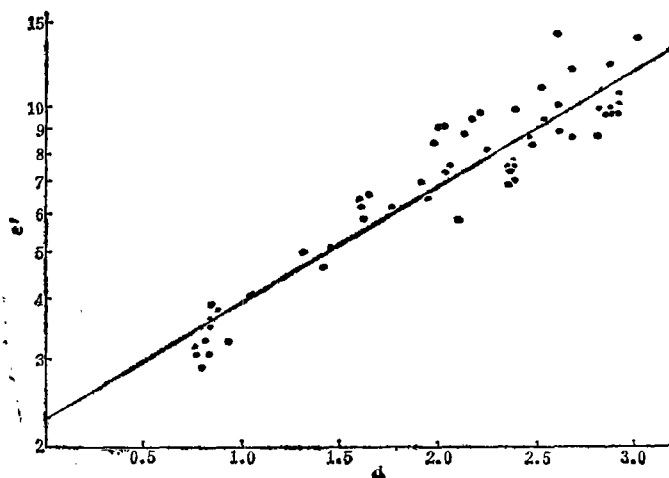


图 3 夏威夷玄武岩的介电常数和密度的关系

Fig. 3 The Dielectric Constants of Hawaii Basalt as a Function of the Density

关性(表 9)。

表 9 矿物的介电常数和比重

Table 9 Dielectric Constants and Specific gravity of Some Minerals

矿 物	分 子 式	比 重	低 频 ϵ'	微 波 ϵ'
方钠石	$\text{Na}_4\text{Al}_3(\text{SiO}_3)\text{Cl}$	2.30	8.1	5.59
高岭石	$\text{Al}_2[(\text{OH})_4\text{Si}_4\text{O}_{10}]$	2.65	9.4—13.7	11.24
石英	SiO_2	2.65	4.5—5.2	4.17—4.53
红柱石	Al_2SiO_5	3.15	5.4—11.0	11.83
雄黄	AsS	3.56	6.0—7.0	6.58
锐钛矿	TiO_2	3.90	42.5	42.6
菱铁矿	FeCO_3	3.96	8.0—9.3	9.97
黄铜矿	CuFeS_2	4.20	>81	99.9
辉锑矿	Sb_2S_3	4.60	11.2—49	49.0
硫镉矿	CdS	4.95	9.35	18.75
淡红银矿	Ag_3SbS_3	5.60	16.5	22.4
辉铜矿	Cu_2S	5.70	>81	313.0
辉铋矿	Bi_2S_3	6.78	18.2—45.2	62.8
矾铅矿	$\text{Pb}_2(\text{VO}_4)_2\text{Cl}$	6.88		31.2
黑钨矿	FeWO_4	7.5	12.0—14.0	18.8
方铅矿	PbS	7.5	205	71.8
辰砂	HgS	8.1	10.9—20.0	16.8

6. 变质程度

矿物生成后可经受不同的地质作用,同一矿物也可在不同的地质作用中形成。作者对我国南方几省区碳酸盐地层和北疆一些地层中的天然固体沥青系统研究表明,沥青的微波复介电常数随其变质程度的加深而增加。热变质程度很低的沥青 $\epsilon' = 2.63$; $\epsilon'' = 0.020$; 热变质程度很高的碳沥青 ϵ' 高达 83.0, ϵ'' 达 5.54。 ϵ' 与沥青的 C/H (代表沥青变质程度的最重要指标) 值之间存在很好的相关性(图 4)。

$$\ln \epsilon' = 0.712 + 0.58C/H \quad (5)$$

相关系数为 0.945。同时,沥青的 ϵ' 和 ϵ'' 与其空气或油浸中最大反射率、自由基浓度、有机差热后峰温度、晶面间距 d_{002} 、比重等的资料也非常吻合,并为人工模拟热变质的结果所证实^[27]。

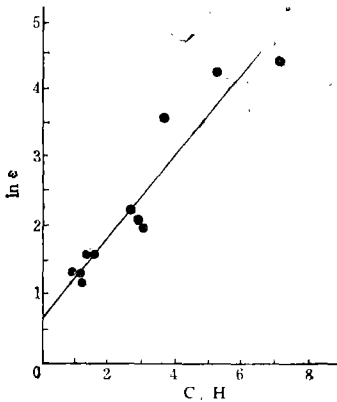


图 4 固体沥青的 ϵ' 和 C/H 的关系
Fig. 4 Plot of ϵ' vs. C/H for Bitumen

7. 地质产状

同一种矿物可以有不同的成因,同一成因的矿物还可有不同的产地。由于地质作用具有较强的区域性,因而它们的形成条件和环境不可

能完全一致, 从而导致它们具有不同的杂质和缺陷。介电性质也带来了许多变化。实验结果表明, 象赤铁矿、磁铁矿、金红石、磷灰石、锡石等许多矿物都有这种现象。表 10 为赤铁矿的实测结果。

表 10 赤铁矿的微波介电常数
Table 10 Microwave Dielectric Constants of Hematite

类型	产地	ϵ'	ϵ''	类型	产地	ϵ'	ϵ''
细晶状	海南岛	20.6	0.40	鲕状	河北庞家堡	39.1	1.03
细条带状	内蒙白云鄂博	37.2	0.53	针状	巴西	46.2	0.60
肾状	河北庞家堡	37.1	2.03	块状		52.2	4.04

三、在微波遥感中的意义

微波遥感中的辐射图像反映的是各类地物的亮度温度, 而亮度温度 T_B 又为各类地物的微波发射率 e 和物体温度 T 所决定。

$$T_B = eT \quad (6)$$

如果能量守恒, 对一个非磁的、各向同性的、绝缘的、具有零温度梯度热平衡光滑平坦表面半无限延展的物体, 它的发射率等于它的吸收率。则有

$$e_{(h, \nu)} = 1 - R_{(h, \nu)} \quad (7)$$

(h, ν) 表示极化状态, 反射率 R 可由 Fresnel 反射系数公式给出:

$$R_{(h)} = \left| \frac{\cos\theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}} \right|^2 \quad (8)$$

$$R_{(\nu)} = \left| \frac{\epsilon \cos\theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}} \right|^2$$

式中 θ 为入射角; $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ 。由此可知, 各类地物的介电常数是决定它的亮度温度高低的重要因素。图 5 为利用上述关系式和实测的介电常数得到的几种具有代表性的地物的微波发射率曲线。

对于一个在有损介质中传播的电磁波而言:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1 \right]} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} + 1 \right]} \quad (10)$$

$$\delta = 1/\alpha \quad (11)$$

$$\gamma = \gamma + i\beta$$

式中 α ——衰减常数; β ——相移常数; δ ——穿透深度; γ ——传播常数。这样, 依据介电常数就能估计电磁波在各类地物中的传播特征。(6) 式到 (11) 式是一组理论公式, 它们仅适用于具有光滑表面的地物, 与实地测量值相比, 有一定的差距, 但两者的变化趋

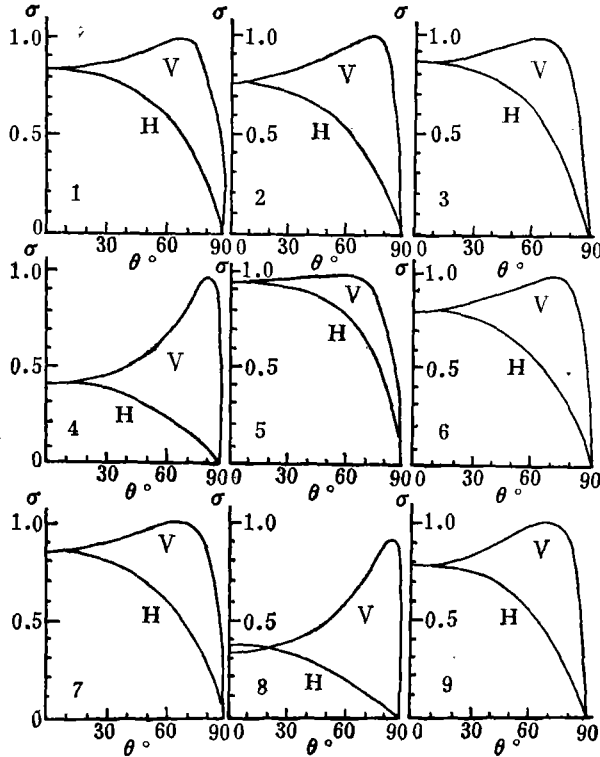


图 5 几类典型地物的微波发射率曲线

1. 玄武岩; 2. 灰岩; 3. 花岗片麻岩; 4. 铁矿石; 5. 沙漠砂; 6. 紫色土;
7. 红壤; 8. 水面; 9. 柏油路面。

Fig. 5 Microwave Emissivity Curves of Some Geological samples

- (1) Basalt; (2) limestone; (3) Granite-gneiss; (4) iron ore; (5) desert sand;
(6) Violet soil; (7) lateritic soil; (8) Surface water; (9) asphalt road surface.

势一致,表面粗糙度愈小,两者间的差异也愈小。尽管这样,我们还是可以利用地物的介电特征来估计它们的亮度温度的高低,对微波辐射图像进行判读,对微波辐射探测各类地物的能力进行预测^[28]。

利用地物的介电特性来判读微波辐射图像已有不少成功例子。成功地区分了水陆界线、岩石类型、不同构造线、铁矿体和土壤水分估算等^[19,20]。实验表明,岩石的介电常数和它的亮度温度之间存在较明显的负相关,相关系数达 0.94。

雷达探测目标依赖于目标的散射特征,而一个目标的散射系数又是其表面特征和电学性质的函数。散射系数和介电常数、电导率之间的理论关系式比较复杂,但实验表明,它们具有很好的相关性。对我国天津和保定地区平原农田的哥伦比亚号航天飞机成像雷达 (SIR-A) 图像进行分析研究表明,土壤的介电特性是影响雷达图像灰度大小的重要因素^[21]。土壤的 ϵ' 和 ϵ'' 与 SIR-A 图像灰度值 G 之间有明显的线性相关 (图 6),其回归方程为:

$$G = 0.539\epsilon' - 0.878$$

$$G = 0.689 + 4.235\epsilon''$$

相关系数分别为 0.91 和 0.80。这是相隔两年之后进行采样分析的结果。若能同步采样, 效果肯定更佳。

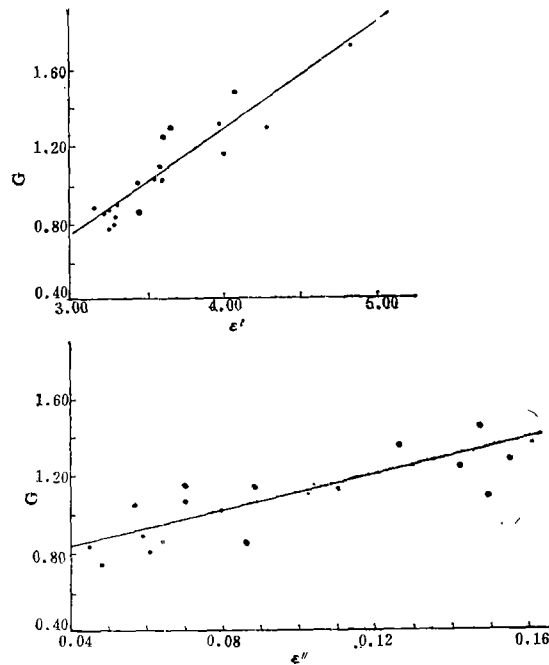


图 6 SIR-A 图像灰度值为土壤介电常数的函数

Fig. 6 The Grayscale Values of the SIR-A Image (G) as a Function of the Dielectric Constants of Soils (Real Part ϵ' and Imaginary Part ϵ'')

参 考 文 献

- [1] Orlhoeft, G. R., Electrical properties of rocks in «Physical properties of rocks and Minerals» (Y. S. Touloukian Ed.), N. Y. McGraw-Hill Book Co., pp. 257—330, 1981.
- [2] Keller, G. V., Electrical properties of rocks and minerals in «Handbook of physical Constant—Revised Edition» (S. P. Clack, Jr., Ed.) Published by the Society, N. Y. pp. 553—577, 1966.
- [3] Дортман, Н. Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика), Недра, Москва, стр. 199—255, 1976.
- [4] Weast, R. C., CRC Handbook of chemistry and physics, 59th Edition, CRC Press Inc., E-55—E-62, 1978—1979.
- [5] Howell, B. F., and P. H. Cicastro Dielectric Behavior of Rocks and Minerals, The American Mineralogist, Vol. 46, No. 3—4, pp. 269—288, 1961.
- [6] Oberste-lehn, D., Phenomena and Properties of Geologic Materials Affeeling Microwave—A Review, NASA-CR-108547, SU-TR-70-10, 1970.
- [7] 赖兆生、肖金凯、冯俊明, 矿物岩石微波频率下的介电常数测定, 矿物物理和矿物材料研究(论文集), 科学出版社, 1982 年。
- [8] 中国地质科学院地质矿产研究所编著, 金属矿物显微鉴定, 地质出版社, 1978 年。
- [9] 中国科学院地球化学研究所, 矿物 X 射线粉晶鉴定手册, 科学出版社, 1978 年。
- [10] 中国科学院地球化学研究所, 稀有元素矿物鉴定手册, 科学出版社, 1972 年。
- [11] Grant, K. H. et al., Dielectric Behavior of Water at Microwave Frequencies, J. Chem. Phys., Vol. 26, No. 1,

- pp. 156—161, 1957.
- [12] Wang, J. R., and T. J. Schmugge, An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soil as a Function of water Content, IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing, Vol. GE-18, No. 4, pp. 288—295, 1980.
- [13] 肖金凯, 矿物的成分和结构对其介电常数的影响, 矿物学报, 5(4), 1985。
- [14] Xiao Jinkai, Microwave Dielectric properties of minerals and rocks, Proceedings of the 3rd International Colloquium on spectral Signatures of Objects in Remote sensing, Les Arcs, France, 16—20 Dec. 1985, pp. 293—296.
- [15] 陈念贻, 键参数函数及其应用, 科学出版社, 1976 年。
- [16] Molockhia, N. M. et al, Dielectric and X-ray Diffraction studies of barium titanate doped with Ytterbium, J. Amer. Ceram. Soc., Vol. 67 No. 4, pp. 289—291, 1984.
- [17] 肖金凯, 固体沥青的微波介电特性研究, 地球化学, (1), 1983。
- [18] 肖金凯等, 岩石土壤的微波介电特征及其在微波遥感中的应用研究, 科学通报, (17), 1983。
- [19] Teng Xuyan, Xiao Jinkai, Shi changging, Lai Zhaoshen, Peng Hongxian, and Yang Bolin, Passive Microwave Radiometry in the Gobi-Desert Region, Remote Sensing of Enviroment Vol. 15, No. 1. pp. 37—46, 1984.
- [20] Teng Xuyan, Xiao Jiakai shon Yuanfu, Zou Xingchan, and Shi Changging, Passive Microwave Rediometry for Soil Moisture and Marine oil Spill, Proceedings of the second Asian Conference on Remote Sensing pp G3.1—10. Beijing, China, 1981.
- [21] Liu Jiyuan, Teng Xuyan, Xiao Jinkai, Application of Shuttle Imaging Radar Date for Land Use Investigations, Remote Sensing of Enviroment Vol. 19 No. 3 pp. 291—301. 1986.

Dielectric Properties of Minerals and Rocks and Their Application in Remote Sensing

Xiao Jinkai

(Guiyang Institute of Geochemistry, Academia Sinica)

Abstract

On the basis of laboratory measured results, dielectric properties of various types of minerals and rocks were summarized in this paper. At microwave band the difference in ϵ' of minerals may be as great as two orders of magnitude and ϵ'' , 4 orders of magnitude. At low frequency the difference is more obvious. Sulfides show most remarkable variations in ϵ' and ϵ'' , followed by oxides. In igneous rocks, either intrusive or extrusive, ϵ' and ϵ'' tend to decrease gradually from ultrabasic-basic to intermediate-acidic rocks. Variations in ϵ' and ϵ'' of metamorphic and sedimentary rocks are more complicated than those of igneous rocks.

Experiments have shown that the structure water in a mineral there is little effect on its dielectric constant. The correlation between ϵ' and absorbed water is represented by $\epsilon' = \epsilon_0^p \epsilon_w'^{1-p}$. Differences in ion type, ion radius, ion polarizability may cause regular variations in ϵ' and ϵ'' . Crystal structure orientation, coordinate-number of atoms, bond type, density, metamorphic degree, and geological occurrence of a mineral also have great influence on its dielectric properties.

Application of dielectric constants to microwave remote sensing were analyzed. There exists an evident correlativity between the brightness temperature of objects and the greyscale value of the SIR-A image and the complex dielectric constants of rocks or soils (real part ϵ' and imaginary ϵ'').