干燥岩石的相对介电常数研究

王湘云④ 郭华东 王 超 陈培荣④ 施央申④

(中国科学院遥感应用研究所遥感信息科学开放实验室, 北京 100101;
④南京大学地球科学系, 南京 210093)

摘要 报道了197块岩石标本的相对介电常数的测量结果, 揭示了相对介电常数随微波频率的变化规律. 讨论了相对介电常数与岩石类型、密度、结构和化学成分的关系. 获得下列结论: ( ) 在0.5~18 GHz频率段, 相对介电常数与微波频率有关; ( ) 不同岩石类型之间的相对介电常数的实部变化较大, 其变化趋势是: 从超基性岩、基性岩→中性岩→酸性岩→沉积岩, 相对介电常数的实部逐渐降低, 变化范围在9~5之间; ( ) 相对介电常数实部与岩石的密度存在显著的正相关关系; ( ) 相对介电常数与岩石的结构有关, 岩石的颗粒越细相对介电常数越大; ( ) 相对介电常数的实部与岩石化学成分的关系比较复杂, 相对介电常数的虚部仅与MnO和烧失量呈显著相关关系.

关键词 干燥岩石 相对介电常数 微波遥感 电磁波传输

一种物质的相对介电常数定义为: $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$, 式中 ε' 是物质的介电常数(相对于自由空间的介电常数), ε'' 是物质的介电损耗因子(也是相对于自由空间的介电常数). 自然界中岩石矿物的相对介电常数的变化很大, 国内、外对介电常数的研究具有浓厚的兴趣. 文献[1~4]对低频介电常数作过不少报道. 文献[5~17]报道了微波介电常数的很多资料. 肖金凯等人[18]利用谐振腔微扰法对100多块天然矿物和岩石进行了测量, 测量结果表明: 在火山岩中, 从基性、超基性到中性、酸性岩, ε' 和 ε'' 都是逐渐降低的. 用谐振腔微扰法测量时对样品的要求是粉末状, 样品粉碎以后, 改变了岩石的原有结构, 在某种意义上限制了对样品进行全面分析, 如, 岩石的密度和结构与相对介电常数的关系. Ulaby等人[19]对80多块岩石标本进行了微波介电常数的测定, 测量结果表明: 介电常数的实部与频率(0.5~18 GHz)无关, 与岩石的密度有关, 与岩石的化学成分有关; 介电常数的虚部, 在所测量的岩石中, 在所有的频率范围内都远小于介电常数的实部.

本文的研究是在国、内外研究者对岩石矿物相对介电常数研究的基础上进行的, 收集了197块岩石标本, 涉及到三大岩类, 7种岩性-超基性岩、基性岩、中性岩、中性偏碱和碱性岩、沉积岩、变质岩. 作者对这些岩石标本做了大量的样品处理、分析测试和数据处理工作. 包括磨制光片197块, 测量了197块岩石标本的密度, 对其中的102块标本做了化学分析并精确测量了197块岩石标本的相对介电常数; 研究了岩石矿物相对介电常数的分布特征、相对介电常数与岩石的密度、化学成分和结构的关系.

1 介电测量技术和测量前样品的准备及测量质量

(1) 介电测量技术. 报道的介电常数数据是用同轴探头终端对待测物质的复反射系数、采用三级平衡电路模型[19]进行测量的, 这种模型能够在0.5~18 GHz整个频率范围测量任何岩石标本的介电常数.

(2) 介电常数测量时样品的准备. 当用同轴探头测量固体物质的介电常数时, 必须满足

下述 2 个条件: (　) 样品的厚度必须致少等于探头的直径, 对于 0. 14 in (1 in= 0. 0254 m) 的探头, 当样品的厚度大于 4 mm 时, 就能满足这一条件[19], 作者所测量的 197 块岩石标本, 其厚度范围在 0. 5~ 3 cm 之间, 因此, 所用标本满足介电常数测量的条件; (　) 样品与探头的接触表面必须非常光滑, 以便保证良好的电接触. 作者对样品的处理是: 将岩矿石标本加工成比较规则的 6 面体, 多数样品一面磨光(表面十分光滑) , 对于特殊样品两面磨光, 其光洁度达到介电常数测量时的条件. 为了避免样品表面可能存在水分子对介电测量时的影响, 在进行介电常数测量之前, 把样品放入烘箱中在 105 ℃的温度下干燥 15 min, 然后再进行测量.

(3) 测量质量评估. 测量精度是通过与测量标准物质的介电常数进行比较来评估的. 测量过程中, 作者分别对有机玻璃和饮用水进行过反复测量, 测量结果与国际上公认的有机玻璃标准值 $\varepsilon = (2.55 - j0.0165)$ 相近, 实测值为: 有机玻璃 $\varepsilon = (2.58 - j\ 0.032)$; 水的介电常数是随着频率而变化的, 实部(ε') 的变化为当频率从 0~ 18 GHz 时, ε' 从 80~ 42 GHz, ε'' 从 2~ 36 GHz, 与公认的结果一致.

2　岩石矿物的介电频谱特征

2.1　不同类型岩石的介电频谱特征

本文涉及到的岩石标本 197 块. 根据岩石的成因可分为: 超基性岩、基性岩、中性岩、酸性岩、中性偏碱碱性岩、沉积岩和变质岩等 7 类. 图 1 是这 7 类岩性的介电频谱分布曲线. 这些曲线的共同特征是: (　) 与频率有关, 当频率小于5 GHz 时, 介电频谱曲线的变化幅度较大, 当频率大于 5 GHz时, 介电频谱曲线的变化幅度较小, 在实际应用中可以认为是不变的; (　) 不同类型的岩石, 其介电常数的实部变化较大, 其变化趋势是从超基性→基性岩→中性岩→酸性岩→沉积岩, 介电常数逐渐降低, 变化范围在 9~ 5 之间, 变质岩介电常数的变化取决于原岩. 介电常数的虚部变化较小, 变化范围在 0. 1~ 0. 5 之间.

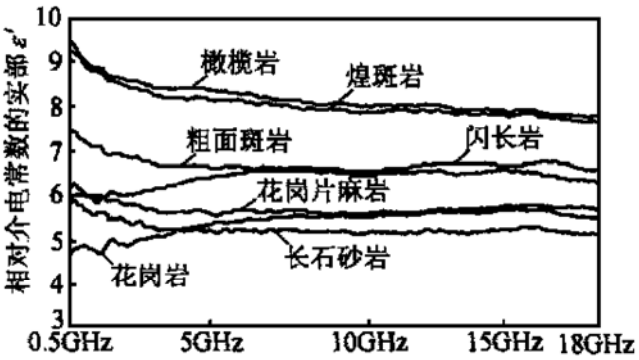

图 1　岩石的介电频谱分布曲线



图 2　不同地区、同类岩石的介电频谱分布曲线
1——江西赣南的混合岩, 2——辽宁张岭的混合岩

2.2　矿物的介电频谱特征

在测量过程中发现, 当岩石标本中的矿物分布均匀时, 在不同位置上的测量结果基本上是相同的. 图 2 展示的是: 产在不同地区的同种岩石(曲线 1 是产自江西赣南的混合岩, 曲线 2 是产自辽宁张岭的混合岩) , 由于它们的物质成分和结构基本相同, 因此, 具有基本相同的介电常数.

但是, 当岩石标本中的物质组成和分布极不均匀时, 在不同位置上的测量结果相差很大. 图 3 展示了同一标本中不同矿物的介电常数, 曲线 1 是绢云母的介电频谱分布曲线, 曲线 2 是炭质物质的介电频谱分布曲线, 其介电常数

的极差为 5.5 左右. 这些数值的差别表明, 介电常数与岩石标本中的物质组成和分布有密切的关系.

2.3 相对介电常数对岩石矿物结构的依赖关系

图 4 是具有不同颗粒(曲线 1 细粒, 曲线 2 中粒, 曲线 3 粗粒) 、同类岩石的介电频谱分布曲线, 从图中可以看出, 岩石颗粒愈细, 其介电常数值愈高, 说明介电常数依赖于岩石矿物的结构.

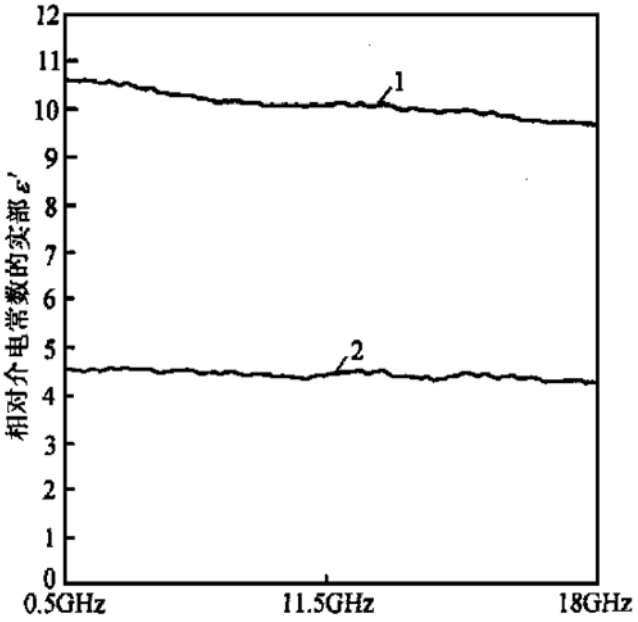

图 3 不同矿物的介电频谱分布曲线
1——绢云母, 2——碳质物质

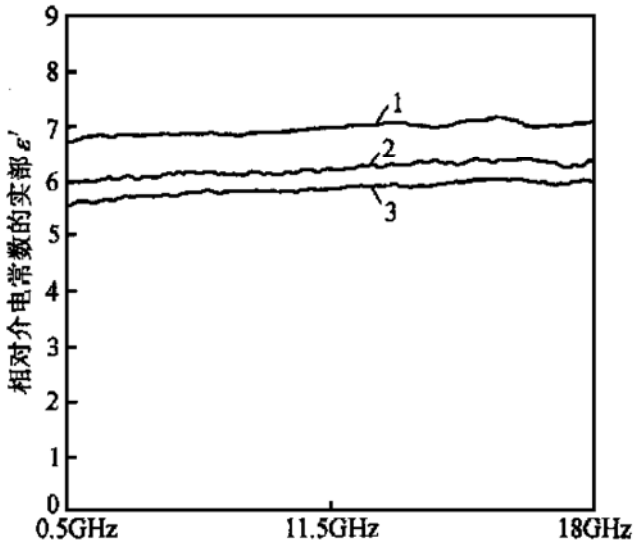

图 4 不同密度、同类岩石的介电频谱分布曲线
1——细粒, 2——中粒, 3——粗粒

3 相对介电常数数据分析

3.1 ε' 对密度和化学成分的依赖关系

(1) ε' 对密度的依赖关系. 根据前人的研究, 岩石的密度(ρ_b) 是支配 ε' 幅度的最重要的参数. 图 5 是 181 块岩石标本 ε' 与密度的一元线性回归曲线及散点图. 从图中可以看出, 岩石的介电常数与岩石的密度之间呈显著的正相关关系, 其相关系数为 0.56(信度为 95%) .

单个岩类的 ε' 随密度的变化, 除酸性岩类与密度不相关以外, 其它 4 类岩性的 ε' 与其密度显著相关, 按相关系数大小的降序排列为: 变质岩类($R=0.72$) → 基性岩类($R=0.70$) → 沉积岩类 → ($R=0.67$) → 中性岩类($R=0.56$) , 表明变质岩、基性岩、沉积岩和中性岩的 ε' 对密度具有较强的敏感性. 因此, 岩石中 ε' 变化量的 50%～70% 可能属于岩石样品的密度.

(2) ε' 对化学成分的依赖关系. 文中岩石样品的化学成分是通过化学分析方法获取的, 岩石样品的化学成分系由南京大学地球科学系(82 个) 和北京大学地质系(20 个) 分析的. 其单个矿物的体积(V_i) 是不确定的, 它仅提供整个物质中不同氧化物的质量百分数 M_i, 化学分析得到 11 个氧化物加上样品的烧失量. 为了获得对矿物成分、晶体大小和结构在确定 ε' 中的作用, 作者首先把所有的岩石看成单个类别进行多元线性回归分析, 然后又按成因进一步细分成基性岩、中性岩、酸性岩、沉积岩和变质岩等 5 类岩性进行分析. 下面分别进行讨论:

1) 全部岩石样品 ε' 对化学成分的多元线性回归分析结果. 表 1 是全部岩石样品(96) 的多

元线性回归分析相关矩阵表. 表中数据表明: 岩石样品介电常数的实部 ε' 与 8 个氧化物和烧失量呈弱正相关关系, 按相关系数大小的降序排列为: CaO($R=0.44$) $\rightarrow$ $\begin{matrix}TiO_2\\MnO\end{matrix}$ ($R=0.41$) $\rightarrow$ FeO ($R=0.39$) $\rightarrow$ 烧失量($R=0.36$) $\rightarrow$ MgO($R=0.2$) $\rightarrow$ Fe_2O_3($R=0.24$) $\rightarrow$ Na_2O($R=0.16$) $\rightarrow$ P_2O_5($R=0.13$) $\rightarrow$ Al_2O_3($R=0.12$) 与 SiO_2 和 K_2O 呈负相关关系, 按相关显著性大小降序排列为 SiO_2 ($R=-0.66$) $\rightarrow$ K_2O($R=-0.41$) .

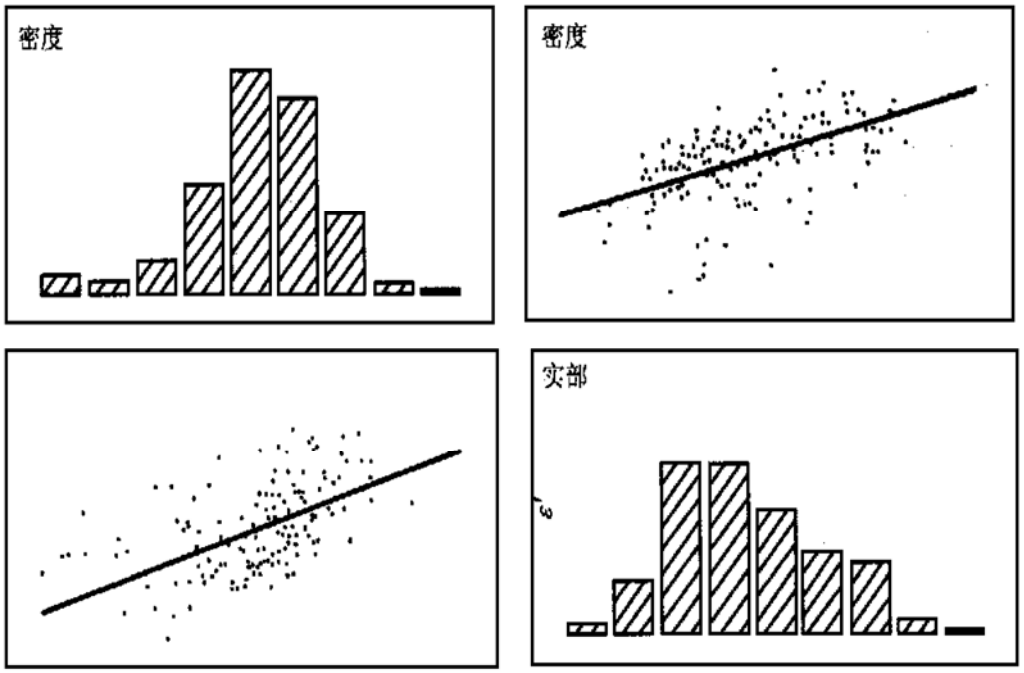

图 5　岩石样品的 ε与其密度的一元线性回归分析散点图

表 1　岩石样品的 ε' 与化学成分的多元线性回归分析相关矩阵表

变量	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI	ε'
SiO_2	1.00												
TiO_2	-0.39	1.00											
Al_2O_3	0.06	0.40	1.00										
Fe_2O_3	-0.37	0.36	-0.14	1.00									
FeO	-0.33	0.56	0.04	0.08	1.00								
MnO	-0.43	0.41	-0.02	0.39	0.51	1.00							
MgO	-0.51	-0.04	-0.44	0.33	0.24	0.19	1.00						
CaO	-0.70	0.13	-0.34	0.07	0.12	0.27	0.07	1.00					
Na_2O	-0.08	0.07	0.30	0.01	-0.08	0.17	-0.27	-0.07	1.00				
K_2O	-0.40	-0.23	0.18	-0.05	-0.40	-0.19	-0.43	-0.32	0.03	1.00			
P_2O_5	-0.25	0.49	0.04	0.47	-0.01	0.29	-0.12	0.25	0.21	0.15	1.00		
LOI	-0.73	-0.01	-0.29	0.03	-0.09	0.05	0.28	0.76	-0.35	-0.37	0.01	1.00	
ε'	-0.66	0.41	0.12	0.24	0.39	0.41	0.27	-0.44	0.06	-0.41	0.13	0.36	1.00

2) 不同成因岩类样品的 ε' 与化学成分的多元线性回归分析结果. 对于基性岩样品: ε' 对化学成分的相对重要性以降序表示为:

$FeO(R=0.41) \rightarrow \begin{matrix}Fe_2O_3\\K_2O\end{matrix} (R=-0.34) \rightarrow P_2O_5(R=-0.33) \rightarrow SiO_2(R=-0.20)$;

对于中性岩样品: ε' 对化学成分的相对重要性以降序表示为:

$CaO(R=0.69) \rightarrow MgO(R=0.64) \rightarrow TiO_2(R=0.60) \rightarrow SiO_2(R=0.58) \rightarrow MnO(R=0.5) \rightarrow K_2O(R=-0.49) \rightarrow \begin{matrix}Fe_2O_3\\P_2O_5\end{matrix} (R=0.43) \rightarrow FeO(R=0.27)$;

对于酸性岩样品: ε' 对化学成分的相对重要性以降序表示为:

$Fe_2O_3(R=0.73) \rightarrow MnO(R=0.67) \rightarrow Na_2O(R=0.58) \rightarrow K_2O(R=-0.57) \rightarrow SiO_2(R=-0.51) \rightarrow CaO(R=0.48) \rightarrow$ 烧失量$(R=0.47) \rightarrow Al_2O_3(R=-0.46) \rightarrow FeO(R=0.39) \rightarrow TiO_2(R=0.31)$;

对于沉积岩样品: ε' 对化学成分的相对重要性以降序表示为:

$SiO_2(R=-0.91) \rightarrow$ 烧失量$(R=0.89) \rightarrow CaO(R=0.73) \rightarrow P_2O_5(R=-0.49) \rightarrow K_2O(R=-0.44) \rightarrow Fe_2O_3(R=-0.40) \rightarrow MgO(R=0.39) \rightarrow TiO_2(R=0.32)$;

对于变质岩样品: ε' 对化学成分的相对重要性以降序表示为:

$SiO_2(R=-0.36) \rightarrow CaO(R=0.35) \rightarrow K_2O(R=-0.34) \rightarrow Al_2O_3(R=0.29) \rightarrow Na_2O(R=0.27) \rightarrow TiO_2(R=0.24)$.

以上分析结果表明: 不同成因类型岩石的 ε' 对化学成分的依赖关系有很大的差异; 基性岩和变质岩的 ε' 对化学成分只存在弱相关关系; 而中性岩、酸性岩和沉积岩的 ε' 对化学成分存在显著的相关关系.

3.2　ε'' 对密度和化学成分的依赖关系

(1) ε'' 对密度的依赖关系. 岩石样品的 ε'' 的分布范围为 0.08~ 0.8, 个别样品达到 1.02. 与 ε' 相同, ε'' 随着频率的增加略有起伏, 但总的趋势与频率无关.

图 6 是 181 块岩石样品的 ε'' 与密度的一元线性回归分析曲线图, 从图中可以看出, ε'' 与岩

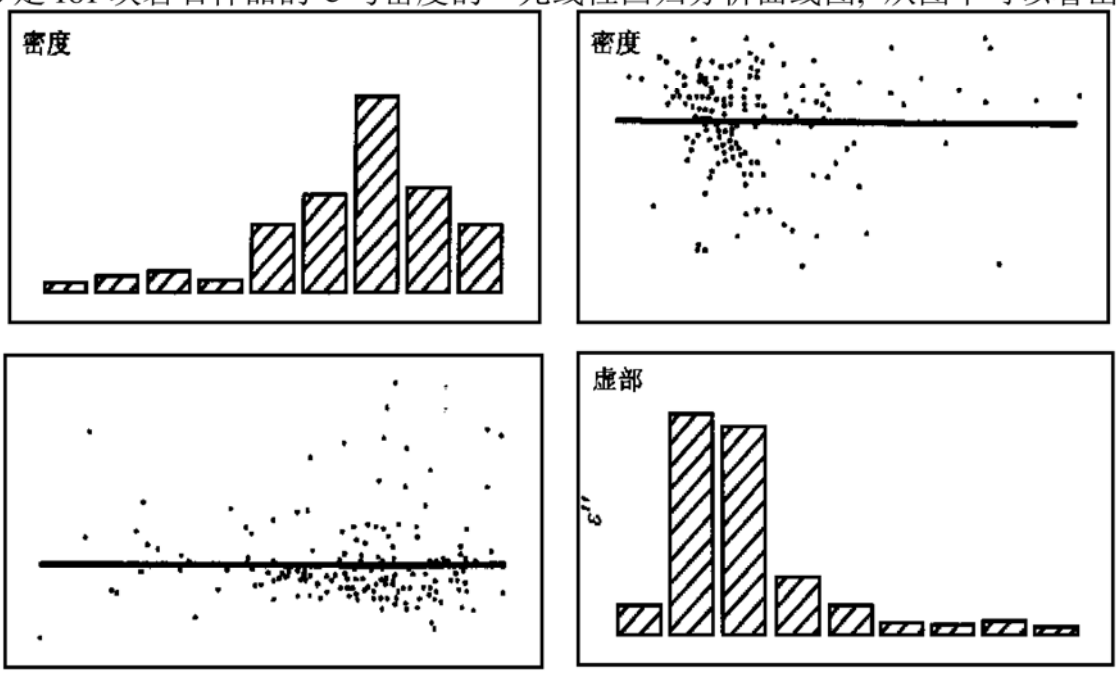

图 6　岩石样品的 ε'' 与其密度的一元线性回归分析散点图

石的密度无关, 相关系数仅为– 0.01, 这一结论与前人的研究是一致的. 因此没有必要象 ε' 那样按岩石的成因分类进行研究.

(2) ε''对岩石化学成分的依赖关系. 1) 全部岩石样品的 ε''对化学成分的依赖关系. 表 2 是 96 块岩石样品的 ε''与岩石化学成分的多元线性回归分析相关系数矩阵, 从表中数据可以看出, 岩石的 ε''仅与 MgO, Fe_2O_3, SiO_2 和烧失量等几个成分呈弱相关关系, 与其他元素几乎不相关, 其相对重要性按降序排列为:

$MgO(R=0.38) \rightarrow Fe_2O_3(R=0.31) \rightarrow SiO_2(R=-0.23) \rightarrow LOI(R=0.21)$.

表 2　岩石样品的 ε''与化学成分的多元回归分析相关矩阵表

变量	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI	ε'
SiO_2	1.00												
TiO_2	– 0.39	1.00											
Al_2O_3	0.06	0.40	1.00										
Fe_2O_3	– 0.37	0.36	– 0.14	1.00									
FeO	– 0.33	0.56	0.04	0.08	1.00								
MnO	– 0.43	0.41	– 0.02	0.39	0.51	1.00							
MgO	– 0.51	– 0.04	– 0.44	0.33	0.24	0.19	1.00						
CaO	– 0.70	0.13	– 0.34	0.07	0.12	0.27	0.07	1.00					
Na_2O	0.08	0.07	0.30	0.01	– 0.08	0.17	– 0.27	– 0.07	1.00				
K_2O	0.40	– 0.23	0.18	– 0.05	– 0.40	– 0.19	– 0.43	– 0.32	0.03	1.00			
P_2O_5	– 0.25	0.49	0.04	0.47	– 0.01	0.29	– 0.12	0.25	0.21	0.15	1.00		
LOI	– 0.73	– 0.01	– 0.29	0.03	– 0.09	0.05	0.28	0.76	– 0.35	– 0.37	0.01	1.00	
ε''	– 0.23	0.09	– 0.08	0.31	– 0.09	0.03	0.38	– 0.06	– 0.11	– 0.11	0.13	0.21	1.00

2) 不同成因岩类样品的 ε''对化学成分的依赖关系. 对于基性岩样品. ε''对化学成分的相对重要性按降序排列为:

$Fe_2O_3(R=0.44) \rightarrow FeO(R=-0.38) \rightarrow MgO(R=0.35) \rightarrow Al_2O_3(R=-0.27) \rightarrow CaO(R=-0.25)$;

对于中性岩样品: ε''对化学成分的相对重要性按降序排列为:

$LOI(R=0.56) \rightarrow SiO_2(R=-0.45) \rightarrow MnO(R=0.33) \rightarrow Fe_2O_3(R=0.31) \rightarrow Al_2O_3(R=0.24)$;

对于酸性岩样品: ε''对化学成分的相对重要性按降序排列为:

$LOI(R=0.55) \rightarrow Fe_2O_3(R=0.47) \rightarrow P_2O_5(R=-0.36) \rightarrow Al_2O_3(R=-0.21)$;

对于沉积岩样品: ε''对化学成分的相对重要性按降序排列为:

$MnO(R=0.54) \rightarrow MgO(R=0.32) \rightarrow TiO_2(R=0.27) \rightarrow CaO(R=0.20) \rightarrow FeO(R=0.25) \rightarrow Al_2O_3(R=0.21)$;

对于变质岩类样品: ε''对化学成分的相对重要性按降序排列为:

$\begin{matrix} Na_2O \\ P_2O_5 \end{matrix}(R=-0.32) \rightarrow MgO(R=0.26) \rightarrow TiO_2(R=-0.21)$.

以上分析结果表明, 不同成因类型岩石样品的 ε''对化学成分的依赖关系有较大的差异, 总的趋势是: ε''与烧失量(LOI), MnO 呈显著相关关系; 与 Fe_2O_3, FeO, MgO 和 P_2O_5 呈弱相关

关系. 当然, LOI 和 MnO 一般是介电损耗因子传导成分中最重要的因素. 人们认为, LOI 主要是由样品的结构水所决定的.

4 结论

(1) 岩石类型不同, 其介电常数具有很大的差异, 其变化趋势是: 从超基性、基性岩→中性岩(含中性偏碱性岩)→酸性岩→沉积岩, 介电常数逐渐降低, 变化范围在 9~5 之间, 变质岩介电常数的变化取决于原岩. 这一结论为利用介电特性进行岩石分类提供了依据.

(2) 岩石的结构不同, 其介电常数存在差异. 当岩石标本中的物质组成和分布均匀时, 在不同位置上的测量结果基本上是相同的, 当岩石标本中的物质组成和分布极不均匀时, 在不同位置上测量的结果相差很大; 具有不同颗粒结构的同类岩石, 其介电常数存在一定的差异, 岩石颗粒愈细, 其介电常数值愈高.

(3) 岩石的密度(ρ)是支配相对介电常数实部(ε')的最重要的参数. 岩石的介电常数与其密度之间存在显著的正相关关系. 单个岩类的 ε' 随密度的变化, 除酸性岩类与密度不相关以外, 其他岩类的 ε' 与密度呈显著正相关关系. 岩石介电常数的虚部(ε'')与岩石的密度不相关.

(4) 对岩石相对介电常数实部与其化学成分的多元线性回归分析的研究结果表明: ( ) 当把全部岩石看成一类进行分析时, 岩石相对介电常数与化学成分之间存在一定的相关关系, 总的规律是与金属氧化物和烧失量呈正相关关系, 与 SiO_2 和 K_2O 呈负相关关系; ( ) 当把全部岩石按成因分类进行研究时, 相对介电常数实部(ε')与化学成分的相关程度有很大变化, 不同成因岩石类型的 ε' 对化学成分的依赖关系表现为, 基性岩和变质岩的 ε' 对化学成分只存在弱相关关系, 而中性岩、酸性岩和沉积岩的 ε' 对化学成分存在显著的相关关系, 总的规律仍然是: ε' 与金属氧化物和烧失量呈正相关关系, 而与 SiO_2 和 K_2O 呈负相关关系, 特别是沉积岩样品中的 ε' 与 SiO_2 的相关系数达到 $R = -0.91$.

(5) 对岩石相对介电常数虚部(ε'')与化学成分的多元线性回归分析的研究结果表明: ( ) 当把全部岩石看成一类进行研究时, 岩石的 ε'' 仅与 MgO, Fe_2O_3, SiO_2 和烧失量等几个成分呈弱相关关系, 与其他元素几乎不相关; ( ) 当把全部岩石按成因分类进行研究时, 不同成因类型岩石样品的 ε'' 对化学成分的依赖关系有较大的差异, 总的趋势是: ε'' 与烧失量(LOI)、MnO 呈显著相关关系; 与 Fe_2O_3, FeOMgO 和 P_2O_5 呈弱相关关系.

参 考 文 献

1 Howell B F, Cicastro P H. Dielectric behavior of rocks and minerals. The American Mineralogist, 1961, 46(3): 269~288

2 Keller G V. Electrical Properties of Rocks and Minerals In: Clack S P Jy, ed. Handbook of Physical Constant-Revised Edition. N, Y: Published by the Society, 1996. 553~577

3 Weast T E. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 59th Edition. CRC Press lnc, 1978~1979

4 Olhoeft G R. Electrical Properties of Rocks In Physical Properties of Rocks and Minerals. N Y: McGraw-Hill Book Co, 1981. 257~330

5 Mohamed A, EL-Rayes, Ulaby F T. Microwave dielectric spectrum of vegetation-Part. iv. experimental observations. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1987, GE-25(5): 541~549

6 Ulaby F T, Mohamed A, EL-Rays. Microwave dielectric spectrum of vegetation-part. ㈥ dual-dispersion model. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1987, GE-25(5): 550~557

4 类超 Cartan 域的 Bergman 核函数

殷慰萍

(首都师范大学数学系, 北京 100037. e-mail: wyin@mailhost.cnu.edu.cn)

摘要 显式给出了 4 类超 Cartan 域的 Bergman 核函数及其全纯自同构群.

关键词 **Cartan 域** **Bergman 核函数** **全纯自同构群**

Bergman 核函数在多复变函数论中扮演一个很重要的角色. 但是能显式求出 Bergman 核函数的域并不多. 华罗庚[1]显式给出了 4 类 Cartan 域(国内称为典型域, 后来为区别于非对称齐性域, 又称为对称典型域) 的 Bergman 核, Cauchy 核和 Poisson 核. 从而建立了 Cartan 域上的多复变函数论的基本理论. 殷慰萍[2]对 2 个例外的 Cartan 域也求出了它们的上述 3 种核. Cartan 域都是有界对称域(也一定是齐性域). 对于有界非对称齐性域, 若其全纯自同构可递群已知, 则可利用华罗庚方法得到其 Bergman 核函数的显表达式[3,4]. 除了这些有界齐性域外, 能求出其 Bergman 核函数显表达式的还有蛋型域 $E(p_1, \cdots, p_n)$. 它由不等式 $|Z_1|^{2/p_1}+\cdots+|Z_n|^{2/p_n}<1$ 所界定. 首先由 Bergman[5, p. 82] 给出 $E(p_1, 1)$ 的 Bergman 核的显表达式(其计算时限定 p_1 为正整数, 但其方法对 p_1 为任何正实数都适用). $E(1, \cdots, 1, p_n)$ 的 Bergman 核由

7 Ulaby F T, Jedlicka R P. Microwave dielectric properties of plant materials. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1984, GE-22(4): 406~414

8 Martti T, Hallikainen F T, UlabyF T, et al. Microwave dielectric behavior of wet soil-part. iv. empirical models and experimental observations. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, GE-23(1): 25~34

9 Dobson M C, Ulaby F T. Microwave dielectric behavior of wet soil-part. ㈦ dielectric mixing models. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1985, GE-23(1): 35~46

10 Paul De loor G. The dielectric properties of wet materials. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1983, GE-21(3): 364~369

11 Wang J R, Schmugge T J. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content. IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, 1980, GE-18(4): 288~295

12 Jackson T J, O'neill P E. Salinity effects on the microwave emission of soils. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 1987, GE-25(2): 214~220

13 Sreenivas K, VenKatartnam L. Dielectric properties of salt-affected soils. INT J Remote Sensing, 1995, 16(4): 641~649

14 Calvet J C. Microwave dielectric properties of a silt-loamat high frequencies. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(3): 634~642

15 赖兆生, 肖金凯. 矿物岩石微波频率下的介电常数测定. 见: 矿物物理和矿物材料研究(论文集). 北京: 科学出版社, 1982

16 肖金凯. 矿物的成分和结构对其介电常数的影响. 矿物学报. 1985, 5(4): 331~337

17 肖金凯. 矿物和岩石的介电性质研究及其遥感意义. 环境遥感. 1988, 3(2): 135~146

18 肖金凯. 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, 1983, 28(17): 1055~1057

19 Ulaby F T. Microwave dielectric properties of dry rocks. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(3): 325~335

(1998-07-06 收稿, 1998-11-24 收修改稿)