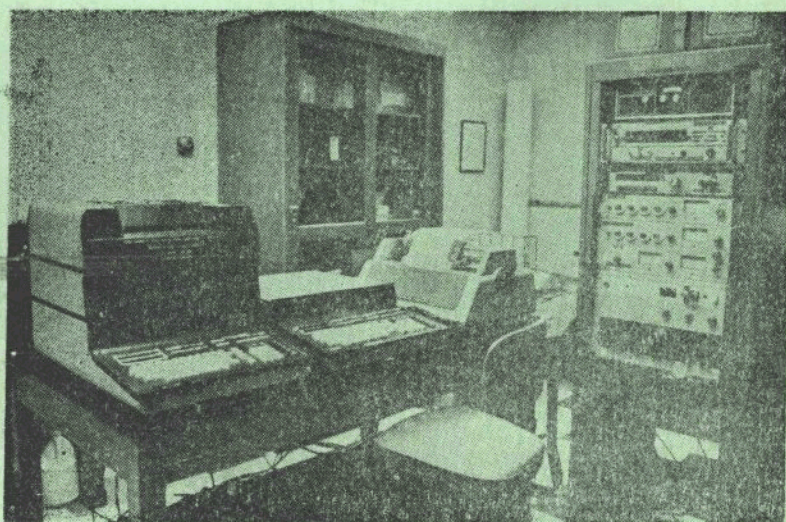


岩矿物性译文集



地质部物探研究所编

1981年

前 言

近年来国外许多地质——地球物理部门积极开展岩矿物性研究工作。这种研究工作已经引起了我国地球物理工作者的重视。我们情报室和物性室对此项工作进行了专题调研，对美国、加拿大、苏联、日本和德国的物性工作进行了初步了解。认为在物性各种参数的研究中首先应考虑的是电参数的研究。其他参数研究也很重要。本译文集共收集译文 11 篇，基本上反应出世界先进水平与发展趋势，可供广大地质——地球物理工作者开展物性工作时参考。

本译文集中的《岩石物理实验室初步报告》较详细地介绍了美国丹佛实验室的各种先进测量系统和测量方法技术。着重于四个领域：电的、磁的、波谱的和结构的研究。在《岩石的电性》、《非线性电性》、《对电勘探方法以及对实验室研究和开发的新要求》、《电磁传播的临界频率及其效应》、《表示电和电磁数据的建议标准》、《用激电方法区分矿物的频率范围》等专题性文章中，都各自侧重于电性研究的某一方面进行了详细的介绍。

《岩石参数》一文系统地介绍了德国电参数的研究方法和各种方法所配备的仪器。其中将矿泉水对电性的影响、胶结因子和构造因子等都作了介绍。同时对于借助于人造模型研究含矿岩石对频率的依赖关系的工作进行了介绍。

《利用岩石电容率和电阻率研究岩石构造的不均匀性》和《研究介质的电阻率和电容率进行地质填图》等译文中，介绍了苏联利用电性资料解决地质问题、岩石成因问题、立体填图和矿产普查问题，可供区域物性工作者参考。

日文的《岩石电性》一文中就介电常数和介电性质，特别是交流电场的介电性质和导电率作了论述。其中对含水率与频率对电性质影响以及复电容率与复电阻率的关系等许多问题作了详细的介绍。

本译文集由地质部物探研究所徐玉贤编。吴中美、胡文惠承担了图件清绘工作。由于编者水平有限，错误难免，请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

岩石物理实验室初步报告	(1)
引言	(1)
电性	(2)
磁性	(32)
波谱特性	(53)
结构特性	(69)
岩石参数	(78)
1. 问题范围介绍	(78)
2. 矿泉水的电性	(79)
3. 岩石的介电常数	(99)
4. 岩石的磁化率	(105)
5. 岩石的电导率	(106)
6. 构造因子	(111)
7. 岩石的孔隙度	(115)
8. 岩石的扭曲度	(117)
9. 胶结因子	(122)
10. 岩石的渗透率	(126)
11. 根据参数的分类	(127)
12. 借助人造模型研究含矿岩石的频率关系的复电导率	(128)
岩石的电性	(150)
非线性电性	(162)
对电勘探方法以及对实验室研究和开发的新要求	(172)
电磁传播的临界频率及其效应	(177)
表示电和电磁数据的建议标准	(184)
用激电方法区分矿物的频率范围	(192)
利用岩石的电容率和电阻率研究岩石构造的不均匀性	(196)
研究介质的电阻率和电容率进行地质填图	(202)
岩石的电性	(206)

岩石物理实验室初步报告

[美] Graham R. Hunt
Gordon R. Johnson
Gary R. Olhoeft
Donald E. Watson
Kenneth Watson

引 言

Kenneth Watson

现代国家对于能源、矿物资源以及环境保护的要求已集中注意力于了解地质体系所需要的新方法发展和解释推断技术。地球物理勘察在取得这些资料中起着重要的作用，特别是在地表的深处提供三维的数据。

自然状态和就地环境下地质物质的物理性质的知识是物探的地质解释、发展新仪器以及分析方案的基础。这些解释推断经常要求综合很多地质和地球物理的观测。最佳的使用这些数据要求清楚地了解地球物理方法的适用性及其极限。

在此报告中我们提出岩石物理实验室物性测量在四个领域中的研究：电的、磁的、波谱的和结构的。由于我们对就地的物性感兴趣，我们必须使实验室具有模拟就地条件的能力，从而使我们能够发现支配这些性质的机制基础认识。

在野外使用井中的，地表的，航空的，宇宙飞船上的仪器所取得的资料，能够按照在实验室中模拟自然环境条件下的试验结果所发现的模型来分析。模拟自然环境的重要性可以用那些决定物性表征的测验来最好地说明。电性的测量均受到所含水的状态与纯度这些效应的控制；可见光波谱测量受到所含各种形态的铁的控制；以及近红外，受到常常像水这样的羟离子所控制；而磁性测量受到在矿物中铁的氧化物的各种物相的控制。因此，用地球物理方法测量这些物性反映了环境参数和条件的效应，它们加于地质物质的作用甚于物质自身的特征性质。

另外，这些支配物性表征的工作机制 (operating mechanisms) 的研究提供洞察物探技术和数据分析方案。对某些地质物质非线性电性表征的研究提出了采用井中就地测量来推断地球化学参量的可能性。波谱测量指出地表蚀变的识别可以用在羟范围接近于 $2.2\mu\text{m}$ 的所获数据来明显地增强。机制研究的一个重要收益是就地有关的现象当它们影响区域数据解释时，比起把每一标本看作是地质点上的直接模拟的情况要更加清楚了。

此报告综述了在实验室中为物理原理所支配的物性表征的研究，讨论了实验室的能力以

及描述了在1977年所完成的计划。此报告愿提供与岩石物理实验室的贡献有关的消息并引起兴趣，使地球物理在美国地质调查所的计划中能有效的使用。

电 性

Gary Olhoelt

在前四年，岩石物理实验室已获得了综合研究岩矿电性的设备。现时的能力可以频率（ 10^{-5} 到 10^{10} Hz），电流密度及电场，温度（100k 到 1900k），压力（ 10^{-9} pa 真空度到 10^{+9} pa 静力液压），水含量和矿藏或其他可变量的复电化学（Complex electrochemistry）以及它的组合为函数的复电阻率和复介电电容率的测量。可测物质的电阻率范围为真空中的月球土壤（ $10^{15} \Omega \cdot m$ ）到块状硫化物（ $10^{-7} \Omega \cdot m$ ）。在实验室环境模拟的范围可以从月球和火星表面到地球深部40公里以及北极冻原的永久冻土。这些环境模拟和其他参量的变化，一样能够完成电性机制的识别，从而产生岩石的物理模式来用于解释由电法或电磁法物探仪器所获得的数据。

对 电 性 的 引 言

在实验室或野外电性都同样地容易测量，并且电性在自然界中广泛地变化着。电阻率的大小范围约覆盖29个阶次，在任何物性中呈现为仅次于粘滞度的变化范围（粘滞度的变化大小达40个阶次，但是难以远距离的测量）。应用电性的很多技术（图1）可远距离地或间接的测量，例如土壤中的水含量，矿床的范围，行星或月球表面上的地貌，软流层顶的深度或者永久冻土带底部的深度。进一步了解可看参考文献 Wait (1959), Parknomenko (1967), Keller (1967), Shuey (1975), Keller and Frischknecht (1966), Olhoelt (1975, 1976), 和 Sumner (1976)。

电性的术语在目前是有点容易变化的，但都起始于麦克斯韦方程(Stratton, 1941; Ward, 1967)并且都为结构单一的物质，它没有纯电荷分布，而且是均匀的，各向同性的和线性的，构成的关系是

$$\begin{aligned} D &= \epsilon E \\ B &= \mu H \\ \text{和} \quad J &= \sigma E \end{aligned} \tag{1}$$

式中 ϵ , μ 和 σ 分别是电容率 (F/m)，磁化率 (H/m) 和电导率 (mho/m)，相应的 E 是电场 (V/m)， D 是电位移 (C/m^2)， H 是磁场 (At/m)， B 是磁感应 (Wb/m^2)，以及 J 是电流密度 (A/m^2)。麦克斯韦方程的解给出所有的量，它按照传播系数 ($j k$) 的形式描述电磁波的传播

$$\text{其中} \quad \kappa^2 = \mu \omega (\omega \epsilon \pm j \sigma) \tag{2}$$

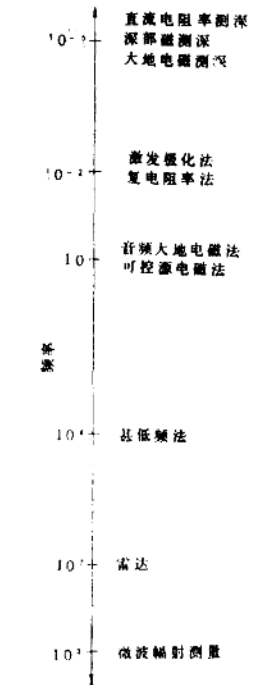


图1 一般的电和电磁地球物理方法，其范围跨越了14个级次的频率数量级。

$\pm j$ 的符号是由 $-j\omega t$ 或 $+j\omega t$ 的方向决定的, ω 是圆频率, 以及 t 是时间。

在频率低于几十兆赫 (10^8 Hz) 时, 对于岩石和一般天然物质假设为没有纯电荷分布以及电性上均匀是能够成立的, 在那里物质中的电磁波长 (1 km) 比起非均匀性来是够长的了。任何各向异性可用电容率磁化率或者电导率张量来表示, 并且任何电压—电流线性的偏差可以使这些量依赖于场来包括 (Sluyters Rehbach and Sluyters, 1970)。

在传播系数中以下的量可以是复数量 (Miles 和其他人, 1957; Fuller and Ward, 1970; 和其他人的):

$$\begin{aligned}\epsilon &= \epsilon' \pm j\epsilon'' \\ \mu &= \mu' \pm j\mu'' \\ \sigma &= \sigma' \mp j\sigma''\end{aligned}\quad (3)$$

以及

式中符号的确定和 (2) 式中的一样。传播系数中的虚部包含了所有有关的波在物质中传播时能量损耗的信息。我们在这里的详述中将不考虑磁性 (见 Miles 和其他人, 1957; Olhoeft and Strangway, 1974; 和其他人的)。因此我们只需要考虑公式 (2) 括号中因子的复数形式。

这个因子能够用复电容率和复电导率来重新表示

$$\omega(\epsilon' - j\epsilon'') - j(\sigma' + j\sigma'') \quad (4)$$

式中 ϵ' 和 σ''/ω 可以组合, 并可考虑作为一个有效电容率, 并且类似地, $\sigma' + \omega\epsilon''$ 可考虑作为有效电导率。随后最好把因子重新写成

$$\omega\epsilon - j\sigma_T = \sigma_T^*$$

式中

$$\begin{aligned}\sigma_T^* &= \sigma_T' + j\sigma_T'' = (\sigma' + j\sigma'') + j\omega(\epsilon' - j\epsilon'') \\ \sigma_T' &= \sigma' + \omega\epsilon'' \\ \sigma_T'' &= \sigma'' + \omega\epsilon'\end{aligned}\quad (5)$$

$\sigma' + j\sigma''$ 项是载流子传输引起, 载流子是由于欧姆的和感应扩散的机制所造成的。 $\epsilon' - j\epsilon''$ 是由于介电张弛的机制引起的。

电的损耗正切为

$$\tan \delta = \tan\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{\sigma_T'}{\sigma_T''} = \frac{\sigma' + \omega\epsilon''}{\sigma'' + \omega\epsilon'} \quad (6)$$

式中 ϕ 是 E 和 J 之间的相角。在没有感应扩散损耗时, 对于欧姆电导损耗,

$$\sigma' \rightarrow \sigma_{DC} \quad \sigma'' \rightarrow 0$$

并且

$$\tan \delta = \frac{\sigma_{DC} + \omega\epsilon''}{\omega\epsilon'} = \frac{\sigma_{DC}}{\omega\epsilon'} + \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

式中 $\sigma_{DC}/\omega\epsilon'$ 是由欧姆电导损耗引起, 而 ϵ''/ϵ' 是由介电损耗引起。在设有介电损耗时 ($\epsilon'' \rightarrow 0$) 我们得到

$$\tan \delta = \sigma_{DC}/\omega\epsilon'$$

它是由欧姆电导引起的损耗。

测量: 介电体

一般要求两类全然不同的测量与数据分析, 决定于是那一种样品, 是以介电体为主的来研究 (方程 (5) 的介电电容率占主导) 还是以导电体为主的来研究 (方程 (5) 的电导项占主

导)。

假如样品是一个介电体，那末就使用低于 10^6 Hz 电容电桥技术，使用的设备如图 2 到图 7 的照片所示。作为最一般的介电体测量技术将不在此详细讨论（见 Von Hippel, 1954a, b; 和 Hill 和其他人, 1969）。基本上在每一个频率上电容电桥用一组已知的电阻、电感和电容来和样品相平衡。测量值是相当于电阻（或电导）和电容的并联或串联。这些值然后用

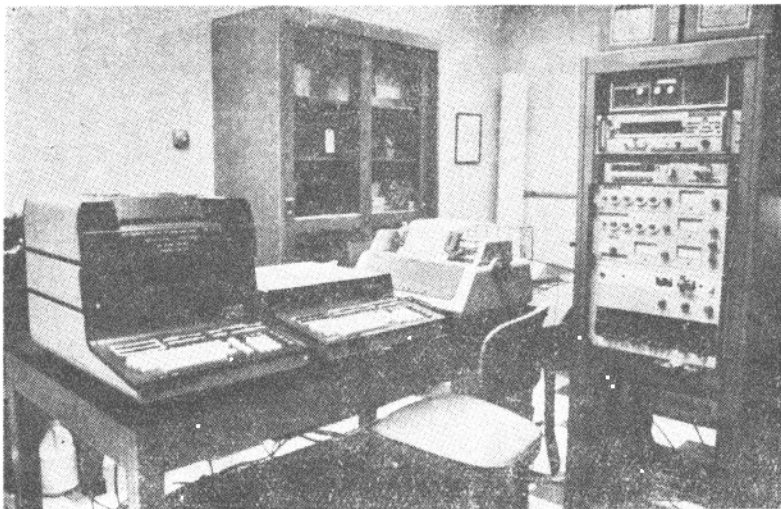


图 2 桌上出示的两个计算机，对于电性研究可完成大部分的测量控制和数据分析的功能。照片右侧的电子设备上，包括有几类的电容电桥。从架子的底部到顶部，包括有以下的仪器：下面三个样机构成一个精密电容电桥；再上去的仪器是（标记高压的）是自动数字欧姆表（用来测量直流电阻）；再下一个仪器是自动电容电桥；以及顶上的仪器是一个真空电子平衡箱。

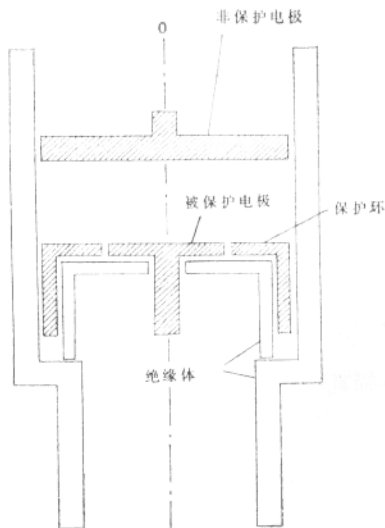


图 3 三端介电测量样品架，简要地说明电极的组成（圆柱状对称）来自 Olhoeft (1975) CL, 中心线

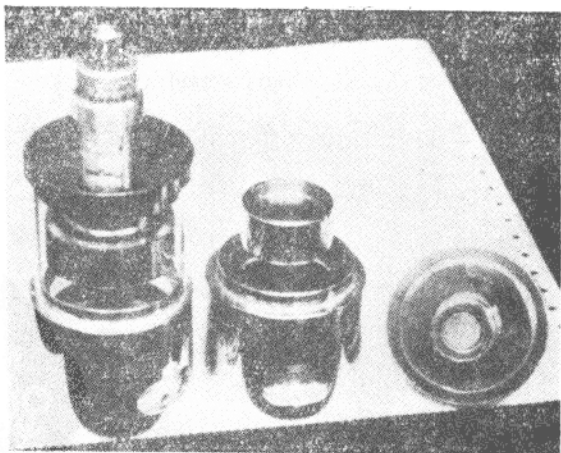


图 4 圆柱状对称的三端介电样品架。从左到右，组装成的样品架，非保护电极（部件底下的片子）以及具有保护环的被保护电极（部件顶部的片子）。

合适的公式转换（纳入样品的几何尺寸值）为复介电电容率，损耗正切等等。

作为一个例子，样品放置在三端的样品架上（保护环，被保护电极和非保护电极）（图 3—7）并联接到如图 2 所示的三端电桥。采用三端样品架要求测量样品的厚度，但样品直径的测量是无关紧要的，因为样品架的保护环和被保护电极的直径确定了样品的有效直径（Von Hippel, 1954a, b; American Society for Testing and Materials, S TM, 1973）。保护环还起到消除残余电容，电缆效应和标本周围的表面电导的功能，从而简化了数据的处理。

上面指出了三端标本架的优点，但是对湿的样品却有容易产生电极效应的缺点，夹子在高于 10^6 HZ 时产生谐振

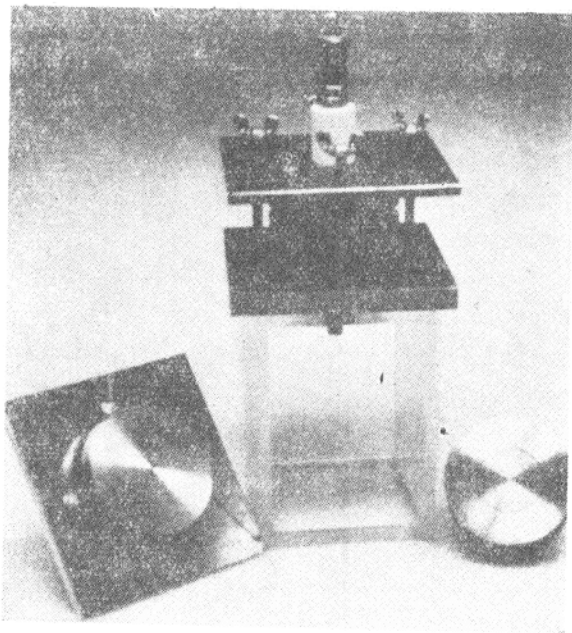


图 5 应用于不规则形状的薄片标本的三端介电样品架。

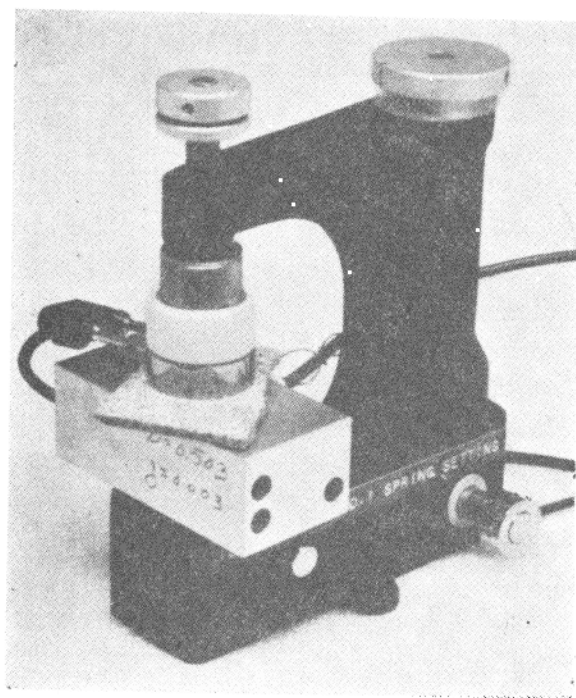


图 6 具有整体同轴负荷 (integral uniaxial loading) 能力的三端介电样品架。

一般的介电体 σ'' 是等于零。然后总损耗正切从下式计算

（并因此而仅适用于低于此频率的工作），并且样品必须做成薄圆盘形状，圆盘的厚度为被保护电极直径的 $\frac{1}{2}$ 或更小。

假如这些效应不成其为问题，电桥可以平衡而获得 C_p 和 G_p ，即在测量频率下样品的等效并联电容和电导。随后这些值即可转换为有效相对实介电电容率

$$K_e' = \epsilon_e' / \epsilon_0 = C_p / C_0 \quad (7)$$

式中 ϵ_0 是自由空间的或真空的电容率 ($8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$) 以及 C_0 是真空的标本架电容。 C_0 是由标本和标本架的几何尺寸计算获得的 (Von Hippel, 1954a, b; American Society for Testing and Metereals, 1973)，或者直接测量没有标本的同等装置的标本架。相对实电容率之所以“有效”是由于上述方程 (4) 中 σ''/ω 项的含糊性所致。

$$\tan \delta = G_p / (2\pi f C_p) \quad (8)$$

式中 f 是以赫为单位的频率； G_p 以欧姆为单位，以及 C_p 以法拉为单位。注意它是方程

(6) 中的损耗正切，并且它不依赖于样品架和样品的几何尺寸。在不同的频率进行测量可得到一组 K_e' 和 $\tan \delta$ 。介电体频谱的分析将在后面讨论。

前面讨论和分析的，仅为使用于 10^6 Hz 的，高于 10^6 Hz 的，介电体与导电体之间的差别变得很少有意义，并且都用类似的技术进行测量。这些在某些文献中已有足够的讨论了 (Von Hippel, 1954a,b; Hill 和其他人, 1969; Beatty, 1973; Jones, 1974; 和其他人的)。岩石物理实验室配备有 TDR (时间域反射计)，测量线以及网络分析器，这些设备在频率高到 4×10^{10} Hz 时进行测量。

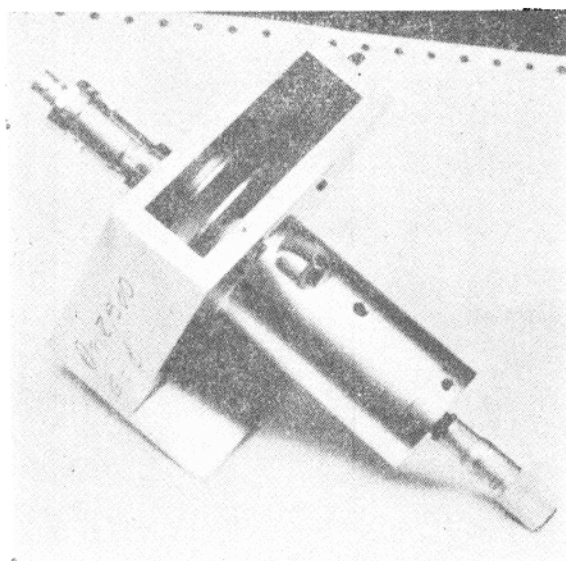


图 7 应用于液体的三端介电样品架。

测量：导电体

对于高损耗，即在方程 (5) 中导电项占主导的样品，必须采取全然不同的途径来测量。这个变换一般发生在电阻率降到 10^5 欧姆米以下的时候。这一基本技术曾在地球科学中用了很多年 (Collett, 1959; Scott, 1965)，但是由于先进仪器设备的出现，测量就更精确了。图 8 简要地说明了用四端样品架的测量系统。图 9 到 13 说明了设备和标本架的要求。

样品架一般用一对电极使用电流通过样品，并用一对隔离的电极测量样品上的电位降。在方框图图 8 上，信号源驱动电流通过已知电阻 R 并通过样品架上的样品。假如样品按图 10 所示的安装，在样品周围就没有电流通道，因此所有的电流将流经 R ，同样的必须流经样品。已知 R 值并测量电阻 R 两端的电位通过样品的电流就测到了测量样品两端电位差的是第二套电极，它们使样品和高输入阻抗测量电路隔开，所以没有可觉察的电流流过电压测量线路 (在小于 10^{-8} A 的级次)。假如有可觉察的电流流过，那末将在电极上产生电化学反应而附加复阻抗，成为测量偏差。

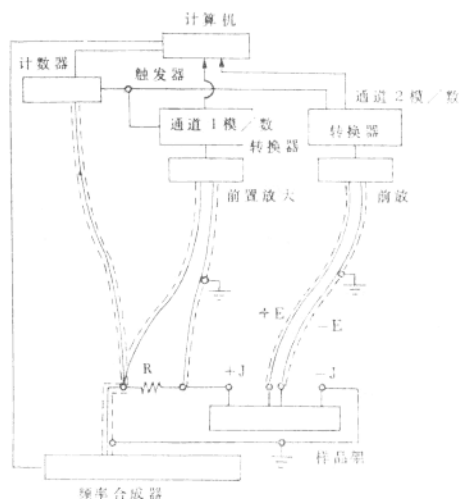


图 8 四端测量系统的简要框图。

+J 和 -J 是样品架的电流电极；+E 和 -E 是电压 (电位降) 电极；R 是已知电阻。所有的引线都是屏蔽的双心绞合电缆；两个前置是很高输入阻抗的场效应前置放大器。设备的照片见图 9。

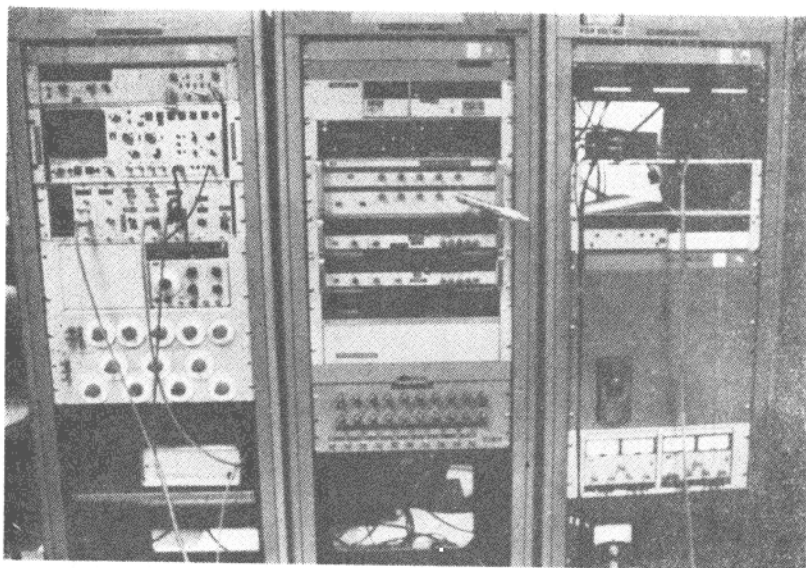


图 9 测量导电样品的四端网络分析器。在左边电子仪器架顶部是电子计数器，它的下面是数字示波器，它同时数字化从样品上取得的电流和电压波形。高输入阻抗的前置放大器都放在示波器的下面。在中央的架框上与前置放大器同一水平的是频率合成器，作为电源来驱动电流通过样品。其余的电子仪器都用于环境的测量和控制（诸如温度，压力等等）。

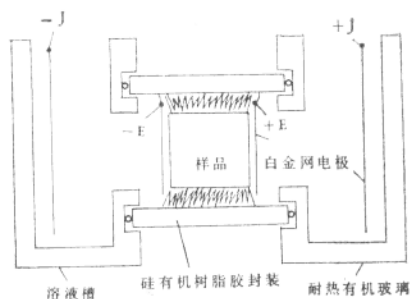


图 10 像图 11 中所示的四端样品架的简图。所示的样品架是由有机玻璃制成，具有三个主要部件：两端的容器和放置样品的连接圆柱筒。样品是由硅有机树脂胶封装在连接圆柱筒中来阻止电流由样品周围泄漏。容器所含的无论什么液体，是希望能接触样品并(或)充满它的孔隙。电极白金网构成以消除反应，电极均接近于样品，但是并不接触它，+J，-J 是样品架电流电极；+E，-E 为电压（电位降）电极。

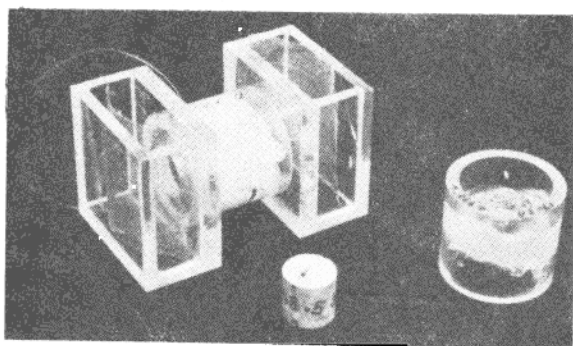


图 11 典型的四端样品架。典型的样品是长等于直径的圆柱体。几何形态是不重要的只要它是已知的。样品用硅有机树脂胶封装在圆柱状的连接筒中，并且筒是像图示的放置在两个溶液槽之间，白金网电极像图 10 说明的放置。硅有机树脂胶至少需要 48 小时使完全凝固，否则凝固过程的化学作用将干扰测量。样品要求至少典型地在真空中 48 小时渗入溶液，直到完全饱和（样品在封装后饱和）。

作为应用的例子，假如一个样品置于图 10 到图 13 所示之一的样品架上，接上图 8 和图 9 所示的设备。所获的数据形式将是一系列在指定时间所获得的电压和电流，它们能够转换成电场和电流密度：

$$E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$$

$$\begin{aligned} J_1, J_2, J_3, \dots, J_n \\ t_1, t_2, t_3, \dots, t_n \\ E_i = V_i / (\text{样品厚度}) \\ J_i = I_i / (\text{样品面积}) \end{aligned}$$

所有这些数据都相应于一个指定的频率 f ，它是用计数器测得的。为了形成图 8 的形式，计数器可以置于自我触发，并同时触发示波器。因此频率用计数器测量，而涉及的数据由示波器数字化。

描述上述数据的一般方程（对于线性的情况服从于欧姆定律）是

$$\begin{aligned} E(t) &= E_i + E_0 \sin(\omega t + \phi_e) \\ J(t) &= J_i + J_0 \sin(\omega t + \phi_j) \end{aligned} \quad (9)$$

式中 E_i 和 J_i 是常量，（当 J_i 是特有的零时 E_i 是自然极化电位）， E_0 和 J_0 是电压，电流的振幅， $\omega = 2\pi f$ ，以及 ϕ_e 和 ϕ_j 是相对于一个任意零时的相位。

假如数据是如下的矩阵形式

$$\underline{X} = \underline{T} \underline{A} \quad (10)$$

式中大写字母下一划表示一个矩阵， $\underline{X}$ 是 $n \times 2$ ， $\underline{T}$ 是 $n \times 3$ ，而 $\underline{A}$ 是 3×2 ，

$$\begin{aligned} \text{然后} \quad X_{n1} &= E(t_n) & X_{n2} &= J(t_n) \\ T_{n1} &= 1 & T_{n2} &= \sin(\omega t_n) \\ T_{n3} &= \cos(\omega t_n) \end{aligned}$$

而 $\underline{A}$ 矩阵的元素是

$$\begin{aligned} A_{11} &= E_i & A_{12} &= J_i \\ A_{21} &= E_0 \cos \phi_e & A_{22} &= J_0 \cos \phi_j \\ A_{31} &= E_0 \sin \phi_e & A_{32} &= J_0 \sin \phi_j \end{aligned}$$

按简单矩阵转换理论 (Scarle, 1971)，

$$\underline{A} = (\underline{T}^T \underline{T})^{-1} \underline{T}^T \underline{X} \quad (11)$$

应用简单的代数处理获得如下的表示式

$$\begin{aligned} \phi_e &= \tan^{-1}(A_{31}/A_{21}) \\ \phi_j &= \tan^{-1}(A_{32}/A_{22}) \\ E_0 &= A_{21}/\cos \phi_e \\ J_0 &= A_{22}/\cos \phi_j \end{aligned} \quad (12)$$

然后我们可以确定

$$\begin{aligned} |\rho| &= E_0/J_0 = \text{电阻率的标量} \\ \angle \rho &= \phi = \phi_e - \phi_j = \text{相角} \\ \rho' &= |\rho| \cos \phi \\ \rho'' &= |\rho| \sin \phi \end{aligned} \quad (13)$$

方程 (13) 是复电阻率，是方程 (5) 复电导率倒数的复数：

$$(\rho' - j\rho'')^{-1} = \sigma'_T + j\sigma''_T$$

非线性电性的测量和分析能够以非线性复电阻率的形式，用这个技术的简单延展来确定。在方程 (9) 中的公式变为

$$E(t) = E_0 + E_0 \sum_{m=1}^k \sin(m\omega t + \phi_{em}) \quad (14)$$

以及

$$J(t) = J_0 + J_0 \sum_{m=1}^k \sin(m\omega t + \phi_{jm})$$

方程 (10) 和 (11) 现在除了 X 是 $n \times 2$, T 是 $n \times (1+2k)$, 和 A 是 $(1+2k) \times 2$ 之外其他保持不变。采用矩阵变换而不用富氏转换的好处是由于在统计学的功效中可以由数据自身来确定变数。(Searle 1971)。表 1 和表 2 表示了典型的计算机打印输出, 由一个线性样品作线性分析的结果 (表 1) 和由一个非线性样品作非线性分析 (谐波分析) 的结果 (表 2)。

表 1 对线性样品的 $E(t)$ 和 $V(t)$ 作线性反演分析, 示出由计算机给出的实际形式

[S.D. 由反演统计得到的标准偏差, 用数据表明它自己。SPV. 由样品产生的自然极化电压]
磁带*4 文件*0
西方花岗岩, pH7, 180000Ω-m水饱和
03:07 11:03:09
1.95E+02 V/m 8.39E-03 A/m*m
0.7% 水可以进入的孔隙度

频率	实电阻率	S.D.	负相位	S.D.	SPV
(HZ)	ohm—m	(%)	(mR)	(mR)	(mV)
1.01E-3	23203.91	0.69	25.04	0.63	-28.76
1.01E-2	22346.16	0.75	19.01	0.65	-30.05
1.01E-1	21576.34	0.68	19.00	0.57	-27.57
1.01E 0	20972.27	0.70	34.94	0.74	-42.02
1.01E+1	19964.72	0.64	156.82	1.52	-42.74
1.02E+2	11449.25	0.63	864.93	3.26	-39.71
1.02E+3	1183.69	0.69	900.21	5.44	-43.25

表 2 非线性分析, 示出由计算机打印出的实际形式

[在每个频率上不但标绘出李沙育图形, 还标绘出相关分析参量。 P_v , 相对于基频的相位 ϕ ; N , 谐波频率 N_f ; $P_j - P_v$, 在谐波时的 $\phi_j - \phi_v$; A_v 换算到基波的谐波电压百分比振幅 (对 $N=1$ 是无意义的); $A_v * M\%$, 谐波振幅反褶积为百分比; 和 THD, 总谐波失真反褶积 (振幅反褶积的 RMS 总和)。在括号中的量值均为标准偏差, 为百分比]
磁带*22 文件*4 频率=1.00E+00 HZ
5 02:17 15:22:27

C-267 阳离子交换树脂

烘炉 4623

110 ohm—m KCl 溶液

$1.00E+00HZ$ $4.6138E+05$ ohm—M

1.06% 37.72mR + - 46.96mR

440.73mV 5.95E01V/m $1.29 E - 04 A/m^2$



N	P_v	$P_i - P_v$	$A_v(N>1)$	$1 - A_i/A_v = M$	$A_v * M\%$	+ -
1	-95.0mR	42.9mR	56248.3(+ - 66.5)%	-0.08(- 4768.7	-2710.	
2	143.3mR	-94.1mR	3.2(+ - 0.0)%	0.08(0.3	0.	
3	1041.3mR	-29.5mR	1.4(+ - 0.0)%	0.06(0.1	0.	
4	-1041.5mR	708.7mR	0.6(+ - 0.0)%	-0.09(- 0.1	-0.	
5	-558.6mR	316.0mR	0.2(+ - 0.0)%	0.31(0.1	0.	
THD = 0.3(+ - 0.6)% (反褶积响应)						

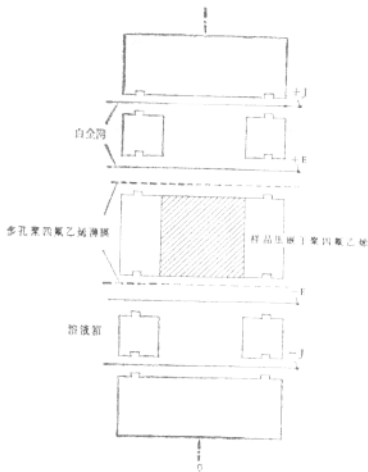


图 12 用于松散样品（粘土，沉积物等）的四端样品架。除了样品与电压降电极之间夹了不活泼的聚四氟乙烯多孔膜片，使电极不与样品接触之外，其基本用途与图10所述类似。

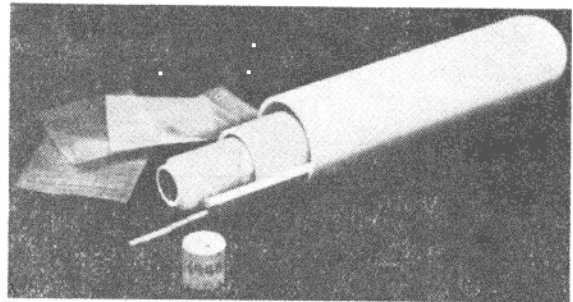


图 13 用于高温高压的四端样品架的基本部件。除了它是用陶瓷构成以及样品用陶瓷粘胶封装之外，样品架基本上等同于图10所示。

电 性 的 机 制

物质中损耗的两种基本类型均在损耗正切方程（6）中表示。并且在电性研究中的两类

基本测量包括有：电导率和介电损耗。欧姆电导损耗是由于在电场中有限速率的载流子穿过物质，而由于在这样的运动中能量损耗（散射过程，复合、化学反应，以及其他）。由电子或空穴作为载流子的电子导体，在很多文献中讨论过（Bardcen, 1967; Blatt, 1968; 以及标准的固体物理学教科书）。离子导电由另一种荷电载子所产生（ H^+ , OH^- , Na^+ ），并且由 Kofstad (1972), Hladik (1972), Wooten (1973), Van Gool (1974), Bockris and Reddy (1970), 以及其他人所讨论过。欧姆电导率损耗随着频率的增加而线性地减少。欧姆损耗阻抗同样不依赖于频率而是线性的（也就是它服从于欧姆定律）。

法拉第电导损耗主要以扩散和耦连作用为机制，具有一个称为“Warburg”阻抗的有效阻抗。这些阻抗随着频率的平方根而变化，并且是非线性。扩散过程使得复电阻率特性导致张弛。它很象将要叙述的极化过程，并且一般伴随有硫化矿物的电极阻抗和很多粘土矿物的薄膜“极化”。它也许也由于孔隙介质中阻抗的分布性质而出现（Rangarajan, 1969）。法拉第的和欧姆的阻抗常常是耦连的过程（de Levie and Pospisil, 1969）。

对于一般参考可看 Madden and Cantwell (1967), Madden and Marshall (1958, 1959 a, b, c), Armstrong, Firman, and Thirsk (1973), Brockris and Reddy (1970), Sluyters—Rehback and Sluyters (1970), and Angoran and Madden (1977)。

介电损耗是由于极化过程的阻尼所致。极化过程是电荷质点的位移，所以它的库仑力场产生一个静电场。自由空间由于正电子和负电子具有真空极化（Dirac, 1967, part xll; Heitler, 1954, part 11.4），它引起有限非零的自由空间电容率，在上述介电常数中，所有物质的电容率以它为参考值。在现存的物质中有八种附加的极化机制增加电容率并降低介质的传播速度（相对于自由空间）：磁电的，热电的，铁电体的，电子的，离子的，定向的和界面的极化。前四种是特别稀少的或者在天然产生的物质中不存在的，将不在这里讨论（见 Von Hippel, 1954 a, b; O'Dell, 1970; Kielich, 1972; Robinson, 1974）。

电子极化是当外加电场后，使原子的电子云相对于原子核引起净位移所产生。离子极化产生于结构（分子，溶液等等），在结构中原子并不一样的共享电子，电场优先把电子云向着有更强键联的原子位移；当荷电原子相互之间位移时也同样产生极化。定向极化为不对称电荷分布的分子，在外加场的影响下，受到顺列的即定向的力矩时所产生。界面的（空间电荷）极化是当迁移的载流子在他们的运动中被捕获或阻碍（由于局部的化学或电位的作用），引起局部的电荷充电而宏观场畸变所致。在岩石电性中最常见的两类极化机制是定向的（例如在水和冰中）和界面的（例如在液体—固体界面的双层电容 [double—layer capacitance] 极化）。

在不均匀物质中常常发生的其他机制是 Maxwell—Wagner 效应（Maxwell, 1873; Wagner, 1913; Sillars, 1937）。这个现象在具有不同电性物质的混合物中产生（例如导电球嵌入于电介质），主要在低频时出现，并且有时在上段张弛机制的所有特性中呈现。对于各种几何状态可用不同的方程式来描述综合特性（Hasted, 1973; Dukin, 1971）：电介质中的导电球或棒，导体和电介质的交替层等等。效应的一般由来是在外加电场的综合作用下，在导体—电介质界面产生的电荷分布，由此而产生很大的低频介电常数。虽然 Maxwell—Wagner 类型的机制是主要的过程，并且一般被认为是影响多相物质低频电性的过程，但是，它们并不是这类过程中唯一的过程（见 Dukhin, 1971 中的一般讨论）。

很可能替代Maxwell—Wagner效应的另一机制是在胶态悬浮体中产生的效应。Maxwell—Wagner效应假定在电介质煤质中导体颗粒周围的电荷是一个薄覆盖层，它比颗粒的尺寸要小得多，所以响应于外加电场的电荷与附近颗粒上的电荷之间无关。在胶态悬浮体中，电荷层的厚度比起颗粒的尺寸有同样的级次或更大一些，很可能被相邻颗粒的电荷分布所影响。虽然这个过程的理论现仍处在研究之中，但胶态响应导致的低频介电常数比起Maxwell—Wagner效应来，明显地趋向于导致远远更高的介电常数（Hasted, 1973; Dukhin, 1971）。 10^5 或更高级次的介电常数是并不罕见的。

极化过程的阻尼可以产生张弛或谐振现象。谐振是当谐和振荡器被驱动于它的最佳频率时的状态（见Barger和Olsson, 1973，或任何标准的古典力学教科书）。而张弛是振荡器的临界阻尼或过阻尼状态。用脉冲施加于谐振系统致使振荡（减幅振荡）；而用脉冲施加于张弛系统产生一个指数衰减一直到零。在天然系统中所有的极化，低于微波频率的涉及于张弛。张弛过程在最佳频率上（为张弛时间常数的倒数）耗损它们的最大能量，在零频率和无限大频率耗损为零。

因此，当DC电导率是一个不依赖于频率的常数时，复介电电容率是依赖于频率的，并且复电导率和复电阻率也依赖于频率。一个系统中的总损耗，具有非零的DC电导率，以及介电极化过程为单一的张弛时间常数，可用方程（6）的损耗正切来描述，式中复相对介电电容率是（Debye, 1899; Sayth, 1966）

$$K' - jK'' = K_{\infty} \left[\frac{\xi}{1 + j\omega\tau} + 1 \right] \tag{15}$$

并且 $\xi = \frac{K_s - K_{\infty}}{K_{\infty}}$

K_{∞} = 在无限大频率时的相对介电电容率 = $\epsilon_{\infty}/\epsilon_0$,

K_s = 在频率为零时的相对介电电容率 = ϵ_s/ϵ_0

τ = 张弛时间常数

以及 $\sigma'' = 0$

不过，单一张弛一般是很少见的。而多重张弛即张弛分布是常见的。他们可以张弛时间分布来表征，它的一般形式是（Gevvers, 1945; Wyllie, 1972）

$$K' - jK'' = K_{\infty} \left[1 + \xi \int_0^{\infty} \frac{G(\tau)(1 - j\omega\tau)}{1 + \omega^2\tau^2} d\tau \right] \tag{16}$$

式中 $G(\tau)$ 是正态分布时间常数，即

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

最常见的简单张弛分布是 Cole-Cole 分布（Cole and Cole, 1941）

$$K' - jK'' = K_{\infty} \left[1 + \frac{\xi}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}} \right] \tag{17}$$

它具有损耗正切

$$\tan \delta = \frac{\sigma_{DC}}{K' \epsilon_0 \omega} = \frac{\xi (\omega \tau)^{1-\alpha} \sin(1-\alpha) \frac{\pi}{2}}{1 + \xi + (2 + \xi) (\omega \tau)^{1-\alpha} \cos(1-\alpha) \frac{\pi}{2} + (\omega \tau)^{2(1-\alpha)}}$$

式中 $\xi = (K_s - K_\infty)/K_\infty$ ，并且 $1-\alpha$ 具有极限为 1（单一张弛）和零（无限宽，连续分布）。后一极限相当于不存在张弛，因而虚部消失而实部变为不依赖于频率。Hasted (1973) 评论了很多上述的张弛分布以及他们的一般应用。分析介电数据的各种方法由 Schwarzl and Struik (1968)，Sheppard and Grant (1974)，Crossley, Tay, and Walker (1974)，Mason, Hasted, and Moore (1974)，Macdonald (1974 a)，以及其他人所叙述。对于岩石的例子可见 Olhoeft, Strangway, and Frisillo (1973)，和 Olhoeft (1976, 1977a, b, c)。

上述的介电张弛方程均由电荷运动方程所导出， q 为电荷：

$$\mu \frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{1}{\sigma} \frac{dq}{dt} + \frac{q}{\epsilon} = 0$$

式中 μ ， σ ，和 ϵ 如上述的，包涵有几何因子，并且均为时间的导数。当使扩散方程用于起始点时，产生不同类型的张弛方程：

$$-D \frac{d^2 r}{dx^2} + \frac{dr}{dt} + \kappa r = 0,$$

式中 r 是荷电离子的浓度，是几何形态和时间的函数； D 是扩散系数，以及 κ 是常数。在此情况下，第一项包涵有对几何状态的微商和含有时间的扩散系数。这个差别改变了张弛方程，成为下面要讨论的内容，并且也导致非线性特性（推导见 Sluyters—Rehbach and Sluyters, 1970）。

扩散张弛实质上是一个分布阻抗形式

$$\sigma' + j\sigma'' = \sigma_{DC} \left[1 + \frac{m (j\omega \tau)^n}{1 + (j\omega \tau)^n (1-m)} \right] \quad (18)$$

式中，对于纯扩散过程 $n = 0.5$ （并且模拟于上述 Cole—Cole α 参量）

$$m = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_{DC}}{\sigma_\infty}},$$

并且 τ 是时间常数

$$\begin{aligned} \sigma_{DC} &= \lim_{\omega \rightarrow 0} \sigma' \\ \sigma_\infty &= \lim_{\omega \rightarrow \infty} \sigma' \end{aligned}$$

并且 m 是激发极化的“荷电能力”（“chargeability”）。注意到这里的 m 和 τ 均为耦合的参数（coupled parameters）包涵欧姆电导 σ_{DC} （见下面的电路例子），不同于介电张弛的独立量 ξ 和 τ 。

因此，方程（2）完全的一般形式是

$$K^2 = -(\mu' - j\mu'')j\omega(\sigma_T' + j\sigma_T''),$$

式中

$$\sigma_T' + j\sigma_T'' = \sigma_{DC} \left[1 + \frac{m(j\omega\tau_1)^n}{1 + (j\omega\tau_1)^n(1-m)} \right] + j\omega\epsilon_0 K_\infty \left[1 + \frac{\xi}{1 + (j\omega\tau_2)^a} \right] \quad (19)$$

并且, $\tan \delta = \cot \phi = \sigma_T' / \sigma_T''$

它的等效电路如右图所示

上式中,

$$m = \frac{R_1}{R_1 + R_0} = \frac{1}{1 + \frac{R_0}{R_1}},$$

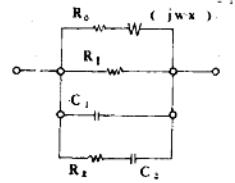
$$\tau_1 = (R_1 + R_0)^{1/n} X,$$

$$\xi = C_2 / C_1$$

$$\tau_2 = R_2 C_2$$

并且

$$n = \alpha = 1$$



岩石的电性

电性的机制已在前节简短的介绍了。他们分为两个基本部分：导电机制和介电机制。虽然他们大多数具有共同的因素：水，但是他们的区别是很大的。水对于几乎所有的电性机制来说，不足作为主动的参予者，就是被动的主体，这是在地学中常常遇到的情况。这一节将叙述水的电性；接着将讨论环境因素的实验室控制，并且最后将评论干的和湿的岩石的已知电性。

水的电性

水的电性是最能变化的，随着它的状态可以以级次的量值变化：自由的液态水，固态结构的冰（或水化物），吸附的水，受化学约束的水或者气化的蒸气。同样的，水的纯度也强烈地影响着它的电性。把关于水的电性或其他物理性质作为评论的课题是很精彩的，但在这里仅仅提供了简短的综述。

水的分子是由两个氢原子键合于某一中央氧原子所组成，并且H—O—H的键合角为105°。随着氧更负于氢时，分子是极化的，并因而具有一个永久偶极以及更高级次的偶极矩（通常简化为一个偶极）。把分子旋转并定向于外场导致大的介电常数。水物性的精彩讨论可以在Bockris和Reddy（1970），Hasted（1973），和Franks（1972 a）中找到。

非常纯的水的D.C.电阻率为10⁵欧姆·米的级次，并且它随着杂质成分的增加而降低。极纯水中主要的电荷传输是靠H⁺和OH⁻的离子传导，在水溶液的传输中是借助于离子杂质传导，例如Na⁺Cl⁻（见Bockris and Reddy, 1970的讨论）。一般天然地下水的电阻率最大为100 ohm·m左右，而海水具有约0.2 ohm·m的电阻率。水具有78.3的低频介电电容率，它随着温度以及溶液中电解质的增高而迅速降低（Bockris and Reddy, 1970; Rao and Premaswarup, 1970; Pottel, 1972; Hladik, 1972; Hasted, 1973）。在它的张弛频率高于1.9×10⁹Hz时电容率下降到4.2（在25℃; Hasted, 1972 a, b, 1973, 和其他人）。

Rahman and Stillinger（1971）已完成一个液态水分子的动力计算机模拟，寻找分子的小范围调整（short range ordering）和某些集体的特性（Cooperative behavior），它与冰中的水分子是很类似的。其他的研究者基于研究的方法和使用的仪器，找到了类似的结果