

石油工业出版社

Petroleum Industry Press

测井学

《测井学》编写组 编

测 井 学

《测井学》编写组 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书共分四篇，全面、系统地反映了测井学科的理论和方法，测井数据的采集、传输与质量控制，测井数据处理、解释及应用，取心与射孔。

本书可作为高等院校测井专业的教学参考书，也可供测井，地质及工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

测井学/《测井学》编写组编
北京：石油工业出版社，1998.1
ISBN 7-5021-2481-0

I. 测…
II. 测…
III. 测井
IV. P631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 35621 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
徐水县照排厂排版
石油工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 50%印张 1300 千字 印 1—1500
1998 年 12 月北京第 1 版 1998 年 12 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5021-2481-0/TE·2040
定价：98.00 元

培养跨世纪的人才
攀登世界科学高峰

王曰才

《测井学》编委会

顾 问 王曰才

主 任 段 康

副主任 谭廷栋 林 峰 陆大卫

委 员 (按姓氏笔划为序)

王寿美 王志信 牛超群 冯启宁 乔贺堂

刘凤亮 陈延禄 李希文 李舟波 吴铭德

吴锡令 李宝同 张庚骥 张作信 欧阳健

姜文达 胡以良 秦 杰 尉中良 曾文冲

主 编 谭廷栋

《测井学》撰稿人名单

第一篇撰稿人

冯启宁	第一章第一节、第四节
张庚骥	第一章第二节、第七节
张庚骥、高杰、冯启宁	第一章第三节
尚作源	第一章第五节、第六节
曾花秀、姜恩承	第一章第八节
尉中良	第一章第九节
侯俊胜	第一章第十节
楚泽涵	第二章第一节、第三节
楚泽涵、张金钟	第二章第二节
陶果	第二章第四节
赵培华	第二章第五节
吴律	第二章第六节
黄隆基	第三章第一节、第二节、第三节、第四节、第五节
谷宁、刘兴斌	第四章第一节
刘兴斌	第四章第二节
吴锡令、徐莉莉	第四章第三节
吴锡令	第四章第四节
王曰才	第四章第五节
冉学锋	第四章第六节
徐莉莉、夏克文、朱军	第四章第七节

第二篇撰稿人

彭琥	第一章第一节
徐莉莉	第一章第二节
邓克全	第二章第一节、第二节
陆大卫	第三章第一节、第二节、第三节、第四节

第三篇撰稿人

雍世和	第一章第一节、第二节
曾文冲	第二章第一节、第二节、第三节、第五节、第六节、第八节
雍世和	第二章第四节、第七节
刘兴斌	第三章第一节、第二节、第三节、第六节
吴锡令	第三章第四节
赵颖	第三章第五节
刘兴斌、魏涛	第三章第七节

王贵文等
王贵文、李军
李国平、王贵文
赵良孝、宋惠珍
雍世和
侯俊胜
张景考

第四篇撰稿人

陈曰俭、丁希杰、张继湘
刘方玉、杨 光、张继果
张少程
杨学政

第四章第一节、第二节
第四章第三节
第四章第四节、第五节
第四章第六节、第七节
第四章第八节
第五章第一节、第三节、第四节
第五章第二节

第一章第一节、第二节；第二章第一节、第二节、第三节
第三章第一节、第二节、第三节
第四章第一节、第二节
第四章第三节

序

测井起源于法国。1927年9月，法国人斯仑贝谢兄弟发明了电测井，开始在欧洲用于勘探煤和油气，两年后传到美国和苏联。中国使用电测井勘探石油与天然气，始于1939年12月。原中国科学院院士、著名地球物理学家翁文波教授是中国测井学科的奠基人。测井界老前辈赵仁寿、刘永年、王曰才先生对测井学科的创立和发展做出了卓越的贡献，他们的业绩将永远载入中国测井学的史册。

众所周知，测井是一种井下油气勘探方法，用于发现油气藏，评估油气储量及其产量，它在油气田开发和钻井工程中也有广泛的用途。测井还是勘探煤、盐、硫、石膏、金属、地热、地下水、放射性等矿产资源的重要方法和有效手段，并扩展到工程地质、灾害地质、生态环境等领域应用。

测井仪器的更新换代最能反映测井学科的发展和进步。60年来，中国测井仪器经历了四次更新换代：第一代——半自动测井仪；第二代——全自动测井仪；第三代——数字测井仪；第四代——数控测井仪。目前，中国正在研制第五代测井仪器——成像测井仪，作为21世纪更新换代数控测井仪的新产品。

现代测井是石油工业中高技术含量最多的产业部门之一。它在石油工业中占有重要的地位，是石油学科中的十大学科之一。

《测井学》是测井学科的理论基础，又是测井技术的科学依据。由石油测井学会组织撰写的中国第一部《测井学》专著的出版，填补了我国只有测井学科而无测井学专著的空白。《测井学》集中反映了测井学科的发展历程和技术进步，对现在和未来的测井理论、方法、实验、技术等都有系统的论述，具有较高的学术水平和应用价值。

《测井学》的出版，得到了大庆油田生产测井研究所、大庆油田测井公司、胜利油田测井公司、辽河油田测井公司、中国煤田地质总局等单位的热情支持，他们为《测井学》的出版提供了资助。我国测井界的很多知名专家、学者，积极撰写书稿，将多年来的科研、生产、教学成果都溶入到《测井学》书稿中，提高了《测井学》的质量和水平。在此，我谨向为《测井学》的出版做过贡献的专家、学者，撰稿人和单位表示衷心地感谢！石油工业出版社为《测井学》的出版给予了极大的帮助，我也向他们表示敬意！

书中的错误和不足，望测井界的同行提出宝贵意见。

段 康

一九九八年四月十八日

第一篇 测井理论和方法

第一章 电磁测井

第一节 岩石电学性质

岩石作为一种多孔（孔隙中含流体）混合介质，表征电学性质的参数与单一介质一样，为电阻率 R 、电导率 σ 、介电常数 ϵ 和磁导率 μ 。但是，由于岩石孔隙含流体，在两相界面（主要是固液界面）上会发生电化学反应而改变岩石的电学特性。因此，与单一介质相比较，影响岩石电学特性的因素更多，机理也更复杂，并由此派生出某些电化测井方法。对于石油测井而言，由于研究对象是沉积岩，磁导率 μ 近似为 1，只涉及研究电导率和介电常数。对于金属矿测井和石油测井中的工程应用问题，还涉及研究岩石和介质的磁导率。

一、岩石电学性质的频率特性

目前所使用的电测井方法从普通电阻率测井、侧向测井、感应测井、介电测井到电磁波传播测井，分布在从直流到微波频段（1.1GHz）相当宽的频率范围内。研究岩石电学性质的频率特性对合理的建立电法测井方法，正确使用不同频率的电测井信息是很重要的。

对于单一介质，按欧姆定律（ $J = \sigma E$ ），传导电流 J 与外场同步，电导率与频率无关。但是，对于岩石这样的多孔复杂介质，孔隙中充满导电流体，传导电流以通过孔道的离子导电为主，其传导电流受多种因素影响。在外加电场情况下，通过岩石的全电流是传导电流和位移电流之和，前者与岩石的电导率有关，后者与岩石的介电常数有关。当外加场的频率改变时，受多孔介质内各种导电机理的影响，传导电流和位移电流在全电流中所占比例也随之改变。因此，岩石的电导率和介电常数都是频率的函数：

$$\epsilon(\omega) = \epsilon'(\omega) + j\epsilon''(\omega) \quad (1-1-1)$$

$$\sigma(\omega) = \sigma'(\omega) + j\sigma''(\omega) \quad (1-1-2)$$

在电磁波测井所用的频段内，一般来说介质损耗很小，可以认为复介电常数虚部是导电损耗引起的。此外，理论分析和实验测量表明，对于沉积岩，电抗分量主要是容抗。于是组合式（1-1-1）、式（1-1-2）得到：

$$\epsilon(\omega) = \left[\epsilon' - \frac{\sigma''(\omega)}{\omega} \right] + j \frac{\sigma'(\omega)}{\omega} \quad (1-1-3)$$

$$\sigma(\omega) = [\sigma'(\omega) - \omega\epsilon''(\omega)] + j\omega\epsilon' \quad (1-1-4)$$

无论是电导率还是介电常数都具有随频率而变化的特性。通常称为频散特性，即 $\sigma(\omega)$ 和 $\epsilon(\omega)$ 是相互影响的。

1. 岩石电阻抗的频率特性

实验室内在模拟地层温度和压力条件下对岩样的测量结果表明,电阻 R 、电抗 X 、阻抗模量 $|Z|$ 和相位 PHI 都具有频散特性。如图 1-1-1 和图 1-1-2 所示。

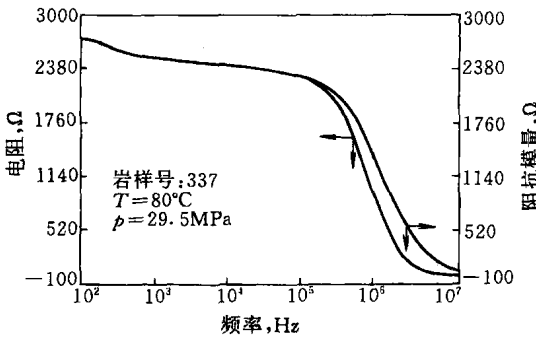


图 1-1-1 电阻 R 、阻抗模量 $|Z|$ 频散曲线

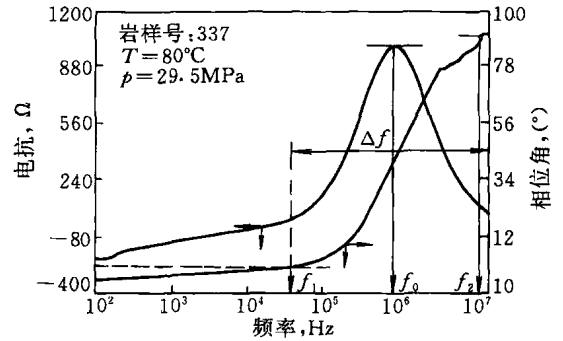


图 1-1-2 电抗 X 、相位 PHI 频散曲线

从图中可看出,上述各变量在 10^5Hz 时发生急剧变化,电阻 R 和阻抗模量急剧变小,电抗 X 出现峰值,相位 PHI 从 0° 到 90° 。这是因为随着外加场频率增高,孔道中导电离子在相界面上的积累减小,离子迁移跟不上电场的变化,使位移电流减小,传导电流增大,因而岩石电阻随频率增高而下降,电抗随位移电流的变化而增大并在位移电流变化最快时达到最大值。电抗曲线峰值所对应的频率值是低频界面极化的松弛频率 f_0 。相位从 0° 变到 90° 所对应的频宽是极化的频宽。其它岩样也有类似的频散曲线,但电阻 R 的突变频率以及松弛极化频率和频宽都因岩性、孔隙结构的差异而有所不同,多数岩样的松弛频率在 10^5Hz 左右。对于 10MHz 以上的射频段,电阻 R 随频率的变化虽不如松弛频率附近那样急剧,但仍存在明显的频散特性。图 1-1-3 是饱和水砂岩在 $20\sim 270\text{MHz}$ 频段电导率随频率的变化曲线。频率增高电导率增大,即电阻率下降。

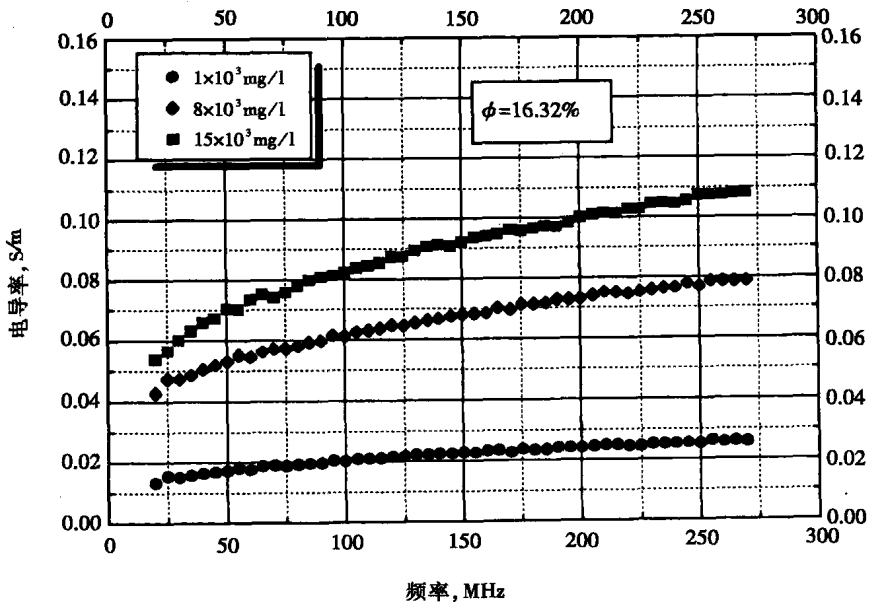


图 1-1-3 $20\sim 270\text{MHz}$ 砂岩电导率频散特性

对于频率在 10^4Hz 以上的各种电阻率测井方法，都需考虑由于频散造成测量值的差异。

2. 岩石介电常数的频率特性

介电常数是反应介质极化能力的宏观物理量。根据定义

$$P = (\epsilon - 1) \epsilon_0 E \tag{1-1-5}$$

式中 P ——极化强度；
 E ——外加电场强度。

显然， ϵ 愈大，极化强度愈大。组成介质的成分和结构是复杂的，微观地从分子极化机理考虑，可分为电子位移极化，原子（或离子）位移极化，极性分子转向极化和混合介质中界面极化（或体极化）。电子极化建立和消除的时间极短，约为 $10^{-15} \sim 10^{-16}\text{s}$ ，原子极化建立和消除时间约为 $10^{-12} \sim 10^{-13}\text{s}$ ，转向极化建立时间为 10^{-10}s 或更长，界面极化的建立时间由于不同介质的组分和结构的差异而有所差别，多数认为在 10^{-6}s 或更长。在电场作用下需要经过相当长的时间（ 10^{-10}s 或更长）才能达到稳定的极化统称为松弛极化。除了转向极化和界面极化外，热离子位移极化的建立时间也在 10^{-10}s ，亦属松弛极化。松弛极化是岩石介电常数频散特性的基本原因。

在 $1\text{kHz} \sim 3\text{GHz}$ 频率范围内，利用石油大学岩石物理实验室所建立的不同频段的测量装置测得的细砂岩介电常数频散特性如图 1-1-4 所示。图中曲线 1 是岩样烘干后测得的，曲线 2 是岩样全饱和水时测得的。曲线 1 数值错动是由于不同测量系统误差引起的，主要是岩样表面与电极的接触状况不同。饱和水后样品表面形成水膜，改善了接触条件，因而曲线 2 不存在明显的数值错动。实验测量结果表明：

(1) 干岩样不存在频散，饱和油的岩样也不存在频散，饱和水后存在明显的频散现象，随频率增高介电常数下降。沉积岩介电常数频散特性主要是孔隙含水引起的，在双对数坐标图上呈非线性关系，可以用多项式拟合：

$$\lg \epsilon' = a_0 + a_1 \lg f + a_2 (\lg f)^2 + a_3 (\lg f)^3 \tag{1-1-6}$$

系数 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 与岩性、孔隙度、含水饱和度、孔隙水矿化度、泥质含量等参数有关。

(2) 从曲线 2 看出，频散特性大致分为三段：低于 100kHz 频散剧烈， $100\text{kHz} \sim 100\text{MHz}$ 仍有比较明显的频散特性，大于 100MHz 频散现象很弱，超过 400MHz 基本不存在频散。这种特征与含水岩石在外加电场后的极化机理有关，在低于 100kHz 的频率范围内，各种极化都存在，介电常数值大，且界面极化随频率增高很快减弱，故出现明显的频散现象。当频率高于 400MHz 时，各种界面极化已不存在，主要是水分子的转向极化起作用，转

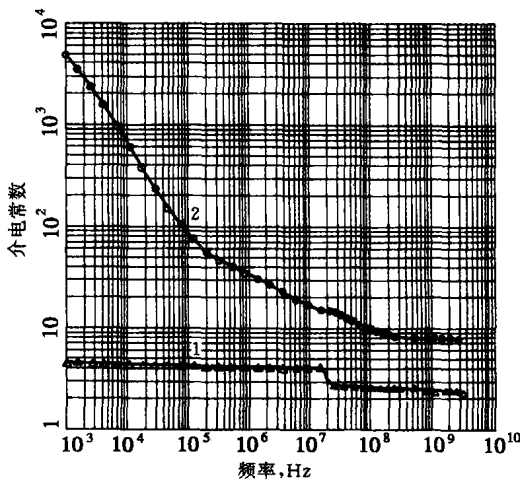


图 1-1-4 $1\text{kHz} \sim 3\text{GHz}$ 细砂岩介电常数频散特性
1—烘干岩样；2—岩样全饱和水

向极化的松弛频率约为 10GHz, 0.4~3GHz 频段仍远离松弛频率, 基本上不呈现频散现象。在 100kHz~100MHz 频率范围内, 尽管界面极化较弱, 但却是各类松弛极化的综合反应, 仍存在明显的频散现象。从图 1-1-4 中还看出, 就某一段频散曲线可以忽略式 (1-1-6) 中的高次项, 用指数函数拟合, 在阿特拉斯双频介电测井的频率范围内, 即 20~270MHz 频段内, 介电常数的频散公式为:

$$\epsilon = A f^{-\alpha} \tag{1-1-7}$$

式中 α ——频散指数;
 A ——频散幅度。

α 表征频散程度, α 愈大频散愈严重。 α 与 A 的大小取决于岩石的孔隙度、含水饱和度和水的矿化度、岩石比表面等。

(3) 从图 1-1-4 可知, 在 1kHz 时含水岩石的介电常数可高达 10^3 。显然, 用体积加权是无法解释的, 只能从低频段岩石极化机理来解释。目前, 主要看法有, 一是认为粘土颗粒表面的扩散双电层加剧了界面极化; 二是岩石骨架结构中含有某些纵、横比特别小的扁平体或薄片状杂质引起的特殊效应。如果前一因素是主要的, 这将是利用介电测井确定 Q_v 值等参数进行泥质砂岩解释的理论依据。对白云岩和泥质粉砂岩样品的测量结果如图 1-1-5 和图 1-1-6 所示。

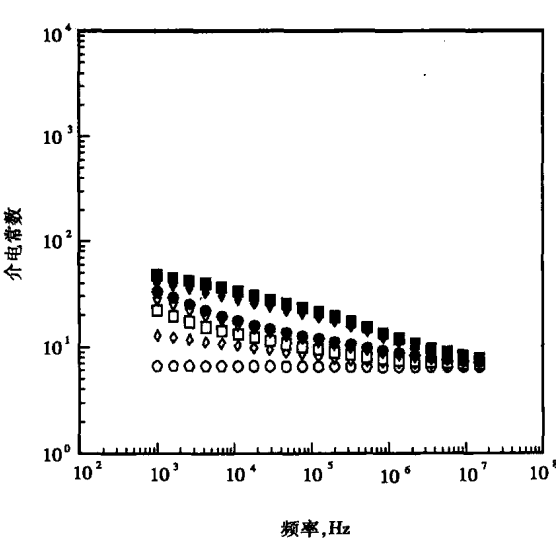


图 1-1-5 白云岩样品介电常数频散特性
 ○、◇、□、▽、●、◆、■ 分别表示含水饱和度为 0、7%、13.5%、17.5%、24.5%、34%、68%

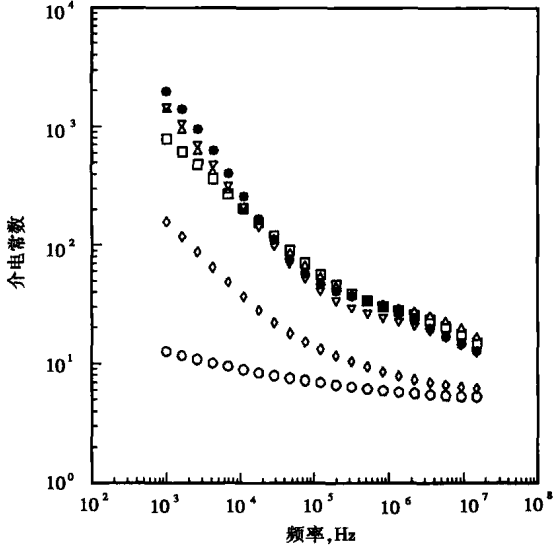


图 1-1-6 泥质粉砂岩样品介电常数频散特性
 ○、◇、□、△、▽、● 分别表示含水饱和度为 0、6.7%、35%、46.3%、50.6%、52.7%

结果表明, 粘土颗粒表面双电层界面极化是低频段介电常数频散的重要因素, 尽管两个样品都是低孔、低渗, 但由于白云岩不含泥质, 泥质粉砂岩所含粘土矿物总含量为 45%, 两个样品的频散曲线截然不同。由于泥质粉砂岩的粘土含量很高, 烘干后样品的介电常数值与白云岩相近, 为 6~7, 还略有频散, 在 1kHz 处达到 10 以上。饱和水后, 泥质粉砂岩的频散现象显著地大于白云岩。在 1kHz 处白云岩含水饱和度为 68% 时, 介电常数为 50, 而泥

质粉砂岩在含水饱和度为 52.7% 时，高达 2000，这个值也高于其它砂岩所相应的值。显然，粘土含量和类型是影响介电常数频散的重要因素。

(4) 在超高频 (UHF) 段，即在 200~3000MHz 频率范围内，存在很不明显的频散现象。图 1-1-7 是某油田砂岩样品用 $100 \times 10^3 \text{mg/l NaCl}$ 溶液完全饱和后测得的介电常数频散曲线，从图中不难看出，700MHz 以上基本上不存在频散。

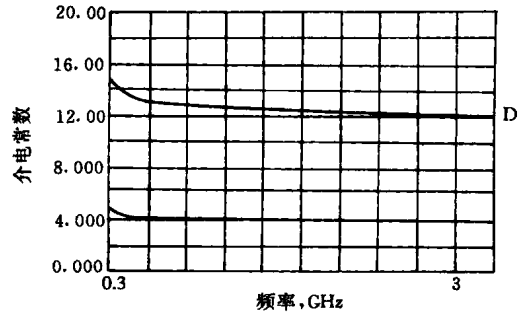


图 1-1-7 砂岩样品在 0.3~3GHz 频段介电常数频散曲线

二、岩石电阻抗与压力、温度、孔隙度、饱和度的关系

1. 岩石电阻抗与压力的关系

在 100Hz~15MHz 的频段上，在实验室对砂岩样品考察了压力对电阻抗特性的影响。对于取自井下的砂岩岩心观察到电阻随压力增大的幅度很小，而且在频散曲线急变频段（图 1-1-8a 在 1MHz 附近），电阻基本上不受压力的影响。对于电抗的频散曲线（图 1-1-8b），当频率低于电抗峰的下限频率时，X 随压力增加而减小，但减幅较小；当频率正对电抗峰的频段时，X 随压力增加而略有增大；当频率更高时，X 基本上不随压力变化。

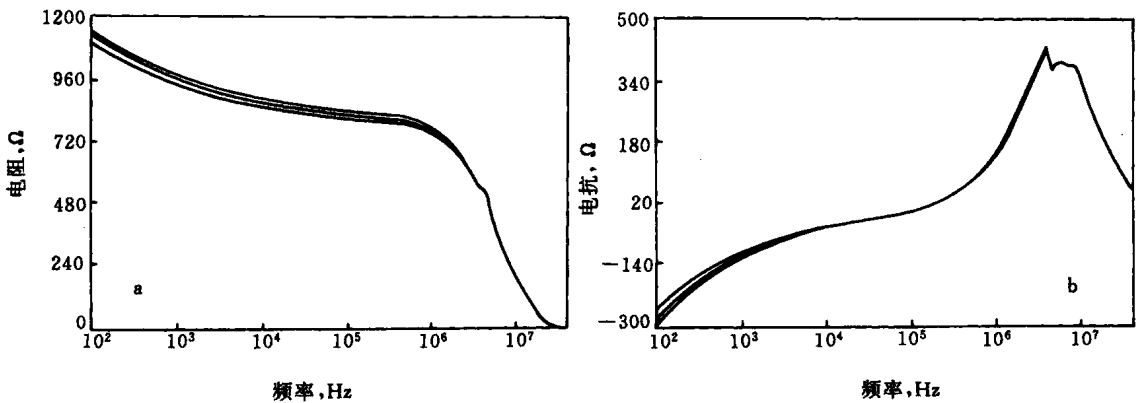


图 1-1-8 不同压力下，337# 岩样电阻 (a) 和电抗 (b) 的频散特性

从图 1-1-8 可以看出，对于从井下取心来的岩样，由于岩石长时期的压实，压力变化对电阻值的影响不显著。在高频段，由于岩样受压后固液界面极化的变化。导致位移电流和传导电流比例的变化，使岩样电阻值基本上不随压力而改变。

对原始岩样进行增压测量和减压测量的往复过程时，观察到压力滞后效应，即同一压力下增压和减压测得的电阻值不同，如图 1-1-9 所示。其它电学参数 X 、 $|Z|$ 、 PHI 也有类似情况。这是由于岩石并非刚体，它是由矿物颗粒和胶结物组成，颗粒间还存在孔隙或间隙，加压或减压后，岩石都会经受一个塑性变化过程，不会完全恢复到原始状态，因而电学性质呈现滞后现象，只是在增压、减压往复若干次后才使电学性质达到稳定值。

国外众多学者的实验测量也得到类似结果，随着净压力增加（围压与孔隙压力之差）岩

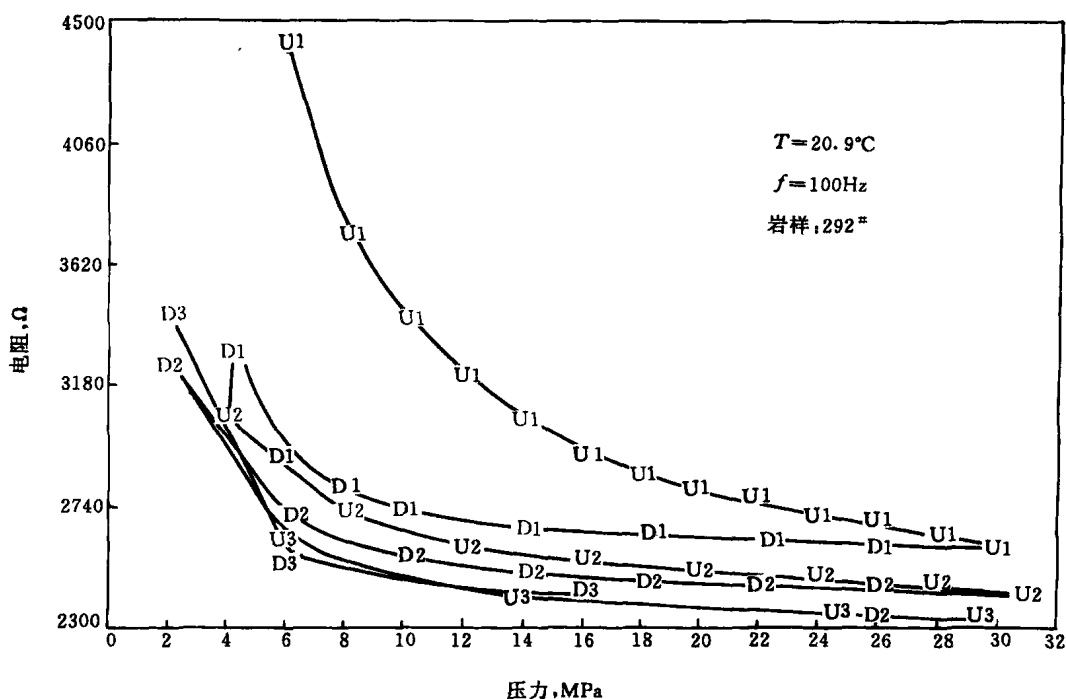


图 1-1-9 岩样电阻-压力滞后图

石发生形变，孔隙体积减小， m 、 a 值都有变化，导致地层因素 F 有不明显的变化且随岩性而异。

2. 岩石电抗与温度的关系

石油大学岩石物理实验室在 100Hz~15MHz 频率范围内研究温度对岩石电抗的影响。随温度升高，岩石电阻值下降，且温度开始变化时降得较快，温度愈高变化愈缓慢，在频率高过松弛极化频率（图 1-1-10）后岩石电阻基本不受温度影响。电抗曲线在峰值（极化频率）附近随温度升高电抗下降，而在极化频率前随温度升高电抗值增大，高过极化频率后， X 值基本不受温度影响。图示表明，固-液界面双电层的导电机理是导致 337# 岩样随温度变化的主要因素。图 1-1-11 是升温 and 降温过程中岩样电阻变化的滞后。

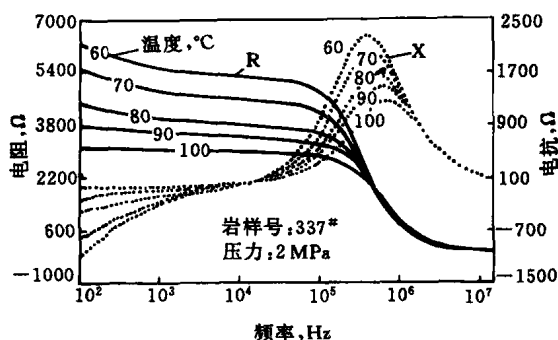


图 1-1-10 不同温度下岩样电阻和电抗与频率的关系

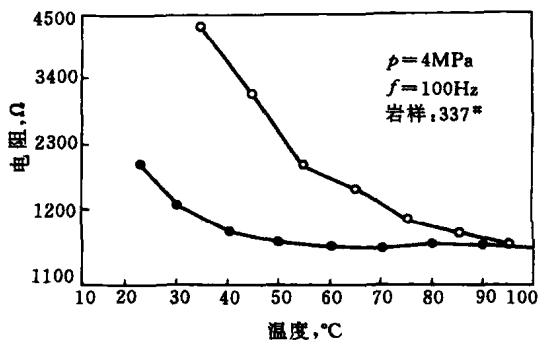


图 1-1-11 升温和降温过程岩样电阻变化的滞后响应

3. 岩石电阻率与孔隙度的关系

1942 年阿尔奇的文章指出, 通过实验得到的储层岩石的地层因素 F (亦称相对电阻率) 与其孔隙度 ϕ 在双对数坐标图上是线性关系, 提出了著名的阿尔奇公式, 从此奠定了测井解释的理论基础。经 Hamble、Wyllie 等人的不断完善, 给出了目前测井解释中所用阿尔奇公式的一般形式:

$$F = \frac{R_o}{R_w} = \frac{a}{\phi^m} \quad (1-1-8)$$

式中 R_o ——地层为水完全饱和时的电阻率;

R_w ——地层水电阻率;

m ——胶结指数。

由于阿尔奇实验中所用岩样的孔隙度都在 10% 以上, 且不富含粘土, 因此, 对于颗粒分选不好的低孔隙度岩石以及富含粘土的岩石, 用一般的阿尔奇公式表示并不合适。实验表明, 对于这些岩石, 地层因素与孔隙度的关系在双对数坐标图上并非线性。图 1-1-12 是塔里木盆地 155 个样品测定的地层因素与孔隙度关系。图示表明, 在整个孔隙度范围内 $F-\phi$ 有如下的非线性关系:

$$\lg F = -0.488 \lg^2 \phi - 2.411 \lg \phi - 0.223 \quad (1-1-9)$$

为了应用方便, 可将它视为折线, 以 12% 的孔隙度为界, 每段直线用阿尔奇公式表示, m 值分别为 1.835 ($\phi \geq 12\%$) 和 1.083 ($\phi < 12\%$); a 值为 0.833 和 4.276。 m 和 a 的

取值都与孔隙结构有关, 结合毛管压力曲线和薄片分析表明, 网络状孔隙 m 值接近 2, a 接近 1, 而毛管束似的孔隙结构 m 值变小, a 值变大。这和斯仑贝谢公司对 m 值的经验取法 (从未充填的粒间孔隙到裂缝, m 值从 2 减小到 1) 是一致的。

4. 岩石电阻率与含水饱和度的关系

阿尔奇在实验室得到的储层岩石电阻率指数 I (亦称电阻率增大系数) 与其含水饱和度 S_w 在双对数坐标图上为一线性关系。其一般的表达式为:

$$I = \frac{R_t}{R_o} = \frac{b}{S_w^n} \quad (1-1-10)$$

式中 R_t ——含烃储层的电阻率, $\Omega \cdot m$;

R_o ——该层完全饱含水时的电阻率, $\Omega \cdot m$;

b ——系数 (通常取为 1);

n ——饱和度指数 (通常取为 2)。

众多学者对不同岩样进行的实验研究表明, 式 (1-1-10) 只对不含泥质或含泥质很少

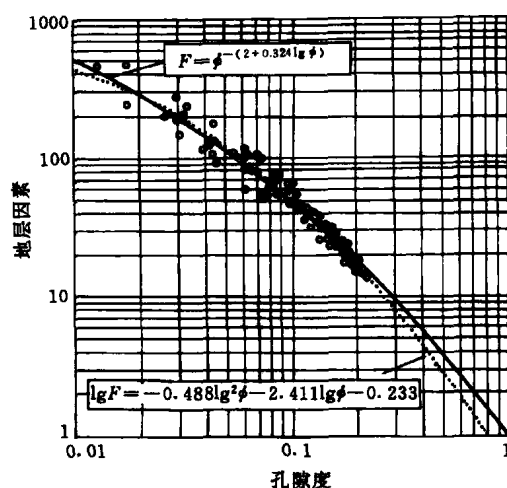


图 1-1-12 塔里木盆地 155 个岩样测定的地层因素与孔隙度关系

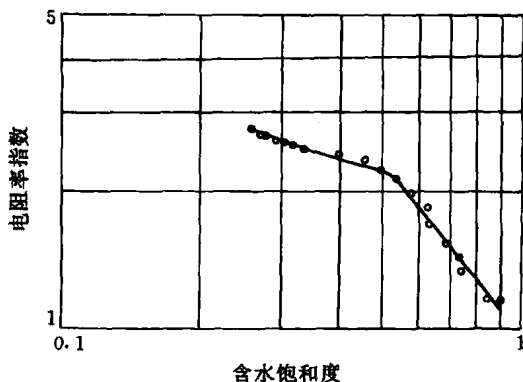


图 1-1-13 吉林油田岩样电阻率指数与含水饱和度关系

水的离子导电。因此，电阻率指数 I 随含水饱和度的增大按另一斜率下降。对于这类岩石，在整个含水饱和度范围内，阿尔奇公式不再适用，从而派生出针对各类泥质砂岩储层，用电阻率测井确定含水饱和度的公式。

实验研究表明，当岩石润湿性不同时，其 $I-S_w$ 关系曲线有很大差别，饱和度指数 n 值不同。国内外报导的许多实验表明，对于亲水岩石，无论岩石的饱和历程如何，饱和度指数 n 都在 2 左右。而对于亲油岩石，指数 n 大于 2，而且随饱和过程（注入或排出）的往复， n 值愈来愈大。润湿性的影响主要为油、水两相在驱替过程中其分布形式有很大差别。对于亲油岩石，含水饱和度低时，孔隙水被分割为水滴，导致岩石电阻率值的增大。

三、岩石介电常数与含水饱和度、矿化度、泥质含量、比表面、阳离子交换容量的关系

1. 岩石介电常数与含水饱和度的关系

总的来说，岩石介电常数随含水饱和度的增加而增大，其变化情况又和频率、岩性等参数有关。图 1-1-14 是 323# 中砂岩（泥质含量 2.06%）在 1kHz ~ 15MHz 频率范围内，介电常数随含水饱和度的变化关系。将图 1-1-14 与前述的图 1-1-5、图 1-1-6 相比较可以看出，无论是何种砂岩，其介电常数随含水饱和度的变化在不同频段内都有相同的规律，这是应用介电测井确定含水饱和度的实验依据。但是，不同频率范围内不同岩性有不同特征。

在频率高于 10^5 Hz 后，岩石介电常数

的地层适合。对于泥质含量高的砂岩，由于粘土颗粒表面形成的扩散双电层，它将导致由阳离子交换能力而形成的表面电流，其导电机理有别于孔隙中液体的离子导电。对于这类岩石，在双对数坐标图上，其电阻率指数和含水饱和度的关系呈非线性，但可近似地用两段直线的折线表示。图 1-1-13 是吉林油田泥质粉砂岩的 $I-S_w$ 关系曲线。从图中不难看出，低含水饱和度段，岩样的导电机理主要是粘土颗粒表面双电层的阳离子交换导电，使电阻率指数随 S_w 的增大很快下降，因此具有较高的 n 值；而含水饱和度提高到一定值以后，主要导电机理是孔隙中地层的

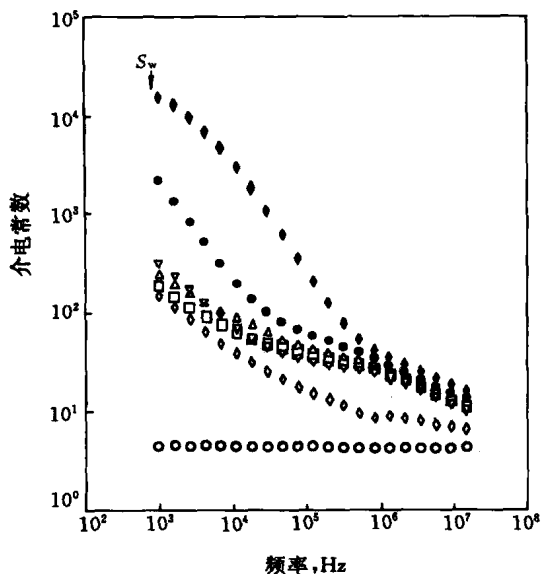


图 1-1-14 323# 中砂岩在不同含水饱和度下介电常数与频率的关系

○、◇、□、△、▽、●、◆ 分别表示含水饱和度为 0、12.2%、20.9%、29%、38%、48.6%、72%

随含水饱和度变化的灵敏度不如低频段 ($f < 10^5 \text{Hz}$)，这是因为低频段包含了各种极化。其中双电层界面极化和极性分子转向极化都直接与孔隙含水有关；频率高于 10^5Hz 后，界面极化很快减弱，主要是转向极化。因此，介电常数随含水饱和度的变化不如低频大。

介电常数随含水饱和度 S_w 增加而增大，当 S_w 增大到某一临界值 S_w^0 时，介电常数趋于不变，呈现平缓区。尔后，随 S_w 的增大，介电常数再度增大或基本不变。不同样品的 S_w^0 值不一样，它主要取决于岩样的比表面值，比表面值愈大， S_w^0 值也愈大。图 1-1-14 中的 S_w^0 值为 20.9%。

含水饱和度低，盐水只进入部分孔隙，并首先为颗粒表面吸附产生界面极化。随着含水饱和度增加，盐水进入更多的孔隙空间，覆盖骨架表面，产生较强的界面极化。当含水饱和度增大到覆盖全部孔隙表面时，界面极化最强，介电常数趋于稳定值，此时的含水饱和度即为 S_w^0 。饱和度再增大时，盐水逐渐充满整个孔隙空间，介电常数再缓慢上升。此时，介电常数的增大由孔隙体积水多少来决定。在射频段，虽然界面极化减弱，但对某些岩石在 47MHz 时仍可观察到介电常数随含水饱和度的增大过程中有一平稳段，如图 1-1-15 所示。但在更高频率，例如 200MHz，则观察不到这种现象。

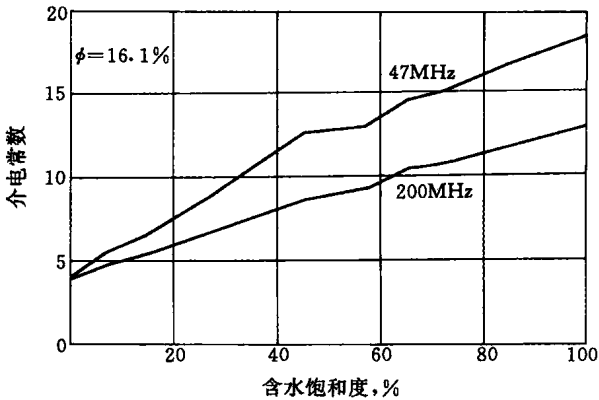


图 1-1-15 岭 307 井岩样介电常数与含水饱和度关系

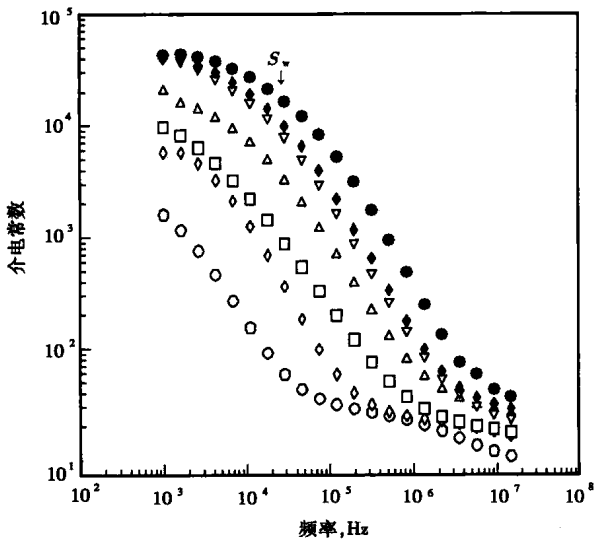


图 1-1-16 220# 细砂岩介电常数随饱和和溶液矿化度的变化关系

○、◇、□、△、▽、●、◆ 分别表示矿化度为
蒸馏水、 $5 \times 10^3 \text{mg/l}$ 、 $10 \times 10^3 \text{mg/l}$ 、 $50 \times 10^3 \text{mg/l}$ 、 $100 \times 10^3 \text{mg/l}$ 、 $150 \times 10^3 \text{mg/l}$ 、 $200 \times 10^3 \text{mg/l}$

2. 岩石介电常数与水矿化度的关系

饱和盐水的岩石，其介电常数随饱和和溶液矿化度的增加而增大，如图 1-1-16 所示。从图可以看出，当溶液矿化度高过某一值后介电常数反而下降。此外，频率愈高，岩石的介电常数受矿化度的影响愈小。砂、泥岩都有类似的情况。

在外加电场作用下饱和盐水的矿化度愈高，堆积在界面处的电荷愈多，扩散双电层的平衡离子浓度增大，平衡离子交换量增强，界面极化增强，介电常数增大。但是，当盐水浓度增大到某值后，界面积累的电荷产生与外场方向相反的附加场，阻碍离子沿场的运动。当这种动态过程达到平衡时，界面的积累电荷不再增加，极化不再增强，介电常数趋于定值。溶液矿化度再增高时，过