



激发极化法 找水基础理论研究

李金铭 等著

国家自然科学基金资助项目



地质出版社

中华人民共和国地质矿产部

地质专报

七 普查勘探技术与方法 第12号

激发极化法找水基础理论研究

李金铭 等 著

国家自然科学基金资助项目

地质出版社

·北京·

(京)新登字 085 号

内 容 简 介

本专报由两部分组成,在第一章“含水岩石激发极化性质的实验研究”中,根据 400 多个样品测得的近千条激电二次场放电曲线,指明了样品极化率和半衰减时与多种影响因素的关系;深入研究了粘土物质在砂-水体系中的作用和机制;总结出了一个能描述放电二次场的数学模型;提出了能有效用于激发极化法找水的一个新参数——“偏离度”。用实验证实了含水岩石激电二次场的时间叠加性。在第二章“等比装置激电测深的正演异常规律及反演解释方法的研究”中,通过系统理论计算和模型实验,全面总结了等比装置视极化率测深曲线在球体、水平圆柱体、板状体及水平地层上的异常规律,指明了与常规对称四极装置的差别,并给出了相应地电条件下的定性、定量解释方法。

本专报可供地质行业从事电测找水的工程技术人员阅读,也可作为地质院校本、专科生和研究生的专题教材或参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

激发极化法找水基础理论研究:地质专报:7.12/李金铭等著. —北京:地质出版社,1994.12
ISBN 7-116-01703-8

I. 激… II. 李… III. 水文地质勘探-激发极化法 IV. P641.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 08361 号

地质出版社出版发行

(100013 北京和平里七区十楼)

责任编辑:曹国芝

北京地质印刷厂印刷·新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092 1/16 印张:10.25 字数 249000

1994 年 12 月北京第一版·1994 年 12 月北京第一次印刷

印数 1—600 册 定价:10.00 元

ISBN 7-116-01701-8

P·1373

序

通过研究，我们在以下几方面取得了具有科学价值和实际指导意义的结果：(1) 根据在 400 多个含水砂样上测得的近千条放电曲线，给出并阐明了样品极化率和半衰减时与多种影响因素的关系，特别对粘土在砂-水体系中的作用进行了深入研究；总结了一个带普遍意义的，能描述放电二次场变化特征的数学模型；提出了一个有重要实用价值的激发极化找水新参数——偏离度。(2) 根据对有限大小含水体和水平含水层上等比装置激电测深的系统理论计算及模型实验，总结了视极化率测深曲线的基本特征和异常规律；指明了与常规对称四极测深曲线的差别；建立了求取有限体埋深和反演水平层层参数的定量解释方法。

1989 年由陈昌礼、张赛珍、何继善、刘振铎、周安昌等专家、教授组成的评审委员会，对本研究成果进行了评审鉴定，给予了较高评价。认为其中提出的“偏离度”新参数具有一定突破性；温纳装置的正、反演理论，对实际工作有重要指导价值”。

1991 年本成果被列入地矿部“八五”新技术推广计划。在推广过程中，有些单位，如吉林省地矿局第四地质调查所，应用新参数——偏离度取得了很好找水效果、明显的经济和社会效益。

本研究成果专报，由项目负责李金铭主编，程学栋、高杰参加了编写，陈兆洪、刘凝做了一定工作。书中插图全部由贾美芝同志绘制。

应当指出，在本项目研究过程中，曾得到傅良魁教授、陈昌礼高级工程师和夏治平高级工程师的热情支持和关照；邓明、刘若谷、俞日洲等同志也给予了积极协助。在此一并致谢。

目 录

绪言	(1)
第一章 含水岩石激发极化性质的实验研究	(2)
第一节 实验条件与方法技术	(2)
一、实验条件	(2)
(一) 仪器设备	(2)
(二) 供电电流强度和电流密度	(3)
(三) 供电时间	(4)
二、方法技术	(4)
(一) 测试样品的制备	(4)
(二) 测量参数的求取	(5)
第二节 含水岩石的极化率和半衰减时与湿度、粒度、孔隙液浓度 (成分) 以及粘土含量等因素的关系	(6)
一、极化率的实验结果	(6)
(一) 极化率与湿度的关系	(6)
(二) 极化率与孔隙液浓度及成分的关系	(9)
(三) 极化率与粒度及粘土含量的关系	(12)
二、半衰减时的实验结果	(14)
(一) 半衰减时与湿度的关系	(14)
(二) 半衰减时与孔隙液浓度及成分的关系	(15)
(三) 半衰减时与粒度及粘土含量的关系	(17)
(四) 半衰减时与延时及供电电流的关系	(18)
第三节 含水岩石激电二次场数学模型及偏离度参数	(20)
一、数学模型	(20)
(一) 数学模型的建立	(20)
(二) 衰减曲线斜率(K)与湿度、粒度、浓度等因素的关系	(22)
二、偏离度参数	(24)
(一) 偏离度参数的实验规律	(24)
(二) 偏离度参数的讨论	(28)
(三) 薄膜极化充放电过程的讨论	(29)
三、偏离度参数的实际应用效果	(32)
(一) 已知井旁的试验对比结果	(32)
(二) 大泉源乡找水实例	(33)
(三) 通化市山珍制品厂找水实例	(33)
(四) 安吉火车站找水实例	(34)
(五) 郑家堡火车站找水实例	(35)
第四节 含水岩石激发极化场的时间叠加性	(35)

一、时间叠加性的实验证明	(36)
(一) 含水自然砂激电信号的叠加现象	(36)
(二) 数学描述	(36)
(三) 实验验证	(37)
二、时间叠加性的某些应用	(39)
(一) 进行激电资料换算压制随机干扰	(39)
(二) 用于定性讨论激电参数的时间特性	(40)
(三) 激电信号与供电波形的关系	(41)
第三章 等比装置激电测深的正演异常规律及反演解释方法的研究	(44)
第一节 有限体上等比激电测深的理论与实验结果	(44)
一、体极化球体上的正、反演理论结果	(44)
(一) 正演计算方法	(45)
(二) 正演计算结果	(49)
(三) 确定球心埋藏深度的方法	(53)
二、水平圆柱体上的正、反演实验结果	(55)
(一) 单个水平圆柱体上的实验结果	(55)
(二) 两个垂向组合水平圆柱体上的实验结果	(58)
三、板状体上的正、反演实验结果	(59)
(一) 直立板上的实验结果	(59)
(二) 倾斜板上的实验结果	(61)
(三) 水平板上的实验结果	(63)
第二节 水平地层上等比激电测深的正演理论结果	(66)
一、正演计算方法	(66)
(一) 视电阻率和视极化率的计算	(66)
(二) 计算视电阻率的滤波器设计	(71)
(三) 滤波器的精度检验	(72)
二、正演计算结果	(74)
(一) 二层水平地层	(74)
(二) 三层水平地层	(76)
(三) 等比装置与对称四极装置视极化率测深曲线的对比	(80)
第三节 水平地层上等比激电测深曲线的反演解释方法	(85)
一、改进阻尼最小二乘法	(85)
(一) 方法原理	(85)
(二) 反演步骤	(88)
二、改进的广义逆矩阵法	(90)
(一) 方法原理	(90)
(二) 反演步骤	(91)
三、两种反演方法的计算实例及比较	(93)
(一) 算例 1	(93)
(二) 算例 2	(94)

参考文献	(96)
附录 A 不同 MN/AB 值滤波系数表	(99)
附录 B 二层及三层水平地层温纳激电测深 η_s 曲线册	(104)
英文摘要.....	(146)

CONTENTS

Preface	(1)
Chapter 1 The study of experiment with induced polarization of water-bearing rocks	(2)
Section 1 Conditions and methods of the experiment	(2)
1. Conditions of the experiment	(2)
(1) Equipment	(2)
(2) Current intensity and density	(3)
(3) Supply time	(4)
2. Methods	(4)
(1) Making samples of the experiment	(4)
(2) Calculation of the measured parameters	(5)
Section 2 Relation between polarizability, half decay time of water-bearing rocks and their moisture, particle size, pore water concentration and composition, and proportion of clay	(6)
1. Experimental result on polarizability	(6)
(1) Relation between polarizability and moisture	(6)
(2) Relation between polarizability and pore water concentration (composition)	(9)
(3) Relation between polarizability and partical size, and proportion of clay	(12)
2. Experimental result on half decay time	(14)
(1) Relation between half decay time and moisture	(14)
(2) Relation between half decay time and pore water concentration and composition	(15)
(3) Relation between half decay time and partical size, and proportion of clay	(17)
(4) Relation between half decay time and delay time, and supply current	(18)
Section 3 Mathematical model and the parameters of rate of deviation of discharge secondary field of water-bearing rocks	(20)
1. Mathematical model	(20)
(1) The founding of mathematical model	(20)
(2) Relation between obliquity of discharge curve and moisture, partical size, and concentration	(22)
2. The parameters of rate of deviation	(24)
(1) Laws of experiment about the parameters of rate of deviation	(24)
(2) Discussions about the parameters of rate of deviation	(28)
(3) Discussions about the charging and discharging process of IP in membrane ploarization	(29)
3. Results of practical application of the parameters of rate of deviation	(32)
(1) Comparing result of the experiment at the case of a known well	(32)

(2) Result of ground water prospecting in daquanyuan Village	(33)
(3) Result of ground water prospecting at Tonghua Mountain Delicacies Processing Factory	(33)
(4) Result of ground water prospecting at Anji railway station	(34)
(5) Result of ground water prospecting at Zhengjiapu railway station	(35)
Section 4 The time superposition property of IP response on water-bearing rocks	(35)
1. Demonstration of the time superposition property with experiment	(36)
(1) Superposed phenomenon of IP signal on natural water-bearing sand	(36)
(2) Mathematic description	(36)
(3) Demonstrating with experiment	(37)
2. Some applications of the time superposition property	(39)
(1) Application in the calculation of IP data and reducing random noise	(39)
(2) Application in qualitative study of time character of IP parameters	(40)
(3) Relation between IP signals and supply current waveshap	(41)
Chapter 2 Study of forward and inversion for equal-ratio array IP sounding	(44)
Section 1 Theoretical and experimental result with equal-ratio array IP sounding over different finite bodys	(44)
1. Forward and inverse result of theory over a volume polarized sphere	(44)
(1) Method of forward calculation	(45)
(2) Result of forward calculation	(49)
(3) Method of calculation on the depth of the center of sphere	(53)
2. Forward and inverse result of experiment over a horizontal cylinder	(55)
(1) Experimental result over a single horizontal cylinder	(55)
(2) Experimental result over two vertical arranged horizontal cylinder	(58)
3. Forward and inverse result of experiment over a plank	(59)
(1) Experimental result over a vertical plank	(59)
(2) Experimental result over a dip plank	(61)
(3) Experimental result over a horizontal plank	(63)
Section 2 Forward result of equal-ratio array IP sounding over horizontal layers ...	(66)
1. Methods of forward calculation	(66)
(1) Calculation of apparent resistivity and apparent polarizability	(66)
(2) Designing of filter for calculating apparent resistivity	(71)
(3) Precision evaluation of filter	(72)
2. Result of forward calculation	(74)
(1) Horizontal two-layers	(74)
(2) Horizontal three-layers	(76)
(3) Comparison of IP sounding curves on the Schlumberger array and equal-ratio array ...	(80)
Section 3 Inverse interpretation of equal-ratio array IP sounding curves over horizontal layers	(85)
1. Improved damping least-squear method	(85)

(1) Methodological principle	(85)
(2) Procedure of inverse calculation	(88)
2. Improved generalized inverse matrix	(90)
(1) Methodological principle	(90)
(2) Procedure of inverse calculation	(91)
3. Practical examples of two inverse calculation methods and their comparison	(93)
(1) Example 1	(93)
(2) Example 2	(94)
Conference	(96)
Appendix A: Filtering coefficient table for different MN/AB	(99)
Appendix B: Wenner induced polarization depth sounding η_s curve atlas of two- and three-layered horizontal strata	(104)
English Abstract	(146)

绪 言

为加速我国四化建设、实现本世纪末工农业年总产值翻两番的宏伟目标,大力寻找和开发地下水资源,不仅是发展农业所必需,而且对工业、国防、城市供水、矿区排水以及各种基本建设等国民经济项目也有着十分重要的意义。

激发极化法(简称激电法或IP法)作为电法勘探的一个重要分支,由于不受或少受地形及围岩电阻率不均匀性影响,且可充分利用其时间(或频率)特性,因此,用激电法找水引起了人们极大兴趣,受到了电法同行的普遍重视。

50年代中期,美国学者瓦克尔(Vacquier, 1957),苏联学者洛克佳恩斯基,Рокитянский, 1957)等,便开始对含水岩石的激发极化现象及用来勘查地下水的可行性,进行了理论和试验研究。之后,马歇尔和麦登(Marshall 和 Madden, 1959),奥吉尔维和库兹明娜(Огилъви и Кузьмина, 1965)以及其他国家的一些学者罗伊和埃里奥特(Roy and Elliott, 1980)埃里赛托(Iliceto, 1982),奥罗朗费米(Olorunfemi, 1985)等,又做了进一步研究,并给出了一些有意义结果,但目前仍处于试验研究阶段。

我国,自60年代末和70年代初开始,也陆续开展了侧重于应用方面的大量研究和试验。陕西省地质局第一物探队提出的衰减时法(1969年)和山西省水利系统提出的以观测极化率和激发比为主的综合参数法(1974),已在许多地区应用并取得了较好的地质效果。近年来,北京地质仪器厂研制推出的DWJ-1型微机激电仪(1984)和DWD-1型微机电测仪(1986),为进一步开展激电找水工作创造了有利条件。但是由于激发极化法是一种间接找水方法,其异常响应除与水有关外,还受多种因素的制约或影响,解释并非单一。这就是为什么有些地区效果好,有些地区效果不好的主要原因。此外,在我国的激电找水工作中,为了克服常规对称四极装置($MN \rightarrow 0$)电测深的异常信号小、观测精度低、曲线有脱节点等缺点,多采用温纳装置($MN = AB/3$)和一些等比装置($MN = AB/5$ 、 $AB/8$ 或 $AB/10$)。由于这方面的理论研究工作还十分薄弱,因此,目前在 $MN \neq 0$ 的激电测深资料解释中,多依赖于地区性经验或套用 $MN \rightarrow 0$ 的已有理论。显然,这是不严格和不合理的。

为了充分发挥激发极化法在寻找和开发地下水资源中的作用,1986—1988年我们在国家自然科学基金委员会的资助下,针对当前激电找水在应用基础方面存在的一些主要问题,进行了较系统的实验和理论研究。这些问题包括:含水岩石的极化率和半衰减时与湿度、颗粒度、孔隙液浓度(成分)及粘土含量等的关系;描述含水岩石激发极化放电二次场的数学模型;激电找水的新参数;含水岩石的激电机理;等比装置激电测深在有限体和水平层上的正演异常规律和反演解释方法等。

第一章 含水岩石激发极化性质的实验研究

在本章中，我们以自然砂和石英砂作为固体介质。对由不同颗粒度、不同湿度、不同孔隙液浓度及成分（NaCl, CaCl₂, FeCl₃）、不同粘土含量组合而成的 400 多个样品，进行了较系统的激发极化（IP）放电二次场测量。根据取得的近千条 IP 放电曲线，在总结规律的基础上作了理论分析，给出了若干有意义结果。

第一节 实验条件与方法技术

良好的实验条件和正确的方法技术，是取得可靠原始数据的基础。为了保证观测质量，在正式测量之前，我们对诸如仪器的选择、样品的制备、电极的类型、供电时间长短、电流密度大小等内容进行了大量条件性试验。本章将对经试验后确定下来的以上有关内容作必要描述，借以说明我们的实验条件和方法技术，并给出一些试验结果。

一、实验条件

（一）仪器设备

为尽可能测得时域较宽的 IP 放电曲线，经选择采用美制 192 型可编程数字多用表作为测量仪器。192 仪是一种具有 $6\frac{1}{2}$ 字节，快速自动换挡的数字多用仪器，直流电压测量范围 1 μ V—1200 V，电压灵敏度为 10 μ V。仪器内配有 7 个程序供专门调用，其中程序 7 可用来取出仪器主机存储器中记录的 100 个放电场采样值。数据采样间隔为 0.15 s。实验前仪器已经过同步改装，改装后的 192 仪器记录数据的首末时间分别为 0.03 s 和 14.88 s（ ≈ 15 s），采样间隔仍为 0.15 s。从这 100 个数据中近似按对数间隔抽取 11 个数值，采样时间依

次为 0.03、0.18、0.33、0.63、1.08、1.83、2.8、4.38、6.48、9.9、15 s。大于 15 s 的放电场值，则用秒表记录。

供电电源用稳压源，一次场供电为单向脉冲，供电持续时间用手动控制。此外，为排除供电过程中电极接触不良造成的微小波动干扰，在供电回路中串联了一个稳流器，不仅保证了供电过程中电流恒定，还使全部实验采用相同的供电电流强度，以便资料对比。

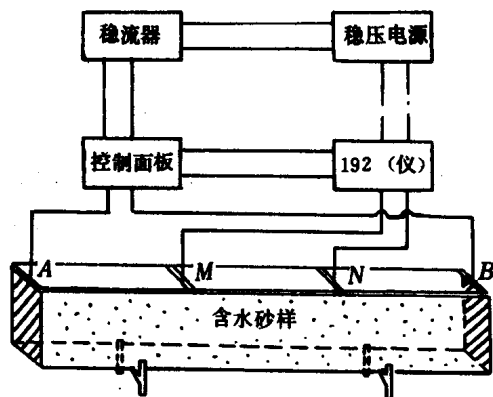


图 1.1.1 实验装置及测量线路连接图

含水砂样放在 $33.6 \times 6 \times 6$ cm^3 的有机玻璃标本盒中进行测量。测量用温纳排列 ($MN = \frac{AB}{3} = a = 11.2 \text{ cm}$)，这样可获得较强的 IP 信号。供电电极和测量电极分别为铜片电极和甘汞电极。试验表明，这种电极组合属于测量结果重复性较好的一种。以下将会看到，铜片自身的极化效应在本实验所用电流范围内可以不予考虑。实验装置及测量线路如图 1.1.1。

(二) 供电电流强度和电流密度

为了提高 $\Delta V_2(t)$ 的观测精度，应保证有足够大的供电电流强度 (I) 和电流密度 (j)。但是，当 I 和 j 太大时，供电电极（铜片）自身产生的极化场将不可忽略，而且测试样品还可能会出现非线性极化。

为此，分别采用蒸馏水、自来水和一定浓度的电解液作为传导介质，测量了铜片的电极效应，以便更合理地选择实验所用的电流强度和电流密度。

在用面状不极化电极供电时的测量结果表明，自来水及蒸馏水的 IP 效应相当微弱 ($\eta < 0.01\%$)。所以，当用铜片电极供电时，如果能测得可观的二次场，那么，这主要是由铜片极化而产生的。实验结果表明（如图 1.1.2），在 $0.05 \sim 5 \text{ mA}$ （或 $j = 0.17 \sim 167 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ）的范围内，铜片电极的电极极化效应可以忽略。

在含水自然砂土的实测结果

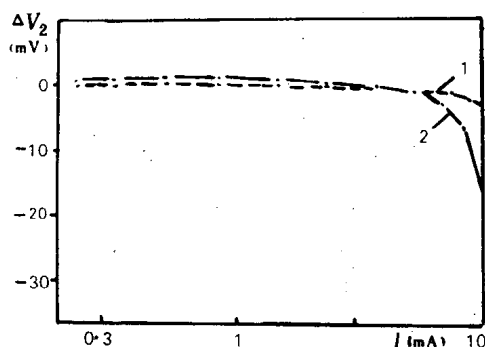


图 1.1.2 供电电极 IP 效应实验结果（自来水）
1—面状不极化电极供电；2—铜片电极供电

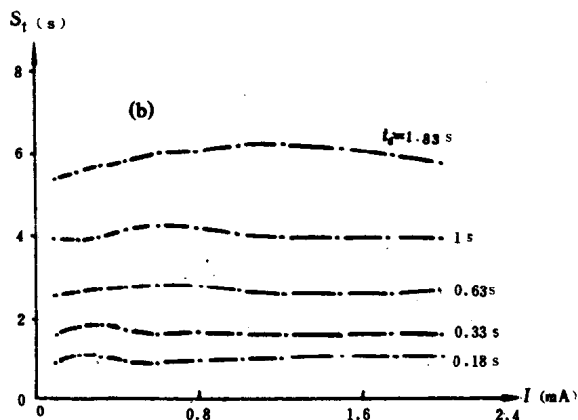
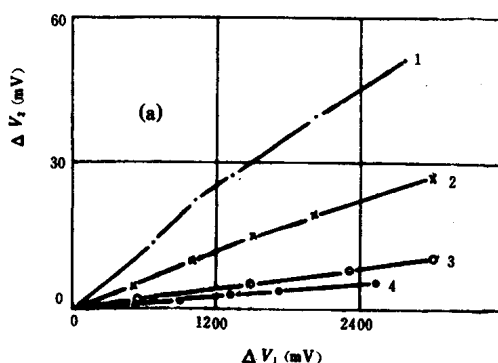


图 1.1.3 含水自然砂土上的条件性实验结果
(a) ΔV_2 与 ΔV_1 的关系 (1— $d=0.2 \sim 0.4 \text{ mm}$, $\omega=5\%$; 2— $d=0.2 \sim 0.4 \text{ mm}$, $\omega=20\%$; 3— $d=4 \sim 7 \text{ mm}$, $\omega=5\%$; 4— $d=4 \sim 7 \text{ mm}$, $\omega=20\%$); (b) S_t 与 I 的关系

表明, 当 I 在 2 mA ($j=67\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$) 以内时, 介质尚未出现 IP 非线性现象, 此时的极化率和衰减时都与 I 无关。如图 1.1.3 所示。 ΔV_2 与 ΔV_1 呈线性关系; 半衰减时 S_t 不受 I 的影响。但由图 1.1.3 (b) 可见, S_t 随延时 t_0 的增加成正比地增大。本实验中一般均取 $t_0=0.18\text{ s}$ 。

根据以上实验结果, 为了使电极极化效应降至最小及保证在线性条件下进行测量, 在所有的实验中, 除少数特殊情况外, 均取供电电流强度, $I=0.3\text{ mA}$, 即, 电流密度 $j=10\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

(三) 供电时间

为了取得明显的二次场值, 通常需要较长的供电时间, 但供电时间太长将会加大电源功耗, 而且还会增加一些不稳定因素的干扰。为选择合适的供电时间, 在含水砂样上对极化率 (η) 和半衰减时 (S_t) 两种参数的量值与供电时间 (T) 的关系进行了实验。实验结果 (图 1.1.4) 表明, η 和 S_t 值均随 T 的增加而变大, 最后趋于饱和。但由图可见, 当 $T=30\text{ s}$ 时, η 和 S_t 值已达饱和值的 80% 以上。因此, 在我们的所有实验中均取供电时间 $T=30\text{ s}$ 。

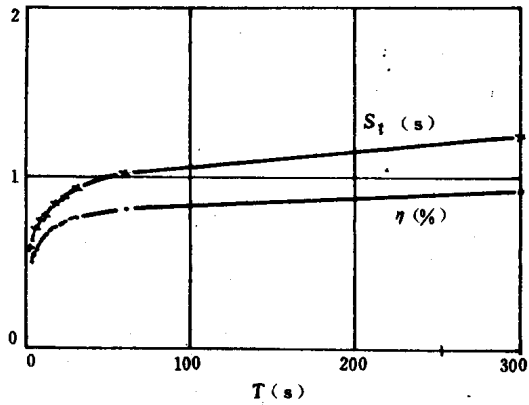


图 1.1.4 含水砂样的 η 和 S_t 与供电时间 T 的实验关系曲线

二、方法技术

(一) 测试样品的制备

我们选用自然砂作为固相介质以接近天然含水层情况, 同时为理论研究的需要, 还测量了含 SiO_2 达 99% 以上的纯石英砂的 IP 效应。

实验用的砂子均首先用自来水淘洗, 并在水中浸泡两天。然后放入烘箱内在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 的恒温下干燥 $10\text{--}15\text{ h}$ 。

为了能准确地控制样品孔隙液的成分及浓度, 一般选用蒸馏水作为母体。溶液成分分别为 NaCl 、 CaCl_2 、 FeCl_3 。在少数实验中曾用自来水作为孔隙液。北京地区自来水的成分及含量见表 1.1.1。

表 1.1.1 北京地区五道口自来水化学分析表 (引自北京自来水厂)

成 分	CaCO_3	MgCO_3	Na	K	Fe	Cu
含 量 (10^{-6})	144	105	<13.2	<2.5	0.01	0.001

实验中所用测试砂样的粒度 (d)、湿度 (ω)、浓度 (C) 及粘土含量 (q) 的定义和单位如下:

[粒度] 砂样颗粒直径的范围用毫米 (mm) 度量, 自然砂的粒度按粒径分为: 0.2--

0.4 mm、0.4—0.75 mm、0.75—2 mm、2—4 mm、4—7 mm、7—10 mm 等六个级别。纯石英砂的粒度用目表示，其对应的粒径如下，表 1.1.2。

表 1.1.2 纯石英砂的目与粒径对照表

粒 度 (目)	50—100	40—70	20—40	8—10	8—10
粒 径 (mm)	<0.4	<0.4	0.4—0.75	1—2	2—4

[湿度] 孔隙水重量相对于干砂重量的百分比

$$\omega = \frac{\text{孔隙水质量}}{\text{干砂质量}} \times 100\%$$

当砂样饱含孔隙液时，这时的湿度称为饱和湿度。记为 ω_m 。不同粒度的砂样 ω_m 也不同，因而，在湿度与激发极化二次场特征的实验结果中，方便于对比各种粒度砂样的实验结果，还采用了“相对湿度”的概念。

[相对湿度] $\omega_i = \frac{\omega}{\omega_m} \times 100\%$, ($\omega_i = 0—100\%$)

[浓度] 用溶质相对于溶液的质量百万分比，单位为 (10^{-6})。

[粘土含量] 干燥粘土相对于干燥砂样的重量百分比

$$q = \frac{\text{干粘土质量}}{\text{干砂质量}} \times 100\%$$

整个实验过程的环境温度为 $20\text{C} \pm 10\text{C}$ 。前人实验已证明在常温下，温度差异带来的 IP 变化可以忽略，因而不同时期的实验结果，在其它条件相同时，可以进行对比。

(二) 测量参数的求取

实验中，根据供电期间测得的一次场 ΔV_1 ，和断电后，在 0.18 s—15 s 时间段内，IP 放电二次场 $\Delta V_2(t)$ 的观测数据，直接整理出的参数有极化率 (η)、半衰减时 (S_i) 和电阻率 (ρ)。

$$\text{极化率} \quad \eta = \frac{\Delta V_2(0.18\text{s})}{\Delta V_1} \times 100\% \quad (1.1.1)$$

半衰减时 S_i ，是指 $\Delta V_2(t)$ 衰减到 $\frac{1}{2}\Delta V_2(t_0) |_{t_0=0.18\text{s}}$ 时所需的时间，以秒或毫秒为单位。计算方法是：

$$\text{若} \quad \Delta V_2(t_i) \geq \frac{1}{2}\Delta V_2(t_0) \geq \Delta V_2(t_{i+1})$$

$$\text{则必有} \quad t_i \leq S_i \leq t_{i+1}$$

假设在 (t_i, t_{i+1}) 时间间隔内， $\Delta V_2(t)$ 近似对数直线形式。(已被实验结果所证实，见第二节一、的 (一) 中所述。) 即

$$\Delta V_2(t) = B - K \log t, \quad t \in [t_i, t_{i+1}]$$

式中 B 为反映极化强度的常数, K 为 ΔV_2 衰减曲线的斜率。

$$\text{从而有} \quad \frac{\log S_i - \log t_i}{\log t_{i+1} - \log t_i} = \frac{\frac{1}{2} \Delta V_2(t_0) - \Delta V_2(t_i)}{\Delta V_2(t_{i+1}) - \Delta V_2(t_i)} \quad (1.1.2)$$

由 (1.1.2) 式可计算出 S_i , 显然不同延时 t_0 有不同 S_i 值。从 (1.1.2) 式还可看出, 当右端的分子分母同时除以某一常量 (例如 ΔV_1) 时, 不影响 S_i 的计算结果, 所以本文中的 S_i 均是根据极化率衰减曲线 $\eta(t)$ 计算出来的。

$$\text{电阻率} \quad \rho = K \frac{\Delta V_1}{I} \quad (\Omega \cdot \text{m}) \quad (1.1.3)$$

式中 $K = \frac{S}{l}$, K 为电阻率系数, S 为样品盒的横截面积, l 为测量电极 MN 之间距离, I 为供电电流强度。

第二节 含水岩石的极化率和半衰减时与湿度、粒度、孔隙液浓度 (成分) 以及粘土含量等因素的关系

系统地研究含水岩石的激发极化率与湿度、颗粒度、孔隙液浓度 (成分) 以及粘土含量等的关系, 并明确它们的规律性, 对激电找水来说具有十分重要的意义。本节以含水砂样作为测试标本, 以反映其极化强度的极化率 (η) 和反映其放电速度的半衰减时 (S_i) 作为基本测量参数, 按照第一节所述及的实验条件和方法技术, 通过大量实验给出了这两种参数与以上影响因素的实验结果, 并在总结其规律的基础上, 探讨了它们的机制。

一、极化率的实验结果

(一) 极化率与湿度的关系

极化率 η 与湿度的关系——激电找水的核心问题, 各家研究者有过不尽相同的实验结果。大多数学者认为, 极化率随湿度变化时有极大值出现, 并存在最佳湿度; 洛克佳恩斯^[7]基, 在石英砂上得到了极化率随湿度增大而减小的实验关系, 并用双电层形变假说解释了这一结果。

图 1.2.1 是在只经过轻微淘洗的自然砂上的测定结果。由图可见。随湿度 ω 的增大, η 先增大, 后减小, 在 $\omega=5\%$ 左右取得极大值。由图还可看出, 随粒度增大, 此极大值向较小湿度方向位移。当 ω 大于 $7\%-10\%$ 后, η 依次递减, 近似有以下关系

$$\eta = \frac{b}{\omega + a} (\%) \quad (1.2.1)$$

式中 a 、 b 为经验系数。在本实验中 $a=0.111$, $b=0.192$ 。

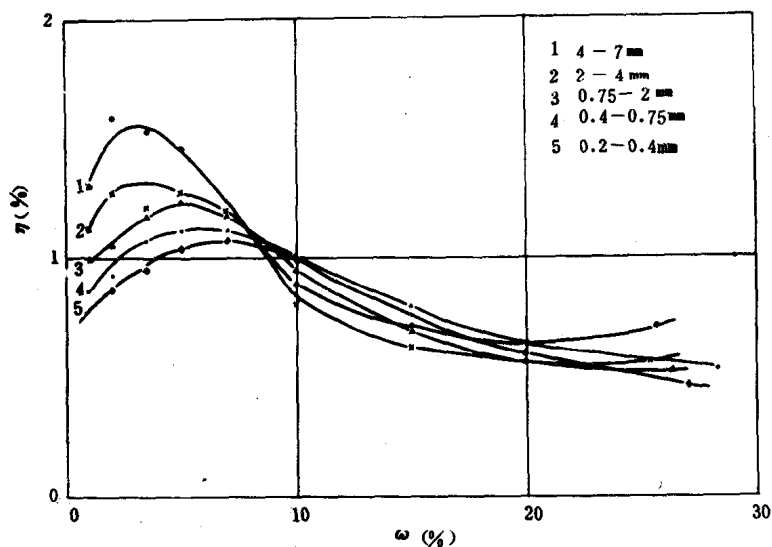


图 1. 2. 1 自然砂的极化率 (η) 与湿度 (ω) 的实验关系曲线
1—5 为自然砂的粒度

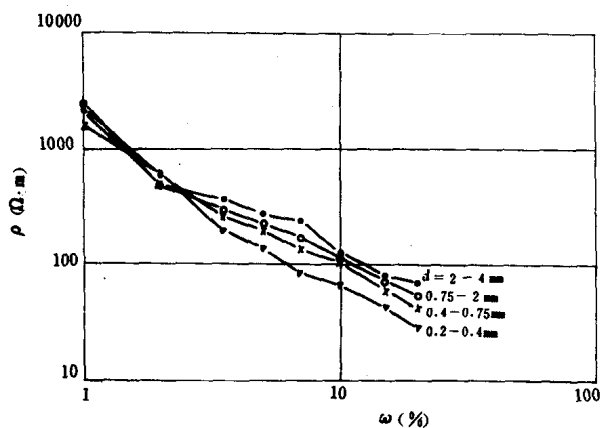


图 1. 2. 2 自然砂的电阻率 (ρ) 与湿度 (ω) 的实验关系曲线

此外, 在 $\omega < 7\%$ 的情况下, 当砂粒的直径变大时, η 值随之有所增加; 而在 $\omega > 7\%$ 以后, 则 η 值与粒度的变化关系不大。

总之, 极化率与湿度的实验结果表明, 只在含水量不大时, 样品的激电效应才随含水量的增加而变大, 即有正相关关系。当含水量较大时, 样品的激电效应, 将随含水量的增加而减小, 即为负相关关系。

样品的电阻率与湿度的关系如图 1.2.2 所示。由图可见, 不同粒度的砂样, 其电阻率值均随湿度的增加而减小, 但湿度很小时, 下降较快, 湿度较大时, 则下降较慢, 而且粒度较大的样品, 电阻率值较高。

对照图 1.2.1 和图 1.2.2 可以看出, η 极大值的出现与电阻率下降速度的转折有关。