

地球物理技术汇编

(8)

《石油地球物理勘探》编辑部

30697

地球物理技术汇编

52/36/06(8)



00304511



200402162



《石油地球物理勘探》编辑部

1987年

地球物理技术汇编(8)共收集了30篇文章,内容包括岩石物理学发展综述、地震解释方法、数字处理、可控震源使用中一些常见问题分析、高分辨率地震检波器介绍与分析,以及数字地震仪的介绍、维修、评述等。可供从事地球物理勘探的同志和大专院校有关专业的师生参考。

地球物理技术汇编

(8)

《石油地球物理勘探》编辑部编辑出版

*

石油部物探局制图印刷厂印刷

1987年12月出版

内部发行

冀出内字第1164号

目 录

岩石物理学的进展及研究综述(下)——岩石的电性

- 及岩石模型…………王之敬 Amos Nur (1)
- 地震物理模拟岩性研究的尝试…………宋一阳 (35)
- 折射波虚拟成像技术…………王修田 焦湘恒 (52)
- 转换横波的试验方法与效果…………温一波 (70)
- 地震叠偏剖面的补偿闭合及作图方法…………祝伟业 (77)
- 变 V_0 , β 连贯算法…………顾先觉 (102)
- 直射法变速空校一例…………夏子煌 (114)
- 地震速度陷阱的几种判别方法…………李荣奎 (124)
- ✓速度谱的密度、选点及特殊现象的解释…………潘尧嘉 (140)
- 初至波静校正方法初探…………唐国成 张智勇 (150)
- 地震解释工作的现状与展望…………金福锦 (157)
- 垂直地震剖面法在四川的初步应用…陈肇怀 唐文祥 (166)
- ✓振幅比法在微机上的实现…………于进芳 (177)
- 时间域积分法 DMO 及其在新疆资料处理中的
应用…………田树人 赵建勋 (185)
- 用宏处理技术建立地震资料解释全层位 t_0 数据库
…………李荣奎 张新云 (205)
- 地震地层学方法在沉积盆地分析中的应用…李汉瑜 (221)
- 高差值异速薄层的地震地质特征…………马永生 (229)
- ✓近期海上地震作业技术的新发展…………谢朝恩 (241)

可控震源鸟车的几种故障分析与排除·····	史津生(259)
对可控震源使用中某些常见问题的分析·····	陶如非(264)
可控震源发动机进气系统改造·····	王长江(274)
液压技术在地震勘探钻机中的应用·····	毛 军(281)
陆用空气枪·····	刘 瑛(285)
高分辨率地震检波器·····	黄永炘(291)
涡流地震检波器应用初探	
·····	叶道凡 康大浩 徐天柱 陈启祥(303)
SK-83 型数控地震仪简介·····	罗维炳(323)
ES-2420 反射地震仪的日检和月检·····	屈智新(334)
用两个波段开关实现 120 道检波器通路的测量	
·····	王众刚(349)
磁带丢码问题初探·····	尤桃如(353)
国外遥测地震仪发展中的几个问题·····	李秋成(357)

岩石物理学的进展及研究综述（下）

——岩石的电性及岩石模型

王之敬 Amos Nur

摘要 本文综述和概括了在岩石电性、岩石模型方面的主要研究成果，并提出了在岩石物理学研究中所存在的问题、以及一些最新研究动态等。

绪 论

岩石物理学是一门研究岩石的物理性质及这些性质间的相互关系和相互作用，以及外界因素对这些性质影响的学科。它的发展和日趋完善对更加精确地提取、反演地下的信息起着十分重要的作用。它的研究内容主要包括岩石的波特性和电性等几个方面。在文献[1]中，我们曾就岩石中波的传播特性及其在这方面的研究成果、进展作了综述。在此文中，我们将对岩石的电性及岩石的模型作出讨论、概括和综述。由于人们在这方面已做了大量的工作，我们只能对一些主要的研究成果进行概括性的叙述。在文章的最后，我们还将简要地讨论一下岩石物理学研究中所存在的问题，最新研究动向及其发展前景等，并就此提出我们的看法。

本文于1987年3月12日收到。

岩石的电性

岩石的电性主要包括岩石的电阻和电介两方面的性质。一般说来，由于岩石的介电常数与其电阻率成反比，即某一因素对岩石电导率（电阻率之倒数）的影响与其对岩石介电常数的影响在本质上是是一致的。因此，在此文中，主要就岩石的电阻率与一些因素（内在的，外在的）的关系进行简要的讨论和综述。

测量岩石的电阻率可以了解多孔岩石（包括砂）的其它性质。在油田的勘探和开发中，油藏岩石的电阻率可以用来计算或估计岩石的孔隙度、水（油）饱和度、以及渗透率等极为重要的参数，并监测油田中所注蒸气的运移。在地球物理勘探中，以研究电阻率为对象，产生了电法勘探（如激发极化法，自然电位法等）、大地电磁法勘探。在天然地震中，人们已经在试图利用地下电阻率的变化来预报或监测地震的发生。在土力学的研究中，由电阻率法而获得的孔隙度信息可以用来估计砂土的强度。在海洋物理中，电阻率法被用来估测在无扰动情况下海底沉积物的孔隙度及密度。另外，电阻率法已被用于地热资源的勘探与评价。总之，对岩石电阻率的研究是十分必要和重要的。

尽管人们已做了大量的工作，研究岩石的电阻率仍是一项复杂而艰巨的任务。由于众多的因素对岩石的电阻率都有着不同程度的影响，且这些因素大都又相互作用。因此人们仍需对更多种类的岩石进行测量，建立更大容量的数据库，对实验结果作出更加详尽全面的分析，以期弄清各种因素的

作用。

在本文中，我们将结合现有的特别是近几年来实验数据，对影响岩石电阻率的一些主要因素进行概括、综合和总结。

压力对岩石电阻率的影响

岩石的电阻率随压力的变化主要取决于岩石孔隙中的含水量。总的说来，岩石孔隙水可细分为吸附层水、扩散层水及自由水。在岩石孔隙水含量较低时（较为干燥的岩石及半饱和状态下的岩石），其电阻率随压力的升高而降低。这是因为压力的升高使得岩石中矿物颗粒间及吸附水间的接触程度升高，从而增加了岩石中的导电通道^[11, 21, 51, 52]。然而，当压力升高时，岩石电阻率降低的程度不取决于岩石的矿物组分、孔隙中含水的多少和孔隙的几何形状等诸因素。

在完全水饱和的岩石中，实验结果和理论都证实岩石（一般为砂岩）的电阻率随围压的升高而升高，随孔隙压的升高而降低^[5, 16, 53]。其原因在于：围压的升高使得岩石的孔隙度下降而“关闭”了一些导电通道；而孔隙压的作用则是增加了岩石中导电通道的截面积。Parkhomenko(1982)认为，岩石电阻率随有效压力（围压与孔隙压之差）的升高而降低的程度取决于：（1）孔隙度；（2）导电通道的弯曲程度；（3）孔隙表面积的大小；（4）岩石颗粒的大小、形状、及筛选性；（5）岩石的矿物组分；（6）岩石胶结物的含量及种类等诸因素。由此可见，岩石的电阻率并非是某一参数的单一函数，而是同时由许多参数决定的。改变其中的某一参数，同时也改变了其它参数的作用。也就是说，某一

参数对岩石电阻率的影响程度还取决于许多其它参数。

Brace 和 Orange (1968) 的实验结果表明：对于由非导电矿物组成的岩石（大多数是沉积岩）来说，水饱和岩石在高压下的电阻率主要取决于岩石的孔隙度。其它参数如颗粒大小、矿物成分等与孔隙度的作用相比几乎可以忽略。在由导电矿物组成的岩石中（如辉长岩），当压力开始升高时，其电阻率急剧下降，尔后压力继续升高对电阻率几乎没有影响。

另外，在岩石孔隙中同时含水 and 油的情况下，即岩石在水、油二相饱和状态下，压力对岩石电阻率的影响还取决于岩石的可湿性及水油含量的比例。不过，据作者所知，这方面的实验结果，迄今还不多。

温度对岩石电阻率的影响

与围压对饱和岩石电阻率的作用相反，温度的升高会使得岩石的电阻率降低。一般说来，当温度变化时，沉积岩电阻率的变化主要取决于其孔隙液体电阻率的变化^[53, 55]，其次取决于岩石的矿物组分，也就是说，含不同矿物组分的岩石电阻率随温度的变化程度不同。因此，水饱和岩石的电阻率随温度的变化主要取决于孔隙水含电解质的程度、岩石的矿物组分，以及孔隙度。

在水饱和的辉长岩和花岗岩中，Volarovich 和 Parkhomenko^[67] 的实验结果表明，岩石的电阻率在 0—120℃ 的温度范围内随温度的升高而急剧下降（达 80%）。当温度继续升高时，其下降的速度大大地减小。他们的解释是，当温度升高时，孔隙水中的导电离子运动速度大大加快，而造成岩石的电阻呈指数下降。Avchian (1972) 对饱和沉积岩的实

验结果也同样证实了这一点，并认为岩石的电阻率在 20—250℃ 的温度范围内可下降至原来的 $1/(4\sim 20)$ ；电阻率下降的程度与岩石中的粘土含量有关，即岩石的粘土含量越高，其电阻率随温度的升高而下降得越快。

Kern 等人 (1977) 通过实验证实，水饱和含泥砂岩的电阻率随温度的升高而呈线性下降。同时，岩石的介电常数或电容随温度的升高也呈线性升高。他们认为岩石的介电常数与地层电阻因数之积可用来估测砂岩的含泥量。

Sanyal 等人 (1972) 通过对三种砂岩和一种石灰岩地层电阻因数（水饱和下岩石的电阻率和饱和水电阻率之比）的测量发现：全部所测岩石的地层电阻因数都随温度的升高而升高；其升高的速度取决于岩石的粘土含量以及岩石的内表面积。因此他们指出在用岩石的地层电阻因数来计算孔隙度（用 Archie 定律）时，要对温度的影响作些校正。

总之，温度对岩石电阻率的影响不是孤立的，没有也不可能有一种温度—电阻率关系可以定量地适用于任何岩石。但总的趋势，即温度的升高会使得岩石的电阻率下降则是一致的。

饱和度对岩石电阻率的影响

Archie (1942) 的饱和方程把岩石的水饱和度与岩石的电阻率联系起来，即 $\frac{R_0}{R_w} = \frac{b}{S_w^n}$ ，其中 b 为一比例常数（一般取为 1）； R_0 为岩石在水饱和度为 S_w 时的电阻率， R_w 是完全水饱和时（ $S_w = 1$ 时）的岩石电阻率。对一般不含粘土的砂岩， n 约为 2.0。显而易见，岩石的电阻率大致与其水饱和度的平方成反比。

一般说来,“干燥”岩石的电阻率很高(对砂岩来说一般大于 $10^6 \Omega \cdot m$)。但当岩石孔隙中含少量水时,这些孔隙水主要吸附在岩石的内表面上而导致表面导电(吸附层水导电),使得电阻率下降。但由于这时的导电通道特别弯曲以及通道的截面积很小,因此电阻率仍较高。当孔隙中的含水量进一步增加时,水在岩石的内表面上形成了较厚的层,并且这时小的孔隙已被水充满(扩散层水导电),电阻率随饱和度的升高而急剧下降。在进入自由水导电阶段时,水饱和度的升高只能增大导电通道的截面积,而通道的长度已不能再继续缩短,因而这时电阻率的下降又趋缓慢起来。

Duba 等人(1978)将“干燥”的砂岩及石灰岩放在相对湿度为45%的空气中,约200小时以后,岩石的电阻率呈指数下降,竟达4级,这时岩石的水饱和度约为20%。

当然,正如其它因素对岩石电阻率的影响一样,水饱和度和电阻率间的关系定量地说也不是孤立的,还同时受许多其它因素的影响(如孔隙度、渗透率、饱和水含盐量等)。确切说,孔隙水对岩石电阻率的影响程度依赖于岩石中的含水量,而不是饱和度。

孔隙度对岩石电阻率的影响

岩石电阻率与孔隙度的关系首先是由 Archie (1942) 建立的。Archie 定律认为,岩石的地层电阻因数(水饱和岩石的电阻率与饱和水电阻率之比) F 与其孔隙度 ϕ 存在如下关系

$$F = a\phi^{nn}$$

其中, a 为一比例常数,其值一般在0.6—1.0之间; n 称为岩石的胶结指数。对砂岩来说, n 一般在1.5—2.2左右,

取决于岩石的胶结状况，即岩石胶结越好， n 就越大。对散砂来说， n 大约在 1.3 左右。

Archie 定律的最大贡献是可以利用电阻率来估计岩石的孔隙度。在已知孔隙水电阻率的情况下，岩石的电阻率将随孔隙度的变化而呈指数变化。

对于非固结砂来说，胶结指数 n 还与砂粒的形状有关。对完全由球状砂粒构成的砂来说 $n \approx 1.2$ ，对由扁平状砂粒构成的砂来说， n 可达 1.9^[31]。因此 n 值的变化可能是不同砂粒形状的含量所决定的^[31, 64, 76]。

另外，岩石中微孔隙的含量也对其电阻率有所影响，即它可使非完全水饱和状态下岩石的电阻率降低^[63]，因此在计算电阻率指数时（非完全水饱和岩石的电阻率与完全水饱和岩石电阻率之比），还要考虑到微孔隙的作用。

许多实验证实^[6, 25, 36]，纯砂岩的电阻率与其孔隙度之间的关系与 Archie 定律吻合甚好。但当岩石中含有粘土时，实验值往往偏离 Archie 定律很多，因此要对含粘土岩石的电阻率作出校正，以便更好地应用 Archie 定律。

渗透率对岩石电阻率的影响

基于流体运动学中的 Poiseuille 定律，岩石孔隙中流体的运动和电阻率间的关系可用下式来描述^[13, 30, 79]

$$K = \frac{m^2}{K_0} F^{-2} \phi^{-1} \quad (1)$$

式中， K 为岩石的渗透率； K_0 为一形状因数（一般在 2 和 3 之间）； m 称为液压半径； F 为岩石的地层电阻因数； ϕ 为孔隙度。

由于 Archie 定律适用于大多数岩石，取 $F = a\phi^{-n}$ 中的

a 为 1, n 为 2, 我们可以导出

$$K = \frac{m^2}{K_0} F^{-1.5} \quad (2)$$

从上式可以看出, 水饱和岩石的渗透率与电阻率的 1.5 次方成反比。这可以理解为: 由于渗透率是定义岩石孔隙连贯性的一个参数, 因此当岩石的渗透率升高时, 岩石中的导电通道数量增加或通道的截面积增加, 从而使得电阻率下降。

Brace (1977) 通过对两种花岗岩和数种砂岩 (孔隙度范围: 1—37%) 的电阻率、渗透率及液压半径的实验室测量发现, 所测结果与用式 (2) 计算出的结果吻合较好。其吻合系数一般小于 2 (即测量 K 值与计算 K 值之比小于 2)。然而此种方法的精度太低, 而且用式 (2) 计算油藏的渗透率也会受到限制。因为实验室中所测的 m 值很难代表地下油藏的 m 值。一般在压力的作用下, 油藏中可能会有许多裂隙或裂隙状孔隙出现, 造成表面导电, 从而导致电阻率的测量误差增大。

值得注意的是, 以上的讨论 (即水饱和岩石的电阻率或地层电阻因数随渗透率的升高而降低) 是对纯砂岩或砂 (即不含粘土) 而言的。当岩石中含有粘土时, 渗透率随粘土的含量的增加而降低。而由于表面导电的作用, 岩石的电阻率随粘土的含量增加而降低。这就形成了水饱和含粘土岩石的电阻率 (或地层电阻因数) 随渗透率的升高而升高的现象 [1, 2, 19, 20, 65, 76]。在这种情况下, 电流主要是由粘土 (泥) — 水界面上的双离子层来传导的。因此 Worthington (1983) 定义了另外一个参数——视地层电阻因数 F_a , 有

$$\frac{1}{F_s} = \frac{1}{F_r} + \frac{R_w C}{F} \quad (3)$$

式中, F 为岩石的真地层电阻因数; C 是由于粘土(泥)产生的附加电导率, R_w 是饱和水的电阻率。

从式(3)可以看出, 当 $R_w C$ 很小时, $F_s \approx F$, 这时式(2)是正确的, 即渗透率升高时, 水饱和岩石的电阻率下降。当 $R_w C$ 很大时, $F_s \approx F/R_w C$, F_s 将会随渗透率的升高而升高。

总之, 渗透率和岩石电阻率之间的关系对不同岩石来说是不一样的, 还要取决于岩石孔隙水的含盐量和岩石中的粘土(泥)含量。

粘土含量对岩石电阻率的影响

如上所述, 对于不含粘土的砂岩或砂, Archie 定律是成立的。但当岩石中含粘土时, 使用 Archie 定律时就要作出校正。一般说来, 岩石的电阻率由于表面导电的作用将随粘土含量的增加而降低。同时, 粘土的存在将使得电测井数据解释变得更为复杂。

Waxman 和 Smits (1968) 建立了一个物理模型, 将水饱和含粘土(泥)砂的电阻率与饱和水电阻率、岩石单位孔隙体积的交换阳离子容量联系起来, 他们还将此模型推广到岩石中同时含水、油二相液体的情况。此模型可以较好地拟合一些实验曲线。并预测当孔隙水的电导率(电阻率的倒数)从零开始升高时, 含粘土砂岩的电导率急剧升高, 其速度远远超过孔隙水电导率升高的速度。他们认为此种现象是由于交换阳离子的运动能力升高而引起的。当孔隙水的电导率进一步升高时, 砂岩的电导率呈直线上升。

Diederix (1982), Olhoeft (1984), Raiga-Clemenieu 等 (1984) 以及 Johnston (1985) 等人通过对岩石随粘土含量与电阻率的关系的研究认为, 粘土具有极化作用, 可以降低岩石的视电阻率, 影响温度、频率等因素的作用, 而且对电阻率具有较强的非线性作用。Raiga-Clemenieu 等 (1984) 和 Clavier 等 (1977) 还提出了“双水”模型, 包含了束缚水和自由水的不同作用。这是因为粘土的存在增加了岩石的内表面面积, 而此内表面上的束缚水能大大增强岩石的导电能力。

另外, Waxman (1985) 又提出了关于粘土对复变电阻率影响的模型。Rankin 和 Singh (1985) 的实验结果显示粘土的存在可以使复变介电常数的实部升高, 虚部降低。Johnston 等 (1985) 则发现岩石中粘土的表面导电作用可以使得电阻率在温度升高 100°C 时下降 $4/5$ 。

粘土的作用不仅仅是使得岩石的电阻率降低, 同时它还影响着其它因素 (如温度、压力、频率、渗透率等) 对岩石电阻率的作用。因此人们仍需要对粘土的作用进行更加系统的、彻底的研究, 以及需要取得更多的实验数据来验证各种模型的可行性。

可湿性对岩石电阻率的影响

岩石的可湿性、饱和度和饱和度能决定孔隙流体的位置及其分布, 所以这些因素对其电阻率起着很重要的作用。当岩石在水、油二相饱和时, 水可湿岩石中的孔隙水主要分布在较小的孔隙中, 并在岩石的内表面上形成连续膜, 保证了导电通道的连续性。然而, 在油可湿岩石中, 孔隙水主要分布在较大孔隙的中心, 使得导电通道时断时续。因此在水饱

和度较低（油饱和度较高）时，在同样条件下水可湿岩石的电阻率要比油可湿岩石低得多。

Archie 在 1942 年建立的饱和方程认为，岩石的水饱和度 S_w 与岩石在此状态下的电阻率 R_0 和完全水饱和下的电阻率 R_w 之比有关，即

$$bS_w^{-n} = \frac{R_0}{R_w} = I$$

其中 I 称为岩石的电阻率指数， n 称为 Archie 饱和指数， b 为比例系数。然而，Archie 饱和方程有三项假设^[45]，即：①水饱和度—电阻率间的关系是唯一的；② n 对一个特定的岩样来说是常数；③所有的孔隙水都对岩石的电阻率发生作用。需要指出的是，这三项假设只有在岩石为水可湿时才成立。当岩石的可湿性改变时，孔隙中的水、油分布状况发生改变，也能造成电阻率的改变。在这种情况下，Archie 饱和方程不是唯一的。

在水饱和程度较低时，油可湿岩石的电阻率要比水可湿岩石高得多，而且使得饱和指数 n 升高^[45]。因此在测量 n 时必须将岩样保持在油藏状态下（可湿性）。比如，在岩石为水可湿时测量 n ，而实际上油藏岩石是油可湿的，这样就会大大地过低估计油藏的水饱和度。Pirson 和 Fraser(1960) 给出了一个实际例子，即在一口油可湿油田中的井只出水而不出油。如果假设油藏是水可湿的，测井结果显示油藏的水饱和度只为 25%，而实际上远不止此。

在水可湿的岩石中，由于孔隙水总是可以形成连续的导电通道，因此其 Archie 饱和指数 n 一般在 2.0 左右时不随饱和度的变化而变化（一般很小）。但在油可湿的岩石中，

在水饱和度较低时（一般小于35%）， n 值可以达到10或更高。这是因为在油可湿岩石中，水一般孤立地分布在较大孔隙的中心，从而造成大多数的导电通道被切断，反而使得岩石的电阻率大大升高^[3]。

在岩石的水饱和度较高时（一般高于40%），无论水可湿还是油可湿岩石中的孔隙水都可以形成连续的导电通道。因此在这种情况下岩石的可湿性对电阻率的影响就很小了。这时的 Archie 饱和指数大约在2.0左右。

由此可见，在测量岩石的电阻率并用其计算 Archie 饱和指数时，所用的岩样必须是从实际井下取出的并保存完好的岩样。否则在估计油藏岩石的水饱和度时，会产生很大的误差。

其它因素对岩石电阻率的影响

电磁波频率 一般说来，电磁波的频率对水饱和岩石的电阻率影响很小。Lockner 和 Byerlee (1985) 的实验显示，对水饱和的砂岩来说，其复变电阻的实部随频率的升高而略有下降。但这种下降是非常缓慢的（在 10^{-3} 到 10^4 Hz 的频率范围内下降了约12%）。在干燥的岩石中，Duba 等人 (1978) 的实验结果显示，岩石（三种砂岩，一种石灰岩，一种花岗岩）的对数电阻率随对数频率的升高而呈直线性下降，当然这种下降也是很缓慢的。

另外，Lysne (1983)、Korringa (1984) 及 Bergman (1982) 等人还分别建立了几种岩石电响应的高频模型。但这些模型主要是针对岩石的介电性质的。

总的说来，对岩石电阻率的研究主要是在低频范围内的（几赫兹到几千赫兹），这个范围又称为导电区。而对岩石