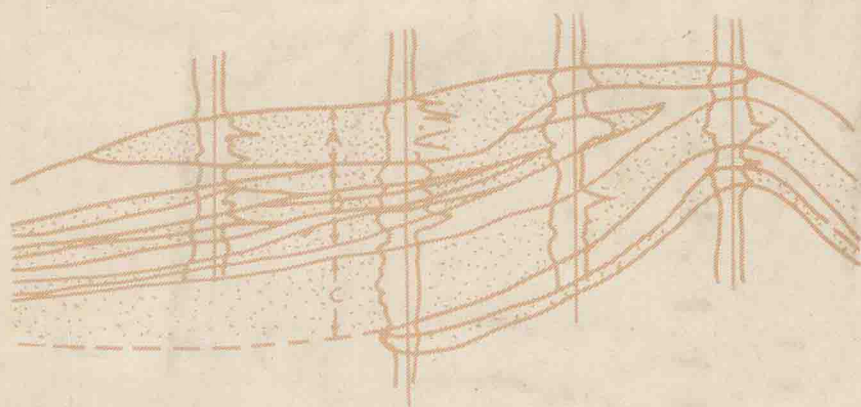


Basic Well Log Analysis For Geologists

By:
George Asquith

With:
Charles Gibson



地质家测井分析基础

新疆石油地质编辑部

李太安等译 秦强审校

✱

新疆石油地质编辑部出版

(克拉玛依长征新村研究中心大院)

勘探开发研究院印刷

开本787/1092 1/16印张 $10\frac{2}{4}$ 字数245千字印数1500册

1984年11月第1版 1984年11月第1次印刷

工本費2.00元

前言

本书是介绍裸眼井测井的一本基础读物。

使用电法、原子核能以及声能等岩石物理技术研究岩石性质与地质工作者所使用的光学、X射线以及化学方法等较普遍的手段研究岩石性质是同样重要的。然而，许多地质工作者却忽视了岩石物理方法的重要性；利用石油物理信息常常不多。他们或者是对测井术语和数学方法望而生畏或者认为深入的测井知识应归入测井分析者和工程师的范畴更为合适；而对于他们的学科来说，只是或多或少有点用而已。

对于地质工作者，测井甚为重要；因此应抛弃旧的观念，专心致志地学习测井解释。事实上，收获是明显的，通过学习，起码对于旧的现在悬而未决的资料得到理解。一勘探程序的成败的关键很可能取决于地质工作者的测井知识。

为了简洁，课文中只限于讨论裸眼井测井，以便充分地讨论石油勘探中广泛应用的各种测井方法。希望读书能成为读者学习超出本书范围之外的其它各种测井的入门。

遗憾的是学习裸眼井测井技术要求于读者的不是浏览正文材料内容，浅尝辄止，事实上，严肃认真的学生所面临的是要做大量艰苦的工作（包括熟记测井术语）；即使这样，还需要在实际工作中，广泛积累经验，才能发展和熟练应用测井技术。该书的目的只不过是以后增进知识奠定基础。因此，超出这一范围以外的许多内容将留待较高级的书讲。

有些同行很可能会对没有安排时间讨论仪器原理提出异议，也许还认为课文陈述质量不高。这些是可以理解的，实际上，就是认为课文结构过于简单。简而言之，应当指出：除了最热情的初学者之外，过多的岩石物理资料常常使初学者裹足不前。当然，要根据初级水平必不可少的资料权衡取舍，在抉择定稿过程中确曾面临不少困难。

许多读者将会注意到在本书中时常提到由科罗拉多州，格尔顿的D. 希尔奇所著题为“裸眼井测井资料应用解释”（1978）一书，读书对于希望扩大对测井了解的读者来说，有很大的帮助。另一本就是职业测井分析家协会编写的《测井术语与词组汇编》（1975），它更深入地解释了测井术语的含义。

最后还要说，为了使课文中尽可能少出错；虽然作出了相当大的努力，但是，由于本书课题性质所决定，出错的可能性极大；加之难免有疏忽之处。但愿，这些错误不太严重。

G·B·阿斯奎斯

先锋生产有限公司

德克萨斯州安玛里罗（Amarillo）

1982. 10.

出版者按语

因为大多数新的地质工作者毕业于院校，对产业基本仪器了解很少，也因为许多富有经验的地质师们仅把测井资料作为生产层对比的一种手段（不了解测井其它许多用途），所以，我们出版了这本书。

如AAPG其它各课题的地质丛书一样，我们打算把这本书作为产业和学术界标准培训课本。本书是为地质工作者，而不是为工程师编写的；它可用于课堂讲授和自学。在第八章里，向读者提供了以测井解释为基础，作出各种不同地质和经济决策的一组实例。

AAPG对为本书提出过意见和提供测井实例的测井公司和工程师专诚致谢。因为在这种性质的课本里举例相当重要，所以斯伦贝谢和德莱赛测井公司要特别明确提出。这并非只认为这两个公司好，也不是意味那些没有采用他们实例的优秀公司不好。在课文和实例中，单星号（•）表示斯伦贝谢，双星号（••）表示德莱赛产业公司。

还要注意：许多服务公司图版是用彩色墨水迭印，以使实例部分鲜明。这是编者作出的选择，有关服务公司对其准确性并无责任。

AAPG出版

俄克拉荷马州塔尔沙（Tulsa）

美国石油学会

美国石油学会出版公司

1977年1月

前言

地质家测井分析基础

秦 强 审校

目 录

第一章 测井资料解释的基本关系.....	郭振彬译 (1)
第二章 自然电位测井.....	李太安译 (21)
第三章 电阻率测井.....	李太安译 (31)
第四章 孔隙度测井.....	陆怀强译 (51)
第五章 自然伽马测井.....	陆怀强译 (67)
第六章 测井解释.....	于 恒译 (71)
第七章 岩性测井及制图方法.....	于 恒译 (93)
第八章 测井解释实例分析.....	匡立春译 (107)
附录.....	(161)
参考文献.....	(163)
专业符号及其意义.....	(164)

地质出版社·D

地质出版社·D

(offprint A) 地质出版社·D

·01·1981

第一章 测井资料解释的基本关系

前言

由于测井探测器和解释方法在精度与完善方面正在发展，它们在地质决策的形成过程中正在起着更大的作用。今天，岩石物理学测井解释，已是石油地质师所能得到的最有用和最重要的手段之一。

除了进行地层对比，确定构造和等厚图等勘探方面的传统用处之外，测井还可帮助确定岩石物理特性，如岩性、孔隙度、孔隙几何形状和渗透率。测井数据用于识别产层，确定深度和厚度，对储集层进行油、气、水判别，估计碳氢化合物（油气）的储量。而且，从测井解释研制出的地质图还可有助于确定岩相关系和井位。

在各种类型的测井中，之所以使用裸眼井这一名称，是因为这些测井所记录的是井眼中未下套管的部分。在本书正文中所讨论的所有不同类型的测井和测井曲线均属于这一类型。

一个地质家在最初接触测井解释时，可能经常失败和落空。这不仅是因为测井术语冗长、陌生，而且因为在可能了解测井过程之前，必须要有有关测井的许多参数，概念和测量方法等方面的知识。

也许开始学习测井的最好的方法是向读者介绍测井分析的一些基本概念。要记住井眼所表示的是一个动态系统；钻井中使用的流体会影响井周围的岩石，因此也影响测井数值。再者井眼周围的岩石也是有会影响流体进入和流出岩石的一定特性。

从测井测量确定的两个主要参数是孔隙度和充满油气的孔隙空间所占的百分数。测井解释参数是由直接测定，或间接推断办法确定，并且由下列三种普通类型的测井方法之一测量之，即：(1) 电子的，(2) 核子的和(3) 声波或声速。这些名称所指的都是用于获得测量值的能量源。由不同的源产生包括一条或多条与井眼周围岩石某些特性有关的曲线记录（参看“职业测井分析家协会”，1975）。对于岩石物理测井还不熟悉的读者，在对“测井”这一词的使用方面可能会发生混乱。在通常的用法中，测井一词可以指某一特定的曲线，一系列或一组曲线，某一测井工具（探测器），或是某一测井方法。

影响测井测量值的岩石性质或特征是：孔隙度、渗透率、含水饱和度和电阻率。在读者学习测井解释之前，了解这些性质和它们所表示的概念是必要的。

孔隙度一定义为岩石的整个体积中为孔隙所占的百分数。它以百分数量度，并用符号 ϕ 表示。

$$\text{孔隙度} (\phi) = \frac{\text{孔隙体积}}{\text{岩石体积}}$$

在一定的岩石体积中，其内部的孔隙或空间的数量是以岩石所容纳的流体的数量量

度的。

能连通的，并且能传送液体的孔隙空间的数量称为有效孔隙度。为吸附水所占据的孔隙与分隔孤立的孔隙体积都未包括在有效孔隙度的定义之内。

渗透率一是岩石具有的传递液体的性能。它与孔隙度有关，但并不总是取决于孔隙度的。渗透率受孔隙之间的通道（孔隙喉道或毛细管）的大小所控制。以达西或毫达西计量，并用符号 K_a 表示。当岩石100%地饱含某种单一流体时，此岩石传递该单一流体的能力称为绝对渗透率。有效渗透率指的是在岩石中存在两种流体，而且在这两种流体不混合时，于存在另一种流体情况下该岩石传送某一种流体的能力。靠岩石孔隙中的毛细管压力保持的地层水的作用是阻止油气的渗透。换句话说，地层水会占有孔隙和孔隙之间的通道。因此，它可以堵塞通道，或者说减少其他流体通过岩石的能力。

相对渗透率是流体部分饱和时的有效渗透率与100%饱含该流体时渗透率（绝对渗透率）之间的比值。当地层水的相对渗透率为零时，则地层将产不含水的油气（即对于油气的相对渗透率是100%）。随着水的相对渗透率的增加，相对于油气地层将增加产水量。

含水饱和度一是岩石中被地层水所占有的孔隙体积的百分数。含水饱和度以百分数量度，并用符号 S_w 表示。

$$\text{含水饱和度 } (S_w) = \frac{\text{地层水占有的孔隙体积}}{\text{岩石中的整个孔隙体积}}$$

含水饱和度是一个重要的测井解释概念，因为可以用1（此处的1=100%含水饱和度）减去含水饱和度而求出油气饱和度。

束缚水饱和度（ S_{wirr} ）是用以描述所有水都被吸附在岩石颗粒上或被毛细管压力约束在毛细管内的一个含水饱和度术语。在束缚水饱和度情况下，水是不流动的，且水的相对渗透率为零。

电阻率一是整个测井技术最早发展所依据的一种岩石特性。电阻率是所有材料反抗电流流动的一种固有的性质，而不管它们的形状，尺寸如何。不同的材料有不同的阻止电流的能力。

电阻率是对电阻的量度，电阻率的倒数是电导率。在测井解释中，油气、岩石（骨架）和淡水都起绝缘体作用，因此，是非导电性的而且对电流有高电阻。而盐水则是导体，并具有低电阻率。导体的量度单位是地层每边长1米的立方体。测量单位是欧姆—米²/米，称为欧姆米。

$$R = \frac{r \times A}{L}$$

式中

R = 电阻率（欧姆米）

r = 电阻（欧姆）

A = 被测量物质的横截面（米²）

L = 被测物质长度（米）

电阻率是储集层流体饱和度的基础性实测值，并且是孔隙度、流体类型（即油气、

淡水或盐水)和岩石类型的函数。

由于岩石和油气两者有绝缘体作用,而盐水则是导电的,因此,由测井仪器确定的电阻率测量值可用于探测油气和估计储集层孔隙度。由于在钻井时流体进入井眼周围的孔隙性,渗透性地层,在地层不同深度下所记录的电阻率实测值常有不同的数值。电阻率是由电测井测量的。

康拉德·斯伦贝谢在1912年开始首次实验,该实验最终导致于当代岩石物理测井的发展。H·G·道尔于1927年9月5日在法国阿尔萨斯—洛林,进行第一次电测井。1941年贝气石油公司的G·E·阿尔奇向在德克萨斯州达拉斯市的美国矿冶工程师学会提出一篇论文,陈述了用来作为现代定量测井解释基础的一些概念(阿尔奇,1942年)。

阿尔奇的实验表明,饱含水地层的电阻率(R_o)与其所含的水的电阻率 R_w 可用地层电阻率因素(F)联系起来:

$$R_o = F \times R_w$$

式中地层电阻率因素(F)等于含水100%的地层电阻率(R_o)除以地层水电阻率(R_w)。

阿尔奇的实验也揭示了地层因素可以下列公式与孔隙度联系起来。

$$F = \frac{1.0}{\phi^m}$$

这里的 m 是一个胶结指数,其值随颗粒大小、颗粒大小的分布以及孔隙间通道的复杂程度(曲折度)而变化。曲折度愈高 m 值就愈高。

含水饱和度(S_w)用含水的地层电阻率(R_o)和地层电阻率(R_t)由以下关系式确定:

$$S_w = \left(\frac{R_o}{R_t} \right)^{1/n}$$

这里的 n 是饱和度指数,其值在1.8至2.5间变化,但一般为2。

结合公式 $R_o = F \times R_w$ 和 $S_w = (R_o / R_t)^{1/n}$,含水饱和度公式可改写成如下形式:

$$S_w = \left(\frac{F \times R_w}{R_t} \right)^{1/n}$$

这个公式一般称为是阿尔奇含水饱和度方程。涉及电阻率曲线的一切现存的解释方法都是从这个方程推导出来的。

至此,对读者已经介绍了一些测井解释的基本概念,可以就影响测井的各种因素继续进行较为细致,深入的讨论了。

井眼环境

在井眼钻入地层处,井眼附近的岩石加上其内部的流体(岩石—流体系统)均已被

改造。一个井的井眼及围绕井眼的岩石均已为能影响测井值的钻井泥浆所污染。图 1 是一个多孔的渗透性地层为充满钻井泥浆的井眼所钻开的示意图。

图 1 中所用各符号的定义，表列如下：

d_h — 井眼直径

d_i — 侵入带直径（内边界；冲洗带）

Δr_j — 侵入半径（外边界）

d_j — 侵入带直径（外边界，侵入带）

h_{mc} — 泥饼厚度

R_m — 泥浆电阻率

R_{mf} — 泥浆滤液电阻率

R_{mc} — 泥饼电阻率

R_s — 泥岩电阻率

R_t — 未侵入带电阻率（真电阻率）

R_w — 地层水电阻率

R_{xo} — 冲洗带电阻率

S_w — 未侵入带含水饱和度

S_{xo} — 冲洗带含水饱和度

显示在图 1 中的一些重要的符号是：

井眼直径 (d_h) — 井眼尺寸被认为是钻头外径，但是井眼直径比钻头直径可大可小，因为(1)有冲蚀作用、或有泥岩及弱胶结的孔隙性岩石的坍塌现象，或者(2)在孔隙性、渗透性地层处有泥饼形成（图 1）。井眼尺寸通常的变化范围是从 $7\frac{7}{8}$ 吋到 12 吋。现代测井仪器都是按在这种尺寸范围的井眼内工作而设计的。井眼尺寸是以井径测井图量度的。

钻井泥浆 (R_m) — 现今，大多数井是用旋转钻头钻井并使用特殊泥浆作为循环流体。泥浆帮助除去井眼中的钻屑，润滑和冷却钻头，保持一个超过地层压力的井眼压力。使用大于地层压力的井眼压力是为了防止井喷。

泥浆密度要保持足够高，使泥浆柱静压力总是高于地层压力。这个压差迫使一些钻井流体侵入多孔和渗透性地层。由于出现侵入使许多固体颗粒（即来自钻井泥浆的粘土矿物）集聚在井眼壁上形成泥饼 (R_{mc} ；图 1)。在侵入过程中，渗滤进入地层的流体称为泥浆滤液 (R_{mf} ；图 1)。钻井泥浆，泥饼，泥浆滤液的电阻率都记录在测井图图头上（图 2）。

侵入带 — 被泥浆滤液所侵入的区域称为侵入带。它是由冲洗带和过渡带或环形带组成。冲洗带 (R_{xo}) 出现在紧靠井眼处（图 1），在该处的泥浆滤液已几乎全部将地层的油气或地层水 (R_w) 冲走。其次是过渡带或环形带 (R_i)，在此带中地层的流体和泥浆滤液互相混合，此带出现于冲洗带和未侵入带之间。未侵入带可定义为超出侵入带以外的区域，在该带中地层流体未受泥浆滤液污染。

泥浆滤液对侵入带的侵入深度称为侵入直径 (d_i 和 d_j ；图 1)。侵入直径要按英吋计量或表示为一比值： d_j/d_h (d_h 代表井眼直径)。侵入的程度取决于泥饼的渗透率，

而不取决于岩石的孔隙性。一般来说，假若钻井泥浆具有相同数量的固体颗粒，则对于低孔隙度和高孔隙度的岩石均可有体积相等的泥浆滤液侵入。钻井泥浆的固体颗粒结合起来构成一层非渗透的泥饼。是时，泥饼即成为对更进一步侵入的屏障。因为，在非渗透的泥饼屏障形成之前可以侵入相同体积的流体，所以在低孔隙度的岩石中侵入的深度将是最大的。这一现象的出现是由于低孔隙度岩石可以容纳流体的储存容量或孔隙体积小所造成的，其结果是使更大体积岩石的全部孔隙都受到影响。一般侵入直径是：

$d_i/d_h = 2$ ，为高的孔隙度岩石。

$d_j/d_h = 5$ ，为中等孔隙度岩石。

$d_i/d_h = 10$ ，为低的孔隙度岩石。

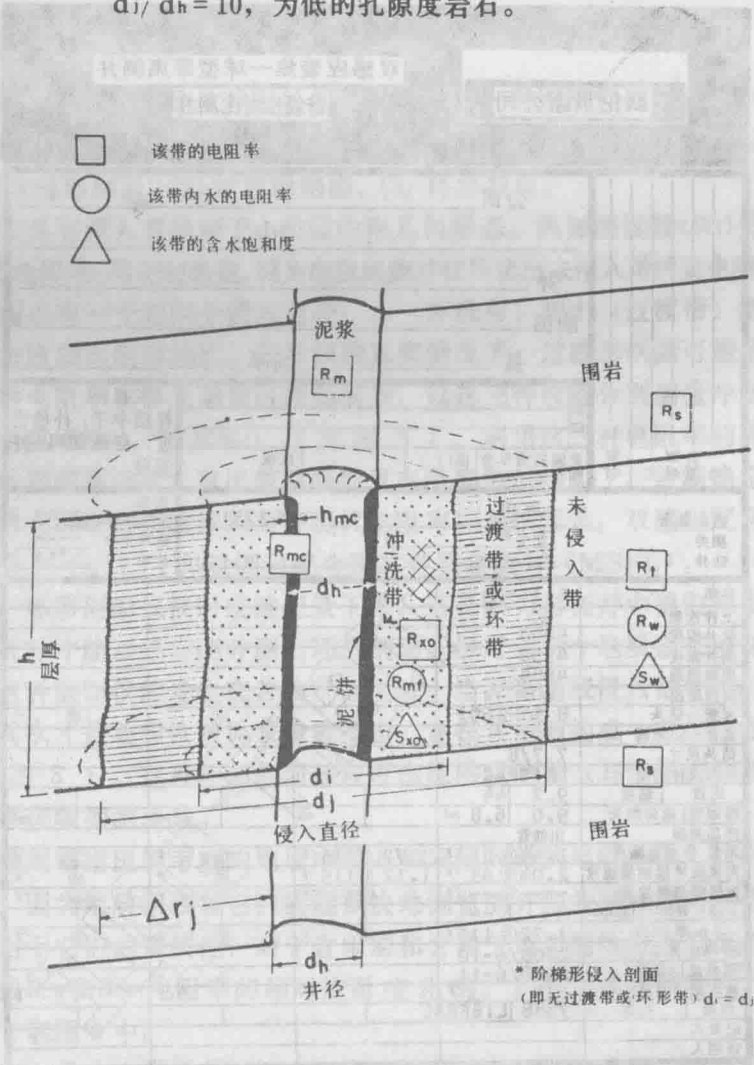


图1 用于测井解释的井眼环境和符号。这个示意图说明当流体由井眼侵入其周围岩石时所发生情况的理想化模式图
虚线指出圆柱形侵入特性
(斯伦贝谢公司，1977年)

冲洗带 (R_{xo}) — 冲洗带从井眼开始仅延展几英吋, 並属于侵入带的一部分。当冲洗带很深或中等深度时, 在大多数情况下是冲洗带的地层水 (R_w) 已被泥浆滤液 (R_{mf}) 完全冲洗干净。有油存在于冲洗带内时, 即可从冲洗带的含水饱和度 (S_{xo}) 与原状地层 (未侵入带) 的含水饱和度 (S_w) 的差异确定其受泥浆滤液冲洗作用的程度 (图 1)。通常大约 70—95% 的油被冲走; 残余下来的油称为残余油 ($S_{ro} = [1.0 - S_{xo}]$, S_{ro} 等于残余油饱和度 [ROS])。

未侵入带 (R_i) — 未侵入带位于超出侵入带以外的区域 (图 1)。未侵入带的孔隙未受泥浆滤液污染, 仍然是为地层水, 油或气所饱和的。

双感应聚焦—球型聚焦测井

带线性对比测井

斯伦贝谢公司

田别井公司

公司		井		油田		县		国家	
位置		美国石油学会 部门		期刊第...号		区域		其它服务 补偿中子/ 补偿密度/ 自然伽玛/ 井温仪	
固定数据		高度		海拔 3731		海拔:		方钻杆补心 3742	
测井		补心高		11		钻井平台		----	
钻井		补心高				地面		3731	
日期	6-11-79								
工作次数	一次								
钻井深度	5000								
测井深度	4990								
底部层段	4984								
顶部层段	1601								
套管—钻头	8 5/8 @ 1601 @ @								
套管—记录器	1601								
钻头尺寸	7 7/8								
井眼流体类型	DRIS PAC								
比重	9.2 44								
酸碱度	9.0 6.8 ml ml ml ml								
样品来源	出油管								
泥浆 @ 测量温度	2.44 @ 81 °F 1.72 @ 115 °F @ °F @ °F								
泥浆滤液 @ 测量温度	2.04 @ 63 °F 1.12 @ 115 °F @ °F @ °F								
泥饼 @ 测量温度	---- @ -- °F @ °F @ °F @ °F								
来源: R _{mf} R _{mc}	M -- @ °F @ °F @ °F @ °F								
R _m @ BHT	1.72 @ 115 °F @ °F @ °F @ °F								
回 停止循环	2000/6-10								
井底记录器	0000/6-11								
最大记录温度	115 °F °F °F °F								
仪器	7688 LIBERAL								
位置									
记录人									
证明人									

* BHT = 井底温度

图 2 是一个有代表性的测井图头的复制品。在图头上, 泥浆 (R_m) 和泥浆滤液 (R_{mf}) 电阻率值的资料对测井解释是特别有用的, 并且都用于计算

注意: 有时, 例如在这个例子中, 泥饼电阻率的值 (R_{mc}) 並未记录在图头上

甚至在油气储集层中，岩石颗粒表面也总存在着一层地层水。由于未侵入带的地层含水饱和度 (S_w ；图 1) 在储集层评价中是一个重要因子，这是由于地质家使用含水饱和度数据，即可确定储集层的含油饱和度。计算含油气饱和度公式是：

$$S_h = 1.0 - S_w$$

S_h = 含油饱和度（即，含油气的孔隙体积的百分数）。

S_w = 未侵入带地层含水饱和度（即含水孔隙体积的百分数）。

原状地层（未侵入带）含水饱和度 (S_w) 和冲洗带含水饱和度 (S_{xo}) 之比是可动油气指数。

侵入和电阻率剖面

侵入剖面和电阻率剖面是从井眼处起进入地层的一种图解性的、理论上的横剖面图。它以图解说明侵入带和未侵入带的水平分布以及与之对应的电阻率。普遍公认的侵入剖面有三种：(1) 阶梯形剖面，(2) 过渡形剖面，(3) 环形剖面。

阶梯形剖面具有侵入直径等于 d_i 的园柱形几何形态。浅探测读数 (R_i) 为电阻率测井仪读出的侵入带电阻率，而深层读数，则为电阻率测井仪所读出未侵入带的真电阻率 (R_t)。

过渡形剖面也有一个用两个侵入直径： d_i （冲洗带）和 d_j （过渡带）所表示的园柱形几何形态。与阶梯形剖面相比，在井眼的真实情况下，过渡形剖面可能是更现实些的模型。需用三种电阻率仪器来测量过渡形剖面，以这三种仪器分别测量冲洗带，过渡带和未侵入带的电阻率 R_{xo} ， R_i 和 R_t ；（见图 3）。利用这三种电阻率的测量值，可校正电阻率测井的深探测读数，求出较准确的真电阻率数值 (R_t)，并能确定其侵入的深度。用于获得这三种电阻率曲线的两种现代电阻率探测仪器是：双感应配合一个八测向或微球型聚焦测井 (SFL)，和双侧向配合微球型聚焦测井 (MSFL)。

在测井时，环形剖面仅仅时或被记录下来，这是因为它在井中消散得很快之故。只在井刚钻完不久时才能以感应测井测出环形剖面。但对于一个地质家来说环形剖面是很重要的，因为这种剖面仅能发生在含油气的区域。当泥浆滤液侵入油气带时，首先运移出去是油气。其次才是地层水被泥浆滤液推出，并在其前面构成一个位于侵入带边缘处的环形区域（图 3）。这种环形剖面效应可由深感应测井（与中感应测井相比）所取得的较高电阻率读数探测出来。

测井电阻率剖面指出所考察的地层中侵入和未侵入带的电阻率值。这些电阻率值是很值得注意的，因为地质家依靠它们就能很快地浏览测井图并寻找值得注意的可能层，例如油气层。由于它们的重要性，对于含水层和含油气地层的电阻率剖面都应进行讨论。这些剖面都是按 R_w 和 R_{mf} 电阻率的相对值而变化的。所有这些变化和它们相应的剖面均已图示于图 4 和图 5 中。

含水带—图 4 是含水带的井眼和电阻率的剖面，在淡水泥浆中，泥浆滤液电阻率 (R_{mf}) 远大于地层水电阻率 (R_w)，但在盐水泥浆中，泥浆滤液电阻率 (R_{mf}) 则近似等于地层水电阻率 (R_w)。淡水泥浆（即， $R_{mf} > 3 R_w$ ）会造成“含水的”测井剖面，此剖面中，浅的 (R_{xo})，中间的 (R_i) 和深的 (R_t) 电阻率仪器可区分和记录高的 (R_{xo})，中间的 (R_i) 和低的 (R_t) 电阻率（图 4）。但盐水泥浆（即， $R_w \leq R_{mf}$ ）

所造成的含水剖面上，浅的 (R_{xo})，中间的 (R_i) 和深的 (R_t) 电阻率仪器所读取的则全部是低的电阻率 (图 4)。图 6a 和 6b 图解说明了为淡水和盐水泥浆所侵入的含水层的电阻率曲线。

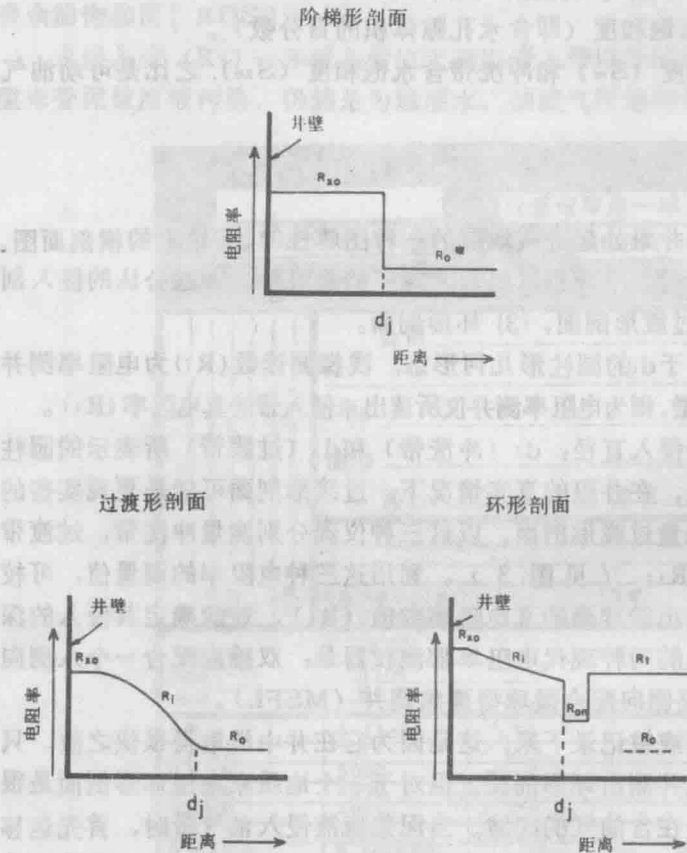


图 3. 在井眼附近流体分布的三种理想化模式的典型剖面。由于泥浆滤液 (R_{mf}) 进入孔隙性、渗透性地层，它以各自不同的方式侵入地层。各种流体分布情况被描述为阶梯，过渡或环形剖面图。

A. 阶梯形剖面—泥浆滤液分布呈环绕井眼的一个圆柱形，并形成一个侵入带。这个圆柱形侵入带以其与未侵入带的突变接触关系为特征。此圆柱形的直径以 d_j 表示。在侵入带中孔隙是充满泥浆滤液 (R_{mf}) 的；未侵入带的孔隙则是充满地层水 (R_w) 或油气的。在这一例子中未侵入带是含水的 (含 100% 的水，而不含油气)，因而超出侵入带范围以外处有低电阻率。侵入带电阻率是 R_{xo} ，若地层是含水层，则未侵入带的电阻率是 R_o ，若地层是含油气的则是 R_t 。

B. 过渡形剖面—这是真实井眼情况的最实际的模型。此时，其侵入作用仍然是一个圆柱形，但是在这个剖面中，泥浆滤液 (R_{mf}) 的侵入作用通过过渡带向侵入带外边界逐渐减弱，

而不是突然减少。(参看图中外边界的位置 d_i)。在侵入带的冲洗部分，孔隙充满泥浆滤液 (R_{mf})，使冲洗带有高的电阻率读数。在侵入带的过渡部分，孔隙充满泥浆滤液 (R_{mf})、地层水 (R_w)，而且如果有的话，还会有残余油气 (R_H) 存在。在侵入带的外边界位置 (d_j) 以外，孔隙充满地层水或油气 (假若存在油气的话)。但在这个图中，油气是不存在的，所以未侵入带的电阻率是低的。侵入带的冲洗带部分的电阻率是 R_{xo} ，过渡部分电阻率是 R_i 。若含油气，未侵入带电阻率是 R_t ，若含水则是 R_o 。

C. 环形剖面—这种剖面所反映的是暂时的流体分布，并且是一个随着时间推移而消失的状况 (假若测井过程被延迟，则可能在测井图上全然记录不出来)。环形剖面所表示的是发生在侵入带和未侵入带之间的流体分布状况，并指示有油气存在。

在侵入带的冲洗部分 (R_{xo})，孔隙中充满泥浆滤液 (R_{mf}) 和残余油两者 (R_H)。故而其电阻率读

数高。超出侵入带冲洗部分以外处的孔隙 (R_i) 中是充满泥浆滤液 (R_{mf})，地层水 (R_w) 和残余油气的混合物 (RH) 的。

在超出侵入带外边界处是孔隙中充满残余油 (RH) 和地层水 (R_w) 的环带。当有环形剖面存在时，在侵入带外边界处测量的电阻率将突然降低。电阻率的突然降低是由于在环带中地层水的高度集中造成的。地层水被侵入的泥浆滤液向前推动进入环带。再由于油气又被地层水向前推动，因而又引起油气的暂时性缺少。在超出环带以外处是其孔隙中充满地层水和油气的未侵入带。已知，由于未侵入带的性质未受扰动，可测得地层的真电阻率。由于油气的电阻率比含盐的水高，所以真电阻率 (R_i) 将高于含水电阻率 (R_o)。

水层电阻率剖面

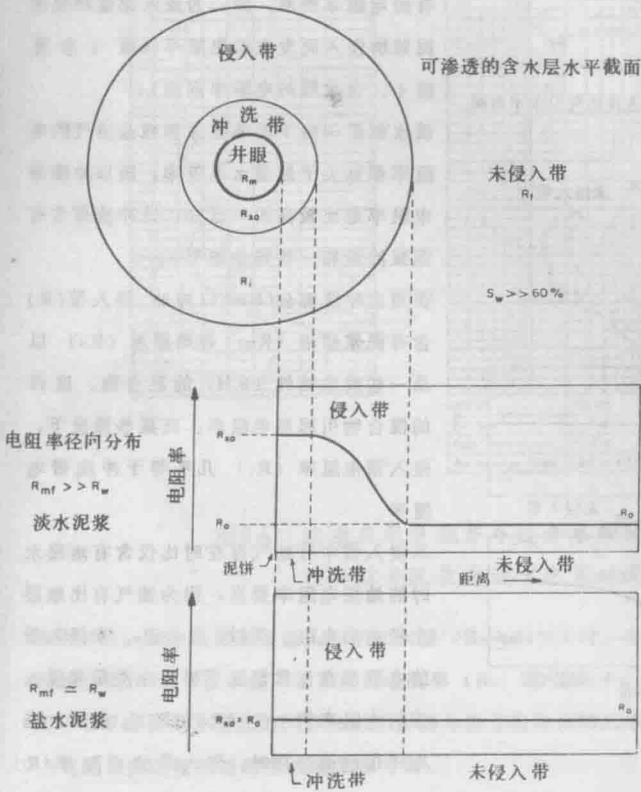


图 4. 当存在有淡水或盐水泥浆侵入时，通过渗透性含水层的水平剖面及其伴有的电阻率剖面（参见图 5，含油气层的电阻率剖面）。注意：之所以给出这些例子是由于淡水泥浆和盐水泥浆常专门适用于不同的地质区域。地质家要意识到这种差别的存在。找出适用于所在区域的泥浆，从而对钻井工程师提出要求。读者以后将会看到，使用的泥浆类型将影响测井组合的选择。

淡水水泥浆一由于含盐量的变化（已知：盐水是导体）泥浆滤液电阻率 (R_{mf}) 比地层水电阻率大。一般规律是，当使用淡水水泥浆时： $R_{mf} > 3R_w$ 。冲洗带 (R_{xo}) 中含有较多的泥浆滤液，故将有一较高的电阻率。在远离井眼处，由于泥浆滤液 (R_{mf}) 含量的减少和地层水 (R_w) 含量的增加，侵入带 (R_i) 的电阻率将减小。对于一个含水层，由于其孔隙充满地层水 (R_w) 则未侵入带的电阻率将是低的。在未侵入带中，真电阻率 (R_i) 将等于含水层电阻率 (R_o)，这是因为地层含地层

水 100%（当地层含水饱和度是 100% 时， $R_i = R_o$ ）。

摘要：在含水层中，冲洗带电阻率 (R_{xo}) 大于侵入带电阻率 (R_i)，而侵入带的电阻率又大于未侵入带电阻率 (R_i)。因此：在含水层中， $R_{xo} > R_i \gg R_i$ 。

盐水水泥浆一由于泥浆滤液电阻率约等于地层水电阻率 ($R_{mf} \approx R_w$)；从冲洗带 (R_{xo}) 到侵入带再到未侵入带的电阻率将看不到显著差别 ($R_{xo} = R_i = R_i$)，也都是低电阻率。

上面这两个例子都假定未侵入带的含水饱和度是远大于 60% 的。

含油气带—图 5 是含油气带的井眼和电阻率剖面, 在该含油气层中, 对淡水泥浆而言, 泥浆滤液电阻率 (R_{mf}) 远大于地层水电阻率 (R_w), 而在盐水泥浆中, 则 R_{mf} 近似等于 R_w 。在被淡水泥浆侵入的含油气带所形成的电阻率剖面图上, 浅的 (R_{xo}), 中间的 (R_i) 和深的 (R_t) 电阻率仪器全部记录高的电阻率 (图 5)。在有些情况下, 深的电阻率将高于中间的电阻率。当有这种情况出现时, 即称为环形剖面效应。在盐水泥浆侵入的油气带 (层) 所形成的电阻率剖面图上, 各种浅、中间、或深探测的电阻率仪器则可以区分和记录低的 (R_{xo}), 中间的 (R_i) 和高的 (R_t) 电阻率 (图 5)。图 7a 和 7b 图示为淡水泥浆和盐水泥浆所侵入的含油气层的电阻率曲线。

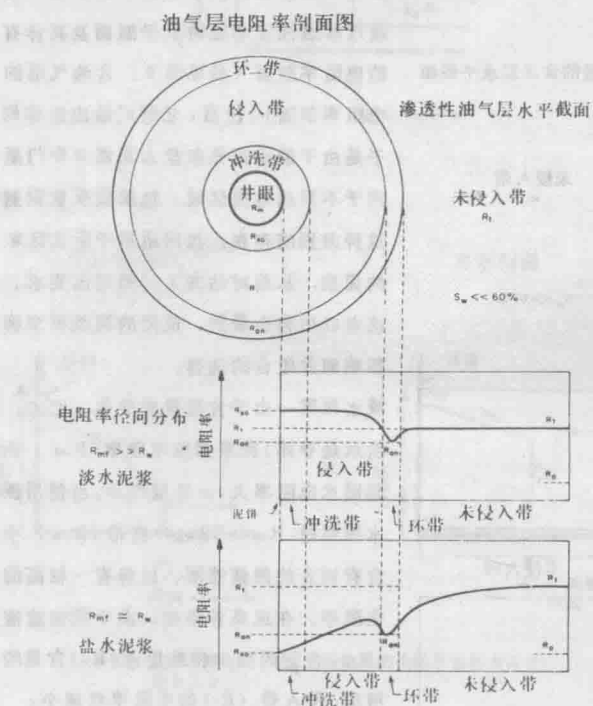


图 5 渗透性含油气层的水平截面及其伴有的电阻率剖面, 即: 为淡水泥浆和盐水泥浆所侵入而发生的电阻率剖面 (参见图 4, 含水层的电阻率剖面)。

淡水泥浆—由于泥浆滤液和残余油气的电阻率都远大于地层水电阻率, 所以冲洗带电阻率是比较高的 (已知: 此冲洗带含有泥浆滤液和一些残余油气)。

在超出冲洗部分 (R_{xo}) 以外处, 侵入带 (R_i) 含有泥浆滤液 (R_{mf}) 和地层水 (R_w) 以及一些残余油气 (R_H) 的混合物。这样的混合物引起高电阻率。在某些情况下, 侵入带电阻率 (R_i) 几乎等于冲洗带电阻率。

未侵入带中有油气存在时比仅含有地层水时的地层电阻率要高, 因为油气有比地层水较高的电阻。所以, $R_t > R_o$ 。未侵入带的电阻率在正常情况下要比冲洗带和侵入带的电阻率稍小些 (R_{xo} 和 R_i)。然而, 当有环形剖面存在时, 侵入带的电阻率 (R_i)

可以略小于未侵入带的电阻率 (R_t)。
总之, 因而在含油气带中, $R_{xo} > R_i \geq R_t$ 。

盐水泥浆—由于泥浆滤液电阻率大约等于地层水电阻率 ($R_{mf} \approx R_w$), 且残余油气量低, 所以冲洗带电阻率 (R_{xo}) 也低。

在远离井眼处, 随侵入带中与泥浆滤液混合油气的增加, 侵入带电阻率 (R_i) 也开始增加。
未侵入带的电阻率 (R_t) 远大于含水饱和度为 100% 的地层的电阻率, 因为油气电阻比盐水大。未侵入带的电阻率远大于侵入带电阻率。所以, $R_t > R_i > R_{xo}$ 。

以上两个例子都假设未侵入带的含水饱和度远小于 60%。

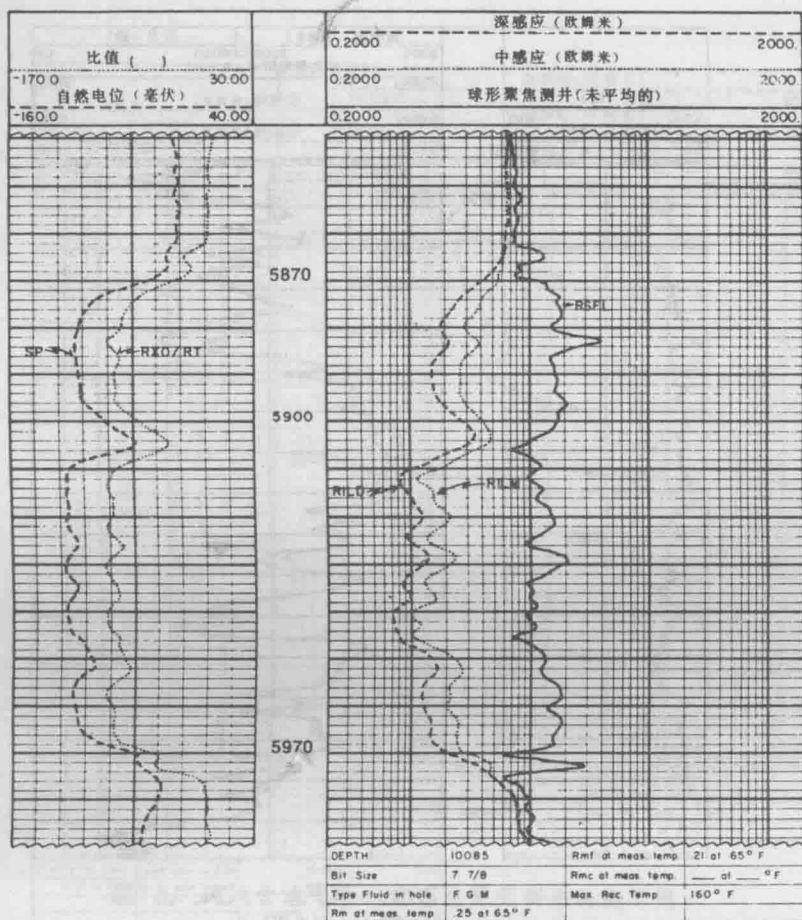


图6A 双感应聚焦测井穿过含水带的测井曲线实例

已知钻井泥浆是淡水水基的泥浆 ($R_{mf} > 3R_w$)

由图可见：淡水钻井泥浆侵入一个含水层 ($S_w \gg 60\%$) 时，冲洗带有高的电阻率，在侵入带有较小的电阻率 (R_i)，在未侵入带有低的电阻率 (R_t)。参见图 4。

暂时不考虑该测井图左边的部分，比较测井图右边部分的三条曲线（第二道和第三道）。在测井图上电阻率曲线值随着深度的增加而变高。

深感应电阻率曲线—深感应测井电阻率曲线是测量超出侵入带外边界较深处的真电阻率或地层电阻率。这是对未侵入带的测量值。在含水带（此例中是5870到5970呎），由于地层水电阻率 (R_w) 小于泥浆滤液电阻率 (R_{mf})，因此曲线将读得低值电阻率。

中感应测井曲线—中感应测井电阻率曲线测量侵入带电阻率 (R_i)。在一含水层中，由于地层水 (R_w) 和泥浆滤液 (R_{mf}) 的混合，曲线将读出中等电阻率。

微球形聚焦测井曲线—微球形聚焦测井曲线测量冲洗带电阻率 (R_{10})。在含水层，由于淡水水泥浆滤液 (R_{mf}) 电阻率高，所以曲线将读出高的电阻率。此处图示的微球形聚焦测井读出一个比之深 (R_{LLd}) 和中 (R_{ILm}) 感应曲线都高的电阻率。

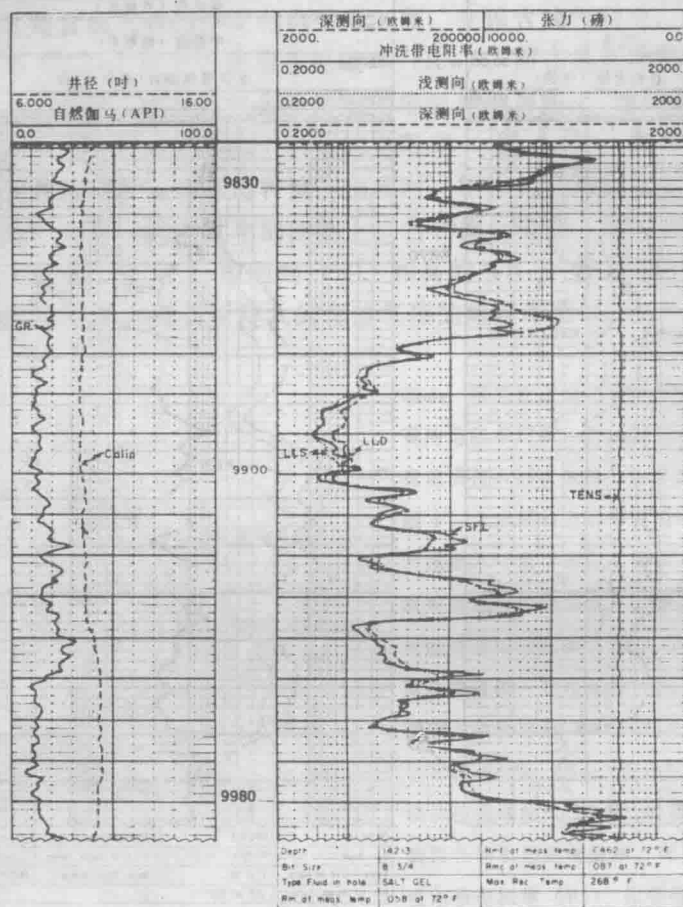


图6B 通过含水层的双侧向*—微球形聚焦测井 (MSFL)*
曲线的例子。已知: 钻井泥浆是盐水水泥浆($R_{mf} \approx R_w$)

由图可见, 盐水水泥浆侵入一含水层 ($S_w \gg 60\%$), 在冲洗带有低的电阻率 (R_{xo}), 在侵入带有低的电阻率 (R_i), 而且在未侵入带也有低的电阻率 (R_i)。由于 R_{mf} 近似等于 R_w , 在冲洗带, 侵入带和未侵入带的孔隙中充满含水的水; 由于有盐的存在而导致有低的电阻率。看图 4。

暂不考虑同页左边的测井图, 并对比测井图右边的三条曲线 (第二道和第三道)。在测井图上电阻率值随深度的增加而变大。

深侧向曲线—深侧向电阻率曲线测量真电阻率 (R_i) 或测量超出侵入带边界更深处的电阻率。在含水层中 (在此例子中为从 9830 到 9980 呎), 曲线将读出低的电阻率, 因为地层孔隙饱含原生水。

浅侧向测井曲线—浅侧向测井电阻率曲线测量侵入带电阻率 (R_i)。在一个含水层中, 浅侧向 (LLS) 将读出一个低的电阻率, 因为 R_{mf} 近似等于 R_w 。

微球形聚焦测井曲线—微球形聚焦测井电阻率曲线测量冲洗带电阻率 (R_{xo})。在含水带 (层), 曲线将读出低的电阻率, 这是因为盐水水泥浆滤液有低的电阻率。微球形聚焦测井所读出的将是低电阻率, 并近似等于侵入带的和未侵入带的电阻率。