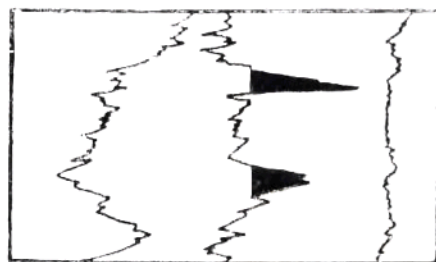


现代测井解释

D. W. 希尔契



石油工业出版社

39288

现代测井解释

D.W. 希尔契

王曰才 章成立 译



5957/5



200406925

石油工业出版社

内 容 提 要

本书在一般测井解释的基础上,深入地探讨了利用测井资料确定储集层参数的方法及影响因素。同时,还针对测井解释中存在的一些问题,如低孔隙地层中的天然气检测技术,泥质砂岩中泥质含量的估算,以及多种岩石成分对测井曲线的影响等进行了专门的论述。书中还对近年来发展起来的岩性密度、能谱、碳氧比、核磁等新的测井方法及应用做了介绍。作者在介绍各种测井解释方法的同时还例举了许多油田的测井实例,并加以具体分析和说明,本书是现场测井分析家极好的参考资料。

ADVANCED WELL LOG INTERPRETATION

Douglas W. Hilchie

Copyright 1982 by Douglas W. Hilchie Inc.

Printed in the United States of America

现 代 测 井 解 释

D. W. 希尔契

王曰才 章成立 译

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京吴海印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 17¹/₂印张 428千字 印1—2,000

1989年4月北京第1版 1989年4月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0186-1/TE·183

定价, 4.20元

目 录

第一章 测井解释的基本概念	(1)
第一节 电阻率.....	(1)
第二节 电阻率测井.....	(14)
第三节 孔隙度测井.....	(15)
第四节 井径测井.....	(16)
第五节 测井曲线的校正.....	(27)
第二章 地层水电阻率	(36)
第一节 水分析资料汇总表.....	(36)
第二节 根据SP求 R_w	(38)
第三节 由孔隙度和电阻率测井确定 R_w	(44)
第三章 电阻率比值法	(51)
第一节 电阻率比值法的原理.....	(51)
第二节 实例.....	(56)
第四章 电阻率-孔隙度交会图	(62)
第一节 对数-对数交会图 (Pickett交会图).....	(62)
第二节 电阻率-孔隙度 (Hingle) 交会图.....	(69)
第三节 log-log 交会图与 RPC 交会图的联合应用.....	(82)
第五章 现代的天然气的检测技术	(91)
第一节 单一孔隙度测井曲线的天然气的效应.....	(91)
第二节 孔隙度测井组合的天然气的校正.....	(95)
第三节 在低孔隙性地层中的天然气的检测.....	(105)
第六章 确定孔隙度和岩性	(117)
第一节 常用的孔隙度测井交会图.....	(117)
第二节 三种孔隙度测井曲线的综合利用.....	(119)
第三节 孔隙度的确定.....	(119)
第四节 根据 MID 图确定孔隙度和岩性.....	(123)
第五节 M-N 图.....	(129)
第七章 泥质砂岩的解释	(134)
第一节 泥质.....	(134)
第二节 泥质砂岩的解释因素.....	(136)
第三节 泥质砂岩含水饱和度的计算模型.....	(143)
第八章 已研制及正在发展的新测井方法	(164)
第一节 岩性密度测井 (LDT).....	(164)
第二节 自然伽马能谱测井.....	(176)

第三节	碳氧比测井	(178)
第四节	核磁测井	(182)
第五节	介电测井和 EPT 测井	(185)
第九章	脉冲中子俘获测井 (TDT 和 NLL)	(192)
第一节	原理	(192)
第二节	测量的限制条件和有效范围	(195)
第三节	解释基础	(196)
第四节	测井仪器与曲线的差异	(200)
第五节	PNC 测井的解释	(204)
第六节	储集层的监测	(210)
第十章	多种岩石成分及测井响应	(212)
第一节	双孔隙度系统	(212)
第二节	黄铁矿对测井曲线的影响	(213)
第三节	岩芯孔隙度与测井孔隙度的对比与校正	(219)
第十一章	空气或天然气钻井的测井解释	(226)
第一节	解释方法	(226)
第二节	密度-中子测井组合	(227)
第三节	密度-电阻率方法	(230)
第四节	密度-中子-电阻率测井组合	(231)
第五节	井温测井	(235)
附录A	测井解释图版	(238)
附录B	岩石特性表	(266)
附表	测井中常用的许用单位与非许用单位换算表	(273)

第一章 测井解释的基本概念

第一节 电 阻 率

电阻率是边长为 1 米的立方体物质的电阻。在大多数的测井中, 电的流动是靠离子导电, 测量值和电的频率无关。因此我们将使用直流方程和直流模拟法。

本节我们将讨论储集层岩石的电阻率而不讨论泥岩的电阻率。

一、储集层岩石的电阻率

这里, 储集层系指非粘土质的不导电的岩层。粘土质岩层将在下面论述泥岩的一节中讨论。不导电的岩石也就是电阻率接近无限大的岩石(电阻率大于 1 兆欧姆米)。在本书中当我们说电阻率无限大时, 实际上它意味着上面所讲述的定义。

在储集层岩石中普遍见到的流体的电阻率如下:

	电阻率 ($\Omega \cdot m$) ●
天然气	无限大
油	无限大
水	随矿化度而变

纯水的电阻率为无限大。当水中所含离子越多, 电阻率就越小。水的电阻率还受温度的控制。在温度较高时, 由于水的粘度较低, 所以离子容易移动, 离子越容易移动, 电阻率越低。当水冻结时, 离子不易移动, 电阻率基本上是无无限大。图 1-1 是以含 NaCl 为主的水的温度、矿化度和电阻率的关系图版。对于含有其他盐类(如 KCl 及 $CaCl_2$) 为主的水来说, 虽然我们知道上述的图版是不太正确的, 但认为它基本适用。目前对于其他水溶液来说, 还没有图版可以利用。

例: R_w 在 $75^\circ F$ (图版上的 A 点) 时为 1.2, 按照斜线的趋势找出其他温度时的 R_w , 例如在地层温度 $(FT) = 160^\circ F$ (B 点) 时, 读得 $R_w = 0.56$ 。该图版上所示的换算可以用 Arps 公式 $R_{FT} = R_{75} \times (75 + 7) / (FT + 7)$ 近似得出。

二、饱含水的储集层

阿尔奇 (Archie) 给出的岩石中所含流体的电阻率与含有这种流体的岩石的电阻率之间的关系如下:

$$R_o = F_R R_w \quad (1-1)$$

式中 R_o ——当岩石中饱含水的电阻率为 R_w 时的岩石电阻率,

F_R ——地层电阻率因素。

地层电阻率因素 F_R 常常和孔隙度有下列的一般关系:

$$F_R = \frac{a}{\phi^m} \quad (1-2)$$

式中 a ——与孔隙几何形状有关的常数;

●书中未标明单位的电阻率均用欧姆米 ($\Omega \cdot m$)

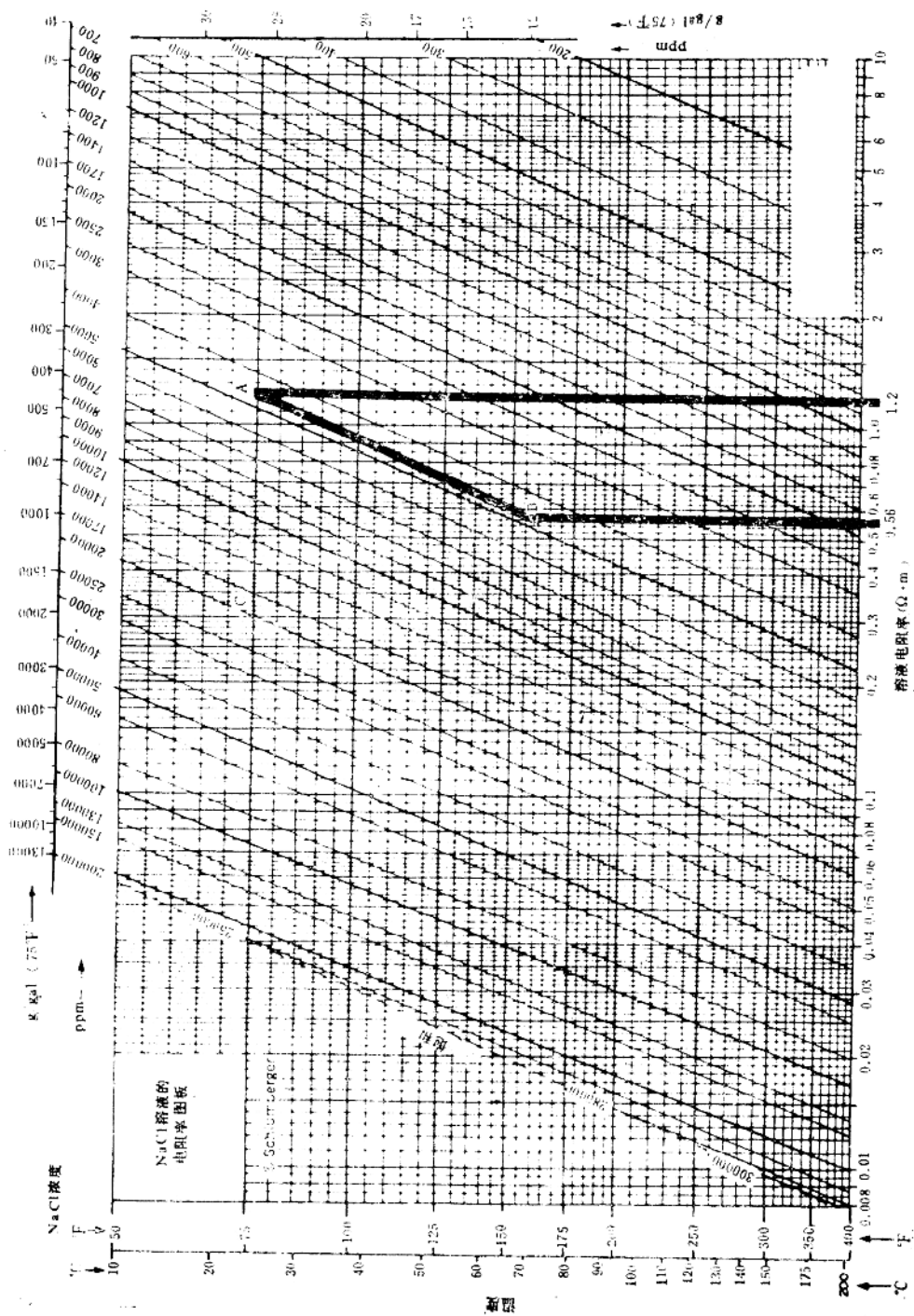


图 1-1 NaCl 溶液的电阻率图版

m ——与孔隙几何形状有关的常数，也叫作孔隙几何形状常数；

ϕ ——以小数形式表示的孔隙度。

这种形式最常用的关系式是：

$$F_R = \frac{0.62}{\phi^{1.8}} \quad (1-3)$$

这个汉布尔关系式适用于孔隙度在 1.3~35% 的正常砂岩。我们也使用下列关系式：

$$F_R = \frac{1}{\phi^2} \quad (1-4)$$

上式适用于碳酸盐岩及低孔隙度砂岩。

关系式 (1-3) 和 (1-4) 代表大多数的岩石，是普通常用的关系式。

为了处理“左边的和右边的极端情况”，我们必须知道在这些公式中孔隙几何形状常数的影响。为此，我们将回到式 (1-2) 的一种特殊形式，

$$F_R = \frac{1}{\phi^m} \quad (1-5)$$

主要因为我们不知道如何处理常数 a ，我们必须把这个讨论分为两个部分，以便能处理孔隙形状问题。我们将首先讨论砂岩（或粒间孔隙类型系统）。

三、砂岩孔隙几何形状

在关系式 (1-5) 中， m 是与孔隙几何形状有关的常数。正如你从描述非压实砂岩的 F_R 和 ϕ 的关系图 1-2 中所看到的那样，汉布尔公式 (1-3) 接近于 $m=1.8$ 时的关系式 (1-5)。孔隙及孔隙形状就是影响 m 的因素。麦克斯韦 (Maxwell) 及其以后的许多人计算了一组等直径球体的 m 值，对这些球体来说， $m=1.34$ 。请看图 1-3，当砂粒变得比较扁平时，对许多小平板来说， m 升高到大约 1.8。要记住，这时我们仅仅考虑了孔隙。下述的计算结果说明 m 对砂岩电阻率的影响。

在公式 (1-2) 中， a 不等于 1， a 描述孔隙几何形状随孔隙度所发生的变化。在公式 (1-3) 中， a 等于 0.62 就表示了当孔隙度从低值变到高值时，孔隙几何形状从胶结很好的砂岩变化到胶结很不好的砂岩。

m 对岩石电阻率的影响

m	孔隙度	F_R	R_o ($R_w=0.03$)
2.0	0.15	44	1.3
1.8	0.15	30	0.9
1.5	0.15	17	0.5
1.34	0.15	13	0.4

注意，只用人工模拟砂岩的孔隙形状变化，能使岩石电阻率降低三倍以上。水层和产油或产气层之间的电阻率值有三倍之差。这意味着如果砂岩是球形颗粒的，则电阻率将比你所料想的小得多。如果这种砂岩中存在着油或气，其电阻率可能低到你所预计的水层的电阻率值。如果你不知道 m 值，你就可能漏掉这个生产层。本书的后面将给出在进行测井曲线解释时，检验这种情况的方法。

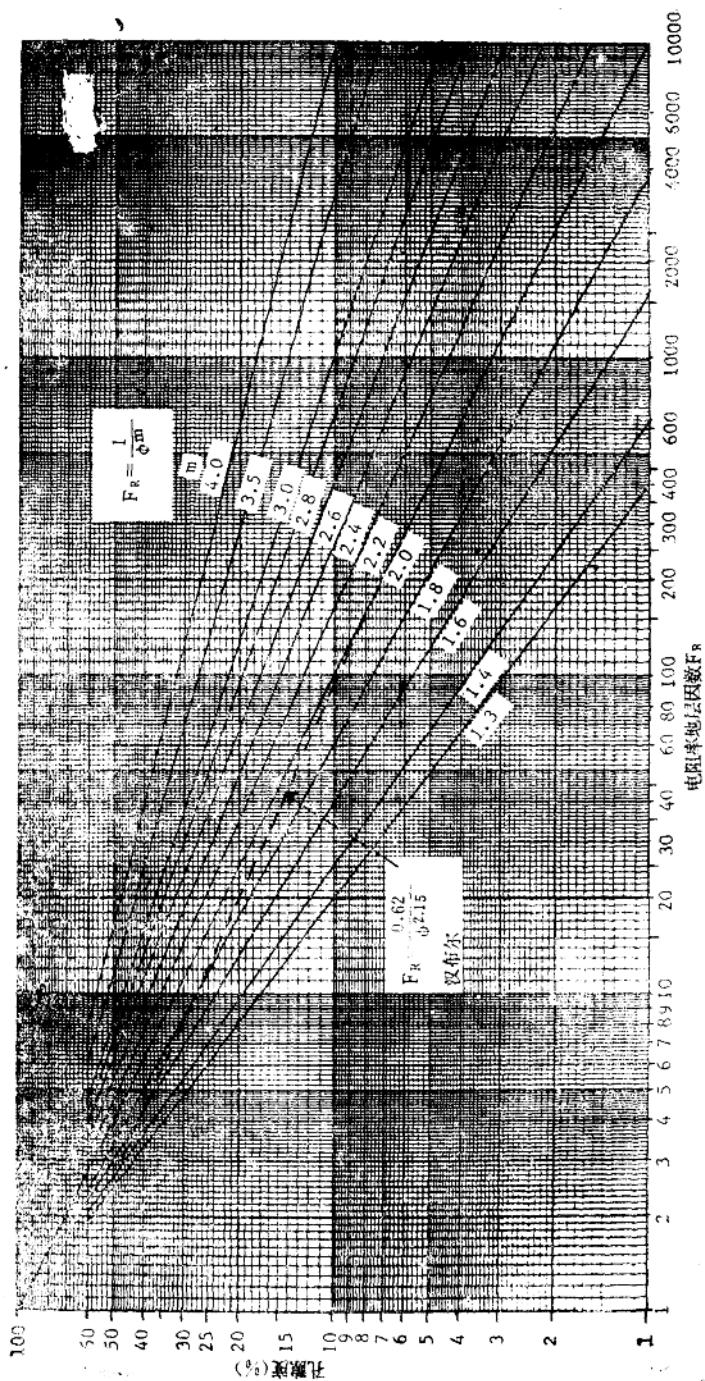


图 1-2 电阻率地层系数 (F_R) 与孔隙度和 m 的关系

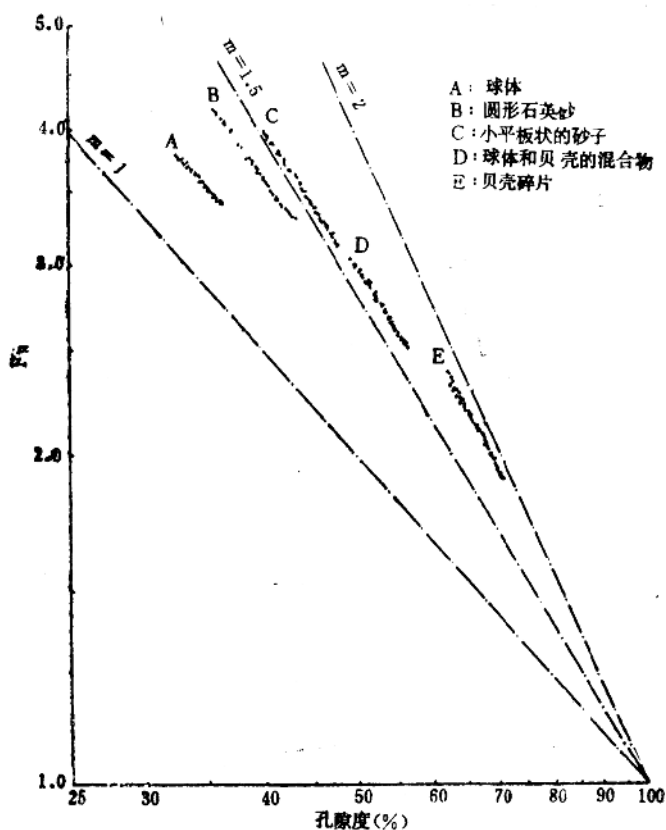


图 1-3 非压实砂岩电阻率地层因素与孔隙度的关系

作者所看到过的具有较低 m 值的地层有：Nugget 层、Norphlet 层及 Dinkman 层。在高孔隙度的鲕状岩层和硅藻土层中当然有这种问题。

依靠观看岩芯及岩样，可以识别这种问题，但是必须从测井曲线上或用岩芯样品测量值来确定 m 的正确值。

四、碳酸盐岩孔隙的几何形状

碳酸盐岩孔隙几何形状的影响是非线性的。在孔洞型及印模型孔隙中， m 值也与孔隙几何形状有关。托雷 (Towle) 在一些计算和图 1-4 中指出， m 值随着孔洞的增多而增加。这里主要讨论裂隙或任何连通大的孔隙（孔洞）的通道。如果没有连通通道，则 m 值将会很大，岩石的渗透率也将是很低的。随着连通通道数目（或通道尺寸）的增加， m 值将减小，渗透率也将增大。作者看到过的测井资料指出， m 值可从正常的 2 变到 7。下述的计算说明较高的 m 值对岩石电阻率的影响。

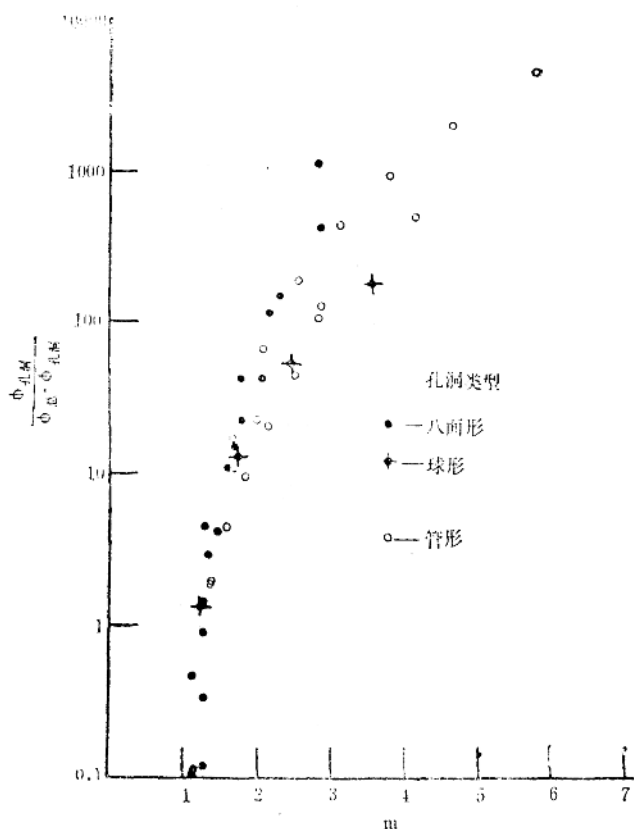


图 1-4 m 与孔洞孔隙度的关系

较高的 m 值对岩石电阻率的影响

m	孔隙度	F_R	R_o ($R_w=0.03$)
2	0.10	100	3
2.5	0.10	316	9.5
3	0.10	1000	30
5	0.10	100000	3000

当 m 值增大时, 地层电阻率增大。这就使水层的计算结果和好的油气层一样。这种情况的一个实例就是俄克拉何马 (Oklahoma) 及堪萨斯 (Kansas) 的鲕状穴地层。这些鲕状穴地层的孔隙度高达 20%, 电阻率通常也很高, 计算的结果必然与好的生产层一样。有时这些地层产水, 有时产油气, 有时什么也不产。

随着致密程度的增大, m 值增加的一个实例是阿尔伯特 (Alberta) 山麓。 m 值随着深度的增加而增大。例如在 5 千英尺处的白云岩, m 值是 2。在 9 千英尺处, m 值为 2.4 左右。在 1.3 万英尺处, m 值常常达到 3 或 3 以上。 m 的增量并不总是相同的。我认为这是由于随着上覆压力增加, 通道渐渐被封闭所致。我曾经说过: 上覆压力增加, 引起较小的孔隙被封闭和 m 值增大。

象壳牌石油公司 (Shell) 的公式对于低孔隙度碳酸盐岩所指出的那样, 碳酸盐岩似乎

也有附加孔隙几何形状的问题。

$$F_R = \phi^{-m}$$

$$m = 1.87 + \frac{0.019}{\phi} \quad (1-6)$$

在测井专业服务公司的图版集中，壳牌石油公司公式中的 m 值随着孔隙度的减小而增加（图 1-5）。孔隙度的减小可能就是所涉及到的孔隙几何形状而造成的。虽然孔隙度的减小也可能是由于测井的测量值精度的减小所造成。

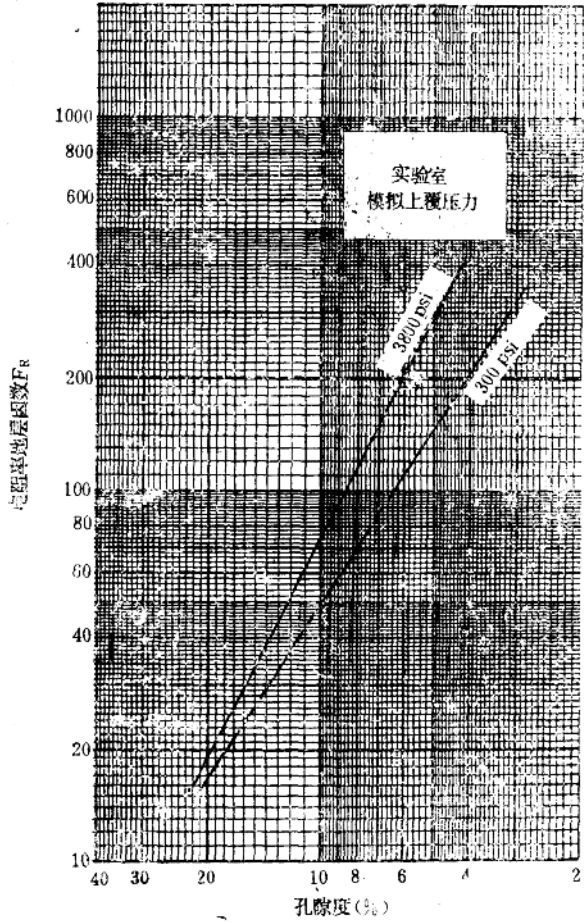


图 1-5 Mitsue 油田的 Gilwood 地层电阻率地层因素与孔隙度的关系

史密斯 (W.D.M. Smith) 在碳酸盐岩中计算的井下参数，不但说明了上覆压力对电阻率的影响，而且也说明了在较低的孔隙度处孔隙几何形状的明显改变。图 1-6 及图 1-7 给出了压力对岩石电阻率的影响。图 1-7 给出孔隙度在 5~7% 以及较低孔隙度处所发生的扰动变化。虽然我们在一个地区看到的多数现象在其他地方也出现，我们这时可以知道我们所期待的现象，但是我们还不知道这个资料是否只是典型的加拿大礁块。

当我们讨论碳酸盐岩时，我们必须记住，在低孔隙度处要强调所有的孔隙几何形状以及

精度问题。如果你承认测井孔隙度的精度最好也不过在百分之一以内，则下面的例子将向你

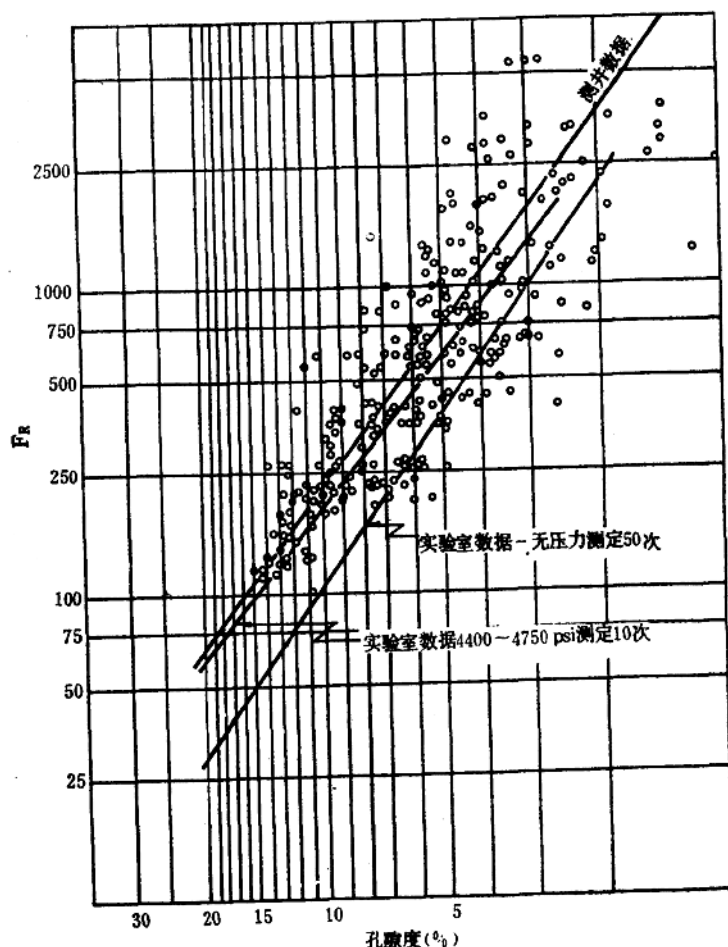


图 1-6 Judu Creek 油田 Swan Hills 地层的孔隙度与地层因素的关系
说明百分之一误差的影响。

孔隙度	$F_R (m=2)$	$R_o (R_w=0.03)$
5%	400	12
5%+1%=6%	278	8.3
5%-1%=4%	625	19

在上例中可以看到孔隙度有-1%的误差，则电阻率增加 58%。孔隙度有+1%的误差，则电阻率有-22%的误差。随着孔隙度的减小，可能的误差也增大。

五、裂缝

如果电流沿着裂缝流过，则裂缝将会使岩石电阻率减小。如果电流垂直于裂缝流过，则电阻率将没有变化。在 $F_R-\phi$ 关系中，宽的开口裂缝将使 m 减小到 1.1 左右。但要致使电阻率严重的减小，地层裂缝宽度必须相当于电流束的垂直分辨率，并且延伸到地层中的深度至少要等于电流束延伸到地层中的深度。我们很少能够辨别出发生这种裂缝的实例。表

1-1 中只给出了粒间孔隙系统的 m 值。

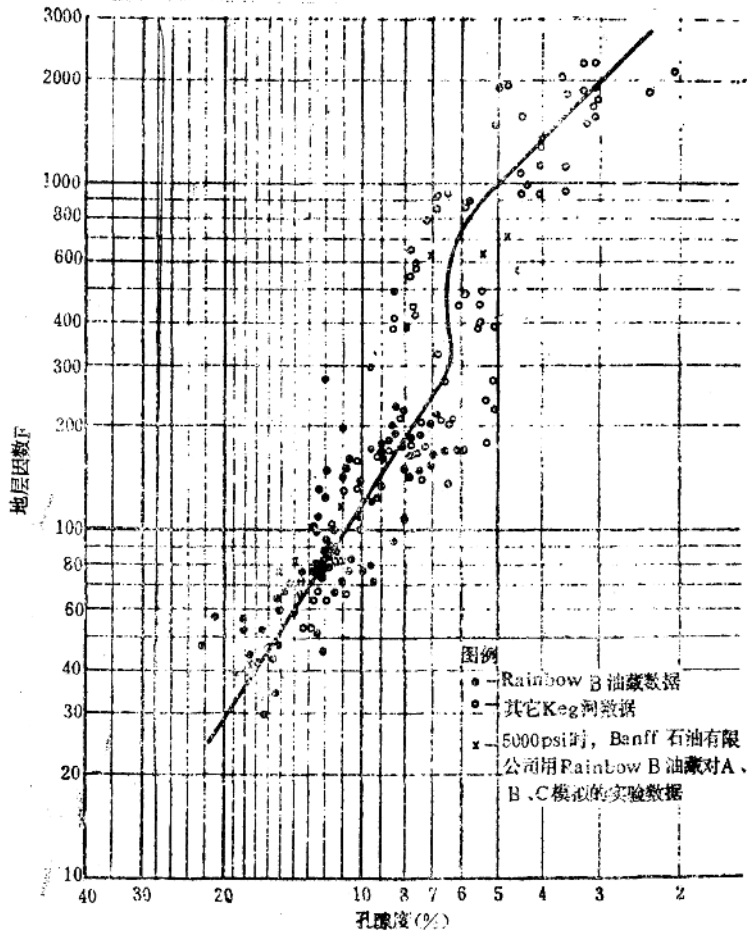


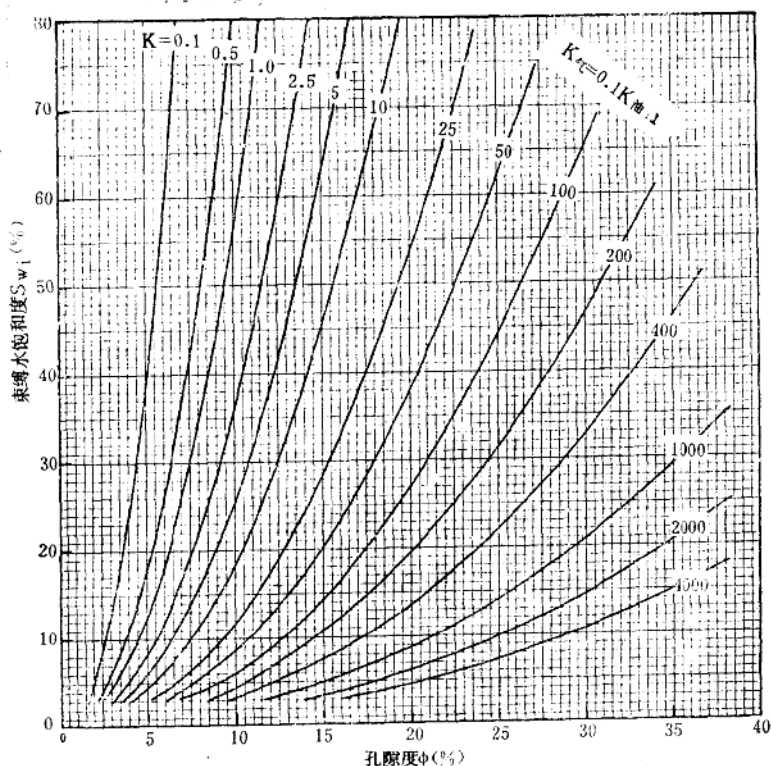
图 1-7 Rainbow B 油藏及北阿伯特地区 Keg River 白云岩的孔隙度与地层因素关系

表 1-1 测得的粒间孔隙系统的 m 值

物 质	m	数据来源
钠蒙脱石	3.28	"Atkins及Smith"
钙蒙脱石	2.70	Atkins及Smith
白云石	2.46	Atkins及Smith
绿帘辉石	2.46	Atkins及Smith
伊利石	2.11	Atkins及Smith
高岭石	1.87	Atkins及Smith
球粒	1.3	"Wyllie及Gregory"
地中海粘土	2.2	?
天然砂	1.6	Archie

六、含水饱和度(束缚水)

储集层岩石的含水饱和度受孔隙尺寸及岩石颗粒表面积的控制。由于毛细作用,较小的孔隙含有毛细管水,然而较大的孔隙则不含有毛细管水。由于岩石颗粒的表面面积大,至使亲水表面面积大,所以含水饱和度增高。在砂岩中,通常含水饱和度越大,则颗粒越小,渗透率越低。图 1-8 和图 1-9 是两张常用的束缚水饱和度、孔隙度及渗透率之间的关系图。比较这两个关系图可以说明,蒂马尔(Timur)的关系图几乎在整个范围内其渗透率都较高。在低含水饱和度处,这两个图有很大差别,这些差别很难调和一致。蒂马尔的公式选用科罗拉多(Colorado)白垩纪岩石作为低孔隙度部分的控制。既然如此,作者希望斯伦贝谢能够使用美国海湾地区或其他一些地区的低孔隙度岩石作为控制。如果你把测井所显示的渗透率的数值以数量级来考虑,则这些关系图没有什么大的问题。当设法使这些关系图与岩芯渗透率相联系时,根据作者的经验,必须乘以 10 和除以 5 才能得到匹配。这样我们就可以看到数量级上的变化。这两个关系图是对于砂岩而制作。



$$K = 8581 \frac{\phi^{4.4}}{S_{wirr}^2} \text{ 对于中等比重的油}$$

$$K = 858 \frac{\phi^{4.4}}{S_{wirr}^2} \text{ 对于气层}$$

K 以 mD 表示 ϕ 和 S_w 以百分数表示

图 1-8 砂岩的束缚水饱和度、孔隙度和渗透率的关系 (Timur)

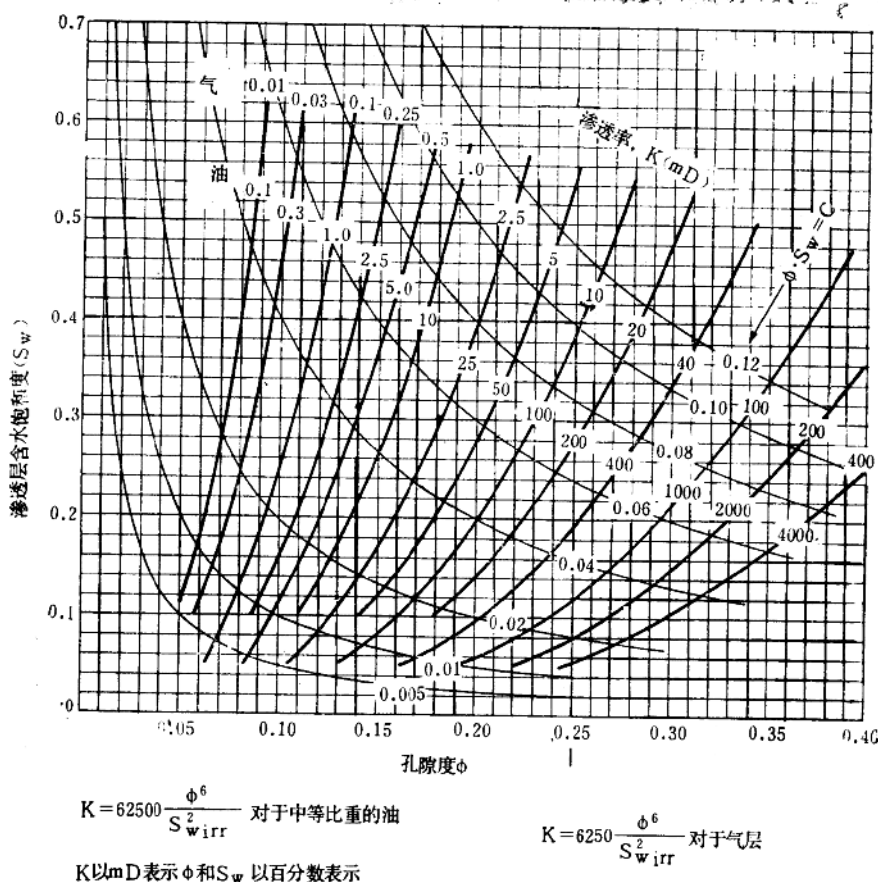


图 1-9 砂岩的束缚水饱和度、孔隙度和渗透率的关系 (斯伦贝谢)

图 1-9 上也有一些标有 $\phi \cdot S_w = C$ 的曲线。这些双曲线通常给出 C 值或“加拿大布克雷斯 (Buckles) 数”。

布克雷斯使用这些数值指示了具有相同特性的储集层。我认为较高的“布克雷斯数”意味着较小的颗粒尺寸。斯奈德 (Sneider) 指出, 在未固结的砂岩中孔隙度受分选度的控制, 渗透率也受分选度和颗粒尺寸的控制。在未固结的砂岩中, 看来平均颗粒直径的数据是符合图 1-9 中“布克雷斯数”线的规律。

图 1-10 给出碳酸盐岩的孔隙度和含水饱和度的关系图。请注意这两族数据。在石灰岩和白云岩之间明显地有结构上的差别。白云岩可能有较多的孔洞。图上所画的各点必然都是在过渡带及含水层以上。图 1-10 中的变化部分可能是 m 值有变化。 m 值的变化常常引起这类的差别。

在图 1-9 上可以看到, 虽然含水饱和度变化了, 但储集层岩石可能具有相同的渗透率。这是由于分选度和颗粒尺寸变化所引起的。图 1-11 给出砂岩的两族数据。在这个实例

中孔隙度基本上是恒定的。图 1-12 是布克雷数及渗透率随深度变化的连续曲线图。可以看出，虽然计算求得的渗透率没有显著的变化，但是布克雷数却有变化。

应该记住，在砂岩及一些碳酸盐岩中高的含水饱和度并不总是意味着地层将产水。这种地层可能是致密的，它可能产一定数量的油气而不产水，因为所有的水都束缚在颗粒表面及小的孔隙中。

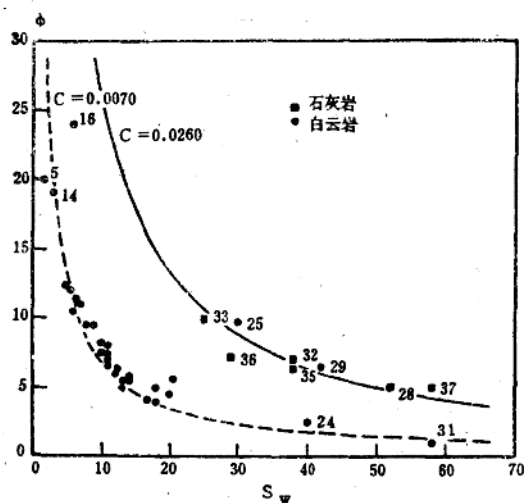


图 1-10 碳酸盐岩的布克雷数图

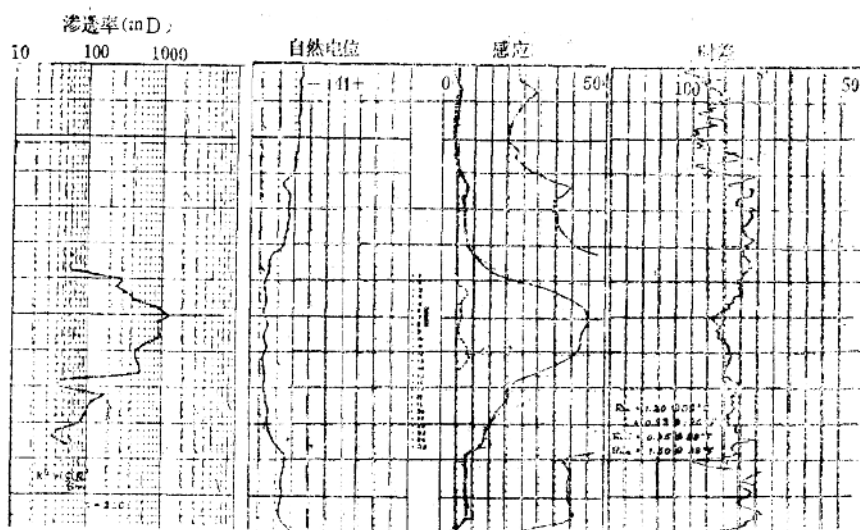


图 1-11a Maracaibo 湖砂岩的 Buckles 数图