

测井工程师

进修丛书

测井资料计算机处理解释方法

钟 兴 水 编著

石油工业出版社



前 言

本书主要介绍斯伦贝尔 (Schlumberger) 公司的四种裸眼井测井资料计算机处理解释方法(即CYBERLOOK、SARABAND、CORIBAND和GLOBAL四种解释方法)同时详细叙述了计算机处理解释过程中经常使用的交会图、频率交会图和概率图的制作及解释方法。全书内容大体可分成两大部分:前两章主要介绍测井资料解释的基础和基本方法;后四章主要介绍斯伦贝尔公司的四种裸眼井测井资料计算机处理解释方法。本书不涉及数字处理技术和具体的程序编制问题。

本着理论联系实际的原则,本书力求在把各种方法的基本概念和计算过程叙述清楚的基础上,对每一种解释方法都列举了实例,并提供了具体的计算程序框图和初步的程序指令,以便于读者学以致用。由于篇幅所限,本书对GLOBAL方法的某些计算公式未作详细推导但对它们的来由和出处作了相应的说明或注解。

在本书编写过程中,受到了周祖凯、陆大卫、沈志成和卢毅杰等同志的大力支持和协助,他们为本书提供了部分资料;华东石油学院测井教研室的老师们,尤其是我的老师王曰才教授,对本书给予了许多指导,提出了许多宝贵意见;王曰才教授对全书进行了审校;江汉石油学院数学教研室主任张烈兴讲师也对本书有关部分给予指导和帮助。在此谨向他们以及给予热心帮助的其它同志表示衷心的感谢。

江汉石油学院测79级毕业生黄书先等同学参与了GLOBAL解释方法等的理论分析和程序编制工作,郑仁娥同志为本书清绘全部图件。

由于编者水平有限,编写时间仓促,书中一定存在不少错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者
一九八四年

绪 言

地球物理测井方法及其资料解释技术,是勘探石油等能源矿床和解决地质问题的重要手段。目前我国测井工作的发展趋向,是要尽快采用先进的技术设备,使测井方法系列化、标准化和数字化,以及测井解释自动化。

近年来,随着计算机在测井工作中的应用,特别是车载计算机测井系统的发展,国外的测井解释技术发展很快,已普遍使用计算机处理和分析测井资料,实现了解释自动化。斯伦贝尔公司的资料解释工作,通常分成三级进行:一级是车载计算机测井系统的井场解释;一级是计算站的解释;一级是计算中心的解释。车载计算机测井系统的井场解释,是在测井的同时,利用装在仪器车上的微型计算机,对刚测出的资料立即进行加工处理和分析,在测井完成后,就能提供初步的解释成果。井场解释采用较为简便易行的解释方法,即由双水模型为基础建立的CYBERLOOK方法。这种方法的解释成果包括:柱状图、交会图、可动油图,气层指示、有生产能力地层指示以及各种解释成果数据表等。它们可对一些目的层作出初步的分析和评价,从而满足现场生产的急需。

在一个较大的油田或地区,斯伦贝尔公司还设有自己的计算站,以对该区的测井资料进行深入的加工处理和分析。测井资料在井场解释的基础上,就由计算站进行深入的处理分析。这时采用的解释方法是SARABAND和CORIBAND方法,前者用于解释砂-泥质地层,后者用于解释复杂岩性地层和碳酸盐岩地层。斯伦贝尔公司还设有计算中心(如设在法国巴黎和美国休斯顿等地)。计算中心和计算站的差别在于:计算中心设有容量较大的计算机,外围设备齐全;解释精度较高,解释内容丰富。此外,这里采用的解释方法也较多,除上述方法外,还采用了一种新的多功能的GLOBAL方法,这种方法可用于任何地层。

计算机解释的整个过程大体可以分为:确立正确的解释模型;建立各种测井响应方程式;初选解释参数并进行试算;优选解释参数作正式运算;检验计算结果的可靠性;成果输出(显示)。在这个过程中,确立正确的解释模型和准确地选择解释参数,对于计算机解释的质量起着关键作用。这些都有赖于测井分析者的正确判断和丰富的经验。因此,计算机解释虽然使解释工作自动化了,但计算方法和程序,仍然依赖人的正确设计和控制。

与其它测井公司相比,斯伦贝尔公司的裸眼井测井资料解释方法大体具有以下一些特点:测井信息齐全,测井精度较高;解释模型种类多,能适应不同的地层;分析程序考虑较全面,特别是包括了油气和岩性校正;在GLOBAL方法中,还利用了数学中的最优化方法原理进行最优解释。根据斯伦贝尔公司在我国服务结果说明,只要解释参数和解释模型选择得准确,无论是CYBERLOOK还是GLOBAL方法,在砂泥岩地层中的解释效果一般是比较好的。斯伦贝尔公司除了测井仪器设备较先进、测井信息较多以外,就其对资料解释的思想、思路以及工作方法等方面,均有许多值得借鉴和参考的。

计算机处理解释测井资料,不仅使解释效率和精度大大地提高了一步,更主要的是为测井信息的综合应用提供了广阔的前景。目前,国内外的测井分析者正在努力地使测井获得的各项物理参数,应用于地质学、地震学、油气田开发工程、金属矿和煤矿勘探等各个部门,一门新的学科——测井地质学,正展现在我们的面前。

目 录

绪言

第一章 测井资料解释基础	(1)
第一节 储集层的地质物理特性	(1)
第二节 纯岩石基本解释关系式	(14)
第二章 测井资料综合评价储集层的基本方法	(30)
第一节 确定岩性和孔隙度	(30)
第二节 确定含油饱和度和划分油(气)、水层	(46)
第三节 确定岩层渗透率	(72)
第四节 探井测井资料综合评价储集层的一般过程	(74)
第三章 交会图、频率交会图和概率图在计算机解释中的应用	(78)
第一节 测井资料计算机处理解释过程的一般概述	(78)
第二节 交会图技术在计算机解释中的应用	(79)
第三节 概率图在计算机解释中的应用	(110)
第四章 车载计算机井场解释方法	
——CYBERLOOK 解释方法原理及应用	(118)
第一节 双水模型及其物理化学基础	(118)
第二节 CYBERLOOK解释方法的基本计算公式	(124)
第三节 CYBERLOOK解释的输入-输出和工作流程	(128)
第四节 CYBERLOOK解释的第一次计算和预解释	(140)
第五节 CYBERLOOK解释的第二次计算和最终解释	(145)
第六节 CYBERLOOK解释计算流程、程序和实例	(155)
第七节 对CYBERLOOK解释方法的简短评价	(168)
第五章 泥质砂岩计算机处理解释方法	
——SARABAND 解释方法原理及其应用	(170)
第一节 泥质概念和泥质砂岩基本参数计算方法	(170)
第二节 泥质砂岩的基本解释关系式	(183)
第三节 SARABAND 解释方法原理	(194)
第六章 复杂岩性地层计算机处理解释方法	
——CORIBAND 解释方法原理及应用	(214)
第一节 概述	(214)
第二节 预解释	(216)
第三节 选择参数和确定解释模型	(220)
第四节 逐点解释	(222)
第五节 成果评价	(236)
第六节 成果显示和应用	(239)

第七节	CORIBAND解释方法计算流程、程序及实例	(241)
第七章	GLOBAL解释方法原理及应用	(254)
第一节	GLOBAL解释方法的理论基础	(255)
第二节	解释模型和响应方程	(260)
第三节	GLOBAL程序链	(280)
第四节	测井质量确定 (LQDET程序)	(282)
第五节	非相关函数的建立	(290)
第六节	围岩和侵入带校正 (RTGLOB程序)	(295)
第七节	选择区域参数的GLOBAL程序	(308)
第八节	逐点储集层评价 (RIGLOB程序)	(310)
第九节	GLOBAL计算流程图和实例	(314)
附录		(325)
附录 I	确定粘土含量的自然电位指示法公式的推导	(325)
附录 II	确定粘土含量的自然伽马指示法公式的推导	(326)
附录 III	在沉积岩、片麻岩和变质岩中出现的主要矿物的测井特征值和骨架值数据表	(328)
附录 IV	电阻率响应误差公式的导出	(334)
附录 V	RTG中电阻率测井误差 $\sigma_{c_{x_0}}$ 和 $\sigma_{c_{x_0}}$ 的导出	(336)
附录 VI	插值函数的一些公式	(337)
附录 VII	GLOBAL解释方法参数表	(338)
附表	本书使用的非许用单位与许用单位对照表	(340)
参考文献		(340)

第一章 测井资料解释基础

第一节 储集层的地质物理特性

一、储集层的概念

自然界存在着各种不同类型的岩层，并不是所有的岩层都能储集油气，在石油地质中，把能够储存油气并使油气在一定压差下流出来的岩层称作储集层。

由此可见，储集层的基本特征是孔隙性和渗透性，即凡储集层必须具备两个基本条件：一是孔隙性；二是渗透性。孔隙性表示岩层具备储集油气和水的空间（这个空间的大小表征岩层储集油气和水的储量多少）；渗透性表示流体在一定压差下通过岩层的能力（这种能力的大小又决定了油井产油气的能力）。决定孔隙性和渗透性好坏的根本因素是孔隙结构。

二、储集层的基本参数

反映储集层储集性质好坏的基本参数是孔隙度、渗透率、含油饱和度和储集层的厚度。测井解释的主要任务就是要用测井资料确定储集层的这些参数，并对它进行评价。

1、孔隙度

地壳中所有的岩石多少都有一些孔隙（包括孔洞和裂隙）。按孔隙的生成及其形成过程分原生和次生两类。原生孔隙包括碎屑沉积（如砂岩、砾岩、生物碎屑灰岩、鲕状生物灰岩等等）颗粒之间的粒间孔隙、岩层层理、层面间的层间孔隙和喷发岩中的气孔等。决定原生孔隙形状和大小的因素是颗粒的形状、分选程度、排列性质、紧密程度和胶结程度等等。岩石生成以后由次生作用形成的孔隙称次生孔隙。决定次生孔隙的诸因素是：溶解的过程、盐类和胶结物重新沉淀以及岩石的白云化等等。例如，在岩石的白云化过程中，由于 CaCO_3 为 MgCO_3 所代替，使石灰岩的体积缩小12%，这就产生了裂缝和孔洞。这些裂隙和孔洞都属于次生孔隙。所有这些孔洞和裂隙都可能成为油气储存的场所和流动的通道。为了衡量岩石中孔隙总体积的大小，以表征岩石孔隙的发育程度，提出了孔隙度的概念。岩石孔隙度就是岩样中所有孔隙空间的总体积（ ΣV_p ）与该岩样的体积（ V ）之比（以百分数表示），即

$$\phi = \frac{\Sigma V_p}{V} \times 100\%$$

岩石的总孔隙度越大，说明岩石中孔隙空间越多。由于自然情况下有许多因素影响到孔隙度的大小，所以天然岩石的孔隙度变化范围很广。表1-1列举出某些岩石孔隙度范围的资料。

在天然岩石中，孔隙形状是各种各样的。图1-1表示出天然岩石的孔隙空间各种形状。

在自然条件下，岩石中不同大小的孔隙，以及孔隙之间的连通程度的不同，对流体的储存和流动所起的作用是不相同的。实践证明，储集层的储集性质，在很大程度上是由孔隙孔道大

表 1-1

岩 石 名 称	以 ϕ 表示孔隙度的值
泥质页岩	0.54~1.4
粘 土	6~50
砂 层	6~52
砂 岩	3.5~29
石灰岩和白云岩 (致密的)	0.65~2.5
含油石灰岩	2.5~33.0
含油白云岩	6.0~33.0

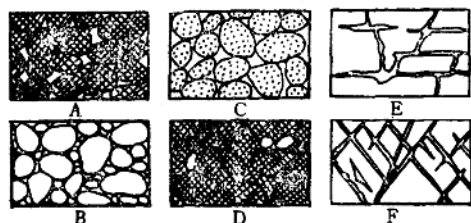


图 1-1 天然岩石孔隙空间各种形状

- A—具有高孔隙度、分选很好的岩石；
 B—低孔隙度分选不好的岩石；
 C—分选很好的岩石，其颗粒间也是多孔的；
 D—分选很好的岩石，其孔隙度由于矿物质沉积在颗粒间的孔隙中而减小；
 E—由于溶解作用成为多孔的岩石；
 F—由于裂缝形成的多孔岩石。

小来决定的。按孔隙的大小和它们对流体的作用可以把岩石孔隙分为三类：

(1) 超毛细管孔隙 孔隙直径尺寸大于0.5毫米、裂隙宽度大于0.25毫米者。在自然条件下，在这类孔隙中，除岩石颗粒表面有一层不能流动的束缚水（又称薄膜滞水）以外，在重力作用下其它的流体（油、水和气）沿着毛细管孔道运动是很自由的。一些胶结疏松的砂岩或未胶结的砂层中的孔隙，大部分都属于这类孔隙。

(2) 毛细管孔隙 孔隙直径尺寸在0.5~0.0002毫米，裂隙宽度介于0.25~0.0001毫米之间者。在这类孔隙中，除了颗

粒表面的束缚水不能流动以外，在某些毛细管弯曲度较大的地方，还会有不能流动的毛细管滞水。油、水和气沿着毛细管孔道运动时，受到的毛细管力阻滞作用很大，而不能自由流动。在由一般孔隙形成的毛细管中，由于毛细管力随毛细管变细而增加，故只有在加上比阻挠液体运动的毛细管力还要大的力时，油、气、水才能沿着这些管道运动。一般的砂岩孔隙，大都属于这一类。

(3) 微毛细管孔隙 孔隙直径尺寸小于0.0002毫米，裂缝宽度小于0.0001毫米者。由于这类孔隙极其微小，孔壁表面对分子的作用力可以到达孔隙孔道的中心，故在通常压力条件下，流体在其中是不能流动的。这类孔隙中的流体一般是成岩过程中形成的地层水，其它地层生成的油气不可能进入这类孔隙。一般的粘土层和泥岩的孔隙均属这一类，所以称这类地层为非储集层。

岩石的孔隙主要为微毛细管时，不管其孔隙度的大小如何，此岩层对液体和气体是不渗透的（如粘土、泥岩）。如岩石的孔隙主要是那些断面足够大的毛细管和超毛细管孔隙组成的，那么该岩层就是好的储集层。从实际出发，只有那些互相连通的超毛细管孔隙和毛细管

孔隙才具有实际意义，因为它不仅能储存油气，且可以允许油气渗滤；而那些孤立的互不连通的孔隙和微毛细管孔隙，即使其中储存有油和气，在现代工艺下，也不能开采出来，实际上没有什么意义。

上述可得出结论：在自然条件下，当有压差存在时，不是所有的孔隙里的液体和气体都能流动的。因此，又导出有效孔隙度（或有效流动孔隙度）的概念。所谓有效孔隙度是单相流动的流体饱和于孔隙并作稳定流动时，此流动的流体所流经的孔隙的体积与岩石总体积的比值。换句话说，在确定有效流动孔隙度时，应除去微毛细管孔隙、某些毛细管孔隙（指不连通的“死孔隙”）以及不流动的靠近管壁的液体的薄层。

显然，岩石的有效孔隙度总是小于或等于总孔隙度。储集性质好的岩石，其有效孔隙度与总孔隙度差别甚小；而储集性质差的储集层，其有效孔隙度与总孔隙度差别较大。砂层的有效孔隙度接近于总孔隙度。在砂岩中，由于砂粒胶结之故，某些孔隙被胶结物填充或隔绝，其有效孔隙度稍小于总孔隙度。在石灰岩、白云岩中，常遇到大量的彼此隔绝的孔隙，所以这类岩石总孔隙度和有效孔隙度可能相差很大。

另外，岩石孔隙度一般随岩石的埋藏深度增加而减小。

从测井解释来说，并不分原生孔隙与次生孔隙。总孔隙度、有效孔隙度和缝洞孔隙度这些参数是通过测井方法的适应性上加以区分的。

2. 渗透率

在有压力差存在的条件下，岩石本身允许流体通过的性能称为岩石的渗透性（严格地说，自然界里所有的岩石都具有渗透性，甚至象金属这样致密的物质在特定的高压条件下，也可使水从其中渗过。故就绝对意义讲，渗透与非渗透之间没有明显的界限）。一般所指的渗透性的和非渗透性的，或者渗透性好的和渗透性差的，都是相对的、有条件的。但是人们习惯于笼统地将那些在通常地层压力条件下，流体比较容易地沿着其中连通的孔隙、缝洞流动的岩石（如一般的砂岩、裂隙灰岩等）称为渗透性岩石；而把那些由于孔洞小、连通性差、在通常地层压力条件下流体通过它流动很艰难的岩石（如粘土、泥岩等）称之为非渗透性岩石。

显然，渗透率是储层的重要参数，它表征了储层岩石让油气向井内流动的能力。它也是决定油气田能否形成以及形成以后产量高低的重要因素。只有渗透性好的储层，油气才能大量进入，开采时产量也高。

岩石渗透性的好坏通常用渗透率表示。当单相流体通过孔隙介质呈层状流动时，流体的流动服从达西直线渗滤定律，用公式表示如下：

$$Q = K \frac{(P_1 - P_2) F t}{\mu L}$$

$$\text{或} \quad K = \frac{Q \mu L}{(P_1 - P_2) F t}$$

式中：Q——t秒内通过岩样的流体体积（立方厘米）；

P_1 ——岩样前端的压力（大气压）；

P_2 ——岩样后端的压力（大气压）；

F——岩样的横截面积（平方厘米）；

L——岩样的长度（厘米）；

μ ——液体或气体的粘度（厘泊）；

t——液体或气体通过岩样的时间（秒）；

K——岩石的绝对渗透率（达西）。

渗透率的单位为达西（用d表示）。1达西的渗透率表示粘度为1厘泊的1立方厘米的流体，通过横截面积为1平方厘米的孔隙介质，在压力差为1个大气压时，1秒钟内流过的距离恰为1厘米时，该孔隙介质的渗透率为1达西。由于这个单位较大，实用上常用毫达西（md），即千分达西。

以上是假定只有单相液体或气体充满和通过岩石孔隙的情况。但在自然界中经常有两相（油-水、气-水）甚至三相（油-气-水）流体同时存在岩石孔隙之中。在这种情况下，各相之间彼此干扰，互相影响，岩石对每一相的渗滤作用都将与单相流动有很大差别。为了区别这些情况，将渗透率分成绝对渗透率及相渗透率（有效渗透率）。

（1）绝对渗透率 绝对渗透率是在只有一种流体（油气或水）通过岩石的情况下测得的渗透率，其大小只与岩石孔隙结构有关，而与流体性质无关。测井解释通常所说的渗透率，就是岩石的绝对渗透率。

（2）相渗透率（有效渗透率） 当两种或两种以上的流体通过岩石时，对其中某一种流体测得的渗透率，称为该流体的相渗透率（有效渗透率）。相渗透率除与岩石的孔隙结构有关以外，还与油、气、水与岩石相互作用及流体性质和流体的相对含量有关。由试油资料求得的渗透率就是有效渗透率。

（3）相对渗透率 有效渗透率与绝对渗透率的比值称为相对渗透率。在多种流体同时通过岩石的情况下，可用相对渗透率的大小衡量某种流体通过岩石的难易程度。设岩石中同时有两相流体——油及水（没有气）在流动，根据实验，油和水的相对渗透率与含水饱和度的关系如图1-2所示。左边的曲线表示岩石中油的相对渗透率与含水饱和度的关系；右边的曲线表示岩石中水的相对渗透率与含水饱和度的关系。

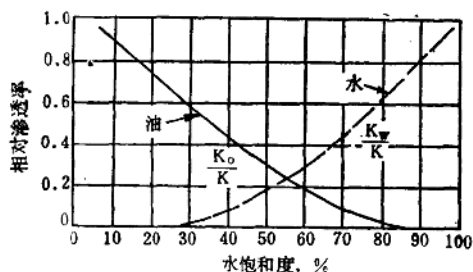


图1-2 含水饱和度与相对渗透率关系曲线

由图1-2可见，在油水两相流动的情况下，当岩石内含有20%的水时，岩石对油的渗透率就急剧下降，但是此时在岩石内几乎看不到水的流动，这是因为当含水饱和度小时，如岩石很好地为水所润湿时，水几乎全部分布在细小孔隙及颗粒接触角间的颗粒表面上。表面分子力和毛细管力将水牢固地保持成这种状态。所以当压力梯度很小时水是不流动的。同时它也减小了石油通过管道截面面积，而使岩石对油的渗透率降低。以后，含水百分比增加，油的渗透率也继续下降，当含水饱和度达80%时，实际上油已停止流动，此时岩石好象完全无油一样。

在油水两相流体的情况下，当含水饱和度很低而含油饱和度很高时，水的相对渗透率接近于零，地层产油而不出水，这时的含水饱和度称为束缚水饱和度 S_{wi} ；而当含水饱和度很高而含油饱和度很低时，油的相对渗透率接近于零，这时地层只出水而不出油，这时的含油饱和度称为残余油饱和度 S_{or} 。

在这个例子中，油和水的相对渗透率之和不等于1，这是因为不同流体之间有相互阻碍流动的作用，使各相流体有效渗透率之和不可能等于绝对渗透率。

储集层的渗透率，甚至在同一油田范围内，变化也是很大的，一般在5~1000md之

间,大部分油气层通常所具有的渗透率为几百千分达西。有时在渗透率 $<5\text{ md}$ 的岩石中,也可产出大量石油,这种储集层往往是因为取芯时不能取出完整的岩芯,不能把渗透性很高的裂隙及孔洞岩石取出所致。

3、含油饱和度

在沉积过程中,岩石孔隙是完全含水的。当油气运移进入储集层时,就把部分孔隙中的自由水排挤出去,然后油气与剩下的水共存于岩石孔隙中。所谓含油饱和度,就是油气体积占岩石有效孔隙体积百分数,而含水饱和度则是含水体积占岩石有效孔隙体积的百分数。含水饱和度、含油饱和度分别用 S_w 和 S_o 表示。显然,在同一地层中 $S_w + S_o = 1$ 。含油饱和度愈高,说明地层含油性愈好。测井解释所说的含油饱和度,通常是指岩石孔隙中含的油,或油气的百分数;如果确实知道岩石孔隙只含气和水,不含油或含油甚少,则可说含气饱和度。如果未加说明,代表油气。

一个储集层是否含油和含油饱和度的高低,最根本的是取决于一个沉积盆地是否有较丰富的生油层,即有油源存在。如果已知有油源存在,在这个条件下,储集层含油饱和度的高低,就取决于两个条件:一个是储集层内部条件,即渗透性的好坏;一个是外部条件,即储集层在构造上的位置。众所周知,油气聚集受构造条件的控制,例如一个背斜油气藏,由于油、气、水按其比重大小发生重力分异,在背斜构造上形成气顶、纯油带、油水过渡带和底水几部分(图1-3)。而在和这个背斜构造相连接的向斜构造上,一般都是不会形成油气藏,除非有断层起封闭作用。因此,尽管地层各部分孔隙性渗透性都很好,但在A井地层中几乎全是水;B井地层中油、气、水都有;在C井,地层只有油和水,处于油水过渡带上。

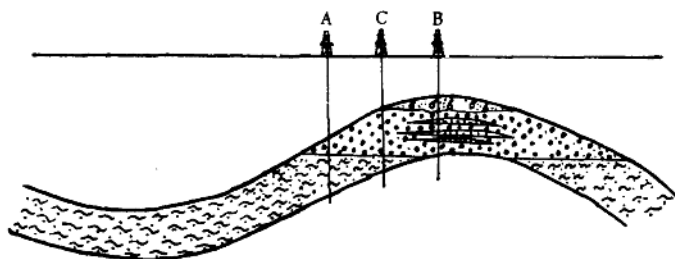


图1-3 油藏中油、气、水的分布

如果B井地层的岩性及物性局部变差,虽然它处于含油有利部位,但仍可能不含油或含油饱和度降低。这就是储集层本身岩性及物性对其含油性的控制作用。一般来说,随着岩石颗粒的变细和泥质含量增加,其孔道直径变小,渗透率降低,而束缚水饱和度随之增加。当地层的岩性变成泥岩或岩性很细、泥质很重时,其束缚水饱和度可接近或达到100%。因此客观上存在着两种控制含水饱和度的因素:一种是储集层的孔隙性渗透性;一种是构造控制。我们在解释一口井的每一个地层的含油性时,必须考虑这两种因素。

4、储集层厚度

通常用岩性变化(如砂岩到泥岩,或碳酸盐岩到泥岩)或孔隙性渗透性的明显变化来划分储集层的界面。储集层顶底界面之间的厚度,即为储集层的厚度或称渗透层的厚度。

在计算油气储量时,还要用油气层有效厚度的概念。根据计算油气储量的要求,规定有效孔隙度和含油饱和度起算标准,还规定单一油气层厚度的起算标准(如半米以上),凡符合这些标准的油气储集层累计厚度(扣掉不合标准的夹层),就是油气储集层的有效厚度。这

是决定油气储集层储量大小的重要参数，有效厚度愈大，储量就愈大。

三、储集层的类型

世界上已知储集层的类型很多，但主要者仅有两类：碎屑岩储集层和碳酸盐岩储集层。目前世界上所查明的油气主要储量也集中在这两大类储集层中，其它岩类储集层仅有零星分布，不占重要地位。

1、碎屑岩储集层

碎屑岩储集层，在岩性类型上包括从砾岩、砾状砂岩、粗砂岩、中砂岩、细砂岩、粉砂岩到细粉砂岩各种粒级的岩石（见表1-2）。就现有资料看，其中以中、细砂岩储集层分布最广，储油物性最好。我国东部各主要含油气盆地的储集层多以细砂岩、粉砂岩为主；西部各含油盆地的储集层则多以中砂岩、细砂岩为主。砾岩、砾状砂岩粗砂岩储集层在一些盆地也都程度不等的有所出现。碎屑岩储集层是目前我国最主要和分布最广的储集层。目前，世界上统计的石油最终可采储量，在碎屑岩储集层中约占42.7%左右。

表 1-2 碎屑岩的粒级

岩 石	名 称	颗粒直径 (mm)
砾 岩	巨 砾	>1000
	粗 砾	$1000\sim100$
	中 砾	$100\sim10$
	细 砾	$10\sim2$
砂 岩	巨 砂	$2\sim1$
	粗 砂	$1\sim0.5$
	中 砂	$0.5\sim0.25$
	细 砂	$0.25\sim0.1$
粉 砂 岩	粗 粉 砂	$0.1\sim0.05$
	细 粉 砂	

碎屑岩储集层中，常见的孔隙空间主要是碎屑颗粒之间的粒间孔隙。影响碎屑岩储集层物性的主要因素是：

(1) 碎屑岩颗粒的排列方式和大小 如图1-4(a)所示，呈立体排列形式时，堆积最松，孔隙度最大（约为47.6%）且孔隙半径大，连通性好，渗透率亦高；呈斜方体排列，排列最紧密时，孔隙度最小，理论孔隙度为25.9%，见图1-4(b)。呈斜方体排列的孔隙半径也较小，连通性较差，故渗透率也较低。当组成岩石的颗粒近于球形且大小均等时，其理论孔隙度与组成岩石的碎屑颗粒大小无关。不过，当粒度减小时，孔隙孔道横截面积减小，孔隙连通性变差，流体与孔壁之间的吸附力增大，使有效孔隙度及渗透率随之降低。

(见图 1-4)。

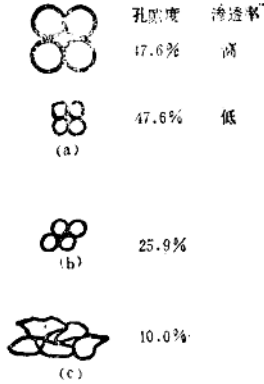


图 1-4 岩石颗粒呈球体或其它形态时，排列形式与孔隙度关系

- (a) 立体排列堆积最松孔隙最大；
- (b) 斜方体排列堆积最紧孔隙度减小；
- (c) 其它形态岩粒紧密堆积孔隙度最小；

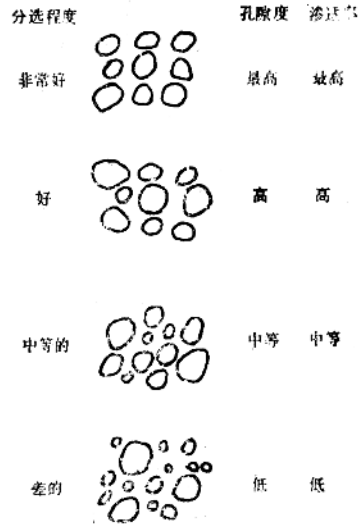


图 1-5 碎屑岩分选程度与物性关系 (示意)

(2) **颗粒分选程度和磨圆度** 自然界中，岩石颗粒大小常常是不相同的。大颗粒之间会被小颗粒充填，小颗粒之间可被更小的颗粒所充填，于是岩石物性就会急剧变差（如图 1-5），通常情况是分选程度越差，其孔隙度、渗透率就越低。

另外，组成岩石的颗粒形状往往极不规则。当它们堆积在一起时，常常相互镶嵌，彼此咬合，从而使颗粒之间的孔隙大大减小，物性变差，相反，颗粒磨圆程度越高，物性则越好（见图 1-6）。

(3) **胶结物的多少、类型和成分** 胶结物的多少对储油物性有明显的影。胶结物含量高，粒间孔隙多被充填，孔隙体积、孔隙半径变小，孔隙间连通性变差，都导致储油物性变差。另外，胶结物的多少还直接决定着储集层胶结的类型。胶结物含量高的一般多为基底式或孔隙-基底式胶结，这种类型的胶结，物性较差；胶结物含量低的多为接触式或接触-孔隙式胶结，这类胶结，物性较好。

胶结物成分对储集层物性好坏也有直接影响。一般地说，硅质、硅质-铁质或铁质胶结的岩石较致密，储油物性差；泥质、泥质-钙质或钙质胶结的岩石较疏松，储油物性较前者为好。

(4) **孔隙度和渗透率的一般关系** 一般地说，在有效孔隙度相同的条件下，孔隙个体小的必定比个体大的渗透率低。孔隙空间形状复杂的必定比形状简单的渗透率低。这是因为孔隙个体越小，截面形状复杂，单位面积上出现的孔隙空间表面面积越大，对流体吸附力、毛细管阻力和流体摩擦阻力也越大。另外，孔隙通道的复杂程度和弯曲程度，也很大程度上影响着岩石的渗透性。因为它可以使流体在流动过程中产生局部的方向变化和速度变异，消耗流体的动能。

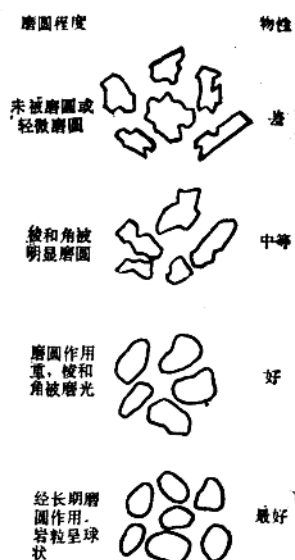


图 1-6 碎屑岩磨圆度与物性关系(示意)

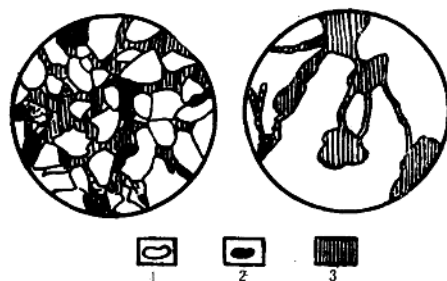


图 1-7 储集层中孔隙与喉道分布示意图

1—岩石颗粒; 2—胶结物; 3—孔隙

近年来,在对孔隙结构的研究中,提出岩石中所有孔隙,可按其在流体储存和流动过程中所起作用分为两部分:一部分孔隙对流体储存有较大作用,如象一些较大的孔洞;另一部分对沟通孔隙使它们连通起来起关键性作用,如象碎屑岩孔隙与孔隙间的狭窄部分,人们将这部分孔隙称为孔隙的喉道(见图 1-7),正是这部分孔隙主要影响着岩石的渗透性。因为流体在岩石中流动必须经过喉道,而所流经的喉道粗细和特征必然要严重地影响着岩石的渗透性。当然这并不是说其它孔隙对渗透率就毫无影响了。就目前所知,由于喉道和孔隙的不同配置关系,可以使储集层呈不同的性质。例如,以喉道较粗和孔隙个体粗大为特征的储集层,一般表现为孔隙度大,渗透率高;以喉道较粗,孔隙较细为特征的储集层,一般表现为孔隙度低到中等,渗透率为中等到偏低;以喉道较细小,孔隙粗大为特征的储集层,一般表现为孔隙度中等,渗透率低;以喉道细小,孔隙亦细小为特征的储集层,一般表现为低孔隙度和低渗透率。

砂层和胶结疏松的砂岩是渗透性好的岩层,因此它们都是好的储集层。它们的渗透率随砂粒之变粗而增大,因为此时颗粒间的通道截面积增大了。

由石灰岩组成的储集层,其孔隙度不大而渗透率之所以大,是因为它具有渗透率大的溶解裂缝及孔道。

大多数的天然储层岩石,还有一个重要性质是水平(平行于层理的)渗透率不同于垂直(垂直于层理的)渗透率。这是因为岩层在垂直层理方向上要比顺着层理方向更为致密。

水平渗透率及垂直渗透率之间最大差异者,常见于含粘土夹层的岩层,以及含淤泥的岩层;未胶结的砂层的渗透率常是均一的。

除去上述因素以外,颗粒的矿物成分,岩层层面、层理面的发育程度,以及一些次生变化(溶解作用、构造变动等)也都可能对碎屑岩类储集层物性有所影响。

2、碳酸盐岩储集层

碳酸盐岩储集层包括石灰岩、白云岩、白云质灰岩、生物碎屑岩和鲕状灰岩等。这一类储集层在世界上占有很重要的地位。目前,世界上已探明的油气储量约有57%储集在这类岩层中,而其产量占总产量的60%。中近东的高产大油气田的产量均是碳酸盐岩储集层。我国华北的上元古界、寒武系和奥陶系的产油层,四川的震旦系和二叠系、三叠系的油气层,均属于这一类储集层。

碳酸盐岩的基本化学成分是碳酸盐(如 CaCO_3 、 MgCO_3 等)。从矿物组成看,碳酸盐岩主要由方解石和白云石两种矿物组成。以方解石为主的称为石灰岩,以白云石为主的称为白云岩。除方解石和白云石以外,在碳酸盐岩中还常有文石、菱镁矿、菱铁矿、菱锰矿及铁白云石等,这些都是碳酸盐矿物。当然也还含有一定数量的非碳酸盐矿物,如粘土矿物等。根据方解石及白云石相对含量,把碳酸盐岩划分为两大类(在两大类之间还存在着一系列过渡性岩类),如表1-3所示。

表 1-3

碳酸盐岩分类

	岩石类型	方 解 石	白 云 岩	CaOMgO
石灰岩类	纯石灰岩	100~95	0~5	>50.1
	含白云质石灰岩	95~75	5~25	50.1~91
	白云质石灰岩	75~50	25~50	9.1~4.0
白云岩类	灰质白云岩	50~25	50~75	4.0~2.2
	含灰的白云岩	25~5	75~95	2.2~1.5
	纯白云岩	5~0	95~100	1.5~1.4

碳酸盐岩一般比较致密,原生孔隙度只有1~2%,但因其性脆和化学性质不稳定,容易形成各种各样的缝洞洞。一般认为,包括原生孔隙度和次生孔隙度(缝洞孔隙)在内的总孔隙度在5%以上时,该碳酸盐岩层就可能具有渗透性。因此,与碎屑岩储集层相比,碳酸盐岩储集层具有储集空间多样性和分布不均匀性的特点,常见的碳酸盐储集空间主要有三种:

(1) 孔隙性储集空间 这与碎屑岩的储集空间极为相似,包括两类孔隙:一类是由颗粒、生物碎屑和结晶颗粒支撑的粒间孔隙,晶间孔隙以及鲕粒和生物体内腔形成的粒间孔隙。这类孔隙是在岩石成岩过程中形成的原生孔隙。其典型的岩性是鲕状灰岩、针孔状生物灰岩等。我国川南高寺气田的鲕状灰岩,其鲕粒直径最大为0.55毫米,最小为0.15毫米,一般为0.2~0.4毫米,鲕粒间连通孔隙度为14~18%。另一类是所谓的白云化及重结晶作用形成的粒间孔隙,这是在岩石成岩后形成的一类次生孔隙。由于地层水中的镁离子与灰岩、方解石中钙离子发生交换作用,由方解石变成白云石,体积缩小12~13%,使孔隙空间扩大,同时伴随着重结晶作用,使颗粒变粗,也会使孔隙空间扩大。

这种储集层的储油物性、油气水在储集层中渗滤和分布,泥浆侵入特性等,与砂岩储集层有些类似,采用的测井方法和解释方法也比较接近。目前测井解释对这类碳酸盐岩储集层比对它类型的碳酸盐岩储集层解释较为成功。

(2) 裂缝性储集空间 这主要是由构造裂缝组成。其发育程度与构造部位和岩性条件有关。一般在构造轴部及断裂附近最发育。而按岩性则以白云岩、石灰岩和泥灰岩的顺序依

次降低。我国川南裂缝性储集层的主要特点是：在构造同一部位往往发育着好几组裂缝，通常有垂直的、水平的、平行的及交错的四组，其中有一组是主要的。裂缝在横向及纵向的发育程度都极不均匀。裂缝的宽度可分粗、细、微三种，其中以粗、细裂缝对储集性能有利。裂缝性储集层的特点是：岩石致密，平均孔隙度很小，渗透率高而变化大，主要渗透带（裂缝发育带）厚度很小，一般一米左右，只占整个地层的一小部分。

由于裂缝的数量、形状和分布极不均匀，使裂缝性储集层的孔隙度和渗透率具有多变性，油气水分布也很不规律。此外，裂缝性储集层还具有泥浆侵入比较深的特点。

对于测井解释来说，裂缝性储集层大致可分为两类：一类是裂缝相当发育，岩石相当破碎，以致在测井探测范围内可认为裂缝是均匀分布的，而且裂缝孔隙度同粒间孔隙度相当或在数量上占优势。在这种情况下，测井的效果比较好，与孔隙性储集层差不多；另一类是裂缝不太发育，分布也很不均匀，裂缝孔隙度不及粒间孔隙度大。这时岩石总孔隙度较低，由于裂缝发育和分布都不均匀，测井效果较差。

（3）洞穴型储集空间 主要指由溶蚀作用、结晶作用和其它次生变化形成的比较大的孔洞（明显大于粒间孔隙）。这类孔隙形状不一，大小悬殊，小的4毫米左右，大的可达几千立方米。常沿裂缝及地层倾斜方向分布。洞穴之间，或直接连通，或通过微细裂缝连通。这是碳酸盐岩富集油气的一种重要的孔隙类型，常是钻遇高产油气层的一种显示，钻井遇到洞穴，会出现放空和泥浆漏失现象，洞穴愈大，漏失愈严重。

目前测井解释，只考虑较小的洞穴，并认为它们在测井探测范围内是均匀分布的。用包括缝洞孔隙在内的有效孔隙度 ϕ 计算含水饱和度，把有效孔隙度 ϕ 与声波孔隙度之差作为缝洞孔隙度（即次生孔隙度）。

3、其它岩类储集层

这类储集层包括岩浆岩、变质岩和泥质沉积岩等。它们都很致密，由于成岩以后的风化、剥蚀作用或强烈的构造运动作用，可以形成次生孔洞和裂缝。如果靠近油源，这些次生的孔洞和裂缝就有可能储集油气。我国油泉盆地的鸭儿峡油田，志留系变质岩风化带就属于这类储集层。

四、储集层的泥浆侵入特性

储集层的泥浆侵入特性是钻井后出现的，并不是地层固有的。由于它对测井解释有重要意义，所以在这里专门进行讨论。众所周知，钻井时，为了防止井喷，通常是使泥浆柱静止压力略大于地层压力，此压力差驱使泥浆向储集层渗透。在不断渗透的过程中，泥浆中的固体颗粒逐渐在井壁上沉淀下来形成泥饼。由于泥饼的渗透性很差，当泥饼形成后，可认为这种渗透作用就基本停止了。这个过程主要是泥浆滤液径向渗透的过程。在这以后，泥浆滤液在垂直方向上的渗透作用将显著表现出来。这是由于泥浆滤液与地层水和油气有不同的物理性质（主要是密度不同），使岩石孔隙中的流体重新进行重力分异作用，以达到新的平衡。显然，泥浆侵入地层的这两个过程是交叉进行的，但泥饼形成前以径向渗透为主，泥饼形成后以纵向为主。

由于泥浆滤液电阻率与地层水电阻率不同。泥浆侵入将改变储集层电阻率的径向特性。假定储集层原来电阻率径向分布是均匀的，都是真电阻率 R_t 。在泥浆滤液向地层渗透的过程中，井壁附近的岩石孔隙受到泥浆滤液的强烈冲洗，原来孔隙中的自由流体几乎都被排挤走了，只剩下一部分束缚水，充满岩石孔隙的是泥浆滤液和没有挤走的残余地层水的混合物

(当地层为水层时)，或夹有少量的残余油(当地层为油气层时)。这个靠近井壁受到强烈冲刷的地带，通常称为地层的冲洗带，它大体是一个与井轴同心的环带，其电阻率比较均匀，称为地层冲洗带电阻率，用 R_{xo} 表示，如图1-8所示。冲洗带以后，是一个过渡带，

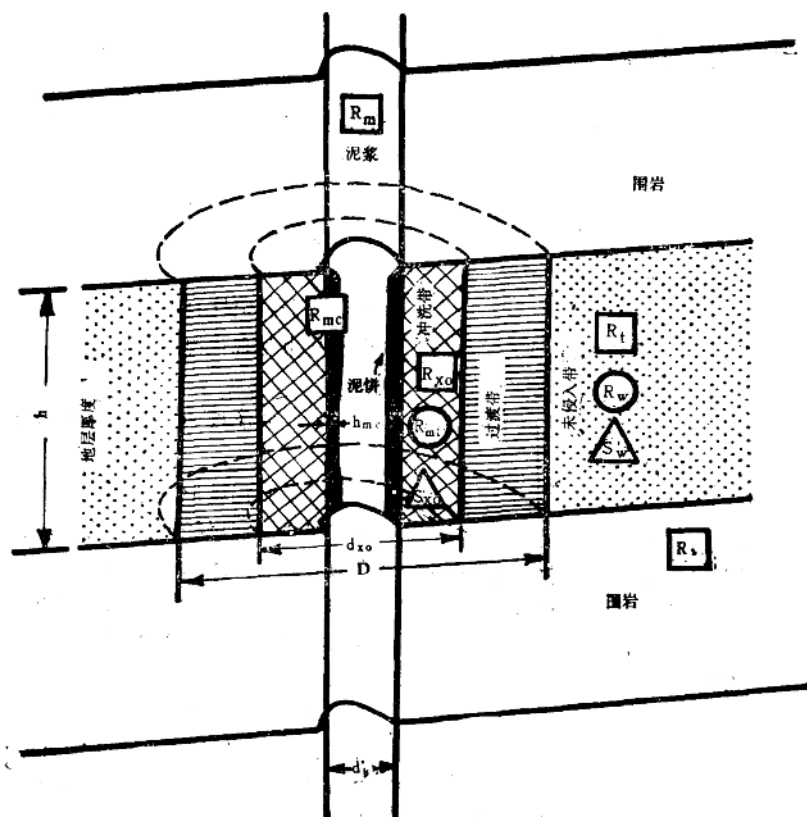


图 1-8 泥浆侵入地层使地层径向电阻率变化的情况(示意)

泥浆滤液逐渐减少，原状地层流体逐渐增加，直到没有泥浆滤液的原状地层（未侵入地带），其电阻率也由 R_{xo} 渐变为 R_t 。通常测井所说的侵入带是包括冲洗带和过渡带，其电阻率用 R_i 表示。在侵入带内的地层电阻率（ R_i ）值是不稳定的。不同部位 R_i 值是不同的，因此测井确定的 R_i 值是与确定 R_i 的方法有关的，可以近似认为是侵入带电阻率的平均值。通常所说的侵入带直径（用 D 表示），并不是整个过渡带的直径，只是过渡带某一部分的直径。测井解释确定的侵入带直径大小与确定侵入带直径的方法有关，根据冲洗带电阻率 R_{xo} 和地层真电阻率 R_t 的相对大小，通常把储集层的侵入特性归纳为两种典型的侵入剖面：高侵剖面和低侵剖面。

1、高侵剖面（图1-9(a)）

用淡水泥浆钻开的水层一般形成典型的高侵剖面（ R_{xo} 明显大于 R_t ）。部分具有高矿化度地层水的油气层；也可能形成高侵剖面，但 R_{xo} 与 R_t 的差别比相应的水层要小。这时，由冲洗带到未侵入带一般是渐变过程，即泥浆滤液含量渐少，地层水或油气含量渐多。若是油气层，则含水饱和度（包括泥浆滤液和地层水）渐小，而含油饱和度渐大。但有时为了理

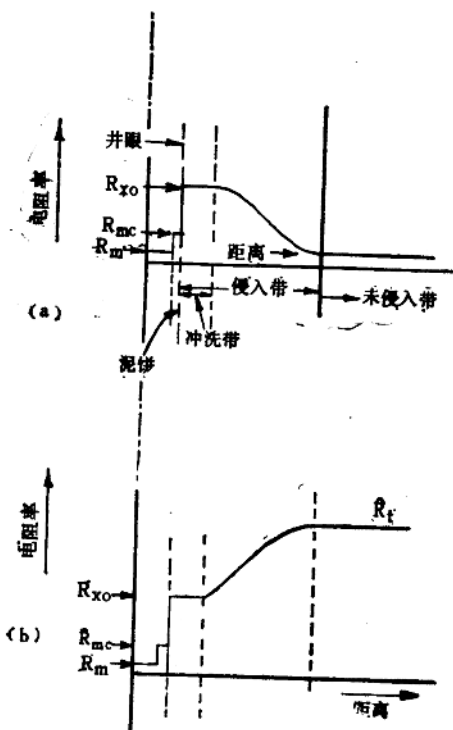
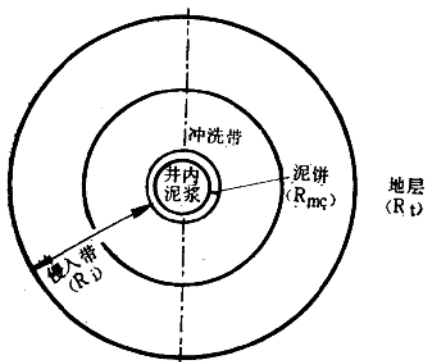


图 1-9 储集层侵入特性示意图

(a) 高侵剖面; (b) 低侵剖面;

电阻率比冲洗带电阻率 R_{xo} 和真电阻率 R_t 都高。

(3) 纵向运移期间 (图 1-10(c)) 当泥饼厚度达到最大时, 由于泥饼的渗透率是很有限的, 因此, 这时纵向运移将占优势。在重力作用下, 侵入带中的滤液和环形带中的地层水都要向下运移, 而可动的油气将去代替它们。这样, 低阻环带将逐渐消失, 冲洗带范围将有所缩小, 而所谓的高阻带的范围将向冲洗带方向扩大。最后达到平衡状态时, 地层将有四个带: 由泥饼有限的渗透率所维持的冲洗带, 其厚度相当薄; 高阻环形带, 其径向范围

论计算的方便, 也可假设冲洗带到未侵入带是突变的, 没有过渡带, 形成所谓阶梯形侵入剖面。

2、低侵剖面 (图 1-9(b))

一般是油气层具有典型的低侵剖面 (R_{xo} 明显小于 R_t), 部分水层 ($R_{mf} < R_w$) 也可能形成低侵剖面, 但 R_{xo} 和 R_t 的差别比相应的油气层要小。同高侵剖面类似, 低侵剖面的过渡带一般也是渐变的, 但有时根据需要也可以认为是阶梯型的。

上述油、水层在侵入特性上的差别, 对用测井资料定性判断油水层有重要的参考作用, 它也是现代测井解释方法中一个重要问题。

3. 高渗透油气层侵入剖面随时间的变化

(1) 泥饼形成以前 (图 1-10(a))

这时泥浆滤液以径向渗滤为主, 径向特性曲线的形态与前述的高侵剖面或低侵剖面很相似, 但由于处在径向渗滤过程中, 冲洗带和过渡带的径向厚度是逐渐扩大的, 直到泥饼形成为止。

(2) 最厚的泥饼形成时 (图 1-10(b)) 在油气层中, 由于油气的相对渗透率明显大于地层水的相对渗透率, 故在滤液径向渗滤过程中, 油气被排挤得更快些。这样, 势必在未侵入带之前形成一个地层水饱和度较高的环形空间, 其电阻率必定低于地层真电阻率 R_t 。与此同时, 当形成泥饼使滤液的纵向移动加强时, 在重力作用下, 滤液将向下移动, 而可动的油气将去占据滤液向下移动以后留出的空间, 这就有可能在低阻环带之前形成一个含油饱和度相对高些、地层水含量少、而滤液含量较大的地带, 其电