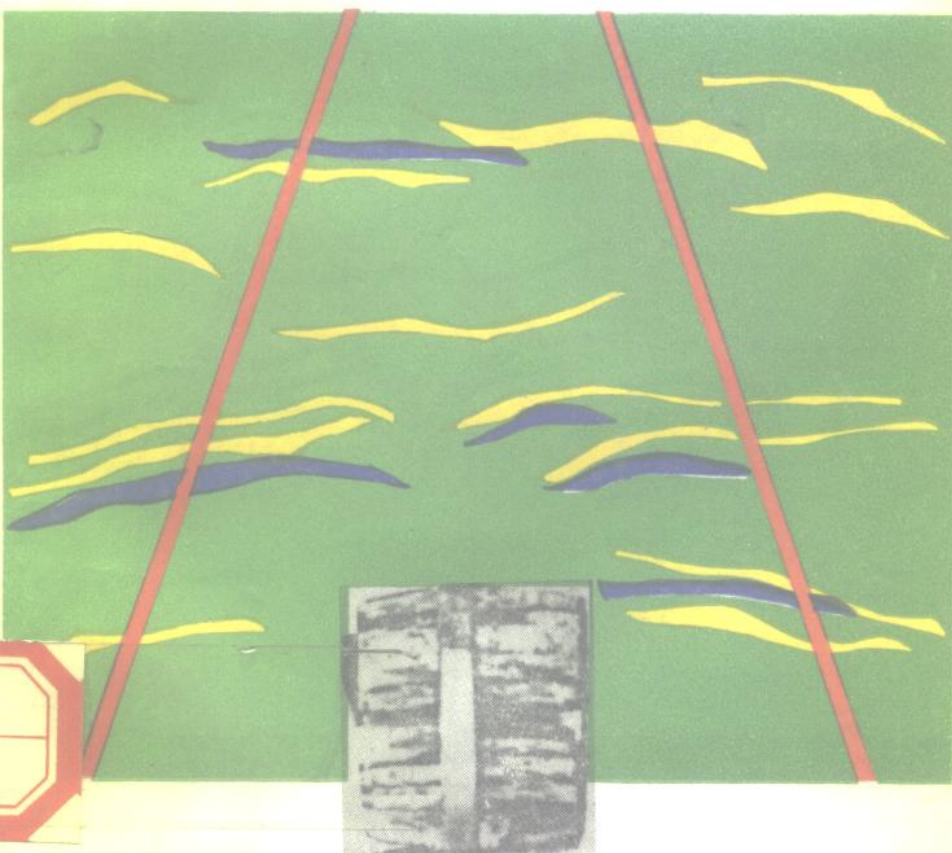


油气储集层的岩石物理研究

(俄)Л. И. 奥尔洛夫 Е. Н. 卡尔波夫

В. Г. 塔波尔科夫



石油工业出版社

070596

TE 311/016

油气储集层的岩石物理研究

[俄] Л.И. 奥尔洛夫

Е.Н. 卡尔波夫

В.Г. 塔波尔科夫

郝志兴 楚泽涵 译



石油工业出版社

(京)新登字082号

内 容 提 要

本书重点阐述了油气储集层与地球物理测井参数之间的相互关系以及影响储集层参数确定的各种因素。同时,还介绍了岩石物理研究的方法和设备,如孔隙度、饱和度的确定,纵波速度等参数的测量。书中列举的油田应用实例对我国油田的开发很有参考价值。

本书可供从事油田勘探开发、储量计算、岩心研究和生产管理的地球物理、地质和矿场工作者的参考。

• • •

本书第二章、第三章由楚泽涵翻译,其余由郝志兴翻译,并互为审校,郝志兴总校。

ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЛЕКТОРОВ НЕФТИ И ГАЗА

Л. И. ОРЛОВ
Е. Н. КАРПОВ
В. Г. ТАБОРКОВ
МОСКВА "НЕДРА", 1987

油气储集层的岩石物理研究

〔俄〕Л. И. 奥尔洛夫
Е. Н. 卡尔波夫
В. Г. 塔波尔科夫
郝志兴 楚泽涵 译

石油工业出版社出版
(北京安徒生外安华里二区一号楼)
北京海淀昊海印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 32开本 8⁵/8印张 188千字 印 1—1,000
1992年1月北京第1版 1992年1月北京第1次印刷
ISBN 7-5021-0749-5/TE·708
定价: 4.70元

前 言

为建立在生产作业阶段和油气储量计算阶段所打井的地球物理资料的定量解释基础，必须进行岩石物理学研究。这个基础包括当仅用岩样研究岩石的储集和物理性质时，要说明的岩心与岩心之间的岩石物理性质相互关系。此外，当储集性质是由岩心确定，而物理性质是由地球物理测井资料确定时，那么岩心与地球物理测井资料之间相互关系的研究就显得更为重要。

为建立以上两种类型的相互关系，必须研究岩样性质，以确定地球物理参数。对于结构简单的储集层，根据岩心分析资料和用少量岩样研究的地球物理资料，就能可靠地解决主要参数（孔隙度、渗透率、饱和度）的评价问题。由于储集层性质的复杂性，就使得详细研究组成产层的岩石更为必要。同时，拓宽了用岩样确定的综合参数，岩石物理参数单个因素影响及其相互关系的研究领域。岩样的综合研究，能使之建立起可靠地球物理测井资料的岩石物理基础。

然而，对于裂缝型、孔洞型、岩性不连续型的复杂储集层，建立参数之间的岩石物理关系和仅根据岩心说明其性质是不可能的。因为对裂缝型和孔洞型储集层来说，岩心主要反映的是岩石骨架的特性，而不是孔隙空间的特征。对于非均质岩性的岩石，可能在很大程度上出现各向异性。因此，研究复杂的孔隙空间结构和岩性不连续的储集层时采用综合

方法：根据岩心、地球物理和井内的流体动力学测试资料。

实践证明，新区域的地质勘探会出现岩石结构和性质上的新特点。岩心分析工作量的增大和确定单个参数精度的需要提高，都必须完善技术和岩石物理研究方法。作者们还描述了岩心研究测试时所用的自己研制的样品设备，这些设备对以后的系列生产（如：时间间隔数字测量仪、孔隙水排出设备等）都是有用的。

由于压力和温度对地层条件下岩石的某些性质起作用，因此本书对相应于天然沉积岩石条件的温压模拟岩心研究给予了相当的关注。评价残余水饱和度常用油基泥浆钻井的岩心完成。鉴于用直接方法研究这种岩心残余水饱和度的重要性，本书描述了其方法和设备。为评价地层出水的可能性，还介绍了根据岩石毛细管测定研究资料对相对渗透率的计算结果。

作者认为，应用本书推荐的设备和方法将有助于提高确定岩石参数的精度和研究的综合效果，并将在岩石物理相互关系的可靠性和用地球物理测井资料解释进行油气储量计算时反映出来。

目 录

第一章 岩石物理学综合研究的目的和任务——	
根据岩心确定参数·····	(1)
第二章 孔隙度·····	(8)
第一节 孔隙的类型及孔隙空间的结构·····	(8)
第二节 总孔隙度与张开孔隙度之间的关系·····	(10)
第三节 电阻率与孔隙度的关系·····	(36)
第四节 自然电位与孔隙度的关系·····	(52)
第五节 声波纵波传播速度与孔隙度的关系·····	(72)
第六节 在常温常压条件及地层温度压力条件下所确定 的孔隙度值间的关系·····	(86)
第七节 泥质含量、自然放射性、岩石矿物骨架中结晶 水的含量与孔隙度间的关系·····	(88)
第三章 含水饱和度·····	(94)
第一节 残余水在储集岩石中的分布特征·····	(94)
第二节 用离心法模拟残余水饱和度·····	(98)
第三节 含油岩石的电阻率及其与残余含水饱和度的关系·····	(119)
第四节 声学参数与含水饱和度的关系·····	(131)
第五节 孔隙度与含水饱和度间的关系·····	(147)
第四章 渗透率·····	(164)
第五章 岩石物理研究的方法和设备·····	(172)
第一节 岩心的选取与保存·····	(173)
第二节 岩样加工·····	(177)
第三节 用直接方法确定残余油水饱和度·····	(179)

第四节	用间接方法确定残余油水饱和度.....	(183)
第五节	气渗透率的测量.....	(189)
第六节	孔隙度的确定.....	(194)
第七节	泥质含量的确定.....	(202)
第八节	岩石矿物骨架中束缚水量的确定.....	(205)
第九节	电阻率测量.....	(208)
第十节	纵波传播速度测量.....	(213)
第十一节	岩心天然放射性的测量.....	(222)
第十二节	岩石中方解石和白云石含量的确定.....	(232)
第十三节	用X射线能谱法的岩石化学分析.....	(237)
第十四节	根据伽马射线的吸收确定岩石密度.....	(242)
第十五节	直接提取孔隙水的方法及确定其矿化度.....	(248)
第十六节	地层条件模拟.....	(251)
第十七节	岩石物理关系的统计处理.....	(259)
参考文献		(265)

第一章 岩石物理学综合研究的目的是和任务——根据岩心确定参数

岩石的物理和储集性质以及所含流体的研究直接关系到油气田勘探和合理开发。为了合理开采产层，必须确定油气储量。为此，也必须知道油气藏范围、储集层的孔隙度和含水饱和度、地层条件下的油气容积系数、储集的油气采收率^[9, 17]。

据根油气田储量分类使用规程^[18]，地质勘探工作分两个阶段进行：即普查和勘探阶段。普查阶段的主要任务是：1) 研究地区的地质构造；2) 查明产层及有希望的油气层（层系）；3) 预测油气储量。在勘探阶段，应保证得到定性和定量评价储量所必需的资料，查明产层形态及其厚度和储集性质的变化规律。

在钻普查井及探井过程中，对于含油气层和有希望的油气目的层都必须进行密集取心，其数量应能保证查明储集层的岩性和物性的变化以及能保证矿场地球物理资料解释的可靠性。用于实验研究的岩样，对于稳定地层的产层部分每隔0.5m厚度、对于不稳定地层则每隔0.25~0.3m必需取样^[18]。

油田勘探时的少数井要用非水基泥浆钻进。这种井的特点是取心收获率高，能保护侵入带的渗透性，并有可能直接评价地层的含水饱和度。对每口井都要进行综合研究，其工作量应能保证定量评价储量的需要；对岩样进行详细综合研究

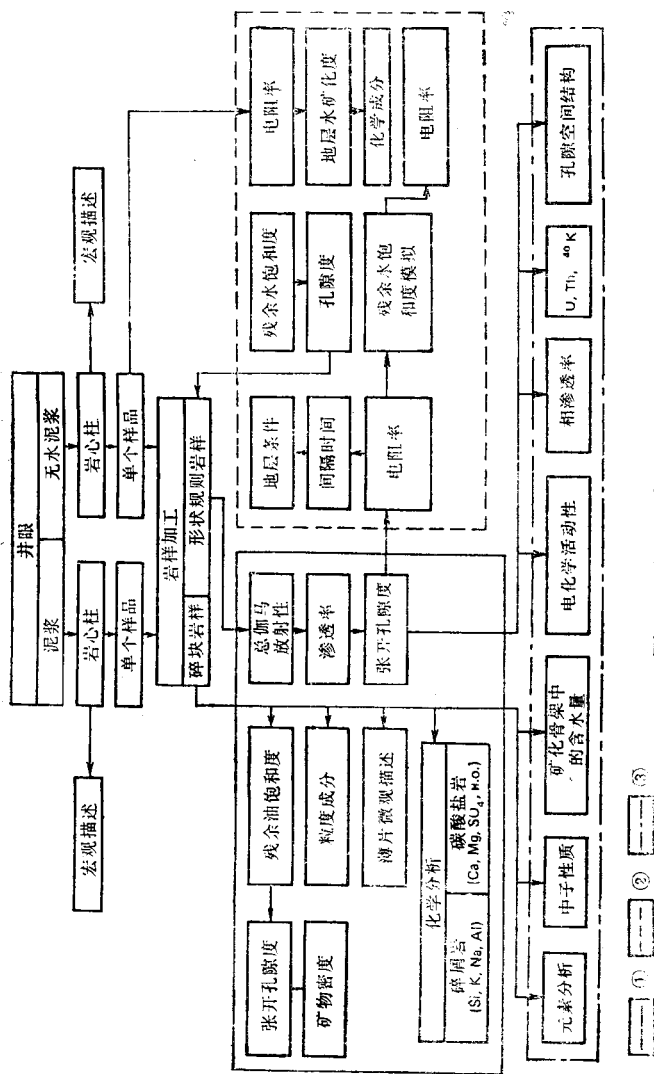
的目的是确定：1) 产层和其围岩地 层岩 石的岩性——矿物成分；2) 张开孔隙度、裂缝性、孔洞性、渗透率；3) 油、气、水饱和度；4) 为获得地球物理参数与 储集层性质之间校正关系所必须的地球物理参数。

上述的情况是以实验室岩样研究为基础的。实验室岩样研究的原理框图示于图1-1。在普查 钻井阶段，完成的工作应能判别储集层模型、岩性、储集性质和岩石孔隙中的流体性质，确定出能对地球物理测井资料进行定性解释的各种关系。研究框图以及用岩心 确定和要 解决这 些问题的 所需参数，在图1-1上都用实线圈连起来。

要用岩样确定出张开孔隙度、残余油饱和度、渗透率、矿物密度、总伽马放射性；进行粒度测定和化学分析；研究原油和沥青的性质；进行薄片研究。张开孔隙度和渗透率的确定在几何形状规则的岩样上完成，而其他研究在岩样加工后剩余的碎块上进行。进行研究的顺 序在图1-1上用箭头标出。

在钻勘探井阶段进行的研究应能得出以定量评价油气储量为目的的地球物理测井资料解释所必需的各种相互关系。为此，除上述内容外还应进行：部分和完全水饱和和岩样的电阻率测量；应用非水基泥浆钻井取心进 行残 余水 饱和度 测量；由密封的岩样中驱排孔隙水并直接测定其矿化度和盐的化学成分；纵波时差的测定；在恒压条件下岩样物理性质的研究；用间接方法模拟残余水饱和度。

参考文献〔26〕的作者指出，在对用水基泥浆钻井取心进行研究时，必须进行毛细管测量研究，目的是使获得的结果与直接确定的残余水饱和度能够对比，以此作为用间接方法



①钻普查井阶段; ②钻勘探井阶段; ③专门研究阶段

评价残余水饱和度的基础。

当对岩心进行的综合研究不能解决提出的某些问题时，特别是研究复杂结构的储集岩石时，就要进行专门的研究（参看图1-1）。它们包括确定相渗透率、电化学活性、岩样的 ^{238}U 、 ^{232}Th 和 ^{40}K 各自的含量、孔隙空间结构、岩石矿物骨架中的结晶水等。这样，岩心资料的实验室研究纲要由研究的具体任务、储集层和地层流体的成分和性质、剖面地质结构的复杂性和取出的岩心来确定。

用非水基泥浆钻井时取心的研究问题是很重要的。它可评估残余水饱和度，还可用直接方法确定孔隙水矿化度。获得这种信息就可能给出重要计算参数之一的含油气饱和度以可靠的依据，这是因为间接方法（离心法、毛细管测定法等）并不是一贯有效，特别是在研究碳酸盐岩储集层时。

当为建立地球物理测井资料定量解释所必需的岩石物理关系而进行岩心研究时，必须注意以下几点：

1) 岩心选择必须保证在岩石储集性质变化的整个范围内岩样的均匀分布；

2) 选择的岩心必须既能反映井剖面，又能反映区域范围内岩性变化的全部特性；

3) 如果地层中出现不同岩性和孔隙空间结构的岩石，那么应该有足够的岩样数目，以便能说明每种岩性类型参数变化全部范围内的特征；

4) 必须保证在用岩心确定的某个参数结果与同类型矿场地球物理方法的曲线图对比时，岩心与井剖面有可靠的联系；

5) 岩心的密封必须保证孔隙流体的完好保存;

6) 如果碳酸盐岩有孔洞和裂缝, 还要评估孔洞性和裂缝度。

实验室研究所需的岩样数由组成剖面的岩石成分和结构的复杂程度来确定。由实验室岩心研究的实际情况得出, 在储气量 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和原油储量 $5000 \times 10^4 \text{ t}$ 的油气田上, 对于在纵剖面 and 面积上都是单一结构的地层, 整个综合研究需要100~150个岩样就足够了。对于复杂结构的地层, 必须对井中所遇到的岩心都进行研究。对于用非水基泥浆钻的井, 一般对与剖面结构性质不同的取心都要研究。

根据储量计算规程^[18], 对于均质地层取样密度不少于每米两块, 对于非均质地层不少于3~4块。

所有研究样品都要测定孔隙度 k_n 和渗透率 k_{np} 。40~50%的样品要测定残余水饱和度 k_{BO} , 总伽马放射性 J_r , 部分和全部含水岩石的电阻率 ρ_{BH} 、 ρ_{HH} 、 ρ_{rH} , 声波时差 Δt 。部分样品(10~20%)用来进行接近地层条件下的研究。30~40%样品作为研究岩石化学和矿物成分之用。约20%样品用来作粒度分析。基于总伽马放射性的测量结果, 粒度分析样品的选择要覆盖伽马放射性测量的整个范围。在进行详细研究时, 还要用20~30%的样品研究孔隙喉道结构、孔隙大小的分布和孔洞—裂缝结构特征(对于碳酸盐岩)。

各种岩石物理性质的研究必须在同一块岩样上完成。在同一块样品(或是加工后剩余的碎块)上研究化学、粒度和矿物成分。

岩石的各向异性对在井中测量的几种参数都有影响。比如声波测井, 它反映的是垂直层面的岩石性质, 而电测井

——主要反映平行层面的岩性。在这两种方向上都测量渗透率。岩石的其他性质（孔隙度，油、气和水饱和度，伽马放射性等）反映的是体积特征，并且与各向异性无关。在实验室条件下，样品的准备一般是按平行于层理进行的。部分样品（5%）为确定其各向异性必须按垂直于层理的方向准备。如果各向异性系数 $\lambda_t > 1.2$ ，那么垂直于层理的样品数要增加到15%。如 $\lambda_t < 1.2$ ，所有样品实际上都可按平行于层理的方向准备。

为在实验室条件下确定电阻率 $\rho_{B.R}$ 和时差 Δt ，样品用接近于产层残余水矿化度的溶液进行饱和。如果确定不了残余水矿化度，就用与油层底部水的矿化度接近的水来饱和。当必须研究侵入带参数时（如对表面导电性 ρ_s 的影响），要进行用接近于泥浆矿化度的水来驱替地层流体的试验。如果在区域井中，地层水电阻率与泥浆滤液电阻率的比值大，确定扩散—吸附电位是很有意义的。

对用非水基泥浆钻井的取心研究应当给予特别注意，因为在这种条件下有可能直接评价电阻率值、残余水饱和度值和孔隙水矿化度值。用直接方法确定的残余水饱和度结果，可作为用间接方法获取含水饱和度和值的根据。

在确定储集层类型时，必须要考虑岩性和岩石的孔隙空间结构，以及水动力学研究的资料。当查明岩石的孔洞性质时，必须要确定孔洞形状和大小，孔洞体积所占岩石体积的百分比，孔洞之间的连通性。在分析各参数之间的关系时，要注意那些受孔洞影响明显的参数，并要评价用测井资料确定孔洞的可能性。当研究裂缝储集层时，必须弄清裂缝形状和裂缝度（平行于层理的、不规则的、垂直的、倾斜的），

在裂缝中无有用流体。

为对中子伽马测井读数进行校正，了解岩石矿物骨架中的结晶水量是很重要的。对于碳酸盐岩储集层，要说明云母、泥质和其他含水矿物的存在和数量。

第二章 孔 隙 度

第一节 孔隙的类型及孔隙空间的结构

岩石的孔隙是组成岩石的固相颗粒之间的空间的总和。根据孔隙的形成条件，孔隙可分为原生孔隙及次生孔隙。原生孔隙在矿物沉积过程中形成。次生孔隙则是在沉积成岩过程之后的某些地质过程中形成。原生孔隙可能是碎屑岩特有的粒间孔隙，也可能是碳酸盐岩所固有的晶间孔隙。

次生孔隙的产生是由于在碳酸盐岩中出现裂缝，或在碳酸盐岩溶解及淋蚀过程中形成。孔隙不仅取决于岩石颗粒的堆集密度，也取决于颗粒的形状、尺寸大小的分布、有无泥质及胶结物。

孔隙分为代表岩石体积中全部空隙的总孔隙，由彼此连通并与岩样表面连通的空隙组成的张开孔隙，由被封隔开的与张开的孔隙系统不连通的孔隙所组成的封闭孔隙，此外还有有效孔隙。有效孔隙可理解为张开孔隙与残余水体积之差。次生孔隙可分为洞穴型及裂缝型，并可据此确定岩石总体积中洞穴型及裂缝型空隙所占空间部分的大小。

所有各类孔隙都可由相应的孔隙度来表示：总孔隙度

$$k_v = \frac{V_v}{V}；\text{ 张开孔隙度 } k_{vo} = \frac{V_{vo}}{V}；\text{ 有效孔隙度 } k_{ve} =$$

$k_{n_0} (1 - k_{n_0})$; 裂缝孔隙度 $k_{n,p} = \frac{V_{n,p}}{V}$; 洞穴孔隙度

$k_{n,n} = \frac{V_{n,n}}{V}$; 式中, V_n ——岩石全部孔隙的体积; V_{n_0} ——张开孔隙的体积; $V_{n,p}$ ——裂缝的体积; $V_{n,n}$ ——洞穴的体积; V ——岩样的体积; k_{n_0} ——残余水饱和度。

按照当前的概念, 总孔隙度包括张开孔隙度及封闭孔隙度:

$$k_n = k_{n_0} + k_{n_1}$$

以苏联地球物理测井研究所在大量实际资料上所进行的工作为基础^[34], 可认定, 苏联各油田的碎屑岩及碳酸盐岩的总孔隙和张开孔隙之间, 实际并无区别。在实验测量中, 被认为是封闭空隙引起的总孔隙与张开孔隙之间的差异, 都在测量误差范围之内。

按孔隙尺寸大小, 孔隙可分为大孔隙、粗毛细管孔隙、毛细管孔隙及超细毛细管孔隙^[11]。大孔隙是指平均直径大于10mm的孔穴, 粗毛细管孔隙的尺寸为0.1至10mm, 毛细管孔隙为0.001~0.1mm, 超细毛细管孔隙小于1μm。孔隙的形状则是千差万别。碎屑状岩石储集层的粒间孔隙, 其形状接近于长菱形(疏松堆积), 四面体形(致密堆积), 而对于鳞片状颗粒堆积, 其孔隙形状为缝隙形。对于刚性联接的岩石, 则具蜂窝状、海绵状及孔道状的孔隙及裂缝特征。对岩浆岩, 以多孔气泡状孔隙为特征^[11]。

根据毛细管压力曲线能确定孔隙空间中各种不同尺寸的连通孔道的部分, 及孔隙空间总体积中连通孔隙分布的特

征。在岩石体积中孔隙沿径向分布具有重大意义。因为孔隙的数目、尺寸及类型基本上决定了岩石的渗透率，换言之，即决定了储集层的储量及产能。对碎屑型、不含泥、结构均匀的储集层，其孔隙通道半径 r_{xp} 、孔隙通道数目 n_i 与孔隙度间关系式为^[11]：

$$k_p = n \pi r_{xp}^3 \frac{z_x}{z_s} = \pi T_x \sum \frac{n_i r_{xi}}{s}$$

式中 n ——孔隙通道的总数；

r_{xp} 、 z_x 、 T_x ——孔隙通道的平均半径、长度及曲折度；

z 、 s ——岩样的长度及截面积。

储集层的孔隙度与分选系数间存在正比关系。随地层埋藏深度增加，由于上覆岩层的压力及大地构造应力的作用，使岩石压实，储集层的孔隙度将减小^[11]。对于岩性成分、密度、矿物成分、地层水饱和度、骨架的弹性、颗粒胶结程度各不相同的岩石，压力和温度的影响将是不同的。

当岩心取到地表时，压力降至大气压，温度降至环境温度，导致孔隙度的稍微增大。因此，所研究的岩石的孔隙度的真实数值，只有模拟自然埋藏条件才能重现。

应用在实验室条件下确定的地球物理参数与孔隙度间的关系，可以确定孔隙度。对孔隙度与岩石电阻率、声导特性、中子特性、密度特性等参数的关系研究得最为充分。

第二节 总孔隙度与张开孔隙度间的关系

解释中子法测井资料以确定地层孔隙度时，重要的是知