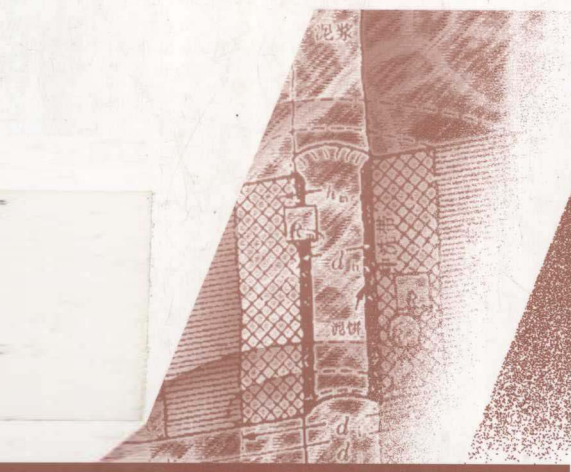


DIQIUWULICEJINGSHUJU
CHULIYUZONGHEJIESHI

地球物理测井数据 处理与综合解释

● 李舟波 编著



吉林大学
出版社

内容提要

本书系统地介绍了评价石油与天然气储层的地球物理测井数据处理与解释方法。首先,回顾了与油气储层评价有关的基本知识。然后分三部分进行了讨论,第一部分分别讲述了确定地层流体性质、泥质性质与含量、骨架矿物成分与含量、孔隙度、渗透率和饱和度等储层特性的地球物理测井研究方法。第二部分介绍了对不同类型储层进行综合评价的测井解释系统。最后一部分概要介绍了测井资料在地质研究中的应用。

本书可供大专院校与石油天然气勘探及开发有关专业作为教材或教学参考书,也可供企事业单位有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地球物理测井数据处理与综合解释/李舟波著. —长春:吉林大学出版社,2003.3

ISBN 7-5601-2805-X

I.地... II.李... III.①油气测井—数据处理②油气测井—地质解释 IV. TE151

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 016233 号

地球物理测井数据处理与综合解释

李舟波 编著

责任编辑、责任校对:唐万新

封面设计:孙群

吉林大学出版社出版
(长春市明德路3号)

吉林大学出版社发行
长春市东方印刷厂印刷

开本:787×1092 毫米 1/16

2003 年 4 月第 1 版

印张:11.5

2003 年 4 月第 1 次印刷

字数:246 千字

印数:1~700 册

ISBN 7-5601-2805-X/TE·5

定价:19.00 元

前 言

本书的第一稿在 1988 年完成,当时是为应用地球物理专业“地球物理测井数据处理与解释”课程编写的教材。经过四年多试用,于 1993 年经前地质矿产部地球物理测井课程教学指导委员会审查通过,准备作为普通高等教育地质矿产类规划教材出版。后来由于专业调整等原因,没有正式出版。但是,一直作为校内教材使用,至今已有十多年。随着地球物理测井方法的不断进步,近十多年来测井数据处理与解释方法也有了很大进展。为了满足勘查技术专业“地球物理测井数据处理与解释”课程教学的需要,在原教材的基础上,做了补充和修改。

地球物理测井工作几乎贯穿于油气勘探与开发的整个过程。只要投入钻探工作,地球物理测井就是不可缺少的环节。其工作成果为进一步的工作部署提供重要依据,特别是在计算探明储量的过程中,地球物理测井数据解释结果所提供的储层参数是不可缺少的基本数据。因此,地球物理测井已成为油气资源评价的关键手段与油藏管理的重要依据。

近年来,石油测井方法和技术的进步,一方面主要体现在对油气储层微观结构的精细描述能力有很大提高;另一方面,则体现在通过与地震勘探等其他勘探方法与手段相结合,提高了对油藏三维描述能力,并向着重现储集体时空分布原貌的方向大大前进了一步。

随着油气勘探领域的扩大,不断出现一些新的复杂类型油气储层,使得评价油气藏的基本任务,包括岩性识别、储层参数计算都遇到了十分严峻的挑战。对各类复杂油气储层准确评价的客观需求,推动着地球物理测井方法和技术不断向前发展。核磁测井、多极源声波测井和各种成象测井,如声波和微电阻率扫描成象测井、阵列感应测井、方位电阻率测井等的出现,使得地球物理测井数据所包含的地质信息量极大的丰富,既扩大了测井分析家视野,同时也要求建立新的综合评价方法。随着数据量的增大,也促使数据传输、管理和显示发生巨大变化。

应该指出,地下地质对象的隐蔽性和复杂性,以及地球物理测井信息的多解性,和由此产生的不确定性,始终是测井分析家面临的挑战。在占有相当数量测井与非测井信息的基础上,能否有效运用这些资料对储层进行准确的分析和评价,则取决于测井分析家的技能和综合判断力。当然,这种能力的培养不仅需要从书本上,而且要在实践中获得。尽管如此,本书作为一本教材,将力求使读者比较全面地掌握利用测井数据评价储层的基本知识和分析问题的方法,配合实验和实习初步掌握数据处理与解释的能力。

在此次对本教材修编过程中,虽然做了很大努力,希望在教学时数允许的范围内,尽可能把地球物理测井数据处理与解释方法的一些新进展在书中有所反映,但一定还有不少缺点和不妥之处。敬请读者批评指正。

编者愿借此次出版的机会,谨向 1993 年担任此书第一稿审查的中国地质大学王惠濂教授和成都理工大学杜萃屏教授表示衷心感谢。也向十多年来使用本书并提出宝贵修改意见的师生,以及支持本书此次出版的吉林大学有关部门和同志表示衷心谢意。

编 者
2003 年 3 月

目 录

绪论	(1)
第一章 若干重要基本知识的回顾	(4)
§ 1.1 储集层的概念	(4)
1.1.1 碎屑岩储集层	(4)
1.1.2 碳酸盐岩储集层	(5)
1.1.3 其他岩石类型储集层	(5)
§ 1.2 储集层的储集性和含油气性	(5)
1.2.1 孔隙度	(5)
1.2.2 饱和度	(6)
1.2.3 渗透率	(7)
1.2.4 毛吸现象和表面张力	(8)
§ 1.3 储集层的岩性、储集性和含油性与各种物理性质之间的关系	(9)
1.3.1 岩性和各种物理性质的关系	(10)
1.3.2 孔隙度和各种物理性质的关系	(11)
1.3.3 饱和度和各种物理性质的关系	(13)
1.3.4 渗透率和各种物理性质的关系	(14)
§ 1.4 泥浆侵入带	(15)
§ 1.5 测井仪器的探测范围和纵向分辨率	(17)
§ 1.6 储集层的定性识别	(19)
1.6.1 自然电位测井	(19)
1.6.2 自然伽马测井	(19)
1.6.3 井径测量	(20)
1.6.4 微电极系测井	(20)
1.6.5 中子-密度测井	(20)
1.6.6 核磁测井	(20)
1.6.7 小结	(20)
第二章 测井数据综合解释前的准备	(23)
§ 2.1 测井数据的质量保证	(23)
2.1.1 测井仪器刻度	(23)
2.1.2 井场记录	(23)
2.1.3 曲线的重复性	(24)
2.1.4 测井速度与深度记号	(25)
§ 2.2 环境影响校正	(25)
§ 2.3 提高测井曲线纵向分辨率的方法概述	(26)
2.3.1 反褶积	(26)

2.3.2 匹配拟合	(27)
§ 2.4 深度对齐	(28)
§ 2.5 测井数据标准化	(29)
第三章 地层流体性质及其确定方法	(32)
§ 3.1 确定地层水电阻率	(32)
3.1.1 直接测定地层水样法	(32)
3.1.2 分析水样离子成分法	(32)
3.1.3 自然电位法	(34)
3.1.4 利用水层的电阻率和孔隙度资料计算法	(37)
§ 3.2 利用测井资料估计地层油气密度	(42)
3.2.1 利用中子孔隙度和密度孔隙度比值估计油气密度	(42)
3.2.2 用视流体密度计算油气密度	(44)
第四章 地层泥质性质及其含量的确定	(46)
§ 4.1 泥质性质及其在岩石中分布形式	(46)
§ 4.2 泥质对测井读数的影响	(48)
§ 4.3 估计泥质含量的方法	(50)
4.3.1 自然电位法	(51)
4.3.2 自然伽马法	(52)
4.3.3 自然伽马能谱法	(53)
4.3.4 中子测井法	(53)
4.3.5 电阻率法	(54)
4.3.6 交会图法	(55)
§ 4.4 确定不同分布形式的泥质含量	(57)
第五章 岩性和孔隙度的确定	(58)
§ 5.1 用单一孔隙度测井资料确定孔隙度	(58)
5.1.1 密度测井	(58)
5.1.2 中子测井	(59)
5.1.3 声波测井	(60)
5.1.4 核磁测井	(60)
5.1.5 含泥质影响	(61)
§ 5.2 确定岩性和孔隙度的作图法	(62)
5.2.1 重叠法	(63)
5.2.2 交会图法	(63)
5.2.3 影响岩性-孔隙度交会图的因素	(68)
5.2.4 岩性识别图	(72)
§ 5.3 确定岩性和孔隙度的数值法	(81)
第六章 饱和度的确定	(84)
§ 6.1 各种电阻率测井的应用范围	(84)
§ 6.2 纯地层含油饱和度的确定	(86)
6.2.1 电阻率-孔隙度交会图法	(87)

6.2.2	电阻率-孔隙度重叠法	(88)
6.2.3	可动油法	(91)
6.2.4	数理统计法	(91)
§ 6.3	含泥质地层饱和度的确定	(94)
6.3.1	泥质体积含量和分布形式的附加导电性模型	(95)
6.3.2	偶电层附加导电性模型	(95)
6.3.3	泥质砂岩储层导电模型的进展	(100)
第七章	渗透率 and 生产能力	(102)
§ 7.1	渗透率的确定	(102)
7.1.1	根据电阻率确定渗透率	(102)
7.1.2	利用孔隙度和束缚水饱和度估算渗透率	(103)
7.1.3	利用孔隙度和粒度中值计算渗透率和束缚水饱和度	(104)
7.1.4	判断油层是否为束缚水饱和的方法	(105)
7.1.5	核磁测井确定渗透率	(106)
7.1.6	有效渗透率和相对渗透率的确定	(107)
7.1.7	利用地层测试器确定渗透率	(108)
§ 7.2	生产能力和含水率预测	(113)
7.2.1	生产能力预测	(113)
7.2.2	含水率预测	(114)
第八章	储层综合评价系统	(116)
§ 8.1	岩石骨架成分稳定的含泥质储层评价系统	(116)
8.1.1	SARABAND 模型	(116)
8.1.2	VOLAN 模型	(121)
§ 8.2	岩石骨架成分变化的复杂岩性储层评价系统	(125)
§ 8.3	最优化测井解释系统	(132)
8.3.1	GLOBAL 解释系统	(133)
8.3.2	ELAN 解释系统	(135)
第九章	裂缝性储层研究	(141)
§ 9.1	天然裂缝和裂缝的测井响应	(141)
9.1.1	天然裂缝	(141)
9.1.2	裂缝地层的地球物理测井响应特征	(141)
§ 9.2	裂缝带的划分	(146)
9.2.1	井壁声波成像测井	(146)
9.2.2	井壁微电阻率扫描成像测井	(148)
9.2.3	综合概率法	(150)
§ 9.3	裂缝孔隙度的估计	(151)
9.3.1	利用双侧向测井估计裂缝孔隙度	(151)
9.3.2	利用光电吸收截面指数估计裂缝孔隙度	(152)
第十章	测井资料的其他地质应用	(154)
§ 10.1	地层对比	(154)

§ 10.2 根据地层倾角测井结果研究地质构造	(155)
10.2.1 地层倾角矢量图形模式的分类	(155)
10.2.2 确定构造倾角和不整合	(156)
10.2.3 确定断层	(157)
10.2.4 确定褶皱、岩礁和砂坝	(158)
§ 10.3 沉积环境与沉积相的	(161)
10.3.1 应用地层倾角测井识别沉积环境	(162)
10.3.2 应用自然电位曲线形状识别砂岩的沉积环境	(167)
10.3.3 根据自然伽马测井曲线对简单沉积环境的解释	(169)
10.3.4 测井相的一般概念	(170)
§ 10.4 地层压力的研究	(170)
10.4.1 异常地层压力产生的原因	(171)
10.4.2 根据测井资料确定压力异常带	(171)
10.4.3 地层流体压力估计	(172)
参考文献	(174)

绪 论

地球物理测井作为油气勘探的一种手段,已有 70 多年历史,由于它在应用中的突出效果,已成为油气勘探与开发过程中不可缺少的工作环节。在研究内容、地质任务和工作方法,以及测量设备等方面,它同其他地球物理方法均有许多不同之处,因此钻井地球物理已成为应用地球物理学中一个独立分支。

地球物理测井是钻井中各种地球物理探测方法的统称,作为地下地质研究的一种手段,是从不同物理性质的一个侧面来认识地质体的方法。由于地质条件的复杂性,需要解决问题的多样性,以及地球物理反问题解的非惟一性,因此要得到确切的答案,往往需要采用多种测井方法并进行综合解释。目前,在石油钻孔中已广泛采用的测井方法,按照所研究的岩石物理性质不同,可分为以下几类:

(1) 研究岩石电学性质为基础的一组方法。其中包括研究岩石导电性的普通电极系电阻率测井、微电极系测井、侧向测井、微侧向测井、球形聚焦测井、感应测井和微电阻率扫描成像测井等;研究岩石介电性质的电磁波传播测井;研究岩石电化学性质的自然电位测井和人工电位测井等。

(2) 研究岩石声学性质为基础的一组测井方法。其中包括纵、横波和斯通利波的速度测井和幅度测井,以及声波成象测井等。

(3) 研究岩石原子物理和核物理性质为基础的一组方法。其中包括自然伽马测井、密度测井、光电吸收指数测井、中子-中子测井、中子寿命测井、自然伽马能谱测井、次生伽马能谱测井、活化测井、同位素测井和核磁测井等。

(4) 其他一些测井方法,如热测井、磁测井、泥浆测井,以及检查井内技术状况的各种测井方法。

在过去的 70 多年中,随着电子技术和计算机技术的发展,测井仪器也在不断更新,从最早的半自动模拟记录,经过自动模拟记录,20 世纪 60 年代中期进入了数字记录阶段。到 70 年代中期,电子计算机被引入野外测井仪后,测井仪器的发展进入了一个新阶段——程控数字测井记录阶段。井下仪器也在向综合化方向发展,多数都采用“积木”式结构,便于按照测井系列的需要进行组合。为了减小井径、泥浆、泥饼和邻层的影响,井下仪器都采用聚焦、井眼补偿或贴井壁等方式。近 10 年来,数据采集方法又有许多新的进展,例如阵列接收、多频和多极发射等。于是,对测井信号传输设备提出了新的挑战。光纤电缆、高速多路传输技术和大容量的微型计算机已进入现场测井设备中。无疑,这必将进一步带动测井解释技术的进展。

现代测井技术的发展特征,可以概括为:方法系列化、仪器综合化、记录数字化、操作程控化、解释智能化和显示图象化。但是,也应该看到,现有的测井方法多数还是间接反映某种地质现实,从观测数据到做出地质结论,要经过许多中间处理与解释环节,在这些环节中往往不得不采用或多或少被简化和理想化的模型,使解释精度降低,有时甚至会发生某些错误。

70 多年来,随着测井方法和仪器设备的进步,数据处理与解释技术也有了巨大的进展。

应用范围也在不断扩大。概括地说，测井结果可以用于四个方面，即储集层评价、地质研究、工程应用和提供自然条件下岩石物理参数。本课程的主要内容是介绍石油和天然气测井数据处理和综合解释方法，因此将集中在储层评价和地质研究两部分。从储层评价的角度来看，测井解释技术的发展，大体经历了以下几个发展阶段。

第一阶段，只拥有普通电极系电阻率法（或称视电阻率法）和自然电位法等少数几种方法，测量仪器和设备都不完善，测量结果受井眼条件等影响很大。测得的是视参数，根据这些视参数，对储层只能做出定性估计。通常把 1927 年 Doll 在法国 Pechelbronn 油田测得第一条电阻率测井曲线作为现代地球物理测井的开端。我国地球物理测井是以 1939 年翁文波在四川石油沟完成的工作为纪元。

第二阶段，研究出了一套由视电阻率转换成地层真电阻率的方法（即所谓横向测井方法），同时对于电阻率和储层储集参数和饱和参数的关系有了初步认识（Archie, 1942）。这样就可以进行初步的定量解释。但是，从视电阻率求地层真电阻率的方法只适用于一些简单的理想情况，并且由于还缺少确定孔隙度和岩性的手段，所以定量解释范围和精度是很有限的，只是在岩性和孔隙度基本不变的条件下，才能给出比较准确的含油饱和度值。

第三阶段，从 20 世纪 50 年代后期开始，陆续产生了一些贴井壁、聚焦和井眼补偿的电测井方法和仪器，如感应测井、侧向测井和各种形式的微电阻率测井，它们受井眼条件和邻层影响较小，能直接反映地层导电性变化，在有利条件下能直接测定地层电阻率和侵入带电阻率。特别是提出并完善了一组孔隙度测井方法，如声波测井、中子测井和密度测井。这样，在评价储层油气饱和度时可以更好地考虑岩性和孔隙度影响。解释精度得到进一步提高，在多数情况下可获得较准确的定量解释结果。

第四阶段，到 20 世纪 70 年代初，对于各种物理参数和储集参数及饱和参数之间的关系有了进一步认识，建立了更接近实际储层特征的多种解释模型。在电子计算机的帮助下，综合多种地球物理测井数据，通过解释可以定量求得岩石矿物成分、储集参数、饱和参数和可采油气数量等，并且以需要的形式显示出来。

上述四个阶段，可以概括为定性解释、半定量解释、定量解释和综合分析阶段。

随着勘探领域的不断扩大，新的更复杂情况也在不断出现，推动着测井技术和测井解释技术不断向前进步，目前，地球物理测井数据处理与解释，一方面针对非均质地层出现的新测井技术，不断完善单井储层评价方法，另一方面在向多井或盆地评价，以及从评价储层静态特征向评价储层动态特征发展。在向这一新的阶段过渡中，将需要进行更广泛的综合，不仅要充分运用测井数据所包括的各种有用信息，而且要地质、地面地球物理勘探、实验室分析和油井测试等多种信息进行综合。

一般地说，地球物理测井是属于信息科学的范畴。它包括两大部分内容，即信息采集和信息处理与解释。在测井方法原理和测井技术两门课程中，介绍了第一部分内容。本课程主要讲述第二部分内容。从大的方面看，这部分内容也可分为两部分，一部分是讨论测井所获得的信息与各种地质信息之间的关系，另一部分则是研究如何采取不同的处理手段从测井信息中最大限度地提取有用信息。因此，要很好地掌握测井解释技术，必须首先弄清哪些是有用信息，这就要求对相邻学科有较多的了解，有比较开阔的视野。事实上，提取有用信息的技术，不少也是从相邻学科中借用的。所以，从事地球物理测井解释的人员，要不断注意相邻学科的发展，不断吸取有益的东西，以丰富现有的方法。

纵观测井技术的发展，方法理论、仪器设备和解释技术三者是互相推动、相辅相成的。

例如，利用测井资料评价油气储层技术从定量解释阶段进入综合分析阶段，是和数字记录技术与电子计算机技术的应用有着直接关系；从半定量解释阶段进入定量解释阶段，是和一组孔隙度测井方法的出现，以及聚焦电阻率测井的应用紧密相关的。因此，我们既要注意改进对现有测井数据的处理与解释技术，又要注意吸收新的参数进入综合解释系列。

测井数据处理与解释是一个系统分析方法，它应是严密的和可重复的。它的一般步骤可以概括如下：

- (1) 资料汇集。除测井资料之外，还要收集有关地质、钻井录井和其他有关资料。
- (2) 对原始测井数据的质量进行检查。
- (3) 对测井数据进行环境校正等预处理，求准物理参数。
- (4) 进行初步定性解释。
- (5) 选择解释模型。
- (6) 确定解释参数。
- (7) 计算储层的储集参数和饱和参数。
- (8) 提出解释结论。

既然测井信息一般都是地质特征的一种非直接反映，则由这种间接性所带来的模糊性，以及自身所隐含的多解性，使得测井资料解释本身就是一种对地质特征的推理、演绎和还原的过程。因此，要得到符合实际的结果，必须十分重视研究测井信息与地质特征之间的定性与定量关系。其中最直接、最基本的方法，是以岩心、岩屑分析以及试油试采的实际数据与测井数据建立某种定性与定量关系，从而赋予测井数据以某种直接的地质含义，例如地层的岩性、储集性和所含流体的性质等。通过建立一系列的经验关系式或理论模式，形成测井地质分析的最基本方法。随着计算机技术的进步和广泛应用，把测井数据处理与解释推向一个新的高度。

本书的主要目的是使读者掌握测井数据分析、处理和解释技术的基本方法，并能针对不同地质条件下的问题，加以灵活运用。由于地质条件的复杂性、随机性和强烈的地区性特点，现有的数据处理方法与解释模型远没有达到尽善尽美的程度。因此，测井资料解释的实践过程，也是一个研究过程。为了把测井数据处理与解释和有关的测井方法及油气储层的基本知识相衔接，本书首先对某些基本知识进行了回顾和归纳。接下来分三部分进行讨论：一是介绍储集层储集特性的研究方法，分别讲述确定地层流体性质、泥质性质和含量、骨架矿物成分和含量，以及孔隙度、饱和度和渗透率的方法。其次是对不同类型储层进行系统分析，做出综合评价。主要介绍了泥质砂岩储层、岩性复杂的储层和裂缝储层。最后一部分是概要介绍测井结果在地质研究中的应用。

第一章 若干重要基本知识的回顾

§ 1.1 储集层的概念

在天然状态下能够储存油气的地层称为油气储集层，因此，它必须具备三个条件：一是具有储存油气的孔隙空间，如孔隙、裂隙和孔洞等；二是沟通孔隙空间的通道，使油气能够流动；三是封闭条件，以便在自然条件下油气不能逸散。储集层通常按岩性分类，有时也按照孔隙类型或其他特征来划分。按岩性可以大致分为以下三类。

1.1.1 碎屑岩储集层

碎屑岩储集层包括砾岩、砂岩、粉砂岩等。目前，世界上大约有 40% 的油气储量属于这一类储集层。这类储集层在我国中、新生代含油气层系中有广泛分布。

碎屑岩由矿物碎屑、岩石碎屑和胶结物结合而成。碎屑又可分为颗粒和充填在颗粒间的基质两部分。最常见的矿物颗粒为石英、长石和云母。岩石碎屑由母岩的类型决定。基质由颗粒的磨蚀产物（粒径一般不大于粉砂级）和黏土矿物等组成。最常见的胶结物是氧化硅、碳酸盐和各種氧化物。按照类似十进位标准的碎屑岩粒度分级，如表 1-1 所示。其中粉砂和黏土构成通常所说的泥质（在不同的粒度分级方法中，数值大小有些差别）。根据各粒级颗粒的含量确定岩石名称时，某一粒级的重量百分比超过一半时，定为主名；重量百分比在 10% ~ 25% 时，称为“含”；在 25% ~ 50% 时，称“质”，且“含”列于“质”之前。因为碎屑岩的成分对储集性质有一定影响，所以碎屑岩定名时，有时把主要碎屑成分加上，例如长石砂岩和石英砂岩等。

碎屑岩的胶结成分、数量及胶结形式，对岩石储集性都有很大影响。胶结物含量多时，也参加岩石定名。例如，砂岩中钙质胶结物含量达 25% ~ 50% 时，叫做钙质砂岩。

碎屑岩储集层的矿物成分，首先和碎屑的化学成熟度和结构成熟度有关，其次和胶结物的性质有关。化学成熟度愈高，岩石中稳定的矿物——石英含量愈高；化学成熟度愈低，含不稳定的长石、云母以及岩石碎屑愈多，杂砂岩和长石砂岩属于这种情况。因此，化学成熟度可以由石英与长石的含量比，或者近似地由钾含量和放射性来表示。

结构成熟度由基质百分数和分选程度决定。在一定程度上碎屑和黏土的含量是结构成熟度的标志，黏土含量愈低，结构成熟度愈高。

化学成熟度和结构成熟度不一定同时出现，例如有些砾岩表现出很高的结构成熟度，但却有很低的化学成熟度；有些细砂岩可能是高化学成熟度，却是低结构成熟度。从油田开发或从测井解释的观点，了解这两种成熟度都是重要的。显然，成熟度低的储层，将增加测井解释的难度。

砂岩中的孔隙以粒间孔隙为主，岩石中孔隙空间所占的比例和颗粒分选程度与黏土含量，即结构成熟度有关。

表 1-1 碎屑岩的粒度 (类似十进制) 分级

岩石名称	粒级划分	颗粒直径/mm
砾岩	巨砾	> 1000
	粗砾	1000 ~ 100
	中砾	100 ~ 10
	细砾	10 ~ 2
砂岩	巨砂	2 ~ 1
	粗砂	1 ~ 0.5
	中砂	0.5 ~ 0.25
	细砂	0.25 ~ 0.1
	微粒砂	0.1 ~ 0.05
粉砂岩	粗粉砂	0.05 ~ 0.01
	细粉砂	0.01 ~ 0.004
黏土		< 0.004

1.1.2 碳酸盐岩储集层

就全世界而言, 碳酸盐岩类型储层占很大比重, 大约有 50% 的储量和 60% 的产量来自这一类储层。常见的碳酸盐岩按矿物成分可分为石灰岩类和白云岩类, 中间也存在一些过渡类型。碳酸盐岩的成因类型很多, 因此储集层的孔隙类型也比较复杂, 但基本上可以分为两类: 一类是原生孔隙, 如生物灰岩中生物遗骸之间的孔隙, 鲕状灰岩中鲕粒之间的孔隙等; 另一类是次生孔隙, 它是在成岩后由于溶解作用、白云岩化作用、重结晶作用、风化作用以及构造运动形成的各种孔隙、溶洞和裂缝等。由于碳酸盐岩孔隙类型比较多, 特征比较复杂, 所以在测井资料解释时遇到的问题也多一些。

1.1.3 其他岩石类型储集层

除了上述两种岩石以外的岩石所形成的储集层, 如岩浆岩、变质岩等属于这一类。这类岩石的骨架孔隙度一般都很小, 一些火山岩储层即使孔隙很大, 其连通性也很差, 但是当裂缝发育时, 也可形成良好的储层。它的矿物成分一般相当复杂, 有时还要加上风化产物。这类储层虽然在世界各油气田中所占的比例不大, 但在一些油田却给出很高的产量, 在研究中也是不容忽视的。

由于孔隙和裂隙对地层物理性质的影响不同, 往往需要采用不同的评价方法, 所以地层评价中常把储集层按孔隙类型划分, 如孔隙性储集层和裂缝性储集层, 以及孔隙-裂隙性储集层等。

对于孔隙性储集层, 按照岩性是否稳定和含泥质情况不同, 又可划分为不同的储集层测井解释模型, 例如, 岩性稳定的不含泥质储集层、岩性变化的不含泥质的储层、岩性稳定含泥质储层和岩性变化含泥质储层等等。

§ 1.2 储集层的储集性和含油气性

岩石的储集性是指岩石能够储集流体的容积和流体在其中运移的能力。含油气性是指储集层孔隙中油或气的相对数量。它们分别由孔隙度、渗透率和饱和度等参数来表征。

1.2.1 孔隙度

在岩石形成过程, 以及后期的各种作用下, 岩石固体颗粒之间形成的空隙、裂缝和空洞, 叫

做岩石孔隙.按照流体在孔隙中能够运动的情况,孔隙可分为有效孔隙和总孔隙两类.

有效孔隙是指那些互相连通的,且在一般压力条件下流体可以在其中流动的那部分孔隙.

总孔隙或绝对孔隙是岩石中所有孔隙空间的总体,不论这种孔隙的大小、形态和孔隙孔道的截面如何,也不管是否是封闭的(不连通的孔隙)都包括在内.

岩石孔隙体积大小用孔隙度定量描述.它的定义是孔隙体积与岩石总体积之比,通常以百分数(%)表示,如假定 V_T 表示一块岩石的总体积, V_S 表示这块岩石中固体部分的体积, V_P 表示这块岩石中孔隙的体积,则孔隙度为

$$\varphi = \frac{V_P}{V_T} \times 100\% = \frac{V_T - V_S}{V_T} \times 100\% \quad (1.1)$$

岩石的有效孔隙与岩石总体积之比,叫做有效孔隙度;岩石的总孔隙与岩石总体积之比,叫做总孔隙度.

对于储集性很好的岩石,它的有效孔隙度和总孔隙度差别很小,而储集性差的岩石,它们的差别将是比较明显的.

碎屑岩的结构对岩石孔隙度的影响可以概括为:岩石的总孔隙度和岩石颗粒尺寸的大小关系不大;岩石颗粒的分选性愈好,孔隙度愈大;岩石颗粒排列愈紧密(压实),孔隙度愈小;岩石的基质和胶结物增加时,孔隙度降低.

前面已经说过,碳酸盐岩的孔隙结构比较复杂,按照孔隙的分布特点可以分为孔隙性、裂隙性和溶洞性.第一类的分布特点和砂岩的粒间孔隙相类似.鲕状灰岩、针状灰岩、“砂糖”状白云岩等属于这一类.裂隙性孔隙的分布特点是不均匀.它的发育情况受构造控制比较明显.溶洞性孔隙的特点是孔洞大小相差悬殊,分布不均匀.孔洞小到几毫米大到几十米或更大.

1.2.2 饱和度

岩石的含油气性由含油气饱和度定量描述.其定义为:孔隙中含油或含气部分的体积与整个孔隙体积之比,通常用百分数(%)表示,即

$$S_{o(或g)} = \frac{V_{o(或g)}}{V_P} \times 100\% \quad (1.2)$$

按照定义,对于含有油气水的地层,含油饱和度 S_o 、含气饱和度 S_g ,和含水饱和度 S_w 之间,显然满足

$$S_o + S_w + S_g = 1 \quad (1.3)$$

在地层中,如果只含有油和水或气和水的情况下,(1.3)式可以写成

$$S_o + S_w = 1 \quad (1.4)$$

或

$$S_g + S_w = 1 \quad (1.5)$$

岩石的含水饱和度 S_w 是由两部分组成,一部分是可动的(或有效的),另一部分是束缚的.在可动的那部分中又分作两部分,一部分是自由流动的,一部分是在一定条件下才能流动的.束缚水饱和度 S_{wi} 和有条件的可动水饱和度加到一起称为残余水饱和度 S_{wr} .残余水饱和度和束缚水饱和度之间呈线性关系.

$$S_{wr} = b S_{wi} \quad (1.6)$$

随岩性不同, b 值一般在 1.05 到 5 之间变化.同样,含油饱和度也是由可采出的和束

缚的两部分组成，可采出的部分也包括可自由流出的和有条件流出的两种。有条件流出的含油饱和度和束缚油饱和度加到一起称为残余油饱和度。这个数值通常和冲洗带的含油饱和度 S_{or} 相对应。

1.2.3 渗透率

孔隙介质中的流体，在一定的压差条件下发生移动。表示流体在介质中流动难易程度的量称为该介质的渗透率。

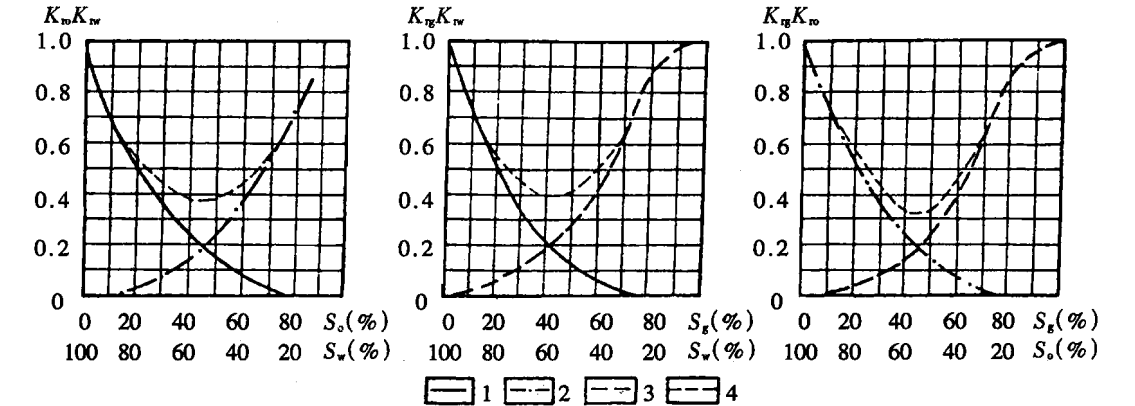
孔隙介质中流体流动的数量，可达西（Darcy）公式描述，

$$Q = K \frac{A}{\mu L} \Delta P \tag{1.7}$$

式中 Q 是通过介质的流体流量，单位为 m^3/s ； μ 为流体的黏度，单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； A 为垂直于流体运动方向的介质横截面，单位为 m^2 ； L 为流体穿过介质的厚度，以 m 为单位； ΔP 为流体两端的压力差，单位为 Pa ； K 为渗透率，它具有面积量纲，单位为 m^2 ，但是显得过大，通常以 μm^2 作为单位。过去采用达西（d）或毫达西（md）作为单位。新旧单位的换算关系为：1 d = $0.9869 \mu\text{m}^2 = 0.9869 \times 10^{-12} \text{m}^2$ ，1 md = $0.9869 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 = 0.9869 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 。当岩石中 100% 含有单相流体时，由（1.7）式定义的渗透率是岩石的绝对渗透率。

当岩石中含有多相流体时，每相流体的渗透率称为该相流体的有效渗透率。例如在孔隙中存在油和水两相液体时，对于油或水的渗透率。

有效渗透率与绝对渗透率的比值称为相对渗透率。在多相液体同时存在时，通常用相对渗透率来衡量某种流体通过岩石的难易程度。图 1.1 是油-水、气-水和气-油两相流体情况下的相对渗透率的示意图。



1——水的相对渗透率 K_{rw} . 2——油的相对渗透率 K_{ro} . 3——天然气的相对渗透率 K_{rg} . 4——相对渗透率总和。

图 1.1 相对渗透率与饱和度的关系

从图 1.1 可以看出，相对渗透率随流体的相对数量不同而变化。例如，在油-水两相的情况下，当含水饱和度低于 S_{wi} 时，水的相对渗透率接近于零，则地层全出油，相反，当含油饱和度低于某一数值以下时，地层全出水。可见，纯出油地层并不是说地层中完全没有水。

从图 1.1 还可以看出，相对渗透率之和都不等于 1，这是由于不同流体之间相互阻碍流动的结果。

在指定的含水饱和度下，油或水流动的体积（ Q ）不仅是相对渗透率的函数，也和流体

的黏度有关,

$$\frac{Q_o}{Q_w} = \frac{K_{ro}\mu_w}{K_{rw}\mu_o} \quad (1.8)$$

渗透率和碎屑岩结构的关系是:颗粒尺寸愈大,渗透率愈大;颗粒的分选性愈好,渗透性亦愈好;颗粒排列愈紧,即岩石愈压实,则渗透率降低;基质和胶结物增加时,渗透率降低。

裂缝对渗透的影响极大,渗透率和裂缝宽度(H)的平方成比例(Van Golf-Racht T. D., 1982)。可见,毫米级的裂缝就可以形成非常大的渗透率。

储集层的渗透率往往具有方向性,平行于层理面的渗透率 K_H 一般大于垂直层理面的渗透率 K_V 。

1.2.4 毛细现象和表面张力

岩石中孔隙通常是由直径很小的通道或裂隙连通。由于孔道非常细,如同毛细管一样,孔隙流体将受到毛细管压力的作用。毛细管压力 P_c 是单位表面的力,表示为

$$P_c = \frac{2\sigma\cos\theta}{r} \quad (1.9)$$

式中 σ 为流体的表面张力(流体与空气表面),以 N/m 为单位; θ 为弯液面和毛细管壁的接触角(度); r 为毛细管半径(cm)。

当流体和固体表面接触时,随液体对固体表面的润湿性不同,液体将受到表面的吸引或排斥。我们知道,当把毛细管插到水中时,由于表面张力的作用,水将在毛细管中升起(见图 1.2),升起的高度为

$$h = \frac{2\sigma\cos\theta}{r\rho g} \quad (1.10)$$

式中 ρ 是液体的密度(g/cm^3), g 为重力加速度。

这个高度也可以用毛细管压力表示,

$$h = \frac{P_c}{\rho g} \quad (1.11)$$

当有两种流体存在时,润湿性强的流体将分布在孔隙的弯曲部分和包围在固体颗粒的表面。例如,孔隙中含油和水的情况,水几乎总是包围在颗粒表面。这时还要引入两种不混合流体的界面张力的概念。这个力大致等于每种流体相对于空气的表面张力之差,

$$\sigma_{1-2} = \sigma_1 - \sigma_2 \quad (1.12)$$

于是,毛细管中润湿流体的液面高度为

$$h = \frac{2(\sigma_1 - \sigma_2)\cos\theta}{r(\rho_1 - \rho_2)g} \quad (1.13)$$

即水将升高到含油带中。当两种流体密度差和毛细管孔径愈小时,两种流体的过渡带将愈长。地层中颗粒的分选性愈差,过渡带也将拉长。

图 1.3 是表示毛细管尺寸和形状对毛细管压力曲线形态的影响。毛细管压力曲线左侧的渐近线是束缚水饱和度 S_{wi} , 它是由非常小的孔隙在总孔隙中所占的比例所决定。如果多数孔隙空间的尺寸都很小,束缚水饱和度将比较大,随着孔隙尺寸愈来愈大,束缚水饱和度将

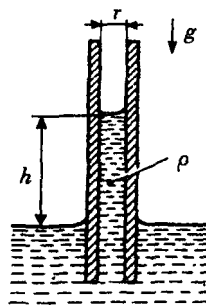


图 1.2 毛细管中水面增高

减小. 一般说来, 高渗透率岩石的 P_c-S_w 曲线上的过渡带比较陡和具有比较低的束缚水饱和度; 低渗透率岩石 P_c-S_w 曲线上有长的过渡带并具有高的束缚水饱和度.

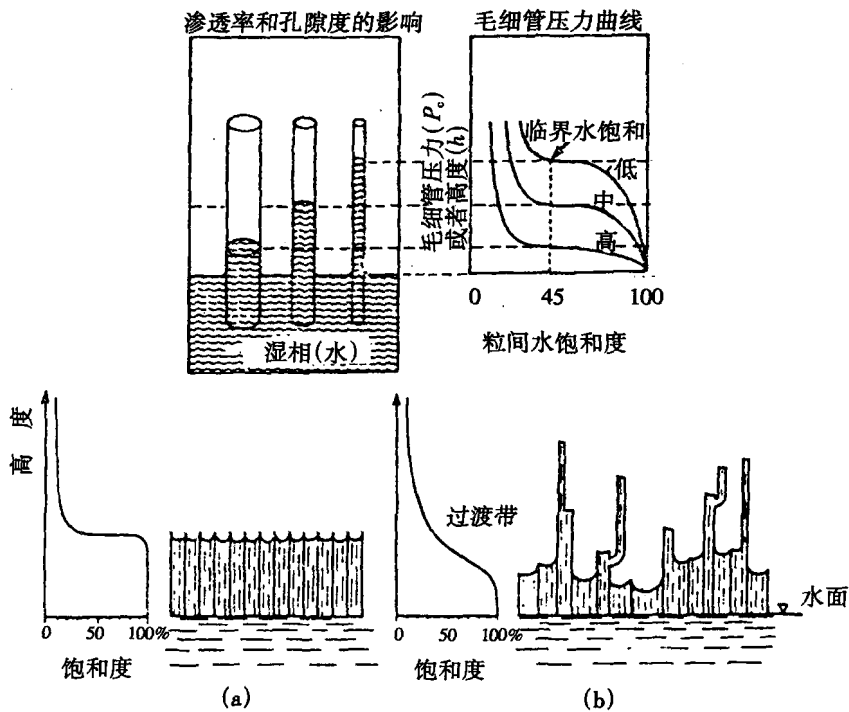


图 1.3 毛细管压力曲线和孔隙结构关系

§ 1.3 储集层的岩性、储集性和含油性 与各种物理性质之间的关系

从不同的研究侧面出发, 储集层可以用它的岩性、储集性、含油性和物理性质, 即所谓“四性”来说明. 岩性是从岩石学角度对储集层的认识, 储集性是指储集层的空隙性和渗透性, 含油性则是由其含油饱和度表示, 物理性质包括电性、密度、弹性、放射性等等. 因为储集层的这些性质是反映同一事物的不同侧面, 所以它们之间存在着一定的内在联系. 在勘探过程中, 人们主要是想得到关于岩性、储集性、含油性的资料, 但是直接研究这三性有许多困难, 一是不能大量取岩心, 二是取出的岩心已经改变了自然状态, 三是岩心所反映的体积很有限. 测井资料综合解释的目的, 就是通过研究由测井获得的反映岩石各种物理性质的测井数据, 间接地了解其他三性, 于是可以看出, “四性”关系的研究程度直接决定了测井工作能解决地层评价问题的程度. 因此“四性”关系的研究, 重点是研究由测井得到的各种物理参数与其他三性的关系.

因为岩石的固体骨架、泥质和孔隙流体三部分对地球物理测井结果的影响存在明显差别, 测井工作者通常把储集层岩石看作是由三部分组成. 此外, 测井结果还受到测井环境, 即井的条件和测井技术条件的影响, 而这种影响往往都是作为干扰因素在解释之前加以校正. 固体骨架对测井读数的影响主要是受固体成分控制. 泥质的影响是和泥质成分和分布状态有关. 孔隙流体的影响是取决于流体的种类、分布状态和多少. 因此, 岩石物理参数和储集性、含油性、岩性的关系, 也可以说是物理性质与矿物成分、流体性质、岩石结构和构造

的关系。岩层结构是指颗粒的尺寸、形状、分选性、排列方式、排列方向和胶结程度，而构造主要是指成层情况。因此，每种地球物理测井的观测结果（响应）和岩石成分、结构、构造等之间的关系可以概括成图 1.4。

为了更好地理解测井数据的处理与解释方法，下面将分别讨论物理参数和另外三性之间的关系。

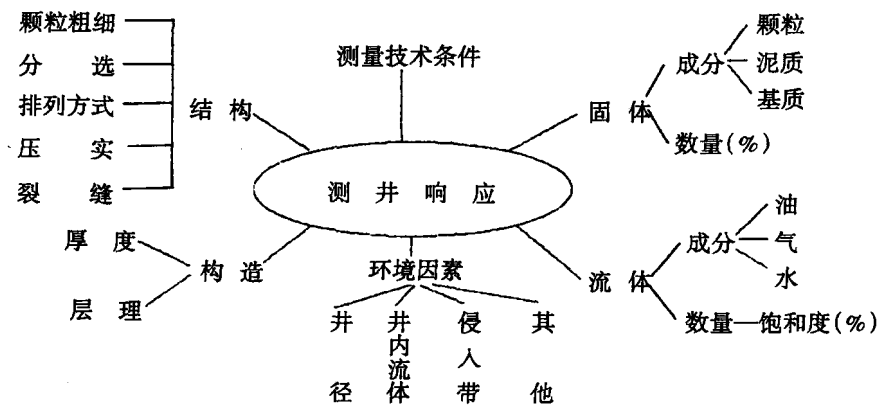


图 1.4 影响测井响应的各种因素

1.3.1 岩性和各种物理性质的关系

岩性变化主要是指矿物成分的变化，而每种矿物的物理性质，如密度、声波传播速度等，都具有一定的特征值。因此，有可能根据测井结果划定岩性。对于由单一矿物组成的岩石，根据这个特征值就可以判定岩性。表 1-2 是一些矿物和流体的常用物理参数值。

表 1-2 一些矿物和流体的常用物理参数表

矿物名称	电阻率 $\Omega \cdot m$	Δt $\mu s/m$	密度 g/cm^3	φ_{CNL} (石灰岩孔隙度单位)	$\Sigma c.u.^{\text{①}}$	P_e b/电子
石英	$10^{12} \sim 10^{17}$	182.1	2.65	-2	4.3	1.81
方解石	$10^7 \sim 10^{12}$	155.8	2.71	0	7.5	5.08
白云石	10^8	142.7	2.86	1~3	4.7	3.14
伊利石	10^{11}	—	2.64~2.89	—	40	3.45
蒙脱石	10^{11}	—	2.00~2.50	44	9	2.04
高岭石	10^{11}	—	2.40~2.70	37	13	1.83
岩盐	$10^4 \sim 1^{14}$	219.8	2.03	-3	760	4.65
硬石膏	$10^4 \sim 10^{10}$	164	2.98	-2	12	5.05
石膏	10^6	173.9	2.35	49	18.5	3.42
烟煤	$10 \sim 10^6$	360.9~459.3	1.3~1.5	>60	14.3	0.18
无烟煤	$10^{-4} \sim 10^{-2}$	295.3~389.6	1.4~1.8	38	8.65	0.16
纯水 (27℃)	—	620.1	1	>60	22	0.36
原油 $(CH_2)_n$ 30°API	—	773.0	0.88	>60	25.13	0.12
甲烷 CH_4 , 93℃, 48 MPa	—	—	0.25	—	12.49	0.1

根据 Hilchie D W 及 Serra D 资料整理。

①c.u. 为中子俘获截面 Σ 的一种单位，称为俘获单位， $1 c.u. = 10^{-3} cm^{-1}$ 。

岩石是由两种以上矿物组成时，则必须由两种以上的测井结果才能求出各种矿物组成的相对数量。

岩石某一物理性质与各组分的含量和相应物理性质的关系，由混合规则决定 (Korvin, 1982)。由数种物质均匀混合构成的复合物质，其物理性质由各组成成分的含量及相应物理性质所决定。有相当多的物理性质，在复合物质与组成成分之间满足或近似满足线性关系，