

泥质砂岩的物理性质 及其测井应用

王伟男 童茂松 编著
陈国华 姜亦忠



石油工业出版社

内 容 提 要

本书是在大庆测井公司岩石物理实验室近年来的研究成果的基础上,全面系统地总结、研究了国内外最新的岩石物理实验研究成果,全书以岩石物理实验为依据,注重理论分析,从岩石的微观结构到宏观参数,比较深刻地介绍了人们所关心的一些岩石物理实验现象和规律,有些研究成果还是首次对外发表,这是第一本比较全面地介绍有关岩石物理实验研究方面知识的专著。

本书可作为测井方法研究和测井解释人员的工具书,也可以作为其他石油工程人员和大专院校师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

泥质砂岩的物理性质及其测井应用/王伟男等编著.

北京:石油工业出版社,2004.8

ISBN 7-5021-4832-9

I. 泥…

II. 王…

III. ①粘土岩:砂岩-岩石物理性质

②粘土岩:砂岩-岩石物理性质-应用-油气测井-地质解释

IV. ①P588.21 ②TE151

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 112627 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.cn

总 机: (010) 64262233 发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂印刷

2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 12

字数: 307 千字 印数: 1—1300 册

书号: ISBN 7-5021-4832-9/TE·3391

定价: 38.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

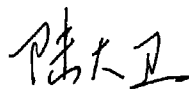
序

测井领域的许多创新成果都是从岩石物理实验开始的，所以岩石物理实验是测井方法的基础。作为 CNPC 测井重点实验室的实验基地，大庆油田测井公司岩石物理实验室近年来为大庆油田的勘探、开发和测井解释做了大量的基础性研究工作，一些工作很有创新性。他们开展的对岩石激发极化弛豫时间谱的研究很有意义，把岩石的核磁弛豫特性和电弛豫特性对比进行研究，建立了岩石激发极化弛豫时间谱与孔隙结构、渗透率之间的关系，具有较高的理论和实际应用价值。

王伟男等同志编著的《泥质砂岩的物理性质及其测井应用》一书，结构严谨，逻辑性强，是国内第一本比较全面地介绍有关岩石物理实验研究方面知识的专著。全书以岩石物理实验为依据，注重理论分析，从岩石的微观结构到宏观参数，比较深刻地介绍了人们所关心的一些岩石物理实验现象和规律，有些研究成果还是首次对外发表。该书可以作为测井方法研究和测井解释人员的工具书，也可以作为其他石油工程人员和大专院校师生的参考书。

大庆油田测井公司在岩石物理实验方面做了大量的工作，有了新的认识，能写成书，这就十分有价值。希望各油田、高校以及其他科研单位从事岩石物理实验研究的科技工作者努力工作，也希望 CNPC 测井重点实验室进一步扩大在行业中的影响，共同推进我国岩石物理实验研究工作的开展。

CNPC 测井重点实验室学术委员会主任



2004 年 8 月 18 日

前 言

近年来,岩石物理实验研究越来越引起人们重视,CNPC测井重点实验室的成立标志着我国岩石物理实验研究已经进入了一个新的发展时期。作为CNPC测井重点实验室的实验基地,大庆测井公司岩石物理实验室利用先进的引进设备,为大庆油田的勘探、开发和测井解释提供了大量的基础研究资料和数据。本书在大庆测井公司岩石物理实验室近年来研究成果的基础上,全面系统地总结、研究了国内外最新的研究成果,编著成书。每章从岩石物理性质介绍开始,介绍各种实验方法、基础理论、影响因素、实验关系、实验规律以及在测井解释中的应用等。

全书共九章,其中第一章、第二章、第四章和第五章由王伟男编著;第三章、第六章和第八章的第一、三、四节由童茂松编著;第七章、第九章和第八章的第二节由姜亦忠编著;全书最后由王伟男统稿、陈国华定稿。

大庆测井公司教授级高工杨荫祖同志对第三章、第四章、第五章、第六章、第八章和第九章作了审核;大庆测井公司副总工程师荆万学同志对第二章作了审核;大庆测井公司原总地质师付有升同志对第七章作了审核;中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司副总工程师、CNPC测井重点实验室学术委员会主任、教授级高级工程师陆大卫同志为本书写了序,并且对全书内容作了审定,在此表示感谢!

大庆测井公司经理石德勤、副经理陶宏根同志对本书的编著给予了大力的支持和帮助;中国石油集团测井有限公司总经理李剑浩同志在大庆测井公司任职期间,对岩石物理实验室工作给予了很多的支持和指导,在此表示感谢!

大庆测井公司俞军同志为本书整理了大量的实验资料;曹雅芳同志绘制了部分章节的图幅;张元中、丁柱、王艳、张继红、潘书民和汪光丽同志为本书提供了资料;耿昕、昌庆珍、井连江、杨芳、曹庆芳、王丽娟、张金莉、曹丽、张家举、范清华和王容等同志参加了本书所涉及的一些实验,在此表示谢意!

由于水平有限,书中难免出现纰漏或错误,敬请提出宝贵意见!

王伟男

2004年8月22日于大庆

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 岩石物理实验研究的重要性	(1)
第二节 岩石物理实验的研究方法	(1)
一、科学的思维方法	(1)
二、科学的实验方法	(2)
第三节 岩石物理实验结果的应用	(3)
第二章 泥质砂岩的电阻率	(4)
第一节 岩石的电阻率	(4)
第二节 岩心电阻率的测量方法	(5)
一、测量原理	(5)
二、改变岩心含水饱和度的电阻率测量方法	(6)
第三节 泥质砂岩电阻率的影响因素	(10)
一、岩石电阻率与含水饱和度的关系——阿尔奇公式	(10)
二、泥质含量对岩石电阻率的影响——W—S 模型	(12)
三、地层水矿化度对泥质砂岩电阻率的影响	(14)
四、温度和压力对泥质砂岩电阻率的影响	(16)
五、孔隙结构对泥质砂岩电性质的影响	(18)
六、润湿性对泥质砂岩电性质的影响	(21)
七、阿尔奇参数影响因素小结	(22)
第四节 应用举例	(23)
一、岩石物理实验参数在确定储层含油饱和度方面应用	(23)
二、复杂储层的岩石物理性质	(24)
三、化学驱油地层的岩石物理性质	(25)
参考文献	(28)
第三章 泥质砂岩的复电阻率特性	(31)
第一节 泥质砂岩的复电阻率	(31)
一、岩石复电阻率定义	(31)
二、岩石复电阻率频散机理	(32)
第二节 岩石复电阻率实验方法	(32)
第三节 泥质砂岩复电阻率影响因素分析	(34)
一、复电阻率频谱	(34)
二、泥质砂岩复阻抗与渗透率的关系	(35)
三、饱和度对复电阻率频谱的影响	(36)
第四节 复电阻率频谱参数反演技术研究	(39)
一、频率域激发极化模型	(39)

二、复电阻率模型参数反演	(40)
参考文献	(42)
第四章 泥质砂岩的介电常数	(44)
第一节 岩石的介电常数	(44)
一、物质的介电常数	(44)
二、岩石的介电常数	(45)
第二节 岩心介电常数的测量方法	(46)
一、电容法	(46)
二、同轴线测量法（散射参数法）	(48)
第三节 泥质砂岩介电常数的影响因素	(49)
一、岩石介电常数与含水饱和度的关系	(49)
二、岩石介电常数与孔隙度的关系	(51)
三、岩石介电常数与地层水矿化度的关系	(52)
四、泥质含量及其分布状态对岩石介电常数的影响	(53)
五、温度对岩石介电常数的影响	(58)
六、岩石介电常数的频散特性	(59)
第四节 应用举例	(61)
一、电磁波测井应用范围探讨	(61)
二、电磁波测井用于识别水层	(62)
三、电磁波测井用于矿化度多变地区识别油层的实例	(62)
参考文献	(64)
第五章 泥质砂岩的扩散吸附电位	(66)
第一节 岩石的扩散吸附电位	(66)
一、地层的自然电位	(66)
二、岩石扩散吸附电位的形成机理	(66)
三、地层扩散吸附电位场的分布	(67)
第二节 岩心扩散吸附电位的测量方法	(69)
第三节 岩心扩散吸附电位的影响因素	(70)
一、岩性的影响	(70)
二、矿化度的影响	(73)
三、温度的影响	(73)
四、压力的影响	(73)
五、地层水化学成分的影响	(74)
第四节 用自然电位测井资料确定地层水电阻率	(74)
参考文献	(76)
第六章 泥质砂岩激发极化特性	(77)
第一节 泥质砂岩激发极化	(77)
第二节 泥质砂岩激发极化机理	(78)
一、薄膜极化	(78)
二、双电层形变极化	(78)

第三节 泥质砂岩激发极化实验	(79)
第四节 泥质砂岩极化率影响因素	(79)
一、供电电流的影响	(79)
二、矿化度的影响	(80)
三、孔隙度的影响	(80)
四、渗透率的影响	(80)
五、阳离子交换量的影响	(81)
六、含水饱和度的影响	(81)
第五节 泥质砂岩激发极化弛豫时间谱	(82)
一、激发极化弛豫时间谱	(82)
二、弛豫时间谱反演	(82)
三、弛豫时间谱影响因素分析	(84)
第六节 激发极化与复电阻率的等价性	(90)
一、极限情况下频散度与极化率等价性	(90)
二、激发极化衰减谱和复电阻率频谱的等价性	(90)
参考文献	(93)
第七章 泥质砂岩的核磁共振特性	(96)
第一节 核磁共振实验基础	(96)
一、核磁共振原理	(96)
二、物质的弛豫机制	(101)
三、油气水核磁共振弛豫特征	(104)
四、核磁共振 T_2 谱的拟合	(106)
第二节 泥质砂岩核磁共振基础实验研究	(108)
一、核磁共振特性参数的测量	(109)
二、核磁共振孔隙结构实验研究	(115)
三、截止值的确定方法	(121)
四、岩屑的核磁共振特性研究	(125)
五、束缚水的确定方法	(126)
六、核磁共振成像分析技术	(127)
第三节 岩石核磁共振特性的影响因素	(131)
一、矿化度对核磁共振弛豫谱影响的实验研究	(131)
二、粘土的影响	(132)
三、顺磁物质的影响	(134)
四、不同油品对核磁共振测量的影响	(136)
第四节 核磁共振在泥质砂岩储层的应用实例	(140)
一、储层参数求取	(140)
二、流体识别方法	(140)
三、划分有效厚度	(142)
四、利用核磁共振测井评价厚层内部的水淹特征	(142)
参考文献	(144)

第八章 泥质砂岩的声学特性	(146)
第一节 岩石声学特性	(146)
一、岩石的弹性力学参数.....	(146)
二、岩石的声学参数.....	(147)
第二节 岩石声学特性的实验	(148)
一、声波测量方法.....	(148)
二、岩石声波实验系统.....	(149)
三、高温高压实验系统.....	(149)
四、三轴向实验系统.....	(152)
第三节 泥质砂岩声学特性的影响因素	(153)
一、岩石的声速的影响因素.....	(153)
二、岩石含水饱和度对纵波、横波幅度的影响.....	(158)
三、岩石的声频散特性.....	(161)
四、实验室岩石的声频谱特性.....	(163)
第四节 岩石声电效应实验研究	(164)
一、模型井实验系统.....	(165)
二、转换电磁波的频率和相位特征.....	(165)
三、转换电磁波幅度与矿化度的关系.....	(166)
参考文献.....	(166)
第九章 自然伽马能谱	(169)
第一节 自然伽马能谱的地质基础	(169)
第二节 自然伽马能谱测量方法	(171)
一、测量仪器.....	(171)
二、标准源和岩样的制备.....	(172)
三、样品的测量.....	(172)
四、伽马谱的解析.....	(173)
第三节 岩样 Th、U、K 含量与岩性的关系	(176)
一、Th 含量与泥质含量的回归分析.....	(176)
二、Th 含量与 $(\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2$ 的回归关系.....	(176)
三、Th 含量与阳离子交换容量 (C_{Ec}) 的回归分析.....	(177)
四、总计数率 N 与泥质含量的回归分析.....	(178)
五、利用 U、Th 交绘图判断岩性.....	(178)
六、自然伽马能谱与比表面的关系.....	(179)
第四节 自然伽马能谱测井应用实例	(179)
一、计算粘土矿物含量.....	(179)
二、识别高自然伽马储层和判别裂缝.....	(180)
三、沉积环境分析.....	(181)
参考文献.....	(182)

第一章 绪 论

第一节 岩石物理实验研究的重要性

岩石物理实验是测井方法的基础。1942 年,美国石油工程师阿尔奇在岩石物理实验资料的基础上,首次把岩石的电阻率和地层的含油性建立起关系,总结出著名的阿尔奇公式。此后,测井资料才引起地质家的足够重视,不断发展成为测井学科。也是依据岩石物理实验的结果,魏克斯曼和史密斯在 1968 年发展了适用于泥质砂岩剖面的解释模型, W—S 模型,后来又被发展为双水模型。可以看出,每一次测井方法上的突破都必然是以岩石物理实验上的突破为前提的。任何一种测井方法的产生都是从岩石物理实验研究开始的,有些是通过岩心实验完成的,有些是通过刻度井实验完成的(天然或人工岩石),还有些是通过野外试验发现的。1956 年, Chevron 公司的 Brown 和 Fatt 通过对砂岩样品进行核磁共振实验,发现了岩石孔隙中流体的核磁共振弛豫与它自由流体时不同;1960 年, Brown 和 Gamson 设计了大地磁场的核磁共振测井仪器,并且进行了现场试验,以后发展了人工磁场的核磁共振测井仪器。电磁波传播测井方法(EPT)也是在进行大量的岩石物理实验之后才开始研制仪器的。测井方法、测井解释模型和测井仪器刻度等都需要通过岩石物理实验提供参数或图版。如阿尔奇公式的 a 、 b 、 m 、 n 参数需要通过岩石物理实验来确定;核磁共振测井的测前设计需要通过岩石物理实验提供设计参数;核测井仪器的刻度需要通过核刻度井来实现,等等。近年来,“岩心刻度测井”越来越引起人们的重视,用岩心测试数据来刻度测井数据,其目的是提高测井数据采集的质量、提高解释精度。

我国的石油测井技术起步较晚,在很长一段时间里,主要是以沿用国外的方法为主;这与岩石物理实验并没有引起人们的足够的重视不无关系,当然也不能否认早期的研究手段和实验条件限制了我国岩石物理实验技术的发展。20 世纪 80 年代以后,随着国际上石油测井技术的飞跃发展和我国测井技术的不断进步,岩石物理实验技术越来越引起人们的重视。大庆、江汉、胜利、南阳、新疆等油田和石油大学(北京)都相继开展了各具特色的岩石物理实验研究工作。后来组建的中国石油天然气集团公司测井重点实验室,以江汉测井研究所、石油大学(北京)和江汉石油学院为依托单位,以大庆油田、辽河油田和大港油田为实验基地,已经取得了一些创新性的研究成果;测井重点实验室每两年举行一次学术论文发布会,有力地推动了我国岩石物理实验技术的发展。大庆测井公司在 1999 年至 2000 年间,引进了 12 套国外最先进的岩石物理实验设备,其规模和配套程度在国内测井界都是空前的。

第二节 岩石物理实验的研究方法

这里需要讨论两种方法,科学的思维方法和科学的实验方法。

一、科学的思维方法

科学的思维方法就是要解决如何用岩石物理实验的手段来达到所预期的研究目的。可以采用正向思维方法，也可以采用逆向思维法。所谓正向思维法就是在大量的实验现象、关系和数据的基础上，去发现、总结、提炼出规律性的东西，形成理论，再用理论去指导实验，使其在实验过程中不断得到完善，进而为生产服务。正向思维方法需要有比较好的总结、归纳、观察和抽象能力。逆向思维方法就是首先构思出一种理论、模型或规律，然后用实验去验证它，最后形成完整的理论。逆向思维需要有良好形象思维能力和理论基础。在科学的历史上，这两方面成功的例子都有很多，科学上的发现一般都是通过正向思维得到的，而大多数发明则是逆向思维的结果。两种思维方式不是互相孤立的，逆向思维有时需要正向思维给予补充，正向思维有时也需要逆向思维来不断完善，两种思维方式灵活运用，才能实现科学上的进步。然而，无论哪一种思维方式，都离不开下面要谈到的科学的实验方法。

二、科学的实验方法

首先要有一个科学的实验方案设计。一个好的实验方案设计是实验成功的关键，它一般包括明确实验目的、确定实验内容、选择实验对象、设计实验方法，约束实验条件，配置实验设备，制定实验步骤等。

实验方案的设计一般是要经过反复论证的，一定要做到科学设计、合理设计。明确实验目的就是要明确为什么做实验，要解决什么问题，服务的对象是谁、他有什么要求，以及要达到什么目的等。只有明确了实验目的，才能避免盲目性，少走弯路。确定实验内容就是针对要解决的问题，确定所必需的实验项目和具体内容。实验内容确定之后，就要选择实验对象，例如选择实验区域、井位、关键井等；还要选择有代表性的层位和岩心。实验方法是实验方案设计的核心问题，也许解决一个问题可以通过多种实验方法，那么就需要选择最直接、最科学、最经济的方法来达到所需要的目的。实验设计中约束实验条件是必要的，比如根据需要约束实验的温度、压力、流体类型等；为了突出某一影响因素进行研究，也需要通过约束其他条件来实现，以避免各种影响因素共同作用而分辨不清其规律性。关于实验仪器和设备，不一定非要贵重的、精密的，关键是要匹配，要根据实际需要合理配置。制定实验步骤也是实验设计必须的内容，从某种意义上讲它是设计者对实验员的约束，有时错误的步骤会导致错误的结果。

有了科学的实验方案设计以后，就要认真组织实施，也就是进行实验。实验过程中应该抓住几个重要环节。一是根据实验设计要求做好实验准备工作，准备好实验需要的设备、材料、化学药品等。二是严格按设计的实验步骤进行操作，避免错误的步骤和错误的操作。三是严格控制实验条件，有些实验结果是在特定的条件下得到的，离开了某些特定条件，其结果就不能成立。四是要认真观察和分析实验过程中的现象，尤其要注意一些异常现象和异常数据，通过认真分析这些异常现象和数据，有可能会得到新的认识和发现。五是要注意实验结果的重现性，重要的结论、关键的岩心一定要做重复实验来验证其结果的可靠性。此外，实验过程中有时还会遇到需要更改实验设计的情况，必要时可以根据实验反馈的信息更改实验设计。

实验室的实验完成后，要写好总结报告，从某种意义上说，总结的过程也是一个认识提高的过程。在编写报告过程中要正确处理实验数据和分析实验结果，要认真地总结和分析，

要分清表象的和本质的东西，要区分偶然现象和必然规律。分析过程中，正确运用数学物理方法是必要的，统计分析是岩石物理实验资料分析中最重要的手段。尤其要认真分析那些异常现象和异常数据，要认真分析、反复分析，必要时做补充实验，不能主观臆断。

第三节 岩石物理实验结果的应用

岩石物理实验成果应用十分广泛，可以用于测井资料的解释，为测井解释提供基础参数和图版，提供各种实验关系、实验规律和解释模型，这是岩石物理实验最基本、也是最主要的研究内容。岩石物理实验参数还可以为测井工程提供设计参数，比如核磁测井需要实验室提供等待时间、截止值等参数。近年来岩心刻度测井发展很快，它是以岩石物理实验资料为依据来刻度测井资料，以及用岩心实验资料对测井解释结果进行验证和评价。再有，油田勘探和开发工程也都需要岩石物理实验提供参数，如为油田勘探提供储量参数以及为油田开发的压裂改造提供岩石力学参数等。油藏描述同样也需要岩石物理实验提供参数，包括其他一些地质研究也都需要岩石物理实验参数。

正确而合理地使用岩石物理实验成果，有时比实验研究本身还要困难。首先应该了解参数测量的基本原理、环境条件和实验方法等。了解了这些环节，就知道了实验数据的来龙去脉，使用起来胸中有数。具体地说，使用实验室提供的数据时，就应该了解实验数据是用什么方法、在什么条件下得来的，与测井数据有什么差别，精度是多少，是原始数据还是导出数据或是合成数据？与野外测井数据一样，一些岩石物理实验的原始数据也需要做相应的处理后才能使用。实验条件、环境、测量方法以及岩心的几何尺寸等都决定了岩心实验数据与野外测井数据会有所差别。长期以来，一些人对于岩石物理实验数据的使用有一个误区，总习惯于用实验室的原始数据与测井曲线值直接对比，其实只有少部分实验室的原始数据能够与测井曲线直接对得上，大多数都会有所差异。还有一些人，拿来实验室数据就直接使用，效果不好就怀疑实验数据有问题。由此看来，了解岩石物理实验的方法，正确使用岩石物理实验数据是非常重要的。

此外，实验室的仪器也不是万能的，有许多参数是不可能在实验室直接测得到的，因此期望实验室提供所有的参数也是不现实的。近年来，岩石物理实验技术已经取得了长足的进步，许多过去不可能实现的实验分析项目现在已经成为现实，尤其是计算机技术和层析成像技术用于岩心分析中，使岩石物理实验成果更加直观、适用，内容也更加丰富了。即使如此，有些参数还是不可能直接提供，还有一些测量参数的准确性和精度都有待提高。

利用岩石物理实验数据建立各种关系以及研究它们之间的规律是很重要的。实验数据有时会因为实验条件等因素的限制而不能直接使用，但是通过大量实验数据建立起来的统计关系和规律性往往能够正确地反映地质规律，因此具有真实性。正确使用岩石物理实验得出的关系和规律，是测井地层评价的重要内容。

多种方法结合，多种实验手段结合，多参数测试以及由微观结构到宏观参数的研究方法是当前岩石物理实验的一些突出特点。多种方法结合包括物理的、化学的、数学的、地质的以及理论的和实验的等多种方法；多种实验手段结合包括成像、变频、多轴向以及高温高压、人造岩心等，随着这些技术的不断成熟，必将推动岩石物理实验技术的发展。相信在CNPC测井重点实验室的带动下，我国的岩石物理实验技术一定会取得长足进步。

第二章 泥质砂岩的电阻率

第一节 岩石的电阻率

岩石电阻率是测井地层评价的重要参数之一，许多测井方法如侧向、感应、微球聚焦测井等给出的都是不同探测深度的岩石电阻率参数。岩石的电阻率定义如下：

$$R = r \cdot \frac{s}{l} \tag{2-1}$$

式中 R ——岩石电阻率；
 r ——单位体积岩石的电阻；
 s ——岩石的横截面积；
 l ——岩石的长度。

岩石电阻率主要取决于岩性、岩石孔隙度、岩石孔隙中的流体饱和度、导电流体矿化度、泥质含量以及温度等。表 2-1 列出了一些矿物和岩石的电阻率值，可以看出，金属矿物的电阻率都很低，主要造岩矿物（如石英、长石、云母、方解石等）的电阻率都比较高，大部分火成岩的电阻率也都比较高（如花岗岩、玄武岩等），而沉积岩的电阻率则相对较低。

表 2-1 主要岩石和矿物的电阻率表

矿 物	电阻率 ($\Omega \cdot m$)	矿 物	电阻率 ($\Omega \cdot m$)
粘 土	$1 \sim 2 \times 10^2$	白云母	4×10^{11}
页 岩	$10 \sim 10^2$	长 石	4×10^{11}
泥质页岩	$5 \sim 10^3$	石 油	$10^9 \sim 10^{16}$
疏松砂岩	$2 \sim 50$	方解石	$5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^{12}$
致密砂岩	$20 \sim 10^3$	烟 煤	$10 \sim 10^4$
含油气砂岩	$2 \sim 10^3$	无烟煤	$0.0001 \sim 1$
贝壳石灰岩	$20 \sim 200$	硬石膏	$10^4 \sim 10^6$
泥灰岩	$5 \sim 500$	无水石膏	10^9
石灰岩	$600 \sim 6000$	石 墨	$10^{-6} \sim 3 \times 10^{-4}$
白云岩	$50 \sim 6000$	磁铁矿	$10^{-4} \sim 6 \times 10^{-3}$
玄武岩	$600 \sim 10^5$	黄铁矿	10^{-4}
花岗岩	$600 \sim 10^5$	黄铜矿	10^{-3}
石 英	$10^{12} \sim 10^{14}$		

资料来源于尚作源：《地球物理测井方法原理》，石油工业部勘探培训中心，1982 年。

岩石骨架可以认为是不导电的，纯砂岩地层的导电机理主要是离子导电，离子导电岩石的电阻率主要取决于孔隙中流体的导电能力。因为石油和天然气的电阻率值要比地层水的电阻率值大得多，因此，当岩石孔隙中含油气饱和度比较高时，地层的电阻率值就比较高，这

是电阻率测井方法评价地层含油饱和度的物理基础。对于泥质砂岩地层，因为有泥质的附加导电作用，其导电机理要复杂些，但离子导电仍然是主要因素。

电阻率测井之所以能成为应用最广泛、也是最重要的测井方法，主要依赖于建立在岩石物理实验基础上的阿尔奇（Archie）公式。阿尔奇公式比较好地建立了电阻率测井资料与地层含油气饱和度之间的关系，多年以来一直被人们所使用，成为具有划时代意义的理论公式。阿尔奇公式是在一定地质条件下建立起来的，有一定的适用范围；而且地层的电阻率值以及阿尔奇公式中的参数都会受到某些因素的影响，对这些问题的研究，已经成为当前岩石物理实验领域最活跃的内容。

第二节 岩心电阻率的测量方法

一、测量原理

测量原理示意图如图 2-1 所示。对岩心两端施以一定的电压，岩心中就有电流产生。在恒定电流供电的情况下，通过测量岩心两端的电位差，根据岩心的几何尺寸，就可以得到岩心的电阻率值。计算公式如下：

$$R = \frac{\pi d^2}{4l} \times \frac{V}{I} \quad (2-2)$$

式中 d ——岩心直径；
 l ——岩心长度；
 I ——通过岩心的电流强度；
 V ——岩心两端电位差。

测量可以采用两极法，也可以采用四极法。两极法测量时电极的排列已经在图 2-1 中示出了，电极 A 和 B 既是供电电极又是测量电极。两极法的缺点是测量精度受岩心与电极之间接触电阻的影响。为了减少接触电阻影响，测量电极一般采用导电性能好、而且容易贴紧岩心的软质金属材料，如铜或银等；还要用麂皮、滤纸等吸水材料放在岩心与电极之间作为耦合材料。四极法测量时电极的排列如图 2-2 所示，此时公式（2-2）中的 l 应该是 M、N 之间的距离。四极法测量能在很大程度上减小或消除接触电阻的影响，但是这种方法仅适

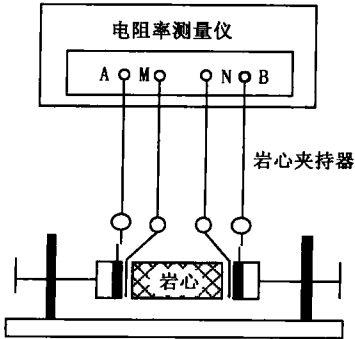


图 2-1 两极法测量岩心电阻率示意图
A、B—供电电极；M、N—测量电极

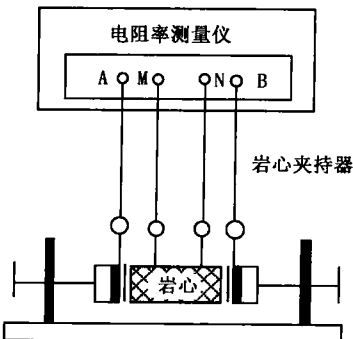


图 2-2 四极法测量岩心电阻率示意图
A、B—供电电极；M、N—测量电极

合在岩心完全饱和水的情况下使用, 否则 M、N 电极之间的含水饱和度不易计量。

二、改变岩心含水饱和度的电阻率测量方法

1. 增饱和度法

增饱和度法是将处理好的岩心放入盐水中, 依靠岩心自身的毛管力作用, 将盐水吸入岩心孔隙中, 在不同含水饱和度下进行岩心电阻率的测量。岩心的含水饱和度计量采用重力法:

$$S_w = \frac{(W_w - W_d)}{V_\phi D} \times 100\% \quad (2-3)$$

式中 S_w ——岩心含水饱和度;
 W_w ——含水岩心质量;
 W_d ——干岩心质量;
 V_ϕ ——岩心孔隙体积;
 D ——水的密度。

该方法是一种以水驱替气体的方法, 属于气、水两相驱替法。用空气模拟油来计算油、水饱和度, 这里需要假设油和气体的电阻率值都是无穷大。为了不使开始饱和时盐水增加得太快, 在低饱和度时一般采用往岩心表面刷水的办法, 使岩心的含水饱和度有控制地增加。在岩心的含水饱和度达到一定程度以后, 仅仅依靠毛管力的作用是不可能使岩心的孔隙中充满水的, 尤其是低孔渗岩心。这时就需要对岩心抽真空使其孔隙中的气体被排出, 然后再施以一定的压力使盐水进入岩心孔隙中。具体做法是, 将岩心置入装有盐水的压力容器中, 容器留有接真空泵和压力泵的接口。首先对岩心进行抽真空处理 (25mm 直径的标准岩心一般应抽真空 30min 以上), 然后再增加驱替压力, 直到岩心完全饱和为止。每次取出岩心称量和测量时, 都需要将岩心表面的盐水处理好, 既不能将岩心表面孔隙中的盐水吸出, 又不能使岩心表面的盐水过多而形成电流的捷径, 这实际上是很难控制的。岩心表面水的处理是该方法最难控制的因素, 它一方面影响岩心饱和度的准确性, 另外表面水容易形成导电通道, 使测量的岩心电阻率值偏低, 因此需要有相当的经验 and 细心才能控制好。

该方法的另一个影响因素是盐水在岩心中的分布状态。盐水在岩心中的分布状态对其电阻率的影响是很大的, 为了减少这一影响, 应该增加盐水在岩心中的稳定时间。岩心表面水处理好之后, 将其放到夹持器中进行监测, 直到其电阻率值稳定后再进行记录, 此时岩心中的盐水已经分布均匀, 达到了稳定的平衡状态, 测量效果最好。

增水法操作简单, 一次可以同时处理多块岩心, 因此效率比较高。如果控制得好, 用该方法测量不同饱和度下岩心电阻率的效果还是比较理想的。该方法是一种常温常压下的测量方法, 不能模拟实际地层条件。美国岩心公司 (CORELAB) 的 CEF 型常温常压岩心电阻率测量装置如图 2-3 所示。

2. 减饱和度法

减饱和度法是增饱和度法的逆过程, 也属于气、水两相驱替法, 含水饱和度的计量及电阻率的测量与增水法时一样。常见的减饱和度法有气驱法、离心法和半渗透隔板法。

1) 气驱法

将处理好的岩心完全用盐水饱和, 然后采用自然或人工脱水的办法来降低其盐水饱和

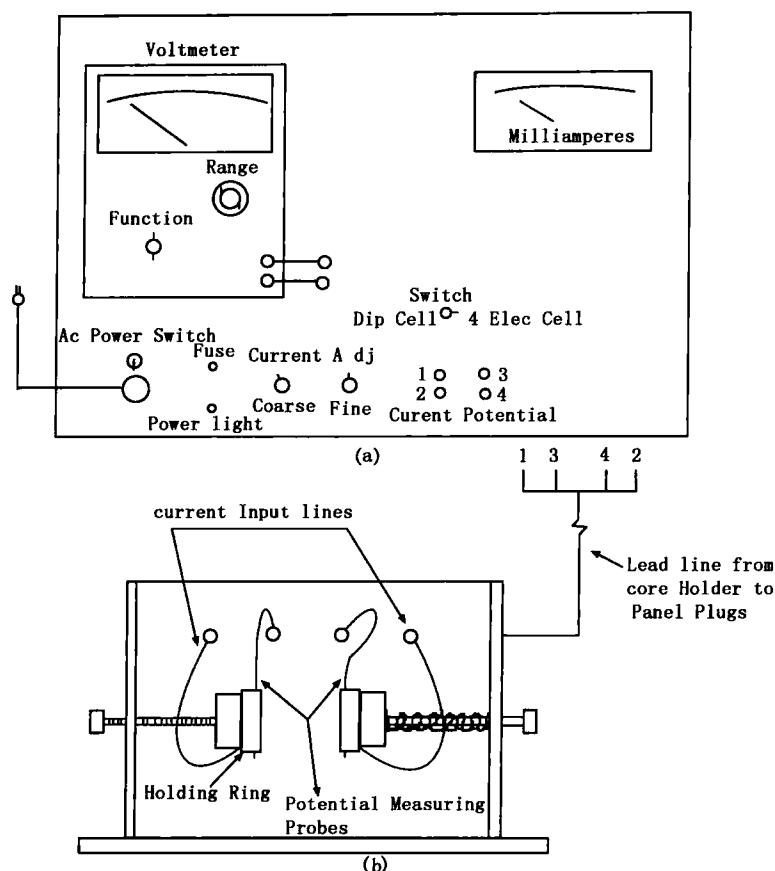


图 2-3 CORELAB CEF 型岩心电阻率测量仪
(a) CEF 型岩心电阻率测量仪；(b) CEF 岩心夹持器

度。自然脱水需要的时间长，一般不用；人工脱水一般采用气吹法或烘干法，但要控制好测量时岩心的温度。气驱法的优点是盐水在岩心中的分布比较均匀，而且不存在表面水的影响。缺点是岩心中的水分减少了，盐分却没有减少，因为脱水是靠岩心中的水分蒸发来实现的，相当于盐水的浓度增大了，因此会影响测量结果。与增饱和度法一样，该方法也不能模拟地层条件，只能在常温常压下进行测量。

2) 离心法

离心法是人工降低岩心孔隙中盐水饱和度的另一种形式，其手段是通过离心力来进行驱替。具体做法是，将饱和好的岩心放入特制的离心管中，离心管的末端留有带刻度线的集水管，靠离心力驱替出的盐水被收集在刻度管中（图 2-4），依据体积法计算岩心的含水饱和度。计算公式如下：

$$S_w = \frac{V_w}{V_\phi} \times 100\% \quad (2-4)$$

式中 V_w ——刻度管中盐水的体积。

使用离心法测量时，岩心的润湿性比较好，不存在表面水的影响。离心力能在一定程度上模拟地层的驱替压力，而且通

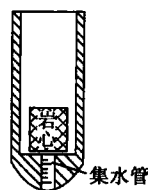


图 2-4 离心管示意图

过调整离心机的转数可以改变驱替压力。不同驱替压力时的出水量反映岩心孔隙的毛管力，因此该方法可以用于研究不同毛管压力条件下的岩电关系。如果离心管设计合理，该方法也可以进行油、水两相驱替实验。该方法比前两种方法复杂，每次测量都需要把岩心取出来；而且用该方法进行测量时，岩心中的盐水分布不均匀，末端的盐水饱和度要大于顶端。该方法也不能模拟地层条件，只能在常温常压下进行测量。

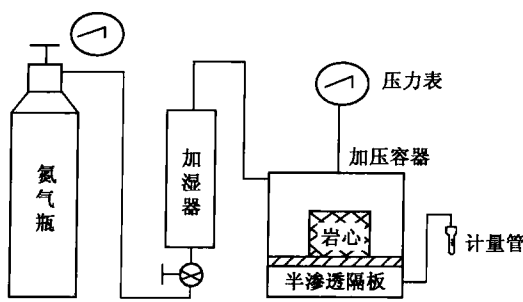


图 2-5 半渗透隔板法测量岩心电阻率装置

3) 半渗透隔板法

半渗透隔板法也是一种人工降低盐水饱和度的方法。半渗透隔板是一种多孔板，孔隙致密、具有较大的毛管压力。半渗透隔板的孔隙表面经化学处理后，在一定压力下只能使润湿相流体（水）渗透，而非润湿相流体（油气）不能渗透，因此能消除常规法驱替时由于非润湿相流体的活塞式推进所产生的“末端效应”。由于采用的半渗透隔板，驱替相和润湿相的相互作用

主要取决于岩心的毛管压力，因此这种驱替过程能较好地模拟油气藏的压力系统。半渗透隔板法的测量装置如图 2-5 所示^[1]。岩心和半渗透隔板在装入压力容器前都要先抽真空饱和，驱替时通过调节压力阀来控制加湿氮气的驱替压力。在某一压力下，如果计量管中的盐水体积不再增多就可以认为两相流体的分布达到了平衡（这一过程一般需要几天时间），此时卸掉压力，取出岩心进行称重确定其含水饱和度、测量其电阻率值。然后再把岩心放入压力容器内，增加压力进行下一个饱和度点的测量。不同含水饱和度下，两相流体分布达到平衡时的压力就是该状态下的毛管力，因此该方法也可以用来研究不同毛管力条件下的岩电关系。为了提高测量效率，一次可以同时处理多块岩性相近、孔渗差别不大的岩心。该方法同样不能模拟地层的温度和压力条件，也只能在常温常压下进行测量。

3. 油、水两相驱替法

油、水两相驱替法（也可以是气、水两相或油、气、水三相驱替）是将岩心装在一个橡胶筒中，橡胶筒的两端用与岩心直径相同的柱状电极封堵，外边用金属套箍住，使其密封，以防止压力泄漏。对橡胶筒外部施以液压，能够模拟地层的上覆压力，还能够使橡胶筒贴紧岩心，避免驱替时盐水从橡胶筒与岩心的接触面导通，见图 2-6。金属电极中心留有注液孔，通过它可以对岩心注入流体形成驱替压力。金属电极与岩心的接触面留有网状小沟槽，以便驱流体沿岩心端面均匀推进（图 2-7）。

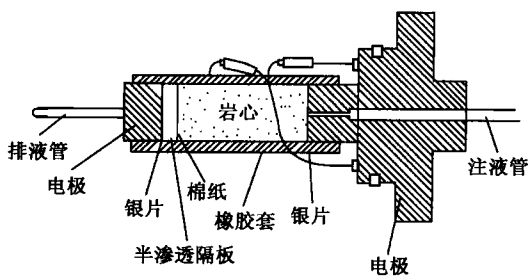


图 2-6 油、水两相驱替法岩心夹持器

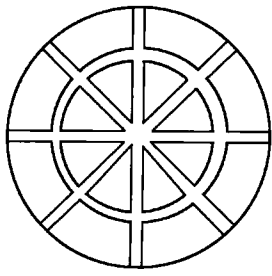


图 2-7 油水两相驱替法电极端面

流体饱和度计量采用体积法，驱替出的流体被收集到计量管中，根据计量管中的流体体积和岩心的孔隙体积即可得到岩心中某一种流体的饱和度。也可以采用其他方法计量岩心中的流体饱和度（如电容法）。油、水两相驱替只能采用两极法来测量岩心的电阻率，若采用四极法测量则无法得到测量电极之间的真实流体饱和度。在这种装置中，四极法仅适用于100%含水岩心的测量。

大庆测井公司在1999年引进了美国岩心试验公司（CORETEST）的RPS-850-Z5型岩石电阻率、毛管压力和相对渗透率自动测量系统，其原理图如图2-8所示。它是美国岩心实验公司的最新产品，可以在模拟地层温度和压力条件下自动测量油、水两相条件下岩心

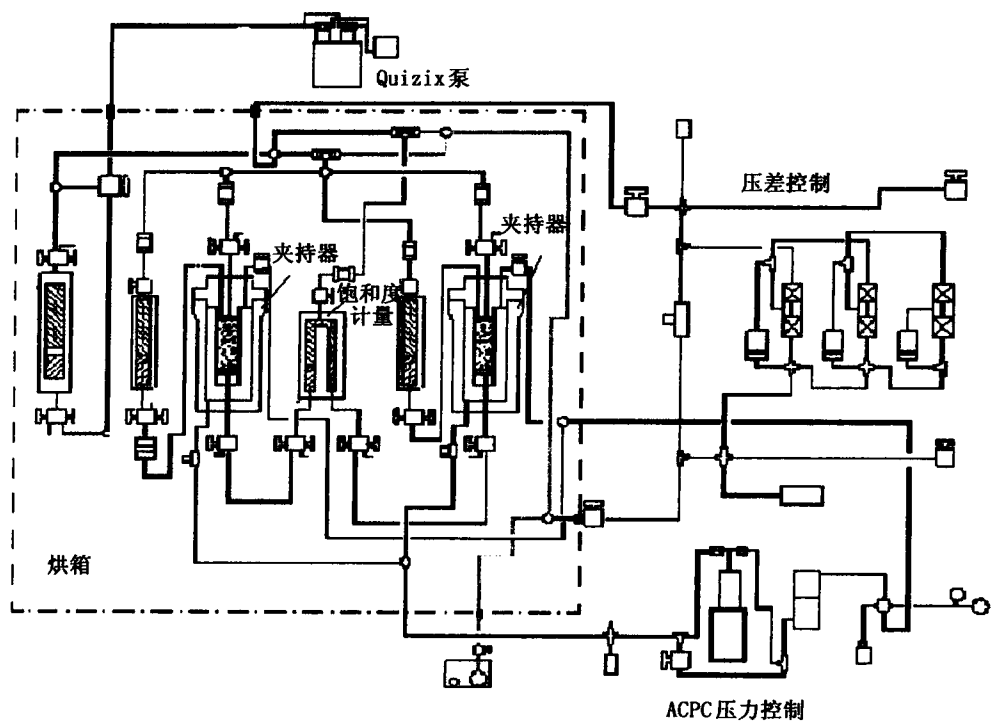


图 2-8 美国岩心公司 RPS-850-Z5 型岩心电阻率驱替系统流程图

的电阻率、毛管压力和相对渗透率。为了便于饱和度计量，采用两极法测量岩心电阻率。岩心夹持器两端分别装有亲油和亲水的半渗透隔板，以利于不同润湿相的驱替和毛管压力的建立，也有利于消除“末端效应”的影响，从而提高测量分析结果的可靠性和精度。采用 QUIZIX 精密计量泵对岩心进行驱替，根据驱替到计量管内流体的体积，用电容法计算计量管内流体的含水率，从而得到岩心内部的流体饱和度。上覆压力是通过液压泵来建立的，温度的控制是通过恒温箱来完成的、岩心夹持器安装在恒温箱中；采用三个压力传感器测量毛管压力。该系统还可在两相或三相流条件下测量流体的非稳态相对渗透率。控制软件能够实施对温度和压力的自动控制，能够适时进行数据采集和处理，能够监测和诊断系统各部分的工作情况、实现全自动测量（图 2-9）。该系统可以自动改变方向对岩心进行不同润湿相流体的驱替，测量时不需取出岩心。

系统的主要技术指标如下：

最大上覆压力：10000psi；