

王贵文 郭荣坤 编著

测井地质学



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

测 井 地 质 学

王贵文 郭荣坤 编著

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书以大量油田现场测井地质综合分析研究成果为主线,以多方面系统总结了测井地质学的研究方法及发展趋势,是面向地质、地球物理类研究生的第一本测井地质综合解释方向的教材。

本书可作为地质勘探、地球物理的研究生及本科生的教科书,也可作为石油大专院校相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

测井地质学/王贵文 郭荣坤编著.
北京:石油工业出版社,2000.11
ISBN 7-5021-3192-2

I. 测…
II. ①王…②郭…
III. 测井-地质学
IV. TE14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 77265 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
霸州市长虹图文制作有限公司排版
地矿部河北地勘局测绘院印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 14.5 印张 371 千字 印 1—1500
2000 年 11 月北京第 1 版 2000 年 11 月河北第 1 次印刷
ISBN 7-5021-3192-2/TE·2421
定价:29.00 元

前 言

油气勘探和开发中油气检测的测井技术可以为地质勘探家提供大量第一手的地球物理信息及其地质解释成果。随着油气勘探开发的不断深入，测井技术也得到迅速发展，并能够提供除油气水检测为中心的更多的地质现象和地质目标评价的方法，因而逐渐形成了一门新兴边缘学科——“测井地质学”。

测井地质学是地质和测井两大学科相互交叉、渗透而派生和发展起来的新兴边缘学科。即是以地质学和岩石物理学的基本理论为指导，综合运用各种测井信息来解决地层学、沉积学、构造地质学、石油地质综合研究中的各种地质目标解释和评价的一门学科。为满足教学和科研的需要，有必要系统地介绍有关测井地质解释的基本理论、研究方法及技术。正式出版前，作为石油大学（北京）地质工程、地球物理的研究生及本科生的试用教材，连续印刷三次，并逐次请相关专家、教授审校，得到教师和学生们的的一致好评。本书是在讲义的基础进一步修改、加工编写而成。全书共分八章，包括测井地质导论，常规测井方法及其地质响应，成像测井方法及其地质响应，测井层序地层、沉积、构造、裂缝、烃源岩等的分析、解释方法和综合评价等。

在本书编写过程中，得到了著名测井学家欧阳健、谭廷栋两位教授的悉心指导和帮助，同时还得到石油大学管守锐教授、朱筱敏教授、研究生院培养办公室的大力支持和帮助，也要感谢李军、肖承文、祁兴中、李国平、吴继余等同志的协助。在此一并致谢。

由于编者水平有限，书中错误及不足之处，敬请各位读者批评指正。

编者

2000年9月于北京

责任编辑: 鲜于德清 王宇芬
封面设计: 施 云
责任校对: 王 颜

ISBN 7-5021-3192-2



9 787502 131920 >

ISBN 7-5021-3192-2/TE·2421

定价: 29.00 元



目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 测井地质学的内涵和外延.....	(1)
第二节 测井地质学的进展.....	(3)
第三节 测井信息影响因素.....	(5)
第二章 常规测井方法及其地质响应	(10)
第一节 岩性、孔隙度测井系列.....	(10)
第二节 电阻法测井系列.....	(39)
第三节 地层倾角测井.....	(52)
第三章 成像测井方法	(79)
第一节 成像测井系统.....	(79)
第二节 微电阻率扫描成像测井.....	(81)
第三节 井下声波电视.....	(90)
第四节 井周成像测井系列.....	(94)
第四章 测井层序地层分析	(112)
第一节 层序的概念及其测井特征.....	(112)
第二节 层序地层的界面特征及识别.....	(115)
第三节 测井层序地层分析方法.....	(116)
第四节 应用实例.....	(124)
第五章 测井沉积学研究	(128)
第一节 测井沉积学概念及解释模型.....	(128)
第二节 碎屑岩测井沉积微相建模与划分.....	(150)
第三节 碳酸盐岩测井沉积微相研究.....	(153)
第四节 测井沉积学解释计算机辅助系统.....	(158)
第六章 测井构造地质精细分析	(167)
第一节 测井结构研究的一般方法.....	(167)
第二节 褶皱构造倾角解释方法.....	(167)
第三节 断裂构造倾角测井解释方法.....	(171)
第四节 不整合面的地层倾角测井解释.....	(175)
第五节 利用井壁成像研究地质构造.....	(176)
第七章 裂缝储层的测井评价	(178)
第一节 概述.....	(178)
第二节 裂缝的测井响应.....	(179)
第三节 裂缝有效性的测井评价及参数计算.....	(186)
第四节 碳酸盐岩裂缝储层的综合评价.....	(192)
第五节 裂缝发育规律及现代地应力场研究.....	(196)

第八章 烃源岩与盖层的测井研究	(200)
第一节 烃源岩的定义及地质分类.....	(200)
第二节 烃源岩的测井分析方法.....	(203)
第三节 盖层的测井分析与评价.....	(214)
参考文献	(223)

第一章 绪 论

第一节 测井地质学的内涵和外延

一、测井地质学的涵义

测井地质学是以地质学和岩石物理学的基本理论为指导,综合运用各种测井信息,来解决地层学、构造地质学、沉积学、石油地质学以及油田地质学中各种地质问题的一门科学。

测井地质学是地质和测井两大学科相互交叉、渗透而派生和发展起来的新兴边缘学科,是 80 至 90 年代石油勘探事业和石油科技飞速发展应运而生的地球物理和地质学相结合的一个分支学科。地质学和地球物理测井学是两门自成体系相对独立的学科,都有着各自的基本理论和解决问题的方法。随着勘探难度的加大,石油勘探中提出的地质问题越来越复杂。因此,就必须通过地质、测井紧密结合,采取多学科综合研究即测井地质学来解决这些难题。测井地质学是石油勘探生产实践活动的产物,反过来它又能较好地解决石油勘探中的实际问题,从而促进生产实践活动的进一步发展。

二、测井地质学的研究内容

测井地质学将通过各类测井手段获取信息,经过计算机的加工和处理,来解决基础地质、石油地质和油田工程地质领域中的问题。所要解决的上述问题就是测井地质学所要研究的基本内容。

1. 测井地质学的基础地质研究

基础地质学中的首要任务是充分利用地质资料和测井信息并与地表资料、地震资料相配合进行地层层序划分和标定,建立区域性的统一的地层层序,确定沉积体系域,找出不同体系域的测井曲线响应,进行井间层序和沉积体系域的分析,这是区域地质综合研究的基础。

利用测井信息进行构造地质研究是测井地质学研究的又一重要内容。利用测井信息进行区域和局部构造以及断层研究,编制构造图是测井地质学最基本、最常规的研究内容。除此以外,还可以以构造地质学的基本理论为指导,充分利用测井信息进行构造裂缝的定量和定性研究,通过构造应力场的分析,确定其性质、产状、组系发育和分布规律、裂缝发育的控制因素、形成机制等,从而为油气勘探和油气田的合理开发提供依据。

测井沉积的研究是测井地质学研究的重要组成部分,近期获得了迅速发展。测井相分析是测井曲线岩性解释最有效的方法和手段。利用倾角测井资料进行沉积岩层理构造的研究,进而综合其他资料进行沉积相的标定、沉积微相分析和古水流方向的研究已取得了突破性的进展和良好的效果。利用测井信息进行欠压实泥岩的研究、沉积岩中粘土矿物研究,结合地质学确定粘土矿物的类型、丰度性质和组合,对钻井液配制、储层性质、油层保护都具有重要意义。利用测井信息研究沉积岩中微量元素的类型、性质和丰度是测井沉积学研究的新领域,它对古环境的确定具有重要意义,此外,利用测井信息进行成岩作用研究,划分成岩

段, 确定成岩环境, 也是测井地质学所应完成的任务之一。

2. 测井地质学的石油地质研究

利用测井信息解释油、气、水层, 确定含油岩系的孔隙度、含油饱和度是当今各油田采用的解决石油地质问题的常规手段。除此以外, 利用测井信息研究生油层、盖层及油气的生、储、盖组合也是测井地质学必不可少的组成部分。不同类型、不同丰度的生油层, 不同特性的盖层, 不同的生、储、盖组合形式应当具有不同的测井响应。这一问题的研究和解决对于含油气盆地预测和评价将起着重要的作用。利用测井信息研究储量参数、地下流体性质、分布状况是测井地质学的实际问题之一。

3. 测井地质学的油田工程地质研究

在油气勘探和开发的生产实践中, 综合各种测井信息, 应用于地震解释设计、钻井设计、油井压裂、试油过程中的钻井液配制、套管的损伤和变形、油层保护等工程地质的研究, 是测井地质研究的又一新领域。综合测井信息还可以应用于大地应力场的研究、岩石力学性质及可钻性的研究, 三次采油中剩余油饱和度及剩余油分布的研究, 这些都属于测井地质学所要研究的对象和内容。

三、测井地质学的研究方法

测井地质学的研究建立于地质学和岩石物理学理论基础之上, 以地质信息和测井信息的提取为依据, 通过地质信息和测井信息间的正演和反演过程, 建立测井解释地质模型, 以期解决地质问题。

1. 测井地质学研究的逻辑步骤

1) 钻井岩心和野外露头的观察

露头和岩心观察是地质学及测井地质学研究的基础, 通过露头和岩心的观察可获取诸如地层、岩性、岩石物质成分、结构、构造、沉积组合、生、储、盖条件等大量的地质信息和第一性资料。以此为基础, 可以建立起地层层序、沉积相和生、储、盖组合等概念模型。

2) 地质刻度测井

应用野外露头, 钻井岩心和实验室分析化验获取的地质信息和参数, 进行各种测井曲线的标定和刻度, 通过建立正演和反演模型, 建立正确可靠的岩电关系, 为提高测井地质的解释精度奠定坚实的基础。

3) 测井资料的处理

根据各种地质基础资料和测井系列, 进行资料的可行性评价及数据处理, 并对测井曲线进行校正和资料处理, 是测井地质学研究的重要环节。

4) 测井资料的地质解释

在岩石物理研究的基础上, 以大量的地质资料所建立的地质模型和测井资料处理结果为依据, 完成测井地质解释工作。

2. 测井地质学研究的定量及定性分析方法

地球物理测井资料实质上是井剖面岩层各种物理性质(如导电性、放射性、电化学特性等)的二维或三维分析, 是一组数据。这些数据仅仅间接地反映了岩石地质特性(如, 岩石的成分和结构), 而岩石性质的描述信息大量的的是不便于数量化的知识信息。为了完成由数据信息到知识信息的转换, 测井地质学研究中使用了近年来发展起来的许多数学分析方法, 主要有:

(1) 模糊统计方法;

- (2) 小波分析方法;
- (3) 分形几何方法;
- (4) 人工神经网络算法;
- (5) 混沌及随机行走分析方法。

第二节 测井地质学的进展

一、测井地质学的进展

目前,测井资料已经在岩石学、沉积学、地层学、构造地质学、油气储层评价、生油岩及油气盖层的评价等地质学领域中得到广泛应用。其中岩性分析、储层参数分析、断层分析都已经较为成熟并且开发出一些较实用的计算机辅助解释程序,如斯伦贝谢公司的 LITHO 及 FACILOG 程序,阿特拉斯公司的 STRATADIP 程序,石油大学(北京)的 CALIS 程序等。本世纪 80 年代以来,随着测井技术的发展和计算机的进步,国外的测井地质学研究在以下一些方面取得了较明显的进展。

1. 识别岩石成分和结构

继自然伽马测井和自然伽马能谱测井之后,斯伦贝谢公司在 80 年代中后期推出了以探测岩石矿物成分为主要目标的地球化学测井方法,该方法基本原理是利用加速器产生的中子源轰击地层的粒子,使之产生活化作用,测量并分析元素活化生成的次生伽马线能谱,可以计算出 K、Th、U、Al、Ca、Si、Fe、S、Ti、Cd、Cl、H 等 12 种元素的含量,并用其合成六种矿物成分,据此识别岩石的成分。这种方法识别和划分火成岩见到较好的结果。

岩石的结构指的是岩石组成分的几何特征,如颗粒大小、形状、分选和排列等。传统上依靠自然电位和自然伽马的测井曲线特征来研究和估计碎屑岩的岩石颗粒大小,借助于测井资料计算的孔隙度来研究岩石颗粒的分选性,利用岩石电导率的各向异性研究岩石颗粒的排列方式,近年来成像测井的发展使地质家有可能应用井壁测井成像图来估算结构复杂的砾岩、碳酸盐岩的结构。

2. 相和相序的研究

相反映了沉积物沉积时的物理、化学、生物条件,相序反映沉积物沉积的时间和空间的变化,自 80 年代以来,不少人沿用了 O.Serra 提出的电相和电序列概念来研究沉积相和相序。其基本方法是通过测井曲线值和形状变化进行岩性分析、电相分析和电序列(曲线变化趋势)分析。使用的数学方法主要是数理统计、时间序列分析、谱分析、分形几何、马尔可夫过程等。分析的准确性主要取决于用岩心、露头、地震反射波刻度和约束测井资料的精度。

3. 成岩作用研究

沉积岩是由沉积物被埋藏以后经过一系列物理的、化学的、生物的作用即所谓石化作用而生成的,这个过程称为成岩作用,主要的成岩作用有压实、胶结、重结晶、交代、水化等。成岩作用使沉积物在粒度、形状、表面结构、取向、矿物成分、孔隙度、渗透率诸方面发生变化,而这些变化在常规测井及成像测井资料上都能得到响应。

4. 层序地层学研究

测井资料直接响应的是岩性变化,而层序地层学研究的是沉积地层的时间格架,近年来把测井资料通过对准层序的响应研究由岩性格架转变时间地层格架方面有了很大的进步。其核心内容是层序界面的确定和旋回研究。通过这些研究将层理研究和层序研究结合了起来。

并有可能发展成测井层序地层学。

5. 生油岩的测井分析

在测井用于储层评价时主要研究对象是砂岩，而在生油岩评价中测井解释的主要对象是泥岩。实践证明富含有机质的泥岩的电阻率比不含有有机质的泥岩的电阻率高数倍。通过对泥质岩石电导率、自然伽马能谱分析、声波纵横波速度差异的研究，测井可以有效地识别生油岩。

6. 储层预测及油气区域研究

通过测井曲线的标准化刻度和井间对比，可以在油气区块上制作出各种各样的地球物理相态等值图，如自然伽马、电阻增大率、胶结指数、测井孔隙度、渗透率、泥质含量等在一个储层的区域分布图，这种图与含油饱和度、沉积相等有极为密切的关系，依靠这些图的研究可以得出油气储层在区块上的时空展布，为科学布井和开采提供了依据。在我国国内，经过“七五”计划油藏描述科技攻关及“八五”计划储层预测攻关，测井地质学研究取得了显著成效，并广泛得到应用，诸如：油藏中饱和度分布规律的测井研究，测井预测油/水界面，测井精细构造解释，包括高陡构造、逆冲断层、复杂小断块、测井沉积微相、古水流分析、裂缝性地层的裂缝分布规律研究，地层压力剖面解释、低电阻层机理与地质研究，现代地应力测井分析，地层压力剖面解释和预测等。此外，还有测井对泥岩生烃能力评价、测井层序地层学、垂直地震测井解释等，在测井与地震资料结合解释方面也取得了很多成果，测井约束条件下的地震反演，人工合成地震剖面已经在油藏描述中得到了广泛的应用。我国近年来开发出了一些已经得到广泛应用的测井、地质、地震联合解释软件平台，比较好的如 GRISTATION、NEWS 等。

二、测井地质学研究存在的问题及探索方向

1. 当前测井地质学研究主要存在的问题

1) 解的不确定性

利用测井技术在井下检测到的岩石物理性质如导电性、放射性等仅仅是间接包含了岩石的地质描述信息，而不是直接得出地质知识信息。例如测量的地质对象由钻井取心观察是“灰色含泥细砂岩”。这个结论有四个信息需要量化约定才可能由测井数据集判定。即颜色、泥质成分及含量、砂粒的矿物成分（石英或长石）、砂粒的粒径。其中尤其是颜色，直到目前也无法用测井曲线解释清楚。实际上，人们往往要求测井数据集合去直接解一个地质描述目标，也就是说在测井与地质两个集合之间寻找对应关系。由于测井数据集是确定的（而不是随机的）、全部可量化的（而不是描述的）、维数是有限的（即仅有几种测井方法），因此测井数据集与地质描述结合之间就不是一一对应的，存在着不确定的解。

2) 解的区域性

由于沉积体与沉积环境密切相关，因此地质学对沉积体的描述大多是地区性的。而测井方法是固定的，同样是电阻率曲线对不同井、不同层位、不同地区，即使是同一类岩石也不会具有相同的数量。这就是为什么用同一种测井方法，如果不修改控制参数，在研究地质问题时在不同的地区会得到不同的结论。

3) 负载能力有限性

地球物理测井探测的是地层的电性、声学特性和核物理特性，加上探测研究环境和条件的影 响，不同的地质对象的响应差异并不显著，例如石英、白云石、方解石三种沉积岩主要矿物的声波时差（纵波）相对差值仅为 10% 左右，而测井仪器的误差为 5%，井径和钻井液变化的影响可以达到 50% 以上。所以利用测井识别地质现象的能力是很有限的，只有在数

学约束、物理约束、地区约束条件都能满足的条件下才可以得出满意的解。不能什么问题都企望测井去解决。

鉴于以上几点,我们不妨把测井地质学成果定位在辅助信息、辅助工具这个层次。即辅助地质家在由数据信息到知识和智慧(即决策)信息的生成过程中少走弯路,节省投入,达到事半功倍的境界。

2. 测井地质学当前主要探索方向

(1) 更新用测井资料确定岩性、岩相、沉积环境研究的概念,将测井信息作为单项指标量提高到模型化的高度(即由数量模型提高到概念模型),建立典型模式。

(2) 深入研究测井曲线的旋回特性,建立测井层序地层学分析体系,并以层序地层、旋回地层、地层模拟为基础综合测井和地震勘探资料研究使地震高分辨率上升到测井的量级,使测井在区域研究上有更大的用武之地。

(3) 加深低孔低渗油气储层有效孔隙度、渗透率的测井计算方法研究,束缚水饱和度计算方法研究,在油藏产能评价方面开辟新的方向。

(4) 将测井资料进一步有效地应用到地应力计算及次生孔隙评价、地层敏感性分析和油层保护等工程方面。

第三节 测井信息影响因素

测井信息是用不同的测井仪器按不同的方法在井下采集的。测井信息主要受岩石物理性质、井眼环境、测量方式及仪器结构、操作者的处理方式(校正及输入参数)的影响。

一、测井探测的岩石物理性质

1. 电性

(1) 岩石的电阻率($\Omega \cdot m$)。

(2) 岩石的电导率(s/m)。

(3) 介电常数(F/m 或相对介电常数)。

(4) 自然电位(mV)。

(5) 激发极化电位(mV)。

(6) 阳离子交换能力(阳离子交换容量 QV), CEC , 是岩石中粒土矿物及含量的一种测度。

2. 声学特性

(1) 声波传播时间($\mu s/m$)(岩石的声波传播速度)。

(2) 声波幅度衰减(衰减系数), 岩石声波吸收特性。

3. 核物理性质

(1) 自然伽马射线强度(每秒计数率或 API 刻度单位), 岩石含放射性矿物数量。

(2) 自然伽马射线能量谱分析(eV 或 MeV), 岩石含放射性同位素的类别。

(3) 电子密度及体积密度(g/cm^3), 岩石的伽马射线散射能力。

(4) 光电吸收指数($b^{\bullet}/e$), 岩石矿物对软伽马射线吸收特性。

(5) 体积光电吸收指数(b/cm^3), 岩石各种矿物对软伽马射线综合吸收特性。服从物理平衡方程。

① $1 b = 10^{-28} m^2$ 。

- (6) 含氢指数及中子孔隙度 (%), 岩石的中子衰减特性。
 (7) 热中子俘获截面 (b), 岩石的热中子衰减特性。
 (8) 热中子衰减时间 (μs), 岩石的热中子寿命特性。
 (9) 次生伽马射线谱 (MeV), 岩石各种矿物及元素在中子场中的活化特性。

4. 核磁共振特性

- (1) 横向弛豫时间 T_2 (自旋-自旋弛豫)。
 (2) 纵向弛豫时间 T_1 (自旋晶格弛豫时间)。
 (3) 扩散系数 D 。

二、测井的测量方法

主要的裸眼井测井方法如表 1-1 所示。

表 1-1 主要的裸眼井测井方法

类 别	方 法	测量的物理量	方法代号
利用自然现象, 无源	自然电位	电位差	SP
	自然伽马放射性	总计数率	GR
		谱测量率 U、Th、K	NGS
	井径	井眼直径	CAL
	井温	井内钻浆湿度	T
利用各种场源激发的信息, 包括源、探测器	井斜	井轴倾角及方位	DEV
	双侧向	电阻率 R	LLS, LLD
	微侧向		MLL
	八侧面		LL8
	微球形聚焦		MSFL
	双感应	电导率 C	ILM, ILD
	电磁波传播	ϵ 介电常数传播时间	EPT, tPL
	双频介电	介电常数 200M、47M	
	中子测井 (补偿)	含氢指数	CNL
	中子寿命测井	中子俘获截面 Σ , 衰减时间	TDT
	碳氧比测井	次生伽马能谱	C10
	岩性密度	光电吸收截面 EP_e	LDT
	补偿密度	电密度 ρ_b	FDC, DC
	核磁共振	质子自旋衰减时间	CMR, MRIR
	补偿声波	声波传播时间 声波衰减幅度 声波波列 Δt	BHC, AC
	长源距声波		LSS
	阵列声波		

续表

类 别	方 法	测量的物理量	方法代号
成像测井	微电成像	井壁介质导电性	FMI, EMI, STAR
	井下声波电视	声波反射幅度及时间	USI, CBIL, CAST
	阵列感应	电导率	AIT
	方位电阻率	电阻率	ARI
	偶极（多极声波）	声波（挠曲波）传播时间	DSI
	地层倾角		HDT, SHDT

三、测井信息受环境的影响因素

1. 井眼影响

1) 井径变化及井眼垮塌

井眼越大，测井仪周围的钻井液体积越多，影响了测井读数。对于贴井壁仪器井径扩大及不规则直接造成极板贴不上井壁，读数变小。

2) 钻井液影响

井内钻井液的成分和矿化度，对电法测井和中子及密度测井都有较大影响，若含有大量重晶石，则严重影响岩性密度测井，使测井曲线无法应用。

2. 侵入影响

由于井内压力与地层压力不一致，造成了一部分钻井液滤液侵入地层，驱替一部分地层流体（油、气、地层水），这就是侵入，侵入使得井壁周围的地层电性、声学特性、核物理性都要发生重大变化，使测井读数不能反映。侵入使井壁周围的地层产生的冲洗带、侵入过渡带和原状地层三个区带，其导电性和流体饱和度发生变化如图 1-1 所示。显然必须通过侵入校正才能获得正确的地层岩石物理值。

3. 下井仪器的状态

1) 仪器直径及偏心

仪器直径与井眼直径必须匹配适当，否则不易顺利测井，且影响电缆的张力从而影响深度的准确性。仪器偏心对于井下声波电视影响最大，有时会得不到可用的图像。

2) 仪器的旋转和跳动

下井仪器的旋转和跳动对于声波测井，特别是地层倾角测井曲线影响最大，必须控制和校正。

4. 测井速度

各种测井仪器的测井速度（即每小时仪器自井底上提的长度）是不同时，特别是有“时间常数”要求的放射性仪器，对测井速度有着较严格的要求，速度太快将降低测量值。

四、测井曲线的纵向和径向分辨率

测井仪器的纵向分辨率指其区分地层厚度的能力，而径向分辨率指其对地层横向的探测能力。测井仪器的两个分辨率是互相制约的，一般来说，纵向分辨率越高的仪器径向探测深度越浅。分辨率主要受控于传感器的结构和几何尺寸。常规测井的分辨率如表 1-2 所示。

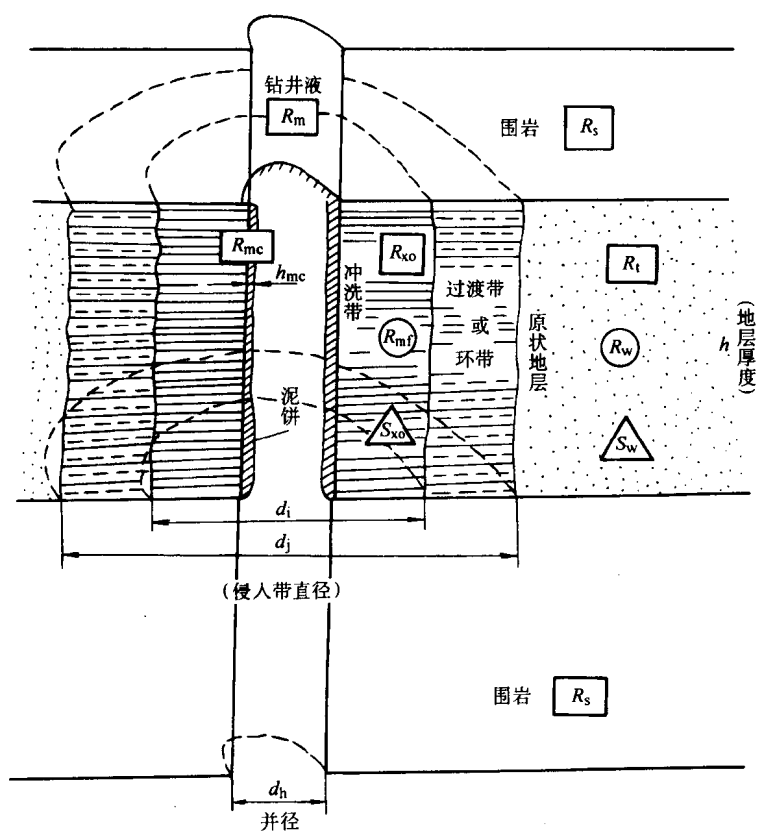


图 1-1 渗透层侵入的示意图

□—带的电阻率；○—带中水的电阻率；△—带中含水饱和度

表 1-2 斯伦贝谢公司各测井项目分辨率^①

测井仪器	测井曲线	固有垂向分辨率	采样率	有效垂向分辨率	常规 CSU 分辨率 (磁带上)	径向分辨率
EPT	衰减系数 传播时间	2 in ^②	2 in	4 in	4 in	2 in
		2 in	0.4 in	2 in	2 in	
		2 in	2 in	4 in	4 in	
		2 in	0.4 in	2 in	2 in	
微测井 MSFL	微梯度 微电位	6 in	2 in	6 in	6 in	6 in
		6 in	2 in	6 in	6 in	
		5 in	2 in	5 in	5 in	
HDT SHDT FMS	电导率	$\frac{1}{2}$ in	0.2 in	$\frac{1}{2}$ in	$\frac{1}{2}$ in	1~2 in
		$\frac{1}{2}$ in	0.1 in	$\frac{1}{2}$ in	$\frac{1}{2}$ in	
		$\frac{1}{4}$ in	0.1 in	$\frac{1}{4}$ in	$\frac{1}{4}$ in	

续表

测井仪器	测井曲线	固有垂向分辨率	采样率	有效垂向分辨率	常规 CSU 分辨率 (磁带上)	径向分辨率
声波测井仪 井眼补偿测井仪 阵列声波 STC	Δt	2 ft 3 ft 6 in	6 in 6 in 1.2 in	2 ft 3 ft 6 in	2 ft 3 ft 6 in	6~20 in
LDT α 处理 α 处理 CNL α 处理 α 处理	ρ_b	16 in	6 in	20 in	32 in	<6 in
	ρ_b	16 in	2 in	16 in	20 in	
	ρ_b	4 in	6 in	8 in	12 in	
	ρ_b	4 in	2 in	4 in	4 in	
	ρ_b	2 in	6 in	6 in	18 in	
	ρ_b	2 in	2 in	4 in	8 in	12 in
	ϕ_n	20 in	6 in	24 in	36 in	
	ϕ_n	20 in	2 in	24 in	28 in	
	ϕ_n	10 in	6 in	14 in	14 in	
	ϕ_n	10 in	2 in	10 in	10 in	
GR	GR	8~12 in	6 in	12~16 in	24~28 in	4~6 in
NGS	轴、钍、钾	8~12 in	6 in	12~16 in	24~28 in	
SP	SP	6~10 ft	6 in	6~10 in	6~10 in	

① 改编自 Allen 等人, "The Technical Review" V36, N2, P6, 1988;

② 1 in=0.0254 m。

第二章 常规测井方法及其地质响应

所谓常规测井方法主要是指目前在油气勘探开发中, 探井测井, 评价井测井、开发井测井工程中都要测量的测井方法, 即所谓“九条”曲线系列——自然伽马、自然电位、井径三岩性曲线, 浅、中、深三电阻率曲线, 声波、中子、密度三孔隙度曲线。在地层复杂的情况下再加上地层倾角、自然伽马能谱二项构成所谓的“十一条曲线”, 这也是测井地质学研究所依靠的基本测井信息。这些测井方法从 70 年代的数字测井系列、到 80 年代的数控测井系列, 直到 90 年代的成像测井系统 (如 5700 和 MAXIS-500) 都保留着, 也都是常测的项目。本章将简述它们的基本原理, 测量信息, 影响因素, 所能解释的地质现象, 重点不在于方法原理的数学推导, 而在于其地质响应。

第一节 岩性、孔隙度测井系列

一、自然电位测井

在电阻率测井的初期, 人们在钻井中就观测到了一种非人工产生的直流电位差, 且可以毫伏级的精度记录下来, 人们称之为自然电位。自然电位的测量很简单, 即把一个测量电极放在井下, 另一个放在地面, 可以连续地测量出一条自然电位曲线, 如果把曲线正极电位作为基准, 则曲线的负峰处一般都是具有渗透性的砂岩。因此自然电位曲线可以作为划分岩性, 判断储层性质的基本测井方法。

1. 自然电位产生的原因

1) 扩散电动势

在纯水砂岩的井壁上产生的扩散电动势, 是井壁的钻井液滤液与砂岩中地层水接触的结果。这些钻井液滤液是井内钻井液慢慢脱水产生的。钻井液滤液和地层水都主要含 NaCl, 假设钻井液滤液的浓度是 C_{mf} , 地层的水浓度是 C_w , 电阻率是 R_w , 一般是 $C_w > C_{mf}$, $R_w < R_{mf}$, 也就是说地层中的 Na^+ , Cl^- 离子都要由地层向钻井液滤液方向扩散, 由于 Cl^- 的迁移速度比 Na^+ 快, 于是在地层水内就富集正电荷, 钻井液滤液中富集负电荷, 形成了一个由于离子扩散而产生的电动势——扩散电动势, 实验证明, 纯水砂岩的扩散电动势等于:

$$E_{砂} = K_1 \lg \frac{a_w}{a_{mf}} \quad (mV) \quad (2-1)$$

式中 K_1 ——扩散电位系数, 与溶液的成分和温度有关;

a_w 和 a_{mf} ——分别表示地层水和钻井液滤液的电化学活度, 与含盐量和化学成分有关。

与纯水砂岩相邻的泥岩井壁上产生的扩散电动势, 是泥岩所含的地层水与井壁钻井液滤液相接触的产物。泥岩所含的地层水其成分和浓度一般与相邻砂岩石中的水是一样的。由于泥岩的孔隙喉道极小, 地层水都被束缚在泥岩的泥质颗粒表面。而泥质颗粒对 Cl^- 离子有选择性吸附的作用, Cl^- 离子都被束缚在泥质颗粒表面, 不能自由移动, 只有 Na^+ 可在地层水中移动。因此, 在泥岩井壁上只发生 Na^+ 离子的扩散。这时形成的电动势, 称为扩散吸附