

高等学校教学用书

测井原理 **与**

综合解释

洪有密 主编

石油大学出版社

高等学校教学用书

测井原理与综合解释

洪有密 主编

石油大学出版社

内 容 提 要

本书以测井地层评价为主线,将测井数据采集、处理和解释的各种方法有机地组织成一个整体;从应用的角度,系统地介绍这些方法的基本概念、基本理论和基本知识;介绍的方法,从自然电位到各种能谱测井,从阿尔奇公式到双水模型,从手工解释到数字处理,都尽可能全面和简要得当;由浅入深,由局部到整体,用油田实例和作业说明如何正确认识和应用测井资料和非测井资料,做出尽可能准确的地质或工程解释。全书共12章,每章有思考题和作业题。

本书可供矿场地球物理、石油地质、采油和油藏工程专业作为教材或教学参考书,也可供这些专业及其他有关专业的科技人员在职配培训或进修选用。

图书在版编目(CIP)数据

测井原理与综合解释/洪有密主编. —东营:石油大学出版社,1998(2002.11 重印)

ISBN 7-5636-0270-4

I. 测… II. 洪… III. 测井-高等学校-教材
IV. P631.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第091657号

测井原理与综合解释

洪有密 主编

出版者:石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://suncetr.hdpu.edu.cn/~upcpres>

电子信箱: upcpres@mail.hdpu.edu.cn

印刷者:石油大学印刷厂

发 行 者:石油大学出版社(电话 0546—8392563)

开 本: 787×1092 1/16 印张:23.5 字数:600千字

版 次:1993年3月第1版第1次印刷 2002年12月第1版第3次印刷

印 数:1701—3000册

定 价:28.00元

编 者 的 话

本书是根据中国石油天然气总公司 1991 年教材会议的决定编写出版的,可作为矿场地球物理专业必修课“测井原理与综合解释”的教材,讲课约 110 学时,另安排 4 次习题课,实验和教学实习另行安排。

本书是在《电法测井》(上册,张庚骥主编)、《放射性测井原理》(黄隆基)、《声波测井原理》(楚泽涵)和《测井资料综合解释与数字处理》(雍世和、洪有密)这几本教材的基础上,并参考兄弟院校的教材和国内外文献编写的。我国矿场地球物理专业创建 40 年来,开设“测井原理与综合解释”这样综合性大型必修课和编写相应的教材,是不断深化教学改革的一次新尝试。编者希望本课和本书有以下特点:

(1) 以测井地层评价为主线,将测井技术的各种测井方法和解释方法有机地组织成一个整体。在测井技术的数据采集、处理和解释日益综合化的形势下,这对于学生增强工程意识,了解和掌握测井技术的各个方面和相互间的联系将是有益的。

(2) 从应用的角度介绍测井技术中各种方法(从早期的到现代的)的基本原理、处理方法和解释方法。这些基本概念、基本理论和基本知识,是任何一个测井技术人员随时随地都需要的。本书是学生入门的向导,又不失参考作用,并可让学生有的放矢地选修专门课程或专门著作继续提高。

(3) 自始至终为学生认识和应用测井技术创造条件,由浅入深,由局部到整体,并且较早地进行综合认识和综合应用。这对于加强学生的基本工程训练,对于学生较早地开展课外专业技术学习、研究和实践,都将会有促进作用。

本书承蒙石油大学(华东)教授和应用地球物理博士生导师张庚骥、胜利油田付总工程师和国家级有突出贡献的测井技术专家曾文冲、石油大学(华东)副教授黄隆基在百忙中进行详细审阅,编者非常感谢他们提出的许多修改意见,并认真进行了修改。编者还要感谢青年教师范宜仁和焦翠华分别编写了第七章和第十一章,感谢石油大学出版社耿全喜对全书进行了认真严谨的编辑,感谢本书引用文献的作者和译者,感谢测井界许多同志对本人的支持和帮助。没有上述同志的指导和帮助,没有这些同志工作的基础,本人难成此书。

编者一向把自己看成是一个学生,本书也是学习的结果。书中一定有许多不当之处,恳请各位专家和读者给予指正,并期望有更好的矿场地球物理教材问世。

洪有密

一九九二、六、六

目 录

第一章 地层评价概论	(1)
第一节 地层评价的任务	(1)
第二节 地层评价测井技术	(10)
第三节 测井解释模型和响应方程	(17)
第二章 自然电位测井	(28)
第一节 井内的自然电动势	(28)
第二节 自然电位曲线形态分析	(33)
第三节 自然电位测井的应用	(36)
第三章 声波测井	(44)
第一节 井内声波的发射、传播和接收	(44)
第二节 声波速度测井	(52)
第三节 声波全波列测井	(62)
第四节 声波幅度测井	(71)
第四章 普通电阻率测井	(80)
第一节 普通电阻率测井的原理	(80)
第二节 梯度电极系和电位电极系测井	(83)
第三节 微电极测井	(94)
第四节 标准测井	(95)
第五章 侧向测井	(103)
第一节 七电极侧向测井	(103)
第二节 三电极侧向测井	(112)
第三节 球形聚焦和微球形聚焦测井	(120)
第四节 双侧向测井	(123)
第六章 感应测井	(128)
第一节 感应测井原理	(128)
第二节 感应测井探测特性	(131)
第三节 感应测井视电导率曲线及其应用	(137)
第四节 介电测井和电磁波传播测井	(146)
第七章 纯岩石地层评价方法	(154)
第一节 测井解释井段及储集层的划分	(154)
第二节 确定孔隙度和饱和度	(159)
第三节 评价储集层含油性的交会图	(165)
第四节 评价含油性的重叠图	(169)
第五节 确定束缚水饱和度和渗透率	(176)

第六节	综合判断油气、水层	(182)
第八章	自然伽马测井和自然伽马能谱测井	(195)
第一节	岩石的自然伽马放射性	(195)
第二节	伽马射线与物质的作用和探测	(199)
第三节	自然伽马测井	(204)
第四节	放射性同位素测井	(211)
第五节	自然伽马能谱测井	(215)
第九章	密度测井和岩性-密度测井	(222)
第一节	地层密度测井	(222)
第二节	岩性-密度测井	(229)
第三节	密度测井和岩性-密度测井的应用	(233)
第十章	中子测井	(241)
第一节	中子与地层的相互作用	(241)
第二节	中子孔隙度测井	(249)
第三节	中子寿命测井	(259)
第四节	次生伽马能谱测井	(268)
第十一章	测井资料数字处理基础	(276)
第一节	测井数字处理系统	(276)
第二节	测井数据用户磁带	(279)
第三节	用户磁带数据的显示和编辑	(284)
第四节	交会图技术	(288)
第五节	确定泥质含量的方法	(305)
第六节	复杂岩性地层评价方法	(308)
第七节	泥质砂岩地层评价方法	(316)
第八节	多参数油水层判别分析	(325)
第十二章	测井资料的综合应用	(332)
第一节	裸眼井地层评价测井	(332)
第二节	储集层动态分析	(334)
第三节	构造和沉积学研究	(341)
第四节	油藏描述	(348)
第五节	资源综合勘探	(353)
参考文献		(354)
附录一	书中使用的许用单位与非许用单位	(355)
附录二	复杂岩性分析程序 CRA	(356)
附录三	常用符号说明	(365)

第一章 地层评价概论

地球物理测井是应用地球物理学的一个分支,简称测井(well logging)。它是在勘探和开采石油、天然气、煤、金属矿等地下矿藏的过程中,利用各种仪器测量井下地层的各种物理参数和井眼的技术状况,以解决地质和工程问题的工程技术。它是应用物理学原理解决地质和工程问题的一种边缘性技术学科。

石油和天然气储藏在地下具有连通的孔隙、裂缝或孔洞的岩石中。这些具有连通空隙,既能储存油、气、水,又能让油、气、水在岩石空隙中流动的岩层,称为储集层。用测井资料划分井剖面的岩性和储集层,评价储集层的岩性(矿物成分和泥质含量)、储油物性(孔隙度和渗透率)、含油性(含油气饱和度和含水饱和度)、生产价值(预期产油、气、水的情况)和生产情况(实际产油、气、水的情况及生产过程中储集层的变化),称为地层评价(formation evaluation)。地层评价是测井技术最基本和最重要的应用,也是测井技术其它应用的基础。

世界上第一次测井是由法国人斯仑贝谢(Schlumberger)兄弟(康拉德和马塞尔)与道尔(Doll)一起,在1927年9月5日实现的。我国第一次测井是由中国科学院学部委员、著名地球物理学家翁文波先生,于1939年12月20日在四川巴县石油沟油矿1号井实现的。经过几十年的发展,现在测井技术已成了一个主要提供技术服务的现代化的高技术产业。航天技术要上天,而测井技术要入地(数百米、数千米、上千米),两者在技术上的难度和发展水平都值得从事这些事业的人们引以为骄傲。

本书将以地层评价为中心,系统地介绍各种单项测井方法的基本原理、单项测井资料的地质解释、多种测井资料的综合地质解释以及用计算机处理和解释测井数据的基本原理和基本方法。本书将从地质、物理、数学及仪器设计的基本意义上认识测井技术的各种基本问题,不打算详细讨论其中某些复杂的数学-物理原理和计算,请对此有兴趣的同志看有关专门著作或选修有关课程。

本章将介绍测井技术和地层评价方面的一些基本问题,是学习和应用测井技术的基础。

第一节 地层评价的任务

地层评价的中心任务是储集层评价,相关的任务还有划分井剖面地层的年代和岩性组合,评价一口井的完井质量,描述和评价一个油气藏。油气藏是整体,单井储集层是局部,对油气藏的正确认识可以指导单井储集层评价,单井储集层评价搞好了又可加深对油气藏的认识。

一、划分单井地质剖面

图1-1是我国玉门油田老君庙背斜油藏L油层顶面构造图、L和M油层横剖面图及K、L、M油层的综合柱状图。该综合柱状图表示出上第三系中新统白杨河组的间泉子段、石油沟段和干油泉段。其中干油泉段分为K₀层(该图未画出)和K油层组,总厚度100~140m,油层岩性为浅红色中粒石英砂岩及粉砂岩;石油沟段分为B层和C层,厚度44~105m,为暗棕红

色泥岩夹天青色砂岩和石膏,是 K 油藏和 L 油藏之间的隔层;间泉子段分为 L 油层组、L-M 夹层和 M 油层组,总厚 260~280m,L 层岩性为桔红色中粒、细粒石英砂岩及粉砂岩,夹泥岩薄层,M 层为桔红色块状砂岩及砾状砂岩,L-M 夹层为粉红色粉砂质泥岩层。该图两侧的测井曲线的变化,与上述地层单位的划分有对应关系,即测井曲线的变化与地层特性有关。

由图 1-1 的综合柱状图可以看出,划分单井地质剖面是对一口井粗略的评价,包括完成以下任务:

(1) 划分全井地层的年代和主要地层单位的界线 如本例为上第三系中新统,地层单位是白杨河组的间泉子段、石油沟段和干油泉段。

(2) 找出本井的含油层系 含油层系是同一地质时代的一系列油气层及其围岩的总称,一般对应于地层单位的组,如本例白杨河组含油层系。油气资源丰富的地区,可以有多套含油层系,如胜利油田。

(3) 找出属于同一油气藏的油层组 油层组是含油层系中沉积环境相似、岩性和物性基本相同、具有同一水动力系统的油层组合。各油层组间有厚度较大的非渗透性的稳定隔层分开,每个油层组可作为油气开发的基本单元。如本例的 K、L、M 油层组。油层组也是储集层定量评价的基本单元,常称为解释井段。

(4) 在油层组内分出不同的砂岩组 每个砂岩组是一个砂岩集中发育段,砂岩组之内有一定连通性,而不同砂岩组之间常有较稳定的隔层。划分砂岩组有助于井间小层对比。

(5) 必要时,为了地质工作需要,可画出某一井段的岩性解释剖面,如本例的岩性柱状图。其中单一的储集层是地层评价的基本对象。

为了完成上述任务,应当熟悉本地区有关地质情况(以图 1-1 三个图为代表),还应知道本井的井位及其钻井地质情况。有关这方面的详细介绍,请参看地质教材。

二、单井储集层评价

储集层是具有连通的孔隙、裂缝或孔洞,能储存油、气、水,又能让油、气、水在这些连通空隙中流动的岩层。在单井中划分和评价那些可能有工业价值的储集层,是测井地层评价的中心任务。单井储集层评价的任务有以下几项。

1. 划分储集层

划分储集层是指确定单一储集层在井内的位置、其顶界面和底界面的深度和厚度。

储集层的基本特性是有一定的孔隙性和渗透性,能储集流体,又能让流体在自然条件下流动。地质上常常把储集层按岩性分类,有碎屑岩储集层、碳酸盐岩储集层和其它岩类储集层。但从测井地层评价的角度来看,应突出强调不同空隙类型对岩石形成储集性质的决定性作用和它们对测井地层评价带来的差别。这样我们强调把储集层分成两大类:孔隙性储集层和裂缝性储集层。

(1) 孔隙性储集层 粒间孔隙对岩石储集性质起决定作用的储集层。岩性以碎屑岩为主,砂岩储集层为代表,其他还有鲕状灰岩、生物灰岩、生物碎屑灰岩、内碎屑灰岩及细粒以上白云岩等碳酸盐岩石。孔隙以粒间孔隙为主,也可有溶孔、印模孔、粒内孔隙、生物骨架孔隙、微裂缝等,是成岩作用或后生变化形成的,一般与构造作用无关。孔隙分布均匀,横向变化较小。孔隙度较高,低者 10% 左右,高者 30% 左右,一般 15~25%。

孔隙性储集层,尤其是碎屑岩剖面内的孔隙性储集层,是测井地层评价应用最好的一类储集层。因为碎屑岩剖面内的孔隙性储集层有以下特点:

① 储集层之间有泥岩隔层,而泥岩的性质较稳定,使夹在它们之间的储集层较易识别,特别使自然电位测井成了识别储集层最简便易行的方法;

② 储集层孔隙度较高,使储集层的定性评价和定量评价都有良好的效果;

③ 储集层的岩性、物性、含油性较均匀,横向变化小,使各种探测特性不同的测井方法具有良好的重复性,容易实现比较理想的组合,评价效果较好。

(2) 裂缝性储集层 因裂缝较发育而使岩石具有储集性质的储集层。岩性以碳酸盐岩为主,还包括火成岩、硅质岩、岩浆岩、变质岩,甚至还有泥岩裂缝储集层。除了泥岩裂缝储集层,这些裂缝性岩石一般比较纯(不含泥质或泥质含量很低),性脆,基质孔隙度很低(一般小于5%);因构造作用、成岩作用、水流作用而生成构造缝、层间缝、成岩缝、压溶缝(缝合线)及溶蚀裂缝和孔洞,才使这些岩石具有储集性质。因此,其空隙结构复杂,空隙类型多,分布不均匀,横向变化较大。其中以构造缝对岩石的储集性质影响最大,尤其是近于铅直的构造缝。构造缝发育程度与局部构造的形成有关,一般在构造高点、长轴、断裂带附近较发育。

裂缝发育和孔隙度较高(10%左右)的裂缝性储集层,测井地层评价的效果同孔隙性储集层相同。而裂缝发育程度有限、孔隙度很低(5~7%)的裂缝性储集层,对测井技术的要求很高,应用效果却比较差。低孔隙度裂缝性储集层的地层评价,有以下特点值得注意:

① 储集层之间是比较纯的低孔隙度致密岩石,或者说储集层是这些纯岩石中孔隙度稍高的部分,即裂缝性储集层具有岩性纯(不含泥质或泥质含量低)、孔隙度稍高、有缝洞孔隙等地质特征,这是识别这类储集层的地质依据;

② 储集层上下方的致密围岩使井内自然电流不能在储集层界面附近形成回路,因而不能用自然电位划分储集层,而要根据前述地质特征在测井上的显示识别储集层;

③ 识别裂缝发育程度是这类储集层评价的关键,因而除了常规测井方法,还发展了一些专门识别裂缝的技术,如裂缝识别测井等;

④ 由于储集层岩性复杂、孔隙度低和孔隙结构多变,使测井地层评价很困难,效果较差,因而除了要加强测井的质量控制和解释方法的研究,还应加强地质研究和对钻井地质资料的分析。

2. 岩性评价

储集层的岩性评价是指确定储集层岩石所属的岩石类别,计算岩石主要矿物成分的含量和泥质含量,甚至确定泥质在岩石中分布的形式和粘土矿物的成分。

(1) 岩石类别 地质上把储集层岩石分成三大类:碎屑岩,碳酸盐岩,其它岩石。测井地层评价按岩石的主要矿物成分确定岩石类别,如砂岩,石灰岩,白云岩,硬石膏,石膏,盐岩,花岗岩、灰质砂岩、灰质白云岩等。

(2) 泥质含量和矿物含量 泥质含量是岩石中颗粒很细的细粉砂(小于0.1mm)和湿粘土的体积占岩石体积的百分数,用符号 V_{sh} 表示。文献中还常用粘土含量一词,它是岩石中湿粘土的体积占岩石体积的百分数,用符号 V_{clay} 表示。其实,如果在计算中不把泥质区分为细粉砂和湿粘土,这两个名词是同义词,此时应避免采用粘土含量一词。

岩石中除了泥质以外的其它造岩矿物构成的岩石固体部分,我们称为岩石骨架(rock matrix),这是测井的专用术语。所谓确定岩石矿物成分及其含量,就是确定岩石骨架的矿物成分及其体积占岩石体积的百分数。由于岩石的矿物成分较复杂,而测井计算的能力有限,故一般只考虑一、二种矿物成分,最多能考虑四种矿物成分,其它忽略不计。另外,测井只注重矿物的化学成分,按化学成分命名矿物,如 SiO_2 为石英, $CaCO_3$ 为方解石,等等。

(3) 泥质分布形式和粘土矿物成分 泥质分布形式是指泥质在岩石中分布的状态,有分散泥质,是分布在粒间孔隙表面的泥质;层状泥质,是呈条带状分布的泥质;结构泥质,是呈颗粒状分布的泥质。确定泥质分布形式,就是分别计算其含量,但因计算方法不太成熟,一般很少用。

岩石中常见的粘土矿物有高岭石、伊利石、蒙脱石和绿泥石。如果有自然伽马能谱测井等新方法,就可确定粘土矿物成分及其含量。

3. 储油物性评价

储集层岩石储集流体的能力称为孔隙性,而它在一定压差下允许流体渗透的能力称为渗透性,两者合称储油物性。根据测井资料可定性判断地层的孔隙性和渗透性,也可计算反映地层孔隙性和渗透性的有关参数。

(1) 总孔隙度 总孔隙度是岩石全部孔隙体积占岩石体积的百分数,用符号 φ 表示。

(2) 有效孔隙度 有效孔隙度是岩石有效孔隙体积占岩石体积的百分数,用符号 φ_e 表示。

岩石孔隙按其大小分为超毛细管孔隙(孔隙直径 0.5mm 以上,裂缝宽度 0.25mm 以上)、毛细管孔隙(孔隙直径 0.5~0.0002mm,裂缝宽度 0.25~0.0001mm)和微毛细管孔隙(孔隙直径小于 0.0001mm,裂缝宽度小于 0.0001mm)。疏松砂层的孔隙大多为超毛细管孔隙,一般砂岩为毛细管孔隙,而泥岩为微毛细管孔隙。有效孔隙是互相连通的超毛细管孔隙和毛细管孔隙,它们不但能储集流体,而且能让流体在岩石孔隙间流动。

测井技术难以区分孔隙大小,但能区分泥岩和不含泥质或含泥质很少的纯岩石,也能计算岩石的泥质含量。因此,在测井地层评价中认为:泥岩和其它岩石所含泥质的孔隙是微毛细管孔隙,不是有效孔隙;计算的纯岩石孔隙度为有效孔隙度,泥质岩石的包含泥质孔隙的孔隙度为总孔隙度,泥质岩石的不包含泥质孔隙的孔隙度为有效孔隙度,即 $\varphi_e = \varphi - V_{sh}\varphi_{sh}$, φ_{sh} 为泥质孔隙度, V_{sh} 为泥质含量。

(3) 缝洞孔隙度 缝洞孔隙度是有效缝洞体积占岩石体积的百分数,是岩石有效孔隙度的一部分,用符号 φ_2 表示。它是表征裂缝性储集层储油物性的重要参数。因为缝洞是岩石次生变化形成的,文献上也常称为次生孔隙度或次生孔隙度指数。但次生孔隙并不仅限于缝洞孔隙,而测井计算的缝洞孔隙度是反映规模较大的缝洞孔隙,故称为缝洞孔隙度更好。

(4) 绝对渗透率 绝对渗透率是岩石孔隙中只有一种流体时测量的渗透率,用符号 k 表示,因为常用空气测量,也常称空气渗透率。它是岩石本身的孔隙特性决定的岩石渗透能力,与流体种类和性质无关。测井通常只计算绝对渗透率。

(5) 有效渗透率 当岩石孔隙中有两种以上流体存在时,对其中一种流体测量的渗透率称为有效渗透率或相渗透率。它表示岩石孔隙中有多种流体时,让某一种流体流动的能力。它不但与岩石孔隙特性有关,而且与流体相对含量和流体性质有关(图 1-2)。有效渗透率之和总是小于绝对渗透率。符号 k_o 、 k_g 、 k_w 分别表示油、天然气和水的有效渗透率。

绝对渗透率和有效渗透率的单位是 μm^2 ,但过去常用达西^①。当粘度为 1 厘泊(cP)的流体,在一个大气压(atm)的压差下,通过截面积为 1 平方厘米(cm^2)、长度为 1 厘米(cm)的岩石,流量为 1 立方厘米每秒(cm^3/s)时的渗透率为 1 达西(D)。这单位太大,常用它的千分之一,称为毫达西,记为 mD。

(6) 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,数值在 0~1 的范围

① 非法定计量单位, $1\text{D}=0.987\mu\text{m}^2$

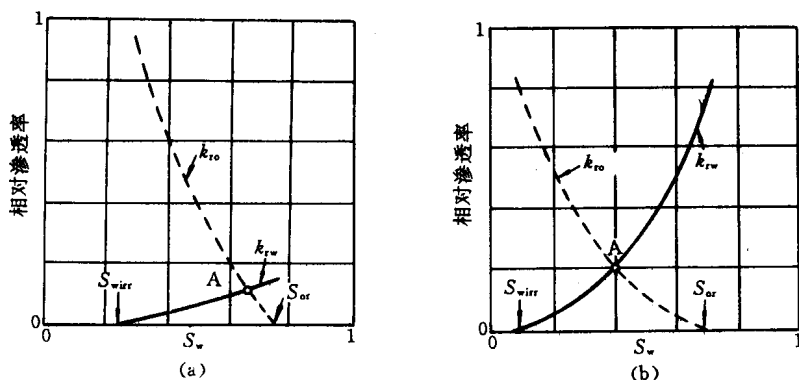


图 1-2 相对渗透率与含水饱和度的关系

(a) 亲水储集层; (b) 亲油储集层

内。符号 k_{ro} 、 k_{rg} 、 k_{rw} 分别表示油、天然气和水的相对渗透率。

4. 含油性评价

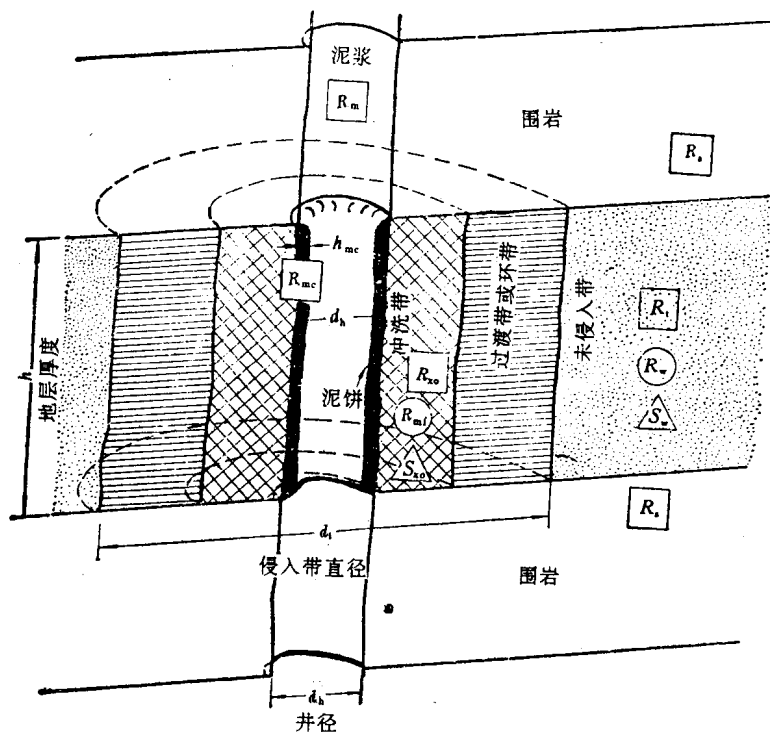
储集层的含油性是指岩石孔隙中是否含油气以及含油气的多少。地质上对岩心含油级别的描述分为饱含油、含油、微含油、油斑和油迹,其含油性依次降低。我们通过计算饱和度来评价储集层的含油性。

(1) 含水饱和度 岩石含水体积占其有效孔隙体积的百分数,称为含水饱和度,用 S_w 表示。岩石孔隙总含有地层水,其中被吸附在孔隙表面而不能流动的地层水,称为束缚水;而离孔隙表面较远,在一定压差下可以流动的地层水,称为可动水或自由水。相应地,有束缚水饱和度 S_{wirr} 和可动水饱和度 S_{wm} , 并且 $S_w = S_{wirr} + S_{wm}$ 。

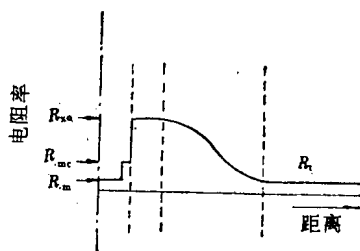
(2) 含油气饱和度 岩石含油气体积占其有效孔隙体积的百分数,称为含油气饱和度,用 S_h 表示,且 $S_w + S_h = 1$ 。如果明确知道只含油,用 S_o 表示含油饱和度, $S_w + S_o = 1$;如果明确知道只含气,用 S_g 表示含气饱和度, $S_g + S_w = 1$ 。当含水饱和度很高,即含油饱和度很低时,油的有效渗透率接近于 0,这部分油称为残余油,其饱和度为残余油饱和度,用 S_{or} 表示(图 1-2)。

(3) 储集层侵入特性 钻井的泥浆柱压力略大于地层压力,其压力差驱使泥浆滤液向储集层孔隙渗透,驱替出一部分原来的流体。在不断渗透的过程中,泥浆中的固体颗粒逐渐在储集层井壁沉淀下来形成泥饼。因泥饼是非渗透的,当泥饼形成时,泥浆滤液的渗透也就停止了。泥饼形成前以径向渗透为主,泥饼形成后,油气水和泥浆滤液产生重力分异,使纵向渗透显著表现出来。这个过程使井壁附近的储集层形成几个环带(图 1-3):泥饼,厚度 0.5~2.5cm,全是泥质颗粒的沉淀物;冲洗带,厚度约 10~50cm,是储集层在井壁附近受到强烈冲洗的部分,其孔隙以泥浆滤液为主,其它为残余水或残余油气,其含水饱和度称为冲洗带含水饱和度,用 S_{xo} 表示,其电阻率称为冲洗带电阻率,用 R_{xo} 表示;过渡带,是储集层受泥浆侵入影响由强到弱的过渡部分,其厚度不定,与钻井条件和储集层性质有关;未侵入带或原状地层,是储集层未受侵入影响部分,其含水饱和度为 S_w ,其电阻率为 R_i 。

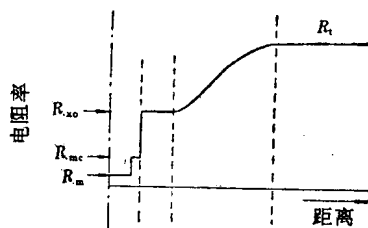
储集层受泥浆侵入以后发生的变化,特别是冲洗带与原状地层的差别,称为储集层的侵入特性。图 1-3(a)示出储集层理想化的结构图,是测井地层评价研究的基本对象,搞测井的人随时都会想到这个图形;图 1-3(b)是高侵电阻率剖面,表示出从井轴开始径向电阻率的变化,其特点是冲洗带电阻率 R_{xo} 明显高于原状地层电阻率 R_i ;图 1-3(c)是低侵电阻率剖面,其特点是



(a)



(b)



(c)

图 1-3 储集层侵入特性示意图

(a)储集层示意图；(b)高侵电阻率剖面；(c)低侵电阻率剖面

R_{xo} 明显低于 R_i , 若 R_{xo} 与 R_i 相近, 称为侵入不明显。表 1-1 列举了淡水泥浆钻井时油气层与纯水层在侵入性质上的差别, 是含油性评价依据之一。

表 1-1 油气层与纯水层在侵入性质上的差别(淡水泥浆)

		油 气 层	纯 水 层
孔隙流体	冲洗带	含盐量较低的滤液, 残余地层水和油气	含盐量较低的滤液, 残余地层水
	未侵入带	油气为主, 少量含盐量较高的地层水	含盐量较高的地层水
含水饱和度	冲洗带	大于 50%, $S_{xo} > S_w$	100%
	未侵入带	一般小于 40%, $S_w = S_{wif}$	100%
电阻率		$R_{xo} \leq R_i$ 或 $R_{xo} > R_i$	$R_{xo} > R_i$
侵入性质		泥浆低侵、侵入不明显或泥浆高侵	泥浆高侵

泥浆滤液侵入储集层,既给测井地层评价带来许多问题,又给它创造了良好的条件,测井技术的发展总是离不开对这个问题的研究。

5. 产能评价

产能评价是在定性分析与定量计算的基础上,对储集层产出流体的种类和产量的高低做出综合性的解释结论。常用的主要解释结论有:

油层:产出有工业价值的原油,不产水或含水小于 10%;

气层:产出有工业价值的天然气,不产水或含水小于 10%;

油水同层:油水同出,含水 10~90%;

含油水层:产水大于 90%到见油花;

水层:完全产水,有时也把含水油层归入水层;

干层:不论产什么,因产量极低而被认为无生产能力。

由图 1-2 可以看出:油气层是含水饱和度接近于束缚水饱和度的储集层;水层是不含油或仅含残余油的储集层;油水同层介于两者之间;干层是孔隙性和渗透性很差的地层。这些是储集层产能评价最基本的出发点。

(1) 预期产能评价 预期产能评价是在储集层未向井内产出流体的情况下,用裸眼井或套管井的地层评价测井资料对储集层产能做出的评价。它只是预期储集层可能产出什么流体和产量高低,实际如何还要靠生产结果来检验。预期结果的准确性称为测井解释的符合率,现在一般在 80%以上。

(2) 实际产能评价 在储集层正在向井内产出流体的情况下,用生产测井资料对储集层产能做出的评价,是实际产能评价。它表示经过生产验证,对储集层做出的解释结论。

(3) 油气层有效厚度 在目前经济技术条件下,能够产出有工业价值油气的油气层实际厚度,称为油气层有效厚度。它是已经确认的一个油气层的总厚度扣除无生产价值的夹层(泥质夹层、致密夹层或物性和含油性很差的部分)以后剩下的厚度。油气层的有效孔隙度、含油气饱和度和有效厚度,是计算油气地质储量的重要参数。

三、油井技术评价

一口井从钻井开始到采出油气,要做许多技术工作,其中有些技术工作的质量或效果要靠测井资料来评价,而且这些资料常常同储集层评价也很有关系。

1. 裸眼井井身质量

裸眼井是由被顺序钻开的各种地层形成的井眼,其井身质量主要由井斜和井径确定。

(1) 井斜方位角和井斜角 某一段井身的井轴在水平面上的投影与正北方向的夹角(顺时针)称为井斜方位角,数值可为 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$;井轴与铅垂线的夹角称为井斜角,数值可为 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 。测井用井斜仪测量井斜方位角和井斜角。一般井斜角在 3° 以内,而定向钻井井斜方位角和井斜角则应符合设计要求,以便钻到在某一部位的地层。

(2) 井径 井径是井眼的直径。井径的大小除与钻头直径有关以外,还与地层的岩性和钻井用的泥浆有关。一般,胶结好的非渗透致密岩石,井径与钻头直径相同;渗透性好,又不易垮塌的岩石容易形成缩径(井径小于钻头直径),有些泥岩膨胀也可形成缩径;易垮塌的泥岩和缝洞发育的碳酸盐岩石,常形成扩径(井径大于钻头直径)。盐水泥浆有利于井身结构稳定,而淡水泥浆浸泡容易使井身变化。井径变化同固井作业和固井质量有关,可用来估算固井要用的水泥量,分析固井质量不好的原因。井径变化还可帮助划分岩性和储集层。

2. 固井质量

如前所述,同一井内可能有多个油气藏的储集层,同一油气藏内可能有气层、油层、水层等性质不同的储集层,它们之间有非渗透隔层。为了实现有选择的开发,必须把不同的油气藏和不同性质的储集层封隔开。采用的办法是在井内下入套管,在油气层井段内的套管与井壁之间注入水泥,水泥凝固后便把套管与地层胶结起来,并把不同油气藏和不同储集层封隔开。这一过程称为固井。然后用射孔器把需要开采的油气层打开(穿透套管、水泥环和部分井壁岩石),称为射孔完井法。图 1-4 是一段套管井的井身结构示意图,有相当一部分测井方法是在套管内进行的。

固井质量是指水泥环与套管之间(第一界面)和水泥环与地层之间(第二界面)胶结的好坏以及水泥环本身水泥丰满的程度。测井对固井质量评价一般分为胶结良好、胶结中等和胶结不好,后者为不合格。储集层与储集层间因固井质量不好而串通,称为窜槽。油气层与水层之间应特别避免窜槽。

3. 射孔质量

油井射孔是采用专门的井下射孔器完成的,是测井技术的服务项目之一。射孔质量首先是深度准确性,特别是不能射开水层;其次是射入深度、孔眼大小、射孔密度(每米孔数)和孔眼方位分布;再次是孔眼畅通程度。

4. 压裂和酸化效果

油层渗透率低,可以用水力压裂为主的各种办法来改善。水力压裂是向井内大排量地注入高压压裂液,使井底压力大幅度提高,油层被压裂,产生一条或多条大裂缝,并有支撑剂支撑裂缝。酸化是在低渗透碳酸盐岩石中注入盐酸,或在低渗透砂岩中注入土酸(盐酸与氢氟酸的混合酸),它们使碳酸盐、石英、硅酸盐矿物溶解,从而使缝、孔扩大,然后排出废液。将压裂或酸化前后的同类测井曲线进行比较,可评价压裂或酸化的效果。

5. 管材损伤

如油管 and 套管变形、腐蚀、穿孔,油管接头漏气,油管与套管之间安装的封隔器(便于分层开采或测试)发生漏失等,都影响开采效果,可用测井方法对这些损伤进行探测。

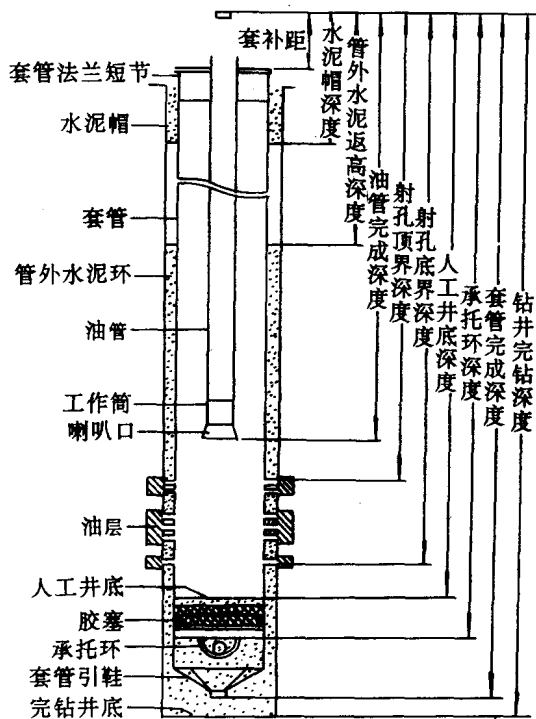


图 1-4 套管井井身结构

四、多井解释与油气藏研究

对开采油气来说,油气藏是整体,一个井眼只是一个很小的局部。因此,单井地层评价应着眼于油气藏,而单井评价的结果应当自然地描述油气藏发展,这就出现了多井解释或油气藏研究。长期以来,单井解释与多井解释一直是互为补充的,只是发展水平有所不同。按多井解释的难易程度,大体上可分为以下几项工作。

1. 地层对比

测井在地质上最初的应用,就是实现井间地层之间的对比,即找出不同井中属于同一地层的岩层。如果地层不连续,必然有断层或尖灭。对比结果用横剖面图表示。在多井对比的基础上,参考地质和钻井资料,还可绘出构造图。

2. 复查解释结论

单井地层评价结论是预测性的,要靠试油结果或生产测井来验证。因此,当积累了较多的测试资料以后,重新认识油、气、水层的特点,对原有的解释结论进行复查,并对过去没有划分的储集层进行研究,这是一项既简便、又非常有益的工作。

3. 二次解释和多次解释

如果对区域性的储集层评价有了新的认识,需要修改测井解释模型、某些响应方程或某些解释参数,那就需要选择有代表性的井进行研究,再对其它井进行二次解释或二次处理。这可以使计算的参数和解释的结论更符合实际。

4. 沉积相研究

沉积相是沉积环境及在该沉积环境中形成的沉积岩特征的综合。沉积岩特征包括岩性特征(颜色、成分、结构、构造、岩石类型及其组合)、古生物特征和地球化学特征。其中岩性特征对岩石的储油物性控制作用很大,从而影响油气开采措施和效果。因此,对油气藏研究逐渐从以地层对比为手段转到以沉积相研究为手段,试图将油气藏在纵向和横向上划分为不同的相带。在这一研究中,测井资料作为反映地下地质情况的主要资料,正日益发挥巨大的作用,其研究结果反过来又促进了测井资料的地质解释。

5. 油藏描述

在油气藏勘探开发的各个阶段,需要用地质、物探、测井和开发资料,反复地对油气藏进行综合研究和评价,并将结果以各种图形(等值线图、剖面图、栅状图等)显示出来,以描述油气藏的几何形态、参数空间分布及开采动态等。这一工作称为油气藏研究或油气藏描述。过去这一工作是人工完成的,现在已发展了油藏描述计算机方法和软件系统。在这一研究中,大体上可以认为地质资料和地质认识居于主导地位,测井资料是主要信息来源,地震资料起宏观描述作用。

如图 1-1,用等值线图表示出老君庙背斜油藏 L 油层顶面的构造,并画有 L 和 M 油层南北向的横剖面图。该图说明老君庙油田是一个北陡南缓的不对称背斜油藏。背斜南翼倾角 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$,北翼倾角 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$;背斜长轴方位 290° ,北翼被逆掩断层切割,南翼受边水支托。再仔细划分,L 油藏自上而下分成五个层组共 20 个小层。其中 L_1 、 L_2 、 L_3 含油面积大,在整个油田都有分布;而 L_4 和 L_5 仅分布在构造西倾部位,向西增厚,向东在构造高部位变薄至尖灭,实为构造岩性油藏。油藏描述就是要使我们对油气藏的认识和评价更深入,而且显示更方便和更直观(如三维立体图)。这样,不但有利于油气开发,而且也有利于井位设计和预测,使单井测井解释能更好地立足于对油气藏的认识。

第二节 地层评价测井技术

一、测井技术的分类

测井技术是应用物理学原理解决地质和工程问题的边缘性技术学科。由于它面临的任务太复杂,它本身没有直接现实性的品格,只是一种间接研究地质和工程问题的方法,因而发展

了众多的技术,门类也不好划分。但为了便于理解和使用,仍有必要对测井技术进行分类。

1. 按研究的物理性质分类

(1) 电法测井(electrical logging) 电法测井是研究地层电学性质和电化性质的各种测井方法的总称。研究地层导电性质的有各种电阻率测井,研究地层极化性质的有各种高频电磁波测井,研究地层电化性质是自然电位测井和人工电位测井。

(2) 声波测井(acoustic logging) 声波测井是研究地层声学性质的各种测井方法的总称,包括研究纵波速度的声速测井,研究纵波幅度的声幅测井,研究横波速度的横波测井,研究声波全波列各个成分的声波全波列测井,研究纵波反射的井下电视测井等。

(3) 放射性测井(radioactive logging) 放射性测井是研究地层核物理性质的各种测井方法的总称。研究地层天然放射性的有自然伽马测井和自然伽马能谱测井,研究伽马射线与介质相互作用的有密度测井和岩性-密度测井,研究中子与介质相互作用的有中子孔隙度测井、中子寿命测井和次生伽马能谱测井等。

(4) 其它测井 如测量地层温度的井温测井,测量地层压力的地层测试器,测量井眼几何形态的井径测井,测量泥浆烃含量的气测井等。

2. 按技术服务项目分类

提供测井技术服务的产业是测井公司。测井公司为了提供一个技术服务项目,要根据地质或工程需要选择几种测井方法,构成该技术服务项目所需要的一套综合测井方法。这套综合测井方法称为测井系列(logging suite)。如果一个测井系列包括的测井方法很多,还可细分为不同的系列。如裸眼井地层评价测井系列通常包括岩性-孔隙度测井系列,深、浅、微电阻率测井系列,辅助测井系列。

按测井公司提供的技术服务项目,测井技术主要分为四大测井系列。

(1) 裸眼井地层评价测井系列 在未下套管的裸眼井中,用测井资料对储集层做出预测性评价使用的一套综合测井方法,称为裸眼井地层评价测井系列。

(2) 套管井地层评价测井系列 在已经下套管的井中,用测井资料对储集层做出预测性评价所用的一套综合测井方法,称为套管井地层评价测井系列。该系列也用于储集层监视。

(3) 生产动态测井系列 在生产井或注入井的套管内,在地层产出或吸入流体的情况下,用测井资料确定生产井的产出剖面或注水井的注水剖面所用的一套综合测井方法,称为生产动态测井系列。一般包括流量、持相率(多相流动时,某一相的面积占套管截面积的百分数称为该相的持相率)、温度和压力等测量方法。测量结果反映井眼和每个储集层实际的生产状态。

(4) 工程测井系列 在裸眼井或套管井中,用测井资料确定井斜状态、固井质量、酸化或压裂效果、射孔质量和管材损伤等所用的各种测井方法,总称为工程测井系列。具体使用何种方法,视工程需要而定。

此外,测井技术还可提供下列服务项目:

(1) 井壁取心 用井壁取心器从裸眼井井壁取出地层的岩心,作为直接认识储集层的一种手段。一般用于测井解释没有把握的储集层。

(2) 地层测试 在裸眼井或套管井中,用电缆地层测试器可从地层取得流体样品,并在取样过程中得到井内静液压、流动压力、地层静压力、压力恢复曲线和压降曲线等压力资料。用这些资料可建立压力剖面,定性判断储集层的性质,并可计算其有效渗透率。

(3) 射孔 下套管固井以后,根据射孔完井的要求将射孔器下到预定的深度,按预定的射孔密度(每米孔数),用射孔弹射开套管、水泥环和井壁地层,构成地层至套管内的通道,以开采