

电测井在 地质勘探中的应用

中国石油学会地质委员会 编



石油工业出版社

069998



200432406



0068-2169



电测井在地质勘探中的应用

中国石油学会地质委员会 编

5243/21



石油工业出版社

内 容 提 要

本书由二十六篇文章组成。书中简述了电测井的发展历程与远景,介绍了电测井的理论、方法和解释技术的新进展与研究成果,并着重介绍了电磁波传播测井的新成果与应用,电阻率测井在裂缝性地层的特征,径向电阻率研究的成果,含水饱和度方程考察,感应测井的反演,反褶积滤波,薄层的划分以及实验室研究。上述论文,是中国石油学会地质委员会1985年在四川乐山举行的电法测井学术讨论会上精选出来的。本书可供测井工作者、地质工作者及大专院校有关师生参考。

本书在编辑出版过程中,王书林、邱玉春、廖明书等同志做了大量工作,在此一并表示感谢。



电测井在地质勘探中的应用

中国石油学会地质委员会 编

石油工业出版社出版发行

(北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社激光照排室排版

北京市朝阳区教师进修学校胶印厂印刷

787×1092毫米 16开本 16印张 400千字 印 1-1,200

1988年12月北京第1版 1988年12月北京第1次印刷

书号: 15037·3018 定价: 3.80元

ISBN 7-5021-0167-5/TE·165

目 录

一. 电测井的发展历程与未来展望	谭廷栋 叶庆生 段康 黄远大	(1)
二. 理想化 Q_v ——双水模型解释方法新探		
——在地层水电阻率变化情况下泥质砂岩测井方法研究	王曰才	(11)
三. 岩石介电常数的泥量及其应用	尚作源 冯启宁 郭荣坤 马庆刚	(28)
四. 电磁波传播测井“校正传播时间”和“复合传播时间”解释技术	尉中良	(37)
五. 油水界面及储集岩性界面附近的电磁波传播特性	王惠濂	(43)
六. 电磁波传播测井在四川应用的地质效果	张绍儒	(49)
七. 电磁波传播测井在华北油田碳酸盐岩地层中的应用	曹嘉猷 蔡增泽	(61)
八. 单孔电磁波干涉法的原理和应用	佟文琪 陈森鑫	(68)
九. 侧向测井电极系数的计算公式及其与探测深度的关系	谭廷栋 陈世新	(82)
十. 电阻率泥并在裂缝性地层的应用	文华川	(96)
十一. 利用相关检测原理测量视电阻率	余伦广	(106)
十二. 利用视电阻率研究岩石的抗压强度	张景考 赵祥三	(111)
十三. 径向电阻率分析方法及其应用	欧阳健	(117)
十四. 双侧向测井仪的校正图版和解释方法	陈洸钧	(132)
十五. 含水饱和度方程式考察	王继贤	(142)
十六. 岩石孔隙结构和电、渗特性的计算机模拟	陈福煊 刘焕宁	(156)
十七. 水平层状多层介质的感应测井反波法	谢明廉	(164)
十八. 感应测井趋肤效应非线性反褶积滤波	田子立 宋延津	(168)
十九. 自然电波与环自然电位测井方法研究	王德贵 刘宝生	(180)
二十. 泥质均匀分布地层的测井解释方法	朱德怀 曾才顺	(188)
二十一. 束缚水饱和度的测定、求取和应用	汪仕杰 孙君明 甄庭江	(200)
二十二. 模拟地层温度条件下含水岩心电阻率测量装置和方法的研究	王伟男	(210)
二十三. 冲洗带饱和度计算的波普	肖慈珣 陶淑娴	(214)
二十四. 深浅井测非线性双侧向测井仪线路设计	李兴年	(222)
二十五. 微球屏流比的测量和解释	卜勤生	(231)
二十六. WQ-84 微球形果焦测井仪	张国辉	(241)

一. 电测井的发展历程与未来展望

谭廷栋 叶庆生 段康 黄远大

国外电测井

电测井起源于地面电法勘探。1927年9月,法国人斯仑贝谢(Schlumberger)兄弟发明了电测井。电测井最早在欧洲使用,1929年传到美国和苏联。

经过斯仑贝谢等人多年的酝酿和理论上的探讨,1927年测出了第一条井下电阻率“曲线”。当时测量的目的仅仅是为了“根据测量可以搜集到深部地层的电阻率值,从而对地面电法勘探作出可靠的评价”。可是,它一出现就显出可描绘井下地层特征的独特本领。譬如,它在泥岩段显示为低电阻率值而且平坦,而在油气层和致密层则表现为明显的峰值。此后,这种电测井便成为研究井内地质情况的基本手段,并获得广泛的应用。

国外电测井的发展,经历了下列三个阶段。

(一) 普通电测井阶段

1. 电极系的演变

斯仑贝谢兄弟1927年9月5日设计的第一个测井电极系,是AMN梯度电极。那时候认为,测得的电阻率曲线就是地层的真电阻率,或者接近真电阻率。所以供电电极有时候放在测量电极的上边,有时候就放在测量电极的下边。

但是,在1931年,有一次斯仑贝谢兄弟在法国测一口煤井,用的是梯度电极系,并把供电电极放在测量电极的上边。根据测量结果解释,与钻井资料不符。于是,他们又测了第二次。这次把测量电极放在供电电极的上边,测到的高阻层与上次结果不同。他们认为这是电极系本身的问题,于是又设计了电位电极系。这种电极系可以测厚层。在1931年底,标准电极系就变成了测量自然电位和短电位电阻率两条曲线。不过在当时还只能进行点测,而且是手工记录。

用短电位电极系测量的仅仅是井壁附近地层的电阻率,而且曲线形状对称。为了增加它的探测深度,1934年又引入了“长电位电极系”。

大约在1936年,引用了照相底片记录,使测井面貌为之一新。

2. 自然电位的产生与发展

自然电位测井也是最早的电测井之一。据说,一开始测量电阻率,就发现了自然电位。斯仑贝谢兄弟在1929年获得了用自然电位确定渗透性地层的专利,1931年把它应用于商业。此后,自然电位一直作为标准电测井项目之一,服务于石油勘探。

3. 普通电测井解释

1941年,阿尔奇(Archie)从海湾油砂岩测量的实验资料,对不含泥质的孔隙地层导出了如下关系式:

$$F = R_0 / R_w$$

式中: F ——地层因数 (又称相对电阻率);

R_0 ——100%饱含水的地层的电阻率;

R_w ——地层水电阻率;

阿尔奇还发现了 F 与孔隙度 ϕ 的关系: $F = 1/\phi^m$

指数 m 值在 1.8 到 2.2 之间。此外, 阿尔奇还得到含水饱和度的平均公式:

$$S_w^n = R_0 / R_t$$

式中: R_t ——含水饱和度为 S_w 时的地层真电阻率;

n ——指数, 对纯砂岩和砂岩接近于 2。

阿尔奇公式为测井定量解释奠定了基础。但是, 阿尔奇也指出了这些公式的近似性, 它们不宜用于更为复杂的情况。他还指出, 测量的电阻率值需要做井眼、侵入带和围岩等的校正。由于阿尔奇治学严谨, 他的结论很快就得到推广应用, 阿尔奇公式一直沿用到今天。

(二) 感应、聚焦测井阶段

1949 年, 感应测井投入工业值用。在这之前, 人们普遍有这样一种认识, 即任何有关解释问题都可以在自然电位和电阻率测量的基础上解决。

现在, 大家都知道, 影响测量地层真电阻率的因素很多, 如井眼、泥浆、泥饼、层厚、围岩、地层水、冲洗带等等。

在四十年代, 最突出的问题是侵入带的影响。这个问题可以通过两条途径来解决: 一是从所测的视电阻率中设法消去侵入带贡献的部分, 这就导致了微电极和侧向测井的产生; 二是使电流回路避开侵入带而直接在地层中流过, 这就导致了感应测井的出现。

1. 微电极

1948 年, 斯仑贝谢引入微电极测井, 研制了一种专门测冲洗带电阻率的仪器。它没有聚焦功能, 靠一块镶有电极的绝缘极板紧贴井壁, 基本上不受井眼影响。而只受泥饼和冲洗带电阻率的影响。这种仪器的突出特点是分层能力强, 并且可以由离差曲线直观地判断渗透层。

2. 聚焦测井

到四十年代末和五十年代初, 屏蔽聚焦测井的研究进入了高潮。道尔 (Doll) 设计的七电极侧向测井于 1949 年在休斯敦试验, 记录了第一条曲线, 试验取得了成功。同时, 发展了三电极侧向测井。聚焦测井的纵向分层能力极好, 尤以三侧向测井为最佳, 可用于研究薄层, 它们很快就代替了常规电阻率测井。

要想提高七侧向测井分层的能力, 必须减小它的电极距尺寸。后来发展了一种八侧向测井, 它的原理与七侧向测井是一样的, 只是缩短了电极距, 从而大大提高了纵向分层能力。八侧向与感应组合替代了短电位。不过, 它受井眼和侵入带的影响比较大。在这方何找到出路的首先是道尔, 他引进了微侧向测井 (1953), 即在做电极的基础上加上聚焦装置。由于它具有良好的与地层对应的关系, 有人用它做成了高分辨率地层倾角仪 (1956)。

微侧向测井克段泥饼影响的能力并不很强, 后来又发展了邻近侧向测井 (1960)。针对微侧向的中心电极过小和各方面屏蔽能力均等的弱点, 把邻近侧向测井的中心电极加长, 并把屏蔽电极相应改成矩形, 这样就改善了聚焦的效果, 并大大提高了探测深度。

发展起来的另一种浅探测电阻率测井仪, 称为球形聚焦测井。当初, 它主要是为克倾八

侧向测井的井筒分流影响而设计的,但从目前所使用的仪器系列来看,它与深感应组合,可以取代短电位,用来求地层真电阻率、侵入带电阻率和侵入带直径。这种电极系的优点在于它一方面克服了井眼对电流线的影响,另一方面使电流进入地层以后不太深就回到远处的B电极。因此,它的探测深度不太深,测量值基本上只受冲洗带电阻率的影响。

在1972年最后确定的双侧向组合测井仪中(Schuster等,1972),浅层电阻率用微型的、装了衬垫的“微球形聚焦”替换其它微字号仪器。这种微球形聚焦仪器比微侧向受泥饼影响小,比邻近侧向的探测深度要浅。

至此,人们已经研制出各种探测深度、性能各异的仪器,为实现深中浅系列化打下了基础。1971年,与声、感组合的有球形聚焦;1972年,与双侧向组合的有微球形聚焦。这些组合式测井仪,由于它们具有良好的性能而一直沿用至今。

3. 感应测井

前面提到过,早在三十年代,为了解决油基泥浆测井问题,就曾提出过感应测井。感应测井曲线,是道尔于1945年在美国取得的。

感应测井井下仪器,到1956年才算真正完成,并逐渐地取代常规电阻率测井系列。

1959年,出现了一种六线圈系的感应测井仪,它具有更深的探测深度。

单独一条感应测井曲线,很难求准地层真电阻率。为此,在1962年提出了双感应—八侧向组合测井。这种仪器,对于中、低阻厚层可以求准地层真电阻率,但对于高阻层还是求不准。

4. 介电测井

大约在1937年到1940年,就有人提出在井内测量岩石介电常数的问题。测量方法有电容法和电感法。

六十年代初期,苏联人开始研究高频电磁波测井。这种方法从1964年开始现场应用。

5. 地层倾角测井

地层倾角测井是在钻井过程中测量地层以及井本身的倾斜角度与方位,这对于地质学家们了解地质构造、指导勘探都是极有用的。

最早的地层倾角测井,是测量相隔 120° 的三条井径曲线,以磁针来定方位,记录任一条井径臂的方位变化。由三条相关井径曲线和方位变化,可以计算出地层的倾角和方位。

第二代地层倾角测井仪,是利用三个装在橡胶极板上的自然电位电极,同时测出三条相关的自然电位曲线,与照相井斜仪组合,求出地层的倾角。

第三代地层倾角测井仪,是测量微电阻率。它装有三个微电阻率电极系、一个罗盘和一个初级计算器。计算器根据罗盘和两个摆锤的读数,计算出井的偏斜角度和方位。1959年,这种仪器装上了无摩擦电位器,性能上得到了进一步改进。

1956年,出现了第一种聚焦型地层倾角测井仪。它装有相隔 120° 的三块微侧向极板,可同时测三条微侧向的相关曲线。这种仪器有极好的垂直分辨率,所以得到了广泛应用。

为了适应解释上的要求,在七十年代,又出现了高分辨率地层倾角测井仪。它有一个电缆传输的遥测系统,由地面来控制井下仪器的动作。它的四个测量臂,可同时测四条微电阻率曲线,垂直分辨率可达0.2英寸;还可以测双井径曲线,测井眼几何形状;全部数据都记录在磁带上,并由电子计算机处理。这种仪器成了地质学家和地层学家详细研究沉积相和构造必不可少的工具。

为了增加采集的数据量,后来又发展了六臂和八臂地层倾角测井仪。

(三) 超高频和微波测井阶段

1970年,高劳德(Gouilloud)等人发表了一篇专利。这是第一次把微波应用于测井技术的尝试。介电常数测井是一种与矿化度基本无关的新技术,它对于低矿化度地区油、水层的区分以及对于油田的二次和三次开发,都具有特殊的工业价值。

电磁波传播测井仪在1977年投入现场实验。微波介电测井新技术,可以用来测量束缚流体孔隙度,还可以用来测量地层的各向异性、分析地层构造。

五十年代曾出现过一次“聚焦测井热”,20年后,七十年代中叶又出现了“微波测井热”。各种新方案、新设计、改进的技巧此起彼落。

微波电磁波测井测量的是井壁附近地层的容积水,测量值与水的矿化度无关。这个特点,使得它不仅在淡水泥浆的情况下,而且在盐水泥浆、注水及其它的一些情况下都能使用。

中国电测井创业史

中国电测井由翁文波先生创建。1939年,翁先生在四川巴县石油沟一号井进行第一次电测井试验。1940年,翁先生同赵仁寿先生在甘肃玉门油矿石油河浅井中成功地进行了电阻率与自然电位测井。1947年,翁先生同孟尔盛、刘永年先生在玉门油矿成立了中国第一个测井站。1948年,王曰才先生参加玉门油矿测井站工作,研制成功电测仪值用的直流放大器,曾于1950年荣获全国劳动模范称号。

中国煤田电测井在王曰才先生的指导下创建于1954年。

回顾中国电测井创业史,翁文波、赵仁寿、刘永年、王曰才等老前辈对地球物理测井学科的建立和发展都做出了重要的贡献。

中国石油电测井

石油(包括天然气)是液体矿,储藏在岩石孔隙内。钻开油气层后,由于井内泥浆压力大于地层压力,泥浆滤液便驱赶井壁周围地层的原油与天然气。这种情况对石油电测井会有严重的影响。

(一) 石油电测井的用建

电测井与其它测井组合,可以解决下列石油勘探与开发中的问题。

1. 评价油(气)层

- (1) 划分渗透层和裂缝发育带,识别油(气)、水层;
- (2) 确定油(气)层埋藏深度和有效厚度;
- (3) 预测油(气)层产微。

2. 确定岩性

- (1) 进行地层对比,确定岩性,定量解释岩石骨架矿物成分;
- (2) 确定岩石粘土含量和粘土类型。

3. 确定孔隙度

- (1) 确定砂岩与非砂岩油(气)层岩石有效孔隙度;
- (2) 确定裂缝性油(气)藏岩石裂缝孔隙度、基块孔隙度与总孔隙度;

(3) 确定油（气）藏岩石束缚水孔隙度和含油（气）孔隙度。

4. 确定饱和度

(1) 确定油（气）藏岩石原始油（气）饱和度或束缚水饱和度；

(2) 确定油（气）藏岩石残余油（气）饱和度或冲洗带含水饱和度；

(3) 确定油（气）藏岩石可动油（气）饱和度。

5. 确定渗透率

(1) 确定油（气）藏岩石渗透率；

(2) 确定油（气）藏油、水相对渗透率。

6. 研究构造与沉积环境

(1) 确定构造倾角与方位角；

(2) 确定断层与不整合；

(3) 确定背斜、岩礁、泥丘、盐丘、砂坝、河道；

(4) 确定地层水矿化度；

(5) 识别岩相，研究沉积环境。

7. 油（气）藏描述研究

(1) 研究油（气）藏岩石物理参数在空间的分布和油（气）藏的几何特征，提供与油田开发和生产有关的经济评价；

(2) 估算油（气）储量；

(3) 研究生、储、盖、圈、运。

8. 评价水淹层

(1) 识别水淹层；

(2) 确定剩余油饱和度。

(二) 石油电测井的种类

用于石油勘探与开发的电测井方法和仪器种类繁多。这些测井方法和仪器，展示了中国石油电测井技术的发展历程。

1. 电位电极系与梯度电极系测井

又称标准电测井，采用 M0.5A 电位电极系和 N0.5M2.25A 梯度电极系，测量井内岩石电阻率和自然电位，用于地层对比，鉴别岩性，划分渗透层，识别油（气）、水层。

标准电测井是石油勘探最早使用的一种测井方法，至今仍被广泛地应用。

2. 横向电测井

使用梯度电极系进行横向电测井。梯度电极系尺寸 AO 分别为 0.25、0.45、1.0、2.5、4.0、8.0 米，测量井内岩石电阻率，确定岩石真电阻率、侵入带电阻率和侵入带直径，用于识别油（气）、水层和确定含油饱和度。

3. 微电极系测井

采用 N0.025M0.025A 微梯度电极系和 M0.05A 微电位电极系，测量井内岩石电阻率，用于划分渗透层与非渗透层，确定油（气）层有效厚度。

4. 三侧向测井

三侧向测井电极系由主电极 A_0 和屏蔽电极 A_1 和 A_2 组成，测量井内岩石电阻率。三侧向测井可以测量深、浅三侧向测井电阻率。在淡水泥浆侵入情况下，油（气）层为减阻侵入，即深三侧向测井电阻率大于浅三侧向测井电阻率；水层为增阻侵入，即深三侧向测井电

阻率小于浅三侧向测井电阻率。然而，在盐水泥浆侵入情况下，油（气）层与水层均为减阻侵入性质。

三侧向测井主要用于盐水泥浆和高阻地层剖面测井。当泥浆侵入深度小于深侧向测井探测深度时，经过泥浆侵入校正，能够确定油（气）层岩石真电阻率，用它计算原始含油饱和度。

5. 七侧向测井

七侧向测井电极系由主电极 A_0 、屏蔽电极 A_1 和 A_2 以及测量电极 M_1N_1 和 M_2N_2 组成，测量井内岩石电阻率。用途同于三侧向测井。

6. 双侧向测井

吸收了三侧向测井电极系和七侧向测井电极系的优点，制成双侧向测井电极系，测量井内岩石电阻率。双侧向测井仪器动态范围大，特别适用于测量低孔隙碳酸盐岩电阻率。双侧向测井径向探测深度深，可以减小泥浆侵入的影响。

在碳酸盐岩剖面中，双侧向测井还能用来计算裂缝宽度和裂缝孔隙度。

7. 微侧向测井

在主电极 A_0 周围有两个圆形测量电极环（ MN 与 $M'N'$ ）和一个圆形屏蔽电极环（ A_1 与 A_2 ），它们构成邻近侧向测井电极系。其用途同于微侧向测井。

8. 微球形聚焦测井

在主电极 A_0 周围是一个矩形屏蔽电极环（ A_1 与 A_2 ），两个矩形测量电极环位于屏蔽电极环外而（ MN 与 $M'N'$ ），它们构成微球形聚焦测井电极系。其用途同于微侧向测井。

9. 球形聚焦测井

测量原理与微球形聚焦测井相同，但其探测深度大于后者。它是测量侵入带岩石电阻率。它与感应测井组合，可校正泥浆侵入的影响，确定岩石真电阻率；亦可根据泥浆侵入性质，识别油（气）、水层。

10. 八侧向测井

其原理同于七侧向测井，探测深度接近于球形聚焦测井，测量侵入带岩石电阻率。用途同于球形聚焦测井。

11. 感应测井

利用电微感应原理测量岩石电导率（电阻率的倒数）。感应测井通过井下仪器发射线圈向地层发射交变电磁场，从而在地层中产生感应电动势，然后由接收线圈系进行测量，这种测井方法既可以在淡水泥浆井中使用，也可以在油基泥浆井或干井中使用。它与球形聚焦或八侧向测井组合，可以确定岩石真电阻率，识别油（气）、水层，确定含油（气）饱和度。

12. 双感应测井

由深、中感应测井所组成。深感应测井的径向探测深度大于中感应测井，前者主要探测原状地层岩石电阻率，后者主要探测侵入带岩石电阻率。双感应与微球形聚焦测井组合，可确定岩石真电阻率、冲洗带电阻率与侵入带直径，是探测低电阻率油（气）、水层的有效测井方法。

13. 地层倾角测井

在主电极周围有屏蔽电极（ A_1 与 A_2 ），工作原理同于三侧向测井。地层倾角测井仪有四个推靠器极板，电极安装在极板上，供给高电流强度，测量岩石电导率，探测地层界面变

化, 用来确定地层倾角与方位角, 研究构造与沉积环境。

14. 裂缝识别测井

应用地层倾角测井仪探测裂缝, 供给低电流强度, 测量岩石电导率, 用来识别裂缝发育带, 确定裂缝方位角。

15. 流体电阻率测井

由供电电极 A_0 和测量电极 MN 组成的流体电阻率测井电极系, 测量井内流体电阻率, 用来识别水层位置。

16. 自然电位测井

采用单电极测量井内地层产生的自然电位, 用来划分岩性、识别渗透层和水淹层, 还可以确定地层水电阻率。

17. 人工电位测井

与激发极化电位测井原理相同, 测量人工激发电位, 用来判断水淹层。

18. 电磁波传播测井

井下仪器由两个微波发射天线 (T_1 和 T_2) 和两个微波接收天线 (R_1 和 R_2) 所组成, 微波频率为 1.1 千兆赫, 测量岩石电磁波传播时间。电磁波传播时间与岩石介电常数成正比。应用电磁波传播时间或介电常数, 可以确定岩石孔隙度和冲洗带岩石含水饱和度。

用于石油电测井的地面仪器有半自动测井仪、全自动测井仪、数字测井仪和数控测井仪。

1952 年, 在北京和西安建立了石油地球物理实验室, 开始研制测井仪。1953 年和 1954 年, 相继试制出半自动和全自动测井仪。刘永年总工程师创造的 JD-581 型多线式井下自动测井仪, 于 1958 年在西安地球物理仪器修造厂投入生产, 该仪器至今还是我国石油测井的主要工具。

1975 年, 从美国引进 3600 数字测井仪, 开始了我国数字测井发展新阶段。西安石油勘探仪器总厂研制成功我国第一台 SJD-801 型数字测井仪。该仪器于 1982 年通过技术鉴定, 并投入批量试生产, 这标志着我国石油测井技术初步具有数字测井先进水平。与此同时, 各油田都建立了测井资料计算机处理解释系统, 并发展和开发了许多适应我国不同地区地质特点的测井解释方法和软件, 从而更进一步促进我国测井技术的进步。

1979 年, 我国首次雇佣斯仑贝谢公司测井队来中国服务。该公司现用的 CSU 数控测井系统是勘探难度较大的砂岩与非砂岩油气藏的主要手段, 特别是勘探裂缝性油气藏有显著的效果。研制和应用数控测井系统, 是发展我国测井技术的当务之急。

原油与天然气都是绝缘体, 电阻率为无穷大; 地层水是导体, 电阻率很小。因此, 电测井对识别油 (气)、水层具有很高的分辨率。迄今, 电测井仍是石油勘探与开发的重要测井方法和手段。

中国煤田电测井

煤是固体可燃矿产, 其渗透性取决于本身的裂缝发育程度。探煤钻井的直径一般为 80 ~ 95 毫米。因此, 进行煤田电测井, 一般受井径和泥浆侵入的影响较小。

(一) 煤田电测井的用途

电测井与其它测井组合, 可以解决下列煤田勘探与开发问题。

1. 评价煤层

- (1) 确定煤层埋藏深度及厚度;
- (2) 评价煤层的灰分和发热量;
- (3) 判断煤层风化带和氧化带的深度, 评价煤的变质程度。

2. 识别岩性

- (1) 划分岩性, 确定各种岩层的深度和厚度;
- (2) 计算岩石孔隙度和抗压强度;
- (3) 利用特殊岩性标志进行地层对比。

3. 研究沉积环境

- (1) 研究煤层层位和岩相变化, 发现断层;
- (2) 研究岩层产状和构造形态;
- (3) 研究煤田盆地沉积环境及其聚煤带。

4. 解决水文地质问题

- (1) 划分冲积层与基岩接触面, 研究第四系地层岩性变化及其含水性;
- (2) 测定钻孔中含水层的深度及其厚度, 查明出水点位置;
- (3) 解释含水层的涌水量。

(二) 煤田电测井的种类

广泛用于煤田勘探与开发的电测井方法和仪器有许多种。这些测井方法和仪器, 展示了中国煤田电测井技术的发展历程。

1. 电位电极系测井

最早采用 B2.5A0.1M 电位电极系测量岩层视电阻率, 确定煤层埋藏深度和厚度。煤田勘探钻孔直径一般小于 0.1 米, 使用 0.1 米的短电位电极系测量, 可以提高煤层定厚和定深的精度。

2. 双电位电极系测井

由两个电位电极系组成。采用 M0.05A0.05N (或 M0.1A0.1N) 双电位电极系测量岩层视电阻率差值, 能够精确地确定煤层的厚度。

3. 双梯度电极系测井

由两个梯度电极系组成。采用 A₁0.2M0.1N0.2A₂ 双梯度电极系测量岩层视电阻率差值, 可以提高煤层定厚的精度。

4. 电极电位测井

应用刷子电极裸露部分与井壁接触, 测量井内无煤层电子导电体的有电极电位和围岩离子导电体的无电极电位, 以划分无烟煤和天然焦。

5. 人工电位测井

又称激发极化测井, 测量岩石人工激发极化电位, 可以识别煤层与含水层。

6. 三侧向测井

同时测量井内岩石的电阻率与电导率, 对划分煤层和确定煤层真电阻率有显著效果。

7. 接地电阻梯度测井

这是接地电阻测井派生方法。把两个接地电极 (A₁ 与 A₂) 放入井内, 测量电桥肩 MN 之间的接地电阻梯度, 以确定煤层厚度。它的分层能力高达 5 厘米。

8. 微屏蔽电极系测井

采用微电极系改装而成,中心电极 A_0 的直径为 0.8 厘米,微屏蔽电极 A 的长度为 10~12 厘米,宽度为 4~5 厘米, A_0 与 A 之间的绝缘环厚度为 0.5 厘米,测量流入井内岩石屏蔽电流的变化,用于露天煤矿边坡勘探,提高划分软弱薄层的能力。这种测井方法能探测出厚度为 1.5 厘米的薄夹层。

9. 自然电位测井

用单电极系测量井内岩石产生的自然电位,可以识别煤层和含水层。无烟煤和天然焦的自然电位为正异常。当泥浆电阻率大于地层水电阻率时,水层自然电位为负异常;反之,为正异常。

用于煤田测井的地面仪器有半自动测井仪、全自动测井仪和数字测井仪。

五十年代,煤田测井使用的是半自动测井仪。六十年代,普遍使用全自动测井仪,主要有上海地质仪器厂生产的 JBC-2 型照相式轻便自动测井仪和 JDC-2 型笔绘式轻便自动测井仪。七十年代以来,主要使用渭南煤矿专用设备厂生产的 TYFZ-4 型组合测井仪和 TYJJ-2 型静电显影记录仪。

煤田测井已跨入数字测井新时代。数控测井系统也是中国煤田测井仪器重要的发展方向。1978 年以来,煤炭系统在研制数字测井仪和开发专用软件方面做了一定的工作,并已初见成效。1983 年底,煤炭工业部第一物探队试制成 SCJ-1 型数字测井记录仪。渭南煤矿专用设备厂研制的数控测井仪样机已接近完成。自 1982 年以来,煤炭系统引进了加拿大世纪地球物理 (CGC) 公司的计算机测井系统一套、美国蒙特索普利斯 (Mount Sopris) 公司的 III 系列数字测井系统五台。与此同时,渭南煤矿专用设备厂正在引进蒙特公司的 III 系列数字测井系统制造技术。目前,上海地质仪器厂正在与煤炭科学院西安煤田地质勘探分院协作,设计研制微机数控测井仪。

煤不是绝缘体,本身存在着电子导电性。无烟煤电阻率极低,褐煤与劣质煤电阻率中等,油质煤电阻率特别高。电测井也是在煤田勘探与开发中的主要测井方法与手段。

电测井未来展望

电测井地面记录仪器将要广泛使用车载计算机测井系统。将建立计算机测井解释系统,发展最优化测井处理解释技术和人工智能评价方法,开展油 (气) 藏描述和煤田地质研究,实现测井技术现代化。

反映岩石性质的电测井信息还有很大潜力。到 2000 年,石油测井将发展一些新方法,有些电测井方法可以用于煤田勘探与开发。今后,煤田电测井的研究应着重于如何提高煤层定厚的精度,以及电测井与哪些其它测井组合,可以定量解释煤层的灰分、水分、含碳量和发热量。

1. 电抗测井

电抗测井是测量井内岩石的阻抗、容抗和感抗,它可以准确识别油 (气) 层、煤层和含水层。

2. 交流电法测井

用高频电磁波同时测量井内岩石的介电常数和电导率,以便直接勘探石油和煤炭。

3. 双感应—双侧向测井

双感应与双侧向测井组合,可同时测量井内岩石电阻率与电导率,提高直观识别油

(气)层的分辨率,排除多解性。

4. 微电阻扫描测井

在极板上装 40 个甚至 100 个点电极,供给低频电流,测量井内岩石电流的变化。微电阻扫描测井的测量值反映岩石电阻的变化,可以检测出厚度小于 1 厘米的地层。它采用三维成像显示,用于研究沉积方向与河流方向,同时还能指示裂缝和裂缝发育方向。

5. 自然电流测井

测量井内地层产生的自然电流,用于识别水淹层和含水层。

6. 电阻率随钻测井

把电极系安装在钻头附近的钻具上,测量刚被钻开的岩石的真电阻率,测量值基本上不受泥浆侵入的影响,有利于直接找油找气。

在钻具上安装两个尺寸和几何形状完全相同的电极系。一个装在钻头附近的钻具上,测量没有泥浆侵入时的岩石电阻率;另一个装在远离钻头的钻具上,测量有泥浆侵入时的岩石电阻率。当泥浆电阻率大于地层水电阻率时,油气层岩石电阻率时间推移测井出现负差异。电阻率时间推移测井探测的岩石体积相同,可以消除复杂岩性和孔隙度非均匀分布的影响,测量的岩石电阻率比值只与导电流体电阻率和含水饱和度比值有关,这是一种直接找油找气的电测井方法。

目前的测井仪器使用电缆传输信息,未来的测井仪器将使用光缆传输信息,这样可以提高测井信息传输能力 100 倍以上。所有的测井信息都将全部实现电子计算机采集、处理、解释和评价,并且使用彩色显示测井解释成果图。测井解释由单井评价向多井研究发展,定量描述油(气)田和煤田地质基本参数在空间的分布和几何特征,提供与石油和煤炭开发和生产相关联的经济评价。电测井用途还将进一步扩大。

结 束 语

中国电测井创建于 1939 年,到现在经历了四十六年的发展历程。电测井用于勘探石油和煤炭以及地热、地下水、金属矿资源,为国家经济建设做出了重要贡献。

电测井可以分为直流电法测井和交流电法测井两大类,主要探测井内岩石的电阻率、电导率、介电常数、电磁波传播时间、自然电位和激发电位等信息。岩石中还有许多信息没有被探测,今后有可能出现一些新的测井方法,电测井在勘探矿产资源的作用中潜力还极大。

(参考文献略)

二. 理想化 Q_v ——双水模型解释方法新探

——在地层水电阻率变化情况下泥质砂岩测井方法研究

王 日 才

引 言

对于泥质砂岩, 当其泥质含量小于 5% 时, 可以近似地使用惯用的阿尔奇公式进行解释; 但当泥质含量增多, 超过 5% 时, 由于含有泥质而引起的解释结果的误差, 就不能忽略。不同地区不同层段所含泥质的种类不同、性质不同, 对测井解释的影响也就不一样。因此, 在不同地区就出现了不同的解释公式, 如印度尼西亚公式, 尼日利亚公式及 Simondoux 公式等。

国外从六十年代就开始在实验室并在理论方面研究岩石的阳离子交换浓度这种物理性质, 认为含有各种不同泥质的砂岩, 其导电性和电化学电位都可以用岩石阳离子交换浓度这个参数来描述。近几年来, 石油工业发达的国家逐渐推广应用 Waxman-Smith 模型 (简称 W-S 模型) 和双水模型的解释方法, 在评价上述地层方面取得了突破。

理想化 Q_v 和理想化双水饱和度方程

本文以双水模型理论导出的理想泥岩 (perfect shale) 为标准, 把泥质砂岩的理想化 Q_v (perfect Q_v) 记作 Q_{vp} , 并定义为:

$$Q_{vp} = \frac{V_{sh} \cdot \varphi_{Tsh}}{\varphi_T} \cdot \frac{S_{MB}}{\alpha \cdot V_Q} \quad (1)$$

式中: S_{MB} —— 实际泥岩的粘土水饱和度;
 α —— 双水模型中扩散层扩展因子;
 V_Q —— Q_v 为 1 时粘土水所占的孔隙体积。

(1) 式的意义说明如下: Clavier 等人业已证明, 对一般的粘土来说, 其粘土水电导率为:

$$C_{cw} = \frac{\beta}{\alpha \cdot V_Q} \quad (2)$$

式中: β —— Na^+ 补偿阳离子的当量电导, $\beta = 0.0857 \times T (^{\circ}C) - 0.143$;

$$V_Q = 1 / (2.853 + 0.019 \times T);$$

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{当 } n > n_1 \text{ 时} \\ \sqrt{n_1 / n} & \text{当 } n \leq n_1 \text{ 时} \end{cases} \quad (n_1 = 0.24 \text{ 摩尔})$$

Clavier 等人把理想泥岩的 Q_v 值记作 $(Q_{vp})_{sh}$ ，并根据理想泥岩中“远水”含量等于零这个条件，推导出：

$$(Q_{vp})_{sh} = \frac{1}{\alpha \cdot V_Q} \quad (3)$$

由于泥岩压实不完全，使得实际求得的 Q_v 值偏离上述值。现在我们以“理想泥岩”作为参考，来研究实际的泥岩及泥质砂岩的实际的 Q_v 值。在讨论中，为了便于和以往讨论的 Q_v 值公式中的 Q_v 值相区别，把以理想泥岩作为参考来研究的泥质砂岩的实际的 Q_v 值定义为“理想化 Q_v ”，并用符号 Q_{vp} 来表示。

设令纯泥岩中粘土水饱和度为 S_{MB} ，泥质砂岩中粘土水饱和度（即单位孔隙体积中粘土水含量）为 S_{wp} ，则

$$S_{wp} = \frac{V_{sh} \cdot \varphi_{Tsh}}{\varphi_T} \cdot S_{MB} \quad (4)$$

我们认为，泥质砂岩的 Q_v 值的大小与其粘土水饱和度 S_{wp} 成比例。因此，我们可以定义理想化 Q_v 为：

$$Q_{vp} = (Q_{vp})_{sh} \cdot S_{wp} = \frac{S_{wp}}{\alpha \cdot V_Q} \quad (5)$$

将 (4) 式代入 (5) 式，则得：

$$Q_{vp} = \frac{V_{sh} \cdot \varphi_{Tsh}}{\varphi_T} \cdot \frac{S_{MB}}{\alpha \cdot V_Q} \quad (6)$$

上式就是前面的 (1) 式。

对于实际泥岩， $S_{wp} = S_{MB}$ ，由 (5) 式可得实际泥岩的理想化 Q_v 值：

$$Q_{vp} = (Q_{vp})_{sh} \cdot S_{MB} = \frac{S_{MB}}{\alpha \cdot V_Q} \quad (7)$$

下面再讲一下 S_{MB} 与测井值的关系。因为泥岩中不含油气，总含水饱和度 $S_{WT} = 1.0$ ，其中导电介质为粘土水和束缚性自由水并联导电，因此泥岩混合液等效电导率 C_{wesh} 为：

$$C_{wesh} = \frac{1}{R_{wesh}} = \frac{\varphi_{Tsh}^{-m_0}}{R_{sh}} = S_{MB} \cdot C_{CW} + (1 - S_{MB}) C_{CW} \quad (8)$$

把 (2) 式代入 (8) 式, 得:

$$S_{MB} = \frac{R_w \cdot \varphi_{Tsh}^{-m_0} - R_{sh}}{R_w \cdot R_{sh} \cdot (\beta / \alpha \cdot V_Q) - R_{sh}} \quad (9)$$

由 (6)、(7) 和 (9) 式可知, 目的层的阳离子交换浓度 Q_{vp} 及邻近泥岩的阳离子交换浓度 Q_{vpsh} , 当地层水矿化度已知时, 可以由测井值求得。

用 S_{MB} 可以估算实际泥岩的不理想程度。在理想泥岩中, $S_{MB}=1$ 。这样, 在计算泥质砂岩的 Q_v 值 (即 Q_{vp}) 中就排除了实际泥岩中束缚性远水的影响, 可以利用粘土水和泥质砂岩中的远水并联的模型来求解, 从而比较严格地遵守了双水模型的理论。在后面讲述的理想化双水饱和度方程最优化解法的实际计算中, 利用 Q_{vp} 概念所得出的地层水电阻率值与试水资料基本上吻合。

由理想化 Q_v 根据双水理论导出的理想化双水饱和度方程为:

$$\frac{\varphi_T^{-m_0}}{R_t} = S_{WT} \left[\frac{1}{R_w} + \frac{\alpha \cdot V_Q \cdot Q_{vp}}{S_{WT}} \left(\frac{1}{R_{CW}} - \frac{1}{R_w} \right) \right] \quad (10)$$

写成阿尔奇饱和度方程的形式则为:

$$S_{WT} = \left[\frac{\varphi_T^{-m_0} \cdot R_{we}}{R_t} \right]^{1/n_0} \quad (11)$$

其中:

$$\frac{1}{R_{we}} = \left[\frac{1}{R_w} + \frac{\alpha \cdot V_Q \cdot Q_{vp}}{S_{WT}} \left(\frac{1}{R_{CW}} - \frac{1}{R_w} \right) \right] \quad (12)$$

$$S_{MB} = \frac{R_w \cdot \varphi_{Tsh}^{-m_0} - R_{sh}}{R_w \cdot R_{sh} (\beta / \alpha \cdot V_Q) - R_{sh}} \quad (13)$$

式中: R_{sh} 、 φ_{Tsh} 分别为泥岩电阻率和泥岩总孔隙度;

R_{CW} 为粘土水电阻率。

上式中所需参数, 除饱和度指数 n_0 外, 均可由实际测井资料求出。因为在求含水饱和度的公式中用的是等效地层水电阻率, 考虑了油替水时远水和粘土水不是等同替代的情况。