

地球物理测井技术与应用丛书
GEOPHYSICAL WELL LOGGING TECHNOLOGY & APPLICATION

主 编
王敬农 汤天知 张辛耘

油气层测井识别与评价

孙宝佃 周灿灿 赵建武 等编著



石油工业出版社

技术与应用丛书

主编：王敬农 汤天知 张辛耘

油气层测井识别与评价

孙宝佃 周灿灿 赵建武 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要由测井方法概述、砂泥岩油气层识别与评价、碳酸盐岩油气层识别与评价、火成岩油气层识别与评价、低孔低渗储层识别与评价、低阻油气层识别与评价、水淹层识别与评价七章构成,介绍了现有的测井方法原理和地质应用,各种油气储层的地质特点、测井评价方法和大量的示例等。

本书可帮助测井解释评价工程师熟练掌握解释原理和各类油气层的识别与评价,并指导测井作业,同时可作为石油测井培训教材和在校大学生的教科书。

图书在版编目 (CIP) 数据

油气层测井识别与评价/孙宝佃等编著.
北京:石油工业出版社,2014.9
(地球物理测井技术与应用丛书)
ISBN 978-7-5183-0283-3

I. 油…
II. 孙…
III. 油气测井
IV. P631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 148272 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.com.cn

编辑部: (010) 64523593

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2014 年 9 月第 1 版 2014 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 28.75

字数: 730 千字 印数: 1—3000 册

定价: 98.00 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

测井是地球物理测井的简称。测井技术是应用物理学（电磁学、声学、核物理学等）的基本原理解决地质及工程问题的一门综合性应用技术，其作用贯穿石油勘探开发全过程，已发展成为石油工程技术服务的主干技术之一。纵观测井技术 80 余年的发展，一个显著的特点就是，物理学、电子信息、自动化、计算机和新材料等领域的最新成果很快在测井技术中得到应用。

中国石油集团测井有限公司成立以来，大力发展成套测井装备，精心研究测井新方法新技术，全面提升测井技术水平，各项工作取得丰硕成果，为油气勘探开发作出了重要贡献。为了使广大测井工程师能在较短时间内掌握自主研发的装备和软件所包含的技术和方法，中国石油集团测井有限公司组织编写了这套《地球物理测井技术与应用丛书》。《丛书》的作者是工作在生产、科研和教学一线的测井专家和教授，《丛书》是他们科研和教学工作的积淀和凝练。组织出版这套《丛书》，有利于测井学科的传承和发展，是一件意义深远的再创新工作。

从知识结构和谋篇布局上看，《丛书》是一个有机的整体，但各分册又自成体系。《测井电子信息技术》是测井仪器装备所用的各类器件、模块的基础，《测井场论》是测井探测器设计、解释评价的依据，《电测井算法》集中反映了张庚骥教授电法测井理论和方法的精髓。《测井场论》和《测井电子信息技术》以新颖的角度切入，更加突出测井与物理学、电子信息技术等学科领域的紧密结合，这在测井技术理论教材的编写上是一次大胆的尝试和创新。《EILog 快速与成像测井系统》、《油气层测井识别与评价》和《LEAD 测井综合应用平台》剖析了中国石油集团测井有限公司在用的主流测井装备和处理解释软件，分别对应测井技术体系的数据采集、解释评价和测井软件三个技术板块。

这套《丛书》构思缜密、布局精巧、门类齐全，是一套理论与实际相结合的、高水平的专业教材，十分难得。我愿向大家推荐这套《丛书》，它不仅可供测井专业技术人员培训之用，也可作为大专院校相关专业在校本科生、研究生的参考和教学用书。

陆大卫

2009 年 8 月 27 日

前 言

伴随着石油天然气勘探开发对象日益复杂（主要包括低孔、低渗、低阻、复杂岩性等油气藏），以及勘探开发领域的不断深入、一些新的测井设备的引入，对解释评价方法提出了更高的要求。中国石油集团测井有限公司利用重组后科研技术整合的优势，在多年技术积累的基础上，对现有的解释方法和评价领域进行了系统的整理和深化。并在现场得到了广泛应用。截至目前，共评价解释4万多口井，油气识别准确率提高6%，在解决复杂油气层识别评价方面取得了显著效果。

本书是《地球物理测井技术与应用丛书》之一，主要由测井方法概述、砂泥岩油气层识别与评价、碳酸盐岩油气层识别与评价、火成岩油气层识别与评价、低孔低渗储层识别与评价、低阻油气层识别与评价、水淹层识别与评价共七章构成，介绍了现有的测井方法原理和地质应用，各种油气储层的地质特点、测井评价方法和大量的示例等。可帮助测井解释评价工程师熟练掌握解释原理和各类油气层的识别与评价，并指导测井作业。同时，也可作为石油测井培训教材，以及相关院校的教学参考书。

本书由孙宝佃、周灿灿、赵建武等组织编著，第一章撰写人为杨双定等；第二章撰写人为孙宝佃、杨林、蔡文渊、高敏、罗安银、李振苓、刘晓虹、诸葛月英、齐宝艳、刘海啸、黄胜、张浩、王建功、丛培栋、毋学平、张琳、刘英、孙玉红、令狐松等；第三章撰写人为司马立强、杜环虹、令狐松等；第四章撰写人为陶宏根、令狐松等；第五章撰写人为冯春珍、杨双定、令狐松等；第六章撰写人为周灿灿、李潮流、程相志、李长喜、杜环虹、令狐松等；第七章撰写人为秦民君、路云峰、赵建武、令狐松、曾花秀、范宜仁、荆万学等。在此，对为本书编写提供帮助的所有人员一并表示诚挚的谢意。

尽管我们的目标是将本书打造成“精品”，但由于水平有限，书中存在的这样或那样的不足，敬请广大读者批评指正。

编者

2012年10月

目 录

第一章 测井方法概述	(1)
第一节 常规测井	(1)
第二节 成像测井	(17)
第二章 砂泥岩油气层识别与评价	(29)
第一节 砂泥岩储层的地质特点和划分方法	(29)
第二节 砂泥岩储层的识别与评价	(42)
第三节 测井方法的适用性	(108)
第四节 测井系列选择	(120)
第三章 碳酸盐岩油气层识别与评价	(121)
第一节 碳酸盐岩油气层地质特点	(121)
第二节 碳酸盐岩储层的识别	(124)
第三节 碳酸盐岩储层参数定量计算方法	(144)
第四节 成像测井定量计算裂缝参数	(153)
第五节 测井新方法综合评价碳酸盐岩储层实例	(159)
第六节 测井系列选择	(165)
第四章 火成岩油气层识别与评价	(167)
第一节 火成岩的地质特点	(167)
第二节 火成岩储层的识别与评价	(172)
第三节 典型应用实例	(211)
第四节 测井系列选择	(217)
第五章 低孔低渗储层测井识别与评价	(224)
第一节 低孔低渗储层地质特点	(224)
第二节 低孔低渗储层识别与评价	(229)
第三节 典型实例	(276)
第四节 测井系列选择	(324)
第六章 低电阻率油气层识别与评价	(326)
第一节 低阻油气层地质特点	(326)
第二节 低阻油气层识别评价技术	(356)
第三节 低阻油气层测井评价实例	(373)
第四节 测井方法的适用性	(388)
第五节 测井系列选择	(396)

第七章 水淹层识别与评价 (398)

第一节 水淹层水淹机理 (398)

第二节 水淹层测井解释与评价 (429)

第三节 测井方法适应性 (440)

第四节 测井系列选择 (448)

参考文献 (451)

第一章 测井方法概述

目前，以电阻率—孔隙度系列为主的常规测井仍然是测井解释的主要依据，在常规油气层的识别与评价中发挥着重要作用。随着以低孔、低渗、低阻复杂岩性等为主要特征的隐蔽油气层的勘探开发，常规测井技术的“盲区”日益显现。成像测井在复杂储层的解释和认识中发挥着越来越重要的作用，因而利用常规测井和成像测井，找到适用于储层特征的测井系列，发掘出测井信息中蕴含的油气信息是测井工作者的责任。

第一节 常规测井

一、自然电位测井

(一) 方法原理

自然电位测井是在裸眼井中测量井轴自然产生的电位变化以研究井剖面地层性质的一种测井方法。它是世界上最早使用的测井方法之一，是一种最简便且实用的测井方法，至今仍然是砂泥岩剖面裸眼井（淡水钻井液）必测的项目之一。

1. 井内的自然电动势

井内有自然存在的电位变化，说明井内有自然电流流动，井内必然有自然产生的电动势。

图 1-1 为一个完全含水的纯砂岩层及其围岩（泥岩）与井眼交界处的自然电流分布和自然电位曲线示意图。在图示的情况下，井内的自然电流从泥岩流向砂岩，自然电位曲线左为低，右为高。

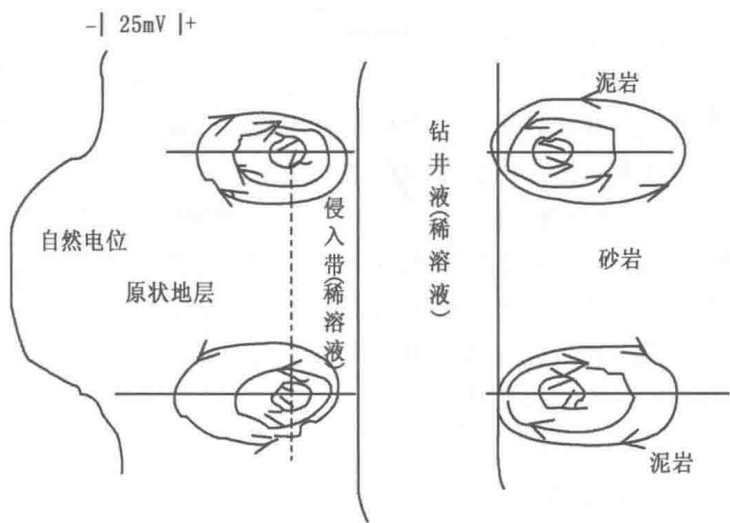


图 1-1 完全含水的纯砂岩层及其围岩与井眼交界处的自然电流分布示意图

井内自然电动势的起因,包括不同浓度的盐溶液相接触时的扩散、吸附作用,盐溶液在岩石孔隙中的渗滤作用,金属矿物和煤的氧化还原作用。对石油测井来说,主要是前两种。

2. 自然电位曲线异常

自然电位曲线记录井轴上自然电位的数值变化,并不记录自然电位的实际数值,因而在图上不标出电位的真实坐标,只用正负号标出电位高低方向,并用两条竖线标出电位变化的横向比例,即图 1-1 上那段横向距离(一般 2cm)代表 25mV 的电位变化。

(1) 泥岩基线。

泥岩的自然电位曲线不但比较平直,而且一个井段内相邻泥岩的自然电位曲线大体上构成一条竖直线或略有倾斜的直线。储层的自然电位曲线则偏离这条曲线,我们把一个井段内泥岩自然电位曲线构成的直线段,称为自然电位泥岩基线,简称泥岩基线,泥岩基线是认识和应用自然电位曲线的基础。

(2) 储层自然电位异常。

砂岩储层的自然电位曲线都向低电位方向偏移,从而形成偏离泥岩基线的曲线异常。这些异常同图 1-1 的形态一致,说明地层水的电导率 C_w 大于钻井液滤液电导率 C_{mf} 即 $C_w > C_{mf}$ 。我们把储层自然电位曲线偏离低电位一方的异常,称为负异常,它偏离泥岩基线的最大幅度是该异常的大小,其值是负的,这是 $C_w > C_{mf}$ 或 $R_{mf} > R_w$ 时发生的情况。反之, $C_w < C_{mf}$ 或 $R_{mf} < R_w$ 时,自然电位偏向高电位一方,称为正异常,其值是正的。

3. 自然电位曲线的形成

要了解自然电位曲线的形成,就要了解自然电流。图 1-1 画有一个厚度较大的含水纯砂岩储层, $C_w > C_{mf}$, 其上下有厚度较大的纯泥岩。如前所述,此时在砂岩冲洗带与未侵入带的交界面上产生扩散电动势 E_d , 冲洗带一侧为负极,未侵入带一侧为正极,砂岩未侵入带的地层水通过泥岩孔隙与泥岩井眼内的钻井液滤液产生扩散吸附电动势 E_{da} , 设该电动势在泥岩井壁两侧,钻井液一侧为正极,泥岩一侧为负极。如果 $C_w < C_{mf}$, 则扩散方向相反。这两个电动势的方向也相反。在图 1-1 的情况下,自然电流从泥岩井壁的正极出发,流经井内钻井液,进入砂岩冲洗带和未侵入带,再经过泥岩流向井内钻井液。因此,井内的自然电流在砂岩、泥岩与井眼交界处形成环状流动,全部电流都流经井内砂岩与泥岩的界面,该处电流密度最大,其他地方有不同程度的发散。

自然电流在井内的电位降造成井轴上自然电位的变化,各个地层的变化构成全井自然电位曲线。如图 1-1 所示,由上往下,当泥岩厚度较大,测量电极离泥岩与砂岩界面较远时,那里没有自然电流流动,测量到的电位是电极极化电位,一般非常小而且稳定,故自然电位曲线是一段比较平直的直线。当井内有了自然电流由上往下流动,且井内各横截面的电流强度逐渐增加时,它产生的电位降也增加,井内自然电位缓慢降低,因界面上电流强度最大,到地层界面降低最快,而过了界面电位降低又由快到慢,直至没有自然电流时变成直线段。到了井内出现下部界面的自然电流时,因电流是由下往上流动,使井内自然电位由上往下逐渐升高,直至没有自然电流时升到泥岩井内的电极电位。如果砂岩是均匀的,上下泥岩岩性相同,则自然电位曲线对称于砂岩的中点。

4. 自然电位异常的影响因素

(1) 地层水与钻井液的性质。

两者含盐量应有较大差别, $C_w > C_{mf}$ 为负异常, $C_w < C_{mf}$ 为正异常, C_w 与 C_{mf} 相近无异常。NaCl 以外的其他盐类增多,也会有一定影响,但通常不考虑。

(2) 储层与泥岩的岩性。

如果储层泥质含量增加,或者泥岩砂质增多,都将使总自然电动势减小。

(3) 地层温度。

地层温度升高,自然电位系数 K 增加,从而使自然电位幅度增加,但温度变化的影响很有限,一般在有限的解释井段内可不考虑温度变化。

(4) 储层厚度。

一般 4m 以下的地层,自然电位幅度随其厚度减小而减小;相反,当储层厚度充分大时(实际观察要在 4m 以上),自然电位幅度不受影响。

(5) 储层的含油性和电阻率。

含油气饱和度比较高的储层,其电阻率比它完全含水时要高 3~5 倍以上,使自然电位幅度略有减小。故在测井图上,油气层的自然电位幅度略小于相邻的水层;厚度较大的油水同层,当其向下 S_w 增加时,自然电位幅度异常逐渐增大。

(6) 储层侵入带直径。

储层侵入带直径越大,自然电位幅度越小。

(7) 钻井液电阻率和井径。

当钻井液电阻率很低时(常认为地层温度下小于 $0.1\Omega \cdot m$),被称为盐水钻井液,井内自然电位几乎没有变化,曲线平直。因此,自然电位测井不能用于盐水钻井液。

储层井径明显扩大时,自然电位幅度可能减小。

(8) 岩性剖面。

自然电位测井是一种以泥岩为背景来显示储层性质的测井方法。幅度大小不只与储层性质有关,而且也与相邻泥岩的性质有关。因此这种方法只能用于储层与泥岩交替出现的岩性剖面,最常见的是砂泥岩剖面。这种方法不能用于巨厚的碳酸盐岩剖面,因为它没有或很少有泥岩,裂缝发育的储层以致密碳酸盐岩为围岩,许多储层要通过远处的泥岩才能形成自然电流回路,因而在相邻泥岩间形成巨厚的大片自然电位异常,不能用来划分和研究储层。

(二) 地质应用

自然电位测井适用于砂泥岩剖面和淡水钻井液的裸眼井,其主要应用如下。

1. 划分储层

自然电位曲线偏离泥岩基线的明显异常是孔隙性和渗透性较好的储层的标志。而在泥岩基线上或附近变化的地层是非储层,是泥岩或其孔隙性和渗透性很差的地层(称为致密层)。对于岩性均匀、厚度较大、界面清楚的储层,通常用自然电位异常幅度的半幅点确定储层界面;如果厚度较小,SP 异常较小,半幅点厚度将大于实际厚度,地层界面将靠近异常顶部。如果上下界面幅度大小不同,应分别用其半幅点确定界面,如果岩性渐变层某个界面不清楚,应参考其他曲线确定界面。

2. 判断岩性

在划分储层与非储层的基础上,依据本地岩性剖面的组成情况、本地解释经验和其他曲线的显示,可进一步划分岩性。

3. 判断油气水层

自然电位曲线的幅度异常可帮助区分油气水层,一般来说,油气层的 SP 异常略小于水层;完全含水,岩性较纯,厚度较大的纯水层,SP 异常最大;下部含水饱和度明显升高的油层,SP 异常由上往下有渐大的趋势;因注入淡水水淹后的油层,其被水淹的底部或

顶部的 SP 异常明显小于未水淹部分的 SP 异常，使该层上下部泥岩基线发生明显的偏移。

4. 地层对比和沉积相研究

地质学有研究沉积相的系统方法，在此基础上，SP 曲线常常作为单层划分，井间对比，绘制沉积体等值图的手段之一。

5. 计算泥质含量

碎屑岩泥质含量的增加，将使自然电动势减小，从而使 SP 幅度减小，因此，以完全含水、厚度足够大的水层的静自然电位 SSP 为标准，某地层 SP 与 SSP 的差别与地层泥质含量有关。通常把泥质含量表示为：

$$V_{sh} = 1 - SP/SSP = (SSP - SP) / SSP \quad (1-1)$$

式中 V_{sh} ——地层泥质含量，无量纲；

SP——解释层的 SP 幅度，mV；

SSP——解释井段的静自然电位，mV。

6. 确定地层水电阻率

在评价油气储层时，含油气饱和度是一个非常重要的参数，而要确定含油饱和度 S_o ，则必须知道地层水电阻率 R_w 。用自然电位测井资料确定地层水电阻率是常用的方法之一。

一般方法是，选择剖面中较厚的饱和水的纯净砂岩层，读出该层的自然电位异常幅度 ΔU_{sp} ，并根据钻井液资料确定钻井液滤液电阻率 R_{mf} ，然后根据下式即可确定。

$$SSP = K \lg \frac{R_{mf}}{R_w} \quad (1-2)$$

这对于低矿化度的地层水和钻井液滤液来说，所得到的 R_w 是正确的。

但当上述溶液矿化度较高时，由于矿化度与溶液电阻率不是线性关系，如果仍用上式确定 R_w ，则会有一定的误差。在此引入“等效电阻率”的概念，即不论溶液矿化度范围如何，溶液的等效电阻率和溶液的矿化度总是保持线性关系，即：

$$SSP = K \lg \frac{R_{mfe}}{R_{we}} \quad (1-3)$$

式中 R_{mfe} ——钻井液滤液等效电阻率；

R_{we} ——地层水等效电阻率。

式 (1-3) 适用于任何矿化度的溶液，但求出的结果是地层水等效电阻率 R_{we} ，然后再用相应图版求出 R_w 。

7. 判断水淹层

在油田开发过程中，常采用注水的方法提高采收率，如果储层见到了注入水则该层称为水淹层。储层哪部分被水淹决定于岩层各部分的渗透性。一般规律是渗透性好的部分容易被水淹，利用测井资料判断水淹层位及估计水淹程度是检查注水效果的重要课题。目前有些油田利用 SP 曲线上出现基线偏移确定水淹层位，并根据偏移量 ΔE_{sp} （原基线与偏移后基线之间所代表的毫伏数）的大小估计水淹程度。一般情况下，注入淡水水淹后的油层，其被水淹的底部或顶部的 SP 异常明显小于未水淹部分的 SP 异常，使该层上下部泥岩基线发生明显的偏移。

二、微电极测井

(一) 方法原理

微电极电极距比普通电极系的电极距小得多,为了减小井的影响,电极系采用特殊的结构,测井时使电极紧贴在井壁上,这就大大减小了钻井液对结果的影响。

微电极测井普遍采用微梯度和微电位两种电极系,微梯度的电极距为 0.0375m,微电位的电极距为 0.05m。由于电极距很小,实验证明微梯度电极系的探测范围只有 5cm,微电位为 8cm 左右。

在渗透性地层处,由于钻井液滤液侵入地层中,在井的周围形成钻井液滤液侵入带,井壁上形成了泥饼,侵入带内的钻井液滤液是不均匀的。靠近井壁附近,孔隙内几乎都是钻井液滤液,这部分称钻井液冲洗带,它的电阻率大于 5 倍的泥饼电阻率,而泥饼电阻率约为钻井液电阻率的 1~3 倍,在非渗透的致密层和泥岩层段,没有泥饼和侵入带。渗透层和非渗透层的这种区别,是区分它们的重要依据。

由于微梯度和微电位电极系探测半径不同则泥饼钻井液薄膜(极板与井壁之间夹的钻井液)和冲洗带之间的电阻率也不同,探测半径较大的微电位电极系主要受冲洗带电阻率的影响,显示较高的数值。微梯度受钻井液影响较大,显示较低的数值。因此在渗透性地层处,这个差异可以判断渗透性地层,显示出的幅度差称为正幅度差;反之,显示出的幅度差称为负幅度差。

利用微梯度和微电位的视电阻率曲线的差别研究地层,必须使微电极系和井壁的接触条件保持不变,所以要求微梯度和微电位同时测量。

(二) 微电极曲线的应用

1. 划分岩性和储层

(1) 泥岩。微电极曲线幅度为低值,无幅度差或只有很小的正幅度差或负幅度差,曲线平直,但随含砂量增加幅度略有升高。

(2) 渗透性砂岩。幅度中等,明显正幅度差,幅度和幅度差有随粒度变粗而增加的趋势。

(3) 渗透性生物灰岩或其他渗透性碳酸盐岩石。微电极曲线幅度和幅度差均明显大于邻近的渗透性砂岩。具体岩性划分,可根据本地地质情况和解释经验而定。

(4) 致密砂岩或致密碳酸盐岩。微电极曲线有明显的高幅度,砂泥岩剖面一般幅度最高,薄层呈尖峰状,这是最基本的特征,至于幅度差可正可负,不足为凭。一般砂岩中的夹层判断为灰质砂岩,而孤立致密层的岩性解释则要根据地区经验和声速等岩性显示而定。

2. 确定岩层界面和扣除非渗透夹层

一般用微电位视电阻率异常的半幅点确定界面。如果储层顶部或底部有致密夹层,仍把致密夹层划在储层内。

(1) 致密夹层。微电极曲线有高尖峰显示,尖峰底部厚度为致密层厚度。

(2) 泥质夹层。微电极曲线明显下降,微梯度可降至泥岩值,微电位应降至低于砂岩微梯度值,但微梯度与微电位可不重合,此时可用微电位低阻异常的半幅宽作为泥岩夹层的厚度。

3. 确定井径扩大的井段

微梯度探测深度约 4cm,微电位探测深度约 10cm,它们相当于井壁探测环带的厚度。

而微电极弹簧片张开的最大直径约 40cm，若测井遇到石灰岩大溶洞或井壁坍塌形成的大洞穴，使弹簧片远离井壁，则微电极两条曲线幅度很低，等于或接近井下钻井液电阻率，则可判断该井段井眼扩大严重。

4. 确定冲洗带电阻率和泥饼厚度

这是最初发展微电极测井的目的之一，并制作了相应的解释图版，但经生产使用，发现地质效果并不很理想，解释方法又很繁琐，因而未推广。后来又发展了微侧向和微球形聚焦等冲洗带电阻率测井方法，使微电极测井的应用只限于定性解释。

三、微球形聚焦测井

(一) 方法原理

微球形聚焦测井原理与球形聚焦测井完全相同，只是电极系形状不同。主电极呈矩形，其他电极是矩形环状，电极间的距离变小，并装在绝缘极板上，借助于推靠器，使电极与井壁直接接触，辅助电流 I_a 主要经泥饼流入 A_1 ，这就减小了泥饼的影响，迫使主电流 I_0 流入地层中。对渗透性地层，即使流到侵入带中，但由于电极距小，探测深度浅，也不受原状地层电阻率影响，主要是探测侵入带电阻率 R_{xo} 。

微球形聚焦测井一般与双侧向测井组合成一种综合下井仪器。一次下井能提供以下曲线：

- (1) 深侧向测井电阻率 (R_{LLD}) 曲线；
- (2) 浅侧向测井电阻率 (R_{LLS}) 曲线；
- (3) 微球形聚焦测井电阻率 (R_{MSFL}) 曲线、井径曲线；
- (4) 自然电位曲线；
- (5) 泥饼厚度。

(二) 地质应用

实际应用前，先制作双侧向测井的井眼校正和围岩校正图版，以及双侧向—微球形聚焦组合图版。然后对 R_{LLD} 和 R_{LLS} 进行井眼和围岩校正，利用微球给出的侵入带电阻率 R_{xo} 和组合图版得出地层电阻率 R_t 。再利用相应的饱和度公式即可得出地层含油饱和度。用 R_{xo} 可求出侵入带的残余油饱和度，从而可得出可动油饱和度。

四、双侧向测井

(一) 方法原理

双侧向测井是在三侧向和七侧向的基础上发展起来的，所以先大致讲一下七侧向测井的工作原理。

七侧向的电极系由七个环状金属电极组成。一个主电极 A_0 ，两对监督电极 M_1 和 M_2 ， N_1 和 N_2 以一对屏蔽电极 A_1 和 A_2 ，每对电极对称地分布在 A_0 两侧，并短路相接。

测量时 A_0 电极供以恒定电流 I_0 ，屏蔽电极 A_1 和 A_2 流出相同极性的屏蔽电流 I_s ，通过自动调节，使监督电极 M_1 和 N_1 (M_2 和 N_2) 之间的电位差为零，因此无论从 A_0 或 A_1 、 A_2 来的电流都不能穿过 M_1 、 N_1 (M_2 与 N_2) 之间的介质。迫使电流沿径向流入地层。主电极的 I_0 电流呈圆盘状沿径向流入地层，圆盘厚度约为 O_1O_2 (O_1 ， O_2 分别为 M_1N_1 和 M_2N_2 的中点)。

七侧向

$$R_a = KU_m / I_0 \tag{1-4}$$

式中 U_m —— M_1 (或 N_1) 电极相对远处 N 电极的电位;

I_0 —— A_0 电极的供电电流;

K ——七电极侧向测井电极系数。

上述的七侧向是深七侧向测井, 其探测深度较大, 为研究井壁附近侵入带的电阻率, 提出了浅七侧向测井。除了深七侧向的七个电极外, 又在屏蔽电极 A_1 和 A_2 的外侧, 加上回路电极 B_1 和 B_2 , B_1 、 B_2 电极的极性与 A_0 , A_1 , A_2 相反, 因此, 由 A_0 , A_1 , A_2 流出的电流穿入地层后不远, 即流向 B_1 , B_2 电极, 从而减小了探测深度, 主要反映侵入带电阻率的变化。

双侧向测井的原理与七侧向测井类似, 采用两个柱状电极和七个环状电极, 主电极 A_0 通以恒定的测量电流 I_0 , M_1 和 M_2 (N_1 和 N_2) 为测量电极, 测量过程中, 通过自动调节电路保持监督电极 M_1 和 N_1 (M_2 和 N_2) 间的电位差为零, 柱状屏蔽电极 A_1' 上的电位与环状屏蔽电极 A_1 上的电位比值为一常数, 即 $U_{A_1'}/U_{A_1}=\alpha$ 。进行深侧向测井时屏蔽电极 A_1 、 A_1' 合并为上屏蔽电极, A_2 和 A_2' 合并为下屏蔽电极, 并发射极性与 A_0 电极相同的屏蔽电流 I_s 。浅侧向测井时, A_1 和 A_2 为屏蔽电极, 极性与 A_0 电极相同, A_1' , A_2' 为回路电极, 极性与 A_0 相反。由 A_0 和屏蔽 A_1 , A_2 流出的电流进入地层后很快返回到 A_1' , A_2' 电极, 减少了探测深度。

(二) 双侧向测井曲线的应用

1. 确定地层的真电阻率

经过井眼、围岩、侵入三种影响因素校正后, 可以确定岩层的真电阻率 R_t 和侵入带直径 d_i 值。

2. 划分岩性剖面

由于井眼分流小, 对于电阻率不同的岩层都有明显的曲线变化, 厚度在 0.6 m 以上的地层都可分辨。如果与邻层电阻率差异较大, 其厚度在 0.4 m 时亦有明显的异常变化。

3. 快速、直观判断油层、水层

将深、浅侧向视电阻率曲线重叠绘制, 观察两条曲线幅度的相对关系, 在渗透层井段会出现幅度差。深侧向曲线幅度大于浅侧向曲线幅度, 称为正差异; 反之当深侧向曲线幅度小于浅侧向曲线幅度时, 称为负差异。在其他条件相同时, 地层中含有油气, 双侧向曲线会显示为正差异, 当地层中含水时, 双侧向曲线显示为负差异。

将目前所使用的侧向测井电极系进行比较, 结果表明, 在探测深度、纵向分辨能力上各有优缺点。权衡的结果认为双侧向电极系较优越, 资料便于对比, 使用效果较好, 目前得到越来越多的应用。

4. 识别裂缝

深电阻率曲线主要反映原状地层电阻率, 浅电阻率曲线主要反映侵入带电阻率, 两条曲线一般以相同纵横向比例重叠绘制。在裂缝发育段, 两条曲线具有明显的幅度差, 可据此定性和定量地分析与判别裂缝的延伸和产状。该方法简单快速, 效果较好, 应用非常广泛。

五、双感应—八侧向测井

电法测井在油气层饱和度评价方面具有其他测井无法替代的作用。常规电法测井中主要用到的测井方法有深浅侧向、双感应—八侧向等, 在低孔低渗油藏主要采用双感应—八侧向测井。主要应用包括:

- (1) 求取地层的真电阻率；
- (2) 感应测井与一种孔隙度测井组合，可以计算地层水电阻率 R_w 、钻井液滤液电阻率 R_{mf} 、地层水含水饱和度 S_w 、含油气饱和度 S_h ；
- (3) 定性判断油水层；
- (4) 油田地质研究。如油层对比和油层非均质性研究，感应测井优于侧向测井和普通电阻率测井，因为感应测井曲线的界面清楚，层内非均质性显示明显，与自然电位曲线对应较好。

六、补偿声波测井

声波测井是通过测量井壁介质的声学性质来判断井壁地层的地质特性及井眼工程状况的一类测井方法，简称声速测井。它是最早发展的一种声波测井方法，也是目前使用最普遍的一种声波测井方法。因而声波测井常常就是指声速测井。

(一) 方法原理

1. 单发双收存在的缺陷

声系的发射探头和接收探头，即换能器，是由压电陶瓷晶体制成，利用这种晶体具有的压电效应的物理性质，以其反效应发生声波，以其正效应接收声波。单发双收存在一定的缺陷，表现为：

(1) 在井眼比较规则的时候能够测量记录井壁上随深度变化的时差，而且测量结果不受井内钻井液的影响。但如果井眼不规则，测量结果会受井内钻井液声速的影响，且误差较大。

(2) 单发双收声系存在深度误差。我们规定单发双收声系的记录点为两接收探头的中点。它记录的结果应该是在该记录点附近厚度为 L_d 的岩层的声速平均值，但实际情况并不是这样。声波在两个接收探头之间传播的距离并不和它们所对应的地层完全重合。这一深度误差在地层速度较高、井径较小时并不大，可忽略。但当地层 v_c 与 v_l 相差不大，且井径增大时，如在疏松的泥岩段，井壁坍塌，发生井径扩大，且第一临界角比较大，这一误差可达 0.5m，因此，深度误差必须考虑。

2. 井眼补偿声波测井

为了消除深度误差及井径不规则所引起的误差，一般采用双发双收声系井眼补偿声波测井。井眼补偿声波测井的井下仪器通常设有两个发射器和两个接收器，称为“双发双收”声波测井仪，其简单结构如图 1-2 所示。它由两个发射器 T_1 、 T_2 和两个接收器 R_1 、 R_2 组成。两个接收器在中间，两端放置发射器。

3. 井眼补偿声波测井原理

测井时，上、下发射器交替发射声脉冲，两个接收器接收 T_1 、 T_2 交替发射产生的滑行波，得到时间差 Δt_1 和 Δt_2 ，地面仪器的计算电路对 Δt_1 、 Δt_2 取平均值。

$$\Delta t = (\Delta t_1 + \Delta t_2) / 2 \quad (1-5)$$

由图 1-2 可以看出，双发双收声波测井仪的 T_1 发射得到的 Δt_1 和 T_2 发射得到的 Δt_2 曲线，在井径变化处的变化方向相反，所以，取平均值得到的曲线恰好补偿掉了井径变化对测量结果的影响。双发双收声波测井仪还可以补偿仪器倾斜对时差造成的影响。

另外，在一定程度上降低了深度误差。这是由于上发射时，测量地层的中点位于仪器记

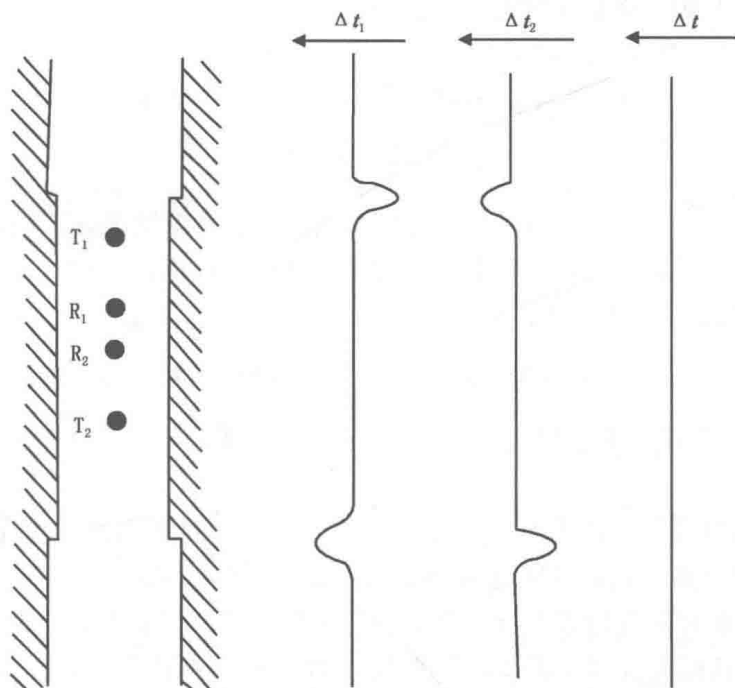


图 1-2 双发双收井眼补偿声波测井示意图

录点的上方；下发射时，测量地层的中点位于仪器记录点的下方，当接收器对应地层速度及井径变化不大时，即可保证实际记录点与仪器记录点重合，不再出现深度误差。

4. 声波时差测井曲线的影响因素

(1) 井径的影响。扩径段声波时差减小，使时差曲线出现假异常。

(2) 层厚的影响。声波测井仪对小于间距的薄地层分辨能力较差。减小间距可以提高对于薄层的分辨能力，但是记录精度就受影响了，特别是探测深度也随之变浅。

(3) 周波跳跃的影响。正常情况下，声波测井仪的两个接收探头是被同一脉冲首波触发的，但在含气疏松地层中，由于能量的严重衰减致使首波减弱到只能触发第一接收探头而不能触发第二接收探头的情况下，第二接收探头为后续波所触发时，则会出现测井曲线上的急剧偏转或特别大的时差值，这种现象称为周波跳跃。含气的疏松砂岩、裂缝发育的地层以及钻井液气侵的井段，由于声能量的严重衰减，经常出现周波跳跃现象。所以周波跳跃是疏松砂岩气层和裂缝发育地层的一个特征，可被利用来寻找气层或裂缝带。

(二) 声波测井曲线的应用

1. 确定岩性和孔隙度

声波测井是最常用的岩性—孔隙度测井方法之一。要想用声波测井确定地层的岩性和孔隙度，就必须建立声波测井响应方程。目前比较流行的声波测井响应方程有以下三种。

(1) 威利时间平均公式。

国内外实验研究和理论分析都证明了纯岩石声波时差与其孔隙度的关系是线性的，这一关系最初是 MRJ Wyllie 提出来的，常称为威利时间平均公式，其形式为

$$\Delta t = (1 - \phi) \Delta t_{ma} + \phi \Delta t_f \quad (1-6)$$

式中 Δt ——测量的纯砂岩声波时差， $\mu s/m$ ；

Δt_{ma} ——岩石骨架声波时差， $\mu s/m$ ；

Δt_f ——岩石孔隙流体的声波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$;

ϕ ——纯砂岩孔隙度, 无量纲。

由公式可导出求纯砂岩孔隙度的公式:

$$\phi = (\Delta t - \Delta t_{ma}) / (\Delta t_f - \Delta t_{ma}) \quad (1-7)$$

各地用本公式计算的孔隙度结果, 发现比实测的岩心孔隙度偏高, 而偏高的程度与岩石压实程度有关, 岩石完全压实则没有差别。为了进行压实校正, 在式 (1-7) 中引入压实校正系数 C_p , 求砂岩孔隙度的方程则为:

$$\phi = (\Delta t - \Delta t_{ma}) / [(\Delta t_f - \Delta t_{ma}) C_p] \quad (1-8)$$

式 (1-8) 是常用的计算孔隙度公式之一。 $C_p \geq 1$, 采用经验方法确定。

(2) 非线性方程。

1980 年, 人们对威利公式的使用效果进行了分析, 并对不同孔隙度范围 (低到中, 孔隙度接近 25%; 中到高, 孔隙度接近 40%; 极高, 孔隙度为 45% ~ 85%, 现代沉积) 的声波时差与孔隙度关系分别进行了拟合, 提出对不同孔隙度范围采用不同的非线性方程, 不做压实校正, 可求得比威利公式更准确的孔隙度。对于常见的孔隙度范围 (0 ~ 57%), 计算孔隙度的方程为:

$$\frac{1}{\Delta t} = \frac{(1-\phi)^{m'}}{\Delta t_{ma}} + \frac{\phi}{\Delta t_f} \quad (1-9)$$

式中 m' ——同岩性有关的系数, 砂岩为 2, 碳酸盐岩为 2 ~ 2.2。

(3) 声波地层因数方程。

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_{ma}} = \frac{1}{(1-\phi)^x} \quad (1-10)$$

指数 x 可用岩性孔隙度绘制 $\lg (1/\Delta t)$ 与 $\lg (1-\phi)$ 交会图确定, 或按岩性选用经验值: 砂岩 $x=1.6$, 石灰岩 $x=1.76$, 白云岩 $x=2$ 。式 (1-10) 的优点是不必做压实校正, 也不需要流体时差, 而计算结果与岩心资料的拟合可能最好。

2. 识别气层和裂缝

声波测井用首波触发记录电路, 一般对第一接收器, 首波都有足够的幅度触发电路, 如声波衰减过大, 第二接收器的首波将没有足够的幅度触发电路, 要依靠续至波触发电路, 这样将使记录的时差增大或出现“周波跳跃”, 即声速曲线在一段地层内忽高忽低地交替变化。当衰减特别大时, 甚至要依靠第二、第三个续至波才能触发电路, 使记录时差特别大, 周波跳跃呈阶梯变化。含气的疏松砂岩具有典型的周波跳跃。如果气层是胶结良好或压实的, 一般没有明显的周波跳跃, 但时差有增大或明显增大的显示。气层压力越高越明显。裂缝或层理异常发育的地层, 也可出现时差明显增大或周波跳跃, 因为声波在裂缝间要经过多次反射和折射, 声波衰减较大。因此, 对声速曲线做定性解释, 要根据具体情况做具体分析。

(1) 时差增大 (如增大 10 ~ 20 $\mu\text{s}/\text{m}$), 可认为同类地层中孔隙更发育一些。如果有产气或生成裂缝的地质依据, 也可判断为有气或有裂缝带。

(2) 如果时差明显增大或有周波跳跃, 当地质上可能含气, 并且电阻率测井以明显高电阻率显示证明地层含油气时, 可判断为气层; 当地质上不可能含气时, 可判断为裂缝异常