

SHUIWEN DIQIU WULI CEJING FANGFA YU YINGYONG

水文地球物理测井 方法与应用

郭崇光 李振拴 赵莹 杨展 编著

煤炭工业出版社

水文地球物理测井方法与应用

郭崇光 李振拴 赵莹 杨展 编著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

全书共九章,分别论述了电法测井、放射性测井、声波测井、井内技术测量、井液电阻率测井、流量测井、温度测井,以及测井仪器设备和水文测井资料的综合应用。重点介绍了专门水文测井方法和综合测井方法的应用。

本书适用于从事测井及水文地质勘探工作的人员,也可作为其他相关专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

水文地球物理测井方法与应用/郭崇光等编著. —北京:煤炭工业出版社,2006

ISBN 7-5020-2859-5

I. 水… II. 郭… III. 水文地质勘探:地球物理勘探-测井 IV. ①P641.72②P631.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第036921号

煤炭工业出版社 出版

(北京市朝阳区芍药居35号 100029)

网址: www.cciph.com.cn

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm×1092mm¹/₁₆ 印张 16

字数 371千字 印数 1—1,500

2006年6月第1版 2006年6月第1次印刷

社内编号 5646 定价 50.00元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换



■ 第一作者 郭崇光

物探高级工程师。毕业于四川矿院（现中国矿业大学）地球物理勘探专业。毕业后一直在山西省煤炭地质水文勘查研究院，从事测井等物探工作近三十年。现任山西省煤炭地质水文勘查研究院物探队总工程师，山西省地球物理学会副理事长，为山西省科技专家。曾参加多项大型水源勘探等项目，主持物探工作，多次获优秀报告奖。发表有学术价值的论文15篇，其中1篇在国际学术研讨会交流；合著图书《中国北方喀斯特水源地勘探方法研究》。

前 言

随着我国改革开放的不断深入, 经济建设的迅速发展, 水文测井不仅仅应用于水文地质, 而且已渗透到许多领域, 如矿产开采、工程地质、环境地质、灾害地质、基础建设等。因此, 进行研究水文测井的综合应用, 对提升综合地质勘查效果, 服务于经济建设具有重要的意义。

水文测井属地球物理应用学科, 是地质勘查的主要手段之一。我国的水文测井工作自1957年在山西开始开展以来, 已经历了将近半个世纪的时间, 无论从方法原理、测量技术到资料的分析处理及应用研究都有很大的发展。同行专家们总结了不少工作经验, 发表了许多有价值的论文, 同时出版了一些专著, 但较系统地编写水文测井应用书刊的却不多。为使水文测井更好地服务于国民经济建设, 山西省煤炭地质水文勘探研究院进行了综合水文测井的应用研究, 编者根据亲身的实践经验及平时积累和收集的一些资料编写了《水文地球物理测井方法与应用》一书。

本书是以专门水文测井方法和综合应用为主, 从基础知识、基本原理到探测仪器、测量方法技术及实例分析应用较系统地进行了介绍, 并列举了大量应用实例。对图像测井较为详细地作了介绍。考虑到本书的完整性, 对常规测井方法也作了一般性介绍。

本书共分九章, 主要包括5大部分: ①常规测井部分, 即电、核、声、井内技术测井。②图像测井, 即超声成像和井下电视测井。③专门水文测井部分, 即流量、井液电阻率、温度测井。④仪器设备简介部分。⑤综合应用部分。本书由郭崇光主编、审订, 参加编写人员有郭崇光、李振拴、赵莹、杨展、樊甲成、张树田, 主要引用参考文献作者有黄智辉、葛亮涛、高洪烈、陈森鑫。初稿完成后, 承蒙中国煤炭地质总局教授级物探高工段铁梁审阅, 并在审稿中提出了许多宝贵意见, 在此表示衷心的感谢。

在本书编写过程中, 参考和吸收了同行专家们的研究成果(常规测井和理论基础部分), 以及实际工作经验和应用实例。因此, 本书是各位编者以及书后所引参考文献的各位作者集体劳动的成果, 借此机会对所引参考文献的各位作者表示诚挚地谢意。本书中多数应用实例和研究成果来源于山西省煤炭地质水

文勘查研究院,均是多年来与编者在一起工作的同志们共同完成的,慕秀琴、马伯华、李宝宏同志参与了部分文字的录入,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,经验不足,所掌握资料不多,其中疏漏错误和不妥之处在所难免,恳请读者及专家和同行们批评指正。

编者

2006年4月8日

目 录

| | |
|---------------------------|----|
| 绪论 | 1 |
| 1 电测井及其应用 | 3 |
| 1.1 自然电位法及其应用 | 3 |
| 1.1.1 自然电位的成因 | 3 |
| 1.1.2 自然电位曲线在水文地质中的应用 | 5 |
| 1.2 视电阻率法及其应用 | 5 |
| 1.2.1 岩石的电阻率及其影响因素 | 6 |
| 1.2.2 视电阻率测井的基本原理 | 6 |
| 1.2.3 视电阻率测井曲线在水文地质中的应用 | 9 |
| 1.3 侧向测井及其应用 | 10 |
| 1.3.1 三电极侧向测井的基本原理 | 10 |
| 1.3.2 三电极侧向测井曲线的特点 | 12 |
| 1.3.3 三电极侧向测井曲线的应用 | 12 |
| 1.4 微电极系测井及其应用 | 13 |
| 1.5 激发极化测井及其应用 | 14 |
| 1.5.1 激发极化测井的基本原理 | 14 |
| 1.5.2 视极化率测井曲线的解释及其应用 | 16 |
| 参考文献 | 17 |
| 2 放射性测井及其应用 | 18 |
| 2.1 核物理基础知识 | 18 |
| 2.1.1 原子结构 | 18 |
| 2.1.2 放射性及衰变规律 | 18 |
| 2.1.3 γ 射线与物质的相互作用 | 21 |
| 2.1.4 γ 射线的吸收 | 21 |
| 2.1.5 中子 | 22 |
| 2.1.6 γ 射线强度的测定 | 23 |
| 2.2 γ 测井及其应用 | 24 |
| 2.2.1 岩石的放射性 | 24 |
| 2.2.2 γ 测井的基本原理 | 24 |
| 2.2.3 γ 测井仪的刻度 | 24 |
| 2.2.4 γ 测井曲线的应用 | 25 |

| | | |
|----------|-------------------------|-----------|
| 2.3 | γ-γ 测井及其应用 | 26 |
| 2.3.1 | γ-γ 测井的基本原理 | 27 |
| 2.3.2 | 补偿密度测井 | 28 |
| 2.3.3 | γ-γ 及补偿密度测井曲线的应用 | 30 |
| 2.4 | 中子测井 | 30 |
| 2.5 | 同位素示踪测井 | 32 |
| 2.5.1 | 群井工作方式 | 32 |
| 2.5.2 | 单孔测量 | 33 |
| | 参考文献 | 35 |
| 3 | 声波测井法及其应用 | 36 |
| 3.1 | 岩石的声学特性 | 36 |
| 3.1.1 | 岩石的弹性 | 36 |
| 3.1.2 | 声波在岩石中的传播 | 38 |
| 3.1.3 | 纵波和横波 | 39 |
| 3.2 | 声波速度测井 | 40 |
| 3.2.1 | 声波速度测井的基本原理 | 40 |
| 3.2.2 | 声波速度测井曲线及其影响因素 | 43 |
| 3.2.3 | 井眼补偿式声波测井法 | 45 |
| 3.2.4 | 声波速度测井曲线的应用 | 47 |
| 3.3 | 声波幅度测井 | 48 |
| 3.4 | 超声波扫描成像测井 | 49 |
| 3.4.1 | 超声波扫描成像测井仪 | 50 |
| 3.4.2 | 超声波图像的分析解释 | 54 |
| 3.4.3 | 超声成像测井的应用 | 55 |
| | 参考文献 | 60 |
| 4 | 井内技术测量及其应用 | 61 |
| 4.1 | 井斜测量 | 61 |
| 4.1.1 | 点测井斜仪 | 61 |
| 4.1.2 | 连续井斜仪 | 62 |
| 4.2 | 井径测量 | 63 |
| 4.2.1 | 井径仪的测量原理 | 63 |
| 4.2.2 | 井径仪的使用 | 64 |
| 4.3 | 电视测井 | 66 |
| 4.3.1 | 电视测井的原理及仪器 | 66 |
| 4.3.2 | 电视测井在水井成井和修井中的应用 | 67 |
| | 参考文献 | 70 |

| | |
|----------------------------------|-----|
| 5 井液电阻率测井及其应用 | 71 |
| 5.1 井液电阻率测井的基本原理及仪器..... | 71 |
| 5.1.1 基本原理..... | 71 |
| 5.1.2 测量仪器..... | 71 |
| 5.2 井液电阻率测井的测量方法及其技术..... | 74 |
| 5.2.1 测量方法..... | 74 |
| 5.2.2 测量技术..... | 75 |
| 5.3 自然井液电阻率曲线的应用..... | 79 |
| 5.3.1 确定岩溶裂隙含水层位置..... | 79 |
| 5.3.2 确定井液界面和区分咸淡水界面..... | 83 |
| 5.3.3 了解地下水的矿化度及对环境的污染..... | 83 |
| 5.4 人工井液电阻率曲线的应用..... | 83 |
| 5.4.1 人工井液电阻率曲线的基本类型..... | 83 |
| 5.4.2 横向扩散型曲线的应用..... | 87 |
| 5.4.3 垂向扩散(注入)型曲线的分析应用..... | 87 |
| 5.4.4 检查止水效果..... | 94 |
| 参考文献..... | 95 |
| 6 流量测井法及其应用 | 96 |
| 6.1 流量测井的理论基础..... | 96 |
| 6.1.1 多含水层混合井流动力学特征..... | 96 |
| 6.1.2 多含水层混合抽水时流量与水位降低的关系曲线..... | 97 |
| 6.1.3 井中纵向水流及其变化规律..... | 98 |
| 6.2 流量测井仪..... | 103 |
| 6.2.1 叶轮流量测井仪的组成及其工作原理..... | 104 |
| 6.2.2 叶轮流量测井仪的分类..... | 104 |
| 6.2.3 连续流量测井仪..... | 106 |
| 6.2.4 叶轮流量测井仪的标定..... | 109 |
| 6.3 流量测井的测量方法及其技术..... | 112 |
| 6.3.1 流量测井的施测方法..... | 112 |
| 6.3.2 连续测量的记录方式..... | 117 |
| 6.3.3 测量技术要求..... | 117 |
| 6.3.4 测量技术条件对流量测井的影响..... | 118 |
| 6.4 流量测井曲线的应用..... | 120 |
| 6.4.1 曲线的分析解释..... | 120 |
| 6.4.2 应用实例..... | 125 |
| 6.4.3 简易流量测井的应用..... | 138 |
| 参考文献..... | 140 |

| | |
|------------------------------|-----|
| 7 温度测井法及其应用 | 142 |
| 7.1 温度测井的理论基础 | 142 |
| 7.1.1 有关传热的基本知识 | 142 |
| 7.1.2 地球的热场及地热异常 | 146 |
| 7.1.3 温度测井的概念 | 149 |
| 7.2 温度测井的测量原理和仪器 | 152 |
| 7.2.1 用不同温度系数的金属制成的井温仪 | 153 |
| 7.2.2 利用热敏电阻制成的井温仪 | 153 |
| 7.2.3 利用感温二极管制成的井温仪 | 155 |
| 7.2.4 井温测井仪的使用现状 | 158 |
| 7.3 温度测井方法及其测量技术 | 159 |
| 7.3.1 测量方法的类型 | 159 |
| 7.3.2 测量技术条件对测温成果的影响 | 160 |
| 7.3.3 测量技术要求 | 161 |
| 7.3.4 地温与地温梯度的确定 | 161 |
| 7.3.5 简易测温资料的校正 | 163 |
| 7.4 井温资料的分析应用 | 165 |
| 7.4.1 井温曲线的类型 | 166 |
| 7.4.2 含水层在井温曲线上的特征 | 167 |
| 7.4.3 井温资料的应用 | 170 |
| 参考文献 | 184 |
| 8 测井仪器设备简介 | 185 |
| 8.1 模拟测井系统 | 185 |
| 8.2 数字测井系统 | 187 |
| 8.2.1 TYSC-3Q 型数字测井系统 | 187 |
| 8.2.2 JGS-1B 型智能测井系统 | 194 |
| 8.2.3 PSJ-2 型轻便数字测井系统 | 199 |
| 8.2.4 JHQ-2D 型数字测井系统 | 204 |
| 参考文献 | 207 |
| 9 水文测井资料的综合应用 | 208 |
| 9.1 地下水的基本知识 | 208 |
| 9.1.1 含水层的赋存 | 208 |
| 9.1.2 地下水的运动与循环 | 211 |
| 9.1.3 含水层的重要水文地质性质及参数 | 214 |
| 9.1.4 地下水的物理性质和化学成分 | 217 |
| 9.2 水文测井参数的综合选择 | 218 |

| | |
|----------------------------------|-----|
| 9.3 钻孔地质剖面划分 | 220 |
| 9.3.1 区分不同岩性的岩层, 进行全孔地质解释 | 220 |
| 9.3.2 确定破碎带 | 224 |
| 9.3.3 划分新老地层界面 | 224 |
| 9.3.4 孔隙性地层的划分 | 227 |
| 9.3.5 岩溶裂隙的划分 | 228 |
| 9.4 含水层的综合解释 | 230 |
| 9.4.1 流体(专门水文)测井的综合解释 | 230 |
| 9.4.2 常规测井与流体(专门水文)测井的综合解释 | 232 |
| 9.5 其他有关参数的解释 | 240 |
| 9.5.1 岩土层含水量的解释 | 240 |
| 9.5.2 岩土层孔隙率的解释 | 241 |
| 9.5.3 地层水矿化度的确定 | 244 |
| 9.5.4 岩土层密度的解释 | 245 |
| 9.6 多孔测井资料的综合应用 | 246 |
| 参考文献 | 246 |

绪 论

地球物理测井，简称测井，又称为钻井地球物理或矿场地球物理测井。它是应用地球物理方法来研究钻孔地质剖面，从而解决某些地下地质问题和钻井技术问题的一门技术科学，是地质勘探工作的主要手段之一。

从测井方法的大类来讲，首先分成参数测井和钻孔环境测井两类。前者是有关测井规程规范中提出的要求测量的物性参数（电、核、声、磁、热、光及流体性质等，这些参数反映地层的或与地层密切相关的流体信息，实际上是岩性测井的范畴），后者是钻孔的环境测量（包括井径、井斜、地层产状、井温、沉渣厚度、套管接箍、水泥凝结检测等）。根据勘探对象的不同，测井又可分为油田测井、煤田测井、金属非金属矿测井、水文测井及工程测井等。根据勘探对象的地质——地球物理特点，它们既有选用共同的物理参数进行测井的共性，又有选用各自独特的物理参数进行测井的特性。水文测井中将共性的物理参数测井通称为常规测井，将能反映地下水活动特征参数测井称为专门水文测井，本书着重介绍专门水文测井及其综合应用。

我国的测井工作起步于1939年翁文波在四川巴县石油沟的测井试验。1948年在玉门油矿做过少量电测井工作。新中国成立后，随着油田、煤田勘查工作的展开及油田、煤田的不断发现和开发，大大促进了测井技术的发展。1954年，煤田、金属非金属矿等测井均开始试验和应用。水文测井起步于1957年，其发展过程大致为以下情况。

1957~1958年，煤炭部门在山西太原西山煤矿及地质部门在四川南桐煤矿使用了井液电阻率仪。在人工盐化条件下，通过提捞、注入和自然扩散等方式测定孔内含水层位置、渗透速度，并计算钻孔涌水量，获得成效，被认为是我国水文测井的开端。1960年，我国物探工作者在水文钻孔的混合抽水试验中使用流量测井仪，测定通过井中每一横截面或若干横截面的纵向水流量，以查明各含水层层位、涌水量（或吸水量）及补给关系，取得较好成效。在使用上述方法的同时，其他一些方法，如自然电位、电阻率、自然 γ 、 γ - γ 、井温及井径测量等也在水文测井工作中得到应用。我国物探工作者对水文测井某些方法的技术问题作了较深的研究，取得了有实用意义的成果。20世纪50~60年代初的这些起步性工作，为我国广泛开展水文测井奠定了较好基础。此后一些声测井方法，以及主要适用于专门水文钻孔的井中光学电视等方法也得到应用。我国水文测井技术水平和方法的综合化程度得到进一步提高，解决问题能力得到进一步增强。在指导包括孔隙水、裂隙水、岩溶水在内的各类水文钻孔的成井及旧井处理等工作中发挥了重要作用。

水文测井是水文、地热，以及矿产资源、工程和环境地质勘查工作中的一个重要组成部分，亦是钻孔以及整个工程监理工作的重要手段。水文测井是在水文地质勘查工作的生产实践中逐步发展起来的，水文测井的发展对提高勘查质量及加快勘查速度、降低勘查成本起着很大的作用。目前，测井资料的地质解释成果已成为供水、修井、水害防治和编制其他地质资料的重要依据。因此，所有为水文、地热等地质项目所施工的钻孔（井），尤其

是无岩心钻孔，都需进行水文测井。目前，水文测井可解决的地质任务主要有下列8项。

(1) 判别岩性、编录和校正钻孔地质剖面。

(2) 确定含(隔)水层位置和厚度，判定为孔隙含水、裂隙含水或溶洞含水，含咸水或淡水，含冷水或热水。

(3) 计算含水层的孔隙率，渗透率，矿化度，含水砂岩的砂、泥、水含量和岩、土层的力学参数。

(4) 确定各涌、漏水部位的涌、漏水量，估算单井涌水量。查明钻孔中含水层之间的补给关系，并测量地下水的流速和流向等。

(5) 测量静止水位，检查钻孔的止水质量和堵孔质量。

(6) 研究钻孔技术状况。包括井径、井斜的变化，套管完好情况，井内故障位置和原因等。为定向孔、灌注桩、老井修复等工程项目提供精确资料。

(7) 进行区域性的地层对比。了解含水层在地下空间的分布范围和特征，建立地热田的热储模型。

(8) 提供岩(水)层物性参数。

上述任务由于各地区的地质——地球物理条件及井内结构情况的不同，取得的地质效果也不尽相同。此外，这些任务中有一些已经相当成熟，有一些正处于取得一定成果的试用之中。

由于地质条件是复杂的，需要解决的任务是多样的，因此采用的研究手段也必须是多参数的。实际测井中可根据不同的地质任务，进行不同组合选测。目前，根据岩层和物质的不同物理性质及岩石空隙中地下水的特征建立起来的，并且在水文钻孔中广泛应用的测井方法有：

(1) 以岩石导电性为基础的一组方法。其中包括普通电极系电阻率法测井、侧向测井、微电极系测井、激发极化测井、感应测井等。

(2) 以岩石电化学性质为基础的自然电位测井等。

(3) 以物质的原子物理和核物理性质为基础的一组方法。其中包括自然 γ 、 γ - γ 密度测井、中子测井及同位素测井等。

(4) 以岩石弹性为基础的一组方法。其中包括声波速度测井、声波幅度测井、超声波扫描成像测井等。

(5) 以岩石空隙中的地下水活动特征为基础的一组方法。其中包括流体识别测井(又称井液电阻率测井含扩散法、注入法)、流量测井、井液温度测井及同位素测井等。

(6) 研究钻孔技术状况的一组方法。其中包括井径、井斜测井、地层参状测井及电视测井等。

测井仪器的水平也随着电子工业的发展不断更新，从最早的手摇式半自动模拟记录→推笔式或静电显影自动模拟记录→磁带数字记录→计算机数字记录，井下仪器也向组合化方向有了很大发展，便于按照测井系列的需要进行组合。为了减少井径、泥浆、泥饼和邻层的影响，井下仪器基本上都采用聚焦、井眼补偿、贴井壁和加扶正装置等方式。

概括起来，现代测井技术的发展具有方法系列化、仪器综合化、记录数字化、操作程控化和解释自动化的特点。

随着测井方法的不断提高和完善，以及测井仪器设备的不断改进和更新，水文测井在整个地质勘查中必将发挥越来越多的作用。

1 电测井及其应用

电测井是国内外出现最早，发展形成的方法种类较多，在应用中始终处于重要地位的一类测井方法。20世纪50年代中期，我国的油田、煤田、金属矿产勘探已开展电测井工作，但各部门的发展不太平衡，采用的方法、仪器种类较多。这里只简要介绍目前水文测井中常用的自然电位测井、普通视电阻率测井、侧向测井、微电极系及激发极化测井。

1.1 自然电位法及其应用

自然电位测井是最早兴起的测井方法之一，是以岩石的电化学活动性质为基础的测井方法。自然电位测井是测量沿井轴移动的M电极与固定在地面的N极之间的自然电位差，其测量线路如图1-1所示。

在井内及井的四周，发生着一系列自然的物理-化学作用过程，并在岩层与岩层、岩层与井液相接触的界面上形成电动势。这些自然电动势引起流过岩层及井液的自然电流，自然电流造成沿井轴变化的电位降落，因此，沿井轴各点上就有不同的自然电位。根据测量的自然电位，可以研究岩层的岩性和它的电学性质之间的关系，从而解决水文地质问题。

1.1.1 自然电位的成因^[1]

产生井中自然电位的原因较为复杂，就水文来说，产生井中自然电位的主要成因有地层水与井液之间的扩散作用、岩石颗粒对离子的吸附作用等。

1.1.1.1 扩散电位

当两种不同浓度（含盐量不同）的溶液直接接触时（如地层水与泥浆接触），就会产生扩散现象。由于浓度的差别，被离解的正负离子就会在渗透压力作用下，从浓度大的溶液扩散到浓度小的溶液中去。又因为正、负离子的迁移率不同，因此在

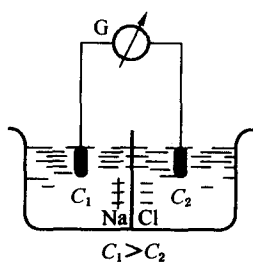


图1-2 两种不同浓度溶液接触产生电位差

浓度较小的溶液中就会出现过多的迁移率大的离子，而在浓度大的溶液中，就会出现过多的符号相反的离子。例如，两种不同浓度的NaCl溶液，在它们直接接触时，因为Cl离子的迁移率大于Na离子，因而低浓度溶液中就会有Cl离子的积聚，而在高浓度的溶液中就相对地积聚了Na离子，这样就在两种溶液间产生了一定的电位差（图1-2）。但是，由于这种电位差的建立，正负离子在继续扩散时，Cl离子受到正电荷的吸引和负电荷的排斥，其移动速度将减低；Na离子受到正电荷的排斥和负电荷的吸引，其移动速度将加大，结果使正负电荷在两种不同浓度的溶液中富集的速度减慢。当两端的电位差增加到Cl离子与Na离子移动速度相同时，正、

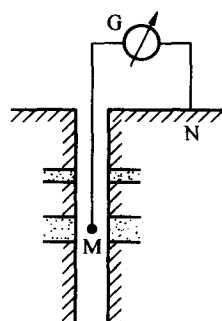


图1-1 自然电位测井线路图

负电荷的富集便停止了。但这时因为仍然存在浓度差，所以离子的扩散仍在进行，只不过此时因正、负离子的移动速度相同，而达到了动态平衡状态，电位差将保持一个定值。这个电位差是离子扩散产生的，故称扩散电位。实验证明，扩散电位的产生是因为溶液存在着浓度差，而其大小除决定于浓度差之外，尚与溶液的温度和溶液中所含离子的种类有关。

两种溶液，当溶质的分子在溶液中全部离解时，直接接触的扩散电动势可由电化学中导出的涅耳斯特公式表示：

$$E_d = K_d \lg \frac{C_1}{C_2} \quad (1-1)$$

式中 E_d ——扩散电动势；

K_d ——扩散电位系数；

C_1, C_2 ——两种溶液的浓度。

扩散电位系数 K_d 与溶液的温度、化学成分、组成溶液的盐类的离子价有关。

如果溶液中有好几种盐类（如NaCl, KCl, MgCl₂等），则在溶液中所含离子数量较多的离子在溶液中的影响较大。因此，扩散电动势的数值是由溶液中含最多的那种盐类来决定的。如果溶液中所含其他盐类量不大（10%以内），则电动势数值与仅有一种盐类的溶液相差不多。当溶液中所含各种盐类的含量几乎相同时，则盐类化学成分对电动势数值影响大。

在井内，自然电位的产生和上述情况一样，也是两种不同浓度的溶液相接触的产物。在含水砂岩的井壁上产生的扩散电动势是井内泥浆与含水层中的地层水接触的结果。当地层水的含盐浓度大于井内泥浆的浓度时，则形成的电动势在地层水一方为正，而在泥浆一方为负。

1.1.1.2 扩散吸附电位

在泥岩上产生的扩散电位是泥岩内的地层水与井内泥浆相接触的产物。根据实验结果，发现在其他条件不变的情况下，电动势的方向与上述扩散电动势相反，即在浓度高的一方为负，而在浓度低的一方为正。这是由于泥岩的孔隙直径极小，地层水都被束缚在泥岩的泥质颗粒表面，而泥质颗粒对Cl⁻离子有选择吸附作用，Cl⁻离子被吸附在泥质颗粒表面，不能自由移动，而Na⁺离子可在地层水中移动，这时形成的电动势称为扩散吸附电动势，泥岩一方为负，井内泥浆一方为正。这种扩散吸附电动势可用公式表示为

$$E_{da} = K_{da} \lg \frac{C_1}{C_2} \quad (1-2)$$

式中 K_{da} ——扩散吸附电位系数，其数值决定于溶液的成分和温度。

1.1.1.3 过滤电位

除去上述由于扩散、扩散吸附作用所产生的自然电位之外，还有一种由于地层水和泥浆柱压力差引起的过滤电位。

在压力差的作用下，当溶液通过毛细管时，由于毛细管壁吸附负离子，使溶液中正离子相对地增多，并且同溶液一起向压力低的一端移动。因此，在毛细管两端富集了不同符号的离子，于是产生了电位差。在压力低的一端带正电，压力高的一端带负电，如图1-3所示。

在岩层中有很多很细的连通孔隙，相当于上述毛细管。当泥浆柱的压力大于地层水压

力时,由于毛细管孔道壁上泥质颗粒选择吸附负离子,而正离子随着溶液向地层中移动,这样就在井壁附近聚集了大量负离子,在岩层内部有大量正离子,这种电位称为过滤电位。

理论和实践证明,过滤电位的数值与地层水和泥浆柱之间的压力差及过滤溶液的电阻率成正比,与过滤溶液的黏度成反比。通常,过滤电位只有在地层水压力与泥浆柱的压力相差很悬殊时,才有较明显的显示。

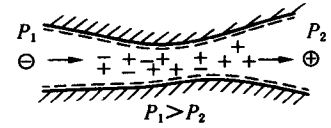


图1-3 过滤电位

在金属矿和煤田钻孔中观测到的自然电位,还包括金属矿层和煤层的氧化还原作用产生的电动势。

1.1.2 自然电位曲线在水文地质中的应用

自然电位法在水文地质中的应用,主要是求地层水矿化度及配合其他测井曲线划分岩性和渗透性地层及含水层,还可以确定地层水电阻率及估计泥质含量。这里只介绍自然电位曲线在划分渗透性地层及含水层中的应用。

1.1.2.1 划分渗透性地层及含水层^[1]

一般情况下,井内泥浆和地层水的矿化度总是有比较明显的差别,也就是说产生自然电动势的条件是经常具备的。渗透性地层在自然电位曲线上一般都有明显的异常显示,因此,自然电位测井是划分砂泥岩剖面中渗透性地层的主要手段。

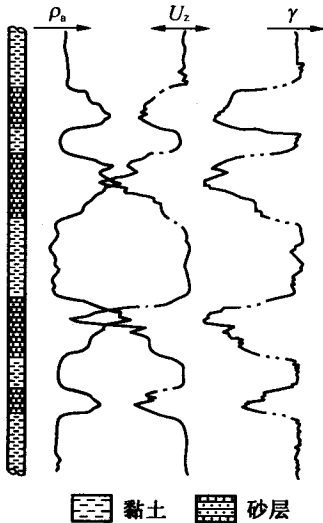


图1-4 划分孔隙性含水层实例

砂岩层的渗透性好坏与岩石中含泥质的多少有直接关系,而自然电位曲线也受岩石中泥质含量的影响。在地层水矿化度大于泥浆矿化度的情况下,一般渗透性好的地层(岩粒粗、分选好、含泥少),自然电位为较大的负异常;渗透性差、致密的地层(岩粒细、分选差、含泥多),自然电位为较小的负异常。当地层水矿化度小于泥浆矿化度时,自然电位为正异常。因此,根据自然电位曲线可以粗略判断岩层的渗透性。

在砂岩层中如果含有泥质夹层,自然电位曲线也能比较清楚地反映出来。所以,一些地区不仅利用自然电位曲线定性划分渗透性地层,而且还可利用自然电位曲线和其他曲线相配合,确定孔隙性含水层的有效厚度。

在地质条件较简单、物性差异明显的地区,可以根据孔隙性含水层的物性特征,即自然电位的正负异常、视电阻率较高、 γ - γ 较低及低自然 γ 来划分含水层。图1-4所示为某地划分孔隙性含水层的一个实例。4层渗透性砂层在3种参数曲线上均有明显的反映,呈低自然 γ 、负自然电位(U_z)、高视电阻率(ρ_a)异常。

1.2 视电阻率法及其应用

视电阻率测井是地球物理测井中兴起最早、最基本的以研究岩石电阻率为基础的测井方法。它是通过测量人工电场沿井剖面的变化来反映岩石电阻率变化,从而解决地质问题。

1.2.1 岩石的电阻率及其影响因素^[1]

矿物和岩石的导电性是视电阻率和其他电阻法测井的物理基础。视电阻率法和其他电阻法测井的地质效果是由不同的岩石和矿物的导电性差异决定的。一般来说,这种差异越大,地质效果越好。也就是说,不同的岩层存在着导电能力的差异,这便是视电阻率和其他电阻测井方法的地质-地球物理基础。

在电测井中,通常用电阻率 ρ 表示矿物或岩石的导电性能。所谓电阻率就是对一块长为 L ,截面积为 S 的六面体矿物或岩石的标本,沿着 L 方向通电时,若测得 L 两端的电阻为 R ,则其电阻率值(单位为 $\Omega \cdot m$)为

$$\rho = R \frac{S}{L}$$

矿物和岩石所以能导电,主要原因有3种,即电子导电、颗粒孔隙中水溶液的离子导电,以及晶体离子导电。在一般情况下,多数岩石均以充填在颗粒孔隙中液体的离子导电为主。表1-1列出了一些常见岩石的电阻率值,从中可以看出,不同岩石具有不同的电阻率。

表1-1 岩石电阻率值表

| 岩石名称 | 电阻率值/ ($\Omega \cdot m$) | 岩石名称 | 电阻率值/ ($\Omega \cdot m$) |
|------|------------------------------------|------|------------------------------------|
| 泥岩 | $10^0 \sim 3 \times 10^2$ | 烟煤 | $5 \times 10^2 \sim 5 \times 10^3$ |
| 黏土 | $2 \sim 10$ | 褐煤 | $10 \sim 2 \times 10^2$ |
| 白云岩 | $5 \times 10^1 \sim 5 \times 10^3$ | 玄武岩 | $6 \times 10^2 \sim 6 \times 10^5$ |
| 石灰岩 | $6 \times 10^2 \sim 6 \times 10^3$ | 辉长岩 | $6 \times 10^2 \sim 6 \times 10^5$ |
| 砾岩 | $2 \times 10^1 \sim 2 \times 10^3$ | 片麻岩 | $6 \times 10^2 \sim 6 \times 10^4$ |
| 砂岩 | $2 \times 10^0 \sim 2 \times 10^3$ | 花岗岩 | $6 \times 10^2 \sim 6 \times 10^5$ |
| 页岩 | $10^1 \sim 10^3$ | 辉绿岩 | $6 \times 10^2 \sim 6 \times 10^4$ |
| 无烟煤 | $10^{-3} \sim 10^0$ | | |

另外,对于同一种岩石来说(如砂岩),其电阻率变化范围很大,一般为几欧姆·米到几千欧姆·米。这是由于影响岩石电阻率的因素很多,其中主要因素有:①组成岩石的矿物成分;②组成岩石的矿物颗粒的结构状态;③温度;④湿度。这些因素中若某些因素稍加变化就可引起电阻率值的强烈变化。尽管如此,却仍然有规律可循。譬如就某一矿区或勘探区来说,同一地质年代,同一种岩性的岩石,在一般的情况下,是具有相近似的电阻率值的。因此,只要预先掌握了各种岩石的电阻率特性,就可根据电阻率值来划分钻井地质剖面,解决各种地质问题。

1.2.2 视电阻率测井的基本原理^[1,2]

1.2.2.1 均匀介质电阻率的测定

电阻率是表征物质导电能力好坏的一个物理量,物质电阻率的大小只有在物质中有电流流过时才能表现出来。在电流一定的情况下,对于几何形状相同的不同材料制成的导体,若两端产生的电位差越高,其电阻率也越大。根据这个道理,在电测井中,通过装置在电缆末端的A极和置于地表的B极,将一定的电流 I 送到井下,在井下产生一个稳定的直流