

# 油气田开发 测井技术与应用

《油气田开发测井技术与应用》编写组 编

石油工业出版社



## 内 容 提 要

本书较系统的叙述了油气田开发过程中裸眼井测井和生产测井技术与应用。所取素材主要是国内各油田实际测井资料。本书一方面介绍在油田开发过程中测井技术，另一方面介绍测井资料的应用和效果，并有适当的实例。本书主要适用于油田地质人员、油藏工程技术人员、采油工程技术人员，并为测井工程技术人员系统了解油气田开发中测井技术与应用提供参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

油气田开发测井技术与应用 /  
《油气田开发测井技术与应用》编写组编.  
北京: 石油工业出版社, 1995.9  
ISBN 7-5021-1271-5

I. 油…

II. 油…

III. ①油田开发-测井②气田开发-测井

IV. ①TE34 ②TE15

石油工业出版社出版  
(100011 北京安定门外安华里2区1号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷  
新华书店北京发行所发行

\*

787×1092毫米 16开  $34\frac{1}{2}$ 印张 871千字 印1—2000

1995年9月北京第1版 1995年9月北京第1次印刷

定价: 38.00元

# 《油气田开发测井技术与应用》

## 编委会名单

主任：王乃举

副主任：姜文达 褚人杰

委员：马鑫贵 王 乾 伊广林 朱恂廉

李学文 李明春 吴铭德 金振武

尚作元 耿秀文 唐开宁 凌寿培

张宝群 李希文 黄隆基 薛 中

林长海

主编：姜文达

副主编：金振武 李希文 褚人杰

### 审稿人员名单（按姓氏笔划为序）

王秀兰 李学文 尚作源 林长海 郝志兴 郭海敏

曹瑜玲 潘兴国

《油气田开发测井技术与应用》一书撰、写、纂编人员名单

篇	章	节	撰 稿 人	纂 编 人
	绪论		姜文达	
	一	1~3	陈金权 衡志 季平 刘建斌	胡克珍
	二	1~8	何俊才 赵文光 严振东 吴淑琴 赵继志	肖立志
	三	1~2	季平 严振东 钟兴水	钟兴水
	四		卜勤生 刘子云 叶炎章 郭东润 王继贤	金振武 刘志云
	五	1~3	郝越望 唐永平 王有毅 于兴帮 郑雪祥 刘福兴 贾修信 王乾 寇双林 游佳雄 曹瑜玲	林奇伟
	六	1~3	郭海敏 张宝群 谈中玉 李明刚 刘丙元 勒文明 阮长川 李祚长 霍树义 王道开 吕志强 王培烈 彭代勇 屈永松 王祥	郭海敏
	六	4~6	张庆珍 于洪文 王前 霍权义 杨永祥 王秀兰 李爱民 王祥 史学兰 罗彦生	吴锡令
	七	1~3	殷国才 高殷曾 刘应 符传复 吴先家 郭风琴 曹嘉猷 李继雄 符仲金	张超沫
	八	1	大庆生产测井所, 沙洋仪表厂	林奇伟
		2~7	凌寿培 霍树义 武风荣 许吉庆 王秀兰 吕志强 区金焕 李爱民	代家才
		九		姜文达

## 序 言

石油工业中测井是一个高技术工种，是石油矿场对储层和井筒流体进行信息采集的重要手段。因此，对测井资料的应用，不仅在石油勘探阶段显得越来越重要，而且在油田开发阶段更是如此。

我国绝大多数油田是注水开发，许多油藏是分层开采，需要测井解决的问题更加复杂。不仅要解决大量开发裸眼井测井问题，还要解决水驱油田开发过程中水淹层测井问题、油水井的注采剖面、井的技术状况、产层参数—孔、渗、饱变化等问题。由于我国油田开发的特殊性，决定了开发阶段的测井具有服务周期长、内容多、工作量大、工艺技术复杂等特点。然而，我国油田开发面临新的挑战：一些老油田相继进入高含水开发阶段；一些难开发的油田如低渗透油田、稠油油田相继投入开发。这就要求测井要不断发展，推广应用各种新技术，准确的划分油气水层、水淹层，求准剩余油饱和度，取准油气水井中各项参数，提高我国油田开发水平。

我国测井工人、工程技术人员和专家，经过近四十年的努力，解决了油田开发各阶段的测井及其资料解释问题，为油田开发提供了大量可靠的资料，促进了我国测井技术的发展与完善。为了让油田地质人员、油藏工程、采油工程和测井工程技术人员，系统了解油气田开发过程中的测井技术，使测井更好为油田开发服务。我们组织了测井界的专家、教授，整理和总结了我国油气田开发过程中测井技术及其发展，编写了《油气田开发测井技术与应用》一书。借此机会对该书编写过程中给予支持的同志表示谢意。

本书中不妥之处，请读者提出宝贵意见，在此均表感谢。

编者

# 目 录

绪论	( 1 )
<b>第一篇 油田开发中裸眼井测井概述</b>	
第一章 裸眼井测井储层评价	( 6 )
§ 1 测井定量解释基础	( 6 )
§ 2 砂泥岩储集层测井解释	( 9 )
§ 3 碳酸盐岩地层评价	( 29 )
§ 4 复杂储层评价技术	( 55 )
第二章 砂泥岩剖面水淹层测井技术	( 80 )
§ 1 油层水淹后岩石物性的变化	( 80 )
§ 2 砂泥岩剖面水淹层测井系列	( 82 )
§ 3 环自然电位测井与自然电流测井	( 83 )
§ 4 人工电位测井	( 88 )
§ 5 介电测井	( 97 )
§ 6 利用常规测井资料定性识别水淹层	( 103 )
§ 7 多功能测井解释程序评价水淹层	( 119 )
§ 8 最优化方法评价水淹层	( 124 )
§ 9 专家系统评价水淹层	( 127 )
§ 10 判别分析法评价水淹层	( 132 )
§ 11 模糊数学方法评价水淹层	( 138 )
§ 12 应用测井资料评价储集层饱和度	( 141 )
§ 13 双河油田水淹层测井解释实例	( 146 )
§ 14 大庆油田薄层水淹层测井解释实例	( 155 )
§ 15 克拉玛依油田水淹层测井解释实例	( 159 )
第三章 碳酸盐岩与膏盐地层剖面水淹层测井	( 165 )
§ 1 碳酸盐岩剖面水淹层测井	( 165 )
§ 2 膏盐地层剖面水淹层测井解释方法	( 177 )
第四章 测井技术在油藏描述中的应用	( 185 )
§ 1 油藏描述概论	( 185 )
§ 2 测井资料的标准化处理	( 187 )
§ 3 关键井研究	( 188 )
§ 4 测井相分析	( 189 )
§ 5 地层对比	( 197 )
§ 6 构造与储集体形态描述	( 200 )
§ 7 油藏描述数据库系统	( 222 )

§ 8 油藏描述工作站 .....	(225)
-------------------	-------

## 第二篇 生产测井

第五章 生产测井仪器与设备 .....	(232)
§ 1 常规生产测井仪器 .....	(232)
§ 2 数字生产测井仪器 .....	(247)
§ 3 数控生产测井仪 .....	(250)
§ 4 生产测井辅助设备 .....	(282)
第六章 生产动态测井 .....	(300)
§ 1 垂直管流及流动模拟实验装置 .....	(300)
§ 2 注入剖面测井 .....	(310)
§ 3 产出剖面测井 .....	(333)
§ 4 井间示踪监测 .....	(398)
§ 5 裸眼井生产动态测井 .....	(406)
§ 6 生产动态测井资料综合分析与应用 .....	(415)
第七章 产层评价测井 .....	(436)
§ 1 碳氧比 (C/O) 能谱测井 .....	(436)
§ 2 中子寿命测井 .....	(452)
§ 3 电缆地层测试器 .....	(468)
第八章 工程测井 .....	(488)
§ 1 工程测井的仪器与设备 .....	(488)
§ 2 固井质量检查测井 .....	(505)
§ 3 射孔质量及井下工具到位检查 .....	(516)
§ 4 套管质量检查 .....	(518)
§ 5 套管外流动检测 .....	(528)
§ 6 检查出砂、防砂效果测井 .....	(534)
§ 7 特殊工程测井 .....	(537)
第九章 油(气)田开发测井技术展望 .....	(543)

## 绪 论

我国从 30 年代玉门油田的开发,到九十年代初已开发二百多个油田,年产石油已达一亿多吨。为了搞好油田的开发,每年要钻较多数量的开发井,例如“七五”(1986~1990 年)期间就钻开发井约 3.5 万口,致使油水井增加数量较多,到 1990 年已有油水井约 7 万口。因此油田开发对裸眼井测井和生产测井都提出较多的任务。

测井为了适应注水开发发展的需要,近 20 年来,许多油田已经研究了砂泥岩油气藏的水淹油层的岩性和物性的变化,建立了适应油田开发的测井系列、解释模型与解释方法,并不断发展完善。70 年代初大庆、胜利等油田对水淹油层的解释问题进行了研究。利用自然电位偏移、三侧向、声波和感应等测井资料定性划分水淹层。到 80 年代,大庆油田使用了介电、C/O 能谱和人工电位测井方法和“逐步判别多元回归分析”的解释方法定量求孔隙度、渗透率和剩余油饱和度等参数,对水淹层划分出强水淹、中水淹、弱水淹等级;胜利油田使用多功能解释程序,计算 9 种类型 23 种地质参数,对水淹层进行定量解释。以上两种方法均见到了好的地质效果,并在许多油田推广应用。南阳油田在岩电关系方面开展了油层水淹机理系统的试验研究,揭示了不同矿化水对水淹后“U”型电性特征。“七五”期间各油田都建立了水淹层测井解释组(岗),辽河、吉林、大港南阳、新疆、玉门等油田建立了水淹层测井系列而且解释水平也有很大提高;北京石油勘探开发研究院在水淹层测井解释上也作了大量细致的研究工作,与许多油田协作研究出适合其油田水淹特点的解释方法。到“七五”末,全国大部分油田水淹层解释在定量求孔、渗、饱和含水率等参数的基础上,划分为强、中、弱水淹等级,其符合率可达 80—85%。针对碳酸盐岩油气藏底水上升(水锥)和边、底水沿裂缝上窜而造成的水淹,华北油田、四川气田等进行了这方面测井及解释研究工作,并建立测井系列和解释模型与方法。一些复杂岩性的油藏如火成岩、变质岩、凝灰岩以及稠油油藏(辽河、新疆油田)和低渗、薄层(大庆油田)都相继投入开发,对这些复杂岩性油藏也建立了相应的测井系列,并着手研究其解释方法。

“七五”期间我国开展了油藏描述工作,测井信息成为油藏描述资料的重要来源。北京石油勘探开发研究院与中原油田合作,对文留油田进行了开发过程中的油藏描述。

我国多数油田是分层注水和分层开发生产的。因此分层认识注水井的注水情况和油层的分层的产出(油、气、水)情况,产层参数孔、渗、饱和压力的变化情况又是搞好油田开发方案的编制和调整的前提。还必须看到我国油水井总数增加较快,1980 年油井数为 1.82 万口,水井为 6400 口,到 1990 年油井增加到 5.2 万口,水井 1.76 万口。为了搞好油田的调整要采取维护和增产措施,每年井下作业数量也越来越大,1981 年为 5.89 万井次,1990 年增加到 14.73 万井次。另一方面油水井套管损坏变形越来越多。鉴于上述情况,就要求生产测井从以下几个方面进行井下的信息采集:

1. 油水井生产动态(注入剖面和产出剖面)
2. 产层参数
3. 井的技术状况(固井质量、射孔位置、套管损坏等)。
4. 为井下作业和增产措施提供依据,并检查实施效果。



我国从 50 年代玉门油田使用同位素<sup>65</sup>Zn (半衰期 243.8 天) 测注水井注入剖面、检查套管外窜槽和压裂效果开始, 揭开生产测井的序幕, 到 60 年代大庆油田为了适应六分 (分层采油、注水、测试、研究、管理、改造) 四清 (分层采油量清、注水量清、压力清、出水清) 的需要, 在注水管理中使用同位素<sup>65</sup>Zn、<sup>110</sup>Ag 和活性炭为载体测注水剖面: 在油井中使用涡轮产量计测产出剖面, 使用微井径仪检查射孔位置。同期新疆油田也开展了同位素测注水剖面工作。进入 70 年代胜利油田为了减少对环境的污染, 使用短半衰期 8.06 天的同位素<sup>131</sup>I 测成注水剖面: 大庆、新疆油田推广应用 73 型、75 型找水仪测产液剖面和持水率: 一些油田 (大庆、大港等) 使用低能源 (<sup>109</sup>Cd) 含水率密度计在生产井中进行了油、气、水三相流产出剖面的试验研究工作: 华北油田研制并推广了适应于碳酸盐岩裸眼井产出剖面井下流量计和其他类型生产测井仪器。由于油井生产方式由“自喷井大量转入”抽油, 为了在抽油井进行产出剖面测井, 一些油田相继进行了气举法 (大港、大庆等)、抽测法 (胜利、南阳等) 和过油套管环空法 (江汉) 试验研究。在 70 年代工程测井中普遍使用了声幅测井仪、双向井径仪和井下声波电视等检查套管质量和射孔位置 (大庆、吉林、华北、大港等油田)。在 70 年代大庆油田研制出了点测的 C/O 能谱测井仪。一些油田 (大庆、华北等) 建立了油、水两相和油、气、水三相流动模拟试验装置, 进行流量、持水率和含水率之间关系的试验研究, 并为产出剖面测井解释图版绘制井下仪器的校验和垂直管流的试验研究创造了条件。

进入 80 年代, 推广了大庆油田与中国原子能科学院同位素所协作研制成<sup>131</sup>Ba (半衰期 11.7 天) 微球人工载体 (简称<sup>131</sup>Ba“微球”) 测注水剖面, 同时由于应用了井下“微球”释放器, 减少了地面的放射性污染, 提高了测井时效, 使测井工作量增加了 60 多倍。在 80 年代, 在全国范围内推广了过环空找水仪、偏心井口等辅助装置 (大庆、江汉油田研制的), 摸索出一整套过环空测井起下电缆及其电缆与油管防缠解缠工艺技术, 使测井工作量大幅度增加。在 80 年代, 主要油田 (大庆、胜利、辽河等) 应用引进的 C/O 能谱测井仪在套管井中进行测井和在观察井中进行时间推移测井, 分别求得剩余油饱和度和对油藏的饱和度进行监测; 胜利、江汉油田应用了中子寿命测井方法, 进行了测—注 (吐) —测求得残余油饱和度; 中原、华北油田等应用了电缆地层测试器测得地层压力; 大庆、吉林等油田研制推广应用了过油管井径仪、八臂井径仪、磁测井仪、陀螺测井仪和超声波井壁彩色成像测井仪等。

新疆等油田引进高温生产测井仪对于稠油井注汽剖面已经开始监测, 并将监测气驱情况。

在 80 年代由大庆研制、西仪厂定型生产的 SD—81 型生产测井地面仪已在全国范围推广。同期在各油田先后引进 CSU (SCHLUMBERGER 公司)、DDL (HALLIBUTON 公司)、3700 (WESTERN ATLAS 公司)、AT<sup>+</sup> (COMPUTALOG 公司) 等数控生产测井仪 38 套及其相应的井下仪器。到“七五”末全国有生产测井设备 340 台 (套), 小队为 172 个。

生产测井技术工艺与装备促进生产的发展, “六五”期间共测井 3.8 万口 (年均为 7600 口), “七五”期间共测井 7 万口 (年均为 1.4 万口), 比“六五”增长 84%。

在我国, 测井技术在油田开发中见到显著的效果:

1. 了解开发井内纵向上的储层的水淹厚度、水淹等级、剩余油分布以及储层参数, 进行油藏描述, 为编制和调整开发方案, 提高采收率提供依据; 又为当年打的调整井增加产量提供了挖潜的办法。能够对低孔低渗、薄层、稠油和复杂岩性油藏进行储层评价。

2.注水剖面测井资料反映注水井分层自然注水情况，和在分层配注条件下的注水状况，进而分析出油井分层产液状况。

3.产出剖面和产层参数测井资料为增产措施提供依据，并检查其措施效果。

4.工程测井资料提供固井质量、射孔位置、套管损坏状况等情况，为井下作业提供依据并检查其施工质量情况。

5.生产测井资料已由单井发展到区块上的多井采集，为油藏描述和油藏数值模拟提供信息。

综上所述，40年来我国开发裸眼井测井有了很大的发展，并形成一套适应我国油田注水开发特点测井技术；我国生产测井技术从无到有，并随之油（气）田开发的发展与深化不断发展与完善，基本上具备了在油（气）水井生产时在各种情况下进行信息采集的能力和一般的生产测井解释方法。

为了让油田地质人员，油藏工程、采油工程和测井工程技术人员系统了解油（气）田开发中测井技术，编写了这部书。本书总结整理了我国油（气）田开发过程中测井技术发展及其资料应用。它分为两部分（篇）进行叙述：

1.油田开发中裸眼测井，本篇系统介绍了油（气）田开发中测井的储层评价，水淹层测井，油藏描述等内容。

2.生产测井，本篇系统介绍了生产测井的地面仪器设备、垂直管流、生产动态测井、产层参数测井和工程测井井下仪器以及测井资料的应用效果。



# 第一篇 油田开发中裸眼井测井概述

本篇主要系统的介绍油气田开发中测井的储层评价，水淹层测井，油藏描述等内容。针对我国的地质特点，描述开发过程中的静态数据到动态分析，有目的地在储层评价方面，用深入浅出的语言说明了三种储层（砂泥岩、碳酸盐岩、复杂岩性）的测井响应，测井系列，解释模型，定性或定量的求得物性参数方程，以及评价油、气、水层的方法；水淹层测井方面对砂泥岩、碳酸盐岩储层，说明油层水淹后岩石物性的变化，在储层评价方面提出了单项方法（如环自然电位测井，人工电位测井，介电测井，电阻率时间推延测井）到综合方法应用计算机技术评价水淹层（如常规测井的综合分析，多功能解释程序，最优化方法，专家系统等）；油藏描述方面叙述了油藏描述的基本概念，基本特点，解释模型，由关键井的单井评价发展到多井评价，如测井相分析，地层对比，构造与储集体形态描述，地面地震剖面，垂直地震剖面与测井响应分析，再结合地质的精细模型，最后作出区块的地下油藏的剩余油分布及构造形态图等。由于篇幅的限制，只作简要的说明，如果读者有兴趣时，可参阅本书提供的参考文献作进一步深入了解。

除了以上的方法介绍外，还提供了现场的应用实例，简要说明测井评价的条件和内容，计算方法，计算结果与试油结论对比，使读者更进一步理解在油（气）田开发中的作用，为了避免实例的重复，第一章偏重于开发初期的实例。

# 第一章 裸眼井测井储层评价

地球物理测井能够测量岩石骨架和孔隙流体的物理性质。因此，地球物理测井是地层分析的一种基本方法。应用泥质含量、孔隙度（以及孔隙结构）、油气饱和度、渗透率等地质参数评价地层生产油气的可能程度与生产能力，是测井解释最终要解决的重要任务之一。

我国目前大多数生产油气的地层是砂岩地层、含泥质砂岩地层、碳酸盐岩地层，此外还有含钙质、渗透率较低的致密砂岩地层，少数为蒸发盐层地层，各类火成岩、泥灰岩裂缝、泥岩裂缝、巨砾岩等复杂的地层。应用各种测井方法计算上述各种地层的地质参数和进行油气评价，是储层评价的主要内容。但是，由于实践程度不同，它们各自解决问题的程度也不同。

本章将介绍泥质砂岩地层、碳酸盐岩地层、稠油砂岩、低孔隙度、低渗透率砂岩以及火成岩等复杂储层评价方法。

## § 1 测井定量解释基础

评价一个储集层所需要的主要地质参数是：它的孔隙度、含烃饱和度、厚度和渗透率。另外，储集层几何形状、地层温度和压力以及在储集层中岩性评价，这些在探井评价和开发中都起着重要的作用。

### § 1.1 孔隙度

储集层的孔隙度是单位体积岩石内孔隙体积所占的百分数，它是说明储集层储集能力相对大小的基本参数。测井解释中常用的孔隙度概念有总孔隙度、有效孔隙度和缝洞孔隙度。总孔隙度是指全部孔隙体积占岩石体积的百分数，一般用 $\phi_T$ 表示；有效孔隙度是指具有储集性质的有效孔隙体积占岩石体积的百分数，一般用 $\phi$ 表示；缝洞孔隙度是指缝洞孔隙体积占岩石体积的百分数，一般用裂缝孔隙度 $\phi_f$ 来描述，缝洞孔隙度也称为次生孔隙度。

测井解释中常把有效孔隙度称为孔隙度。

在碳酸盐岩储集层中，还要将粒间孔隙（这里亦称为基块孔隙）与缝洞孔隙加以区别。因为碳酸盐岩岩石一般比较致密，基块孔隙、渗透率都比较差，只有当缝洞较发育时形成的次生孔隙，才具有储集性质。

### § 1.2 饱和度

地层饱和度是指所考虑的流体在地层孔隙体积中占据的比例（或百分数）。于是，含水饱和度就是含地层水的孔隙体积占总孔隙体积的百分数，用 $S_w$ 表示；含油气饱和度指其油气体积占总孔隙体积的百分数用 $S_h$ 表示；如果储集层只含油和水，则 $S_w+S_o=1$ ， $S_o$ 为含油饱和度；若储集层只含天然气和水，则 $S_w+S_g=1$ ， $S_g$ 为含气饱和度；若储集层只含水，则 $S_w=1$ 。

地层的含水饱和度可以从100%变化到很小值。但是，不管怎样的好的油气层，总有少量的毛细管水不能被油气取代，这种水称束缚水，其饱和度称为束缚水饱和度（ $S_{wi}$ ）或原生水饱和度。

同样，对于一个开采后的储集层，一部分烃被存留在孔隙体积中，这种含烃饱和度称为残余烃饱和度  $S_{or}$ 。

### § 1.3 渗透率

渗透率是流体流过地层难易程度的量度，它是决定油气藏能否形成和形成后油井产量高低的重要因素。渗透率的标准化单位为  $10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

实验证明，当只有一种流体通过岩样时，所测得的渗透率与流体性质无关，只与岩石本身的结构有关；而当多种流体（如油和水）通过岩样时，对不同的流体则有不同的渗透率。

绝对渗透率是在只有一种流体通过岩石的情况下测得的渗透率，其大小只与岩石孔隙结构有关，而与流体性质无关。测井解释通常所说的渗透率，就是指岩石的绝对渗透率，用符号  $K$  表示。

有效渗透率是指当两种或两种以上的流体同时通过岩石时，对其中某一种流体测得的渗透率，也称相渗透率。油、气、水的有效渗透率分别用  $K_o$ 、 $K_g$ 、 $K_w$  表示。

有效渗透率与绝对渗透率的比值称为相对渗透率。油、气、水的相对渗透率分别用  $K_{ro}$ 、 $K_{rg}$ 、 $K_{rw}$  表示。

### § 1.4 储集层厚度

储集层顶、底界面之间的厚度即为储集层厚度  $h$ 。在油气储量计算中所采用的油气层有效厚度，是指在目前经济技术条件下能够产出工业性油气层的实际厚度，即符合油气层标准的储集层厚度扣除不合标准的夹层（如泥质夹层或致密夹层等）剩下的厚度。

### § 1.5 （泥浆）侵入过程

钻井时，由于泥浆柱压力略大于地层压力，此压力差驱使泥浆滤液向具有渗透性的储集层渗透，不断渗透的结果，使泥浆的固体颗粒沉积在井壁上形成泥饼。由于泥饼的渗透性很差，一旦泥饼形成，侵入速度减慢直至基本停止。此后，泥浆滤液从径向渗滤转为纵向渗滤。

由于泥浆滤液电阻率  $R_{mf}$  与地层水电阻率  $R_w$  不同，故侵入改变了储层的径向特征。在紧靠井眼的部分，原始地层水的大部分和烃的一部分可能被滤液冲洗掉，这个带叫做冲洗带，其电阻率用  $R_{xo}$  表示，泥浆滤液电阻率为  $R_{mf}$ ，相应的冲洗带含水饱和度为  $S_{xo}$ 。（见图 1-1a），冲洗带以后是一个过渡带，泥浆滤液渐少，原状地层的流体渐多，直到没有滤液的原状地层，其电阻率由  $R_{xo}$  变为  $R_t$ ，流体电阻率变为  $R_w$ 。通常所说的侵入带包括冲洗带和过渡带，其外径用侵入带直径  $d_i$  表示。

根据  $R_{xo}$  和  $R_t$  的相对大小，通常把储集层的侵入特征分为高侵、低侵和无侵（或侵入不明显）三种情况。

1. 高侵。  $R_{xo}$  明显大于  $R_t$ ，高侵地层电阻率的径向变化称为高侵剖面（图 1-1b）。淡水泥浆钻井的水层一般是高侵，少数含高矿化度地层水的油气层也可能高侵。

2. 低侵。  $R_{xo}$  明显低于  $R_t$ ，低侵地层电阻率的径向变化称为低侵剖面（图 1-1c），油气层多为低侵或侵入不明显（ $R_{xo}$  与  $R_t$  差别小），部分水层也可能低侵。

### § 1.6 阿尔奇方程

关于岩石电阻率与其岩性、孔隙度和含水饱和度的关系，最初是阿尔奇（Archie）提出的，从而奠定了测井资料综合定量解释的基础。他根据实验研究的结果，分别对具有粒间孔隙的含水纯岩石和含油气纯岩石概括成两个基本的解释关系式，后来被称为阿尔奇公式（或方程）。现在通用的阿尔奇公式的一般形式为：

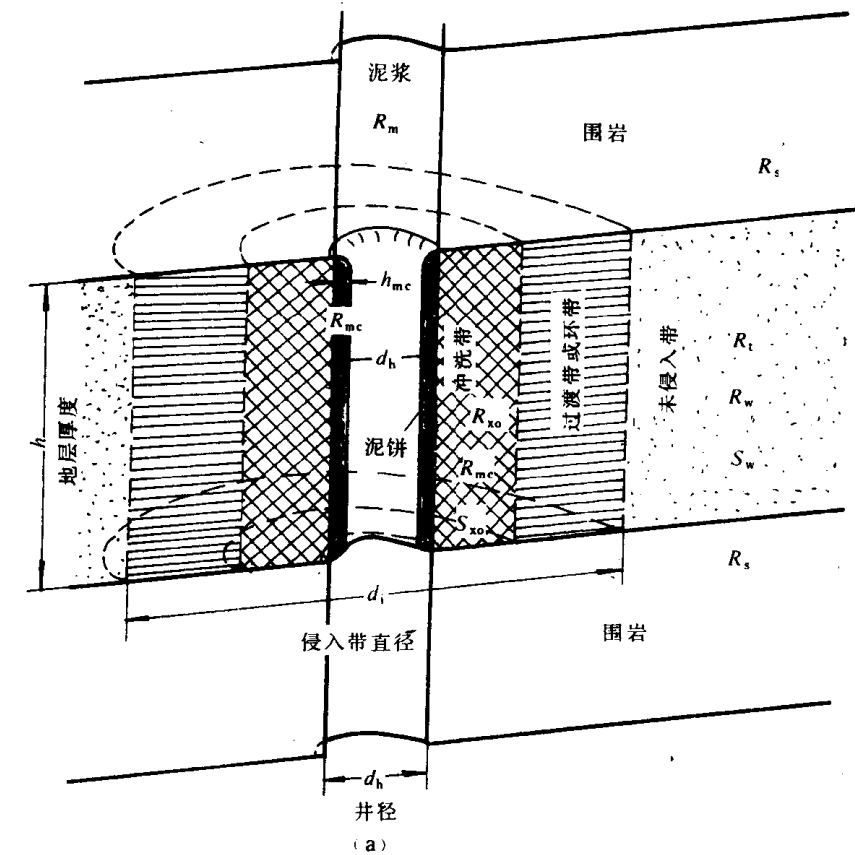


图 1-1 储集层侵入特征示意图

a—井剖面图；b—高侵剖面；c—低侵剖面

$$F = R_o / R_w = a / \phi^m \quad (1-1)$$

$$S_w = \left( \frac{R_w}{F \times R_t} \right)^{1/n} = \left( \frac{a R_w}{\phi_t^m R_t} \right)^{1/n} \quad (1-2)$$

式中  $R_o$ ——100%饱和地层水的岩石电阻率；

$R_w$ ——岩石中所含地层水电阻率；

$\phi$ ——岩石有效孔隙度，本式为小数。也常可用百分数；

$a$ ——岩性系数，一般 0.6~1.5。

$m$ ——胶结指数，一般为 2 左右，变化范围为 1.5~3；

$F$ ——地层电阻率因素（简称地层因素）。它是 100% 饱和地层水的岩石电阻率（ $R_0$ ）与所含地层水的电阻率（ $R_w$ ）之比值，其大小只与地层岩性或孔隙度、孔隙结构有关；

$b$ ——岩性系数，一般取  $b=1$ ；

$n$ ——饱和指数，与油气水在孔隙中分布状况有关，常取  $n=2$ ；

$S_h$ ——含油气饱和度，本式为小数，也常用百分数；

$S_w$ ——含水饱和度，本式为小数，也常用百分数。

引用阿尔奇方程 (1-2)，可得到冲洗带含水饱和度公式：

$$S_{x_0} = \sqrt[n]{\frac{FR_{mf}}{R_{x_0}}} \quad (1-3)$$

式中  $R_{mf}$ ——泥浆滤液电阻率；

$R_{x_0}$ ——冲洗带岩石电阻率；

$S_{x_0}$ ——冲洗带含水饱和度（等于  $1-S_{hr}$ ）， $S_{hr}$  为冲洗带残余烃饱和度。

## § 2 砂泥岩储集层测井解释

砂泥岩又称碎屑岩，它主要由各种岩石碎屑、矿物碎屑、胶结物（如泥质、灰质、硅质和铁质），可把碎屑岩分为砾岩、砂岩、粉砂岩和泥岩等。

在碎屑岩中，砂质岩为主要的储集层，每组砂质岩之间，沉积有厚度较大的泥岩隔层（在测井解释中称上、下围岩），这是碎屑岩剖面的基本岩性特点。

### § 2.1 砂泥岩的测井响应方程

1. 孔隙度方程 各种孔隙度测井方法的测量结果可看成仪器探测范围内某种物理量的综合响应。在岩性均匀的情况下，无论任何大小的岩石体积，它们对测井结果的贡献，按单位体积来说都是相同的。这就使人们在寻找测井参数与地质参数的关系时，可以不考虑测井方法的微观物理过程，而只从宏观上研究岩石各部分（岩石骨架、泥质和孔隙流体）对测量结果的贡献，因而发展了岩石“体积物理模型”（简称“体积模型”）的研究方法。

所谓岩石体积模型是根据岩石的组成按其物理性质的差异，把单位体积岩石分成相应的几部分，然后研究每一部分对岩石宏观物理量的贡献，并把岩石的宏观物理量看成是各部分贡献之和。例如，纯砂岩水层可认为由砂粒（骨架）、孔隙中的水两部分组成；泥质砂岩水层则认为由砂粒、泥质（或粘土）与充满孔隙的水三部分组成。图 1-2 为纯砂岩水层的岩石体积模型示意图。

根据体积模型的思路，可导出纯砂岩、泥质砂岩孔隙度方程。

图 1-3 为砂岩含泥质、含油气时的体积模型，先导出孔隙度测井响应方程的一般形式，然后将含水纯地层（ $V_{sh}=0$ ， $S_h=0$ ），含油气纯地层（ $V_{sh}=0$ ， $V_{sh}$  为泥质含量）、含水泥质地层（ $S_h=0$ ）视为上述体积模型的特例。

若以  $X_h$ 、 $X_w$ 、 $X_{ma}$ 、 $X_{sh}$  分别表示油气、水、骨架和泥质的某一物理参数，则该物理参数的测井值  $X$  是上述物理参数与相应的相对体积  $V_i$  乘积之和，即：



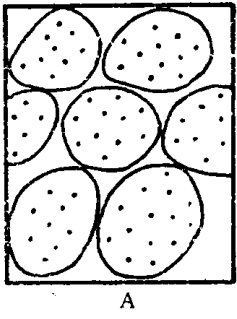


图 1-2 纯砂岩水层体积模型示意图

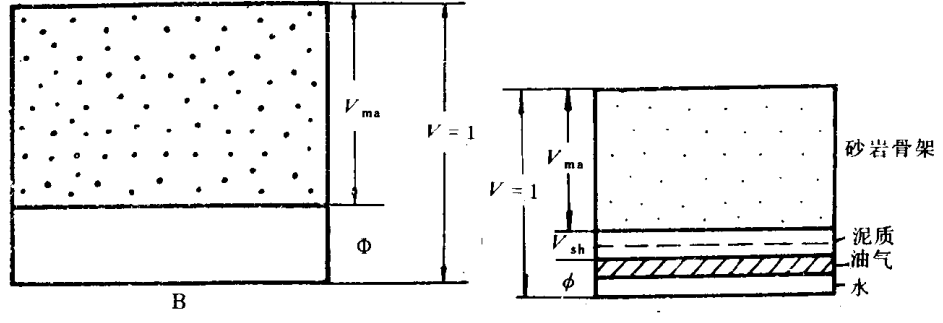


图 1-3 含油气泥质砂岩体积模型

$$X = \sum_{i=1}^n X_i V_i \quad (1-4)$$

故测井响应方程为:

$$X = \phi (X_h S_h + X_w S_w) + V_{sh} X_{sh} + (1 - \phi - V_{sh}) X_{ma} \quad (1-5)$$

或

$$X = [\phi X_w + (1 - \phi) X_{ma}] - \phi S_h (X_w - X_h) - V_{sh} (X_{ma} - X_{sh}) \quad (1-6)$$

显然: 式 (1-6) 等号右边第一项为含水纯地层的表达式 (或称贡献); 第二项为岩石含油气对测井值的影响; 第三项为岩石含泥质的影响。

对式 (1-6) 进行整理得:

$$\phi = \frac{\left( \frac{X_{ma} - X}{X_{ma} - X_w} \right) - V_{sh} \left( \frac{X_{ma} - X_{sh}}{X_{ma} - X_w} \right)}{1 + S_h \left( \frac{X_{ma} - X_h}{X_{ma} - X_w} - 1 \right)} \quad (1-7)$$

当岩层不含油气时,  $S_h=0$ , (1-7) 式变为:

$$\phi = \left( \frac{X_{ma} - X}{X_{ma} - X_w} \right) - V_{sh} \left( \frac{X_{ma} - X_{sh}}{X_{ma} - X_w} \right) \quad (1-8)$$

当岩层不含油气、不含泥质的含水纯地层时,  $S_h=0$ ,  $V_{sh}=0$ , 式 (1-6) 变为: