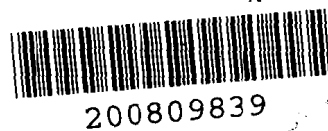
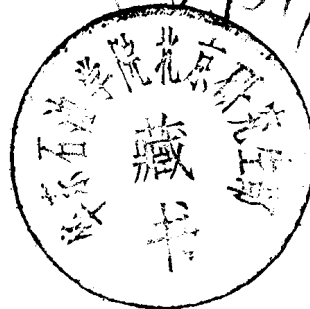
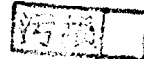


884

测井资料综合解释 与数字处理

雍世和 洪有密 编



石油工业出版社

内 容 提 要

本书全面介绍了地球物理测井资料综合解释基础、计算机处理方法及应用,其中包括:确定储集层的岩性和物性参数,测井资料的快速直观解释方法,测井资料的数字处理系统、预处理及其成果显示,砂泥岩的处理方法(SARABAND、POR及SAND2)和复杂岩性的处理方法(CORIBAND、CRA),测井资料在油气田勘探开发中的应用。本书可作为地球物理测井专业及相近专业的教科书,也可作为地球物理测井、地质、钻井及采油工程技术和科研人员的参考书。

测井资料综合解释与数字处理

雍世和 洪有密 编

*

石油工业部教材编译室编辑(北京902信箱)

石油工业出版社出版发行

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

化工印刷厂排版
印刷厂印刷

*

787×1092毫米^{1/16}开本 28^{1/4}印张 708千字 印1—4,000

1982年8月北京第1版 1982年8月北京第1次印刷

书号: 15037·2326 定价: 2.95元

编 者 的 话

本教材是根据石油地球物理测井专业《测井资料综合解释与数字处理》教学大纲编写的，学时104~110。

测井资料综合解释与数字处理研究的基本问题是测井资料的综合解释与应用。测井资料综合解释强调测井资料综合解释与应用的原理和方法；测井资料数字处理则突出了现代测井解释的主要手段和与它相适应的处理方法，而它的基础主要还是测井资料综合解释与应用的原理和方法。因为测井资料综合解释与数字处理在内容上有不可分割的联系，我们便在原来单独编写的讲义《测井资料综合解释》和《测井资料数字处理》的基础上，统编了这本《测井资料综合解释与数字处理》教材。

测井资料综合解释与数字处理，是一门综合性的边缘课程，不仅涉及所有测井方法，而且涉及地质学、钻井采油工程和计算技术等多种学科，这些学科的发展又非常快。就我们自己的能力来说，要想编写一本很好反映这方面情况的教材，是很不适应的。现在受工作所迫编写出这本教材，我们觉得它是向国内外、校内外学习的产物。在我们过去编写讲义和这次统编教材过程中，校内外许多同志对教学大纲和教材内容提出宝贵意见，胜利油田、四川石油管理局、华北油田等许多单位、许多同志热情地为我们提供宝贵资料。但是，由于出版上的原因，未能将这些资料在参考文献中一一列举。我们仅向热心帮助我们的各单位领导和同志们表示衷心的感谢，尤其参加审稿的王曰才、钟兴水、潘瑾台、欧阳健、庄长淞、周彦等同志，我们更是感谢他们。

本书第一、二章由洪有密执笔，第三、四章由雍世和执笔，第五、六、七章由洪有密与雍世和共同执笔。

由于编者水平有限，加上时间仓促，本书错漏之处一定很多，敬请同志们随时批评指正。

1980.12.

绪 论

地球物理测井是应用地球物理学的一个分支,它用物理学的原理解决地质学的问题,已用于石油、金属矿、煤田、工程及水文地质等许多方面。测井资料综合解释,就是要按照预定的地质任务选择几种测井方法组成综合测井系列,并根据测井资料综合解释的原理与方法,对有关的测井、地质、钻井和开发资料进行综合分析,对测井资料作出综合性的地质解释,解决地层划分、油气储集层和有用矿藏的评价及其勘探开发中的其他地质问题。测井资料数字处理是测井资料综合解释应用数字技术以后的新发展,就是用电子计算机对测井资料进行自动整理和自动解释,并将解释成果自动显示出来。

测井资料应用的领域是很多的,本书将重点介绍测井资料在油气勘探开发中的应用。在油气勘探开发中,测井资料的应用包括以下三个方面。

1. 地层评价 包括裸眼井和套管井的地层评价。地层评价包括岩性分析:判断井剖面的岩石性质和确定地层界面,计算地层泥质含量、主要矿物成分及其含量,绘制井的岩性剖面;计算储集层参数:有效孔隙度,缝洞孔隙度,渗透率,含油气饱和度和含水饱和度,套管井中已开发储集层的残余油饱和度,油气层有效厚度,油气密度和地层水含盐量;储集层综合评价:划分油层、气层、水层,并评价其产能。

2. 油矿地质 编制钻井地质综合柱状剖面图,岩芯归位,地层对比,油层对比;研究地层、构造、断层和沉积相;研究油气藏和油气水分布规律,计算油气储量和制订开发方案。

3. 钻井采油工程 在钻井工程中,测量井眼的井斜、方位和井径等几何形态的变化,估计地层孔隙流体压力和岩石的破裂压力梯度,确定下套管的深度和水泥上返高度,计算平均井径,检查固井质量,确定井下落物位置,钻具切割等;在采油工程中,进行油井射孔,测量生产剖面和吸水剖面,确定注入水水淹层位、压力枯竭层位、出水层位、出砂层位和串槽层位,检查射孔质量、酸化和压裂效果等。

虽然测井资料在油气勘探开发中有着十分广泛的应用,但地层评价是最基本的方面。这不仅因为地层评价是要解决油气勘探开发中最基本的问题(认识油气水层),而且因为它提供的结果常常也是其他地质应用的基础或最重要的参考资料。而在地层评价中,又以裸眼井地层评价最为重要,因为它对油气勘探成果和勘探开发方案的制定有最直接的影响,同时又是套管井地层评价最基本的参考资料。因此,本书将以地层评价,特别是裸眼井地层评价,作为最基本的内容。

我们知道,测井方法多达数十种,每种方法都有它本身的探测特性和适用范围。而井下地质情况又很复杂,如岩石种类多,孔隙结构多变,孔隙流体性质和含量各不相同,以致不同的地层很可能有某种相同的物理性质,即在某种测井曲线上有相同的显示。这就是单用某一种测井资料作地质解释的多解性。为了避免多解性,首先要根据预定的地质任务和各种测井方法的探测特性及适用范围,选择几种测井方法组成综合测井系列,其次要加强综合分析,不但要找出各种测井资料的内部联系,而且要与钻井、井壁取芯、地层测试等其他来源的地质资料配合起来分析判断,作出准确的地质解释。

根据测井在油气勘探开发中的应用,综合测井系列可分为三种类型。一是裸眼井地层评价

测井系列，二是套管井地层评价测井系列，三是生产测井系列。根据预定的地质任务、测井的地质条件（如岩性剖面和储集层类型等）和井眼条件（如淡水泥浆与盐水泥浆）以及各种测井方法的探测特性和适用范围，选择适当的综合测井系列，是测井资料综合解释与数字处理最基本的条件。测井系列有相对的稳定性，但又会因时因地而异。如以裸眼井地层评价测井系列为例，我国五十年代和六十年代前期是以梯度电极系横向测井、微电极测井和自然电位测井构成的，有时又加测自然伽马和中子伽马测井；六十年代中期开始用感应测井或侧向测井代替梯度电极系横向测井，还增加声波速度测井作为岩性孔隙度测井；至七十年代中期，又开始增加密度测井和中子孔隙度测井作为岩性孔隙度测井，使裸眼井测井系列可以达到比较完善的地步：声波、密度和中子三种岩性孔隙度测井，深、浅、微三种电阻率测井，以及自然伽马、自然电位、井径、地层测试器或井壁取芯。当然也不是都要采用这些方法，应视地质情况难易程度和本地测井技术条件而定，如在岩性和油水关系简单的地区，有的仍在使用简化横向测井。

测井资料记录的一般都是各种不同的物理参数，如电阻率、自然电位、声波速度、岩石体积密度、岩石热中子俘获截面等，可统称为测井信息。而测井资料综合解释与数字处理的成果，如岩性（岩石矿物成分）、泥质含量（粘土含量）、含水饱和度、含油气饱和度、渗透率等等，可统称为地质信息。确定测井信息与地质信息之间应有的关系，采用正确的方法把测井信息加工成地质信息，是测井资料综合解释与数字处理的核心。

确定测井信息与地质信息之间应有的关系，一般是通过建立适当的解释模型来完成的。所谓测井解释模型，是指人们对测井信息与地质信息的客观关系，在理论分析、实验研究、资料统计中有所认识以后，把这种关系抽象成的一种为多数人易于理解的形象。广义的解释模型是指人们对测井信息与地质信息之间关系的形象化描述，如测井解释最早采用的定性分析法以及各种表征测井信息与地质信息之间关系的图形（如地层因素 F 与孔隙度 ϕ 关系图）或其方程式（如 $F-\phi$ 关系式）。而狭义的解释模型是一种简化的地层模型，如常用的纯岩石模型与泥质岩石模型，依据这类模型可以导出一些表征测井信息与地质信息数量关系的方程式（如各种孔隙度测井的解释方程），或者用来预测或解释测井信息与地质信息之间可能具有的某种经验关系（如 $F-\phi$ 关系）。我们以后讲到解释模型，通常是指这种简化的地层模型。

根据本地的地质情况和所能利用的测井资料，确定适当的解释模型，是搞好测井资料综合解释与数字处理的关键。因为测井资料在地质上应用的发展（地质信息的增多和质量提高），也就是测井信息的增多以及加工测井信息的方法与技术的发展，而加工测井信息的方法首先就决定于测井解释的模型。例如在裸眼井地层评价中，我国五十年代的测井方法基本上都是电法测井，没有岩性孔隙度测井，因而当时的解释基本上是定性解释。人们根据各种测井曲线的形态特征和幅度的相对大小，参考各种地质资料，判断地层的岩性、孔隙性、渗透性和含油性，区分油、气、水层。到六十年代有了声波速度测井作为岩性孔隙度测井，就可以采用纯岩石解释模型，用声波时差计算孔隙度，用阿尔奇公式计算含水饱和度，还可计算渗透率和油气层的有效厚度。这时加工测井信息的方法是半定量的，因为这种纯岩石模型只反映了储集层主要的方面，没有考虑泥质含量和油气密度等影响因素，使计算的准确性受到限制。到七十年代有了更完善的测井系列和计算机处理测井资料以后，就可以采用比较复杂的泥质单矿物岩石（泥质砂岩）模型和泥质双矿物岩石模型，可以运用交会图和迭代法等数字处理技术，广泛采用各种计算数学方法，考虑泥质含量、不同矿物成分、粒间孔隙与缝洞孔隙、油气密度等因素的影响，使测井解释达到自动定量解释和自动显示形象直观的解释成果。

这样现代化的水平。虽然测井技术和测井解释的发展大体上可以分为这样三个阶段，但有了新的解释模型后并不是不用旧的模型了，也不是任何情况都是测井系列和解释模型愈完善愈好，而应区别地质情况考虑经济适用的原则。例如发展测井资料数字处理技术以后，对测井资料的定性解释仍然是十分重要的，它不仅是测井数字处理中曲线编辑的基本方法，而且对检验处理成果、改进处理参数或方法，以至对处理成果的综合应用，都是少不了的重要方法。

有了正确的解释模型，就可导出适用于这种模型的各种测井方法的解释方程，也称响应方程。这些解释方程，有些是直接可以应用的（如各种孔隙度测井），有的则不能直接应用（如电阻率测井），还必须通过实验资料的统计分析确定相应的经验关系，使之成为实用的解释方程（如阿尔奇公式）。应用几种测井资料进行综合解释或数字处理，也就是应用这些有关的方程把测井信息加工成地质信息。把测井信息加工成地质信息的方法就是测井解释方法或测井数字处理技术。这些解释方法，按计量的程度可分为定性解释、半定量解释和定量解释；按操作的方法可分为人工解释和数字处理；按显示的形式可分为交会图、直方图、解释成果图或曲线重迭图，因为这些方法有形象直观的特点，常又统称为直观解释方法；按解释的地点和采用解释方法的难易程度，则可分为井场解释、测井站解释和计算中心解释，或者仅按难易程度分为快速直观解释和定量解释；而按应用的测井信息或地质信息又可分为视地层水电阻率法、双孔隙度法、可动油法和可动水法等许多种。对于学习和应用来说，重要的不在于这样那样的分类方法，而在于理解和掌握每个具体解释方法的原理、计算和显示方法、应用的条件和作地质解释的方法。

用测井信息加工成的地质信息，有时并不是实际的地质信息，可能有假象。这就在测井资料的应用中，也就是在测井资料的综合解释中，最后还存在综合分析判断和验证的问题。例如在裸眼井地层评价中，要把原始的测井资料、加工成的地质信息（包括人工计算及数字处理得到的所有地质参数和直观显示的图形）、其他来源的地质资料（如钻井、井壁取芯或地层测试）都综合起来进行分析判断，做出地层是否油、气、水层的结论。过去，这主要是靠解释人员的综合思考完成的，目前我国已可以在数字处理中实现自动判别油水层，但解释人员的综合分析仍然是必要的。综合分析是测井资料综合解释与数字处理中最基本的方法，贯彻始终，尤其最后作综合地质结论时最为重要。

尽管测井资料的应用日益广泛，但也不能认为它时时处处都很准确。由于油气勘探的程度越来越高，测井面临的地质情况也越来越复杂，因而还存在多种应用不灵的问题。如裂缝性低孔隙度碳酸盐岩储集层的评价，具有复杂泥质成分的泥质砂岩储集层的评价，盐水泥浆低电阻油气层的评价，注入水水淹层的评价，深井和超深井储集层的评价等，不仅是我国测井解释面临的一些重大问题，也是世界上的问题。为了更好地完成我国测井工作面临的复杂的地质任务，我国正在发展三化一深（系列化、标准化、数字化、超深井）的现代测井技术，争取尽早健全岩性孔隙度测井系列和深浅微电阻率测井系列；正在进行介电感应测井、碳/氧比和伽马能谱及岩性密度测井等测井新方法的研究；根据复杂的地质问题开展实验研究和资料的统计分析，发展更有效的测井解释模型，发展数字处理技术（如质量检验、自动校正、参数选择和应用数理统计等），以进一步提高测井解释的水平；测井解释人员和地质、钻井、采油人员正在进一步密切合作，更广泛的应用测井信息解决更多的地质及工程问题。

目 录

绪 论

第一章 测井资料综合解释基础	1
第一节 储集层的地质特点和划分方法	1
第二节 纯岩石基本解释关系式	17
第三节 确定岩性和孔隙度	36
第四节 确定含油气饱和度	59
第五节 确定束缚水饱和度和渗透率	74
第二章 快速直观显示油气水层的方法	85
第一节 显示含油性的重迭法	85
第二节 显示含油性的交会图	91
第三节 直观显示气层的方法	101
第四节 可动油气及可动水显示	106
第三章 测井资料数字处理系统	112
第一节 测井数字处理概况	112
第二节 计算机硬件配置	114
第三节 计算机软件系统介绍	122
第四节 测井资料的分析解释系统	126
第四章 测井资料的预处理与成果显示	131
第一节 野外数字磁带的预处理	131
第二节 模拟测井曲线数字化和预处理	148
第三节 频率交会图和直方图技术	165
第四节 数字测井曲线的编辑	172
第五节 测井曲线的环境影响校正	182
第六节 数字处理成果的显示方法	185
第五章 泥质砂岩解释方法	195
第一节 泥质砂岩解释模型	195
第二节 泥质岩石解释关系式	205
第三节 选择解释参数	225
第四节 SARABAND处理方法	229
第五节 POR处理方法	243
第六节 SAND2处理方法	252
第七节 泥质砂岩的其他解释方法 <i>by computer</i>	269
第六章 复杂岩性解释方法	281
第一节 复杂岩性储集层的划分	281
第二节 确定岩性模型和解释参数	288

第三节	CORIBAND处理方法	300
第四节	CRA处理方法	314
第五节	其他复杂岩性解释方法	325
第七章	测井资料的综合应用	334
第一节	裸眼井地层评价	334
第二节	多参数油水层判别分析	348
第三节	套管井地层评价	361
第四节	套管井和储集层动态分析	372
第五节	油气勘探与油矿地质	377
第六节	煤层的分析	385
第七节	岩石强度分析	391
附录 I	有关矩阵和求逆矩阵方法的某些知识	400
附录 II	算术参考	406
附录 III	常用单位换算尺	408
附录 IV	地质图例	409
附录 V	测井分析源程序	410
附录 VI	常用符号说明	434
参考文献		439

第一章 测井资料综合解释基础

第一节 储集层的地质特点和划分方法

一、储集层的概念和分类

试油的时候，我们看到石油像喷泉一样源源不断地流向地面。是不是地下有石油河或石油海呢？不是的，石油和天然气是储藏在地下具有孔隙、裂缝或孔洞的岩石中的。自然界岩石种类很多，已被人们认识的就有一百多种，如砂岩、泥岩、石灰岩、白云岩、生物灰岩、花岗岩等等。但不是所有的岩石都能储集石油和天然气，能够储藏石油和天然气的岩石必须具备两个条件：一是具有储存油气的孔隙、裂缝和孔洞等空间场所，二是孔隙、裂缝和孔洞之间必须相互连通，能够形成油气流动的通道。我们把具备这两个条件的岩石就叫做储集层。人们常说的油层、气层、油水同层、含油水层和水层都是储集层，因为不管这些地层产什么，它们都是具备这两个条件的。储集层是形成油气藏的基本要素之一，自然也是形成油气层的基本要素之一，因而是测井资料进行地层评价的基本对象。

世界上能够储存油气的岩石很多，但按岩性可以分为碎屑岩储集层、碳酸盐岩储集层和其他岩类储集层，前两类是主要的储集层。由于孔隙与裂缝和孔洞对测井地层评价有不同的影响，在地层评价中常把储集层分为孔隙性储集层、裂缝性储集层和孔隙-裂缝性储集层。孔隙性储集层具有比较均匀的粒间孔隙结构，岩性以砂岩最多，其次是孔隙发育的生物灰岩、白垩、鲕状石灰岩和白云岩。裂缝性储集层是指粒间孔隙度很低而天然裂缝很发育的储集层，其孔隙结构除了均匀而细小的粒间孔隙，还有天然裂缝系统和淋滤而成的比粒间孔隙要大得多的孔洞。孔隙-裂缝性储集层界于前两类之间，其粒间孔隙可能比裂缝性储集层要好点，但裂缝又不及它发育。裂缝性储集层和孔隙-裂缝性储集层以碳酸盐岩石中最多，也曾在岩浆岩、变质岩、砾岩和泥岩等岩石中发现这类储集层。下面重点介绍碎屑岩和碳酸盐岩储集层。

1. 碎屑岩储集层

碎屑岩储集层包括砂岩、粉砂岩和砾岩。在世界油气储量和产量方面，碎屑岩储集层略低于碳酸盐岩储集层。我国已经发现的油气田，大多是碎屑岩储集层。碎屑岩储集层的上下一般以泥岩作为隔层，故在油井剖面中常常是砂、泥岩交替，测井解释称之为砂泥岩剖面。

碎屑岩主要是由各种岩石碎屑、矿物碎屑、胶结物（如泥质、灰质、硅质和铁质）及孔隙空间组成。决定碎屑岩岩性特征的主要是碎屑的成分和颗粒的大小，按其颗粒大小（粒级），可把碎屑岩分为砾岩、砂岩和粉砂岩等。表1-1是我国采用的碎屑粒级分类，与温德华士分类有些差别。但用声波、密度和中子三种孔隙度测井资料解释岩性时，其依据是岩石中矿物的化学成分，是采用所谓岩石的化学分类法。按岩石的化学分类，认为砂岩的矿物成分是石英，化学成分是 SiO_2 ；石灰岩的矿物成分是方解石，化学成分是 CaCO_3 ；白云岩的矿物成分是白云石，化学成分是 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ；等等。故在测井中认为粉砂岩是颗粒很细的砂岩，而燧石是结晶结构与石英不同的砂岩。粘土虽然属碎屑岩，由于它有特殊的矿物成分和物理化学性质，在测井资料上也有特殊的显示，故测井把粘土划为一个独立的岩类。对粘土性质

的研究是现代测井解释的重要基础之一，因为各类储集层都含有程度不同的粘土。

表 1-1 碎屑的粒级分类

碎 屑 名 称		颗粒直径 (毫米)
砾	巨 砾	>1000
	粗 砾	1000~100
	中 砾	100~10
	细 砾	10~2
砂	巨 砂	2~1
	粗 砂	1~0.5
	中 砂	0.5~0.25
	细 砂	0.25~0.1
粉 砂	粗 粉 砂	0.1~0.05
	细 粉 砂	0.05~0.01
粘 土		<0.01

碎屑岩储集层基本上就是砂岩储集层，砾岩储集层较少，泥岩储集层（有裂缝才具储集性质）更少。一般砂岩储集层的储集性质（孔隙度和渗透率），主要决定于砂岩颗粒大小，同时还受颗粒均匀程度（分选程度）、颗粒磨圆程度和颗粒之间胶结物的性质及含量的影响。一般来说，砂岩颗粒越大，分选越好，磨圆程度越好，颗粒之间充填胶结物越少，则其孔隙空间越大，连通性越好，即储油物性愈好。从理论上计算，如果是同样直径的圆球颗粒，当相邻四个球心构成正方形时，则不论颗粒直径大小，其孔隙度都是47.6%，但颗粒直径愈大渗透性愈好；如果相邻四个球心构成菱形（最紧排列），则孔隙度降为25.9%，渗透性也变差，且颗粒愈细渗透性愈差。砂岩胶结物一般是泥质的，也有灰质的，以泥质对储集性质影响最大。在测井中认为泥质是粘土、细粉砂与束缚水的混合物。当泥质含量较低时，它一般是分散在砂岩颗粒的表面，因而使砂岩粒间孔隙截面和孔隙体积减小，使其储集性质变差，泥质含量愈大影响愈大。这种泥质称为分散泥质，其含量不可能超过粒间孔隙体积的40%。当泥质含量较高时，除了分散泥质，还会有层状泥质，即在砂岩中呈条带状分布的泥质。此外，在砂岩碎屑中还有泥质颗粒，它们将不改变砂岩粒间孔隙的结构，这种泥质称为结构泥质。研究泥质的含量、性质、分布形式及其对储集层性质和测井解释方法的影响，是现代测井解释的主要课题之一。

2. 碳酸盐岩储集层

碳酸盐岩储集层包括石灰岩、白云岩、生物碎屑灰岩、白垩和鲕状石灰岩等，其基本化学成分都是碳酸的盐类（如 CaCO_3 ， MgCO_3 ）。这类储集层的油气储量占世界总储量的一半，其产量占总产量的60%以上，而且日产千吨以上的高产油井大多在碳酸盐岩油田中。我国华北的震旦系、寒武系和奥陶系的产油层，四川震旦系和二叠系、三叠系的油气层，以及中东和近东一些高产大油田，均属这类储集层。

碳酸盐岩石一般都比较致密，原生粒间孔隙度在1~2%左右。但因其性脆和化学性质不稳定，容易形成各种裂缝和孔洞。一般认为，包括原生粒间孔隙和次生缝洞在内的总孔隙度如果在5%以上，碳酸盐岩石就可能具有渗透性。因此，与碎屑岩储集层相比，碳酸盐岩储集层具有储集空间多样性和分布不均匀性等特点。表1-2列举了砂岩和碳酸盐岩孔隙的比较。

表 1-2 砂岩和碳酸盐岩孔隙的比较

比较项目	砂 岩	碳 酸 盐 岩
沉积物原始孔隙度	一般为25~40%	一般为40~70%
岩石最终孔隙度	一般为原始孔隙度的一半或更多 数值多为15~30%	常常只是原始孔隙度的很小一部分或近于零, 储集层一般为5~15%
原始孔隙类型	几乎只有粒间孔隙	粒间孔隙居多, 但粒内孔隙和其他孔隙也重要
最终孔隙类型	几乎只有原生的粒间孔隙	成岩作用后变化很大
孔隙大小	孔隙直径和孔道大小基本上与颗粒大小和分选作用有关	孔隙直径和孔道大小一般与沉积颗粒大小和分选作用关系很小
孔隙形状	受颗粒形状强烈影响	变化极大
孔隙大小、形状和分布的均匀性	在均匀岩石内一般完全是均匀的	可变的, 即使在单一类型的岩石内, 也可从十分均匀到完全不均匀
成岩作用的影响	很小, 由于压实和胶结作用, 原始孔隙度略有减小	很大, 可使孔隙形成、消失或完全变形, 胶结和溶解作用有重要影响
裂缝作用的影响	对储集层特点没有重大影响	如果有裂缝, 对储集层特点有重大影响
目估孔隙性和渗透性	半定量的目估一般比较容易	一般需要对孔隙度、渗透率和毛细管压力作仪器测量
储集层评价对岩心分析的要求	岩芯长1英寸, 直径要能反映骨架孔隙度	孔隙性储集层可做岩芯分析, 但对有大孔隙的岩石, 即使直径3英寸的岩心也不够
渗透率与孔隙度的关系	相当密切, 一般决定于孔隙大小和分选程度	变化很大, 一般与颗粒大小和分选程度无关

常见碳酸盐岩储集层的储集空间主要有以下三种, 由于其成因和结构不一, 各具有不同的特点。

(1) **孔隙性储集空间** 孔隙性储集空间与砂岩储集空间极为相似。如鲕粒、生物碎屑和结晶颗粒支撑的粒间孔隙、晶间孔隙以及鲕粒和生物内体腔形成的粒内孔隙, 其典型岩性是白垩、鲕状灰岩和针孔状生物灰岩等。我国川南高寺气田的鲕状灰岩, 其鲕粒直径最大为0.55毫米, 最小0.15毫米, 一般0.2~0.4毫米, 鲕粒间连通孔隙度为14~18%。又如石灰岩白云岩化及重结晶作用形成的粒间孔隙, 也可具有储集性质。由于地层水中的镁离子与方解石中的钙离子发生交换作用, 由方解石变成白云石, 其体积可收缩12~13%, 使孔隙空间扩大; 伴随的重结晶作用, 又使颗粒变粗, 也可使孔隙空间扩大。所谓“砂糖状”白云岩, 其孔隙度可与砂岩相比。

碳酸盐岩石孔隙成因复杂, 次生变化也很大。但对测井解释来说, 孔隙成因是不关重要的, 关键是孔隙大小、形状及其分布。所谓孔隙性碳酸盐岩储集层, 就是指孔隙较小(与砂岩孔隙相比)而又分布均匀的储集层。这种储集层的储集性质、油气水在储集层中的渗滤和分布、泥浆侵入的特点等, 均与砂岩储集层相似, 适用的测井方法与解释方法也基本相同, 都是目前测井解释应用最成功的一类储集层。

(2) **裂缝性储集空间** 主要是由构造裂缝和层间裂缝组成。构造裂缝发育的程度与构造部位和岩性条件有关, 一般在构造轴部和断裂带附近最发育, 而按岩性是以白云岩、石灰岩、泥灰岩的顺序而降低。我国川南裂缝性储集层的主要特点是: 在构造同一部位往往发育着好几组裂缝, 通常有垂直的、水平的、平行的和交错的四组, 其中有一组是主要的; 裂缝在纵

向和横向的发育程度都极不均匀；裂缝宽度可分粗、细、微三种，其中以粗、细裂缝对储集性质最有利。其储集性质的特点是：岩石致密，平均孔隙度很小；渗透性好，但变化大；主要渗透带（裂缝发育带）厚度很小，一般一米左右，可能只占整个产层的小部分。测试资料表明，裂缝性储集层的产能主要来自垂直裂缝，但有渗透性的层间缝，压裂后也能增加生产能力。

由于裂缝的数量、形状和分布极不均匀，使裂缝性储集层的孔隙度和渗透率具有多变性，油气水分布也很不规律。裂缝还具有渗透率高和泥浆侵入深的特点。对测井解释来说，裂缝性储集层是指裂缝异常发育而原生孔隙度又很低的岩石，以致在通常的测井探测范围内，可认为裂缝是均匀分布的，缝洞孔隙度与粒间孔隙度相当或占数量优势。对这类储集层，目前的测井方法和解释方法效果都比较好，与孔隙性储集层差别不大，只要适当选择解释参数就行了。而对于裂缝不太发育、分布又很不均匀、缝洞孔隙度很小、粒间孔隙度也很低的孔隙-裂缝性储集层，由于其总孔隙度较低（5%左右），裂缝又分布不均，目前测井解释还存在不少问题，用通常适用于孔隙性储集层的那些解释方法，常常还不足以区分油气水层。

（3）洞穴型储集空间 主要是指由溶蚀作用、重结晶作用及其他次生变化形成的比粒间孔隙大得多的孔洞（2毫米以上）。这类孔洞形状不一，大小悬殊，小的4毫米左右，大的体积可达几千立方米，常沿裂缝及地层倾斜方向分布。这是富集油气的一种重要的孔隙类型，常是钻遇高产油气层的一种显示。钻井遇到洞穴，会出现放空和泥浆漏失现象，洞穴愈大，漏失愈严重。对于通常测井的探测范围来说，大洞穴的出现带有局部的性质，并不是处处都有的。因此，虽然有人就洞穴对测井解释的影响进行讨论，但还没有形成系统的方法。目前测井解释只考虑较小的洞穴，并认为它们在测井探测范围内是均匀分布的，把洞穴与裂缝一块处理，它们的体积占岩石体积的百分数称为缝洞孔隙度。在测井解释中，也不单独区分洞穴性储集层。

二、储集层的基本参数

我们如何评价一个储集层好不好？这就要有基本的数量分析，以确定反映储集层性质的基本参数：孔隙度，渗透率，含油气饱和度和含水饱和度，储集层厚度。用测井资料进行地层评价，就是要通过测井资料的综合解释确定储集层的这些参数，并对储集层的性质给以综合评价。

1. 孔隙度

储集层的孔隙度是指其孔隙体积占岩石体积的百分数，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，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，缝洞孔隙度是指缝洞孔隙体积占岩石体积的百分数。

为了说明有效孔隙的概念，我们以粒间孔隙为例，说明孔隙大小对流体（油、气、水）储存和运移的影响。为此，把粒间孔隙分为三类。

（1）超毛细管孔隙 超毛细管孔隙是直径在0.5毫米以上的孔隙。在自然条件下，除岩石颗粒表面有一层不能动的束缚水（又称薄膜滞水）以外，其他流体可在超毛细管孔隙中自由流动。一般胶结疏松的砂岩或未胶结的砂层，大都属于这种孔隙。

（2）毛细管孔隙 毛细管孔隙是直径在0.0002~0.5毫米的孔隙，除了颗粒表面的束缚水不能动以外，在某些毛细管弯曲度较大的地方还有不能动的毛细管滞水。在一般孔隙形

成的毛细管中，由于毛细管力随毛细管变细而增加，只有当外力的作用大于本身的毛细管力时，束缚水和毛细管滞水以外的其他流体才能在其中自由流动。一般砂岩的孔隙大部分都属于这一类。

(3) 微毛细管孔隙 微毛细管孔隙是直径小于0.0002毫米的孔隙。由于孔隙截面极其微小，孔壁表面对分子的作用力可以到达孔隙孔道的中央。故孔隙中的流体都不能流动，一般是成岩过程中形成的地层水，其他地层生成的油气不可能进入这类孔隙。一般粘土层和泥岩的孔隙均属这一类，因而称它们为非储集层，它们是形成油气藏的生油层或盖层。

孔隙要具有储集性质，除了与孔隙大小有关以外，还必须互相连通。我们把不与总的孔隙系统连通的孔隙称为“死孔隙”，其中包括被岩石颗粒包围的孤立孔隙和被微毛细管包围的孤立孔隙。所谓有效孔隙，就是具有储集性质的孔隙，即孔隙直径在0.0002毫米以上的连通孔隙。有效孔隙度是有效孔隙体积占岩石体积的百分数，一般用 ϕ 表示。而总孔隙度是全部孔隙体积占岩石体积的百分数，一般用 ϕ_t 表示。严格说，测井确定的孔隙度并不是有效孔隙度，电阻法确定的是含水岩石的连通孔隙度，各类孔隙度测井基本上反映总孔隙度。在储集层评价中，由于以下两个原因，常认为测井资料反映有效孔隙度：①含泥质少的储集层 ϕ_t 与 ϕ 差别很小，含泥质多时可作泥质校正；②测井计算的含水饱和度是含水体积占连通孔隙体积的百分数，非有效孔隙为水所占据，计算结果不会减少油气体积。因此，解释中常把有效孔隙度简称为孔隙度，需要特别指明时才讲总孔隙度。

在碳酸盐岩储集层中，还要将有效孔隙中的粒间孔隙与裂缝和孔洞加以区别。因为碳酸盐岩石一般比较致密，原始孔隙性和渗透性都比较差，只有当缝洞比较发育时，才具有储集性质。因此，碳酸盐岩石的缝洞孔隙度是其储集性质好坏的重要标志。一般认为包括缝洞在内的有效孔隙度在5%以上，碳酸盐岩石就具有储集性质。由于缝洞都是次生作用造成的，也常把缝洞孔隙度称为次生孔隙度。

多数储集层的孔隙度在5~30%，碎屑岩和孔隙性碳酸盐岩储集层的孔隙度较高，而裂缝性储集层的孔隙度一般较低。对孔隙性岩石，按其孔隙度大小可分为：孔隙度0~5%，无价值；5~10%，不好；10~15%，中等；15~20%，好；20~25%以上，极好。

2. 渗透率

油井是在井底压力低于油层压力的情况下采油的。这就是说，在有压差存在的条件下，储集层岩石有让流体在其孔隙孔道中流动的能力。这种岩石允许流体通过的性质，叫做渗透性。岩石的渗透性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。岩石渗透性的好坏用渗透率表示，单位是达西。1达西的渗透率，表示在1厘米长的岩样两端压差为1大气压时，岩石让粘度为1厘泊、体积为1厘米³的液体在1秒钟内通过截面积为1厘米²岩石的能力。实际工作中，由于达西太大，常采用它的千分之一作为渗透率单位，称为千分达西或毫达西。

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（如油与水）通过岩样时，对不同的流体则有不同的渗透率。为了区分这些情况，将渗透率分为绝对渗透率和有效渗透率（相渗透率）。

(1) 绝对渗透率 绝对渗透率是在只有一种流体（油或气或水）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。根据岩石绝对渗透率的大小，按经验可把储集层分为：小于1到15毫达西，差到尚可；15~50毫达西，中等；50~250毫达西，好；250~1000毫达西，

很好，大于1000毫达西，极好。

(2) 有效渗透率 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，称为该流体的有效渗透率，也称相渗透率。测井解释中，绝对渗透率用 K 表示，油、气、水的有效渗透率分别用 K_o 、 K_g 、 K_w 表示。有效渗透率的大小除与岩石孔隙结构有关，还与流体的性质和相对含量以及流体与岩石的相互作用有关。由试油资料求得的渗透率是有效渗透率。

(3) 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。在多种流体通过岩石的情况下，可用相对渗透率的大小衡量某种流体通过岩石的难易程度。油、气、水的相对渗透率分别用 K_{ro} 、 K_{rg} 和 K_{rw} 表示。图1-1表示油水两相流动时相对渗透率与含水饱和度的关系。

3. 含水饱和度和含油气饱和度

储集层含水饱和度是指其含水体积占有效孔隙体积的百分数，用 S_w 表示；含油气饱和度是指其油气体积占有效孔隙体积的百分数，用 S_h 表示。显然， $S_w + S_h = 1$ 。储集层总是含有地层水的。地层条件下的石油也总含有溶解气。如果储集层只含天然气和水，则含气体积占有效孔隙体积的百分数称为含气饱和度，用 S_g 表示，这时 $S_w + S_g = 1$ 。如果储集层只含油和水，则 $S_w + S_o = 1$ ， S_o 为含油饱和度。含油气饱和度泛指油气，究竟是油或气或含气很多的油气混和物，应视具体情况而定。含油气饱和度也常简称为含油饱和度。

4. 储集层的厚度

通常用岩性变化（如砂岩到泥岩或碳酸盐岩到泥岩）或孔隙性渗透性的显著变化（如巨厚致密碳酸盐岩石中的裂缝带）来划分储集层的界面。储集层顶、底界面之间的厚度即为储集层的厚度。

在油气储量计算中，要用油气层有效厚度，它是指在目前经济技术条件下能够产出工业性油气的油气层实际厚度，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）剩下的厚度。

三、油气水层的特点

油层、气层和水层等名称是在油气勘探开发过程中，人们根据试油的结果对储集层下的几种结论，也是测井地层评价中采用的结论。在测井地层评价中，根据试油的结果，把解释结论分为六种（各地规定可能略有出入）：

油层：产油，不含水或含水小于10%；

气层：产气，不含水或含水小于10%，包括产气为主又产油；

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：完全出水，有时也把含油水层归入水层；

干层：按干层求产制度求得的日产液量小于1方，其中油小于0.5吨。如某地规定干层求产制度为：产层位置小于2000米，抽深不小于1000米；产层位置大于2000米，抽深不小于1200米；用分离器测，抽深不小于800米。

可以说这些地层都是储集层，只有干层是储集性质差的地层，其他都是孔隙性渗透性比较好的地层。为要区分这些不同类型的地层，就必须掌握它们在地质上的不同特点。

1. 孔隙饱和特性

如图 1-1 所示, 在油水两相流动的情况下, 当含水饱和度很低而含油饱和度很高时, 水的相对渗透率 K_{rw} 接近于零, 油的相对渗透率 K_{ro} 很高, 地层将只产油而不出水。这时的含水饱和度称为束缚水饱和度, 用 S_{wirr} 表示。反之, 当含水饱和度很高而含油饱和度很低时, K_{ro} 接近零而 K_{rw} 很高, 地层将只产水而不出油。这时的含油饱和度称为残余油饱和度, 用 S_{or} 表示。这就是油气层与水层在孔隙饱和特性上的显著区别: 油气层是只含束缚水的储集层, $S_w = S_{wirr}$; 水层是一点不含油 (纯水层) 或只含残余油的储集层。油水同层居于两者之间。

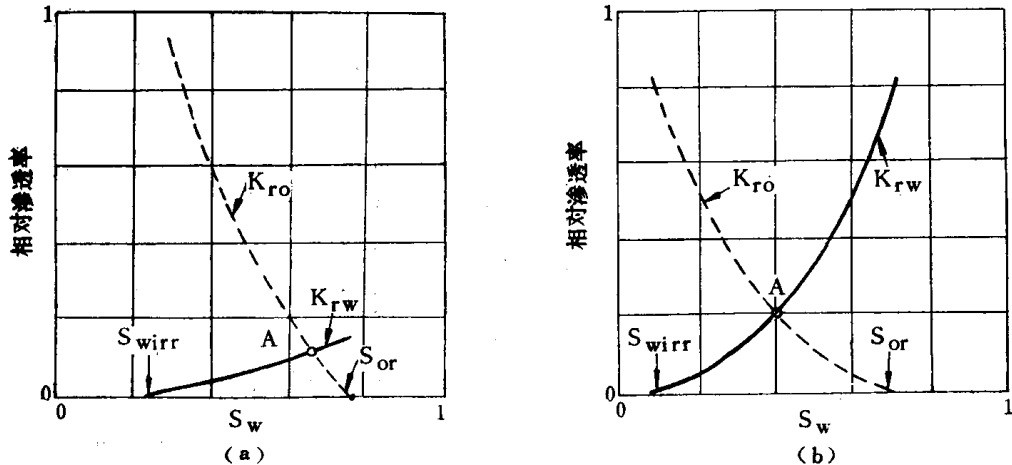


图 1-1 相对渗透率与含水饱和度的关系

(a) 一亲水储集层; (b) 一亲油储集层

由图 1-1 还可以看出, 岩石的润湿性对储集层的相对渗透率、束缚水饱和度和残余油饱和度的大小有相当大的影响。岩石的润湿性是指岩石颗粒表面被液体附着的能力。一般认为, 天然气对岩石是非润湿性的, 而油和水对岩石都有一定的润湿性, 但大部分岩石总是被首先存在的液体润湿的。相对而言, 容易被水附着的岩石称为亲水储集层, 而容易被油附着的岩石称为亲油储集层。在亲水储集层中, 束缚水饱和度较高, 大多是 $S_{wirr} > 20\%$, 油和水相对渗透率相等的 A 点有较高的含水饱和度 ($S_w > 50\%$), 而残余油饱和度较低。亲油储集层与此相反, 一般 $S_{wirr} < 15\%$, A 点 $S_w < 50\%$, S_{or} 较高。A 点是油水同出的典型代表, 但油水同出的范围很大。虽然岩石的润湿性影响较大, 但目前测井资料还没有能识别润湿性的方法, 一般要根据岩芯测定的资料, 由地区经验确定岩石的润湿性。通常不含油的地层是亲水的, 而含油层可以是亲水或亲油的, 由于长期被油饱和, 原来亲水的地层也可能变成亲油的。

2. 油气水层在构造上的分布

油气水层并不是孤立存在的, 而是受着油田构造和地层岩性等因素控制的。在有生油条件的情况下, 油气聚集受着构造条件的控制。例如一个背斜油气藏, 由于油、气和水按其比重大小在储集层中发生重力分异, 在有泥岩或其他非渗透地层作为盖层的背斜构造上形成气顶、纯油带、油水过渡带和底水几部分 (图 1-2), 而在与之连接的向斜构造上则都是水。因此, 尽管图上的 M 层各部分渗透性都很好, 但在 A 井, M 层全是水; B 井 M 层油气水都有; C 井 M 层只有油和水, 处在油水过渡带上。如果 B 井 M 层的储集性质局部变差, 虽然它处在含油的有利部位, 但可能不含油或含油饱和度明显降低, 以致可能为干层。这就是储集层岩性、物性 (孔隙度和渗透率) 对其含油性的控制作用。在砂岩储集层中, 一般是随着砂岩颗

粒变细和泥质含量增加，其孔隙直径变小，渗透率降低，而束缚水饱和度增加，可由储集层

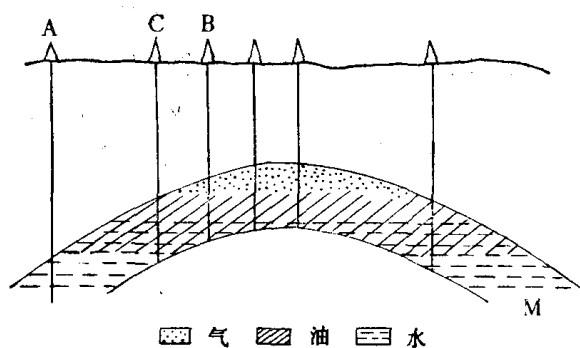


图 1-2 油气藏中油、气、水的分布

变为非储集层（干层）。因此，客观上存在两种含水饱和度增加而含油气饱和度降低的过程。一种发生在孔隙性渗透性好的储集层中，其含油气饱和度受着构造的控制，可以发生油层—油水同层—水层的转化。另一种发生在孔隙性渗透性变差的储集层中，如果它们在含油的有利部位，可以发生油层—低产油层—干层的转化；如果它们在构造含水的部位，则可发生水层到干层的转化。

一个实际的油气藏常是在纵向上互相连通的多个储集层构成的一个圈闭的压力系统，图

1-2 只是画出一个储集层作为示意。一个大的油气藏可以包括一个或两个以上的含油层系，每个含油层系又可包括若干油层组，每个油层组又可包括几个单一的小层。这些小层在每口井里都是孤立存在的，有泥岩或其他非渗透层把它们隔开，但在别的什么地方，这些小层又可以互相连通，如由两个小层合为一个统一的小层。因此，在一个油气藏中，虽然小层很多，但它们却彼此连通构成一个统一的压力系统。另一个油气藏则有另一个压力系统。如果这样的油气藏是一个完整的背斜圈闭，没有断层切割，则这许多小层几乎有相同的气-油和油-水接触面，好比像图 1-2 那样有几个水平的界面。如果已知这些界面的大概深度，则对测井资料判断油气水层将有很大指导意义：简单来说，油气界面以上是气层，油水过渡带以上是油层，油水界面以下是水层。但如果存在断层切割形成断块油气藏，则油气水分布可能很复杂。断块油气田的基本特点是油气藏类型多，纵向油气水关系很复杂，在一口井里可能有多套油水系统（由气层—油层—水层的一套地层构成一个油水系统）。

一个大的油气田可能油气水关系很复杂，但在局部地区局部层位上，油气水关系也可能变得比较简单。因此，在用测井资料进行地层评价时，总是要不断掌握油田总的地质地球物理特点，包括油田的构造特点和油气藏类型，油田各时代地层的划分情况和在纵横向上的分布情况，可作地质地球物理对比的主要标准层和辅助标准层，各主要含油层系的岩性、物性、含油性和电性特点（泛指岩性、物性和含油性在测井资料上反映的特点）及其在纵横向上的变化等。

3. 油气水层的侵入特性

储集层都有一定的渗透性。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储集层渗透。在不断渗透的过程中，泥浆中的固体颗粒逐渐在井壁上沉淀下来形成泥饼。由于泥饼的渗透性很差，当泥饼形成以后，可认为这种渗透作用就基本上停止了。在这之前，主要是泥浆滤液径向渗透的过程；此后，泥浆滤液在纵向的渗透作用将显著表现出来，油气水和滤液重新进行重力分异。这个过程称为泥浆侵入。

由于泥浆滤液电阻率与地层水电阻率不同，泥浆侵入将改变储集层电阻率的径向特性。设储集层的电阻率原来在径向是均匀的，都是真电阻率 R_t 。泥浆侵入以后，井壁附近受到泥浆滤液强烈冲刷的部分，大致是与井轴同心的环带（图1-3(a)），其孔隙流体主要是滤液，还有残余水（水层）和残余油气（油气层），其电阻率比较均匀，用冲洗带电阻率 R_{so} 表示；冲洗带以后是一个过渡带，滤液渐少，原来地层的流体渐多，直到没有滤液的原状地层（未

侵入带), 其电阻率由 R_{xo} 渐变为 R_t 。人们常说的侵入带其实并没有固定的范围, 它的大小与浅探测和深探测电阻率测井的探测特性有关, 大体包括冲洗带的全部和过渡带的一部分, 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性分为高侵、低侵和无侵 (侵入不明显) 三种情况。

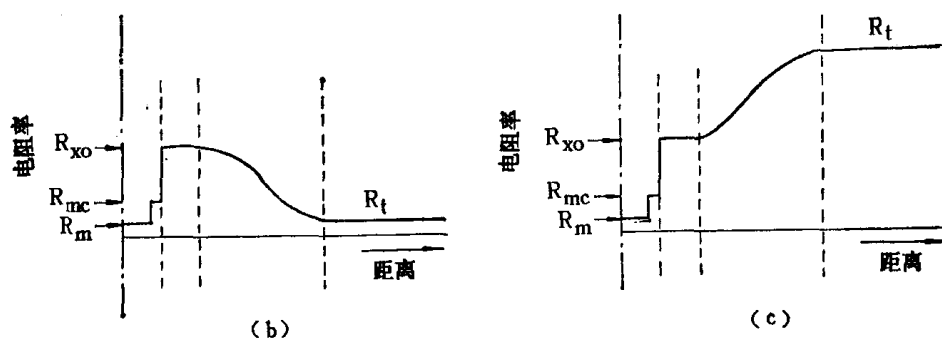
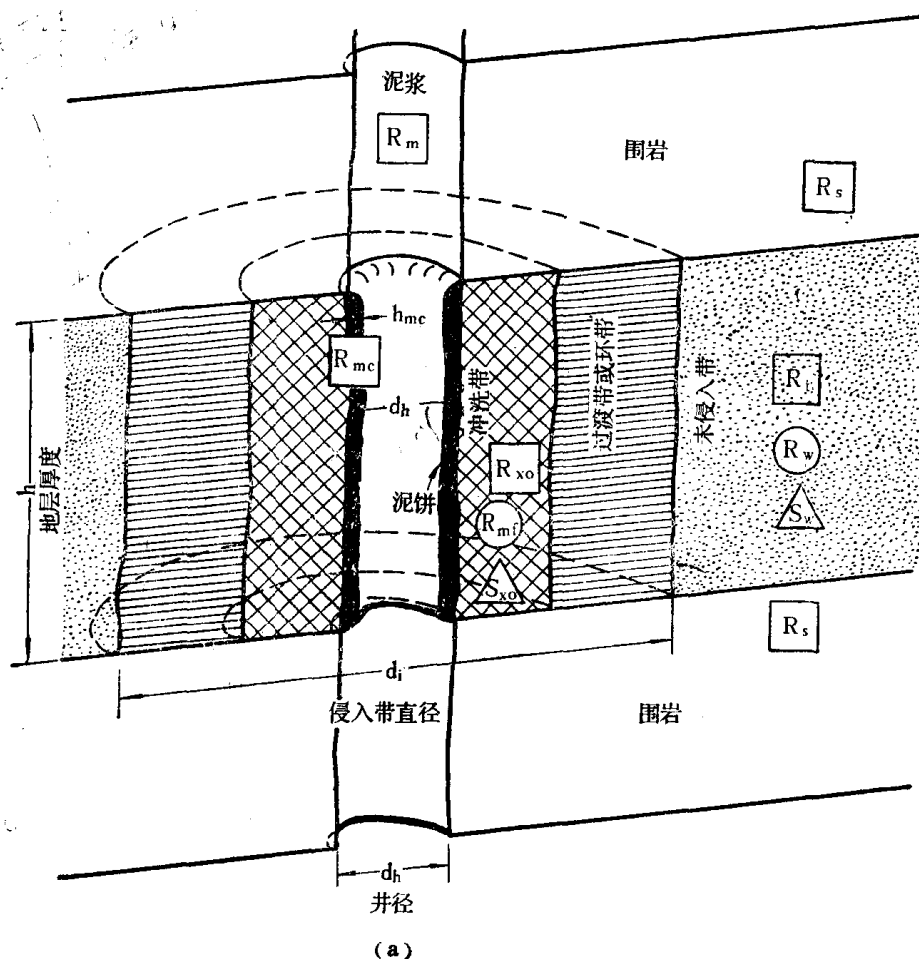


图 1-3 储集层侵入特性示意图
(a) 一井剖面图; (b) 一高侵剖面; (c) 一低侵剖面

(1) 高侵剖面 R_{xo} 明显大于 R_t , 称为泥浆高侵, 高侵地层电阻率的径向变化称为高侵剖面 (图1-3(b))。淡水泥浆钻井的水层一般是高侵, 部分具有高矿化度地层水的油气层也可能为高侵, 但 R_{xo} 与 R_t 的差别较小。

(2) 低侵剖面 R_{xo} 明显低于 R_t , 称为泥浆低侵, 低侵地层电阻率的径向变化称为低