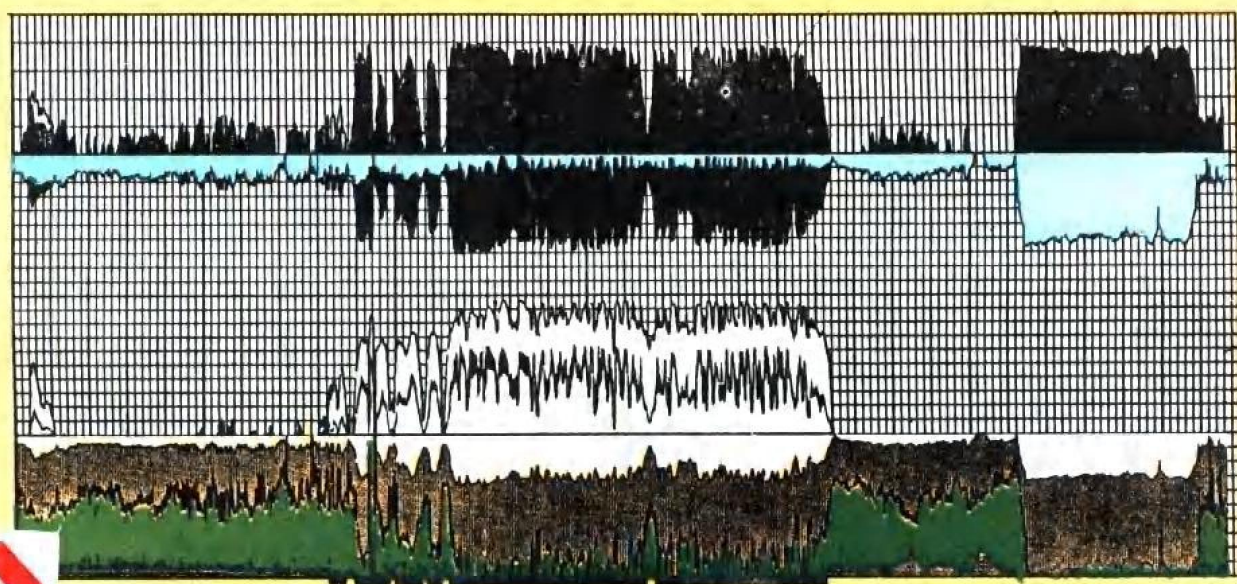


碳酸盐岩储层测井评价技术

赵良孝 补 勇 编著



(北京)

2

石油工业出版社

碳酸盐岩储层测井评价技术

赵良孝 补 勇 编著

石 油 工 业 出 版 社

(京)新登字 082 号

内 容 提 要

本书从测井资料在碳酸盐岩裂缝性储层评价中的实际应用出发,着重讨论了现场解释中经常遇到的各种问题,主要包括储层评价的地质、物理基础,即碳酸盐岩储层的岩石骨架、空隙空间结构、含流体性质的地质特征及测井响应;储层评价方法,即有效裂缝的划分、裂缝产状与组合状态的确定、含流体性质的判别、裂缝参数的计算、储层产能的综合评价等方法;最后给出了大量的现场解释实例,对典型的裂缝性储层,特殊的裂缝性储层和貌似储层的干层,分别展示了相应的曲线特征,并分析了解释成功和失败的原因。

本书主要供从事碳酸盐岩裂缝性储层测井评价的研究人员及现场解释人员使用,也可供地质、油藏工程、钻井的工程技术人员及高等院校有关专业的师生、研究生参考。

碳酸盐岩储层测井评价技术

赵良孝 补 勇 编著

*

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 $9\frac{1}{2}$ 印张 231 千字 印 1-1500

1994 年 12 月北京第 1 版 1994 年 12 月北京第 1 次印刷

ISBN7-5021-1199-9/TE·1096

定价: 10.00 元

前 言

碳酸盐岩裂缝性储层以其自身独有的空隙空间结构而区别于孔隙性砂储层。它的低孔、各向异性、非均质性三大特点，给测井评价带来了多解性、模糊性、不确定性，致使现场解释人员常常判断失误，甚至束手无策。面对此现状，作为一个身处碳酸盐岩裂缝性油、气田的老测井方法研究人员，理应责无旁贷地收集、整理、总结、研究上述问题，并以其结果奉献给奋战在现场解释中的同行们，虽然是浅薄的，但也可求得内心的喜悦。这是此书的目的所在。

本书以裂缝为主线，建立了一套适合于碳酸盐岩各类储层的测井评价方法，并重点分析和比较了这些方法的使用条件和效果，便于用者根据具体地层情况进行选择。

该套测井评价技术是以地质基础描述和测井曲线响应特征分析为主要内容，而把各种定量计算作为辅助的手段，因此书中列出了较多的实例，便于读者从千变万化的碳酸盐岩地层的测井曲线形状中去领略地质特征与测井响应之间的复杂关系，这是本书的特点。

在本书编写过程中，参阅了谭廷栋、廖明书、李厚义、文华川、廖觉生、陈福煊、刘宗诚、李松旺、张绍儒、刘浩升等同志的有关文章，在此一并表示感谢。

作者

引 言

随着世界油气勘探的发展，在碳酸盐岩剖面中得到的油、气储量和产量越来越大，因而引起了人们的高度重视。然而由于碳酸盐岩储层特有的性质，这就是它的非均质性和各向异性，大大增加了油、气勘探的难度，对于测井评价技术当然也不例外。正是这两方面的原因促使了碳酸盐岩剖面油、气勘探技术的飞速发展，并逐步成为一套有别于砂泥岩剖面的专门的勘探技术。碳酸盐岩储层的测井评价也就是在这种情况下发展起来的。

对碳酸盐岩储层来说，其测井评价的基本任务是通过计算岩石成分，判断岩石结构、构造的类型，识别空隙空间结构特征，确定储层的各种孔隙度、饱和度、渗透率等参数，进而在纵向上划出有效储集层段，定出含流体性质，估计产能的大小；在横向上估算储层的地质储量和可采储量。

认识碳酸盐岩储层特征的核心是它的空隙空间结构。也就是它的孔隙、溶洞和裂缝的发育特征及组合状况。这是因为以下四个原因：

第一、储层的空隙空间结构在很大程度上影响着地层原始的流体分布状况；

第二、当地层被井钻穿后，泥浆或泥浆滤液对储层的侵入特征将受到空隙空间结构的控制；

第三、空隙空间结构直接影响储层的储量和产能以及生产方式；

第四、空隙空间结构对各种测井信息都有程度不同的影响，因此在用这些测井信息来研究该类储层时，就必须建立一系列不同于砂泥岩剖面的概念和响应方程。因此，只有当我们认识了储层的空隙空间结构，才可能对储层进行全面的评价，也就是既认识它的现状，又预测它的未来；既可以说明它是一个什么样的储层，还可解释它为什么是这样一个储层。从而使我们可以进一步由一个单井的评价跨入多井的，对整个油、气藏的评价。

目 录

第一章 碳酸盐岩储层评价的地质、物理基础	(1)
第一节 岩石骨架	(1)
一、岩石成分及其主要物理性质	(1)
二、岩石结构及其对岩石物理性质的影响	(7)
三、岩石构造及其对岩石物理性质的影响	(10)
第二节 空隙空间	(14)
一、空隙空间的基本类型	(14)
二、空隙空间的测井响应	(19)
三、地下空隙空间的组合——储层空隙空间类型的划分	(30)
四、碳酸盐岩储层空隙空间结构与其主要油层物性关系	(33)
第三节 地层流体	(39)
一、地层流体的性质及其测井响应	(39)
二、储层原始流体的分布特征	(44)
三、开采中储层的流体分布特征	(45)
四、储层的泥浆或泥浆滤液侵入特征	(45)
第二章 碳酸盐岩储层的测井评价方法	(48)
第一节 碳酸盐岩储层的划分	(48)
一、碳酸盐岩储层划分的意义	(48)
二、碳酸盐岩储层划分的常规方法	(49)
三、几种特殊碳酸盐岩储层的识别	(50)
四、几种貌似储层的非储层的识别	(51)
第二节 碳酸盐岩储层的含流体性质判别	(59)
一、一般地层含流体性质判别方法的应用分析	(59)
二、特殊碳酸盐岩储层含流体性质的判别	(68)
第三节 碳酸盐岩储层参数的计算	(72)
一、基本解释参数的确定	(73)
二、泥质含量的计算	(76)
三、孔隙度计算	(77)
四、裂缝张开度 ε 的计算	(85)
五、裂缝发育程度的估算	(88)
六、饱和度的计算	(90)
七、渗透率的计算	(97)
八、有效厚度的确定	(104)
第四节 储层综合评价	(107)
一、储层综合评价指标	(107)

二、几点说明·····	(113)
第三章 碳酸盐岩储层测井评价实例·····	(115)
第一节 一般碳酸盐岩裂缝性储层的测井实例·····	(115)
一、高角度裂缝性储层的测井实例·····	(115)
二、低角度裂缝性储层的测井实例·····	(119)
三、网状裂缝性储层的测井实例·····	(124)
第二节 特殊碳酸盐岩裂缝性储层的测井实例·····	(129)
一、与井壁基本不相截割的高角度裂缝型储层实例·····	(129)
二、高放射性异常储层·····	(129)
第三节 各种貌似储层的非储层测井实例·····	(133)
一、重泥浆压裂缝的测井实例·····	(133)
二、非均匀岩石构造层的测井实例·····	(133)
三、高束缚水饱和度干层的测井实例·····	(139)
参考文献·····	(144)

第一章 碳酸盐岩储层评价的地质、物理基础

碳酸盐岩储层评价之所以不同于砂泥岩剖面储层的测井评价，是由于它有着不同的地质因素。其中与测井信息最密切相关的因素是地层的岩石骨架，岩石中的空隙空间结构，空隙中的流体性质及分布特征。因此它们是测井评价的地质基础。而这些地质因素对各种测井信息的影响状况，则是测井评价的物理基础。

第一节 岩石骨架

在任何地层中，岩石骨架所占的体积百分比和重量百分比都是最大的，尤其在低孔的碳酸盐岩地层中更是如此，因此它们对各种测井信息的贡献是不能忽视的。为了认识其贡献的大小，我们必须了解岩石的成分、结构和构造的地质特征及其物理性质。

一、岩石成分及其主要物理性质

在碳酸盐岩中，主要的矿物成分是方解石、白云石，但经常还含有一些粘土矿物、有机质、黄铁矿、石膏、硅质等，它们虽然含量不多，但对储层的影响及对测井信息的贡献都较大，因此有必要加以分析。

1. 方解石和白云石

它们是碳酸盐岩的主要造岩矿物。

以方解石为主的矿物有：文石、又名霏石 (aragonite)，它是最纯的，其 MgCO_3 含量最低；其次是低镁方解石，它的 MgCO_3 含量稍高；最不纯的是高镁方解石，其 MgCO_3 含量可高达 5%~10%。

白云石的分子式为 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ，其中阳离子层与阴离子层相间排列，形成高度的有序结构。在现代碳酸盐岩沉积物中很难见到原生的白云岩，基本都是在准同生期或成岩期由含镁的方解石转变而来。因此在自然界中很难找到含 100%白云石的白云岩，而绝大部分都含有不同比例的方解石。

区分方解石和白云石的主要物理性质见表 1-1。

表 1-1 方解石和白云石的主要物理参数表

矿物	密度 (g/cm^3)	热中子俘获 截面, Σ c.u.	纵波速度 (km/s)	中子含氢指数 (石灰岩刻度)	电磁波传播 时间 ($\mu\text{s/m}$)	光电系数 (b/cm^3)
方解石	2.71	7.1	6.6	0	9.1	5.08
白云石	2.87	4.8	7.0-7.6	0-2.5	8.7	3.14

因此用 ρ_b 、 P_e 、 Δt 、 Σ 来区分方解石和白云石是比较好的。应强调指出，这些参数是对方解石和白云石而言的，它们不能简单地对应于石灰岩和白云岩，尤其是白云岩，因所含方解石含量变化很大，使得物理参数随之而明显改变。这在测井解释中选取骨架参数和制作

白云岩刻度模型块时，应予以注意。

2. 粘土矿物

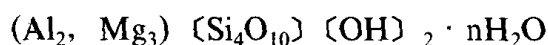
碳酸盐岩中的粘土矿物因其种类繁多，结构复杂，分布形式多变、含量不稳定，加之其性能特殊，对储集物性和测井响应都有极大的影响。所以我们必须予以足够的重视。下面就从粘土的成分、结构、含量、分布形式等因素出发，对储层性能和岩石物理性质的影响机理和程度进行分析。

(1) 粘土矿物的成分

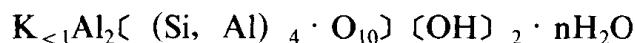
粘土矿物是一种含水的铝硅酸盐，但因其化学成分和结构不同而形成了多种的粘土矿物，一般常见的有以下三种。

高岭石 (kaolinite)，分子式为： $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

蒙脱石 (montmorillonite)，又名微晶高岭石，其分子式为：



伊利石 (illite) 又名水白云母，其分子式为：



由上可知，高岭石中的 Al_2O_3 含量较多，但 SiO_2 则较少，而蒙脱石刚好相反， Al_2O_3 较少， SiO_2 较多。伊利石则主要含有相对较多的 K_2O ，这些化学成分上的差别将影响到它们的物理性质。

(2) 粘土矿物的结构

高岭石是六角形鳞片状结构，在这片状结构中，一面为 OH 层，另一面为氧层，而 OH 键具有很强的极性 ($\text{O}^- - \text{H}^+$)，故片与片之间易形成氢键，使层间连接紧密，其晶格底面间距只有 $7.2\text{\AA}$ ，因而水分子不易进入晶层之间。

蒙脱石也呈片状结构，但晶层间靠微弱的氧层与氧层分子间力连接，使得晶胞间不紧密，故水分子容易进入两个晶胞之间而发生膨胀，使晶格间距增大到 $21\text{\AA}$ ，但如当它完全脱水时，晶格间距可减小到 $9.6\text{\AA}$ 。

伊利石的晶层之间虽然也是靠氧层与氧层的分子间力连接，但其中间有 K^+ ，使晶层间引力有所增加。因此它的晶层间引力小于高岭石，大于蒙脱石；晶层间距离大于高岭石，小于蒙脱石，为 $10\text{\AA}$ ，故其吸水能力也就介于二者之间。

粘土矿物的这一结构特征，决定了它的较强的可压缩性，尤其是蒙脱石和伊利石，因此它的很多性质都要受到埋藏深度的影响。

(3) 粘土矿物的含量

在各地层中，粘土矿物的总含量常常不同，因此地质上常以岩石中粘土的重量百分含量不同而给予分类和命名，见下表 1-2：

但测井上常采用粘土的体积百分含量。这两者有一定差别，因为粘土矿物的颗粒密度与其它矿物的颗粒密度一般是不同的。

在碳酸盐岩中不仅粘土的总含量各不相同，而且各种粘土矿物的百分含量也常常不同。表 1-3 是四川各套地层中粘土矿物的成分。

表 1-2 岩石按粘土含量的分类表

岩石名称	矿物百分含量 (%)	
	方解石或白云石	粘土矿物
粘土岩	0~5	100~95
含灰质 (云质) 粘土岩	5~25	95~75
灰质 (云质) 粘土岩	25~50	75~50
泥灰岩 (泥质白云岩)	50~75	50~25
含粘土质灰岩 (含粘土质白云岩)	75~95	25~5
石灰岩 (白云岩)	95~100	5~0

表 1-3 四川主要地层的粘土成份及其含量表

地层 粘土 含量 (%)	三迭系 绿豆岩	三迭系 兰灰色泥岩	上二迭系 灰质泥岩	下二迭系 泥岩	石炭系 泥质云岩	震旦系 兰灰色泥岩	震旦系 炭质页岩	震旦系 白云岩
伊利石	100	75.1	93.1	100	46.1	100	0	约 30
高岭石	0	0	0	0	0	0	> 80	约 40
蒙脱石	0	0	0	0	0	0	0	0
绿泥石	0	24.9	6.9	0	29.3	0	0	约 20

(表中数据为 X 射线衍射分析结果)

由表可知，四川地层中的粘土矿物，以伊利石为主，但也有特殊情况。

上述特性不仅影响到岩石的各种物理性质，对地层的储集性能也有较大的影响。

(4) 粘土矿物的分布形式

沉积岩石中粘土矿物分布形式有三种：层状或条带状分布，颗粒状或结核状分布，分散状分布，即粘土颗粒均匀地分散于其它岩石颗粒周围或孔隙空间中。

(5) 粘土矿物对岩石物理性质的影响

粘土矿物对岩石物理性质影响的程度决定于粘土在岩石中的成份，结构、含量、分布形式和埋藏深度等五个因素。

1) 对岩石电阻率的影响：粘土矿物影响岩石电阻率的根本原因在于粘土颗粒的表面导电性。这种表面导电性是由两种因素造成。第一，粘土颗粒裸露在外面的氢氧根，其氢发生离解而使表面带负电荷，但这是比较弱的。第二，粘土矿物晶格中发生离子取代现象，如在硅氧四面体中的硅被三价的铝取代或铝氧八面体中的铝被二价的镁取代而呈负电荷特征，如图 1-1 所示。

这两个因素都使粘土颗粒表面带负电荷，所以当它处于盐溶液中时，将吸附一部分阳离子而形成“吸附层”，并中和掉一部分表面负电荷，剩下的表面负电荷还可松散地吸引一些阳离子，位于“吸附层”之外，被称作“扩散层”。这时，如在外电场作用下，这些松散的“扩散层”中的阳离子，将在粘土颗粒表面相继交换位置而形成电流，这就是粘土颗粒表面的阳离子导电机理。

为了定量描述这种表面导电性，引入阳离子交换容量即 CEC 的概念，它表示在 pH 值

为 7 的溶液中，粘土能吸附可交换的阳离子总量，它的数值均以 100g 粘土吸附阳离子的毫克当量数表示。

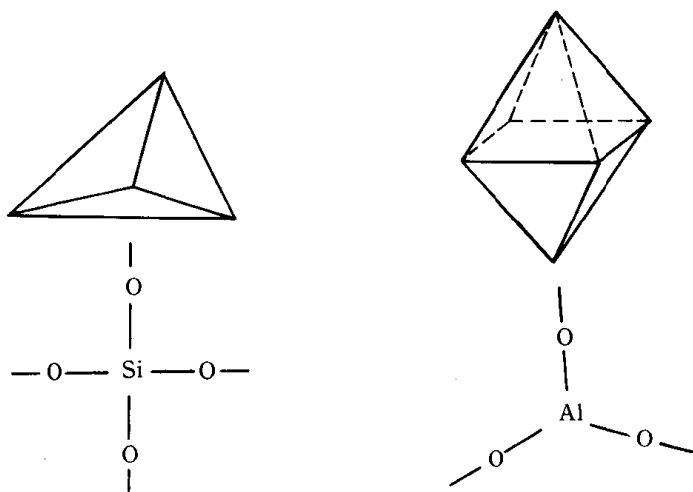


图 1-1 粘土矿物晶格图

粘土矿物对岩石电阻率的影响程度取决于粘土的种类、含量和分布形式，主要表现在以下几个方面：

①种类的影响：在三种粘土矿物中，蒙脱石除了要发生氢氧根中氢的离解而带负电外，更主要的是易于发生晶格中的离子取代现象，因而它具有最好的表面导电性，它的 CEC 值可达 (80~150) 毫克当量 / 100g 粘土，而高岭石则不发生离子取代现象，只靠氢氧根离解使表面带有微弱的负电荷，因而其表面导电性很差，只有 (3~15) 毫克当量 / 100g 粘土。伊利石则介于以上二者之间。

②分布形式的影响：可归结为两种影响方式。一是通过对导电路径的改变来影响岩石平均电阻率，即为条带泥质和分散泥质时，将降低岩石的平均电阻率，而结核状泥质则影响很小。此外更要影响岩石电阻率的各向异性，尤其是层状或条带状粘土可造成很大的各向异性。二是通过粘土矿物本身电阻率的改变来影响，因为层状粘土和结构状粘土要受到上覆岩层的压力，而分散状粘土则不受上覆岩层的压力，只受到静水柱压力的作用，故后者含有较多的束缚水，使其导电性能较好。

③含量的影响：在粘土种类和分布形式一定时，其含量越多，导电性能越好。

2) 对岩石自然电位特性的影响：当粘土与水溶液接触时粘土颗粒表面的阳离子扩散层将与水溶液建立起吸附与解离的动平衡，如水溶液的浓度改变，则动平衡也随之而变。因此，当粘土将同性质的，浓度不同的两种水溶液隔开时，在浓度大的一边的粘土颗粒的“扩散层”将吸附更多的阳离子，这样粘土颗粒两边将形成电位差，且浓度大的一边电位高，故使阳离子要往低浓度溶液一方跑，但它不能从溶液中运动，而只能在粘土颗粒表面移动。于是在高浓度溶液一边的阳离子不断从水溶液里进入到“扩散层”；低浓度溶液一边又将“扩散层”中得到的阳离子解离到溶液中。如此继续下去，直到新平衡的建立，其结果大大提高了低浓度溶液一边的电位。这就是“泥岩电位”或“薄膜电位”。显然它与渗透性地层中的“扩散电位”的极性刚好相反，所以在泥岩处出现相对正的自然电位。其值大小与以下因素有关：

第一，与被粘土颗粒隔开的两种溶液的浓度和性质有关。

第二，与粘土颗粒的类型有关。含蒙脱石越多“薄膜电位”越大。

第三，同类型的粘土含量越多，“薄膜电位”在自然电位中占的比例越大。

3) 对岩石自然放射性的影响：由于粘土矿物颗粒小，比面大，且有较大的晶格结构，故在沉积过程中易于吸附带有放射性元素的一些离子。此外，在伊利石中含有较多的钾元素，其中也有不少的放射性同位素钾，因此粘土矿物自然放射性都较高。这样，凡含有粘土矿物的岩石，其自然放射性也就相应增高。增高的程度和放射性的能谱决定于以下几个因素：

①岩石所含粘土的种类；

不同的粘土矿物，其放射性水平不同，所含铀、钍、钾的放射性能谱也不相同，见表1-4。

表 1-4 常见粘土矿物的自然伽玛放射性强度和能谱

粘土矿物	总放射性 (API)	钍 (ppm)	钾 %	铀 (ppm)
高岭石	80~130	6~19	0~0.5	4.4~7
绿泥石	180~250	0~8	0~0.3	17.4~36.2
伊利石	250~300	10~25	3.51~8.31	8.7~12.4
蒙脱石	150~200	14~24	0~1.5	4.3~7.7

②岩石所含粘土的数量：对同种粘土矿物来说，岩石含的粘土越多，放射性也越高，在四川碳酸盐岩地层中，除开有机质的影响，则粘土含量与自然放射性有较好的对应关系，根据实验研究结果表明，除开石炭系，下二迭系阳新统地层（因它们的有机质含量较高），其余地层的粘土含量与自然放射性的相关系数都在 0.9 以上。特别是与钾的相关性更好（因为四川地层中的粘土成分多以伊利石为主）。因此，在粘土矿物类型确定后，有可能用放射性的高低或钾含量的高低来判断粘土含量的多少。

4) 对岩石中子减速特性的影响：物质对快中子的减速特性，主要取决于物质中的含氢量。在碳酸盐岩中，一般造岩矿物的含氢量都明显少于粘土矿物，这是因为粘土矿物除分子本身含有结晶水外，其晶格间还会有束缚水，故岩石的减速特性在很大程度上与粘土矿物有关，其相关程度决定于所含粘土的类型，分布形式和含量。

①粘土的类型：不同的粘土矿物含有不同量的结晶水，故含氢量不同，因此中子减速特性各不一样。其等效平均含氢指数如下：蒙脱石 44%，绿泥石 37%，高岭石 34%，伊利石 20%。

②粘土的分布形式：如前所述，对层状或结构状粘土因受到上覆岩层压力，而使其晶片间的束缚水部分被挤出，故含水量减少。但分散状粘土则因只受较小的静水柱压力，故可含较多的束缚水，所以分散状粘土具有较大的中子减速能力。

③粘土的含量：对同种类型，同种分布形式的粘土来说，其含量越多，对中子减速特性影响越大。

5) 对岩石声速特性的影响：粘土矿物对岩石声速的影响，关键在于它的分布形式，尤其是晶格间距较大的蒙脱石更是如此。当它们处于分散状时，含有较多的束缚水，故粘土声速接近于水的声速；当它们处于层状或结构状时，因大部分束缚水被排出，故其声速接近于埋藏深度与之相近的纯泥岩层声速。

(6) 粘土矿物对岩石储集性能的影响

当岩石中含有粘土矿物时，一般都将造成储集性能变坏，但对于不同种类，不同分布形式和不同含量的粘土，作用的程度是不同的。

1) 粘土种类的作用：因蒙脱石具有很好的吸水性，吸水后必然造成体积膨胀，故当岩石中含有蒙脱石时，最容易使储集空间减小，渗透性变差。

2) 粘土分布形式的作用：通常层状或结构状粘土对岩石储集性能的作用很小，但分散

状粘土，尤其是分布在岩石孔隙中的粘土则使储集性能明显变坏。

3) 粘土含量的作用：对同种类型的分散状粘土，其含量越大，储集物性越差。

3. 有机质

有机质是碳酸盐岩中一种十分重要的物质成分，它虽含量不多，但对油、气的生成和岩石的某些物理性质却有很大的影响。特别是由于有机质的形式多种多样，性能各不相同，对测井信息的贡献很难确定，故在测井评价中必须予以充分地重视。

(1) 有机质的基本类型和成分

地层中的有机质经过长期演变，都基本变为酞醌根，所以现在地层中看到的有机质主要都是酞醌根，它约占有机质总量的 95%~97%。通常所说的有机炭，也是酞醌根最为普遍的一种存在形式。因此可把有机质、有机炭的研究基本归结为对酞醌根的认识。

酞醌根由 C、H、O、S、N 元素组成。可分为三种类型：第一，腐泥型，其 H/C 比较高，而 O/C 比则低，它主要来源于低等植物（藻类）和水生动物，是成油的母源物质；第二，腐植型，其 H/C 比低而 O/C 比高，它主要来源于高等植物，是生成天然气的主要母源物质；第三，过渡型，其 H/C 比和 O/C 比都介于上述二者之间。

(2) 酞醌根的演变

地层中酞醌根的类型并非一成不变，在漫长的地质岁月中，它们将向油、气或炭质、沥青质演变。一般腐植型往天然气和炭质方向转化，腐泥型往石油和沥青质方向转化。根据酞醌根转化程度的不同，将其分为三种状态：第一，未成熟状态：正在向油气方向演变。如四川三迭系地层中的酞醌根即属此种状态；第二，过成熟状态：已变成炭质，或沥青质。如震旦系、石炭系地层中的炭质均属于过成熟状态。第三，过渡型状态：介于上述二种状态之间。如四川二迭系地层中的有机炭就属此种状态。

(3) 酞醌根的性质

从酞醌根的类型和它的演变阶段可知，它们的成分和状态是变化的，因而其性质也要随之而改变。现择其与测井信息关系最密且的含氢和含铀二特性作一分析。

1) 含氢特性：酞醌根的类型不同，含氢量亦不同，其中以腐泥型含氢量最多，过渡型次之，腐植型最低。对同一种类型的酞醌根来说，越往过成熟阶段演变，含氢量越少，一旦演变到炭质，沥青质，则含氢将减到很低。这一特性对中子的减速能力有明显的影响。

2) 含铀特性：由于以下几种原因使酞醌根对铀具有很强的富集作用。

第一，酞醌根表面容易吸附铀离子；

第二，酞醌根可与铀元素结合成难溶的有机络合物而沉淀析出；

第三，酞醌根可使六价铀的铀铈络合物还原成四价铀，从而变成难溶的沉淀物；

第四，酞醌根可分解出 H_2S ，而 H_2S 也可使六价铀还原成四价铀，促使铀铈络合物的沉淀；

第五，酞醌根分解生成的有机酸可降低介质的 pH 值，进而使铀铈碳酸盐络合物破坏，释放出铀铈离子，再被酞醌根表面所吸附。

因此含有酞醌根的岩石都具有较高的铀能谱的自然放射性特性。而且它们之间有很好的相关关系。如图 1—2 所示，它是富含酞醌根的二迭系阳新统地层中铀含量与自然放射性之间的关系曲线。

但应注意，酞醌根的类型不同，演变状态不同其铀放射性也不相同。即腐泥型的放射性高于腐植性，未成熟状态放射性高于过成熟状态。

(4) 有机质的分布特征

有机质主要在以下几种情况发生富集:

1) 在生物含量较多的岩石中, 因生物体腔常被有机质侵染, 故有机质含量较高;

2) 在地层层界面上, 尤其在薄层的层面上有机质含量较高。因为一个层面往往标志着沉积上的间断, 故容易造成有机物的增加; 最典型的例子是川东地区阳三²A 中的薄层状灰岩, 具有极高的铀放射性;

3) 在缝合线中, 尤其是水平产状的缝合线中有机质含量增高;

4) 有机质有时也与地层中的裂缝、地下水溶蚀有关, 特别是喉道半径较小的孔喉处, 易于发生有机质的富集;

5) 还原环境中形成的岩石、有机质含量较多。

因此在上述情况下, 岩石的含氢量和含铀量要增加。

4. 黄铁矿

属于复硫化物, 分子式为 FeS_2 , 有时还含 Cu、Ag、Au 的细分散包裹体。常呈结核状或团块状分布。它的出现多与还原环境下有机体的分解有关, 因而常和有机质、泥质共生。如在四川二迭系阳一的泥岩中, 震旦系兰灰色泥岩中都常见到黄铁矿。

它的主要物理性质是密度大, 为 $4.9 \sim 5.2 \text{ g/cm}^3$ 。电阻率很低, 当其分布较密集时, 可造成电阻率测井明显的低值。

5. 铝土矿

它是铝的氧化物的混合物, 由一水硬铝石 HALO_2 , 一水软铝石 ALOOH , 三水铝石 $\text{AL}(\text{OH})_3$ 三种矿物组成, 并常含褐铁矿、赤铁矿、高岭石、蛋白石等矿物。

铝土矿是表生作用的产物, 故常分布于风化面附近。如四川二迭系阳一的泥岩中就含较多的铝土矿。

铝土矿的主要特征是钪含量较大, 其钪/钾比值达 $35 \sim 100$ 。

6. 碳酸磷灰石

其分子式为 $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3]_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 。当碳酸盐岩地层中含有以磷灰石为主成分的胶磷矿或细晶灰岩时, 无论在早期沉积成岩过程中, 还是在固结成岩以后, 只要溶液近于中性或弱酸性, 磷酸钙都可以吸附溶液中的铀, 使其铀含量高于大多数的沉积岩, 而钪、钾含量则与一般的石灰岩、白云岩相近。如四川寒武系底部的含磷白云岩中就含有这种矿物, 经化验分析, 铀含量达 24.4 ppm 。使其自然放射性大大高于下部的泥岩层。

二、岩石结构及其对岩石物理性质的影响

所谓岩石结构是指岩石颗粒、晶粒的大小、形状、分选、表面性质及其组成方式, 总之结构是描述岩石各组成部分的几何形态物征的一个概念。碳酸盐岩的结构大致可分成四类, 即粒屑结构、生物骨架结构、结晶结构、残余结构。

对岩石结构的研究有着十分重要的意义, 因为它们反映了沉积相的变化, 同时又不仅影响着岩石的孔隙度、渗透率等重要的油层物理特性, 而且对测井信息也有程度不同的影响。因此搞清岩石结构及其物理性质, 对于用测井资料来评价储集层, 分析沉积环境都是非常必

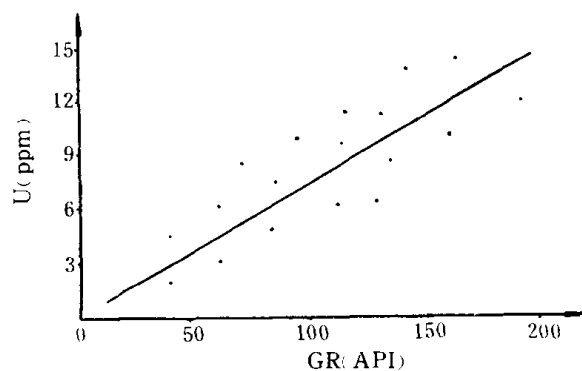


图 1-2 四川二迭系阳新统地层中铀含量与自然放射性强度的关系

要的。

1.粒屑结构（又名沉积结构）

(1) 粒屑结构的地质概念

它是由波浪和流水作用的搬运、沉积而形成的一种碳酸盐岩结构，由颗粒、泥晶基质、亮晶胶结物和孔隙四个部分组成。

颗粒：是在盆地内形成的内碎屑、生物碎屑、包粒、球粒及团块。如四川三迭系鲕状灰岩中的鲕粒，就属于包粒的一种。它常形成于能量较高的鲕粒砂坝、鲕粒三角洲，范围大者可形成鲕滩，这些鲕粒如经淡水淋滤，形成中空的负鲕，则可成为良好的油、气储集空间。

泥晶基质：又名基质或灰泥。它是在盆地内生成的，其成分是单一的碳酸盐岩矿物，呈泥晶或微晶结构，晶粒小于 0.03mm，充填于颗粒之间，对颗粒起胶结作用。它形成于较弱的水动力条件。

亮晶胶结物（又称作淀晶胶结物）：它是由干净的、较大的方解石等晶体构成，晶粒常大于 0.01mm，形成于较强的水动力条件，对碳酸盐岩颗粒起胶结作用。

孔隙：将在空隙空间结构一章中专门介绍。

(2) 粒屑结构对岩石物理性质的影响

表 1-5 列出了粒屑结构对储层物性和测井参数的影响。

表 1-5 粒屑结构对储层物性和测井参数的影响

结构参数		受岩石结构影响的储层物性	受影响的测井参数	有关的测井仪器
(1) 颗粒	大小	(1) 孔隙度 ϕ	$R, \rho_b, \Delta t$ Σ, TPL, P_c	LLS、LLD、MSFL FDC、LDT、CNL BHC、TDT、EPT、 GST
	形状	总孔隙度 ϕ_t		
	分选	原始孔隙度 ϕ_i		
(2) 基质	压实	有效孔隙度 ϕ_e	$R, F, \Delta t, TPL$	LLS、LLD、MSFL、 BHC、EPT SP
	方向	(2) 曲折度或孔隙度指数 m		
	百分含量	(3) 孔、喉大小，控制着：		
(3) 胶结物	性质	渗透率 k	SP 曲线形状	LLS、LLD、MSFL
	百分含量	水平渗透率 k_H		
	性质	垂直渗透率 k_v		
		(4) 润湿性	各向异性系数	LLS、LLD、MSFL
		(5) 各向异性		

在上述结构与物性关系中，以与岩石自然放射性和电阻率的关系最为密切，因此下面着重分析对这两种物性的影响。

1) 对岩石自然放射性的影响：粒屑结构主要对岩石的自然放射性有较大的影响。我们知道，在砂岩剖面中，岩石粒度中值与自然放射性有很好的相关关系，即粒度越细，自然放射性越高。在碳酸盐岩剖面中其关系要复杂一些，因颗粒的粒度和胶结物的性质都将影响岩石的自然放射性。

在 高能环境中沉积的碳酸盐岩其颗粒较粗，如砾屑、砂屑、鲕粒等，其胶结物以晶粒较大的亮晶为主。故它们沉积速度较快，且颗粒比面较小，这都不利于对放射性微粒的吸附，因而岩石的自然放射性较低。但在低能环境中沉积的碳酸盐岩则刚好相反，其颗粒很细，以

粉屑、微屑，甚至泥屑为主，其胶结物以泥晶基质为主。它们粒度小，比面积大，沉积速度又慢，故有利于对放射性微粒的吸附，加之在低能环境中，水体安静、循环较差，成为一种还原环境，而这种环境又有利于对铀元素的沉淀和富集。这两方面的因素促使它们总具有较高的自然放射性，特别是较高的铀放射性。

如四川二迭系阳新统地层中，阳二²和阳三⁵为海侵中期高能环境下的沉积地层，故其放射性明显低于它们上下较低能量沉积的阳二¹、阳三¹和阳三²地层。这也是阳新统地层中，自然放射性与粘土含量相关性很差的原因之一。

2) 对岩石电阻率的影响：实验研究表明颗粒直径越大，地层的电阻率因子 F 也越大，因此对于相同的地层水电阻率，颗粒越粗，电阻率越大，见图 1-3。如上述的阳新统地层中，阳二²、阳三³的粗结构地层，比之阳二¹、阳三¹等较细粒结构的地层来说，当它们都为致密层，且泥质含量相同时，前者的电阻率明显要高些。

2. 生物骨架结构

(1) 生物骨架结构的地质概念

生物骨架结构是由生物群体死后的骨架堆积而成，在生物骨架间的孔隙被基质或亮晶胶结物充填。生物礁和生物滩均属此种结构类型，所不同者礁是原地生长并固着于海底上具有抗波浪骨架的生物群体，而滩是不具抗波浪骨架的生物死后或在原地或经过搬运（海流及潮汐作用）并聚集在一起的生物沉积群。但不论是礁还是滩，它们都具有较粗的颗粒，发育的粒间孔隙和粒内孔隙，因而都容易成为碳酸盐岩地层中良好的油、气储集层。

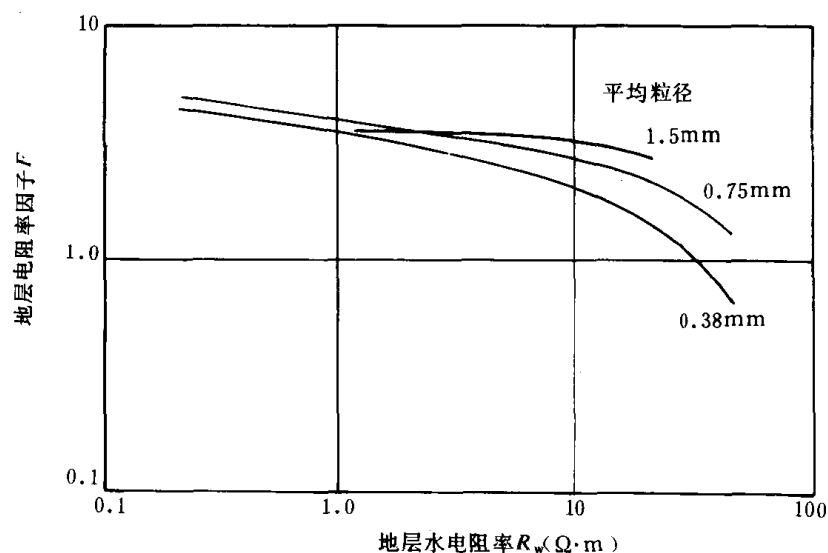


图 1-3 地层电阻率因子、地层水电阻率与岩石粒度关系图

(2) 生物骨架岩石的重要物理性质

1) 体积密度、声波传播速度的变化：由于在生物礁中普遍存在着白云岩化作用，而且白云岩化往往是礁体能成为良好储层的关键因素之一，因此在具生物骨架灰岩的礁中，岩石平均密度有由 $2.71g/cm^3$ 向 $2.87g/cm^3$ 增大，声波纵波传播速度由 $6494m/s$ 向 $7090m/s$ 增大的趋势，是鉴别有利礁带的一项重要物理性质。

2) 低的自然放射性：由于造礁生物的生长、繁殖要求有适当的温度 ($25^\circ C \sim 30^\circ C$)，清洁的不含泥砂的海水、充足的阳光、丰富的食物、一定能量和流动的水。因此使礁体总形成于高能的，具有氧化环境的浅海陆棚区，其颗粒较粗，泥质含量很少，且不利于铀元素的沉淀和富集，故使它的自然放射性很低。

3) 特殊的几何形态：由于生物礁有其特定而严格的生长条件和生成环境，因此构成了它如下几方面特殊的几何形态。

① 礁体本身是一个局部的隆起，因而其厚度大于同时期围岩沉积层的厚度，而且在礁体的不同部位，其厚度和形状也是不同的，礁核比礁翼有较大的厚度，礁前比礁后更为陡峻。

②礁体与同期沉积的围岩之间呈指状交接的界限。

③礁块的基底岩石由于受到局部较大的上覆压力，因此可能向下沉陷，造成负向构造，特别是当下伏地层是较软的可塑性地层时，更容易出现这种现象。另外与这一作用有关的现象是在近礁的基底岩石处发生隆起，这是由于礁下的沉积物被挤出所形成。

④礁体上覆岩层的厚度要小于同时期沉积围岩层的厚度。

上述这些性质和特征，对我们用地球物理勘探和测井方法来研究礁体都是极其重要的。

3. 晶粒结构

(1) 晶粒结构的地质概念

它是指岩石中结晶颗粒大小粒级的分类。具体分类级别和名称目前尚无统一规定。通常多采用奇林格 (Chilingar) 分类方法。即晶粒直径为 $1\sim 4\text{mm}$ ，为极粗晶， $1\sim 0.5\text{mm}$ 为粗晶， $0.5\sim 0.25\text{mm}$ 为中晶， $0.25\sim 0.05\text{mm}$ 为细晶， $0.05\sim 0.01\text{mm}$ 为粉晶， $0.01\sim 0.001\text{mm}$ 为微晶，小于 0.001mm 为隐晶。

这种晶粒结构可存在于各种原生的灰岩，白云岩中，也可存在于经白云化或重结晶作用的灰岩和白云岩中。

(2) 晶粒结构的物理性质

目前已被大量资料所证实的是岩石的自然放射性与晶粒结构有着较密切的关系，即随着晶粒变大，自然放射性降低。这可能与晶粒粒度增加，比面积减小，吸附放射性微粒的能力降低有关，这一现象对用自然放射性资料求泥质含量有着十分重要的意义。

4. 残余结构

这是指石灰岩经过白云岩化，重结晶等次生改造作用后所具有的一些残余结构，如残余生物结构，残余鲕粒结构，残余碎屑结构等。

三、岩石构造及其对岩石物理性质的影响

沉积岩石构造是指其颗粒的排列和分布状况，通常将岩石构造分为无机的和生物的两类，无机的又分为机械的和化学的两种，如层理，层面痕迹就属机械的，原生沉积构造，缝合线、结核、晶洞等则属化学沉积构造。但对于测井信息来说，则将其分为均匀岩石构造和非均匀岩石构造较为合适，所谓均匀岩石构造是指岩石颗粒不规则，无定向分布的构造，故有时又称作杂乱构造；而非均匀岩石构造则是岩石颗粒按某种规律排列和分布的构造。前者岩石坚实，地下水不易渗透，并不按层面破裂，故常以厚层状出现，且具各向同性的物理性质，因而对测井信息没有额外的异常影响，而后者则表现出明显的各向异性和非均匀性，故对测井信息的特征和数值均有较大影响。因此我们这里将只研究非均匀岩石构造的地质性质和测井特征。

在碳酸盐岩剖面中，常见的有四种非均匀岩石构造，即薄层状构造，眼球状构造、豹斑构造、燧石结核构造。它们在测井曲线上的某些特征，往往与储层相似，但试油多为干层，仅在一些特殊情况下可具有工业价值，因此容易造成解释的错误，使之对一些没有工业价值的非均匀岩石构造地层进行射孔、酸化、压裂，结果一无所获。所以在储层评价中，不可不研究这种特殊的岩石构造，以达到划准有效储层的目的。

1. 薄层状构造

(1) 地质特征

当岩石颗粒呈层状排列分布且层距很小时就形成所谓薄层状构造，其单层厚度为零点几毫米至几厘米，层面多平行于整套地层的层理，仅少数呈交叉排列。见图 1-4。在原始状态