

碳酸盐岩储层 测井评价方法及应用

司马立强 疏壮志 编著



石油工业出版社

碳酸盐岩储层测井评价方法及应用

司马立强 疏壮志 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书通过理论、实验、现场实例相结合,介绍了碳酸盐岩储层测井评价方法。主要内容
包括碳酸盐岩储层测井评价岩石物理基础、碳酸盐岩储层储集空间特征、碳酸盐岩储层测井
系列与测井响应特征、碳酸盐岩储层测井定性与定量解释方法、测井新技术评价缝洞性碳酸
盐岩储层方法及碳酸盐岩储层产能测井评价方法。

本书适用于从事石油测井、地质、物探、开发的研究人员和现场工程师使用,也可作为
石油高校相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

碳酸盐岩储层测井评价方法及应用/司马立强,疏壮志编著.
北京:石油工业出版社,2009.3

ISBN 978-7-5021-6988-6

I. 碳…

II. ①司…②疏

III. 碳酸岩油气田-测井

IV. TE344

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 008012 号

碳酸盐岩储层测井评价方法及应用

Tansuanyanyan Chuceng Cejing Pingjia fangfa Ji Yingyong

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) 64523736

发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:保定彩虹印刷有限公司

2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:15

字数:379 千字 印数:1—1500 册

定价:58.00 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 言

据有关资料统计,在碳酸盐岩储层中已发现的油气储量接近全球发现油气总储量的一半,油气产量则占全球总产量的60%以上。世界上许多高产油气藏(如伊朗的Gachsaran油田、伊拉克的Kirkuk油田)的储层类型都属于碳酸盐岩。在我国,四川盆地川东北地区飞仙关组鲕滩灰岩、塔里木盆地塔河油田奥陶系油气藏都属于碳酸盐岩储层。

和碎屑岩储层相比,碳酸盐岩储层一个显著的特点是非均质分布的裂缝与溶洞,因此,碳酸盐岩缝洞性储层具有比常规均质孔隙性储层更为复杂的空隙空间结构与极强的各向异性,测井解释评价的难度也远大于均质孔隙性储层。多年来,碳酸盐岩缝洞性储层测井评价一直是测井解释的十大难题之一,是测井解释方法研究的前沿课题,碳酸盐岩储层测井评价在油气储层测井评价中占有极为重要的地位。

随着我国油气勘探开发技术的不断进步与勘探开发领域的迅速拓展,碳酸盐岩油气藏在我国油气领域所占的比重越来越大,碳酸盐岩油气储层测井技术也越来越受到重视。

由于传统的测井理论、测井仪器大多是基于均匀径向对称模型建立与设计的,所以,对于非均质的碳酸盐岩来讲,测井响应与测井评价方法远比相对均质的碎屑岩复杂,这严重制约了碳酸盐岩储层测井评价技术的发展。

为了推动和促进碳酸盐岩测井评价技术的发展,本书作者集从事碳酸盐岩储层测井评价工作20多年的经验,在借鉴国内外专家、学者的理论、方法、成果的基础上,撰写了《碳酸盐岩储层测井评价方法及应用》一书。

该书较系统、全面地介绍了碳酸盐岩储层测井评价岩石物理基础、碳酸盐岩储层定性和定量评价方法及测井新技术评价碳酸盐岩储层的方法。它的出版将为从事测井及相关工作的工程技术人员提供又一个重要的参考信息,也一定能对碳酸盐岩储层测井评价技术的深化研究与推广起到积极的推动作用。

陆大卫

2008年8月

前 言

半个多世纪以来,我国的石油测井技术随着油气勘探开发技术的发展获得了快速发展。但是,由于过去我国油气勘探开发的重点是陆相碎屑岩,而在海相碳酸盐岩领域,油气储量所占的比重要小一些,油气勘探开发投入的力量也相对要弱一些。因此,尽管有许多测井工作者长期从事碳酸盐岩测井及测井评价技术研究,但碳酸盐岩测井评价技术的发展还是在一定程度上滞后于碎屑岩。

近二十年来,随着四川盆地石炭系长兴组、飞仙关组气藏和塔里木盆地奥陶系油气藏等一批大中型油气藏的发现与深化勘探开发,碳酸盐岩油气勘探开发技术在我国也越来越受到各方面的重视,碳酸盐岩储层测井评价技术的研究与应用也得到了长足的发展。

和碎屑岩储层相比,碳酸盐岩储层一个显著的特点是非均质分布的裂缝与溶洞,因此,碳酸盐岩缝洞性储层具有比常规均质孔隙性储层更为复杂的空隙空间结构与极强的各向异性,测井解释评价的难度也远大于均质孔隙性储层。多年来,碳酸盐岩缝洞性储层测井评价一直是测井解释的十大难题之一,是测井解释方法研究的前沿课题,碳酸盐岩储层测井评价在油气储层测井评价中占有极为重要的地位。

为此,笔者以国家 863 课题“特殊储层测井识别与地层参数定量评估技术”(课题编号:2006AA06Z220 资助)为支撑,在借鉴国内外专家、学者的理论、方法、成果的基础上,结合自己从事碳酸盐岩储层测井评价工作 20 多年的经验,撰写了《碳酸盐岩储层测井评价方法及应用》一书。希望本书的出版,对我国的碳酸盐岩储层测井评价技术起到积极推动作用,也希望本书能在我国碳酸盐岩油气田的勘探、开发中发挥一定的作用。

本书共分八章。第一章介绍了碳酸盐岩储层测井评价岩石物理基础,第二章介绍了碳酸盐岩储层储集空间特征与储层分类,第三章介绍了碳酸盐岩储层测井系列与测井响应特征,第四章介绍了碳酸盐岩储层测井定性解释方法,第五章介绍了碳酸盐岩储层测井定量评价方法,第六章介绍了微电阻率成像测井、核磁共振测井及偶极声波测井等测井新技术评价缝洞性碳酸盐岩储层的方法,第七章介绍了碳酸盐岩储层产能测井评价方法,第八章以四川北部地区飞仙关组碳酸盐岩储层为例,介绍了碳酸盐岩储层测井评价方法的应用。

在本书的编著过程中,得到了中国石油、中国石化许多领导、专家的支持和帮助,在此一并表示诚挚的谢意!

鉴于资料保密要求,书中涉及的具体地区、井均非真名,一些敏感图件也做了技术处理,读者参考时请慎重。

由于水平有限,书中难免存在缺点和不足,恳请读者批评指正。

2008 年 6 月于成都

目 录

第一章 碳酸盐岩储层测井评价岩石物理基础	(1)
第一节 碳酸盐岩岩石物理特征	(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	(10)
三、岩石构造及其对岩石物理性质的影响	(12)
第二节 地层流体的物理性质与分布特征	(17)
一、地层流体的物理性质	(17)
二、储层原始流体的分布特征	(21)
三、钻井液的侵入特征	(21)
第二章 碳酸盐岩储层储集空间特征与储层分类	(24)
第一节 碳酸盐岩储层与碎屑岩储层的异同	(24)
第二节 碳酸盐岩储层空隙特征	(25)
一、碳酸盐岩的空隙类型	(25)
二、碳酸盐岩的空隙结构	(27)
三、碳酸盐岩的空隙组合类型	(30)
第三节 碳酸盐岩储层的类型	(31)
一、根据空隙组合类型分类	(32)
二、根据储集体成因分类	(34)
第三章 碳酸盐岩储层测井系列与测井响应特征	(36)
第一节 常规测井	(36)
一、自然伽马测井	(37)
二、三孔隙度测井	(43)
三、电阻率测井	(57)
第二节 特殊测井	(63)
一、微电阻率成像测井	(64)
二、声波成像测井	(66)
三、核磁共振测井	(71)
第四章 碳酸盐岩储层测井定性解释方法	(80)
第一节 碳酸盐岩储层识别与划分方法	(80)
一、鉴别岩性, 去掉明显的非储层段	(80)
二、寻找具有一定孔隙度且电阻率相对降低的层段	(81)
三、寻找缝、洞发育的层段	(81)
第二节 裂缝型储层评价方法	(81)
一、裂缝的测井响应特征	(81)
二、天然裂缝的识别	(82)

三、天然裂缝有效性的评价	(82)
四、裂缝识别及有效性评价实例	(84)
第三节 洞穴型储层评价方法	(85)
一、溶洞的测井响应特征	(85)
二、真、假孔洞的定性鉴别	(86)
三、微细孔洞或微裂缝型储层定性识别	(86)
四、小、中洞穴型储层识别及评价	(87)
五、大型溶洞型储层识别及评价	(87)
六、洞穴型储层有效性评价	(88)
第四节 碳酸盐岩储层流体性质判别方法	(91)
一、 $P^{1/2}$ 法	(91)
二、重叠法	(93)
三、电阻率测井识别法	(95)
四、纵横波速度比值法	(95)
五、电阻率—孔隙度交会图判别法	(97)
六、孔隙度—饱和度交会图判别法	(98)
七、电缆地层测试器测井识别法	(100)
八、时间推移测井识别法	(101)
九、核磁共振测井判别法	(102)
十、其他综合分析法	(102)
第五章 碳酸盐岩储层定量评价方法	(104)
第一节 泥质含量计算	(104)
第二节 孔隙度计算	(105)
一、各种测井孔隙度的含义	(106)
二、孔隙度计算	(107)
第三节 渗透率计算	(113)
一、基块岩石渗透率	(113)
二、裂缝渗透率	(114)
三、裂缝—孔隙型储层渗透率的计算	(115)
第四节 饱和度计算	(115)
一、孔隙型储层饱和度计算	(116)
二、裂缝—孔隙型储层饱和度计算	(116)
第五节 裂缝参数计算	(118)
一、双侧向测井计算法	(119)
二、成像测井计算法	(119)
第六节 储层有效厚度确定	(119)
一、有效孔隙度下限值的确定	(120)
二、含油气饱和度下限值的确定	(121)
三、渗透率下限值的确定	(122)
第七节 测井解释参数确定方法	(122)

一、地层水电阻率的确定	(122)
二、岩石物理参数的确定	(124)
三、泥质参数的选取	(131)
四、岩石骨架参数的选取	(132)
第六章 测井新技术评价缝洞性储层方法	(133)
第一节 利用核磁共振资料评价碳酸盐岩储层	(133)
一、碳酸盐岩的核磁共振测井响应特征	(133)
二、研究储集空间结构	(135)
三、确定有效储层孔隙度下限	(137)
四、估算渗透率	(138)
五、分析流体性质	(138)
六、应用效果评价	(142)
第二节 利用微电阻率成像测井评价碳酸盐岩储层	(144)
一、定性评价方法	(144)
二、定量评价方法	(151)
第三节 利用偶极声波成像测井评价碳酸盐岩储层	(156)
一、用斯通利波信息评价储层的渗透性	(156)
二、地层各向异性分析	(161)
第七章 碳酸盐岩储层产能测井评价方法	(168)
第一节 油气储层产能的表述方法与影响因素	(168)
一、油气储层产能的表述方法	(168)
二、油气储层产能的影响因素	(169)
第二节 储层产能测井预测模型建立	(170)
一、储层产能测井评价指标及其含义	(170)
二、构建储层产能测井预测模型	(173)
三、储层产能测井预测方法应用	(173)
四、测井方法预测油气产能的局限性	(178)
第八章 碳酸盐岩储层测井评价现场实例	(179)
第一节 川东北部地区飞仙关组储层特征	(179)
一、储层岩性特征	(179)
二、储集空间类型	(179)
第二节 孔隙结构特征分析	(180)
一、孔喉分布特征	(180)
二、排驱压力及饱和度中值压力	(181)
三、束缚水饱和度	(181)
第三节 储层类型的划分	(182)
一、储层类型的定性判别方法	(182)
二、储层等级划分方法	(182)
第四节 川东北部飞仙关组储层测井响应特征分析	(182)
一、常规测井	(182)

二、特殊测井	(184)
第五节 裂缝分析	(186)
一、研究区地质构造背景	(186)
二、单井裂缝特征分析	(187)
三、裂缝分布规律分析	(195)
第六节 储层流体性质判别	(200)
一、储层流体性质判别的难点	(200)
二、判别方法	(200)
三、疑难井解释结果分析	(200)
四、流体性质判别效果及有效性分析	(202)
第七节 储层参数计算	(206)
一、储层参数计算模型	(206)
二、测井解释模型参数的确定	(209)
第八节 测井单井处理解释及效果评价	(211)
一、测井资料单井处理解释	(211)
二、储层有效厚度确定与分类解释	(212)
第九节 测井资料多井对比与储层横向分布特征分析	(218)
一、测井资料多井储层横向对比	(218)
二、川东北部地区飞仙关组鲕滩储层横向分布规律分析	(222)
参考文献	(226)

第一章 碳酸盐岩储层测井评价岩石物理基础

碳酸盐岩储层是指具有储存油气空间的碳酸盐岩层，这些储集空间是相互连通的。因此，碳酸盐岩储层是寻找油气和勘探开发的对象，是碳酸盐岩储层测井评价的重要内容之一。

碳酸盐岩储层评价之所以不同于碎屑岩储层，是由于它有着不同的地质特征。其中与测井信息最密切相关的因素是地层的岩石骨架，岩石的孔隙空间结构，孔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。本章重点陈述碳酸盐岩地层岩石骨架和孔隙中流体的性质。

第一节 碳酸盐岩岩石物理特征

在地层中，岩石骨架所占的体积百分比和质量百分比都是最大的，尤其在基质物性较差的碳酸盐岩储层地层中更是如此，因此它们对各种测井信息的贡献是不能忽略的。为了认识其贡献的大小，必须了解岩石的成分、结构和构造地质特征及其物理性质。

一、岩石成分及其主要物理性质

碳酸盐矿物在地壳中分布广泛，已发现的矿物有 80 多种，它们主要是由 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Sr^{2+} 、 Pb 、 Ba 等阳离子与 CO_3^{2-} 结合而成的盐类矿物。其中，分布最广的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的碳酸盐矿物，是碳酸盐岩中主要的造岩矿物，常常构成分布广、厚度大的湖相和海相碳酸盐岩。本类矿物以离子晶格为主，矿物呈无色、白色或灰白色，但含 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Cu^{2+} 等离子的矿物常呈各种色彩，玻璃光泽，硬度小于 4.5，密度为 $2.7 \sim 5 \text{ g/cm}^3$ ，含 Pb 、 Ca^{2+} 的碳酸盐矿物密度增大。

碳酸盐岩主要由方解石和白云石等碳酸盐矿物组成。碳酸盐岩的主要岩石类型为石灰岩和白云岩，但经常还含有一些非碳酸盐岩矿物，如石膏、硬石膏、天青石、重晶石、萤石、石盐、钾石盐、自生石英、黄铁矿、赤铁矿、海绿石等。另外，碳酸盐岩还常含一些陆源矿物，如黏土矿物、石英、长石、云母、绿泥石等。此外，碳酸盐岩还常含一些有机质。这些陆源矿物和有机质的含量虽然不多，但对储层的影响及对测井信息的贡献都比较大，因此有必要加以分析。一些主要碳酸盐矿物的理论化学成分见表 1-1。

表 1-1 主要碳酸盐矿物的理论化学成分

矿物	化学式	CO ₂	CaO	MgO	FeO	MnO	SiO ₂	H ₂ O
方解石	CaCO ₃	44	56					
白云石	CaMg (CO ₃) ₂	47.9	30.4	21.7				
菱镁矿	MgCO ₃	52.4		47.6				
文石	CaCO ₃	44	56					

续表

矿物	化学式	CO ₂	CaO	MgO	FeO	MnO	SiO ₂	H ₂ O
菱铁矿	FeCO ₃	37.9			62.1			
菱锰矿	MnCO ₃	38.3				61.7		
石膏	CaSO ₄ · 2H ₂ O		32.5				46.6	20.9
硬石膏	CaSO ₄		41.2				58.8	

1. 方解石和白云石

1) 方解石 (CaCO₃)

方解石一般为白色、灰色，因含杂质有时呈浅黄、浅红、浅蓝、黄褐等色。硬度为 3，密度为 2.395 ~ 2.740g/cm³，如图 1-1 所示。方解石在自然界分布很广，它可以由各种地质作用形成。浅海或湖泊常常形成分布广、厚度大的石灰岩层。地下水活动可以溶蚀石灰岩，在石灰岩溶洞中饱和 CaCO₃ 的地下水又可以重新形成方解石，如石钟乳、石柱等。已经形成的石灰岩经过变质作用又可以形成大理岩。此外，方解石也可以形成于热液矿床和喷出岩的气孔中。

以方解石为主的矿物有文石、低镁方解石和高镁方解石。文石又名霏石 (aragonite)，它是方解石中 CaCO₃ 含量最高的，其 MgCO₃ 含量最低；低镁方解石的 MgCO₃ 含量稍高；高镁方解石的 MgCO₃ 含量可达 5% ~ 10%。

2) 白云石 [CaMg (CO₃)₂]

纯的白云石为灰白色，含铁白云石呈灰褐色，透明玻璃光泽，硬度为 3.5 ~ 4，密度为 2.80 ~ 2.87g/cm³，如图 1-2 所示。白云石是在沉积岩中分布最广的矿物之一，是白云岩和白云质石灰岩的主要矿物成分。原生沉积白云岩是在咸度很高的海、湖中直接形成的。但是大量的白云岩是次生的，是石灰岩受到含镁溶液交代而成的白云岩，岩石的孔隙度增高，为油、气、水提供了良好的运移和储集条件。



图 1-1 方解石



图 1-2 白云石

以方解石为主要成分的岩石称为石灰岩，以白云石为主要成分的岩石称为白云岩。二者的主要特征如下：

(1) 石灰岩又名灰岩，呈白色、浅灰色，含杂质后呈灰色、褐灰色。矿物成分以方解石为主，含有少量的白云石和黏土矿物。遇稀盐酸强烈起泡。具可溶性，可溶蚀成各种岩溶

形态。按成因、结构不同，石灰岩又可以有各种名称，如生物灰岩，竹叶状灰岩，鲕粒状灰岩。若白云石含量达到 25% ~ 50% 时，可称为白云质灰岩。石灰岩常含有一定数量的黏土矿物，若其含量达到 25% ~ 50% 时则称为泥灰岩。常见有泥质条带灰岩。

(2) 白云岩又称苦灰石，白云岩是以白云石为主要成分的碳酸盐岩，是碳酸钙和碳酸镁的复盐。主要成分为白云石，其次有方解石、黏土矿物及陆源碎屑（石英、长石和云母），有时也有少量的石膏、硬石膏、天青石、重晶石、黄铁矿、有机质等。纯白云石的化学分子式为 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ，理论含量 CaO 占 30.41%、 MgO 占 21.86%、 CO_2 占 47.73%，其晶体结构为三方晶系，晶形为菱面体形态。颜色为灰白色，有时为浅黄色、浅褐色、浅绿色、肉红色。光泽为玻璃光泽，解离完全。硬度为 3 ~ 4，密度为 $2.8 \sim 2.9\text{g/cm}^3$ 。滴入盐酸后不发泡，只受侵蚀。白云岩的化学成分见表 1-2。

表 1-2 白云岩的化学成分

含量 (%) 岩石 代号 化学成分	纯白云岩 的理论值	含泥的白云 质灰岩 (四川三叠系)	含硬石膏的 灰质白云岩 (四川三叠系)	灰质白云岩 (四川三叠系)	含泥质白云岩 (辽宁抚顺 古近系、新近系)	白云岩 (辽宁中 寒武统)
CaO	30.4	43.04	33.3	38.7	21.37	30.44
MgO	21.7	10.95	13.6	14.24	14.53	21.29
CO ₂	47.9	未分析	未分析	未分析	33.73	46.12
SO ₃	—	0.31	11.13	0.34	—	—
Al ₂ O ₃	—	0.55	0.9	0.9	7.97	—
Fe ₂ O ₃	—				4.91	1.06
SiO ₂	—	—	—	—	14.63	0.48
其他	—	11.06	4.2	0.64	—	—

2. 硬石膏和岩盐

1) 硬石膏 (CaSO₄)

硬石膏的颜色呈白色或灰白色，玻璃光泽，透明，硬度为 3 ~ 3.5，密度为 $2.899 \sim 2.96\text{g/cm}^3$ ，如图 1-3 所示。硬石膏是盐类矿床的重要矿物之一，在咸湖或咸度较高的海水蒸发时形成，其形成温度约为 42℃ 以上。常与石膏伴生。在地表或近地表条件下，硬石膏不稳定。在接近地表的露头部分，由于上部压力减小和遭受水化作用，则转变成石膏。在此转变过程中，常使体积增大约 30%，因此，对地表工程设施有极大的破坏作用。

2) 岩盐 (NaCl)

岩盐又称石盐，化学成分为 NaCl，纯净的岩盐为无色透明或呈白色，含杂质时则可染成灰、黄、红、黑等色。新鲜面呈玻璃光泽，潮解后表面呈油脂光泽。具完全的立方体解理。硬度为 2.5，密度为 2.17g/cm^3 。易溶于水，味咸。晶形呈立方体，在立方体晶面上常有阶梯状凹陷，如图 1-4 所示。

岩盐是典型的化学沉积成因的矿物。在干热气候条件下常沉积于各个地质年代的盐湖和海滨浅水湖中，与钾盐、石膏等共生，广泛分布于世界各地。它是最丰富的蒸发岩，在海水中沉淀的顺序上，是在石膏和硬石膏的后面，因此，常常在岩盐之下找到石膏和硬石膏。有些地方岩盐不纯，和岩盐互层的还有其他沉淀矿物，如方解石和钾盐以及砂子和黏土。我国以柴达木盆地最为著名，四川、湖北、江西、江苏也都有大规模的岩盐矿床。

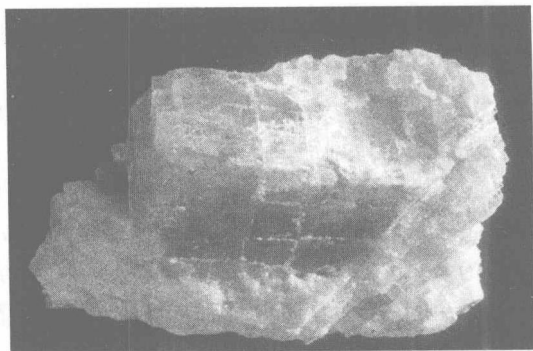


图 1-3 硬石膏

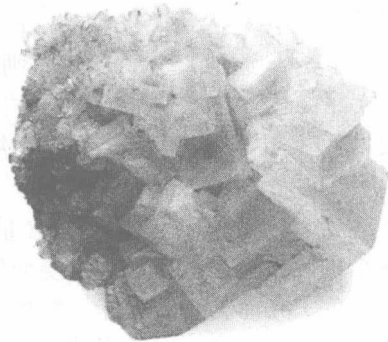


图 1-4 岩盐

3. 黏土矿物

碳酸盐岩中的黏土矿物种类繁多、结构复杂、分布形式多变、含量不稳定，加之性能特殊，对储集物性和测井响应都有极大的影响，所以必须予以足够的重视。下面就从黏土的成分、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) 黏土矿物的成分

黏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黏土矿物，一般常见的有以下四种。

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，分子式为 $(\text{Al}_2, \text{Mg}_3)(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ；

伊利石 (Illite)，又名水白云母，分子式为 $\text{K}_{<1}\text{Al}_2[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ；

绿泥石 (Chlorite)，分子式为 $(\text{Mg}, \text{Al})_6[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ 。

由以上可知，高岭石中的 Al_2O_3 含量较多， SiO_2 含量则较少，而蒙脱石刚好相反， Al_2O_3 含量较少， SiO_2 含量较多。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) 黏土矿物的结构

高岭石是 TO 型结构，有一片 Si—O 四面体片 (T) 和一片 Al—O 八面体片叠合成晶层，故称为 TO 型。由于晶层一面为 OH 层，另一面为 O 层，而 OH 键具有很强的极性 ($\text{O}^{2-} - \text{H}^+$)，故相邻两晶层之间除范德华力增扩的静电能外还易形成氢键，使层间连接紧密，其晶格底面间距只有 $7.2 \times 10^{-10}\text{m}$ ，因而水分子不易进入晶层之间。

蒙脱石是 TOT 型片状结构，有两片 Si—O 四面体片夹一片 Al—O 八面体片叠合成一晶层，故称为 TOT 型。晶层之间靠微弱的 O 层与 O 层分子间力连接，层间无氢键力，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 $21 \times 10^{-10}\text{m}$ ，但如当它完全脱水时，晶格间距可减小到 $9.6 \times 10^{-10}\text{m}$ 。

伊利石也是 TOT 型片状结构。晶层之间虽然也是靠 O 层与 O 层的分子间力连接，但其中有 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 $10 \times 10^{-10}\text{m}$ ，故其吸水能力介于二者之间。

绿泥石是 TOT. O 型片状结构，有两片 Si—O 四面体片夹一片 Al—O 八面体片，外加一片氢氧镁石（水镁石）八面体片，故称为 TOT. O 型。绿泥石的晶层间的联系力，除了范德华力和水镁石八面体上 OH⁻ 根形成的氢键外，就是阳离子之间交换后形成的静电力。它的晶层间引力远高于伊利石；晶间距离略高于伊利石，为 $14.2 \times 10^{-10} \text{m}$ ，故其吸水能力低于伊利石。

黏土矿物的这一结构特征决定了它有较强的可压缩性，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) 黏土矿物的含量

在地层中，黏土矿物的总含量常常不同，因此地质上常以岩石中黏土的质量百分含量不同而给予分类和命名，见表 1-3。

表 1-3 岩石按黏土含量的分类表

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

但测井上常采用黏土的体积百分含量。这两者有一定的差别，因为黏土矿物的颗粒密度与其他矿物的颗粒密度一般是不同的。

在碳酸盐岩中不仅黏土的总含量各不相同，而且各种黏土矿物的百分含量也常常不同。表 1-4 是四川盆地各套地层中黏土矿物的成分。

表 1-4 四川盆地主要地层的黏土成分及其相对含量表

地层 黏土 含量 (%) 矿物	三叠系 绿豆岩	三叠系蓝 灰色泥岩	上二叠系 灰质泥岩	下二叠系 泥岩	石炭系 泥质云岩	震旦系 蓝灰色泥岩	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

注：表中数据为 X 射线衍射分析结果

由表 1-4 可知，四川盆地地层中的黏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) 黏土矿物的分布形式

沉积岩石中黏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和分散状分布，即黏土颗粒均匀地分散于其他岩石颗粒周围或孔隙空间中。

5) 黏土矿物对岩石物理性质的影响

黏土矿物对岩石物理性质影响的程度取决于岩石中黏土的成分、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。黏土矿物影响岩石电阻率的根本原因在于黏土颗粒表面的导电性。这种表面导电性是由两种因素造成的。第一,黏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,黏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。

这两个因素都使黏土颗粒表面带负电荷,所以当它处于盐溶液中时,将吸收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,将在黏土颗粒表面相继交换位置而形成电流,这就是黏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,黏土能吸附可交换的阳离子总量,它的数值均以 100g 黏土吸附阳离子的毫克当量数表示。

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

①种类的影响。在四种黏土矿物中,蒙脱石除了要发生氢氧根中氢的离解而带负电荷外,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 ~ 150meq/100g 黏土,而高岭石则不发生离子取代现象,而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 ~ 15meq/100g 黏土。伊利石与绿泥石相当,介于二者之间。

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,层状或条带状泥质还可造成岩石电阻率很大的各向异性。二是通过黏土矿物本身电阻率的改变来影响,因为层状黏土和结构状黏土要受到上覆岩层的压力,而分散状黏土则不受上覆岩层的压力影响,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。在黏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。当黏土与水溶液接触时,黏土颗粒表面的阴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,则动平衡也随之改变。因此,当黏土将同性质的、浓度不同的两种水溶液隔开时,在浓度大的一边的黏土颗粒的“扩散层”将吸附更多的阳离子,这样黏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,而只能在黏土颗粒表面移动。于是在高浓度溶液一边的阳离子不断地从水溶液里进入到“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,与被黏土颗粒隔开的两种溶液的浓度和性质有关;

第二，与黏土颗粒的类型有关。含蒙脱石越多“薄膜电位”越大；

第三，同类型的黏土含量越多，“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。由于黏土矿物颗粒小，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，因此黏土矿物自然放射性都较高。这样，凡含有黏土矿物的岩石，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岩石所含黏土的种类。不同的黏土矿物，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 1-5。

表 1-5 常见黏土矿物的自然伽马放射性强度和能谱

黏土矿物	总放射性 (API)	钍 (mg/L)	钾 (%)	铀 (mg/L)
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岩石所含黏土的数量。对同种黏土矿物来说，岩石含的黏土越多，放射性也越高，在四川碳酸盐岩地层中，除了有机质的影响，则黏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，除石炭系，下二叠系阳新统地层（因它们的有机质含量高），其余地层的黏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（因为在四川的地层中的黏土成分多以伊利石为主）。因此，在黏土矿物类型确定后，就可以根据地层自然放射性的高低或钾含量的高低来判断黏土含量的多少。

(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黏土矿物，这是因为黏土矿物除分子本身含有结晶水外，其晶格间还有束缚水，故岩石的减速特性在很大程度上与黏土矿物有关，其相关程度取决于所含黏土的类型、分布形式和含量。

①黏土的类型。不同的黏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黏土的分布形式。如前所述，对层状或结构状黏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。但分散状黏土则因只受较小的静水柱压力，故可含较多的束缚水，所以分散状黏土具有较大的中子减速能力。

③黏土的含量。对同种类型、同种分布形式的黏土来说，其含量越多，对中子的减速特性影响越大。

(5) 对岩石声速特性的影响。黏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，故黏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) 黏土矿物对岩石储集性能的影响

当岩石中含有黏土矿物时,一般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黏土,作用的程度是不同的。

(1) 黏土种类的作用。因蒙脱石具有很好的吸水性,吸水后造成体积膨胀,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) 黏土分布形式的作用:通常层状或结构状黏土对岩石储集性能的作用很小,但分散状黏土,尤其是分布在岩石孔隙中的黏土则使储集性能明显变坏。

(3) 黏土含量的作用:对同种类型的分散状黏土,其含量越大,储集物性越差。

4. 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的重视。

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,都基本变为干酪根,所以现在地层中看到的有机质主要都是干酪根,它约占有机质总量的 95% ~ 97%。通常所说的有机碳,也是干酪根最为普遍的一种存在形式。因此可把有机质、有机碳的研究基本归结为对干酪根的研究。

干酪根由 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,腐殖型,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) 干酪根的演变

地层中干酪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。一般腐殖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。根据干酪根转化程度的不同,将其分为三种状态:第一,未成熟状态:正在向油气方向演变,如四川三叠系地层中的干酪根即属此种状态;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,如四川二叠系地层中的有机碳就属此种状态。

3) 干酪根的性质

从干酪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切的含氢和含铀二特性作一分析。

(1) 含氢特性。干酪根的类型不同,含氢量亦不同,其中以腐泥型含氢量最多,过渡型次之,腐殖型最低。对同一种类型的干酪根来说,越往过成熟阶段演变,含氢量较少,一旦演变到炭质、沥青质,则含氢将减到最低。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干酪根对铀具有很强的富集作用。

第一,干酪根表面容易吸附铀离子;

第二,干酪根可与铀元素结合成难溶的有机质络合物而沉淀析出;

第三,干酪根可使六价铀的铀酰络合物还原成四价铀,从而变成难溶的沉淀物;

第四,干酪根可分解出 H_2S , 而 H_2S 也可使六价铀还原成四价铀,促使铀酰络合物的沉淀;

第五,干酪根分解生成的有机酸可降低介质的 pH 值,进而使铀酰碳酸盐络合物破坏,