



“九五”中国石油天然气集团公司级重点教材

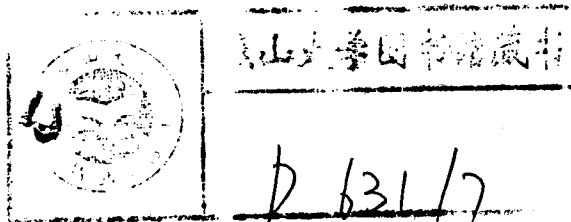
地球物理资料 综合应用

孙建孟 王永刚 主编

石油大学出版社

地球物理资料综合应用

孙建孟 王永刚 主编



石油大学出版社



0760588

图书在版编目(CIP)数据

地球物理资料综合应用/孙建孟编著. —东营:
石油大学出版社, 2001. 9
ISBN 7-5636-1541-5

I. 地… II. 孙… III. 地球物理勘探-资料-应
用 IV. P631

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 073588 号

书 名: 地球物理资料综合应用
主 编: 孙建孟 王永刚

出版者: 石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://sunctr.hdpu.edu.cn/~upcpres>

电子信箱: upcpres@mail.hdpu.edu.cn

印刷者: 石油大学印刷厂

发 行 者: 石油大学出版社(电话 0546—8392569)

开 本: 787×1092 1/16 印张: 29.125 字数: 744 千字

版 次: 2001 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

印 数: 1—2000 册

定 价: 38.00 元

前 言

本教材是CNPC“九五”规划教材,也是近五年来石油高校教学改革成果之一。勘探地球物理和矿场地球物理专业曾被合并为应用地球物理专业,目前更改为勘查技术与工程专业。专业合并和新的专业名称体现了“加强基础、拓宽专业”的教改精神。为了实施新专业的培养计划,我们专门编写了“地球物理资料综合应用”的专业必修课教材,计划96学时,其中包括实验10学时。

本教材考虑到学校的办学方向,国内存在物探、测井两大行业的现实,多年教学实践的积累,抓住最基本的教学内容,在原《测井数据处理与综合解释》(雍世和、张超谟主编)和《地震勘探原理(下册)》(陆基孟主编)教材的基础上编写而成。考虑到学时的压缩,测井方面突出泥质砂岩地层评价和裂缝性地层评价两条主线,增加了录井地层评价、储量计算、天然气储层评价、核磁共振、偶极横波、地层微电阻率扫描等测井新技术在储层描述中的应用等内容,舍去了多井评价和油藏描述等内容;物探方面以地震资料的构造解释、地震地层学解释、岩性解释和油藏描述为主线,增加了工作站人机交互解释以及地球物理资料综合解释的相关内容。近年来技术发展迅猛,使我们很难及时地把所有新内容都写入教材,即使如此本教材仍显厚重。

与本课程相联系的专业课程设置顺序为地球物理学概论、勘查地球物理基础(物探)、矿场地球物理基础(测井)、地球物理资料综合应用(本教材)、生产测井、倾角测井、测井新方法和新技术、地震资料数字处理方法、石油地球物理综合勘探、物探新方法和新技术等。

本书承蒙石油大学王曰才教授和胜利油田杨云岭教授级高工在百忙之中,对全书进行了详细审阅,并提出了许多建设性的意见,作者对此进行了认真修改。在1999年底进行教学大纲修订时,对本教材的编写内容进行了认真的讨论,根据会议达成的共识,确定了该版本,在此一并向他们表示衷心的感谢。

本书由孙建孟和王永刚主编,孙建孟教授编写第一章、第二章、第三章、第四章的第一节至第十一节,胜利油田地科院储量室的张玲高级工程师编写第四章第十二节。第五章由杨国权副教授、王永刚副教授共同编写,王永刚副教授编写第六章。最后由孙建孟、王永刚负责统稿。

书中所存不妥或错误之处,敬请专家和读者批评指正。

编 者

2000年6月

CAI 6/07

目 录

第一章 测井资料综合解释基础	1
第一节 地层评价概述	1
第二节 纯岩石模型测井响应方程	16
第三节 纯岩石模型地层评价方法	25
第四节 测井系列的选择	37
第五节 综合判断油、气、水层的一般方法	44
第六节 快速直观显示油、气、水层的解释方法	49
第七节 应用数理统计方法建立测井解释模型	55
第二章 测井资料数据处理基础	63
第一节 测井数据记录格式	63
第二节 测井交会图技术	74
第三节 测井数据预处理	86
第三章 泥质砂岩地层评价	103
第一节 中子—密度频率交会图分析	103
第二节 泥质砂岩测井响应方程	110
第三节 泥质砂岩的电阻率测井响应方程	116
第四节 解释参数的选择	131
第五节 泥质砂岩地层评价方法	144
第四章 裂缝性储集层评价	157
第一节 裂缝性储集层的测井响应特征	157
第二节 常规测井裂缝定性识别技术	165
第三节 裂缝性储层评价	171
第四节 复杂岩性的 CRA 处理方法	178
第五节 最优化测井解释原理	183
第六节 地层微电阻率扫描测井(FMI)解释	194
第七节 偶极横波成像(DSI)测井解释	202
第八节 核磁共振测井(NMR)地层评价	208
第九节 低阻油气层测井评价	220
第十节 录井地层评价	227
第十一节 天然气储层评价	240
第十二节 储量计算	253
第五章 地震资料的解释	262
第一节 地震资料的构造解释	263
第二节 地震资料的地层解释	296
第三节 地震资料的岩性解释	329
第四节 储集体地震解释技术	377

第六章 地球物理资料综合解释	427
第一节 开展综合解释的必要性	427
第二节 地球物理资料的综合应用	428
第三节 地震、测井、地质资料的综合解释	431
第四节 地球物理资料综合处理方法	439
参考文献	459

第一章 测井资料综合解释基础

第一节 地层评价概述

地球物理测井在石油、天然气、煤、金属矿藏等地下矿藏的勘探、开发过程中有着广泛的应用。下面主要讨论它在石油和天然气工业中的应用。

石油和天然气储存在地下具有孔隙、孔洞或裂缝(隙)的岩石中。自然界的岩石种类虽然很多,但并不是所有岩石都能储存石油和天然气。能够储存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、孔洞和裂缝(隙)等空间场所;二是孔隙、孔洞和裂缝(隙)之间必须相互连通,在一定压差下能够形成油气流动的通道。我们把具备这两个条件的岩层称为储集层。也就是说,储集层就是具有连通孔隙,既能储存油气,又能使油气在一定压差下流动的岩层。岩石具有由各种孔隙、孔洞、裂缝(隙)形成的流体储存空间的性质称为岩石的孔隙性;而在一定压差下允许流体在岩石中渗流的性质称为岩石的渗透性。

地层评价是指用测井资料划分岩性和储集层,评价储集层的岩性(矿物成分和泥质含量)、储油性(孔隙度和渗透率)、含油性(含油气饱和度和含水饱和度)、产能和生产动态(开发过程中油、气、水的产能变化及储集层变化)等。

一、储集层的分类

地质上常按成因和岩性把储集层划分为三类:碎屑岩储集层、碳酸盐岩储集层与其他岩类储集层。前两类是主要的储集层。不同类型的储集层具有不同的地质特征。

(一) 碎屑岩储集层

碎屑岩储集层为陆源碎屑岩,主要包括粉砂岩、砂岩、砂砾岩和砾岩。它们的储集空间以碎屑颗粒之间的粒间孔隙为主,有时伴有裂隙(缝)、微孔隙以及成岩过程中所产生的各种次生孔隙。碎屑岩储集层的隔层一般为泥岩,故在油井剖面中常常是砂岩、泥岩交替,在测井解释中称之为砂泥岩剖面。

碎屑岩主要是由各种矿物碎屑、岩石碎屑、胶结物(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因素是碎屑的成分和颗粒的大小,并以它们作为碎屑岩分类和命名的主要依据。

1. 碎屑物的矿物成分

目前已发现的碎屑矿物约有160种,最常见的约20种。但在一种碎屑岩中,其主要碎屑矿物通常只有3~5种,常见的碎屑矿物主要有石英、长石、云母和粘土以及重矿物。石英是碎屑岩中分布最广、含量最多的一种碎屑矿物,它主要出现在砂岩和粉砂岩中(其含量可达50%~90%,平均含量达66.8%),在砾岩中的含量较少,在粘土岩中的含量更少。长石在碎屑岩中的含量仅次于石英,通常,砂岩中长石的平均含量为10%~15%,远小于石英含量,但在有些砂岩中,长石的含量相当高,可达50%。白云母和黑云母的碎屑颗粒是砂岩中常见的次要组分。白云母多分布在粉砂岩和细砂岩中;而黑云母则常出现在砾岩或杂砂岩中。碎屑岩中密度大于 2.86 g/cm^3 的矿物称为重矿物,它们在岩石中的含量很少,一般不超过1%。重矿物的

种类很多,常见的有辉石、角闪石、萤铁矿、磁铁矿、重晶石、锆石、电气石、金红石等等。这些含量很少的重矿物,在地质工作中常用于划分地层和地层对比,而且它们对密度、岩石密度等测井响应也有着重要影响。

岩石碎屑(岩屑)是母岩经机械破碎形成的岩石碎块,一般由两种以上的矿物集合体组成,保留着母岩的结构特点,因此岩屑是判断母岩成分及沉积来源的重要标志。砾岩中的岩屑种类多,含量高。砂岩中一般多为细粒结构及隐晶结构的岩屑。粉砂岩中几乎不存在岩屑。

2. 碎屑颗粒的粒度

粒度是指颗粒的大小,用粒径表示。它是碎屑颗粒最主要的结构,直接决定着碎屑岩的分类命名和性质。根据粒度大小将碎屑分成砾、砂、粉砂三类,表 1-1 是我国广泛采用的碎屑颗粒的粒度分类表。

表 1-1 碎屑颗粒的粒度分类表

碎屑名称	碎屑名称亚类	颗粒直径/mm
砾	巨砾	>1 000
	粗砾	1 000~100
	中砾	100~10
	细砾	10~1
砂	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(泥)	粘土(泥)	<0.01

碎屑颗粒的分选性是指颗粒大小的均匀程度。按碎屑岩中主要粒度的含量可将分选性划为好、中、差三等。主要粒度的含量>75%者为好,含量在50%~70%者为中,含量<50%者为差。分选差,大小混杂,大颗粒间形成的孔隙就被小颗粒所充填,使岩石的孔隙性和渗透性变差。

3. 胶结物

把松散的砂、砾胶结成整体的物质叫胶结物。最常见的胶结物有泥质、钙质(又称灰质)、硅质及铁质,其中主要是泥质、钙质。通常泥质胶结的砂岩较疏松,孔隙性及渗透性较好;钙质胶结次之;硅质及铁质胶结的砂岩一般均致密坚硬,储油物性差。胶结物不但有粘接碎屑颗粒的作用,同时还会充填粒间孔隙,使孔隙缩小和被堵塞。因而胶结物含量是影响储油物性的重要因素,随着胶结物含量的增加,储集层的孔隙性和渗透性变差。

泥质胶结物的成分是粘土矿物。不同种类的粘土矿物,由于吸水后的膨胀性不同,对储油物性的影响也是不同的。高岭石和伊利石的膨胀性最小,蒙脱石的膨胀性最大,因而后者对孔隙的堵塞最严重。所以含高岭石和伊利石的砂岩的储油物性较含蒙脱石者为好。

砂岩储集层中分散分布的粘土矿物,一般都以晶粒或其他集合体形式作为充填物分散存在于孔隙中,其分布类型有三种(图 1-1):

(1) 分立质点式 粘土矿物以晶体的集合体形式分散附着于孔壁或占据部分粒间孔隙。

(2) 孔隙内衬式 粘土矿物以相对连续的薄层附着在孔壁上,形成“粘土套”,且具有丰富的微细孔隙。

(3) 孔隙搭桥式 粘土晶形变化延伸到孔隙中,或完全穿过孔隙,粘土矿物与孔隙系统共生和交缠,孔隙通道变得更细。

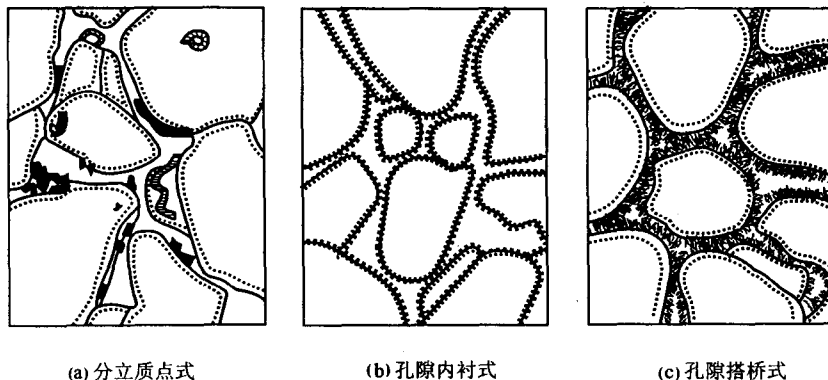


图 1-1 砂岩储集层中分散粘土的分布类型

(a) 分立质点式; (b) 孔隙内衬式; (c) 孔隙搭桥式

砂岩储集层中分散粘土的不同分布类型,对储集层物性的影响也不同。以分立质点式为主的砂岩的泥质含量最低,孔隙空间发育,具有较高的渗透能力和产油能力。以孔隙内衬式为主的砂岩的泥质含量相对增多,孔隙发育程度中等或较差,但喉道仍然是相对张开的,在孔隙度相同的情况下,比分立质点式的空气渗透率低,因而一般储集层具有中等渗透率和较低的产油能力。以孔隙搭桥式为主的砂岩,胶结物含量最高,孔隙发育中等、较差或差,只有很低的渗透性。

粘土的颗粒极细(粒径小于 0.01 mm),又具有复杂的矿物成分和物理化学性质,在地层中又会引起特殊的导电作用;在不同的碎屑岩中,粘土的矿物成分、含量及分布类型又有很大变化。因此,地层中的粘土成分是造成测井解释复杂性的重要原因之一。粘土的性质及其对测井资料的影响,是现代测井资料解释的重要基础之一。

4. 碎屑岩的孔隙分类

碎屑岩储集层孔隙空间的大小和形状是多样的。按孔隙成因,可将碎屑岩孔隙分为:

(1) 粒间孔隙 在碎屑颗粒、基质及胶结物之间的孔隙空间称为粒间孔隙,这是碎屑岩中最主要、最大量的储集空间。粒间孔隙的多少、孔径大小及分布是碎屑颗粒的粒度、分选、磨圆程度、颗粒排列及填充因素变化的结果。

(2) 微孔隙 孔径小于 0.5 μm 的孔隙称微孔隙。在碎屑岩中,它们有时可占岩石体积的百分之十几,数量相当可观。最常见的是基质内微孔隙及粘土矿物重结晶间隙。在泥质砂岩中,微孔隙普遍发育,但渗透性极差。由于孔径很小,表面积大,故微孔隙中吸附有大量的不能流动的束缚水。

(3) 溶蚀孔隙 这是由碎屑颗粒、自生矿物胶结物或交代矿物中的可溶组分被溶解形成的,包括溶孔、颗粒内溶孔、胶结物内溶孔及铸模孔等。当碎屑岩的胶结物是以碳酸盐为主时,溶解产生的次生粒间孔隙可形成良好的储集层。

(4) 微裂缝 在碎屑岩成岩过程中,由于岩石组分的收缩作用或构造力作用而形成的微

裂缝十分发育。仅由微裂缝提供的孔隙空间是很少的,通常只占岩石体积的1%,最多也只有百分之几。但它将提高碎屑岩的渗透能力,尤其是具有发育的微孔隙或孤立溶蚀孔隙的储集层,微裂缝则成为主要渗滤通道。此外,在碎屑岩中还有沉积作用形成的纹理缝或层理缝等等,但它们所能提供的储集空间均很有限。

上述各类孔隙中,粒间孔隙及纹理缝、层理缝是沉积时形成的,叫原生成因;微孔隙属原生次生混合成因;溶蚀孔隙及微裂缝均属次生成因。

按碎屑岩孔隙的孔径大小,可把孔隙分为三类:

(1) 超毛细管孔隙 孔径在0.5 mm、裂缝宽度在0.25 mm以上的孔隙。在自然条件下,除岩石颗粒表面被吸附的一层不能流动的薄膜水以外,其他流体均可在超毛细管孔隙中自由流动。胶结疏松或未胶结的砂层中,大多数属超毛细管孔隙。

(2) 毛细管孔隙 孔径在0.5~0.000 2 mm、裂隙宽度在0.25~0.000 1 mm的孔隙。除了颗粒表面的薄膜水不能流动外,在某些毛细管弯曲度较大的地方还有不能流动的毛细管滞留水。在一般孔隙形成的毛细管中,只有当外力的作用大于本身的毛细管力时,薄膜水和毛细管滞留水以外的流体才能在其中流动。一般砂岩的孔隙多属此类。

(3) 微毛细管孔隙 孔径小于0.000 2 mm、裂隙宽度小于0.000 1 mm的孔隙。由于孔隙截面极微小,孔壁表面分子的作用力达到或几乎达到孔隙孔道的中心,致使流体不能在其中流动。一般粘土层或泥岩的孔隙均属这一类,因而称它们为非储集层,是形成油气藏的生油层或盖层。

对于油气运移、聚集及开采来说,有用的是那些互相连通的超毛细管孔隙和毛细管孔隙。因为它们不仅可储存油气,而且还允许流体在其中流动。

按对流体的渗流情况可把孔隙分为有效和无效孔隙。所谓有效孔隙,就是孔径在0.000 2 mm以上的互相连通,且在自然条件下流体可在其中流动的孔隙空间。所谓无效孔隙(或“死孔隙”)就是岩石中那些孤立的、互不连通的孔隙及微毛细管孔隙。

碎屑岩储集层基本上就是砂岩和粉砂岩储集层,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)主要取决于砂岩颗粒大小,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,即储油物性越好。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%;如果相邻四个球心构成斜菱形(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,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。

(二) 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,其基本化学成分都是碳酸盐类(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。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。

表1-2 砂岩和碳酸盐岩孔隙比较表

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	受颗粒形状影响强烈	变化很大
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,也可从十分均匀变化到完全不均匀
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	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	岩心长0.0254 m,直径要能反映骨架孔隙度	孔隙性储集层可做岩心分析,但对大孔隙的岩石,即使直径为0.0762 m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	变化很大,一般与颗粒和分选程度无关

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。我国川南阳高寺气田的鲕状灰岩,其鲕直径最大为0.55 mm,最小0.15 mm,一般0.2~0.4 mm,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,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

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,所以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。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. 洞穴型储集层

洞穴型储集层主要是指由溶解作用、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 mm 以上)组成。这类孔洞形状不一,大小悬殊,小的 4 mm 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。

近年来,其他类型的储集层如火成岩储集层受到重视,该类储集层岩性复杂,其产能主要取决于后期的成岩变化,它与碳酸岩储集层的储集空间有很大的相似之处。

二、储集层的基本参数

储集层的基本参数包括评价储集层物性的孔隙度和渗透率,评价储集层含油性的含油气饱和度、含水饱和度与束缚水饱和度、储集层的厚度等。用测井资料进行储集层评价及油气分析,就是要通过测井资料数据处理与综合解释来确定这些储集层参数,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概念有总孔隙度、有效孔隙度和缝洞孔隙度。总孔隙度 ϕ 是指全部孔隙体积占岩石体积的百分数;有效孔隙度 ϕ_e 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 ϕ_f 是指有效缝洞孔隙体积占岩石体积的百分数,它是表征裂缝性储集层储集物性的重要参数,因为缝洞是岩石次生变化形成的,故常称为次生孔隙度或

次生孔隙度指数。上述孔隙度的定量表达为：

$$\phi_t = V_t/V \times 100\% \quad (1-1)$$

$$\phi_e = V_e/V \times 100\% \quad (1-2)$$

$$\phi_2 = V_2/V \times 100\% \quad (1-3)$$

式中 V, V_t ——岩石体积与孔隙总体积；

V_e, V_2 ——有效孔隙体积与缝洞孔隙体积。

此外，有时还用“残余孔隙度”概念，它表示岩石中的无效孔隙或“死孔隙”体积（即互不连通的孔隙及微毛细管的体积）占岩石体积的百分数。

一般来说，未固结的和中等胶结程度的砂岩，其 ϕ_e 与 ϕ_t 接近，胶结程度高的砂岩，特别是碳酸盐岩，其 ϕ_e 通常比 ϕ_t 大很多。同时，随着地层的埋藏深度增加，胶结和压实作用增强，砂岩的孔隙度也降低。砂岩的总孔隙度一般在 5%~30%；储油砂岩的有效孔隙度一般在 10%~25%。孔隙度低于 5% 的储油砂岩，除非其中有裂缝、孔穴之类，一般可认为无开采价值。

在碳酸盐岩储集层中，还要将有效孔隙中的粒间孔隙（又称基块孔隙）与缝洞孔隙加以区别。因为碳酸盐岩一般都比较致密，原始基块孔隙性和渗透性都比较差，只有裂缝和孔洞比较发育时才具有生产能力。因此，碳酸盐岩的缝洞孔隙度是其产能的重要标志。此外，在碳酸盐岩地层中，孔隙度与深度的关系不像砂岩地层中那样明显。

现在广泛应用测井资料来计算地层的孔隙度及泥质含量。测井地层评价理论认为：泥质和其他岩石所含泥质的孔隙是微毛细管孔隙，不是有效孔隙；计算的纯岩石孔隙度为有效孔隙度。泥质砂岩中包含泥质孔隙在内的孔隙度是总孔隙度 ϕ_t ，泥质岩石中除去泥质孔隙外的孔隙度为有效孔隙度 ϕ_e ，即 $\phi_e = \phi_t - V_{sh} \times \phi_{sh}$ ， V_{sh} 和 ϕ_{sh} 分别为泥质含量和泥质孔隙度。

2. 渗透率

在有压力差的条件下，岩层允许流体流过其孔隙孔道的性质称为渗透性。岩石渗透性的大小是决定油气藏能否形成和油气层产能大小的重要因素。常用渗透率来定量表示岩石的渗透性。根据达西定律，岩层孔隙中的不可压缩流体，在一定压力差条件下发生的流动，由式(1-4)表示：

$$Q = K \frac{A \Delta p}{\mu L}; \quad K = \frac{Q \mu L}{A \Delta p} \quad (1-4)$$

式中 Q ——流体的流量， cm^3/s ；

A ——垂直于流体流动方向的岩石横截面积， cm^2 ；

L ——流体渗滤路径的长度， cm ；

Δp ——压力差， Pa ；

μ ——流体的粘度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ；

K ——岩石的渗透率， μm^2 。

在压力梯度为 101 325 Pa/cm 条件下，粘度为 1 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 的流体在孔隙中作层流运动时，在 1 cm^2 横截面积上通过流体的流量为 1 cm^3/s 时的岩石渗透率为 0.987 (≈ 1) μm^2 。实际工作中，这个单位太大，常用它的千分之一作单位，即 $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

达西定律只适用层流以及流体与岩石无相互作用的情况，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；而当有多种流体（如油和水）同时通过岩样时，不同的流体则有不同的渗透率。因此常用绝对渗透率、有效渗透率和相对渗透率来区分。

(1) 绝对渗透率 绝对渗透率是岩石孔隙中只有一种流体(油、气或水)时测量的渗透率,常用符号 K 表示。其大小只与岩石孔隙结构有关,而与流体性质无关。因为常用空气来测量,故又称空气渗透率。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大小,按经验可把储集层分为:小于 1 到 $15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的,属差到尚可; $(15 \sim 50) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的,属中等; $(50 \sim 250) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的属好; $(250 \sim 1\ 000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的,属很好;大于 $1\ 000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的,属极好。

(2) 有效渗透率 当两种以上的流体同时通过岩石时,对其中某一流体测得的渗透率,称为岩石对该流体的有效渗透率或相渗透率,岩石对油、气、水的有效渗透率分别用 K_o 、 K_g 、 K_w 表示。有效渗透率大小除与岩石孔隙结构有关外,还与流体的性质和相对含量、各流体之间的相互作用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。

多种流体同时通过岩石时,各单相的有效渗透率以及它们之和总是低于绝对渗透率的。这是因为多相共同流动时,流体不仅要克服自身的粘滞阻力,还要克服流体与岩石孔壁之间的附着力、毛细管力以及流体与流体之间的附加阻力等等,因而使渗透能力相对降低。

实践证明,流体的有效渗透率与它在岩石中的相对含量有关,当流体的相对含量变化时,其相应的有效渗透率随之改变。为此,引入相对渗透率的概念。

(3) 相对渗透率 岩石的有效渗透率与绝对渗透率之比值称为相对渗透率,其值在 $0 \sim 1$ 之间。通常用 K_{ro} 、 K_{rg} 、 K_{rw} 分别表示油、气、水的相对渗透率。

3. 饱和度

饱和度是用来表示岩石孔隙空间所含流体的性质及其含量的,其定义是某种流体(油气或水)所充填的孔隙体积占全部孔隙体积的百分数。

(1) 含水饱和度 岩石含水孔隙体积占孔隙体积的百分数,称为含水饱和度,用 S_w 表示。岩石孔隙总是含有地层水的,其中被吸附在岩石颗粒表面的薄膜水和无效孔隙及狭窄孔隙喉道中的毛细管滞留水,在自然条件下是不能自由流动的,称之为束缚水;而离颗粒表面较远,在一定压差下可以流动的地层水,称为可动水或自由水。相应地,有束缚水饱和度 S_{wb} 与可动水饱和度 S_{wm} ,且 $S_w = S_{wb} + S_{wm}$ 。

储油层的各个部分均含有束缚水。在含油(气)部分,油(气)与束缚水共存;在含水部分,可动水与束缚水共存;在油-气过渡带,油、气与束缚水三相共存。

储集层的束缚水含量取决于它的岩性。地层的泥质含量越多,岩石颗粒越细、孔隙孔道越窄,其束缚水饱和度越大。因此,不同岩性的储集层,它们的油、水层饱和度界限也是不同的。为了准确评价储集层的含油性,往往需要将地层水的含水饱和度 S_w 与束缚水饱和度 S_{wb} 进行比较。当 S_w 小,且 $S_w \approx S_{wb}$ 时,即只含束缚水时为油(气)层;反之,当 S_w 很高,且 $S_w \gg S_{wb}$ 时为水层;介于这两者之间的则为油水同层。

储集层中的束缚水饱和度 S_{wb} 一般在 $20\% \sim 50\%$, S_{wb} 低于 10% 的情况很少。但当油气聚集在天然裂缝或洞穴中时, S_{wb} 值很低。储集层中的束缚水含量直接影响着油气的最终采收率,对油层的电阻率也有重要的影响。低电阻率油气层在很多情况下就是束缚水的含量过高造成的。研究束缚水的影响是当前电阻率测井资料解释的重要课题之一。

(2) 含油气饱和度 岩石含油气体积占有效孔隙体积的百分数,用 S_h 表示,且 $S_w + S_h = 1$ 。当地层只含油时,用 S_o 表示含油饱和度,且 $S_w + S_o = 1$;当地层只含气时,用 S_g 表示含气饱和度,且 $S_w + S_g = 1$ 。地层条件下的石油一般含有溶解气,故常用含油气饱和度,它又常简称为含油饱和度或含烃饱和度。

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)或孔隙性与渗透性的显著变化(如巨厚致密碳酸盐岩中的裂缝带)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。

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流的油气层实际厚度,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、储集层的重要特性

在石油勘探开发过程中储集层被进一步划分为油气层、水层、干层等。在测井地层评价中,根据试油结果,把测井解释结论分为六种(不同的油田规定的划分界限可能略有出入):

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%,包括以产气为主又同时产油;

油水同层:油水同出,含水10%~90%;

含油水层:产水大于90%,见到油花;

水层:完全出水,有时也把含油水层归入水层;

干层:按一定的求产制度求得的日产液量小于1方,其中含水小于0.5 t。不同的油田规定的求产制度不同,因而其干层界限也会略有差异。

在测井定性解释中,对含泥质较少的砂岩粗略的把含水饱和度小于50%的储集层定为油气层,50%~70%之间的储集层定为油水同层,大于70%的储集层定为水层,不同的油田也会有较大的差异,这主要取决于束缚水饱和度的高低和油水相对渗透率曲线。

1. 储集层的油水相对渗透率分析(孔隙饱和特性)

在储集层孔隙中充满不同含量的油、气、水时,岩层对某一种流体的相对渗透率取决于其他流体的数量(饱和度)及性质。某一流体的相对渗透率随该流体的饱和度增加而增加,直到该流体全部饱和孔隙空间时达到绝对渗透率值为止,图1-2示出油水两相流动时相对渗透率与含水饱和度的关系。(a)为亲水储集层,(b)为亲油储集层。它是根据大块岩心的相渗透率实验得到的,岩石的润湿性不同(亲油或亲水),其相对渗透率曲线也有较大差异。

当地层的含水饱和度 S_w 很高,即含油饱和度 S_o 很低时,油的相对渗透率 K_{ro} 接近于零,这部分油称为残余油,其饱和度称为残余油饱和度,用 S_{or} 表示。

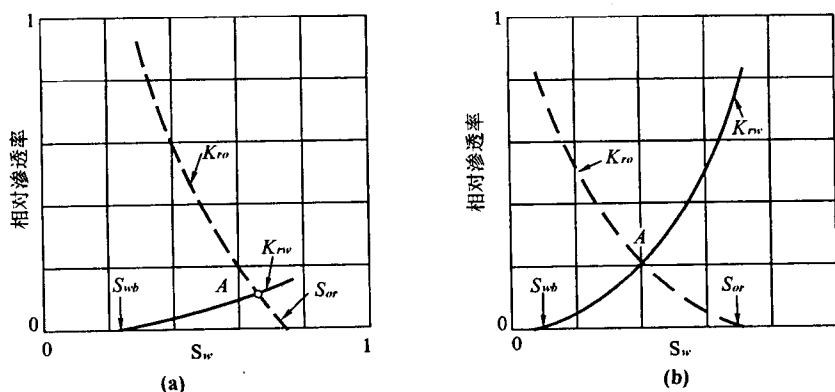


图 1-2 相对渗透率与含水饱和度的关系砂岩储集层中分散粘土的分布类型

(a) 亲水储集层; (b) 亲油储集层

当地层的含水饱和度 S_w 很低,即含油饱和度 S_o 很高时,水的相对渗透率 K_{rw} 接近于零,这部分油称为残余水,其饱和度称为残余水饱和度(束缚水饱和度),用 S_{wb} 表示。

可见,在油水两相流动的情况下,油层是只含束缚水的储集层, $S_w = S_{wb}$, 油的相对渗透率 K_{ro} 很高,而水的相对渗透率 K_{rw} 接近于零,地层只产油而不出水;水层是一点不含油(纯水层)或只含残余油的储集层, $S_w \gg S_{wb}$, $S_o = S_{or}$, K_{rw} 很高,而 K_{ro} 接近零,地层只出水而不产油。油水同层界于两者之间。

由图 1-2 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 $S_{wb} > 20\%$, 油和水相对渗透率相等的点 A 有较高含水饱和度 ($S_w > 50\%$), 而残余油饱和度较低。亲油储集层与此相反,一般 $S_{wb} < 15\%$, 点 A 的 $S_w < 50\%$, S_{or} 较高。点 A 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,一般要根据岩心测定的资料,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和亲油的,由于长期被油饱和,原来亲水的地层也可能变成亲油的或变成混合润湿的。

2. 储集层的侵入特征分析

钻井过程中泥浆与地层的作用是双向的,地层中可溶性盐类(石膏、盐岩、芒硝)、各种流体(油、气、水)以及岩石细粒(如粘土、砂)会使泥浆性能发生不符合施工要求的变化,这称为泥浆受侵。另一方面,泥浆在正向压差作用下,侵入地层,其具体过程大致如下:从井眼形成的瞬间开始泥浆和泥浆水便向孔隙性地层渗透,在这一段时间内还未形成泥饼称为瞬时失水过程,泥饼建立、形成后,泥浆循环状态下,失水量由大到小以致恒定,这一段时间属于动失水过程。钻进若干时间后,起下钻过程中,停止泥浆循环,此时泥饼加厚,仍发生失水现象,但逐渐减小。这一阶段称为静失水过程,之后动失水过程和静失水过程交替出现,最终泥饼保持一定的厚度,累积失水量达到一定数值,形成动态平衡。这个过程称为泥浆侵入。达到动态平衡后,泥饼起着决定性的作用,其厚度约 0.5~2.5 cm。由于泥饼的渗透性很差,因此当泥饼形成以后,油、气、水和滤液重新重力分异作用会显著起来。

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。这种泥浆侵入引起储集层电阻率在径向上的变化,称为储集层的侵入特性。

图 1-3 示出储集层侵入特性示意图。设储集层的电阻率原来在径向上是均匀的,都是真电阻率 R_i , 泥浆侵入以后,井壁附近受到泥浆滤液强烈冲刷的部分称为冲洗带,其径向厚度约 10~50 cm,它大致是与井轴同心的环带[图 1-3(a)],孔隙流体主要是泥浆滤液,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;其含水饱和度称为冲洗带含水饱和度,用 S_{so} 表示,冲洗带后面是过渡带,是储集层受泥浆侵入由强到弱的过渡部分,原状地层的流体逐渐增多,直到没有泥浆滤液的原状地层,其电阻率由 R_{so} 渐变为 R_i 。过渡带的等效电阻率用 R_t 表示,过渡带的径向厚度不定,与钻井条件和储集层性质有关。未侵入带即原状地层,是储集层未受泥浆侵入影响部分,其电阻率为地层真电阻率 R_i , 其含水饱和度为 S_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。侵入带直径 D_i 大小取决于地层的孔隙度和渗透率、泥浆性能、泥浆柱压力与地层压力之差,以及地层被钻开后所经历的时间。一般来说,在其他条件相同的情况下,地层孔隙度和渗透率愈低,泥浆侵入愈

深, D_i 愈大。有人定性估计地层孔隙度 ϕ 与侵入带直径 D_i 的大致关系为: $\phi=5\% \sim 10\%$, $D_i=10d$; $\phi=10\% \sim 15\%$, $D_i=5d$; $\phi=15\% \sim 20\%$, $D_i=2.5d$ 。这里 d 为井径。这种定性估计出自假设: 井壁上的泥饼一旦形成, 泥浆侵入就基本停止, 而单位厚度地层上形成一定厚度的泥饼所需要的泥浆滤液量是一定的, 所以地层孔隙度越大侵入带直径就越小。根据 R_{xo} 和 R_i 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。

(1) 高侵剖面 R_{xo} 明显大于 R_i , 称为泥浆高侵或增阻侵入, 高侵地层电阻率的径向变化称为高侵剖面[图 1-3(b)]。一般在泥浆滤液电阻率大于地层水电阻率($R_{mf} > R_w$)时, 发生泥浆高侵。因此, 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_i 差别较小。

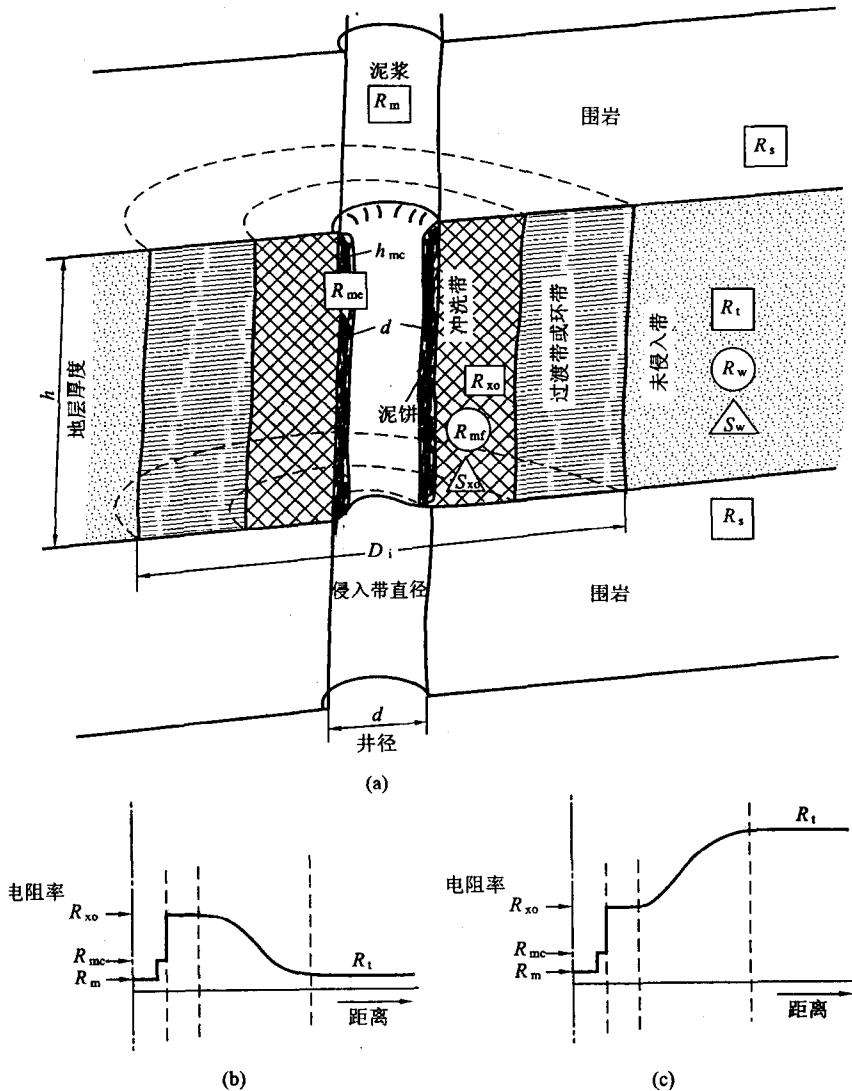


图 1-3 储集层侵入特性示意图

(a) 井剖面图; (b) 高侵剖面; (c) 低侵剖面