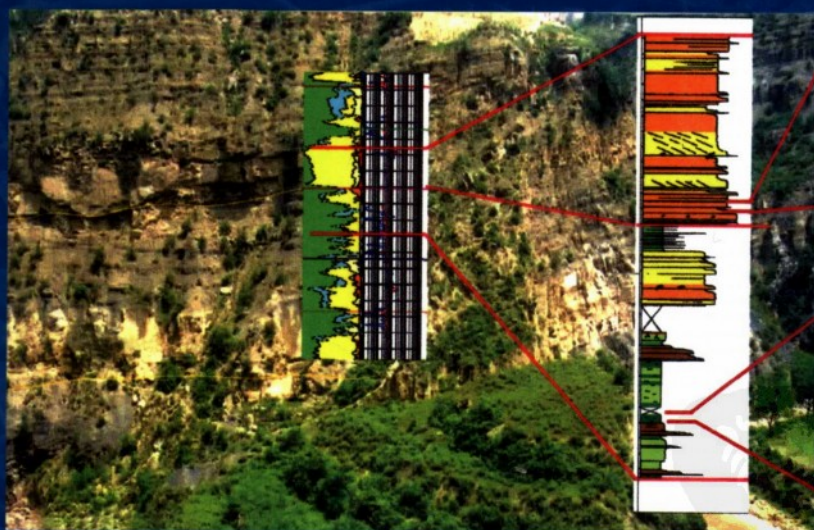


■ 高等院校教材

油层物理学

YOU CENG WU LI XUE

□ 王允诚 向 阳 邓礼正 单钰铭 著

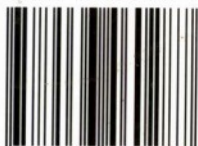


四川出版集团·四川科学技术出版社

本书侧重介绍油层物理学的基本知识和基本理论，注重应用。

作为一本教科书，本书在广泛参考近年来油层物理学的最新发展和国内外相关书籍的同时，主要继承了本校各个历史时期《油层物理学》教材的优点和特色。本书在编写中，在以下几方面有所加强和完善：①加强了地质基础和应用方面的有关内容；②增加了裂缝性岩石物理参数的确定方法；③增加了地层条件下的物性参数、孔隙结构、储层岩石敏感性，以及岩石力学性质的测试方法和基本原理；④书后附有油层物理基本实验和习题，以便学生通过实验教学和习题，掌握有关实验和分析计算技能。

ISBN 7-5364-6028-7



9 787536 460287 >

ISBN 7-5364-6028-7

定价：45.00 元

■ 高等院校教材

油层物理学

YOU CENG WU LI XUE

王允诚 向 阳 邓礼正 单钰铭 著

四川出版集团 · 四川科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

油层物理学/王允诚等著. - 成都:四川科学技术出版社,2006.8
ISBN 7-5364-6028-7

I. 油... II. 王... III. 储油层-物理性质-研究
IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 076503 号

油层物理学

著 者 王允诚 向 阳 邓礼正 单钰铭
责任编辑 宋 齐
封面设计 梁 成
版面设计 梁 成
责任出版 邓一羽
出版发行 四川出版集团·四川科学技术出版社
成都市三洞桥路 12 号 邮政编码 610031
成品尺寸 210mm×285mm
印张 18 字数 400 千 插图 2
印 刷 成都拓展印务有限公司
版 次 2006 年 8 月成都第一版
印 次 2006 年 8 月成都第一次印刷
定 价 45.00 元
ISBN 7-5364-6028-7

■ 版权所有·翻印必究 ■

■ 本书如有缺页、破损、装订错误,请寄回印刷厂调换

■ 如需购本书,请与本社邮购组联系

地址/成都市三洞桥路 12 号 电话/(028)87734081
邮政编码/610031

数字图书馆
PDG



王允诚

油气藏地质及开发工程国家重点实验室研究人员、成都理工大学教授、博士生导师。1958年毕业于北京石油学院钻采系，长期从事油气田开发地质、油层物理学、储层地质学领域的教学和科研工作。

向阳

油气藏地质及开发工程国家重点实验室研究人员、成都理工大学教授、博士生导师。1967年毕业于原成都地质学院石油系，长期从事储层岩石物理学、储层评价及储层保护领域的教学和科研工作。

邓礼正

成都理工大学副教授、硕士生导师。1977年毕业于原成都地质学院石油系，长期从事油层物理学、储层评价及储层描述等方向的教学和科研工作。

单钰铭

油气藏地质及开发工程国家重点实验室研究人员、成都理工大学副教授、硕士生导师。1982年毕业于原成都地质学院，长期从事储层岩石物理学、油层物理学、储层改造方向的教学和科研工作。



此书得到

油气藏地质及开发工程国家重点实验室的鼎力资助



前言

油层物理学是研究储油(气)层物理和物理化学现象的一门科学,主要包括储油(气)岩石的物理性质、储油(气)层中流体的物理性质、饱和油气水多相流体时岩石的物理性质及其在石油勘探和开发中的应用。

长期以来,油层物理学作为基础知识服务于石油及天然气的勘探与开发;从石油勘探早期的储层诊断和评价,一直到开发后期剩余油分布研究和提高石油采收率的整个进程中,都涉及油层物理学的基本知识。因此,油层物理学历来是高等院校石油资源勘查、石油工程及相关专业的一门重要的专业基础课。本课程的目的是使学生牢固地掌握油层物理学的基本理论、基本知识和基本技能,为学习后续专业课程和相关课程打下坚实的基础。

油层物理学初步形成于上世纪 30 年代,当时美国、前苏联等国家从事油气田开发的技术人员,注意到了油藏流体的特性及影响,初步进行了流体性质的测试及测定方法的研究;1949 年美国学者 M. 麦斯盖特所著《采油物理原理》,总结了关于储油岩石和油、气、水流体性质的研究与实践资料,概括并提升到物理学高度予以描述和解释,从而指导了各种驱动类型油气田的科学开发;1956 年前苏联学者 Ф. И. 卡佳霍夫所著《油层物理基础》,把油层物理从采油工程中独立出来,建立了一个新的学科分支;1960 年美国学者 J.W. 阿米克斯等所著《油藏工程——物理部分》,是美国油层物理学理论体系的代表;这两本著作的内容是构成目前国内所广泛采用的《油层物理学》的基本内容。我国最早从事油层物理研究的学者——秦同洛、洪世铎教授于上世纪 60 年代首次编写了我国第一部高等院校教材《采油工程》,其中第一分册即为油层物理部分。之后,为适应各油田生产和教学部门的需要,各院校相继编写了各具特色的油层物理学教材或讲义。根据服务对象的不同,油层物理学的内容亦有所侧重。

本书侧重介绍油层物理学的基本知识和基本理论,注重应用。作为一本教科书,本书在广泛参考近年来油层物理学的最新发展和国内外相关书籍的同时,主要继承了本校各个历史时期《油层物理学》教材的优点和特色。本书在编写中,在以下几方面有所加强和完善:①加强了地质基础和应用方面的有关内容;②增加了裂缝性岩石物理参数的确定方法;③增加了地层条件下的物性参数、孔隙结构、储层岩石敏感性,以及岩石力学性质的测试方法和基本原理;④书后附有油层物理基本实验和习题,以便学生通过实验教学和习题,掌握有关实验和分析计算技能。总之,本书的编写尽力体现学科的先进性、科学性和完整性,使之更适应于我国目前石油专业人才培养的需要。

本书由邓礼正编写第一章和附录习题部分,单钰铭编写第二章和附录基本实验部分,王允诚教授编写第三章,向阳教授编写第四章。

本书得到“油气藏开发和地质国家重点实验室”的支持,表示深切地感谢。

由于编者水平和学识所限,书中难免有不足和疏漏之处,敬请读者批评指正。

著者

2006年6月于成都

- 9 -

五、实验室测定的水饱和度和值的代表性分析	55
第五节 储集岩石的其他物理性质	56
一、岩石的颗粒组成	56
二、岩石的比面	59
三、岩石的碳酸盐含量	61
四、岩石的压缩性	62
五、岩石的导电性	64
六、储层岩石的声学特性	64
七、岩石的力学性质	65
八、岩石的热学性质	66
九、岩石的铸体技术	67
第二章 储油气层中流体的物理性质	69
第一节 油层烃类的相态特征	69
一、油层烃类的化学组成及烃类相态表示方法	69
二、单组分烃的相态特征 ^{[4][5]}	71
三、双组分烃的相态特征 ^{[4][5]}	74
四、多组分烃的相态特征	75
五、典型油气藏的相图	77
第二节 天然气的物理性质	79
一、天然气的组成和分类	79
二、天然气的状态方程	81
三、天然气压缩因子的确定	83
四、天然气的体积系数	93
五、天然气的压缩系数	94
六、天然气的密度和比重	95
七、天然气的粘度	96
八、天然气中的水蒸气和水化物的形成	99
第三节 地层原油的物理性质	101
一、原油的化学组成和分类	101
二、天然气在石油中的溶解和分离	102
三、地层原油的饱和和压力	109
四、地层石油的压缩系数	110
五、地层石油的体积系数	111
六、地层石油的密度和比重	117
七、地层石油的粘度	118
第四节 油层水的物理性质	121
一、油层水的矿化度和分类	121
二、天然气在地层水中的溶解度	123
三、油层水的体积系数	124
四、油层水的压缩系数	125
五、油层水的密度	126

六、油层水的粘度	126
第五节 油层流体的高压物性研究	127
一、测定油气高压物性的仪器及样品准备	128
二、油层流体的高压物性研究	129
三、实验数据的匀整 ^{[1][18][24]}	131
四、确定地层流体高压物性参数的经验公式 ^[25]	135
第六节 油层烃类的相态方程	138
一、理想溶液的相态方程	139
二、实际烃类体系的相态方程	141
三、平衡常数(K_i)值的求取	142
四、相态方程应用举例 ^[16]	145
第三章 饱和多相流体时岩石的物理性质	150
第一节 表面张力和表面能	150
一、表面张力和表面能的基本概念	150
二、流体的极性	151
三、温度和压力对表面张力的影响	152
四、吸附与表面张力	153
五、表面能和表面张力的小结	154
六、表面张力的测定方法	154
七、地层条件下界面张力的确定方法	156
第二节 润湿性 ^[6]	158
一、润湿作用	158
二、附着张力和润湿接触角	158
三、不同固体表面对不同油和水两相系统的润湿性	159
四、润湿滞后 ^[3]	160
五、实际油层的润湿性 ^[7]	160
六、油层润湿性的改变	163
七、油层润湿性的测定方法	164
第三节 毛细管压力 ^[11]	168
一、毛细管压力的基本概念	168
二、理想介质中的毛细管压力	170
三、饱和顺序对毛细管压力的影响	171
四、毛细管压力的测定方法	173
五、毛细管压力曲线的绘制及形态分析	179
六、毛细管压力曲线的定量特征	182
七、平均毛细管压力和“J”函数曲线 ^[10]	186
八、毛细管压力曲线的统计性质	187
九、毛细管压力与饱和度曲线的应用	193
十、碳酸盐岩的毛细管压力和孔喉宽度	202
第四节 储油气岩石的相对渗透率 ^[19]	202
一、多相流体渗流	202

二、相渗透率和相对渗透率	203
三、相对渗透率曲线	205
四、相对渗透率比值与流体饱和度的关系	207
五、影响相渗透率的因素分析	209
六、相对渗透率的实验室测定方法	211
七、应用毛细管压力资料计算相渗透率	213
八、相对渗透率曲线和毛细管压力曲线的综合应用 ^[24]	216
第五节 饱和和多相流体时的微观渗流机理 ^[3]	217
一、互不连通的毛细管孔道——单相液流	217
二、互不连通的毛细管孔道——两相液流	218
三、不等径并联孔道——两相液流	219
四、毛管孔道的混合液流	220
第四章 岩石特殊物理性质	222
第一节 地层条件下的孔隙度	222
一、概念	222
二、实验室测定方法	223
第二节 地层条件下的渗透率	228
一、地层条件下的渗透率	228
二、压力和温度对渗透率的影响	229
第三节 有效应力下的孔喉大小分布	230
第四节 地层岩石的电阻率	232
一、电阻率	232
第五节 储层岩石的敏感性	237
一、胶结物及胶结类型	237
二、油气储层损害的潜在因素——粘土矿物	237
三、储层敏感性的评价方法	240
第六节 岩石的力学性质	243
一、概述	243
二、岩石力学参数的应用	243
三、地层条件下的岩石力学参数测试设备	243
附录一 油层物理基本实验	248
附录二 油层物理习题	279

第一章 储油气岩石的物理性质

第一节 储集岩的孔隙空间和孔隙类型

一、储集岩的孔隙空间和孔隙结构^[1]

岩石中未被矿物颗粒、胶结物或其他固体物质填集的空间称为岩石的孔隙空间。孔隙空间可以均匀地散布在整个岩石内,亦可以不均匀地分布在岩石中形成孔隙群。岩石孔隙空间最主要的构成是孔隙和喉道。一般可以将岩石颗粒包围着的较大空间称为孔隙,而仅仅在两个颗粒间连通的狭窄部分称为喉道。

砂岩储集岩的孔隙大小和形状取决于砂子颗粒相互接触的关系以及后来的成岩后生作用所发生的变化。孔隙喉道的大小和形态主要取决于砂岩的颗粒接触类型和胶结类型、砂岩颗粒本身的形状、大小、圆度和球度也对孔隙及喉道的形状有直接影响。

砂岩储集岩的孔隙和喉道如图 1-1-1 所示。孔隙分为连通孔隙、死胡同孔隙、微毛细管束缚孔隙和孤立的孔隙四种,其中连通孔隙是有效的。

孔隙与喉道的相互配置关系是比较复杂的,每一支喉道可以连通两个孔隙,而每一个孔隙则至少可以和三个以上的喉道相连接,最多有的可以与六个到八个喉道相连通。孔隙反映了岩石的储集能力,而喉道的形状、大小则控制着孔隙的储集和渗透能力。

在研究储集岩中孔隙和喉道的相互关系时,概括出孔隙结构的概念。一般来说,储集岩的孔隙结构是指岩石所具有的孔隙和喉道的几何形状、大小分布及相互连通关系。

碳酸盐岩的储集空间比较复杂,次生变化非常强烈,可以产生大量次生孔隙,再加上裂缝常常很发育,使碳酸盐岩储集层具有岩性变化大、孔隙类型多、物性变化无规律等特点。碳酸盐岩的储集空间包括孔隙、洞穴和裂缝空间。孔隙可以容纳油气,并在一定程度上起到连通作用。裂缝分布不规则,在裂缝发育的地层也具有容纳油气的能力,但主要起连通作用。洞穴往往与裂缝共生,在洞穴发育的储层中,它也是一种储集油气的空间。

在碳酸盐储集岩中,除了与砂岩的孔隙结构有一致性而外,由于溶洞、裂缝及次生孔隙的发育,因此其孔隙结构有特殊性。通常,碳酸盐储集岩中,孔隙结构是指岩石所具有的孔、洞、缝的大小、形状和相互联通关系。碳酸盐岩的储集空间如图 1-1-2 所示。

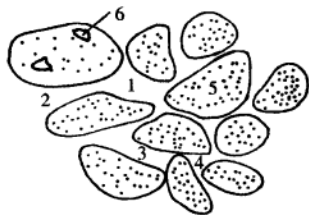


图 1-1-1 砂岩储集岩的孔隙和喉道

1-连通孔隙;2-喉道;3-死胡同孔隙;
4-微毛细管束缚孔隙;5-颗粒;6-孤立的孔隙

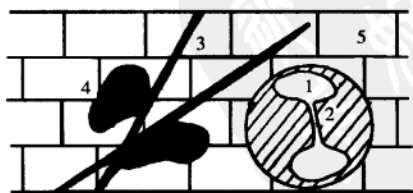


图 1-1-2 碳酸盐岩的储集空间

1-基质孔隙;2-喉道;3-裂缝;
4-洞穴;5-基质

二、砂岩储集岩的孔隙类型

砂岩中存在四种基本孔隙类型:粒间孔、溶蚀孔、微孔隙和裂隙。前三种类型与岩石结构有关,裂隙则可与其他任何孔隙共生^[2]。

所有的砂岩最初都有粒间孔,如果它未遭到破坏的话,常常是渗透好、孔喉大。溶蚀孔是由于碳酸盐、长石、硫酸盐或其他易溶物质的溶解造成的。具溶蚀孔隙的砂岩储集性可以从极好到极差,这取决于孔隙和喉道的大小以及孔隙空间的相互连通性。孤立的溶孔并不会改善渗透能力。对低渗透岩石来说,当溶孔互不连通时,它的渗透率仍然很低。含有较多粘土矿物的砂岩则有大量的微孔隙,其特征常常是高比面、小孔径、低渗透性和高含水饱和度,并且对淡水的粘土膨胀灵敏度增加。裂隙只占总孔隙空间的百分之几,但它将提高任何一种储集岩的渗透能力。无论是天然的或是人工的张开缝,它均能提高岩石的渗透率,特别是对只有微孔隙或孤立溶孔的岩石其作用最为明显。

孔隙类型及孔隙几何形状均随成岩作用而发生变化。如从大孔隙演变成微孔隙,矿物被溶解而形成孔隙,以及孔隙从部分到全部被沉淀矿物所占据。

此外,孔隙类型很少是单一的,大多数储集岩中有多种孔隙类型共存,构成不同的孔隙组合。在实际研究中,必须细心地在镜下区别所存在的孔隙类型及其数量。

为了实际应用的方便,可以把砂岩中的孔隙类型划分为以下七类,即:

(1) 粒间孔隙。砂岩为颗粒支撑或杂基支撑,含少量胶结物,在颗粒间的孔隙称为粒间孔隙。以粒间孔隙为主的砂岩储集岩,其孔隙大、喉道粗、连通性较好。无论从储集能力或渗透能力的观点来看,最好的砂岩储集岩是以粒间孔隙为主的。

(2) 杂基内的微孔隙。包括泥状杂基沉积在石化时收缩形成的孔隙及粘土矿物重结晶晶间孔隙,高岭土、绿泥石、水云母及碳酸盐泥杂基中均具此类孔隙。杂基内的微孔隙极为细小,宽度一般小于 $0.2\mu\text{m}$,在扫描电镜下方可清晰辨认。此种孔隙虽然可以形成百分之十几的孔隙度,但渗透能力极差。杂基内的微孔隙几乎在所有的砂岩中均有分布。

(3) 矿物解理缝和岩屑内粒间微孔。长石和云母等解理发育的矿物常见有片状或楔形解理缝,其宽度大都小于 $0.1\mu\text{m}$ 。有时可见到岩屑内的粒间微孔,数量极少。此类微孔隙的储集特征比杂基内的微孔隙更差,因为它常呈一端敞开的“死胡同孔隙”,故它一般是不含烃的无效孔隙。

(4) 纹理及层理缝。在具有层理和纹层构造的砂岩中,由于不同细层的岩性或颗粒排列方向的差异,沿纹理或层理常具缝隙,表现为渗透性的好坏具有方向性。但总的来看,因其数量少、规模小,故其储渗意义不大。

(5) 溶蚀孔隙。溶蚀孔隙是由碳酸盐、长石、硫酸盐或者其他可溶组分溶解而形成的。溶解性比较差的硅酸盐矿物或其他矿物,例如氧化物矿物组合,早期可被易溶矿物交代,后被溶解产生次生溶蚀孔隙。可溶组分可以是碎屑颗粒、自生矿物胶结物或者交代矿物。溶蚀孔隙又可以分成以下几种类型:

1) 溶孔 不受颗粒边界限制,边缘呈港湾状,形状不规则,有时很大甚至比邻近颗粒还要大;

2) 颗粒内溶孔和胶结物内溶孔 早期易溶矿物交代颗粒后被溶解形成粒内溶孔。如早期碳酸盐局部交代了长石,后来碳酸盐被溶解,致使长石具晶内溶孔或呈蜂窝状。此外,当介质条件变化时,胶结物组分亦可溶解形成胶结物晶内溶孔。

3) 铸模孔 包括颗粒的铸模孔和粒间易溶胶结物的铸模孔。

由于溶蚀孔隙往往是在原生粒间孔隙或其他孔隙的基础上发展起来的,故实际上不好区分。尤其是当原生粒间孔隙和次生溶蚀孔隙同时存在时,更是如此。仅具溶蚀孔隙的砂岩的储集性变化很大,可以从差到很好,它们仍然是由孔隙的大小和连通性来决定的。

(6) 晶体再生长晶间孔隙及成岩期胶结物充填未饱和孔、胶结物的晶间孔在许多致密砂岩中,石英的再生长明显地减少了原生的粒间孔隙,最后只在再生长的晶体之间保留了细小的四面体孔或片状缝隙(喉

道)。石英再生长可以很明显地降低孔隙空间和渗透能力,有时几乎可以填满全部孔隙。

在粒间孔隙中胶结物充填未满孔以及胶结物的晶间隙与晶体再生长的晶间隙其最后保留下来的形态都是一样的。这类孔隙一般不大,而且具片状喉道。其喉道的宽度大都只有零点几个微米,个别的也只有几微米,所以其储、渗条件均很差。

(7)裂缝孔隙。在砂岩储集岩中,由于构造力作用而形成的微裂缝有时可以十分发育。微裂缝呈细小片状,缝面弯曲,绕过颗粒边界,其排列方向受构造力控制。裂缝宽度则受残余构造水平应力场的控制。在砂岩储集岩中,裂缝宽度一般为几微米到几十微米。

仅由裂缝造成的孔隙度很小,通常小于1%,但能提高储集层的渗透能力。裂缝性储集层的初产量一般较高,如果没有良好的孔隙层,则产量很快就会下降。

上述砂岩储集岩的孔隙类型见图1-1-3。

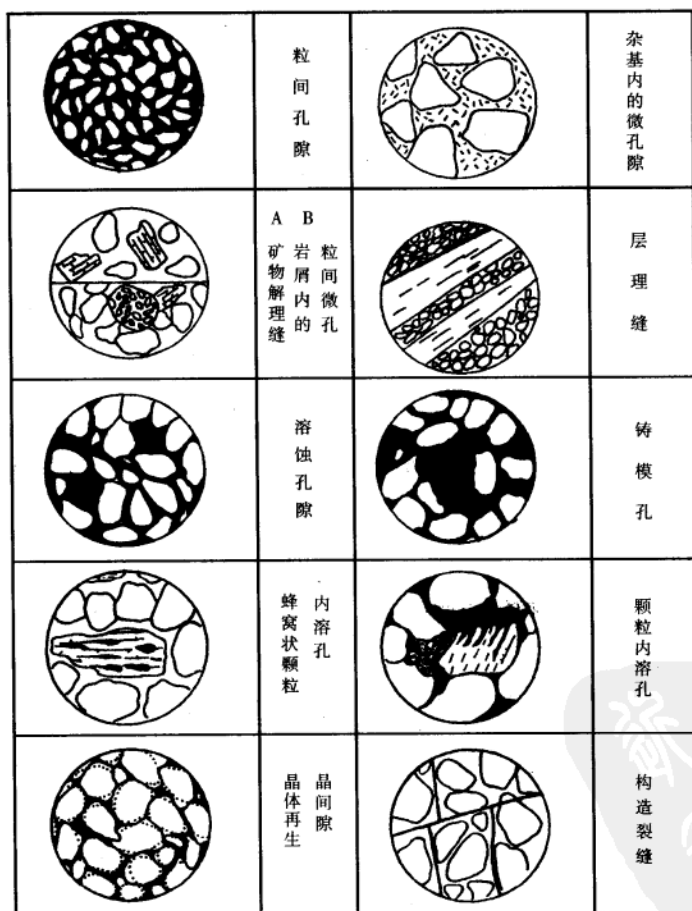


图1-1-3 砂岩储集岩的孔隙类型示意图

三、碳酸盐岩的孔隙类型

碳酸盐岩孔隙的分类及命名,乔奎特等(Choquette, P. W. & Pray, L. C., 1970)曾作了较为详细而深入的工作。他们按受组构控制及不受组构控制将碳酸盐岩孔隙划分为三大类十五种基本类型^[3],如图1-1-4所示。

他们认为,大多数碳酸盐岩仅具有微小的孔隙,但其孔隙空间对油气聚集作用却不相同。不同的孔隙类型具有不同的分布特征及含油气特点。因此,对孔隙类型研究就会有助于勘探部署,此外,在碳酸盐沉积物的成岩及后生变化过程中,孔隙的形成、变化和消失可以造成不同类型的孔隙。其中孔隙的大小和丰富程度对油气聚集有重要作用,并结合成因可作为主要的分类依据。

基本孔隙类型包括:

(1)原生孔隙 这是沉积时形成的孔隙,成岩过程中可能产生一定的变化。这种孔隙主要受碳酸盐岩的结构组分所控制,其中颗粒因素是主要的。有时原生孔隙也受到溶蚀作用影响,但如其孔隙仍保持基本的原始状态时,仍可将其划归为原生孔隙。原生孔隙可分为粒间孔隙、粒内孔隙、晶间孔隙、壳体掩蔽孔隙和生物骨架孔隙等五种。

(2)溶蚀孔隙 指沉积过程及成岩后由于溶解作用所形成的孔隙。地下水的溶解作用往往在沉积过程中就已开始进行,并延续到成岩作用结束。在这个阶段,地层中原生孔隙发育时,地下水大都比较活跃,并通过溶蚀而使孔隙进一步增加。成岩作用结束后,溶蚀孔隙仍可继续发育。尤其在不整合侵蚀面附近,由于处于渗流带及潜流带土部水文条件下,使得地下水在原生的孔隙发育带更为活跃。加上地表水的不断补充,因而在不整合面附近往往形成极为发育的溶蚀孔隙,有时可具有极高的产能。

溶蚀孔隙有以下几种类型:粒间及晶间溶蚀孔隙、铸模孔隙、窗格孔隙、沟道、晶洞、洞穴和角砾孔隙。

(3)生物钻孔和潜孔孔隙 这种孔隙多在沉积及成岩过程中形成,它对油气储集的意义是次要的。

(4)收缩孔隙 由于沉积物的收缩作用而形成的孔隙。这种孔隙在大气或水体条件下皆可形成。

(5)裂缝 裂缝一般是由于构造作用或成岩作用而形成的。在挤压盆地中,裂缝十分发育。裂缝的长度可以由几厘米到几公里不等。宽度也可由几毫米到几十厘米,但微裂缝的宽度仅数十微米。一般说来,大裂缝延伸远,方向稳定,与油气储集关系更为密切。

根据许多研究人员的意见,在1000m深度以下,裂缝宽度可能不超过0.1mm。裂缝孔隙度通常为0.5%~0.6%,很少超出1%~2%。若1000cm³正方体中有10条0.1mm宽的裂缝时,其裂缝孔隙度仅为1%。

对于含有许多任意分布裂缝的碳酸盐储集岩要进行数学描述是困难的。假定井筒周围地层中只有一条延伸一定距离的垂直裂缝,据马斯凯特(Masket M., 1949)计算,当裂缝宽度超过0.035mm时,裂缝地层的产能就超过无裂缝地层简单径向流动系统的产量;当裂缝宽度为0.5mm时,裂缝本身所运载的流体就占了灰岩-裂缝系统组合流量的90%;当裂缝宽度大于1mm时,绝大部分的油层流体是由裂缝通过的。由上可见,碳酸盐储集岩中裂缝发育的多少及宽度对产能的影响是何等的重要。

四、储集岩孔隙空间和孔隙结构的研究方法

不论是砂岩或是碳酸盐岩,它们的孔隙类型、喉道类型以及孔隙-喉道的配合关系,与储集岩有密切关系。流体沿着自然界复杂的孔隙系统流动时,将要经历一系列交替着的孔隙和喉道。无论在石油二次运移向孔隙介质中驱替在沉积期所充满的水时,或者是在开采过程中石油从孔隙介质中被驱替出来时,都受流体流动通道中最小的断面(即喉道直径)所控制。显然,喉道的大小和分布,以及它们的几何形状是影响储集岩的储集能力和渗透特征的主要因素。所有的孔隙都受与其连通的喉道所控制。

因此,确定喉道大小分布是研究储集岩孔隙结构的中心问题。



图 1-1-4 碳酸盐岩的孔隙分类命名

(据 Choquette; p. p. w. & pray, L. C., 1970)

可以将所有复杂形状的喉道断面都用一个等效的圆面积来近似。这样,每一支喉道都能相应地近似看作为一支毛细管。于是,各种测定毛细管压力的方法便可用来测定储集岩的喉道直径及该喉道所控制的孔隙体积占总孔隙体积的百分数。这种大小分布称为视孔隙大小分布,或称为孔喉大小分布。

目前在测定孔喉大小分布方面最流行的方法是水银注入法,或称为压汞法。它是根据水银对岩石是一种非润湿流体,在施加压力后,能克服岩石孔隙喉道的毛细管阻力的原理来测定岩石的孔喉大小分布的方法。这种方法具有快速、准确的优点。所测得的毛细管压力-水银饱和度关系曲线可以定量反映储集岩的孔隙喉道的大小分布。

研究真实孔隙大小分布的现代方法是定量立体学方法以及孔隙铸体(或薄片)的镜下统计法。前者是将伍德合金灌注在岩石的孔隙空间中去,溶蚀掉岩石后,对留下的孔隙空间结构的铸体用定量立体学方法恢复其三维空间结构,根据一定的数学解来确定真实的孔隙大小的体积分布。后者则是将染色树脂灌注到岩石的孔隙空间中去,树脂固结后,溶解掉岩石部分,对留下的孔隙空间铸体用扫描电镜观察研究。用这两种方法都可以直观地了解岩石孔隙空间的三维结构,并可量度其尺寸,是一种比较先进而成功的方法。

将灌注了染色树脂的岩石磨成薄片,在显微镜下观察研究,称为铸体薄片法,也是常用的方法。这种方法可以很方便地直接观察到孔隙、喉道及其相互连通、配合的二维空间结构。如果有计划地从各个方向来切取较多的薄片,也可以适当程度地了解岩石孔喉三维空间结构。

从孔隙铸体或者岩石铸体薄片,可以了解许多有关孔隙、喉道的特性。包括:孔隙类型、形状、测定平均孔隙直径、孔隙大小分布频率,确定孔隙-孔隙或孔隙-喉道的组合关系及孔隙-喉道的配合数,测量二维或三维的孔-喉直径比,等等。

描述真实孔隙大小分布的数学模型研究得尚少。Meyer(1952)曾提出使用泊松分布来定量描述真实孔隙大小分布。

近年来,已逐步开展了视孔隙大小分布和真实孔隙大小分布的综合研究。Wardlaw (1976)提出了岩石的平均孔-喉直径比,Dullien (1972)提出了岩石的结构难度指数。这些综合参数都是研究储集岩的储集性和石油采收率的重要参数。可以将孔隙结构的研究方法和内容概括在表 1-1-1 内。储集岩的孔隙结构实质上是岩石的微观物理性质,它比仅仅研究统计量的常规物性更为深入而细致。由于储集岩的孔隙结构十分复杂,因此,常规物性不一定能完全反映岩石的储集特征。而只有增加对孔隙结构的了解才能正确地反映其储集性和渗滤特征。

本节介绍了储集岩孔隙空间和孔隙类型的基本情况,为研究岩石物理参数提供了地质基础。

表 1-1-1 储集岩孔隙结构的研究方法、类型、数学分布及各种物理参数表

类型	研究方法及内容		孔喉特征描述及定量物理参数	数学模型		综合研究参数
	方法	内容		分布	参数	
视孔喉大小分布	测定毛管压力	注入曲线	排驱压力——最大连通孔喉半径 饱和度中值毛管压力——近似平均孔喉半径 最小非饱和的孔喉百分数 平均毛管压力——平均孔喉半径	正态分布	均值 分选 峰态 歪度 峰值	平均 孔-喉直径比
		退出曲线 (吸入曲线) 重新注入曲线	孔喉分选系数 喉道体积 孔隙加喉道的总体积 退出效率 阻滞迟后及捕集迟后	地质混合经验分布	均值 分选 变异系数 歪度	
真实孔隙大小分布	孔隙铸体	普通岩石铸体薄片 孔隙铸体薄片 孔隙铸体薄片	孔隙类型、形状 平均孔隙直径 孔隙大小分布频率 孔隙-喉道配合数 孔隙-喉道组合关系 二维孔-喉直径比	泊松分布		结构难度指数

第二节 储集岩的孔隙度

具有各种形状固体物质的颗粒组成沉积岩石,它们的固结程度各不相同,其间则存在孔隙空间,就是这些孔隙空间有可能包含流体,如像水、液态或气态碳氢化合物,这些流体可以沿着孔隙空间流动。在这种情况下,岩石被称为多孔性的和可渗透的。

一、储集岩孔隙度的概念

为了衡量储集岩孔隙性的好坏和孔隙发育程度,并表征岩石中孔隙总体积的大小,提出了岩石孔隙度(或孔隙率)的概念^{[4][5]}。

储集岩孔隙度可定义为岩石孔隙的总体积 V_p 与岩石总体积 V_r 之比,用希腊字母 φ 表示,一般为百分数,其表达式为:

$$\varphi = \frac{V_{\text{孔隙}}}{V_{\text{岩石}}} \times 100\% = \frac{V_p}{V_r} \times 100\% = \frac{V_p}{V_s + V_p} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中, φ ——孔隙度, %;

V_r ——储集岩的总体积, cm^3 ;

V_p ——孔隙体积, cm^3 ;