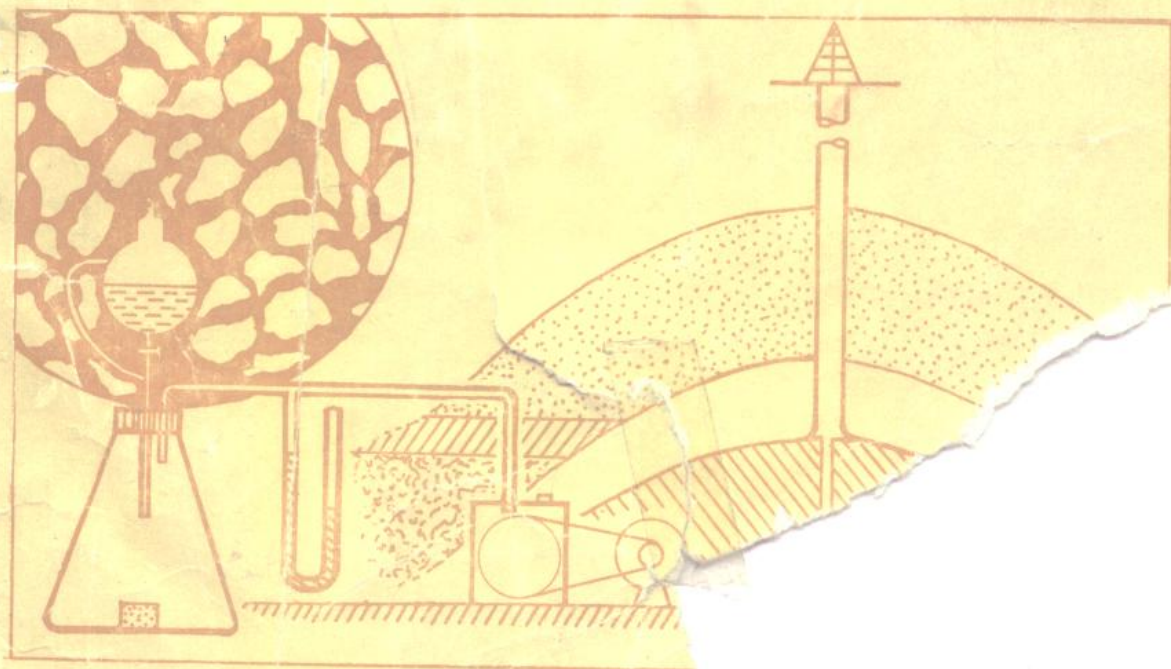


高等学校教材

油层物理

罗蛰潭 主编



地质出版社

高等学校教材

油 层 物 理

罗 蛰 潭 主 编

地 质 出 版 社

内 容 简 介

本书主要讲述储油气岩石、油层流体及储油气岩石饱和多相流体时的物理性质，扩大层石油采收率的基本原理以及渗层物理在石油地质中的应用等内容，并附有基本实验及习题。

本书主要作为高等院校石油地质专业教材，也可供从事石油地质、勘探和开发的地质工作者、科学研究人员以及中等专业学校和职工大学等有关专业的师生参考。

高等学校教材 油 层 物 理

罗登潭 主编

*

责任编辑：曲志浩

地质出版社出版

（北京西四）

妙峰山印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本：787×1092 1/16 印张：19 1/2 字数：459,000

1985年9月北京第一版·1985年9月北京第一次印刷

印数：1—3,685册 定价：3.85元

统一书号：13038·教216

52467/02

前言

《油层物理》是按照地质矿产部石油地质教材编审委员会下达的统编教材任务，由成都地质学院石油地质系、武汉地质学院勘探系及西北大学地质系有关教师组成编写组负责编写的高等地质院校教材。本书可作为四年制石油地质专业教材，也可供从事石油地质、勘探及开发的地质工作者和科学研究人员参考。

全书共分五章，包括储油气岩石的物理性质，油层中流体的物理性质，饱和多相流体时的储油气岩石物理性质，提高油层石油采收率的基本原理以及油层物理在石油地质中的应用。这样的内容安排是参照三个院校解放后三十余年从事油层物理课程教学的经验及严格按照石油专业教材编审委员会1982年成都会议通过的教学大纲进行的。在初稿完成后，编写组又于1983年在成都地质学院召开会议，进行交互审查及交换意见，在认识一致的前提下，分别对各章初稿进行了大量的修改及补充，最后由主编进行统一增删及修改完稿。

由于历史原因，本书仍采用以国际单位制暂时并用的单位，且均用文字符号书写，书中引用的国外实例未换算成国际单位，其换算关系见附表。敬请读者原谅。

本书由成都地质学院罗蛰潭教授主编。王允诚同志编写第一章的第一、七节，第五章及基本实验；杨训庭同志编写第一章的二、三、四、五、六节及第四章；武汉地质学院张博全同志编写第二章；西北大学曲志浩同志编写第三章。为了有利于教学的进展由成都地质学院董继芬同志编写了习题。成都地质学院陈庸勋高级工程师及四川石油管理局石油勘探开发研究院高连云、孔金祥工程师对本书作了全面审定，提出了不少宝贵建议及修改意见。

教材编写过程中，地质矿产部石油地质教材编审委员会给予了大力支持及指导；成都地质学院、武汉地质学院和西北大学绘图室分别绘制了全部插图；成都地质学院石油系的有关同志作了清抄和校对等辅助工作。在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中一定有不少缺点和疏漏之处，衷心欢迎读者批评指正。

编者

1984年元月

目 录

第一章 储油气岩石的物理性质	(1)
1—1 储集岩的孔隙空间和孔隙类型.....	(1)
1—2 储集层岩石的孔隙度.....	(14)
1—3 储集层岩石的渗透性.....	(24)
1—4 储集层岩石的油、气、水饱和度.....	(40)
1—5 储集层岩石的其它物理性质.....	(49)
1—6 岩石的铸体技术.....	(61)
1—7 影响储集岩物理性质的地质因素.....	(65)
参考文献.....	(73)
第二章 油层中流体的物理性质	(75)
2—1 油层烃类体系的相态特征.....	(75)
2—2 天然气的物理性质.....	(83)
2—3 地层原油的物理性质.....	(100)
2—4 地层水的物理性质.....	(115)
2—5 油层流体的高压物性研究.....	(118)
2—6 相态方程的基本概念.....	(125)
参考文献.....	(129)
第三章 饱和多相流体时储油气岩石的物理性质	(130)
3—1 表面张力.....	(130)
3—2 吸附作用.....	(136)
3—3 润湿性.....	(140)
3—4 毛管压力.....	(146)
3—5 岩石毛管压力测定方法.....	(153)
3—6 毛管压力曲线.....	(160)
3—7 毛管压力资料在孔隙结构研究中的应用.....	(169)
3—8 相对渗透率.....	(176)
参考文献.....	(188)
第四章 提高油层石油采收率的基本原理	(190)
4—1 提高油层石油采收率的基本概念.....	(190)
4—2 油层中的残余油饱和度与石油采收率.....	(203)
4—3 二次和三次采油.....	(213)
参考文献.....	(226)
第五章 油层物理在石油地质中的应用	(227)
5—1 油层物理在石油地质中的应用.....	(227)

5-2 应用油层物理参数对储集岩分类和评价	(237)
5-3 油层物理在油田开发中的应用	(255)
参考文献	(266)
油层物理基本实验	(268)
测定岩石物理性质的准备工作	(268)
岩样的抽提	(268)
实验一 饱和煤油法测定岩石连通孔隙度	(269)
实验二 岩石气体渗透率的测定	(271)
实验三 岩石油、气、水饱和度测定	(273)
实验四 岩石比面的测定	(275)
实验五 液体表面张力的测定	(277)
实验六 半渗透隔板法测定孔隙大小分布	(279)
实验七 压汞法测定岩样的孔喉大小分布	(280)
实验八 岩石铸体薄片的制备和鉴定	(283)
实验九 储油岩石的润湿性	(284)
油层物理习题	(285)
第一章习题(1—20题)	(285)
第二章习题(21—64题)	(287)
第三章习题(65—100题)	(293)
习题答案	(302)
附表 本书使用单位与法定计量单位的换算表	(306)

第一章 储油气岩石的物理性质

1-1 储集岩的孔隙空间和孔隙类型

1-1-1 储集岩的孔隙空间和孔隙结构

岩石中未被矿物颗粒、胶结物或其它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，而仅仅在二个颗粒间连通的狭窄部分称为喉道。在各类化学著作中，将各类固体催化剂中的孔隙称为膨体，而将喉道称为缩颈。在某些岩石微观结构的专著中亦引用了膨体和缩颈的名词，但不论其称呼如何变化，其含意是相同的。

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。

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。

与砂岩相比较，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。

碳酸盐岩储集层的储集性能主要受孔隙、洞穴和裂缝三个因素控制。实际上，碳酸盐岩的储集空间往往是由上述三组空隙空间系统所构成。孔隙可以容纳油气，并在一定程度上起到连通作用，而裂缝如有好的连通性，则可造成储集层的高渗透带。在不少的情况下，裂缝和洞穴也是重要的储油气空间。

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、分布及其相互连通关系。

流体沿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从孔隙介质中驱替在沉积期间所充满的水时，或者是在开采过程中石油从孔隙介质中被驱替出来时，都受到流体通道中最小的断面（即喉道直径）所控制。显然，喉道的大小、分布以及它们的几何形状是影响储集岩的储集能力和渗滤特征的主要因素。因此，喉道和孔隙的大小、分布及几何形态就是储集岩孔隙结构研究的中心问题。

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、裂缝等次生孔隙发育，其孔隙结构有特殊性。通常，在各种碳酸盐储集岩中，孔隙结构是指岩石所具有的孔、洞、缝的大小、形状及相互连通关系。

1-1-2 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，裂隙则可与其它任何孔隙共生。

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、硫酸盐或其它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。对低渗透岩块来说，当具有互不连通的溶孔时，它仍然是低渗透性。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，低渗透性以及高残余水饱和度，并且对淡水的粘土膨胀灵敏度增加。裂隙只占累计孔隙空间的百分之几，但它将提高任何一种储集岩的渗滤能力。无论是天然的还是人造的张开缝，它对仅仅具有微孔隙或孤立溶蚀孔隙的储集岩来说，都是必要的渗滤通道。

孔隙类型及孔隙几何形状均随成岩作用而发生变化。如从大孔隙变成微孔，矿物溶解而产生孔隙，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。大量微孔隙和部分连通的大孔隙所构成的砂岩是一种特殊的例子。它属于两套孔隙系统的叠合，微孔中是水，而大孔中可以是油，并且具有产纯油的能力。因此，当实际储集岩中具有复杂的孔隙类型时，必须仔细研究。

砂岩储集岩中常见的孔隙类型的详细描述如下：

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。此为砂岩储集岩中最主要、最普遍的孔隙类型。它受砂岩成分及组构的控制。是砂岩的粒度、分选、颗粒球度、圆度、颗粒方位和填集因素变化的结果。这种孔隙的分布直接与沉积环境有关，经成岩后生作用而发生变化。

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滤能力的观点来看，最好的砂岩储集岩是以粒间孔隙为主的。它一般都具有较大的孔隙度（大于20%）和渗透率（大于100毫达西）。

我国大庆油田第三系产层的细砂岩、苏北下第三系阜宁组的部分产层、陕甘宁盆地马岭地区的侏罗系产层以及河南、山东等第三系产层的砂岩储集岩均以粒间孔隙为主。

典型的粒间孔隙的镜下素描如图1-1所示。

2. 杂基内微孔隙

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。杂基内微孔隙极为细小，宽度一般小于0.2微米，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，这是由于喉道细的缘故。杂基内微孔隙几乎在所有的砂岩中均有分布。典型的杂基微孔隙的镜下素描图如图1-2所示。

皮特曼(Pittman, E.D., 1979)提出将孔隙直径小于0.5微米的孔隙称为微孔隙。据他的观察，一般很窄的喉道常与小孔隙相联系，对于非常小的喉道而连通着较大孔隙的情况，相对来说是不常见的。

泥质砂岩都普遍有显著的微孔隙，其渗透性极差，这类具有小孔径和高表面积的岩石中，残余水饱和度也很高。除非有发育的裂缝存在，否则很难有较大的自然产能。

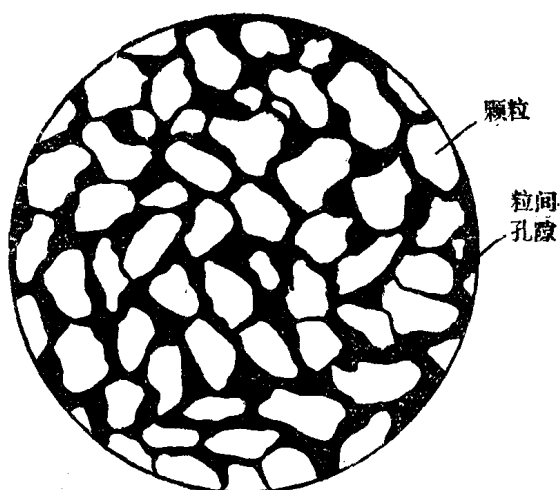


图 1-1 粒间孔隙的镜下示意图

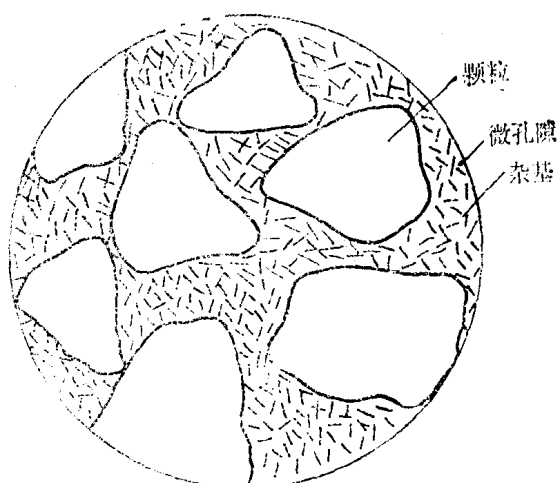


图 1-2 杂基内微孔隙的镜下示意图

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微米。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微孔隙更差。由于此类孔隙常呈一端敞开的“死胡同孔隙”，故它一般是不含烃的无效孔隙。其典型的镜下素描图如图1-3所示。

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。典型的层理缝示意图见图1-4。总的来说，其储集意义不大。

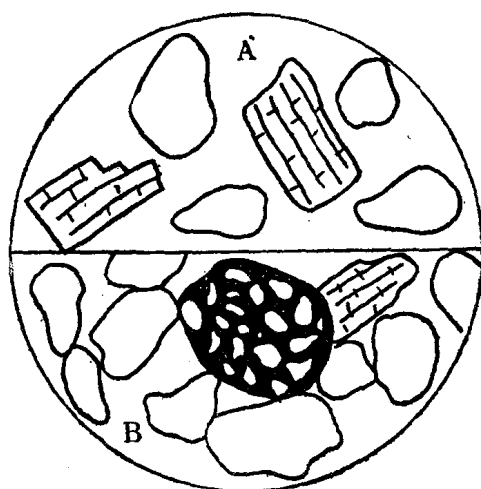


图 1-3 矿物解理缝A和岩屑内粒间微孔B的镜下示意图

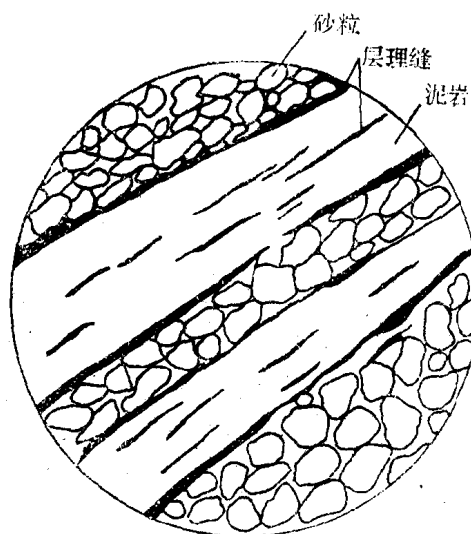


图 1-4 砂岩内层理缝示意图

5. 溶蚀孔隙

溶蚀孔隙是由碳酸盐、长石、硫酸盐或者其它可溶组分溶解而形成的。对溶解性比较差的硅酸盐矿物或其它矿物，例如氧化物矿物组合，早期可被易溶矿物交代，然后被溶解

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。溶蚀孔隙又可分成以下几种类型：

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，甚至比邻近的颗粒大得多。在同一块样品中溶蚀作用不完全的地方可见到易溶组分的残余。苏北下第三系阜宁群三段上砂组就见有溶孔发育的特征。砂岩内溶孔的特征见图1-5。

铸模孔 包括颗粒的铸模和粒间易溶胶结物的铸模。新疆乌尔禾系砾石间的方沸石铸模孔是十分典型的例子。铸模孔的示意图，见图1-6。



图 1-5 砂岩内溶孔的典型特征示意图
(图中黑色区为溶孔、颗粒具港湾状边缘)

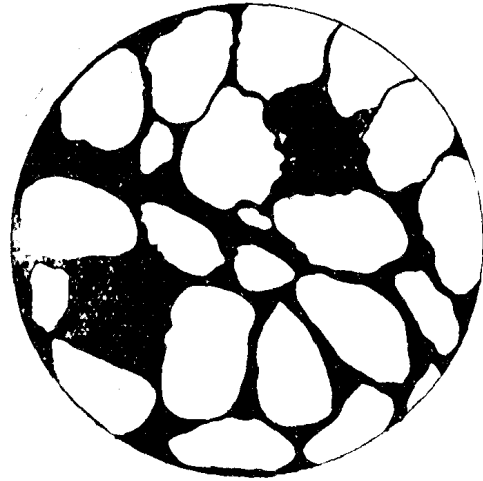


图 1-6 铸模孔示意图
(取代颗粒位置的黑色部分，为铸模孔)

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。这种孔隙相当普遍。在川中香溪群砂岩及陕甘宁盆地侏罗系产层中均可见到。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。图1-7为颗粒内溶孔及蜂窝状颗粒的示意图

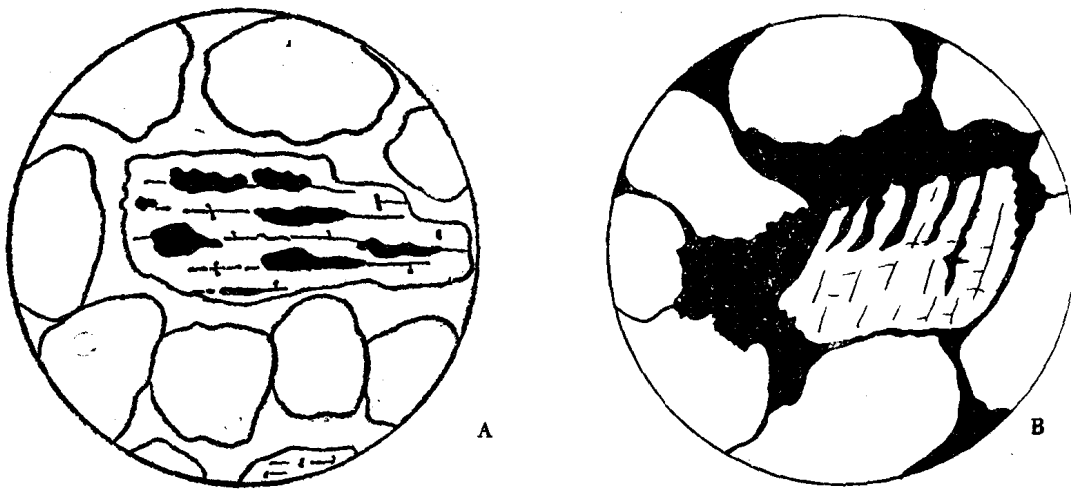


图 1-7 颗粒内溶孔(B)及蜂窝状颗粒(A)示意图
(黑色为孔隙)

意图。

由于溶蚀孔隙往往是在原生粒间孔或其它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它们的连通性所决定。仅具溶蚀孔隙的砂岩中假如可溶矿物是分散的,那么砂岩的基块渗透性极低,甚至无法测量,因为可溶矿物的溶解只构成了微孔道相连通的分散孔隙。如果可溶矿物丰富到足以连接起来的程度,当受到溶解时,就会有良好的渗透性。碳酸盐胶结物被溶解而形成次生粒间溶孔的地方,可以形成良好储集性砂岩。

皮特曼(Pittman, E.D., 1979)的看法是,由长石溶解(或者是交代了长石的碳酸盐的溶解)而形成的孔隙在全世界范围内所有时代的砂岩中都很普遍。溶解作用可以影响长石颗粒的一部分,或者实际上是整个颗粒溶解。如果砂岩中有丰富的长石,大量的孔隙空间能以此种方式产生。

6. 晶体再生长晶间隙及成岩期胶结物充填未溶孔、胶结物的晶间孔

砂岩中常有很丰富的石英胶结物,其含量可从1%到28%。在没有方解石胶结物的地方,颗粒接触点(即压力传递点)上有明显的溶解作用,造成颗粒的缝合线接触以及相互嵌入。在颗粒具有粘土膜和粘土边的地方,促进了溶解物质的扩散,而增强了这种压溶作用。从压溶点上释放出来的二氧化硅转移到低压点,形成石英次生加大。石英加大大约在500—1000米的埋藏深度开始发育。

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。四川上三迭系香溪群的长石石英砂岩中石英再生长发育(埋藏深度为三千米左右),大部呈镶嵌接触,只局部保留了一些片状晶间孔隙和细小的四面体孔(或多面体孔)。孔隙度降到5—9%,渗透率只有0.1—0.5毫达西左右。

一般来说,石英再生长的深度下限可能在6000米左右,而在2000米左右发育最完全。但在饱和烃的砂岩中,石英再生长会被抑制。此外,石英的再生长可以阻止砂岩被压实。

在粒间孔隙中胶结物充填未溶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,而且具有片状的喉道。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。

晶体再生长晶间隙的典型示意图见图1-8。

7. 裂缝孔隙

在砂岩储集层中,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。在砂岩储集层中,裂缝宽度一般为几微米到几十微米。

裂缝孔隙最多提供百分之几的孔隙度,但将提高任何砂岩储集层的渗透能力。因为粒间孔隙是相互连通的,所以除了性质很差的以外,即使没有裂隙也可成为合适的储集岩。具显著微孔隙或孤立溶孔的砂岩储集岩特别需要裂缝,无论是天然的或人造的,都可以成为主要渗透通道。

仅由裂缝造成的孔隙度很小,通常小于1%,这类储集层的特征是初产量高,随后就急剧下降。

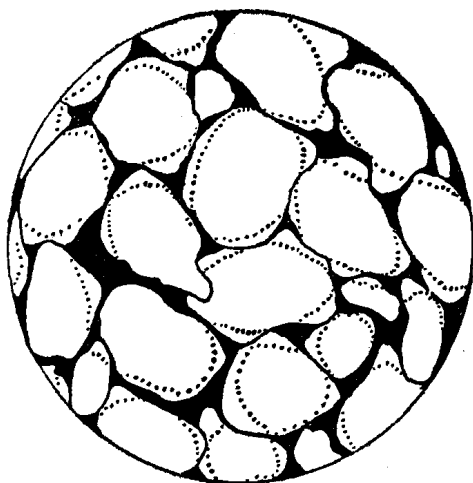


图 1-8 晶体再生长晶间隙的典型示意图
(黑色为晶间孔隙，虚线外的白色部分为石英加大)

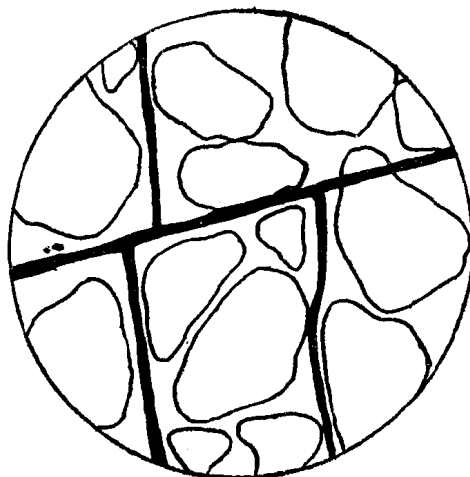


图 1-9 构造裂缝示意图
(黑色粗线为裂缝孔隙)

各种收缩裂缝，包括那些由于岩石组分或岩石收缩引起的应力而形成的裂缝，其成因虽然与构造裂缝截然不同，但其形态和对储集岩产能的作用却与构造裂缝相同。虽然它们为数很少，但对储集岩的渗透能力却有一定的改善。

老君庙油田M层，基块孔隙度约为10—18%，基块渗透率从小于一毫达西到几十毫达西。由于其垂直裂缝发育，使它具有产纯油的能力而有工业价值，初期单井日产量有的可达几十吨石油。

典型的构造裂缝示意图见图1-9。

以上所述的孔隙类型可以按其成因概括在表1-1中。

表 1-1 砂岩的孔隙类型及成因

类	型	成 因
原生或沉积的	粒间孔	沉积作用
	纹理及层理缝	
次生或沉积后的	溶孔、铸模孔、颗粒内溶孔和胶结物内溶孔	溶解作用
	晶体再生长晶间孔	压溶作用
	裂缝孔隙	构造作用
	颗粒破裂孔隙、收缩孔隙	岩石的破裂和收缩
混合成因的孔隙	微孔隙	复合成因

施密特等(Volkmar Schmit & D.A. Mc Donald, 1979)将砂岩次生孔隙分为以下五种结构类型：粒间孔隙、跨粒缘孔隙、铸模孔隙、组份内孔隙、破裂孔隙。

1-1-3 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研究工作。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, 如图1-10所示。

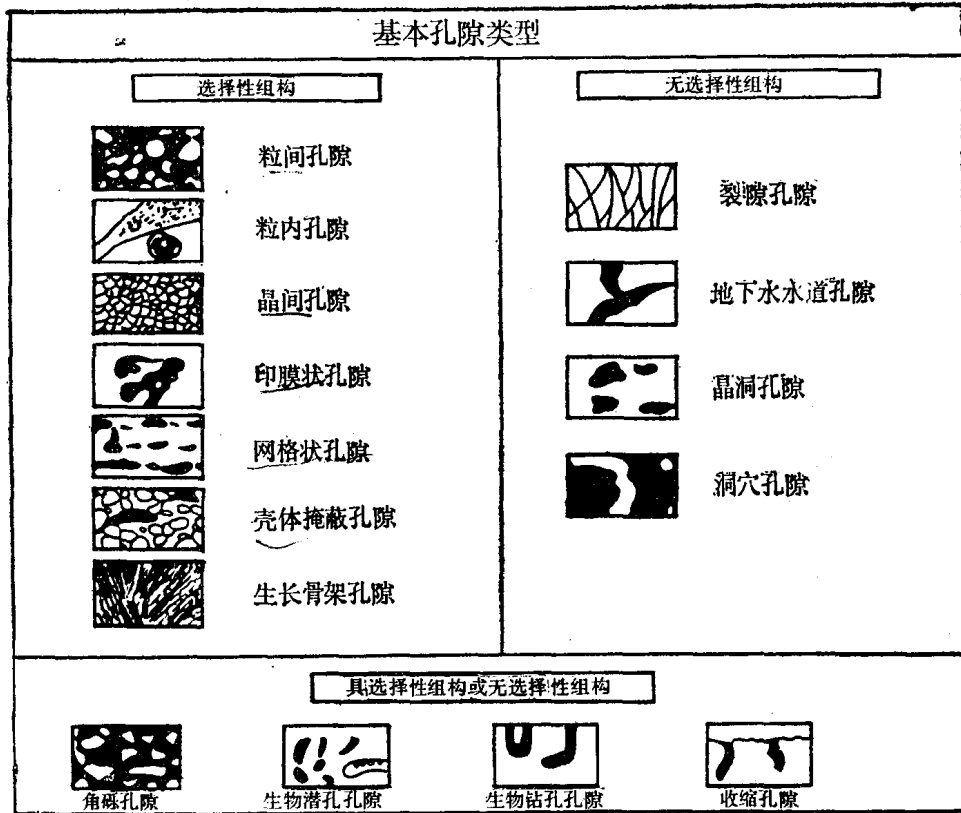


图 1-10 碳酸盐岩的孔隙分类及命名
(据 Choquette, P.W. & Pray, L.C., 1970)

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, 对孔隙类型的了解就会有助于勘探布署。在碳酸盐沉积物的成岩及后生变化过程中, 由于物理—化学条件的变化, 其中的孔隙会产生一系列的变化, 包括孔隙的形成、变化和消失。因此, 必须了解碳酸盐岩及其孔隙的成因, 亦即了解从原始沉积物到碳酸盐岩及其孔隙的发育过程, 必须对不同阶段的孔隙分布情况给予正确的认识。这样才可以进一步认识与所含流体之间的相互关系, 从而考虑对它的开采方法。此外, 孔隙的大小和丰富程度对油气聚集也有很重要的关系。因而, 基本孔隙类型、成因、直径以及孔隙的丰富程度应作为主要的分类依据。

基本孔隙类型可划分出十五种(图1-10), 其中有几种是常见类型, 其它则为比较特殊的类型。

根据基本孔隙类型及其成因, 可以对碳酸盐岩的孔隙作如下描述*。

1. 原生孔隙

• 《碳酸盐岩油气地质》燃化科技资料, 1973年第2期

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份所控制，其中颗粒因素是主要的。在碳酸盐岩成岩过程以及成岩以后，岩石皆可受地下水溶蚀而形成孔隙(或充填)。这在碳酸盐岩中是普遍存在的，有时这种溶蚀孔隙与原生孔隙同时存在。如果溶蚀作用轻微，当孔隙仍保持基本的原始状态时，仍可将其划归为原生孔隙。

原生孔隙可以分为粒间孔隙、粒内孔隙、晶间孔隙、壳体掩蔽孔隙和生物骨架孔隙五种。

粒间孔隙 系指颗粒含量在岩石中占主要地位时(大于50—60%)，它可形成颗粒支撑，其空间未被灰泥或胶结物所充填的部分即为粒间孔隙。灰泥及胶结物少，分选及圆度好时，有利于粒间孔隙的发育。

粒内孔隙 它是颗粒沉积前已存在的孔隙。这种孔隙是由于生物死亡后，软体部分腐烂分解所出现的空间。这种孔隙单独形成储集岩的情况较少。在很多情况下，它与粒间孔隙伴生，共同形成储集岩。

晶间孔隙 是碳酸盐晶体之间形成的孔隙。主要是重结晶作用所形成，因而孔隙都比较规则。一般情况下，主要表现为泥晶转变为亮晶过程中所形成的孔隙。它可以在成岩以后形成，也可以在沉积过程中发生。此外，晶洞孔隙也包括原地生长的石盐晶体和其它蒸发矿物之间的孔隙。

壳体掩蔽孔隙 是由于壳体或壳体碎片沉积后起了掩蔽作用，阻止了较小颗粒、胶结物及灰泥进入掩蔽空间，从而形成的孔隙。

生长骨架孔隙 是由于生物造礁活动而形成的骨架空间。这种空间在没有或局部充填的情况下，往往形成大量孔隙。造礁生物包括群体珊瑚、藻类、海绵、层孔虫、厚壳蛤等多种生物。它经常形成良好的储集空间。

颗粒石灰岩有时有丰富的粒间孔隙。世界最大的沙特阿拉伯加瓦尔油田主要产层上侏罗统阿拉伯组D层的颗粒石灰岩主要由碎屑颗粒、球粒及鲕粒组成。D层厚30—45米，产层深度为2000米，孔隙度为21%，渗透率达4达西，单井平均日产油为1600吨。

世界上生物礁大油田很多，油气主要储集在生物骨架孔隙中。如美国二叠系盆地的马蹄环礁油区克勒—富德油田产油礁岩厚70米，孔隙度最大为10.03%(平均为7.11%)，水平渗透率为30.6毫达西。该油区最大油柱高230米，地质储量4亿吨。是一个大型的生物礁油田，估计其采收率可达51.7%。

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上部水文条件下，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。

粒间及晶间溶蚀孔隙 是由于颗粒之间和晶间的胶结物或灰泥被溶解所形成的孔隙。

它与晶洞的区别在于颗粒和晶体本身受到溶蚀作用较少。这种选择性的溶蚀主要是由于地下水沿亮晶之间或灰泥收缩空间的运动造成。

印模孔隙 是地下水将颗粒组份部分或全部溶去所形成的孔隙。这种选择性溶蚀是由于颗粒化学组份所决定的。印模孔隙有时可形成比较重要的储油气空间。这种孔隙主要发育在由化石或颗粒组成的岩石中，有时一些石膏或盐的晶体受溶解后也可形成。化石层、生物礁、鲕粒及球粒碳酸盐岩易于形成这种孔隙。

网格孔隙 它的形成主要取决于岩石组构情况。孔隙一般多呈扁平状平行于岩石的纹层或层面分布，但有时亦呈球形、鸟眼状或不规则状，有时亦作垂向延伸。因而，一些分隔的网格孔隙往往形成连通性很好的储集层，尤其在裂缝发育的层系中，这种现象更为明显。此外，这种选择性溶蚀作用主要是沿高孔隙带进行，因而粗粒碳酸盐岩就具有形成网格孔隙的良好条件。

地下水水道孔隙 由于地下水活动而形成的连通水道。大多数沿层理分布，有时被后生沉淀物所充填或部分充填。它在储集层中虽然对孔隙度的贡献是次要的，但对渗透率的贡献有时可以很大。

晶洞孔隙 其溶蚀作用不受岩石组构所控制，一般直径为十六分之一毫米到十厘米，其连通情况决定了这种孔隙的重要性。

洞穴孔隙 其成因与晶洞相同，一般直径为十厘米以上，这种空间在喀斯特区特别发育。在溶蚀型油气田钻探过程中，常发生“放空”现象。这种现象一般与洞穴有关，常说明有高产层存在。洞穴有时很大，可达2米，甚至更大。

角砾孔隙 是由断裂作用及塌陷作用形成角砾状破裂而造成的孔隙。其成因不一，所形成的角砾孔隙形状和大小均各不同，差异很大。

在碳酸盐岩地层中，溶蚀型孔隙是普遍的。利比亚锡尔特盆地的泽勒坦油田，就是一个溶蚀孔隙高度发育的实例。该油田的产层属第三系古新统的泽勒坦段，产层厚110—120米，最高孔隙度可达35%，单井平均日产在1000吨以上，石油可采储量为3亿吨。

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。裂缝的长度不一，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，大的裂缝延伸远，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，在一千米深度以下，裂缝宽度可能不超过0.1毫米。裂缝孔隙度通常为0.5—0.6%，很少超出1—2%。若一千立方厘米正方体中有10条0.1毫米宽的裂缝时，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，据梅斯凯特(Masket, M., 1949) 计算，当裂缝宽度超过0.035毫米时，裂缝地层的产量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0.5毫米时，裂缝本身所能运载的流体就占了灰岩—裂缝系统组合流量的90%；

当裂缝宽度大于一毫米时，绝大部分的油层流体是由裂缝通过的。

由此可见，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重要。同样，也可以认识到，在碳酸盐储集层中通过酸化、压裂制造人工裂缝对改造低渗透含油气层的重要意义。

以上介绍了乔奎特和普雷(Choquette, P.W. & Pray, L.C., 1970) 所提出的十五种基本孔隙类型的简单情况。碳酸盐岩孔隙由于控制因素较多，故其命名也较为繁琐。孔隙命名主要根据为：基本孔隙类型 + 成因 + 直径 + 丰富度(孔隙度)等四项。可以根据孔隙的主要特征，择其要点进行命名，例如：原生中粒内孔隙(4.5%)；溶解扩大原生微晶间孔隙(7%)。

菲希特鲍尔(Füchtbauer, Hans, 1975)对上述分类命名作了简化处理。他的分类见表1-2。各种孔隙类型的示意图见图1-11。

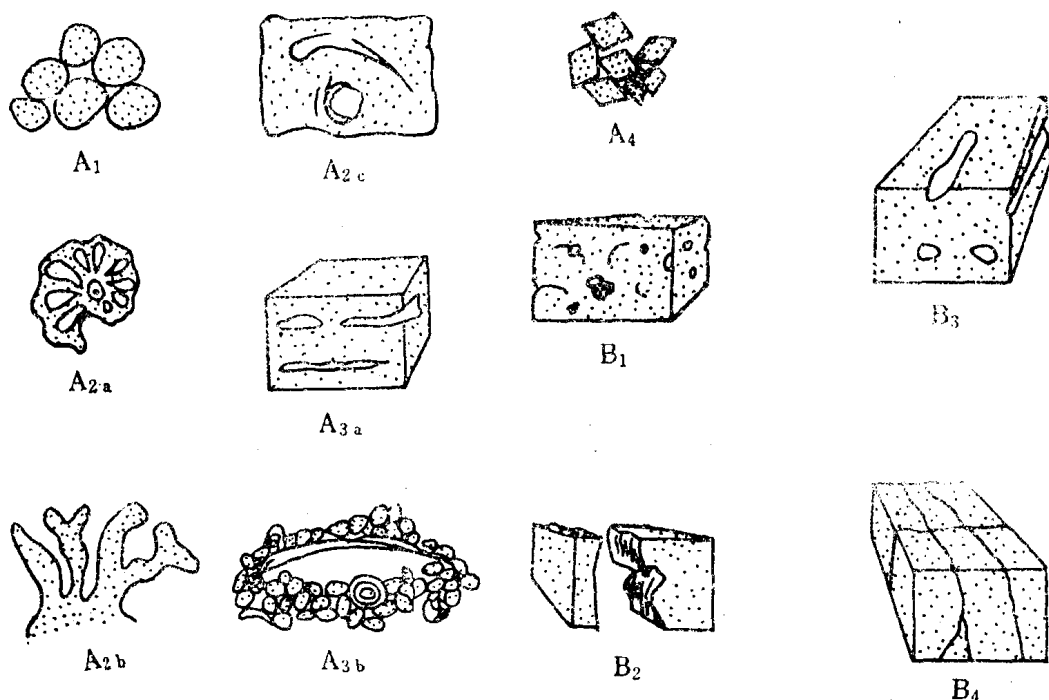


图 1-11 碳酸盐岩孔隙分类图解
(据Füchtbauer, Hans, 1975)

默雷(Murray, R.C., 1960)按成因将孔隙进行分类，他把糖粒状白云岩孔隙单独划为一类，也是一种相当成功的分类。他的分类比较简练，表1-3就是他按成因的孔隙分类。

糖粒状白云岩是碳酸盐储集岩的一种重要类型。白云岩的成因及具有发育的孔隙空间使白云岩的研究成为一个重要领域。灰岩被白云岩的分子置换后使其体积收缩12—13%。如果方解石转换成白云石是严格按照分子与分子置换的基础上进行，并假定没有压实作用，必然导致一定程度的孔隙增加。但在某些情况下，有相当证据说明方解石转换成白云石属于体积置换，这样自然就不会引起任何孔隙空间的变化。糖粒状白云岩中晶粒大小的范围由小于5微米到大于100微米，但储集岩中最普遍的晶粒大小为25到50微米。

除了上述分类以外，阿尔奇(Archie, G.E., 1952)按基质结构及孔隙大小来探讨碳酸

表 1-2 菲希特鲍尔(Füchtbauer, Hans, 1975)的孔隙分类表

A受结构控制的	B不受结构控制的(沉积期后)
1. 粒间孔(生因与沉积期间) 2. 粒内孔 a. 房室孔或骨骼内孔(沉积期前) b. 生长骨架孔 c. 铸模孔(沉积期后) 3. 窗孔及遮蔽孔(同生期) a. 窗孔 b. 遮蔽孔 4. 晶间孔	1. 溶孔 (偶而为结构选择性) 2. 洞穴 (具有人孔或人孔以上的洞穴) 3. 沟槽 (二维或三维的显著长形孔隙长度与平均横截面积的直径比超过10, 有机或无机成因均有) 4. 裂缝

表 1-3 默雷(Murray, R.C., 1960)按成因的孔隙分类表

1. 原生孔隙	a. 骨架孔隙 b. 石化碳酸盐泥孔隙 c. 碳酸盐砂粒孔隙
2. 次生孔隙	主要由溶解作用扩大了原来存在的孔隙、节理、层面、裂缝面及不整合面都可以是溶解作用的通道
3. 糖粒状白云岩孔隙	

表 1-4 义和庄油田(奥陶系)主要储集类型表①

储 集 类 型	岩 性	含油情况
孔隙型	粒间孔隙	均匀含油
	晶间孔隙	斑状含油
孔洞型	溶蚀洞(特大—微)	洞孔含油
	脉间洞	不含油
裂缝型	开启缝(大—微)	缝间含油
	充填缝(宽—细)	不含油
	层间缝	层间油浸
	压溶缝、缝合线	不含油

① 据“义和庄油田奥陶系碳酸盐岩储层分布规律及其渗滤条件分析”，张秉政(1979)