

美国石油地质学家协会进修丛书(十二)

沃马克·施密特 戴维 A. 麦克唐纳著

砂岩成岩过程中的 次生储集孔隙

石油工业出版社

美国石油地质学家协会进修丛书(十二)

砂岩成岩过程中的 次生储集孔隙

沃克马·施密特 戴维A.麦克唐纳 著

陈荷立 汤锡元 译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书为美国石油地质学家协会进修丛书之十二。书中介绍了砂岩次生孔隙的成因-结构类型、识别标志、形成原因以及在不同成岩作用阶段的分布。并在此基础上着重探讨了砂岩在成岩作用中期结构的演化,及其在该阶段脱碳酸盐化孔隙的形成、分布与油气生成聚集的关系,以及具次生孔隙储集层的特征。书中并附有孔隙分布的实例和大量次生孔隙结构的显微照片。本书可供石油地质、沉积岩石学专业技术人员及有关院校师生参考。

AAPG Continuing Education Course Note Series *12
Secondary Reservoir Porosity in the
Course of Sandstone Diagenesis
Volkmar Schmidt and David A. McDonald
Offered by the AAPG Education Department

*

美国石油地质学家协会进修丛书(十二)
砂岩成岩过程中的次生储集孔隙

沃克马·施密特 戴维A.麦克唐纳 著
陈荷立 汤锡元 译

*

石油工业出版社出版
(北京安定门外外馆东后街甲36号)
交通印刷厂排版
顺义燕华营印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 3 $\frac{1}{2}$ 印张 90千字 印1—5,000
1982年8月北京第1版 1982年8月北京第1次印刷
书号: 15037·2364 定价:0.43元

目 录

摘 要

一、引 言	3
二、砂岩次生孔隙的成因-结构类型	4
(一)基本成因类型	4
(二)混合成因的孔隙	7
三、砂岩次生孔隙的结构系列	8
(一)粒间孔隙结构	8
(二)特大孔隙结构	10
(三)印模孔隙结构	11
(四)组分内孔隙结构	12
(五)裂隙孔隙结构	13
(六)孔隙结构综合评述	14
四、砂岩次生孔隙的识别	15
(一)岩石学标志	15
(二)分析方法	20
五、砂岩次生孔隙的地质分布及成因	21
(一)成岩作用的阶段	21
(二)成岩作用	22
(三)次生孔隙的起因	24
(四)成岩作用中期的脱碳酸盐化孔隙	25
六、砂岩在中期成岩作用中结构的演化阶段	27
(一)一般介绍	27
(二)砂岩矿物的影响	30
(三)温度和时间的影响	30
(四)孔隙的变化	31
七、石英砂岩的成岩作用	32
(一)不含碳酸盐的石英砂岩	33
(二)具沉积和早期形成的碳酸盐的石英砂岩	34
(三)具中期形成的碳酸盐的石英砂岩	35
(四)具沉积、早期形成和中期形成的碳酸盐的石英砂岩	37
(五)综合评述	38
八、中等和低矿物成熟度砂岩的孔隙成岩作用	40
九、孔隙分布的实例	40
(一)马更些三角洲的实例	40
(二)斯科舍陆架的实例	42
十、储集层的情况	44
(一)孔隙的几何形态	44

(二) 储集层的几何形态	46
(三) 岩石物性特征	47
(四) 储集层的一般特性	48
十一、结 论	48
参考文献	51

摘 要

砂岩次生孔隙可以按照成因和孔隙结构进行分类。可使砂岩产生次生孔隙的作用有：(1)破裂作用；(2)收缩作用；(3)沉积颗粒和基质的溶解作用；(4)自生孔隙充填胶结物的溶解作用；以及(5)自生交代矿物的溶解作用。从这些作用考虑，可将砂岩次生孔隙划分为五种重要的成因类型。混合孔隙的特征是几种成因的次生孔隙共存，或原生与次生孔隙共存。

次生孔隙有五个主要孔隙结构组，它们是：(1)粒间孔隙；(2)特大孔隙；(3)印模孔隙；(4)组分内孔隙；以及(5)张开的裂隙。有一些次生孔隙与砂岩原生孔隙的大小和结构完全一样，而另一些只是一般的相似，在细节上并不相同。次生孔隙也可以呈完全不同于原生孔隙的结构形式出现。

大多数情况下利用一套简单的岩石学标志，即可在薄片中鉴别次生孔隙的成因。这些岩石学标志包括：(1)部分溶解作用；(2)印模；(3)排列的不均一性；(4)特大孔隙；(5)伸长状孔隙；(6)溶蚀的颗粒；(7)组分内孔隙；以及(8)破裂的颗粒。有时中粒和粗粒砂岩的次生孔隙可以用肉眼观察。

次生孔隙岩石学特征的详细分析，则需要利用先进的分析技术，例如，阴极发光岩石学(cathode luminescence petrography)、扫描电镜、孔隙铸体实验、显微探针分析以及稳定同位素分析。不过，对于大多数砂岩，只要用一般的岩石显微镜进行仔细观察，且运用得法，就可以获得异常大量的重要资料。

在砂岩成岩作用中，次生孔隙起着重要的作用。世界上有不少沉积盆地的砂岩，其次生孔隙体积等于或超过了原生孔隙。世界天然气和原油储量有很大一部分是储集在砂岩次生孔隙中的。普拉德霍湾(Prudhoe Bay)油田以及北海的一些侏罗系油田，可作为在砂岩次生孔隙中形成的许多特大油田的代表。

在化学、物理、物理化学、生物化学和生物物理作用下，可使砂岩组分淋滤和收缩，或者使其中裂隙和孔洞开启，从而产生次生孔隙。砂岩次生孔隙可以形成在沉积地壳的任何深度。它们可以生成在：(1)有效埋藏前，在沉积环境的物理化学条件直接影响下(早期形成的“eogenetic”^①)；(2)在有效埋藏过程中，在变质作用带以上的任何深度(中期形成的“mesogenetic”^①)；以及(3)在埋藏一段时期以后，又出露地表的过程中(晚期形成的“telogenetic”^①)。次生孔隙可以在任何矿物或结构组成的砂岩中生成，也不受时代的影响。不过，它们在曾经持续较长时间和较深埋藏的，并且已经没有原生孔隙的砂岩中是最常见的。

砂岩次生孔隙中很大一部分是由淋滤作用生成的。碎屑沉积物中所见到的大多数矿物成分都是可溶的。然而，古老砂岩中的大部分次生孔隙，是在成岩作用中期由于碳酸盐矿物方解石、白云石和菱铁矿经淋滤作用而产生的。这种脱碳酸盐化作用移走了沉积的碳酸盐组分，也移走了成岩作用时期产生的碳酸盐，例如胶结物或交代物。

中期产生的砂岩脱碳酸盐化作用，可由许多化学的和物理化学的成岩作用引起。不过，

^①采用乔奎特与普雷(Choquette and Pray, 1970)所提出的成岩作用术语。

看来它似乎主要与砂岩相邻地层中的有机物在成熟过程中的脱羧作用有关。脱羧作用生成了二氧化碳，在有水存在时，后者可形成碳酸。有人提出：当这些酸性水与砂岩接触时，就可与其中的碳酸盐组分发生反应。

在大多数情况下，用显微镜可区分砂岩的原生和次生孔隙。这样，即可追溯在埋藏过程中原生孔隙的减少。在有水存在和静水压力条件下，砂岩中除去颗粒间体积不大的不可压缩的纹层状孔隙外，大部分原生孔隙在超过一定的温度-时间界限后是不能存在的。该温度-时间极限随砂岩矿物稳定性的增加而加大，其次也随颗粒大小的增加而加大。

砂岩的中期成岩作用可以分为四个阶段：（1）不成熟阶段——机械压实阶段；（2）半成熟阶段——原生孔隙的化学压实阶段；（3）成熟阶段——仅有次生孔隙存在；以及（4）过成熟阶段——没有有效的原生和次生孔隙。

在中期成岩作用的半成熟阶段，脱碳酸盐化作用可以形成相当大量的次生孔隙。但是在这个阶段中，砂岩平均碳酸盐的增加量，通常大于平均碳酸盐的减少量。

在中期成岩作用的成熟阶段，脱碳酸盐化作用达到了高潮。此时，这种作用将大大超过碳酸盐化作用。因此，大量次生砂岩孔隙是在有效原生孔隙消失以后生成的。显然，即使在低渗透性砂岩中，裂隙和颗粒间不可压缩的纹层状孔隙，也可为脱碳酸盐化流体开始进行淋滤作用提供足够的通路。

大量含有碳酸盐的溶液，从处于成岩作用成熟阶段的砂岩向上运移，并且，至少部分地又在未成熟和半成熟阶段的砂岩中重新沉淀。在下沉的棱柱状碎屑沉积体中，所含有的许多碳酸盐正在以这种方式向上重复进行着循环，浅处的砂岩也正在不断富集着碳酸盐。

烃类的初次运移通常都紧随次生孔隙形成之后而发生。这种情况显然与下述事实有关，即在有机质成熟过程中，烃类生成的主要时期出现在脱羧高潮之后。生油层和储集层在时间和空间上的这种紧密联系，有利于烃类在次生孔隙中的聚集。

在有孔隙水存在时，次生孔隙将在进一步埋藏过程中逐渐减少，虽然与原生孔隙相比，其减少的速度要慢得多。

砂岩次生孔隙的主要地质和经济意义在于，它扩大了有效砂岩孔隙存在的深度范围，使其远远超出了有效原生孔隙可以存在的最大深度界限。烃类生成和初次运移主要产生在有效原生孔隙可以存在的深度以下。所以，初次运移的途径与油气聚集的场所，通常都是受次生孔隙分布所控制的。

只有在胶结作用之后砂岩非可溶性骨架没有发生变化，且孔隙中充填的胶结物后来又毫无例外地全部被溶解时，次生孔隙的几何形态才与原生孔隙相似。在大多数情况下，次生孔隙与类似砂岩的原生孔隙相比，其几何形态有下述一些不同：（1）孔隙大小和孔隙形状变化都较大；（2）孔隙喉道的大小和形状极其不同；（3）单个砂岩体中孔隙的分布变化较大。由于具有这样的孔隙几何形态特征，所以大多数具次生孔隙砂岩的储集层的特征和物理性质，与原始岩性相似、且原生孔隙大致相同的砂岩差别很大。受影响的参数包括：（1）渗透性；（2）束缚水饱和度；（3）机械强度；（4）声波传播时间。次生孔隙的存在通常会改变某些测井曲线的特征。它也会显著地影响地球物理特性。许多具次生孔隙的砂岩含油层，还以具相对较低的水饱和度为特征。

从次生孔隙砂岩生产的油田，其储集层的情况常常更像碳酸盐岩储集层，而不像具原生孔隙的砂岩油田。在有远景的或已开采的砂岩层中，次生孔隙的分布可能并不一定与沉积岩相或埋藏史有直接关系，且可能很难或甚至不可能用常规地下方法去预测它们。但是，对

控制次生孔隙生成因素进行详细的地质和岩石学分析,常可大为提高对其分布的了解和预测。次生孔隙砂岩储集层有其特殊的问题,而它们也给勘探工作者和开发工作者提供了特殊解决这些问题的机会。首先,必须去认识这些储集层孔隙的次生性质;其次,必须去解释控制这些孔隙生成的因素,和确定孔隙生成的时间;第三,必须评价在保存这些孔隙中可能起作用的各种因素;以及第四,必须去研究现在的孔隙几何形态,以便尽可能完善寻找和开采油气的方法和提高经济效益。

一、引言

1975年以前出版的文献很少注意砂岩次生孔隙问题。大多数人认为砂岩孔隙只有很小一部分是次生的。人们把除去裂隙以外的大量次生孔隙,都说成是当砂岩层出露地表时,被渗入的大气水溶去可溶组分的产物(Sedimentation Seminar, 1969; Hraber and Potter, 1969)。克里南(Krynine, 1941)指出,奥瑞斯坎尼(Oriskany)砂岩的碳酸盐淋滤作用可能是产生在地下的。当地下有含盐地层水存在时,可以形成大量砂岩孔隙,这一现象大概是由普鲁士里亚科夫(Proshlyakov, 1960)首次使人信服地提出的。萨夫凯维克(Savkevic, 1971)最先发表了关于地下可能引起次生孔隙生成作用的详细讨论。罗塞尔与德斯瓦尔特(Rowsell and De Swardt, 1973)观察了中伊克(Middle Ecca)砂岩中很可能是在地下生成的次生孔隙,这种砂岩产自南非卡鲁(Karoo)盆地北部,其时代属宾夕法尼亚纪。罗塞尔与德斯瓦尔特是在苏联以外,最先利用关心成岩作用中期形成孔隙的苏联地质学家们发展起的概念的人。直到1976年,苏联和南非的这些研究,在北美还没有引起很大的注意。在最近几年中,北美的一些地质学家已经认识到了,砂岩在地下产生次生孔隙是一种常见的现象,但仍不了解上述的一些研究。

近来已有一些文献提到了这些研究成果,而且还有一些作者介绍了在埋藏之后有孔隙产生的那些地区的地下情况(Schmidt, 1976; Stanton and McBride, 1976; Alcock and Benteau, 1976; Pittman, 1979; Hayes, 1979)。海斯(Hayes)与本文作者早在1970年就认识到了砂岩次生孔隙的广泛存在,随后作者们又改进了识别次生孔隙的标准(Schmidt et al., 1977),并研究了在加拿大、阿拉斯加和欧洲等地不同地质背景下,砂岩次生孔隙的情况。通过对马更些三角洲帕森斯(Parsons)砂岩的研究(Schmidt et al., 1977),提出了关于地下次生孔隙成因的某些新概念。麦克布赖德(McBride)和他的学生们应用这些概念和标准,非常成功地研究了得克萨斯南部的地下次生孔隙(Stanton and McBride, 1976; Lindquist, 1976)。

随着作者们研究的逐渐深入,发现有许多次生孔隙过去被错当成了原生孔隙。他们关于次生孔隙丰富程度的意见,正在随着资料的不断增长而发生着变化(图1)。砂岩所有孔隙至少有三分之一是次生的,现在这一点已没有什么可怀疑的。看来有可能砂岩中的次生孔隙比原生孔隙还更丰富。无疑,砂岩次生孔隙有着重要的地质意义。它的成因、稳定性和分布是砂岩成岩作用的重要表现。

迄今除去裂隙以外,仍有大量的砂岩次生孔隙被错当成原生的,而且次生孔隙也还没有引起大家的注意。这是由于有许多种次生孔隙,在结构上常常与原生孔隙极其相似,以及很多研究者不熟悉识别砂岩次生孔隙的标志。

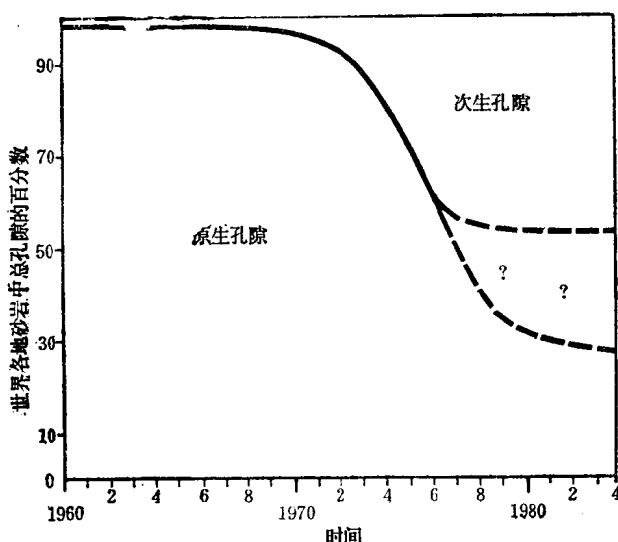


图1 对砂岩孔隙成因解释的变化

结构类型，并提出便于识别它们的一些标准。

(2) 初步介绍砂岩次生孔隙的成因，以及它们在成岩过程中的演变。

(3) 提出对砂岩次生孔隙储集情况的一些认识。

我们希望用这种办法可以为那些致力于研究砂岩成岩作用这一诱人课题的，并准备用自己的才能去打开具次生孔隙砂岩中所蕴藏的资源的人，奠定有用的基础。我们特别希望能够有更多的关于砂岩次生孔隙的报导，对它们的成因能有更精确的解释，并且能够更有效地去利用它们的储集特性。

这个小册子基本上是本书作者三个出版物的汇编 (Schmidt et al., 1977; Schmidt and McDonald, 1979a; Schmidt and McDonald, 1979b)。不过，在这本书中不可能包括彩色显微照像。因此，读者们可以参考前面列举的文献，以及砂岩孔隙和成岩作用杰出的显微照像图册 (Scholle, 1979)。

二、砂岩次生孔隙的成因-结构类型

砂岩的次生孔隙主要是其非硅酸盐组分（以碳酸盐矿物为主）溶解的产物。形成这种溶解孔隙的可溶物质可呈三种结构形式：沉积的物质、自生胶结物以及自生交代产物。岩石组分的破裂和收缩也可使砂岩产生重要的次生孔隙，不过，通常在数量上都是居于次要地位的。

为了便于进行地质解释，最好以结构成因为根据来划分次生孔隙的主要类型。同时，在划分产生次生孔隙的结构类型时，应该以便于如实的对它们进行描述为原则。

(一) 基本成因类型

按照成因及与结构的相互关系，我们认为可以将次生孔隙划分为五种基本类型(图2)：

(1) 破裂产生的孔隙；(2) 收缩产生的孔隙；(3) 沉积组分溶解产生的孔隙；(4) 自生胶结

有不少油田气的储集层砂岩，其大部分或全部有效孔隙都是次生的。精确鉴别这些储集层砂岩孔隙的次生性，以及它们与母岩的结构关系，显然将有助于对这些砂岩储集层的勘探和开发 (Hayes, 1979; Pittman, 1979)。

总之，对砂岩次生孔隙的研究，仍然是处于非常初期的阶段。不过，已经获得的有用资料已足以说明，砂岩在成岩作用中产生的次生孔隙是非常值得进一步研究的。

这个简短的课程有三重意图：

(1) 概略指出砂岩次生孔隙的结

矿物溶解产生的孔隙；以及(5)自生交代矿物溶解产生的孔隙。

1. 破裂产生的孔隙

指所有新形成的裂隙(图3)，包括在岩石组分或整个岩石收缩所产生应力的作用下形成的裂隙。如果裂隙被胶结物或沉积物所充填，后来这些充填物或其交代物可因选择性溶解，而产生第二世代的裂隙。这些重新开启的裂隙应该包括在溶解孔隙的适当类型中。

2. 收缩孔隙

收缩孔隙是由于一些矿物，例如海绿石(图4)、赤铁矿或像泥岩这样的一些矿物集合体，在脱水(和/或)重结晶过程中形成的孔隙。它们并没有收缩的特征。可收缩的组分可以是颗粒、颗粒中的一部分、基质、自生胶结物和自生交代物。因此，收缩孔隙包括了多种多样的孔隙结构。它的规模通常可以从亚微观的直到接近砂岩颗粒大小。不过，也可以产生更大的收缩孔隙。

3. 沉积物溶解产生的孔隙

它是很常见和很重要的一种类型。由可溶性颗粒和可溶性基质的选择性溶解而生成。在大多数情况下，这些可溶性的物质都是一些碳酸盐矿物(图5)。由于沉积组分的溶解可以产生大量的孔隙，其大小变化在从直径不到1微米的亚微观孔隙，到几厘米宽的溶洞。孔洞的大小经常超过邻近岩石的颗粒。

图3~5为砂岩次生孔隙成因类型实例。

4. 自生胶结物溶解产生的孔隙

它可能是最常见的一种孔隙类型。溶解的胶结物大多是碳酸盐矿物方解石、白云石和菱铁矿(图6)。这些被溶解的胶结物过去可能存在于任何原生或次生孔隙中，因此，胶结物的溶解可以使原生和次生孔隙结构的一切类型重新开启。

5. 自生交代矿物溶解产生的孔隙

此种孔隙通常在砂岩次生孔隙中占有相当大的比例。它们是由原来交代沉积组分和(或)自生胶结物的可溶性矿物，主要是方解石、白云石和菱铁矿，经选择性溶解而生成的(图7)。按照乔奎特与普雷(1970)的意见，原来被交代的物质本身可以是可溶的，也可以是不可溶的。交代矿物的溶解，正如胶结物的溶解一样，可以创建任何类型的孔隙结构。

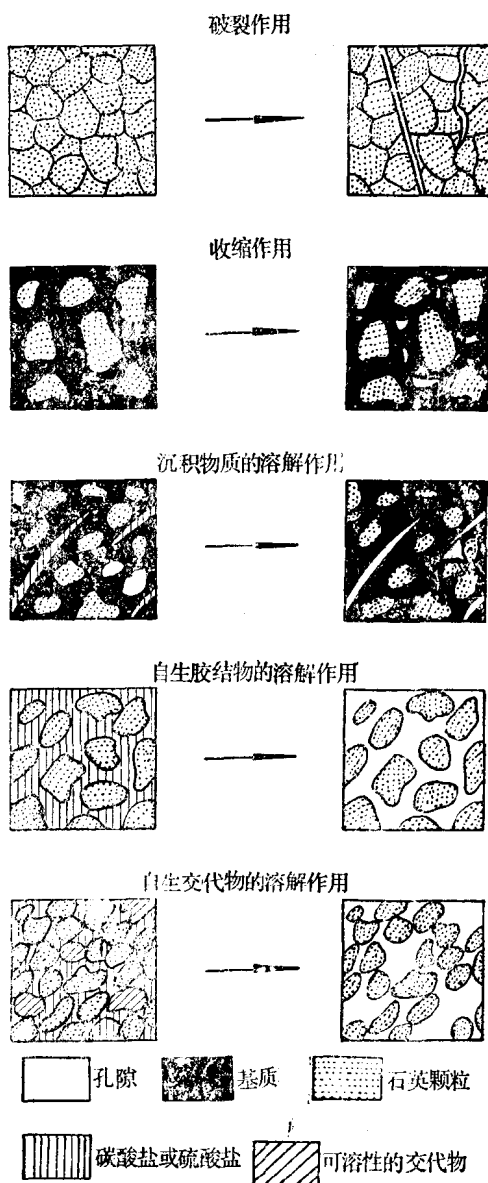


图2 砂岩次生孔隙的成因类型



图3 破裂孔隙

长石颗粒破裂产生的次生孔隙。半正交偏光。加拿大马更些三角洲，下白垩统。P—孔隙；F—破裂的长石

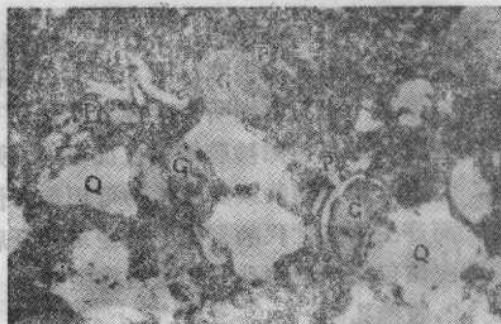


图4 收缩孔隙

海绿石颗粒收缩产生的次生孔隙。单偏光。加拿大斯科舍 (Scotian) 陆架，白垩系。P—孔隙；G—海绿石；Q—石英

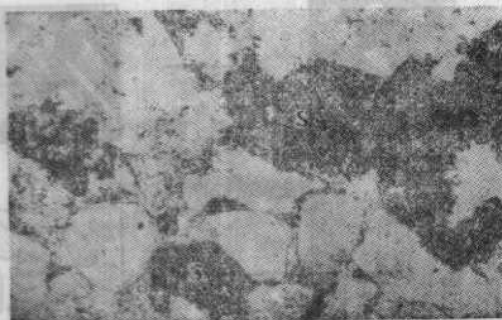


图5 沉积物质溶解产生的孔隙

沉积的菱铁矿基质和菱铁矿颗粒溶解而产生的次生孔隙。单偏光。北海斯塔特弗约德 (Statfjord) 油田，侏罗系。P—孔隙；S—微晶菱铁矿



图6 胶结物溶解后产生的孔隙

由于粒间胶结物的溶解而形成的次生孔隙。半正交偏光。加拿大马更些三角洲，下白垩统。P—孔隙；C—方解石；Q—石英颗粒；G—海绿石颗粒

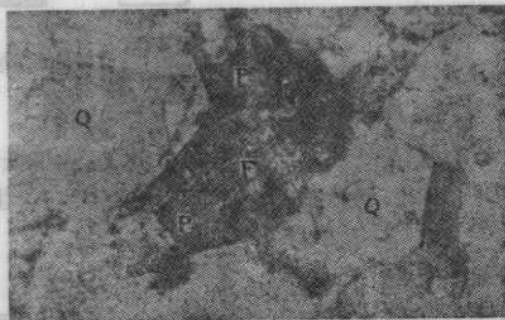


图7 交代物溶解后产生的孔隙

部分交代长石颗粒的菱铁矿被溶解后产生的次生孔隙。单偏光。加拿大马更些三角洲，下白垩统。P—孔隙；F—长石（蜂窝状颗粒）；Q—石英

(二)混合成因的孔隙

单个孔隙也可以是经多种作用形成的。它们可能包括几种成因类型的次生孔隙,也可能部分是原生的,部分是次生的。这种混合成因的孔隙可以称作“混合孔隙(hybrid pore)”(图9)。例如,在砂岩颗粒边缘被交代时,经常其邻近的粒内空间同时被同一种矿物所胶结(图8)。当这些自生矿物全部被溶解以后,就会形成混合孔隙,因为孔隙胶结物和颗粒交代物都被溶解掉了。

图6~8为砂岩次生孔隙成因类型实例。

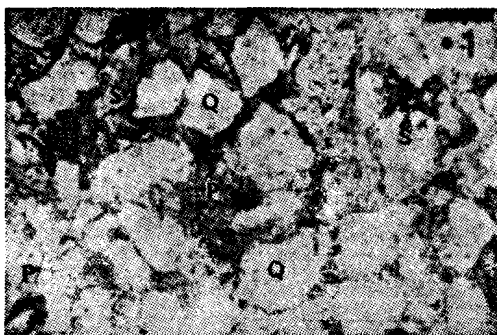


图8 混合孔隙

由于粒间菱铁矿胶结物,以及石英与燧石颗粒边缘菱铁矿交代物的溶解,而形成的混合次生孔隙。单偏光。阿拉斯加北坡普鲁德霍湾油田,三迭系。P—孔隙;S—菱铁矿(高突起);Q—石英颗粒;CH—燧石颗粒(低突起)

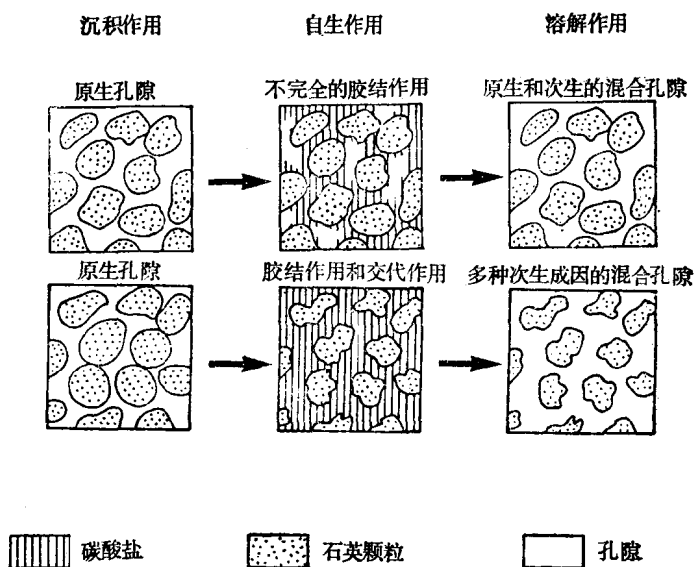


图9 混合孔隙结构发育示意图

大部分次生孔隙是混合成因的,它们可以具有次生孔隙的所有结构形式。通常,每一种孔隙结构中的单个孔隙,都可以结合成许多不同成因的混合类型。

三、砂岩次生孔隙的结构系列

在划分砂岩次生孔隙的结构类型时，必须要以能客观如实地对它们进行描述、可提供较多的资料和便于应用为原则。利用乔奎特和普雷（1970）对碳酸盐岩提出的部分孔隙结构术语，可以在砂岩中分出下述几组孔隙结构类型：

- （1）粒间孔隙结构；
- （2）特大孔隙结构；
- （3）印模孔隙结构；
- （4）组分内孔隙结构；
- （5）裂隙结构。

每一组孔隙结构都包含有两种或更多种不同的孔隙结构类型。下面按照这些孔隙结构类型与不同次生孔隙成因类型的结合，对砂岩次生孔隙结构系列进行逐一介绍（表1）。

砂岩次生孔隙结构系列

表1

孔 隙 结 构	破裂作用产物	收缩作用产物	沉积物溶解作用产物	胶结物溶解作用产物	交代物溶解作用产物
粒间孔隙结构：					
正常的粒间孔隙结构		×P ^①	×P与C ^②	×P与C	×P与C
缩小的粒间孔隙结构		×P	×P与C	×P与C	×P与C
扩大的粒间孔隙结构		×P	×P与C	×P与C	×P与C
特大孔隙结构：					
有组构选择的		×	×	×	×
无组构选择的				×	×
印模孔隙结构：					
颗粒印模		×P	×P与C	×P与C	×P与C
胶结物印模		×P		×P与C	×P与C
交代物印模		×P		×P与C	×P与C
组分内孔隙结构：					
粒内的		×	×	×	×
基质内的		×	×	×	×
胶结物内的		×		×	×
交代物内的		×	×	×	×
裂隙结构：					
岩石裂隙	×		×P与C	×P与C	×P与C
颗粒裂隙	×			×P与C	×P与C
粒间裂隙	×			×P与C	×P与C

①P—表示张开的孔隙只占原来结构的一部分。

②P与C—表示张开的孔隙可以占据原来结构的一部分或原来结构的全部。

（一）粒间孔隙结构

粒间孔隙结构组系由颗粒之间的孔隙组成（图10）。粒间孔隙可以为后来补充的或共生的胶结物充填。次生粒间孔隙结构可分为三种类型：（1）正常的粒间孔隙；（2）缩小的粒间

孔隙；以及(3)扩大的粒间孔隙。

1. 正常的粒间孔隙结构

正常的粒间孔隙结构基本上反映了沉积时粒间空间的大小和形状(图11与12)，与原生粒间孔隙结构完全相同。次生孔隙可能占据整个粒间空间，也可能与基质、胶结物、交代物或原生孔隙共同占据一个个别的粒间空间，这样就形成了“完全的”或“部分的”次生正常粒间孔隙结构。

次生正常粒间孔隙结构在砂岩次生孔隙中占有很大的比例。它们是由下列作用产生的：

(1)粒间沉积基质的收缩作用(例如，海绿石基质的收缩)；(2)粒间沉积基质的溶解作用(例如，碳酸盐基质的溶解)；(3)粒间胶结物的溶解作用(例如，粒间碳酸盐与硫酸盐胶结物的溶解)；(4)粒间交代物的溶解作用(例如，交代海绿石基质的碳酸盐的溶解)；以及(5)以上结构形成作用的不同结合(例如，在同一粒间空间内，碳酸盐胶结物和碳酸盐基质的共同溶解)。

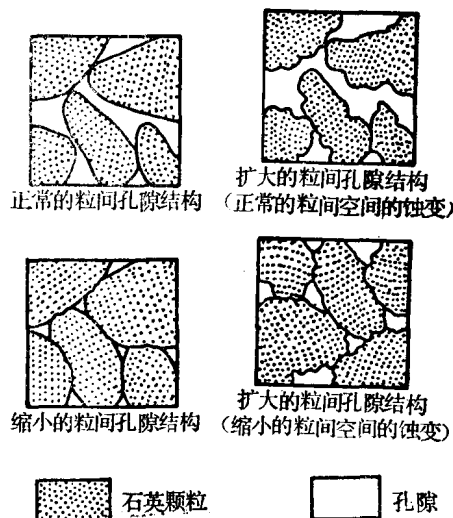


图10 次生粒间孔隙结构

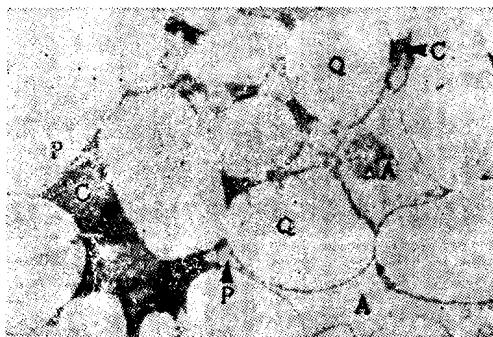


图11 原生正常粒间孔隙(为方解石和硬石膏胶结物所充填)

胶结物的早期溶解作用，可以产生部分的次生孔隙或正常粒间结构。单偏光。加拿大西北地区寒武系。国际海洋考查协会，中途站L-34, 2794英尺(852米)。P—孔隙；Q—石英颗粒；C—方解石胶结物；A—硬石膏胶结物

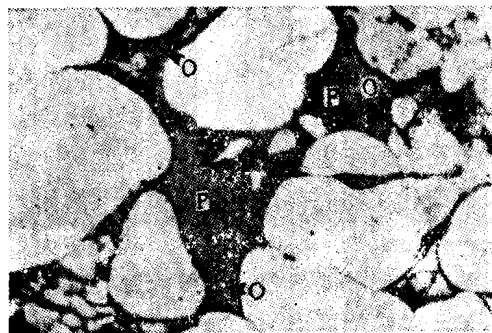


图12 次生正常粒间孔隙(粒间碳酸盐和硫酸盐胶结物溶解后所产生的)单偏光。位置同图11，深度2786英尺(849米)。

P—孔隙；Q—石英颗粒；O—残余油

2. 缩小的粒间孔隙结构

发育在沉积颗粒之间为下述任一作用缩小了的空间内。这些作用有：(1)颗粒变形；(2)由于颗粒接触处的溶解而产生的化学压实作用；(3)共生胶结作用；以及(4)后来补充的胶结作用。这类孔隙结构很像缩小了的原生粒间孔隙(图13)。

图11~13为砂岩次生粒间孔隙结构实例。

次生缩小的粒间孔隙结构占有砂岩次生孔隙相当大的一部分。它们可占据部分的或整个的粒间空间。其孔隙成因类型和混合成因孔隙类型，与在正常粒间孔隙结构中列举的相同。呈缩小粒间结构形式的次生孔隙，通常都不再受进一步变化的影响(图14)。然而，次生正常粒间孔隙和扩大的粒间孔隙在进一步成岩过程中，却较容易变成缩小的粒间孔隙。

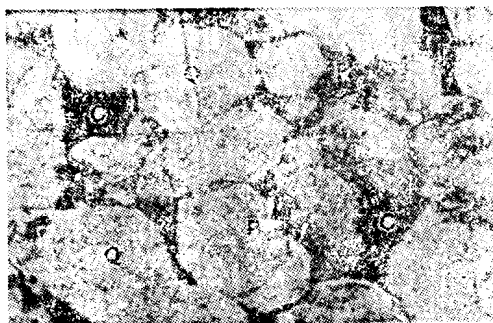


图13 缩小粒间结构的次生孔隙
(粒间方解石胶结物溶解后所产生的)
单偏光。加拿大西北地区寒武系。P—孔
隙；Q—石英；C—方解石



图14 两种缩小的粒间孔隙形式
(1) 缩小的纹层状粒间孔隙,其成因部分为原生的,
部分为次生的,(2)次生缩小的多边形粒间孔隙,它是在
成岩作用缩小了粒间空间之后,由于碳酸盐胶结物的溶
解而形成的。孔隙环氧铸体的电子扫描显微镜照片。加拿
大马更些三角洲下白垩统。PL—纹层状孔隙;PP—多边
形孔隙;Q—用氢氟酸处理掉的石英颗粒

3. 扩大的粒间孔隙结构

扩大的粒间孔隙结构可由沉积颗粒间空间的扩大形成,也可由以前缩小了的粒间空间的扩大而形成(图15)。有三种变化可引起粒间空间的扩大:(1)颗粒骨架的收缩作用(例如,海绿石颗粒的收缩);(2)颗粒边缘、共生胶结物或后来补充胶结物的溶解作用(例如,菱铁矿颗粒边缘的溶解);以及(3)颗粒边缘、共生胶结物或后来补充胶结物的交代,和随后交代矿物的选择性溶解作用(例如,石英颗粒边缘为菱铁矿交代,随后菱铁矿又被溶解)。次生扩大的粒间孔隙的形状,在大多数情况下都与正常或缩小的原生粒间孔隙不同。其孔隙壁呈明显的凹形,邻接的颗粒常常被溶蚀。

扩大的粒间孔隙结构是砂岩次生孔隙中比较重要的组成部分,它们可以占据部分的或整个的粒间空间。同一个结构-成因作用可以既使原有粒间空间开启,又使它扩大(例如,在沉积粒间基质被溶解的同时,还可发生相邻颗粒边缘的溶解作用)。然而,最常见的扩大的粒间孔隙,则是混合成因的(例如,粒间胶结物的溶解,以及与此同时相邻颗粒边缘处交代矿物的溶解)。其孔隙成因类型及混合孔隙类型与前面谈到的正常粒间孔隙结构相同。

(二)特大孔隙结构

超过相邻颗粒直径1.2倍以上的孔隙(除去裂隙),都包括在特大孔隙结构组中。次生特大孔隙结构可以划分为两种类型:(1)有组构选择的,以及(2)无组构选择的。

1. 有组构选择的特大孔隙结构

其孔隙形状通常受母岩组构单元的限制(图16、17)。乔奎特与普雷(1970)称这样的孔隙为“网状的(fenestrate)”孔隙。它选择性的发育在砂岩某些结构单元受到破坏的情况下。与此类似的原生孔隙很少见,但也是可以产生的(例如,由于砂岩中气体的逸出而形成的晶洞)。

图15~17为次生粒间孔隙及特大孔隙的实例。

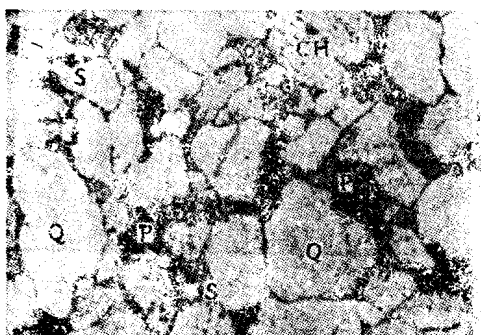


图15 次生扩大的粒间孔隙结构(菱铁矿胶结物和交代物溶解后所形成的)
在扩大的粒间孔隙相连接的地方,形成了孔道。半正交偏光。北海贝里尔(Beryl)油田,侏罗系。P—孔隙;Q—石英颗粒;CH—燧石颗粒;S—菱铁矿胶结物

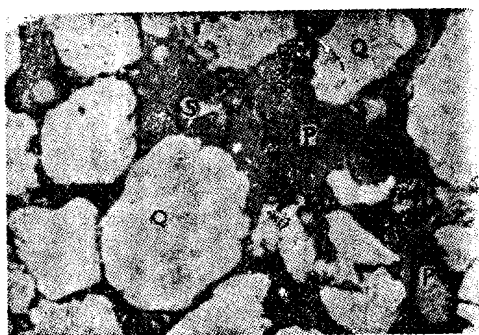


图16 次生有结构选择的特大孔隙结构(菱铁矿交代物与粒间菱铁矿胶结物溶解后所形成的)
单偏光。北海贝里尔油田,侏罗系。P—孔隙;Q—石英颗粒;S—菱铁矿残留物(高突起)

次生有结构选择的特大孔隙结构是相当重要的,它有四种成因:(1)收缩作用(例如:强收缩性基质特大团块的收缩);(2)沉积物质的溶解作用(例如:粒间基质及邻接颗粒的溶解);(3)胶结物的溶解作用(例如:填充特大孔隙的胶结物的溶解);以及(4)交代物的溶解作用(例如:交代基质和相邻颗粒的碳酸盐的溶解)。混合成因的孔隙很常见,并且可以是上述成因的任何结合(例如,粒间胶结物及相邻颗粒的溶解)。另外,有结构选择的特大孔隙结构也常常可以是原生和次生混合成因的(例如,原生粒间孔隙与由可溶性颗粒溶解生成的次生孔隙相结合)。

2. 无结构选择的特大孔隙结构

以孔隙壁横切母岩结构单元为特征。这种孔隙结构不可能有原生的。

无结构选择的特大孔隙结构很少见,但可作为确定成岩作用次序的很有价值的标准。它们主要是由砂岩无选择性交代矿物受到溶解形成的。其次,第一世代无结构选择的孔隙经胶结后,胶结物又被溶解也可形成。

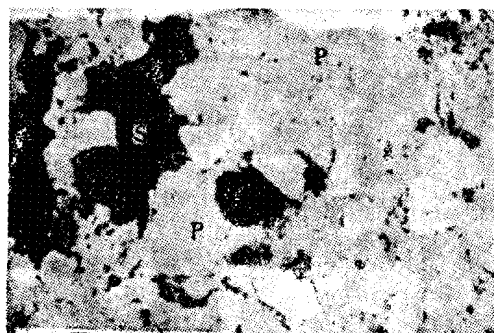


图17 次生有结构选择的特大孔隙结构
(由于沉积的菱铁矿颗粒和菱铁矿基质的溶解,而形成的)
单偏光。北海斯泰特弗约德油田,侏罗系。P—孔隙;S—微晶菱铁矿

(三)印模孔隙结构

印模孔隙结构组是指那些具有原来组分结构外形特征的孔隙,其中不包括裂隙和粒间孔隙。可以看到三种类型的印模孔隙:(1)颗粒印模;(2)胶结物印模;以及(3)交代物印模。由溶解作用形成的印模可以是部分的,也可以是全部的。收缩作用只能形成部分的印模。印模孔隙结构都是次生的。

1. 颗粒印模孔隙结构

是指为其它颗粒、基质和（或）胶结物所围绕的颗粒，或为交代上述组构的矿物所围绕的颗粒，被选择性破坏而形成的次生孔隙（图22与25）。

颗粒印模孔隙结构很常见，它在砂岩次生孔隙中占相当大的比例。可有四种成因类型：（1）收缩作用产生的（例如，由海绿石颗粒收缩产生的部分印模）；（2）沉积颗粒溶解产生的；（3）充填第一世代颗粒印模的胶结物被溶解后，形成的第二世代的颗粒印模；（4）交代矿物溶解产生的（例如，选择性交代碳酸盐颗粒的硬石膏溶解后产生的）。另外，也可以有原生与次生混合成因的印模孔隙（例如，具有原生粒内孔隙的颗粒经溶解产生的）。

2. 胶结物印模孔隙结构

这种孔隙结构的产生至少要经过下述三种连续的成岩作用变化：（1）最初胶结物部分充填了发育有自形晶面或其它特征形态的孔隙；（2）残留的孔隙以后为另外的物质所充填，从而包围了最初的胶结物；（3）在形成孔隙的过程中，某些作用选择性的影响了最初的胶结物。

胶结物印模孔隙结构很少见，但它提供了一种确定成岩作用次序的良好依据。它可以区分为三种成因类型：（1）产生部分印模的收缩作用；（2）胶结物的溶解作用；以及（3）具有一定结构特征的胶结物被选择性交代后，交代矿物的溶解作用。

3. 交代物印模孔隙结构

如果交代矿物发育有自形晶面或其它特征形态，并且，如果随后形成孔隙的作用又选择性的影响了交代物的话，即可产生交代物印模孔隙结构。

交代物印模孔隙结构很少见，但对确定成岩作用次序是有用的。它有三种成因类型：（1）产生部分印模的收缩作用；（2）充填第一世代交代物印模的胶结物的溶解作用；以及（3）交代矿物的溶解作用（例如，交代碳酸盐基质和颗粒的自形硬石膏晶体的溶解）。

（四）组分内孔隙结构

组分内孔隙结构包括位于个别结构组分内的所有孔隙。其大小可以不到1微米直到接近产生孔隙组分的直径。次生组分内孔隙结构可有四种类型：（1）粒内的；（2）基质内的；（3）胶结物内的；以及（4）交代物内的。

1. 粒内孔隙结构

它是使颗粒内部（而不仅是使颗粒边缘）产生孔隙作用的产物。具有大量粒内孔隙的颗粒可以称作“蜂窝状颗粒”（图28、29）。罗塞尔与德斯瓦尔特（1974）称这样的颗粒为“残骸（skeleton）颗粒”，福克斯等人（Fox et al., 1975）则称为“淋滤的颗粒”。它们显然是次生的。在只有较少粒内孔隙的颗粒中，孔隙的类型是比较难于确定的，因为很多种颗粒都可以具有一些原生粒内孔隙。在这类次生孔隙结构中，不论是亚微观（小于4微米）的孔隙直径，还是微观的孔隙直径都很常见。

次生的粒内孔隙结构是相当多的。它们可由下列作用形成：（1）颗粒内部的收缩作用（例如，海绿石颗粒的收缩）；（2）颗粒内部的溶解作用（例如，菱铁矿化燧石颗粒中菱铁矿的溶解）；（3）充填原生或次生粒内空洞的胶结物的内部选择性溶解作用（例如，充填燧石颗粒中原生孔隙的碳酸盐胶结物的溶解）；以及（4）在交代部分颗粒的矿物内部，产生的选择性溶解作用（例如，部分交代长石颗粒的碳酸盐的溶解）。一些颗粒可以既有原生的，也