



油气储层地质学

Hydrocarbon Reservoir Geology

于兴河 教授 博士生导师

中国地质大学（北京）能源学院石油教研室

Tel: 82320109 或 82321857 (O)

Email: billyu@cugb.edu.cn





第五章 储层微观孔隙结构

- 第一节 储集岩的孔隙和喉道类型
- 第二节 孔隙结构的研究方法
- 第三节 孔隙结构参数的定量表征
- 第四节 孔隙结构的分类与评价
- 第五节 孔隙结构的应用



第一节 储集岩的孔隙和喉道类型



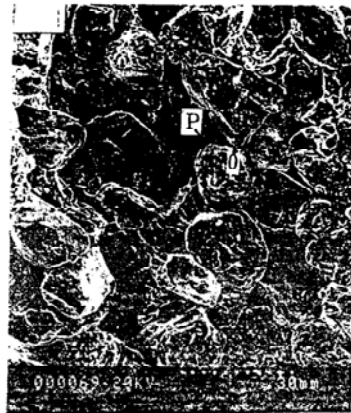
一、孔隙和喉道的概念

储集岩中的储集空间是一个复杂的立体孔隙网络系统. 但这个复杂孔隙网络系统中的所有孔隙（广义）可按其在流体储存和流动过程中所起的作用分为**孔隙（狭义孔隙或叫储孔）**和**孔隙喉道**两个基本单元:

- 被骨架颗粒包围着并对流体储存起较大作用的相对膨大部分，称为**孔隙**.
- 另一些在扩大孔隙容积中所起作用不大，但在沟通孔隙形成通道中却起着关键作用的相对狭窄部分，则称为**喉道**.

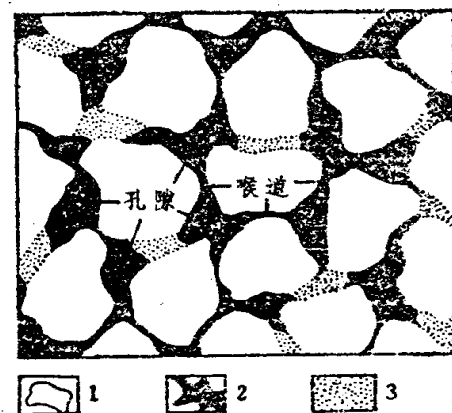


(a) 砂岩孔隙空间结构放大模型



(b) 储集岩立体孔隙网络系统

注：P—孔隙 O—孔隙喉道



(c) 岩石孔隙结构示意图

1.岩石颗粒; 2.孔隙系统; 3.胶结物

图 5-1 储集岩孔隙网络系统 (a 据陈碧珏, 1987; b 据邸世祥, 1991; c 据陈作全, 1987)

二、碎屑岩的孔隙和喉道类型

(一) 孔隙类型

1. 成因分类

目前国内外比较流行的一种分类，V. Schmidt 等的分类。

(1) 原生孔隙 (2) 次生孔隙 (3) 混合孔隙

2. 按孔隙产状及溶蚀作用分类

邸世祥 (1991) 按产状把孔隙分为四种基本类型又按溶蚀作用分出了四种溶蚀类型：

- **粒间孔隙**：指储集岩碎屑颗粒之间的孔隙。
- **粒内孔隙**：指碎屑颗粒内部不具溶蚀痕迹的孔隙
- **填隙物内孔隙**：指杂基和胶结物内存在的孔隙。
- **裂缝孔隙**：指切穿岩石，甚至切穿其中碎屑颗粒本身的缝隙。
- **溶蚀粒间孔隙**：是粒间孔隙遭受溶蚀后所形成的孔隙。

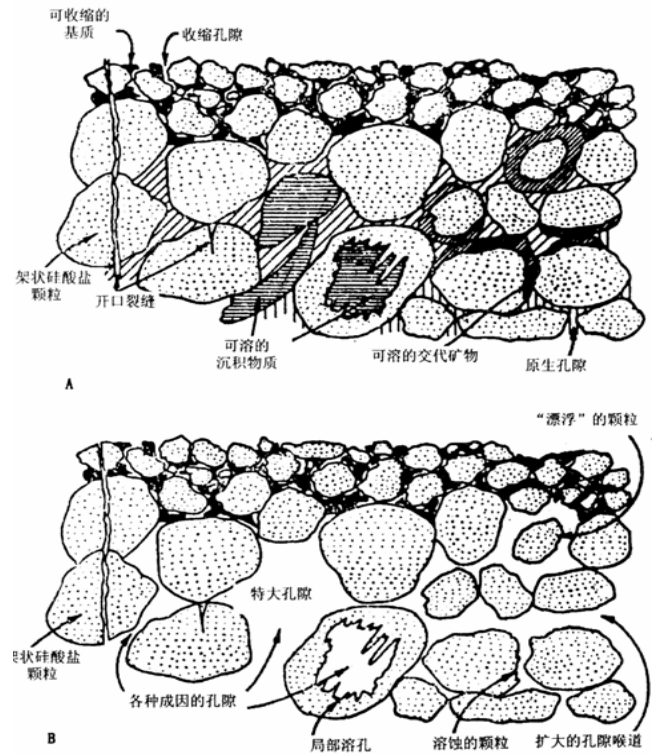


图 5—2 次生孔隙类型及形成模式图 (据罗明高, 1998)
注：A—砂岩中溶蚀作用前的主要孔隙特征，包括粒间孔、收缩孔和裂缝；B—砂岩中溶蚀作用后的主要孔隙特征，包括扩大的粒间孔、特大孔、粒内



二、碎屑岩的孔隙和喉道类型

- **溶蚀粒内孔隙**：指碎屑颗粒内部所含可溶矿物被溶，或沿颗粒解理等易溶部位发生溶解而成的孔隙。
- **溶蚀填隙物内孔隙**：指填隙物受溶蚀作用所形成的孔隙。
- **溶蚀裂缝孔隙**：是流体沿岩石裂缝渗流，使缝面两侧岩石发生溶蚀所致。

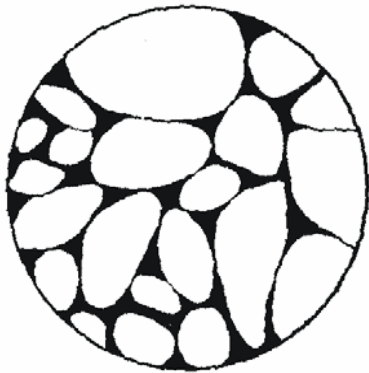
前四种基本类型孔隙并不都是原生孔隙，其中的自生粘土矿物填隙物内晶间孔隙和裂缝孔隙等主要还是次生的。

后四种类型孔隙是在前四类孔隙受到溶蚀改造，并保留有溶蚀痕迹，严格地说，它们不是完整的次生孔隙，只能是原生与次生孔隙的组合，属混合孔隙。

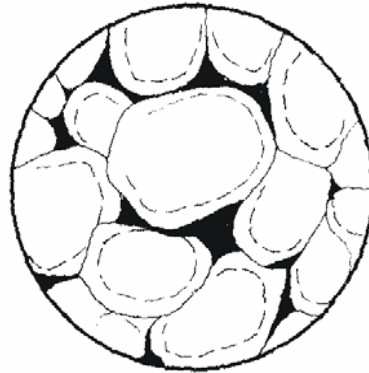
从对渗流作用的物理意义出发，可将上述八类孔隙划分为三大类：

- ① 粒间孔隙及溶蚀粒间孔隙大类；
- ② 溶蚀粒内孔隙、填隙物内孔隙、溶蚀填隙物内孔隙及粒内孔隙大类；
- ③ 溶蚀裂缝孔隙及裂缝孔隙大类。

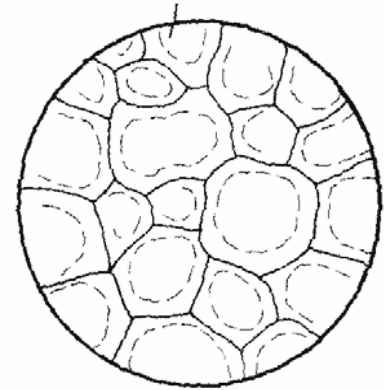
二、碎屑岩的孔隙和喉道类型



a. 完整粒间孔隙
Complete intergranular



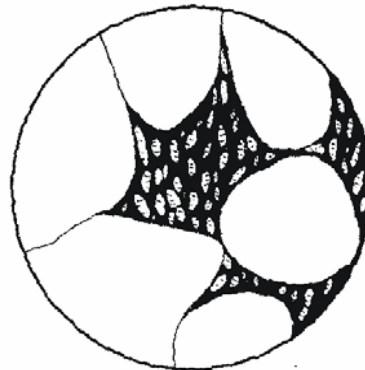
b. 剩余粒间孔隙
Remnant intergranular



c. 缝状粒间孔隙
Contracted intergranular



d. 粒内孔隙
Intragranular



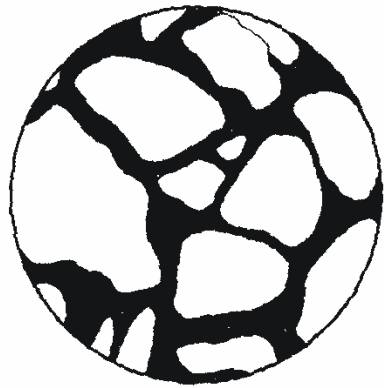
e. 填隙物内孔隙
Intra-filling



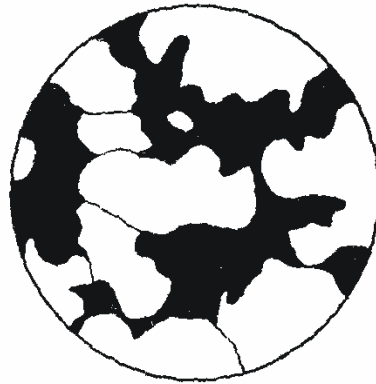
f. 裂缝孔隙
Fracture

图 5-3 碎屑岩孔隙类型示意图 (据邸世祥, 1991)

二、碎屑岩的孔隙和喉道类型



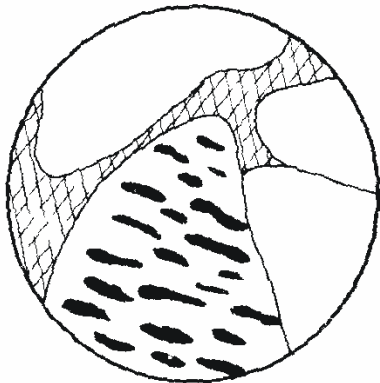
g. 长条状溶蚀粒间孔隙
Elongate intergranular dissolution



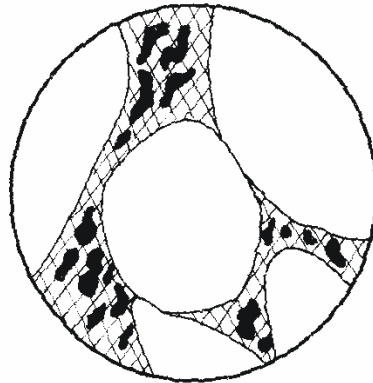
h. 港湾状溶蚀粒间孔隙
Embayed intergranular dissolution



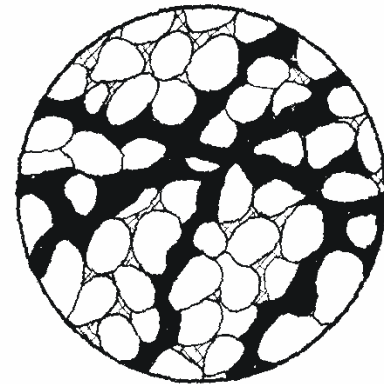
i. 特大溶蚀粒间孔隙
Oversized intergranular dissolution



j. 溶蚀粒内孔隙
Intragranular dissolution



k. 溶蚀填隙物内孔隙
Intra-filling dissolution



l. 溶蚀裂缝孔隙
Fracture dissolution

图 5-3 碎屑岩孔隙类型示意图 (据邸世祥, 1991)



二、碎屑岩的孔隙和喉道类型

3. 成因及孔隙几何形态分类

美国学者皮特门 (E. D. Pittman) 把孔隙分为下列四种类型:

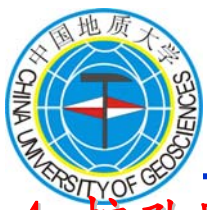
(1) **粒间孔隙**: 指在碎屑颗粒、基质及胶结物之间的孔隙空间。

(2) **微孔隙**: 皮特门 (1979) 将孔径小于 $0.5 \mu\text{m}$ 的孔隙称微孔隙。

(3) **溶蚀孔隙**: 指由碎屑颗粒、基质、自生矿物胶结物或交代矿物中的可溶组分 (如碳酸盐、长石、硫酸盐等) 被溶解形成的孔隙。

(4) **裂缝**: 指在碎屑岩成岩过程中因岩石组分的收缩作用或构造力作用而形成的裂缝。

粒间孔隙属原生成因; 微孔隙属原生及次生混合成因; 溶蚀孔隙及裂缝均属次生成因。



二、碎屑岩的孔隙和喉道类型

4. 按孔隙直径大小分类

根据岩石中的孔隙大小及其对流体储存和流动的作用的不同、可将孔隙划分为三种类型：

(1) **超毛细管孔隙**：管形孔隙直径 $> 500 \mu\text{m}$ ，裂缝宽度 $> 250 \mu\text{m}$ 。在自然条件下，流体在其中可以自由流动。

(2) **毛细管孔隙**：管形孔隙直径介于 $500 \mu\text{m} \sim 0.2 \mu\text{m}$ 之间，裂缝宽度介于 $250 \mu\text{m} \sim 0.1 \mu\text{m}$ 之间。流体在这种孔隙中，由于受毛细管力的作用，已不能在其中自由流动，只有在外力大于毛细管阻力的情况下，流体才能在其中流动。微裂缝和一般砂岩中的孔隙多属这种类型。

(3) **微毛细管孔隙**：管形孔隙直径 $< 0.2 \mu\text{m}$ ，裂缝宽度 $< 0.1 \mu\text{m}$ 。在通常温度和压力条件下，流体在这种孔隙中不能流动；增加温度和压力，也只能引起流体呈分子或分子团状态扩散。粘土、致密页岩中的一些孔隙属此类型。

5. 按孔隙对流体的渗流情况分类

(1) **有效孔隙**：指储集层中那些相互连通的超毛细管孔隙和毛细管孔隙。其中流体在地层压差下可流动。

(2) **无效孔隙**：指储集层中那些孤立的互不连通的死孔隙及微毛细管孔隙。其中流体在地层压差下不能流动。

二、碎屑岩的孔隙和喉道类型

(一) 喉道类型

在储集岩复杂的立体孔隙系统中，控制其渗流能力的主要是喉道及主流喉道的形状与大小和孔隙连通的喉道数目。

在不同的接触类型和胶结类型中，常见有五种孔隙喉道类型（图5-4）：

- ① 孔隙缩小部分成为喉道
- ② 可变断面收缩部分成为喉道
- ③ 片状喉道
- ④ 弯片状喉道
- ⑤ 管束状喉道

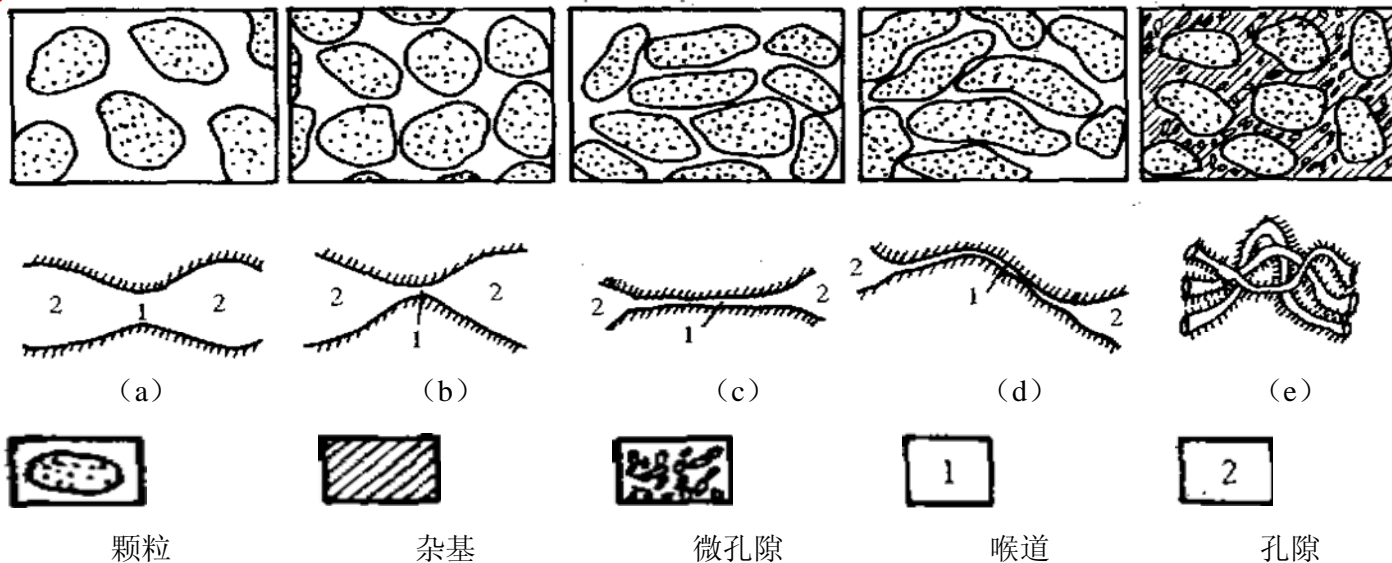


图 5-4 碎屑岩孔隙喉道的类型示意图（据罗蛰潭、王允诚，1986）

- (a) 喉道是孔隙的缩小部分；
- (b) 可变断面收缩部分是喉道；
- (c) 片状喉道；
- (d) 弯片状喉道；
- (e) 管束状喉道；

三、碳酸盐岩的孔隙和喉道类型

(一) 孔隙类型

1. 成因及形态综合分类

碳酸盐岩储集空间分为孔、洞、缝

●**孔或粒间—晶间孔隙**：主要为原生孔隙，包括粒间、晶间、粒内生物骨架等孔隙，空间的分布规则。

●**洞或溶洞—溶解孔隙**：主要为次生孔隙，包括溶洞或晶洞，无充填者为溶洞，有充填者叫晶洞。

●**缝或裂缝—基质孔隙**：是岩石受应力作用而产生的裂缝。

孔、洞、缝三大类中，又各自包括多种亚类（图5—5，表5—1）。

 粒间孔隙	 生物蚀孔孔隙	 粒间溶孔
 晶间孔隙	 生物骨架孔隙	 角砾状孔隙或裂缝
 粒内孔隙	 晶间孔隙	 溶洞
 体腔孔隙	 粒内溶孔	 裂缝
 生物骨架孔隙	 溶蚀孔隙	 裂缝

图 5—5 孔隙类型示意图（黑影部分代表孔隙）（据张万选，张厚福）



三、碳酸盐岩的孔隙和喉道类型

表 5—1 碳酸盐岩主要储集空间类型表 (据熊琦华, 1987)

储集空间类型		成因及分布形态	
孔 (粒间 ~ 晶间孔隙)	原生 孔 隙	粒间孔隙	碎屑颗粒、鲕粒、球粒、豆粒、晶粒、生物碎屑等之间的孔隙, 分布较均匀, 似砂岩。
		粒内孔隙	生物体腔内孔隙、孤立分布。
		生物格架孔隙	原地生长的造礁生物群软体部分分解后, 其坚固骨架之间的孔隙。分布有一定范围, 多呈块状。
	次生 孔 隙	晶间孔隙	晶体之间的孔隙, 主要为白云岩化、重结晶作用形成的孔隙。分布不均匀常与裂缝带共生, 少数原生晶间小孔隙分布较均匀。
角砾孔隙		构造角砾或沉积角砾之间的孔隙, 前者分布有一定范围, 后者较均匀, 似碎屑岩。	
洞 (溶解~ 溶蚀孔隙)	岩溶溶洞	与不整合面及古岩溶有关的溶蚀孔洞或缝。	
	溶蚀孔隙	在孔、缝基础上溶蚀形成的孔洞往往与裂缝分布有一致性。	
缝 (裂缝 ~ 基质孔隙)	构造缝	受构造应力作用形成的裂缝, 有短而小的层间缝, 也有大而长的穿层缝。	
	层间缝	在构造应力作用下, 薄层相对运动形成的缝。呈层状分布, 多发育在构造轴部。	
	成岩缝	成岩过程中岩石收缩形成的网状缝。	
	压溶缝	缝合线。为压溶作用的产物、呈锯齿状顺层分布。	



三、碳酸盐岩的孔隙和喉道类型

2. 碳酸盐岩储集空间的其它分类

(1) 按形成时间分类——原生孔隙及次生孔隙。

(2) 按孔径大小分类

溶洞大于2mm；溶孔大小为2.0至1.0mm；粗孔大小1.0至0.5mm；中孔大小为0.5至0.25mm；细孔大小为0.25至0.1mm；很细孔大小为0.1至0.01mm；极细孔小于0.01mm；也有分为两类：隐孔隙（孔径 $< 0.01\text{mm}$ ）和显孔隙（孔径 $> 0.01\text{mm}$ ）。

(3) 其它分类

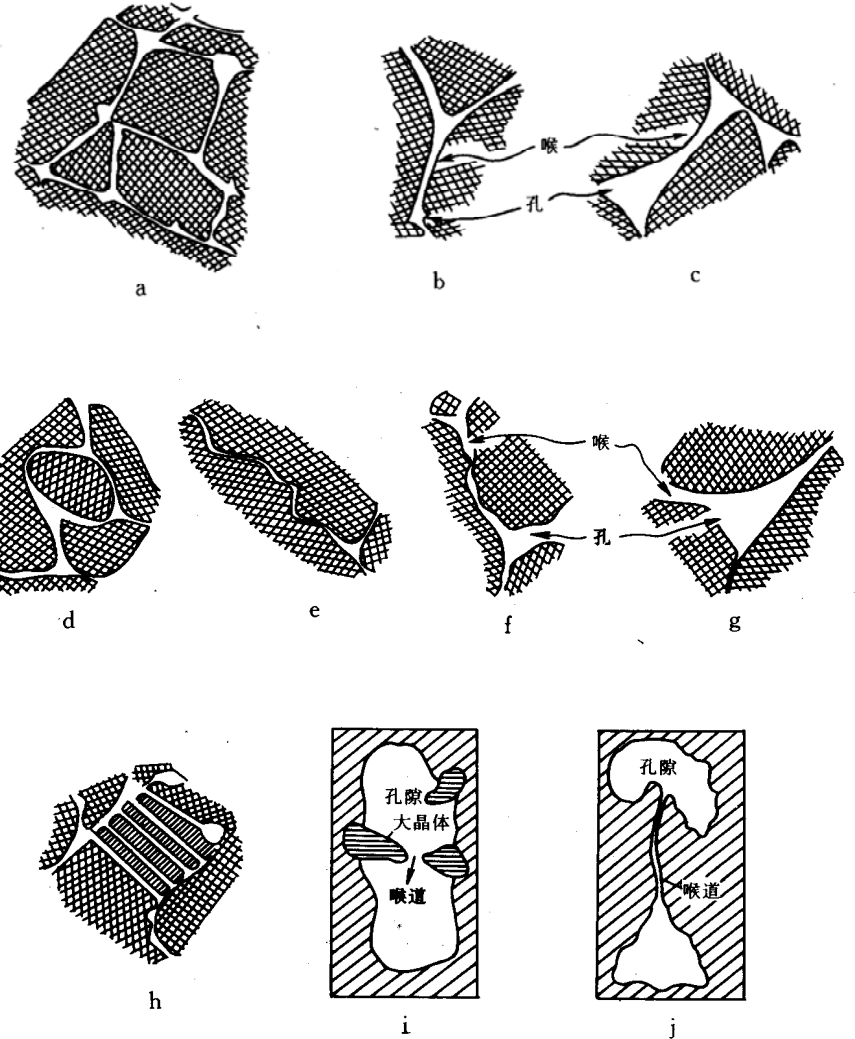
美国学者阿尔奇提出的基质结构的分类（类型I致密结晶质；类型II白垩质；类型III颗粒状或糖粒状）及其据孔隙直径大小分类（0.01、0.1、1mm）分为四类。以及流体渗滤及几何特征不同把裂缝性碳酸盐岩孔隙空间系统分为裂缝孔隙系统及基块孔隙系统。

三、碳酸盐岩的孔隙和喉道类型

(二) 喉道类型

吴元燕 (1996) 按喉道成因可分为如下五种喉道类型:

- (1) 构造裂缝型
- (2) 晶间隙型
- (3) 孔隙缩小型
- (4) 管状喉道
- (5) 解理缝型



a—微裂缝型; b—规则型; c—短喉型; d—弯曲型; e—曲折型; f—不平直型;
 g—宽度不等型; h—解理缝型 (据《碳酸盐岩储集层》, 1993)
 i—孔隙缩小型; j—管状喉道 (据罗蛰潭 王允诚, 1986)



四、火成岩与变质岩

(一) 火成岩孔隙类型

火成岩油气储集空间分为两种类型，即**孔隙和裂缝**。

1. 孔隙

- ①气孔：②斑晶间孔：③收缩孔：④微晶晶间孔：⑤玻晶间孔：
⑥晶内孔：⑦熔蚀孔：⑧胀裂孔：⑨塑流孔：

2. 裂缝

- ①构造裂缝：②隐爆裂缝：③成岩裂缝：
④风化裂缝：⑤竖直节理：⑥柱状节理：

按成因火山岩的储集空间还可划分为**原生储集空间和次生储集空间**两类。

3. 孔缝组合类型

各种储集空间多不是单独存在，而是呈某种组合形式出现。



表 5-2 火山岩储集空间类型 (据赵澄林, 1997, 以苏北闵桥地区火山岩为例)



孔隙类型		成因推断	充填情况、含油性	分布特征	对应岩类	组合
原生	粒	胶结物或自	孔隙残留, 充填弱,	多存在于角砾岩中	岩屑角砾岩、玄武	多与晶间 (缘)
	间孔	生矿物不足	含油性好		质自碎角砾熔岩	孔相连
	气孔	气体膨胀逸出	少~半充填, 与缝洞相连者含油性较好	分布在韵律层的中、上部	杏仁状玄武岩及角砾岩、具气孔的岩屑角砾岩	与溶缝、洞相连
	晶间孔	自生矿物的晶体间	半充填, 含油性取决于与缝洞相连的情况	孔隙较小, 呈微孔, 孔径小于 0.05 微米	杏仁状玄武岩、自碎角砾熔岩	与构造缝相连
次生	粒内孔	原生、自生矿物溶蚀, 含铁矿物转变成粘土后解理产生收缩缝	半充填, 与缝洞相连, 含油性好	韵律层的中上部	杏仁状玄武岩、火山碎屑岩	与溶缝、洞相连
	溶蚀孔、缝、洞	淋滤、溶蚀	未—半充填, 含油好	蛇曲状裂缝沿裂缝发育带, 岩流单元的顶部近断层处构造高部位	蚀变杏仁状玄武岩、玄武质自碎角砾熔岩、构造角砾岩破碎带	溶蚀构造复合缝, 与孔、洞、缝相连
	构造缝	构造应力作用	开启—半充填, 含油性好, 部分全~半充填, 不含油	较平直, 高角度开启或闭合, 有呈“X”型, 不同时期发育的缝切割, 近断层处发育	各类岩石均可, 但以致密玄武岩为主	溶蚀构造复合缝
	晶缘孔	晶体边缘的溶蚀	由于原生空隙扩大, 含油性好	自生矿物边缘	杏仁状玄武岩、火山碎屑岩	与晶间孔相连, 与溶蚀孔缝相连



四、火成岩与变质岩

(二) 变质岩孔隙类型

表 5-3 变质岩储集体中常见的储集空间及其特征（据赵澄林，1997）

成因类型	储集空间类型	特征
变晶成因	变晶间孔隙	变晶矿物间的孔隙，明显见于结晶程度较粗矿物间
	变余粒间孔隙	在变质程度较低岩石中保留原生空隙，也见残余的原碎屑岩中的粒间孔隙
	解理缝隙	沿矿物解理所形成的缝隙广泛见于各类有解理的矿物，受力或受风化作用后更明显
构造成因	构造裂隙	在岩石内呈平面或曲面延伸，有的集中成带状或扇形
	破碎粒间孔隙	因受应力作用造成的岩石破碎，在矿物、岩石碎屑之间形成的孔隙
物理风化成因	风化裂隙	当岩石暴露于地表，因风化、剥蚀作用产生的裂隙
	风化破碎粒间孔隙	因温差、冰冻等物理因素造成岩石的破碎、崩解，在碎块之间形成的孔隙
化学淋溶孔隙	溶蚀孔隙	在前期形成的孔隙，诸如变晶间、变余粒间、矿物晶体内，经溶蚀作用形成的孔隙
	溶蚀缝隙	在前期形成的裂隙，由于溶蚀扩大，或充填的裂隙在再溶蚀，常见到的有：解理溶蚀缝、构造溶蚀缝等

变质岩储集体的储集空间为**孔隙和裂隙**，多采用**成因—形态**分类。按成因或阶段性划分为**变晶的、构造的、物理风化的和化学淋溶的**储集空间。



第二节 孔隙结构的研究方法

目前研究孔隙结构的实验室方法很多、发展较快，总体上分为三大类。

- ▶ **间接测定法**，如毛细管压力法，包括压汞法、半渗透隔板法、离心机法、动力驱替法、蒸气压力法等。
- ▶ **直接观测法**，包括铸体薄片法、图像分析法、各种荧光显示剂注入法、扫描电镜法等。
- ▶ **数字岩芯法**，包括铸体模型法、孔隙结构三维模型重构技术，这是当前及今后的发展方向。

表 5-4 孔隙结构研究方法分类

分类	方法
间接测定法	毛细管压力法，包括压汞法、半渗透隔板法、离心机法、动力驱替法、蒸气压力法等
直接观测法	铸体薄片法、图像分析法、各种荧光显示剂注入法、扫描电镜法等
数字岩芯法	铸体模型法、数字岩芯孔隙结构三维模型重构技术



一、压汞法研究孔隙结构

测定岩石毛细管压力曲线的方法较多，但目前在油田中常用的方法主要有三种（在油层物理课程中讲过，这里不再详述）

- 1、半渗透隔板法 2、离心法 3、压汞法

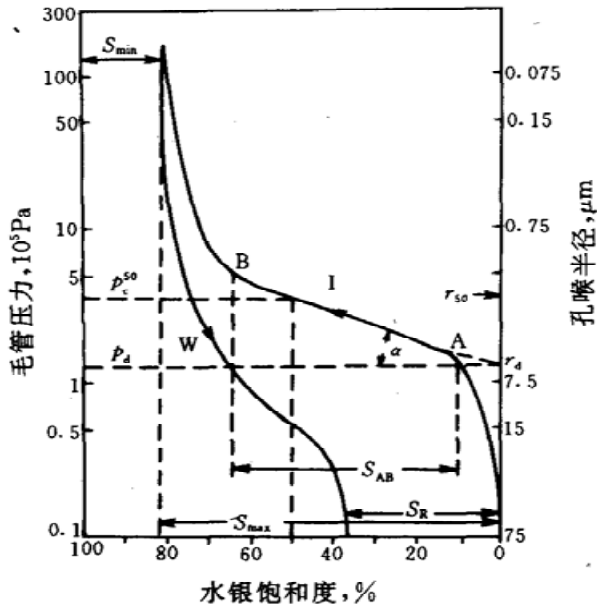


图 5-7 毛细管压力曲线

I—注入曲线；W—退出曲线
(据罗善潭、王允斌, 1986)

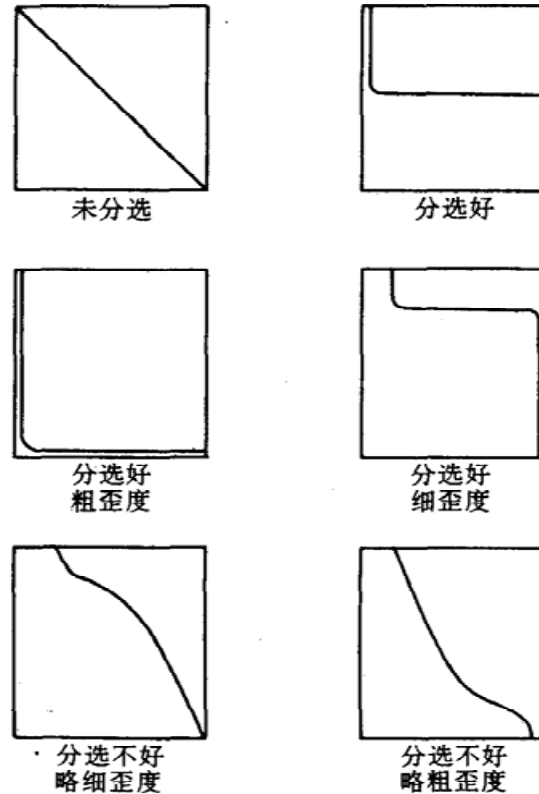


图 5-8 典型的理论毛细管压力

曲线形态示意图
(据 Chilingar 等, 1972)

一、压汞法研究孔隙结构

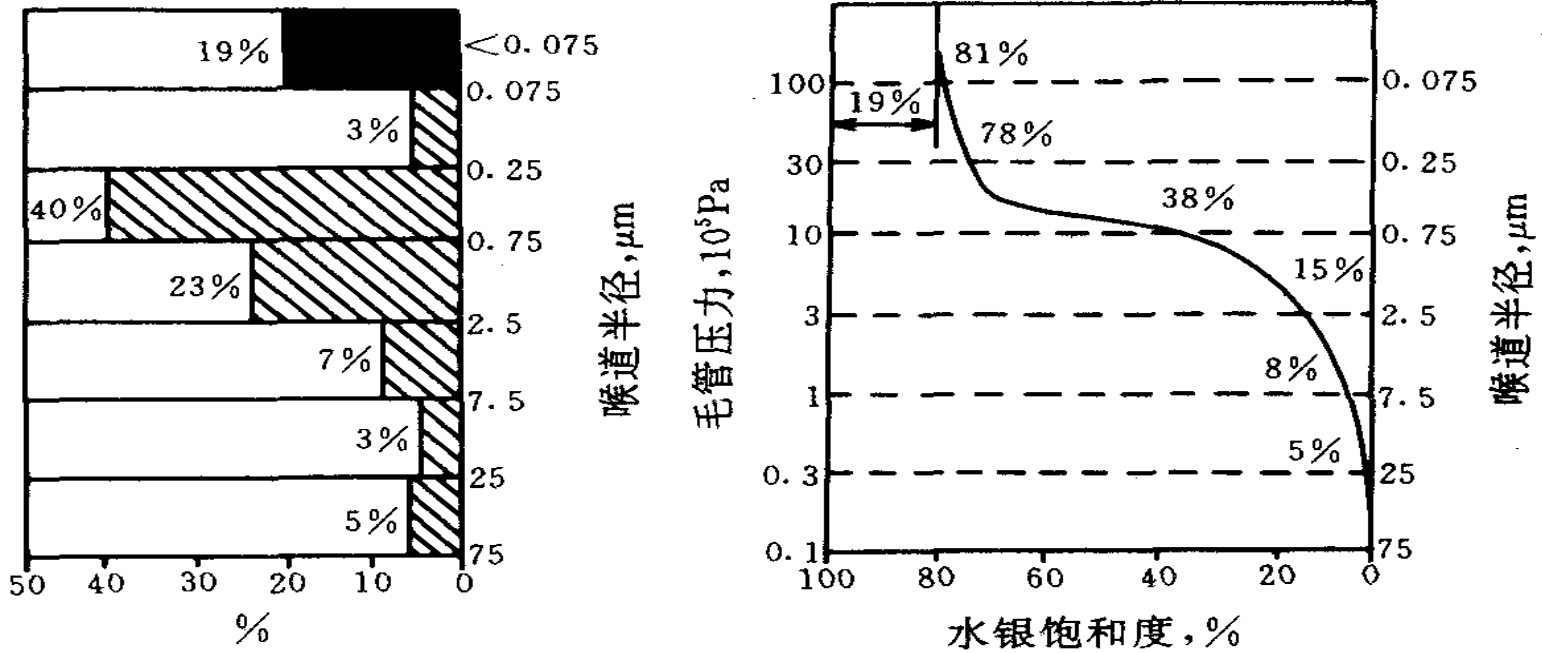
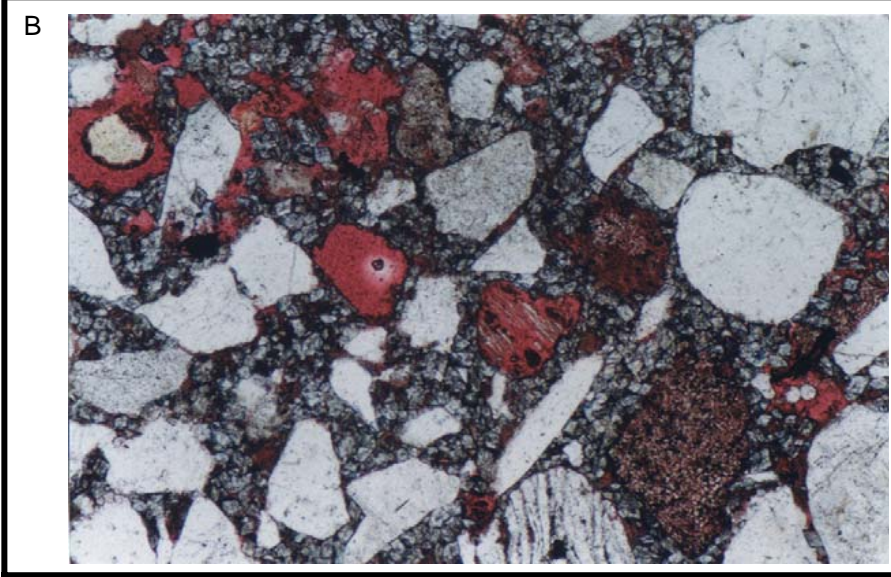
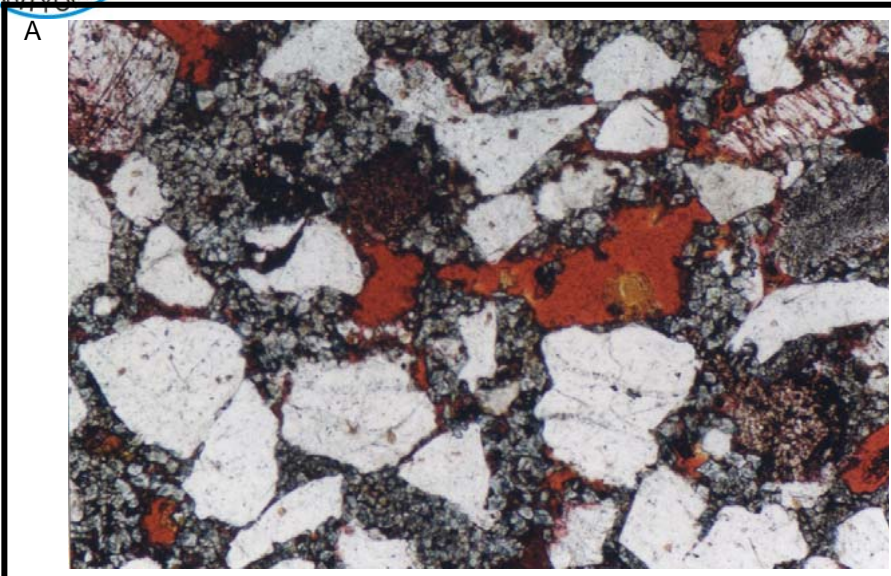


图 5-9 孔隙喉道大小的柱状频率分布图

右图横坐标为各等级孔喉体积占总孔隙体积的百分数

(据罗蛰潭、王允诚, 1986)

二、薄片法研究孔隙结构



镜下特征:													深度: 2777.3m 样品号:			
557 组 特 征	粒径(mm): 最大 1.48/主要区间 1.48-0.50										胶结类型: 孔隙					
	分选性: 中					磨圆: 次圆					石英加大: 个别					
碎屑 组 分 (%)	多晶 石英	单晶 石英	长石		火成岩		变质岩		沉积岩		其它		岩屑 总量	面 孔 率 (%)		
			斜 长 石	钾 长 石	火 山 岩	花 岗 岩	千 枚 岩	片 岩	糜 棱 岩	泥 岩	灰 岩	帘 石			云 母	
	2	89	/	3	6	/	/	/	/	/	/	/	6	9		
填 隙 物 (%)	基质		胶结物					填 隙 物 总 量 (%)	孔隙类型							
	泥 质	高 岭 石	方 解 石	铁 方 解 石	铁 质	铁 白 云 石	硅 质		黄 铁 矿	粒 间 孔	粒 间 溶 孔	粒 内 溶 孔	颗 粒 溶 孔	晶 间 孔	生 屑 内 孔	铸 模 孔
								1								

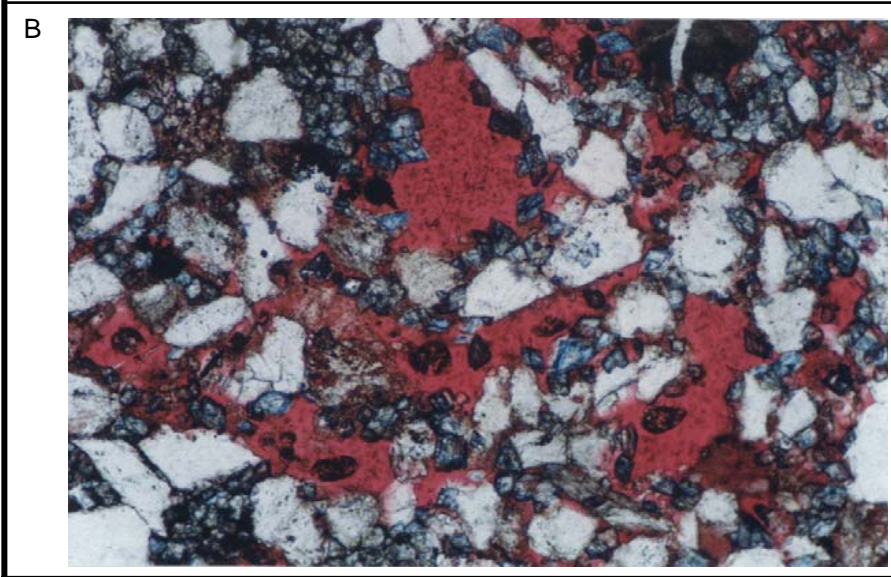
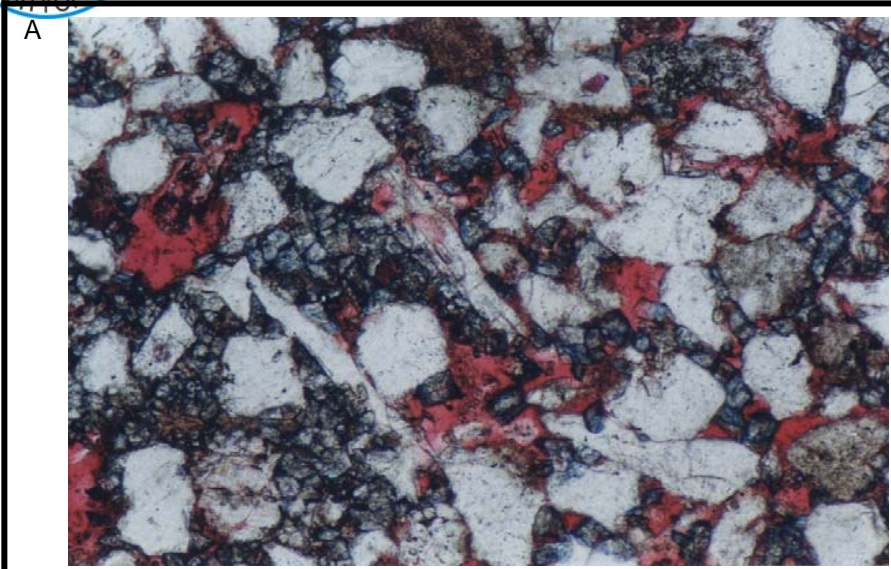
描述:

A: 20倍, 单偏光
白云石和铁白云石(粉晶, 自形)孔隙式胶结, 孔隙以粒间溶孔及铸模孔、粒间孔为主, 连通性极差。

B: 20倍, 单偏光
铸模孔、粒内溶孔。

特征描述:
粗砂与中砂混杂分布, 颗粒排列无定向, 颗粒之间为点接触, 火山岩岩屑蚀变深, 一类为硅化, 另一种为高岭石化(全由高岭石及其晶间孔组成, 外形轮廓保留完好), 白云石和铁白云石(粉晶, 自形)胶结, 孔隙以粒间溶孔及铸模孔、粒间孔为主, 连通性极差。

二、薄片法研究孔隙结构



镜下特征:															深度: 2774.3m 样品号:				
545 组 特 征	粒径(mm): 最大 0.28/主要区间 0.25-0.1										胶结类型: 孔隙								
	分选性: 好					磨圆: 次圆					石英加大: 个别								
碎屑 组 分 (%)	多晶 石英	单晶 石英	长石		火成岩		变质岩		沉积岩		其它		岩屑 总量	面 孔 率 (%)					
			斜 长 石	钾 长 石	火 山 岩	花 岗 岩	千 枚 岩	片 岩	糜 棱 岩	泥 岩	灰 岩	帘 石			云 母				
	3	82	/	9	5	/	/	/	/	/	<1	1	6	9					
填 隙 物 (%)	基质		胶结物					填隙 物总 量 (%)	孔隙类型										
	泥 质	高 岭 石	方 解 石	铁 方 解 石	铁 质	铁 白 云 石	硅 质		黄 铁 矿	粒 间 孔	粒 间 溶 孔	粒 内 溶 孔	颗 粒 溶 孔	晶 间 孔	生 屑 内 孔	铸 模 孔			
								2									/	13	/

描述:

A: 80倍, 单偏光
铁白云石多为零散分布, 交代颗粒。局部见较大的粒间溶孔。

B: 80倍, 单偏光
同上。

特征描述:
细砂含量95%, 碎屑近于等轴状, 无定向排列。此外含生屑(有孔虫)4%, 颗粒之间多为点接触, 一部分为漂浮状态, 白云石为自形粉晶, 常集中呈棒槌状, 不规则团块状分布, 铁白云石多为零散分布。孔隙孔径小, 连通性差, 分布亦不均匀。



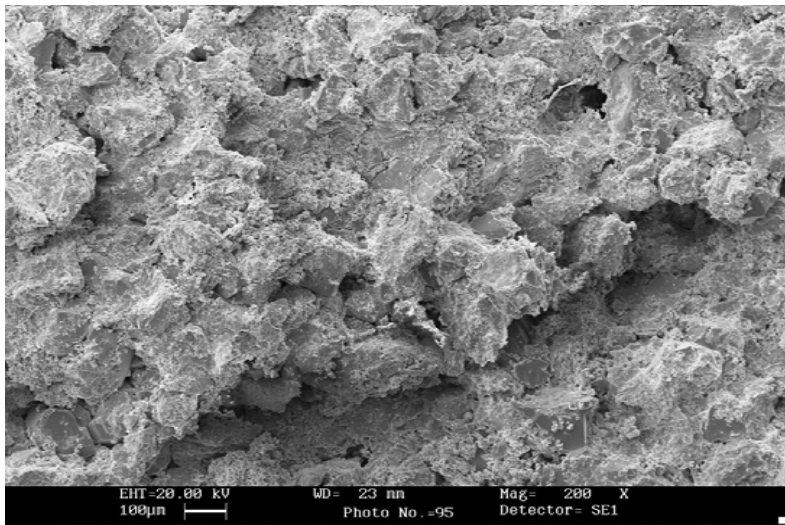
三、扫描电子显微镜（SEM）法

在薄片签定研究和X射线衍射粘土矿物分析的基础上，主要研究内容：

- 1、观察研究砂岩（砾岩）储层中**孔隙发育和充填**情况，深入分析孔隙结构类型（包括次生孔隙）、成因、组合特征（图5-15），测量孔隙和喉道的大小；
- 2、研究**碎屑大小排列及石英长石等的成岩演化**，即次生加大发育情况和程度，及其对孔隙的影响；
- 3、鉴定和研究**粘土矿物**的种类、大小、组合、分布、产状及其对孔隙和渗透性的影响；
- 4、鉴定和研究其它各种**自生胶结矿物**如浊沸石、方解石等的分布特征；
- 5、确定成岩**自生矿物的生成顺序**；
- 6、研究注水开发前后**储层孔隙结构变化**等；
- 7、测定储层**酸化**及流动性试验样品中矿物的成分变化及新的固体产物成分，为深入研究油层污染及损害机理提供新的微观资料。

三、扫描电子显微镜 (SEM) 法

A: PY30-95 (2764.28m, 样品号505)

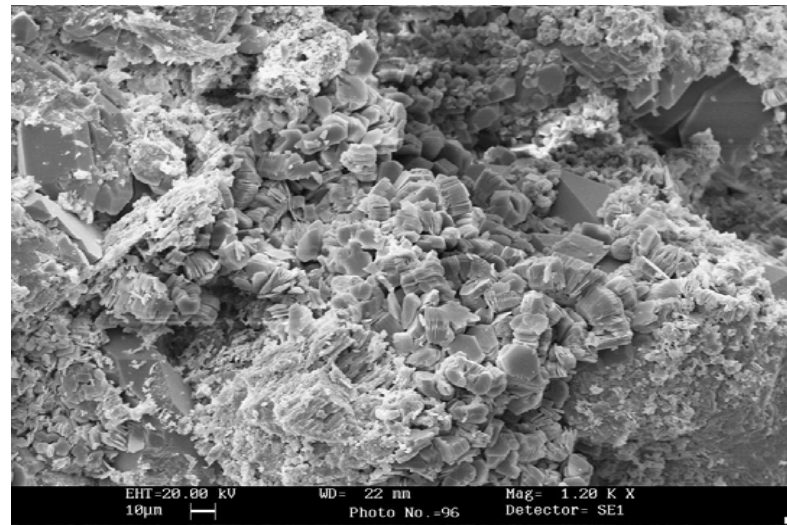


A:
全貌, 粒
间孔隙30
~
60 μ m.

B:
粒间高岭
石胶结
物。

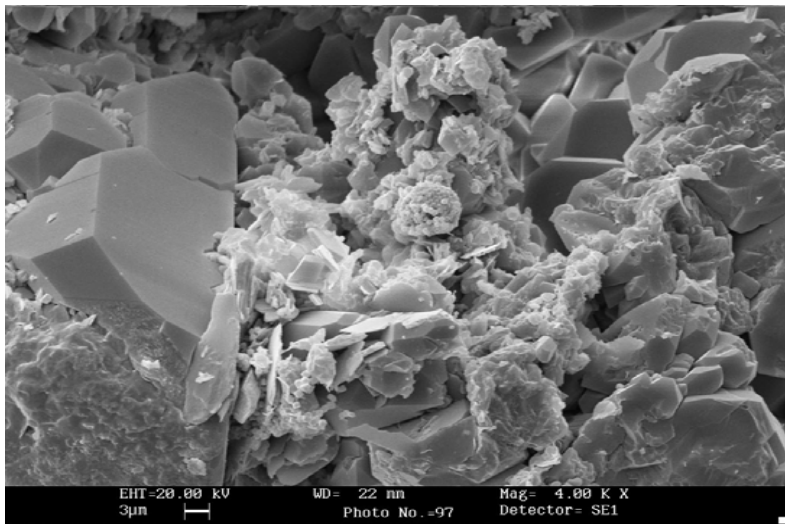
C:
石英表面
溶蚀坑内
黄铁矿及
片状伊利
石充填。

B: PY30-96 (2764.28m, 样品号505)

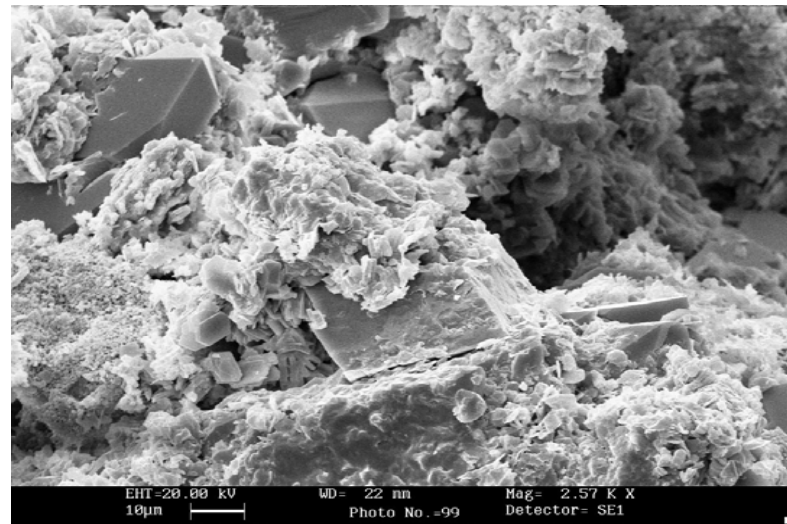


D:
粒间高岭
石与铁白
云石晶
体。

C: PY30-97 (2764.28m, 样品号505)

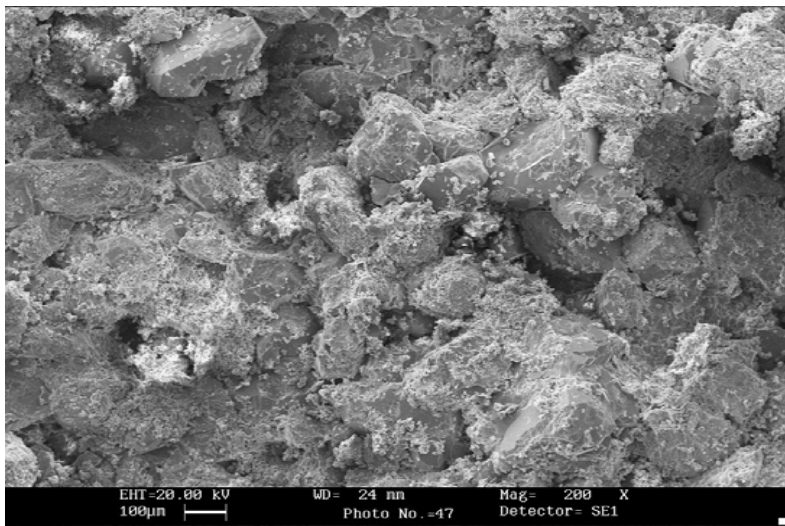


D: PY30-99 (2764.28m, 样品号505)



三、扫描电子显微镜 (SEM) 法

A: SSH-47 (2760.31m, 样品号463)



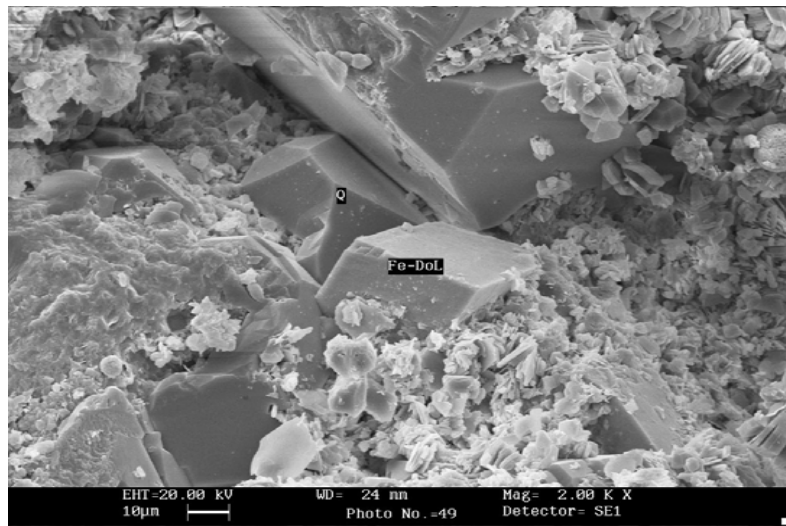
A:
全貌, 粒
间孔隙
20~
50 µm。

B:
粒间铁白
云石, 高
岭石, 石
英加大III
级。

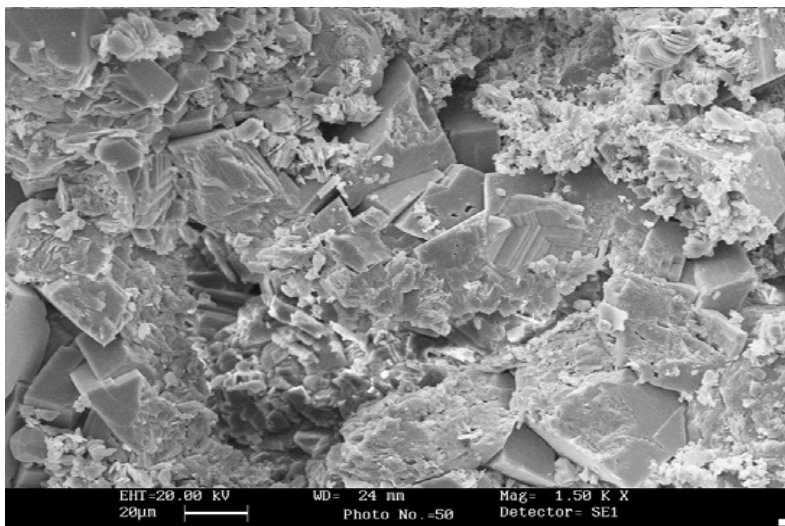
C:
粒间铁白
云石胶结
物。

D:
粒表高岭
石与黄铁
矿。

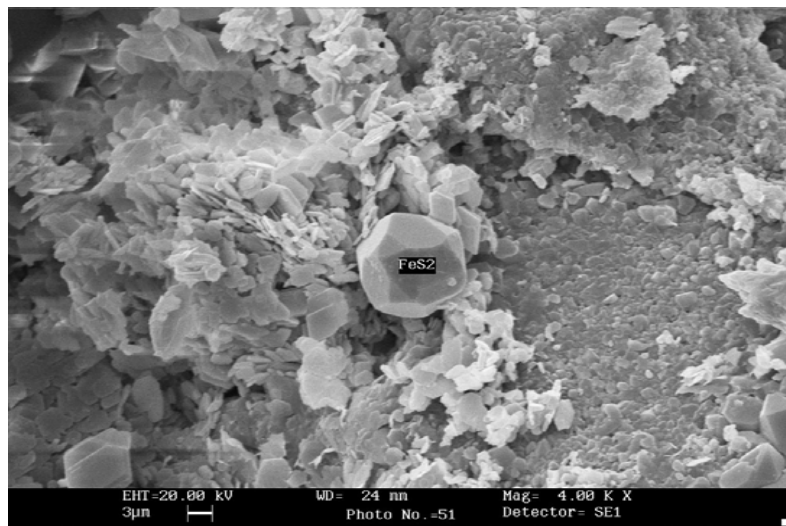
B: SSH-49 (2760.31m, 样品号463)



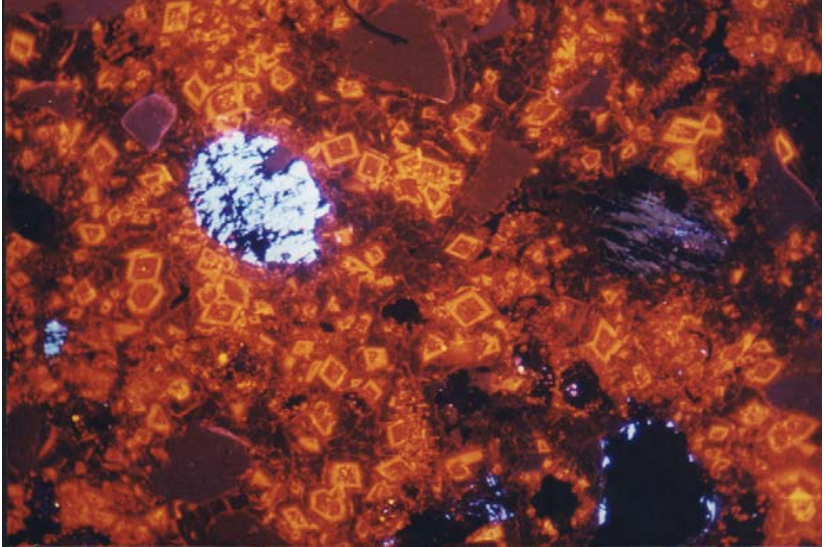
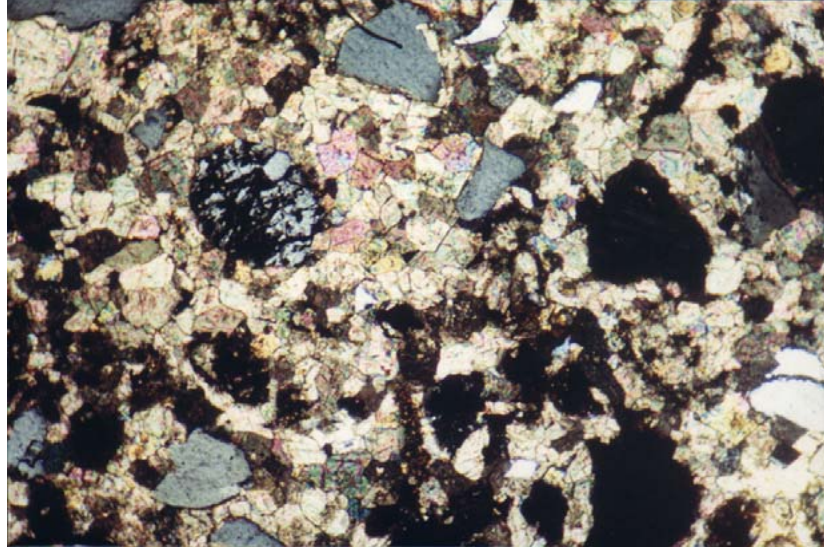
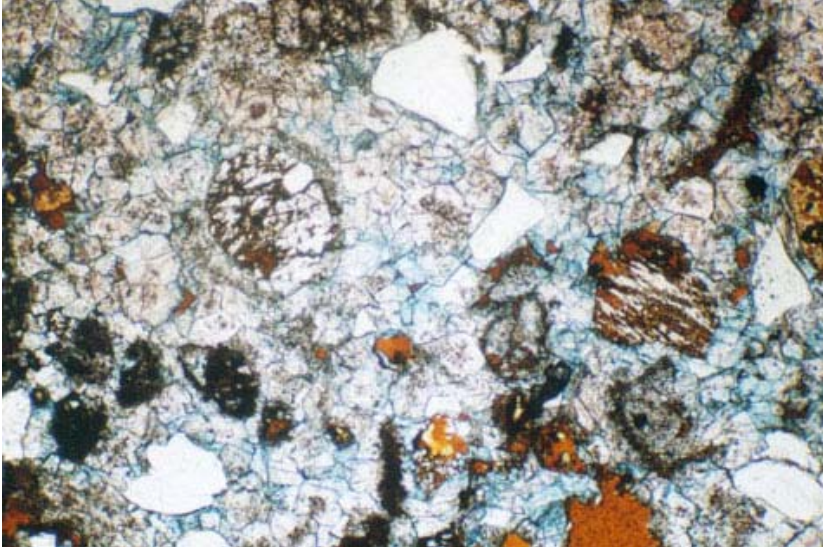
C: SSH-50 (2760.31m, 样品编号463)



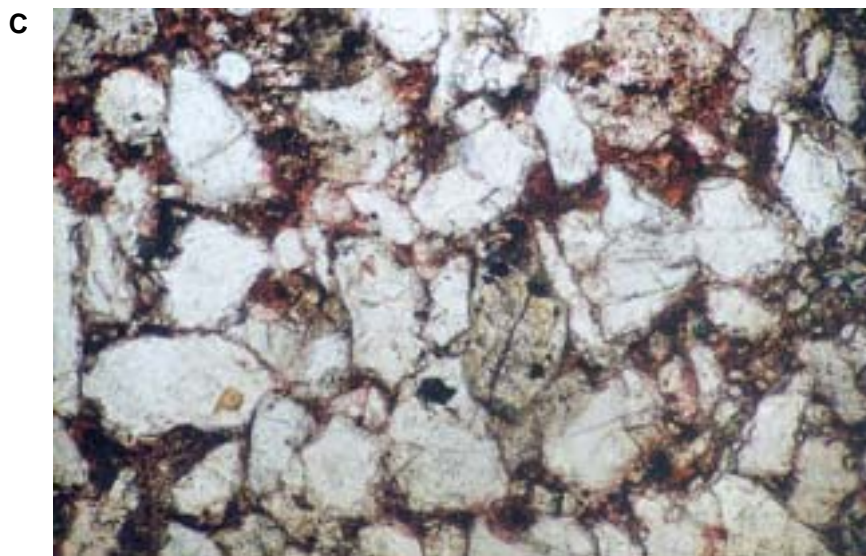
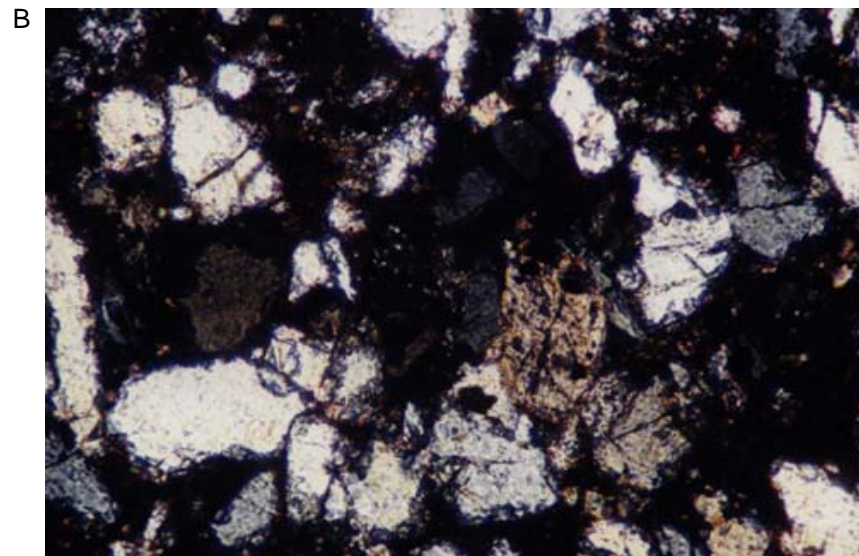
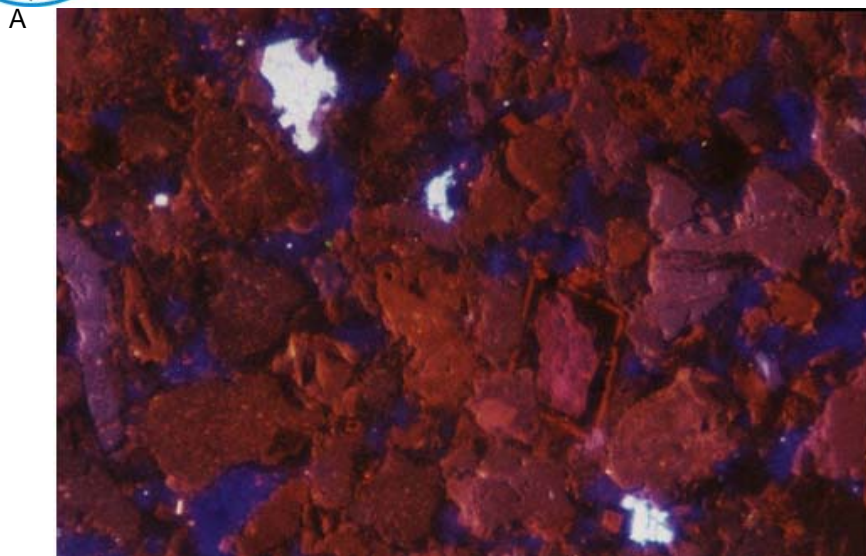
D: SSH-51 (2760.31m, 样品号463)



四、阴极发光法

<p>A</p> 	<p>B</p> 
<p>C</p> 	<p>描述: 深度: 2780.3m 样品号: 569</p> <p>A: 40倍, 阴极发光 白云石具环带结构, 自形、半自形, 核部发橙红色光, 环部发桔黄色光, 含铁白云石发暗橙红色光, 见钾长石为核的表鲕, 同心层已被白云石化, 见长石白蓝色、灰粉蓝色光。在白云石、含铁白云石充填后, 长石有溶蚀现象发生。石英发暗棕色、暗紫色光, 基本无加大现象。</p> <p>B: 40倍, 正交偏光 含铁白云石和白云石发育处。</p> <p>C: 40倍, 单偏光 同上。</p>

四、阴极发光法



描述：
号：513

深度：2766.28m样品

A: 100倍，阴极发光

白云石充填、交代，具单环结构，环带发桔红色光，其核部为发棕紫色光的石英颗粒。石英发棕色、棕紫色光，见石英次生加大现象，加大部分不发光，长石发白兰色光，可见后期有溶蚀，高岭石充填粒间发靛兰色光。

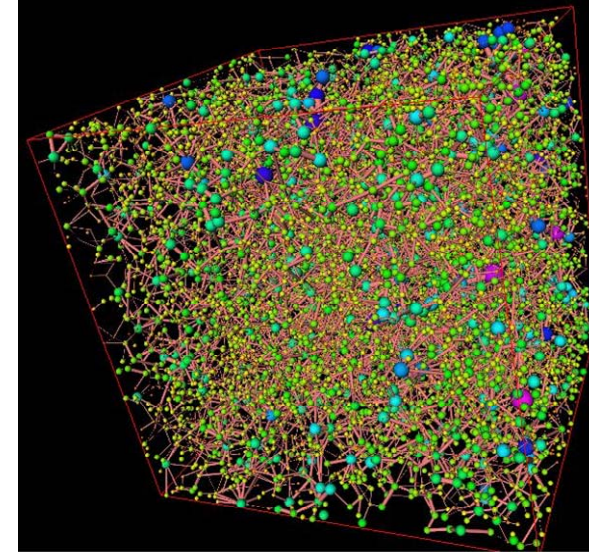
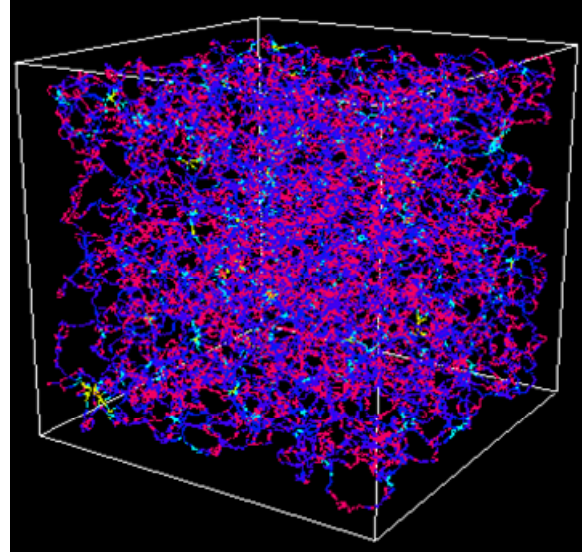
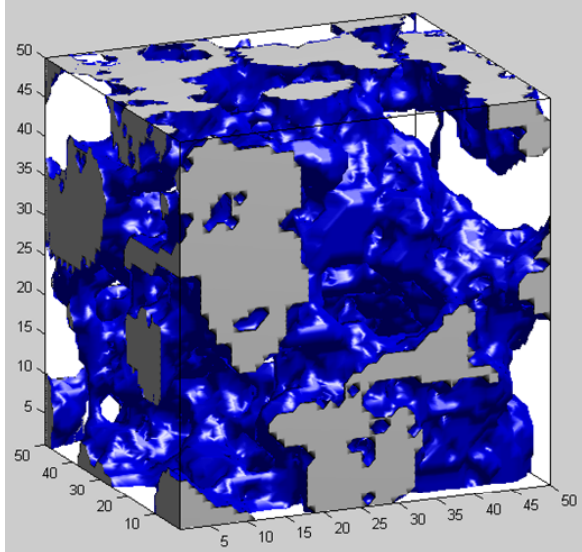
B: 100倍，正交偏光

白云石和高岭石充填粒间。

C: 100倍，单偏光

同上。

五、数字岩芯——孔隙结构三维模型重构技术



(a) 由 CT 切片形成的数字岩芯
3mm × 3mm × 3mm 立方体 3 万多
个孔隙和喉道组成

(b) 数字岩芯孔隙中轴线

(c) 基于岩心的孔隙网络模型

图 5—16 数字岩芯孔隙结构三维模型重构（据姚军，2006）

储层孔隙结构可用孔隙结构的直观写实图像（如铸体薄片、扫描电镜图片）、数字模型（如数字岩芯孔隙结构三维模型）、实体模型（如铸体模型），孔隙结构测试图件（如毛管压力曲线、孔隙喉道大小分布曲线等）及孔隙结构参数等来表征。

一、反映孔喉大小的参数

- 1、孔隙喉道半径及孔隙喉道大小分布
- 2、最大孔隙喉道半径 R_d 及排驱压力 p_d
- 3、毛细管压力中值 p_{50}
- 4、孔隙喉道平均值 R_m 和孔隙喉道半径中值 R_{50}
5. 主要流动孔喉半径平均值（ R_z ）
6. 难流动孔喉半径（ R_{min} ）

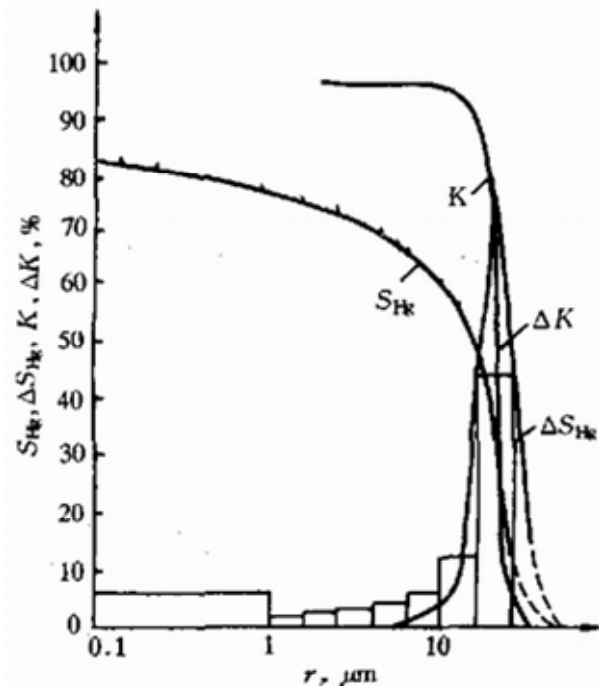


图 5—17 孔喉半径、汞饱和度

及渗透分布曲线（据韩锦文，1978，稍作修改）

S_{Hg} —累积汞饱和度； ΔS_{Hg} —某一孔喉半径区间汞饱和度；
 K —累计渗透率百分数； ΔK —某一孔喉半径区间渗透率百分数；
 r —孔喉半径



二、反映孔隙喉道分选特征的参数

1. 孔隙喉道分选系数 S_p

S_p 是指孔隙喉道的均匀程度，其经验公式为：

$$S_p = \frac{D_{84} - D_{16}}{4} + \frac{D_{95} - D_5}{6.6} \quad (\text{式 5-18})$$

S_p 越小，孔隙喉道越均匀，分选越好。显然在其他条件相同时， S_p 越小越好，这是因为同一岩石孔隙半径相近，注入剂驱油均匀。

2. 孔隙喉道歪度 S_{kp}

S_{kp} 用以度量孔隙喉道频率曲线的不对称程度，即非正态性特征，其经验公式为：

$$S_{kp} = \frac{(D_{84} + D_{16} - 2D_{50})}{2(D_{84} - D_{16})} + \frac{(D_{95} + D_5 - 2D_{50})}{2(D_{95} - D_5)} \quad (\text{式 5-19})$$

孔隙喉道频率曲线左侧（ ϕ 值小）陡，右侧（ ϕ 值大）缓为正歪度，反之为负歪度。曲线两侧陡缓差异越大，歪度绝对值则越大。



二、反映孔喉分选特征的参数

3、孔隙喉道峰态 K_p

K_p 可反映孔隙喉道频率曲线峰的宽度及尖锐程度，其经验公式为：

$$K_p = \frac{D_{95} - D_5}{2.44(D_{75} - D_{25})} \quad (\text{式 } 5-20)$$

显然， K_p 越大，峰越窄越尖，说明孔喉多集中于某一半径区间的小范围内。

4、孔隙喉道分布峰数 N 、峰值 X 、峰位 R_0

峰数 N 是指孔隙喉道频率曲线中峰的个数。据此可分成单峰、双峰和多峰型。

峰值 X 是指占孔隙喉道体积百分比最高的孔喉半径处的体积百分数。

峰位 R_0 是指孔隙喉道分布峰值处所对应的孔喉半径。

5、均值系数 α

表征储集岩孔隙介质中每个喉道半径 r_i 与最大喉道半径 (r_{\max}) 的偏离程度对汞饱和度的加权。

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{r_{\max}} \cdot \Delta S_i}{\sum_{i=1}^n \Delta S_i} \quad (\text{式 } 5-21)$$

式中 r_i ——孔喉半径分布函数中某一孔喉半径； r_{\max} ——最大孔喉半径；

ΔS_i ——对应于 r_i 的某一区间汞饱和度。

从上式可见， α 的变化范围在 0—1 之间， α 愈大，孔喉分布愈均匀。当 $\alpha=1$ 时，为极均匀。



三、反映孔喉连通性及控制流体运动特征的参数

1. 退汞效率 W_e

在限定的压力范围内，以最大注入压力降到最小压力时，从岩样内退出的水银体积占降压前注入的水银总体积的百分数，反映了非润湿相毛细效应的采收率（图 5—19）。

$$W_e = \frac{S_{max} - S_R}{S_{max}} \times 100\% \quad (\text{式 5—22})$$

- 式中 S_{max} ——实验最高压力时累计汞饱和度；
- S_R ——退汞结束时，残留在孔隙中的汞饱和度；
- W_e ——退汞效率，用百分数表示。

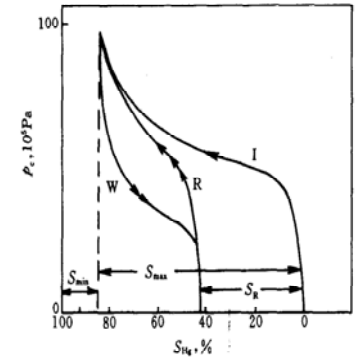


图 5—19 汞注入 (I)、退出 (W)、再注入 (R) 曲线与毛管压力的关系图 (据吴云燕, 1996)

2. 孔隙喉道比

孔喉比是指孔隙大小与喉道大小的比值，比值越高、渗透能力越低；反之，比值越低、渗透能力越高。与之相适应的是：在开采时，前者在孔隙空间系统中残留的非润湿相流体多，后者则残留的非润湿相流体少，也就是说，当孔喉比增高时，采收率则降低

3. 孔喉配位数 (配合数)

配位数指连通每一个孔隙的喉道数量，它是孔隙系统连通性的一种量度

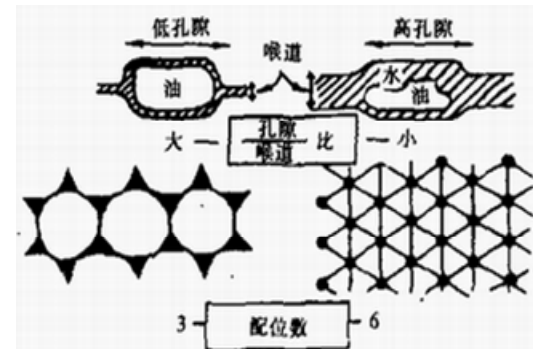


图 5—21 孔隙与喉道大小的比值和配位数及其对非润湿相采收率影响示意图 (据 Wardlaw, 1978)



三、反映孔喉连通性及控制流体运动特征的参数

4. 孔隙曲折度（又称弯曲系数）

孔隙结构的曲折度是指孔隙空间系统中，两点之间沿连通孔隙的距离与两点间直线距离之比值，它在一维空间表现孔隙结构特征。

5. 最小非饱和孔喉体积百分数（ S_{min} ）

表示注入水银压力仪器达最高工作压力时，未被水银侵入的孔喉体积百分数。 S_{min} 大，表示岩石小孔喉所占体积大。

6. 孔隙结构综合评价系数（ B_z ）

是综合反映孔隙结构好坏的参数。 B_z 愈大，渗流特征愈好。

$$B_z = V_z \cdot R_z / L \quad V_z \text{——与} R_z \text{对应的孔喉总体积。}$$

7. 视孔喉体积比（ V_R ）

是度量孔隙体积与喉道体积的数值。根据沃德洛（Wardlaw）试验，认为水银的退出主要视为从喉道中退出，而孔隙中仍保持充满水银。因此视孔喉体积比可用下式表示：

$$V_R = (\text{水银注入率} - \text{水银退出率}) / \text{水银退出率}$$



三、反映孔喉连通性及控制流体运动特征的参数

8. 结构均匀度 ($\alpha \cdot We$)

表征岩石孔隙结构的均匀、连通程度的参数。完整地反映了注入曲线与退出曲线的特征。由上可见，岩石孔隙结构的非均质性决定了岩石的储集和渗流特征及其差异，孔隙结构特征控制着流体微观渗流过程、注入剂微观驱油效果及剩余油和残余油的形成。



第四节 孔隙结构的分类与评价



一、孔隙结构的基本分类

1. 按孔隙与喉道大小组合分类

表 5-8 孔喉分类及孔喉组合类型表 (据张绍槐, 1993)

类型	喉道分级界线 (半径) . μm	孔隙中值界线 (直径) . μm
孔隙类型	粗喉道 >7.5	大孔型 >60
	中喉道 $7.5\sim 0.62$	中孔型 $60\sim 30$
	细喉道 $0.61\sim 0.063$	小孔型 $30\sim 10$
	微喉道 <0.063	微孔型 <10
孔喉组合类型	A1 粗喉道——B1 大孔型	A1B1 型 A1B2 型
	A2 中喉道——B2 中孔型	A2B1 型 A2B2 型 A2B3 型
	A3 细喉道——B3 小孔型	A3B2 型 A3B3 型 A3B4 型
	A4 微喉道——B4 微孔型	A4B3 型 A4B4 型

2. 据孔、洞、缝大类孔喉组合分类

将孔隙、裂缝、溶洞看作三大类孔喉类型，并据此将储层孔隙结构分为单一、双重、三重孔隙结构类型。

一、孔隙结构的基本分类

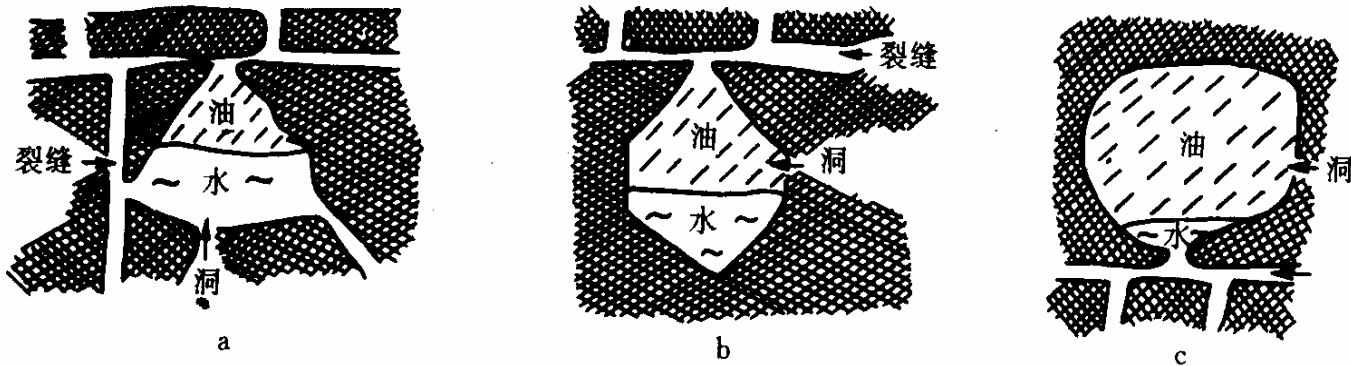
3. 按孔隙结构的特点和对开发效果的影响分类

吴元燕（1996）按孔隙结构的特点和对开发效果的影响将碳酸盐岩孔隙结构分为以下四种类型。

1) 大缝洞型孔隙结构

以宽度大于0.1mm的裂缝为喉道，连通大中型溶洞所组成的孔隙结构。可细分为以下几种类型。

- ① 宽喉均质型 ② 下洞上喉型 ③ 上洞下喉型



a—均质型； b—下洞上喉型； c—上洞下喉型

一、孔隙结构的基本分类

2) 微缝孔隙型孔隙结构

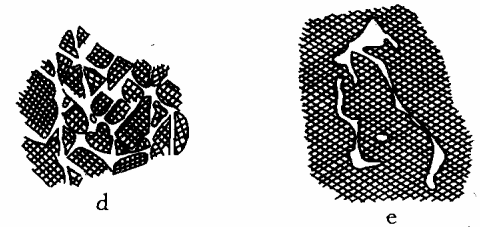
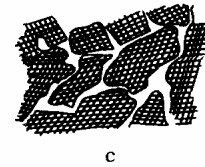
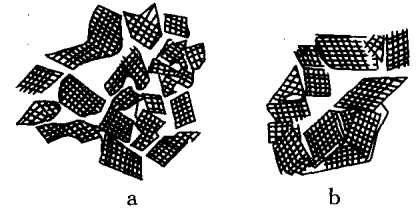
是以微裂缝及晶间隙为喉道，连通各种孔隙和小型洞所组成的孔隙结构。主要可分为三种类型。

- ① 短喉型： ② 网格型： ③ 细长型：

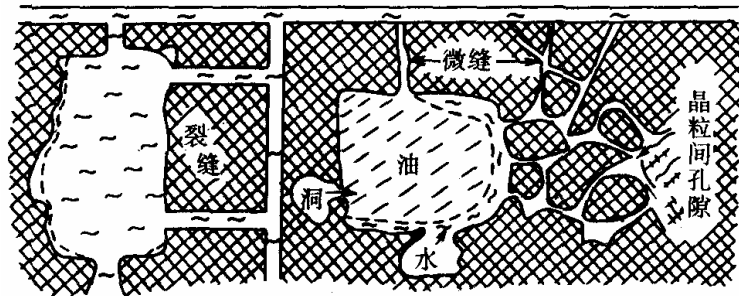
3) 裂缝型孔隙结构

储集空间和喉道均为裂缝，孔洞极不发育。若裂缝宽度大、密度大、分布均匀，则储集性能好。

4) 复合型孔隙结构: 大裂缝、溶洞与微裂缝、小孔隙的各种不同形式和不同数量组合而成的孔隙结构



a、b—短喉孔隙结构；c—晶间网状孔隙结构；d—微裂缝网格状孔隙结构；e—弯曲细长孔隙结构

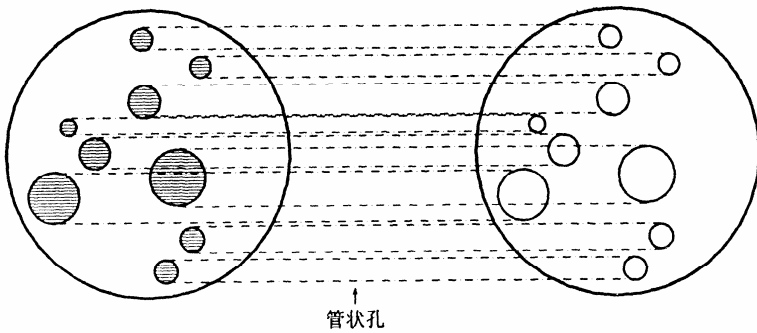


复合型孔隙结构模式图

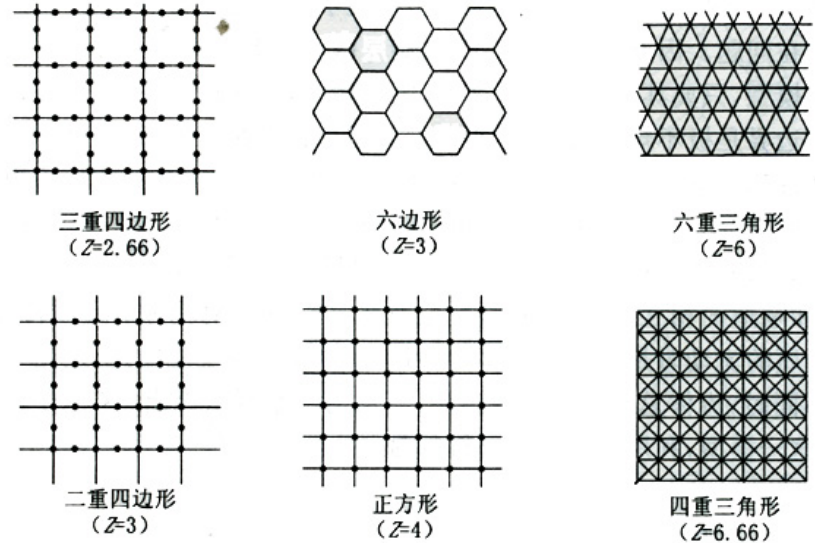
一、孔隙结构的基本分类

4. 孔隙结构简化模型

- (1) 毛细管束模型： (2) 管子网络模型： (3) 球形孔隙段节模型
 (4) 普通孔隙段节 (GPS) 模型：



毛细管束孔隙结构模型



管子网络孔隙结构模型



二、孔隙结构的综合分类

许多学者从不同角度提出过很多划分方案，但还没有统一标准。

1. 罗蛰潭教授分类方案：根据我国一些主要砂岩油气层近一千块岩样的毛细管压力特征和孔隙铸体薄片观察结果，将我国砂岩储集层分为四类。

2. 邸世祥教授分类方案：邸世祥教授据压汞资料的排替压力 (P_d)、喉道均值 (x)、毛管压力曲线特征；常规物性；主要岩性；主要孔隙类型及其连通情况等将碎屑岩储集层孔隙结构分为三级六亚级，即好 (I)、中 (II)、差 (III) 三级，最好 (IA)、次好 (IB)、中上 (IIA)、中下 (IIB)、次差 (IIIA)、极差 (IIIB) 六亚级 (表5—10)。

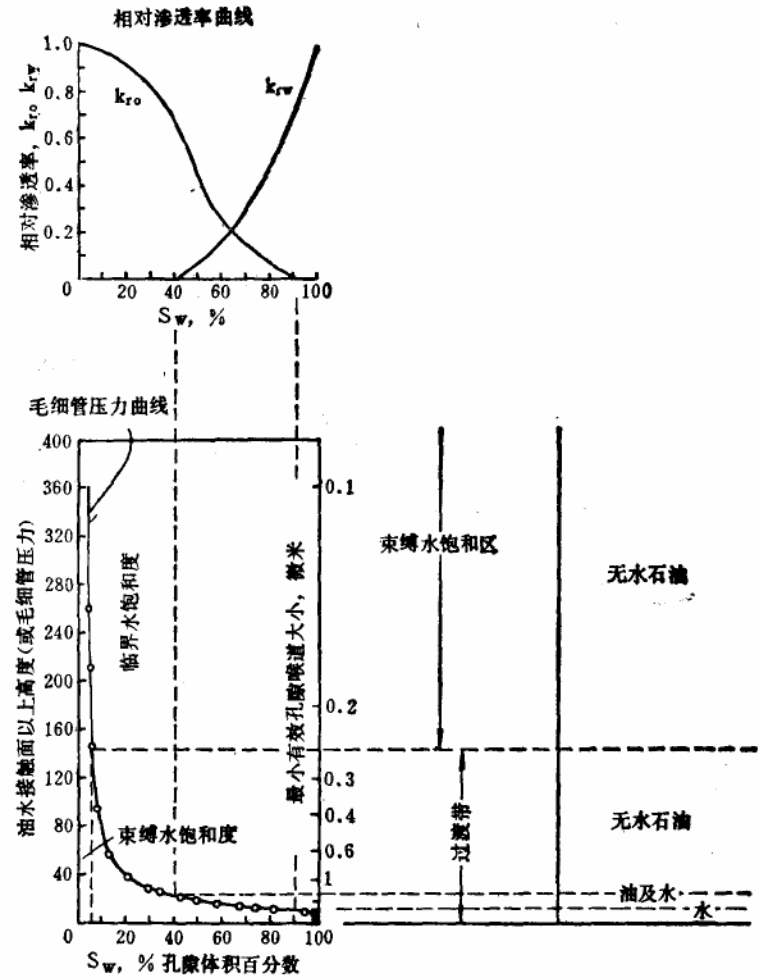
3. 其它分类方案：如张研农曾根据压汞试验资料把低渗透砂岩储集层的孔隙结构分为 I—V 级，它们的排驱压力 (P_d)、中值压力 (P_{50}) 及束缚水饱和度 (S_{wi}) 分别为： <0.5 、 $0.5 \sim 1$ 、 $1 \sim 3$ 、 $3 \sim 5$ 、 >5 、 0 MPa； <2 、 $2 \sim 3$ 、 $3 \sim 8$ 、 $8 \sim 15$ 、 >15 、 0 MPa； <25 、 <30 、 <40 、 <45 %。谢庆邦在划分低渗透储集层孔隙结构时首先把孔隙喉道按大小进行分级，进而根据二者的结合，将孔隙结构也分为五级，即中孔粗细喉道、中小孔细喉道、小孔微微喉道、微细孔微喉道及微孔微喉道级别。



第五节 孔隙结构的应用



- 一、储层评价
- 二、油（气）藏最小喉道下限及变化规律
- 三、预测储集层的生产能力
- 四、驱替效率与油气采收率
- 五、油田开发过程中的储层孔隙结构变化



由毛细管压力曲线及相对渗透率曲线确定储集层的生产能力



思考题

1. 孔隙、喉道、孔隙结构的概念是什么？
2. 简述碎屑岩的孔隙和喉道类型。
3. 简述碳酸盐岩的孔隙和喉道类型。
4. 简述储集层孔隙结构研究方法。
5. 什么是毛管压力曲线？它有什么作用？
6. 定量评价孔隙结构的参数有哪些？
7. 孔隙结构有哪些分类？
8. 孔隙结构简化模型有哪些？其优缺点是什么？
9. 如何用储层孔隙结构预测产液性质和产液能力？
10. 孔隙结构对石油采收率有什么影响？