第二章 岩心分析技术

油气藏地质及开发工程国家重点实验室
中国石油天然气集团公司油井完井技术中心
西南石油大学新能源研究中心

2011年03月13日

岩心分析技术

岩心分析是认识油气层地质特征的必要手段，油气层的敏感性评价、损害机理的研究、油气层损害的综合诊断、保护油气层技术方案的设计都必须建立在岩心分析的基础之上。所以，岩心分析是保护油气层技术系列中不可缺少的重要组成部分，也是保护油气层技术这一系统工程的起始点



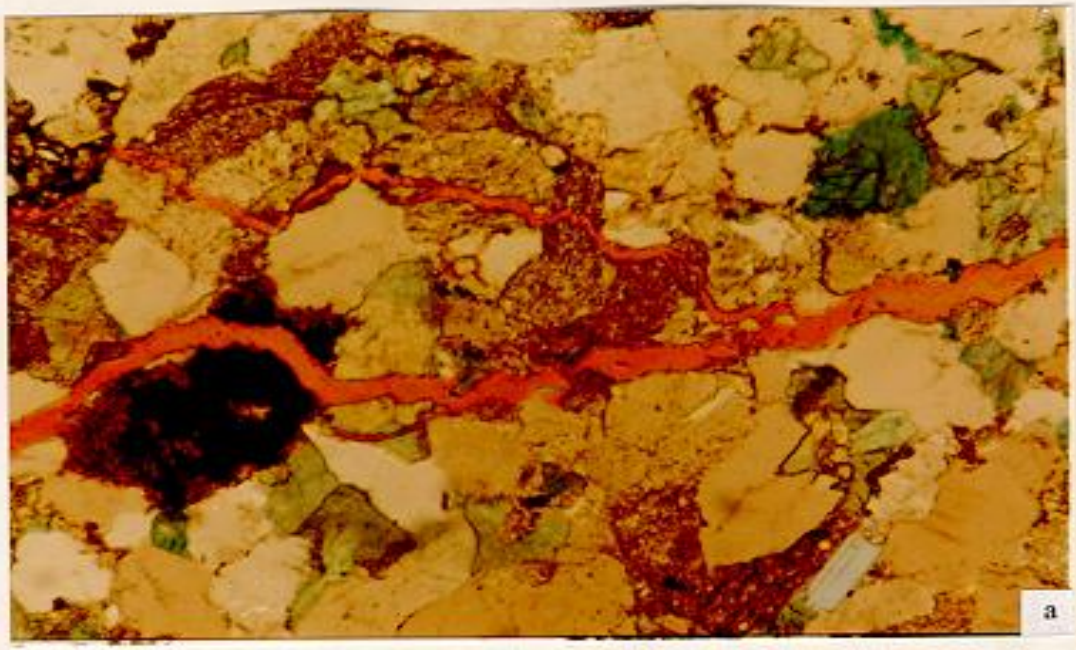
川西新场气田，侏罗系沙溪庙组



鄂尔多斯盆地北部气田，二叠系



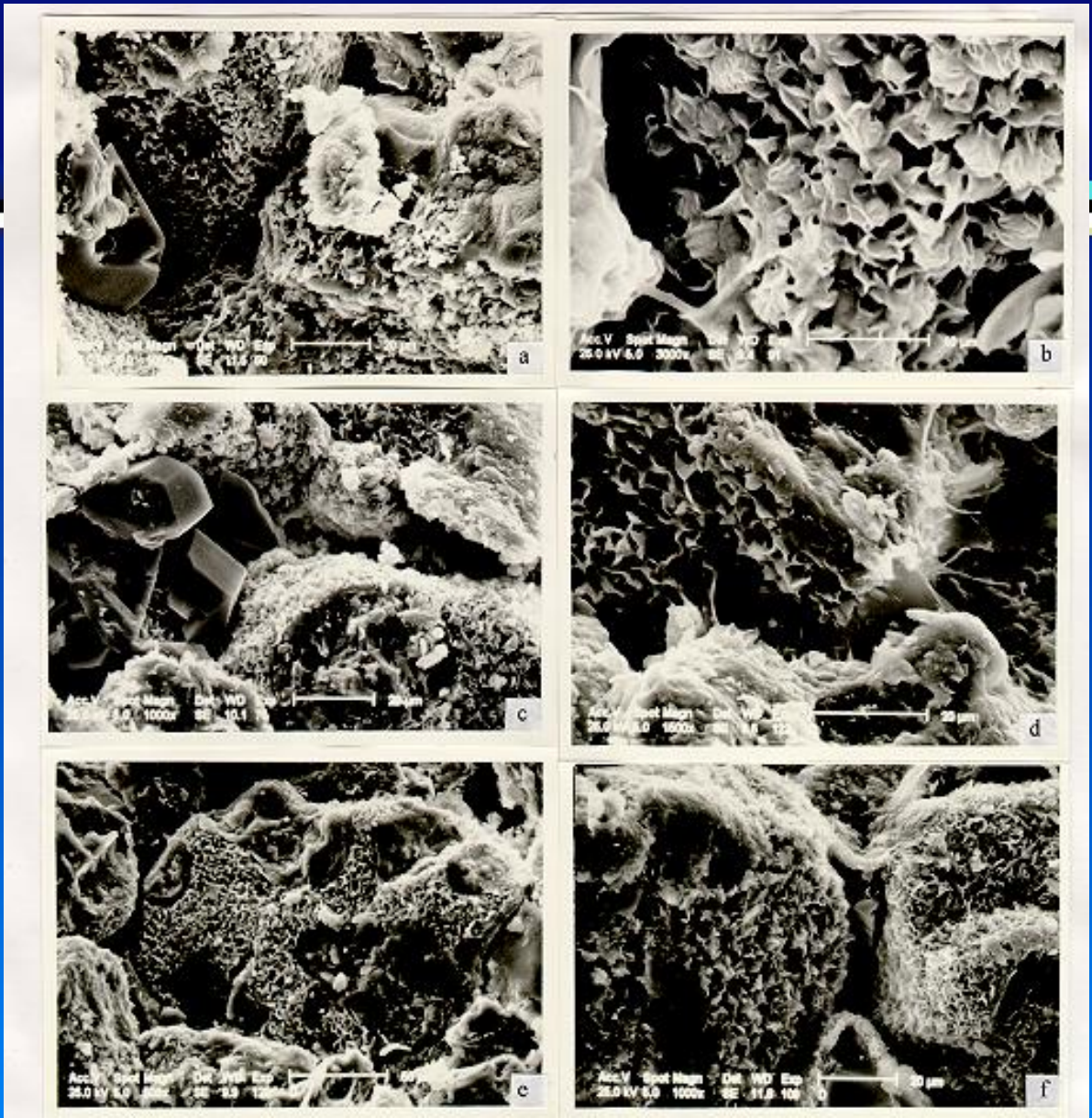
哈萨克斯坦扎那若尔油田，石炭系





微裂缝系统

放大50倍



样品采自川西新场蓬莱镇组砂岩

储层的物理化学性质主要取决于粘土矿物的结构特性

1 概 述

1.1 岩心分析的目的

- 评价油气层岩石物理性质
- 揭示岩石中敏感性矿物类型、产状、含量和分布特点
- 确定潜在损害类型、程度和原因
- 为保护方案设计提供依据和建议

1.2 油气藏工程地质描述



- 保护油气层技术的基础
- 岩心分析是工程地质描述的重要手段
- 工程地质描述的目的：
  - 准确认识油气层的初始状态
  - 打开油气层后对环境变化后的响应

（1）微观尺度

——孔隙、颗粒尺寸分布

——矿物类型、结构

（2）宏观尺度

——岩心孔隙度、渗透率

——岩心饱和度、润湿性

——天然裂缝

（3）大型尺度

——测井、地震数据

（4）巨型尺度

——试井、油藏规模

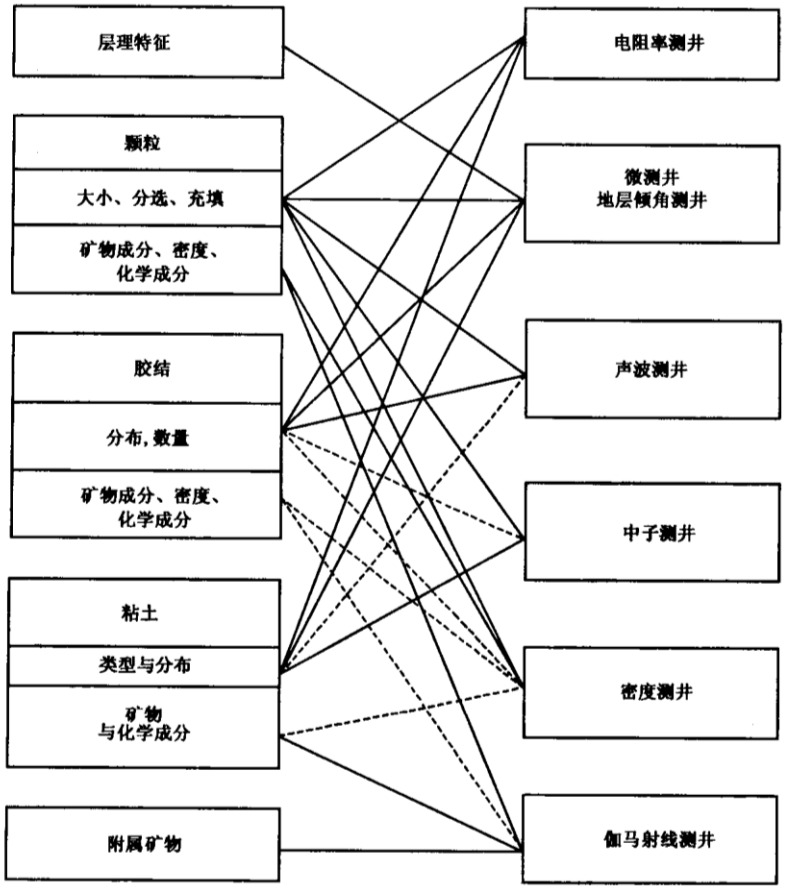


图 6.1　用于确定地层特征的测井技术

（据 Weber，1986；经作者和学院出版社许可重印）

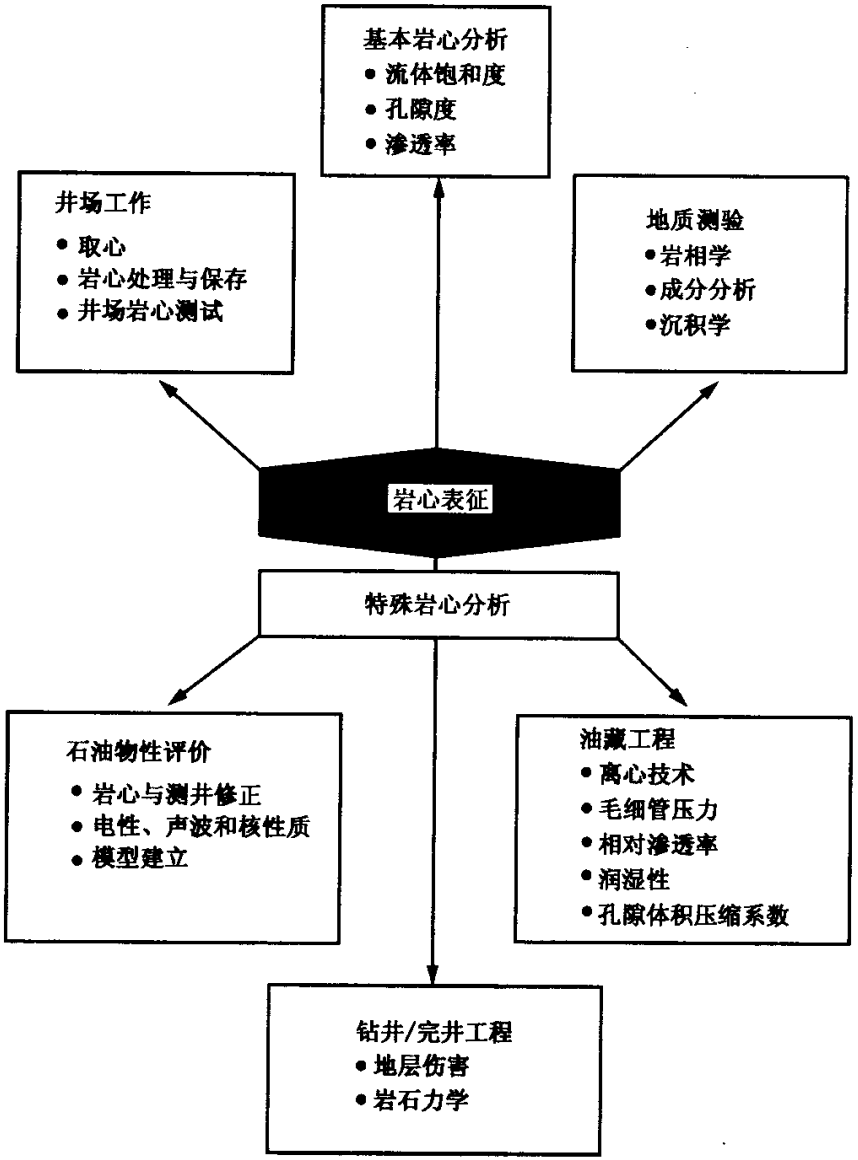


图 6.2　岩石综合表征要素

（据 Skopec，1992；经 SPWLA 许可重印）

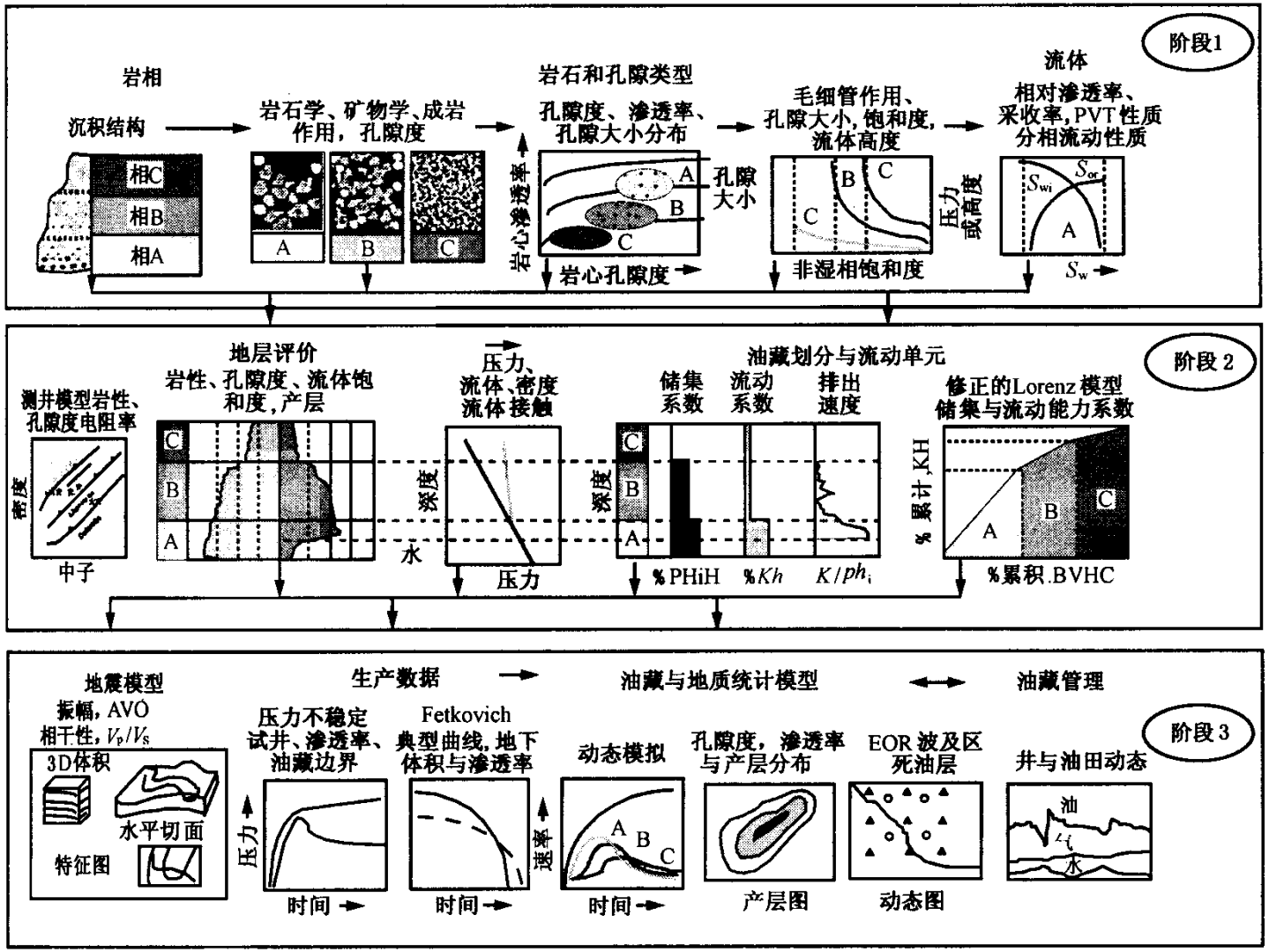


图 6.3　地层表征和评价的岩石物理综合研究

（据 Gunter 等，1997 SPE；经石油工程师协会许可重印）

1.3 油气藏工程地质描述内容

（1）矿物性质：敏感性矿物类型、产状和含量

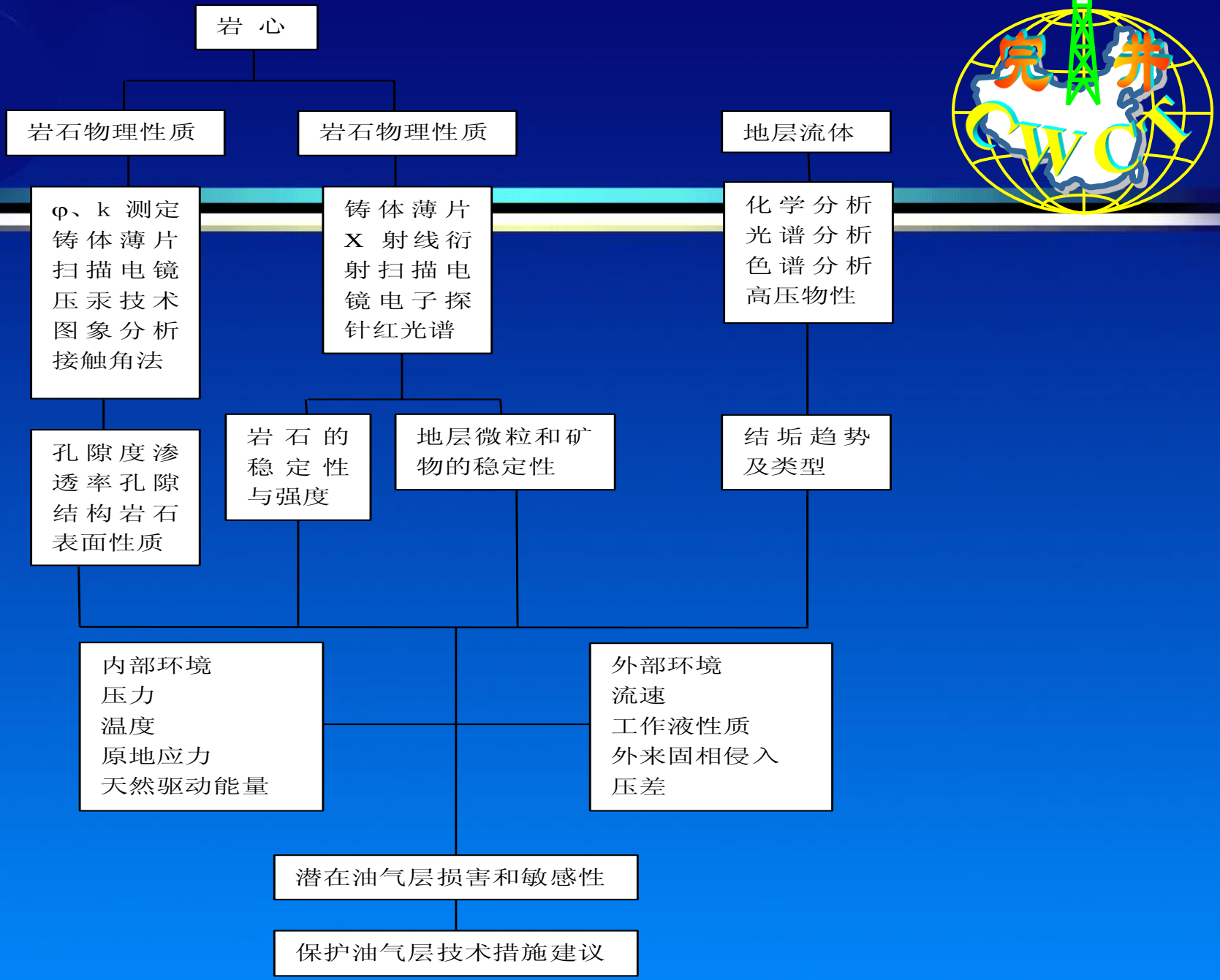
（2）渗流多孔介质性质：孔渗性、孔隙和喉道

（3）岩石表面性质：比面、润湿性、吸入特性

（4）地层流体性质：油气水组成、高压物性、析蜡点、凝固点、原油酸值等

（5）油气藏环境：内部环境和外部环境

（6）矿物—渗流介质—流体对环境变化的敏感性及可能的损害趋势和后果


岩 心
岩石物理性质
岩石物理性质
地层流体
φ、k 测定
铸体薄片
扫描电镜
压汞技术
图象分析
接触角法
铸体薄片
X 射线衍
射扫描电
镜电子探
针红光谱
化学分析
光谱分析
色谱分析
高压物性
孔隙度渗
透率孔隙
结构岩石
表面性质
岩石的
稳定性
与强度
地层微粒和矿
物的稳定性
结垢趋势
及类型
内部环境
压力
温度
原地应力
天然驱动能量
外部环境
流速
工作液性质
外来固相侵入
压差
潜在油气层损害和敏感性
保护油气层技术措施建议

与敏感性及损害评价的关系

- 室内敏感性评价和工作液筛选使用的岩心数量有限，不可能全部考虑油气层物性及敏感性矿物所表现出来的各种复杂情况，岩心分析则能够确定某一块实验岩样在整个油气层中的代表性，进而可通过为数不多的实验结果，建立油气层敏感性的整体轮廓，指导保护油气层工作液的研制和优选

1.4 岩心分析的内容

- 岩心分析是指利用各种仪器设备来观测和分析岩心一切特性的系列技术
- 岩心是地下岩石（层）的一部分，所以岩心分析是获取地下岩石信息的十分重要的手段
- 应用中要根据具体的油气层特点进行选择分析，做到既能抓住主要矛盾，解决实际问题，又要经济实用，注意发挥不同技术的优点，配套实施

常规岩心分析的内容

- 岩石物理性质
  - 常规物性：孔隙度、渗透率、比表面、相对渗透率、润湿性
  - 孔隙结构：孔隙和喉道的类型、大小、形态、分布、连通性；孔喉大小及分布
- 岩石结构与矿物
  - 骨架颗粒：石英、长石、岩屑、云母
  - 填隙物：粘土矿物、非粘土矿物
  - 岩石结构：层理、接触关系、粒度大小及分布

岩心分析揭示的内容及所用的方法

内　　容					方　法
岩石物理性质	常规物性	孔隙度	常规条件	总孔隙度、连通孔隙度	气测法、煤矿油饱和法孔隙度仪
			模拟围压	总孔隙度	CMS-300 全自动岩心分析仪
		渗透率	空气渗透率、煤油渗透率、地层水渗透率；水平渗透率、垂直渗透率、径向渗透率、全直径岩心渗透率；模拟围压渗透率		渗透率仪 CMS-300 全自动岩心分析仪
		比表面			压汞或等温吸附法
		相渗透率	气-水、油-气、气-油-水		稳态法、不稳态法
		润湿性	油湿、水湿、中间润湿		接触角测量、阿莫特（自吸人）法、离心机法毛管压力曲线测定
	孔隙结构	孔隙-喉道	类型、大小、形态、连通性、分布		铸体薄片、图象分析、SEM、X 射线、CT 扫描、NMR
		孔喉	大小、分布		压汞法、离心机法毛管压力曲线测定
岩石结构与矿物	骨架颗粒	石英、长石岩屑、云母	粒度大小、分布		筛析法、薄片粒度图象分析
			接触关系、成分、含量、成岩变化		铸体薄片、阴极发光、XRD 全岩分析、红外光谱
	填隙物	粘土矿物	产状		铸体薄片、SEM
			类型、成分、含量		铸体薄片、XRD、红外光谱、沉降分离法、电子探针或能谱
		非粘土矿物	产状		岩石薄片、SEM
			类型、成分、含量		薄片染色、XRD 全岩分析、红外光谱、碳酸盐含量测定

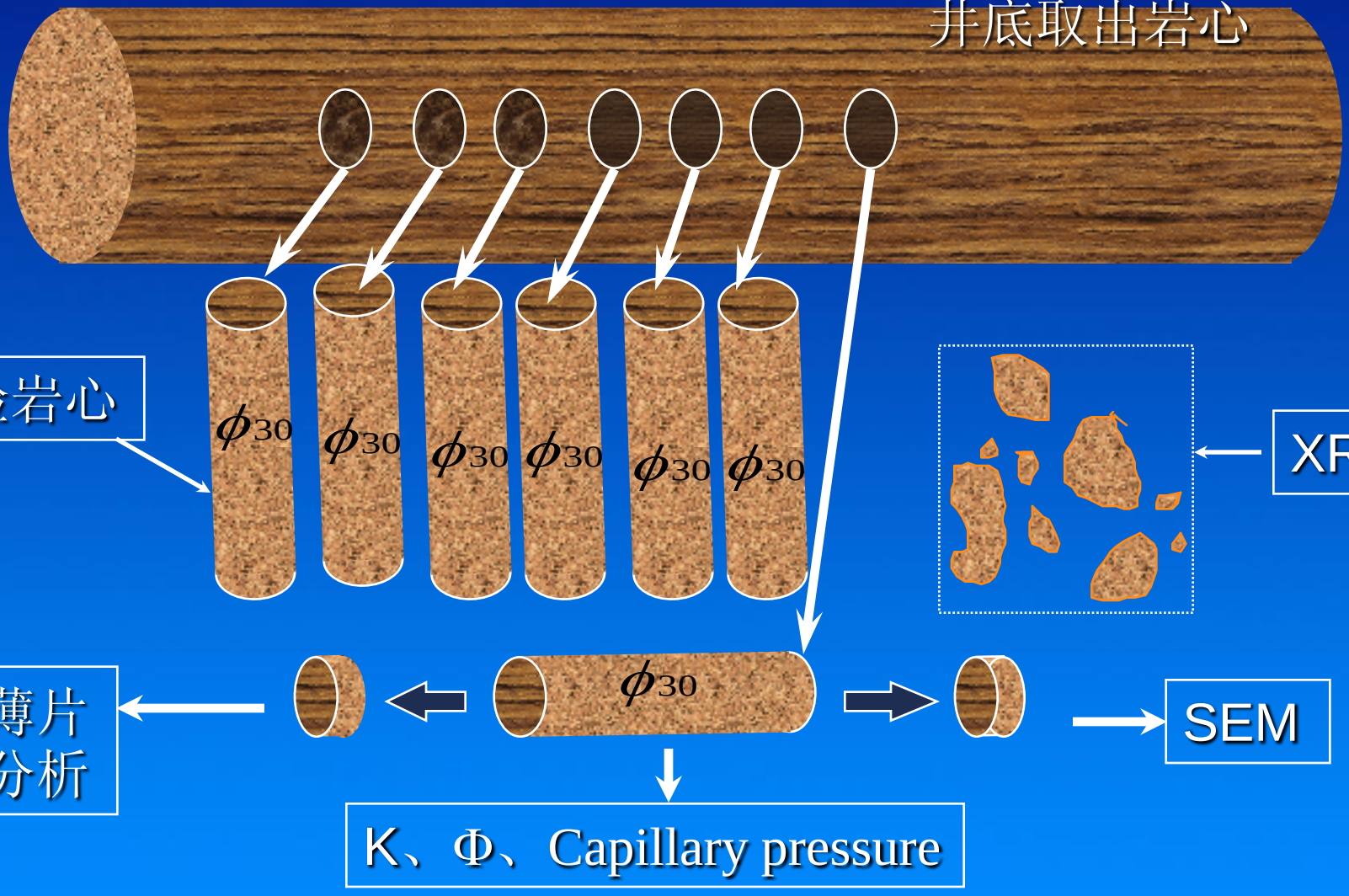
1.5 取样要求

- 钻屑、井壁取心、岩心，推荐使用成形岩心
- 了解岩石“岩性、物性、含油气性、电性”基础上，有重点地进行选择分析
- 铸体薄片：1~5块/米，包括岩石的各种极端情况
- XRD、SEM样品密度大致为前者1/2~1/3
- 压汞毛管压力曲线，3~5样/油组或渗透率级别
- 油气层加密，水层和夹层控制性分析
- 推荐在一段岩心上进行配套分析

推荐的取样方式

- 最好在同一段岩心上取足配套分析的柱塞
- 铸体薄片、扫描电镜、压汞分样需在同一柱塞上进行，这有利于建立孔隙分布与孔喉分布参数间的关系，以及孔隙结构与岩性、物性、粘土矿物之间的联系
- XRD分析可以用碎样，但应清除被泥浆污染的部分，否则会干扰实验结果。电子探针分析可用其它柱塞端部
- 在所有分析项目完成后，就能指出潜在的损害类型及原因，预测不同渗透率级别（储层类型）的油气层的敏感程度，正确解释敏感性评价实验结果

Coring Sample 取样



2 X射线衍射分析（XRD）

- X射线衍射原理
- X射线衍射仪
- 实验样品制备
- 在保护油气层研究中的应用

分析原理

- X射线是波长很短的电磁波，波长2.5-0.1x10^{-1} nm,射线通过晶体时发生干涉现象
- Bragg公式:

$$n\lambda=2d\sin\theta$$

d——面网间距；

n——整数

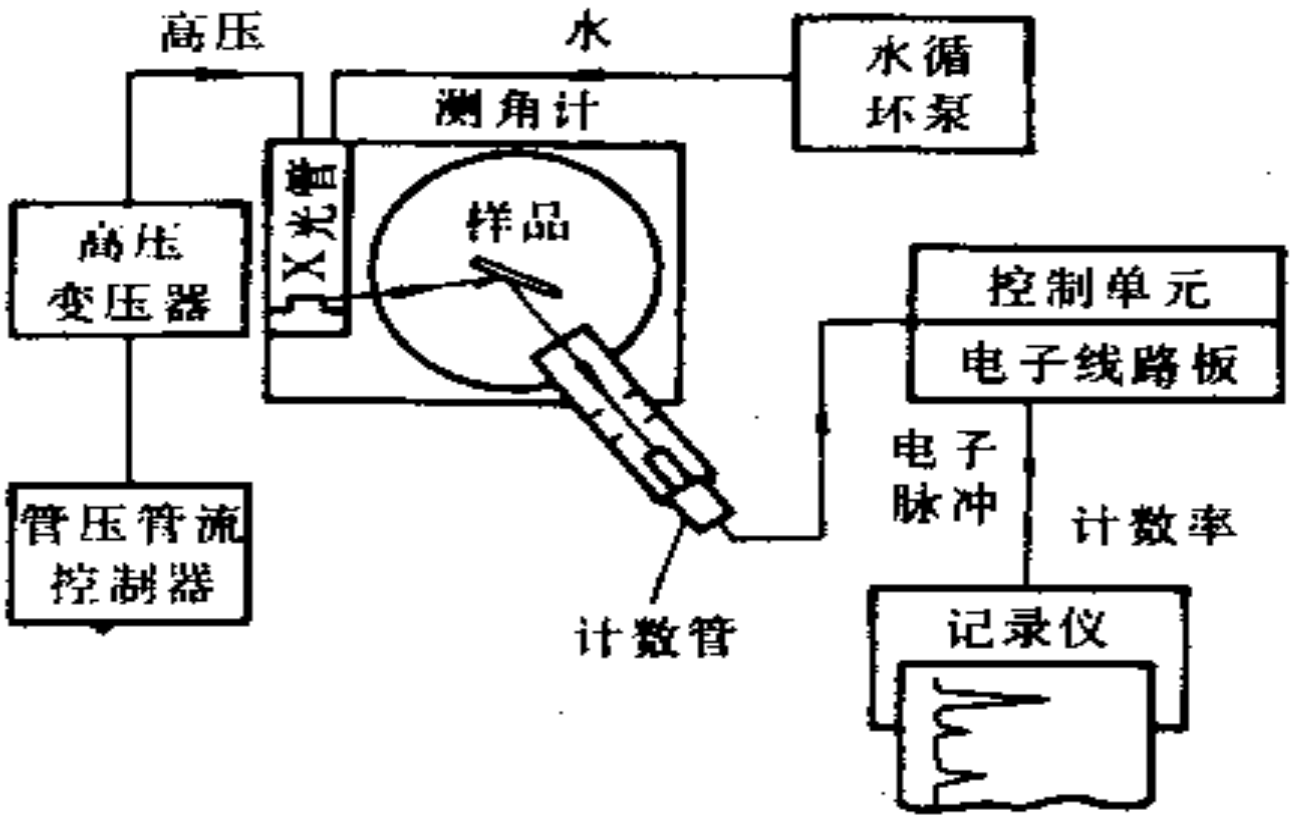
λ——射线波长

θ——射线与样品夹角

2.1 X射线衍射原理

- 全岩矿物组分和粘土矿物可用X射线衍射（XRD）迅速而准确地测定
- XRD分析借助于X射线衍射仪来实现，它主要由光源、测角仪、X射线检测和记录仪构成

X射线衍射仪结构示意图



2.2 X射线衍射仪



DMX-3C型

2.3 实验样品制备

- 由于粘土矿物的含量较低，砂岩中一般3%～15%。这时，X射线衍射全岩分析不能准确地反映粘土的组成与相对含量，需要把粘土矿物与其它组分分离，分别加以分析
- 将岩样抽提干净，然后碎样，用蒸馏水浸泡，最好湿式研磨，并用超声波振荡加速粘土从颗粒上脱落，提取粒径小于2μm（泥、页岩）或小于5μm（砂岩）的部分，沉降分离、烘干、计算其占岩样的重量百分比

X射线衍射分析制片

- 粘土矿物的XRD分析使用定向片，包括自然干燥的定向片（N片）、经乙二醇饱和的定向片（再加热至550℃），或盐酸处理之后的自然干燥定向片
- 粒径大于2μm或5μm的部分则研磨至粒径<40μm的粉末，用压片法制片，上机分析
- 还可以直接进行薄片的XRD分析，它对于鉴定疑难矿物十分方便，并可与薄片中矿物的光性特征对照，进行综合分析

2.4 XRD分析技术的应用

- 地层微粒分析，粒径<37微米组分
- 全岩分析，粒径>5微米组分
- 粘土矿物分析，粒径<5微米组分
  - 类型鉴定和含量计算
  - 间层矿物鉴定和间层比计算
- 无机垢分析

（1）地层微粒分析

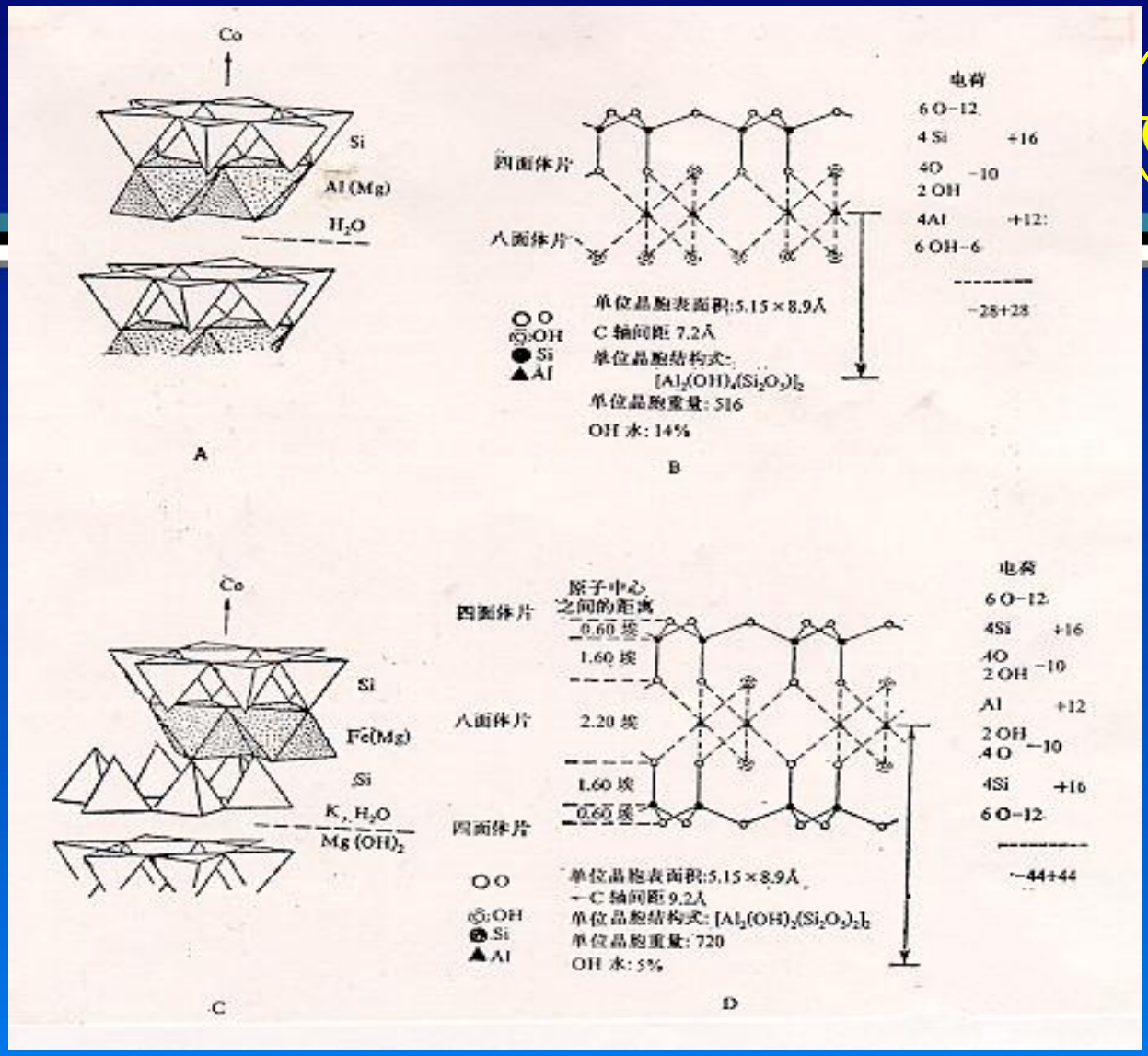
- 地层微粒指粒径小于37μm（或44μm）即能通过美国400目（或325目）筛的细粒物质，它是砂岩中重要的损害因素，砂岩中与矿物有关的地层损害都与其有密切的联系
- 地层微粒的分析为矿物微粒稳定剂的筛选、解堵措施的优化提供依据。除粘土矿物外，常见的其它地层微粒有长石、石英、云母、菱铁矿、方解石、白云石、石膏等

（2）全岩分析

- 对粒径大于5μm的非粘土矿物部分进行XRD分析，可以知道诸如云母、碳酸盐矿物、黄铁矿、长石的相对含量，对酸敏（HF，HCl）性研究和酸化设计有帮助
- 长石含量高的砂岩，当酸液浓度和处理规模过大时，会削弱岩石结构的完整性，并且存在着酸化后的二次沉淀问题，可能导致土酸酸化失败

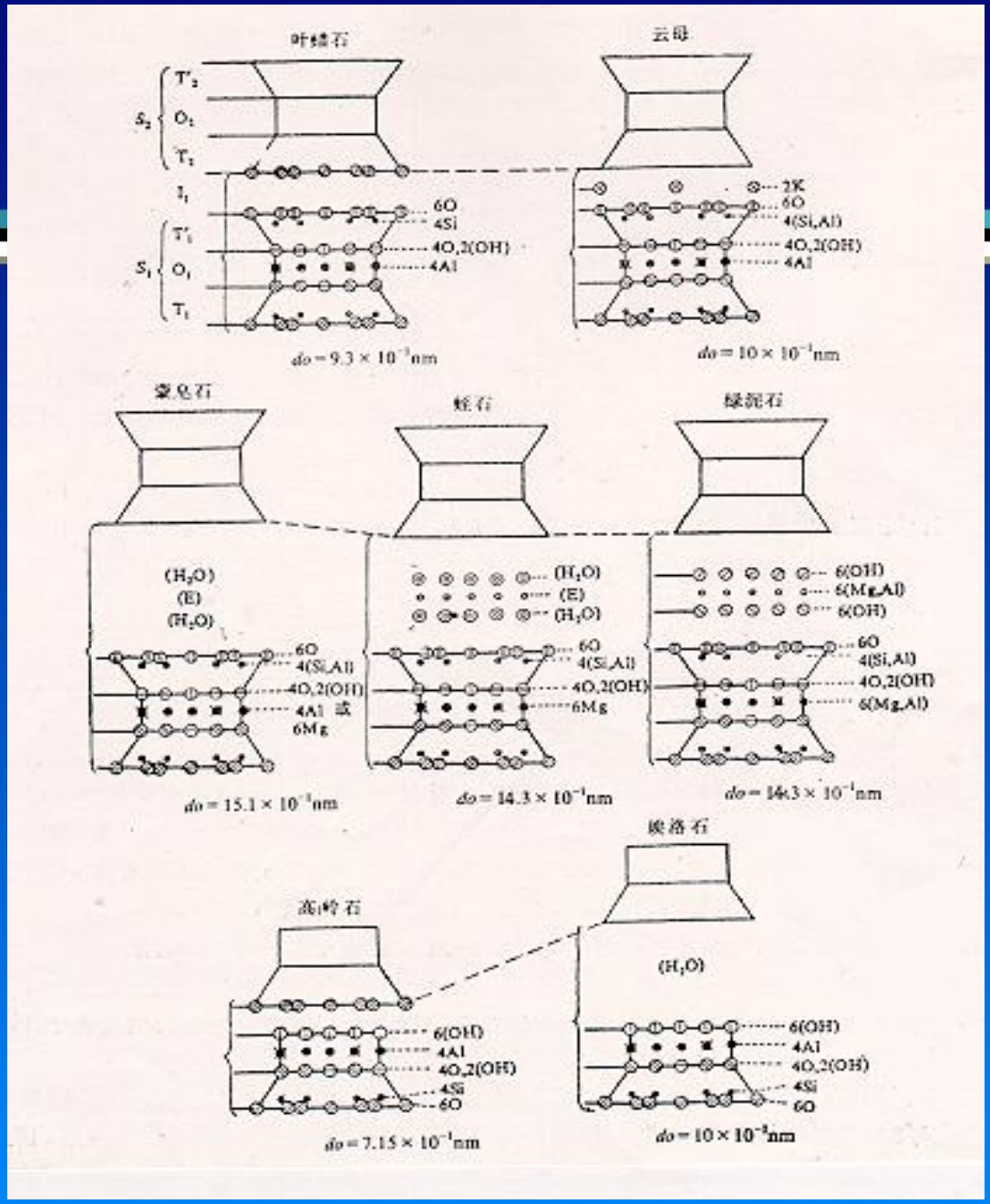
（3）粘土矿物分析

- 粘土矿物类型鉴定和含量计算
- 利用粘土矿物特征峰的 d_{001}值鉴定粘土矿物类型
- 根据出现的矿物对应衍射峰的强度（峰面各或峰高度），依据行业标准SYS5163-87“用X射线衍射仪测定沉积岩粘土矿物的定量分析方法”求出粘土矿物相对含量



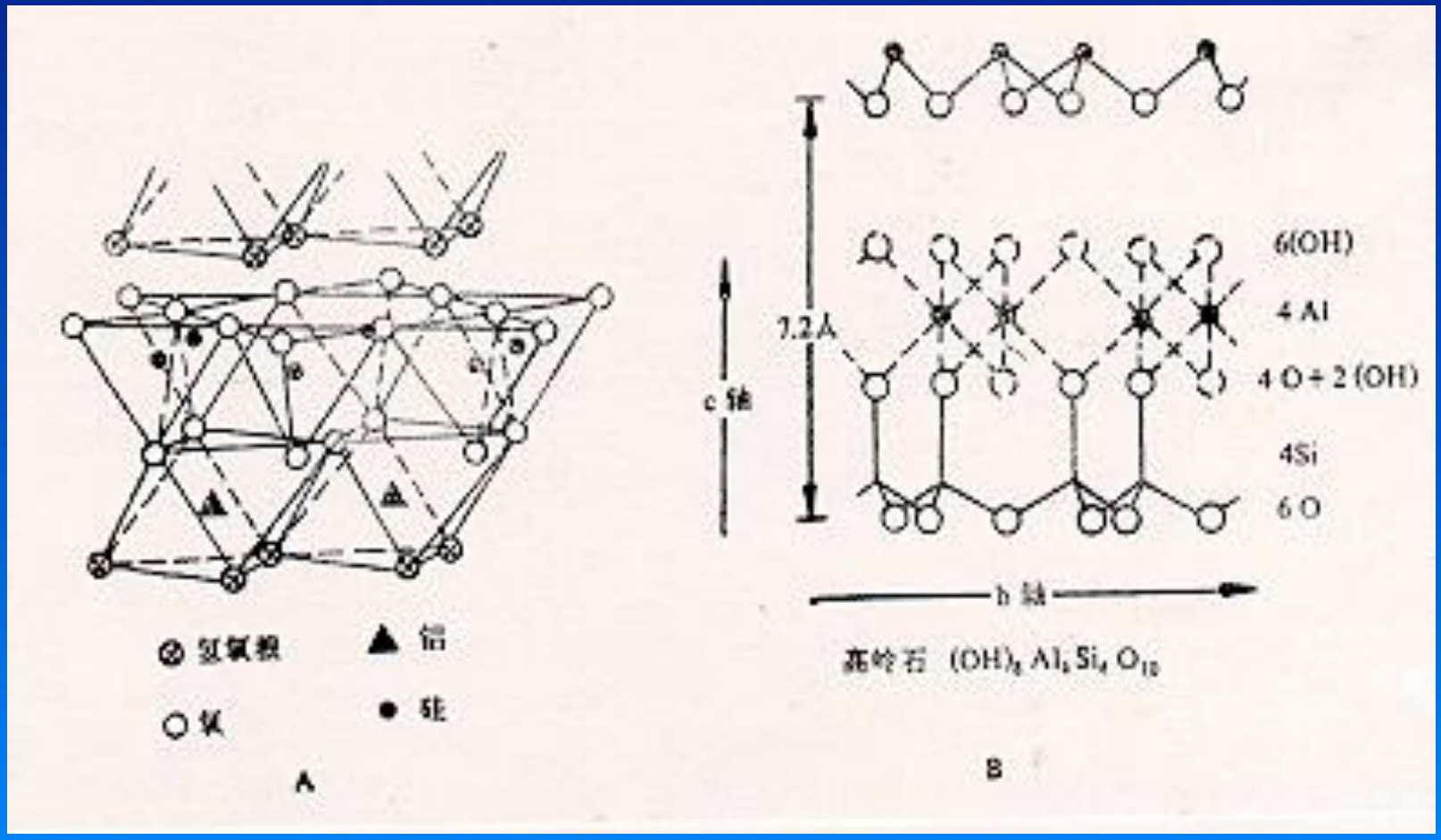
粘土矿物的基本层型（硅氧四面体与八面体的连接方式）

A、B—1：1型；C、D—2：1型

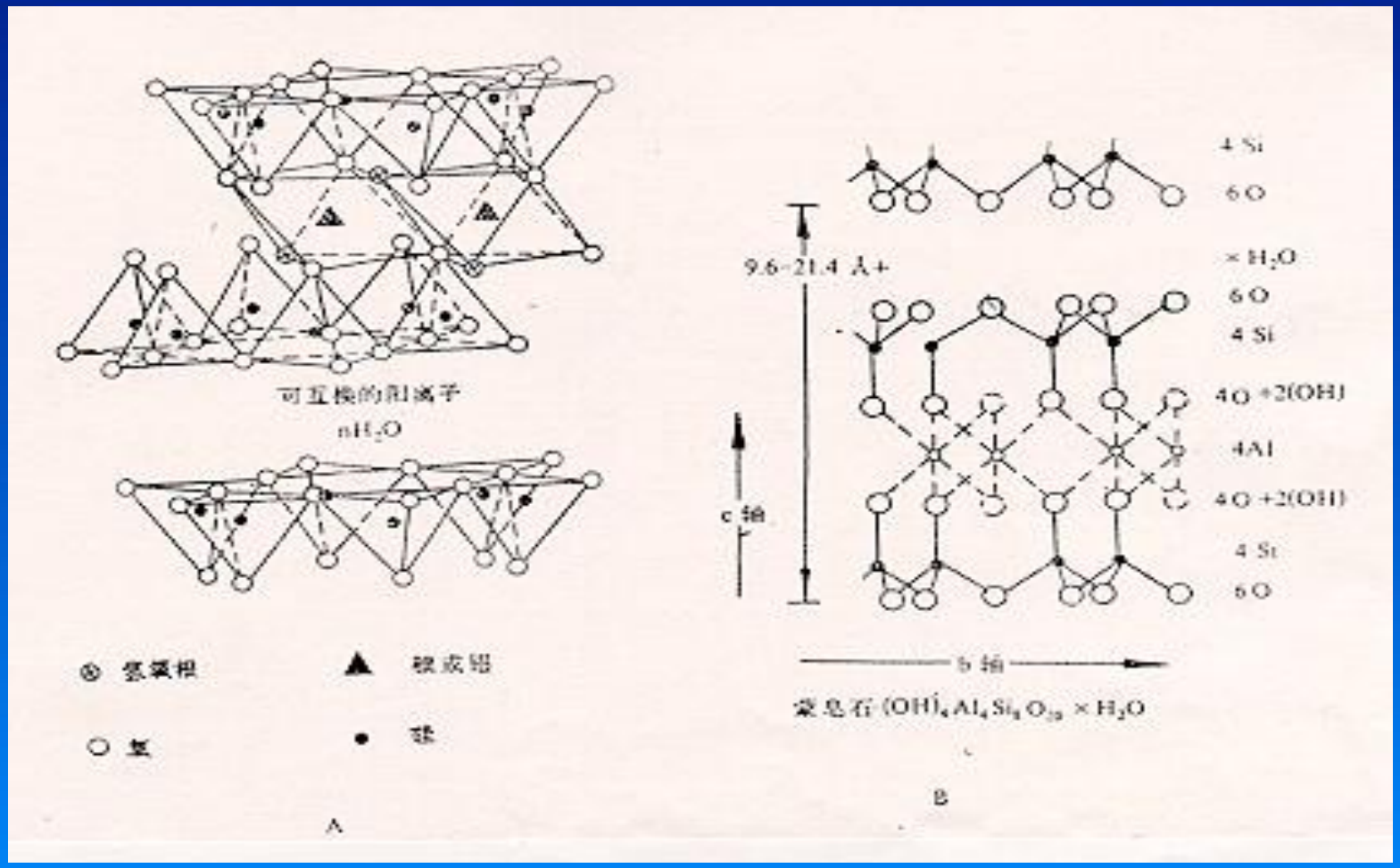

叶蜡石
云母
T'_2
O_2
T_2
S_2
I_1
T'_1
O_1
T_1
S_1
6O
4Si
4O,2(OH)
4Al
2K
$d_0 = 9.3 \times 10^{-1}$nm
$d_0 = 10 \times 10^{-1}$nm
蒙皂石
蛭石
绿泥石
(H_2O)
(E)
4(Si,Al)
4Al 或
6Mg
6(OH)
6(Mg,Al)
$d_0 = 15.1 \times 10^{-1}$nm
$d_0 = 14.3 \times 10^{-1}$nm
$d_0 = 14.3 \times 10^{-1}$nm
高岭石
埃洛石
$d_0 = 7.15 \times 10^{-1}$nm
$d_0 = 10 \times 10^{-1}$nm

常见粘土矿物的结构式

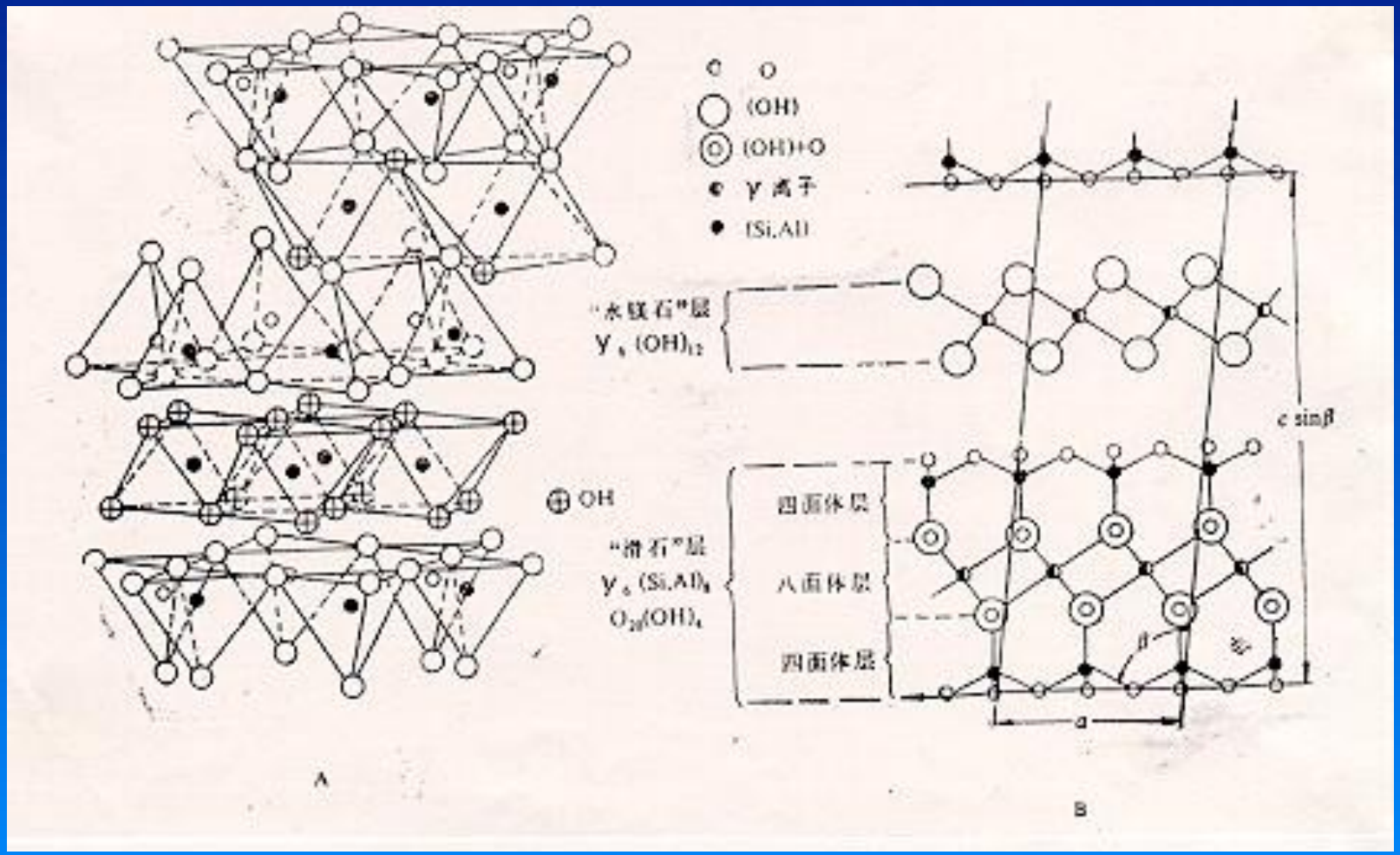
高岭石晶体结构



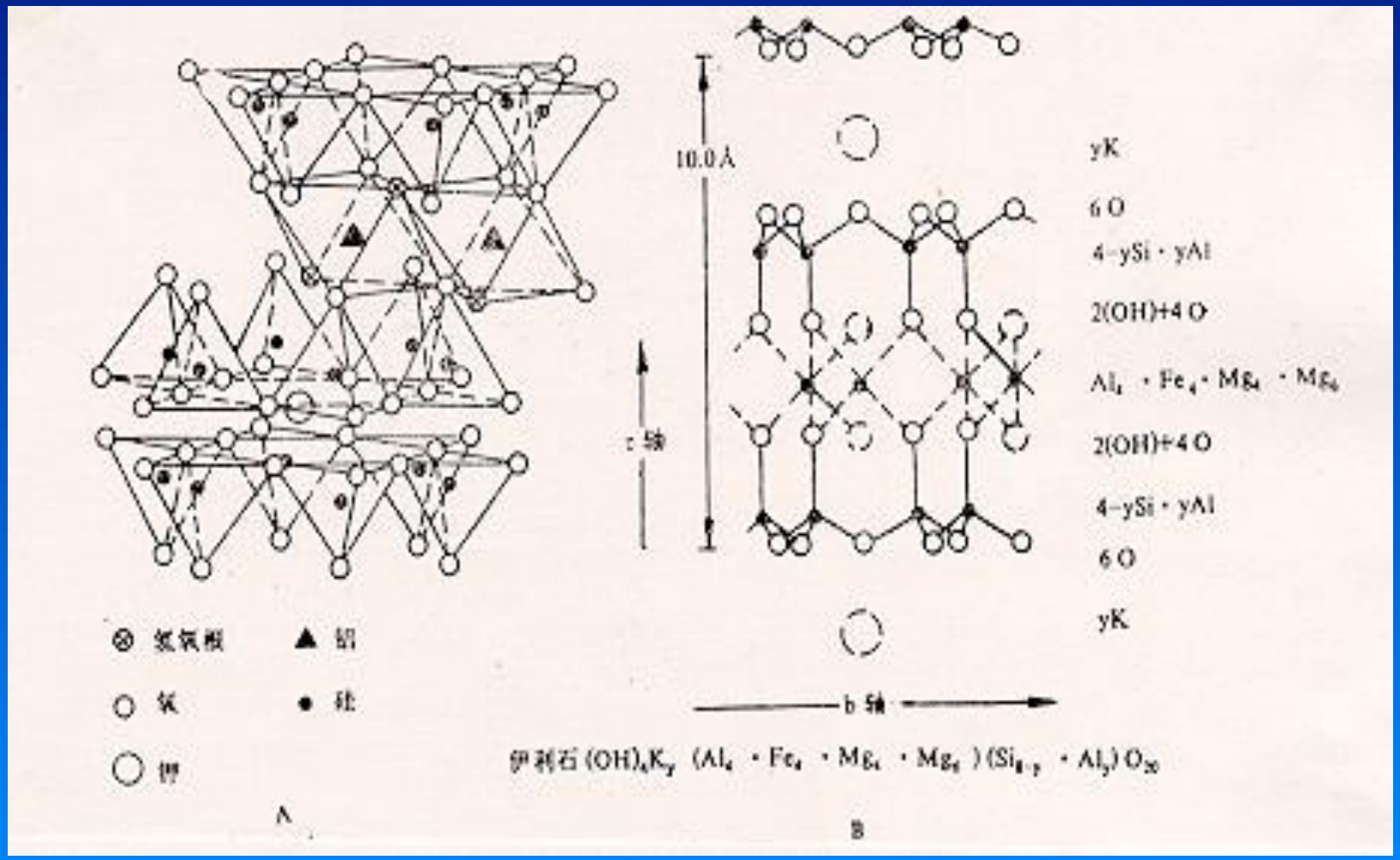
蒙皂石晶体结构


可互换的阳离子
nH_2O
氢氧根
氧
硅或铝
硅
A
4 Si
6 O
9.6-21.4 Å+
$\times H_2O$
6 O
4 Si
4O +2(OH)
4Al
4O +2(OH)
4 Si
6 O
c 轴
b 轴
蒙皂石 $(OH)_4Al_4Si_8O_{20} \times H_2O$
B

绿泥石晶体结构


O
(OH)
(OH)+O
Y 离子
(Si,Al)
"水镁石"层
$Y_6(OH)_{12}$
OH
"滑石"层
$Y_6(Si,Al)_8O_{20}(OH)_4$
四面体层
八面体层
四面体层
c sinβ
β
a
A
B

伊利石晶体结构


10.0Å
c 轴
b 轴
yK
6 O
4−ySi · yAl
2(OH)+4 O
Al4 · Fe4 · Mg4 · Mg6
2(OH)+4 O
4−ySi · yAl
6 O
yK
氢氧根
铝
氧
硅
钾
伊利石 (OH)4Ky (Al4 · Fe4 · Mg4 · Mg6) (Si8−y · Aly) O20
A
B

各族主要粘土矿物的 d_{001}（10^{-1}nm）X 射线衍射特征

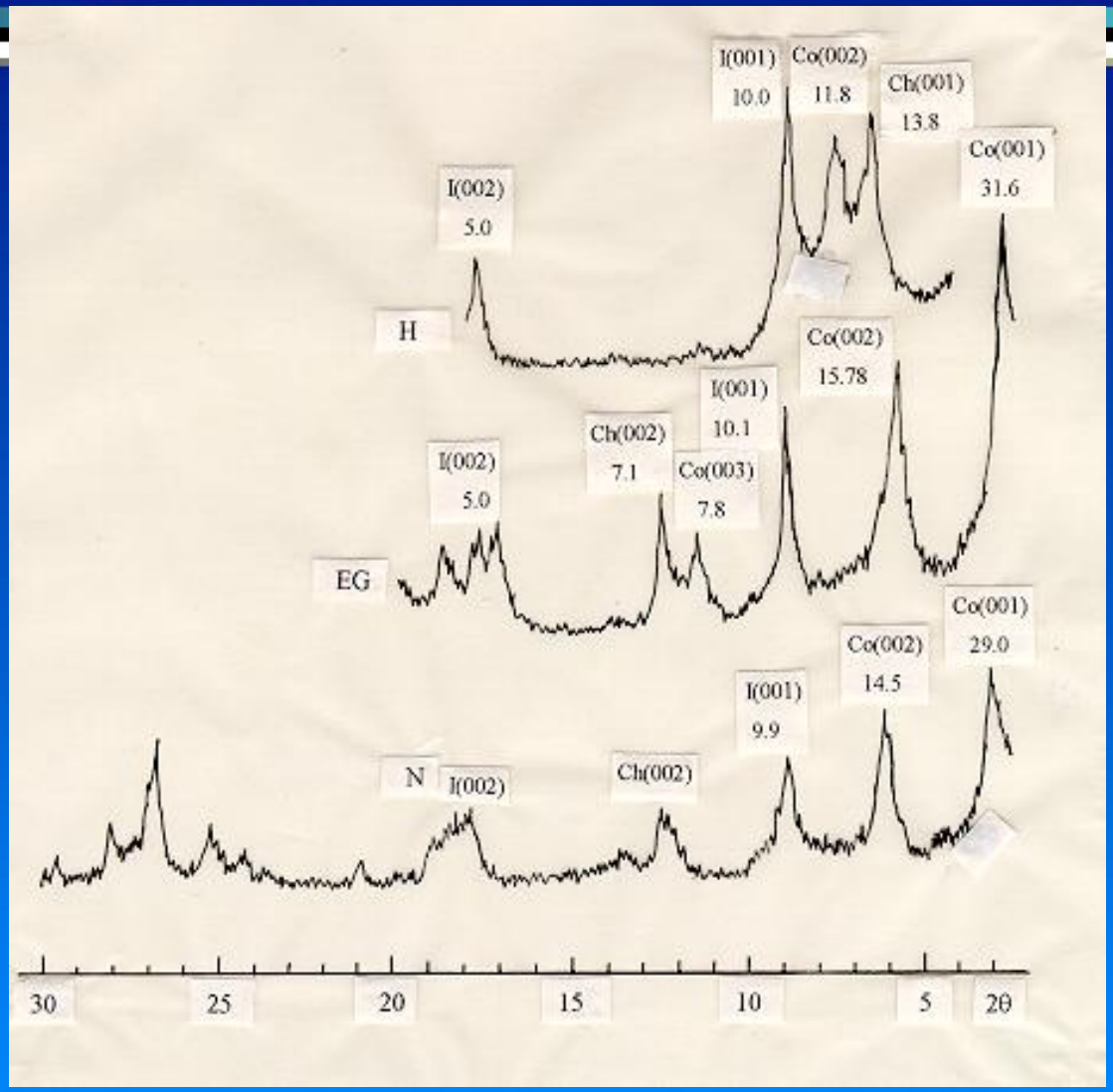
矿　物	d_{001}	d_{002}	d_{003}	d_{004}	d_{005}
蒙皂石	12~15		4~5		2.4~3
绿泥石	14.2	7.1	4.7	3.53	2.8
蛭石	14.2	7.1	4.7	3.53	2.8
伊利石	10.0	5.0	3.33	2.5	
高岭石	7.15	3.58	2.37		

主要间层粘土矿物类型

非膨胀组分 / 有序度	云　母		绿泥石		高岭石
	二八面体	三八面体	二八面体	三八面体	
近程有序	钠板石 累托石 云母/蒙皂石 云母/蛭石	水黑云母 云母/蛭石	苏托石 （羟硅铝石） （Di-Ch）/S	柯绿泥石 （Tri-Ch）/Ve （Tri-Ch）/S	
长程有序	伊利石/ 蒙皂石	云母/蛭石	?	?	?
无　　序	伊利石/ 蒙皂石	云母/蛭石 云母/蒙皂石	绿泥石/蒙皂石 绿泥石/蛭石	绿泥石/蒙皂石 绿泥石/蛭石	高岭石/ 蒙皂石

注：Di-二八面体；Tri-三八面体；　Ch-绿泥石；　S-蒙皂石；　Ve-蛭石；　Bi-黑云母

柯绿泥石XRD图谱



样品采自川西侏罗系蓬莱镇组砂岩

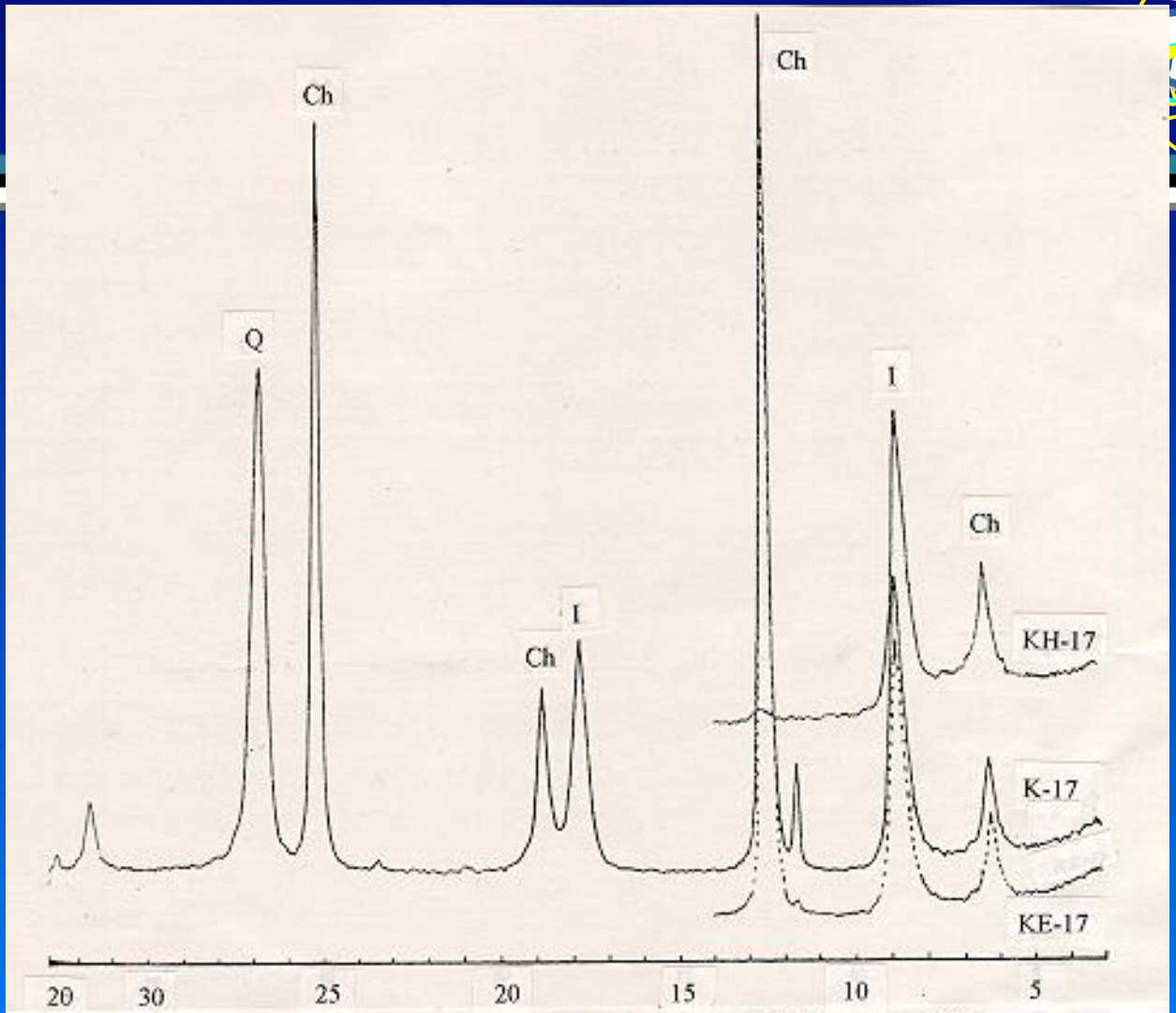


图 3-15　须二下亚段中部绿泥石包壳发育的砂岩粘土矿物 X-射线衍射图谱,K-17;未处理;KE-17;饱和乙二醇;KH-17;加热 550 ℃

（4）无机垢分析

- 油气井见水后，可能会有无机盐类沉积在射孔孔眼和油管中，利用XRD分析技术就可以识别矿物的类型，为预防和解除垢沉积提供依据
- 如大庆油田聚合物驱采油中，生产井油管中无机垢沉积，经XRD鉴定存在$BaSO_4$
- XRD分析还用于注入和产出流体中的固相分析，明确矿物成分和相对含量，对于研究解堵措施很有帮助

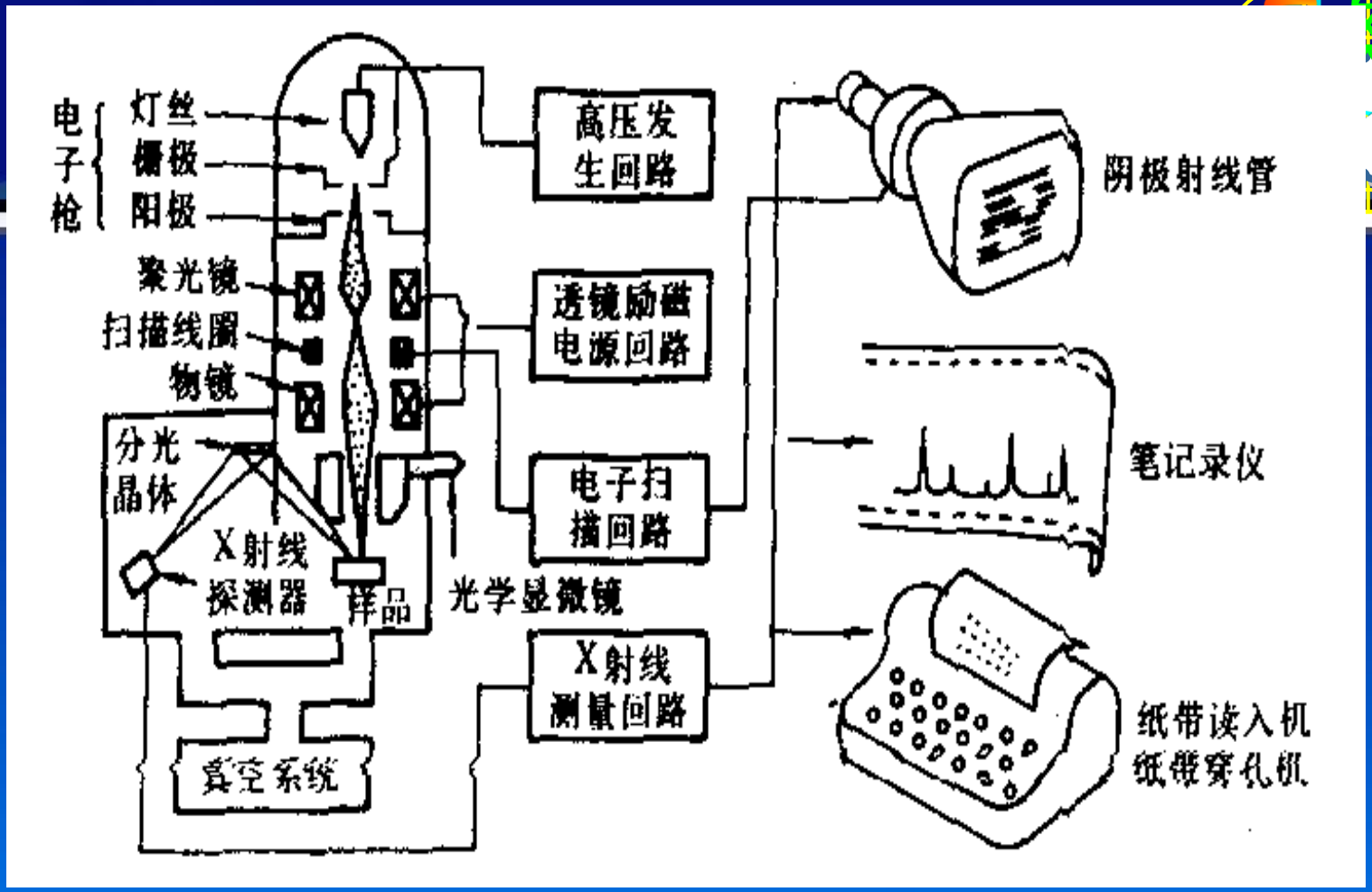
3 扫描电镜分析技术

- 油气储层研究中的应用

——扫描电镜（SEM）分析能提供孔隙内充填物的矿物类型、产状的直观资料，同时也是研究孔隙结构的重要手段

3.1 扫描电镜原理和仪器

- 利用类似电视摄影显象的方式，用细聚焦电子束在样品表面上逐点进行扫描，激发产生能够反映样品表面特征的信息来调制成象
- 有些扫描电镜配有X射线能谱分析仪，因此能进行微区元素分析



扫描电镜通常由电子系统、扫描系统、信息检测系统、真空系统和电源系统五大部分构成

扫描电子显微镜

（XL30型，EDAX4型）



3.2 样品制备

- 扫描电镜分析具有制样简单、分析快速的特点
- 分析前要将岩样抽提清洗干净，然后加工出新鲜面作为观察面，用导电胶固定在样品于桩上，自然晾干，最后在真空镀膜机上镀金（或碳），样品直径一般不超过1cm
- 样品制备方面新进展:临界点干燥法可以详细地观察原状粘土矿物的显微结构，背散射电子图象的使用能够在同一视域中直接识别不同化学成分的各种矿物

3.3 扫描电镜分析应用

- 油气层中地层微粒的观察
- 粘土矿物的观测
- 油气层孔喉的观测
- 含铁矿物的检测
- 油气层损害的监测

油气层中地层微粒的观察

- 扫描电镜分析能给出孔隙系统中微粒的类型、大小、含量、共生关系的资料
- 越靠近孔、喉中央的微粒，在外来流体和地层流体作用下越容易失稳
- 测定微粒的大小分布及在孔喉中的位置，能有效地估计临界流速和速敏程度，便于有针对性地采取措施防止或解除因分散、运移造成的损害

粘土矿物的观测

- 粘土矿物有其特殊的形态借此可确定粘土矿物的类型、产状和含量
- 孔喉桥接状、分散质点状粘土矿物易与流体作用
- 对于间层矿物，通过形态可以大致估计间层比范围



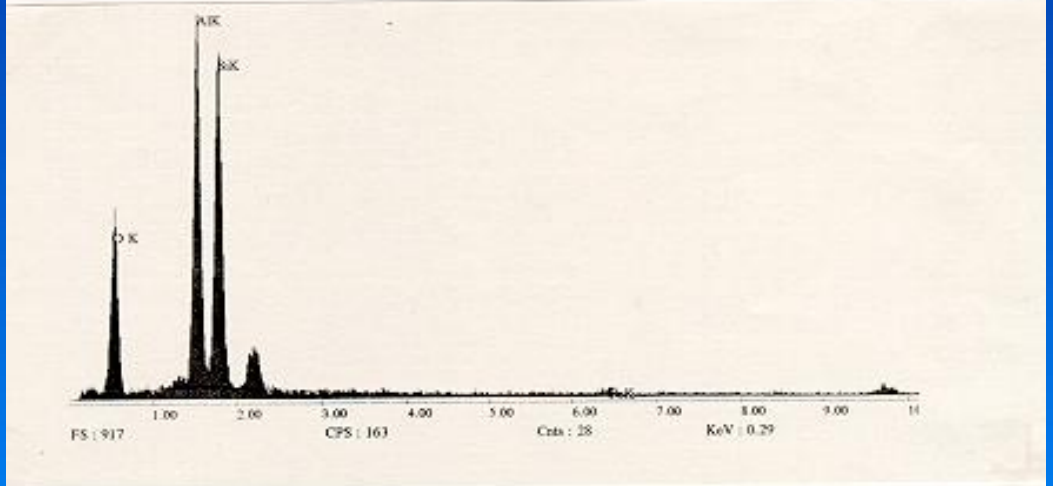
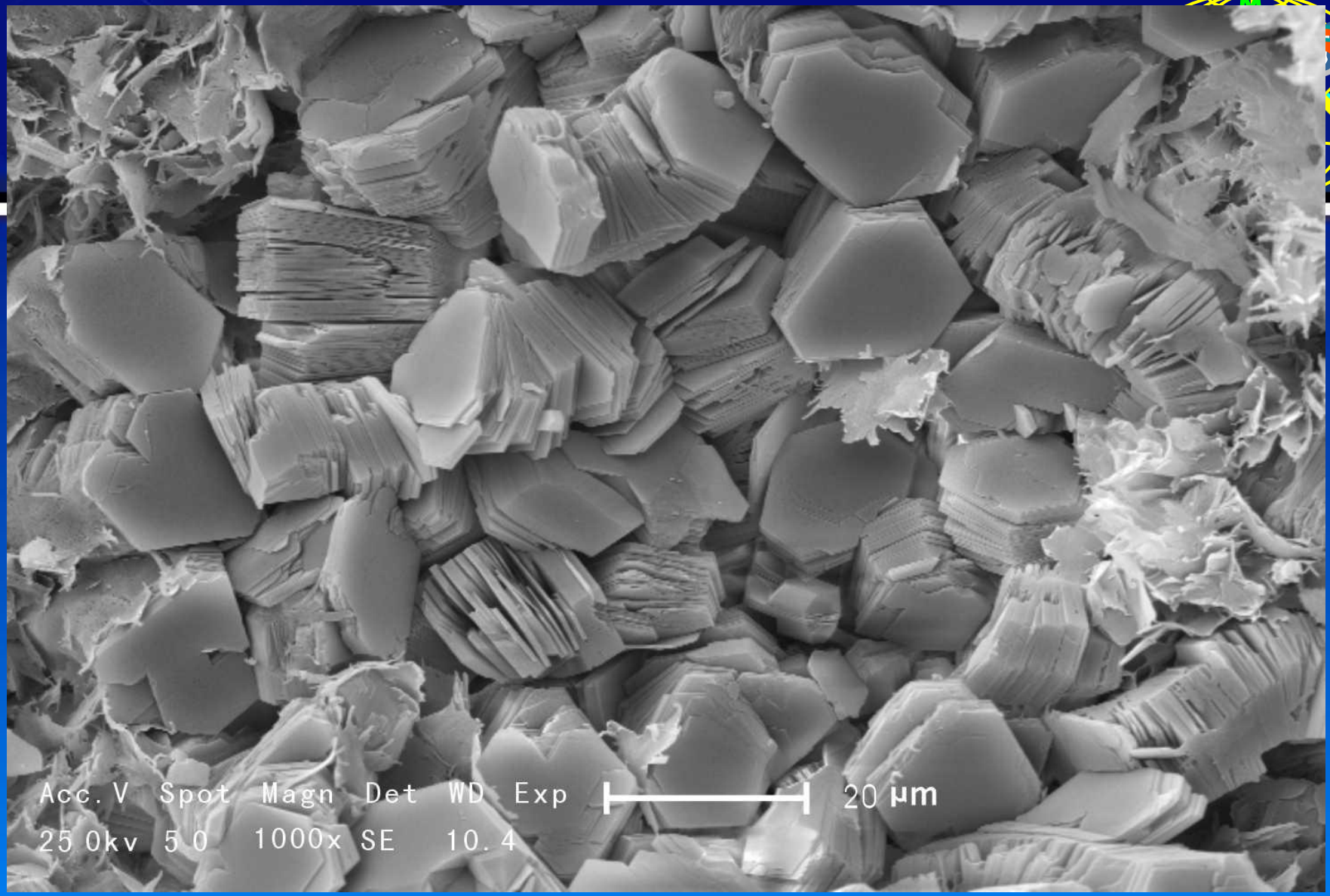
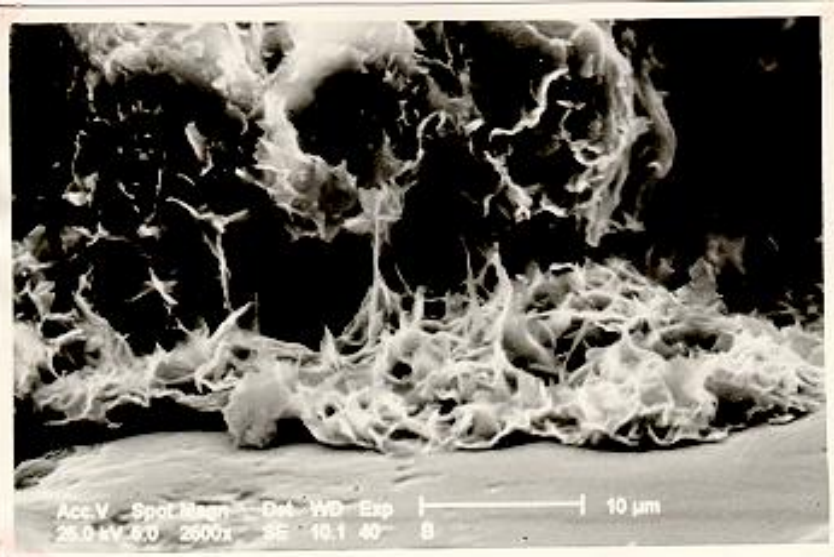


图 3-4 扫描电镜下高岭石及能谱分析

川孝 129 井,J_3s, 2174 ~ 2190m, 1 79/271,灰绿色砂岩



高岭石集合体，鄂北上古生界致密砂岩



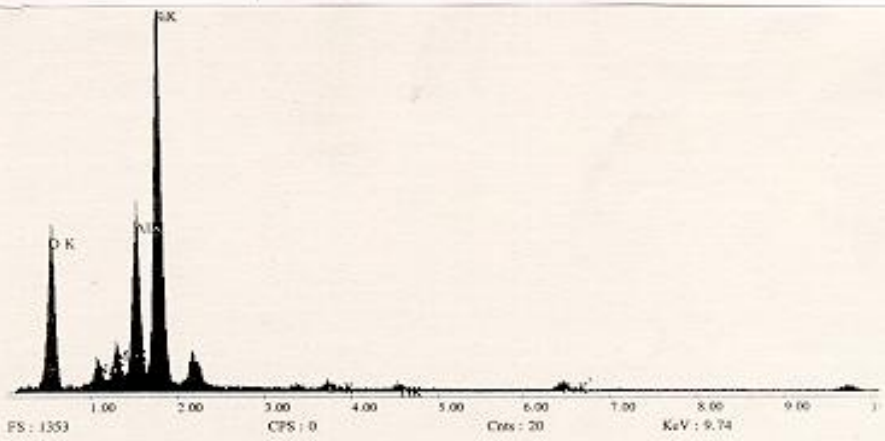
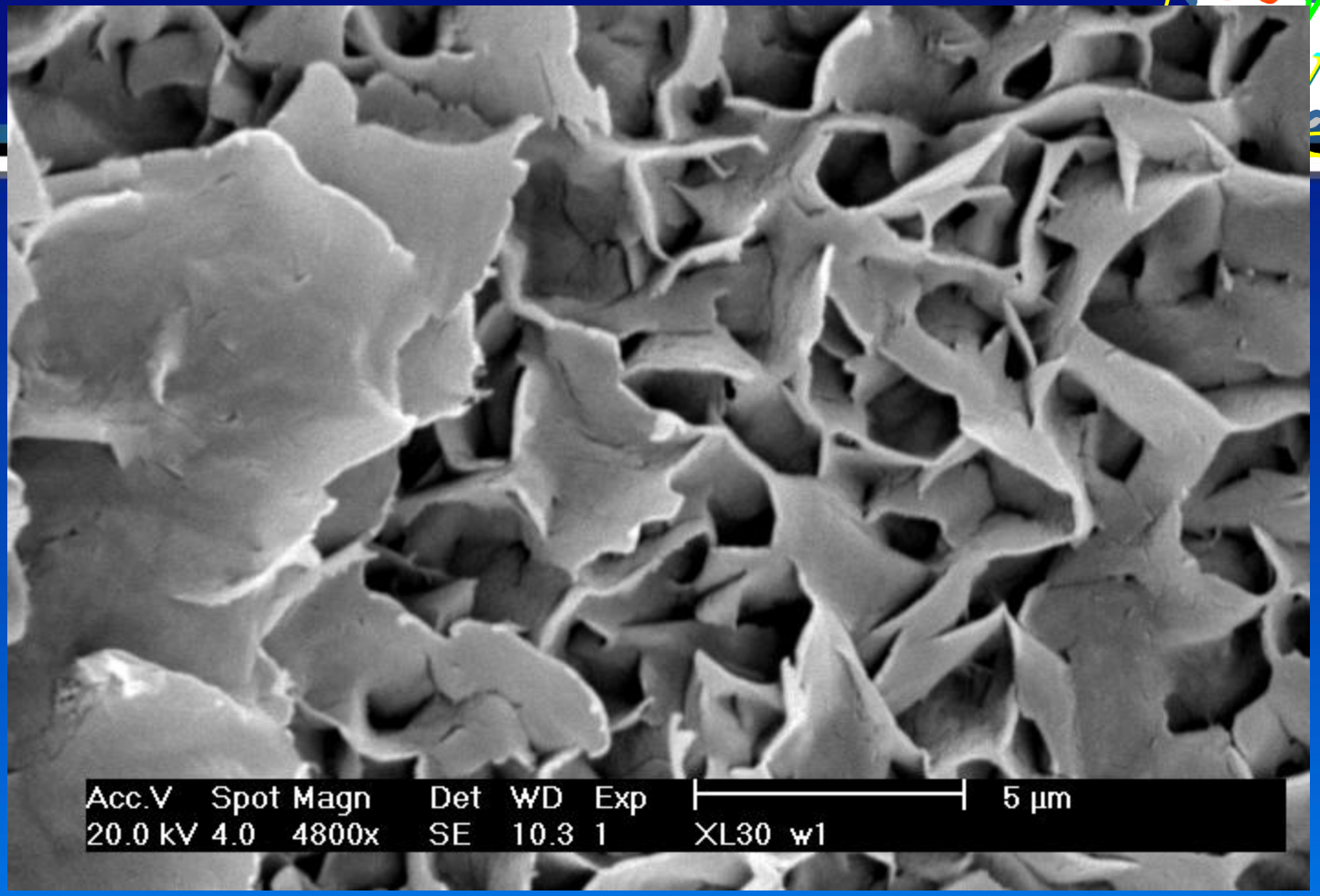


图 3-6 蒙皂石形貌及能谱分析;浅 2 井

J_3p_1,712.50 – 715.70m,3 2/67,灰绿色细砂岩(夹棕色条带)



蒙皂石蜂窝状集合体，川西白马，侏罗系蓬莱镇组



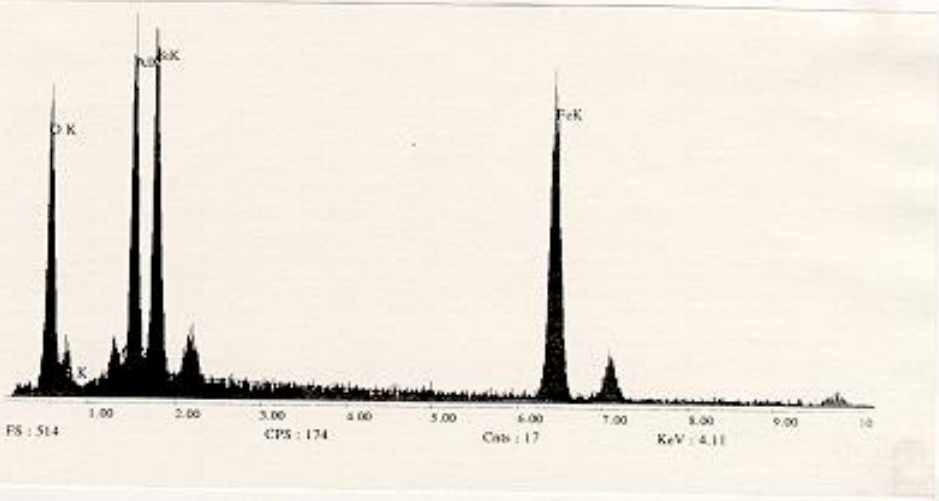


图 3-8　富铁绿泥石的形貌和能谱分析

川孝 164 井, J_1q, 2734.90m, 5 68 /106, 砾岩

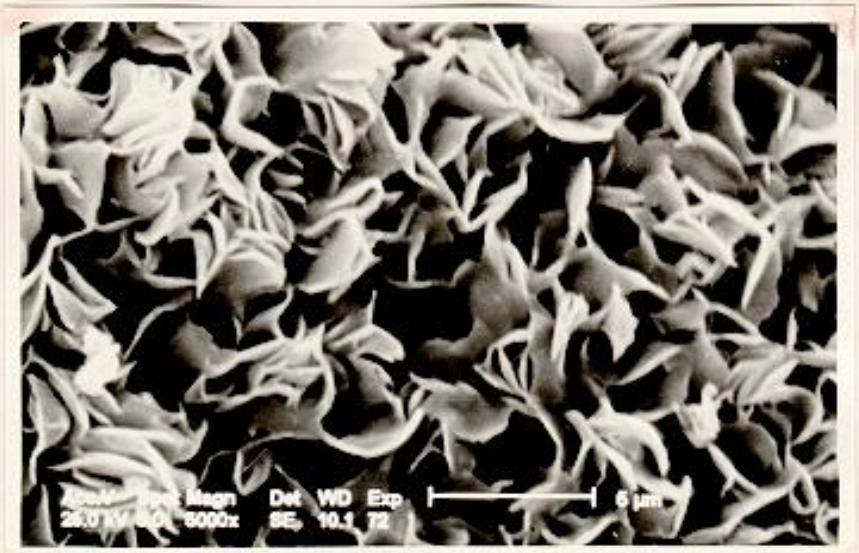


图 3-10 绿/蒙间层矿物扫描电镜下形貌和能谱分析

浅 2 井, J_3p_1, 718.71 ~ 721.26m, 3 61/67, 浅绿色细砂岩



图 3-12 伊利石呈丝缕状

川孝 129 井,J_2s,2178.45m,浅绿色砂岩

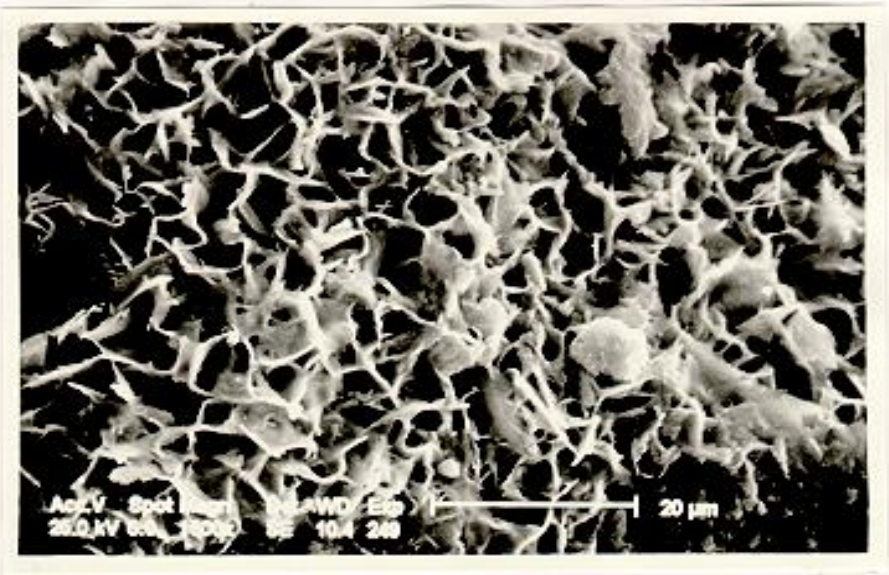
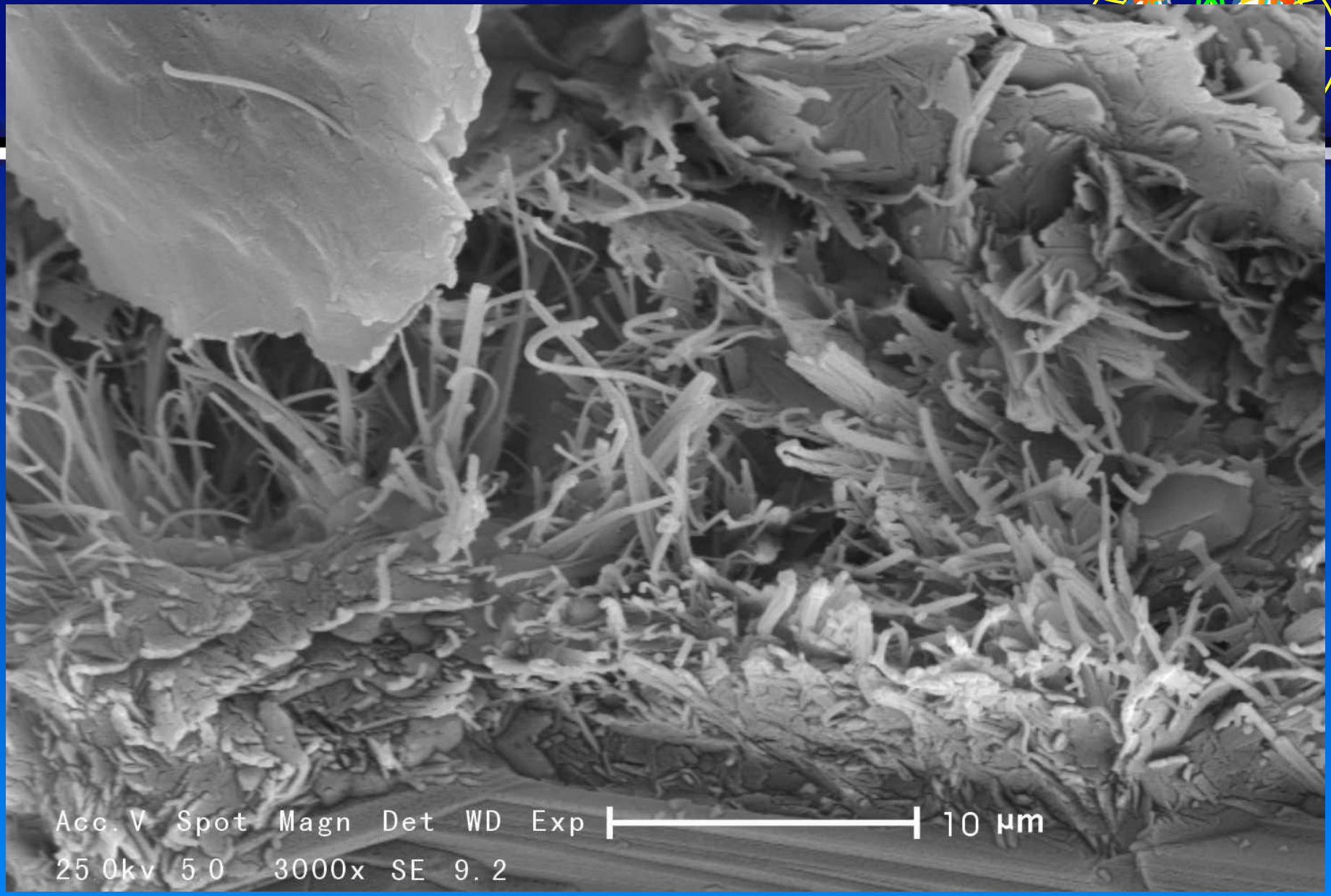
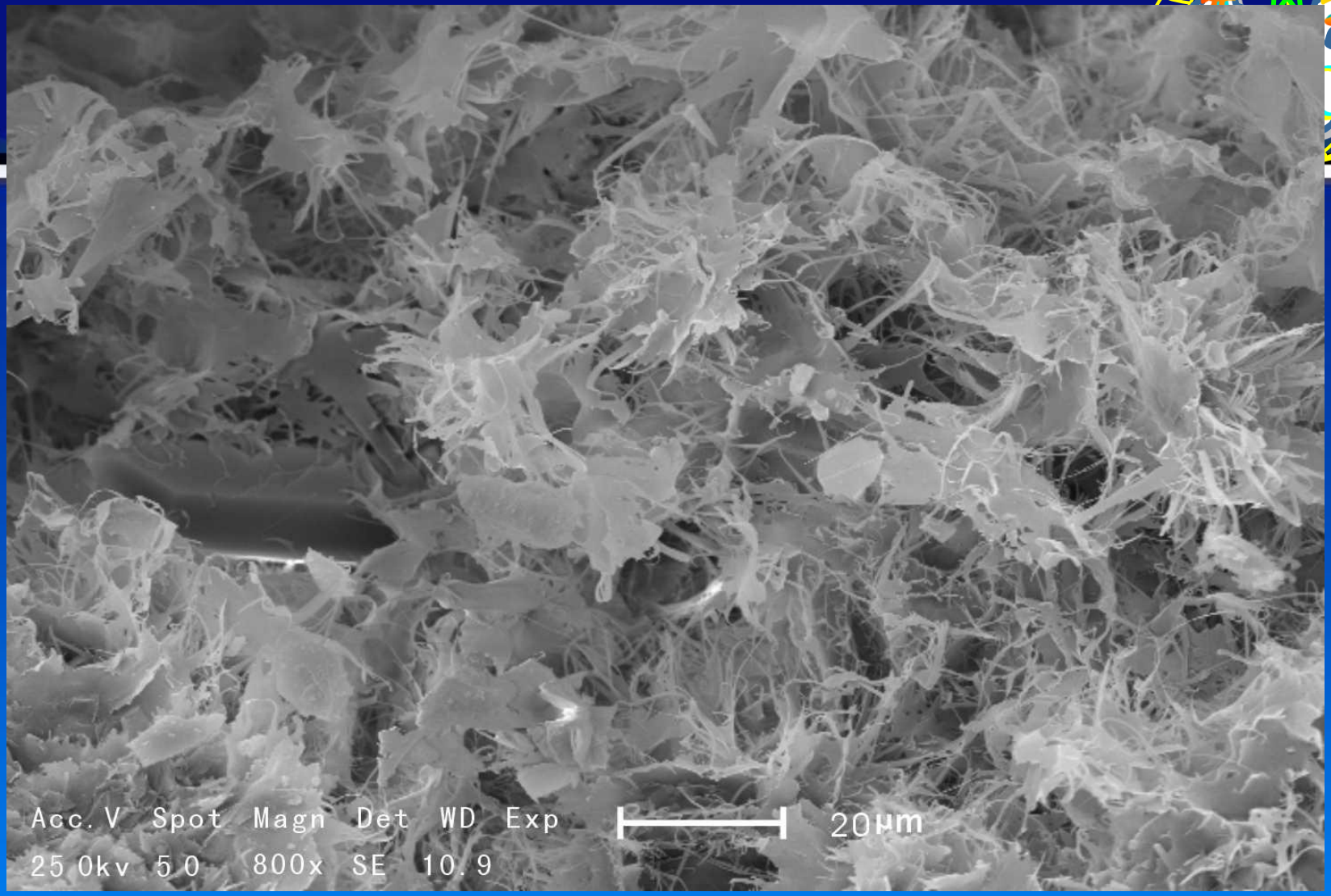


图 3-13 伊/蒙间层矿物,呈不规则蜂窝状

川孝 164 井,J_2s,2448.21-2451.55m, 4 47/47,浅绿色砂岩


Acc.V Spot Magn Det WD Exp
10 µm
25.0kv 5.0 3000x SE 9.2



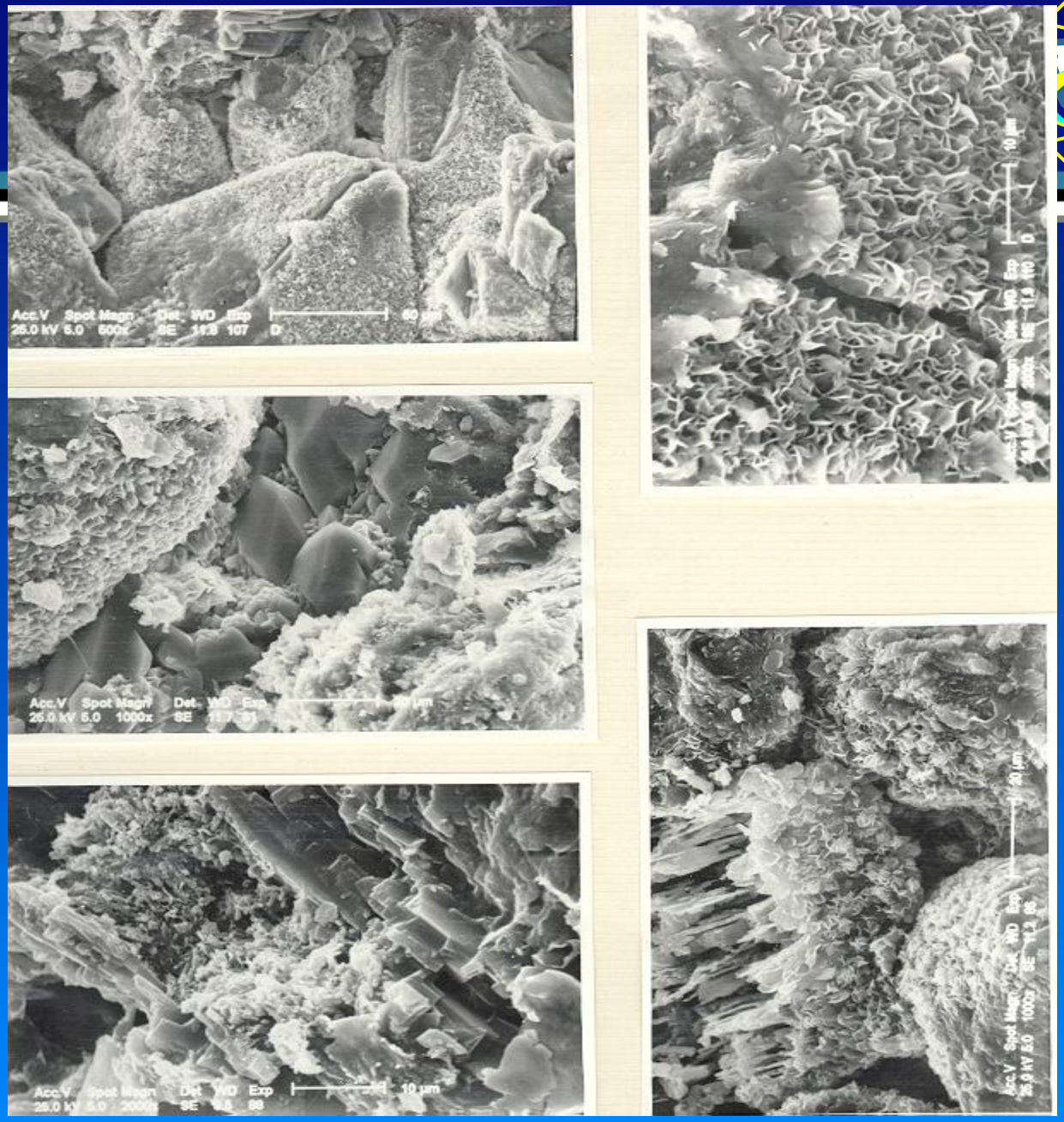
毛发状伊利石，鄂北上古生界致密砂岩

主要粘土矿物及其在扫描电镜下的特征

构造类型	族	矿物	化学式	d_{001} 10^{-1}nm	单体形态	集合体形态
1：1	高岭石	高岭石 地开石	$Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$	7.1~7.2, 3.58	假六方板状 鳞片状 板条状	书页状 蠕虫状 手风琴状 塔晶
	埃洛石	埃洛石	$Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$	10.05	针管状	细微棒状 巢状
2：1	蒙皂石	蒙脱石 皂石	$R_x(AlMg)_2(Si_4O_{10})(OH)_2 4H_2O$	Na~12.99 Ca~15.50	弯片状 皱皮鳞片状	蜂窝状 絮团状
	水云母	伊利石 海绿石 蛭石	$KAl((AlSi_3)O_{10})(OH)_2 \cdot mH_2O$	10	鳞片状 碎片状 毛发状	蜂窝状 丝缕状
2：1：1	绿泥石	各种 绿泥石	FeMgAl 的层状硅酸盐，同形置换普遍	14 , 7.14, 4.72, 3.55	薄片状 鳞片状 针叶片状	玫瑰花状 绒球状 叠片状
2：1 层链状	海泡石	山软木	$Mg_2Al_2(Si_8O_{20})(OH)_2(OH_2)_4 \cdot m(H_2O)_4$	10.40, 3.14 , 2.59	棕丝状	丝状 纤维状

油气层孔喉的观测

- 扫描电镜立体感强，更适于观察孔喉的形态、大小及与孔隙的连通关系
- 对孔喉表面的粗糙度、弯曲度、孔喉尺寸的观测能揭示微粒捕集、拦截的位置及难易程度，对研究微粒运移和外来固相侵入很有意义


Acc.V Spot Magn Det WD Exp
25.0 kV 5.0 500x SE 113 107
60 µm
10 µm
Acc.V Spot Magn Det WD Exp
25.0 kV 5.0 1000x SE
10 µm
Acc.V Spot Magn Det WD Exp
25.0 kV 5.0 2000x SE 98
10 µm
Acc.V Spot Magn Det WD Exp
25.0 kV 5.0 1000x SE
20 µm

含铁矿物的检测

- 当扫描电镜配有X射线能谱仪时，能对矿物提供半定量的元素分析
- 常用于检测铁元素，如碳酸盐矿物、不同产状绿泥石的含铁量，因为在盐酸酸化时少量的铁很容易形成二次沉淀，造成油气层的损害

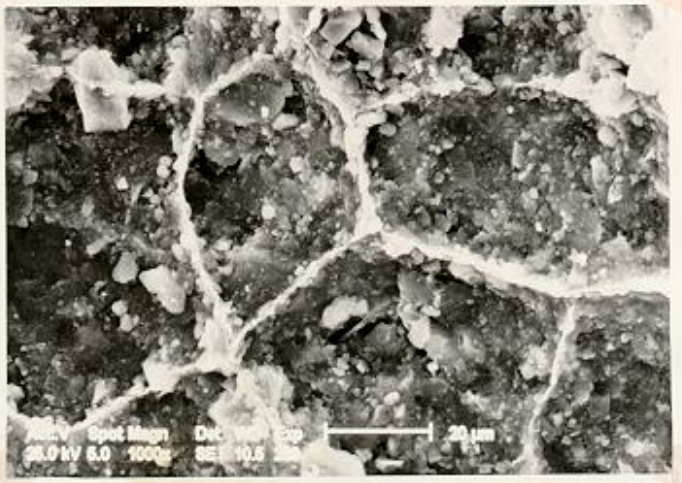


图 3-14　氧化铁矿物 SEM 下形貌及能谱分析,川孝 164 井,J_2s

油气层损害的监测

- 利用背散射电子图象，岩心可以不必镀金和镀碳就能测定，在敏感性(或工作液损害)评价实验前后都可以进行直观分析
- 对于无机和有机垢的晶体形态、排布关系的观察，还可以为抑垢除垢、筛选处理剂、优化工艺措施提供依据





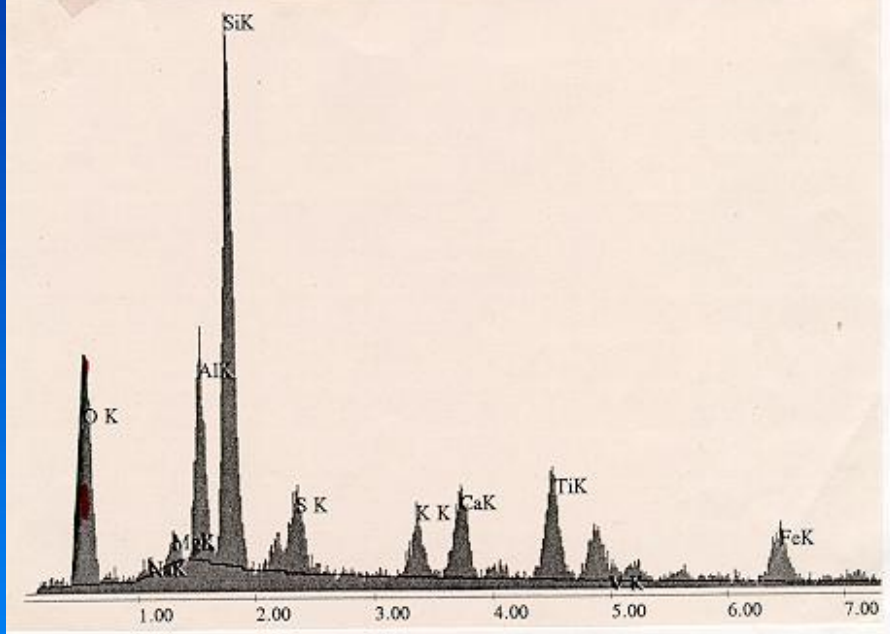


图 5-16 侵人天然缝泥浆固相的显微结构

存在聚合物网络并粘附众多微粒，EDX 分析指示有重晶石、钛铁矿等加重剂，Na^{+}、Mg^{2+}的出现指示含钠蒙脱土，最大颗粒尺寸近 15μm。

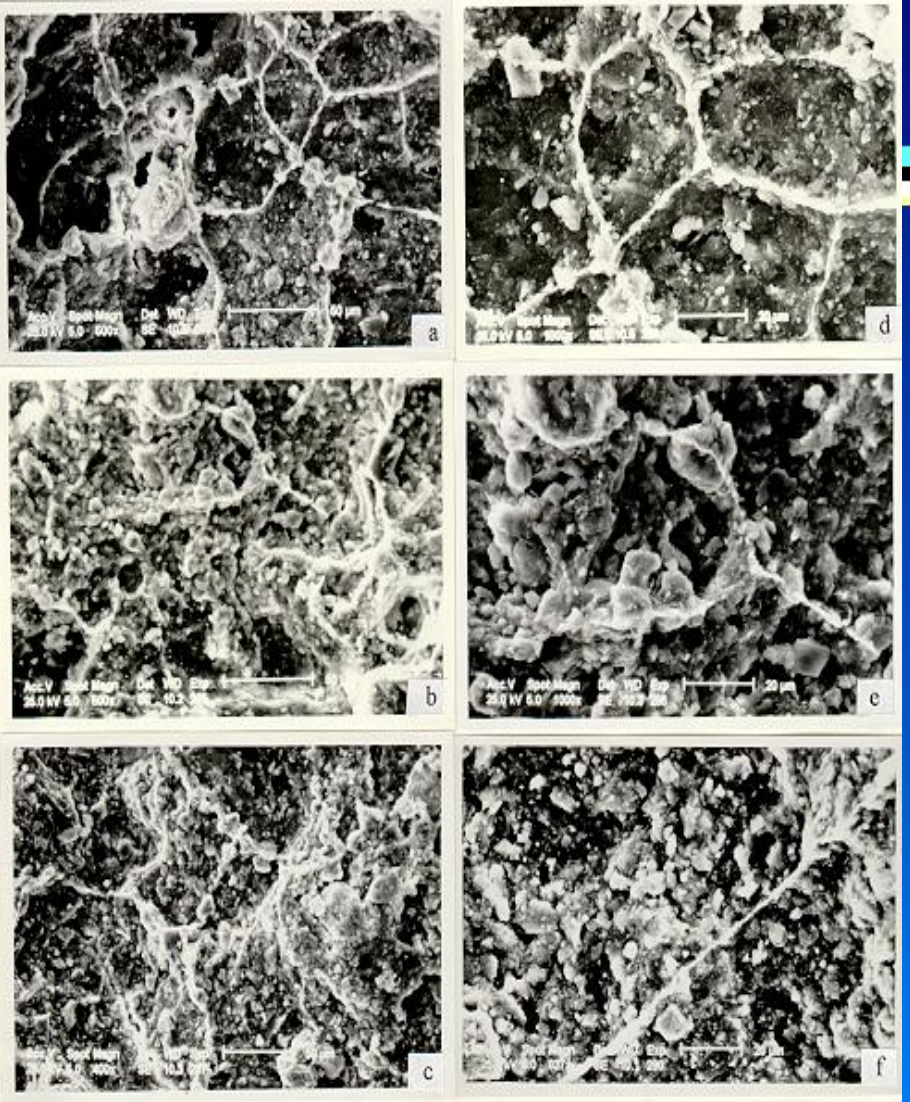


图 5-15 侵入裂缝泥浆固相的扫描电镜照片

显示聚合物网架结构，由于粘附粘土等微粒，网丝直径可达 1μm 以上，较粗颗粒被网丝连接成串珠状，聚合物桥联粘粒成絮团状。



图 5-17 基块岩样的扫描镜照片

自形石英、绿泥石和高岭石形态精致，特征明显，与固相侵入物形成鲜明的对照。

4 薄片分析技术

薄片技术是保护油气层的岩相学分析三大常规技术之一，也是最基础的一项分析。应用光学显微镜观察薄片，由铸体薄片获得的资料比较可靠

4.1 样品制备

- 制作铸体薄片的样品最好是成形岩心，不推荐使用钻屑。
- 薄片厚度为0.03mm，面积不小于 15mm×15mm
- 未取心的情况除外，建议少用或不用钻屑薄片，因为岩石总是趋于沿弱连接处破裂，胶结致密的岩块则能保持较大的尺寸，这样会对孔隙发育及胶结状况得出错误的认识

4.2 观察仪器



4.3 薄片分析技术应用



- 岩石的结构与构造
- 骨架颗粒的成分及成岩作用
- 孔隙特征
- 不同产状粘土矿物含量的估计
- 荧光薄片应用

岩石的结构与构造

- 薄片粒度分析给出的粒度分布参数可供设计防砂方案时参考，当然应以筛析法和激光粒度分析获得的数据为主要依据
- 研究颗粒间接触关系、胶结类型及胶结物的结构可以估计岩石的强度，预测出砂趋势
- 对砂岩中泥质纹层、生物搅动对原生层理的破坏也可观察，当用土酸酸化时，这些粘土的溶解会使岩石结构稳定性降低，诱发出砂

骨架颗粒的成分及成岩作用

- 沉积作用、压实作用、胶结作用和溶解作用强烈地影响着油气层的储集性及敏感性
- 了解成岩变化及自生矿物的晶出顺序对测井解释、敏感性预测、钻井完井液设计、增产措施选择、注水水质控制十分有利

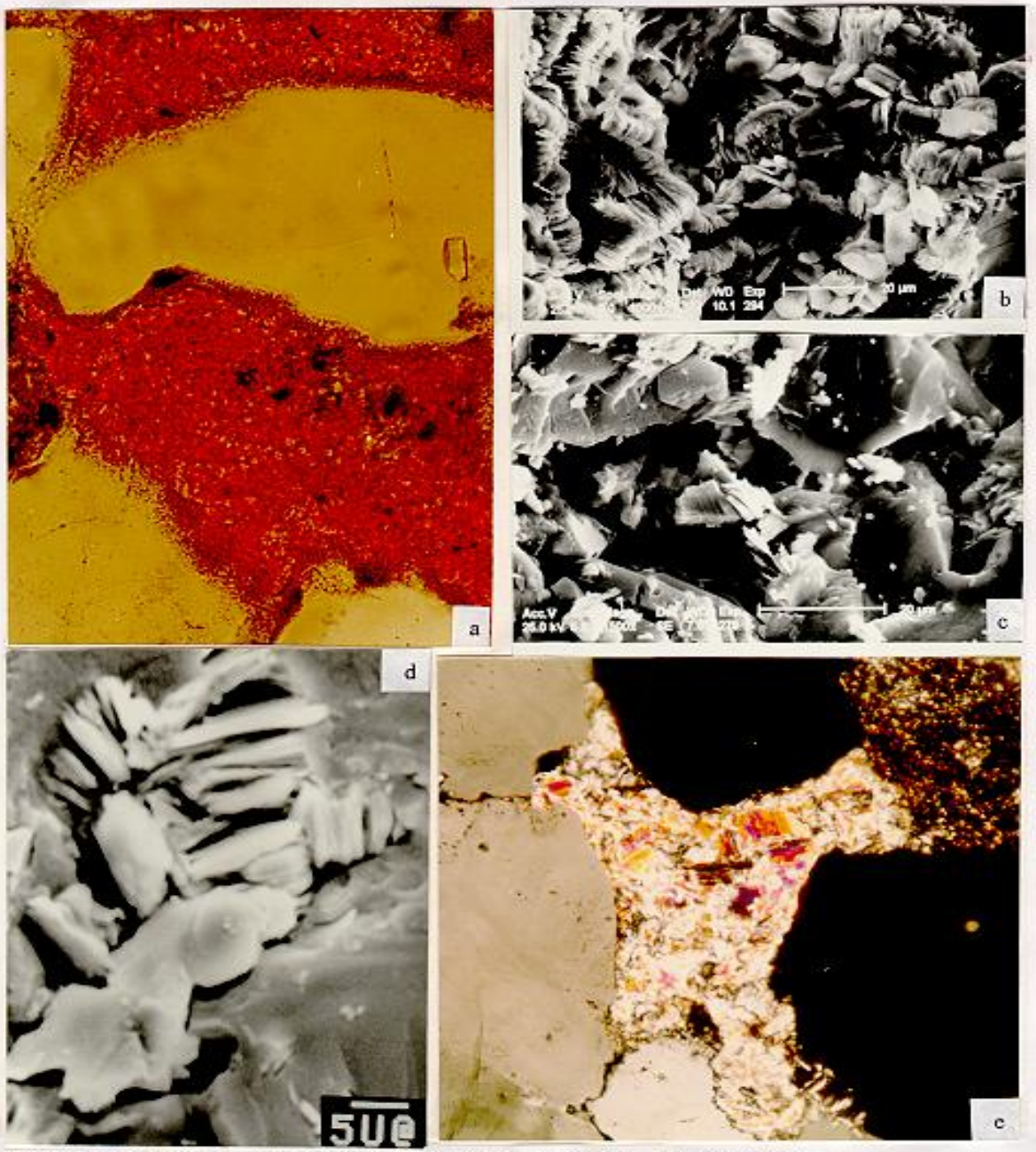
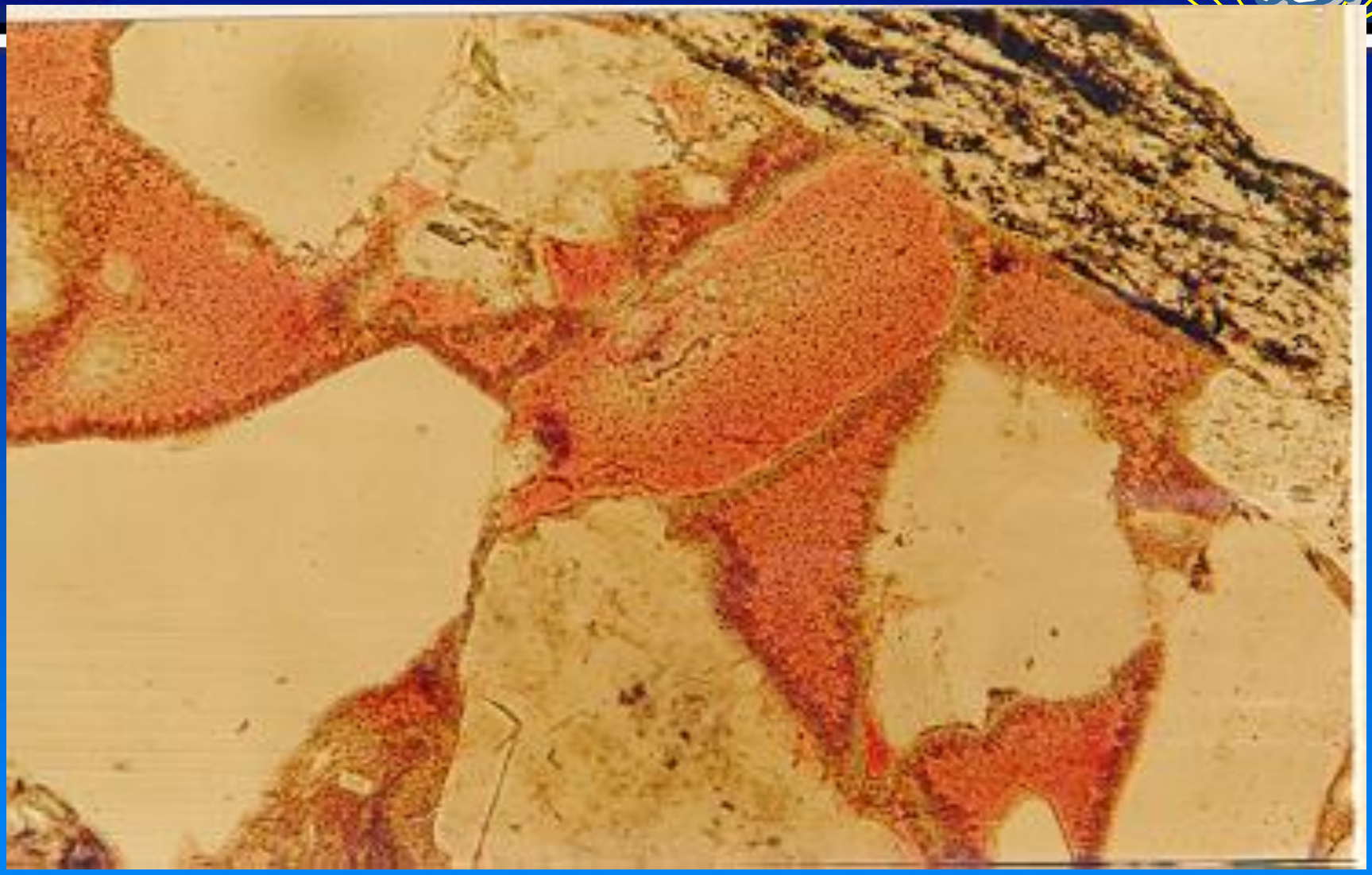


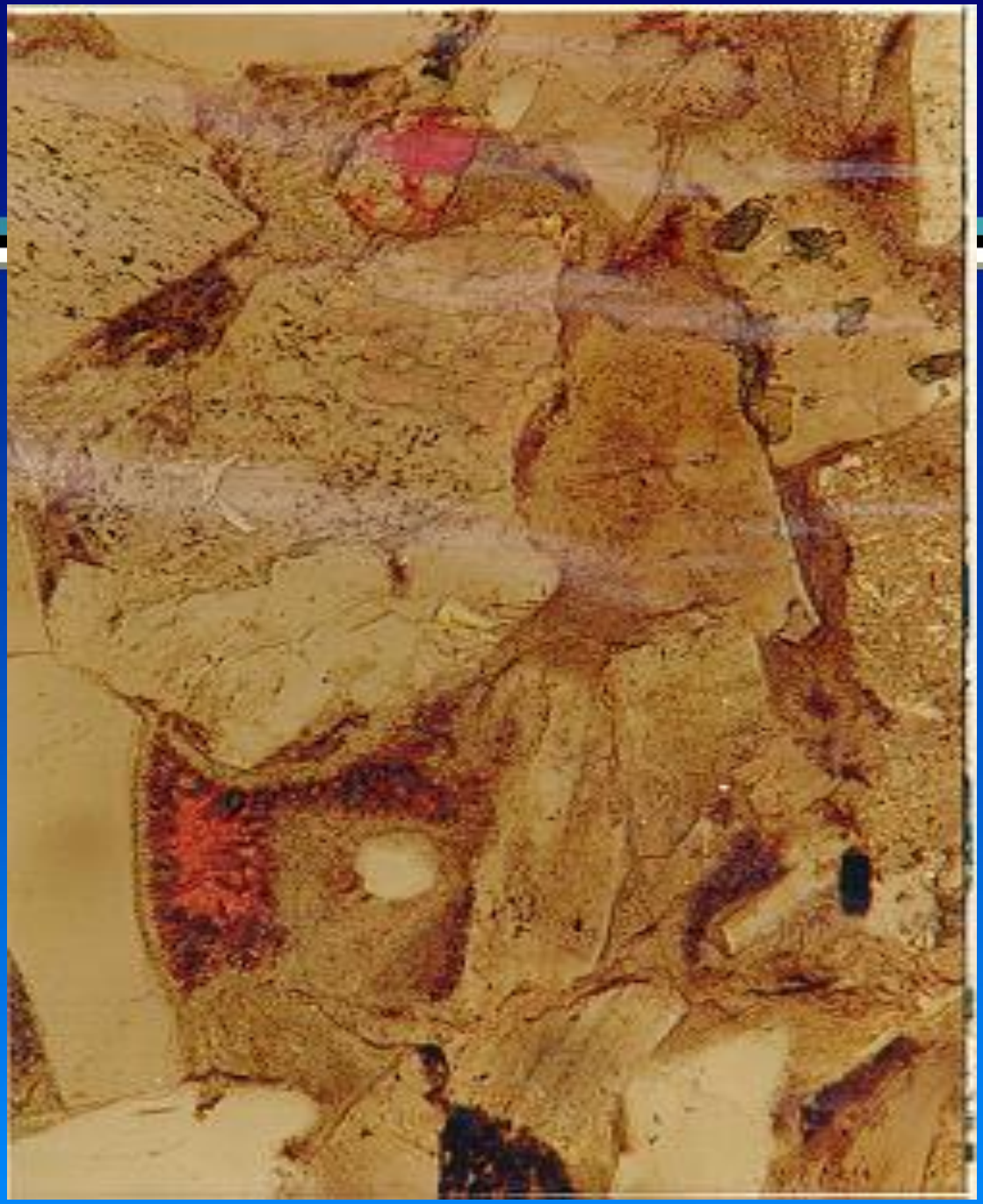
图 3-16 高岭石产状 a.高岭石充填粒间孔,密集出现,J_3s; b.书状、蠕虫状高岭石,J_3s;
c.书状集合体呈分散质点,J_1q; d.松散片状,T_3x^4;
e.原孔隙充填高岭石,已伊利石化,保持高岭石假象,T_3x^2。

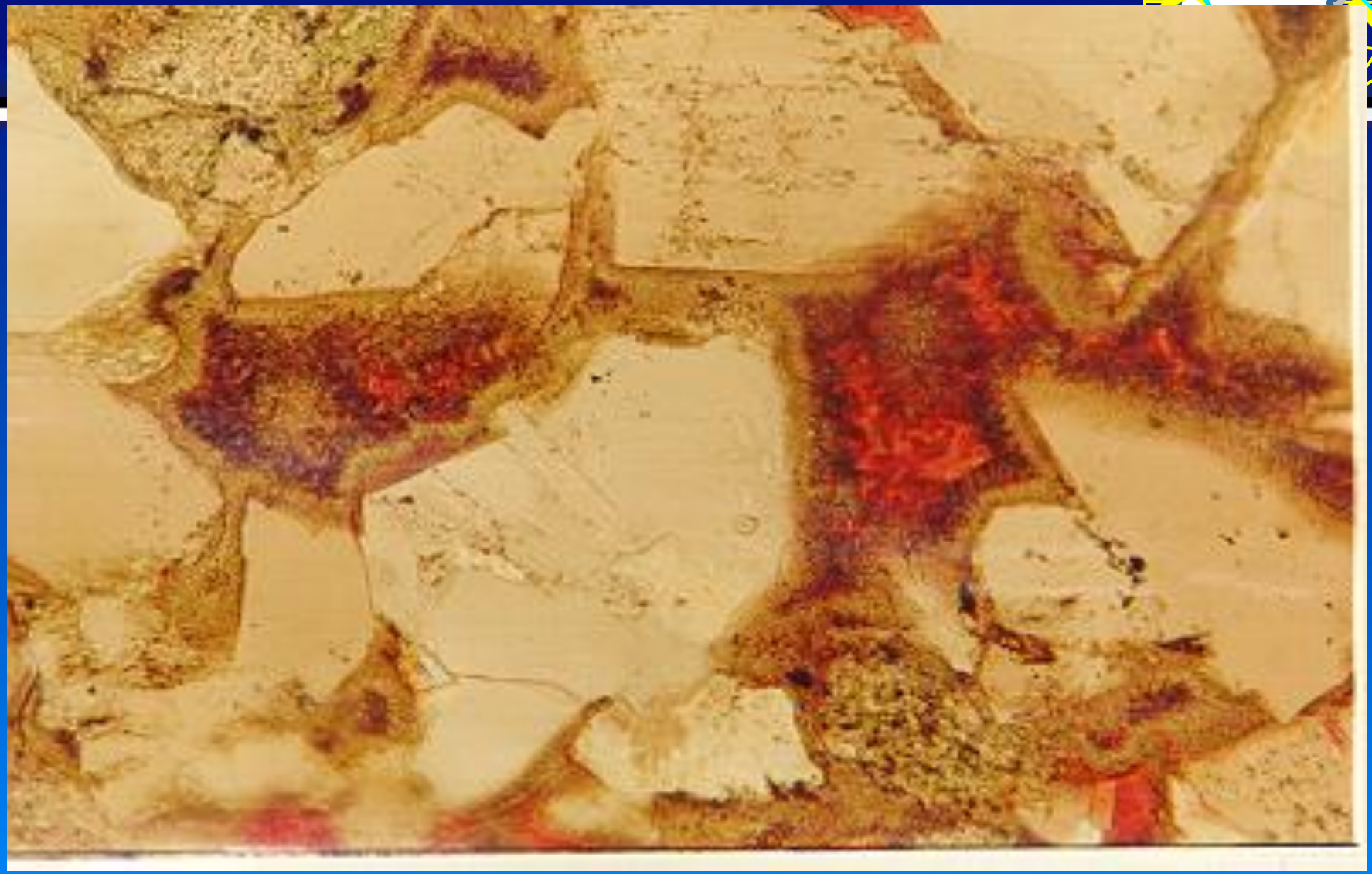
孔隙特征

- 薄片分析获得孔隙成因、大小、形态、分布资料，用于计算面孔率及微孔隙率
- 研究地层微粒及敏感性矿物在孔隙和喉道中的位置及与孔喉的尺寸匹配关系，可以判断油气层损害原因，并用于综合分析潜在的油气层损害，提出防治措施
- 低渗—致密油气层使用高分子有机阳离子聚合物粘土稳定剂时，虽可有效地稳定粘土，但由于孔喉细小，处理剂分子尺寸较大，它同时又损害油气层

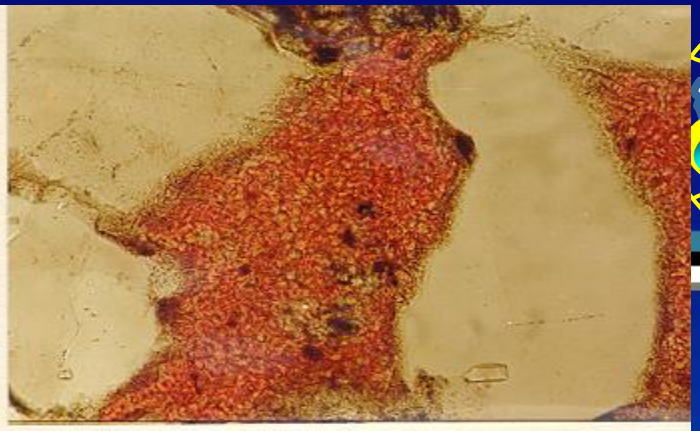


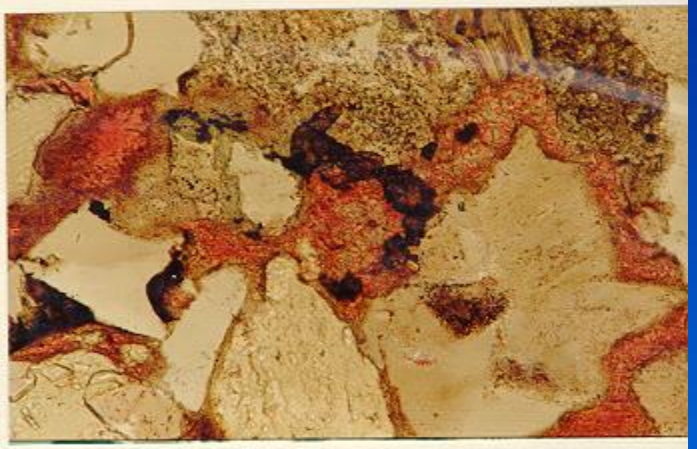




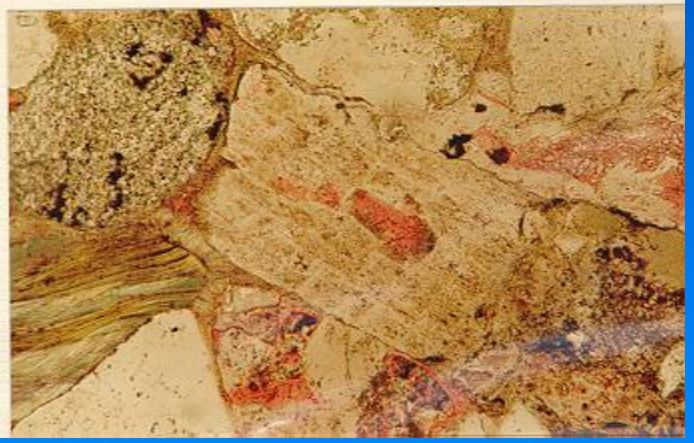












不同产状粘土矿物含量的估计

- XRD和红外光谱均不能给出粘土矿物的产状及成因，薄片分析则可说明同一种类型粘土矿物的几种产状（成因）的相对比例
- 只有位于孔隙流动系统中的粘土矿物才对外来工作液性质最敏感
- 薄片分析还用于粘土总量的校正，如泥质岩屑的存在可能引起粘土总量的升高，研究中应注意区分
- 沉降法分离出的粘土受粒径限制，难于反映出较大粒径变化范围（5~20μm）时粘土的真实组成

荧光薄片应用

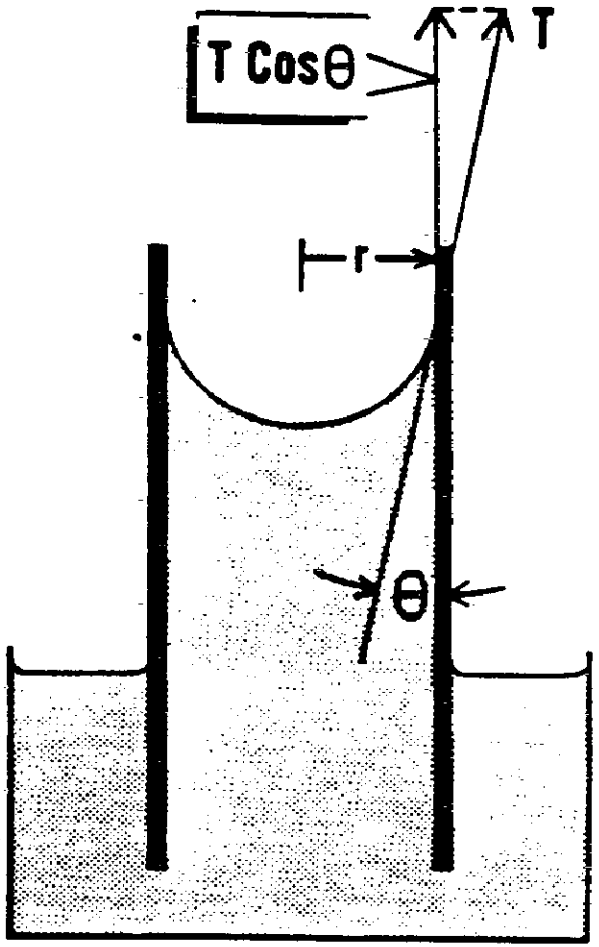
- 荧光薄片提供油存在的有效储集和渗流空间的性质，如孔隙、大小、连通性及裂缝隙发育程度，为更好地了解油气层损害创造了条件

5 压汞毛管压力曲线分析

由毛管压力曲线可以获得描述孔喉分布及大小的系列特征参数，确定各孔喉区间对渗透率的贡献

5.1 基本原理

- 压汞法由于其仪器装置固定、测定快速准确，并且压力可以较高，便于更微小的孔隙测量,它是目前国内外测定岩石毛细管压力曲线的主要手段
- 原理是汞对大多数造岩矿物为非润湿，对汞施加压力后，当汞的压力和孔喉的毛管压力相等时，汞就能克服阻力进入孔隙，计量进汞量和压力，根据进入汞的孔隙体积百分数和对应压力就得到毛细管压力曲线



Capillary Rise
Of
Wetting Liquid

$$Pc = \frac{2\sigma \cos\theta}{r_t}$$

R_t = Capillary tube radius

$COS\infty$ = Cosine of the Contact Angle, θ

基本原理

压力和孔喉半径的关系:

$$p_c = \frac{0.735}{r}$$

式中 p_c—毛管压力，Mpa

r—毛管半径，μm

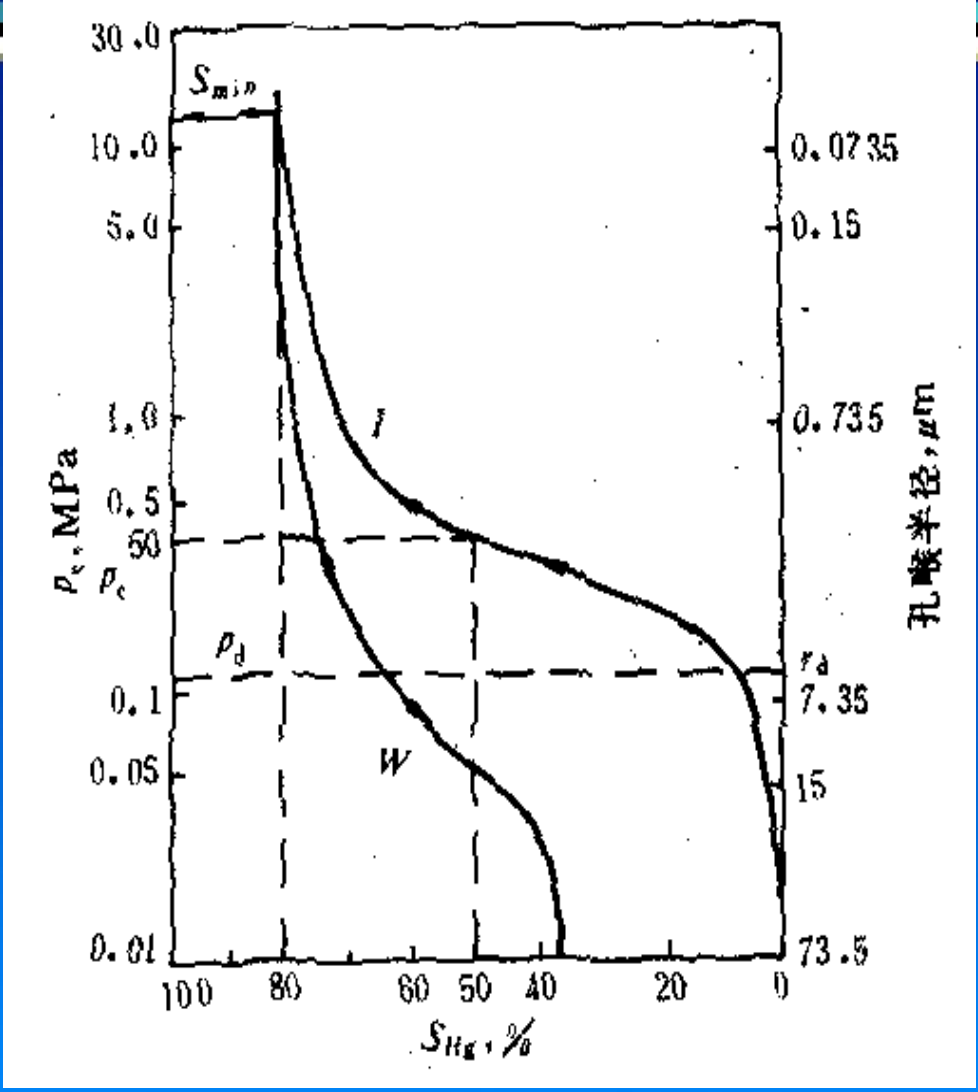
5.2 制样和仪器

- 压汞试验所用岩样一般为直径2.5cm，长2.5cm左右的柱塞，测定前将油清洗干净，测定岩石总体积、氦气法孔隙度、岩石密度和渗透率





毛管压力曲线


30.0
10.0
5.0
1.0
0.5
0.1
0.05
0.01
S_{min}
p_c, MPa
p_c
p_d
I
W
0.0735
0.15
0.735
7.35
15
73.5
r_d
孔喉半径, μm
100
80
60
50
40
20
0
S_{Hg}, %

5.3 毛管压力曲线应用

- 储集岩的分类评价
- 油气层损害机理分析
- 钻井完井液设计
- 入井流体悬浮固相控制
- 评价和筛选工作液

储集岩的分类评价

- 储集岩分类是评价油气层损害的前提，同一损害因素在不同类型的储集岩中的表现存在差异
- 根据毛细管压力的曲线特征参数，用统计法求特征值，结合岩石孔隙度、渗透率、孔隙类型、岩性等可以对储集岩进行综合分类

油气层损害机理分析

- 油气层微粒的粒度分析、微粒在孔隙中的空间分布及与孔喉大小的匹配关系是分析油气层损害的关键
- 相同间层比的伊利石/蒙皂石间层矿物，对细孔喉型油层的水敏损害比中、粗孔喉型油气层严重

钻井完井液设计

- 屏蔽暂堵型钻井完井液技术中架桥粒子的选择，就是依据由压汞曲线获得的孔喉分布。通过对一个油组或油气层不同物性级别岩样的毛管压力曲线测定，构制平均毛管压力曲线
- 架桥粒子即根据平均毛管压力曲线，考虑到出现的最大孔喉半径，按2/3架桥原理设计
- 暂堵型酸化、压裂过程中，暂堵剂粒度的筛选也要参考孔喉分布数据

入井流体悬浮固相控制

- 压井液、洗井液、射孔液、修井液、注入水和压裂液等都涉及固相颗粒的含量和粒径大小控制问题，而控制标准则视油气层储渗质量、孔喉参数而定
- 研究表明，当颗粒直径大于平均孔喉直径的1/3时，形成外泥饼，1/3~1/10时会侵入孔喉形成内泥饼，小于1/10时颗粒能自由移动

评价和筛选工作液

- 油气层损害的实质是岩石孔隙结构的改变，通过测定岩石与工作液作用前后的岩样毛管压力曲线就能对配伍性有明确的认识
- 应用高速离心机法可以快速测定毛管压力曲线，了解工作液作用前后储集岩孔喉分布参数和润湿性变化

6 岩心分析技术新发展

- 傅立叶变换红外光谱分析
- CT扫描层析成像
- 核磁共振成像技术（NMRI）
- 扫描电镜技术
- 环境扫描电镜技术
- 非晶态矿物研究

6.1 傅立叶变换红外光谱分析

- 采用傅里叶变换红外光谱仪，测定矿物的基团、官能矿物的基团、官能团来识别和量化常见矿物
- 定量分析的矿物有石英、斜长石、钾长石、方解石、白云石、菱铁矿、黄铁矿、硬石膏、重晶石、绿泥石、高岭石、伊利石和蒙皂石总和，以及粘土总量
- 对非晶质物、间层粘土矿物的分析有独到之处
- 国外已将其用于井场岩石矿物剖面分析图的快速建立，国内亦逐渐成为分析敏感性矿物，尤其是油气层粘土矿物的有力手段

6.2 CT扫描层析成像

- 将医学CT扫描技术引人到岩心分析中，原理是用X射线照射岩心，断面上岩石颗粒密度的信息，经计算机处理转换成岩心剖面图
- 不改变岩石形态及内部结构的条件下观察岩石的裂缝和孔隙分布
- 当固相物侵入岩心时，能够对固相侵入深度及其在孔喉中的状态进行监测，也可以观察岩样与工作液作用后的孔隙空间变化
- 主要用于高渗透疏松砂岩和裂缝性储层的损害研究中，如出砂机理、稠油蚯蚓孔道的形成、侵入裂缝的固相分布、岩心内泥饼的分布形态

6.3 核磁共振成像技术

- 简称NMRI，它能够观测孔隙或裂缝中流体分布与流动情况
- 对于流体与流体之间，流体与岩石之间的相互作用，以及润湿性和润湿反转问题的研究有特殊意义，是研究油气损害的最新手段之一
- NMRI测井技术发展很快，主要用于剩余油的分布探测，已成为提高采收率的重要评价技术

6.4 扫描电镜技术

- 在SEM上配置能谱仪（EDS）可以对矿物提供半定量元素分析，对敏感性矿物的识别及损害机理研究有很大的帮助
- 背散射仪的应用免除镀膜对粘土形貌的改变，更宜于试验前后的样品观察
- 临界点冷冻干燥法，能够揭示粘土矿物在油气层条件下的真实形态
- 扫描电镜与图象分析仪使用，研究粘土矿物微结构并预测微结构的稳定性

6.5 非晶态矿物研究

- 油气层中非晶态矿物有蛋白石、水铝英石、伊毛缟石、硅铁石等，还有比粘土矿物微粒更小的纳米级矿物
- 它们或单独产出，或存在于粘土矿物晶体之间，起到连接微结构的作用，比表面更大，性质更活跃

分析方法及意义

- 研究方法主要有化学分析、电子探针、原子力显微镜等
- 吐哈盆地丘陵三间房组砂岩高岭石进行电子探针分析，指出高岭石化学组成很少符合理论组成，SiO_2、Al_2O_3经常过量，这种硅、铝部分以非晶态存在，它们易于溶解并促使高岭石微结构失稳

6.6 环境扫描电镜技术

- 环境扫描电镜则可以在气体、液体介质环境下分析样品
- 国外已开始利用此项技术研究膨胀性粘土矿物与工作液作用的机理，分析粘土矿物间层比和遇水膨胀的关系、水化膨胀和脱水过程的差异等
- 环境扫描电镜是损害机理研究和工作液评价的有力手段
- 目前，我国已引进了这种仪器

关于岩心分析

- 岩心分析技术在认识油气层特征、研究油气层损害机理及保护油气层工程设计中具有广泛的应用
- 每种技术都有其优点及局限性，实际工作中要具体问题具体分析，并制定一套切实可行的技术路线
- 各项技术本身在石油工程中的应用还有较大的潜力尚待开发，同时工程实践中也不断提高许多新问题，需要创造性地应用先进技术来解决

岩相学分析

- 综合利用X射线衍射、扫描电镜、薄片分析等技术，揭示岩石的微观结构及构造、矿物成分及含量、敏感性矿物产状，孔隙类型、形态、大小及连通关系等特征的过程。

——X射线衍射分析：主要用于全岩矿物分析、地层微粒分析、黏土矿物类型及相对含量的确定；

——扫描电镜分析：主要用于岩石孔隙类型、几何形态及连通关系，敏感性矿物类型及产状观察；

——薄片分析：揭示岩石矿物组分、结构及含量，岩石孔隙类型、成因、几何形态及连通关系，矿物产状等特征。

7 油气层潜在损害因素分析

岩心分析的直接应用就是潜在损害因素研究。油气层的潜在损害与其储渗空间特性、敏感性矿物，岩石表面性质、地层流体性质有关，同时还受外来流体和环境因素的影响

研究内容

- 油气层储渗空间
- 油气层敏感性矿物
- 油气层岩石的润湿性
- 油气层流体性质
- **油气藏环境**

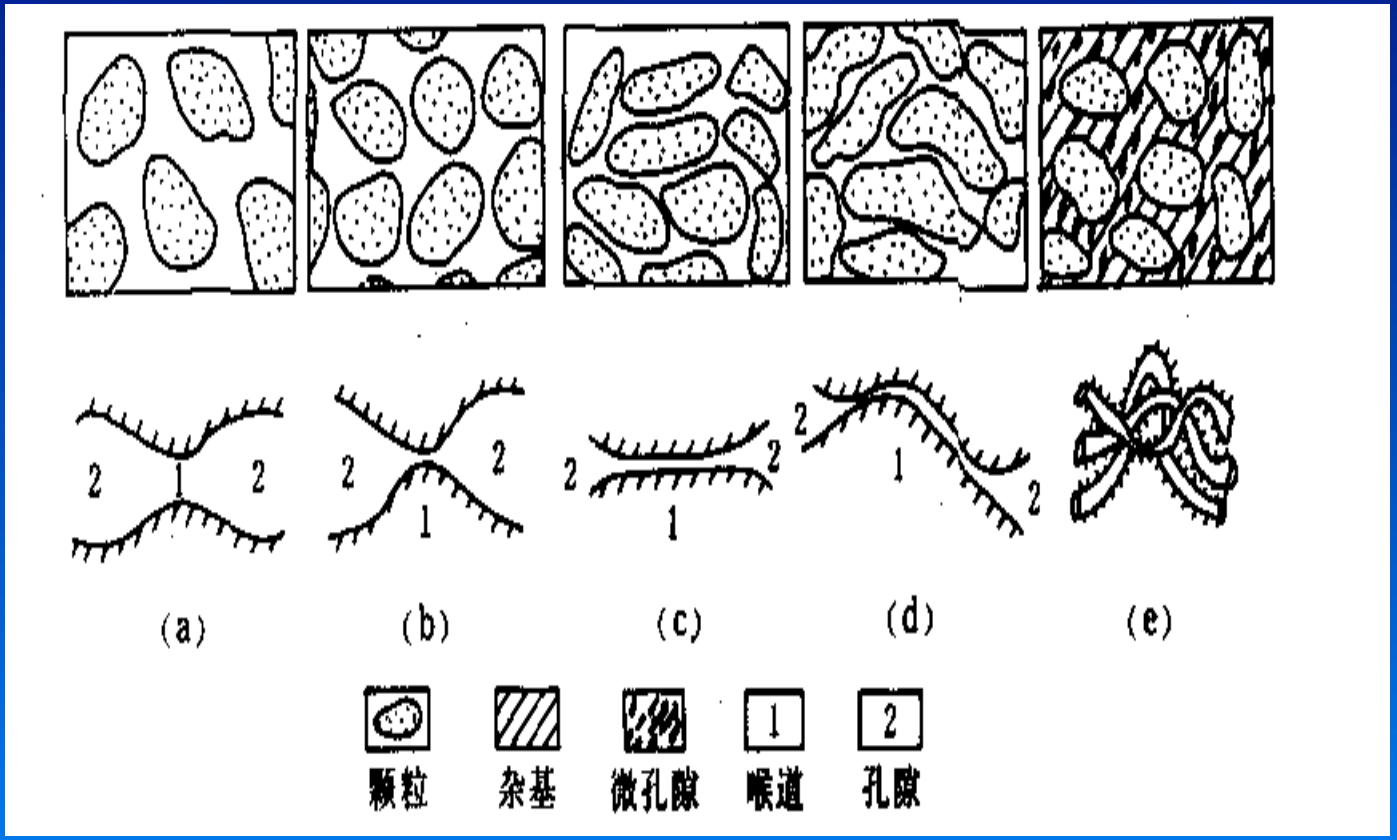
7.1 油气层储渗空间

- 碎屑岩油气层的储集空间主要是孔隙，渗流通道主要是喉道。喉道是指两个颗粒间连通的狭窄部分，是易受损害的敏感部位。孔隙和喉道的几何形态、大小、分布及其连通关系，称为油气层的孔隙结构
- 对于裂缝性储层，天然裂缝既是储集空间又是渗流通道, 根据基块孔隙和裂缝的渗透率贡献大小，可以划分出一些过渡储层类型。
- 孔隙结构是从微观角度来描述油气层的储渗特性，而孔隙度与渗透率则是从宏观角度来描述油气层的储渗特性

孔隙度和渗透率

- 宏观上表征油气层特性的两个基本参数，其中与油气层损害关系比较密切的是渗透率，因为它是孔喉的大小、均匀性和连通性三者的共同体现
- 对于一个渗透性很好的油气层来说，它的孔喉较大并较均匀，连通性好，胶结物含量低，这样它受固相侵入损害的可能性也更大
- 对于一个低渗透性油气层来说，由于它的孔喉小、连通性差、胶结物含量较高，就更容易受到粘土矿物水化膨胀、分散运移、水锁和贾敏损害

储层孔隙结构



孔隙结构与油气层损害的关系

- 在其它条件相同的情况下，喉道越粗，不匹配的固相颗粒侵入的深度就越大，造成的固相损害程度就越严重。但滤液侵入造成的水锁、贾敏等损害的可能性较小
- 孔喉弯曲程度越大，外来固相颗粒侵入越困难，侵入深度变小；而地层微粒易在喉道中阻卡，微粒分散/运移的损害潜力增加
- 孔隙和喉道尺寸越小且连通性越差，油气层越易受到与流体、界面现象相关的损害，如水锁、贾敏、乳化堵塞、粘土矿物水化膨胀等

喉道类型与油气层损害特点

类　型	主要特征	主要损害方式
缩颈喉道	孔隙大，喉道粗，孔隙与喉道直径比接近于 1	固相侵入，出砂和地层坍塌
点状喉道	孔隙较大，喉道略细，孔隙与喉道直径比大	固相侵入，微粒分散/运移，水锁，贾敏
片状和 弯片状喉道	孔隙小，喉道细而长，孔隙与喉道直径比中到大	微粒分散/运移，水锁，贾敏，粘土矿物水化膨胀
管束状喉道	孔隙和喉道成为一体，界限不分明，且细小	水锁，贾敏，乳化堵塞，粘土矿物水化膨胀

7.2 油气层敏感性矿物

——定义

- 易与工作液发生物理和化学作用，导致油气层渗透性显著降低的矿物属于敏感性矿物。
- 它们的特点是粒径很小（<37μm），比表面大，且多数位于孔喉处，它们优先与外界流体接触充分,作用速度快，易引起油气层损害

（1）水敏和盐敏矿物

- 与矿化度（或活度）不同于地层水的水基流体作用产生水化膨胀、或分散/运移等，并引起储层渗透率下降的矿物。主要有蒙皂石、伊/蒙间层矿物和绿/蒙间层矿物

（2）碱敏矿物

- 与高pH值工作液作用产生分散/运移，或新的硅酸盐沉淀和硅凝胶体，并引起储层渗透率下降的矿物。主要有高岭石等各类粘土矿物、长石和微晶石英

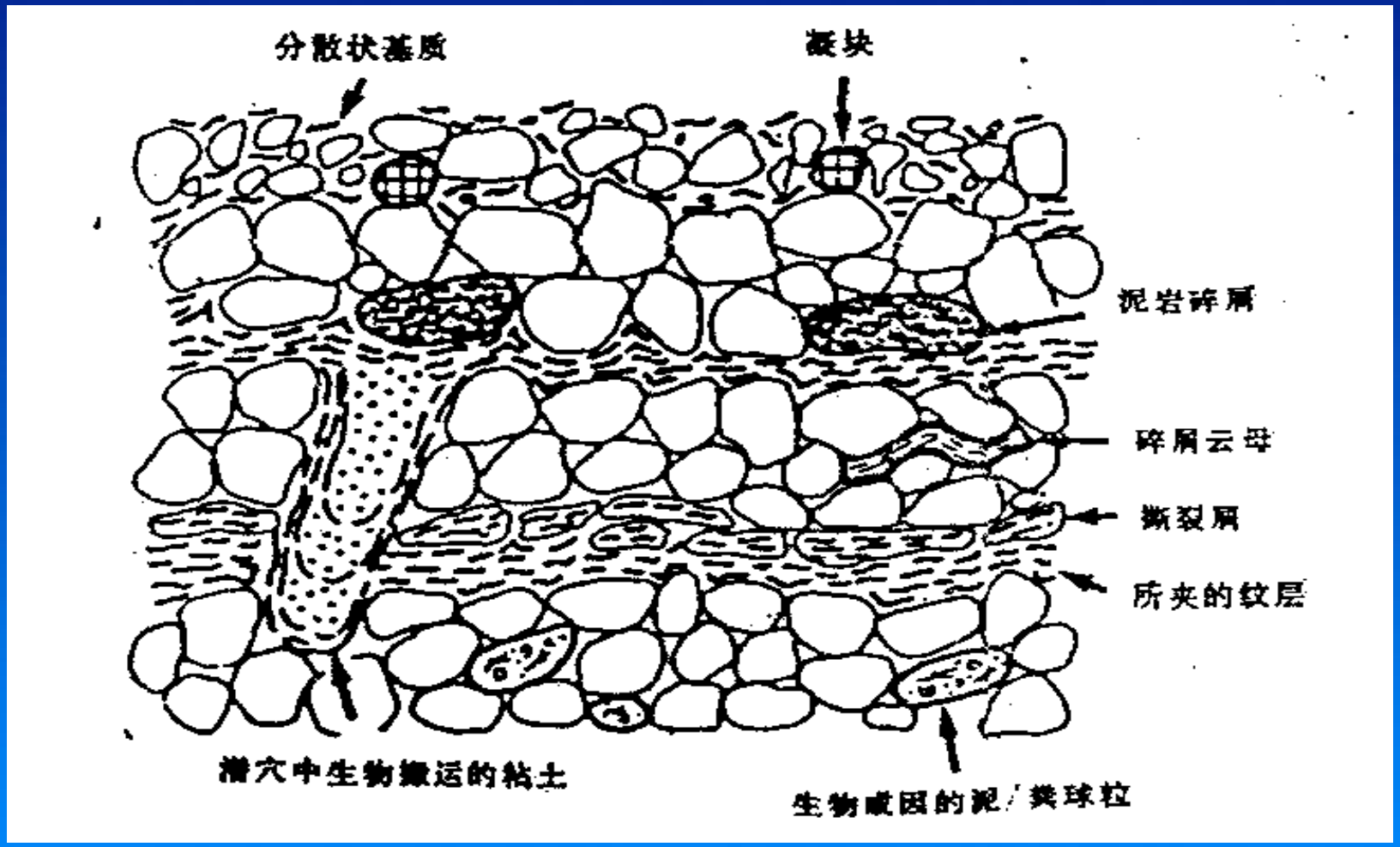
（3）酸敏矿物

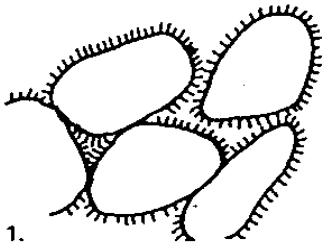
- 与酸液作用产生化学沉淀或酸蚀后释放出微粒，并引起储层渗透率下降的矿物
- 酸敏矿物分为盐酸敏感矿物和氢氟酸敏感矿物
- HF敏感的矿物主要有方解石、白云石、长石、微晶石英、沸石、各类粘土矿物和云母
- HCl敏感的矿物常见的包括富铁绿泥石、菱铁矿、黄铁矿、赤铁矿、铁方解石、铁白云石、黑云母、磁铁矿等

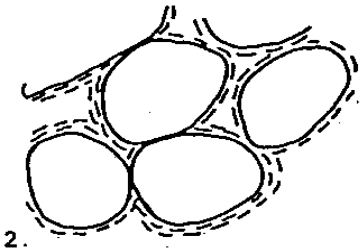
（4）速敏矿物

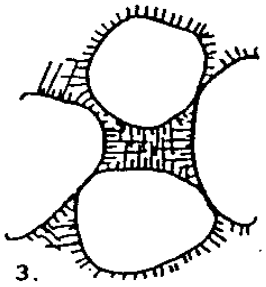
- 在高速流体流动作用下发生脱落、分散/运移，并堵塞喉道的微粒矿物。主要有粘土矿物及粒径小于37μm的各种非粘土矿物，如微晶石英、、菱铁矿、微晶方解石等

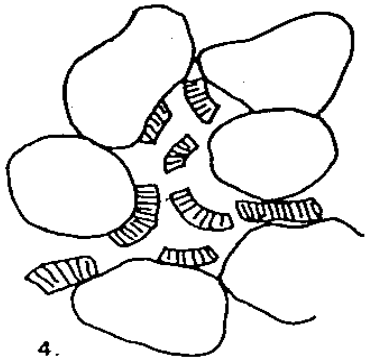
碎屑粘土的产状

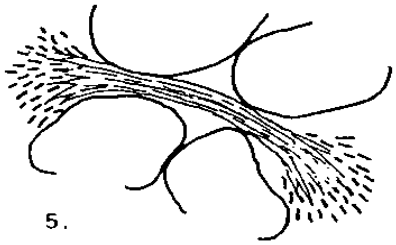


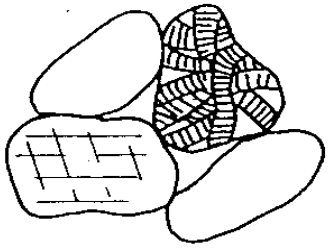


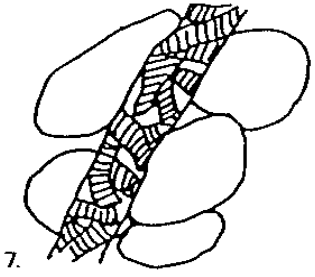












自生粘土矿物产状

7.3 油气层岩石的润湿性

- 岩石表面被液体润湿（铺展）的情况称为岩石的润湿性
- 岩石的润湿性一般可分为亲水性、亲油性和两性润湿三大类
- 油气层岩石的润湿性取决于矿物的晶体结构、地层流体的活性组分性质，工作液侵入也可以改变岩石的润湿性

润湿性的作用

1）控制孔隙中油气水分布。对于亲水性岩石，水通常吸附于颗粒表面或占据小孔隙角隅，油气则占孔隙中间部位；对于亲油性岩石，刚好出现相反的现象

2）决定岩石孔道中毛管压力的大小和方向。毛管压力的方向总是指向非润湿相一方。当岩石表面亲水时，毛管压力是水驱油的动力；当岩石表面亲油时，毛管力是水驱油的阻力

润湿性的作用

3）制约微粒运移的损害程度。当油气层中流动的流体润湿微粒时，微粒容易随之运移，否则微粒难以运移。油气层岩石的润湿性的前两个作用，可造成有效渗透率下降和采收率降低，而后一作用对微粒运移有较大影响

7.4 油气层流体性质

- 地层水性质
- 原油性质
- 天然气性质

地层水性质

- 地层水性质主要指矿化度、离子类型和含量、pH值和水型等
- 当油气层压力和温度降低或侵入流体与地层水不配伍时，会生成$CaCO_3$、$CaSO_4$、$BaSO_4$等无机垢
- 高矿化度地层水还可引起进入油气层的高分子处理剂发生盐析
- 室内实验流体配制、工作液基液的选择、防垢抑垢剂的筛选、除垢工艺的优化，地层水是重要依据

原油性质

- 原油性质主要包括粘度、含蜡量、胶质、沥青、析蜡点和凝固点
- 石蜡、胶质和沥青可能形成有机沉淀，堵塞喉道、射孔孔眼、砾石充填层、筛管和油管
- 原油与入井流体不配伍形成高粘乳状液，胶质沥青质与酸液作用形成酸渣
- 注水和压裂中的冷却效应还可以导致石蜡、沥青在井间地层中沉积

天然气性质

- 与损害有关的天然气性质主要是相态特征和H_2S、CO_2腐蚀气体的含量
- 相态特征主要是针对凝析气藏而言，当开采时压差过大、或气藏压力衰竭时，井底压力低于露点压力，此时凝析液在井筒附近积聚，使气相渗透率大大降低，形成油相圈闭
- 腐蚀性气体的作用是设备腐蚀产生微粒，如H_2S在腐蚀过程中形成FeS沉淀，造成井下和井口管线的堵塞

7.5 油气藏环境

- 地层损害是在特定的环境下发生的
- 内部环境包括油气藏温度、压力、原地应力和天然驱动能量
- 外部环境有工作液的流速、化学性质、固相颗粒分布、压差、流体的温度等

地层损害的类型、损害方式、预防及处理措施

损害类型		敏感性矿物	损害方式	预防及处理措施
水　敏		蒙皂石、伊/蒙间层、钠板石、绿/蒙间层、柯绿泥石、伊利石、绿泥石、高岭石、水化云母	晶格膨胀 分散/运移	1.用与地层水和矿物配伍的工作液 2.加入粘土稳定剂和防膨剂 3.使用惰性流体，如气体为工作流体
盐　敏			分散/运移	
酸敏	HCl	绿泥石、黄铁矿、黑云母、菱铁矿、铁方解石、铁白云石、含铁重矿物	$Fe(OH)_3$ 沉淀、硅胶沉淀、酸蚀后颗粒运移	1.酸液中加铁的整合剂和除氧剂 2.用 EDTA 处理碳酸盐或氟硼酸酸化
	HF	方解石、白云石、各类粘土矿物、长石、部分岩屑、白云母	CaF_2 沉淀、硅胶沉淀，氟硅酸盐沉淀，氟铝酸盐沉淀	1.加适当的添加剂减少铁的沉淀 2.用盐酸或醋酸溶解碳酸盐矿物 3.注意控制作业规模。
碱　敏（PH>9）		各类粘土矿物（尤以高岭石为主）、微晶长石、微晶石英	硅酸盐沉淀，硅胶沉淀，分散/运移，颗粒运移，晶格膨胀	1.控制工作液的 pH 值 2.加粘土稳定剂 3.减少工作液滤失量

速　敏		高岭石、蒙皂石、伊/蒙间层、绿/蒙间层、柯绿泥石、伊利石、绿泥石、微晶石英、水化云母	分散/运移	1. 减小压力波动 2. 控制流速 3. 加粘土稳定剂 4. 用氟硼酸处理粘土矿物 5. 注入非润湿性流体
出　砂		碎屑颗粒（石英、长石、岩屑）	弱 固 结 颗粒运移	1. 降低流速和压力波动 2. 早期采取有效防砂措施
结垢	无机	碳酸钙、 硫酸钙、硫酸钡	化学沉淀	1. 控制温度压力变化，工作液的矿化度、组成和 pH 值 2. 加防垢剂、抑垢剂 3. 用盐酸、醋酸处理
	有机	沥青、石蜡	化学沉淀	1. 控制压力和温度变化幅度 2. 加防蜡剂 3. 采用清蜡防蜡措施
应力敏感		造岩矿物	岩石压实 孔喉压缩	1. 避免井底压差、或能量亏空过大 2. 及时注入流体补充能量
固相侵入		钻屑、加重剂，人工钠土、微生物、机械杂质、铁锈等	外来固相在孔喉内沉积	1. 钻井完井采用屏蔽暂堵技术 2. 采用欠平衡作业 3. 压井液、射孔液、措施流体、注入流体要严格过滤

环境因素的研究

- 随着保护储层技术重点向注水开发、EOR过程和非常规油气藏转移，将更多地关注环境因素，如时间（t）、温度（T）、压力（P）或应力（St）
- 开发过程周期长，损害的累积性和叠加性均是时间的反映。温度效应在深井超深井作业和注蒸汽稠油开采中显得特别突出
- 压力（或应力）的影响在裂缝性油气藏和疏松砂岩油藏表现明显，应力敏感性和油藏压实已经引起重视

思考题

1、岩相学分析包括哪些内容？

2、开展岩心分析的意义是什么？

3、怎样研究储层岩石结构和敏感性矿物的特征？

4、如何获得孔隙类型及孔隙结构参数？孔隙结 构参数在保护储层中有哪些应用？

5、如何诊断油气层潜在损害？

6、如何分析砂岩储层中的粘土矿物？

7、试述粘土矿物的类型、含量和产状与潜在损害的关系。

欢 迎 光 临



谢谢指导！