

## 乙酸对长石砂岩溶蚀作用的实验模拟

杨俊杰 黄月明 张文正 刘桂霞

(长庆石油勘探局)

黄思静

(成都理工学院)

**摘 要** 本文描述动态条件下开放体系中的长石砂岩溶蚀模拟实验。实验样品为陕甘宁盆地下石盒子组绿灰色中粒蚀变凝灰质长石砂岩岩心,采用地层水中普遍存在的乙酸配制成反应介质,动态溶蚀实验时间为 813h。溶蚀后岩样的次生孔隙显著增加,物性明显改善,检测到长石蚀变形成的高岭石和微晶石英。本文探讨了实验样品中矿物的溶蚀序列,以及长石矿物溶蚀、次生孔隙、新生矿物的形成机理。

**主题词** 长石砂岩 动态 实验室实验 模拟 溶蚀孔隙 矿物 乙酸溶液

## 前 言

近 10 多年来,有机—无机相互作用在油气储集岩(碎屑岩,碳酸盐岩)中矿物组分溶蚀、自生矿物产生及次生孔隙形成过程中的重要性已越来越被国内外学者所重视,并被逐步应用于油气储集层的次生孔隙评价等方面<sup>[1,2]</sup>。同时,人们也开展了多种模拟实验,以探讨有机酸(溶液介质)对长石类铝硅酸盐矿物的溶蚀机理及控制因素——包括有机酸种类及其离子类型(Ronald 和 Edward, 1990)和 pH 值(Bevan 和 Savagel, 1989)。

在不同温压条件下,进行乙酸溶液介质对长石单矿物的溶蚀实验。结合陕甘宁盆地古生界天然气勘探实际,进一步开展了乙酸溶液介质对长石砂岩岩心的溶蚀过程模拟实验,可以更直接地观察溶蚀后岩样中次生孔隙与自生矿物的形成,了解砂岩中各矿物组分的相对溶蚀速率等。

## 实 验

## 1. 实验条件

**作者简介:** 杨俊杰,男,62 岁,教授级高级工程师,1954 年毕业于西北大学地质系,现从事石油地质研究工作,曾获总公司及国家科技进步奖多次。地址:甘肃省庆阳县长庆石油勘探局,745101

**收稿日期:** 1994-06-21

根据陕甘宁盆地油气地质以及现有的实验设备情况,我们设计了动态条件下,开放体系中长石砂岩的溶蚀模拟实验条件。温度  $88 \pm 2^\circ\text{C}$ ,流体驱动压力  $30\text{MPa}$ ,围压  $34 \pm 1\text{MPa}$ ,末端与大气相通(即常压);压力容器:材料选用耐酸耐腐蚀的特种不锈钢(1Cr 18Ni 9Ti),承压大于  $40\text{MPa}$ ;流体性质:浓度  $0.15\text{mol/L}$  的乙酸溶液,无固体微粒。

## 2. 样品

采用具一定代表性的陕甘宁盆地的下石盒子组绿灰色中粒蚀变凝灰质长石砂岩。x 射线衍射和薄片鉴定结果(见表 1)均表明岩石中含有约 20% 的长

表 1 长石砂岩实验样品的矿物成分表

Table 1 Mineral composition of the feld spathic samples tested

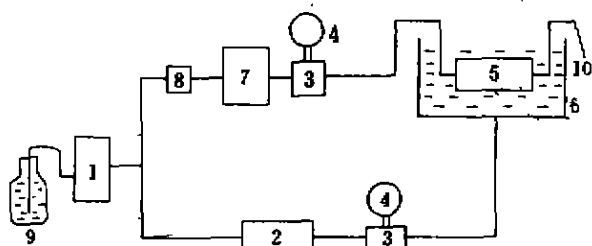
方 法	矿 物 %					
	石英	长石	方解石	绿泥石	蚀变凝灰质	云母 岩屑
x 射线衍射	50	21	3	26		
薄片鉴定	58	19	4		18	1 少量

石类矿物。该长石砂岩的孔隙度为 2.86%,渗透率为  $0.029 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,比表面为  $0.78\text{m}^2/\text{g}$ 。据铸体薄

片分析,长石砂岩的孔隙类型为孔隙极不发育的溶孔微孔型,溶孔小于1%,溶孔孔径小于 $30\mu\text{m}$ ,溶孔不均匀地分布于微层间空隙,矿物微裂隙、解理和充填物晶间隙,其孔隙结构特征: $r_D$ 为 $417\mu\text{m}$ , $r_{50}$ 为 $0.13\mu\text{m}$ , $S_{\Sigma Hg}$ 为56.292%。

### 3. 实验装置与流程

实验装置见图1。将直径25mm,长为50mm,重量75g的岩心安放在岩心夹持器内,中间容器内装满乙酸溶液,压力容器内充满纯水。并按装置图连接好,由往复柱塞泵提供围压与反应介质的启动压力。启动微量往复柱塞泵,步进式升压,使岩心夹持器的围压达到 $35\pm 1\text{MPa}$ ,反应介质(乙酸溶液)达到 $29\pm 1\text{MPa}$ ,升压过程中始终保持围压大于工作压力 $3\sim 5\text{MPa}$ 。恒温水浴同时升至实验温度。反应介质在高压驱使下通过岩心柱,对矿物组分进行溶蚀反应。上述流程完成并压力条件稳定后,数10min后,就有反应介质从出口端流出。



1—往复柱塞泵(40MPa);2—压力容器(40MPa)3—六通阀门座;4—压力表(60MPa);5—TY-II型岩心夹持器(50MPa);6—恒温水浴;7—10 000mL中间容器(35MPa);8—1 000mL中间容器(35MPa);9—2 500mL容器,盛无颗粒煤油;10—取样口

图1 长石砂岩岩心溶蚀实验装置示意图

Fig. 1 A sketch of equipments used in the dissolution experiment of feldspathic sandstone core samples

### 4. 水样采集与分析检测

水样采集采用分段累积采样的方法,时间间隔为2~4d不等,在约34d(813h)的实验时间内,共采水样14次。累计采集水样697mL,反应介质的平均流速为0.86mL/h。

用原子吸收光谱测定水样的K、Na、Ca、Mg、Al、Si、Sr、Ba等离子的含量,并测定pH值,共获14组数据。

实验完后收集岩心进行物性、铸体薄片、压汞、电镜扫描-能谱、x-射线衍射分析。

## 实验结果与讨论

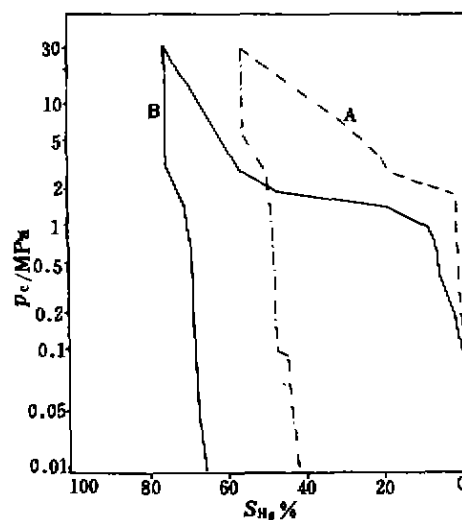
### 1. 物性变化

从表2和图2上均可显示溶蚀后显著的物性变

表2 实验样品溶蚀前后的压汞法  
毛管压力试验分析数据表

Table 2 Capillary pressure data of the samples tested before and after dissolution by Hg injection

物性参数	溶蚀前	溶蚀后
孔隙度%	2.56	5.85
$r_D$ 均值/ $\mu\text{m}$	0.13	0.39
分选系数	1.656	2.174
偏态	-0.8453	0.20351
渗透率/ $\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$	0.029	0.058
峰态	3.45	2.14
排驱压力/MPa	1.8	0.65
变异系数	0.128	0.192
$S_{\Sigma Hg}$ %	56.292	76.011



A—溶蚀前;B—溶蚀后

图2 实验样品溶蚀前后的毛管压力曲线图

Fig. 2 Capillary pressure curve of the sample tested before and after dissolution test

化。孔隙度由原来的2.86%升到5.85%,渗透率由原来的 $0.029 \times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 增至 $0.058 \times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。 $r_D$ 由原来的 $417\mu\text{m}$ 增至 $1153\mu\text{m}$ ,其均值由原来的 $0.13\mu\text{m}$ 增至 $0.39\mu\text{m}$ , $S_{\Sigma Hg}$ 由原来的56.292%增至76.011%。次生孔隙度净增3.3%,达4.5%,孔

径扩大,一般为0.1~0.5mm。孔隙类型从微孔型为主变为溶孔型。扫描电镜和能谱分析也显示孔隙度明显升高。

## 2. 主要易溶组分溶蚀量的半定量计算

### (1) 绿泥石的溶蚀量

绿泥石主要元素有Al、Si、Fe、Mg等,试样中未发现其它含镁矿物,从而以镁离子的溶出量进行化学计算。镁离子溶出总量为1.90mg,折合铁绿泥石为99.5mg,占试样重量的0.13%。

### (2) 长石的溶蚀量

长石主要元素为Al、Si、K、Na,试验过程中铝溶出量4.93mg,扣出绿泥石溶蚀产生的铝1.4mg,则长石溶蚀提供铝离子3.53mg,按钾长石标准化化学式计算,相当于101.4mg钾长石,占试样0.14%;若按钠长石计算,则相当于90.13mg钠长石,占试样的0.12%。根据薄片鉴定资料,取长石溶蚀量为0.13%。

### (3) 方解石的溶蚀量

实验中钙离子的累积溶出量达804.53mg,是溶出量最高的离子,折合方解石为2011mg,占试样的2.7%。

上述3种矿物的溶蚀量之和已占岩石重量的2.96%,稍低于从铸体法获得的次生孔隙增加量(3.5%,见表3)。

表3 主要易溶组分的溶蚀量和溶蚀孔隙度增加量比较表

Table 3 A comparison between the amount of dissolution of the main readily soluble components and increment of dissolution porosity

主要易溶组分的溶蚀量(占试样重量%)				孔隙度增加量 %	
绿泥石	长石	方解石	合计	薄片估计	铸体法
0.13	0.13	2.70	2.96	2.99	3.50

## 3. 主要离子溶出浓度变化和溶蚀序列

### (1) 方解石的溶蚀速率显著高于各种铝硅酸盐矿物

尽管岩石中方解石的含量很低(见表1),但图3和表4显示,Ca的溶出速率大大高于Si、Al、K、Na,这无疑说明方解石的溶出速率大大高于各种铝硅酸盐矿物。同时,方解石的最快溶蚀区间主要在300h以前,以后随着岩石中方解石含量的降低而使溶蚀速率迅速下降,因而方解石也是最早被溶蚀的矿物,并首先提供大量的次生孔隙。与方解石相比,Si、Al、

K、Na的溶出速率极慢,比Ca低1~2个数量级,在整个溶蚀过程中,Si、Al、K、Na溶蚀总量没有显著变化,只在溶蚀后期略有上升,这主要与实验早期方解石大量溶蚀造成的次生孔隙增加及岩石的表面积增加有关。前期溶出的Si主要来自绿泥石等粘土矿物,这从Mg的演化曲线得到证实;后期则主要来自长石类矿物,这与长石单矿物实验结果一致。

表4 实验过程中主要离子的溶出量和溶出速率表

Table 4 Amount of main ions dissolved and rate of dissolution

离子	反应时间 h	溶出量 mg	溶出速率 mg/h	占溶出离子总量 %
Ca	0~270	499.5	1.85	94
	310~537	174.8	0.77	76
	537~810.6	128.6	0.47	58
Al	0~270	0.54	0.002	0.1
	310~537	0.68	0.003	0.3
	537~810.6	3.56	0.013	1.6
Si	0~270	4.05	0.015	0.70
	310~537	3.41	0.015	1.5
	537~810.6	5.20	0.019	2.3

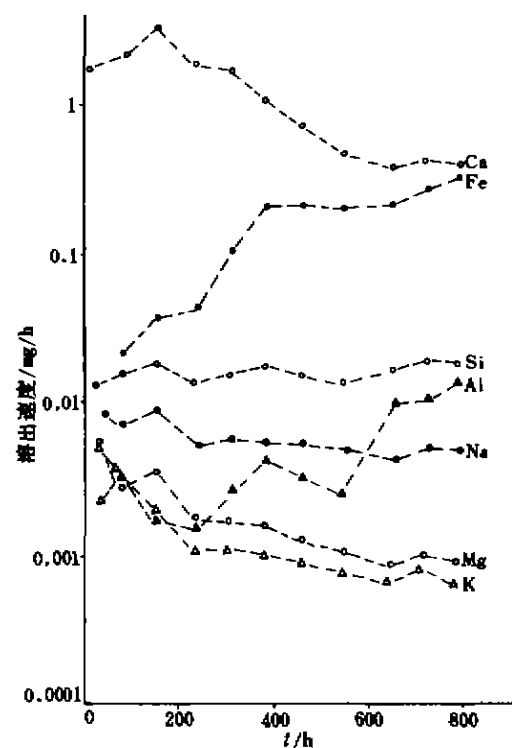


图3 主要离子溶出速率变化曲线

Fig. 3 Change of dissolution rate of main ions

## (2) 钠长石的溶出速率高于钾长石

溶蚀砂岩中钾长石的绝对含量在15%左右,而钠长石在6%左右,但整个实验中,钠的溶出速率大约是钾的6.9倍(见表5),这与长石单矿物的溶蚀实验结果基本一致。

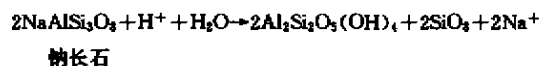
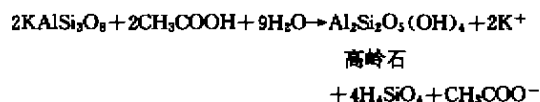
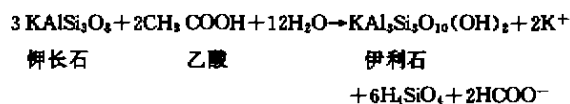
表5 K、Na 离子的溶出速率表

Table 5 Dissolution rate of K, Na ions

mg/L								
样品	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	4-6	4-7	4-8
K	0.023	0.005	0.003		0.002	0.001	0.001	0.001
Na	0.21	0.008	0.007		0.009	0.005	0.006	0.006
样品	4-9	4-10	4-11	4-12	4-13	4-14	平均速率	
K	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003 2	
Na	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.012	0.022 1	

## 4. 溶蚀过程中的新生成矿物

在有机酸与铝硅酸盐的溶蚀反应中,既可形成次生孔隙,又可形成高岭石、伊利石和石英等新的成岩矿物,一般反应过程如下:



我们以钾长石为例来讨论溶蚀、次生孔隙和新生成矿物的关系。据 Meshri 的研究(见表6),在乙酸与长石的溶蚀反应中,当新生成矿物为高岭石时,则可形成占长石体积12.5%的次生孔隙;若新生成矿物为伊利石,则可以提供15.3%的次生孔隙。不过 Meshri 的实验是在几乎常温常压的条件(25℃, 1bar)下进行的。

在相对高温高压的长石溶蚀实验中,获得了2%的长石溶蚀孔隙,即长石溶蚀量为样品中长石总量的10%,但通过溶出离子化学计算获得的长石溶出量仅有0.13%,占长石总量的0.65%。这种极大的数量级差使我们想到在溶解组分以离子方式溶出带走的同时,可能还存在岩石内的元素再分配,其主要过程应是新成岩矿物的形成作用。为了检测被溶蚀岩石中是否有高岭石、微晶石英或其它自生矿物的形

成,我们对实验样品溶蚀前后的x射线衍射图进行了对照,注意到在溶蚀以前,几乎没有高岭石的反射

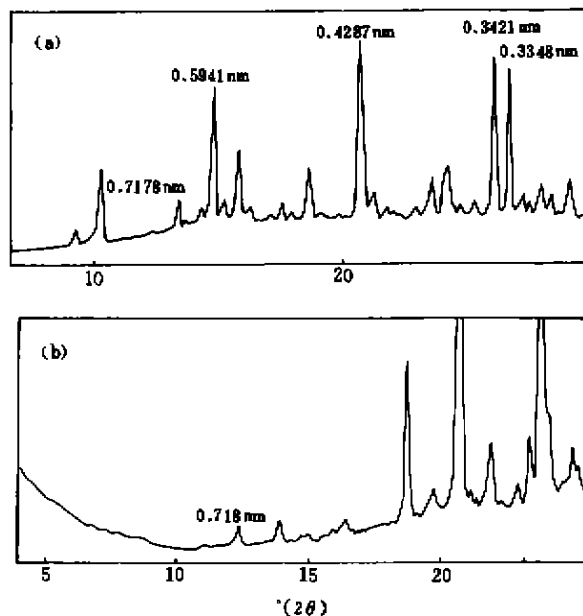
表6 碳酸、乙酸、甲酸与不同长石反应的自由能对比表

Table 6 A comparison of free energy in the reaction of carbonic acid, acetic acid and formic acid with various types of feldspar

转 化	$\Delta V_s^*$ %	转化剂	$\Delta G_r^*/\text{kJ/mol}$
微斜长石→伊利石	-15.3	碳酸	+429.51
		甲酸	+400.26
		乙酸	+99.35
微斜长石→高岭石	-12.5	碳酸	+96.21
		甲酸	+66.15
		乙酸	-17.92
钙长石→高岭石	-1.26	碳酸	-62.80
		甲酸	-69.08
		乙酸	-154.49

注:  $\Delta V_s^*$  代表固相体积减少百分数(与固相反应物对比)

存在,而溶蚀后则有明显的高岭石反射(见图4)。在对溶蚀前样品的薄片检测中,也几乎没有发现高岭石,而在溶蚀以后样品的薄片,高岭石十分常见,且分布于新生的长石溶孔中,与自生石英伴生。扫描电镜下,石英呈晶芽状产出,自形者为六方柱状,高岭石则呈六方板状,并有书页状集合体。因而我们认为这些高岭石与石英中至少有一部分是溶蚀过程中



(a) — 溶蚀前(经15%盐酸处理); (b) — 溶蚀后

图4 实验样品溶蚀前后的x射线衍射对比图

Fig. 4 A comparison of x-ray photo of samples tested before and after dissolution

的新生成矿物。

### 5. 长石砂岩溶蚀过程中微观结构的变化

经过约34d的溶蚀,长石砂岩的微观结构发生了极其显著的变化,包括碎屑颗粒的表面特征,胶结物充填方式以及孔隙形态和结构特征等。长石是变化最为显著的碎屑,边缘呈港湾状,棱角钝化,解理缝扩大,沿解理分布有显微串珠状孔隙,形成蜂窝状结构,部分长石只剩下孤立的残余斑块。一些石英偶见孤立的粒内孔,它们是局部交代石英的方解石被溶解后形成的次生孔隙。绿泥石胶结物也发生变化,由均一的微晶质充填结构演变为不完整的补丁状、斑点状分布。溶蚀残余的方解石呈零星的斑块状,亦可见溶蚀圆化的边缘。新生的高岭石呈团块状的分散微粒,其中混有少量微晶石英,高岭石的晶间孔相当发育。溶蚀作用对原岩孔隙结构的改造最为有效,一些片状,小管状喉道直径扩大,进汞量增加,排驱压力降低,粒间溶孔、粒内溶孔增多,并偶见溶缝,砂岩储集性得到改良。

## 结 论

1. 实验证明,在埋藏成岩条件下,有机酸与无机矿物之间的化学反应是本区二叠系长石砂岩孔隙增大的重要原因。有机质热分解产生的有机酸对于铝硅酸盐矿物和碳酸盐矿物有着明显的溶解作用。

2. 在砂岩中,碳酸盐矿物的溶解对溶出量起着决定性的控制作用。二叠系长石砂岩含有约3%的方解石胶结物,溶蚀后的残余量不足0.5%。反应溶液中离子溶出总量为993.77mg,其中Ca离子占81%,说明相似埋藏环境中钙质砂岩比粘土质或硅质砂岩有更好的溶蚀条件,会产生更多的溶蚀孔隙。但碳酸盐矿物对成岩物理化学条件的敏感性会导致可能的沉淀作用。

3. 长石类铝硅酸盐矿物的溶解过程是缓慢进行

的,这种化学反应过程的离子迁移量甚微,据前边的半定量计算,铝硅酸盐矿物离子的溶出量只有离子总量的3.4%。但是,铝硅酸盐矿物溶解提供了接近2%的次生孔隙度,占孔隙度增值的大部分。因而我们认为,铝硅酸盐矿物,尤其是长石类矿物溶蚀过程中的矿物的转化,元素的再组合分配以及新矿物的生成可能在该过程中起了重要的作用。

4. 团块状高岭石是埋藏成岩过程中有机、无机相互作用的重要指向矿物之一,以往这些团块状高岭石被人们俗称为“碎屑状”高岭石,对其成因有沉积、早成岩、表生等不同的解释。我们的实验证明,有机酸作用于碎屑长石,完全可以形成高岭石微晶集合体的碎屑外貌,与高岭石伴生的还常有微晶自形石英。

5. 微晶质高岭石作为粘土矿物的重要类型,在碎屑岩中出现,人们总是将其归结为沉积成因,但我们的实验表明,它们可以在埋藏成岩环境中广泛生成,所以,这说明粘土矿物来源于泥质沉积的单一成因是片面的,而粘土矿物的成岩后生成因则是不可忽视的,只有将两者相结合,才能全面解释碎屑岩中的粘土矿物因果关系。

(编辑 张 怡)

## 参 考 文 献

- 1 杨俊杰. 陕甘宁盆地地下古生界天然气的发现. 天然气工业, 1991, 11(2)
- 2 陈荷立, 汤锡元译. 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. 北京: 石油工业出版社, 1982
- 3 Bevan J and Savaget D. The Effect of Organic Acids on the Dissolution of K-feldspar under Conditions Relevant to Burial Diagenesis. Min. Mag. 1989, 53: 415-425.
- 4 Ronald K. Stoessell and Edward D. Pittman. Secondary Porosity Revisited: The Chemistry of Feldspar Dissolution by Carboxylic Acids and Anions AAPG, 1990, 74: 1,795-1,808

# 固态沥青对储层储集性能的影响

纪友亮 张世奇 李红南 张立强

(石油大学)

**摘 要** 储层沥青对储层的储集性能有重要影响,它可以大大降低储层的孔隙度和渗透率,改变储层的孔隙结构,甚至可以完全堵塞孔隙,形成圈闭的遮挡层。储层沥青的显微形态各种各样。在宏观上常成均匀状、斑块状、纹层状分布,主要受控于储层的原始孔隙结构。储层沥青的成因主要有 2 种:一种是天然气运移引起的去沥青化作用;另一种是大气淡水引起的风化淋滤作用。风化淋滤作用形成的储层沥青主要沿断层和不整合面分布。

**主题词** 储层沥青 孔隙结构 储集性能

## 前 言

过去许多学者对沥青的研究多集中在地球化学性质上,作为研究石油的热演化程度、石油和生油岩对应关系的一种工具。自 1977 年后,研究人员开始注意并研究沥青对储层的孔隙度、非均质性和储层损害的影响。本文主要讨论沥青对储层性质的影响。

储层沥青是储层中的石油变化和沉淀出来的。它可以分布在原生孔隙中,也可以出现在次生孔隙和裂缝中。储层沥青一旦形成,就象碳酸盐岩、二氧化硅和自生粘土胶结物一样对储层的储集性能产生影响。由于固态沥青是从孔隙中的液态相中沉淀出来的,因此应被看作是储层孔隙系统中成岩演化的一部分。

## 储层沥青的概念 及分布状态

使用储层沥青一词可以避免与生油岩沥青和干酪根的混淆<sup>①</sup>。储层沥青占据着储层的储集空间,是从已经聚集或正在运移的石油中变化或沉淀出来。储层沥青基本上不能开采,在储层条件下为高粘度

液态至固态,在实验室条件下从可抽提状态到不可溶状态都有,通常富含 N、S、O。形成固态储层沥青的主要的自然过程有去沥青化、热裂解、细菌降解和大气淡水的淋滤作用 4 种。储层沥青也可以在 CO<sub>2</sub> 流动的过程中沉淀下来。

储层沥青的分布状态主要有以下几种:

### 1. 孔隙系统中储层沥青的分布状态

东濮凹陷沙三段储层沥青的分布形态与 Anthony J. Lomando (1992)<sup>②</sup>所描述的形态类似。在普通显微镜下观察,砂岩中的沥青出现在孔隙和喉道中(见图版 I-a)<sup>③</sup>。可以完全填满孔隙,也可以部分充填孔隙(见图版 I-b)。有些视域中见沥青充填到长石的粒内溶孔中(见图版 I-c)。在含有硬石膏胶结物的部位,不存在沥青,说明沥青形成于硬石膏胶结物沉淀之后,胶结物的沉淀抑制了沥青的沉淀。

在砾岩孔隙中,沥青的充填情况在内眼下观察能分辨清楚。如内蒙二连盆地阿 1 井砾岩储层中,某些部位沥青完全充填孔隙,而另一些部位,沥青只充填了孔隙空间 1/2 或 1/3,且沥青颗粒形态不规则,常沿孔隙的一个边缘分布。此外,储层沥青还沿微细裂缝呈树枝状分布(见图版 I-d)。在扫描电镜下,储层沥青的形态有滴状、球状、贝壳状和三角状,及不规则状(见图版 I-e)<sup>④</sup>。某些沥青颗粒表面具裂口(见

① 图版 I 见封底。

② 图版 I 见第 91 页。

作者简介:纪友亮,男,33 岁,教授,1991 年毕业于石油大学石油地质系,现从事沉积学及储层地质学研究,成果获部级科技进步三等奖。地址:山东东营石油大学勘探系,257062

收稿日期:1994-07-20

图版 I-g)、洞穴(见图版 I-j)。大部分沥青呈薄层状覆盖在颗粒表面及自生方解石和石英晶体的表面,透过沥青可辨别出这些自生矿物的形态(见图版 I-f,h),还可见到沥青呈薄膜状覆盖在被淋滤的长石的表面(见图版 I-i)。

### 2. 储层沥青在纹层中的分布

从岩心上观察,沥青常沿砂岩的粗纹层分布。东濮凹陷胡83井4 728m 井段岩心多发育平行层理。层理由粒度的变化显示出来。粗纹层颗粒粗,分选好,粘土杂基含量少,孔隙度(扣除沥青之后)高。这些粗纹层中充满了黑色沥青。交错层理砂岩中,也出现了这种分布状态。沥青充填使层理更易辨认。

### 3. 储层沥青在砂层中的分布

#### (1) 均匀分布状态

在东濮凹陷庆64井4 732m 井段的砂岩岩心上观察,沥青均匀地分布在砂岩中。这种砂岩是三角洲前缘砂体,呈块状结构,颗粒分选好,孔隙沥青分布均匀。

#### (2) 斑块状分布

东濮凹陷庆64井4 727m 井段,砂岩具冲刷充填结构。冲刷面之上,分布有砂岩砾和粉砂,砂岩砾为同生砾,呈棱角状。砂岩砾本身孔隙(扣除沥青后)比其周围粉砂岩的孔隙度高。在这种孔隙度高的砂岩砾中充满有沥青,而周围的粉砂岩中不含沥青。

#### (3) 半均匀分布状态

在东濮凹陷胡83井4 720m 井段,黑色沥青砂岩中含有白色斑团,这些斑团致密坚硬,显微镜下鉴定为硬石膏胶结物,胶结类型为嵌晶式。这种硬石膏胶结物形成时间早于沥青的沉淀充填。由于硬石膏胶结物的存在,抑制了沥青在这些部位的沉淀。使沥青的分布呈半均匀状态。

## 储层沥青对孔隙度的影响

储层沥青对孔隙度有明显的影响,但要用测井曲线确定因沥青充填引起的孔隙度的减小量是很困难的,因为储层沥青在测井曲线上不易识别。东濮凹陷胡83井沙三段储层中含沥青的层段被解释成油层,这是由于沥青的组成、密度和含氢指数与石油相似。将胡83井沙三段岩心测量的孔隙度和中子密度孔隙度进行比较,发现其储集空间的50%~60%被沥青所充填(见表1),因此计算这种储层的储集空间时,应以岩心的孔隙度为准。

表1 东濮凹陷胡83井含沥青砂岩测井孔隙度与岩心孔隙度的关系表

Table 1 Log porosity vs. core analysis porosity of bituminous sandstone from well Hu83, Dongpu sag

深度/m	岩心实测孔隙度/%	中子密度孔隙度/%	沥青含量/%
4 721.0	5.2	28.9	23.7
4 721.8	7.8	21.8	14.0
4 723.01	3.1	30.1	27.0
4 723.65	6.4	24.6	18.2
4 724.9	7.4	27.3	19.9
4 725.3	9.1	20.5	11.4
4 728.0	3.2	23.1	19.9

由表2可见,沥青含量与剩余孔隙度大致呈负相关关系。

表2 濮深12井铸体薄片沥青的面积百分比与面孔率统计表

Table 2 Percentage of bitumen and surface porosity of a cast section of a core from well Pushen12

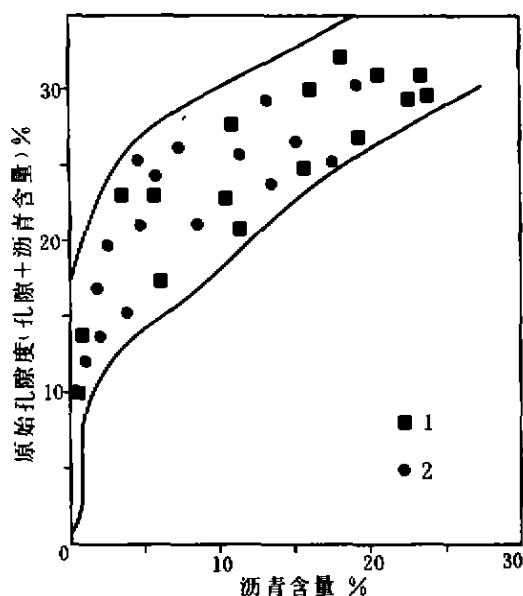
样品深度/m	镜下观察 沥青含量/%	镜下观察 残余孔隙面孔率/%
4 918	2	4.2
4 920	0	8.4
4 923	12	0
4 924	9	2.1

经过统计沥青含量与砂岩原始孔隙度(残余孔隙度+沥青含量)的关系(见图1),发现在低孔隙度砂岩中,几乎不含沥青,即沥青含量与原始孔隙度无关,这是由于低孔隙度砂岩,其孔隙喉道也很小,排驱压力高,无早期石油的进入,也就不会形成后期的沥青。而在孔隙度较高的砂岩中,沥青含量与原始孔隙度大致呈线性关系。

## 储层沥青对渗透率及孔隙结构的影响

储层沥青的含量变化较大,从只占孔隙体积的2%到完全堵塞孔隙。对储层孔隙系统最重要的影响是减少渗透率,增加非均质性。当沥青含量较少时,其对孔隙体积的影响可能不大,但相同含量的沥青沉淀在狭窄的孔隙喉道处,可大大地减小喉道直径。

储层沥青的存在也影响着储层孔隙结构的分布。东濮凹陷沙三段岩性和岩相特征相同的砂岩样品的统计结果表明,不含沥青的砂岩样品中,大多数



1—滇深12井样品; 2—胡83井样品

图1 沥青含量与原始总孔隙度的统计关系图

Fig. 1 Statistical relationship between original total porosity and bitumen content

孔隙喉道的直径是 $0.7 \sim 7.0 \mu\text{m}$ , 孔隙度为 $15\% \sim 20\%$ , 渗透率是 $(10 \sim 100) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。含沥青的砂岩样品的孔隙度为 $\pm 10\%$ , 渗透率分布范围为 $(1.0 \sim 10.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。孔隙和喉道主要分布在 $0.7 \sim 7.0 \mu\text{m}$ 的区域, 在 $0.7 \sim 0.07 \mu\text{m}$ 之间的孔隙喉道也有一个高峰分布(见图2), 可能是由于压汞过程中, 随压力增加沥青受压缩, 导致孔喉体积又增加。

### 细屑的迁移和储层损害

储层沥青可因沥青细屑的迁移而引起储层的损害, 这与粘土矿物迁移引起的储层伤害相似。对庆64

井的沥青砂岩样品的敏感性流动实验结果表明, 随着酸性水注入速度提高, 其渗透率降低, 表明其微小的沥青颗粒在强水流作用下发生了迁移, 堵塞喉道降低了渗透率。实验表明, 储层沥青含量越高, 其临界流速越低, 但用淡水做实验, 其渗透率变化不明显。

由此可见, 酸化——这种对碳酸盐岩或钙质砂岩储层常用的一种增产措施, 可以使储层沥青机械地脱离孔隙壁, 从而造成储层伤害。因此对含沥青的砂岩不能采用酸化措施。但储层沥青覆盖在粘土颗粒表面, 抑制了粘土矿物的敏感性。

### 储层中沥青的宏观分布 状态及成因分析

从目前储层沥青的宏观分布状态来看, 储层沥青通常富集在早期形成的石油圈闭中, 在圈闭中优先分布在高孔隙度和高渗透率区带。

储层沥青的成因目前有2种解释。

#### 1. 去沥青化作用

天然气或很轻质的油流经饱含油的岩石时, 使石油中的沥青发生沉淀, 形成储层沥青。去沥青化的作用过程如下: 当生油岩经过生油窗时, 产生了液态烃, 沿着主要断层向上运移, 聚集于上部的储层中。凹陷的持续沉降使这些生油岩进入生轻烃和生气窗。这个过程中产生轻烃和气, 使储层中的石油发生去沥青化作用。

因气体总是沿着毛细管阻力最小的高孔渗区带运移, 所以高孔渗区带沥青的沉淀效率是高的。在纹层状砂岩中, 粒度较粗或较清洁的部分其储集性能最佳, 因此此处单位孔隙体积中沥青的含量相对最

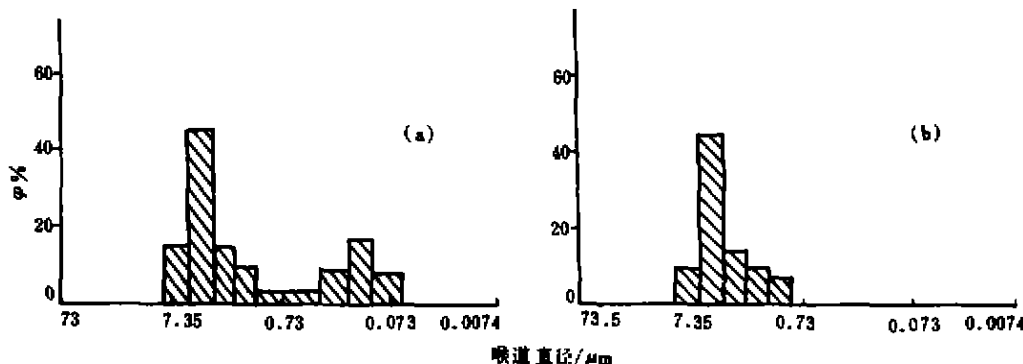


图2 沥青砂岩(a)和非沥青砂岩(b)的孔隙结构特征图

Fig. 2 Structural characteristics of bituminous sandstone(a) and Non-bituminous sandstone(b)



高。这就意味着,在某一时期曾经具有最佳储集性能的含油区,最终可能因沥青沉淀而使储集性能大大地降低。

## 2. 早期聚集的石油经大气淡水的淋滤作用形成储层沥青

目前东濮凹陷储层沥青的分布状态也说明了这一点。从图3中可以看出,储层沥青主要分布在沙三段和剥蚀面及其断层附近。将岩心观察结果及部分井岩屑的检查结果标在平面图上(见图4),发现储层沥青只出现在沿西部主要断层及地层剥蚀线分布的井中。不整合面和断层曾是大气淡水向下运移的通道<sup>[3]</sup>。由于大气淡水的淋滤作用造成了储层沥青目前的这种分布状态。庆64井沙三<sub>3</sub>亚段沥青砂的热解分析结果表明, $S_1$ 峰的含量较高,说明残余烃的含量高,是风化成因沥青的证据<sup>[4]</sup>。

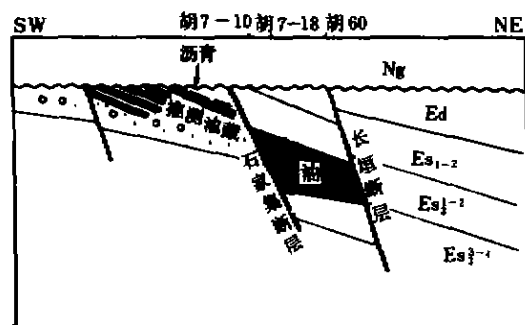


图3 东濮凹陷西斜坡储层沥青分布剖面图

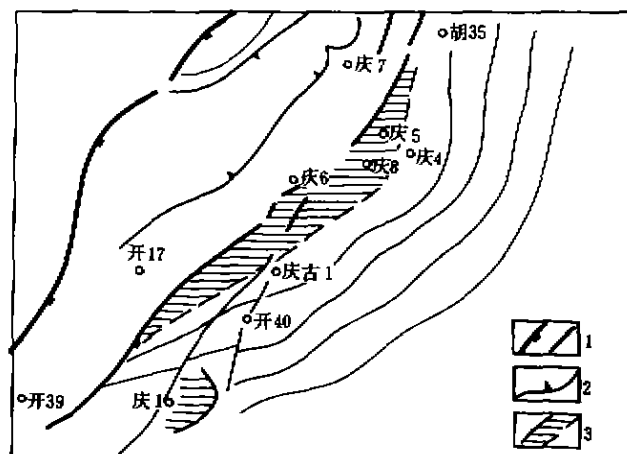
Fig. 3 Sectional bitumen distribution in reservoir on west slope of Dongpu sag

东营组沉积时期,东濮凹陷西部生油凹陷中生成的石油向凹陷西斜坡的古构造运移,形成油藏,由于后期东营运动的影响,西部斜坡带发生抬升和断裂活动,并遭受风化剥蚀,大气淡水沿不整合面及断层向下运移,使早期聚集的石油被淋滤,形成储层沥青。断层和不整合面控制着目前储层沥青的分布。但在远离断层的下倾部位,仍有石油的存在,且储层的储集性能较好。

确定了储层沥青的形成分布模式后,可以预测出储层沥青引起的渗透率屏障的分布,精确地确定采收率系数。

## 结 论

1. 储层沥青在微观孔隙结构中有多种形态,对



1—断层;2—地层剥蚀线;3—沥青分布区

图4 东濮凹陷储层沥青在平面上的分布状态图

Fig. 4 Planar bitumen distribution in reservoirs in Dongpu sag

孔隙的充填程度不同。在层理中主要沿粗纹层分布。在砂岩层中可呈均匀、半均匀和斑块状态。

2. 含储层沥青的砂岩在测井曲线上常被解释成油层,其中子密度孔隙度远远大于岩心实测孔隙度。在高孔隙度砂岩中,储层沥青的含量与原始孔隙度呈正相关。

3. 储层沥青不仅减小储层的孔隙度,而且大大降低储层的渗透率,改变储层的孔隙结构,对酸性流体的速敏性强。

4. 储层沥青主要分布于原始油藏的高孔渗带部位,其成因解释一种是去沥青化作用;另一种是大气淡水的淋滤作用,这2种解释都可以说明储层沥青主要分布在断层和不整合面附近。

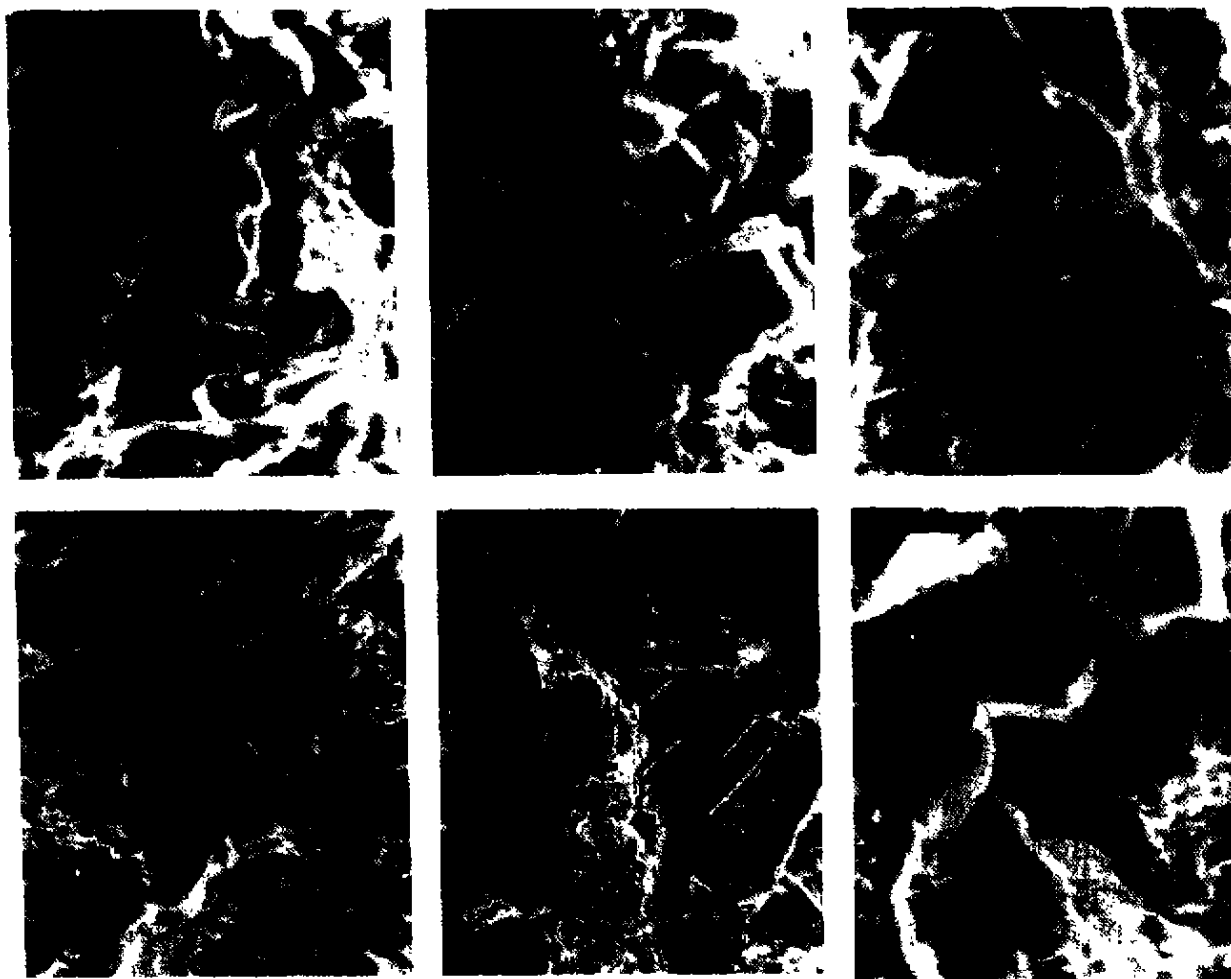
5. 储层沥青一方面破坏储层的孔渗性,另一方面成为遮挡层,在其下方形成“成岩圈闭”。

(编辑 张 怡)

## 参 考 文 献

- 1 Anthony J. Lomando. The Influence of Solid Reservoir Bitumen on Reservoir. Quality, AAPG Bull, 76(8):1,137—1,152
- 2 刘孟慧,赵薇林. 碎屑岩储层成岩演化模式. 山东:石油大学出版社,1993
- 3 杨绪充. 含油气区地下温压环境. 山东:石油大学出版社,1993
- 4 郝石生等. 碳酸盐岩油气生成. 北京:石油工业出版社,1993

纪友亮等 固态沥青对储层储集性能的影响 图版 I



e	f	g
h	i	j

(上接第80页)

## 参 考 文 献

- 1 熊养泉,李思田,杨士恭,陈俊亮. 湖泊三角洲前缘砂体内部构成及不均一性露头研究. 地球科学——中国地质大学学报, 1993, 18(4):441~450
- 2 李思田,熊养泉,付清平. 鄂尔多斯盆地延安组三角洲砂体内部构成及非均质性研究. 见:袁亦楠,薛叔浩,应凤祥主编:中国油气储层研究论文集(续一). 北京:石油工业出版社,1993:312~325
- 3 李慎,杨士恭,傅泽民,李智民,辛劳田. 鄂尔多斯盆地延安组曲流

河砂体内部构成与孔渗变化研究. 见:袁亦楠,薛叔浩,应凤祥主编:中国油气储层研究论文集(续一). 北京:石油工业出版社, 1993:326~335

- 4 Miall A D. Architectural Elements and Bounding Surfaces in Channelized Clastic Deposits: Notes on Comparisons between Fluvial and Turbidite Systems in: Taira A and Masuda F (eds). Sedimentary Facies in the Active Plate Margin, 1989:3~15
- 5 Miall A D. Hierarchies of Architectural Units in Terrigenous Clastic rocks: a Frsmework for the Analysis of Fluvial Deposits. 1992, 29th International Geological Congress Abstracts, Volume 2 of 3, II-2-2, O-10, 1993:293