

泰康和古龙地区粘土矿物对砂岩储层 孔隙结构及产能的影响

王 行 信

(大庆油田勘探开发研究院)

储油砂岩中,都或多或少地存在粘土矿物胶结物。这些粘土矿物的成分、含量及其产状特征是影响砂岩孔隙结构和油层物性的重要因素。本文主要根据对松辽盆地泰康和古龙地区中部含油组合砂岩的研究,讨论粘土矿物在砂岩孔隙中的分布特征及对孔隙结构和产能的影响。粘土矿物成分用X射线衍射分析测定,其在孔隙中的分布特征根据扫描电镜观察,孔隙结构参数是压汞法测定结果。同一块砂岩样品除作上述三项分析外,还同时做粒度和碳酸盐含量分析。

一、粘土矿物的产状类型

在砂岩储集层中,常见的粘土矿物有蒙脱石、伊利石、高岭石、绿泥石以及蒙脱石-绿泥石、蒙脱石-伊利石等混层粘土矿物。据其在砂岩孔隙中的分布特征及与砂岩碎屑颗粒的相互关系,分为三种基本产状类型¹⁾。

(一)分散质点式

粘土矿物以分散质点的形式充填在砂岩的粒间孔隙中,它是自生高岭石的典型产状。高岭石常呈完整的假六边形自形晶体,或者由这些自形晶体组成书页状、蠕虫状等各种形式的集合体(图版I-1-3)。

分散粘土质点在砂岩粒间孔隙的充填,对油层可能带来两个方面的影响:

(1) 由于粘土质点在粒间孔隙的充填,不仅减小了砂岩的孔隙度,而且使原始粒间孔隙变成被许多松散的粘土质点所分割的微细孔隙,从而降低了岩石的渗透性。

(2) 由于充填在孔隙中的粘土质点是松散的,它与碎屑颗粒的附着力很差。因此,在油层改造和开发过程中,这些粘土质点可能随流体的流动在孔隙中运移,并可能堵塞孔隙喉道。

(二)薄膜式

粘土矿物在碎屑颗粒表面呈定向排列,构成连续的粘土薄膜贴附在孔隙壁上或颗粒表面,因此,也有人把这种产状叫孔隙衬层或颗粒套膜。这种粘土矿物产状最常见的是蒙脱石、绿泥石、伊利石和混合层粘土矿物。它们绝大多数都是垂直颗粒表面(即孔壁)

1) Neasham J. W., 1977, The morphology of dispersed clay in sandstone reservoirs and its effect on sandstone shaliness pore space and fluid flow properties. SPE, No. 6858.

平行排列,厚度一般小于5微米(图版I-4—6)。

薄膜式粘土对油层的可能影响是:

(1) 粘土薄膜的存在大大减小了孔隙的有效半径,并且常常造成孔隙喉道的堵塞。因此,这类粘土产状的砂层渗透性较差,一般都属于中-低渗透层。

(2) 在钻井、完井以及油层改造和注水开发过程中,注入油层的流体首先与粘土矿物薄膜起反应,而这时砂岩中的碎屑颗粒却是稳定的,或者很少与注入流体起反应。因此粘土矿物薄膜的化学组成和物理性质将直接影响上述各项操作的效果,如果在施工前未加考虑,就可能对油层造成危害。

(三) 搭桥式

粘土矿物晶体自孔隙壁向孔隙空间生长,最终直达孔隙空间的彼岸,形成粘土桥。最常见的是各种条片状、纤维状的自生伊利石,它们在孔隙中形成网络状的分布。蒙脱石和混合层粘土矿物也可于孔隙喉道处形成粘土桥。高岭石的粘土桥比较少见(图版I-7—9)。

搭桥式粘土,特别是纤维状伊利石在孔隙中的分布,使砂岩原来的粒间孔隙被肢解切割,变得迂回曲折,成为粘土矿物晶粒之间的微细孔隙。实际上,这些孔隙大多数都是束缚孔隙,其空气渗透率多数都小于1毫达西。

由于纤维状伊利石具有很大的比表面,因此,在砂岩孔隙中形成一个比面积很大的吸水区,后期进入的石油一般只占据砂岩中的可流动孔隙。所以这类砂岩往往有较高的含水饱和度和较低的电阻率,在电测解释时容易将这些低电阻油层误认为是水层。

二、孔隙结构特征

(一) 孔隙分布曲线特征

泰康地区不同粘土矿物产状的砂岩孔隙分布曲线表明,分散粘土质点的砂岩和薄膜式粘土的砂岩,它们的孔隙分布具有如下共同特征(图1):

(1) 孔隙分布具有双峰性:孔隙分布曲线具有前、后两峰,后峰高,孔隙半径大(一般大于6—10微米),是砂岩主要的粒间孔隙;前峰低,孔隙半径小(一般小于0.5微米),它是由于粘土矿物充填孔隙,从而造成许多粘土质点间的微细孔隙所致。

(2) 渗透率贡献的峰位与孔隙分布的主峰位一致。

上述特征说明,分散粘土质点的砂岩和薄膜式粘土的砂岩均以粒间孔隙为特征,它们的主要孔隙半径也就是主要渗流孔隙。两类砂岩的区别是分散质点式粘土产状的砂岩其主要渗流孔隙半径较大,一般大于10微米,而薄膜式粘土产状的砂岩,主要渗流孔隙半径较小,一般在6—10微米。

搭桥式粘土产状的砂岩,其孔隙分布曲线特征与上述两类砂岩相比具有明显的差别:

(1) 孔隙半径小,分布范围窄,呈狭窄的单峰型,主要孔隙半径在0.5—1微米。

(2) 孔隙分布的峰位与渗透率贡献的峰位不一致,后者位于孔隙分布峰位的右侧。

上述特征说明,搭桥式粘土产状的砂岩其孔隙特征与上述两类砂岩不同,它的原始

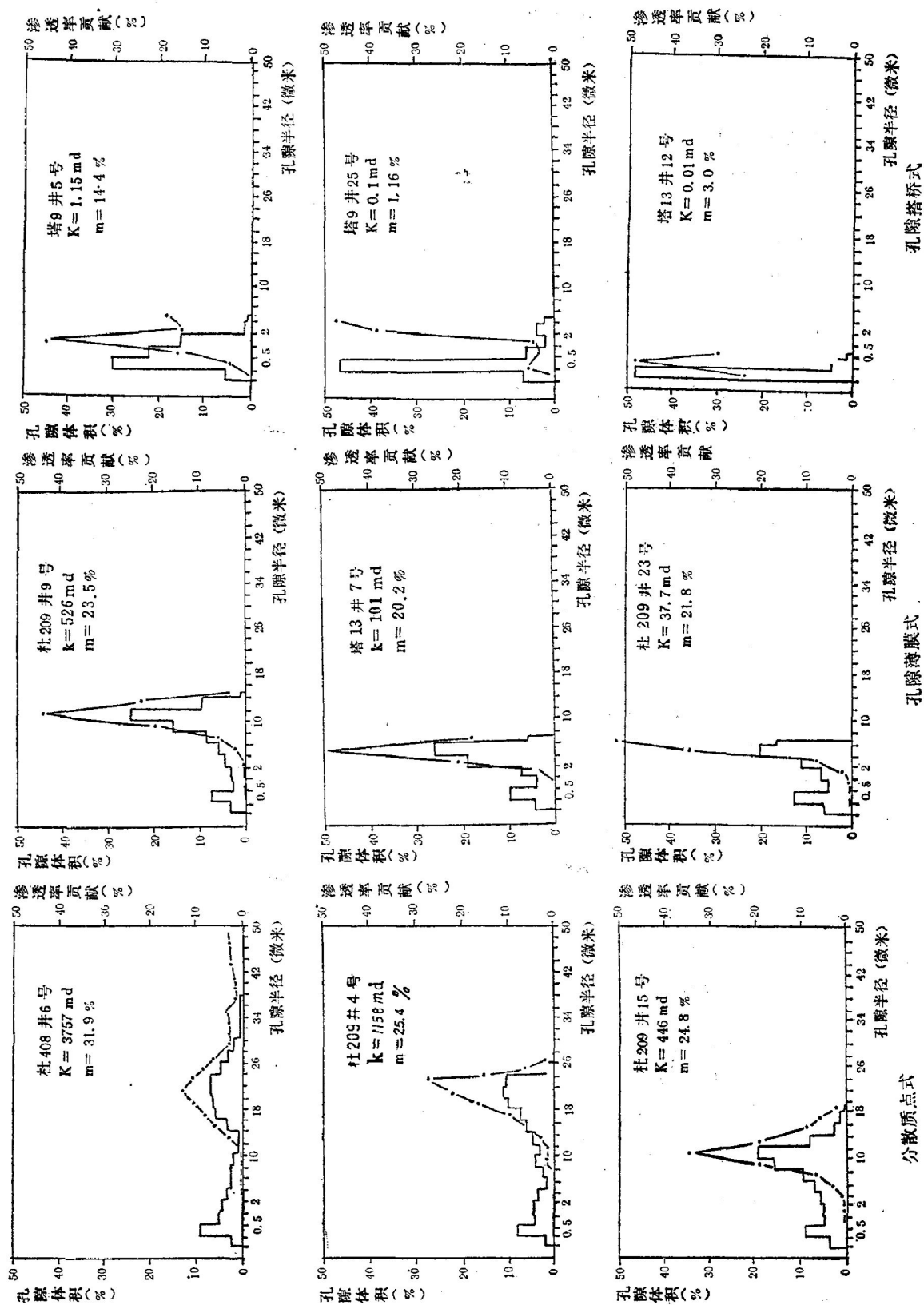


图1 典型孔隙分布曲线

粒间孔隙绝大多数均被伸入空隙空间的粘土矿物所切割,成为粘土矿物之间的微细孔隙。因此,大部分孔隙是不渗透的束缚孔隙,只有少数稍大的孔隙具有一定的渗透性,整个岩石的渗透性极低。

(二) 孔隙结构特征

在研究粘土矿物产状对砂岩孔隙结构的影响时,为了尽量减小砂岩粒度大小,泥质含量和碳酸盐胶结物对砂岩孔隙结构的影响,从几百块砂岩样品的压汞分析资料中选取了117块细粒砂岩的分析资料,它们的粒度中值相近,碳酸盐含量都小于1%,泥质含量在8%左右。扫描电镜观察,属于分散质点式的29块,属于薄膜式的58块,属于搭桥式的30块。

1. 孔隙的大小

上述样品的压汞分析资料表明,不同粘土矿物产状的砂岩,它们的最大孔隙半径(R_A)、平均孔隙半径($\bar{R}$)、孔隙半径中值(R_{50})和孔隙半径均值的主要分布范围(表1)和它们的频率分布特征(图2)是不同的。由于这些样品的粒度大小、泥质和碳酸盐的含量均相似,因此可以认为,表1和图2所反映的差异主要是由于粘土矿物产状的不同所引起的,表明粘土矿物在砂岩孔隙中产状对孔隙喉道的大小有明显的影响。

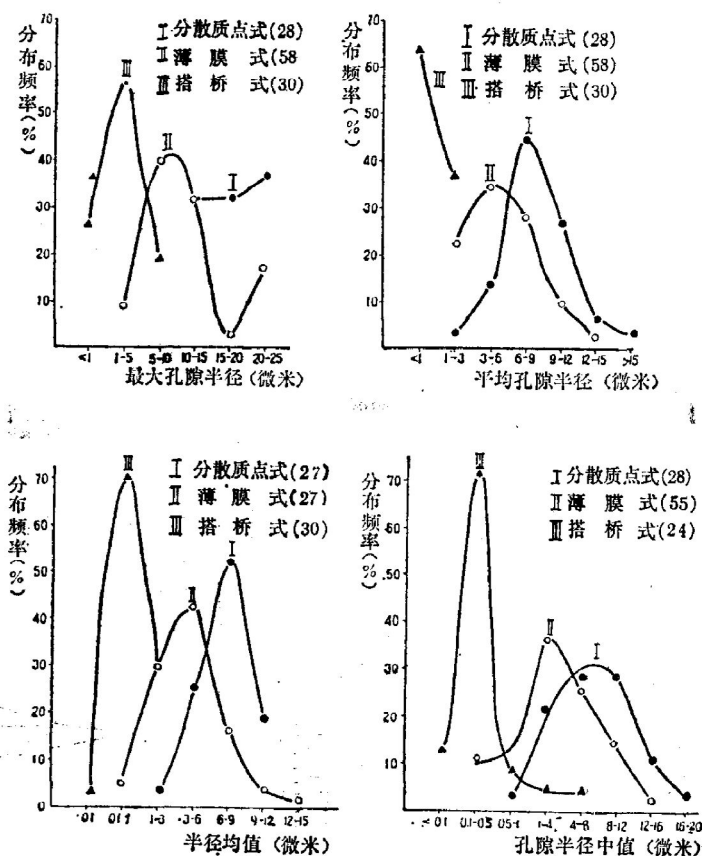


图2 孔隙大小的分布特征

2. 歪度

歪度频率分布特征表明:分散质点式粘土的砂岩其全部样品均为粗歪度,其中

表1 砂岩的主要孔隙大小特征

砂岩粘土矿物产状	分散质点式	薄膜式	搭桥式
最大孔隙半径(微米)	15—25	5—15	<5
平均孔隙半径(微米)	6—12	3—9	<1
孔隙半径均值(微米)	6—12	1—9	<1
孔隙半径中值(微米)	8—12	1—8	<0.5

90%以上的样品的歪度在0.6—0.9之间；薄膜式粘土的砂岩，90%以上的样品歪度在0.3—0.9之间，仅少数样品属细歪度（负值）；搭桥式粘土的砂岩，大多数样品的歪度在+0.6和-0.6之间，粗歪度和细歪度的样品各占50%左右（图3）。

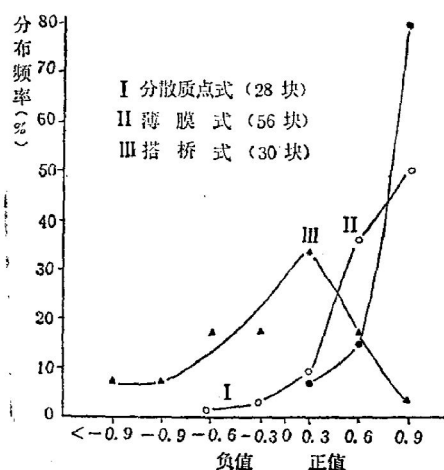


图3 歪度的频率分布特征

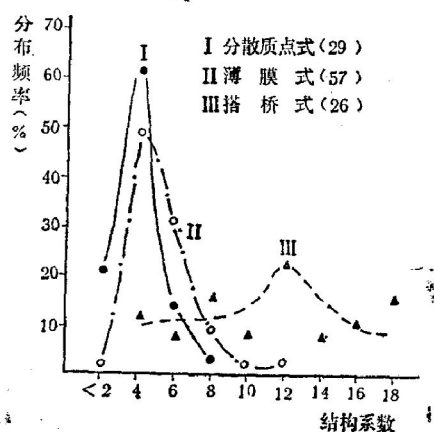


图4 孔隙结构系数的分布特征

3. 结构系数

不同粘土矿物产状对孔隙空间几何形态的影响是不同的。从图4可见，分散质点式粘土的砂岩和薄膜式粘土的砂岩，它们的孔隙结构系数频率分布的峰位是一致的，都在2—4之间，反映孔隙结构特征相似，都是以粒间孔隙为主，有较好的连通性。两者的差别是分散质点式粘土的砂岩与薄膜式粘土的砂岩相比，孔隙结构系数更小，80%以上的样品结构系数小于4，表明前者比后者具有更好的孔隙连通性和渗透性。

搭桥式粘土的砂岩与上述两种砂岩孔隙结构特征不同，其80%以上的样品，孔隙结构系数均大于8，大部分孔隙变为不渗透的束缚孔隙。

4. 孔隙和渗透率特征

孔隙分布的峰位和渗透率分布的峰位，分别表示样品主要孔隙半径的大小和主要渗流孔隙半径的大小。对不同粘土矿物产状的砂岩统计结果表明，它们的主要孔隙半径和主要渗流孔隙半径特征是不同的，如图5所示，分散质点式粘土的砂岩和薄膜式粘土的砂岩，它们的主要孔隙半径较大，大多数样品分别大于6—12微米和3—9微米。另外，它们的孔隙分布峰位与渗透率分布峰位一致，说明岩石的主要孔隙就是岩石的主要渗流通道。

搭桥式粘土的砂岩不仅主要孔隙半径很小,在统计的30块样品中,有65%以上的样品其主要孔隙半径均小于1微米。这些孔隙一般都是不渗透的束缚孔隙,对岩石渗透性的贡献很小。这些砂岩的渗透率峰位多数样品在1—3微米之间,其孔隙分布的峰位与渗透率分布的峰位不一致,砂岩的渗透率贡献主要来自少量的孔隙半径大于岩石主要孔隙半径的孔隙。

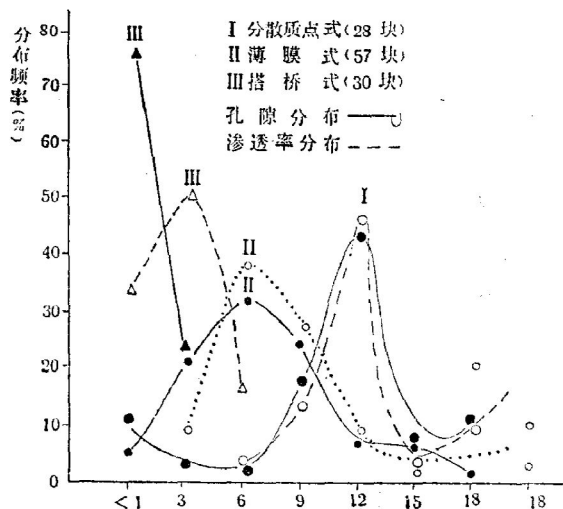


图5 孔隙分布和渗透率分布的峰位分布特征

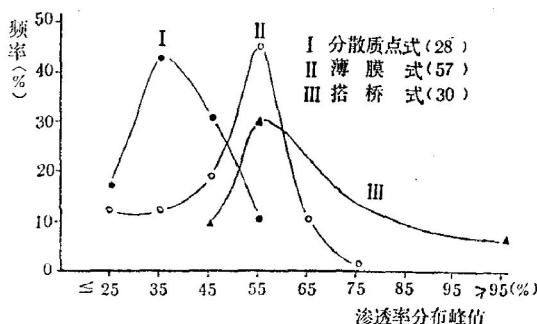


图6 渗透率分布峰值的频率分布特征

渗透率分布的峰值,表示位于渗透率峰位的孔隙占岩石总渗流孔隙体积的百分数,也表示主要渗流孔隙对岩石渗透率贡献的大小。它反映砂岩渗流孔隙半径分布范围的大小,从另一方面反映了砂岩渗流孔隙的分布特征。图6表示不同粘土矿物产状的砂岩它们的渗透率分布峰值的频率分布特征。从图中可见:分散质点式粘土的砂岩,其渗透率分布的峰值均在25—55%之间,其中60%以上的样品其渗透率分布的峰值均在35%以下,反映了这类砂岩渗透性好,孔隙半径大,渗流孔隙半径分布范围大的特征。薄膜式粘土的砂岩,60%以上的样品其渗透率分布的峰值在45—55%之间,渗透率分布峰值的增大反映了其渗流孔隙半径分布范围的缩小和岩石渗透性的降低。搭桥式粘土的砂岩,60%以上的样品其渗透率分布的峰值在55%以上,最高可达95%以上,说明渗流孔隙已接近其所要求的下限,渗流孔隙半径很小,分布范围很窄,渗透性极差。

不同粘土矿物产状的砂岩,它们的孔隙分布的峰值变化与它们的渗透率分布峰值的变化相似,它们的典型孔隙分布曲线(图1)也反映了这一特征。

三、对油层物性和产能的影响

(一) 孔隙度-渗透率特征

图7表示不同产状粘土矿物砂岩的孔隙度和渗透率特征。为了减小粒度和其它因素对砂岩油层物性的影响,图中所用样品不但是粒度大小相似的细粒砂岩,而且碳酸盐含量都小于1%,泥质含量在8%左右。因此,可以认为砂岩中粘土矿物成分和产状的不同是导致各油层物性差异的一个重要原因。从图中可见:

(1) 分散质点式粘土砂岩, 多数样品的空气渗透率在 500—1000 毫达西, 孔隙度在 23—33% 之间, 储油物性最好; 薄膜式粘土砂岩, 样品的空气渗透率一般 < 1000 毫达西, 在 10—800 毫达西, 孔隙度在 18—27% 之间, 储油物性次之; 搭桥式粘土砂岩, 其样品的空气渗透率都低于 10 毫达西, 绝大多数样品的空气渗透率小于 1 毫达西, 孔隙度小于 15%, 储油物性最差。因此, 从砂岩粘土矿物的产状类型可以大致反映砂岩储油物性的好坏和油层自然产能的高低。

(2) 分散质点式和薄膜式粘土的砂岩它们的渗透率与孔隙度的关系曲线斜率相近, 两条关系曲线几乎平行, 而搭桥式粘土的砂岩它们的渗透率 - 孔隙度关系曲线的斜率与上述两类砂岩不同, 这是由它们的孔隙结构特征决定的, 并且与它们之间在孔隙结构上的相似性和差异性相一致。

(二) 毛细管压力曲线特征

从图 8 可见不同粘土矿物产状的砂岩, 它们的毛细管压力曲线的分布是十分有规律的:

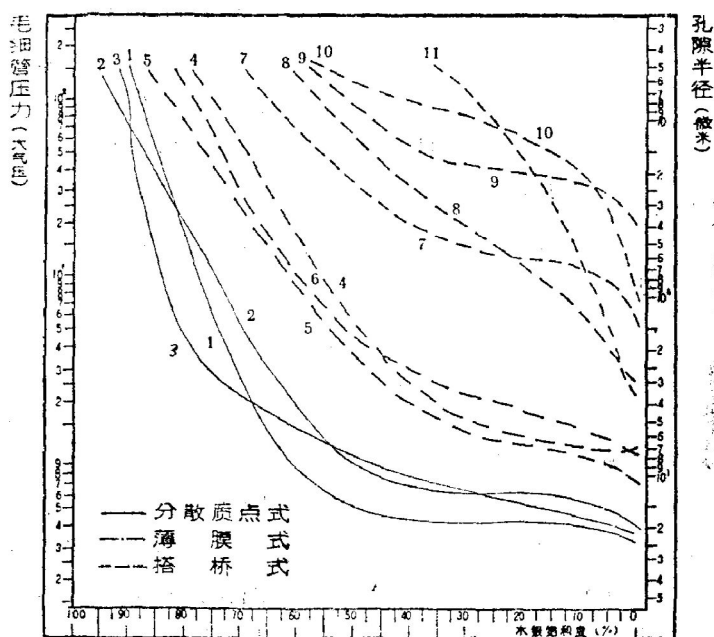


图 8 毛细管压力曲线

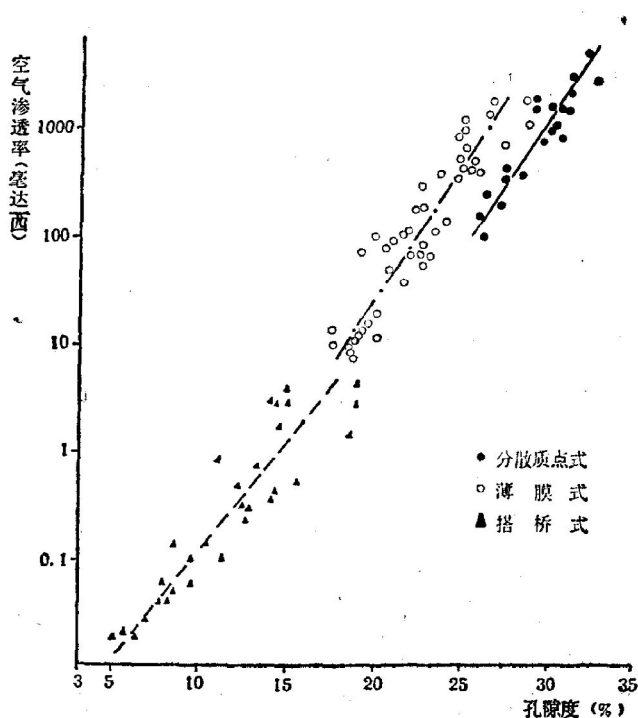


图 7 孔隙度-渗透率特征

分散质点式粘土的砂岩, 其毛细管压力曲线偏向左下方; 搭桥式粘土的砂岩, 其毛细管压力曲线集中在右上方; 薄膜式粘土的砂岩, 其毛细管压力曲线介于两者之间。上述特征反映了孔隙特征和产能的规则变化:

1. 排驱压力 (pd) 泰康地区分散质点粘土的砂岩, 排驱压力一般均小于一个大气压, 在 0.4—0.8 大气压, 与它相对应的最大连通孔隙喉道半径 (rd) 在 10—22 微米, 空气渗透率一般均大于 1000 毫达西, 油层的产能与大庆油田的

主力油层相似；薄膜式粘土的砂岩样品，排驱压力在 0.9—1.5 大气压，其对应的最大连通孔隙的喉道半径在 6—9 微米，其渗透性和油层的产能均较分散质点式粘土的砂岩为低，一般是中-低产油层；搭桥式粘土的砂岩样品，排驱压力在 10—40 大气压，其相应的最大连通孔隙的喉道半径在 0.2—0.7 微米，样品的空气渗透率一般小于 1 毫达西，这类油层一般均需进行油层酸化、压裂等改造以后，才具有生产能力。

2. 饱和度中值压力 (P_{C50}) 当孔隙中存在油、水两相时，以饱和度中值压力衡量产油能力的大小，因此，可以作为产出纯油能力的标志。 P_{C50} 值越大，表明岩石致密程度越高，偏向细歪度，虽然能出纯油，但生产能力很小， P_{C50} 值越小，则岩石对油的渗滤性能越好，具有高的生产能力。从图 8 可见，分散质点粘土的砂岩其 P_{C50} 在 0.5—1.0 大气压，具有最高的生产能力；薄膜式粘土的砂岩，其 P_{C50} 在 3—5 个大气压，产油能力较前明显降低；而搭桥式的砂岩，其 P_{C50} 在 30—100 大气压，产油能力最低。

3. 最小非饱和的孔隙体积 (S_{min}) 最小非饱和的孔隙体积 (S_{min}) 表示当注入水银的压力达到仪器的最高压力时，没有被水银侵入的孔隙体积百分数。 S_{min} 值越大，表示这种小孔隙越多。这些孔隙在一般情况下是束缚孔隙，而当岩石被水所润湿时，这些细小孔隙将为水所饱和，这时 S_{min} 值的大小在一定意义上反映岩石束缚水饱和度的大小，从图 8 可见：分散质点式粘土的砂岩其 S_{min} 值最小，在 8—13%，薄膜式

粘土的砂岩次之，在 17—25%；搭桥式粘土砂岩的 S_{min} 值最高，一般大于 30%，最大达 65%。

4. 最大汞饱和度 图 9 是 117 块样品的分析结果，表示不同粘土矿物产状的砂岩，它们的最大汞饱和度分布特征。从图中可见：分散质点粘土的砂岩最大汞饱和度都大于 70%，其中绝大多数样品在 90% 以上；薄膜式粘土的砂岩样品，多数在 80% 以上，而搭桥式粘土的砂岩，除个别样品外，均小于 80%，其中 70% 以上的样品，小于 70%。当这些砂岩后期为油所浸润的条件下，最大汞饱和度的数值大小，在一定意义上反映了不同粘土矿物产状砂岩的含油饱和度的大小。

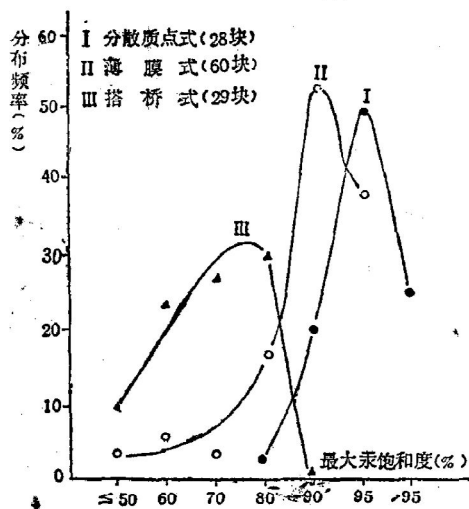


图 9 最大汞饱和度分布特征

四、纵向变化

随着埋藏深度的增加和成岩作用的加强，砂岩中的粘土矿物成分和产状也随之变化，由自生高岭石分散质点充填为主逐渐变为以混合层粘土为主的薄膜式产状为主，最后变为以条片状、纤维状或发丝状自生伊利石为特征的搭桥式。随着粘土矿物产状的变化，粘土矿物对砂岩原始孔隙结构的改造和对油层物性的影响也逐渐加强，使油层物性和油层产能变差。在松辽盆地，埋藏深度小于 1300 米的油层一般均以高岭石分散质点充填为主，一般都是高渗透层，渗透率一般在 1000 毫达西以上，大庆油田的主力油层

多属此类型;埋藏深度在1300—1800米时,砂岩的粘土矿物一般以薄膜式产状的混合层粘土为特征,一般是中-低渗透油层;当埋藏深度大于1800米时,砂岩的粘土矿物一般以自生伊利石的搭桥式生长为特征,都是一些低渗透的砂层,其渗透率多数小于1毫达西。

上述深度界线在不同地区是变化的,变化的幅度在300米左右。另外,油气的早期进入和砂岩粘土矿物含量稀少都可以极大地改变上述深度界线,前者使粘土矿物的成岩变化“终止”,后者使粘土矿物成岩变化影响减小,因此,仍然可以在埋藏深度1800米以下,找到以自生高岭石分散质点充填的油层,它们仍可能有较高的产能。

另外,在高岭石分散质点充填为主的储油砂岩之上,还可以有以蒙脱石呈薄膜式粘土为主,并含高岭石分散质点充填的砂岩,这是一种胶结十分松散,成岩程度很差的砂岩,大庆油田的黑帝庙油层即属此类型。

(收稿日期 1984年7月11日)

THE EFFECT OF CLAY MINERAL OCCURRENCE ON PORE STRUCTURES AND PRODUCTION CAPACITY OF SANDSTONES IN TAIKANG AND GULONG AREAS

Wang Xingxin

(Scientific Research Institute of Petroleum Exploration
and Development, Daqing Oilfield)

Abstract

On the basis of observation by means of scanning electron microscope, the occurrence of clay minerals in pore spaces of sandstone can be divided into three types, i.e. 1) separated spot type; 2) film-like type and 3) bridge-like type.

Sandstones that contains the first type have in the main intergranular pore space. The peak distribution of permeability is consistent with that of the porosity. They show a larger pore radius (6-12 μ) and a smaller texture coefficient ($Gg < 4$), good pore connection, high permeability and natural production capacity.

Sandstones with the second occurrence of clay minerals is generally in conformity with that of the one said above in pore texture feature, porosity and the accordant peak distribution of permeability and porosity, but they have a smaller pore radius (3-9 μ), bigger texture coefficient, and show a lower permeability in samples.

Sandstones with the third type occurrence of clay minerals are different to the other two types. Since clay mineral are formed in a bridge-like way within the pore spaces, the primary pore space have been disintegrated into micropores among clay minerals. Therefore, the porosity characteristics of these sandstones are similar to that of claystones, most samples show a small average pore radius (1μ), a bigger pore texture coefficient ($Gg > 8$). Because most pores in sandstones turned to be bound pores, their permeability for gas is less than 1md which are devoted merely by a few pore space with radius bigger than 1μ .

The vertical evolution of the above mentioned three types of sandstones can be seen clearly that, with the increase of the depth, the sandstones with predominantly separated spot of kaolinite have gradually changed into sandstones with intergranular film-like clay minerals, and finally into sandstones with bridge-like clay minerals represented mainly by flake-like and fibrous illites. At the same time, the pore structure and the physical properties of oil reservoir have been changed accordingly.

地质矿产部一批专家在同济大学海洋地质系兼职

自1980年以来,地质矿产部一批著名专家学者在同济大学海洋地质系兼职并招收博士与硕士研究生,计有朱夏教授,业治铮教授,刘光鼎教授,陈焕疆副教授等。他们分别在该系招收海洋构造、海洋沉积、海洋地球物理方面的博士和硕士研究生,迄今业已培养出两批海洋地质学方面的高级人才,有些已被选送到生产部门。这些研究生的学术论文和业务能力均得到有关专家的好评。

为了能使以上专家学者能按照各自所长来进行科研和培养人才,同济大学特为他们配备了一批年富力强、具有相当教学和科研能力的教师作助手,并按课题组成专门的班子,从人力和物力上给予保证。而这些专家则以他们渊博的学识、丰富的阅历,给该校海洋地质系的教学、科研工作以有力的推动,使这个在国内还比较年轻的系迅速达到同行的水平,而且开始形成自己的特色。

这种打破部门之间的界限,充分发挥生产部门专家的作用,使之与学校的教学、科研两个中心工作相结合,从而出现新的优势,并对生产部门和学校互利的作法,体现了当前重视知识和知识分子的作用以及人才交流的政策,同时也是在新的形势下教育与生产相结合的一种好形式。

(一 鸣)