

文章编号 :1000-0550(2001)02-0233-06

莲花油层中粘土矿物分布规律研究^①

唐洪明¹ 曾凡刚² 陈 忠¹ 赵敬松¹ 沈明道¹
唐清山² 柴利文² 魏桂萍²

(西南石油学院石工院 四川南充 637001) (中央民族大学生物化学系 北京 100081)
(辽河油田高升采油厂 辽宁盘锦 124000)

摘 要 辽河高升油田莲花油层富含稠油,搞清储层中粘土矿物的类型、含量、平面和纵向分布规律对整个稠油油藏开发方案的设计、油层保护、提高采收率等开发措施实施和稠油油藏形成条件等研究都具有极其重要的意义。本文利用 X—衍射、电镜、热反应实验对高升油田莲花油层中的粘土矿物进行了系统研究。研究表明,莲花油层中的粘土矿物以蒙脱石为主,粘土矿物类型、含量分布主要受岩石类型和沉积相控制,含油饱和度大小对粘土矿物类型影响不大。蒸汽驱采油会导致储层中蒙脱石的含量减少,增加储层的微观非均质性。

关键词 莲花油层 粘土矿物 蒸汽驱 沉积相 储层

第一作者简介 唐洪明 男 1966 出生 博士 储层地质和油层保护技术

中图分类号 TE122.2+3 **文献标识码** A

1 引言

高升油田高二、三区位于辽河断陷盆地西坡的北端。油藏生产层为下第三系沙河街组莲花油层,埋藏深度 1 450~1 700 m。含油面积 14.54 km²,平均油层厚度 67.7 m,地质储量 10 068 × 10⁸ t。目前油藏已开发 22 年,蒸汽开发是稠油油藏开发的常用措施。莲花油层自注蒸汽开采以来取得了较好的效果。但地下情况愈趋复杂,随着吞吐轮次的不断增加,增产效果越来越差,原油产量难以稳住。暴露出注入蒸汽回采水平低,地下存水不断增加,油层压力下降缓慢,部分井出砂等问题^[1]。这些问题对于我们实施增产措施带来了极大困难,直接影响油藏开发的经济效率。这些问题的存在除了与油层物性、岩性、成岩作用等内在原因有关外,无不与注蒸汽热采带来的储层伤害有关。而最易引起油层伤害的地质因素为储层中的敏感性矿物,尤其是粘土矿物对油层伤害程度起着决定性的作用。本文对研究区具有代表性的 13 口井 208 块岩心样利用 X—衍射、电镜、热反应实验对高升油田莲花油层中的粘土矿物进行了系统研究,探讨了粘土矿物类型、含量、平面、纵向上分布规律,宏观、微观控制因素及沉积相对粘土矿物的平面分布控制作用。这些研究对于实施开发方案和防止储层伤害具有十分重要的意义。同时,储层中粘土矿物含量和产状直接影响储层的孔喉大小分布,增大微观非均质性,对储层中剩余油和残余

油分布有一定的控制作用^[2]。因此,搞清储层中粘土矿物的分布无论对石油勘探或开发都具有十分重要的意义。

2 莲花油层基本地质特征

莲花油层是在辽河盆地 S₃ 深陷期受高 23 和台安两条正断层控制而形成的断槽形注陷背景中重力流沉积所形成的储集层,可用槽相模式解释^[3]。沉积物岩性主要为砾岩、砂岩及泥岩,厚度 50~640 m。对 5 口井连续取心资料统计,储层砾岩类占 31.1%,砂岩类占 42.67%,泥岩类(含泥质粉砂岩类)占 20.93%,灰岩类占 5.3%。砾岩一般为厚层状,具有正粒序递变的旋律,砂岩呈薄—中层状。莲花油层分为 8 个砂岩组,1~4 砂岩组为气层,5~7 砂岩组为主力油层,8 砂岩组为水层。5、6 砂岩组厚度大,在高二、高三区分布广泛,这是研究的主要目标层位。

莲花油层岩石具有成分成熟度和结构成熟度低的特点。碎屑成分以长石、岩屑含量高,石英含量低为特征。石英一般为 20%~30%,长石一般为 25%~50%,平均值 34.94%;岩屑为 20%~70%,平均值为 30.5%,岩屑以花岗岩、喷出岩、板岩、千枚岩为主。沉积物的结构特点为粒径范围大、粒级分散、大小混杂,最大粒径为 15 mm 左右,一般为 0.21 mm,粒度中值为 0.43 mm,分选差,分选系数为 0.43 mm,砂岩中颗粒呈次棱角状为主,而砾岩或含砾砂岩中颗粒为次棱—棱

① 西南石油学院“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室开放基金项目(PLN0114)研究内容

角状。

莲花油层物性好,孔隙度一般为20%~26%,最大可达39.6%,空气渗透率为1~4 μm^2 ,纵向上油藏中部物性好,上下砂体差异大。水平渗透率一般大于垂直渗透率,平均相差1.2~2.3倍。原生的粒间孔占75%左右,长石和岩屑的粒内溶孔、超大孔隙、铸模孔隙总共约占18%左右,其它部分为微孔隙和微裂缝。

3 粘土矿物分布规律及控制因素

3.1 分析实验条件

有油的岩心用苯和无水乙醇体积比为1:1的混合液在水浴锅上利用萃取的原理将油清洗干净、烘干。用橡胶锤将岩样粉碎、称重,用蒸馏水进行抽提 $<4\mu\text{m}$ 的粘土15次以上。然后,再将抽提残余部分非粘土烘干、称重求出粘土绝对含量。粘土沉淀后制成定向薄片进行X—射线衍射分析,求出粘土矿物的相对含量。衍射仪为日本理学公司生产的Dmax III—C型,分析条件为电压35 kV,电流30 mA,扫描速度为2°/分。

3.2 粘土矿物的类型和含量

研究的13口井莲花油层岩样所处的最大埋深为1959.30 m,最浅埋深为1401.50 m。取心井所取岩心最长为3-3-4井,557.80 m;最短为3-3-新96井,52.70 m。莲花油层中粘土矿物绝对含量一般小于20%,一般为8%~15%。粘土矿物的类型见表1。从表中可知粘土矿物有蒙脱石、高岭石、伊利石、绿泥石四种基本类型。不管岩石类型如何,含油性怎样,也不论井位和层位如何,岩石中粘土矿物几乎都以蒙脱石为主,其中蒙脱石相对含量最高可达98%,最低相对含量为42.17%,一般为60%~85%;其次是伊利石,一般为8%~20%;高岭石的变化幅度最大0~47.04%,一般为5%~25%;绿泥石含量很低,一般小于5%,而其最大值为34.95%。辽河高升油田莲花油藏稠油是底水

稠变成因的,由于边底水比较活跃,油水接触面积大,经过长期的、缓慢的水洗作用,使油藏下部的原油因细菌降解作用逐渐变为稠油油藏。

3.3 粘土矿物对储层伤害预测

莲花油层蒙脱石的含量最高,而蒙脱石具有最易产生水化膨胀的特征。在地下蒙脱石等粘土矿物与地层水处于稳定的平衡状态,一旦受到(矿化度较低的)外来液体侵入,粘土矿物与地层水之间稳定的平衡状态即遭破坏。一方面,对于小孔隙,粘土吸水膨胀堵塞部分渗流通道或使孔喉半径缩小,甚至堵死孔道,结果降低油层渗透率;另一方面,吸水后膨胀的粘土和膨胀性粘土在水的冲刷作用下分散—运移堵塞渗流孔道,大孔隙则出现粘土矿物颗粒膨胀后被带走,但堵塞了孔隙喉道,导致莲花油层强的水敏性。热采造成莲花水敏强的主要原因是注入水的矿化度低,为628.59 mg/l,而对应的地层水矿化度为6000~7600 mg/l,水型 NaHCO_3 。因此,注入低矿化度蒸汽带来的水敏伤害是严重性的。粘土矿物的碱敏和酸敏主要由于高强度的碱、酸进入储层溶解粘土颗粒产生沉淀,以及改变粘土颗粒表面电荷,从而导致粘土颗粒的分散/运移,堵塞储层的孔喉。对于莲花油层而言,由于高温对注入蒸汽的水解,使溶液呈碱性 $\text{pH}=11\sim12$,不可避免会溶解、分散粘土矿物,从而堵塞喉道。粘土对储层的伤害除了与其产状、含量、类型有关外,还与储层孔隙结构、流体性质、温度、储层的润湿性等因素有关。油层伤害的最终结果是增大储层的非均质性,降低采收率和产量。结合储层岩石学和粘土矿物分布特征,我们不难预测莲花油层主要存在水敏和碱敏,其次为盐敏、酸敏和速敏。

3.4 粘土矿物纵向分布规律

表1为莲花油层各砂岩组砂砾岩中粘土矿物平均

表1 莲花油层纵向上各砂岩组粘土矿物平均含量统计表

Table 1 The clay minerals content statistics of the Lianhua profile

层位	样品数	埋深 / m	粘土绝对含量 / %	高岭石相对含量 / %	绿泥石相对含量 / %	伊利石相对含量 / %	蒙脱石相对含量 / %
S ₂	2	< 1 450	15.47	3.92	0	6.32	89.77
1砂组	5	542~1 301	10.76	0.81	0.69	8.84	89.36
2砂组	3	1 360~1 550	18.84	5.80	1.93	14.96	77.32
3砂组	14	1 401~1 585	10.60	4.94	2.46	11.81	80.12
4砂组	17	1 450~1 625	8.50	5.32	0.82	11.46	78.68
5砂组	60	1 480~1 625	8.67	7.36	1.03	12.59	72.24
6砂组	85	1 543~1 694	8.17	5.93	3.52	12.10	63.83
7砂组	17	1 583~1 837	10.62	3.85	2.51	17.19	71.86
8砂组	5	1 643~1 922	15.10	17.24	3.14	15.24	64.38

含量分布情况。从此可知蒙脱石在砂砾岩中的相对含量以第一砂岩组最高 89.77% ,随埋深的增大,蒙脱石呈递减趋势,第六砂岩组均值为最低 63.83%。而伊利石、绿泥石、高岭石的相对含量由上至下亦有一定的增长,高岭石平均增加 11% ,绿泥石增加了 3% ,伊利石增加了 7%。蒙脱石的相对含量与粘土的绝对含量成正比例关系。蒙脱石这种在埋藏过程中向其它矿物转变的规律与其它地区的演变规律一样,说明了蒙脱石在埋藏成岩过程中是不稳定的。粘土矿物的这种纵向分布规律是成岩作用结果的矿物标志。

沙河街组中泥岩夹层的蒙脱石含量也是随埋藏增大,其含量逐渐减小,但变化幅度不如砂砾岩强。伊利石增加了 10% ,高岭石和绿泥石增加了 2%。这说明了砂砾岩的成岩演化强度强于泥岩。同时,这也证实了蒙脱石在砂砾岩中的转化速度比泥岩中快,这与砂砾岩中孔隙发育,孔隙流体易于循环,利于矿物转化有关。

无论是原生或次生粘土矿物,在埋藏成岩过程中随埋深、温度、压力的增加,将发生成岩转化,即沉积时期或成岩时期形成的蒙脱石在不同的条件下会转变为不同的粘土矿物类型。在 50℃ ~ 70℃、富含 K⁺ 孔隙水的条件下,蒙脱石消耗大量的 K⁺ 而转变为伊利石和伊/蒙间层矿物,同时释放大量的 Si⁴⁺、Na⁺、Fe³⁺、Mg²⁺ 和水。在同等温度条件下,如果富含 Fe³⁺、Mg²⁺,则蒙脱石转化为绿泥石。莲花油层砂砾岩中蒙脱石主要向高岭石、伊利石转化,而向绿泥石转化速度相对较慢。主要是由于在低温条件下,富含稠油的储层中蒙脱石更易向高岭石、伊利石转化,不具备向绿泥石转变的其它成岩作用与之匹配,导致孔隙介质缺乏 K⁺、Na⁺ 等离子。粘土矿物的这种演变规律本质上讲是成岩环境变化的结果,不同的成岩环境介质条件具有不同的演化序列。

3.5 岩石类型与粘土矿物分布间的关系

莲花油层岩石类型比较复杂多样,中—细砾岩、砂砾岩、粗—细砂岩和泥质粉砂岩、泥岩均是常见岩石类型。为了研究工作的方便将样品归并为砂砾岩和泥岩两大类,分别统计粘土矿物绝对、相对含量。其结果见图 1。泥质岩多属储层内的夹层和层组间的隔层。从中可以看出:

(1)砂砾岩类和泥岩类中的粘土矿物均以蒙脱石为主,但泥岩类中蒙脱石相对含量高于砂砾岩。砂砾岩中粘土矿物相对含量各井均值为:蒙脱石为 53.88% ~ 85.99% ,平均值为 67.94% ,而泥质岩类中其相对含量为 69.54% ~ 86.59% ,平均值为 79.02%。砂砾岩中高岭石普遍高于泥质岩类,统计表明其相对含量均值

要高出泥质岩 11.52%。其中一部分为蒙脱石向伊利石转化的结果。砂砾岩中高岭石含量高与有机质演化有关,有机质在进入生油门限之前到生油高峰期的一段时间将产生大量短脂肪酸和酚,这类物质进入成岩溶液,造成孔隙水为酸性,它将溶解岩石中的铝硅酸盐,如各类长石等,从而在储层孔隙中常常形成自生高岭石沉淀。因此,砂砾岩中自生高岭石的发育要求砂砾岩是一个渗透性较好的开放系统。

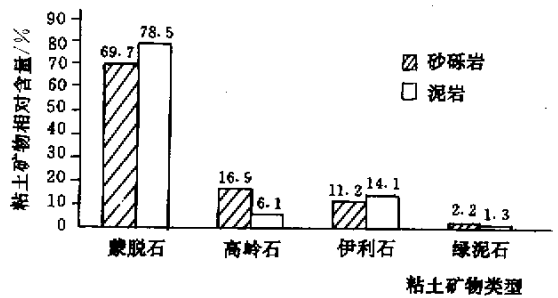


图 1 莲花油层不同岩石粘土矿物的分布

Fig. 1 The clay distribution in different sandstone types of Lianhua group

表 2 第 5、6 砂岩组不同粒径岩类中粘土矿物含量的分布情况

Table 2 The clay distribution of different size classes in the 5th and 6th unit of Lianhua group

砂岩组	岩性	样品数	绝对含量 均值/%	粘土矿物相对含量/%			
				高岭石	绿泥石	伊利石	蒙脱石
5	砾岩	5	8.85	19.76	0.99	11.38	68.46
	砂岩	38	9.75	16.73	1.32	12.76	68.73
	泥岩	12	28.05	7.50	0.26	18.69	79.18
6	砾岩	12	8.64	30.72	2.29	8.62	58.36
	砂岩	49	9.33	24.74	5.15	12.34	57.67
	泥岩	9	25.67	7.10	1.73	16.01	75.14

泥岩类中的伊利石略高于砂砾岩中的伊利石,这是由于泥质岩类中原生沉积粘土矿物时,尤其是蒙脱石,粘土矿物颗粒表面吸附大量的阳离子,如 Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺ 等,当随埋藏加深,这些离子就释放出来,促使蒙脱石向富含 K⁺ 的伊利石转化。

砂砾岩中的绿泥石含量和泥质岩类二者的含量相差不大,没有明显的差别,相对含量相差小于 3% ,这说明了莲花油层中绿泥石基本上属于原生成因的,成岩作用演化基本没有对它改造。

(2)对主力油层 5、6 砂岩组中的粘土矿物相对含量分别按砾岩、砂岩、泥岩三大类分别进行统计,目的是搞清楚岩石的不同粒径对粘土矿物分布的影响,结果见表 2。由此可见,粘土矿物绝对含量随着岩石骨

架颗粒粒径减小而增加。高岭石相对含量分布规律为：砾岩 > 砂岩 > 泥岩，而伊利石的相对含量分布规律正好相反，砂岩、砾岩蒙脱石的相对含量相差不大，但均小于泥岩 10% ~ 15%，绿泥石含量分布与粒度大小间的变化规律不明显。这也有利地说明了砾岩具有很好的渗透系统，有利于高岭石的形成。

3.6 粘土矿物的类型与含油饱和度间的关系

宏观上将砂砾岩的含油情况分为无油、油斑、油侵、含油及饱和五个等级。由于受样品数量的限制，将样品分为有油（油侵、含油、饱油）、无油（无油、油斑）二种类型，分别对 12 口井中粘土矿物相对含量进行统计，见图 2。有油砂砾岩中高岭石、伊利石和绿泥石的

相对含量略高于无油砂砾岩中的相对应类型含量的 1.5%，而蒙脱石的相对含量则略低于无油砂砾岩含量的 1.5%，这证实了含油岩石渗透性好，孔隙介质流体交换较快，从而导致蒙脱石向其它类型的粘土矿物转化，长石向高岭石等粘土矿物转化。

4 蒸汽驱对粘土矿物分布的影响

选择蒸汽驱前后相邻二口井 3-4-新 96 和高检 1 井的粘土矿物进行对比分析见表 3。从表 3 可知，蒸汽驱后砂砾岩中蒙脱石的相对含量降低了 23%，高岭石则增加了 15%，伊利石增加了 8%，而泥岩中基本未变。大量的文献资料和我们的室内实验都证明了在蒸汽驱的条件下高岭石与骨架碳酸盐岩反应可生成蒙脱石，从而增加储层中蒙脱石的含量，但是，莲花油层中蒙脱石的相对含量却降低了。我们通过分离实验证实了尽管蒸汽驱过程中可产生一定量的蒙脱石，但是稠油能够从储层中携带出一定量的蒙脱石，直接导致蒸汽驱后储层岩心中蒙脱石含量降低。因此，不难推断，储层中的稠油在运移时会携带大量的地层微粒，当运移能量降低时，易于堵塞喉道，降低喉道半径，相应增大了储层的孔隙直径，微粒带出储层必然增加孔隙度。

5 沉积相对粘土矿物分布的控制作用

莲花油层 5 ~ 7 砂岩组为主力油层，其中 5、6 砂岩组厚度大，在高二、三区分布广泛，7 砂岩组分布范围

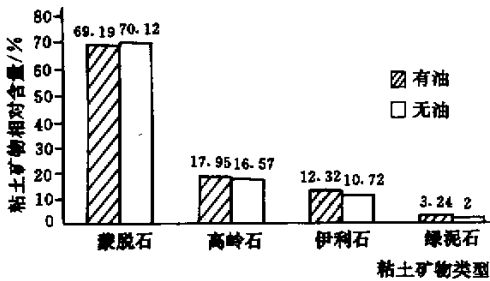


图 2 粘土矿物分布与含油饱和度关系

Fig.2 The relationship between clay distribution and oil saturation

表 3 蒸汽驱前后储层中粘土矿物的变化情况

Table 3 The distribution characteristics of clay minerals before and after the steam flooding

井号	砂岩中/泥岩中粘土矿物相对百分含量/%				样数	粘土矿物绝对含量/% 砂岩/泥岩
	高岭石	绿泥石	伊利石	蒙脱石		
3-4-新 96	10.16 ~ 8.21	3.43 ~ 0	8.45 ~ 6.16	78.07 ~ 85.63	4 ~ 2	9.76 ~ 35.80
高检 1 井	25.37 ~ 4.42	6.28 ~ 2.16	13.15 ~ 4.73	55.19 ~ 88.84	10 ~ 3	8.65 ~ 35.50

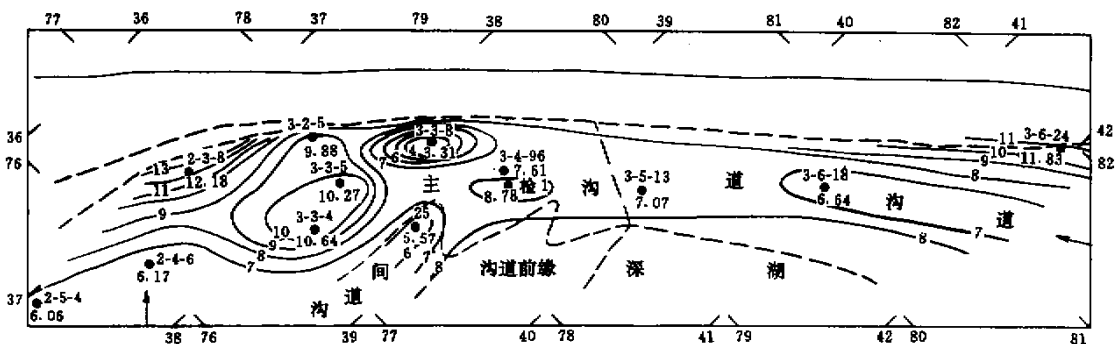


图 3 莲花油层 5、6 砂岩组粘土矿物绝对含量分布等值线图

Fig.3 Contour map of absolute clay content in the 5th and 6th unit of Lianhua group

Therefore, a more comprehensive study of the types, content, and the horizontal and vertical distribution characteristics of the clay minerals in the reservoir is of most important consequence to the design of the heavy crude oil development, reservoir protection, reservoir evaluation, and enhanced oil recovery (EOR) etc. The clay minerals in Lianhua reservoir are systematically studied by means of X-ray diffraction, scan electronic microscope and heat simulation experiments.

The Lianhua reservoir is a sediment by gravity flow, with the rock types being gravel, sandstone, and mudstone, and the sedimentary depth being 50 ~ 600 m. Lianhua reservoir has excellent physical property, with the porosity being 20% ~ 26% and the permeability being 1 ~ 4 μm^2 .

The studies show that the major clay minerals in Lianhua reservoir are montmorillonite (60% ~ 85%), illite (8% ~ 20%), kaolinite (5% ~ 25%), and chlorite (< 5%). The montmorillonite content decreases with the increase of the burial depth, but the kaolinite and illite content are just the opposite, because the porosity fluid in sandstone and gravels more easily circulative than that in mudstone, and the montmorillonite in sandstone can more easily convert into other clays.

For the study of the relationship between oil saturation and clay types, the rock is divided into two groups according to the oil saturation degree: the oil-saturated and non-saturated. The statistical result shows that the clay minerals content and clay types have nothing to do with the oil saturation percentage.

The types, contents and distributions of clay minerals are mainly controlled by rock types and sedimentary facies. In general, the absolute content of the montmorillonite increases with decrease of the sedimentary rock grains. The montmorillonite in gravel and sandstone has a relatively lower content than that in mudstone, but there is no much difference between the gravel and sandstone in their contents of montmorillonite. The relative content of montmorillonite in gravel and sandstone is 53.88% ~ 85.99%, with an average of 67.94%, while the content in mudstone is 69.54% ~ 86.59%, with an average of 79.02%. The relative contents of kaolinite distribution decrease in the sequence of gravel, sandstone, and mudstone. But that of the illite is just the opposite. Lianhua reservoir is a turbidity current deposit in lake facies. Sandstone and gravel are mainly distributed in groove and branch groove facies, mudstone and aleuolite in deep lake, groove front margin and interlayer branch groove facies. During the evolving process of the facies from the main groove to branch groove, to the groove front margin, to the interlayer branch groove, and finally to deep lake, the absolute content of clay minerals and the relative content of montmorillonite in Lianhua reservoir increases with the decline of the primary hydraulics.

By heat simulation experiments and a comparative study of the distribution characteristics of clay minerals before and after the steam flooding, it is found that the montmorillonite in the reservoir can increase because of kaolinite's reaction to carbonate grains. But because the heavy crude oil carries the montmorillonite grains out, there finally is an approximately 1% deduction of the absolute amount of montmorillonite in the reservoir after steam flooding. Because the steam flooding can destroy the clay microstructure to a large degree, some clay minerals disperse and migrate to increase the micro-heterogeneity parameters of reservoir. According to the types, contents and distributions of the sensitive minerals, the main mechanism of formation damage during steam flooding is particle migration and swelling of montmorillonite. Steam has a strong effect to the microstructure of the clay minerals.

Key words Lianhua reservoir clay minerals steam flooding sedimentary facies reservoir