

莺歌海盆地东方区黄流组 低渗储层特征及影响因素分析

谢玉洪¹, 张亚², 张峭楠^{3,4}, 张迎朝¹, 刘景环¹

(1. 中海石油(中国)有限公司 湛江分公司, 广东 湛江 524057; 2. 中国石油 西南油气田分公司 勘探开发研究院, 成都 610041; 3. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学), 成都 610500; 4. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 成都 610500)

摘要:以恒速压汞实验为基础,对莺歌海盆地东方区黄流组储层微观孔隙结构特征以及影响因素进行分析。数据表明,东方区黄流组低渗储层平均孔隙半径约为 100~140 μm ,平均喉道半径约为 1~5 μm ,主流喉道半径小于 5 μm 。孔隙半径对渗透率影响较小,喉道半径以及主流喉道半径随着渗透率的降低而减小,分布范围变窄;孔喉比随着渗透率的降低而增大,分布范围变宽。研究区储层较低的渗透率主要是由于储层喉道半径较小造成,而较强压实作用以及自生黏土矿物堵塞喉道是研究区储层孔隙结构差,喉道半径较小的主要原因。

关键词:恒速压汞;孔隙半径;喉道半径;孔喉比;黄流组;东方区;莺歌海盆地

中图分类号: I22.2

文献标志码: A

Structural characteristics of micro-pores and factors controlling low-permeability reservoirs in the Huangliu Formation in the Dongfang area, Yinggehai Basin

Xie Yuhong¹, Zhang Ya², Zhang Shaonan^{3,4}, Zhang Yingzhao¹, Liu Jinghuan¹

(1. Zhanjiang Branch of CNOOC, Zhanjiang, Guangdong 524057, China; 2. Exploration and Development Research Institute of PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 4. College of Earth Science and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: Characteristics of micro-pore structures and factors controlling the low-permeability reservoirs in the Huangliu Formation in the Dongfang area of the Yinggehai Basin were studied by mercury injection experiments with constant rates. The average pore radius of the reservoirs is about 100–140 μm , the average throat radius is about 1–5 μm , and the mainstream throat radius is less than 5 μm . The permeability is not correlated with pore radius, and reservoirs with different permeabilities can have similar pore radius distributions. In contrast, permeability is strongly associated with throat radius and its distribution. The throat radius and the mainstream throat radius decrease as permeability becomes lower, and the distribution range gets narrower. The throat to pore ratio increases as permeability decreases, and its distribution range becomes wider. The low permeability of rocks in the study area can be explained by their small throat radius. Strong compaction effects and authigenic clay minerals are the main factors which undermine the micro-pore structures and make the permeability low.

Key words: mercury injection with constant rate; pore radius; throat radius; throat to pore ratio; Huangliu Formation; Dongfang area; Yinggehai Basin

低渗透储层是指渗透率相对较低的储层,中华人民共和国石油与天然气行业标准规定渗透率为 $(10\sim 50)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的储层为中渗储层,渗透率 $(1\sim 10)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的储层为低渗透储层, $(0.1\sim 1)\times$

$10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的储层为特低渗储层^[1]。前人通过对低孔低渗储层的成因及形成机理研究后发现,沉积作用是形成低渗透储层的最基本因素,决定了后期成岩作用的类型和强度;成岩作用是形成低孔低渗储

层的关键,特别是成岩早期强烈的压实和胶结作用对形成低孔低渗储层起了决定性作用^[2]。低渗透储层按成因可分为原生低渗透储层和次生低渗透储层。原生低渗透储层主要受沉积作用影响,未经强烈的后期成岩作用改造;而次生低渗透储层则是后期成岩作用改造的结果。不同成因的低渗储层具有不同的微观孔隙结构特征,因此,可以通过储层微观孔隙结构特征识别低渗储层形成机理和影响因素^[3]。恒速压汞技术是目前使用较为广泛的孔隙结构研究方法,与常规压汞相比,其能更有效地识别孔隙、喉道的大小及分布规律^[4]。本文旨在利用恒速压汞技术分析黄流组低渗透储层微观孔隙结构特征,掌握低渗储层影响因素和成因机理。

1 地质背景

东方区位于莺歌海盆地中央凹陷西北部,发育海底扇分支水道和主水道沉积相,黄流组储层以岩屑石英砂岩和岩屑砂岩为主。研究区处于超压发育带,超压的存在有效地抵抗了机械压实作用,保存了部分粒间孔隙,对储层物性有一定程度的改善作用^[5-7]。

2 储层物性特征

通过统计 8 口井(图 1)400 余个样品的物性数据得出,黄流组储层平均孔隙度约为 17%,孔隙度大于 15% 的样品数约占总样品数的 82.34%;平均渗透率约为 $6.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,渗透率小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品数约占总样品数 87.15%(图 2),因此认为黄流组储层以中孔低渗—特低渗储层为主,局部发育少量中孔中渗储层。

3 储层微观孔隙结构特征

储层孔隙结构特征是指储层孔隙与喉道的大小、形状以及空间配置关系,孔隙大小决定了储层

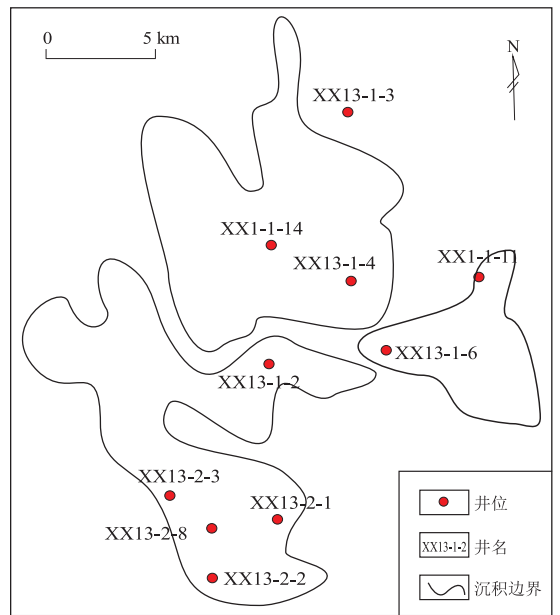


图 1 莺歌海盆地东方区井位分布示意

Fig.1 Well locations in the Dongfang area, Yinggehai Basin

的储集能力,喉道大小决定了储层对油气的渗流能力^[8]。可以说,储层渗透率直接受控于储层孔隙结构特征。

3.1 恒速压汞试验原理

恒速压汞技术是近年来比较流行的获取微观孔隙结构特征定量参数的技术手段。Gaulier 于 1971 年首次提出了比较完整的恒速压汞实验思想并设计了相关的实验仪器, Yuan 和 Swanson 在 1986 年发表的论文“Resolving pore space characteristics by rate-controlled porosimetry”中对恒速压汞原理进行了详细论述,尤其是对孔隙和喉道对毛管压力的不同响应特征进行了明确区分^[9-10]。恒速压汞技术以 0.000 05 mL/min 的速率将汞压入样品内,利用进汞过程中汞对孔隙和喉道突破压力的不同来区分孔隙和喉道,并记录孔隙和喉道的大小、数量以及分布规律,以此得出微观孔隙结构特征^[11-12]。

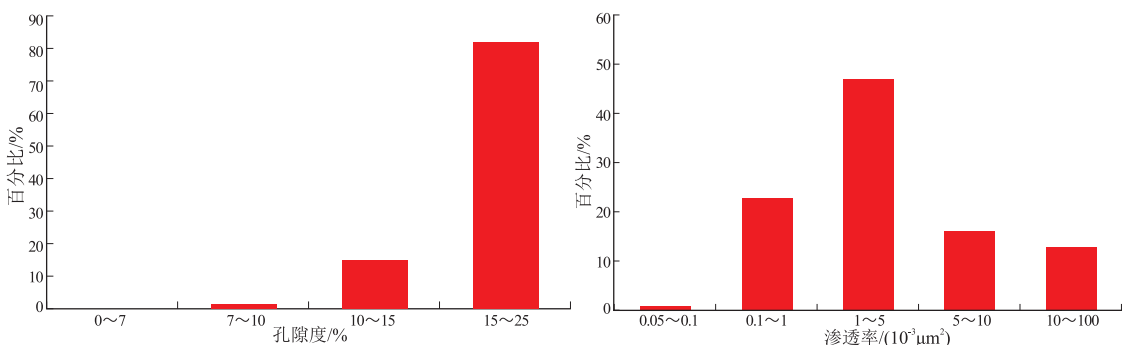


图 2 莺歌海盆地东方区黄流组物性统计

Fig.2 Physical properties of the Huangliu Formation in the Dongfang area, Yinggehai Basin

3.2 恒速压汞实验仪器与测试结果

本次研究共取 6 块黄流组砂岩样品进行测试,测试单位为西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,实验采用国产 ASPE-730 自动孔隙结构测试仪(恒速压汞仪)。ASPE-730 是一套以极低速率注射汞自动测定微小孔隙结构的系统。该系统具有高精度的泵控制器,可监测精度超过 0.000 001 mL,系统能够以 0.000 001 mL/s 的低速率操作,同时系统提供 2 个可互换的高精度(0.05%F.S.)压力传感器,压力范围在 0~100 psi 和 0~1 000 psi。

本次实验压力设置为 0~1 000 psi,进汞速率为 0.000 05 mL/min,温度为恒温 20 ℃,湿度小于 70%。根据实际需要,本次实验参数结果精确至 0.001 μm,表 1 为实验测试所得样品孔隙结构参数。从实验结果以及相关图(图 3)可以看出,不同渗透率样品的平均孔隙半径相差不大,其区别主要在喉道半径。渗透率小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 样品的平均喉道半径(平均喉道半径指各级别喉道与其占总喉道百分比的加权平均值)均小于 2.1 μm,平均主流喉道半径(平均主流喉道半径指对储层渗透率累计贡献值达到 80%的喉道半径加权平均值)均小于 3 μm;而渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 样品的平均喉道半径均大于 3 μm,平均主流喉道半径均大

于 4 μm,且渗透率与平均喉道半径以及平均主流喉道半径之间存在极好的正相关关系,即随着喉道半径的增大,渗透率逐渐升高。也就是说,黄流组储层渗透率大小与储层喉道发育程度直接相关。

3.3 不同渗透率样品孔隙结构特征

为了说明孔隙结构对储层渗透率的影响,做出了不同渗透率样品的孔隙结构参数分布图(图 4)。可以看出,不同渗透率的样品其孔隙半径大小及分布规律基本相同,孔隙半径分布在 50~200 μm 之间,呈较明显的正态分布,大小孔隙均有发育,说明孔隙半径对储层渗透率影响程度较低。而不同渗透率样品的喉道半径大小及其分布规律具有明显的差异。渗透率越低,喉道半径越小且分布范围越窄,如渗透率为 $1.72 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品,其喉道半径几乎全部小于 3 μm;渗透率越高,喉道半径越大且分布范围越宽,如渗透率为 $31.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品,其最大喉道半径为 6 μm,大于 2 μm 的喉道个数约占全部喉道个数的 85%以上。孔喉比是孔隙与喉道半径的比值,当不同渗透率样品的孔隙半径基本相同而喉道半径相差较大时,其孔喉比随渗透率的变化而具有明显的变化,即随着渗透率减小,孔喉比将逐渐增大且分布范围逐渐变宽(图 4)^[9,13-14]。

根据以上分析可以得出,黄流组储层喉道半径的大小直接控制了储层渗透率的高低。因此通过

表 1 莺歌海盆地东方区黄流组砂岩孔隙结构参数统计

Table 1 Pore structure parameters for sandstones from the Huangliu Formation in the Dongfang area, Yinggehai Basin

样品号	深度/m	井号	平均喉道半径/μm	平均孔隙半径/μm	平均孔喉比	主流喉道半径/μm	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	孔隙度/%
2	2 985.22	XX13-1-2	1.451	111.93	33.93	2.210	1.06	19.26
5	2 991.32	XX13-1-2	1.542	129.88	166.58	1.750	1.72	16.91
12	2 818.33	XX13-1-4	3.224	130.74	82.98	4.045	17.09	19.44
14	2 863.62	XX13-1-6	2.052	133.66	98.96	2.453	6.42	20.80
25	3 130.38	XX13-2-2	4.245	131.80	52.49	4.926	31.50	19.50
26	3 131.31	XX13-2-2	4.193	133.53	50.12	4.759	32.48	17.56

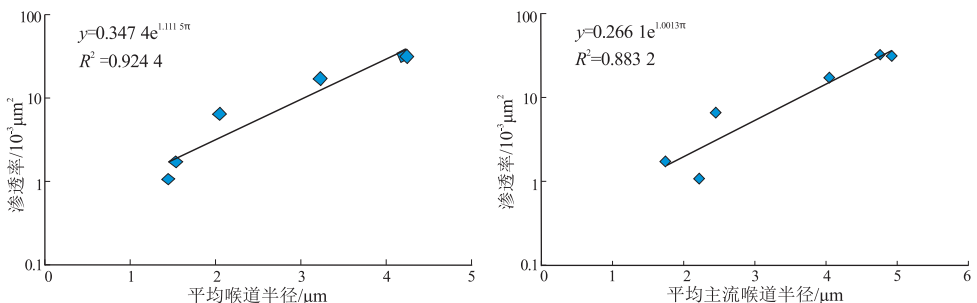


图 3 莺歌海盆地东方区黄流组渗透率与喉道半径相关性

Fig.3 Relationship between permeability and average throat radius in samples from the Huangliu Formation in the Dongfang area, Yinggehai Basin

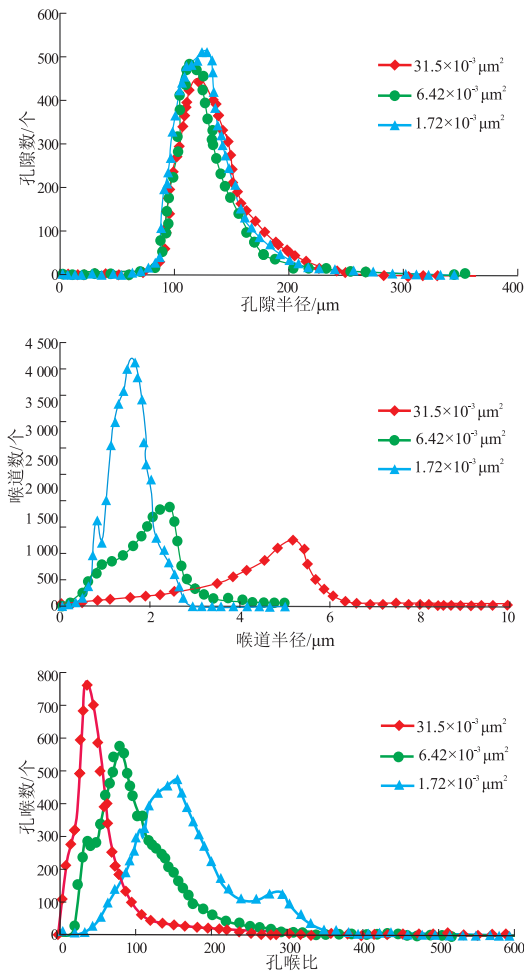


图4 莺歌海盆地东方区黄流组不同渗透率样品微观孔隙结构特征

Fig.4 Micro-pore structures of samples with different permeabilities from the Huangliu Formation in the Dongfang area, Yinggehai Basin

分析喉道发育的影响因素可以得出影响储层渗透率发育的直接因素。

4 储层孔隙结构影响因素

4.1 压实作用

根据前人研究可知,压实作用是破坏储层孔隙结构、降低储层渗透率的主要原因之一^[15-17]。较强的压实作用使储层碎屑颗粒之间接触更为紧密,

喉道半径缩小,孔隙结构变差,从而渗透率降低^[17-18]。由于东方区处于超压发育区,且压力系数大(1.7~2.0),超压部分抵抗了上覆地层的压实作用,对原生粒间孔隙起到了保护作用,在一定程度上改善了储层物性条件^[7,19]。因此,超压对储层的保护强度是研究孔隙结构需要重点关注的问题。为此,本文引入了压实程度接触强度(CI)对黄流组储层压实作用进行半定量评价。

$$CI = \frac{a + 1.5ab + 2b + 3c + 4d}{a + ab + b + c + d} \quad (1)$$

式中:*a*为接触个数;*ab*为点—线接触个数;*b*为线接触个数;*c*为凹凸接触个数;*d*为缝合接触的个数。通常 $CI=1.0\sim 1.5$ 为弱压实阶段, $CI=1.5\sim 2.5$ 为中等压实阶段, $CI>2.5$ 为强压实阶段^[20]。

根据计算结果可知(表2),研究区黄流组储层总体 $CI=1.6\sim 2.3$,为中等压实,其中,XX13-1区储层压实程度相对较强,CI值基本大于2.0,XX13-2区储层压实程度相对较弱,CI值基本在1.8左右。

通过不同压实程度样品的喉道半径分布可知(图5),储层压实作用程度越强,喉道半径相对越小(图5a),其 $CI=2.21$,喉道半径主要分布在1~2 μm之间;储层压实作用程度越弱,喉道半径越大(图5c),其 $CI=1.85$,喉道半径主要分部在4~6 μm之间。也就是说,黄流组储层压实作用影响了储层孔隙结构,进而控制了储层渗透率。

4.2 溶蚀作用

通过物性统计数据 and 恒速压汞实验数据可知,黄流组低渗储层具有孔隙较大、喉道偏小的特征,为中孔低渗—特低渗储层。造成这种特征的根源在于低渗储层发育区经历了强烈的溶蚀作用,形成大量次生孔隙。这些次生孔隙主要为长石等铝硅酸盐矿物溶蚀形成的粒间溶孔、粒内溶孔、超大孔和铸模孔(图6a,b),部分溶蚀作用的产物(如高岭石等)没有全部带出体系外而充填在次生孔隙内

表2 莺歌海盆地东方区黄流组砂岩压实程度CI值计算结果统计

Table 2 CI data for sandstones from the Huangliu Formation in the Dongfang area, Yinggehai Basin

井名	深度/m	点接触 <i>a</i>	点—线接触 <i>ab</i>	线接触 <i>b</i>	凹凸接触 <i>c</i>	缝合接触 <i>d</i>	CI
XX13-1-2	2 991.32	2	5	5	12	0	2.21
XX13-1-3	2 908.79	1	4	10	8	0	2.22
XX13-1-4	2 868.75	4	8	5	2	0	1.68
XX13-1-6	2 863.62	4	6	23	14	2	2.22
XX13-2-1	3 047.00	15	8	23	4	0	1.70
XX13-2-2	3 130.38	7	6	16	5	0	1.85
XX13-2-8	3 080.41	7	3	19	8	0	1.99

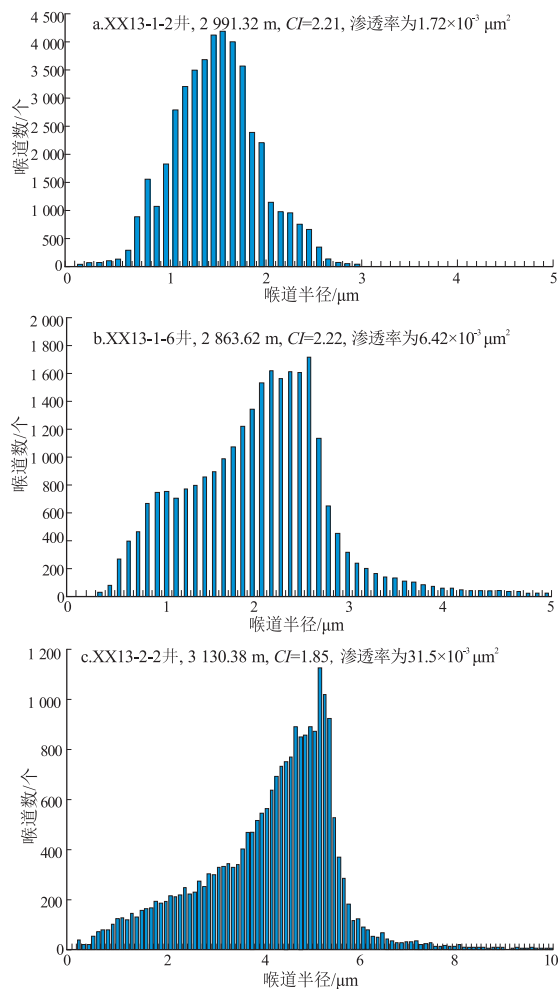


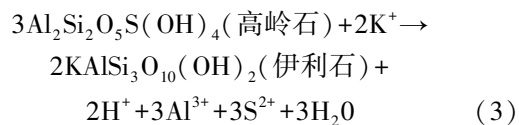
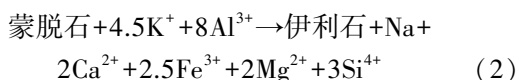
图5 莺歌海盆地东方区黄流组不同压实强度样品喉道半径分布

Fig.5 Throat radius of samples with different CI values from the Huangliu Formation in the Dongfang area, Yinggehai Basin

(图 6c, d)。这些产物的存在减弱了溶蚀作用对储层物性的改善,导致储层渗透率没有明显的提高,而只是增加储层孔隙度,从而形成了低渗储层中孔低渗的特征。

4.3 黏土矿物

黄流组储层发育多种黏土矿物,包括伊利石、高岭石、绿泥石和伊蒙混层黏土矿物,其中以伊利石为主,其次为高岭石(图 6)。研究认为,伊利石主要有 2 个来源:(1)蒙脱石转化为伊利石;(2)高岭石转化为伊利石。



反应式(2)是一个低耗能的自发反应,只要地层中蒙脱石和钾离子存在,当温度达到 70~100 °C 时,该反应就会在碎屑岩地层中普遍发生^[21]。由于研究区强烈的长石溶蚀生成了大量自生高岭石,这些高岭石在当温度高于 130 °C 时,只要有 K⁺ 存在也可通过反应式(3)转化为伊利石^[21]。

王行信^[22]、张惠良^[23]等认为,黏土矿物的含量及其形式将严重影响储层孔隙结构,进而影响储层渗透率。张哨楠等认为^[24],与其他黏土矿物相比,伊利石在生长过程中,向孔隙中心延伸得更远,对储层的孔喉结构影响非常严重,使孔隙结构变得

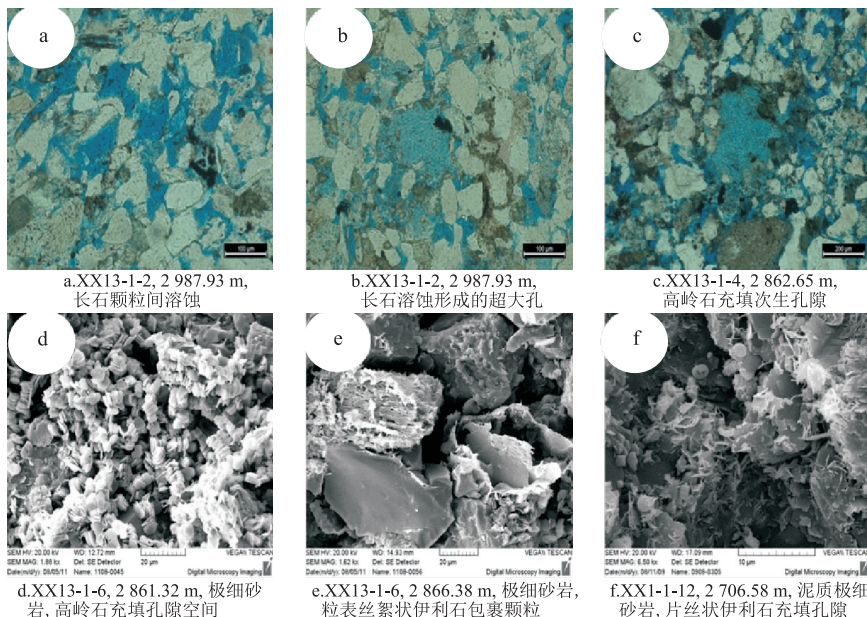


图6 莺歌海盆地东方区黄流组砂岩中黏土矿物显微照片

Fig.6 Microscope pictures showing clay minerals in sandstones from the Huangliu Formation in the Dongfang area, Yinggehai Basin

表 3 莺歌海盆地东方区黄流组砂岩中黏土矿物含量统计

Table 3 Contents of clay minerals in sandstones from the Huangliu Formation in the Dongfang area, Yinggehai Basin

井区	井号	岩性	伊利石/%	高岭石/%	绿泥石/%	伊蒙混层/%
XX13-1	XX13-1-2	细砂岩	87.00	2.67	1.22	9.11
	XX13-1-4	细砂岩	65.40	17.40	2.60	14.60
	XX13-1-6	细砂岩	67.63	14.13	3.88	14.38
XX13-2	XX13-2-2	细砂岩	24.25	14.88	45.88	15.00
	XX13-2-8	细砂岩	27.75	16.25	28.13	27.88

更为复杂,渗透率急剧下降。宋丽红^[25]等在研究黏土对广安须家河组致密砂岩影响时也得出类似的结论。通过 X 射线衍射发现,研究区内喉道半径较小,渗透率较低的 XX13-1 区储层内伊利石含量较高,最高可达 87%,而喉道半径较大、渗透率相对较高的 XX13-2 区伊利石含量小于 30% (表 3)。扫描电镜显示,XX13-1 区内颗粒边缘的伊利石呈丝状、卷曲片状,由颗粒边缘向孔隙发育中心生长,占据大量的孔隙空间,并将孔隙切割成更小区域,甚至完全占据并堵塞孔隙(图 6e, f)。由此可以看出,伊利石的存在也在一定程度上破坏了储层孔隙结构,降低了储层的渗流能力,这是研究区储层渗透率低的原因之一。

此外,长石大量溶蚀后形成的高岭石呈叠层状、书册状充填于次生孔隙之中。高岭石的晶间孔可以增加部分孔隙空间,但其对孔隙和喉道的充填破坏了储层孔隙结构,在一定程度上造成了渗透率的下降。

5 结论

(1) 根据孔隙结构参数可知,黄流组渗透率小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 储层的平均喉道半径小于 $2.1 \mu\text{m}$, 平均主流喉道半径小于 $3 \mu\text{m}$; 渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 储层的平均喉道半径和平均主流喉道半径均大于 $3 \mu\text{m}$ 。

(2) 喉道半径是控制储层渗透率的直接因素。不同渗透率样品孔隙半径分布规律相似,而喉道半径分布规律差异较大。渗透率越低,喉道半径越小,分布范围也越窄,反之,喉道半径越大,分布范围也越宽。

(3) 压实作用是黄流组储层孔隙结构较差、渗透率较低的主要成因,自生黏土矿物,尤其伊利石,是破坏孔隙结构、降低储层渗透率的次要因素。此外,长石的强烈溶蚀作用是造成储层中孔低渗特征的根本原因。

参考文献:

- [1] 国家能源局.SY/T6832-2011 中华人民共和国石油和天然气行业标准:致密砂岩气地质评价方法[S].北京:石油工业出版社,2011.
National Energy Administration.SY/T6832-2011 Petroleum and natural gas industry standard: Geological evaluating methods for tight sandstone gas[S].Beijing:Petroleum Industry Press,2011.
- [2] 杨晓萍,赵文智,邹才能,等.低渗透储层成因机理及优质储层形成与分布[J].石油学报,2007,28(4):57-61.
Yang Xiaoping, Zhao Wenzhi, Zou Caineng, et al. Origin of low-permeability reservoir and distribution of favorable reservoir[J]. Acta Prteolei Sinica, 2007, 28(4): 57-61.
- [3] 蒋凌志,顾家裕,郭彬程.中国含油气盆地碎屑岩低渗透储层的特征及形成机理[J].沉积学报,2004,22(1):13-18.
Jiang Lingzhi, Gu Jiayu, Guo Bincheng. Characteristics and mechanism of low-permeability clastic reservoir in Chinese petroliferous basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(1): 13-18.
- [4] 伍小玉,罗明高,聂振荣,等.恒速压汞技术在储层孔隙结构特征研究中的应用:以克拉玛依油田七中区及七东区克下组油藏为例[J].天然气勘探与开发,2012,35(3):28-30.
Wu Xiaoyu, Luo Minggao, Nie Zhenrong, et al. Application of constant-velocity mercury-injection technology to studying porous structure of reservoir: an example from Kexia Formation in 7 Middle and East areas of Karamay Oilfield [J]. Natural Gas Exploration & Development, 2012, 35(3): 28-30.
- [5] 高煜婷.莺歌海盆地成岩作用研究与孔隙演化[D].大庆:东北石油大学,2011.
Gao Yuting. Diagenesis research and pore evolution in Yinggehai Basin[D]. Daqing: University of Northeast Petroleum, 2011.
- [6] 姜涛,解习农.莺歌海盆地高温超压环境下储层物性影响因素[J].地球科学——中国地质大学学报,2005,30(2):215-220.
Jiang Tao, Xie Xinong. Effects of high temperature and overpressure on reservoir quality in the Yinggehai Basin, South China Sea [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2005, 30(2): 215-220.
- [7] Tingay M R P, Hillis R R, Swarbrick R E, et al. Origin of overpressure and pore-pressure prediction in the Baram province, Brunei [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(1): 51-74.
- [8] 唐海发,彭仕宓,赵彦超.大牛地气田盒 2+3 段致密砂岩储层微观孔隙结构特征及其分类评价[J].矿物岩石,2006,26(3):107-113.
Tang Haifa, Peng Shimi, Zhao Yanchao. Characteristics of pore structure and reservoir evolution in H2+3 tight gas reservoir, Daniudi gas

- field[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2006, 26(3): 107-113.
- [9] 孙军昌,杨正明,肖前华.恒速压汞实验技术发展历史及其在油气田开发中的应用[J].*渗流力学进展*,2011,1(1):1-7.
Sun Junchang, Yang Zhengming, Xiao Qianhua. The history of constant-rate mercury injection technology and its application on the development of petroleum fields [J]. *Advances in Porous Flow*, 2011, 1(1): 1-7.
- [10] 李彦举.基于恒速压汞的孔隙结构特征研究[D].北京:中国地质大学(北京),2014.
Li Yanju. Study on pore structure characteristics based on constant-rate mercury injection [D]. Beijing: China University of Geoscience (Beijing), 2014.
- [11] 师调调,孙卫,何生平.低渗透储层微观孔隙结构与可动流体饱和度关系研究[J].*地质科技情报*,2012,31(4):81-85.
Shi Tiaotiao, Sun Wei, He Shengping. Relationship between micro-pore structure and movable fluid saturation in low permeability reservoir [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2012, 31(4): 81-85.
- [12] 陈蒲礼,王烁,王丹,等.恒速压汞法与常规压汞法的优越性比较[J].*新疆地质*,2013,31(S1):139-141.
Chen Puli, Wang Shuo, Wang Dan, et al. Comparing the constant-speed mercury injection technique with the conventional mercury injection technique [J]. *Xinjiang Geology*, 2013, 31(S1): 139-141.
- [13] 蔡玥,赵乐,肖淑萍,等.基于恒速压汞的特低—超低渗透储层孔隙结构特征研究;以鄂尔多斯盆地富县探区长3油层组为例[J].*油气地质与采收率*,2013,20(1):32-35.
Cai Yue, Zhao Le, Xiao Shuping, et al. Study on pore structure characteristics of super-low permeability and ultra-low permeability reservoir by means of constant-speed mercury injection technique; case of oil layers of Chang 3 of the Yanchang Formation in Fuxian exploration area of the Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(1): 32-35.
- [14] 李珊,孙卫,王力,等.恒速压汞技术在储层孔隙结构研究中的应用[J].*断块油气田*,2013,20(4):485-487.
Li Shan, Sun Wei, Wang Li, et al. Application of constant-rate mercury injection technology in reservoir pore structure study [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2013, 20(4): 485-487.
- [15] 朱春俊,王延斌.大牛地气田低渗透储层成因及评价[J].*西南石油大学学报:自然科学版*,2011,33(1):49-56.
Zhu Chunjun, Wang Yanbin. Reservoir genesis and evaluation for the low porosity and permeability sandstone in the Daniudi gasfield [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2011, 33(1): 49-56.
- [16] 张琴,唐玄,庞正炼.鄂尔多斯盆地杭锦旗探区二叠系低渗透层主控因素分析[J].*大庆石油地质与开发*,2011,30(3):45-50.
Zhang Qin, Tang Xuan, Pang Zhenglian. Main controlling-factor analysis of Permian low porosity and low permeability reservoirs in Hangjinqi exploration area in Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 2011, 30(3): 45-50.
- [17] Amthor J E, Okkerman J. Influence of early diagenesis on reservoir quality of Rotliegende sandstones, northern Netherlands [J]. *AAPG Bulletin*, 1998, 82(12): 2246-2265.
- [18] Beard D C, Weyl P K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand [J]. *AAPG Bulletin*, 1973, 57(2): 349-369.
- [19] 姚雅琴,寇海亮.莺歌海盆地超压流体对储层物性的影响[J].*内蒙古石油化工*,2010(6):121-124.
Yao Yaqin, Kou Hailiang. Effect of overpressure liquid on the reservoir property in Yinggehai Basin [J]. *Inner Mongolia Petrochemical*, 2010(6): 121-124.
- [20] 梁建设,王琪,郝乐伟,等.成岩相分析方法在南海北部深水区长3油层预测的应用;以珠江口盆地白云凹陷为例[J].*沉积学报*,2011,29(3):503-511.
Liang Jianshe, Wang Qi, Hao Lewei, et al. Application of diagenetic facies analysis to reservoir prediction in deep water area of the northern south China sea: A case study from Baiyun Sag, Zhujiangkou Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(3): 503-511.
- [21] 黄思静,孙伟,黄培培,等.鄂尔多斯盆地东部太原组碎屑岩中自生伊利石形成机制及其对储层形成的影响[J].*矿物岩石*,2009,29(4):25-32.
Huang Sijing, Sun Wei, Huang Peipei, et al. The origin of authigenic illite and its effects on reservoir quality: A case study from Taiyuan sandstone, eastern Ordos basin [J]. *Journal of Mineralogy Petrology*, 2009, 29(4): 25-32.
- [22] 王行信.泥岩中碎屑高岭石的分布及其在沉积环境研究中的意义[J].*大庆石油地质与开发*,1983,2(1):1-6.
Wang Xingxin. The distribution of clastic kaolinite in mudstone and its significance in the study of sedimentary environment [J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 1983, 2(1): 1-6.
- [23] 张惠良,张荣虎,王月华,等.粘土膜对砂岩储集性能的影响;以塔里木盆地群6井区泥盆系东河塘组下段为例[J].*石油实验地质*,2006,28(5):493-498.
Zhang Huiliang, Zhang Ronghu, Wang Yuehua, et al. Influence of clay minerals membrane on sandstone reservoirs: A case study on the lower Donghetang reservoirs of the Devonian of well Qun 6 in the Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2006, 28(5): 493-498.
- [24] 张哨楠,丁晓琪,万友利,等.致密碎屑岩中粘土矿物的形成机理与分布规律[J].*西南石油大学学报:自然科学版*,2012,34(3):174-182.
Zhang Shaonan, Ding Xiaoyi, Wan Youli, et al. Formation mechanism and distribution of clay minerals of deeply tight siliciclastic reservoirs [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2012, 34(3): 174-182.
- [25] 宋丽红,朱如凯,朱德升,等.粘土矿物对广安须家河组致密砂岩物性影响[J].*西南石油大学学报:自然科学版*,2011,33(2):73-78.
Song Lihong, Zhu Rukai, Zhu Desheng, et al. Influences of clay minerals on physical properties of tight sandstones of Xujiahe formation in Guang'an area [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2011, 33(2): 73-78.