

致密砂岩储层孔隙结构及其对渗流的影响

——以鄂尔多斯盆地马岭油田长8储层为例

任晓霞¹, 李爱芬¹, 王永政², 吴松涛³, 王桂娟¹

[1. 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266580; 2. 浙江海洋学院, 浙江 舟山 316022; 3. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083]

摘要:致密砂岩油藏岩性致密、孔喉细小, 贾敏效应及应力敏感性强, 导致油气渗流规律不同于常规储层。为研究致密储层孔隙结构对渗流的影响, 首先通过岩心观察、铸体薄片、扫描电镜及高压压汞等实验方法, 研究了鄂尔多斯盆地马岭长8致密砂岩储层微观孔隙结构特征。结果表明, 该储层平均面孔率较低, 孔隙类型复杂, 非均质性较强; 渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩心纳米级与亚微米级孔喉占总孔喉的比例均较高(30%~55%), 渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩心微米级孔喉占总孔喉的比例增大。应用毛细管渗流模型分析了不同尺度喉道对渗透率的贡献, 指出研究储层中亚微米级孔喉对渗流起主导作用。通过岩心驱替实验发现, 油相(S_{wc})最小启动压力梯度与岩心最大喉道半径之间呈幂函数负相关, 最大喉道半径小于 $1.0 \mu\text{m}$ 时, 油相(S_{wc})最小启动压力梯度随喉道半径的降低迅速增加; 随岩心渗透率的降低, 喉道分布曲线左移, 喉道半径减小, 对应岩心的流速-压差曲线非线性段增长。

关键词:渗流; 最小启动压力梯度; 孔隙结构特征; 致密砂岩; 马岭油田; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Pore structure of tight sand reservoir and its influence on percolation

—Taking the Chang 8 reservoir in Maling oilfield in Ordos Basin as an example

Ren Xiaoxia¹, Li Aifen¹, Wang Yongzheng², Wu Songtao³, Wang Guijuan¹

(1. China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316022, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: The percolation of oil and gas in tight sandstone reservoirs is different from the conventional reservoirs because of its tight lithology, tiny pore and throat, Jamin effect and strong stress sensitivity. In order to understand the influences of pore structures on the percolation of oil and gas, the structural characteristics of micro pores of the Chang 8 reservoir were analyzed based on core and flake observation, SEM (scanning electron microscope) and mercury intrusion porosimetry. The results indicate that the reservoir has low surface porosity, complicated pore types and strong heterogeneity. The percentage of nanopore throats and submicron pore throats in the total pore throats is high (30%~55%) in the cores with permeability lower than $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, while the percentage of micron pore throats in the total pore throats is higher in the cores with permeability higher than $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. The contributions of the pores with different throat sizes to the permeability were analyzed with the capillary's model. The result shows that the submicron size pore throats play a major role in the permeability of reservoir in this study. The result of core displacement experiments shows that the minimum starting pressure gradient of oil (S_{wc}) is negatively correlated with the largest pore sizes. The minimum starting pressure gradient of oil (S_{wc}) increases rapidly along with the decreasing of pore throat size when the largest pore throat radius is less than $1.0 \mu\text{m}$. As the core permeability decreases, the throat distribution curve is shifted to the left, the pore throat radius lowers, and the nonlinearity section of the velocity - pressure gradient curve becomes longer.

Key words: percolation, minimum starting pressure gradient, structural characteristics of pores, tight sandstone, Maling oilfield, Ordos Basin

1 地质概况

鄂尔多斯盆地是发育在华北克拉通之上并位于其

西部的多旋回叠合型盆地, 地跨陕、甘、宁、蒙、晋五省区, 总面积约 $32 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是我国形成历史最早、演化时间最长的陆上第二大沉积盆地^[1-4], 其四周与周缘构造单元的连接处均为断裂带, 其中断裂褶皱发育, 盆

收稿日期: 2014-10-12; 修订日期: 2015-07-20。

第一作者简介: 任晓霞(1986—), 女, 博士研究生, 低渗透油藏孔隙结构及油气渗流机理。E-mail: 394418021@qq.com。

通讯作者简介: 李爱芬(1960—), 女, 教授、博士, 提高采收率及致密油气渗流机理。

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05044); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1294); 国家自然科学基金项目(51274226)。

地内部陕北斜坡的构造相对简单,以鼻状构造为主,地层比较平缓。马岭油田位于鄂尔多斯盆地的西部陇东地区,为构造-岩性油气藏,研究区域面积约1 300 km²,是鄂尔多斯盆地最早开发的油田,该油田含油层主要为中生界三叠系延长组和侏罗系延安组,长8油层组是一套以三角洲前缘沉积为主的陆源碎屑沉积,其中发育泥岩、泥质砂岩及中-细砂岩,是一套低孔、低渗-特低渗储层^[5-6]。

2 岩石学特征

储层岩石学特征包括岩石碎屑的矿物组成、碎屑分选、磨圆、排列方式、填隙物特征等,是影响储层成岩作用、孔隙结构及储层物性的重要因素。马岭地区长8储层薄片鉴定结果显示,该区以浅灰色、灰色长石砂岩、岩屑长石砂岩为主,含少量岩屑砂岩。砂岩碎屑中石英含量为29.16%,长石含量为28.62%,岩屑含量为27.53%,石英、长石、岩屑的比例几乎为1:1:1。砂岩碎屑颗粒磨圆度以次棱角状、次圆-次棱角状为主,粒度较细,以细-中粒为主,极细-细粒和细粒次之,分选中等、好为主。砂岩填隙物含量较高,为14.69%,类型较为多样,以自生粘土矿物和碳酸盐胶结物为主,硅质胶结物含量较低。粘土矿物主要以高岭石、绿泥石为主,碳酸盐胶结物则主要为方解石和铁方解石。砂岩碎屑胶结类型以孔隙式-基底式胶结为主。

3 储集空间特征

3.1 储集空间类型

1) 孔隙类型

通过对马岭地区长8储层铸体薄片、扫描电镜资料统计,研究区储层孔隙类型复杂,主要有粒间孔、长石溶孔、岩屑溶孔,次为晶间孔、微裂隙及粒间溶孔(图1)。储层平均面孔率较低,为2.46%,粒间孔平均为1.33%,长石溶孔为0.73%,岩屑溶孔为0.14%,发育

少量晶间孔、粒间溶孔、微裂隙等其他类型孔隙。

主要孔隙组合类型为粒间孔-溶蚀孔,粒间孔发育于颗粒碎屑之间,为原生孔隙,是在压实过程中碎屑颗粒间残存的空间,在长8砂岩储层中,一般是由绿泥石薄膜状包裹碎屑颗粒后剩余的粒间孔隙(图1)。原生孔隙为主表明该区有利沉积相带主要受控于原始沉积环境,成岩溶蚀作用只是在原有的粒间孔基础上对储层进行了溶蚀改造,由沉积、成岩或构造作用形成的微裂缝(图1)在研究区储层中虽发育较少,但对孔隙的联通性起重要作用,使储层物性得到进一步改善。

2) 喉道类型

喉道是连通两个孔隙的狭窄通道,喉道大小、形态控制孔隙的储集和渗透能力^[7],不同类型喉道应力敏感的程度也不相同,缩颈喉道类型储层应力敏感性较强,片状或弯曲片状喉道类型储层应力敏感性次之,管束状喉道类型储层孔隙本身就是喉道,应力敏感性最弱^[8]。通过铸体薄片和扫描电镜观察,马岭地区长8储层砂岩颗粒之间以线接触、点-线接触为主,凹凸接触和缝合线接触次之,喉道类型以孔隙缩小型喉道、缩颈型喉道以及片状或弯片状喉道为主,管束状喉道较为少见。

3.2 孔喉结构特征

图2与表1为马岭地区长8储层具有代表性样品的高压压汞毛管力曲线与孔喉特征参数。研究区样品压汞毛管力曲线形态上多符合6种典型的毛管力曲线^[7]中的c类和e类。

c类毛管力曲线中间段平缓,分选性较好,孔喉均匀较细偏度,但是排驱压力较高。研究区储层中这类岩石孔喉分布均匀,变异系数低(0.567~0.898)。然而排驱压力大于1 MPa,喉道细小,中值半径为0.024~0.128 μm,多小于0.1 μm。其孔隙度较低,渗透率一般小于 $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最大进汞饱和度相对较低(表1)。e类毛管力曲线平缓段不如c类明显,中间段近似斜坡状,孔喉分布不均匀,略细偏度。变异系数为0.834~1.174。排驱压力小于0.5 MPa,孔喉尺寸相

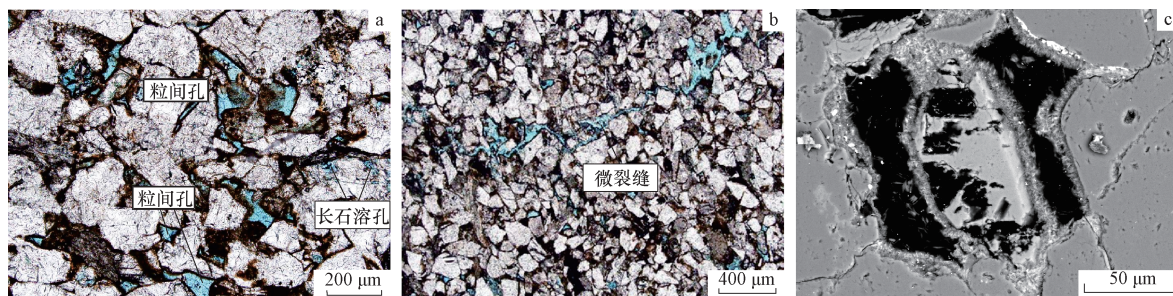


图1 马岭油田长8储层孔隙及孔隙组合类型

Fig. 1 Types of pore and its assembly of the Chang 8 reservoir in Maling oilfield

a. 原生孔+溶蚀孔;b. 微裂缝;c. 粒缘针状绿泥石

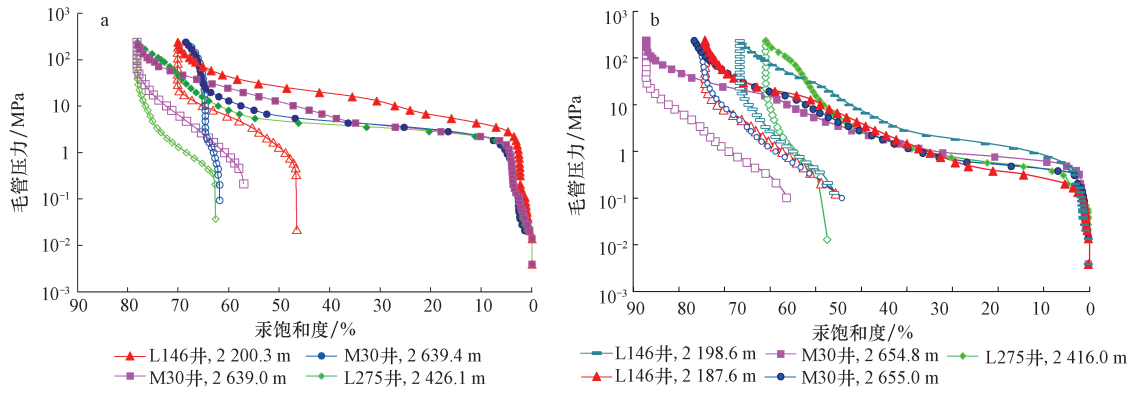


图 2 马岭油田长 8 储层高压压汞毛管力曲线

Fig. 2 Mercury injection curves of the Chang 8 reservoir in Maling oilfield

a. 高排驱压力,分选好毛管力曲线 c 类;b. 低排驱压力,分选好毛管力曲线 e 类

表 1 马岭油田长 8 储层高压压汞孔喉特征参数

Table 1 Pore throat parameters of the Chang 8 reservoir in Maling oilfield obtained from mercury injection curves

毛管力曲线 类型	井号	深度/m	渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	孔隙度/%	排驱压力/ MPa	最大孔喉 半径/ μm	中值压力/ MPa	中值半径/ μm	退汞效率/ %	最大汞饱和度/ %
c 类	里 275	2 426.10	0.063	7.660	2.293	0.321	5.764	0.128	14.43	73.22
	木 30	2 639.00	0.146	10.822	1.317	0.558	17.126	0.043	22.21	73.39
	木 30	2 639.40	0.180	13.274	1.527	0.482	9.369	0.079	0.53	62.61
	里 146	2 200.30	0.121	11.095	2.434	0.302	31.23	0.024	29.69	66.19
e 类	里 146	2 187.60	2.660	16.868	0.160	4.598	5.427	0.136	31.57	81.35
	里 146	2 198.61	1.373	12.471	1.553	2.082	11.179	0.066	31.57	73.50
	里 275	2 416.00	2.169	14.785	0.291	2.526	5.880	0.125	12.31	65.70
	木 30	2 654.80	1.055	13.488	0.404	1.819	3.051	0.241	29.78	94.54
	木 30	2 655.00	3.307	16.934	0.269	2.738	3.585	0.205	35.35	83.94

对较大,中值半径多大于 0.1 μm ,气体渗透率多为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 数量级。

由高压压汞毛管力曲线分析(表 1)可知,马岭长 8 储层毛管压力参数变化较大,储集层孔隙结构具有较强的非均质性,总体具有排驱压力低(平均为 0.894 MPa),最大进汞饱和度较高(平均为 74.94%)、孔隙与喉道间的连通性相对较好的特点。研究区储层平均中值压力 10.290 MPa,中值半径 0.116 μm ,喉道变异系数为 0.885,分选中等;退汞效率较低,平均 23.05 %。

3.3 物性特征

马岭地区长 8 储层 200 余块岩心分析资料统计(图 3)表明,储层孔隙度为 0.26%~17.59%,平均值为 8.15%,主要分布范围为 6.0%~8.0%;渗透率为 $(0.018 \sim 8.270) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.782 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,主要分布范围为 $(0.1 \sim 0.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。依据储层分类标准,研究区长 8 储集层主要为低孔-特低孔、超低渗透-特低渗透储层。

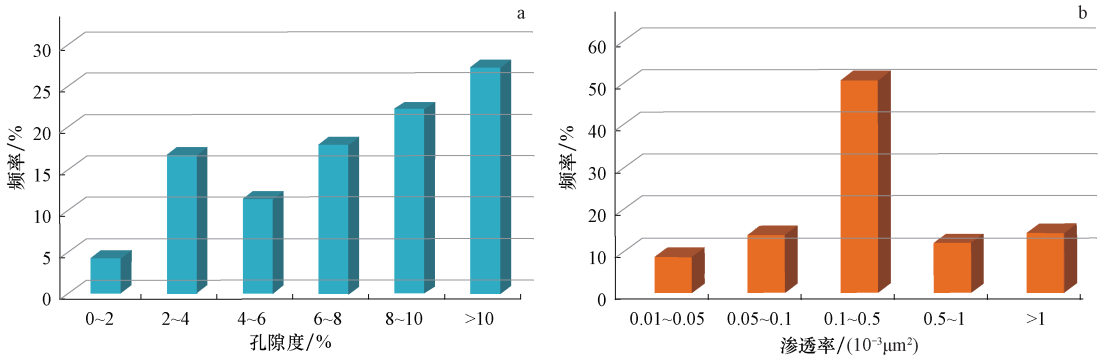


图 3 马岭油田长 8 储层岩石物性分布

Fig. 3 Porosity and permeability distributions of the Chang 8 reservoir in Maling oilfield

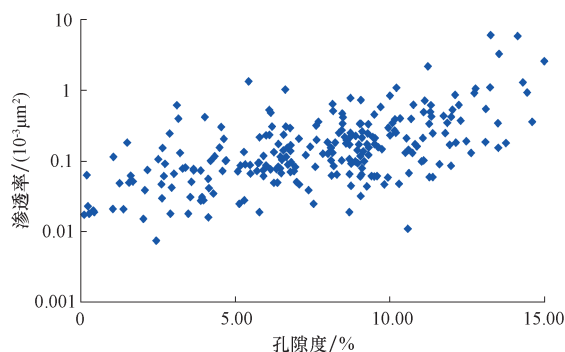


图4 马岭油田长8储层岩石孔、渗相关性

Fig. 4 Relationship between porosity and permeability of the Chang 8 reservoir in Maling oilfield

储层孔隙度与渗透率基本呈正相关(图4),不同样品的孔、渗关系差异较大,相同孔隙度的样品,渗透率相差10倍,甚至更多,可能是因为样品中存在微裂缝;而相同渗透率的样品,孔隙度相差约5%,这种差异表明长8超低渗透砂岩储层微观孔隙结构复杂多样。

4 孔隙结构对宏观渗流参数的影响

4.1 对渗透率的影响

目前国际上公认纳米级尺度空间为 $0.0001 \sim 0.1 \mu\text{m}$,亚微米级尺度空间为 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$,微米级尺度空间为 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 。根据高压压汞毛管力曲线分析,马岭地区长8储层不同渗透率岩心内不同尺度孔喉占总孔喉的比例不同,对渗透率的贡献率也不相同(图5)。在半对数坐标内,纳米尺度孔喉所占总孔喉的比例随渗透率的增加而降低;亚微米级尺度孔喉占总孔喉的比例随渗透率的增大略微呈现出先升高后降低的趋势;在渗透率较低时,微米级孔喉所占总孔喉的比例较小,基本不随渗透率的增加而改变,渗透率增加至 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 后,随渗透率的增加而增大。

对于渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品,纳米级与

亚微米级孔喉占总孔喉的比例均较高,且相差不多。由毛细管渗流模型可知,岩石渗透率与平均孔喉半径的二次方成正比,因此相同比例下的纳米级孔喉与亚微米级孔喉,亚微米孔喉对渗透率的贡献率要远远高于纳米级孔喉,对岩心的渗流起主导作用。渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品,微米级孔喉占总孔喉比例增加,对渗透率的贡献率随微米级孔喉占总孔喉空间的比例增加,仍是分布较广的亚微米级孔喉对渗透率的贡献起主导作用。

4.2 对非线性渗流特征的影响

低渗透多孔介质中液体渗流特征偏离达西线性定律,呈现出具有启动压力梯度的非线性渗流特征^[9-10],出现这种现象的主要原因有3个方面:岩石孔隙结构、渗流流体的性质、以及流体与孔隙介质相互作用^[11-12]。原油在多孔介质内流动时吸附在孔隙壁上,在颗粒表面形成具有较高粘度和极限剪切应力的边界层,驱动压力梯度只有克服了半径最大的喉道的边界层后,储层中才会允许流体通过,这个驱动压力梯度就是真实(最小)启动压力梯度^[13]。根据马尔哈辛得到的原油有效边界层厚度与驱替压力梯度和毛管半径的关系(图6)可知,随驱替压力的增加,边界层厚度减小,半径较小的吼道内的流体开始流动,并且参与流动的喉道的数量增多,流速-压差关系曲线出现弯曲段;当驱替压力增加至一定程度时,边界层厚度基本不随驱替压力的增加而减小,岩心内可以流动的孔隙全部参与流动,流速与压力梯度开始呈现线性关系^[11,14-15]。

采用“毛细管平衡法”^[16]与传统的“压差-流量法”相结合^[17-18],实验测试了马岭地区长8储层代表样品的油相(S_{wc})最小启动压力梯度与流速-压差关系曲线,结果如图7和图8所示。分析表明(图7),油相(S_{wc})最小启动压力梯度与岩心最大喉道半径之间呈幂

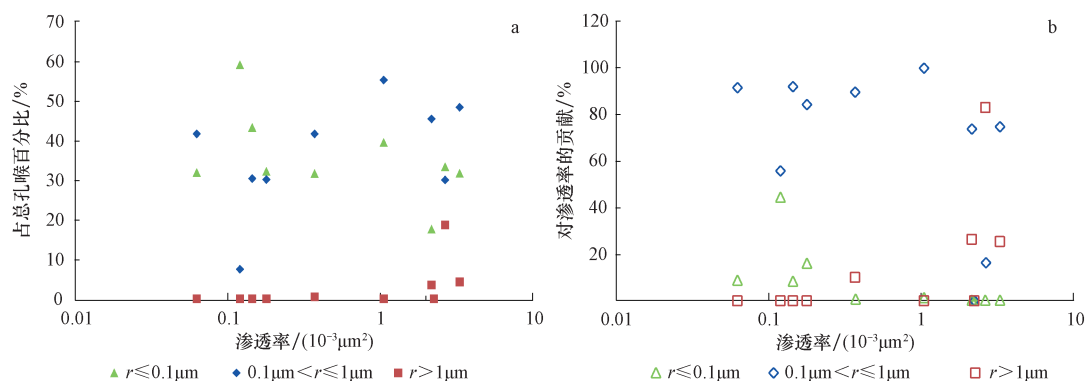


图5 马岭油田长8储层不同岩心内不同尺度喉道半径分布特征及其对渗透率的贡献值对比

Fig. 5 Distribution of different pore throat radius and its contribution to the permeability of cores in Chang 8 reservoir in Maling oilfield
a. 不同尺度喉道半径分布特征;b. 不同尺度喉道半径对渗透率的贡献值对比

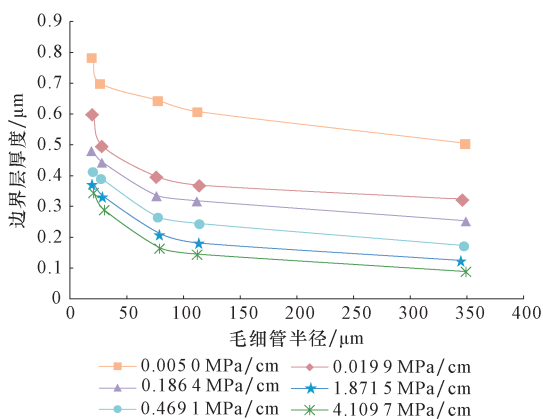


图6 马岭油田长8储层不同压力梯度下原油边界层厚度与毛管尺寸关系^[11]

Fig. 6 Relationship between the thickness of oil boundary layer and the capillary size under different pressure gradients for the Chang 8 reservoir in Maling oilfield^[11]

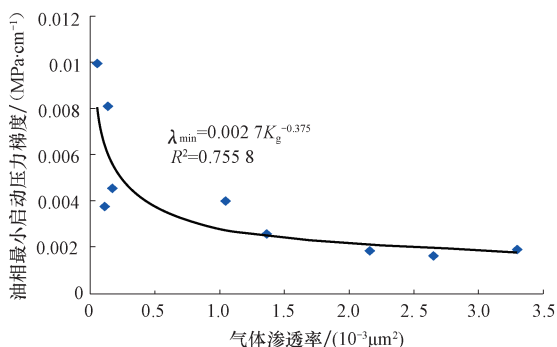


图7 马岭油田长8储层油相(S_{wc})最小启动压力梯度(λ_{min})与气体渗透率(K_g)关系

Fig. 7 Relationship between the minimum starting pressure gradient(λ_{min}) of oil(S_{wc}) and gas permeability(K_g) for the Chang 8 reservoir in Maling oilfield

函数负相关,岩心最大喉道半径小于 $1.0\ \mu\text{m}$ 时,油相(S_{wc})最小启动压力梯度随喉道半径的降低迅速增加。

图8为马岭地区长8储层M30井不同深度处油相(S_{wc})流速-压差曲线与对应岩心的喉道半径分布曲线。通过分析可知,压力梯度较低时,渗流曲线存在非线性渗流段,且随岩心渗透率的降低,曲线右移,非线性段增长。分析对应岩心的喉道分布曲线发现,随岩心渗透率降低,喉道半径分布曲线向左移动,喉道半径减小,相同压力梯度下,流体边界层较厚,使所有孔隙中的流体参与流动所需的压力增加,对应的非线性段加长。

5 结论

1) 渗透率小于 $1 \times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 时,纳米级与亚微米级孔喉占总孔喉的比例较高(30%~50%),亚微米孔喉对渗透率的贡献率大,对岩心的渗流起主导作用;渗

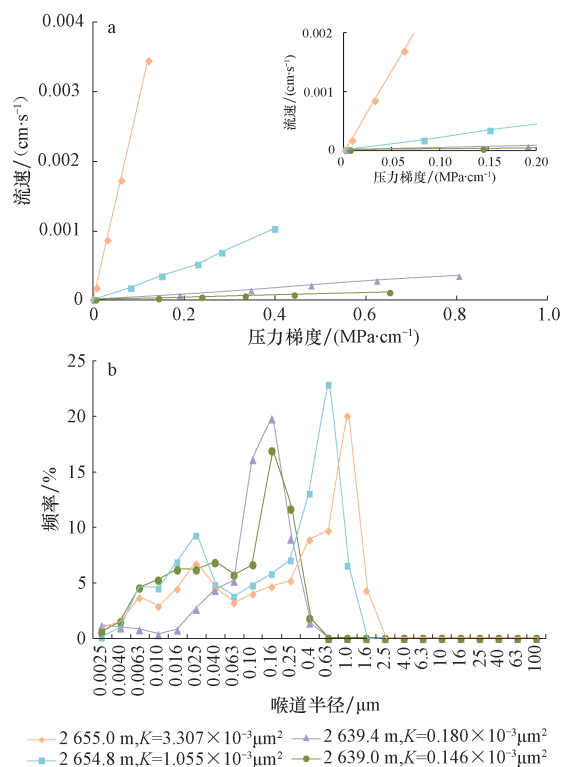


图8 马岭油田长8储层不同渗透率岩心单相油(S_{wc})渗流曲线(a)与喉道分布曲线(b)

Fig. 8 Percolation curve (a) of single phase oil(S_{wc}) and throat distribution curve (b) for cores of different permeability in Chang 8 reservoir in Maling oilfield

透率大于 $1 \times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 时,微米级孔喉占总孔喉比例增加,仍是分布较广的亚微米级孔喉对渗透率的贡献起主导作用。

2) 研究区样品油相(S_{wc})最小启动压力梯度与岩心最大喉道半径之间呈幂函数负相关,样品最大喉道半径小于 $1.0\ \mu\text{m}$ 时,油相(S_{wc})最小启动压力梯度随喉道半径的降低迅速增加。

3) 利用边界层理论,结合孔喉分布曲线,定性解释了非线性渗流曲线的变化规律。随岩心渗透率降低,喉道半径分布曲线向左移动,喉道半径减小,相同压力梯度下,流体边界层较厚,使所有孔隙中的流体参与流动所需的压力增加,渗流曲线非线性段加长。

参考文献

- [1] 杨俊杰,李克勤,张东生. 中国石油地质志(卷十二) - 长庆油田[M]. 北京:石油工业出版社,1992:3-7.
Yang Junjie, Li Keqin, Zhang Dongsheng, et al. Petroleum geology of China (Vol. 12) Changqing Oil Field [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992: 3-7.
- [2] 张纪智,陈世加,肖艳,等. 鄂尔多斯盆地华庆地区长8致密砂岩储层特征及其成因[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 679-684.
Zhang Jizhi, Chen Shijia, Xiao Yan, et al. Characteristics of the Chang 8 tight sandstone reservoirs and their genesis in Huaqing area, Ordos

- Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(5): 679–684.
- [3] 牛小兵, 冯胜斌, 刘飞, 等. 渗透致密砂岩储层中石油微观赋存状态与油源关系——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组为例[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(3): 288–293.
- Niu Xiaobing, Feng Shengbin, Liu Fei, et al. Microscopic occurrence of oil in tight sandstones and its relation with oil sources—a case study from the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(3): 288–293.
- [4] 苏复义, 周文, 金文辉, 等. 鄂尔多斯盆地中生界成藏组合划分与分布评价[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(4): 582–590.
- Su Fuyi, Zhou Wen, Jin Wenhui, et al. Identification and distribution of the Mesozoic plays in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 582–590.
- [5] 马春林, 王瑞杰, 罗必林, 等. 鄂尔多斯盆地马岭油田长8油层组储层特征与油藏分布研究[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(3): 514–519.
- Ma Chunlin, Wang Ruijie, Luo Bilin, et al. Characteristics of Chang-8 oil reservoir and distribution of oil reservoir in Ma Ling oil field, Ordos basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(3): 514–519.
- [6] 曲春霞. 马岭油田长8油藏储层地质特征研究[D]. 西安: 西安石油大学硕士, 2012.
- Qu Chunxia. Research on the reservoir characteristics of the Chang 8 Formation in Maling Oilfield[D]. Xi'an: Xi'an Petroleum University, 2012.
- [7] 李爱芬. 油层物理学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2011: 142, 278.
- Li Aifen. Petro-physics[M]. Dongying: China university of Petroleum Press, 2011: 142, 278.
- [8] 廖纪佳, 唐洪明, 朱筱敏, 等. 特低渗透砂岩储层水敏实验及损害机理研究——以鄂尔多斯盆地西峰油田延长组第8油层为例[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(2): 321–328.
- Liao Jijia, Tang Hongming, Zhu Xiaomin, et al. Water sensitivity experiment and damage mechanism of sandstone Reservoirs with ultra low permeability; a case study of the eighth oil layer in the Yanchang Formation of Xifeng oilfield, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 321–328.
- [9] 黄延章, 杨正明, 何英, 等. 低渗透多孔介质中的非线性渗流理论[J]. 力学与实践, 2013, 35(5): 1–8.
- Huang Yanzhang, Yang Zhengming, He Ying, et al. Nonlinear porous flow in low permeability porous media[J]. Mechanics in Engineering, 2013, 35(5): 1–8.
- [10] 宋付权. 低渗透多孔介质和微管液体流动尺度效应[J]. 自然杂志, 2004, 26(3): 128–131.
- Song Fuquan. Research of the size effect of liquid flow in low permeability porous media and microchannels[J]. Chinese Journal of Nature, 2004, 26(3): 128–131.
- [11] Мархасин, И. Л. 油层物理化学机理[M]. 李殿文, 译. 北京: 石油工业出版社, 1987: 121–123.
- Мархасин, И. Л. Reservoir physical and chemical mechanism[M]. Translated by Li Dianwen. Beijing: Petroleum Industry Press, 1987: 121–123.
- [12] 王晓冬, 郝明强, 韩永新. 启动压力梯度的含义与应用[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 188–191.
- Wang Xiaodong, Hao Mingqiang, Han Yongxin. Implication of the threshold pressure gradient and its application[J]. Acta Petrolei Sinica. 2013, 34(1): 188–191.
- [13] 高旺来. 安塞低渗油田孔隙结构对渗流特征曲线的影响[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(1): 79–80.
- Gao Wanglai. The effect of pore structure on the characteristics of percolation flow curves of Ansai low-permeability reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(1): 79–80.
- [14] 熊伟, 雷群, 刘先贵, 等. 低渗透油藏拟启动压力梯度[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(2): 232–236.
- Xiong Wei, Lei Qun, Liu Xiangui, et al. Pseudo threshold pressure gradient to flow for low permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(2): 232–236.
- [15] 韩永林, 刘军锋, 余永进, 等. 致密油藏储层驱替特征及开发效果——以鄂尔多斯盆地地上里塬地区延长组长7油层组为例[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 207–211.
- Han Yonglin, Liu Junfeng, Yu Yongjin, et al. Displacement characteristics and development effect of tight oil reservoir; a case from Chang 7 oil layer of the Yanchang Formation in Shangliyuan area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 207–211.
- [16] 李爱芬, 张少辉, 刘敏, 等. 一种测定低渗油藏启动压力的新方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008, 32(1): 68–71.
- Li Aifen, Zhang Shaohui, Liu Min, et al. A new method of measuring starting pressure for low permeability reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum, 2008, 32(1): 68–71.
- [17] 李浩, 赵鹏大, 刘柏林. 拟启动压力对低渗透单相流体及油水两相渗流的影响——以沙埕油田沙7断块为例[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(1): 84–86.
- Li Hao, Zhao Dapeng, Liu Bolin. Effects of starting pressures on single phase fluid and oil/water two phase fluid flow in low permeability reservoir—case study in Sha 7 fault block in Shanchi Oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(1): 84–86.
- [18] 李爱芬, 刘敏, 张少辉. 特低渗透油藏渗流特征实验研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2008, 23(2): 35–9.
- Li Aifen, Liu Min, Zhang Shaohui. Experimental study on the percolation characteristic of extra low-permeability reservoir[J]. Journal of Xian Shiyou University (Natural Science Edition), 2008, 23(2): 35–9.

(编辑 张亚雄)