文章编号:1009-3850(2003)01-0090-05

榆树林油田低渗透储层微观孔隙结构特征及渗流特性

石京平^{1,2}, 向阳¹, 张丽萍², 王新江², 肖鲁川²

 (1. 成都理工大学,四川 成都 610059; 2. 大庆油田有限责任公司 勘探开发研究院,黑龙 江 大庆 163712)

摘要:通过对榆树林油田压汞资料的分析,发现该油田的微观孔隙结构参数大部分与中高渗透油层的特征相似,其 相对分选系数和结构系数随着渗透率的降低而增大,结构特征参数和孔喉平均半径随着渗透率的降低而减小。在 毛管压力曲线上,其排驱压力高,孔喉细小。由于油层的低孔、低渗特性,油、水在孔隙介质中流动,呈现了非线性渗 流特征,而且随着孔隙半径和渗透率降低,非线性渗流特征越来越明显。油水两相共同渗流时,束缚水饱和度、残余 油饱和度以及共渗点饱和度均较高,而两相渗流范围较小,残余油下水相渗透率较低,最终驱油效率不高。

关键 词:低渗透油层;微观孔隙结构;榆树林油田;黑龙江

中图分类号: TE122.2 文献标识码: A

榆树林油田位于黑龙江大庆长垣东部的外围, 属于低渗透、低产、低丰度的大型油田,有部分地区 属于特低渗透油藏。该油田于 1991 年投入开发,相 继出现了一系列问题:注水压力高、套损现象严重、 采油速度低、产量递减幅度大等。低渗透储层开发 过程中所表现出来的这种开发特征,其根本原因就 在于储层低孔、低渗特征。揭示低渗透储层的孔喉 结构特征及微观分布,揭示低渗透储层开发特征产 生的原因,提出搞好低渗透油田开发的对策。

油田上一般用铸体图像技术研究孔隙和喉道的 几何形状、大小和相互配置关系,但其分辨率低,因 此研究者常采用毛管压力的测定来研究储层的微观 孔隙结构^[1]。测定毛管压力的方法有半渗透隔板 法、离心机法、压汞法和吸附法等4种,油田上最常 用的就是压汞法和离心机法。笔者通过榆树林油田 的压汞曲线资料,总结了低渗透储层的微观结构特 性及对渗流性质的影响。

1 毛管压力曲线特征

一块岩样的毛细管压力曲线,不仅仅是孔径分 布和孔隙体积分布的函数,也是孔喉连接方式的函 数,更是孔隙度、渗透率和饱和度的函数。实际资料 表明,毛管压力曲线的主要部分,越是接近纵横坐标 轴,微观孔隙结构越好,渗透率高,排驱压力小;反 之,越是远离纵横坐标轴,微观孔隙结构越差,渗透 性差,排驱压力高。

1.1 曲线形态特征

图 1 是榆树林油田不同渗透率范围内几条典型 的压汞曲线。为了减少资料的分散性,对不同渗透 率区间采用的是平均毛管压力。具体做法是:将 *P_c-S_{He}*的关系曲线的坐标按公式(1)换算成*J-S_{He}*坐 标,并把许多样品的测点都绘在一张图上,求得平均 *J*函数,然后反求平均毛管压力 *P_c*,绘制 *P_c-S_{He}*的 关系曲线图。



图 1 榆树林油田低渗透储层典型毛细管压力曲线图 Fig. 1 Representative capillary pressure curves for the lowpermeable reservoir beds in the Yushulin Oil Field

$$J(S_{\rm Hg}) = \frac{100P}{\sigma} \sqrt{\frac{10K}{\varphi}}$$
(1)

其中, $J(S_{Hg})$ 为无因次量, P_{\circ} 为毛管压力 (10^{6} Pa), σ 为表面张力(达因/m), K为渗透率(10^{-3} μ m²), ϕ 为孔隙度(小数)。

从图中看出毛管压力曲线簇有以下几个特点:

(1)随着渗透率的降低,曲线向右上方移动,曲 线的尾部和纵坐标轴有斜交的趋势。

(2)随着渗透率的降低,最大进汞饱和度减小, 即预示着储层的束缚水饱和度高。

(3)随着渗透率的降低,岩样的排驱压力和中值 压力增大,孔喉变小。

1.2 孔喉分布特征与渗透率贡献值

根据 29 块岩心压汞资料及孔道大小累积分布 曲线,可以看出岩样的孔道直径大部分小于 1 μ m,这 是榆树林油田低渗透储层孔隙结构的普遍特征。当 渗透率小于 1×10⁻³ μ m²时,小于1 μ m的微细孔道所 占的比例达80%。孔隙度和渗透率的分布峰值均在 0.25~1.6 μ m之间,它们对渗透率的贡献值为 46.09%~72.51%,可见储层的主要渗流通道为 0.25~1.6 μ m。低渗透储层的这种小孔细喉的特性, 必然对储层的油水渗流造成很大的阻力。

1.3 孔隙度与渗透率的关系

就一般油层来讲,孔隙度大的样品,其渗透率相

对也大。因此许多文献资料中表明孔隙度与渗透率 之间呈良好的线性关系。榆树林油田的孔隙度与渗 透率之间的关系也是这种趋势(图 2),相关系数为 0.53。这次统计的样品中有90%渗透率小于 5× $10^{-3}\mu m^2$,孔隙度范围为9.30%~18.03%,平均孔隙 度仅有14.22%。

2 低渗透储层微观孔隙结构特征

国外在研究孔隙结构与石油采收率的关系时, 曾采用了 31 项参数,我国的油藏工程师及实验专家 曾用 45 项参数描述油层的微观孔隙结构^[1]。这些 参数基本上由实验测得,经过前人的归纳总结,很多 已经可以用结构表达式建立与石油采收率的关系。 其中与渗流和石油采收率有关的参数达20项,不同 的油田选用不同的参数来描述本油田的孔隙结构。 笔者根据压汞资料,主要从以下几种参数的规律,来 描述榆树林油田的微观孔隙结构。

2.1 微观非均质系数

微观非均质系数(α) 是指每一喉道半径 *r* 偏离 最大喉道半径的的程度,其表达式^[23] 为:

 $\alpha = \int_{0}^{S_{\text{max}}} r(S) \, dS \, \left(S_{\text{max}} \,^{\circ} r_{\text{max}} \right)$ 其中, S 为汞饱和度(小数)

其含义为每一孔喉半径对最大孔喉半径的比 值, 总偏离度为每个 r 值的偏离值, 对饱和度加权, 0 < α<1。因此, α 值越大, 组成岩样的喉道半径能越 接近最大喉道半径, 岩样的孔喉分布越均匀。对于 榆树林低渗透油层 α 值随渗透率的降低有增大的趋 势(图 2)。但是这种变化不是很明显。

2.2 孔隙结构特征参数

孔隙结构特征参数 $(\frac{1}{D_r, \varphi_p})$ 是相对分选系数 (D_r) 与结构系数 (φ_p) 乘积的倒数,其值与渗透率有 着密切的关系。实际资料表明,中高渗透油层的结 构特征参数随着渗透率的增大而增大^[1],榆树林油 田低渗透油层的结构特征参数也是随着渗透率的增 大而增大(图 2),与中高渗透油层有相同的特征。 杨普华曾研究了结构特征参数与驱油效率的关系 为^[4]:

$$\eta_{\&} = 6.81 n \frac{1}{D_x \varphi_p} + 63.9$$
 (3)

其相关系数为 0.9009~0.8775。可见, 渗透率 越高, 结构特征参数值越大, 驱油效率也越大。根据



图 2 渗透率与均质系数(α)、相对分选系数(D_r)、孔隙结构特征参数($1/D_r \varphi_p$)、结构系数(φ_p)、孔隙度(φ) 关系图 Fig. 2 Plots of the permeability versus isotropism coefficients (α), relative sorting coefficients (D_r), porosity structural parameters ($1/D_r \varphi_p$), structural coefficients (φ_p) and porosity (φ)

榆树林油田岩心驱替实验,总结驱油效率与渗透率 的关系,也得到了上述结论。这里结构特征参数涉 及到相对分选系数和孔隙结构系数两个参数,故有 必要简述这两个参数的特征。

1. 相对分选系数

相对分选系数(*D*_r) 是孔喉半径的方差除以平 均值, 即孔喉半径对于平均半径的偏差, 该值愈小, 说明孔喉大小分布越集中于平均值, 孔隙结构愈均 匀。一般低渗透油层的相对分选系数随着渗透率增 高而增大^[1], 可是榆树林低渗透油层却随着渗透率 的降低而增大(图 2), 即非均质性增强。微观孔隙 的非均质性, 造成注水采油过程中, 水沿大孔喉的砂 体迅速推进, 使部分含油面积处于水线圈闭的范围, 形成剩余油, 因此给油田开发带来了困难。

2. 孔隙结构系数

孔隙结构系数(φ_p)表征了真实岩石孔隙特征 与长度相同的平行柱状毛细管束模型之间的差别, 它的数值是影响这种差别的各种综合因素的度 量^[5]。可见 $\varphi_p = 1$ 时,即为毛管束模型。

$$\varphi_{p} = \frac{\varphi}{SK}(\gamma) \tag{4}$$

卡佳霍夫(1987)^[6] 得出孔隙结构系数与孔道迂 曲度(λ)的平方成正比, 与流动系数(ε) 成反比。

$$\varphi_{\rm p} = \frac{\gamma^2}{\varepsilon} \tag{5}$$

公式中流动系数(ε) 是流动孔隙度(φ_p) 与绝对 孔隙度(φ) 的比值, 当两值相同时, $\varphi_p = \gamma^2$ 。此时, 孔隙结构系数的差异主要反映油层孔道迂曲度的差 异, 而油层迂曲度的大小反映了油层流通渠道的长 度。对榆树林油田而言, 其孔隙结构系数随着渗透 率的降低而增大(图2), 即油层迂曲度增大, 从而增 加了油层中油水流动的难度, 这与中高渗透油层的 特性很相似。

2.3 平均半径

平均半径(7) 与中值半径具有相似的含义, 但是 计算方法不同, 平均半径是根据孔喉半径间距对间 距饱和度的加权而建立。无论是平均半径, 还是中 值半径, 与中高渗透层的特征相似, 都随着渗透率的 降低而减小。根据 29 块样品的统计, 孔喉的平均半 径范围是0.16~3.40^µm, 平均值只有0.74^µm。按照 李道品^[1]建议的孔喉分类, 榆树林油田属于细微孔 隙结构。

3 微观渗流特征

3.1 非线性渗流特征

1. 渗流曲线特征

低渗透储层由于孔喉微细,流体在渗流过程中 受到岩石孔壁与流体固、液界面上的表面分子力的 强烈作用,因此需要一个启动压差,才能使流体流 动,此时的渗流曲线并不是一个通过原点的直线 (图 3)。从图中看出,低渗透岩心的油、水单相流 动,在速度很低的情况下,渗流曲线呈非线性变化, 随着流速的增加曲线逐渐过渡到直线变化;渗流曲 线的线性段也不是达西流特征,线性段截距表明,存 在初始(启动)压力梯度。一般将渗流曲线线性段与 压力梯度轴的截距称为拟启动压力梯度,国内外学 者均以拟启动压力梯度的大小,判断储层岩石非线 性渗流特征的显著程度^[7,8]。启动压力的存在,将降 低驱油过程中的有效驱动压力,从而降低最终采收 率。



图 3 榆树林油田低渗透率储层油水渗流曲线(K= 0.52×10^{-3 μ m²)}

1. 单相水; 2. 单相油; 3. 线性(单相油)

Fig. 3 Curves for oil and water seepage in the low-permeable reservoir beds of the Yushulin Oil Field ($K=0.52\times10^{-3}$ μ m²)

1= water; 2= oil; 3= linear (oil)

2. 拟启动压力梯度与孔渗关系

实验表明, 拟启动压力梯度与岩石孔喉的排驱 压力、孔喉平均半径有一定的相关性。榆树林油田 低渗油层的拟启动压力梯度随着排驱压力的增大而 增大(相关系数为0.70), 随孔喉平均半径的增大而 减小, 尤其是模拟油的拟启动压力梯度与孔喉平均 半径的相关系数达0.75。 实验还表明, 低渗油层中油、水渗流的非线性范 围与渗透率有明显的关系, 油、水在岩石中流动的拟 启动压力梯度随着渗透率的增高而乘幂趋势降低。 对于单相水的渗流而言, 当渗透率大于 1×10⁻³μm² 时, 拟启动压力梯度很低, 且变化很小; 对于模拟油 的渗流而言, 当渗透率大于 5×10⁻³μm² 时, 拟启动 压力梯度很低, 且变化很小。可见低渗透储层孔喉 半径愈小、渗透率愈低, 则非线性渗流特征愈明显。 因此可认为非线性渗流是低渗透油层的一个渗流特 性。

3.2 油水相对渗透率参数及曲线特征

1.油水相对渗透率参数特征

由榆树林 29 块样品综合分析可知,油水相对渗 透率参数中束缚水饱和度 Swi 较高(平均40.33%), 残余油饱和度 Sor 较高(平均30.57%),油水两相共 渗范围较小(平均28.99%),出现等渗点的含水饱和 度较高(平均58.29%),残余油时水相相对渗透率较 低(平均 17.83%),无水期采收率较高(平均 25.74%),而最终采收率不高(平均48.84%,中高渗 岩心实验一般达60%左右)。

2. 曲线形态特征

油水相对渗透率曲线类型很多,而榆树林油田 以近似直线(异常)型相渗曲线为主,随着含水饱和 度的增加,其油相相对渗透率下降很快,而水相相对 渗透率上升缓慢,残余油下相对渗透率值一般在 13%~26%之间。因此表现在低渗透油层生产上, 则呈现出油井见水后,随含水上升产液指数下降,难 于用提高排液量的方法保持稳产。

4 结论和认识

(1)榆树林油田属于细微孔隙结构,在毛管压力 曲线上表现为排驱压力高,孔喉细小,最大进汞饱和 度低,曲线偏于细歪度。

(2)榆树林油田孔道直径大部分小于 14m,储层
的主要渗流通道为0.25~1.64m,孔径为0.25~
1.64m孔隙,为储层提供了46.09%~72.51%的渗透率。

(3)榆树林油田的微观孔隙结构参数大多具有 中高渗透层的特征,即随着渗透率的降低,结构特征 参数降低,相对分选系数和结构系数增大,孔喉平均 半径减小。

(4) 由于榆树林油田的低孔、低渗特性,油、水在

多孔介质中的流动呈现非线性渗流特征,且随着孔 隙半径的降低,渗透率降低,非线性渗流特征越明 显。

(5)油水两相在低渗油层中流动时,其束缚水饱 和度、残余油饱和度以及共渗点饱和度均较高,而两 相渗流范围较小,残余油下水相渗透率较低,最终驱 油效率不高。

参考文献:

- [1] 李道品.低渗透砂岩油田开发[M].北京:石油工业出版社, 1997.
- [2] 沈平平,李秉智,涂富华.砂岩孔隙结构对水驱油效率的影响及

分类[A].中国大庆国际油田开发技术会议[C].北京:石油工 业出版社,1992.

- [3] 高雅明, 沈平平, 涂富华. 利用数字图像处理系统研究孔隙结构 及其应用[A]. 第二次国际石油工程会议[C]. 北京:石油工业 出版社, 1986.
- [4] 杨普华. 孔隙结构对水驱油机理影响研究[J]. 石油学报, 1980 (增刊):
- [5] 王允成. 油层物理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.
- [6] 卡佳霍夫. 测定储集岩石性质的岩心分析[M]. 北京: 石油工业 出版社, 1987.
- [7] 阮敏,何秋轩,等.低渗透油层渗流特征及对油田开发的影响
 [J].特种油气藏,1998,5(3):23-28.
- [8] 任晓娟, 闵琪. 特低渗储层岩石中流体的渗流特征[J]. 低渗透 油气田, 1997, (2): 13-15.

Microporous structures and seepage regimes of the low-permeable reservoir beds in the Yushulin Oil Field, Heilongjiang

SHI Jing-ping^{1,2}, XIANG Yang¹, ZHANG Li-ping², WANG Xin-jiang², XIAO Lu-chuan²

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Daqing Oil Field Cor., Ltd., Daqing 163712, Heilongjiang, China)

Abstract: The analysis of the pressure mercury data indicates that most of the parameters for the microporous structures are similar to those of the moderate- to high-permeable reservoir beds in the Yushulin Oil Field, Heilongjiang. The relative sorting coefficients and structural coefficients tend to be increased in response to the decrease of the permeability while the structural parameters and average pore throat radii generally decrease in response to the decrease of the permeability. The capillary pressure curves also show that the driving pressures are inversely proportional to pore throat radii. The low porosity and permeability of the reservoir beds result in the nonlinear flows of the oil and water in the pore medium. Furthermore, this kind of nonlinear flows becomes conspicuous when the pore throat radii and permeability decline. The coexistence of oil and water in the nonlinear flows lead to the higher bound water saturation, residual oil saturation and co-vadose point saturation. The smaller extend of the vadose areas and lower permeability of the water below residual oil tend to cause the lower oil-driving efficiency.

Key words: low-permeable source bed; microporous structure; Yushulin Oil Field; Heilongjiang