

影响特低-超低渗透砂岩油藏开发效果的因素分析

齐亚东¹, 雷 群¹, 于荣泽², 晏 军², 刘学伟^{2,3}, 战剑飞⁴

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油勘探开发研究院 廊坊分院, 河北 廊坊 065007;
3. 中国科学院 渗流流体力学研究所, 河北 廊坊 065007; 4. 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:以特低-超低渗透砂岩油藏为研究对象,应用恒速压汞技术深入分析其微观孔隙结构,通过低渗透物理模拟试验研究该类储层的应力敏感性、单相流体渗流以及油水两相渗流特征,并从微观孔隙结构角度进行解释,在此基础上讨论该类油藏开发效果的影响因素。结果表明:微观孔隙结构是决定和影响特低-超低渗透油藏开发难度和开发效果的根本性因素;当渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,孔喉微细,储层动用难是开发面临的最核心的矛盾,但储层一旦得到有效动用,因其良好的喉道分选,开发效果会比较好;而当渗透率大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,流体流动通道较宽,建立起有效的驱动压力体系较为容易,开发此类储层面临的关键问题是微观非均质性降低了储层的开发效果。

关键词:油藏; 特低-超低渗透油藏; 孔喉结构; 应力敏感性; 启动应力梯度; 开发效果; 因素分析

中图分类号:TE 122 **文献标志码:**A

Analysis on factors influencing development effect of extra-ultra low permeability sandstone reservoirs

QI Ya-dong¹, LEI Qun¹, YU Rong-ze², YAN Jun², LIU Xue-wei^{2,3}, ZHAN Jian-fei⁴

(1. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;*
2. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang Branch, PetroChina, Langfang 065007, China;*
3. *Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, CAS, Langfang 065007, China;*
4. *Exploration and Development Research Institution of Daqing Oilfield Company Limited, Daqing 163712, China*)

Abstract: The micro pore-throat structures of extra-ultra low permeability sandstone reservoirs were researched through the constant-rate mercury injection experiment. The stress sensitivity, characteristics of single-phase flow and two-phase flow of such reservoirs were studied by means of physical simulation and the origins of these characteristics were discussed in terms of micro pore-throat structures. Based on the above research findings, the factors influencing the development effect of extra-ultra low permeability sandstone reservoirs were analyzed. The results show that the micro pore-throat structures thoroughly determine and affect the development difficulty and development effect of such reservoirs, and that the key problem is tiny throats boosting the development difficulty when the permeability is lower than $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, while the key problem is micro-heterogeneity lowering the development effect rather than development difficulty when the permeability is higher than $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$.

Key words: reservoir; extra-ultra low permeability reservoir; pore-throat structure; stress sensitivity; threshold pressure gradient; development effect; factors analysis

低渗、特低渗、超低渗油藏有着不同于常规油气藏的显著特点^[1-3]:特殊的微观孔隙结构、复杂的流固耦合作用、较强的应力敏感性、典型的非线性渗流特征以及复杂的油水两相渗流规律等,这些特点

直接关系着油气藏的开发难度和开发效果。但是,不同物性的储层其开发效果受上述特点的影响程度也不同。笔者以恒速压汞以及低渗透物理模拟为手段,分别对储层微观孔隙结构、应力敏感性、启动压

力梯度以及两相流体渗流特征进行研究,并归纳总结不同渗透率区间的储层在开发过程中所面临的关键矛盾,给出应对策略。

1 微观孔喉结构特征

储层岩石中相互连通的孔隙和喉道是油、气、水赋存和流动的重要空间,孔喉结构特征直接影响着储层内流体的流动及分布,最终关系到油气藏的动用程度及开发效果。

当前,获取储层微观孔喉结构特征参数的各种测试手段中,恒速压汞技术尤为实用有效且有其独到之处:该技术实施过程逼近于准静态,可以同时准确地获得孔隙和喉道两方面的信息,因而对储层微观孔喉结构特征表征得更完整、更接近实际。

对采自大庆长垣西部待探明地区的23块岩心进行了恒速压汞测试。样品的孔隙度为7.03%~19.88%,渗透率为 $(0.12 \sim 12.97) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于典型的特低-超低渗透范畴。表1给出了代表性样

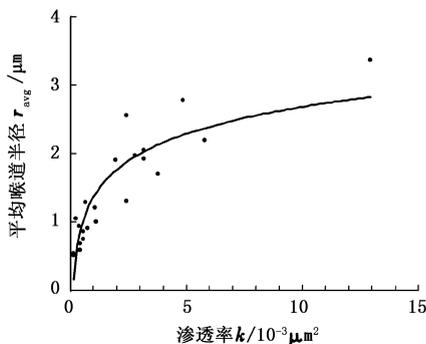


图1 特低-超低渗透砂岩样品喉道半径与渗透率的关系

Fig. 1 Relationship between throat radius and permeability of extra-ultra low permeability sandstone samples

结合表1和图1可知,整体上看,样品的平均喉道半径为 $0.511 \sim 3.358 \mu\text{m}$,平均值为 $1.456 \mu\text{m}$;平均喉道半径与渗透率呈良好的对数关系,渗透率越小,储层平均喉道半径越小。关系曲线可以分为3个区间:当渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,随着渗透率的降低,平均喉道半径急剧减小,并且样品的平均喉道半径均不足 $2 \mu\text{m}$,平均值仅为 $0.939 \mu\text{m}$,按照李道品的喉道划分方案^[2],属于微细喉道范畴,由此可见,该渗透率区间的储层,其流体的流动通道非常窄小,再加上很容易由此引起各种敏感性伤害^[4],最终导致该类储层开发难度显著增大;当渗透率大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,随着渗透率的增大,平均喉道半径亦增大,但增幅较缓,样品的平均喉道半径均大于 $2 \mu\text{m}$,平均为 $2.776 \mu\text{m}$,属中喉道范畴,该渗透率区

品的微观孔隙结构测试结果。

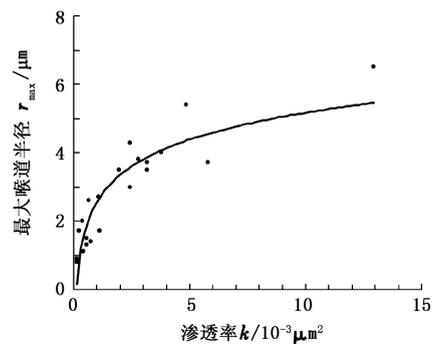
表1 典型样品的微观孔隙结构测试数据

Table 1 Microscopic pore structure test result of typical samples

样品编号	渗透率 $k/10^{-3} \mu\text{m}^2$	孔隙度 $\varphi/\%$	平均喉道半径 $r_{\text{avg}}/\mu\text{m}$	最大喉道半径 $r_{\text{max}}/\mu\text{m}$	平均孔喉比 R_{pt}	分选系数 S
138-3	0.12	12.87	0.51	0.9	368.76	0.16
147-1	0.54	13.49	0.74	1.3	179.30	0.23
306	1.09	9.99	1.21	2.7	151.04	0.69
215-2	2.78	13.68	1.97	3.8	124.68	1.00
291	4.84	14.32	2.78	5.4	122.49	1.21
263	12.97	16.70	3.36	6.5	117.04	1.54

1.1 喉道半径特征

特低-超低渗透储层的性质主要受喉道控制,喉道决定了储层流通性质,进而影响其开发效果^[3]。图1为23块样品的平均喉道半径、最大喉道半径与渗透率的关系。



间的储层,其流体的流动通道较宽,因而开发难度相应较小;渗透率为 $(2 \sim 5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时为过渡区间,相应地储层开发难度也介于两者之间。

样品的最大喉道半径与渗透率也呈良好的对数关系,并且渗透率越小,储层的最大喉道半径越小;当渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,样品的最大喉道半径均低于中喉道级别,并且最大喉道半径随渗透率的降低而急剧减小,因此流体的流通难度显著增大;而当渗透率大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,最大喉道半径随渗透率的增大而缓慢增大,属粗喉道范畴,流体流通不成问题。

1.2 孔喉半径比特征

图2为23块特低-超低渗透样品测试获得的孔喉半径比与渗透率的关系。由图2和表1可知:二

者呈现良好的对数关系;当渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,平均孔喉半径比随渗透率的降低而急剧增大,由143.07骤增至368.76,增幅近2倍;当渗透率大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,随着渗透率的增大,平均孔喉半径比虽有降低的趋势,但变化幅度很小,为112.37~151.04,平均值为129.37。从油气田开发角度讲,孔喉半径比决定了开发过程中油(气)被捕集的几率^[5]。孔喉半径比大,表明储层孔隙被细小的喉道所包围和控制,两相流动时在喉道处会产生很强的贾敏效应;在石油开采中,随着含油饱和度的不断降低,原本连续的油相被阻断成段塞或油滴是必然发生的现象,此时如果孔喉半径比很大,强贾敏效应会导致原油段塞或泡滴被捕集在喉道处,只有外界提供很大的驱替力时才能使其通过,由此造成储层的开发难度增大(但开发效果不一定差)。

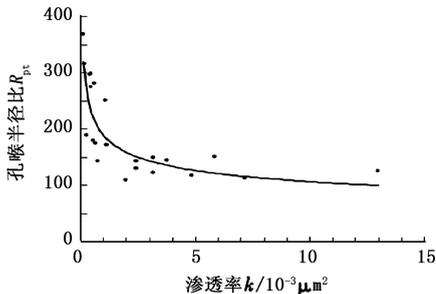


图2 特低-超低渗透砂岩样品孔喉半径比与渗透率的关系

Fig. 2 Relationship between pore-to-throat-radius ratio and permeability of extra-ultra low permeability sandstone samples

1.3 喉道分选特征

将岩样中喉道半径的标准方差定义为喉道分选系数,它是喉道分选程度的表征参数。分选系数越小,表明岩样中喉道的分选越均匀。图3为23块特低-超低渗透样品测得的喉道分选系数与渗透率的关系。

由图3看出:分选系数随着渗透率的降低而不断减小,表明样品渗透率越低,其喉道分选越均匀;当样品渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,随着渗透率的降低,喉道分选系数由0.703急剧降低至0.113,平均值仅为0.338,这说明随渗透率的降低样品喉道的均匀程度显著提高;当渗透率大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,分选系数随渗透率的增大而缓慢增大,其值分布在0.740~1.539,平均值为1.046,明显高于低渗透率区间的平均值(0.338),这说明该渗透率区间样品的喉道均匀程度明显变差,但区间内样品之间的差异不大。

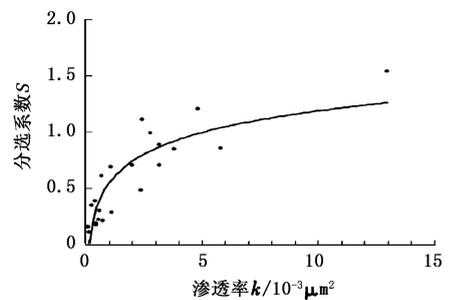


图3 特低-超低渗透砂岩样品喉道分选系数与渗透率的关系

Fig. 3 Relationship between throat separation coefficient and permeability of extra-ultra low permeability sandstone samples

2 应力敏感性特征

随应力的变化,储层渗透率发生变化的现象称为储层的应力敏感性^[6]。储层应力敏感性是影响特低-超低渗透油田开发效果的重要因素之一。对大庆长垣西部待探明地区的22块样品进行了应力敏感性测试。样品的孔隙度为10.22%~18.71%,渗透率为 $(0.15 \sim 17.02) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。试验应力以各储层原始有效应力为基准上下浮动12 MPa,以保证评价条件和评价结果能够真实地反映油藏实际生产过程中的有效应力变化^[7]。

图4为特低-超低渗透砂岩样品应力敏感性特征曲线。其中, k_i/k_0 为渗透率变化率, k_i 为不同有效应力下的渗透率, k_0 为初始有效应力下的初始渗透率。由图4(a)可以看出:①有效应力的变化对渗透率较小的样品影响更显著,相同的应力变化条件下,渗透率越小,渗透率随有效应力的变化而变化的幅度越大,趋势越明显;②渗透率损失主要发生在有效应力增加的初始阶段,随有效应力的不断增加,渗透率降低趋势越来越弱。

从图4(b)可以看出,有效应力变化引起的渗透率损失率与初始渗透率之间有良好的幂函数关系。对于渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品,渗透率损失率随初始渗透率的降低而急剧增大,其变化为10.45%~82.58%,变化幅度很大;而对于渗透率大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品,渗透率损失率差异较小,维持在7%左右,从趋势上看,随着渗透率的增大而略有降低。这说明对于渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层,其应力敏感性较强,并且其强度随渗透率的降低而急剧增大,而对于渗透率大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层,应力敏感程度较弱,并且不同渗透率储层间的差异较小。这一现象可以从微观上得到解释:恒速压

汞分析显示,渗透率越低,储层喉道半径越小,受挤压之后喉道半径损失越严重,再加上边界层的存在^[1]可能会导致压缩后的喉道不再允许流体通过,

因此在宏观上就表现为渗透率越小,应力敏感性越强。

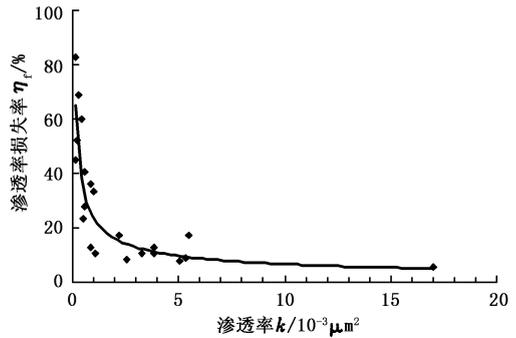
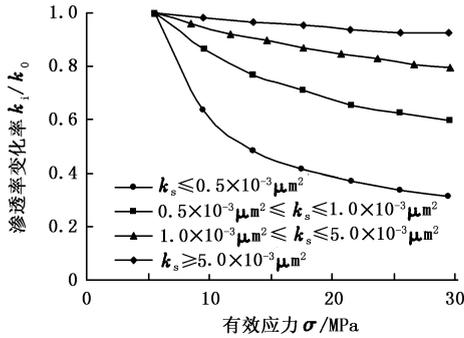


图4 特低-超低渗透砂岩样品应力敏感性特征曲线

Fig. 4 Stress sensitivity characteristics curves of extra-ultra low permeability sandstone samples

从油气田开发角度看,随着油气的不断采出,储层孔隙压力逐渐下降,岩石骨架承受的有效应力增大,导致岩石的孔隙结构随有效应力的变化而变化,从而引起油藏渗透率降低,最终影响油井产能。因而对于渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层,较强的储层应力敏感性会显著增大储层的开发难度,而对于渗透率大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层,应力敏感性对开发的影响较小。

以及较强的固液作用等特征^[1],其流体在低速流动过程中不再遵循经典的达西定律,而是表现为非线性渗流特征,其特点之一便是存在启动压力梯度。

对采自大庆长垣西部待探明地区的52块样品进行了非线性渗流测试并计算了每块样品的启动压力梯度,样品渗透率为 $(0.11 \sim 12.97) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。为了分析启动压力梯度的影响因素,又对其中的20块样品进行了恒速压汞测试,得到了各自的平均喉道半径。

3 单相流体渗流特征

特低-超低渗透油藏由于具有复杂的孔隙结构

图5为特低-超低渗透砂岩样品启动压力梯度测试结果。

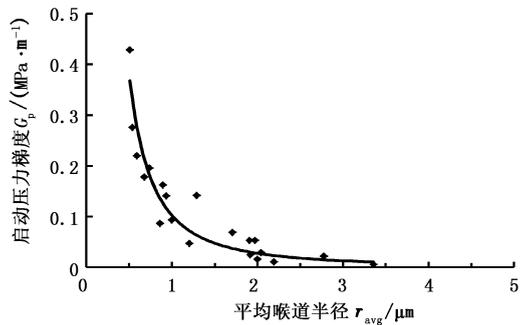
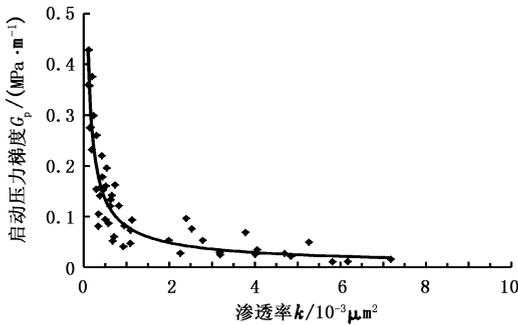


图5 特低-超低渗透砂岩样品启动压力梯度测试结果

Fig. 5 Testing results of threshold pressure gradient of extra-ultra low permeability sandstone samples

从图5看出:启动压力梯度与渗透率呈良好的幂函数关系;当渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,随渗透率的降低,启动压力梯度急剧增大,从统计结果看,其值从0.012骤增至0.148 MPa/m甚至更高,这将成为此类油藏的开发带来巨大的难度;当渗透率大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,启动压力梯度维持在一个很低的水平,平均值仅为0.006 MPa/m,从趋势上看,随渗透率的增高,启动压力梯度缓慢降低。启动压力梯度与平均喉道半径呈很好的幂函数关系,并且随着平

均喉道半径的减小,启动压力梯度不断增大,特别是当平均喉道半径小于 $1 \mu\text{m}$ 时,启动压力梯度急剧增大,这主要是因为多孔介质中的流体性质会受到界面的作用和影响,由此导致紧靠孔道壁面处形成一个边界层^[1],对于喉道而言,边界层的存在相当于缩小了喉道尺寸甚至阻塞了喉道;平均喉道半径较大的储层,大尺寸喉道比例较大,边界层对渗流通道的影响相对较小,而平均喉道半径较小的储层,由于大尺寸喉道比例很小,如果边界层阻塞了喉道,会

对渗流通道产生显著影响,启动压力梯度也会显著增大。

4 油水两相渗流特征

对采自大庆长垣西部待探明地区的16块样品进行了水驱油物理模拟试验,并对束缚水状态下的采油指数以及水驱油结束时的驱油效率进行了分析。

采油指数是衡量油井生产能力的重要指标,试验测试得到的束缚水状态下的采油指数虽无法完全模拟实际情况,但它依然可以定性评价储层动用的难易程度。图6为试验得到的束缚水状态下的采油指数与渗透率的关系曲线。由图6可以看出:整体而言,束缚水状态下的采油指数随着样品渗透率的增大而增大,二者表现为良好的指数函数关系;当渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,随渗透率的增大,采油指数虽有缓慢增大,但始终维持在一个很低的水平,表明这个渗透率级别的储层开发难度很大,欲有效开发需采取激励措施;当渗透率为 $(2 \sim 5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,采油指数随渗透率的增大而增大的速度有所加强,表明该渗透率级别的储层开发难度有所降低;当渗透率大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,采油指数随渗透率的增大而急剧增大,表明该类储层开发难度明显降低,储层易动用。

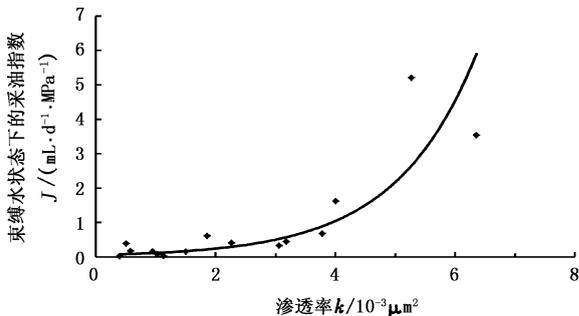


图6 特低-超低渗透砂岩样品束缚水状态下的采油指数与渗透率的关系

Fig. 6 Relationship between productivity index with bound water and permeability of extra-ultra low permeability sandstone samples

需要指出,易动用储层的开发效果不一定好于不易动用储层的。图7为砂岩样品水驱油最终状态时的驱油效率分布曲线。从图7所示的驱油效率与渗透率的关系来看,在特低-超低渗透范畴,随着渗透率的降低,驱油效率有增大的趋势,特别是当渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,驱油效率增长的趋势变得更明显,这说明如果能够采取措施使得难以动用的储层得到有效动用,其开发效果可能会比渗透率较高

的储层更好。因为渗透率越低,喉道分选系数越低,即喉道分选越均匀,喉道之间的尺寸差异越小,因而流体流经各喉道时的黏滞阻力差异越小。注水开发油田时出现“大孔道中的油水界面移动速度较快而先到达出口,致使小孔道中的原油残留”这一现象的几率降低,水驱油过程近似于活塞式,因此驱油效率会较高,开发效果较好。驱油效率与喉道分选系数之间存在很好的负相关,即喉道分选越均匀,样品驱油效率越高,陈杰^[8]也得到了类似的结论。

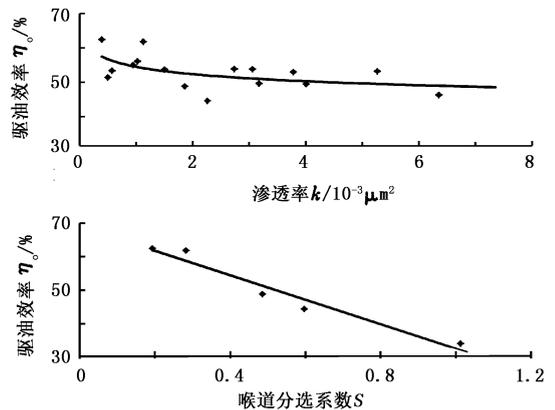


图7 特低-超低渗透砂岩样品水驱油最终状态时的驱油效率

Fig. 7 Sweep efficiency at final state of water flooding for extra-ultra low permeability sandstone samples

5 储层有效开发的关键

综上分析可知:渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层,随着渗透率的降低,喉道半径急剧减小,孔喉半径比迅速增大,相应地,储层的应力敏感性显著加强,启动压力梯度明显增大,束缚水状态下的采油指数维持在一个非常低的水平,表明此类储层开发难度很大,但其喉道分选程度显著改善,导致其驱油效率较高,说明此类储层一旦得到有效动用,其开发效果会较好;而对于渗透率大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层,喉道半径普遍较大,多处于中、粗喉道级别,孔喉半径比很小,储层应力敏感程度较弱,启动压力梯度值较低,束缚水状态下的采油指数随渗透率的增大而骤增,表明该类储层较容易动用,开发难度不大,但其喉道分选程度明显变差,由此导致其驱油效率呈降低趋势,说明该类储层虽容易动用,但开发效果不一定好。

微观孔隙结构是决定和影响特低-超低渗透油藏开发难度和开发效果的根本性因素。对于渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层,开发面临的核心矛盾是

“动起来”,是如何面对开发难度层面上的问题,采取激励措施建立有效的驱动压力体系以使储层得到动用是关注重点;而对于渗透率大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层,“动起来”较容易,其开发面临的核心矛盾是“微观非均质性”,是改善开发效果层面的问题。

6 结论与建议

(1) 微观孔隙结构是决定和影响特低-超低渗透油藏开发难度和开发效果的根本性因素。

(2) 对于渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层,孔喉微细,储层动用难是开发面临的最核心的矛盾,储层一旦得到有效动用,其开发效果会比较好。为解决动用难的问题,可以根据油田实际情况采取适当的激励措施:压裂或酸化投产可有效改善油气渗流通道;超前/同步注水可保证充足的地层能量以避免因地层压力下降造成储层物性变差;井网的合理部署与优化是建立有效的驱动压力体系的核心;低界面张力驱替剂可大幅减弱油水界面张力,降低注水难度。

(3) 对于渗透率大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层,建立起有效的驱动压力体系较为容易,因此动用不成问题,开发此类储层面临的最关键的矛盾是微观非均质性降低了储层的开发效果。微观非均质性是储层的固有属性,改善起来相对困难,但可以从如何适应储层微观非均质性的角度去解决问题,在综合考虑储层的润湿性、微观非均质性成因等因素的基础上,应制定合理的注水制度或采用注气(如 CO_2 等)驱油技术。

参考文献:

- [1] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京:石油工业出版社,1998.
- [2] 李道品. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京:石油工业出版社,1997:47-48.
- [3] 杨正明,张英芝,郝明强,等. 低渗透油田储层综合评

价方法[J]. 石油学报,2006,27(2):64-67.

YANG Zheng-ming, ZHANG Ying-zhi, HAO Ming-qiang, et al. Comprehensive evaluation of reservoir in low-permeability oilfields [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006,27(2):64-67.

- [4] 王瑞飞,沈平平,宋子齐,等. 特低渗透砂岩油藏储层微观孔喉特征[J]. 石油学报,2009,30(4):560-563.
WANG Rui-fei, SHEN Ping-ping, SONG Zi-qi, et al. Characteristics of micro-pore throat in ultra-low permeability sandstone reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009,30(4):560-563.
- [5] 高辉,解伟,杨建鹏,等. 基于恒速压汞技术的特低-超低渗透砂岩储层微观孔喉特征[J]. 石油实验地质,2011,33(2):206-211.
GAO Hui, XIE Wei, YANG Jian-peng, et al. Pore throat characteristics of extra-ultra low permeability sandstone reservoir based on constant-rate mercury penetration technique[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011,33(2):206-211.
- [6] 阮敏,王连刚. 低渗透油田开发与压敏效应[J]. 石油学报,2002,23(3):73-76.
RUAN Min, WANG Lian-gang. Low-permeability oilfield development and pressure-sensitive effect [J]. Acta Petrolei Sinica, 2002,23(3):73-76.
- [7] 王学武. 大庆外围特低渗透储层微观孔隙结构及渗流机理研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2010.
WANG Xue-wu. Study on micro pore structure and seepage flow in ultra-low permeability of Daqing Oilfield[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [8] 陈杰,周鼎武. 鄂尔多斯盆地合水地区长8储层微观非均质性的试验分析[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(4):13-18.
CHEN Jie, ZHOU Ding-wu. Experimental analysis on micro-anisotropy of Chang 8 reservoir in Heshui area, Ordos Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010,34(4):13-18.

(编辑 李志芬)