

低渗透砂砾岩油藏储层分类方法

姜瑞忠¹, 乔杰¹, 孙辉², 傅建斌³, 彭国强¹, 乔欣⁴

(1.中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266580; 2.中国石油大学(华东)计算机与通信工程学院, 山东 青岛 266580; 3.中国石化青岛安全工程研究院, 山东 青岛 266000; 4.中国石油北京油气调控中心, 北京 100000)

摘要:针对目前低渗透储层分类研究中存在分类方法较多且不统一、实用性差等诸多不完善问题,以新疆某低渗透区块为例,首先对分类参数进行筛选,再结合实际储层分类参数分布情况,有针对性地给出该区块储层初步分类界限,最后利用油藏数值模拟技术,对储层分类参数进行表征及综合分析,判断各参数对产能的影响强度,影响强度由大到小依次为启动压力梯度、渗透率、压敏因子、有效孔隙度、原油粘度、可动流体百分数、主流喉道半径和粘土矿物含量。通过根据影响强度对每个参数赋予权重,构建储层综合分类系数,提出八元综合分类法,利用该方法绘制目标区块实际单井产能分布散点图,发现计算得到的储层综合分类系数与区块单井产能分布呈现很好的一致性,说明所建分类方法的准确性;最后,根据现场对目标区块油井产能的分类,利用八元综合分类法将储层按照产能高低分为4类。

关键词:低渗透砂砾岩油藏 参数筛选 权重分析 八元综合分类法 储层分类

中图分类号:TE348

文献标识码:A

Reservoir classification method for low-permeability glutenite reservoirs

JIANG Ruizhong¹, QIAO Jie¹, SUN Hui², FU Jianbin³, PENG Guoqiang¹, QIAO Xin⁴

(1.School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China; 2.College of Computer & Communication Engineering, China University of Petroleum(East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China; 3.SINOPEC Research Institute of Safety Engineering, Qingdao City, Shandong Province, 266000, China; 4.Beijing Oil and Gas Control Center, CNPC, Beijing City, 100000, China)

Abstract: According to the current imperfections in the study of low-permeability reservoir classification, a low-permeability block in Xinjiang was selected as an example. Firstly, the classification parameters were selected. Secondly, combined with the distribution of the actual reservoir classification parameters, preliminary reservoir classification boundary of this block was given. Finally, the reservoir classification parameters were characterized and analyzed comprehensively by the reservoir numerical simulation technique, and the influence degree of each parameter on the productivity was evaluated, which are in the descending order as follows: threshold pressure gradient, permeability, pressure sensitivity factor, effective porosity, oil viscosity, movable fluid percentage, mainstream throat radius and clay mineral content in ascending. By assigning weights to each parameter according to the influence intensity, the reservoir comprehensive classification coefficient was constructed, an eight-element comprehensive classification method was proposed. This method was applied to draw the scatter diagram of actual single-well production distribution in the target block. It is found that the reservoir comprehensive classification coefficient is consistent with the single well production of the block, and the accuracy of the method has been proved. Finally, according to the on-site classification criteria for the target block based on oil production capacity, the reservoirs were divided into 4 types based on the level of productivity using this method.

收稿日期:2017-09-04。

作者简介:姜瑞忠(1964—),男,江苏溧阳人,教授,博导,从事油气田开发方面的研究与教学工作。联系电话:18678967281, E-mail:jrzhang@126.com。

基金项目:国家自然科学基金项目“页岩气藏多级压裂水平井流动特征及产能评价方法研究”(51374227)。

Key words: low-permeability glutenite reservoirs; parameter selection; weight analysis; eight-element comprehensive classification method; reservoir classification

低渗透油藏储量约占中国探明未动用石油地质储量的50%以上,尤其是近几年其储量约占探明石油地质储量的2/3以上^[1-3]。因此,能否有效地开发低渗透油气资源,将影响中国石油工业的持续发展。

中高渗透储层内部的流体渗流为达西线性渗流,产能与地质流体参数以及人为控制参数之间具有明确的约束关系,目前利用渗透率和含油丰度等参数分类可以很好地表征开发方式、井网井距和开发效果,但低渗透储层受到液固界面的严重影响,流体渗流属于具有启动压力梯度的非达西渗流,由于孔隙结构和粘土矿物组成不同,同样的地质流体参数呈现完全不同的渗流规律,因此,迫切需要确定能够反映低渗透储层特有开发机理的评价参数,建立新的储层分类方法。

目前低渗透储层分类研究主要存在以下问题:①分类方法较多且不统一,实用性差。②储层分类参数不一致,各有优劣。③储层分类参数的相关性研究较少而且不明确。④储层分类参数多倾向于微观的实验参数,以渗流参数为主的研究成果较少。⑤储层分类参数的系统表征方法研究成果较少。⑥储层分类结果并没有系统地与开发规律相结合^[4-5]。为此,笔者基于新疆某低渗透区块实际资料,结合现有的储层分类方法及参数进行系统研究,筛选得到储层分类参数,确定了储层分类参数表征方法,结合油藏数值模拟技术,通过多因素分析,定量评价了储层分类参数对开发指标的影响,以期为类似低渗透油藏的精细、高效开发提供参考和依据。

1 储层分类参数的初步筛选

根据现阶段储层分类相关研究成果^[6-12],储层分类参数大体包括孔隙结构参数、流体及渗流特征参数、敏感性参数和工艺相关参数4类。在有针对性地考虑目标区块地质与流体特征的基础上,兼顾启动压力梯度和可动流体饱和度等低渗透砂砾岩油藏的特殊属性,初步筛选得到最大喉道半径、主流喉道半径、喉道均质系数、可动流体百分数、启动压力梯度、原油粘度、地层压力系数、粘土矿物含量、伊/蒙混层含量、压敏因子和脆性指数等11个分类参数(表1)。

表1 低渗透砂砾岩油藏储层初步确定的分类参数
Table1 Preliminary determination of classification parameters of low-permeability glutenite reservoir

分类参数	参数名称	物理意义
孔隙结构参数	最大喉道半径	反映排驱压力
	主流喉道半径	主要影响渗流作用
	喉道均质系数	反映喉道均一程度
	可动流体百分数	体现流体流动有效空间
流体及渗流特征参数	启动压力梯度	体现渗流非线性程度和流动能力
	原油粘度	反映流体性质
	地层压力系数	影响产能及能量供给难易程度
敏感性参数	粘土矿物含量	较大程度影响储层有效渗流能力
	伊/蒙混层含量	影响储层水敏特性的参数
	压敏因子	表征储渗特性对压力的敏感性
工艺相关参数	脆性指数	体现人工储层改造能力

2 储层分类参数的确定及初步分类

以恒速压汞、核磁共振和渗流实验等物理实验为基础,通过深入研究不同低渗透油藏的孔隙结构、固液作用和渗流特征变化规律及其相关性,发现表1中的4类参数之间存在一定层次上相互作用,为了使分类方法更为实用,避免因缺乏单一参数而无法准确分类的情况,选取每类参数中的1个或2个进行分类方法研究。另外,因目标区块缺乏储层改造方面的相关研究或措施,故不考虑脆性相关参数对储层分类带来的影响。结合杨正明等的研究成果^[13],确定低渗透砂砾岩油藏渗流能力和开发潜力初步分类评价参数界限。

目标区块各相关参数的主要分布范围包括:主流喉道半径为1.13~3.72 μm,可动流体饱和度为20.50%~77.43%,启动压力梯度为0.05~0.54 MPa/m,地层原油粘度为0.31~5 mPa·s,渗透率为0.03~10 mD,有效孔隙度为24.00%~15.30%,粘土矿物含量为3%~8%,压敏因子为0.056~0.177 MPa⁻¹。

根据评价储层参数应该覆盖主要分布范围的原则,结合中外针对低渗透储层分类研究现状,将目标区块储层分为4类(表2)。其中I类储层具有最优的储渗特征,布置在该类储层上的井,一般会取得较好的开发效果;而IV类储层为目标区块中最差的储层,内部流体很难发生渗流,基本不具有开发价值。

表2 目标区块储层分类参数初步分类结果
Table2 Preliminary classification result of reservoir classification parameters in target block

主流储层类型	可动喉道半径/ μm	启动流体百分数/ %	启动压力梯度/ (MPa·m ⁻¹)	粘土矿物含量/ %	地层原油粘度/ (mPa·s)	渗透率/ mD	有效孔隙度/ %	压敏因子/ MPa ⁻¹
I类	4~6	>65	<0.01	<5	<2	>0.3	>12	<0.01
II类	2~4	50~65	0.01~0.1	5~10	2~5	0.2~0.3	10~12	0.01~0.1
III类	1~2	35~50	0.1~0.5	10~15	5~8	0.1~0.2	8~10	0.1~0.2
IV类	<1	20~35	>0.5	>15	>8	<0.1	<8	>0.2

表3 储层分类参数影响强度正交实验方案设计
Table3 Design of orthogonal experimental scheme for evaluating the influence of reservoir classification parameters

方案编号	主流喉道半径/ μm	可动流体百分数/ %	启动压力梯度/ (MPa·m ⁻¹)	粘土矿物含量/ %	地层原油粘度/ (mPa·s)	渗透率/ mD	有效孔隙度/ %	压敏因子/ MPa ⁻¹
1	6.00	65.00	0.01	5.0	2.0	4.60	19.63	0.010 0
2	4.75	53.75	0.13	7.5	3.5	3.46	15.08	0.057 5
3	3.50	42.50	0.26	10.0	5.0	2.31	10.53	0.105 0
4	2.25	31.25	0.38	12.5	6.5	1.17	5.98	0.152 5
5	1.00	20.00	0.50	15.0	8.0	0.01	1.43	0.200 0

3 储层分类方法的建立

3.1 储层分类参数表征方法

ECLISPE油藏数值模拟软件通过相对渗透率曲线中的毛管压力、渗透率、残余油饱和度和油相指数来表征主流喉道半径,通过渗透率和残余油饱和度表征可动流体百分数,通过设置每个网格的阈值来表征储层内部的启动压力梯度,通过残余油饱和度表征粘土矿物含量,通过表征岩石属性的ROCK-TAB关键字对压敏因子进行表征,原油粘度、渗透率、孔隙度等其余参数则可直接设定。据此,储层分类参数的表征方法和选取原则为:①原油粘度、渗透率、孔隙度、压敏因子和启动压力梯度必须给予直观和准确的表征。②因粘土矿物含量与残余油饱和度的相关性较好,且物理意义更清晰,故利用残余油饱和度表征粘土矿物含量。③确定粘土矿物含量表征方法后,利用毛管压力和油相指数表征主流喉道半径。④与可动流体百分数相关程度最高的是驱油效率,而驱油效率又可直接体现在相对渗透率曲线的参数设置上,所以可用水相端点值及水相指数来表征可动流体百分数。

3.2 储层分类参数影响强度

为了分析各参数的影响强度,设计5组正交实验(表3),以累积产油量作为实验结果,计算得到储层分类参数对储层产能的影响强度。结果表明,启动压力梯度、渗透率、压敏因子、有效孔隙度、原油粘度、可动流体百分数、主流喉道半径和粘土矿物含量的影响强度分别为-7.757 6, 2.340, -2.005, 1.025, -1.006, 0.941, 0.936和-0.821。由影响强度的绝对值可以看出,各参数影响强度由大到小依次为启动压力梯度、渗透率、压敏因子、有效孔隙度、原油粘度、可动流体百分数、主流喉道半径和粘土矿物含量。

3.3 储层分类方法

根据各参数影响强度的正负性可以看出,主流喉道半径、可动流体百分数、有效孔隙度和渗透率与区块开发效果呈正相关关系,而启动压力梯度、压敏因子、原油粘度和粘土矿物含量与开发效果呈负相关关系。根据正交设计方案,每个参数的影响水平不同,根据影响强度对每个参数赋予权重。据此,建立的八元综合分类法的计算式为

$$F_{eci} = \ln \frac{S_o^* \frac{S_o}{S_{o\min}} \times r_m^* \frac{r_m}{r_{m\min}} \times K^* \frac{K}{K_{\min}} \times \phi^* \frac{\phi}{\phi_{\min}}}{\lambda^* \frac{\lambda}{\lambda_{\min}} \times m^* \frac{m}{m_{\min}} \times \mu_o^* \frac{\mu_o}{\mu_{o\min}} \times \alpha_k^* \frac{\alpha_k}{\alpha_{k\min}}} \quad (1)$$

式中: F_{eci} 为储层综合分类系数; S_o^* , r_m^* , K^* , ϕ^* , λ^* , m^* , μ_o^* 和 α_k^* 分别为对应参数的权重,即影响强度的绝对值; S_o 为可动流体饱和度,%; r_m 为主流喉道半径,μm; K 为渗透率,mD; ϕ 为有效孔隙度,%; λ 为启动压力梯度,MPa/m; m 为粘土矿物含量,%; μ_o 为地层原油粘度,mPa·s; α_k 为压敏因子。

以新疆某低渗透区块为例,统计每一口生产并有效半径内的储层分类参数值,然后根据式(1),计算得到储层综合分类系数。由储层综合分类系数与目标区块油井产能的关系(图1)可知,计算得到的储层综合分类系数与目标区块单井产能分布呈现很好的一致性,这也从一定程度上说明所建分类方法的准确性。依据现场对目标区块油井产能的分类,将该储层划分为4类:一类储层,储层综合分类系数大于8,储层单井产能大于40 m³/d,可有效开发;二类储层,储层综合分类系数为5~8,储层单井产能为20~40 m³/d,开发难度较大;三类储层,储层综合分类系数为2~5,储层单井产能为10~20 m³/d,储层开发难度大,需采取相关增产措施进行开发;四类储层,储层综合分类系数小于2,储层单井产能小于10 m³/d,不能进行经济有效开发。

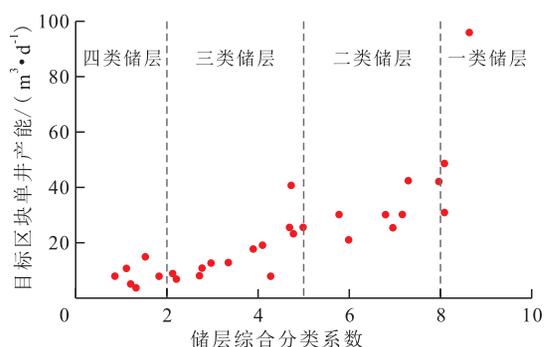


图1 储层综合分类系数与目标区块单井产能的关系

Fig.1 Relationship between the comprehensive classification coefficient of reservoir and the single well productivity of the target block

4 结论

通过对低渗透砂砾岩油藏储层分类方法的研究,确定了新的储层分类参数,并对储层进行了初步分类;利用油藏数值模拟技术,对得到的储层分类参数进行表征和综合分析,判断各参数对产能的影响强度,提出储层综合分类系数评价指标并构建了低渗透油藏八元综合分类法。以新疆某低渗透区块为例,发现储层综合分类系数与生产井单井产能分布之间呈现很好的一致性,说明所建分类方法准确性,并根据目标区块油井实际产能分类情况,确定目标区块每类储层的分类标准。

参考文献:

- [1] 李玉丹,董平川,张荷,等.低渗透油藏渗透率及启动压力梯度应力敏感性分析[J].油气地质与采收率,2016,23(6):57-63.
LI Yudan, DONG Pingchuan, ZHANG He, et al. Stress sensitivity analysis of permeability and threshold pressure gradient in low-permeability reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(6): 57-63.
- [2] 汤连东,陈小凡,孙兆鑫,等.考虑应力敏感的低渗透底水油藏见水时间预测[J].大庆石油地质与开发,2017,36(3):60-63.
TANG Liandong, CHEN Xiaofan, SUN Zhaoxin, et al. Prediction of the water breakthrough time for the low-permeability oil reservoir considering the stress sensitivity [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(3): 60-63.
- [3] 计秉玉,赵宇,宋考平,等.低渗透油藏渗流物理特征的几点新认识[J].石油实验地质,2015,37(2):129-133.
JI Bingyu, ZHAO Yu, SONG Kaoping, et al. New insights into the physical percolation features of low-permeability reservoirs [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 129-133.
- [4] 束青林,郭迎春,孙志刚,等.特低渗透油藏渗流机理研究及应用[J].油气地质与采收率,2016,23(5):58-64.
SHU Qinglin, GUO Yingchun, SUN Zhigang, et al. Research and application of percolation mechanism in extra-low permeability

- oil reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(5): 58-64.
- [5] 杨秋莲,李爱琴,孙燕妮,等.超低渗储层分类方法探讨[J].岩性油气藏,2007,19(4):51-56.
YANG Qiulian, LI Aiqin, SUN Yanni, et al. Classification method for extra-low permeability reservoirs [J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(4): 51-56.
- [6] 张立强,纪友亮.羌塘盆地侏罗系低渗透砂岩储层成因分类及有利储层预测[J].石油大学学报:自然科学版,2001,25(5):6-10.
ZHANG Liqiang, JI Youliang. Genesis types of low-permeability Jurassic sandstone reservoirs and prediction of favorable reservoirs in Qiangtang basin [J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2001, 25(5): 6-10.
- [7] 彭寿昌,许长福,张强,等.低渗透砾岩油藏含油饱和度解释及水淹层评价[J].特种油气藏,2015,22(6):108-110.
PENG Shouchang, XU Changfu, ZHANG Qiang, et al. Oil saturation interpretation and watered-out zone evaluation of low permeability conglomerate reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(6): 108-110.
- [8] 刘向军.高速通道压裂工艺在低渗透油藏的应用[J].油气地质与采收率,2015,22(2):122-126.
LIU Xiangjun. Application of Hiway technology in the low permeability reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(2): 122-126.
- [9] 代金友,谢建慧,李子龙,等.苏里格气田东区储层分类评价[J].石油地质与工程,2017,31(2):57-60.
DAI Jinyou, XIE Jianhui, LI Zilong, et al. Reservoir classification and evaluation of He8 and Shan1 members in the east of Sulige gasfield [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2017, 31(2): 57-60.
- [10] 郭迎春.低渗透油藏高含水期技术极限井距计算方法[J].油气地质与采收率,2015,22(2):88-92.
GUO Yingchun. A calculation method of technical limited well spacing in the low permeability reservoir at high water cut stage [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(2): 88-92.
- [11] 张仲宏,杨正明,刘先贵,等.低渗透油藏储层分级评价方法及应用[J].石油学报,2012,33(3):437-441.
ZHANG Zhonghong, YANG Zhengming, LIU Xiangui, et al. A grading evaluation method for low-permeability reservoirs and its application [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 437-441.
- [12] 姜艳娇,孙建孟,高建申,等.X区块低孔渗气藏储层特征及分类评价研究[J].科学技术与工程,2017,17(10):164-172.
JIANG Yanjiao, SUN Jianmeng, GAO Jianshen, et al. Studies on reservoir characteristics and classification evaluation in low porosity and low permeability gas reservoir of X Block [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(10): 164-172.
- [13] 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 Zhengming, ZHANG Yingzhi, HAO Mingqiang, et al. Comprehensive evaluation of reservoir in low-permeability oilfields [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(2): 64-67.