

基于流动单元分类的非均质砂岩储集层渗透率预测

宋宁^{1,2}, 刘振¹, 张剑风³, 杨帅帅¹, 郭海莹¹

1. 常州大学石油工程学院, 江苏常州 213016
2. 中国华电工程(集团)有限公司油气分公司, 北京 100035
3. 大庆油田有限责任公司第九采油厂, 黑龙江大庆 163853

摘要 综合岩心分析测试和测井资料,对松辽盆地新站油田 D404 区块葡萄花油层进行流动单元划分,建立中低孔、中低渗非均质砂岩的渗透率预测模型。首先,将葡萄花油层划分为 4 个特征明显的流动单元,分类后的孔隙度与渗透率关系明显改善;其次,筛选最能表征储集层储集性能的补偿密度、深感应电阻率和中感应电阻率为变量,建立了流动单元指数(FZI)的测井响应多元回归方程,为应用测井曲线划分流动单元奠定基础;第三,应用与孔隙度关系最密切的补偿密度测井预测孔隙度;最后,应用基于流动单元分类的孔隙度与渗透率关系,预测非均质储集层渗透率,精度明显提高。研究结果为中低孔中低渗砂岩储集层解决非均质问题提供有效途径。

关键词 非均质储集层;流动单元指数;渗透率预测;储集层分类

中图分类号 TE122

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.02.009

Permeability Prediction of Heterogeneous Sand Reservoir Based on Flow Units Classification

SONG Ning^{1,2}, LIU Zhen¹, ZHANG Jianfeng³, YANG Shuaishuai¹, GUO Haiying¹

1. School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, Jiangsu Province, China
2. Oil and Gas Company, China Huadian Engineering (Group) Co. Ltd., Beijing 100035, China
3. No. 9 Oil Production Company, Daqing Oilfield Company, Ltd., Daqing 163853, Heilongjiang Province, China

Abstract Putaohua sand reservoir with medium-low porosity and medium-low permeability is heterogeneity in nature at D404 block of Xinzhan oilfield, Songliao Basin. By integrating core test with petrophysics logs data to classify flow units and to built the accurate permeability prediction model for identifying oil and water formation and interpreting the degree of water flooded layers. Putaohua reservoir would be divided into four distinct sub flow units on the principles of the flow unit classification, therefore the relationship between porosity and permeability is significantly improved, and different flow units are identified based on core data and wire-logging. The multiple-statistic equation of the Flow Zone Indicator (FZI) is built up by screening compensation density log, deep induction resistivity log, and middle induction resistivity log which are able to best characterize the accumulation property of reservoir, and an identification model of flow unit is obtained. The porosity permeability models of each flow unit are established by using core analysis data, which obtain effective result in Putaohua reservoir of D404 Block, and permeability prediction accuracy is improved. The workflow methodology could be used in other sandstone formation.

Keywords heterogeneous reservoirs; flow zone indicator; permeability prediction; reservoir classification

0 引言

渗透率是储集层物性评价的重要参数之一,可以通过测

井、岩心分析、地层测试等获得^[1-4]。常规测井解释通常忽视砂岩组或单砂体内部不同流动单元渗透率的差异,对于非均质

收稿日期: 2012-11-05;修回日期: 2012-12-21

基金项目: 常州大学引进人才基金项目

作者简介: 宋宁,高级工程师,研究方向为油气田地质,电子邮箱: songn@sohu.com

严重的储集层^[4-6],建立的孔隙度-渗透率关系很难达到理想的精度^[6-8]。为了提高渗透率的解释精度,很多学者尝试了不同的模型及计算方法^[2-9]。如 Jennings 和 Lucia 等基于岩石构系数提出了广义渗透率模型, Bryant 等通过地质模型预测渗透率, Mathisen 等借助于测井相应用数学统计方法计算渗透率^[9]。目前普遍采用的是基于 Kozeny-Carman 方程及其变形形式^[4-16],或是根据测井参数与渗透率的相关关系建立不同的模型^[2],进行储集层流动单元划分和渗透率计算。

松辽盆地新站油田葡萄花油层,储集层非均质性强、碎屑物颗粒粒级较低、成分和结构成熟度较低。经过多年开发,油水关系复杂、水淹层识别难、剩余油分布规律差,剩余油分布与储集层渗透率密切^[10,11]。为了准确识别有油层,有必要建立更为精细的储集层渗透率预测模型。本文在对储集层特征和渗透率影响因素的综合分析基础上,应用流动单元指数对储集层进行分类,并进行不同流动单元的渗透率预测,取得了较好的效果。为油田的开发调整提供了科学依据,对非均质性储集层渗透率的预测提供了借鉴。

1 砂岩储集层特征

新站油田位于松辽盆地北部中央凹陷龙虎泡阶地南部,为大安鼻状构造向北东倾没及延伸部分。D404 区块构造位于鼻状构造的轴部,主要产层葡萄花油层,属于白垩纪姚家组一段。葡萄花油层主要为三角洲前缘砂泥薄互层沉积,发育水下分流河道砂、席状砂、砂坝等微相。微相平面变化快,储集层厚度变化大,砂岩单层厚度 1.0~3.0m,累积厚度 6.0~12.0m。

葡萄花油层的碎屑物颗粒粒级、成分和结构成熟度均较低。储集层岩性多以灰色粉砂岩和泥质粉砂岩为主,粉砂级碎屑物颗粒含量 80%~95%。岩石类型主要为长石岩屑砂岩,石英含量 20%~24%,长石含量 29%~35%,岩屑含量 35%~40%。岩石碎屑物颗粒排列紧密,孔隙发育较差,长石颗粒定向排列,石英次生加大,泥质具重结晶,方解石呈零星或嵌晶状结构。岩石颗粒分选差,分选系数平均 5.96,粒度中值平均 0.052mm,泥质含量平均 23.1%。

葡萄花油层为中低孔中低渗储集层,非均质性强。孔隙度分布在 12%~26%之间,平均为 16.4%,渗透率分布范围在 $(0.06\sim 250)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间,平均为 $3.45\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。该区孔隙度、渗透率与黏土含量、粒度中值关系密切,与碳酸盐岩含量关系不明显;孔隙度、渗透率与黏土含量负相关,与粒度中值正相关。由于储集层的渗透率差异较大,油水分布复杂,油水层识别和水淹层解释困难,严重制约该区的油藏评价与滚动开发。为了精确描述渗透率分布,把储集层进一步细分为具有相似或相同流动单元。

2 储集层分类和渗透率预测

葡萄花油层非均质性强。同一孔隙度下的渗透率级差

大,岩心样品的孔渗关系较为离散,传统方法建立的渗透率模型,无法满足油水层及水淹层解释的需要。为了提高渗透率的解释精度,以流动单元分类和传统的孔渗关系为基础,分别建立渗透率模型。

2.1 岩心流动单元储集层分类

储集层分类评价是解决非均质性的最有效途径。为了突出表征储集层之间的差异,国内外学者普遍应用“流动单元”的概念实现储集层分类评价^[6-16]。同一流动单元具有相似的岩石物理特征和流体渗流能力^[2-16],其水淹层及剩余油分布特征一般也具有相似性^[14],不同流动单元间有较大差别。

储集层岩石物理相是流动单元划分的最基础岩石单元。同类岩石物理相储集层具有相似的成因和特征,孔隙度类型、结构及其孔渗关系趋于一致,岩电关系和测井响应趋于吻合。分类分析储集层参数与测井响应参数的相关性明显提高^[2,6,7]。岩石物理相表征参数主要包括:(1)反映储集层岩石相的泥质含量和粒度中值;(2)反映储集层物性的孔隙度和渗透率;(3)反映储集层微观结构的流动单元指数^[14-16]。

流动单元指数是把岩石矿物地质特征、孔喉特征结合起来综合判定孔隙几何特征参数,可较好地描述储集层储集特征、渗流特征和非均质特征^[1-16]。根据 Kozeny-Carman 方程变化^[14-16],其数学表达式为

$$FZI=(1-\Phi)/\Phi\cdot(K/\Phi)^{1/2} \quad (1)$$

其中, FZI 为流动单元指数, μm ; Φ 为孔隙度, %; K 为渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

研究过程中,首先根据取心井的岩心物性资料,利用式(1)计算样本点的流动单元指数;然后应用概率图法实现储集层分类。同类储集层的流动单元指数为正态分布,在正态概率坐标系中应为一一直线;而不同流动单元具有不同的概率分布,在正态概率坐标系中表现为具有不同斜率的直线(图1)。不同斜率直线的条数即为流动单元类型的数目,线段的端点或交叉所对应的值即为流动单元的分界点。

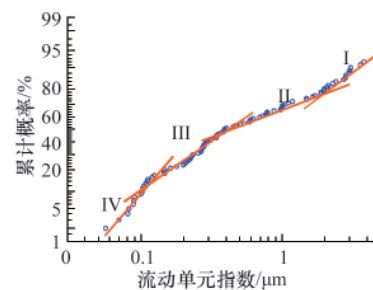


图1 流动单元指数概率分布和储集层分类
Fig. 1 Probability distribution of flow unit index and reservoir classification

选用葡萄花油层岩心物性分析资料中 91 件有效样本,计算的流动单元指数范围为 0.06~3.79 μm 。结合岩心分析、测井等资料,根据流动单元指数,将储集层按照物性好差依次

划分为 I、II、III 和 IV 4 类, 流动单元指数划分的流动单元区
间见图 1 和表 1。4 类储集层的流动单元指数范围依次减小,
孔隙度和渗透率的平均值依次减小, 泥质含量依次增加。储

集层分类后的孔隙度与渗透率之间的相关性明显改善 (图
2)。不同流动单元之间的岩性和物性参数差异明显, 而同一
类型流动单元内部的各种属性则具有较好的匹配关系。

表 1 流动单元特征参数

Table 1 Characteristic parameters of flow units

流动类型	流动单元指数/ μm	孔隙度(均值)/%	渗透率(均值)/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	泥质含量(均值)/%	岩石类型	样品数
I	3.79~2.00	17.3~24.6(21.0)	65.6~252.31(123.81)	17.7~21.4(19.0)	粉砂-细砂岩	13
II	2.00~0.40	15.1~25.9(20.5)	1.53~112.38(23.12)	11.9~31.2(18.8)	粉砂岩	29
III	0.40~0.15	12.2~22.4(17.1)	0.08~1.86(0.67)	12.1~44.2(24.9)	泥质粉砂岩	33
IV	0.15~0.06	13.4~18.5(15.6)	0.03~0.13(0.05)	14.8~31.2(25.2)	含泥粉砂岩	16

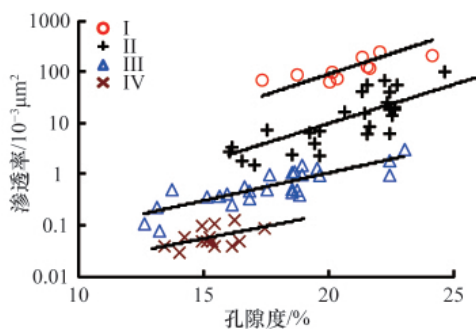


图 2 流动单元分类后的孔渗关系

Fig. 2 Relationship between porosity and permeability after flow unit classification

2.2 流动单元指数测井计算

在取心井段可直接用岩心分析资料计算流动单元指数进行储集层分类, 而对于未取心井和未取心井段, 只能通过测井数据建立储集层流动单元指数与测井响应之间的定量关系, 先计算出流动单元指数, 再进行储集层分类。

建立储集层流动单元指数与测井响应的函数关系。首先对测井响应进行敏感性分析, 通过对流动单元指数与测井响应的相关分析, 筛选出对流动单元指数反映灵敏的测井响应; 然后用最优测井参数建立与流动单元指数之间的函数模型^[9]。对取心井葡萄油层的多项测井参数与流动单元指数进行相关性分析, 其中补偿密度、中感应电阻率、深感应电阻率、声波时差、自然伽马与流动单元指数均具有较好的相关性。通过对测井响应的敏感性分析和多元回归统计分析, 筛选补偿密度 DEN 、反映地层特征的深感应电阻率 $RILD$ 、反映侵入带特征的中感应电阻率 $RILM$ 为变量, 建立的流动单元指数 FZI 多参数拟合方程为

$$FZI = 5.69565 - 2.45835DEN - 0.12454RILD + 0.22100RILM \quad (2)$$

该方程具有较高的相关系数, $R^2=0.7246$ 。另外, 应用式 (2) 的计算流动单元指数与岩心分析计算流动单元指数具有很好的对比性。

2.3 孔隙度测井计算

葡萄油层孔隙度测井系列中的补偿密度、中子孔隙度、声波时差与岩心分析孔隙度之间具较好的相关性, 其中补偿密度与岩心分析孔隙度关系最为密切, 拟合方程为

$$\Phi = -46.503DEN + 128 \quad R^2 = 0.7852 \quad (3)$$

2.4 流动单元渗透率预测

在岩心样品流动单元指数分类的基础上 (图 2), 按照不同类的储集层分别建立孔渗关系, 其相关性得到了明显的改善, 具体关系式为

$$\text{I 类 (FZI 为 } 3.79 \sim 2.0) : K = 0.0952e^{0.3434\Phi}, R^2 = 0.6053 \quad (4)$$

$$\text{II 类 (FZI 为 } 2.0 \sim 0.4) : K = 0.0086e^{0.30487\Phi}, R^2 = 0.7365 \quad (5)$$

$$\text{III 类 (FZI 为 } 0.4 \sim 0.15) : K = 0.0072e^{0.2492\Phi}, R^2 = 0.7133 \quad (6)$$

$$\text{IV 类 (FZI 为 } 0.15 \sim 0.06) : K = 0.0021e^{0.2204\Phi}, R^2 = 0.5923 \quad (7)$$

流动单元渗透率预测的具体步骤如下: 首先应用测井数据通过式 (2) 计算流动单元指数, 对储集层进行流动单元分类; 其次通过式 (3) 计算测井孔隙度; 最后针对不同类型储集层流动单元, 通过式 (4)~(7) 计算渗透率。流动单元分类后计算的渗透率与岩心分析的渗透率相关性较好, 如图 3 所示。该方法计算的渗透率精度明显提高, 达到了储集层精细评价的要求。

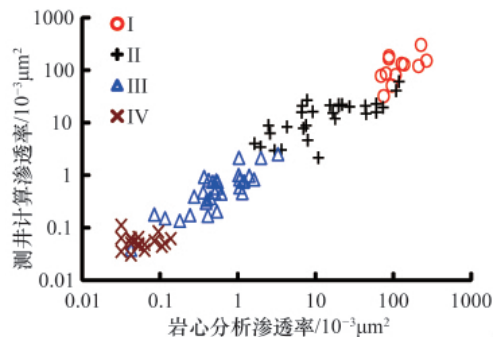


图 3 岩心分析渗透率与测井计算渗透率对比

Fig.3 Permeability comparison between core analysis and logging

3 应用效果分析

利用上述建立的式(2)~式(7),对研究区典型井进行了处理。图4是处理成果图,左边为测井响应,右边为岩心分析数据与测井计算曲线对比。对比图中的杆状图为岩心分析孔隙度、岩心分析渗透率和基于岩心分析计算的流动单元指数,曲线为测井响应参数计算的孔隙度和流动单元指数、基于流动单元指数分类方法计算的渗透率。测井计算的渗透率与岩心分析渗透率的误差都在数量级范围内,充分验证了所建模型的精确性。这为未取心井段预测渗透率提供了依据。

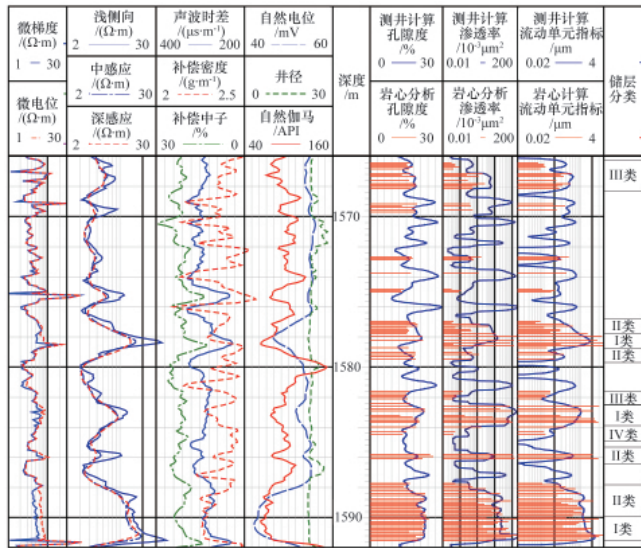


图4 储集层分类和渗透率预测成果

Fig. 4 Reservoir classification and permeability prediction

4 结论

(1) 新站油田葡萄花油层为中低孔中低渗砂岩储集层,非均质性强,同一孔隙度值下的渗透率级差大,传统方法建立的渗透率模型,无法满足油水层识别及水淹层解释的需要。测井响应中补偿密度、深感应电阻率、中感应电阻率对流动单元指数最为敏感性,补偿密度与岩心分析孔隙度关系最为密切。

(2) 应用流动单元指数概率分布法将储集层划分为4类,分类后的孔渗关系明显改善。同一岩石物理相具有相似的岩性、物性、孔隙结构特征,不同岩石物理相则难以用统一的解释模型对储集层进行表征。

(3) 基于流动单元建立的渗透率模型,反映了不同非均质条件下的渗透率分布规律,减小了储集层非均质性对渗透率的影响,从而提高了渗透率预测的精度。

参考文献 (References)

[1] Rahmawan I, Aditian Y, Kumiawan, et al. Estimating permeability in uncored wells using modified flow zone index[C]. SPE 122490 presented at the 2009 SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta Indonesia, August 4-6, 2009.

[2] 董春梅, 林承焰, 赵海朋, 等. 基于流动单元的测井储层参数解释模型

[J]. 测井技术, 2006, 30(5): 425-428.

Dong Chunmei, Lin Chengyan, Zhao Haipeng, et al. Well Logging Technology, 2006, 30(5): 425-428.

[3] Izadi M, Ghalambor A. A new approach in permeability and hydraulic flow unit determination[C]. SPE151576 presented at the SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette Louisiana, USA, February 15-17, 2012.

[4] Nooruddin H A, Hossain M E. Modified Kozeny-Carmen correlation for enhanced hydraulic flow unit characterization [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 80: 107-115.

[5] 孙勤华, 李军, 张超谟, 等. 基于流动单元、ANFIS 和多元统计分析建立高含水储层渗透率模型[J]. 测井技术, 2005, 29(2): 121-124.

Sun Qinhu, Li Jun, Zhang Chaomo, et al. Well Logging Technology, 2005, 29(2): 121-124.

[6] 王志章, 何刚. 储层流动单元划分方法与应用 [J]. 天然气地球科学, 2010, 31(3): 362-366.

Wang Zhizhang, He gang. Natural Gas Geoscience, 2010, 31(3): 362-366.

[7] 袁彩萍, 姚光庆. 油气储层流动单元研究综述[J]. 地质科技情报, 2006, 25(4): 21-26.

Yuan Caiping, Yao Guangqing. Geological Science and Technology Information, 2006, 25(4): 21-26.

[8] 范宜仁, 葛新民, 汪海龙, 等. 非均质性砂砾岩储层渗透率预测方法研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2010, 32(3): 6-10.

Fan Yiren, Ge Xinmin, Wang Hailong, et al. Journal of Southwest Petroleum University: Natural Science Edition, 2010, 32(3): 6-10.

[9] 焦翠华, 徐朝晖. 基于流动单元指数的渗透率预测方法 [J]. 测井技术, 2006, 30(4): 317-319.

Jiao Cuihua, Xu Zhaohui. Well Logging Technology, 2006, 30(4): 317-319.

[10] Aggoun R C, Tiab D, Owayed J F. Characterization of flow units in shaly sand reservoirs-Hassi R'mel Oil Rim, Algeria [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2006, 50: 211-226.

[11] 欧家强, 罗明高, 王小蓉. 低渗透油藏中储层流动单元划分 [J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2008, 23(5): 24-27.

Ou Jiaqiang, Luo Minggao, Wang Xiaorong. Journal of Xi'an Petroleum University: Natural Science Edition, 2008, 23(5): 24-27.

[12] Guo S S, Cai J, Zhou J, Niu Y Q, et al. Hydraulic flow unit based permeability characterization and rapid production predication workflow for an offshore field, South China Sea [C]. SPE 131486 presentation at the CPS/SPE International Oil & Gas Conference and Exhibition in China, Beijing, China, June 8-10, 2010.

[13] 靳彦欣, 林承焰, 赵丽, 等. 关于用 FZI 划分流动单元的探讨[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 130-132.

Jin Yanxin, Lin Chengyan, Zhao Li, et al. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(5): 130-132.

[14] 杨景强, 樊太亮, 马宏宇, 等. 利用储层分类进行水淹层测井解释的方法研究[J]. 测井技术, 2010, 34(3): 238-241.

Yang Jingqiang, Fan Taiyang, Ma Hongyu, et al. Well Logging Technology, 2010, 34(3): 238-241.

[15] 吕晓光, 闫伟林, 杨根锁. 储层岩石物理相划分方法及应用 [J]. 大庆石油地质与开发, 1997, 16(3): 18-21.

Lu Xiaoguang, Yan Weilin, Yang Gensuo. Daqing Petroleum Geology and Development, 1997, 16(3): 18-21.

[16] 李洪娟, 覃豪, 杨学峰. 基于岩石物理相的酸性火山岩储层渗透率计算方法[J]. 大庆石油学院学报, 2011, 35(4): 38-41.

Li Hongjuan, Qin Hao, Yang Xuefeng. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2011, 35(4): 38-41.

(责任编辑 刘志远)