基于岩相约束的砂岩油藏渗透率表征新方法

刘彦成,罗宪波,康 凯,张 俊,赵靖康,李 林,胡治华 (中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院,天津 300452)

摘要:渗透率是油藏工程中一项重要的基础参数。常规获取渗透率的方法通常是首先根据电性测井解释得到孔隙度,然后根据室内岩心实验获得的孔隙度和渗透率,建立岩石物性解释模型,进而求取渗透率。分析渤海Y油田 300多块岩心样品的孔隙度和渗透率室内实验数据发现,利用统一的孔、渗回归关系无法准确确定多层砂岩油藏的 渗透率,表现为测井解释的渗透率往往与生产动态响应不一致。为此,提出基于岩相约束,利用相渗曲线、吸水剖 面和初期产能资料验证的渗透率定量表征新方法。微观上,通过扫描电镜、铸体薄片、常规测井和取心等资料明确 孔隙度和渗透率关系的主控因素;宏观上,利用岩相约束,根据室内岩心相渗曲线、吸水剖面和初期产能等资料进 行动态验证。研究结果表明,利用基于岩相约束的砂岩油藏渗透率表征新方法计算的渗透率与初期吸水剖面的吻 合度从65%提高至91%。

关键词:渗透率 束缚水饱和度 粘土矿物 岩石骨架 岩相中图分类号:TE311文献标识码:A

A new method of permeability characterization in sandstone reservoir based on petrographic constraints

Liu Yancheng, Luo Xianbo, Kang Kai, Zhang Jun, Zhao Jingkang, Li Lin, Hu Zhihua

(Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch Company, CNOOC China Ltd., Tianjin City, 300452, China)

Abstract: Permeability is an important basic parameters in reservoir engineering. First step of conventional method for obtaining permeability is usually to get porosity according to the electric logging interpretation. Second step is to establish petrophysical interpretation model according to the relationship between porosity and permeability obtained from the core laboratory test. And then the permeability is gained. Experimental data of porosity and permeability in 300 pieces of cores of Bohai Y oilfield shows that the permeability in the multi-layer sandstone reservoir cannot be accurately described by unified regression relationship between porosity and permeability, and the permeability from well logging interpretation is often inconsistent with production performance. Therefore, a new method of quantitative characterization based on petrographic constraint, relative permeability test and dynamic agreement was put forward. Microscopically, main factors controlling the relationship between porosity and permeability were known by scanning electron microscope (SEM), cast thin section, logging and core data. Macroscopically, it was verified dynamically by laboratory relative permeability curve, water injection profile and initial productivity using petrographic constraints. The results show that the permeability gained by the new method based on petrographic constraints can improve the alignment with initial injection profile from 65% to 91%. **Key words**: permeability; irreducible water saturation; clay minerals; rock skeleton; lithofacies

渤海Y油田作为中国海上最大的复杂河流相油 田之一,其纵向跨度超过500m,含油井段超过100 m,小层数量多达47个,为典型的多层砂岩油藏。 其储层在纵向和平面上的非均质性均很强,不能采 用传统的同一油田内利用1条孔、渗回归关系曲线 来表征渗透率。随着开发的不断深入,发现研究区

文章编号:1009-9603(2016)05-0093-05

收稿日期:2016-05-11。

作者简介:刘彦成(1985—),男,陕西榆林人,工程师,硕士,从事海上多层砂岩油藏开发研究。联系电话:18576610638,E-mail:163lycgt@163.com。

基金项目:国家科技重大专项"渤海油田加密调整及提高采收率油藏工程技术示范"(2016ZX05058-001)。

利用统一的渗透率解释模型获得的解释结果与实际生产动态响应的吻合度较差,给油藏数值模拟带来较大的困难。为此,结合渤海Y油田实际的室内 岩心相渗曲线及动态资料,创新性地提出基于岩相 约束的砂岩油藏渗透率表征方法,以期实现多层砂 岩油藏渗透率解释的突破。

基于岩相约束的孔隙度与渗透率 关系的定量表征

1.1 孔隙度与渗透率关系的控制因素

通过分析大量的扫描电镜、铸体薄片、常规测 井和取心等资料,发现渤海Y油田生产层段孔隙度 与渗透率的关系在微观上主要有孔隙内的束缚水 饱和度、岩石表面的粘土矿物含量以及岩石骨架的 矿物类型共3个控制因素,宏观上主要受岩相控制。

孔隙内束缚水饱和度与储层岩石的类型^[1-3]、孔 隙度^[4]、微观孔隙结构^[5]、润湿性^[6-9]以及宏观油气成 藏动力等因素相关。束缚水饱和度在一定程度上 可以表征储层岩石孔隙的复杂程度,岩石孔隙结构 越复杂、毛管压力越大,孔隙内滞留水越多,即束缚 水饱和度越高^[10-12]。通过分析渤海Y油田毛管压力 资料,可以确定储层束缚水饱和度分布范围。研究 区所有样品的束缚水饱和度为15%~60%,因此,将 束缚水饱和度为15%作为测井解释含水饱和度的 下限值。对比毛管压力的岩心分析结果与测井解 释结果,发现二者具有较高的吻合度;进而利用测 井资料计算出不同储层的含水饱和度,并且按照束 缚水饱和度为15%,20%,25%,30%,35%,40%, 50%和60%等分别表征不同岩石特征下孔隙度与渗 透率的关系。

利用扫描电镜和铸体薄片等资料,分析渤海Y 油田储层岩石表面的粘土矿物成分。结果表明,研 究区储层岩石表面的粘土矿物以高岭石为主,伊/蒙 混层和伊利石次之,蒙脱石相对较少。扫描电镜资 料(图1)显示,研究区岩心样品胶结疏松,孔隙连通 性好,粒间孔隙发育,且在颗粒表面局部存在溶蚀; 高岭石呈鳞片状、蠕虫状结构,以分散质点式包裹 于颗粒表面并充填于粒间孔隙。铸体薄片资料(图 2)显示,研究区岩心样品的分选性总体较好,孔隙 发育且连通性好;局部发育粘土矿物,呈团块状、蜂 窝状或填隙状,并控制着储层的渗透性;岩石颗粒 为次棱角一次圆状,个别为棱角状,为点接触或呈 游离状疏散分布,个别石英见次生加大现象。在对 岩心样品粘土矿物成分定性描述的基础上,结合X



 c—粘土矿物充填孔隙 d—粒间孔发育 (1267.10 m)
 图 2 渤海Y油田馆陶组岩心样品铸体薄片资料
 Fig.2 Thin sections of core samples of the Guantao Formation in Bohai Y oilfield

衍射和激光粒度分析资料,对不同油组不同粘土矿物的含量进行定量表征。其中,并壁取心样品的频率累积曲线上的概率值为5%时,对应的粘土矿物含量为2.5%,可以作为研究区所有岩心样品粘土矿物含量的最小值;而频率累积曲线上的概率值为95%时,对应的粘土矿物含量却不能作为所有岩心样品的最大粘土矿物含量;其原因为取心样品主要是针对目的层段,非目的层段的取心样品相对较少,无法获得足够多的泥岩分析样品,因此概率值为95%时所对应的粘土矿物含量不能作为所有岩心样品的最大值。根据X衍射和激光粒度分析得到的粘土矿物含量为60%~70%,因此将粘土矿物含量为65%作为研究区所有岩心样品粘土矿物含量

的最大值。据此,利用自然伽马测井资料计算粘土 矿物含量时,将粘土矿物含量为2.5%和65%分别作 为研究区所有岩心样品粘土矿物含量计算结果的 划分界限,进而实现定量划分不同岩相的目的。

利用渤海Y油田大量的岩心和井壁取心资料, 分析岩石骨架类型,为建立更合理的测井解释模型 提供依据。渤海Y油田是典型的多层砂岩油藏,其 砂岩骨架类型主要是由石英、长石和粘土矿物组 成。岩心薄片分析发现,研究区砂岩颗粒的主要成 分为石英、长石以及火成岩、变质岩和沉积岩碎屑, 也有少量的碳酸盐和高岭石胶结物,但整体胶结疏 松。储集空间主要由骨架颗粒之间的原生孔隙以 及长石和岩屑部分溶蚀形成的次生孔隙组成。

基于对3个微观控制因素的系统分析,在宏观 上结合渤海Y油田多层砂岩油藏的沉积特征和评价 井的岩心资料,系统研究其馆陶组和明化镇组的沉 积环境和岩石学特征,将研究区的岩心样品划分为 岩相A—岩相H共8种岩相类型(图3)。



samples in Bohai Y oilfield

1.2 孔隙度与渗透率关系的定量表征

通过储层渗透率的微观和宏观控制因素分析, 对渤海Y油田各种类型的岩相进行详细描述,针对 划分的8种岩相类型的孔、渗关系进行分类并预测, 建立表征研究区8种岩相类型孔隙度与渗透率的关 系式。

岩相A为粗粒一富含砾石砂岩,其孔隙度与渗

透率的关系式为

 $K = 10^{10.586 \, 3^{+12.963 \, \lg \phi}} \qquad R^2 = 0.925 \, 3 \qquad (1)$

式中: K 为渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; ϕ 为孔隙度, %。

岩相B为中粒互层状砂岩,其孔隙度与渗透率的关系式为

K=10^{8.073 98+9.552 63 \u03bgeb R²=0.965 3 (2) 岩相C为细粒—极细粒波状层理砂岩,其孔隙 度与渗透率的关系式为}

$$K = 10^{8.10118+11.3253 \lg \phi}$$
 $R^2 = 0.9158$
 (3)

 岩相D为细粒—极细粒泥质砂岩,其孔隙度与

渗透率的关系式为 *K*=10^{3.124 83+3.638 15 lg *\eta R*²=0.823 6 (4)}

岩相E为细粒一极细粒砂岩,含碳质碎屑,其孔 隙度与渗透率的关系式为

$$K = 10^{2.127\,23 + 4.638\,15\,\mathrm{lg}\phi} \qquad R^2 = 0.815\,6 \tag{5}$$

岩相F为泥质砂岩和砂质泥岩,其孔隙度与渗透率的关系式为

K=10^{1.12491+6638151g0} R²=0.8031 (6)
岩相G为灰绿色泥岩和砂质泥岩,其孔隙度与
渗透率的关系式为

 $K = 10^{5.12462 + 2.33815 \lg \phi} \qquad R^2 = 0.8739 \qquad (7)$

岩相H为淡红色泥岩和砂质泥岩,其孔隙度与 渗透率的关系式为

 $K = 10^{2.1293 + 7.63815 \lg \phi} \qquad R^2 = 0.7928 \qquad (8)$

2 应用效果分析

2.1 室内相渗曲线验证

对比分析渤海Y油田室内岩心相渗实验获得的 相渗曲线与基于岩相约束的砂岩油藏渗透率表征 新方法计算的渗透率结果(图4),来验证新方法计 算结果的精度以及能否真实反映地下多孔介质的 渗流能力。结果表明,新方法计算的渗透率与岩心 相渗实验的束缚水饱和度成反比关系(图4a),与油 水两相跨度成正比关系(图4b),与束缚水饱和度条 件下的油相渗透率和残余油饱和度条件下的水相 渗透率均成正比关系(图4c,4d),且相关性较好,表 明新方法计算的渗透率可以准确地表征地下多孔 介质的渗流能力。

2.2 吸水剖面资料验证

基于室内岩心相渗实验数据验证,结合吸水剖 面资料,对基于岩相约束的多层砂岩油藏渗透率表 征新方法计算结果的精度和准确性进行验证。结 果表明,新方法计算的渗透率比根据所有岩心样品



Fig.4 Comparison of phase permeability curve data and calculated result by the new method based on petrographic constraint in Bohai Y oilfield

回归得到的孔、渗关系的单一方程计算的渗透率更 精确,与吸水剖面的测试资料吻合度更高。注水井 初期吸水剖面与储层物性的吻合度从之前的65% 提高至目前的91%,显著提高了注水井初期吸水剖 面的预测精度,可以更好地反映地下多孔介质的渗 流能力。

2.3 初期产能资料验证

综合渤海Y油田73口生产井资料,将利用基于

岩相约束的多层砂岩油藏渗透率表征新方法计算 的渗透率和根据所有岩心样品回归得到的孔、渗关 系单一方程计算的渗透率分别代入开发井的流度 中,可以看到利用新方法获得的流度与比采油指数 的相关性明显变好(图5)。因此,利用新方法获得 的油井产能与流度的回归关系较好,而利用孔、渗 关系单一方程获得的产能与流度的回归关系较差, 表明基于岩相约束的砂岩油藏渗透率表征新方法





Fig.5 Comparison of the productivity-mobility relationship obtained by porosity-permeability single formula and the new method based on petrographic constraint in sandstone reservoirs of Bohai Y oilfield

的计算结果准确率较高。

3 结论

提出一种基于岩相约束,利用相渗曲线、吸水 剖面和初期产能资料验证的渗透率定量表征新方 法。该方法在微观上通过扫描电镜、铸体薄片、常 规测井和取心等资料确定影响孔隙度与渗透率关 系的主要控制因素,宏观上利用岩相来约束,动态 上利用室内岩心相渗实验、吸水剖面和初期产能等 资料,对建立的基于岩相约束的砂岩油藏渗透率表 征新方法计算结果的精度和准确性进行验证。结 果表明,利用新方法计算的渗透率的精度得到显著 提高,与生产动态资料的吻合度较高,证明该方法 计算结果具有较高的准确率。研究成果对于渤海 油田陆相沉积多层砂岩油藏的后续储量复算、综合 调整和油藏数值模拟等均具有重要的现实意义。

参考文献:

- [1] 胡振华.辽河坳陷东部凹陷沙三段火成岩成因及储集特征[J]. 油气地质与釆收率,2014,21(4):46-49.
 Hu Zhenhua.Genetic analysis and reservoir characteristics of Sha3 igneous in eastern sag of Liaohe depression [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2014,21(4):46-49.
- [2] 刘爱永,李令喜,杨国臣,等.查干凹陷苏红图组火山岩储层及 其油气成藏特征[J].油气地质与釆收率,2014,21(4):54-57. Liu Aiyong, Li Lingxi, Yang Guochen, et al.Study of volcano rock reservoir and oil and gas accumulation characteristics of Suhongtu member in Chagan depression [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2014,21(4):54-57.
- [3] 宫雪,沈武显,李文厚,等.苏里格气田苏77区块特低渗储层成 岩相识别及分布规律研究[J].石油实验地质,2014,36(3): 291-298.

Gong Xue, Shen Wuxian, Li Wenhou, et al.Diagenetic facies identification and distribution study of ultra-low permeability reservoir in Su77 block of Sulige Gas Field [J].Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(3):291-298.

[4] 王峰,陈蓉,田景春,等.鄂尔多斯盆地陇东地区长4+5油层组 致密砂岩储层成岩作用及成岩相[J].石油与天然气地质,

2014,35(2):200-206.

Wang Feng, Chen Rong, Tian Jingchun, et al.Diagenesis and diagenetic facies of the Chang4+5 tight sandstone reservoirs in Longdong area, Ordos Basin[J].Oil & Gas Geology, 2014, 35(2):200-206.

- [5] 范瑞峰,董春梅,吴鹏,等.渤南油田四区沙三段储层特征及其 控制因素[J].油气地质与采收率,2015,22(4):64-68.
 Fan Ruifeng, Dong Chunmei, Wu Peng, et al.Reservoir characteristics and its control factors of Es, member in Area4, Bonan oilfield [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22 (4):64-68.
- [6] Amott E.Observations relating to the wettability of porous rock [J]. Transaction of American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 1959, 216(3):156–162.
- [7] Anderson W G.Wettability literature survey-part1: Rock/oil/brine interactions, and the effects of core handling on wettability [J]. JPT, 1986, 38(10): 1 125-1 144.
- [8] Anderson W G.Wettability literature survey- Part2: Wettability measurement[J].JPT, 1986, 38(11):1 246-1 262.
- [9] Anderson W G.Wettability literature survey-Part3: The effects of wettability on the electrical properties of porous media [J].JPT, 1986,38(12):1 371-1 378.
- [10] 操应长,张少敏,王艳忠,等.渤南洼陷近岸水下扇储层岩相一成岩相组合及其物性特征[J].大庆石油地质与开发,2015,34 (2):41-47.

Cao Yingchang, Zhang Shaomin, Wang Yanzhong, et al.Combination and physical property characteristics of the lithofacies and diagenetic facies for the nearshore subaqueous fan reservoirs in Bonan Sag[J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015, 34 (2):41-47.

- [11] 崔迎春,张琰.低渗气层岩样束缚水饱和度的室内实现方法
 [J].石油钻采工艺,2000,22(4):11-13.
 Cui Yingchun, Zhang Yan.Laboratory control of the irreducible water saturation of core sample from low permeable gas reservoir
 [J].Oil Drilling & Production Technology,2000,22(4):11-13.
- [12] 王晓畅,范宜仁,邓少贵,等.基于离心试验数据确定束缚水饱 和度[J].中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(3):76-79.
 Wang Xiaochang, Fan Yiren, Deng Shaogui, et al.Irreducible water saturation determination based on centrifugal test data [J].
 Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science,2009,33(3):76-79.

编辑 邹潋滟