

疏松砂岩稠油层含油饱和度测井解释校正方法探讨

——以济阳坳陷沾化凹陷馆陶组为例

耿斌¹, 闫华¹, 周德志¹, 程紫燕¹, 康元勇¹, 韩连滨¹, 胡兴中²

(1. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257015;
2. 中国石化胜利油田分公司油气勘探管理中心, 山东 东营 257001)

摘要: 针对含油饱和度的测井解释过程中通常重视 Archie 公式中岩石电阻率参数的研究与选取, 很少考虑油层中油水赋存状态的影响。浅层疏松砂岩稠油层具有与常规油层不同的油水赋存状态, 以“孤立水滴”形式存在于孔隙体积中的水被油分隔, 很难形成导电网络, 导致利用 Archie 公式解释得到的稠油层含油饱和度值比实际值偏高, 因此需要对饱和度的测井解释进行优化校正。本文选取济阳坳陷沾化凹陷馆陶组稠油油藏为研究目标, 阐述了产生“孤立水滴”赋存方式的主要因素是储层孔隙结构, 并以油基泥浆取心分析含油饱和度作为标准, 采用实验分析和解释方程对比两种方式, 通过 CT 图像分析、Archie 公式、毛细管压力曲线反算含油高度和含水率方程反算等方法, 初步确定解释值的校正量为 4.1%~5.4%, 平均为 5%, 这为浅层疏松砂岩稠油层的含油饱和度解释校正提供了依据, 也为稠油层含油饱和度的校正研究提供了方法和思路。

关键词: 疏松砂岩; 稠油层; 含油饱和度; 含水率方程; 校正量

中图分类号: TE31

文献标识码: A

Correction method of oil saturation in unconsolidated sandstone heavy oil reservoirs: A case study of Guantao Formation in Zhanhua Sag, Jiyang Depression

GENG Bin¹, YAN Hua¹, ZHOU Dezhi¹, CHENG Ziyan¹, KANG Yuanyong¹, HAN Lianbin¹, HU Xingzhong²

(1. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 2. Oil and Gas Exploration Administration Center, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257001, China)

Abstract: The selection of rock resistivity parameters in Archie formula is important during the logging interpretation of oil saturation. However, the influence of the oil and water occurrence mode in reservoirs is rarely considered. The oil and water occurrence mode in shallow unconsolidated sandstone heavy oil reservoirs is different from that in the conventional oil reservoirs. The pore water in the form of “isolated water droplets” is separated by oil, which makes it difficult to form a conductive network. As a result, the oil saturation of heavy oil reservoirs interpreted by Archie formula is higher than the actual one. Therefore, it is necessary to optimize and correct the saturation interpreted by logging data. In this study, the heavy oil reservoir of Guantao Formation in Zhanhua Sag, Jiyang Depression is selected as the research target to illustrate that the main factor influencing the occurrence of “isolated water droplets” in pore is the pore structure. And then the oil saturation analyzed by oil-based mud core is taken as the standard, the correction amount of the initial interpretation value is calculated to be 4.1%–5.4% with an average of 5% by the methods of experimental analysis and equation interpretation, such as CT scans, Archie formula, oil height and capillary pressure, and water cut equation. The results provide a basis for the interpretation and correction of the oil saturation in heavy oil reservoir, and provide a method for the oil saturation correction of shallow unconsolidated sandstone heavy oil reservoirs.

Key words: unconsolidated sandstone; heavy oil reservoir; oil saturation; water cut equation; correction amount

以往的含油饱和度测井解释大多偏重于 Archie 公式中岩石电阻率参数的研究与选取,没有考虑到油层中油水赋存状态会影响疏松砂岩稠油层测井解释含油饱和度的计算精度。针对浅层疏松砂岩稠油层中油水的赋存状态,耿斌等利用 CT 扫描检测技术对疏松砂岩稠油层中的孔隙结构分布及油水赋存状态进行研究,提出了疏松砂岩稠油层中存在被油分割的“孤立水滴”^[1],重新认识了油层中油水赋存方式。与常规油层相比,疏松砂岩稠油层的油水赋存状态,造成传统测井解释方法计算的含油饱和度不能真实反映地层实际状况。实践中也发现浅层疏松砂岩稠油层测井解释含油饱和度值往往比油基泥浆实际分析值偏差较大,但如何量化,如何对测井解释的含油饱和度进行优化校正等问题前人尚未开展过研究,亟需从油水赋存状态对含油饱和度的测井解释影响分析入手,探讨浅层疏松砂岩稠油层测井解释含油饱和度校正方法,对于保证饱和度解释结果的客观准确性具有重要的意义。

1 含油饱和度测井解释影响分析

1.1 理论分析

原始含油饱和度是油层的认识和评价非常关键的参数。目前,确定原始含油饱和度有油基泥浆取心和密闭取心样品测定、水基泥浆取心分析残余油饱和度估算和测井解释等方法。油基泥浆取心样品测定可以获取油藏原始含油饱和度的第一手资料,也是用其它间接方法进行研究工作的基础和对比验证的依据^[2]。但由于油基泥浆取心和密闭取心成本高、资料少,在应用上受到了一定的限制,在实际工作中通常采用测井解释的方法。

Archie 于 1942 年提出了著名的阿尔奇公式^[3],

奠定了含油饱和度测井定量评价的理论基础,其表达式为:

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{abR_w}{R_i\phi^n}} \quad (1)$$

对于油层的传统认识是孔隙中除了原油以外均为束缚水, Archie 公式中的地层真电阻率反映的是束缚水形成导电网络后测井测得的岩石电阻率^[4],由此计算的含水饱和度对应束缚水饱和度,含油饱和度则对应于孔隙中不导电的油气部分所占的体积。在疏松砂岩稠油层中不导电的孔隙中并不全是原油,其中还有一部分体积被油所包裹或隔离的“孤立水滴”所占据。因此,基于电阻率利用 Archie 公式解释得到的含油饱和度数值大于实际值,由此所估算的储量也会比实际值大,直接影响了油气资源评价的客观性^[1]。

1.2 实验分析

采用 CT 图像定量研究“孤立水滴”占据的含油饱和度值。CT 图像处理能够提取骨架矿物及孔隙结构的诸多信息^[5-6]。

垦 119 井馆下段稠油层岩样 CT 扫描检测结果(图 1)显示,图 1a 为反演标定后的岩心 CT 切片,图 1b 为图 1a 二值化之后的岩心 CT 图像,图 1c 是为便于在 Image 软件中求取孔隙部分面积而对图 1b 所做的伪彩色 CT 图像。截取岩心 CT 切片中含有“孤立水滴”的部分,利用 Image 软件求取“孤立水滴”部分面积和孔隙面积,二者的比值即为“孤立水滴”对应的含水饱和度。

选取有代表性的 4 幅“孤立水滴”CT 图像进行含水饱和度定量分析,结果(图 2)表明,估算的“孤立水滴”所占的含水饱和度为 4.55%~6.26%,平均值为 5.4%。这说明在不导电孔隙里存在约 5% 的地层水。因此,“孤立水滴”的油水赋存状态必然会影

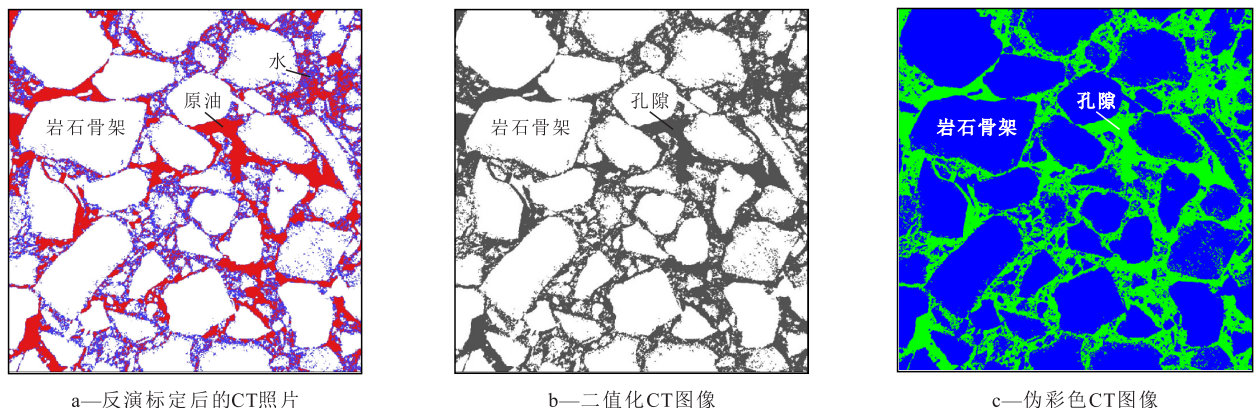


图 1 垦 119 井馆下段稠油层岩样 CT 扫描结果

Fig.1 CT images of heavy oil reservoir samples of Lower Guantao Formation from Well Ken 119

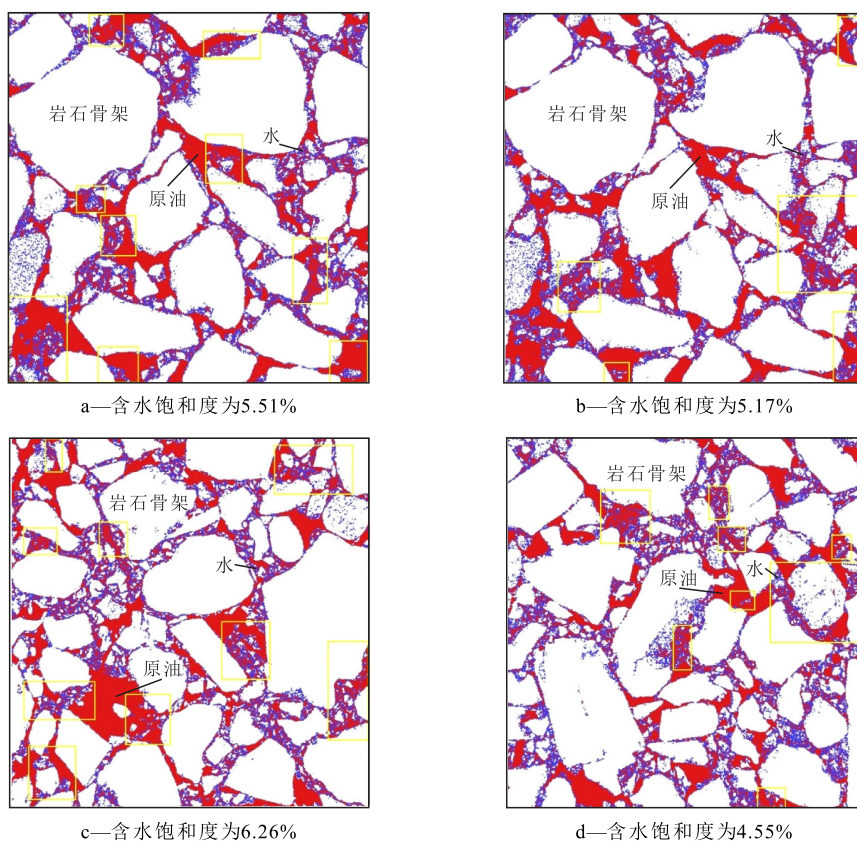


图2 垦119井馆下段稠油层岩样中不同含水饱和度CT图像

Fig.2 CT images of water saturations in heavy oil reservoir samples of Lower Guantao Formation from Well Ken 119

响导电网络的形成,进而影响疏松砂岩稠油层测井解释含油饱和度的计算结果,需要对饱和度的解释进行优化校正。

2 含油饱和度测井解释校正方法

考虑到油基泥浆取心分析、岩石电阻率和压汞等实验资料的完整性,选取济阳拗陷沾化凹陷馆陶组稠油油藏为研究目标,采用多种方法,探讨疏松砂岩稠油层测井解释含油饱和度校正问题。

沾化凹陷位于济阳拗陷东北部,馆陶组油藏埋深一般小于1 700 m^[7],以粉砂岩、细砂岩为主^[8],为河流相沉积,储层具有胶结疏松、高孔高渗透的特点,原油表现为高密度、高黏度的特点^[9]。利用沾化凹陷馆陶组岩石电阻率实验数据,拟合孔隙度-地层因素和含水饱和度-电阻增大率之间的关系,进而确定岩石电阻率参数 a 、 b 、 m 和 n 分别为0.501、1.052、1.869和1.911。利用以上岩石电阻率参数,对油层进行饱和度测井解释,通过与油基泥浆取心分析、毛细管压力-含油高度估算、基于含水率方程的饱和度解释结果对比分析,可以确定疏松砂岩稠油层饱和度测井解释的优化校正量。

2.1 油基泥浆取心分析结果对比

由于非渗滤油基泥浆能保证岩样处于天然饱和状态^[10-11]。根据测井等资料确定油层的原始含油饱和度时,其精度要依据油基泥浆取心分析的结果进行检验。

选取研究区馆陶组油基泥浆取心且收获率较高的5口井,对含油级别高、岩性纯,电阻率、声波时差读数可靠,岩电对应良好,样品分析密度较高的纯油层段进行饱和度测井解释(图3)。油层段测井解释的平均含油饱和度高于油基泥浆取心分析结果,部分数据点也达不到储量规范所要求的绝对误差为 $\pm 5\%$ 以内的精度(图4,表1),由统计结果可以看出疏松砂岩稠油层含油饱和度测井解释的校正量为2.9%~8.8%,平均为5.3%。

2.2 毛细管压力-含油高度估算结果对比

压汞毛细管压力是研究孔隙结构特征及其对油气储运能力影响作用参数,且其对确定油气藏的原始含油、气饱和度具有一定的意义^[12]。毛细管压力曲线的形态特征受储层岩石类型、物性和孔隙结构影响。

利用毛细管压力曲线估算含油饱和度已经是成熟的技术。根据孔隙结构特征进行分类,针对不

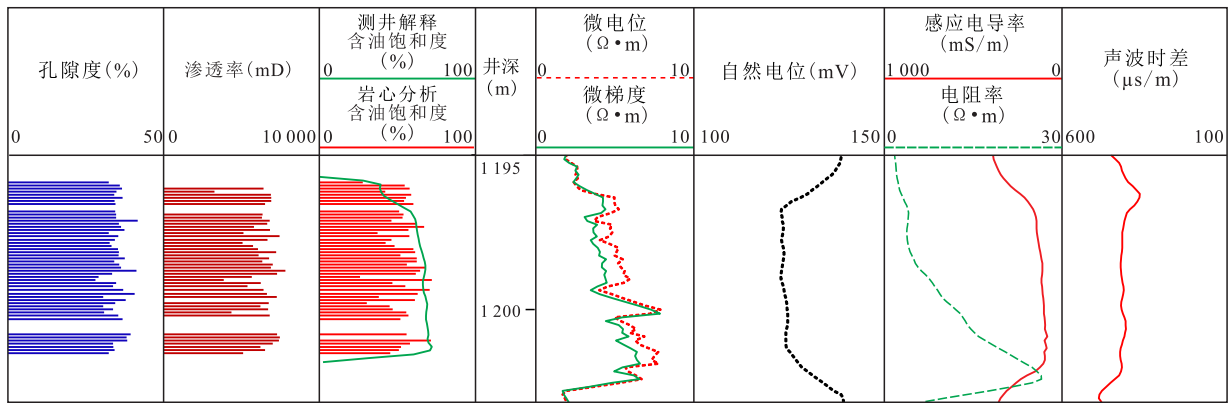


图3 渤116井测井解释结果

Fig.3 Logging interpretation of Well Bo116

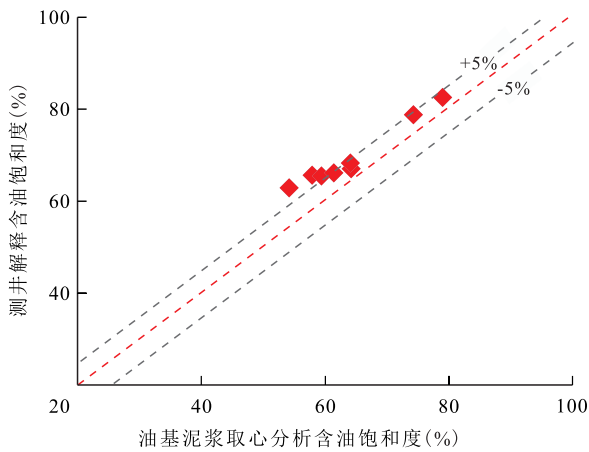


图4 含油饱和度对比分析
Fig.4 Oil saturation analysis

表1 测井解释与油基泥浆取心分析含油饱和度对比
Table1 Comparison of oil saturations estimated from logging interpretation and analyzed by oil-based mud core

井号	井段(m)	油基泥浆取心分析 (已校正) S_o (%)	Archie公式解释 S_o (%)	校正量 (%)
渤116	1 196.2~1 202.2	57.9	65.7	7.8
渤116	1 254.2~1 255.2	54.2	62.9	8.7
渤108	1 230.2~1 244.0	59.4	65.5	6.1
渤108	1 297.0~1 306.0	64.2	67.1	2.9
孤东7-36-206	1 275.4~1 278.8	64.1	68.3	4.2
孤东7-36-206	1 282.0~1 289.0	61.4	66.2	4.8
孤东12-8	1 297.6~1 305.5	79.0	82.6	3.6
孤东试7	1 308.2~1 316.8	74.3	78.8	4.5

同的孔隙结构类型计算J函数,然后分类计算平均毛细管压力,再转化为油藏条件下的毛细管压力,最后建立油藏含油高度与含油、水饱和度关系,最终确定油藏的含油饱和度。

J函数处理是获得平均毛细管压力曲线的经典方法^[13]。J函数的计算公式为:

$$J(S_w) = \frac{31.62p_c}{\sigma \cos\theta} \left(\frac{K}{\phi} \right)^{0.5} \quad (2)$$

当油藏的毛细管压力为油水的重力差所平衡时,毛细管压力可表示为将实验室条件下毛细管压力关系转换成油藏条件下的油藏含油高度与油水密度的关系:

$$H = \frac{(p_c)_R}{(\rho_w - \rho_o)g} \quad (3)$$

利用沾化凹陷馆陶组131块压汞样品,建立沾化凹陷馆陶组J(S_w)函数与汞饱和度的关系(图5),选取能确定含油高度的油基泥浆取心井岩样,并对取心井段的含油饱和度进行估算(表2),结果比油基泥浆岩心分析含油饱和度值高,偏差为2.6%~9.5%,平均为5.2%。

表2 利用毛细管压力曲线估算油基泥浆取心井岩样含油饱和度
Table2 Oil saturations in sample of oil-based mud core estimated by capillary pressure curve

井号	小层号	平均油藏高度(m)	实测 S_o (%)	压汞估算 S_o (%)	校正量 (%)
孤东12-8	9	30.0	70.1	73.8	3.7
孤东12-8	11	55.0	69.1	78.6	9.5
孤东试7	12	38.8	72.6	77.9	5.3
孤东试7	13	48.6	75.6	78.2	2.6

2.3 基于含水率方程的计算结果对比

对于稠油层初期出水问题,含水率可以反映油层中“孤立水滴”所占可动水的比例。含水率也是油水相对渗透率的函数^[14]。根据分流方程,对于油水共渗体系,储层的含水率可近似表示为^[15]:

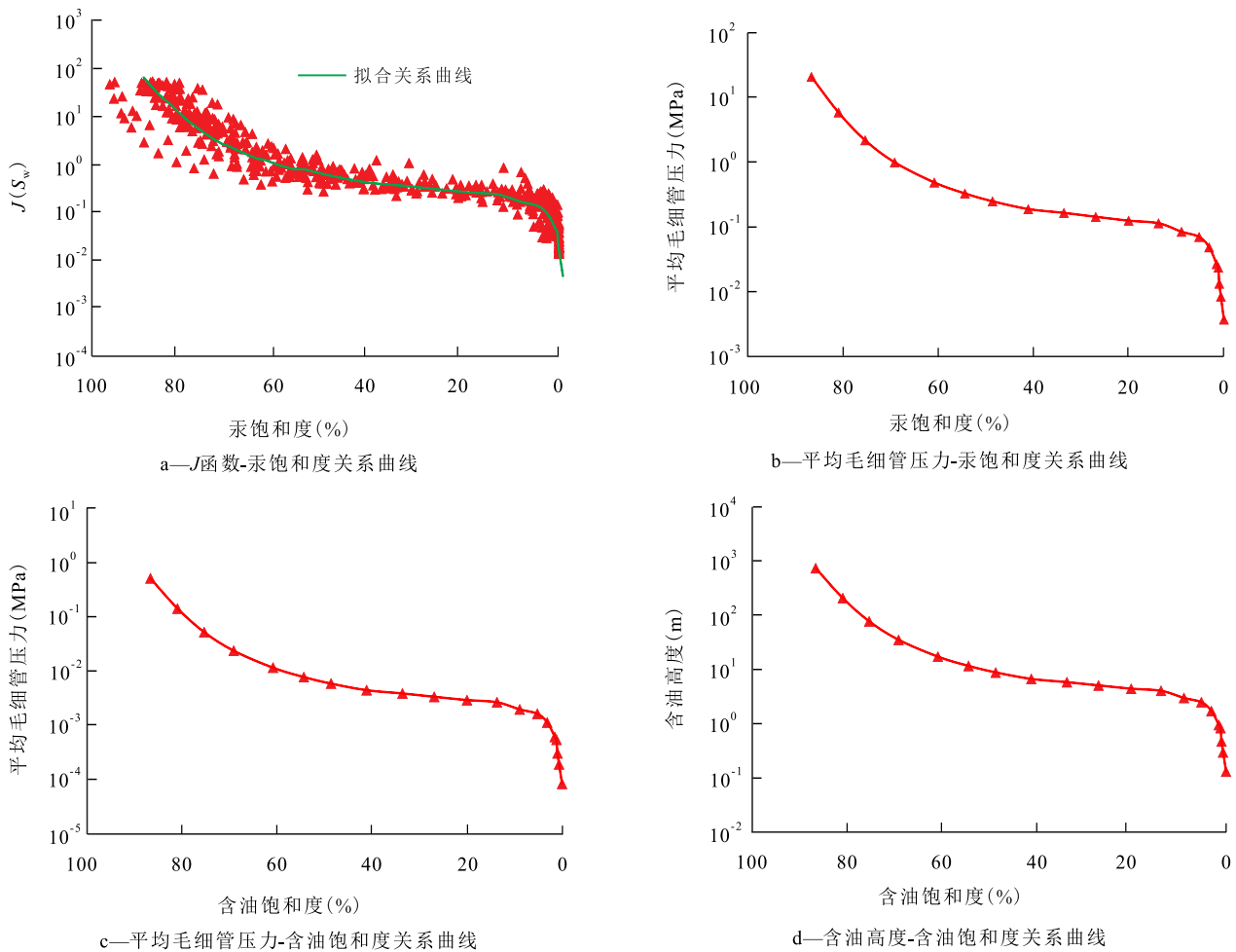


图5 毛细管压力-含油高度估算法确定含油饱和度图版

Fig.5 Oil saturation plate determined by capillary pressure and oil height

$$F_w = \frac{Q_w}{Q_w + Q_o} = \frac{\bar{\mu}_w}{\frac{K_{rw}}{\mu_w} + \frac{K_{ro}}{\mu_o}} = \frac{1}{1 + \frac{K_{ro}\mu_w}{K_{rw}\mu_o}} \quad (4)$$

油、水相相对渗透率的计算选用琼斯方程,其表达式分别为:

$$K_{rw} = \left(\frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi}} \right)^2 \quad (5)$$

$$K_{ro} = \left(\frac{0.9 - S_w}{0.9 - S_{wi}} \right)^2 \quad (6)$$

疏松砂岩稠油层开发过程中普遍产水,可根据含水率方程和琼斯方程反算含水饱和度。具体方法如下:利用稠油油藏初期生产情况首先计算初期含水率,再根据含水率方程计算 K_{ro} 和 K_{rw} ;其次,结合相渗实验确定 S_{wi} ;最后,利用琼斯方程反算 S_w 。以孤岛油田馆陶组某井稠油层为例(表3),可以看出此方法计算的含水饱和度比束缚水饱和度值高4.1%,说明该稠油层中存在的可动水饱和度为

4.1%。

需要指出的是,含水率方程分析方法只适用于常规投产开发的油藏,对于蒸汽吞吐的油藏,由于含水率难以准确评价而不适用。

表3 利用含水率方程反算含水饱和度计算参数
Table3 Parameters used to calculate water saturation by water cut equation

含水率	水黏度 (mPa·s)	油黏度 (mPa·s)	水黏度/油黏度	$\frac{K_{ro}}{K_{rw}}$	S_{wi} (%)	S_w (%)	S_o (%)
0.153	0.43	22.16	0.019 4	285.29	26	30.1	69.9

3 讨论

在疏松砂岩稠油油藏的生产实践中,开采初期往往在稠油采出的同时也伴有一定量的地层水产出^[16],这也容易造成把稠油层误解释为油水同层或含水层。耿斌等通过CT扫描检测,显示了存在3种类型孔隙^[1],提出了疏松砂岩稠油层中存在被油

分割的“孤立水滴”这种赋存方式,较好地解释了稠油油藏开发初期即出水的现象。

从岩石物理学角度,砂岩骨架和孔隙中的油气基本不导电,而孔隙中的水由于含离子形成导电网络而导电,这决定了油层测井电阻率的绝对量,而“孤立水滴”被油包裹或所分割,对导电网络的形成未做贡献,同时由于所占比例小,也可以认为对稠油层电阻率不产生影响。基于 Archie 公式解释的含油饱和度所对应的是孔隙空间中不导电部分所占体积,通常是油气,但对本文中所研究的疏松砂岩稠油层,这部分体积不仅包含油气,还包含一部分“孤立水滴”,这也是疏松砂岩稠油层饱和度解释需要进行校正的理论基础。本文采用了实验分析(CT 图像分析)和解释方程(Archie 公式、毛细管压力曲线反算含油高度和含水率方程)反算两种方式,通过与油基泥浆取心分析的对比,得到平均校正量集中分布为 4.1%~5.4%,平均为 5%。这结果基于研究区丰富资料,对于其它地区油藏是否适用还需要具体资料具体分析,本文仅提供一种思路和方法。

成藏过程中,油气优先进入大孔隙^[17],驱替其中的原生地层水,当大孔隙充注完成后,进而驱替渗流能力较差的孔隙,这部分孔隙黏土矿物发育,吸附水,且被油分隔,形成“孤立水滴”^[1]。因此影响“孤立水滴”这种赋存状态的主要因素是储层孔隙结构^[17]。本文选取了疏松砂岩稠油层作为研究对象,对其它类型的稠油层是否有普适性有待进一步研究。

4 结束语

浅层疏松砂岩普遍具有胶结疏松、高孔高渗透的特点,CT 扫描检测也已证实稠油层具有与常规油层不同的油水赋存方式,以“孤立水滴”形式存在的孔隙体积中水被油分隔,很难形成导电网络,使得按 Archie 公式计算的含油饱和度偏高,因此对于疏松砂岩稠油油藏饱和度有效校正成为亟待解决的问题。本文采用实验分析和解释方程对比得到的平均校正量分布为 4.1%~5.4%,有较好的可信度。因此,建议对于浅层稠油饱和度测井解释结果应相应下调 5% 左右。

对于浅层疏松砂岩稠油油藏含油饱和度的测井解释校正,仍然需要从理论和实验的角度深入开展研究,对于其它类型稠油层本文提供了一种研究思路,以期抛砖引玉,为今后的研究工作提供参考。

符号解释

- a, b, m, n ——岩石电阻率参数, f ;
 F_w ——含水率, f ;
 g ——重力加速度, g/cm^3 ;
 H ——油藏自由水面以上含油高度, m ;
 $J(S_w)$ —— J 函数;
 K ——空气渗透率, mD ;
 K_{ro} ——油相相对渗透率, f ;
 K_{rw} ——水相相对渗透率, f ;
 p_c ——毛细管压力, MPa ;
 $(p_c)_R$ ——油藏条件下的毛细管压力, Pa ;
 Q_w ——水相分流量, m^3/s ;
 Q_o ——油相分流量, m^3/s ;
 R_t ——地层真电阻率, $\Omega \cdot m$;
 R_w ——地层水电阻率, $\Omega \cdot m$;
 S_w ——含水饱和度, $\%$;
 S_{wi} ——束缚水饱和度, $\%$;
 θ ——流体与固体的接触角, $(^\circ)$;
 μ_o ——油黏度, $mPa \cdot s$;
 μ_w ——水黏度, $mPa \cdot s$;
 ρ_o ——地层油的密度, kg/m^3 ;
 ρ_w ——地层水的密度, kg/m^3 ;
 σ ——流体两相的界面张力, mN/m ;
 ϕ ——孔隙度, f 。

参考文献

- [1] 耿斌, 蔡进功, 王端平, 等. 疏松砂岩稠油层油水赋存特征及识别研究——以济阳坳陷沾化凹陷馆下段稠油油藏为例[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(5): 1126-1133.
 GENG Bin, CAI Jingong, WANG Duanping, et al. Characteristics and recognition of existing states of oil and water in unconsolidated sandstone heavy oil layer: A case study of the heavy oil reservoir of Guantao formation in Zhanhua sag of Jiyang depression[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(5): 1126-1133.
- [2] 萧德铭, 毕海滨. 利用油基泥浆取心资料确定砂岩油藏原始含油饱和度若干问题探讨[J]. 中国海上油气: 地质, 2003, 17(4): 252-255.
 XIAO Deming, BI Haibin. Determining the oil saturation of sandstone reservoir using oil-base core data [J]. China Offshore Oil and Gas: Geology, 2003, 17(4): 252-255.
- [3] 蒋阿明, 李秋政. Waxman-Smits 模型关键参数修正及解释应用——以苏北盆地高邮凹陷沙花瓦地区为例[J]. 石油实验地质, 2018, 40(3): 448-453.
 JIANG Aming, LI Qiuzheng. Correction and interpretation application of key parameters of Waxman-Smits model: A case study of

- SHW area in North Jiangsu Basin[J].Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(3): 448-453.
- [4] 宋延杰, 么丽娜, 徐广田, 等. 长垣地区低孔隙度低渗透率砂岩储层中连通导电模型的应用[J]. 测井技术, 2012, 36(4): 345-351.
- SONG Yanjie, YAO Lina, XU Guangtian, et al. Study on connectivity model for low porosity and permeability sand reservoirs in Daqing placanticline[J]. Well Logging Technology, 2012, 36(4): 345-351.
- [5] 朱益华, 陶果, 方伟. 图像处理技术在数字岩心建模中的应用[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(5): 54-57.
- ZHU Yihua, TAO Guo, FANG Wei. Application of image processing technique in digital core modeling[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(5): 54-57.
- [6] 林国松, 徐中波, 汪利兵, 等. 渤海湾盆地P油田馆陶组物源演化及其对沉积体系的影响[J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(6): 22-27.
- LIN Guosong, XU Zhongbo, WANG Libing, et al. Evolutions and their influences on the sedimentary system for Guantao Formation provenances in Oilfield P of Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(6): 22-27.
- [7] 束宁凯, 孟芳婷, 郑昕, 等. 孤岛油田东区馆6低含油饱和度特稠油油藏成藏条件及油水分布模式[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(3): 38-45.
- SHU Ningkai, MENG Fangting, ZHENG Xin, et al. Accumulation conditions and oil-water distribution patterns of low oil-saturated super-heavy oil reservoir in Ng6 layer in the east region of Gudao Oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(3): 38-45.
- [8] 唐洪明, 朱柏宇, 龚小平, 等. 疏松砂岩稠油油藏油井产能下降潜在因素分析[J]. 油气藏评价与开发, 2017, 7(6): 39-45.
- TANG Hongming, ZHU Baiyu, GONG Xiaoping, et al. Potential factors analysis of well productivity reduction in loose sandstone heavy oil reservoir [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2017, 7(6): 39-45.
- [9] 涅费多娃 H H, 皮赫 H A. 陆源储层油气饱和度的确定[M]. 卢文瑞, 译. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- NEFERDOVA H H, PICH H A. Determination of oil and gas saturation in terrestrial reservoirs [M]. LU Wenrui, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.
- [10] 陈德坡, 薛亮, 王宁, 等. 密闭闭心三相流体饱和度半解析校正方法[J]. 特种油气藏, 2019, 26(2): 82-85.
- CHEN Depo, XUE Liang, WANG Ning, et al. Semi-analytical correction of three-phase fluid saturation for pressure coring[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(2): 82-85.
- [11] 邵才瑞, 张鹏飞, 张福明, 等. 用J函数提高致密砂岩气层饱和度测井评价精度[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2016, 40(4): 57-65.
- SHAO Cairui, ZHANG Pengfei, ZHANG Fuming, et al. Improving well log evaluation accuracy of tight sandstone gas saturation using J function [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Sciences, 2016, 40(4): 57-65.
- [12] 罗蛰潭, 王允诚. 油气储集层的孔隙结构[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- LUO Zhetan, WANG Yuncheng. Pore structure of oil and gas reservoirs [M]. Beijing: Science Press, 1986.
- [13] 韩清忠, 杜淑艳. 高含水期储层产水率的评价方法[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1996, 20(6): 9-12.
- HAN Qingzhong, DU Shuyan. Determination technique of water fraction flow in flood formation [J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Sciences, 1996, 20(6): 9-12.
- [14] 钟思存, 王怒涛, 黄炳光, 等. 一种计算含水饱和度与产水率关系的新方法[J]. 天然气技术, 2008, 2(2): 26-27, 94.
- ZHONG Sicun, WANG Nutao, HUANG Bingguang, et al. A new method for calculating the relationship between water saturation and productivity [J]. Natural Gas Technology, 2008, 2(2): 26-27, 94.
- [15] 孙强, 周海燕, 石洪福, 等. 窄河道普通稠油油藏见水规律研究[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(2): 21-24, 37.
- SUN Qiang, ZHOU Haiyan, SHI Hongfu, et al. Research on water production rule of heavy oil reservoirs in narrow channels [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9(2): 21-24, 37.
- [16] 康海亮, 林畅松, 张宗和, 等. 南堡凹陷1号构造源上油气成藏特征及控制因素分析[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(3): 49-55.
- KANG Hailiang, LIN Changsong, ZHANG Zonghe, et al. Above-source hydrocarbon accumulation in No.1 structure of Nanpu sag and its controlling factors [J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(3): 49-55.
- [17] 惠威, 贾昱昕, 程凡, 等. 苏里格气田东部盒8储层微观孔隙结构及可动流体饱和度影响因素[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(5): 10-16.
- HUI Wei, JIA Yuxin, CHENG Fan, et al. Impact of microscopic pore structure on moveable fluid saturation in He8 reservoir of eastern Sulige Gasfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(5): 10-16.