

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.201501014

基于测井岩石力学参数计算砂泥岩储层含气饱和度的新方法

桂俊川¹, 夏宏泉¹, 邹 勇², 弓浩浩¹

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学), 四川成都 610500; 2. 中石化中原石油工程有限公司地球物理测井公司, 河南濮阳 457001)

摘 要:为提高砂泥岩含气储层测井精细解释的符合率,研究了利用测井岩石力学参数计算其含气饱和度的方法(以下简称新方法)。基于岩石体积物理模型和体积弹性模量,推导了岩石体积压缩系数、孔隙流体体积压缩系数及气体压缩系数的计算式,建立了含气饱和度计算模型。以 S 气田砂泥岩储层测井数据为基础,对比分析了由新方法、Archie 公式和物性分析等 3 种方法计算得到的含气饱和度,并与试气结论进行了对照评价。研究表明,在气层、差气层,用新方法计算的含气饱和度与 Archie 公式、物性分析得到的结果的平均误差分别为 3.5%、4.0%,三者数值上差别不大;在差油层、干层,用新方法计算的含气饱和度与其他 2 种方法得到的结果差别较大,但其与试气产量相一致,显示出了新方法的优点。研究认为,利用测井岩石力学参数计算砂泥岩储层含气饱和度的新方法,可作为 Archie 公式计算含气饱和度的有效补充。

关键词:测井数据 岩石力学 砂岩 泥岩 压缩系数 含气饱和度

中图分类号:TE311⁺.2;P631.8⁺4 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2015)01-0082-06

A New Method to Calculate the Gas Saturation of the Sand and Shale Formations Based on Logging Rock Mechanics Parameters

Gui Junchuan¹, Xia Hongquan¹, Zou Yong², Gong Haohao¹

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation (Southwest Petroleum University), Chengdu, Sichuan, 610500, China; 2. Geophysical Logging Company, Sinopec Zhongyuan Oilfield Service Corporation, Puyang, Henan, 457001, China)

Abstract: To improve the precision of interpretation of gas reservoir to correlate with the rate of logging, a study using logging rock mechanics parameters to calculate gas saturation of sand and shale rock formations was carried out (hereinafter referred to as the new method). Based on the physical volume in the rock model and the bulk modulus, the formulas of volume compressibility, the fluid compressibility and gas compressibility factors were deduced, and a gas saturation calculation model was established. Based on the logging data in S gas field, the gas saturation results were calculated by the new method, the Archie formula, the Physical Analysis were contrasted, and a controlled evaluation with gas testing conclusion was conducted. The study revealed that the average error of the gas saturation calculated by the new method with the gas saturation from the Archie formula, and the gas saturation from the Physical Analysis in the gas zone was 3.5%, and the poor gas reservoir was 4.0%, the values of the saturation were quite the same. The values of the saturation calculated by new method were quite different with another two methods in dry layer and poor reservoir, but the same with the gas testing result. This proved the advantages of the new method. Studies suggested that this method of calculating the gas saturation could be used as an effective complement to Archie formula.

Key words: log data; rock mechanics; sandstone; mudstone; compression factor; gas saturation

饱和度是评价储集层的一个重要参数,目前确定饱和度的方法主要有实验室岩心测量和利用测井资料计算两类^[1-5]。实验室岩心测量方法属于直接测量,但存在岩心在深度上不连续、实验时间长、成本高等问题,并不是获取地层饱和度的主要方法。

收稿日期:2014-07-04; **改回日期:**2014-10-13。

作者简介:桂俊川(1989—),男,四川自贡人,2012年毕业于西南石油大学石油工程专业,油气井工程专业在读硕士研究生,主要研究岩石力学、偶极声波测井和随钻测井的精细解释及其在油气井工程中的应用。

联系方式:(028)83032734, guijunchuan@163.com。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目课题“页岩气水平井钻完井关键技术研究”(编号:2013CB228003)资助。

测井资料具有分辨率高、连续性好等优点,因此被广泛应用于储层饱和度的评价。其中,基于测井岩石力学参数识别气层的方法较多,如用纵横波时差比值^[6-8]、泊松比^[9-10]和弹性模量及岩石体积压缩系数等^[11],这些方法只能定性判断地层是否含气,不能定量计算储层的含气饱和度。利用测井资料计算含气饱和度常用 Archie 公式及其变形公式,但会受到地层电阻率大小和岩电参数差异的影响,在砂泥岩储层中应用效果不够理想。此外,还可根据偶极横波测井资料,利用钻井液侵入模型和测井响应的数理模型计算含油气饱和度^[12]、利用密度测井计算含油气饱和度^[13]、碳氧比计算含油气饱和度^[14]等,但这些方法导出的计算公式有的过于复杂,有的只能定性判断,同样不是低孔、低渗透砂泥岩储层的理想选择。为此,笔者提出利用纵、横波时差及密度测井数据计算岩石体积压缩系数,然后根据岩石体积物理模型求流体压缩系数,进而建立含气饱和度计算模型,最后利用该模型定量计算砂泥岩储层含气饱和度。

1 含气饱和度计算模型的建立

1.1 岩石体积压缩系数和流体压缩系数的计算

根据岩石体积物理模型和岩石体积弹性模量的定义,岩石体积压缩系数可表示为^[15]:

$$C_b = \frac{1}{\rho \left(\frac{1}{\Delta t_c^2} - \frac{4}{3\Delta t_s^2} \right) \times 10^9} = \frac{1}{(1 - \phi - V_{sh})C_{ma} + \phi C_f + V_{sh}C_{sh}} \quad (1)$$

式中: C_b 为岩石体积压缩系数, $(10 \text{ GPa})^{-1}$; Δt_c , Δt_s 分别为岩石纵波时差和横波时差, $\mu\text{s/m}$; C_{ma} , C_f , C_{sh} 分别为骨架、流体和泥质的体积压缩系数, $(10 \text{ GPa})^{-1}$; ρ 为岩石体积密度, g/cm^3 ; ϕ , V_{sh} 分别为岩石孔隙度和泥质含量。

由式(1)推导出流体体积压缩系数的计算公式为:

$$C_f = \frac{1}{\phi} [C_b - (1 - \phi - V_{sh})C_{ma} - V_{sh}C_{sh}] \quad (2)$$

由式(1)、(2)可知,由纵波时差、横波时差和密度求出 C_b 后,代入 C_{ma} 和 C_{sh} , 就可以算出 C_f 。

1.2 含气饱和度计算公式的推导

假设孔隙被气水混合物饱和且孔隙流体均匀分布,则流体体积压缩系数可表示为^[15]:

$$C_f = S_g C_g + (1 - S_g) C_w \quad (3)$$

由式(3)变换可得:

$$S_g = \frac{C_f - C_w}{C_g - C_w} \quad (4)$$

式中: S_g 为含气饱和度; C_g 和 C_w 分别为气体和水的体积压缩系数, $(10 \text{ GPa})^{-1}$ 。

由式(4)可知,由 C_f , C_g 和 C_w 可以算出地层含气饱和度。当压力和温度变化时,水的体积压缩系数变化非常小,可以取定值。 C_g 的大小与天然气组分、非烃类气体含量、温度及压力等相关。

1.3 气体体积压缩系数 C_g 的计算

由于天然气中大多数组分属于烷烃,化学结构相似,采用对应状态原理计算体积压缩系数完全能满足工程需求^[16]。对于多组分天然气,根据对应状态原理, C_g 的计算公式为:

$$C_g = \frac{1}{p_{pc}} \left(\frac{1}{p_{pr}} - \frac{1}{Z} \frac{\partial Z}{\partial p_{pr}} \right) = \frac{1}{p_p} - \frac{1}{Z} \frac{1}{p_{pc}} \frac{\partial Z}{\partial p_{pr}} \quad (5)$$

式中: p_p , p_{pc} 分别为地层孔隙压力和天然气的视临界压力, MPa; p_{pr} 为视对比压力; Z 为压缩因子。

压缩因子 Z 可通过图 1 所示图版^[16]确定。其中, p_p 采用伊顿(Eaton)法^[17]计算, p_{pc} , p_{pr} 分别下式计算:

$$\begin{cases} p_{pc} = \sum y_i p_{ci} \\ T_{pc} = \sum y_i T_{ci} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} p_{pr} = \frac{p_p}{p_{pc}} \\ T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}} \end{cases} \quad (7)$$

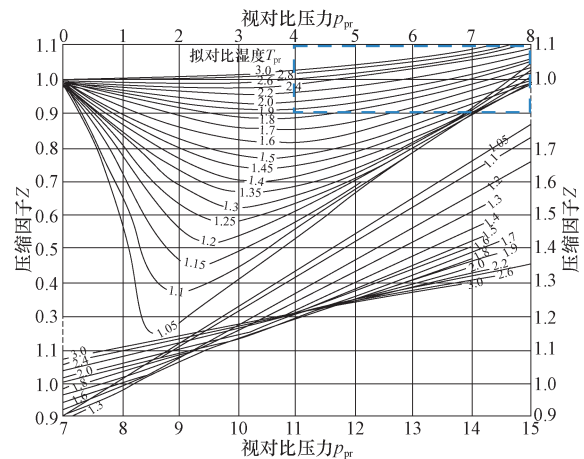


图 1 天然气压缩因子图版

Fig. 1 Gas compression factor plate

式中: T , T_{pc} 分别为储层所在深度的地层温度及天然气的视临界温度, K; p_{ci} 为组分 i 的临界压力,

MPa; T_{ci} 为组分 i 的临界温度, K; T_{pr} 为天然气的视对比温度; y_i 为组分 i 的摩尔分数。

用 Eaton 法计算地层孔隙压力时, 需做出相应参数的正常压实趋势线, 从正常压实趋势线上求出参数 L 的正常趋势值 L' , 代入下式即可得到 p_p :

$$p_p = p_o - (p_o - p_w) \left(\frac{L}{L'} \right)^x \quad (8)$$

式中: p_o 为上覆地层压力, MPa; p_w 为地层水静液柱压力, MPa; x 为 Eaton (压实) 指数; L, L' 为所选取的测井或钻井参数, 可为纵波时差、电阻率、层速度和 d_c 指数等, 且满足 $L/L' < 1$ 。

天然气的视临界参数和视对比参数由式(6)、式(7)计算。

常规天然气中丁烷、戊烷等含量相对较少, 将其一并归类为重烃。天然气主要成分的视临界参数见表 1^[16]。

表 1 天然气主要成分的临界压力和临界温度

Table 1 Critical pressure and critical temperature of the main component of natural gas

组分	临界温度/K	临界压力/MPa
CH ₄	190.58	4.544
C ₂ H ₆	305.42	4.816
C ₃ H ₈	369.82	4.194
nC ₄ H ₁₀	425.18	3.747

将表 1 中的临界压力、临界温度及天然气各组分的摩尔分数代入式(6), 即可求出 p_{pc} 和 T_{pc} 。

储层所在深度的地层温度 T 采用式(9)计算:

$$T = T_s + hG/100 \quad (9)$$

式中: T_s 为地面温度, K; h 为井深, m; G 为地温梯度, K/100m。

将式(8)和式(9)算出的地层孔隙压力和地层温度及由式(6)算出的天然气临界参数代入式(7), 即可求出天然气的视对比温度 T_{pr} 和视对比压力 p_{pr} 。可以通过 T_{pr} 和 p_{pr} , 并结合图 1 快速取准天然气的压缩因子 Z , 代入式(5)可以算出天然气的体积压缩系数 C_g 。

2 应用实例分析

S 气田的 S_1 层和 S_2 层是主要的产气层, 为粉砂岩和细砂岩, 储集空间以孔隙为主, 平均孔隙度小于 5%, 渗透率小于 1 mD, 具有明显的低孔低渗透特征。经分析, S 气田产气层一些参数的合理取值分别为: $C_{ma} = 0.206$, $C_f = 0.64$, Eaton 指数 $x =$

0.274, $G = 2.89$ K/100m, $p_{pc} = 4.55$ MPa, $\frac{\partial Z}{\partial p_{pc}} =$

0.032。基于 Forward. NET 测井解释平台, 利用 Fortran 语言对笔者建立的含气饱和度计算模型(以下称为新方法)进行优化编程, 处理多口井的测井资料, 利用流体体积压缩系数计算储层段的含气饱和度、判断储层含流体性质, 并将程序计算结果与 Archie 公式计算的含气饱和度(计算过程中取 $R_w = 0.04$, $A = 1$, $B = 1$, $N = 2$, $M = 2$)、物性分析得到的含气饱和度及试气结论进行对比。

S 气田某区块 A 井 3 780~3 835 m 井段砂泥岩地层的测井解释处理成果如图 2 所示。其中, 第 22 号层(埋深 3 803.13~3 805.75 m)、24 号层(埋深 3 828.38~3 832.25 m)为气层。从图 2 可以看出, 用 Archie 公式和新方法计算的含气饱和度与物性分析得到的饱和度较为接近, 变化趋势一致, 而物性分析得到的含气饱和度比其余两者略大(图中, S_{g1} 为由 Archie 公式计算所得, S_{g2} 为由物性分析所得, S_{g3} 为由新方法计算所得, 下同)。射孔段 3 785.00~3 787.00、3 803.00~3 806.00 和 3 829.00~3 832.00 m 三段合试, 日产气量 26 425 m³, 试气结果与计算结果一致。

S 气田某区块 B 井 3 269.00~3 412.00 m 井段砂泥岩地层的测井解释处理成果如图 3 所示。精细解释结果表明, 第 39 号层(埋深 3 274.00~3 277.63 m)、41 号层(埋深 3 293.00~3 297.50 m)、43 号层(埋深 3 333.75~3 344.50 m)、44 号层(埋深 3 390.63~3 396.13 m)、46 号层(埋深 3 399.25~3 405.00 m)为气层。从图 3 可以看出, 用 Archie 公式和新方法计算的含气饱和度与物性分析得到的饱和度较为接近, 变化趋势一致, 由物性分析得到的含气饱和度比其余两者略大。射孔段 3 273.00~3 276.00 和 3 293.00~3 296.00 m, 两段合试, 日产气量 41 707 m³; 射孔段 3 337.00~3 341.00 m 日产气量 42 161 m³; 射孔段 3 398.00~3 404.00 m 日产气量 20 618 m³, 产水 19.2 m³, 试气结果与计算结果相一致。

按照油气解释结论分层, 3 种方法得到的 A 井储层含气饱和度对比结果见表 2。

从表 2 可以看出, 在气层、差气层中 S_{g1} , S_{g2} 和 S_{g3} 三者差别不大(气层、差气层的平均绝对误差分别为 3.5%, 4.0%), 但差油气层、干层的含气饱和度差别较大(差油气层、干层的平均绝对误差分别为 11.2%, 25.4%)。这是因为储层孔隙度低、渗透率较低、含水饱和度较高, 其孔隙中流体的体积压缩系

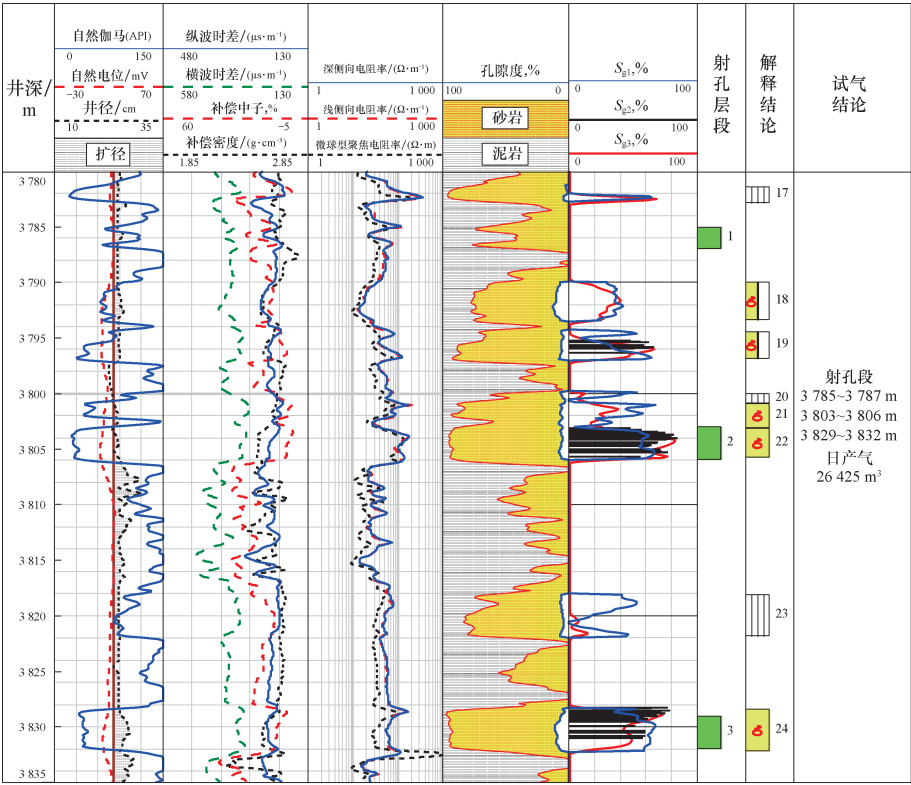


图 2 A 井 3 780~3 835 m 井段新方法计算结果与其他结果的对比

Fig. 2 Gas saturation at 3 780~3 835 m of Well A calculated by the new method compared with other results

表 2 3 种方法得到的含气饱和度对比

Table 2 Comparison of gas saturation obtained by three methods

井号	层号	含气饱和度, %			绝对误差 1 ¹⁾ , %	绝对误差 2 ²⁾ , %	解释结论
		新方法计算	Archie 公式计算	物性分析结果			
A	17	10.89	15.81		4.92		干层
	18	32.93	36.07		3.14		差气层
	19	39.43	35.42	48.47	4.02	9.04	差气层
	20	8.70	16.19		7.49		干层
	21	26.33	45.31		18.98		干层
	22	56.96	56.28	60.10	0.68	3.14	气层
	23	3.66	33.71		30.05		干层
	24	55.93	56.42	61.24	0.49	5.30	气层
B	38	32.03	29.78	47.47	2.25	15.44	差油气层
	39	55.01	51.10	60.48	3.91	5.47	气层
	40	5.38	34.57		29.20		干层
	41	64.13	69.63	70.75	5.49	6.61	气层
	42	2.28	38.07		35.78		干层
	43	57.91	61.81	63.98	3.90	6.07	气层
	44	66.49	63.52	72.53	2.98	6.04	气层
	45	34.57	41.94	56.57	7.37	22.00	差油气层
	46	57.10	56.46	62.43	0.65	5.33	气层
	47	37.24	34.11	54.39	3.13	17.15	差油气层

注:1)表示用新方法计算的含气饱和度和用 Archie 公式计算的含气饱和度之差;2)表示用新方法计算的含气饱和度和由物性分析得到的含气饱和度之差。

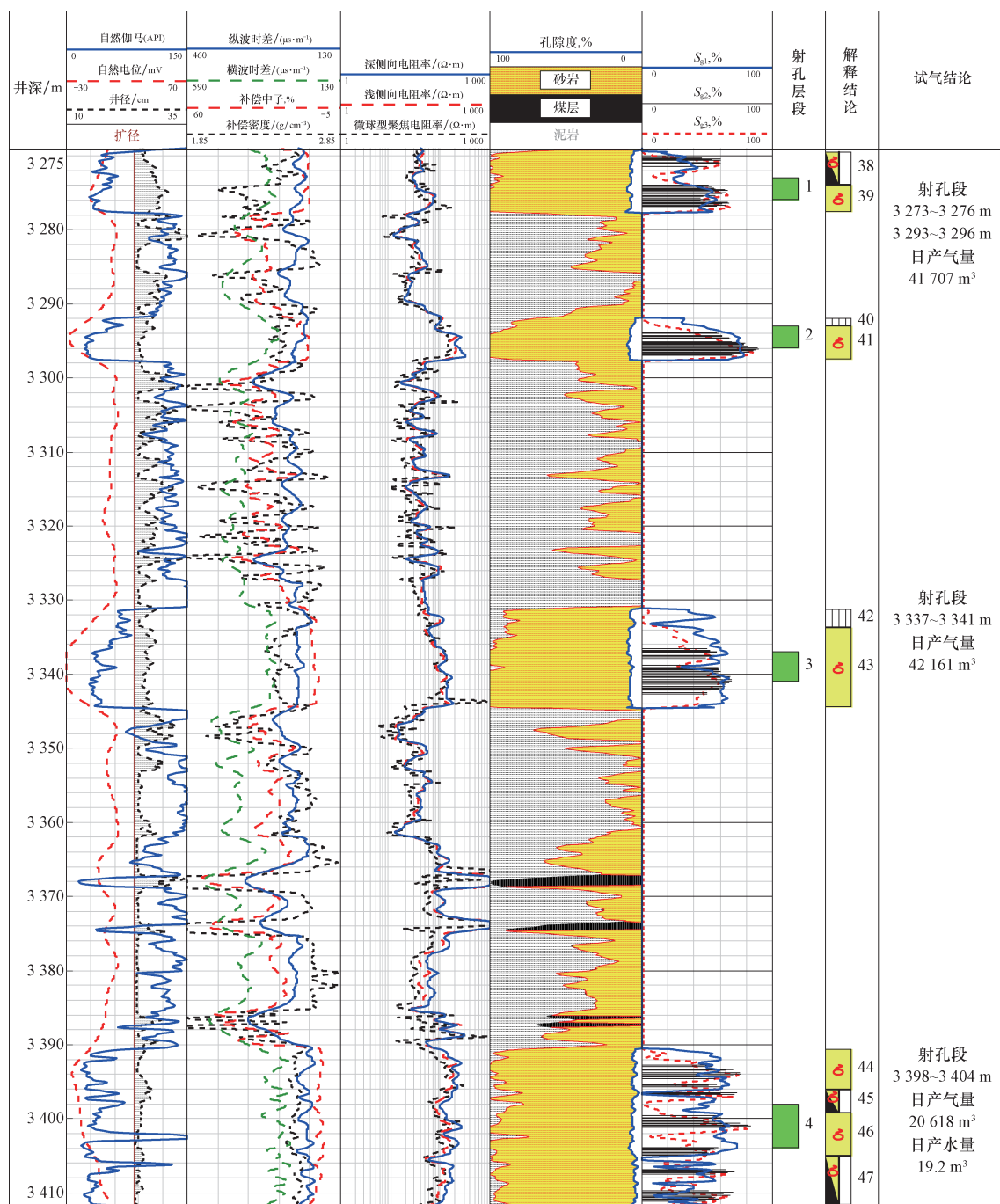


图3 B井3 269~3 412 m井段新方法计算结果与其他结果的对比

Fig. 3 Gas saturation at 3 269~3 412 m of Well B calculated by the new method compared with

数较小,由新方法计算出的含气饱和度很低(干层平均值为 9.54%,差油气层平均为 34.60%),这与其产气量很低是一致的,优于用 Archie 公式计算的含气饱和度(干层平均值为 30.6%,差油气层平均值为 35.3%,解释的 S_{g1} 偏高,易误判储层的含流体性质);而由物性分析得到的含气饱和度(差油气层为 52.8%)通常比其他两者要大,这主要是因为在地面试验条件下,岩心中的孔隙压力得到释放,孔隙中的

气体膨胀,导致测得的含气饱和度大于地层条件下的含气饱和度。

3 结论与建议

1) 基于岩石和流体体积物理模型用流体体积压缩系数计算地层含气饱和度 S_g ,关键是用测井数据求准岩石体积压缩系数 C_v 及通过公式计算得到

合理的气体体积压缩系数 C_g 。

2) 计算砂泥岩地层含气饱和度的新方法避开了地层电阻率大小和岩电参数差异的影响,在电阻率测井资料品质不好的情况下,可以利用测井岩石力学参数计算含气饱和度作为 Archie 公式计算含气饱和度的有效补充,提高了应用声波测井资料进行储层精细评价的能力,结合常规电法测井计算含气饱和度,能进一步提高含气储层测井精细解释的符合率,值得推广应用。

3) 新方法在砂泥岩储层的适用性好,但对于具有复杂孔隙结构的碳酸盐岩储层,岩石体积压缩系数和流体体积压缩系数的计算模型还需进一步细化。

参 考 文 献

References

- [1] 刘福利. 哈萨克斯坦油田复杂储层饱和度计算方法研究[D]. 北京:中国地质大学(北京)能源学院,2008.
Liu Fuli. Kazakhstan oilfield complex reservoirs saturation calculation method[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), School of Energy Resources, 2008.
- [2] 毕研斌,石红萍. 常规测井资料解释含油饱和度的厚度参数校正[J]. 断块油气田,2005,12(1):38-40.
Bi Yanbin, Shi Hongping. Thickness parameter correction on interpreting oil saturation with conventional well logging data [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2005, 12(1): 38-40.
- [3] 赵良孝,张树东,胡玲. 复杂碳酸盐岩储层含油气饱和度计算方法探索[J]. 天然气工业,2005,25(9):42-44.
Zhao Liangxiao, Zhang Shudong, Hu Ling. Calculation methods of the oil and gas saturation in complex carbonate reservoir [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(9): 42-44.
- [4] 刘伟,张德峰,刘海河,等. 数字岩心技术在致密砂岩储层含油饱和度评价中的应用[J]. 断块油气田,2013,20(5):593-596.
Liu Wei, Zhang Defeng, Liu Haihe, et al. Application of digital core technology in oil saturation appraisal of tight sandstone reservoir [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2013, 20(5): 593-596.
- [5] 肖亮,梁晓东,林雨静. 储层原始含油饱和度评价新方法研究[J]. 石油地质与工程,2007,21(6):53-55.
Xiao Liang, Liang Xiaodong, Lin Yujing. Study on a new method for evaluating initial oil saturation of reservoir [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2007, 21(6): 53-55.
- [6] Brie A, Pampuri F, Marsala A F, et al. Shear sonic interpretation in gas-bearing sands[R]. SPE 30595, 1995.
- [7] 赵辉,司马立强,戴诗华,等. 利用纵横波速度判别火成岩气、水层的理论基础及应用[J]. 测井技术,2012,36(6):602-606.
Zhao Hui, Si Ma Liqiang, Dai Shihua, et al. The theoretical principle and application of distinguishing igneous gas and water layers using vp/vs[J]. Well Logging Technology, 2012, 36(6): 602-606.
- [8] 罗宁,刘子平,殷增华,等. 利用纵横波速度比判断储层流体性质[J]. 测井技术,2008,32(4):331-333.
Luo Ning, Liu Ziping, Yan Zenghua, et al. Identifying reservoir fluid nature with the ratio of compressional wave velocity to shear wave velocity[J]. Well Logging Technology, 2008, 32(4): 331-333.
- [9] Saxena V. Hydrocarbon evaluation through modulus de-composition of sonic velocities in shaly sands[C]. SPWLA 37th Annual Logging Symposium, 1996.
- [10] 黄国骞. 泊松比在储层及流体识别中的应用//中国地球物理学会. 中国地球物理:第二十三届年会[G]. 青岛:中国海洋大学出版社,2007:244.
Huang Guoqian. Poissons Ratio in reservoir fluid identification// Chinese Geophysical Society. The Chinese Geophysics: the Twenty-Third Annual Meeting [G]. Qingdao: China Ocean University Press, 2007: 244.
- [11] 张永军,顾定娜,马肃滨,等. 阵列声波测井资料在吐哈油田致密砂岩气层识别中的应用[J]. 测井技术,2012,36(2):175-178.
Zhang Yongjun, Gu Dingna, Ma Subin, et al. The application of an array acoustic wave data to tight sandstone gas reservoir in Tuha Oilfield [J]. Well Logging Technology, 2012, 36(2): 175-178.
- [12] 云美厚,丁伟,王新红. 利用声波全波列测井确定剩余油饱和度方法研究[J]. 测井技术,2004,28(1):20-23.
Yun Meihou, Ding Wei, Wang Xinhong. On methods for predicting residual oil saturation using sonic full waveform logging [J]. Well Logging Technology, 2004, 28(1): 20-23.
- [13] 毛志强,谭廷栋. 密度测井和中子测井的相关性及其在识别天然气层中的应用[J]. 地球物理学报,1996,39(1):125-133.
Mao Zhiqiang, Tan Tingdong. The correlativity of density log and neutron log and its application in identifying gas formations [J]. Acta Geophysica Sinica, 1996, 39(1): 125-133.
- [14] 汤金奎,王绍春,高伟,等. 碳氧比能谱测井在冀东油田的应用[J]. 测井技术,2013,37(4):436-440.
Shang Jinkui, Wang Shaochun, Gao Wei, et al. Application of C/O spectral logging in Jidong Oilfield [J]. Well Logging Technology, 2013, 37(4): 436-440.
- [15] 章成广,江万哲,潘和平. 声波测井原理与应用[M]. 北京:石油工业出版社,2009:137-141.
Zhang Chengguang, Jiang Wanzhe, Pan Heping. Sonic logging principles and applications [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 137-141.
- [16] 何更生. 油层物理[M]. 北京:石油工业出版社,1994:127-137.
He Gengsheng. Reservoir physics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 127-137.
- [17] 刘厚彬,孟英峰,王先起,等. 利用测井资料预测地层孔隙压力方法研究综述[J]. 西部探矿工程,2006,18(6):91-93.
Liu Houbin, Meng Yingfeng, Wang Xianqi, et al. Study on methods of anticipating formation pore pressures with logging data [J]. West-China Exploration Engineering, 2006, 18(6): 91-93.

[编辑 令文学]