

新疆塔北地区低电阻率碎屑岩储层饱和度计算方法

郑小川 钟晓群 刘萍英 郑淑芬 常俊

(四川石油管理局测井公司研究所)

郑小川等.新疆塔北地区低电阻率碎屑岩储层饱和度计算方法.天然气工业,2006,26(8):56-59.

摘要 从分析新疆塔北地区碎屑岩储层低电阻率的影响因素出发,认为储层电阻率低主要是在高矿化度使电阻降低的基础上,泥质等造成的微孔隙较多,进一步降低了电阻率,缩小了气层和水层的电阻率差别,较多的微孔隙是造成气层和水层电阻率差别小的主要原因。据此,建立了含有自由水和束缚水的低电阻储层“双水导电模型”。根据该模型,在参考现有饱和度方程的基础上,结合新疆塔北地区实测电阻率资料情况和侵入特性,从推导纯地层饱和度模型出发,建立了适合该地区含泥质碎屑岩低电阻储层的饱和度方程,并利用计算机系统计算了包括束缚水饱和度、可动水饱和度、可动烃饱和度和不可动烃饱和度等饱和度数据,能有效地用于低电阻储层流体性质判别,为低电阻储层识别、储量计算提供可靠参数和科学依据。最后给出了利用饱和度数据判别低阻储层流体性质的应用实例。

主题词 储集层 电阻率 束缚水 饱和度 流体性能 数学模型 塔里木盆地 北

新疆塔北地区第三系至白垩系碎屑岩储层电阻率值普遍较低,电阻率增大指数一般小于2,气层电阻率一般在 $2\ \Omega\cdot\text{m}$ 左右,水层电阻率一般为 $0.5\sim 2\ \Omega\cdot\text{m}$,气层和水层电阻率差别小,泥岩电阻率高于砂岩电阻率,储层识别及流体性质判别难度大,用阿尔奇公式等现有饱和度方法计算饱和度参数难度大,计算结果与压汞实测数据误差大,准确率不高。寻求一种适合该地区的饱和度计算方法,正确计算饱和度参数是该地工储层测井解释评价中亟待解决的重要问题之一。这对该地区储层识别、流体性质判别及储层测井综合评价有着极其重大的意义。

一、电阻率影响因素

塔北地区的水分析资料表明,低阻储层段地层水矿化度极高,总矿化度在 $100\ \mu\text{g/g}$ 以上,计算的地层水电阻率约在 $0.02\ \Omega\cdot\text{m}$ 以下,矿化度增加将使地层电阻率降低^[1],因为当地层的水含量相同时,地层矿化度越高,电解质的浓度越大,地层水形成高导网络,电阻率就越低。高地层水矿化度是该区地层电阻率幅度值低的主要原因。地层水矿化度在引起油层电阻降低的同时,也引起水层电阻率的降低,所以二者的差别仍然应较明显,不会造成油气水

层判别的困难。分析认为气层和水层电阻率差异非常小主要是由于储层中泥质引起较多微孔隙所致。

泥质对岩石电阻率的影响非常大,主要由泥质成分、含量、分布形式等决定。一方面是因具有阳离子交换能力而产生附加导电性,降低储层的电阻率;另一方面是增加微孔隙使得束缚水饱和度增加,从而降低储层电阻率。通过分析认为研究区内第一影响比较小,因为塔北地区砂泥岩地层水矿化度大,最低的也在 $30000\ \mu\text{g/g}$ 左右,而附加导电性的影响只有当地层水矿化度低于 $15000\ \mu\text{g/g}$ 时才比较显著,故主要影响是第二种。一方面,砂岩中泥质含量的增加会减小粒间孔隙直径、加大孔径弯曲度、使得微孔隙增加^[2]。泥质(粘土)以离散式、孔隙内衬式和孔隙搭桥式等形式附在砂岩颗粒和孔隙表面,或充填在它们中间,改造粒间孔隙,造成孔隙直径普遍变小和微孔隙十分发育,即一部分为可动流体占据,另一部分为束缚流体占据。微孔隙的半径一般小于 $0.1\ \mu\text{m}$,由于孔径小,孔隙分子作用力可以达到孔隙中心,水分子被限定在其中不能自由流动,被束缚水占领,虽然这部分液体不能流动,但其导电性却和其它自由粒间孔隙水是等效的,从而降低地层电阻率,

作者简介:郑小川,女,工程师,1974年生;1997年毕业于原西南石油学院测井专业,现从事测井方法研究。地址:(400021)重庆市江北区大石坝。电话:(023)67352054。E-mail:zxc_slc_2002@163.com

缩小水层与气层电阻率的差别。另一方面,微孔隙增加,将使地层导电路径复杂化,孔隙结构复杂化,这些都会在一定程度上缩小气层与水层电阻率差异,加上含有伊利石、绿泥石等电阻率值较高的粘土成分,使得泥岩电阻率略高于砂岩电阻率。

该地区微孔隙比较发育,从岩心物性分析资料可知,储层孔隙基本呈双峰分布(如图1)。较多的微孔隙不仅降低了储层电阻率,更大大缩小了气层与水层电阻率的差异。一般地区电阻率增大指数一般大于5,气层电阻率一般是水层电阻率的3~5倍,而该地区电阻率增大指数一般小于2,气层电阻率一般在 $2\ \Omega\cdot\text{m}$ 左右,水层电阻率一般为 $0.5\sim 2\ \Omega\cdot\text{m}$,气层和水层电阻率差别特别小,主要是由于微孔隙较多引起的。

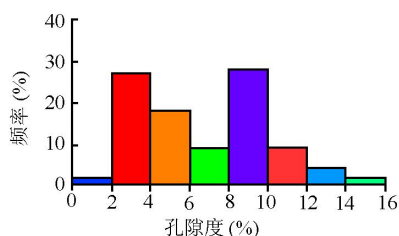


图1 塔北某井岩心分析孔隙度频率分布图

随束缚水饱和度的增加电阻率将会降低^[1],研究区束缚水饱和度并不是特别高。从压汞资料分析数据显示,储层束缚水饱和度主要在20%~30%之间,由于束缚水饱和度值整体不高,主要与该地区特殊的粘土成分和较多微孔隙引起电阻率值有所增加所致。

综上所述,形成新疆塔北区块地层低电阻率的主要是在高矿化度使电阻降低的基础上,泥质等造成的微孔隙较多,使得束缚水饱和度增加,进一步降低了电阻率,缩小了气层和水层的电阻率差别。而地层具有亲水性,含有导电重矿物也是储层电阻率值较低的原因之一。

二、低电阻油气层导电模型

根据前面的分析可知,研究区的饱和度模型应充分考虑自由水、束缚水(泥质等微孔隙)、矿物和烃等因素的影响。据此,建立如图2所示的导电模型,即孔隙流体包括自由水和束缚水的“双水导电模型”。岩石整体电阻率可视为两种孔隙流体形成的电阻率相并联而成,即

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{n} + \frac{1}{n} \quad (1)$$

式中: r 为地层电阻率; n 为可动水电阻率; n 为束缚水电阻率。

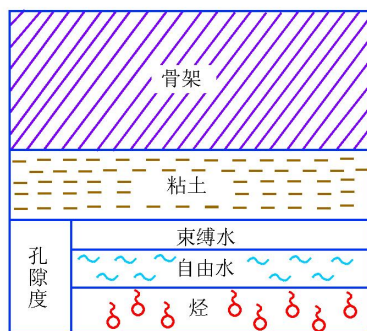


图2 低电阻率油气层导电模型示意图

三、饱和度计算

根据前面建立的导电模型,结合测井电阻率资料和侵入特性,可以建立正确的饱和度方程。通过推导纯地层(指不含泥质和导电矿物)和含泥质地层两步来建立饱和度方程,求解地层的饱和度参数,结果包括可动水饱和度、束缚水饱和度、可动烃饱和度和不可动烃饱和度。

1. 纯地层的饱和度方程

当储层中基本不含泥质和导电矿物时,地层电阻可视为可动水(地层水)电阻率和束缚水电阻率并联之结果,根据电阻率测井资料并考虑侵入特性可建立以下方程组,计算4种饱和度(束缚水饱和度、可动水饱和度、束缚烃饱和度、可动烃饱和度),这4种占据了整个储集空间,之和为100%。

$$S_{wir} + S_{wf} + S_{hr} + S_{hr} = 1 \quad (2)$$

原始地层含油气(含束缚水)、水(可动水),其电阻率由可动水和束缚水共同作用所致,即含水饱和度等于束缚水饱和度与可动水饱和度之和,分析认为深侧向(深感应)电阻率基本真实反映了储层含水饱和度情况,利用阿尔奇公式,则有:

$$S_w = S_{wir} + S_{wf} = \left(\frac{aR_w}{R_d \phi^m} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

在碎屑岩储层中泥浆滤液较均匀地侵入地层,将地层流体赶离井壁,形成冲洗带和过渡带,直到泥饼形成。冲洗带流体主要为残余油气、泥浆滤液及附着于岩石颗粒表面及微细喉道中的束缚地层水,由于束缚地层水含量小,且将与泥浆滤液发生离子交换,其矿化度取终与泥浆滤液基本相同,故冲洗带电阻率可按泥浆滤液电阻率处理。过渡带泥浆滤液相对减少,离子交换受到扩散电位的阻扰不能继续进行,其流体是泥浆滤液、地层束缚水的混合液。

综上所述,侵入带含有残余油气、泥浆滤液、油气及地层束缚水,其含水饱和度可由束缚水饱和度、可动烃饱和度、残余烃饱和度组成。侵入带含水饱和度可由侵入带混合液电阻率带入阿尔奇公式求得:

$$S_{xo} = S_{wir} + S_{wf} + S_{hf} = \left(\frac{abR_{mix}}{R_s \varphi^m} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

其中侵入带中混合液的电阻率(R_{mix})满足下面公式:

$$\frac{1}{R_{mix}} = \frac{S_{wir}}{R_w S_{xo}} + \frac{S_{xo} - S_{wir}}{R_{mf} S_{xo}} \quad (5)$$

束缚水饱和度(S_{wir})用密度资料或孔隙度资料求得:

$$S_{wir} = \frac{\rho_{mix} - \rho_{nf}}{\rho_w - \rho_{nf}} S_{xo} \quad (6)$$

或

$$S_{wir} = \frac{\varphi_{mix} - \varphi_{nf}}{\varphi_w - \varphi_{nf}} S_{xo} \quad (7)$$

$$b = \frac{3.562 - \lg(R - 0.0123)}{0.955} \quad (8)$$

$$R_2 = R_1 \frac{T_1 + 21.5}{T_2 + 21.5} \quad (9)$$

$$\rho = 1 + 0.73P \quad (10)$$

式中: R 为24℃时水溶液的电阻度; P 为溶液矿化度, $10^{-6} \mu g/g$; S_w 、 S_{xo} 分别为地层含水饱和度、冲洗带含水饱和度; R_w 、 R_{mix} 分别为地层含水电阻率、冲洗带混和液电阻率; R_d 、 R_s 分别为反映地层和侵入带电阻率的测井值; ρ_{nf} 、 ρ_{mix} 、 ρ_w 分别为泥浆滤液密度、冲洗带混和液密度、地层水密度; φ_{nf} 、 φ_{mix} 、 φ_w 分别为泥浆滤液孔隙度、冲洗带混和液孔隙度、地层水孔隙度; S_{wir} 、 S_{wf} 、 S_{hf} 、 S_{hr} 分别为束缚水饱和度、可动水饱和度、可动烃饱和度、不可动烃饱和度; T_1 、 T_2 分别为起始温度、某深度处地层温度; R_1 、 R_2 分别为对应 T_1 、 T_2 温度时溶液电阻率。

2. 含泥质地层的饱和度方程

当储层中含有泥质,深感应(或深侧向)电阻率反映泥质电阻率和地层水电阻率,为二者并联之结果;中感应(或浅侧向)反映泥质和冲洗带电阻率,亦为二者并联之结果。研究区以分散状泥质为主,地层水矿化度较高,借鉴印度尼西亚方程^[3],结合测井电阻率资料和侵入特性可建立如下饱和度方程:

$$\frac{1}{R_i} = \frac{V_{CL}^{E_{VCL} - V_{CL}/2} - V_{CL}^{V_{CL}/2}}{\sqrt{R_{CL}}} + \frac{\varphi^{(m_1 + m_{C_2})/2} \varphi}{\sqrt{aR_w}} \times S_w^2 \quad (11)$$

$$\frac{1}{R_{xo}} = \frac{V_{CL}^{E_{VCL} - V_{CL}/2} - V_{CL}^{V_{CL}/2}}{\sqrt{R_{CL}}} + \frac{\varphi^{(m_1 + m_{C_2})/2} \varphi}{\sqrt{aR_{mf}}} \times S_{xo}^2 \quad (12)$$

$$S_w = S_{wir} + S_{wf} \quad (13)$$

$$S_{xo} = S_{wir} + S_{wf} + S_{hf} \quad (14)$$

$$\frac{1}{R_{mix}} = \frac{S_{xo} - S_{wir}}{R_{mf} S_{xo}} + \frac{S_{wir}}{R_w S_{xo}} \quad (15)$$

束缚水饱和度同样用密度资料或孔隙度资料求得:

$$S_{wir} = \frac{\rho_{mix} - \rho_{nf}}{\rho_w - \rho_{nf}} S_{xo} \quad (16)$$

或

$$S_{wir} = \frac{\varphi_{mix} - \varphi_{nf}}{\varphi_w - \varphi_{nf}} S_{xo} \quad (17)$$

式中: E_{VCL} 为泥质体积指数,常取1; $(m_1 + m_{C_2})/\varphi$ 为可变孔隙度指数,一般取 $1.87 + 0.019/\varphi$; V_{CL} 为泥质含量体积百分数; R_{CL} 为泥质电阻率。

根据以上方程,编制成计算机程序,输入常规测井资料即可求得束缚水饱和度、可动水饱和度、可动烃饱和度、残余烃饱和度和饱和度数据。利用这些饱和度参数可帮助识别低阻碎屑岩储层、定量或半定量判别储层流体性质,也可为三级储量计算提供饱和度数据。

四、应用实例

利用“双水导电”模型推导出的含泥质地层饱和度计算方法已在新疆塔北地区实际计算处理了30余口井近1000个储层段,饱和度结果与压汞分析资料对应关系好、误差小,可动水、可动烃饱和度数据与试油结果符合率高。可动水饱和度、可动烃饱和度数据在低电阻油气层流体性质判别方面准确率较高、效果显著,取得了良好的地质效果。

利用可动水饱和度、束缚水饱和度、可动烃饱和度、束缚水饱和度等饱和度数据在新疆塔北地区低阻碎屑岩储层中进行流体性质判别一般存在如下规律。

(1) 水层

储集空间绝大部分被可动水和束缚水占领,不含可动烃或可动烃饱和度极底,可动水饱和度较高: $S_{hf} \approx 0$, $S_w = S_{wf} + S_{wir} = 100\%$, $S_{wf} > 60\%$ 。

(2) 气层

储集空间大部分被油气占领,小部分为束缚水占领,基本上不含可动水: $S_{wf} \approx 0$, $S_{hf} > 50\%$, $S_{hf} + S_{hr} + S_{wir} = 100\%$, $S_w < 40\%$, $S_{wir} \approx 30\%$ 。

(3) 气水同层

储集空间同时含有可动烃、残余烃、可动水和束缚水,且可动烃和可动水饱和度都比较大: $S_{hf} > 40\%$, $S_{wf} > 0$, $S_{hf} + S_w + S_{hr} = S_{hf} + S_{wf} + S_{hr} + S_{wir} = 100\%$, $S_{wir} \approx 30\%$, $40\% < S_w < 60\%$ 。

(4)干层

可动水和可烃含量低,束缚水或残余烃含量较高; $S_{hr} + S_{wr} < 40\%$, $S_{wir} \approx 50\%$ 。

由于受物性控制,干层即便是有一定的可动水和气,往往产量很低。

图3为塔北地区某井苏维依组用含泥质地层饱和度方程处理计算得到的饱和度成果与岩心分析、测试成果对比图。图中左边第一道为深、中感应和八侧向电阻率曲线;第二道为测井计算的束缚水饱和度曲线和由压汞资料得到的束缚水饱和度数据(离散点);第三道为束缚水饱和度、可动水饱和度、可动烃饱和度、不可动烃饱和度成果;第四道为试油结果。该井苏维依组共有70个压汞分析资料点,由图可知,测井计算的束缚水饱和度与压汞分析资料换算的束缚水饱和度基本重叠,说明测井处理结果比较准确。井段4954~4957.5m、4957.7~4966m、4974.25~4990.5m可动烃饱和度(S_{hr})都在20%以上,可动水饱和度(S_{wr})接近0,为油气层;井段4991~4994.75m平均可动烃饱和度(S_{hr})为28.68%,平均可动水饱和度(S_{wr})19.51%,为油气水同层。该井在井段4958~4963m、4980~4984m、4990~4984m试油,第一段产凝析油101 m³/d、气10.77×10⁴ m³/d,第二段产凝析油14.7 m³/d、气15.09×10⁴ m³/d,第三段产凝析油26.1 m³/d、气3.84×10⁴ m³/d、水93.6 m³/d,与判别结果吻合。

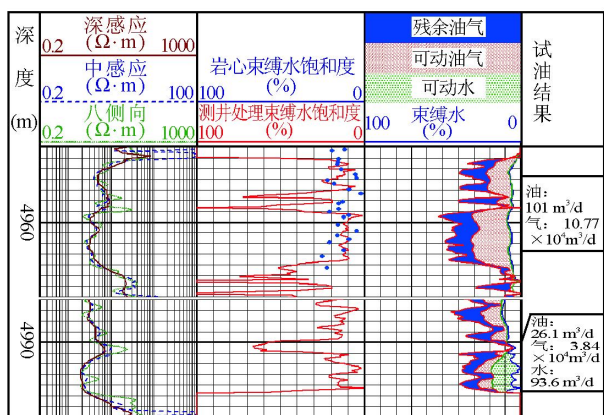


图3 塔北某井苏维依组饱和度成果图

可见,利用可动水饱和度、束缚水饱和度、可动烃饱和度等数据判别低电阻油气层流体性质效果较

好,且具有一定的定量性,比其它定性判别方法优越,在新疆塔北地区碎屑低电阻储层流体性质判别中符合率较高,说明该套饱和度计算方法基本正确可靠。

五、结 论

笔者从分析电阻率影响因素出发,建立了符合实际地层情况的导电模型,根据导电模型、结合实际电阻率资料情况和地层侵入特性,推导出正确的饱和度计算公式,解决了该地区现有饱和度计算方法不适应的难题。根据建立的饱和度计算方法,利用计算机工具定量计算束缚水饱和度、可动水饱和度、不可动烃饱和度、可动烃饱和度和含水饱和度等多个饱和度数据,与常规饱和度计算方法计算结果只有含水饱和度或含气饱和度相比,有较大的突破。计算的饱和度参数结果与压汞资料结果相关性好,误差较小,符合率较高,可用于低电阻油气层识别、流体性质判别、储量计算等方面,解决了该地区饱和度计算难题,在新疆塔北地区低电阻碎屑岩储层计算测井评价中见到了良好的地质应用效果。总之,该饱和度计算方法模型是进行低阻碎屑岩储层流体饱和度计算有益尝试并取得了长足发展。

参 考 文 献

- [1] 曾文冲. 油气藏储集层测井评价技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.
- [2] 周海民, 董月霞, 等. 冀东复杂断块油田精细勘探实践与认识[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- [3] 雍世和, 张超谟. 测井数据处理与综合解释[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 1996.
- [4] 赵良孝, 补勇. 碳酸盐岩储层测井评价技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- [5] 宋惠珍, 贾承造, 欧阳健, 等. 裂缝性储集层研究理论与方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- [6] 蒋炳南, 等. 塔里木盆地北部油气田勘探与开发论文集[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- [7] 潘和平, 王家映, 等. 新疆塔北三叠系低阻油气层特征及成因研究[J]. 天然气工业, 2004, 24(5).

(收稿日期 2006-04-04 编辑 韩晓渝)