均质砂岩原始含油(气)饱和度方程的推导

康 志 勇

(辽河石油勘探局勘探开发研究院)

摘　　要

康志勇．均质砂岩原始含油(气)饱和度方程的推导．石油地球物理勘探，1997，32(增刊 1)：109～112

本文以双水(束缚水和可动水)模型为基础，根据岩石的导电机理，将均质砂岩划分成单一介质的最小导电网络，建立了均质砂岩原始含油(气)饱和度方程。该方程中原始含油(气)饱和度的变化主要取决于可动地层水电阻率(R_{wf})与综合地层水电阻率(R_w^*)的比值。其比值与砂岩的孔隙结构和分散状黏土矿物含量有关，与孔隙中流体性质无关。利用该比值可预测油藏的最大含油(气)饱和度。

主题词　原始含油(气)饱和度　地层水　电阻率　束缚水　可动水　均质砂岩

纯砂岩含水饱和度方程是 Archie(1941)依据大量实验数据总结的经验方程，其标准形式为[1]

$$S_w^{n^*} = \frac{R_w}{R_t \phi^m} \tag{1}$$

式中：R_w 为地层水电阻率；R_t 为油层电阻率；ϕ 为岩石孔隙率；m 为岩石的胶结指数；n 为饱和指数。

之后，Winsauer、Hossin、Simandowx 及 Waxman-Smits、Fertl 等人分别提出了不同形式的泥质砂岩饱和度方程。Worthington(1985)又对多年来所用的 30 多种饱和度方程作了综合性评述，给出了 4 个最基本的饱和度方程[2]。这些方程虽然对解释不同砂岩储层的含水饱和度有实用性，但均缺乏足够的理论依据。直到 1989 年，我国第一位测井博士——李宁，首次用理论模型对岩石的饱和度方程进行了推导，从而为测井解释饱和度奠定了理论基础[3]。李宁博士在饱和度方程的推导过程中，虽然已经考虑了诸多因素对饱和度的影响，但忽略了孔隙中束缚水与可动水电阻率的差异对饱和度计算的影响。本文以“双水”模型为基础，考虑到孔隙中束缚水(包括黏土水和薄膜水)与可动水电阻率之间的差异对均质砂岩的含油(气)饱和度方程的影响，得到一种形式简单、物理意义明确的原始含油(气)饱和度方程。

饱和度方程的理论基础及其推导

“双水”模型的基本思想认为砂岩孔隙中的地层水以两种形式存在：一种是不流动的黏土水，另一种是远离黏土的远水，其中部分远水为不流动的残余水，另一部分是可流动的可动水或自由水[4]。本文将黏土水和残余水统称为束缚水(Irreducible Water)。根据岩石的导电机理，

本文于 1996 年 3 月 29 日收到。

岩石颗粒(部分导电矿物除外)、泥质骨架及烃类不导电,只有孔隙中的非烃流体才导电。

在地层条件下,若电阻率测井的供电电流由垂直于井轴方向流向地层,则从岩石中取一单位立方体,用垂直于电流流向的平面将单位立方体切成 N 个等厚薄片,每个岩石薄片再切成 $N\times N$ 个等立方体(图1)。则单位立方体的电阻为 N 个岩石薄片电阻的串联,每个岩石薄片的电阻为 $N\times N$ 个小立方体电阻的并联(图2)。为确保每个小立方体均由单一介质构成,N 值要取足够大。

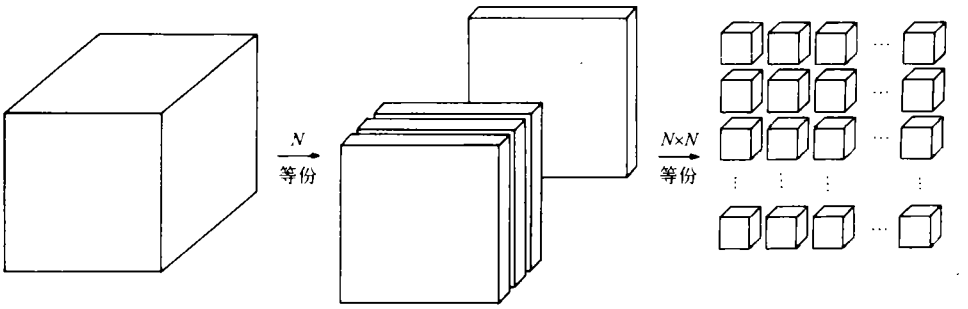


图1 均质岩石模型

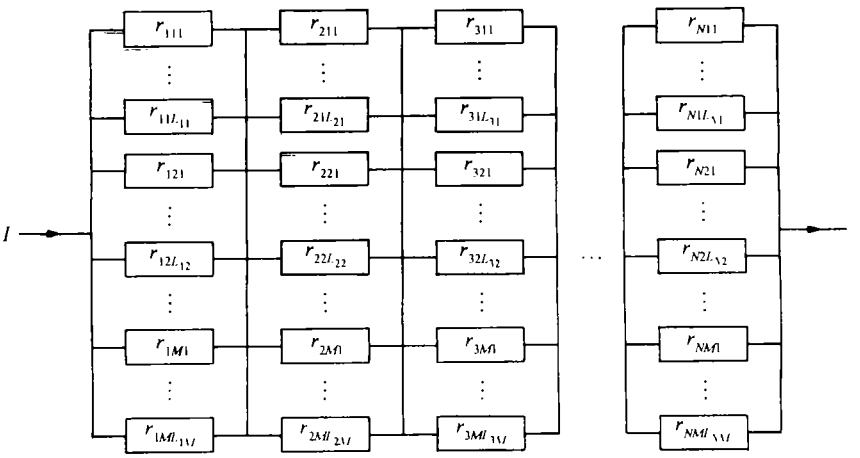


图2 均质岩石等效电路图

根据图1和图2,有

(1)单个小立方体的电阻为

$$r_{ijk}=R_j\frac{\frac{1}{N}}{\frac{1}{N}\times\frac{1}{N}}=NR_j \tag{2}$$

(2)第 i 个岩石薄片的电阻为

$$\frac{1}{r_i}=\sum_{j=1}^{M}\sum_{k=1}^{L_{ij}}\frac{1}{r_{ijk}}=\sum_{j=1}^{M}\sum_{k=1}^{L_{ij}}\frac{1}{NR_j} \tag{3}$$

(3)单位立方体的电阻为

$$r = R_x = \sum_{i=1}^{N} r_i = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{\sum_{j=1}^{M}\sum_{k=1}^{L_{ij}} \frac{1}{NR_j}} \tag{4}$$

式(2)、(3)、(4)中：r 为单位立方体的电阻；r_i 为单位立方体中第 i 个岩石薄片的电阻；r_{ijk} 为单位立方体中第 i 个岩石薄片的第 j 种介质的第 k 个小立方体的电阻；R_j 为单位立方体中第 j 种介质的电阻率；R_x 为单位立方体的电阻率，L_{ij} 为第 i 个岩石薄片中第 j 种介质的立方体的个数；M 为单位立方体的介质的种类；N 为单位立方体的切片数。

若均质砂岩的总孔隙率为 ϕ_t，原始含油饱和度为 S_{oi}，黏土水饱和度为 S_{wc}，薄膜水饱和度为 S_{wd}，束缚水饱和度为 S_{wi}($S_{wi}=S_{wc}+S_{wd}$)，可动水饱和度为 S_{wf}，则在每个岩石薄片中可动水被切成 $N^2\phi_t(1-S_{wi}-S_{oi})$ 个小立方体；黏土水被切成 $N^2\phi_t S_{wc}$ 个小立方体；薄膜水被切成 $N^2\phi_t S_{wd}$ 个小立方体。

对纯水层而言($S_{oi}=0$，$S_{wi}+S_{wf}=1$)，式(4)可写成

$$R_0\phi_t = \frac{1}{\frac{S_{wc}}{R_{wc}} + \frac{S_{wd}}{R_{wd}} + \frac{S_{wf}}{R_{wf}}} \tag{5}$$

综合地层水电阻率(束缚水与可动水电阻率的调和平均值)R_w^* 为

$$R_w^* = \frac{S_{wc} + S_{wd} + S_{wf}}{\frac{S_{wc}}{R_{wc}} \cdot \frac{S_{wd}}{R_{wd}} \cdot \frac{S_{wf}}{R_{wf}}} \tag{6}$$

式(5)、(6)中：R_0 为 100%含水岩石的电阻率；R_w^* 为综合地层水电阻率；R_{wd} 为薄膜水电阻率；R_{wf} 为可动地层水电阻率，并且 $R_{wc}>R_{wf}$；$R_{wd}>R_{wf}$[5]。故有 $R_w^*>R_{wf}$，R_w^* 随 S_{wc} 和 S_{wd} 的增大而增大。

由式(5)、(6)联立可求得

$$R_w^* = R_0\phi_t \tag{7}$$

对油层而言($S_w+S_{oi}=1$，$S_w \geqslant S_{wi}$)，式(4)可写成

$$R_t\phi_t = \frac{1}{\frac{S_{wc}}{R_{wc}} \cdot \frac{S_{wd}}{R_{wd}} \cdot \frac{S_{wf}-S_{of}}{R_{wf}}} \tag{8}$$

由式(5)、(8)联立可求得

$$S_{oi} = \frac{R_{wf}}{R_0\phi_t} - \frac{R_{wf}}{R_t\phi_t} \tag{9}$$

由式(7)、(9)联立，可求得

$$S_{oi} = \frac{R_{wf}}{R_w^*} - \frac{R_{wf}}{R_t\phi_t} \tag{10}$$

式(10)即为均质砂岩原始含油(气)饱和度方程的一般形式。式中可动地层水电阻率与综合地层水电阻率的比值为 $0<\frac{R_{wf}}{R_w^*}<1$，运用该比值可估算砂岩油藏的最大含油饱和度 $S_{oi\,max}$，即 $S_{oi\,max}<\frac{R_{wf}}{R_w^*}$，其中 R_{wf} 可由水分析资料获取，R_w^* 可由式(7)求得。

原始含油(气)饱和度方程的物理意义

Archie 方程中地层水电阻率 R_w 与地层水性质和地层温度有关,与孔隙的内部结构无关。本文导出的综合地层水电阻率 R_w^* 是储层孔隙结构参数、分散黏土矿物含量、地层温度、地层水矿化度的函数,它客观地反映了束缚水和可动水对岩石导电的贡献。而饱和度方程中可动地层水电阻率与综合地层水电阻率的比值却与孔隙中的流体性质无关,只与孔隙结构和分散黏土矿物含量有关。该比值是原始含油(气)饱和度变化的主导因素。

结论

(1)由均质砂岩导出的原始含油(气)饱和度方程,揭示了原始含油(气)饱和度的变化主要取决于可动地层水电阻率与综合地层水电阻率的比值 R_{wf}/R_w^*,而储层的孔隙结构和分散状黏土矿物含量是影响地层水电阻率变化的根本原因。

(2)综合地层水电阻率 R_w^* 与 Archie 饱和度方程中的地层水电阻率有本质区别。Archie 地层水电阻率 R_w 相当于本文的可动地层水电阻率 R_{wf},在地层条件下,只与流体性质有关;而综合地层水电阻率 R_w^* 是地层束缚水与可动地层水电阻率的调和平均值,在地层条件下,不仅与流体性质有关,主要与储层的本身结构有关。R_w^* 可由纯水层直接求取,二者的关系是 $R_w^* > R_w$。

参 考 文 献

1 Archie G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *AIME*, 1942,146(1):54～62
2 Worthington P F. The evolution of shaly-sand concepts in reservoir evaluation. *The log analyst*, 1985,26(1):23～40
3 李宁. 电阻率—孔隙度、电阻率—含油(气)饱和度关系的一般形式及其最佳逼近函数类型的确定(Ⅰ). 地球物理学报,1989,32(5):580～591
4 Clavier C, Coates G, Dumanoir J. The theoretical and experimental basis for the "Dual Water" model for the interpretation of shaly sands. *SPE*, 6859
5 雍世和,洪有密. 测井资料综合解释与数字处理,石油工业出版社,1982,275～280

(上接第 94 页)

参 考 文 献

1 陆基孟. 地震勘探原理,石油工业出版社,1982
2 牟永光. 地震勘探资料数字处理方法,石油工业出版社,1981
3 Sangree J B, Sneider R M 著(美),杨贝德等译. 层序地层学,石油地球物理勘探局,1990
4 严又生. 速度横向变化对小幅度构造解释的影响. 石油地球物理勘探,1994,29(6):759～768
5 马涛,严又生,刘文利. 塔里木盆地速度场的建立及应用. 石油地球物理勘探,1996,3(3):382～393

作 者 介 绍

顾树松　教授级高级工程师，1933 年生，1952 年毕业于西北大学石油地质专业。承担和主持过狮子沟深层、砂西油田、南乙山中深层及台南气田第一口发现井的布井和确定井深工作，在国内外刊物上发表论文多篇。现在青海石油管理局从事石油、天然气勘探工作。

杜启振　助理工程师，1969 年生，1991 年毕业于石油大学物探专业。毕业后一直从事教学和油储地球物理的研究工作。现在石油大学从事油气预测及软件开发工作。

孟伯恩　高级工程师，1941 年生，1965 年毕业于兰州大学物理系物理专业。曾从事绕射扫描叠加偏移的理论研究和软件设计工作，参加了"八五"总公司重点科研项目"地震测井综合应用系统"软件开发工作。现在江汉石油管理局测井研究所从事地震、测井资料综合反演的研究工作。

于建国　高级工程师，1963 年生，1984 年毕业于华东石油学院石油地质专业。曾主持了东营凹陷的地震、地质综合研究工作，发表论文多篇。现在胜利石油管理局物探公司研究所从事地震资料的综合解释工作。

刘　莹　工程师，1963 年生，1983 年毕业于西南石油学院物探专业。曾从事高分辨率地震资料解释工作。现在滇黔桂石油勘探局物探公司从事地震资料综合研究工作。

李卫忠　助理工程师，1967 年生，1990 年毕业于石油大学物探专业。现在胜利石油管理局物探公司研究所从事地震资料的解释处理方法研究和软件应用开发工作。

唐立章　工程师，1960 年生，1983 年毕业于成都地质学院石油地质专业。曾从事国家"六五"、"七五"、"八五"重点科技攻关项目科研课题的研究工作，发表论文十多篇。现在华川石油天然气勘探开发总公司研究院从事石油地质及应用性课题的研究工作。

鄢永玲　高级工程师，1954 年生，1977 年毕业于成都地质学院物探系。曾主持专题地震资料解释和方法研究工作、川西东坡地区地震资料解释工作，发表论文多篇。现在地质矿产部西南石油地质局第二物探大队从事地震资料解释工作。

聂凯轩　工程师，1962 年生，1981 年毕业于石油物探学校，1988 年毕业于石油物探职工大学，现在石油地球物理勘探局物探地质研究院一边攻读硕士学位，一边从事地震资料处理及解释软件的开发应用工作。

任　颖　工程师，1965 年生，1987 年毕业于山东海洋学院地球物理专业。毕业后一直从事地震资料的处理、解释工作。现在石油地球物理勘探局物探地质研究院从事地震解释工作。

冉建斌　工程师，1966 年生，1988 年毕业于石油大学石油地质专业，1994 年在石油大学攻读油藏描述专业硕士学位。现在石油地球物理勘探局物探地质研究院从事地震资料解释及油藏描述的研究工作。

李幸栗　工程师，1963 年生，1981 年毕业于石油物探学校物探专业，1988 年毕业于石油大学物探专业。曾从事地震资料处理和解释工作。现在石油地球物理勘探局物探地质研究院从事解释方法和速度的研究工作。

王世瑞　工程师，1966 年生，1990 年毕业于大庆石油学院物探专业。曾从事物探解释方法研究工作。现在石油地球物理勘探局第一地质调查处从事速度研究工作。

蔡大江　高级工程师，1950 年生，1975 年毕业于长春地质学院石油物探专业。曾从事地震数据处理及应用软件开发工作，发表论文数篇。现在地质矿产部第五物探大队从事地震资料解释和工程地震勘察工作。

陈必远　高级工程师，1963 年生，1983 年毕业于西南石油学院物探专业，1991 年毕业于同济大学海洋地质专业，获硕士学位。长期从事地震资料处理及方法研究工作。现在大庆石油管理局物探公司研究所主要从事地震资料高分辨率处理方法的研究工作。

康志勇　工程师，1964 年生，1988 年毕业于石油大学石油地质专业。曾获总公司科技进步三等奖

一项，辽河石油勘探局科技进步一、二、三等奖各一项，发表学术论文4篇。现在辽河石油勘探局勘探开发研究院从事储层特征研究工作。

王晓华 副教授，1963年生，1982年毕业于华东石油学院物探专业。毕业后一直从事应用地球物理专业的教学和科研工作。现在大庆石油学院从事地震资料处理方法研究工作。

李国林 工程师，1963年生，1986年毕业于长春地质学院地质专业。曾从事地震资料解释工作，参加了国家"八五"重点科技攻关课题"东部地区天然气藏识别与预测技术研究"工作，发表论文多篇。现在胜利石油管理局地质勘探处从事储量管理与研究工作。

林 宁 工程师，1949年生，1983年毕业于西南石油学院矿机专业。现在华北石油管理局从事野外采集和装备的管理工作。

沈 飚 副教授，1963年生，1992年毕业于中南工业大学应用地球物理专业，获博士学位。曾出版专著《电磁波伪脉冲成像及其波动理论》，发表论文20余篇，获部级奖3项。现在东南大学毫米波国家重点实验室从事脉冲探地雷达系统和步进调频探地雷达的开发、研制工作。

游 俊 博士生，1971年生，1994年毕业于江汉石油学院物探专业，1996年毕业于中国地质大学(北京)石油专业，获硕士学位。现在中国地质大学(北京)攻读博士学位，并从事"板桥—歧口凹陷深部储层特征及预测"的研究工作。

唐恩德 工程师，1964年生，1986年毕业于西南石油学院物探专业。毕业后一直从事三维地震资料的处理工作。现在新疆石油管理局地质调查处研究所从事物探方法研究工作。

常新伟 工程师，1965年生，1988年毕业于江汉石油学院物探专业，1992年毕业于长春地质学院地震勘探专业，获硕士学位。毕业后一直从事地震资料的处理工作，发表论文多篇。现在大庆石油管理局物探研究所从事高分辨率、高信噪比等方面的研究工作。

杨子建 工程师，1958年生，1980年毕业于南京工学院无线电系，后毕业于成都地质学院物探专业。曾从事大地电磁测深及其资料的处理、解释工作。现在地质矿产部第六物探大队从事大地电磁测深资料的处理、解释工作。

冯世民 工程师，1956年生，1976年毕业于陕西省煤矿学校物探专业。毕业后一直从事地震资料的野外采集、处理和解释工作，发表论文3篇，曾获天津市储委颁发的铜牌奖。现在河北煤田物测队从事地震资料的处理和解释工作。

崔若飞 副教授，1954年生，1977年毕业于中国矿业大学物探专业，1995年获博士学位。曾主持过多项煤炭系统的科研任务，获部级科技进步二等奖一项，发表论文30余篇。现在中国矿业大学从事地震勘探方面的教学、科研工作。