

碳酸盐岩岩电特性数字岩心仿真

岳文正¹, 陶 果¹, 崔冬子², 郑小川³

(1. 中国石油大学 北京地球探测与信息技术重点实验室, 北京 102249;

2. 中国石油集团长城钻探工程有限公司 钻井技术服务公司, 辽宁 盘锦 124010;

3. 中石油四川石油管理局 测井公司, 重庆 401147)

摘要:对于碳酸盐岩储层,其孔隙度通常较低,流体驱替难度大,从而造成岩电物理实验难以获得低含水饱和度情况下的电阻率资料。利用数字岩心模型,结合格子气自动机技术对不同含水饱和度情况下电的传输特性进行数值模拟研究,揭示非阿尔奇现象产生的原因,建立新的含水饱和度计算模型。并将计算结果与人工岩心和实际岩心实验的结果作对比,其良好的吻合性表明新模型适于在非阿尔奇碳酸盐岩储层进行准确的含水饱和度评价。

关键词:格子气自动机;数字岩心;非阿尔奇现象;含水饱和度

中图分类号:TE319

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)03-0007-05

Simulation of Digital Core of Carbonate Rock with Electrical Properties

YUE Wenzheng¹, TAO Guo¹, CUI Dongzi², ZHENG Xiaochuan³

(1. Beijing Key Lab of Earth Prospecting and Information Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Drilling Technology Services Company, PetroChina GWDC, Panjin, Liaoning 124010, China;

3. Logging Company Ltd., Sichuan Petroleum Administration, CNPC, Chongqing 401147, China)

Abstract: Generally, it is difficult to obtain the resistivity data of low water saturation through the physical experiments of carbonate rock reservoirs because of their small porosity preventing fluids draining in pore space. In this paper, lattice gas automata (LGA) based on the digital core was applied to simulate the electrical transport properties of samples with different saturations, revealing the reasons producing non-Archie phenomenon and establishing the new model of water saturation computation. The contrast of results from computation with the results from experiments of artificial cores and actual cores was made and the good agreement of results demonstrated that the new model was suitable to the accurate evaluation of water saturation of non-Archie carbonate rock reservoirs.

Key words: lattice gas automata; digital core; non-Archie phenomenon; water saturation

1942年,阿尔奇建立了饱和度评价中电阻率增大系数和含水饱和度($I-S_w$)之间的关系模型,该模型是建立在纯砂岩岩石物理电性实验基础上的半理论半经验公式,表明在双对数坐标下 $I-S_w$ 关系为直线^[1],如图1所示。

碳酸盐岩储层通常具有较强的非均质性,在碳酸盐岩岩电关系的实验研究中发现了大量的非阿尔奇现象^[2-3],即在双对数坐标中,电阻率增大系数和含水饱和度($I-S_w$)之间的关系并不是阿尔奇公式描述的直线,而是随着岩石含水饱和度(S_w)的减小, $I-S_w$ 关系逐渐偏离阿尔奇公式描述的直线而出现弯曲(图1),此时,如果继续采用阿尔奇公式进行含油气性评价,必然会对含油气饱和度的解释结果造成较大误差,影响油气层的识别,故而在碳酸盐岩储层含水饱和度计算的应用上存在一定的局限性。因此,研究碳酸盐岩非阿尔奇

收稿日期:2011-01-24

基金项目:国家自然科学基金项目(41074103);国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2007CB209601);中国石油天然气集团公司基础研究计划项目(06A30102)。

作者简介:岳文正(1974—),男,辽宁盘锦人,副教授,博士,主要从事石油测井资料处理、岩石物理实验及其仿真研究。

E-mail: yuejackl@sina.com.

现象的成因、建立相应的岩电关系模型,是提高碳酸盐岩储层含油气定量评价准确性,提高储量计算精度的关键。

图 1 中横坐标为含水饱和度,纵坐标为电阻率增大系数,菱形数据点为得到的非阿尔奇岩电数据,直线为利用阿尔奇模型对这些数据的拟合结果。

对于非阿尔奇现象的成因及其相应的解释模型,学者们的研究结果证实^[2-3],多种因素可以导致 $I-S_w$ 关系非阿尔奇现象的产生,比如润湿性、束缚水、流体的非均衡分布以及泥质成分等。但各因素的微观作用机理仍存争议,原因在于岩石物理实验是一种宏观研究手段,实验过程中岩石微观孔隙结构、流体分布状态以及电传输过程等微观因素无法直接观测和控制,鉴于此,许多人尝试用数值模拟物理实验仿真的方法来解释阿尔奇公式参数的物理意义,寻找建立储层参数定量解释模型的方法^[4-6]。虽然大量的数值研究取得一定成果,但这些数值方法所采用的孔隙介质模型的孔隙结构简化,岩石模型孔隙结构与实际岩石孔隙结构相差太大、流体分布过于理想,计算结果有很大的局限性。

本研究将采用基于数字岩心的格子气自动机方法对饱和和多相流体岩心的导电特性进行模拟,可以采用与岩石具有相似复杂度的孔隙结构模型,揭示非阿尔奇现象的成因,并将计算结果与岩心实验结果作对比。

1 格子气自动机方法

格子气自动机(lattice gas automata ,LGA)模型方法是在细胞自动机基础上演变和发展起来的。第一个完全离散的 LGA 模型是 1973 年建立的 HPP(Hardy-Pomeau-Pazzis)模型^[7]。该模型的正方形网格导致了 HPP 模型中的应力张量各向异性,不能正确导出 Navier-Stokes 方程,并导致了其他一些不合理的模拟结果。1986 年,正六边形格子的 FHP(Frisch-Hasslacher-Pomeau)模型的提出解决了 HPP 模型的非旋转对称问题^[7]。

格子气自动机模型对流场空间、流体和时间均进行离散。对于流体,将其离散成只有质量而没有体积的微小粒子,按一定规则分布在节点上,沿着格线方向运动,在运动过程中粒子的分布遵守 Pauli 不相容准则。而对于时间的离散是把时间离散成统一的时间步,在每一个时间步内,粒子完成在每个节点上的相互碰撞,然后从节点向邻居节点的运移。演化过程可以描述为

$$f_a(x+e, t+1) = f_a(x, t) + \Omega(f_a(x, t)). \quad (1)$$

其中: $f_a(x, t)$ 是在 x 节点 t 时刻的粒子分布函数, e_a 为从格子节点 x 指向其邻近节点的单位向量集。

如果定义密度(ρ)和动量(ρu)为

$$\rho = \sum_a f_a(x, t), \quad (2)$$

$$\rho u = \sum_a e_a \cdot f_a, \quad (3)$$

则 FHP 模型微观粒子演化的宏观行为在不考虑重力影响条件下符合达西定律。比较欧姆定律和达西定律可以发现,如果用电荷代替流体粒子,用电场强度代替压力梯度,那么两定律式子的形式几乎是相同的,这说明在忽略重力影响时,电的流动与其他流体的流动有着相似的规律^[8]。由此可见,可以合理地认为格子气方法同样可以用来模拟电的流动。

2 数字岩心建模与模拟方法

数字岩心方法,是采用数值模拟和数据分析技术建立具有与地层孔隙结构相同的数字化孔隙介质模型。

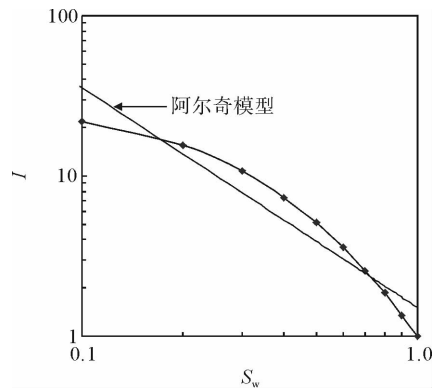


图 1 $I-S_w$ 关系阿尔奇模型和非阿尔奇示意图
Fig. 1 Sketch of $I-S_w$ relation between Archie and non-Archie models

由于其在处理复杂孔隙几何结构的灵活性和方便性,在岩石物理领域扮演越来越重要的角色。研究证实数字岩心作为岩石物理实验的补充,是一种在中观尺度研究岩石孔隙传输特性的有效手段^[9]。

数字岩心建模可采用图像处理技术对得到的 2D 铸体薄片进行处理,得到储层岩石的孔隙结构信息,用顺序指示模拟方法进行 3D 数字岩心建模。薄片的二值图像每个节点的意义,可以分为 2 种:孔隙和骨架。从薄片数据的图像处理中,得到了二值图像的空间统计参数——孔隙度和自相关函数,然后确定随机访问每个网格节点路径,指定估计网格点的领域条件数据的个数,在每个节点处,都估算出一个局部条件累积分布函数。与先前沿着随机的路线模拟的点一样受薄片图像制约。估算的值作为条件保存下来后,沿着随机路线处理下一个节点。当所有节点都处理后,用正确的空间统计,就能得到新的 3D 数字岩心模型^[9]。该建模方法得到的数字岩心能最大程度地与实际的岩石接近,重构的数字岩心不仅可以用来精确地预测物理特性,而且还可以用来了解不同物理响应之间的内在关系。这对岩石物理的研究有着十分重要的意义。

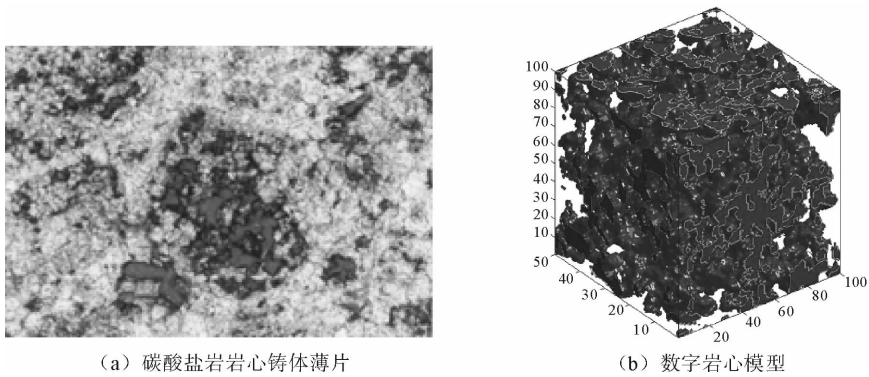


图 2 碳酸盐岩岩心铸体薄片和数字岩心模型图
Fig. 2 The core cast slices of carbonate rock and digital core model

此外,为了检验孔隙空间结构对导电特性的影响,还可采用大小形状不同的骨架颗粒来构造数字岩心模型,通常骨架的复杂程度同样能够反映孔隙空间的复杂程度。首先可由岩心薄片确定骨架颗粒的粒径分布情况(图 3(a))。根据骨架颗粒分布特征,采用数值方法模拟颗粒的沉积过程,形成数字岩心模型,如图 3(b)。根据需要,分别按照不同的孔隙度来建立模型,并按照饱和度大小,利用数值模拟流体的分布特征,对不同的孔隙结构和饱和流体的分布情况建立相应的数字岩心模型。

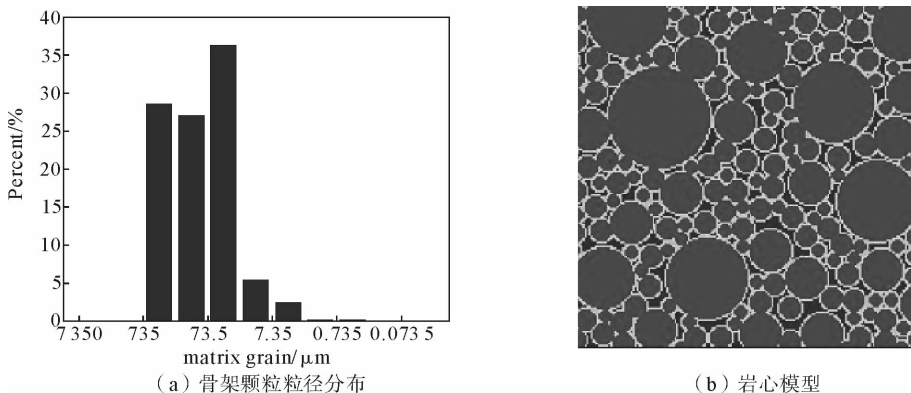


图 3 根据骨架颗粒粒径分布建立数字岩心模型图
Fig. 3 The digital core model formed with the radius distribution of matrix grain

数值实验过程中,模型的上下边界采用无滑移固壁边界模拟绝缘边界。模型的左右边界设为周期性边界,模拟无穷介质。具体过程可以描述为:如果以 $S_{出}(t)$ 表示第 t 时间步流出边界的状态, $S_{入}(t+1)$ 表示第 $t+1$ 时间步流入边界的状态,则 $S_{入}(t+1) = S_{出}(t)$ 。设置电压为 0.1,初始平均粒子分布密度为 0.85。

3 数值模拟结果和分析

在含油气储层饱和度评价中,目前普遍应用的阿尔奇公式是建立在具有均匀粒间孔隙的纯砂岩岩石物理电性实验基础上的半理论半经验公式

$$I = bS_w^{-n} \quad (4)$$

其中: n 称为饱和度指数,对应于双对数坐标系中阿尔奇直线的斜率; b 为阿尔奇参数;对于同一岩心, n 和 b 可视为常量。

碳酸盐岩具有低孔、低渗、非均质性强等特点,岩电物理实验难以获得低含水饱和度情况下的电阻率资料,所以本研究通过数字岩心模拟不同含水饱和度下的岩电特性,建立含水饱和度计算模型。

首先研究饱和单相流体数字岩心的导电特性。根据不同孔隙完全水饱和和数字岩心的导电特性模拟结果,图 4 展示了地层因素 F 与孔隙度 ϕ 的相互关系,与阿尔奇所描述的 $F-\phi$ 幂函数关系^[1]几乎完全吻合。说明数字岩心模拟方法是有效的、切实可行的。

此外,根据不同骨架颗粒分布建立的孔隙介质模型,使其饱和和多相流体(本研究中是油水两相流体),利用数值模拟其导电特性,在模拟过程中,孔隙介质模型的骨架和流体分布规律是可调的,因而可以研究导电特性与骨架和流体分布之间的关系。

模拟结果显示,在双对数坐标下 $I-S_w$ 关系并不总是直线,当 S_w 小于 0.55 时,出现明显的非阿尔奇现象,即此时 I 与 S_w 的关系为一条曲线,而且随着 S_w 的减小, $I-S_w$ 关系逐渐向横坐标轴(即 S_w 轴)靠近,见图 5。

由图 5 可见,当含水饱和度小于 0.55 时,其 I 值已经偏离了阿尔奇描述的直线关系(在双对数坐标下),这说明在含水饱和度小于 0.55 时, I 与 S_w 间的关系发生改变,在双对数坐标下表现为明显的非线性关系,这种现象同文献[3]和文献[10]的岩心实验结果非常一致,由于本孔隙介质模型是纯的模型,不存在其他导电现象的影响,因而这一结果表明 $I-S_w$ 关系的非阿尔奇现象可以归结为孔隙介质、骨架、流体等混合导电的本质表现。

从前面的研究结果可以发现,饱和度指数 n 不是常数,它是含水饱和度以及孔隙结构等参数的函数。因此,在这种情况下利用阿尔奇公式计算饱和度存在较大的误差。利用本文方法可以较有效地解决这个问题,通过对结果进行分析可建立新的计算模型

$$I = S_w^{-Y} S_w^U \quad (5)$$

其中, Y 和 U 是和孔隙结构有关的常量。

为检验本文饱和度计算方法的实用性,通过 2 块人工岩心^[10]的岩电物理实验测量数据,将实验测量得

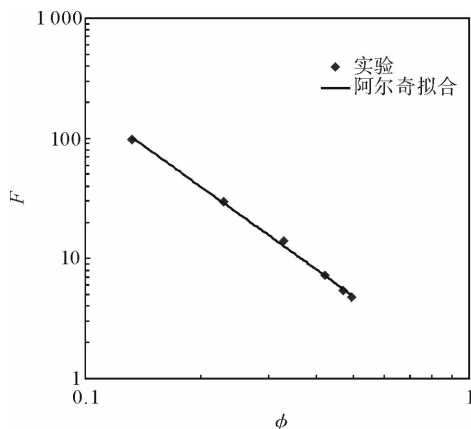


图 4 F 与孔隙度关系数值模拟结果图

Fig. 4 The simulated results of relations between formation factor (F) and porosity (ϕ)

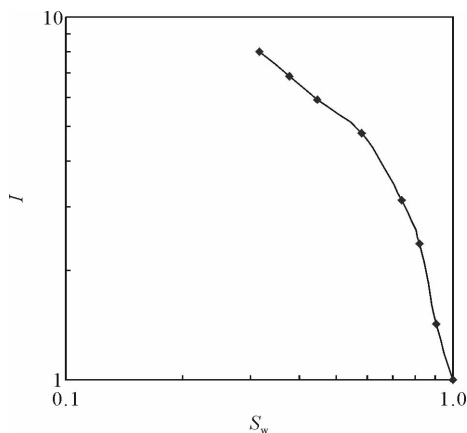


图 5 I 与 S_w 关系图

Fig. 5 The relation between I and S_w

到的相关结果与用新模型的处理结果进行比较。为了更清楚地了解详细情况并不失一般性,将这2块人工岩心的 $I-S_w$ 的关系图绘制在一张图上,以便于分析。

从图6中可以清楚地看到,虽然这2块样品的骨架特性相同,但是2号样品的非阿尔奇现象的程度要比1号样品更加明显和突出,原因在于这两块岩心的孔隙结构不同。图6所示的岩心实验结果表明,随着含水饱和度的减小,非阿尔奇现象越来越明显。这与利用格子气自动机模拟的结论相同,证明格子气方法的有效性。

图7是来自中国中部某油田的碳酸盐岩岩心实验数据,图中直线为阿尔奇方法对实验数据的处理结果,曲线为本文新方法对实验数据的处理结果,数据点为实验测量获得的数据结果。可以发现,实验数据与新模型计算数据吻合的相当好,这表明数据的一致性很好,也说明饱和度计算是有效的。由图7可以看出,对于存在非阿尔奇现象的数据,利用本文方法比利用阿尔奇方法处理更有效。同样,在存在非阿尔奇现象的碳酸盐岩储层,应用新模型可以获得更加准确的饱和度信息。

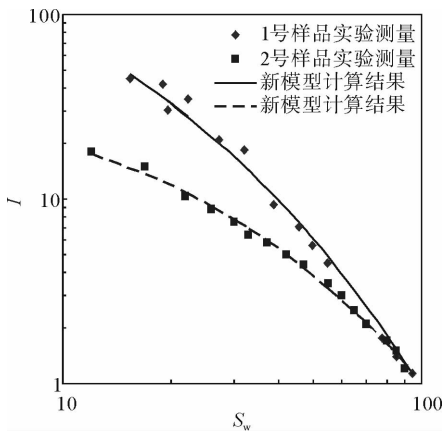


图6 人工样品的 S_w 关系图

Fig. 6 The $I-S_w$ relation of artificial samples

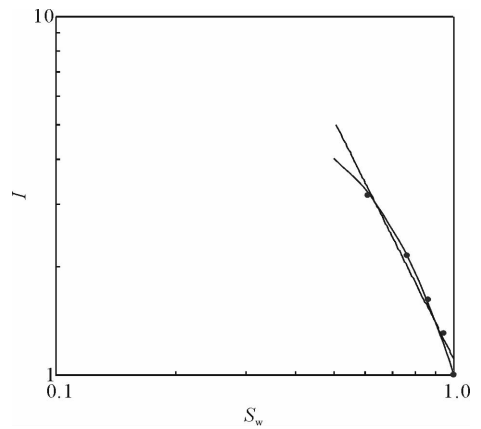


图7 阿尔奇方法与本方法计算结果对比图

Fig. 7 The contrast of results from the calculation and method using Archie's formula

4 结论

通过数字岩心方法研究发现,孔隙介质模型的骨架和流体分布规律是可调的,因而可以研究导电特性与骨架和流体分布之间的关系,模拟结果显示数字岩心模拟方法是有效的、切实可行的。

基于数字岩心的格子气自动机是岩石物理研究的数值仿真算法,可以研究岩石物理实验过程,其便捷之处在于数字岩心微观结构和流体流动状态是可直观观测和调节的,因而可以研究不同微观因素对岩电特性的影响规律,并开发适用的非阿尔奇模型来应用于碳酸盐岩储层的饱和度评价。

采用数字岩心研究结果表明,饱和度指数 n 不是一个定值,它是 S_w 以及孔隙结构的函数; $I-S_w$ 关系的非阿尔奇现象是孔隙介质、骨架、流体等混合导电的本质表现。

参考文献:

- [1] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. Petroleum Transaction of AIME, 1942, 146: 54-61.
- [2] 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)[J]. 地球物理学报, 1989, 32(5): 580-591.

LI Ning. Generalization of the resistivity-porosity and resistivity-oil gas saturation relations, as well as the determination of their optimum approximation function[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1989, 32(5): 580-591.