

引用格式:王敏.基于砂砾岩多组分三维数字岩心的电阻率数值模拟与影响规律分析[J].油气地质与采收率,2024,31(6):33-44.
WANG Min.Resistivity numerical simulation and its influence law analysis based on multi-component 3D digital core of glutenite [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(6): 33-44.

基于砂砾岩多组分三维数字岩心的 电阻率数值模拟与影响规律分析

王敏^{1,2}

(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.页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室,北京 102206)

摘要:砂砾岩储层具有强烈的非均质性和复杂的孔隙结构,导致其电阻率响应难以准确反映含油性,而传统的两组分三维数字岩心建模和电阻率数值模拟方法均不能表征砂砾岩多组分和多尺度孔隙空间,不能准确模拟砂砾岩的电阻率。以东营凹陷北部陡坡带古近系沙四段上亚段深层砂砾岩为研究目标,以盐家油田盐22-22井柱塞岩样为研究对象,开展常规岩心分析、核磁共振(NMR)测试、X射线计算机层析(X-CT)扫描、拼接扫描电镜(MAPS)测试和扫描电镜矿物定量评价(QEMSCAN),建立砂砾岩多组分三维数字岩心,采用电阻率数值模拟方法,分析储层参数对砂砾岩电阻率特性的影响规律。结果表明:①采用X-CT扫描标准柱塞岩样,采用多阈值分割区分主要矿物组分,建立砂砾岩多组分三维数字岩心,主要矿物组分与样品X射线衍射(XRD)测试结果吻合,但受到扫描分辨率的限制,识别孔隙度远低于岩心气测孔隙度。②选用100和10 nm分辨率的MAPS测试建立的二维图像计算主要矿物组分微孔隙率,与三维数字岩心中矿物组分含量结合,计算砂砾岩多组分三维数字岩心的总孔隙度,与岩心气测孔隙度基本吻合。③电阻率数值模拟结果表明砾石和黏土矿物含量对砂砾岩电阻率的影响并非单调关系,砾石含量的影响与样品分选有关,黏土矿物含量的影响与黏土矿物类型和地层水矿化度有关。

关键词:砂砾岩储层;X-CT扫描;MAPS测试;高精度数字岩心;电性;数值模拟;东营凹陷

文章编号:1009-9603(2024)06-0033-12

DOI:10.13673/j.pgre.202308034

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Resistivity numerical simulation and its influence law analysis based on multi-component 3D digital core of glutenite

WANG Min^{1,2}

(1.Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City,
Shandong Province, 257015, China;2.State key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment
Mechanisms and Effective Development, Beijing City, 102206, China)

Abstract: Due to the strong non-homogeneity and complex pore structure of glutenite reservoirs, it isn't easy to accurately reflect the oil content of the reservoir through resistivity response. However, the traditional two-component three-dimensional (3D) digital core modeling and numerical simulation method of resistivity fail to characterize the multi-component and multi-scale pore space and accurately simulate the resistivity of the glutenite. The deep glutenites of the upper Submember of the 4th Member of the Paleogene Eocene Shahejie Formation (Es_4^U) in the northern steep slope zone of Dongying Sag were studied, as well as the plunger samples of Well Yan 22-22 in Yanjia Oilfield. The conventional core analysis, nuclear magnetic resonance (NMR) test, X-ray com-

收稿日期:2023-08-11。

作者简介:王敏(1982—),男,山东博兴人,高级工程师,博士,从事测井信息处理及解释工作。E-mail:wangmin136.slyt@sinopec.com。

基金项目:中国石化前瞻基础课题“陆相页岩电性控制因素及导电机理研究”(P24184),中国石化科技攻关项目“济阳拗陷缓坡带稠油发育区潜力评价及目标优选”(P24018)。

puterized tomography (X-CT) scanning, modular automated processing system (MAPS) test, and quantitative evaluation of minerals by scanning electron microscopy (QEMSCAN) were performed to establish a multi-component 3D digital core of glutenite. The numerical simulation method of resistivity was adopted to analyze the influence of reservoir parameters on the resistivity characteristics of the glutenite. The results show that ① X-CT scanning is used to scan the standard plunger samples, and the multi-threshold segmentation is performed to distinguish the main mineral components to establish a multi-component 3D digital core of the glutenite. The main components match with the results of X-ray diffraction (XRD) tests of the samples, but the identified porosity is much lower than the gas porosity measured of the core due to the limitation of the scanning resolution. ② The two-dimensional (2D) images established by the MAPS test with 100 nm and 10 nm resolution are selected to calculate the microporosity of the main mineral components, which is combined with the component content of the 3D digital core to calculate the total porosity of the multi-component 3D digital core of the glutenite, which matches with the gas porosity measured of the core. ③ The numerical simulation results of resistivity show that the influence of gravel and clay mineral content on the resistivity of glutenite is not monotonous. The influence of gravel content is related to sample sorting, and that of clay mineral content is related to the type of clay and the salinity of the formation water.

Key words: glutenite reservoir; X-CT scanning; MAPS test; high-precision digital core; electrical property; numerical simulation; Dongying Sag

沙四段上亚段砂砾岩体是东营凹陷北部陡坡带重要的油气储集体,其非均质性强、孔隙结构复杂、岩性种类多、成分及结构成熟度均较低,导致其电阻率响应受岩石骨架和孔隙结构影响严重^[1-2]。岩石骨架成分复杂且测井曲线同时受储层岩性、结构、黏土矿物含量及含油性等因素的影响,导致油层、气层、干层界限的电性特征极不明显,很难建立含水饱和度的计算模型,流体识别难度大,使用常规的解释图版对油水层进行判别不能达到理想效果。骆飞飞等通过大量的岩石物理实验分析了玛湖地区砂砾岩的岩电参数与孔隙结构、岩石颗粒和黏土矿物等参数的关系,并采用回归方法建立定量关系,提高了储层含油气饱和度计算精度,但该方法适用性不强,也未能揭示非均质砂砾岩的导电机理^[3]。因此,有必要系统定量地研究储层岩性、物性和孔隙结构对砂砾岩岩石物理属性的影响规律,明确砂砾岩储层电性特征与含油性定量关系,进一步为砂砾岩储层含油性评价和储层参数定量解释奠定理论基础。

三维数字岩心是岩石的三维数字化图像,能较真实地反映岩石微观孔隙结构,应用其进行岩石物理属性数值模拟的结果与实验测量的结果吻合度较高,已经发展为岩石物理研究的重要方法^[4-5],其应用主要体现在以下3个方面:①采用物理成像方法在孔隙尺度定性或定量分析微观结构特征^[6-9]。②基于三维数字岩心进行岩石物理属性数值模拟,预测实验难以测量的物理属性^[10-12]。③定量研究储层微观结构对岩石物理性质的影响规律^[13-16]。三维数字岩心建模的准确性和代表性决定了岩石物理属性数值模拟结果的准确性和适用性。砂砾岩属于近源快速堆积的产物,一般分选较差,导致岩心

具有极强的非均质性^[17];因此,如何建立与实际砂砾岩情况相符,且微观参数连续可调的砂砾岩三维数字岩心至关重要。X-CT扫描是构建三维数字岩心最直接的方法,可建立三维灰度图像,经过图像滤波和分割等流程,识别孔隙空间和岩石骨架。X-CT扫描图像空间分辨率与样品尺寸相互制约,样品尺寸越大,扫描分辨率越低,孔隙识别能力越弱。由于砂砾岩非均质性强、物性差、孔隙尺寸小,仅通过X-CT扫描不能同时满足样品代表性和孔隙识别能力的要求,且砂砾岩黏土矿物含量高,传统的基于三维数字岩心电阻率数值模拟方法仅考虑了孔隙流体的导电作用,未考虑黏土矿物对电阻率的影响。

为了保证岩石物理属性数值模拟结果的准确性,构建适用于砂砾岩电阻率数值模拟的三维数字岩心,笔者采用NMR测试、X-CT扫描、MAPS测试、QEMSCAN及SEM成像方法识别不同尺度的砂砾岩孔隙空间,采用多阈值分割建立砂砾岩多组分三维数字岩心。在此基础上,采用数值模拟方法,融合不同尺度孔隙流体和矿物的电阻率,准确模拟砂砾岩样品电阻率,验证方法的准确性。在真实三维数字岩心的约束下,采用过程法建立具有不同微观结构的虚拟多组分三维数字岩心,开展电阻率响应有限元数值模拟分析,明确微观因素对电阻率的影响规律,揭示砂砾岩的导电机理,对改进现有的测井解释模型具有指导意义。

1 多组分三维数字岩心建模

1.1 粒间孔隙识别

渤海湾盆地东营凹陷北部陡坡带沙四段上亚

段沉积了一套巨厚的砂砾岩,其母岩成分复杂,主要来源于遭受剥蚀的太古界花岗片麻岩,具有高放射性的特点。选取盐家油田盐22-22井5块砂砾岩样品,开展岩心常规分析、NMR测试及X-CT扫描识别粒间孔隙。

5块样品孔隙度为3.32%~9.74%,渗透率均低于0.1 mD(表1)。NMR测试结果表明 T_2 谱呈多峰态分布(图1),弛豫时间主要分布在0.1~1 000 ms,表明样品发育多种孔隙类型,且尺寸分布范围广。

表1 盐22-22井砂砾岩样品孔隙度和渗透率测量结果
Table1 Porosity and permeability of glutenite samples from Well Yan 22-22

样品编号	深度/m	孔隙度/%	渗透率/mD
#74	3 394.02	5.43	0.055 6
#74-1	3 394.06	3.32	0.033
#74-2	3 394.12	7.53	0.089
#74-3	3 394.15	8.21	0.086 6
#74-4	3 394.20	9.74	0.098

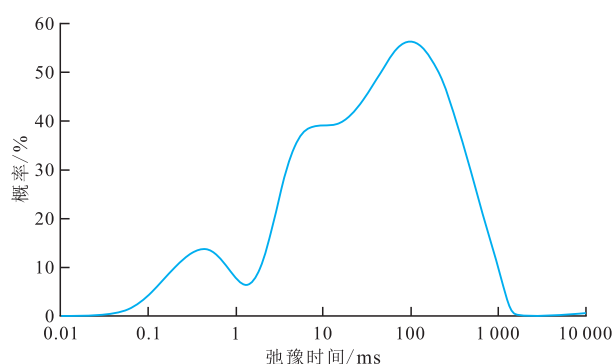


图1 盐22-22井#74-4样品NMR测试结果

Fig.1 NMR test results of #74-4 sample from Well Yan 22-22

采用X-CT扫描标准柱塞样品(图2a)(直径为25.4 mm),建立岩心三维灰度图像和二维切片图像(图2b,图2c),可见砾石分布,以岩屑为主,粒径大于1 cm,岩心非均质性强。图像的灰度值与矿物组

分密度相关,亮度最暗的部分为孔隙,岩石骨架中不同亮度区域代表不同矿物组分,然而有些密度接近的矿物组分无法通过灰度图像区分。经过图像分割,将三维灰度图像(图3a)分割为岩石孔隙和骨架(图3b),采用Hoshen-Kopelman(HK)标记算法,将属于同一孔隙簇的像素点统一标记,判断各个孔隙簇是否贯穿岩心,进而判断孔隙连通性,如图3c所示,不同的色彩表示不同的孔隙簇,色彩与孔隙簇尺寸等信息无关。

由图2和图3可见,受图像分辨率限制,X-CT扫描(分辨率为15 μm /像素)能识别大尺寸的粒间孔隙,这些粒间孔隙组成了大量的孤立孔隙簇,孔隙连通性差,不存在一个孔隙簇贯穿整个岩心,由此构建的三维数字岩心识别的孔隙度(4.2%)低于岩心实测值(9.74%),需通过QEMSCAN、XRD测试及MAPS测试识别三维数字岩心中的矿物组分与微孔隙。

1.2 矿物组分别

X-CT扫描获取的三维灰度图像中灰度值与矿物组分密切相关,但尚未建立定量关系。QEMSCAN能够通过沿预先设定的光栅扫描模式加速的高能电子束对样品表面进行扫描,根据每个像素点的散射能谱(EDS)反演像素点代表的矿物组分,进而得到矿物集合体嵌布特征的彩图,如图4a所示,图中不同颜色代表不同矿物组分。采用图像配准算法,确定该二维彩色图像对应的二维灰度图像切面(图4b),通过对比图4a和图4b,得到不同矿物组分对应的灰度区间。采用多阈值分割算法将二维灰度图像划分为孔隙与4种组分。按照灰度值由高到低的顺序依次为X-CT扫描识别的孔隙、伊利石与高岭石、石英与钠长石、钾长石与方解石、绿泥石,其中伊利石与高岭石发育微孔隙导致像素接

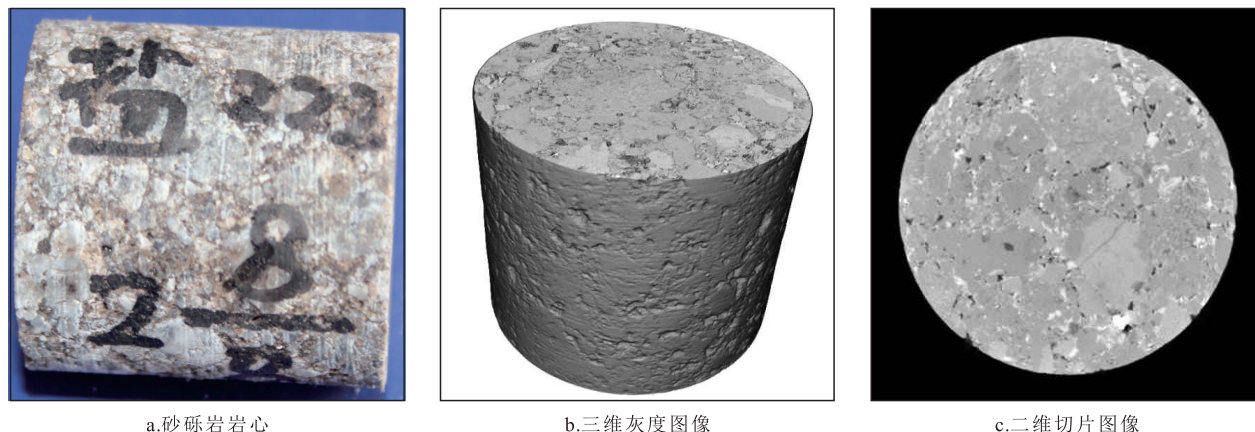
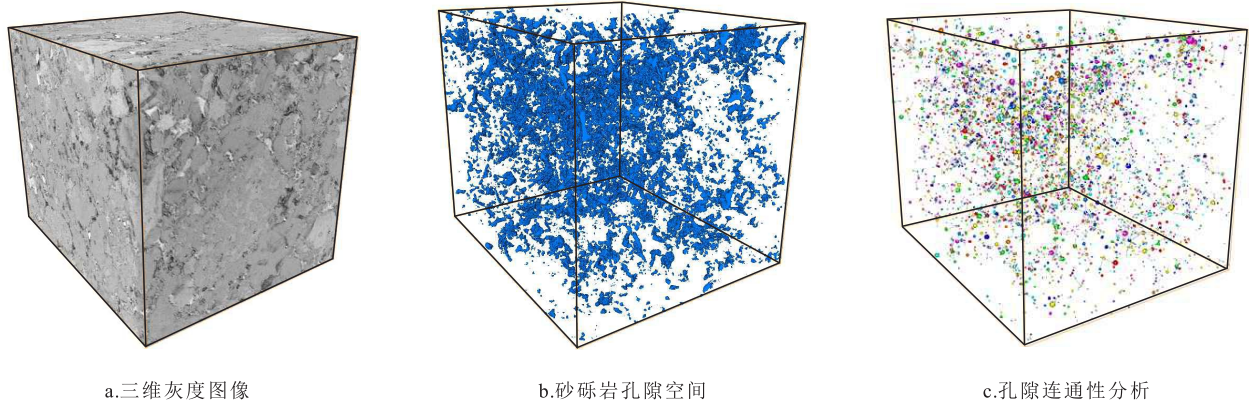


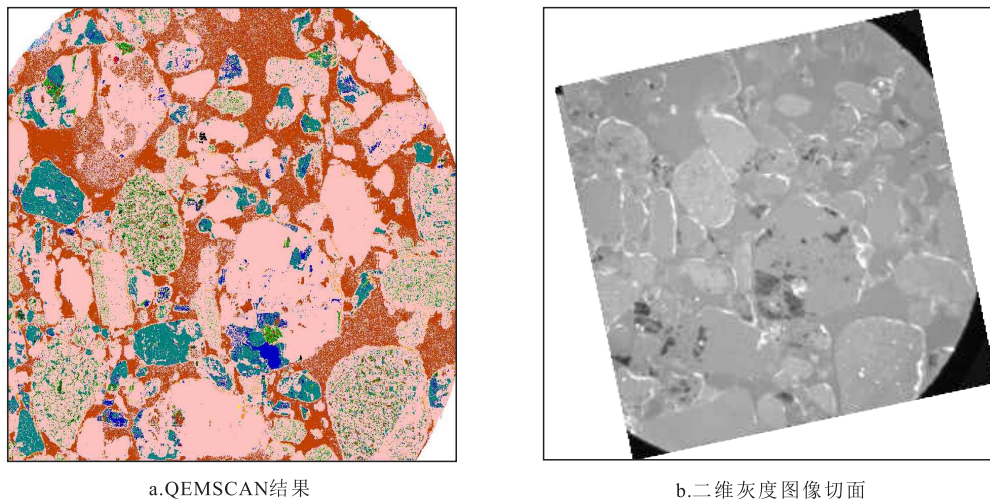
图2 砂砾岩岩心及其三维灰度图像

Fig.2 Core and 3D grayscale images of glutenite



a.三维灰度图像
注:蓝色为岩石孔隙,透明为岩石骨架。

图3 基于X-CT扫描的三维数字岩心模型
Fig.3 3D digital core model based on X-CT scanning



a.QEMSCAN结果
b.二维灰度图像切面
图4 QEMSCAN结果与对应的二维灰度图像切面
Fig.4 QEMSCAN results and responding 2D grayscale images

近,石英与钠长石密度接近无法区分。由此,构建多组分三维数字岩心模型(图5),统计各组分体素点所占比例可得到矿物的体积分数。将XRD测试结果转化为体积分数,与多组分三维数字岩心模型中矿物的体积分数基本接近,表明该模型能准确表征样品的矿物组分信息。

1.3 微孔隙分布特征

X-CT扫描可以识别出砂砾岩样品中的部分粒间孔隙,但对于砂砾岩中尺度更小的粒间孔隙和微孔隙难以识别,因此无法形成完整的导电路径。为分析孔径小于分辨率的微孔隙,反映非均质性强的砂砾岩孔隙空间,采用MAPS测试将样品端面划分为一系列网格,扫描每一个网格获取高精度图像,最后拼接所有网格的二维图像,建立高精度大视域二维图像(图6),图像分辨率为100 nm/像素。在整个视域图像(图6a)下,可见大尺寸残余粒间孔隙和岩石颗粒,将二维图像放大,可见小尺寸颗粒粒间孔隙、黏土矿物填隙物微孔隙及岩屑中发育的微孔

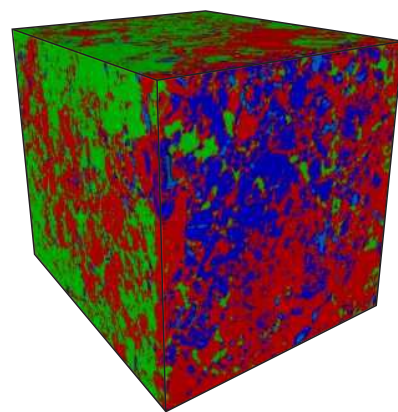
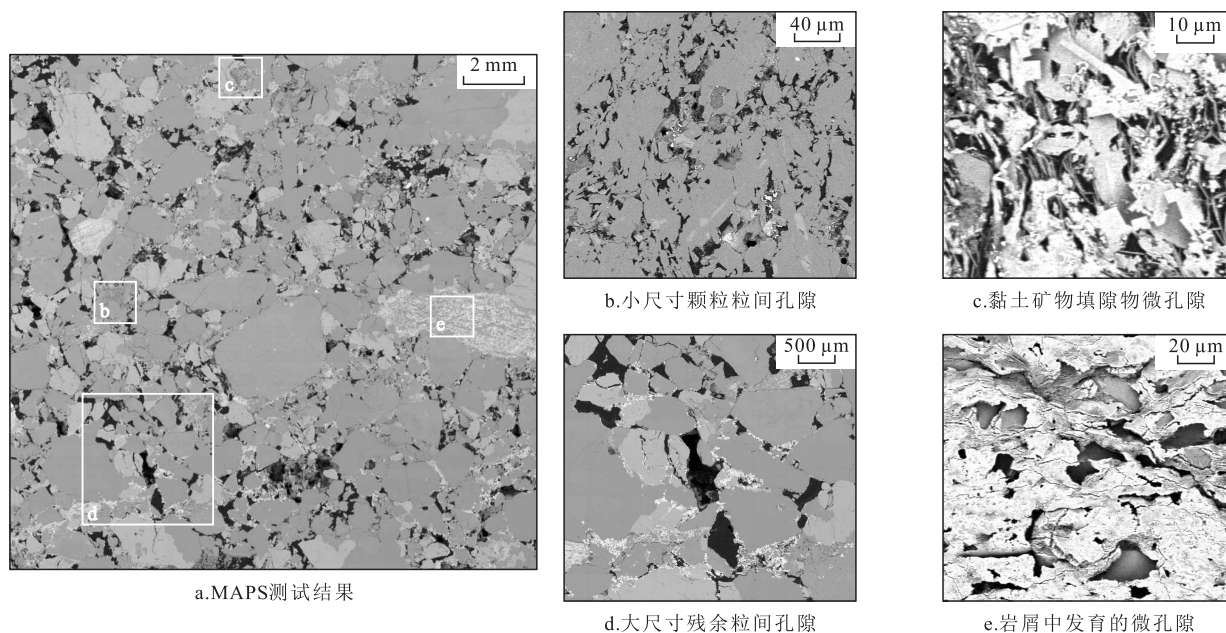


图5 多组分三维数字岩心模型
Fig.5 Multi-component 3D digital core model

隙(图6b-6c)与图1显示的多峰态分布相吻合。

MAPS测试识别的孔隙度为7.54%,由于分辨率提高,孔隙识别能力明显高于X-CT扫描,但仍小于岩心实测值。统计MAPS和NMR测试计算的孔隙半径分布曲线(图7),发现MAPS测试基本识别了大孔径的孔隙,微孔隙尚未完全识别。图8为砂



注:图中亮度较低的区域为孔隙,高亮的部分为岩石骨架,岩石骨架中不同亮度表征不同的矿物组分。

图6 MAPS测试识别砂砾岩的不同类型孔隙
Fig.6 Different types of pores in glutenite identified by MAPS

砾岩样品 SEM 图像,图 8a 分辨率为 500 nm/像素,显示石英颗粒间的粒间孔隙被充填,但在该分辨率下仍不能识别充填物类型和孔隙结构。提高分辨率至 29 nm/像素(图 8b),显示粒间孔隙充填物是高岭石,可见明显的六边形结构,成书页状分布。当分辨率提高到 15 nm/像素(图 8c),可见高岭石结构之间存在明显的孔隙,通过图像分割,区分出高岭石和孔隙。经过统计,由高岭石组成的充填物中的微孔隙度为 22%,该部分孔隙构成了砂砾岩样品的大部分孔隙,对岩石的物性和电性具有重要的影响,是不可忽略的。

将砂砾岩的孔隙空间划分为 X-CT 扫描识别的残余粒间孔隙、钾长石和方解石中的溶蚀孔、高岭石和伊利石中的微孔隙、石英和钠长石中的晶间孔、绿泥石中的充填物微孔隙,统计每种矿物组分

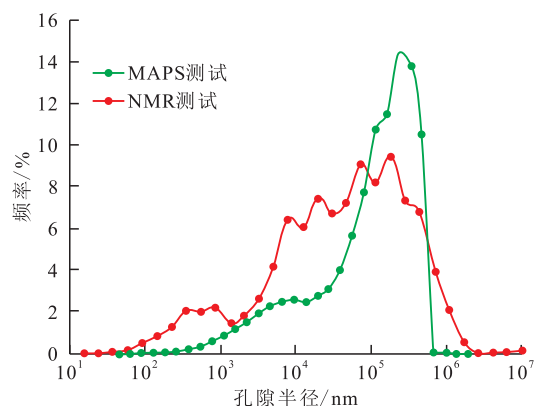


图7 MAPS和NMR测试计算的孔隙半径分布曲线
Fig.7 Pore radius distribution curves calculated by MAPS and NMR tests

相对应的微孔隙率(表2)。在多阈值分割建立多组分三维数字岩心的基础上,每种矿物组分体积分数乘以其微孔隙率,再与识别粒间孔隙度相加,得到

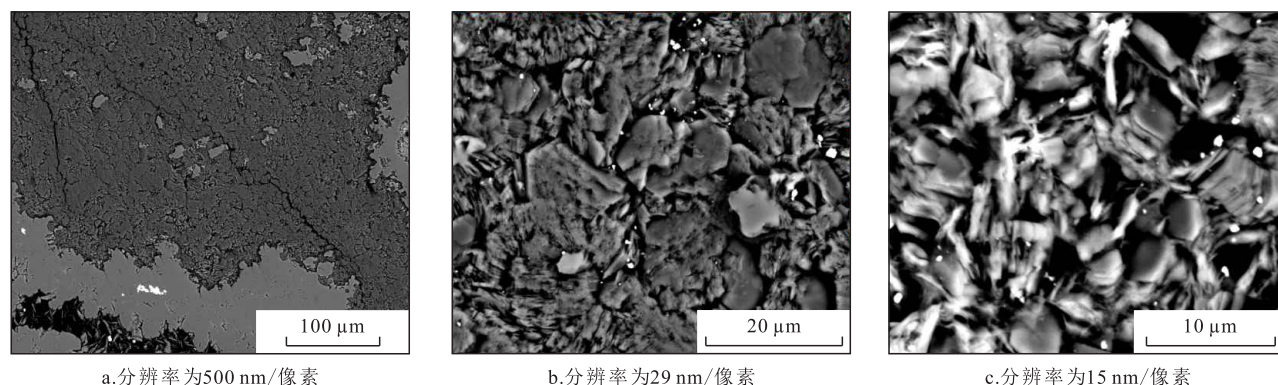


图8 砂砾岩样品 SEM 图像
Fig.8 SEM images of glutenite samples

表2 不同矿物组分对应的微孔隙率
Table2 Microporosities of different mineral components

序号	孔隙类型	矿物组分	微孔隙率
1	残余粒间孔隙	孔隙	1
2	溶蚀孔	钾长石和方解石	0.1
3	黏土矿物片间孔	高岭石和伊利石	0.3
4	晶间孔	石英和钠长石	0.03
5	黏土矿物片间孔	绿泥石	0.05

总孔隙度为8.6%,接近岩心实测值,说明多组分三维数字岩心模型能准确表征主要矿物组分和多尺度孔隙空间。

2 电阻率数值模拟

岩石电性特性通常包括电阻率、复电阻率和介电特性等,本文中的岩石电性特性指狭义的电阻率特性,与岩石的孔隙空间流体分布有关,对于单相流体饱和岩石,孔隙空间流体无需特别处理,假设孔隙空间完全充满地层水^[19]。对于双相流体饱和岩石,电阻率数值模拟分为2个步骤:①应用数学形态学方法中的开运算模拟不同含水饱和度下的孔隙空间油水分布。②应用有限元方法计算不同含水饱和度下多组分三维数字岩心电阻率。

2.1 孔隙空间油水分布

在不同含水饱和度下,油和水在孔隙空间中的分布决定了岩石的电阻率特性。孔隙空间油水分布又与岩石骨架的润湿性密切相关,常用的模拟方法主要有格子 Boltzmann(LBM)方法和数学形态学方法。LBM方法通过密度分布函数的演化方程模拟流体的宏观特性,计算量大,效率较低。数学形

态学方法采用图像处理方法模拟孔隙空间油水分布,尽管物理意义不如LBM方法明确,但实现简单且效率高,因此本研究采用数学形态学方法中的开运算模拟流体分布情况。

以孔隙介质二维原始图像(图9a)为例,选取半径为 R 的圆形结构元素,使 R 由大到小依次变化,对图中的孔隙空间进行开运算(图9b),随着 R 的减小,开运算结果表征的孔隙空间依次增加。

若假设开运算结果表征油驱水过程中的油,其余孔隙空间表征地层水,则该过程与水湿岩石的排驱过程相似。在水湿岩石中非润湿相油首先占据孔隙空间中的大孔隙,随着驱替压力的增大,油按照孔隙半径由大到小的顺序依次侵入。因此,利用开运算可以模拟水湿岩石的排驱过程,进而确定在不同含水饱和度下孔隙空间中油和水的分布。油湿岩石不同含水饱和度下的孔隙流体分布与水湿岩石不同。在油湿岩石的排驱过程中,油首先占据孔隙空间中的小孔隙,再按照孔隙半径由小到大的顺序占据孔隙空间^[15],大孔隙被水占据。因此,在确定油湿岩石储层不同含水饱和度下的孔隙流体分布时,仍采用开运算方法,不同的是开运算结果表征的是地层水,其余的孔隙空间则被油占据。

2.2 三维数字岩心电阻率

采用有限元方法计算三维数字岩心电阻率,可归结为求恒定电场边值问题的数值解,求解域为三维数字岩心,即基于三维数字岩心数值求解拉普拉斯方程。有限元方法以变分原理为基础,把所求解的微分方程的边值问题转化为相应的变分问题,即泛函求极值的问题;利用剖分插值离散化变分问题为普遍多元函数的极值问题,即最终归结为一组多元的代数方程组,解之即得边值问题的数值解。

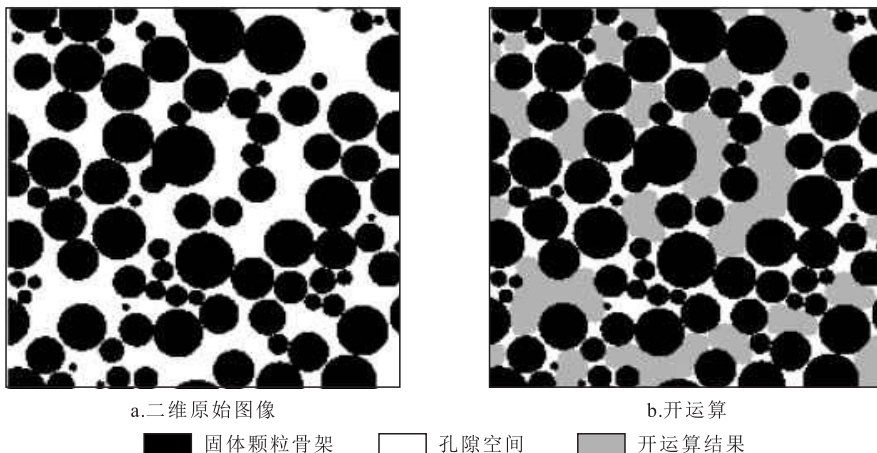


图9 孔隙介质二维原始图像与开运算示意

Fig.9 Original 2D image of porous media and open operation

将三维数字岩心中的体素视为一个正六面体单元,采用三线性插值方法将单元内部的电势能表示为单元节点电势的函数。根据电势能取极小值的条件,电势能对节点电势偏微分为0,得到关于节点电势的线性方程组,采用共轭梯度法求解可得电势能取极小值时的节点电势,根据每个单元的电阻率,可得流过三维数字岩心的等效电流,进而求得三维数字岩心的等效电阻率。

传统的二值化三维数字岩心只包含孔隙流体和岩石骨架2种组分,将岩石骨架视为绝缘体,地层水电阻率根据地层水类型和矿化度确定。针对砂砾岩构建的多组分三维数字岩心将岩石骨架细分为4种组分,每种组分含有不同比例的微孔隙,因此每种矿物组分也具有一定的导电能力。

分别采用 Archie 公式和 Waxman-Smits (W-S) 模型计算非黏土矿物和黏土矿物的等效电阻率,具体计算方法为:①根据岩电实验确定地层水电阻率。②伊利石和高岭石部分电导率由2部分组成,根据 W-S 模型计算伊利石的附加导电和地层水导电。③建模过程中设定石英和钠长石的孔隙度为3%,则其电导率根据地层水电导率和 Archie 公式共同确定。④建模过程中设定钾长石和方解石的孔隙度为10%,则其电导率根据地层水电导率和 Archie 公式共同确定。⑤绿泥石电导率由2部分组成,根据 W-S 模型,计算伊利石的附加导电和地层水导电。

将各矿物组分的等效电阻率和多组分三维数字岩心作为输入,通过有限元方法计算砂砾岩的电导率,确定砂砾岩的地层因素,公式为:

$$F = \frac{R_0}{R_w} = \frac{a}{\phi^m} \quad (1)$$

式中: F 为地层因素,无量纲; R_0 为100%饱和地层的岩石电阻率, $\Omega \cdot m$; R_w 为地层水电阻率, $\Omega \cdot m$; a 为与岩性有关的岩性系数,一般为0.6~1.5,通常取1; ϕ 为岩石有效孔隙度,小数; m 为胶结指数,一般为1.5~3,通常取2。

有限元方法地层因素数值模拟结果如图10所示,可见基于多组分三维数字岩心模拟结果与实验结果基本吻合,验证了算法的准确性。若不考虑X-CT扫描未识别的微孔隙,孔隙流体不连通,则电阻率数值模拟结果为无穷大,与物理实际不符。若采用基于多组分三维数字岩心的数值模拟方法准确分析砂砾岩的导电机理,微孔隙的导电能力不能忽略。

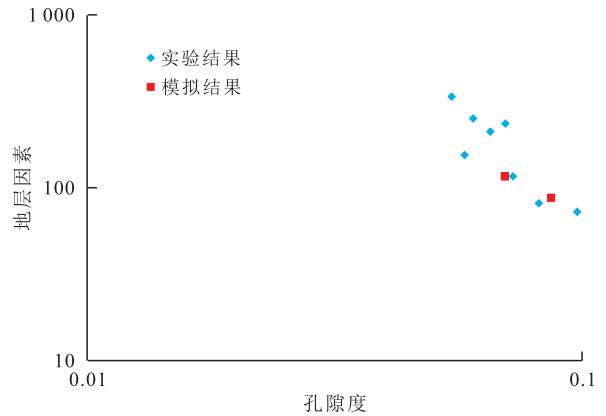


图10 有限元方法模拟地层因素与实验结果比较
Fig.10 Comparison of simulated formation factors and experimental results by finite element method

3 电性微观影响规律分析

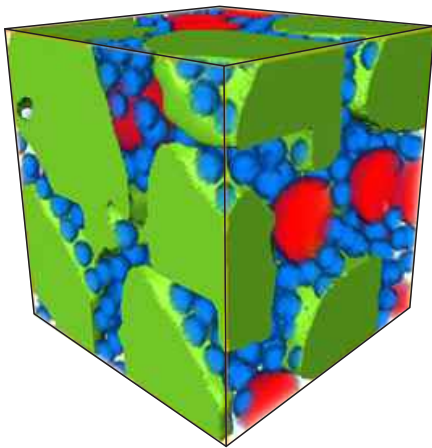
地下取心样品数量有限,难以获取某一储层参数连续变化且其他参数不变的真实岩心样品,采用岩石物理实验难以实现单影响因素分析。另外,基于真实岩心样品构建的三维数字岩心孔隙结构固定,也不适用于影响因素分析。本次研究在真实岩心样品分析基础上,结合微观结构分析结果,利用计算机合成具有不同储层特征参数的虚拟砂砾岩多组分三维数字岩心,砾石含量、黏土矿物类型、地层水矿化度连续可调,利用电阻率数值模拟方法分析砂砾岩电阻率的变化规律。

3.1 虚拟砂砾岩多组分三维数字岩心的构建

多组分三维数字岩心建模结果表明砂砾岩非均质性极强,岩石粒径范围广(包含粒径大于1 mm的砾石,也包含小尺寸的粉砂和泥质),导致孔隙尺寸分布范围广。砂砾岩中含有颗粒较大的砾石,形状复杂,为了合成更高精度的虚拟砂砾岩多组分三维数字岩心,在X-CT扫描构建的三维数字图像的基础上,采用数字图像处理方法,将砂砾岩中的砾石提取出来,采用过程法首先完成砾石的沉积,然后在砾石的粒间孔隙中模拟砂粒的沉积过程,最后在砂粒的粒间孔隙中完成黏土的沉积(图11)。

3.2 砾石对砂砾岩电阻率的影响规律

岩石是由性质不同、形状各异、大小不等的砂粒经胶结物胶结而成。由砂粒和胶结物构成的构架称为岩石骨架。理论上岩石的孔隙度并不取决于岩石粒径,但由于岩石粒径控制着孔隙和连接孔隙之间的喉道,所以岩石粒径对岩石物理特性有重要影响。砂砾岩与均质碎屑岩相比,最突出的特点



注:绿色、红色和蓝色代表不同粒径的岩石颗粒。

图11 虚拟砂砾岩多组分三维数字岩心

Fig.11 Multi-component 3D digital core of synthetic glutenite

是含有粒径较大的砾石,导致砂砾岩非均质性强。关于砾石含量对砂砾岩电阻率的影响规律存在2种观点:①随着砾石含量增大,渗透率增大,岩石电阻率降低,胶结指数减小。②随着砾石含量增大,平

均粒径增大,渗透率降低,岩石电阻率升高,胶结指数增大,通过这2种截然不同的观点进一步展开分析,砂砾岩的渗透性和导电特性主要取决于砂砾岩的孔隙结构,而砂砾岩的孔隙结构不仅与平均粒径有关,且与岩石的分选性密切相关。

除砾石含量和平均粒径外,砂砾岩的分选性也影响其孔隙结构。在计算机中合成了2种不同分选性的虚拟砂砾岩三维数字岩心,一种为单一粒径分布,分选性好,另一种粒径分布满足对数正态分布函数,分选性较差。

针对第1种情况,采用过程法构建3种单一粒径的虚拟砂砾岩三维数字岩心,粒径分别为0.25、0.75和1.5 mm(图12)。利用有限元方法计算虚拟砂砾岩三维数字岩心的电导率和地层因素,设 Archie公式中常数 $a=1$,计算胶结指数,胶结指数反映岩石孔隙空间的迂曲度,即导电路径的曲折程度。由图13可见,随着岩石粒径的减小,胶结指数增大,岩石孔隙空间迂曲度增大。

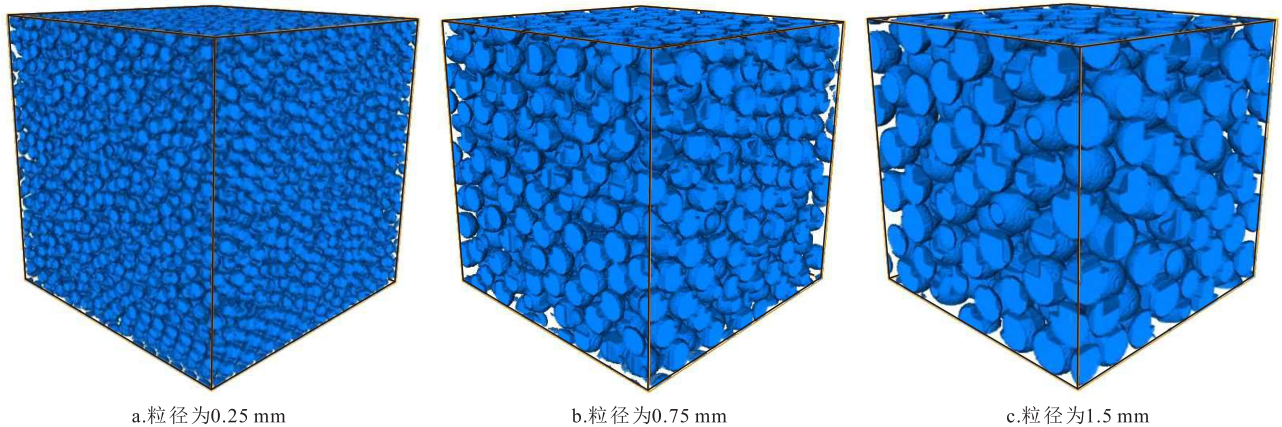


图12 不同粒径虚拟砂砾岩三维数字岩心

Fig.12 3D digital cores of synthetic glutenite based on different grain sizes

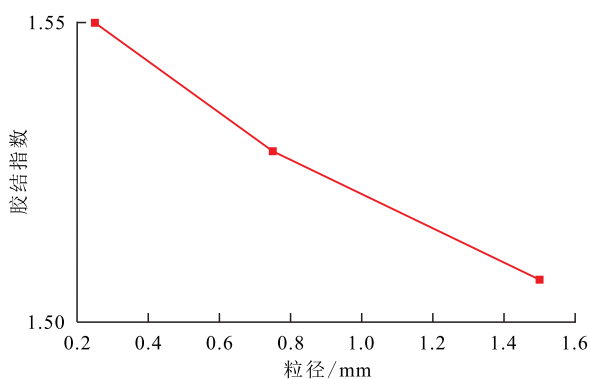


图13 岩石粒径对胶结指数的影响

Fig.13 Influence of rock grain size on cementation index

针对第2种情况,若岩石分选性变差,岩石粒径有一定分布范围,假设岩石粒径分布满足对数正态

分布,则计算式为:

$$f(\log x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\log x - \log \alpha)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

式中: x 为粒度, φ ;其中, $\varphi = -\log_2 d$, d 为颗粒直径,mm; σ 为标准差,其大小表示分选度; α 为粒度平均值, φ 。

设岩石的平均粒径为 2^φ ,分选度为1.8,粒度分布曲线如图14所示,折算最大粒径为8 mm,为砾石级别,最小粒径为0.125 mm,为细砂级别,而黏土矿物和粉砂岩采用等效方式考虑其导电作用。

盐22-22井的砂砾岩沉积为三模态特点,砾石间孔隙被充填,胶结方式类似于基底胶结,首先模拟砾石的沉积过程,然后再模拟砂粒的沉积,直至

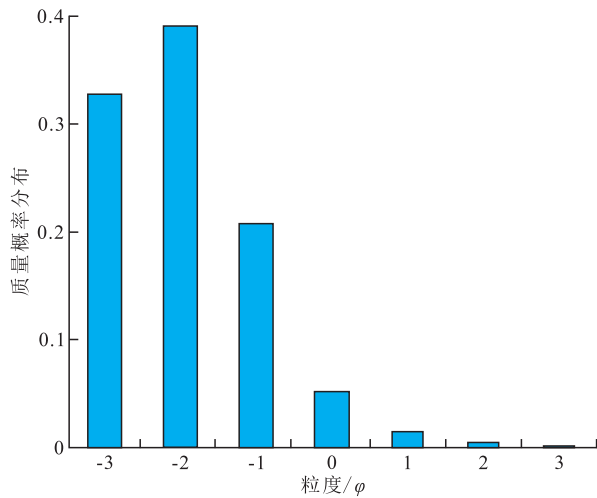


图14 砂砾岩粒度分布曲线

Fig.14 Grain size distribution curve of glutenite

砾石间的孔隙被完全充填。基于图14所示的粒径分布曲线,采用过程法构建虚拟砂砾岩三维数字岩心(图15)。

改变砾石含量,观察砾石含量对胶结指数的影响。由图16可见,随着砾石含量的增大,起始阶段胶结指数基本不变,这是由于砾石含量较少,只有少部分砂粒被砾石替代,对岩石孔隙结构的影响不大。随着砾石含量的继续增加,越来越多的砂粒和粒间孔隙被砾石替换,原先连通较好的孔隙系统被砾石阻断,增大了粒子导电路径的曲折度,从而导致岩石电阻率和地层因素增大,胶结指数缓慢升高。

砂砾岩电阻率数值模拟结果说明,胶结指数与砾石含量或平均粒径的关系复杂,不是单调增大或减小,而是与岩石的分选性有关。分选性好,平均粒径增大,胶结指数减小;分选性差且呈基底胶结,砾石含量大,平均粒径增大,胶结指数增大。

3.3 黏土矿物对砂砾岩电性的影响规律

黏土矿物颗粒很细,直径一般小于0.01 mm。

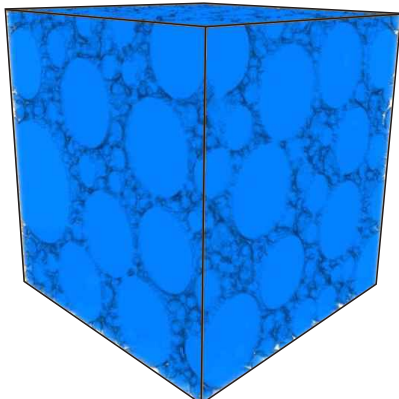


图15 分选性差的虚拟砂砾岩三维数字岩心

Fig.15 3D digital core of synthetic glutenite with poor sorting

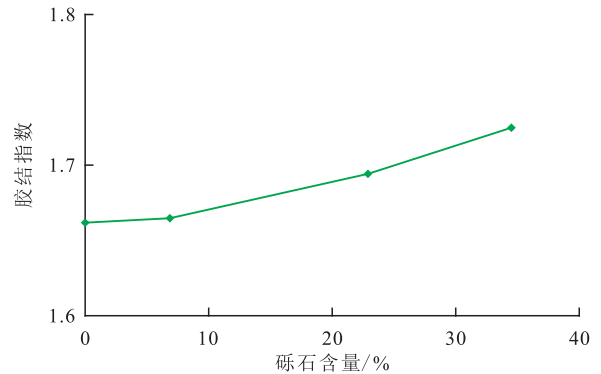


图16 砾石含量对胶结指数的影响

Fig.16 Influence of gravel content on cementation index

黏土矿物是泥质的主要成分,常见的黏土矿物有蒙脱石、高岭石、伊利石以及绿泥石等。

根据砂砾岩 X-CT 扫描、QEMSCAN 和 MAPS 测试结果,研究区黏土矿物主要为高岭石、伊利石、绿泥石和蒙脱石。不同黏土矿物在砂砾岩中的空间分布不相同。高岭石主要填充粒间孔隙,伊利石和蒙脱石或伊/蒙混层一般为砂砾岩的杂基部分,往往呈现薄膜式、搭桥式和充填式。另外不同黏土矿物阳离子交换能力也不相同,高岭石阳离子交换能力最弱。

以高岭石为例,在计算机中合成不同高岭石含量的虚拟砂砾岩多组分三维数字岩心(图17)。模型中砾石体积分数为34.5%,砂粒体积分数为32%,高岭石为充填式,占据粒间孔隙,随着高岭石体积分数增大,孔隙度降低。设地层水矿化度为60 000 mg/L,25 °C时地层水的电阻率为0.13 Ω·m,高岭石阳离子交换能力(CEC)为5 meq/100 g。

胶结指数的数值模拟结果如图18所示,随着高岭石含量的增大,胶结指数逐渐增大。由于黏土矿物具有阳离子交换能力,从而在黏土矿物表面形成双电层。双电层内的水(即通常所说的黏土束缚水)同孔隙空间中的自由水在性质上存在差异,其导电性服从指数变化规律。对高矿化度的孔隙自由水而言,由于黏土束缚水导电性低于孔隙自由水而呈现出增阻作用,所以胶结指数缓慢增加。

构建不同蒙脱石含量的虚拟砂砾岩多组分三维数字岩心,基本参数与上述三维数字岩心相同。黏土矿物为蒙脱石,假设以薄膜式分布在岩石中,在多组分三维数字岩心骨架界面选取一层像素等效黏土矿物的导电作用,黏土矿物含量并不改变岩心孔隙度。设蒙脱石含量分别为2%和7%,地层水矿化度为4 000 mg/L,电阻率为1.3 Ω·m。地层因素模拟结果如图19所示,随着蒙脱石含量的增加,

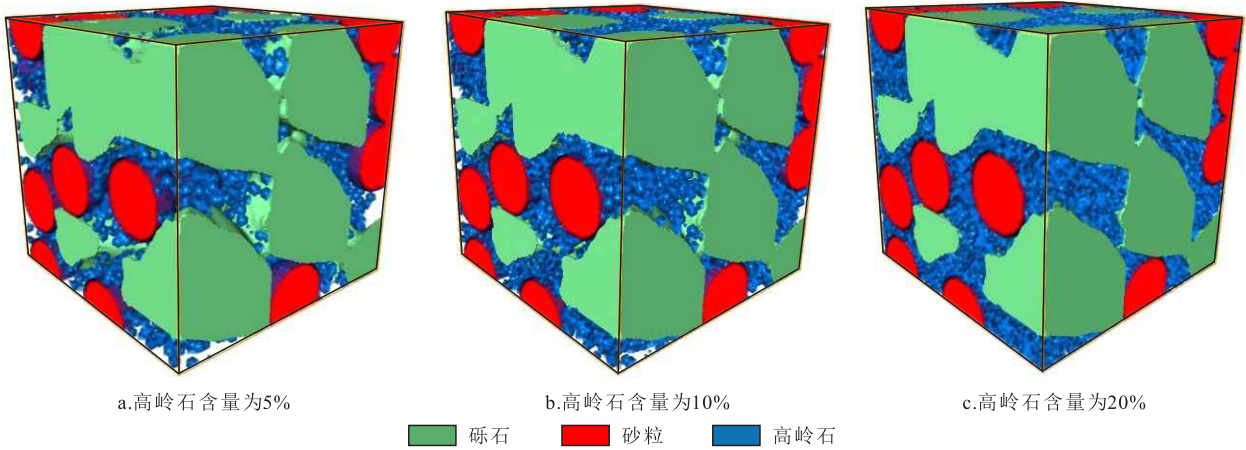


图17 不同高岭石含量的虚拟砂砾岩多组分三维数字岩心

Fig.17 Multi-component 3D digital cores of synthetic glutenite with different kaolinite contents

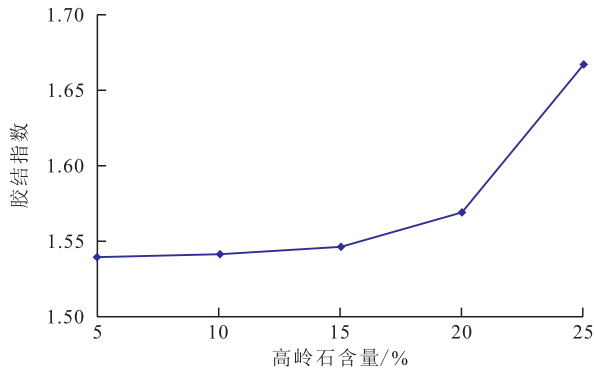


图18 高矿化度下高岭石含量对胶结指数的影响

Fig.18 Influence of kaolinite content on cementation index under high salinity

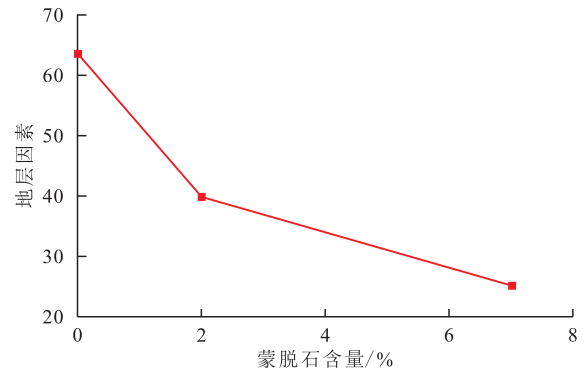


图19 低矿化度下蒙脱石含量对砂砾岩地层因素的影响

Fig.19 Influence of montmorillonite content on formation factors of glutenite under low salinity

砂砾岩地层因素减小,所以胶结指数也应减小。采用数学形态学方法模拟不同含水饱和度下的油水分布,然后采用有限元方法计算不同蒙脱石含量下的虚拟砂砾岩三维数字岩心电阻率,计算电阻增大率,公式为:

$$RI = \frac{R_t}{R_0} = \frac{b}{S_w^n} \quad (3)$$

式中:RI为电阻增大率,小数;R_t和R₀分别为部分饱和和地层水和完全饱和和地层水条件下的储层电阻率,Ω·m;b为常数;S_w为含水饱和度,小数;n为饱和度指数。

蒙脱石含量对电阻增大率的影响规律如图20所示,在高含水饱和度下,蒙脱石含量对电阻增大率影响较小,随着含水饱和度降低,电阻增大率变低。这是由于蒙脱石CEC为70~100 meq/100 g,阳离子交换能力强,同时地层水电阻率高,此时蒙脱石主要起到减阻作用。

根据沉积学原理,泥质含量的增加往往伴随着沉积速度由高速转为低速,岩石颗粒由粗变细,这一作用可产生2种效果:一是使得孔隙直径减小,孔

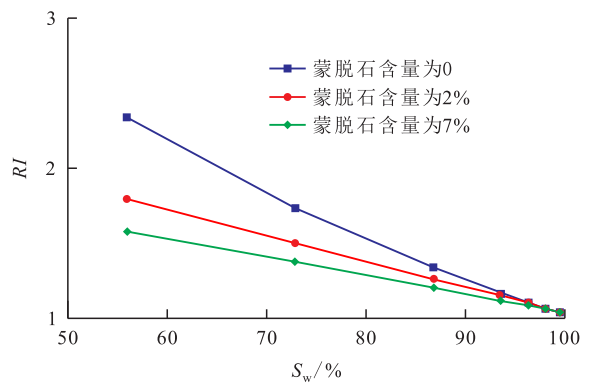


图20 低矿化度下蒙脱石含量对砂砾岩电阻增大率的影响

Fig.20 Influence of montmorillonite content on increase rate of glutenite resistance under low salinity

隙表面粗糙程度增加,微孔隙变得发育,毛管束缚水增加,从而有降低电阻率的趋势;二是使得电流迂曲度增大、流动路径增长,呈现出使电阻率增大的趋势。

由上述分析可知,泥质既有增阻作用,也有减阻作用。在不同条件下,泥质减阻和增阻作用的相对强弱不一样,因而可表现出不同的电阻率变化规律。

4 结论

(1)以盐家油田盐22-22井柱塞岩样为例,提出砂砾岩多组分三维数字岩心建模流程,通过融合X-CT扫描、QEMSCAN和MAPS测试,准确识别砂砾岩主要矿物组分和多尺度孔隙空间,数字岩心孔隙度和矿物含量分别与岩心实测值和XRD测试结果吻合,为定量分析非均质储层孔隙结构和电阻率数值模拟提供了精确的孔隙尺度模型。

(2)在多组分三维数字岩心的基础上,建立了适用于砂砾岩的电阻率数值模拟方法,同时考虑多尺度孔隙中地层水和黏土矿物的导电作用,电阻率数值模拟结果与实验结果吻合,为采用数值模拟方法定量分析砂砾岩电阻率变化规律奠定了基础。

(3)从X-CT扫描灰度图像中提取砾石的基本结构信息,采用过程法建立不同砾石含量、泥质含量、不同分选的虚拟砂砾岩多组分三维数字岩心,定量研究砂砾岩储层微观因素对岩石电性的影响规律。结果表明:①砾石含量和分选性共同决定了岩石的孔隙结构,在分选性好的情况下,胶结指数随着砾石平均粒径的增大而变小;在分选性差且杂基胶结的情况下,随着砾石含量的增大,胶结指数反而增大。②黏土矿物对砂砾岩电性的影响受黏土矿物类型、分布形式和含量的影响。高岭石阳离子交换能力低,附加导电性弱,且占据砂砾岩孔隙空间,在高矿化度地层水的条件下起增阻作用;蒙脱石阳离子交换能力强,主要以薄膜式和桥接式分布,对岩石孔隙度影响较小,因此在低矿化度情况下主要起减阻作用。

参考文献

[1] 汪新光, 郇金来, 彭小东, 等. 基于数字岩心的致密砂岩储层孔隙结构与渗流机理[J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(6): 22-30.
WANG Xinguang, HUAN Jinlai, PENG Xiaodong, et al. Flow mechanism and pore structures of tight sandstone based on digital core analysis [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(6): 22-30.

[2] 高阳. 渤海湾盆地东营凹陷陡坡带沙四下亚段砂砾岩储层物性主控因素[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(5): 28-36.
GAO Yang. Main controlling factors of glutenite reservoir property in steep slope zone of Lower Es₄ of Dongying Sag in Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(5): 28-36.

[3] 骆飞飞, 谢天寿, 钟磊, 等. 基于NMR的砂砾岩储层岩电参数

计算方法[J]. 测井技术, 2021, 45(3): 317-323.

LUO Feifei, XIE Tianshou, ZHONG Lei, et al. Calculation method of rock-electrical parameters of glutenite reservoirs based on NMR [J]. Well Logging Technology, 2021, 45(3): 317-323.

[4] 孙建孟, 姜黎明, 刘学锋, 等. 数字岩心技术测井应用与展望[J]. 测井技术, 2012, 36(1): 1-7.

SUN Jianmeng, JIANG Liming, LIU Xuefeng, et al. Log application and prospect of digital core technology [J]. Well Logging Technology, 2012, 36(1): 1-7.

[5] 刘学锋, 张伟伟, 孙建孟. 三维数字岩心建模方法综述[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(6): 3 066-3 072.

LIU Xuefeng, ZHANG Weiwei, SUN Jianmeng. Methods of constructing 3-D digital cores: A review [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(6): 3 066-3 072.

[6] 赵建鹏, 陈惠, 李宁, 等. 三维数字岩心技术岩石物理应用研究进展[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(3): 1 099-1 108.

ZHAO Jianpeng, CHEN Hui, LI Ning, et al. Research advance of petrophysical application based on digital core technology [J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(3): 1 099-1 108.

[7] 梁卫, 闫正和, 杨勇, 等. 南海东部西江油田低阻油层识别及主控因素研究[J]. 特种油气藏, 2022, 29(1): 10-14.

LIANG Wei, YAN Zhenghe, YANG Yong, et al. Study on identification and main controlling factors of low-resistivity oil reservoirs in Xijiang Oilfield, Eastern South China Sea [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(1): 10-14.

[8] 蒋裕强, 陈林, 蒋婵, 等. 致密储层孔隙结构表征技术及发展趋势[J]. 地质科技情报, 2014, 33(3): 63-70.

JIANG Yuqiang, CHEN Lin, JIANG Chan, et al. Characterization techniques and trends of the pore structure of tight reservoirs [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2014, 33(3): 63-70.

[9] 李小彬. 基于三维数字岩心的岩石孔隙结构表征及弹渗属性模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.

LI Xiaobin. Characterization of pore structure and simulation of elasticity and permeability based on 3D digital cores [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.

[10] 刘学锋. 基于数字岩心的岩石声电特性微观数值模拟研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010.

LIU Xuefeng. Numerical simulation of elastic and electrical properties of rock based on digital cores [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.

[11] 姜黎明. 基于数字岩心的天然气储层岩石声电特性数值模拟研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2012.

JIANG Liming. Numerical simulation of acoustic and electrical properties of natural gas reservoir rocks based on digital cores [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2012.

[12] 刘凯. 基于数字岩心的致密砂岩电学特性数值模拟研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.

LIU Kai. Numerical simulation of electrical properties of tight

- sandstone based on digital cores [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [13] 王克文,孙建孟,关继腾,等.储层岩石电性特征的逾渗网络模型[J].石油学报,2007,28(1):101-106.
WANG Kewen, SUN Jianmeng, GUAN Jiteng, et al. Percolation network modeling of electrical properties of reservoir rock [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(1): 101-106.
- [14] 胡渤,蒲军,苟斐斐.基于数字岩心的致密砂岩微观孔喉结构定量表征[J].油气地质与采收率,2022,29(3):102-112.
HU Bo, PU Jun, GOU Feifei. Quantitative characterization of pore throat microstructure of tight sandstone based on digital core technology [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(3): 102-112.
- [15] 孔强夫,胡松,王晓畅,等.基于数字岩心电性数值模拟新方法的研究[J].非常规油气,2016,3(5):45-53.
KONG Qiangfu, HU Song, WANG Xiaochang, et al. New numerical simulation method of electrical properties of rock based on digital cores [J]. Unconventional Oil & Gas, 2016, 3(5): 45-53.
- [16] 聂昕,李秉科,张杰,等.基于数字岩心的裂缝性碳酸盐岩储层电性数值模拟[J].长江大学学报:自然科学版,2022,19(6):20-29.
NIE Xin, LI Bingke, ZHANG Jie, et al. Numerical simulation of electrical properties of fractured carbonate reservoirs based on digital cores [J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2022, 19(6): 20-29.
- [17] 韩晓彤.东营凹陷盐22块砂砾岩油藏储层非均质性研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2020.
HAN Xiaotong. Study on heterogeneity of glutenite reservoir in Yan 22 Block, Dongying Sag [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020.
- [18] 况晏.致密砂砾岩储层孔隙结构及饱和度测井评价方法研究[D].成都:西南石油大学,2018.
KUANG Yan. Study on the well logging evaluation method of pore structure and saturation in the tight sandy conglomerate reservoirs [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [19] 冯进.基于数字岩石物理实验的岩石电性影响因素分析——以珠江口盆地(东部地区)中浅层砂岩储层为例[J].中国海上油气,2012,24(6):12-16.
FENG Jin. An analysis of the factors to influence electrical properties of rocks based on a digital petrophysical experiment: a case of the middle-shallow sandstone reservoirs in Pearl River Mouth basin (the eastern area) [J]. China Offshore Oil and Gas, 2012, 24(6): 12-16.

编辑 林 璐