

## 低渗透砂岩油藏岩电参数测试方法

刘 丽<sup>1</sup>,张红欣<sup>1</sup>,闵令元<sup>1</sup>,顾辉亮<sup>1</sup>,杨怀建<sup>2</sup>

(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.中国石油渤海钻探 第五钻井工程公司,河北 河间 062465)

**摘要:**岩石电阻率参数(简称岩电参数)是利用测井资料开展油藏含油饱和度评价及储量计算不可或缺的重要资料,室内岩心测试是获得岩电参数的唯一途径。以胜利油区低渗透砂岩油藏岩心为测试对象,从实验方法和实验条件2个角度,开展低渗透砂岩油藏岩电参数测试结果的影响因素分析,基于岩电参数的单因素比对实验,研究驱替方式、驱替介质、温度、围压及水矿化度对胶结指数 $m$ 、饱和度指数 $n$ 及岩性系数 $a$ 和 $b$ 的影响。研究结果表明,半渗透隔板法的准静态驱替过程与油藏成藏过程相似,且不受驱替介质类型影响,岩电参数对实验温度变化不敏感,但受围压和地层水矿化度影响显著。基于上述认识,确定适用于低渗透砂岩油藏的岩电参数测试方法:根据地层水矿化度配制等矿化度的实验用水,采用半渗透隔板法进行气驱水或油驱水,在室温条件下模拟地层有效上覆压力,开展低渗透砂岩油藏岩电参数测试。

**关键词:**低渗透砂岩油藏 岩电参数 阿尔奇参数 驱替方式 驱替介质 实验温度 净围压 水矿化度

中图分类号:TE311

文献标识码:A

## Technique of laboratory measurement of rock resistivity parameters in low permeability sandstone reservoir

LIU Li<sup>1</sup>,ZHANG Hongxin<sup>1</sup>,MIN Lingyuan<sup>1</sup>,GU Huiliang<sup>1</sup>,YANG Huaijian<sup>2</sup>

(1.Exploration and Development Research Institute,Shengli Oilfield Company,SINOPEC,Dongying City,Shandong Province,257015,China; 2.Fifth Drilling Engineering Co.,CNPC Bohai Drilling Company,Hejian City,Hebei Province,062465,China)

**Abstract:** Rock resistivity parameters are important data for reservoir oil saturation evaluation and reserve calculation by logging data. Laboratory core testing is the only way to obtain rock resistivity parameters. Influencing factors on the test results of rock resistivity parameters for the low permeability sandstone reservoir in Shengli Oilfield were analyzed from two aspects of experimental methods and experimental conditions. By means of factor comparison experiment, the influence of displacement method, displacing fluid, temperature, confining pressure and brine salinity on cementation exponent  $m$ , saturation exponent  $n$  and lithology factor  $a$  and  $b$  was discussed. The research results show that quasi-static displacement process of semipermeable plate method is similar to the oil accumulation of the oil reservoir whatever the displacement media is. The rock resistivity parameters is not sensitive to the experiment temperature, but is influenced by confining pressure and formation water salinity greatly. At last, technique of laboratory measurement of rock resistivity parameters for the low permeability sandstone reservoir was determined. Experimental water was prepared using the formation water with the same salinity, the semipermeable plate method was applied for water drive by gas or by oil, effective overburden pressure was simulated on the condition of indoor temperature, and the rock resistivity parameters of the low permeability sandstone reservoir were tested.

**Key words:** low permeability sandstone reservoir; rock resistivity parameters; Archie parameters; displacement method; displacement media; experimental temperature; net confining pressure; water salinity

收稿日期:2017-09-05。

作者简介:刘丽(1972—),女,河南焦作人,高级工程师,硕士,从事油气藏渗流机理方面的研究工作。联系电话:13963359458, E-mail:liuli-1972@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“胜利油田特高含水期提高采收率技术(二期)”(2016ZX05011),中国石化胜利油田分公司重点实验室课题“低渗透砂岩油藏岩石电性特征实验研究及应用”(YKS1703)。

电阻率测井是获取油藏含油饱和度的重要手段之一,岩电参数(胶结指数  $m$ 、饱和度指数  $n$  及岩性系数  $a$  和  $b$ )是含油饱和度计算不可或缺的重要参数,岩石的孔隙度越低,岩电参数对饱和度的影响程度越大,因此,对于低孔、低渗透油藏而言,获得准确的岩电参数尤为重要。

室内岩心电阻率测试是目前获得岩电参数的唯一途径<sup>[1-5]</sup>。胜利油区 165 口井、986 块次低渗透油藏亲水岩心的岩电测试结果表明,胜利油区低渗透砂岩的岩电参数分布范围较宽,  $m$  值为 0.47~4.41,  $a$  值为 0.02~12,  $n$  值为 0.32~5.4,  $b$  值为 0.82~2.5, 大多偏离理论值( $m=n=2, a=b=1$ ), 部分甚至超出了经验值范围( $m$  值为 1.8~2.0,  $a$  值为 0.5~1.5,  $n$  值为 1.5~2.5,  $b$  值为 1.0)。BEKRI 等研究发现,  $m$  和  $a$  既受控于岩石的孔隙结构和岩石组分, 也受实验温度、围压和水矿化度等实验条件影响, 但与实验方法无关;  $n$  和  $b$  则主要受控于含水饱和度的大小及分布, 不但受含水饱和度建立方式的影响, 同时还受实验温度、围压和水矿化度等实验条件的影响<sup>[6-20]</sup>。

针对胜利油区低渗透砂岩油藏岩电参数实验值偏离理论值、超出经验值的现状, 笔者开展了低渗透砂岩油藏岩电参数测试方法研究, 分析现有岩电参数测试方法对于低渗透砂岩油藏的适用性, 确定适用于低渗透砂岩油藏岩电参数测试的实验方法及实验条件, 以期为后期开展胜利油区低渗透砂岩油藏岩石物性、孔隙结构和矿物组分等岩石固有属性对岩电参数的影响研究提供依据。

## 1 岩电参数测试的实验方法

分析 SY/T 5385—2007<sup>[13]</sup> 中推荐的实验方法可知, 根据驱替方式可分为离心法、驱替法和半渗透隔板法, 根据驱替介质可分为气驱水法和油驱水法。驱替方式或驱替介质的不同, 导致同一块岩心中的含水饱和度大小及分布状态不同, 从而影响岩电参数测试结果。以胜利油区低渗透砂岩油藏岩心为测试对象, 开展不同驱替方式、不同驱替介质的单因素比对实验, 从而确定适用于低渗透砂岩油藏岩电参数测试的实验方法。

### 1.1 驱替方式对岩电参数的影响

#### 1.1.1 离心法与驱替法比对实验

离心法与驱替法比对实验步骤包括: ①选择渗透率为 16.9 mD、孔隙度为 19.12% 的 1 块低渗透岩心, 用质量分数为 5% 的 NaCl 溶液饱和岩心。②采用离心法气驱水建立不同含水饱和度。③将岩心

经甲醇除盐、烘干, 再次用 5% NaCl 溶液饱和岩心, 采用驱替法气驱水建立不同的含水饱和度。

离心法与驱替法的含水饱和度与电阻增大率的关系曲线(图 1a)表明, 2 种方法测定的  $n$  值分别为 1.450 和 1.629, 相对误差高达 12.3%,  $b$  值分别为 1.033 和 1.026, 相对误差仅为 0.7%。分析后认为, 离心法的测试结果更准确可靠。其原因在于: ①离心法气驱水只需克服毛管压力, 测试过程中随着离心机转速的提高, 空气逐渐进入不同半径孔隙中并将其中的水驱出, 残余水只存在于较小孔隙中; 驱替法气驱水则需同时克服毛管压力和粘滞力, 气体粘性指进现象显著, 容易造成气窜, 导致岩心出口端过早见水, 使得残余水同时存在于大、小孔隙中。相比较而言, 离心法所建立的含水饱和度大小及分布状态更接近低渗透油藏的实际情况, 因此离

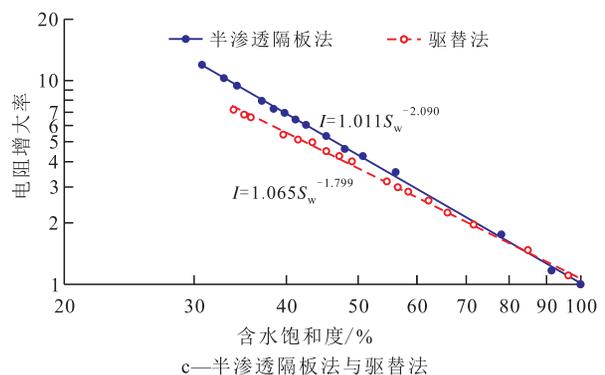
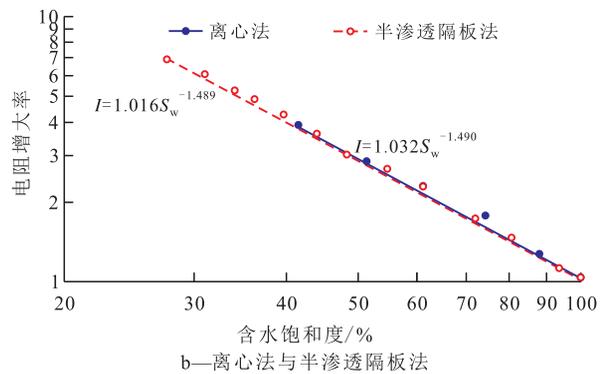
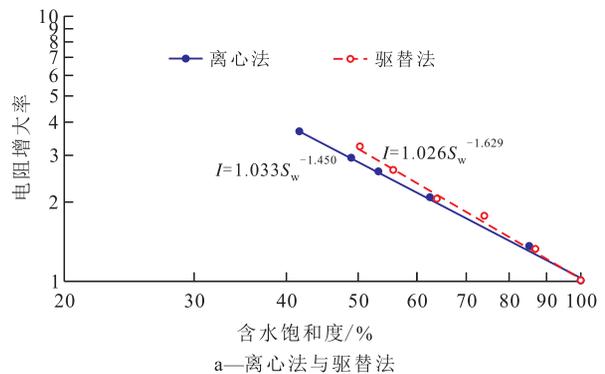


图 1 不同驱替方式岩电参数比对实验曲线

Fig.1 Experimental curves of rock resistivity parameters at different displacement methods

心法岩电参数测试结果更准确、可靠。②驱替法气驱水随着含水饱和度的降低,孔隙水中的盐析出滞留在孔隙中,导致孔隙水矿化度增大,使得测定的 $n$ 值偏大。

### 1.1.2 离心法与半渗透隔板法比对实验

离心法与半渗透隔板法比对实验步骤为:①选择渗透率为20.8 mD、孔隙度为19.20%的1块低渗透岩心,用5%NaCl溶液饱和和岩心。②采用离心法建立不同含水饱和度。③将岩心经甲醇除盐、烘干,再次用5%NaCl溶液饱和,采用半渗透隔板法气驱水建立不同的含水饱和度。

由离心法与半渗透隔板法的含水饱和度与电阻增大率关系曲线(图1b)可知:2种方法测定的 $n$ 值分别为1.490和1.489, $b$ 值分别为1.032和1.016;2种方法测定的 $n$ 和 $b$ 值相对误差均很小;但束缚水饱和度差别较大,离心法的束缚水饱和度为41.5%,半渗透隔板法的仅为27.5%,二者相对误差高达50.9%。分析后认为,半渗透隔板法更适用于低渗透油藏岩心的岩电参数测试。其原因在于:离心法受离心机转速及旋转半径所限,气驱水最大离心力一般不超过2 MPa,用于低渗透油藏岩心测试时所建立的束缚水饱和度偏高,无法获得低含水饱和度阶段的岩电参数特征;而半渗透隔板的突破压力目前最高可达到10 MPa,用于低渗透油藏岩心测试时可建立较低的束缚水饱和度,因此半渗透隔板法更适用于低渗透油藏岩心的岩电参数测试。

### 1.1.3 半渗透隔板法与驱替法比对实验

半渗透隔板法与驱替法比对实验步骤包括:①选择渗透率为22.3 mD、孔隙度为14.55%的1块低渗透岩心,用5%NaCl溶液饱和和岩心。②采用半渗透隔板法油驱水建立不同含水饱和度。③将岩心除油、除盐、烘干,再次用5%NaCl溶液饱和和岩心,采用驱替法油驱水建立不同的含水饱和度。半渗透隔板法与驱替法的含水饱和度与电阻增大率关系曲线(图1c)显示:2种方法测定的 $n$ 值分别为2.090和1.799,相对误差高达13.9%; $b$ 值分别为1.011和1.065,相对误差高达5.3%。分析后认为,半渗透隔板法的测试结果更准确、可靠。这是因为:①半渗透隔板法与离心法相似,驱替过程中也只需克服毛管压力,准静态驱替过程更接近油藏成藏过程,建立的含水饱和度更接近油藏实际情况;驱替法需要同时克服毛管压力和粘滞力,粘性指进影响含水饱和度的分布,从而影响岩电参数的测定。②油驱水法存在岩心末端效应,由于毛细管的不连续性,导致岩心出口端水相滞留,影响含水饱和度的分布,

使得岩电参数测试结果偏离真实值。

## 1.2 驱替介质对岩电参数的影响

### 1.2.1 半渗透隔板法气驱水与油驱水比对实验

半渗透隔板法气驱水与油驱水比对实验步骤包括:①选择渗透率为10.3 mD、孔隙度为13.12%的1块低渗透岩心,用5%NaCl溶液饱和和岩心。②采用半渗透隔板法气驱水建立不同含水饱和度。③将岩心经甲醇除盐、烘干,再次用5%NaCl溶液饱和和岩心,采用半渗透隔板法油驱水建立不同含水饱和度。

由半渗透隔板法气驱水与油驱水得到的含水饱和度与电阻增大率关系曲线(图2a)可知,2种方法测定的 $n$ 值分别为2.079和2.073, $b$ 值分别为1.014和1.016,测定结果基本一致。说明半渗透隔板法测定的岩电参数不受驱替介质影响。其原因在于:采用半渗透隔板法不管是气驱水还是油驱水,建立含水饱和度的过程中均是毛管压力起主导作用,含水饱和度分布仅与岩心的孔隙结构有关,不受驱替介质类型的影响,因此采用半渗透隔板法进行岩电参数测试时,既可选择气体作为驱替介质,也可选择模拟油作为驱替介质。

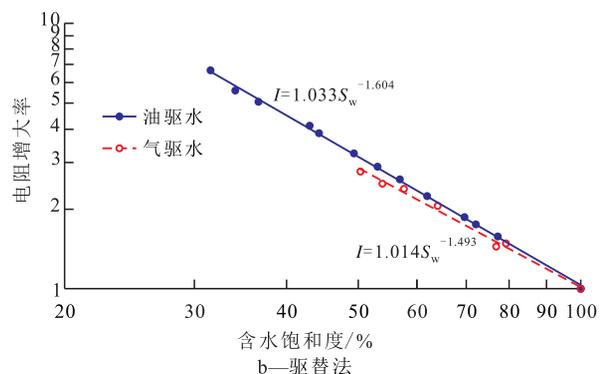
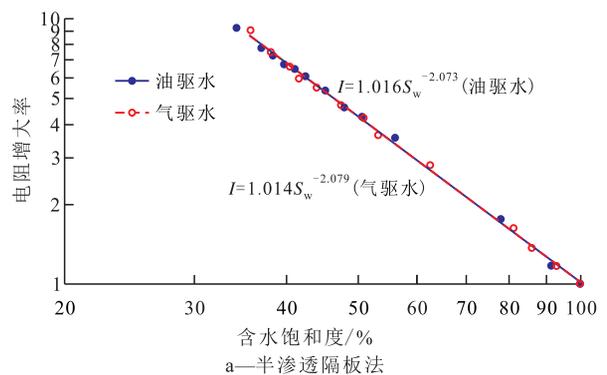


图2 不同驱替介质岩电参数比对实验曲线

Fig.2 Experimental curves of rock resistivity parameters at different displacement fluids

### 1.2.2 驱替法气驱水与油驱水比对实验

驱替法气驱水与油驱水比对实验步骤为:①选择渗透率为5.81 mD、孔隙度为10.70%的1块低渗透岩心,用5%NaCl溶液饱和和岩心。②采用驱替法

气驱水建立不同含水饱和度。③将岩心经甲醇除盐、烘干,再次用5%NaCl溶液饱和岩心,采用驱替法油驱水建立不同的含水饱和度。

驱替法气驱水与油驱水比对的含水饱和度与电阻增大率关系曲线(图2b)表明:2种方法测定的 $n$ 值分别为1.493和1.604,相对误差为6.9%; $b$ 值分别为1.014和1.033,相对误差仅为1.8%。2种情况下岩电参数出现差别的原因在于:驱替法粘滞力起主导作用,气体和模拟油的粘性指进程度不同,气驱水容易造成气窜,导致2种情况下含水饱和度的分布不同,岩电参数的测试结果不同。

通过分析不同驱替方式及不同驱替介质岩电参数测定的比对结果,认为半渗透隔板法是低渗透砂岩油藏岩电参数测试的最佳驱替方式,采用半渗透隔板法进行岩电参数测试时,既可选择模拟油作为驱替介质,也可选择气体作为驱替介质。

## 2 岩电参数测试的实验条件

胜利油区低渗透砂岩油藏的埋深一般大于3 000 m,岩石在地下承受高温、高压作用,另外,低渗透砂岩油藏中普遍存在粘土矿物,且粘土矿物的附加导电性与地层水矿化度密切相关。为此,开展不同温度、不同围压及不同矿化度下的单因素比对实验,以确定低渗透砂岩油藏岩电参数测试的实验条件。

### 2.1 实验温度对岩电参数的影响

#### 2.1.1 不同实验温度 $m$ 和 $a$ 值比对实验

不同实验温度 $m$ 和 $a$ 值比对实验步骤为:①选择取自同一口井、同一层位、岩心渗透率为3~50 mD、孔隙度为10%~20%的6块低渗透岩心,用5% NaCl溶液饱和岩心。②设定围压为5 MPa,在实验温度分别为30, 50, 70和90℃的条件下,测定完全饱和水岩心的地层因素,分别建立4种不同实验温度下的孔隙度与地层因素的关系曲线。

由图3a可知,当实验温度由30℃升至90℃时, $m$ 值由1.797降至1.729, $a$ 值从1.074降至1.028,降幅均小于5%,表明 $m$ 和 $a$ 值受实验温度影响程度较小。

#### 2.1.2 不同实验温度 $n$ 和 $b$ 值比对实验

不同实验温度 $n$ 和 $b$ 值比对实验步骤为:①选择渗透率为33.3 mD、孔隙度为19.82%的1块低渗透岩心,用5%的NaCl溶液饱和。②设定围压为5 MPa,在实验温度分别为30, 50, 70和90℃的条件下,采用半渗透隔板法油驱水建立不同的含水饱和

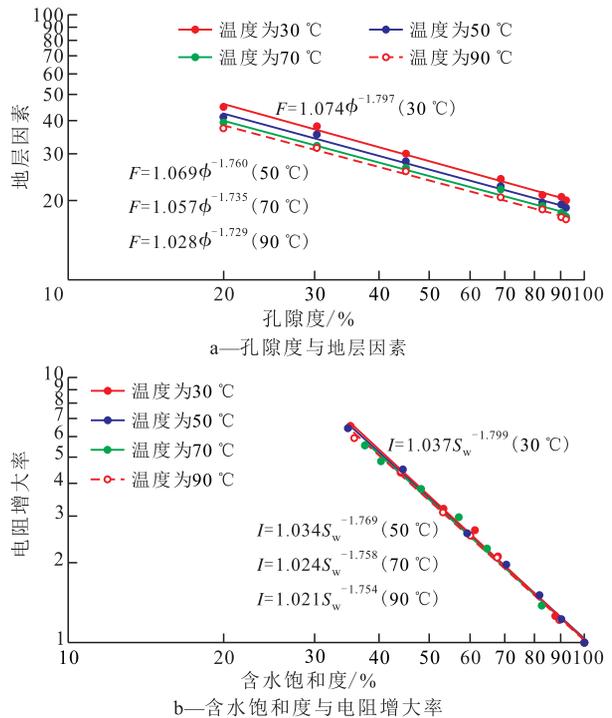


图3 不同实验温度岩电参数比对实验曲线

Fig.3 Experimental curves of rock resistivity parameters at different temperatures

度,获得30℃下含水饱和度与电阻增大率的关系曲线。③将岩心除油、除盐、烘干,重新饱和5%的NaCl溶液后,分别获得50, 70和90℃下含水饱和度与电阻增大率的关系曲线。

分析图3b可知,当实验温度由30℃升至90℃时, $n$ 值由1.799降至1.754, $b$ 值由1.037降至1.021,变化幅度均小于2.5%。综合图3a和3b可知,实验温度对岩电参数的影响程度较小。

### 2.2 实验围压对岩电参数的影响

#### 2.2.1 不同围压下 $m$ 和 $a$ 值比对实验

不同围压 $m$ 和 $a$ 值比对实验步骤包括:①选择取自同一口井、同一层位、岩心渗透率为5~45 mD、孔隙度为10%~20%的6块低渗透岩心,用5%NaCl溶液饱和岩心。②设定实验温度为30℃,在净围压分别为2, 5, 10, 20, 30和40 MPa的条件下,测定完全饱和水岩心的地层因素,分别建立6种不同围压条件下的孔隙度与地层因素的关系曲线。

由图4a可知:当围压由2 MPa升至40 MPa时, $m$ 值由1.430增至1.898,增幅为32.73%; $a$ 值由2.346降至1.492,降幅为36.40%,表明净围压增加,导致 $m$ 值增大、 $a$ 值减小。其原因在于:随着净围压的增大,低渗透岩心出现微裂隙闭合、孔喉变形缩小等现象,造成岩心的孔喉半径减小、孔隙迂曲度增大、孔隙结构非均质性增强,使得岩心的导电路径更加曲折,导致胶结指数 $m$ 值增大、岩性系数 $a$ 值减小。

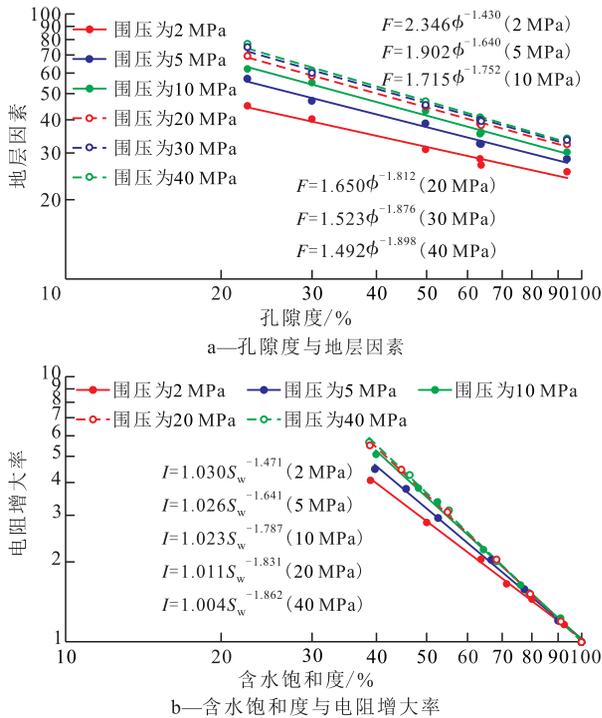


图4 不同围压下岩电参数对比实验曲线

Fig.4 Experimental curves of rock resistivity parameters at different confined pressures

2.2.2 不同围压下n和b值对比实验

不同围压下n和b值对比实验步骤包括:①选择渗透率为25.8 mD、孔隙度为15.78%的1块低渗透岩心,用5%NaCl溶液饱和。②设定实验温度为30℃,在净围压分别为2,5,10,20和40 MPa的条件下,采用半渗透隔板法油驱水建立不同的含水饱和度,获得2 MPa下含水饱和度与电阻增大率的关系曲线。③将岩心除油、除盐、烘干,重新饱和5%NaCl溶液,采用半渗透隔板法油驱水分别获得净围压在5,10,20和40 MPa条件下含水饱和度与电阻增大率的关系曲线。

由图4b可知:当围压由2 MPa升至40 MPa时,n值由1.471增至1.862,增幅为26.58%;b值由1.030降至1.004,降幅仅为2.52%,表明实验围压对n值影响较大,且随净围压的增加而增大。其原因在于:随着净围压的增大,岩心的孔喉半径比增大、部分饱和水岩心中孔隙水的非均匀分布程度增强,使岩心的导电路径更加复杂,导致饱和度指数n值增大。

2.3 矿化度对岩电参数的影响

2.3.1 不同矿化度下m和a值对比实验

不同矿化度下m和a值对比实验步骤为:①选择取自同一口井、同一层位、岩心渗透率为5~45 mD、孔隙度为10%~20%的6块低渗透岩心,用矿化度为200 g/L的NaCl溶液饱和岩心。②在实验温度为30℃、净围压为5 MPa的条件下,测定每块完全

饱和水岩心的地层因素,建立矿化度为200 g/L时孔隙度与地层因素的关系曲线;③分别向每块岩心中依次注入矿化度为100,50,20,10和5 g/L的NaCl溶液30 PV,测定地层因素,建立不同矿化度下孔隙度与地层因素的关系曲线。

由图5a可知,当矿化度由5 g/L升至200 g/L时,m值由1.435先降至1.388再增至1.597,a值由1.196先升至2.007再降至1.430,表明随着矿化度的增大,m值呈现先降后增、a值呈现先增后降的变化趋势。其原因在于:实验所选择的胜利油区低渗透砂岩油藏岩心并非纯净砂岩,矿物组分中存在一定含量的粘土矿物,粘土矿物的附加导电性受孔隙水矿化度的影响,导致m和a值随矿化度的变化而变化。

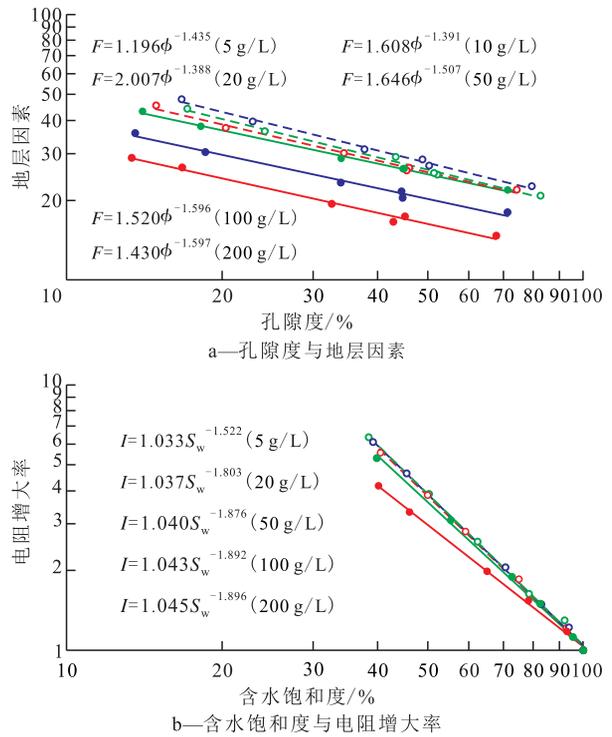


图5 不同矿化度下岩电参数对比实验曲线

Fig.5 Experimental curves of rock resistivity parameters at different salinities

2.3.2 不同矿化度下n和b值对比实验

不同矿化度下n和b值对比实验步骤为:①选择渗透率为9.52 mD、孔隙度为10.73%的1块低渗透岩心,用矿化度为200 g/L的NaCl溶液饱和岩心。②在实验温度为30℃、实验净围压为5 MPa的条件下,采用半渗透隔板法油驱水建立不同的含水饱和度,获得矿化度为200 g/L时岩心的含水饱和度与电阻增大率的关系曲线。③将岩心除油、除盐、烘干,采用半渗透隔板法油驱水,分别获得矿化度为100,50,20和5 g/L条件下含水饱和度与电阻增大率的关

系曲线。

由图5b可知:当矿化度由5 g/L升至200 g/L时, $n$ 值由1.522升至1.896,增幅为24.57%; $b$ 值由1.033增至1.045,增幅仅为1.16%,表明 $n$ 和 $b$ 值均随矿化度的增大而增大,但 $b$ 值受矿化度的影响较小。这是因为,低渗透岩心中的粘土矿物具有附加导电性,粘土矿物中可导电阳离子的导电能力与孔隙水矿化度有关。

通过对比不同温度、围压及矿化度条件下的岩电参数测定结果,笔者确定了低渗透砂岩油藏岩电测试的实验条件:①考虑到温度对岩电参数的影响程度很小,实验温度可选择室温,不需模拟实际油藏的高温条件。②考虑到围压对岩电参数的影响程度较大,实验净围压应与实际油藏承受的有效上覆压力相当。③考虑到水矿化度对岩电参数的影响程度较大,实验用水矿化度应与实际油藏的地层水矿化度一致。

### 3 结论

半渗透隔板法的准静态驱替过程与实际油藏成藏过程相似,建立的含水饱和度大小及分布状态接近实际油藏条件,且不受驱替介质类型影响。因此,半渗透隔板法是适用于低渗透砂岩油藏岩电参数测试的最佳驱替方式,气体和模拟油均为适用于低渗透砂岩油藏岩电参数测试的驱替介质。

低渗透砂岩油藏的岩电参数主要受围压和地层水矿化度的影响,对实验温度的变化不敏感。因此,低渗透砂岩油藏岩电参数测试需要根据地层有效上覆压力确定净围压,根据实际油藏地层水矿化度配制实验用水,在室温条件下进行。

#### 参考文献:

- [1] 沈平平.油层物理实验技术[M].北京:石油工业出版社,1995:180-193.  
SHEN Pingping.Reservoir physical experiment technique [M]. Beijing:Petroleum Industry Press,1995:180-193.
- [2] LASSWELL Patrick M.Core analysis for electrical properties [J].Petrophysics,2006,47(3):191-213.
- [3] 公言杰,柳少波,赵孟军,等.核磁共振与高压压汞实验联合表征致密油储层微孔喉分布特征[J].石油实验地质,2016,38(3):389-394.  
GONG Yanjie, LIU Shaobo, ZHAO Mengjun, et al.Characterization of micro pore throat radius distribution in tight oil reservoirs by NMR and high pressure mercury injection [J].Petroleum Geology & Experiment,2016,38(3):389-394.
- [4] 杜威,王红才,马天骄,等.磁化率测井响应特征及主控因素分析[J].油气地质与采收率,2017,24(2):52-57.  
DU Wei, WANG Hongcai, MA Tianjiao, et al.Response characteristics of magnetic susceptibility logging and controlling factors analysis [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2017,24(2):52-57.
- [5] 马世忠,张宇鹏.应用压汞实验方法研究致密储层孔隙结构——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组为例[J].油气地质与采收率,2017,24(1):26-33.  
MA Shizhong, ZHANG Yupeng.Study on the pore structure of tight reservoir by using method of mercury injection—A case study of the Lucaogou Formation in Jimsar sag, Junggar Basin [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2017,24(1):26-33.
- [6] BEKRI S, HOWARD J, MULLER J.Electrical resistivity index in multiphase flow through porous media [J].Transport in Porous Media,2003,51:41-65.
- [7] 盛英帅,张玉广,顾明勇,等.原位条件下致密储层岩体力学动静态参数校正[J].石油与天然气地质,2016,37(1):109-116.  
SHENG Yingshuai, ZHANG Yuguang, GU Mingyong, et al.Static and dynamic mechanical parameter calibration of tight reservoir rock mass under in-situ condition [J].Oil & Gas Geology,2016,37(1):109-116.
- [8] 毛志强,谭廷栋,林纯增,等.完全含水多孔岩石电学性质及其孔隙结构实验研究[J].石油学报,1997,18(3):51-55.  
MAO Zhiqiang, TAN Tingdong, LIN Chunzeng, et al.The laboratory studies on pore structure and electrical properties of core samples fully saturated with brine water [J].Acta Petrolei Sinica,1997,18(3):51-55.
- [9] 原海涵.影响饱和度指数 $n$ 的因素[J].江汉石油学院学报,1992,14(2):48-55.  
YUAN Haihan.The factors affecting saturation exponent,  $n$  [J].Journal of Jianghan Petroleum Institute,1992,14(2):48-55.
- [10] 张宏志.影响阿尔奇参数测定的因素[J].大庆石油地质与开发,2014,33(3):155-157.  
ZHANG Hongzhi.Factors of influencing the determination of Archie parameters [J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2014,33(3):155-157.
- [11] 王勇,章成广,李进福,等.岩电参数影响因素研究[J].石油天然气学报,2006,28(4):75-77.  
WANG Yong, ZHANG Chengguang, LI Jinfu, et al.Study on influencing factors of rock electrical parameters [J].Journal of Oil and Gas Technology,2006,28(4):75-77.
- [12] 赵杰,姜亦忠,俞军.低渗透储层岩电实验研究[J].大庆石油地质与开发,2004,23(2):61-63.  
ZHAO Jie, JIANG Yizhong, YU Jun.Electricity experiment study of low-permeability reservoir [J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2004,23(2):61-63.
- [13] 阳晓燕,王月杰,郭诚,等.电阻率校正比采油指数在轻质油藏中的应用[J].特种油气藏,2016,23(6):90-92.  
YANG Xiaoyan, WANG Yuejie, GUO Cheng, et al.Application of specific productivity index with resistivity correction in medium-light oilfield [J].Special Oil & Gas Reservoirs,2016,23(6):90-92.