

低渗砂岩油藏水驱开发规律物理模拟研究

蒲泓丞, 吴居林, 吴柏宣

成都理工大学能源学院, 四川 成都

收稿日期: 2024年2月27日; 录用日期: 2024年4月30日; 发布日期: 2024年5月9日

摘要

低渗砂岩油藏随着我国油气开采技术提高与科技的不断发展, 其地位日益显得重要起来, 我国的低渗透砂岩油藏储量十分丰富, 分布范围也较为广泛, 然而, 国内对低渗砂岩油藏的开采存在不足, 导致低渗砂岩油藏的采收率一般会远远低于其储量。含水饱和度对于油藏的最终产量和采收率的影响很大, 因此, 本文将在阿尔奇公式的理论基础之上通过实验的方法进行低渗砂岩油藏含水饱和度变化规律物理模拟研究, 分析了含水饱和度的变化规律以及影响低渗砂岩含水饱和度变化的压力因素。本文通过调研与实验, 得到的主要结论如下: 1) 使用阿尔奇公式的方法相较于其他物理模拟方法更加简单, 便于操作, 适用范围更加广泛, 相对更具有可靠性。2) 不同储层具有不同的阿尔奇公式参数, 且参数的取值对结果的影响很大, 因此对于不同的储层, 需要先研究其岩电关系, 确定其阿尔奇公式中参数的数值, 以保证结果的准确性和有效性。3) 给出了低渗砂岩岩心的水驱过程中含水饱和度变化曲线, 分析对比不同压力情况下的曲线, 发现压力对含水饱和度的变化有明显的影响, 相同情况下, 在增大压力后, 含水饱和度曲线上升速度增大, 且驱替结束时的残余油饱和度减小。

关键词

低渗砂岩油藏, 水驱油物理模拟实验, 电阻率, 含水规律分析

Physical Simulation of Water Drive Development in Low Permeability Sandstone Reservoir

Hongcheng Pu, Julin Wu, Baixuan Wu

College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

Received: Feb. 27th, 2024; accepted: Apr. 30th, 2024; published: May. 9th, 2024

Abstract

With the improvement of oil and gas exploitation technology, the status of low permeability sand-

stone reservoir becomes increasingly important. The reserves of low permeability sandstone reservoir in China are very rich and the distribution range is relatively wide. However, the exploitation capacity of low permeability sandstone reservoir is quite insufficient, which leads to the recovery rate of low permeability sandstone reservoir is generally far lower than its reserves. Water saturation has a great influence on the final production and recovery efficiency of reservoirs. Therefore, based on the theory of Archie formula, this paper will conduct physical simulation research on the change law of water saturation in low-permeability sandstone reservoirs through experimental methods, and analyze the change law of water saturation and the pressure factors affecting the change of water saturation in low-permeability sandstone reservoirs. Through investigation and experiment, the main conclusions are as follows: 1) Compared with other physical simulation methods, the method using Archie formula is simpler, easier to operate, more widely applicable and more reliable. 2) Different reservoirs have different parameters of the Archie formula, and the values of the parameters have a great impact on the results. Therefore, for different reservoirs, it is necessary to study their rock-electric relationship and determine the values of the parameters in the Archie formula to ensure the accuracy and effectiveness of the results. 3) The curve of water saturation change in the process of water flooding of low-permeability sandstone cores is given. The curve under different pressure conditions is analyzed and compared, and it is found that pressure has a significant influence on the change of water saturation. Under the same circumstances, after increasing pressure, the rise rate of water saturation curve increases, and the residual oil saturation decreases at the end of displacement.

Keywords

Low Permeability Sandstone Reservoirs, Physical Simulation Experiment of Water Flooding Oil, The Resistivity, Analysis of Water Cut Law

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

对于低渗油藏的开采,现阶段有各种不同的方式,如在合理的井网设计下进行水驱、气驱、各种压裂方法等,相较之下,水驱的技术发展更加成熟。在实际生产中,确定水淹情况和剩余油饱和度是指导后续开发的关键,因此常用测井手段中的电阻率参数根据电阻率与含水饱和度的关系进行含水饱和度的推算,含水饱和度这一参数的确定对油气藏开发的最终产量预测、储层评价等方面有着重要的意义。

在现阶段,岩心规模的物理模拟是最为适合研究水驱开发规律的方法,其既反映地下储层的复杂性,又便于操作,数据具有代表性。自从阿尔奇于1942年研究总结出阿尔奇公式之后,阿尔奇公式一直被用于油藏的含水饱和度计算中。阿尔奇公式将岩石中的含水饱和度与岩石的电阻率建立起联系,通过阿尔奇公式,可以把对含水饱和度的测量转变为对岩石电阻率的测量。Z Qin等[1]研究了阿尔奇胶结指数的快速预测方法。郭龙[2]针对低含油饱和度砂岩油藏开发初期含水现象,以室内物理模拟实验为手段,通过水驱过程中含水饱和度和含水率的变化,研究了特低渗透砂岩油藏的水驱油特征。在使用传统阿尔奇公式中的电阻率法对岩心进行室内水驱后,得到了注入体积倍数与含水饱和度的关系,该项成果揭示了低渗透低含油饱和度油藏含水率的变化规律和变化机理,较好地解释了低渗透砂岩油藏生产初期就含水的现象。赵景[3]通过比较电阻率法与CT法得到结论:电阻率测量方法在操作上更加的简单,安全性也更高,对于环境的适应性更好,陈雨龙[4]研究致密砂岩导电规律,成功建立了饱和度模型并验证了正确

性。在阿尔奇公式多年来一直指导着含水饱和度的研究，具有较为广泛的适用性，此外，电阻率法更加适合于室内实验研究[5] [6] [7]。所以最终选择从电阻率法入手设计室内物理模拟实验开展低渗砂岩油藏含水饱和度变化规律物理模拟研究。

2. 水驱物理模拟实验方法

2.1. 实验原理及装置

对于纯砂岩油藏，阿尔奇经过研究后于 1942 年提出了阿尔奇公式[8]，其通式为：

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

式中， a 为岩石系数， m 为胶结系数，在阿尔奇引入电阻增大系数 I 后：

$$I = \frac{R_t}{R_0} \quad (2)$$

R_0 为砂岩包含水时的电阻率， R_t 为砂岩含油时的电阻率。

由于 I 只与含水饱和度 S_w 有关，根据统计计算，最终得到 I 与 S_w 的关系式：

$$I = \frac{R_t}{R_0} = \frac{b}{S_w^n} = \frac{b}{(1 - S_o)^n} \quad (3)$$

在调研低渗砂岩特征、确定合适的物理模拟方法之后，本次实验选择使用短岩心驱替仪进行水驱物理模拟实验。本次实验使用了短岩心驱替装置，能够在驱替过程中更加准确、及时地得到电阻率变化数据，以便于能后续对数据进行分析，其驱替系统流程示意如图 1。

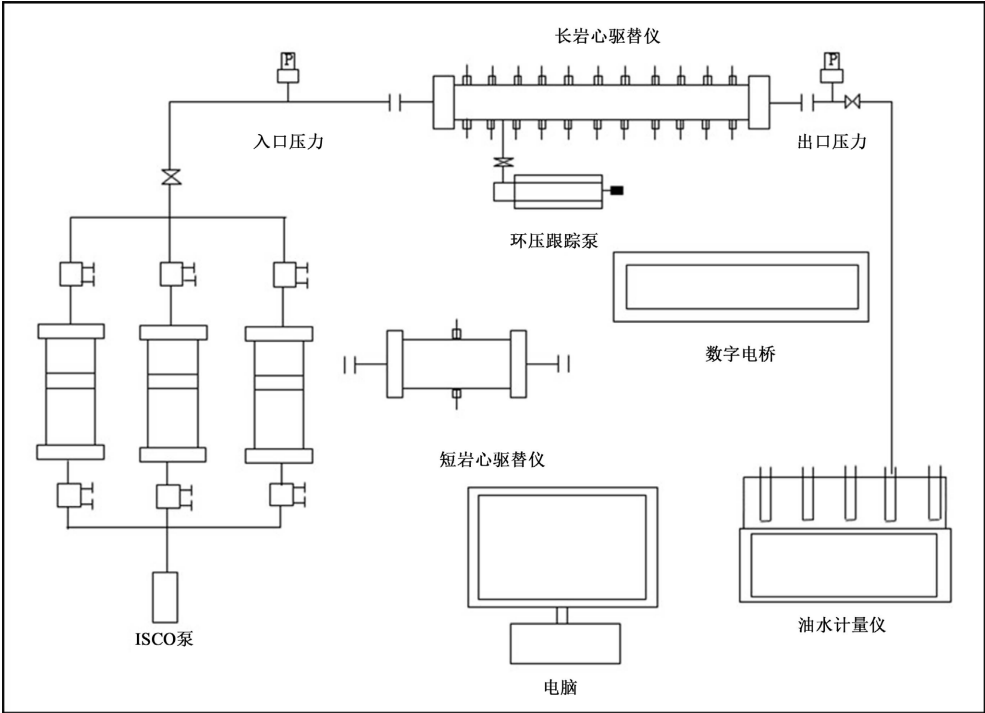


Figure 1. Flow chart of displacement system
图 1. 驱替系统流程图

如图 1 流程图所示，短岩心驱替仪入口端为 3 个圆柱形盛液器，其中 2 个分别装入地层水与原油，作为本次实验的驱替液使用；短岩心驱替仪器中部连接环压跟踪泵，用于给仪器施加围压以及监测围压的数据变化；仪器出口端连接油水计量仪，可以收集实验过程中出口端排出的液体；整个实验过程均连接电脑，可以在电脑端通过软件对实验进行驱替压力、围压控制，开始、停止驱替、实验的驱替方式选择等操作以及监管和记录实验过程中的各项数据。短岩心驱替仪中部电阻率测点连接数字电桥，可以对岩心对应部位进行电阻率和压力的数据测量。

实验室仪器图片如图 2 和图 3 所示。



Figure 2. CYQ-III data acquisition control system touch screen interface

图 2. CYQ-III 型数据采集控制系统触屏界面

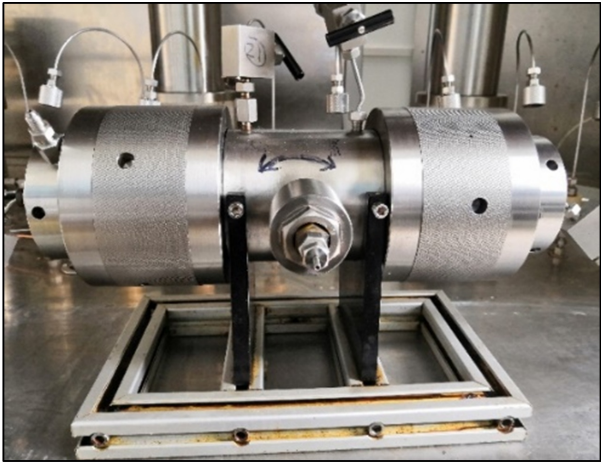


Figure3. Short core displacement chart

图 3. 短岩心驱替仪图

2.2. 实验设计及准备

实验是建立在阿尔奇公式电阻率法的理论基础上，所以将侧重于电阻率的测量，只有先通过实验获取准确的电阻率数据才能进一步通过公式计算得到准确的含水饱和度数据。使用短岩心驱替仪，利用仪器中部的电阻率测点即可以得到所需的砂岩岩心电阻率数据。为了对比分析驱替压力对含水饱和度变化的影响，将分为两组进行对比实验。两组实验使用同样的 4 组岩心，第一组实验在围压 15 MPa，驱替压

力 5 MPa 的条件下进行水驱过程模拟，第二组实验在围压 15 MPa，驱替压力 10 MPa 的条件下进行，其他条件均不做改变。

在水驱模拟实验进行之前，因为不能确定 4 组岩心的岩电关系，所以需要先进行岩电关系的标定实验，由此来得到 4 组岩心的阿尔奇拟合公式。

1) 样品参数

本次实验根据需要一共选择了四块低渗砂岩岩心，编号分别为 HJ23、HJ25、HJ27、HJ28，测量岩心的物理参数见表 1。

Table 1. Physical parameters of sandstone samples table
表 1. 砂岩岩样物理参数表

岩心编号	长度	直径	气测渗透率	岩心体积	骨架体积	孔隙度
	mm	mm	mD	cm ³	cm ³	%
HJ23	72.35	25.41	29.018	36.6891	30.4635	16.9686
HJ25	71.74	25.38	22.356	36.2939	30.2726	16.5905
HJ27	72.06	25.36	22.080	36.3984	30.4037	16.4697
HJ28	72.94	25.36	27.378	36.8429	30.0152	18.5319

2) 实验步骤

- ① 将 4 组岩心清洗、烘干后浸泡在煤油溶液中，使用真空泵将岩心饱和模拟地层水。
- ② 将煤油与模拟地层水装入短岩心驱替仪入口端对应的圆柱体容器中。
- ③ 将岩心从右侧装入短岩心驱替仪中，连接实验装置，检查各连接点是否牢固。
- ④ 打开电脑、数字电桥、气瓶、双杆泵和数据采集控制系统，设置实验参数后使用煤油进行驱替实验。
- ⑤ 在出口端的油水计量仪处每间隔 10 s 进行一次油水计量，直到出口端的液体不再含水，停止实验，统计每个计量时刻的油、水量。
- ⑥ 四组岩心均完成实验后，再次将岩心清洗、烘干，浸泡在地层水模拟溶液中，使用真空泵将岩心饱和和地层水模拟溶液。
- ⑦ 将岩心放入岩心驱替仪中，使用煤油进行驱替，建立束缚水饱和度。
- ⑧ 用建立好束缚水饱和度的岩心进行水驱实验，各岩心分别在围压 15 MPa，驱替压力 5 MPa 和围压 15 MPa，驱替压力 10 MPa 的条件下进行两组实验，通过短岩心驱替仪中部的电阻率测点实时记录水驱过程中岩心的电阻率变化与压力变化。
- ⑨ 导出电脑软件中的实验过程中的电阻率与压力数据。
- ⑩ 关闭气瓶，卸除围压和驱替压力，关闭各仪器电源，清洁整理实验设备。

3. 含水饱和度与电阻率关系

3.1. 含水饱和度与电阻率关系式推导

由式 3 已知阿尔奇公式中含水饱和度与电阻率的关系，其中， b 是与岩心相关的参数， n 为饱和度指数，通常 b 与 n 的值难以确定，且不同的 b 值与 n 值对数据分析结果的影响很大。因此，需要通过对原阿尔奇公式进行变形，以便后续实验数据处理的顺利进行，首先需要将阿尔奇公式变形。

$$R_t = \frac{bR_0}{S_w^n} \tag{4}$$

在式 4 中， b 与 R_0 的取值仅与岩性有关，对于同一岩样， b 与 R_0 始终不变。因此可将 bR_0 用参数 c 取代，把电阻率与含水饱和度的关系式改写为：

$$R_t = \frac{c}{S_w^n} \tag{5}$$

其中 c 为仅受岩性控制的参数。确定了 n 与 c 值后，对于同一岩样即可进行含水饱和度与电阻率之间的转换。且可以推断当含水饱和度升高时，电阻率应该呈现下降趋势。

3.2. 阿尔奇公式拟合

关于公式 3-2 对阿尔奇公式的变形，需要确定 4 组岩心不同的 n 值与 c 值。在对 4 组岩心进行标定实验之后，可以通过电阻率测点记录的数据得到标定实验过程中不同时刻岩心的电阻率数值变化。同时，在标定实验过程中，在出口端油水计量仪处进行了油水计量，因此可以通过出口端排驱液体的水相体积及油相体积计算得到不同时刻砂岩岩心的含水饱和度，大致方法为累加某时刻前收集到的水相总体积，初始时的岩心内含水饱和度为 100%，由岩心参数可计算出岩心的孔隙体积，将孔隙体积减去排驱出的水相体积，就得到岩心中剩余的水相体积，进一步可以得到这一时刻的含水饱和度。将各时刻岩心的含水饱和度与电阻率值一一对应，即可以进行式 5 的阿尔奇公式拟合。岩心 HJ23 的标定电阻率数据与含水饱和度数据见表 2。

Table 2. HJ23 core resistivity and water saturation calibration data
表 2. HJ23 岩心电阻率与含水饱和度标定数据

HJ23	
电阻率(Ω)	含水饱和度
152640000	0.580
161740000	0.260
171740000	0.120
183880000	0.055
193880000	0.033
202960000	0.020
202960000	0.020

对电阻率与含水饱和度使用式 4 进行拟合，得到 HJ23 岩心电阻率与含水饱和度的关系式，HJ23 号岩心的拟合结果见图 4。

完成全部四组岩心的阿尔奇公式拟合之后，将四组岩心的拟合结果进行整合，得到表 3。
4 组岩心的拟合结果的 R^2 平方均接近 0.99 或大于 0.99，说明各岩心的拟合准确性很高，得到各岩心的拟合结果后，就可以进一步展开水驱实验进行含水饱和度变化分析。

4. 含水饱和度变化及影响因素分析

4.1. 含水饱和度变化规律

进行各岩心的岩电标定后，在束缚水饱和度下进行低渗砂岩岩心的水驱实验，测量收集水驱过程中

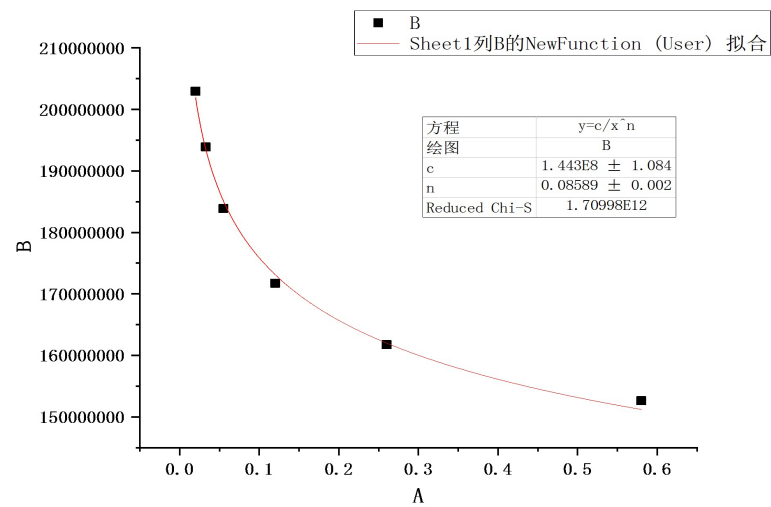


Figure 4. HJ23 fitting results
图 4. HJ23 拟合结果

Table 3. Archie formula fitting results
表 3. 阿尔奇公式拟合结果

岩样	n 值	c 值	含水饱和度与电阻率关系
HJ23	144,300,000	0.08589	$R_t = 144300000/S_w^{0.08589}$
HJ25	100,294,000	0.26558	$R_t = 100294000/S_w^{0.26558}$
HJ27	54,942,300	0.55025	$R_t = 54942300/S_w^{0.55025}$
HJ28	81,534,200	0.45339	$R_t = 81534200/S_w^{0.45339}$

电阻率测点测得的砂岩的电阻率值。电阻率值增大，即可推断砂岩的含水饱和度下降，反之则含水饱和度和度上升。在围压 15 MPa，驱替压力 5 MPa 条件下对 4 组岩心进行水驱实验，4 组岩心的电阻率变化情况见图 5。

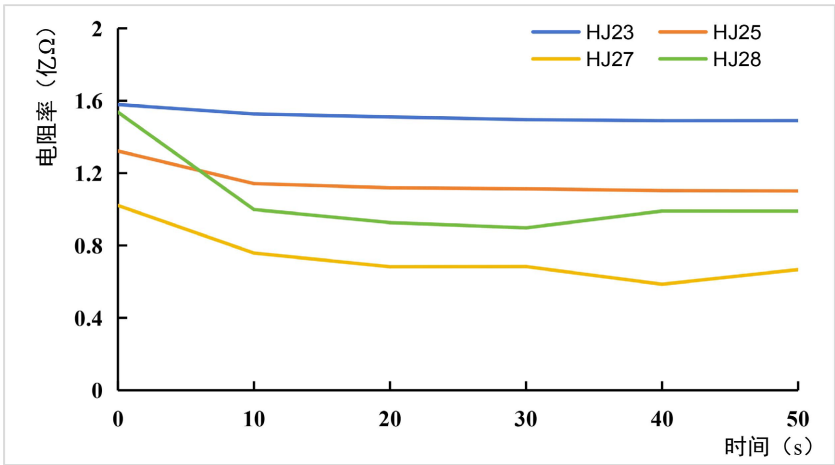


Figure 5. Core resistivity curve
图 5. 岩心电阻率变化曲线

通过各岩心建立的岩电关系, 可将电阻率的变化转换为含水饱和度变化见图 6。

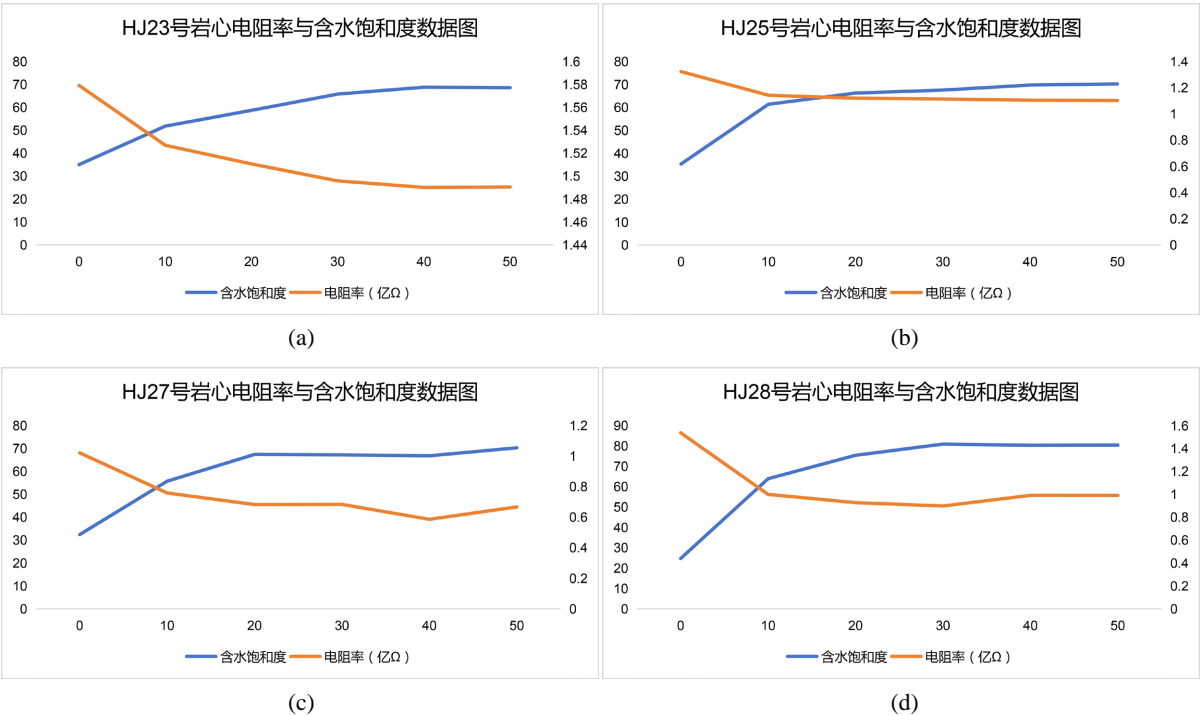


Figure 6. Resistivity and water saturation data graph
图 6. 电阻率与含水饱和度数据图

低渗砂岩岩心的驱替大致可以划分为三个阶段: 含水饱和度剧烈上升阶段、平缓上升阶段与趋于稳定阶段, 在水驱过程刚开始时, 岩心处于原始含油饱和度状态(即束缚水饱和度状态), 含油饱和度在这时处于最高值, 当地层水进入岩心, 可以将岩心中的大孔隙中的油给快速驱替出来, 驱油效率最高, 因此含水饱和度表现为迅速上升且上升速率最快; 随着岩心中含油饱和度逐渐降低, 岩心内剩余油减少, 驱油效率降低, 这时出口端开始见水, 含水饱和度上升速度降低; 当岩心中的可动油被地层水全部驱替出后, 继续驱替岩心含油饱和度不再发生变化, 含水饱和度变化曲线变得平稳, 接近水平直线, 此时岩心中未被驱替出的油即为水驱剩余油。从各岩心呈现的含水饱和度变化曲线中, 可以看出第一阶段与第二阶段之间存在拐点或斜率明显降低的区间, 这表明在岩心中, 地层水不断进入大的连通孔隙, 将其中的油驱替出来, 当大孔隙中的油被全部驱替后, 岩心的含水饱和度就不再能迅速上升, 上升速率由快变慢, 具体体现在图中的拐点或斜率降低的区间上。各岩心的剧烈上升阶段在前期很快结束, 在 50 s 的驱替时间里, 剧烈上升阶段通常在 10 s 内就已经完成。在这一阶段, 砂岩内的含水饱和度迅速上升, 最容易被水驱替的油被驱替出岩心, 驱替出口端的液体全部为油相; 第二阶段平缓上升阶段在各组岩样的表现中有些许差异, 体现在上升速率和持续时间两个方面, 如 HJ23 号岩心与 HJ25 号岩心的第二阶段占总驱替时间的一半以上, HJ25 号岩心第二阶段的含水饱和度上升最少, 仅为 8.4%, 这可能与砂岩岩样的孔隙结构有关, 当岩心的孔隙结构、连通性好时, 当地层水进入岩心, 岩心孔隙中的大部分油都会被迅速驱替出去, 难驱替的油更少, 体现在图中就为第二阶段更加稳定, 含水饱和度上升较少, 在这一阶段, 出口端液体为油水两相; 到达稳定阶段后, 砂岩的含水饱和度基本不发生变化, 在这个阶段岩心中的油相全部为不能被驱动的残余油, 出口端的液体全部为水相。在四组岩样中, HJ28 号砂岩岩心驱替结束后的含

水饱和度最高，且 HJ23 号与 HJ28 号岩心驱油效率明显强于其他两组岩心，通过结合各组岩心的物理参数可以发现 HJ23 号与 HJ28 号岩心的渗透率和孔隙度综合数值偏高，因此认为渗透率与孔隙度对驱油效率有影响，渗透率、孔隙度越高，驱油效率越好。4 组低渗砂岩岩心在水驱实验过程中呈现出了相同的含水饱和度变化趋势。

4.2. 驱替压力对含水饱和度变化的影响

为了进一步探究影响低渗砂岩岩心含水饱和度的因素，本次实验进行了变驱替压力的对比实验，从压力的角度入手探究压力因素对低渗砂岩含水饱和度变化的影响。在结束 15 MPa 围压，5 MPa 驱替压力的四组实验后，再次补充了 15 MPa 围压，10 MPa 驱替压力下的水驱实验。在清洗完岩心后，用同样的实验步骤再次进行实验，在设定驱替压力时，设定值从 5 MPa 增大到 10 MPa，其余步骤不变。将实验数据导出、处理后与之前的实验数据进行对比，结果见图 7。

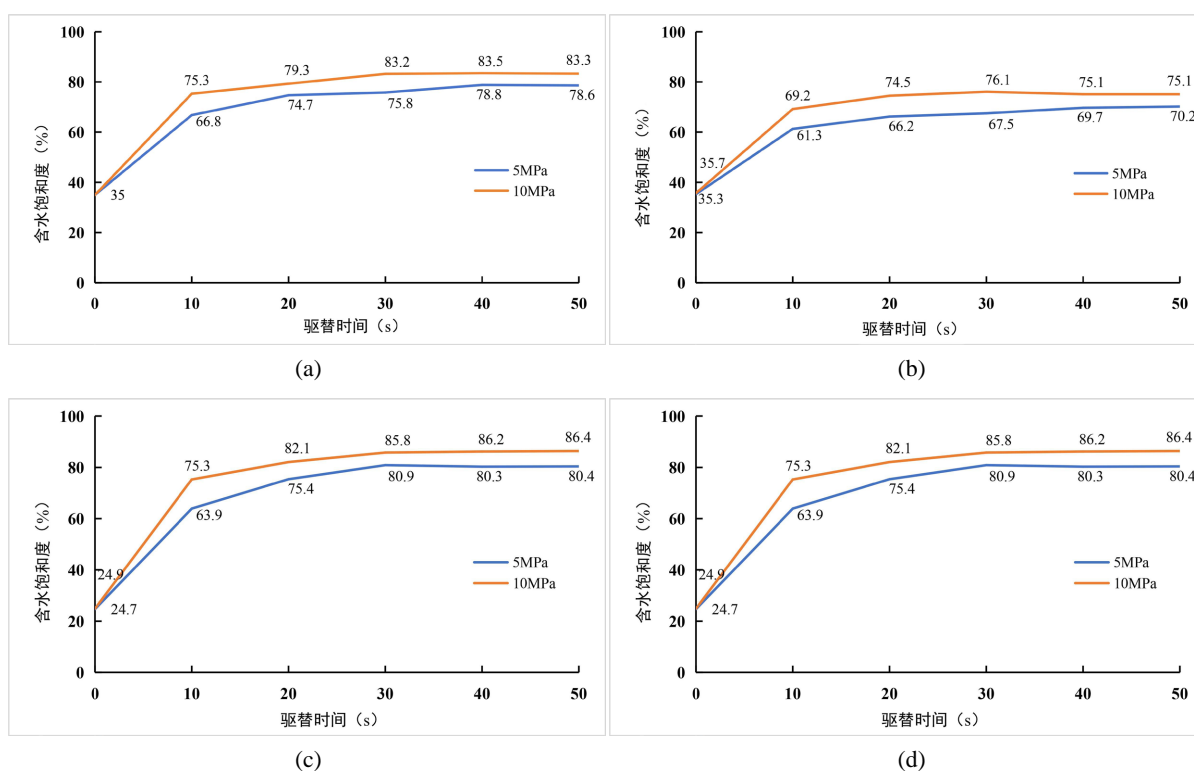


Figure 7. Comparison of changes of core water saturation under different pressures

图 7. 不同压力下岩心含水饱和度变化对比图

当实验的驱替压力增大到 10 MPa 时，低渗砂岩岩心在驱替过程各个阶段、各时刻的含水饱和度数据皆比驱替压力为 5 MPa 的同时刻的数据高，此外，在高驱替压力下，第一阶段和第二阶段的持续时间更短，岩心的含水饱和度可以更快地到达稳定阶段，到达驱替结束时，残余油饱和度也更低，这是由于当驱替压力增大时，岩心中原本在低驱替压力下不能被驱动的残余油达到了启动压力，可以被地层水驱替出岩心，导致最终的含水饱和度变高，残余油饱和度降低。由于第一个计数点在 10 s 处，10 s 时各岩心已经完成了第一阶段的含水饱和度迅速上涨这一过程，因此第一阶段与第二阶段之间的实际拐点应比图中的拐点更早出现，含水饱和度曲线在前期的斜率应该更大，在前期，含水饱和度比低驱替压力上升更

显著。可以得到结论：在更高驱替压力下，低渗砂岩岩心的水驱过程更快，最终剩余油更少，可以认为驱油效率相较于低驱替压力更高。比较 5 MPa 驱替压力下曲线有波动的 HJ27 号岩心和 HJ28 号岩心的数据可以看到，当压力升高到 10 MPa 后，整个驱替过程中的含水饱和度变化更加稳定，没有出现反常数据。

5. 结论

1) 对阿尔奇公式的岩电关系进行了完善，对比常规使用阿尔奇公式的岩电关系研究，本文进行了阿尔奇公式的公式推导，将较难取值的部分参数进行了优化，将其中不易确定的参数通过变形，再经过岩电关系标定实验最终确定下来，建立了每个岩样独立的阿尔奇拟合公式，更便于后续的含水饱和度研究；

2) 完成低渗砂岩的物理模拟实验后，根据实验数据得到了含水饱和度变化曲线，分析曲线规律总结出低渗砂岩在水驱过程中的含水饱和度变化规律，即大致分为三个阶段：含水饱和度剧烈上升阶段、平缓上升阶段与趋于稳定阶段，三个阶段里第一阶段用时最短，整个图像呈现出半漏斗状。在四组岩样中，HJ28 号砂岩岩心驱替结束后的残余油饱和度最低，且 HJ23 号与 HJ28 号岩心驱油效率明显强于其他两组岩心，通过结合各组岩心的物理参数可以发现 HJ23 号与 HJ28 号岩心的渗透率和孔隙度综合数值偏高，因此认为渗透率与孔隙度对驱油效率有影响，渗透率、孔隙度越高，驱油效率越好；

3) 在变驱替压力对比实验中，通过增大驱替压力，所有岩心的驱替过程均加快，且最终残余油饱和度降低，可以认为在相同条件下，适当增大驱替压力能有效改善水驱效果，缩短水驱时间。

参考文献

- [1] Qin, Z., Pan, H., Ma, H., *et al.* (2016) Fast Prediction Method of Archie's Cementation Exponent. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **34**, 291-297. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.06.070>
- [2] 郭龙. 特低渗透砂岩油藏初期含水变化机理实验研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008(4): 127-129+6.
- [3] 赵景. 电阻率测井在含水饱和度测量中的应用分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(23): 60-61.
- [4] 陈雨龙. XX 区块致密砂岩导电规律研究及饱和度测井评价[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2017.
- [5] 张丽华, 潘保芝, 单刚义, 郭宇航. 阿尔奇公式中饱和度指数影响因素及特征概述[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(3): 1247-1256.
- [6] 杨克兵, 王竞飞, 马凤芹, 唐海洋, 潘雪峰. 阿尔奇公式的适用条件分析及对策[J]. 天然气与石油, 2018, 36(2): 58-63.
- [7] 邹良志. 阿尔奇公式中参数的影响因素分析[J]. 国外测井技术, 2013(4): 23-273.
- [8] Archie, G.E. (1942) The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. *Transactions of the AIME*, **46**, 56-67. <https://doi.org/10.2118/942054-G>