



张浩, 郭旭光, 徐小龙, 等. 2023. 一种超高压致密油气藏地层压力条件渗透率的实验室测量新方法. 地球物理学进展, 38(4):1673-1679, doi:10.6038/pg2023GG0296.

ZHANG Hao, GUO XuGuang, XU XiaoLong, et al. 2023. New measurement method of permeability under the pore pressure condition of rock sample of ultrahigh pressure tight reservoir. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 38(4):1673-1679, doi:10.6038/pg2023GG0296.

一种超高压致密油气藏地层压力条件渗透率的实验室测量新方法

New measurement method of permeability under the pore pressure condition of rock sample of ultrahigh pressure tight reservoir

张浩¹, 郭旭光¹, 徐小龙¹, 牟立伟¹, 申子明¹, 樊海涛¹, 韩学辉^{2*}

ZHANG Hao¹, GUO XuGuang¹, XU XiaoLong¹, MU LiWei¹, SHEN ZiMing¹, FAN HaiTao¹, HAN XueHui^{2*}

1. 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院, 克拉玛依 834000

2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580

1. *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, China*

2. *School of Geoscience, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China*

摘要 实验观测超高压致密油气藏的地层压力条件的渗透率对于定量表征储层物性以及制定开发方案具有重要意义. 常规的方法采用在岩心的出口端设置回压阀的方式实现孔隙压力的控制和流量的计量, 存在回压阀控制孔隙压力精度低、灵敏度低、流量计量不准确的技术缺陷, 渗透率测量精度低. 在岩心的出口端使用高精度恒速恒压泵代替回压阀, 开发了一种基于高精度恒速恒压泵双泵联动控制孔隙压力及流量/压力计量技术的渗透率测量新方法, 通过岩心的入口端和出口端的两台高精度恒速恒压泵做进液、退液的联动操作计量恒压模式的进液/退液体积或者恒流量模式的上游压力/下游压力实现超高压渗透率的测量. 在最高为 138 MPa 的超高压条件下, 实验观测了准噶尔盆地白垩系清水河组的超高压致密油气藏的 5 块岩样的地层压力条件的渗透率, 结果发现: 低地层压力条件下的渗透率测量结果与相同有效压力的覆压渗透率吻合较好, 超高压条件下的渗透率重复性好并且符合渗透率随有效压力变小而变大的一般规律.

关键词 超高压; 致密油气藏; 地层压力; 渗透率; 实验

中图分类号 P631

Abstract It is very important to measure the permeability under the formation pressure condition of rock sample of ultrahigh pressure tight reservoir for the reservoir characterization and prediction. The normal method with back-pressure valve technology for exerting pore pressure and measurement of flow was not able to gain ideal permeability precision because of low control precision of pore pressure, low sensitivity, and low measurement precision of flow. A new measurement method of permeability was developed through the flow linkage of 2 high precision constant pressure and speed pumps located both sides of rock sample for exerting pore pressure and measurement of flow or pressure, in which the back-pressure valve at the end of rock sample was replaced by a high precision constant pressure and speed pump and the permeability can be calculated by the measurement of flow in the mode of constant pressure or the measurement of differential pressure in the mode of constant flow. Under the ultrahigh pore pressure condition up to 138 MPa, the permeabilities of 5 rock samples from ultrahigh pressure tight reservoir of Qingshuihe Formation of Lower Cretaceous in southern margin of Junggar Basin were measured with the employment of new method. The results showed that the permeabilities measured by new method match the permeabilities measured by overburden pressure method good under the low pore pressure condition and good reproducibility of the measurement and positive correlation between permeability and effective pressure under the ultrahigh pressure condition.

收稿日期 2022-11-18; 修回日期 2023-06-03.

投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 国家自然科学基金(U1562108)资助.

第一作者简介 张浩, 男, 1983 年生, 高级工程师, 主要研究方向为测井技术. E-mail: zhanghao8@petrochina.com.cn

* 通讯作者 韩学辉, 男, 1974 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为岩石物理. E-mail: hanxuehui@upoc.edu.cn

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2023GG0296

Keywords Ultrahigh pressure; Tight reservoir; Formation pressure; Permeability; Experiment

0 引言

异常高压油气藏是目前深层和超深层等非常规油气藏勘探和开发的主要目标之一,其地层压力系数大以及埋深大的特点导致异常高压油气藏的地层压力常常大于 70 MPa(相当于 7000 m 油藏的正常压力),压力指标上属于超高压油气藏. 对于超高压油气藏,超高的地层压力对储层物性的影响直接关系到储层表征和地质勘探甜点的预测. 以准噶尔盆地南缘白垩系清水河组深层致密油气藏为例,地层压力系数在 1.6~2.4 之间,上覆地层压力在 150 MPa 左右,地层压力绝对值甚至超过 138 MPa(张凤奇等,2020). 有文献研究(Secor,1965; Walsh,1981; Du Rouchet,1981; 胡济世,1989; 戴俊生等,2007; 马晓鸣等,2011; 张海勇等,2014; 周军良等,2017)认为异常高压会通过保持原生孔隙、产生以及保存微裂隙等次生孔隙来改善储层的物性特别是渗透率. 由于渗透率直接关系到储层物性表征以及开发方案的制定,如何得到超高压致密油气藏地层压力条件的渗透率一直是岩石物理学家和油藏工程师关注的重点问题.

目前,主要通过钻井取心的渗透率实验测量得到油藏的渗透率(韩学辉,2021). 实验室测量渗透率的方法包括:稳态测量法、瞬时压力脉冲法、核磁共振法(NMR)、脱气测试法、压汞法、岩石复电阻率法(Zetinskii and Levina,1933; 杨明松等,2001; 邹良志和刘清华,2011; Brace *et al.*,1968; Gueguen and Palciauskas,1994; 黄理善等,2007). 针对致密储层(如致密页岩气、页岩油储层),最近提出一些新方法来提高渗透率的测量精度,包括周期振荡法(王小琼等,2015)、毛细管流黏法(戢俊文等,2007).

通常,这些渗透率测量都是在孔隙压力近于大气压(0.1 MPa)的条件下进行的. 如果需要在孔隙压力条件下测量渗透率,则需要在岩心的出口端设置回压阀来施加孔隙压力并计量出口端流量. 具体的做法包括:首先,按照油藏条件或者实验设计压力条件在岩心的出口端设置回压阀来控制孔隙压力. 其次,在岩心的入口端设置合适的进口压力产生压差(应该大于启动压力)驱动实验液体(高压情况一般采用盐水或者油)向出口端流动. 最后,计量通过

回压阀的流体流量结合压差、岩样长度、横截面积等参数按照达西定律计算渗透率. 图 1 给出了典型的基于回压阀控制孔隙压力并计量流量的渗透率实验测量装置的示意图.

该方法在实际使用中,特别是超高压条件下测量致密储层的渗透率有一些技术缺陷. 首先,利用回压阀建立油藏实际地层压力或者实验设定孔隙压力较为困难. 回压阀具有单向流通的特性,压力并不能通过回压阀传导至夹持器出口端. 出口端的孔隙压力的建立必须依赖驱替泵泵入的流体从夹持器进口端流过岩心,然后在夹持器出口端汇集而缓慢升高. 当岩心渗透率较低时,建立孔隙压力耗费的时间过于漫长. 其次,回压阀变形不易恢复,灵敏度低. 当流动压力大于设定压力较高数值时阀门仍然不能打开,而一旦打开,流动压力低于有效压力又不能及时关闭,造成整个流动实验过程压力波动过大,不能对出口端的压力和流量做出快速响应. 最后,由于回压阀出口处的管汇体积难以计量,驱出的液体暴露于空气中存在蒸发影响,使用量筒或者天平称重计量流量的方式容易产生较大的流量误差. 特别是对于致密岩心,储层产出的流体体积较少,渗透率测量过程中过低的流速会放大量筒或者天平称重计量流量的测量误差,直接导致渗透率的测量精度变差.

图 2 为来自准噶尔盆地的 3 块超高压致密油藏岩心的变孔隙压力的渗透率实验测量结果,实验采用的固定围压为 150 MPa. 当孔隙压力低于 60 MPa 的时候,两次实验测量渗透率的平均相对偏差小于 5%,随孔隙压力增加(有效压力减小)渗透率变大,符合一般认识. 当孔隙压力高于 60 MPa 的时候,两次实验测量渗透率的平均相对偏差远大于 5%,岩心 A 和岩心 B 出现了随孔隙压力增加(有效压力减小)渗透率变小的情况,不符合一般实验规律,表明基于回压阀控制孔隙压力的渗透率实验测量方法无法用于超高压致密油气藏的地层压力条件渗透率的实验室测量.

为了克服传统的基于回压阀控制孔隙压力的渗透率实验测量结果的精度低的技术缺陷,本次研究开发了一种基于高精度计量泵双泵联动控制孔隙压力及流量/压力计量的超高压致密油气藏的地层压力条件渗透率的实验室测量新方法. 实验测量了准

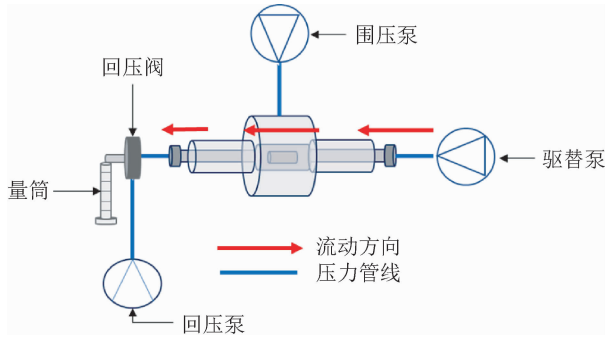


图1 基于回压阀控制孔隙压力的渗透率实验测量装置的示意图

Fig. 1 Sketch map of measurement device of permeability under pore pressure condition with back-pressure valve technology

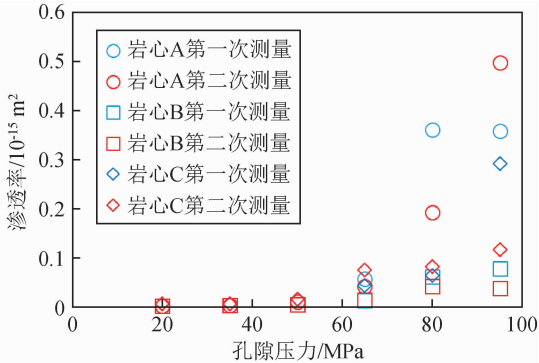


图2 基于回压阀控制孔隙压力的渗透率实验测量结果

Fig. 2 Result of permeability under pore pressure condition measured by back-pressure valve technology

噶尔盆地白垩系清水河组超高压致密油气藏的超高压条件的渗透率,结果重复性好,与其他方法测量结果吻合较好并且符合渗透率随有效压力变小而变大的一般实验规律,能够满足超高压致密油气藏的地层压力条件渗透率的实验室测量需求。

1 高精度恒速恒压计量泵双泵联动的渗透率实验测量方法

由达西定律可知,准确测量超高压致密油气藏的地层压力条件渗透率的技术关键是孔隙压力施加以及驱替过程中的压差和流量的计量。为了实现高孔隙压力的施加、以及压差和液体流量的计量的技术目的,在岩心的出口端使用高精度恒速恒压泵代替回压阀,开发了一种基于高精度恒速恒压泵双泵联动控制孔隙压力及流量/压力计量技术的渗透率测量新方法,通过岩心的入口端和出口端的两台高

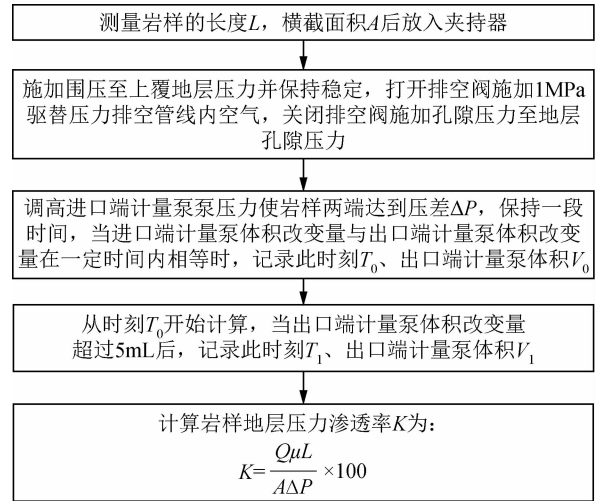


图3 超高压致密油气藏的地层压力条件渗透率实验室测量技术路线

Fig. 3 Work flow of permeability under pore pressure condition of rock sample of ultra high pressure tight reservoir

精度恒速恒压泵做进液、退液的联动操作计量恒压模式的进液/退液体积或者恒流量模式的上游压力/下游压力实现超高压渗透率的测量。

为了完成在给定的上覆压力、孔隙压力条件下的渗透率测量,需要实验观测 3 个基本的参数:在上覆地层压力、孔隙压力条件下液体流动的压差 ΔP ; 在压差 ΔP 作用下液体在岩样中流动达到稳定状态后, T_0 时刻的出口端计量泵体积读数 V_0 ; 液体在压差 ΔP 作用下稳定流动一定时间后, T_1 时刻的出口端计量泵体积读数 V_1 。

在压差 ΔP 作用下流过岩样的流量 Q , 有:

$$Q = \frac{V_1 - V_0}{T_1 - T_0}, \quad (1)$$

在某一上覆压力和地层压力下的渗透率 K , 有:

$$K = \frac{Q\mu L}{A\Delta P} \times 100, \quad (2)$$

式中, Q 是流过岩样的流量,单位为 mL/s ; ΔP 是岩样两端压差,单位为 MPa ; μ 是液体的黏度,单位为 $0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$; L 是岩样的长度,单位为 cm ; A 是岩样的横截面积,单位为 cm^2 。

具体实验测量时,可以采用图 3 所示的技术路线图设置围压、孔隙压力并采集压差 ΔP 、 T_0 时刻的出口端计量泵体积读数 V_0 和 T_1 时刻的出口端计量泵体积读数 V_1 ,最终结合长度 L 和横截面积 A 按照式 (1) 和式 (2) 计算得到围压、孔隙压力条件的渗透率。

相对于传统的基于回压阀控制孔隙压力的渗透

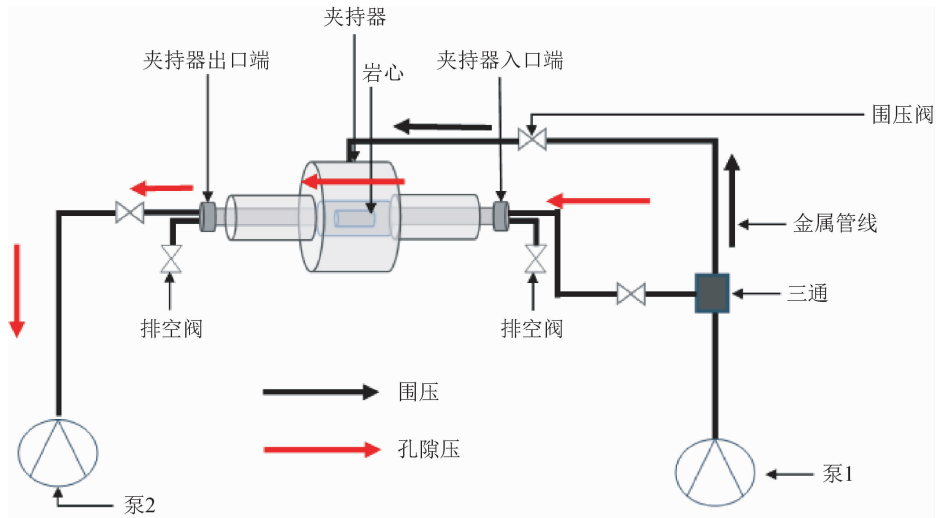


图 4 超高压油藏的地层压力条件渗透率的实验测量装置示意图

Fig. 4 Sketch map of measurement device of permeability under pore pressure condition of rock sample of ultrahigh pressure tight reservoir

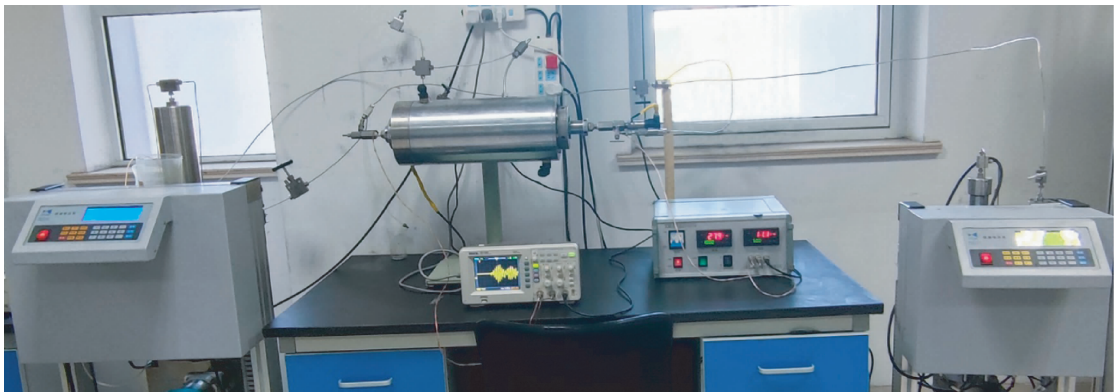


图 5 超高压油藏的地层压力条件渗透率实验测量装置照片

Fig. 5 Photo of measurement device of permeability under pore pressure condition of rock sample of ultra high pressure tight reservoir

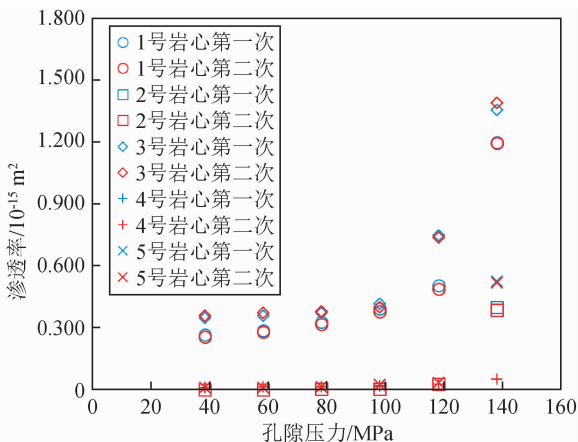


图 6 地层压力条件渗透率的重复性测量结果

Fig. 6 Repeatability of permeability under pore pressure condition measured by the method in this study

率实验技术,高精度恒速恒压计量泵双泵联动的渗透率实验测量方法具有以下优点:可以在恒压泵的工作压力范围内连续地设置孔隙压力;可以通过使用合适的高精度恒速恒压计量泵大幅度提升孔隙压力,目前可以做到大约 170 MPa 左右.回压阀常用的合金膜片存在容易被拉力撕裂导致回压阀失效等易发问题,同时存在高压条件下阀针使用寿命短、在高温高压条件下可靠性差等缺点,国产和进口的回压阀一般做到 70 MPa 以上就比较困难;该方法较好地克服了回压阀变形不易恢复、压力控制精度低的缺点;高精度恒速恒压计量泵计量压差和流量的精度高,压力的计量精度可以达到 0.01 MPa,流量的计量精度可以达到 0.001 mL/min,并且压差和流量无波动和迟滞.

2 实验装置及不确定度分析

2.1 实验装置

为了实现图3方法所示的地层压力条件渗透率的测量,设计制作了一种超高压致密油气藏的地层压力条件渗透率的实验测量装置,图4为装置的示意图.装置包括:高温高压岩心夹持器、高精度恒速恒压计量泵、三通阀门、阀门、金属管线等.其中,夹持器围压接口通过金属管线与高精度计量泵连接;夹持器孔隙压力进口端及出口端均采用双管线设计,分别与高精度计量泵1、高精度计量泵2和排空阀相连接.这种设计的优势主要有:采用高精度计量泵代替回压阀控制孔隙压力,解决了回压阀启动压力较大,变形不易恢复、压力控制精度低的缺点,能够精确计量岩石两端压差;采用进口端、出口端双计量泵计量液体流量,比采用量筒、天平等传统方法计量液体流量的精度高,可以根据进口端泵体积变化等于出口端泵体积变化来简单判定流动进入稳态.采用高压计量泵,目前该装置能够测量最高为150 MPa的超高压条件的岩石渗透率.图5为超高压油藏的地层压力条件渗透率实验测量装置照片.

2.2 实验测量的不确定分析

当不考虑环境和人为因素带来的测量不确定时,依据CNAS-GL05《测量不确定度要求的实施指南》,参考CNAS-GL016:2020《石油化工领域理化检测不确定度评估指南及实例》,高孔隙压力地层压力渗透率的B类不确定度可按以下方法评估.

假设样品的长度 L 为5 cm、直径 D 为2.5 cm,数显卡尺的测量精度为0.001 cm,则测量岩样长度 L 和横截面积 A 的测量不确定度可表示为:

$$u_L = \frac{0.001}{\sqrt{3} \times 5} = 0.0001, \quad (3)$$

$$u_A = 2 \frac{0.001}{\sqrt{3} \times 2.5} = 0.00046. \quad (4)$$

假设测量岩心施加地层压力环境状态岩心两端压差 ΔP 为5 MPa时,不确定度可表示为:

$$u_{\Delta P} = \frac{0.01}{\sqrt{3} \times 5} = 0.001. \quad (5)$$

测量岩心施加地层压力环境状态,并在压差 ΔP 下稳定流动的流量 Q 时,假设 T_0 时刻出口端计量泵体积读数 V_0 读数为50 mL, T_1 时刻出口端计量泵体积读数 V_1 为55 mL,不确定度可表示为:

$$u_{V_0} = \frac{0.001}{\sqrt{3} \times 50} = 0.00001, \quad (6)$$

$$u_{V_1} = \frac{0.001}{\sqrt{3} \times 55} = 0.00001, \quad (7)$$

$$u_{\Delta P} = \sqrt{u^2(V_0) + u^2(V_1)} = 0.000014 = 0.000014. \quad (8)$$

测量岩心施加地层压力环境状态渗透率 K 时,不确定度可表示为:

$$u_K = \sqrt{u^2(Q) + u^2(L) + u^2(A) + u^2(\Delta P)}. \quad (9)$$

当数显卡尺的精度为0.001 cm,计量泵计量精度为0.001 mL,0.01 MPa时,测量直径2.54 cm、长度5 cm岩样地层压力条件渗透率的合成不确定度 $u_K \approx 0.001 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 当测量岩心的渗透率大于 $0.02 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 时,渗透率测量的相对不确定度不高于5%,能够满足渗透率测试的准确度要求.

3 超高压致密油气藏的地层压力条件渗透率的实验效果分析

3.1 实验样品

选取来自准噶尔盆地白垩系清水河组异常高压致密油气藏的5块岩样,从超高压的地层压力条件渗透率测量的重复性、与覆压渗透率的对比、以及渗透率随孔隙压力的变化规律三方面考察了地层压力条件渗透率的实验测量方法和装置的效果.表1给出了5块岩样的埋深、上覆地层压力、地层压力、常规渗透率、岩性信息.岩性主要是含砾砂岩和小砾岩,上覆地层压力大约150 MPa,地层压力大约138 MPa,常规渗透率分布在 $(0.08 \sim 1.69) \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 之间,为超高压致密储层.

表1 超高压致密油气藏的5块岩样的基本信息

Table 1 Basic information of 5 rock samples from ultra high pressure tight reservoir

岩样号	深度 /m	常规渗透率 / 10^{-15} m^2	上覆地层压力/MPa	地层压力 /MPa	岩性
1	6498.37	1.48	149.46	137.44	小砾岩
2	6505.82	0.52	149.63	137.60	含砾砂岩
3	6521.55	1.69	150.00	137.93	含砾砂岩
4	6528.38	0.08	150.15	138.08	小砾岩
5	6534.64	0.89	150.30	138.21	小砾岩

3.2 地层压力条件渗透率的实验测量的重复性和实验规律

在150 MPa围压条件下,成功地应用上述高精度恒速恒压计量泵双泵联动方法和装置重复测量了孔隙压力分别为38 MPa、58 MPa、78 MPa、98 MPa、118 MPa、138 MPa的渗透率,并将两次结果做了对

比,结果见图 6.5 块样品的两次重复测量的渗透率相对偏差均小于 5%,显示了较好的重复性.同时,5 块样品的渗透率随着孔隙压力增大而增大,这与渗透率随有效压力变小而变大的一般实验规律相同.

3.3 与覆压渗透率实验结果对比

为了考察异常高压地层压力条件渗透率的测量

结果的准确性,选用 1~4 号岩样与同等有效压力条件的覆压渗透率测量结果做了对比,实验测量结果见表 2.表中覆压渗透率的结果由业界比较认可的 CMS-300 型计算机控制覆压孔渗自动测试仪测试,最高测试围压约为 68 MPa(10000 PSI),渗透率测试时的孔隙压力在 0.1 MPa(等于大气压力)左右.

表 2 地层压力条件渗透率和覆压渗透率测量结果对比

Table 2 A comparison between permeability under pore pressure condition and overburden pressure permeability

编号	孔隙压力 /MPa	有效压力 /MPa	地层压力条件渗透率 / 10^{-15} m^2	覆压渗透率 / 10^{-15} m^2	差值 / 10^{-15} m^2	相对偏差 /%	编号	孔隙压力 /MPa	有效压力 /MPa	地层压力条件渗透率 / 10^{-15} m^2	覆压渗透率 / 10^{-15} m^2	差值 / 10^{-15} m^2	相对偏差 /%
1	138	12	1.185	1.221	-0.036	-3.01	3	138	12	1.378	1.295	0.083	6.02
	118	32	0.485	0.471	0.013	2.72		118	32	0.732	0.748	-0.016	-2.13
	98	52	0.377	0.373	0.003	0.90		98	52	0.399	0.387	0.012	2.98
	84	66	0.316	0.317	-0.001	-0.44		84	66	0.377	0.362	0.015	4.06
2	138	12	0.383	0.360	0.023	6.01	4	138	12	0.055	0.055	-0.001	-1.10
	118	32	0.031	0.029	0.002	6.47		118	32	0.029	0.030	-0.001	-4.11
	98	52	0.005	0.005	0.000	-4.00		98	52	0.021	0.021	0.000	-1.44
	84	66	0.004	0.004	0.000	7.32		84	66	0.017	0.016	0.001	5.78

在有效压力不高于 68 MPa 时,超高压地层压力条件渗透率与覆压渗透率的差值较小并且有正有负.以覆压渗透率为参照,超高压地层压力条件渗透率的平均相对偏差约为 4%,小于 5%,吻合得较好.

4 结论与认识

(1) 基于回压阀控制孔隙压力的渗透率实验测量方法存在回压阀控制孔隙压力精度低、灵敏度低、流量计量不准的技术缺陷,在超高压条件下测量渗透率的相对不确定度远大于 5%,无法满足超高压致密油气藏的地层压力条件渗透率定量表征的需要.

(2) 高精度恒速恒压计量泵双泵联动的渗透率实验测量方法最高可以实现约 170 MPa 的地层压力条件的渗透率的实验测量,具有可连续地设置孔隙压力、使用寿命长、在高温高压条件下可靠性好、压差和流量的计量精度高、压差和流量无波动和迟滞的优点,低孔隙压力条件下渗透率测量结果与相同有效压力的覆压渗透率吻合较好,超高压条件下的渗透率重复性好并且符合随有效压力变小而变大的一般实验规律,能够满足超高压致密油气藏的渗透率定量表征的需要.

理实验室提供的实验方法指导以及实验数据支持,感谢审稿专家提出的修改建议.

References

- Brace W F, Walsh J B, Frangos W T. 1968. Permeability of granite under high pressure. *Journal of Geophysical Research*, 73(6): 2225-2236, doi: 10.1029/JB073i006p02225.
- Dai J S, Wang B F, Ma Z R. 2007. Research on cracking principles of brittle low-permeability sands. *Xinjiang Petroleum Geology (in Chinese)*, 28(4): 393-395, doi: 10.3969/j.issn.1001-3873.2007.04.001.
- Du Rouchet J. 1981. Stress fields, a key to oil migration. *AAPG Bulletin*, 65(1): 74-85, doi: 10.1306/2F919774-16CE-11D7-8645000102C1865D.
- Gueguen Y, Palciauskas V. 1994. *Introduction to the Physics of Rocks*. Princeton: Princeton University Press.
- Han X H. 2021. *Experimental Teaching Guidebook for Well Logging Petrophysics (in Chinese)*. Beijing: Petroleum Industry Press.
- Hu J S. 1989. Abnormal pressure, fluid fracturing, and migration of oil and gas. *Petroleum Exploration and Development (in Chinese)*, 16(3): 17-23.
- Huang L S, Zhang S Y, Chen C J, et al. 2007. Research on calculating permeability with complex resistivity. *Chinese Journal of Engineering Geophysics (in Chinese)*, 4(5): 444-449, doi: 10.3969/j.issn.1672-7940.2007.05.010.
- Ji J W, Chen Y J, You L J, et al. 2007. A new measuring method for liquid permeability determination of tight cores: capillary flow rate and viscosity method. *Drilling Fluid & Completion Fluid (in Chinese)*, 24(3): 29-30, doi: 10.3969/j.issn.1001-5620.2007.03.009.
- Ma X M, Zhao Z Y, Liu H W. 2011. Influences of abnormal overpressure on super-low permeability reservoirs in Chexi depression in Shangdong. *Journal of Central South University (Science and*

致 谢 感谢中国石油大学(华东)的应用岩石物

- Technology) (in Chinese), 42(8): 2507-2513.
- Secor D T. 1965. Role of fluid pressure in jointing. *American Journal of Science*, 263(8): 633-646, doi: 10.2475/ajs.263.8.633.
- Walsh J B. 1981. Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18(5): 429-435, doi: 10.1016/0148-9062(81)90006-1.
- Wang X Q, Ge H K, Chen H C. 2015. Ultralow permeability measurements with periodic oscillation method. *Rock and Soil Mechanics* (in Chinese), 36(S2): 237-244, doi: 10.16285/j.rsm.2015.S2.031.
- Yang M S. 2001. Study of optimal work condition about instantaneous-pulse permeability test equipment. *Journal of Southwest Petroleum Institute* (in Chinese), 23(1): 46-48, doi: 10.3863/j.issn.1674-5086.2001.01.013.
- Zetinskii N D, Levina R J. 1933. Cyclopentadiene and methylcyclopentadiene. *Berl Tsch Chem Ges B*, 66B: 477-478.
- Zhang F Q, Lu X S, Zhuo Q G, et al. 2020. Genetic mechanism and evolution characteristics of overpressure in the lower play at the southern margin of the Junggar Basin, northwestern China. *Oil & Gas Geology* (in Chinese), 41(5): 1004-1016, doi: 10.11743/ogg20200511.
- Zhang H Y, He S L, Gu D H, et al. 2014. The effect of pore pressure on the media deformation of microcrack low permeability reservoir. *Science Technology and Engineering* (in Chinese), 14(11): 22-26, doi: 10.3969/j.issn.1671-1815.2014.11.006.
- Zhou J L, Hu Y, He K, et al. 2017. Genesis of abnormal high pressure in mid-deep strata of C area in central Bohai sea and influence of it on reservoir quality. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)* (in Chinese), 32(1): 23-30, doi: 10.3969/j.issn.1673-064X.2017.01.004.
- Zou L Z, Liu Q H. 2011. Analysis of the permeability model of NMR logging. *World Well Logging Technology* (in Chinese), 31(3): 27-31.
- 2007.04.001.
- 韩学辉. 2021. 测井岩石物理实验教学指导书. 北京: 石油工业出版社.
- 胡济世. 1989. 异常高压、流体压裂与油气运移(下). *石油勘探与开发*, 16(3): 17-23.
- 黄理善, 张胜业, 陈长敬, 等. 2007. 用岩石复电阻率求渗透率的研究. *工程地球物理学报*, 4(5): 444-449, doi: 10.3969/j.issn.1672-7940.2007.05.010.
- 戢俊文, 陈一键, 游立军, 等. 2007. 致密岩心液体渗透率测量的新方法——毛细管流黏法. *钻井液与完井液*, 24(3): 29-30, doi: 10.3969/j.issn.1001-5620.2007.03.009.
- 马晓鸣, 赵振宇, 刘昊伟. 2011. 山东车西洼陷异常高压对特低渗储层的影响. *中南大学学报(自然科学版)*, 42(8): 2507-2513.
- 王小琼, 葛洪魁, 陈海潮. 2015. 利用周期振荡法测试超低渗储层的渗透率. *岩石力学*, 36(S2): 237-244, doi: 10.16285/j.rsm.2015.S2.031.
- 杨明松. 2001. 瞬时脉冲渗透率测试装置最佳工作条件研究. *西南石油学院学报*, 23(1): 46-48, doi: 10.3863/j.issn.1674-5086.2001.01.013.
- 张凤奇, 鲁雪松, 卓勤功, 等. 2020. 准噶尔盆地南缘下组合储层异常高压成因机制及演化特征. *石油与天然气地质*, 41(5): 1004-1016, doi: 10.11743/ogg20200511.
- 张海勇, 何顺利, 顾岱鸿, 等. 2014. 孔隙压力对微裂隙低渗透介质变形的影响实验研究. *科学技术与工程*, 14(11): 22-26, doi: 10.3969/j.issn.1671-1815.2014.11.006.
- 周军良, 胡勇, 何康, 等. 2017. 渤海海域渤中C地区中深层异常高压成因及对储层质量的影响. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 32(1): 23-30, doi: 10.3969/j.issn.1673-064X.2017.01.004.
- 邹良志, 刘清华. 2011. 核磁共振测井渗透率模型分析. *国外测井技术*, 31(3): 27-31.

附中文参考文献

- 戴俊生, 汪必峰, 马占荣. 2007. 脆性低渗透砂岩破裂准则研究. *新疆石油地质*, 28(4): 393-395, doi: 10.3969/j.issn.1001-3873.