

裂缝性地层呼吸效应特征实验研究

代锐¹, 马传华¹, 黄洪林^{1,2*}, 吴艳辉¹,
罗鸣¹, 李文拓^{1,2}, 张波涛¹, 高热雨³

(1. 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海南海口 570100; 2. 海南省深海深层能源工程重点实验室, 海南海口 570100; 3. 中国石油集团工程技术研究院有限公司, 北京 102200)

摘要: 裂缝性地层钻进时, 由于井筒压力波动导致的地层呼吸效应易被误判为溢流而采取不必要的压井措施, 严重影响钻井安全。为此, 研制了可用于模拟裂缝性地层呼吸效应的实验装置, 探索了钻井液循环压力、裂缝张开压力和岩石类型对钻井液漏失与返排特征的影响。研究表明, 裂缝性地层呼吸效应是一种可逆性漏失, 其发生过程为漏失—拟稳态—返排。随着钻井液循环压力的增加, 钻井液最大漏失量和返排量均增加; 随着裂缝张开压力的增加, 钻井液最大漏失量增加, 而返排量减少; 相对于砂岩和灰岩, 特低孔低渗的花岗岩的漏失量更大, 而返排量更小。研究结果为分析深部裂缝性地层呼吸效应特征、区别其他工况而采用正确措施等提供了理论基础。

关键词: 裂缝性地层; 地层呼吸效应; 漏失与返排; 实验模拟

中图分类号: TE28 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)01-0093-09

Experimental study on the characteristics of respiration effect in fractured formations

DAI Rui¹, MA Chuanhua¹, HUANG Honglin^{1,2*}, WU Yanhui¹, LUO Ming¹,
LI Wentuo^{1,2}, ZHANG Botao¹, GAO Reyu³

(1. CNOOC (China) Co., Ltd. Hainan branch, Haikou Hainan 570100, China; 2. Hainan Key Laboratory of Deep Sea Energy Engineering, Haikou Hainan 570100, China; 3. CNPC Engineering Technology R & D Company Limited, Beijing 102200, China)

Abstract: When drilling deep fractured formation, the formation breathing effect caused by wellbore pressure fluctuation is easy to be misjudged as overflow and unnecessary killing measures are taken, which seriously affects the drilling safety. Therefore, an experimental equipment was developed to simulate the breathing effect of fractured formation. A series of experiments were carried out to analyze the effects of drilling fluid circulation pressure, fracture opening pressure and rock type on the characteristics of drilling fluid leakage and flowback. The results show that the fractured breathing effect is a reversible leakage, and the whole process of its occurrence is leakage—“quasi—steady”—flowback. With the increase of circulating pressure of drilling fluid, the maximum leakage and return amount of drilling fluid increased. With the increase of fracture opening pressure, the maximum leakage amount of drilling fluid increases, but the return amount decreases. Compared with sandstone and limestone, granite with extremely low porosity and low permeability has larger leakage and smaller return amount. The research results provide a theoretical basis for analyzing the characteristics of fractured breathing effect of deep fractured formation and adopting correct

收稿日期: 2024-04-01; 修回日期: 2024-06-21 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.01.013

基金项目: 中海油“十四五”重大科技项目2下属课题1“深水超深水复杂井安全高效钻完井关键技术”(编号: KJGG2022-0201)

第一作者: 代锐, 男, 汉族, 1992年生, 工程师, 石油工程专业, 主要从事海洋油气钻完井技术研究工作, 海南省海口市秀英区长滨三路6号荣城铂郡, dairui2@cnooc.cn.com。

通信作者: 黄洪林, 男, 汉族, 1994年生, 工程师, 油气井工程专业, 博士, 主要从事海洋油气井钻井技术与理论研究工作, 海南省海口市秀英区长滨三路6号荣城铂郡, huanghl_cup@163.com。

引用格式: 代锐, 马传华, 黄洪林, 等. 裂缝性地层呼吸效应特征实验研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(1): 93-101.

DAI Rui, MA Chuanhua, HUANG Honglin, et al. Experimental study on the characteristics of respiration effect in fractured formations [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 93-101.

measures to distinguish other operating conditions.

Key words: fractured formation; breathing effect; leakage and flowback; experimental simulation

0 引言

在钻遇裂缝地层时,由于井筒压力波动而导致的钻井液漏失与返排被称为裂缝性地层呼吸效应(以下简称“裂缝性呼吸效应”)。在钻井液正常循环时,井筒压力大于裂缝张开压力,钻井液沿着裂缝发生漏失;当停泵等导致井底压力突然降低,裂缝缝宽变小甚至闭合,钻井液沿着裂缝返排回井筒内^[1]。呼吸效应的发生容易被误判为溢流而采取压井措施会加剧呼吸效应,这给井筒压力控制产生了巨大威胁^[2-3]。

关于裂缝性呼吸效应的研究,主要集中在数值模拟方面。Helstrup等^[4]基于孔弹性理论构建了单裂缝数值模型,分析认为裂缝性呼吸效应的特征与地应力、岩石物性等相关。Lavrov等^[5]建立了一个可变形的有限非连通圆形裂缝模型,获取幂律流体在裂缝中的漏失与返排特征曲线,结果表明,钻井液粘度系数、井底压差、裂缝尺寸对钻井液的漏失和返排特征具有显著影响。随后,Lavrov等^[6]继续结合不同流型流体的渗流控制方程,分析了地层压力、井筒压力、流体及裂缝性质等参数对裂缝性呼吸效应的影响。同时他们在润滑理论范围内对双粘性流体从井筒流向有限圆盘状裂缝的过程进行了模拟^[7]。研究认为,进入裂缝中的钻井液量与流体的屈服应力呈线性负相关,与井筒的压力呈线性正相关。Ozdemirtas等^[8]建立了二维粗糙裂缝条件下的裂缝性呼吸效应模型,研究了裂缝粗糙度、尺寸对裂缝性呼吸效应的影响。Majidi等^[9]推导了单裂缝条件下裂缝性呼吸效应的控制方程,发现钻井液最大漏失量与裂缝刚度呈负相关函数,钻井液的剪切稀化效应会增加漏失量,而高屈服应力的钻井液则会降低漏失量。Shahri等^[10]在单个圆盘状裂缝模型的基础上,建立不同流型钻井液条件下的裂缝性呼吸效应控制方程,研究认为与指数变形相比,线性变形的裂缝会造成更少的钻井液漏失,但压力在裂缝内传播更快。Shahri等^[11]建立了可以倾斜、变形的有限矩形裂缝的呼吸效应的数学模型,认为更大裂缝面会导致更严重的呼吸效应,且较大的裂缝会造成呼吸效应初期和末期钻井液漏失速率的下降。Baldino等^[12]建立了基于双重孔弹性的一维

有限裂缝呼吸效应模型,该模型不仅可以对裂缝的开合进行模拟,也可组成裂缝网络,分析与多个裂缝相交的井段发生的呼吸效应,可以量化裂缝与岩石基质中压力的分布。基于该模型,Baldino等^[13]对数据进行无量纲化处理,获取钻井液回流特征曲线,分步匹配并判别井筒流体流入的原因、推断裂缝网络特性。Yang等^[14]基于Cohesive内聚力单元方法建立了裂缝性呼吸效应的数值模型,实现了对裂缝性呼吸效应的全三维模拟,研究了裂缝性呼吸效应动态响应机理。

通过实验研究裂缝性呼吸效应则相对较少。目前为止,只有Ozdemirtas等^[15]建立了简易的实验装置,模拟了裂缝打开和闭合引起的钻井液漏失和返排的现象,分析了小尺寸岩样条件下裂缝性呼吸效应对钻井液流变性的敏感性。但该实验装置过于简陋,实验条件过于理想,未能进一步研究如岩石性质、裂缝张开压力、井筒压力等其他因素的影响。

因此,为了进一步了解裂缝性地层呼吸效应,基于裂缝性地层裂缝张开和闭合的特征,研制了裂缝性地层呼吸效应实验模拟装置,更加真实地模拟地层和井筒环境。在实验过程中,严格监测和记录整个过程,实现对裂缝性呼吸效应全过程的模拟,并获得了裂缝性呼吸效应发生时井筒流体漏失一保持一返排全过程的典型特征。进一步分析岩石类型、裂缝张开压力和钻井液循环压力对裂缝性呼吸效应特征的影响。

1 室内实验

1.1 实验装置

该装置设计工作压力为0.1~20 MPa,工作温度为25~100 °C,可以用来模拟不同压力条件、不同类型岩石、不同形式裂缝和不同性质流体等多种因素下的裂缝性呼吸效应。裂缝性呼吸效应实验装置原理示意与实物如图1、图2所示。裂缝性呼吸效应模拟装置的具体配置见表1。

实验装置主要包括驱替、三轴岩心夹持、背压加载、压力计量、流量计量、数据实时采集和应用分析处理7个子单元系统,具体如下:

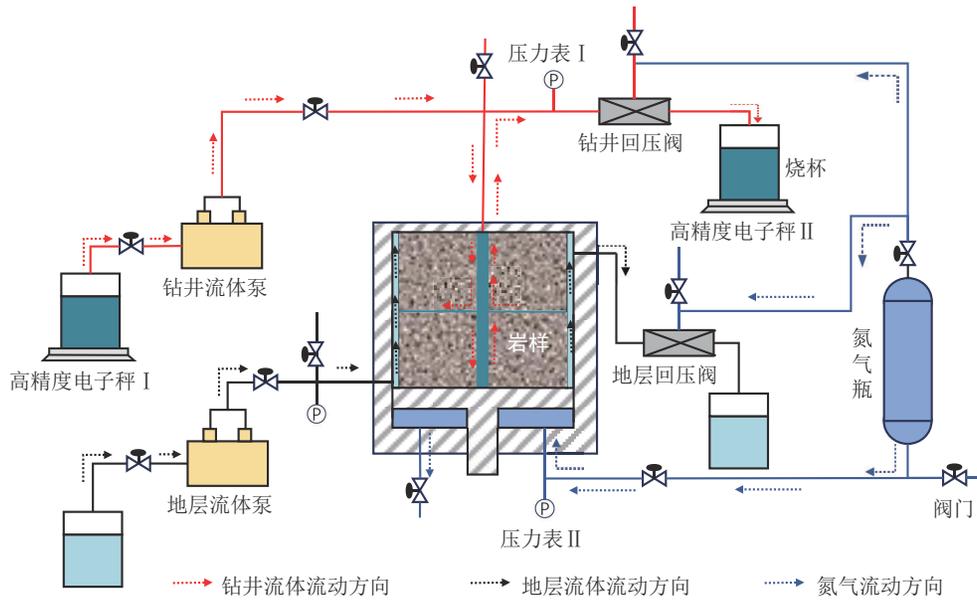


图1 裂缝性呼吸效应实验装置原理示意

Fig.1 Schematic diagram of the experimental device for fractured breathing effect

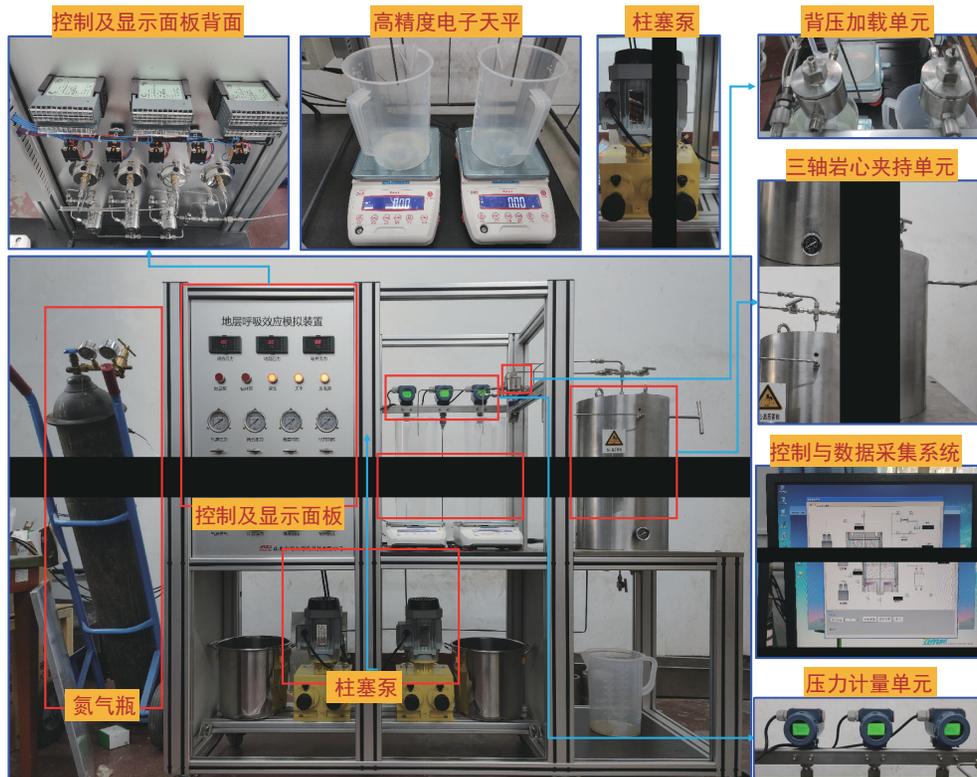


图2 裂缝性呼吸效应实验装置实物

Fig.2 Physical image of the experimental device for fractured breathing effect

(1) 驱替单元: 由地层流体泵与钻井流体泵组成(均采用双柱塞计量泵)。其中, 地层流体泵的最大泵压为 20 MPa, 最大排量为 16 L/h; 钻井流体泵的最大泵压为 32 MPa, 最大排量为 8 L/h。地层流

体泵从三轴岩心夹持单元的侧面向实验桶内注入流体, 以模拟地层流体; 与背压装置配合, 通过注入流体向岩样施加围压。钻井流体泵将流体从三轴岩心夹持单元顶部注入实验桶中, 模拟钻井液循

表1 裂缝性呼吸效应模拟装置配置单
Table 1 Distribution sheet for fracture respiratory effect simulation device

序号	部件名称	性能参数	数量
1	主体框架	4080钢材	1套
2	地层围压泵	双柱塞,泵压20 MPa,排量16 L/h	1台
3	钻井液泵	双柱塞,泵压32 MPa,排量8 L/h	1台
4	三轴岩心夹持单元	4080钢材,承压10 MPa	1套
5	实验岩心	整体 $\varnothing 240\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,通孔 $\varnothing 10\text{ mm}$	8块
6	背压控制器	25 MPa	2台
7	压力传感器	精度0.25%F.S,量程25 MPa	2台
8	高精度电子天平	精度0.01g,最大量程5kg	2台
9	数据实时采集系统	7017C模块、7520模块	1套
10	装置电路	电缆、交流接触器、按钮等	1套
11	装置管汇	三通、阀门、接头、管线等	1套

环;通过注入流体施加钻井液循环压力。

(2)三轴岩心夹持单元:是该装置最重要的单元之一,主要由一个可放入实验岩样和注入实验流体的实验桶组成,该实验桶可模拟“裂缝性呼吸效应”发生的地层环境。实验桶的下部可以注入高压氮气以施加轴向压力,模拟裂缝张开压力。三轴岩心夹持单元可容纳两个尺寸为 $\varnothing 240\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的岩样。同时,在实验筒体的上下端面均设有密封层,避免实验过程中压力泄漏。

(3)背压加载单元:主要由两个能够承受25 MPa压力的背压控制器组成,即地层流体背压控制器和钻井流体背压控制器。整个单元包括背压阀、管路流程、气体减压阀和压力表等共同组成。使用背压加载单元时,首先需要使用高压氮气瓶提供初始压力。背压值可以通过读取面板上的精密压力表或检查压力传感器进行设定。当需要微调时,可以通过液压泵泵送增压或放空阀排气减压来进行压力调整。

(4)压力计量单元:由两个测量范围为0.1~25 MPa、精度为0.25%F.S的压力传感器组成,可测量三轴岩心夹持单元上下游的压力变化。

(5)流量计量单元:由一个高精度电子天平组成,该天平与计算机端口之间串行进行通信。可实

时监测实验过程中钻井液的泵送量和排放量,以实现裂缝性呼吸效应引起的液体进出量更准确地记录。

(6)数据实时采集系统:包括7017C和7520两个模块,分别用于压力、流量、温度等信号的采集和传送,使计算机应用分析判断实现自动控制。

(7)应用分析处理软件:可以实时监测压力动态,绘制压力曲线和流量曲线。当设备出现超压和泄漏事件时,软件会立即报警并显示下一步操作提示。同时,计算机将自动切断温度和压力源,以保证操作人员和设备的安全。

1.2 实验方案

1.2.1 实验样品

1.2.1.1 实验用岩样

实验选用了3种常见的岩石类型,分别为砂岩、灰岩和花岗岩,这是由于在钻井作业中,这3种类型的地层中含有较多的天然裂缝或/和诱发裂缝。为了更为真实地模拟地层裂缝性呼吸效应现象,我们将实验所用的单块岩心尺度设置为直径240 mm,高度100 mm的圆柱体,并且在每块岩样中心的圆心位置钻取一个直径为10 mm的通孔,用以模拟真实作业情况下钻开的井筒(如图3所示)。实验用的三种岩石物性参数见表2。



图3 实验岩样

Fig.3 Experimental rock sample

表2 岩石物性参数

Table 2 Physical property parameters of rocks

岩型	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	孔隙度/%	渗透率/(μm^2)
砂岩	2.31	29	450×10^{-3}
灰岩	2.45	25	380×10^{-3}
花岗岩	2.80	0.50	2.82×10^{-6}

如图4所示,将两块岩石放置于三轴岩心夹持单元实验桶内。两块岩心之间存在一定的间隙,该间隙用来模拟裂缝。对于处于地下深处的岩石大多处于饱和状态,因此在实验开始前必须将岩样完全浸泡、饱和。首先,在水中浸泡3h,然后在每组实验开始前将其放置于在实验桶内以6MPa的轴压和围压再次加压浸泡3h,确保岩样在实验中更接近真实的地层环境。实验过程中,将两个相同类型或不同类型的岩样重叠置入三轴岩心夹持单元,以两个岩石接触面之间的间隙作为预制裂缝,模拟与井筒相交的地层裂缝。



图4 裂缝模拟原理

Fig.4 Fracture simulation principle

1.2.1.2 实验用流体

为了更真实地模拟实际情况,实验中用于浸泡、饱和岩样的流体为水,在钻井液循环开始前,充满三轴岩心加持单元。实验用循环钻井液是按照Ozdemirtas等^[15]实验时配比的稀薄黄原胶钻井液。实验用流体的具体性质见表3。

表3 实验流体的流变特性

Table 3 Rheological properties of experimental fluids

流体种类	<i>n</i>	<i>K</i>
水	1	1
钻井液	0.53	0.45

1.2.2 实验方法

为了模拟裂缝性呼吸效应的全过程,以及钻井液循环压力、裂缝张开压力和岩石类型对裂缝性呼吸效应特征的影响,将钻井液循环压力分别设置为3、4和5MPa,而裂缝张开压力则分别设置为1、2和3MPa。采用交叉测试的方式开展室内实验,共计

27组。实验中通过调整轴向压力改变裂缝张开压力,通过调整钻井流体注入压力模拟钻井液循环压力。待岩样饱和后,将实验桶内压力归零至初始状态,即可开始实验。具体实验步骤如下:

(1)打开总电源开关。

(2)打开天平开关和采集开关,调整钻井流体泵和地层流体泵的泵速至50%。

(3)打开氮气瓶,对实验筒供气施加恒定轴向压力6MPa,模拟裂缝张开压力。

(4)打开地层流体泵和地层回压阀,往实验筒内泵注地层流体,观察到地层流体回压阀出口处出现地层流体后,施加6MPa地层回压,继续泵注地层流体3h确保实验筒及岩石充分饱和。

(5)将氮气瓶压力设置成所需的模拟的裂缝张开压力。

(6)关闭地层流体泵,打开地层回压阀进行泄压,直至地层回压阀出口处连续30min无流体渗出,关闭地层回压阀。

(7)记录高精度天平I读数*X*,初始读数为*X*₁。

(8)设置钻井液回压阀初值(钻井液循环压力),打开钻井流体泵泵注钻井液,直至高精度天平I读数连续1min不变。

(9)关闭钻井流体泵,记录高精度天平I读数*X*₂。

(10)记录高精度天平II读数*Y*,初始读数为*Y*₁。

(11)打开回压阀进行泄压,观察钻井流体回压阀出口处流体流出情况,直至连续5min无流体流出,记录高精度天平II读数*Y*₂。

(12)放空氮气,关闭气瓶,关闭天平开关,关闭采集开关,关闭总电源,实验结束。

其中,步骤(7)~(8)模拟的是钻进工况,井筒压力大于地层压力,其压差为钻井液循环压力(此时地层压力为零);步骤(9)~(11)模拟的是停泵工况。

2 实验结果与分析

2.1 实验结果

钻井液注入量为*X*₁-*X*₂、钻井液返排量为*Y*₂-*Y*₁、钻井液残留量为*X*₁-*X*₂-*Y*₂+*Y*₁。其中,钻井液的注入量表示的是钻井液漏失量。绘制步骤(7)~(12)期间钻井液循环压力(压力表I)、轴向压力(压力表II)和钻井液漏失和返排量随时间的变化

曲线,分析其变化规律。

图5显示了裂缝性呼吸效应的实验结果,其实验条件为:砂岩、裂缝张开压力1 MPa、钻井液循环压力2 MPa。根据钻井液累计漏失量和压力变化情况,可以将整个实验过程分为AB、BC、CD和DE四个阶段。

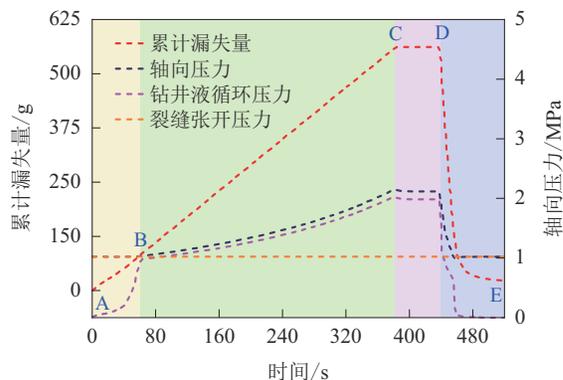


图5 裂缝性呼吸效应模拟结果

Fig.5 Simulation results of fractured breathing effect

AC阶段:井筒开泵循环后,循环压力逐渐增大,钻井液逐渐进入井筒与裂缝。其中,在AB阶段(0~61.2 s),钻井液循环压力小于裂缝张开压力,钻井液逐渐被注入井筒,井筒压力迅速上升;在BC阶段(61.2~379.8 s),钻井液循环压力超过设定的裂缝张开压力,导致裂缝开始张开,随后钻井液逐渐进入裂缝。此时轴向压力与钻井液循环压力变化基本保持一致。在C点,钻井液泵注量(漏失量)达到了最大值。在实际钻井作业过程中,AC阶段对应钻井作业开泵后,井筒钻井液开始循环,井筒压力逐渐上升,钻井液微小而持续的漏失过程^[16]。

CD阶段:钻井液循环压力达到实验预定的最大值,钻井液在井筒中正常循环,不再继续进入裂缝,轴向与钻井液循环压力均保持不变。该阶段井筒—裂缝—地层处于相对平衡状态,对应实际钻井作业过程中钻井液在井筒内正常循环的过程。

DE阶段:钻井液循环压力减小,裂缝逐渐闭合,迫使前期进入裂缝的钻井液返排回井筒。该阶段钻井液循环压力迅速下降,且钻井液循环压力下降至零,而轴向压力则迅速下降至裂缝张开压力。同时,钻井液在短时间内通过井筒大量排出井眼,钻井液返排量为538.54 g。该阶段对应实际钻井作业过程中,正常循环后的停泵阶段钻井液突然溢出

的过程。

值得注意的是,BC和CD阶段期间的轴向压力比钻井液循环压力要略微大一点,这是因为钻井液循环压力和岩石自重对底部氮气压缩所致。若轴向压力与钻井液循环压力相等,那么裂缝张开的程度会略微大一点。尽管理论上钻井液漏失量、返排量和残留量会增加,但增加的量不多,尤其是残留量。

总的来说,裂缝性呼吸效应属于一种可逆性的漏失,其发生的过程可以以漏失、拟稳态和返排阶段表示,分别对应AC、CD和DE阶段。值得注意的是,裂缝性呼吸效应发生后,会导致一部分钻井液残留在裂缝及岩体内。这与Gao等^[17]的数值模拟研究结果是一致的。同样,Huang等^[18]和罗鸣等^[19]对渗透性呼吸效应开展的研究有得出了一样的结论,这表明,在井底始终保持正压差的条件下,呼吸效应诱发的钻井液漏失量比返排量要大。

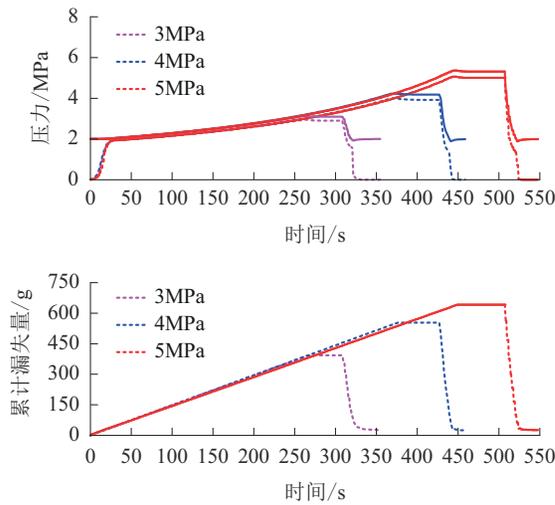
2.2 敏感性分析

2.2.1 钻井液循环压力对裂缝性呼吸效应的影响

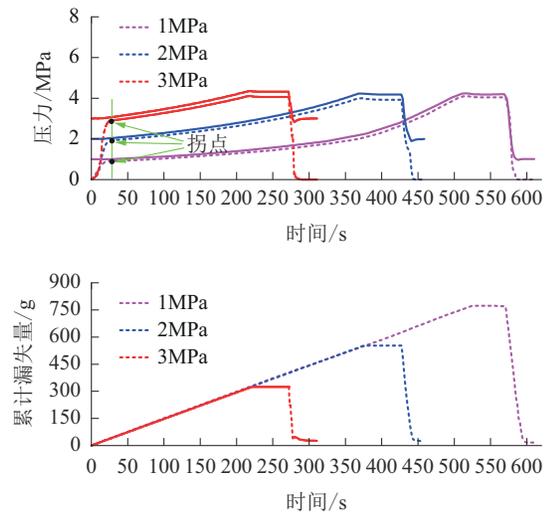
实验条件:砂岩,裂缝张开压力2 MPa,钻井液循环压力分别为3、4和5 MPa。从图6中可以看出,尽管设定的峰值不一样,但钻井液循环压力起点均为裂缝张开压力,其变化曲线基本重合。当裂缝张开压力不变时,随着钻井液循环压力的增加,钻井液最大漏失量明显增大,但增加幅度逐渐变小。因此,很有可能当钻井液循环压力增加到一定程度后,若裂缝不发生延伸与扩展,钻井液的漏失量将不会随着钻井液循环压力的增加而增加。这与裂缝的变形与储存能力、钻井液体积变化非常有限的特性引起的钻井液漏失量存在峰值是一致的。钻井液循环压力的增加,钻井液最大漏失量和返排量均增加,这是由于压差增加导致的(如图7所示)。而钻井液的残留量随着钻井液循环压力的增加而出现略微的增加,这是由于压差增加,钻井液在AC阶段渗入岩体的孔隙的量增加,而在DE阶段返排受阻所致。

2.2.2 裂缝张开压力对裂缝性呼吸效应的影响

实验条件:砂岩,钻井液循环压力4 MPa,裂缝张开压力1、2和3 MPa。裂缝张开压力越小,钻井液循环时裂缝张开程度越大,因此会产生越多的钻井液漏失,而返排的量也更多(如图8所示)。同时,在较小压差条件下,裂缝张开程度小,钻井液循环



(图中虚线为钻井液循环压力, 实线为轴向压力)
图 6 钻井液循环压力对砂岩裂缝性呼吸效应的影响
Fig.6 Effect of circulating pressure of drilling fluid on fractured breathing effect of sandstone



(图中虚线为钻井液循环压力, 实线为轴向压力)
图 8 裂缝张开压力对砂岩裂缝性呼吸效应的影响
Fig.8 Influence of fracture opening pressure on fractured breathing effect of sandstone

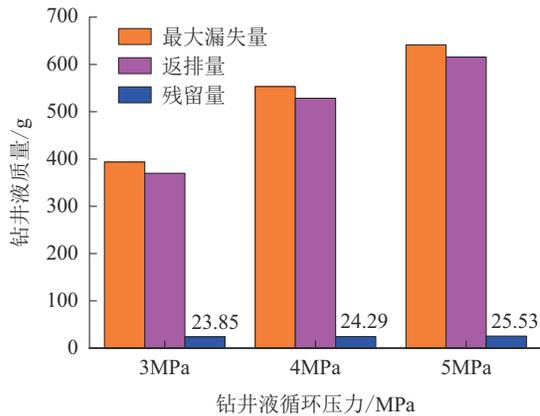


图 7 钻井液循环压力对钻井液最大漏失量、返排量和残留量的影响
Fig.7 Influence of circulating pressure on maximum loss, return and residual amount of drilling fluid

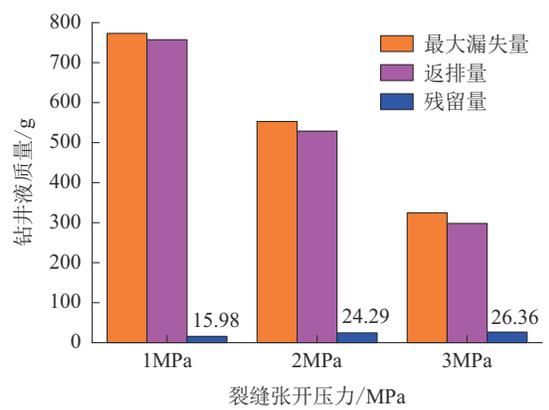


图 9 裂缝张开压力对钻井液最大漏失量、返排量和残留量的影响
Fig.9 Influence of fracture opening pressure on maximum loss, return and residual amount of drilling fluid

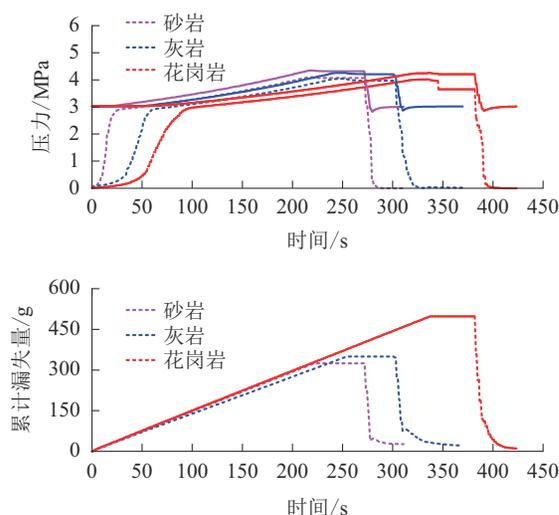
压力增加也相对要缓慢一些,其斜率相对更小。尽管裂缝张开压力不同,但钻井液循环压力均在 28 s 附近快速上升到达压力拐点,表明这段时间内裂缝并未撑开,压力的传播只受压差的影响。从图 9 中可以看出,随着裂缝张开压力的增加,钻井液的残留量也逐渐增加。这是由于裂缝张开程度越大,漏失的钻井液主要储存在裂缝中,DE 阶段反排的量相对较多。

2.2.3 岩石种类对裂缝性呼吸效应的影响

实验条件:裂缝张开压力 3 MPa,钻井液循环压力 4 MPa,岩性分别为砂岩、灰岩和花岗岩。由图

10 可以看出,在不同岩石类型组成的裂缝中,钻井液漏失与返排量、压力传播均存在较大差异。从钻井液的最大漏失量来看,灰岩与砂岩的钻井液最大漏失量比较接近,而花岗岩的钻井液最大漏失量则大得多。从钻井液循环压力和轴向压力来看,花岗岩达到拐点和预设压力所需的时间也明显大于砂岩和灰岩。这表明岩石类型对裂缝性呼吸效应的影响较明显。造成这种现象的原因是岩石的物性差异。钻井液与裂缝面接触时,在正压差的条件下渗入岩体孔隙中,并将压力传递至内部。砂岩和灰

岩的孔隙度和渗透率远大于花岗岩,因此花岗岩中的液体压力扩散速率也小于砂岩和灰岩,从而导致在裂缝性花岗岩地层中漏失更多的钻井液。相同的压力条件下,特低孔低渗的花岗岩比砂岩和灰岩的钻井液渗入量更少,残留量也更少(见图11)。这与Yang等^[14]和Gao等^[17]的数值模拟结论也是一致的。



(图中虚线为钻井液循环压力,实线为轴向压力)

图10 岩石类型对裂缝性呼吸效应的影响

Fig.10 Influence of rock type on fractured breathing effect of sandstone

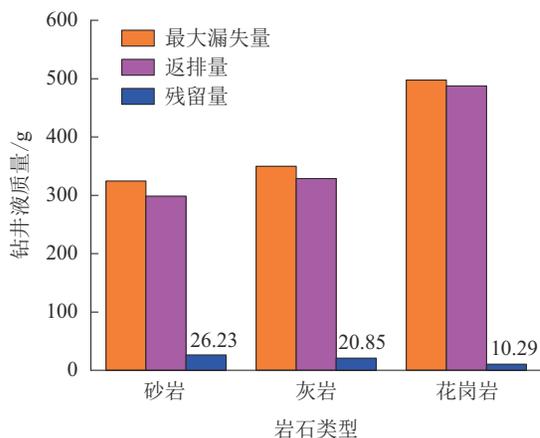


图11 岩石类型对钻井液最大漏失量、返排量和残留量的影响

Fig.11 Influence of rock type of drilling fluid on maximum loss, return and residual amount of drilling fluid

3 结论

(1)基于井筒压力变化引起井周裂缝系统张开

和闭合,诱发钻井液漏失与返排的特征,研制的裂缝性地层呼吸效应室内实验装置能有效模拟裂缝性地层呼吸效应。

(2)裂缝性地层呼吸效应发生的全过程可以划分为钻井液漏失—拟稳态—返排3个过程。

(3)钻井液循环压力和裂缝张开压力与岩性对裂缝性地层呼吸效应影响显著。随着钻井液循环压力的增加,钻井液最大漏失量和返排量均增加;随着裂缝张开压力的增加,钻井液最大漏失量增加,而返排量减少;相对于砂岩和灰岩,特低孔低渗的花岗岩的漏失量更大,而返排量更小。

(4)该实验属于相似性原理实验,而非全尺寸实验,属于定性分析,尚无法实现量化分析。且存在裂缝内压力分布情况无法监测、岩石弹性参数对裂缝性地层呼吸效应的影响无法进一步分析等缺点,后续将进一步研究改善。

参考文献(References):

- [1] 黄洪林.考虑底辟构造的海洋地层压力体系形成机制与精确预测方法研究[D].北京:中国石油大学(北京),2023.
HUANG Honglin. Study on formation mechanism and accurate prediction method of marine formation pressure system considering diapir structure[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.
- [2] 李军,杨宏伟,张辉,等.深水油气钻采井筒压力预测及其控制研究进展[J].中国科学基金,2021,35(6):973-983.
LI Jun, YANG Hongwei, ZHANG Hui, et al. Progress of basic research on wellbore pressure control in deepwater oil and gas drilling and production[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021,35(6):973-983.
- [3] 李奎.泸州深层页岩气呼吸性地层井漏堵漏方法及对策分析——以Y101H3-4井为例[J].钻探工程,2022,49(5):106-110.
LI Kui. Plugging of breathing formation in deep shale gas wells in Luzhou: Taking Well Y101H3-4 for example[J]. Drilling Engineering, 2022,49(5):106-110.
- [4] Helstrup O A, Rahman K, Chen Z, et al. Poroelastic effects on borehole ballooning in naturally fractured formations[C]//SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. SPE, 2003: SPE-79849-MS.
- [5] Lavrov A, Tronvoll J. Modeling mud loss in fractured formations[C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. SPE, 2004: SPE-88700-MS.
- [6] Lavrov A, Tronvoll J. Mechanics of borehole ballooning in naturally-fractured formations[C]//SPE middle east oil and gas show and conference. SPE, 2005: SPE-93747-MS.
- [7] Lavrov A. Modeling flow of a biviscous fluid from borehole into rock fracture[J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2006, 73(1):171-173.
- [8] Ozdemirtas M, Babadagli T, Kuru E. Numerical modelling of

- borehole ballooning/breathing-effect of fracture roughness[C]//PETSOC Canadian International Petroleum Conference. PETSOC, 2007: PETSOC-2007-038.
- [9] Majidi R, Miska S Z, Yu M, et al. Fracture ballooning in naturally fractured formations: mechanism and controlling factors [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. SPE, 2008: SPE-115526-MS.
- [10] Shahri M P, Zeyghami M, Majidi R. Investigation of fracture ballooning and breathing in naturally fractured reservoirs: effect of fracture deformation law [C]//Nigeria Annual International Conference and Exhibition. OnePetro, 2011.
- [11] Shahri M P, Mehrabi M. A new approach in modeling of fracture ballooning in naturally fractured reservoirs [C]//SPE Kuwait International Petroleum Conference and Exhibition. OnePetro, 2012.
- [12] Baldino S, Miska S Z, Ozbayoglu E M. A novel approach to borehole-breathing investigation in naturally fractured formations[J]. SPE Drilling & Completion, 2019,34(1):27-45.
- [13] Baldino S, Miska S Z, Ozbayoglu E M, et al. Borehole-breathing/kick discriminator: Diagnostic tool and potential resource for in-situ formation characterization [J]. SPE Drilling & Completion, 2019,34(3):248-267.
- [14] Yang H W, Gao R Y, Li J, et al. Dynamic response mechanism of borehole breathing in fractured formations [J]. Energy Reports, 2022,8:3360-3374.
- [15] Ozdemirtas M, Kuru E, Babadagli T. Experimental investigation of borehole ballooning due to flow of non-Newtonian fluids into fractured rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010,47(7):1200-1206.
- [16] Ozdemirtas M, Babadagli T, Kuru E. Experimental and numerical investigations of borehole ballooning in rough fractures [J]. SPE Drilling & Completion, 2009,24(2):256-265.
- [17] Gao R Y, Li J, Yang H W, et al. A novel approach to investigating the mechanism of permeability-induced borehole breathing in deepwater shallow formations [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022,208:109331.
- [18] Huang H L, Li J, Gao R Y, et al. Investigation of the mechanisms and sensitivity of wellbore breathing effects during drilling in deepwater shallow formations [J]. Ocean Engineering, 2023,269:113405.
- [19] 罗鸣,高德利,黄洪林,等.深水浅层呼吸效应机理及影响因素分析[J].钻井液与完井液,2022,39(6):668-676.
- LUO Ming, GAO Deli, HUANG Honglin, et al. Analyses of the ballooning effect and its affecting factors in drilling shallow formations in deep water [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2022,39(6):668-676.

(编辑 荐华)