

裂缝自调节高温高压堵漏模拟装置及评价方法

马英文¹, 冯桓楷¹, 吴怡¹, 张伟², 陈家旭², 张宇飞², 于松辰²

¹中海油研究总院有限责任公司, 北京

²中海油田服务股份有限公司油田化学事业部油化研究院, 河北 三河

收稿日期: 2025年3月3日; 录用日期: 2025年4月25日; 发布日期: 2025年5月30日

摘要

在钻进过程中, 由于井筒压力和地层压力的不断变化, 当地层存在裂缝并发生漏失时, 裂缝宽度便会发生动态变化, 目前室内实验所采用的固定缝宽堵漏装置难以模拟裂缝蠕变情况且温压上限较低, 导致堵漏配方在高温高压地层中的应用情况较差。为此, 研制了一套裂缝自调节高温高压堵漏模拟装置, 适用于所有桥接堵漏材料, 可模拟裂缝在液柱压力和地层压力的共同作用下的蠕变情况, 评价堵漏剂在地层高温高压环境下的动态封堵裂缝效果, 通过测压点监测封堵架桥位置, 完成了裂缝堵漏模拟评价方法可行性分析。结果表明: 裂缝自调节高温高压堵漏模拟装置可有效评价裂缝宽度0.1~10 mm、温度232℃、压力25 MPa条件下的地层漏失情况与动态封堵裂缝效果, 有效提升高温高压地层堵漏配方选择的准确性。

关键词

裂缝蠕变, 高温高压地层, 封堵架桥位置, 堵漏配方

Fracture Self-Adjusting High Temperature and High Pressure Plugging Simulation Device and Evaluation Method

Yingwen Ma¹, Huanzhi Feng¹, Yi Wu¹, Wei Zhang², Jiaxu Chen², Yufei Zhang², Songchen Yu²

¹CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing

²Oilfield Chemistry Research Institute, China Oilfield Service Co., LTD., Sanhe Hebei

Received: Mar. 3rd, 2025; accepted: Apr. 25th, 2025; published: May 30th, 2025

Abstract

In the process of drilling, due to the constant change of wellbore pressure and formation pressure,

文章引用: 马英文, 冯桓楷, 吴怡, 张伟, 陈家旭, 张宇飞, 于松辰. 裂缝自调节高温高压堵漏模拟装置及评价方法[J]. 矿山工程, 2025, 13(3): 592-599. DOI: 10.12677/me.2025.133066

when fractures in the formation and leakage occurs, the fracture width will change dynamically. At present, the fixed fracture width plugging device used in laboratory experiments is difficult to simulate the creep of fractures and the upper limit of temperature and pressure is low, which leads to the poor application of the plugging formula in high temperature and high pressure formation. Therefore, a set of fracture self-regulating high temperature and high pressure plugging simulation device was developed, which can applicable to all bridging plugging material, simulate the creep of fracture under the combined action of liquid column pressure and formation pressure, evaluate the dynamic plugging effect of plugging agent in high temperature and high pressure environment, monitor the position of plugging bridge by pressure measuring point, and complete the feasibility analysis of fracture plugging simulation evaluation method. The results show that the fracture self-adjusting high temperature and high pressure plugging simulation device can effectively evaluate the formation leakage and dynamic plugging fracture effect under the conditions of fracture width 0.1~10 mm, temperature 232°C and pressure 25 MPa, and effectively improve the accuracy of plugging formula selection in high temperature and high pressure formation.

Keywords

Creep of Fracture, High Temperature and High Pressure Formation, Blocking the Bridge Position, Plugging Formula

Copyright © 2025 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

在钻进过程中, 井筒带来的新增压力使地层应力重新分布, 当地层存在裂缝且发生漏失时, 地层裂缝表面有效应力发生变化, 随后裂缝宽度、深度会发生动态变化[1]。目前实验室内常用堵漏效果评价方法大多使用固定缝宽的堵漏装置, 其模拟缝宽为某一固定值, 对于同一套堵漏体系需进行多次实验才能全面评价其堵漏效果, 且评价结果与现场实际情况存在较大误差[2]-[5]。

在钻井作业过程中, 地层裂缝在地层压力与井眼液柱压力的共同作用下存在蠕变现象。并且在高温高压地层中, 裂缝蠕变程度随堵漏材料的物化性质、力学性能及其与裂缝宽度之间的匹配关系变化而发生改变, 导致高温裂缝封堵层易失稳, 从而难以在高温裂缝地层中形成致密封堵层, 极易引发复漏或恶性漏失[6]-[8]。

为此, 笔者研制了一套裂缝自调节高温高压堵漏模拟装置, 可模拟裂缝在液柱压力和地层压力的共同作用下产生的蠕变情况, 并通过测压点监测封堵架桥位置, 实现桥接堵漏剂在高温(232°C)高压(25 MPa)地层环境下的动态封堵裂缝效果评价。

2. 裂缝自调节高温高压堵漏模拟设备

2.1. 设备关键模块

裂缝堵漏模拟评价方法的关键是模拟流体循环过程及地层裂缝蠕变情况。同时评价装置必须具备测试漏失量、堵漏深度等评价指标的功能[9], 从操作上避免造成低堵漏效率的“封门”假象, 保证评价结果与现场情况尽可能一致或相近。为此, 装置设计应主要具备动态测试釜、裂缝自调节模块与机械执行机构三大主要模块。

2.1.1. 动态测试釜

测试釜体采用内外筒结构设计,用于模拟堵漏浆在井筒中的流动情况。调速电机带动釜体的外转子旋转(磁力驱动转子),安装在釜体中的内转子在强磁瓦的磁力驱动下带动釜体中的内筒旋转,从而达到控制流体剪切速度梯度模拟的目的。电机的转速通过伺服电机驱动器控制,可手动设置也可通过计算机设置,还能实现无级变速。釜体容积:900 mL,转速范围:0~200 r/min;转速控制精度: ± 1 r/min;工作温度:室温~235℃;有效漏失体积:600 mL、1000 mL,动态测试釜结构图见图1所示。

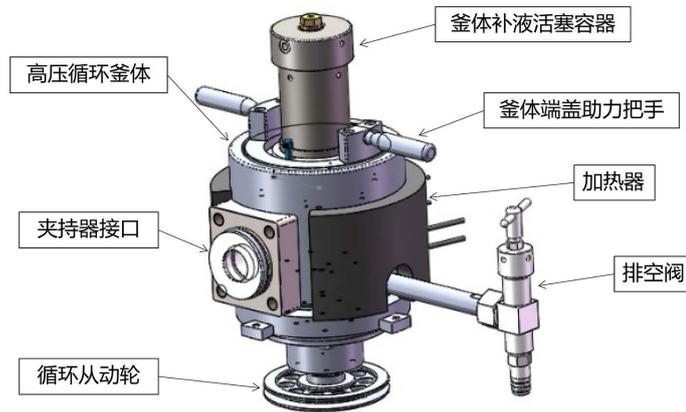


Figure 1. Dynamic test kettle structure diagram
图 1. 动态测试釜结构图

2.1.2. 裂缝自调节模块

测试裂缝在液柱压力和地层上覆压力作用下的蠕变情况及其对堵漏效果的影响。通过恒压泵给模拟缝块加载一定的上覆压力(该泵有恒压和跟踪两种工作模式),测试过程中釜体压力(模拟静液柱压力)改变,上覆压力恒定,当模拟静液柱压力接近上覆压力时,裂缝会产生蠕变(裂缝自调节),同时可通过位移测量系统实时监测裂缝的变化情况。

主要工作原理为:裂缝自调节物理模块由直缝块,宽度 38 mm,缝高可调范围 0.1~10 mm,长度 200 mm;1 度梯形缝块,宽度 38 mm,梯缝角度为 1 度,可调范围出口端最大 10 mm,最小 0.1 mm,长度 200 mm;1.5 度梯形缝块,宽度 38 mm,梯缝角度为 1.5 度,可调范围出口端最大 10 mm,最小 0.1 mm,长度 200 mm 组成。缝块上布置 3 个测压点(监测堵漏深度),间距 75 mm。

缝自动调节机包括伺服电机和减速机,行程 10 mm,中间带测压点。当缝调节到位后,可将上部通过螺母锁死以固定缝高,也可不固定以观察模拟堵漏时,在液柱压力和上覆压力的共同作用下,裂缝的蠕变过程。

裂缝自调节高温高压动态堵漏仪配备直缝和梯形缝两种模拟模块,用于模拟不同地层孔隙情况。缝块采用双相钢材质制作,具备良好的耐压、耐腐蚀等性能,如图 2 所示。

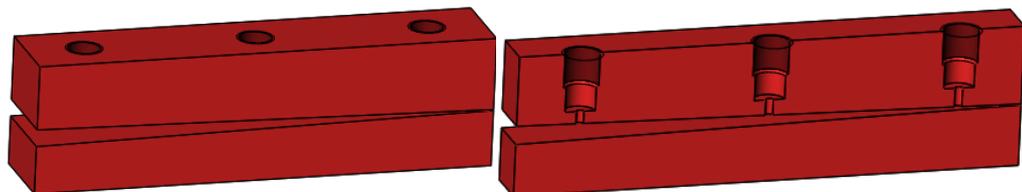


Figure 2. Fracture module
图 2. 裂缝模块

测试固定宽度裂缝的堵漏效果，在系统将裂缝宽度调节到实验所需缝宽后，拧紧可调夹持器上部的锁紧机构即可，实验过程中裂缝宽度不会随压力变化发生改变；若需改变缝宽需手动解锁，然后在软件界面上输入新的缝宽，系统会自动将缝宽调整到设定值。

裂缝夹持器设计有三个测压点，测试过程中通过夹持器上分布的测压点，可实时监测堵漏浆封堵位置，如图 3 所示。

2.1.3. 机械执行机构

机械执行机构由伺服电机、上覆压力活塞、夹持器、位移传感器和限位开关组成。通过电机带动丝杆从而带动上覆压力活塞杆提拉缝块，实现模拟缝块缝宽的机械调节，由限位开关限制最大缝宽，可在 0.1~10 mm 精度范围内动态调节，如图 4 所示。

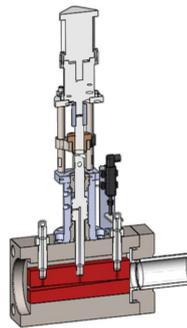


Figure 3. Fracture self-adjusting module profile
图 3. 裂缝自调节模块剖面图

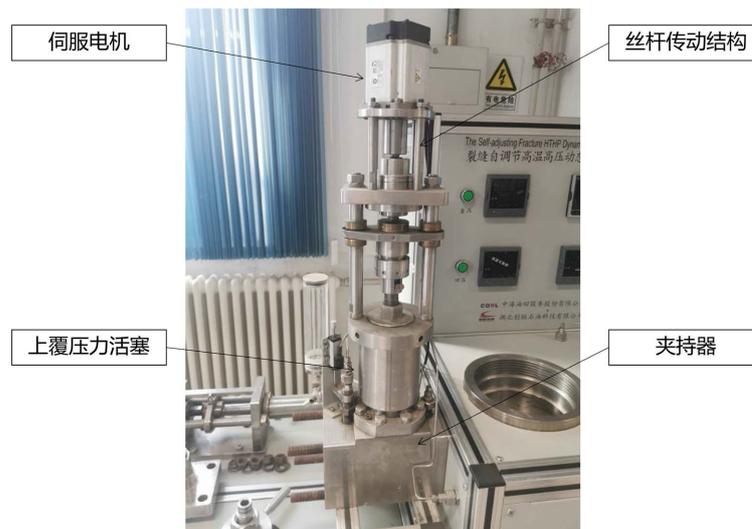


Figure 4. Mechanical actuator structure diagram
图 4. 机械执行机构结构图

2.2. 设备整体设计

裂缝自调节高温高压动态堵漏仪依据功能需要主要由动态测试釜体、裂缝自调节物理模块、机械执行机构、温度控制系统、测试压力控制系统、上覆压力加载系统、回压控制系统、测量模块、安全控制系统、电气控制及数据采集与分析软件、管路系统等模块组成，如图 5 所示。

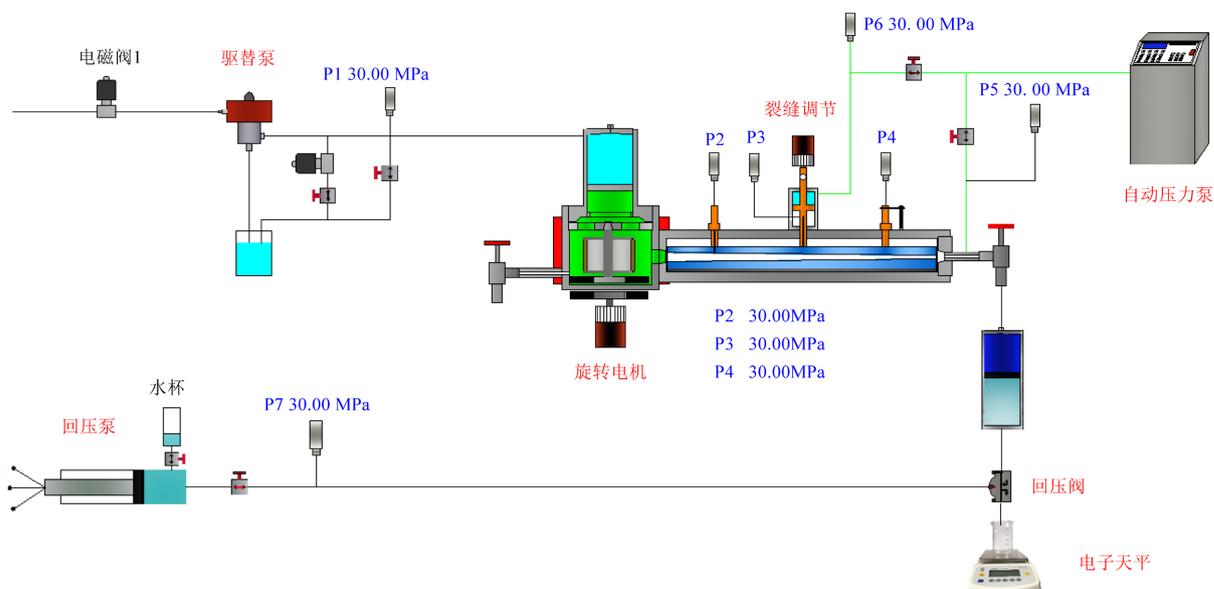


Figure 5. schematic diagram of fracture self-regulating high temperature and high pressure plugging evaluation equipment
图 5. 裂缝自调节高温高压堵漏评价设备原理图

2.3. 装置设计功能

- (1) 仅适用于桥接堵漏材料，凝胶等不适用；
- (2) 模拟地层高温(232℃以内)，高压(25 MPa)环境和 0.1~10 mm 裂缝地层漏失情况，测量堵漏剂在高温高压环境下的动态封堵裂缝效果；
- (3) 实现裂缝自动无级精确调节，模拟裂缝调节范围 0.1~10 mm，并实时显示当前缝宽；
- (4) 模拟裂缝在液柱压力和地层压力的共同作用下的蠕变情况，测试各种堵漏浆在裂缝蠕变情况下对地层裂缝的封堵能力；
- (5) 堵漏缝块中设计有测压点，可监测封堵架桥位置；
- (6) 评价堵漏浆正向承压与防返吐能力。

2.4. 技术参数

- (1) 最高测试压力：≤25 MPa，测压精度：0.1% F.S；
- (2) 最高上覆压力：≤50 MPa；
- (3) 最大裂缝尺寸：≤10 mm；
- (4) 工作温度范围：室温~235℃，控温精度：±1℃；
- (5) 剪切速度：0~200 r/min；
- (6) 模拟漏失地层类型：0.1~10 mm 裂缝型漏失地层；
- (7) 循环釜体有效容积：900 mL。

3. 试验评价方法及可行性分析

3.1. 裂缝堵漏模拟评价方法

- (1) 按照流程图连接相应的管线，将配好的泥浆倒入釜内，盖上盖后，补充一定量泥浆，将活塞装入浆筒内，倒入少量水，盖上上盖直至有水溢出即可；

- (2) 通过软件设置目标温度加热升温, 关闭所有阀门, 并点击开始实验, 记录测试时间;
- (3) 待温度升至目标温度后, 打开气瓶, 给气泵提供气源压力, 打开增压阀、釜体连通阀和滤失阀, 设定相应的压力条件, 进行实验;
- (4) 试验过程中观察压力曲线变化情况, 当出现突破压力时, 漏失也随之进行, 漏失质量超过 600 g 时, 实验即可终止, 最高釜体压力可判定为最大承压压力;
- (5) 实验结束后缓慢打开泄压阀卸掉釜体压力, 开启循环冷却水进行冷却, 待温度降至室温后拆卸清洗;
- (6) 打开补液阀, 松开釜体连通阀的丝扣, 用气压将活塞顶回容器顶部, 同时排出活塞内的泥浆, 清洗干净。

3.2. 可行性分析

(1) 仪器温压测试实验

裂缝自调节高温高压动态堵漏仪可在温度 232℃、压力 25 MPa 条件下, 连续工作 3 h, 如图 6 所示。



Figure 6. Temperature and pressure curve

图 6. 温度压力曲线图

(2) 裂缝自动调节实验



Figure 7. Fracture change curve

图 7. 裂缝变化曲线图

一定上覆压力条件下, 改变釜体压力, 模拟裂缝发生明显蠕变, 裂缝变化最大范围可达 10 mm, 如图 7 所示。

(3) 裂缝桥接堵漏剂封堵实验

1) 实验目的: 利用裂缝桥接堵漏剂在 235℃ 条件下, 封堵 10 mm 裂缝, 承压能力达 20 MPa 以上。

2) 实验配方: 4% 般土浆 + 1% POLYVIS + 10% FRACSEAL CC + 10% FRACSEAL C + 10% FRACSEAL M + 5% FRACSEAL F (其中 POLYVIS 为自研的增粘剂、FRACSEAL CC、FRACSEAL C、FRACSEAL F 为自研的桥接堵漏剂)。

3) 实验结果: 压力曲线如图 8 所示。由实验结果可知, 可封堵 10 mm 裂缝, 承压能力可达 20 MPa, 加压过程中无压力突破现象, 漏失量较低, 仅为 25.92 g。加压过程中, 测压点 1 压力始终保持在 1 MPa 左右, 说明测压点 1 位置缝板壁面承压, 存在有效封堵; 测压点 2 压力与测压点 3 压力始终为 0 MPa, 说明测压点 2、测压点 3 位置缝板壁面未承压, 没有桥接堵漏剂, 未形成有效的裂缝封堵层, 封堵位置位于测压点 1。

打开缝板, 如图 9 所示, 该配方所形成的封堵层确实位于裂缝测压点 1 附近(堵漏深度在 25 mm 位置), 且形成的封堵层较为致密, 堵漏效果较好, 该配方可封堵 10 mm 裂缝, 承压能力可达到 20 MPa。

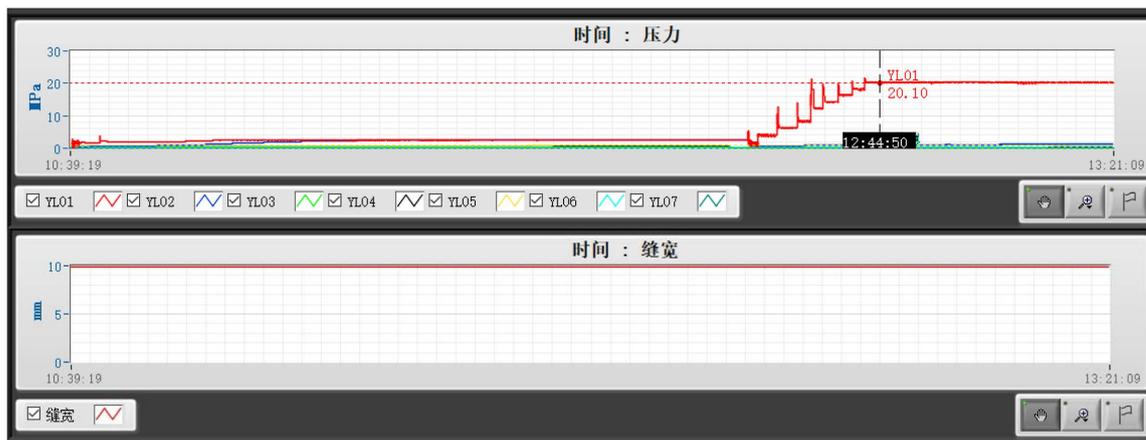


Figure 8. Pressure curve of plugging experiment

图 8. 堵漏实验压力曲线图



Figure 9. Fracture module plugging effect diagram

图 9. 裂缝模块封堵效果图

4. 结论

裂缝自调节高温高压堵漏模拟装置可模拟裂缝在液柱压力和地层压力的共同作用下的蠕变情况, 评价桥接堵漏剂在地层高温高压环境下的动态封堵裂缝效果, 是目前较为先进的裂缝堵漏模拟试验装置。

通过试验方法可行性分析,该方法可有效评价裂缝宽度 0.1~10 mm、温度 232℃、压力 25 MPa 条件下的地层漏失情况与动态封堵裂缝效果,有效提升了高温高压地层桥接堵漏配方选择的准确性。

参考文献

- [1] 马成云, 窦益华, 邓金根, 等. 动态裂缝堵漏试验装置的研制与应用[J]. 石油机械, 2023, 51(12): 25-30.
- [2] 蒋振新, 孟胡, 熊超, 等. 模拟环空流动状态的堵漏试验装置设计[J]. 石油机械, 2019, 47(9): 44-49.
- [3] 刘金华, 李大奇, 李凡, 等. 活跃水缝洞漏失堵漏模拟评价装置及实验研究[J]. 钻井液与完井液, 2023, 40(2): 169-175.
- [4] 贾利春, 谢洪印, 谭清明. 三轴承压堵漏模拟实验研究[J]. 钻采工艺, 2017, 40(1): 14-17.
- [5] 赵正国, 蒲晓林, 王贵, 等. 裂缝性漏失的桥塞堵漏钻井液技术[J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(3): 44-46.
- [6] 杨宽才, 王兴乐, 梁丽, 等. 基于新型中压堵漏试验仪的堵漏试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(2): 49-52.
- [7] 郭宝利, 袁孟雷, 孟尚志, 等. 一种新型堵漏模拟装置[J]. 钻井液与完井液, 2003, 20(4): 47-48, 51.
- [8] 窦斌, 舒尚文, 郭建华, 等. 高保真模拟漏失地层堵漏评价试验装置设计[J]. 石油机械, 2009, 37(11): 5-7.
- [9] 刘永峰, 闫文辉, 郭宝利, 等. DLM-01 型堵漏模拟装置在堵漏试验中的应用[J]. 钻井液与完井液, 2006, 23(4): 44-46.