

封堵评价用微裂缝岩心的模拟及模拟封堵实验

闫 晶

(大庆钻探工程公司钻井工程技术研究院,黑龙江 大庆 163413)

摘要:采用不同厚度的金属箔片和胶凝材料浇筑出了微裂缝岩心,配合高温高压失水仪外筒和泥浆杯,通过监测 30 min 内的漏失量,即可开展微裂缝岩心封堵评价实验,评价钻井液的封堵效果。通过微观观察法和流量计算法对制作的微裂缝的表面形态和开度进行了验证,结果表明岩心缝面具有一定的粗糙度,裂缝开度符合实验设计,最小 3.33 μm ,且岩心具有 5~10 cm 的裂缝行程。微裂缝岩心制作方法简单,重复率高,通过室内实验验证了制作的微裂缝岩心可以用于钻井液封堵材料的封堵性能评价,为微裂缝封堵评价实验提供了岩心模块,弥补了使用缝板模拟裂缝表面光滑和采用砂床钢珠砂盘等孔隙介质换算裂缝开度的不足。

关键词:微裂缝;裂缝模拟;人造岩心;封堵评价;钻井液封堵

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)05-0018-04

Simulation of Core with Micro Cracks Used in Plugging Evaluation and Plugging Simulation Experiment/YAN Jing
(Drilling Engineer Technology Research Center of Daqing Drilling and Exploration Engineer Company, Daqing Heilongjiang 163413, China)

Abstract: The cores with micro cracks were manufactured with metal foil and cementitious materials of different thickness, together with external cylinder of high temperature and high pressure water loss instrument and mud cup, the evaluation on micro crack plugging can be carried out. The verification is made by micro observation method and flow calculation method, the result shows that the micro cracks surface has a certain roughness and fracture opening is in accordance with the experimental design; the minimum crack opening is 3.33 μm and the length of crack is 5~10cm. The manufacturing method of micro crack core is simple with high opening similarity. It is verified that the laboratory-made crack can be used to evaluate the plugging performance of drilling fluid plugging material, which provides core module for the evaluation experiment of micro crack sealing, and makes up the shortcomings of smooth crack surface by crack plate simulation and crack opening conversion when using porous media of sand bed, steel balls and sand plate.

Key words: micro crack; crack simulation; artificial core; plugging evaluation; drilling fluid plugging

0 引言

自 20 世纪 60 年代,人们开始运用实验室手段模拟地层的漏失情况。最初的评价手段以 API 堵漏评价仪为主,而后,人们考虑了裂缝表面的形态、粗糙度等漏失通道特征。国外防漏堵漏室内评价模拟装置较为先进,可以在模拟井底温度及压力等条件下,全尺寸动态模拟防漏堵漏作用效果。如 N. Kaageson - Loe 等报道了在两块平行带孔金属板之间填充不同粒径的粒子来模拟不同渗透率的裂缝壁面,模块的规格为 250、500、1000 μm ^[1]。OFI 公司使用过滤介质为不同目数的砂盘或瓷片,最小模拟

缝宽为 14 μm ,工作压力最大 28 MPa,需要配备高温高压渗透性封堵仪^[2]。国内 80 年代中期开始也相继研制或参照国外经验改进了一批堵漏评价实验装置,常见的堵漏模拟实验大多都是狭缝、弹子床或滚珠、砂床模拟的动态静态堵漏实验,除此之外,部分仪器还能够进行夹持岩心进行堵漏实验和堵漏过程模拟实验,如西南石油大学的高温高压钻井液漏失动态评价仪,模块裂缝开度规格为 1~10 mm^[1];石秉忠等采用高精度激光刻蚀工艺技术,在钢化玻璃面中间部位精密刻蚀出各种微米级裂缝宽度的模拟缝,裂缝开度 10~100 μm ^[3];陈良制作了金属缝

收稿日期:2017-11-10;修回日期:2018-04-10

基金项目:“十三五”国家重大专项“大庆油田持续有效发展关键技术研究与应用”课题之“深层天然气高效开发技术研究与应用”(编号 2016E-0211)

作者简介:闫晶,女,汉族,1983 年生,油气井工程专业,硕士,从事钻井液技术研究工作,黑龙江省大庆市红岗区八百响钻井工程技术研究院钻井液技术研究所,yanj_zy@cnpc.com.cn。

板,通过尺规和螺钉的调节,铁块能够模拟 20~100 μm 的微裂缝,深度为 5 mm^[4];徐同台等提出采用高温高压滤失仪,通过砂床和泥饼模拟井壁内外泥饼的封堵效果^[5];岳前升、向兴金等利用低渗人造岩心和切片金属岩心模拟硬脆性泥页岩微裂缝;冯学荣设计了组合型裂缝漏床,采用不同配件的组合应用,模拟出不同张开度、横截面形状、孔喉锥度、粗糙度的漏层^[6];李春霞等利用现有的 HTHP 钻井液滤失仪进行开发,采用石英砂粒的填集来模拟破碎性地层,代替专用进口仪器对钻井液和完井液封堵效果进行评价实验^[7]。

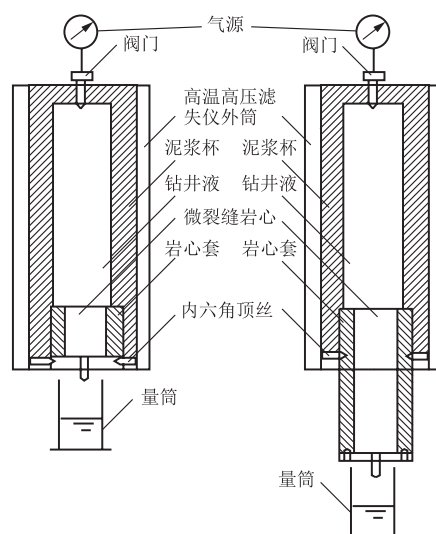
N. Kaageson - Loe 所述的模拟方法,以粒子填充在金属板中的方式模拟裂缝,以及陈良设计的金属缝板,均存在缝面光滑、裂缝开度规格少的不足;OFI 公司使用的砂盘或瓷片进行模拟,解决了缝面粗糙度的问题,但模拟的是孔隙度和渗透率,不能较好的模拟孔缝,且需要额外配备价格高昂的高温高压渗透性封堵仪;西南石油大学进行了动态漏失模拟,然而裂缝开度仅为毫米级;石秉忠模拟了具有一定表面粗糙度的微米级裂缝,然而使用岩心夹持器具有误差大、重复性差的缺点。上述方法在裂缝开度和模拟方法方面,存在模拟程度差、裂缝开度规格少、实验误差大、重复性差,而且一些仪器操作相对过于复杂等不足,尤其针对微裂缝模型有一定的局限,因此,室内开展了封堵评价用微裂缝岩心的模拟实验,对人造裂缝进行了有效开度测量和微观观察,并通过室内实验验证了该人造微裂缝可以用于钻井液封堵材料的封堵性能评价。

1 微裂缝封堵评价方法建立

根据高温高压失水仪的温度压力控制原理,结合 OFI 高温高压渗透性封堵仪,设计加工长度分别为 5 cm 和 10 cm 岩心套和可以承压的泥浆杯,利用高温高压失水仪的内六角螺丝固定岩心套,采用胶圈密封泥浆杯和岩心套。装置工作温度室温~260 $^{\circ}\text{C}$,工作压力 0~10 MPa,评价装置如图 1 所示。通过监测 30 min 内漏失量来评价封堵剂对微裂缝的封堵效果。

2 微裂缝岩心模拟实验

将水泥与水按一定比例混合,并进行充分搅拌,将长度为 10~20 cm,宽度为 2~3 cm,不同厚度和



(a) 岩心套长度 5 cm (b) 岩心套长度 10 cm

图 1 微裂缝封堵评价装置示意图

组合的造缝用软质铝箔片固定在岩心套中,浇筑搅拌均匀的水泥,浇筑完成放入 40 $^{\circ}\text{C}$ 恒温恒湿条件下进行养护。利用水泥的碱性和铝箔遇碱易腐蚀的性质,在水泥固化的同时完成微裂缝的制作。表 1 为相同尺寸不同厚度的铝箔在水泥碱性相当的溶液中完全腐蚀所需的时间,图 2 为厚度 20 μm 的铝箔在水泥碱性相当的溶液中的腐蚀情况。

表 1 铝箔完全腐蚀用时

| 序号 | 铝箔厚度/ μm | 腐蚀用时/ min | 序号 | 铝箔厚度/ μm | 腐蚀用时/ min |
|----|------------------------|--------------|----|------------------------|--------------|
| 1 | 20 | 16 | 5 | 100 | 31 |
| 2 | 20 | 15 | 6 | 100 | 33 |
| 3 | 50 | 26 | 7 | 200 | 76 |
| 4 | 50 | 28 | 8 | 200 | 79 |

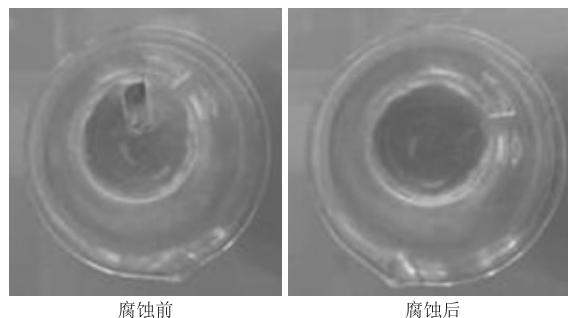


图 2 铝箔腐蚀前后对比图

从表 1 和图 2 可以看出,铝箔在碱性溶液中会完全腐蚀,腐蚀时间随着铝箔片厚度的增加由 16 min 增长至 79 min,小于水泥完全固化所需时间,可以制造出不同宽度的微裂缝。

3 微裂缝岩心有效缝宽验证

由于胶凝材料的固化时间大于金属箔片的腐蚀时间,金属箔片腐蚀过程中,胶凝材料会继续流动并占据一定的金属箔片的空间,因此,模拟的岩心裂缝开度小于所用金属箔片的厚度,需要对岩心的有效缝宽进行验证。

求取裂缝岩心的宽度时,一种是薄片分析法,没有考虑裂缝内流体的流动,另一种是利用高尔-拉特经验公式,没有考虑裂缝表面的微观特性、机械宽度和水力学开度,难以准确反映裂缝的真实流动特性。论文采用了微观观察法和流量计算法。流量计算法考虑裂缝表面是凹凸不平的,用传统的几何方法难以准确地反映出本质特征,因此使用分形几何法描述岩石裂缝表面^[8-16]。

3.1 微观观察法

应用金相显微镜对论文制作的岩心裂缝有效开度进行微观观察,见图3。模拟的岩心裂缝表面具有一定的粗糙度,裂缝开度处于微米级别,与设计相符。

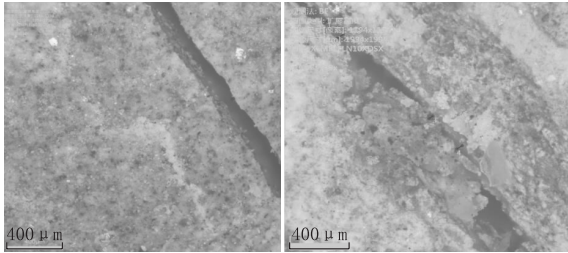


图3 微裂缝显微照片

3.2 流量计算法

岩石断面具有分形特征,考虑裂缝中流体的流动,根据 Navier-Stokes(N-S)方程、质量守恒方程和达西定律,推导出裂缝流动的有效开度模型^[8],见公式(1)。

$$h = \sqrt[3]{\frac{12Q\mu L}{\omega \varepsilon \Delta P}} \quad (1)$$

式中: h ——裂缝有效开度, μm ; Q ——缝内流体单位时间的流量, mL/s ; μ ——流体的粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; L ——裂缝行程, mm ; ω ——裂缝宽度, mm ; ε ——裂缝粗糙度校正系数,无量纲; ΔP ——流体流动方向的压力梯度, MPa 。

根据以上数学模型,通过设计组装的封堵评价装置(图1),计算出微裂缝的有效开度 h 。室内模拟制作了 $20\ \mu\text{m}$ 内开度的微裂缝,数据见表2。

表2 流量计算法验证微裂缝开度实验数据

| 序号 | 箔片厚度/ μm | 箔片张数/片 | $Q/(\text{mL}\cdot\text{s}^{-1})$ | $h/\mu\text{m}$ |
|----|---------------------|--------|-----------------------------------|-----------------|
| 1 | 10 | 1 | 2.80 | 3.33 |
| | | | 5.74 | 4.55 |
| | | | 4.67 | 4.38 |
| 2 | 22 | 1 | 19.66 | 9.39 |
| | | | 18.62 | 8.14 |
| | | | 14.00 | 7.91 |
| 3 | 10+22 | 2+1 | 218.75 | 16.42 |
| | | | 194.44 | 15.95 |
| | | | 269.23 | 16.79 |

由表2可以看出,模拟的岩心裂缝开度小于所用金属箔片的厚度,微裂缝的开度重复率较高,可以模拟出 $20\ \mu\text{m}$ 内开度的微裂缝。

通过以上方法验证了微裂缝岩心的开度和形态与地层裂缝岩心相近,表明文中所述的制作方法是可行有效的。

4 钻井液封堵剂对微裂缝的封堵性能评价实验

采用图1的封堵评价装置,将仪器预热至所需实验温度,检查并更换老化的密封件,拧紧与泥浆杯连接的阀杆,将加入封堵剂的钻井液倒入泥浆杯中,放入带有微裂缝的岩心套,使用密封圈密封,并用内六角顶丝固定,倒置在高温高压失水仪套筒上,插入温度计,连接并调节好气源至所需压差,待温度升至所需温度,开通气源,进行封堵性能评价实验,时长 $30\ \text{min}$,记录 $1\ \text{min}$ 及每 $5\sim 10\ \text{min}$ 漏失量,对各数据点画图并进行回归,可得瞬时漏失量,利用公式(2)计算出总漏失量,用来评价钻井液封堵剂对不同宽度裂缝的封堵性能。

$$V = V_{\text{sp}} + 2V_{30} \quad (2)$$

式中: V ——总漏失量, mL ; V_{sp} ——瞬时漏失量, mL ; V_{30} —— $30\ \text{min}$ 漏失量, mL 。

室内对裂缝有效开度为 $0\sim 100\ \mu\text{m}$ 的人造微裂缝岩心进行了封堵实验,实验数据见表3和图4。

表3 钻井液封堵剂对微裂缝的封堵性能评价实验

| 序号 | 裂缝宽度/ μm | 实验方法 | | 线性回归方法 | | |
|----|---------------------|--------------------|------------------------|--------------------|------------------------|-------------------|
| | | 瞬时漏失量/ mL | 30 min漏失量/ mL | 瞬时漏失量/ mL | 30 min漏失量/ mL | 总漏失量/ mL |
| 1 | 3.3 | 3 | 5 | 4.00 | 5.36 | 14.72 |
| 2 | 16.4 | 5 | 8 | 6.33 | 8.59 | 23.51 |
| 3 | 50.0 | 8 | 12 | 10.00 | 12.72 | 35.44 |
| 4 | 100.0 | 11 | 15 | 13.00 | 15.72 | 44.44 |

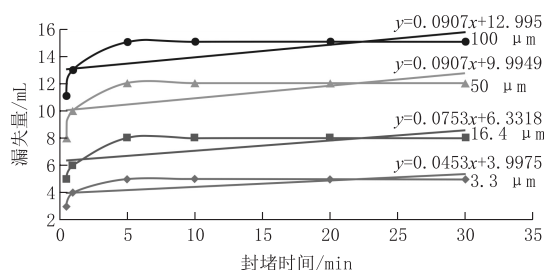


图 4 钻井液封堵剂对微裂缝的封堵效果

从表 3 和图 4 可以看出,室内实验和线性回归的瞬时漏失量相差较大,30 min 漏失量数据相近,通过线性回归可以计算出最终的总漏失量,小于封堵实验用钻井液体积,说明加入封堵剂后的钻井液对微裂缝具有一定的封堵作用,评价钻井液封堵性能的方法是可行有效的。

5 结论

(1)设计加工了加长岩心套,配合高温高压滤失仪建立了一套微裂缝封堵评价方法,装置工作温度室温 $\sim 260\text{ }^{\circ}\text{C}$,工作压力 $0\sim 10\text{ MPa}$ 。

(2)使用胶凝材料和固化剂制备出了裂缝开度 $0\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ 、裂缝行程 $5\sim 10\text{ cm}$ 的微裂缝,通过微观观察和流量计算两种方法表明制作的微裂缝开度、粗糙度和缝面形态与设计相符。

(3)该方法适用于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 内裂缝的人工模拟,由于厚度 $>100\text{ }\mu\text{m}$ 的铝箔在胶凝材料介质中腐蚀用时较长,在胶凝材料固化后铝箔仍未完全腐蚀,目前采用的是插拔方式,人为误差较大,大于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的微裂缝模拟仍需要摸索。

(4)利用微裂缝封堵评价装置,通过监测 30 min 内漏失量可评价钻井液封堵剂对微裂缝的封堵

效果。

参考文献:

- [1] 余海峰. 裂缝性储层堵漏实验模拟及堵漏浆配方优化[D]. 四川成都: 西南石油大学, 2014: 5-9.
- [2] 王波. 页岩微纳米孔缝封堵技术研究[D]. 四川成都: 西南石油大学, 2015: 7.
- [3] 石秉忠, 胡旭辉, 高书阳, 等. 硬脆性泥页岩微裂缝封堵可视化模拟试验与评价[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(3): 32-33.
- [4] 陈良. 钻井液防塌封堵评价方法及封堵机理研究[D]. 四川成都: 西南石油大学, 2013: 26.
- [5] 徐同台, 卢淑芹, 何瑞兵, 等. 钻井液用封堵剂的评价方法及影响因素[J]. 钻井液与完井液, 2009, 26(2): 60.
- [6] 冯学荣. 组合型裂缝漏床及其模拟堵漏试验方法的探索[J]. 钻采工艺, 2004, 27(6): 14-16.
- [7] 李春霞, 黄进军, 崔茂荣. H.T.H.P87-42 型仪器功能开发与应用—钻井液封堵效果评价方法[J]. 实验科学与技术, 2003, (2): 58-60.
- [8] 蒋海军, 鄢捷年, 张仕强. 储层裂缝有效宽度模型探讨[J]. 钻井液与完井液, 2000, 17(2): 12-14.
- [9] 谢和平. 分形几何及其在岩土力学中的应用[J]. 岩土工程学报, 1992, (1): 14-24.
- [10] 施行觉, 牛志仁. 岩石破裂断面的分维研究[J]. 科学通报, 1991, 36(7): 567.
- [11] 施行觉, 牛志仁, 许和明, 等. 岩石断面的分形测量及其分维的计算[J]. 地球物理学报, 1992, 35(2): 154-159.
- [12] 倪玉山, 匡震帮. 常规三轴压缩下花岗岩断裂表面的分形研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 12(3): 295-303.
- [13] 谢和平, 陈至达. 分形几何与岩石断裂[J]. 力学学报, 1988, 20(3): 264-271.
- [14] 李庆忠. 怎样正确对待分形、分维技术[J]. 石油地球物理勘探, 1996, 31(1): 136-160.
- [15] 张仕强. 天然岩石裂缝表面形态描述[J]. 西南石油学院学报, 1998, 20(2): 19-22.
- [16] 牛志仁, 施行觉. 岩石分形断裂的统计理论[J]. 地球物理学报, 1992, 35(5): 595-603.