

裂缝性油藏固相颗粒封堵体系实验研究

卢小波^{1,2}, 李欣儒³, 张艳娜¹, 李良川^{1*}, 王平美¹, 路遥²

¹中石油勘探开发研究院, 北京

²北京中科聚和开发技术有限公司, 北京

³西安石油大学新能源学院, 陕西 西安

收稿日期: 2022年12月23日; 录用日期: 2023年3月2日; 发布日期: 2023年3月9日

摘要

为解决裂缝性油藏常规堵调有效期短、易污染油层问题, 提出了对裂缝性油藏窜流通道深部充填长效封堵技术思路。以石英砂为基材添加无机填充颗粒、双控暂堵颗粒、自悬浮砂、体膨颗粒等材料形成紧密堆积, 提高控水能力, 调整充填体封堵能力, 降低堆积体的渗透率, 达到堵水目的。

关键词

颗粒材料, 封堵, 裂缝, 石英砂

Experimental Study on Solid Particle Plugging System in Fractured Reservoir

Xiaobo Lu^{1,2}, Xinru Li³, Yanna Zhang¹, Liangchuan Li^{1*}, Pingmei Wang¹, Yao Lu²

¹Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing

²Beijing Zhongke Juhe Technology Development Co. LTD, Beijing

³Xi'an Shiyou University College of New Energy, Xi'an Shaanxi

Received: Dec. 23rd, 2022; accepted: Mar. 2nd, 2023; published: Mar. 9th, 2023

Abstract

To solve the problem that the conventional plugging period of a fractured reservoir is short and easy to pollute the reservoir, the idea of deep filling and long-term plugging technology for the channeling path of a fractured reservoir is put forward. With quartz sand as the base material, inorganic filling particles, double-controlled temporary blocking particles, self-suspended sand,

*通讯作者。

文章引用: 卢小波, 李欣儒, 张艳娜, 李良川, 王平美, 路遥. 裂缝性油藏固相颗粒封堵体系实验研究[J]. 石油天然气学报, 2023, 45(1): 37-43. DOI: 10.12677/jogt.2023.451006

bulk expansion particles, and other materials are added to form tight packing, which can improve the water control ability, adjust the blocking ability of backfill, reduce the permeability of accumulation body, and achieve the purpose of water plugging.

Keywords

Granular Materials, Plugging, Fracture, Quartz Sand

Copyright © 2023 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

裂缝性油藏由于储层内部裂缝发育, 基质孔渗差, 开发过程中, 油藏压力的降低, 注水或边底水沿天然裂缝进入油井, 见水后快速水淹, 甚至形成无效循环; 裂缝性油藏能量低, 地层存水量少, 注水驱替波及体积小、效率低; 是开发效果较差的主要原因[1]。为了提效增产, 华北油田在潜山裂缝油藏开展机械和化学堵水; 塔河油田缝洞油藏、新疆油田潜山火山岩裂缝油藏、玉门油田下沟组裂缝油藏也开展了堵水工作, 都取得一定效果[2] [3] [4]。

裂缝性油藏已形成水窜的主流裂缝, 既是地层流体汇聚、流动的主要通道, 又是堵水时堵剂进入储层的主要通道。这一特殊性决定对裂缝进行封堵后, 能否释放富油条带或动用较差油层的产油能力是影响堵水效果的关键地质因素[5] [6]。裂缝性油层常采用颗粒材料封堵裂缝[7], 颗粒材料的粒径分布是重要的参数, 是否能够进入裂缝, 进入裂缝深度及在裂缝内堆积状态等方面起主要作用, 还影响封堵层孔隙度, 封堵率和封堵强度等[8] [9]。根据封堵理论需要考虑封堵颗粒的粒径分布、物化性能等与地层不同裂缝类型匹配关系[10] [11] [12]。

堵水施工中, 因堵剂注入排量过大, 对主要出水/吸水裂缝进行封堵, 同时对剩余油较为富集的次级裂缝、微裂缝或孔隙也造成一定的伤害。堵水施工后, 出现油井产液量大幅度下降, 增油效果较差, 且有效期短[13]。为此进行裂缝通道深部充填长效封堵实验研究, 其工艺原理是: 超破裂压力下, 储层天然裂缝扩张、延伸, 注入堵剂对已形成水窜的主流裂缝进行大排量深部充填; 充填材料采用低成本的石英砂与可调节渗透率的不同性能的填充颗粒混合砂, 不仅降低材料成本, 还能适用于不同工况需求; 充填材料进入裂缝, 使得流体在裂缝内的流动形态由窜流变成渗流, 大幅度降低裂缝内的水窜速度, 达到控水目的。

2. 实验方法

2.1. 裂缝导流能力评价法

1) 实验材料及仪器

漏斗、烧杯、直尺、密度瓶、压力试验机、振筛机、电子天平、体视显微镜、体积密度仪、样品筛、破碎室、裂缝导流仪等。

2) 实验方法

裂缝恰好保持不至于闭合所需的流体压力即闭合压力, 在模具中加入 70~140 目石英砂模拟无固相颗粒充填裂缝, 施加不同载荷的闭合压力, 在充填裂缝中通入不同压差的压缩空气, 根据气体径向渗流定

律计算出模拟充填裂缝的导流能力值。

2.2. 填砂管驱替评价法

1) 实验材料及仪器

烧杯、橡胶锤、填砂管、球磨机、电子天平、高温高压多功能驱替装置等。

2) 实验方法

注入流体：蒸馏水；注入前需要过滤，滤膜孔径规格为 0.22 μm ；填砂管：规格 $\phi 2 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 。填砂方法：称取 200 g 石英砂或添加一定量的颗粒材料的石英砂与水混匀搅拌均匀成团至无游离的砂和水，取少量混合砂放入填砂管，橡胶锤敲击填砂管外壁 8~10 次，再用填砂杵反复用力填实，重复填砂至填砂管满为止；填砂管填充结束后连接到驱替装置，以设定流速注水(或其他介质)，注入口排空后测渗透率。

3. 实验内容

3.1. 固体颗粒材料的粒径分布及功能

单独石英砂堆积后形成的充填体渗透率偏高，为了提高充填体堵水效果，可通过增加不同性能的细颗粒材料，各填充材料粒径及功能见表 1。

Table 1. Particle size and function of various filling materials

表 1. 各类填充材料粒径及功能

名称	粒径分布(目)	粒径范围(μm)	填充功能与目的
石英砂	70~140	109~212	填充材料主体
双控暂堵颗粒	500~1000	10~30	油井暂堵剂，降滤控渗
无机填充颗粒	180~300	50~80	充填裂缝深部，降低裂缝水相渗透率
体膨颗粒	180~300	50~80	吸水膨胀降低充填体渗透率
自悬浮结颗粒	70~140	109~212	提高封堵强度，降低封堵后渗透率

3.2. 固体颗粒封堵性能评价

1) 石英砂充填裂缝导流能力评价

选择 70~140 目石英砂作为封堵材料，充填到裂缝导流室内，逐步调高闭合压力 10~50 MPa，常温水驱替，每一个闭合压力下测试 2、5、10 mL/min 的三个驱替速度，测试石英砂充填体的渗透率和导流能力(结果见表 2)。

Table 2. Fracture conductivity after filling quartz sand with different closing pressure

表 2. 充填石英砂后不同闭合压力下裂缝导流能力

闭合压力(MPa)	流量(mL/min)	压差(KPa)	渗透率(μm^2)	导流能力($\mu\text{m}^2\text{cm}$)
10	10	8.64	11.53	6.34
	5	4.39	11.24	6.18
	2	1.95	11.36	6.25

Continued

20	10	10.25	7.04	5.79
	5	5.23	6.36	5.23
	2	2.29	6.16	5.07
30	10	10.25	6.84	5.58
	5	7.84	4.22	3.44
	2	3.63	4.07	3.32
40	10	10.25	6.7	5.41
	5	9.23	2.66	2.15
	2	7.65	2.61	2.11
50	10	10.25	6.56	5.23
	5	10.25	2.72	2.17
	2	10.25	2.07	1.65

从实验测试结果看，随着闭合压力的升高，石英砂充填体的渗透率大幅度降低，导流能力下降。闭合压力为 10 MPa 时，渗透率为 11.24~11.53 μm^2 ，导流能力为 6.18~6.34 $\mu\text{m}^2\text{cm}$ 。而闭合压力增加为 30 MPa 时，渗透率降为 4.07~4.22 μm^2 ，导流能力为 3.32~3.44 $\mu\text{m}^2\text{cm}$ 。当闭合压力一定的情况下，驱替流量分别设置了 2、5、10 mL/min，当流量为 10 mL/min 时，导流室入口出口压差接近或高于 10 KPa，高于安全压力值，且测得的渗透率和导流能力值也与 2、5 mL/min 时的渗透率和导流能力值发生了较大的偏离，因此认为 70~140 目石英砂充填体在 10~50 MPa 压力范围内的合理的驱替流量为 2~5 mL/min，随着闭合压力越高，压实作用下导致渗透率下降、导流能力下降。

闭合压力 5 MPa、15 MPa，且驱替流量为 2~5 mL/min，测试石英砂的渗透率和导流能力。由表 3 内的实验结果显示，闭合压力对石英砂充填体的渗透率起到重要的影响作用，闭合压力 15 MPa 比 5 MPa 石英砂渗透率降低。但随着驱替流量降低，导流能力下降，因为石英砂粗颗粒多，颗粒堆积形成的骨架大，在驱替流量发生变化时，横向压差增加，挤压石英砂颗粒，骨架之间的空间被压缩，因此渗透率降低，导流能力下降。

Table 3. Fracture conductivity after filling quartz sand with different flow rates

表 3. 充填石英砂后不同流量下裂缝导流能力

闭合压力 MPa	流量 mL/min	压差 KPa	渗透率 μm^2	导流能力 $\mu\text{m}^2\text{cm}$
5	7.5	3.7	20.5	11.3
5	4.7	2.4	20.3	11.2
5	2.2	1.2	19.0	10.4
15	7.4	5.5	14.0	7.5
15	4.3	3.4	13.4	7.2
15	1.9	1.5	13.2	7.1

2) 功能型颗粒充填体封堵性能评价石英砂充填裂缝导流能力评价

① 无机充填颗粒充填体的裂缝导流能力

无机充填颗粒为粒径为 50~80 μm 的固体材料, 其平均渗透率为 0.18 μm^2 , 比 70~140 目石英砂充填裂缝的渗透率低, 降幅达 98.9%, 因此可以通过改变粒径大小来改善充填体的渗透率。

② 70~140 目石英砂 + 双控暂堵颗粒充填体的裂缝导流能力

由表 4 可知, 70~140 目石英砂的渗透率仍然比较高, 5 MPa 闭合压力下, 充填体渗透率为 10~20 μm^2 。为了降低充填体的渗透率, 在石英砂基材中添加 9% 双控暂堵剂颗粒, 常温测试混合砂的裂缝导流能力显示超压, 降低排量 2 mL/min 以下, 仍然超压, 说明 9% 双控暂堵剂的加入能够大幅度降低 70~140 目石英砂充填体的渗透率, 导致驱替压力过大, 渗透性明显变差。而且双控暂堵剂能够高温溶解, 改善充填体的导流能力。

Table 4. Fracture conductivity after filling inorganic filling particles

表 4. 无机充填颗粒充填裂缝导流能力

样品	闭合压力(MPa)	流量(mL/min)	压差(KPa)	渗透率(μm^2)	导流能力($\mu\text{m}^2\text{cm}$)
无机充填颗粒 80℃水驱	5	0.22	10.25	0.22	0.12
	5	0.19	10.25	0.18	0.1
	5	0.16	10.25	0.16	0.09

由表 3 和表 5 可知, 70~140 目石英砂中加入少量双控暂堵剂颗粒, 能够大幅度降低充填裂缝的渗透率。5 MPa 闭合压力下石英砂渗透率由平均 20 μm^2 降低为 5.4 μm^2 , 降低幅度 73%, 15 MPa 闭合压力下, 渗透率同样下降明显, 说明通过在 70~140 目石英砂为基材, 通过添加小粒径的填充颗粒材料能够大幅度降低渗透率, 调整充填体的封堵能力。

Table 5. Fracture conductivity after filling quartz sand mixed with double-controlled temporary plugging particles

表 5. 石英砂与双控暂堵颗粒混合充填裂缝导流能力

样品	闭合压力(MPa)	流量(mL/min)	压差(Kpa)	渗透率(μm^2)	导流能力($\mu\text{m}^2\text{cm}$)
70~140 目石英砂 + 9% 双控暂堵颗粒		0.97	1.88	5.22	2.87
	5	0.773	1.48	5.25	2.89
		0.702	1.22	5.84	3.21
		1	10.25	1.02	0.54
	15	0.73	10.25	0.76	0.4
		0.498	10.25	0.51	0.27

③ 填砂管不同填料渗透率测试

由表 4 和表 6 可知, 无机填充颗粒可单独使用, 也可与石英砂混合使用, 均较石英砂大幅度降低裂缝导流能力。随着无机填充颗粒填充比例增大, 渗透率降低幅度越大。9%~25% 充填比时, 70~140 目石英砂与无机填充颗粒材料混合形成的充填体渗透率由 365.39 mD 降至 46.40 mD, 较石英砂渗透率的降幅

达 86.89%~98.33%；石英砂 + 30%自悬浮堵剂可将充填体渗透率降低至 32.83 mD，降低率 98.82%。同时，无机填充颗粒具有粒径小、悬浮性能好、成本低的优势，适合用于大规模储层深部裂缝填充封堵，控制底水上窜。

Table 6. Effect of different inorganic filling particles on permeability

表 6. 不同无机填充颗粒填充对渗透率影响

无机填充颗粒(质量比)	流速 mL/min	压力 MPa	渗透率 mD	渗透率降幅%
100%石英砂	2	0.01	2786.63	/
100%无机填充颗粒	2	0.8	39.32	98.59
石英砂 + 9%无机填充颗粒	2	0.12	365.39	86.89
石英砂 + 15%无机填充颗粒	2	0.16	199.04	92.86
石英砂 + 25%无机填充颗粒	2	0.68	46.40	98.33
石英砂 + 30%自悬浮堵剂	2	0.97	32.83	98.82

在 70~140 目石英砂中，加入不同的有机填充颗粒，也可以明显降低充填体的渗透率(结果见表 7)；油基双控暂堵剂作为填充颗粒可降低充填体的渗透率，且随养护时间延长，部分颗粒融化被水流带出，恢复部分渗透率，有利于实现裂缝的选择性封堵；在石英砂中加入体膨调剖剂颗粒，可大幅度降低水相渗透率，充填到裂缝内有利于降低水窜速度，改善封堵效果；石英砂与自悬浮砂 7:3 配比再加入少量油基双控暂透率也大幅降低；自悬浮堵剂表面涂覆有机物，其能在水中溶解增加粘度，提高携砂能力。

Table 7. Effects of different organic particles on permeability

表 7. 不同有机填充颗粒对渗透率的影响

有机填充颗粒	流量 mL/min	注入压力 MPa	渗透率 mD	渗透率降幅%
石英砂 + 9%双控暂堵颗粒	2	0.04	796.18	71.43
石英砂 + 15%双控暂堵颗粒(① 常温)	2	0.1	318.47	88.57
石英砂 + 15%双控暂堵颗粒(② 90℃)	4	0.04	503.98	81.91
石英砂 + 15%双控暂堵颗粒(③ 恢复常温)	2	0.05	636.94	77.14
石英砂 + 自悬浮砂(7:3) + 9%双控暂堵颗粒	0.2	4.22	0.75	99.97
石英砂 + 5%体膨颗粒	0.2	15.65	0.2	99.99

4. 结论

通过裂缝导流能力评价和填砂管驱评价对石英砂性能及封堵性能评价，石英砂等颗粒材料满足裂缝通道深部充填长效封堵技术要求。单独石英砂堆积后形成的充填体渗透率偏高，通过粒径优化选择，但与其他小一级粒径具有一定功能性的固相颗粒材料以不同比例混和，充填到石英砂堆积形成的孔隙体积中，实现颗粒之间的最紧密堆积，大幅度降低石英砂堆积体的渗透率，降幅 85%~98%，达到堵水的目标。

参考文献

- [1] 李宜坤, 李宇乡, 彭杨, 于洋. 中国堵水调剖 60 年[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(6): 773-787.
- [2] 喻高明, 刘保磊, 许爱云, 唐灿, 张艺钟, 张淑娟. 任丘雾迷山组裂缝性碳酸盐岩油藏降压开采改善开发效果研究[J]. 长江大学学报(自科版), 2017, 14(23): 70-75+6.
- [3] 李静. 任丘潜山型碳酸盐岩储层微观分析及裂缝预测研究[D]: [博士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2011.
- [4] 吴文明, 秦飞, 欧阳冬, 何龙. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏堵水技术[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(6): 104-107+118.
- [5] 朱秀雨, 程涛, 张祎. 裂缝性砂砾岩油藏深部封窜技术的研究进展[J]. 内蒙古石油化工, 2020, 46(9): 98-101.
- [6] 唐长久, 张震, 唐颖, 周隆超, 安玉华, 等. 新型组合调驱技术在裂缝性油藏的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(1): 126-130.
- [7] Xu, C.Y., Kang, Y.L., Tang, L., *et al.* (2014) Prevention of Fracture Propagation to Control Drill-In Fluid Loss in Fractured Tight Gas Reservoir. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **21**, 425-432. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.08.021>
- [8] 孙其诚, 金峰, 王光谦. 密集颗粒物质的多尺度结构[J]. 力学与实践, 2010, 33(1): 10-15.
- [9] 赵洪波, 单文军, 朱迪斯, 岳伟民, 何远信. 裂缝性地层漏失机理及堵漏材料新进展[J]. 油田化学, 2021, 38(4): 740-746.
- [10] 许成元, 闫霄鹏, 康毅力, 游利军, 张敬逸. 深层裂缝性储集层封堵层结构失稳机理与强化方法[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 399-408.
- [11] 赵洪波, 单文军, 朱迪斯, 等. 裂缝性地层漏失机理及堵漏材料新进展[J]. 油田化学, 2021, 38(4): 740-746.
- [12] 郑力会, 张明伟. 封堵技术基础理论回顾与展望[J]. 石油钻采工艺, 2012, 3(5): 1-9.
- [13] 孙涛, 孟祥娟, 王静, 黎真, 吴红军, 阿克巴尔·卡得拜, 赵静. 注水水质对裂缝性油藏储层的影响[J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(2): 199-203+210.