裂缝性低渗透油藏注水开发实验研究

张思蕊,曹祺悦,陈方帅,诸奕霏,李文睿

重庆科技大学石油与天然气工程学院,重庆

收稿日期: 2025年3月1日; 录用日期: 2025年5月26日; 发布日期: 2025年6月5日

摘要

在我国石油工业的版图里,裂缝性低渗透油藏占据着举足轻重的位置。对石油部门而言,如何达成这类 油藏的经济高效开发,已然成为亟待攻克的关键课题。相比于常规储层,裂缝性低渗透储层中油水两相 的渗流规律呈现出更为复杂的特性,并且其开采机理也有着显著的不同。但相关研究体系不够完善,本 文根据矿场岩心性质筛选契合实验要求的造缝方法进行人工造缝,制备裂缝性低渗透岩心,并对其基本 物性参数进行测量,开展一维水驱实验,通过改变围压分析裂缝性低渗透储层注水开采过程中裂缝宽度 对开采效果的影响,为裂缝性低渗透油藏注水开发提供参考。

关键词

裂缝性油藏,低渗透,注水开发

Experimental Research on Water Injection Development of Fractured Low Permeability Reservoirs

Sirui Zhang, Qiyue Cao, Fangshuai Chen, Yifei Zhu, Wenrui Li

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Mar. 1st, 2025; accepted: May 26th, 2025; published: Jun. 5th, 2025

Abstract

In the landscape of China's petroleum industry, fractured low-permeability reservoirs hold a pivotal position. For the petroleum sector, achieving the economically efficient development of such reservoirs has become a critical challenge that urgently needs to be addressed. Compared to conventional reservoirs, the flow patterns of oil and water in fractured low-permeability reservoirs exhibit more complex characteristics, and the mechanisms of extraction are also significantly different. However, the research system in this area is not yet sufficiently developed. This paper, based on the properties of field cores, selects suitable fracture creation methods that meet experimental requirements to artificially create fractures, thereby preparing fractured low-permeability cores. The basic physical parameters of these cores are then measured, and one-dimensional water-flooding experiments are conducted. By altering the confining pressure, the influence of fracture width on the effectiveness of water-flooding in fractured low-permeability reservoirs is analyzed, providing a reference for the water-flooding development of such reservoirs.

Keywords

Fractured Reservoirs, Low Permeability, Water Flooding Development

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/

1. 引言

我国目前大部分常规储层都进入中后期开发阶段。这些储层普遍表现出高采出程度、高含水率等特 征,表明了这些常规油气藏的开采已接近或已进入衰退期,剩余可开采的剩余资源逐渐减少。相对而言, 非常规储层勘探开发程度较低,剩余储量巨大。从我国目前剩余油资源的品质来看,低渗透、特低渗透 和稠油等"低品位"资源量占比已增至64%,其中大部分为低渗透和特低渗透储层[1]。这些储层虽开采 难度较大,但仍然蕴藏着巨大的资源潜力。对于低渗透储层,尤其是深成岩作用形成的低渗透储层,由 于其岩石力学性质更具有脆性,在油气藏形成的地质历史中,构造变形总会在不同程度上使之产生裂缝, 使"低渗透率"和"具有裂缝"常常成为一对孪生现象,形成裂缝性低渗透油藏[2]。大量的实践证明, 低渗透油藏投产后,如果能量补充不及时,地层压力会大幅度下降,油井产量迅速递减,依靠天然能量 的采收率很低。所以无论从石油储量的合理利用,还是从经济效益看,对低渗透油藏补充能量的开发方 式都是必要的。注水开发是低渗透油藏重要的补充能量方式,通常包括水驱和吞吐两种模式[3]。无论是 水驱还是吞吐,注入水均首先进入裂缝系统,裂缝和基质中均存在油水两相渗流现象,此时低渗储层油 水相渗曲线区别于常规油藏,导致开采机理也存在较大差异。但是目前有关油水两相渗流规律的研究绝 大多数均集中在常规均质储层,而对于裂缝性低渗透储层的研究却非常少。相比于常规储层,裂缝性低 渗透储层的油水两相渗流规律更为复杂,涉及的影响因素众多,当前现有的油水两相渗流理论和数学模 型无法准确描述和表征裂缝-基质系统中的渗流规律。

2. 研究现状

国内外学者开展了大量的裂缝岩心流动实验[4]-[7]。针对裂缝性岩心流动实验而言,准确控制实验岩 心裂缝宽度,保持构成裂缝界面的岩石介质性质以及裂缝界面形状规则是实验成功的关键因素。一些学 者[8]-[10]尝试使用人造岩心造缝并用树脂类材料粘结固定以保持缝宽。然而这种方法存在一定的局限性, 主要在于其岩心来源于非储层,改变了岩心组分和性质,同时树脂类材料易发生弹性形变或破碎引起缝 宽和渗透率测量不准。还有一些学者[11][12]选择使用测量支撑裂缝用金属丝厚度作为实验缝宽,因金属 丝具有弹性,同一金属丝在围压释放与施压状态下的测量厚度不等,导致测定缝宽失真、渗透率偏离实 际。最终引起实验数据规律性差,实验结果背离实际。唐军等[13]应用储层流体流动基础理论,采用储层 岩心制成规则的单一裂缝单元进行流动实验,既满足达西定律和泊肃叶方程应用的充要条件,又符合特 定储层岩性与结构强度等环境条件,减少了多裂缝对缝宽测定的影响,排除了非储层因素与裂缝形状等 其它因素对裂缝及其渗透率测定的影响,保证了方法应用的可靠性和实用性。陈浩等[14]在变围压和变流 压条件下对人工裂缝应力敏感性进行了测试。研究结果表明,加入支撑剂显著提高了裂缝的导流能力, 同时有效降低了人工裂缝的应力敏感性。这表明,支撑剂的加入可以增强裂缝在高应力环境中的稳定性, 从而在一定程度上减少裂缝对外界压力的敏感反应。此外,随着铺砂浓度增加,敏感性逐渐减弱,最终 趋于不变。这一变化趋势表明,在较高浓度铺砂下,裂缝的应变反应更加稳定,对外界应力变化不再表 现出明显的敏感性。低铺砂浓度下,两种测试方法所得结果基本一致,表明这两种方法在此条件下能够 提供相似的应力敏感性评估。但随着铺砂浓度的进一步增加,由于支撑剂的明显运移现象,变流压测试 的结果明显高于变围压测试,且这种差异随铺砂浓度增加而逐渐扩大。当铺砂浓度超过 20%时,两种方 式测试结果差异更为明显,这说明在高铺砂浓度缘件下,变流压测试方法能够更真实的模拟实际现场中 裂缝的应力响应,尤其是在高应力环境下。因此,变流压测试方法应优先用于人工裂缝应力敏感性的室 内评价。为了进一步完善裂缝性低渗储层物理模拟手段,需要对现有的实验方法进行改进。

可以看出,裂缝性低渗透油藏注水开发过程中,不同裂缝系统下油水两相渗流规律还有待深入探究。 优化现有的物理模拟实验手段,构建完备的油水两相渗流理论,对裂缝性低渗透油藏开发潜力预测具有 重要意义。

3. 实验方法

(1) 岩心基础物性测试方法

为了研究裂缝性低渗透油藏相渗规律及水驱油机理,在制备裂缝岩心之前应弄清岩心基质物性参数 情况。因此,首先针对油田低渗透油藏矿场岩心进行孔隙度、渗透率测试,测试标准参考覆压下岩石孔 隙度和渗透率测定方法(SY/T6385-1999),实验设备为TC-200脉冲孔渗联测仪。

序号	岩心编号	孔隙度,%	渗透率,mD	序号	岩心编号	孔隙度,%	渗透率,mD
1	16CJ12-1YD	6.44	0.012	16	16CJ12-24YD	7.38	0.152
2	16CJ12-5YD	8.76	0.036	17	16CJ12-26XS	8.97	0.03
3	16CJ12-7YD	4.36	0.016	18	16CJ12-27YD	6.41	0.045
4	16CJ12-8XS	10.84	0.017	19	16CJ12-29YD	11.79	0.066
5	16CJ12-9YD	10.67	0.016	20	16CJ12-30YD	7.39	0.056
6	16CJ12-10XS	9.62	0.390	21	16CJ12-31YD	8.93	1.131
7	16CJ12-12YD	9.49	0.040	22	16CJ12-33YD	6.32	0.155
8	16CJ12-13YD	10.96	0.070	23	16CJ12-34YD	9.04	0.051
9	16CJ12-14YD	14.82	0.078	24	16CJ12-35YD	8.92	0.011
10	16CJ12-15YD	a10.83	0.054	25	16CJ12-36YD	6.53	0.018
11	16CJ12-16XS	10.58	0.027	26	16CJ12-41YD	7.88	0.075
12	16CJ12-17YD	10.49	0.033	27	16CJ12-44YD	8.94	0.033
13	16CJ12-18YD	7.14	0.131	28	16CJ12-45YD	6.59	0.105
14	16CJ12-20YD	11.72	0.289	29	16CJ12-47YD	4.48	0.018
15	16CJ12-22YD	3.14	0.012	30	16CJ12-48YD	7.48	0.064

Table	e 1. Core	permeabilit	ty test	results
表1.	岩心孔法	渗测试结果	:	

根据上述测试方法和步骤,对某油田矿场岩心展开造缝前孔隙度和渗透率测定实验,共收集油田现场岩心 30 个,实验结果见表1。根据测试结果可知,本批次岩心样品平均孔隙度为 8.56%,平均气测渗

透率为 0.108 mD,其中渗透率低于 0.1 mD 的岩心样品为 23 块,占比 76.7%。根据岩心渗透率划分标准,本批次岩心大部分为致密岩心。

(2) 一维驱替实验方法

根据前期文献调研,目前常见的岩心人工造缝方法为对半切割法和径向挤压法,对半切割法即用切 割机将岩心沿轴向剖为对等的两部分,径向挤压法即用平口钳夹住岩心,施加水平方向径向力制作裂缝。 对半切割法制作的裂缝壁面平整光滑,而径向挤压法制得的裂缝壁面粗糙且弯曲延展。由于本批次岩心 长度较短,质地较脆,通过径向挤压法造缝成功率较低,容易发生岩心碎裂的情况,因此本项目采用对 半切割法进行人工造缝。

由于裂缝导流能力远大于基质,因此对于造缝后的岩心难以进行饱和油水处理,对于后续相渗测试 及一维水驱油实验造成较大困难。为了解决这一难题,本项目采取先饱和油水,再进行人工造缝的方式, 确保造缝后岩心基质中流体分布与实际地层一致。

常规一维驱替实验所使用的设备与裂缝岩心物性测试实验类似,包括岩心夹持器、注入泵、围压控制泵、中间容器、压力传感器及油水计量装置。实验中所使用的岩心见表 2 序号为物性接近的 8 块岩心,实验用油为标准白油,实验用水为去离子水,实验温度为 20℃,实验围压分别为 3 MPa、5 MPa、7 MPa、8 MPa、10 MPa、12 MPa、15 MPa、18 MPa。具体实验步骤如下:

将人工造缝后裂缝岩心放入岩心夹持器中,利用注入泵向裂缝中饱和原油并测量裂缝岩心渗透率,过程中保持围压为设定值不变,测量后老化24小时以上;

② 利用注入泵向饱和油后的裂缝岩心注入去离子水进行驱油实验,注入速度为0.02 ml/min,同时计量不同时刻产油量、产水量及岩心两端压力梯度;

③ 继续注入直至采出液含水 100% 后结束实验,根据记录绘制水驱油动态曲线;

④ 更换岩心重复步骤①~③,改变围压以研究裂缝宽度对水驱油动态的影响。

4. 结果分析

为了研究不同裂缝宽度下油水相渗曲线及水驱油动态特征,本项目通过改变围压的方式来控制裂缝 宽度,围压值分别取 3 MPa、5 MPa、7 MPa、8 MPa、10 MPa、12 MPa、15 MPa、18 MPa,根据布辛列 克方程即可计算不同围压下裂缝宽度数值。

$$Q = \frac{HW^3}{12\mu} \frac{dp}{dx}$$

式中,Q为通过裂缝内部流体的流量, $cm^{3/s}$;

W为裂缝宽度, cm;

H为裂缝高度, cm;

 μ 为流体粘度, mPa·s;

dp/dx 为岩心两端压力梯度, MPa/cm。

基于人工造缝后的裂缝岩心,进行了常规一维驱替实验,得出了裂缝宽度对水驱油动态曲线的影响。 根据裂缝岩心一维驱替实验结果可以得出不同裂缝宽度下水驱油动态曲线见图1。

图 1 为 8 块裂缝岩心一维水驱油动态曲线。从图中可以明显发现,当采出液见水后,含水率上升速度极快,随着围压增大驱替压力梯度逐渐增加。这主要是由于注入水主要沿裂缝通道窜流,裂缝内注入水渗流阻力很低,当增大围压后裂缝宽度逐渐减小,使得注入水在裂缝内的渗流阻力增加,因此驱替压力梯度逐渐增加。同时,在围压为 3 MPa 时,注入量为 0.125 PV 出口端即见水,而围压为 18 MPa 时,注入量为 0.23 PV 出口端才见水。这说明裂缝宽度减小后,裂缝中流动阻力增加,导致进入基质中的水量

增加, 使得出口端见水 PV 数增大。



Figure 1. Fracture core 1D water drive performance curve 图 1. 裂缝岩心一维水驱油动态曲线



Figure 2. The PV number of water drive front breakthrough for different fractured core samples 图 2. 不同裂缝岩心水驱前缘突破 PV 数

图 2 为不同裂缝宽度岩心水驱油过程中,水驱前缘突破 PV 数与裂缝宽度的关系。从图中可以看出,裂缝宽度为 0.05 mm 的岩心水驱前缘突破 PV 数为 0.125,随着裂缝宽度降低,水驱前缘突破 PV 数呈单 调递增趋势,当裂缝宽度小于 0.03 mm 后增加趋势明显变缓。这表明裂缝宽度对注入水窜流程度存在较 大影响,在裂缝宽度大于 0.03 mm 时,注入水窜流程度较为严重,水驱前缘突破 PV 数较小,当裂缝宽 度小于 0.03 mm 时,注入水窜流现象依然存在,但是明显改善,当裂缝宽度继续减小,水驱前缘突破 PV 数变化不大。



图 3. 不同裂缝岩心的水驱采收率

图 3 为裂缝宽度对水驱采收率的影响,从曲线趋势可以看出,裂缝岩心的水驱采收率随裂缝宽度增加而降低,并最终趋于稳定。裂缝宽度为0.022 mm的岩心水驱采收率为26.2%,而裂缝宽度为0.05 mm的岩心水驱采收率为14.8%,二者相差11.4%,即裂缝宽度从0.05 mm降低至0.022 mm时,采收率增加了77%,这说明裂缝宽度对水驱采收率的影响较大。主要原因是当裂缝宽度逐渐增大时,裂缝中水的流动阻力会逐渐减小,造成越来越多的水沿着裂缝向前推进,而进入基质中的水逐渐减小,导致波及效率下降,但是当裂缝宽度增加到一定程度,几乎全部注入水均沿着裂缝窜流,这种情况下继续增大裂缝宽度也不会使波及系数进一步降低,因此采收率下降趋势会逐渐变缓。



Figure 4. The proportion of water-free oil displacement efficiency to the total oil displacement efficiency 图 4. 无水期驱油效率占总驱油效率比例

图 4 为不同裂缝岩心无水期驱油效率占总驱油效率的比例,裂缝宽度为 0.05 mm 的岩心总水驱效率 中,无水期驱油效率所占比例为 40.3%;而裂缝宽度为 0.022 mm 的岩心总水驱效率中,无水期驱油效率 所占比例为 77.8%。从图中趋势可以看出,随着裂缝宽度降低,无水期驱油效率在总驱油效率中所占比例 呈逐渐增大的趋势。这主要是由于裂缝宽度越大,裂缝中流动阻力越小,注入水在裂缝中窜流越严重, 导致水驱前缘突破时间短,当出口端见水时仅有裂缝中的少量原油被采出,随着注入 PV 数逐渐增加,裂 缝中剩余油逐渐被驱替出来,同时也有一部分基质中原油在渗吸作用下被采出,因此无水期驱油效率占 总驱油效率比例越小。而裂缝宽度越小,则裂缝导流能力越弱,注入水裂缝和基质中突进的越均匀,当 岩心出口端见水时裂缝中大部分原油已经被采出,后续水驱能够采出的原油较少,因此无水期驱油效率 所占总驱油效率比例越大。

基金项目

重庆科技大学大学生科技创新训练项目(项目编号: S2024115001027)。

参考文献

- [1] 贾承造, 庞雄奇, 姜福杰. 中国油气资源研究现状与发展方向[J]. 石油科学通报, 2016, 1(1): 2-23.
- [2] Arshad, A., Al-Majed, A.A., Menouar, H., Muhammadain, A. and Mtawaa, B. (2009) Carbon Dioxide (CO₂) Miscible Flooding in Tight Oil Reservoirs: A Case Study. *Kuwait International Petroleum Conference and Exhibition*, Kuwait City, 14-16 December 2009, SPE-127616-MS. https://doi.org/10.2118/127616-ms
- [3] Yu, W., Lashgari, H.R., Wu, K. and Sepehrnoori, K. (2015) CO₂ Injection for Enhanced Oil Recovery in Bakken Tight Oil Reservoirs. *Fuel*, 159, 354-363. <u>https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.06.092</u>
- [4] 袁广金, 宋思媛. 下寺湾油田延长组储层裂缝特征及对注水开发影响[J]. 西安科技大学学报, 2014, 34(5): 569-573.
- [5] Chen, P. and Mohanty, K.K. (2015) Surfactant-Enhanced Oil Recovery from Fractured Oil-Wet Carbonates: Effects of Low IFT and Wettability Alteration. SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, Texas, 13-15 April 2015, SPE-173797-MS. <u>https://doi.org/10.2118/173797-ms</u>
- [6] Zheng, W., Liu, Y., Huang, J., Liu, Y. and Chen, J. (2018) Study on the Optimal Development Method for Offshore Buried Hill Fractured Reservoirs. *Arabian Journal of Geosciences*, **11**, Article No. 640. <u>https://doi.org/10.1007/s12517-018-3965-9</u>
- [7] 李云鹏,朱志强,孟智强,等.裂缝性油藏的注采模式研究[J]. 特种油气藏, 2018, 25(3): 130-134.
- [8] 张华丽, 金志荣, 包敏新, 等. 特低渗裂缝性油藏渗吸采油主控因素影响规律实验研究[J]. 复杂油气藏, 2022, 15(2): 101-104.

[9] 张志威, 王长全, 石立红, 等. 裂缝性低渗油藏注气提高采收率实验研究[J]. 非常规油气, 2022, 9(1): 65-70.

[10] 王大为, 高振南. 裂缝性低渗透油藏窜流规律实验研究[J]. 非常规油气, 2021, 8(4): 43-47.

[11] 张儒, 康梦娜. 安塞油田低渗储层中裂缝对相渗曲线的影响分析[J]. 内蒙古石油化工, 2014, 40(20): 155-156.

[12] 李理, 桑晓彤. 低渗透储层裂缝研究现状及进展[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(6): 2472-2484.

[13] 唐军, 吴正良. 裂缝性储层岩心制作方法及评价研究[J]. 钻采工艺, 2019, 42(6): 105-109.

[14] 陈浩,周涛,杨胜来.页岩储层人工裂缝岩样制备方法及应力敏感性[J].石油学报,2020,41(9):1117-1126.