

滑溜水渗吸对页岩孔隙结构影响研究 现状与展望



谢鑫*, 潘悦, 封奔, 于季灏, 张晗

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆 401331

摘要: 页岩气是一种新兴的清洁能源。要实现页岩气的有效开采需要对页岩储层进行大规模压裂改造。由于页岩储层孔渗低开采困难, 水力压裂是一种有效的增产措施, 而滑溜水是页岩水力压裂的常用压裂液体系。现已有研究揭示页岩储层孔隙结构是影响页岩气流动的关键因素, 但还不能全面解释“滑溜水返排率低、气产量高”的异常工程现象。为了全面掌握滑溜水渗吸作用对页岩储层孔隙结构的影响, 实现页岩气有效增产, 文章通过调研前人研究成果, 总结孔隙结构评价方法, 重点分析滑溜水注入、滑溜水滞留和实际施工过程中存在的强制渗吸三个因素对页岩孔隙结构的影响, 得出结论: 滑溜水注入促进裂缝产生与扩展, 使孔隙喉道变得光滑通顺; 滑溜水滞留会破坏原有微观结构, 改变岩石物理化学性质; 强制渗吸通过改变压差改善渗吸效果。指出掌握带压渗吸对页岩气储层孔隙结构影响能够有效改善页岩气采收率但此类研究不够充分的现状, 并对此提出优化实验方案的建议。

关键词: 页岩气; 水力压裂; 滑溜水; 带压渗吸

DOI: [10.57237/j.jest.2024.03.002](https://doi.org/10.57237/j.jest.2024.03.002)

Current Status and Prospect of Imbibition of Slippery-water Effect on Shale Pore Structure Research

Xie Xin*, Pan Yue, Feng Ben, Yu Jihao, Zhang Han

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China

Abstract: Shale gas is an emerging clean energy source. Effective shale gas extraction requires large-scale fracturing of shale reservoirs. Due to the difficulty of extracting shale reservoirs with low porosity and permeability, hydraulic fracturing is an effective measure to increase production, and slippery water is a commonly used fracturing fluid system of shale. Some studies have revealed that the pore structure of shale reservoirs is a key factor affecting the flow of shale gas, but they can't fully explain the anomalous engineering phenomenon of "low flowback rate of slippery water and high gas production". In order to comprehensively grasp the influence of slippery water seepage and suction on the pore structure of shale reservoir, and to realize the effective increase of shale gas production. The article investigates the research results of the previous researchers, summarizes the pore structure evaluation method, and focuses on analyzing the influence of three factors on shale pore structure, namely, slippery water

基金项目: 哈法亚油田 Sadi 碳酸岩油藏压裂前置微乳液渗吸增油规律研究 (基金号: YKJCX2320126).

*通信作者: 谢鑫, 202201049@cqust.edu.cn

收稿日期: 2024-04-10; 接受日期: 2024-04-30; 在线出版日期: 2024-05-23

<http://www.energysci.tech.org>

injection, slippery water retention, and forced seepage and suction. It is concluded that: slippery water injection promotes the generation and expansion of cracks, and makes the pore throat smooth; slippery water retention destroys the original microstructure and changes the physicochemical properties of the rock; and forced seepage improves the effect of seepage by changing the pressure difference. The effect of pressurized seepage of slippery water in shale reservoirs can effectively improve shale gas recovery, but there are fewer studies in this area, and there are great prospects for future research.

Keywords: Shale Gas; Hydraulic Fracturing; Slippery Water; Pressurized Seepage

1 引言

截至 2023 年末, 全国天然气剩余技术可采储量 6683.7 亿立方米, 页岩气剩余技术可采储量 5516.1 亿立方米[1], 具有巨大的开发潜力和发展前景。页岩气主要以游离气、吸附气的形式存储于孔隙度和渗透率极低的页岩储层中, 实现页岩气有效开发的技术是水力压裂液技术, 通过向地下泵注大量的压裂液使储层岩石起裂, 并形成缝网以便天然气流入井筒, 从而提高油气产量, 进行商业开发[2]。其中滑溜水压裂液体系是压裂领域中的主要压裂液之一, 优点包括能够大排量泵送、降低液体摩阻、减少压裂施工过程能耗。

但根据工程现场分析, 在采用压裂液储层压裂后, 通过高压注入大量压裂液破碎致密页岩, 该过程对周围环境产生潜在影响[3], 会有部分压裂液滞留在储层中, 并存在“滑溜水返排率低, 气产量高”的异常工程现象, 引发相关研究学者的关注。

基于现有研究证明页岩储层孔隙结构对页岩气采收率的影响, 文章通过总结滑溜水注入、滑溜水滞留两个因素对页岩储层微裂缝、孔隙、孔喉等的影响的研究现状, 分析了不同因素对页岩储层孔隙结构影响的特点和机理。在此基础上, 指出滑溜水强制渗吸对页岩储层孔隙结构存在影响但目前的研究尚不充分的现状, 为完善针对滑溜水渗吸对页岩气储层孔隙结构影响的研究提供新的思考和方向。

2 孔隙结构评价方法

2.1 扫描电镜

通过探测电子作用于样品所产生的信号来观察并分析样品表面的组成, 形态和结构, 但仅定性描述页岩孔隙形态和类型[4]。

2.2 高压压汞

属于物理测量法; 测量方法是将页岩样品浸泡在汞中, 通过施加压力压缩汞, 使其进入页岩孔隙, 最后测量压缩汞体积变化计算页岩孔隙度和孔径分布。

2.3 低温液氮吸附实验

属于化学测量, 测量方法将页岩暴露在一定压力下的气体环境中, 通过测量气体吸附量变化来计算页岩样品的孔隙度和孔径分布[5]。

2.4 核磁共振技术

核磁共振成像优点在于能够直接观察流体在岩石中的形态分布和孔隙介质的结构变化。其他方式对页岩孔隙的表征都有一定的局限性, 但核磁共振法(NMR)基本不受骨架成分影响, 可获得较准确的页岩孔隙度及孔径, 可以完整地表征页岩孔径分布[6]。

3 孔隙结构对页岩气运移影响

页岩气的产出过程受到多方因素的影响, 其中的主导因素为孔渗空间中的微观孔喉、宏观裂缝、微裂缝和水力裂缝, 以及上述因素的多重耦合作用。因此掌握页岩气的微观运移影响因素和机理, 有助于实现产能的准确评价与预测。

若早期形成较发育的裂缝, 就会导致储层封闭性遭到破坏, 对页岩气保存造成不利影响[7]; 但同时页岩裂缝发育显著提高了储层的渗透率, 增大了游离气的聚集量, 能够作为疏导系统达到促进页岩气运移的效果。

于荣泽等人[8]通过分析对比气井的累积产气量, 发现在不同基质渗透率、微裂缝渗透率和压裂诱导主裂缝导流能力条件下, 开发时间相同, 累积产气量会随着压裂诱导裂缝的导流能力的加强而增长, 但增幅

是一个逐渐变缓的趋势。此现象说明了对于页岩气藏水平井,掌握最优导流能力的是压裂诱导裂缝,证明压裂诱导裂缝对页岩气藏水平井产能存在影响。

李武广等人[9]通过实验结果绘制孔隙度与气体扩散系数、渗透率与页岩气体扩散系数评价参数关系对比曲线,通过渗透率与其他因素的相关性,进一步讨论并阐明页岩气扩散能力。结果得到,页岩气体扩散能力与渗透率的相关性好,渗透率越大扩散能力越强,但扩散能力增强的程度会随着渗透率的不断增大而有所减弱。但该实验结果不能明确表明与孔隙度的关系。

通过大量调研发现孔隙结构对页岩气运移存在影响,但目前对页岩气微观运移规律的研究存在争议,气体扩散系数评价参数相关性的研究不够充分。在后续研究页岩气扩散能力与其他因素的相关性时,可以考虑微裂缝、孔喉等,通过绘制关系对比曲线,判断相关性。充实孔隙结构影响页岩气运移的相关研究,为实现产能评价与预测提供可靠依据。

4 滑溜水对孔隙结构影响

4.1 滑溜水注入

压裂液储层改造技术可以通过构筑具有高导流性能的人造裂缝以有效提高页岩油气储层的开采效果,但是其也会对储层孔隙结构造成一定程度的影响。对岩心造成微观伤害的同时,也能影响宏观层面。通过滑溜水注入对孔隙结构影响规律的研究,能够有效改善现场滑溜水体系,提高页岩气采收率。

刘忠华等人通过将抽真空饱和 2%KCL 盐水后的岩心,在注入不同量的滑溜水情况下进行核磁共振测试,发现发育有微裂缝的页岩样品中,滑溜水的注入能够促进页岩样品中的微裂缝的产生和扩展,沟通了原有的不连通的孔隙和微裂缝,改变了页岩样品中的大孔和微裂缝分布比例。同时通过对比滑溜水及其组分对渗吸前后页岩样品的孔隙度和孔隙度比值的影响,看出滑溜水及其组分的渗吸均明显提高了页岩样品的孔隙体积,增加了页岩岩心的孔隙度。

郑乃瑜在研究中发现,滑溜水与岩石反应过程中岩心表面沉积吸附严重,颗粒吸附胶结在一起,形成光滑清晰的晶体结构,滑溜水与岩石硅酸盐组分发生了元素迁移,反应产物被滑溜水携带运移,孔隙喉道变得光滑通顺[10];

针对典型页岩储层,杨柳[11]开展室内自发渗吸实验,通过检测实验溶液中离子含量的变化,证明压裂液中阳离子表面活性剂可以降低渗吸-离子扩散能力,改变毛细管力。

游利军[12]开展实验中,利用 SCMS-C 型高温高压岩心多参数自动测试系统,根据有效应力变化,测试压裂液滤液浸润岩样的渗透率变化。结果发现页岩裂缝表面强度有所下降,分析认为原因是压裂液与页岩的物理化学作用有所下降,使得页岩微裂缝更易压缩闭合,页岩的应力敏感性得到强化。因此,要实现页岩气井长期稳产,需要做到 (1) 控制压裂液浸入;(2) 提高支撑剂的铺置效率;(3) 促进滤液返排,减少浸润。研究还发现水的润滑作用会因为降低岩石强度,压缩颗粒的孔喉,导致含水致密砂岩干岩样应力敏感性增强。同时当含水量越高,含粘土矿物的岩石强度降低幅度就会越大。在宏观上体现为含水饱和度越大,应力敏感性越强[13]。

4.2 围压影响下滑溜水注入

实验带压是指给页岩样品加围压,模拟有效应力,得到页岩的渗吸核磁共振响应特征。

钱斌[14]利用核磁共振和 CT 扫描技术,在围压 10MPa 条件下开展水化实验。分析实验结果,总结出水化作用抵消了由应力敏感引起的渗透率降低,且由于孔隙-裂缝结构扩张、新微裂缝的产生以及缝间交汇等原因,岩心裂缝复杂程度提高,孔隙-裂缝体积及其连通性增强,岩心渗透率上升。

肖文联[15]利用核磁共振技术,开展关于通过对页岩气藏岩样完成不带压和带压下渗吸实验,通过分析实验结果的核磁响应曲线,发现带压渗吸实验的岩样孔隙中几乎没有渗吸水的进入, T_2 谱曲线几乎无变化。通过面积比值法和称重法对比,发现孔隙体积增大到原来的 1.5 倍,孔隙度增加 13.5%。说明在考虑有效应力时,页岩吸水率几乎不随时间改变。

丁乙等人[16]通过展开不同围压条件下的三轴实验,对比实验后的岩样图,发现单轴条件下由于缺乏围压的支撑,岩样出现多条破坏面。同时岩样的破坏程度会随着围压的增大而减小,展现出了单一破坏面特征。分析下指出渗吸过程中的水化裂纹扩展会导致岩样完整性遭到破坏,承压能力因此减弱。

4.3 滑溜水滞留

滑溜水滞留影响因素的研究能够一定程度解释“低返排、高产量”现象，因此探究滑溜水滞留导致的孔隙结构变化，需要考虑到滑溜水滞留影响因素与孔隙结构的相关性。

康毅力[17]开展压裂液滤失与自吸实验，通过观察页岩水相返排现象，发现气藏压力下返排困难，同时基质渗透率、扩散系数以及气体压力传递能力下降。分析得出纳米孔隙发育是页岩气藏水相圈闭损害严重的主因，水相圈闭损害是页岩气井压裂后测试无气、快速减产以及维持低产的主要原因。

梁利喜[18]等人发现粘土矿物水化的水化应力对页岩强度因子增量的影响较大，容易使页岩产生微裂缝，孔隙扩展延伸形成裂纹，改变页岩储层孔隙结构。

随着滑溜水滞留影响页岩增产机理研究的不断深入，实验发现：随着滑溜水滞留页岩的时间延长，水化、膨胀作用就会加强，含水饱和度越高，孔隙、裂缝扩展延伸越明显，并且由于滑溜水本身具有黏稠性，随着浸泡时间增加，滑溜水溶液可能将堵塞部分微裂缝，从而改变页岩储层孔隙结构。

由于滞留的滑溜水长时间浸泡，应力在支撑剂支撑点处密集。支撑点周围的页岩破碎导致支撑剂嵌入深度会在大于页岩破裂压力时候加大，随之裂缝导流能力下降。此外，滞留的压裂液会在岩石微粒表面生成水膜，因此当有作用力施加在水膜上时，缝隙面容易产生的错位滑移会导致缝隙宽度变得更窄。通过岩石敏感性测试，发现如果滞留于储层的压裂液与储层岩石矿物不配伍，流体敏感性还会改变岩石物理、化学性质[19]。

减阻剂多数由聚合物构成，在 300 摄氏度以下温度难以分解。Sun hong [20]在研究中发现聚合物沉降堆积在缝隙和支撑剂填充层中，减小孔隙通道，对储层造成伤害。高等人[21]设计滑溜水压裂液表面张力相同的条件下的实验时，发现当毛细管的半径越小，毛细管力反而越大，滑溜水的自吸深度也越高，且浸入速度快。在滑溜水推进过程中，相连的毛细管中，较小毛细管会从较大毛细管中吸水，较大半径的毛细管中的滑溜水从边缘部分上升。以上现象导致水化作用全面扩展，横向纵向上裂缝不断发展，原有的微观结构最终被破坏。

5 未来研究方向展望

5.1 带压渗吸

在成藏过程中，储层为高压环境，渗吸主要为压力条件下的强制渗吸；在实际施工过程中，压裂液在地层中滞留也存在压力。因此要充实渗吸对页岩储层孔隙结构的影响的研究，就应该考虑带压渗吸。

赵[22]等人基于块状和层状页岩储层的结构特征，模拟分析了注水焖井返排过程，研究了强制渗吸的作用机理，分析了强制渗吸过程中的压差驱动和毛管力驱动对水相进入油层的作用，表明强制渗吸作用决定了水相自裂缝进入基质内的深度和进入量，解释了焖井过程中毛细作用产生的水相渗入与同时排出油相的逆向渗吸现象。

杜等人[23]通过测量地层水/表面活性剂的界面张力和接触角研究了基质-流体界面特征，通过自发和强制渗吸实验对比了两种方式的渗吸采收率和渗吸速率，从而得到了渗吸效果随浸泡压力的变化规律。结果表明随浸泡压力的增加，渗吸采收率和渗吸速率均呈增大的趋势，但增加幅度有限。压力能减少渗吸平衡时间并增加渗吸深度，该文章弥补了压力对渗吸影响的研究空缺，为渗吸采油提供了更清晰的思路。

研究指出带压渗吸对页岩储层存在影响，同时说明针对页岩气藏的相关研究具有必要性。

郭等人设计的实验[24]通过分析了强制渗吸规律，对页岩水化作用诱导微裂缝起裂时间进行定量表征，优化了页岩气井焖井时间。研究发现储层围压抑制了页岩渗吸能力，但在最终结果上体现为提高储层改造效果，孔隙度增加倍数范围为 0.42~1.63 倍。该研究成果可为页岩气井返排制度优化提供科学可靠的依据。

5.2 存在问题

关于页岩水相强制渗吸的研究成果证实了强制渗吸对页岩储层孔隙结构存在影响，但目前关于强制渗吸的研究主要针对页岩油藏，且也只能掌握孔隙度增加范围，尚不能明确对页岩储层孔隙结构的影响规律和机理。

5.3 建议

因此在设计完善滑溜水渗吸对页岩孔隙结构影响研究的相关实验时，应设置不同压差下页岩水相强制

渗吸对照组,通过压汞法、低温氮气吸附、核磁共振技术和扫描电镜等方法对页岩水化作用诱导微裂缝起裂进行定量表征,对比分析页岩孔隙度、微观微裂缝变化,由此探究压差对页岩气储层孔隙结构影响规律。

渗吸时间影响滑溜水与页岩储层水化作用程度。因此还应设置相同压差下注入滑溜水不同渗吸时间条件下的对照组。

压裂液配方决定了压裂液性能,在研究滑溜水滞留对储层造成影响的基础上,还应开展滑溜水不同浓度条件下,相同注入压力和相同作用时间下页岩水相强制渗吸对照组。

6 结束语

页岩气藏是重要的非常规天然气资源,有巨大的开发前景。由于页岩气特殊的附存性质,水力压裂成为其有效开发的技术。滑溜水作为现今压裂领域中最常用的压裂液之一,其对页岩储层孔隙结构的影响引发学者关注。

综合评价滑溜水对页岩储层孔隙结构的影响需要考虑滑溜水注入、滞留和压裂过程中存在的带压渗吸现象,利用电镜扫描、低温氮气吸附和压汞法等实验手段,从大孔和微裂缝分布比例、孔隙喉道、毛细管力、页岩微裂缝宽度、孔隙等的变化进行评估。

其中,目前带压渗吸对页岩储层影响的研究能说明强制渗吸对页岩储层孔隙结构存在影响,但其主要针对页岩油储层,并且没有从微观结构对影响因素做出规律总结。

因此文章对未来带压渗吸实验提出需要优化的建议,通过设置压差、滑溜水组分、渗吸时间为主控因素,采用电镜扫描、低温氮气吸附和压汞法等实验手段,对比孔隙结构前后变化特征,探索孔隙结构变化规律。

通过总结上述因素与页岩储层孔隙结构变化的相关性,能完善针对实际工程中“滑溜水返排率低、气产量高”的异常工程现象的研究,为提高页岩气采收率提供理论依据。

参考文献

[1] 2023 年中国自然资源公报 2024-02-29 版名: 公报; 版号: 007 专辑: 基础科学; 经济与管理科学; 专题: 资源科学; 宏观经济管理与可持续发展; 分类号: F205.

- [2] 江雨龙, 陈前一, 王彬, 等. 页岩气开发水力压裂技术进展 [J]. 山东化工, 2023, 52(01): 71-73.
- [3] 刘焕通. 页岩气储层注水过程局部地应力场扰动及断层稳定性研究 [D]. 北京交通大学, 2022.
- [4] 梁峰, 吴伟, 张琴, 等. 四川盆地南部下寒武统筇竹寺组页岩孔隙结构特征与页岩气赋存模式 [J]. 天然气工业, 2024, 44(03): 131-142.
- [5] 赵海军, 魏爱华, 张家祥, 等. 基于氮气吸附法和压汞法的玄武岩孔隙结构特征及其对储层渗透性的影响 [J]. 第四纪研究, 2023, 43(02): 560-572.
- [6] 余旭东, 康志宏, 周磊, 等. 核磁共振技术在页岩孔隙表征中的应用 [J]. 煤炭技术, 2018, 37(05): 129-131.
- [7] 姜瑞忠, 汪洋, 刘海成, 等. 页岩气生产机理及影响因素分析 [J]. 特种油气藏, 2014, 21(01): 84-87+155.
- [8] 于荣泽, 张晓伟, 卞亚南, 等. 页岩气藏流动机理与产能影响因素分析 [J]. 天然气工业, 2012, 32(09): 10-15+126.
- [9] 李武广, 钟兵, 杨洪志, 等. 页岩储层基质气体扩散能力评价新方法 [J]. 石油学报, 2016, 37(01): 88-96.
- [10] 郑乃瑜. 滑溜水对页岩储层的微观伤害及流动性评价研究 [D]. 东北石油大学, 2023.
- [11] 杨柳, 葛洪魁, 程远方, 闫伟, 赵凤坤, 刘敦卿, 李伟. 页岩储层压裂液渗吸—离子扩散及其影响因素 [J]. 中国海上油气, 2016(4): 94-100.
- [12] 游利军, 王巧智, 康毅力, 等. 压裂液浸润对页岩储层应力敏感性的影响 [J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(06): 102-106+118.
- [13] 游利军, 康毅力, 陈一健, 等. 考虑裂缝和含水饱和度的致密砂岩应力敏感性 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006(02): 59-63.
- [14] 钱斌, 朱炬辉, 杨海, et al. 页岩储集层岩心水化作用实验 [J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(4): 7.
- [15] 肖文联, 张骏强, 杜洋, 赵金洲, 赵哲军. 页岩带压渗吸核磁共振响应特征实验研究 2019: 13-8.
- [16] 丁乙, 刘向君, 曹雯, 等. 页岩渗吸过程中的水化损伤演化特征研究 [J/OL]. 工程地质学报: 1-13 [2024-04-09].
- [17] 康毅力, 陈强, 游利军, 等. 页岩气藏水相圈闭损害实验研究及控制对策——以四川盆地东部龙马溪组露头页岩为例 [J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(06): 87-91+117.
- [18] 梁利喜, 熊健, 刘向君. 水化作用和润湿性对页岩地层裂纹扩展的影响 [J]. 石油实验地质, 2014, 36(06): 780-786.
- [19] 章哲宇. 滑溜水对页岩储层渗透率的影响实验研究 [D]. 重庆科技学院, 2017.
- [20] SUN Hong, STEVEN Dick, Cutler Jennifer, et al. A novel nondamaging friction reducer: development and successful slickwater fra application[R]. SPE 136806. 2010.

- [21] 高树生, 胡志明, 郭为, 等. 页岩储层吸水特征与返排能力 [J]. 天然气工业, 2013, (12): 71-76.
- [22] 赵心仪, 桑茜, 董明哲. 强制渗吸在页岩油储层注水吞吐开发中的作用机理 [C] // 中国地质大学 (武汉), 西安石油大学, 陕西省石油学会. 2023 油气田勘探与开发国际会议论文集III. [出版者不详], 2023: 12.
- [23] 杜可心, 李明鹤, 李松岩. 基于地层水/表面活性剂的低渗砂岩油藏自发和强制渗吸实验研究 [C] // 中国地质大学 (武汉), 西安石油大学, 陕西省石油学会. 2023 油气田勘探与开发国际会议论文集II. [出版者不详], 2023: 9.
- [24] 郭建春, 陶亮, 陈迟, 等. 页岩储层水相强制渗吸规律实验研究 [J/OL]. 计算物理: 1-10 [2024-04-05].