

页岩气储层超临界CO₂压裂技术研究进展

杨弘¹, 林郑文², 杨辰华¹, 虞成¹

¹中国石化江汉油田分公司采气一厂, 重庆

²中海石油(中国)有限公司深圳分公司流花作业公司, 广东 深圳

收稿日期: 2026年4月1日; 录用日期: 2026年5月11日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

针对我国“双碳”战略与页岩气规模化开发需求, 为破解常规水力压裂储层伤害、耗水量大、地层污染等技术瓶颈, 本文以超临界CO₂ (SCCO₂)压裂储层改造与CO₂-CH₄竞争吸附的协同匹配为核心, 系统阐释了SCCO₂与页岩储层的相互作用机理、竞争吸附与裂缝扩展的耦合规律, 总结了该技术的核心优势, 锚定了制约其协同匹配与工业化应用的核心瓶颈, 明确了未来技术发展方向。研究表明, 二者的协同匹配是该技术的核心价值, 本文成果可为SCCO₂压裂技术的理论完善、工艺优化与工业化推广提供重要参考。

关键词

超临界CO₂, 页岩气, 压裂机理, 竞争性吸附, 储层改造

Advances in Supercritical CO₂ Fracturing Technology for Shale Gas Reservoirs

Hong Yang¹, Zhengwen Lin², Chenhua Yang¹, Cheng Yu¹

¹No.1 Gas Production Plant, Sinopec Jiangnan Oilfield Branch, Chongqing

²Lihua Operating Company, Shenzhen Branch of CNOOC (China) Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

Received: April 1, 2026; accepted: May 11, 2026; published: May 29, 2026

Abstract

Under China's "Dual Carbon" strategy and large-scale shale gas development, to address the technical bottlenecks of conventional hydraulic fracturing (reservoir damage, high water consumption, formation pollution), this paper focuses on the synergistic matching between supercritical CO₂ (SCCO₂) fracturing reservoir stimulation and CO₂-CH₄ competitive adsorption. It systematically explains the SCCO₂-shale interaction mechanism, the coupling law of competitive adsorption and fracture

propagation, summarizes the technology's core advantages, identifies key bottlenecks for its industrial application, and defines its development direction. The study confirms that the synergistic matching is the core value of the technology, and the findings can provide important reference for its theoretical improvement, process optimization and industrial promotion.

Keywords

Supercritical CO₂, Shale Gas, Fracturing Mechanism, Competitive Adsorption, Reservoir Stimulation

Copyright © 2026 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

全球能源体系正加速向低碳清洁转型,在我国“双碳”战略目标下,二氧化碳捕集、利用与封存(CCUS)技术成为削减大气CO₂浓度的核心路径,页岩气作为我国非常规天然气核心组成与天然气增储上产的关键接替领域,实现其高效开发与CO₂地质封存的协同发展,已成为行业核心需求[1]。

我国页岩气技术可采储量位居全球前列,已建成涪陵、长宁等四大规模化生产基地,但页岩气储层普遍低孔低渗,以“自生自储、源储一体”为成藏核心,必须依托压裂改造实现经济开发[2]。常规水力压裂存在储层水敏伤害、水资源消耗大、地层水污染等固有缺陷,与油气低碳开发需求相悖[3][4]。SCCO₂压裂技术兼具高密度、低黏度、高扩散性的独特物性,在页岩储层改造中优势显著,可同步实现CO₂地质封存,与CCUS发展目标高度契合[5]。

目前国内外围绕该技术已开展大量研究,但多数仍将压裂造缝、竞争吸附作为独立环节分析,未能充分揭示二者内在关联,也难以形成基于协同效应的技术优化思路。基于此,本文以SCCO₂压裂改造与吸附提采的协同匹配为核心,系统论述相关作用机理、耦合规律与技术瓶颈,提出未来研究方向,为该技术的理论研究与工业化应用提供支撑。

2. SCCO₂与页岩储层的相互作用

SCCO₂是温度高于31.1℃、压力高于7.39 MPa临界条件下形成的特殊流体(见图1),兼具高密度、低黏度、高扩散性特征,是其与页岩储层产生多尺度物理化学作用的核心前提。我国页岩气储层埋深1500~5000 m,地层温压条件恰好满足CO₂超临界态转化要求,为技术应用提供了天然地质基础[6]。

页岩矿物组分与孔隙结构是SCCO₂-储层相互作用的核心载体,其岩石体系由黏土矿物基质、陆源碎屑颗粒和富有机质相构成:仅3%左右的有机质主控气体吸附行为,37%~48%的黏土矿物纳米孔隙是气体储集与运移的核心场所,石英等脆性矿物含量直接决定页岩破裂特性与缝网发育程度。SCCO₂对页岩矿物组分与孔隙结构的改造,同步作用于压裂造缝与气体吸附两大过程,是二者协同增效的根本前提。

2.1. 矿物组分改造效应

SCCO₂与页岩相互作用的核心是SCCO₂-水-页岩体系的化学耦合反应[7][8]。SCCO₂与孔隙水结合形成弱碳酸体系,对碳酸盐矿物溶蚀率达12%~19%、黏土矿物溶蚀率4.5%~7.2%,石英等硅质矿物基本不反应,最终导致碳酸盐与黏土矿物绝对含量下降(见图2),硅质矿物相对占比提升。

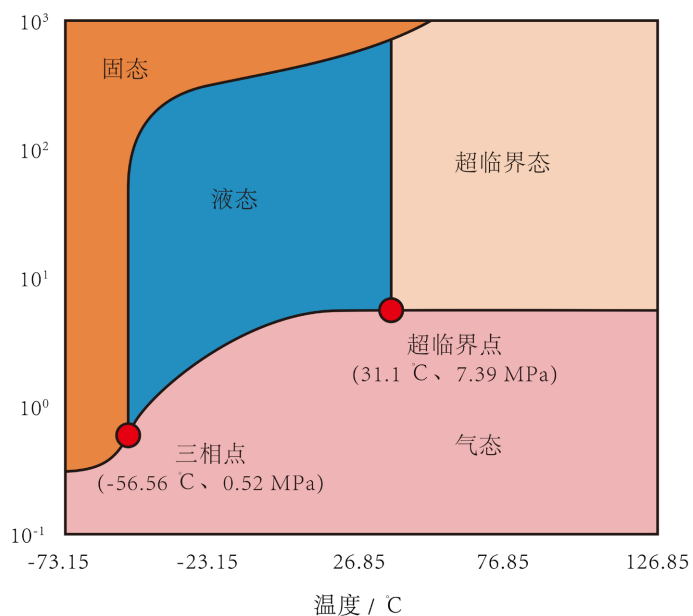


Figure 1. Phase diagram of CO₂ [7]

图 1. CO₂ 相态图[7]

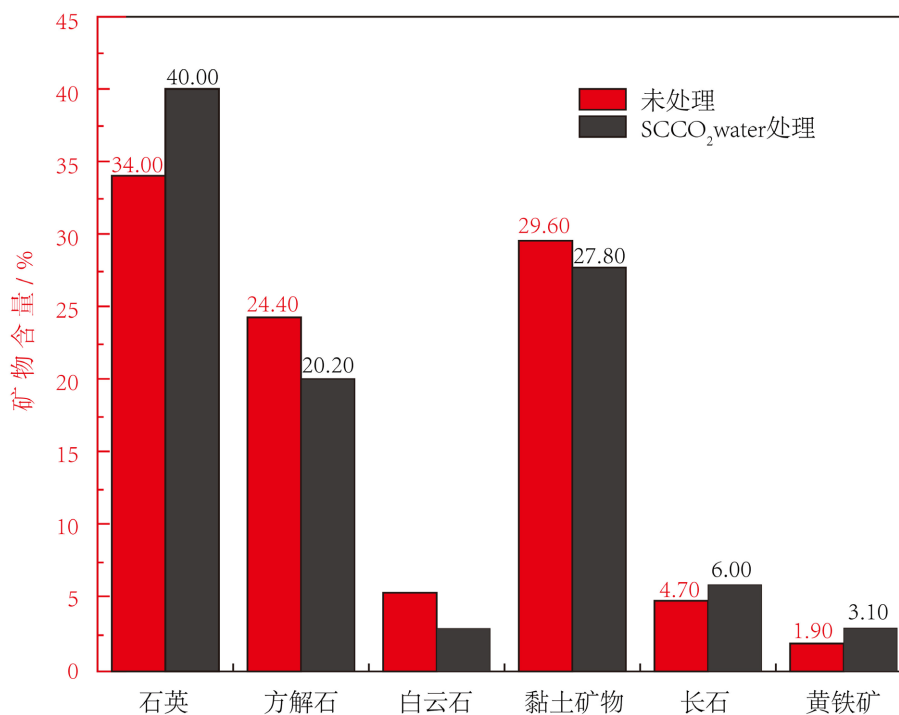


Figure 2. Changes in shale mineral composition before and after SCCO₂ treatment [2]

图 2. SCCO₂ 处理前后页岩矿物组分变化[2]

该溶蚀效应随浸泡时间延长、地层压力升高而加剧，一方面会持续劣化页岩力学强度，使其抗拉强度降低 18.7%~52.3%、弹性模量下降 14.8%~38.4%，降低页岩起裂压力，为压裂造缝奠定基础[1]；另一方面，SCCO₂ 对页岩有机质的强萃取能力会改变页岩吸附位点分布，直接调控 CO₂-CH₄ 竞争吸附行为，构成了协同增效的矿物学基础。

2.2. 孔隙结构重构机制

SCCO₂ 通过物化耦合效应实现孔隙-裂缝系统重构, 可使页岩孔隙度提升 20%~30%、渗透率提高 50% 以上, 核心通过低黏度渗流改造、矿物溶蚀扩孔、有机质萃取造孔、相变应力改造四大机制实现。

上述机制使页岩 < 2 nm 微孔、2~50 nm 中孔占比降低, >50 nm 大孔与微裂缝占比提升, 孔隙分形维数从 2.82 降至 2.61, 非均质性显著减弱, 向连通缝网结构转变(见图 3)。这一过程既为裂缝扩展提供天然弱面, 扩大改造体积 40% 以上; 又打通气体运移通道, 扩大 CO₂ 接触面积, 为竞争吸附创造条件。需注意, CO₂ 吸附引发的基质膨胀, 可使黏土矿物含量 > 40% 的页岩渗透率最高下降 12%, 是影响协同匹配的重要地质因素。SCCO₂ 对页岩力学性能具有显著弱化作用(见表 1), 弱化效果优于氮气, 整体弱于水基流体与液态 CO₂, 能使页岩强度快速稳定以利于井壁稳定; 页岩弱化程度随 SCCO₂ 浸泡时间延长而增强, 且湿页岩弱化幅度明显高于干页岩; 不同岩性页岩对 SCCO₂ 的响应存在差异, SCCO₂ 与盐水协同作用可有效降低页岩强度与模量、提高裂纹萌生应力, 有利于储层压裂改造。

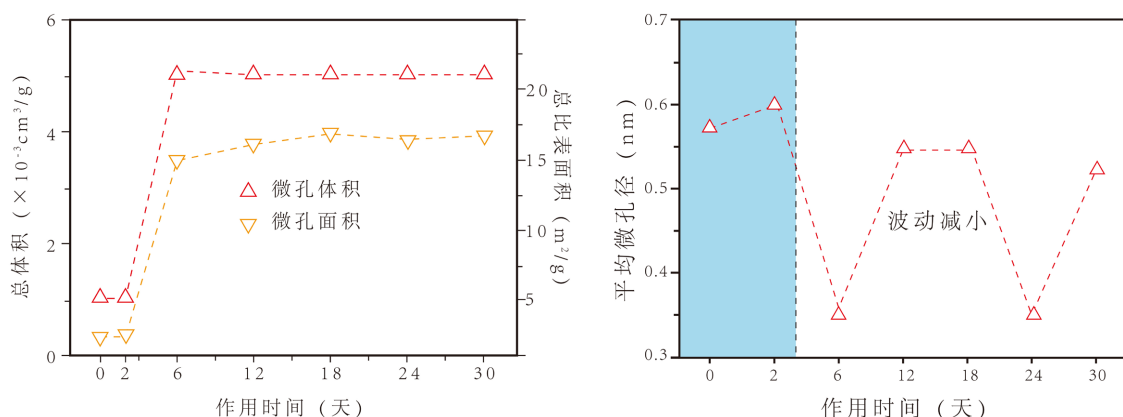


Figure 3. Changes in micropore parameters at different interaction times [9]
图 3. 不同相互作用时间微孔参数变化[9]

Table 1. Variations in shale mechanical properties under different tests
表 1. 不同试验下页岩岩石力学变化

样品	实验条件	实验结果
四川长宁页岩	进行清水、氮气、ScCO ₂ 浸泡	注入 SCCO ₂ 后岩芯抗压强度降低 64%, 注入氮气仅降低 7%; 清水浸泡下页岩抗压强度持续下降, 不利于井壁稳定; 而 SCCO ₂ 浸泡后强度降至稳定值, 更利于井壁稳定。
重庆龙马溪页岩	分别用滑溜水、5℃ 液态 CO ₂ 、45℃ + 10 MPa ScCO ₂ 浸泡	随滑溜水、SCCO ₂ 、液态 CO ₂ 浸泡时间延长, 样品抗拉强度逐渐降低, 48 h 后降幅趋缓; 弱化程度: 滑溜水 > 液态 CO ₂ > SCCO ₂ 。
四川长宁龙马溪页岩	分别对干湿页岩用 60℃、20 MPa 的 ScCO ₂ 浸泡	SCCO ₂ 作用会降低页岩抗拉强度与劈裂模量, 弱化程度随作用时间延长而增大; 湿页岩弱化幅度显著高于干页岩。
四川长宁龙马溪页岩和长庆油页岩	分别进行 110℃、30 MPa 盐水 + ScCO ₂ 浸泡、饱和盐水浸泡	相较于盐水饱和, SCCO ₂ + 盐水处理后龙马溪页岩与长庆页岩峰值应力分别降低 1.3%、7.87%, 杨氏模量分别降低 30.80%、18.31%, 裂纹萌生应力分别提高 15.97%、12.54%。

3. SCCO₂ 作用下页岩气体吸附特性

CO₂-CH₄ 竞争吸附是 SCCO₂ 压裂同步实现页岩气提采与 CO₂ 封存的核心内在机制, 而吸附置换效率

完全依赖压裂改造形成的裂缝网络，二者形成强耦合的协同体系，这也是该技术区别于常规水力压裂的核心所在。页岩气藏中吸附态 CH_4 占总资源量的 20%~85%，而页岩对 CO_2 的吸附亲和力远高于 CH_4 ，这是二者协同增效的核心前提。

3.1. 竞争吸附与压裂改造的耦合关系

CO_2 的吸附优势源于分子物性差异：其动力学直径 0.33 nm，小于 CH_4 的 0.414 nm，可接触更多吸附位点；同时更强的四极矩使其与极性位点结合更稳定，可有效置换 CH_4 [6] [10]。核心过程为： SCCO_2 通过缝网渗入基质孔隙，优先占据吸附位点迫使 CH_4 解吸，解吸气体经裂缝驱替至井筒， CO_2 则吸附封存。数据显示，干页岩 CO_2/CH_4 吸附比 1.3~10， SCCO_2 驱替可提升采收率 10%~25%， CO_2 吸附封存占比达 40%~60%，而该过程必须以复杂缝网为前提，压裂效果直接决定提采与封存成效。吸附实验样品(见图 4)取自黔北牛蹄塘组页岩，在 45℃、2~20 MPa 下开展混合气吸附测试。选择性系数随压力升高非线性下降，低压段(<8 MPa) CO_2 竞争优势显著，高压段(>12 MPa)趋于平稳，源于高能吸附位点逐步饱和。选择性系数与 TOC 正相关、与黏土矿物含量负相关，TOC 每提升 1%， CO_2 极限吸附量提升 0.8~1.2 cm^3/g ，表明高有机质、低黏土矿物储层为最优适配对象。

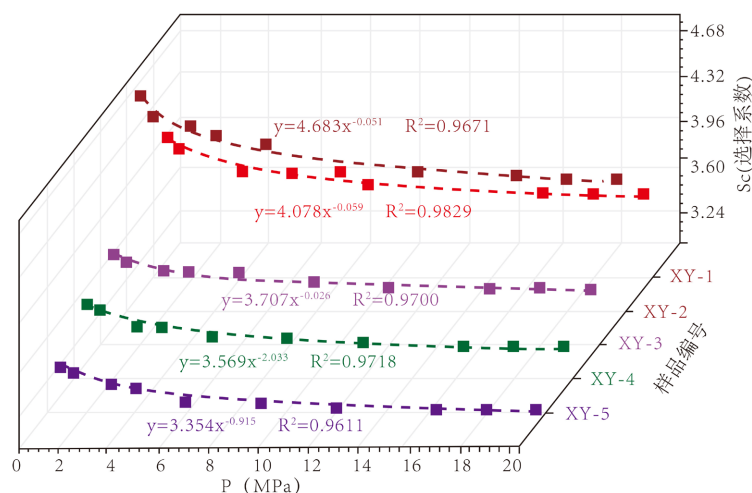


Figure 4. Variation characteristics of mixed gas selectivity coefficients in mixed gas adsorption experiments of different samples [11]

图 4. 不同样品混合气吸附实验中混合气体选择系数的变化特征[11]

3.2. 吸附主控因素与协同匹配关联

页岩对 CO_2 与 CH_4 的吸附行为受多因素耦合调控，中低压条件下单组分气体吸附符合 Langmuir 等温吸附模型，高温高压超临界条件下需结合流体特性优化模型，二元体系的竞争吸附能力通过吸附选择性系数定量表征[12] [13]。其核心主控因素包括温压条件、地层水含量、有机质含量、黏土矿物含量、页岩润湿性五大类。且上述五大主控因素，同时也是 SCCO_2 压裂裂缝扩展的核心调控因素，温压条件、矿物组成、孔隙结构等地质参数，同时决定着压裂造缝效果与吸附提采效率[5] [14]，这一特征决定了压裂与吸附两大过程无法孤立分析，必须以二者的协同匹配为核心开展研究与工艺设计。

4. SCCO_2 压裂机理

压裂改造形成的裂缝网络，是竞争吸附过程规模化发生的工程载体，而 SCCO_2 与页岩基质的吸附作用，又会反过来改变岩石力学特性、优化裂缝扩展条件，二者相互促进、协同增效[15] [16]。相较于常规

水力压裂, SCCO₂ 压裂的独特造缝机理, 不仅实现了储层高效改造, 更与竞争吸附形成了天然适配性。

4.1. 压裂起裂机理与协同适配优势

相较于常规水力压裂, SCCO₂ 压裂起裂门槛更低、造缝能力更强, 核心通过四大机理实现, 且均同步作用于压裂造缝与吸附提采的协同匹配: 化学-吸附弱化机理、低黏度渗流致裂机理、相变致裂机理、热应力致裂机理[17]。四大机理既降低了页岩起裂压力, 又推动形成多尺度裂缝网络, 大幅提升储层改造体积, 为 CO₂ 扩散与气体运移提供了通道, 进一步优化了吸附置换的空间条件。

现场注入 SCCO₂ 与储层温差 35°C~140°C, 以 3000 m 埋深储层为例, 可产生最高 112 MPa 热应力, 远超页岩抗拉强度(5~15 MPa), 使起裂压力较常规水力压裂降低 22%~35%。四大机理既降低起裂压力, 又形成多尺度缝网, 大幅提升改造体积, 为 CO₂ 扩散提供通道, 优化吸附置换条件。压裂实验样品(见图 5)为四川盆地焦石坝龙马溪组页岩, 在 25 MPa、60°C 真三轴条件下开展 SCCO₂ 压裂。低应力差(<5 MPa)以剪切破坏为主, 形成复杂缝网, 储层改造体积提升 60% 以上; 高应力差(>10 MPa)为张拉破坏, 仅发育单一主裂缝。缝网复杂度调控 CO₂ 扩散与 CH₄ 解吸, 是压裂-吸附协同匹配的核心工程基础。

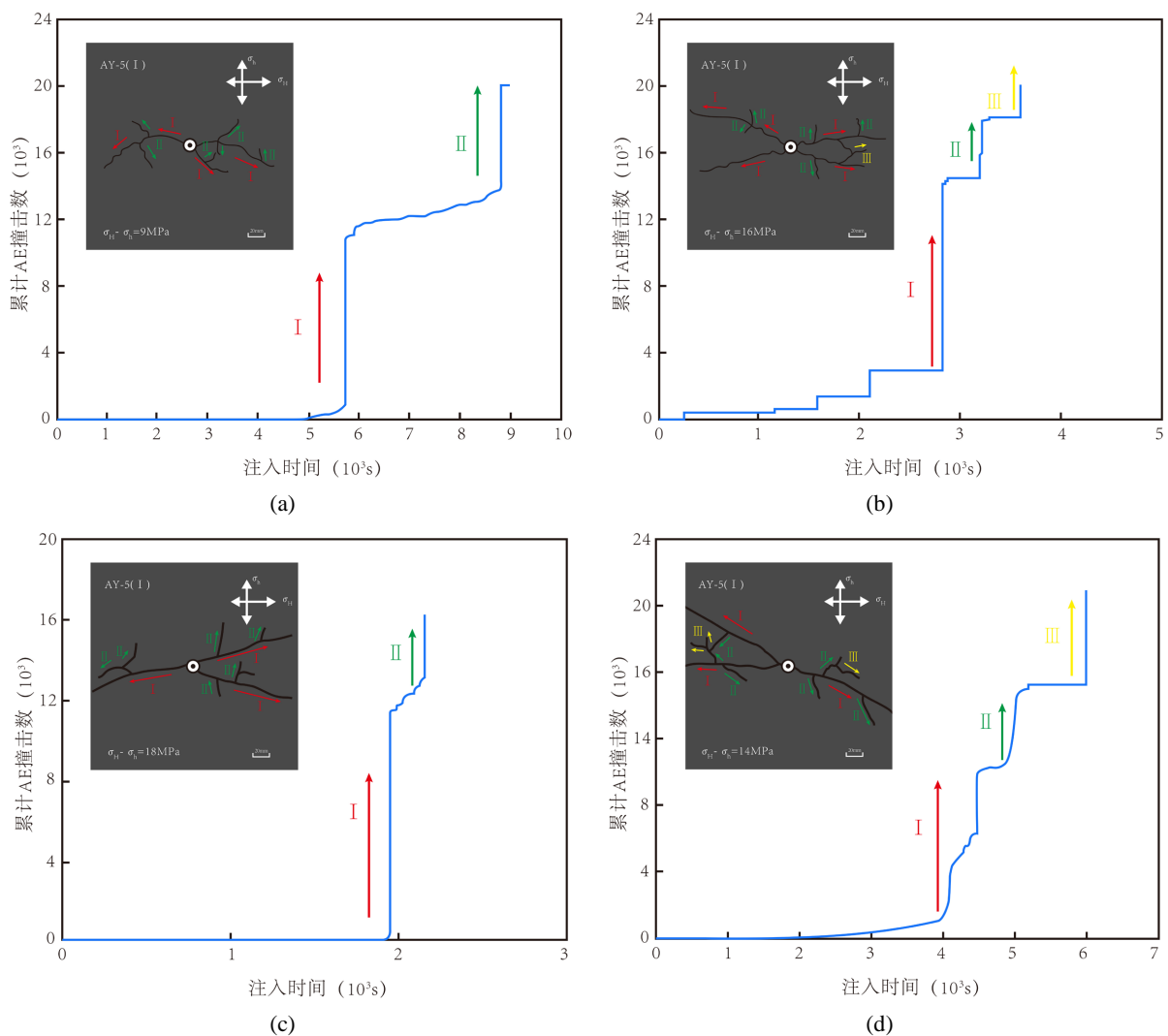


Figure 5. Evolution process of shale fractures induced by SCCO₂ fracturing. (a) AY-2, (b) AY-3, (c) AY-4, (d) AY-5 [17]
图 5. SCCO₂ 压裂页岩裂缝的演化过程。(a) AY-2, (b) AY-3, (c) AY-4, (d) AY-5 [17]

基于上述机理, SCCO_2 压裂形成四大协同优势: 起裂压力更低, 适配深层储层; 造缝效果更优, 易形成复杂缝网; 无储层水敏伤害, 零水资源消耗; 同步实现增产与减排, 契合“双碳”战略[13]。

4.2. 裂缝扩展规律与协同制约因素

SCCO_2 压裂裂缝扩展规律与常规水力压裂存在显著差异: 常规水力压裂以张拉破坏为主, 多形成单一主裂缝[18]; 而 SCCO_2 压裂以剪切破坏为主, 极易沿层理面、天然裂缝等弱面渗流楔入, 驱动弱面剪切滑移, 更易形成“主裂缝 + 多分支微裂缝”的复杂立体缝网, 且裂缝扩展各向异性更弱、覆盖范围更广, 与竞争吸附对多尺度孔隙 - 裂缝网络的需求高度契合, 是实现二者协同增效的关键工程特征。

裂缝扩展主控因素包括页岩层理各向异性、水平主应力差、温压条件、施工参数四大类, 与吸附行为调控因素高度重合, 印证了二者的强耦合关系[19][20]。需重点指出的是, SCCO_2 低黏度特性带来的携砂能力不足, 是当前协同系统的核心制约因素: 裂缝扩展过程中压力易快速耗散, 易造成支撑剂沉降堆积, 不仅影响裂缝长期导流能力, 更会直接阻断气体运移通道, 从根本上破坏压裂与吸附的协同匹配关系, 是制约该技术现场工业化应用的核心瓶颈。

5. 超临界 CO_2 压裂技术的主要问题及发展趋势

当前 SCCO_2 压裂技术规模化应用面临的各类瓶颈, 本质上均会破坏压裂改造与吸附提采的协同匹配关系, 最终削弱技术的综合应用效益。基于此, 未来技术研究需以强化二者协同匹配、最大化发挥协同效益为核心, 开展系统攻关。

5.1. 核心应用瓶颈

当前技术规模化应用面临四大核心瓶颈, 均直接影响协同系统的匹配性: 一是携砂能力先天不足, SCCO_2 低黏度低密度的特性易导致支撑剂沉降、引发砂堵, 直接阻断压裂与吸附的协同通道, 是首要制约因素; 二是专用配套装备不完善, 常规压裂设备无法实现 SCCO_2 相态、压力、排量的精准控制, 无法满足协同匹配对施工参数的高精度要求; 三是施工工艺适配性差, 现有水基压裂工艺与 SCCO_2 流体特性适配性不足, 无法实现裂缝扩展与吸附扩散的节奏匹配; 四是全流程应用经济性不足, CO_2 捕集、储运成本偏高, 低成本稳定气源保障体系尚未建立, 制约了规模化推广进程。

5.2. 技术发展趋势

针对上述瓶颈, 该技术未来需围绕强化协同匹配、提升综合效益开展系统研究与攻关, 核心方向如下: 材料与工艺层面, 研发环保低成本的 CO_2 增黏体系, 突破携砂核心难题, 优化配套施工工艺, 实现裂缝扩展与吸附扩散的参数匹配; 装备配套层面, 研制耐高压、抗腐蚀的专用地面泵组与井下工具, 实现 SCCO_2 相态、压力、排量的精准控制; 理论与工程层面, 深化 SCCO_2 压裂 - 吸附多场耦合基础理论研究, 建立协同匹配程度的定量评价体系, 攻关低浓度 CO_2 高效捕集与储运技术, 加快先导示范工程与标准化技术体系建设, 推动技术工业化应用。

6. 结论

本文围绕 SCCO_2 压裂改造与 CO_2 - CH_4 竞争吸附的协同匹配关系, 系统梳理了页岩气储层 SCCO_2 压裂技术的研究进展, 形成以下核心结论:

- 1) SCCO_2 与页岩的物化作用, 同步改造页岩矿物组分与孔隙结构, 既为压裂造缝提供了有利条件, 也调控了气体吸附行为, 是实现压裂与吸附协同增效的核心物质基础。
- 2) CO_2 - CH_4 竞争吸附是实现“页岩气提采- CO_2 封存”协同的核心机理, 其效率完全依赖压裂改造形

成的缝网系统，二者的协同匹配程度直接决定技术应用效果，是 SCCO₂ 压裂技术区别于常规水力压裂的核心竞争力。

3) SCCO₂ 压裂独特的起裂与扩展机理，易形成多尺度复杂立体缝网，与竞争吸附的空间需求高度契合，是协同增效的工程载体；而低黏度导致的携砂能力不足，会从根本上破坏压裂与吸附的协同匹配，是制约技术应用的核心因素。

4) 当前 SCCO₂ 压裂技术的规模化应用瓶颈，本质上是“压裂-吸附-封存”协同系统的匹配性不足，未来需围绕强化协同增效开展系统研究与攻关，突破核心难题，才能充分发挥该技术的综合价值。

5) SCCO₂ 压裂技术通过压裂改造与吸附提采的深度耦合，同步实现了页岩气高效开发与 CO₂ 地质封存，完美契合我国“双碳”战略与页岩气规模化开发的双重需求，是非常规油气低碳开发的核心技术方向，具备广阔的工业化应用前景。

参考文献

- [1] 李佳旻, 张艺钟, 张茂林. CO₂ 压裂在页岩油气藏中提高采收率技术进展[J]. 当代化工, 2025, 54(11): 2704-2708.
- [2] Yang, K., Zhou, J., Xian, X., Zhang, C., Gan, Q. and Dong, Z. (2023) Effect of Supercritical CO₂-Water-Shale Interaction on Mechanical Properties of Shale and Its Implication for Carbon Sequestration. *Gas Science and Engineering*, **111**, Article ID: 204930. <https://doi.org/10.1016/j.gjsce.2023.204930>
- [3] 袁建强. 中国石化页岩气超长水平段水平井钻井技术新进展与发展建议[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 81-87.
- [4] 郭旭升, 李宇平, 刘若冰, 等. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩微观孔隙结构特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 9-16.
- [5] 徐沛华. 浅析压裂液在页岩储层中的伤害特征[J]. 江汉石油职工大学学报, 2023, 36(4): 32-34.
- [6] 谭鹏, 陈朝伟, 赵庆, 等. 页岩气多簇压裂断层活化机理与控制方法[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(6): 107-116.
- [7] Jiang, Z., Quan, X., Tian, S., Liu, H., Guo, Y., Fu, X., et al. (2022) Permeability-Enhancing Technology through Liquid CO₂ Fracturing and Its Application. *Sustainability*, **14**, Article No. 10438. <https://doi.org/10.3390/su141610438>
- [8] 周德华, 杨勇, 王运海, 等. 超临界二氧化碳混合压裂技术机理及应用——以渤海湾盆地济阳拗陷页岩油为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(2): 575-585.
- [9] 代旭光. 页岩 CO₂ 地质封存空间演化及分子动力学作用机理[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- [10] 赵金洲, 杨竣瀚, 魏兵, 等. 致密/页岩油气储层 CO₂ 利用与封存研究进展及矿场实践[J]. 石油学报, 2026, 47(1): 134-154.
- [11] 张瑞嘉, 李波波, 吕心妍, 等. 黔北牛蹄塘组页岩 CO₂ 与甲烷吸附特性研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2025, 42(2): 116-124.
- [12] Lin, B. and Li, Z. (2020) Analysis of the Natural Gas Demand and Subsidy in China: A Multi-Sectoral Perspective. *Energy*, **202**, Article ID: 117786.
- [13] 吴长亮, 朱洪建, 路艳军, 等. CO₂ 与页岩气储层相互作用研究进展及其地质封存意义[J]. 世界石油工业, 2026, 33(3): 1-10.
- [14] 赵玉龙, 黄义书, 张涛, 等. 页岩气藏超临界 CO₂ 压裂-提采-封存研究进展[J]. 天然气工业, 2023, 43(11): 109-119.
- [15] Yu, C., Deng, H., Jiang, Q., Fan, Z., Zhou, X., Huang, S., et al. (2024) Mechanism of Pore Expansion and Fracturing Effect of High-Temperature ScCO₂ on Shale. *Fuel*, **363**, Article ID: 130950. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.130950>
- [16] 敖翔, 赖粮丰, 陆朝晖, 等. 深层页岩超临界 CO₂ 前置压裂裂缝扩展机制[J]. 煤炭学报, 2025, 50(9): 4235-4246.
- [17] 杨先超. 海相页岩在超临界 CO₂ 作用下储层物性及裂缝扩展机理研究[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2025.
- [18] 蔡灿, 冯彪, 陈浩, 等. 超临界 CO₂ 复合压裂页岩裂缝扩展及增渗机理[J]. 天然气工业, 2025, 45(9): 104-113.
- [19] 张义祥, 林冲, 赫建明, 等. 页岩的超临界二氧化碳压裂机理及其优势分析[J]. 工程地质学报, 2024, 32(4): 1301-1308.
- [20] 陆朝晖, 闫卓林, 王俐佳, 等. 超临界 CO₂ 脉冲致裂页岩裂缝起裂及扩展影响规律[J]. 天然气工业, 2025, 45(9): 79-91.