

超临界 CO₂ 作用下深部煤裂缝扩展与增透提产一体化研究进展

周三栋^{1,2,3}, 张伟鑫^{1,2,3}, 成巧耘^{1,2,3}, 刘大锰⁴, 严德天¹

1. 中国地质大学（武汉）资源学院，湖北武汉 430074
2. 中国地质大学（武汉）构造与油气资源教育部重点实验室，湖北武汉 430074
3. 油气勘探开发理论与技术湖北省重点实验室（中国地质大学（武汉）），湖北武汉 430074
4. 中国地质大学（北京）能源学院，北京 100083

摘要：深部煤储层超临界 CO₂ (Sc-CO₂) 压裂具增渗与碳封存双重效用。研究综合实验分析、理论模型和数值模拟认识，探究 Sc-CO₂ 压裂深部煤裂缝起裂—扩展力学响应机制，剖析增产机理并提出裂缝扩展与增透提产一体化研究方向。研究表明：深部煤 Sc-CO₂ 压裂裂缝起裂—扩展受煤储层特征和 CO₂ 注入参数共同影响，其力学响应由表面能降低、塑化、膨胀和矿物溶解等机制约束。热流固耦合—能质传递分阶段模型可表征各阶段（Sc-CO₂ 压裂—相变致裂—改性阶段）裂缝扩展和增产效果，Sc-CO₂ 通过甲烷置换、力学弱化和渗透率提升实现增产。未来需重点攻关 Sc-CO₂ 压裂深部煤裂缝差异化扩展规律、裂缝动态非均质性扩展机制及压裂—增产一体化评价。研究为深部煤 Sc-CO₂ 压裂设计及煤层气增产改造提供技术支撑。

关键词：深部煤储层；煤层气；CO₂ 压裂；裂缝；增产

中图分类号：P618.11

收稿日期：2025-12-18

Research progress on the integration of fracture propagation and enhanced coalbed methane recovery in deep coal under supercritical CO₂

Zhou Sandong^{1,2,3}, Zhang Weixin^{1,2,3}, Cheng Qiaoyun^{1,2,3}, Liu Dameng⁴, Yan Detian¹

1. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources (China University of Geosciences), Ministry of Education, Wuhan 430074, China
3. Hubei Key Laboratory of Oil and Gas Exploration and Development Theory and Technology (China University of Geosciences), Wuhan 430074, China
4. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract: Supercritical CO₂ (Sc-CO₂) fracturing in deep coal reservoirs offers dual benefits of enhanced permeability and carbon sequestration. This study integrates experimental analysis, theoretical modeling, and numerical simulation to investigate the mechanical response mechanisms of fracture initiation and propagation in deep coal reservoirs during Sc-CO₂ fracturing, elucidate the mechanisms of production enhancement, and propose integrated research directions of fracture propagation and increased permeability and production. The results show that the fracture initiation and propagation of Sc-CO₂ fracturing in deep coal reservoirs are jointly influenced by reservoir characteristics and CO₂ injection parameters, with the mechanical response constrained by mechanisms including surface energy reduction, plasticization, expansion, and mineral dissolution. A staged model of thermo-hydro-mechanical coupling-energy and mass transfer can characterize the fracture propagation and production enhancement effects across stages (Sc-CO₂ fracturing, phase-change fracturing, and modification). Sc-CO₂ achieves production enhancement

基金项目：国家自然科学基金项目（42102219）；中国石油科技创新基金项目（2024DQ02-0110）

作者简介：周三栋（1991-），男，教授，博士，主要从事非常规油气储层地质学研究，ORCID: 0000-0002-9887-830X, E-mail: zhousandong@cug.edu.cn

through methane displacement, mechanical weakening, and permeability increase. Future research should focus on the differential fracture propagation laws, the dynamic heterogeneous fracture propagation mechanisms, and the integrated evaluation for fracturing and production enhancement during Sc-CO₂ fracturing in deep coal reservoirs. This research provides technical support for the Sc-CO₂ fracturing design in deep coal reservoirs and coalbed methane production enhancement projects.

Keywords: deep coal reservoirs; coalbed methane; CO₂ fracturing; crack; enhanced coalbed methane recovery

0 引言

近年来,我国能源供给面临严峻挑战,煤层气已成为实现增储上产、维护能源安全、推动低碳转型的重要非常规天然气能源之一(苏现波等, 2023; 鲜保安等, 2023)。全国煤层气地质资源总量约 $80 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 其中陆地 2000 m 以浅的 $30.05 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、2000 m 以深的 $40.47 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 以及近海海域的 $7 \times 10^{12} \sim 11.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (徐凤银等, 2023)。沁水盆地、鄂尔多斯盆地东缘等地区实现了煤层气商业开发,随着浅部可供规模效益开发的区块越来越少,深部(>2000 m)煤层气正成为我国下一阶段煤层气勘探开发的关键接替领域(黄中伟等, 2022; 李熹微等, 2025)。鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气探明储量达 $762 \times 10^8 \text{ m}^3$, 截止 2024 年 12 月,大吉气田深部煤层气累计产量突破 30 亿方。深部(层)煤层气勘探的成功实践极大坚定了深部煤层气规模效益开发的信心(刘翰林等, 2026; 王香增等, 2026)。

深部煤储层“高地应力、特低渗透”导致煤层气“见气快、产能转化率低、资源动用率低”,在深部煤层气开发时,储层改造是突破特低渗透瓶颈、提高产能的关键环节(桑树勋等, 2022)。常规水力压裂技术在深部煤储层改造时面临诸多难题:一是深部高地应力环境导致裂缝起裂压力升高(秦勇, 2023);二是深部储层闭合应力大,压裂后裂缝易闭合,支撑剂易嵌入煤岩,导致储层改造效果不佳;三是水力压裂会产生大量污水,易造成储层伤害和环境污染,与低碳环保开发理念相悖(梁卫国等, 2026)。此外,深部煤在垂向结构上存在“煤系组合—煤岩类型”多层次纵向非均质性(李倩等, 2023)。不同煤系组合的顶底板强度、不同宏观煤岩类型的组分和结构差异,不仅会影响储层物性和含气性,还会影响储层可改造性,导致压裂裂缝扩展规律复杂、改造效果难以控制(李勇等, 2024)。由此,如何对具有多层次纵向非均质性的深部煤储层

开展有效压裂(储层改造)是深部煤层气规模上产的关键。

液态 CO₂ (L-CO₂) 注入深部煤储层后,在高温、高压环境下逐渐膨胀并相变为超临界 CO₂ (Sc-CO₂) (刘佳佳等, 2024; 王梓麟等, 2024)。作为新型环保的无水压裂技术,CO₂ 压裂一相变致裂技术相对于常规水力压裂技术,具有显著优势:一是能够减小煤岩的起裂压力(王磊和梁卫国, 2019; Xu et al., 2022);二是 CO₂ 相变过程中会释放大能量,可激活煤岩中的原生裂缝、诱发新生裂缝,显著提升储层渗透率和裂缝网络复杂程度(文虎等, 2016; 闫浩等, 2023);三是压裂后 CO₂ 可实现地质封存,既减少了温室气体排放,又提高了煤层气采收率,能够助力我国“双碳”目标顺利实现(孙小辉等, 2015; 袁亮, 2023)。厘清不同煤系组合、不同宏观煤岩类型深部煤在 Sc-CO₂ 相变致裂过程中的裂缝起裂—扩展规律、致裂机理以及 Sc-CO₂ 相变致裂增产效果是提高煤层气采收率的关键。

笔者从深部煤储层 CO₂ 压裂一相变致裂技术出发,剖析了深部煤裂缝起裂—扩展影响因素及力学响应机制,系统梳理了深部煤 Sc-CO₂ 压裂裂缝扩展数值模拟的研究内容与方法,揭示了深部煤 Sc-CO₂ 压裂的增产作用及机理,指出了深部煤 Sc-CO₂ 压裂的研究重点及未来发展趋势,以期丰富深部煤压裂和碳地质封存技术的基础理论并解决特低渗透煤煤层气开采困难的问题。

1 深部煤储层 CO₂ 压裂一相变致裂技术

为降低 CO₂ 压缩及运输成本,通常向煤储层注入 L-CO₂ (苏现波等, 2023)。近年来, L-CO₂ 相变爆破致裂技术得到了发展(曹运兴等, 2023; 陈鹏等, 2021)。国内学者提出 L-CO₂ 相变爆破致裂技术是一种对于松软、低透气性煤层瓦斯高

效抽采的关键技术（陈鹏等，2021；王双明等，2024）。许多学者已经在我国低渗矿区（埋深<1000 m）进行了 L-CO₂ 相变爆破致裂的现场应用研究，并表明能有效提高瓦斯抽采效率。L-CO₂ 相变爆破致裂的核心机理在于：L-CO₂ 受热发生相变，由液态瞬间转变为气态（图 1a），在有限空间和极短时间内体积急剧膨胀，形成高速射流，对煤岩产生“爆轰”冲击，使煤岩诱发裂纹，有效降低储层压力，实现预裂效果。但也有研究表明 L-CO₂ 相变爆破后，孔壁严重破碎垮塌，降低了煤储层渗透率，且施工过程也存在诱发次生灾害的潜在风险（文虎等，2016）。以上研究大多基于煤层卸压和高效瓦斯抽采防治，所考虑的储层深度较低，原位温度、压力范围较小。

鄂尔多斯盆地东缘大宁—吉县区块和纳林

河区块，煤层埋藏深度主要集中在 2000~3500 m，储层压力集中在 17.2~34.3 MPa，储层温度 66~120 °C。原位温压条件均在 CO₂ 超临界点（T=31.04 °C，P=7.38 MPa）以上。理论上，L-CO₂ 相变为高压 Sc-CO₂，诱导天然裂缝弱面起裂，此阶段为 Sc-CO₂ 压裂阶段；起裂瞬间，裂缝内压力骤降，Sc-CO₂ 将瞬间相变为气态，相变释放的能量使裂缝进一步扩展，同时，Sc-CO₂ 的高扩散性将导致裂缝出现剪切滑移行为，影响裂缝的扩展效果，此阶段为 Sc-CO₂ 相变致裂阶段；当 CO₂ 的注入与流体渗流、裂缝扩展三者处于稳定平衡状态时，裂缝的扩展将继续受到 Sc-CO₂ 与煤的相互作用的影响，此阶段为 Sc-CO₂ 改性阶段。

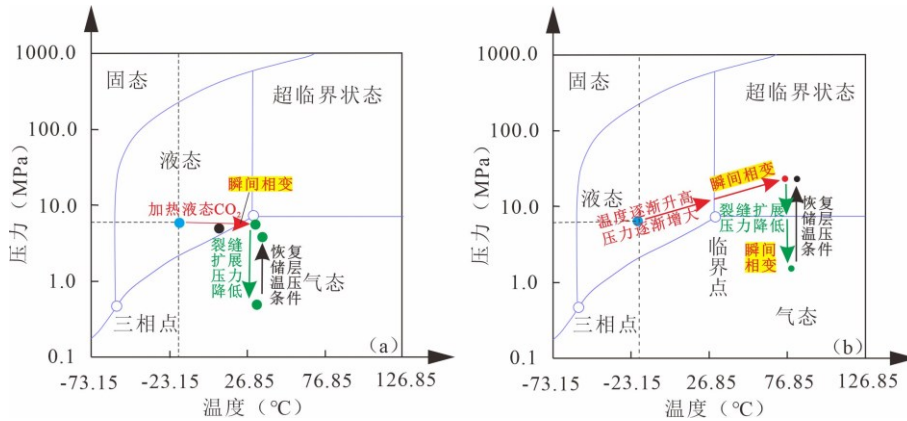


图 1 (a) 浅部煤储层与 (b) 深部煤储层注液态 CO₂ 后的相态转变

Fig. 1 The phase transition of (a) shallow coal reservoirs and (b) deep coal reservoirs after injecting liquid CO₂

深部煤储层具高地应力、高温高压、低含水率和低渗透率特征，原位温压条件均在 CO₂ 超临界点（T=31.04 °C，P=7.38 MPa）以上，压裂过程将经历超临界态—气态的复杂相变过程（图 1b）（姚素平等，2012；周宏伟等，2021）。对比浅部煤层，将 CO₂ 相变致裂技术应用于深部煤储层的优势在于：①注入的 L-CO₂ 无需进行井下加热就能达到相变条件以发挥致裂作用（陈鹏等，2021）；②注入后裂缝扩展瞬间导致压力骤降，不平衡的状态下储层中的 CO₂ 会反复发生相变，有利于裂缝扩展；③达到平衡后深部储层中的 CO₂ 稳定为超临界态，Sc-CO₂ 对煤储层的改造作用优于浅部储层稳定条件下的气态 CO₂。将 CO₂ 相变致裂技术应用于深部煤层气开采具有巨大潜力，但在工程应用上暂未解决如何使注入深部煤层的 L-CO₂ 逐渐相变后能在目的层形成流体压力大于裂缝起裂压力的高压 Sc-CO₂ 流体。

Sc-CO₂ 压裂及相变致裂过程中不同煤系组合、宏观煤岩类型煤的破裂机理，以及改性增产过程中 Sc-CO₂ 与煤岩的相互作用仍需进一步探明，为评价深部煤 Sc-CO₂ 压裂改造效果提供参考方案。

2 深部煤裂缝起裂—扩展力学响应机制研究

2.1 深部煤裂缝起裂—扩展影响因素

2.1.1 煤储层特征

煤储层特征是决定深部煤压裂裂缝起裂—扩展与煤层气高效开采的基础条件，通过“储层地应力与地层温度→煤系组合与宏观煤岩类型→Sc-CO₂ 与煤岩相互作用的改造效应”三个层级相互关联、协同作用，共同影响裂缝的起裂压

力、扩展方向及裂缝网络复杂程度。

深部煤层气储层状态由地应力和地层温度共同控制（秦勇, 2023）。随埋深增加，储层围压显著升高，形成三轴应力状态，使得深部煤岩变形破坏模式由脆性向延性过渡；力学行为由弹性转为塑性；弹性模量随深度增加先快速增加，后趋于平缓；泊松比与埋深呈负相关关系（敬鹏飞等, 2023）。深部高地应力环境显著影响裂缝起裂压力，水平应力差决定裂缝扩展的主导方向。Sc-CO₂ 弱化了地应力对深部煤岩裂缝起裂—扩展的影响，储层次级裂缝发育，裂缝网络复杂度提升，改造体积相比于水力压裂高 2 倍以上。地温直接影响 CO₂ 相态转变，进而改变致裂压力与能量释放效率（王香增等, 2026）。温度升高，Sc-CO₂ 黏度逐渐降低，煤岩起裂压力减小，Sc-CO₂ 压裂压力升高到峰值的耗时增加。

不同煤系组合、宏观煤岩类型煤储层天然裂缝发育特征和力学性质变化较大，由此引起的煤储层非均质性使压裂行为难以控制和预测（图 2）（李倩等, 2023）。从煤砂、煤灰到煤泥，煤储层天然裂缝变得发育。从光亮煤到暗淡煤，煤储层压裂形成的主裂缝长度变短而高度增加（姚艳斌等, 2021）。不同煤系组合中煤岩强度比和煤层厚度，影响裂缝的纵向扩展与稳定性。煤砂和煤灰的高强度顶底板可使得 Sc-CO₂ 压裂产生的裂缝止于煤岩界面。煤泥对裂缝纵向扩展的抑制能力弱。煤层厚度增加时，裂缝更易止于煤岩界面，破坏形式由拉伸劈裂破坏变为共轭剪切破坏，主裂缝剪切角降低（张小强等, 2023）。不同宏观煤岩类型因其组分和结构的不同，表现出截然不同的压裂响应。光亮煤和半亮煤镜质组含量高、脆性强，天然裂缝通常较为发育，在压裂过程中起裂压力较低，裂缝易于沿原生弱面延伸，从而倾向于形成较长但高度受限的主裂缝。半暗煤和暗淡煤天然裂缝不发育，压裂时需要更高的起裂压力，压裂裂缝纵向扩展的阻力相对较低，更容易穿透力学弱面，形成较短但高度较大的裂缝，甚至可能沟通顶底板（李倩等, 2023）。目前有关宏观煤岩类型的压裂研究未同时考虑煤系组合顶底板与煤层之间的地应力差异。

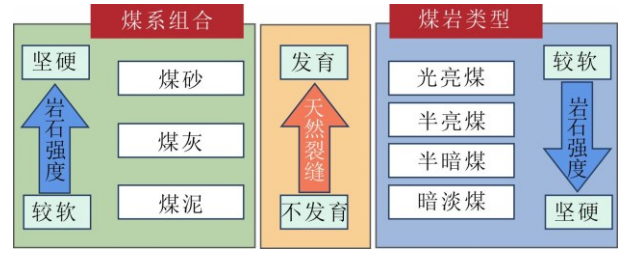


图 2 深部煤储层天然裂缝、岩石强度和不同煤系组合、宏观煤岩类型的关系（改自李倩等, 2023）

Fig. 2 The relationship between natural fractures, rock strength and different coal-bearing combinations, coal macro-lithotype in deep coal reservoirs (modified from Li et al., 2023)

Sc-CO₂ 与煤岩相互作用的改造效应进一步改变煤储层的力学性质和孔裂缝结构，进而影响裂缝起裂与扩展。一方面，Sc-CO₂ 使煤岩黏聚力和内部胶结性能降低，煤岩更易发生塑性破坏，且 CO₂ 注入对煤岩力学性质产生弱化，表现为峰值强度、弹性模量的减小和泊松比的增大（桑树勋等, 2023）。另一方面，Sc-CO₂ 对煤岩的吸附作用会引发煤岩膨胀与收缩变形，使原生微裂缝张开、扩展并产生新裂缝，而 Sc-CO₂ 与煤岩中地层水形成的弱酸性环境引起碳酸盐矿物的溶解，会减少胶结物、增强孔裂缝连通性，进一步优化孔裂缝网络，为裂缝起裂与多方向扩展提供更有利的条件（迟焕鹏等, 2025；刘佳佳等, 2024）。

深部煤本身的强塑性变形及其垂向非均质性（不同煤系组合、宏观煤岩类型）使得煤储层力学性质变化更明显，Sc-CO₂ 对煤岩的压裂改造效应进一步加剧了力学特性降级。Sc-CO₂ 压裂前后深部煤岩宏观细观力学参数的动态演化规律仍需进一步阐明，以期支撑深部煤层气有效开发。

2.1.2 CO₂ 注入参数

目前采用单一相态的 CO₂ 压裂煤储层的研究成果较多，有部分针对 Sc-CO₂ 相变压裂煤储层的研究多以瓦斯高效抽采为目的。Sc-CO₂ 可渗入到煤岩微纳米孔隙/裂缝中产生较均匀孔隙压力场进而影响裂缝的扩展，其具有降低破裂压力和产生曲折破裂裂缝的特点。注入 Sc-CO₂ 压裂裂缝的扩展规律也已经获得普遍认识（Cao et al., 2017；梁卫国等, 2022；丛日超等, 2023）。CO₂ 压裂增压缓慢，但煤岩弹性模量降低导致起

裂压力相比水力压裂低 35%以上, 起裂更快, 并且能够产生更多的起裂位置, 形成的裂缝网络也更复杂(图 3)(梁卫国等, 2022)。CO₂注入过程中, CO₂注入压力、CO₂相态、围压和时间作为关键工程参数, 控制着深部煤储层 CO₂压裂裂缝扩展特征与煤岩力学响应(Sampath et al., 2019a; 桑树勋等, 2022; 王香增等, 2026)(图 4)。



图 3 (a) 水力、(b) 液态 CO₂、(c) 超临界 CO₂ 压裂后煤岩表面裂缝形态(改自梁卫国等, 2022)
Fig. 3 Fracture morphology of coal surface after (a) Hydraulic, (b) liquid CO₂, and (c) supercritical CO₂ fracturing (modified from Liang et al., 2022)

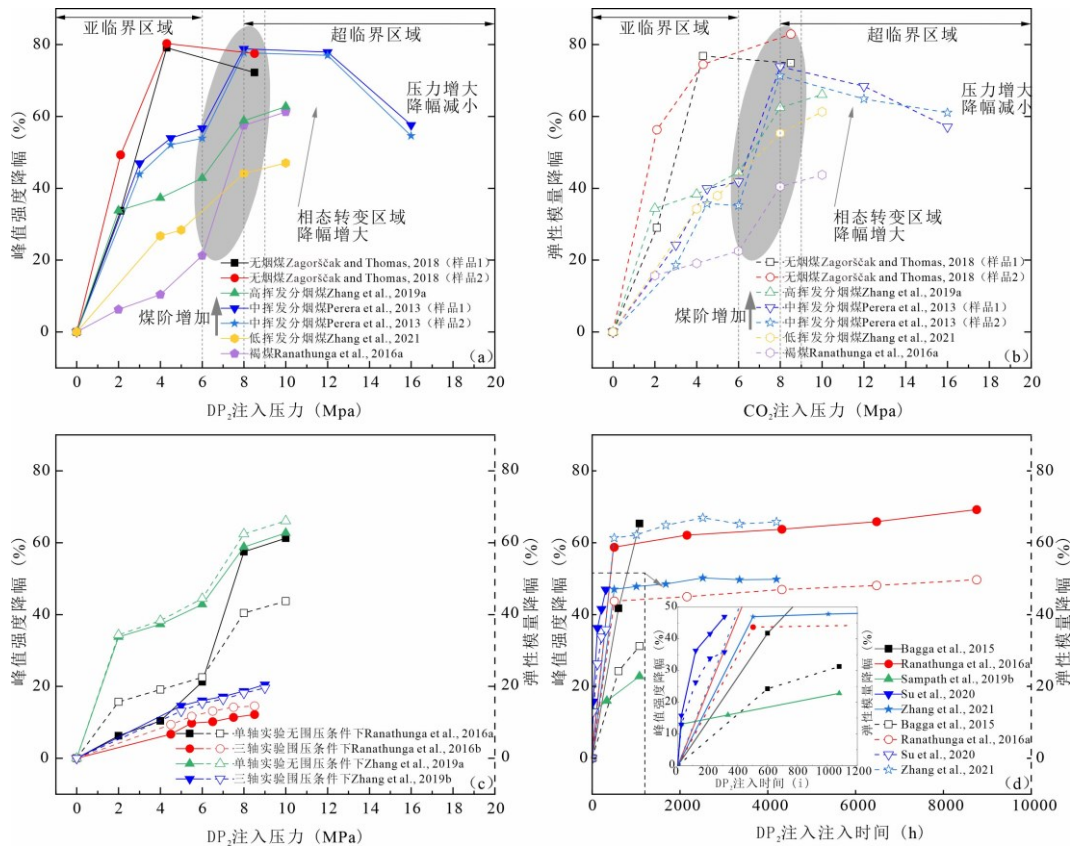


图 4 CO₂注入过程中不同因素对煤岩力学性能的影响 (a) CO₂注入压力对煤岩强度的影响, (b) CO₂注入压力对煤岩弹性模量的影响, (c) CO₂注入过程中有无围压条件对煤岩强度和弹性模量的影响, (d) CO₂注入时间对煤岩强度和弹性模量的影响(数据来自 Perera et al., 2013; Bagga et al., 2015; Ranathunga et al., 2016a; Ranathunga et al., 2016b; Zagorščak and Thomas, 2018; Zhang et al., 2019a; Zhang et al., 2019b; Sampath et al., 2019b; Su et al., 2020; Zhang et al., 2021)

Fig. 4 The influence of different factors on the mechanical properties of coal during CO₂ injection. (a) The influence of CO₂ injection pressure on the strength of coal. (b) The influence of CO₂ injection pressure on the elastic modulus of coal. (c) The influence of confining pressure on the strength and elastic modulus of coal during CO₂ injection. (d) The influence of CO₂ saturation time on the strength and elastic modulus of coal (data from Perera et al., 2013; Bagga et al., 2015; Ranathunga et al., 2016a; Ranathunga et al., 2016b; Zagorščak and Thomas, 2018; Zhang et al., 2019a; Zhang et al., 2019b; Sampath et al., 2019b; Su et al., 2020; Zhang et al., 2021)

深部煤储层的高温高压环境使得 CO₂注入后会发生显著的相态转变(Zhang et al., 2019a)。

注入压力是调控相态转变的核心驱动力, 二者共同决定煤岩力学性质与造缝能力的阶段性变化。

在亚临界 CO₂ 阶段,煤岩强度和弹性模量随压力升高逐渐衰减,起裂压力随之降低。在亚临界和超临界相态转变过渡阶段,煤岩力学参数降幅显著,起裂压力出现大幅下降(Zagorščak and Thomas, 2018; Zhang et al., 2019b)。高于 10 MPa 注入压力下, Sc-CO₂ 致使煤岩强度和杨氏模量有所回升(Perera et al., 2013)。

不同围压条件影响了 CO₂ 作用下深部煤裂缝起裂与扩展的效果(Zhang et al., 2019a)。高应力条件增强了煤岩整体强度,围压抑制了 CO₂ 注入对煤岩力学性能的削弱(Ranathunga et al., 2016a; Ranathunga et al., 2016b)。CO₂ 与煤岩的相互作用具有显著的时间效应,决定了裂缝系统的长期演化与储层稳定性(Sampath et al., 2019b; Zhang et al., 2021)。CO₂ 在煤基质上的快速吸附导致相互作用早期力学性能弱化更为显著,之后随着时间的增加,力学性能存在逐渐的减弱,进一步促进了裂缝稳定扩展,为长期储层改造提供了支撑(Bagga et al., 2015; Su et al., 2020)。

2.2 深部煤裂缝扩展力学响应机制

基于煤储层典型的多级双重孔隙介质特征,对 CO₂ 压裂深部煤力学变化及裂缝扩展力学响应机制进行综合讨论。深部煤储层通常含地下水,且在原位温压下煤、Sc-CO₂ 与水之间复杂的物理、化学和热力学耦合作用会引起明显的煤岩力学特性变化。许多研究均表明 CO₂-基质相互作用导致煤岩中严重的力学特性降级,进而驱动裂缝的起裂与扩展,煤岩力学强度削减主要受以下参数的协同调控。①地应力状态:原位应力升高降低了 CO₂ 诱发的煤岩力学强度削减,这是由于 CO₂ 吸附势的降低和膨胀效应的受阻。围压的约束作用会抵消部分煤岩膨胀产生的应力,避免裂缝因膨胀而扩展(桑树勋等, 2022)。低地应力环境中, CO₂ 作用下煤岩膨胀效应显著,其力学特性劣化明显,裂缝更易扩展。②煤岩特征:具有良好裂缝系统的煤岩表现出更大程度的强度削减。由于裂缝系统中更容易入侵 CO₂, 并作为 CO₂ 吸附的场所,强度削减沿着裂缝壁传递到基质(苏现波等, 2023)。③CO₂ 吸附压力和相态:煤岩强度削减幅度随着 CO₂ 吸附压力的增加而增加, CO₂ 相变到超临界状态,会导致力学强度显著削减,这是因为 Sc-CO₂ 的吸附和对煤岩结构的弱化能力都比非超临界 CO₂ 更高(梁卫国

等, 2026)。当吸附压力升高时, Sc-CO₂ 在煤岩中的吸附量增加,与分子聚合物的反应加剧,煤岩力学特性进一步劣化。④CO₂-基质相互作用时间:CO₂ 与煤基质的相互作用具有显著的时间依赖性。由于快速的 CO₂ 吸附过程,短期内煤岩会发生明显的力学特性降级,而额外的 CO₂ 注入会持续降低煤岩的强度,但速度较慢(刘佳佳等, 2023)。

超临界 CO₂ 作用下多种内在力学响应机制协同作用,共同驱动深部煤裂缝扩展。①表面能降低机制:CO₂ 吸附诱发的表面能降低,使得煤岩更容易发生破裂(梁卫国等, 2022)。CO₂ 吸附会使裂缝尖端的表面能进一步降低,当表面能降低至临界值时,裂缝会张开、扩展,进而形成复杂缝网。②塑化作用机制:CO₂ 诱发的煤岩聚合物结构的塑化,使得煤岩更加疏松、煤岩强度降低。CO₂ 分子打破了煤岩聚合物分子链之间的氢键、范德华力等作用力,使得煤岩发生塑性变形、脆性降低,避免了裂缝扩展过程中突然发生断裂,有利于形成连续、完整的裂缝网络。③膨胀效应机制:由于煤基质自由膨胀、差异膨胀和收缩膨胀而形成微裂缝(迟焕鹏等, 2025)。因吸附 CO₂ 而发生的自由膨胀使得煤岩内部产生拉应力,当拉应力超过煤岩的抗拉强度时,会产生新的裂缝。由于煤岩内部不同组会对 CO₂ 吸附能力不同,膨胀程度存在差异,进而在组分界面处产生裂缝。循环膨胀和收缩使得煤岩内部产生反复的应力交替,加剧裂缝的疲劳损伤,促使裂缝扩展变宽。④矿物溶解机制:CO₂-水相互作用生成的碳酸引起充填于孔隙及裂缝中碳酸盐矿物的溶解,导致结合能降低,影响颗粒间的接触,煤岩次生孔裂缝系统形成(刘佳佳等, 2024)(图 5)。矿物溶解引起相应的内聚力降低而导致储层宏观强度和弹性模量降低,溶解产生的溶蚀通道成为 CO₂ 吸附新路径,促使裂缝的多分叉扩展(刘勇等, 2024)。

超临界 CO₂ 压裂深部煤裂缝扩展的力学响应是煤岩力学特性劣化与多机制驱动共同作用的结果。CO₂-煤基质相互作用引发的煤岩力学特性削减,为裂缝扩展提供了前提条件,而表面能降低、塑化作用、膨胀效应和矿物溶解机制协同作用,驱动裂缝扩展,提升了裂缝网络的复杂程度。

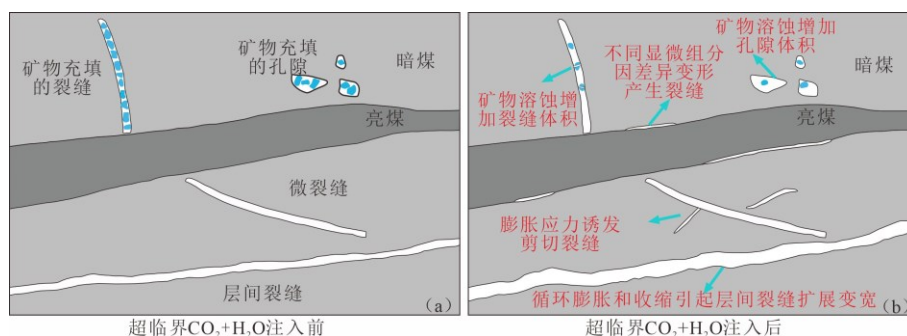


图 5 超临界 CO₂+水作用下深部煤岩内部裂缝结构响应模式 (改自桑树勋等, 2022)

Fig. 5 Response mode of internal fracture structure in deep coal under the action of supercritical CO₂+water (modified from Sang et al., 2022)

3 Sc-CO₂ 压裂裂缝扩展与增产一体化研究

3.1 深部煤 Sc-CO₂ 压裂裂缝扩展数值模拟

Sc-CO₂ 压裂对煤层气工程具备着压裂增透和置换吸附的双重效益 (张遂安等, 2021)。在深部煤层压裂过程中的滤失效应、热量传递、置换吸附等方面, 所构建的理论模型有: ①基于 Sc-CO₂ 造壁性弱、滤失性强的特征, 实现了滤失过程中岩石温度场理论模型的构建 (闫浩等, 2023)。②基于 Sc-CO₂ 在煤层中的 CH₄ 置换吸附特性: 建立包含煤岩变形、气体吸附与渗流的多重介质热流固耦合模型 (Fang et al., 2024); 另有 Sc-CO₂ 与煤岩流固耦合作用下的孔隙结构演化与吸附性能变化的数学模型 (Sampath et al., 2019c)。③基于煤层 Sc-CO₂ 起裂压力建立了裂缝扩展模型 (文虎等, 2016)。

围绕煤岩压裂裂缝扩展及增产, 国内外学者开展了较为丰富的理论研究 (王士国等, 2022)。在已有压裂裂缝扩展理论基础上, 众多研究基于有限元等连续介质方法与离散元等非连续介质方法 (唐书恒等, 2011), 并结合 Petrel 软件 Stimulation 模块、Fortran 语言、Comsol 多场耦合、双线性 T-S (traction-separation) 内聚力模型、Abaqus 软件 Cohesive 单元等多种技术, 对裂缝扩展过程进行了系统的模拟分析 (Wang et al., 2017; 张东明等, 2018)。关于 CO₂ 压裂的数值模拟研究多采用计算流体力学方法 (孙小辉等, 2015), 主要关注流体流动, 涉及到裂缝扩展方面, 裂缝常作为模型的固定边界条件。已开展的相关数值模拟主要关于: ①非常规油气储层改造

中 Sc-CO₂ 压裂与其它压裂效果的对比。②基于计算流体力学方法, 模拟了 Sc-CO₂ 压裂过程中的流体流动 (魏建平等, 2024), 分析 Sc-CO₂ 在不同类型裂缝中的运输过程 (Wang et al., 2018), 并探讨了支撑剂的密度、流量、粒径等参数对裂缝宽度与支撑剂流动行为的影响 (Behnoudfar et al., 2019)。③明确 CO₂ 注入储层采收过程中 CH₄ 和 CO₂ 的浓度变化 (Sun et al., 2013)。④关注不同影响因素下 Sc-CO₂ 压裂裂缝起裂、扩展的影响因素及其动态渗流模型 (Yan et al., 2021; Yang et al., 2026)。

深部煤层的地质条件更加复杂, 当注入 L-CO₂ 后, 在深部温度与压力的影响下, CO₂ 逐渐转变为超临界态, 随着裂缝的扩展与煤层气的产出, 储层压力得到释放, 长期产气不同阶段裂缝扩展演化往往伴随着煤岩的蠕变—损伤。CO₂ 相变致裂阶段作用时间极短, 实验监测主要关注压裂—相变致裂阶段的耦合效应, 难以定量剖析每个阶段在整个过程中的独立贡献, 数值模拟可直观、可量化任意时间点裂缝起裂—扩展特征。Sc-CO₂ 压裂实质上是煤岩、裂缝网络、超临界流体及气体等多介质相互作用、分阶段演化的复杂过程, Sc-CO₂ 相变压裂整个压裂过程可分为 Sc-CO₂ 压裂和 Sc-CO₂ 相变致裂 (超临界态—气态) 两个阶段来分析。采用“热流固耦合—能质传递”分阶段数值模拟, 可研究地应力、注入压力等关键参数及煤系组合中煤岩强度比、煤厚对抗压强度、弹性模量和破裂特征的影响规律, 进一步定量评价 CO₂ 相变致裂和 Sc-CO₂ 改性阶段的增产效果 (图 6)。

压裂过程中存在裂缝扩展、CO₂ 与煤岩多矿物的差异性反应、CO₂ 与 CH₄ 间的相互作用及流

动,关于这一系列多物理化学过程耦合机制的研究仍存在局限(张烈辉等, 2024)。因此,近原位条件对 Sc-CO₂ 相变压裂裂缝的起裂条件、扩展规律、裂缝扩展控制方法以及压裂增产一体化研究仍需通过理论建模与数值模拟相结合的方法开展深入探索。

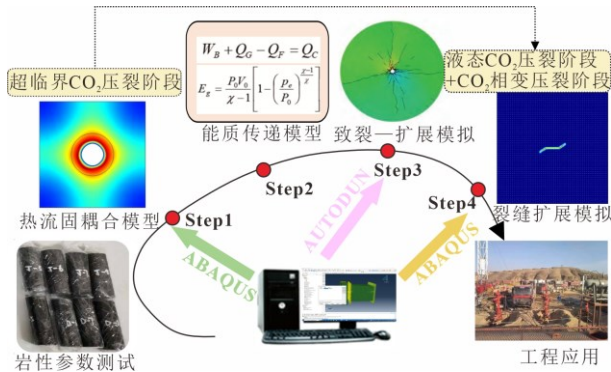


图 6 深部煤储层“热流固耦合—能质传递”分阶段压裂数值模拟流程图(改编自闫浩, 2022)

Fig. 6 Numerical simulation flow chart of “thermo-hydro-mechanical coupling-energy and mass transfer” staged fracturing in deep coal reservoirs (modified from Yan, 2022)

3.2 深部煤 Sc-CO₂ 压裂的增产作用及机理

深部煤 Sc-CO₂ 压裂具有显著的增产作用,其增产机理主要涉及甲烷置换强化、力学性能弱化和渗透率增加(王梓麟等, 2024)。Sc-CO₂ 在高压下渗透至煤基质微孔隙,通过竞争吸附置换 CH₄,同时软化煤岩、降低破裂压力,形成高效导流通道。

向深部储层注入 CO₂ 时,CO₂ 以超临界状态存在(Sc-CO₂, T>31.06 °C, P>7.39 MPa)。Sc-CO₂ 具有独特的属性:①Sc-CO₂ 为无损压裂液,拥有气体和液体两种相态,具有独特的溶解增透特性,Sc-CO₂ 在置换过程中对储层中游离态和吸附态的低分子化合物有一定程度的萃取作用;同时 Sc-CO₂ 可以溶解岩石中的矿物,提高了煤储层的孔隙体积和连通性。②Sc-CO₂ 具有其类气相黏性和高压缩性,很容易渗透到岩层中的极小裂缝中,引诱出更细、更多的三维扩展裂缝,同时保持较低的临界破裂压力。③Sc-CO₂ 的类液态密度可以对岩石施加较大压力,使其很容易超过最小主应力和岩石拉伸强度,容易导致裂缝开裂与传播(王磊和梁卫国, 2019)。

相较于水力压裂,液态 CO₂ 相变致裂和高扩

散性 Sc-CO₂ 压裂可形成复杂裂缝网络,有效改造储层,亦可减少水资源消耗,避免煤储层水锁伤害。驱替 CH₄ 后的 Sc-CO₂ 可长期封存于煤层孔隙裂缝中,实现碳减排,符合“双碳”目标下的低碳化开发理念。

4 研究重点及未来发展趋势

Sc-CO₂ 压裂一相变致裂技术作为一种新型无水压裂方法,以其超强的流动、传输、渗透等独特优势,正逐渐成为一种绿色、环保、高效的煤层压裂新途径。但是,前期物理实验及压裂模拟较少在深部煤层近原位储层条件(高温压、高含气量等)开展,深部煤层多层次纵向非均质性(不同煤系组合、宏观煤岩类型)对 Sc-CO₂ 压裂过程中裂缝差异性扩展规律和动态演化尚不明确,Sc-CO₂ 相变致裂—增产一体化作用也需进一步模拟阐明。基于超临界 CO₂ 作用下深部煤裂缝扩展与增透提产一体化研究基础,系统梳理了 3 个亟需攻关的研究重点和未来发展趋势(图 7)。研究有望为我国深部煤 Sc-CO₂ 压裂方案制定和深部煤层气增产改造一体化提供有效技术支持。

4.1 Sc-CO₂ 压裂深部煤裂缝的差异化扩展规律分析

4.1.1 Sc-CO₂ 压裂及相变致裂裂缝扩展演化规律分析

针对不同煤系组合、不同宏观煤岩类型深部煤样开展真三轴实时 CT 加载 Sc-CO₂ 压裂及相变致裂实验。通过控制温度、压力条件,使 CO₂ 实现相态转化。融合多分辨扫描图像及数字岩心技术方法得到 4 维(3 维+时间)数据体,对比分析卷积神经网络、生成对抗网络等方法对 3 维裂缝模型的适用性。分析 CO₂ 的相态转化过程中的能量及压力演化规律,揭示不同煤系组合、不同宏观煤岩类型深部煤在 Sc-CO₂ 压裂阶段和相变致裂阶段裂缝的起裂压力、致裂半径、多尺度裂缝差异演化规律。

4.1.2 裂缝扩展过程中的剪切滑移规律研究

压裂过程中流体的注入导致的地震性非稳定滑移、抗震性蠕变滑移也是不可忽视的,这种滑移能改变裂缝面的稳定性。对比 Sc-CO₂ 压裂

和 Sc-CO₂ 相变致裂前后的裂缝分布及力学特性，根据 4 维数据体及声发射数据分别量化 Sc-CO₂ 压裂及 Sc-CO₂ 相变导致的裂缝面剪切滑

移量，分析裂缝滑移量对多尺度裂缝扩展的影响。探明 Sc-CO₂ 压裂和相变致裂过程中压裂裂缝—天然裂缝间的剪切破坏规律。

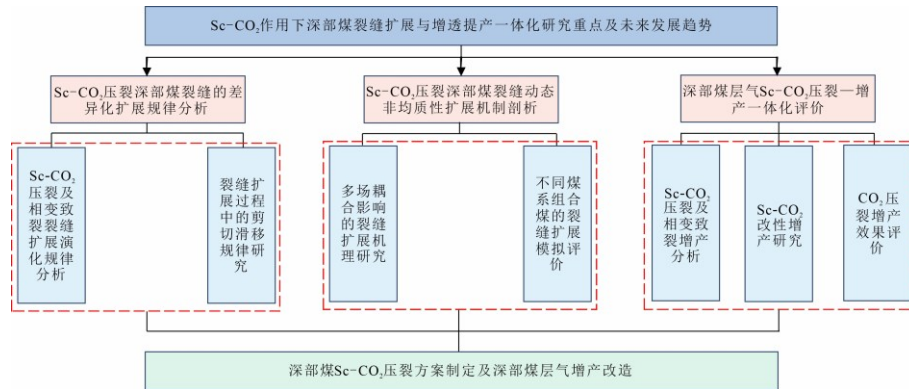


图 7 Sc-CO₂ 作用下深部煤裂缝扩展与增透提产一体化研究重点及未来发展趋势

Fig. 7 Research priorities and future development directions of integrated on fracture propagation and enhanced coalbed methane recovery in deep coal under supercritical CO₂

4.2 Sc-CO₂ 压裂深部煤裂缝动态非均质性扩展机制剖析

4.2.1 多场耦合影响的裂缝扩展机理研究

结合深部煤岩力学特性，厘清煤岩脆性—延性、单轴抗压强度和弹性模量等力学特性。明确不同煤系组合、不同宏观煤岩类型煤的脆性矿物—脆性指数与裂缝起裂—扩展间的响应机理，评价不同煤系组合、不同宏观煤岩类型深部煤储层的可压性。结合准脆性断裂理论，考虑 Sc-CO₂ 流体注入过程中裂缝的剪切滑移行为，构建适用于 CO₂ “超临界—气态”相态转化全过程的裂缝起裂扩展理论模型，分析多尺度裂缝扩展主控因素以及裂缝扩展的力学间互馈机制。

4.2.2 不同煤系组合煤的裂缝扩展模拟评价

针对深部煤储层，利用实验室实验测得的物性、力学性质及裂缝起裂压力等参数，开展 Sc-CO₂ 压裂和相变致裂的“热流固耦合—能质传递”裂缝扩展分段数值模拟。明确煤系组合体中不同厚度比和不同岩性类别对抗压强度、弹性模量和破裂特征的影响规律，揭示不同组合配置下的 Sc-CO₂ 压裂及相变致裂的裂缝扩展行为。为评价深部煤 CO₂ 相变致裂改造效果提供参考方案。

4.3 深部煤层气 Sc-CO₂ 压裂—增产一体化评价

4.3.1 Sc-CO₂ 压裂及相变致裂增产分析

利用经典热力学能量守恒定律、状态方程定量分析 CO₂ 相变过程中的能量变化。结合相变致裂不同煤系组合、不同宏观煤岩类型煤裂缝的起裂压力、裂缝分布—扩展规律，分析相变致裂阶段的能量滤失耗散情况，探明的 Sc-CO₂ 压裂及相变致裂对不同煤系组合、不同宏观煤岩类型煤的造缝—增产能力。

4.3.2 Sc-CO₂ 改性增产研究

利用原位 CO₂ 压裂后的煤样继续开展 Sc-CO₂ 长期浸泡实验（浸泡过程保持相同的三轴应力条件），对浸泡前后的煤样分别进行红外光谱测试、压汞、氮气吸附实验。分析 Sc-CO₂ 浸泡前后不同煤系组合、不同宏观煤岩类型煤中含氧官能团变化、煤岩的蠕变—损伤规律以及孔隙—裂缝多尺度分布的差异。揭示长期 Sc-CO₂ 作用下煤岩蠕变—损伤对改性增产的影响，阐明 Sc-CO₂ 改性增产机理。

4.3.3 CO₂ 压裂增产效果评价

深部煤层的高地应力、高温环境可能影响 Sc-CO₂ 的相态稳定性，需结合储层条件调整技术参数，配套智能完井与排采决策系统，实时监测 CO₂ 运移与 CH₄ 产出动态，优化注采方案。设计现场原位试验，测定煤层气参数和开采参数，准确表征与监测深部煤层压裂改造过程中复杂裂缝扩展的力学响应机制，评价 CO₂ 原位压裂增产效果，实时优化 CO₂ 压裂的工程参数（CO₂ 注入压力、温度等）以平衡增透效果与煤岩结构

稳定性（图 8）。结合 Sc-CO₂ 压裂及相变阶段与 Sc-CO₂ 改性阶段不同煤系组合、不同宏观煤岩类型深部煤的增产机理及“热流固耦合—能质传递”数值模拟，分析不同参数对增产效果的影响，为工程参数优化提供参考依据，提高 CO₂ 压裂增产的有效性。

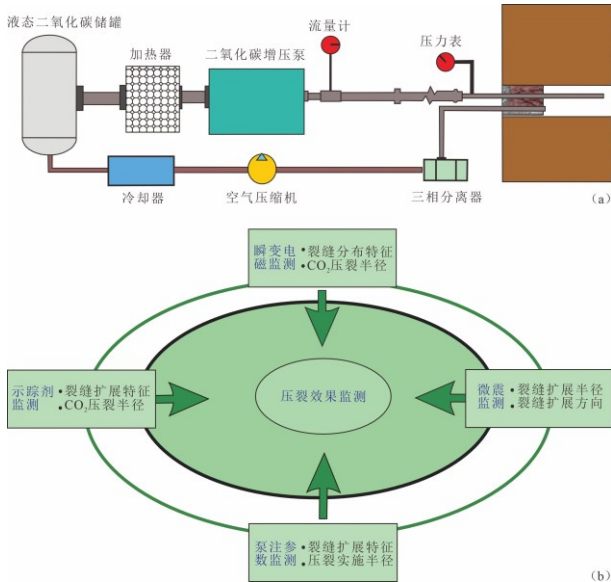


图 8 深部煤储层 Sc-CO₂ 压裂系统布置和压裂效果监测体系图（改编自闫浩, 2022）

Fig. 8 Sc-CO₂ fracturing system layout and fracturing effect monitoring system diagram of deep coal reservoirs (modified from Yan, 2022)

5 结论

（1）超临界 CO₂ 作用下深部煤裂缝的起裂和扩展受到煤储层特征和 CO₂ 注入参数的综合影响。煤储层特征通过储层地应力与地层温度、煤系组合与宏观煤岩类型、Sc-CO₂ 与煤岩相互作用的改造效应三个层级协同作用，决定煤岩初始力学状态、孔裂缝非均质性结构特征及压裂裂缝响应。较高的 CO₂ 注入压力和 CO₂ 注入时间有利于裂缝的起裂和扩展，并可提升裂缝网络复杂程度。吸附 CO₂ 引起的表面能降低、塑化作用、膨胀效应和矿物溶解，这一系列化学—物理耦合作用诱发煤岩力学性能弱化，均不同程度导致深部煤裂缝扩展。

（2）数值模拟是深部煤 Sc-CO₂ 压裂裂缝扩展和增产一体化研究的关键，通过构建“热流固耦合—能质传递”分阶段模型，可量化各阶段（Sc-CO₂ 压裂—相变致裂—改性阶段）裂缝扩展和增产效果。深部煤 Sc-CO₂ 压裂具有显著的

增产作用，其增产机理主要包括甲烷置换强化、力学性能弱化和渗透率增加。Sc-CO₂ 压裂-相变致裂技术利用 CO₂ 相转变的能量释放与超临界态特性，能有效突破深部高应力约束，形成复杂裂缝网络，进而实现深部煤增透与提产。

（3）超临界 CO₂ 作用下深部煤裂缝扩展与增透提产一体化研究亟需攻关的研究重点和未来发展趋势包括：Sc-CO₂ 压裂深部煤裂缝的差异化扩展规律分析、Sc-CO₂ 压裂深部煤裂缝动态非均质性扩展机制剖析、深部煤层气 Sc-CO₂ 压裂—增产一体化评价。未来的研究需厘清 Sc-CO₂ 压裂（不同煤系组合、宏观煤岩类型）深部煤裂缝差异化和动态非均质性扩展机制，建立 Sc-CO₂ 压裂及相变致裂深部煤裂缝扩展—增产一体化评价体系，为深部煤高效开发提供支撑。

作者贡献度说明

周三栋：数据管理，形式分析，撰写初稿，审阅及修订；张伟鑫：数据管理，可视化，调查；成巧耘：数据管理，调查；刘大锰：方法，验证，项目管理；严德天：监督，项目管理。

致谢：本研究由国家自然科学基金项目（42102219）和中国石油科技创新基金项目（2024DQ02-0110）资助。

References

- Bagga, P., Roy, D. G., Singh, T. N., 2015. Effect of Carbon Dioxide Sequestration on the Mechanical Properties of Indian Coal. ISRM Regional Symposium - EUROCK. OnePetro.
- Behnoudfar, P., Asadi, M. B., Gholilou, A., et al., 2019. A New Model to Conduct Hydraulic Fracture Design in Coalbed Methane Reservoirs by Incorporating Stress Variations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 174: 1208-1222. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.10.001>
- Cao, Y. X., Zhang, J. S., Zhai, H., et al., 2017. CO₂ Gas Fracturing: A Novel Reservoir Stimulation Technology in Low Permeability Gassy Coal Seams. *Fuel*, 203: 197-207. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.053>
- Cao, Y. X., Zhang, X. S., Zhang, J. S., et al., 2023.

- Characteristics and Formation Mechanisms of Microstructures in Coal Treated with CO₂ Phase Transition Fracturing. *Coal Geology & Exploration*, 51(2): 137-145 (in Chinese with English abstract).
- Chen, P., Sun, K. M., Zhang, Y., 2021. Simulation of Fracturing Law of Heterogeneous Coal Caused by Supercritical CO₂ Explosion. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 38(6): 770-778 (in Chinese with English abstract).
- Chi H. P., Bi C. Q., Wan D. P., et al., 2025. Degradation of the Mechanical Properties of Medium-Rank Coals under Supercritical CO₂ Soaking and Its Mechanisms. *Oil & Gas Geology*, 46(3): 983-994 (in Chinese with English abstract).
- Cong, R. C., Wang, H. Z., Li, G. S., et al., 2023. Feasibility on Exploitation of Coalbed Methane by SC-CO₂ Shock Fracturing. *Journal of China Coal Society*, 48(8): 3162-3171 (in Chinese with English abstract).
- Fang, H. H., Sang, S. X., Wang, Z. F., et al., 2024. Numerical Analysis of Temperature Effect on CO₂ Storage Capacity and CH₄ Production Capacity during the CO₂-ECBM Process. *Energy*, 289(15): 130022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.130022>
- Huang, Z. W., Li, G. F., Yang, R. Y., et al., 2022. Review and Development Trends of Coalbed Methane Exploitation Technology in China. *Journal of China Coal Society*, 47(9): 3212-3238 (in Chinese with English abstract).
- Jing, P. F., Xie, H. P., Zhou, H. W., et al., 2023. Study on Structural Damage Evolution Mechanism of Coal in Situ Environment. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 40(5): 894-904 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q., Li, T., Cai, Y. D., et al., 2023. Research Progress on Hydraulic Fracture Characteristics and Controlling Factors of Coalbed Methane Reservoirs. *Journal of China Coal Society*, 48(12): 4443-4460 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. W., Liu, H. T., Ning, C. B., et al., 2025. The Hydrocarbon Generation Characteristics of the Upper Paleozoic Coaly Bearing Source Rocks and Its Main Controlling Factors in the North of the Jizhong Depression. *Earth Science*, 50(5): 1917-1932 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Xu, F. Y., Tang, S. H., et al., 2024. Progress and Development Direction of Coalbed Methane (Coal-Rock Gas) Exploration and Development in the Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 44(10): 63-79 (in Chinese with English abstract).
- Liang, W. G., He, W., Yan, J. W., 2022. Weakening and Fracturing Mechanism of Mechanical Properties of Coal and Rock Caused by Supercritical CO₂. *Journal of China Coal Society*, 47(7): 2557-2568 (in Chinese with English abstract).
- Liang, W. G., Yan, J. W., Zhu, D. J., et al., 2026. Concept of CCCUS Technology for CO₂ Recycling in Deep Unmineable Coal Seams. *Coal Geology & Exploration*, 54(1): 80-93 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. L., Zou, C. N., Deng, Z., et al., 2026. Pore Characteristics and Coalbed Gas Reservoir Formation Characteristics of Coal Reservoir of No.8 Coal Seam in Well Suide 1H, Ordos Basin. *Earth Science*, 51(1): 284-302 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. J., Nie, Z. S., Yu, B. Z., et al., 2023. Analysis of the Mechanism and Influencing Factors of Supercritical Carbon Dioxide on Coal Permeability Enhancement. *Coal Science and Technology*, 51(2): 204-216 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. J., Xu, Y. Z., Nie, Z. S., et al., 2024. Experimental Study of Microstructure and Mechanical Properties-Acoustic Emission Characterization of High-Rank Coal under Supercritical CO₂ Action. *Coal Science and Technology*, 52(10): 127-135 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Li, H. C., Wei, J. P., et al., 2024. CT Experimental Study on the Fracture Evolution of Coal Body under Supercritical CO₂ Short Duration Action. *Journal of China Coal Society*, 49(9): 3829-3844 (in Chinese with English abstract).
- Perera, M. S. A., Ranjith, P. G., Viète, D. R., 2013. Effects of Gaseous and Super-Critical Carbon Dioxide Saturation on the Mechanical Properties of Bituminous Coal from the Southern Sydney Basin. *Applied Energy*, 110: 73-81. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.069>
- Qin, Y., 2023. Progress on Geological Research of Deep

- Coalbed Methane in China. *Acta Petrolei Sinica*, 44(11): 1791-1811 (in Chinese with English abstract).
- Ranathunga, A. S., Perera, M. S. A., Ranjith, P. G., et al., 2016a. Super-Critical CO₂ Saturation-Induced Mechanical Property Alterations in Low Rank Coal: An Experimental Study. *The Journal of Supercritical Fluids*, 109: 134-140. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.11.010>
- Ranathunga, A. S., Perera, M. S. A., Ranjith, P. G., 2016b. Influence of CO₂ Adsorption on the Strength and Elastic Modulus of Low Rank Australian Coal under Confining Pressure. *International Journal of Coal Geology*, 167: 148-156. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.08.027>
- Sampath, K. H. S. M., Perera, M. S. A., Ranjith, P. G., et al., 2019a. CO₂ Interaction Induced Mechanical Characteristics Alterations in Coal: A Review. *International Journal of Coal Geology*, 204: 113-129. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.02.004>
- Sampath, K. H. S. M., Perera, M. S. A., Li, D. Y., et al., 2019b. Evaluation of the Mechanical Behaviour of Brine+CO₂ Saturated Brown Coal under Mono-Cyclic Uni-Axial Compression. *Engineering Geology*, 263: 105312. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105312>
- Sampath, K. H. S. M., Perera, M., Matthai, S. K., et al., 2019c. Modelling of Fully-Coupled CO₂ Diffusion and Adsorption-Induced Coal Matrix Swelling. *Fuel*, 262: 116486. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116486>
- Sang, S. X., Liu, S. Q., Han, S. J., et al., 2023. Coal Methane Control and Its Emission Reduction Potential in China. *Coal Geology & Exploration*, 51(1): 159-175 (in Chinese with English abstract).
- Sang, S. X., Niu, Q. H., Cao, L. W., et al., 2022. Mechanical Response Characteristics and Mechanism of Coal-Rock with CO₂ Injection in Deep Coal Seam: A Review. *Earth Science*, 47(5): 1849-1864 (in Chinese with English abstract).
- Su, E. L., Liang, Y. P., Chang, X. Y., et al., 2020. Effects of Cyclic Saturation of Supercritical CO₂ on the Pore Structures and Mechanical Properties of Bituminous Coal: An Experimental Study. *Journal of CO₂ Utilization*, 40: 101208. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101208>
- Su, X. B., Wang, Q., Yu, S. Y., 2023. Integrated Development Technology Path for Deep Coal Measure Gas Based on Low-Negative Carbon Emission Reduction. *Acta Petrolei Sinica*, 44(11): 1931-1948 (in Chinese with English abstract).
- Sun, H., Yao, J., Gao, S. H., et al., 2013. Numerical Study of CO₂ Enhanced Natural Gas Recovery and Sequestration in Shale Gas Reservoirs. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 19: 406-419. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.09.011>
- Sun, X. H., Sun, B. J., Wang, Z. Y., 2015. Fissure Temperature Field Model of Supercritical CO₂ Fracturing. *Acta Petrolei Sinica*, 36(12): 1586-1592 (in Chinese with English abstract).
- Tang, S. H., Zhu, B. C., Yan, Z. F., 2011. Effect of Crustal Stress on Hydraulic Fracturing in Coalbed Methane Wells. *Journal of China Coal Society*, 36(1): 65-69 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. Z., Wang, M., Yang, B., et al., 2018. Numerical Study of Supercritical CO₂ and Proppant Transport in Different Geometrical Fractures. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 8(5): 898-910. <https://doi.org/10.1002/ghg.1803>
- Wang, J. T., Sun, B. J., Wang, Z. Y., et al., 2017. Study on Filtration Patterns of Supercritical CO₂ Fracturing in Unconventional Natural Gas Reservoirs. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 7(6): 1126-1140. <https://doi.org/10.1002/ghg.1721>
- Wang, L., Liang, W. G., 2019. Experimental Study on Crack Propagation of Coal-Rock Mass under Supercritical CO₂ Fracturing. *Coal Science and Technology*, 47(2): 65-70 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. G., Jin, Y., Tan, P., et al., 2022. Experimental Investigation on Hydraulic Fracture Propagation of Coal Shale Reservoirs under Multi-Gas Co-Production. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 44(12): 2290-2296 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. M., Liu, L., Zhu, M. B., et al., 2024. New Way for Green and Low-Carbon Development of Coal Industry under the Target of "Dual-Carbon". *Journal of China Coal Society*, 49(1): 152-171 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. Z., Wu, J. Q., Zhang, F. S., et al., 2026.

- Microscopic Fracture Distribution Characteristics and Control Mechanism of Deep Coal Body Fractured by Supercritical CO₂ Fracturing. *Journal of China Coal Society*, 51(1): 181-192 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. L., Shi J. Y., Xu D., et al., 2024. Current Situation and Prospect of Waterless Fracturing Technology for Coal Reservoirs. *Drilling & Production Technology*, 47(1): 80-86 (in Chinese with English abstract).
- Wei, J. P., Li, X., Liu, Y., et al., 2024. Study on the Impact Frequency Modulation of Self-Excited Oscillating Pulsed SC-CO₂ Jet. *Journal of China Coal Society*, 49(6): 2675-2690 (in Chinese with English abstract).
- Wen, H., Li, Z. B., Wang, Z. P., et al., 2016. Experiment on the Liquid CO₂ Fracturing Process for Increasing Permeability and the Characteristics of Crack Propagation in Coal Seam. *Journal of China Coal Society*, 41(11): 2793-2799 (in Chinese with English abstract).
- Xian, B. A., Gao, D. L., Xu, F. Y., et al., 2023. Research Progress of Coalbed Methane Horizontal Well Drilling and Completion Technology in China. *Acta Petrolei Sinica*, 44(11): 1974-1992 (in Chinese with English abstract).
- Xu, F. Y., Yan, X., Li, S. G., et al., 2023. Theoretical and Technological Difficulties and Countermeasures of Deep CBM Exploration and Development in the Eastern Edge of Ordos Basin. *Coal Geology & Exploration*, 51(1): 115-130 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. Z., Zhai, C., Ranjith, P. G., et al., 2022. Investigation of the Mechanical Damage of Low Rank Coals under the Impacts of Cyclical Liquid CO₂ for Coalbed Methane Recovery. *Energy*, 239: 122145. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122145>
- Yan, H., 2020. Staged Cracking Mechanism and Crack Propagation Law of Supercritical CO₂ Fracturing Coal Mass (Dissertation). China University of Mining and Technology, Xuzhou (in Chinese with English abstract).
- Yan, H., Zhang, J. X., Li, B. Y., et al., 2021. Crack Propagation Patterns and Factors Controlling Complex Crack Network Formation in Coal Bodies during Tri-Axial Supercritical Carbon Dioxide Fracturing. *Fuel*, 286: 119381. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119381>
- Yan, H., Zhang, J. X., Zhou, N., et al., 2023. Prediction of SC-CO₂ Fracturing Effects of Coal and Rock Mass Based on DA-DE-SVM Intelligent Model. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 45(2): 362-368 (in Chinese with English abstract).
- Yang, K., Liang, Y. P., Li, Q. G., et al., 2026. A Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Damage (THMD) Model Based on Finite Element Method-Discrete Fracture Model (FEM-DFM) for Simulating Supercritical CO₂ (ScCO₂) Fracturing. *Computers and Geotechnics*, 191: 107795. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107795>
- Yao, S. P., Tang, Z. Y., Tan, L. H., et al., 2012. The CO₂ Geological Sealing Conditions and Potential Evaluation in Coal Seams in Jiangsu Province. *Geological Journal of China Universities*, 18(2): 203-214 (in Chinese with English abstract).
- Yao, Y. B., Wang, H., Yang, Y. H., et al., 2021. Evaluation of the Hydro-Fracturing Potential for Coalbed Methane Reservoir: A Case Study of Zhengzhuang CBM Field. *Coal Geology & Exploration*, 49(1): 119-129 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, L., 2023. Theory and Technology Considerations on High-Quality Development of Coal Main Energy Security in China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 38(1): 11-22 (in Chinese with English abstract).
- Zagorščak, R., Thomas, H. R., 2018. Effects of Subcritical and Supercritical CO₂ Sorption on Deformation and Failure of High-Rank Coals. *International Journal of Coal Geology*, 199: 113-123. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2018.10.002>
- Zhang, D. M., Bai, X., Yin, G. Z., et al., 2018. Mechanism of Breaking and Fracture Expansion of Liquid CO₂ Phase Change Jet Fracturing in Low-Permeability Coal Seam. *Journal of China Coal Society*, 43(11): 3154-3168 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. L., Ranjith, P. G., Li, Z. S., et al., 2021. Long-Term Effects of CO₂-Water-Coal Interactions on Structural and Mechanical Changes of Bituminous

Coal. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 207: 109093. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109093>

Zhang, L. H., Zhang, T., Zhao, Y. L., et al., 2024. A Review of Interaction Mechanisms and Microscopic Simulation Methods for CO₂-Water-Rock System. *Petroleum Exploration and Development*, 51(1): 199-211 (in Chinese with English abstract).

Zhang, S. A., Liu, X. J., Wen, Q. Z., et al., 2021. Development Situation and Trend of Stimulation and Reforming Technology of Coalbed Methane. *Acta Petrolei Sinica*, 42(1): 105-118 (in Chinese with English abstract).

Zhang, X. G., Ranjith, P. G., Ranathunga, A. S., et al., 2019a. Variation of Mechanical Properties of Bituminous Coal under CO₂ and H₂O Saturation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 61: 158-168. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.11.010>

Zhang, X. G., Ranjith, P. G., Lu, Y. Y., et al., 2019b. Experimental Investigation of the Influence of CO₂ and Water Adsorption on Mechanics of Coal under Confining Pressure. *International Journal of Coal Geology*, 209: 117-129. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.04.004>

Zhang, X. Q., Wang, W. W., Jiang, Y. L., et al., 2023. Mechanical Properties and Fracture Damage Law of Coal-Rock Composition under the Action of Supercritical CO₂. *Journal of China Coal Society*, 48(11): 4049-4064 (in Chinese with English abstract).

Zhou, H. W., Liu, Z. L., Sun, X. T., et al., 2021. Evolution Characteristics of Seepage Channel during Water Infusion in Deep Coal Samples. *Journal of China Coal Society*, 46(3): 867-875 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

曹运兴, 张新生, 张军胜, 等, 2023. CO₂相变致裂煤的显微构造特征与成因机制. *煤田地质与勘探*, 51(2): 137-145.

陈鹏, 孙可明, 张宇, 2021. 超临界 CO₂气爆非均质煤体破裂规律模拟研究. *计算力学学报*, 38(6): 770-778.

迟焕鹏, 毕彩芹, 宛东平, 等, 2025. 超临界 CO₂浸泡中阶煤岩力学性能劣化特性及其机制. *石油与天然气*

地质, 46(3): 983-994.

从日超, 王海柱, 李根生, 等, 2023. 超临界 CO₂聚能压裂开发煤层气可行性研究. *煤炭学报*, 48(8): 3162-3171.

黄中伟, 李国富, 杨睿月, 等, 2022. 我国煤层气开发技术现状与发展趋势. *煤炭学报*, 47(9): 3212-3238.

敬鹏飞, 谢和平, 周宏伟, 等, 2023. 原位赋存环境下煤体结构损伤演化机理研究. *采矿与安全工程学报*, 40(5): 894-904.

李倩, 李童, 蔡益栋, 等, 2023. 煤层气储层水力裂缝扩展特征与控因研究进展. *煤炭学报*, 48(12): 4443-4460.

李熹微, 刘海涛, 宁才倍, 等, 2025. 冀中坳陷北部上古生界煤系烃源岩生烃特征及发育的主控因素. *地球科学*, 50(5): 1917-1932.

李勇, 徐凤银, 唐书恒, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地煤层(岩)气勘探开发进展及发展方向. *天然气工业*, 44(10): 63-79.

梁卫国, 贺伟, 阎纪伟, 2022. 超临界 CO₂致煤岩力学特性弱化与破裂机理. *煤炭学报*, 47(7): 2557-2568.

梁卫国, 阎纪伟, 朱帝杰, 等, 2026. 深部不可采煤层 CO₂可循环利用的 CCCUS 技术构想. *煤田地质与勘探*, 54(1): 80-93.

刘翰林, 邹才能, 邓泽, 等, 2026. 鄂尔多斯盆地绥德 1H 井 8#煤储层孔隙特征及煤岩气成藏特征. *地球科学*, 51(1): 284-302.

刘佳佳, 聂子硕, 于宝种, 等, 2023. 超临界二氧化碳对煤体增透的作用机理及影响因素分析. *煤炭科学技术*, 51(2): 204-216.

刘佳佳, 许艳之, 聂子硕, 等, 2024. 超临界 CO₂作用下高阶煤微观结构及力学特性声发射特征研究. *煤炭科学技术*, 52(10): 127-135.

刘勇, 李海超, 魏建平, 等, 2024. 超临界二氧化碳短时作用煤体裂隙演化 CT/XRD 实验研究. *煤炭学报*, 49(9): 3829-3844.

秦勇, 2023. 中国深部煤层气地质研究进展. *石油学报*, 44(11): 1791-1811.

桑树勋, 刘世奇, 韩思杰, 等, 2023. 中国煤炭甲烷管控与减排潜力. *煤田地质与勘探*, 51(1): 159-175.

桑树勋, 牛庆合, 曹丽文, 等, 2022. 深部煤层 CO₂注入煤岩力学响应特征及机理研究进展. *地球科学*, 47(5): 1849-1864.

苏现波, 王乾, 于世耀, 等, 2023. 基于低负碳减排

的深部煤系气一体化开发技术路径. 石油学报, 44(11): 1931-1948.

孙小辉, 孙宝江, 王志远, 等, 2015. 超临界 CO₂ 压裂裂缝温度场模型. 石油学报, 36(12): 1586-1592.

唐书恒, 朱宝存, 颜志丰, 2011. 地应力对煤层气井水力压裂裂缝发育的影响. 煤炭学报, 36(1): 65-69.

王磊, 梁卫国, 2019. 超临界 CO₂ 压裂下煤岩体裂缝扩展规律试验研究. 煤炭科学技术, 47(2): 65-70.

王士国, 金衍, 谭鹏, 等, 2022. 煤系页岩储层多气共采水力裂缝扩展规律试验研究. 岩土工程学报, 44(12): 2290-2296.

王双明, 刘浪, 朱梦博, 等, 2024. “双碳”目标下煤炭绿色低碳发展新思路. 煤炭学报, 49(1): 152-171.

王香增, 吴金桥, 张锋三, 等, 2026. 超临界 CO₂ 压裂深部煤体的显微裂缝分布特征及其控制机理. 煤炭学报, 51(1): 181-192.

王梓麟, 时婧玥, 徐栋, 等, 2024. 煤储层无水压裂技术现状及展望. 钻采工艺, 47(1): 80-86.

魏建平, 李翔, 刘勇, 等, 2024. 自激振荡脉冲 SC-CO₂ 射流冲击频率调制研究. 煤炭学报, 49(6): 2675-2690.

文虎, 李珍宝, 王振平, 等, 2016. 煤层注液态 CO₂ 压裂增透过程及裂隙扩展特征试验. 煤炭学报, 41(11): 2793-2799.

鲜保安, 高德利, 徐凤银, 等, 2023. 中国煤层气水平井钻完井技术研究进展. 石油学报, 44(11): 1974-1992.

徐凤银, 闫霞, 李曙光, 等, 2023. 鄂尔多斯盆地东缘深部(层)煤层气勘探开发理论技术难点与对策. 煤田地质与勘探, 51(1): 115-130.

闫浩, 2020. 超临界 CO₂ 压裂煤体分阶段致裂机理及裂缝扩展规律 (博士学位论文). 徐州: 中国矿业大学.

闫浩, 张吉雄, 周楠, 等, 2023. 基于 DA-DE-SVM 智能模型的煤岩体 SC-CO₂ 压裂效果预测. 岩土工程学报, 45(2): 362-368.

姚素平, 汤中一, 谭丽华, 等, 2012. 江苏省 CO₂ 煤层地质封存条件与潜力评价. 高校地质学报, 18(2): 203-214.

姚艳斌, 王辉, 杨延辉, 等, 2021. 煤层气储层可改造性评价——以郑庄区块为例. 煤田地质与勘探, 49(1): 119-129.

袁亮, 2023. 我国煤炭主体能源安全高质量发展的理论技术思考. 中国科学院院刊, 38(01): 11-22.

张东明, 白鑫, 尹光志, 等, 2018. 低渗煤层液态 CO₂ 相变射孔破岩及裂隙扩展力学机理. 煤炭学报, 43(11): 3154-3168.

张烈辉, 张涛, 赵玉龙, 等, 2024. 二氧化碳-水-岩作用机理及微观模拟方法研究进展. 石油勘探与开发, 51(1): 199-211.

张遂安, 刘欣佳, 温庆志, 等, 2021. 煤层气增产改造技术发展现状与趋势. 石油学报, 42(1): 105-118.

张小强, 王文伟, 姜玉龙, 等, 2023. 超临界 CO₂ 作用下煤岩组合体力学特性损伤及裂隙演化规律. 煤炭学报, 48(11): 4049-4064.

周宏伟, 刘泽霖, 孙晓彤, 等, 2021. 深部煤体注水过程中渗流通道演化特征. 煤炭学报, 46(3): 867-875.