

深层煤岩气缝网激活无砂压裂理论基础与实践

赵松^{1,2}, 侯雨庭^{1,2}, 费世祥^{2,3,4}, 崔越华^{2,5}, 问晓勇^{2,6}, 雷文智^{2,5}, 胡云鹏⁷, 彭越^{2,5}, 陈红飞^{2,5}

(1. 中国石油长庆油田分公司, 陕西 西安 710018; 2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安 710018; 3. 中国石油长庆油田分公司第二采气厂, 陕西 榆林 719000; 4. 中国石油大学石油工程学院, 北京 102249; 5. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018; 6. 中国石油长庆油田分公司油气工艺研究院, 陕西 西安 710018; 7. 中国石油油气和新能源分公司, 北京 100007)

摘要:鄂尔多斯盆地煤岩气资源丰富, 对提升中国天然气供应能力具有重要意义。煤岩储层在原位条件下渗流能力极弱, 目前主要依赖大规模加砂压裂实现产量突破, 但该方法成本高、经济性差。以鄂尔多斯盆地东部石炭系本溪组8[#]煤岩为研究对象, 综合运用储层特征分析、岩石力学测试、水-煤反应实验及压后导流能力评价等方法, 并结合矿场实践开展系统研究。研究结果表明: 煤岩中天然割理发育且具有较强塑性, 在顶、底板“硬支撑”约束下形成类似“应力封存箱”的结构, 高压流体注入可诱发煤岩发生拉张-剪切复合破坏与滑移, 促进煤体破碎及天然割理激活, 进而形成复杂缝网。破碎后的煤岩可极大地提高原位条件下的渗流空间, 使裂缝在压裂液排出后仍能保持较高导流能力。基于上述认识, 提出了煤岩气“缝网激活无砂压裂”理念, 实现了压裂方式由“稳液控砂—极限控砂—无砂压裂”的转变。现场试验结果表明: 在未加砂且液量规模相近的条件下, 无砂压裂的单井产能仍与常规压裂相当, 表明液体规模是影响产能的主控因素; 在水平段长1500 m、入井液量24500 m³的无砂压裂条件下, 日产气量稳定在4×10⁴ m³以上。无砂压裂技术充分利用了煤岩储层地质-工程独特属性, 在保持产量稳定的情况下, 同时具有降低成本的优势, 对深层煤岩气规模化开发具有重要意义。

关键词: 矿场试验; 水-煤反应; 物理模拟; 增产机理; 应力封存箱; 缝网激活无砂压裂; 煤岩气; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

Theoretical basis and field application of fracture network activation and proppant-free stimulation for deep coal-rock gas development

ZHAO Song^{1,2}, HOU Yuting^{1,2}, FEI Shixiang^{2,3,4}, CUI Yuehua^{2,5}, WEN Xiaoyong^{2,6}, LEI Wenzhi^{2,5},
HU Yunpeng⁷, PENG Yue^{2,5}, CHEN Hongfei^{2,5}

[1. Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 2. National Engineering Lab for Prospecting & Exploration of low-Permeability Oil-Gas Field, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 3. No. 2 Gas Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Yulin, Shaanxi 719000, China; 4. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 5. Exploration and Development Research Institute, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 6. Oil & Gas Technology Research Institute Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 7. Oil and Gas and New Energy Branch, PetroChina, Beijing 100007, China]

Abstract: Coal-rock gas in the Ordos Basin represents an abundant, strategically vital resource for enhancing China's natural gas supply capacity. However, these deep coal reservoirs exhibit extremely low permeability under in-situ conditions. Although current commercial production breakthroughs primarily rely on large-scale propped hydraulic fracturing, this method is constrained by high operational costs and marginal economic returns. Focusing on the No. 8 coal seam of the Benxi Formation in the eastern Ordos Basin, this study integrates reservoir characterization, rock mechanical testing, water-coal interaction experiments, and post-fracturing conductivity evaluations with field practices for comprehensive analysis. As indicated by the research results, the coal reservoirs are characterized by highly developed natural cleats and pronounced plastic deformation. Under the mechanical boundary conditions of “rigid

收稿日期: 2026-03-13; 修回日期: 2026-05-11。

第一作者简介: 赵松(1971—), 男, 正高级工程师, 天然气开发。E-mail: zhaosong7198_cq@petrochina.com.cn。

通信作者简介: 费世祥(1984—), 男, 正高级工程师, 天然气开发。E-mail: fshix_cq@petrochina.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05047-001); 中国石油股份公司科技专项(2023ZZ18YJ04)。

support” provided by the roof and floor strata, a unique configuration similar to a “stress compartment” is established. The injection of high-pressure fluids induces coupled tensile-shear failure and structural slip within the coal matrix, promoting matrix fragmentation and activation of natural cleats, which ultimately generates a complex fracture network. The resulting fragmented coal significantly expands the available seepage space under in-situ conditions, allowing the unpropped fractures to maintain high conductivity even after fracturing fluid flowback. Based on these insights, the concept of “fracture-network activation and proppant-free stimulation” for coal-rock gas development was proposed, marking a technological paradigm shift from “controlled proppant transport with fluid rate stabilization” to “maximum proppant concentration,” and ultimately to “proppant-free fracturing.” Field pilot tests demonstrate that, under conditions of no proppant and similar fluid volumes, the single-well production is on par with that of conventional fracturing, indicating that fluid volume is a primary factor controlling well productivity. Specifically, a horizontal well with a 1 500 m lateral and subjected to proppant-free fracturing with 24 500 m³ of fluid, achieved a stable daily gas production exceeding 40 × 10³ m³. This study concludes that proppant-free fracturing technology successfully capitalizes on the unique geological-engineering attributes of coal-rock reservoirs. While ensuring stable production, it offers substantial cost reduction and environmental advantages, holding profound implications for the commercial, large-scale development of deep coal-rock gas.

Key words: field test, water-coal interaction, physical simulation, permeability enhancement mechanism, stress compartment, fracture-network activation and proppant-free fracturing, coal-rock gas, Ordos Basin

引用格式:赵松,侯雨庭,费世祥等. 深层煤岩气缝网激活无砂压裂理论基础与实践[J]. 石油与天然气地质,DOI:10.11743/oggXXXXXX01.

ZHAO Song, HOU Yuting, FEI Shixiang, et al. Theoretical basis and field application of fracture network activation and proppant-free stimulation for deep coal-rock gas development[J]. Oil & Gas Geology, DOI:10.11743/oggXXXXXX01.

中国深层煤岩气(埋深大于1 500 m的煤层气)资源丰富,广泛分布于鄂尔多斯、四川、准噶尔、塔里木、海拉尔、松辽、渤海湾、吐哈、三塘湖和沁水等10个含煤盆地,估算煤岩气总资源量约为45.81 × 10¹² m³[1-3]。其中,鄂尔多斯盆地本溪组8#煤岩和山西组5#煤岩的煤岩气资源量最为丰富,达24.30 × 10¹² m³,占国内总资源量的53%,勘探开发潜力大。加快煤岩气发展是保障国家能源安全的重大战略举措[4-5]。

2022年以前,煤岩气勘探开发主要借鉴页岩气的发展思路,以大规模体积压裂为核心,率先在鄂尔多斯盆地东部实现了煤层气勘探开发的历史性突破[6-7]。深层煤岩储层在孔隙结构、岩石力学特性及含气赋存规律等方面,与常规砂岩、致密砂岩及页岩储层存在显著差异。其储集空间以微-纳米级孔隙-割理双重介质为核心,具有割理系统密集发育、岩石强度低以及吸附气与游离气共存等典型特征[8]。相较于致密砂岩与页岩储层,深部煤岩表现出天然渗透率更低、岩石力学强度更弱以及非均质性更强的地质-工程属性[9-10]。深层煤岩大规模加砂压裂改造面临多方面问题,煤岩质地松软、易破碎,压裂支撑剂易嵌入煤岩,且支撑剂运移距离有限,难以在空间上形成有效的骨架支撑缝网;同时,煤岩储层压裂改造规模更大,大规模压裂施工成本高、投入产出比偏低,导致煤岩气开发的经济效

益低于致密气与页岩气,存在“资源潜力大、开发效益弱、发展速度与战略定位不匹配”的现实矛盾。

为探索适合煤岩气效益开发的新型压裂工艺,长庆油田有序开展了稳液控砂及极限条件下的无砂压裂矿场试验。试验结果显示,无砂压裂井在排采初期日产气量与常规压裂井基本相当,可显著降低压裂投入,显示了良好的生产效果及效益潜力,初步表明,无支撑剂压裂是实现煤岩气提产、增效、降本的有效技术路径。然而,目前针对煤岩气无砂压裂尚缺乏相应的实验及机理性研究,国内外之前亦未开展煤岩气无砂压裂相关工作。因此,亟需从煤岩自身地质与力学特性出发,系统阐明无砂压裂的理论基础,创新形成适配深部煤岩储层的经济高效储层改造理论与技术体系。

本文以鄂尔多斯盆地东部深层煤岩为研究对象,通过储层特征分析、岩石力学测试、水-煤反应实验以及压裂物理模拟等研究,并结合矿场实践,取得以下认识:①刚性顶、底板与塑性煤岩所形成的受限空间,是煤体充分破碎、割理大量激活并形成复杂缝网的基本地质前提;②石英砂与煤岩之间的硬度差异对支撑剂铺置具有限制作用,而煤岩破碎后的增渗效应,则是无支撑剂压裂改造路径科学、可行的关键因素。基于上述认识,本文原创性地提出了煤岩缝网激活无砂压裂

(Cleat Activated Proppant-free Stimulation, CAPS)理论与技术,简称无砂压裂。该技术利用煤岩自身的地质与岩石力学特性,按照“因势利导”的工程方法,以缝网激活为核心,通过高压流体将煤岩天然割理裂隙系统充分激活,并升级为高效的人工气藏渗流通道。试验井单井产量保持稳定,井筒工程投资大幅降低,为煤岩气规模效益开发提供了全新技术路径。

煤岩缝网激活无砂压裂与传统清水和低砂比压裂的本质差异在于缝网形成与支撑机制:传统清水和低砂比压裂以水力张拉为主,受控于地应力,易形成单一主裂缝,其导流能力依赖支撑剂且易衰减^[11]。而无砂压裂则通过水-煤反应弱化煤岩基质和溶蚀矿物,利用水力能量破碎煤岩和激活割理,从而突破地应力限制,形成由“主缝—分支缝—微孔缝”构成的复

杂缝网;同时,依靠压后顶、底板提供的硬支撑和煤岩破碎后的增渗效应,实现无支撑剂压裂工艺,最终形成长效导流能力。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地构造上隶属于华北克拉通西部,为一大整体稳定沉降、拗陷迁移且富含油气的大型叠合盆地^[8],包括伊陕斜坡、晋西挠褶带、伊盟隆起带、渭北隆起带、天环坳陷和西缘冲断带6个一级构造单元^[9](图1a)。研究区位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东部的榆林地区,石炭系本溪组与二叠系山西组是含煤层系^[10],自上而下发育1[#]—10[#]煤岩(图1b)。本溪组8[#]煤岩形成于滨海沼泽环境^[12],埋深主要集中在2 600~2 800 m,

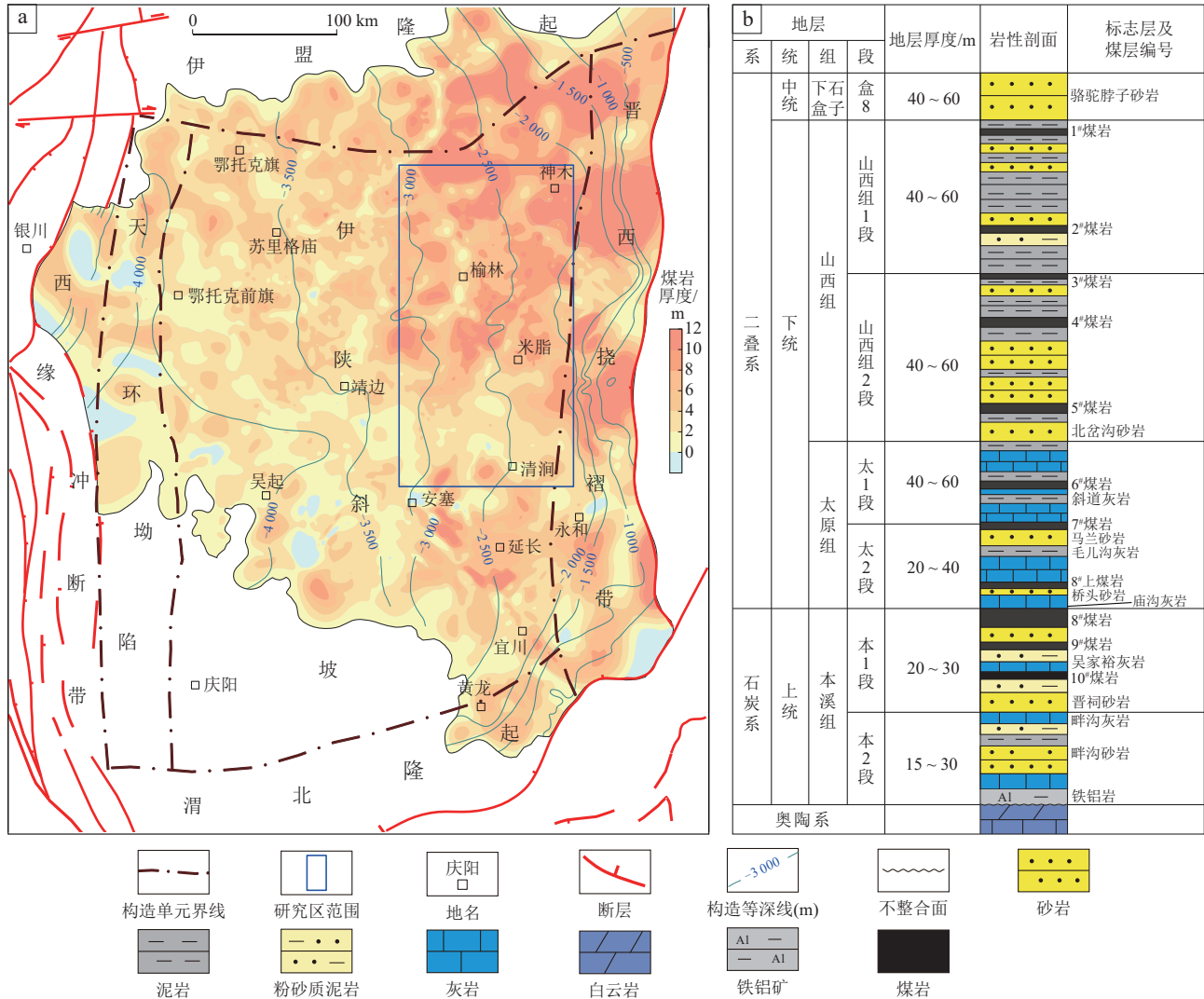


图1 鄂尔多斯盆地东部本溪组8[#]煤岩构造特征(a)及煤系地层综合柱状图(b)

Fig. 1 Structural characteristics of the No. 8 coal seam (a) and composite stratigraphic column of the coal-bearing strata (b) in the eastern Ordos Basin

整体呈广覆式稳定发育、连续性好;厚度介于6.0~12.0 m,平均值为7.8 m,平面上呈NE-SW向条带状分布,具有西薄、东厚的特征^[13-14](图1a)。研究区8#煤岩镜质体反射率(R_o)介于1.75%~2.06%,以瘦煤-贫煤为主,处于生气高峰,实测含气量主要分布在15.0~25.0 m³/t,平均含气量为21.8 m³/t。总体而言,该区煤岩结构完整、煤层分布连续,具备较强的生气能力与巨大的资源潜力。

研究区煤岩内部一般无泥质夹层,以无夹层型中厚层煤岩为主,煤质较松软,割理及裂隙相对较发育,煤岩自身强度低、易破碎。8#煤岩的直接盖层为一套海-陆交互相沉积地层,其中直接顶板岩性以泥岩为主(占比62%),其次是灰岩(占比20%)(图2);底板岩性基本为泥岩。整体上,煤岩顶、底板岩性致密、力学强度高且封隔性良好。坚硬顶、底板的围岩形成了天然的“硬”支撑,维持了较高的垂向与水平主应力差^[15-16]。

2 煤储层特征

2.1 煤岩煤质特征

煤岩以有机组分为主导,与少量无机组分混合后经成岩及变质作用形成。有机组分来源于高等植物遗体,由镜质组、惰质组和类脂组构成^[17-18],是影响煤岩力学性质的关键因素。研究区8#煤岩的固定碳含量约为50.0%~90.0%,镜质组含量为47.6%~96.9%,平均值为79.8%;惰质组含量为3.1%~39.8%,平均值为18.3%。灰分产率为5.0%~30.0%,平均值为8.5%;无机矿物以高岭石和伊利石等黏土矿物为主,

约占无机矿物总量的20%~50%,石英零星分布,方解石常充填于割理和构造裂缝中。在原位地层条件下,高固定碳含量、低灰分产率的煤岩天然具备高塑性特性,在压裂能量作用下更易产生滑移变形,从而具备“接力式破岩、推进式造缝”的有利条件。

2.2 储层物性特征

基质孔隙与裂隙系统共同决定了煤岩的储集性能与渗流能力^[19-20]。研究区8#煤岩的测试孔隙度为3.6%~10.4%,平均值为6.7%。基质孔隙主要包括煤岩中残留的植物组织孔、气孔及矿物质孔等,多呈孤立集群式分布,直径从几十至几百纳米不等;其中,微孔(孔径<2 nm)平均占比为69.6%,宏孔(孔径>50 nm)平均占比为22.0%。裂隙主要包括内生割理和外力作用形成的微裂隙。岩心实验统计结果显示,割理较发育的煤岩样品,其割理密度为9~10条/(5 cm);割理弱发育的煤岩样品,割理密度为3~5条/(5 cm)。煤岩割理及微裂隙充填程度较高,可见方解石和黏土矿物等填充物,多数割理及裂隙处于半充填-充填状态,孔隙、割理及微裂隙之间的连通性较差。注入-压降测试分析表明,煤储层渗透率分布在 $(0.020 \sim 0.210) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $0.080 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;气测渗透率为 $0.040 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;覆压基质渗透率介于 $(0.001 \sim 0.005) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

煤岩属于特低孔、特低渗储层,原位条件下的有机孔和原生割理无法形成有效的渗流通道,必须通过“水平井+大规模压裂改造”构建人工定容气藏,激活并沟通割理-孔隙系统,形成人工渗流网络^[21]。压裂后,天然裂隙系统扩张并相互沟通,促使其与新生水力裂缝交织,构建起以天然裂隙为骨架、人工裂缝为连接的三维缝网体系,从而将孤立的基质孔隙、天然割理与人工

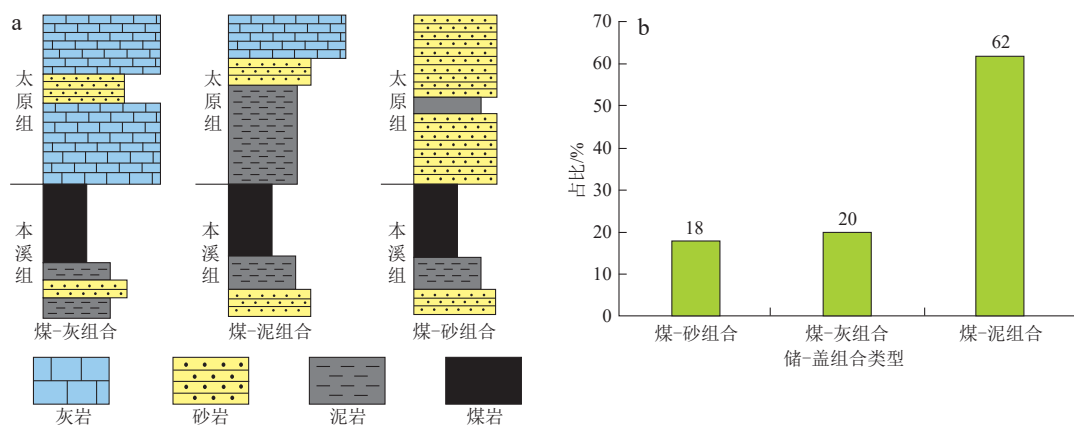


图2 鄂尔多斯盆地东部本溪组8#煤岩直接顶板储-盖组合模式(a)及占比统计(b)

Fig. 2 Reservoir-caprock assemblage patterns of the immediate roof of the No. 8 coal seam in the Benxi Formation (a) and their percentage statistics (b) in the eastern Ordos Basin

裂缝整合为贯通系统,形成有效的渗流通道。随着游离气驱动压裂液排出,煤岩储层原有的压力平衡被破坏,形成煤岩气流动场,微孔中的吸附气逐渐解吸-扩散至裂缝网络中,游离气与吸附气协同产出,生产初期表现为产量高、见气快的特点。因此,尽管煤岩在地层原位条件下几乎没有渗流能力,但其以微孔、宏观割理和微裂隙为核心的特殊孔隙结构,使储层具备通过压裂诱导激活形成有效渗流网络体系、并在压裂后实现稳定生产的先决条件。

2.3 煤岩力学特征

2.3.1 煤储层力学性质

以研究区致密砂岩、煤岩、顶板灰岩、底板泥岩以及川南页岩为例,对比分析了不同储层岩石力学参数的差异。深层煤岩的核心特征可概括为“低刚度、高塑性、中脆性”:其杨氏模量仅为其他类型岩石的 $1/9 \sim 1/3$,显著低于顶板灰岩、底板泥岩、页岩和砂岩;泊松比为其他岩石的 $1.1 \sim 1.3$ 倍。同时,根据脆性指数评价方法^[22],煤岩的脆性指数高于砂岩,但低于页岩、灰岩及泥岩(图 3a)。低弹性模量表明煤岩难以形成张性破裂所需的“应力骤释-裂缝快速扩展”条件;高泊松比一定程度上反映了侧向变形显著,压裂液注入时,煤岩在轴向压力作用下侧向膨胀明显,易形成剪切裂缝。针对大吉深层煤岩及顶、底板岩心开展的巴西劈裂实验显示:顶、底板为泥岩和砂岩时的平均抗张强度分别为 7.2 MPa 和 12.5 MPa ,破坏载荷分别为 11.1 kN 和 15.4 kN ,表明顶、底板稳定性强^[23]。煤岩储层的平均抗张强度为 1.9 MPa ,平均破坏载荷为 3.2 kN ,大部分样品破碎所需轴压约为 2.0 kN ^[23](图 3b)。上述实验结果表明,煤岩抗张强度小,易于水力压裂;与页岩相比,其脆性指数低、塑性变形能力更强,受力时更易发生“塑性屈服-剪切滑移”,而非“脆性断裂-张性

开裂”。

深层煤岩具有刚度低、塑性强的力学特征,其破坏模式以“剪切+滑移”为主,裂缝通常呈现“主剪切缝+分支剪切缝”构成复杂连通网络,而非张性破裂形成的“单条主缝+少量分支”,这种裂缝形态能够更充分地沟通煤岩内部的天然割理。此外,相比于张性裂缝窄且易闭合的特点,由剪切滑移形成的复杂裂缝网络因剪切错位而不会随储层压力降低而闭合,仍能保持一定的增渗作用。同时,煤储层天然割理较为发育,具备大规模水力压裂的基本物质条件。

2.3.2 煤岩顶、底板应力差

基于 Kaiser 地应力测试结果,研究区煤岩的主地应力方向为近 WE 向,水平两相应力差分布在 $1.3 \sim 4.2 \text{ MPa}$ 。煤岩与顶、底板应力差分别为 12.0 MPa 和 6.7 MPa (表 1)。闫霞等^[23]运用应力数值模拟探究了不同顶、底板岩性组合对煤岩应力的影响,结果显示:当底板为泥岩时,随着顶板力学强度的降低,煤岩的最大水平主应力和最小水平主应力均逐渐增大,而水平主应力差逐渐减小。在顶板分别为灰岩、砂岩和泥岩的条件下,煤岩的水平主应力差分别为 7.17 , 7.05 和 6.64 MPa (图 4b)。模拟结果显示,软岩层所承受的构造应力相对较小,硬岩层则承受较大的构造应力,进一步证实了煤岩整体赋存于顶、底板致密、应力差大、力学强度高且封隔性能优良的地质环境中;坚硬围岩构成天然刚性支撑体系,为储层维持较高的垂向应力及水平应力差提供了稳定力学保障(图 4)。在空间结构上,煤岩与顶、底板呈现顶、底板刚性支撑-煤岩基质软弱塑性的典型结构特征,顶、底板的强遮挡效应与煤岩的力学特性差异协同作用,构成了顶、底板强约束、煤岩储层充分受力的有利改造地质先决条件。

综上所述,本文定义“应力封存箱”为:由高强度

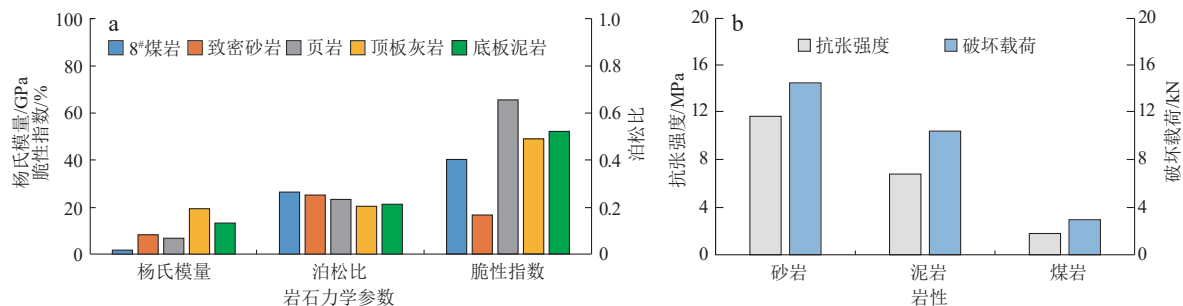


图3 鄂尔多斯盆地东部不同岩性储层岩石力学参数对比

Fig. 3 Comparison of rock mechanical parameters among reservoirs of different lithologies in the eastern Ordos Basin

a. 杨氏模量、泊松比和脆性指数;b. 平均抗张强度与破坏载荷^[23]

表1 鄂尔多斯盆地东部本溪组8#煤岩及其顶、底板 Kaiser 地应力测试结果

Table 1 Kaiser in-situ stress test results of the No. 8 coal seam and its roof/floor strata in the Ordos Basin

岩性	样本数/组	平均埋深/m	σ_v /MPa	σ_H /MPa	σ_h /MPa	煤岩与顶、底板应力差/MPa
顶板灰岩	6	2 655	58.2	54.5	48.1	12.0
煤岩	12	2 677	58.4	37.4	36.1	—
底板泥岩	6	2 673	58.6	45.7	42.8	6.7

注：“—”表示无此数据。 σ_v 为垂向主应力； σ_H 为最大水平主应力； σ_h 为最小水平主应力。

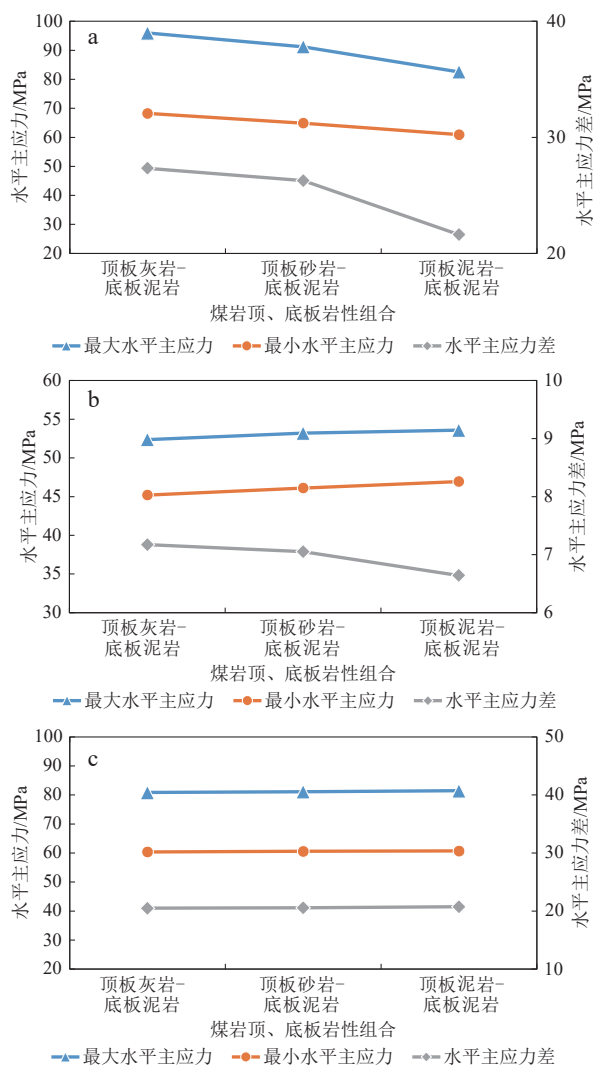


图4 鄂尔多斯盆地不同顶、底板岩性组合对煤岩地应力的影响^[23]

Fig. 4 Influence of different roof and floor lithological combinations on the in-situ stress of coal seams in the Ordos Basin (data from reference [23])

a. 顶板应力; b. 煤岩应力; c. 底板应力

顶、底板岩石包裹内部易塑性变形和裂隙发育的低强度煤岩所构成的封闭力学单元。在外力作用下,围岩

变形量小,主要承担上覆岩层压力;上、下刚性围岩形成边界,限制煤岩变形及裂缝的穿层扩展,使应力集中于中部煤岩而难以向外释放,最终形成应力封闭,并可约束煤岩应力场及裂缝系统。在煤岩水力压裂后,顶、底板像一个坚固的“容器”将煤岩包裹在中间,形成“硬支撑”,而中部煤岩发生软弱塑性形变,形成“软改造”效果。正常情况下,随着生产进行,地层压力下降,作用在煤储层骨架上的应力应逐渐增加,但是由于顶、底板形成“应力封存箱”的遮挡条件,承载了大部分上覆岩石压力,从而有效抑制了煤岩变形及渗流能力损失(图5)^[24]。复杂裂缝网络主要存在于煤岩储层内,纵向上难以贯穿顶、底板。因此,坚硬顶、底板为储层改造及压后缝网导流能力的保持提供了有利条件。

基于层状应力遮挡理论、研究区实际力学参数及数值模拟结果分析,应力封存效果主要受煤岩与顶、底板的应力差、岩石力学强度参数及煤岩厚度的影响。结合同类研究成果^[23, 25],定义以下4项指标作为“应力封存箱”的定量判别标准:①顶、底板与煤岩抗压强度比 ≥ 2 ;②顶、底板与煤岩杨氏模量比 ≥ 5 ;③层间垂向应力差 ≥ 6 MPa;④顶、底板有效隔挡层与煤岩储层厚度比 ≥ 2 。满足以上任意2项,即可判定为有效应力封存箱。

2.3.3 支撑剂强度与运移铺置特征

煤岩水平井水力压裂开发中常采用石英砂作为支撑剂。石英砂具有坚硬、耐磨和化学性质稳定的特征,在20 MPa和30 MPa应力条件下,其破碎率分别低于5%和8%^[26]。单晶石英颗粒的杨氏模量通常大于50.0 GPa,远高于煤岩的2.1 GPa。石英砂的莫氏硬度为6~7,而煤岩的莫氏硬度仅为1~3。由于两者硬度差异显著,石英支撑剂实际上难以发挥有效的支撑作用^[27]。

基于压裂物理模拟实验和矿场实验结果发现,支撑剂主要聚集在近井筒附近,远端支撑剂浓度迅速降低(图6)。煤岩比石英砂更“软”,硬质石英砂在破碎煤岩中运移时受到极大阻力,导致其快速沉降并集中镶嵌在煤岩基质中。同时,煤岩割理在水力能量作用下阶段性激活,形成曲折型裂缝体系。这使得支撑剂即使能够通过高阻力破碎带,后续的曲折割理裂缝也会削弱其运移动力,并在裂缝转弯处大量堆积,进一步阻碍石英砂向远端推进。因此,煤岩与支撑剂之间的硬度差异显著限制了支撑剂的运移距离及其铺置支撑效果。

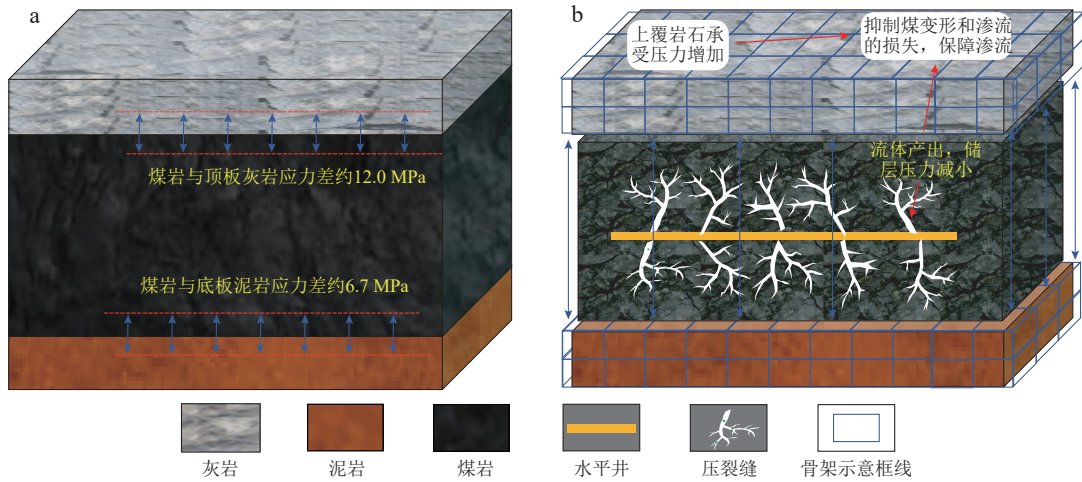


图5 顶、底板应力封存条件下煤岩水力压裂示意图

Fig. 5 Schematic diagram of coal-rock hydraulic fracturing under stress confinement by the roof and floor strata

a. 顶、底板应力差示意图;b. 压裂后顶、底板“应力封存箱”示意图

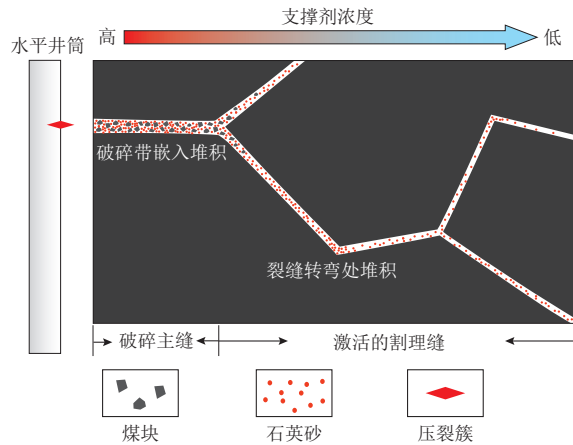


图6 煤岩压裂过程中石英砂支撑剂运移铺置模式示意图

Fig. 6 Transport and placement modes of quartz-sand proppants during coal-rock fracturing

3 煤岩压裂模拟与实验

煤岩储层富碳、贫矿物的特征决定了其低刚度、高塑性、中脆性的力学特征,而低孔、低渗的储层物性和天然气赋存状态,决定了人工压裂以沟通孔-缝是实现有效增渗和提产的关键途径。为了尽快构建适配的煤岩储层压裂技术体系,基于室内物理模拟实验和水-煤反应实验,进一步探究了压后煤岩缝网的空间扩展规律,并揭示了水-岩相互作用下的增渗机制。

3.1 水力压裂物理模拟实验

3.1.1 岩心尺度水力压裂物理模拟实验

岩心尺度水力压裂实验是评价储层改造效果、分

析压后裂缝微观力学机理的有效手段。基于实际井的地质参数与压裂施工参数等资料,采用相似准则,设计了尺寸为 $5\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ (直径 $\times$ 高度)的柱状岩心实验。压裂液配比为:0.1%生物胶稠化剂、0.2%助排剂和0.3%黏土矿物稳定剂,以 0.5 mL/min 的流速注入,模拟压裂过程直至煤岩完全破裂。

压后岩心CT扫描结果显示,煤岩经改造后形成了复杂的缝网形态。裂缝扩展受天然割理影响,发生剪切扩展,并衍生出次生裂缝,呈现出主裂缝与分支缝网交织共存的多样化空间形态,直观印证了煤岩压裂过程中存在多模式破裂,以及压后能够形成复杂缝网的储层改造效果(图7)。煤岩自身应力差较小和天然割理发育是复杂缝网形成的核心诱因。

3.1.2 大型水力压裂物理模拟实验

为了弥补岩心尺度物理模拟难以复现实际储层应力场约束等宏观条件的局限,采用与实际储层尺度及应力环境匹配的大型物理模拟装置,复现矿场压裂的多场耦合作用环境,以明确工程实际条件下煤岩压裂缝网的空间扩展规律^[28]。大型物理模拟实验结果表明:砂岩储层天然弱面稀少,且受较高水平应力差约束,压裂裂缝只能沿最大水平主应力方向延伸,最终形成直主裂缝,储层改造范围局限于主缝周边,导流通道单一(图8a)。相比之下,煤岩储层不仅力学强度低,内部面割理与端割理广泛交织,加之煤岩与顶、底板的层间应力差限制了裂缝垂向窜逸,压裂时高压流体可沿天然弱面楔入并使其开启,最终形成由“主缝-分支缝-天然割理”连通的复杂缝网,显著提升储层泄流面积(图8b)。

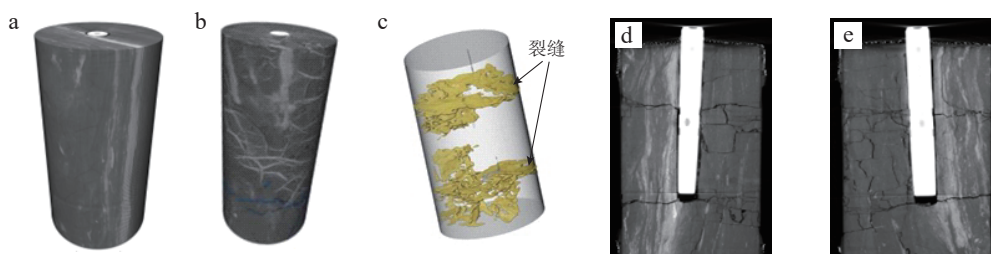


图7 岩心尺度水力压裂物理模拟实验后CT扫描图像

Fig. 7 Post-experimental CT images of core-scale physical simulation experiments of hydraulic fracturing

a. 原始样品;b. 压后CT图;c. 样品重构;d. YZ方向切片;e. XZ方向切片
(X,Y和Z为坐标轴方向。)

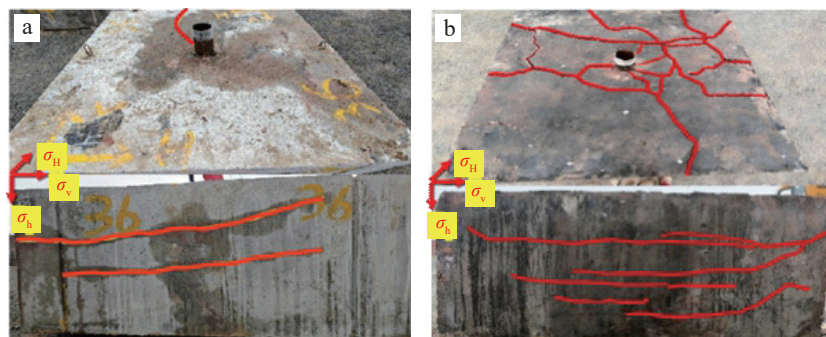


图8 大型水力压裂物理模拟实验后不同岩性裂缝形态及扩展规律

Fig. 8 Fracture morphology and propagation patterns in different lithologies after large-scale physical simulation experiments

a. 砂岩;b. 煤岩

(σ_v 为垂向主应力; σ_H 为最大水平主应力; σ_h 为最小水平主应力。红色线条为裂缝。)

3.2 水-煤反应实验

无砂压裂依靠大排量液体激活煤岩以形成复杂缝网,在储层高温-高压环境下,压裂液与煤岩会发生复杂的物理-化学反应,其增渗效应主要体现在劣化煤岩力学强度以及改善储层物性与流体输运效率两个方面^[29]。

一方面,水-岩相互作用可劣化煤岩力学强度,促进裂缝网络的生成与扩展。压裂液中的化学离子与煤基质中的矿物(如方解石和黏土矿物等)发生溶蚀及离子交换等作用,弱化了煤岩的胶结结构。Lv Kunhong等^[30]分析了深部煤岩在热-水-力耦合作用下力学性质的变化。结果表明,同一水介质的环境温度从25℃提高到60,90和120℃时,煤岩的弹性模量分别降低了1.28%,6.58%和13.16%。鄂尔多斯盆地东部8#煤岩地层温度约为70℃,按照趋势粗略估算,弹性模量约降低3%,说明低地温条件下煤岩的水-煤反应对温度变化并不敏感,常温实验条件可有效地反映原位煤岩的变化。同时,煤岩水平井压裂施工采用清水配置的压裂液,矿化度极低。因此,本文设置常温条件下的煤岩蒸馏水浸泡实验,以分析煤体结构变化。结果表明,

经过15 d的水-岩作用后,煤岩的杨氏模量可降低57%,抗压强度大幅下降71%。实验显示,矿物的持续溶蚀会提高水体矿化度,浸泡过程中蒸馏水矿化度提高至25 g/L,折算成质量分数约为2.5%。吴宝杨等^[31]发现,煤体在不同矿化度水浸条件下,杨氏模量和抗压强度随着矿化度的增加呈递减趋势:矿化度从0提高至10%时,抗压强度降低约60%,杨氏模量降低约36%,表明随着水-岩反应时间增加,矿化度的提高会进一步加剧煤岩劣化。这种力学性质的“软化”使煤岩在应力作用下更易于产生剪切破坏与破碎,从而促使主裂缝更充分地沟通内部基质块,有效缩短煤岩气从基质向裂缝扩散与运移的距离。

另一方面,水-岩相互作用能有效改善储层物性与流体输运效率。该作用可改变煤岩表面性质,使其由亲气、疏水向亲水转变,从而显著降低毛细管力,为气体解吸后的液体返排和气体的渗流创造有利条件。此外,对部分矿物的溶解作用可直接改善孔隙与微裂缝的连通性。本研究利用三轴热-流-固耦合注入实验系统,开展煤岩水-岩相互作用实验,分析在实际地层温度(70℃)与压力(25 MPa)条件下,流体浸润对煤体渗流能力的影响。实验结果表明,与压裂液作用后

的煤岩岩心出现边缘溶解脱落现象。CT及核磁共振测试进一步证实,岩心内部孔隙与微裂缝数量显著增加,平均孔隙度由2.1%提升至2.7%,平均渗透率由 $0.73 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 提高至 $1.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,增幅达39.7%,表明深部煤岩节理填充矿物出现了显著的水-岩溶蚀效应,有助于实现储层的长效增渗。这种物性的整体改善,不仅降低了气体扩散与渗流的阻力,也在一定程度上降低了气体解吸的门槛,从而共同增强了天然气的产出能力(图9)。

岩心观察分析表明,煤岩割理缝及微裂隙中多见方解石充填,因此适当的酸化溶蚀改造是潜在的增渗手段。为了分析酸性液体对煤岩储层的作用机理,并评价煤岩储层压裂过程中通过添加酸性液体进行造缝增渗的可行性,借鉴碳酸盐岩储层酸化压裂理念,开展了弱酸性液体条件下煤岩储层压裂改造潜力测试分析,为下一步开展无砂压裂探索性试验提供基础认识。

据此,选择相对典型的方解石胶结煤岩样品,分别置于浓度为5%,8%和10%的稀盐酸中浸泡6,12,18,24和264 h,并利用微米CT分析泡酸前、后煤岩结构、方解石溶蚀率和孔隙度变化(图10;表2)。

煤岩方解石溶蚀率通过下面公式计算:

$$D = \frac{V_{c0} - V_{c1}}{V_{c0}} \quad (1)$$

式中: D 为方解石溶蚀率,%; V_{c0} 为方解石初始体积分数,%; V_{c1} 为浸泡稀盐酸后方解石体积分数,%。

实验结果表明,不同浓度盐酸浸泡后,煤岩中充填的方解石均表现出早期快速溶蚀特征。浸泡24 h后,3个样品的方解石溶蚀率均约为70%;此后溶蚀速率明显降低,浸泡264 h后,各浓度盐酸条件下的溶蚀率均稳定在约85%,表明酸液浓度对最终溶蚀程度的影响不显著(图10a)。反应前6 h为方解石快速溶解阶段,煤岩孔隙度显著增加:样品a的孔隙度由0.17%增

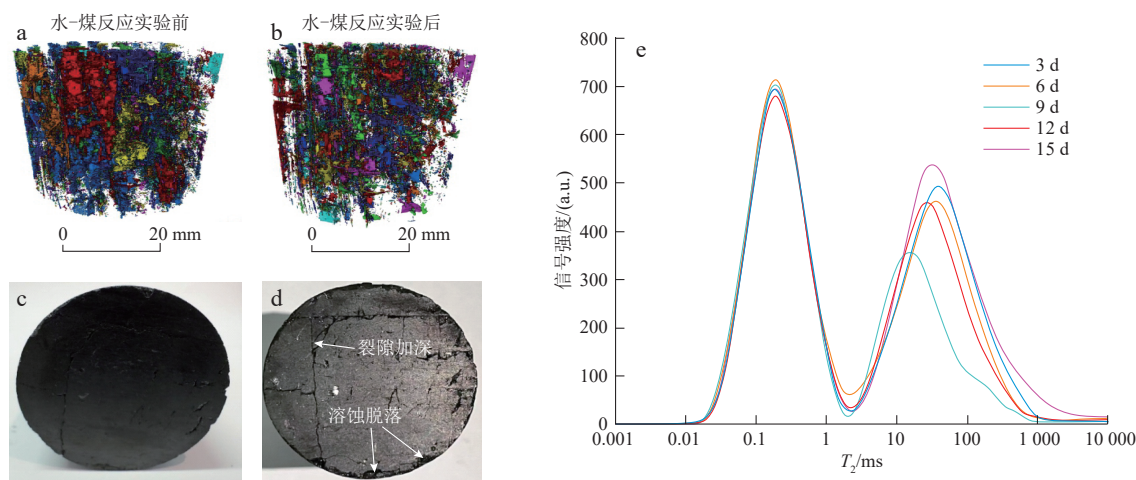


图9 水-煤反应实验前、后CT扫描图像与核磁共振 T_2 谱变化

Fig. 9 Variations in CT images and NMR T_2 spectra before and after water-coal interaction

a. 水-煤反应实验前CT扫描图像;b. 水-煤反应实验后CT扫描图像;c. 水-煤反应实验前岩心照片;d. 水-煤反应实验后岩心照片;e. 核磁共振 T_2 谱(T_2 为横向弛豫时间。)

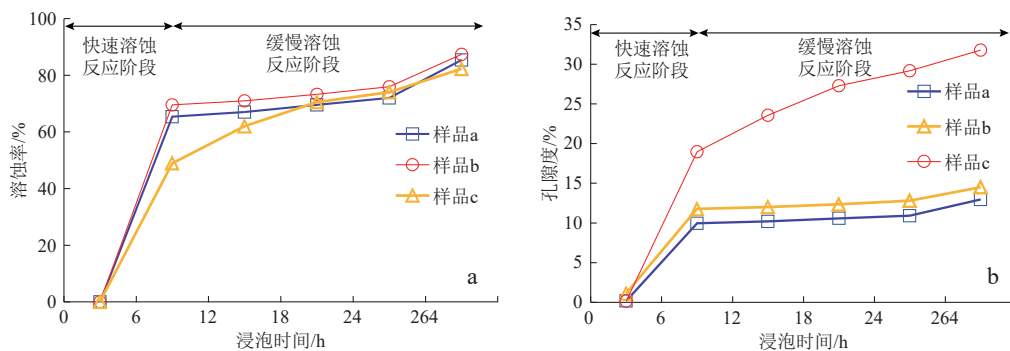


图10 水-煤反应实验中不同浸泡时间下快速、缓慢溶蚀反应阶段及样品溶蚀率和孔隙度的变化

Fig. 10 Rapid/slow dissolution stages and variations in dissolution behaviors under different soaking durations

a. 溶蚀率;b. 孔隙度

至 10.57%, 样品 b 和 c 分别增至 12.33% 和 27.28% (图 10b)。微米 CT 结果显示, 方解石溶蚀后形成大量微裂缝 (图 11), 新增孔隙空间主要受原始方解石体积分数控制, 因此方解石含量较高的样品 c 孔隙度增幅最大, 约为 31%。实际煤岩气井压裂过程中, 施工完成后进入返排阶段通常间隔 12 ~ 24 h。该实验结果证实, 气井开始返排时, 煤岩中的可溶矿物已与酸性压裂液发生快速反应, 形成一定规模的溶蚀孔缝, 短时间内溶蚀率超过 50%、孔隙度增加约 10% ~ 27%, 为增孔、增渗的主要阶段。浸泡 264 h (11 d) 后的样品结果可指示远端液体与煤岩在长时间缓慢溶蚀改造后的效果, 其溶蚀率超过 80%。因此, 气井进入返排阶段后, 长时间的水-煤反应虽不占主导地位, 但仍对压裂液

波及的远端煤岩储层具有积极改造作用。

此外, 酸化后的煤岩样品出现明显破碎, 且盐酸浓度越高, 破碎越快。这主要是因为盐酸溶蚀胶结的方解石后, 煤岩结构被切割为小块并发生崩解, 酸液浓度越高, 反应速率越快, 该现象越显著 (图 11)。总体而言, 酸化作用可有效溶蚀方解石胶结物, 扩大储集空间, 提升渗流能力, 并促进煤体破碎, 从而增强压裂改造效果。

4 压后岩心分析

水-煤作用可软化煤岩基质、溶蚀矿物, 进而形成次生微裂缝并弱化结构强度, 促进煤岩物理破碎。在水力改造过程中, 煤岩破碎形成的复杂裂缝网络可推动水-岩反应向远部延伸; 同时, 机械剪切与拉张作用进一步扩大水-煤反应产生的微裂隙, 增强裂缝复杂度。在化学-力学协同耦合作用下, 三者共同驱动原生割理与裂缝扩展、次生微裂缝形成以及煤体结构破碎, 最终形成多类型缝网形态。

4.1 煤岩压后缝网形态

为验证室内岩心实验与大型物理模拟实验中形成复杂缝网的认识, 开展了矿场水力压裂压后的取心研

表 2 水-煤反应实验中煤岩样品泡酸溶蚀实验样品信息及实验条件

Table 2 Sample information and experimental conditions for acid dissolution tests on coal samples

样品编号	稀盐酸浓度/%	方解石初始体积分数/%	初始孔隙度/%
a	5	14.96	0.17
b	8	15.34	1.08
c	10	38.46	0.16

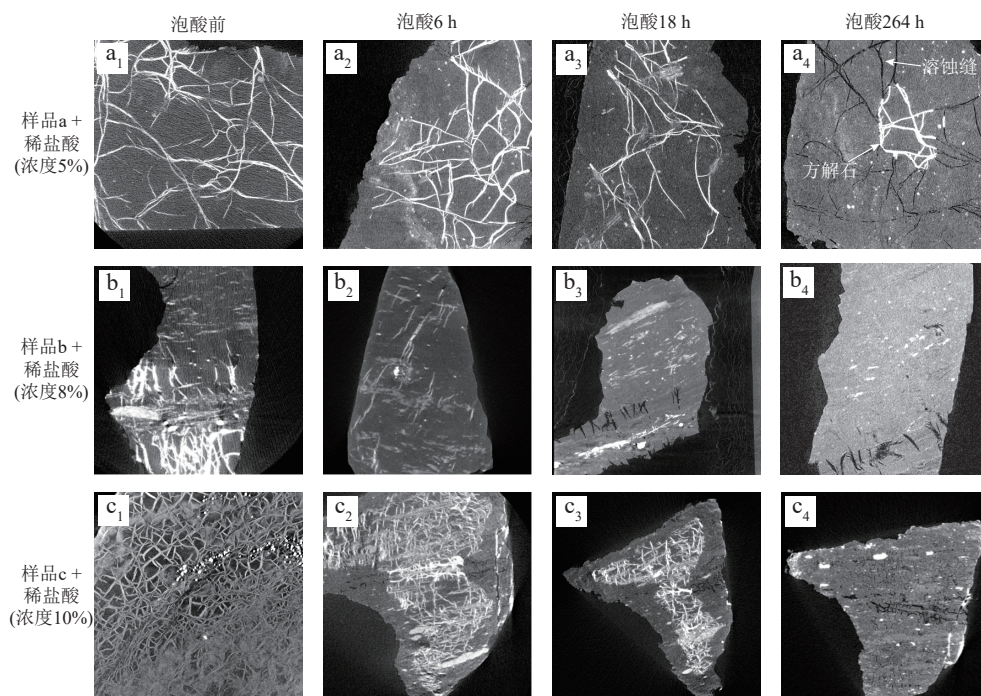


图 11 水-煤反应实验中不同浓度稀盐酸浸泡后煤岩样品微米 CT 图像中方解石充填物溶蚀特征

Fig. 11 Dissolution characteristics of calcite veins in micro-CT images of coal samples after immersion in dilute hydrochloric acid of varying concentrations

a₁—a₄. 样品 a 在浓度 5% 的稀盐酸中浸泡前及浸泡 6, 18 和 264 h 后的 CT 图像; b₁—b₄. 样品 b 在浓度 8% 的稀盐酸中浸泡前及浸泡 6, 18 和 264 h 后的 CT 图像; c₁—c₄. 样品 c 在浓度 10% 的稀盐酸中浸泡前及浸泡 6, 18 和 264 h 后的 CT 图像

究,构建了“微观机理—宏观规律—现场验证”的研究思路。图12a展示了割理诱导裂缝特征:煤岩天然割理对压裂裂缝扩展具有明显的导向作用,压裂液沿割理延伸形成密集裂缝网络,从而增强缝网复杂度。图12b为剪切滑移裂缝形态:压裂过程中,煤岩在应力作用下发生剪切破裂并产生滑移,形成规模性剪切裂缝,进一步连通局部裂缝网络,提高储层渗流通道的连通性。总体而言,压后取心CT扫描结果验证了室内实验提出的煤岩多模式破裂特征,表明煤岩压裂主要形成以剪切滑移为主、沟通天然割理的复杂缝网结构。

4.2 压后碎裂煤岩天然增渗效应

基于压后岩心特征及工业CT扫描结果,根据破碎程度由高到低,可将压后煤岩破碎形态可分为近粉末状、碎块状和碎饼状3类,破裂方向均垂直于煤岩层理面(图12)。近粉末状破裂表现为碎片细小、形态不规则,煤粉与细小煤块混合堆积(图12e,f)。碎块状破裂以大量棱角状煤块堆叠为特征,平均粒径为1~2 cm。CT扫描图像显示,碎块之间以点接触为主,形成类似砂岩的“骨架结构”,可抵抗水平主应力作用下的裂缝闭合,从而提高渗流能力(图12g,h)。碎饼状破裂则为相邻面割理在压裂能量作用下发生不规则破裂所形成的饼状煤块,其破裂面凹凸不平,块间常有细小碎煤填充(图12i,j)。

4.3 压后煤岩渗流能力评价

4.3.1 压后煤岩渗透性实验

前文压后岩心分析结果证实,压后煤岩裂缝面未

见明显支撑剂嵌入,仅在近粉末状煤块中发现少量团簇状石英砂;同时,物理模拟结果显示,支撑剂主要在近井筒区域堆积,难以沿裂缝长距离搬运和铺置(图6)。因此,压后煤岩裂缝导流能力的维持并不完全依赖支撑剂,而主要来源于煤岩破裂后形成的骨架结构。上述煤岩破裂形态表明,水力压裂能量作用下,碎裂煤块相互接触可形成骨架结构,但其在应力条件下的导流能力及变化规律仍有待进一步认识。为此,本研究将现场采集的不同类型压后煤岩碎块铺设于API导流室中,模拟其破碎后的堆积形态,并测试评价导流能力差异。实验步骤如下:①按不同粒径煤块进行配比,包括粉末状、大粒径块状(粒径=1~2 cm)和小粒径块状(粒径<1 cm),以模拟不同破裂形态的渗流特征;②将配比样品均匀填入导流室,并施加设定的闭合压力;③以恒流方式注入实验流体,注入压力为7 MPa,出口压力为大气压,记录稳定后的压力与流量;④依据《压裂支撑剂导流能力测试方法》(SY/T6302—2019)计算不同时间下的渗透率。

根据煤岩压后破碎形态,设计了3种煤块配比组合样品及相应的实验条件(表3),分别模拟近粉末状破裂(煤粉与不同粒径煤块混合样)和碎块状破裂(不同粒径煤块混合样)的导流能力。轴压依据鄂尔多斯盆地东部深层煤岩实际地层条件设定。

4.3.2 压后煤岩渗透性影响因素

样品1(70%煤粉+30%大粒径煤块)初始渗透率为 $1.570 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,在0~20 h内渗透率快速下降,随后在20~64 h期间渗透率稳定在 $0.402 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 附近

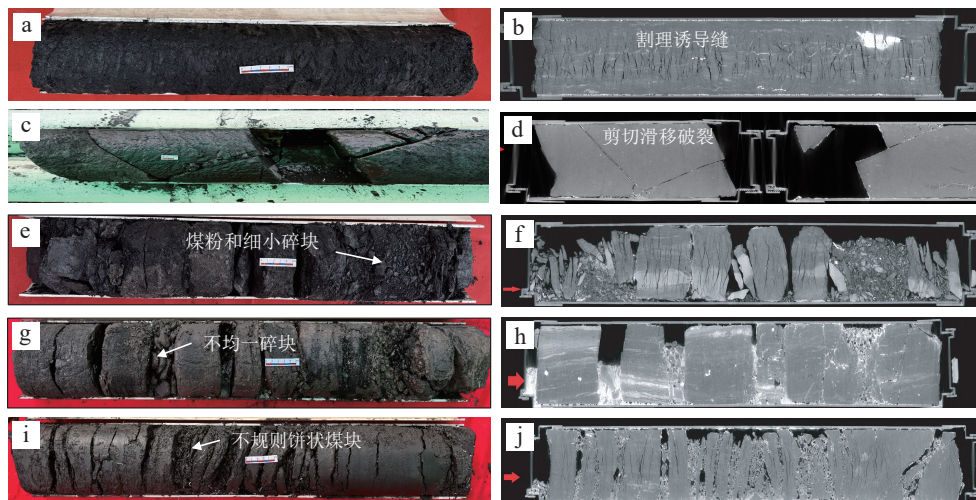


图12 鄂尔多斯盆地东部煤岩压后岩心特征

Fig. 12 Post-fracturing core characteristics of coal rock in the eastern Ordos Basin

a. 割理诱导缝,煤心照片; b. 割理诱导缝,CT扫描图像; c. 剪切滑移缝,煤心照片; d. 剪切滑移缝,CT扫描图像; e. 近粉末状煤岩,煤心照片; f. 近粉末状煤岩,CT扫描图像; g. 碎块状煤岩,煤心照片; h. 碎块状煤岩,CT扫描图像; i. 碎饼状煤岩,煤心照片; j. 碎饼状煤岩,CT扫描图像

表3 鄂尔多斯盆地东部煤岩压后自身导流能力测试实验条件及样品类型

Table 3 Experimental conditions and samples for self-conductivity testing of post-fracturing coal rock

样品类型	铺置厚度/cm	注入排量/ (mL/min)	轴压/MPa	注入介质	环境温度/°C
样品 1: 70% 煤粉 + 30% 大粒径煤块	2.5	2.5	25	煤油	20
样品 2: 70% 煤粉 + 30% 小粒径煤块	2.5	2.5	25	煤油	20
样品 3: 70% 大粒径煤块 + 20% 小粒径煤块 + 10% 煤粉	2.5	0.8	25	水基压裂液	20

(图 13a)。样品 2(70% 煤粉+30% 小粒径煤块)渗透率由 $0.386 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 持续降至 $0.036 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 下降约一个数量级; 约 12 h 后渗透率下降速率减缓, 但未出现稳定阶段(图 13c)。样品 3(70% 大粒径煤块 + 20% 小粒径煤块 + 10% 煤粉)初始渗透率达 $25.300 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 渗透率随时间呈阶梯式下降: 约 5 h 后渗透率由

$25.300 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 骤降至 $12.600 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 维持约 20 h 后逐渐降至约 $5.100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 并趋于稳定(图 13e)。

实验结束后, 各样品的压实程度差异明显: 样品 1 仍可见少量煤块, 且局部黏结成块; 样品 2 整体致密, 基本黏结成块; 而样品 3 仍保留大量颗粒状煤块, 未明显固结(图 13b₁, b₂, d₁, d₂, f₁, f₂)。样品 3 中大粒径煤块

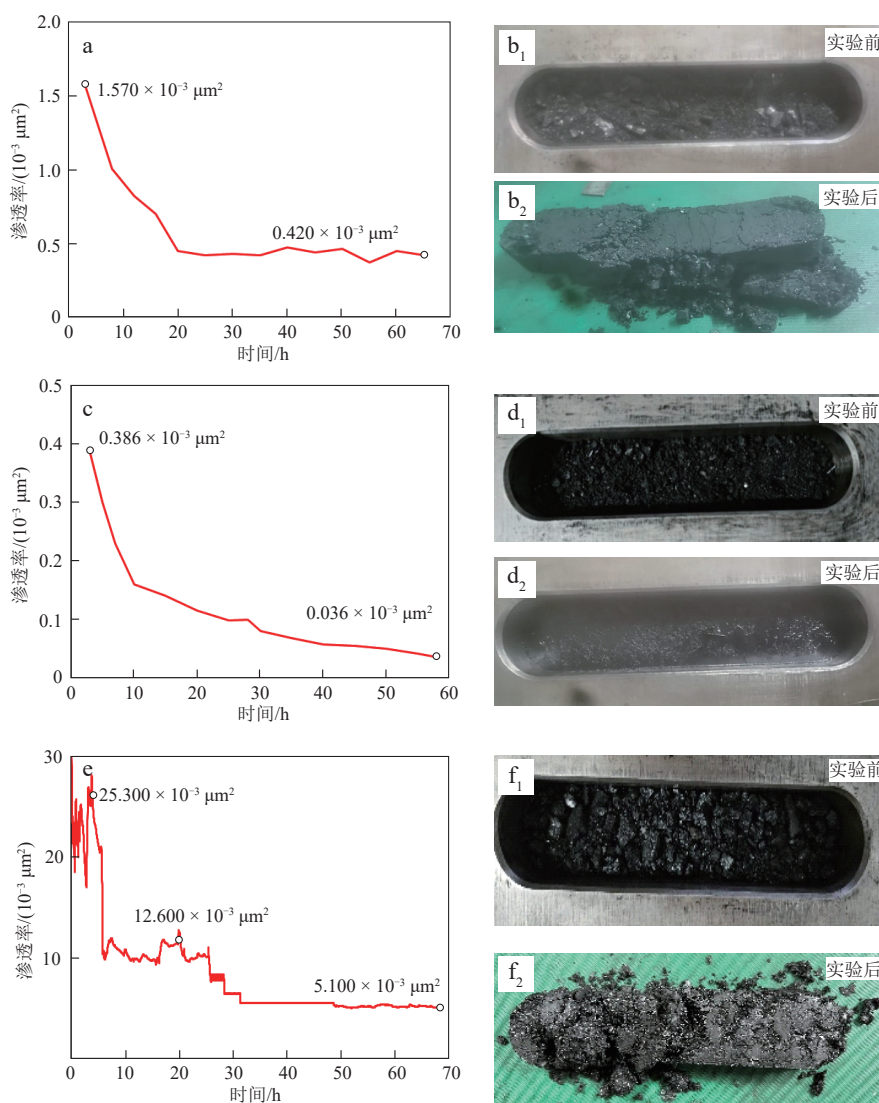


图 13 鄂尔多斯盆地东部煤岩压后渗透性实验中不同应力条件下渗透率随时间演化规律及实验前、后样品形态特征

Fig. 13 Time-dependent permeability variations and morphology of different post-fracturing coal rock samples before and after experiments

a. 样品 1 渗透率随时间演化曲线; b₁, b₂. 分别为样品 1 实验前、后形态变化特征照片; c. 样品 2 渗透率随时间演化曲线; d₁, d₂. 分别为样品 2 实验前、后形态变化特征照片; e. 样品 3 渗透率随时间演化曲线; f₁, f₂. 分别为样品 3 实验前、后形态变化特征照片

占比达70%;而样品2不含大粒径煤块且煤粉含量高,表明大粒径煤块具有更显著的增渗作用,煤粉易在应力作用下压实并黏结成块。对比样品1与样品2的粒径组合可见,即使在煤粉含量较高的条件下,大粒径煤块的增渗效果仍明显优于小粒径煤块。

实验结果表明,大粒径煤块占比与初始及长期渗透率均呈显著正相关:样品3的初始和长期渗透率分别约为样品1的17倍和11倍,而样品1则分别约为样品2的5倍和10倍(图14)。这表明,大颗粒煤块之间的点接触可形成类似骨架结构,是提高渗透率的关键。此外,不含大粒径煤块的样品2在长时间测试中渗透率持续缓慢下降,且未出现稳定阶段,而样品1和样品3最终均趋于稳定(图13a,c,e)。其原因在于煤粉易被压实并随流体运移堵塞通道,导致渗流空间有限、连通性差,对储层产生一定伤害。然而,现场试验并投运一体化装置配套的过滤分离器(对粒径3 μm 以上粉尘的分离效率 $\geq 99\%$),持续半年的监测结果显示,分离滤芯无煤粉析出,说明压后破碎煤岩形成的煤粉对井筒和地面设备的影响十分有限。相比之下,大粒径煤块相互接触形成的通道连通性更好,不易完全封堵,可维持稳定渗流。总体来看,破碎煤块粒径越大、数量越多,在地层应力下形成的导流能力越强,稳定性也越好。贺甲元等^[32]对煤岩开展的长期导流能力测试发现,在30 MPa和40 MPa应力条件下,40 h后的渗透率仅相差 $0.24 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,表明高应力状态下加载应力对长期导流能力的影响相对较小,上覆加载应力主要影响前期导流能力下降速率。因此,在实际生产过程中,注入的高压流体对煤岩渗流通道具有保护作用;随着返排进行,地层流体压力下降,有效应力会逐渐增加,但煤岩自身渗透率随时间的衰减幅度较低,仍能维持相近水平。

压后岩心观察分析表明,压后煤岩破碎类型以碎

块状为主,在25 MPa轴压下,样品3的长期渗透率可稳定维持在约 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。上述结果有力地证实了破碎煤岩具备持续、稳定的渗流能力,为无砂压裂的实施提供了可靠基础理论支撑。

5 缝网激活无砂压裂理念与技术

煤岩储层中发育的面割理与端割理构成独特的双重“天然复杂原始缝网”,既是天然力学弱面,也是优势渗流通道。煤岩缝网激活无砂压裂理念的核心在于:依托煤岩割理系统、塑性力学性质及天然“应力封存箱”条件,不依赖支撑剂,而是通过高压流体诱发拉张-剪切破坏与滑移,促使“软性”煤岩破碎并激活天然割理,从而形成稳定的高效渗流通道。

在高压流体持续注入过程中,天然弱面易优先开启并延伸,在扩展过程中发生捕获与偏转,使各裂缝相互沟通,形成覆盖范围广、复杂程度高的主控裂缝网络(图15)。破碎带内煤块与煤粉相互支撑形成骨架结构,贯穿裂缝与激活的天然割理共同构建高速渗流网络;在顶、底板“硬支撑”结构的约束下,压后煤岩能够维持高渗流特性,显著提升储层渗透能力^[33-34](图16)。此外,高温-高压条件下压裂液与煤岩发生的物理-化学反应,如力学强度劣化、表面性质改变及矿物溶解等产生的协同作用,进一步增强了压后储层的渗透能力。

煤岩储层割理发育、力学强度低、基质致密且渗流能力弱。在高压流体作用下,煤岩易发生破碎并沟通天然割理,从而形成高渗流通道;同时,水-岩相互作用可进一步劣化煤岩强度并改善储层渗透性。基于上述认识,创新提出“缝网激活无砂压裂”技术:在顶、底板“硬支撑”条件下,通过地面向煤岩储层注入高压液体,激活并扩展天然割理,促使煤岩破碎并形成高渗流的人工再造缝网体系,从而实现储层增产改造。

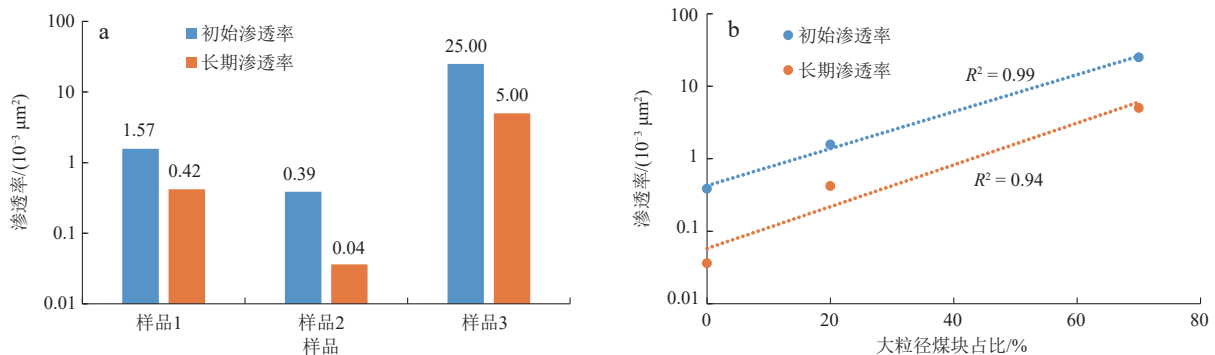


图14 鄂尔多斯盆地东部煤岩压后渗透性实验中不同应力条件下样品渗透率特征

Fig. 14 Permeability characteristics of various post-fracturing coal rock samples

a. 不同样品初始渗透率和长期渗透率对比柱状图; b. 渗透率与样品中大粒径煤块占比的关系

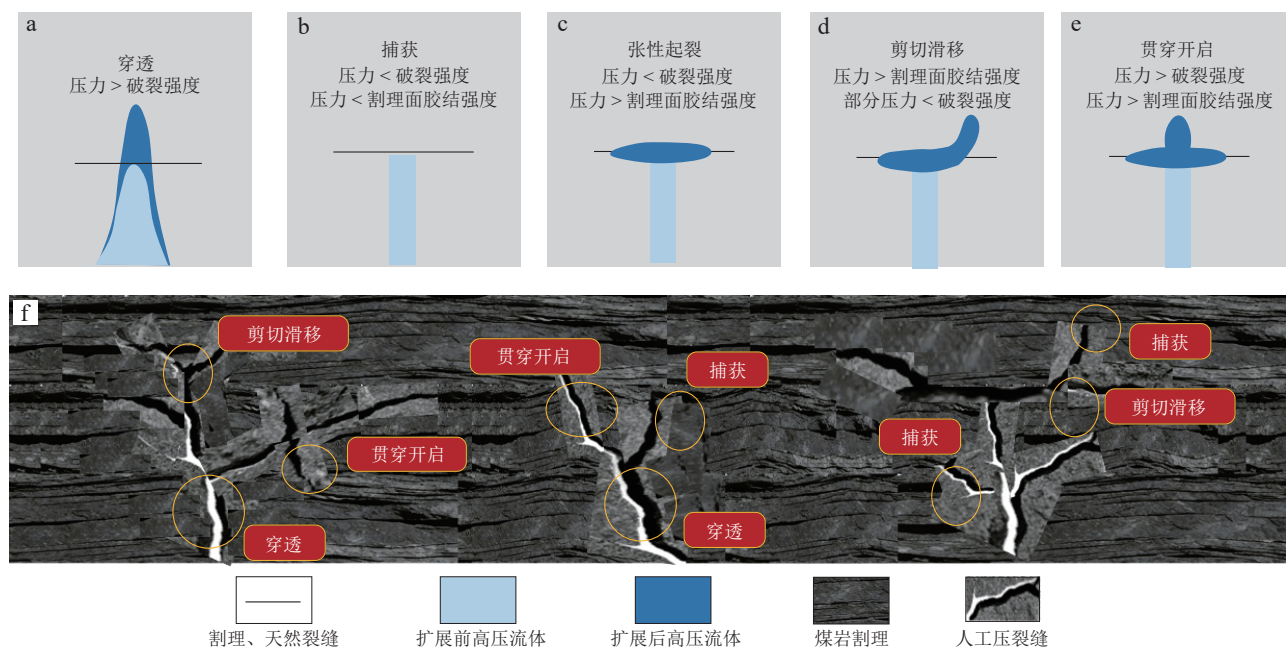


图 15 煤岩天然割理激活扩展形成复杂缝网示意图

Fig. 15 Formation of complex fractures induced by the activation and propagation of natural cleats in the coal rock

a. 压裂缝穿透煤岩割理; b. 压裂缝被煤岩割理捕获; c. 煤岩割理张性起裂; d. 煤岩割理起裂后发生剪切滑移; e. 压裂缝贯通煤岩割理; f. 煤岩天然割理激活扩展模式

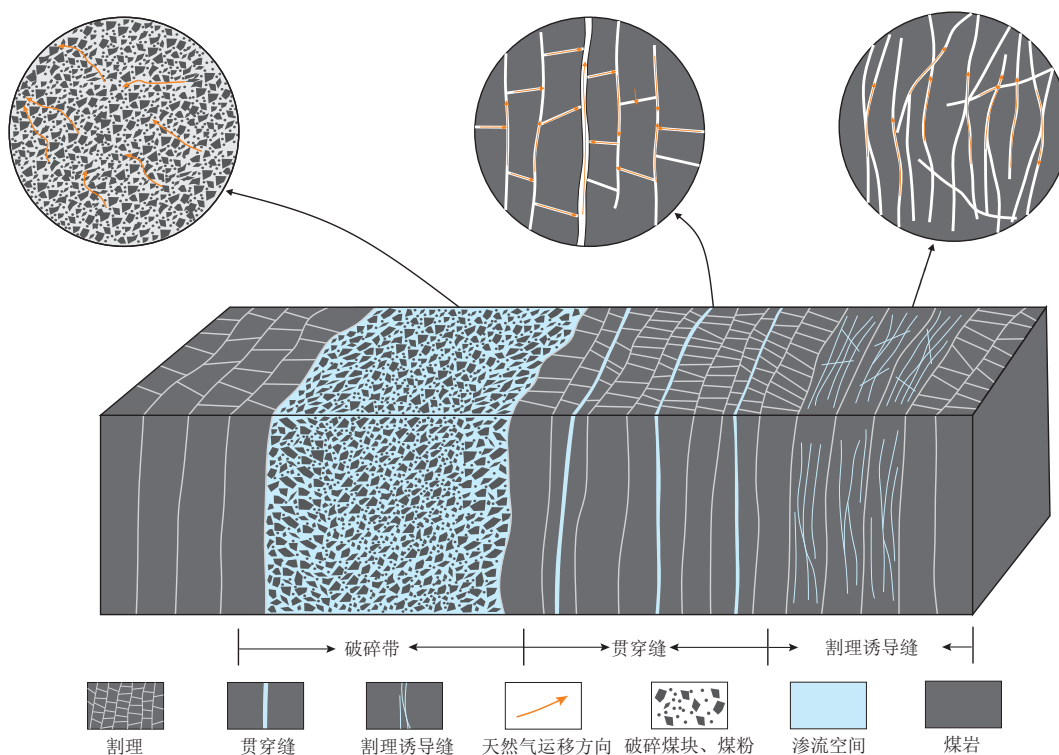


图 16 压后煤岩破碎增渗模式示意图

Fig. 16 Fragmentation-induced permeability enhancement model of the coal rock after fracturing

6 无砂压裂现场实践

自 2023 年以来,长庆油田持续推进煤岩气基础理

论研究与技术攻关,在超大规模与适度规模两个阶段的技术迭代中不断深化对压裂机制的认识。煤岩气压裂技术逐步由“依赖支撑剂维持裂缝导流”向“激活天然缝网实现天然渗流”转变。目前已进入缝网激活型

体积压裂试验阶段,按照从稳液控砂到极限控砂压裂试验,再到无砂压裂试验的思路,有序开展了无砂压裂现场实践,并持续完善无砂压裂理论体系、优化施工参数,探索成本、产量与效益之间的最优平衡。

6.1 稳液控砂压裂试验

针对缝网激活体积压裂技术,在S平台开展了稳液控砂先导试验。两口井在水平段长度、段簇、排量及液量相同的情况下,试验井YH3井的加砂强度从5 t/m降至3 t/m,压后试采60 d,日产气量与油压和套压均与对比井相当,初步证实了产能主控因素进液量大于加砂量(表4)。

6.2 极限控砂压裂试验

在直井、水平井和大斜度井中开展了极限控砂压裂试验,试验井总加砂量为60~300 m³(表5)。水平井M-MH6单段液量为1 570 m³,每段尾追石英砂20 m³,压后测试日产气量 8.37×10^4 m³,试采166 d,稳产气量 4.44×10^4 m³/d,油压4.99 MPa、套压6.99 MPa(图17a)。大斜度井M-10MX总加砂量80 m³,压后试采155 d,日产气量稳定在约 3.00×10^4 m³,油压3.40 MPa、套压5.51 MPa。与对比井相比,试验井支撑剂用量减少约95%,测试与试采产量相当,油压和套压略低且生产稳定,再次表明液体规模对煤岩无砂压裂产能具有主控作用(图17b;表5)。

6.3 无砂压裂优化试验

在水平井M-MH6试采效果的基础上,部署了4口水平井,开展相同段长、相同排量和不同进液量的对比试验,进一步探索“无砂压裂”提产规模的上限(表6)。试验井排量为18 m³/min,总液量范围为26 142~34 681 m³,进液强度为17.4~23.1 m³/m。其中,水平井M-MH5和M-MH7均已进入试采阶段:M-MH5井

目前试采46 d,油压1.5 MPa、套压4.4 MPa,火长5~6 m,日产气量 4.0×10^4 m³;M-MH7井试采22 d,油压3.3 MPa、套压6.9 MPa,火长5~6 m,日产气量 4.5×10^4 m³,均展示出良好的效果。该试验进一步揭示了液体规模主导下无砂压裂的产能控制因素,也为无砂压裂技术的迭代及规模化推广提供了关键依据。

7 结论与展望

1) 煤岩岩石力学强度低、非均质性强,在地层原位条件下整体呈塑性,煤岩储层具备实现“接力式破岩、推进式造缝”的基本条件。煤岩整体处于顶、底板致密、力学强度高且封隔性好的地质条件下,顶、底板围岩形成天然的“硬”支撑,维持了较高的垂向与水平应力差,从而促成了压裂过程中“应力封存箱”的形成,这是煤体充分破碎、割理大量激活进而形成复杂缝网的地质前提。

2) 高压流体改造后的破碎煤岩相互接触可显著增大渗流空间,使裂缝网络在压裂液排出后仍能保持较高导流能力。在25 MPa覆压条件下,测试60 h后,破碎煤岩渗透率仍可保持在约 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3) 煤岩缝网激活无砂压裂理念的核心是在煤岩割理系统、塑性力学性质及天然“应力封存箱”条件下,不依赖支撑剂,通过高压流体诱发拉张-剪切破坏与滑移,促使“软性”煤岩破碎并激活天然割理,形成稳定的高效渗流通道。

4) 煤岩气“无砂”压裂试验的成功标志着储层改造由传统“大规模加砂”向“无砂”模式的重要转变,缝网激活体积压裂技术具有良好应用前景。但目前试验样本少、生产时间短、理论基础仍不完善,规模化应用仍需进一步探索。未来长庆油田将通过长周期试采和扩大试验持续完善技术,并以源头提高采收率为核心,优化压裂参数、缩短段间距、提高进液强度,提

表4 鄂尔多斯盆地东部本溪组8[#]煤岩稳液控砂压裂试验井情况统计

Table 4 Statistics of pilot wells subjected to fracturing of controlled proppant transport with fluid rate stabilization in the No. 8 coal seam, Benxi Formation, Eastern Ordos Basin

试验类型	井型	井号	排量/(m ³ /min)	加砂量/m ³	进液量/m ³	同期对比情况
稳液控砂	水平井	S-YH3 (试验井)	16	3 000 (加砂强度3 t/m)	23 112 (进液强度16 m ³ /m)	测试产量: 13.5×10^4 m ³ /d 试采产量: 5.2×10^4 m ³ /d 油压:7.8 MPa 套压:13.3 MPa
		S-YH5 (对比井)	16	4 995 (加砂强度5 t/m)	24 276 (进液强度16 m ³ /m)	测试产量: 12.3×10^4 m ³ /d 试采产量: 5.4×10^4 m ³ /d 油压:8.6 MPa 套压:14.6 MPa

表 5 鄂尔多斯盆地东部本溪组 8#煤岩无砂压裂试验井情况统计

Table 5 Statistics of pilot wells subjected to proppant-free fracturing in the No. 8 coal seam, Benxi Formation, Eastern Ordos Basin

试验类型	井型	井号	排量/(m ³ /min)	加砂量/m ³	进液量/m ³	同期对比情况
无砂压裂	直井	M-23M(试验井)	16	60	1 530.0	测试产量:1.50×10 ⁴ m ³ /d 试采产量:0.71×10 ⁴ m ³ /d 油压:0.80 MPa 套压:3.10 MPa
		M-16M(对比井)	16	—	1 514.0	测试产量:2.79×10 ⁴ m ³ /d 试采产量:1.50×10 ⁴ m ³ /d 油压:0.40 MPa 套压:2.30 MPa
	水平井	M-MH6(试验井)	16	300	24 534.0 (进液强度 16 m ³ /m)	测试产量:8.37×10 ⁴ m ³ /d 试采产量:4.44×10 ⁴ m ³ /d 油压:4.99 MPa 套压:6.99 MPa
		S51-YH5(对比井)	12	4 520 (加砂强度 4.5 t/m)	28 434.6 (进液强度 19 m ³ /m)	测试产量:16.11×10 ⁴ m ³ /d 试采产量:4.25×10 ⁴ m ³ /d 油压:6.13 MPa 套压:7.92 MPa
	大斜度井	M-10MX(试验井)	16	80	7 530.0 (进液强度 22 m ³ /m)	测试产量:3.35×10 ⁴ m ³ /d 试采产量:2.92×10 ⁴ m ³ /d 油压:3.70 MPa 套压:6.00 MPa
		M-19MX(对比井)	16	1 030 (加砂强度 5.0 t/m)	5 210.0 (进液强度 18 m ³ /m)	测试产量:3.61×10 ⁴ m ³ /d 试采产量:3.11×10 ⁴ m ³ /d 油压:7.50 MPa 套压:9.50 MPa

注：“—”表示无数据。

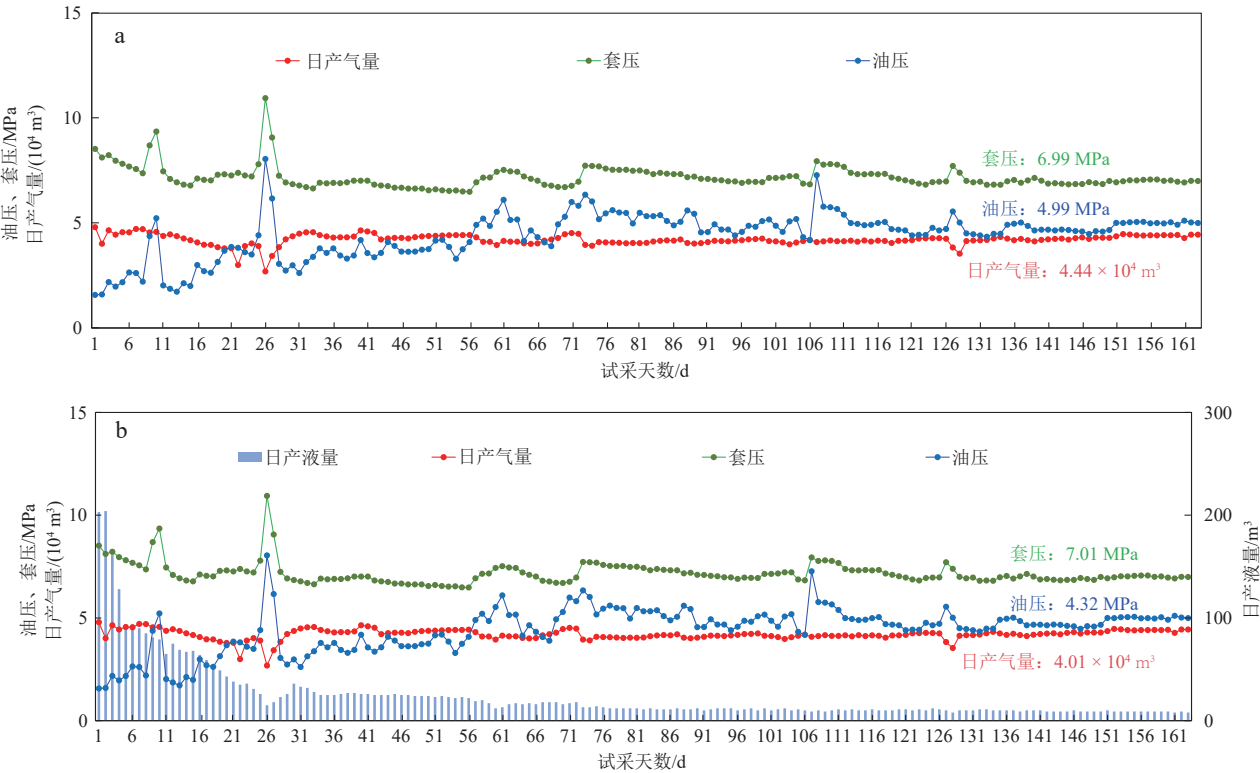


图 17 鄂尔多斯盆地东部本溪组 8#煤岩缝网激活无砂压裂试验水平井与对比井排采曲线

Fig. 17 Flowback and production curves of horizontal wells using fracture-network activation and proppant-free fracturing versus conventional offset wells in the No. 8 coal seam, Benxi Formation, Eastern Ordos Basin

a. M-MH6 井(试验水平井), 水平段长 1 500 m, 气测含量平均值 45%; b. S51-YH5 井(对比井), 水平段长 1 500 m, 气测含量平均值 56%

表6 鄂尔多斯盆地东部本溪组8#煤岩无砂压裂扩大试验水平井统计(水平段长1 500 m,排量18 m³/min)
Table 6 Statistics of expanded pilot wells for proppant-free fracturing in the No. 8 coal seam, Benxi Formation, Eastern Ordos Basin

井号	进液量/m ³	进液强度/(m ³ /m)	目前进展
M-MH1	33 943	22.6	排液中
M-MH3	26 142	17.4	
M-MH5	26 323	17.5	试采产量:4.0×10 ⁴ m ³ /d 油压:1.5 MPa 套压:4.4 MPa
M-MH7	34 681	23.1	试采产量:4.5×10 ⁴ m ³ /d 油压:3.3 MPa 套压:6.9 MPa

升单井产量和EI比(单井EUR与单井投资的比值),同时推进CO₂及酸性液体压裂现场试验。

参 考 文 献

[1] 邹才能,赵群,刘翰林,等. 中国煤岩气突破及意义[J]. 天然气工业, 2025, 45(4): 1-18.
ZOU Caineng, ZHAO Qun, LIU Hanlin, et al. China's breakthrough in coal-rock gas and its significance[J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(4): 1-18.

[2] 周立宏,熊先钺,丁蓉,等. 煤岩气内涵、富集机理及实践意义[J]. 天然气工业, 2025, 45(3): 1-15.
ZHOU Lihong, XIONG Xianyue, DING Rong, et al. Connotation, enrichment mechanism and practical significance of coal-rock gas[J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(3): 1-15.

[3] 费世祥,崔越华,李小锋,等. 鄂尔多斯盆地中、东部深层煤岩气水平井高效开发主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(1): 273-287.
FEI Shixiang, CUI Yuehua, LI Xiaofeng, et al. Main factors controlling the efficient production of horizontal wells for deep coal-rock gas in the eastern and central Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(1): 273-287.

[4] 费世祥,侯雨庭,张正涛,等. 鄂尔多斯盆地东部煤岩气水平井差异化精细导向方法及应用[J]. 天然气地球科学, 2025, 36(6): 985-999.
FEI Shixiang, HOU Yuting, ZHANG Zhengtao, et al. Differentiated and refine geosteering methods for coal-rock gas horizontal wells and their applications in the eastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2025, 36(6): 985-999.

[5] 侯雨庭,周国晓,黄道军,等. 鄂尔多斯盆地纳林河地区煤岩气成藏地质特征[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(6): 1605-1616.
HOU Yuting, ZHOU Guoxiao, HUANG Daojun, et al. Geological characteristics of coal-rock gas accumulation in the Nalinhe area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(6): 1605-1616.

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

LI Yong, XU Fengyin, TANG Shuheng, et al. Progress and development direction of coalbed methane (coal-rock gas) exploration and development in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(10): 63-79.

[7] 张燕明,蔺小博,周长静,等. 鄂尔多斯盆地深层煤岩气储层改造增产关键技术与应用[J]. 中国石油勘探, 2025, 30(4): 160-170.
ZHANG Yanming, LIN Xiaobo, ZHOU Changjing, et al. Key reservoir stimulation technologies and application for deep coal-rock gas in Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2025, 30(4): 160-170.

[8] 李勇,徐立富,张守仁,等. 深煤层含气系统差异及开发对策[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 900-917.
LI Yong, XU Lifu, ZHANG Shouren, et al. Gas bearing system difference in deep coal seams and corresponded development strategy [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 900-917.

[9] 问晓勇,陈磊,叶亮,等. 鄂尔多斯盆地气藏新类型储层岩石断裂性质及导流能力[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2024, 39(2): 12-21, 46.
WEN Xiaoyong, CHEN Lei, YE Liang, et al. Breaking properties and fracture conductivity of new type of gas reservoir rocks in Ordos Basin [J]. Journal of Xi'an Shiyu University (Natural Science Edition), 2024, 39(2): 12-21, 46.

[10] 杨华,刘新社,闫小雄. 鄂尔多斯盆地晚古生代以来构造-沉积演化与致密砂岩气成藏[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 174-183.
YANG Hua, LIU Xinshe, YAN Xiaoxiong. The relationship between tectonic-sedimentary evolution and tight sandstone gas reservoir since the Late Paleozoic in Ordos Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 174-183.

[11] 李小刚,唐政,朱静怡,等. 深层煤岩气压裂研究进展与展望[J]. 天然气工业, 2024, 44(10): 126-139.
LI Xiaogang, TANG Zheng, ZHU Jingyi, et al. Research progress and prospect of deep coalrock fracturing [J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(10): 126-139.

- [12] 张才利, 刘新社, 杨亚娟, 等. 鄂尔多斯盆地长庆油田油气勘探历程与启示[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(3): 253-263.
ZHANG Caili, LIU Xinshe, YANG Yajuan, et al. Petroleum exploration history and enlightenment of Changqing Oilfield in Ordos Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(3): 253-263.
- [13] 牛小兵, 赵伟波, 史云鹤, 等. 鄂尔多斯盆地本溪组天然气成藏条件及勘探潜力[J]. 石油学报, 2023, 44(8): 1240-1257.
NIU Xiaobing, ZHAO Weibo, SHI Yunhe, et al. Natural gas accumulation conditions and exploration potential of Benxi Formation in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(8): 1240-1257.
- [14] 席胜利, 闫伟, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地天然气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 33-51, 132.
XI Shengli, YAN Wei, LIU Xinshe, et al. New fields, new types and resource potentials of natural gas exploration in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 33-51, 132.
- [15] 牛小兵, 范立勇, 闫小雄, 等. 鄂尔多斯盆地煤岩气富集条件及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(5): 972-985.
NIU Xiaobing, FAN Liyong, YAN Xiaoxiong, et al. Enrichment conditions and resource potential of coal-rock gas in Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(5): 972-985.
- [16] 张正涛, 费世祥, 罗文琴, 等. 鄂尔多斯盆地东部本溪组煤岩气储集层评价及甜点区优选[J]. 新疆石油地质, 2025, 46(3): 263-272.
ZHANG Zhengtao, FEI Shixiang, LUO Wenqin, et al. Reservoir evaluation and sweet spot optimization for coal rock gas in Benxi Formation, eastern Ordos Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2025, 46(3): 263-272.
- [17] 李勇, 潘松圻, 宁树正, 等. 煤系成矿学内涵与发展——兼论煤系成矿系统及其资源环境效应[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(10): 1948-1965.
LI Yong, PAN Songqi, NING Shuzheng, et al. Coal measure metallogeny: Metallogenic system and implication for resource and environment [J]. Science China Earth Sciences, 2022, 52(10): 1948-1965.
- [18] 李勇. 煤结构演化及燃料、原料和材料属性开发[J]. 煤炭学报, 2022, 47(11): 3936-3951.
LI Yong. Coal structure evolution and its fuel, raw material and functional material properties development [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(11): 3936-3951.
- [19] 黄有根, 郑小鹏, 张道锋, 等. 鄂尔多斯盆地本溪组煤岩微观特征及气体赋存状态[J]. 新疆石油地质, 2025, 46(3): 253-262.
HUANG Yougen, ZHENG Xiaopeng, ZHANG Daofeng, et al. Microscopic characteristics of and gas occurrence in coal rock in Benxi Formation, Ordos Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2025, 46(3): 253-262.
- [20] 王红岩, 段瑶瑶, 刘洪林, 等. 煤层气水平井开发的理论技术初探——兼论煤层气和页岩气开发条件对比[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(4): 47-59.
WANG Hongyan, DUAN Yaoyao, LIU Honglin, et al. Preliminarily exploring the theories and technologies for coalbed methane production using horizontal wells: Comparison of conditions for coalbed methane and shale gas exploitation [J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(4): 47-59.
- [21] 张道锋, 孟康, 黄有根, 等. 鄂尔多斯盆地石炭系本溪组煤岩解析气甲烷碳同位素特征及其地质意义[J]. 天然气地球科学, 2025, 36(9): 1728-1740.
ZHANG Daofeng, MENG Kang, HUANG Yougen, et al. Characteristics of methane carbon isotopes in desorbed gas from the Carboniferous Benxi coal rock in Ordos Basin and their geological significance [J]. Natural Gas Geoscience, 2025, 36(9): 1728-1740.
- [22] 侯雨庭, 周国晓, 黄道军, 等. 鄂尔多斯盆地纳林河地区煤岩气成藏地质特征[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(6): 1605-1616.
HOU Yuting, ZHOU Guoxiao, HUANG Daojun, et al. Geological characteristics of coal-rock gas accumulation in the Nalinhe area, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(6): 1605-1616.
- [23] 闫霞, 熊先钺, 徐凤银, 等. 深部煤岩储层地质力学影响机制及控制因素——以鄂尔多斯盆地大吉区块为例[J]. 煤炭学报, 2025, 50(5): 2550-2566.
YAN Xia, XIONG Xianyue, XU Fengyin, et al. Deep coal geomechanical influence mechanism and its control factors of Daji Block in Ordos Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(5): 2550-2566.
- [24] 熊冬, 贺甲元, 马新仿, 等. 深部煤及顶底板不同射孔位置条件下的压裂模拟——以鄂尔多斯盆地某气田8号深部煤层为例[J]. 煤炭学报, 2024, 49(12): 4897-4914.
XIONG Dong, HE Jiayuan, MA Xinfang, et al. Fracturing simulation with different perforation positions at deep coal seam and roof/floor rock—case study at the No. 8 deep coal seam of a gas field in the Ordos Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(12): 4897-4914.
- [25] LIAO Songze, HU Jinghong, ZHANG Yuan. Mechanism of hydraulic fracture vertical propagation in deep shale formation based on elastic-plastic model [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 295: 109806.
- [26] 王俊亭, 许冬进, 陶振强, 等. 非常规油气支撑剂粒度粒形对其破碎率及裂缝导流能力的影响[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(9): 3672-3679.
WANG Juntong, XU Dongjin, TAO Zhenqiang, et al. Effects of particle size and shape of unconventional oil and gas proppants on breakage rate and fracture conductivity [J]. Science Technology

- and Engineering, 2025, 25(9): 3672–3679.
- [27] 阎纪伟, 梁卫国, 宋晓夏. 水力压裂煤层中砂和煤粉的分布及对煤层气排采的影响[J]. 煤炭学报, 2026, 51(2): 1476–1486.
- YAN Jiwei, LIANG Weiguo, SONG Xiaoxia. Distribution of quartz sand and coal fines in hydraulic fracturing coal seams and its impact on coalbed methane extraction [J]. Journal of China Coal Society, 2026, 51(2): 1476–1486.
- [28] 李明瑞, 史云鹤, 范立勇, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界本溪组8[#]煤岩煤岩气与致密砂岩气主要气藏特征对比[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(6): 1590–1604.
- LI Mingrui, SHI Yunhe, FAN Liyong, et al. Comparison of main reservoir characteristics between deep coal-rock gas of the No. 8 coal seam of the Upper Paleozoic Benxi Formation and tight sand gas reservoirs, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(6): 1590–1604.
- [29] 王勃, 徐凤银, 张傲翔, 等. 煤层气排采过程中水岩耦合作用及其产能响应——以沁水盆地樊庄区块为例[J]. 煤炭学报, 2025, 50(8): 4008–4021.
- WANG Bo, XU Fengyin, ZHANG Aoxiang, et al. Coupling effect of water-rock in the process of coalbed methane extraction and its response to production capacity-Fanzhuang block in Qinshui Basin as an example [J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(8): 4008–4021.
- [30] LV Kunhong, ZHANG Hui, WU Baokang, et al. Damage constitutive model and experimental study of deep coal rock under thermal-hydro-mechanical coupling[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 29337.
- [31] 吴宝杨, 宋佳辉, 李鹏, 等. 不同浸水作用下煤岩损伤及力学性质劣化规律[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(增刊1): 84–93.
- WU Baoyang, SONG Jiahui, LI Peng, et al. Damage and mechanical property deterioration of coal rocks under different water flooding [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(S1): 84–93.
- [32] 贺甲元, 张士诚, 郭旭升, 等. 深部煤层压裂裂缝长期导流能力实验与生产评价应用[J]. 天然气地球科学, 2025, 36(9): 1753–1766.
- HE Jiayuan, ZHANG Shicheng, GUO Xusheng, et al. Experimental study and production of long-term conductivity in deep coal seam propped fractures [J]. Natural Gas Geoscience, 2025, 36(9): 1753–1766.
- [33] 冀胤霖, 张苏鹏, 朱鸿鹄, 等. 深地工程岩体界面摩擦-渗流耦合机理与调控技术: 综述与展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2025, 7(6): 063541.
- JI Yinlin, ZHANG Supeng, ZHU Honggu, et al. Mechanisms and control techniques of friction-permeability coupling of rock discontinuities in deep underground engineering: State of the art and future perspectives [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(6): 063541.
- [34] GE Zhaolong, LI Shihua, ZHOU Zhe, et al. Modeling and experiment on permeability of coal with hydraulic fracturing by stimulated reservoir volume [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(8): 2605–2615.
- (编辑 刘恪云)