

鄂尔多斯盆地煤岩气大规模压裂实践及认识

严向阳, 林波, 陈恒, 杜良军, 蔡东青, 王锐

四川申和新材料科技有限公司 四川成都 610500

项目支持: 四川省工业发展资金产业技术研发和创新能力提升项目“高温储层酸化压裂液体体系开发与应用”(2022JB001202303)

引用: 严向阳, 林波, 陈恒, 等. 鄂尔多斯盆地煤岩气大规模压裂实践及认识[J]. 油气井测试, 2026, 35(1): 44-49.

Cite: YAN Xiangyang, LIN Bo, CHEN Heng, et al. Practices and insights into large-scale hydraulic fracturing of coal rock gas in Ordos basin[J]. Well Testing, 2026, 35(1): 44-49.

摘要 为实现鄂尔多斯盆地煤岩气高效开发, 针对深层煤岩储层特性与压裂关键问题, 结合煤岩气大规模压裂现场实践, 从储层特征出发, 总结研究煤岩气压裂核心问题、工艺技术、参数选择和压裂材料体系, 并提出后续开发需解决的问题。结果表明, 大规模压裂是煤岩气高效开发的核心技术, 需加砂强度在 $4 \text{ m}^3/\text{m}$ 、用液强度在 $30 \text{ m}^3/\text{m}$ 以上才能取得良好的增产效果; 煤岩储层压裂模拟优化、压裂液性能加强、返排液重复利用是需要深化研究的方向。研究成果为鄂尔多斯盆地乃至国内煤岩气高效、经济、绿色开发提供了理论参考与实践借鉴, 同时明确了煤岩气后续开发的技术攻关方向。

关键词 鄂尔多斯盆地; 煤岩气; 大规模压裂; 储层特性; 压裂参数; 压裂液

中图分类号: TE357.1 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2026.01.006

Practices and insights into large-scale hydraulic fracturing of coal rock gas in Ordos basin

YAN Xiangyang, LIN Bo, CHEN Heng, DU Liangjun, CAI Dongqing, WANG Rui

Sichuan Shenhe New Material Technology Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610500, China

Abstract: To achieve efficient development of coal rock gas in the Ordos basin, the core challenges, engineering techniques, parameter selection, and material systems of coal rock gas fracturing were systematically summarized. These analyses were conducted based on reservoir characteristics and extensive field practices of large-scale fracturing, with a particular focus on the unique properties of deep coal seams and critical fracturing issues. Furthermore, the challenges to be addressed in subsequent development were identified. The results indicate that large-scale fracturing constitutes the fundamental technology for effective coal rock gas extraction, where a proppant intensity exceeding $4 \text{ m}^3/\text{m}$ and a fluid intensity above $30 \text{ m}^3/\text{m}$ are required to ensure superior stimulation performance. Further research should focus on fracturing simulation optimization for coal rock reservoirs, enhancement of fracturing fluid performance, and the reuse of flowback fluid. These findings offer both theoretical guidance and practical benchmarks for the efficient, economical, and green development of coal rock gas in the Ordos basin and throughout China, while clearly delineating the trajectory for future technical breakthroughs.

Keywords: Ordos basin; coal rock gas; large-scale fracturing; reservoir characteristic; fracturing parameter; fracturing fluid

2021年, 中石油煤层气公司大吉区块深层煤岩气 JS6-7P01 井产量获得重大突破, 标志着我国深层煤岩气勘探开发取得重大进展, 成为重要的天然气开发资源^[1-2]。煤岩气的勘探开发成功, 不仅为煤岩气规模化、效益开发奠定了基础, 也为我国能源供应提供了重要保障。

以大排量、大排量和大砂量为主要特征的大规模压裂技术已成为煤岩气关键开发技术^[3-4]。尽管煤岩气开发思路和工艺技术还在不断发展和突破, 但也存在返排液利用难度大、产量递减快等问题,

因此有必要从煤岩储层特性出发, 结合煤岩压裂关键问题及技术思路, 对压裂工艺技术、工艺参数、压裂液体体系优选等进行总结分析研究, 探讨提出解决开发过程中实际问题的方向, 为下一步煤岩气高效开发提供借鉴。

1 鄂尔多斯盆地煤岩气大规模压裂的由来

鄂尔多斯盆地深层 8# 煤储层是目前煤岩气开发的主力层位, 其在埋深、成藏、赋存及生产特征等

方面与常规的浅层煤存在明显区别^[5-7]。在岩石力学特征上,深层煤岩还具有高泊松比(0.25~0.4)、低弹性模量(4.5~8 GPa)的特征^[8-9],这种特征使得煤岩与砂岩储层的压裂也存在较大的不同。

这些特征差异,导致煤岩气无法按常规的技术思路进行开发。2019年,中石油煤层气公司率先在鄂尔多斯盆地东缘针对深层8#煤开展一系列技术攻关,首先实践了煤岩体积酸压技术^[10],并通过灰色关联方法认识到加砂量、液量及施工排量是影响深层煤岩气增产效果的主要因素。在结合直井大规模加砂实践认识并借鉴页岩气体积压裂技术思路的基础上,在JS6-7P01井采用大规模压裂改造技术,产气量实现重大历史突破,奠定了大规模压裂技术作为煤岩气开发关键技术的基础,拉开了该技术在煤岩气开发中广泛应用的序幕。

2 大规模压裂增产核心技术思路

深层煤岩增产改造的核心在于通过大规模体积压裂技术突破煤岩基质低孔低渗的难题,大幅增加复杂缝网范围和裂缝有效支撑体积,形成高效的渗流网络,缩短气体渗流距离,实现游离气与吸附气的协同开采。

2.1 煤岩气开发需要解决的核心问题

(1)需要充分“打碎煤岩”形成多级网络渗流通道

煤岩的割理和微裂缝发育,具备“打碎”的基础。但煤岩割理间连通性差,且连通性受地应力各向异性影响显著,因此如何加强割理间连通从而促进游离气流动和吸附气解吸,成为煤岩气增产的关键。所以需要通过大规模压裂来激发多向割理扩展,从而形成“主缝+次级缝+微裂隙”的三级流动通道结构(见图1)。

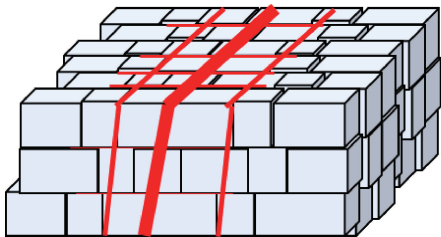


图1 煤岩压裂形成的“主缝+次级缝+微裂隙”的三级流动结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the three-level flow structure of “main fracture + secondary fracture + micro-fracture” formed by coal rock fracturing

(2)需要高排量保障煤岩压裂顺利实施

煤岩割理的存在导致压裂能量会首先用于割理压缩,宏观表现为“吸能”效应。割理的存在也导致液体滤失增大,主缝延伸困难,增加了打碎煤岩基质的难度,因此要实现压碎煤岩需要远超压碎页岩的能量(液量、排量)。

根据天然裂缝产生张性裂缝所需净压力方程^[11]

$$P_{\text{net}}(x,t) \geq \frac{\sigma_{\text{H}} - \sigma_{\text{h}}}{2}(1 - \cos \theta) \quad (1)$$

式中: $P_{\text{net}}(x,t)$ 为裂缝壁面净压力,MPa; σ_{H} 为最大水平主应力,MPa; σ_{h} 为最小水平主应力,MPa; θ 为天然裂缝逼近角,°。

鄂尔多斯盆地深层煤岩的储层水平两向主应力差为2.4~4.2 MPa^[12],两相差值较小,具备形成缝网的条件。高排量压裂有利于缝内净压力的提升,为煤岩形成复杂缝网形成提供了基础。

(3)需要小粒径支撑剂实现加砂目的

由于煤岩储层滤失和割理“吸能”导致主缝扩展受限,使得主缝和次级裂缝宽度均比较小,加之割理开启又会强化裂缝弯曲形态,对支撑剂的通过性提出更高要求^[13]。采用小粒径支撑剂作为压裂主体支撑剂,不仅能够更有效充填微裂缝从而降低滤失保障主缝延伸,为加砂提供有利条件,同时还能够保证形成的缝网最大程度的得到有效支撑。

(4)需要大规模加砂实现压裂效果

尽管小粒径支撑剂会降低加砂难度,但小粒径占比高,若加砂总量低,则因煤岩较软支撑剂易嵌入影响裂缝长期导流问题就会更突出。因此需要大规模加砂提高缝网有效支撑,提升压裂效果。

(5)需要高质量的人井液作为煤岩开发保障

煤岩的储层特性导致其容易吸附入井液从而产生吸附伤害^[14]。如何兼顾成本和储层保护是煤岩气开发的关键问题。

2.2 煤岩气压裂的技术思路

借鉴页岩气体积压裂思路,通过分段多簇密切割体积压裂技术,采取“三大一小(大排量、大液量、大砂量、小砂比)+构建复杂立体缝网+饱填砂有效支撑”压裂设计理念,最大限度“打碎”煤岩,构建复杂立体缝网,并通过饱和填砂提高裂缝导流,实现煤岩气井产能提升。

2.3 压裂液材料的系统优化

研发专用煤岩变黏压裂液体系及控制方案^[15],解决降阻与携砂难兼顾、煤岩易伤害等难题。同时

加入促解吸剂促进煤岩吸附气解吸,加入阻垢剂抑制返排阶段井筒内垢的生成,保障井筒生产稳定。

3 煤岩气大规模体积压裂技术与实践

从压裂工艺技术、工艺参数、液体类型及支撑剂四个方面对煤岩气大规模体积压裂技术进行探讨。

3.1 压裂工艺技术

基于煤岩气压裂面临的问题,按照煤岩气压裂设计思路,结合煤岩特性及改造条件,形成了多项主流压裂工艺技术。

(1) 多簇密切割体积压裂工艺

通过多簇射孔、密集布缝缩小射孔簇间距,增加单段射孔簇数量,同时可通过投加暂堵材料封堵已开启裂缝,迫使压裂液转向未充分改造区域,实现裂缝均衡扩展。大规模体积压裂可有效激活割理和微裂隙,提高裂缝复杂度,实现煤岩气高效开发^[16]。

该工艺在煤岩气水平井开发中得到广泛应用,施工井次超 300 口。煤岩气水平井采用该工艺通常分 10~18 段压裂,单段长度 60~90 m,每段一般按 3~4 簇,单段液量最高超 5 000 m³,砂量超 650 m³。

(2) 停泵转向压裂工艺

停泵转向压裂工艺是针对煤层持续注入压裂液后会出现裂缝单一、改造不充分的情况,采用类似于二次加砂压裂方法,主动中断压裂一段时间后重启施工的工艺。该工艺思路是裂缝闭合后支撑剂沉降会导致原裂缝再度延伸困难,迫使后续压裂液转向未改造区域,提高储层改造程度。该工艺已经实施井次超百口,停泵前后同排量下压力差异可达到 5 MPa 以上。

(3) 多轮次压裂工艺

煤岩储层裂缝扩展复杂且规律认识不清,现有压裂可能存在过度改造和改造不充分并存问题,采用多轮次缝网弥合压裂技术^[17],可解决井筒两侧因应力差异而导致裂缝单侧扩展问题,促进井筒两侧裂缝均匀扩展,提高煤岩资源动用程度。

大吉区块 DJ55 井通过 5 轮次压裂,单井累计压裂液量超 15 000 m³,支撑剂超 1 700 m³,裂缝体积较常规大规模压裂提升 170%,稳定日产气超 35 000 m³,取得良好效果。

3.2 煤岩气压裂工艺参数选择

用液规模、加砂规模以及施工排量是影响增产

效果的关键工程因素^[18],因此需要合理优化选择。

(1) 用液强度与加砂强度

用液强度增加可增加缝网复杂度,加砂强度提高可实现支撑剂有效支撑保持高导流能^[19]。图 2 为 170 口煤岩气水平井平均单段液量和砂量占比统计,可知平均单段用液量主要在 2 500 m³ 以上,平均砂量 300 m³ 以上。

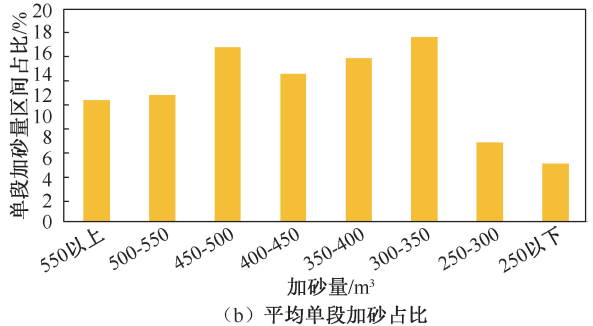
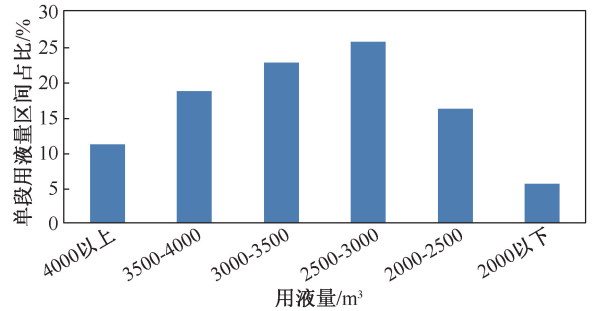


图 2 170 口煤岩气水平井的平均单段用液量及加砂量占比
Fig. 2 Proportion of average single-stage fluid volume and proppant volume in 170 CBM horizontal wells

图 3 为 55 口煤岩气井产量与用液强度、加砂强度关系图。可知用液和加砂强度与产量相关性都比较好,加砂强度与产量相关性更高。因此提高加砂强度,更易取得更好开发效果。结合经济性考虑,建议煤岩气压裂用液强度 30~40 m³/m,加砂强度 4~6 m³/m。

(2) 施工排量

现场数百口井实践表明,高排量是煤岩气压裂高效造缝和加砂连续性及稳定性的关键保障。目前现场超 95% 以上井施工排量都在 16 m³/min 以上,最高达到 24 m³/min。鉴于不同区域煤岩埋深和条件不同,建议施工排量 16~20 m³/min。

3.3 压裂液体系

活性水广泛应用于我国浅层煤层气开发,然而其黏度低、降阻和携砂能力差使其难以实现深层煤岩压裂形成复杂缝网和远端支撑的目的。煤岩气大规模压裂对煤岩用压裂液提出更高要求:①对煤

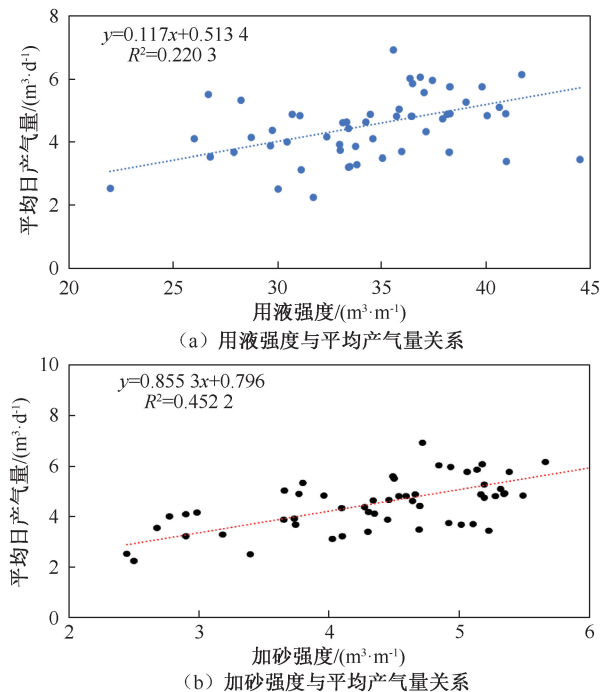


图3 55口井用液强度、加砂强度对单井日产量影响散点图

Fig.3 Scatter diagram of the influence of fluid intensity and proppant concentration on daily gas production per well for 55 wells

岩储层伤害低,利于气体解吸;②增黏、降阻及抗剪切性能好;③良好造缝与携砂能力;④破胶性能好,吸附伤害低;⑤配制方便,施工简单,成本低。

鉴于上述要求,目前深层煤岩气压裂液体系形成了一体化变黏压裂液为主,低伤害胍胶压裂液探索性实施的发展局面。

(1) 一体化变黏压裂液

煤岩大规模压裂的技术特点决定在不同压裂阶段对压裂液性能要求不同,前置液阶段用高黏液打开割理造主缝,用中低黏度液体形成复杂缝;携砂液阶段用适当黏度液体既要满足降阻,又要满足造缝,还要有携砂能力满足高强度加砂要求。一体化变黏压裂液体系具有免混配、减阻携砂一体、伤害低,且可实时调控黏度增强施工可控和稳定性等优点成为煤岩气压裂的首选。

(2) 低伤害胍胶压裂液

胍胶压裂液具有造缝能力强、耐高温性能可靠、携砂性能优异等优势,但其存在残渣含量高,煤岩吸附伤害大,冻胶降阻性能差、无法实时变黏等问题,因此需对常规胍胶体系配方进行优化,以满足煤岩气大规模压裂施工要求。

(3) 液体黏度选择

液体黏度越高,支撑剂运输距离越远,但黏度高意味着稠化剂添加比例高,储层伤害增大。低黏液输送支撑剂距离较近,但不同簇间支撑剂体积差异比高黏液要低^[20]。尽管从施工角度看只要排量足够高(18 m³/min 以上)即便用较低黏度施工整体仍较平稳,但易出现压力波动大和压力突降等现象,这可能与低黏液突破窜流形成优势通道有关^[21]。此外低黏易使支撑剂在井周附近堆积,不利于长期开发效果。因此液体黏度不是越高越好,也不是越低越好,需兼顾成本、储层伤害和裂缝支撑。目前选择中黏液作为煤岩气主体压裂液,且占比80%以上。根据数百口井施工分析,建议高、中、低黏度液体分别不低于42 mPa·s、18 mPa·s和6 mPa·s。

3.4 支撑剂选择

为降低施工难度兼顾成本,煤岩气压裂以70/140目小粒径石英砂为主,40/70目石英砂为辅,30/50目陶粒仅在尾追阶段应用以便实现缝口的高导流。总体上小粒径支撑剂更有利于次级或更小缝宽的裂缝得到有效支撑,因此70/140目小粒径石英砂占比一般在60%以上^[22]。

4 煤岩气压裂发展方向讨论

大规模压裂技术在深层煤岩气开发中发挥着关键作用,但仍面临诸多挑战。笔者结合现场实践和前人成果进行了总结和分析,认为要实现深层煤岩气的高效开发,未来应从压裂模拟优化技术、压裂液功能优化、返排液重复利用技术等方面持续创新和发展。

4.1 压裂模拟优化技术

煤岩压裂模拟优化在分段分簇、裂缝模拟和施工参数优化等方面需要突破:①结合目前煤岩储层特点、“黑金靶体”特征和现有储层评价手段,建立和完善甜点评价方法,为压裂分段分簇设计优化提供参考;②研究水力裂缝与煤岩割理、微裂隙之间的交互作用机理,弄清煤岩裂缝扩展规律,为缝网模拟提供研究基础;③利用产能分析和缝网体积等评价方法,摸清地质参数、工程参数与产能关系,为压裂施工参数优化确定依据。

4.2 压裂液功能强化

从数百口煤岩气井施工经验来看,压裂液对压裂施工和增产效果都具有重要影响。尽管目前煤岩气开发效果较好,但从煤岩含气性和单井产量

看,煤岩气井产能仍有较大提升空间。如何对现有压裂液体系的增黏、降阻、携砂、促解吸、阻煤粉和抑垢等方面进行优化升级,更有效的提高吸附气解吸、降低吸附伤害、防止结垢、出煤粉和出砂等影响煤岩气井生产关键问题,是煤岩气压裂液下一步研究的重点。

4.3 返排液重复利用技术

深层煤岩地层水以 CaCl_2 水型为主,地层水总矿化度 40 000~320 000 mg/L。压裂液进入地层与岩层作用后,随返排时间增长,返排液矿化度急剧增加,由此带来巨大的环保和处理成本压力。尽管目前已开展了抗盐压裂液研究和现场返排液回用实验^[23],但其重复利用仍存在诸多难题有待解决。突破返排液重复利用关键问题并降低储层应用伤害也是下一步研究的重点。

5 结论

(1) 结合煤岩特征进行了深层煤岩压裂改造核心问题分析,认为大规模体积压裂是实现煤岩气复杂立体缝网扩展、游离气和吸附气双气协同开采的关键。

(2) 综合煤岩气大规模压裂实践,对现有压裂工艺技术、工艺参数选择和压裂液体系进行了分析,认为需进一步研究优化,提升煤岩气大规模体积压裂技术水平。

(3) 结合目前技术水平及开发现状,对煤岩气开发后续发展方向进行了探讨。认为未来需要加强压裂模拟优化,做好压裂液体系的功能强化,提升煤岩气返排液重复利用技术,最终实现深层煤岩气的进一步高效和可持续开发。

致谢:感谢四川省工业发展资金对本研究项目的支持。

参考文献

[1] 徐凤银,侯伟,熊先钺,等.中国煤层气产业现状与发展战略[J].石油勘探与开发,2023,50(4):669-682.
XU Fengyin, HOU Wei, XIONG Xianyue, et al. The status and development strategy of coalbed methane industry in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(4): 669-682.

[2] 李国欣,张水昌,何海清,等.煤岩气:概念、内涵与分类标准[J].石油勘探与开发,2024,51(4):783-795.
LI Guoxin, ZHANG Shuichang, HE Haiqing, et al. Coal-rock gas: concept, connotation and classification criteria [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51

(4): 783-795.

[3] 徐凤银,王成旺,熊先钺,等.深部(层)煤层气层成藏模式与关键技术对策——以鄂尔多斯盆地东缘为例[J].中国海上油气,2022,34(4):30-42.
XU Fengyin, WANG Chengwang, XIONG Xianyue, et al. Deep (layer) coalbed methane reservoir forming modes and key technical countermeasures-taking the eastern margin of Ordos basin as an example [J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(4): 30-42.

[4] 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.

[5] 牛小兵,喻健,徐旺林,等.鄂尔多斯盆地上古生界煤岩气成藏地质条件及勘探方向[J].天然气工业,2024,44(10):33-50.
NIU Xiaobing, YU Jian, XU Wanglin, et al. Reservoir-forming geological conditions and exploration directions of Upper Paleozoic coal-rock gas in the Ordos basin [J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(10): 33-50.

[6] 李曙光,王成旺,王红娜,等.大宁-吉县区块深层煤层气成藏特征及有利区评价[J].煤田地质与勘探,2022,50(9):59-67.
LI Shuguang, WANG Chengwang, WANG Hongna, et al. Reservoir forming characteristics and favorable area evaluation of deep coalbed methane in Daning-Jixian block [J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(9): 59-67.

[7] 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.

[8] 杨秀春,徐凤银,王虹雅,等.鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探开发历程与启示[J].煤田地质与勘探,2022,50(3):30-41.
YANG Xiuchun, XU Fengyin, WANG Hongya, et al. Exploration and development process of coalbed methane in eastern margin of Ordos basin and its enlightenment [J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 30-41.

[9] 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.

[10] 李曙光,王红娜,徐博瑞,等.大宁-吉县区块深层煤层气井酸化压裂产气效果影响因素分析[J].煤田地质与勘探,2022,50(3):165-172.

- LI Shuguang, WANG Hongna, XU Borui, et al. Influencing factors on gas production effect of acid fractured CBM wells in deep coal seam of Daning-Jixian block[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(3): 165-172.
- [11] 吴奇, 胥云, 王腾飞, 等. 增产改造理念的重大变革—体积改造技术概论[J]. *天然气工业*, 2011, 31(4): 7-12.
- WU Qi, XU Yun, WANG Tengfei, et al. The revolution of reservoir stimulation: an introduction of volume fracturing[J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(4): 7-12.
- [12] 聂志宏, 徐凤银, 时小松, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气开发先导试验效果与启示[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(2): 1-12.
- NIE Zhihong, XU Fengyin, SHI Xiaosong, et al. Outcomes and implications of pilot tests for deep coalbed methane production on the eastern margin of the Ordos basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(2): 1-12.
- [13] 苏现波, 范渐, 王然, 等. 煤储层水力压裂裂缝内支撑剂运移控制因素实验研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(6): 62-73.
- SU Xianbo, FAN Jian, WANG Ran, et al. An experimental study on factors controlling the proppant transport in hydraulic fractures of coal reservoirs[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(6): 62-73.
- [14] 游利军, 钱锐, 康毅力, 等. 深层煤岩压裂液稠化剂吸附损害机理与控制对策[J]. *石油勘探与开发*, 2025, 52(1): 185-193.
- YOU Lijun, QIAN Rui, KANG Yili, et al. Adsorption damage mechanism and control of fracturing fluid thickener in deep coal rock[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2025, 52(1): 185-193.
- [15] 林波, 陈帅, 严向阳, 等. 深层煤岩气高效能变黏压裂液及在极限体积压裂中的推广应用[J]. *煤炭学报*, 2025, 50(2): 1094-1106.
- LIN Bo, CHEN Shuai, YAN Xiangyang, et al. Efficient and variable viscosity fracturing fluid of deep coal rock gas and popularization in ultimate volume fracturing[J]. *Journal of China Coal Society*, 2025, 50(2): 1094-1106.
- [16] 杨帆, 李斌, 王昆剑, 等. 深部煤层气水平井大规模极限体积压裂技术: 以鄂尔多斯盆地东缘临兴区块为例[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(2): 389-398.
- YANG Fan, LI Bin, WANG Kunjian, et al. Extreme massive hydraulic fracturing in deep coalbed methane horizontal wells: a case study of Linxing block, eastern Ordos basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(2): 389-398.
- [17] 熊先钺, 甄怀宾, 李曙光, 等. 大宁—吉县区块深部煤层气多轮次转向压裂技术及应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(2): 147-160.
- XIONG Xianyue, ZHEN Huaibin, LI Shuguang, et al. Multi-round diverting fracturing technology and its application in deep coalbed methane in the Daning-Jixian block[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(2): 147-160.
- [18] 闫霞, 熊先钺, 李曙光, 等. 深层煤岩气水平井各段产出贡献及其主控因素——以鄂尔多斯盆地东缘大宁—吉县区块为例[J]. *天然气工业*, 2024, 44(10): 80-92.
- YAN Xia, XIONG Xianyue, LI Shuguang, et al. Production contributions of deep CBM horizontal well sections and their controlling factors: a case study of Daning-Jixian area, eastern Ordos basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(10): 80-92.
- [19] 安琦, 杨帆, 杨睿月, 等. 鄂尔多斯盆地神府区块深部煤层气体积压裂实践与认识[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(5): 2376-2393.
- AN Qi, YANG Fan, YANG Ruiyue, et al. Practice and understanding of deep coalbed methane massive hydraulic fracturing in Shenfu block, Ordos basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(5): 2376-2393.
- [20] FREDDY Crespo, NEVIL Kunnath Aven, JANETTE Cortez, et al. Proppant distribution in multistage hydraulic fractured wells: a large-scale inside-casing investigation[R]. SPE 163856, 2013.
- [21] 黄海, 郑永, 王毅, 等. 粗糙壁面压裂裂缝内支撑剂运移铺置特征[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(2): 399-408.
- HUANG Hai, ZHENG Yong, WANG Yi, et al. Characteristics of proppant transport and placement within rough hydraulic fractures[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(2): 399-408.
- [22] 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.
- [23] 张瀚, 李小江, 朱卫平, 等. 深层煤层气返排液用无固相一体化悬浮液的研究[J]. *钻井液与完井液*, 2024, 41(6): 800-805.
- ZHANG Han, LI Xiaojiang, ZHU Weiping, et al. Study on an all-in-one solid-free suspension as flow-back fluid for deep coalbed methane development[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2024, 41(6): 800-805.

编辑 吴志力

第一作者简介: 严向阳, 男, 1985年出生, 高级工程师, 硕士, 2012年毕业于西南石油大学油气田开发工程专业, 现主要从事油气田增产改造理论与技术方面的工作。电话: 028-61626454, Email: xycy911@163.com。通信地址: 四川成都新都新泰东路71号, 邮政编码: 610500。