

引用格式:朱苏阳,曾欣雨,张圣,等.考虑孔隙压降速度的煤岩渗透率应力敏感实验研究[J].油气藏评价与开发,XXXX,XX(X):
ZHU Suyang, ZENG Xinyu, ZHANG Sheng, et al. Experimental study on stress sensitivity of coal rock permeability considering the rate of pore
pressure decline[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, XXXX, XX(X):
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025480

考虑孔隙压降速度的煤岩渗透率应力敏感实验研究

朱苏阳¹, 曾欣雨¹, 张圣², 刘伟¹

(1.西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500; 2.荆门中石油昆仑燃气有限公司, 湖北 荆门 448000)

摘要: 深层煤岩气已成为我国天然气增储上产的重要方向,实践证明大宁—吉县的深层煤岩气采出速度与气井控制的经济可采储量之间存在一定关系,但现有的煤岩应力敏感响应关系并不能有效反映这一现象,尤其未能体现渗透率对应力路径(压降速度)的差异化响应规律。研究针对应力路径对渗透率应力敏感的影响,特别是压降过程中孔隙压降速度与渗透率之间的关系,通过模拟孔隙压力变化过程,分析不同应力条件下煤岩储层渗透率的变化规律。实验采用非常规储层岩心脉冲法测试渗透率,调节上、下游标准舱室的平均压力,模拟不同的孔隙压降速度(应力路径),对保德煤矿8号煤层的4块岩心进行测试,研究煤岩在不同压降路径下的渗透率变化趋势及其不可逆性。结果表明,随着孔隙压力的降低,煤岩基质渗透率大致呈指数式递减,并呈现出下降趋势先快后慢的变化特点。归一化分析显示,卸载过程中渗透率恢复较缓慢,未能恢复到初始值,且卸载曲线的下降幅度小于加载曲线,表现出明显的滞后效应。对不同岩心的压降速度和渗透率变化率拟合分析发现,当孔隙压降速度增加1 MPa/d时,渗透率应力敏感程度平均增加0.28%,煤岩在不同加载速度时渗透率应力敏感程度存在差异化响应。基于现场统计规律,亦证实了煤岩渗透率对孔隙压降速度的敏感性。

关键词: 深层煤岩气; 基质渗透率; 应力敏感; 压降速度; 塑性变形

中图分类号: TE37

文献标识码: A

Experimental study on stress sensitivity of coal rock permeability considering the rate of pore pressure decline

ZHU Suyang¹, ZENG Xinyu¹, ZHANG Sheng², LIU Wei¹

(1. College of Petroleum and Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Jingmen PetroChina Kunlun Gas Company Limited, Jingmen, Hubei 448000, China)

Abstract: Deep coal-rock gas has become an important target for increasing natural gas reserves and production in China. Field practice indicates that there is a clear relationship between the production rate of deep coal-rock gas in the Daning - Jixian area and the economically recoverable reserves (EUR) controlled by gas wells. However, existing stress-sensitivity relationships for coal rock fail to effectively capture this phenomenon, particularly the differentiated response of permeability to stress paths, i.e., different pressure-decline rates. In this study, the pore pressure variation process was simulated to investigate the influence of stress paths on permeability stress sensitivity, with a specific focus on the relationship between pore pressure decline rate and permeability during pressure depletion. The permeability evolution of coal-rock reservoirs under different stress conditions was systematically analyzed. Permeability experiments were conducted using a pulse-decay method for unconventional reservoir cores. By adjusting the average pressures of the upstream and downstream reference chambers, different pore pressure decline rates (stress paths) were simulated. Four core samples from the No. 8 coal seam of the Baode Mine were tested to examine permeability evolution and its irreversibility under different pressure-decline paths. The results show that, as pore pressure decreases, the matrix permeability of coal rock generally exhibits an exponential decline, characterized by a rapid decrease at the early stage followed by a slower decline at later stages. Normalized analysis indicates that permeability recovery during unloading is limited and fails to return to its initial value; moreover, the permeability reduction during unloading is smaller than that during loading, demonstrating a pronounced hysteresis effect. Regression analysis of pressure-decline rate versus permeability change rate reveals that, for every 1 MPa/d increase in pore pressure decline rate, the permeability stress-sensitivity degree increases by an average of

收稿日期: 2025-12-17。

第一作者简介: 朱苏阳(1989—), 博士, 副教授, 主要从事煤层气、缝洞型油气藏工程与数值模拟方面的科研与教学工作, 地址: 四川省成都市新都区西南石油大学石油与天然气工程学院, 邮政编码: 610500。E-mail: Suyang.zhu@swpu.edu.cn

基金项目: 中国工程院科技战略咨询项目学部重点项目“我国建成千亿方级煤层气大产业发展战略路径研究”(2025-XZ-54); 十五五国家油气科技重大专项“深层煤岩气高效体积压裂技术攻关与集成应用”(2025ZD1405704-006)。

0.28%, indicating a differentiated stress-sensitive response of coal permeability under different loading rates. Field statistical observations further confirm the sensitivity of coal-rock permeability to the pore pressure decline rate.

Keywords: Deep coal-rock gas; matrix permeability; stress sensitivity; pressure drop rate; plastic deformation

中国在鄂尔多斯盆地突破了深层煤岩气的高效开发技术,实现了将丰富的深层煤岩气储量(2 000 m以深的煤岩气资源量为 $40.71 \times 10^{12} \text{ m}^3$)的高效产量转化,使得深层煤岩气资源成为了中国天然气开发的新质生产力^[1-3],与浅部相比,深层煤岩气具有压力高、温度高、含气量大、厚度大、游离气饱和度高、煤体坚硬和渗透率低的特点^[4-6]。页岩气的开发实践表明,生产制度(配产比例)明显影响了气井的渗透率应力敏感行为和可控储量^[7-8]。深层煤岩气的有效开发与页岩气类似,主要依赖于水平井多段压裂技术所形成的复杂裂缝网络,压裂后游离气在早期迅速产出,随着裂缝网络压力逐渐降低,基质中的储量(包括吸附气、残余游离气)得到持续释放,实现对深层煤岩气的稳定动用^[9-10]。

煤岩气排采实践与室内实验均证实了煤的渗透率对应力具有较强的敏感性^[11-12],煤岩应力敏感性研究主要包括常规围压和孔压的应力敏感性试验、微观机理研究和评价^[13-14]。原煤和型煤的围压等幅循环加卸载渗流试验,明确了煤岩对应力的响应特征符合一般岩石应力敏感的变化趋势^[15],虽然趋势一致,但是煤岩渗透率应力敏感的微观机制则与常规岩石存在明显的差异^[16]。煤岩的岩石力学真三轴试验机和声发射监测系统进行了单轴加载试验和三轴加-卸载试验,煤岩的应变对应力路径的响应会存在一定的差异^[17-18],说明煤岩在三轴应力下的弹性变形往往伴随着一定的塑性变形^[19]。目前,此类研究多集中于采矿与路桥工程的应变研究,还缺乏煤岩渗透率对应力路径的响应关系的实验探索。

以保德煤矿8号煤层煤岩为研究对象,考虑了应力路径对渗透率应力敏感的影响,特别是压降过程中孔隙压降速度与渗透率之间的关系,通过模拟孔隙压力变化过程,分析了不同应力条件下煤岩储层渗透率的变化规律^[20-21]。

1 煤岩气基质渗透率的意义

1.1 “缝控储量”的含义

由于煤岩气链式流动的赋存与运移特征,煤岩气需依次经历基质-割理-压裂缝的串联通道才能被采出,因此,深层煤岩气压裂改造后的生产动态表现出显著的缝控储量特征,即后期稳产产量与压裂改造规模呈明显的正相关关系,基质向割理的流动速率是制约气井产量与可动用储量的关键因素(图1)。目前,深层煤岩气长水

平井+超规模压裂的改造方式可以密切割煤层,极大缩短游离气和吸附气在基质中的传输距离,快速释放基质中的储量,加速基质中的煤岩气的流动速率,实现由不可动用储量向可动用储量的转化。

煤岩气井全生产周期可划分为返排上产、高产稳产、递减、稳产4个阶段(图1)^[17]。各个阶段的产能特征均与压裂缝网的结构特征相关。在返排上产阶段,气井主要处于返排阶段,日产气量逐步增加并进入高产期;高产稳产阶段主要受游离气储量、缝网密度、主裂缝长度及缝网导流能力等因素控制,产量稳定;随着大量游离气的开采,受解吸速率影响,解吸气量低于游离气产出量,气井由高产稳产阶段向低产稳产阶段过渡;进入低产期后,液量、排量、簇数与解吸速率一同影响低产阶段的稳产时间和产量^[22]。

1.2 基质渗透率的影响

煤岩通常被视为典型的基质-裂隙双重孔隙介质,虽然,基质渗透率极低,但其赋存的储量超过70%,因此,基质渗透率的应力敏感性对长期的吸附气储量释放具有主导意义。生产过程中,基质中的吸附气首先向割理扩散,再通过天然裂缝流入压裂缝,随着游离气逐渐被动用,吸附气在产气中的占比提高,基质对裂缝系统的补给比例升高,基质渗透能力对产能的影响逐渐增大(图1)。前期生产制度的设置,特别是对压降速度的控制,直接影响储层渗透率的损失程度,进一步对中后期的产能表现产生显著影响。所以,亟须研究深层煤岩基质在不同有效应力下的渗透率变化特征。煤岩气产出过程遵循“解吸-扩散-渗流”机制^[23-24],其中,基质渗透率是影响气体从煤岩基质扩散到割理的重要因素。当基岩渗透率较高时,气体能快速高效地扩散到割理,从而提升气井产能;当基岩渗透率较低时,流动通道受限和扩散速率减缓导致气井产能降低。因此,基质渗透率是影响后期稳产产量的主要因素。

若开采前期采速过高,使进入稳定生产阶段时割理压力过低,从而使基质中的应力敏感效应显著降低气井的稳定产量并缩短稳产时间。同时,过快的采速会使割理压力下降过快,导致基质中的气体扩散到割理的速度减缓,进一步减少气井的稳定产量^[25]。因此,合理控制初期采速、避免割理压力过低,减缓基质渗透率下降速度,是确保后期煤岩气稳定生产的关键,研究煤岩基质渗透率对应力路径的应力敏感性是一个亟须解决的问题。

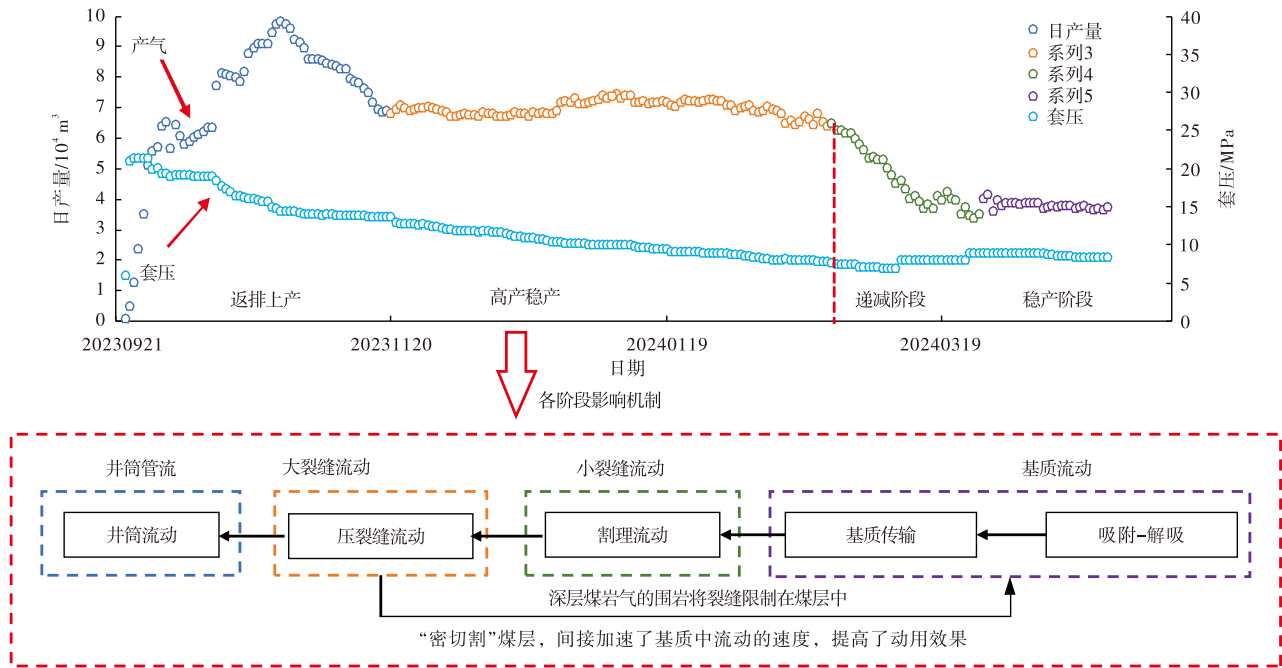


图1 深层煤岩气产量变化模式

Fig. 1 Pattern diagram of deep coal, rock and gas production changes

2 考虑塑性变化的渗透率应力敏感实验研究

2.1 岩心取样与描述

研究取样来自鄂尔多斯盆地东缘保德煤矿的8号煤层,煤层位于山西组底部砂岩之上,矿区内最上部的可采煤层的煤层平均厚度为7.62 m,以厚煤层为主。保德煤

矿8号煤层全区分布稳定,存在二分型或是三分型的夹矸,为典型的复杂结构煤层,与大宁一吉县深层8号煤特征基本一致。为更好地对研究区进行进行实验分析研究,依据中华人民共和国国家标准化管理委员会标准《岩心分析方法》(GB/T 29172—2012),避开夹矸部位选取结构裂隙发育少的大块煤钻取25 mm×50 mm圆柱样,圆柱体煤样的钻取方向平行于煤层层面方向,2号和4号岩心边缘存在一定程度的碎裂(主体完整,不影响实验),以胶带进行固定(图2)。



图2 保德矿井下8号煤取样岩心

Fig. 2 Small core samples of No. 8 coal taken from underground in Baode Mine

钻取柱样后选取4块煤样进行基本工业分析和物性分析(表1),样品工业分析测试依据ISO 17246:2024《煤炭与焦炭工业分析》(Coal and coke—Proximate analysis);镜质组反射率的测定依据ISO 7404-5:2025《煤岩相分析方法第5部分:镜质体反射率的显微测定方法》(Coal—Methods for petrographic analysis—Part 5: Method of determining microscopically the reflectance of vitrinite)。

2.2 实验设计

研究采用产自法国的 Low Gas Permeability Measurement 700 超低渗气体渗透率测定仪,对不同应力条件下岩心样品的孔隙度和渗透率进行测量。研究所用仪器的渗透率测试下限最低可达 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,围压最高可达 70 MPa,孔隙流体压力最高可达 20 MPa,能够满足煤岩岩样基础物性参数的测试需求。具体实验流程如图3所示:岩心两端分别用柱塞连接上游与下游标准舱室,实验开始时上游和下游标准舱室先达到平衡压力,接着上游标准舱室产生一个短暂的脉冲压力使内部压力升高,上下游标准舱室间形成压力差,在该压力差的作用下气体开始流动,直至岩心两端压力再次达平衡状态,最后,依据中华人民共和国国家标准化管理委员会标准《页岩孔隙度、渗透率和饱和度测定》(GB/T 34533-2023),对超低渗气体渗透率测定仪所产生的压力波动曲线进行分析,得出深层煤岩的渗透率。

利用非稳态方法得到的气测渗透率公式如下:

$$K = \frac{-s_1 \mu L f_z}{f_1 A p_m \left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} \right)} \quad (1)$$

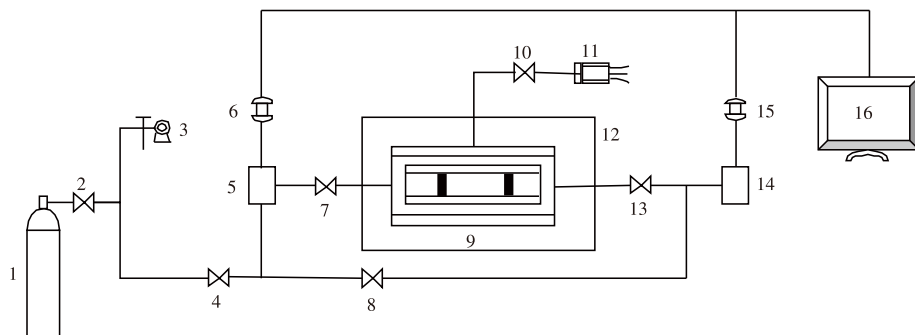
式中: K 为气测渗透率,单位 $10^{-3} \mu\text{m}^2$; s_1 为测试中上、下游标准舱室压差与时间在单对数坐标图中曲线斜率,单位 kPa/s ; μ 为黏度,单位 $\text{mPa}\cdot\text{s}$; L 为岩心长度,单位 cm ; f_z 为实际气体偏离理想气体的特性值; f_1 为流量校准因子; A 为岩心的横截面积,单位 cm^2 ; p_m 为测试平均压力,单位 kPa ; V_1 和 V_2 分别为上、下游舱室体积,单位 mL 。

研究过程中,渗透率测试实验设定的固定围压介于 39~40 MPa,参考大宁—吉县区块返排初期套压递减规律情况设定压降速度,现场监测数据的分析结果表明首周日均压降速度可达 2~3 MPa/d。实验过程中为保证操作可行性与压力控制的稳定性,采用 12 h 为一个压力调整周期。考虑实验装置的气密性,一条完整测试实验数据须在 14 d 内完成,因为若测试时间过长(24 h),总实验周期将超出气密性时限,若时间过短(8 h),则操作人员需夜班操作,将增加人力成本。在此条件下,选取 10、5、2、1 MPa/12 h 压降速度,使其与现场压降速度相匹配,同时覆盖快速、中等与缓慢三类典型的压力下降情况,能较全面地反映压降速度对渗透率应力敏感特征的影响。实验温度控制在 35°C ,采用氮气进行试验,为了减小滑脱效应对试验的影响,试验过程中保持最小压力为 2 MPa,平

表1 4块煤样的工业分析和物性分析

Table 1 Proximate analysis and physical parameters of 4 coal samples

样品 编号	尺寸		物性		工业成分/%			镜质组 反射率 /%	
	长度/ cm	直径/ cm	孔隙度/ %	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	空气干燥基 水分	灰分	挥发分		固定碳
BD-1	4.98	2.52	5.35	0.621 4	1.18	21.62	4.25	72.95	3.23
BD-2	4.23	2.52	6.21	0.985 2	1.03	20.65	4.95	73.37	3.05
BD-3	4.63	2.52	7.05	1.190 3	1.21	22.51	5.21	71.07	2.98
BD-4	4.46	2.52	6.52	0.845 3	1.06	21.21	4.63	73.1	3.11



注:1为高压氮气瓶;2、4、7、8、10、13为二通阀;3为真空泵;5为上游标准舱室;6、15为压力传感器;9为岩心夹持器;11为围压泵;12为恒温箱;14为下游标准舱室;16为计算机。

图3 煤岩气应力敏感实验装置和流程

Fig. 3 Coalbed methane stress-sensitive experimental setup and flowchart

均压力大于5 MPa。

3 结果与讨论

3.1 实验结果

通过实验测得不同孔隙压降速度条件下岩心渗透率与孔隙压力的变化关系,根据测定结果可知(图4):煤岩基质样品的初始气测渗透率介于 $(0.621\ 4\sim 1.190\ 3)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,随着孔隙压力的降低,煤岩基质渗透率大致呈指数式递减,并呈现出下降趋势先快后慢的变化特点。

对比不同孔隙压降速度渗透率的变化发现(图5):当孔隙压降速度较快时(10 MPa/12 h、5 MPa/12 h),煤岩基质的渗透率下降幅度相对较快,而且渗透率下降幅度几乎没有平缓期;当孔隙压降速度较慢(2 MPa/12 h、1 MPa/12 h)时,深层煤岩基质渗透率下降幅度明显变小,而且存在明显的下降平缓期。将渗透率绝对值进行归一化处理,可以得到4块煤岩的归一化渗透率对孔隙压降速度的应力敏感响应关系。

对比同一岩心加载和卸载曲线,加载过程中煤岩的

渗透率随孔隙压降速度的增加而显著降低,而卸载过程中,渗透率恢复较缓慢,未能恢复到初始值,且卸载曲线的下降幅度小于加载曲线,表现出明显的滞后效应。实验结果表明,不同岩心的加载和卸载曲线渗透率的变化幅度和响应速度也存在差异。

通过对不同岩心的压降速度和渗透率变化进行拟合分析发现(图6):孔隙压降速度与渗透率变化率呈现指数关系,当孔隙压降速度增加1 MPa/d时,渗透率应力敏感程度平均增加0.28%,证实煤岩在不同加载速度时渗透率应力敏感程度存在差异化响应,且在一定范围内,压降速度的快慢直接影响到煤岩渗透率应力敏感的响应,为预测和优化煤岩气返排过程中的控压速度提供了重要的理论依据。

3.2 渗透率对压降速度差异化响应的原因与意义

3.2.1 煤岩的塑性变形导致渗透率对路径的应力敏感性

大量实验研究结果证实了由于煤岩的矿物组成与割理结构,在围压条件下,煤岩的塑性变形占比明显增加,实际开采过程中,随着有效应力的不断增大,塑性变形逐

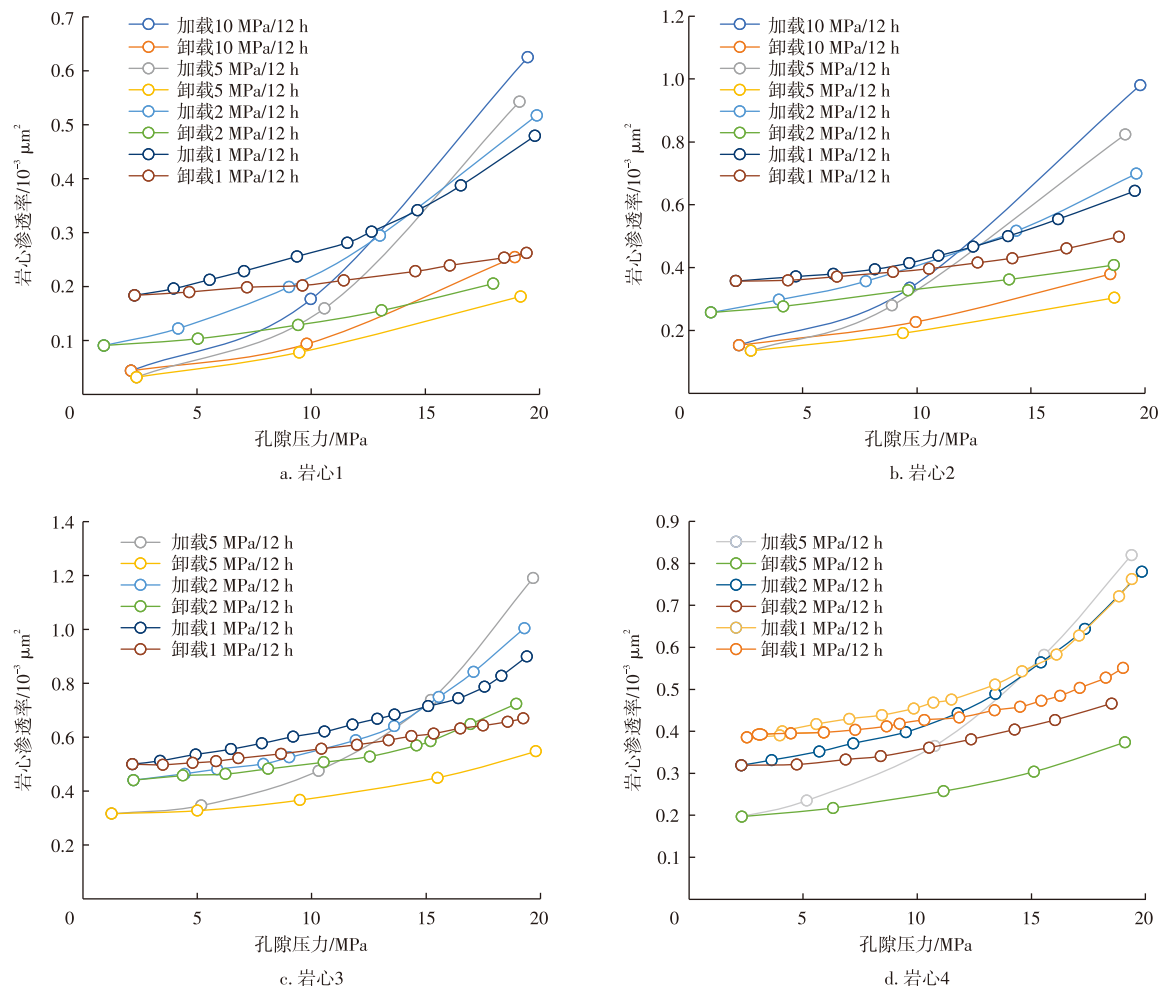


图4 考虑不同孔隙压降速度的应力敏感实验结果

Figure 4 Results of stress-sensitive experiments considering different rates of pore pressure decline

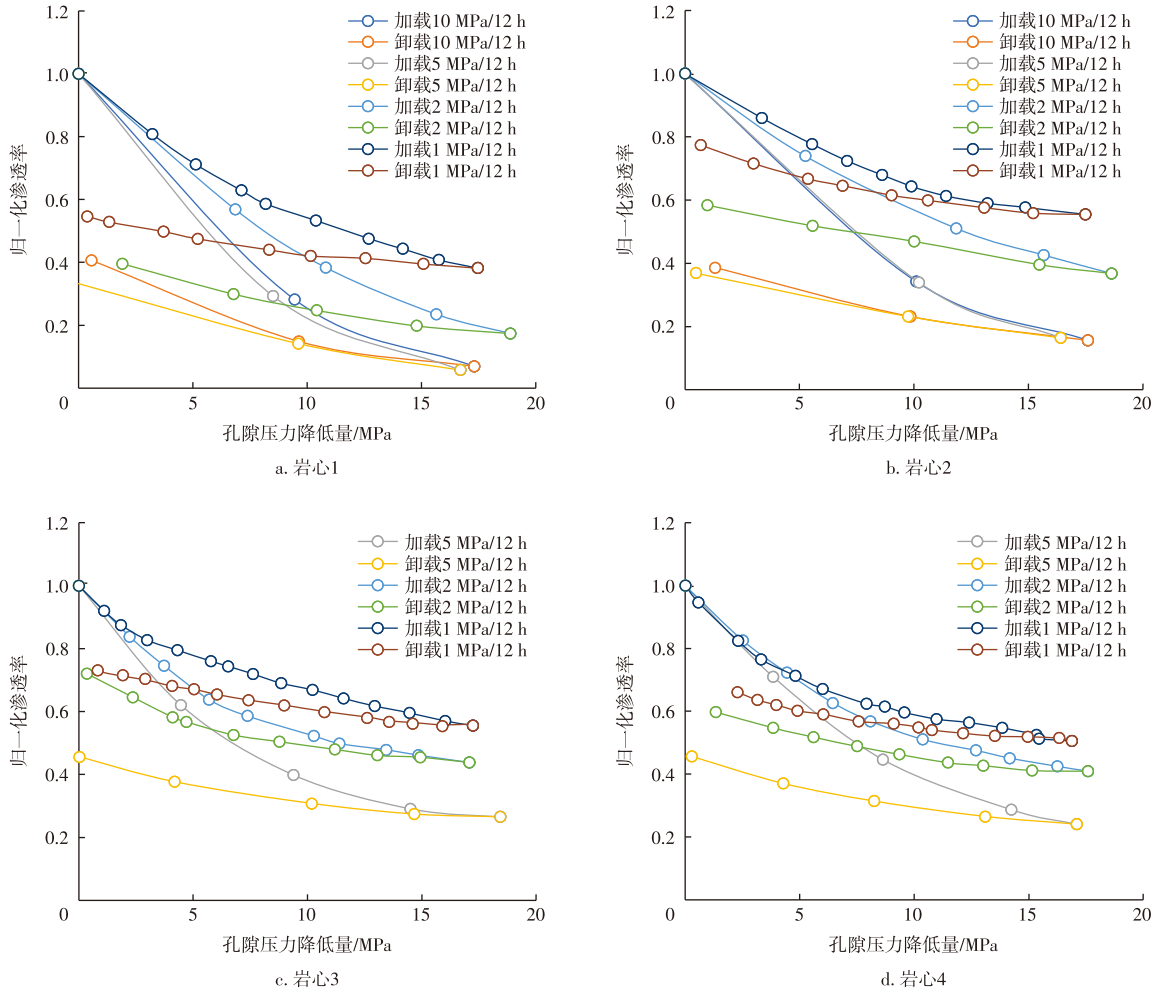


图5 考虑不同孔隙压降速度的应力敏感实验归一化情况

Fig. 5 Normalized situation of stress-sensitive curve considering different rates of pore pressure decline

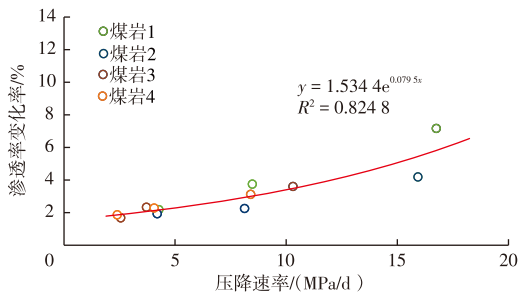


图6 不同孔隙压降速度与渗透率变化率的关系

Fig. 6 The relationship between the decline rate of different pore pressures and the degree of permeability loss

渐占主导地位,使煤岩孔隙和裂隙结构发生显著变形(图7),煤岩的孔隙结构受到压缩,裂隙逐渐闭合,煤岩渗透率显著降低,从而导致渗透率对应力路径产生强烈滞后与不可逆性,表现出强塑性变形特征^[26]。但从理论角度来看,煤岩渗透率对应力路径的敏感性通常是塑性变形,即加载-卸载会导致孔隙与裂隙结构发生不可逆变形;从多项实验与力学研究成果看,煤岩基质的整体变形在宏观尺度上多呈现弹性行为,宏观弹性响应掩盖了局部

孔隙-裂隙系统可能出现的塑性屈服或不可逆闭合现象^[27]。

塑性变形改变了煤岩的结构特征,使应变与应力路径之间的响应关系逐渐增强,渗透率对孔隙压降表现出更强的敏感性,这种敏感性不仅体现在渗透率变化的快速响应上,还表现为煤岩在不同应力路径下的非线性响应特征。在高应力路径变化条件下,塑性变形主导了煤岩的形变过程,孔隙结构的不可逆压缩使渗透率对孔隙压降的响应更加迅速,下降幅度更大。

3.2.2 深层煤岩气早期高产需要控压生产

大宁一吉县区块位于鄂尔多斯盆地东缘^[28-29],截至2025年6月,大宁一吉县区块已投产110余口井,核心生产区主力煤层为石炭系太原组8号煤层,埋深主要介于2000~2520 m,煤层平均厚度7.8 m,煤体结构以原生结构为主,平均镜质组反射率为2.7%,平均含气量为25.2 m³/t,割理较发育^[30-31]。选用在2023年6月至2024年2月期间投产的20口井进行研究(保证压裂工艺与参数一致,地质区域特征基本一致),所有井采用多段多簇

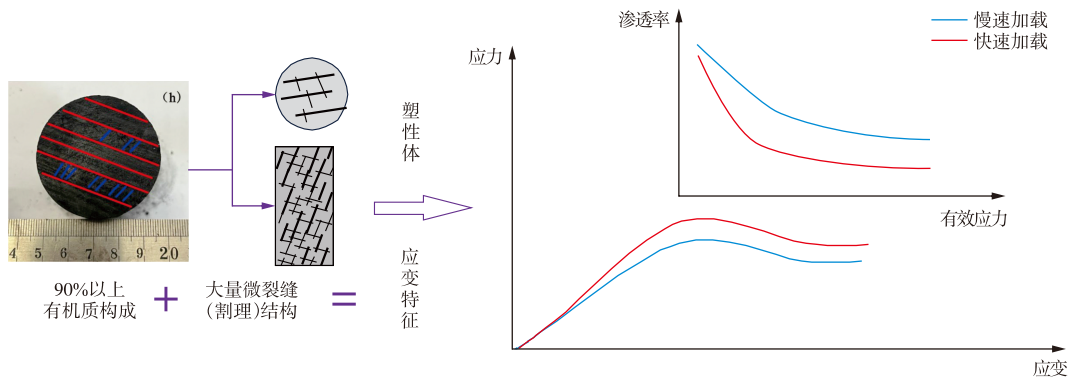


图7 弹性变形和塑性变形对渗透率应力敏感影响示意图

Fig. 7 Effect of elastic deformation and plastic deformation on stress sensitivity of permeability

工艺,井距主要介于300~400 m,水平段长度介于1 000~1 700 m^[32]。在实际生产中,为了减少由于压力过大导致的井控储量损失,需控制井内压降速度,从而提高气井稳产量和延长生产周期,避免由塑性变形引起的强应力敏感性问题^[33-34]。通过研究在不同控压条件下的生产动态特征(图8),分析前期控压对后期生产情况的影响。

根据图8所示,不同控压条件下的生产动态表现出显著差异:初期不控压生产时,较高的初始配产导致套压下降速度较快(图8a),在生产后期表现出较低的稳产气量,稳产时间较短,而井的稳产套压越高,稳产气量越大。一些偏离整体线性趋势的异常点主要受压窜影响(图

8b)。由研究结果可知:强应力敏感性会导致煤岩在高应力下发生不可逆的形变,进而加速渗透率的下降速率,导致井控储量的损失,控压生产在一定程度上能够减缓储层伤害,延长气井稳产期,提升气井产量和经济效益,为深层煤岩气的可持续开发提供重要保障。

由于实验观察问题与响应幅度问题,套压递减率取平均值,在一定程度上低估了初始实际压降速度,返排第一周的最大压降速度可达2~3 MPa/d。因此,目前实验测试过程中压降速度仍比现场返排的压降速度快一个数量级,现有实验测试结果有可能高估煤岩渗透率应力敏感对应力路径的响应程度,这是下一步实验研究需要改进的方向。

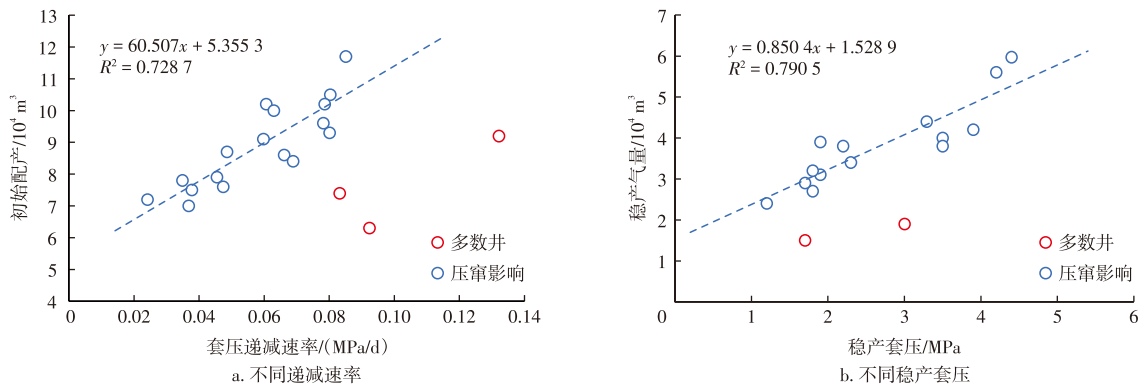


图8 不同控压条件下的生产动态特征

Fig. 8 Production dynamic characteristics under different pressure control conditions

4 结论

1)随着孔隙压力的降低,煤岩基质渗透率大致呈指数式递减,初期渗透率降低较快,后期渗透率降低幅度逐渐减小,煤岩的基质渗透率不仅对孔隙压力变化敏感,还与孔隙压降速度有明显的响应关系。

2)煤岩基质渗透率对应力路径的响应特征主要源于塑性变形,塑性变形改变了煤岩的结构特征,使应变与应

力路径之间的响应关系逐渐增强,并且随着压降速度的增加,煤岩的渗透率呈现指数关系变化。

3)在煤岩气开发过程中,压降速度过快时,深层煤岩基质和微裂缝系统发生蠕变变形,导致渗透率的变化更加显著。因此,深层煤岩气需要控压生产,避免强应力敏感性导致煤岩在高应力作用下发生不可逆的塑性变化。

参考文献

- [1] 邹才能,李士祥,熊波,等.新质生产力下"能源绿色转型"革命及意义:兼论"能源三角"理论认识[J].石油勘探与开发,2024,51(6):

- 1395-1408.
- ZOU Caineng, LI Shixiang, XIONG Bo, et al. Revolution and significance of "Green Energy Transition" in the context of new quality productive forces: A discussion on theoretical understanding of "Energy Triangle"[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(6): 1395-1408.
- [2] 刘斌. 我国煤岩气效益开发的对策与思考[J]. *石油科技论坛*, 2025, 44(1): 51-62.
- LIU Bin. Countermeasures and thinking on China's high-performance development of coal-rock gas[J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2025, 44(1): 51-62.
- [3] 傅雪海, 张宝鑫, 康俊强. "煤岩气"概念的探讨与辨析[J]. *天然气工业*, 2025, 45(3): 46-53.
- FU Xuehai, ZHANG Baoxin, KANG Junqiang. Discussion and analysis on the concept of "coal-rock gas"[J]. *Natural Gas Industry*, 2025, 45(3): 46-53.
- [4] 刘新社, 黄道军, 虎建玲, 等. 鄂尔多斯盆地中东部地区石炭系本溪组煤岩气储层特征[J]. *天然气工业*, 2024, 44(10): 51-62.
- LIU Xinshe, HUANG Daojun, HU Jianling, et al. Reservoir characteristics of Carboniferous Benxi Formation coal-rock gas in the central and eastern Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(10): 51-62.
- [5] 李雪彬, 金力新, 陈超峰, 等. 深层煤岩气水平井压裂关键技术: 以准噶尔盆地白家海地区侏罗系为例[J]. *油气藏评价与开发*, 2024, 14(4): 629-637.
- LI Xuebin, JIN Lixin, CHEN Chaofeng, et al. Key technologies of horizontal well fracturing for deep coal-rock gas: A case study of Jurassic in Baijiahai area, Junggar Basin[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2024, 14(4): 629-637.
- [6] 康毅力, 邵俊华, 刘嘉榕, 等. 深部致密煤藏适度就地气化可行性评价方法及应用[J]. *油气藏评价与开发*, 2025, 15(2): 237-249.
- KANG Yili, SHAO Junhua, LIU Jiarong, et al. Feasibility evaluation method and application of moderate in-situ gasification in deep tight coal & gas reservoirs[J]. *Petroleum reservoir evaluation and development*, 2025, 15(2): 237-249.
- [7] 朱维耀, 马东旭. 页岩储层有效应力特征及其对产能的影响[J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(6): 845-852.
- ZHU Weiyao, MA Dongxu. Effective stress characteristics in shale and its effect on productivity[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(6): 845-852.
- [8] 王高成, 田文广, 章超, 等. 四川盆地大安区块深层煤岩气储层特征及勘探潜力[J]. *天然气工业*, 2025, 45(3): 68-81.
- WANG Gaocheng, TIAN Wenguang, ZHANG Chao, et al. Reservoir characteristics and exploration potential of deep CBM in the Da'an Block, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2025, 45(3): 68-81.
- [9] 孔祥伟, 谢昕, 王存武. 基于综合可压指数的煤层气水平井压裂分段参数优化[J]. *油气藏评价与开发*, 2024, 14(6): 925-932.
- KONG Xiangwei, XIE Xin, WANG Cunwu. Optimization of segmented fracturing parameters for coalbed methane horizontal wells based on comprehensive fracability index[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2024, 14(6): 925-932.
- [10] 陈维铭, 蒋琳, 罗彤彤, 等. 基于深度学习的页岩气藏压裂缝网反演方法研究[J]. *油气藏评价与开发*, 2025, 15(1): 142-151.
- CHEN Weiming, JIANG Lin, LUO Tongtong, et al. Research on deep learning-based fracture network inversion method for shale gas reservoirs[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2025, 15(1): 142-151.
- [11] 康永尚, 邓泽, 刘洪林. 我国煤层气井排采工作制度探讨[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(3): 423-426.
- KANG Yongshang, DENG Ze, LIU Honglin. Discussion about the CBM well draining technology[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(3): 423-426.
- [12] 李相臣, 康毅力, 罗平亚. 煤层气储层变形机理及对渗流能力的影响研究[J]. *中国矿业*, 2009, 18(3): 99-102.
- LI Xiangchen, KANG Yili, LUO Pingya. Rock deformation mechanisms and its influence on poecolation ability for CBM reservoirs[J]. *China Mining Magazine*, 2009, 18(3): 99-102.
- [13] 吴双, 汤达祯, 李松, 等. 煤层气储层孔渗参数的应力响应特征[J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(6): 80-86.
- WU Shuang, TANG Dazhen, LI Song, et al. Stress response characteristics of porosity and permeability of coalbed methane reservoirs[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(6): 80-86.
- [14] 贾恒义, 王凯, 王益博, 等. 围压循环加卸载作用下含瓦斯煤样渗透特性试验研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(5): 1710-1718.
- JIA Hengyi, WANG Kai, WANG Yibo, et al. Permeability characteristics of gas-bearing coal specimens under cyclic loading-unloading of confining pressure[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1710-1718.
- [15] 刘正帅. 煤层气储层敏感性机理及对产能的影响[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- LIU Zhengshuai. Sensitivity mechanism of coalbed methane reservoir and its impact on CBM production[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.
- [16] 刘海燕. 组合煤岩加卸载过程损伤演化规律研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023.
- LIU Haiyan. Study on damage evolution law in loading and unloading process of coal-rock combination[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2023.
- [17] 崔峰, 罗钟, 何仕凤, 等. 不同加卸载路径下冲击倾向性煤岩组合试件破坏特征研究[J]. *煤炭科学技术*, 2025, 53(9): 258-274.
- CUI Feng, LUO Zhong, HE Shifeng, et al. Study on failure characteristics of coal-rock composite specimens with impact tendency under different loading and unloading paths[J]. *Coal Science and Technology*, 2025, 53(9): 258-274.
- [18] 王振至, 傅雪海, 潘结南, 等. 深部储层煤层气产出影响因素[J]. *煤田地质与勘探*, 2025, 53(2): 84-98.
- WANG Zhenzhi, FU Xuehai, PAN Jienan, et al. Factors influencing the production of coalbed methane from deep reservoirs[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(2): 84-98.
- [19] 孙粉锦, 杨焦生, 王玫珠, 等. 不同煤阶煤应力敏感特征及其控制机理[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(9): 51-58.
- SUN Fenjin, YANG Jiaosheng, WANG Meizhu, et al. Stress sensitivity characteristics and control mechanism of different coal rank reservoirs[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(9): 51-58.
- [20] 闵超, 郭星, 华青, 等. 基于FCMFS特征选择算法的煤层气压裂效果预测[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2025, 47(2): 95-104.
- MIN Chao, GUO Xing, HUA Qing, et al. Coalbed methane fracturing

- effect prediction based on FCMFS feature selection algorithm[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2025, 47(2): 95-104.
- [21] 张千贵, 邓健, 范翔宇, 等. 考虑地应力影响的煤层气水平井井眼变形破坏物理模型实验[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2025, 47(6): 107-118.
ZHANG Qiangui, DENG Jian, FAN Xiangyu, et al. Physical model experiment on wellbore deformation and failure of coalbed methane horizontal well considering the influence of in-situ stresses[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2025, 47(6): 107-118.
- [22] 朱苏阳, 向东流, 李博文, 等. 基于气藏数值模拟与动态分析的深层煤岩气缝网参数优化研究[J]. 钻采工艺, 2025, 48(3): 155-164.
ZHU Suyang, XIANG Dongliu, LI Bowen, et al. Optimization study of fracture network parameters for deep coal-rock gas based on gas reservoirs numerical simulation and dynamic analysis[J]. Drilling & Production Technology, 2025, 48(3): 155-164.
- [23] 刘泽源, 魏晨慧, 刘书源, 等. 煤层气解吸-扩散-渗流过程的气-固-热耦合模型[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(6): 97-104.
LIU Zeyuan, WEI Chenhui, LIU Shuyuan, et al. A gas-solid-thermal coupling model for desorption-diffusion-seepage process of coalbed methane[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(6): 97-104.
- [24] 杨晓盈, 李玉魁, 王理国, 等. 贵州省过饱和煤层气藏产气规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(4): 181-186.
YANG Xiaoying, LI Yukui, WANG Liguang, et al. Study on gas production laws of supersaturated CBM reservoir in Guizhou Province [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(4): 181-186.
- [25] 郭平, 赵梓寒, 汪周华, 等. 应力敏感对东方1-1气田开发指标的影响[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2016, 38(4): 95-100.
GUO Ping, ZHAO Zihan, WANG Zhouhua, et al. Influence of stress-sensitivity on development index in Dongfang 1-1 gas field[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2016, 38(4): 95-100.
- [26] 刘齐, 陈强, 孙中光, 等. 煤层不同类型裂缝应力敏感性实验: 以阜新盆地煤样为例[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(3): 437-446.
LIU Qi, CHEN Qiang, SUN Zhongguang, et al. Stress sensitivity of coal seam with different fractures: Case study of Fuxin Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(3): 437-446.
- [27] GUO Z, REGENAUER-LIEB K, VU P N H, et al. Characteristics of elastoplastic consolidation by compaction and its effects on coal permeability[J]. Energies, 2022, 15(20):7647.
- [28] 唐淑玲, 汤达祯, 杨焦生, 等. 鄂尔多斯盆地大宁-吉县区块深部煤储层孔隙结构特征及储气潜力[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1854-1866.
TANG Shuling, TANG Dazhen, YANG Jiaosheng, et al. Pore structure characteristics and gas storage potential of deep coal reservoirs in Daning-Jixian block of Ordos Basin[J]. Acta Petroli Sinica, 2023, 44(11): 1854-1866.
- [29] 徐凤银, 闫霞, 李曙光, 等. 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[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 115-130.
XU Fengyin, YAN Xia, LI Shuguang, et al. Theoretical and technological difficulties and countermeasures of deep CBM exploration and development in the eastern edge of Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 115-130.
- [30] 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.
- [31] 巢海燕, 李泽, 甄怀宾, 等. 大宁-吉县区块深部煤层气水平井压裂干扰行为及其机理[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(3): 328-339.
CHAO Haiyan, LI Ze, ZHEN Huaibin, et al. Fracturing interference behavior and mechanism of deep coalbed methane horizontal wells in the Daning-Jixian Block[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(3): 328-339.
- [32] 赵景辉. 埋深对深部煤层气储层物性及开发效果的影响: 以鄂尔多斯盆地东南缘延川南区块为例[J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(3): 62-67.
ZHAO Jinghui. Effect of burial depth on reservoir petrophysical properties and development performance of deep coalbed methane reservoirs: A case of Yanchuannan Block in southeastern margin of Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(3): 62-67.
- [33] 马丁. 煤层气-水两相渗流应力敏感性数值模拟[J]. 内蒙古煤炭经济, 2025, 42(2): 35-37.
MA Ding. Numerical simulation of stress sensitivity of coalbed methane-water two-phase seepage[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2025, 42(2): 35-37.
- [34] 李明宅, 曹毅民, 丁蓉, 等. 大宁-吉县区块深层煤岩气赋存产气特征与储量估算方法指标探讨[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(4): 142-155.
LI Mingzhai, CAO Yimin, DING Rong, et al. Gas occurrence and production characteristics of deep coal measure gas and reserve estimation method and indicators in Daning-Jixian block[J]. China Petroleum Exploration, 2024, 29(4): 142-155.

(编辑 余聪)