DOI:10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202511050139

鄂尔多斯盆地东缘二叠系山西组5号煤覆压渗透率演化规律

史云鹤[1,2]，张 辉[1,2]，王怀厂[1,2]，曹晶晶[1,2]，孙 闻[1,2]，
陈宇航[1,2]，胡新友[1,2]，高 星[1,2]

（1. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院，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）

摘要：深部煤层气作为我国煤层气勘探开发的重要接替领域，尽管已实现初步商业化开发，但因孔隙度低、渗透率低和非均质性强等特征，其规模化开采仍面临较大挑战。有效应力对渗透率的影响是制约深部煤层气产能的关键机制，亟需系统实验研究予以揭示。本文以鄂尔多斯盆地东缘深部山西组5号煤层样品为研究对象，开展了覆压条件下的渗透率测试。结果表明，煤样渗透率随有效应力整体呈指数式下降，不同样品在渗透率损害累积速率和敏感区间存在显著差异。为系统表征这一过程，本文引入渗透率损害度、应力敏感滞回系数与滞回能量指数三类参数，对加载-卸载过程中渗透率变化特征进行定量化描述。相关性分析结果显示，渗透率损害度和滞回能量指数主要受孔喉几何规模与连通性控制，而应力敏感滞回系数除反映孔隙结构影响外，还显著受煤阶及有机质组成调节。研究表明，深部煤层应力敏感性具有双重控制机制，既取决于孔隙结构对渗流通道的压缩效应，也受到有机骨架性质对加载－卸载回弹行为的制约。上述认识有助于深化深部煤层渗透率演化规律的理解，并为压裂改造优化及深部煤岩气高效开发提供理论依据。

关键词：深部煤层气；应力敏感性；渗透率演化；孔隙结构；山西组；二叠系；鄂尔多斯盆地

中图分类号：P618. 1；TE122. 1 **文献标志码：**A **文章编号：**1000-8527(2026)01-0183-10

Evolution of Confining-Pressure-Controlled Permeability in the No. 5 Coal Seam of the Permian Shanxi Formation, Eastern Margin of the Ordos Basin

SHI Yunhe[1,2], ZHANG Hui[1,2], WANG Huaichang[1,2], CAO Jingjing[1,2], SUN Wen[1,2],
CHEN Yuhang[1,2], HU Xinyou[1,2], GAO Xing[1,2]

(1. *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi* 710018, *China*;
2. *National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an, Shaanxi* 710018, *China*)

Abstract: Deep coalbed methane (CBM) is an important successor domain for CBM exploration and development in China. Although preliminary commercial development has been achieved, large-scale production remains challenging due to low porosity, low permeability, and strong heterogeneity. The influence of effective stress on permeability is a key mechanism constraining deep CBM productivity and requires systematic experimental investigation. In this study, deep No. 5 coal samples from the Shanxi Formation on the eastern margin of the Ordos Basin were tested for permeability under confining-pressure conditions. The results show that coal

收稿日期：2025-11-05；**修回日期：**2025-12-06；**编辑：**董立。

基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFC2909400）；中国石油天然气股份有限公司重大专项课题（2023ZZ18YJ03）。

作者简介：史云鹤，男，高级工程师，1982年出生，主要从事石油地质综合研究。Email：syhe_cq@petrochina. com. cn。

引用格式：史云鹤，张辉，王怀厂，等. 鄂尔多斯盆地东缘二叠系山西组5号煤覆压渗透率演化规律［J］. 现代地质，2026，40（1）：183-192. DOI：10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202511050139.

SHI Yunhe, ZHANG Hui, WANG Huaichang, et al. Evolution of Confining-Pressure-Controlled Permeability in the No. 5 Coal Seam of the Permian Shanxi Formation, Eastern Margin of the Ordos Basin［J］. GEOSCIENCE, 2026, 40（1）: 183-192. DOI: 10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202511050139.

permeability generally decreases exponentially with increasing effective stress, while significant differences exist among samples in the cumulative rate of permeability damage and the stress-sensitive intervals. To systematically characterize this process, three parameters—permeability damage degree, stress-sensitivity hysteresis coefficient, and hysteretic energy index—were introduced to quantitatively describe permeability variations during loading-unloading cycles. Correlation analyses indicate that the permeability damage degree and hysteretic energy index are mainly controlled by pore-throat geometric scale and connectivity, whereas the stress-sensitivity hysteresis coefficient, in addition to reflecting pore-structure effects, is also significantly modulated by coal rank and organic matter composition. The results demonstrate that stress sensitivity in deep coal seams is governed by a dual-control mechanism: compression of seepage pathways by pore-structure deformation and constraints on loading-unloading rebound behavior imposed by the properties of the organic framework. These findings deepen the understanding of permeability evolution in deep coal seams and provide a theoretical basis for hydraulic fracturing optimization and efficient development of deep coalbed methane.

Key words: deep coalbed methane; stress sensitivity; permeability evolution; pore structure; Shanxi Formation; Permian; Ordos Basin

0 引 言

近年来，随着技术进步与地质认识的深化，深部煤层气已在部分区块实现初步商业化开采，并展现出较强的增产潜力[1-3]。与中浅层相比，深部煤层普遍具有孔隙度低、渗透率低、非均质性强等储层特征，气体运移受限，成为制约规模化开发的关键瓶颈[4-6]。这种“资源丰富而开采受限”的结构性矛盾，使深部煤层气开发的研究受到广泛关注[7-8]。

水力压裂是改善煤层渗流条件、提高单井产能的关键技术手段，在深部煤层气开发中已取得局部突破。在大宁—吉县区块吉深6-7平01井，中国石油首次实施大规模极限体积压裂，压后日产气量达到10×10^4 m^3，实现了深部煤层气单井产能的历史性提升[9-10]。中海石油在临兴区块采用水平井多段多簇压裂，最高日产气量达到6×10^4 m^3。中国石化在延川南区块则应用大规模连续加砂体积压裂工艺，17口低效井的平均日产量由0.63×10^4 m^{3}提升至3.6×10^4 m^3[11]。这些实践表明，深部煤层气具备较好的增产潜力和应用前景。然而，压裂改造效果并不稳定，部分井在压裂初期虽能获得较高产量，但仍普遍面临稳产周期短、产量衰减快以及低产井比例高等问题[12]。其根源在于深部煤储层的物性和力学特征与常规砂岩储层存在本质差异，煤体非均质性强、力学强度低、杨氏模量偏低而泊松比偏高，容易在高应力环境下产生塑性变形和裂缝闭合[13-15]。因此，深入揭示深部煤储层在复杂应力环境下的渗透率演化规律，厘清加载—卸载过程中的通道压缩与回弹特征，成为优化压裂工艺、提升改造效果的核心科学问题。

渗透率是控制煤层气运移能力的核心参数。已有研究表明，有效应力增加会导致煤体孔隙与裂隙压缩，使孔隙度与渗透率整体呈指数式下降[16-19]。相关工作从不同角度揭示了应力敏感性的控制机制。割理宽度、连通性及方向性决定了渗流通道在应力作用下的压缩与演化特征[20-21]。孔裂隙类型与煤变质程度影响孔隙体积压缩性及渗透率损失，不同煤阶样品表现出明显差异[22-24]。此外，已有模型尝试建立有效应力与孔隙度、渗透率的定量关系，表明应力敏感性受孔隙结构及演化过程的共同制约[25]。然而，在变化趋势及主控因素方面仍缺乏统一认识。有学者认为渗透率与有效应力呈典型负指数关系[26]，也有研究得到近似二次多项式或分段函数关系[20]。受原煤样品制备与实验条件限制，许多实验采用型煤替代，但其孔-裂隙结构与原煤差异显著，难以真实反映深部储层特征[27-28]。因此，深部原煤在三轴应力条件下的渗透率演化规律仍缺乏系统验证，加载与卸载过程的变化模式及其控制机制尚不明确。

综上所述，本文选取鄂尔多斯盆地东缘深部山西组5号煤样品，开展覆压条件下的渗透率实

验，引入渗透率损害率、应力敏感滞回系数与滞回能量指数三类参数，对煤样在加载—卸载过程中的应力敏感性进行系统表征，并结合相关性分析揭示其控制机制。研究成果可为深部煤层气储层改造提供理论支持，并为后续高效开发提供参考。

1　样品与方法

1.1　样品基本信息

本研究从鄂尔多斯盆地不同埋深位置采集了本溪组与山西组煤样，依据镜质体反射率（R_o）差异选取了四组具有代表性的样品，涵盖了不同煤阶范围。试验煤样基本信息如表1所示。R_o为1.08 %～2.26%，整体为中-高变质煤，样品密度为1.39～1.50 g/cm^3，常规气测孔隙度为4.74%～8.61%，初始渗透率差异显著为0.02～21.07 mD。样品S2与S3表面可见贯穿裂缝，尽管其孔隙度低于S1与S4，但渗透率高出数百倍，显示渗流能力主要受裂缝连通控制。工业分析显示，样品水分含量低（0.58%～1.16%）、灰分含量低（5.05%～11.21%）、挥发分中等偏低（9.27%～26.44%）、固定碳含量高（67.38%～84.24%）。上述组分与煤阶特征相互印证，且与前人关于深部中-高变质煤的认识一致[9]。

1.2　实验方法

本研究采用高压压汞法（Mercury Intrusion Porosimetry，MIP）用来表征煤体孔隙结构。汞在常温下对煤壁呈非润湿性，需外加压力方能进入孔隙，依据Washburn方程，可将施加的毛细压力换算为对应的孔喉半径[29]：

$$r_c = -\frac{2\sigma\cos\theta}{P_c} \tag{1}$$

式中，r_c为孔喉半径，nm；σ为汞的表面张力（0.48 J/m^2）；θ为接触角（143°）；P_c为施加的毛细压力，MPa。测试在AutoPore Ⅳ 9505自动压汞仪上完成，最高进汞压力200 MPa，对应最小可分辨孔喉半径约3 nm。试验前对煤样进行干燥并抽真空以去除自由水与空气，随后逐级加压记录进汞体积与压力关系获取进汞曲线，并在降压阶段同步获取退汞曲线。依据进、退汞数据计算最大汞饱和度、平均孔喉半径、排驱压力与退汞效率等参数，并获得孔径分布，用以刻画孔隙连通与尺度特征。

覆压渗透率测试采用SY/T 6385—2016《覆压下岩石孔隙度和渗透率测定方法》标准执行。实验使用AP-608型覆压孔隙度、渗透率测试仪，以氦气为流体介质，通过平流泵逐级升高和降低围压以模拟不同有效应力条件。在每个围压加载阶段，保证样品渗流状态稳定至少30 min后记录渗透率数据。整个加载过程设置6～8个压力点，最大围压不超过25 MPa。实验过程中经历完整的升压—降压循环，以考察渗透率的损伤效应和可恢复性。

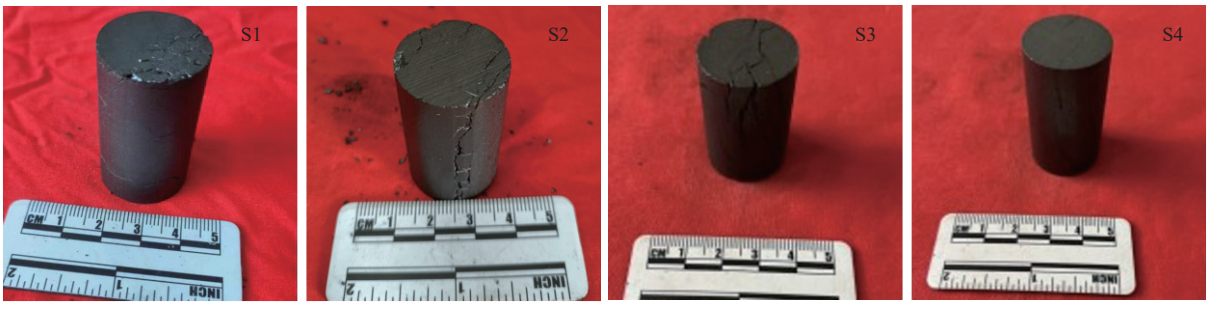


图1　实验煤样照片

Fig. 1　Photographs of the experimental coal samples

表1　覆压渗透率实验煤样基本信息

Table 1　Basic information of coal samples used in confining pressure permeability tests

样品编号	Ro(%)	埋深(m)	直径(cm)	长度(cm)	ρ(cm^3/g)	Φ(%)	K(mD)	工业分析(%)			
								M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}
S1	2.10	2361.94	25.00	40.90	1.44	8.61	0.02	0.58	5.90	9.27	84.24
S2	1.08	2586.43	24.90	42.40	1.39	5.37	9.55	1.16	5.05	26.44	67.35
S3	1.75	3163.80	25.00	37.00	1.50	4.74	21.07	0.71	15.30	15.21	68.78
S4	1.81	3198.47	25.00	44.69	1.42	7.21	0.04	0.76	11.21	12.05	75.98

2 结 果

2.1 煤压汞曲线特征

为直观展示煤样的孔喉结构特征，本文将所测煤样的进退汞曲线划分为三类。图2展示了四个样品的进、退汞曲线，并据此归纳出三种典型类型。图3展示了相应的孔径分布曲线。表2则汇总了最大汞饱和度、排驱压力、平均孔径等关键参数，作为后续分析的依据。

S1归为Ⅰ类。进汞曲线整体平缓，< 1 MPa阶段几乎无汞侵入，表明大孔与可导裂缝不发育。随着压力升高，最大进汞饱和度不足40 %，指示总体孔隙含量偏低。孔径分布以微-介孔（r < 0.05 μm）为主，> 1 μm孔隙段基本缺失且峰形狭窄（图3）。退汞曲线与进汞曲线高度贴合、滞后极弱，呈近似可逆的进、退汞特征，提示孔喉形貌较为规则、喉道均匀且贯通，墨水瓶效应不显著。相应地，该类样品通常表现为最大汞饱和度较低、退汞效率较高、排驱压力偏高。

S2归为Ⅱ类。在 < 1 MPa时，进汞曲线轻微抬升且斜率较大，进汞饱和度小于10%，表明样品内存在一定数量的大孔或裂缝。1 ~ 10 MPa阶段进汞不显著，当压力 > 10 MPa时，才出现显著而持续的汞侵入，说明孔隙主要由细微孔贡献，需要高毛管压力方可侵入。图3显示孔隙主峰在 r < 0.01 μm，同时在0.3 ~ 2 μm区出现次峰，说明总体受微孔控制，但存在少量大孔。进、退汞曲线滞回显著，排驱困难，最大汞饱和度偏低而排驱压力高，退汞效率低，指示以微孔为主、通道狭窄且结构复杂的“瓶体-瓶颈”型孔隙发育，其连通性受限。

S3、S4归为Ⅲ类。进汞曲线呈典型三段式：< 1 MPa见轻微起伏，进汞饱和度 < 10 %，表示仅有少量大孔提供初始通道。1 ~ 10 MPa汞饱和度增至20 % ~ 40 %，对应中等孔喉逐步开放。> 10 MPa 汞饱和度迅速增加至约90 %，反映微孔占比较高。孔径分布呈双峰型，峰位分别位于 r < 0.01 μm与0.3 ~ 2 μm，与进汞特征相互印证。该类样品参数特征为：最大汞饱和度约为90%，退汞效率为65% ~ 80%，排驱压力为0.26 ~ 0.55 MPa，参数组合指示多尺度孔-喉结构发育、喉道连通性相对较好。

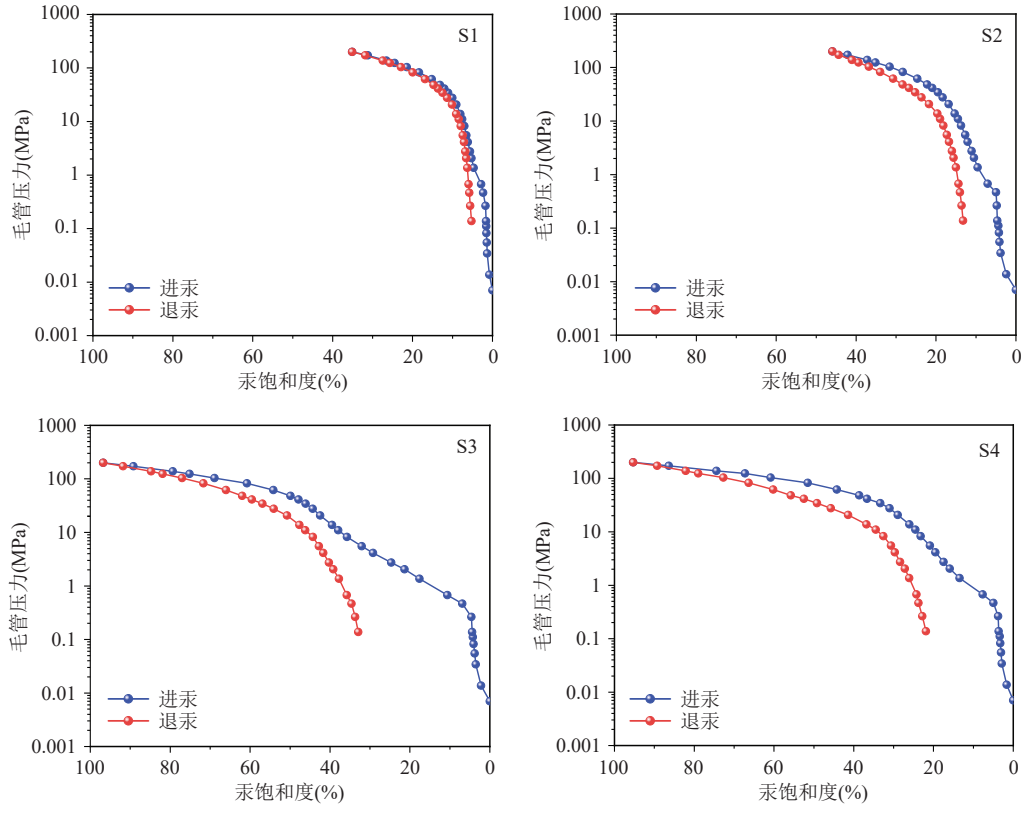


图2 煤样进汞和退汞曲线

Fig. 2 Mercury intrusion and extrusion curves of the coal samples

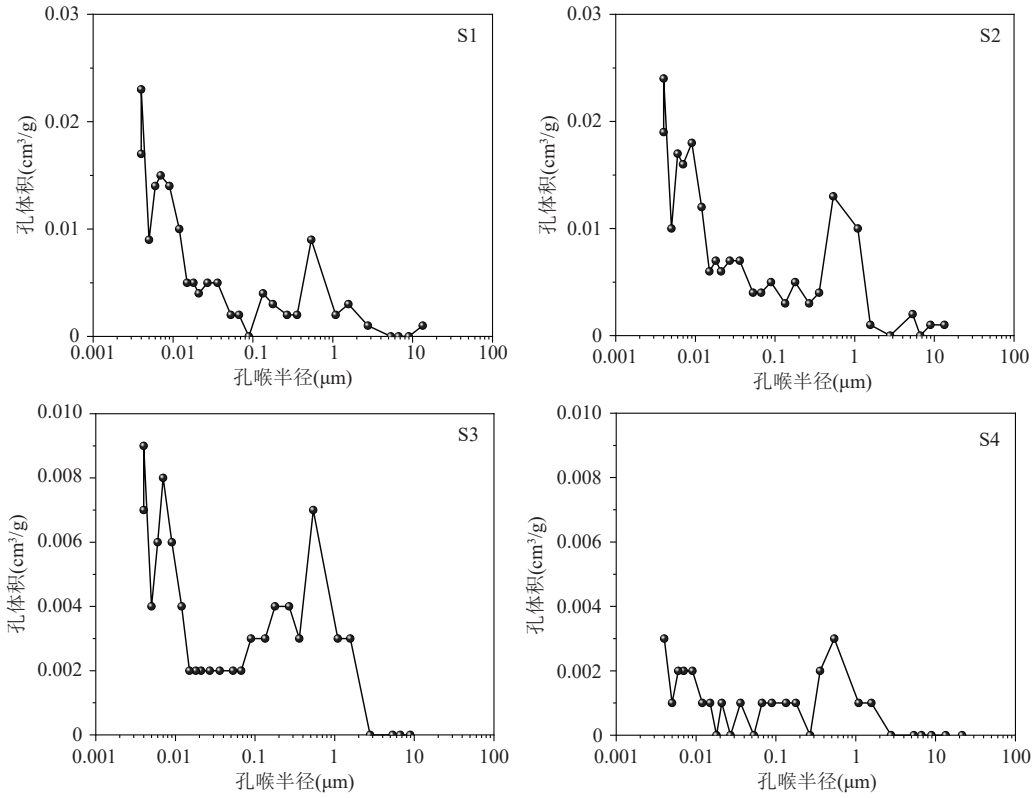


图3　煤样压汞孔径分布

Fig. 3　Pore size distribution of the coal samples derived from mercury intrusion data

表2　煤样压汞孔隙结构特征参数

Table 2　Pore structure parameters of coal samples derived from mercury intrusion porosimetry

样品编号	r(μm)	S_p	D	S_w(%)	W_e(%)	P_{cd}(MPa)	分类
S1	0.14	1.40	20.61	35.10	85.00	0.67	Ⅰ类
S2	0.27	2.13	66.55	45.93	71.19	0.47	Ⅱ类
S3	0.37	3.09	50.49	96.74	65.98	0.26	Ⅲ类
S4	0.12	2.19	4.27	93.11	86.31	0.68	Ⅲ类

注：r为平均孔喉半径，μm；S_p为分选系数，无因次；D为结构系数，无因次；S_w为最大汞饱和度，%；W_e为退汞效率，%；P_{cd}为排驱压力，MPa。

2.2　煤渗透率与有效应力的关系

如图4所示，在有效应力作用下，煤样的渗透率均呈现显著的应力敏感性。随围压逐级提高，加载过程中渗透率单调衰减，符合指数型下降规律。卸载过程中虽有一定回升，但整体难以恢复至加载前水平，体现出不可逆损伤，其演化亦可用指数函数描述，可表示为[30-31]：

$$K_{\sigma(i)} = K_0 e^{-\alpha\sigma(i)} \tag{2}$$

式中：$K_{\sigma(i)}$为在不同有效应力$\sigma(i)$时的渗透率，mD；K_0为煤样脱离原位储层，不受任何外部应力和不考虑基质吸附变形时的原始渗透率，mD；α为应力敏感性系数，MPa^{-1}。

四组煤样在加载与卸载阶段的渗透率与有效应力关系均可由指数模型较好拟合（$R^2 > 0.9$）（表3）。不同样品加载过程的原始渗透率（K_{0l}）差异显著：S2、S3为35.50 ~ 37.24 mD，而S1、S4仅为0.015 ~ 0.110 mD。不同样品卸载阶段的原始渗透率（K_{0u}）之间的差异明显收敛，分布于0.003 ~ 4.332 mD且普遍小于K_{0l}。应力敏感系数亦存在样品之间的差异，其中加载阶段α_l为0.364 ~ 0.927 MPa^{-1}，卸载阶段α_u为0.284 ~ 0.739 MPa^{-1}。

S2、S3含有更多较大孔喉（图3），因此在低应力下表现出更高的渗透率，而S1、S4以细喉与微孔为主，导致初始渗透率较低。机制上，加载阶段主要由裂缝逐步闭合与孔喉结构重排主导，导致的通道收缩与渗流路径丧失，该过程受裂缝密度、取向与孔喉形貌等几何特征控制。卸载阶段则以基质孔隙的弹性回弹及已闭合裂缝的部分再张开为主，但加载期形成的不可逆压密与喉颈塑性损伤限制了完全恢复，因而出现$K_{0u} < K_{0l}$及加载与卸载曲线滞回现象。

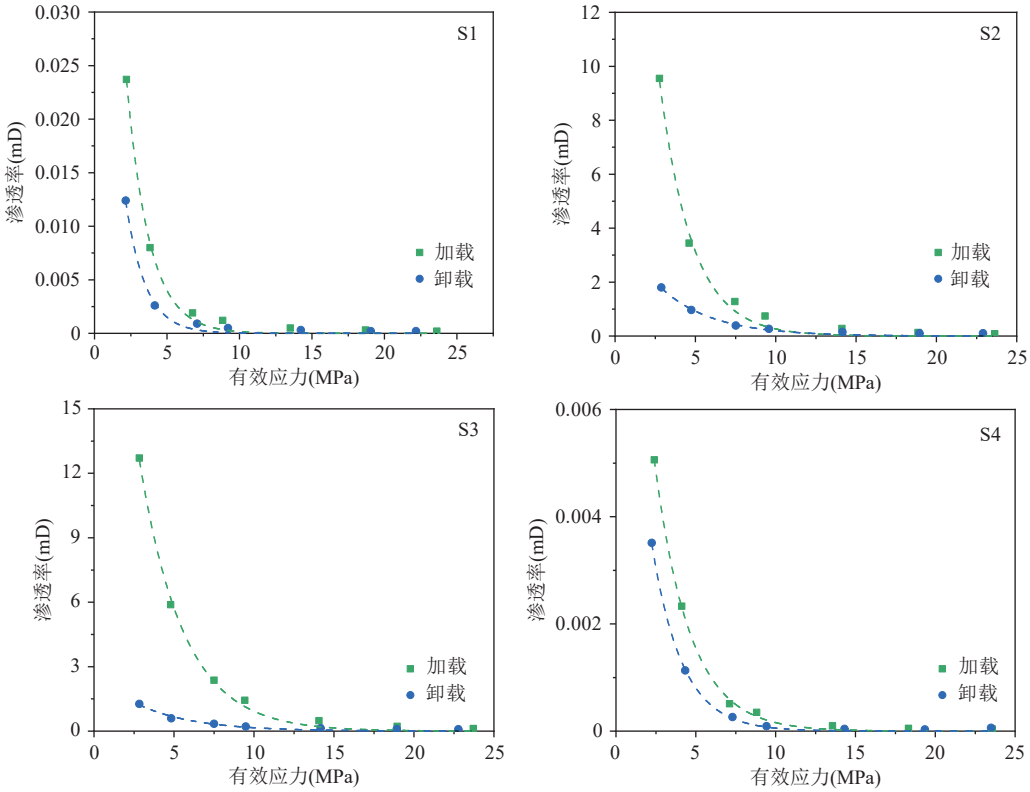


图4 煤渗透率与有效应力的关系

Fig. 4 Relationship between coal permeability and effective stress

表3 煤渗透率与有效应力关系拟合结果

Table 3 Fitting results of the permeability-effective stress relationship

样品编号	加载过程			卸载过程		
	K_{0l}	α_l	R^2	K_{0u}	α_u	R^2
S1	0.096	0.637	0.9991	0.061	0.739	0.9974
S2	37.244	0.495	0.9954	4.332	0.309	0.9942
S3	35.503	0.364	0.9984	2.740	0.284	0.9832
S4	0.015	0.455	0.9992	0.012	0.532	0.9997

2.3 煤储层应力敏感性分析

煤层气开采过程中，随有效应力持续增大，煤储层孔/裂隙系统发生不同程度的变形与重排，导致渗透率降低。不同煤层的抗压缩能力存在差异，表现为渗透率对应力的敏感性不同。为定量刻画这种差异，本文引入两类指标：渗透率应力损害率与渗透率-应力曲线的曲率指标。渗透率应力损害率表示在给定有效应力下，相对初始状态损失的渗透率百分比：

$$K_S = \frac{K_1 - K_i}{K_1} \times 100\% \tag{3}$$

式中：K_S为渗透率应力损害率，%；K_1为试验测得的第1个有效应力下的渗透率，mD；K_i为某个有效应力点下的渗透率，mD。

本文以渗透率-有效应力曲线的曲率（K_C）表征应力作用的“影响强度”。几何意义上，曲率反映曲线在某点的弯曲程度，K_C越大说明该应力区间渗透率对应力的响应越剧烈，反之则越弱。渗透率曲率指标：

$$K_C = \frac{|K''|}{\left(1 + K'^2\right)^{2/3}} \times 100\% \tag{4}$$

式中：K_C为渗透率曲率，%；K'为渗透率与有效应力的一阶导数；K''为渗透率与有效应力的二阶导数。

图5（a）给出了样品在加载阶段的渗透率损害率与有效应力关系曲线。整体上，各样品渗透率损害率均呈现“低-中应力段快速累积、高应力段趋于饱和”的特征。在约3～10 MPa范围内损害度迅速上升，10～15 MPa后增幅明显放缓，20 MPa以上基本接近100%。不同样品的差异主要体现在起始敏感区的进入时间与增长速率，S1最早进入快速累积区且在同一应力下K_S最高，S4次之，S2与S3起步较晚、上升相对缓慢。以有效应力为4～5 MPa为例，S1的K_S已达约65%～70%，S4约50%～55%，S2与S3仍处于50 %左右。到8～

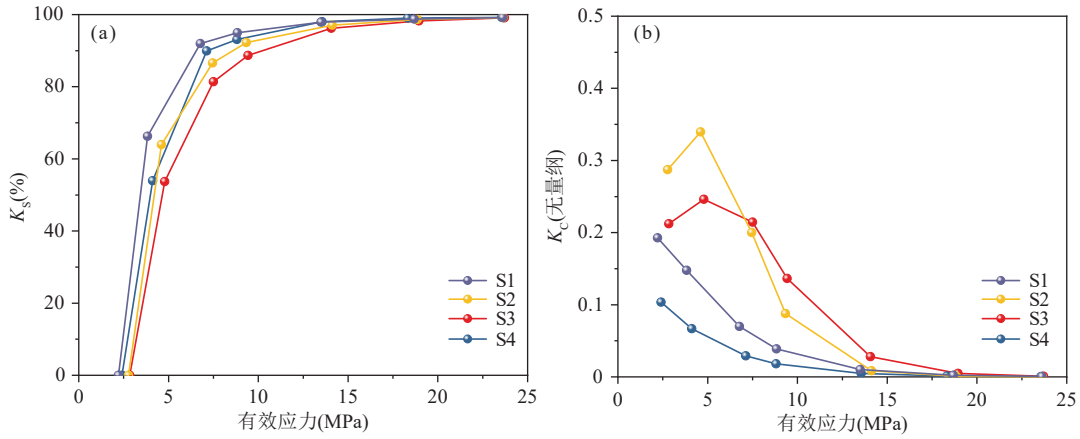


图5　渗透率应力损害率与有效应力的关系（a）与渗透率曲率和有效应力的关系（b）

Fig. 5　Relationship between permeability damage rate and effective stress（a）and between permeability curvature and effective stress（b）

10 MPa时四条曲线均已达到85% ~ 95%。S1、S4以细喉-微孔为主，整体孔隙体系较弱，在应力作用下更易发生持续压缩，因此归一化后的损害率较高；S2、S3裂缝和大孔发育，初始渗透率本身较高，在相同绝对压缩量下归一化损害率显得更低，但这并不意味着其对应力不敏感。

如图5（b）所示，四组样品的K_C随有效应力增加总体呈负指数衰减，表明煤储层对应力的敏感性随应力增大而逐步减弱。在相同有效应力下，始终有S2、S3的K_C大于S1、S4，表明前者在加载过程中对应力变化更为敏感。尤其在低应力阶段（< 15 MPa），S2的曲率呈“先升后降”特征，由于初始阶段裂缝快速闭合，使得渗透率下降速率陡然增大，K_C突然放大。随着主要裂缝闭合完成，控制机制转为基质孔隙的弹性-塑性压缩，渗透率变化趋于平缓，K_C随之减小。当有效 > 15 MPa时，各样品的曲率曲线逐渐变缓并趋于一致，说明多数孔裂隙已被压缩至极小尺度。此阶段渗透率应力损害率的上升速率同步降低，即渗透率下降趋缓、敏感性较弱。

2.4　滞回效应特征

在一次完整的加载—卸载循环中，所有样品均表现出不同程度的滞回效应，即卸载过程中渗透率未能完全恢复至加载前的水平，说明高应力作用下煤体结构发生了不可逆损伤。为定量表征这一过程，本文采用了渗透率损害程度、应力敏感滞回系数以及渗透率滞回指数三个指标进行分析。

渗透率损害程度（D_K）用来量化一次完整加载—卸载循环后的“渗透率不可逆损失量”。定义为：

$$D_K = \frac{K_1 - K_1'}{K_0} \times 100\% \tag{5}$$

其中，K_1和K_1'分别表示加载和卸载在相同最小有效应力时的两处渗透率。$D_K = 0$表示完全可逆，$D_K \to 100$表示渗流能力几乎丧失。它刻画的是端点间的净损失，不反映路径形状，也不区分损失来源，因此在解释机理时通常需要与曲线形态类指标配合。

应力敏感滞回系数（$\Delta\alpha$）表示加载与卸载应力敏感系数的差异，定义为$\Delta\alpha = \alpha_l - \alpha_u$。$\Delta\alpha > 0$意味着卸载段对应力的敏感性变钝，常见情形是高应力作用后孔隙与喉道被压紧、变窄，卸载时只能部分回弹，单位应力释放带来的通道“放宽”有限；$\Delta\alpha = 0$表示两段几乎平行，敏感性形态未变，仅表现为基准渗透率降低；$\Delta\alpha < 0$则说明卸载更敏感，多出现在低应力区跨越“再连通阈值”时的小孔喉或少量裂缝迅速回开，渗透率对应力的响应突然变快。

渗透率滞回指数（A_{loop}）用于衡量一次完整加载—卸载循环中路径分离的累积强度。在统一的有效应力范围内，对两条曲线的差做面积积分即可得到该指数。该参数具有渗透率与有效应力乘积的量纲（如mD·MPa），在文中主要作为不同样品之间的相对比较指标使用。数值越大表示滞回越强、路径依赖越显著，对“整条曲线的平均分离”特别敏感，既能识别两条曲线平行但整体下移，也能反映斜率改变导致的形态差异。对应关系可简明归纳为D_K给出循环后的净损失，$\Delta\alpha$给出加载与卸载敏感性形态是否改变及其方向强弱，A_{loop}给出全过程的滞回强度。

S3 的 A_{loop}、D_K 均为高值，而 Δα 仅为小幅正值。其反映的信息是“损失很大、能量耗散很大，但应力敏感差不大”。合理的解释是，加载与卸载两段近似平行而整体下移，表明渗流通道发生了显著的不可逆闭合或堵塞，而回弹时的敏感性形态未见显著改变。S2 的 A_{loop} 与 D_K 亦处于高值，同时 Δα 是四者中最大的正值。其主要信息是“损失大、耗散大，且卸载相对变钝”。相比于S3，S2突出了“形态变化”的特征，即除基准下降之外，卸载路径对应力的灵敏度被削弱，常见情形是瓶颈喉道在高应力下发生塑性变形或坍塌，导致回弹时难以重新恢复到加载时的敏感水平。S1 的 A_{loop} 与 D_K 很小而 Δα 为负，其主要信息是“能量损失最小、几乎无滞回，且卸载更敏感”。这种组合典型对应“近似可逆或平行滞回”的类型，两段曲线高度贴合，滞回面积极小，循环后仅表现为初始渗透率 K_0 的整体下移。负的Δα表明在卸载低应力阶段存在再连通区间，单位应力释放带来的渗透率恢复幅度更大。这一特征与以微细而规则的孔喉通道为主、滞留效应较弱的孔隙结构特征相一致。S4 的 A_{loop}、D_K 和 Δα 均处于较低水平，说明其“近可逆、卸载更敏感”的特征表现得最为稳定，加载-卸载路径分离有限，低应力区段回弹灵敏，指示孔喉构造较为简单，回弹响应集中。

表 4 煤样加载-卸载过程中滞回参数与应力敏感性指标

Table 4 Hysteresis parameters and stress sensitivity indices of coal samples during loading-unloading cycles

样品编号	D_K（%）	Δα	A_{loop}
S1	47.68	−0.10	0.02
S2	81.17	0.19	13.35
S3	90.07	0.08	30.38
S4	30.63	−0.08	0.01

2.5 相关性结果与控制因素

为探讨覆压渗透率应力敏感性的主控因素，本文对三类敏感性参数（D_K、Δα、A_{loop}）与煤阶、工业分析组分、常规孔隙度、渗透率以及压汞参数进行了皮尔逊相关性分析。结果表明，三类指标既存在共性，也体现出差异性控制。

结果显示，三类参数均与孔隙度表现为强负相关，与平均孔喉半径和结构系数呈显著正相关。同时，它们与退汞效率和排驱压力均呈强负相关。这说明在大孔/裂缝与粗喉道发育、连通性较好的样品中，更易在加载-卸载过程中产生不可逆闭合与曲线不重合，从而导致渗透率损害与能量耗散加剧。在总孔隙度较高、微孔占比大的样品中，孔隙体系主要表现为均匀压缩与可恢复性形变，曲线多为平行下移型，三类敏感性参数整体较低。

相比 D_K 与 A_{loop}，Δα 与煤的本体性质相关性更为突出。其与镜质组反射率及固定碳含量呈强负相关，与挥发分、水分呈正相关。说明煤阶越低（R_o小、挥发分高、固定碳低），其有机骨架刚度较弱，在加载-卸载循环中更易表现为应力敏感不一致，导致 Δα 偏大，而煤阶较高时骨架刚性增强，加载与卸载曲线趋于平行，Δα 相应减小或接近零。由此可见，Δα 在反映加载与卸载过程中响应速率差别时，更容易受到煤有机骨架性质的影响。

综合来看，D_K 与 A_{loop} 主要受控于孔喉几何规模与连通性特征，反映了储层在应力作用下的损害程度与能量耗散水平，而 Δα 除了对孔隙结构有

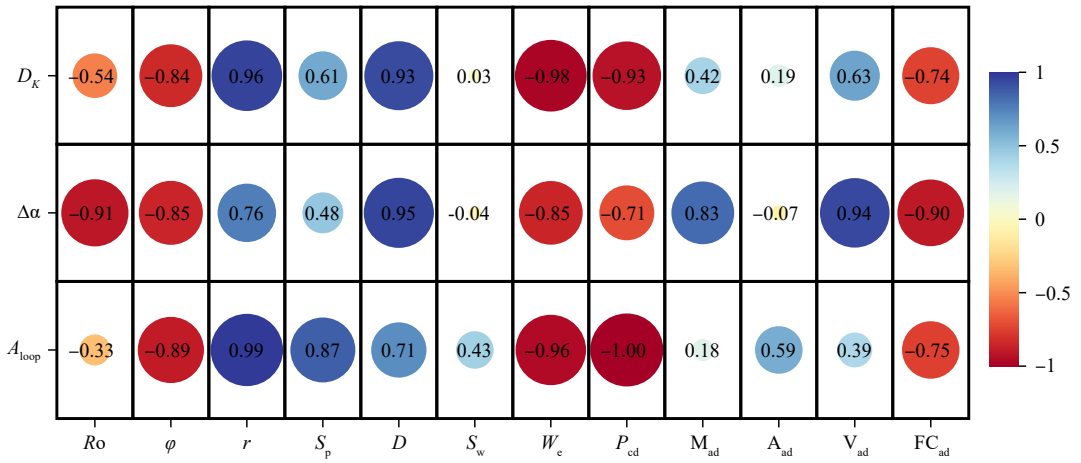


图 6 渗透率应力敏感性相关性热图

Fig. 6 Heatmap showing correlations among permeability stress sensitivity parameters

响应外，还显著受煤阶及有机质组成的影响，更能揭示加载与卸载过程的响应速率差别与回弹特征。换言之，三类指标分别从损害强度与加载–卸载响应特征两个维度揭示了储层应力敏感性的双重控制机制。

3　结　论

本研究基于覆压渗透率实验和相关性分析，系统评估了煤储层在应力作用下的渗透率演化规律及其主控因素。主要结论如下：

（1）煤样渗透率随有效应力整体呈指数式下降，卸载过程中仅部分恢复，表现出明显的不可逆损伤。不同煤样品在低–中应力阶段的渗透率敏感性差异明显，裂缝和大孔较多的样品在低应力条件下渗透率下降更快，而以微孔和细小喉道为主的样品在前期变化较缓，但随着应力进一步增加，其渗透率下降同样趋于严重。

（2）通过引入渗透率损害度 D_K、应力敏感滞回系数 $\Delta\alpha$ 和滞回能量指数 A_{loop} 三个参数来表征覆压渗透率损害。结果显示，D_K 与 A_{loop} 反映了损害程度与能量耗散水平，而 $\Delta\alpha$ 更能揭示加载与卸载过程的响应速率差别与回弹特征。三者结合可从不同角度全面描述煤样的应力敏感性。

（3）相关性分析表明，D_K 与 A_{loop} 主要受孔隙度、平均孔喉半径、结构系数和连通性等孔喉几何特征控制。$\Delta\alpha$ 在对孔隙结构敏感的同时，还显著受煤阶和有机质性质调节，说明煤储层应力敏感性受孔喉几何与有机骨架双重因素控制，不同参数在刻画损害量级与加载–卸载响应方面具有互补作用。

（4）孔喉结构支配了渗流通道的可压缩性与滞回类型，而煤阶决定了基质强度及微裂隙在应力作用下的可演化程度。两者协同作用使不同煤样呈现出明显差异化的渗透率–应力响应模式。该机制对工程具有重要意义，在压裂改造中，可根据孔喉和煤阶组合判断裂缝网络的保持能力和压裂液返排效率。

参考文献：

[1] 李国永，姚艳斌，王辉，等．鄂尔多斯盆地神木–佳县区块深部煤岩气地质特征及勘探开发潜力[J]．煤田地质与勘探，2024，52(2)：70－80.

[2] 李亚辉．鄂尔多斯盆地大牛地气田深层中煤阶煤层气勘探实践及产能新突破[J]．石油与天然气地质，2024，45(6)：1555－1566.

[3] 闫欣璐，唐书恒，傅小康，等．含水层越流补给对煤层气井产能影响的数值模拟：以柿庄南区块为例[J]．现代地质，2025，39(4)：1143－1155.

[4] 范立勇，周国晓，杨兆彪，等．鄂尔多斯盆地深部煤岩气差异富集的地质控制[J]．煤炭科学技术，2025，53(1)：203－215.

[5] 黄道军，许浩，虎建玲，等．鄂尔多斯盆地深部8号煤储层孔隙发育模式及其控气作用[J]．煤炭科学技术，2025，53(3)：115－123.

[6] 邓毅，高崇龙，王剑，等．准噶尔盆地南缘西段齐古组深层储层特征及物性控制因素[J]．现代地质，2024，38(2)：335－349.

[7] 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.

[8] 刘祥柏，陶士振，杨秀春，等．煤系氦气富集机理与资源潜力–以鄂尔多斯盆地东缘为例[J]．煤田地质与勘探，2024，52(9)：49－66.

[9] 闫霞，徐凤银，聂志宏，等．深部微构造特征及其对煤层气高产“甜点区”的控制：以鄂尔多斯盆地东缘大吉地区为例[J]．煤炭学报，2021，46(8)：2426－2439.

[10] 桑树勋，韩思杰，周效志，等．华东地区深部煤岩气资源与勘探开发前景[J]．油气藏评价与开发，2023，13(4)：403－415.

[11] 姚红生，陈贞龙，郭涛，等．延川南深部煤岩气地质工程一体化压裂增产实践[J]．油气藏评价与开发，2021，11(3)：291－296.

[12] 徐凤银，闫霞，林振盘，等．我国煤层气高效开发关键技术研究进展与发展方向[J]．煤田地质与勘探，2022，50(3)：1－14.

[13] 牛小兵，张辉，王怀厂，等．鄂尔多斯盆地中、东部石炭系本溪组煤储层纵向非均质性特征及成因——以M172井为例[J]．石油与天然气地质，2024，45(6)：1577－1589.

[14] 伍岳，夏东领，郭秀娟．鄂尔多斯盆地南缘长8致密砂岩储层裂缝发育特征及主控因素[J]．现代地质，2025，39(5)：1282－1292.

[15] 李辉，张涛，侯雨庭，等．鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段陆相页岩层系致密储层充注物性下限及其控制因素[J]．现代地质，2024，38(6)：1498－1510.

[16] 黄强，傅雪海，张庆辉，等．沁水盆地中高煤阶煤储层覆压孔渗试验研究[J]．煤炭科学技术，2019，47(6)：7.

[17] WANG Z，PAN J，HOU Q，et al. Changes in the anisotropic permeability of low-rank coal under varying effective stress in Fukang mining area，China [J]. Fuel，2018，234(DEC. 15)：1481－1497.

[18] LI Qian，ZHANG Rui，CAI Yidong，et al. CH4 adsorption capacity of coalbed methane reservoirs induced by microscopic differences in pore structure [J]. Unconventional Resources，2024，4，100097. https://doi. org/10. 1016/j. uncres. 2024. 100097.

[19] 邓文龙，刘莉萍，代平，等．低渗—致密砂岩储层饱含束缚水状态下渗透率降低效应及修正[J]．石油实验地质，2025，47(5)：1198－1211.

[20] 于永江，张华，张春会，等. 温度及应力对成型煤样渗透性的影响[J]. 煤炭学报，2013，38(6)：936－941.

[21] 李俊乾，刘大锰，姚艳斌，等. 气体滑脱及有效应力对煤岩气相渗透率的控制作用[J]. 天然气地球科学，2013，24(5)：1074－1078.

[22] 黄道军，王康乐，陈宇航，等. 鄂尔多斯盆地上古生界山西组5#煤地质特征与差异含气性主控因素[J]. 现代地质，2025，39(6)：1595－1610.

[23] 叶桢妮，侯恩科，段中会，等. 不同煤体结构煤的孔隙－裂隙分形特征及其对渗透性的影响[J]. 煤田地质与勘探，2019，47(5)：70－78.

[24] 臧杰，王凯，刘昂，等. 煤层正交各向异性渗透率演化模型[J]. 中国矿业大学学报，2019，48(1)：36－45.

[25] 张云骥，李倩，蔡益栋，等. 基于机器学习测井反演的宏观煤岩类型评价——以鄂尔多斯盆地佳县区块本溪组8号煤为例[J]. 现代地质，2025，39(5)：1427－1436.

[26] 魏文辉，魏皑冬，段敏克. 轴向加载速率对原煤力学和渗透特性的影响[J]. 煤矿安全，2021，52(7)：39－46.

[27] 魏建平，王登科，位乐. 两种典型受载含瓦斯煤样渗透特性的对比[J]. 煤炭学报，2013，38(S1)：93－99.

[28] 李波波，王斌，杨康，等. 应力与温度综合作用的煤岩渗透机理[J]. 中国矿业大学学报，2020，19(5)：844－855.

[29] LIU Zengqin，ZHAO Shihu，HU Zongquan，et al. Characteristics and controlling factors of coal-measure unconventional reservoirs-A case study of the Carboniferous-Permian in the Ordos Basin [J]. Unconventional Resources，2025，6：100153. https：//doi. org/10. 1016/j. uncres. 2025. 100153.

[30] 唐代学，娄毅，冯运富. 黔西土城向斜煤储层覆压孔渗试验研究[J]. 煤矿安全，2023，54(2)：28－34.

[31] 马如英，王猛，阿斯亚·巴克，等. 准东南低阶煤覆压孔渗试验研究[J]. 中国矿业大学学报，2020，49(6)：1182－1192.