

引文: 郝兆栋, 唐书恒, 杨文府, 等. 煤层自封闭性对深层煤岩气的富集与改造意义[J]. 天然气工业, 2024, 44(10): 105-112.
XI Zhaodong, TANG Shuheng, YANG Wenfu, et al. Implications of coal reservoir self-sealing for the enrichment and stimulation of deep coal-rock gas[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(10): 105-112.

煤层自封闭性对深层煤岩气的富集与改造意义

郝兆栋^{1,2} 唐书恒^{1,2} 杨文府³ 杨雄雄¹ 张 迁¹ 王凯峰¹ 吕建伟¹

1. 中国地质大学(北京)能源学院 2. 山西省煤系矿产综合勘查技术创新中心 3. 山西省煤炭地质勘查研究院有限公司

摘要: 近年来, 煤岩气勘探开发成功突破“深度禁区”, 将中国煤岩气产业带入了一个新的发展阶段。深层煤岩气富集规律以及“千方砂, 万方液”的超大规模储层压裂改造工艺无不与中、浅层煤岩气的富集规律和勘探开发技术形成鲜明对比, 进一步彰显了深层煤岩气成藏、富集及开采的特殊性。为进一步明确有利于深层煤岩气富集、储层改造的地质—工程甜点纵向分布, 推动实现深层煤岩气地质—工程一体化发展, 以华北地区深层煤岩气为研究对象, 基于土力学中超固结比的概念定量表征了煤储层的自封闭性, 评价了深层煤岩气的富集条件和煤储层的可改造性。研究结果表明: ①超固结比能够反映煤储层自封闭性的动态演化特征, 与煤层埋藏深度具有耦合关系; ②埋深越大, 煤层超固结比越小, 煤储层自封闭性越强, 有利于煤岩气的富集, 但煤储层压裂改造难度增大; 埋深越浅, 煤层超固结比越大, 煤储层自封闭性越弱, 不利于煤岩气的保存, 但煤储层相对易于压裂改造; ③基于煤层超固结比与埋深的耦合关系揭示了既有利于煤岩气富集又利于煤储层改造的深度范围, 该深度带是深层煤岩气地质—工程甜点区带。结论认为, 基于超固结比确定的地质—工程甜点深度界限可为相似地质背景条件下的深层煤岩气地质—工程一体化实施提供参考和借鉴, 有助于煤岩气产业的高质量发展。

关键词: 深层煤岩气; 成藏; 保存条件; 力学性质; 可改造性; 超固结比; 地质—工程一体化

中图分类号: TE132.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3787/j.issn.1000-0976.2024.10.008

Implications of coal reservoir self-sealing for the enrichment and stimulation of deep coalrock gas

XI Zhaodong^{1,2}, TANG Shuheng^{1,2}, YANG Wenfu³, YANG Xiongxiang¹, ZHANG Qian¹, WANG Kaifeng¹, LYU Jianwei¹

(1. School of Energy Resource, China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083, China; 2. Shanxi Center of Technology Innovation for Coal Measure Mineral Resources Comprehensive Exploration, Taiyuan, Shanxi 030000, China; 3. Shanxi Coal Geology Investigation and Research Institute Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030031, China)

Natural Gas Industry, Vol.44, No.10, p.105-112, 10/25/2024. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: In recent years, the exploration and development of coal-rock gas has successfully broken through the "deep forbidden zone", which has brought China's coal-rock gas industry into a new development stage. The enrichment laws of deep coal-rock gas and the ultra large scale reservoir fracturing with "one thousand cubic meters of sand, ten thousand cubic meters of fracturing fluid" are in sharp contrast to the enrichment laws and exploration and development technologies of middle and shallow coal-rock gas, highlighting the special characteristics of deep coal-rock gas in accumulation, enrichment and exploitation. In order to further determine the vertical distribution of the geology-engineering sweet spots favorable for the enrichment and reservoir stimulation of deep coal-rock gas and promote the geology-engineering integration development of deep coal-rock gas, this paper takes the deep coal-rock gas in North China as the research object to quantitatively characterize the self-sealing property of coal reservoirs based on the concept of over consolidation ratio (OCR) in rock mechanics and evaluate the enrichment conditions of deep coal-rock gas and the fracability of coal reservoirs. The following results are obtained. First, the OCR can reflect the dynamic evolution characteristics of the self-sealing property of coal reservoir, and it is in a coupling relationship with the burial depth of coal reservoir. Second, the greater the burial depth, the smaller the OCR of coal reservoir, and the stronger the self-sealing ability of coal reservoir, which is beneficial to the enrichment of coal-rock gas, but increases the difficulty in the fracturing stimulation of coal reservoir. Otherwise, the smaller the burial depth, the greater the OCR of coal reservoir, and the weaker the self-sealing ability of coal reservoir, which is not conducive to the preservation of coal-rock gas, but facilitates the fracturing stimulation of coal reservoir. Third, the coupling relationship between OCR and burial depth of coal reservoir reveals a depth range that is beneficial to both coal-rock gas enrichment and coal reservoir stimulation. This depth zone is a geological-engineering sweet spot zone of deep coal-rock gas. In conclusion, the depth limit of geological-engineering sweet spot determined on the basis of OCR can provide reference and guidance for the implementation of geology-engineering integration of deep coal-rock gas with similar geological background conditions, and is conducive to the high-quality development of coal-rock gas industry.

Keywords: Deep coal-rock gas; coal-rock gas accumulation; Preservation condition; Mechanical properties; Fracability; Over consolidation ratio (OCR); Geology-engineering integration

基金项目: 国家自然科学基金项目“煤系页岩储层可改造性的微观控制机理研究”(编号: 42302203)。

作者简介: 郝兆栋, 1991年生, 副教授, 博士研究生导师; 主要从事非常规天然气勘探与开发研究工作。地址: (100083) 北京市海淀区学院路29号。ORCID: 0000-0002-5146-2243。E-mail: xizhaod@cugb.edu.cn

通信作者: 唐书恒, 1965年生, 教授, 博士研究生导师; 主要从事非常规天然气勘探与开发研究工作。地址: (100083) 北京市海淀区学院路29号。ORCID: 0000-0002-7255-9693。E-mail: tangsh@cugb.edu.cn

0 引言

“十三五”期间,中国新增煤岩气探明地质储量达到 $1\,555 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2023 年煤岩气产量已经突破 $110 \times 10^8 \text{ m}^3$, 同比增幅 20.5%, 彰显了中国煤岩气良好的资源潜力和开发前景^[1-2]。2 000 m 以深煤岩气的有效动用对近年中国煤岩气迅速发展起到了重要支撑作用。初步估计埋深 2 000 m 以深煤岩气资源量超过 $30 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 其中埋深 1 500 ~ 2 000 m 煤岩气资源量约占 1/3。当前, 深层煤岩气单井日产天然气量超万立方米, 甚至十万立方米; 深层煤岩气探明地质储量达千亿立方米, 彰显了深层煤岩气的快速发展^[3-4]。同时, 中国深层煤岩气在成藏、富集、储层改造及排采等方面面临众多基础科学问题, 并亟需解决。

随着埋藏深度的增加, 深层煤储层具有含气饱和度更高的优势(富集游离气), 以及压裂改造难度更大的劣势(孔隙度变小、渗透率变差、地应力变高)。相关学者针对深层煤层含气性特征, 尤其是针对游离气的含量、富集、预测及产出效应等方面开展了相关探索^[5-7]。在游离气富集机理方面, 总体认为构造改造强度弱、抬升幅度小及适宜的煤储层温压系统利于深层煤层游离气的富集^[8-10], 而针对煤层的非常规属性(自封闭性)对游离气富集的控制机制认识稍显薄弱。构造抬升阶段煤层发生破裂, 自封闭性变差会直接导致游离气的大量逸散, 使得现今一些深层煤岩气井产出特征与浅层煤岩气井无异^[11-13]。因此, 研究煤储层自封闭性对游离气的滞留效应是揭示深层煤岩气富集机制的关键。

煤储层自封闭性越好, 越有利于煤岩气的保存, 但同时也意味着煤储层较为致密, 天然孔隙裂缝不发育, 不利于煤储层的压裂改造继而影响煤岩气的

可采性。深层煤储层可改造性的相关研究主要围绕煤体结构、地应力、温压场及煤岩组合体力学性质等开展研究^[14-16], 而对于煤储层自封闭性与可改造性的耦合关系缺少关注。煤储层天然孔隙裂缝越发育, 相对越易于改造, 但其自封闭性相对变差, 不利于煤岩气富集, 尤其是不利于游离气的保存。可见, 煤储层自封闭性对深层煤岩气的富集以及对煤储层的改造均具有显著影响, 找到既利于深层煤岩气富集又利于煤储层改造的地质—工程甜点, 实现煤岩气地质—工程一体化对于深层煤岩气进一步的勘探开发势在必行。

参考页岩气储层自封闭性评价的研究思路并应用土力学中超固结比(Over Consolidation Ratio, OCR)的概念^[17-21], 结合华北地区石炭系—二叠系深层煤层实验测试资料, 建立煤储层自封闭性与煤岩气富集及煤储层改造的耦合关系, 揭示深层煤岩气地质—工程甜点的深度界限, 旨在为华北地区深层煤岩气及相似地质条件深层煤岩气区块的勘探开发提供指导。

1 煤储层自封闭性的表征

针对煤储层自封闭性的研究多从其致密程度考虑, 主要基于孔渗性和孔隙结构评价其自封闭能力。随着埋藏深度(围压)的增加, 煤储层孔隙度和渗透率总体呈现降低的趋势(图 1-a), 煤储层自封闭能力逐渐增强。杨兆彪等^[22]认为原位渗透率低于 0.1 mD 的煤储层具有较好的自封闭性, 可以作为煤系地层含气系统的隔水阻气层。陈世达等^[23]提出黔西地区埋深大于 750 m 且渗透率小于 0.01 mD 的煤储层可阻断煤层内部流体流出和外部流体流入。张雷等^[24-25]、联合压汞、 N_2 吸附和 CO_2 吸附实验发现鄂尔多斯盆地

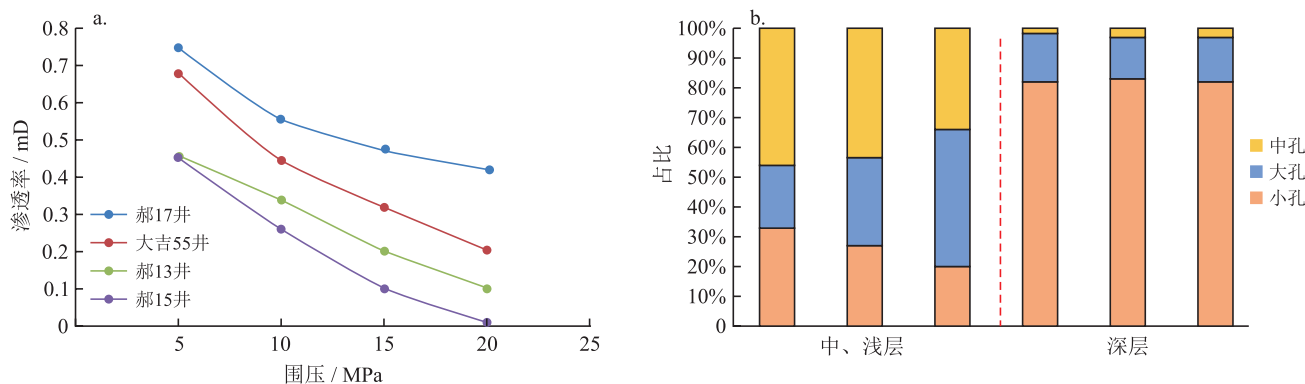


图1 鄂尔多斯盆地东缘煤储层物性特征图

(资料来源: 据本文参考文献[24,26], 有修改)

大宁—吉县地区深层煤储层孔隙主要以小孔为主，占比超过 80%，而中、浅层煤储层主要以中、大孔为主，深层煤储层自封闭性明显强于浅层煤储层（图 1-b）。

当前，针对煤储层自封闭性的表征主要基于静态指标分析，而非常规油气自封闭成藏作用是动态的，在其成藏、富集和改造阶段是不断变化的^[27-28]，尤其是构造抬升阶段煤储层自封闭性容易被破坏。现今埋深条件下具有相似自封闭性的深层煤层含气性（尤其是游离气的富集程度）差异较大，从基本无游离气到占比超过 30%；天然气测试产量方面表现为单井日产气量从几百立方米到几万立方米，深层煤岩含气量与日产气量的差异与煤储层自封闭性的动态演化过程具有显著耦合关系。

超固结比指岩石的先期固结压力与现今所受垂向有效应力之比（式 1）。超固结比常用来表征岩石的力学性质^[29-31]，超固结比越大的岩石越容易发生破裂，继而导致其自封闭性变差。先期固结压力指岩石在地质历史时期所经受的最大垂向有效应力，与最大埋深期上覆地层压力与煤储层压力相关（式 2）。现今所受垂向有效应力与煤层现今埋深上覆地层压力和煤储层压力相关（式 3）。OCR 为 1 的煤层被称为正常固结煤层，表明现今埋深就是整个沉积—埋藏演化过程中的最大埋深。经历过构造抬升阶段，且现今埋深小于最大古埋深的煤层，称为超固结煤层。传统油气地质理论认为，构造抬升阶段地层的抬升和剥蚀使得岩石逐渐变得易于发生破裂继而破坏其封闭性^[18,31-32]。超固结煤层 $OCR > 1$ 且 OCR 越大，煤层越容易破裂，自封闭性越差。基于超固结比可以评价煤储层现今自封闭性，同时只要知道抬升阶段任一地质历史时期所受垂向有效应力，即可以计算整个构造抬升阶段煤层的超固结比，继而可以评价煤储层自封闭性的演化特征^[33]。

超固结比计算公式如下：

$$OCR = \sigma_{vmax} / \sigma_v \quad (1)$$

$$\sigma_{vmax} = p_{jmax} - p_{cmax} \quad (2)$$

$$\sigma_v = p_{jo} - p_{co} \quad (3)$$

$$p_{jmax} = H_{max} \times \rho_1 \times g \quad (4)$$

$$p_{jo} = H_o \times \rho_2 \times g \quad (5)$$

式中 σ_{vmax} 表示煤层在地质历史时期所经受的最大垂向有效应力，MPa； σ_v 表示煤层现今承受的垂向有效应力，MPa； p_{jmax} 表示煤层在最大古埋深下所经受的最大静岩压力，MPa； p_{cmax} 表示煤层在最大古深埋时的储层压力，基于 PetroMod 软件埋藏史重建获

取，MPa； p_{jo} 表示煤层在现今埋深下经受的静岩压力，MPa； p_{co} 表示煤层在现今埋深下的储层压力，通过试井资料获取，MPa； H_{max} 表示煤层的最大古埋深，基于 PetroMod 软件埋藏史重建获取，m； ρ_1 表示最大古埋深时上覆地层平均密度， g/cm^3 ； H_o 表示煤层现今埋藏深度，m； ρ_2 表示煤层现今上覆地层平均密度， g/cm^3 ； g 表示重力加速度， m/s^2 。

2 煤储层自封闭性与深度的耦合效应

收集整理鄂尔多斯盆地东缘临兴区块、沁水盆地中东部榆社—武乡区块和宁武盆地南部煤岩气钻井资料及试井资料，计算得到石炭系—二叠系 8 号 +9 号、15 号煤层现今埋深条件下的超固结比（图 2）。随着埋深的增加，OCR 整体呈现减小的趋势。深埋藏煤层的 OCR 普遍低于中、浅层煤层，指示深层煤储层自封闭性相对较强，与渗透性及孔隙结构等参数表征现今深层煤储层自封闭性的结论一致。

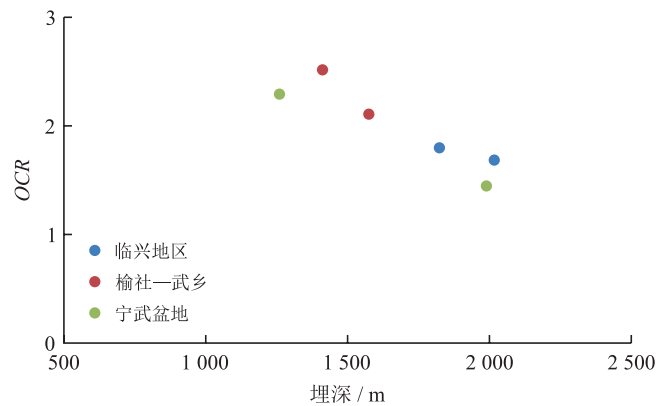


图 2 典型煤岩气区块现今埋深条件下煤层的 OCR 特征图

对于同一区块煤层而言，一般煤层埋深越大，OCR 越低；当比较不同区块煤层的 OCR 时，存在埋藏深的煤层 OCR 高于埋藏浅煤层的现象（图 2）；可见，OCR 不仅能反映现今煤储层的自封闭性同时也反映了煤层经历的历史演化过程。如不同区块相似埋深条件下的深层煤层含气性往往存在很大差异，就是因为含气性与煤层经历的历史演化过程息息相关。由于不同区块煤层的构造演化过程不同，就会导致煤层 OCR 与埋深的耦合关系变差，也反映出 OCR 包含的信息更为丰富和动态。

基于临兴区块和榆社—武乡区块典型井埋藏史的恢复，计算得到石炭系—二叠系 8 号 +9 号、15 号煤层的 OCR 在构造抬升阶段的演化特征（图 3）。两个区块煤层 OCR 均随着埋藏深度的减小而逐渐增大，

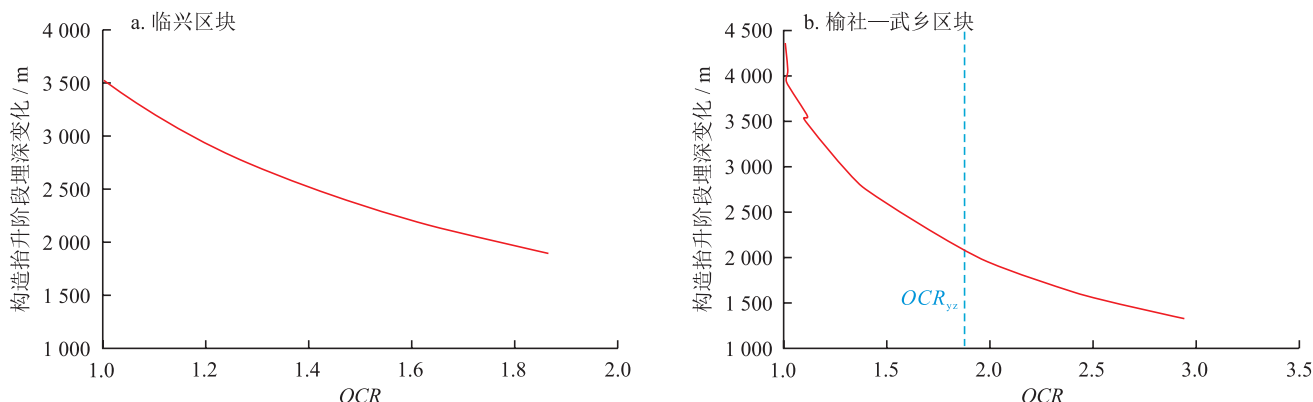


图 3 构造抬升阶段煤储层 OCR 演化特征图

其中榆社—武乡区块煤层超固结比增加的幅度远高于临兴区块。此外，榆社—武乡区块抬升幅度明显大于临兴区块，进一步导致榆社—武乡区块现今埋深条件下煤层的 OCR 远高于临兴区块。

3 煤储层自封闭性对深层煤岩气富集与改造的指示意义

3.1 对深层煤岩气富集的指示意义

在应用超固结比评价黏土和页岩的力学性质时，认为当岩石的 OCR 值超过某一阈值 (OCR_{yz}) 时，岩石极易发生破裂（达到完全脆性），形成的裂缝主要为肉眼可见的穿层裂缝，即裂缝的尺度较大。在构造抬升阶段该类裂缝的开启导致煤储层的自封闭性显著降低，不利于煤岩气的富集，尤其是可能会导致游离气的大量逸散。当煤层 OCR 值小于该阈值时，煤层不易破裂（即不易形成大尺度裂缝），但可能在煤层内部发育大量微裂缝^[34]。在构造抬升阶段微裂缝的形成在一定程度上会使得煤储层的自封闭性降低，但是由于裂缝在其内部形成所以没有破坏煤储层整体的自封闭性，不会造成煤岩气的大规模逸散。

该阈值满足下列公式^[35]：

$$Q/\sigma_{wy} = a \times OCR^b \quad (6)$$

$$(OCR_{yz})^b = 2 \quad (7)$$

式中 Q 表示三轴压缩实验中的主应力差，MPa； σ_{wy} 表示三轴压缩实验中设定的围压，根据煤层的埋藏深度确定，MPa； a 、 b 通过岩石的抗剪强度和 OCR 的耦合关系确定； OCR_{yz} 表示岩石达到完全脆性，极易破裂，无量纲。

基于临兴^[36]、榆社—武乡区块^[37]煤层样品的三轴压缩实验数据及 OCR 拟合得到系数 a 和 b （图 4），

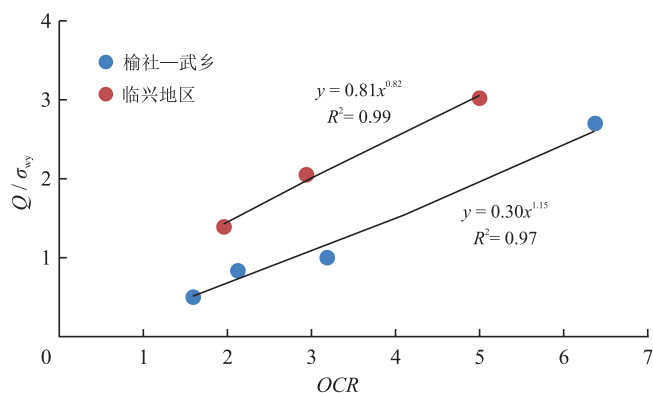


图 4 煤储层 OCR 与归一化最大主应力差的耦合关系图

继而计算得到临兴区块和榆社—武乡区块的 OCR_{yz} 分别为 2.32 和 1.82。临兴区块在整个构造抬升阶段的 OCR 值均低于 OCR_{yz} （图 3-a），表明煤储层自封闭性维持相对较好，利于煤岩气的保存。临兴区块深层煤层的含气性测试资料也证实其富集一定的游离气^[6,38]。对于榆社—武乡区块而言，煤层在抬升至 2 300 m 以浅后其 OCR 值高于阈值（图 3-b），表明至少在后续抬升过程中煤层极易发生破裂继而导致煤岩气的逸散。榆社—武乡区块深层煤层的含气性测试资料也显示该区块煤岩气赋存相态基本以吸附态为主，表明在抬升阶段而且极有可能是在抬升至 2 300 m 左右（距今约 20 ~ 5 Ma）煤层发生破裂而造成游离气的逸散。

OCR 值反映的是煤层破裂的难易及破裂的程度，并与煤层的埋藏深度具有一定的耦合关系，在一定程度上指示了煤岩气保存条件的优劣。由于不同区块甚至同一区块不同构造带深层煤层的历史演化过程、煤储层特征及地质背景存在明显差异^[39-40]，煤层的 OCR 值和 OCR_{yz} 显著不同，在应用超固结比评价其煤岩气富集条件时应结合具体区块的实际情况灵活运用。

3.2 对深层煤储层改造的指示意义

临兴区块和榆社—武乡区块煤层超固结比均随着埋藏深度的减小而逐渐增大,埋藏深度越大的煤储层自封闭性越强,越利于煤岩气的富集,尤其是利于游离气的保存。然而,埋藏深度越大,煤储层自封闭性越强,天然孔隙裂缝发育程度越差,越不利于煤储层的压裂改造,影响深层煤岩气的可采性。基于大量单轴和三轴压缩实验表明,随着温度和压力的增加,岩石的力学性质会发生显著改变,裂缝的起裂和扩展难度明显增强。以页岩为例,围压较小时页岩易于破碎并伴随较大的应变,而当围压增至 50 MPa 时,页岩的峰值强度 (σ_{tz}) 和残余强度 (σ_{cy}) 基本相似,呈现明显的塑性变形,不利于压裂改造 (图 5)。

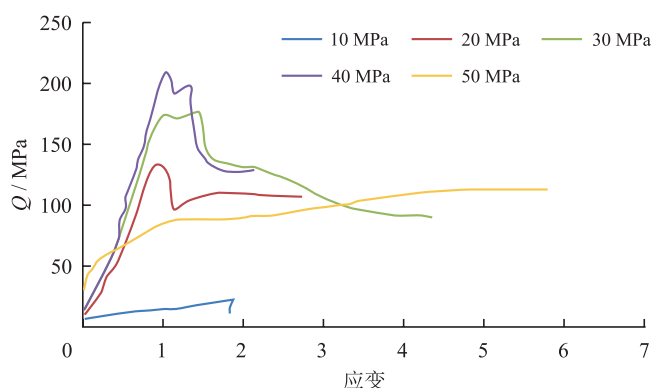


图 5 不同围压影响下的页岩应力—应变曲线特征图

(资料来源:据本文参考文献 [27],有修改)

基于临兴区块煤层样品三轴压缩实验数据^[16],拟合得到围压与残余强度/峰值强度比值的耦合关系 (图 6)。

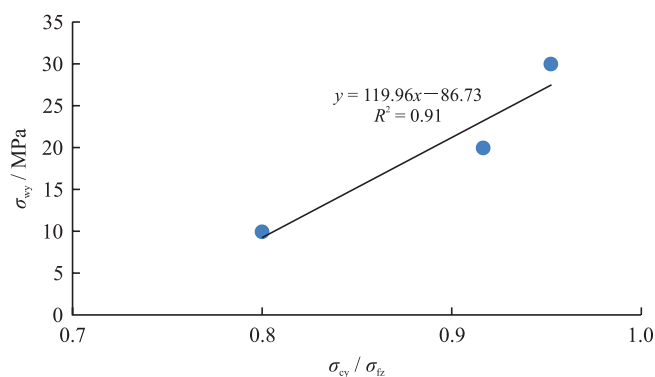


图 6 基于三轴压缩实验的煤层样品残余强度/峰值强度与围压的相关关系图

$$\sigma_{cy} = 119.96 \times (\sigma_{cy} / \sigma_{tz}) - 86.73 \quad (8)$$

式中 σ_{cy} 表示三轴压缩实验残余强度, MPa; σ_{tz} 表示三轴压缩实验峰值强度, MPa。

当 $\sigma_{cy} / \sigma_{tz}$ 为 1 时, σ_{cy} 为 33.23 MPa, 对应的埋藏深度约 3 000 m, OCR 值约为 1.2。当现今煤层的 OCR 值小于 1.2 时 (埋深 3 000 m 以深), 煤储层具有极强的自封闭性, 煤层的峰值强度和残余强度基本相似, 开始呈现明显的塑性变形, 煤层极难破裂, 并且不利于裂缝的扩展和维持, 可改造性差。尽管该深度以深煤储层较强的自封闭性有助于煤岩气的富集, 尤其是有利于游离气的保存, 但富集并不等同于高产。煤储层较强的自封闭性是制约深层煤岩气可采性的重要因素之一, 储层越致密, 天然裂缝越不发育, 渗透性越低, 煤储层改造难度大, 煤岩气的可采性就越差。

煤储层自封闭性与煤岩气的保存及煤储层的改造均具有明显的耦合关系, 此是寻找深层煤岩气地质—工程甜点层段的桥梁。超固结比能够有效表征煤储层自封闭性, 并与埋藏深度具有明显的耦合关系 (图 7)。某一深度以浅时, 煤储层自封闭性较差, 容易破裂形成较多且尺度较大的天然裂隙, 不利于气体的富集; 某一深度以深时, 煤储层具有极强的自封闭性, 利于气体的保存, 但煤储层孔渗性较差且呈现塑性特征, 可改造性差 (图 7-a)。因此, 存在一个深度区间使得煤储层的自封闭性既能够利于气体的富集, 尤其是深层煤层游离气的富集, 又能够利于深层煤储层的压裂改造。在该深度区间的煤储层可能呈现一种“裂而不破”的状态^[34], 即煤储层发育天然裂隙, 但这些裂隙尺度较小, 形成于煤层内部, 不会导致游离气的大规模逸散。同时这些天然微裂隙能够有效改善煤储层的渗透性, 利于压裂改造。对于临兴区块而言, 根据本文使用的相关数据, 认为 1 500 m 以浅时存在煤层含气性低的勘探

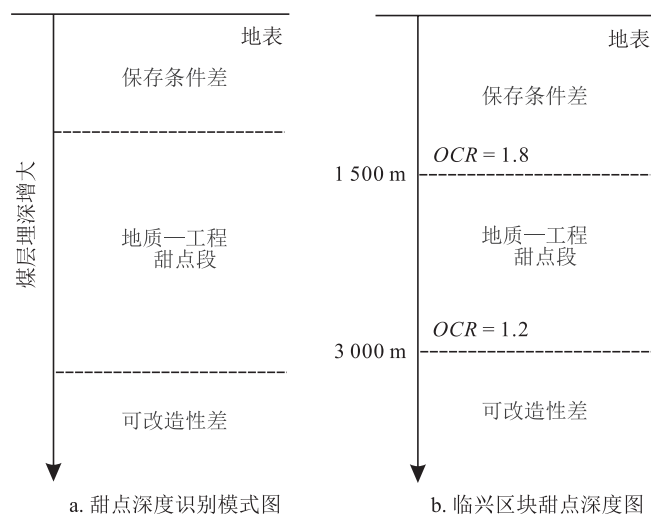


图 7 基于 OCR 的深层煤岩气富集与改造的深度效应图

风险, 3 000 m 以深时煤层的压裂改造难度可能较大(图 7-b)。因此, 临兴区块的地质—工程甜点深度区间在 1 500 ~ 3 000 m 之间, 需结合其他地质、工程参数在此区间内进一步确定有利区范围和精细化靶体深度。与临兴区块具有相似构造演化背景和地质特征的深层煤层地质—工程甜点深度区间可以进行类比和参考。

4 结论

1) 煤储层自封闭性是评价深层煤岩气富集和煤储层可改造性的重要参数。基于超固结比可以有效表征煤储层自封闭性的动态演化, 且超固结比与埋藏深度具有耦合关系。

2) 基于超固结比能够预测深层煤岩气地质—工程甜点的深度界限, 埋深浅于该深度界限的煤储层可能煤岩气富集程度差, 埋深深于该深度界限的煤储层可能改造难度大, 位于该深度区间的煤储层既利于煤岩气富集且易于压裂改造。

3) 不同地区或同一区块不同构造带的深层煤层, 其沉降—抬升历史演化过程、煤储层特征及地质背景存在明显差异, 基于超固结比确定的地质—工程甜点深度界限差异显著。

参 考 文 献

- [1] 秦勇. 中国深部煤层气地质研究进展[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1791-1811.
QIN Yong. Progress on geological research of deep coalbed methane in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1791-1811.
- [2] 叶建平, 侯淦译, 张守仁. “十三五”期间我国煤层气勘探开发进展及下一步勘探方向[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 15-22.
YE Jianping, HOU Songyi, ZHANG Shouren. Progress of coalbed methane exploration and development in China during the 13th Five-Year Plan period and the next exploration direction[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 15-22.
- [3] 秦勇, 申建, 李小刚. 中国煤层气资源控制程度及可靠性分析[J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 19-32.
QIN Yong, SHEN Jian, LI Xiaogang. Control degree and reliability of CBM resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 19-32.
- [4] 罗平亚, 朱苏阳. 中国建立千亿立方米级煤层气大产业的理论与技术基础[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1755-1763.
LUO Pingya, ZHU Suyang. Theoretical and technical fundamentals of a 100 billion-cubic-meter-scale large industry of coalbed methane in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1755-1763.
- [5] 康永尚, 闫霞, 皇甫玉慧, 等. 深部超饱和煤层气藏概念及主要特点[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1781-1790.
KANG Yongshang, YAN Xia, HUANGFU Yuhui, et al. Concept and main characteristics of deep oversaturated coalbed methane reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1781-1790.
- [6] 李勇, 高爽, 吴鹏, 等. 深部煤层气游离气含量预测模型评价与校正——以鄂尔多斯盆地东缘深部煤层为例[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1892-1902.
LI Yong, GAO Shuang, WU Peng, et al. Evaluation and correction of prediction model for free gas content in deep coalbed methane: A case study of deep coal seams in the eastern margin of Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1892-1902.
- [7] 刘之的, 韩鸿来, 王成旺, 等. 鄂尔多斯盆地大宁—吉县区块深部煤层含气饱和度测井计算方法及分布特征[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(2): 193-201.
LIU Zhidi, HAN Honglai, WANG Chengwang, et al. Calculation method of gas saturation and distribution characteristics of deep coal seam in Daning-Jixian block using logging data[J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(2): 193-201.
- [8] 郝兆栋, 唐书恒, 刘忠, 等. 宁武盆地南部深部煤层气临界深度与成藏特征[J]. 天然气工业, 2024, 44(1): 108-118.
XI Zhaodong, TANG Shuheng, LIU Zhong, et al. Critical depth and accumulation characteristics of deep coalbed methane in the southern Ningwu Basin[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(1): 108-118.
- [9] 陈世达, 侯伟, 汤达祯, 等. 煤储层含气性深度效应与成藏过程耦合关系[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(2): 52-59.
CHEN Shida, HOU Wei, TANG Dazhen, et al. Effects of depth on gas-bearing properties of coal reservoirs and their coupling relationships with coalbed methane accumulation[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(2): 52-59.
- [10] 许浩, 汤达祯, 陶树, 等. 深、浅部煤层气地质条件差异性及其形成机制[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(2): 33-39.
XU Hao, TANG Dazhen, TAO Shu, et al. Differences in geological conditions of deep and shallow coalbed methane and their formation mechanisms[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(2): 33-39.
- [11] 周德华, 陈刚, 陈贞龙, 等. 中国深层煤层气勘探开发进展、关键评价参数与前景展望[J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 43-51.
ZHOU Dehua, CHEN Gang, CHEN Zhenlong, et al. Exploration and development progress, key evaluation parameters and prospect of deep CBM in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 43-51.
- [12] 徐凤银, 王成旺, 熊先钺, 等. 深部(层)煤层气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 Xianyu, 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.
- [13] 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.
- [14] 姚艳斌, 王辉, 杨延辉, 等. 煤层气储层可改造性评价——以郑庄区块为例[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(1): 119-129.
- YAO Yanbin, WANG Hui, YANG Yanhui, et al. Evaluation of the hydro-fracturing potential for coalbed methane reservoir: A case study of Zhengzhuang CBM field[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(1): 119-129.
- [15] 桑树勋, 郑司建, 王建国, 等. 岩石力学地层新方法在深部煤层气勘探开发“甜点”预测中的应用[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1840-1853.
- SANG Shuxun, ZHENG Sijian, WANG Jianguo, et al. Application of new rock mechanical stratigraphy in sweet spot prediction for deep coalbed methane exploration and development[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1840-1853.
- [16] 高向东, 王延斌, 倪小明, 等. 临兴地区深层煤岩力学性质及其对煤储层压裂的影响[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(增刊 2): 912-921.
- GAO Xiangdong, WANG Yanbin, NI Xiaoming, et al. Mechanical properties of deep coal and rock in Linxing area and its influences on fracturing of deep coal reservoir[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S2): 912-921.
- [17] 袁玉松, 刘俊新, 周雁. 泥页岩脆—延转化带及其在页岩气勘探中的意义[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(5): 899-906.
- YUAN Yusong, LIU Junxin, ZHOU Yan. Brittle-ductile transition zone of shale and its implications in shale gas exploration[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(5): 899-906.
- [18] 刘俊新, 杨春和, 刘伟, 等. 泥质岩盖层前期名义固结压力及封闭特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(12): 2377-2387.
- LIU Junxin, YANG Chunhe, LIU Wei, et al. Apparent preconsolidation stress and sealing characteristics of argillaceous cap rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(12): 2377-2387.
- [19] 郭旭升, 胡东风, 俞凌杰, 等. 页岩自封闭性与页岩气保存的微观机理研究[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(5): 821-831.
- GUO Xusheng, HU Dongfeng, YU Lingjie, et al. Study on the micro mechanism of shale self-sealing and shale gas preservation[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(5): 821-831.
- [20] 贾承造, 庞雄奇, 宋岩. 论非常规油气成藏机理: 油气自封闭作用与分子间作用力[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(3): 437-452.
- JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. The mechanism of unconventional hydrocarbon formation: Hydrocarbon self-containment and intermolecular forces[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 437-452.
- [21] 何治亮, 胡宗全, 聂海宽, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气富集特征与“建造—改造”评价思路[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(5): 724-733.
- HE Zhiliang, HU Zongquan, NIE Haikuan, et al. Characterization of shale gas enrichment in the Wufeng-Longmaxi Formation in the Sichuan Basin and its evaluation of geological construction-transformation evolution sequence[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(5): 724-733.
- [22] 杨兆彪, 秦勇, 陈世悦, 等. 多煤层储层能量垂向分布特征及控制机理[J]. *地质学报*, 2013, 87(1): 139-144.
- YANG Zhaobiao, QIN Yong, CHEN Shiyue, et al. Controlling mechanism and vertical distribution characteristics of reservoir energy of multi-coalbeds[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(1): 139-144.
- [23] 陈世达, 汤达祯, 陶树. 原地地应力约束下煤储层自封闭作用及其成藏效应[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(8): 2466-2478.
- CHEN Shida, TANG Dazhen, TAO Shu. Self-sealing of coals and CBM accumulation effect constrained by in situ stress[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(8): 2466-2478.
- [24] 张雷, 边利恒, 侯伟, 等. 深部煤储层孔隙结构特征及其勘探意义——以鄂尔多斯盆地东缘大宁—吉县区块为例[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1867-1878.
- ZHANG Lei, BIAN Liheng, HOU Wei, et al. Pore structure characteristics and exploration significance of deep coal reservoirs: A case study of Daning-Jixian block in the eastern margin of Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1867-1878.
- [25] 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 Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1854-1866.
- [26] ZHANG Songhang, TANG Shuheng, TANG Dazhen, et al. The characteristics of coal reservoir pores and coal facies in Liulin district, Hedong coal field of China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2010, 81(2): 117-127.
- [27] 李双建, 沃玉进, 周雁, 等. 影响高演化泥岩盖层封闭性的主控因素分析[J]. *地质学报*, 2011, 85(10): 1691-1697.
- LI Shuangjian, WO Yujin, ZHOU Yan, et al. Controlling factors affect sealing capability of well-developed muddy cap rock[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(10): 1691-1697.

- [28] 郭旭升, 腾格尔, 魏祥峰, 等. 四川盆地深层海相页岩气赋存机理与勘探潜力 [J]. 石油学报, 2022, 43(4): 453-468.
GUO Xusheng, BORJIGIN Tenger, WEI Xiangfeng, et al. Occurrence mechanism and exploration potential of deep marine shale gas in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(4): 453-468.
- [29] BJØRLYKKE K, HØEG K. Effects of burial diagenesis on stresses, compaction and fluid flow in sedimentary basins[J]. Marine and Petroleum Geology, 1997, 14(3): 267-276.
- [30] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. Géotechnique, 1990, 40(3): 329-378.
- [31] NYGÅRD R, GUTIERREZ M, BRATLI R K, et al. Brittle-ductile transition, shear failure and leakage in shales and mudrocks[J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23(2): 201-212.
- [32] 胡东风, 魏志红, 李宇平, 等. 四川盆地东南部地区复杂构造带深层页岩气勘探进展与突破 [J]. 天然气工业, 2022, 42(8): 35-44.
HU Dongfeng, WEI Zhihong, LI Yuping, et al. Deep shale gas exploration in complex structure belt of the southeastern Sichuan Basin: Progress and breakthrough[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(8): 35-44.
- [33] 张凤奇, 孙越, 刘思瑶, 等. 构造抬升区泥页岩脆性破裂泄压特征及对页岩油富集的影响——以延安地区延长组长₇₃亚段为例 [J]. 石油实验地质, 2023, 45(5): 936-951.
ZHANG Fengqi, SUN Yue, LIU Siyao, et al. Characteristics of pressure relief induced by shale brittle fracture in tectonic uplift area and its influence on shale oil enrichment: A case study of Chang₇₃ sub-member of Yanchang Formation in Yan'an area[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(5): 936-951.
- [34] HE Zhiliang, LI Shuangjian, NIE Haikuan, et al. The shale gas "sweet window": "The cracked and unbroken" state of shale and its depth range[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 101: 334-342.
- [35] INGRAM G M, URAI J L. Top-seal leakage through faults and fractures: The role of mudrock properties[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1999, 158(1): 125-135.
- [36] 高向东. 临兴深部煤储层孔渗成因演化机制及压裂可改造性研究 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2019.
GAO Xiangdong. Study on porosity and permeability evolution mechanism and fracturing reconstruction feasibility of deep coal reservoirs in Linxing area[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2019.
- [37] 张苗. 深部煤系气储层物性随温压增加的差异性变化规律 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
ZHANG Miao. The variation law of deep coal measure gas reservoirs physical properties with the increase of temperature and pressure[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [38] 朱光辉, 李本亮, 李忠城, 等. 鄂尔多斯盆地东缘非常规天然气勘探实践及发展方向——以临兴—神府气田为例 [J]. 中国海上油气, 2022, 34(4): 16-29.
ZHU Guanghui, LI Benliang, LI Zhongcheng, et al. Practices and development trend of unconventional natural gas exploration in eastern margin of Ordos Basin: Taking Linxing-Shenfu gas field as an example[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(4): 16-29.
- [39] 匡立春, 温声明, 李树新, 等. 低煤阶煤层气成藏机制与勘探突破——以吐哈—三塘湖盆地为例 [J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 33-42.
KUANG Lichun, WEN Shengming, LI Shuxin, et al. Accumulation mechanism and exploration breakthrough of low-rank CBM in the Tuha-Santanghu Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 33-42.
- [40] 门相勇, 娄钰, 王一兵, 等. 中国煤层气产业“十三五”以来发展成效与建议 [J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 173-178.
MEN Xiangyong, LOU Yu, WANG Yibing, et al. Development achievements of China's CBM industry since the 13th Five-Year Plan and suggestions[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 173-178.

(修改回稿日期 2024-06-18 编辑 韩 建)



本文互动