



临兴地区深部煤储层煤体结构定量表征及影响因素分析

高向东 周世豪 郭慧 孙昊 张明达 骆潮威 王延斌 吴翔

引用本文:

高向东, 周世豪, 郭慧, 等. 临兴地区深部煤储层煤体结构定量表征及影响因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(10): 147–157.

GAO Xiangdong, ZHOU Shihao, GUO Hui. Quantitative characterization and influencing factor analysis of coal structure of deep coal reservoirs in Linxing area[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(10): 147–157.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1647>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深部煤储层孔裂隙结构对煤层气赋存的影响

Influence of deep coal pore and fracture structure on occurrence of coalbed methane: a case study of Daning–Jixian Block in eastern margin of Ordos Basin

煤炭科学技术. 2024, 52(8): 106–123 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1334>

基于深度学习的煤系页岩孔隙结构定量表征

Quantitative characterization of pore structure in coal measure shales based on deep learning

煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 183–190 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1597>

鸡西盆地煤储层吸附孔特征及分形表征研究

Study on characterization and fractal features of adsorption pores of coal reservoirs in Jixi Basin

煤炭科学技术. 2021, 49(5): 218–226 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/12bd15b1-a300-42f5-8962-c3496c199311>

临兴地区深部煤储层地应力场及其对压裂缝形态的控制

In-situ stress field of deep coal reservoir in Linxing area and its control on fracturing crack

煤炭科学技术. 2022, 50(8): 140–150 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/89ccb35a-401e-4189-a310-94470bd0dd0d>

老厂矿区煤储层孔隙结构特征及全尺度表征

Pore structure characteristics and full-scale characterization of coal reservoirs in the Laochang mining area

煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 165–174 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-1743>

低阶长焰煤细观结构定量分析与表征单元确定

Quantitative analysis of meso-structured and representative elementary volume determination of low rank long flame coal

煤炭科学技术. 2023, 51(3): 116–129 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2054>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

地球科学与工程



移动扫码阅读

高向东,周世豪,郭 慧,等. 临兴地区深部煤储层煤体结构定量表征及影响因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(10): 147–157.

GAO Xiangdong, ZHOU Shihao, GUO Hui, *et al.* Quantitative characterization and influencing factor analysis of coal structure of deep coal reservoirs in Linxing area[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(10): 147–157.

临兴地区深部煤储层煤体结构定量表征及影响因素分析

高向东¹,周世豪¹,郭 慧²,孙 昊¹,张明达¹,骆潮威¹,王延斌³,吴 翔⁴

(1. 东华理工大学 地球科学学院, 江西南昌 330013; 2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 3. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 4. 中联煤层气有限责任公司, 北京 100016)

摘 要:煤体结构的定量表征是煤储层研究的热点问题之一。为精细刻画煤体结构的空间分布, 查明其差异分布的主控因素, 通过煤岩取心观测, 借助地质强度因子对煤体结构进行定量表征, 结合不同煤体结构的测井响应, 构建了基于测井曲线的煤体结构量化表征模型, 预测了煤体结构的空间分布, 探讨了沉积、构造、地应力、微观力学性能对煤体结构的影响特征。研究表明: 密度、伽马、声波、井径测井对煤体结构响应灵敏, 利用测井多元回归法可以显著提高煤体结构的判识精度。研究区煤体结构以原生-碎裂结构为主, 其次为碎裂结构, 发育少量的原生结构和碎裂-碎粒结构。整个研究区的煤体结构分布可以归纳为四大类七个小分区。发育在潮道、砂坪、泥坪、三角洲平原、潟湖环境中的煤层, 其厚度逐渐变大, 但煤体结构与煤层厚度没有明显的关系。然而, 灰分含量与煤体结构的完整性呈正相关, 研究不同沉积环境中灰分的变化规律是揭示沉积环境对煤体结构控制特征的关键。煤储层变形程度越大, 煤体结构越破碎。原生结构煤、原生-碎裂结构煤、碎裂结构煤的平均构造速率分别为 8.4×10^{-6} 、 18.7×10^{-6} 、 $25.7 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 。断层发育区, 煤体结构以碎裂结构为主。随着埋深增大, 原地地应力增大, 煤体结构完整性增强, 地应力状态在此基础上进一步分化煤体结构。在浅部伸张-压缩过渡带以碎裂-碎粒结构为主; 在深部压缩状态以原生-碎裂结构为主; 在深部压缩-伸张过渡带碎裂结构的比例有所增加。煤岩微观力学性能受控于煤基质组分和显微孔隙结构。煤岩无机组分力学强度高于有机组分, 且无机组分孔隙孔径比有机组分孔隙孔径小, 则无机组分含量越高, 煤岩力学强度越高, 煤体结构越完整。该研究成果为煤层钻井施工、压裂改造、储层评价提供参考。

关键词:鄂尔多斯盆地; 临兴地区; 深部煤储层; 煤体结构; 定量表征

中图分类号: TD15; P584

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)10-0147-11

Quantitative characterization and influencing factor analysis of coal structure of deep coal reservoirs in Linxing area

GAO Xiangdong¹, ZHOU Shihao¹, GUO Hui², SUN Hao¹, ZHANG Mingda¹, LUO Chaowei¹,
WANG Yanbin³, WU Xiang⁴

(1. School of Earth Science, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China; 3. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 4. China United Coalbed Methane Corporation Limited, Beijing 100016, China)

Abstract: The quantitative characterization of coal structure is one of the hot topics in coal reservoir research. To finely characterize the spatial distribution of coal structure and identify the main controlling factors for its differential distribution, through observation and measurement of coal cores, quantitative characterization of coal structure using geological intensity factors, and statistics of logging response of different coal structures, a quantitative characterization model of coal structure based on logging curves was constructed. The spatial distribution of coal structure in the study area is dominated by primary-fractured structure, followed by fractured structure, and a small amount of primary structure and fractured-granular structure. The coal structure distribution in the study area can be归纳为四大类七个小分区。发育在潮道、砂坪、泥坪、三角洲平原、潟湖环境中的煤层, 其厚度逐渐变大, 但煤体结构与煤层厚度没有明显的关系。然而, 灰分含量与煤体结构的完整性呈正相关, 研究不同沉积环境中灰分的变化规律是揭示沉积环境对煤体结构控制特征的关键。煤储层变形程度越大, 煤体结构越破碎。原生结构煤、原生-碎裂结构煤、碎裂结构煤的平均构造速率分别为 8.4×10^{-6} 、 18.7×10^{-6} 、 $25.7 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 。断层发育区, 煤体结构以碎裂结构为主。随着埋深增大, 原地地应力增大, 煤体结构完整性增强, 地应力状态在此基础上进一步分化煤体结构。在浅部伸张-压缩过渡带以碎裂-碎粒结构为主; 在深部压缩状态以原生-碎裂结构为主; 在深部压缩-伸张过渡带碎裂结构的比例有所增加。煤岩微观力学性能受控于煤基质组分和显微孔隙结构。煤岩无机组分力学强度高于有机组分, 且无机组分孔隙孔径比有机组分孔隙孔径小, 则无机组分含量越高, 煤岩力学强度越高, 煤体结构越完整。该研究成果为煤层钻井施工、压裂改造、储层评价提供参考。

收稿日期: 2023-11-09

策划编辑: 宫在芹

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.12438/cst.2024-1647

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2016ZX05060001-002); 江西省研究生创新创业基金资助项目(YC2022-s595)

作者简介: 高向东(1988—), 男, 陕西延川人, 讲师, 博士。E-mail: gaoxd1990@163.com

bution of coal structure was predicted, and the influence characteristics of sedimentation, structure, in-situ stress, and micro-mechanical properties on coal structure were explored. The research results indicate that density, gamma-ray, interval transit time, and caliper loggings are sensitive to the coal structure, and the use of logging multiple regression method can significantly improve the accuracy of coal structure identification. The coals in the study area are mainly composed of primary-fragmented coals, followed by cataclastic coals, with a small amount of primary and cataclastic-granulated coals developed. The coal structure of the entire study area can be divided into four categories and seven small areas. The sedimentary environment can affect the coal structure by controlling the thickness of coal seam development. The thickness of coal seams developed in tidal channels, sand flats, mud flats, delta plains, and lagoon environments gradually increases, but there is no obvious relationship between coal structure and coal seam thickness. However, the ash content is positively correlated with the integrity of coal structure, and studying the changes in ash content in different sedimentary environments is the key to revealing the control characteristics of sedimentary environments on coal structure. The average structural curvature of primary structured coals, primary-fragmented structured coals, and cataclastic coals are 8.4×10^{-6} , 18.7×10^{-6} , $25.7 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$, respectively. Where faults develop, the coal structure is characterized by cataclastic coals. As the burial depth increases, the in-situ stress increases, and the integrity of the coal structures are enhanced. Based on this, the in-situ stress state further differentiates the coal structures. In the shallow extensional and compression transition zone, the coal structure is mainly fragmented and fragmented; In the deep compression state, the primary fragmented structure is dominant; The proportion of fractured structures in the deep compression and extension transition zone has increased. The micro mechanical properties of coal are controlled by the composition of coal matrix and micro pore structure. The mechanical strength of inorganic components of coal is higher than that of organic components of coal, and the pore size of inorganic components is smaller than that of organic components. The higher the content of inorganic components, the higher the mechanical strength of coal, and the more complete the coal structure. This research achievement provides reference for coal seam drilling construction, fracturing transformation, and reservoir evaluation.

Key words: Ordos Basin; Linxing area; deep coal reservoir; coal structure; quantitative characterization

0 引言

煤体结构对钻井工程质量、储层物性评价、储层压裂改造、煤层气的赋存和产出等都有重要的影响^[1-4],加之中国煤盆地复杂的构造运动背景为不同煤体结构的发育奠定了基础,因此,煤体结构的精准判识、分布预测、影响因素分析一直是煤储层研究领域的热点。

煤体结构的准确判识是煤体结构分布预测的基础,逐渐由定性向半定量到定量发展^[5-6]。目前,煤体结构的定量表征主要借助地球物理方法(地震和测井)^[7-8],地震法由于高成本和低判识精度而应用受限。测井方法能够不间断记录岩石的地球物理响应,具有较好的纵向连续性,且具有一定的径向探测深度,能够很好地反映井周岩石的地质和地球物理属性,加之测井成本低,又是钻、完井以后的必然工序,数据丰富且获取容易^[9]。因此,利用测井曲线判识煤体结构被广泛接受。基于测井曲线识别煤体结构的方法很多,有通过测井曲线的形态和幅度进行煤体结构的半定量识别^[10-11],但是受其他因素的影响较大,其实用性受到影响。也有借助支持向量机、BP神经网络、XGBoost等机器学习方法划分煤体结构^[12-14],但是该类方法的操作过程复杂且判识精度与训练样本有关,影响了其推广应用。还有利用地质强度因

子(Geological Strength Index, GSI)量化表征煤体结构,然后建立与测井曲线的关系,进而定量识别煤体结构^[15-17]。此类方法基于煤岩宏观观测,并将观测结果关联测井数值统计,操作简单、易行,且判识结果可以参与其他数学表达,大大提高了煤体结构定量化的应用价值。该方法应注意 GSI 值与多条测井曲线的综合响应,以提高煤体结构的判识精度。

煤体结构是煤岩自身力学强度对外力作用的自适应结果,即煤体结构不仅受自身物质组成、结构的影响,同时受控于构造作用强度及外部应力环境的影响。张俊杰^[18]认为煤体结构变化与构造发育程度相关,原生结构煤发育在构造简单的区域,而构造煤则发育在构造复杂的区域。刘博远^[19]深入分析了褶皱、断层对煤体结构的影响,认为褶皱是控制煤体结构的主要因素,大断层或密集的小断层与褶皱构造叠加煤体则较为破碎。吴伟等^[20]探讨了煤岩成分、褶皱、断层、层滑构造对煤体结构的影响,认为均质镜质体含量越高、褶皱、断层越发育、距离层滑越近,煤体结构越破碎。张珺晔^[21]通过对新疆阜康地区八道湾组下段煤层煤体结构的研究,认为煤体结构展布主要受控于沉积特征和构造运动,但以构造控制为主。显然,煤体结构是煤岩成分、沉积、构造等多因素综合作用的结果,而以往的研究侧重于构造类型、构造作用强度对煤体结构的影响,缺乏多因素的

系统分析,侧重于宏观地质条件对煤体结构的影响,而储层微观属性的影响没有得到重视,且鲜有报道原位应力对煤体结构的影响。

此次研究在煤体结构 GSI 表征的基础上,构建基于测井多元回归的煤体结构 GSI 量化模型,预测煤体结构的分布,探讨沉积、构造、地应力、微观力学性能对煤体结构空间差异分布的影响机制,旨在为研究区煤层气施工工程和储层评价提供可靠的地质依据。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地位于华北地台西部,根据其构造特征,可细分为六个次级构造单元,其中,伊陕斜坡构成了盆地的主体^[22](图 1a)。临兴区块位于晋西挠褶带北部偏西位置,整体呈一个西倾的单斜构造,地层倾角小,中部受紫金山隆起的影响,地层倾角较大,构造也相对复杂。紫金山隆起区外的构造主要是大型的宽缓褶皱,发育一些小型逆断层^[23](图 1b)。研究区石炭-二叠系为主要含煤地层,其中本溪组的 8+9 号煤层为该区深部煤层气勘探开发的主力,煤层埋深为 1 090.4 ~ 2 163.5 m,平均为 1 910.4 m。煤层厚度为 1.52 ~ 15.54 m,平均为 5.69 m,主要发育在潮坪-潟湖沉积体系^[24]。

2 煤体结构的定量表征及空间分布

2.1 煤体结构的定量表征

2.1.1 煤体结构的测井响应

为了详细刻画煤体结构的分布(纵向和平面)特征,将煤体结构与测井曲线关联,通过测井曲线的变化来反映煤体结构差异。具体做法是在样品归位校正以后,统计不同煤体结构的测井曲线值,总结煤体结构的测井响应规律。该方法实施过程中特别重要的一个步骤是样品的归位校正,只有煤样准确归位后才能获得真实的测井响应,归位校正主要借助灰分与自然伽马的相关关系。煤体结构的测井响应统计工作如图 2 所示。

煤体结构的测井响应结果如图 3 所示,由原生结构向糜棱结构演变,煤体结构破碎程度逐渐增加,声波时差和井径测井值逐渐增大,密度和自然伽马测井值逐渐减小。这是因为随着煤体结构破碎程度的增加,煤中的空隙(宏观、显微裂隙)增多,单位体积内的物质(包括反射物质)减少,井壁稳定性降低,导致声波的传播速度降低,体积密度减小,放射强度变弱,扩径现象出现。此外,同一测井曲线对不同煤体结构的响应值是交叉的,因此,利用单一测井曲线是无法准确判识煤体结构类型的,利用多条响应较好的测井曲线去联合判识煤体结构是必要的。

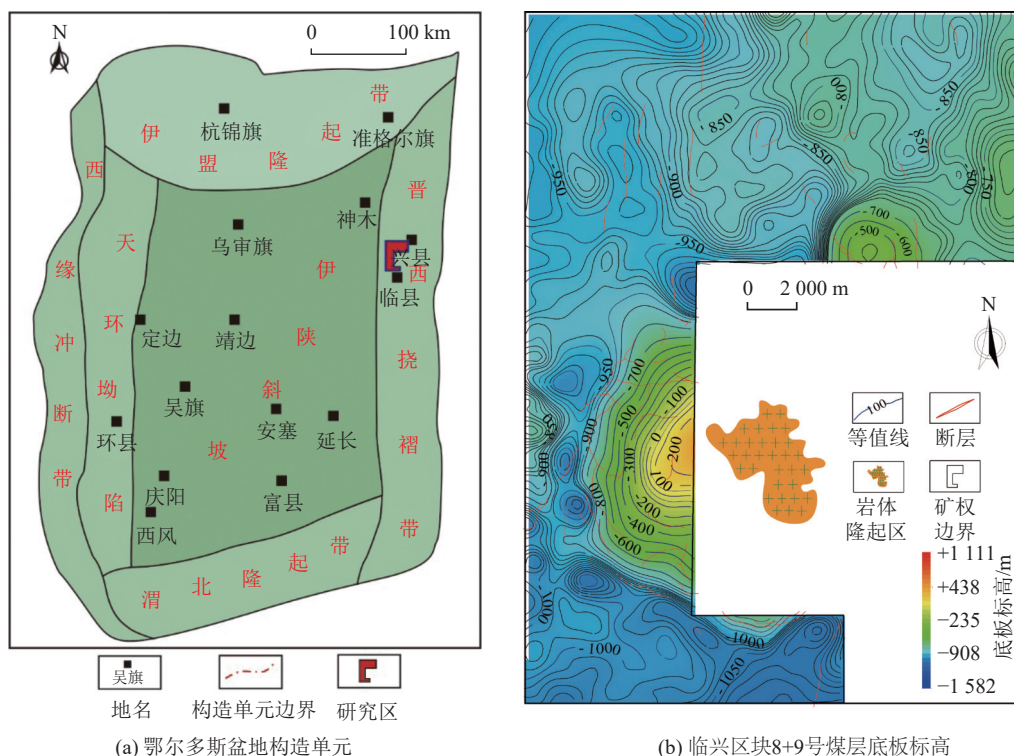


图1 鄂尔多斯盆地和临兴区块构造纲要

Fig.1 Structural outline of Ordos Basin and Linxing Block

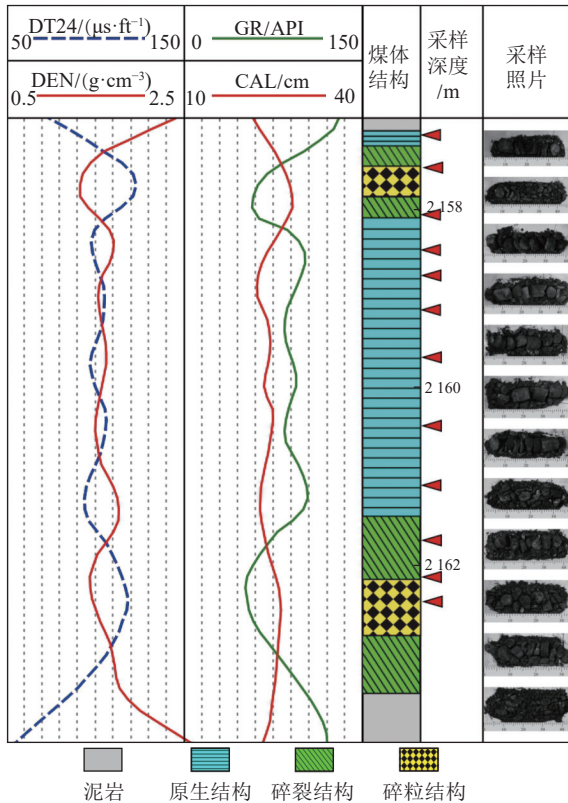


图 2 研究区煤体结构的观测与统计
Fig.2 Observation and statistics of coal structures in the study area

2.1.2 煤体结构的 GSI 量化

GSI 是 HOKE 等^[25] 根据岩石的完整程度、表面粗糙程度、裂缝发育情况等提出的岩石强度量化方法。由于 GSI 的内涵与煤体结构的本质内容高度吻合,因此,该方法已经被众多学者用于煤体结构的定量表征^[26-28],其基本量化准则参考文献^[27],即根据煤岩破碎的块体大小和裂隙的发育程度、结构面的质量状况等对煤体结构进行 GSI 赋值, GSI 值越大,煤体结构越完整。GSI 不仅可以刻画煤体结构的微小差异,也使得煤体结构可以参与数学表达与运算,这是该方法得到广泛应用的重要原因。依据 GSI 量化准则,对研究区的典型样品进行 GSI 赋值,也作为研究区煤体结构 GSI 表征的直观体现和应用参考。值得一提的是,由煤体结构的宏观观测和描述可知,研究区煤体结构主要为原生结构,其次为碎裂结构,其他类型的煤体结构发育较少,一般以薄夹层出现,煤体结构类型比较简单。为了更加精细表征煤体结构差异,此次研究特引入过渡组分原生-碎裂结构、碎裂-碎粒结构。研究区不同煤体结构宏观特征及 GSI 赋值如图 4 所示, L-42-8+9-2 为样品编号, (20) ~ (70) 为 GSI 赋值。

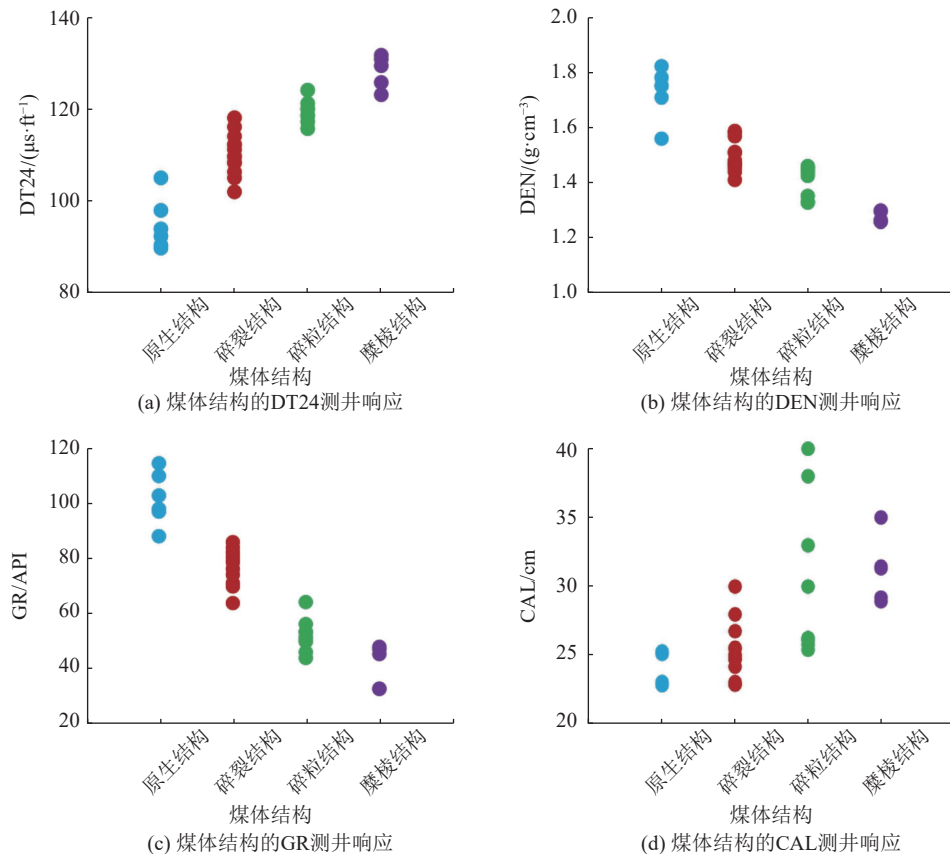


图 3 煤体结构的测井响应
Fig.3 Logging responses of coal structures

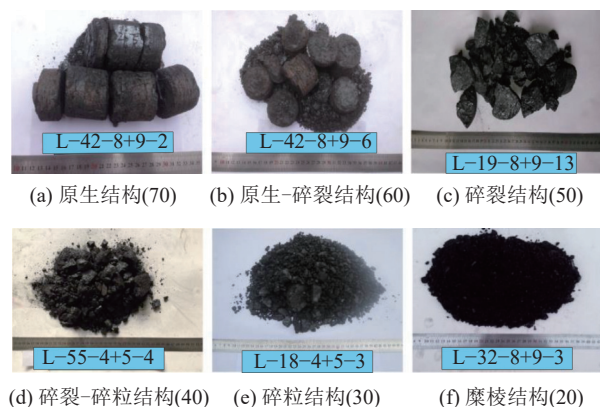


图4 基于GSI的研究区煤体结构量化值

Fig.4 Quantification values of coal structure of study area based on GSI

2.1.3 基于测井曲线的煤体结构量化模型

在取心样品 GSI 量化的基础上,进行 GSI 与测井曲线的相关性分析,统计结果表明,声波时差、自然伽马、密度和井径测井与 GSI 的相关性较高,具体如图 5 所示。交会结果显示,煤体结构量化表征值 GSI 与密度、自然伽马测井值呈线性正相关(图 5a,图 5b),与声波时差、井径测井值呈线性负相关

(图 5c,图 5d),这与煤体结构测井响应结果一致。由交会图分析可知,声波时差、井径测井对煤体结构的响应更灵敏,密度和自然伽马略差。由于单一测井曲线值与 GSI 的相关性较低,为了更加准确地开展煤体结构的量化表征,通过 GSI 与测井值的多元线性回归,建立基于测井曲线的煤体结构定量表征模型如公式(1)所示:

$$I_{GS} = 11.438D + 0.033G - 0.253D_{T,24} - 0.767C + 90.548 \quad (1)$$

式中: I_{GS} 为煤体结构量化值,无量纲; D 为密度测井值, g/cm^3 ; G 为自然伽马测井值, API; $D_{T,24}$ 为声波时差测井值, $\mu s/ft$; C 为井径测井值, cm。

GSI 与测井曲线多元回归的拟合系数 R^2 为 0.88,与单一测井拟合值相比,相关性得到很大的提高,表明多条测井曲线配合评价煤体结构的效果更好。

2.2 煤体结构空间展布

利用上述煤体结构测井量化模型,开展研究区煤体结构空间分布预测,并对不同煤体结构进行厚度统计,如此可以直观地看到不同煤体结构在煤层中的占比,得到的煤体结构空间分布如图 6 所示。

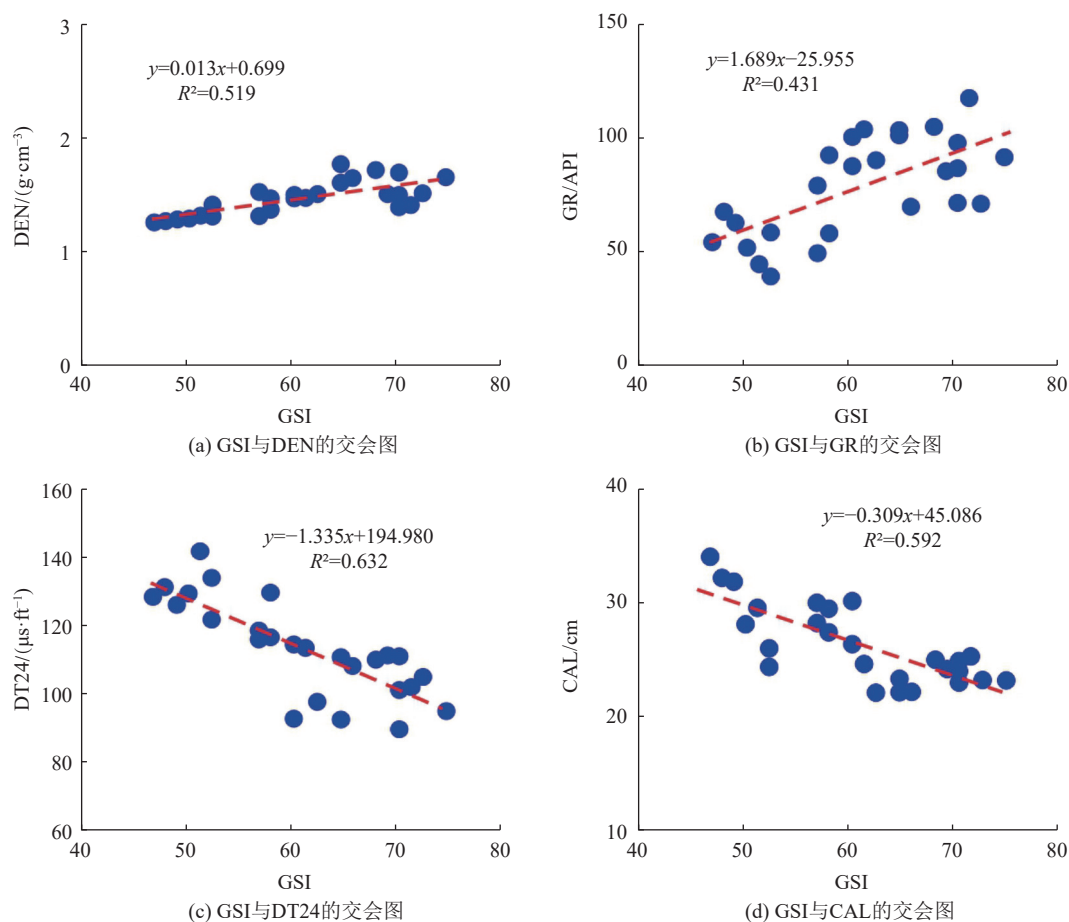
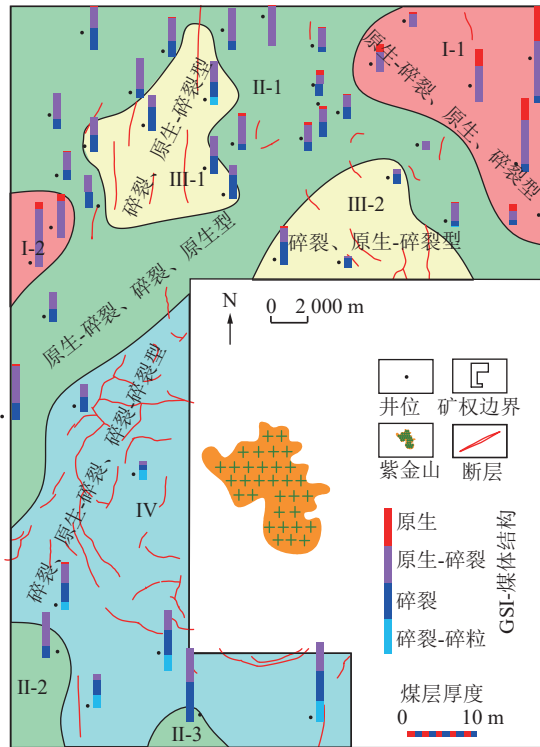


图5 GSI 与测井值的交会图

Fig.5 Crossplot of GSI and logging curve values



注：分类中煤体结构的先后顺序代表该类煤体结构占比的相对高低。

图6 研究区8+9号煤层煤体结构空间展布

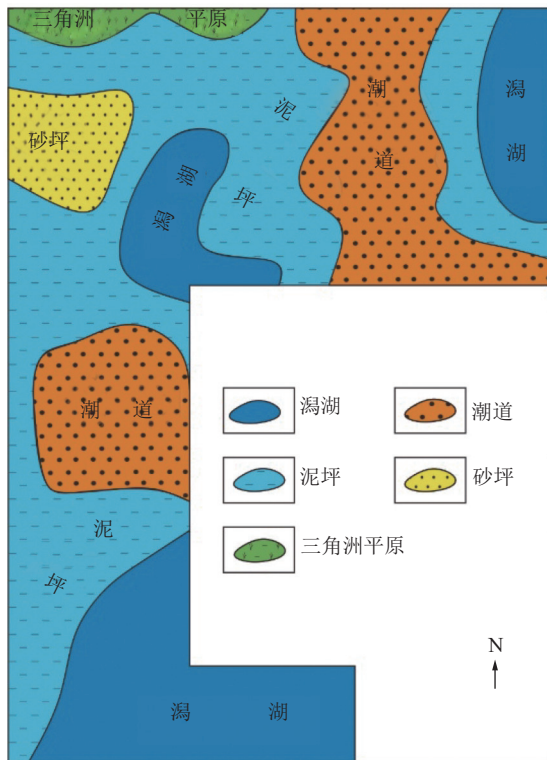
Fig.6 Spatial distribution of coal structures of No.8+9 coal seam in the study area

由煤体结构的发育特征可知,研究区深8煤的煤体结构以原生-碎裂结构为主,其次为碎裂结构,发育少量的原生结构和碎裂-碎粒结构。研究区煤体结构的区域分布可以分为四种类型,类型Ⅰ以原生-碎裂结构为主,其次为原生结构,主要分布在区块的东北角;类型Ⅱ以原生-碎裂结构为主,其次为碎裂结构,是研究区的主要煤体结构类型,因此分布面积也最广;类型Ⅲ以碎裂结构为主,其次为原生-碎裂结构,主要分布在断层发育区和紫金山隆起区周围;类型Ⅳ与类型Ⅲ的区别在于出现了一定比例的碎裂-碎粒结构,主要环紫金山隆起区分布。从类型Ⅰ到类型Ⅳ,煤体结构的破碎程度在增加。如此,研究区按照煤体结构类型可以分为7个小分区,这对储层评价和改造具有重要的参考意义。

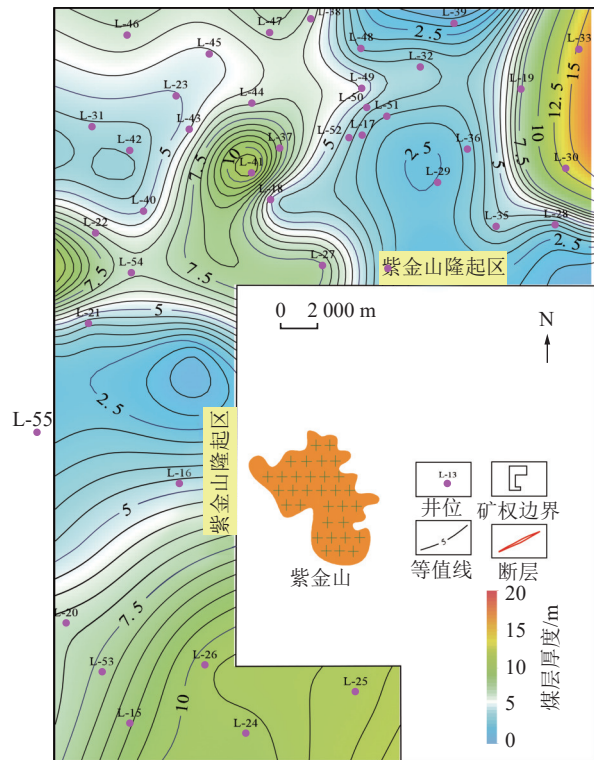
3 煤体结构影响因素分析

3.1 沉积环境

研究区8+9号煤主要发育在潮坪-潟湖沉积体系,少量发育在三角洲平原亚相(研究区西北角)(图7a)。不同沉积环境下的聚煤厚度不同。潮道由于水动力条件较强,不利于泥炭堆积,导致该环境下煤层发育厚度较薄,煤层厚度为1.5~4.7 m,平均为3.1 m。砂坪水动力条件比潮道弱,但比泥坪强,也不



(a) 研究区沉积相图



(b) 研究区8+9号煤层厚度图

图7 研究区8+9号煤层沉积相与厚度图

Fig.7 Sedimentary facies and thickness of No.8+9 coal seam in the study area

是有利的泥炭堆积场所,煤层厚度一般是 4.1~5.0 m, 平均为 4.5 m。泥坪是潮坪环境中水动力条件最弱的,比较适合泥炭堆积,煤层厚度一般为 4.1~7.4 m, 平均为 5.6 m。潟湖环境是最适于泥炭堆积的场所,相对静水的环境及其在后期淤浅过程中连续的泥炭堆积最终形成了厚煤层。该环境中沉积的煤层厚度为 8.9~15.5 m, 平均为 11.4 m。由于晚石炭—早二叠海水由东南方向侵入,西北方向则是陆相一侧,因此研究区西北角发育三角洲平原亚相,该环境中聚煤厚度为 6.4~7.2 m, 平均为 6.8 m。该环境聚煤条件

仅次于潟湖环境(图 7b)。

由煤层厚度与 GSI 的相关性分析可知, 两者没有明显的关系, 即使在相同的沉积环境中煤体结构的变化也比较大(图 8a)。然而, GSI 与灰分呈明显的正相关关系, 即灰分越高, GSI 越大, 煤体结构越完整(图 8b)。这是因为灰分含量越大, 煤岩力学强度越高, 抵抗外力破坏的能力越大, 煤体结构也相对完整。由于灰分的变化受控于沉积环境的变动, 因此, 未来系统研究不同沉积环境中灰分的变化规律是揭示沉积环境对煤体结构影响特征的关键所在。

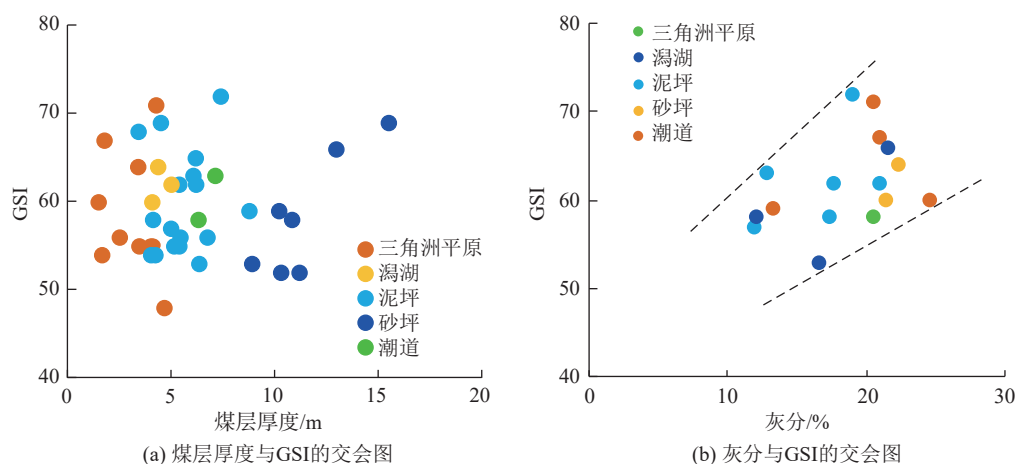


图 8 沉积环境对煤体结构的影响

Fig.8 The influence of sedimentary environment on coal structures

3.2 构造变形程度

研究区煤储层构造相对简单,以单斜构造为主,发育小型的褶皱构造和逆冲断层。其中,褶皱构造可以通过构造曲率来量化,反映煤层的弯曲变形程度。构造曲率的计算参考他人研究方法^[26],先对研究区网格化,在网格化后的小单元中,利用式(2)、式(3)进行计算,计算示意如图9所示。

某一方向的构造曲率表达如下:

$$r_i = \frac{2\Delta h}{\Delta h^2 + \frac{(H_{i+1} - H_{i-1})^2}{4} + a^2} \quad (2)$$

小网格内的构造曲率则表达如下:

$$r = \max(r_i) \quad (3)$$

式中: H_{i+1} 、 H_{i-1} 为小网格的节点标高, m; H_i 为小网格中心点的标高, m; a 为小网格边长的一半 ($a=1\ 000$), m; R 为小网格曲面半径, m; r_1 为小网格某一方向上的构造曲率, m^{-1} ; r 为小网格构造曲率, m^{-1} ; Δh 、 $\Delta h'$ 、 b 为中间变量, m。

依据上述方法计算的构造曲率分布如图 10 所示。由构造曲率区域分布可知, 环紫金山隆起区, 构

造曲率普遍较大,代表煤储层变形程度高,远离紫金山隆起区,煤储层变形程度相对较小。由 GSI 和构造曲率的相关性分析可知,两者呈负相关(图 11),构造曲率越大, GSI 越小,即煤储层变形程度越大,煤体

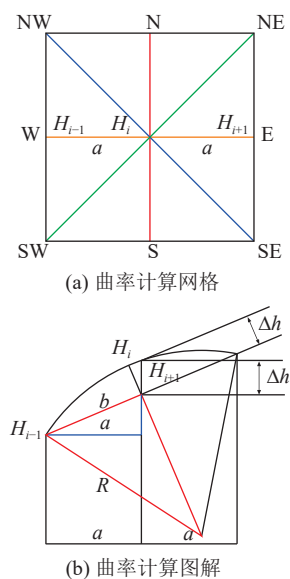


图9 构造曲率计算示意

Fig.9 Schematic diagram for calculating structural curvature

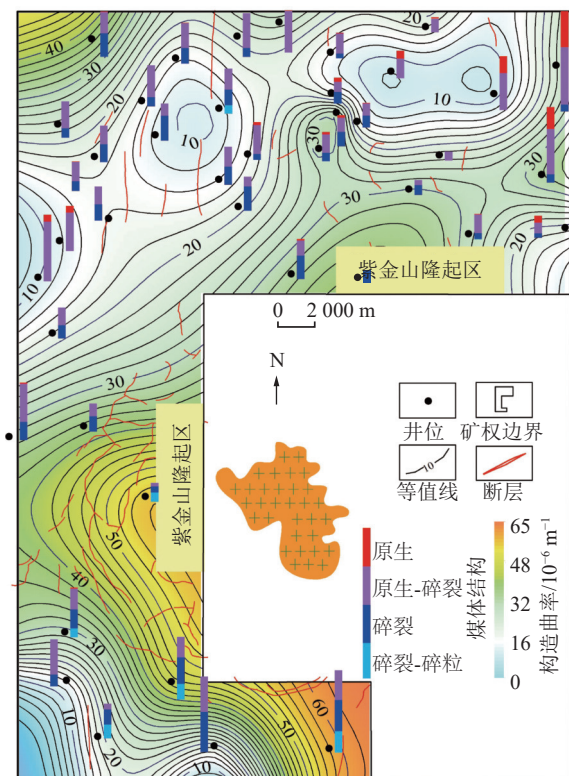


图10 构造对煤体结构的影响

Fig.10 The influence of structures on coal structures

结构越破碎。依据不同井位的数据统计可知,原生结构煤的构造曲率平均为 $8.4 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$, 原生-碎裂结构煤的构造曲率平均为 $18.7 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$, 碎裂煤构造曲率平均为 $25.7 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$, 这为研究区利用构造曲率预测煤体结构提供了依据。另外, GSI 的分布由低曲率向高曲率逐渐集中, 表明当煤储层变形程度较低时, 煤体结构类型多样, 即受多因素控制, 如断层的存在使得低变形区域的煤体结构相对破碎, 这是煤体结构分区Ⅲ1形成的主要原因。当构造曲率较大时, 煤储层高变形程度促使煤体结构破碎, 所以

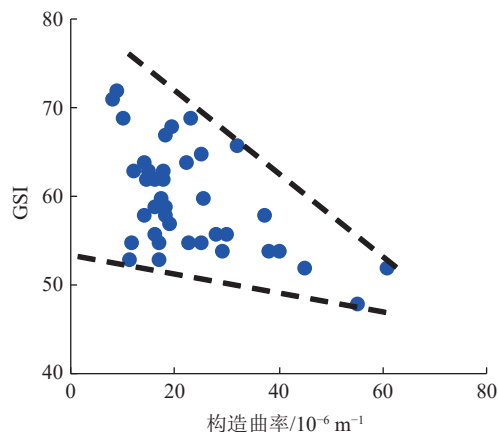


图11 GSI与构造曲率的关系

Fig.11 Relationship between GSI and structure curvature

GSI在高构造曲率时分布比较集中。煤体结构分区Ⅲ2和Ⅳ主要受控于高储层变形程度。

3.3 原位地应力

煤储层地应力是煤岩原位条件下受力情况的综合体现, 其组合特征反映了煤储层所处的应力状态。研究区煤储层地应力随埋深的增加而线性增大(图12a)。侧压系数作为水平主应力和垂直主应力相对强弱的指标, 在研究区呈现先增大后减小的趋势, 变化范围为0.6~1.1, 最大值出现在1600 m附近(图12b)。综合地应力、侧压系数随埋深的变化特征可知, 地应力的垂向分布呈现分带性。具体为: 当埋深为700~1100 m时, $\sigma_v \approx \sigma_{h, \max} > \sigma_{h, \min}$, 地应力由伸张态向压缩态过渡; 当埋深为1100~1600 m, $\sigma_{h, \max} > \sigma_v \geq \sigma_{h, \min}$, 以水平主应力为主, 地应力为压缩状态, 表现为大地动力场类型; 当煤层埋深为1600~2000 m时, $\sigma_{h, \max} > \sigma_v > \sigma_{h, \min}$, 仍以水平主应力为主, 但垂直主应力逐渐增强; 当埋深大于2000 m时, $\sigma_{h, \max} \approx \sigma_v > \sigma_{h, \min}$, 地应力由压缩态向伸张态过渡, 侧压系数显示

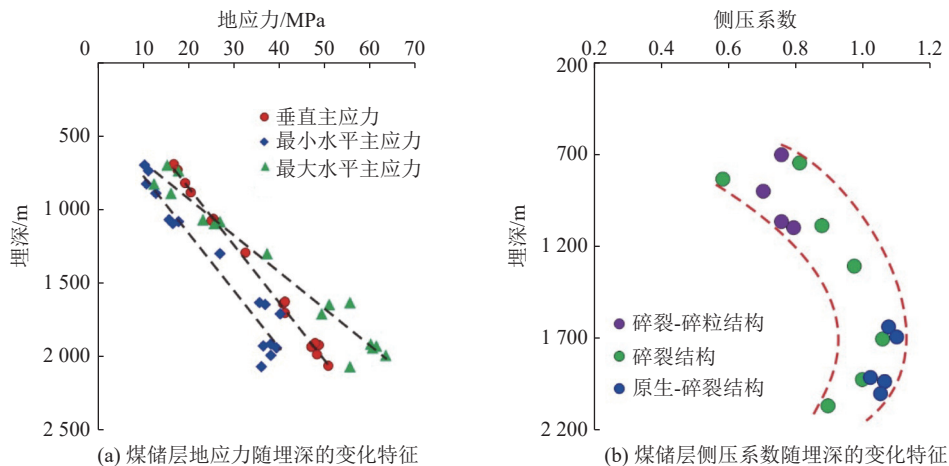


图12 地应力与埋深、煤体结构的关系

Fig.12 The relationship between in-situ stress and burial depth and coal structures

垂直主应力进一步增强。由煤体结构与地应力的关系可以,在浅部伸张-压缩过渡带,煤体结构以碎裂-碎粒结构为主,碎裂结构次之;在以水平主应力主导的压缩带煤体结构以原生-碎裂结构为主,碎裂结构次之;在压缩-伸张过渡带,碎裂结构的比例增大。随着埋深的增加,煤储层原位条件下温度和应力增大。根据前人研究成果,在温度和应力的耦合作用下,煤岩力学强度呈增大趋势^[27],则随着埋深的增大,煤岩抵抗变形的能力增强,煤体结构趋于完整。在此基础上,地应力状态将进一步分化煤体结构的完整程度。

3.4 微观力学性能

煤体结构类型与煤岩本身的力学性能密切相关,探讨不同煤体结构煤的力学性质,有助于理解煤体结构的差异分布^[28-29]。一般煤岩力学性质常用柱塞样品的力学实验来揭示,然而构造煤由于裂隙发育而难以制成柱样,因而无法开展常规力学实验研究,影响了不同煤体结构煤的力学性能评价。鉴于此,本研究借助原子力显微镜揭示不同煤体结构煤的微

观力学性质。

3.4.1 实验设计、样品制备及基本信息

研究区深 8 煤的煤体结构以原生结构、原生-碎裂结构和碎裂结构为主,基于控制变量的原则,此次实验所用样品采自同一口井的不同深度,但具有相似的组分和构造背景(样品的基本信息见表 1),样品先后经过切割、抛光处理后,制成 10 m×10 m×7 mm 的小长方体。观测过程中分别对样品进行二维、三维以及杨氏模量成像。

3.4.2 实验结果分析

样品的测试结果如图 13 所示。M-1、M-2、M-3

表 1 AFM 实验样品信息及测试结果

Table 1 Sample information and test results of AFM

样品编号	密度/ (g·cm ⁻³)	R _o /%	M _{ad} /%	A _d /%	V _{daf} /%	煤体结构
M-1	1.50	1.01	1.34	19.26	21.79	原生结构
M-2	1.47	0.98	0.96	14.53	21.39	原生-碎裂结构
M-3	1.45	1.03	0.80	15.22	20.65	碎裂结构

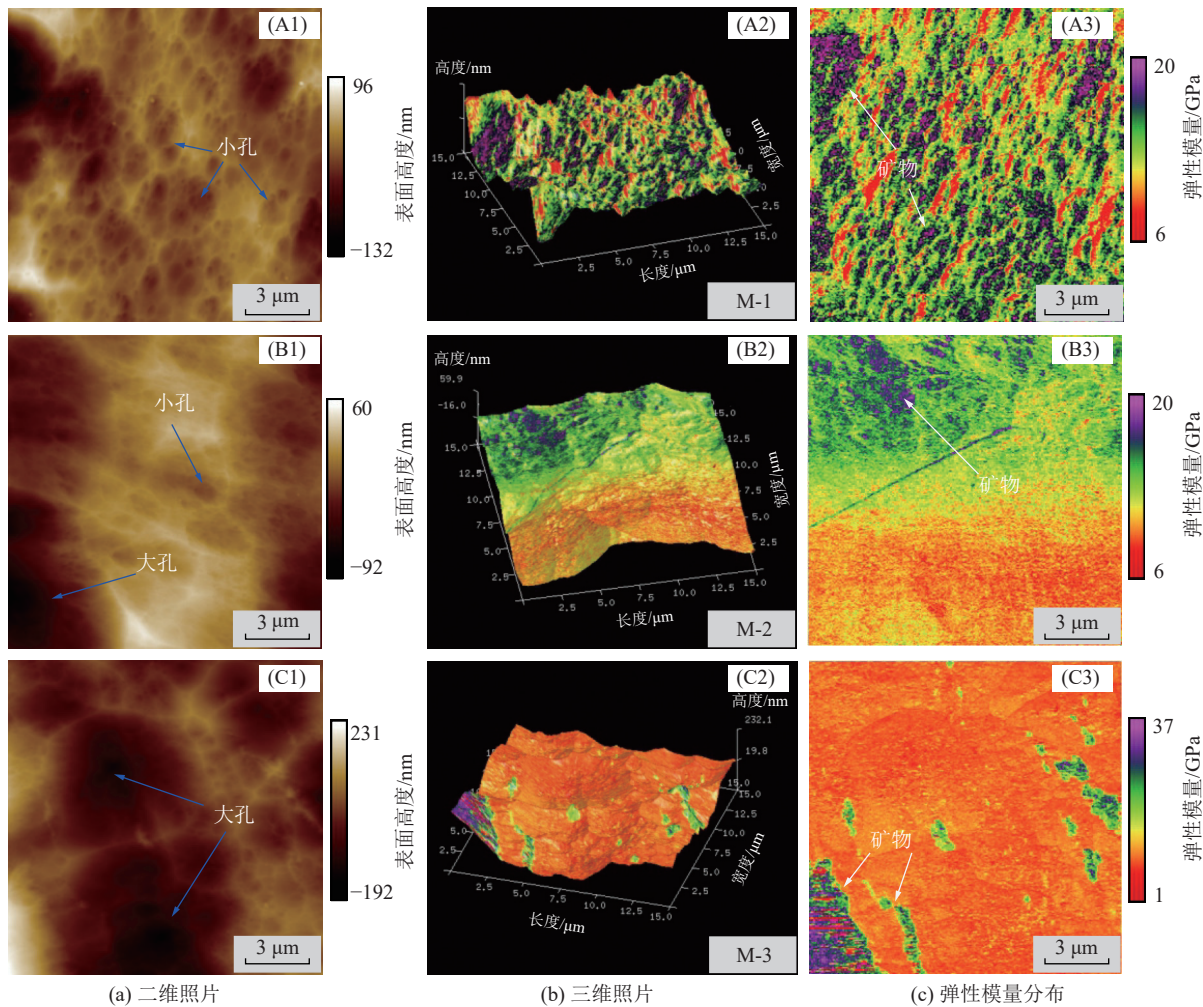


图 13 不同煤体结构煤的 AFM 测试结果

Fig.13 Test result of coal with different structures based on AFM

三个样品的杨氏模量平均为 15.1、13.6、9.9 GPa。随着煤岩杨氏模量减小,煤体结构破碎程度增加。在构造背景相同的情况下,煤岩力学性能取决于煤岩物质组成和显微孔隙结构。对比三个样品的灰分含量可知,M-1 的最高,M-3 的最低,M-2 介于两者之间。这与原子力显微镜观测结果一致,原子力显微镜下的紫色部分代表煤中的无机组分(图 13 的 A3、B3、C3),M-1 的无机组分最高,M-3 的最低。另外,M-3、M-2、M-1 的孔径依次减小(图 13 的 A1、B1、C1),这是因为有机孔的孔径一般大于无机孔的孔径,对于有机质含量高的煤样,孔径较大的有机孔就相对发育。分析认为,有机质力学强度低,抵抗变形能力差,而矿物的力学强度高,煤中矿物成分的增加会提高煤的力学性能。另外,煤中孔隙孔径越大,煤的力学强度也越低。煤岩力学强度的差异将影响煤体结构类型。从测试数值来看,利用该方法获取的煤的杨氏模量要大于力学实验测试结果,这是因为该方法无法反映宏观结构面,导致了宏观和微观力学性能的差异。

4 结 论

1)研究区煤体结构以原生-碎裂结构为主,其次为碎裂结构,发育少量的原生结构和碎裂-碎粒结构。煤体结构分布可以归纳为四大类,据此将研究区划分为七个小分区,该分区对于储层评价和压裂改造的意义值得重视。

2)灰分与煤体结构的完整性呈正相关,研究不同沉积环境中灰分的变化规律是揭示沉积对煤体结构影响特征的关键。

3)原生结构、原生-碎裂结构、碎裂结构煤发育的平均构造曲率分别为 8.4×10^{-6} 、 18.7×10^{-6} 、 $25.7 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 。断层发育的地方,煤体结构以碎裂煤为主。

4)煤岩微观力学性能取决于煤基质组分和显微孔隙结构,煤岩无机组分含量越高,力学强度越高,煤体结构越完整。

参考文献(References):

- [1] 倪小明,石书灿.不同煤体结构组合下井径扩径的钻进主控因素[J].西南石油大学学报(自然科学版),2011,33(6):135-139,212-213.
NI Xiaoming, SHI Shucan. Main controlling factors about expanding well diameter in the process of drilling in different combined coal structure[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2011, 33(6): 135-139, 212-213.
- [2] 肖翠,陈贞龙,金晓波.延川南煤层气田煤体结构模式及改造效果分析[J].煤炭科学技术,2021,49(11):38-46.
- [3] 张小东,杜志刚,李朋朋.不同煤体结构的高阶煤储层物性特征及煤层气产出机理[J].中国科学:地球科学,2017,47(1):72-81.
ZHANG Xiaodong, DU Zhigang, LI Pengpeng. Physical characteristics of high-rank coal reservoirs in different coal-body structures and the mechanism of coalbed methane production[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2017, 47(1): 72-81.
- [4] 胡奇,王生维,张晨,等.沁南地区煤体结构对煤层气开发的影响[J].煤炭科学技术,2014,42(8):65-68,74.
HU Qi, WANG Shengwei, ZHANG Chen, et al. Coal structure affected to coalbed methane development in Qinnan Region[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(8): 65-68, 74.
- [5] 王鹏,苏现波,韩颖,等.煤体结构的定量表征及其意义[J].煤矿安全,2014,45(11):12-15.
WANG Peng, SU Xianbo, HAN Ying, et al. Quantitative characterization of coal structure and its significance[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(11): 12-15.
- [6] 王勇飞,曾焱,卜海.利用测井曲线定量识别安泽区块煤体结构[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2019,38(2):103-111.
WANG Yongfei, ZENG Yan, BU Tao. Well logs applied to quantitatively identify coal structure in the Anze area[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2019, 38(2): 103-111.
- [7] 王远,崔若飞,孙学凯,等.利用地震反演信息划分煤体结构[J].煤田地质与勘探,2011,39(4):69-73,76.
WANG Yuan, CUI Ruofei, SUN Xuekai, et al. Utilizing seismic inversion information in classifying coal structures[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(4): 69-73, 76.
- [8] 滕娟.基于地球物理测井的煤体结构预测:以沁水盆地南部煤储层为例[D].北京:中国地质大学(北京),2016.
TENG Juan. Prediction of coal structure based on geophysical logging: a case study of coal reservoir in the south of Qinshui Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016.
- [9] 陈跃,汤达祯,许浩,等.应用测井资料识别煤体结构及分层[J].煤田地质与勘探,2014,42(1):19-23.
CHEN Yue, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Application of logging data in recognition of coal structure and stratification[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(1): 19-23.
- [10] 许启鲁,黄文辉,杨延绘,等.构造煤的测井曲线判识:以柿庄北区块为例[J].科学技术与工程,2016,16(3):11-16.
XU Qilu, HUANG Wenhui, YANG Yanhui, et al. Analysis of identifying deformed coal by logging curve in Shizhuang north block, Qinshui Basin, China[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(3): 11-16.
- [11] 张超,黄华州,徐德林,等.基于测井曲线的煤体结构判识[J].煤炭科学技术,2017,45(9):47-51.
ZHANG Chao, HUANG Huazhou, XU Delin, et al. Coal structure identified based on logging curve[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(9): 47-51.
- [12] 郭建宏,杜婷,张占松,等.基于支持向量机与地球物理测井资

- 料的煤体结构识别方法[J]. 物探与化探, 2021, 45(3): 768–777.
- GUO Jianhong, DU Ting, ZHANG Zhansong, *et al.* The coal structure identification method based on support vector machine and geophysical logging data[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(3): 768–777.
- [13] WANG Z H, CAI Y D, LIU D M, *et al.* Intelligent classification of coal structure using multinomial logistic regression, random forest and fully connected neural network with multisource geophysical logging data[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2023, 268: 104208.
- [14] 丁阳阳, 赵军龙, 李兆明, 等. 基于 XGBoost 算法的煤体结构测井识别技术研究[J]. *地球物理学进展*, 2022, 37(3): 998–1006.
- DING Yangyang, ZHAO Junlong, LI Zhaoming, *et al.* Research on logging recognition technology of coal structure based on XGBoost algorithm[J]. *Progress in Geophysics*, 2022, 37(3): 998–1006.
- [15] 李俊堂, 王如江, 高彬, 等. 新景煤矿保安区煤体结构特征及测井模型构建[J]. *矿业安全与环保*, 2022, 49(2): 72–77.
- LI Juntang, WANG Rujiang, GAO Bin, *et al.* Characteristics of coal structure and construction of well logging model in Baoan block of Xinjing Mine[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2022, 49(2): 72–77.
- [16] 李松林, 李忠城, 王利娜, 等. 寿阳区块高阶煤煤体结构及破裂压力测井解释方法[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(6): 146–154.
- LI Songlin, LI Zhongcheng, WANG Lina, *et al.* High rank coal structure and log interpretation method of fracture pressure in Shouyang block[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(6): 146–154.
- [17] 李存磊, 杨兆彪, 孙晗森, 等. 多煤层区煤体结构测井解释模型构建[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(2): 721–730.
- LI Cunlei, YANG Zhaobiao, SUN Hansen, *et al.* Construction of a logging interpretation model for coal structure from multi-coal seams area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(2): 721–730.
- [18] 张俊杰, 赵俊龙. 老厂矿区煤体结构测井判识与分布规律[J]. *地质与勘探*, 2019, 55(2): 570–578.
- ZHANG Junjie, ZHAO Junlong. Logging discrimination of coal structures and their distribution in the Laochang mining area, eastern Yunnan Province[J]. *Geology and Exploration*, 2019, 55(2): 570–578.
- [19] 刘博远. 祁南矿煤体结构的测井曲线响应特征及其分布规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学(徐州), 2017.
- LIU Boyuan. Response characteristics of logging curve and research of distribution of coal structure in Qinan Mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [20] 吴伟, 钱程, 杨智, 等. 芦岭煤矿 8、10 煤层煤体结构成因探讨[J]. *西部探矿工程*, 2009, 21(12): 85–87, 90.
- WU Wei, QIAN Cheng, YANG Zhi, *et al.* Study on genesis of coal structure of No. 8 & 10 coal seams in Luling Mining[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2009, 21(12): 85–87, 90.
- [21] 张珺晔. 新疆阜康低阶煤煤体结构及其地质控因分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- ZHANG Junye. Study on coal structure and its geological factors of low rank coals in the Fukang area, Xinjiang, China[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- [22] 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.
- [23] 师晶, 黄文辉, 吕晨航, 等. 鄂尔多斯盆地临兴地区上古生界泥岩地球化学特征及地质意义[J]. *石油学报*, 2018, 39(8): 876–889.
- SHI Jing, HUANG Wenhui, LYU Chenhang, *et al.* Geochemical characteristics and geological significance of the Upper Paleozoic mudstones from Linxing area in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(8): 876–889.
- [24] 蔡益栋, 高国森, 刘大锰, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴中区煤系气富集地质条件及成藏模式[J]. *天然气工业*, 2022, 42(11): 25–36.
- CAI Yidong, GAO Guosen, LIU Dameng, *et al.* Geological conditions for coal measure gas enrichment and accumulation models in Linxingzhong Block along the eastern margin of the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(11): 25–36.
- [25] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(8): 1165–1186.
- [26] 郭红玉, 苏现波, 夏大平, 等. 煤储层渗透率与地质强度指标的关系研究及意义[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(8): 1319–1322.
- GUO Hongyu, SU Xianbo, XIA Daping, *et al.* Relationship of the permeability and geological strength index (GSI) of coal reservoir and its significance[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(8): 1319–1322.
- [27] 高向东, 王延斌, 倪小明, 等. 临兴地区深部煤岩力学性质及其对煤储层压裂的影响[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(S2): 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.
- [28] 高向东, 王延斌, 张崇崇. 钻井中煤体结构特征与井壁稳定性分析研究[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(5): 95–99.
- GAO Xiangdong, WANG Yanbin, ZHANG Chongchong. Study and analysis on coal structure features during drilling operation and well wall stability[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(5): 95–99.
- [29] 陶传奇, 王延斌, 倪小明, 等. 基于测井参数的煤体结构预测模型及空间展布规律[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(2): 173–177, 196.
- TAO Chuanqi, WANG Yanbin, NI Xiaoming, *et al.* Prediction model of coal-body structure and spatial distribution law based on logging parameters[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(2): 173–177, 196.