

4-28-2023

Mechanical property evaluation of coal bed and favorable area prediction of coalbed methane (CBM) development based on well logging: A case study of No. 3 coal bed in Zhengzhuang Block, southern Qinshui Basin

QIU Feng

School of Energy Resources, China University of Geosciences (beijing), Beijing 100083, China; Longkou Mining Group Engineering Construction Co., LTD., Yantai 265700, China, 3006210001@email.cugb.edu.cn

LIU Jinhua

School of Energy Resources, China University of Geosciences (beijing), Beijing 100083, China; Longkou Mining Group Engineering Construction Co., LTD., Yantai 265700, China

CAI Yidong

School of Energy Resources, China University of Geosciences (beijing), Beijing 100083, China; Longkou Mining Group Engineering Construction Co., LTD., Yantai 265700, China, yidong.cai@cugb.edu.cn

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://cge.researchcommons.org/journal>



Part of the [Earth Sciences Commons](#), [Mining Engineering Commons](#), [Oil, Gas, and Energy Commons](#), and the [Sustainability Commons](#)

Recommended Citation

QIU Feng, LIU Jinhua, CAI Yidong, et al. (2023) "Mechanical property evaluation of coal bed and favorable area prediction of coalbed methane (CBM) development based on well logging: A case study of No. 3 coal bed in Zhengzhuang Block, southern Qinshui Basin," *Coal Geology & Exploration*: Vol. 51: Iss. 4, Article 6. DOI: 10.12363/issn.1001-1986.22.10.0808

Available at: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol51/iss4/6>

This Coal-measure Gas, Coal-hosted Minerals is brought to you for free and open access by Coal Geology & Exploration. It has been accepted for inclusion in Coal Geology & Exploration by an authorized editor of Coal Geology & Exploration. For more information, please contact 380940179@qq.com.

Mechanical property evaluation of coal bed and favorable area prediction of coalbed methane (CBM) development based on well logging: A case study of No. 3 coal bed in Zhengzhuang Block, southern Qinshui Basin

Authors

QIU Feng, LIU Jinhua, CAI Yidong, LIU Dameng, and SUN Fengrui



移动阅读

邱峰, 刘晋华, 蔡益栋, 等. 基于测井的煤层力学特性评价及煤层气开发有利区预测——以沁南郑庄区块 3 号煤层为例[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(4): 46–56. doi: 10.12363/issn.1001-1986.22.10.0808

QIU Feng, LIU Jinhua, CAI Yidong, et al. Mechanical property evaluation of coal bed and favorable area prediction of coal-bed methane (CBM) development based on well logging: A case study of No. 3 coal bed in Zhengzhuang Block, southern Qinshui Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(4): 46–56. doi: 10.12363/issn.1001-1986.22.10.0808

基于测井的煤层力学特性评价及煤层气开发有利区预测

——以沁南郑庄区块 3 号煤层为例

邱峰^{1,2}, 刘晋华^{1,2}, 蔡益栋^{1,2}, 刘大猛^{1,2}, 孙逢瑞^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083; 2. 煤层气开发利用国家工程研究中心煤储层物性实验性, 北京 100083)

摘要: 准确掌握煤岩力学性质对储层改造及煤层气开发具有重要意义, 以郑庄区块 3 号煤层为研究层位, 建立以多测井参数为基础的煤储层横波时差预测模型和以动静态力学参数转换为依据的脆性指数评价模型; 利用弹性参数法对研究区内煤储层脆性指数进行了综合评价, 发现单井中煤层脆性指数受“边界效应”影响明显且分布具有区域性; 脆性指数与煤体结构指数存在正相关关系, 并据此提出以脆性指数为依据的煤体结构划分标准; 脆性指数与抗压强度、抗拉强度均为负相关关系; 四维地震裂缝监测结果显示碎裂结构煤压裂效果最好, 原生结构煤次之, 碎粒结构煤最差; 最后, 以含气量与脆性指数为主要评价参数, 预测了区块内煤层气开发地质有利区, 为煤储层压裂设计提供了依据。

关键词: 力学参数; 测井评价; 脆性指数; 煤体结构; 有利区优选

中图分类号: P618.11 文献标志码: A 文章编号: 1001-1986(2023)04-0046-11

Mechanical property evaluation of coal bed and favorable area prediction of coalbed methane (CBM) development based on well logging: A case study of No. 3 coal bed in Zhengzhuang Block, southern Qinshui Basin

QIU Feng^{1,2}, LIU Jinhua^{1,2}, CAI Yidong^{1,2}, LIU Dameng^{1,2}, SUN Fengrui^{1,2}

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Coal Reservoir Laboratory of National Engineering Research Center of CBM Development & Utilization, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Accurately grasping the mechanical properties of coal is of great significance to reservoir reconstruction and CBM development. Herein, the prediction model of shear wave time difference in coal reservoir based on multiple logging parameters and the brittleness index evaluation model based on dynamic and static mechanical parameter conversion were established for the research horizon of No.3 coal bed in Zhengzhuang Block. The brittleness index of coal reservoir in the study area was comprehensively evaluated by elastic parameter method. By this way, it is found that the brittleness index of coal bed in single well is obviously affected by “boundary effect” and in regional distribution. Besides, the brittleness index is positively correlated to the coal structure index, and put forward the classification standard of coal structure based on brittleness index. The brittleness index is negatively correlated with the compressive and tensile strength. In addition, the results of four-dimensional seismic fracture monitoring show that the coal in cataclastic structure has the best fracturing effect, followed by the coal in primary structure and granular structure successively. Finally, the favorable area of CBM development in the block was predicted with gas content and brittleness index as the main evaluation parameters, which provides a basis for the fracturing design of coal reservoir.

Keywords: mechanical parameters; logging evaluation; brittleness index; coal structure; favorable area optimization

收稿日期: 2022-10-12; 修回日期: 2023-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(42130806, 41922016)

第一作者: 邱峰, 1993 年生, 男, 河北保定人, 博士研究生, 从事煤层气地质与开发工作. E-mail: 3006210001@email.cugb.edu.cn

通信作者: 蔡益栋, 1985 年生, 男, 江苏盐城人, 博士, 教授, 从事非常规油气地质与开发工作. E-mail: yidong.cai@cugb.edu.cn

煤层气是以甲烷为主要成分的煤炭共生矿产资源,属非常规天然气,是新晋清洁、高效、优质能源之一。煤层气的开发利用不仅有利于我国能源供给侧结构改革,而且对环境保护与生态文明建设具有重要意义^[1-2]。我国地质条件复杂,煤储层具有“低渗、低孔、低饱和、高非均质性”特征,煤层气开发难度巨大^[3-4]。目前国内外主要增产方法可分为水力压裂、多元气体驱替及高效钻完井技术^[5-7],其中水力压裂(含二次压裂)是我国煤层气商业化开采的重要手段。力学参数是水力压裂设计及脆性指数计算中的重要参数^[8],而脆性是决定水力压裂能否产生复杂网络的重要力学性质^[9]。选取合适的脆性评价方法对煤储层的脆性指数进行评价和研究,对煤层气压裂增产具有关键理论指导意义。

根据研究方法及技术手段,前人对岩石力学性质的研究分为实验室测试及地球物理反演。实验室测试是借助单轴或三轴力学实验对煤岩力学性质进行定量表征;地球物理反演则是利用测井数据对煤岩力学参数进行反演分析。申卫兵^[10]、杨永杰^[11]等通过三轴力学压缩实验,得到了煤岩力学参数随深度的变化规律和压缩过程中煤岩变形特性及影响因素;尤明庆^[12]研究了煤在三轴压缩实验中的破坏形式,认为 Coulomb 强度准则可以较好地表征煤岩强度特征;李小春等^[13]对煤岩进行多低围压下三轴加卸载试验,实现了塑性特征新表述;Zhang Bo 等^[14]将弹性模量、泊松比与岩石密度相结合,提高了脆性表征准确性;孟召平等^[15]发现岩石动静态弹性参数间线性相关,并建立了不同条件下的动静态弹性参数的转换关系;梁豪^[16]将由页岩的横波和纵波速度计算得到的动态力学参数转化为静态力学参数并对页岩脆性进行了评价;艾林等^[17]通过阵列声波测井资料对研究区中煤岩脆性指数进行计算,指出脆性指数与煤体结构相关;陈东锐等^[18]提取沁水盆地的横波和纵波时差等测井信息,并基于横波时差预测结果与常规测井资料对研究区力学参数进行计算;张杰等^[19]利用基于多种测井曲线的力学参数计算方法对不同类型的煤体结构进行划分。当前基于测井数据的煤岩力学特性研究多局限于优化数学模型以提高力学参数(弹性模量,泊松比,脆性指数等)计算结果及表征煤体结构的准确性方面,缺乏对煤储层脆性评价方法及其应用的相关研究。

针对目前煤储层力学特性研究存在的不足,笔者基于郑庄区块3号煤层的测井数据建立了煤岩横波时差预测模型,利用煤层力学参数测井反演结果优选了煤岩脆性评价方法,并对区块煤储层脆性指数特征及其与煤体结构、力学参数及裂缝扩展规律关系进行了

剖析,最后结合脆性指数与煤层含气性预测了郑庄区块煤层气开发地质有利区。

1 研究区地质概况

郑庄区块位于沁水盆地南部的构造斜坡带,东南部与樊庄区块以寺头断层分界,北部和西部无明显边界。区块内正断层发育,其中规模较大的断层包括郑1断层、郑2断层、后城腰断层及寺头断层(图1a),较大断层间发育多个小型北东向正断层。郑庄区块地层发育稳定且平缓,由老至新依次为峰峰组、本溪组、太原组、山西组、下石盒子组、上石盒子组、三叠系及第四系(图1b)。3号目标煤层位于山西组中下段,分布稳定,属于三角洲平原沼泽相沉积。煤层埋深为386~1339 m,厚度为2.6~7.1 m,平均厚度为5.2 m;最大镜质体反射率(R_{\max})为3.01%~4.04%,属无烟煤范畴;宏观煤岩类型以半亮煤和半暗煤为主;煤层中微孔与小孔较为发育,煤层气储集能力较强;顶板主要为泥岩,底板为泥岩或砂岩,封盖条件良好;煤层含气量为1.51~31.44 m³/t,平均含气量为19.04 m³/t,含气性较好。

2 基于测井的煤储层脆性评价模型

2.1 横波时差预测模型的建立

横波时差是利用测井数据计算岩石力学的关键参数,通常借助交叉偶极子阵列声波测井获取。由于阵列声波测井成本较高,所以绝大部分煤层气井缺乏横波时差数据,因而无法直接获取煤层力学参数。对于同一地层,不同测井方法得到的测井参数间具有相关性和互补性,使得利用其他常规测井参数转换实现横波时差预测成为可能。当前,应用较为广泛的横波时差预测模型有经验模型、多元回归模型、Critensen 模型、Biot-Gassmann 模型和 Xu-White 模型^[21]。

Critensen 模型、Biot-Gassmann 模型和 Xu-White 模型对砂泥岩和页岩层的横波时差预测效果较好,但对煤层的预测结果存在较大误差。因此,选取经验模型和多元回归模型对郑庄区块3号煤层横波时差进行预测及准确性验证以实现模型的优选。为减小结果误差,对具有阵列声波测井资料的5口井进行数据筛选,最终在剔除岩性分界线、夹矸附近的测井异常值后,得到346套煤层测井数据,曲线参数包括横波时差(DTS)、纵波时差(DTC)、井径(CAL)、补偿中子(CNL)、密度(DEN)及自然伽马(GR)。

2.1.1 一元线性回归

一元线性回归是对横波时差与纵波时差进行线性拟合,得到的经验公式如下:

$$DTS = 1.3895 \times DTC + 150.01 \quad (1)$$

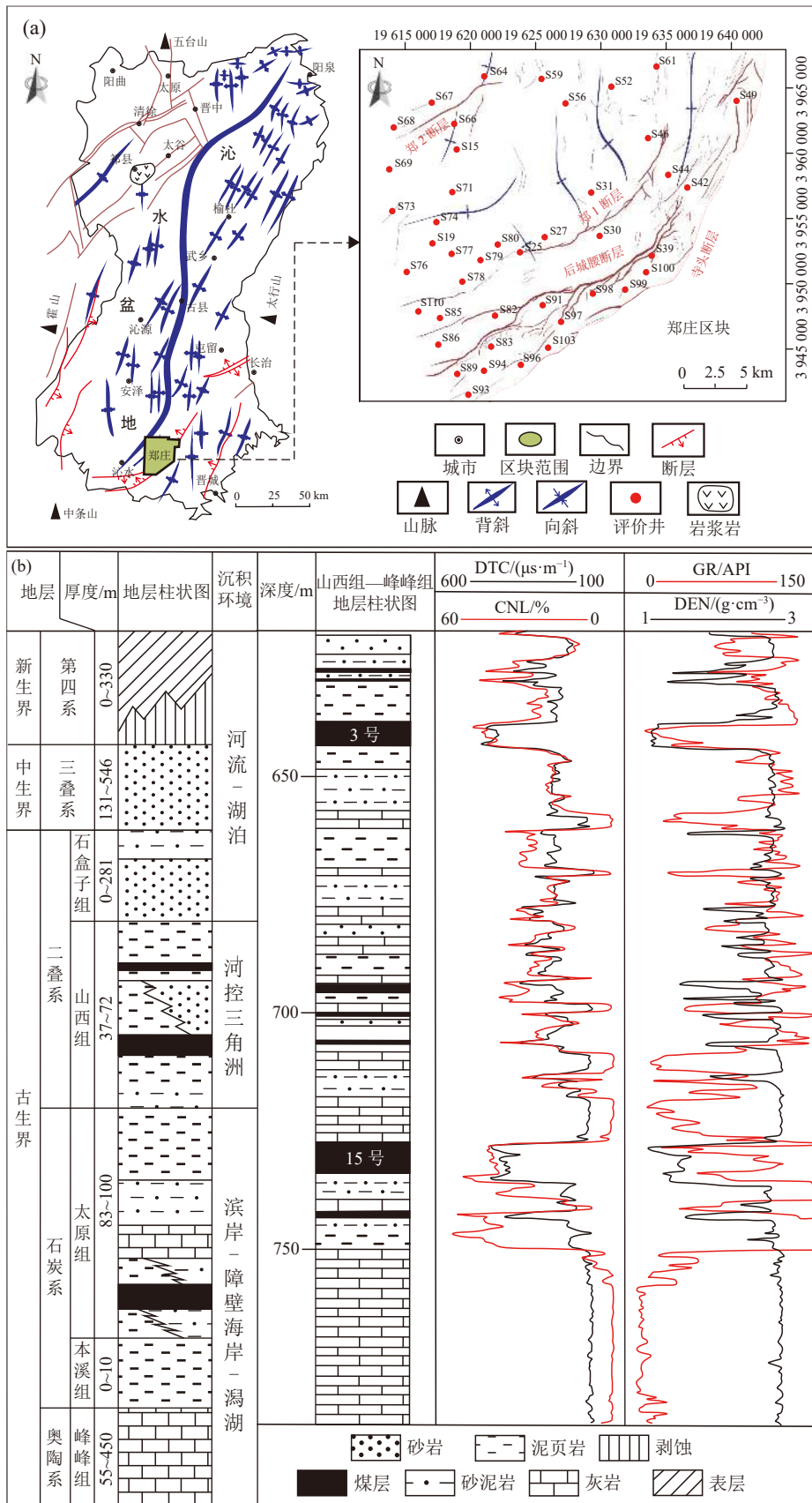


图 1 郑庄区块构造地质与地层综合柱状图^[20]

Fig.1 Structural geology and composite stratigraphic histogram of Zhengzhuang Block

基于式(1)与纵波时差对横波时差进行预测计算, 并与实际测量值拟合(图 2)。拟合结果显示, 数据点分

布较为集中,关联系数(R^2)为 0.66,预测结果较好。但测井过程中声波易受孔隙内流体影响,因此,仅通过单一变量对煤储层横波时差进行预测会存在较大误差。

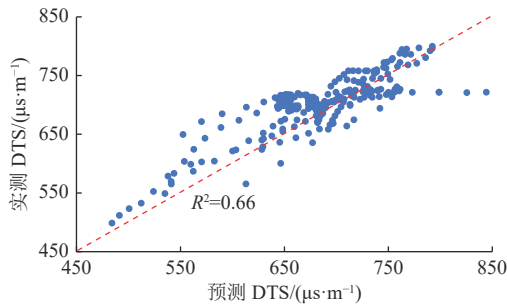


图 2 DTS 计算值与测量值相关性拟合

Fig.2 Correlation fitting of DTS calculated and measured values

2.1.2 多元线性与非线性回归

建立多元回归模型前需对横波时差与其他测井参数进行双变量相关性分析(表 1)。因井径(CAL)与横波时差(DTS)相关性绝对值系数过小,因此,不予考虑。最终选择纵波时差(DTC)、补偿中子(CNL)、密度(DEN)和自然伽马(GR)作为横波时差多元回归预测参数。

多元线性回归是以 DTC、CNL、DEN 和 GR 数据为自变量,DTS 数据为因变量,利用 SPSS 软件进行线性回归分析,得到的横波时差(DTS_0)计算模型表达式。

$$DTS_0 = 1.205 \times DTC + 1.661 \times CNL + 31.817 \times DEN - 0.439 \times GR + 128.528 \quad (2)$$

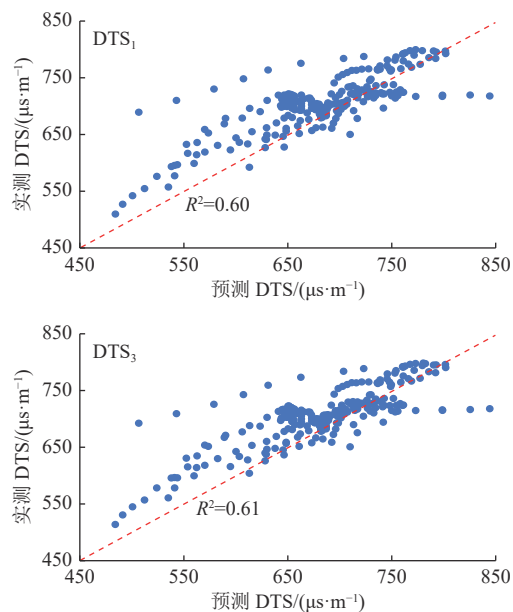
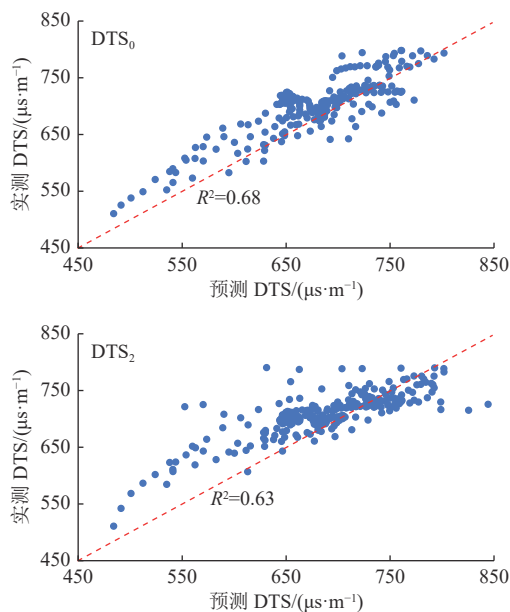


图 3 多元回归模型 DTS 计算值与测量值相关性拟合

Fig.3 Correlation fitting of DTS calculated and measured values of different multiple regression models

2.2 煤储层脆性指数评价模型

声波在岩石中传播时,岩石颗粒因受声波应力产生震动,进而发生弹性形变^[24]。因此,利用横波与纵波

表 1 煤层 DTS 与常规测井响应相关性绝对值参数
Table 1 Absolute value parameters of correlation between DTS and conventional well logging response of coal bed

测井参数	DTC	CAL	CNL	DEN	GR
DTS	0.802	0.452	0.716	0.751	0.664

与多元线性回归不同,多元非线性回归需要分别确定符合每个测井参数特征的数学模型,以达到最佳预测效果。基于前人工作^[21-23]及研究区测井资料,优选出 3 种非线性回归模型,表达式如下:

$$DTS_1 = 1.25 \times DTC \times 0.961^{DEN} + 1.103 \times CNL + 184.125 \quad (3)$$

$$DTS_2 = (DEN \times DTC^2) / (1.057 \times DTC + 148.182 \times DEN - 317.731) \quad (4)$$

$$DTS_3 = 1.008 \times DTC^{1.02} + 113.362 \times DEN^{-102.525} + 49.157 \times CNL^{0.327} + 120.984 \times GR^{-0.1} \quad (5)$$

式中: DTS_1 、 DTS_2 和 DTS_3 为利用不同非线性回归模型计算得到的横波时差, $\mu s \cdot m^{-1}$ 。

利用上述多元回归模型对煤层横波时差进行预测计算,并与实测值比较验证(图 3)。结果表明,上述模型的预测结果与实测值的相关系数 $R^2 \geq 0.60$,其中 DTS_0 模型相关性最高。此外, DTS_0 模型对比数据在斜率为 1 附近分布更为集中,可信度高,在后续计算中将利用 DTS_0 模型进行煤层力学参数测井反演。

速度可以实现岩石弹性力学参数的计算,公式如下:

$$E = \frac{\rho}{\Delta t_s^2} \times \frac{3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2} \times 10^6 \quad (6)$$

$$\mu = \frac{\Delta t_s^2 - 2\Delta t_p^2}{2\Delta t_s^2 - 2\Delta t_p^2} \quad (7)$$

式中： ρ 为岩石密度， g/cm^3 ； Δt_p 、 Δt_s 分别为纵波时差、横波时差， $\mu\text{s/m}$ ； E 为弹性模量， GPa ； μ 为泊松比。

岩石力学参数分为动态力学参数和静态力学参数，且两者因测试作用力的性质与施加时长的不同而存在较大差异。动态力学参数是对储层力学性质的间接反映，在应用时需要利用线性或简单非线性公式将其转换为静态力学参数^[25]。对由式(6)、式(7) 计算得到的动态力学参数与统计得到的静态力学参数进行线性拟合，得到转换公式如下：

$$E_s = 0.833 1E_d - 4.230 4 \quad (8)$$

$$\mu_s = 1.066\mu_d + 0.051 1 \quad (9)$$

式中： E_s 为静态弹性模量， GPa ； E_d 为动态弹性模量， GPa ； μ_s 为静态泊松比； μ_d 为动态泊松比。

由动静态力学参数拟合结果(图 4) 可知，研究区内煤层动态弹性模量大于静态模量，而动态泊松比小于静态泊松比，其可能为在煤岩静态力学参数测试过程中，岩石内部颗粒间发生摩擦或轻微滑动导致。此外，煤层动静态弹性模量和泊松比相关性较高，相关系数均在 0.80 左右，也说明横波时差预测模型在该区适用性较强。

脆性是岩石变形特征和材料特征的综合表现，即为内部原生损伤与受力损伤扩展的共同表征^[26]。煤岩属高脆性岩石，一般具有断裂破坏由裂缝主导、较低应变下破坏、高回弹能、抗压/抗拉强度高、内摩擦

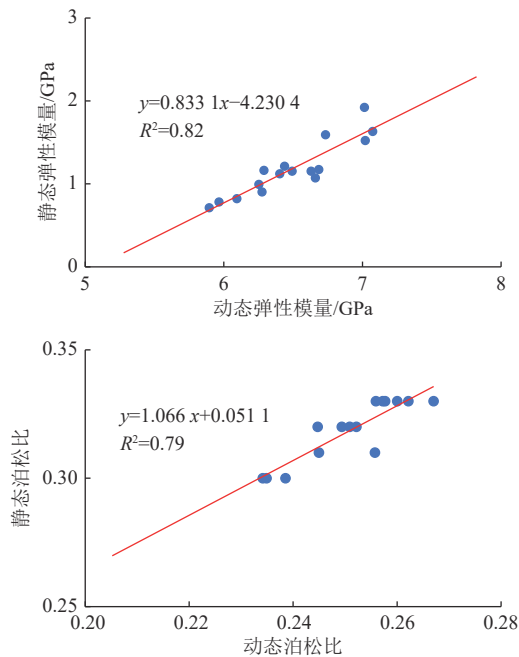


图 4 郑庄区块 3 号煤层的动、静态力学参数拟合
Fig.4 Fitting of dynamic and static mechanical parameters of No.3 coal bed in Zhengzhuang Block

角大等特征^[27]。各类脆性评价方法在不同地区与不同岩性中的适用性差别较大，在砂泥岩和页岩中的应用相对成熟，但在非均性极强的煤岩中应用仍需进一步探索。岩石脆性评价方法众多，如硬度法、模量法、弹性参数法、冲击穿透实验法等等，但因适用性与假设条件的差异，在煤岩中应用最为广泛的是弹性参数法。弹性参数法的计算公式^[28-29] 如下：

$$B = \frac{E_{BI} + \mu_{BI}}{2} \quad (10)$$

$$E_{BI} = \frac{E - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} \times 100 \quad (11)$$

$$\mu_{BI} = \frac{\mu_{max} - \mu}{\mu_{max} - \mu_{min}} \times 100 \quad (12)$$

式中： B 为脆性指数； E_{BI} 为均一化弹性模量， GPa ； μ_{BI} 为均一化泊松比； E_{max} 与 E_{min} 分别为弹性模量最大值与最小值， GPa ； μ_{max} 与 μ_{min} 为泊松比最大值与最小值。其中，弹性模量与泊松比均为静态力学参数。

3 煤储层力学特性及开发有利区预测

3.1 煤岩脆性特征

脆性指数是储层孔裂隙结构、内部流体性质、矿物组成及自身力学特征的综合反应。弹性参数法是利用岩石静态弹性模量与泊松比对岩石脆性进行表征，即认为岩石脆性主要受力学性质控制。煤体结构类型、三轴压缩试验、裂缝发育情况与排采曲线均可以直接或间接反映煤层力学特征，所以，本文基于郑庄区块 3 号煤层煤体结构指数、岩石力学参数、四维地震裂缝监测和排采数据对煤储层脆性指数和方法应用效果进行综合分析。

以研究区中 S19, S49 和 S59 三口距离较远且具有代表性的评价井为例，根据测井曲线和脆性指数评价模型，计算煤层脆性指数(步长 0.1 m) 并分析其变化规律(图 5)。S19 井中煤层脆性指数由上至下呈先减后增趋势，并在 561 m 附近脆性指数、密度与自然伽马均出现异常高值，其原因是煤层与顶板接触面(煤层边界)泥质含量偏多，对测井结果造成了影响，进而导致储层脆性指数异常增大。其余煤层段的脆性指数变化较大，说明煤层纵向非均质性较强。随深度增加，S49 井中煤层脆性指数逐渐减小并趋于稳定，且无明显测井异常点，说明煤层纵向非均质性较弱。S59 井中煤层脆性指数随埋深加大整体呈增长趋势，并在 1 160.8~1 161.2 m 范围内出现跳跃式增长，对应密度与自然伽马曲线也出现突增。此深度范围外，各测井值无明显异常，说明该深度范围内存在夹矸，导致脆性指数高异常。综上可知，“边界效应”对煤储层的脆性

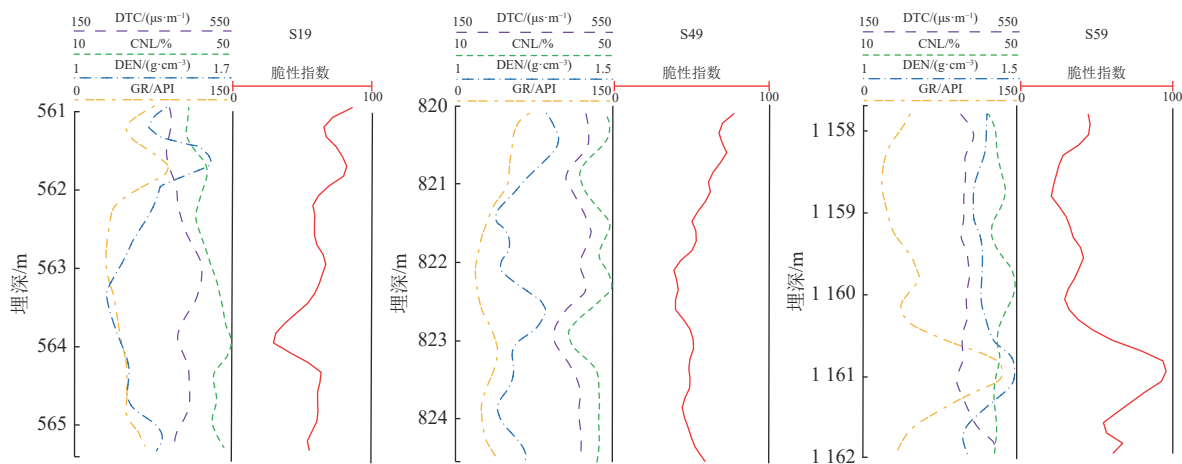


图 5 郑庄区块典型井 3 号煤层测井反演脆性指数结果剖面

Fig.5 Profile of well logging inversion results of brittleness index of No.3 coal bed in typical well of Zhengzheng Block

指数影响较大, 顶底板接触面及夹矸的存在均会对测井结果产生干扰, 造成测井参数异常, 进而影响煤岩脆性指数结果。

对郑庄区块 44 口井中煤层平均脆性指数进行计算对比(图 6)发现, 该区煤层平均脆性指数为 34~80,

且具有明显的区域性特征, 表现为后城腰断层与寺头断层处煤层脆性指数均值最高, 并向两侧呈现逐渐减小的趋势; 郑 1 断层与后城腰断层中间区域的东北部煤层脆性指数均值偏高, 处于双褶皱构造带边缘; 郑 2 断层西北侧煤层脆性指数也较高, 煤层存在挠曲现象。

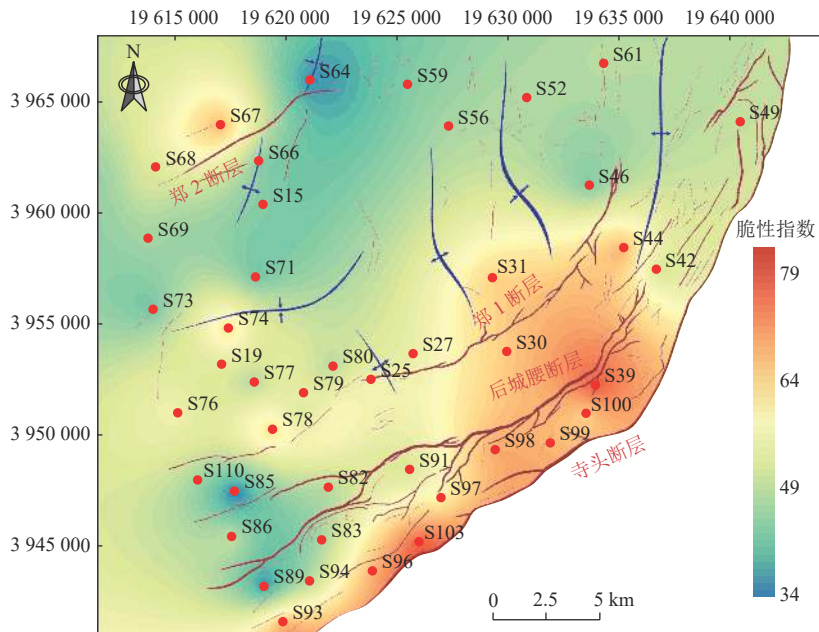


图 6 郑庄区块 3 号煤层脆性指数均值分布

Fig.6 Distribution of average brittleness index of No.3 coal bed in Zhengzhuang Block

3.2 煤岩脆性与煤体结构

煤体结构指数(Coal Structure Index, CSI)是对岩心煤体结构定量表征的标准, 其可以大幅降低主观不确定性对煤体结构鉴别结果造成的误差。CSI 由煤岩结构强度(Coal Structure Designation, CSD)与煤岩结构面等级(Surface Condition Rating, SCR)共同决定^[20], 横(SCR)纵(CSD)轴的值确定后, 在煤体结构指数图版中读取。CSD 为煤层在钻进过程中的破坏程度,

SCR 可由脆性变形指数和韧性变形指数计算获得。对研究区 44 口井中 200 余块煤岩岩心进行 CSI 计算, CSI 频率分布统计如图 7 所示。统计结果显示, 煤岩 CSI 为 7~96, 平均值为 43.6, 且 CSI 随着岩心破碎和变形程度的加剧而增大, 其中原生结构煤(CSI<40)占比 46%, 脆性变形煤(CSI: 40~65)占比为 42%, 更高程度变形煤(CSI>65)仅占 12%, 表明研究区煤层受区域地质构造运动影响较弱。

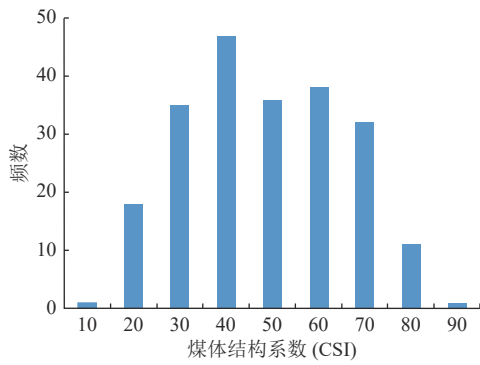


图 7 郑庄区块 3 号煤层煤体结构指数(CSI) 数值统计
Fig.7 Numerical statistics on coal structure index (CSI) of No.3 coal bed in Zhengzhuang Block

对煤岩岩心取样深度校正后提取其对应测井参数, 利用弹性参数法计算各岩心脆性指数, 并与 SCR、CSD 和 CSI 进行相关性分析(图 8)。结果表明: 脆性指数与 SCR、CSD 和 CSI 均具有一定的正相关关系, 其中与 CSI 相关性较强, 与 SCR 和 CSD 相关性弱, 说明脆性指数是 SCR 和 CSD 的综合体现, 与煤体结构密切相关。煤岩脆性指数越高, 在地质作用下越容易被破坏, 表现为煤体结构破碎程度越高^[30-31]。

结合煤岩 CSI 值及煤体结构区间划分标准, 利用脆性指数对研究区不同变形程度煤岩进行定量划分(表 2)。基于煤岩脆性指数的煤体结构划分标准为: I 型-原生结构煤($B \in [0, 47)$), II 型-碎裂煤($B \in [47, 60]$), III 型-碎粒煤($B \in (60, 74]$) 与 IV 型-糜棱煤($B \in [74, 100]$)。

为验证划分方案的适用性, 以不同构造位置试井(S31、S39、S66、S97) 为例进行验证, 验证结果见表 3。由脆性指数与 CSI 值划分得到的煤体结构类型一致, 说明利用脆性指数划分煤体结构具有可行性, 且准确度较高。

3.3 煤岩脆性与其他力学参数关系

针对区内 16 口井的脆性指数和力学参数(抗压强度、抗拉强度)进行相关性分析(图 9), 结果表明抗压强度、抗拉强度与脆性指数均具有一定的负相关关系, 但相关性偏弱, 且饱和状态下抗压强度更低。

饱水状态下, 煤岩中水充当润滑剂, 岩石内摩擦力减小, 力学强度降低^[31]。此外, 当脆性指数小于 70 时, 因煤岩未发生高程度变形, 基质颗粒间存在一定的黏结力, 所以随脆性指数上升, 岩石力学参数值变化较小, 但随变形程度逐渐增加, 煤岩黏聚力降低, 脆性增大, 煤岩更加容易被破坏。当脆性指数大于 70 时, 煤岩力学参数均明显降低, 破碎程度加剧。煤岩脆性越高, 在埋藏过程中变形更为严重, 在取心时极易破碎, 因此, 区内 IV 型煤岩岩心较少。

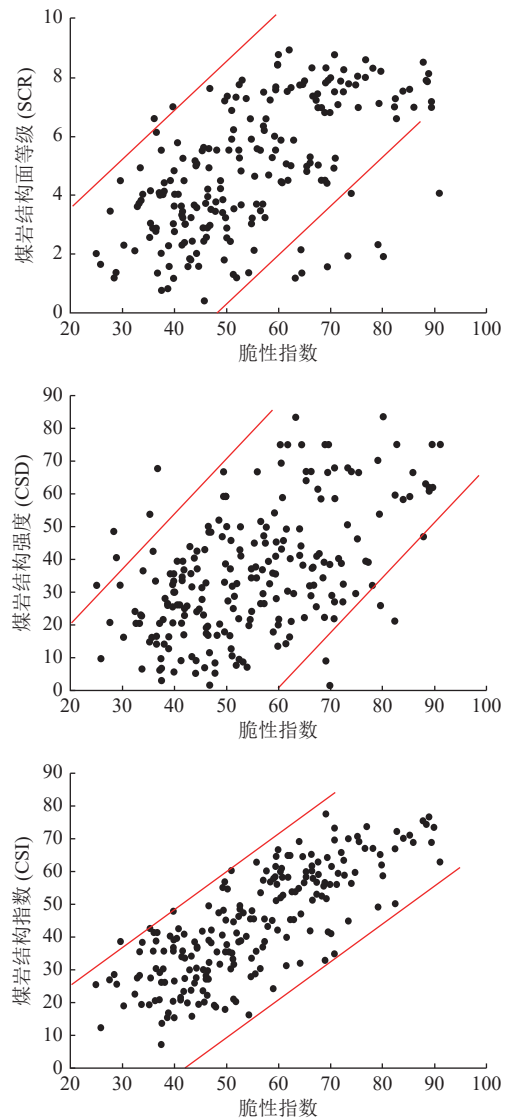


图 8 脆性指数与煤层变形程度的关系
Fig.8 Relationship between brittleness index and deformation degree of coal bed

表 2 脆性指数与煤体结构分类
Table 2 Brittleness index and coal structure classification

煤体结构	CSI	脆性指数 B	脆性指数分类
原生结构煤	<40	[0,47)	I 型
碎裂煤	40~65	[47,60]	II 型
碎粒煤		(60,74]	III 型
糜棱煤	>65	[74,100]	IV 型


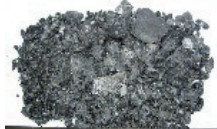

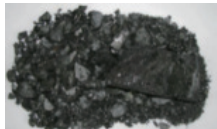

3.4 煤储层开发有利区预测

3.4.1 脆性指数与水力压裂裂缝扩展

水力压裂是通过向储层内部直接注入携砂及其他化学物质的高压流体, 促使煤层产生裂缝, 进而形成导流通道, 缩短排采降压期, 最终实现增产^[32], 而煤层力学性质及脆性指数是影响压裂效果的关键因素, 也是煤层气开发地质有利区优选的重要参数。

压裂时, 压裂液沿原生裂缝/割裂向四周辐射并造

表 3 煤体结构分类结果验证
Table 3 Verification of coal structure classification results

样品编号	深度/m	CSI	脆性指数 <i>B</i>	煤体结构类型	煤心图片
S31-3	603.14~603.47	61.53	59.38	II型	
S39-3	995.41~995.92	69.12	85.85	IV型	
S66-4	1 075.62~1 076.11	15.52	39.77	I型	
S97-1	1 259.60~1 260.05	52.82	67.21	III型	
S97-3	1 260.60 ~ 1 261.05	30.07	42.85	I型	

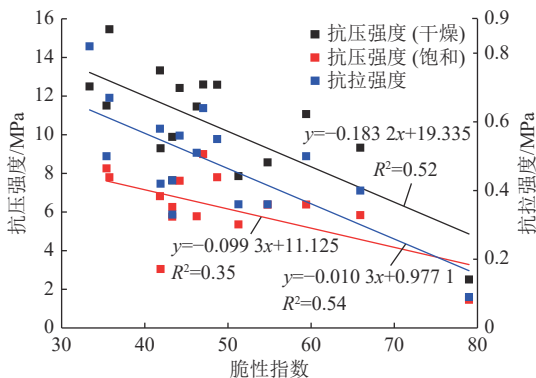


图 9 脆性指数与力学参数关系

Fig.9 Relationship between brittleness index and mechanical parameters

成岩层错动或张裂,进而形成新裂缝。压裂裂缝微地震检测技术能够对辐射弹性波能量进行准确检测,并在时间域上直接分析裂缝演变,达到对地下压裂效果监测的目的。研究区 3 号煤层水力压裂微地震检测数据(表 4)表明,区内主裂缝长度为 152.0~220.9 m,缝高为 5.7~10.7 m。主裂缝多为北东向,与喜马拉雅山运动晚期至今的应力方向较为一致。除主裂缝外,水力压裂也会产生多条支缝,最长支裂缝多沿最大水平应力方向延伸,但同时也受煤体结构的影响。

由水力压裂主裂缝长度与煤岩脆性指数关系(图 10)可知,主裂缝长度随煤岩脆性指数增加呈先升后降的变化趋势。当脆性指数小于 45 时,煤层以原生结构为主,裂隙发育较少,近井裂缝主要沿初始破裂方向开裂,

表 4 郑庄区块 3 号煤层水力压裂裂缝监测统计
Table 4 Hydraulic fracture monitoring of No.3 coal bed in Zhengzhuang Block

井号	脆性指数均值	总长/m	缝高/m	方位/(°)
S30	65.9	152.0	6.7	北东56.2
S64	35.4	170.7	6.7	北东81.8
S73	41.9	197.7	6.6	北东70.0
S76	61.4	187.8	7.4	北东56.1
S78	68.3	160.0	10.7	北东64.7
S80	51.2	216.7	6.8	北东49.6
S83	47.0	197.9	7.5	北东64.5
S86	49.9	202.7	6.5	北东54.5
S91	52.0	181.4	7.5	北东60.2
S94	48.7	212.4	9.0	北东55.0
S97	57.1	220.9	5.7	北东42.0
S100	65.4	178.0	6.7	北西85.0

且原生结构煤力学强度与顶底板接近,易发生穿层。当脆性指数为 45~60 时,煤层以碎裂结构煤为主,煤层发生轻微变形,裂隙发育,脆性增强,压裂时更易产生沿主应力方向的长裂缝,且此时煤岩与顶底板的力学强度差距较大,裂缝不易贯穿顶底板,是储层改造最有利区间。当脆性指数大于 60 时,煤层以碎裂煤为主,裂隙大量发育,但会分担部分泵压,不利于主裂缝的延伸,压裂效果差^[33]。

3.4.2 郑庄区块 3 号煤层气开发地质有利区预测

水力压裂是实现煤层气增产的重要手段,而含气

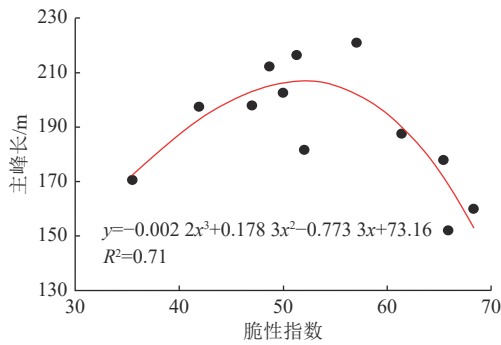


图 10 郑庄区块 3 号煤层脆性指数与主峰长关系

Fig.10 Relation of brittleness index and main seam length in No.3 coal bed of Zhengzhuang Block

量是决定煤层气藏能否高产的关键因素。在总结前人对不同地区煤储层有利区评价中参数权重赋值^[34]的研究基础上,笔者以脆性指数和含气量为评价参数,对郑庄区块煤层气开发地质有利区进行预测,参数临界值与权重值见表 5。

根据预测结果,可将研究区分为三类:综合评价值>78 为 I 类开发有利区,主要分布在区内中西部;综合评价值为 66~78 为 II 类次有利开发区,主要位于区内西南部与东北部;综合评价值<66 为 III 类开

表 5 郑庄区块 3 号煤层气开发地质评价参数及评价标准
Table 5 Geological prediction parameters and evaluation criterion for CBM development of No. 3 coal bed in Zhengzhuang Block

参数	权重	划分指标	评价指数
脆性指数	0.6	<45	60
		45~60	90
		>60	30
含气量/(m ³ ·t ⁻¹)	0.4	<15	30
		15~23	60
		>23	90

发不利区,主要位于区内西北部与东南边界处(图 11)。为验证有利区预测的准确性,以区内煤层气井的平均日产气量作为检验参数,验证结果表明: I 类开发有利区内,单井平均日产气量高于 1 500 m³,产气效果好; II 类次有利开发区内单井平均日产气量为 800~1 500 m³,产气效果较好; III 类开发不利区内,单井平均日产气量小于 800 m³,甚至部分井未见产气。区内实际产气结果与预测结果一致。因此,该方法可用于指导煤储层水力压裂方案的设计与煤层气开发。

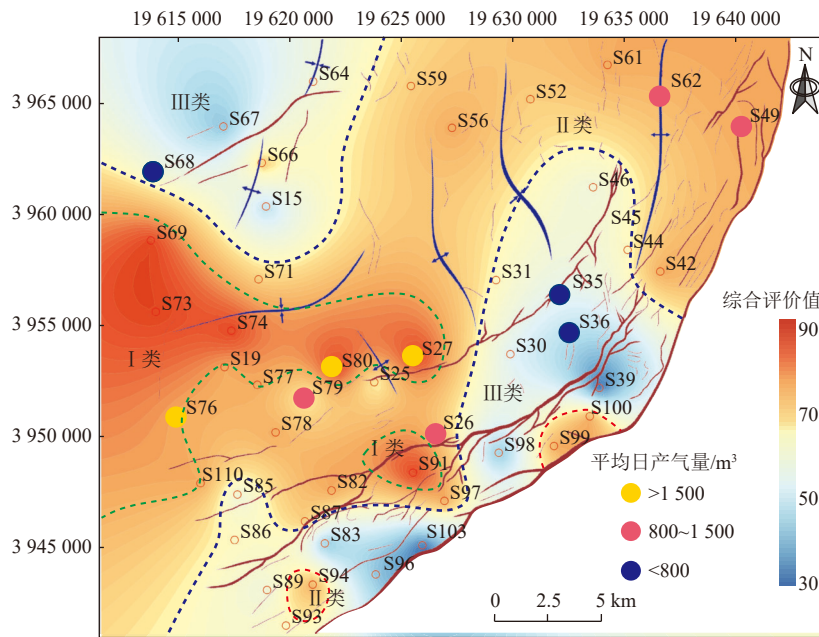


图 11 郑庄区块 3 号煤层煤层气开发地质有利区预测

Fig.11 Prediction of geological favorable area for CBM development of No.3 coal bed in Zhengzhuang Block

4 结论

a. 基于常规测井参数建立了煤储层横波时差预测模型,并据此计算了煤层动态弹性模量与泊松比,发现动态弹性模量大于静态弹性模量,动态泊松比小于静态泊松比,以及动静态弹性模量/泊松比间存在明显正相关关系。

b. 运用归一化弹性模量与泊松比对区内煤层脆性指数进行综合评价。单井中煤层脆性指数随深度变化规律不一,受“边界效应”影响明显,而全区煤层脆性指数分布具有明显区域性,活动构造带附近煤层脆性指数较高。

c. 煤层岩心脆性指数与煤体结构指数存在明显正相关关系,从而形成了以脆性指数为基础的煤体结构

划分标准,并在研究区具有良好的适用性。煤岩脆性指数与抗压强度、抗拉强度均为负相关关系,煤岩脆性越强且其结构越破碎时,力学强度越低。

d. 压裂效果与脆性指数显著相关,碎裂结构煤压裂效果最好,原生结构煤次之,碎粒结构煤最差。根据含气量与脆性指数预测了三类开发地质有利区,其结果与实际生产排采数据较为吻合。

参考文献(References)

- [1] 琚宜文, 乔鹏, 卫明明, 等. 区域构造与演化控制下煤层气富集高产典型模式[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(9): 1-12.
JU Yiwen, QIAO Peng, WEI Mingming, et al. Typical coalbed methane (CBM) enrichment and production modes under the control of regional structure and evolution[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(9): 1-12.
- [2] 门相勇, 韩征, 宫厚健, 等. 新形势下中国煤层气勘探开发面临的挑战与机遇[J]. *天然气工业*, 2018, 38(9): 10-16.
MEN Xiangyong, HAN Zheng, GONG Houjian, et al. Challenges and opportunities of CBM exploration and development in China under new situations[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(9): 10-16.
- [3] 刘大猛, 周三栋, 蔡益栋, 等. 地应力对煤储层渗透性影响及其控制机理研究[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(6): 1-8.
LIU Dameng, ZHOU Sandong, CAI Yidong, et al. Study on effect of geo-stress on coal permeability and its controlling mechanism[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(6): 1-8.
- [4] 孟召平, 彭苏萍, 傅继彤. 含煤岩系岩石力学性质控制因素探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(1): 102-106.
MENG Zhaoping, PENG Suping, FU Jitong. Study on control factors of rock mechanics properties of coal-bearing formation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(1): 102-106.
- [5] 张亚蒲, 杨正明, 鲜保安. 煤层气增产技术[J]. *特种油气藏*, 2006, 13(1): 95-98.
ZHANG Yapu, YANG Zhengming, XIAN Bao'an. Coal-bed gas stimulation technology[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2006, 13(1): 95-98.
- [6] 冯青. 煤层气井低产伤害诊断方法及应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(1): 86-91.
FENG Qing. Method and application of diagnosis of low productivity damage of CBM wells[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(1): 86-91.
- [7] 张遂安, 刘欣佳, 温庆志, 等. 煤层气增产改造技术发展现状与趋势[J]. *石油学报*, 2021, 42(1): 105-118.
ZHANG Sui'an, LIU Xinjia, WEN Qingzhi, et al. Development situation and trend of stimulation and reforming technology of coalbed methane[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(1): 105-118.
- [8] 张辰庆, 许江, 彭守建, 等. 考虑断裂韧性影响的页岩气储层可压性评价方法[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(5): 131-137.
ZHANG Chenqing, XU Jiang, PENG Shoujian, et al. Evaluation method of compressibility of shale gas reservoir in consideration of the influence of fracture toughness[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(5): 131-137.
- [9] 袁俊亮, 邓金根, 张定宇, 等. 页岩气储层可压裂性评价技术[J]. *石油学报*, 2013, 34(3): 523-527.
YUAN Junliang, DENG Jinggen, ZHANG Dingyu, et al. Fracability evaluation of shale-gas reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(3): 523-527.
- [10] 申卫兵, 张保平. 不同煤阶煤岩力学参数测试[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(增刊1): 860-862.
SHEN Weibing, ZHANG Baoping. Testing study on mechanical parameters of coal[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(Sup.1): 860-862.
- [11] 杨永杰, 宋扬, 陈绍杰. 三轴压缩煤岩强度及变形特征的试验研究[J]. *煤炭学报*, 2006, 31(2): 150-153.
YANG Yongjie, SONG Yang, CHEN Shaojie. Test study of coal's strength and deformation characteristics under triaxial compression[J]. *Journal of China Coal Society*, 2006, 31(2): 150-153.
- [12] 尤明庆. 岩样三轴压缩的破坏形式和Coulomb强度准则[J]. *地质力学学报*, 2002, 8(2): 179-185.
YOU Mingqing. Destroy character and coulomb criterion of rock specimen in pseudo-triaxial compression[J]. *Journal of Geomechanics*, 2002, 8(2): 179-185.
- [13] 李小春, 白冰, 唐礼忠, 等. 较低和较高围压下煤岩三轴试验及其塑性特征新表述[J]. *岩土力学*, 2010, 31(3): 677-682.
LI Xiaochun, BAI Bing, TANG Lizhong, et al. Triaxial tests of coal under low and high confining pressures and its plastic characteristics description[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(3): 677-682.
- [14] ZHANG Bo, ZHAO Tao, JIN Xiaochun, et al. Brittleness evaluation of resource plays by integrating petrophysical and seismic data analysis[J]. *Interpretation*, 2015, 3(2): T81-T92.
- [15] 孟召平, 张吉昌, TIEDEMANN J. 煤系岩石物理力学参数与声波速度之间的关系[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(5): 1505-1510.
MENG Zhaoping, ZHANG Jichang, TIEDEMANN J. Relationship between physical and mechanical parameters and acoustic wave velocity of coal measures rocks[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(5): 1505-1510.
- [16] 梁豪. 页岩储层岩石脆性破裂机理及评价方法[D]. 成都: 西南石油大学, 2014.
LIANG Hao. Brittle fracture mechanism and evaluation method of shale reservoir rock[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.
- [17] 艾林, 周明顺, 张杰, 等. 基于煤岩脆性指数的煤体结构测井定量判识[J]. *岩性油气藏*, 2017, 29(2): 139-144.
AI Lin, ZHOU Mingshun, ZHANG Jie, et al. Quantitative identification of coal structure based on coal rock brittleness index by logging data[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2017, 29(2): 139-144.
- [18] 陈东锐, 王延斌, 韩文龙, 等. 基于常规测井资料计算煤层力学参数[J]. *云南化工*, 2020, 47(6): 135-136.
CHEN Dongrui, WANG Yanbin, HAN Wenlong, et al. Calculating mechanics parameters of coal seam based on conventional logging data[J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2020, 47(6): 135-136.
- [19] 张杰, 范立红, 梅杰, 等. 测井技术在樊庄地区煤岩结构识别中的应用[J]. *中国煤层气*, 2017, 14(3): 12-16.

- ZHANG Jie, FAN Lihong, MEI Jie, et al. Application of logging technology in recognizing coal structure in Fanzhuang Area[J]. *China Coalbed Methane*, 2017, 14(3): 12–16.
- [20] WANG Yingjin, LIU Dameng, CAI Yidong, et al. Constraining coalbed methane reservoir petrophysical and mechanical properties through a new coal structure index in the Southern Qinshui Basin, Northern China: Implications for hydraulic fracturing[J]. *AAPG Bulletin*, 2020, 104(8): 1817–1842.
- [21] 熊晓军, 林凯, 贺振华. 基于等效弹性模量反演的横波速度预测方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2012, 47(5): 723–727.
- XIONG Xiaojun, LIN Kai, HE Zhenhua. A method for S-wave velocity estimation based on equivalent elastic modulus inversion[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2012, 47(5): 723–727.
- [22] 刘志强. 煤层地应力预测方法研究: 以郑庄煤层气区块为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- LIU Zhiqiang. Method of estimating in-situ stresses: A case study of Zhengzhuang coalbed methane field[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.
- [23] 杨秀春, 张继坤, 周科. 鄂东气田韩城矿区煤层横波时差测井曲线的构建方法[J]. *测井技术*, 2014, 38(3): 304–308.
- YANG Xiuchun, ZHANG Jikun, ZHOU Ke. Study on establishing method of shear wave logging curves for coalbed in Eastern Block of Ordos Basin[J]. *Well Logging Technology*, 2014, 38(3): 304–308.
- [24] 刘卫国, 韩登宇, 苗文韬, 等. 利用地球物理测井数据计算新疆托克逊县白嘴山地区岩石力学参数的方法探讨[J]. *铀矿地质*, 2013, 29(5): 310–314.
- LIU Weiguo, HAN Dengyu, MIAO Wentao, et al. Discussion on the calculation of mechanical parameters of rocks with geophysical logging data in Baizuishan Region, Tuokexun, Xinjiang[J]. *Uranium Geology*, 2013, 29(5): 310–314.
- [25] 单钰铭, 刘维国. 地层条件下岩石动静力学参数的实验研究[J]. *成都理工学院学报*, 2000, 27(3): 249–254.
- SHAN Yuming, LIU Weiguo. Experimental study on dynamic and static mechanics parameters of rocks under formation conditions[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2000, 27(3): 249–254.
- [26] 蒋东峰. 基于损伤理论的演示脆性评价方法研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2016.
- JIANG Dongfeng. Research on brittleness evaluation of rock based on damage theory[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2016.
- [27] 李邵军, 匡智浩, 邱士利, 等. 岩石脆性评价方法研究进展及适应性探讨[J]. *工程地质学报*, 2022, 30(1): 59–70.
- LI Shaojun, KUANG Zhihao, QIU Shili, et al. Review of rock brittleness evaluation methods and discussion on their adaptabilities[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(1): 59–70.
- [28] 刘晓辉, 郑钰, 郝齐钧, 等. 基于特征应力的准静态三轴煤岩脆性特征分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(12): 2454–2465.
- LIU Xiaohui, ZHENG Yu, HAO Qijun, et al. Brittleness characteristics of quasi-static triaxial coal rock based on characteristic stress[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(12): 2454–2465.
- [29] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 475–499.
- [30] RICKMAN R, MULLEN M, PETRE E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization[C]//All shale plays are not clones of the Barnett shale. Denver: SPE Annual Technical Conference & Exhibition, 2008.
- [31] 熊德国, 赵忠明, 苏承东, 等. 饱水对煤系地层岩石力学性质影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(5): 998–1006.
- XIONG Deguo, ZHAO Zhongming, SU Chengdong, et al. Experimental study of effect of water-saturated state on mechanical properties of rock in coal measure strata[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(5): 998–1006.
- [32] ARASH D T, OLSON J E. How natural fractures could affect hydraulic-fracture geometry[J]. *SPE Journal*, 2013, 19(1): 161–171.
- [33] 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.
- [34] 向文鑫, 桑树勋, 吴章利, 等. 贵州省煤层气规划区块煤储层特征与有利区优选[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(3): 156–164.
- XIANG Wenxin, SANG Shuxun, WU Zhangli, et al. Characteristics of coal reservoirs and favorable areas classification and optimization of CBM planning blocks in Guizhou Province[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(3): 156–164.

(责任编辑 聂爱兰)