

## 煤与煤系气地质与勘查

## 深部煤岩储层地质力学影响机制及控制因素

## ——以鄂尔多斯盆地大吉区块为例

闫霞<sup>1,2</sup>, 熊先钺<sup>1,2</sup>, 徐凤银<sup>3,4</sup>, 喻岳钰<sup>1,2</sup>, 李曙光<sup>1,2</sup>, 王峰<sup>1,2</sup>, 刘敬寿<sup>5</sup>,  
冯延青<sup>1,2</sup>, 唐志潭<sup>5</sup>, 魏振吉<sup>1,2</sup>

(1. 中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司, 北京 100095; 2. 中石油煤层气有限责任公司, 北京 100028; 3. 成都理工大学 能源学院(页岩气现代产业学院), 四川 成都 610059; 4. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 四川 成都 610059; 5. 中国地质大学(武汉) 构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**深部煤层岩石力学特性及微构造、顶底板岩性组合、煤层厚度、夹矸厚度对其应力影响机制不清, 制约了差异化气藏工程设计、大规模压裂改造设计参数优化和单井产量的大幅提升。首先, 采用三轴抗压试验、巴西劈裂试验、三轴抗剪试验及阵列声波测井曲线, 探究静态岩石力学参数单井分布特征; 然后, 通过差应变试验方法明确研究区煤层、顶底板现今地应力大小; 最后, 基于力学试验结果, 构建三维地质力学模型并开展了不同条件下的应力模拟, 以获得不同微构造形态、岩性组合、煤岩厚度和夹矸厚度等因素对深部煤储层的应力影响机制。结果表明: ①基于岩石力学试验, 研究区深部煤岩样品的煤岩平均弹性模量为 7.19 GPa, 平均泊松比为 0.32, 平均抗张强度为 2.68 MPa, 平均垂向应力为 51.78 MPa, 平均最大水平主应力为 43.66 MPa, 平均最小水平主应力为 37.57 MPa。②数值模拟表明煤岩微构造、煤层厚度和顶底板岩性组合等对煤岩地应力均有较大影响, 在相同顶底板条件下, 煤层从正向微构造向负向微构造转变的过程中, 煤层最小水平主应力逐渐增大, 负向构造部位地应力大于正向和平缓微构造部位, 随着煤层与围岩力学性质差异性的增大, 煤层地应力呈减小趋势, 且减小幅度依次为负向构造>正向构造>平缓区; ③鄂尔多斯盆地深层 8 号煤的 6 种顶底板岩性组合中, 顶板灰岩-底板砂岩组合下的煤岩最小水平主应力最小, 顶板泥岩-底板泥岩组合下的煤岩最小水平主应力最大, 顶底板与煤层力学性质相差越大, 煤岩应力值越小; ④其他条件相同时, 随着煤层厚度的增大, 煤岩水平主应力、水平主应力差总体呈增加趋势, 厚度变化对厚度小于 4 m 的薄煤层的应力影响更为敏感, 当煤层厚度大于 4~6 m 后, 水平主应力、水平主应力差增幅趋于平缓, 故建议水平井开发的深部煤层厚度下限为 4 m; 煤层厚度从 2 m 增大至 10 m, 最小、最大水平主应力增幅分别为 12.9% 和 23.3%, 水平主应力差增幅达 98.3%; ⑤夹矸厚度从 0.5 m 增至 7 m 过程中, 夹矸所受水平主应力及应力差下降幅度明显, 降幅约为 34.1%, 当夹矸厚度大于 3 m 时, 夹矸水平主应力、水平主应力差降幅趋于平缓。为深部煤层气开发方案优化设计、工程差异化设计及单井产量差异原因分析等方面, 提供了重要的试验和理论指导依据。

**关键词:**深部煤层气; 岩石力学; 地质力学; 岩性组合; 微构造; 夹矸; 地应力; 鄂尔多斯盆地

**中图分类号:** TE122.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)05-2550-17

收稿日期: 2024-11-24 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2025.0037

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42272195); 中国石油天然气股份有限公司攻关性应用性科技资助项目(2023ZZ18, 2023ZZ18YJ04)

作者简介: 闫霞(1984—), 女, 山东东营人, 高级工程师, 博士。E-mail: yanxia\_cbm@petrochina.com.cn

引用格式: 闫霞, 熊先钺, 徐凤银, 等. 深部煤岩储层地质力学影响机制及控制因素——以鄂尔多斯盆地大吉区块为例[J]. 煤炭学报, 2025, 50(5): 2550-2566.

YAN Xia, XIONG Xianyue, XU Fengyin, et al. Deep coal geomechanical influence mechanism and its control factors of Daji Block in Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(5): 2550-2566.



移动阅读

## Deep coal geomechanical influence mechanism and its control factors of Daji Block in Ordos Basin

YAN Xia<sup>1,2</sup>, XIONG Xianye<sup>1,2</sup>, XU Fengyin<sup>3,4</sup>, YU Yueyu<sup>1,2</sup>, LI Shuguang<sup>1,2</sup>, WANG Feng<sup>1,2</sup>, LIU Jingshou<sup>5</sup>,  
FENG Yanqing<sup>1,2</sup>, TANG Zhitan<sup>5</sup>, WEI Zhenji<sup>1,2</sup>

(1. China United Coalbed Methane National Engineering Research Center Co., Ltd., Beijing 100095, China; 2. PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100028, China; 3. College of Energy (College of Modern Shale Gas Industry), Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 4. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 5. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Influence mechanism of rock mechanical properties and microstructure, the lithological combination of roof/floor, and coal thickness and gangue thickness on their stress of deep coal seam are unclear, which restricts differentiated gas reservoir engineering design, optimization of parameters for large-scale fracturing transformation design, and significant increase in single well production. The single well distribution characteristics of static rock mechanics parameters were determined using triaxial compression tests, Brazilian splitting tests, triaxial shear tests, and array acoustic logging curves. The current stress levels of coal seams, roof and floor in the study area were determined through differential strain experiments. A three-dimensional geomechanical model was constructed based on the results of mechanical experiments, and stress simulations were carried out under different microstructural shapes, lithological combinations, coal rock thickness, and gangue thickness conditions. The results show that: ① The average values for the Young's modulus, Poisson's ratio, tensile strength of deep coal are 7.19 GPa, 0.32, and 2.68 GPa respectively, and the average values for the vertical, primary minimum and maximum stresses are 51.78, 43.66, and 37.57 MPa respectively. ② Numerical simulation shows that coal microstructure, seam thickness and roof and floor lithology combination have great influence on coal rock in-situ stress. Under the same roof and floor conditions, the minimum horizontal principal stress of coal seam increases gradually during the transition from positive microstructure to negative microstructure, the minimum horizontal principal stress of the coal seam gradually increases and the stress in the negative structural area is greater than that in the positive and gentle structural areas. As the difference in mechanical properties between the coal seam and the surrounding rock increases, the stress in the coal seam shows a decreasing trend, with the magnitude of the decrease being negative structural > positive structural > gentle area. ③ Six combinations of roof/floor rock types of deep 8th coal seam in the Ordos Basin were classified, among which the minimum horizontal principal stress of coal rock under the combination of roof limestone and floor sandstone was the smallest, and under the combination of roof mudstone and floor mudstone was the largest. The greater the difference in mechanical properties between the roof and floor and the coal seam, the smaller the coal rock stress value. ④ When other conditions are the same, as the thickness of the coal seam increases, the horizontal principal stress and horizontal principal stress difference of the coal rock generally show an increasing trend. The influence of thickness changes on the stress of thin coal seams is more sensitive when the coal seam thickness is less than 4 m. After the thickness of the coal seam is greater than 4-6 m, the increase in horizontal principal stress and horizontal principal stress difference slows down. When the thickness of the coal seam increases from 2 m to 10 m, the minimum and maximum horizontal principal stress increases by 12.9% and 23.3% respectively, and the increase in horizontal principal stress difference reaches 98.3%. ⑤ As the thickness of the gangue increases from 0.5 m to 7 m, the horizontal principal stress and stress difference of the gangue decrease significantly by 34.1%. When the thickness of the gangue is greater than 3 m, the decrease in horizontal principal stress and stress difference of the gangue slows down. The above new achievements and insights provide important experimental and theoretical guidance for the division of deep coalbed methane development plan optimization, engineering differentiation design, and analysis of production differences, etc.

**Key words:** deep coalbed methane; rock mechanical; geomechanics; lithological combination; microstructure; rock gangue; stress; Ordos Basin

## 0 引言

近年来,深部煤层气在大宁—吉县<sup>[1-3]</sup>、纳林<sup>[4]</sup>、米脂北、神府<sup>[5]</sup>和石楼西等地区取得勘探开发进展<sup>[6]</sup>。

2021年,吉深6-7平01井作为国内第1口大规模压裂水平井,其煤层气产量获得日产 $10.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 新突破,其压裂技术突破了采深超过2 000 m以上的煤层压裂技术瓶颈,推动了我国煤层气的开发从中浅层向

深部的延伸<sup>[6-8]</sup>。特别地,中石油煤层气有限责任公司累计探明深部煤层气储量  $3\ 063\times 10^8\text{ m}^3$ , 2024 年深部煤层气产量 19.6 亿  $\text{m}^3$ , 深部煤层气日产气量超  $700\times 10^4\text{ m}^3$ , 该公司率先建成了我国首个百万吨油气当量的深部煤层气田,成为目前国内探明储量规模最大、生产规模最大的深部煤层气田。目前,我国深部煤层气井普遍获得高产,且展示了良好的勘探开发前景,进而引发了国内深部煤层气的勘探开发和科研攻关热潮<sup>[4]</sup>。

尽管深部煤层气勘探开发已取得重大突破,但其开发机理研究与理论认识尚滞后于生产实践<sup>[9]</sup>,严重制约下步生产试验及技术的攻关方向。相比中浅煤层,深部煤层埋深大、应力高,各向异性更强,采用均匀设计难以“极限”动用资源,在相同井距、相同规模情况下,不同压裂施工井段对邻井的压力波及状况不同,从而导致其开发效果亦有差异。前期,笔者团队利用示踪剂监测技术开展了为期连续半年以上的动态监测,发现深部煤层气水平井单井各段累产贡献差异可达 11.5 倍<sup>[8]</sup>,约 37.5% 的段数贡献了单井 59.2% 的累计产气量,该研究揭示了水平井各段产量主控因素与钻遇“黑金靶体”甜点情况、压裂改造规模明显相关;特别在钻遇夹矸或顶底板部位的井段时,增加钻遇夹矸或顶底板部位井段的压裂改造规模,但其累产贡献率增幅仍不明显,分析认为岩性变化较大的交界面(即弱面)是压裂液优势通道,原拟设计用于改造煤层的压裂液,大部分沿着煤层与夹矸之间的弱面滤失,进而影响改造效果。闫霞等<sup>[3]</sup>通过精细刻画深部单斜构造上的 5 类微构造单元,分析不同构造部位井的生产特征、地质特征及工程参数的相关性,发现微构造对深部煤层气高产甜点具有重要贡献,但不同微构造形态对储层应力影响的定量认识仍待进一步研究。目前,确定深部煤层气开发方案技术中的部分关键指标仍缺乏理论指导,鄂尔多斯盆地煤层存在着多种顶底板岩性组合,为了形成具有针对性和差异化的压裂改造技术,不同的岩性组合对煤岩力学性质变化特性的影响仍待深入研究;水平井钻井过程难免会钻遇夹矸或顶底板,但夹矸厚度对改造效果的影响尚不清楚;采用水平井部署方式,煤层厚度、夹矸厚度等参数的技术界限尚未明确。以上问题既是当前深部煤层气开发生产面临的迫切问题,也是制约深层煤层气开发方案设计亟待解决的问题。

目前,诸多学者对煤层岩石力学特征开展了大量的试验研究,但现有研究多是基于中浅层煤层<sup>[10-11]</sup>和深部煤矿(煤矿深度多为 1 000 m 以内)<sup>[12-14]</sup>,而埋深大于 2 000 m 的深部煤岩力学性质的研究鲜有报道。

已有研究表明<sup>[15-20]</sup>:微构造中的裂隙、褶皱会影响岩石的力学性质及应力分布特征;不同顶底板岩性组合下的煤层力学性质和煤矿开采稳定性存在差异;夹矸发育会降低煤层的抗压强度和弹性模量,且夹矸厚度对煤层力学性质和开采稳定性也有着重要影响。蔡益栋等<sup>[15]</sup>、常海明等<sup>[16]</sup>开展了沁水盆地武乡区块埋深大于 1 300 m 以上的煤系泥岩、煤和砂岩的单一及其组合的力学特性和破裂机制的研究,揭示了煤-岩组合体中不同厚度比、不同岩性类别等对组合体抗压强度、弹性模量、声发射信号特征和破裂特征的影响。黄琪嵩等<sup>[17]</sup>分析软硬互层岩体构成的采场底板的应力分布及破坏特征,结果表明由于硬岩的强度较高,其内部产生了相对软岩更大的水平应力。刘齐等<sup>[18]</sup>利用数值模拟法探究了不同顶底板岩性组合、煤层厚度对煤矿生产中的应力场分布的影响,研究表明强度较高的顶底板由于其更能抵抗剪切破坏变形而出现应力集中,降低了煤层内部及其附近区域的拉张破坏;此外,煤层厚度越大,煤层中应力集中程度越低,且应力主要集中于煤层顶底板。周涛等<sup>[19]</sup>通过数值模拟法,研究不同厚度和硬度的夹矸对煤矿工作面超前支承压力分布的影响,结果表明夹矸直接影响了煤矿采场底板的应力集中程度。唐志潭等<sup>[20]</sup>分析深部煤层微构造的类型、产状对煤层应力的控制机理,认为正向微构造下的煤层应力与泊松比呈正相关,与弹性模量呈负相关,而负向微构造则相反。

鉴于深部煤层微构造、煤层顶底板不同岩性组合、煤岩厚度和夹矸厚度等因素对应力的影响机制尚不明确,关键参数的技术界限亟待探索,笔者首先基于深层煤岩地质力学试验,探究深层煤岩及其顶底板岩石的弹性、塑性和强度等力学特性,再结合阵列声波测井资料,实现岩石弹性参数的动静转换,基于此建立地质力学模型并进行单因素规律模拟,明确在不同微构造形态、不同顶底板岩性组合、不同煤岩厚度、不同夹矸厚度等情况下各因素对应力变化特征的影响机制,为评价深部煤岩及顶底板裂缝参数、地应力场提供基础力学试验参数依据,为探究深层煤层气单井产量差异原因并指导地质工程一体化精益设计探索了新思路,同时也为建立煤层气压裂水平井非均匀裂缝参数一体化优化模型及渗流场-应力场耦合模拟模型提供重要支撑,以期指导开发方案差异化部署及针对性的工程技术对策。

## 1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地划分为 6 个一级构造单元,包括西缘逆冲带、天环坳陷、伊盟隆起、伊陕斜坡、渭北隆起



带和晋西挠褶带(图1)。盆地发育多套煤层,其中主要含煤地层为二叠系山西组和太原组,又以山西组5号煤层和太原组8号煤层为主采煤层,煤层分布稳定且连续。其中8号煤形成于瀉湖-潮坪沉积环境,整体厚度大、分布稳定,平均厚度为6~8 m,煤层连续性好,总体呈现东厚西薄、东浅西深的分布特性,地质构造相对简单,断层不发育。8号煤层纵向上可分为8-1号、8-2号、8-3号3套煤层小层,各套煤层中含有不稳定的夹矸分布,夹矸厚度主体介于0.5~7 m。煤层结构分布特性呈现出盆地的北东部以整装型煤层为主(占比50%~70%),盆地中部以Ⅱ分型煤层为主(整装型占60%、Ⅱ分型占38%)。盆地8号煤的底板以泥岩为主、部分发育砂岩;储盖组合可划分为煤灰、煤泥、煤砂3种类型,主体为煤泥和煤砂,其中,盆地的北东部以煤砂为主,北西部以煤砂和煤泥为主,中部和东部以煤灰为主。从储盖组合封盖性和保存条件而言,由好及差分别为煤泥、煤灰和煤砂。一般而言,煤泥组合气测峰值可达90%以上,煤灰组合气测峰值可达80%以上,而煤砂组合气测峰值30%以下。从夹矸分布来看,盆地东部的夹矸局部发育,盆地中部连片集中发育,西部大面积广泛发育。

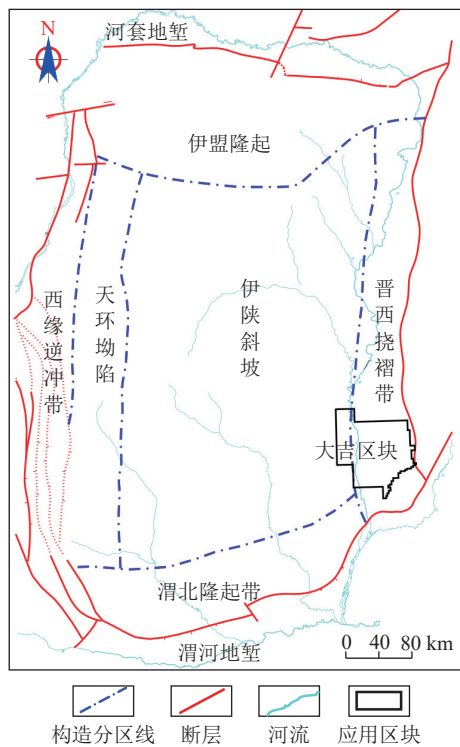


图1 鄂尔多斯盆地位置及区块

Fig.1 Location and application block of Ordos Basin

为了获取深部煤岩储层及围岩、夹矸等力学参数,文中开展岩石力学试验所用的煤岩样主要来自于大吉区块的钻遇深部煤岩及其围岩的探井及评价井取

心岩样,基于此,开展不同因素条件下的应力数值模拟,进而研究盆地不同储盖类型组合、不同煤层厚度及夹矸厚度等条件下的深部煤岩应力影响机制。

## 2 岩石力学参数试验及单井分布特征

岩石力学参数主要包括弹性模量、泊松比、抗张强度和内摩擦角等参数,是衔接储层地质参数与地质力学参数<sup>[21-22]</sup>的桥梁,是裂缝成因机制分析<sup>[23-24]</sup>、储层应力场模拟<sup>[25]</sup>及工程甜点评价<sup>[26]</sup>的关键。与深层煤岩密切相关的岩石力学参数包括:弹性参数(弹性模量、泊松比),强度参数(抗张强度、内摩擦角)。岩石力学试验测定法和地球物理测井资料解释法是2种常用的岩石力学参数测定方法<sup>[27-28]</sup>,但二者存在一定差异,通常需将动态参数转换为更接近地下原位应力条件下的静态参数,进而评价储层的岩石力学性质。

### 2.1 深部煤岩三轴抗压试验

利用鄂尔多斯盆地大吉区块阵列声波测井资料,计算得到该研究区深部煤岩储层的水平最大主应力梯度为0.026 8~0.033 5 MPa/m,水平最小主应力梯度为0.014 0~0.022 1 MPa/m。为了明确地下岩石原位应力环境,设计了岩石力学试验方案,采用常规三轴压缩试验,对岩样横向施加围压,逐渐增大轴向载荷,通过传感器测量岩样的轴向、横向应变及轴向载荷,直至岩样破坏,绘制应力-应变曲线,基于式(1)、式(2)计算静态弹性模量、泊松比:

$$E_s = \frac{\Delta\sigma_a}{\Delta\epsilon_a} \quad (1)$$

$$\mu_s = \frac{\Delta\epsilon_r}{\Delta\epsilon_a} \quad (2)$$

式中:  $E_s$ 为静态弹性模量, GPa;  $\Delta\sigma_a$ 为轴向应力增量, MPa;  $\Delta\epsilon_a$ 为轴向应变增量, mm;  $\mu_s$ 为静态泊松比;  $\Delta\epsilon_r$ 为径向应变增量, mm。

试验装置采用RTR-2000高压岩石三轴动态测试系统,系统配置有高精度压力、温度和声波等传感器,可提供最大轴压2 000 kN,最大围压140 MPa,最大孔压140 MPa,最高温度200℃,流体驱替速率0.001~2.0 mL/min,测试条件的改变和数据采集可完全通过计算机进行控制。

对深层煤岩岩心样品开展了同围压三轴抗压试验,利用测井得到的地应力梯度,模拟岩心地下围压,岩心样品来自DJ9-3X6井,共12块,取心深度介于2 257.65~2 261.76 m。依据研究区地温梯度设计试验温度为55℃。为减少样品制备过程对煤岩力学性质的影响,采用线切割方式垂直于岩心轴线取样,加

工成 25 mm×50 mm 的圆柱形试样, 共计 8 件, 三轴抗压试验方案及试验结果见表 1, 其中围压均为 45 MPa。煤岩泊松比平均为 0.32, 弹性模量平均为 7.19 GPa。煤岩泊松比一般小于 0.4, 其中个别值偏大可能与试验误差有关。

表 1 同围压三轴抗压试验方案及试验结果  
Table 1 Experimental scheme and results of triaxial compression under the same confining pressure

编号	深度/m	峰值应力/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
26-1	2 257.65	42.5	1.517 2	0.405
10-1	2 258.26	50.8	9.066 4	0.398
19-2	2 258.93	85.0	4.963 9	0.440
24-2	2 259.56	35.1	3.003 7	0.481
14-1	2 259.77	55.7	10.894 4	0.365
14-3	2 259.77	71.7	5.938 7	0.363
16-1	2 259.9	75.6	5.548 7	0.115
22-2	2 261.76	46.7	7.576 6	0.145

2.2 深部煤岩、顶底板岩石三轴抗剪试验

同围压力学试验获取的岩石弹性参数主要用来进行地应力场模拟, 若满足有利压裂区预测、储层地质工程一体化等开发应用的需求, 则还需要获取抗张强度、内摩擦角及黏聚力等强度参数。深层煤岩抗张强度主要通过巴西劈裂试验获得, 在数值上等于破坏时的最大拉应力<sup>[29]</sup>。此次试验装置采用 TAW-1000 微机电液伺服控制岩石三轴应力试验机, 将加工好的短圆柱状岩样置于压力机的承压板上, 沿着圆柱体直径方向施加集中载荷, 岩样受力后会沿着受力的直径方向劈开。根据弹性力学理论, 沿着施加集中力的直径方向产生近似均匀分布的水平张应力, 测量岩样破坏时的最大压力, 利用式 (3) 即可计算岩样的抗张强度:

$$\sigma_t = \frac{2p_{\max}}{\pi D_L} \tag{3}$$

式中:  $\sigma_t$  为抗张强度, MPa;  $p_{\max}$  为岩石破裂时的最大载荷, N;  $D_L$  为岩样直径, mm。

针对深层煤层及顶底板岩心样品开展了巴西劈裂试验。根据现有研究认识, 8-1 号、8-2 号煤层镜质组含量高 (> 70%)、全烃气测值高, 是研究区主要的开发目的小层。煤层岩心样品来自 DJ8-1-3H 井、DJ3-4 井、DJ17-1X5 井、DJ9-3X6 井 8-1 号和 8-2 号煤层小层, 共 10 块, 埋深介于 205 3.24~225 8.93 m。由于大吉区块地温梯度约为 25~30 °C/km, 故根据埋深不同设计试验温度为 50~55 °C, 且由于部分岩样的非

均质性, 在采用线切割方式取样的同时利用水钻的方式对部分样品进行垂直于岩心轴线取样, 最后统一加工成 25 mm×50 mm 的圆柱体试样, 共计 8 件, 巴西劈裂试验方案及试验结果如表 2 和图 2 所示: 煤岩储层抗张强度 1.9 MPa, 破坏轴压强度为 3.15 kN; 抛开个别试样, 煤岩储层破坏所需轴压强度大致在 2 kN 左右。顶底板岩心的巴西劈裂试验方案及试验结果见表 3, 顶底板为泥岩时的抗张强度 7.25 MPa, 破坏载荷约为 11.12 kN; 顶底板为砂岩时的抗张强度为 12.45 MPa, 顶底板稳定性强, 破坏载荷约为 15.45 kN。试验结果表明, 针对不同岩性的抗张强度而言, 煤岩最小, 最易于水力压裂, 其次分别为泥岩、砂岩。

三轴抗剪试验是对近似相同的样品做不同围压的三轴抗压试验, 通过对 DJ17-1X5、DJP22-1V 井等

表 2 煤岩巴西劈裂试验方案及试验结果  
Table 2 Brazilian split test plan and experimental results

编号	井号	深度/m	直径/mm	破碎力/kN	抗张强度/MPa
27-5	DJ8-1-3H	2 073.63	25.20	2.1	1.3
25-1	DJ3-4	2 120.84	25.10	2.3	1.4
17-1	DJ17-1X5	2 051.84	25.21	3.2	1.9
15-1	DJ8-1-3H	2 073.73	25.17	1.9	1.2
19-1	DJ9-3X6	2 258.93	25.16	2.3	1.4
21-2	DJ9-3X6	2 257.54	25.09	3.4	2
22-1	DJ9-3X6	2 261.76	25.45	6.2	3.7
12-1	DJ17-1X5	2 053.24	25.52	3.8	2.3



图 2 煤岩破裂示意  
Fig.2 Diagram of coal fractures

表3 顶底板巴西劈裂试验方案及试验结果  
Table 3 Brazilian splitting experiment scheme and experimental results of top and bottom plate

编号	井号	岩性	深度/m	直径/mm	破碎力/kN	抗张强度/MPa
1-0	DJ3-4	泥岩	217 3.88	25.08	10.35	6.56
2-0	DJ15	泥岩	212 8.89	25.12	13.97	8.85
3-0	DJ38	砂岩	196 8.80	25.13	17.45	11.08
4-0	DJ9-3X6	泥岩	225 6.08	25.07	14.08	8.94
9-0	DJ15	泥岩	212 9.25	24.21	7.11	3.72
10-0	DJP20	泥岩	227 6.11	25.04	12.28	7.80
11-0	DJ38	砂岩	196 8.59	24.23	13.44	13.82
12-0	DJ3-4	泥岩	217 4.07	24.23	8.40	8.61
13-0	DJ17-1X5	泥岩	205 9.20	25.45	9.75	7.37
14-0	DJ17-1X5	泥岩	205 0.74	25.52	13.01	6.13

共计6块岩心,埋深介于2 050.74~2 136.16 m,设计试验温度为50~53℃,采用线切割方式垂直于岩心轴线取样,并将其加工成25 mm×50 mm的圆柱形试样,共计6块。采用等侧压三轴压缩试验( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ),可求得岩石不同压力条件下的力学参数和莫尔圆包络线,进而求得岩石的内摩擦角和黏聚力<sup>[30]</sup>。模拟地层条件,根据岩性及深度,加载不同围压。试验方案及试验结果见表4。由表4可得,DJ17-1X5井泥岩样品的平均泊松比为0.22,平均弹性模量为30.43 GPa;DJP22-1V井泥岩样品的平均泊松比为0.25,平均弹性模量为26.35 GPa;泥岩黏聚力平均为8.98 MPa,内摩擦角平均为38.21°。

表4 顶底板泥岩三轴抗剪试验方案及试验结果  
Table 4 Results of triaxial compressive test of rocks for shear analysis

编号	井号	深度/m	围压/MPa	泊松比	弹性模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
9-1	DJ17-1X5	2 059.2	30	0.183	18.434 4	12.11	22.14
9-2	DJ17-1X5	2 059.2	40	0.266	22.243 3		
5-3	DJP22-1V	2 136.16	36	0.143	31.321 4	8.92	41.60
5-4	DJP22-1V	2 136.26	42	0.396	14.991 5		
5-5	DJP22-1V	2 136.36	48	0.219	32.756 3		
23-1	DJ17-1X5	2 050.74	31	0.148	34.754 5	5.92	50.99
23-2	DJ17-1X5	2 050.74	41	0.199	41.058 3		
23-3	DJ17-1X5	2 050.74	51	0.328	35.675 6		

### 2.3 动态岩石力学参数及其动静转换

岩石力学试验时,直接对地下岩心进行取样并开展测试,所测量的岩石力学参数具有较高的准确度和

可信度,但深部煤储层取心过程较为困难,岩样较少,且岩石力学试验测定法测量难度大、花费高,因此难以在单井全井尺度或区域面上尺度开展地应力分析。然而,测井资料相对容易获取,且可以获得沿井筒一维岩石力学参数分布,具有较好的垂向连续性,利用阵列声波资料,通过纵、横波时差、密度以及泥质含量数据,计算岩石弹性参数和岩石强度参数<sup>[31-33]</sup>,具体计算过程如下:

$$E_d = 10^{-3} \rho V_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \quad (4)$$

$$\mu_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (5)$$

式中:  $E_d$  为动态弹性模量, GPa;  $\rho$  为岩石密度,  $\text{g/cm}^3$ ;  $V_p$  为纵波速度, m/s;  $V_s$  为横波速度, m/s;  $\mu_d$  为动态泊松比。

基于以上模型,首先,利用测井资料计算得到深部煤储层动态岩石力学参数,再标定测井计算结果,交汇分析动态岩石力学参数与静态岩石力学参数,建立动态-静态参数之间的关系,完成岩石力学参数的动静转换。深部煤岩和泥岩的岩石力学参数交汇图如图3所示,由图3可知:动静态岩石力学参数之间转换系数相关性较高,呈正相关的线性关系,进一步得到岩石力学参数动静转换公式如下:

$$E_{s\_coal} = 0.310 6 E_{d\_coal} + 1.763 0 \quad (6)$$

$$\mu_{s\_coal} = 0.822 5 \mu_{d\_coal} + 0.004 5 \quad (7)$$

$$E_{s\_mud} = 1.052 3 E_{d\_mud} - 18.925 \quad (8)$$

$$\mu_{s\_mud} = 10.838 \mu_{d\_mud} - 2.671 6 \quad (9)$$

式中:  $E_s$  为静态弹性模量, GPa;  $E_d$  为动态弹性模量, GPa;  $\mu_s$  为静态泊松比;  $\mu_d$  为动态泊松比。其中下标 coal、mud 分别代表煤岩和泥岩。

动态岩石力学参数与静态岩石力学参数的校正关系确定后,即可将测井计算剖面校正为三轴静态参数剖面,进而得到关键井点连续岩石力学参数剖面。以DJ3-4井为例(图4),从岩石弹性参数来看,深部煤储层煤岩弹性模量介于3.16~6.23 GPa,泊松比介于0.246~0.382,垂向上随着埋深的增加,弹性模量呈逐渐增大的趋势,而泊松比则随着深度的增加逐渐减小;埋深约2 000 m的深部煤系地层水平最大主应力介于60~70 MPa,水平最小主应力介于40~55 MPa。

### 2.4 岩石力学试验数据的分析

由三轴抗压试验可知:研究区深部8号煤岩泊松



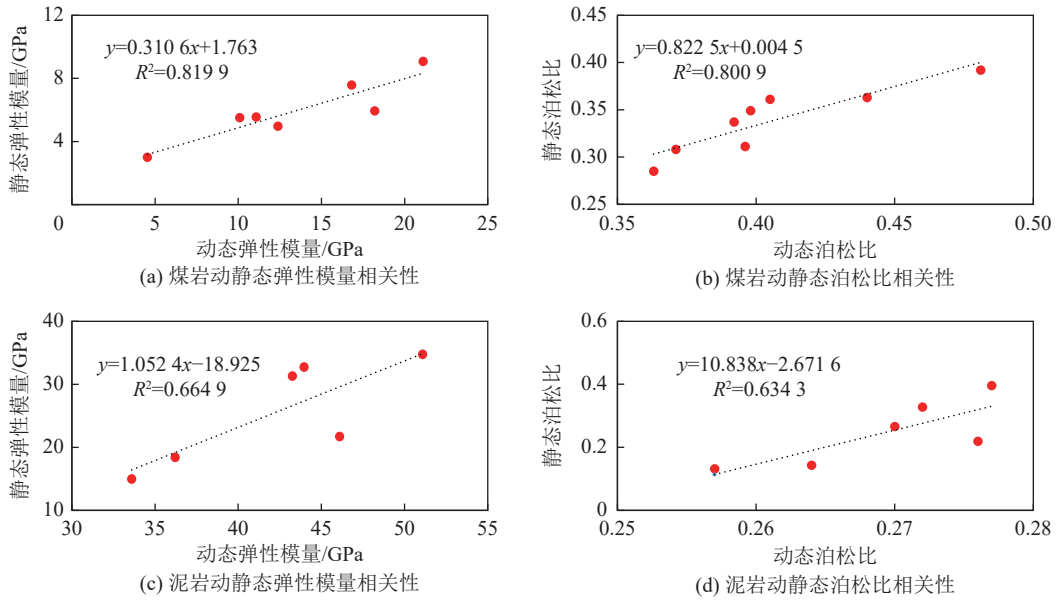


图3 深部煤岩和泥岩的岩石力学参数交汇图

Fig.3 Intersection diagram of rock mechanics parameters

比平均为 0.32, 弹性模量平均为 7.19 GPa; 由巴西劈裂试验与三轴抗剪试验可知: 煤岩抗张强度平均为 2.68 MPa, 泥岩泊松比平均为 0.193, 弹性模量平均为 30.09 GPa, 内摩擦角平均为 38.2°。顶底板岩石抗拉强度等参数通过试验获取后, 可用于地质力学建模与三维应力场模拟。

根据煤岩与泥岩的动静态转换模型, 可知煤岩动静态力学性质拟合度好, 弹性模量相关性达 0.82, 泊松比拟合相关性达 0.80; 泥岩的弹性模量拟合相关性 0.66, 泊松比拟合相关性达 0.63, 符合一般规律。

通过变围压岩石力学试验, 明确了不同岩性的岩石静态力学参数特征, 建立了煤岩与泥岩的动静态岩石力学参数转换模型, 为储层地质力学的非均质建模奠定基础。

### 3 差应变试验地层有效主应力分析

深部地层受到地应力的作用, 煤岩处于压缩状态, 含有的天然裂隙也处于闭合状态; 将岩心取至地面后, 由于地应力的解除将引起岩心膨胀, 从而产生许多新的微裂隙。这些裂缝张开的程度和产生的密度和方向与岩心所处地应力场有关, 是地下地应力场的反映。

按照 GB/T 23561.12—2024《煤和岩石物理力学性质测定方法 第 12 部分: 煤的坚固性系数测定方法》<sup>[34]</sup>, 参考国际岩石力学学会《岩石力学试验建议方法》<sup>[35]</sup>等, 为保证试验的可靠性, 选取 DJ38、DJ9-3X6、DJ3-4、DJ17-1X5、DJ15、DJP20 等 6 口井共 9 块岩心, 埋深介于 196 8.59~227 6.11 m, 对应试验温度为 48~

55 ℃。将煤岩心加工制成边长为 20~30 mm 的正方体, 在正方体的 3 个相互垂直的面上贴应变片, 并依次对每个应变片进行编号, 一共贴上 3 组应变片。岩样用聚四氟乙烯制成的塑料套套住, 加热收缩使塑料套略贴在岩样上。之后将调制好的硅胶灌入塑料套内, 硅胶固结后即可进行差应变试验。

在差应变试验中, 需要给岩样加载相同方向的静水压力, 并同时采集 9 个方向的应变变化, 其中加载装置仍使用 TAW-1000 三轴伺服试验系统, 数据采集使用便贴式应变片和信号采集系统。正应变和剪应变的计算方法如下:

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = (\varepsilon_1 + \varepsilon_9) / 2 \\ \varepsilon_{yy} = (\varepsilon_6 + \varepsilon_7) / 2 \\ \varepsilon_{zz} = (\varepsilon_3 + \varepsilon_4) / 2 \\ \varepsilon_{xy} = \varepsilon_8 - (\varepsilon_7 + \varepsilon_9) / 2 \\ \varepsilon_{yz} = \varepsilon_5 - (\varepsilon_4 + \varepsilon_6) / 2 \\ \varepsilon_{zx} = \varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) / 2 \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_9$  为岩样上相邻的、相互正交的 3 个面上 9 个方向的应变;  $\varepsilon_{xx} \sim \varepsilon_{zz}$  为正应变和剪应变。

根据式 (11), 可进一步求取 3 个方向的主应变。

$$\varepsilon_{ii}^3 + A\varepsilon_{ii}^2 + B\varepsilon_{ii} + C = 0 \quad (11)$$

式 (11) 的 3 个根  $\varepsilon_{11}$ 、 $\varepsilon_{22}$ 、 $\varepsilon_{33}$  即为岩样受到的三向主应变。其中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的计算式如下:

$$\begin{cases} A = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \\ B = \varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yy}\varepsilon_{zz} + \varepsilon_{zz}\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{xy}^2 - \varepsilon_{yz}^2 - \varepsilon_{zx}^2 \\ C = \varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy}\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx}\varepsilon_{yz}^2 - \varepsilon_{yy}\varepsilon_{zx}^2 - \varepsilon_{zz}\varepsilon_{xy}^2 + 2\varepsilon_{xy}\varepsilon_{yz}\varepsilon_{zx} \end{cases} \quad (12)$$

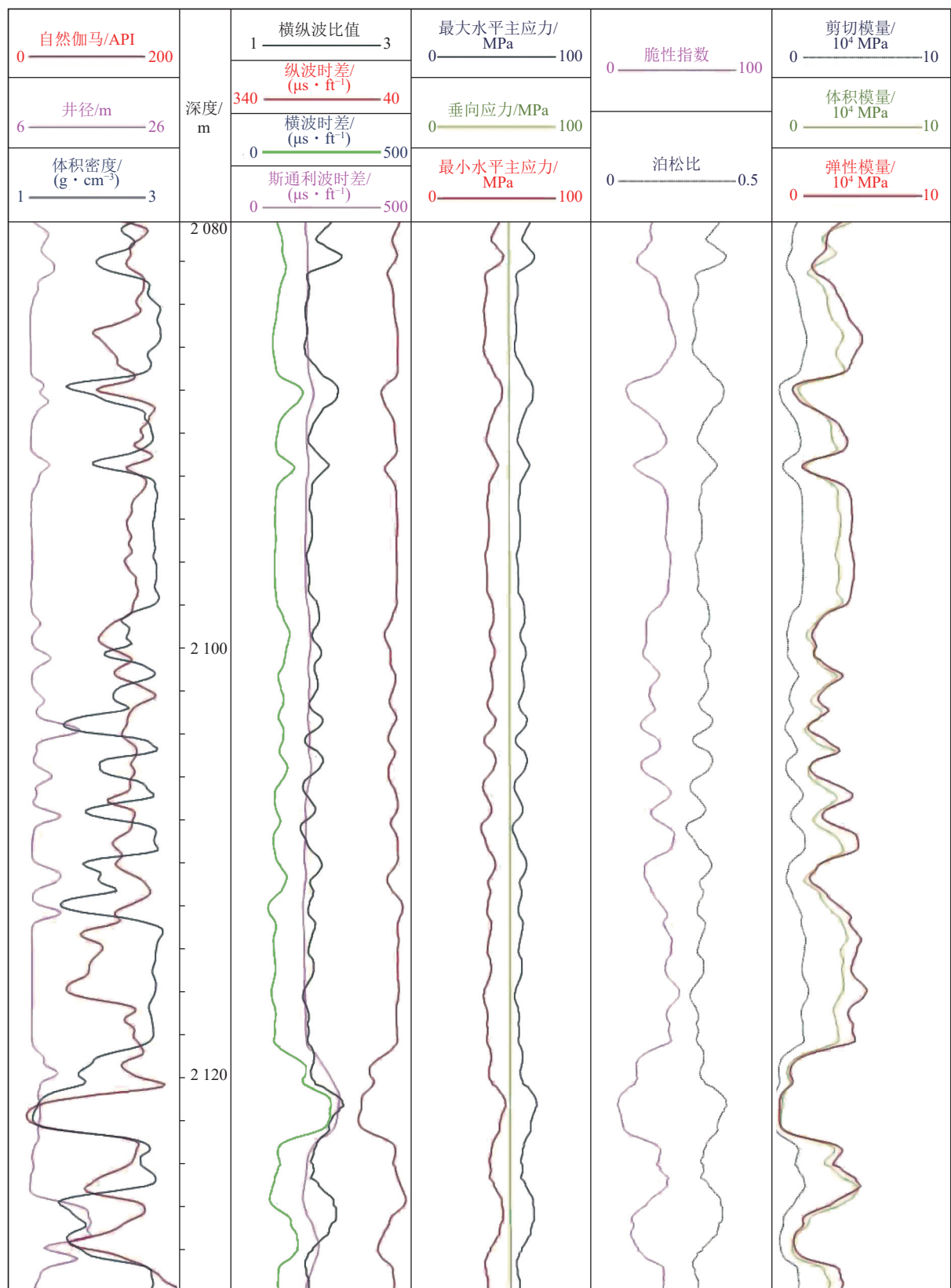


图 4 深部煤层气 DJ3-4 井静态岩石力学参数计算成果

Fig.4 Calculation results of static rock mechanical parameters of deep CBM Well DJ 3-4

根据下式,可求取 3 个主应力,即

$$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = [\mu(\varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) + (1 - \mu)\varepsilon_{11}] : [\mu(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) + (1 - \mu)\varepsilon_{33}] : [\mu(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{33}) + (1 - \mu)\varepsilon_{22}] \quad (13)$$

式中:  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  为三向主应力, MPa;  $\mu$  为泊松比。

对于同一组试样,在特定的围压条件下进行差应变试验,通过测量静水压力加载过程中立方体岩心 3



个正交方向上的应变变化,确定岩心在地下状态下受到的上覆岩层压力、水平最大主应力和水平最小主应力。

根据差应变试验结果(表 5),可知研究区煤岩、泥岩、砂岩样品的地应力范围:①煤岩样品的垂向应力平均为 51.78 MPa,最大水平主应力为 43.66 MPa,最小水平主应力为 37.57 MPa;②泥岩样品的垂向应力

值平均为 51.7 MPa,比最大水平主应力值(平均 44.6 MPa)高 7.1 MPa;最大水平主应力比最小水平主应力(38.2 MPa)大 6.4 MPa,③砂岩样品的垂向地应力值平均为 45.18 MPa(44.88~45.48 MPa),比最大水平主应力值 38.09 MPa(37.80~38.39 MPa)大 7.09 MPa;最大水平主应力比最小水平主应力 32.18 MPa(31.30~33.07 MPa)大 5.91 MPa。

表 5 深部煤储层及顶底板不同岩性的差应变试验测试结果  
Table 5 Differential strain test results for different lithology of deep coal reservoir

井号	岩性	深度/m	垂向应力/ MPa	最大水平主 应力/MPa	最小水平主 应力/MPa	垂向应力梯度/ (MPa·m <sup>-1</sup> )	最大水平主应力 梯度/(MPa·m <sup>-1</sup> )	最小水平主应力 梯度/(MPa·m <sup>-1</sup> )
DJ9-3X6	泥岩	2 256.08	57.30	47.60	38.58	0.025 4	0.02 11	0.017 1
DJ9-3X6	煤岩	2 259.98	51.53	44.30	37.52	0.022 8	0.019 6	0.016 6
DJ3-4	泥岩	2 174.07	52.18	45.00	39.79	0.024 0	0.020 7	0.018 3
DJ17-1X5	泥岩	2 050.74	48.40	41.22	37.32	0.023 6	0.020 1	0.0 82
DJ17-1X5	煤岩	2 052.95	52.04	43.03	37.02	0.023 1	0.019 1	0.016 7
DJ17-1X5	泥岩	2 059.20	49.21	40.36	36.45	0.023 9	0.019 6	0.017 7
DJ15	泥岩	2 129.25	49.82	46.42	37.05	0.023 4	0.021 8	0.017 4
DJP20	泥岩	2 276.11	53.49	47.12	40.29	0.023 5	0.020 7	0.017 7
DJ38	砂岩	1 968.59	44.88	38.39	33.07	0.022 8	0.019 5	0.016 8
DJ38	砂岩	1 968.69	45.48	37.80	31.30	0.023 1	0.019 2	0.015 9

以 DJ9-3X6 井为例,根据该井停泵压降曲线解释的最大水平主应力为 44.93 MPa、最小水平主应力为 39.17 MPa,根据密度曲线累计计算的煤岩垂向应力为 49 MPa,与该井 8 号煤样品差应变测试结果(表 5)基本吻合,对试验数据的可靠性进一步验证。

4 微构造、顶底板、泥岩夹矸对深部煤岩应力的影响机制

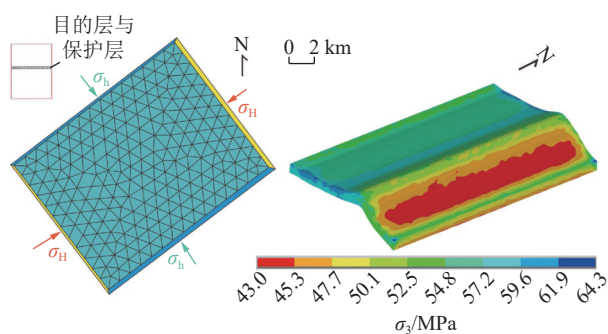
基于力学物理模拟试验获得的力学参数和测井数据,开展单因素对煤岩应力影响的数值模拟研究。由于深部煤岩应力受到多方面因素的影响,具体包含顶底板与煤岩力学性质差异、煤层厚度、夹矸厚度和微构造发育程度等,这也是地质力学的关键研究内容,具体分为平面和纵向 2 个层面:在平面上,需考虑不同微构造位置对地应力分布的影响特征;在纵向上,需考虑顶底板岩性组合、岩石力学特征、煤层厚度和夹矸厚度等对煤层地应力分布影响特征。

地应力场数值模拟可定量评价煤层及围岩地应力的影响因素以及定量分析不同条件下煤层及围岩应力的变化趋势,然而确切的应力、应变边界条件较难给出,故考虑到研究区煤系地层平缓(地层倾角小于 3°,平均 0.5°)、断裂不发育的地质条件,文中转为采用较为近似的应力边界条件,重点研究顶底板岩性

组合、煤层厚度、夹矸厚度和微构造发育程度等单因素对煤层及顶底板应力的趋势性影响特性。

4.1 地质力学模型及边界条件设置

基于 ANSYS 软件模拟微构造类型、顶底板岩性组合、煤层及夹矸厚度对煤层地应力的影响特征<sup>[36]</sup>。基于成像测井给出的诱导缝及井壁崩落特征分析,结合区域的地应力信息,确定研究区现今水平最大主应力方向为 NEE70°。根据前文三轴抗压试验得到的岩石力学参数,取其平均值赋予地质力学模型,其中,泥岩的弹性模量为 30.09 GPa,泊松比为 0.193;煤层弹性模量为 7.19 GPa,泊松比为 0.32,对于由于样品原因而缺少的灰岩与砂岩静态力学参数,文中参考邻近区块的测试数据,利用测井数据中的动态力学参数经动静态转换后得到的数据进行替代,灰岩的弹性模量为 47 GPa,泊松比为 0.33,砂岩的弹性模量为 54.71 GPa,泊松比为 0.15。根据声发射及差应变试验确定模型加载过程中的边界应力条件,具体参见文献[20]:垂向应力为 51.54 MPa,最大水平应力为 61.3 MPa,最小水平应力为 50.97 MPa。模拟过程中对模型进行北东向、北西向线性位移约束,以防止地质力学模型旋转和刚性位移,进而求解最趋于真实的应力场、应变场(图 5)。此外,将外部嵌套模型的顶部设置为自由移动面,底部设置 Z 方向的位移约束,以防止其以自由落体的形



(a) 研究区地质力学模型应力加载示意 (b) 煤层三维应力分布

图5 研究区地质力学建模与应力分布 (据文献[20]修改)

Fig.5 Geomechanical modeling and stress distribution in study area (Modified according to Reference [20])

式下落,最后,采用交叉试验原则,依次改变单一因素开展应力场数值模拟。

#### 4.2 微构造对地应力的影响

研究区深部煤层构造整体较为平缓,受差异压实作用和各期构造运动的影响,次生褶皱等微构造(构造幅度3~10 m)普遍发育,平面上可大致划分为正向、负向和平缓构造等3种微构造类型<sup>[4,37]</sup>。

微构造形变会引起煤层地应力分布变化,进而影响煤层渗透率和储层改造效果。选取鄂尔多斯盆地大吉区块某井区地质模型为例,开展不同微构造类型的应力模拟。结果表明,煤层从正向微构造向负向微构造转变的过程,煤层最小水平主应力逐渐增大,负向构造位置的地应力大于正向和平缓微构造位置的地应力(图6a)。煤层渗透率、压裂改造效果与地应力密切相关,正向构造位置地应力较低,渗透率较高、压裂改造效果较好,这与研究区高产气井多集中分布在正向微构造区与平缓微构造区的生产特征相符<sup>[3]</sup>。此外,煤层从正向微构造向负向微构造转变过程中,煤层水平主应力差逐渐减小(图6b)。受构造形变的影响,均质煤层在纵向上出现了地应力分布、水平主应力差的变化(图6b)。

#### 4.3 顶底板不同岩性组合对煤岩应力影响

鄂尔多斯盆地8号煤层顶底板主要为灰岩、砂岩和泥岩3类,底板主要为泥岩和砂岩2类,相对于煤岩,其顶底板岩石均为硬岩。鄂尔多斯盆地8号深层煤岩顶底板岩性组合类型,主要包括6种模式:顶板灰岩-底板泥岩(模式I)、顶板砂岩-底板泥岩(模式II)、顶板泥岩-底板泥岩(模式III)、顶板灰岩-底板砂岩(模式IV)、顶板砂岩-底板砂岩(模式V)和顶板泥岩-底板砂岩(模式VI)(图7),其中前3种模式是底板泥岩;后3种模式为底板砂岩。研究发现顶底板岩性组合及顶底板地层(硬岩)与煤层(软岩)的力学性质差异会对煤层地应力产生显著影响,这是因为在硬岩

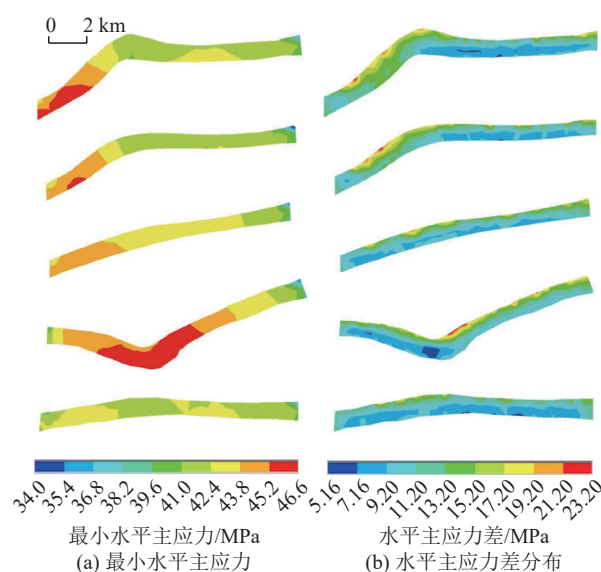


图6 不同类型微构造对应的煤层应力分布<sup>[20]</sup>

Fig.6 Distribution map of stress in reservoirs under different types of microstructures<sup>[20]</sup>

和软岩互层的情况下,硬岩层可以缓解和分散部分构造应力,使得软岩层所承受的构造应力相对较小,软岩层由于其承载能力弱,会加剧硬岩围岩的应力集中程度<sup>[18]</sup>。

为研究围岩与煤层的力学性质差异对煤层地应力分布的影响,在研究区模型基础上,模拟围岩与煤层的弹性模量差分别为0、10、20和30 GPa情形下的地应力分布,如图7a—图7d所示。数值模拟过程中,设置煤层顶板和底板为同一岩性,且弹性模量相同,围岩泊松比为0.30,煤岩泊松比为0.32。由图7可知:围岩与煤层的弹性模量差每增大10 GPa,负向构造处煤层应力减小17.8%~21.2%(4.9~7.2 MPa),正向高部位煤层应力减小13.1%~16.7%(3.9~5.7 MPa),平缓处煤层应力减小7.4%~9.6%(1.8~3.1 MPa)。随着煤层与围岩的力学性质差异的增大,煤层地应力呈减小趋势,且减小幅度依次为负向构造>正向构造>平缓区(图7e)。数值模拟结果表明,围岩与煤层的力学性质差异对煤层应力分布产生了显著影响且因微构造类型不同而存在明显差异。

为了探究不同顶底板岩性组合对煤层应力影响,设置水平地层基础模型:煤层厚度为6 m,顶板、底板厚度均为8 m,垂向应力为51.54 MPa,最大水平应力为61.3 MPa,最小水平应力为50.97 MPa。针对鄂尔多斯盆地8号煤层6种不同顶底板岩性组合模式开展应力数值模拟(图8),并统计顶板、煤层、底板应力参数(表6)。顶底板岩性组合对煤层应力影响规律为:

1) 当底板为泥岩时,随着顶板围岩力学强度的降

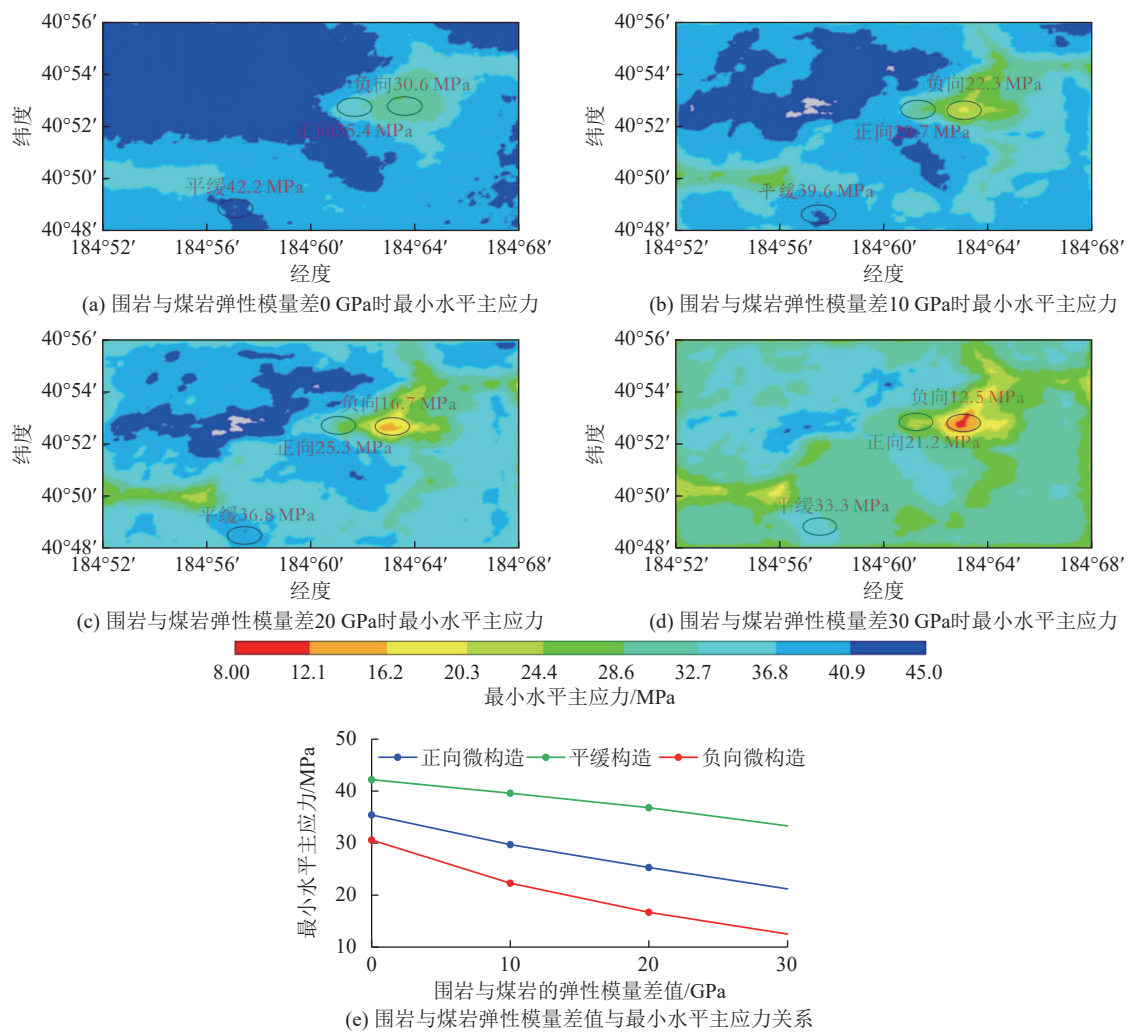


图7 顶底板力学性质对煤层应力影响

Fig.7 Influence of mechanical properties of roof and floor on stress of the coal seam

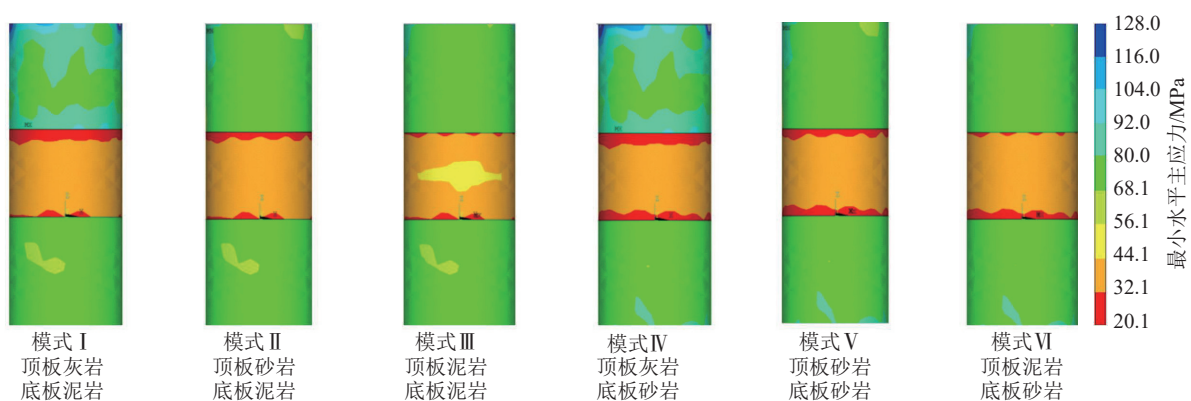


图8 不同顶底板岩性组合对煤层应力影响(最小水平主应力)

Fig.8 Influence of roof and floor combination on coal seam stress(the minimum horizontal principal stress)

低,即顶板为灰岩、砂岩和泥岩等不同岩性条件下(模式I—模式III),煤岩最大水平主应力、最小水平主应力逐渐增大;煤岩水平主应力差分别为7.17、7.05和6.64 MPa,其值逐渐减小(图9b、表6);顶板灰岩(模式I)相比顶板泥岩(模式III),煤岩最大水平主应力增大1.21 MPa,增幅为2.3%,最小水平主应力增

大1.75 MPa,增幅为3.9%,而水平主应力差减小0.53 MPa,降幅为7.4%。随着岩性强度的降低,顶板的最大和最小水平主应力、水平主应力差均显著减小(图9a、表6),顶板灰岩(模式I)相比泥岩(模式III),其顶板最小水平主应力下降7.3 MPa,降幅为10.7%,最大水平主应力下降13.42 MPa,降幅为14%,



表6 不同顶底板岩性组合下的煤层及顶底板的水平主应力及水平主应力差

Table 6 Horizontal principal stresses and their difference of coal seam, roof/floor under different roof/floor lithology combination

MPa

不同模式、 不同岩性组合	主应力、水平主应力差	底板泥岩						底板砂岩	
		模式I	模式II	模式III	模式IV	模式V	模式VI		
		顶板灰岩 底板泥岩	顶板砂岩 底板泥岩	顶板泥岩 底板泥岩	顶板灰岩 底板砂岩	顶板砂岩 底板砂岩	顶板泥岩 底板砂岩		
顶板应力	最大水平主应力	95.94	91.17	82.52	95.73	90.80	82.20		
	最小水平主应力	68.21	64.86	60.91	68.18	64.83	60.78		
	水平主应力差	27.33	26.26	21.61	27.55	25.97	21.42		
煤岩应力	最大水平主应力	52.36	53.19	53.57	51.85	52.79	53.01		
	最小水平主应力	45.19	46.10	46.94	44.98	45.78	46.02		
	水平主应力差	7.17	7.05	6.64	6.86	7.01	6.99		
底板应力	最大水平主应力	80.82	81.11	81.43	88.71	89.04	89.25		
	最小水平主应力	60.35	60.55	60.68	64.54	64.62	64.72		
	水平主应力差	20.47	20.55	20.74	24.17	24.42	24.53		

水平主应力差下降 5.72 MPa, 降幅为 20.9%。

2) 当底板为砂岩时, 随着顶板围岩力学强度的降低, 即顶板为灰岩、砂岩和泥岩等不同岩性条件下 (模式 IV—模式 VI); 煤岩最大水平主应力、最小水平主应力均微幅增大, 二水平主应力差变化不大; 顶板的最大和最小水平主应力、水平主应力差均显著减小 (图 9a、表 6), 顶板灰岩 (模式 IV) 相比泥岩 (模式 VI), 其顶板最小水平主应力下降 7.4 MPa, 降幅为 10.9%, 最大水平主应力下降 13.53 MPa, 降幅为 14.1%, 水平主应力差下降 6.13 MPa, 降幅为 22.3%。

3) 相同底板岩性、不同顶板岩性条件下, 底板应力状态受顶板影响较小; 相比底板砂岩 (模式 IV—模式 VI), 底板泥岩 (模式 I—模式 III) 的水平主应力、水平主应力差普遍较低 (图 9c)。

4) 6 种模式中, 煤岩最大、最小水平主应力最低的情况为模式 IV (顶板灰岩、底板砂岩组合), 其对应顶板灰岩的水平主应力差最高; 煤岩最大、最小水平主应力的最大值为模式 III (顶板泥岩、底板泥岩组合), 这也是研究区主流的岩性组合模式, 其水平主应力差最小, 相比模式 IV (顶板灰岩、底板砂岩), 该模式下煤岩的最大水平主应力增大 3.3%, 最小水平主应力增大 4.4%。

整体来看, 模拟结果基本与软岩层所承受的构造应力相对较小、硬岩承受构造应力较大的认识相符合。对于煤岩, 随着围岩力学强度的降低 (由灰岩、砂岩、泥岩), 煤岩分担的应力负载增大, 其最大、最小水平主应力增大, 泥岩底板条件下煤岩水平主应力差呈减小趋势, 砂岩底板条件下煤岩水平主应力差变化不大 (图 9b)。对于顶板而言, 随其岩石力学强度的降低, 顶

板的水平主应力、水平主应力差下降幅度较大 (图 9a)。对于底板而言, 其水平主应力与顶板岩性变化基本没有关系, 而与底板岩性有关 (图 9c)。

#### 4.4 不同煤层厚度影响煤岩应力的分布特征

在相同平缓构造、模式 I 岩性组合 (顶板灰岩—底板泥岩) 背景下, 发现煤层厚度的变化对地应力的分布也产生影响。煤层厚度从 0.1 m 增加至 10 m, 力学边界条件为最大水平主应力 61.3 MPa、最小水平主应力 50.97 MPa、垂向应力 51.54 MPa。

模拟结果表明, 煤层厚度从 0.1 m 增大至 1 m 时, 受边界效应的影响, 最小水平主应力从 46.8 MPa 下降至 39.7 MPa, 降幅为 15.2%; 最大水平主应力从 49.9 MPa 下降至 45.4 MPa, 降幅 9%。当煤层厚度从 2 m 开始, 煤层的水平主应力、水平主应力差迅速增大, 煤层厚度从 2 m 增大至 10 m, 最小水平主应力从 39.7 MPa 增大至 49 MPa, 增幅为 12.9%, 最大水平主应力从 49.4 MPa 增大至 60.9 MPa, 增幅为 23.3%, 水平主应力差从 6 MPa 增至 11.9 MPa, 增幅为 98.3% (图 10、表 7)。当煤层厚度小于 4 m 时, 薄煤层厚度变化对煤层地应力的影响较为敏感, 当煤层大于 4~6 m 后, 水平主应力、水平主应力差增幅逐渐趋缓。

由图 10 可知: 煤层 (如煤层厚度为 4、6、8 m) 顶部、底部应力值出现的突变和降低现象, 是顶底板硬岩、煤层 (软岩) 承载能力不同, 改变了界面两侧应力分布的结果, 分析认为, 顶底板硬岩承载较多应力负载, 进而导致煤层顶底位置的应力产生突变和降低<sup>[19]</sup>。随着煤层厚度的增大, 煤层中部应力受边界效应的影响而减小, 煤层中部的水平主应力及水平主应力差增大并趋于稳定 (图 10)。

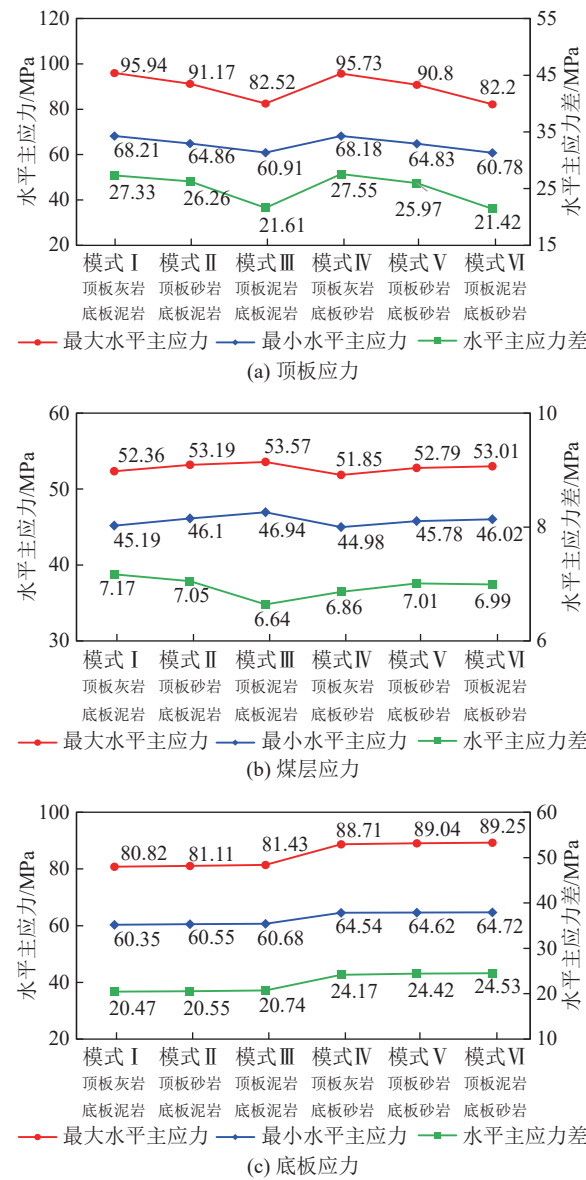


图 9 不同顶板岩性对煤层、顶板应力影响特征

Fig.9 Influence of different roof lithology on coal seam stress

4.5 不同泥岩夹矸厚度影响煤岩应力的分布特征

从夹矸分布来看,鄂尔多斯盆地由东向西,夹矸从局部发育到连片集中发育再到大面积广泛发育,夹矸厚度主体在 0.5~7 m。岩石力学试验表明,取自同一层位的泥岩夹矸岩心样品,其破裂形态因夹矸厚度的不同而有所区别,据此推测泥岩夹矸的存在会对煤层或夹矸的地应力分布造成影响。

为了推广文中的研究成果,结合鄂尔多斯盆地泥

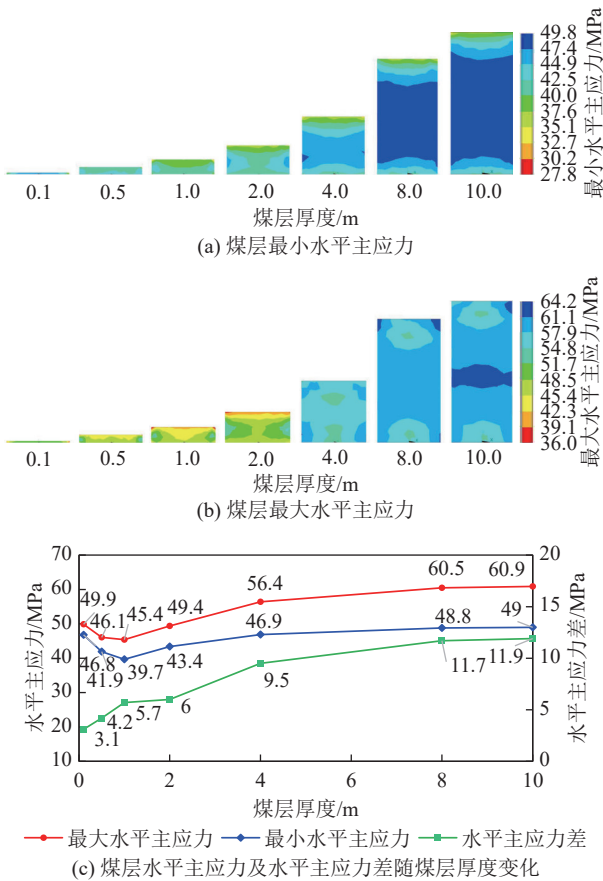


图 10 不同煤层厚度下的煤层水平主应力及水平主应力差

Fig.10 Coal seam horizontal principal stresses and their difference under different coal seam thicknesses

岩夹矸的厚度主体变化范围,设计水平地层模型、模式 I(顶板灰岩-底板泥岩组合),夹矸厚度分别为 0.5、0.8、1.2、1.5、2、2.5、3、5 和 7 m,力学边界条件为最大水平主应力为 40.38 MPa、最小水平主应力为 34.12 MPa、垂向应力为 47.89 MPa 开展数值模拟。

随着夹矸厚度从 0.5 m 增大到 7 m,夹矸厚度对应力影响具有以下规律:

1) 夹矸水平主应力、水平主应力差随夹矸厚度的增大呈降低趋势(图 11a、图 11b)。最小水平主应力由 42.6 MPa 降低至 36.6 MPa,降幅约为 14.1% (6 MPa);最大水平主应力由 65.2 MPa 降低至 51.5 MPa,增幅约为 21%(13.7 MPa);水平主应力差由 22.6 MPa 下降至 14.9 MPa,降幅为 34.1%(7.7 MPa)。夹矸厚度小于 1 m 时,夹矸层应力显著增大;当夹矸厚度大于

表 7 不同煤层厚度下煤层的水平主应力及水平主应力差

Table 7 Horizontal principal stresses and their difference of coal seam with the thickness of coal seam

煤层厚度/m	0.1	0.5	1.0	2.0	4.0	8.0	10.0
最大水平主应力/MPa	49.9	46.1	45.4	49.4	56.4	60.5	60.9
最小水平主应力/MPa	46.8	41.9	39.7	43.4	46.9	48.8	49.0
水平主应力差/MPa	3.1	4.2	5.7	6.0	9.5	11.7	11.9

3 m 时, 夹矸水平主应力、水平主应力差降幅逐渐趋缓。

随夹矸厚度的增大, 煤岩水平主应力、水平主应力差变化不大 (图 11c, 表 8), 煤岩最小水平主应力为 33.6 MPa、最大水平主应力为 40.4 MPa、水平主应力差为 6.8 MPa。夹矸水平主应力、水平主应力差呈现下降趋势 (图 11b), 且夹矸的应力差数值始终大于煤岩的主应力差。

在设定模型的应力边界、煤层和夹矸的总厚度不变、夹矸位置处于煤层中部等条件下, 夹矸厚度变化主要影响了夹矸的水平主应力大小; 对于煤层, 因煤层厚度随着夹矸厚度的增大而减小, 煤层内部水平主应力保持稳定。由模拟结果可知: 薄层夹矸 (小于 1 m) 所受的应力显著增大, 这种薄层夹矸的应力集中

易导致夹矸出现剪切破坏, 因此, 在钻穿薄层夹矸时, 应注意可能会极易出现掉块导致的卡钻现象。

上述针对微构造类型、顶底板组合及与煤层力学性质差异、煤层厚度和夹矸厚度等因素的数值模拟, 揭示了不同因素对煤层应力分布的影响特征。整体上看, 微构造曲率对煤层地应力的影响较大, 实际生产中, 出现陡变或曲率变化快的部位, 应加以关注。煤层厚度变化对煤岩地应力影响较为显著, 当煤层厚度小于 4 m 时, 煤岩地应力随煤层厚度的变化较为显著, 建议水平井开发时煤层厚度的下限不小于 4 m。顶底板的岩性组合类型对煤层地应力具有一定程度影响, 底板泥岩条件下顶板岩性变化对煤层地应力影响相比底板砂岩更为明显。夹矸厚度变化对煤岩地应力的分布影响不大, 但对夹矸的应力影响较大, 夹

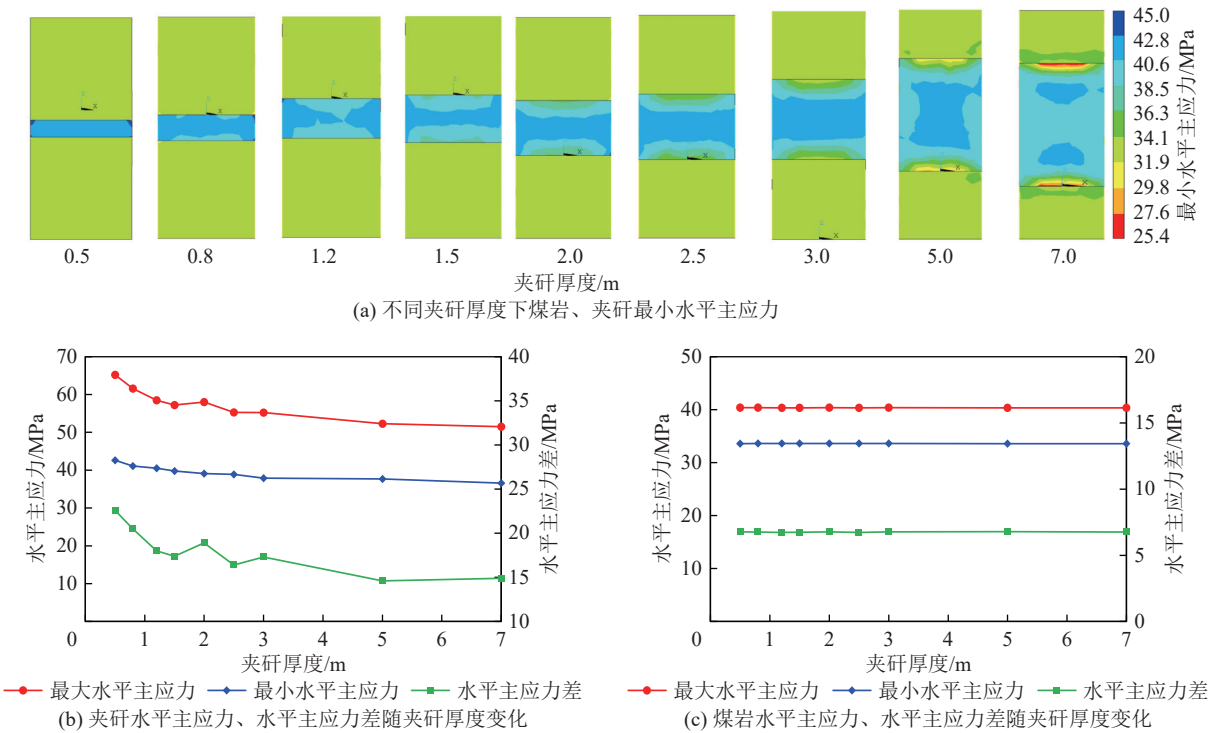


图 11 水平主应力、水平主应力差随夹矸厚度变化

Fig.11 Horizontal principal stresses, their difference of coal seam with the change of the thickness of parting

表 8 煤岩和夹矸的应力随夹矸厚度变化结果

Table 8 Result of stress variation in coal rock and gangue with the thickness of gangue										
不同岩性(位置)的应力/MPa		不同夹矸厚度/m								
		0.5	0.8	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0	5.0	7.0
夹矸	最大水平主应力	65.2	61.6	58.5	57.2	58	55.3	55.2	52.3	51.5
	最小水平主应力	42.6	41.1	40.5	39.8	39.1	38.9	37.9	37.7	36.6
	水平主应力差	22.6	20.5	18	17.4	18.9	16.4	17.3	14.6	14.9
煤岩	最大水平主应力	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4
	最小水平主应力	33.6	33.6	33.6	33.6	33.6	33.6	33.6	33.6	33.6
	水平主应力差	6.8	6.8	6.7	6.7	6.8	6.7	6.8	6.8	6.8



矸应力和应力差均大于煤岩。生产实践表明,煤岩夹矸对水力压裂过程中的煤岩破裂压力和改造效果有明显影响,在夹矸或顶底板部位射孔的井段,其累计产气贡献率极低<sup>[8]</sup>。

微构造形变导致均质煤层纵向上出现地应力分布、两向应力差变化的现象,以及顶底板组合、煤层厚度、夹矸厚度变化等对地应力分布的影响,与现场具有一定吻合度。例如,研究区平均厚度为 7.8 m、吸附气含气量为 24 cm<sup>3</sup>/g,深部煤层气直井 DJ55 的 8 号煤垂直厚度为 5.2 m,吸附气含气量为 20.14 cm<sup>3</sup>/g,但该井位于宽缓的正向微构造,位于有利构造部位,相比其他部位煤岩张性裂隙发育,且高部位游离气相对富集;同时钻遇的岩性组合为模式 IV(煤层顶板灰岩、底板砂岩),其底板砂岩为差气层,故排除了底板砂岩气补给的情况,该类岩性组合模式 IV 在 6 种岩性组合类型中煤岩所受的应力最低,煤岩应力差也较低,该类组合下煤层的压裂改造程度更为充分,改造效果也更好。该直井采用了多轮压裂改造,已连续生产 628 d,日产气量持续保持在较高产量水平,日产气量为 3.5×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d(图 12),累计产气量超 2 000×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。距离 DJ55 直井 10 km 的另一口直井 DJ54,同样采用多轮压裂技术,该井钻遇煤层厚度为 5.4 m,钻遇的岩性组合为模式 I(煤层顶板灰岩、底板泥岩),位于相对平缓构造,直井 DJ54 的日产气量平均为 1.5×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d。在相同工程工艺、相近资源条件下,不同的构造部位、岩性组合下单井产量差异较大。采用不同采气举升设备(抽油机、射流泵等),也会使深部煤层气井产能的释放存在差异。由于相同工程工艺条件下对应考虑地质单因素的评价井样本较少,更多是 2 种或多种组合因素的综合效应,后面随着不同微构造、岩性组合、夹矸厚度和工艺条件下样本井数量的增加,下一步将结合更多井的资料分析研究,以期更好指导实践应用。

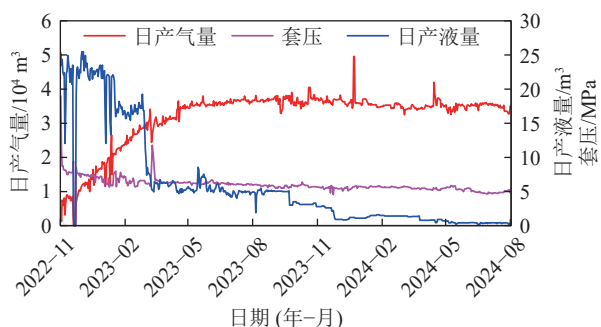


图 12 大吉区块深部煤层气直井 DJ55 生产曲线

Fig.12 Production curve of deep CBM vertical well DJ55 in Daning-Jixian Block

## 5 结论与建议

1) 利用岩石力学试验取得了研究区煤岩储层动、静态岩石力学参数特征及其转换关系:利用三轴抗压强度试验明确地层条件下煤岩弹性模量平均为 7.19 GPa、泊松比平均为 0.32;巴西劈裂与三轴抗剪试验表明,煤岩抗张强度平均为 2.68 MPa,泥岩泊松比平均为 0.193;泥岩弹性模量平均为 30.09 GPa;内摩擦角介于 22.14°~50.99°,平均为 38.2°。

2) 基于岩石力学试验和应力模拟研究,揭示了微构造类型、顶底板岩性组合、煤层厚度、夹层厚度煤层及围岩地应力的影响机制:①就微构造类型而言,负向及正向微构造对煤层应力影响较大,煤层从正向微构造向负向微构造转变的过程,煤层最小水平主应力逐渐增大,负向构造位置地应力大于正向、平缓微构造位置;随煤层与围岩的力学性质差异的增大,煤层地应力呈减小趋势,减小幅度依次为负向构造>正向构造>平缓区;②就不同顶底板岩性组合而言,随围岩力学强度的降低,煤岩应力逐渐增大,泥岩底板条件下煤岩水平主应力差呈减小趋势。顶板随岩石力学强度的降低,水平主应力、水平主应力差下降幅度较大。整体上,煤岩最小水平主应力在顶板灰岩—底板砂岩组合下(模式 IV)最小,顶板泥岩—底板泥岩组合下(模式 III)最大;③就煤层厚度而言,随煤层厚度增大,煤层水平主应力、水平主应力差整体呈增加趋势,厚度变化对小于 4 m 薄煤层的应力影响更为敏感,当煤层厚度大于 4~6 m 后,水平主应力、水平主应力差增幅逐渐趋缓;④随着泥岩夹矸厚度的增加,夹矸所受水平主应力、水平主应力差下降,当夹矸厚度大于 3 m 时,夹矸水平主应力、水平主应力差降幅逐渐趋缓。

3) 受不同微构造、岩性组合、煤层厚度和夹矸厚度等多种因素对煤和围岩应力的共同影响,对深部煤层气井压裂裂缝扩展预测和开发效果评价分析变得尤为复杂。基于试验和数值模拟取得的不同微构造、岩性组合、煤层厚度、夹矸厚度等单一因素对深部煤储层应力影响特征,可为深入探究深层煤层气单井产量差异原因,指导地质工程一体化精益设计提供新思路,为评价深部煤岩及顶底板裂缝参数、地应力场提供基础力学试验资料,同时也对实现精益化地质—工程一体化设计等具有重要意义。

需要注意的是,地应力场数值模拟可用于定量评价煤层及围岩地应力的影响因素、也可定量分析不同条件下煤层及围岩应力的变化特征,然而,针对地应力研究领域而言,如何给定地层实际准确的应力边界

条件, 仍存在较大难度和争议。文中在当前给定的应力边界条件下, 模拟获得煤层、围岩的地应力随不同因素变化对应力的影响特征。另外, 现有商业压裂软件多针对理想水平构造和均质煤层, 对深部煤层实际复杂非均质条件下的差异化设计指导性不足, 故文章旨在提出深部煤层复杂非均质性对应力变化产生的重要影响, 并揭示各要素组合及其变化对煤层和围岩应力的影响。针对深部煤层平面和纵向非均质性差异大的特点, 如何差异化气藏工程设计和针对性压裂改造设计, 将是下一步突破深部煤层气单井产量大幅增加和实现降本增效的关键。

### 参考文献(References):

- [1] 徐凤银, 闫霞, 李曙光, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部(层)煤层气勘探开发理论技术难点与对策[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(1): 115–130.  
XU Fengyin, YAN Xia, LI Shuguang, et al. Theoretical and technological difficulties and countermeasures of deep CBM exploration and development in the eastern edge of Ordos Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 115–130.
- [2] 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.  
XU Fengyin, YAN Xia, LIN Zhenpan, et al. Research progress and development direction of key technologies for efficient coalbed methane development in China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(3): 1–14.
- [3] 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.  
YAN Xia, XU Fengyin, NIE Zhihong, et al. Microstructure characteristics of Daji area in east Ordos Basin and its control over the high yield dessert of CBM[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(8): 2426–2439.
- [4] 赵喆, 徐旺林, 赵振宇, 等. 鄂尔多斯盆地石炭系本溪组煤岩气地质特征与勘探突破[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(2): 234–247, 259.  
ZHAO Zhe, XU Wanglin, ZHAO Zhenyu, et al. Geological characteristics and exploration breakthroughs of coal rock gas in Carboniferous Benxi Formation, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(2): 234–247, 259.
- [5] 刘建忠, 朱光辉, 刘彦成, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气勘探突破及未来面临的挑战与对策: 以临兴—神府区块为例[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1827–1839.  
LIU Jianzhong, ZHU Guanghui, LIU Yancheng, et al. Breakthrough, future challenges and countermeasures of deep coalbed methane in the eastern margin of Ordos Basin: a case study of Linxing-Shenfu block[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1827–1839.
- [6] 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.
- [7] 熊先钺, 闫霞, 徐凤银, 等. 深层煤层气多要素耦合控制机理、解吸规律与开发效果剖析[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1812–1827, 1853.  
XIONG Xianyue, YAN Xia, XU Fengyin, et al. Analysis of multi-factor coupling control mechanism, desorption law and development effect of deep coalbed methane[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1812–1826.
- [8] 闫霞, 熊先钺, 李曙光, 等. 深层煤岩气水平井各段产出贡献及其主控因素: 以鄂尔多斯盆地东缘大宁—吉县区块为例[J]. *天然气工业*, 2024, 44(10): 80–92.  
YAN Xia, XIONG Xianyue, LI Shuguang, et al. Production contributions of deep CBM horizontal well sections and their controlling factors: A case study of Daning–Jixian area, eastern Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(10): 80–92.
- [9] 闫霞, 徐凤银, 熊先钺, 等. 深部煤层气勘探开发关键实验技术及其发展方向[J]. *煤田地质与勘探*, 2025, 53(1): 128–141.  
YAN Xia, XU Fengyin, XIONG Xianyue, et al. Key experimental technology of deep CBM exploration and development and its development direction[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(1): 128–141.
- [10] 姚强岭, 李学华, 朱柳, 等. 煤岩体地质力学参数原位测试系统开发与应用[J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(6): 1169–1176.  
YAO Qiangling, LI Xuehua, ZHU Liu, et al. Development and application of in-situ testing system for geomechanical parameters of coal and rock mass[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(6): 1169–1176.
- [11] 蔡益栋, 贾丁, 邱峰, 等. 基于纳米压痕的煤岩微观力学特性及其影响因素剖析[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(2): 879–890.  
CAI Yidong, JIA Ding, QIU Feng, et al. Micromechanical properties of coal and its influencing factors based on nanoindentation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(2): 879–890.
- [12] 刘俊民. 野川煤业地质力学参数原位测试研究[J]. *煤炭技术*, 2020, 39(9): 79–82.  
LIU Junmin. In-situ testing of geomechanics parameters in yechuan coal mine[J]. *Coal Technology*, 2020, 39(9): 79–82.
- [13] 李术才, 王德超, 王琦, 等. 深部厚顶煤巷道大型地质力学模型试验系统研制与应用[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(9): 1522–1530.  
LI shucai, WANG dechao, WANG qi, et al. Development and application of large-scale geomechanical model test system for deep thick top coal roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(9): 1522–1530.
- [14] 唐东旗, 吴基文, 李运成, 等. 断裂带岩体工程地质力学特征及其对断层防水煤柱留设的影响[J]. *煤炭学报*, 2006(4): 455–460.  
TANG Dongqi, WU Jiwen, LI Yuncheng, et al. The features of fault zone rockmass engineering geological mechanics and its effect on leaving fault waterproof pillar[J]. *Journal of China Coal Society*, 2006(4): 455–460.
- [15] 蔡益栋, 李倩, 肖帆, 等. 深部煤-岩组合体力学特征及裂隙扩展规律: 以沁水盆地武乡区块为例[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(6): 1686–1704.  
CAI Yidong, LI Qian, XIAO Fan, et al. Mechanical characteristics and fracture propagation patterns of deep coal-rock assemblages: A case study of the Wuxiang block, Qinshui Basin[J]. 2024, 45(6): 1686–1704.
- [16] 常海明. 榆社-武乡区块深部煤系气储层岩石力学特性及其演化规律研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.  
CHANG Haiming. Study on rock mechanical properties and evolution law of deep coal measures gas reservoir in Yushe-Wuxiang[D].

- Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.
- [17] 黄琪嵩, 程久龙. 软硬互层岩体采场底板的应力分布及破坏特征研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(S1): 36–42.
- HUANG Qisong, CHENG Jiulong. Research on stress distribution and failure characteristics of coal mining floor in soft-hard alternant strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S1): 36–42.
- [18] 刘齐. 含逆断层顶底板煤岩组合系统内应力场的演化规律[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- LIU Qi. Evolution of stress field in coal - rock combination system with reverse fault[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [19] 周涛, 刘长友, 杨伟. 煤层夹矸对采场应力分布的影响[J]. 煤炭技术, 2011, 30(9): 106–107.
- ZHOU Tao, LIU Changyou, YANG Wei. Effect of coal-bed gangue on stress distribution in mine stope[J]. Coal Technology, 2011, 30(9): 106–107.
- [20] 唐志潭, 刘敬寿, 闫霞, 等. 深层煤岩微构造对现今地应力的控制机理[J]. 地学前缘, 2024, 31(5): 344–357.
- TANG Zhitan, LIU Jingshou, YAN Xia, et al. The control mechanism of deep coal rock microstructure on current in-situ stress[J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(5): 344–357.
- [21] 赵进雍, 冀冬生, 吴见, 等. 准噶尔盆地四棵树凹陷侏罗系: 白垩系储层岩石力学参数研究[J]. 地质力学学报, 2022, 28(4): 573–582.
- ZHAO Jinyong, JI Dongsheng, WU Jian, et al. Research on rock mechanics parameters of the Jurassic-Cretaceous reservoir in the Sikeshusag, Junggar Basin, China[J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(4): 573–582.
- [22] 周文, 高雅琴, 单铭钰, 等. 川西新场气田沙二段致密砂岩储层岩石力学性质[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 34–37, 163.
- ZHOU Wen, GAO Yaqin, SHAN Yuming, et al. Lithomechanical property of tight sand reservoirs in the second member of Shaximiao formation Xichang gas field, west sichuan basion[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 34–37, 163.
- [23] 刘敬寿, 丁文龙, 杨海盟, 等. 鄂尔多斯盆地华庆地区天然裂缝与岩石力学层演化: 基于数值模拟的定量分析[J]. 地球科学, 2023, 48(7): 2572–2588.
- LIU Jingshou, DING Wenlong, YANG Haimeng, et al. Natural fractures and rock mechanical stratigraphy evaluation in huaqing area, ordos basin: a quantitative analysis based on numerical simulation [J]. Earth Science, 2023, 48(7): 2572–2588.
- [24] 刘敬寿, 丁文龙, 肖子亢, 等. 储层裂缝综合表征与预测研究进展[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(6): 2283–2300.
- LIU Jingshou, DING Wenlong, XIAO Zikang, et al. Advances in comprehensive characterization and prediction of reservoir fractures[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(6): 2283–2300.
- [25] HAN Lingling, LI Xizhe, LIU Zhaoyi, et al. Study on rock mechanics characteristics of deep shale in Luzhou block and the influence on reservoir fracturing[J]. Energy Science & Engineering, 2022, 11(1): 4–21.
- [26] 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.
- [27] 路保平, 鲍洪志. 岩石力学参数求取方法进展[J]. 石油钻探技术, 2005, 36(5): 47–50.
- LU Baoping, BAO Hongzhi. Advances in calculation methods for rock mechanics parameters[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 36(5): 47–50.
- [28] HOU Lianlang, LIU Xiangjun, LIANG Lixi, et al. Investigation of coal and rock geo-mechanical properties evaluation based on the fracture complexity and wave velocity[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 75: 103–113.
- [29] LI Kaihui, CHENG Yungming, YIN Zhenyu, et al. Size effects in a transversely isotropic rock under Brazilian tests: laboratory testing[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(6): 2623–2642.
- [30] 曹振中, 卢秀莲, 莫红艳, 等. 高内摩擦角下珊瑚礁砂地基极限承载力初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(S1): 3609–3617.
- CAO Zhenzhong, LU Xiulian, MO Hongyan, et al. Ultimate bearing capacity of coralline sand foundation under high internal friction angle[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(S1): 3609–3617.
- [31] 陆诗阔, 王迪, 李玉坤, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田致密砂岩储层三维岩石力学参数场研究[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(10): 1844–1850.
- LU Shikuo, WANG Di, LI Yukun, et al. Research on the three-dimensional mechanical parameters' distribution of the tight sandstone reservoirs in Daniudi Gasfield[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(10): 1844–1850.
- [32] 贾利春, 陈杨, 余晟. 基于统一强度理论的水平井井壁稳定性分析[J]. 断块油气田, 2018, 25(5): 639–643.
- JIA Lichun, CHEN Yang, YU Hao. Analysis of wellbore stability for horizontal wells based on unified strength theory[J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2018, 25(5): 639–643.
- [33] 刘建华, 吴超, 陶兴华. 钻井岩石力学参数三维建模方法及其现场应用[J]. 钻采工艺, 2020, 43(1): 13–16, 7-8.
- LIU Jianhua, WU Chao, TAO Xinghua. Three-dimensional modeling method for drilling rock mechanics and its field application[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(1): 13–16, 7–8.
- [34] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 23561.12—2024 煤和岩石物理力学性质测定方法 第 12 部分: 煤的坚固性系数测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [35] 国际岩石力学学会 (ISRM). 岩石力学试验建议方法[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1980: 189–207.
- [36] 徐珂, 戴俊生, 付晓龙, 等. 基于有限元法的层状岩体破裂规律探讨[J]. 地质力学学报, 2015, 21(3): 330–340.
- XU Ke, DAI Junsheng, FU Xiaolong, et al. Discussion on the fracture of layered rock mass based on the finite element method[J]. Journal of Geomechanics, 2015, 21(3): 330–340.
- [37] 闫霞, 徐凤银, 张雷, 等. 微构造对煤层气的控藏机理与控产模式[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 893–905.
- YAN Xia, XU Fengyin, ZHANG Lei, et al. Reservoir-controlling mechanism and production-controlling patterns of microstructure to coalbed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 893–905.