

皇甫展鸿, 吕文雅, 唐英航, 曾联波, 邓泽, 吴雨蕙. 2024. 深层煤层气储层现今地应力测井计算方法: 以大宁—吉县地区本溪组煤层为例. 地质科学, 59(6): 1662-1674. DOI: 10.12017/dzkx.2024.114.

Huangfu Zhanhong, Lü Wenya, Tang Yinghang, Zeng Lianbo, Deng Ze, Wu Yuhui. 2024. Present-day in-situ stress calculation by conventional logs of deep coalbed methane reservoirs: A case study in the deep coal reservoir of the Benxi Formation in Daning-Jixian area, Ordos Basin. *Chinese Journal of Geology*, 59(6): 1662-1674. DOI: 10.12017/dzkx.2024.114.

深层煤层气储层现今地应力测井计算方法: 以大宁—吉县地区本溪组煤层为例*

皇甫展鸿^{1,2} 吕文雅^{1,2} 唐英航^{1,2} 曾联波^{1,2} 邓 泽³ 吴雨蕙³

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249;
3. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083)

摘要 大宁—吉县(大吉)地区是中国煤层气勘探开发的热点区域之一。地应力的分布影响着煤层的渗透率、压裂改造等, 从而影响煤层气的产出效果。文中选取大吉煤层气田探明区本溪组8号煤层为研究对象, 基于偶极子声波测井、水力压裂、常规测井、高温高压三轴岩石力学实验等分析测试资料, 结合修正后的Newberry模型, 对单井地应力方向和大小进行研究。结果表明, 大宁—吉县地区本溪组8号煤层水平最大主应力方向为北东东—南西向至近东西向。利用常规测井资料计算得出, 8号煤层水平最大主应力在41.2~55.8 MPa之间, 平均值为51.2 MPa, 水平最小主应力在32.0~42.6 MPa之间, 平均值为38.3 MPa。与水力压裂资料得到的现今地应力值对比, 常规测井计算的现今地应力相对误差均在10%以内, 结果可信。影响常规测井地应力计算精度的因素主要有合适的地层模型的选取、纵横波时差获取的准确性、岩石力学参数的确定、孔隙压力的求取、有效应力系数的确定等。本文探索了一套适合于构造较平缓地区深层煤储层的常规测井地应力评价方法, 以期为深层煤储层地应力的研究提供借鉴。

关键词 常规测井 现今地应力 煤储层 深部 大宁—吉县地区

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

文章编号: 0563-5020(2024)06-1662-13

Present-day in-situ stress calculation by conventional logs of deep coalbed methane reservoirs: A case study in the deep coal reservoir of the Benxi Formation in Daning-Jixian area, Ordos Basin

Huangfu Zhanhong^{1,2} Lü Wenya^{1,2} Tang Yinghang^{1,2} Zeng Lianbo^{1,2} Deng Ze³ Wu Yuhui³

(1. National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249;

2. College of Geoscience, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249; 3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083)

Abstract The Daning-Jixian (Daji) area is one of the hot areas of coalbed methane exploration and development in China. The distribution of the present-day in-situ stress affects the permeability and fracturing of coal seams, thus affecting the production effect of coalbed methane. This work takes the No.8 coal seam of the Benxi Formation in the proven area of Daji coalbed methane field as the research object. Based on the analysis and test data of

* 基金项目: 中石油战略合作科技专项(编号: ZLZX2020-02)和辽宁省矿产资源绿色开发重点实验室开放重点基金项目(编号: LNTU/GDMR-2303)资助

本文作者: 皇甫展鸿, 女, 2000年生, 硕士研究生, 地质资源与地质工程专业。E-mail: 2082068455@qq.com

吕文雅, 女, 1990年生, 博士, 副教授, 地质资源与地质工程专业。本文通讯作者。E-mail: wylwwenwen@163.com

收稿日期: 2024-06-24, 修回日期: 2024-08-23

dipole acoustic logs, hydraulic fracturing, conventional logs, high temperature and high pressure triaxial rock mechanics experiment, combined with the modified Newberry model, the direction and magnitude of the present-day in-situ stress of single wells are studied. The results show that the maximum horizontal principal stress direction of the Benxi Formation No. 8 coal seam in Daning-Jixian area is from NE-SWW to nearly EW. The maximum and minimum horizontal principal stresses of the No. 8 coal seam calculated by conventional logs vary from 41.2 MPa to 55.8 MPa, with an average of 51.2 MPa, and 32.0 MPa to 42.6 MPa, with an average of 38.3 MPa, respectively. Compare to the maximum and minimum horizontal principal stresses of the No. 8 coal seam measured by hydraulic fracturing data, the relative errors of those calculated by conventional logs are within 10%, which shows that the calculated results by conventional logs are reliable. The factors, affecting the calculation accuracy of the present-day in-situ stress obtained by conventional logs, mainly include the selection of appropriate formation model, the accuracy of P-wave and S-wave time difference acquisition, the determination of rock mechanics parameters, the calculation of pore pressure, and the determination of effective stress coefficient. This paper explores a suitable method for the present-day in-situ stress evaluation by conventional logs for the deep coal reservoirs in relatively flat areas, thus providing a reference for the study of present-day in-situ stress in deep coal reservoirs.

Keywords Conventional logs, Present-day in-situ stress, Coal reservoir, Deep, Daning-Jixian area

煤层气是我国重要的非常规天然气资源之一, 主要以吸附态或游离态存在于煤层之中(张懿等, 2022)。深层煤层气为中国煤层气产业规模性发展奠定了重要基础。深层不代表具体的深度, 而是表征地应力、含气量等发生转换时的状态(秦勇等, 2016)。中国一般把3 500 m以深作为深层油气的勘探领域(康竹林, 2000)。据目前我国已探明的煤层气资源可以看出, 深层煤层气地质资源量是浅部煤层气的两倍(刘成林等, 2009; 董晨明, 2019; 徐凤银等, 2023), 占据煤层气总数的大部分, 具有可观的勘探前景。大宁—吉县地区探明深层煤层气含气面积308.9 km², 地质储量762×10⁸ m³, 是目前深层煤层气勘探开发的热点区域之一(李曙光等, 2022; 聂志宏等, 2022)。深层煤层气具有高含气、高饱和、吸附气与游离气共存的特征, 但其埋藏深、地应力高、渗透率低、非均质性强等特点使其开发较为困难(吴国代等, 2009; 余琪祥, 2023)。地应力的分布影响着煤层的渗透率、压裂改造等, 同时也对煤层中的裂缝分布及形态具有一定的控制作用, 因而其对深层煤层气的勘探开发起到非常重要的作用(鲁秀芹等, 2019; 鞠玮等, 2020; 魏永恒等, 2022)。

地应力主要由构造应力、静岩应力(重力)、热应力、孔隙流体压力组成, 是控制煤层气富集高产的重要因素之一(卢蕊, 2021)。地应力分为

古地应力与现今地应力。本文主要研究现今地应力。现今地应力评价内容包括现今地应力方向和大小。现今地应力方向评价方法有成像测井解释的井壁崩落法与诱导裂缝法、阵列声波测井横波分裂法(波速各向异性法)、微地震监测法、差应变法等(黄继新等, 2006; 赵永强, 2009; 王祥涛等, 2010; 刘建等, 2021)。现今地应力大小评价方法有水力压裂法、声发射实验法以及通过测井曲线计算地应力等(刘建等, 2021; 赖锦等, 2023)。众多学者利用测井资料对地应力方向和大小进行了大量的研究(余雄鹰等, 1996; 四川石油管理局, 1999; Nikolaevskiy et al., 2000; 黄继新等, 2006; 王涛等, 2012; 任瑞莲, 2015)。四川石油管理局(1999)、Nikolaevskiy et al.(2000)、黄继新等(2006)利用成像测井资料, 基于井壁崩落法、诱导裂缝法明确了最大、最小主应力方向; 该方法的优势是简单直观, 可以排除非应力因素干扰, 不足是根据压裂诱导裂缝和崩落方位确定地应力方向只适用于直井, 不适用于斜井, 且天然裂缝和钻井诱导裂缝难以区分, 容易混淆。任瑞莲(2015)根据地层倾角测井获取了最小主应力方向; 该方法只能判断地应力方向, 不能计算地应力大小。测井曲线计算地应力的模型有单轴应变模型(Eaton模型、Anderson模型、Newberry模型)和三轴应变模型(黄氏模型、葛氏模型、组合

弹簧模型)(Anderson, 1951; Matthews et al., 1967; Schmitt et al., 1989; 葛洪魁等, 1998; Li et al., 2018; Daines, 2019; Wang et al., 2021)。单轴应变模型片面认为水平地应力小于垂直地应力, 只适用于构造平缓的地区, 如盆地腹部地层, 其中 Newberry 模型尤其适用于低渗透和微裂缝地层。黄氏模型可解释 3 项应力不等且最大水平应力大于垂向应力的现象, 但未考虑地层刚性对水平地应力的影响, 无法突出地应力分布规律, 对部分岩性复杂的地层应用效果不好(余雄鹰等, 1996; 王涛, 2012)。葛式模型充分考虑了构造应力、热应力以及地层剥蚀应力对水平应力的影响, 适用于构造较剧烈, 发育大量垂直缝或水平缝的地区。组合弹簧模型将地层假定为平行板之间的一组弹簧, 忽视了非线弹性的影响。前人研究表明(谢正龙等, 2024), 6 种研究方法中组合弹簧模型和 Newberry 模型对于煤层地应力预测精度较高, 但仍存在较大误差, 需要进一步优化。

前人对大宁—吉县地区深层煤层地应力进行了研究(陈刚等, 2009; 李长贵, 2015; 姜波等, 2016; 刘川庆等, 2018)。研究表明, 地应力场对煤储层渗透性具有极其重要的控制作用, 最小主

应力低和主应力差大的区域渗透率较高, 东南部煤层气较为丰富, 有利于煤层气的高效开发。总体来说, 目前对于大宁—吉县地区地应力的研究主要集中在渗透率以及高效开发理论方面, 对于测井资料的应用尤其是常规测井计算煤储层地应力的研究较少, 缺少对该地区现今地应力的认识, 一定程度上会影响该地区压裂施工及煤层气开发的进程。

本文以大宁—吉县煤层气田探明区本溪组 8 号煤层为研究对象, 结合偶极子声波测井、水力压裂、常规测井、高温高压三轴岩石力学实验等分析测试资料, 对单井地应力方向和大小进行研究, 探索了一套适合于构造较平缓地区深层煤储层的常规测井地应力评价方法, 为该区煤层气高效勘探开发提供地质依据。

1 区域地质概况

研究区大宁—吉县位于鄂尔多斯盆地东部(图 1a), 横跨晋西褶皱带和伊陕斜坡带。整体为宽缓的西倾单斜, 形成了“一隆一凹两斜坡”的构造格局(闫霞等, 2021; 聂志宏等, 2022), 煤层气开发区位于西部斜坡带上。斜坡(单斜)海拔为 1 000 ~

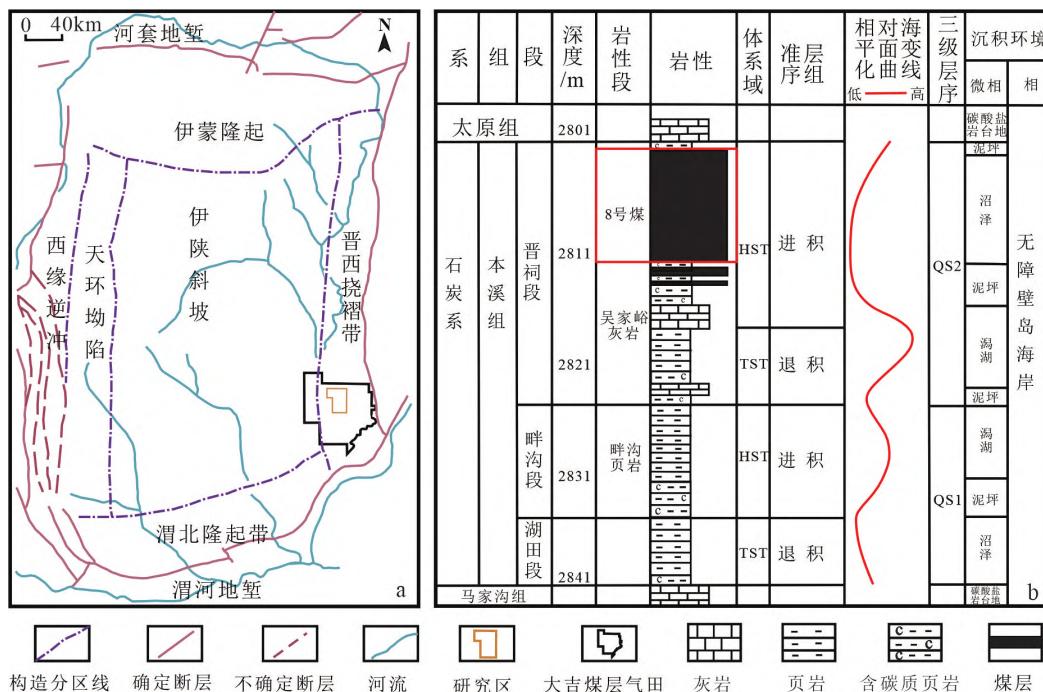


图 1 大宁—吉县区域构造位置及含煤地层(据闫霞等, 2021 修改)

a. 大宁—吉县区块位置; b. 研究区含煤地层

Fig. 1 The regional tectonic location and coal-bearing strata of Daning-Jixian area (modified from Yan et al., 2021)

1 260 m, 地层倾角约为 $0.3^\circ \sim 2.5^\circ$, 断层不发育, 煤层产状平缓。自三叠系地层沉积后, 研究区历经印支运动、燕山运动、喜马拉雅运动最终发育完善, 现今主体构造线为北西向(赵振宇等, 2012; 吕文雅等, 2020; 席颖洋等, 2022)。此次研究主力层为本溪组8号煤层(图1b), 本溪组地层从下到上共可分为3段, 依次为湖田段、畔沟段和晋祠段, 8号煤层位于晋祠段上部, 煤层厚度在4.0~12.0 m之间, 属于潮坪—潟湖—障壁岛—沼泽混合沉积体系。8号煤层以原生结构煤为主, 热演化程度高, 平均孔隙度为3.13%, 平均渗透率为0.4 mD, 属于特低孔特低渗透储层(孙斌等, 2008; 齐奉忠等, 2015; 席颖洋等, 2022)。

2 单井地应力

2.1 单井地应力方向

明确地应力方向对于钻完井工程设计、压裂改造、井网部署等方面有着重要影响(张和伟等, 2020)。研究地应力的方法主要有井壁崩落法、诱导裂缝法、波速各向异性法、微地震监测法、差应变法等(黄继新等, 2006; 赵永强, 2009; 王祥涛等, 2010; 刘建等, 2021)。本文主要采用偶极

子声波测井资料对地应力方向进行研究, 在裂缝不发育情况下, 快横波方向即为现今水平最大主应力方向。其原理是在钻井取心过程中, 岩心进行应力释放, 产生微裂缝, 而最大主应力方向上岩心应力释放强烈, 形成的微裂缝要比最小主应力方向上的多, 导致最大主应力方向多为高阻抗地层, 沿该方向上声波传播速度慢; 反之, 沿最小主应力方向上传播速度快(戴俊生等, 2016; 王猛等, 2019; 闵建等, 2020)。偶极子横波各向异性成像图具体表现为一对亮黄色(或暗色)条带, 呈 180° 对称出现。如J1井本溪组8号煤层段深度段为2 162~2 178 m, 偶极子横波各向异性水平最大主应力方位为 $53^\circ \pm 5^\circ$ 和 $75^\circ \pm 5^\circ$, 对应方向为北东东—南西西向(图2)。根据18口井的偶极子横波各向异性资料, 得到研究区本溪组8号煤层水平最大主应力方向为北东东—南西西向至近东西向(图3)。

2.2 单井地应力大小

(1) 单井地应力测量

在进行岩层地应力大小的计算过程中, 水力压裂法的运用十分广泛, 其具有操作简便、测量结果准确、可以远距离测量深层地应力等优点(张

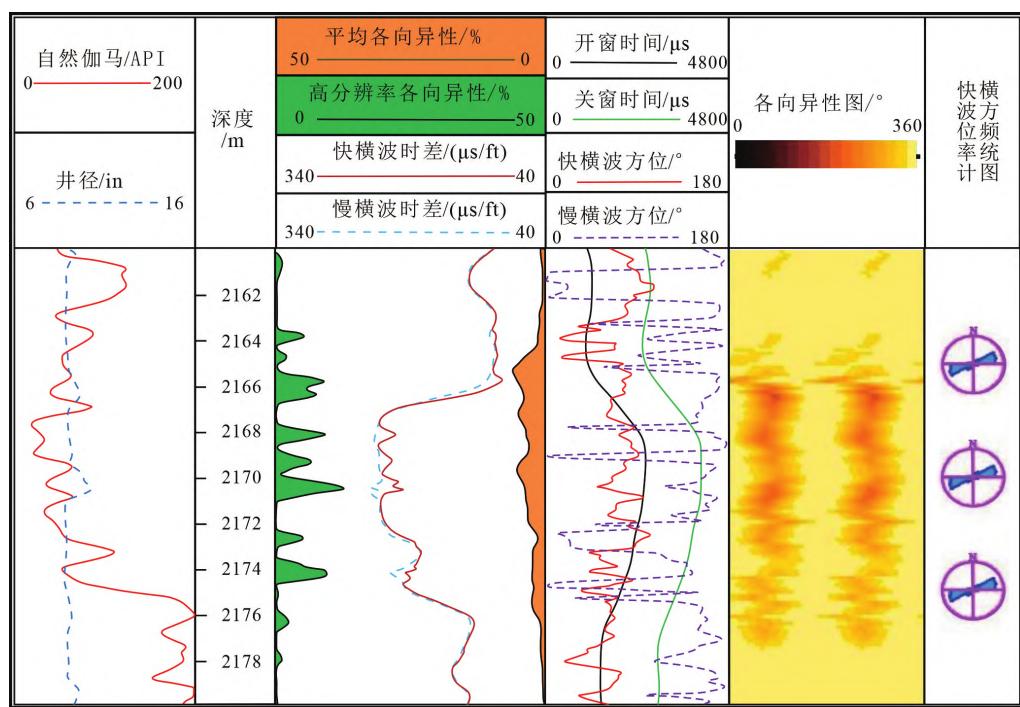


图2 J1井8号煤层段根据偶极子声波测井横波各向异性得到的最大主应力方向

Fig. 2 The orientations of the maximum principal stress obtained by the shear wave anisotropy of dipole acoustic logs of the No.8 coal seam in well J1

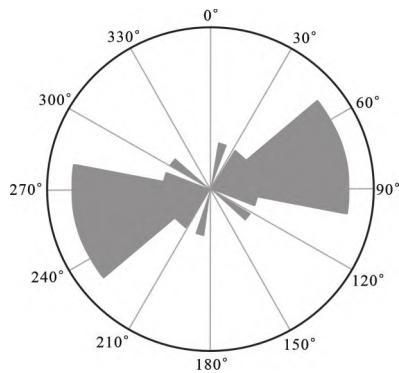
图 3 本溪组 8号煤层最大主应力方位图($N=23$)

Fig. 3 The maximum principal stress orientation map of No.8 coal seam in Benxi Formation ($N=23$)

重远等, 2012; 解东亮, 2013), 因此被广泛使用。水力压裂法主要工作原理是水力压裂产生的裂缝总是沿着水平最大主应力的方向延伸, 当停止液泵加压后, 裂缝停止张开并且闭合, 裂缝内的流体压力与水平最小主应力相等, 此时裂缝的瞬时闭合压力即可视为井口水平最小主应力 (Montmayeur et al., 1986; Schmitt et al., 1989; 景峰等, 2008), 因而有:

$$\sigma_h = P_c \quad (1)$$

式中, P_c 为瞬时闭合压力, 单位为 MPa; σ_h 为井口水平最小主应力, 单位为 MPa。

$$P_p = \rho \times K \times 9.8 \times 0.001 \times H \quad (2)$$

式中, P_p 为储层流体压力, 单位为 MPa; ρ 为地层流体密度, 1.03 g/cm^3 ; K 为压力系数; H 为垂直深度, 单位为 m。大宁—吉县地区压力系数范围为 $0.902 \sim 0.936$, 取平均值 0.919。

$$\sigma_h = 3\sigma_h - P_f - P_p + S_t \quad (3)$$

式中, σ_h 为井口水平最大主应力, 单位为 MPa; P_f 为破裂压力, 单位为 MPa; S_t 为抗张强度, 单位为 MPa。煤岩抗张强度范围为 $0 \sim 1 \text{ MPa}$, 取定值 1 MPa , 以便于计算。

压裂施工曲线获得的是井口水平最大、最小主应力, 需要折算为井底水平最大、最小主应力, 影响井底压力计算的因素为压裂液密度、摩阻压力等, 其计算公式为:

$$\sigma_h' = \sigma_h + \rho_f g H - P_{pf} \quad (4)$$

式中, σ_h' 为井底水平最小主应力, 单位为 MPa; σ_h 为井口水平最小主应力, 单位为 MPa; ρ_f 为压裂液密度, 单位为 g/cm^3 ; g 为重力加速度, 9.8 g/cm^3 ; H 为垂直深度, 单位为 m; P_{pf} 为摩阻压力, 单位为 MPa。

$$\sigma_h' = \sigma_h + \rho_f g H - P_{pf} \quad (5)$$

式中参数含义同上。 σ_h' 为井底水平最大主应力, 单位为 MPa; σ_h 为井口水平最大主应力, 单位为 MPa。

$$P_{pf} = P_n - P_c \quad (6)$$

式中, P_{pf} 为摩阻压力, 单位为 MPa; P_n 为施工压力, 单位为 MPa; P_c 为瞬时闭合压力, 单位为 MPa。

如图 4 所示, 煤层压裂施工曲线图中随着水压不断增大, 孔壁煤岩体沿阻力最小的方向出现裂缝, 此时相应的泵压为破裂压力 P_f , 保持水压恒定的泵压为瞬时闭合压力 P_c 。已知 J1 井 $H = 2511.7 \text{ m}$, $\rho_f = 1.30 \text{ g/cm}^3$, $P_f = 22.4 \text{ MPa}$, $P_c = 35.2 \text{ MPa}$, $P_n = 51.0 \text{ MPa}$, 得到 $P_p = 23.3 \text{ MPa}$, $P_{pf} = 15.8 \text{ MPa}$, $\sigma_h = 35.2 \text{ MPa}$, $\sigma_h' = 60.9 \text{ MPa}$, 最终得到 $\sigma_h' = 51.4 \text{ MPa}$, $\sigma_h = 77.1 \text{ MPa}$ 。

根据研究区 6 口井的水力压裂资料分析, 得到本溪组 8 号煤层水平最大主应力在 $54.5 \sim 79.5 \text{ MPa}$ 之间, 平均值为 64.3 MPa ; 水平最小主应力在 $36.2 \sim 57.6 \text{ MPa}$ 之间, 平均值为 44.8 MPa ; 水平两向差应力在 $14.2 \sim 25.7 \text{ MPa}$ 之间, 平均值为 15.3 MPa (表 1)。

(2) 单井地应力计算

水力压裂法虽可直接得到水平最小主应力大

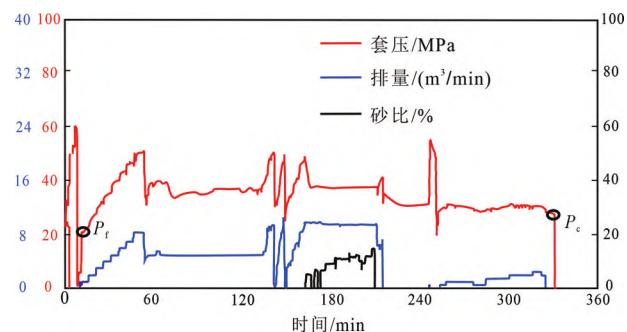


图 4 J1 井 8号煤层压裂施工曲线示意图

Fig. 4 Hydraulic fracturing construction curve of the No.8 coal seam in J1 well

表 1 水力压裂法测得的8号煤层现今地应力值

Table 1 The present-day in-situ stress values of the No.8 coal seam measured by hydraulic fracturing method

井名	P_r /MPa	P_c /MPa	P_p /MPa	P_{p1} /MPa	σ_h^r /MPa	σ_h^l /MPa	$\Delta\sigma$ /MPa
J1井	26.8	32.4	22.1	20.6	59.3	42.4	16.9
J2井	30.9	40.0	22.7	13.7	54.5	40.3	14.2
J3井	22.4	35.2	23.3	15.8	77.1	51.4	25.7
J4井	47.8	44.0	27.3	16.3	79.5	57.6	21.9
J5井	32.8	34.1	17.3	21.5	55.3	36.2	19.1
J6井	18.6	34.1	21.1	20.8	60.5	41.0	19.5
		均值			64.3	44.8	15.3

小, 但是该方法要求压裂段岩心较为完整, 不能含有天然裂缝, 且其测量精度也会受到一定的限制, 无法获得纵向上连续的结果(景锋等, 2008; 解东亮, 2013), 而测井资料计算方法具有成本低、方便、纵向连续性好的特点(智慧文等, 2015), 通过测井计算值与水力压裂测量值相互验证, 即可得到更为可靠的单井应力值。

在一般的非挤压性盆地中, 垂向应力是由上覆岩层重力引起的, 可用密度测井资料求出, 其计算公式(Brown et al., 1978)为:

$$\sigma_v = P_0 = g \times \int_0^H \rho_b(H) dh \quad (7)$$

式中, σ_v 为垂直应力, 单位为 MPa; P_0 为上覆岩层重力, 单位为 MPa; g 为重力加速度, 9.8 g/cm³; H 为垂直深度, 单位为 m; ρ_b 为岩层密度, 单位为 g/cm³。

根据大宁—吉县地区发育煤层、构造应力较弱、孔渗较低、天然裂缝较发育的特点以及现有数据资料, 主要利用 Newberry 模型来计算水平地应力。未改进的 Newberry 模型计算公式为:

$$\sigma_h = \frac{\mu}{1-\mu} (\sigma_v - \alpha P_p) + P_p \quad (8)$$

$$\sigma_h = \{1 + A[1 - (b/a)^2](E/E_{ma})\} \sigma_h \quad (9)$$

式中, σ_h 为水平最小主应力, 单位为 MPa; σ_h 为水平最大主应力, 单位为 MPa; α 为有效应力系数(Biot 系数), 在 0~1 之间; μ 为静态泊松比; P_p 为孔隙压力, 单位为 MPa; a 为井眼长半轴, 单位为 m; b 为井眼短半轴, 单位为 m; E 为地层弹性模量, 单位为 MPa; E_{ma} 为地层骨架弹性模量, 单位为 MPa; A 为修正系数。

水平两向应力主要受到岩层重力以及构造挤压应力的影响(Zoback et al., 2003), 在经过较强烈的构造运动后, 由于地质体的残余变形而残留的部分构造应力, 保存到现在为构造残余应力, 研究区该应力随深度增加而增加, 影响不可忽略(朱兴珊, 1994)。由于未改进的 Newberry 模型未考虑到构造残余应力的影响, 结合前人思路(高向东等, 2022), 本文在原有公式基础上引入修正系数来提高预测精度, 修正后的 Newberry 模型适用于受构造活动影响较小的区域, 其计算公式为:

$$\sigma_h = \frac{\mu}{1-\mu} (\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + S_{th} \quad (10)$$

$$\sigma_h = \frac{\mu}{1-\mu} (\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + S_{th} \quad (11)$$

式中, S_{th} 、 S_{th} 为水平最小、最大构造残余应力, 单位为 MPa。

$$S_{th} = \beta_h (\sigma_v - \alpha P_p) \quad (12)$$

$$S_{th} = \beta_h (\sigma_v - \alpha P_p) \quad (13)$$

$$3S_{th} - S_{th} \leq \min \left\{ P_w + \alpha P_p - 2 \frac{\mu}{1-\mu} (\sigma_v - \alpha P_p) \right\} \quad (14)$$

式中, β_h 、 β_h 分别为最小、最大水平地应力构造系数; P_w 为地下水压力, 单位为 MPa; 其他参数含义同上。公式(12)和公式(13)为计算式, 公式(14)式为检验式。 β_h 、 β_h 参数值由 6 口具有完整数据的压裂测试井结合修正后的 Newberry 模型反推式求出, 得到 $\beta_h = 0.221$, $\beta_h = 0.669$ 。

偶极子声波测井可以提取地层中的纵、横波时差, 进而计算出岩石力学参数。但在通常情况

下, 测井资料中缺少横波资料, 而根据研究区构造作用弱、相对稳定的特点, 可以根据纵横波时差的转换关系来获取横波时差(周广照等, 2017)。为了使纵、横波时差相关关系拟合度更高, 依据埋藏深度不同将研究区划分为3个区域(图5)。不同区域进行测井数据的纵、横波时差统计, 建立适合的横波预测公式。

对不同地区的横纵波时差相关关系进行进一步拟合得到如下结果:

$$DTS = DTC \times 3.148 - 118.923 \quad (15)$$

$$DTS = DTC \times 2.639 - 46.442 \quad (16)$$

$$DTS = DTC \times 3.539 - 159.712 \quad (17)$$

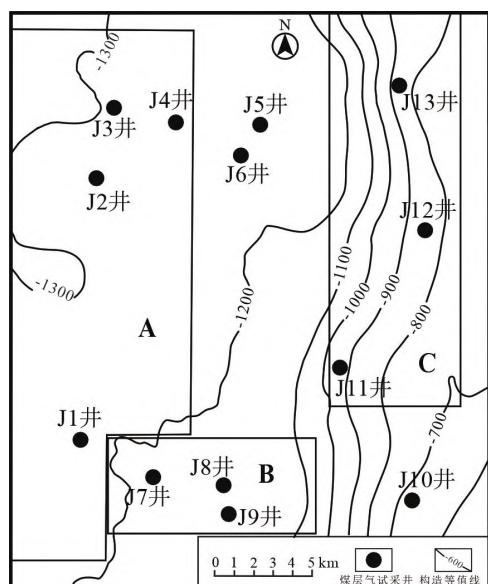


图 5 研究区纵、横波井位分区图

Fig. 5 Well location zonal map of P wave and S wave in the study area

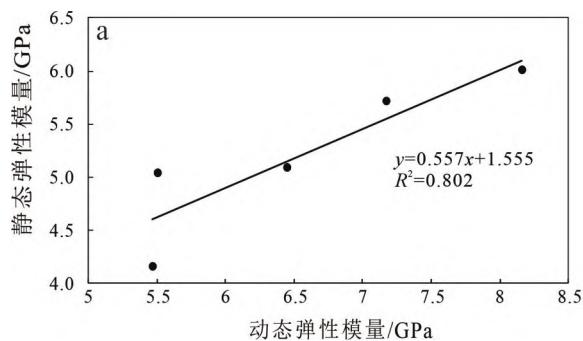


图 6 研究区 8 号煤层段动、静态岩石力学参数转换关系

a. 动、静态弹性模量转换关系;

公式(15)为 A 区横纵波时差相关关系, 公式(16)为 B 区横纵波时差相关关系, 公式(17)为 C 区横纵波时差相关关系。式中, DTS 为横波时差, 单位为 $\mu\text{s}/\text{ft}$; DTC 为纵波时差, 单位为 $\mu\text{s}/\text{ft}$ 。

在已获得横波时差的基础上, 可以通过密度测井、纵横波声波测井数据计算岩石力学参数, 进而间接求出地应力大小。该方法计算得出的杨氏模量和泊松比随着不同深度的纵横波时差发生变化, 为动态杨氏模量和动态泊松比, 在实际计算过程中需要将其换算成为静态的参数, 静态参数的获取需要在实验室中使用设备最大程度地模拟地层条件环境, 测出取样岩心的杨氏模量和泊松比, 称为静态杨氏模量和静态泊松比(林英松等, 1998)。这些参数均反映岩石力学性质, 煤岩岩石力学性质主要受内因与外因两方面控制。内因主要受煤岩组分(如显微煤岩成分、宏观煤岩类型等)、煤岩结构(孔隙、裂缝等)和煤质等影响; 外因主要受地应力、流体(水和气体)、温度、应力作用时间等的影响(孟召平等, 2002; 辛聪聪等, 2016)。

本文以 J1 井为例, 由高温高压三轴岩石力学实验得到的静态杨氏模量和静态泊松比进行校正, 基于常规测井资料计算得到的动态杨氏模量和动态泊松比, 从而得到煤层段动、静态杨氏模量和泊松比拟合关系(图 6), 其关系式为:

$$\text{静态杨氏模量} = 0.557 \times \text{动态杨氏模量} + 1.555 \quad (18)$$

$$\text{静态泊松比} = 0.591 \times \text{动态泊松比} + 0.173 \quad (19)$$

根据修改后的 Newberry 模型进行计算统计, 得到应力剖面图(图 7)以及单井应力值(表 2)。根

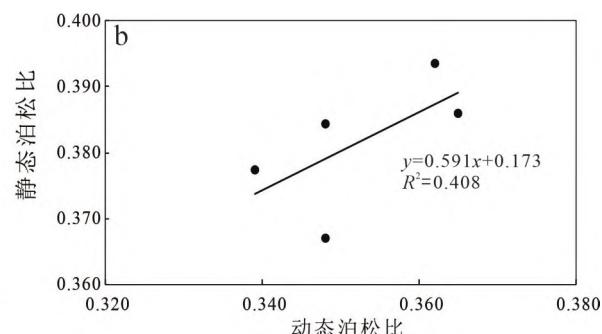


图 6 研究区 8 号煤层段动、静态岩石力学参数转换关系

a. 动、静态弹性模量转换关系;

Fig. 6 Conversion relationships between the dynamic and static rock mechanics parameters of the No.8 coal seam in the study area

据测井资料计算得出, 本溪组8号煤层水平最大主应力在41.2~55.8 MPa之间, 平均值为51.2 MPa; 水平最小主应力在32.0~42.6 MPa之间, 平均值为38.3 MPa; 水平两向差应力在8.3~16.7 MPa之间, 平均值为12.9 MPa(表2)。

(3) 计算结果验证

根据6口井水力压裂资料测量得出的煤层地应力大小与根据测井资料计算得出的结果进行对比分析(表3, 表4), 研究区各口井相对误差均在10%以内, 误差较小, 符合研究区钻井、压裂等工程对地应力误差范围的要求, 说明根据测井资料计算出的应力结果相对可靠。

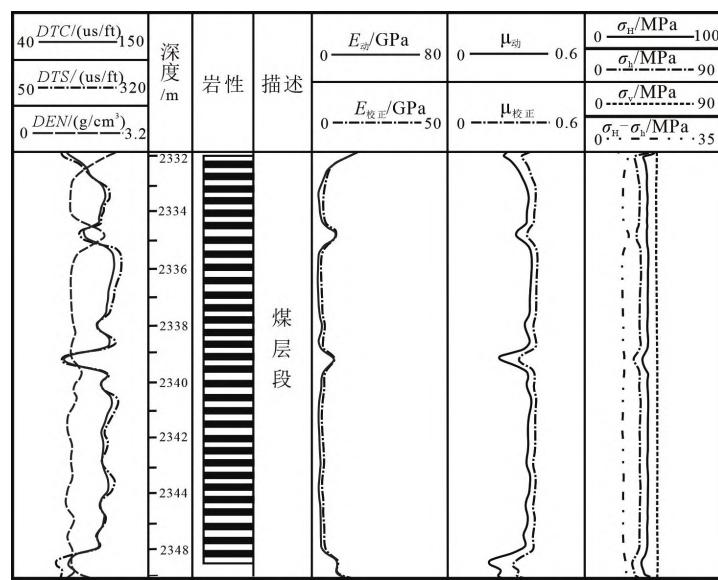


图7 J1井8号煤层现今地应力分布图

Fig. 7 The present-day in-situ stress distribution map of the No.8 coal seam in J1 well

表2 常规测井资料计算的8号煤层现今地应力值

Table 2 The present-day in-situ stress values calculated by conventional logs of the No.8 coal seam

井名	最大主应力/MPa	最小主应力/MPa	水平差应力/MPa
J1井	55.8	42.6	13.2
J2井	55.4	42.1	13.3
J5井	54.1	37.5	16.6
J6井	55.7	39.0	16.7
J7井	45.0	36.7	8.3
J8井	41.2	32.0	9.2
均值	51.2	38.3	12.9

表3 水力压裂—常规测井资料计算的8号煤层水平最大地应力均值对比表

Table 3 Comparison table of mean values of the maximum horizontal present-day in-situ stress of the No.8 coal seam calculated by hydraulic fracturing data and conventional logs

井名	水力压裂数据/MPa	测井资料值/MPa	绝对误差/MPa	相对误差/%
J1井	59.3	55.8	3.5	6.3
J2井	54.5	55.4	0.9	1.6
J5井	55.3	54.1	1.2	2.2
J6井	60.5	55.7	4.8	8.6
均值	57.4	55.2	2.6	4.7

表 4 水力压裂—常规测井资料计算的 8 号煤层水平最小地应力均值对比表

Table 4 Comparison table of mean values of the minimum horizontal present-day in-situ stress of the No.8 coal seam calculated by hydraulic fracturing data and conventional logs

井名	水力压裂数据/MPa	测井资料值/MPa	绝对误差/MPa	相对误差/%
J1 井	42.4	42.6	0.2	0.5
J2 井	40.3	42.1	1.8	4.2
J5 井	36.2	37.5	1.3	3.5
J6 井	41.0	39.0	2.0	5.1
均值	40.0	40.3	1.3	3.3

3 讨 论

利用常规测井资料计算符合研究区实际较精确的地应力大小, 合适的地层模型的选取尤为重要, 不同地应力计算模型, 地应力计算方法存在差异。对于研究区这种构造较平缓、低渗透、有微裂缝发育的地区可以采用 Newberry 模型, 考虑到构造残余应力的影响, 结合前人思路在原有公式基础上引入修正系数 β_i 、 β_h 来提高预测精度。

纵横波时差作为计算地应力的重要参数之一, 纵横波时差获取的准确性是影响常规测井地应力计算结果精度的又一重要因素。纵波资料相对横波资料较易获得, 常规声波测井资料一般测量的是纵波时差, 常规测井曲线不能直接测量横波时差, 横波时差可以通过偶极子声波测井、多极子声波测井等特殊测井资料获得, 但是这些特殊测井花费高昂、资料有限, 利用常规测井资料得到的纵波时差结合经验公式求取横波时差, 便成为最常用的方法之一。此外, 还可以通过岩石弹性参数测试测量岩石的纵横波时差, 从而建立纵横波时差关系(周道生, 2020)。由于不同岩性、不同埋藏深度、不同构造部位、不同煤层展布带的纵横波时差存在差异, 在实际研究过程中, 按岩性、埋藏深度、构造、煤层带展布等地质因素分析纵横波时差关系, 可以得到更加准确的纵横波时差。

岩石力学实验获取的静态岩石力学参数具有精度高、数据可靠的优点, 但费用昂贵, 参数不连续, 而动态法正好弥补了这一缺点, 求取的动态岩石力学参数具有纵向分辨率高、参数连续的优点, 对两种方法得到的岩石力学参数进行相关性分析, 会更加贴近真实生产中的岩石力学参数, 实用性更强。实验中样品的选取尤为重要, 多选

取结构完整, 天然裂缝与纹层不发育的岩样进行实验, 为了符合测试要求, 岩样还要进行加工处理。实验过程中尽可能多测量不同岩性的岩石力学参数, 以保证结果的准确性。

孔隙压力与孔隙度、流体类型、地层压实程度等因素有关, 可以通过盆地模拟、地层速度求取, 但准确性较低, 较常用的方法有 Eaton 公式、Yan 公式, 这些公式均需求取正常压实速度, 在浅层声波时差波动大的时候误差较大(陈新等, 2016)。本文通过压裂深度、不同地层流体的密度、压力系数求取, 压裂深度不同, 地层流体密度与压力系数也具有差异性, 选取正确的参数对结果的影响很大。

有效应力系数反映孔隙空间对岩石整体变形的贡献, 控制岩石的应力状态与孔隙压力的变化(谢正龙等, 2024), 该参数对于地应力的计算结果影响较大。有效应力系数一般利用岩石骨架的纵、横波时差与体积模量等测井资料获取, 确定有效应力系数的方法有 Cross-plotting 法、排水试验法、声波速度法(程远方等, 2015; 徐欣等, 2018), 3 种方法对于中高渗岩心效果较好, 而对于低渗岩心效果较差。影响有效应力系数的因素为有效应力的大小、实验加载速率、孔隙度、岩石组分、孔隙流体类型等。有效应力系数随着有效应力和钙质胶结物的增加而减小, 随着孔隙度的增大而增大。

综上所述, 影响常规测井地应力计算精度的主要因素有合适的地层模型的选取、纵横波时差获取的准确性、岩石力学参数的确定、孔隙压力的求取、有效应力系数的确定等。利用常规测井资料结合水力压裂法可获得地应力的连续剖面, 提高资料的利用率, 且结果较为准确, 对钻井设计、压裂设计优化、井网部署等具有一定指导意义。

4 结 论

(1) 根据 18 口井的波速各向异性结果, 大宁—吉县地区本溪组 8 号煤层水平最大主应力方向为北东东—南西西向至近东西向。

(2) 据水力压裂资料分析, 得到本溪组 8 号煤层水平最大主应力在 54.5~79.5 MPa 之间, 平均值为 64.3 MPa; 水平最小主应力在 36.2~57.6 MPa 之间, 平均值为 44.8 MPa; 水平两向差应力在 14.2~25.7 MPa 之间, 平均值为 15.3 MPa。根据修正后的 Newberry 模型, 基于常规测井资料, 计算得到本溪组 8 号煤层水平最大主应力在 41.2~55.8 MPa 之间, 平均值为 51.2 MPa; 水平最小主应力在 32.0~42.6 MPa 之间, 平均值为 38.3 MPa; 水平两向差应力在 8.3~16.7 MPa 之间, 平均值为 12.9 MPa。两者相对误差在 10% 以内, 结果相对可靠。

(3) 影响常规测井地应力计算精度的主要因素有合适的地层模型的选取、纵横波时差获取的准确性、岩石力学参数的确定、孔隙压力的求取、有效应力系数的确定等。本文提出了一套适合于构造较平缓地区深层煤储层的常规测井地应力评价方法, 可为类似深层煤储层地应力的研究提供借鉴。

致 谢 感谢东华理工大学的高向东老师对本论文提供的宝贵建议及相关资料!

参 考 文 献

- 陈 刚, 赵庆波, 李五忠等. 2009. 大宁—吉县地区地应力场对高渗区的控制. 中国煤层气, 6(3): 15-20.
Chen Gang, Zhao Qingbo, Li Wuzhong et al. 2009. Control of high permeability zone by ground stress field in Daning-Jixian area. *China Coalbed Methane*, 6(3): 15-20.
- 陈 新, 丁富峰, 尹国庆. 2016. 地层孔隙压力预测方法研究. 石油工业技术监督, 32(9): 46-49.
Chen Xin, Ding Fufeng and Ying Guoqing. 2016. Study on prediction method of formation pore pressure. *Technology Supervision in Petroleum Industry*, 32(9): 46-49.
- 程远方, 程林林, 黎 慧等. 2015. 不同渗透性储层 Biot 系数测试方法研究及其影响因素分析. 岩石力学与工程学报, 34 (增刊 2): 3998-4004.
Cheng Yuanfang, Cheng Linlin, Li Hui et al. 2015. Research on testing methods of Biot coefficient in reservoir with different permeability and its influencing factors. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34(suppl. 2): 3998-4004.
- 戴俊生, 刘敬寿, 杨海盟等. 2016. 铜城断裂带阜二段储层应力场数值模拟及开发建议. 中国石油大学学报(自然科学版), 40(1): 1-9.
Dai Junsheng, Liu Jingshou, Yang Haimeng et al. 2016. Numerical simulation of stress field of Fu-2 member in Tongcheng fault zone and development suggestions. *Journal of China University of Petroleum (Edition of National Science)*, 40(1): 1-9.
- 董晨明. 2019. 深部煤层气基本地质问题探讨. 石化技术, 26(2): 327-327.
Dong Chenming. 2019. Discussion on basic geological problems of deep coalbed methane. *Petrochemical Industry Technology*, 26(2): 327-327.
- 高向东, 孙 昊, 王延斌等. 2022. 临兴地区深部煤储层地应力场及其对压裂缝形态的控制. 煤炭科学技术, 50(8): 140-150.
Gao Xiangdong, Sun Hao, Wang Yanbin et al. 2022. In-situ stress field of deep coal reservoir in Linxing area and its control on fracturing crack. *Coal Science and Technology*, 50 (8) : 140-150.
- 葛洪魁, 林英松, 王顺昌. 1998. 地应力测试及其在勘探开发中的应用. 石油大学学报(自然科学版), 22(1): 94-99.
Ge Hongkui, Lin Yingsong and Wang Shunchang. 1998. In-situ stresses determination technique and its applications in petroleum exploration and development. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 22(1): 94-99.
- 黄继新, 彭仕宓, 王小军等. 2006. 成像测井资料在裂缝和地应力研究中的应用. 石油学报, 27(6): 65-69.
Huang Jixin, Peng Shimil, Wang Xiaojun et al. 2006. Application of imaging logging data in the research of fracture and ground stress. *Acta Petrolei Sinica*, 27(6): 65-69.
- 姜 波, 汪吉林, 屈争辉等. 2016. 大宁—吉县地区地应力特征及其对煤储层渗透性的影响. 地学前缘, 23(3): 17-23.
Jiang Bo, Wang Jilin, Qu Zhenghui et al. 2016. The stress characteristics of the Daning-Jixian area and its influence on the permeability of the coal reservoir. *Earth Science Frontiers*, 23(3): 17-23.
- 解东亮. 2013. 地应力测量方法综述. 科技资讯, (6): 150-153.
Jie Dongliang. 2013. Review of in-situ stress measurement methods. *Science and Technology Information*, (6): 150-153.
- 景 锋, 梁合成, 边智华等. 2008. 地应力测量方法研究综述. 华北水利水电学院学报, 29(2): 71-75.
Jing Feng, Liang Hecheng, Bian Zhihua et al. 2008. Review of geo-stress measurement method and study. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 29(2): 71-75.
- 鞠 珮, 姜 波, 秦 勇等. 2020. 滇东恩洪区块地应力分布及深部煤层气临界深度预测. 煤炭科学技术, 48(2): 194-200.
Ju Wei, Jiang Bo, Qin Yong et al. 2020. Distribution of in-situ stress and prediction of critical depth for deep coalbed methane in Enhong block of eastern Yunnan region. *Coal Science and Technology*, 48(2): 194-200.

- Technology, 48(2): 194-200.
- 康竹林. 2000. 中国深层天然气勘探前景. 天然气工业, 20(5): 1-4.
- Kang Zhulin. 2000. The exploration prospect of deep gas in China. *Natural Gas Industry*, 20(5): 1-4.
- 赖 锦, 白天宇, 肖 露等. 2023. 地应力测井评价方法及其地质与工程意义. 石油与天然气地质, 44(4): 1033-1043.
- Lai Jin, Bai Tianyu, Xiao Lu et al. 2023. Well-logging evaluation of in-situ stress fields and its geological and engineering significances. *Oil and Gas Geology*, 44(4): 1033-1043.
- 李长贵. 2015. 煤层气成藏的构造—水文动力学特征及控制机理——以鄂尔多斯盆地东缘中南部为例(博士学位论文). 江苏徐州: 中国矿业大学. 1-112.
- Li Changgui. 2015. Structural-Hydrological Dynamic Characteristics and Its Control Mechanism on Coalbed Methane Reservoir: An Example from the Middle-southern Region in the Eastern Margin of Ordos Basin (PhD Thesis). Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology. 1-112.
- 李曙光, 王成旺, 王红娜等. 2022. 大宁—吉县区块深层煤层气成藏特征及有利区评价. 煤田地质与勘探, 50(9): 59-67.
- Li Shuguang, Wang Chengwang, Wang Hongna et al. 2022. Reservoir forming characteristics and favorable area evaluation of deep coalbed methane in Daning-Jixian block. *Coal Geology and Exploration*, 50(9): 59-67.
- 林英松, 葛洪魁, 王顺昌. 1998. 岩石动静力学参数的试验研究. 岩石力学与工程学报, 17(2): 216-222.
- Lin Yingsong, Ge Hongkui and Wang Shunchang. 1998. Testing study on dynamic and static elastic parameters of rocks. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 17 (2) : 216-222.
- 刘成林, 朱 杰, 车长波等. 2009. 新一轮全国煤层气资源评价方法与结果. 天然气工业, 29(11): 130-132.
- Liu Chenglin, Zhu Jie, Che Changbo et al. 2009. Methodologies and results of the latest assessment of coalbed methane resources in China. *Natural Gas Industry*, 29(11): 130-132.
- 刘川庆, 朱卫平, 夏 飞等. 2018. 鄂尔多斯盆地大宁—吉县区块煤层气水平井分段压裂实践. 天然气工业, 38(增刊1): 112-117.
- Liu Chuanqing, Zhu Weiping, Xia Fei et al. 2018. Staged fracturing of CBM horizontal wells in Daning-Jixian block, Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 38(suppl. 1): 112-117.
- 刘 建, 惠 晨, 樊建明等. 2021. 鄂尔多斯盆地合水地区长6致密砂岩储层现今地应力分布特征及其开发建议. 地质力学学报, 27(1): 31-39.
- Liu Jian, Hui Chen, Fan Jianming et al. 2021. Distribution characteristics of the present-day in-situ stress in the Chang 6 tight sandstone reservoirs of the Yanchang Formation in the Heshui area, Ordos Basin, China and suggestions for development. *Journal of Geomechanics*, 27(1): 31-39.
- 卢 蕊. 2021. 泥页岩储层岩石力学参数与地应力表征方法研究——以苏北盆地阜二段为例(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学(北京). 1-65.
- Lu Rui. 2021. Study on Rock Mechanics Parameters and In-situ Stress Characterization Methods of Shale Reservoirs: Take E1 f2 of Subei Basin as An Example (Master's Thesis). Beijing: China University of Geosciences (Beijing). 1-65.
- 吕文雅, 曾联波, 周思宾等. 2020. 鄂尔多斯盆地西南部致密砂岩储层微观裂缝特征及控制因素——以红河油田长8储层为例. 天然气地球科学, 31(1): 37-46.
- Lü Wenya, Zeng Lianbo, Zhou Sibin et al. 2020. Microfracture characteristics and its controlling factors in the tight oil sandstones in the Southwest Ordos Basin: Case study of the eighth member of the Yanchang Formation in Honghe oilfield. *Natural Gas Geoscience*, 31(1): 37-46.
- 鲁秀芹, 张永平, 周秋成等. 2019. 郑庄区块地应力场分布规律及其对煤层气开发的影响. 中国煤层气, 16(5): 14-18.
- Lu Xiuqin, Zhang Yongping, Zhou Qiucheng et al. 2019. Characteristics of in-situ stress field in Zhengzhuang block and its influence on CBM development. *China Coalbed Methane*, 16(5): 14-18.
- 孟召平, 彭苏萍, 傅继彤. 2002. 含煤岩系岩石力学性质控制因素探讨. 岩石力学与工程学报, 21(1): 102-106.
- Meng Zhaoping, Peng Suping and Fu Jitong. 2002. Study on control factors of rock mechanics properties of coal-bearing formation. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 21(1) : 102-106.
- 闵 建, 马辉运, 彭钩亮等. 2020. 波速各向异性结合古地磁测试地应力方向研究. 钻采工艺, 43(增刊): 17-19.
- Min Jian, Ma Huiyun, Peng Juanliang et al. 2020. Study on determination of in-situ stress direction using wave velocity anisotropy method combined with paleomagnetism method. *Drilling and Production Technology*, 43(suppl.): 17-19.
- 聂志宏, 时小松, 孙 伟等. 2022. 大宁—吉县区块深层煤层气生产特征与开发技术对策. 煤田地质与勘探, 50(3) : 193-200.
- Nie Zhihong, Shi Xiaosong, Sun Wei et al. 2022. Production characteristics of deep coalbed methane gas reservoirs in Daning-Jixian block and its development technology countermeasures. *Coal Geology and Exploration*, 50 (3) : 193-200.
- 齐奉忠, 于永金, 刘子帅. 2015. 大宁—吉县地区煤层气水平井固井技术研究与应用. 非常规油气, 2(1): 54-60.
- Qi Fengzhong, Yu Yongjin and Liu Zishuai. 2015. Cementing technology of horizontal coalbed methane wells in Daning-Jixian area. *Unconventional Oil and Gas*, 2 (1) : 54-60.
- 秦 勇, 申 建. 2016. 论深部煤层气基本地质问题. 石油学报, 37(1): 125-136.
- Qin Yong and Shen Jian. 2016. On the fundamental issues of deep coalbed methane geology. *Acta Petrolei Sinica*, 37 (1) : 125-136.
- 任瑞莲. 2015. 地层倾角资料确定地应力的方法及应用. 中国化工贸易, (7): 188-189.
- Ren Ruilian. 2015. The method and application of determining in-situ

- stress by stratigraphic dip data. *China Chemical Trade*, (7): 188-189.
- 四川石油管理局. 1999. 成像测井技术的解释方法和应用领域. 北京: 化学工业出版社. 1-160.
- Sichuan Petroleum Administration. 1999. Interpretation Method and Application Field of Imaging Logging Technology. Beijing: Chemical Industry Press. 1-160.
- 孙斌, 邵龙义, 李五忠等. 2008. 大宁地区煤层气成藏控气因素分析. 天然气工业, 28(3): 40-44.
- Sun Bin, Shao Longyi, Li Wuzhong et al. 2008. An analysis of control factors on CBM pooling in Daning area, Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 28(3): 40-44.
- 王猛, 李明涛, 张志强等. 2019. 基于交叉偶极子阵列声波资料精细评价地应力方法. 海洋石油, 39(3): 66-70.
- Wang Meng, Li Mingtao, Zhang Zhiqiang et al. 2019. The method of evaluating ground stress based on cross dipole acoustic. *Offshore Oil*, 39(3): 66-70.
- 王涛, 王磊, 王庆军等. 2012. 基于测井资料的地应力连续剖面计算方法. 长江大学学报(自然科学版), 9(11): 116-119.
- Wang Tao, Wang Lei, Wang Qingjun et al. 2012. The calculation method of in-situ stress continuous profile based on logging data. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 9(11): 116-119.
- 王祥涛, 赵强. 2010. 从第25次南极科考论穿越西风带航线选择. 极地研究, 22(2): 199-210.
- Wang Xiangtao and Zhao Qiang. 2010. The route selection for r/v Xuelong's crossing the westerly belt based on the 25th Chinese national Antarctic research expedition. *Chinese Journal of Polar Research*, 22(2): 199-210.
- 魏永恒, 葛燕燕, 王刚等. 2022. 新疆库拜煤田铁列克矿区地应力分布及其对煤层气开发的影响. 现代地质, 36(5): 1324-1332.
- Wei Yongheng, Ge Yanyan, Wang Gang et al. 2022. In-situ stress distribution and its influence on coalbed methane development in Tielieke mining area of Kubai coalfield, Xinjiang. *Geoscience*, 36(5): 1324-1332.
- 吴国代, 桑树勋, 杨志刚等. 2009. 地应力影响煤层气勘探开发的研究现状与展望. 中国煤炭地质, 21(4): 31-34.
- Wu Guodai, Sang Shuxun, Yang Zhigang et al. 2009. Current research status and prospect of geo-stress impact on CBM exploration and exploitation. *Coal Geology of China*, 21(4): 31-34.
- 席颖洋, 文志刚, 赵伟波等. 2022. 鄂尔多斯盆地东部石炭系本溪组页岩气地质特征及富集规律. 天然气地球科学, 33(12): 1936-1950.
- Xi Yingyang, Wen Zhigang, Zhao Weibo et al. 2022. Study on geological characteristics and enrichment law of shale gas of Carboniferous Benxi Formation in eastern Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 33(12): 1936-1950.
- 谢正龙, 刘之的, 韩鸿来等. 2024. 大吉区块深部(层)煤层气储层地应力测井预测研究. 物探与化探, 48(2): 356-365.
- Xie Zhenglong, Liu Zhidi, Han Honglai et al. 2024. Log-based in situ stress prediction of deep coalbed methane reservoirs in the Daji block. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 48(2): 356-365.
- 辛聪聪, 吴灿灿, 朱方华等. 2016. 宿州市祁南煤矿区含煤岩系岩石力学性质探讨. 赤峰学院学报(自然科学版), 32(1): 151-153.
- Xin Congcong, Wu Cancan, Zhu Fanghua et al. 2016. Discussion on mechanical properties of coal-bearing rock series in Qinan coal mining area of Suzhou. *Journal of Chifeng University (Natural Science Edition)*, 32(1): 151-153.
- 徐凤银, 聂志宏, 孙伟等. 2023. 大宁—吉县区块深部煤层气高效开发理论技术体系. 煤炭学报, 49(1): 528-544.
- Xu Fengyin, Nie Zhihong, Sun Wei et al. 2023. Theoretical and technological system for highly efficient development of deep coalbed methane in the eastern edge of Erdos Basin. *Journal of China Coal Society*, 49(1): 528-544.
- 徐欣, 王伟, 胡明毅等. 2018. 中孔中渗砂岩储层Biot系数测试方法对比研究. 石油钻探技术, 46(2): 109-114.
- Xu Xin, Wang Wei, Hu Mingyi et al. 2018. Comparison and study over the Biot coefficients test methods in medium porosity and medium permeability sandstone reservoirs. *Petroleum Drilling Techniques*, 46(2): 109-114.
- 闫霞, 徐凤银, 聂志宏等. 2021. 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. 煤炭学报, 46(8): 2426-2439.
- Yan Xia, Xu Fengyin, Nie Zhihong et al. 2021. Microstructure characteristics of Daji area in East Ordos Basin and its control over the high yield dessert of CBM. *Journal of China Coal Society*, 46(8): 2426-2439.
- 余琪祥. 2023. 开发前景广阔的深层煤层气. 石油知识, (3): 12-14.
- Yu Qixiang. 2023. Deep coalbed methane with broad development prospects. *Petroleum Knowledge*, (3): 12-14.
- 余雄鹰, 王越之, 李自俊. 1996. 声波法计算水平主地应力值. 石油学报, 17(3): 59-63.
- Yu Xiongying, Wang Yuezhi and Li Zijun. 1996. Calculation of horizontal principal in-situ stress with acoustic wave method. *Acta Petrolei Sinica*, 17(3): 59-63.
- 张重远, 吴满路, 陈群策等. 2012. 地应力测量方法综述. 河南理工大学学报(自然科学版), 31(3): 305-310.
- Zhang Chongyuan, Wu Manlu, Chen Qunce et al. 2012. Review of in-situ stress measurement methods. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science Edition)*, 31(3): 305-310.
- 张和伟, 申建, 李可心等. 2020. 鄂尔多斯盆地临兴西区深煤层地应力场特征及应力变化分析. 地质与勘探, 56(4): 809-818.
- Zhang Hewei, Shen Jian, Li Kexin et al. 2020. Characteristics of the in-situ stress field and stress change of deep coal seams in the western Linxing area, Ordos Basin. *Geology and Exploration*, 56(4): 809-818.

- 张 懿, 朱光辉, 郑求根等. 2022. 中国煤层气资源分布特征及勘探研究建议. *非常规油气*, 9(4): 1-8.
- Zhang Yi, Zhu Guanghui, Zheng Qiugen et al. 2022. Distribution characteristics of coalbed methane resources in China and recommendations for exploration research. *Unconventional Oil and Gas*, 9(4): 1-8.
- 赵永强. 2009. 成像测井综合分析地应力方向的方法. *石油钻探技术*, 37(6): 39-43.
- Zhao Yongqiang. 2009. A method of analyzing crustal stress orientation using imaging logging. *Petroleum Drilling Techniques*, 37(6): 39-43.
- 赵振宇, 郭彦如, 王 艳等. 2012. 鄂尔多斯盆地构造演化及古地理特征研究进展. *特种油气藏*, 19(5): 15-20.
- Zhao Zhenyu, Guo Yanru, Wang Yan et al. 2012. Study progress in tectonic evolution and paleogeography of Ordos Basin. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 19(5): 15-20.
- 智慧文, 胡永章. 2015. 元坝气田地应力测井计算研究. *物探化探计算技术*, 37(6): 743-748.
- Zhi Huiwen and Hu Yongzhang. 2015. Study on well logging with crustal stress calculation in Yuanba gas field. *Computing Technology for Geophysical and Geochemical Exploration*, 37 (6): 743-748.
- 周道生. 2020. 绥德—吴堡区块山西组1段致密砂岩储层脆性特征研究(硕士学位论文). 江苏徐州: 中国矿业大学. 1-80.
- Zhou Daosheng. 2020. Study on the Brittleness Characteristics of Tight Sandstone Reservoir of Shanxi 1 Member in Suide-Wubu Block (Master's Thesis). Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology. 1-80.
- 周广照, 谢元德, 陈 庆等. 2017. 沁水盆地南部海陆过渡相煤系地层横波波速预测. *大庆石油地质与开发*, 36(4): 128-136.
- Zhou Guangzhao, Xie Yuande, Chen Qing et al. 2017. Prediction of the shear wave velocity for the sea-land transitional facies coal measure strata in South Qinshui Basin. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 36(4): 128-136.
- 朱兴珊. 1994. 关于残余构造应力及其与煤和瓦斯突出关系的几点看法. *煤矿安全*, (1): 35-39.
- Zhu Xingshan. 1994. Some views on residual tectonic stress and its relationship with coal and gas outburst. *Safety in Coal Mines*, (1): 35-39.
- Anderson E M. 1951. The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain. Edinburgh: Oliver and Boyd. 1-200.
- Brown E T and Hoek E. 1978. Trends in relationships between measured *in-situ* stresses and depth. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15(4): 211-215. DOI: 10.1016/0148-9062(78)91227-5.
- Daines S R. 2019. Prediction of fracture pressures for wildcat wells. *Journal of Petroleum Technology*, 34 (4): 863-872. DOI: 10.2118/9254-PA.
- Li P and Cai M F. 2018. Distribution law of in situ stress field and regional stress field assessments in the Jiaodong Peninsula, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 166: 66-79. DOI: 10.1016/j.jseas.2018.07.021.
- Matthews W R and Kelly J. 1967. How to predict formation pressure and fracture gradient. *Oil and Gas Journal*, 65: 92-106.
- Montmeyer H and Graves R M. 1986. Prediction of static elastic/mechanical properties of consolidated and unconsolidated sands from acoustic measurements: Correlations. New Orleans, Louisiana: SPE Annual Technical Conference and Exhibition. SPE-15644-MS. DOI: 10.2118/15644-MS.
- Nikolaevskiy V N and Economides M J. 2000. The near-well state of stress and induced rock damage. Lafayette, Louisiana: SPE International Symposium on Formation Damage Control. SPE-58716-MS. DOI: 10.2118/58716-MS.
- Schmitt D R and Zoback M D. 1989. Poroelastic effects in the determination of the maximum horizontal principal stress in hydraulic fracturing tests: A proposed breakdown equation employing a modified effective stress relation for tensile failure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 26(6): 499-506. DOI: 10.1016/0148-9062(89)91427-7.
- Wang S G, Han F X and Bing Q. 2021. Application of *in-situ* stress calculation in engineering. *Iop Conference Series: Earth and Environmental Science*, 660: 012040. DOI: 10.1088/1755-1315/660/1/012040.
- Zoback M D, Barton C A, Brady M et al. 2003. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40 (7-8): 1049-1076. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2003.07.001.