



移动扫码阅读

徐浩然,鞠 玮,周 阳,等.滇东恩洪地区地应力场特征及对煤储层渗透性影响[J].煤炭科学技术,2019,47(12):184-193.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.12.027

XU Haoran, JU Wei, ZHOU Yang, *et al.* Characteristics of in-situ stress field and its influence on coal reservoir permeability in Enhong Basin of Eastern Yunnan Region[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(12): 184-193. doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.12.027

滇东恩洪地区地应力场特征及对煤储层渗透性影响

徐浩然¹,鞠 玮^{1,2},周 阳³,姜 波^{1,2},吴财芳^{1,2},李 明^{1,2}

(1.中国矿业大学 资源与地球科学学院,江苏 徐州 221116;2.中国矿业大学 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室,江苏 徐州 221008;
3.中国地质大学(武汉) 地球科学学院,湖北 武汉 430074)

摘 要:现今地应力场影响煤储层渗透率以及水力压裂裂缝的形成和扩展,在煤层气勘探开发过程中至关重要。我国滇东恩洪地区煤层气资源丰富,但目前该区现今地应力研究程度较低,限制着煤层气的高效开发。为解决上述问题,在研究区实测地应力参数综合分析基础上,选取区内稳定分布的上二叠统宣威组 C₁₆ 号煤层为研究对象,利用有限元数值模拟方法开展现今地应力分布特征研究。结果表明,研究区浅部煤储层为走滑型应力机制,深部转变为正断型应力机制。恩洪地区宣威组 C₁₆ 号煤层最大主应力为 11.0~38.9 MPa,其中西南部应力较高,北部和东南部应力较低。现今地应力分布特征受构造影响,断层及褶皱发育区应力对比周围区域较小,不同性质的断层以及褶皱对应力的影响不同。现今地应力及其机制影响煤储层渗透率,有效应力对煤储层渗透性的影响不显著,应力机制对煤储层渗透率影响较大。

关键词:恩洪地区;地应力场;渗透率;应力机制

中图分类号:P618

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)12-0184-10

Characteristics of in-situ stress field and its influence on coal reservoir permeability in Enhong Basin of Eastern Yunnan Region

XU Haoran¹, JU Wei^{1,2}, ZHOU Yang³, JIANG Bo^{1,2}, WU Caifang^{1,2}, LI Ming^{1,2}

(1.School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2.Key Laboratory of Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 3.School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: The present in-situ stress field is an important factor for exploration and development of coalbed methane (CBM), which affects the permeability of coal reservoirs and the formation and spreading of hydraulic fractures. A large volume of coalbed methane resources distributes in Enhong Basin of eastern Yunnan region in China. However, current studies on the in-situ stresses in this area are rare, which limits the efficient development of coalbed methane. In order to solve above problems, this paper studies the characteristics of present in-situ stress distributions in this area using the finite element numerical simulation method. The Upper Permian Xuanwei Formation No.16 coal seam was selected as the research target and comprehensive analysis of the measured in-situ stress in the study area was conducted. The results show that the shallow coal layers are in the stress region of strike-slip faults while the deep coal layers are in normal faults stress region. The maximum principal stress of No.16 coal seam of Xuanwei Formation in Enhong area is between 11.0 MPa and 38.9 MPa, with higher stress in the southwest and lower stress in the north and southeast. The distributions of present in-situ stress are affected by tectonic movements, with lower value in fault and fold development area. Different faults and folds affect the distributions of in-situ stresses differently. It is also found that the present in-situ stress has in significant influence on the permeability of coal reservoirs while the stress mechanism has significant influence on the permeability of coal reservoirs.

Key words: Enhong area; in-situ stress field; coal permeability; stress mechanism

收稿日期:2019-07-26;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05044);中国博士后科学基金特别资助项目(2017T100419)

作者简介:徐浩然(1996—),男,山东济宁人,硕士研究生。E-mail: xuhr@cumt.edu.cn

通讯简介:鞠 玮(1988—),男,山东临沂人,副教授,博士。E-mail: wju@cumt.edu.cn

0 引言

煤层气是一种储存于煤层及其围岩中以吸附为主要状态的非常规天然气^[1]。我国作为仅次于俄罗斯和加拿大的第三大煤层气资源国,煤层气资源非常丰富,埋藏深度低于 2 000 m 的煤层气资源量为 $3.68 \times 10^{13} \text{ m}^3$ ^[2]。煤层气的勘探开发一方面可以对国家能源紧缺问题起到缓解作用,另一方面还有助于减少煤矿的瓦斯事故,故在社会和经济两方面都起着极其重要的作用^[3]。我国虽然在煤层气的勘探与开发方面还相对滞后,但近年来该产业发展的脚步在不断加快。我国地质条件复杂,煤储层大都遭受多期构造活动的叠加和改造,从而导致煤储层非均质性强,并且呈现出低含气饱和度、低渗透率、低储层压力、低资源丰度和高原地应力(四低一高)的特点,这些条件都制约着我国煤层气的发展^[4]。因此,查明现今地应力状态有助于指导煤层气的勘探与开发。

地应力是指地壳内部的应力状态。通常认为煤储层渗透率会受到地应力的影响,其随有效应力的增加而呈指数下降^[5-9]。秦勇等^[10]通过对山西沁水盆地中、南部研究发现,煤储层渗透率梯度随着主应力差的增加,呈指数形式上升;孟召平等^[11]分析了沁水盆地南部地应力对煤储层渗透率的影响后提出,煤储层试井渗透率与地应力呈现负相关的指数关系;吴财芳等^[12]对滇东老厂矿区数据统计得出,煤储层渗透率随最小主应力梯度增加而减小,相应地,压力系数随其增加而增大。此外,地应力还对煤储层水力压裂裂缝的延伸方向和形态有所影响^[1]。唐书恒等^[13]通过数值模拟的方式发现,水力压裂裂缝延伸方向不仅会垂直于水平最小主应力方向,而且还会由于水平主应力差的影响形成不同的裂缝展布形态^[12]。文献[12,14]研究认为,地应力还会影响储层压力,当地应力增大的同时会使得储层压力也上升。地应力可以用 3 个相互垂直的主应力及其应力分量的方向来表示。其中一个主应力由于来自于地球的重力场,因而方向垂直向下,该应力分量记为垂向主应力 S_v ;其他 2 个方向的应力分量方向水平,分别记为水平最小主应力 $S_{h,\min}$ 和水平最大主应力 $S_{H,\max}$ ^[15]。通常情况下,这三大主应力的应力大小不等,在不同区域其大小关系会发生变化,根据 Anderson 的分类^[16],可依据其大小关系划分为 3 种应力状态:①正断型应力机制($S_v > S_{H,\max} > S_{h,\min}$);②走滑型应力机制($S_{H,\max} > S_v > S_{h,\min}$);③逆断型应力机制($S_{H,\max} > S_{h,\min} > S_v$)。

滇东地区是我国南方最重要的聚煤区和煤层气富集区,其中恩洪地区是煤层气勘探开发的重点区域^[17],但对该地区现今地应力方面的研究依然薄弱,这限制了区内煤层气的勘探和开发。所以,目的是通过对研究区地应力实测数据资料进行综合分析,继而利用数值模拟的方式,预测恩洪地区煤层气储层现今地应力的分布状态,并讨论其对煤储层渗透率的影响,以期对该区域煤层气的勘探开发提供新的地质参考。

1 地质背景

恩洪地区地处云南省曲靖市麒麟区与富源县境内,如图 1^[18]所示。

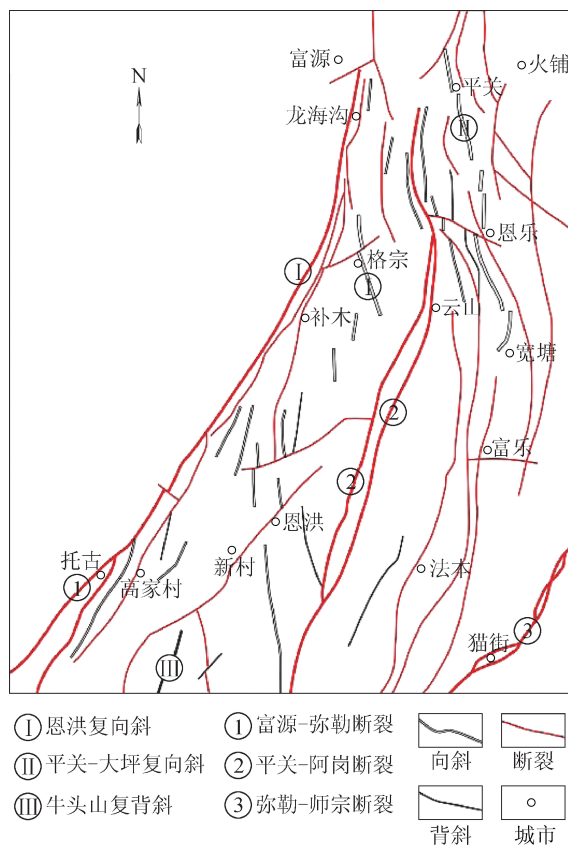


图 1 滇东恩洪地区构造纲要

Fig.1 Structure outline map of the Enhong area

区内主体构造为一轴向 NNE—SSW 向的复向斜,北部轴向近南北向,西部以富源—弥勒断裂为界,其余边界多为上二叠统宣威组地层的底界,其中夹有边界断层作为局部边界,面积约 620 km²。区内构造复杂,发育有大量的“入”字形的压扭性的断裂,其间次级褶皱密集展布,向斜一般较为完整,背斜多被断裂破坏。主要的褶皱构造包括西部的恩洪复向斜和东部的平关—大坪复向斜,轴向皆向北倾,倾角 10°~25°。矿区内主干断裂包括西部的富源—

弥勒断裂以及中部的平关—阿岗断裂,呈 NNE—SSW 向或 NE—SW 向^[18-21]。

上二叠统是滇东地区最主要的含煤地层,其在恩洪向斜内主要沉积了宣威组地层,沉积环境以陆相为主,地层特征如图 2 所示。煤层总厚 15.99~67.68 m,含煤 18~73 层,可采煤层 8~20 层,一般 11~13 层,煤层由西向东、自北向南含煤性增强,可采层数逐渐增多,煤层厚度逐渐增大^[18-20]。可采煤层主要位于宣威组中下段,其中 C₉、C₁₆、C₂₃ 号煤层为重点煤层,重点煤层特征对比见表 1。

C₉号煤层厚度为 0.83~12.36 m,一般厚度在 1.7~5.0 m,厚度较稳定,在主要可采煤层中分布最广、厚度最大。但部分地区由于分流河道的同期或后期冲刷造成了煤层缺失,导致煤层增厚或变薄。C₁₆号煤层平均厚度 1.0~4.2 m,一般厚度在 1.3~2.0 m,层位稳定,除北部少数地区外,全区均为大面积可采。同 C₉号煤层类似,部分地区由于分流河道沉积发育,煤层增厚或变薄。南部煤层结构简单,煤层厚度较为稳定,向北延伸后,稳定性开始变差,厚度发生变化,煤厚增加,不可采点也变多。C₂₃号煤层厚度一般在 0.7~4.0 m,层位较稳定,煤层厚度变化较大,一般大部分地区可采,层间夹 3~4 层夹矸,夹矸结构复杂,厚度不稳定^[18,22]。

由于 C₁₆号煤层层位稳定,相较于其他煤层,其煤厚变化小,且 C₁₆号煤层测量实测数据多于其他煤层,故选取 C₁₆号煤层进行二维建模处理。

2 地应力特征

2.1 研究方法

前已述及,地应力可分为 3 个彼此垂直的应力分量 S_{H,max}、S_{h,min} 以及 S_v。其中对于垂向应力 S_v,即上覆的地层压力,可利用式(1)来计算^[5-6,23-24]:

S_v = γh (1)

式中:γ 为上覆地层的应力梯度,此处 γ = 0.027 MPa/m;h 为埋藏深度,m。

地应力的测量有很多方式,经典的应力测量方法包括基于钻孔的测量方法(例如钻孔崩落、水力压裂等)以及基于岩心的测量方法(例如 Kaiser 效应、

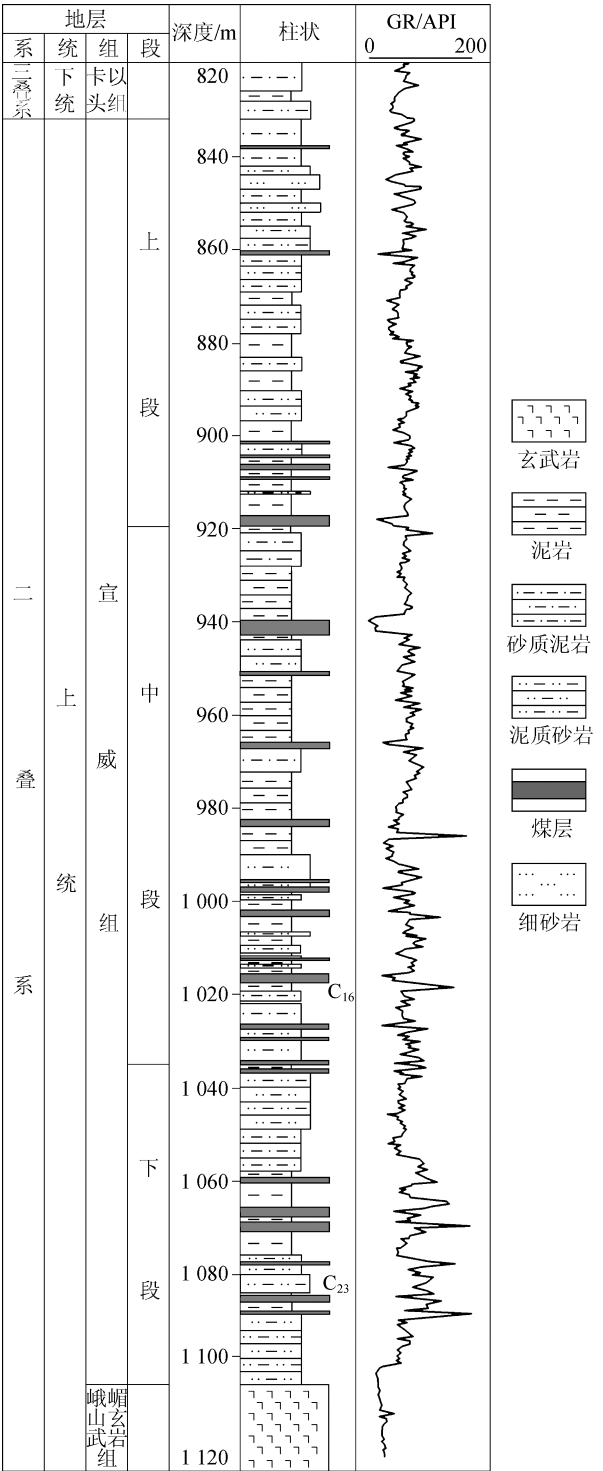


图 2 恩洪地区上二叠统宣威组地层特征
Fig.2 Stratigraphy of the Upper Permian Xuanwei Formation in Enhong area

表 1 恩洪地区 C₉、C₁₆、C₂₃号煤层主要特征^[22]

煤层编号	全层厚度/m			纯煤厚度/m			煤层结构	层间距/m		
	最小	最大	平均	最小	最大	平均		最小	最大	平均
C ₉	0	12.36	2.70	1.39	3.84	2.68	简单	3.0	18.0	5.0
C ₁₆	0	9.57	1.48	0.63	3.79	1.43	较简单	0.8	27.0	11.0
C _{21a}	0	4.00	0.93	0.73	0.88	0.82	较复杂	0.5	8.6	3.0
C _{21b}	0	5.38	1.20	0.63	1.60	1.10	较复杂	1.0	21.0	9.7

应变恢复法等)^[15]。因为前人对恩洪地区地应力的研究较少,故本次研究通过水力压裂试验测量了恩洪部分地区应力数据,以及模拟所需的相关参数。

水力压裂法是通过在钻孔中选取一个试验段进行密闭,然后通过向其注入高压液体使钻孔孔壁开裂,当井壁压裂时,利用压力计记录的临界压力为破裂压力,当裂缝重新闭合时,记录闭合压力^[15];根据排采过程中初始动液面的高度可以得到煤储层储层压力^[25]。而水力压裂诱发形成的裂缝平面走向即为 $S_{H,max}$ 的方向^[15]。对于 $S_{h,min}$,其大小与闭合压力 P_c 相当^[5-6,23-24],即:

$$S_{h,min}=P_c \tag{2}$$

对于 $S_{H,max}$,其大小可以用经验公式来推算获取^[5-6,23-24]:

$$S_{H,max}=3P_c-P_f-P_o+T \tag{3}$$

式中: P_f 为破裂压力; P_o 为储层压力; T 为煤储层的抗张强度。通常,由于煤的拉伸强度较低,且在压裂开启时, T 已经被克服了,故在此次研究中取零。

2.2 结果与分析

通过对恩洪地区 4 口井的煤储层实施注入/降压试验,共收集了 8 组地应力数据作为基础,恩洪地区地应力实测数据见表 2。

表 2 恩洪地区地应力实测数据

Table 2 Measured data of in-situ stress in Enhong Area

井号	煤层编号	埋深/m	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	P_o /MPa	P_f /MPa	P_c /MPa	S_v /MPa	$S_{h,min}$ /MPa	$S_{H,max}$ /MPa
EH-01	C ₉	512.550	0.016	5.09	15.50	13.52	13.84	13.52	19.97
	C ₁₆	565.830	0.011	5.46	20.19	18.36	15.28	18.36	29.43
EH-02	C ₉	497.120	0.005	3.13	13.63	10.98	13.42	10.98	16.18
	C ₁₆	557.940	0.020	3.91	12.33	11.33	15.06	11.33	17.75
	C ₂₁	604.470	0.056	4.06	14.14	11.46	16.32	11.46	16.18
EH-C6	C ₉	1 078.220	0.030	9.78	16.25	15.22	29.11	15.22	19.63
	C ₁₆	1 142.305	0.110	8.84	18.57	17.51	30.84	17.51	25.12
EH-C7	C ₁₆	1 017.450	0.170	9.63	20.36	18.77	27.47	18.77	26.32

2.2.1 恩洪地区地应力参数

通过所测数据可知,埋深 512.55~1 142.305 m, P_o 为 3.13~9.78 MPa,平均值 6.24 MPa; P_f 为 12.33~20.36 MPa,平均值 16.37 MPa; P_c 为 10.98~18.77 MPa,平均值 14.64 MPa。通过对破裂压力 P_f 、闭合压力 P_c 以及储层压力 P_o 与埋深 h 的关系进行拟合发现(图 3 虚线),储层压力与埋深相关性较好,说明储层压力受埋深影响显著;破裂压力以及闭合压力与埋深的相关性差,但若将图中三角形的点视为异常点而舍去,重新拟合数据可以看出(图 3 实线),破裂压力以及闭合压力与埋深之间具有一定的相关性。

通过拟合储层压力 P_o 与闭合压力 P_c 的关系发现,二者具有相关性,储层压力随闭合压力的上升呈现单调递增的对数形式(图 4 虚线)。若不考虑上文提到的奇异点,然后重新拟合曲线(图 4 实线),发现储层压力受闭合压力的影响显著,说明恩洪地区储层压力对地应力的变化敏感。这与吴财芳等^[12]对相邻的滇东老厂矿区地应力的研究结果具有一致性。

2.2.2 恩洪地区主应力分析

水平最大主应力在 16.18~29.43 MPa,平均为 21.32 MPa;水平最小主应力在 10.98~18.77 MPa,平均 14.64 MPa。水平最大主应力与水平最小主应力

之间表现出了强烈的相关性(图 5)。

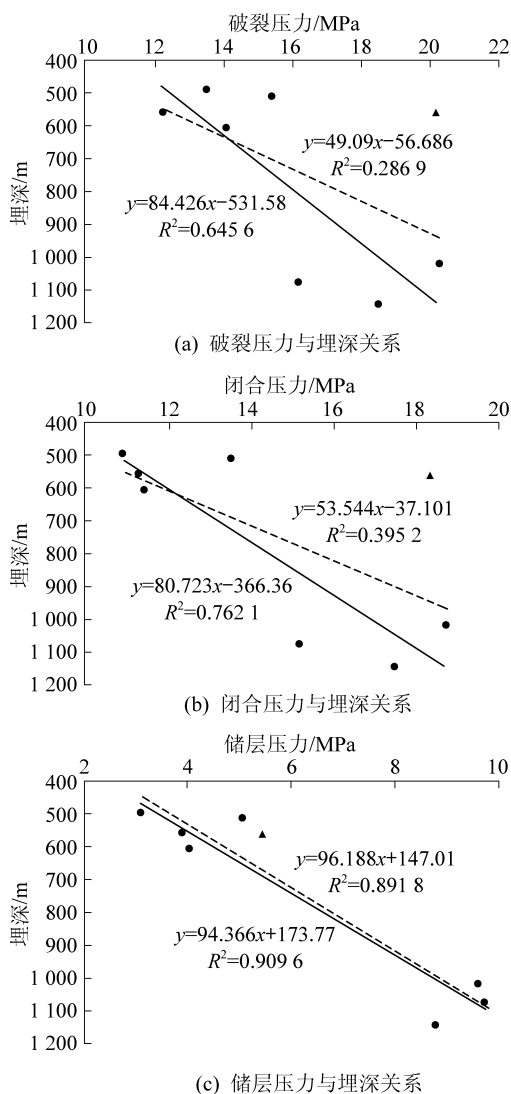
此外,当埋深小于 600 m 时,地应力分布主要表现为 $S_{H,max}>S_v>S_{h,min}$,为走滑型应力机制;当埋深大于 1 000 m 时,地应力分布表现为 $S_v>S_{H,max}>S_{h,min}$,为正断型应力机制;在埋深 600~1 000 m 缺少实测应力数据,但仍可发现从 600 m 开始,应力机制在该深度段内由走滑型应力机制转变为正断型应力机制(图 6,图中框线中的点: $h=604.47\text{ m}$, $S_v=16.32\text{ MPa}$, $S_{H,max}=16.18\text{ MPa}$),表明恩洪地区现今地应力随着深度增加存在应力转换深度,为 700~1 000 m。

3 地应力场的数值模拟

3.1 研究方法

对一个地区地应力的分布进行研究常需要大量的实测资料。但恩洪地区可用于计算现今地应力场的钻井十分有限,因此为了获得整个研究区的地应力特征,需要使用数值模拟的手段,通过已知信息对恩洪地区现今地应力场进行反演。笔者通过有限元方法对恩洪地区进行数值模拟。有限元法的基本思路是利用网格将连续复杂的地质体离散为有限个通过节点相连的不同单元,各单元被赋予实际的岩石力学参数,从而将该区域的场函数转变为每个节点的函数^[26]。通过对这些单元组成的整体施加应力作用,分别求解各个单元节点值的函数,最后将所有单

元结合起来获得整个区域的应力场特征^[27-28](图7)。



虚线为包含异常点的拟合曲线;实线为去除异常点的拟合曲线;

●为正常点;▲为异常点

图3 恩洪地区煤储层破裂压力、闭合压力、储层压力与埋深的关系

Fig.3 Relationships between fracturing pressure, closing pressure, reservoirs pressure of coal reservoirs and burial depth in Enhong area

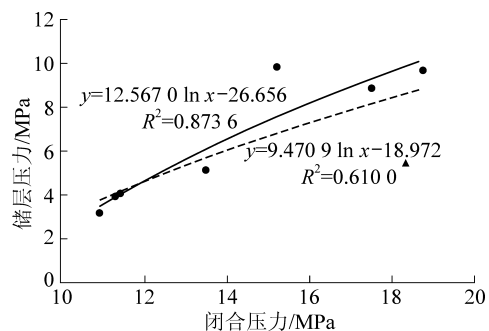


图4 恩洪地区煤储层闭合压力与储层压力的关系

Fig.4 Relationship between closing pressure and reservoirs pressure of coal reservoirs in Enhong area

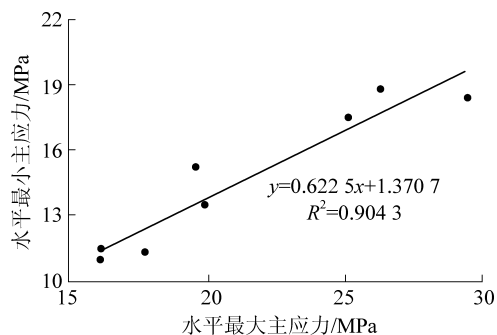


图5 恩洪地区水平最大主应力与水平最小主应力的关系

Fig. 5 Relationship between $S_{H,max}$ and $S_{h,min}$ in Enhong area

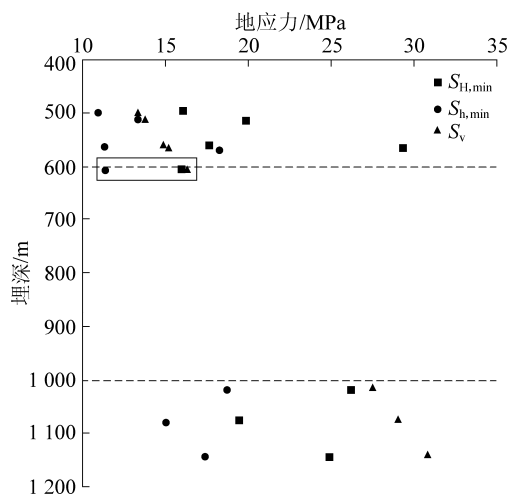


图6 恩洪地区地应力随埋深变化规律

Fig.6 In-situ stress distribution Pattern with burial depth in Enhong Area

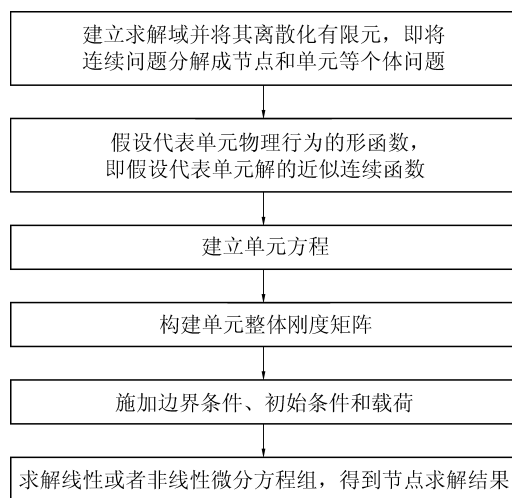


图7 基于有限元的地应力场分析流程

Fig.7 Analysis process of in-situ stress field based on finite element method

主要方法是首先根据研究区构造图建立几何模型,对各构造区进行划分;然后对各构造区添加实际的岩石力学参数,将几何模型转化为地质模型;再对地质模型进行网格剖分,将其划分为许多个离散的单元,从而转化为力学模型;最后根据边界条件调整

所加载荷的大小,使模拟结果尽可能接近约束条件,保证模拟结果的准确性^[29-32]。

3.2 几何模型的建立

根据研究区地质构造图,读取了建模所需的二维坐标,通过命令流在模型中投影了1 454个坐标点,然后利用线将其连接,并由线生成了相应的面。

在模型中划分出3种介质:断层、褶皱以及C₁₆号煤层。将断层和褶皱作为模拟中的薄弱区,之后对整个有限元进行连续的网格划分。C₁₆号煤层通过对整个研究区进行布尔运算切割掉断层和褶皱来生成。此外,由于研究区与周围地区之间没有明确界限分隔,通常做法是将研究区嵌套进一个4倍研究区面积的矩形区域中,以便能够减少边界效应,方便之后加载载荷。

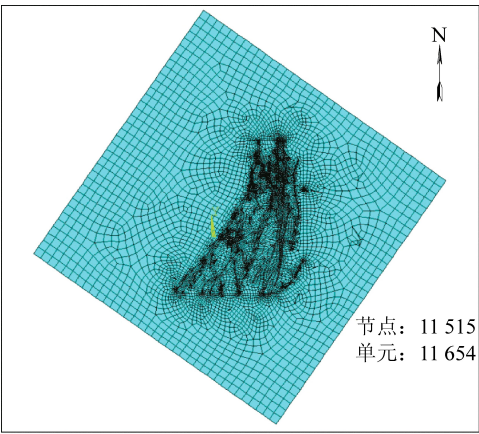
3.3 地质模型的建立

几何模型建立之后,各单元需要赋予不同岩石力学参数以实现地质模型的构建。由于此次模拟为二维模拟,故需要赋予的岩石力学参数只有弹性模量与泊松比。C₁₆号煤层以及褶皱带的煤岩力学参数由中联煤层气公司根据C₁₆号煤层注入/压降测试结果计算,断层内的岩石力学参数无法试验测得,根据前人经验^[28,33-34],将断层区作为软弱带,弹性模量约为相应沉积层50%~70%,其泊松比稍高于C₁₆号煤层。具体恩洪地区岩石力学参数见表3。

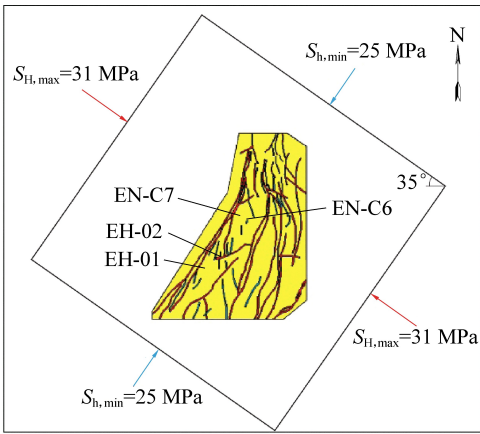
表3 恩洪地区岩石力学参数

Table 3 Rock mechanics parameters in Enhong Area

单元	弹性模量/GPa	泊松比
C ₁₆ 号煤层	3.97	0.47
断层带	2.40	0.49
褶皱带	3.20	0.42
外部嵌套部分	10.00	0.28



(a) 网格模型



(b) 力学模型

图8 恩洪地区网格模型与力学模型

Fig.8 Meshing model and stress model in Enhong Area

3.4 网格划分与加载条件

研究区地质模型构建后进行网格剖分并加载载荷,以建立力学模型。本次研究采用 plane182 单元类型,整个地质模型共被划分为11 515个节点与11 654个单元(图8a)。网格划分完成后,需要对上述模型施加应力。桂宝林等^[35]认为滇东—黔西地区的最大主应力方向与主构造线方向近似垂直。故选取WNW—ESE方向作为S_{H,max}的方向,取NNE—SSW作为S_{H,min}的方向,约定压应力为负值,拉应力为正值。

以已有的实测试井应力值作为约束条件,不断调整边界所加载荷,使模拟结果尽可能逼近实测数据,最终获得了恩洪地区地应力场的数值模拟结果。在WNW—ESE方向和NNE—SSW方向分别施加了31 MPa和25 MPa的最大主应力与最小主应力(图8b),同时对地质模型施加约束,防止其发生旋转和位移。

3.5 模拟结果分析

根据模拟所得恩洪地区的最大主应力云图(图9),表明该地区主要表现为压缩,研究区应力的分布表现出了强烈不均衡性,最大主应力值在西南部相对较高,而在北部和东南部相对较低。研究区最大主应力从11 MPa到38.9 MPa不等,大部分地区的应力集中在21.5 MPa到31.5 MPa的范围内,只有西南部较小的区域内应力大于31.5 MPa,应力低于21.5 MPa的区域主要是研究区内与水平最大主应力呈低角度相交的断层区内。

此外,地应力分布还受到了先存构造的影响,断层和褶皱发育区通常出现应力较低的异常区,这表明断层和褶皱地区由于构造活动的影响使岩体发生变形破碎,应力在此类区域不易积累而发生了释放。

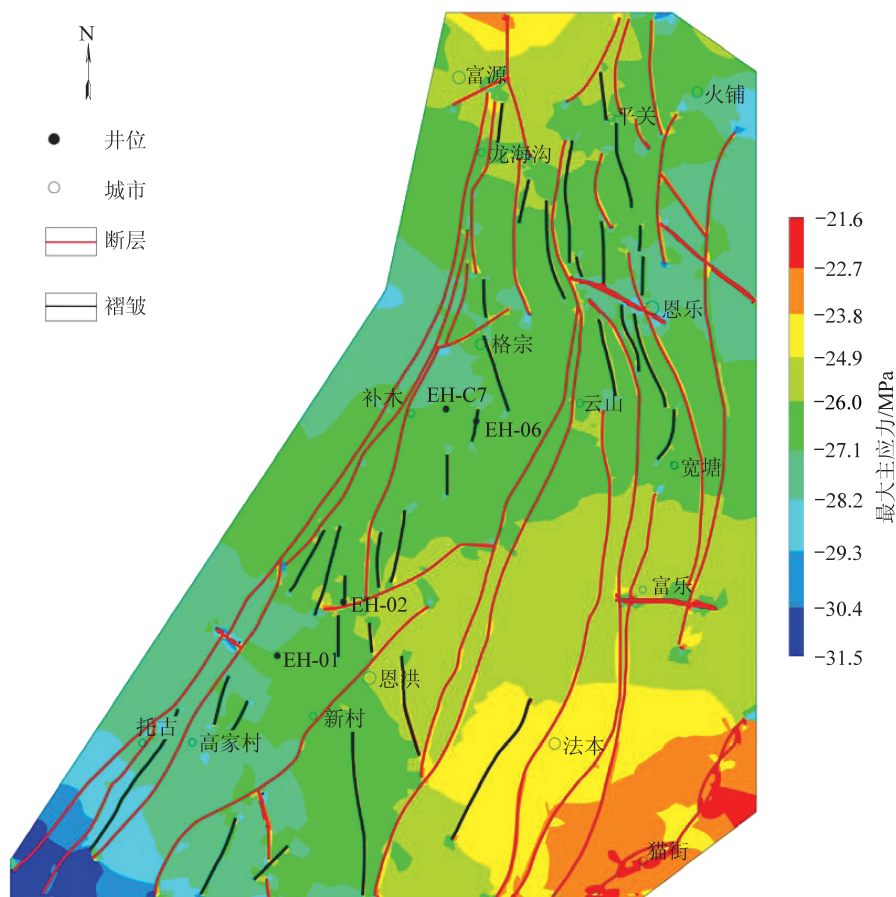
图 9 恩洪地区 C₁₆ 号煤层最大主应力分布

Fig.9 Maximum principal stress distribution pattern in No.16 coal seam of Enhong area

不同的构造活动对地应力的影响程度有着明显差异,相比较褶皱而言,地应力受断层的影响要更大,且最大主应力方向与断层走向所夹角度越小,断层对地应力值的影响越大。

3.6 误差分析

为了了解模拟结果的可靠性,可以通过对比实测应力值与预测应力值来对误差 r 进行分析。

$$r = (S_s - S_y) / S_s \quad (4)$$

其中: r 为预测和实测应力大小之间的误差; S_s 为实测应力值; S_y 为模拟的预测应力值。恩洪地区 C₁₆ 号煤层地应力预测误差分析见表 4。

表 4 恩洪地区 C₁₆ 号煤层地应力预测误差分析

Table 4 Error analysis of in-situ stress prediction within No.16 coal seam of Enhong Area

井号	实测地应力/MPa	预测地应力/MPa	误差/%
EH-01	29.43	27.1	7.91
EH-02	17.76	23.5	32.39
EH-C6	25.21	26.3	4.70
EH-C7	26.32	26.9	2.20

目前恩洪地区共有 4 口井对 C₁₆ 号煤层通过水力压裂试验测得了实际应力值,可以看到,除 EH-

02 之外的其他 3 口井误差均较小,在 10% 以内。EH-02 井的实测应力值与预测应力值差别较大,考虑到该井周围的构造活动强烈,且根据表 2 数据发现,EH-02 井各煤储层破裂压力与闭合压力都低于其他井。所以误差原因是 EH-02 井由于构造活动的影响岩石破碎过于严重,模拟时未能考虑局部地区力学参数的变化所致。综上所述,模拟结果能够提供一定的参考价值。

4 地应力对煤储层渗透性的影响

煤储层的渗透率是煤层气储层产能的基础,也是决定煤层气产能的关键,而现今地应力状态又影响着煤储层的渗透率^[5-11]。现在的普遍观点认为,煤的渗透性受地应力影响较大,当其他因素相同时,高地应力会导致较低的煤储层渗透率;且有效主应力的增加,会造成煤储层渗透率的负指数式变化,有效应力与煤储层渗透性满足以下关系式^[5-8]:

$$k = k_0 e^{-\mu \sigma} \quad (5)$$

式中: k_0 为原始渗透率; k 为煤储层渗透率; σ 为有效应力,为地应力与储层压力之差; μ 为有效应力系数。

通过拟合恩洪地区渗透率与有效应力的关系(图10)发现,本地区并没有表现出上述规律,且有效垂直应力较大的点渗透率总体上要更高,这与传统认识恰好相反。

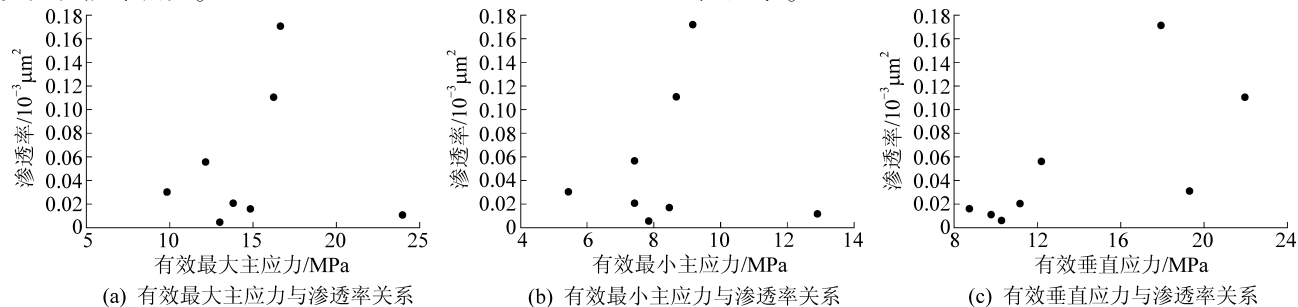


图10 恩洪地区有效应力与煤储层渗透率的关系分布

Fig.10 Relationship between effective in-situ stress and coal reservoirs permeability in Enhong Area

通过对比不同深度的煤储层的渗透率,得出煤储层渗透率与埋藏深度变化的关系(图11)。

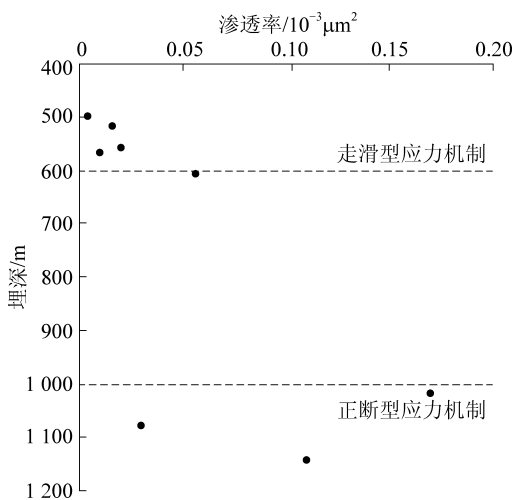


图11 恩洪地区煤储层渗透率与埋深分布

Fig.11 Distribution of coal permeability and burial depth of coal reservoirs in Enhong Area

结果表明,深部煤储层的渗透率总体上要大于浅部煤储层的渗透率,浅部煤储层中虽有一个点渗透率相对较高,但通过前文的表2以及图6可以看出,该点垂向应力已经开始超过水平最大主应力(该点 $S_v = 16.32$ MPa, $S_{H, \max} = 16.18$ MPa),应力状态已经由走滑型应力机制开始向正断型应力机制发生转换。据上文所述,浅部煤储层为走滑型应力机制,深部煤储层则逐渐转变为正断型应力机制。说明正断型应力机制影响下的煤储层渗透性要高于走滑型应力机制。其可能的原因在于,煤储层为低孔低渗性储层,其层内裂隙系统的发育和分布对储层物性有显著影响^[36]。正断层为张性断裂,更容易形成流体运移所需的天然裂缝,从而使煤储层的渗透率得到提高;而浅部的走滑型应力机制下则会形成较高的压应力,导致煤储层渗透率降低^[23]。

由此可表明,研究区的煤储层渗透率除受到有效应力影响外,还受其他多种因素控制,有效应力对研究区煤储层渗透率的影响较小,不是主控因素。

5 结 论

1)我国滇东恩洪地区的地应力随埋深呈现出不同的变化规律:① P_0 、 P_c 和 P_t 均与埋深有一定的线性关系, P_0 对地应力变化敏感;②水平最大主应力与水平最小主应力具有较强的相关性;③应力状态随埋藏深度的变化也有不同的规律,浅层煤储层为走滑型的应力状态,至深层煤储层转变为正断型应力状态。

2)基于数值模拟表明,研究区C₁₆号煤层最大主应力为11.0~38.9 MPa,大部分地区在21.5~31.5 MPa,其中高应力区分布在研究区的西南部,低应力区主要出现在研究区的北部与东南部以及构造强烈的区域。

3)现今地应力的大小受现存构造活动的影响,断层及褶皱发育区应力值多小于周围区域。相比较褶皱而言,地应力受断层的影响要更大;且最大主应力方向与断层走向所夹角度越小,断层对地应力值的影响越大。

4)现今地应力场影响着煤储层渗透率,进而影响到煤层气的产能。恩洪地区煤储层渗透率受到应力机制影响,正断型应力机制下的煤储层相较于走滑型应力机制下的煤储层有着更高的渗透率。

致谢:感谢从中联煤层气有限责任公司及刘近帮硕士处获得的部分数据支持,同时感谢审稿专家为本文提供的宝贵意见。

参考文献(References):

- [1] 逢思宇,贺小黑.地应力对煤层气勘探与开发的影响[J].中国矿业,2014,23(S2):173-177.
- PANG Siyu, HE Xiaohai. Influence of crustal stress on coal bed methane exploration and developing[J].China Mining Magazine,

- 2014, 23(S2): 173-177.
- [2] 白 优, 黄平良, 樊莲莲, 等. 国内外煤层气资源开发利用现状[J]. 煤炭技术, 2013, 32(3): 5-7.
BAI You, HUANG Pingliang, FAN Lianlian, *et al.* Development and utilization status of coalbed methane resources at home and abroad[J]. Coal Technology, 2013, 32(3): 5-7.
 - [3] 杨兆中, 刘云锐, 张 平, 等. 滇东黔西地区多层叠置煤层压裂分层决策方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(9): 7-12.
YANG Zhaozhong, LIU Yunrui, ZHANG Ping, *et al.* Study on fracturing and slicing decision method of multilayer overlay seam in east Yunnan and west Guizhou[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(9): 7-12.
 - [4] 吴国代, 桑树勋, 杨志刚, 等. 地应力影响煤层气勘探开发的研究现状与展望[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(4): 31-34.
WU Guodai, SANG Shuxun, YANG Zhigang, *et al.* Current research status and prospect of geo-stress impact on CBM exploration and exploitation[J]. Coal Geology of China, 2009, 21(4): 31-34.
 - [5] JU Wei, JIANG Bo, QIN Yong, *et al.* The present-day in-situ stress field with in coalbed methane reservoirs, Yuwang Block, Laochang Basin, south China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 102: 61-73.
 - [6] JU Wei, YANG Zhaobiao, QIN Yong, *et al.* Characteristics of in-situ stress state and prediction of the permeability in the Upper Permian coalbed methane reservoir, western Guizhou region, SW China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 165: 199-211.
 - [7] ZHAO Junlong, TANG Dazhen, XU Hao, *et al.* Characteristic of in situ stress and its control on the coalbed methane reservoir permeability in the eastern margin of the Ordos Basin, China[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49: 3307-3322.
 - [8] 曾 玲. 盆地演化因素对煤储层渗透率的影响研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
 - [9] 刘大锰, 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, 23.
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, 23.
 - [10] 秦 勇, 张德民, 傅雪海, 等. 山西沁水盆地中、南部现代构造应力场与煤储层物性关系之探讨[J]. 地质评论, 1999, 45(6): 576-583.
QIN Yong, ZHANG Demin, FU Xuehai, *et al.* A Discussion on correlation of modern tectonic stress field to physical properties of coal reservoirs in central and southern Qinshui Basin[J]. Geological Review, 1999, 45(6): 576-583.
 - [11] 孟召平, 田永东, 李国富. 沁水盆地南部煤储层渗透性与地应力之间关系和控制机理[J]. 自然科学进展, 2009, 19(10): 1142-1148.
 - [12] 吴财芳, 王 肖, 刘小磊, 等. 滇东老厂矿区多煤层条件下地应力特征及其影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 118-124.
WU Caifang, WANG Xiao, LIU Xiaolei, *et al.* Study on geostress features and influences under multi-seam condition in Laochang Mining Area of East Yunnan[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 118-124.
 - [13] 唐书恒, 朱宝存, 颜志丰. 地应力对煤层气井水力压裂裂缝发育的影响[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 65-69.
TANG Shuheng, ZHU Baocun, YAN Zhifeng. Effect of crustal stress on hydraulic fracturing in coalbed methane wells[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 65-69.
 - [14] 张培河. 沁水煤田煤储层压力分布特征及影响因素分析[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(6): 31-32.
ZHANG Peihe. Characters of distribution and influencing factors about the reservoir pressure in Qinshui coalfield[J]. Coal Geology and Exploration, 2002, 30(6): 31-32.
 - [15] 阿尔诺·赞格, 奥韦·斯特凡松. 地壳应力场[M]. 北京: 地震出版社, 2013: 1-12, 131-157.
 - [16] ANDERSON E M. The dynamics of faulting and dyke formation with applications to Britain[M]. 2nd ed. Edinburgh: Oliver & Boyd, 1951.
 - [17] 桂宝林. 恩洪-老厂地区煤层气成藏条件研究[J]. 云南地质, 2004, 23(4): 421-433.
GUI Baolin. The study on formation conditions of the seam gas in Enhong-Laochang Area[J]. Yunnan Geology, 2004, 23(4): 421-433.
 - [18] 李 勇. 滇东地区煤层气地质条件及选区评价[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
 - [19] 李彦朋. 恩洪老厂矿区煤层气地质评价及有利区优选[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
 - [20] 王鹏刚. 恩洪煤矿区构造生成机制初步分析[J]. 四川地质学报, 2018, 38(3): 413-415.
WANG Penggang. Preliminary study of tectonic mechanism of the Enhong coal mine[J]. Acta Geologica Sichuan, 2018, 38(3): 413-415.
 - [21] 易同生. 恩洪矿区煤层气富集的控制因素[J]. 矿物学报, 2007, 27(3/4): 493-498.
YI Tongsheng. Factors controlling the accumulation of coalbed methane in the Enhong coal mining district[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2007, 27(3/4): 493-498.
 - [22] 兰凤娟. 恩洪向斜煤层重烃浓度异常及其成因[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
 - [23] CHEN Shida, TANG Dazhen, TAO Shu, *et al.* In-situ stress measurements and stress distribution characteristics of coal reservoirs in major coalfields in China: Implication for coalbed methane(CBM) development[J]. International Journal of Coal Geology, 2017, 182: 66-84.
 - [24] CHEN Shida, TANG Dazhen, TAO Shu, *et al.* In-situ stress, stress-dependent permeability, pore pressure and gas-bearing system in multiple coal seams in the Panguan area, western Guizhou, China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 49: 110-122.
 - [25] 倪 冬, 王延斌, 韩文龙, 等. 沁水南部柿庄南区块3号煤层现今地应力特征及其与渗透率的关系研究[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2019, 38(1): 68-75.
NI Dong, WANG Yanbin, HAN Wenlong, *et al.* Characteristic of in-situ stress in No.3 coal seam of southern Shizhuang Block,

- southern Qinshui basin, and its influence on the permeability[J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2019, 38(1): 68-75.
- [26] JIU Kai, DING Wenlong, HUANG Wenhui, *et al.* Simulation of paleotectonic stress fields within Paleogene shale reservoirs and prediction of favorable zones for fracture development within the Zhanhua Depression, Bohai Bay Basin, east China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2013, 110: 119-131.
- [27] JU Wei, LI Zhaoliang, SUN Weifeng, *et al.* In-situ stress orientations in the Xiagou tight oil reservoir of Qingxi Oilfield, Jiuxi Basin, northwestern China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 98: 258-269.
- [28] JU Wei, WANG Ke. A preliminary study of the present-day in-situ stress state in the Ahe tight gas reservoir, Dibe Gasfield, Kuqa Depression[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 96: 154-165.
- [29] 鞠 玮, 侯贵廷, 黄少英, 等. 库车坳陷依南-吐孜地区下侏罗统阿合组砂岩构造裂缝分布预测[J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(4): 592-602.
- JU Wei, HOU Guiting, HUANG Shaoying, *et al.* Structural fracture distribution and prediction of the lower jurassic ahe formation sandstone in the Yinan-Tuzi Area, Kuqa Depression[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2013, 37(4): 592-602.
- [30] 伍 亚, 戴俊生, 顾玉超, 等. 高台子油田扶余油层现今地应力数值模拟及对水力压裂的影响[J]. 地质力学学报, 2014, 20(4): 363-371.
- WU Ya, DAI Junsheng, GU Yuchao, *et al.* Numerical simulation of present geo-stress field and its effect on hydraulic fracturing of Fuyu reservoir in Gaoataizi oilfield[J]. Journal of Geomechanics, 2014, 20(4): 363-371.
- [31] 房 璐, 王 硕, 徐 珂, 等. 山西沁水盆地现今地应力特征[J]. 断块油气田, 2018, 25(4): 413-418.
- FANG Lu, WANG Shuo, XU Ke, *et al.* Characteristics of current in-situ stress of Qinshui Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2018, 25(4): 413-418.
- [32] 张 熙, 单钰铭, 冉令波, 等. 有限元法在地应力研究中的应用[J]. 石油规划设计, 2011, 22(3): 14-17.
- ZHANG Xi, SHAN Yuming, RAN Lingbo, *et al.* Application of the finite element method to the research of in-situ rock stress[J]. Petroleum Planning and Engineering, 2011, 22(3): 14-17.
- [33] YIN Shuai, XIE Runcheng, WU Zhonghu, *et al.* In situ stress heterogeneity in a highly developed strike-slip fault zone and its effect on the distribution of tight gases: A 3D finite element simulation study[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 99: 75-91.
- [34] JU Wei, SUN Weifeng. Tectonic fractures in the lower cretaceous Xiagou Formation of Qingxi Oilfield, Jiuxi Basin, NW China. Part two: Numerical simulation of tectonic stress field and prediction of tectonic fractures[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 146: 626-636.
- [35] 桂宝林, 王朝栋. 滇东-黔西地区煤层气构造特征[J]. 云南地质, 2000, 19(4): 321-351.
- GUI Baolin, WANG Chaodong. Structural characteristics of coal-bed methane in east Yunnan and west Guizhou area[J]. Yunnan Geology, 2000, 19(4): 321-351.
- [36] 鞠 玮, 侯贵廷, 冯胜斌, 等. 鄂尔多斯盆地庆城-合水地区延长组 6_3 储层构造裂缝定量预测[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 310-320.
- JU Wei, HOU Guiting, FENG Shengbin, *et al.* Quantitative prediction of the Yanchang Formation Chang 6_3 reservoir tectonic fracture in the Qingcheng-Heshui Area, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(6): 310-320.
- [37] 王 亮, 陈大鹏, 郭品坤, 等. 深部煤层渗透特征及首采关键层卸压改造技术[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(6): 17-23.
- WANG Liang, CHEN Dapeng, GUO Pinkun, *et al.* Permeability characteristics of deep coal seam and pressure relief technologies of the key first mined coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(6): 17-23.