

文章编号:0253-9993(2013)01-0122-07

鄂尔多斯盆地东南缘地应力、储层压力及其耦合关系

孟召平^{1,2}, 蓝 强¹, 刘翠丽¹, 纪懿明¹, 李诗男¹, 张小明¹

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083;2. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室,湖北 宜昌 443002)

摘 要:采用水压致裂测量地应力方法,获得了鄂尔多斯盆地东南缘26口煤层气井地应力分布,通过统计分析,建立了二叠系山西组2煤储层地应力与煤层埋藏深度之间的相关关系和模型,揭示了现今地应力分布规律及受控机制。研究表明,本区二叠系山西组2煤层破裂压力梯度、闭合压力梯度和煤储层压力梯度的平均值分别为1.96,1.69,0.71 MPa/100 m。煤储层最大水平主应力、最小水平主应力和垂直主应力以及储层压力均随着煤层埋藏深度增大呈线性规律增高。在1 000 m以浅煤储层地应力状态主要表现为 $\sigma_v > \sigma_{h_{max}} > \sigma_{h_{min}}$,最小水平主应力小于16 MPa,现今地应力处于拉伸应力状态,煤储层有效应力系数 K_0 为0.48,且低于油气盆地页岩层中的有效应力系数值($K_0=0.80$);在1 000 m以深煤储层地应力状态转化为 $\sigma_{h_{max}} \geq \sigma_v \geq \sigma_{h_{min}}$,最小水平主应力大于16 MPa,现今地应力转化为挤压应力状态。本区现今地应力受华北区域构造应力场控制,最大水平主应力方向主要以NEE-SWW方向为特征。本区煤储层压力偏低,相同深度条件下鄂尔多斯盆地东南缘煤储层压力要比沁水盆地南部偏低0.73~0.93 MPa,且煤储层压力与地应力呈正相关关系,随着地应力的增加,煤储层压力增大。

关键词:鄂尔多斯盆地东南缘;地应力;煤储层压力;耦合关系

中图分类号:P618.11 **文献标志码:**A

In-situ stress and coal reservoir pressure in Southeast margin of Ordos basin and their coupling relations

MENG Zhao-ping^{1,2}, LAN Qiang¹, LIU Cui-li¹, JI Yi-ming¹, LI Shi-nan¹, ZHANG Xiao-ming¹

(1. College of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Adopted hydraulic fracturing method to measure in-situ stress, obtained in-situ stress of 26 coalbed methane wells in Southeast margin of Ordos Basin. Through statistical analysis, the correlations and their models between in-situ stress of No. 2 coal seam in Shanxi Formation of Permian and the burial depth of coal seam were established, the distribution law of present stress and its controlled mechanism were revealed. The results show that the average value of the fracture pressure gradients, closure pressure gradients and coalbed reservoir pressure gradients of the No. 2 coal seam in Shanxi Formation of Permian in study area are 1.96, 1.69, 0.71 MPa/100 m, respectively. Coalbed reservoir stress (the maximum horizontal principal stress, the minimum horizontal principal stress, the vertical principal stress) and the coalbed reservoir pressure both increases linearly with the increasing of the burial depth. The coalbed reservoirs with a burial depth lower than 1 000 m, in-situ stress state principally shows $\sigma_v > \sigma_{h_{max}} > \sigma_{h_{min}}$, the minimum horizontal principal stress is below 16 MPa, the recent in-situ stress state is tension; the coal reservoir effective stress coefficient equals to 0.48, lower than the parameter of shales in oil gas basin, which is 0.80 generally. In-situ stress state of coalbed reservoirs with a burial depth deeper than 1 000 m transforms into $\sigma_{h_{max}} \geq \sigma_v \geq \sigma_{h_{min}}$, the minimum horizontal prin-

收稿日期:2012-07-23 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2012CB214705);国家自然科学基金资助项目(41172145,41030422)

作者简介:孟召平(1963—),男,湖南汨罗人,教授,博士生导师,博士。E-mail:mzp@cumt.edu.cn

principal stress is bigger than 16 MPa, the in-situ stress state transforms into compression. The present in-situ stress is controlled by the regional tectonic stress field of North China, the maximum horizontal principal stress direction is mainly in the NEE-SWW direction. The coal reservoir pressure in the study area is lower, coal reservoir pressure under the conditions of the same depth in southeast margin of Erdos basin is lower 0.73-0.93 MPa than southern Qinshui basin. Coal reservoir stress has positive correlation to the recent stress. As stress increases, the coal reservoir stress increases.

Key words: Southeast margin of Ordos Basin; in-situ stress; coal reservoir pressure; coupling relation

地应力是存在于地壳中的单位面积上的力,地应力的形成主要与地球的各种动力作用过程有关,按不同成因,地应力可分为:自重应力、构造应力变异及残余应力和感生应力(附加应力)等类型^[1]。获得地应力的途径主要是通过现场实测和统计分析预测^[2-9],在地应力现场测试中应力(或应变)解除法和水压致裂法两种测量方法是目前地应力测量中应用较广的方法,通过这些方法获得了原岩应力的分布规律。从 20 世纪 80 年代中期开始,随着美国煤层气地面开采的成功和对煤层气商业价值与能源战略地位的认识不断提高,我国开始参考美国的有关理论进行煤层气地面开发的研究和试验,并采用水压致裂法对煤储层地应力进行了测量,获得了煤储层地应力资料,并应用这些资料指导煤层气勘探与开发。国内外有关地应力的研究已取得了显著的进展, Hoek 和 Brown^[10-11]根据全球不同区域现今地应力测试资料,分析了两个水平应力的平均值与垂直应力之比(侧压系数)随深度的变化规律,提出了在浅部侧压系数值较大、变化范围也大;而在深部侧压系数值渐小,变化范围也缩小,且随着深度的增加,侧压系数值趋近于 1,反映出地壳浅部以水平应力为主的特征。赵德安等^[12]分析了我国地应力场分布规律获得了侧压系数与深度关系的最大应力包络线与 Hoek-Brown 模型基本吻合,最小应力包络线的应力水平小于 Hoek-Brown 模型相应的应力水平的认识。邵云慧等^[13]通过地应力资料的统计分析,提出了我国现代地应力场在三维空间的各个方向上均为压应力,大部分地区以水平应力占优势,地壳隆起区多属高水平应力区。康红普等^[14-15]根据沁水盆地南部的晋城矿区井下实测资料分析了水平主应力和垂直主应力随深度的变化规律,并指出,水平应力总体上随埋深增加而增大,在浅部的增加速度大于垂直应力,且随埋深增加,其增加速度逐渐降低,至深部两者有接近的趋势。孟召平等^[16-17]根据煤层气井试井资料分析了沁水盆地南部 45 口煤层气井主采煤层地应力分布,建立了煤储层应力随煤层埋藏深度增大而增高的线性关系模型,并指出,地应力在 650 m 以浅以垂直应力为主的特征;

提出了沁水盆地南部煤储层地应力状态的变化趋势不同于 Hoek 和 Brown(1980)的统计规律,分析认为, Hoek 和 Brown(1980)统计的地应力数据表明浅部主要位于挤压盆地或形成逆断层的应力机制中;而沁水盆地南部浅部地层位于拉伸盆地或形成正断层应力机制中,并分析了地应力对煤储层渗透性的影响。现今地应力是在古构造应力场形成的天然裂隙背景上的叠加,往往制约着煤储层渗透性的高低和各向异性特征^[18]。在未开采的煤储层中,所有应力处于平衡状态;在煤层气开发过程中,随着水、气介质的排出,煤储层压力逐渐下降,导致煤储层有效地应力(地应力-煤储层压力)增加,煤储层微孔隙和裂隙被压缩和闭合,煤体发生显著的弹塑性形变,从而使煤储层渗透率明显下降。因此研究煤储层应力和压力,揭示煤储层渗透性的受控机制,对于合理确定煤层气开发方案、工作制度和排采速度,提高煤层气产能具有理论和实际意义。以往由于煤层气井地应力测量点资料相对较少,系统的地应力、煤储层压力资料相对比较缺乏,难以建立地应力、储层压力及其耦合关系和模型。

本文针对鄂尔多斯盆地东南缘煤层气开发实际,收集了 26 口煤层气井地应力及煤储层压力资料,通过统计分析,建立了二叠系山西组 2 煤储层地应力、储层压力与煤层埋藏深度之间的相关关系和模型,进一步分析了地应力与储层压力之间的耦合关系,揭示了现今地应力和煤储层压力分布规律及受控机制,为本区煤层气勘探开发提供了理论依据。

1 研究区概况及地应力、储层压力测试

1.1 研究区概况

研究区位于鄂尔多斯盆地东南缘地区,地理位置位于晋陕交界处,以黄河为界分为山西省部分和陕西省两部分包括大宁-吉县、延川南和韩城等区,构造上隶属于渭北隆起和晋西挠褶带交汇处。大宁-吉县和延川南地区属于晋西挠褶带南部,韩城地区位于渭北隆起的东缘,总体上表现为一向西、北西倾斜的大型单斜构造,构造发育具有明显的分带性,盆缘以

断层及伴生的挠褶为主,中部发育宽缓的褶皱,向西逐渐过渡为比较平缓的单斜构造;大宁-吉县和延川南地区构造整体呈南北向展布,其南部构造形迹转为北东向,研究区介于盆地内部稳定构造和盆地边界褶皱、断裂发育的活动构造之间,属于具有过渡性质的盆缘构造区。研究区地层为典型的华北地区地层,含煤地层主要为上古生界石炭-二叠系,包括上石炭统本溪组(C_{2b})、上石炭-下二叠统太原组(C_2-P_{11})及下二叠统山西组(P_{1s})。主采煤层为山西组的 2 煤层和太原组的 10 煤层,煤层较稳定,煤阶高,主要为中高变质的烟煤和无烟煤,煤层含气量大,是煤层气勘探开发的目标层。

1.2 地应力及煤储层压力测试

采用注入/压降试井方法,获取破裂压力、闭合压力和煤储层压力及渗透率等储层参数(图 1)。注入/压降试井作为一种常用试井方法,已在煤层气井中广泛应用。该方法一般使用油管串将井下压力计、封隔器、井下关井工具等下入井中,根据测井资料选择煤储层的直接顶坐封好封隔器,然后连接好地面注入系统,按设计泵率向储层注入地层水(或过滤过的洁净水),达到设计总流量后关闭井下关井工具,测试压力降落数据^[1]。

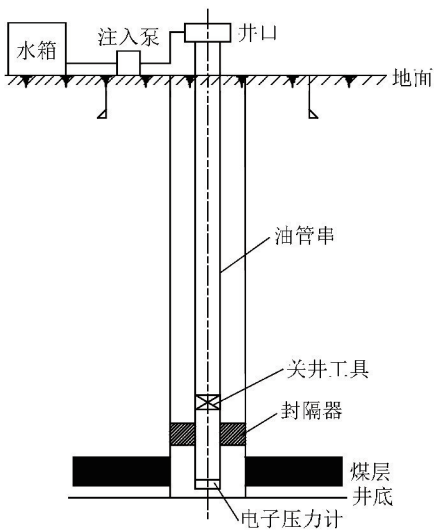


图 1 煤层气井注入压降测试示意

Fig. 1 Sketch map of injection pressure drop test in CBM well

在试井过程中,采用多循环水力压裂方法进行煤储层地应力测试,即用地面注入泵在很短时间内以较高的定排量向井筒中注入流体,使井底流动压力高于目的层(煤层)破裂压力,从而使目的层破裂,产生裂缝后关井,获取测压降曲线。通过分析注入曲线求取煤层的破裂压力,分析压降曲线求取煤层裂缝的闭合压力。

通过水力压力测试直接测得闭合压力即为最小

水平主应力(σ_{hmin});根据破裂压力、闭合压力和煤储层压力等试井参数计算最大水平主应力(σ_{hmax}),即

$$\sigma_{hmin} = p_c \quad (1)$$

$$\sigma_{hmax} = 3p_c - p_f - p_0 + T \quad (2)$$

式中, p_c 为闭合压力,MPa; p_f 为破裂压力,MPa; p_0 为煤储层压力,MPa; T 为煤的抗拉强度,MPa。

2 地应力分布规律

鄂尔多斯盆地东南缘总体倾向西和北西向的大型单斜构造,其上发育轻微褶皱,断层较少且规模小。早在 20 世纪 90 年代初就开始了煤层气的勘探和生产试验,是目前全国勘探程度较高和开发前景较好的煤层气勘探开发区。

根据区内 26 口煤层气井试井资料统计表明:鄂尔多斯盆地东南缘二叠系山西组 2 煤层最大水平主应力为 7.73 ~ 40.98 MPa,平均为 23.76 MPa,最大水平主应力梯度为 1.11 ~ 3.53 MPa/100 m,平均为 2.56 MPa/100 m;最小水平主应力,即为闭合压力为 5.820 ~ 27.475 MPa,平均为 15.68 MPa,闭合压力梯度为 1.00 ~ 2.78 MPa/100 m,平均为 1.69 MPa/100 m。

统计分析表明,尽管煤储层地应力和煤储层压力随地质条件有所变化,但本区煤储层地应力和储层压力随深度的增加呈线性增大的规律(图 2)。

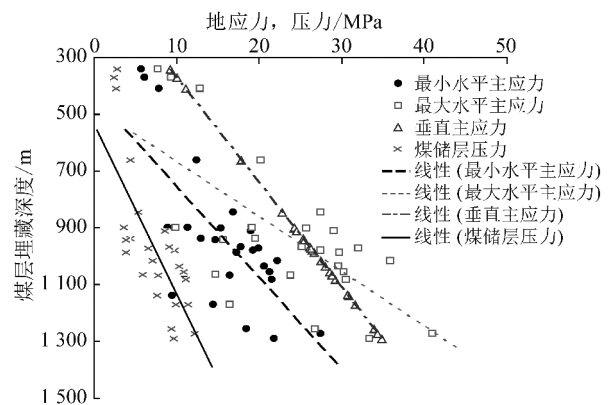


图 2 鄂尔多斯盆地东南缘煤储层地应力、压力与深度的关系

Fig. 2 Relationship between the principal stress, pressure of coal reservoir and burial depth in Southeast margin of Ordos Basin

(1) 最小水平主应力即闭合压力为

$$\sigma_{hmin} = 0.015 7D + 0.943 6 \quad (3)$$

(2) 最大水平主应力为

$$\sigma_{hmax} = 0.023 5D + 1.810 1 \quad (4)$$

式中, D 为煤层埋藏深度,m;统计数 N 为 26,相关系数 R 为 0.68。

(3) 垂直应力 σ_v 按 E. T. Brown 和 Hock (1978)

给出的关系估算(图 2),即

$$\sigma_v = 0.027D \quad (5)$$

式中, σ_v 为垂直主应力, MPa。

(4) 煤储层压力, 随着煤层埋藏深度的增加, 煤储层压力也增高(图 2), 其关系为

$$p_0 = 0.0095D - 2.2215 \quad (6)$$

其中, 统计数 N 为 26; 相关系数 R 为 0.74。

随着现今地应力的增大或有效应力的增高, 煤储层渗流空间减少, 渗透率下降。在煤层气开发过程中, 随着储层压力下降, 有效压力增加, 煤储层渗透率下降。

煤储层压力决定着煤层对甲烷等气体的吸附与解吸能力。煤储层压力越高, 越容易排采, 越有利于煤层气开发, 但是当煤储层压力随煤层埋藏深度线性增大的同时, 煤储层渗透率按指数函数快速降低。煤储层压力对渗透率的影响是通过有效应力的变化来影响煤储层渗透性, 其远小于埋深对渗透率的控制。因此对生产过程中地应力和储层压力变化过程的研究, 将有助于煤层气的合理开采, 减少煤储层伤害, 提高最终采收率。

回归分析统计表明(图 2), 在 1 000 m 以浅煤储层地应力状态主要表现为 $\sigma_v > \sigma_{hmax} > \sigma_{hmin}$, 且最小水平主应力小于 16 MPa; 而在 1 000 m 以深煤储层地应力状态为 $\sigma_{hmax} \geq \sigma_v \geq \sigma_{hmin}$, 且最小水平主应力大于 16 MPa。

研究区两个水平应力分量不相等, 两个水平主应力之比($\sigma_{hmax}/\sigma_{hmin}$)在 1.07 ~ 1.72, 平均为 1.47。最大水平主应力 σ_{hmax} 与垂直主应力 σ_v 之比为 0.41 ~ 1.31, 平均为 0.96。

根据上面的分析可以看出, 在 1 000 m 以浅, 煤储层位于拉伸盆地或形成正断层应力机制中, 地应力以垂直主应力为主的特征; 在 1 000 m 以深, 煤储层受到挤压应力作用, 最大水平主应力大于垂直主应力或者 3 个主应力趋于一致。

3 最小水平主应力、垂直主应力和储层压力之间的关系

3.1 煤层破裂压力与闭合压力(最小水平主应力)之间的关系

通过鄂尔多斯盆地东南缘煤层气井的水力压裂试验资料统计表明: 二叠系山西组 2 煤层在埋藏深度 341.84 ~ 1 289.45 m 内, 煤层破裂压力为 7.31 ~ 29.63 MPa, 平均为 17.84 MPa, 破裂压力梯度为 0.99 ~ 2.98 MPa/100 m, 平均为 1.96 MPa/100 m; 闭合压力为 5.82 ~ 27.475 MPa, 平均为 15.68 MPa, 闭

合压力梯度为 1.00 ~ 2.78 MPa/100 m, 平均为 1.69 MPa/100 m(表 1)。

表 1 鄂尔多斯盆地东南缘煤层水力压裂试验参数

Table 1 Hydrofracturing testing parameters statistics in Southeast margin of Ordos Basin

测试参数	参数值
煤层埋藏深度/m	(341.84 ~ 1 289.45)/949.79
破裂压力/MPa	(7.31 ~ 29.63)/17.84
破裂压力梯度/(MPa · (100 m) ⁻¹)	(0.99 ~ 2.98)/1.96
闭合压力/MPa	(5.82 ~ 27.47)/15.68
闭合压力梯度/(MPa · (100 m) ⁻¹)	(1.00 ~ 2.78)/1.69
煤储层压力/MPa	(2.39 ~ 12.22)/6.82
煤储层压力梯度/(MPa · (100 m) ⁻¹)	(0.31 ~ 1.03)/0.71
煤抗拉强度/MPa	(0.25 ~ 0.81)/0.42

注: (最小 ~ 最大)/平均。

本区煤层破裂压力与闭合压力(最小水平主应力)之间的关系具有高度的线性相关性(图 3), 其关系为

$$p_f = 0.9974p_c + 1.7321 \quad (7)$$

其中, 统计数 N 为 26, 相关系数 R 为 0.99。

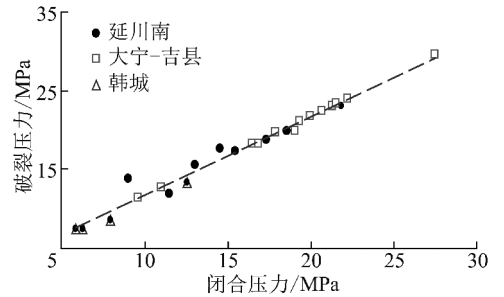


图 3 煤层破裂压力与闭合压力之间的关系

Fig. 3 Relationship between the fracture pressure of coal reservoir and its closure pressure

3.2 最小水平主应力、垂直主应力和储层压力的关系

试井测试结果统计表明, 本区二叠系山西组 2 煤层在埋藏深度 341.84 ~ 1 289.45 m 内, 煤储层压力为 2.39 ~ 12.22 MPa, 平均为 6.82 MPa; 煤储层压力梯度为 0.31 ~ 1.03 MPa/100 m, 平均为 0.71 MPa/100 m(表 1)。

最小水平主应力在一般沉积盆地中通常近似为垂直主应力的 70%。图 4 反映了鄂尔多斯盆地东南缘水力压裂测试获得的最小水平主应力与按煤储层中垂直主应力的 70% 估算的应力值。从图 4 可以看出, 按煤储层中垂直主应力的 70% 不能准确地描述最小水平主应力的大小。煤储层中最小水平主应力比一般沉积盆地中沉积岩石地层中的应力偏低, 这主要是由

煤为有机质以及煤岩力学强度较低所致。

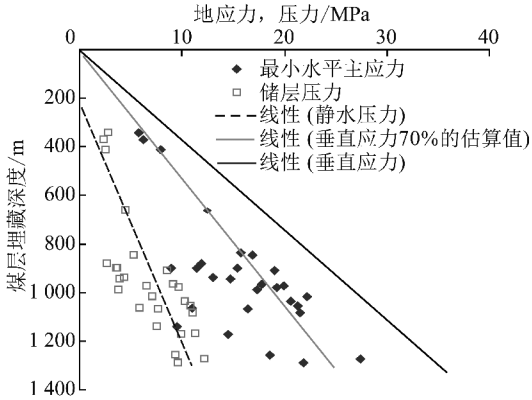


图4 煤储层垂直应力、储层压力及最小水平主应力的关系

Fig. 4 Relationship of vertical stress, reservoir pressure, and the minimum horizontal stress

测量数据分析表明,煤储层有效最小水平主应力与有效垂直主应力(垂直应力-储层压力)有较好的相关关系(图5),其关系式为

$$\sigma_{\text{hmin}} = 0.4758(\sigma_v - p_0) + p_0 + 1.3168 \quad (8)$$

其中,统计数 N 为 26, 相关系数 R 为 0.76。

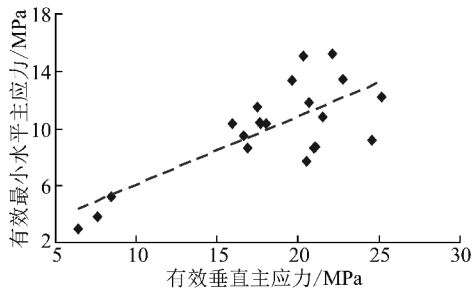


图5 煤储层有效垂直主应力和有效最小水平主应力的关系

Fig. 5 Relationship of effective vertical stress and effective minimum horizontal stress in coal reservoir

式(8)表明,煤储层具有与一般油气盆地内沉积地层相类似的有效应力关系。Matthews 和 Kelly (1967)根据有效应力系数和垂直应力及储层压力来预测分析最小水平主应力(或破裂梯度)。

$$\sigma_{\text{hmin}} = K_0(\sigma_v - p_0) + p_0 \quad (9)$$

式中, K_0 为有效应力系数, $K_0 = \sigma'_{\text{hmin}}/\sigma'_v$; σ'_{hmin} 为最小有效应力; σ'_v 为垂直有效应力。

根据现场经验的破裂阈值确定 K_0 值。 K_0 可以通过漏失测试(leak-off tests)(LOT)和区域经验确定。从式(8)可以看出鄂尔多斯盆地东南缘煤储层有效应力系数 K_0 为 0.48, 低于油气盆地中页岩层中通常使用的值(如 $K_0 = 0.80$)^[17,19]。

戴恩斯(Daines)(1982)提出了相类似的最小水平主应力预测模型,即

$$\sigma_{\text{hmin}} = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - p_0) + p_0 + \sigma_{\text{tec}} \quad (10)$$

式中, ν 为泊松比; σ_{tec} 为构造应力, MPa。

与鄂尔多斯盆地东南缘煤储层获得的经验关系相比较,式(8)与式(10)完全一致。由式(8)和式(10)可以看出,本区构造应力 $\sigma_{\text{tec}} = 1.3168$ MPa, 构造应力较小,反映了鄂尔多斯盆地东南缘具有拉伸盆地特征;煤储层泊松比 $\nu = 0.322$, 该值与本区煤储层试验值完全一致。

3.3 煤储层压力与最小水平主应力关系

本区煤储层压力偏低,石炭-二叠系煤系地层中含水层水位深度平均为 213 m, 比沁水盆地南部 120~140 m 偏深 73~93 m, 相同深度条件下鄂尔多斯盆地东南缘煤储层压力要比沁水盆地南部偏低 0.73~0.93 MPa。这主要是由于新生代以来,鄂尔多斯盆地不断抬升,地下水位下降所致。

地壳抬升作用,除对煤储层压力产生影响外,由于盆地抬升导致煤层自然脱气,煤层含气量和含气饱和度降低。由于地壳抬升,地下水位下降,可使煤储层压力降低,若按静水压力梯度估计,地下水位下降 100 m,煤储层压力将降低近 1 MPa,在储层压力降低的同时煤层含气量也相应降低。即使原始煤层处于气体饱和状态,由于煤储层含气量的降低,那么含气量将从相应的等温吸附曲线上移,使得煤层处于气体不饱和状态。因此研究区煤储层为不饱和状态,且含气饱和度低。研究区测试结果表明,2号煤层的含气饱和度为 39.51%~56.11%,10号煤层的含气饱和度为 26.95%~50.91%。

煤储层压力与地应力密切相关,随着地应力的增加,煤储层孔隙-裂隙被压缩,体积变小,煤储层压力增大;反之,则减小。因此,地应力与煤储层压力存在相关性(图6)。

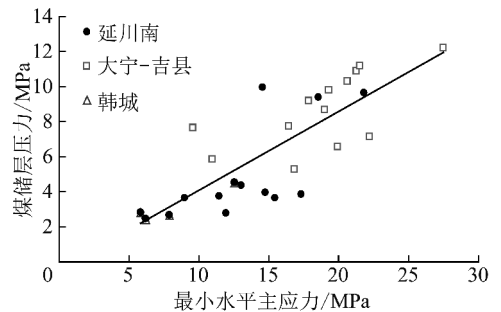


图6 煤储层压力与最小水平主应力的关系

Fig. 6 Relationship of coal reservoir pressure and the minimum horizontal stress

根据鄂尔多斯盆地东南缘煤层储层压力与地应力(闭合压力)实测数据统计分析表明,煤储层压力与最小水平主应力呈线性正相关关系,即

$$p_0 = 0.4498\sigma_{\text{hmin}} - 0.399 \quad (11)$$

其中,统计数 N 为 26,相关系数 R 为 0.80。

随着地应力的增高,可使煤体中部分大孔隙和裂隙变窄甚至闭合,堵塞流体流动,渗透的通道以至形成一些彼此近似隔离的空间,由于增高的应力作用,这些隔离空间中流体压力急剧增高,从而形成局部储层压力增高的地带。事实上,不仅在构造应力场作用下,就是在采动应力场作用下,也会产生这种局部储层压力增高的地带。例如,在前苏联顿巴斯加里宁 7-8 矿 519 m 水平的普拉斯柯维耶夫斯基煤层,就曾在回采工作面前方 3 m 处测得瓦斯压力为 13.4 MPa(即 $p=0.0258H$);又如北票冠山矿二井-540 m 水平西 1 石门 54 煤层,由于受开采集中应力的影响,瓦斯压力高达 13.6 MPa,因此由于高地应力的封闭作用,可以导致煤储层压力出现高压现象。

煤储层压力与最小水平主应力之间的这种规律,在我国煤层气勘探开发众多的测试结果也得到了验证。处于挤压构造应力场背景中的煤储层,其压力值往往偏大,压力梯度偏高;而处于拉张型构造应力场中的煤储层,其压力值偏低,压力梯度较低。向斜、背斜或单构造的含煤区,煤储层的埋深、封闭条件和煤储层内的压力分布与变化存在明显差异。另外,在抬升地块或逆掩超覆以压扭作用为主的构造部位,构造应力的存在往往是影响储层压力变化的主要原因,甚至产生储层压力异常。增加地应力,有利于煤储层压力的保持,但往往导致渗透率降低,并给煤储层的排水、降压以及煤层气的解吸、运移、产出造成一定困难,在高地应力区尤为如此,对于煤层气开采是一对矛盾,储层压力大,容易排水降压,形成压力差,气体易解吸;而最小水平主应力对煤层气开采有不利影响,随着应力的增加煤储层的渗透率降低,也就影响到产气量。因此,煤层气开采应综合考虑这两种参数选择应力小的区域和储层压力高的区域。总体上来看,构造应力过高会对煤层气井的高产带来不利影响,过低则不利于煤层气的富集。

3.4 最小水平主应力与岩石弹性参数和温度之间的关系

最小水平主应力除与构造应力和垂直应力密切相关外,最小水平主应力受岩石弹性参数和温度影响也非常明显。

关于地应力估算的理论与方法,将地球表述为一个具有变化的地热梯度,这表明,由于地温梯度的关系,水平应力与弹性参数和地温具有相关性。如果地温梯度为零,水平应力与弹性参数不再具有相关性^[20]。对于各向同性岩石具有如下关系:

$$\sigma_{\text{hmin}} = \frac{\nu}{1-\nu}\gamma D + \frac{\beta EG}{1-\nu}(D+1000) \quad (12)$$

式中, γ 为岩石的容重; β 为岩石线性热膨胀系数; E 为岩石弹性模量; G 为岩石地温梯度。

根据理论模型(式(12))对鄂尔多斯盆地东南缘煤储层最小水平主应力进行计算,理论计算值与试井实测值之间具有很好的线性相关性(图 7),其相关关系为

$$\sigma_{\text{hmin}}^s = 1.052\sigma_{\text{hmin}}^{\text{li}} - 0.0543 \quad (13)$$

式中, σ_{hmin}^s 为最小水平主应力实测值,MPa; $\sigma_{\text{hmin}}^{\text{li}}$ 为最小水平主应力理论计算值,MPa;统计数 N 为 26,相关系数 R 为 0.78。

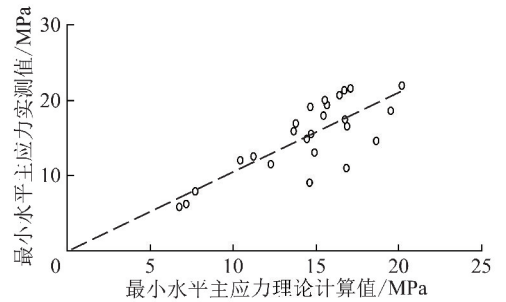


图 7 鄂尔多斯盆地东南缘煤储层最小水平主应力理论计算值与实测值的关系

Fig. 7 Comparison of the measured and calculated minimum principal horizontal stress in Southeast margin of Ordos Basin

4 结 论

(1)本区二叠系山西组 2 煤层破裂压力梯度、闭合压力梯度和煤储层压力梯度的平均值分别为 1.96, 1.69, 0.71 MPa/100 m。煤储层地应力(最大水平主应力、最小水平主应力和垂直主应力)和储层压力均随着煤层埋藏深度增大呈线性规律增高。

(2)鄂尔多斯盆地东南缘具有拉伸盆地特征,煤储层中的最小水平主应力比一般沉积盆地中沉积地层的应力偏低,煤储层有效应力系数 K_0 为 0.48,其低于一般沉积盆地中的页岩层有效应力系数值(如 $K_0=0.80$);现今地应力随着深度的增加而增高,且岩石弹性参数和温度对地应力影响明显。

(3)由于新生代以来,鄂尔多斯盆地不断抬升,地下水位下降,本区煤储层压力偏低,相同深度条件下鄂尔多斯盆地东南缘煤储层压力要比沁水盆地南部偏低 0.73~0.93 MPa。煤储层压力与地应力之间呈正相关关系。随着地应力的增加,煤储层孔隙-裂隙被压缩,体积变小,煤储层压力增大。

(4)在 1000 m 以浅煤储层地应力状态主要表现为 $\sigma_v > \sigma_{\text{hmax}} > \sigma_{\text{hmin}}$,最小水平主应力小于 16 MPa,现

今地应力处于拉伸应力状态;在1 000 m以深煤储层地应力状态转化为 $\sigma_{\text{hmax}} \geq \sigma_v \geq \sigma_{\text{hmin}}$,最小水平主应力大于16 MPa,现今地应力转化为挤压应力状态。

(5)鄂尔多斯盆地东南缘现今地应力受华北区域构造应力场控制,最大水平主应力方向主要以NEE-SWW方向为特征。煤储层地应力状态的变化趋势不同于Hoek和Brown(1980)的统计规律,在1 000 m以浅,煤储层位于拉伸盆地或形成正断层应力机制中,地应力以垂直应力为主的特征;而在1 000 m以深,煤储层受到挤压应力作用,最大水平应力大于垂直应力或者3个主应力近乎一致。

参考文献:

- [1] 孟召平,田永东,李国富.煤层气开发地质学理论与方法[M].北京:科学出版社,2010.
- [2] 李方全,王连捷.华北地区现今构造应力场[M].北京:地质出版社,1981:142-150.
- [3] Haimson B C, Cornet F H. ISRM suggested methods for rock stress estimation-part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF) [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2003, 40: 1011-1020.
- [4] 蔡美峰,乔兰,李华斌.地应力测量原理和技术[M].北京:科学出版社,1995.
- [5] 张宏伟,张文军,南存全.采矿工程中的原岩应力测量[J].阜新矿业学院学报,1997,16(6):25-29.
Zhang Hongwei, Zhang Wenjun, Nan Cunquan. Stress measurement of original rock in mining engineering [J]. Journal of Fuxin Mining Science and Technology, 1997, 16(6): 25-29.
- [6] 刘允芳,刘元坤.单钻孔中水压致裂法三维地应力测量的新进展[J].岩石力学与工程学报,2006,25(S2):3816-3822.
Liu Yunfang, Liu Yuankun. New advance in 3D geostress measurement hydraulic fracturing technique in one borehole [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3816-3822.
- [7] 陈庆宣,王维襄,孙叶,等.岩石力学与构造应力场分析[M].北京:地质出版社,1998:58-182.
- [8] 韩军,张宏伟.淮南矿区地应力场特征[J].煤田地质与勘探,2009,37(1):17-21.
Han Jun, Zhang Hongwei. Characters of in-situ stress field in Huainan mine area [J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37(1): 17-21.
- [9] 尤明庆.水压致裂法测量地应力方法的研究[J].岩土工程学报,2005,27(3):350-353.
You Mingqing. Study on the geo-stresses measurement with hydro-
- fracture of borehole [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 350-353.
- [10] Hoek E, Brown E T. Empirical strength criterion for rock masses [J]. Geotech. Engng. Div. ASCE, 1980, 106(GT9): 1013-1035.
- [11] Hoek E, Brown E T. Underground excavations in rock [M]. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980.
- [12] 赵德安,陈志敏,蔡小林,等.中国地应力场分布规律统计分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(6):1265-1271.
Zhao Dean, Chen Zhimin, Cai Xiaolin, et al. Analysis of distribution rule of geostress in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1265-1271.
- [13] 邵云慧.地质力学在环境地质中的应用[M].北京:地质出版社,1991.
- [14] 康红普,姜铁明,张晓,等.晋城矿区地应力场研究及应用[J].岩石力学与工程学报,2009,28(1):1-8.
Kang Hongpu, Jiang Tieming, Zhang Xiao, et al. Research on in-situ stress field in Jincheng mining area and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 1-8.
- [15] 康红普,林健,颜立新,等.山西煤矿矿区井下地应力场分布特征研究[J].地球物理学报,2009,52(7):1782-1792.
Kang Hongpu, Lin Jian, Yan Lixin, et al. Study on characteristics of underground in-situ stress distribution in Shanxi coal mining fields [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(7): 1782-1792.
- [16] 孟召平,田永东,李国富.沁水盆地南部地应力场特征及其研究意义[J].煤炭学报,2010,35(6):975-981.
Meng Zhaoping, Tian Yongdong, Li Guofu. Characteristics of in-situ stress field in southern Qinshui Basin and its research significance [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 975-981.
- [17] Meng Zhaoping, Zhang Jincai, Wang Rui. In-situ stress, pore pressure, and stress-dependent permeability in the Southern Qinshui Basin [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, 48: 122-131.
- [18] 秦勇,张德民,傅雪海,等.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].地质论评,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.
- [19] Zhang J, Standifird W, Roegiers J C, et al. Stress-dependent permeability in fractured media: from lab experiments to engineering applications [J]. Rock Mechanics Rock Eng., 2007, 40(1): 3-21.
- [20] Sheorey P R, Murali Mohan G, Sinha A. Influence of elastic constants on the horizontal in situ stress [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2001, 38: 1211-121.