

文章编号:0253-9993(2011)12-2086-06

温度及含水率对切削原煤吸附瓦斯特性的影响

王俊峰¹,张 力²,赵 东¹

(1. 太原理工大学 矿业工程学院,山西 太原 030024;2. 国家安全生产监督管理总局 研究中心,北京 100713)

摘 要:为了测定温度、含水率对切削原煤吸附特性的影响,针对之前煤对瓦斯吸附性研究的不足,采用屯兰矿的焦煤、屯留矿的贫煤并经煤岩钻样机切削加工成 $\phi 100\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 的圆柱形块状原煤,根据实验结果及相关理论采用Langmuir单分子层吸附模型进行结果分析。实验从等温条件下测定两种煤的吸附常数入手,之后调节至不同的温度和不同的含水率,测得吸附常数 a 、 b 分别随温度、含水率变化的关系式。结果表明:温度对吸附性的影响只取决于吸附常数 a 的变化,而含水率与 b 有关;在实验所研究的温度梯度内,得到吸附常数 a 随温度的变化呈线性衰减的趋势;在干燥到饱和含水的范围内,得出吸附常数 b 随含水率的变化呈指数衰减的趋势,并说明切削原煤的含水吸附性质与粉煤粒煤是存在差异的。

关键词:温度;含水率;原煤;吸附特性;Langmuir 吸附方程

中图分类号:P618.11 **文献标志码:**A

Effect of temperature and moisture on raw coal adsorption characteristics

WANG Jun-feng¹,ZHANG Li²,ZHAO Dong¹

(1. College of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Research Center, State Administration of Work Safety, Beijing 100713, China)

Abstract: In order to study the effects of temperature and moisture ratio on raw coal samples' adsorption characteristics towards coalbed methane and due to lack of researches of effects of temperature or moisture ratio on the adsorption capability of coal samples, coke coal from Tunlan Mine and the lean coal from Tunliu Mine were adopted. The original ones were processed from big block samples with size of $\phi 100\text{ mm}\times 150\text{ mm}$, and the experimental results were fitted through Langmuir single molecule absorption model. The experiments begun from the measurement on absorption constants of the two sorts' of coal at equal temperature, and later different temperature and moisture ratio were regulated and determined the relationship of the absorption constants a & b followed by temperature & moisture ratio. The conclusion show that: the equal temperature experiments of coal samples with different metamorphose degree displays that absorption becomes much larger with the increase of metamorphose degree of coal; temperature is only related to absorption constant a . At the fixed temperature scope of these experiments, the relationship of absorption constant a by temperature is in linearity attenuation; in the range from dryness to saturation moisture, the relationship of absorption constant b by moisture ratio is in exponential attenuation. And the diversity of block coal sample and renew-shaped one on adsorption characteristics was explained.

Key words: temperature; moisture; raw coal; adsorption characteristic; Langmuir absorption model

煤是一种孔隙裂隙高度发育的多孔介质,成煤中伴随着大量煤层瓦斯的产生^[1]。在目前的可采深度

下,80%~90%的煤层气以吸附态存在于煤体孔隙中^[2-3],因此研究煤体的吸附性对煤层气的开采具有

理论指导意义。

许多学者进行过煤吸附性的研究,但存在以下问题没有得到很好的解决:一是水分对煤体吸附性的影响,之前学者做过破碎后重塑煤样注水的吸附研究,得到了水分对煤吸附影响的校正公式^[4],但重塑煤破坏了煤体原有裂隙,且水在其中的赋存状态是附着在煤粉颗粒表面的,而不是原生块煤存在于裂隙孔隙通道中的,因此与实际地层中的煤体不符;二是温度的影响,之前研究的温度范围是25~50℃^[5],最高实验至70℃^[6],但实际情况中,在此温度范围内吸附性变化非常大,较窄的温度梯度不易推导出普遍适用的关系式,而且不足以从实验角度说明整个温度区域的吸附性变化,因此得出的结论普遍性不足;三是在吸附常数的测定上,目前多数学者认定煤对甲烷的吸附符合Langmuir单分子层模型,并且许多结论证实温度和含水率分别作用于 a 、 b 系数,但对具体的影响程度研究得不够细致^[7-10]。本文以测定块煤吸附瓦斯常数 a 、 b 入手,选用不同煤种,在不同温度、水分条件下测定吸附常数的校正关系式,温度梯度选用0~90℃,水分采用块煤外部高压注水的方式。

1 实验过程

1.1 实验样品与设备

实验所用煤样分别是取自西山矿区屯兰矿的焦煤和潞安矿区屯留矿的贫煤,两者挥发分含量分别为25%和15%。采用大型煤岩钻样机,将煤样取成 $\phi 100\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 的大块圆柱形试件,干燥后称重,每种煤各取两块分别进行实验,之后取平均值计算,确保实验结果的基本稳定性。选用大块煤样是为了增加量值基数,降低误差,焦煤标记为1号样品, $m_1 = 1.598\text{ kg}$;贫煤为2号样品, $m_2 = 1.605\text{ kg}$ 。

实验装置选用太原理工大学采矿工艺研究所自制的块煤吸附解吸成套设备,由放置煤样的不锈钢吸附罐、可调节温度的恒温水槽(0~90℃)、高压注水泵(1~10 MPa)、用于注气的瓦斯压力瓶(CH_4 纯度99.9%)、真空泵(真空度-0.094 MPa)、鼓风干燥箱(工作温度 $< 300\text{ }^\circ\text{C}$)以及一些相关仪表组成。吸附罐的温度由恒温水槽控制,含水率的高低由高压注水泵和鼓风干燥箱控制,装置连接如图1所示。

1.2 实验目的与过程

针对以往研究的不足,考虑到孔隙裂隙通道中的水分及较大的温度梯度对煤吸附瓦斯的影响,选用大块煤样及0~90℃的温度范围,实验设备密封性良好,确保无气体渗漏,温度传感器误差为 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$,保证实验结果真实可靠。实验前首先要用真空泵测定放

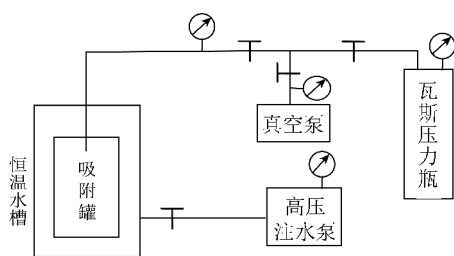


图1 试验系统

Fig. 1 Experiment system

入煤样后吸附罐的剩余体积,测定结果1号煤样是175 mL,2号煤样是200 mL,剩余空间主要由煤样内部的裂隙和孔隙组成。

实验过程:(1)分别取含水率为0的1、2号煤样,将其温度调至25℃,注气片刻后停止,当压力下降幅度小于0.005 MPa/h,则可认定吸附平衡,此时的吸附时间是24 h,之后通过逐渐的注气补充连续注气产生新的吸附平衡点,每一个平衡点的吸附均需24 h,同时记录每次吸附的终止压力和注气体积,由此获得不同平衡压力下的吸附量;(2)将2号煤样温度调至0℃,重复过程(1)并记录终止压力和注气体积,结果与25℃时加以对比,得出只受温度影响下同种煤吸附常数的变化;(3)对于2号煤样,0℃下吸附平衡后,逐次调节温度直至90℃,恒压下采用升温解吸气体的方式逐次解吸平衡,此时即为该温度下的吸附平衡,记录解吸气体体积,从而计算任一实验温度下的吸附体积;(4)4 MPa水压给1号煤样注水24 h,确保吸水充分完全,煤样称重后算得含水率为2%,而后逐次烘干并称重以获取不同的含水率(2%~0),重复吸附过程并记录。

2 实验结果分析

2.1 实验数据分析

实验结果见表1,目前评价煤体对单组分气体——瓦斯的吸附性,多采用Langmuir单分子层吸附模型,且众多研究结果表明^[11-15],Langmuir单分子模型对煤体吸附瓦斯气体的拟合结果最好,因此采用此模型拟合实验数据,即

$$V = \frac{abp}{1 + bp} \quad (1)$$

其中, V 为标准状况下煤样吸附瓦斯体积,L; p 为瓦斯赋存于煤体中的孔隙压力,MPa; a 、 b 为吸附常数,L/MPa⁻¹。分析此模型得出, V 与 p 成正比,说明随着煤体中瓦斯的孔隙应力的增加,吸附量增加,当 $p \rightarrow \infty$ 时,方程简化为 $V=a$,则 a 称为给定温度下的极限吸附体积,而 b 是与其它因素有关的吸附常数。

表 1 实验数据

Table 1 The experiment data

| 1 号煤样 | | | | | 2 号煤样 | | | | |
|---------------------|------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|--------------------|---------------------|------------|
| 25 °C, W=0 | | | 25 °C, W=0 ~ 2% | | 25 °C, W=0 | | 0 ~ 90 °C, W=0 | | |
| 压力 <i>p</i> /MPa | 吸附量 V/L | 含水率 W/% | 压力 <i>p</i> /MPa | 吸附量 V/L | 压力 <i>p</i> /MPa | 吸附量 V/L | 温度 <i>T</i> /°C | 压力 <i>p</i> /MPa | 吸附量 V/L |
| 0.186 | 2.404 | 2.000 | 1.270 | 0.075 | 0.106 | 3.035 | 0 | 0.55 | 13.650 |
| 0.374 | 4.212 | 1.696 | 1.070 | 0.388 | 0.473 | 9.025 | 15 | 0.55 | 12.480 |
| 0.714 | 6.705 | 1.410 | 0.966 | 0.581 | 0.853 | 13.42 | 30 | 0.55 | 10.680 |
| 0.837 | 7.544 | 1.110 | 0.775 | 0.857 | 1.079 | 16.30 | 45 | 0.55 | 8.545 |
| 0.953 | 8.463 | 0.880 | 0.590 | 1.332 | 1.395 | 18.84 | 60 | 0.55 | 5.905 |
| 1.275 | 10.150 | 0.670 | 0.381 | 1.606 | 1.656 | 20.75 | 70 | 0.55 | 4.612 |
| 1.502 | 11.370 | 0.341 | 0.334 | 2.088 | 1.873 | 22.61 | 80 | 0.55 | 3.636 |
| 1.669 | 12.410 | 0 | 0.185 | 2.379 | | | 90 | 0.55 | 2.901 |

图 2 为 25 °C 时 1、2 号煤样的等温吸附曲线,由图 2 可知,随着吸附平衡压力的增加,吸附量呈规律性地逐渐增加,并且同等条件下 2 号煤样的吸附性要高于 1 号煤样。图 3 为 1 号煤样在相同初始压力的定容条件下,煤样的含水率与吸附量的关系,由图 3 可知,在此情况下吸附量随含水率的增加近似呈现线性衰减,当含水率为 2% 时吸附量接近于零。图 4 为在相同吸附平衡压力 0.55 MPa 下,吸附量随温度的变化关系,由图 4 可知,在实验温度条件下,吸附量随温度的升高仍然近似呈线性衰减的趋势,0 °C 的吸附量是 90 °C 时的 4.71 倍。

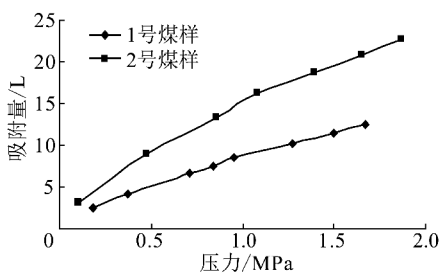


图 2 1、2 号煤样 25 °C 等温吸附曲线
Fig. 2 Adsorption isotherm of No. 1 and No. 2 coal samples at 25 °C

2.2 温度和含水率对吸附性的影响

首先,根据表 1 数据推导温度在 25 °C 下 1、2 号煤样的 a 、 b 值,由于 Langmuir 模型是非线性的,拟合比较繁琐,并且原式拟合结果与实际吻合度不高,因此把此模型简化为线性模型。

令 $Y=1/V$, $X=1/p$, 则模型变为

$$Y = \frac{X}{ab} + \frac{1}{a} \quad (2)$$

此时再令 $C=1/(ab)$, $D=1/a$, 则

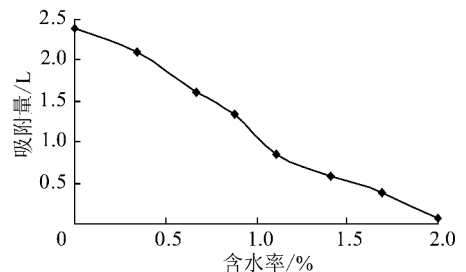


图 3 煤样定容条件下含水率与吸附量的关系

Fig. 3 Relationship between moisture content and adsorption volume at constant volume of No. 1 coal sample

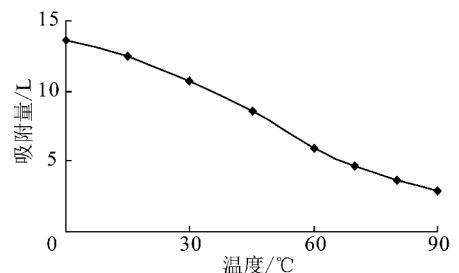


图 4 2 号煤样 0.55 MPa 吸附平衡压力下温度与吸附量的关系

Fig. 4 Relationship between temperature and adsorption volume at 0.55 MPa gas pressure of No. 2 coal sample

$$a = 1/D, b = D/C \quad (3)$$

$$Y = CX + D \quad (4)$$

将计算结果代入式(4),拟合关系式为:1 号煤样, $y = 0.0699x + 0.0445$; 2 号煤样, $y = 0.0317x + 0.033$ 。相关系数分别为 0.9982 和 0.9969。

代入式(3)得 25 °C 下 1 号煤样的吸附常数 $a = 22.47$, $b = 0.637$; 2 号煤样 $a = 30.30$, $b = 1.04$ 。

采用同样的方法导出 0 °C 下 2 号煤样的 a 、 b 值和拟合关系式: $a = 37.17$, $b = 1.07$, $y = 0.0251x + 0.0269$, 相关系数为 0.9927。

比较 2 号煤样在 0、25 °C 下的两组数据可以发现 b 值相差不到 5%, 在误差允许的范围, 可以认为同种煤只在温度变化时, 吸附量 V 只与吸附常数 a 有关, 而与 b 无关, 这与之前的重塑煤研究得出的结论相同, 说明无论裂隙存在与否, 吸附能力只与温度有关。并且随着温度的升高, a 值逐渐降低, 由之前研究可得, 煤中含水率对吸附性的影响只与 b 有关, 而与 a 无关^[7,12,14], 本实验结果同样证实这一理论。

对于 Langmuir 单分子吸附模型, 若 a 恒定, 则方程(1)变为

$$b = \frac{V}{p(a - V)} \quad (5)$$

将 1 号煤样在不同含水率下的吸附值代入式(5), 结果见表 2。若 b 恒定, 则方程(1)变为

$$a = \frac{V(1 + bp)}{bp} \quad (6)$$

将 2 号煤样在不同温度下的吸附值代入式(6), 结果见表 2。

表 2 两煤样 a 、 b 值随温度和含水率的变化情况

Table 2 Variability of a & b with temperature & moisture separately of two samples

| $a = 22.47$ | | $b = 1.07$ | |
|-------------|-------|------------|--------|
| b 值 | 含水率/% | a 值 | 温度/K |
| 0.002 6 | 2.000 | 37.17 | 273.15 |
| 0.016 4 | 1.696 | 33.98 | 288.15 |
| 0.027 5 | 1.410 | 29.08 | 303.15 |
| 0.051 2 | 1.110 | 23.27 | 318.15 |
| 0.107 0 | 0.880 | 16.08 | 333.15 |
| 0.202 0 | 0.670 | 12.56 | 343.15 |
| 0.307 0 | 0.341 | 9.90 | 353.15 |
| 0.637 0 | 0 | 7.90 | 363.15 |

3 块煤吸附性讨论

3.1 吸附性影响因素分析

拟合表 2 的数据, 采用最小二乘法逼近, 如图 5、6 所示。 a 恒定时, b 与 V 成正增长; b 恒定时, a 与 V 成正比, 且 2 号煤样的 b 值大于 1 号煤样。结果说明, 煤样的吸附性与含水率、温度成反比, 与煤的变质程度成正比, 吸附常数 a 随温度的变化在本实验研究的温度内是线性的, 吸附常数 b 随煤变质程度的增加而增大、随含水率的变化呈指数衰减形态。由于图 6 的拟合公式在温度大于 382 K 时无意义, 因此此拟合关系式不适用于高温阶段煤对瓦斯的吸附量随温度的变化。

由表 2、图 5 得出, 含水率 < 1% 时, 随着含水率的

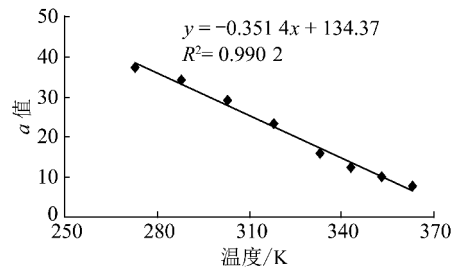


图 5 含水率为 0 时 2 号煤样温度与 a 值的拟合关系
Fig. 5 Relationship of temperature and a on No. 2 coal sample at moisture 0

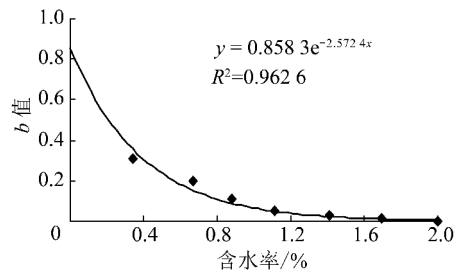


图 6 25 °C 下 1 号煤样含水率与 b 值的拟合关系
Fig. 6 Relationship of moisture and b on No. 1 coal sample at 25 °C

降低, b 值显著增加, 微观上分析是大的裂隙孔隙通道中的水分已基本蒸发, 形成吸附通道, 并且和内部的微孔隙逐渐连通, 吸附量显著增加; 处于饱和含水 2% 时, 大的裂隙被水充填, 气体无法渗流进入到内部的孔隙中, 且大裂隙的吸附值很低, 因此此时几乎是不吸附状态; 而在干燥状态附近时是一个突变的过程, 此时存在于内部的微孔隙逐渐被连通, 而煤体中的吸附瓦斯主要存在于微孔隙中, 所以此时可吸附区域快速增加, 直至完全干燥时, 吸附性达到最大。文献[16-17]认为, 甲烷分子在煤表面主要以正三角锥的方式吸附, 而水分子在分子结构上以两个氢原子向下、一个氧原子向上的方式吸附, 因此煤表面对水分子的吸附势阱远远大于甲烷分子, 所以煤中水分含量的增加会导致煤对甲烷吸附量的减少^[16-17]。

由表 2、图 6 得出, 在实验温度段内, a 值随温度的变化大致呈线性衰减的趋势, 在 0 °C 以下, 由于煤体中的流体处于液-固两相临界状态, 因此研究此温度段的吸附性没有意义, 而且实际煤体的赋存也没有此临界温度以下的, 而对于 90 °C 以上的温度, 因为本实验装置是通过水的加热来控制温度, 而常压下水会在 100 °C 左右发生气相转变, 装置无法达到更高的温度, 因此得出的关系式适用于本实验温度范围内。温度对吸附性的影响, 微观上表现为随着温度的升高, 煤体孔隙表面吸附瓦斯的自由活化能逐渐降低, 瓦斯不能存在于孔隙表面上, 而是游离到孔隙中, 这使得

孔隙压力升高^[2],温度越高,游离值越大;另一说法是随着温度的上升孔径增大,在体积一定的前提下就会使得更多的微孔合并成小孔甚至较大的孔,因此吸附性降低^[15]。但可以肯定的是,随着温度的进一步增加,更多的吸附气体转变为游离气体,但更高的压力可以促使进一步的吸附,这种动态变化的过程在温度恒定一段时间之后达到平衡,此时的吸附量就是此温度值下的平衡吸附值。

而煤的变质程度对吸附性的影响,是由于随着煤的进一步变质,固体颗粒煤体会产生更多的微孔,而微孔在瓦斯的吸附中占主导地位,因此吸附性增加^[2]。以往实验研究结果表明,2 MPa下3号无烟煤的吸附性是褐煤的5~8倍^[18]。

3.2 a、b常数的讨论

本文得出了吸附常数 a 与温度 T 呈线性衰减,吸附常数 b 与含水率 W 呈指数衰减。文献[5]得出在给定压力下,吸附量与温度的拟合关系式是 $V = -0.107t + 21.96$, $R^2 = 0.9904$, t 的单位是 $^{\circ}\text{C}$,此式会在 $t = 205^{\circ}\text{C}$ 时溢出;而本文得出的 a 与 T 的拟合关系式是 $a = -0.3514T + 134.37$, T 的单位是 K ,会在 $T = 382\text{ K}$ (109°C)时溢出。由于文献[5]的温度梯度是 $25 \sim 50^{\circ}\text{C}$,而本实验的温度梯度是 $0 \sim 90^{\circ}\text{C}$,因此可认为本文得出的公式在吸附涉及的全温度梯度内更具有普遍意义,至于更高温度段的研究,等待设备改进后会继续跟进实验,取得更大温度梯度的适用公式。现在此预测500 K以内, a 值与温度 T 呈倒抛物线型衰减。

文献[4]给出了水分对煤吸附瓦斯量的校正关系式:

$$\eta = \frac{1}{1 + (0.147e^{0.022V_r})W} \quad [4]$$

其中 η 为校正系数; W 为含水率, $\%$; V_r 为挥发分, $\%$ 。将1号煤样挥发分代入得:

$$\eta = \frac{1}{1 + 0.255W}$$

本文给出的 b 与 W 的关系式 $b = 0.8583e^{-2.5724W}$,用本文的相关数据代入文献[4]的校正式可以看出,当 $W = 2\%$ 时, $\eta = 0.662$,但由本实验结果可知, $W = 2\%$ 时的吸附量几乎为零,因此粉煤含水状态下的吸附和块煤是存在差异的,这主要是由于粉煤的粒径是 $40 \sim 80$ 目,重塑之后再吸水只是物理上的浸润,而不是将水真正注入到煤体孔隙裂隙中将通道堵塞,这种情况下只影响部分可吸附煤粉的吸附性,而对其它煤粉的吸附性影响甚微。对于实际中的承压含水或渗水矿井,由于是处于承压含水层之上,因此水浸入到煤体的方式是高压注入,这样就会堵塞煤层中大的裂隙通道,因此本实验对现场情况的模拟是最为相似的。如果在解吸的相

似实验中可以实现注高压水堵塞大的裂隙通道,而能够抑制瓦斯的解吸,那么就可以对矿井采取高压注水的方式抑制瓦斯突出或喷出,若此法可行可有效防止煤矿的煤与瓦斯突出事故和瓦斯爆炸事故,因此本实验对现场施工及安全具有一定的指导意义。

4 结 论

(1)温度的变化对煤吸附瓦斯特性的影响只与吸附常数 a 有关。

(2)对实验用贫煤,在实验温度梯度内,吸附常数 a 与温度 T 呈线性衰减,公式是 $a = -0.3514T + 134.37$,当 $T > 382\text{ K}$ 时无意义。

(3)对实验用焦煤,吸附常数 b 与含水率呈指数衰减,公式是 $b = 0.8583e^{-2.5724W}$ 。

参考文献:

- [1] 刘高峰,张子戌,张小东,等.气肥煤与焦煤的孔隙分布规律及其吸附-解吸特征[J].岩石力学与工程学报,2009,28(8):1587-1592.
Liu Gaofeng, Zhang Zixu, Zhang Xiaodong, et al. Pore distribution regularity and absorption-desorption characteristics of gas coal and coking coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1587-1592.
- [2] Levy J H, Day S J, Killingley J S. Methane capacities of Bowen Basin coals related to coal properties[J]. Fuel, 1997, 76(9): 813-819.
- [3] Yao Y B, Liu D M, Tang D Z, et al. Fractal characterization of adsorption-pores of coals from North China; an investigation on CH_4 adsorption capacity of coals[J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 73(1): 27-42.
- [4] 张占存,马丕梁.水分对不同煤种瓦斯吸附特性影响的实验研究[J].煤炭学报,2008,33(2):144-147.
Zhang Zhancun, Ma Piliang. Experimental on moisture effects on the gas absorption specialty of different kinds of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(2): 144-147.
- [5] 谢振华,陈绍杰.水分及温度对煤吸附甲烷的影响[J].北京科技大学学报,2007,29(S2):42-44.
Xie Zhenhua, Chen Shaojie. Effect of moisture and temperature to CH_4 absorption of coal[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(S2): 42-44.
- [6] 牛国庆,颜爱华,刘明举.瓦斯吸附和解吸过程中温度变化实验研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2003,22(2):155-157.
Niu Guoqing, Yan Aihua, Liu Mingju. Experimental study on temperature variation of gas being absorbed and extracted[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2003, 22(2): 155-157.
- [7] 梁冰,刘建军,王锦山.非等温情况下煤和瓦斯固流耦合作用的研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),1999,18(5):483-486.
Liang Bing, Liu Jianjun, Wang Jinshan. The study of coupling effect

- of coal and gas under unequal temperature[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science Edition), 1999, 18(5):483-486.
- [8] 唐巨鹏,潘一山,李成全,等.有效应力对煤层气解吸渗流影响试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(8):1 563-1 568. Tang Jupeng, Pan Yishan, Li Chengquan, et al. Experimental study on effect of effective stress on desorption and seepage of coal bed methane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8):1 563-1 568.
- [9] 田永东,李 宁.煤对甲烷吸附能力的影响因素[J].西安科技大学学报,2007,27(2):247-250. Tian Yongdong, Li Ning. Affecting factors of the coal absorbing methane capability[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2007, 27(2):247-250.
- [10] 于洪观,范维唐,孙茂远,等.煤中甲烷等温吸附模型的研究[J].煤炭学报,2004,29(4):463-467. Yu Hongguan, Fan Weitang, Sun Maoyuan, et al. Study on fitting models for methane isotherms absorption of coals[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(4):463-467.
- [11] 张 群,杨锡禄.平衡水分条件下煤对甲烷的等温吸附特性研究[J].煤炭学报,1999,24(6):566-570. Zhang Qun, Yang Xilu. Isothermal absorption of coal on methane under equilibrium moisture[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(6):566-570.
- [12] 孙可明,梁 冰,王锦山.煤层气开采中两相流阶段的流固耦合渗流[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2001,20(1):36-39. Sun Keming, Liang Bing, Wang Jinshan. The fluid-solid-coupling seepage of two phase fluid(gas and water) in coal seams gas reservoir[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science Edition), 2001, 20(1):36-39.
- [13] 李志强,鲜学福,隆清明.不同温度应力条件下煤体渗透率实验研究[J].中国矿业大学学报,2009,38(4):523-527. Li Zhiqiang, Xian Xuefu, Long Qingming. Experiment study of coal permeability under different temperature and stress[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(4):523-527.
- [14] 孙可明,梁 冰,王锦山.考虑解吸扩散过程的煤层气流固耦合渗流研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2001,20(4):548-549. Sun Keming, Liang Bing, Wang Jinshan. Study of fluid-solid coupling of coal methane considered about desorption and diffusing process[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science Edition), 2001, 20(4):548-549.
- [15] 张 群,崔永君,钟玲文,等.煤吸附甲烷的温度-压力综合吸附模型[J].煤炭学报,2008,33(11):1 272-1 278. Zhang Qun, Cui Yongjun, Zhong Lingwen, et al. Temperature-pressure comprehensive absorption model for coal absorption of methane[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(11):1 272-1 278.
- [16] 张时音,桑树勋.液态水影响不同煤级煤吸附甲烷的差异及其机理[J].地质学报,2008,82(10):1 350-1 354. Zhang Shiyin, Sang Shuxun. Influence mechanism of liquid water on methane absorption of coals with different ranks[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(10):1 350-1 354.
- [17] 降文萍,崔永君,钟玲文,等.煤中水分对煤吸附甲烷影响机理的理论研究[J].天然气地球科学,2007,18(4):576-583. Jiang Wenping, Cui Yongjun, Zhong Lingwen, et al. Quantum chemical study on coal surface interacting with CH₄ and H₂O[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(4):576-583.
- [18] 马东民,温兴宏.无烟煤对甲烷等温吸附解吸特性实验研究[J].煤田地质与勘探,2007,35(2):25-27. Ma Dongmin, Wen Xinghong. Study on adsorption/desorption character of anthracite in CH₄ isotherm experiments[J]. Coal Geology & Exploration, 2007, 35(2):25-27.

Journal of Coal Science and Engineering (China) 被 INSPEC 文摘数据库收录

Journal of Coal Science and Engineering (China) 即《煤炭学报》英文版被 INSPEC 文摘数据库收录。

INSPEC(科学文摘)文摘数据库是基于 Web 方式检索的文摘索引数据库。INSPEC 是理工学科最重要、使用最为频繁的数据库之一,由英国机电工程师学会(IEE)出版,涉及电气工程、电子工程、电子学、物理、控制工程、信息技术、通信、计算机科学等领域,收录自 1969 年以来全世界范围出版的 3 300 余种科技期刊、2 000 余种会议论文集以及 1 000 种科技报告、图书、学位论文等其他文献的文摘信息。