

引用格式:马东民,王馨,滕金祥,等. 镜煤和暗煤与甲烷界面作用实验研究——以民和盆地低阶煤为例[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(4): 556-563.

MA Dongmin, WANG Xin, TENG Jinxiang, et al. Experimental study on interfacial interaction between methane and vitrinite and durain: A case study of bituminous coal in Minhe Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(4): 556-563.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.04.002

镜煤和暗煤与甲烷界面作用实验研究

——以民和盆地低阶煤为例

马东民^{1,2}, 王馨¹, 滕金祥¹, 季长江², 邵凯³, 郑超¹, 佘雨松¹, 惠鹏¹

(1. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 国家能源煤与煤层气共采技术国家重点实验室, 山西 晋城 048000; 3. 陕西省煤层气开发利用有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要:为研究低阶煤中凝胶化组分(镜煤)与丝炭化组分(暗煤)对甲烷的吸附/解吸差异,采集民和盆地海石湾煤矿2号煤作为研究对象,分别对等温吸附/解吸实验数据进行Langmuir拟合与双位Langmuir拟合,计算等量吸附热,分析不同逸度环境的吸附热力学特征,探讨煤岩组分差异对煤层气产出的影响。结果表明:①煤中凝胶化组分与丝炭化组分对甲烷的吸附均符合Langmuir方程,凝胶化组分的吸附量远高于丝炭化组分;②同一温度点下,无论是粒煤还是柱煤,均存在解吸滞后现象,这是由于吸附热差异导致,而粒煤实验拟合结果的 a 、 b 值均大于块煤实验结果的 a 、 b 值;③等量吸附热随逸度的增大而变大,随温度的升高而降低,吸附相密度对等量吸附热的影响大于温度,导致在煤表面吸附动能更大的甲烷分子,其等量吸附热整体随温度升高呈下降趋势;④煤的不同宏观组分吸附能力差异较大,镜煤含量较大区应为煤层气井井位部署的首选。

关键词:凝胶化组分;丝炭化组分;吸附/解吸;等量吸附热;海石湾煤矿

中图分类号:TE135

文献标识码:A

Experimental study on interfacial interaction between methane and vitrinite and durain: A case study of bituminous coal in Minhe Basin

MA Dongmin^{1,2}, WANG Xin¹, TENG Jinxiang¹, JI Changjiang², SHAO Kai³, ZHENG Chao¹, JI Yusong¹, HUI Peng¹

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Key Laboratory of Coal and Coalbed Methane Co-mining Technology, Jin Cheng, Shanxi 048000, China;

3. Shaanxi Coalbed Methane Development Corp., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: In order to study the differences in the adsorption/desorption characteristics of methane between the gelification and fusinization in the bituminous coal, the 2# coal seam of the Haishiwan Coal Mine in Minhe Basin is collected as the research object. By using the Langmuir fitting and dual-site Langmuir fitting on the experimental data of isothermal adsorption/desorption respectively, the adsorption thermodynamic characteristics of different fugacity environments are analyzed by calculating the isosteric adsorption heat, and the influence of maceral difference on coalbed methane production is discussed. The results show that: ①The adsorption of methane on the gelification and fusinization in coal accords with the Langmuir function, and the fitting degree is higher than 0.99. The adsorption capacity of the gelification is much higher than that of the fusinization. ②At the same temperature point, there is desorption lag phenomenon in both granular coal and pillar coal, which is due to the difference of

收稿日期:2022-04-12。

第一作者简介:马东民(1967—),男,博士,教授,主要从事煤与煤层气地质教学研究。地址:陕西省西安市碑林区文艺路街道雁塔中路58号西安科技大学,邮政编码:710054。E-mail:mdm6757@126.com

通信作者简介:王馨(1999—),男,在读硕士研究生,从事非常规天然气地质方面的研究。地址:陕西省西安市碑林区文艺路街道雁塔中路58号西安科技大学,邮政编码:710054。E-mail:2289475221@qq.com

基金项目:国家自然科学基金项目“润湿性制约下低阶煤不同煤岩组分甲烷解吸机制”(41902175);陕西省自然科学基金研究计划“彬长地区煤层气解吸产出过程的润湿性作用机制”(2019JQ-245);中国博士后科学基金项目“低煤阶镜煤与暗煤润湿性差异及对甲烷解吸的影响”(2019M653873XB)。

adsorption heat. The fitting results of granular coal experiment are larger than those of lump coal experiment. ③The equivalent adsorption heat increases with the increase of fugacity and decreases with the increase of temperature. The influence of adsorption phase density on the equivalent adsorption heat is greater than that of temperature, leading to the adsorption of methane molecules with greater kinetic energy on the coal surface. The equivalent adsorption heat decreases with the increase of temperature as a whole. ④The adsorption capacity of different components of coal is quite different, and areas with high vitrain content should be the first choice for CBM well location deployment.

Keywords: gelification; fusinization; adsorption/desorption; isosteric adsorption heat; Haishiwan Coal Mine

中国西部低阶煤地区煤层厚度大,煤炭开采的纵深发展使得瓦斯安全问题突显。随着甘肃海石湾煤矿地面煤层气抽采工作展开并发展,高效采气的基础研究工作逐渐深入,甲烷在煤孔隙表面的解吸行为成为研究重点之一。外部因素如温度、压力、埋深、构造,煤的自身因素如分子结构、孔隙特征、煤岩组分、灰分产率、水分含量、变质程度等都会影响煤对甲烷的吸附能力^[1-4]。众多学者研究了煤岩组分对吸附的影响,实验研究发现镜质组对甲烷的吸附能力最强,其次为惰质组,壳质组最弱:即只有惰质组含量的降低才能引起煤对甲烷吸附能力的减弱,因而镜质组含量的增加有利于吸附^[5-6]。另外,一些学者的研究也发现不同煤阶的煤岩组分对吸附能力的影响有差异,研究表明低、中阶煤对甲烷的吸附能力随镜质组含量的增大而增强,随惰质组含量的增大先增强后减弱,高阶煤吸附能力则是随惰质组的增加而增大^[7]。镜质组反射率以2.0%为转折点:小于2.0%时,吸附能力随镜质组增加而增大,随惰质组增加而减小;大于2.0%时,吸附能力与惰质组的相关性更好^[8]。镜质组和惰质组吸附能力强弱的问题目前仍存在争议,但研究结果都说明煤岩组分对吸附能力具有重要的影响。

为研究煤组成成分中具有与镜质组相似性质的凝胶化组分和与惰质组相似的丝炭化组分的吸附/解吸特征,在实验样品的处理方面,由于以往对甲烷在煤孔隙表面的解吸研究集中于压力变化时甲烷吸附质在粒煤(60~80目)吸附剂的等温吸附量。但钻井现场煤芯自然解吸显示,镜煤条带的边缘仅发生可视觉解吸。因而设计以柱体原煤作为吸附剂探索甲烷煤界面作用。

1 吸附/解吸实验

1.1 煤样

煤样采自民和盆地海石湾煤矿2号煤层工作面。

依据国家标准《煤的工业分析方法:GB/T 212—2008》对样品进行工业分析测定,结果如表1。依据国家标准《显微煤岩类型测定方法:GB/T 15590—2008》测得显微煤岩组分,结果如表2。为尽可能保留煤样在地层中的原始状态,与以往研究不同,并未将吸附/解吸实验样品粉碎为60~80目的颗粒,而是标记样品的顶底面关系并沿垂直切割成直径为12 cm,高为13 cm的圆柱(图1)。

表1 海石湾2号煤层煤样的工业分析结果

Table 1 Proximate analysis results of coal samples in No.2 coal seam of Haishiwan Coal Mine

样品来源	水分 M_{ad}	灰分 A_{ad}	挥发分 V_{ad}	固定碳 FC_{ad}	%
海石湾2号煤层原煤	4.25	7.25	24.93	63.57	
海石湾2号煤层镜煤	1.38	3.28	26.92	68.42	
海石湾2号煤层暗煤	1.63	3.99	23.28	71.10	

表2 海石湾2号煤层煤样的显微组分分析结果

Table 2 Results of maceral analysis of coal samples in No.2 coal seam of Haishiwan Coal Mine

样品来源	镜质组	惰质组	壳质组	矿物质	%
海石湾2号煤层镜煤	78.3	18.0	1.9	1.8	
海石湾2号煤层暗煤	13.3	74.6	7.3	4.8	



图1 柱状煤样试件

Fig. 1 Experimental coal sample

1.2 实验仪器

甲烷的吸附/解吸实验采用国家标准《煤的高压等温吸附实验方法:GB/T 19560—2008》规定的实验方法,利用AST-2000型煤层气等温吸附/解吸大样量仿真实验仪(图2),具体压力平衡的时间为24 h。该仪器具有含样量大、精度高、稳定性强等特点,最高承受压力为25 MPa,温度调节范围为0~80℃,可有效满足模拟真实地质环境下的煤储层特征。仪器主要由高压容器系统、恒温系统、温度和压力实时监测系统、数据采集系统、实验数据处理系统、高压供气系统6部分组成(图3)。

1.3 实验过程

实验温度范围在20~45℃,梯度为5℃。参照GB/T 19560—2008中的容量法进行,实验过程主要包括以下步骤:



图2 AST-2000型等温吸附/解吸仿真实验仪

Fig. 2 AST-2000 isothermal adsorption/desorption simulation experiment instrument

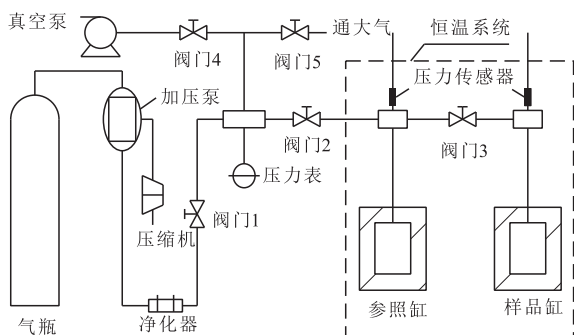


图3 AST-2000型大样量煤层气吸附/解吸仿真实验原理

Fig. 3 AST-2000 large capacity CBM adsorption/desorption experimental device schematic

1) 装样。装样时应注意样品缸的清洁和密封。
2) 装置密闭性测试。将He充入装置的样品缸、参照缸及连接管路中保持6 h后观察压力变化,若在实验需要的最大压力下保持6 h无变动则说明密闭性较好,即可进行实验。

3) 系统抽真空。接通真空泵将系统抽真空20~30 min且压力无明显变化时结束抽真空。

4) 样品缸自由空间体积测定。自由空间体积包括样品缸中除煤样占据空间之外的剩余体积,连接管道和阀门内部体积的和,选择可忽略吸附量、纯度大于99.999%的He,根据不同温度和压力数据即可用非理想气体状态方程计算出自由空间体积大小。

5) 等温吸附实验。吸附实验是加压—平衡—再加压的过程,将气瓶中的甲烷通入到装置后记录初始压力和温度,待24 h吸附平衡后记录平衡压力和温度,通过体积法计算出吸附量。

6) 等温解吸实验。与吸附实验相反,解吸是减压—平衡—再减压的过程。

1.4 实验结果

由海石湾煤样不同温度下的等温吸附/解吸曲线(图4)可知,当温度相同时,吸附量随压力的增大而增大;压力增大时,煤孔隙中的甲烷分子受到外力的作用,抑制了分子的自由运动,使得更多的甲烷吸附

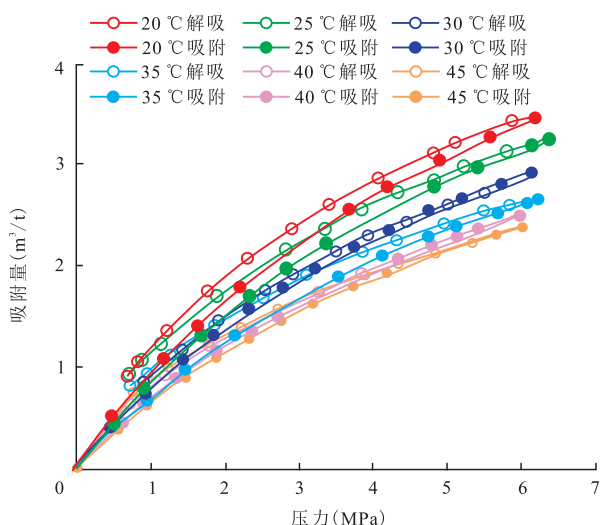


图4 海石湾2号煤层柱样等温吸附/解吸曲线

Fig. 4 Isothermal adsorption/desorption curves of coal sample in No.2 coal seam of Haishiwan Coal Mine

于孔隙表面;压力相同时,吸附量随温度的升高而降低;温度升高时,甲烷分子的热运动增强,因而有更多的甲烷分子克服煤基质对其的束缚作用,脱离孔隙表面转变为自由态;温度和压力都相同时,解吸过程的吸附量高于吸附过程,说明吸附是一个自发、总能量降低的放热过程,解吸过程存在滞后性,需要外界的能量输入才能够使更多的甲烷解吸。各等温吸附曲线的斜率处处都大于零,说明实验中煤样对甲烷的吸附未达到饱和。

2 实验结果数学分析

2.1 Langmuir 方程与解吸式拟合

为定量分析煤对甲烷的吸附特征,对实验数据进行 Langmuir 拟合与解吸拟合^[9],分别见式(1)与式(2),拟合结果如表3所示。

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

$$V = \frac{abp}{1 + bp} + c \quad (2)$$

式(1)一式(2)中: V 为吸附/解吸过程中压力 p 下的吸附量, cm^3/g ; a 为吸附/解吸过程中的最大吸附量, cm^3/g ; b 为吸附/解吸速度与吸附热综合参数, MPa^{-1} ; c 为匮乏压力下残余吸附量, cm^3/g 。

由等温吸附/解吸拟合结果(表3)可知,吸附和解吸过程中,最大吸附量 a 值随温度升高而减小。温度相同,解吸过程的 a 值小于吸附过程。吸附过程中 b 值随温度的变化基本不变,解吸过程中 b 随温度升高有减小的趋势。 c 值的大小与温度的关系不显著,这说明外界条件不是影响 c 值大小的主要原因, c 值的大小可能与煤自身的性质有关。

表3 等温吸附/解吸拟合结果
Table 3 Fitting results of isothermal adsorption/desorption

温度 (°C)	升压过程 Langmuir 拟合			降压过程解吸式拟合			
	a	b	R^2	a	b	c	R^2
20	7.276	0.145	0.999	6.109	0.188	0.195	0.999
25	6.751	0.144	0.999	5.593	0.176	0.288	0.999
30	6.157	0.144	0.999	5.540	0.159	0.129	0.999
35	5.611	0.142	0.999	4.490	0.179	0.283	0.999
40	5.357	0.144	0.999	4.964	0.140	0.166	0.999
45	5.106	0.143	0.999	4.235	0.152	0.316	0.999

2.2 双位函数拟合

煤的有机组分包括凝胶化组分与丝炭化组分两部分^[10],姚艳斌^[11]利用 $^1\text{H-NMR}$ (核磁共振氢谱)的 T_2 弛豫时间差异对剥离镜煤(凝胶化组分为主)与暗煤(丝炭化组分为主)孔径分布分析结果显示,凝胶化组分以微孔为主,而丝炭化组分以介孔为主。赵伟^[12]利用红外吸收光谱对低阶煤进行分析,认为凝胶化组分较丝炭化组分的含氧官能团(羧基— COOH 、羟基— OH 、醚基— O —)多,相应两种组分的吉布斯势存在差异,而 Langmuir 方程与解吸式皆为非线性函数,因此,用加和方式(双位函数)来对实验数据进行拟合,如式(3):

$$V = \frac{a_1 b_1 p}{1 + b_1 p} + \frac{a_2 b_2 p}{1 + b_2 p} \quad (3)$$

式中: a_1 、 a_2 分别为吸附/解吸过程中凝胶化组分和丝炭化组分的最大吸附量, cm^3/g ; b_1 、 b_2 分别为吸附/解吸速度与吸附热综合参数, MPa^{-1} 。

对甲烷与海石湾2号煤层柱体煤样的吸附/解吸实验数据进行同样数学分析,结果见表4。吸附过程中: a_1 的值总是大于 a_2 , a_1 随温度的升高而降低, a_2 始终较小,几乎不超过1; b_1 随温度的变化较小,基本保持稳定,约为0.14, b_2 随温度的变化无明显特征。解吸过程中: a_1 的变化与吸附过程类似,都随温度升高而降低, a_2 则随温度升高先增大后减小,但变化范围较小; b_1 随温度升高波动较大,但无明显增大或减小的规律, b_2 与温度的关系不明显。

2.3 镜煤吸附/解吸实验的验证

在煤矿井下工作面采样点对镜煤条带进行剥离,室内将镜煤研磨筛分为粒径1 mm进行20 °C、30 °C、40 °C吸附/解吸实验,实验结果如图5所示。式(1)、式(2)对镜煤的拟合结果如表5所示,与表3原煤样的拟合结果相比,相同温度下,吸附过程镜煤 a 值较大,解吸过程原煤样 a 值较大,说明镜煤能够吸附更多的甲烷,也易发生解吸。含凝胶化组分更多的镜煤吸附量大验证了前文双位拟合的结果。

3 吸附热

3.1 计算方法

甲烷分子吸附于煤基质表面,分子的热运动速

率降低并因此而释放热量。等量吸附热和极限吸附热可用来衡量吸附过程的热效应。等量吸附热也称微分吸附热,是指吸附无限少量的分子时释放的热量,是吸附瞬时的焓值变化。极限吸附热是指当吸附压力降低为零时的等量吸附热。真实煤储层的压力难以降低至零,极限吸附热的参考价值有限,因此,只以等量吸附热来研究吸附热力学特征,通过吸附热的表达式计算等量吸附热,如式(4)^[13]:

$$\frac{d \ln f}{dT} = \frac{q^{st}}{RT} \quad (4)$$

式中: q^{st} 为等量吸附热,kJ/mol; f 为逸度,MPa; T 为绝对温度,K; R 为气体常数,取8.314 J/(mol·K)。

3.2 等量吸附热

由吸附量与等量吸附热关系(图6)可以看出,吸附量与等量吸附热呈线性正相关,这是因为随着吸

表4 双位函数拟合结果
Table 4 Fitting result of dual-site function

温度(°C)	升压过程双位 Langmuir 拟合					降压过程双位解吸式拟合				
	a_1	b_1	a_2	b_2	R^2	a_1	b_1	a_2	b_2	R^2
20	7.284	0.143	0.015	0.735	0.999	6.076	0.203	0.092	-3.285	0.999
25	6.703	0.145	0.009	-0.082	0.999	5.588	0.178	0.267	-27.088	0.999
30	6.132	0.142	0.057	0.396	0.999	6.069	0.057	1.732	0.486	0.999
35	5.624	0.140	0.012	1.017	0.999	4.475	0.188	0.227	-10.099	0.999
40	5.198	0.147	0.578	-0.011	0.999	3.475	0.280	0.091	-0.127	0.999
45	4.993	0.138	0.152	0.284	0.999	4.601	0.102	0.632	2.535	0.999

表5 镜煤等温吸附/解吸拟合结果
Table 5 Fitting result of adsorption/desorption of vitrain

温度(°C)	升压过程 Langmuir 拟合			降压过程解吸式拟合			
	a	b	R^2	a	b	c	R^2
20	7.399	0.151	0.999	6.388	0.175	0.252	0.999
30	6.162	0.150	0.999	5.214	0.201	0.145	0.999
40	5.600	0.150	0.999	4.860	0.185	0.107	0.999

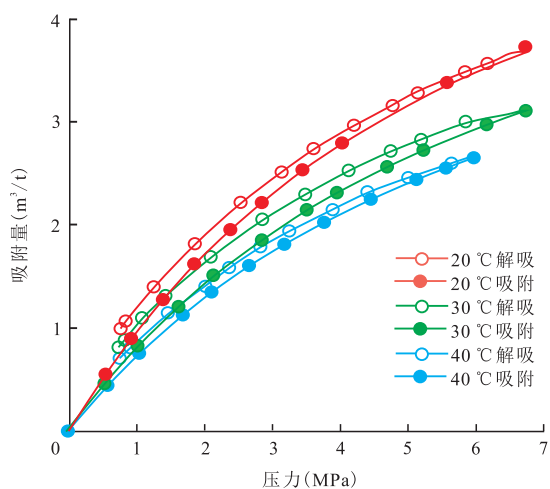


图5 镜煤的等温吸附/解吸曲线

Fig. 5 Isothermal adsorption/desorption curves of vitrain

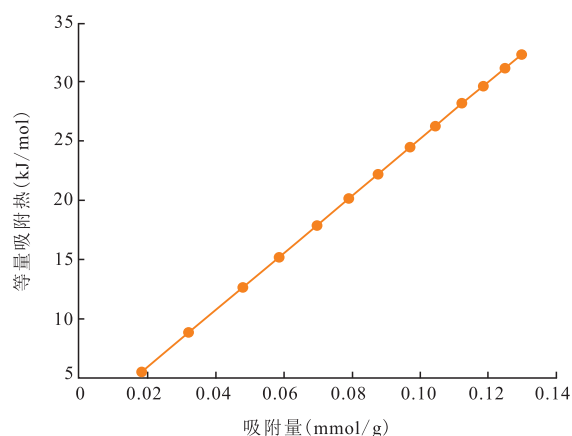


图6 吸附量与等量吸附热关系

Fig. 6 Relationship between adsorption capacity and isosteric adsorption heat

附的不断进行,固体吸附剂表面的气体吸附相密度增大,吸附质分子之间的作用力增强,由于吸附的分子越来越多,再吸附就需要克服更多的吸附质分子间的作用力,因此放热更多^[14]。

物质在任何状态下都有逃离原来状态的趋势,物质的这种热力学性质就是逸度。在计算非理想气体的等量吸附热时,常用逸度而不是压力,此过程中可将逸度看作是对理想气体与非理想气体之间差异进行修正的结果^[15]。逸度与等量吸附热的关系如图7所示,等量吸附热随逸度的变大呈向上凸起的非线性增加,逸度变大反映了自由态甲烷向吸附态转变的趋势在增大,煤表面吸附的甲烷分子数量就会越多。逸度相同时,等量吸附热随温度的升高而降低,这与以往的研究结果不同^[16]。原因在于逸度在一定程度上可以反映压力的大小,由图4甲烷的等温吸附曲线可知当压力近似相同时,温度越低,吸附量越大。低温吸附相吸附质分子数量较多,高温吸附相吸附单个分子放出的热量更多,也就是说吸附相的密度和温度对吸附热的影响不同是造成等量吸附热随温度的升高而减小的主要原因^[17],对于海石湾2号煤层,吸附相密度对等量吸附热的影响大于温度。图8温度与平均等量吸附热的关系图也显示等量吸附热与温度呈线性负相关,拟合度为0.96,再次验证了温度对等量吸附热的影响较小。

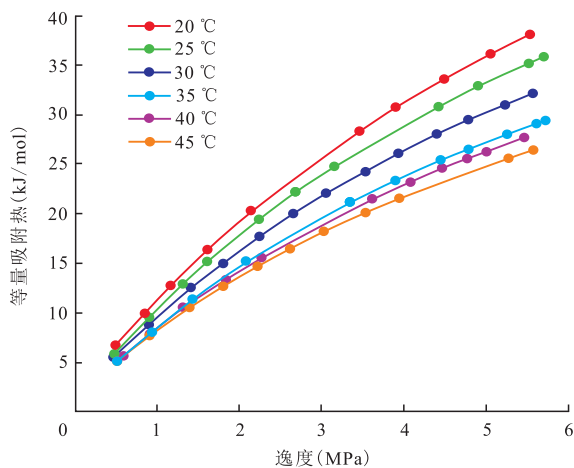


图7 逸度与等量吸附热关系

Fig. 7 Relationship between fugacity and isosteric adsorption heat

4 讨论

实验样品采集时,在采煤工作面采取无夹矸块煤样,基于2个原因:①典型的凝胶化组分对应宏观煤岩组成镜煤可以剥离,而典型的丝炭化组分丝炭难以分离,孔隙度、孔隙结构、比表面积、孔喉特征对比难以完成,同时液氮吸附、压汞实验无可重复再现性,而煤层的有机组成是凝胶化组分与丝炭化组分的复合体,实质是煤的3种显微组分的抽象概括;②成煤作用过程形成的甲烷在煤孔隙表面吸附的影响因素较多,但吸附剂以及煤的有机组成是重要的影响因素,对煤的直观判定是光泽强度,在煤炭勘查的各个阶段,都有煤岩分析结果,一般用镜质组含量与壳质组含量之和来标识凝胶化组分含量,而甲烷吸附量较大的有机组分为凝胶化组分,可以与煤层气开发靶区相联系。

4.1 数据分析结果

1) 表3、表4显示,升压吸附过程与降压解吸过程,柱煤的 a 值随温度升高而降低,与60~80目粒煤实验结果一致^[18-19]。

2) 同一温度点,降压解吸过程中的 a 值较升压吸附过程中的 a 值小,是解吸滞后现象,由吸附热差异导致^[20]。

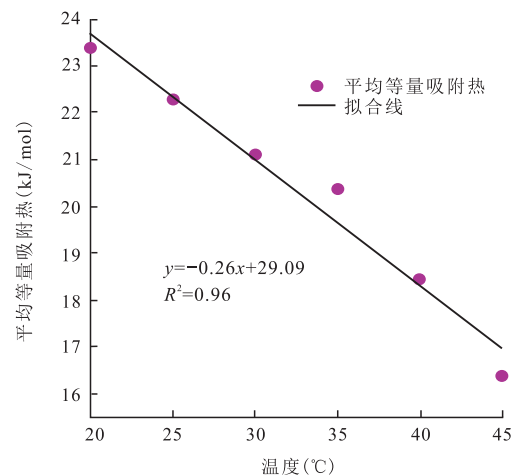


图8 温度与平均等量吸附热关系

Fig. 8 Relationship between temperature and average isosteric adsorption heat

3) 同一温度点下, 60~80目粒煤实验拟合结果, a 值、 b 值均大于块煤实验结果, 可能因为煤对甲烷的储集能力与煤的孔隙密切相关, 吸附能力与总孔体积、孔隙总比表面积和微孔比表面积均呈正相关关系, 孔体积和比表面积越大, 煤储集气的能力越强^[21]。

4) 吸附热计算结果显示, 降压(解吸)过程的吸附热大于升压(吸附)过程的吸附热, 如果煤层气的吸附作用自然发生, 则解吸作用需要能量传递至吸附体系。在60~80目粒煤实验过程中, 相同吸附量下, 解吸过程的等量吸附热大于吸附过程, 可能因为解吸时甲烷分子需要吸收更多的能量才能从煤基质表面释放, 或因甲烷分子在吸附时需要抵制解吸过程, 故与煤基质表面的作用力更大, 吸附热值更大^[22], 与块煤实验结果一致。

Langmuir 方程中的 a 表示煤中有机组成的饱和吸附量, 双位 Langmuir 方程中的 a_1 、 a_2 则表达了2种不同成因的碳汇的饱和吸附量, 认为 a_1 、 a_2 分别代表了凝胶化组分与丝炭化组分的饱和吸附量。

4.2 煤层气井靶区部署

以往煤层气勘探部署的靶区选择是建在煤层气储层高渗透富集区。研究表明渗透率越高排水降压效率越高, 煤层气产出效率越高。从煤层气吸附/解吸实验结果显示, 煤岩组分是控制含气量的关键因素之一^[23]。因在同一矿区基本构造以及水文地质基本变化不大, 故沉积环境变化是控制煤层气含气量的关键因素。在沉积角度, 应该考虑煤岩煤相分区, 煤田勘查阶段有丰富的煤岩分析资料, 对目标煤层进行煤岩分区, 进而确定靶区的选择方案, 即选择镜煤含量较大区为煤层气井井位部署区, 在西北早、中侏罗世淮南煤田、鄂西南大佛寺得到初步验证, 在彬长矿区大佛寺煤层气开采实践中, 4号煤层的镜质组含量等值线图表明, 直井产能高(大于2 500 m³/d)的井位于镜质组含量大于60%区域, 最大产能为2 986 m³/d, 而直井产能低(小于1 000 m³/d)的井位于镜质组含量小于40%区域。

5 结论

1) 块煤的吸附、解吸影响因素较多, 但与瓦斯

抽采以及煤层气排采联系紧密, 柱体煤样的吸附、解吸实验数据用双位函数拟合, 拟合度较高。

2) 初步认为, 双位函数分项分别代表了煤中凝胶化组分与丝炭化组分的吸附、解吸行为, 凝胶化组分的吸附量大于丝炭化组分。

3) 块煤的等量吸附热随逸度的变大而变大, 随温度升高而降低。

4) 煤勘查阶段显微煤岩分析结果的凝胶化组分富集区为煤层气勘探开发部署的首选区; 双位函数中甲烷在暗煤组分的吸附、解吸特征不明显, 可能与丝炭组分(矿物含量高)孔隙表面的亲疏水特征有关, 有待深入研究。

参考文献

- [1] 张文静, 琚宜文, 卫明明, 等. 不同变质变形煤储层吸附/解吸特征及机理研究进展[J]. 地学前缘, 2015, 22(2): 232-242.
ZHANG Wenjing, JU Yiwen, WEI Mingming, et al. Study on characteristics and mechanism of adsorption/desorption on different metamorphic-deformed coal reservoirs[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(2): 232-242.
- [2] 赵丽娟, 秦勇, WANG Geoff, 等. 高温高压条件下深部煤层气吸附行为[J]. 高校地质学报, 2013, 19(4): 648-654.
ZHAO Lijuan, QIN Yong, WANG Geoff, et al. Adsorption behavior of deep coalbed methane under high temperatures and pressures[J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(4): 648-654.
- [3] 王宝俊, 章丽娜, 凌丽霞, 等. 煤分子结构对煤层气吸附与扩散行为的影响[J]. 化工学报, 2016, 67(6): 2548-2557.
WANG Baojun, ZHANG Lina, LING Lixia, et al. Effects of coal molecular structure on adsorption and diffusion behaviors of coalbed methane[J]. Ciesc Journal, 2016, 67(6): 2548-2557.
- [4] 徐江涛, 李靖, 侯文刚, 等. 石灰沟地区上石炭统煤系气源岩生气潜力分析[J]. 石油地质与工程, 2019, 33(5): 15-20.
XU Jiangtao, LI Jing, HOU Wengang, et al. Gas potential analysis of upper carboniferous coal-measure gas source rocks in Shihuigou area[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2019, 33(5): 15-20.
- [5] 张丽萍, 苏现波, 曾荣树. 煤体性质对煤吸附容量的控制作用探讨[J]. 地质学报, 2006, 80(6): 910-915.
ZHANG Liping, SU Xianbo, ZENG Rongshu. Discussion on the controlling effects of coal properties on coal adsorption capacity [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(6): 910-915.
- [6] 张文静, 琚宜文, 孔祥文, 等. 沁水盆地南部高煤级变形煤结构组成特征及其对吸附/解吸的影响[J]. 中国科学院大学学报, 2014, 31(1): 98-107.
ZHANG Wenjing, JU Yiwen, KONG Xiangwen, et al. Structure and composition characteristics of deformed high-rank coals in the south of Qinshui basin and their influence on CBM adsorption/desorption[J]. Journal of University of Chinese

- Academy of Sciences, 2014, 31(1): 98-107.
- [7] 李振涛,姚艳斌,周鸿璞,等. 煤岩显微组成对甲烷吸附能力的影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(8): 125-128.
LI Zhentao, YAO Yanbin, ZHOU Hongpu, et al. Study on coal and rock maceral composition affected to methane adsorption capacity[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(8): 125-128.
- [8] 张凯,汤达祯,陶树,等. 不同变质程度煤吸附能力影响因素研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(5): 192-197.
ZHANG Kai, TANG Dazhen, TAO Shu, et al. Study on influence factors of adsorption capacity of different metamorphic degree coals[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 192-197.
- [9] 马东民,张遂安,蒯亚兵. 煤的等温吸附-解吸实验及其精确拟合[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 477-480.
MA Dongmin, ZHANG Sui'an, LIN Yabing. Isothermal adsorption and desorption experiment of coal and experimental results accuracy fitting[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 477-480.
- [10] 崔哲治,孙卫. 基于高压压汞与核磁共振的致密砂岩孔隙结构研究——以苏里格气田山西组与下石盒子组为例[J]. 非常规油气, 2020, 7(2): 49-55.
CUI Zhezhi, SUN Wei. Study on the pore structure of dense sandstone based on high-pressure piezometric mercury and nuclear magnetic resonance: Example of Shanxi and Lower Shibox formations in Surig gas field[J]. Unconventional Oil and Gas, 2020, 7(2): 49-55.
- [11] 姚艳斌,刘大猛,蔡益栋,等. 基于NMR和X-CT的煤的孔隙结构精细定量表征[J]. 中国科学:地球科学, 2010, 40(11): 1598-1607.
YAO Yanbin, LIU Dameng, CAI Yidong, et al. Advanced characterization of pores and fractures in coals by nuclear magnetic resonance and X-ray computed tomography[J]. Scientia Sinica (Terra), 2010, 40(11): 1598-1607.
- [12] 赵伟,杨志远,李振,等. 电化学处理对神木煤显微组分表面结构及可浮性的影响研究[J]. 燃料化学学报, 2017, 45(4): 400-407.
ZHAO Wei, YANG Zhiyuan, LI Zhen, et al. Influence of electrochemical treatment on surface structure and flotability of Shenmu coal macerals[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2017, 45(4): 400-407.
- [13] 白建平,张典坤,杨建强,等. 寺河3号煤甲烷吸附解吸热力学特征[J]. 煤炭学报, 2014, 39(9): 1812-1819.
BAI Jianping, ZHANG Diankun, YANG Jianqiang, et al. Thermodynamic characteristics of adsorption-desorption of methane in coal seam 3 at Sihe Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(9): 1812-1819.
- [14] 兰俊. 海陆过渡相煤系页岩气成藏条件及储层特征[J]. 石油地质与工程, 2021, 35(5): 27-32.
LAN Jun. Reservoir forming conditions and reservoir characteristics of coal measure shale gas in marine continental transitional facies[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2021, 35(5): 27-32.
- [15] 施云海,王艳莉,彭阳峰. 化工热力学[M]. 上海:华东理工大学出版社, 2007.
SHI Yunhai, WANG Yanli, PENG Yangfeng. Chemical thermodynamics[M]. Shanghai: East China University of Technology Press, 2007.
- [16] 卢守青,王亮,秦立明. 不同变质程度煤的吸附能力与吸附热力学特征分析[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(6): 130-135.
LU Shouqing, WANG Liang, QIN Liming. Analysis on adsorption capacity and adsorption thermodynamic characteristics of different metamorphic degree coals[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6): 130-135.
- [17] 郑青榕, BIRKETT G, DO D D. 甲烷在活性炭上吸附的实验及理论分析[J]. 天然气化工, 2009, 34(1): 41-45.
ZHENG Qingrong, BIRKETT G, DO D D. Theoretical and experiment analysis of methane adsorption on activated carbon [J]. Natural Gas Chemical Industry, 2009, 34(1): 41-45.
- [18] 马东民,李来新,李小平,等. 大佛寺井田4号煤CH₄与CO₂吸附解吸实验比较[J]. 煤炭学报, 2014, 39(9): 1938-1944.
MA Dongmin, LI Laixin, LI Xiaoping, et al. Contrastive experiment of adsorption-desorption between CH₄ and CO₂ in coal seam 4 of Dafosi Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(9): 1938-1944.
- [19] 朱一铭,王嘉君,徐源鸿,等. CH₄和CO₂的水合物沉积物力学特性对比研究[J]. 非常规油气, 2021, 8(5): 1-8.
ZHU Yiming, WANG Jiajun, XU Yuanhong, et al. A comparative study on the mechanical properties of hydrate sediments with CH₄ and CO₂[J]. Unconventional Oil and Gas, 2021, 8(5): 1-8.
- [20] 马东民,马薇,蒯亚兵. 煤层气解吸滞后特征分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(11): 1885-1889.
MA Dongmin, MA Wei, LIN Yabing. Desorption hysteresis characteristics of CBM[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(11): 1885-1889.
- [21] 李庆庆,何倩. 大佛寺4号煤等量吸附热分析[J]. 能源与环保, 2018, 40(12): 132-134.
LI Qingqing, He Qian. Equivalent adsorption thermal analysis of Dafosi No. 4 coal[J]. China Energy and Environmental Protection, 2018, 40(12): 132-134.
- [22] 邱峰. 煤层气吸附/解吸过程中能量变化特征[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2021.
QIU Feng. Energy variation characteristics of coalbed methane adsorption / desorption process[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.
- [23] 魏刚. 利用测井交会图技术建立GZ地区煤层气分类评价标准[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(2): 54-56.
WEI Gang. Establishment of classification and evaluation standard of coalbed methane in GZ area by well logging cross plot technology[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2020, 34(2): 54-56.

(编辑 顾丽媛)