

# 不同变形程度煤的吸附时间及其影响因素

李朋朋<sup>1</sup>, 张小东<sup>1,2\*</sup>, 杨延辉<sup>3</sup>, 丁哲<sup>1</sup>, 张硕<sup>1</sup>

(1.河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2.中原经济区煤层气(页岩气)协同创新中心, 河南 焦作 454000; 3.中国石油华北油田分公司 勘探开发研究院, 河北 任丘 062552)

**摘要:** 基于沁水盆地南部长治和安泽区块 103 口煤层气井的实测资料, 探讨不同变形程度煤的吸附时间及其影响因素。研究表明, 不同变形程度煤的孔隙结构导致其解吸特征具有较大差异。随着煤变形程度的增加, 吸附时间迅速减小。相对于未变形煤和弱变形煤, 强变形煤由于裂隙和大、中孔隙发育较多且连通性较好, 导致甲烷运移距离较短, 解吸速率较大且解吸量急剧增加, 吸附时间显著减小; 解吸后期, 强变形煤由于小孔隙和微孔隙发育, 吸附能力增强且连通性较差, 导致甲烷解吸和运移的难度增大, 解吸速率迅速下降, 而弱变形煤和未变形煤受孔隙、裂隙特征和取心煤样几何形态的共同影响, 解吸速率变化较小且吸附时间较长。依据煤层气井排采数据可知, 煤的变形程度差异是导致煤层气井产气量不同的主要原因, 明确煤的吸附时间可以为预测煤层气井的产气量提供依据。

**关键词:** 变形程度 解吸特征 吸附时间 日产气量 影响因素 煤层气

中图分类号: TE112

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2017)04-0043-06

## Adsorption time of coals with different degrees of deformation and their influencing factors

Li Pengpeng<sup>1</sup>, Zhang Xiaodong<sup>1,2</sup>, Yang Yanhui<sup>3</sup>, Ding Zhe<sup>1</sup>, Zhang Shuo<sup>1</sup>

(1.School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo City, Henan Province, 454000, China; 2.Collaborative Innovation Center of Coalbed Methane(Shale Gas) in Central Plains Economic Zone, Jiaozuo City, Henan Province, 454000, China; 3.Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu City, Hebei Province, 062552, China)

**Abstract:** Based on measured data of 103 CBM wells in Changzhi and Anze Block in Southern Qinshui Basin, the adsorption time of coals with different degrees of deformation and its influencing factors were discussed, which can provide guidance for production prediction of coalbed methane well. The pore structures of coals with different degrees of deformation result in great difference in their desorption characteristics. As the degree of coal deformation increases, the adsorption time decreases quickly. In contrast to undeformed coal and weakly deformed coal, the desorption rate of strongly deformed coal is higher, and its amount of desorption increases sharply and the adsorption time become shorter because of well-developed fractures, macropores and mesopores which provide better connectivity and shorter migration path. In the late of desorption, the well-developed small pores and micropores of strongly deformed coal have strong adsorption ability and poorer connectivity, which increases difficulty in methane desorption and migration and therefore the desorption rate reduces markedly. However, the desorption rate of undeformed coal and weakly deformed coal changes slightly and their adsorption time is very long, which is the integrated result influenced by pore and fracture characteristics and geometry shape of coal core. Based on the drainage date of coalbed methane well, it can be drawn that the difference of coal deformation is the major reason for the production change of coalbed methane well. The adsorption time of coal can provide guidance for produc-

收稿日期: 2017-03-11。

作者简介: 李朋朋(1991—), 男, 山西晋城人, 在读硕士研究生, 从事煤层气地质方面的研究。联系电话: 18236886598, E-mail: lipp1991@163.com。

\*通讯作者: 张小东(1971—), 男, 河南焦作人, 教授, 博士。联系电话: (0391)3987686, E-mail: z\_wenfeng@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目“煤层气地面开采过程中储层的渗透性动态变化规律及其控制机理”(41372162)。

tion prediction of coalbed methane well.

**Key words:** degree of deformation; desorption feature; adsorption time; daily gas production; influencing factors; coalbed methane

随着常规油气资源获取难度的增大,全球油气勘探已进入常规与非常规油气并重发展的时代<sup>[1]</sup>。近年来,煤层气作为全球重要的接替资源,其高效开发受到了广泛关注<sup>[2-3]</sup>。美国 Black Barrier 盆地煤层气井的排采数据表明,吸附时间可用于预测煤层气井产气高峰的时间,对煤层气井产能和排采管控具有重要影响<sup>[4]</sup>。一般认为,吸附时间是煤的微观结构对气体解吸、扩散、渗流等过程影响的直观表现。因此,可作为直观评价煤层开发潜力的重要参数<sup>[5]</sup>。针对不同变质变形程度煤的孔隙和裂隙系统及吸附特征,前人开展了大量的实验研究和理论分析<sup>[6-13]</sup>。近年来,基于煤层气商业化开发区块的实际开采资料,众多学者对煤层气开采过程中的解吸特征及其影响因素已进行了初步的研究<sup>[4-5,14-15]</sup>。笔者基于前人研究成果,利用沁水盆地南部构造较为复杂的长治和安泽区块 103 口煤层气井的实测资料,系统分析不同变形程度煤的解吸特征及其影响因素,并探索相应的影响机理,以期对煤层气井产气量的预测提供理论依据。

## 1 不同变形程度煤的吸附时间

高煤级煤是指镜质组油浸最大反射率大于 2.0% 的煤。沁水盆地南部安泽和长治区块煤的镜质组油浸最大反射率为 2.10% ~ 2.78%,均属于高煤级煤。

由于中国大部分含煤盆地经历了多期次不同规模的构造运动,煤层遭受不同程度的变形、破坏后,形成不同类型的构造煤<sup>[16]</sup>。在煤层气井钻进过程中,不同变形程度煤的取心煤样的几何形态具有较大差异,通常煤的变形程度越大,取心煤样越破碎。笔者将研究区取心煤样分为未变形煤、弱变形煤和强变形煤 3 种类型。研究表明,研究区未变形煤、弱变形煤和强变形煤的最小吸附时间分别为 1.58, 0.21 和 0.68 d,最大吸附时间分别为 27.14, 4.77 和 4.15 d,平均吸附时间分别为 6.49, 3.74 和 2.39 d,整体表现为未变形煤吸附时间最长,弱变形煤吸附时间次之,强变形煤吸附时间最短。

在含气量相等的情况下,随着煤变形程度的增大,逸散气量显著增加。强变形煤的解吸量和解吸时间明显小于弱变形煤和未变形煤。未变形煤、弱

变形煤和强变形煤在 0 ~ 45, 45 ~ 95, 95 ~ 185 和 185 ~ 485 min 共 4 个时间段的解吸速率均呈下降趋势,未变形煤和弱变形煤在各时间段解吸速率的降幅相差较小,而强变形煤在各时间段解吸速率的降幅明显;表明强变形煤的解吸能力下降最快,而弱变形煤和未变形煤解吸能力持续时间较长。在 0 ~ 485 min 时间段内,强变形煤的解吸量占总解吸量比例达 69.7%,明显高于弱变形煤和未变形煤<sup>[15]</sup>。

## 2 不同变形程度煤吸附时间的影响因素

### 2.1 孔隙和裂隙发育特征

#### 2.1.1 孔隙和裂隙发育类型

对研究区不同变形程度煤的取心煤样进行扫描电镜观测,结果表明,研究区整体孔隙发育程度一般,常见铸模孔,孔隙被矿物不同程度充填,导致连通性变差,不同变形程度煤的孔隙、裂隙发育类型及程度具有较大差异。未变形煤中主要发育铸模孔,大部分孔隙的孔径较小(图 1a),连通性差,偶见少量气孔(图 1b),裂隙以内生裂隙、层间裂隙为主,且定向性较强,但矿物的存在堵塞了层理与裂隙之间的通道,不发育穿层裂隙(图 1c, 1d)。弱变形煤中的铸模孔通常呈带状分布(图 1e),孔隙连通性好于未变形煤,可观测到呈带状分布的气孔(图 1f),发育呈一定角度的交叉裂隙(图 1g),增加了煤储层的渗透性。强变形煤中的铸模孔呈带状分布(图 1h),气孔发育,呈气孔群、气孔带分布(图 1i),微裂隙发育较多,裂隙定向性完全遭受破坏,可观测到多组“X”型剪切裂隙且以任意角度交叉(图 1j),表明随着煤体变形程度的增加,孔隙数量增加,且由零星分布向带状分布转变,气孔数量也明显增加,呈气孔群或带状分布,使得孔隙的连通性明显变好,构造裂隙发育的密度逐渐增大,且分布由强定向性转变为任意角度交叉。

#### 2.1.2 孔隙结构参数

利用压汞法对采集于霍尔辛赫矿和常村矿断层附近的不同变形程度煤样的孔隙结构进行测试,结果(表 1)表明,随着煤变形程度的增加,总孔隙显著增大,大孔隙(孔径为 1 000 ~ 10 000 nm)、中孔隙(孔径为 100 ~ 1 000 nm)、小孔隙(孔径为 10 ~ 100

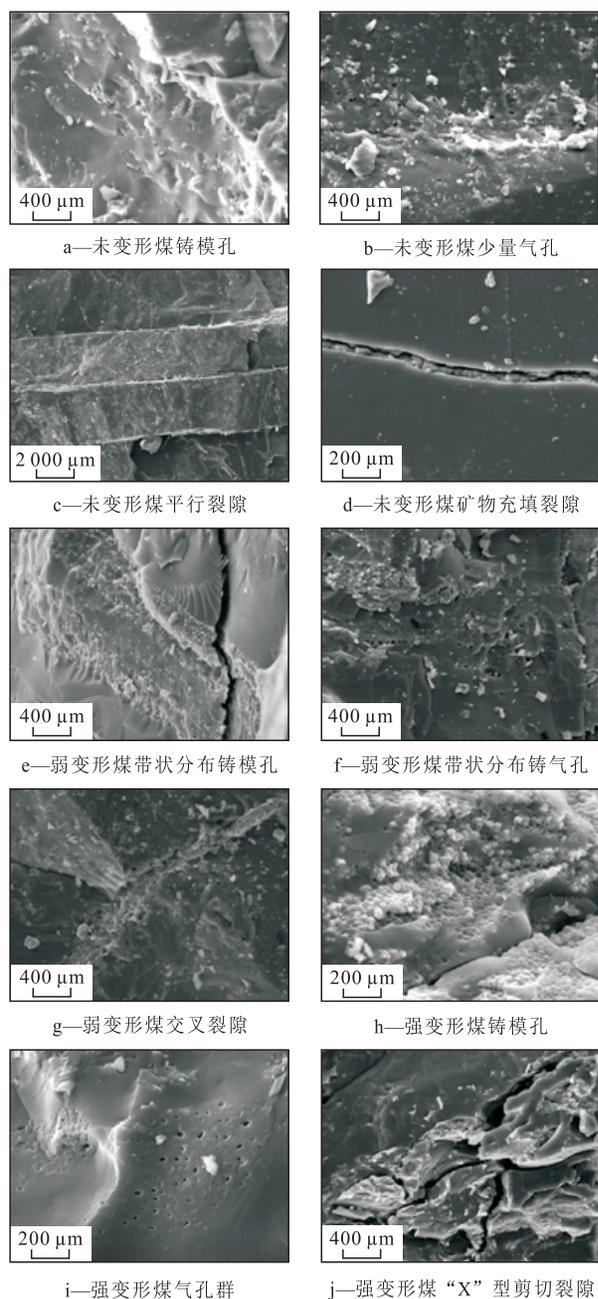


图1 不同变形程度煤的孔隙和裂隙发育类型

Fig.1 Types of pores and fractures of coals with different degrees of deformation

nm)和微孔隙(孔径为3.1~10 nm)的孔容增加幅度具有一定差异。未变形煤的小孔隙和微孔隙孔容所占比例较大,随着煤变形程度的增加,大孔隙和中孔隙孔容所占比例增加;在强变形煤中,常村矿的大孔隙和中孔隙孔容所占比例为29.6%,而霍尔辛赫矿的大孔隙和中孔隙孔容所占比例达60.2%,表明构造破坏作用使煤的不同孔径段孔隙的体积增加,尤其是大、中孔隙。

### 2.1.3 孔隙连通性

根据压汞曲线中孔隙滞后环特征,可对煤的孔隙连通性及其基本形态进行初步评价<sup>[17]</sup>。对于大、

表1 不同变形程度煤的各孔径段孔容及其所占比例  
Table1 Volume of pores with different pore-size ranges in coals with different degrees of deformation and their respective proportion

样品编号	孔容 / (10 <sup>-4</sup> cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )				总孔容	所占比例, %			
	大孔隙	中孔隙	小孔隙	微孔隙		大孔隙	中孔隙	小孔隙	微孔隙
CC-I	10	12	89	253	364	2.7	3.3	24.5	69.5
CC-II	15	14	95	238	362	4.1	3.9	26.2	65.8
CC-III	51	96	131	219	497	10.3	19.3	26.4	44.0
HEXH-I	8	44	98	221	371	2.2	11.9	26.4	59.5
HEXH-II	88	233	137	154	612	14.4	38.1	22.4	25.1
HEXH-III	97	501	175	221	994	9.8	50.4	17.6	22.2

中孔隙,随着煤变形程度增加,孔隙滞后环面积逐渐增加,表明该孔径范围内开放孔隙数量增加,且连通性增强;而对于微孔隙和小孔隙,孔隙滞后环的面积逐渐减小,表明该孔径范围内封闭孔隙数量增加,且连通性变差。在甲烷解吸初期,变形煤中开放孔隙所占比例较大,有利于甲烷的运移、产出。

不同变形程度煤的孔隙结构不同导致其解吸特征具有较大差异。随着煤变形程度的增加,不同孔径段孔隙数量均增加,尤其是大、中孔隙<sup>[8]</sup>;同时,构造变形使大、中孔隙的连通性变好,相对于未变形煤,弱变形煤和强变形煤在甲烷解吸初期的解吸速率较快且解吸量迅速增加。未变形煤的几何形态呈柱状,裂隙分布的定向性强;弱变形煤沿着构造裂隙面断开并呈较大的块状,裂隙连通性得以改善;强变形煤呈现小块状和粉状集合体,裂隙非常发育,甲烷运移距离较短。因此,随着煤变形程度的增加,吸附时间显著减小。在解吸后期,强变形煤的小孔隙和微孔隙发育,吸附能力强且连通性差,甲烷解吸、运移和产出的难度较大,解吸速率迅速下降;而弱变形煤和未变形煤受其孔隙和裂隙特征及取心煤样几何形态的共同影响,解吸速率变化较小且持续时间较长。强变形煤的总解吸量小于弱变形煤和未变形煤,其原因为地层在高压条件下,一定数量的气体分子可能楔开煤中的微裂隙和微孔隙,进入芳香层缺陷或煤的大分子之间,并以固溶态存在,且晶体扩散的阻力非常大<sup>[18-19]</sup>。

### 2.2 显微组分

由煤的显微组分对吸附时间的影响分析结果(图2)表明,吸附时间随着镜质组含量的升高而减小,随着惰质组含量的升高而增大。除了煤的变质程度,其显微组分对煤的吸附/解吸性也具有较大影响。对于高煤级煤,其吸附能力随着镜质组含量的

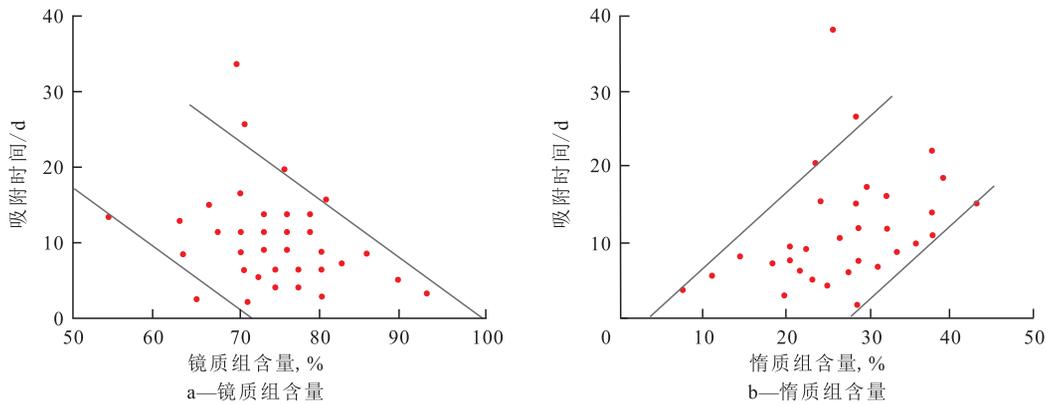


图2 煤的显微组分对吸附时间的影响

Fig.2 Effect of maceral on adsorption time of coals

升高而增强,随着惰质组含量的升高而降低<sup>[20]</sup>。镜质组是成煤物质在还原环境下腐植凝胶脱水及沥青化作用的产物,其变质气孔相对发育,且孔隙连通性较好<sup>[20-21]</sup>。此外,煤中镜质组含量越高,微裂隙越发育<sup>[22]</sup>。因此,煤的吸附时间随其镜质组含量的升高而减小。

### 2.3 水分和灰分含量

随着煤中水分含量的增加,吸附时间整体呈减小趋势(图3a)。煤中的水分分为化合水、吸附水和自由水,其中化合水对甲烷吸附/解吸量的影响微弱。吸附水占据煤体表面一定数量的吸附空间,从而影响煤吸附甲烷的有效面积,导致吸附量降低,解吸量也随之降低。处于液态的自由水具有一定的蒸汽压,在小孔隙中这些水分子与甲烷对同一活性点展开竞争吸附,致使甲烷吸附/解吸量减少。当煤中的水分含量达到临界值(约为1.3%)时,水分含量的增加几乎不会影响煤中甲烷的吸附/解吸量<sup>[12-13]</sup>,吸附时间的变化范围较小。

研究区煤的灰分含量主要为10%~20%,随着灰分含量的增加,甲烷的吸附时间逐渐增加。当灰分含量大于20%时,由于数据较少,需根据现场资

料进一步补充数据后再进行探讨(图3b)。灰分一般为无机矿物,不吸附甲烷分子,随着灰分含量的增加,单位质量煤中有机质所占比例下降,甲烷的吸附量减小。此外,矿物充填裂隙也会减缓甲烷的产出速度。

### 2.4 含气量和含气饱和度

煤的吸附时间随着埋深的增加呈线性关系减小。随着埋深的增加,煤的含气量呈线性增加。当煤层埋深较浅时(约为600 m),位于风氧化带之上,其含气量一般小于6 m<sup>3</sup>/t,吸附时间急剧增加。傅雪海等分析淮南地区4口煤层气井煤储层测试资料也得出相同的结论,尤其当含气量小于8 m<sup>3</sup>/t时,煤的吸附时间随含气量的减少而急剧增加<sup>[23-24]</sup>。

实测含气饱和度是指实测含气量与实测储层压力投影到等温吸附曲线上所对应的饱和含气量<sup>[21]</sup>。根据现场实测资料,煤层实测含气饱和度随着含气量的增加呈线性增加,且实测含气饱和度越高,吸附时间越短(图4)。在煤层Langmuir体积几乎相等的情况下,煤层实测含气量越高,其临界解吸压力越高,越接近储层压力,且实测含气饱和度越高,甲烷越容易解吸<sup>[14]</sup>。

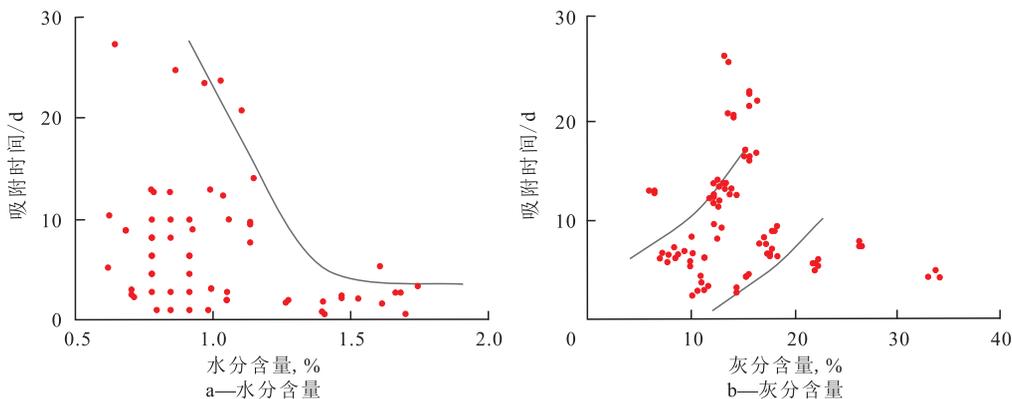


图3 水分和灰分含量对吸附时间的影响

Fig.3 Effect of moisture and ash content on adsorption time

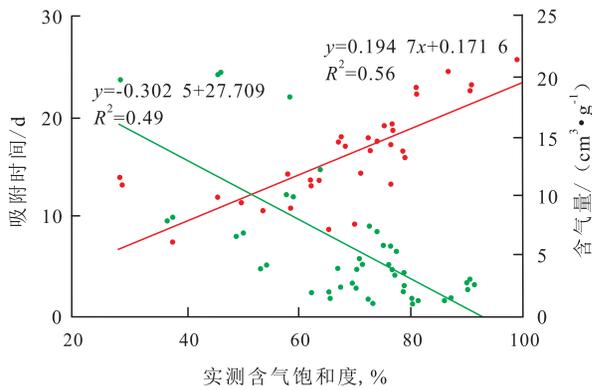


图4 实测含气饱和度与含气量和吸附时间的关系  
Fig.4 Relationship between measured gas saturation, gas content and adsorption time

### 3 煤层气井排采实例分析

选取沁水盆地南部长治和安泽区块变形程度具有显著差异的A,B和C共3口典型煤层气井的实际生产数据进行分析,结果(表2)表明,A,B和C井经水力压裂改造后投入排采,B井的日产气量最高,

A井次之,C井最低,而A井和C井的日产气量迅速减小至0是突然关井所致。煤层厚度及其埋深、水分和灰分含量、含气量和含气饱和度对煤层气井的产气量均具有不同程度的影响。在相同的成煤物质和沉积环境下,煤变形程度差异是导致煤层气井产气量不同的主要原因。以强变形煤为主的C井,由于裂隙、大孔隙和中孔隙较发育,大量的煤层气在钻遇煤层后快速逸散,含气量降低,致使该井的日产气量最低;以弱变形煤为主的B井,构造裂隙、内生裂隙以及不同孔径段孔隙均有发育,有利于甲烷的解吸、运移及产出,因此,B井的日产气量最高;以未变形煤为主的A井,以微孔隙和内生裂隙最为发育,构造裂隙、大孔隙和中孔隙不发育,导致甲烷解吸、运移阻力增加,相比于B井,A井的日产气量有所降低(表2,图5)。以弱变形煤为主的煤储层,其吸附时间介于未变形煤和强变形煤之间,表明在该类煤储层中甲烷可以解吸形成相对稳定的补给来源,且解吸的甲烷可通过相对发育的孔隙和裂隙系统运移、产出。综合表2可知,煤吸附时间的确定

表2 煤层气井的煤储层特征

Table2 Coal reservoir characteristics of coalbed methane wells

井号	煤层厚度/m	埋深/m	水分含量,%	灰分含量,%	含气饱和度,%	含气量/(m <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	吸附时间/d	日产气量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	煤储层特征描述
A	6.60	1 205	0.84	14.9	72.34	14.97	5.26	512	整体为未变形煤
B	5.55	1 104	0.75	19.0	72.67	15.26	3.17	1 131	弱变形煤为主,夹杂极少量的强变形煤
C	5.80	962	0.78	16.5	86.7	20.57	1.51	103	强变形煤为主,夹杂厚度约为0.3 m的夹矸

可以为煤层气井产气量的预测提供依据。

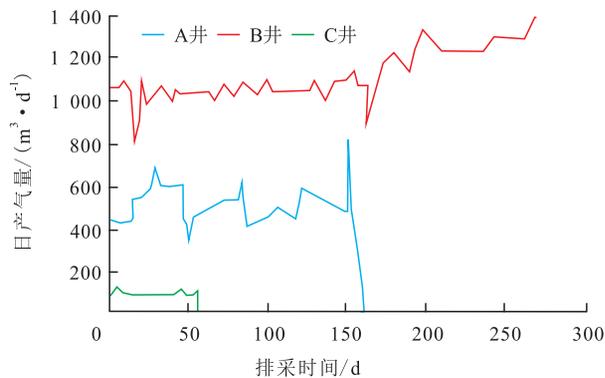


图5 煤层气井日产气量统计结果  
Fig.5 Statistical data of daily gas production from coalbed methane wells

### 4 结论

不同变形程度煤的孔隙结构导致其解吸特征具有较大差异。随着煤变形程度的增加,吸附时间

显著减小。解吸初期,裂隙及大孔隙内的甲烷迅速解吸出来,解吸速率较大,解吸量迅速增大。解吸后期,小孔隙和微孔隙中的甲烷解吸后进入大孔隙和裂隙,运移路径变长,导致解吸速率明显下降,解吸量缓慢增加。相对于未变形煤和弱变形煤,强变形煤由于裂隙、大孔隙和中孔隙所占比例较大以及连通性强,解吸速率较高,解吸量急剧增加,吸附时间较短。随着解吸时间的增加,强变形煤中的小孔隙和微孔隙发育,吸附能力较强且连通性较差,甲烷解吸、运移及产出的难度较大,解吸速率迅速下降,而弱变形煤和未变形煤的解吸速率变化较小且持续时间较长。分析煤层气井的排采数据可知,煤变形程度差异是导致煤层气井产气量不同的主要原因。煤的吸附时间的确定可以为煤层气井产气量的预测提供依据。

#### 参考文献:

[1] 徐祖新,姜文亚,刘海涛.常规与非常规油气关系研究现状与发

- 展趋势[J].油气地质与采收率,2016,23(3):14-19.
- Xu Zuxin, Jiang Wenya, Liu Haitao. Research status and development tendency of the relationship between conventional and unconventional oil and gas[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(3): 14-19.
- [2] 王南,裴玲,雷丹凤,等.中国非常规天然气资源分布及开发现状[J].油气地质与采收率,2015,22(1):26-31.
- Wang Nan, Pei Ling, Lei Danfeng, et al. Analysis of unconventional gas resources distribution and development status in China[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 26-31.
- [3] 法贵方,衣艳静,刘娅昭,等.基于PRMS准则的煤层气资源/储量划分与评估[J].石油实验地质,2015,37(5):665-670.
- Fa Guifang, Yi Yanjing, Liu Yazhao, et al. Classification and evaluation of coalbed methane resources/reserves based on the Petroleum Resources Management System (PRMS) rules [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(5): 665-670.
- [4] 刘洪林,王红岩,张建博.煤层气吸附时间计算及其影响因素分析[J].石油实验地质,2000,22(4):365-367,381.
- Liu Honglin, Wang Hongyan, Zhang Jianbo. Calculation of coal bed gas desorption time and analysis and its influential factors[J]. Experimental Petroleum Geology, 2000, 22(4): 365-367, 381.
- [5] 李小彦,解光新.煤储层吸附时间特征及其影响因素[J].天然气地球科学,2003,14(6):502-505.
- Li Xiaoyan, Xie Guangxin. Characteristics and effecting factors of adsorption time of coalbed gas reservoir [J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(6): 502-505.
- [6] 郭威,姚艳斌,刘大锰,等.基于核磁冻融技术的煤的孔隙测试研究[J].石油与天然气地质,2016,37(1):141-148.
- Guo Wei, Yao Yanbin, Liu Dameng, et al. Research on measurement of pores in coals with NMRC technique[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 141-148.
- [7] 李俊乾,卢双舫,薛海涛,等.高阶煤层气储层非均质性及其定量评价——以沁水盆地南部郑庄区块为例[J].石油与天然气地质,2016,37(1):72-79.
- Li Junqian, Lu Shuangfang, Xue Haitao, et al. Intra stratal heterogeneity of high rank coalbed methane reservoirs and their quantitative evaluation: A case study from Zhengzhuang block in the southern Qinshui Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 72-79.
- [8] 张小东,刘浩,刘炎昊,等.煤体结构差异的吸附响应及其控制机理[J].地球科学——中国地质大学学报,2009,34(5):848-854.
- Zhang Xiaodong, Liu Hao, Liu Yanhao, et al. Adsorption response of different coal body structures and its influence mechanism [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2009, 34(5): 848-854.
- [9] 降文萍,宋孝忠,钟铃文.基于低温液氮实验的不同煤体结构煤的孔隙特征及其对瓦斯突出影响[J].煤炭学报,2011,36(4):609-614.
- Jiang Wenping, Song Xiaozhong, Zhong Lingwen. Research on the pore properties of different coal body structure coals and the effects on gas outburst based on the low-temperature nitrogen adsorption method [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 609-614.
- [10] Pan Jienan, Zhu Haitao, Hou Quanlin, et al. Macromolecular and pore structure of Chinese tectonically deformed coal studied by atomic force microscopy [J]. Fuel, 2015, 139: 94-101.
- [11] Nie Baisheng, Liu Xianfeng, Yang Longlong, et al. Pore structure characterization of different rank coals using gas adsorption and scanning electron microscopy [J]. Fuel, 2015, 158: 908-917.
- [12] Stuart Day, Richard Sakurovs, Steve Weir. Supercritical gas sorption on moist coals [J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 74(3): 203-214.
- [13] Yves Gensterblum, Alexej Merkel, Andreas Busch, et al. High-pressure CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> sorption isotherms as a function of coal maturity and the influence of moisture [J]. International Journal of Coal Geology, 2013, 118(3): 45-57.
- [14] 李景明,刘飞,王红岩,等.煤储集层解吸特征及其影响因素[J].石油勘探与开发,2008,35(1):52-58.
- Li Jingming, Liu Fei, Wang Hongyan, et al. Desorption characteristics of coalbed methane reservoirs and affecting factors [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(1): 52-58.
- [15] 张小东,李朋朋,衡帅,等.煤体结构对煤层气吸附-解吸及产出特征的影响[J].煤田地质与勘探,2016,44(4):40-45.
- Zhang Xiaodong, Li Pengpeng, Heng Shuai, et al. The influence of coal body structure on adsorption-desorption and releasing characteristics of coalbed methane [J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(4): 40-45.
- [16] Jiang Bo, Qu Zhenghui, Wang Geoff G X, et al. Effects of structural deformation on formation of coalbed methane reservoirs in Huabei coalfield, China [J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 82(3/4): 175-183.
- [17] 张小东,苗书雷,王勃,等.煤体结构差异的孔隙响应及其控制机理[J].河南理工大学学报:自然科学版,2013,32(2):125-130.
- Zhang Xiaodong, Miao Shulei, Wang Bo, et al. Pores response of structural difference of coal body and its influence mechanism [J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2013, 32(2): 125-130.
- [18] Alexeev A D, Vasylenko T A, Ul'yanova E V. Phase states of methane in fossil coals [J]. Solid State Communications, 2004, 130(10): 669-673.
- [19] 侯泉林,李会军,范俊佳,等.构造煤结构与煤层气赋存研究进展[J].中国科学:地球科学,2012,42(10):1487-1495.
- Hou Quanlin, Li Huijun, Fan Junjia, et al. Structure and coalbed methane occurrence in tectonically deformed coals [J]. Science China: Earth Science, 2012, 42(10): 1487-1495.
- [20] 傅雪海,秦勇,李贵中,等.特高煤级煤平衡水条件下的吸附实验[J].石油实验地质,2002,24(2):177-180.
- Fu Xuehai, Qin Yong, Li Guanzhong, et al. Adsorption experiment of extra-high rank coal under the condition of equilibrium moisture content [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2002, 24(2): 177-180.
- [21] 李俊乾,姚艳斌,蔡益栋,等.华北地区不同变质程度煤的物性特征及成因探讨[J].煤炭科学技术,2012,40(4):111-115.