

# 致密气吸附能力影响因素研究

吴秀英

(胜利油田勘探开发研究院,山东 东营 257015)

**摘要:**为研究不同条件下致密气吸附量的变化规律,为致密气藏开发提供理论依据,针对致密气吸附的不同影响因素,自行设计完成致密气吸附解吸试验设备,对影响致密气吸附量的温度、粒径、有机质含量、含碳量等不同因素开展了研究。研究表明,在温度接近室温时,用Langmuir吸附模型拟合效果较好,而在温度过高条件下,因为Langmuir模型吸附过程中没有考虑吸附热对吸附的影响,Langmuir吸附模型对实验数据的拟合较差。实验过程中应用60~80目粒径的页岩颗粒进行吸附测试,比较吻合致密气吸附实际。致密气吸附量随着有机质质量分数的增加而增大,受含水率等因素干扰,吸附量与有机质质量分数呈正相关关系。

**关键词:**致密气;吸附;含水率;有机碳

**中图分类号:**TE341 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-8020(2024)01-0009-05

由于常规能源储量有限,且现在常规能源的开发越来越困难,开发非常规能源——致密气可以缓解世界能源紧张的现状。致密气是指在低渗透率、低孔隙度的致密岩石中所储藏的天然气,包括致密砂岩气、致密炭层气等,致密气的主要成分是甲烷。世界范围内,致密气含量约为 $4.6 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,巨大的潜能受到各国普遍关注,我国幅员辽阔,具有广阔的致密气开发前景,潜力巨大<sup>[1-6]</sup>。因此,尽快做好致密气资源评价,可为后续开发提供有力支撑<sup>[7-8]</sup>。胜利油田主体位于黄河下游地区,是在华北地区早期找油的基础上发现并发展起来的。胜利油田勘探开发建设以来,为国民经济建设、石油石化工业和区域经济社会发展做出了重要贡献。胜利油田致密气的有效开发为保障国家能源安全,提升产气能力意义重大。

致密气有吸附气和游离气两种状态并存,从美国生产数据看,吸附气占20%~80%,因此针对致密气的吸附能力及影响因素进行研究,对其开采及生产指标预测具有指导意义<sup>[9-11]</sup>。在致密气藏中,气体通常以三种形式进行赋存:一是在粘土表面、有机物质中以吸附的形式存在;二是在油藏的孔隙及微裂缝中以自由气体的形式存在;三是在沥青质、干酪根中气体溶解其中<sup>[12]</sup>。其

中,以第三种形式赋存的致密气体量较小。致密气体的吸附量大小与孔隙体积大小、岩石矿物成分、油藏成岩作用、油藏温度、压力分布状况及岩石中有机物质含量等因素息息相关。

确定致密气体吸附量大小的常用方法有以下几种:通过对生产数据进行历史拟合得到吸附量,通过实验手段测试进行计算,或者通过测井方法得到致密气体吸附量大小。研究表明,实验手段是最精准的计算致密气体吸附量大小的有效手段。本文通过实验手段,对影响致密气吸附量的因素开展研究,明确不同影响因素条件下,致密气吸附量的变化规律,对致密气藏开发优化、增产措施选择及产能预测具有很好的指导意义<sup>[13-14]</sup>。

## 1 仪器、方法及数据分析

### 1.1 实验设备

基于物质平衡理论,自主研发致密气吸附测试装置,应用系统误差分析理论<sup>[15]</sup>,对实验装置误差进行了分析论证。该装置达到以下要求:实验压力0.1~20 MPa,实验计量压力精度为0.001 MPa,实验温度为室温以下300℃,温度精度为0.1℃。该

收稿日期:2023-09-07;修回日期:2023-11-20

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05011)

通信作者简介:吴秀英(1986-),女,工程师,研究方向为油气田开发工程。E-mail:wuxiuying.slyt@sinopec.com

装置主要由恒温装置、温度控制系统、压力控制系统组成,能够实现温度、压力持续稳定变化,具有

实验精度高、计量准确的特点。实验装置示意图如图1所示。

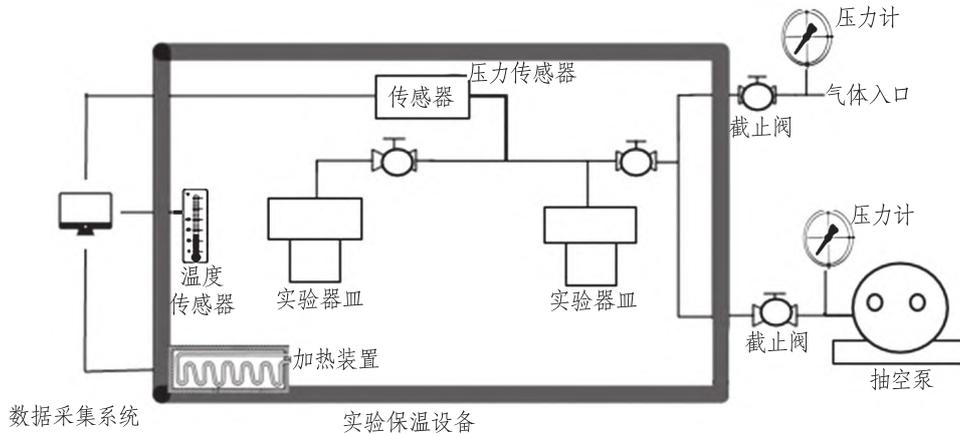


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental device

实验仪器及样品包括:真空泵、样品缸、参照缸、高压管线、六通、压力表、恒温系统、温度控制系统、压力读取系统、氦气、甲烷、页岩样品(参数如表1)。

表1 致密岩样参数指标  
Tab.1 Parameters of tight rock samples

样品编号	有机质含量/%	泥质含量/%	取样井深/m
1	0.482	15.7	4 755.96
2	0.463	14.9	4 170.61
3	0.396	19.7	3 581.52
4	0.263	8.4	3 586.22

## 1.2 实验原理

致密气等温吸附实验是一个加压-平衡-加压的过程,致密气解吸实验是一个减压-平衡-减压的过程。通过计算吸附之前的甲烷气体的物质的量和吸附平衡后的甲烷气体的物质的量之差来计算平衡过程中页岩样品吸附的甲烷的物质的量<sup>[16]</sup>。

## 1.3 实验步骤

致密气吸附解吸测试方法参照煤层气等温吸附曲线标定国家标准<sup>[17]</sup>。对样品分别在35、55、85℃条件下,压力在0.1~10 MPa条件下进行以下各步实验。

致密气吸附实验步骤:

(1) 准确测量装入样品前后,容器质量

$m_1$ 、 $m_2$ ;

(2) 将连接好的容器抽真空5 h以上;

(3) 用氦气对容器的空间进行标定,并关闭阀门;

(4) 关紧恒温箱门,加热至所需温度并稳定2 h;

(5) 打开气源阀向参照缸中通入一定量的甲烷,然后马上关闭气源阀,待温度、压力示数稳定后记录压力 $P_i^1$ ;

(6) 打开平衡阀,平衡两小时使页岩样品充分吸收甲烷。待温度、压力稳定后记录平衡压力 $P_e^1$ ;

(7) 重复实验步骤(5)(6),逐步升高实验压力,分别记录其他各组数据 $P_i^2$ 和 $P_e^2$ , $P_i^3$ 和 $P_e^3$ …… $P_i^i$ 和 $P_e^i$ ……当实验压力达到气瓶能提供的最大压力时吸附实验完成。

## 1.4 结果与分析

对测试的数据,应用Langmuir公式进行拟合,得到页岩样品在35、55、85℃条件下,致密气吸附量。

1) 测试压力保持稳定的条件下,逐步升高压力,吸附量变化幅度不尽相同,温度较低条件下,致密气吸附量上升幅度较大,随着实验压力增大,吸附量趋于饱和,上升幅度变化较小,如图2~4所示。

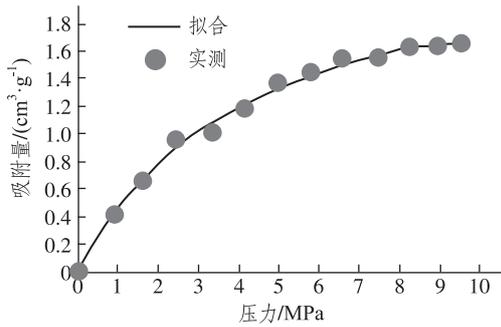


图 2 35 °C 条件下的吸附曲线  
Fig. 2 Adsorption curve at 35 °C

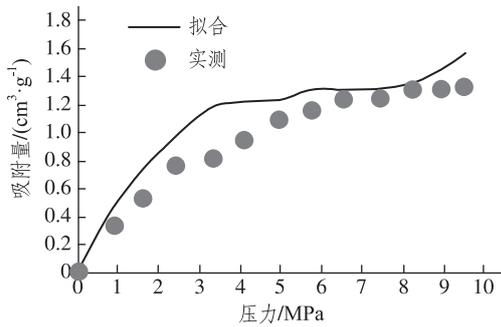


图 3 55 °C 条件下的吸附曲线  
Fig. 3 Adsorption curve at 55 °C

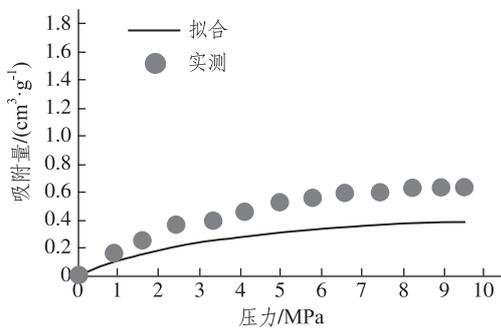


图 4 85 °C 条件下的吸附曲线  
Fig. 4 Adsorption curve at 85 °C

2) 由表 2 拟合率数据可知,在温度接近室温时,用 Langmuir 吸附模型拟合效果较好,相关系数在 0.911 左右。在温度过高条件下,Langmuir 吸附模型对实验数据的拟合较差,这是因为 Langmuir 吸附模型吸附过程中没有考虑吸附热对吸附的影响,因此导致较高温度条件下,吸附拟合效果差。

表 2 页岩吸附致密气 Langmuir 拟合结果  
Tab. 2 Langmuir fitting results of tight gas

温度/°C	拟合方程	R <sup>2</sup>
35	$V = 5.28P / (P + 9.12)$	0.911
55	$V = -0.63P / (P - 10.72)$	0.368
85	$V = -0.155P / (P - 8.56)$	0.496

注:P 表示压力(MPa),V 表示吸附量( $cm^3 \cdot g^{-1}$ )。

## 2 影响因素研究

### 2.1 粒径对吸附的影响

对取自鄂尔多斯盆地的页岩样品取心,得到 2 块页岩标准岩心(标准岩心尺寸为直径 2.5 cm,长度分别为 5 cm 和 3 cm 的圆柱体,分别称为长岩心和中岩心)。分别对页岩标准岩心和 60 ~ 80 目页岩岩心颗粒样品(对页岩样品进行粉碎研磨,制成 60 ~ 80 目小颗粒)测定等温吸附曲线。

页岩标准岩心的吸附气量与岩心颗粒样品吸附气量的关系曲线如图 5 所示。由图 5 可知,岩心颗粒样品的吸附量较岩心的吸附量大。这是因为,对岩石粉碎研磨后,页岩表面积增大,为致密气的吸附提供较大的空间,因此吸附量较岩心的吸附增大。页岩标准岩心吸附量与岩心颗粒样品吸附量有一定的偏差,但是偏差不大,说明实验过程中采用 60 ~ 80 目的岩心颗粒样品做吸附实验能够反映地下页岩的吸附情况,具有说服力。

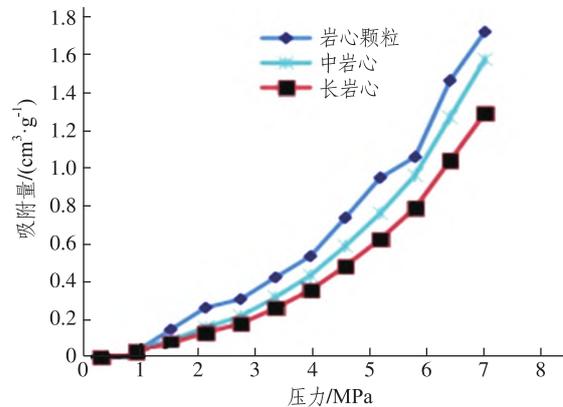


图 5 30 °C 条件下岩心吸附与岩心颗粒吸附对比  
Fig. 5 Comparison between core adsorption and core particle adsorption at 30 °C

### 2.2 有机质质量分数的影响

取自国内的致密岩样,有机碳质量分数较高,为了分析致密气吸附受页岩样品中有机碳质量分数的影响,对 35 °C 条件下,不同有机碳质量分数对致密气的吸附量大小进行了比较,结果表明,吸附量大小随着样品中有机碳质量分数增加而加大,二者呈现正相关关系(图 6)。两种实验条件下的函数关系如图 6 所示。

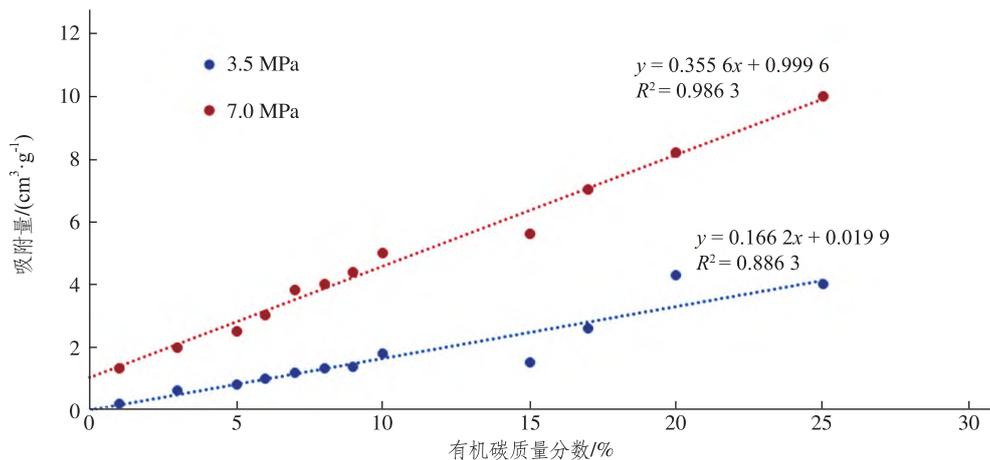


图6 不同质量分数有机碳对致密气吸附的影响

Fig. 6 Influence of different organic carbon content on adsorption of tight gas

### 2.3 含水率对致密气吸附的影响

大多数致密气藏位于边水,或是含水量高达75%~80%的地层中间。因此,页岩湿度对致密气吸附作用具有很大影响。

在30℃、7种不同的页岩湿度条件下,进行吸附实验,结果如图7所示。

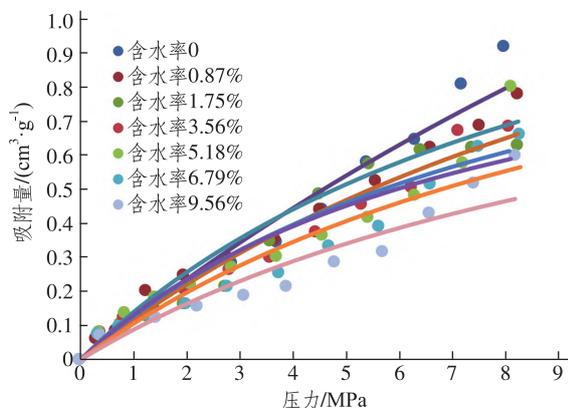


图7 不同含水率条件下致密气的吸附量

Fig. 7 Adsorption capacity of tight gas under different water content

由图7可知,湿度为0时,最大吸附量为 $0.91 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ ,当湿度增大到9.56%时,最大吸附量为 $0.60 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ ,降低了34.07%,这说明含水率对致密气的吸附量有重要影响。这是因为水分的存在占据空隙表面,使得页岩吸附表面积减小,从而影响了甲烷气体的吸附。因此,在一定的含水率变化范围内,随着水分的增加,吸附表面积逐渐变小,甲烷气体吸附量降低。当页岩孔喉

表面水分达到一定程度后,页岩表面几乎完全被水分覆盖,使得吸附表面积不再变化,此时,随着湿度的增加,吸附量变化缓慢。

## 3 结论

本研究通过自主研发致密气吸附测试装置,系统开展了致密气吸附能力研究,并对粒径大小、有机质含量、含水率对吸附的影响规律开展研究,得出以下结论。

当实验温度保持不变、实验压力不断增加时,实验样品对致密气吸附量逐渐趋于饱和,上升幅度变缓,室内条件下,吸附量符合Langmuir公式,拟合率较高。页岩粒径大小对致密气吸附有一定影响,实验过程中应用60~80目粒径的颗粒进行吸附实验,比较吻合致密气吸附实际,有机碳质量分数对吸附解吸影响较大,二者呈非线性正相关。样品中含水量对致密气的吸附量有一定影响,随着水分的增加,致密气吸附解吸量降低,含水饱和后,吸附量不再发生变化。

### 参考文献:

- [1] 刘亢. 鄂尔多斯盆地石炭-二叠纪海陆过渡相致密气成藏条件及勘探潜力[J]. 中国煤炭地质, 2021, 33(9): 1-7.
- [2] 黄婷. 鄂尔多斯盆地东缘煤系致密气储层特征评价[J]. 中国煤炭地质, 2020, 32(1): 65-72.
- [3] 曹学明, 周志强. 甘肃省庆阳地区致密气地质特征分析[J]. 中国煤炭地质, 2016, 28(9): 30-36.
- [4] 付锁堂, 付金华, 席胜利, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系

- 海相致密气地质特征及勘探前景[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(2): 33-44.
- [5] 杜燕, 刘超, 高潮, 等. 鄂尔多斯盆地延长探区陆相致密气勘探开发进展、挑战与展望[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 33-42.
- [6] 冯小龙, 敖卫华, 唐玄. 陆相致密气储层孔隙发育特征及其主控因素分析: 以鄂尔多斯盆地长7段为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(3): 678-692.
- [7] CURTIS B C, MONTGOMERY S L. Recoverable natural gas resource of the United States; summary of recent estimates[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(10): 1671-1678.
- [8] 王海柱, 沈忠厚, 李根生. 超临界 CO<sub>2</sub> 开发致密气技术[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(3): 30-35.
- [9] 张金川, 薛会, 张德明, 等. 页岩气及其成藏机理[J]. 现代地质, 2003, 17(4): 466.
- [10] 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 15-18.
- [11] 李玉喜, 乔德武, 姜文利, 等. 致密气含气量和致密气地质评价综述[J]. 地质通报, 2011, 30(Z1): 308-317.
- [12] 苏现波, 林萌, 林晓英, 等. 吸附势理论在煤层甲烷吸附中的应用[J]. 中国煤层气, 2006, 3(2): 28-30.
- [13] 郭智, 位云生, 孟德伟, 等. 苏里格致密砂岩气田水平井差异化部署新方法[J]. 天然气工业, 2022, 42(2): 100-109.
- [14] 李柱正, 李开建, 李波, 等. 辫状河砂岩储层内部结构解剖方法及其应用: 以鄂尔多斯盆地苏里格气田为例[J]. 天然气工业, 2020, 40(4): 30-39.
- [15] 唐波涛, 曾冀, 陈伟华, 等. 川中秋林地区致密砂岩水平井多簇射孔优化设计方法及应用效果[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(2): 337-344.
- [16] 刘成川, 王勇飞, 毕有益. 中江气田窄河道致密砂岩气藏高效开发技术[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(2): 345-355.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 煤的高压等吸附试验方法: GB/T19560—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

## Influencing Factors of Tight Gas Adsorption Capacity

WU Xiuying

(Shengli Oilfield Exploration and Development Research Institute, Dongying 257015, China)

**Abstract:** In order to study the change law of tight gas adsorption capacity under different conditions and provide theoretical basis for the development of tight gas reservoirs, the shale gas adsorption and desorption test equipment was designed and completed based on different influencing factors of shale gas adsorption. Research on different factors such as temperature, particle size, organic matter content, and carbon content that affect shale gas adsorption was conducted, which provides a basis for accurately measuring the calculation of shale gas adsorption under different conditions. The research results indicate that when the temperature is close to room temperature, the fitting effect of the Langmuir adsorption model is better. Under high temperature conditions, because the Langmuir model does not consider the effect of adsorption heat on adsorption, the fitting effect of the Langmuir adsorption model on experimental data is poor. During the experiment, shale particles with a particle size of 60-80 mesh were used for adsorption testing, which is more in line with the actual adsorption of shale gas. The adsorption capacity of shale gas increases with the increase of organic matter content, and is positively correlated with organic matter content due to interference from factors such as water content.

**Keywords:** shale gas; adsorption; moisture content; organic carbon

(责任编辑 李维卫)