

引用格式:朱苏阳,孟尚志,彭小龙,等.煤岩润湿性对煤层气赋存的影响机理[J].油气藏评价与开发,2022,12(4):580-588.

ZHU Suyang, MENG Shangzhi, PENG Xiaolong, et al. Mechanism of coal wettability on storage state of undersaturated CBM reservoirs [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(4): 580-588.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.04.005

煤岩润湿性对煤层气赋存的影响机理

朱苏阳¹,孟尚志²,彭小龙¹,李相臣¹,张千贵¹,张斯¹

(1.西南石油大学石油与天然气工程学院,四川成都610500;2.中联煤层气有限责任公司,北京100000)

摘要:岩石对流体润湿性决定了孔隙中流体的分布特征,多孔介质中的小孔隙优先被润湿相流体占据。基于这一原理,分析了目前煤岩润湿性实验与煤层气赋存状态的矛盾,从煤岩润湿性的角度,提出了两种可能的煤层气宏观赋存模式。如果煤岩亲气,甲烷在毛管压力的作用下,可以被割理中的水封闭在煤基质中。由于煤基质和割理界面处的毛管压力,煤层气的吸附是平衡的,但赋存可以出现欠饱和状态,这也是排采过程中出现临界解吸现象的原因。当煤岩水相润湿时,水相需要占据煤岩中的小孔隙(基质),甲烷可以通过液相吸附的形态储存在基质中。液相吸附中,排采过程的临界解吸源自欠饱和的煤层气溶解状态。通过煤层气液相吸附的验证实验,也表明甲烷可以通过液相吸附的形式大量赋存于煤层中。

关键词:煤层气;润湿性;气相赋存;液相吸附;欠饱和赋存;欠平衡吸附

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Mechanism of coal wettability on storage state of undersaturated CBM reservoirs

ZHU Suyang¹, MENG Shangzhi², PENG Xiaolong¹, LI Xiangchen¹, ZHANG Qiangui¹, ZHANG Si¹

(1. Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

2. Zhonglian Coalbed Methane Co., LTD., Beijing 100000, China)

Abstract: The wettability decides the fluid distribution in porous media, and the wet-phase fluid will primarily occupy the smaller pore. Based on this principle, the paradox between laboratory test of coal wettability and state of fluids distribution is analyzed. On the view of wettability, two possible coalbed methane (CBM) storage types are proposed. When the coal is gas-phase wettability, owing to capillary pressure, the free gas and adsorption gas can be trapped in matrix (smaller pore system) by the water in cleat (larger pore system). In matrix system, the sorption of gas is in equilibrium state, but the storage of gas is in the undersaturated state. The critical desorption process results from the capability pressure of water and gas. When the coal is water-phase wettability, the matrix is saturated by water, and the coalbed methane can store in the matrix in liquid-phase sorption state. This study designs the experiment to validate the gas liquid-phase sorption. The results indicate that a mass of methane can be adsorbed in the matrix in the liquid-phase sorption mode.

Keywords: coalbed methane(CBM); wettability; gas storage; liquid-phase sorption; undersaturated storage; underbalance sorption

煤岩由基质和割理(裂缝)构成,而煤层气主要以吸附态赋存于煤岩基质中,是一种典型的非常规天然气^[1-2]。多数煤层气藏的赋存状态是欠饱和^[3-4],开采过程需要先通过排水降低煤层的压力,煤岩中的气体才能解吸流动^[5-8]。根据煤层气的生产动态可

知,煤层气赋存于煤基质中(小孔隙),煤岩的割理中被地层水饱和,否则不可能出现排水采气过程和临界解吸现象。然而,大多数实验表明煤岩亲水或弱亲水,极少数改变饱和顺序的实验说明煤岩弱亲气^[9-12]。这就说明作为非湿相的煤层气赋存于多孔

收稿日期:2022-05-24。

第一作者简介:朱苏阳(1989—),男,博士后,副教授,主要从事油藏工程、煤层气开发、页岩气开发、渗流力学、数值模拟方面的研究。地址:四川省成都市新都区新都大道8号国重B404,邮政编码:610500。E-mail:1546287562@qq.com

基金项目:中国工程院战略研究与咨询项目“我国煤层气有效开发发展战略研究”(2021-XY-25);国家自然科学基金青年基金“基于煤粉群运移动力学特征的煤层气—水—固耦合传质机理研究”(52104036)。

介质的小孔隙(基质)中。由此可知,煤岩的润湿性研究结果与多孔介质中流体赋存位置存在一定的矛盾。

针对此问题,提出了两种煤层气可能存在的赋存模式,并讨论了两种模式存在的可能性以及对采过程的影响。

1 煤层气赋存模式与煤岩润湿性

1.1 煤层流体的赋存模式

根据煤层气的生产动态可知,煤层气的开采需要先通过排水压降,此时气井仅产出地层水,当压力下降一定程度后,煤层气方能解吸产气。根据煤层气的吸附实验可知,煤岩对甲烷拥有良好的吸附能力,煤层气可通过吸附态赋存于煤层基质中^[13-14]。

普遍认为,煤岩由割理(裂缝)和基质组成,是典型的双重介质(图1)。根据孔隙的相对大小而言,割理系统的孔隙开度较大,而基质系统的孔隙开度相对较小。结合煤岩的双重介质孔隙结构,传统的煤层气吸附理论采用气相吸附模型解释煤层气的赋存状态,认为煤岩的割理系统被水饱和,煤层气主要以吸附态赋存于煤岩基质。

根据现有的等温吸附实验结果以及大多数煤层气井排水采气的临界解吸现象,目前普遍认为初始条件下,煤岩中的甲烷处于欠平衡的吸附状态,这导致了临界解吸现象。传统的煤层气吸附理论较为符合大多数煤层气井排采情况的直观认识,并被广泛应用于工程领域。

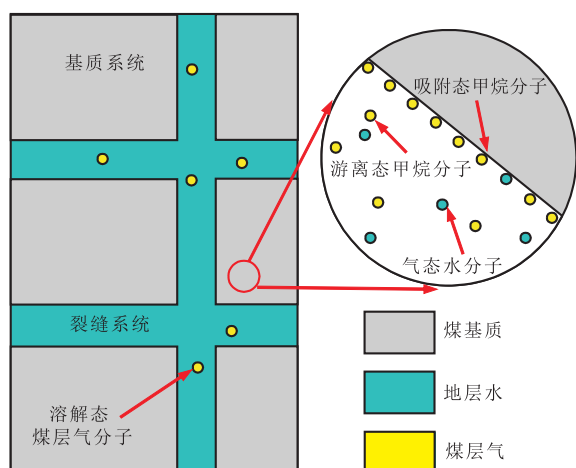


图1 煤岩结构模型与赋存方式示意图
Fig. 1 Structure of coal and storage of CBM

1.2 煤岩的润湿性

目前,油气藏的储层岩性主要是砂岩、碳酸盐岩或页岩,以无机矿物碎屑岩为主,多数碎屑岩以亲水为主。然而,煤层气的储层则主要由有机质构成,但是这些有机质中的含氧官能团对主要由羟基、羧基和酚羟基构成^[9],而这些官能团中的有机氧可以通过偶极作用,与水中的氢缔合形成氢键,进一步影响煤表面的润湿性^[10]。

大多数实验均证实,煤岩的润湿角小于 90° ,为水湿岩石^[11-12]。随着煤热演化程度的提高,煤的亲水性在逐渐减弱,但目前多数研究均表明,即使是高阶煤,多数情况下也是弱亲水,甚至部分高阶煤还具有较小的润湿角和较强的亲水性^[14]。

1.3 润湿性与流体分布的关系

多孔介质中的小孔隙优先被润湿相流体占据^[15],煤岩的润湿性决定了煤层气的赋存模式。

煤岩中,基质系统属于小孔隙,而割理系统则属于大孔隙。如果煤岩是水相润湿(多数润湿性实验结果),那么煤中的小孔隙系统(基质),则应该被水饱和,这显然与传统的煤层气吸附理论不符。此时,若水湿的煤岩中含有游离气,那么大孔隙(割理系统)则应该被煤层气饱和,煤层气的开采就不会经历排水降压过程,而是开井后直接产气。如果煤岩是气相润湿的,那么煤基质(小孔隙)中,应该被煤层气占据,而割理中则被水饱和。这种情况符合煤层气的生产动态和传统的煤层气吸附理论,但这与煤岩的润湿性实验结果完全相反。

由此可见,两种润湿性条件均与目前理论或实验结果存在一定的矛盾。因此,需要对两种润湿性条件下的煤层气赋存状态进行深入研究和讨论。

2 两种润湿可能性

2.1 气湿情况——气相赋存模式

常规油气藏的岩石均为水湿的,低孔致密的岩石可以作为盖层,封堵高孔疏松的储集层中的油气^[16]。由于毛管压力的作用,油气藏盖层的封闭机理为小孔隙(润湿相)封盖大孔隙中的非润湿相。然而,如果储集层为疏水岩石(亲油气),那么圈闭方式恰好相反,为高孔疏松的盖层封堵低孔致密储集层

中的油气。此时,疏水岩石的封闭机理为盖层中大孔隙(非润湿相)封盖储集层小孔隙中的润湿相。多孔介质中,润湿相流体优先饱和小孔隙。因此,如果煤岩亲气,则煤岩基质中饱和气体,这些气体可以被割理中的水(大孔隙中的非润湿相)在毛管压力的作用下封堵在基质,形成一种自封盖的特殊圈闭类型(图2)。

当煤岩表面相对于水亲气时,毛管压力由基质中的润湿相,指向割理中的非湿相。此时,煤岩中气相压力小于水相压力(差值为毛管压力),在煤基质的小孔隙中,煤层气以气相吸附的形式赋存,吸附服从气相吸附规律(图2)^[17]。然而,目前多数实验研究表明,煤岩表面是亲水的,仅有少数改变流体饱和次序的研究得到了煤岩弱亲气的实验结果^[11-12]。

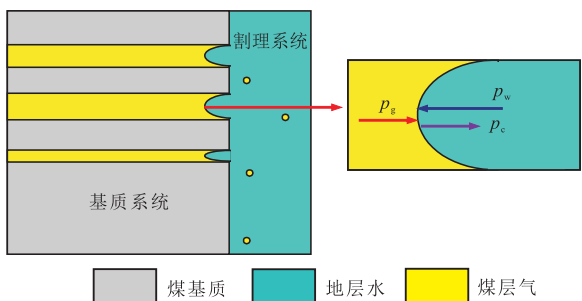
2.2 水湿情况——液相赋存模式

如果煤岩亲水,同时煤岩中存在游离气,那么基质中的小孔隙应该被水占据,而割理中的大孔隙应该被游离气和吸附气占据。此时,开井生产应该直接产气,不会存在排水过程和临界解吸现象。由此可知,如果煤岩亲水,煤岩游离气的存在与已有的生产动态不符。

如果煤岩中不存在游离气,同时煤岩亲水,那么割理和基质均应被水饱和。此时,甲烷可以通过液相吸附的形式赋存于基质内。物理化学中,液相吸附指溶液中,界面对溶质的富集过程^[18-19]。与气相吸附一样,液相吸附也是无条件的^[20],存在溶解态的煤层气,就必然有液相吸附态的煤层气。

1) 液相吸附量的大小

虽然煤层气的液相吸附必然存在,但煤岩中液相吸附的量能否提供煤层的高含气量呢?



注: p_w 为水相压力,MPa; p_g 为煤层基质中的气相压力,MPa; p_c 为基质系统的毛管压力,MPa。

图2 气相润湿条件下的水动力封闭机制

Fig. 2 Mechanism of hydraulic trap under gas-phase wettability condition

物理化学中,液相吸附量的大小可以通过煤层气、水和煤三者之间的亲和力关系进行初步判断^[21-22](图3)。煤是一种主要以有机质构成的烃源岩,煤层气的储存状态为自生自储。因此,作为溶质的煤层气和作为吸附剂的煤之间具有较大的亲和力A(大量吸附实验也表明这一点)。其次,煤层气在地层水中的溶解度极小,由此可知亲和力B很弱。同时,水中的氢键可以促进憎水溶剂(煤层气)的液相吸附^[21]。亲和力C是吸附剂和溶剂之间的力,煤岩亲水,则亲和力C较大。

由此可知,储层条件下的煤岩、地层水和甲烷之间的作用力特征满足形成大量液相吸附的前提条件,这种推测需要通过实验进一步验证。

2) 吸附模型

煤层气的液相吸附耦合了煤层气的溶解与吸附两个物理过程^[22],其过程可以采用液相吸附Langmuir方程描述^[18-21],由此可以引入煤层气的液相吸附关系^[2, 22, 23]:

$$V_{ad}^L = V_{adm}^L \frac{ac_m}{1 + ac_m} \quad (1)$$

式中: V_{ad}^L 为液体吸附量, m^3/m^3 ; V_{adm}^L 为最大液体吸附量, m^3/m^3 ; c_m 为地层水中甲烷的体积溶解量, m^3/m^3 ; a 为甲烷液体吸附系数。

需要说明的是溶解在地层水的气量较少,大量的甲烷以液相吸附的形式赋存于煤岩基质的孔隙表面(图4)。由于压力与煤层气在水中的体积分数 c_m 有关^[2, 22, 23],流体压力与液相吸附量之间存在间接影响的关系^[22]。甲烷在水中的溶解度通常表示为:

$$c_{ms} = \alpha p_w \quad (2)$$

式中: c_{ms} 为甲烷在水中的溶解度, m^3/m^3 ; α 为甲烷的溶解系数, $m^3/(m^3 \cdot MPa)$ 。

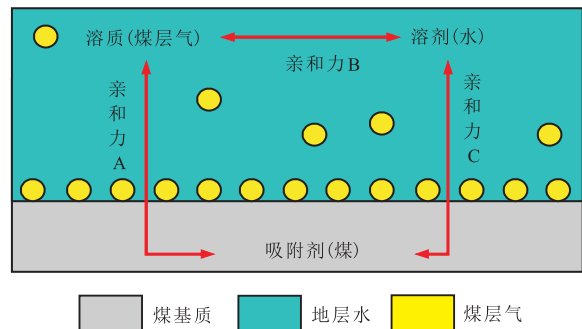


图3 煤层气液体吸附关系下的相互作用

Fig. 3 Interference in coalbed methane liquid phase sorption

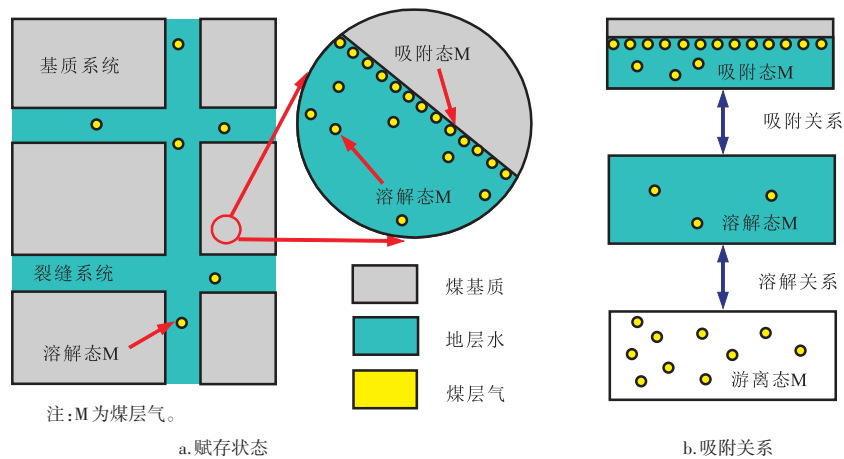


图4 液体吸附理论对煤层气吸附关系的解释

Fig. 4 CBM sorption relation based on liquid phase sorption theory

压力是液相吸附形成的关键因素,而不是致密的盖层。必须说明的是,溶液中的液相吸附极为复杂,即便在物理化学领域内,目前也没有研究可以厘清液相吸附层的真实形式^[21]。因此,煤层气以液相吸附的形式赋存仅是在煤岩亲水且不含游离气条件下的一种推测^[2,22]。

3 煤层气液相吸附的验证实验

3.1 验证实验设计思路

为进一步验证煤层气的液相吸附推测,并论证煤层气以液相吸附态赋存的可能性,需要对煤层气的液相吸附过程开展验证实验研究。而验证实验,可以通过测试饱和水的煤样对水中溶解甲烷的吸附能力而实现。因此,研究设计了煤层气液相吸附理论的验证实验。验证实验的思路为:验证饱和水的煤样,可以大量吸附溶解态的甲烷气体。因此,验证实验的设计思路如下:吸附舱的上部为游离态的甲烷,下部为饱和水的煤样,中部通过水将甲烷和煤样隔开(图5)。

将当饱和水的煤样与地层水装入吸附舱中,在吸附舱上部通入甲烷,游离态的甲烷溶解到水中后,向下扩散接触到煤样。溶解态的甲烷接触到煤样后,以液相吸附的形式赋存在煤样中。甲烷的液相吸附和溶解均会降低游离气的压力。如果测量流入吸附舱内甲烷的体积并测量游离气压力的变化,排除地层水中溶解态的气体量,从而可以得到甲烷在煤样中的液相吸附量。

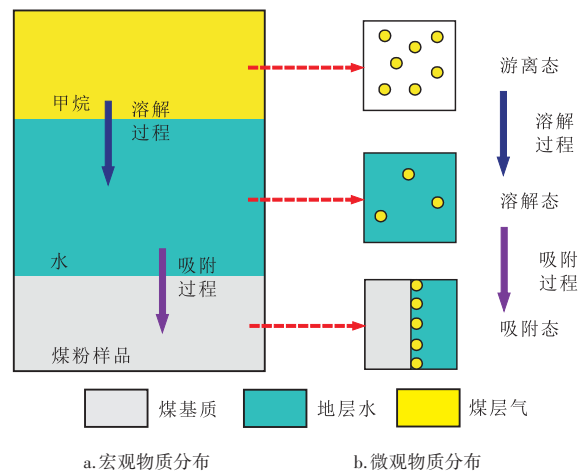


图5 吸附舱内物质分布与运动情况

Fig. 5 Reaction processes in sorption chamber

3.2 实验设计与方法

煤层气液相吸附的物理模拟中存在溶解、扩散与液相吸附3个过程,其中扩散的速度极慢,实验中的压力平衡时间远大于常规吸附实验。常规气相吸附设备的中间容器体积一般较小,吸附剂(煤)测试质量也较小(一般为10 g以内),测试时间较快。然而,液相吸附测试时间较长,长时间测试带来的气密性问题会影响实验结果。同时,液相吸附实验中存在饱和水煤样和水的移动,容器与管线内壁残留的液体和煤样同样会影响液相吸附实验的结果。因此,可以通过增加实验装载量,从而减小样品移动以及管壁残留带来的实验误差。

设计将煤样的装载量放大2个数量级,实验中吸附剂(煤)最大装载量提高至1 000 g,吸附舱容积为3 000 cm³左右。根据验证实验思路,设计了煤层气液相吸附理论验证实验的设备(图6)。煤层气的液相吸附曲线需要通过:①煤样前处理过程;②吸附舱流体装载过程;③煤层气的溶解—吸附过程;④液相吸附计算这4个步骤^[22]。

4 结果与讨论

4.1 煤层气液相吸附实验结果

采用韩城矿区5号煤的煤矿井下取样,进行了2

组测试。图7显示了气密性测试过程中吸附舱的压力动态。根据图7中的压力稳定与时间的关系可知,在实验中,当温度不高于45℃时,实验向吸附舱中充注气体后,压力数据的采集需要在30 h之后进行。

通过振动筛获取50目煤粉,第1组实验取煤粉1 000.00 g,第2组实验取煤粉300.00 g。根据溶解—吸附的过程进行液相吸附实验。两组实验的样品质量不同,目的在于测试实验过程所需的时间,测试液相吸附实验设备可用的最小样品质量以及验证实验设计的正确性。根据甲烷在蒸馏水中的溶解度曲线^[24](图8a),以及煤层气液相吸附模型,可以将实验

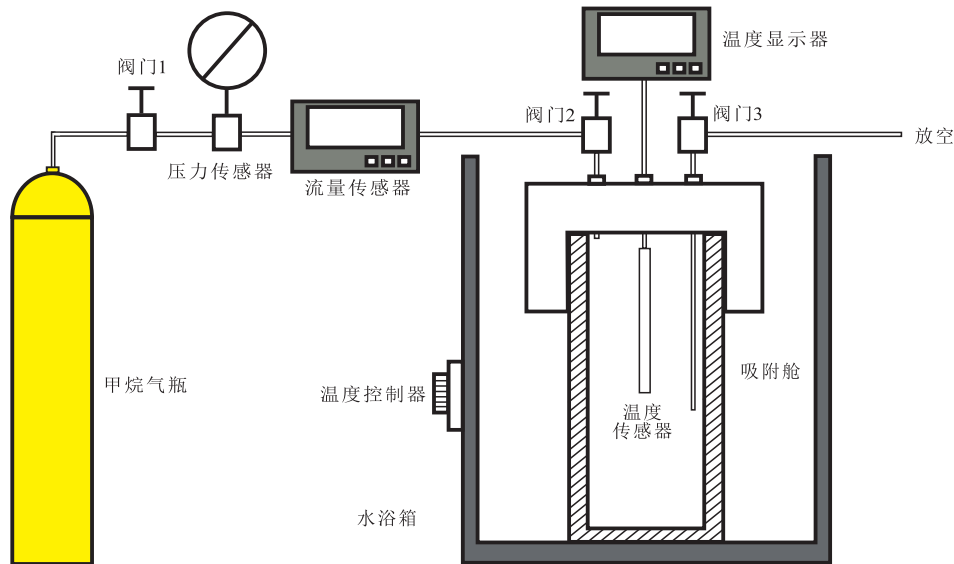


图6 液相吸附实验装置示意图

Fig. 6 Experiment apparatus for methane sorption in water saturated coal

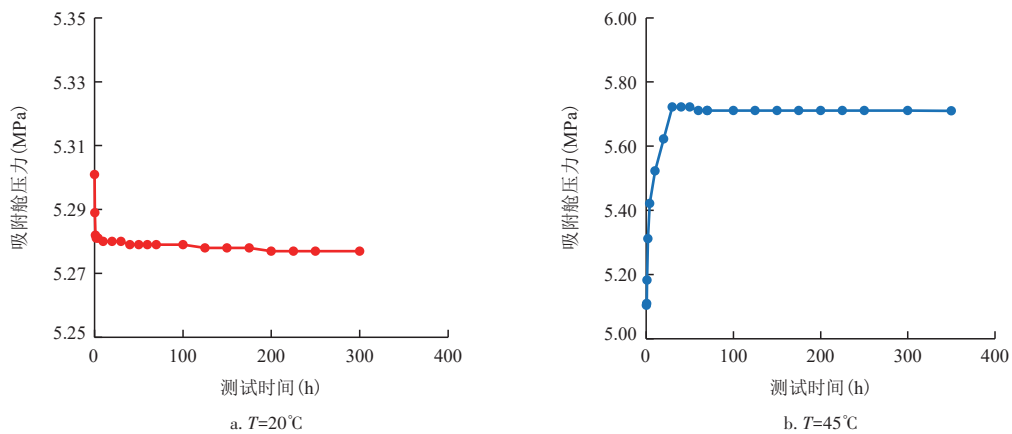


图7 不同温度下实验设备气密性测试压力动态

Fig. 7 Pressure dynamic of seal test of experiment facility at different temperature

压力转换为实验过程中的煤层气在水中的体积分数。由于甲烷在水中的溶解度用线性关系表示,因此,用压力表示的煤层气液相吸附曲线(图8b)与通过甲烷水中溶解体积分数表示的甲烷液相吸附曲线(图8c)的形态完全一致。在溶解饱和的条件下,煤样在流体压力为9 MPa、25 °C条件下煤样通过液相吸附可以固定甲烷的量为17.7 m³/t,韩城矿区部分地区5号煤层的含气量基本一致^[22]。

4.2 传统煤层气吸附理论的欠平衡吸附

基于现场解吸与煤样的等温吸附实验结果^[25-27],传统的煤层气吸附理论认为基质中的煤层气处于欠饱和吸附状态,即初始压力下的含气量小于实验中对应压力的吸附量^[11,28]。这种吸附的欠饱和,具体表

现为生产过程中的临界解吸现象。以图9a为例,初始压力下 p_i 条件下,由于煤层的含气量的状态点低于吸附曲线,所以开井时煤层并不产气,气井需要进行排水从而降低煤层的孔隙压力,吸附状态向左移动,当含气量大于对应的吸附量时,煤层气开始解吸^[2]。临界解吸压差的数值则等于煤层气藏的初始压力与临界解吸压力的差值。

目前,学术界和工业界通常用欠饱和(undersaturated)这一术语,描述煤层气的吸附状态^[29-31]。然而,用欠饱和吸附这一术语在此并不准确。因为气相吸附模型中,饱和吸附指当压力增高,吸附量保持不变后的状态,对应的压力称为饱和吸附压力(图9b中紫色虚线右方的状态)。即Langmuir吸附模型假设条件中的单分子吸附层中已经布满了

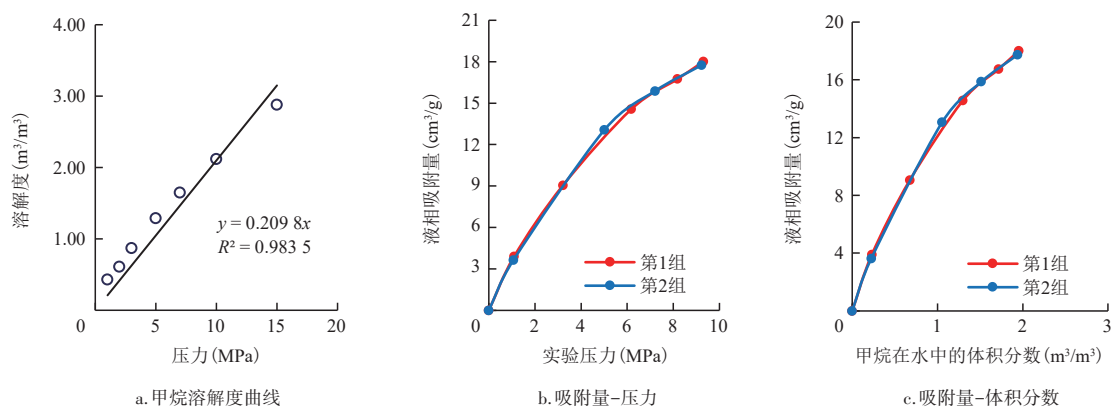
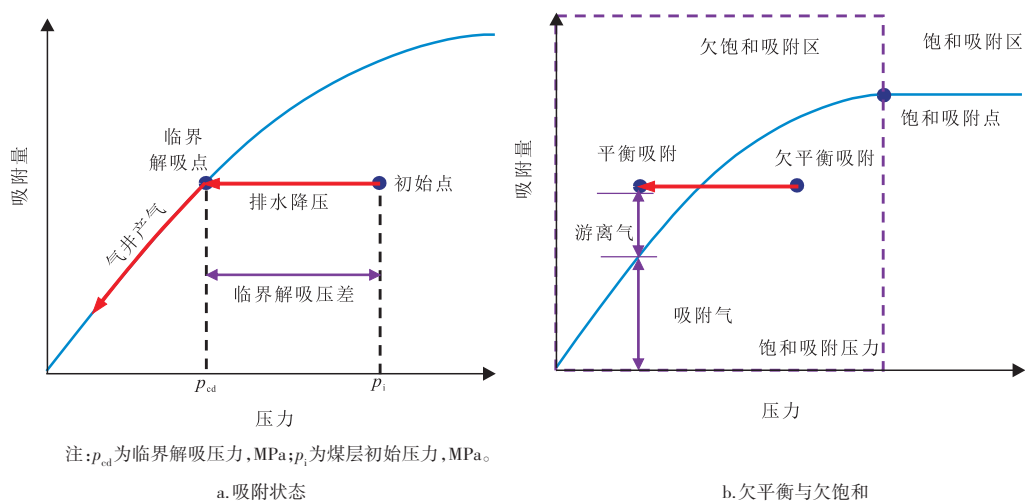


图8 甲烷溶解度曲线与液相吸附关系

Fig. 8 Relationship of solution curves and liquid-phase sorption



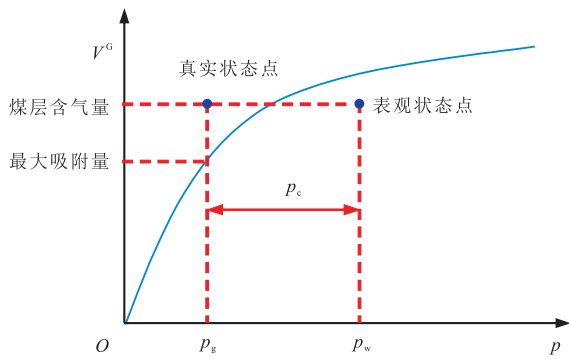
注: p_{cd} 为临界解吸压力,MPa; p_i 为煤层初始压力,MPa。

图9 煤层气传统理论中的欠平衡吸附状态

Fig. 9 Undersaturated sorption state in transitional CBM sorption theory

气体分子,因此,吸附量不能进一步提高。当压力小于饱和吸附压力时,由于压力的增高使得吸附量增大,气体的吸附才会处于欠饱和和吸附的状态(图9b中的紫色虚线框)。

气体的吸附和解吸过程通常被认为是瞬间完成的,即欠饱和吸附状态下的气体,压力下降则气体解吸,并不会出现临界解吸现象^[19-20]。传统的煤层气吸附理论中,气体的吸附状态位于吸附曲线之下(图9a)。这其实不仅是欠饱和吸附,实质是一种欠平衡的吸附状态。但这种欠平衡的状态并不稳定,会进一步趋向平衡,即吸附状态点向左平移,使得系统压力降低^[2]。最终,系统中形成游离气和吸附气的平衡^[2]。因此,欠平衡的吸附状态只可能是一种瞬时状态,不会是气相吸附的平衡状态。而且,煤层经历漫长的地质演化过程,吸附也不会处于欠平衡状态。



注: V^G 为含气量, m^3/m^3 。

图10 欠饱和和吸附状态解释

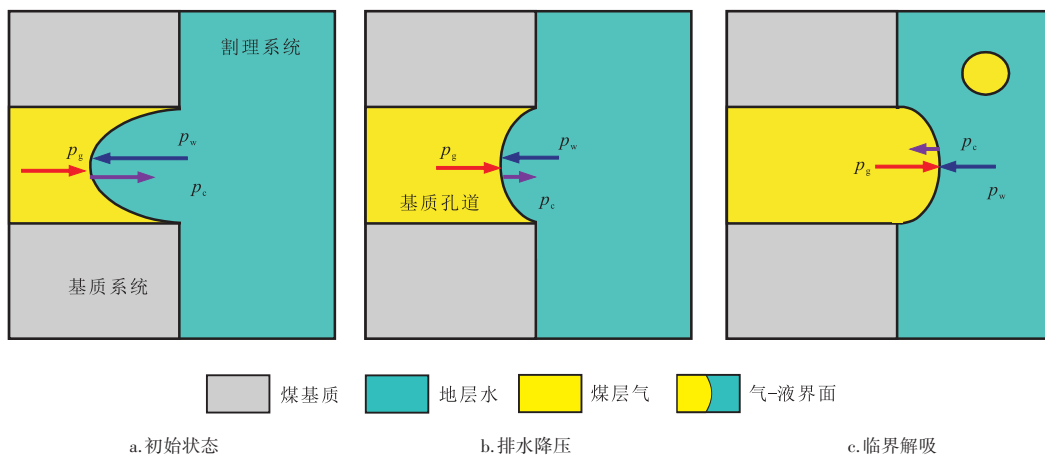
Fig. 10 Under-saturated sorption state

4.3 气相赋存模型(气相润湿)对生产动态的解释

传统煤层气吸附理论得到欠饱和和吸附结论的原因是现场解吸量和压力的测试结果,然而现场测试得到的煤层压力,测试煤层中的水相压力 p_w 。这是因为当气井打开煤层时,井筒中仅有单相的水,也只能测试水相的压力。如果煤岩是气相润湿的,测试的水相压力 (p_w) 比煤层基质中的气相压力 (p_g) 大一个基质系统的毛管压力 (p_c) (图10)^[2]。

正是这个毛管压力,导致了采用水相压力作为初始压力时,煤层气则出现了欠平衡的吸附的假象(图10)。若用气相压力研究,煤层气的吸附仍为平衡吸附。当煤岩气相润湿时,初始条件下,割理-裂缝中仅有水相(图11a)。当排水降低煤层压力后,煤层中的水相压力下降导致了气-液界面弯曲度变缓,毛管压力不断降低(图11b)。当压力进一步降低,气-液界面处的流体张力不足以维持气-液界面变形,甲烷从基质中最大的毛管中突入割理系统(图11c)。

因此,如果煤岩是气相润湿的,由于毛管压力,用水相压力解释吸附状态时,出现了欠平衡吸附的假象。实际上,基质中的煤层气仍然处于平衡吸附状态,游离气与吸附气共存,临界解吸与基质中最大的毛管尺寸有关。在多数煤层气藏温度范围内 ($35 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$),气-水的界面张力大致在 $40 \sim 60 \text{ mN/m}$,基质的孔隙开度则在 $10 \sim 100 \text{ nm}$ 。根据毛管压力计算公式,取界面张力 50 mN/m ,可以计算不同润湿角(润湿强弱)以及不同毛管半径条件下的基质孔隙毛管压力数值(图12)。



a. 初始状态

b. 排水降压

c. 临界解吸

图11 气相赋存条件下的排水降压临界产气过程

Fig. 11 Process of water drainage and critical gas production under condition of gas storage

根据计算结果可知(图12),当润湿角 $\theta=100^\circ$ (弱亲气条件),煤岩基质10~100 nm孔径对应的毛管压力数值为0.208 3~2.083 0 MPa;而当润湿角 $\theta=110^\circ$ (弱亲气条件),煤岩基质10~100 nm孔径对应的毛管压力数值为0.410 4~4.104 0 MPa,毛管压力的数值与矿场生产中的临界压差较为吻合^[10,27]。

由此可见,气相润湿条件下的煤层气赋存模式可以合理地解释煤层气的圈闭条件、生产动态与临界解吸问题,但是气相润湿的条件与煤岩的润湿性实验结果相矛盾。

4.4 液相赋存模型(水相润湿)对生产动态的解释

如果煤岩亲水,那么煤层气有极大的可能,以液相吸附的形式赋存于煤岩中。由于,煤层气的液相吸附是一个溶解和吸附的耦合过程,虽然吸附不会出现欠平衡状态,但是溶解却可以存在欠饱和的状态^[2,22]。而溶解的欠饱和导致了临界解吸的现象(图13)。关于液相吸附的解吸模式,笔者在文献[2,

22,32]中已有详细论述,在此不再赘述。

综上可知,液相吸附模型也可以合理地解释煤层气的赋存条件、生产过程以及临界解吸问题。如果煤层气以液相吸附态赋存于煤层中,排采过程中的临界解吸现象是煤层气在地层水中溶解的欠饱和状态导致的,与液相吸附曲线无关。

5 结论与讨论

1) 多孔介质的小孔隙中的优先充填润湿相流体,割理—裂缝属于煤岩中的大孔隙,而基质中的孔隙为煤岩中的小孔隙。如果煤岩亲气,则基质孔隙中应当饱和甲烷,若煤岩亲水,那么基质孔隙中应饱和和地层水。

2) 如果煤岩亲气,在毛管压力的作用下,煤层气可以被割理中的水封闭在基质中,形成一种自封闭的特殊圈闭类型。当采用水相压力分析煤层的含气状态时,气藏表现出吸附欠平衡的假象。

3) 如果煤岩水相润湿,煤层气的液相吸附量可以形成可经济开发的气藏。煤层气在水中溶解的不饱和现象导致了生产过程中的临界解吸现象。

4) 然而,如果煤岩气相润湿,就与目前煤岩润湿性实验结果相矛盾;如果煤岩水相润湿,就与传统煤层气吸附理论相矛盾。这说明煤层气的吸附理论目前仍不能闭环,煤层气的赋存状态仍存在核心问题尚未解决,仍需进一步探索和研究。

5) 验证煤层气吸附方式的核心是明确煤岩中是否存在游离气,或是直接研究煤岩在不同压力下对甲烷和水体系的润湿性选择。

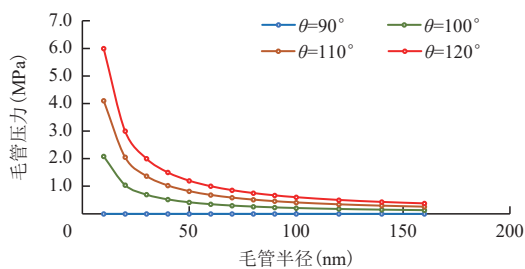
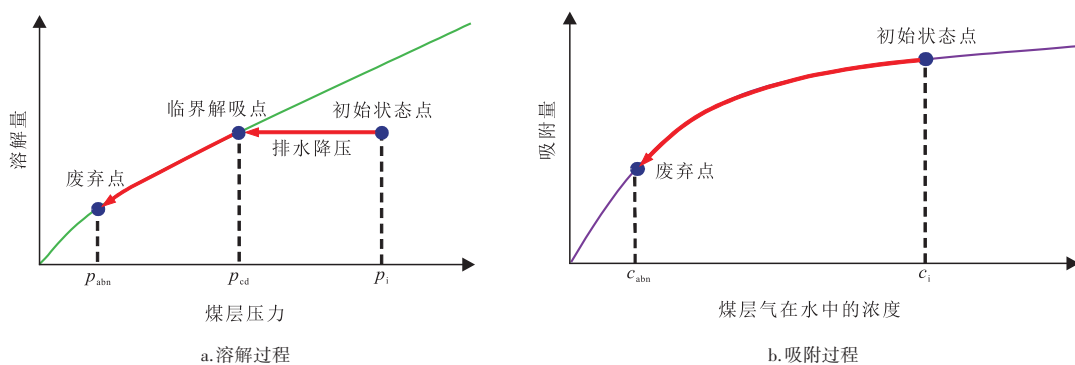


图12 气相赋存条件下的基质毛管压力数值
Fig. 12 Capillary pressure of coal matrix under condition of gas storage



注: p_{abn} 为气藏废弃压力,MPa; c_{abn} 为气藏废弃体积分数, m^3/m^3 ; c_i 为初始溶解体积分数, m^3/m^3 。

图13 液相吸附理论的临界解吸过程

Fig. 13 Explain of critical desorption process based on liquid phase adsorption

参考文献

- [1] 宋岩,李卓,姜振学,等.非常规油气地质研究进展与发展趋势[J].石油勘探与开发,2017,44(4):638-648.
SONG Yan, LI Zhuo, JIANG Zhenxue, et al. Progress and development trend of unconventional oil and gas geological research[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(4): 638-648.
- [2] 朱苏阳,彭小龙,张守仁,等.欠饱和煤层气藏中气体赋存状态的思考与讨论[C]//中国煤层气勘探开发与产业化发展战略—2019年煤层气学术研讨会论文集,2019:11-317.
ZHU Suyang, PENG Xiaolong, ZHANG Shouren, et al. Thoughts and discussion on storage state of undersaturated coalbed methane reservoirs[C]// China's Coalbed Methane Exploration and Development Technology and Industrialization Development Strategy--2019 Coalbed Methane Symposium Proceedings, 2019: 311-317.
- [3] 杨兆彪,李洋阳,秦勇,等.煤层气多层合采开发单元划分及有利区评价[J].石油勘探与开发,2019,46(3):559-568.
YANG Zhaobiao, LI Yangyang, QIN Yong, et al. Development unit division and favorable area evaluation for joint mining coalbed methane[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 559-568.
- [4] 王西贵,邹德永,杨立文,等.深层超深层煤层气保压取心工具设计[J].石油机械,2020,48(1):40-45.
WANG Xigui, ZOU Deyong, YANG Liwen, et al. Design of a Pressure-Preservation Coring Tool for Deep and Ultra-Deep Coalbed Methane Samples[J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(1): 40-45.
- [5] 康志勤,李翔,李伟,等.煤体结构与甲烷吸附/解吸规律相关性实验研究及启示[J].煤炭学报,2018,43(5):1400-1407.
KANG Zhiqin, LI Xiang, LI Wei, et al. Experimental investigation of methane adsorption / desorption behavior in coals with different coal-body structure and its revelation[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1400-1407.
- [6] 朱峰,郭智栋,陈世波,等.煤层气连续管排液采气一体化工艺研究与应用[J].石油机械,2021,49(1):118-123.
ZHU Feng, GUO Zhidong, CHEN Shibo, et al. Research and application of the integrated technology of liquid drainage and CBM production by coiled tubing[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(1): 118-123.
- [7] FENG Q H, ZHANG J Y, ZHANG X M, et al. Optimizing well placement in a coalbed methane reservoir using the particle swarm optimization algorithm[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 104: 34-45.
- [8] 罗平亚.关于大幅度提高我国煤层气井单井产量的探讨[J].天然气工业,2013,33(6):1-6.
LUO Pingya. A discussion on how to significantly improve the single-well productivity of CBM gas wells in China.[J]. Nature Gas Industry, 2013, 33(6): 1-6.
- [9] SEIDLE J. Fundamentals of coalbed methane reservoir engineering[M]. Tulsa: PennWell Books, 2011.
- [10] 村田逞途.煤的润湿性研究及其应用[M].北京:煤炭工业出版社,1992.
MURATA Takusen. The study and application of coal wettability[M]. Beijing: Geology Industry Press, 1992.
- [11] NIU C, XIA W, PENG Y. Analysis of coal wettability by inverse gas chromatography and its guidance for coal flotation[J]. Fuel, 2018, 228: 290-296.
- [12] 李娇阳,李凯琦.煤表面润湿性的影响因素[J].煤炭学报,2016,41(S2):448-453.
LI Jiaoyang, LI Kaiqi. Influence factors of coal surface wettability[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S2): 448-453.
- [13] 苏雪峰,刘岩,崔周旗,等.降压速率对沁水盆地南部高阶煤产气能力的影响[J].石油勘探与开发,2019,46(3):613-620.
SU Xuefeng, LIU Yan, CUI Zhouqi, et al. Influence of depressurization rate on gas production capacity of high-rank coal in the south of Qinshui Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 613-620.
- [14] 孟艳军,汤达祯,许浩,等.煤层气解吸阶段划分方法及其意义[J].石油勘探与开发,2014,41(5):612-617.
MENG Yanjun, TANG Dazhen, XU hao, et al. Division of coalbed methane desorption stages and its significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(5): 612-617.
- [15] 李传亮.油藏工程原理[M].第2版.北京:石油工业出版社,2011.
LI Chuanliang. Fundamentals of reservoir engineering[M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [16] 邹才能.非常规油气地质[M].第2版.北京:地质出版社,2013.
ZOU Caineng. Geology of unconventional oil and gas reservoirs [M]. 2nd ed. Beijing: The Geology Press, 2013.
- [17] 彭小龙,费冬,朱苏阳,等.煤层气吸附-解吸机理再认识[J].中国煤层气,2019,16(2):9-12.
PENG Xiaolong, FEI Dong, ZHU Suyang, et al. Reconsideration of coalbed methane adsorption-desorption mechanism[J]. China Coalbed Methane, 2019, 16(2): 9-12.
- [18] 傅献彩,沈文霞,姚天扬,等.物理化学[M].第5版.北京:高等教育出版社,2006.
FU Xiancai, SHEN Wenxia, YAO Tianyang, et al. Physical chemistry[M]. 5th ed. Beijing: Advance Education Press, 2006.
- [19] ATKINS P, DE PAULA J. Physical Chemistry[M]. 9th ed. Boca Raton: W.H. Freeman, 2009.
- [20] HIEMENZ P C, RAJAGOPALAN R. Principles of colloid and surface chemistry, revised and expanded[M]. 3rd ed. Boca Raton: Chemical Rubber Company Press, 1997.
- [21] 近藤精一,石川达雄,安部郁夫.吸附科学[M].第2版.北京:化学工业出版社,2006.
KONDO Seiichi, ISHIKAWA Tatsuo, ABE Ikuo. Science of adsorption[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [22] 朱苏阳.煤层气的吸附-解吸机理及应用研究[D].成都:西南石油大学,2018.
ZHU Suyang. The mechanism and application studies on coalbed methane adsorption and desorption[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [23] 朱苏阳,李传亮,杜志敏,等.也谈煤层气的液相吸附[J].新疆石油地质,2015,36(5):101-104.
ZHU Suyang, LI Chuanliang, DU Zhimin, et al. Discussion on liquid phase adsorption of coalbed methane[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(5): 101-104.

(下转第595页)

- [14] 欧成华,李士伦,杜建芬,等.煤层气吸附机理研究的发展与展望[J].西南石油学院学报,2003,25(5):34-38.
OU Chenghua, LI Shilun, DU Jianfen, et al. Development and prospect on adsorption mechanism of coalbed methane in coal seams[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2003, 25(5): 34-38.
- [15] 朱苏阳.煤层气的吸附-解吸机理及应用研究[D].成都:西南石油大学,2018.
ZHU Suyang. The mechanism and application studies on coalbed methane adsorption and desorption[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [16] 傅雪海,秦勇,韦重韬,等.QNDN1井煤层气排采的流体效应分析[J].天然气工业,2010,30(6):48-51.
FU Xuehai, QIN Yong, WEI Chongtao, et al. An analysis of fluid effect during coalbed methane drainage in the well QNDN1[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(6): 48-51.
- [17] 司庆红,朱炎铭,曹新款.煤层气井排采初期井底压降的计算方法[J].中国煤层气,2011,8(1):37-39.
SI Qinghong, ZHU Yanming, CAO Xinkuan. Calculation methods of well bottom-hole pressure drop in initial stage[J]. China Coalbed Methane, 2011, 8(1): 37-39.
- [18] 张永生,孙文卿,高学通.煤储层理论临界解吸压力与实际排采对比研究[J].山西焦煤科技,2011,35(1):4-7.
ZHANG Yongsheng, SUN Wenqing, GAO Xuetong. Comparative study between theoretical critical desorption pressure and actual drainage and mining state of coal reservoir[J]. Shanxi Coking Coal Science & Technology, 2011, 35(1): 4-7.
- [19] 彭泽阳.考虑煤层气孔隙水储量计算与临界解吸压力确定方法[D].北京:中国石油大学(北京),2019.
PENG Zeyang. Determination method for gas reserve and critical desorption pressure of coalbed methane by water effect [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [20] 李相方,蒲云超,孙长宇,等.煤层气与页岩气吸附/解吸的理论再认识[J].石油学报,2014,35(6):1113-1129.
LI Xiangfang, PU Yunchao, SUN Changyu, et al. Recognition of absorption/desorption theory in coalbed methane reservoir and shale gas reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(6): 1113-1129.
- [21] 彭小龙,费冬,朱苏阳,等.煤层气吸附-解吸机理再认识[J].中国煤层气,2019,16(2):9-12.
PENG Xiaolong, FEI Dong, ZHU Suyang, et al. Reconsideration of coalbed methane adsorption-desorption mechanism[J]. China Coalbed Methane, 2019, 16(2): 9-12.
- [22] 周琦忠.沁南樊庄区块煤层气井产气压力特征及其对产量的影响[D].徐州:中国矿业大学,2016.
ZHOU Qizhong. Characteristics of gas production pressure and its influence on productivity in Fanzhuang Block of Southern Qinshui Basin[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.

(编辑 徐佩)

(上接第588页)

- [24] 邵长奎.煤储层开发三相态含气量动态数值模拟研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
SHAO Changkui. Numerical simulation of three phase gas content dynamic changes in recovery of coal reservoirs[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [25] MOORE T A. Coalbed methane: A review[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 101(6): 36-81.
- [26] 杨兆彪,吴丛丛,张争光,等.煤层气产出水的地球化学意义——以贵州松河区块开发试验井为例[J].中国矿业大学学报,2017,46(4):830-837.
YANG Zhaobiao, WU Congcong, ZHANG Zhengguang, et al. Geochemical significance of CBM produced water: A case study of developed test wells in Songhe block of Guizhou Province[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2017, 46(4): 830-837.
- [27] 康园园,邵先杰,王彩凤.高一中煤阶煤层气井生产特征及影响因素分析——以樊庄、韩城矿区为例[J].石油勘探与开发,2012,39(6):728-732.
KANG Yuanyuan, SHAO Xianjie, WANG Caifeng. Production characteristics and affecting factors of high-mid rank coalbed methane wells: Taking Fanzhuang and Hancheng mining areas as examples[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 728-732.
- [28] 傅雪海,秦勇,韦重韬.煤层气地质学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2007.
FU Xuehai, QIN Yong, WEI Chongtao. Geology of coalbed methane[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2007.
- [29] CLARKSON C R, QANBARIF. Transient flow analysis and partial water relative permeability curve derivation for low permeability undersaturated coalbed methane wells[J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 152: 110-124.
- [30] KHAVARI-KHORASANI G, MICHELSEN J K. Coal bed gas content and gas undersaturation[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [31] 胡素明,李相方,胡小虎,等.欠饱和煤层气藏的生产动态预测方法[J].西南石油大学学报(自然科学版),2012,34(5):119-124.
HU Suming, LI Xiangfang, HU Xiaohu, et al. Production performance prediction method for undersaturated CBM reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2012, 34(5): 119-124.
- [32] 朱苏阳,李传亮,杜志敏,等.煤层气的复合解吸模式研究[J].中国矿业大学学报,2016,45(2):316-324.
ZHU Suyang, LI Chuanliang, DU Zhimin, et al. Compound desorption model of coalbed methane[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(2): 316-324.

(编辑 常燕)