

引用格式:张斯,彭小龙.欠饱和煤层气藏临界解吸压力计算方法[J].油气藏评价与开发,2022,12(4):589-595.

ZHANG Si, PENG Xiaolong. Calculation method of critical desorption pressure in undersaturated CBM reservoirs[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(4): 589-595.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.04.006

# 欠饱和煤层气藏临界解吸压力计算方法

张斯,彭小龙

(西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610500)

**摘要:**为了探讨欠饱和煤层气藏临界解吸压力的物理意义,基于煤层气藏赋存状态,介绍了目前已有的传统临界解吸压力计算方法、液相吸附理论的计算方法以及矿场统计算法,讨论了在煤岩气相湿润前提下的“欠饱和”现象的来源。在修正的气相吸附基础上,解释了临界解吸压力与基质孔隙毛管压力的关系,得到了新的临界解吸压力计算方法。通过对比4种方法在误差分析、理论完备性以及可操作性的优缺点,认为提出的新计算方法理论较为完备、可操作性强、计算简便,并在实例计算中得出了合乎实际生产范围内的结果。由此可得到在煤岩气相湿润前提下,煤层气吸附平衡且临界解吸现象可解释为储层压力与毛管压力之间作用的结果,改进的气相吸附理论与临界解吸压力新计算方法值得进一步研究。

**关键词:**煤层气;临界解吸压力;气相吸附;毛管压力;赋存方式

中图分类号:TE349

文献标识码:A

## Calculation method of critical desorption pressure in undersaturated CBM reservoirs

ZHANG Si, PENG Xiaolong

(State key laboratory of oil and gas reservoir geology and exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

**Abstract:** In order to investigate the physical meaning of critical desorption pressure in undersaturated CBM (coalbed methane) reservoirs, the traditional critical desorption pressure calculation method and the liquid phase adsorption theory commonly used in field are introduced based on the status of the reserves of CBM, and the origin of the “undersaturated” phenomenon under the premise of gas phase wet is discussed. On the basis of the modified gas phase adsorption, the relationship between the critical desorption pressure and the capillary pressure in matrix pores is explained, and a new calculation method of critical desorption pressure is obtained. By comparing the advantages and disadvantages of the four methods in error analysis, theoretical completeness and operability, it is considered that the new calculation method proposed is relatively complete in theory, has strong operability and is easy to calculate, and obtains a reasonable result in an example. It can be concluded that CBM adsorption equilibrium and critical desorption phenomenon can be interpreted as the result of the interaction between reservoir pressure and capillary pressure under the premise of coalbed gas phase wetting. The improved gas phase adsorption theory and the new calculation method of critical desorption pressure are worth the further study.

**Keywords:** CBM (coalbed methane); critical desorption pressure; gas phase adsorption; capillary pressure; storage state

矿井中瓦斯含量<sup>[1]</sup>及煤层气产气压力<sup>[2]</sup>的研究是从煤炭开采行业对于瓦斯突出相关的认识<sup>[3-5]</sup>开始建立。为了抽排出瓦斯以免造成损害,开始对煤层气的解吸规律<sup>[6-8]</sup>和开发利用<sup>[9-11]</sup>进行研究。在参考国

外的研究并结合现场开发的现象后,明确了煤层气的吸附形式以及相应的实验方法,基于经典的煤层气“欠饱和”气相吸附理论<sup>[12]</sup>并普遍简单地用Langmuir方程来进行表达。通过相应的吸附解吸实

收稿日期:2021-11-02。

第一作者简介:张斯(1995—),男,在读硕士研究生,从事油气田开发工程相关研究。地址:四川省成都市新都区新都大道8号西南石油大学国家重点实验室B404a,邮政编码:610500。E-mail: 854720901@qq.com

基金项目:国家科技重大专项“三气合采产层组合与接替方案优化及开发案优化与产能预测”(2016ZX05066004)。

验也逐渐认识到吸附解吸的不可逆性和不一致性<sup>[13]</sup>。而此前从吸附理论出发对煤层气临界解吸压力进行的研究不够深入。所以,在传统气相吸附理论的基础上,更进一步结合新的气相吸附理论提出对煤层气临界解吸压力的新计算思路,并与传统方法进行对比。

## 1 目前的计算方法

从煤层气产出机理的角度分析,目前公认的煤层气产出机理大致可分为解吸、扩散、渗流3个部分。如图1所示,多年来对煤层气吸附机理的研究<sup>[14]</sup>,可以把实际生产过程总结为降压、解吸、汇聚、产气这4个阶段。第一阶段为单相流动阶段,即只产出水的阶段。在这个阶段,煤层气尚未开始解吸,地层压力高于临界解吸压力,抽采井附近只有单相水流动且气相渗透率为零。事实上,第二阶段和第三阶段可以笼统地看作是一个部分,其中的区别在于,在第二阶段中只有非饱和流状态和单相流状态的流体,解吸出的气体溶解在水中以及在割理中形成孤立气泡,故而在近井区附近处于非饱和和流动状态,而在第三阶段中由于压力降到临界解吸压力之下,随着解吸出气体的增加、气相渗透率的增加,除了非饱和流状态、单相流状态还逐渐出现两相流的状态,所以第三阶段就可以看作是第二阶段和第四阶段之间的过渡过程。在第四阶段中,随着气相渗透率的不断增加,气泡相互连通形成连续的流动,这时主要以气水两相达西流动为主,当煤层内含水饱和度降到接近束缚水饱和度的时候,割理中主要为单相气体流动。

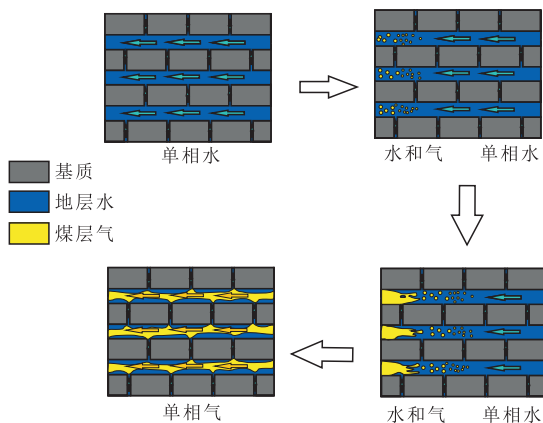


图1 煤层气不同开发阶段

Fig. 1 Different stages of development in coalbed methane

在临界解吸压力获取示意图(图2)中可清楚地看到,临界解吸压力可以利用定义通过等温吸附曲线获取,即根据实测含气量及原始地层压力,获得该储层状态在吸附曲线上所对应的点,则过点 $a$ 的 $x$ 轴和 $y$ 轴坐标的平行线与吸附曲线的交点即为储层的最大储气能力及储层的临界解吸压力。

对于煤层气在储层中的赋存状态,现在普遍的观点认为大量煤层气以物理吸附的状态吸附于有机质表面,服从Langmuir气相吸附规律,剩余的小部分以游离状态存在于孔隙中以及以溶解状态存在煤层的水中。煤层气生产实践表明,在气相吸附模型中,游离气体和吸附气体同时存在于系统的平衡过程中,而系统不可能有一个可以在固体的表面吸附所有的体相流体界面。因此,气相吸附是一种平衡吸附,根本没有“欠饱和”吸附的状态。不仅是气相吸附阶段,整个物理吸附过程是吸附相流体和体相流体之间的动态平衡,所有这些平衡吸附,都不存在欠饱和吸附的状态,所以该传统气相吸附理论不够完善,需要建立新的吸附模型。当煤层中只有吸附态和溶解态的甲烷也可能形成吸附关系,即液相吸附关系<sup>[15]</sup>。液相吸附是一种在溶液中的吸附,是一种由许多溶质和溶剂在固液界面上所富集的吸附过程。煤层气的形成和吸附都是在水下环境中进行的,煤层气的生产过程中也伴随着大量的产水<sup>[15]</sup>。同时,煤岩的湿润实验表明,大部分煤岩润湿性呈亲水性,这为煤层气在水中的溶解和液相吸附创造了有利条件。Langmuir液相吸附与气相吸附都是单分子层的物理吸附过程,均不存在欠平衡的吸附状态。液相吸附过程中,水中的煤层气浓度的变化即会导

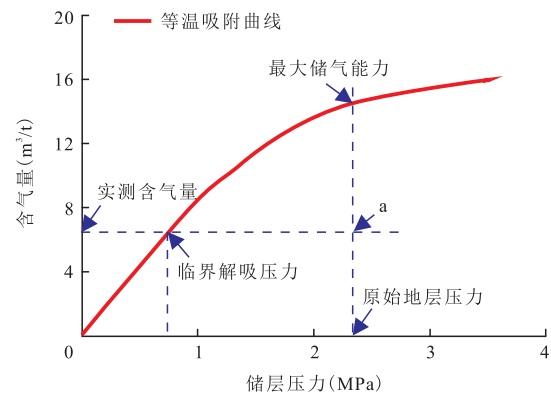


图2 临界解吸压力获取示意图

Fig. 2 Schematic diagram of obtaining critical desorption pressure

致液相吸附量的变化,并不存在临界解吸过程。然而,在初始压力( $p_i$ )条件下,煤层气在水中的溶解是欠饱和的,煤层气状态位于图3中的A点。状态点A可以分解为溶解状态点A(图3a)和吸附状态点A(图3b)。由于溶解状态的欠饱和,煤层的排水降压阶段中,压力的降低不会改变煤层气在地层水中的溶解量,而是将溶解状态从A点平移至B点(图3a)。此时,水中溶解的煤层气浓度( $C_i$ )没有变化,因此,煤层气的液相吸附状态点A位置不变(图3b)并且该点也记作吸附状态点B。当煤层的压力进一步降低,溶解状态点与溶解度曲线相交于点B后,压力下降到临界解吸压力 $p_{cd}$ ,地层水开始脱气,此后溶解状态点由点B沿着溶解度曲线向左移动(图3a)。此过程中,水中的煤层气浓度逐渐降低。与此同时,根据Langmuir液相吸附模型,煤层气液相吸附平衡沿着吸附曲线由点B向左移动(图3b)。煤层气的状态点B为临界解吸点(图3a),当储层压力降至废弃压力 $p_{abn}$ ,同时也是废弃浓度 $C_{abn}$ (废弃点C)时,气藏废弃后采气结束。

目前,现场得到临界解吸压力最常用的方法,即选取见气时或见气前一定时间(通常为一天)的地层压力作为临界解吸压力,该矿场统计方法确定时间时不够精确,产生误差较大,故还需对解吸时间点进行推测,傅雪海等<sup>[6]</sup>研究认为,当煤层气井的累计产量与游离气和水溶气的总量基本相当,并且日产气量开始明显升高时,可以认为煤层处于临界解吸状态。除此之外,还可参考理论临界解吸压力与实际排采产气压力对比研究得到的拟合公式<sup>[17-18]</sup>。除了上述3种方法以外,还有一种由见套压时井底流压反推临界解吸压力的方法<sup>[19]</sup>,这种方法不需要进行

矿场统计方法中对时间的推测,只需要在见套压时采集数据并进行计算即可。

## 2 计算新方法

### 2.1 改进的气相吸附理论

要得到计算临界解吸压力的新方法,首先要明确临界解吸压力的定义,所谓临界解吸压力即气体从煤基质表面解吸时对应的压力值,通俗的说法就是当储层开始产气时的储层压力。传统的气相吸附理论存在着很大的缺陷,煤层气欠饱和的赋存状态也与气相吸附模型中的游离气假设条件不统一,因此,不能直接用气相吸附理论以及“欠饱和”吸附状态来解释。并且固液界面吸附对压力不敏感<sup>[20]</sup>,压力是通过溶液的浓度起作用。对于实际情况中的气、液、固3相界面而言,目前的固液界面吸附解吸理论及方法具有一定的局限性。所以,在传统气相吸附理论的基础上,于2019年提出了一种对煤层气水动力圈闭的新解释。即与常规气藏圈闭情况相反,封闭机理将变为大孔隙封盖小孔隙中的润湿相。因此,煤层基质中的游离气可以被毛管压力“封闭”在基质中,被裂缝中的水相封闭<sup>[21]</sup>。

在上述的封闭机制中,认为抽象为不等径的微纳米毛管束在基质系统气相湿润,基质与裂缝界面处的气水界面形状如图4所示,且毛管压力指向裂缝方向。此时,毛管束中气相压力与毛管压力之和为水相压力,因为气相压力小于水相压力,裂缝系统中的地层水把一些游离气封闭在了基质的纳米孔隙中。由于煤岩的润湿性,基质中的游离气和气相吸附气被毛管压力与裂缝中的水封闭。随水压降低煤

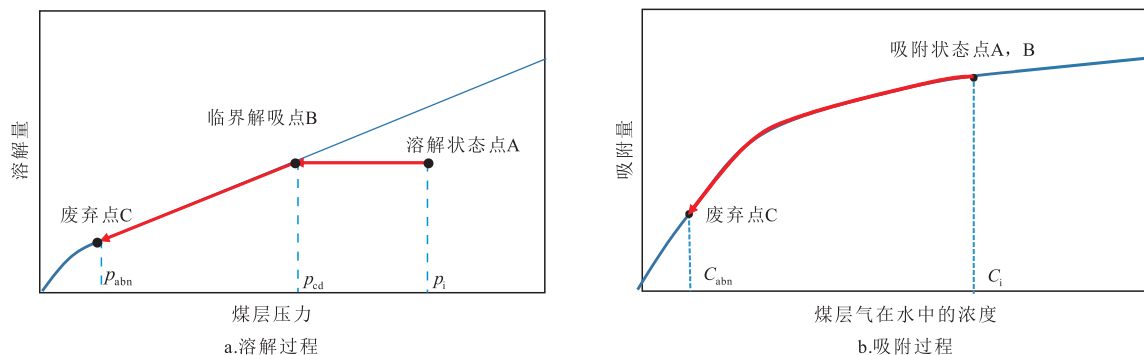


图3 液相吸附条件下对排水降压和临界解吸的解释

Fig. 3 Interpretation of drainage depressurization and critical desorption under liquid phase adsorption conditions

层气进入裂缝系统,在生产过程中表现出“欠饱和”的现象。

### 2.2 临界解吸与毛管压力

在此理论基础上,对新计算方法进行讨论。煤储层基质在气相润湿的前提下,煤层基质中水相压力比气相压力要大,且高出的数值即为毛管压力。

$$p_w = p_g + p_c \quad (1)$$

式中:  $p_w$  为水相压力,MPa;  $p_g$  为气相压力,MPa;  $p_c$  为毛管压力,MPa。

当煤层开始排水降压,煤层中水相压力不断下降,此时纳米孔隙中气液界面弯曲度不断变缓,也即润湿角不断减小,同时毛管压力也不断降低,而气相压力没有明显变化,如图5所示。随着煤层水相压力的不断下降,当气液界面处的界面张力不足以维持液面形变时,煤层气将由基质突入裂缝系统,气井开始产气。

此时,煤层中气相压力为水相压力与毛管力之和。毛管压力的大小如下所示:

$$p_c = \frac{2\sigma}{R} = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (2)$$

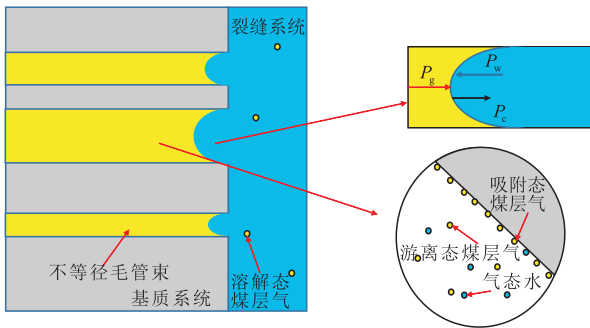


图4 水动力封闭机制

Fig. 4 Mechanism of hydraulic trap

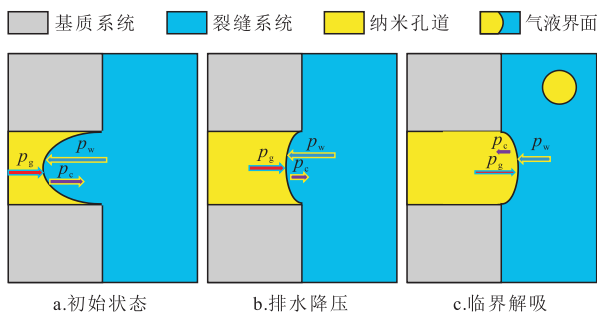


图5 排水降压临界产气过程

Fig. 5 Process of water drainage and critical gas production

将式(1)、式(2)联立,即可得到:

$$p_{cd} = P_g = P_w - \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (3)$$

式中:  $\sigma$  为油水界面张力, N/m;  $R$  为弯液面主曲率半径,  $\mu\text{m}$ ;  $\theta$  为润湿角,  $^\circ$ ;  $r$  为毛管半径,  $\mu\text{m}$ 。  $p_{cd}$  为临界解吸压力, MPa。

由临界解吸压力的定义结合以上推导,可得出临界解吸压力实际上是初始压力与基质孔隙中的最大孔隙毛管压力的差值的结论。其中,初始压力可由井下测量得到,界面张力可以从包含各种不同物质,在各种条件下的表面张力表中查得。而润湿角及毛管半径与毛管压力大小关系可见图6。

在毛管半径不变的情况下,随着润湿角的大小逐渐减小到  $90^\circ$ ,毛管压力随之逐渐减小至零,完全符合上述的推论。

## 3 结果与讨论

### 3.1 对比

对临界解吸压力的研究一般建立在气相吸附状态或液相吸附状态前提下。在假设为传统气相吸附前提下,主要通过实验得到的等温吸附曲线、初始储层压力与原始含气量。而在假设为液相吸附前提下的主要方法其实与在传统气相吸附条件下求取方法在本质上是一致的,即利用定义求取,液相吸附量与煤层气在水中的浓度相关,而煤层气在水中的溶解量则受储层压力的影响。具体计算需要煤层气在蒸馏水中的溶解曲线以及在实验中得到的煤层气液相吸附量与水中溶解度关系曲线。除了上述这2种较为经典的方法之外,还有一些从工程角度出发,比如用见套压时的井底流压反推得到临界解吸压力。该

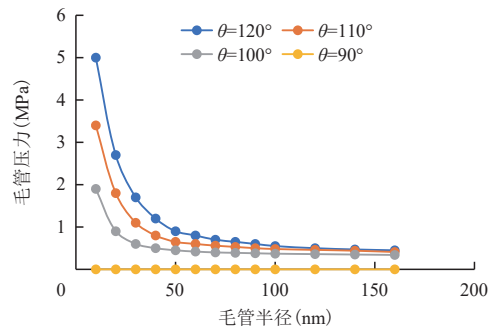


图6 润湿角、毛管半径与毛管压力关系

Fig. 6 Relationship among wetting angle, pore radius and capillary pressure

方法是在液相吸附的基础上,经过分析推导,得出了见套压时井底流压与临界解吸压力间的关系<sup>[19]</sup>。同样是建立在液相吸附的前提条件下的两个方法,后者在理想条件的假设中,明显主要着重于煤层气在微观的生产过程中在基质、割理中的流体相的状态,而前者从Langmuir吸附理论为根据,故设定的条件较为完善。

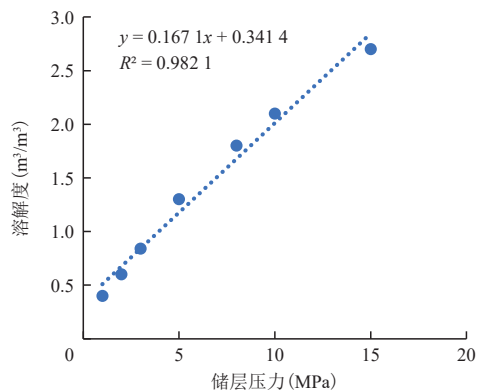
最后,本次研究讨论的新方法在改进的气相吸附理论的基础上,对临界解吸压力的计算进行了探讨。该方法计算临界解吸压力主要由孔隙最大孔径、气液界面润湿接触角、气液界面张力以及储层压力来进行求取。而本方法适用的条件与传统气相吸附理论前提下利用定义求取临界解吸压力的条件最大的区别在于,没有基质中液相含量较低的要求,因为起决定作用的基质孔隙相关的参数是孔径即孔隙本身的性质,润湿角、界面张力即气液间的共同作用,而与基质孔隙中气相或液相含量的多少无关。

上文阐述了4种方法的适用条件及所需参数情况。为了更全面清晰地展示4种方法的优缺点,通过分析总结如表1所示。

由表1可看出,研究从误差分析、理论完备程度

表1 4种方法的比较  
Table 1 Comparison of four methods

参数	传统气相吸附	液相吸附	井底流压反推	改进的气相吸附
误差	较多	一般	较多	一般
理论完备	一般	最好	一般	较好
可操作性	一般	一般	较差	最好



a. 煤层气溶解度曲线

分析和可操作性分析3个角度切入对4种方法进行了对比。

综上所述,传统的“欠饱和”煤层气吸附状态理论存在理论层面上的矛盾,对临界解吸压力的来源认识不清,在许多方面存在无法消去的误差,而本次研究从煤层气储层润湿性入手,讨论在气相润湿的前提之下煤层气在储层中的吸附状态,由对应的临界解吸压力的实质,得到临界解吸压力计算方法。以下将通过现场数据进行对比验证。

### 3.2 矿场对比

由平衡水等温吸附实验<sup>[22]</sup>结果参数得到储层压力—含气量关系(图7),可以看到含气量曲线与Langmuir等温吸附曲线有些许区别不过趋势是一致的,按照传统气相吸附理论定义法由储层原始压力6 MPa与所测得原始含气量21.52 m<sup>3</sup>/t可以得到对应的临界解吸压力为2.26 MPa。

由在液相吸附条件下的吸附解吸实验得到液相吸附量与储层压力,结合煤层气在蒸馏水中的溶解解

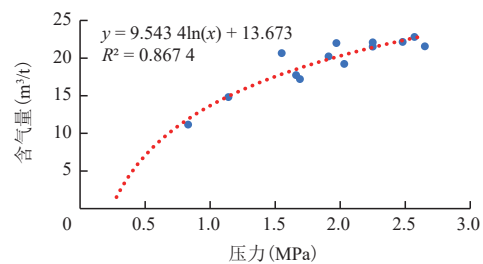
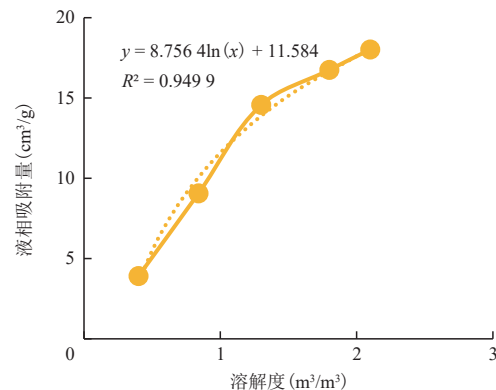


图7 储层压力—含气量关系

Fig. 7 Relationship between pressure and gas content



b. 液相吸附曲线

图8 煤层气溶解度曲线与液相吸附曲线

Fig. 8 CBM solubility curve and liquid phase adsorption curve

度曲线,可将压力转换为煤层气在水中的溶解度,因此可得到煤层气液相吸附量与水中溶解度关系(图8),由此可根据含气量与储层压力求出临界解吸压力。

由液相吸附实验得到液相吸附量为  $9.96 \text{ cm}^3/\text{g}$  就可从液相吸附关系中得到溶解度是  $0.83 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ,再由煤层气溶解度曲线得到相应的临界解吸压力,故可推出临界解吸压力为  $2.93 \text{ MPa}$ 。

本次研究改进的气相吸附计算临界解吸压力方法的实验参数从沁水盆地南部矿区高煤阶煤岩样品中选取,毛管压力如上分析所述,采用 Laplace 方程进行计算,其中润湿角为  $150^\circ$ ,界面张力为  $73.55 \text{ mN/m}$ ,孔径为  $80 \text{ nm}$ ,故最大孔隙毛管压力为  $1.58 \text{ MPa}$ 。在沁水盆地南部,当煤层埋深为  $700 \text{ m}$ 时,静水压力一般介于  $5.6 \sim 6.3 \text{ MPa}$ ,为方便计算故在此次研究中将储层压力设为  $6 \text{ MPa}$ ,临界解吸压力便可由此求得  $4.42 \text{ MPa}$ 。

## 4 结论

1) 煤层气在储层中不存在欠饱和吸附状态,不能直接用 Langmuir 气相吸附解释煤层气的吸附状态。根据在气相润湿前提下的水动力圈闭理论,提出了临界解吸压力的新计算方法。

2) 煤层气藏临界解吸压力的本质就是水相压力与孔隙毛管压力之间的作用结果,即初始压力与基质孔隙中的最大孔隙毛管压力的差值,并以此可对产气压力进行预判,确立精细排采制度。

### 参考文献

- [1] 秦勇,刘焕杰,范秉恒,等.山西南部上古生界煤层含气性研究Ⅲ.煤层气采收潜势分析[J].煤田地质与勘探,1998,26(1):28-32.  
QIN Yong, LIU Huanjie, FAN Bingheng, et al. The studies on gas-bearing characteristics of the upper paleozoic coal seams in the Southern Shanxi, China (Ⅲ). Recoverable potential of coalbed methane[J]. Coal Geology & Exploration, 1998, 26(1): 28-32.
- [2] 赵嵘.井下直接法测定煤层瓦斯压力数值模拟研究及工程指导[D].廊坊:华北科技学院,2017.  
ZHAO Rong. Numerical simulation research and engineering guidance of underground direct measurement of coal seam gas pressure[D]. Langfang: North China University of Science and Technology, 2017.
- [3] 钱鸣皋.介绍煤及瓦斯突出的性质与力学作用的现代学说[J].中国矿业大学学报,1955,1(3):92-100.  
QIAN Minggao. The modern theory of nature and mechanical action of coal and gas outburst is introduced[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1955, 1(3): 92-100.
- [4] 王凯,俞启香,蒋承林.钻孔瓦斯动态涌出的数值模拟研究[J].煤炭学报,2001,26(3):279-284.  
WANG Kai, YU Qixiang, JIANG Chenglin. Study of dynamic gas emission during boring process by using numerical simulation [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(3): 279-284.
- [5] 李晓伟.复杂地质条件下石门及井筒揭煤突出危险性快速预测研究[D].徐州:中国矿业大学,2009.  
LI Xiaowei. Study on rapid prediction of uncovering coal outburst risk in Shimen and shaft under complex geological conditions [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.
- [6] 邵军.关于煤屑瓦斯解吸经验公式的探讨[J].煤炭工程师,1989,16(3):21-27.  
SHAO Jun. Discussion on empirical formula of coal cinder gas desorption[J]. Coal Engineer, 1989, 16(3): 21-27.
- [7] 杨振侠.解吸法损失瓦斯量计算的探索[J].西部探矿工程,1991,3(2):33-36.  
YANG Zhenxia. Exploration of gas loss calculation by desorption method[J]. West-China Exploration Engineering, 1991, 3(2): 33-36.
- [8] 李传亮,朱苏阳,彭朝阳,等.煤层气井突然产气机理分析[J].岩性油气藏,2017,29(2):145-149.  
LI Chuanliang, ZHU Suyang, PENG Zhaoyang, et al. Mechanism of gas production rate outburst in coalbed methane wells[J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(2): 145-149.
- [9] 周昀涵,罗新荣,吴丽丽,等.井下钻屑解吸瓦斯时瓦斯损失量的探讨[J].煤矿安全,2012,43(4):109-111.  
ZHOU Yunhan, LUO Xinrong, WU Lili, et al. Discussion of gas loss amount when underground drilling cuttings desorbed gas [J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(4): 109-111.
- [10] 吴昊铿,彭小龙,朱苏阳,等.煤层气井煤粉成因、运移和防控研究进展[J].油气藏评价与开发,2020,10(4):70-80.  
WU Haoqiang, PENG Xiaolong, ZHU Suyang, et al. Research progress of coal fine formation, migration and control in CBM well[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(4): 70-80.
- [11] 肖翠,王伟,李鑫,等.基于现代产量递减分析的延川南煤层气田剩余气分布数值模拟研究[J].油气藏评价与开发,2020,10(4):25-31.  
XIAO Cui, WANG Wei, LI Xin, et al. Numerical simulation of residual gas distribution in CBM gas field of south Yanchuan based on advanced production data analysis[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(4): 25-31.
- [12] 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):319-327.  
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): 319-327.
- [13] 马东民.煤层气吸附解吸机理研究[D].西安:西安科技大学,2008.  
MA Dongmin. Research on the adsorption and desorption mechanism of coalbed methane[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2008.

- [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)