

文章编号:1009-9603(2020)02-0001-06

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2020.02.001

[编者按]吸附气资源量的评价依赖于等温累积吸附量和等温饱和吸附量的确定。近20年来,中国学者先后在《中国科学:B辑》《科学通报》等多家中文核心期刊上发表了相关论文,提出通过过剩吸附量和绝对吸附量计算页岩气储量等相关参数的计算方法。陈元千教授通过对比、分析和推证,认为利用这些关系式并不能求得所需的等温累积吸附量和等温饱和吸附量。现将其推导依据刊出供读者评议,以期通过学术争鸣的形式共同推进非常规油气藏资源评价理论和方法的发展。

## 评过剩吸附量和绝对吸附量关系式的不正确性

陈元千,傅礼兵,徐佳倩

(中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

**摘要:**页岩吸附气和煤层吸附气都是重要的非常规天然气资源。该资源的评价依赖于在不同压力下等温累积吸附量的计算和等温饱和吸附量的确定。不同压力下的等温累积吸附量,需要通过吸附仪的测试资料,利用有关的计算方法求得。基于1976年Adamson(阿达姆森)提出的固相对气相吸附质量的关系式是不确定的,因此,1998年Donohue和Aranovich引用Adamson的吸附关系式,并提出过剩吸附量和绝对吸附量及其关系式也是不正确的。周理等于2000年发表的文章,确认和引用了Donohue和Aranovich过剩吸附量和绝对吸附量及其关系式同样是不正确的。在2015至2018年间,俞凌杰等沿用周理等的过剩吸附量和绝对吸附量关系式,发表了多篇论文。通过本文的研究,认为过剩吸附量和绝对吸附量是两个缺少物理定义和使用价值的伪名词,两者之间的关系式也是不正确的。利用过剩吸附量和绝对吸附量的关系式根本得不到等温吸附量、等温累积吸附量和等温饱和吸附量。

**关键词:**页岩;煤层;吸附气;过剩吸附量;绝对吸附量;关系式;不正确性

中图分类号:TE31

文献标识码:A

## Comment on inaccuracy of relational expression of excess adsorption capacity and absolute adsorption capacity

CHEN Yuanqian, FU Libing, XU Jiaqian

(Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing City, 100083, China)

**Abstract:** The shale adsorption gas and coalbed adsorption gas are important unconventional natural gas resources. The evaluation of such resources depends on the calculation of the isothermal cumulative adsorption capacity and the determination of the isothermal saturated adsorption capacity under different pressures. The isothermal cumulative adsorption capacity under different pressures needs to be obtained by the relevant calculation methods based on the test data from the adsorption apparatus. Based on the uncertainty of Adamson's equation of solid-phase adsorption capacity presented in 1976, Donohue and Aranovich cited Adamson's adsorption equation, and proposed the excess and absolute adsorption capacities and their relational expression that were incorrect in 1998. The excess and absolute adsorption capacities and their relational expression proposed by Donohue and Aranovich are cited and confirmed in the paper published by ZHOU Li et al. in 2000, which were also incorrect. From 2015 to 2018, YU Lingjie and other relevant experts followed the relational expression of the excess adsorption capacity and absolute adsorption capacity proposed by ZHOU Li et al. and published many papers in some key Chinese journals. Through the tracking research and comparative analysis in this paper, it is concluded that the excess adsorption capacity and absolute adsorption capacity are two pseudo-words lack of physical definition and

收稿日期:2019-11-13。

作者简介:陈元千(1933—),男,河南兰考人,教授级高级工程师,1952年考入清华大学石油工程系,1956年毕业于北京石油学院钻采系,长期从事油气藏工程、油气田开发和油气储量评价工作。E-mail:525980269@qq.com。

use value, and the relational expression of the two is also incorrect. Using the relational expression of the excess adsorption capacity and absolute adsorption capacity, the isothermal adsorption capacity, the isothermal cumulative adsorption capacity, and the isothermal saturated adsorption capacity cannot be obtained at all.

**Key words:** shale; coal seam; adsorbed gas; excess adsorption capacity; absolute adsorption capacity; relationship formula; inaccuracy

页岩吸附气和煤层吸附气都是重要的非常规天然气资源。该类资源的评价依赖于在不同压力下等温累积吸附量的计算和等温饱和和吸附量的确定。不同压力下的等温累积吸附量,需要通过吸附仪的测试资料,利用有关的计算方法求得。文献[1-4]的研究结果表明,关于固相对气相的吸附问题,只有等温吸附量、等温累积吸附量和等温饱和和吸附量,以及描述吸附方程和计算吸附量的方法,根本不存在所谓的过剩吸附量和绝对吸附量。两者之间的关系式也是不正确的。笔者将通过对文献[5-17]提出的所谓过剩吸附量和绝对吸附量关系的评论,让读者直接地了解所谓的过剩吸附量和绝对吸附量关系式的由来及存在的问题,并进行了有关的对比性推导和质疑性评论。

## 1 过剩吸附量和绝对吸附量关系式的由来及存在的问题

### 1.1 Adamson 吸附关系式的不确定性

Adamson 于 1976 年发表了名为《表面物理化学》的专著<sup>[5]</sup>,其中的第 14 章为气体和蒸汽在固体上的吸附,在未给出任何理论推导的情况下,对于多层吸附,作者将固相吸附气相的质量表示为:

$$w = \sum \int_0^{\infty} (\rho_x - \rho_g) dx \quad (1)$$

应当指出,作者除对  $w$  说明是固相吸附气相的质量外,其余包括参数和数学符号均未给予注释。这正是 Adamson 吸附关系式不确定性的所在。当然,笔者也不便于作出任何解释。

### 1.2 Donohue 和 Aranovich 吸附关系式的不正确性

Donohue 和 Aranovich 于 1998 年基于 Adamson 的吸附关系式,直接将所谓的多层过剩吸附量<sup>[6]</sup>表示为:

$$\Gamma_{exc} = a_m \int_0^{\infty} (\rho - \rho_b) dy \quad (2)$$

式中: $\Gamma_{exc}$  为过剩吸附量,  $g$ ;  $a_m$  为单层吸附能力,但从(2)式分析应当为固相体积,  $cm^3$ ;  $\rho$  为距固体表面  $y$  距离的固相密度,  $g/cm^3$ ;  $y$  为吸附方向距离,  $cm$ ;  $\rho_b$  为固相本体(bulk)的密度,  $g/cm^3$ 。

对于单层吸附(monolayer adsorption), Donohue 和 Aranovich 由(2)式得到:

$$\Gamma_{exc} = a_m (\rho_1 - \rho_b) \quad (3)$$

式中: $\rho_1$  为单层固相吸附气相后的密度,  $g/cm^3$ 。

由(3)式看出,  $a_m \rho_1$  为固相吸附气相后的质量,  $a_m \rho_b$  为固相吸附气相前的质量,两者的差值为固相吸附气相的质量。Donohue 和 Aranovich 毫无理由将  $a_m$  与  $\rho_1$  的乘积,即固相吸附气相后的质量称为绝对吸附量。这正是绝对吸附量一词的由来。由此可以得到 Donohue 和 Aranovich 所谓的过剩吸附量与绝对吸附量的关系式为:

$$\Gamma_{exc} = \Gamma_{abs} - a_m \rho_b \quad (4)$$

式中: $\Gamma_{abs}$  为绝对吸附量,  $g$ 。

让人不解的是, Donohue 和 Aranovich 却突然将(3)式中固相吸附气相前的密度  $\rho_b$  错改为气相的密度  $\rho_g$ , 得:

$$\Gamma_{exc} = a_m (\rho_1 - \rho_g) \quad (5)$$

式中: $\rho_g$  为气相的密度,  $g/cm^3$ 。

已知表示固相累积吸附气相的等温兰氏方程<sup>[1]</sup>为:

$$Q = \frac{abp}{1 + bp} \quad (6)$$

式中: $Q$  为 1 克岩样等温累积吸附气相的体积量,  $cm^3/g$ ;  $a$  和  $b$  为兰氏方程常数;  $p$  为吸附压力, MPa。

由文献[3]可知,气相密度与气相压力可近似用如下的直线关系表示:

$$\rho_g = mp \quad (7)$$

式中: $m$  为斜率。

Donohue 和 Aranovich 提出,假定(5)式中的  $\rho_1$  和  $\rho_g$  可分别用(6)式和(7)式表示,因此,将(6)式和(7)式代入到(5)式得:

$$\Gamma_{exc} = a_m \left( \frac{abp}{1 + bp} - mp \right) \quad (8)$$

综上所述,由(3)式可以看出,固相吸附气相的质量是一个非常简单的关系式。但因 Donohue 和 Aranovich 将固相吸附气相的质量,称为所谓的过剩

吸附量,又将 $a_m \rho_1$ 称为所谓的绝对吸附量,因此,为(4)式增添了既难以理解,又感到无奈的神秘色彩。实事求是地讲,Donohue和Aranovich提出的(3)式至(8)式,是一些什么问题都解决不了的虚式,它不能用于求得实际需要的等温累积吸附量和等温饱和吸附量,也没有任何理论价值。尤其将 $\rho_b$ 错改为 $\rho_g$ 得到的(5)式,导致了在中国热引的所谓过剩吸附量和绝对吸附量的关系式全是完全不正确的。

## 2 中国学者对Donohue和Aranovich关系式的确认和引用

尽管Donohue和Aranovich提出的过剩吸附量和绝对吸附量及其关系式是不正确的,但仍被中国学者广泛的引用。首先是周理等于2000年提出了与Donohue和Aranovich相同的如下关系式<sup>[7]</sup>:

$$n_{\text{exc}} = v_a(\rho_a - \rho_g) \quad (9)$$

式中: $n_{\text{exc}}$ 为过剩吸附量,g; $v_a$ 为固相的体积, $\text{cm}^3$ ; $\rho_a$ 为固相吸附气相之后的密度, $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

将(9)式改写为:

$$n_{\text{exc}} = v_a \rho_a - v_a \rho_g \quad (10)$$

由(10)式看出, $v_a \rho_a$ 表示固相吸附气相后的质量, $v_a \rho_g$ 表示气相的质量,两者相减的数值是没有任何物理意义的。由于 $\rho_a \gg \rho_g$ , $v_a \rho_g$ 的作用可以忽略不计。

周理等引用Donohue和Aranovich提出的概念,将 $v_a$ 和 $\rho_a$ 的乘积 $v_a \rho_a$ 称为绝对吸附量。于是得到所谓的过剩吸附量与绝对吸附量的关系式为:

$$n_{\text{exc}} = n_{\text{abs}} - v_a \rho_g \quad (11)$$

式中: $n_{\text{abs}}$ 为绝对吸附量,g。

若将 $n_{\text{abs}} = v_a \rho_a$ 代入(11)式,得中国学者常用过剩吸附量和绝对吸附量的另一表达式为:

$$n_{\text{exc}} = n_{\text{abs}} \left( 1 - \frac{\rho_g}{\rho_a} \right) \quad (12)$$

当用兰氏方程的(6)式描述绝对吸附量时,由(11)式可得中国有关学者用于计算过剩吸附量不正确的表达式为:

$$n_{\text{exc}} = \frac{abp}{1 + bp} - v_a \rho_g \quad (13)$$

应当指出,在文献[10-13]中,作者将表示气体质量的 $v_a \rho_a$ 理解为气体的浮力是不正确的。浮力应当是质量乘以重力加速度,即 $v_a \rho_a g$ 。

在2015年至2018年间,中国的有关学者对利用称量法如何计算等温累积吸附量的方法,发表多篇有关过剩吸附量和绝对吸附量关系的文章<sup>[7-17]</sup>。现将这些关系式同Donohue和Aranovich的关系式以对比形式列于表1。由表1可以看出,不同作者在不同期刊上发表的关系式,只是符号不同,而内容完全相同。

## 3 对过剩吸附量和绝对吸附量关系式对比性推导和评论

在表1中列出了近20年来在中国广泛重视和引用的过剩吸附量和绝对吸附量的关系式。但应当指出,利用这些关系式,并不能求得等温吸附量、等温累积吸附量和等温饱和吸附量。为了拨乱反正,有必要进行如下的对比性推导和质疑性评论。

在文献[3-4]中,对于利用称重吸附仪测试的数据,确定 $m_c$ 克岩样累积吸附甲烷气的质量,可用如下质量平衡关系式表示为:

$$m_{ag} = m_i - m_{fg} \quad (14)$$

其中:

$$m_i = m_t - m_b - m_c \quad (15)$$

$$m_{fg} = v_w \rho_g \quad (16)$$

$$\rho_g = \frac{3.4945 \gamma_g p}{ZT} \quad (17)$$

式中: $m_{ag}$ 为在某稳定压力 $p$ 下 $m_c$ 克岩样累积吸附甲烷气的质量,g; $m_i$ 为在某稳定压力 $p$ 向下向测试桶累积注入(injecting)甲烷气的质量,g; $m_{fg}$ 为在某稳定压力 $p$ 下测试桶的空余体积(void volume)内自由甲烷气的质量,g; $m_t$ 为在某稳定压力 $p$ 下称量法测试的总质量,g; $m_b$ 为测试桶(barrel)的质量,g; $m_c$ 为测试岩样(core sample)的质量,g; $v_w$ 为测试桶内的空余体积(void volume), $\text{cm}^3$ ; $\rho_g$ 为空余体积内自由甲烷气的密度, $\text{g}/\text{cm}^3$ ; $\gamma_g$ 为甲烷气的相对密度,dim; $Z$ 为空余体积内自由甲烷气的偏差因子,dim; $T$ 为气体的绝对温度,K。

将甲烷气的相对密度 $\gamma_g=0.5538$ 代入(17)式得:

$$\rho_g = \frac{1.935p}{ZT} \quad (18)$$

根据气体分子物理学,任何气体的质量除以其分子量,等于该气体的摩尔量。因此,将(14)式除以甲烷气的分子量,得 $m_c$ 克岩样累积吸附甲烷气的

表1 不同作者发表的过剩吸附量与绝对吸附量关系式

Table1 Relational expressions of excess adsorption capacity and absolute adsorption capacity published by different authors

文章作者	发表期刊	发表时间	引用文献	过剩吸附量与绝对吸附量关系式
Donohue 和 Aranovich <sup>[6]</sup>	ACIS	1998	引用	$\Gamma_{exc} = a_m(\rho_1 - \rho_g)$ $\Gamma_{exc} = \Gamma_{abs} - a_m\rho_g$
周理等 <sup>[7]</sup>	中国科学:B辑	2000	未引用	$n_{exc} = v_a(\rho_a - \rho_g)$ $n_{exc} = n_{abs} - v_a\rho_g$
俞凌杰等 <sup>[8]</sup>	石油学报	2015	未引用	$M_{exc} = M_{abs} - v_a\rho_g$ $M_{exc} = M_{abs} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_a}\right)$
熊健等 <sup>[9]</sup>	石油学报	2015	未引用	$v_{exc} = v_{abs} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_a}\right)$
周尚文等 <sup>[10]</sup>	煤炭学报	2016	未引用	$m_{exc} = m_{abs} - v_a\rho_g$ $m_{exc} = m_{abs} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_a}\right)$
周尚文等 <sup>[11]</sup>	天然气工业	2016	未引用	同周尚文等 <sup>[10]</sup>
周尚文等 <sup>[12]</sup>	化工进展	2017	未引用	同周尚文等 <sup>[10]</sup>
周尚文等 <sup>[13]</sup>	科学通报	2017	未引用	同周尚文等 <sup>[10]</sup>
朱汉卿等 <sup>[14]</sup>	石油学报	2018	未引用	$m_{exc} = m_{abs} - v_a\rho_g$ $m_{exc} = m_{abs} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_a}\right)$
田文广等 <sup>[15]</sup>	天然气工业	2018	未引用	$m_{exc} = m_{abs} - v_{void}\rho_g$ $m_{exc} = m_{abs} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_a}\right)$
端祥刚等 <sup>[16]</sup>	石油勘探与开发	2018	未引用	$G_{exc} = G_{abs} - v_a\rho_g$ $G_{exc} = G_{abs} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_a}\right)$
方帆等 <sup>[17]</sup>	石油实验地质	2018	引用	$v_{exc} = v_{abs} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_a}\right)$

摩尔量为:

$$n_{ag} = \frac{m_i - m_{fg}}{M} \quad (19)$$

式中: $n_{ag}$ 为累积吸附甲烷气的摩尔量, mol;  $M$ 为甲烷气的分子量, g/mol。

再由(19)式除以测试岩样的质量  $m_c$ , 可得1克岩样累积吸附甲烷气的摩尔量为:

$$\Omega = \frac{m_i - m_{fg}}{m_c M} \quad (20)$$

式中: $\Omega$ 为1克岩样累积吸附甲烷气的摩尔量, mol/g。

根据 Avogadro(阿伏加德罗)定律<sup>[18]</sup>, 1摩尔的任何气体, 在绝对温度为 273.15 K 和绝对压力为 1 atm(0.101 MPa)的条件下, 占有的气体体积均为

22 414 cm<sup>3</sup>。由于气体体积与温度成正比,因此,1摩尔的任何气体在 293 K 和 0.101 MPa 的地面标准条件下应占有的体积均为 24 056 cm<sup>3</sup>。对此摩尔体积常数可称为 Avogadro 常数,并表示为  $C_A=24\ 056\text{ cm}^3/\text{mol}$ 。因此,1克岩样累积吸附甲烷气的体积量为:

$$Q = \frac{C_A(m_i - m_{fg})}{m_c M} \quad (21)$$

式中: $Q$ 为1克岩样累积吸附甲烷气的体积量,cm<sup>3</sup>/g或m<sup>3</sup>/t。

将甲烷气分子量  $M=16.043\text{ g/mol}$  和  $C_A$  值代入(21)式,计算1克岩样累积吸附甲烷气的体积量为:

$$Q = \frac{1\ 500(m_i - m_{fg})}{m_c} \quad (22)$$

由以上对比性推导可以看出,利用称重测试仪器测试的资料,通过(14)式可计算得到  $m_c$  克岩样累积吸附甲烷气的质量。尽管表1中所列出的关系式与(14)式形式相同,但内涵是完全不同的。难道可以将  $m_{ng}$  和  $m_i$  分别理解为过剩吸附量和绝对吸附量吗?这显然是不可以的。由本文的(14)式可以计算1克岩样累积吸附甲烷气的质量、摩尔量和体积量,而表1中所列的关系式只是一个虚构的而不可使用的关系式。试问,连什么是过剩吸附量和绝对吸附量的定义都没有,而且两者的含义都说不清楚,难道能得到正确的关系式吗?应用该关系式能求得需要的等温吸附量和等温累积吸附量,以及评价页岩和煤层吸附气资源量所需的等温饱和吸附量吗?答案是否定的。在参考文献[2-4]中已经提出了相应的计算方法。最后还想指出,Donohue 和 Aranovich,以及表1中的不同作者,用兰氏方程表示  $\rho_1$  值,以及用于计算绝对吸附量,是没有任何理论依据的,也只是想找一个解决问题的办法而已,但此办法事实上是行不通的。

## 4 结论

通过上述对比、分析和推证表明,Donohue 和 Aranovich 于 1998 年引用 Adamson 不正确的固相吸附气相的质量平衡关系式,在没有任何物理定义条件下,首次提出了过剩吸附量和绝对吸附量两个伪名词,以及两者之间的关系式。此关系式于 2000 年被周理等予以引用。其后,在 2015 年至 2018 年间,又被连续引用,先后在中国的一些重点期刊上发表了多篇文章,足见其影响之深刻。由对比性推

证表明,固相吸附气相质量的关系式,根本不是什么所谓的过剩吸附量和绝对吸附量问题。过剩吸附量和绝对吸附量是作者人为提出的两个伪名词,两者之间的关系式是牵强附会不正确的。从固相对气相的吸附机理而言,只存在等温吸附量、等温累积吸附量和等温饱和吸附量,根本不存在所谓的过剩吸附量和绝对吸附量。请问提出和引用过剩吸附量和绝对吸附量关系式的作者,对此做何考虑?应当指出,某些学者利用兰氏方程表示绝对吸附量是没有任何依据的。表1中所列的符号不同,而内容完全相同的过剩吸附量和绝对吸附量关系式是不正确的,也不能用于吸附理论的分析 and 实际上的应用。由 Donohue 和 Aranovich 提出并命名为过剩吸附量和绝对吸附量的关系式,是如此的简单,问题又是如此的突出。但经 Donohue 和 Aranovich 冠以非常规的名称后,使得关系式增添了浓浓的神秘色彩,让人既怀疑又无奈。其实它说明不了什么问题,也解决不了什么问题。但却让一些学者如此入迷和追求,值得令人思考。

## 参考文献

- [1] 陈元千,傅礼兵,郝明强.气体吸附方程和解吸方程的推导及应用[J].中国海上油气,2018,30(2):85-89.  
CHEN Yuanqian, FU Libing, HAO Mingqiang. Derivation and application of gas adsorption equation and desorption equation [J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(2): 85-89.
- [2] 陈元千,汤晨阳,陈奇.等温吸附量计算方法的推导及应用[J].油气地质与采收率,2018,25(6):56-62.  
CHEN Yuanqian, TANG Chenyang, CHEN Qi. Derivation and application of isothermal adsorption rate calculation method [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(6): 56-62.
- [3] 陈元千,刘浩洋.称重吸附仪计算等温吸附量方法的推导及应用[J].油气地质与采收率,2019,26(2):76-80.  
CHEN Yuanqian, LIU Haoyang. Derivation and application of method for calculating isothermal adsorption capacity by using weighing adsorption apparatus [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(2): 76-80.
- [4] 陈元千,刘浩洋,傅礼兵.计算页岩气等温累积吸附量的称重法[J].中国海上油气,2019,31(4):85-88.  
CHEN Yuanqian, LIU Haoyang, FU Libing. Weighing method for calculating the isothermal cumulative adsorption capacity of shale gas [J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(4): 85-88.
- [5] ADAMSON A W. Physical chemistry of surface [M]. 3rd ed. New York: Wiley-Inter-Science Publication, 1976: 565-576.
- [6] DONOHUE M D, ARANOVICH G L. Classification of Gibbs adsorption isotherms [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 1998: 137-152.
- [7] 周理,李明,周亚平.超临界甲烷在高表面活性炭上的吸附测

- 量及其理论分析[J].中国科学: B辑, 2000, 30(1): 49-56.  
ZHOU Li, LI Ming, ZHOU Yaping. Adsorption measurement and theoretical analysis of supercritical methane on high surface activated carbon[J]. Science in China: Series B, 2000, 30(1): 49-56.
- [8] 俞凌杰, 范明, 陈红宇, 等. 富有机质页岩高温高压重量法等温吸附实验[J]. 石油学报, 2015, 36(5): 557-563.  
YU Lingjie, FAN Ming, CHEN Hongyu, et al. Isothermal adsorption experiment of organic-rich shale under high temperature and pressure using gravimetric method[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(5): 557-563.
- [9] 熊健, 刘向君, 梁利喜, 等. 页岩气超临界吸附的 Dubinin-Astakhov 改进模型[J]. 石油学报, 2015, 36(7): 849-857.  
XIONG Jian, LIU Xiangjun, LIANG Lixi, et al. Improved Dubinin-Astakhov model for shale-gas supercritical adsorption [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(7): 849-857.
- [10] 周尚文, 薛华庆, 郭伟, 等. 基于重量法的页岩气超临界吸附特征实验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2 806-2 812.  
ZHOU Shangwen, XUE Huaqing, GUO Wei, et al. Supercritical isothermal adsorption characteristics of shale gas based on gravimetric method [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2 806-2 812.
- [11] 周尚文, 王红岩, 薛华庆, 等. 页岩过剩吸附量与绝对吸附量的差异及页岩气储量计算新方法[J]. 天然气工业, 2016, 36(11): 12-20.  
ZHOU Shangwen, WANG Hongyan, XUE Huaqing, et al. Difference between excess and absolute adsorption capacity of shale and a new shale gas reserve calculation method [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(11): 12-20.
- [12] 周尚文, 李奇, 薛华庆, 等. 页岩容量法和重量法等温吸附实验对比研究[J]. 化工进展, 2017, 36(5): 1 690-1 697.  
ZHOU Shangwen, LI Qi, XUE Huaqing, et al. Comparative study on the volumetric and gravimetric method for isothermal adsorption experiment of shale [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(5): 1 690-1 697.
- [13] 周尚文, 王红岩, 薛华庆, 等. 页岩气超临界吸附机理及模型[J]. 科学通报, 2017, 62(35): 4 189-4 200.  
ZHOU Shangwen, WANG Hongyan, XUE Huaqing, et al. Supercritical methane adsorption on shale gas: Mechanism and model [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(35): 4 189-4 200.
- [14] 朱汉卿, 贾爱林, 位云生, 等. 蜀南地区富有机质页岩孔隙结构及超临界甲烷吸附能力[J]. 石油学报, 2018, 39(4): 391-401.  
ZHU Hanqing, JIA Ailin, WEI Yunsheng, et al. Pore structure and supercritical methane sorption capacity of organic-rich shales in southern Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(4): 391-401.
- [15] 田文广, 邓泽, 王红岩, 等. 低吸附量煤岩和页岩等温吸附实验的负吸附原因[J]. 天然气工业, 2018, 38(6): 19-26.  
TIAN Wenguang, DENG Ze, WANG Hongyan, et al. Negative adsorption in the isotherm adsorption experiments of low-adsorption coal and shale [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(6): 19-26.
- [16] 端祥刚, 胡志明, 高树生, 等. 页岩高压等温吸附曲线及气井生产动态特征实验[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(1): 119-127.  
DUAN Xianggang, HU Zhiming, GAO Shusheng, et al. Shale high pressure isothermal adsorption curve and production dynamic experiments of gas well [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(1): 119-127.
- [17] 方帆, 孙冲, 舒向伟, 等. 页岩中甲烷等温吸附量计算问题及方法改进[J]. 石油实验地质, 2018, 40(1): 71-77, 89.  
FANG Fan, SUN Chong, SHU Xiangwei, et al. Problems of methane isothermal adsorption calculation in shale and method improvement [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(1): 71-77, 89.
- [18] 萨韦利耶夫依夫. 普通物理学(力学与分子物理学)[M]. 钟金城, 何伯珩, 译. 北京: 高等教育出版社, 1992.  
SAVELYER E V. General physics (Mechanics and molecular physics) [M]. ZHONG Jincheng, HE Boheng, trans. Beijing: Higher Education Press, 1992.

编辑 常迎梅