

等温吸附量方程常数的物理含义及 无因次吸附量方程

陈元千,刘浩洋,汤晨阳,干磊
(中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:LANGMUIR(兰格苗尔)于1918年发表的等温累积吸附量方程,描述了在等温条件下累积吸附量与吸附压力之间的关系。然而,应当指出,兰氏方程是利用甲烷气、氮气、一氧化碳气、二氧化碳气、氧气和氩气等气体,在由云母片制成的吸附仪上进行了大量等温吸附实验,在实验取得数据的基础上,提出的一个等温累积吸附量经验方程。该方程具有 a 和 b 两个常数。陈元千等于2018年发表了等温累积吸附量方程的推导结果。该方程也存在 A 和 B 两个常数。研究结果表明,陈氏和兰氏的等温累积吸附量方程的两个常数都具有重要的物理含义。陈氏方程的常数 A 和兰氏方程的常数 a 都表示样品的极限累积吸附量;陈氏方程的常数 B 和兰氏方程的常数 b 都表示等温瞬压吸附量递减率;陈氏方程的 AB 和兰氏方程的 ab 都表示样品的最大初始理论吸附量。同时,建立了陈氏和兰氏的等温无因次累积吸附量方程和等温无因次瞬压吸附量方程,并提出了确定等温饱和和吸附压力和等温饱和累积吸附量的方法。通过16个实例应用,发现陈氏方程和兰氏方程评价样品的极限累积吸附量基本一致;对于等温瞬压吸附量递减率和最大初始理论吸附量的评价,兰氏与陈氏的结果相差明显。但应当注意到,兰氏方程是一个经验方程,其可靠程度要比陈氏方程低。

关键词:等温;吸附量方程;方程常数;物理含义;无因次吸附量方程;饱和吸附量确定方法

中图分类号:TE31

文献标识码:A

Physical meaning of adsorption isotherm constant and dimensionless adsorption isotherm equation

CHEN Yuanqian, LIU Haoyang, TANG Chenyang, GAN Lei

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

Abstract: The adsorption isotherm equation published by Langmuir in 1918 describes the relationship between cumulative adsorption rate and adsorption pressure under isothermal condition. However, it should be noted that the Langmuir equation is an empirical equation of isothermal cumulative adsorption based on the experimental data from a large number of adsorption isotherm experiments by adsorption instrument (made by mica sheet) using methane (CH_4), nitrogen (N_2), carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO_2), oxygen (O_2), argon (Ar), and other gases. This equation has two constants, a and b . CHEN Yuanqian published the derivation of adsorption isotherm equation in 2018. There are also two constants A and B for this equation. The research results indicate that the two constants in the adsorption isotherm equations proposed by Langmuir and CHEN both have important physical meanings. The constant A of CHEN's equation and the constant a of Langmuir equation represent the limit of cumulative adsorption rate of the sample. The constant B of CHEN's equation and the constant b of Langmuir equation represent the decreasing rate of adsorption capacity. AB of CHEN's equation and ab of Langmuir equation represent the maximum of theoretical initial adsorption rate of the sample. Meanwhile, the dimensionless CHEN's and Langmuir adsorption isotherm equation and adsorption isotherm equation at instantaneous pressure were proposed, and a method for determining the isothermal saturated adsorption pressure and isothermal saturated cumulative

收稿日期:2019-03-01。

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。联系电话:(010)83595952, E-mail:525980269@qq.com。

adsorption capacity was proposed. The application of 16 cases shows that the limit of adsorption rate of samples evaluated by CHEN's equation and Langmuir equation was basically same. For evaluations of the decline rate of instantaneous pressure adsorption rate and the maximum theoretical initial adsorption capacity, the results of Langmuir equation were significantly different from those of CHEN's equation. However, it should be noted that Langmuir equation is empirical, and its reliability is lower than CHEN's equation.

Key words: isotherm; adsorption equation; equation constant; physical meaning; dimensionless adsorption equation; determination method of saturated adsorption

LANGMUIR(兰格苗尔)于1918年发表了著名的兰氏等温累积吸附量方程^[1],受到世人的重视和广泛应用。但应当指出,兰氏方程是一个具有两个常数的非线性经验方程。兰氏曾指出,方程的常数 a 和 b 是两个与气体物理性质和温度有关的常数。但他并不清楚 a 和 b 的实际物理含义。陈元千等于2018年发表了等温吸附量方程和解吸量方程的推导结果^[2]。同时,对兰氏方程进行了完整的理论推导,得到了兰氏的等温瞬压吸附量方程和瞬压解吸量方程。陈氏方程和兰氏方程都具有两个方程常数,通过推导,明确了方程常数的物理含义,并建立了具有广泛理论意义的无因次吸附方程。陈氏方程的常数 A 和兰氏方程的常数 a 都表示样品的极限累积吸附量;陈氏方程的常数 B 和兰氏方程的常数 b 都表示等温瞬压吸附量递减率;陈氏方程的 AB 和兰氏方程的 ab 都表示样品的最大初始理论吸附量。

1 等温吸附量方程常数的物理含义

当以表压表示压力时,陈元千等提出的等温累积吸附量方程和等温瞬压吸附量方程^[2]分别为:

$$v = A(1 - e^{-Bp}) \quad (1)$$

$$q = AB e^{-Bp} \quad (2)$$

当 $p \rightarrow \infty$ 时,由(1)式得陈氏方程的等温极限累积吸附量为:

$$v_{\text{Lim}} = A \quad (3)$$

由(3)式看出,等温极限累积吸附量等于常数 A 。由文献^[2]知,(1)式和(2)式中的 B 为等温瞬压吸附量递减率。

将(3)式代入(1)式得:

$$v = v_{\text{Lim}}(1 - e^{-Bp}) \quad (4)$$

由(4)式对压力求导得陈氏的等温瞬压吸附量方程为:

$$q = v_{\text{Lim}} B e^{-Bp} \quad (5)$$

当 $p = 0$ 时,由(5)式得 $p=0$ 时的最大初始理论

吸附量为:

$$q_{\text{max}} = Bv_{\text{Lim}} \quad (6)$$

再将(3)式代入(6)式,得陈氏的最大初始理论吸附量为:

$$q_{\text{max}} = AB \quad (7)$$

由(7)式看出,陈氏等温累积吸附量方程中常数 A 与 B 的乘积为陈氏最大初始理论吸附量。

兰氏等温累积吸附量和等温瞬压吸附量方程^[1-2]分别为:

$$v = \frac{abp}{1 + bp} \quad (8)$$

$$q = \frac{ab}{(1 + bp)^2} \quad (9)$$

将(8)式改为下式:

$$v = \frac{a}{1 + \frac{1}{bp}} \quad (10)$$

当 $p \rightarrow \infty$ 时,由(10)式得兰氏的等温极限累积吸附量为:

$$v_{\text{Lim}} = a \quad (11)$$

由(11)式看出,兰氏的等温极限累积吸附量等于 a 。结合(8)式、(9)式和(10)式可知, b 为等温瞬压吸附量递减率。

当 $p=0$ 时,由(9)式得兰氏的最大初始理论吸附量为:

$$q_{\text{max}} = ab \quad (12)$$

由(12)式看出,兰氏等温累积吸附量方程中常数 a 与 b 的乘积,等于 $p = 0$ 时的兰氏最大初始理论吸附量。

2 无因次等温吸附量方程的建立及应用

无因次等温吸附量方程是分析和评价样品对甲烷气吸附特点的重要表示方式。采用无因次吸附量方程,可以避免自然因素和人为因素对吸附分析的影响。笔者对吸附量方程2个常数物理含义的理解,为建立无因次吸附量方程提供了条件。

2.1 无因次等温吸附量方程的建立

为了建立无因次等温吸附量方程,需设定无因次等温累积吸附量和无因次吸附量2个无因次量,其表达式分别为:

$$v_D = \frac{v}{v_{Lim}} \quad (13)$$

$$q_D = \frac{q}{q_{max}} \quad (14)$$

基于(13)式和(14)式的无因次量可以分别得到陈氏和兰氏的无因次吸附压力为:

$$p_D = Bp \quad (15)$$

$$p_D = bp \quad (16)$$

将(1)式、(3)式和(15)式代入(13)式,得陈氏的无因次等温累积吸附量方程为:

$$v_D = 1 - e^{-p_D} \quad (17)$$

再将(2)式、(7)式和(15)式代入(14)式,得陈氏的无因次等温瞬压吸附量方程为:

$$q_D = e^{-p_D} \quad (18)$$

将(18)式代入(17)式,得陈氏的无因次等温累积吸附量与无因次等温瞬压吸附量的关系式为:

$$v_D = 1 - q_D \quad (19)$$

将(8)式、(11)式和(16)式代入(13)式,得兰氏的无因次等温累积吸附量与无因次吸附压力的关系式为:

$$v_D = \frac{p_D}{1 + p_D} \quad (20)$$

再将(9)式、(12)式和(16)式代入(14)式,得兰氏的无因次等温瞬压吸附量与无因次吸附压力的关系式为:

$$q_D = \frac{1}{(1 + p_D)^2} \quad (21)$$

给定不同的 p_D 值,由(17)式和(18)式,以及由(20)式和(21)式计算得到的陈氏和兰氏的无因次等温吸附量数据绘于图1。由图1可以看出,陈氏曲

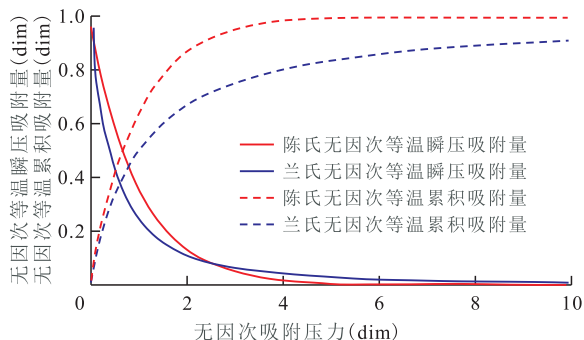


图1 陈氏和兰氏的无因次等温吸附量曲线

Fig.1 Dimensionless adsorption isotherm curves of Chen's and Langmuir equations

线与兰氏曲线存在一定的差异。这是两种方程建立的基础不同所致。陈氏方程是经过理论推导得到的方程,而兰氏方程则为经验方程。

2.2 无因次等温吸附量方程的应用

若设 p_s 为等温饱和吸附压力,那么,由(15)式和(16)式可得陈氏和兰氏的无因次等温饱和和吸附压力分别为:

$$p_{DS} = Bp_s \quad (22)$$

$$p_{DS} = bp_s \quad (23)$$

由(17)式和(20)式可得陈氏和兰氏的无因次等温饱和和累积吸附量分别为:

$$v_{DS} = 1 - e^{-p_{DS}} \quad (24)$$

$$v_{DS} = \frac{p_{DS}}{1 + p_{DS}} \quad (25)$$

陈氏和兰氏的等温饱和和累积吸附量与无因次饱和和吸附压力的关系式分别为:

$$v_s = A(1 - e^{-p_{DS}}) \quad (26)$$

$$v_s = \frac{ap_{DS}}{1 + p_{DS}} \quad (27)$$

3 应用举例

3.1 实例的原始基础资料

对MAVOR等提供的美国3个产煤盆地的3个地层的16个样品^[3]进行注入甲烷气的等温吸附实验,其地质基础资料如表1所示。

表1 16个样品的地质基础资料
Table1 Basic geological data of 16 samples

编号	盆地	地层	井号	深度(m)	温度(°C)
1	Powder R.	Ft.Union	FG29-1	152.44	21.13
2	Powder R.	Ft.Union	FG29-1	152.44	21.13
3	Powder R.	Ft.Union	Bullseye1	349.09	22.24
4	San Juan	Fruitland	S.Ute36-1	744.21	51.71
5	San Juan	Fruitland	S.Ute36-1	744.21	51.71
6	San Juan	Fruitland	S.Ute36-1	744.21	51.71
7	San Juan	Fruitland	S.Ute36-1	744.21	51.71
8	San Juan	Fruitland	Ham3	878.05	46.15
9	San Juan	Fruitland	Ham3	878.05	46.15
10	San Juan	Fruitland	Ham3	725.61	46.15
11	San Juan	Fruitland	Ham3	816.16	46.15
12	San Juan	Fruitland	NEBU403	928.35	43.37
13	San Juan	Fruitland	Co32-79	841.46	46.15
14	San Juan	Fruitland	Co32779	853.35	46.15
15	Appalachian	Pennsylvanian	USM1	267.07	25.02
16	Appalachian	Pennsylvanian	USM1	287.5	25.02

由16个样品等温吸附实验取得的吸附压力和累积吸附量(表2)可以看出:在吸附实验开始时,最低和最高的吸附压力分别为0.10和1.28 MPa;最低和最高累积吸附量分别为0.33和8.65 m³/t。在吸附

实验结束时,最低和最高的吸附压力分别为2.75和14.30 MPa;最低和最高的累积吸附量分别为2.00和36.69 m³/t。利用表2中的吸附量数据,绘制等温累积吸附量曲线。由图2可以看出,样品的等温累积

表2 16个样品等温吸附实验的原始数据
Table2 Initial data for adsorption isotherm experiments of 16 samples

样品 编号	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		
	<i>p</i>	<i>v</i>	<i>p</i>	<i>v</i>	<i>p</i>	<i>v</i>	<i>p</i>	<i>v</i>	<i>p</i>	<i>v</i>	<i>p</i>	<i>v</i>	<i>p</i>	<i>v</i>	<i>p</i>	<i>v</i>	<i>p</i>	<i>v</i>	<i>p</i>	<i>v</i>	<i>p</i>	<i>v</i>	
1	0.28	0.60	0.73	1.57	1.03	2.16	1.41	3.02	1.84	3.76	2.88	5.78	5.52	8.60	7.10	9.20							
2	0.10	0.71	0.26	1.80	0.67	3.94	0.99	5.22	1.35	6.41	2.63	9.16	5.40	11.92	7.07	12.79							
3	0.41	0.50	0.72	0.73	1.42	1.20	2.75	2.00															
4	0.21	2.19	0.28	3.44	0.61	4.52	1.35	7.35	2.82	10.65	5.47	13.39	11.22	14.83	13.80	15.99							
5	0.11	0.33	0.25	1.07	0.56	2.71	1.28	4.31	2.68	7.67	6.44	11.54	10.12	13.06	13.38	14.27							
6	0.18	7.58	0.34	15.82	0.66	20.51	1.28	25.31	2.66	30.33	5.47	34.08	10.90	35.71	13.96	36.69							
7	0.19	1.94	0.46	3.27	0.66	3.96	2.84	9.62	5.45	11.91	10.83	14.30	13.79	15.40									
8	0.10	1.25	0.26	2.31	0.56	3.87	1.39	5.39	2.71	8.25	5.63	11.48	12.12	13.48	14.30	14.00							
9	0.10	1.50	0.24	3.00	0.50	4.57	1.47	8.53	2.77	12.89	5.36	16.36	11.77	21.28	13.89	22.02							
10	0.59	3.14	0.89	4.29	1.43	5.84	2.12	7.41	3.46	9.58	3.50	9.39	5.23	10.90	6.94	11.86	7.27	11.84	11.48	12.88	11.48	12.77	
11	0.52	2.18	0.84	3.21	1.41	4.52	1.52	4.96	2.10	5.84	3.47	7.51	3.50	7.57	5.21	8.83	6.90	9.61	7.64	9.64			
12	0.58	3.42	0.90	4.72	1.43	6.44	1.50	6.50	3.47	9.92	3.52	10.14	5.30	11.70	6.94	12.48	7.01	12.56	11.47	13.43			
13	1.28	4.64	2.65	6.74	5.41	8.67	8.19	9.22	11.01	10.06													
14	1.09	4.41	1.28	5.18	1.81	6.05	2.66	7.69	4.22	9.15	5.42	10.10	8.21	11.15	11.07	11.80	12.56	11.89	13.70	11.86			
15	0.59	8.15	0.89	10.01	1.12	10.68	1.42	12.21	2.10	14.10	2.87	15.23	3.46	16.36	4.15	17.06	5.55	17.95	6.81	18.40	6.93	18.46	
16	0.61	8.65	0.90	10.55	1.08	10.98	1.42	12.81	2.10	14.77	2.80	16.11	3.48	17.13	4.20	17.64	5.55	18.77	6.82	19.22	6.94	19.28	

注:*p*的单位为MPa;*v*的单位为m³/t。

吸附量曲线符合陈氏和兰氏方程描述的特征。

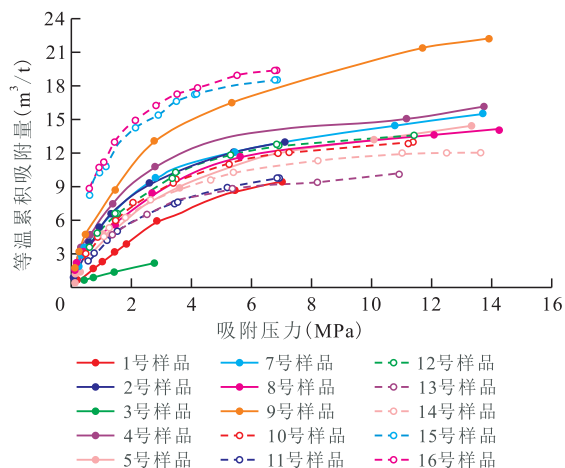


图2 15个样品的等温累积吸附量曲线

Fig.2 Cumulative adsorption isotherm curves of 15 samples

3.2 16个样品的评价结果

利用陈氏和兰氏方程对16个样品进行评价,得到的等温极限累积吸附量(*v_{lim}*)、等温瞬压吸附量递减率(*D*)(其值等于*B*)和最大初始理论吸附量(*q_{max}*)如表3所示,并将数据分别绘于图3至图5上。结果

表3 16个样品吸附实验评价结果

Table3 Experimental evaluation results of 16 samples

样品 编号	陈 氏 方 程				兰 氏 方 程			
	<i>v_{lim}</i> (m ³ /t)	<i>D</i> (MPa ⁻¹)	<i>q_{max}</i> (m ³ /t)	相关 系数	<i>v_{lim}</i> (m ³ /t)	<i>D</i> (MPa ⁻¹)	<i>q_{max}</i> (m ³ /t)	相关 系数
1	10.90	0.27	2.96	0.997 8	22.08	0.11	2.40	0.926 1
2	13.34	0.45	5.98	0.996 6	16.72	0.46	7.69	1.000 0
3	2.88	0.44	1.27	0.995 6	3.82	0.35	1.34	0.931 1
4	16.33	0.27	4.34	0.969 3	15.78	0.83	13.09	0.949 1
5	15.03	0.22	3.31	0.995 2	16.95	0.28	4.75	0.883 3
6	36.76	0.42	15.53	0.949 4	37.47	1.73	64.96	0.962 9
7	15.92	0.24	3.82	0.986 8	15.69	0.63	9.90	0.961 1
8	14.30	0.26	3.76	0.990 7	13.13	0.87	11.41	0.925 6
9	22.68	0.25	5.68	0.995 5	21.66	0.64	13.83	0.947 5
10	13.09	0.35	4.54	0.994 0	15.66	0.43	6.67	0.998 2
11	10.28	0.40	4.12	0.997 7	13.29	0.38	5.02	0.998 5
12	13.60	0.38	5.18	0.997 3	16.35	0.45	7.41	0.998 4
13	10.34	0.32	3.31	0.975 3	11.68	0.51	6.01	0.997 2
14	12.01	0.35	4.18	0.992 6	14.18	0.43	6.10	0.995 7
15	18.66	0.64	11.93	0.988 1	20.85	1.03	21.39	0.993 1
16	19.49	0.63	12.35	0.990 2	21.80	1.03	22.40	0.994 2

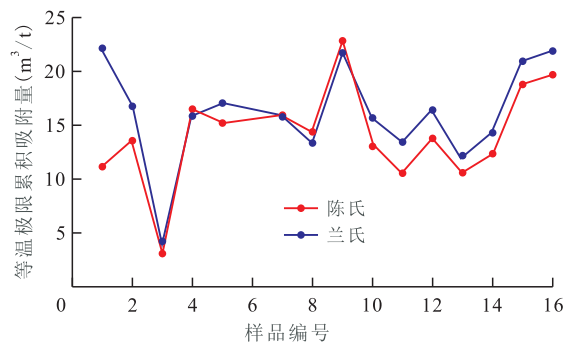


图3 15个样品的等温极限累积吸附量对比

Fig.3 Comparison of the limit of cumulative adsorption capacity of 15 samples

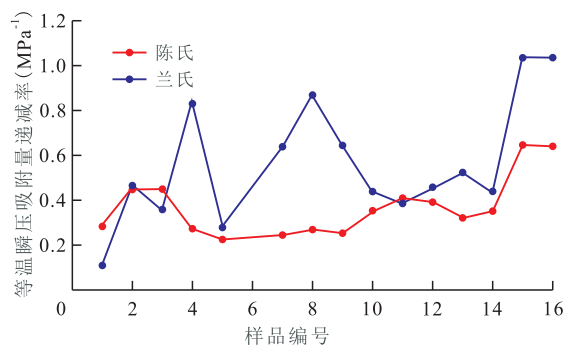


图4 15个样品的等温瞬压吸附量递减率对比

Fig.4 Comparison of D values of 15 samples

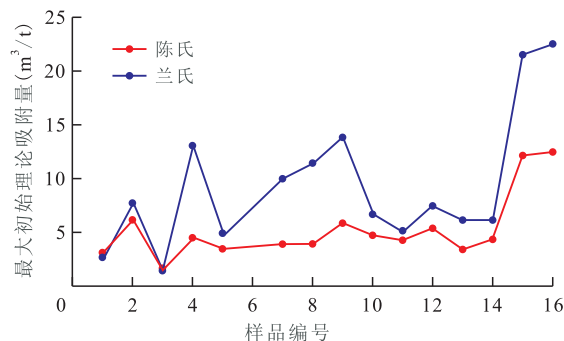


图5 15个样品的最大初始理论吸附量对比

Fig.5 Comparison of q_{max} of 15 samples

表明:陈氏和兰氏的等温极限累积吸附量基本一致(图3);而陈氏与兰氏的等温瞬压吸附量递减率和最大初始理论吸附量评价结果差异明显(图4,图5),陈氏的评价结果比较稳定,而兰氏评价结果变化非常明显,个别的 D 值甚至大于1.0。

3.3 陈氏和兰氏方程预测结果的对比

根据表2中11号样品的数据,分别利用陈氏和兰氏方程计算的等温瞬压吸附量和等温累积吸附量绘于图6。由图6可以看出,陈氏与兰氏方程预测的结果具有很好的一致性。因此,两者可以起到互相验证的作用。

3.4 等温饱和吸附量的确定

正如前述,等温饱和吸附量是评价页岩吸附气

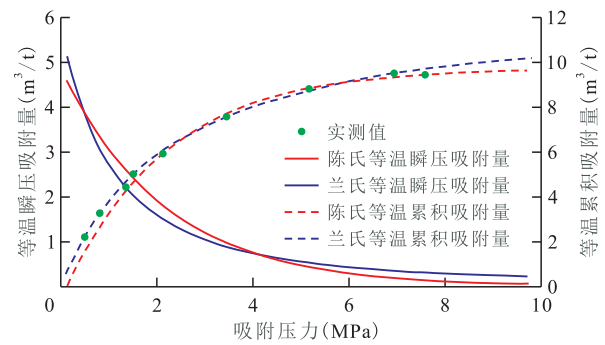


图6 陈氏和兰氏方程的预测曲线对比

Fig.6 Comparison of the predictions of CHEN's and Langmuir equation

和煤层吸附气资源量的重要参数。因此,如何确定等温饱和吸附量是一项重要的工作。假定页岩气和煤层气的等温饱和吸附压力等于岩层的静水柱压力为:

$$p_s = 0.01\rho_w H \quad (28)$$

当 $\rho_w = 1$ 时,(28)式可写为:

$$p_s = 0.01H \quad (29)$$

由表1可以查到11号样品的埋深为816.16 m。将此值代入(29)式得等温饱和和吸附压力为:

$$p_s = 0.01 \times 816.16 \approx 8.16 \text{ MPa} \quad (30)$$

再将 p_s 值和文献[2]中求得陈氏方程中的 $A=9.778$ 和 $B=0.4738$ 代入(1)式,得陈氏的等温饱和和累积吸附量为:

$$v_s = 9.778(1 - e^{-0.4738 \times 8.16}) = 9.57 \text{ m}^3/\text{t} \quad (31)$$

再将 p_s 值和文献[2]中求得的兰氏方程中的 $a=12.61$ 和 $b=0.4464$ 代入(8)式,得兰氏的等温饱和和累积吸附量为:

$$v_s = \frac{12.61 \times 0.4464 \times 8.16}{1 + 0.4464 \times 8.16} = 9.89 \text{ m}^3/\text{t} \quad (32)$$

将 B 和 p_s 值代入(22)式,得陈氏的无因次等温饱和和吸附压力为:

$$p_{DS} = 0.4738 \times 8.16 = 3.8662 \quad (33)$$

再将 p_{DS} 和 A 值代入(26)式,得陈氏的等温饱和和累积吸附量为:

$$v_s = 9.778(1 - e^{-3.8662}) = 9.57 \text{ m}^3/\text{t} \quad (34)$$

将 b 和 p_s 值代入(23)式,得兰氏的无因次等温饱和和吸附压力为:

$$p_{DS} = 0.4464 \times 8.16 = 3.6426 \quad (35)$$

再将 p_{DS} 和 a 值代入(27)式,得兰氏的等温饱和和累积吸附量为:

$$v_s = \frac{12.61 \times 3.6426}{1 + 3.6426} = 9.89 \text{ m}^3/\text{t} \quad (36)$$

上述计算结果表明,无论是解析式或是无因次

法,陈氏方程和兰氏方程预测的等温累积吸附量基本相同。

4 结论

基于文献[2]的研究成果,经过理论推导得到陈氏和兰氏方程2个常数的物理含义,建立了无因次等温吸附量方程;提出了确定饱和吸附压力和饱和吸附量的方法。这为页岩气和煤层气吸附量资源的评价提供了重要参数。方程的应用结果表明,陈氏等温吸附量方程与兰氏等温吸附量方程具有很好的一致性。然而,兰氏的等温累积吸附量方程是一个经验方程,在理论上不如陈氏方程可靠完善。

符号解释

v ——1克岩样等温累积吸附量, m^3/t ; A, B ——陈氏等温吸附量方程常数; p ——吸附压力, MPa; q ——1克岩样等温瞬压吸附量, m^3/t ; v_{lim} ——1克岩样等温极限累积吸附量, m^3 ;

$t; a, b$ ——兰氏等温吸附量方程常数; v_D ——1克岩样无因次等温累积吸附量, dim ; q_D ——1克岩样无因次等温瞬压吸附量, dim ; p_D ——无因次吸附压力, dim ; p_S ——等温饱和吸附压力, MPa; p_{DS} ——无因次等温饱和吸附压力, dim ; v_{DS} ——无因次等温饱和和累积吸附量, dim ; v_S ——1克岩样等温饱和和累积吸附量, m^3/t ; D ——等温瞬压吸附量递减率, MPa^{-1} ; ρ_w ——水的密度, g/cm^3 ; H ——岩样的地层埋深, m 。

参考文献

[1] LANGMUIR I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum[J]. Journal of the American Chemical Society, 1918, 40(9): 1361-1402.

[2] 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.

[3] MAVOR M J, OWEN L B, PRAT T J. Measurement and evaluation of coal sorption isotherm data[R]. SPE 20728, 1990.

编辑 常迎梅

本文作者寄语

我想借此机会,对多年来一直关心、支持我的《油气地质与采收率》编辑部的朋友们,表示衷心的感谢和诚挚的问候!并以五首不成诗意的心得体会,作为本人学术生涯的感悟之语!

(一)
 一生科研画句号,
 忘我拼搏情难消,
 八十六岁闪到来,
 成败得失任评道。

(二)
 一生科研画句号,
 享受沉静苦中熬,
 诚然激情依旧在,
 怎奈黄昏近头绕。

(三)
 一生科研画句号,
 年事已高病来到,
 眼疾之痛堪忧患,
 焦虑强迫病困扰。

(四)
 一生科研画句号,
 难舍难离情义高,
 夜深人静孤灯闪,
 问君为何不服老。

(五)
 一生科研画句号,
 追求事业不酬劳,
 无怨无悔终一生,
 愧对家人心知道。

陈元千
 2019.6.26
 陈元千