

Experimental Research on Isobaric Adsorption of CBM

Dongmin Ma^{1,2}, Tian Mu¹, Nan Dai¹, Qian Li¹, Hailong Xiangli³, Fu Yang², Qingqing Li¹, Qian He¹, Chenyang Zhang¹

¹Xi'an University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi

²Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Land and Resources, Xi'an Shaanxi

³Dafosi Mineral Company, Binxian Shaanxi

Email: mdm6757@126.com

Received: Jan. 19th, 2018; accepted: Feb. 3rd, 2018; published: Feb. 23rd, 2018

Abstract

To determine the influence of temperature on the adsorption capacity of coalbed methane, samples are collected from the long flame coal in Coal Seam 4 at Dafosi Coal Mine in Binchang, coking coal in Coal Seam 11 at Shanggaozhai exploration area in Jiaxian and anthracite in coal seam 3 at east wing of Sihe Coal Mine in Jincheng. They are prepared as the air-dry basis and equilibrium water samples to make isothermal adsorption and desorption experiments at 25°C, 30°C, 35°C, 40°C and 45°C. The results showed that the adsorption capacity of air-dry basis was larger than that of equilibrium water samples at the same temperature. Through fitting and analyzing the experimental data, it is found that there was a linear relationship between the temperature and the adsorption capacity of isobaric points in the process of adsorption and desorption. The results could be supplied to predict CBM content in deep and determine the isobaric surface-collecting radius of production wells.

Keywords

CBM (Coalbed Methane), Temperature, Adsorption Capacity, Isobaric Adsorption

煤层气等压吸附实验研究

马东民^{1,2}, 慕甜¹, 戴楠¹, 李倩¹, 相里海龙³, 杨甫², 李庆庆¹, 何倩¹, 张晨阳¹

¹西安科技大学, 陕西 西安

²国土资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室, 陕西 西安

³大佛寺矿业公司, 陕西 彬县

Email: mdm6757@126.com

收稿日期: 2018年1月19日; 录用日期: 2018年2月3日; 发布日期: 2018年2月23日

文章引用: 马东民, 慕甜, 戴楠, 李倩, 相里海龙, 杨甫, 李庆庆, 何倩, 张晨阳. 煤层气等压吸附实验研究[J]. 地球科学前沿, 2018, 8(1): 19-31. DOI: 10.12677/ag.2018.81003

摘要

为厘定温度对煤层气吸附量的影响关系,采集彬长大佛寺煤矿4#长焰煤、佳县上高寨勘查区11#焦煤及晋城寺河煤矿东翼3#无烟煤,制备成空气干燥基样和平衡水样,分别进行25℃、30℃、35℃、40℃、45℃五个温度点的等温吸附/解吸实验。结果表明,同一温度点下,空气干燥基的吸附量基本大于平衡水样的吸附量;对实验数据进行拟合分析,发现吸附过程与解吸过程中,等压点的温度与吸附量呈线性关系。研究结果可应用于深部煤层气含气量预测、排采井等压面-采收半径的判定。

关键词

煤层气, 温度, 吸附量, 等压吸附

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

彬长与淮南正常产气的煤层气井,井底温度监测发现一些特征变化;同时,排采分析发现,排水与产气对煤储层渗透系数、压降半径、含气量等参数的反演显示出不确定性。分析认为,降压解吸热使煤储层局部温度降低,不规则压裂缝中流体导热差异,导致井底温度变化。进行排水与产气耦合分析,必须考虑煤储层温度降低对解吸作用的抑制,即温度对吸附量的影响-等压吸附特征。

对吸附等压特征的研究,《物理化学》[1]简单图示为二次函数;辜敏、鲜学福[2] 2006年进行过煤的变压吸附实验研究,吴家全、周理[3] 2006年对活性炭储存甲烷进行过研究,钟玲文、郑玉柱[4]等 2002年对温度与压力综合影响煤储层含气量进行预测,秦玉金、罗海珠[5] 2011年对地温梯度影响的深部煤储层含气量进行预测,唐书恒、韩德馨[6] 2002年进行多元气体吸附实验,傅雪海、李升[7] 2014年对排采中水的动态监测研究,但对温度对含气量的影响研究不多。由于等压变温实验条件较难控制,故本文设计不同温度点等温吸附实验,对所得实验结果分别在不同压力点的同一压力线上,取不同温度点的吸附量,从而进行等压吸附实验研究。

2. 研究思路

1) 实验样品涵盖不同变质程度的煤种。取彬长大佛寺 4#长焰煤(CY)、佳县上高寨 11#焦煤(JM)、寺河 3#无烟煤(WY3)为代表;

2) 进行 25℃、30℃、35℃、40℃、45℃五个温度点的吸附解吸实验,绘制等温吸附/解吸线,进行实验数据拟合获取数学式[8];

3) 在不同压力点垂交横轴上,计算各压力点位置的吸附量,绘制温度-吸附量关系曲线;

4) 对温度-吸附量曲线进行不同函数拟合,取拟合度高的数学式表征温度-吸附量关系。

3. 等温吸附解吸实验与结果

3.1. 样品加工与实验仪器

煤样采自彬长矿区大佛寺煤矿 4#煤 40112 采煤工作面、上高寨 11#煤钻孔和晋城寺河煤矿 3#煤东盘

区。采集后包装运回实验室，除矸、破碎、筛分将原煤制成 60~80 目(0.25~0.18 mm)的空干基煤样。参照 ASTM (American Society for Testing Material)标准制成平衡水煤样。

在 25℃, 30℃, 35℃, 40℃, 45℃(分析计算换算为绝对温度, K)五个实验温度点, 按照国家标准《煤的高压容量法等温吸附实验方法》, 使用 AST-2000 型大样量煤层气吸附/解吸仿真实验仪进行实验, 实验仪器及原理图见图 1, 图 2。

3.2. 实验样品表征

1) 物质组成: 工业分析(表 1)挥发分含量与煤岩分析(表 2) R_o 值表明, 实验样品初步代表了低 - 中 - 高煤变质序列。

2) 孔隙结构

利用扫描电镜以及美国贝克曼库尔特公司生产的 ASAP2020 比表面和孔径分析仪对三个样品进行孔隙结构分析, 结果见表 3 与图 3。

3.3. 实验结果

进行空气干燥基样与平衡水分样品的等温吸附/解吸实验, 结果如图 4~9。



Figure 1. Experimental instrument diagram

图 1. 实验仪器图

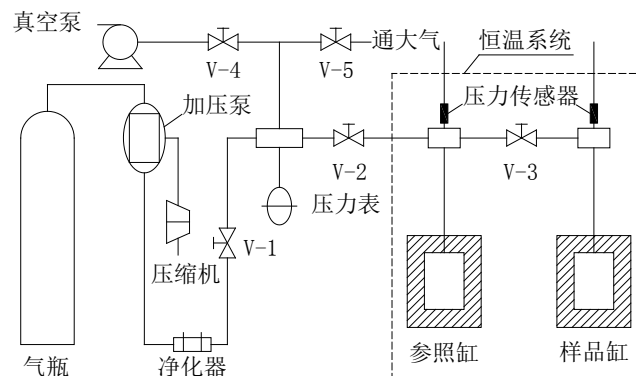


Figure 2. Experimental schematic diagram

图 2. 实验原理图

Table 1. The proximate analysis of experimental samples
表 1. 实验样品工业分析结果

煤样	工业分析			
	水分(M _{ad})/%	灰分(A _d)/%	挥发分(V _{daf})/%	固定碳(FC _{ad})/%
CY	4.65	15.74	32.95	46.66
JM	0.96	6.94	16.62	75.48
WY3	3.55	13.64	6.38	76.43

Table 2. Coal petrography analysis of experimental samples
表 2. 实验样品煤岩组分分析结果

煤样	镜质组最大反射率 R _v /%	显微煤岩组分含量			
		镜质组/%	惰质组/%	壳质组/%	矿物质/%
CY	0.43	22.8	68.1	2.2	6.9
JM	1.26	69.8	14.2	0.0	16.0
WY3	3.27	61.8	29.6	0.0	8.6

Table 3. The pore structure analysis of experimental samples
表 3. 实验样品孔隙结构分析结果

煤样	总孔容 /ml·g ⁻¹	比表面积 /m ² ·g ⁻¹	孔容分布/%			比表面积分布/%		
			微孔	小孔	中孔	微孔	小孔	中孔
CY	0.019	11.46	47.47	43.37	9.16	90.51	9.25	0.24
JM	0.001	0.34	30.00	54.00	16.00	81.51	17.58	0.91
WY3	0.00247	2.04	67.61	26.72	5.67	95.30	4.66	0.04

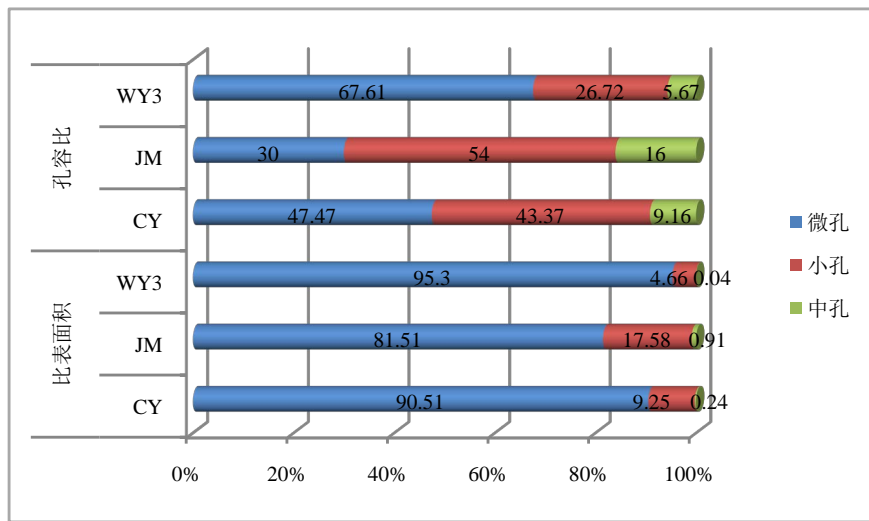


Figure 3. The analysis results of pore structure and specific surface area of experimental samples

图 3. 实验样品孔隙结构与比表面积测试分析结果

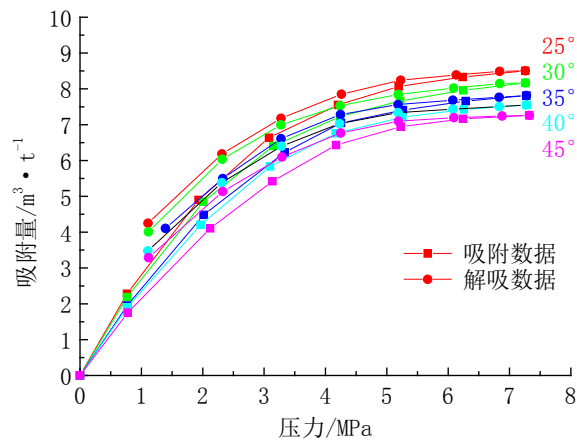


Figure 4. Isothermal adsorption-desorption curves of air-dry basis of coal samples of CY

图 4. CY 空干基煤样等温吸附/解吸曲线

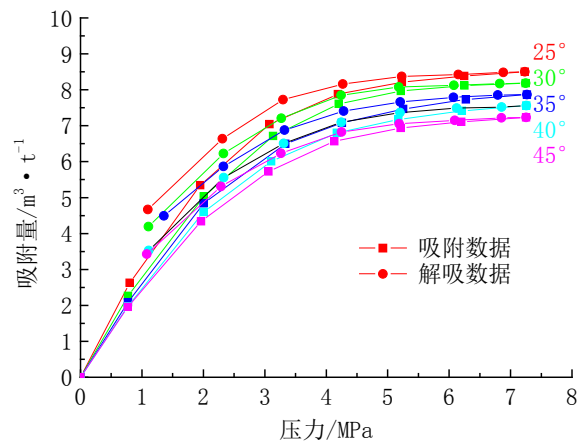


Figure 5. Isothermal adsorption-desorption curves of equilibrium water of coal samples of CY

图 5. CY 平衡水煤样等温吸附/解吸曲线

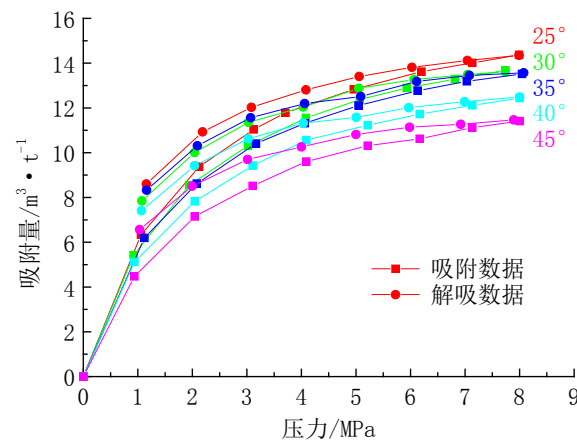


Figure 6. Isothermal adsorption-desorption curves of air-dry basis of coal samples of JM

图 6. JM 空干基煤样等温吸附/解吸曲线

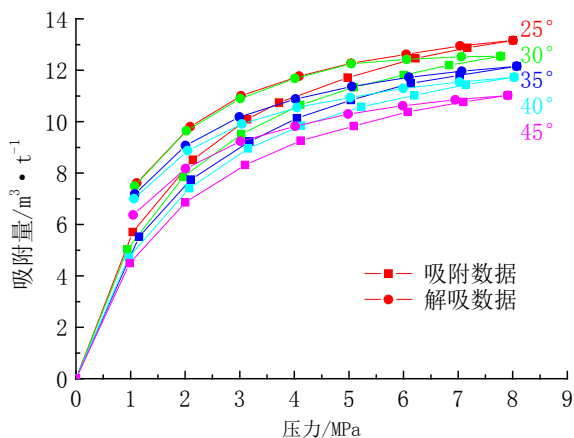


Figure 7. Isothermal adsorption-desorption curves of equilibrium water of coal samples of JM

图 7. JM 平衡水煤样等温吸附/解吸曲线

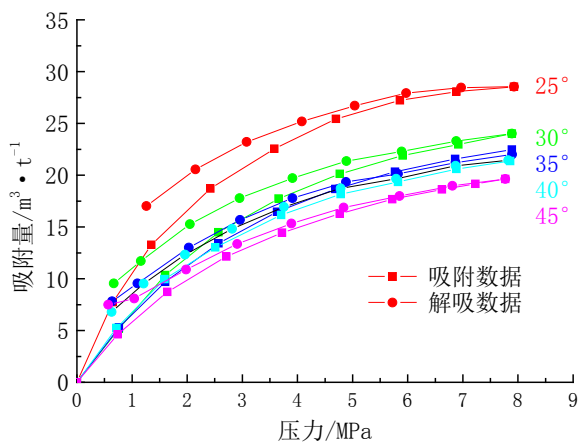


Figure 8. Isothermal adsorption-desorption curves of air-dry basis of coal samples of WY3

图 8. WY3 空干基煤样等温吸附/解吸曲线

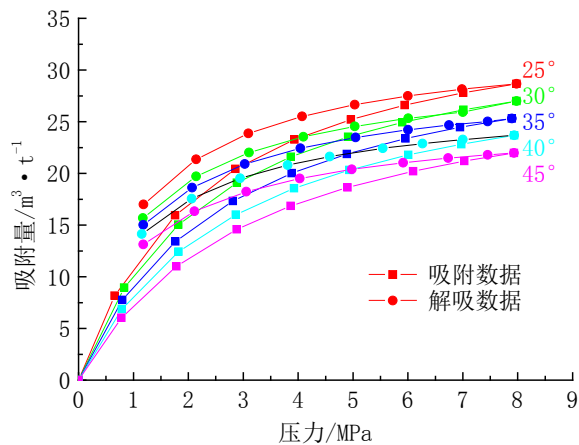


Figure 9. Isothermal adsorption-desorption curves of equilibrium water of coal samples of WY3

图 9. WY3 平衡水煤样等温吸附/解吸曲线

3.4. 实验结果数据拟合

煤层气的等温吸附运用 Langmuir 方程[9] [10] [11] (1)式, 煤层气的等温解吸运用解吸式(2)表征拟合度高[12]。数据拟合结果见表 4。

$$V_{ads} = \frac{abp}{1+bp} \quad (1)$$

式中: V_{ads} ——压力为 p 时的煤层气吸附量, ml/g; a ——煤样最大吸附量, ml/g; b ——吸附、解吸速度与吸附热的综合参数。

$$V_{des} = \frac{abp}{1+bp} + c \quad (2)$$

式中: V_{des} ——煤层气解吸到 p 压力时煤层气的吸附量, ml/g; a ——煤样最大吸附量, ml/g; b ——吸附、解吸速度与吸附热的综合参数; c ——煤层气解吸到匮乏压力时的残余吸附量, ml/g。

4. 等压吸附/解吸特征

利用数学拟合式, 计算升压(吸附)与降压(解吸)过程 0.5 MPa、1.0 MPa、2.0 MPa...8.0 MPa 九个压力点的吸附量, 绘制温度 - 吸附量曲线, 即等压吸附线。

4.1. 升压(吸附)过程各压力点的吸附特征

1) 在 0.5 MPa、1.0 MPa、2.0 MPa...8.0 MPa 九个压力点作垂线, 与等温吸附线相交, 计算升压吸附过程的吸附量。计算结果见图 10, 图 11, 图 12;

2) 对每个压力点下五个温度的吸附量进行多数学式关系拟合, 发现温度 - 吸附量线性相关, 均满足 $Q = aT + b$ 的一元函数关系(Q 为吸附量, T 为绝对温度)。九个压力点下的温度 - 吸附量线性拟合结果见表 5。拟合度 R^2 最低为 0.67;

3) 煤层气升压(吸附)过程, 平衡水样温度 - 吸附量线性拟合度绝大多数大于 0.99, 个别低压点大于 0.93; 干燥基样温度 - 吸附量线性拟合度多数大于 0.85, 低压时线性拟合度最小 0.67, 同时拟合度稍低的情况仅出现在高煤阶、空干基的低压点处。

4.2. 降压(解吸)过程各压力点的吸附特征

1) 同 4.1, 在 0.5 MPa、1.0 MPa、2.0 MPa...8.0 MPa 九个压力点作垂线, 与等温解吸线相交, 计算降压解吸过程的吸附量。计算结果见图 13, 图 14, 图 15;

2) 对每个压力点下 5 个温度的吸附量进行多数学式关系拟合, 发现温度 - 吸附量线性相关, 均满足 $Q = aT + b$ 的一元函数关系(Q 为吸附量, T 为绝对温度)。9 个压力点下的温度 - 吸附量线性拟合结果见表 6。拟合度 R^2 最低为 0.69;

3) 煤层气降压(解吸)过程, 平衡水样温度 - 吸附量线性拟合度绝大多数大于 0.99; 干燥基样较温度 - 吸附量线性拟合度低。

4.3. 小结

1) 无论煤层气升压吸附过程或降压解吸过程, 温度 - 吸附量显示高度的线性相关, 即等压吸附线为直线;

2) 煤层气吸附解吸平衡系统, 平衡水样品等压吸附较空气干燥基样等压吸附关系显著得多。对比平

Table 4. The fitting results of adsorption-desorption experiment
表 4. 吸附解吸实验拟合结果

煤样	含水率/%	温度/℃	Langmuir 拟合			解吸式拟合			
			a	b	R ²	a	b	c	R ²
CY 空干基煤样	4.65	25	12.164	0.359	0.995	8.870	0.587	0.882	0.998
		30	11.592	0.362	0.996	8.370	0.585	0.942	1.000
		35	11.525	0.327	0.993	7.959	0.496	1.072	0.997
		40	11.201	0.324	0.993	7.732	0.529	1.015	0.998
		45	11.200	0.288	0.993	7.467	0.505	1.033	0.997
CY 平衡水煤样	10.14	25	11.563	0.448	0.992	8.623	0.701	0.949	0.996
		30	11.566	0.396	0.990	8.341	0.619	0.994	0.997
		35	11.079	0.382	0.993	8.040	0.597	0.973	0.998
		40	10.725	0.374	0.993	7.698	0.543	1.039	0.999
		45	10.238	0.382	0.993	7.380	0.568	1.009	0.998
JM 空干基煤样	0.96	25	17.820	0.521	0.998	15.230	0.832	1.130	0.996
		30	17.030	0.515	0.998	14.330	0.822	1.230	0.990
		35	16.870	0.511	0.997	13.730	0.819	1.640	0.998
		40	15.560	0.508	0.997	12.630	0.813	1.540	0.999
		45	14.320	0.501	0.999	11.930	0.803	1.160	0.998
JM 平衡水煤样	3.01	25	16.370	0.513	0.998	14.130	0.807	0.930	0.995
		30	15.730	0.506	0.998	13.380	0.801	1.020	0.997
		35	15.210	0.493	0.997	12.330	0.795	1.490	0.995
		40	14.730	0.487	0.997	11.720	0.811	1.570	0.993
		45	13.890	0.486	0.999	11.390	0.791	1.210	0.991
WY3 空干基煤样	3.55	25	40.084	0.366	0.990	29.182	0.516	5.420	0.992
		30	37.148	0.243	0.991	27.769	0.360	3.499	0.995
		35	34.649	0.245	0.990	28.815	0.271	2.895	0.992
		40	33.458	0.267	0.988	27.941	0.282	3.434	0.992
		45	29.963	0.250	0.991	26.482	0.220	3.055	0.981
WY3 平衡水煤样	4.19	25	37.030	0.430	0.998	29.850	0.721	3.250	0.995
		30	35.240	0.410	0.998	27.860	0.715	3.290	0.992
		35	33.970	0.370	0.997	25.920	0.706	3.340	0.993
		40	32.450	0.340	0.997	23.760	0.695	3.560	0.994
		45	30.910	0.310	0.999	22.320	0.687	3.120	0.996

Table 5. The fitting analysis data of air-dry basis and equilibrium water samples in booster process of adsorption
表 5. 升压吸附过程空干基样和平衡水样的拟合分析数据

煤样	压力/MPa	空干基样		平衡水样	
		拟合方程	R ²	拟合方程	R ²
CY	8.0	$Q = -0.0592T + 26.608$	0.9908	$Q = -0.0681T + 29.378$	0.9944
	7.0	$Q = -0.0594T + 26.352$	0.9929	$Q = -0.0674T + 28.883$	0.9951
	6.0	$Q = -0.0593T + 25.959$	0.9945	$Q = -0.0664T + 28.230$	0.9951
	5.0	$Q = -0.0589T + 25.344$	0.9956	$Q = -0.0649T + 27.334$	0.9940
	4.0	$Q = -0.0577T + 24.351$	0.9957	$Q = -0.0626T + 26.046$	0.9911
	3.0	$Q = -0.0549T + 22.677$	0.9945	$Q = -0.0587T + 24.078$	0.9851
	2.0	$Q = -0.0489T + 19.666$	0.9915	$Q = -0.0517T + 20.797$	0.9737
	1.0	$Q = -0.0352T + 13.710$	0.9859	$Q = -0.0371T + 14.577$	0.9525
	0.5	$Q = -0.022T + 8.4091$	0.9818	$Q = -0.0234T + 9.0406$	0.9357
JM	8.0	$Q = -0.1408T + 56.497$	0.9437	$Q = -0.1024T + 43.698$	0.9944
	7.0	$Q = -0.1374T + 55.111$	0.9441	$Q = -0.1003T + 42.718$	0.9947
	6.0	$Q = -0.1332T + 53.364$	0.9446	$Q = -0.0977T + 41.474$	0.9951
	5.0	$Q = -0.1277T + 51.095$	0.9453	$Q = -0.0942T + 39.843$	0.9955
	4.0	$Q = -0.1203T + 48.028$	0.9461	$Q = -0.0893T + 37.616$	0.9960
	3.0	$Q = -0.1096T + 43.655$	0.9473	$Q = -0.0821T + 34.394$	0.9966
	2.0	$Q = -0.093T + 36.920$	0.9491	$Q = -0.0706T + 29.336$	0.9972
	1.0	$Q = -0.0639T + 25.221$	0.9518	$Q = -0.0495T + 20.307$	0.9977
	0.5	$Q = -0.0393T + 15.428$	0.9538	$Q = -0.0309T + 12.543$	0.9977
WY3	8.0	$Q = -0.431T + 156.83$	0.8659	$Q = -0.3321T + 127.7$	0.9999
	7.0	$Q = -0.4225T + 153.19$	0.8532	$Q = -0.3311T + 126.53$	1.0000
	6.0	$Q = -0.4113T + 148.49$	0.8381	$Q = -0.329T + 124.77$	1.0000
	5.0	$Q = -0.3959T + 142.23$	0.8201	$Q = -0.3245T + 122.05$	1.0000
	4.0	$Q = -0.374T + 133.56$	0.7983	$Q = -0.316T + 117.66$	0.9999
	3.0	$Q = -0.3411T + 120.92$	0.7719	$Q = -0.2996T + 110.22$	0.9998
	2.0	$Q = -0.2882T + 101.22$	0.7394	$Q = -0.2665T + 96.611$	0.9996
	1.0	$Q = -0.1941T + 67.392$	0.6996	$Q = -0.1931T + 68.719$	0.9992
	0.5	$Q = -0.1165T + 40.166$	0.6765	$Q = -0.1218T + 42.871$	0.9988

Table 6. The fitting analysis data of air-dry basis and equilibrium water samples in booster process of desorption
表 6. 降压解吸过程空干基样和平衡水样的拟合分析数据

煤样	压力/MPa	空干基		平衡水	
		拟合方程	R ²	拟合方程	R ²
CY	8.0	$Q = -0.0584T + 25.557$	0.9757	$Q = -0.0611T + 26.467$	0.9960
	7.0	$Q = -0.0578T + 25.196$	0.9736	$Q = -0.061T + 26.274$	0.9957
	6.0	$Q = -0.057T + 24.717$	0.9707	$Q = -0.0608T + 26.001$	0.9940
	5.0	$Q = -0.0557T + 24.057$	0.9670	$Q = -0.0603T + 25.597$	0.9916
	4.0	$Q = -0.0538T + 23.096$	0.9618	$Q = -0.0594T + 24.960$	0.9880
	3.0	$Q = -0.0506T + 21.594$	0.9547	$Q = -0.0575T + 23.870$	0.9824
	2.0	$Q = -0.0448T + 18.984$	0.9451	$Q = -0.0532T + 21.763$	0.9735
	1.0	$Q = -0.0318T + 13.624$	0.9362	$Q = -0.0415T + 16.811$	0.9590
	0.5	$Q = -0.0183T + 8.3592$	0.9470	$Q = -0.0275T + 11.327$	0.9498
JM	8.0	$Q = -0.1391T + 55.988$	0.9431	$Q = -0.1021T + 43.612$	0.9933
	7.0	$Q = -0.1367T + 55.023$	0.9416	$Q = -0.0999T + 42.711$	0.9923
	6.0	$Q = -0.1336T + 53.787$	0.9395	$Q = -0.097T + 41.560$	0.9908
	5.0	$Q = -0.1295T + 52.144$	0.9365	$Q = -0.0932T + 40.038$	0.9885
	4.0	$Q = -0.1237T + 49.855$	0.9318	$Q = -0.0879T + 37.930$	0.9845
	3.0	$Q = -0.1151T + 46.448$	0.9237	$Q = -0.0801T + 34.818$	0.9764
	2.0	$Q = -0.1008T + 40.836$	0.9060	$Q = -0.0674T + 29.761$	0.9549
	1.0	$Q = -0.0728T + 29.871$	0.8436	$Q = -0.043T + 20.109$	0.8429
	0.5	$Q = -0.0453T + 19.253$	0.6912	$Q = -0.0201T + 11.029$	0.4541
WY3	8.0	$Q = -0.3851T + 142.35$	0.8535	$Q = -0.3335T + 128.13$	1.0000
	7.0	$Q = -0.3945T + 144.47$	0.8532	$Q = -0.3275T + 125.80$	1.0000
	6.0	$Q = -0.4039T + 146.42$	0.8520	$Q = -0.3197T + 122.82$	1.0000
	5.0	$Q = -0.4123T + 147.86$	0.8496	$Q = -0.3094T + 118.88$	0.9999
	4.0	$Q = -0.4179T + 148.09$	0.8452	$Q = -0.2952T + 113.42$	0.9999
	3.0	$Q = -0.4162T + 145.59$	0.8372	$Q = -0.274T + 105.38$	0.9997
	2.0	$Q = -0.396T + 136.65$	0.8222	$Q = -0.2397T + 92.349$	0.9992
	1.0	$Q = -0.3263T + 111.07$	0.7880	$Q = -0.1739T + 67.634$	0.9965
	0.5	$Q = -0.246T + 83.408$	0.7453	$Q = -0.1121T + 44.626$	0.9849

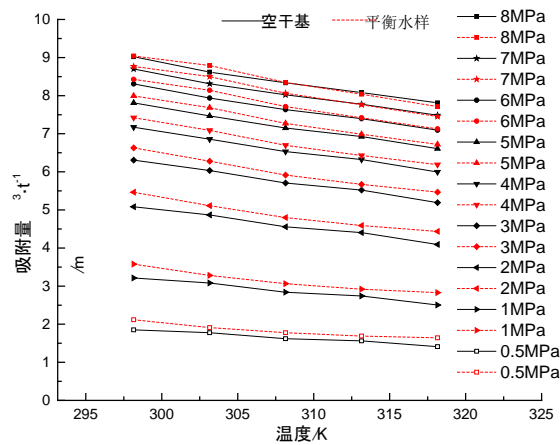


Figure 10. Isobaric adsorption curves of air-dry basis and equilibrium water samples of CY at different pressures

图 10. 不同压力点 CY 空干基样与平衡水样等压吸附曲线

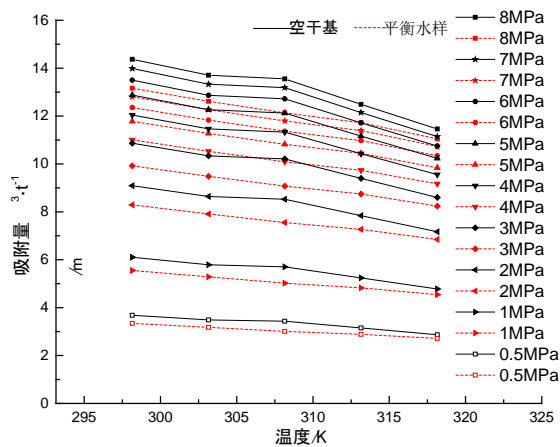


Figure 11. Isobaric adsorption curves of air-dry basis and equilibrium water samples of JM at different pressures

图 11. 不同压力点 JM 空干基样与平衡水样等压吸附曲线

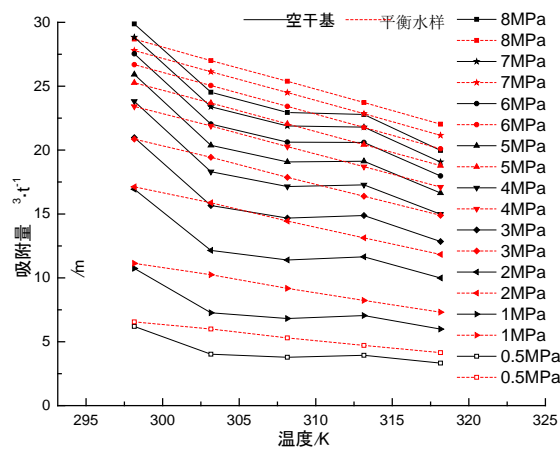


Figure 12. Isobaric adsorption curves of air-dry basis and equilibrium water samples of WY3 at different pressures

图 12. 不同压力点 WY3 空干基样与平衡水样等压吸附曲线

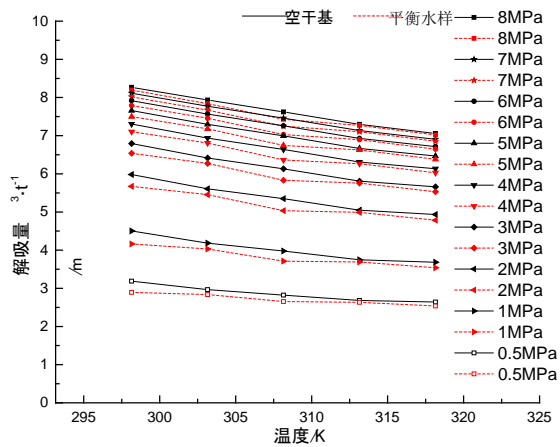


Figure 13. Isobaric desorption curves of air-dry basis and equilibrium water samples of CY at different pressures

图 13. 不同压力点 CY 空干基样与平衡水样等压解吸曲线

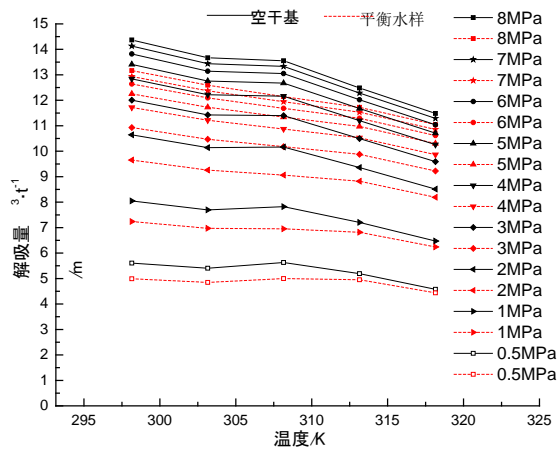


Figure 14. Isobaric desorption curves of air-dry basis and equilibrium water samples of JM at different pressures

图 14. 不同压力点 JM 空干基样与平衡水样等压解吸曲线

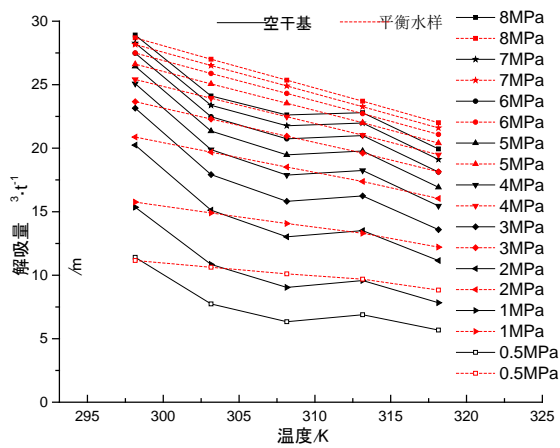


Figure 15. Isobaric desorption curves of air-dry basis and equilibrium water samples of WY3 at different pressures

图 15. 不同压力点 WY3 空干基样与平衡水样等压解吸曲线

衡水分含量分析结果与孔隙结构、比表面积分析结果,认为是 $\text{CH}_4\text{—H}_2\text{O}$ 在煤孔隙内表面作用方式造成的,润湿性研究应受到重视。

5. 结论与建议

1) 尝试了气-固界面吸附解吸中温度与吸附量关系的研究的合理实验方法;煤层气等压吸附/解吸中,温度-吸附量显示高度的线性相关,即煤储层含气量变化与地温梯度成比例关系;

2) 煤层气排采分析中,等压面上,原始储层温度与井底监测温度之差可以确定含气量变化,是煤层气排采井产水与产气耦合的关键,也是确定关键参数-解吸半径的有效方法;

3) 空干基煤样等压吸附量大于平衡水煤样等压吸附量,煤的润湿性与 $\text{H}_2\text{O-CH}_4$ -煤界面关系研究、煤层气井底温度监测应受到重视。

参考文献 (References)

- [1] 天津大学物理化学教研室编. 物理化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.12.
- [2] 辜敏, 鲜学福. 提高煤矿抽放煤层气甲烷浓度的变压吸附技术的理论研究[J]. 天然气化工, 2006(31): 6-10.
- [3] 吴家全, 周理. 多组分气体混合物在多孔固体上吸附平衡研究[D]. 天津大学, 2007.
- [4] 钟玲文, 郑玉柱, 员争荣, 等. 煤在温度和压力综合影响下的吸附性能及气含量预测[J]. 煤炭学报, 2002, 27(6): 581-585.
- [5] 秦玉金, 罗海珠, 姜文忠, 等. 非等温吸附变形条件下瓦斯运移多场耦合模型研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 412-416.
- [6] 唐书恒, 韩德馨. 用多元气体等温吸附成果评价煤层气开发潜力[N]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(6): 630-633.
- [7] 傅雪海, 李升, 于景邨, 等. 煤层气井排采过程中煤储层水系统的动态监测[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 26-31.
- [8] 刘厚宁, 马东民. 煤润湿性以及煤层气吸附/解吸的影响[D]. 西安科技大学, 2016.
- [9] Busch, A., Genst Erblum, Y. and Kross, B.M. (2003) Methane and CO_2 Sorption and Desorption Measurements on Dry Argonne premium Coals: Pure Components and Mixture. *International Journal of Coal Geology*, **55**, 205-224. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(03\)00113-7](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(03)00113-7)
- [10] Harpalani, S. and Pariti, U.M. (1993) Study of Coal Sorption Isotherms Using a Multicomponents Gas Mixture. *Proceedings of the 1993 International Coal Methane Symposium*, Birmingham, 151-160.
- [11] Greaves, K.H., Owen, L.B. and Mclenman, J.D. (1993) Multicomponent Gas Adsorption-Desorption Behavior of Coal. *Proceedings of the 1993 International Coalbed Methane Symposium*, Tuscaloosa, 197-205.
- [12] 马东民, 李来新, 李小平, 等. 大佛寺井田 4 号煤 CH_4 与 CO_2 吸附解吸实验比较[J]. 煤炭学报, 2014, 39(9): 1938-1944.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ag@hanspub.org