



推荐阅读:

[综采工作面上隅角瓦斯流动活跃区形成机理研究](#)

[高瓦斯突出煤层综采工作面注水降尘技术应用研究](#)

[超大直径钻孔采空区瓦斯抽采技术研究](#)

[风速对近距离煤层采空区漏风及煤自燃影响研究](#)

[深部高瓦斯矿井大采高工作面立体抽采瓦斯技术](#)

[水力冲孔压裂卸压增透抽采瓦斯技术研究](#)

[巷道火灾时期流场及瓦斯浓度变化规律数值模拟研究](#)

[高突低渗透煤层超高压水力割缝卸压增透研究](#)

[高瓦斯综采工作面定向高位钻孔瓦斯抽采技术研究](#)

[寺河井田煤层气产能分布特征及影响因素分析](#)

[我国煤矿覆岩采动裂隙带卸压瓦斯抽采技术研究进展](#)

[基于高位定向长钻孔的上隅角瓦斯治理研究](#)

[松软突出煤层瓦斯抽采钻孔施工技术与发展趋势](#)

[综采工作面煤层注水防尘优化及效果研究](#)

[我国煤层气钻井技术及装备现状与展望](#)

[高瓦斯矿井高抽巷合理布置及终巷位置确定研究](#)

[原生结构煤与构造煤孔隙结构与瓦斯扩散特性研究](#)

[不同孔间距抽采孔对深孔预裂爆破增透效果影响研究](#)

[顺层瓦斯抽采钻孔封隔一体化封孔工艺研究](#)

[煤层瓦斯赋存特征及其关键地质因素影响研究](#)



移动扫码阅读

秦 雷,林海飞,兰世瑞,等.低温液氮作用下煤体瓦斯吸附特性试验研究[J].煤炭科学技术,2020,48(10): 105-112. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.10.012

QIN Lei, LIN Haifei, LAN Shirui, *et al.* Experimental study on coal gas adsorption characteristics under action of low temperature liquid nitrogen [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48 (10): 105 - 112. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.10.012

低温液氮作用下煤体瓦斯吸附特性试验研究

秦 雷^{1,2},林海飞^{1,2},兰世瑞^{1,2},赵鹏翔^{1,2},严 敏^{1,2}

(1.西安科技大学 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室,陕西 西安 710054;

2.西安科技大学 安全科学与工程学院,陕西 西安 710054)

摘 要:液氮致裂煤层增透技术具有良好的发展前景,而针对低温液氮作用下煤体瓦斯吸附特性研究目前尚不完善,大部分研究处于初步研究阶段;为了对液氮冻融作用及试验初始温度作用下的煤体瓦斯吸附特性变化规律及变化趋势进行研究,选取新疆硫磺沟煤矿煤样作为研究对象,利用 PCTPro 高压气体吸附仪对试验煤样在不同液氮冻融时间(0、30、60、90、120 min)及不同试验初始温度(30、40、50、60、70 °C)条件下的吸附特性进行了研究,得出了不同液氮冻融时间及不同试验初始温度条件下煤体瓦斯吸附量、吸附增量及煤体瓦斯饱和吸附量的变化,并根据试验结果选取了 3 种吸附理论模型对试验结果进行拟合,分析拟合效果对吸附理论进行优选。归纳煤体在 2 个变量影响下吸附特性的变化。研究表明:煤体瓦斯吸附量随液氮冻融时间增加而逐渐增大、随试验初始温度增大而逐渐减小;煤体瓦斯饱和吸附量随液氮冻融时间增加呈上升趋势、随试验初始温度增加呈下降趋势。在 2 个变量条件下进行不同理论模型拟合,结果表明 Langmuir 理论模型拟合效果最好,其拟合度最高,误差范围小;2 个变量影响条件下,Langmuir 理论模型中吸附常数 b 无明显规律,其影响因素包含多种,而吸附常数 a 随液氮冻融时间增加逐渐增大、随试验初始温度增加逐渐减小。

关键词:煤层气;液氮冻融;初始温度;瓦斯吸附;等温吸附

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2020)10-0105-08

Experimental study on coal gas adsorption characteristics under action of low temperature liquid nitrogen

QIN Lei^{1,2}, LIN Haifei^{1,2}, LAN Shirui^{1,2}, ZHAO Pengxiang^{1,2}, YAN Min^{1,2}

(1.Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention, Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2.College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Liquid nitrogen cracking coal seam permeability technology has good prospects, but research on the gas adsorption characteristics of coal body under the action of low temperature liquid nitrogen is still not perfect, and most of the research is in the preliminary research stage. In order to study coal gas adsorption characteristics under the action of liquid nitrogen freezing-thawing and the initial temperature, the change law and trend of coal gas adsorption characteristics under the action of the coal are studied. A coal sample from Xinjiang Sulgougou Coal Mine was selected to study the adsorption characteristics under different liquid nitrogen freeze-thaw time (0, 30, 60, 90, 120 min) and the different initial temperature (30, 40, 50, 60, 70 °C) using PCTPro high pressure adsorption apparatus. Through the study, the change of adsorption capacity, adsorption of increment and the saturated adsorption amount under the condition of different liquid nitrogen freeze-thaw time and initial temperature were obtained, three kinds of adsorption theory models were selected to fit the experimental results. The variation of coal adsorption characteristics under the influence of two variables were concluded. The results show that the coal gas adsorption capacity gradually increases with the increase of freeze-thaw time and decreases with the increase of initial temperature. The saturated adsorption capacity increases with the increase of liquid nitrogen freeze-thaw time. The initial temperature increase of the test showed a down-

收稿日期:2020-03-25;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51904237, 51674192);中国博士后科学基金面上资助项目(2019M653875XB)

作者简介:秦 雷(1991—),男,山东济宁人,副教授,博士。E-mail:qinlei@xust.edu.cn

ward trend. Fitting different theoretical models under two-variable conditions, the results show that the Langmuir theoretical model has the best fitting effect, the highest degree of fit, and a small error range. Under the condition of two variables, there is no obvious rule for adsorption constant b value, while the adsorption constant a increases with the increase of liquid nitrogen freezing-thawing time and decreases with the increase of initial temperature.

Key words: coalbed methane; liquid nitrogen freezing and thawing; initial temperature; gas adsorption; isothermal adsorption

0 引言

煤层气(瓦斯)的开发和利用对我国能源结构有很大的影响,煤体瓦斯的吸附特性因外界条件不同而不断变化,有的促进吸附,有的抑制吸附^[1]。瓦斯作为煤体中所储存的气体之一,有很大的利用价值,但由于煤体大多埋于地下,不易抽采,且威胁人员安全,故根据实际选取适当方法增透煤体以便增大抽采效率势在必行。目前已有的煤层增透措施主要包含水力化措施^[2]、保护层开采^[3],但水力化措施对水含量要求较高,这与我国水资源缺少形成反差。因此,需研发无水化煤层增透措施^[4],已有研究表明,液氮的冻融侵蚀会促进煤层增透,使煤体内部孔裂隙致裂^[5-6],可有效促进煤体瓦斯吸附,既可解决瓦斯滞于煤体中造成煤层难以开采问题,又可解决水资源短缺问题。

目前多数学者研究的是试验温度^[7]、压力^[8]、孔隙结构^[9]、煤样变质程度^[10]等变量对煤体瓦斯吸附特性的影响。文献[11]通过研究得出煤体瓦斯吸附特性会受煤样粒径大小的影响。梁冰等^[12]经研究认为应力会对煤体瓦斯吸附性能产生一定影响,研究得出时间增加会使得煤样吸附膨胀应变逐渐降低。NIE等^[13]研究了不同变质程度的煤样,认为水分含量相同时,变质程度越高,吸附量受到的影响越大。BUSCH等^[14]认为当煤体吸附水分子后,煤体孔裂隙面积减小导致煤样的吸附性能降低。在液氮冻融致裂^[15-16]方面,研究还处于初期探索阶段,多数研究对象为类煤岩体,对于液氮冻融煤体产生致裂的研究才起步。吴刚等^[17]研究得出石灰岩在循环冻融作用下致使内部裂隙增透扩展,封闭性下降,有利于吸附。LEI等^[18]通过将液氮等超低温流体注入煤岩体中,致使煤岩体内部致裂造成孔隙增大,从而提高吸附能力。李和万等^[19]研究发现煤体的力学强度会随着液氮的冻融作用时间逐渐降低,使吸附能力逐渐增大。液氮对煤体的冻融侵蚀程度会受到外界因素(含水率)的影响^[20]。

针对以上研究现状及所存在的问题,笔者立足于研究初始温度与液氮冻融作用对煤样瓦斯吸附特性的影响,利用 PCTPro 吸附试验装置进行煤体瓦

斯吸附特性试验,揭示煤体瓦斯等温吸附过程及液氮冻融作用下煤样瓦斯吸附特性,获得了煤样瓦斯吸附特性与初始温度及液氮冻融时间之间的关系。

1 煤体瓦斯吸附特性试验

1.1 试验煤样基础参数

为了研究液氮冻融时间及试验温度对煤体瓦斯吸附特性的影响,首先对试验煤样进行基础参数测定。试验所选煤样来自新疆硫磺沟煤矿,煤质分析测定结果如下:

水分/%	3.48
灰分/%	2.32
挥发分/%	24.06
$w(C)/\%$	56.28
$w(H)/\%$	4.13
$w(N)/\%$	0.8
真密度/($g \cdot cm^{-3}$)	1.273 1
视密度/($g \cdot cm^{-3}$)	1.060 2

1.2 试验设备与方案

选用 PCTPro 高压气体吸附仪研究液氮冻融时间与温度影响下的煤体瓦斯吸附特性,试验设备由主机和试验仪器 2 个大单元组成,依靠计算机来控制仪器内部阀门开关,设备系统如图 1 所示。

利用本试验进行煤体瓦斯吸附试验步骤可近似分为 3 步:①煤样准备:将已磨好的硫磺沟煤样用分选筛筛出粒径 8~11 mm 约 200 g 作为试验煤样;用一次性纸杯取约 20 g 煤样进行冻融试验;将已冻融好的煤样放入干燥箱中进行干燥,设定时长为 6 h。②上述步骤完成后,进行装样,装样前应清理干净残留煤样,装样采用差值法计算装入煤样质量。③正式试验阶段包含:脱气、校准体积、吸附、结果输出。具体流程如图 2 所示。

1.3 试验方案

对不同液氮冻融时间(0、30、60、90、120 min)、不同试验温度(40、50、60、70 ℃)条件下煤体瓦斯吸附特性进行研究,并根据试验结果选取不同液氮冻融时间、不同试验温度下的 3 组变量进行吸附理论模型拟合优选。

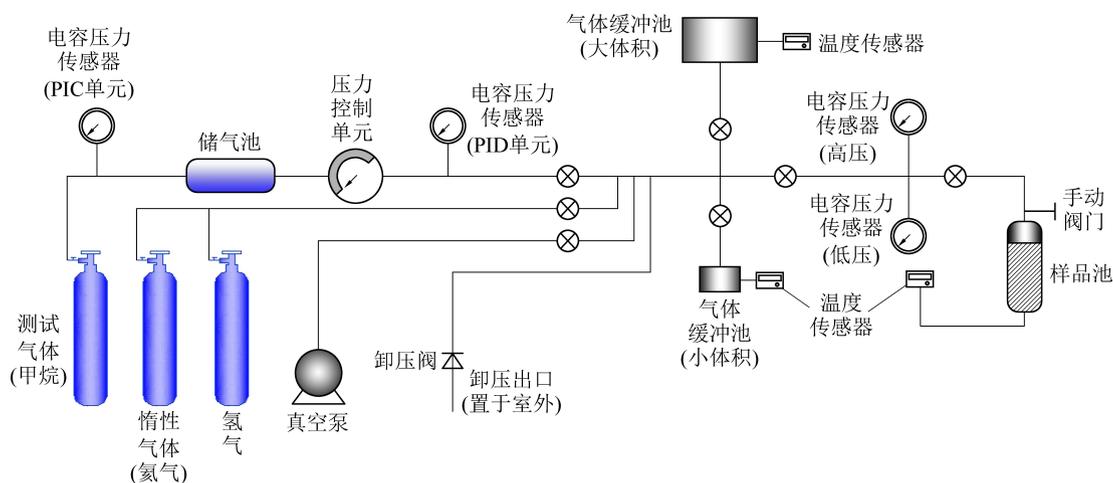


图1 PCTPro 高压气体吸附仪系统

Fig.1 PCTPro high pressure gas adsorption instrument system

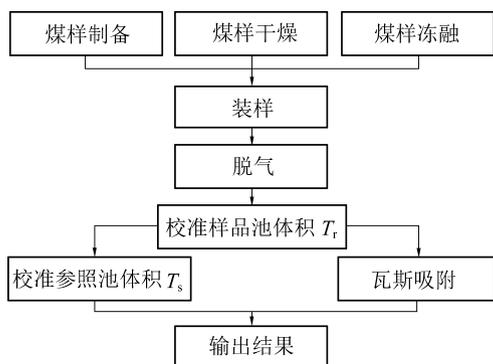


图2 煤体瓦斯吸附特性试验流程

Fig.2 Flow chart of coal gas adsorption experiment

1.4 试验原理

PCTPro 高压吸附仪的原理将两体系之间通过

桥梁联系起来,依靠隔离阀门来控制两侧体系所呈现的状态。这2个体系为样品体系和蓄气体系,且已知压力和体积。依靠气体隔离阀,使该系统自动变化调整为一个新的平衡状态。在此状态下体系中的压力及其与原压力之间产生的差值都是可测的,通过仪器自动识别读出零吸附压力,将三者结合起来计算气体实际的吸附量。

2 煤体瓦斯吸附试验结果

根据煤体瓦斯吸附试验所得数据,经初步整理分析,不同液氮冻融时间、不同试验温度条件下煤体瓦斯吸附量与吸附平衡压力的关系如图3所示。

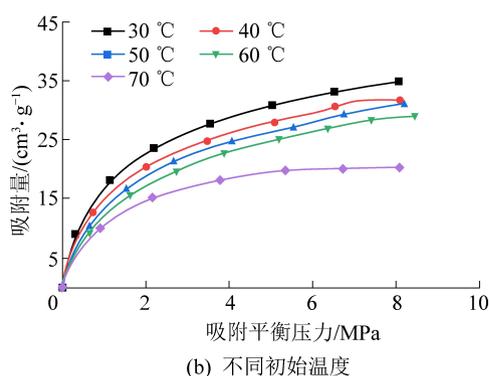
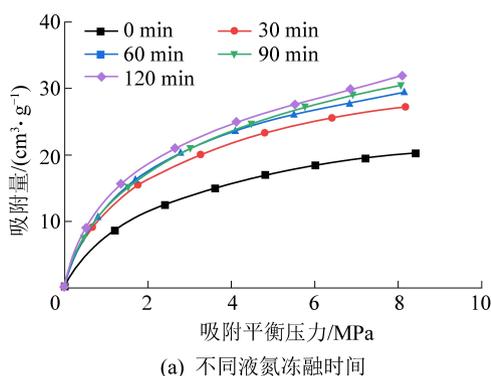


图3 煤样瓦斯吸附量随压力变化

Fig.3 Chart of coal gas adsorption with pressure

从图3中可以看出:①当试验处于同一压力状态时,煤体瓦斯吸附量随着液氮冻融时间的增加而逐渐增大;相同压力下瓦斯吸附量随着温度的逐渐升高而逐渐减小;②同一液氮冻融时间和同一试验温度条件下,增大试验压力,煤体瓦斯吸附量呈减速增大趋势,直至达到吸附平衡,不再随压力的增加而

升高。

由于液氮冻融使得煤体致裂增透,从而裂隙发育扩增,促进吸附;而初始温度升高使得煤体内部分子热运动加剧,导致外界气体分子不易进入煤体内部,从而抑制吸附。2个变量下煤体瓦斯解吸速度均随试验增加逐渐增大。

3 试验结果分析

3.1 吸附理论模型优选

为了对试验结果更好地分析,笔者选取3种吸附理论模型分别进行拟合,以期得出与试验数据拟合度更高的理论模型,更准确地反映试验与实际规律之间所存在的误差,得出更加准确的煤体瓦斯吸附规律。

3.1.1 Langmuir 理论模型

Langmuir 吸附方程^[21]是一种单分子层吸附理

论模型,是吸附体系处于动态平衡得出的等温方程。其关系可用公式(1)表示:

$$V = \frac{V_m b P}{1 + b P} = a \frac{b P}{1 + b P} \quad (1)$$

式中: V 为试验煤样瓦斯吸附量, cm^3 ; V_m 为 Langmuir 体积, cm^3 ; a 、 b 为吸附常数, cm^3/g , MPa^{-1} ; P 为吸附质在气相中的平衡分压, MPa 。

2个变量下 Langmuir 理论拟合结果如图4所示。

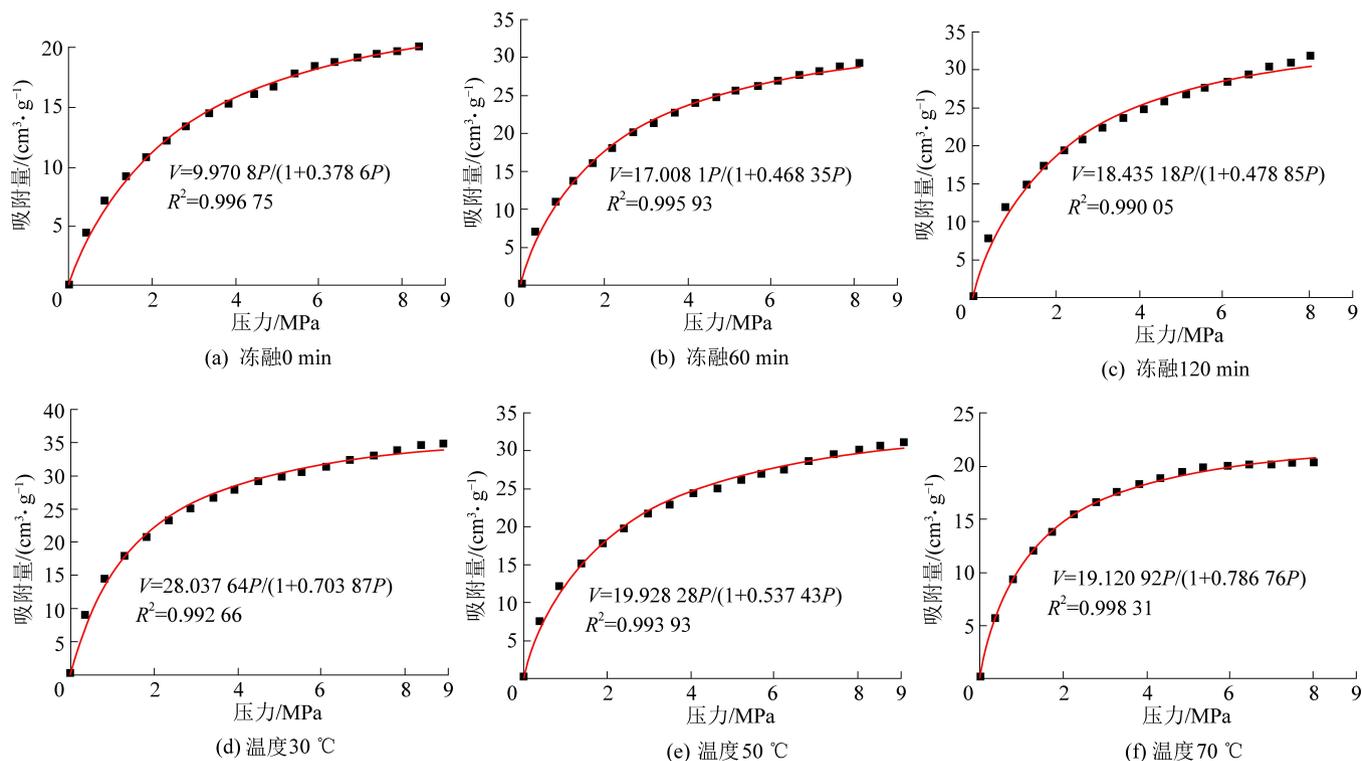


图4 基于 Langmuir 理论的液氮冻融时间和试验温度下的吸附量与压力关系

Fig.4 Relationship between adsorption capacity and pressure at freezing-thawing time and test temperature of liquid nitrogen based on Langmuir theory

利用 Langmuir 理论模型对煤样的瓦斯吸附试验数据进行拟合,得出拟合参数 a 、 b 值,见表1。不同液氮冻融时间下,试验拟合度最大为 0.996 75,拟合度最小为 0.990 05,平均为 0.994 58。不同试验温度下,试验拟合度最大为 0.998 31,拟合度最小为 0.990 41,平均为 0.994 18,如图4所示。

3.1.2 Freundlich 理论模型

Freundlich 方程^[22]可以看作是对 Henry 方程的深层次研究,即:吸附量 V 与 P 的 n 次方是正比的关系,其关系式如下:

$$V = K_b P^n \quad (2)$$

式中: K_b 为 Freundlich 系数, m^3/MPa ; n 为 Freundlich

指数。

表1 Langmuir 理论拟合结果参数

Table 1 Langmuir theory fitting result parameters

液氮冻融时间/min	$a/(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$b/(\text{MPa}^{-1})$	初始	$a/(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$b/(\text{MPa}^{-1})$
			温度/ $^{\circ}\text{C}$		
0	26.336 05	0.378 60	30	39.833 55	0.703 87
60	36.315 28	0.468 35	50	37.080 69	0.537 43
120	38.498 87	0.478 85	70	24.177 85	0.786 75

2个变量下 Freundlich 理论拟合结果如图5所示。

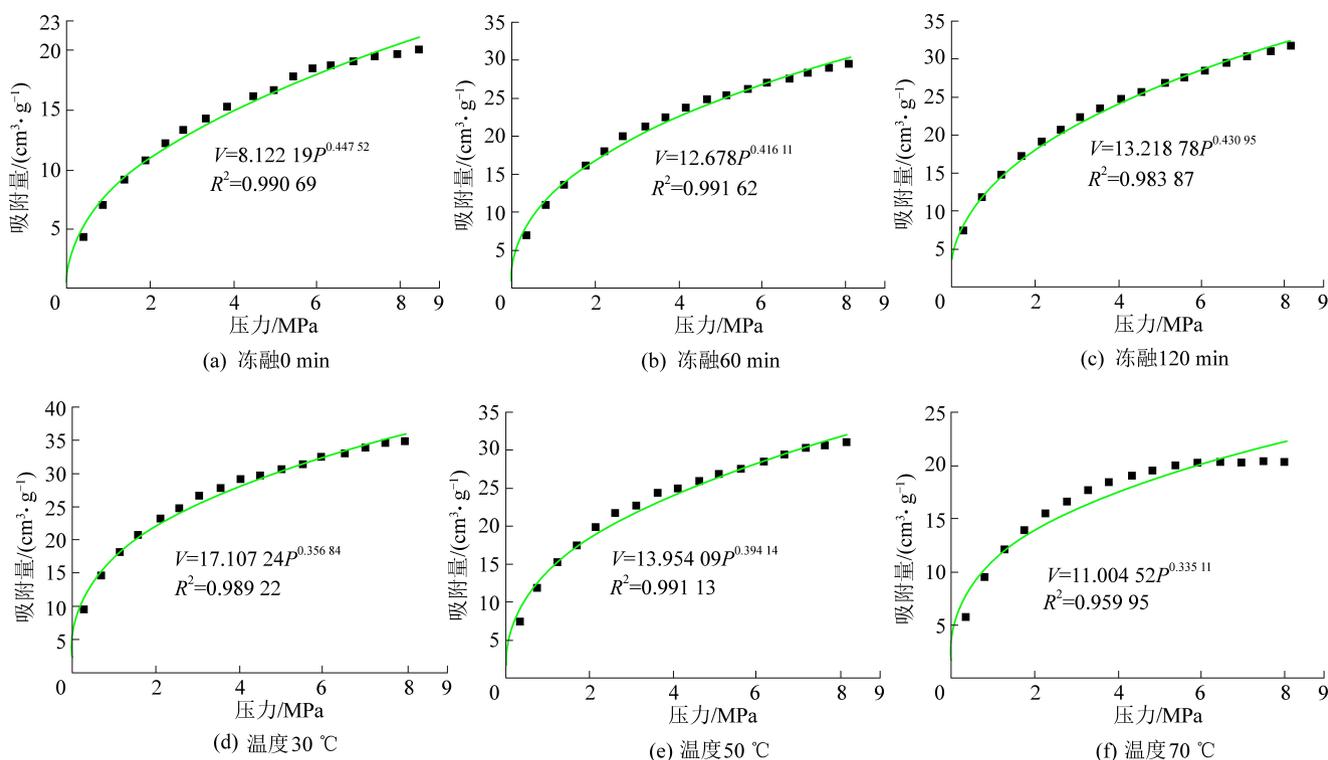


图5 基于 Freundlich 理论的液氮冻融时间和试验温度下的吸附量与压力关系

Fig.5 Relationship between adsorption capacity and pressure at freezing-thawing time and test temperature of liquid nitrogen based on Freundlich theory

对不同的液氮冻融时间和不同试验温度下利用 Freundlich 理论方程对试验数据进行拟合,结果如图 5 所示。可以看出拟合度最大为 0.995 17,拟合度最小为 0.983 87,其平均值为 0.990 22。不同试验温度下其拟合度最大为 0.991 2,拟合度最小为 0.959 95,其平均值为 0.984 26。

3.1.3 微孔填充理论模型

微孔填充理论^[23]是以热力学定律作为基础的,可利用热力学函数中的吉布斯自由能、摩尔自由焓等进行描述,函数关系式如下:

$$V = Q_n \exp \left[-D \ln \left(\frac{P_0}{P_b} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中: Q_n 为饱和吸附量, cm^3 ; D 为亲和性常数; P_0 为甲烷饱和蒸气压,MPa, P_b 为平衡压力,MPa。

2个变量下 D-R 方程理论拟合结果如图 6 所示。在不同液氮冻融时间和不同试验温度条件下,利用微孔填充理论模型对煤样的瓦斯吸附试验数据进行拟合,不同液氮冻融时间条件下拟合度最大为 0.990 71,拟合度最小为 0.980 89,平均为 0.986 226。拟合效果较好。不同试验温度下拟合度最大为 0.990 71,拟合度最小为 0.980 89,平均为 0.986 226。

据 Freundlich 理论、Langmuir 理论、D-R 方程三者拟合结果得出表 2,通过分析得知,Langmuir 理论模型的拟合度均值最高,但 3 种模型差值不大。而三者的方差大小为 Langmuir 理论 < D-R 方程 < Freundlich 理论。所以 Langmuir 理论拟合度最高,效果最好,且误差小,适合本试验研究,故应选取其作为该试验的理论拟合模型。

3.2 不同变量对饱和吸附量的影响

根据上述分析,绘制出不同液氮冻融时间、不同初始温度与煤体瓦斯饱和吸附量之间的关系,如图 7 所示。

表 2 各吸附理论模型拟合结果对比

Table 2 Comparison result of the adsorption theoretical model fitting

项目	拟合参数	Freundlich 理论	Langmuir 理论	D-R 方程
不同液氮冻融时间	拟合度均值	0.988 7	0.996 4	0.985 64
	方差 S^2	1.19×10^{-5}	1.49×10^{-7}	1.15×10^{-5}
	标准差 S	0.003 45	3.87×10^{-4}	0.003 39
不同初始温度	拟合度均值	0.980 1	0.994 967	0.989 286 667
	方差 S^2	0.000 21	5.857×10^{-6}	5.913×10^{-5}
	标准差 S	0.014 26	0.002 42	0.007 689

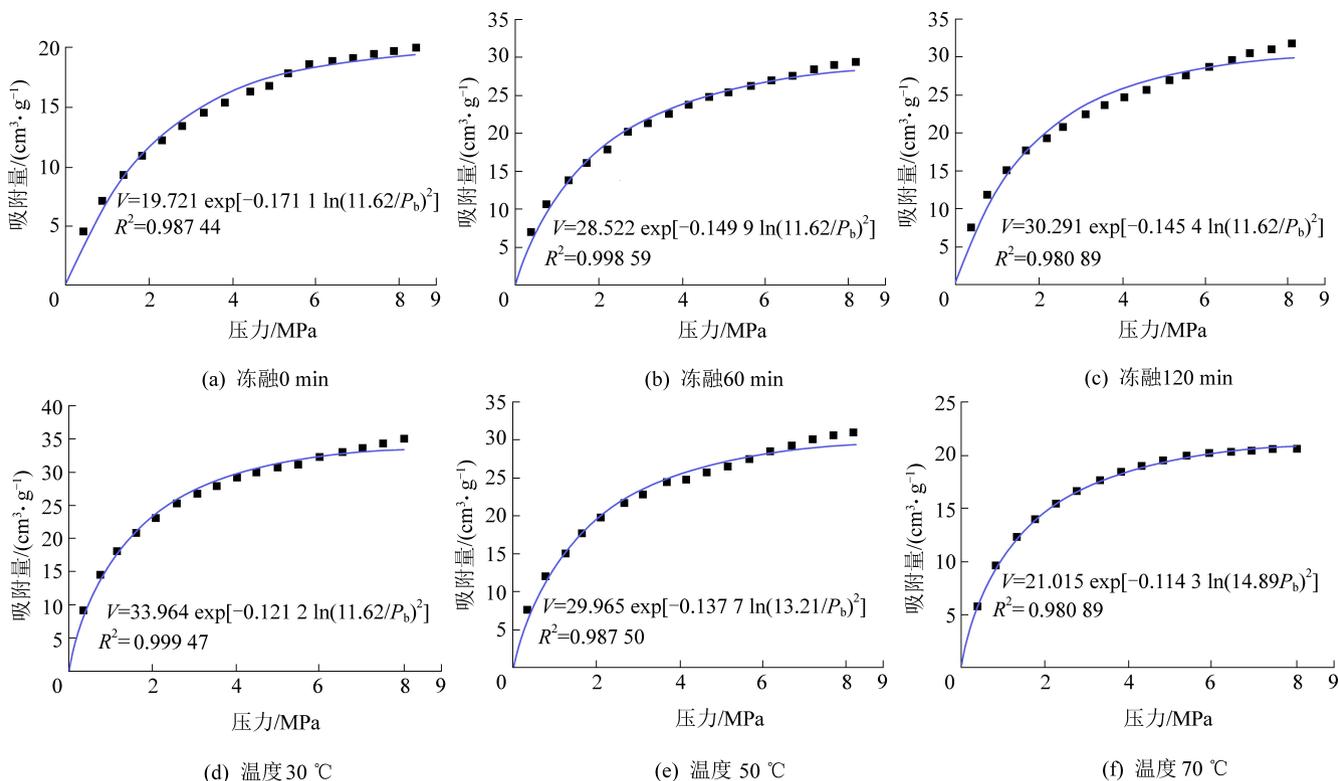


图6 基于D-R方程理论的液氮冻融时间和试验温度下吸附量与压力关系

Fig.6 Relationship between adsorption capacity and pressure at freezing-thawing time and test temperature of liquid nitrogen based on D-R theory

增大液氮冻融时间时,煤体瓦斯极限吸附量呈减速上升状态;增大初始温度时,煤体瓦斯极限吸附量呈加速降低趋势(图7)。控制其他条件不变,增大液氮冻融时间导致煤体冻裂,内部裂隙发育扩大,

从而使煤的饱和吸附量增大。有利于煤体吸附瓦斯,而增大试验初始温度使得煤体内部分子热运动加剧,从而抑制吸附。

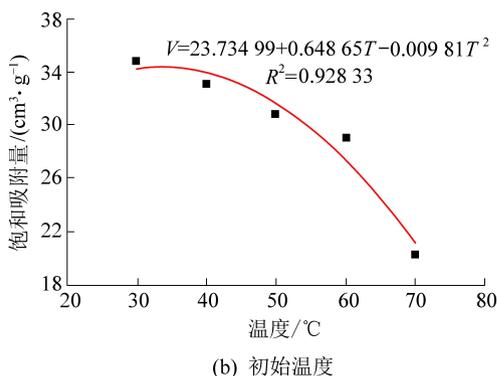
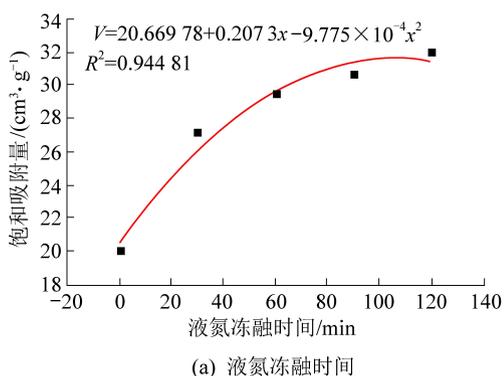


图7 不同液氮冻融时间及初始温度条件下饱和吸附量变化关系

Fig.7 Changes of saturated adsorption at different freezing-thawing time and initial temperature

3.3 不同变量对吸附理论模型参数的影响

对Langmuir理论模型参数进行拟合,进一步探索液氮冻融时间和初始温度对吸附理论模型参数的影响,并绘制出两者变化关系如图8所示。

从图8可以看出,随着液氮冻融时间的增加,吸附常数 a 值逐渐增大,说明煤的吸附能力随着液氮

冻融时间的增加逐渐增大;随着试验温度增大, a 值高逐渐减小,说明煤的吸附能力随着温度的升高逐渐减小。吸附常数 b 值变化无明显规律,这是因为压力常数除了受到液氮冻融时间、温度的影响以外,还与煤本身的属性,吸附压力有关。

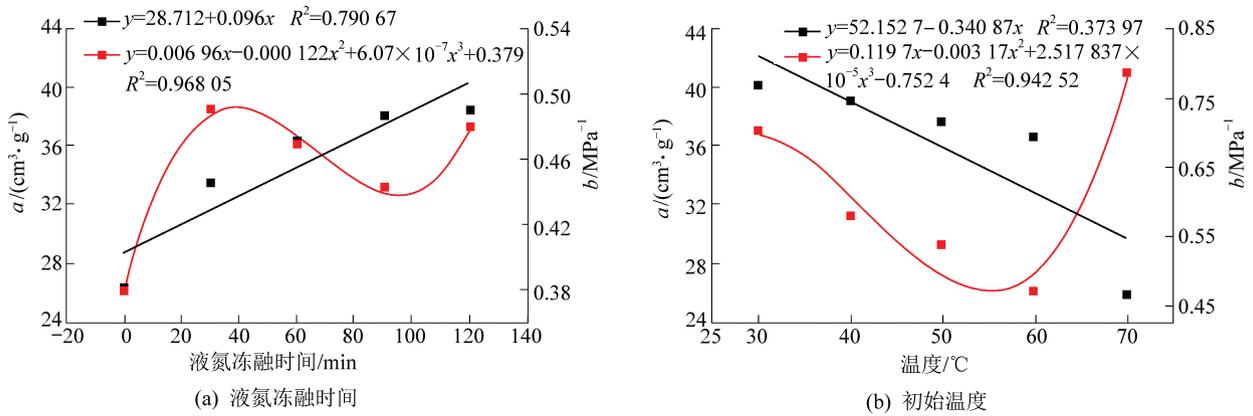


图8 不同液氮冻融时间及初始温度条件下模型参数变化拟合

Fig.8 Model parameter variation fitting diagram at different freezing-thawing time and initial temperature

4 结 论

1) 气体吸附平衡压力增大时不同液氮冻融时间和初始温度下的吸附增量均呈降低趋势;随着液氮冻融时间增加,煤样饱和吸附量逐渐增大、吸附量增量逐渐增大。随初始温度增大,煤样瓦斯饱和吸附量逐渐减小,吸附增量逐渐减小。

2) 不同液氮冻融时间条件下,各理论模型的拟合度 R^2 相比较,Langmuir 理论模型最大,约为 0.996 4,Langmuir 理论模型能更好地反映本试验煤体瓦斯吸附规律。在其他条件不变时,随着液氮冻融时间的增加,Langmuir 吸附理论模型的吸附常数 a 值由 28.5 m³/g 增大至 41 m³/g,而吸附常数 b 变化规律不明显。

3) 不同试验温度条件下,各理论模型的拟合度 R^2 相比较,Langmuir 理论模型最大,约为 0.994 9。在其他条件不变时,随着试验温度的不断增加,Langmuir 吸附理论模型中吸附常数 a 由 42 m³/g 减小至 29 m³/g,而吸附常数 b 无明显变化规律。

参考文献 (References) :

[1] 岳高伟,王兆丰,谢 策,等. 降温促进煤体对瓦斯吸附效应的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2016,44(4):45-49.
YUE Gaowei, WANG Zhaofeng, XIE Ce, *et al.* Experimental study on gas adsorption effect of coal by cooling[J]. Coal Science Technology, 2016, 44(4):45-49.

[2] 黄炳香,程庆迎,陈树亮,等. 突出煤层深孔水力致裂驱赶与浅孔抽采消突研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013,42(5):701-711.
HUANG Bingxiang, CHENG Qingying, CHEN Shuliang, *et al.* Study of coal seam outburst mitigation by deep hole hydro-fracturing and shallow hole methane drainage[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(5):701-711.

[3] 张于祥. 隐伏性突出煤层群保护层开采卸压瓦斯抽采技术研究[J]. 能源与环境, 2019,41(2):26-31.

ZHANG Yuxiang. Study on pressure relief gas drainage technology in protective seam mining of hidden outburst coal seam group[J]. Energy and Environmental Protection, 2019, 41(2):26-31.

[4] 张春会,张海霞,于永江,等. 饱水度和再溶浸对液氮冷冻煤致裂的影响[J]. 煤炭学报, 2016,41(S2):400-406.
ZHANG Chunhui, ZHANG Haixia, YU Yongjiang, *et al.* Effect of water content and redissolution on cracking of liquid nitrogen frozen coal[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S2):400-406.

[5] QIN L, ZHAI C, LIU S, *et al.* Factors controlling the mechanical properties degradation and permeability of coal subjected to liquid nitrogen freeze-thaw[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1):3675-3686.

[6] ZHAI C, QIN L, LIU S, *et al.* Pore structure in coal: pore evolution after cryogenic freezing with cyclic liquid nitrogen injection and its implication on coalbed methane extraction[J]. Energy & Fuels, 2016, 30(7):6009-6020.

[7] 张天军,许鸿杰,李树刚,等. 温度对煤吸附性能的影响[J]. 煤炭学报, 2009,34(6):802-805.
ZHANG Tianjun, XU Hongjie, LI Shugang, *et al.* Effect of temperature on coal adsorption properties [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(6):802-805.

[8] 秦跃平,刘 鹏,郝永江,等. 压力对煤体瓦斯吸附规律影响的实验研究[J]. 煤矿安全, 2014,45(12):14-17.
QIN Yueping, LIU Peng, HAO Yongjiang, *et al.* Experimental study on gas adsorption law in coal body under different pressure [J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(12):14-17.

[9] 刘业忠. 煤的孔隙结构对瓦斯吸附性能的影响[J]. 矿业装备, 2018(5):58-59.
LIU Yezhong. Effect of pore structure on gas adsorption in coal[J]. Mining Equipment, 2018(5):58-59.

[10] 陈向军,刘 军,王 林,等. 不同变质程度煤的孔径分布及其对吸附常数的影响[J]. 煤炭学报, 2013,38(2):294-300.
CHEN Xiangjun, LIU Jun, WANG Lin, *et al.* Influence of pore size distribution of different metamorphic grade of coal on adsorption constant [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(2):294-300.

[11] NAMKUNG H, XU L H, JEON Y, *et al.* Fouling deposition

- characteristic by variation of coal particle size and deposition temperature in dtf (drop tube furnace) [J]. International Symposium on Coal Combustion, 2011(8):231-237.
- [12] 梁冰, 石迎爽, 孙维吉, 等. 考虑压力作用的煤吸附/解吸 CH_4 变形试验研究[J]. 实验力学, 2014, 29(2):215-222.
LIANG Bing, SHI Yingshuang, SUN Weiji, *et al.* Experimental study on coal adsorption/desorption CH_4 deformation under pressure[J]. Experimental Mechanics, 2014, 29(2):215-222.
- [13] NIE B, LIU X, YUAN S, *et al.* Sorption characteristics of methane among various rank coals: impact of moisture[J]. Adsorption Journal of the International Adsorption Society, 2016, 22(3):315-325.
- [14] BUSCH A, KROOSS B M, GENSTERBLUM Y, *et al.* High-pressure adsorption of methane, carbon dioxide and their mixtures on coals with a special focus on the preferential sorption behaviour [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2003, 78(8):671-674.
- [15] 李波, 任永婕, 张路路, 等. 液氮对含水煤岩体增透作用的影响机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(12):145-150.
LI Bo, REN Yongjie, ZHANG Lulu, *et al.* Study on influence mechanism of liquid nitrogen to permeability improved function of water bearing coal and rock mass[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(12):145-150.
- [16] 张春会, 徐刚, 于永江, 等. 钻孔注水-注液氮冷裂增透煤的数学模型研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1):139-144.
ZHANG Chunhui, XU Gang, YU Yongjiang, *et al.* Study on permeability-enhancing mathematical model of coal fracturing with borehole water injection and liquid nitrogen injection [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1):139-144.
- [17] 吴刚, 何国梁, 张磊, 等. 大理岩循环冻融试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1):2930-2938.
WU Gang, HE Guoliang, ZHANG Lei, *et al.* Experimental study on cycles of freeze-thaw of marble [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1):2930-2938.
- [18] LEI Q, CHENG Z, LIU S, *et al.* Fractal dimensions of low rank coal subjected to liquid nitrogen freeze-thaw based on nuclear magnetic resonance applied for coalbed methane recovery [J]. Powder Technology, 2017, 325:11-20.
- [19] 李和万, 王来贵, 张春会, 等. 冷加载循环作用下煤样强度特性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(4):10-14.
LI Hewan, WANG Laigui, ZHANG Chunhui, *et al.* Study on characteristic of coal sample strength under cyclic cold loading [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(4):10-14.
- [20] YAMABE T, NEAUPANE K M. Determination of some thermo-mechanical properties of Sirahama sandstone under subzero temperature condition [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2001, 38(7):1029-1034.
- [21] 孟帅, 朱绍军. Langmuir 方程参数线性回归与非线性回归的比较[J]. 煤矿安全, 2019, 50(1):188-191.
MENG Shuai, ZHU Shaojun. Comparison between linear regression and nonlinear regression of Langmuir equation parameters [J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(1):188-191.
- [22] 王倩倩, 王大祥, 刘仁植. Freundlich 方程常数测定实验的设计实践[J]. 广东化工, 2016, 43(12):44-45.
WANG Qianqian, WANG Daxiang, LIU Renzhi. Design and practice of Freundlich equation constant determination experiment [J]. Guangdong Chemical Industry, 2016, 43(12):44-45.
- [23] 姜永东, 宋晓, 刘浩, 等. 大功率声波作用下煤层气吸附特性及其模型[J]. 煤炭学报, 2014, 39(S1):152-157.
JIANG Yongdong, SONG Xiao, LIU Hao, *et al.* Adsorption model and law of methane under the effect of high-power acoustic wave [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S1):152-157.