

两淮低渗煤的甲烷吸附相密度差异特征及影响因素分析

潘杰成^{1*}, 刘会虎^{1#}, 丁海², 徐宏杰¹, 方惠京²

¹安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

²安徽省煤田地质局勘查研究院, 安徽 合肥

收稿日期: 2025年10月2日; 录用日期: 2025年10月30日; 发布日期: 2025年11月10日

摘要

甲烷吸附相密度的差异是煤中甲烷吸附量的关键影响因素。本文以两淮煤为例, 通过开展煤的甲烷高压等温吸附实验, 采用截距法计算并探讨了不同条件下甲烷吸附相密度的差异, 结合压汞实验和低温液氮吸附实验分析了煤的孔隙结构, 讨论了甲烷吸附相密度的控制因素。研究表明, 在0~5 MPa压力区间内, 甲烷的绝对吸附量和吸附相密度增长较快; 在5 MPa至拐点压力时, 甲烷的吸附量和吸附相密度增长速度减缓; 超过拐点压力(约11 MPa), 甲烷的过剩吸附量随压力增加而减小, 吸附相密度在拐点压力达到峰值后随压力增高出现下降, 并最终趋于稳定; 随着温度升高, 甲烷在煤孔隙中的吸附能力减弱, 煤中甲烷的吸附相密度呈现下降趋势。在孔径为0~10 nm和10~100 nm范围内, 甲烷吸附相密度与孔容呈、比表面积呈负相关; 在孔径为100~1000 nm和大于1000 nm的范围内, 甲烷吸附相密度与孔容、比表面积呈正相关, 甲烷吸附相密度与总孔容呈正相关, 与总比表面积呈负相关, 揭示煤中甲烷吸附以微孔充填为主。

关键词

甲烷吸附相密度, 孔隙结构, 过剩吸附量, 微孔充填

The Characteristics and Influencing Factors of Methane Adsorption Phase Density Differences in Low-permeability Coal from Huainan and Huaibei Region

Jiecheng Pan^{1*}, Huihu Liu^{1#}, Hai Ding², Hongjie Xu¹, Huijing Fang²

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 潘杰成, 刘会虎, 丁海, 徐宏杰, 方惠京. 两淮低渗煤的甲烷吸附相密度差异特征及影响因素分析[J]. 矿山工程, 2025, 13(6): 1276-1284. DOI: 10.12677/me.2025.136142

¹School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui²Anhui Coal Geological Bureau Exploration and Research Institute, Hefei Anhui

Received: October 2, 2025; accepted: October 30, 2025; published: November 10, 2025

Abstract

The difference in methane adsorption phase density is a key influencing factor for methane adsorption capacity in coal. Taking the coal from the Huainan and Huaibei area as an example, this paper carried out high-pressure isothermal adsorption experiments of methane in coal, calculated and discussed the differences in methane adsorption phase density under different conditions by using the intercept method. Combined with mercury intrusion porosimetry and low-temperature nitrogen adsorption experiments, the pore structure of coal was analyzed, and the controlling factors of methane adsorption phase density were discussed. The research results show that the absolute adsorption capacity and adsorption phase density of methane increase rapidly within the pressure range of 0~5 MPa; when the pressure is from 5 MPa to the inflection point pressure of about 11 MPa, the growth rate of methane adsorption capacity and adsorption phase density slows down; when the pressure exceeds the inflection point pressure, the excess adsorption capacity decreases with the increase of pressure, and the adsorption phase density reaches the peak at the inflection point pressure, then decreases with the increase of pressure and finally tends to be stable. With the increase of temperature, the adsorption capacity of methane in pores of coal weakens, and the adsorption phase density of methane in coal shows a downward trend. In the pore size ranges of 0~10 nm and 10~100 nm, the methane adsorption phase density is negatively correlated with the pore volume and specific surface area; in the pore size ranges of 100~1000 nm and greater than 1000 nm, the methane adsorption phase density is positively correlated with the pore volume and specific surface area. The methane adsorption phase density is positively correlated with the total pore volume and negatively correlated with the total specific surface area, revealing that the methane adsorption in coal is dominated by micropore filling.

Keywords

Methane Adsorption Phase Density, Pore Structure, Excess Adsorption Amount, Micropore Filling

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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

Open Access

1. 引言

近年来,煤层甲烷(CBM)的吸附特性及其控制因素已成为非常规能源开发研究的热点[1][2]。其中,甲烷吸附相密度的研究对于揭示煤层甲烷的赋存状态并提高煤层气采收率具有重要意义[3]-[6]。国内外学者利用高压等温吸附实验对不同煤中甲烷的吸附特性进行了广泛研究[7]-[12],结合重量法与体积法研究了煤层甲烷吸附相密度的变化规律[3][13]-[20],分析探讨了煤层甲烷吸附及甲烷吸附相密度的影响。部分研究分析了孔隙结构对煤层甲烷吸附的影响,确认了煤中甲烷吸附存在微孔充填吸附[21][22]。大量工作揭示了煤中甲烷吸附受温度、压力、煤质、煤化程度及煤的孔隙结构的影响[23]-[29]。针对煤中甲烷吸附相密度,国内外不同学者归纳总结了甲烷吸附相密度的方法,如经验常数法、截距法、模型拟合法等[30][31],局部研究通过简化局部密度理论(SLD)开展了甲烷吸附相密度模拟,探讨了甲烷吸附相密度的影响因素[32]-[35]。上述工作多数基于沁水盆地高变质的无烟煤开展了研究工作,个别工作对两淮低渗

煤甲烷吸附相密度模拟开展了一定的工作，然而对于两淮低渗煤的甲烷吸附相密度差异尚未开展实质性的工作。本文通过选取两淮煤田煤样开展了高压等温吸附实验，采用截距法计算并探讨了不同条件下甲烷吸附相密度的差异，结合压汞实验和低温液氮吸附实验分析了煤的孔隙结构，讨论了压力的变化，温度的差异，以及不同的孔隙结构控制甲烷吸附相密度变化曲线，揭示两淮低渗煤中甲烷吸附相密度的变化规律。

2. 实验样品与方法

2.1. 采样及基本物性测试

实验样品来自新集二矿(XJ)、芦岭矿III(LL)、祈南煤矿(QN)、袁店一井(YD)、许疃煤矿(XT-1 至 XT-3)、桃园煤矿(TY)的煤样，依据《煤的镜质体反射率显微镜测定方法》GB/T 6948-2008、《煤的显微组分组和矿物测定方法》GB/T 8899-2013、《烟煤显微组分分类》GB/T 15588-2013、《镜质体反射率的煤化程度分级》MT/T 1158-2011，进行工业分析、显微组分和镜质组反射率测定。煤样工业分析和显微组分及镜质组反射率测定结果中煤样的水分于 1.2%上下浮动、挥发分位于 30%~35%左右、镜煤反射率于 0.71%~0.92%，具体物性参数结果见表 1。

Table 1. Basic physical property parameters of coal samples
表 1. 煤样基本物性参数

编号	煤层号	A _d (%)	M _{ad} (%)	V _{daf} (%)	R _{O, max} (%)	实验温度(℃)
XJ	3	4.70	1.36	34.03	0.71	48
LL	10	7.63	1.02	35.08	0.72	42
QN	3-2	21.76	1.59	36.21	0.88	
XT-1	7-2	21.16	1.32	34.73	0.84	42
XT-2	3-2	12.41	1.02	34.71	0.90	48
XT-3	7-2	10.73	0.88	31.80	0.96	48
TY	10	43.12	1.62	/	0.73	48
YD	10	21.77	1.06	30.58	0.92	48

本次实验采用新集二矿、芦岭矿III、祈南煤矿、袁店一井、许疃煤矿、桃园煤矿煤样共 8 个样品进行等温吸附实验，根据《GB/T 474》GB/T 474 国家标准制样，煤的甲烷等温吸附实验采用重量法依据《页岩甲烷等温吸附测定方法第 2 部分：重量法》GB/T 35210.2-2020 进行实验仪器为德国 Rubotherm (儒压) 的 ISOSORP-HP 磁悬浮天平高压等温吸附仪。实验步骤包括气密性检验、空白试验、预处理试验、浮力试验、吸附实验、脱附试验 6 个过程。实验采用吸附质为纯度 99.99%的甲烷气体，实验温度分别为 42 和 48℃ (考虑深度每相差 200 m 时，地层温度相差约 6℃)，实验最高压力设定为 35 MPa，吸附和解吸过程均设置 24 个平衡吸附压力点。

压汞实验采用 AutoPore IV 9500 压汞仪，依照 GB/T 21650.1-2008 《压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度第 1 部分：压汞法》执行。低温液氮吸附实验采用 TriStar II 3020 自动表面积和孔径分析仪，测试分析依据 GB/T 19587-2017 《气体吸附 BET 法测定固态物质比表面积》执行。结合煤样的孔径分布，进一步分析了孔隙结构对甲烷吸附相密度的影响。

2.2. 分析计算方法

1) 采用截距法计算并得出甲烷吸附相密度其公式为:

$$M_e = -\rho_g V_a + \rho_g V_a \quad (1)$$

通过变形可得

$$\rho_a = \frac{M_e}{V_a} + \rho_g \quad (2)$$

其中: ρ_a 为甲烷吸附相密度, 单位为 cm^3 ; V_a 为甲烷吸附相体积, 单位为 cm^3 ; ρ_g 为甲烷自由相密度, g/cm^3 甲烷的过剩吸附量为 M_e 。

本文中相邻压力点分别采用公式(2)计算吸附相密度

2) 采用优化 Langmuir 模型对甲烷的等温吸附实验数据进行拟合并分析低压段和全压段甲烷的过剩吸附量与压力的关系, 其中优化 Langmuir 模型的吸附等温模型方程为:

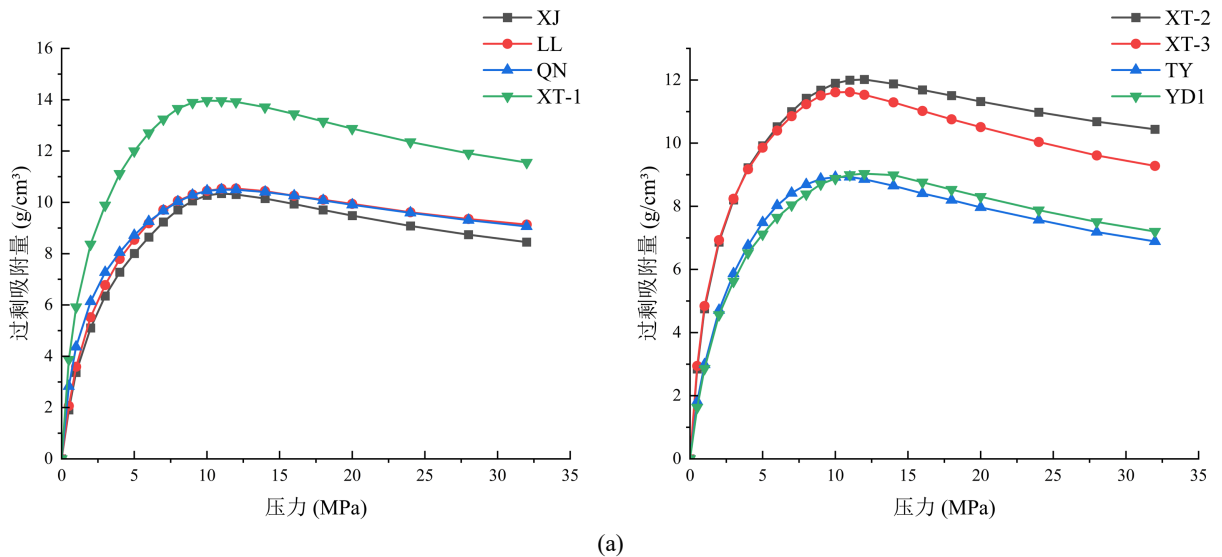
$$M_e = V_L \frac{P}{P_L + P} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_a} \right) \quad (3)$$

3. 结果与分析

3.1. 压力对低渗煤甲烷吸附相密度特征分析

根据等温吸附实验对 XJ、LL、QN、XT-1、XT-2、XY-3、TY、YD 煤样的过剩吸附量、压力、自由相密度、吸附相密度如图 1 所示。

由图 1(a)可知, 在气体压力段处于 0a 至拐点压力时, 过剩吸附量与压力呈正相关, 即过剩吸附量随压力的升高而增加, 其增长速率且随着压力的增大逐渐减缓; 当气体压力超过拐点压力时, 过剩吸附量达到极值随之减小, 并逐渐趋于稳定。根据自由相密度与过剩吸附量的关系(图 1(b)), 通过截距法分别计算出相邻压力点的吸附相密度, 其结果如图 1(c)。由图 1(c)可知, 在到达拐点压力之前, 甲烷的吸附相密度随着压力的增大而增大, 但随着压力的增大, 由公式(2)得, 过剩吸附量减小的幅度大于自由相密度增大的幅度从而导致吸附相密度出现下降。



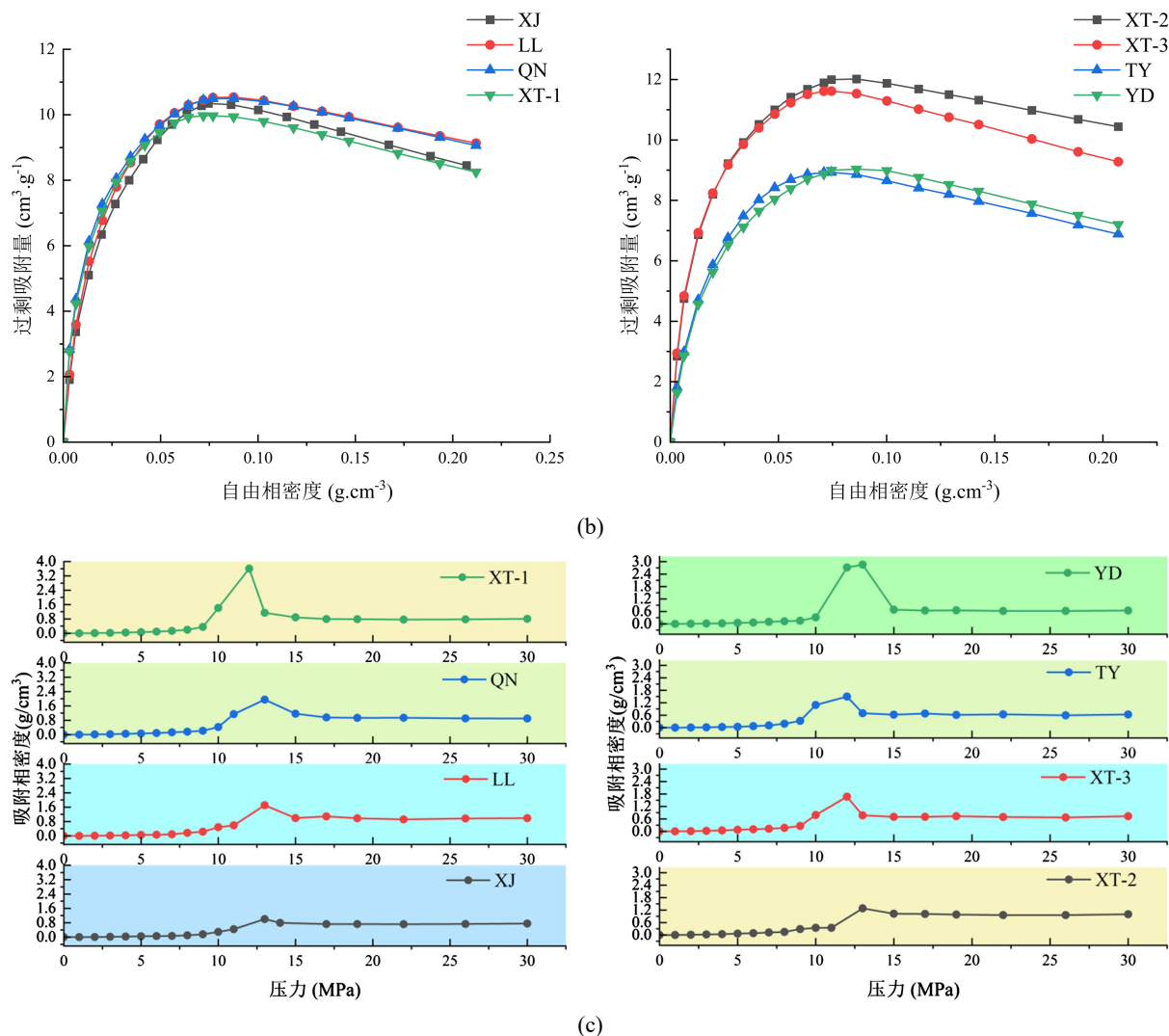


Figure 1. The variation of methane adsorption parameters in coal. (a) The variation of methane excess adsorption capacity with pressure; (b) The variation of methane excess adsorption capacity with free-phase density; (c) The variation of adsorption phase density with pressure

图 1. 煤中甲烷吸附参数的变化。(a) 甲烷过剩吸附量随压力的变化；(b) 甲烷过剩吸附量随自由相密度的变化；(c) 吸附相密度随压力的变化

3.2. 温度对低渗煤甲烷吸附相密度特征分析

通过等温吸附实验分别采用 42℃ 的 LL 和 XT-1 煤样和 48℃ 的 XJ、XT-3、TY 煤样进行等温吸附实验对比分析不同温度下甲烷吸附相密度的差异如图 2(a)，由图 2(b)可得 42℃ 的煤样的吸附相密度整体都高于 48℃ 的煤样，其原因是由于温度的升高时，甲烷在煤孔隙中的吸附能力减弱，从而导致吸附相密度降低。吸附势能随温度升高而降低，因为温度的升高导致煤中孔隙内甲烷分子的平均动能会随着增加，分子间的相互作用力也会因此减小，从而影响吸附相密度。同时由图 2(b)可知，相同温度下甲烷吸附相密度存在一定的差异，其原因可能与煤的孔隙结构有关。

3.3. 孔隙大小对低渗煤甲烷吸附相密度特征分析

煤中的微孔是甲烷吸附的主要场所，因此，微孔体积的增加将显著提高甲烷的吸附相密度[13]。为了

探讨不同煤样在甲烷吸附相密度方面的差异，本文通过对新集煤矿和许瞳煤矿的煤样进行低温液氮吸附实验和压汞实验，比较了同一煤层中不同煤样的孔容和比表面积差异。相关实验结果及其对甲烷吸附相密度的影响，见表 2 和表 3，通过对表 2 中的数据进行对比分析，进一步绘制图 3 和图 4，展示了 XJ 煤样和 XT-2 煤样在不同孔容和比表面积条件下甲烷吸附相密度的差异，由于低温液氮实验中孔容孔径 0~10 nm、100~1000 nm 中 XJ 和 XT-2 相同因此不做比较。

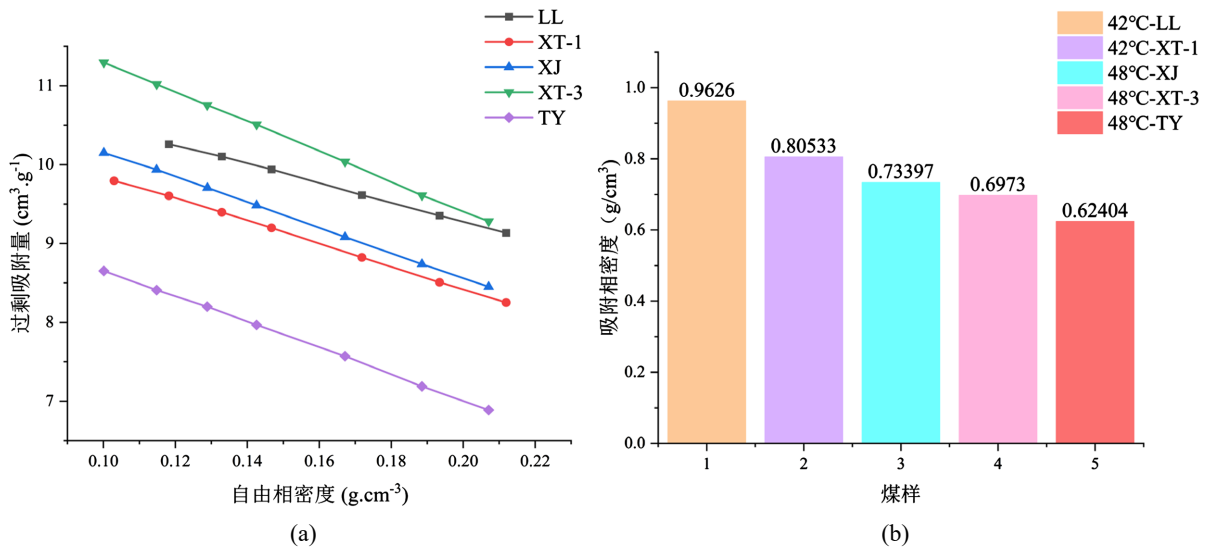


Figure 2. Curve charts of adsorption data relationships for various coal samples. (a) Curve chart of free phase density-excess adsorption amount relationship; (b) Curve chart of adsorption phase density relationship of coal samples at different temperatures

图 2. 各煤样吸附数据关系曲线图。(a) 压力下降段过剩吸附量与自由相密度的关系；(b) 不同温度煤样吸附相密度关系曲线图

Table 2. Pore structure parameters of coal samples from mercury intrusion porosimetry (MIP) experiments
表 2. 压汞实验下煤样的孔隙结构参数

项目		0~10 nm		10~100 nm		100~1000 nm		>1000 nm		总和	
		XJ	XT-2	XJ	XT-2	XJ	XT-2	XJ	XT-2	XJ	XT-2
压汞	孔容	0.0081	0.0080	0.0092	0.0086	0.0015	0.0034	0.0095	0.0110	0.0283	0.0310
	比表面积	4.6374	4.5978	1.7615	1.6145	0.0227	0.0417	0.0030	0.0039	6.4246	6.4049

Table 3. Pore structure parameters of coal samples under low-temperature nitrogen adsorption conditions
表 3. 低温液氮条件下煤样的孔隙结构参数

项目			0~10 nm		10~100 nm		100~1000 nm		总和	
			XJ	XT-2	XJ	XT-2	XJ	XT-2	XJ	XT-2
低温液氮	孔容	0.0001	0.0001	0.0004	0.0005	0.0001	0.0001	0.0004	0.0005	0.0007
	比表面积	0.0861	0.0819	0.0478	0.0763	0.0861	0.0819	0.0478	0.0763	0.1630

注：孔容，mL/g；比表面积， m^2/g 。

通过图 3(a)可以清楚地看出，在 0~10 nm 和 10~100 nm 范围内，新集煤样(XJ)的孔容大于许瞳煤样(XT-

2)的孔容,但其甲烷吸附相密度较 XT-2 低,即此时甲烷的吸附相密度与煤样的孔容呈负相关。然而,在 100~1000 nm、大于 1000 nm 以及总孔容范围内,XT-2 明显大于 XJ 的孔容,且 XT-2 的吸附相密度也大于 XJ 的吸附相密度,表明在这些孔径范围内,甲烷的吸附相密度与孔容呈正相关。这一差异的原因在于微小孔的孔容差异较小,而在中大孔和总孔容中,XT-2 的孔容显著大于 XJ,导致甲烷吸附相密度不仅受微小孔孔容的影响,当中大孔和总孔容差异较大时,微小孔孔容较大的煤样反而具有较低的吸附相密度。

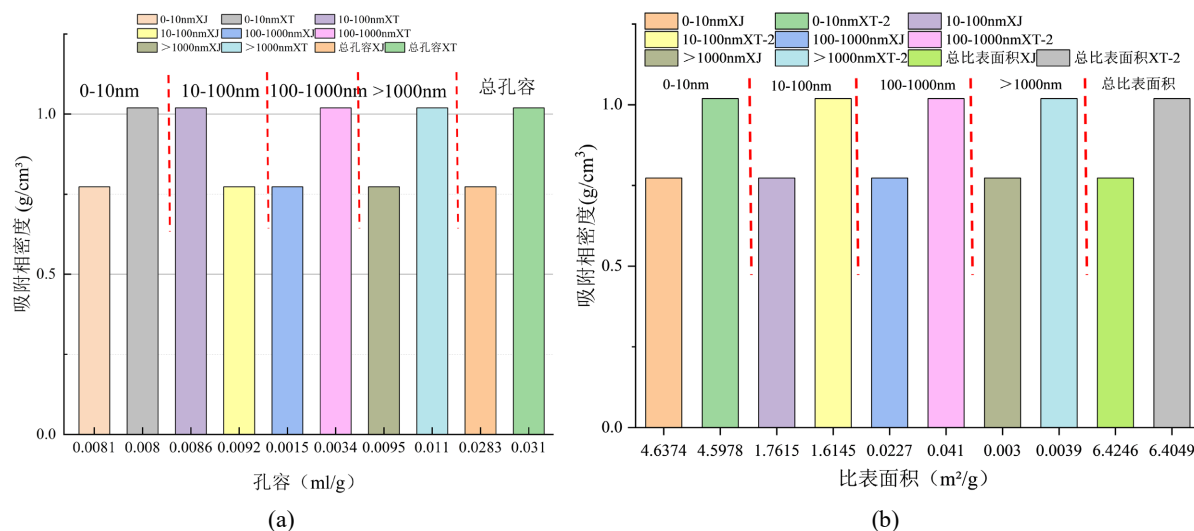


Figure 3. Relationship between pore volume, specific surface area from mercury intrusion porosimetry and adsorption phase density. (a) Relationship between different pore volumes from mercury intrusion porosimetry and adsorption phase density; (b) Relationship between different specific surface areas from mercury intrusion porosimetry and adsorption phase density

图 3. 压汞实验孔容 - 比表面积与吸附相密度关系。(a) 压汞不同孔容 - 吸附相密度关系; (b) 压汞不同比表面积吸附相密度关系

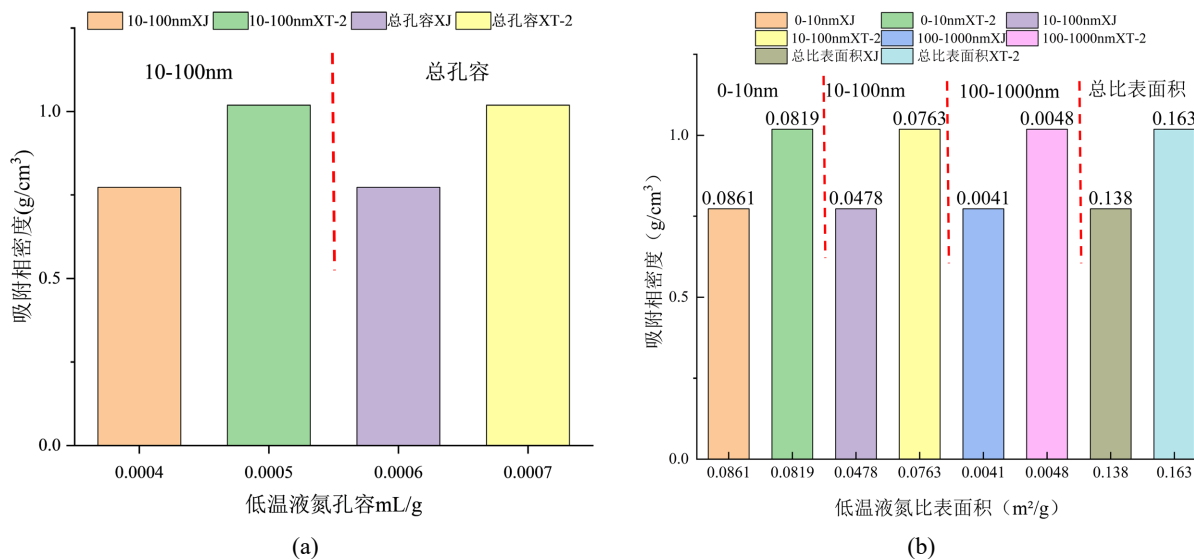


Figure 4. Relationship between pore volume, specific surface area from low-temperature nitrogen adsorption experiments and adsorption phase density. (a) Relationship between different pore volumes under low-temperature nitrogen adsorption and adsorption phase density; (b) Relationship between different specific surface areas under low-temperature nitrogen adsorption and adsorption phase density

图 4. 低温液氮实验孔容 - 比表面积与吸附相密度关系。(a) 低温液氮不同孔容 - 吸附相密度关系; (b) 低温液氮不同比表面积吸附相密度关系

同时,从图 3(b)可以看出,在微小孔(0~10 nm, 和 10~100 nm)范围内,甲烷的吸附相密度与比表面积呈负相关;在 100~1000 nm 和大于 1000 nm 的范围内,甲烷吸附相密度同样与比表面积呈负相关;总比表面积与吸附相密度之间也呈负相关。

通过对新集煤样(XJ)和许瞳煤样(XT-2)的低温液氮吸附实验图 4,分别比较了不同比表面积和孔容对甲烷吸附相密度的影响。10~100 nm 微小孔容中甲烷的吸附相密度与孔容呈正相关,总孔容也表现为与甲烷的吸附相密度呈正相关,在 0~10 nm 时比表面积与甲烷的吸附相密度呈负相关关系,10~100 nm,100~1000 nm,总比表面积甲烷的吸附相密度与比表面积表现为正相关,结果与压汞实验基本一致。

造成上述现象的主要原因是,煤中甲烷的吸附并非完全依赖于单层吸附,同时受微孔充填的影响。

4. 结论

1) 0~5 MPa 时吸附相密度增长较快;在 5 MPa-拐点压力时,甲烷的吸附量和吸附相密度增长速度减缓;超过拐点压力时,甲烷的过剩吸附量随压力增加而减小,且吸附相密度在拐点压力时由于压力的变大,但随着压力的增大,过剩吸附量减小的幅度大于自由相密度增大的幅度,而导致吸附相密度出现下降。

2) 不同煤样在不同温度下随着温度升高,煤中的甲烷吸附相密度减小;由于温度的升高时,甲烷在煤孔隙中的吸附能力减弱,从而导致吸附相密度降低。吸附势能随温度升高而降低,因为温度的升高导致煤中孔隙内甲烷分子的平均动能会随着增加,分子间的相互作用力也会因此减小,从而影响吸附相密度。

3) 在孔径为 0~10 nm 和 10~100 nm 范围内,甲烷吸附相密度与孔容呈、比表面积呈负相关;在孔径为 100~1000 nm 和大于 1000 nm 的范围内,甲烷吸附相密度与孔容、比表面积呈正相关,甲烷吸附相密度与总孔容呈正相关,与总比表面积呈负相关。造成这一现象的主要原因是,煤中甲烷的吸附并非完全依赖于单层吸附,同时受微孔充填的影响。

基金项目

国家自然科学基金项目(42277483,42472228),2023 年安徽省重大基础研究项目(2023z04020001),安徽省公益性地质工作项目(2023-g-1-21,2021-g-2-14)。

参考文献

- [1] 崔永君,李育辉,张群,等.煤吸附甲烷的特征曲线及其在煤层气储集研究中的作用[J].科学通报,2005,50(S1):76-81.
- [2] 张遂安,叶建平,唐书恒,等.煤对甲烷气体吸附-解吸机理的可逆性实验研究[J].天然气工业,2005,25(1):44-47.
- [3] 刘会虎,范正谱,徐宏杰,等.煤层甲烷吸附相密度、吸附模型、吸附机理的再认识[J].煤炭学报,2023,48(10):3806-3817.
- [4] 秦勇,郑长东,王博洋,等.基于等温吸附曲线的煤储层产气潜力定量评价——以黔北地区长岗矿区为例[J].天然气工业,2018,38(9):40-47.
- [5] 毋亚文,潘结南.煤层甲烷等温吸附拟合模型[J].煤炭学报,2017,42(S2):452-458.
- [6] 许江,蔡果良,彭守建,等.温度对二次炭化型煤吸附特性及孔结构影响的研究[J].煤炭科学技术,2021,49(11):21-29.
- [7] 蔡俊杰.构造煤孔裂隙结构演化对甲烷吸附解吸规律研究[D]:[硕士学位论文].贵阳:贵州大学,2023.
- [8] 张昆.不同煤体结构煤中甲烷吸附/解吸-扩散性能及受控机制[D]:[博士学位论文].北京:中国矿业大学,2022.
- [9] 高文萱.大同煤田塔山井田接触变质煤甲烷吸附解吸特性研究[D]:[硕士学位论文].太原:太原理工大学,2023.

- [10] 李树刚, 周雨璇, 胡彪, 等. 低阶煤吸附孔结构特征及其对甲烷吸附性能影响[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(2): 127-136.
- [11] 贾腾飞. 淮东南低阶煤孔隙结构特征及对甲烷吸附的影响[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2021.
- [12] 汤志鹏. 潘三矿 11-2 煤甲烷吸附/解吸特征研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- [13] 降文萍, 崔永君, 钟玲文, 等. 煤中水分对煤吸附甲烷影响机理的理论研究[J]. 天然气地球科学, 2007(4): 576-579+583.
- [14] 蔺亚兵, 马东民, 刘钰辉, 等. 温度对煤吸附甲烷的影响实验[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(6): 24-28.
- [15] 杨靖浩. 烟煤和无烟煤高压 CH₄ 吸附解吸特性差异[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.
- [16] 李树刚, 白杨, 林海飞, 等. 温度对煤吸附瓦斯的动力学特性影响实验研究[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(2): 181-186+272.
- [17] 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.
- [18] 吴双, 汤达祯, 李松, 等. 温度压力对甲烷超临界吸附能量参数的影响机制[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 60-67.
- [19] 胡彪. 煤中多尺度孔隙结构的甲烷吸附行为特征及其微观影响机制[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2022.
- [20] 何珊. 煤岩甲烷高压吸附特性及其影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- [21] 张明杰, 刘浩, 贾天让, 等. 颗粒煤超临界态甲烷吸附相密度特征研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 105-113.
- [22] 陈磊, 姜振学, 纪文明, 等. 陆相页岩微观孔隙结构特征及对甲烷吸附性能的影响[J]. 高校地质学报, 2016, 22(2): 335-343.
- [23] Mastalerz, M., Drobnia, A., Strapoć, D., Solano Acosta, W. and Rupp, J. (2008) Variations in Pore Characteristics in High Volatile Bituminous Coals: Implications for Coal Bed Gas Content. *International Journal of Coal Geology*, **76**, 205-216. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2008.07.006>
- [24] Clarkson, C.R., Bustin, R.M. and Levy, J.H. (1997) Application of the Mono/Multilayer and Adsorption Potential Theories to Coal Methane Adsorption Isotherms at Elevated Temperature and Pressure. *Carbon*, **35**, 1689-1705. [https://doi.org/10.1016/s0008-6223\(97\)00124-3](https://doi.org/10.1016/s0008-6223(97)00124-3)
- [25] Chalmers, G.R.L. and Marc Bustin, R. (2007) On the Effects of Petrographic Composition on Coalbed Methane Sorption. *International Journal of Coal Geology*, **69**, 288-304. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2006.06.002>
- [26] Crosdale, P.J., Moore, T.A. and Mares, T.E. (2008) Influence of Moisture Content and Temperature on Methane Adsorption Isotherm Analysis for Coals from a Low-Rank, Biogenically-Sourced Gas Reservoir. *International Journal of Coal Geology*, **76**, 166-174. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2008.04.004>
- [27] 周家锐, 宋晓夏, 李伟. 西山煤田古交矿区不同深度煤储层 CH₄ 吸附解吸特征[J]. 煤矿安全, 2020, 51(12): 1-7.
- [28] 张凯, 汤达祯, 陶树, 等. 不同变质程度煤吸附能力影响因素研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(5): 192-197.
- [29] 肖藏岩, 韦重韬, 郭立稳. 中低煤阶煤对 CO 的吸附/解吸特性[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(11): 98-102.
- [30] 刘操, 张玉贵, 贾天让, 等. 气源岩吸附试验的机理及吸附特征新认识[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3441-3452.
- [31] Liu, H., Liu, J., Gao, D., Fan, Z., Xu, H., Ding, H., et al. (2024) New Insight into CH₄ Adsorption Mechanism in Coal Based on Modeling Analysis of Different Adsorption Theories. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **12**, Article 113174. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113174>
- [32] Han, S., Wang, S., Guo, C., Sang, S., Xu, A., Gao, W., et al. (2024) Distribution of the Adsorbed Density of Supercritical CO₂ onto the Anthracite and Its Implication for CO₂ Geologic Storage in Deep Coal. *Geoenergy Science and Engineering*, **234**, Article 212624. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212624>
- [33] Yang, Q., Xue, J., Li, W., Hu, B., Ma, Q., Zhan, K., et al. (2022) Reconstructions of Supercritical CO₂ Adsorption Isotherms and Absolute Adsorption Estimation in Nanoporous Coals Considering Volumetric Effects and Varying Adsorbed Phase Densities. *Chemical Engineering Journal*, **433**, Article 133492. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133492>
- [34] Chang, Y., Yao, Y., Wang, L. and Zhang, K. (2024) High-Pressure Adsorption of Supercritical Methane and Carbon Dioxide on Coal: Analysis of Adsorbed Phase Density. *Chemical Engineering Journal*, **487**, Article 150483. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150483>
- [35] 王帅峰, 韩思杰, 桑树勋, 等. 煤层亚临界/超临界 CO₂ 吸附特征与封存模式[J]. 天然气工业, 2024, 44(6): 152-168.