

宿州矿区祁南煤矿构造煤甲烷等温吸附特征研究

王语彤, 李凤丽*

宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

收稿日期: 2025年6月12日; 录用日期: 2025年7月7日; 发布日期: 2025年7月15日

摘要

本研究选取祁南煤矿构造变形煤体作为研究样本, 综合运用宏观形变观测和等温吸附测试方法, 系统探讨了碎裂煤、碎粒煤两种典型构造煤及原生结构煤在30℃、40℃及50℃温控条件下的甲烷气体吸附行为。结果表明: 宿州矿区祁南煤矿发育多种不同变形特征的构造煤, 其甲烷吸附特征与原生结构煤存在差异。研究区煤样朗缪尔体积(V_L)为23.98~28.33 cm³/g, 朗缪尔压力(P_L)分布在2.70~3.90 MPa之间。其中, 构造煤的 V_L 高于原生结构煤, 而 P_L 低于原生结构煤, 表明构造煤甲烷吸附能力强于原生结构煤, 在相同的储层压力条件下, 构造煤更易发生瓦斯突出事故。在煤体吸附甲烷过程中, 压力呈现显著促进作用, 而温度则表现出抑制作用。具体表现为: 在0~3 MPa低压区间, 甲烷吸附量与压力变化呈近似线性增长关系; 当压力升至3~10 MPa高压区间时, 吸附量虽仍随压力升高而增加, 但其增速呈现明显递减趋势。

关键词

构造煤, 宏观变形, 甲烷, 等温吸附

Characterization of Methane Isothermal Adsorption in Tectonic Coal from Qinan Coal Mine, Suzhou Mining Area

Yutong Wang, Fengli Li*

School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

Received: Jun. 12th, 2025; accepted: Jul. 7th, 2025; published: Jul. 15th, 2025

Abstract

In this study, the tectonically deformed coal body of Qinan Coal Mine was selected as the research

*通讯作者。

文章引用: 王语彤, 李凤丽. 宿州矿区祁南煤矿构造煤甲烷等温吸附特征研究[J]. 自然科学, 2025, 13(4): 799-806.
DOI: 10.12677/ojns.2025.134084

sample, and the macroscopic deformation observation and isothermal adsorption test methods were comprehensively used to systematically discuss the coal. The methane gas adsorption behavior of two typical structural coals and primary structural coals of broken coal and crushed coal under temperature control conditions of 30°C, 40°C and 50°C was obtained. The results show that there are a variety of tectonic coals with different deformation characteristics in Qinan Coal Mine in Suzhou Mining Area, and their methane adsorption characteristics are different from those of primary structural coals. The volume (VL) of the coal samples in the study area was 23.98~28.33 cm³/g, and the pressure (PL) of the Langmuir was between 2.70~3.90 MPa. Among them, the VL of structural coal is higher than that of primary structural coal, while the PL is lower than that of primary structural coal, indicating that the methane adsorption capacity of structural coal is stronger than that of primary structural coal, and under the same reservoir pressure conditions, structural coal is more prone to gas outburst accidents. In the process of methane adsorption by coal, pressure showed a significant promoting effect, while temperature showed an inhibiting effect. The specific results showed that in the low pressure range of 0~3 MPa, the methane adsorption capacity and pressure change showed an approximately linear growth relationship. When the pressure rises to the high pressure range of 3~10 MPa, the adsorption capacity still increases with the increase of pressure, but its growth rate shows a decreasing trend.

Keywords

Tectonic Coal, Macroscopic Deformation, Methane, Isothermal Adsorption

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

根据 2023 年官方发布的能源统计报告显示,我国作为全球重要的化石能源储备国,其能源结构呈现显著的资源分布特征:煤炭资源占据主导地位,石油及天然气储备则相对有限。2023 年国家统计年鉴显示,在当年一次能源生产总量中,原煤生产贡献度达到 55.3%,充分印证了“煤炭富集、油气紧缺”的能源禀赋格局。这种以煤炭为主体、油气资源相对匮乏的能源分布特征,构成了我国现阶段能源体系的基本面。可见,煤炭是我国主体能源,未来相当长时间不会改变。

然而,煤炭开采会面临瓦斯突出、矿井突水、冲击地压等地质灾害。在煤矿开采作业过程中,瓦斯(煤层气)作为高危致灾因子,常诱发煤岩瓦斯复合型动力灾害。这类事故不仅威胁井下作业人员生命安全,还可能导致严重的经济损失及次生生态环境破坏,是制约矿山安全生产的关键风险源。瓦斯作为兼具窒息风险与易燃易爆特性的气体,其在井下异常涌出时可能引发多重安全风险。当作业区域发生瓦斯高浓度气体积聚时,不仅显著提升爆炸事故概率,更会快速降低密闭空间氧含量,造成作业人员急性缺氧性窒息[1]。此外,根据国际环境署相关研究,甲烷(瓦斯主要成分)作为强效温室介质,其大气排放具有显著的臭氧层损耗潜能。研究数据表明,在百年时间尺度内,单位质量甲烷产生的温室效应强度可达二氧化碳的 28~36 倍,若考虑其在大气化学反应中对平流层臭氧的次生破坏作用,实际环境影响系数将进一步放大。构造破碎煤体分布区往往是瓦斯异常涌出高危区域。因此,深入揭示构造变形煤体中甲烷赋存特性及温压耦合条件下的吸附解吸规律,不仅为完善煤层气运移理论模型提供科学支撑,同时为深部开采环境下的矿井瓦斯灾害防控体系优化提供关键技术参数,这一研究方向在能源开发工程实践与气体运移机制理论研究层面具有双重价值。

构造煤是煤岩在构造应力场作用下,经历特定应力-应变环境改造后,其物理-化学结构特性及组

分构成发生系统性演变, 经过结构性改造而形成的、具备显著差异化多尺度结构特征的煤体类型[2]。当前构造煤分类体系呈现显著阶段性演进特征, 其发展脉络可归纳为两大历史分期: 早期阶段(20 世纪中叶)主要围绕煤体结构破坏程度建立分类标准, 代表性成果如前苏联东方煤矿安全研究所提出的褶皱变形分级方案, 该方案基于构造变形强度将煤体系统划分为四个典型构造类型 - 层状构造、微褶皱构造、褶皱构造及强烈褶皱构造[3]; 高凌蔚团队(20 世纪后期)基于构造煤成因 - 结构双重属性耦合机制, 通过多尺度结构表征建立了八元分类体系, 其代表性方案包括: 初裂角砾状煤、镶嵌角砾状煤、错裂角砾状煤、碎斑状煤、碎粒状煤、鳞片状煤、鱼鳞状碎裂煤及揉皱状煤[4]。后期分类方案则综合考虑了构造煤的宏观、微观及超微观变形特征和成因机制: 曹代勇研究团队(21 世纪初)基于变形动力学机制理论框架, 结合显微 - 超微多尺度结构解析技术, 构建了六元成因分类系统。该分类体系通过揭示构造变形与物质响应的耦合关系, 将构造煤划分为: 碎裂煤、碎斑煤、鳞片煤、碎粉煤、非均质结构煤及揉流糜棱煤[5]; 基于构造变形机制、成因类型及构造背景的综合分析, 姜波等构建了构造煤的系统分类体系, 将煤岩类型划分为韧性变形序列(包含揉皱煤、糜棱煤)与脆性变形序列(涵盖碎裂煤组: 初碎裂煤 - 碎裂煤 - 碎斑煤 - 碎粒煤; 片状煤组: 片状煤 - 薄片煤; 鳞片煤组: 鳞片煤)两大系列[2]。

基于煤岩学领域已有大量实证研究证实, 受多期构造应力改造的煤体与原生结构煤在储集空间发育程度方面呈现显著分异特征[6], 且不同变形程度、不同变形类型的构造煤也具有明显不同的孔裂隙结构系统[7]-[12], 进而影响储层甲烷吸附能力。据宣文发现, 煤体结构的差异对煤层吸附特性具有显著影响, 其中强变形构造煤的甲烷吸附特征与未变形或弱变形煤存在显著差异[13]。李钰魁通过对比实验证实, 相较于原生结构煤, 构造煤在甲烷吸附参数 a 值和 b 值方面呈现明显提升, 反映出其更优的气体吸附性能[14]。程国玺针对韧性剪切带发育的构造煤开展了系统研究, 其吸附实验结果表明: 经历韧性剪切作用的揉皱煤和糜棱煤相对于未变形的原生煤表现出明显的甲烷吸附优势, 尤其在低压吸附阶段(<2 MPa)表现出显著优势[15]。

基于煤储层多相态赋存理论, 煤层气系统内甲烷存在三种基本赋存机制: 基质表面吸附相态、孔隙空间游离相态以及裂隙网络溶解相态。其中, 吸附 - 游离双相动态平衡受控于煤基双重孔隙系统的结构特征与储层温压系统的协同作用, 其空间分布规律成为评价煤层气储集丰度的关键制约参数, 这一多相态耦合机制本质上反映了煤岩物理化学属性与地质动力学条件的复杂相互作用[16]。对于吸附态甲烷的定量表征, 通常采用甲烷等温吸附实验进行精确测定。当前多孔介质气体吸附测试技术主要包含两种方法学体系: 重量法, 通过高精度电子天平实时监测材料在吸附过程中的质量增量, 结合不同平衡压力下的动态变化, 推导出气体吸附量参数, 该方法在近常温实验条件下具有显著优势[17]; 容量法, 则通过压力传感器记录吸附平衡前后气体压力变化, 结合吸附容器自由空间参数, 计算多孔介质的吸附能力演变规律[18]。本研究选择容量法作为实验手段, 系统测定不同煤阶样品在梯度温度条件下的吸附特性。由于容量法仅能获取离散的吸附数据点, 需借助数学模型对离散数据进行拟合处理, 构建连续吸附等温曲线, 在煤层气赋存状态预测模型构建中, 基于表面物理化学理论, 常采用 Langmuir 单分子层吸附模型、BET 多分子层理论及 DR 微孔填充模型等经典吸附理论体系进行数值解析。本研究选择 Langmuir 理论框架进行等温吸附曲线数学表征, 其核心价值在于构建煤阶 - 温度双变量调控下的吸附本构关系, 通过确定关键参数矩阵, 为复杂地质条件下煤层气储集能力评估提供量化分析工具[19]。

本研究通过文献分析发现, 宿州矿区祁南煤矿在构造煤甲烷吸附机理研究领域已形成基础理论框架, 特别是针对煤体结构 - 吸附特性耦合关系已取得实证性突破。但当前研究体系在温度场作用下构造煤吸附异质性表征方面存在明显局限, 具体表现为: 现有成果多聚焦常温条件($25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$), 缺乏 $30^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 温度梯度内不同变形程度构造煤(碎裂煤/碎粒煤)的吸附动力学对比研究, 进而制约着深部矿井瓦斯赋存规律的精确定量表征及地质工程应用。

2. 地质概况

祁南矿井位于宿南向斜西翼, 倾向 E、至南部逐渐转至倾向 N 或 NE 的倾伏构造, 总体构造形态为向 WS 仰起的宽缓向斜构造。井田内地层倾角变化较大, 其中, 32 煤层南部一水平最小地层倾角 3° , 9 煤层北部最大地层倾角达 32° 。地层整体表现为自北向南逐步变缓, 中部及中南部, 一般为 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 。基于构造解析图件(图 1)显示, 祁南井田展现出典型的复合构造形迹组合特征。构造体系分析表明: 煤系地层发育具有构造叠加属性的王楼 - 张学屋复式褶皱系, 其共轴叠加构造样式表现为 NW-SE 向展布的背斜-向斜, 属古近纪构造应力场控制下的产物, 构造变形强度呈中部向斜 - 背斜耦合带特征。断裂系统具显著构造分带性, 主要发育 NNE-NE 向高角度逆冲断层系与 NWW 向走滑断裂带, 二者构成具有典型共轭剪切破裂系统特征的构造组合模式, 反映区域构造应力场的多期叠加效应。

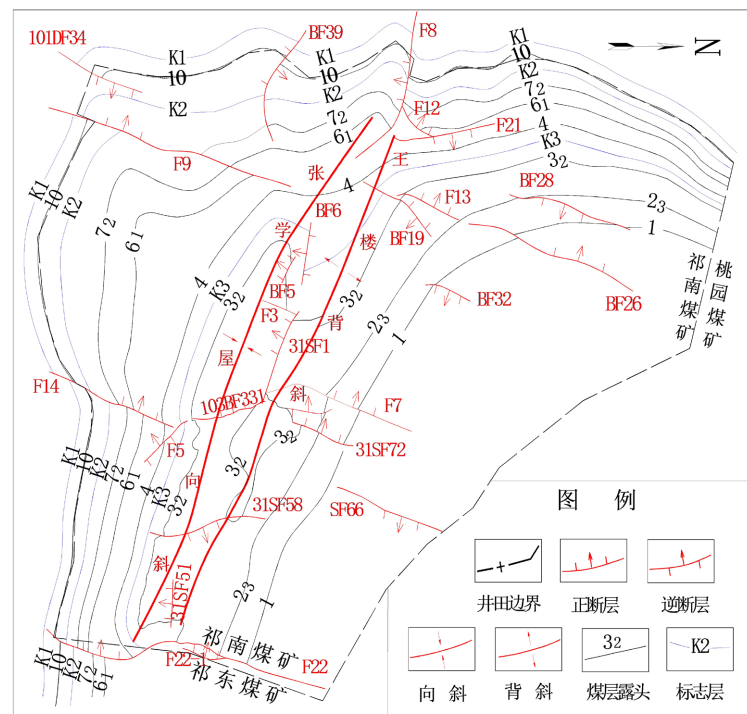


Figure 1. Outline diagram of the mine structure
图 1. 矿井构造纲要图

3. 宏观变形特征

本文聚焦构造煤甲烷吸附特性差异分析, 选取祁南煤矿 72 煤作为目标层。该煤层具有构造煤类型完整且构造变形特征显著的优势, 据此制定针对性取样方案。在采集构造煤样品时要尽量保持构造煤样品的原始状态, 确保后续实验数据的可靠性。

对采集的煤岩样品在实验室内进行肉眼观察、拍照和描述, 结合众多学者对构造煤的分类原则和方案, 根据宏观变形特征, 将本次采集的煤岩样品划分为原生结构煤、碎裂煤和碎粒煤。

原生结构煤

本研究选取与构造煤同层位的老原生结构煤作为基准对比样, 其显微组分以镜质组(体积分数 82.3%)为主, 辅以少量壳质组。煤体呈现典型沉积结构特征, 层理界面清晰可辨, 内生裂隙系统发育良好, 发育三组优势节理, 节理面呈现光滑特征并伴中等光泽, 常见立方体黄铁矿(粒径 $0.5\sim 2\text{ mm}$)充填, 垂向节理

切穿煤岩分层, 与顺层节理构成网状裂隙系统(图 2(a))。

碎裂煤

该煤样显微组分以亮煤为主要成分, 仅在局部断口显露层状构造, 内部裂隙系统发育良好。煤体整体呈现碎裂结构, 包含三组定向节理系统。近平行层理节理组展布稳定, 间距 3~5 cm, 节理面多呈阶梯状延伸; 两组斜交节理组与层理面呈 30°及 45°夹角, 延伸稳定性良好, 裂隙密度介于 3~5 cm。斜交节理面普遍发育摩擦镜面, 其中两组斜交节理面镜面特征显著, 发育锥形或平行滑动纹理, 而平行层理节理面则呈现中等光泽度, 局部发育微米级滑动痕迹(图 2(b))。

碎粒煤

该样品呈现典型构造煤化特征, 显微组分分异不明显, 黏土矿物含量显著(质量分数 >15%), 表面普遍发育方解石脉体(白色被膜平均覆盖率 38%), 原生层理构造呈现断续状分布, 优势顺层裂隙群(间距 2~5 mm)将煤体切割成薄片状碎块(厚度 0.5~2 mm), 两组斜交裂隙系统(与层理面呈 65°~80°交角)构成网状破裂体系, 主滑移面镜面化特征显著(表面粗糙度 $R_a < 0.8 \mu\text{m}$), 擦痕线密度 > 30 条/cm, 走向与主应力方向一致, 摩擦热效应导致边缘煤体完全粉化(粒径 <1 mm 颗粒占比达 85%), 手捏破碎率达 92%, 产物呈棱角状碎粒(1~5 mm)与粉状物(<1 mm) (图 2(c))。



Figure 2. Macroscopic deformation characteristics of primary tectonic coal, fragmented coal and crushed coal
图 2. 原生构造煤、碎裂煤和碎粒煤宏观变形特征

4. 构造煤甲烷等温吸附特征

4.1. 实验系统



Figure 3. Methane isothermal adsorption experimental instrument
图 3. 甲烷等温吸附实验仪器

为研究祁南煤矿构造煤的甲烷吸附特性差异, 本研究选取三组典型煤样开展气体吸附特性分析。实验采用符合 GB/T19650-2008 技术规范的 PH1-1139-A 型高压气体吸附仪(图 3)进行等温吸附测试。具体流程包括: 首先依据 GB474-1996 制样标准将约 3 g 煤样粉碎至 0.18~0.25 mm (60~80 目)粒径范围, 随后将制备样品置于吸附仪反应腔内, 在 105℃恒温条件下实施 2 h 真空脱气预处理。实验过程设定三个梯度温度条件(30℃、40℃、50℃)进行对比测试, 系统压力控制上限为 10 MPa。

4.2. 构造煤的甲烷等温吸附特征

基于表面物理化学吸附理论体系, 煤层气赋存状态研究采用朗缪尔单分子层吸附理论作为基础本构模型。该模型中, 本构参数朗缪尔压力(P_L)与朗缪尔体积(V_L)共同表征吸附界面热力学平衡状态, 其中 V_L 对应于单分子层饱和吸附容量(Q_{max}), P_L 则反映吸附质分子与吸附剂表面结合能的空间分布特征。本研究通过构建构造变形演化序列, 系统解析不同构造煤在温压耦合场中的吸附相态演化规律, 重点探讨不同类型构造煤对吸附本构关系的调控机制。

4.2.1. 变形程度对瓦斯吸附特性的影响

基于甲烷等温吸附测试数据, 通过最小二乘回归分析获取煤样 V_L 与 P_L 等关键参数, 具体数值详见表 1。测试煤样的 V_L 分布在 23.98~28.33 cm³/g 区间内, 数据对比显示构造煤类(25.71~28.33 cm³/g)相较原生结构煤(23.98 cm³/g)具有更高的吸附容量特征。进一步分析发现, 随着煤体结构破坏程度的加剧, V_L 值呈现规律性递增趋势: 碎粒煤因机械破碎作用显著, 其 V_L 值达到 28.33 cm³/g 的最大值。基于构造煤演化序列的吸附性能分析表明, 煤基质甲烷 V_L 与结构破坏程度呈现显著正相关。

Table 1. Methane adsorption constant at 30℃ air-dried base for primary structural coal and structural coal
表 1. 原生结构煤和构造煤 30℃空气干燥基下甲烷吸附常数

样品编号	煤体类型	V_L (cm ³ /g)	P_L (MPa)
M1	原生结构煤	23.98	3.90
M2	碎裂煤	25.71	3.43
M3	碎粒煤	28.33	2.70

研究区煤样的 P_L 分布在 2.70~3.90 MPa 之间, 碎裂煤和碎粒煤的 P_L (2.70~3.43 MPa)低于原生结构煤 (3.90 MPa)。由表 1, 可见煤体结构破坏程度与朗缪尔压力参数(P_L)呈负相关演化规律。基于实验数据对比分析, 碎粒煤的 P_L 明显偏低, 其数值显著小于碎裂煤及原生结构煤, 表明在低压条件下碎粒煤对甲烷的吸附作用更为突出。工程地质意义层面, 碎粒煤储层特有的“低 P_L - 高 V_L ”耦合特征(P_L/V_L 比值 < 0.015 MPa·cm³/g)显著降低瓦斯解吸活化能(E_d < 25 kJ/mol), 使得此类煤体在采动应力扰动下更易触发煤 - 瓦斯两相流失稳现象。

4.2.2. 实验温度和压力对瓦斯吸附特性的影响

如图 4 所示, 热力学条件恒定时, 甲烷吸附量与系统压力呈正相关, 呈现压力驱动的递增趋势。在 0~3 MPa 低压区间内, 吸附量增长与压力变化呈现近似线性相关; 当压力升至 3~10 MPa 高压范围时, 吸附速率呈现渐进式衰减特征。实验数据表明, 甲烷吸附量随压力升高呈正向响应, 但当体系进入高压平衡区间后, 该促进效应呈现显著的非线性衰减特征。

在等压条件下, 不同热力学状态的样品等温吸附曲线在低压区段呈现高度趋同性, 表明温度参数对吸附过程的影响在此阶段处于次要地位; 进入高压作用域后, 吸附量表现出显著的温度依赖性, 呈现低温环境促进吸附的负相关特性。实验研究表明, 在亚临界压力区间内, 温度变化对甲烷吸附容量的调控

作用不明显;当系统跨越临界压力值后,吸附体系的温敏特性发生逆转,表现为吸附量与温度呈负相关,且该抑制作用随压力值向超临界状态逼近而呈二次函数增强趋势。

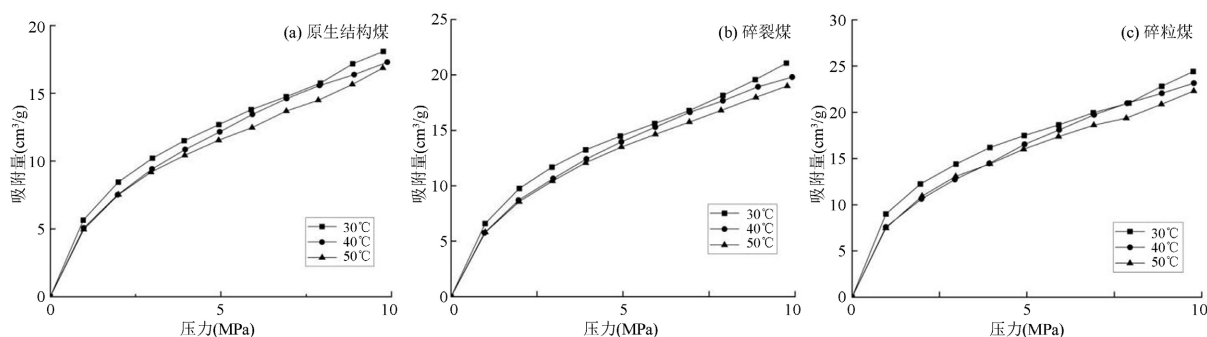


Figure 4. Isothermal adsorption curves of methane between primary structural coal and structural coal

图 4. 原生结构煤与构造煤甲烷等温吸附曲线

5. 小结

通过系统开展构造煤宏观构造形变特征解析与甲烷等温吸附特性测试,研究取得以下关键认识:

(1) 祁南煤矿煤系地层中赋存多类构造煤岩,包括原生结构煤、碎裂煤及碎粒煤等差异显著的构造变形序列。原生结构煤层理可见,内生裂隙发育;煤体较硬,不易捏碎,破碎块体极少。碎裂煤层理在个别断口可见,内生裂隙较为发育;坚硬,难以捏碎。碎粒煤层理不可见;自然碎块为棱角状碎块、碎粒,易捏碎为碎粒、碎粉。

(2) 煤体变形对甲烷吸附性能具有显著调控作用。研究样品 V_L 介于 $23.98\sim 28.33\text{ cm}^3/\text{g}$, P_L 分布于 $2.70\sim 3.90\text{ MPa}$ 区间。构造煤相较于原生结构煤具有更高的 V_L 值,且该参数随煤体破碎程度增强呈现系统性递增特征。动力学特征显示,碎粒煤 P_L 值较原生结构煤降低 30.8% ,表明其在低压环境中甲烷吸附速率与饱和效率显著提升。这种吸附特性差异使得碎粒煤在开采扰动下更易形成瓦斯快速解吸-扩散效应,客观上增加了煤与瓦斯突出的潜在危险性。

(3) 在煤基质对甲烷的吸附控制机制中,系统压力与热力学温度分别表现出显著的促进与抑制效应。实验观测表明,当热力学参数恒定时,甲烷吸附容量与压力梯度呈现正相关演化规律:在低压作用域($0\sim 3\text{ MPa}$ 区间),吸附相密度随压力提升呈现近似线性响应;进入高压作用域($3\sim 10\text{ MPa}$ 范围),其增长速率呈现指数型衰减特征。在恒定压力环境中,甲烷等温吸附曲线呈现出温度依赖特性:低压力区间各温度曲线基本重合,当压力升至临界值以上时,吸附量出现显著温度响应,温度越高,甲烷吸附量越小。

基金项目

安徽省高等学校科学研究项目(2024AH051821)。

参考文献

- [1] Xue, S., Yuan, L., Xie, J. and Wang, Y. (2014) Advances in Gas Content Based on Outburst Control Technology in Huainan, China. *International Journal of Mining Science and Technology*, **24**, 385-389. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.03.017>
- [2] 姜波, 李明, 宋昱, 等. 构造煤及其瓦斯地质意义[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [3] 于不凡. 煤和瓦斯突出机理[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1985.
- [4] 高凌蔚, 龚廷焕, 苗康运, 等. 煤系地层中常见的碎裂变质岩[J]. 煤田地质与勘探, 1979(2): 78-87.
- [5] 曹代勇, 张守仁, 任德贻. 构造变形对煤化作用进程的影响——以大别造山带北麓地区石炭纪含煤岩系为例[J].

- 地质论评, 2002, 48(3): 313-317.
- [6] 张文静, 琚宜文, 卫明明, 等. 不同变质变形煤储层吸附/解吸特征及机理研究进展[J]. 地学前缘, 2015, 22(2): 232-242.
- [7] 李靖. 高水低阶烟煤多尺度结构特征及甲烷吸附响应机制[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- [8] 琚宜文, 姜波, 侯泉林, 等. 构造煤结构-成因新分类及其地质意义[J]. 煤炭学报, 2004, 29(5): 513-517.
- [9] 唐明云, 张海路, 段三壮, 等. 基于 Langmuir 模型温度对煤吸附解吸甲烷影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(5): 182-189.
- [10] 翦非帆. 无烟煤孔隙结构对甲烷吸附解吸特征的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- [11] 李凤丽. 瓦斯生运聚散的构造动力学过程及数值模拟研究——以阳泉矿区为例[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2021.
- [12] 路冠文. 贵州月亮田矿构造煤甲烷解吸滞后行为及微观机理[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [13] 琚宜文, 姜波, 侯泉林, 等. 华北南部构造煤纳米级孔隙结构演化特征及作用机理[J]. 地质学报, 2005(2): 269-285.
- [14] 李钰魁. 构造煤瓦斯吸附、解吸与扩散特性研究[D]: [硕士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2015.
- [15] 程国玺. 韧性变形系列构造煤结构特征及其瓦斯特性研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [16] Aminian, K. and Ameri, S. (2009) Predicting Production Performance of CBM Reservoirs. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **1**, 25-30. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2009.03.003>
- [17] Thommes, M. (2010) Physical Adsorption Characterization of Nanoporous Materials. *Chemie Ingenieur Technik*, **82**, 1059-1073. <https://doi.org/10.1002/cite.201000064>
- [18] Rouquerol, F., Rouquerol, J., Sing, K.S.W., *et al.* (2014) Adsorption by Powders and Porous Solids. Academic Press.
- [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]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.