



煤体结构与宏观煤岩类型对煤体吸附/解吸瓦斯的影响

赵方钰 邓泽 王海超 王泽 孙丕臣 杨胜博

引用本文:

赵方钰, 邓泽, 王海超, 等. 煤体结构与宏观煤岩类型对煤体吸附/解吸瓦斯的影响[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 170-184.

ZHAO Fangyu, DENG Ze, WANG Haichao. Influence of coal structure and macrolithotype of coal on coal adsorption and desorption of gas[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 170-184.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0365>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

含水率对不同宏观煤岩类型甲烷吸附/解吸特征的影响

Effect of water content on adsorption/desorption of methane of different macroscopic lithotypes

煤炭科学技术. 2020, 48(8): 97-105 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e9900ffc-fd08-44bb-b465-29b8eab34aab>

不同宏观煤岩组分润湿性差异及对甲烷吸附解吸的影响

Effects of wettability differences of different macroscopic composition of coal on methane adsorption and desorption

煤炭科学技术. 2021, 49(11): 47-55 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9024de11-f8d8-4075-9187-f0927dfb5943>

水分对煤层气吸附/解吸微观作用研究进展

Research progress micro effect of water on coalbed methane adsorption/desorption

煤炭科学技术. 2023, 51(2): 256-268 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1537>

不同含水及负压条件下煤层气等温吸附解吸规律

Isothermal adsorption and desorption of coalbed methane under different water saturation and negative pressure

煤炭科学技术. 2019(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9647c068-35bb-43d5-8d27-67533429218a>

基于Langmuir模型温度对煤吸附解吸甲烷影响研究

Experimental study on effect of heat on methane adsorption and desorption in coal based on modified langmuir model

煤炭科学技术. 2021, 49(5): 182-189 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/786c17e8-71b6-434e-ace1-4c8045016c9b>

应力对含瓦斯煤解吸特征影响的试验研究

Study on influence of stress on desorption characteristics of coal containing gas

煤炭科学技术. 2021, 49(5): 35-43 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d841ce1c-82e2-4d88-9ec3-117b4f4e31a9>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

赵方钰, 邓泽, 王海超, 等. 煤体结构与宏观煤岩类型对煤体吸附/解吸瓦斯的影响[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 170-184.
ZHAO Fangyu, DENG Ze, WANG Haichao, *et al.* Influence of coal structure and macrolithotype of coal on coal adsorption and desorption of gas[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 170-184.

煤体结构与宏观煤岩类型对煤体吸附/解吸瓦斯的影响

赵方钰^{1,2,3}, 邓泽⁴, 王海超^{1,2,3}, 王泽^{1,2,3}, 孙丕臣^{1,2,3}, 杨胜博^{1,2,3}

(1. 新疆中亚造山带大陆动力学与成矿预测自治区重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 新疆大学地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017; 3. 新疆大学煤层气工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830017; 4. 中国石油天然气集团有限公司非常规油气重点实验室, 河北 廊坊 065000)

摘要:为研究高阶煤中煤体结构和宏观煤岩类型对煤体吸附、解吸的影响, 收集了沁水盆地南部 3 号煤层 55 口煤层气井的 79 个煤岩样品的煤岩、煤质、等温吸附及解吸资料, 对比研究了相同宏观煤岩类型、不同煤体结构煤样和相同煤体结构、不同宏观煤岩类型煤样的兰氏体积(V_L)、兰氏压力(P_L)、解吸率和解吸速率等的变化规律, 探讨了煤体结构和宏观煤岩类型对煤体吸附、解吸的影响机理。研究表明: 研究区煤样的 V_L 平均为 $37.00 \text{ m}^3/\text{t}$, 其中 86.61% 煤样 V_L 分布在 $33.00\sim 41.00 \text{ m}^3/\text{t}$, P_L 平均为 2.82 MPa, 其中 82.28% 煤样 P_L 分布在 $2.30\sim 3.30 \text{ MPa}$; 碎裂煤的吸附、解吸能力均优于原生结构煤, 由构造破坏引起的孔隙连通性的差异是导致原生结构煤和碎裂煤解吸、吸附特征差异的根本原因; 原生结构煤与碎裂煤的孔裂隙发育程度不同, 碎裂煤因孔隙更发育导致其破碎后的甲烷放散效果好于原生结构煤; 煤吸附甲烷时表面自由能降低值规律为糜棱煤>碎粒煤>碎裂煤>原生结构煤, 反映了不同煤体结构煤吸附甲烷能力的差异; 3 种宏观煤岩类型煤的吸附能力和解吸能力均表现为光亮煤>半亮煤>半暗煤, 一方面是由煤的比表面积大致按照光亮煤、半亮煤和半暗煤的顺序逐渐减小反映的煤基质表面吸附点位差异所致, 另一方面是由于镜煤与暗煤中镜质组和惰质组含量的差异所引起。研究旨在进一步揭示高阶煤储层煤层气赋存、产出机理, 为煤层气有利区及目标层位优选提供依据。

关键词:煤层气; 煤体结构; 宏观煤岩类型; 吸附; 解吸

中图分类号: TD713 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2022)12-0170-15

Influence of coal structure and macrolithotype of coal on coal adsorption and desorption of gas

ZHAO Fangyu^{1,2,3}, DENG Ze⁴, WANG Haichao^{1,2,3}, WANG Ze^{1,2,3}, SUN Pichen^{1,2,3}, YANG Shengbo^{1,2,3}

(1. Xinjiang Key Laboratory for Geodynamic Processes and Metallogenic Prognosis of the Central Asian Orogenic Belt, Urumqi 830017, China; 2. School of Geological and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China; 3. CBM Engineering Technology Research Center, Xinjiang University, Urumqi 830017, China; 4. Key Laboratory of Unconventional Oil and Gas, China National Petroleum Corporation, Langfang 065000, China)

Abstract: In order to study the influence of coal body structure and macrolithotype of coal in high rank coal on coal body adsorption and desorption, The data of coal petrography, coal quality, isothermal adsorption and desorption of 79 coal rock samples from 55 coal-bed methane wells in No.3 Coal Seam in the south of Qinshui Basin were collected, and the change laws in the Langmuir volume (V_L), Langmuir pressure (P_L), desorption rate of coal samples with the same macrolithotype of coal, different coal body structures and the same coal body structure, different macrolithotype of coal of coal samples, were discussed in the influential mechanisms of coal body structure and macrolithotype of coal on coal body adsorption and desorption. The results show that the average V_L of coal samples in the study area is $37.00 \text{ m}^3/\text{t}$, of which 86.61% is distributed in $33.00\sim 41.00 \text{ m}^3/\text{t}$, and the average P_L is 2.82 MPa, of which 82.28% is distributed in

收稿日期: 2022-01-18 责任编辑: 周子博 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-0365

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41902171); 新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2018D01C050); 新疆维吾尔自治区天山青年计划资助项目(2020Q065)

作者简介: 赵方钰(1998—), 男, 河南新郑人, 硕士研究生。E-mail: dafeng0717@163.com

通讯作者: 王海超(1988—), 男, 河南南召人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: wangxiaoshi2111@163.com

2.30~3.30 MPa. The adsorption and desorption capacities of fractured coal are better than those of primary structure coal and the difference of pore connectivity caused by structural destruction is the fundamental reason for the difference of desorption and adsorption characteristics between primary structural coal and fractured coal; The development degree of pores and fissures of primary structure coal is different from that of fractured coal. The methane emission effect of fractured coal is better than that of primary structure coal because of more developed pores. The decreasing rule of surface free energy of coal for methane adsorption is the mylonitic coal > granulitic coal > fractured coal > primary structure coal, which reflects the difference of methane adsorption capacity of coal with different coal structure; the adsorption and desorption capabilities of the three types of macro coals are bright coal > semibright coal > semidull coal. On the one hand, the specific surface area of coal decreases roughly in the order of bright coal, semibright coal, and semidull coal, which reflects the difference in adsorption sites on the surface of the coal matrix. On the other hand, it is caused by the difference of vitrinite and inertinite content between vitrain and durain. The purpose of this study is to further reveal the occurrence and production mechanism of CBM in high-rank coal reservoirs, and to provide a basis for the optimization of CBM favorable areas and target horizons.

Key words: coalbed methane; coal body structure; macrolithotype of coal; adsorption; desorption

0 引言

煤储层对甲烷的吸附和解吸特性是煤的孔隙结构、变质作用、显微组分、矿物含量、工业组分、元素含量、储层压力、温度、应力等因素共同作用的结果^[1-5],不同因素对煤吸附/解吸甲烷的影响效果不同。一般认为煤的吸附量随煤变质程度的增高而增大^[2],不过也有学者发现煤阶与吸附量之间呈“U”形关系^[6-7]。随着固定碳含量的增加,煤的孔隙率和比表面积增加,吸附能力增强^[2,8]。煤基质中的水分使得煤和甲烷之间的相互作用减少,抑制甲烷吸附,从而降低了吸附量和吸附速率^[9-10],但甲烷吸附性能和水分含量并非呈简单的负相关关系,这种对吸附的抑制效应的增幅随含水量的增加而逐渐减小,直到水分含量超过某一临界值(平衡水分)时吸附性能基本保持不变^[11-14]。水分会堵塞甲烷的运移通道,水分含量的增加将降低甲烷的解吸能力^[14-16];矿物质可能会填充部分孔隙,不利于甲烷的吸附^[17-18]。煤粒度越小,比表面积越大,甲烷吸附量也就越大,随着粒度的增大,煤样吸附量减小^[19-21],更小的粒度导致煤暴露在空气中的面积增加,气体运移路程变短,从而提高气体的解吸速率^[5,22-24]。一般认为镜质组比惰质组吸附能力更强,煤中甲烷含量与镜质组含量呈正相关^[2,25],但有学者发现此规律只适用于高阶煤,低阶煤则表现为甲烷吸附能力与惰质组含量呈正相关^[26]。气体吸附能力随温度升高而减弱^[27-29],解吸能力随温度升高而增强^[29-30]。

煤储层非均质性强,同一井区煤储层煤体结构、宏观煤岩类型多变,甚至出现相邻井位之间产气效果差异较大的现象,面临着新井产气时间短、产气量衰减快、产能不理想等现实问题^[31],其原因很大程度上在于缺乏对煤储层物性特征尤其是煤体结构、宏

观煤岩类型方面的精细刻画,从而导致井位选取的盲目性。目前研究多将煤按变质程度分为低、中、高阶煤^[2, 32-34]或按煤层的坚硬程度分为软煤(碎粒煤和糜棱煤)和硬煤(原生结构煤和碎裂煤)^[5, 35-40]进行吸附、解吸特征研究,而以煤体结构和宏观煤岩类型来综合划分煤类型,从而进行煤体结构和宏观煤岩类型的差异对煤储层吸附、解吸特征影响的研究相对薄弱。

因此,以沁水盆地南部3号煤层为研究对象,定量分析了煤体结构和宏观煤岩类型差异对煤吸附、解吸特征的影响,从孔隙类型、孔隙发育程度、表面自由能等方面分析了不同煤体结构煤对煤层气的吸附、解吸机理,从宏观煤岩组分和显微煤岩组分等角度探讨了不同宏观煤岩类型煤对煤层气的吸附、解吸机理,以期寻找煤层气井的最佳煤体结构和宏观煤岩类型组合的有利层位提供帮助。

1 地质概况

研究区处于沁水复式向斜南部,东接晋获断裂,西邻霍山断裂,南靠横河断裂,北至襄垣-霍州一线,总体构造呈北倾的弧形斜坡。区内构造较简单,主要断裂为寺头断层、后城腰断层和与之伴生的次一级断层,内部次级褶皱发育,褶皱面积小,地层起伏不大^[41-42](图1)。

研究区主要含煤地层为山西组和太原组,山西组均厚约为45 m,为滨海三角洲相沉积,含煤1~4层,主采煤层为3号煤,埋深介于300~1 000 m,平均厚度为5.79 m,由东南向西北方向厚度逐渐变薄^[43,45];太原组厚度一般在100 m,为海陆交互沉积环境,含煤8~10组,主采煤层为15号煤,位于3号煤层下部80 m左右^[43]。

研究区主力煤层孔隙度介于0.65%~12.50%,集

中于 4.00%~6.00%，平均为 5.31%，整体上非均质性较强，呈现出南高北低、东高西低的特点；主力煤层含气量整体较高，介于 0.31~36.73 m³/t，不同区域差异较大，平均为 12.78 m³/t^[43]。

共收集研究区 145 组 3 号煤层煤样的煤岩、煤质、等温吸附测试数据，镜质组最大反射率($R_{o,max}$)在 2.57%~4.25%，平均为 3.56%，主要分布于 3.40%~

3.70%；煤样有机组分主要为镜质组，其次为惰质组，未见壳质组，镜质组含量介于 38.6%~92.7%，平均为 69.6%；煤样空气干燥基兰氏体积(V_L)平均为 36.72 m³/t，兰氏压力(P_L)平均为 2.80 MPa。为减小煤阶对试验结果的影响且同时使试验结果具有足够的检验效能，以 3.40% $<R_{o,max}<3.70%$ 的 55 口煤层气井的 79 个煤样为对象展开研究。

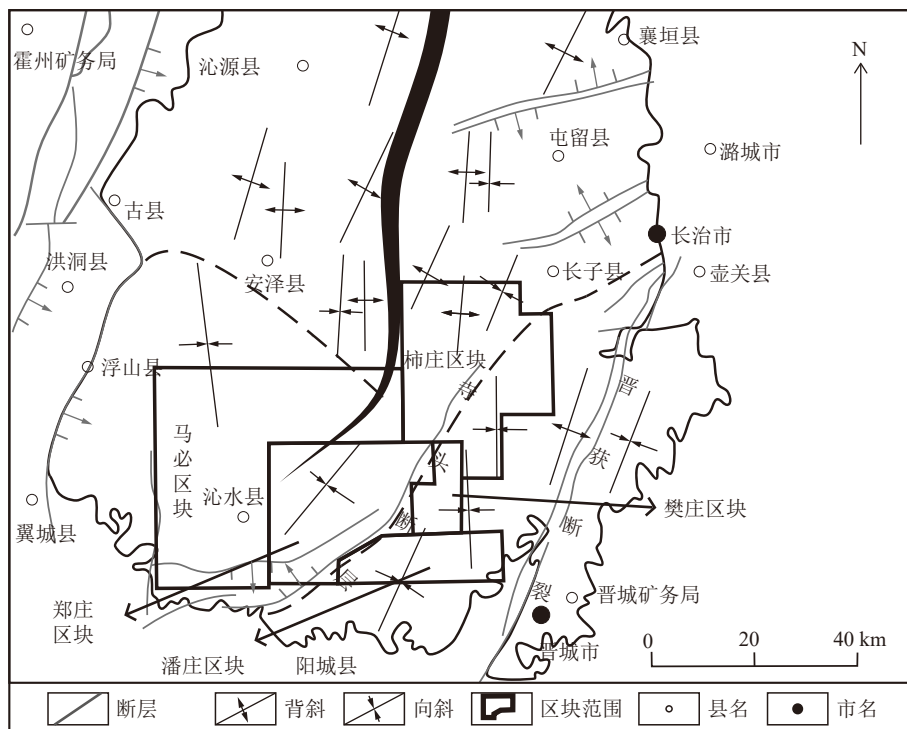


图1 研究区构造纲要^[43-44]

Fig.1 Structure outline of research area^[43-44]

2 样品与试验

对沁水盆地南部 79 个 3 号煤层的煤心样品进行显微煤岩组分、煤质、含气量、等温吸附和压汞测定。显微组分含量测定遵照 GB/T 8899—2013《煤的显微组分组和矿物测定方法》执行；煤质分析遵照 GB/T 212—2008《煤的工业分析方法》标准执行；含气量测定遵照 GB/T 19559—2008《煤层气含量测定方法》执行，煤样到达地面后 10 min 内装入解吸罐密封，温度起伏控制在 ± 1 °C 内，自然解吸至连续 7 d 解吸量均小于 10 cm³，结束解吸测定；等温吸附试验遵照 GB/T 19560—2008《煤的高压等温吸附实验方法》执行，试验仪器采用 AST-2000 型大样量煤层气等温吸附仿真试验仪，试验最高压力点约为 8 MPa；压汞测试遵照 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，试验仪器采用 AutoPore IV 9500 型压汞仪，

可测量 3~10⁶ nm 的孔隙孔径，最大进汞压力约为 227.5 MPa。

依照 GB/T 30050—2013《煤体结构划分标准》，分为原生结构煤、碎裂煤、碎粒煤和糜棱煤；参考 GB/T 18023—2000《宏观煤岩类型划分标准》，分为光亮煤、半亮煤、半暗煤和暗淡煤。研究区碎粒煤、糜棱煤及暗淡煤不发育，故重点对原生结构煤、碎裂煤及光亮煤、半亮煤、半暗煤的煤体-煤岩组合类型的吸附、解吸特征展开对比分析。

3 煤体结构对煤吸附、解吸特征的影响

3.1 不同煤体结构煤的吸附特征

研究煤样的镜质组反射率分布如图 2 所示，其中 84.81% 的煤样的 $R_{o,max}$ 介于 3.46%~3.66%，为减小镜质组反射率差异对试验结果的影响，按镜质组反射率差异小于 0.02% 的原则对样品进行分组分析。

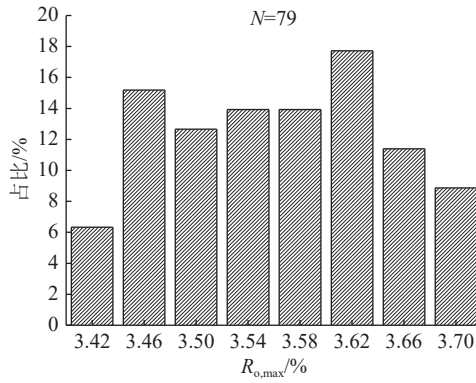
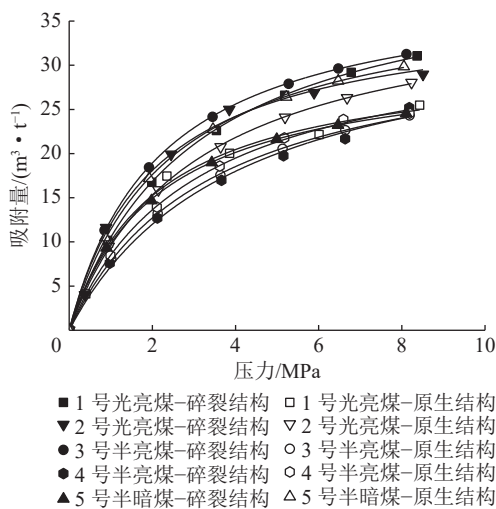


图2 镜质组反射率分布
Fig.2 Reflectance distribution of vitrinite

3类宏观煤岩类型的不同煤体结构煤的等温吸附试验结果表明各煤样的吸附量均随压力增大而增大,不同之处在于:①在0~1 MPa的低压段,光亮-原生结构煤和光亮-碎裂煤、半亮-原生结构煤和半亮-碎裂煤、半暗-原生结构煤和半暗-碎裂煤的吸附曲线几乎重合;②在1~4 MPa的中压段,相同宏观煤岩类型不同煤体结构煤的吸附特征差异明显,光亮-碎裂煤吸附量明显大于光亮-原生结构煤,3号半亮-碎裂煤吸附量也明显大于半亮-原生结构煤,但4号半亮-碎裂煤吸附量则略小于半亮-原生结构煤,半暗-碎裂煤的吸附量明显小于半暗-原生结构煤;③在大于4 MPa的高压段,光亮煤和3号半亮煤的吸附量仍表现为碎裂煤明显大于原生结构煤且两者间差值随压力增大而增大,但4号半亮-原生结构煤与半亮-碎裂煤之间吸附量差距逐渐减小,在压力增加到8 MPa时吸附量基本相同(图3)。



注: X号中相同X代表样品取自同一口井, X不代表实际井号;不同图中的X并不一一对应;下同
图3 3类宏观煤岩类型的不同煤体结构煤的等温吸附曲线
Fig.3 Isothermal adsorption curves of three macrolithotypes of coal with different coal body structure

3类宏观煤岩类型的不同煤体结构煤的 V_L 和 P_L 统计分析发现, V_L 介于 26.43~45.80 m^3/t , 平均为 37.00 m^3/t , 主要集中在 33.00~41.00 m^3/t , 占 86.61% (图4a); 宏观煤岩类型相同时, 不同煤体结构的光亮煤、半亮煤和半暗煤的 V_L 均整体表现为碎裂煤>原生结构煤(图5): 光亮煤中, 碎裂煤 V_L 大于原生结构煤的占 66.7%, 光亮-碎裂煤与光亮-原生结构煤的 V_L 比值介于 0.90~1.30, 平均为 1.12(图5a); 半亮煤中, 碎裂煤 V_L 大于原生结构煤的占 61.9%, 半亮-碎裂煤与半亮-原生结构煤的 V_L 比值介于 0.87~1.21, 平均为 1.04(图5b); 半暗煤中, 碎裂煤 V_L 大于原生结构煤的占 100.0%, 半暗-碎裂煤与半暗-原生结构煤的 V_L 比值平均为 1.16(图5c)。

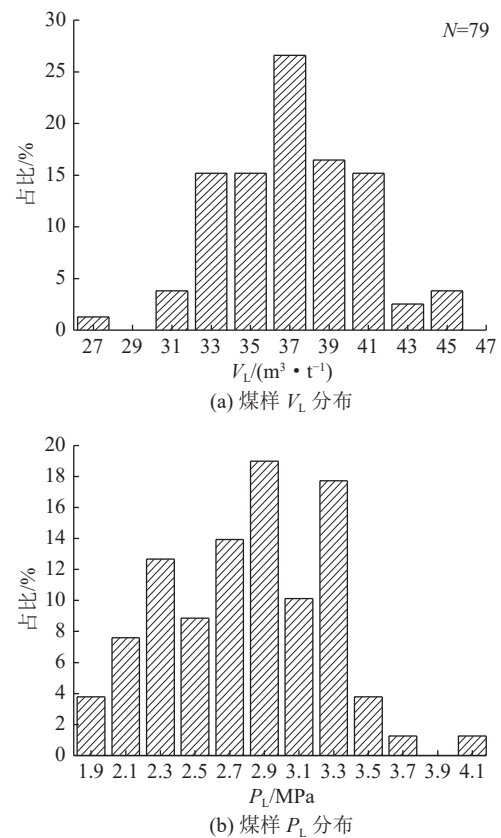
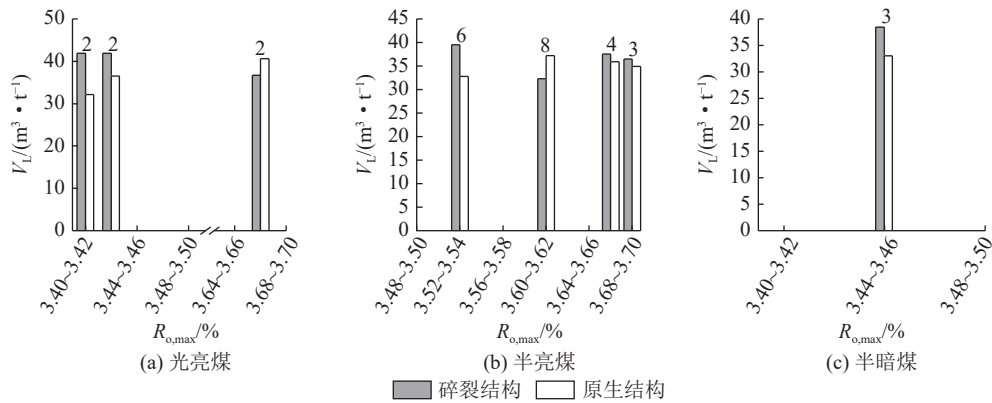


图4 试验煤样的 V_L 、 P_L 频率分布
Fig.4 V_L and P_L frequency distribution of test coal samples

研究区 P_L 介于 1.85~4.01 MPa, 平均为 2.82 MPa, 主要集中在 2.30~3.30 MPa, 占 82.28%(图4b)。宏观煤岩类型相同时, 不同煤体结构的光亮煤、半亮煤和半暗煤的 P_L 与煤体破碎程度之间的关系整体上均表现为碎裂煤>原生结构煤(图6): 光亮煤中, 碎裂煤 P_L 大于原生结构煤的占 66.7%, 光亮-碎裂煤与光亮-原生结构煤的 P_L 比值介于 0.98~1.26, 平均为 1.16(图6a); 半亮煤中, 碎裂煤 P_L 大于原生结构煤的



注：柱状数据上方的数字代表该区间样品数，下同

图5 相同宏观煤岩类型下不同煤体结构煤的 V_L 对比

Fig.5 V_L comparison of coals with different coal body structure under same macrolithotype of coal

占 52.4%，半亮-碎裂煤与半亮-原生结构煤的 P_L 比值介于 0.74~1.39，平均为 1.05(图 6b)；半暗煤中，碎裂煤 P_L 大于原生结构煤的占 100.0%，半暗-碎裂煤

与半暗-原生结构煤的 P_L 比值平均为 1.03(图 6c)。碎裂煤与原生结构煤的 V_L 比值介于 0.87~1.30，平均为 1.08, P_L 比值介于 0.74~1.39，平均为 1.09(图 5, 图 6)。

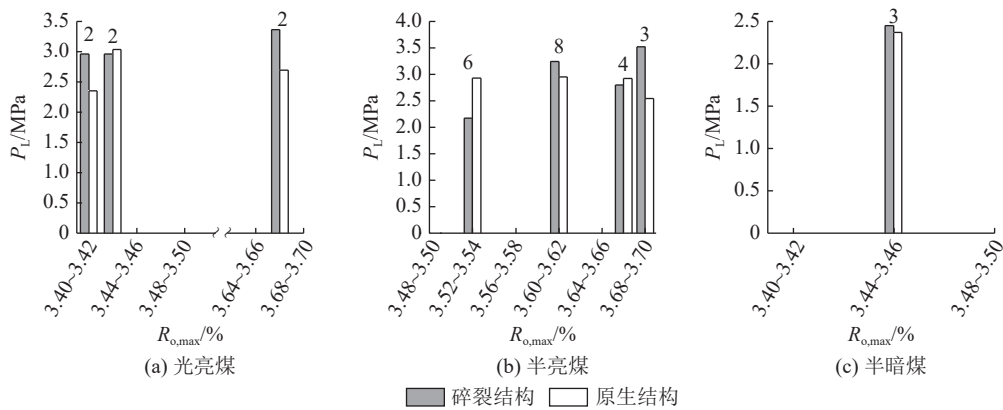


图6 相同宏观煤岩类型下不同煤体结构煤的 P_L 对比

Fig.6 P_L comparison of coals with different coal body structure under the same macrolithotype of coal

3.2 不同煤体结构煤的解吸特征

对相同宏观煤岩类型、不同煤体结构煤的解吸试验结果进行分析可知，不同煤体结构的亮光煤、半亮煤、半暗煤的解吸规律相同，均表现为煤

体越破碎、煤样的解吸率越大，碎裂煤的解吸率大于原生结构煤(图 7)：亮光煤中碎裂煤解吸率大于原生结构煤的占 66.7%，亮光-碎裂煤与亮光-原生结构煤的解吸率的比值介于 0.98~1.09，平均为 1.05

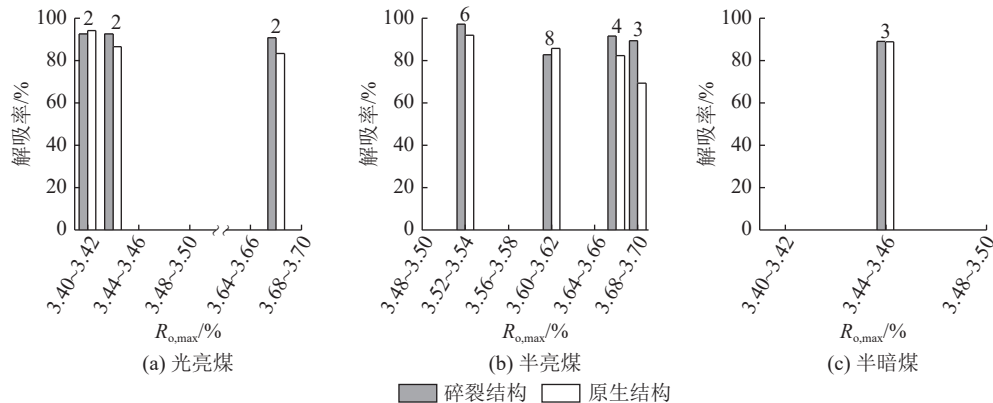


图7 相同宏观煤岩类型下不同煤体结构煤的解吸率

Fig.7 Desorption rate of coal with different coal body structure under same macrolithotype of coal

(图 7a); 半亮煤中碎裂煤解吸率大于原生结构煤的占 61.9%, 半亮-碎裂煤与半亮-原生结构煤的解吸率的比值介于 0.96~1.29, 平均为 1.11(图 7b); 半暗煤中碎裂煤解吸率大于原生结构煤的占 100.0%, 半暗-碎裂煤与半暗-原生结构煤的解吸率的比值平均为 1.00(图 7c)。

相同宏观煤岩类型下不同煤体结构煤的解吸速率对比发现, 五组煤样的解吸速率均随解吸时间逐渐降低, 在解吸至 20 min 时, 原生结构煤的解吸速率基本降至 $20 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$ 以下, 解吸 100 min 后, 全部煤样解吸速率基本都降至 $20 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$ 以下, 解吸至 10 000 min 左右时, 解吸速率变化趋于平缓, 解吸速率趋近于 0。宏观煤岩类型相同时, 整体上表现为碎裂煤的解吸速率高于原生结构煤(图 8)。

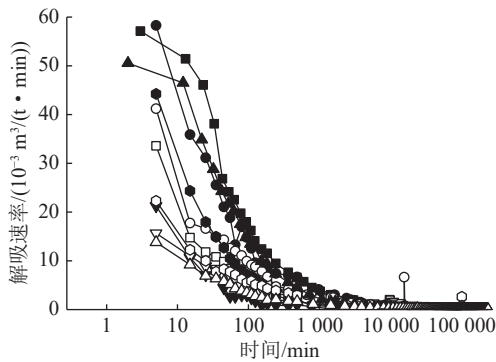


图 8 相同宏观煤岩类型下煤体结构与解吸速率的关系
Fig.8 Relationship between coal body structure and desorption rate under same macrolithotype of coal

3.3 煤体结构影响吸附、解吸的机理

压汞试验中煤样进退汞曲线发现, 从原生结构煤到糜棱煤, 随着煤体破碎程度增大, “滞后环”逐渐增大, 表明煤中开放孔比例逐渐增大(图 9a)。进一步对孔隙类型进行统计发现, 原生结构煤中半封闭孔含量占总孔隙 87.72%, 开放孔占 12.28%; 碎裂煤中半封闭孔含量占总孔隙 82.10%, 开放孔占 17.90%; 碎粒煤中半封闭孔含量占总孔隙 73.90%, 开放孔占 26.10%; 糜棱煤中半封闭孔含量占总孔隙 58.84%, 开放孔占 41.16%。表明随煤体破碎程度增大, 煤中开放孔含量增加, 半封闭孔含量减少, 孔隙连通性增强(图 9b)。试验时则表现为随煤体破碎程度增大和孔隙连通性的增强, 煤样吸附量增大, 解吸率增高, 甲烷更容易解吸(图 5—图 7)。

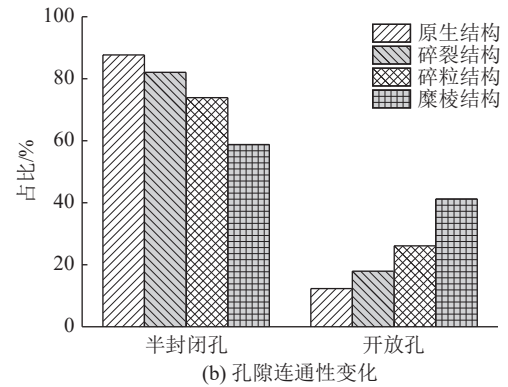
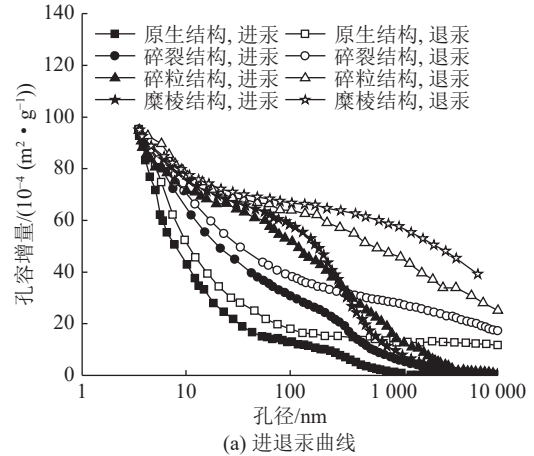


图 9 不同煤体结构煤孔隙连通性对比^[31]

Fig.9 Comparison of pore connectivity of coal with different coal body structure^[31]

煤层气吸附、解吸过程中, 甲烷分子的扩散运移均需在煤基质内部孔隙系统与表面孔隙系统之间形成甲烷浓度梯度的前提下进行。在浓度梯度的作用下, 甲烷沿浓度梯度降低的方向由煤基质外部扩散运移至煤基质内部进行吸附, 或沿浓度梯度降低的方向由煤基质内部扩散运移至煤基质外部进行解吸, 故甲烷浓度梯度的形成及效果直接影响煤层气的吸附和解吸效果^[46]。煤储层孔隙连通性越好, 则甲烷浓度梯度的形成效果越好, 越有利于甲烷的扩散^[31,47]。此外, 解吸时甲烷由吸附态转为游离态是不间断的动态平衡过程, 游离态甲烷在煤基质表面不停震荡, 随着压降的传播, 甲烷开始大量解吸, 若孔隙内甲烷分子无法有效扩散, 浓度总是居高不下, 有可能发生二次吸附, 不利于解吸的进行^[48]。

另一方面, 对于煤基多孔介质, 煤体破碎前后总体积不变, 但粒度的减小使得煤颗粒的数量和暴露面积增加, 同时缩短了甲烷扩散距离, 从而表现为煤体破碎后甲烷解吸速率增大。不过在破碎后粒度相同情况下, 不同煤体结构煤的解吸速率仍有较大差异, 由图 8 可知, 在排除粒度和宏观煤岩类型差异的影响后, 碎裂煤的解吸速率几乎在整个解吸过程都

高于原生结构煤。这是由煤体中孔隙、裂隙发育度不同所引起,本文所用煤样的试验粒度为60~80目(0.25~0.18 mm),煤体的破碎使得煤中裂隙几乎被破坏殆尽,同时孔隙的暴露比例增大,甲烷基本不再通过裂隙放散,而是直接在孔隙中放散,此时孔隙含量更多的碎裂煤比原生结构煤更具放散优势^[22,31,49]。前人就粒径对不同煤体结构煤的气体放散能力的影响做了细致研究,发现不同粒径段,气体放散能力与煤体结构呈现差异性,当煤粒较大时(粒度>0.65 mm,对应25~30目),随着煤体破碎程度的增大,甲烷放散速度变缓,而当煤粒较小时(粒度<0.65 mm),则呈现相反状况(图10)。

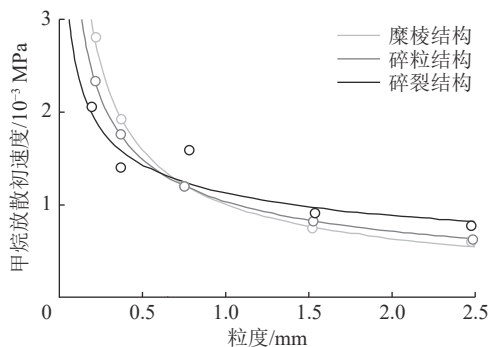


图10 不同粒度下煤样的甲烷气体放散初速度变化^[31]

Fig.10 Variation of methane emission initial velocity of coal samples with different particle sizes^[31]

煤对甲烷的吸附过程中总是伴随能量变化,能量变化是吸附的内在动力,因此表面自由能的差异是不同煤体结构煤的吸附能力差异的主要原因之一^[50]。

根据表面化学理论,煤对甲烷吸附引起的表面张力降低的吉布斯公式^[50]为

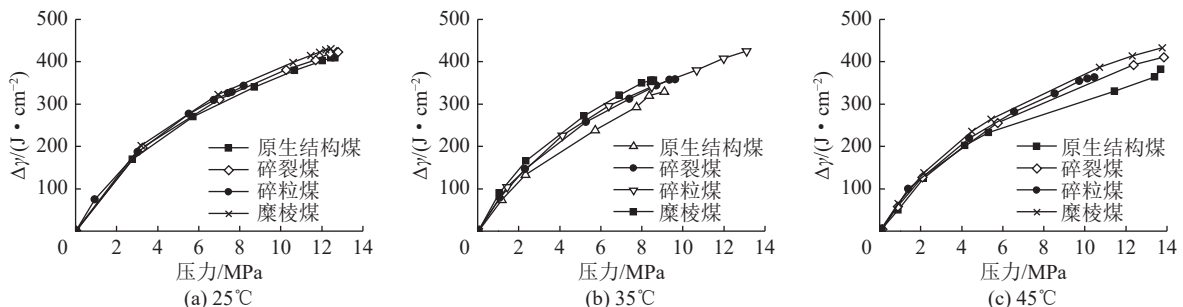


图11 不同煤体结构煤表面自由能的总降低值^[50]

Fig.11 Cumulative reduction of surface free energy on coals with different coal body structure^[50]

4 宏观煤岩类型对煤吸附、解吸特征的影响

4.1 不同宏观煤岩类型煤的吸附特征

原生结构与碎裂结构的不同宏观煤岩类型煤的

$$-d\sigma = RT\Gamma d(\ln P) \quad (1)$$

式中: σ 为表面张力, J/m^2 ; R 为普适气体常数, $J/(mol \cdot K)$; T 为绝对温度, K ; Γ 为表面超量, mol/m^2 ; P 为平衡压力, MPa 。

表面超量 Γ 指甲烷气体在煤表面区域的浓度与煤结构内浓度的差值,其计算式^[50]为

$$\Gamma = \frac{V}{V_0 S} = \frac{V_L P}{(P + P_L) V_0 S} \quad (2)$$

式中: V 为甲烷气体吸附量, L ; V_0 为标准状况下的气体摩尔体积, $22.4 L/mol$; S 为煤比表面积, m^2/g ; V_L 为兰氏体积, m^3/t ; P_L 为兰氏压力, MPa 。

将式(2)代入式(1)并积分得^[50]

$$\Delta\gamma = \int_0^P RT \frac{V_L P}{(P + P_L) V_0 S} d \ln P = \frac{RT V_L}{V_0 S} \ln \left(1 + \frac{P}{P_L} \right) \quad (3)$$

其中, $\Delta\gamma$ 为表面自由能降低值, J/m^2 。

煤表面在吸附过程中,煤消耗部分表面自由能对甲烷分子做功,以此降低甲烷分子部分运动势能,最终煤分子与甲烷分子间产生吸引形式的范德华力,甲烷分子由原来的自由运动状态变为相对稳定的吸附态,甲烷分子自由度减小、运动势能减小、煤表面自由能降低,整个过程由于能量降低而释放热量,表明整个系统能量的改变量越大,吸附越容易进行^[50-51],因此表面自由能的降低值可代表煤吸附甲烷能力。

在吸附过程中,四种煤体结构煤的表面自由能变化量在不同温度下呈相同规律,相同的温度、压力条件下,煤体越破碎,其表面自由能的降低值越大,煤体吸附甲烷的能力越强,即煤的吸附能力与煤体破碎程度呈正相关(图11)。

等温吸附试验结果表明,各煤样的吸附量均随压力增大而增大。在0~1 MPa的低压段,原生结构与碎裂结构的3种宏观煤岩类型煤的吸附曲线都几乎重合;在1~4 MPa的中压段与大于4 MPa的高压段,3

种宏观煤岩类型煤的吸附量出现差距,整体上煤体结构相同时吸附量均表现为光亮煤>半亮煤>半暗煤(图12)。

煤体结构相同时,不同宏观煤岩类型的原生结构煤和碎裂煤的 V_L 均整体表现为光亮煤>半亮煤>半暗煤(图13—图14)。

原生结构煤中:①光亮煤 V_L 大于半亮煤的占63.4%,原生结构-光亮煤与原生结构-半亮煤的 V_L 比值介于0.93~1.24,平均为1.06;②光亮煤 V_L 大于半暗煤的占70.8%,原生结构-光亮煤与原生结构-半暗煤的 V_L 比值介于0.95~1.28,平均为1.09;③半亮煤 V_L 大于半暗煤的占61.0%,原生结构-半亮煤与原生结构-半暗煤的 V_L 比值介于0.91~1.18,平均为1.02(图13)。

碎裂煤中:①光亮煤 V_L 大于半亮煤的占100.0%,碎裂结构-光亮煤与碎裂结构-半亮煤的 V_L 比值为1.02;②光亮煤 V_L 大于半暗煤的占100.0%,碎裂结构-光亮煤与碎裂结构-半暗煤的 V_L 比值为1.19(图14)。

相同煤体结构时,光亮煤与半亮煤的 V_L 比值介

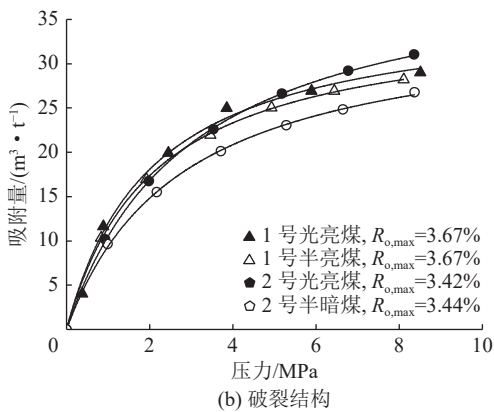
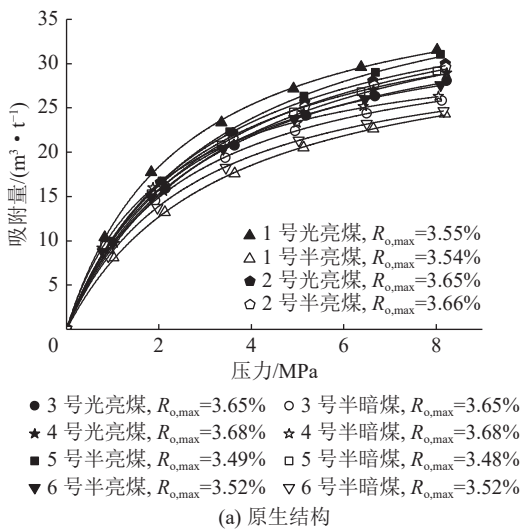


图12 相同煤体结构下不同宏观煤岩类型煤等温吸附曲线
Fig.12 Isothermal adsorption curves of coal with different macrolithotypes of coal under the same coal body structure

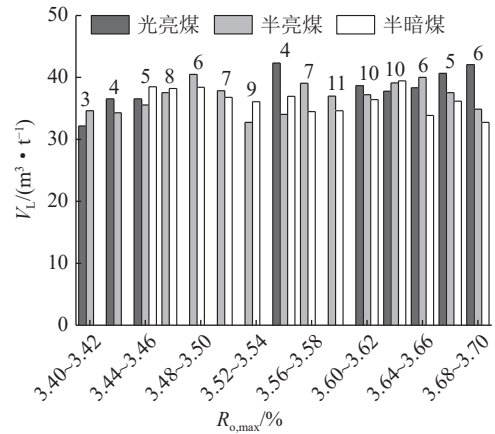


图13 不同宏观煤岩类型的原生结构煤的 V_L 对比
Fig.13 V_L comparison of primary structure coal with different macrolithotypes of coal

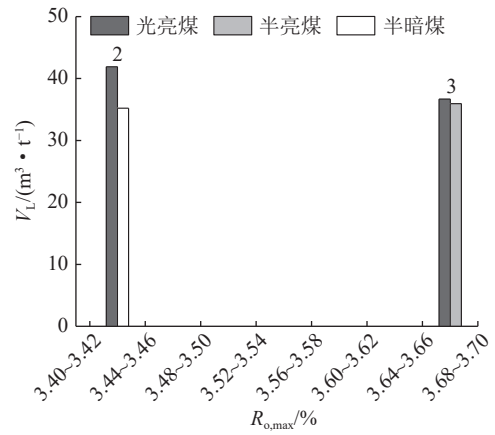


图14 不同宏观煤岩类型的碎裂煤的 V_L 对比
Fig.14 V_L comparison of fractured coal with different macrolithotypes of coal

于0.93~1.24,平均为1.05;光亮煤与半暗煤的 V_L 比值介于0.95~1.28,平均为1.11;半亮煤与半暗煤的 V_L 比值介于0.91~1.18,平均为1.02(图13—图14)。

原生结构和碎裂结构煤中不同宏观煤岩类型煤的 P_L 与宏观煤岩类型的关系一致(图15—图16)。

原生结构煤中:①光亮煤的 P_L 整体明显大于半亮煤,光亮煤 P_L 大于半亮煤的占68.3%,原生结构-光亮煤与原生结构-半亮煤的 P_L 比值介于0.72~1.42,平均为1.07;②光亮煤的 P_L 整体大于半暗煤,光亮煤 P_L 大于半暗煤的占100.0%,原生结构-光亮煤与原生结构-半暗煤的 P_L 比值介于1.00~1.56,平均为1.23;③半亮煤的 P_L 整体大于半暗煤,半亮煤 P_L 大于半暗煤的占81.7%,原生结构-半亮煤与原生结构-半暗煤的 P_L 比值介于0.92~1.29,平均为1.15(图15)。

碎裂煤中:①光亮煤的 P_L 整体略小于半亮煤,光亮煤 P_L 大于半亮煤的占0.0%,碎裂结构-光亮煤与碎裂结构-半亮煤的 P_L 比值为0.97;②光亮煤的 P_L 整

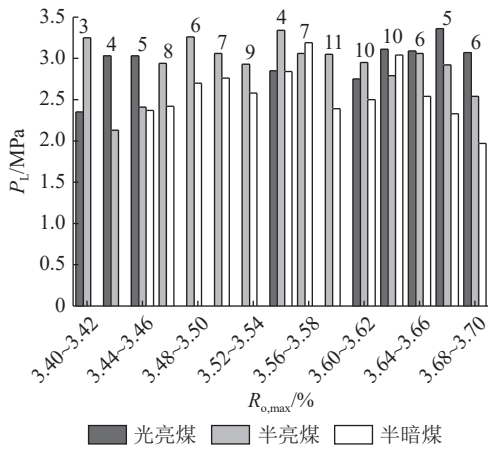


图 15 不同宏观煤岩类型的原生结构煤的 P_L 对比

Fig.15 P_L comparison of primary structure coal with different macrolithotypes of coal

体大于半暗煤,光亮煤 P_L 大于半暗煤的占 100.0%, 碎裂结构-光亮煤与碎裂结构-半暗煤的 P_L 比值为 1.08(图 16)。

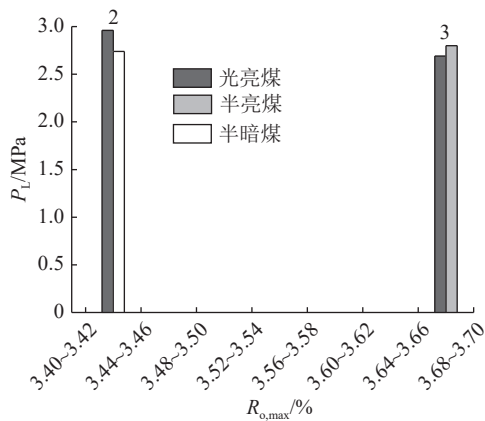


图 16 不同宏观煤岩类型的碎裂煤的 P_L 对比

Fig.16 P_L comparison of fractured coal with different macrolithotypes of coal

相同煤体结构时,光亮煤与半亮煤的 P_L 比值介于 0.72~1.42,平均为 1.06;光亮煤与半暗煤的 P_L 比值介于 1.00~1.56,平均为 1.21;半亮煤与半暗煤的 P_L 比值介于 0.92~1.29,平均为 1.15(图 15—图 16)。

4.2 不同宏观煤岩类型煤的解吸特征

对相同煤体结构、不同宏观煤岩类型煤的解吸试验结果进行分析可知,原生结构的光亮煤、半亮煤、半暗煤的解吸规律相同,均表现为光亮成分含量越高,煤样解吸率越大,解吸率具体表现为光亮煤>半亮煤>半暗煤,碎裂结构则无明显规律(图 17—图 18)。

原生结构时:光亮煤解吸率大于半亮煤的占 80.5%,原生结构-光亮煤与原生结构-半亮煤的解吸率的比值介于 0.92~1.30,平均 1.07;光亮煤解吸率大

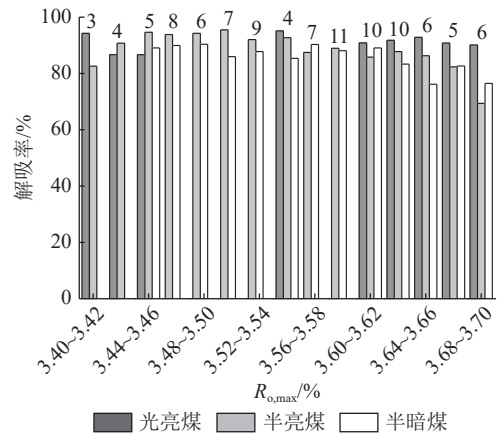


图 17 不同宏观煤岩类型的原生结构煤的解吸率

Fig.17 Desorption rate of primary structure coal with different macrolithotypes of coal

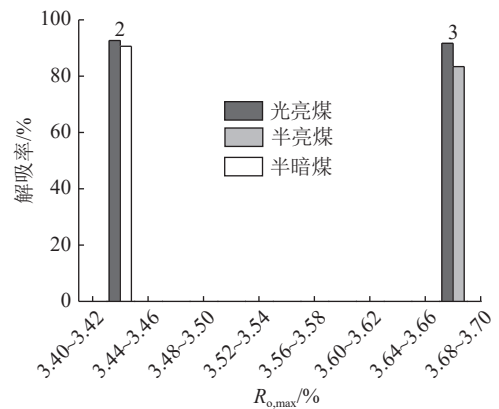


图 18 不同宏观煤岩类型的碎裂煤的解吸率

Fig.18 Desorption rate of fractured coal with different macrolithotypes of coal

于半暗煤的占 91.7%,原生结构-光亮煤与原生结构-半暗煤的解吸率的比值介于 0.97~1.22,平均 1.10;半亮煤解吸率大于半暗煤的占 72.0%,原生结构-半亮煤与原生结构-半暗煤的解吸率的比值介于 0.91~1.13,平均 1.03(图 17)。

碎裂结构时:光亮煤解吸率大于半亮煤的占比为 0,碎裂结构-光亮煤与碎裂结构-半亮煤的解吸率的比值为 0.91;光亮煤解吸率大于半暗煤的占 100.0%,碎裂结构-光亮煤与碎裂结构-半暗煤的解吸率的比值为 1.02(图 18)。

相同煤体结构时,光亮煤与半亮煤的解吸率比值介于 0.92~1.30,平均为 1.07;光亮煤与半暗煤的解吸率比值介于 0.97~1.22,平均为 1.09;半亮煤与半暗煤的解吸率比值介于 0.91~1.13,平均为 1.03(图 17—图 18)。

相同煤体结构下不同宏观煤岩类型的解吸速率对比发现,8 组煤样的解吸速率均随解吸时间逐渐降

低,解吸速率曲线随时间增长趋于平缓,解吸速率的降低速率随时间增长而逐渐降低。在0~100 min解吸时间内,煤样解吸速率较高,基本都在 $10 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$ 以上;在解吸时间达到10 000 min后,解吸速率趋近于0(图19)。整体上解吸速率与光亮成分含量关系一致,相同煤层气井、同一煤层、相同煤体结构的煤样的解吸速率基本都呈现光亮煤>半亮煤、光亮煤>半暗煤、半亮煤>半暗煤的规律(图19)。

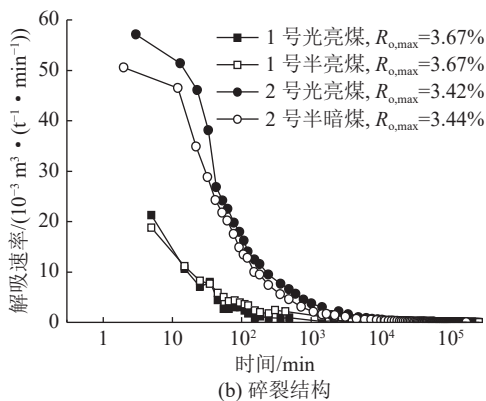
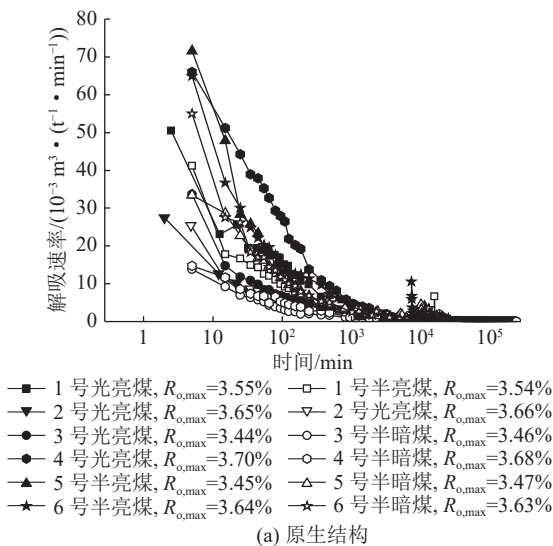


图19 相同煤体结构下宏观煤岩类型与解吸速率的关系
Fig.19 Relationship between macrolithotype of coal and desorption rate under the same coal body structure

4.3 宏观煤岩类型影响煤体吸附、解吸机理

煤对甲烷的吸附主要为物理吸附,吸附性能除了受温度、压力等外因影响,还与显微组分、含水性、煤级、孔隙性等内因有关,且显微组分和煤级是通过改变孔隙间接地影响煤吸附性^[31]。在GB/T 18023—2000中,以镜煤和亮煤为代表的光亮成分含量对宏观煤岩类型进行划分,其中光亮成分含量>80%为光亮煤,光亮成分含量50%~80%为半亮煤,光亮成分

含量20%~50%为半暗煤,光亮成分含量 $\leq 20\%$ 为暗淡煤,因此宏观煤岩类型差异对吸附、解吸的影响实质上是镜煤和亮煤含量对吸附、解吸的影响。

煤体对甲烷的吸附大致可分为2个阶段^[52-53]:第一阶段是甲烷经裂隙渗流到煤基质孔隙网络后向孔隙深处扩散,第二阶段是甲烷被吸附在煤基质孔隙内表面上。第一阶段中,甲烷气体向煤孔隙内扩散。若甲烷分子平均自由程大于煤孔隙直径,则甲烷分子高概率在碰撞煤孔隙后被弹回,无法通过孔隙进入煤基质内部;若甲烷分子平均自由程远小于煤孔隙直径,则甲烷分子扩散进煤基质内部的概率大,同时逃逸的概率也大;当甲烷分子平均自由程略小于煤孔隙直径时,甲烷分子可进入煤基质内部且难以逃逸,易被吸附^[54-56],表明直径略大于甲烷分子平均自由程的孔隙的含量制约了煤实际情况下吸附-脱附动态平衡时的甲烷吸附量。

由分子运动理论知,平均自由程计算式^[56]为

$$\lambda = \frac{kT_1}{\sqrt{2}nd_0^2P_1} \quad (4)$$

式中, λ 为气体平均自由程,m; k 为玻尔兹曼常数, $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; T_1 为气体温度, $^{\circ}\text{C}$; d_0 为分子直径,nm; P_1 为气体压力,Pa。

霍多特孔径分类方案的基础主要是固体孔径大小与固气分子作用效应,依据此方案将煤中孔隙划分为微孔($<10 \text{ nm}$)、过渡孔($10 \text{ nm} < 100 \text{ nm}$)、中孔($100 \text{ nm} < 1000 \text{ nm}$)、大孔($>1000 \text{ nm}$),而甲烷分子直径为 0.414 nm ,以沁水盆地3号煤储层为例,压力 $2.40 \sim 6.14 \text{ MPa}$,温度设为 $0 \sim 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$,则甲烷分子平均自由程 $0.81 \sim 2.82 \text{ nm}$ ^[57],显然微孔与过渡孔更适合甲烷吸附,即微孔和过渡孔含量越高甲烷越易被吸附^[45]。在第二阶段中,煤基质表面分子与甲烷分子之间以范德华力吸引,从而把甲烷吸附在煤体孔隙内,此时煤基质表面吸附点位数量制约煤对甲烷的吸附量,煤基质表面吸附点位越多,甲烷最大吸附量越大,即 V_L 值越大。而吸附点位量取决于煤比表面积大小,煤比表面积越大,煤基质表面吸附点位越多,因此甲烷最大吸附量与煤比表面积呈正相关^[58]。由图12可知,在排除煤体结构差异和变质程度差异的影响后,煤体的吸附量整体上表现为光亮煤>半亮煤>半暗煤,即吸附量与光亮成分含量呈正相关。正是镜煤更大的比表面积,导致从镜煤含量较低的半暗煤到镜煤含量较高的光亮煤,甲烷吸附量逐渐增大(图13,图14,表1)。

此外,相较于暗煤,镜煤的镜质组含量更高,惰

表1 压汞测试比表面积、孔容及各孔径段孔容比例^[59]Table 1 Specific surface area, pore volume and pore volume ratio of each pore section were measured by mercury porosimetry^[59]

煤样编号	宏观煤岩组分	比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	孔容/(10 ⁻³ cm ³ ·g ⁻¹)	各孔径段孔容占比/%			
				微孔	过渡孔	中孔	大孔
H-2-J	镜煤	5.28	35.42	23.19	29.41	39.29	8.11
H-2-A	暗煤	2.86	24.04	25.00	22.75	16.47	35.78
D-4S-J1	镜煤	7.67	56.20	31.91	21.07	46.27	0.75
D-4S-A1	暗煤	3.37	59.53	26.32	9.00	20.09	44.59
D-4S-J2	镜煤	9.62	74.06	34.85	54.25	10.90	0.00
D-4S-A2	暗煤	7.03	77.17	31.05	14.43	39.04	15.48
D-4-J1	镜煤	4.26	51.00	42.30	17.47	37.59	2.64
D-4-A1	暗煤	4.63	59.04	31.46	12.30	25.60	30.64
D-4-J2	镜煤	7.17	56.80	33.62	18.40	47.98	0.00
D-4-A2	暗煤	4.35	64.42	31.04	10.87	20.69	37.41

表2 煤岩显微组分测定结果^[59]Table 2 Determination results of coal macerals^[59]

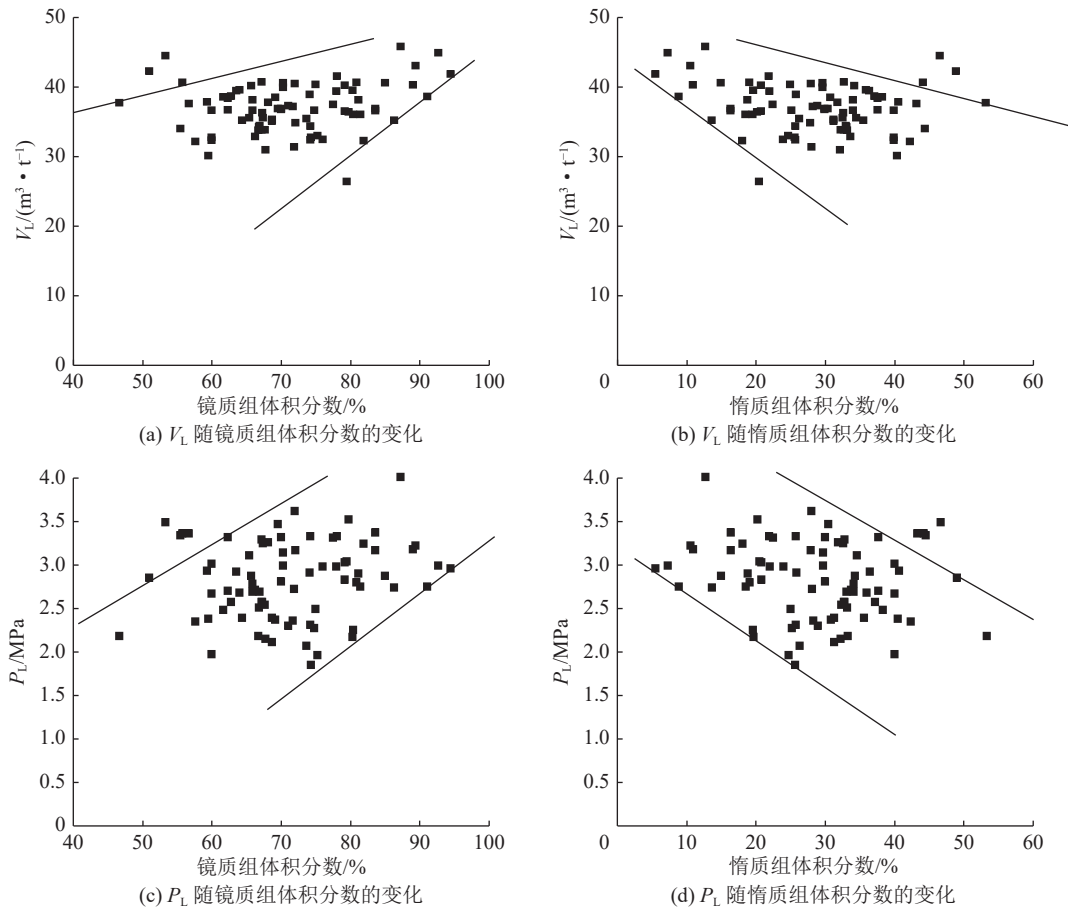
煤样编号	宏观煤岩组分	$R_{o,max}/\%$	显微组分体积分数/%			
			镜质组	惰质组	壳质组	矿物质
H-2-J	镜煤	0.73	72.8	22.8	1.1	3.3
H-2-A	暗煤		13.3	74.6	7.3	4.8
D-4S-J1	镜煤	0.60	66.4	33.0	0.6	0.0
D-4S-A1	暗煤		21.6	76.2	1.8	0.4
D-4S-J2	镜煤		68.1	30.5	0.0	1.4
D-4S-A2	暗煤		19.0	78.3	0.9	1.8
D-4-J1	镜煤	0.63	64.5	31.8	1.6	2.1
D-4-A1	暗煤		18.2	73.5	2.6	5.7
D-4-J2	镜煤		64.9	32.9	0.8	1.4
D-4-A2	暗煤		22.4	74.1	2.0	1.5

质组和矿物质含量更低(表2), 试验煤样中 V_L 随镜质组含量增加而增加, 随惰质组含量增加而减小(图20)。一方面由于镜质组富脂肪烃和芳香烃, 而惰质组富含氧官能团^[60-61], 烷烃侧链吸附甲烷的能力强于含氧官能团^[62], 另一方面是由于镜质组较惰质组更疏水, 镜煤中水分含量更低。水分子与煤分子之间除了范德华力还存在作用力更强的氢键, 二者综合, 煤对水分子的吸附能力远强于对甲烷的吸附能力(水分子与煤之间作用力可达 376.88 kJ/mol 以上, 甲烷分子与煤之间的作用力 262.2 kJ/mol)^[63-64], 水分含量的降低使总吸附点位中被水分子占据的点位减少^[65], 从而增加甲烷分子的吸附点位, 进而增加对甲烷的吸附量^[66], 故镜质组含量高的煤更容易吸附甲烷。本次研究中, 无论是原生结构煤还是碎裂煤, 煤样对甲烷的吸附量均为光亮煤>半亮煤>半暗煤, 即反映了上述煤的吸附能力与镜质组含量呈正相关关系, 与惰质组含量呈负相关关系(图20)。

同时, 由于镜质组和惰质组含量差异引起的含水率的变化也能影响煤对甲烷的解吸。一是因为水

的存在会阻塞孔隙^[32,34,66], 减少了甲烷分子的有效运移通道, 从而抑制甲烷的解吸^[15-16]; 二是随着压力降低, 部分水分汽化, 当因水分汽化增加的吸附点位数大于因解吸增加的吸附点位数时, 被解吸的甲烷可能会被再次吸附^[63]; 三是水分与甲烷竞争吸附, 对甲烷吸附产生抑制, 间接促进了甲烷的解吸^[67], 但有研究表明, 镜煤中水分确因抑制吸附而相对促进甲烷解吸, 暗煤中的水分则并未利于甲烷解吸^[60]。因此, 整体上暗煤更高的含水率导致其解吸效果不如镜煤。由图15、图16和图19可知, 在相同煤体结构和相近的变质程度下, 煤体间的 P_L 和解吸速率有明显规律, P_L 和解吸速率整体上表现为光亮煤>半亮煤>半暗煤, 即光亮成分含量越高的煤解吸效果越好。

由图17可以看出, 原生结构煤的解吸率与光亮成分含量有显著正相关性, 这是由于镜质组较惰质组有更强的吸附能力, 使得同等情况下镜质组含量高的煤储层内外甲烷浓度差更大, 更易形成较高的甲烷浓度梯度, 从而促进甲烷解吸, 提高解吸率^[66,68-70]。此外, 暗煤中矿物质含量较镜煤更高, 煤中微孔隙易

图 20 显微煤岩组分与 V_L 、 P_L 的关系Fig.20 Relationship between macerals and V_L , P_L

被矿物质填充^[60],从而阻碍甲烷扩散,限制煤对甲烷的解吸能力。但图 18 中碎裂煤的解吸速率则无明显规律,笔者认为这是样本数不足产生的偏差。

综上所述,随着煤体破碎程度增大,煤的吸附、解吸能力增强;不同宏观煤岩类型煤对甲烷吸附、解吸能力也有明显差异,吸附和解吸能力表现为光亮煤>半亮煤>半暗煤。因此,为了提高开发效果,煤体结构按优先级选择应为碎裂结构>原生结构,宏观煤岩类型按优先级选择应为光亮煤>半亮煤>半暗煤。

5 结 论

1)研究区 3 号煤层煤样 V_L 整体较高,平均为 $37.00 \text{ m}^3/\text{t}$,其中介于 $33.00\sim 41.00 \text{ m}^3/\text{t}$ 的占 86.61%;相同宏观煤岩类型时, V_L 随煤体破碎程度增大而增大,碎裂煤与原生结构煤二者 V_L 比值介于 0.87~1.30,平均为 1.08;相同煤体结构时, V_L 呈光亮煤>半亮煤>半暗煤的规律,光亮煤与半亮煤的 V_L 比值介于 0.93~1.24,平均为 1.05;光亮煤与半暗煤的 V_L 比值介于 0.95~1.28,平均为 1.11;半亮煤与半暗煤的 V_L 比值介于 0.91~1.18,平均为 1.02。

2)研究区 3 号煤层煤样 P_L 平均为 2.82 MPa,其中介于 2.30~3.30 MPa 的占 82.28%;相同宏观煤岩类型时, P_L 整体随煤体破碎程度增大而增大,碎裂煤与原生结构煤二者 P_L 比值介于 0.74~1.39,平均为 1.09;相同煤体结构时,光亮煤与半亮煤的 P_L 比值介于 0.72~1.42,平均为 1.06;光亮煤与半暗煤的 P_L 比值介于 1.00~1.56,平均为 1.21;半亮煤与半暗煤的 P_L 比值介于 0.92~1.29,平均为 1.15。

3)碎裂煤对甲烷的吸附能力和解吸能力均优于原生结构煤。随着煤体破碎程度增大,煤中半封闭孔含量降低,开放孔含量增高,孔隙连通性增强,提高了煤的吸附、解吸能力。碎裂煤在吸附甲烷过程中表面自由能的改变量大于原生结构煤,导致碎裂煤对甲烷的吸附能力更强。

4)煤体吸附、解吸能力表现为光亮煤>半亮煤>半暗煤。其原因在于一方面镜煤的孔隙含量与孔比表面积均高于暗煤,且暗煤中更高含量的惰质组增大了煤的含水率,使得镜煤中可供甲烷吸附的点位更多;另一方面镜质组本身吸附能力强于惰质组,导致镜质组含量高的煤储层与外界的甲烷浓度差更

大,使得镜质组含量高的煤解吸能力更强;此外暗煤中更多的水分与矿物质含量会阻塞孔隙,限制甲烷扩散。

参考文献(References):

- [1] GUAN Cheng, LIU Shimin, LI Chengwu, *et al.* The temperature effect on the methane and CO₂ adsorption capacities of Illinois coal[J]. *Fuel*, 2018, 211: 241–250.
- [2] CHENG Yuanping, JIANG Haina, ZHANG Xiaolei, *et al.* Effects of coal rank on physicochemical properties of coal and on methane adsorption[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2017, 4(2): 129–146.
- [3] KROOSS B M, VAN BERGEN F, GENSTERBLUM Y, *et al.* High-pressure methane and carbon dioxide adsorption on dry and moisture-equilibrated Pennsylvanian coals[J]. *International journal of coal geology*, 2002, 51(2): 69–92.
- [4] NI Guanhua, LIN Baiquan, ZHAI C. Influence of water incursion on the pore characteristics of coal from Eastern China at different temperatures[J]. *Disaster Advances*, 2013, 6(11): 43–54.
- [5] WEN Zhihui, WEI Jianping, WANG Dengke, *et al.* Experimental study of gas desorption law of deformed coal[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 26: 1083–1088.
- [6] LAXMINARAYANA C, CROSDALE P J. Role of coal type and rank on methane sorption characteristics of Bowen Basin, Australia coals[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1999, 40(4): 309–325.
- [7] LAXMINARAYANA C, CROSDALE P J. Controls on methane sorption capacity of Indian coals[J]. *AAPG bulletin*, 2002, 86(2): 201–212.
- [8] 王可新, 傅雪海, 权彪, 等. 中国各煤级煤的吸附/解吸特征研究[C]// 中国煤炭学会煤层气专业委员会. 2008年煤层气学术研讨会论文集, 江西: 地质出版社, 2008: 31–42.
WANG Kexin, FU Xuehai, QUAN Biao, *et al.* Study on the adsorption/desorption characteristics of various rank coals in China[C]. Coalbed Methane Specialized Committee, China Coal Society. Proceedings of 2008 coalbed methane Symposium, Jiaoxi: Geological Publishing House, 2008: 31–42.
- [9] ZHANG Junfang, CLENNELL M B, DEWHURST D N, *et al.* Combined monte carlo and molecular dynamics simulation of methane adsorption on dry and moist coal[J]. *Fuel*, 2014, 122: 186–197.
- [10] ZHANG Kaizhong, CHENG Yuanping, WANG Liang, *et al.* Pore morphology characterization and its effect on methane desorption in water-containing coal: an exploratory study on the mechanism of gas migration in water-injected coal seam[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020: 75.
- [11] WANG Zhaofeng, SU Weiwei, TANG Xu, *et al.* Influence of water invasion on methane adsorption behavior in coal[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 197: 74–83.
- [12] DAY S, SAKUROVS R, WEIR S. Supercritical gas sorption on moist coals[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2008, 74(3–4): 203–214.
- [13] GUO Haijun, CHENG Yuanping, WANG Liang, *et al.* Experimental study on the effect of moisture on low-rank coal adsorption characteristics[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 24: 245–251.
- [14] SANG Shuxun, ZHU Yanming, ZHANG Jing, *et al.* Influence of liquid water on coalbed methane adsorption: An experimental research on coal reservoirs in the south of Qinshui Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(DecS): 79–85.
- [15] CHEN Xiangjun, CHENG Yuanping. Influence of the injected water on gas outburst disasters in coal mine[J]. *Natural Hazards*, 2015, 76(2): 1093–1109.
- [16] WU Jiahao, YU Jingcun, WANG Zhaofeng, *et al.* Experimental investigation on spontaneous imbibition of water in coal: Implications for methane desorption and diffusion[J]. *Fuel*, 2018, 231: 427–437.
- [17] PENG Cheng, ZOU Changchun, YANG Yuqing, *et al.* Fractal analysis of high rank coal from southeast Qinshui Basin by using gas adsorption and mercury porosimetry[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 156: 235–249.
- [18] FENG Zengchao, ZHOU Dong, ZHAO Yangsheng, *et al.* Study on microstructural changes of coal after methane adsorption[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 30: 28–37.
- [19] GAO Tao, ZHAO Dong, WANG Chen, *et al.* Energy variation in coal samples with different particle sizes in the process of adsorption and desorption[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 188: 106932.
- [20] KIM D, LEE J, LEE Y. The CH₄-CO₂ adsorption characteristics of sub-bituminous coal with different particle sizes[J]. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 2018, 55(1): 37–48.
- [21] ZHANG Lei, AZIZ N, REN Ting, *et al.* Influence of coal particle size on coal adsorption and desorption characteristics[J]. *Archives of Mining Sciences*, 2014, 59(3): 807–820.
- [22] ZHAO Junlong, XU Hao, TANG Dazhen, *et al.* Coal seam porosity and fracture heterogeneity of macrolithotypes in the Hancheng Block, eastern margin, Ordos Basin, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 159: 18–29.
- [23] SOARES J L, OBERZINER A, JOSE H J, *et al.* Carbon dioxide adsorption in Brazilian coals[J]. *Energy & Fuels*, 2007, 21(1): 209–215.
- [24] LUTYNSKI M, M González González. Characteristics of carbon dioxide sorption in coal and gas shale-The effect of particle size[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2016, 28: 558–565.
- [25] TAO Shu, PAN Zhejun, CHEN Shida, *et al.* Coal seam porosity and fracture heterogeneity of macrolithotypes in the Fanzhuang Block, southern Qinshui Basin, China - ScienceDirect[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 66: 148–158.
- [26] CHALMERS G, BUSTIN R M. On the effects of petrographic composition on coalbed methane sorption[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2007, 69(4): 288–304.
- [27] HUANG Liangliang, ZHANG Luzheng, SHAO Qing, *et al.* Simulations of binary mixture adsorption of carbon dioxide and methane in carbon nanotubes: temperature, pressure, and pore size effects[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2007, 111(32): 11912–11920.
- [28] PINI R, OTTIGER S, BURLINI L, *et al.* Sorption of carbon dioxide, methane and nitrogen in dry coals at high pressure and moderate temperature[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2010, 4(1): 90–101.
- [29] YANG Tao, CHEN Peng, LI Bo, *et al.* Potential safety evaluation method based on temperature variation during gas adsorption and

- desorption on coal surface[J]. *Safety Science*, 2019, 113: 336–344.
- [30] HE Manchao, WANG Chunguang, LI Dejian, *et al.* Desorption characteristics of adsorbed gas in coal samples under coupling temperature and uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(5): 865–872.
- [31] 张小东, 杜志刚, 李朋朋. 不同煤体结构的高阶煤储层物性特征及煤层气产出机理[J]. *中国科学(地球科学)*, 2017, 47(1): 72–81.
- ZHANG Xiaodong, DU Zhigang, LI Pengpeng. Physical characteristics of high-rank coal reservoirs in different coal-body structures and the mechanism of coalbed methane production[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2017, 47(1): 72–81.
- [32] WANG Kai, ZANG Jie, FENG Yufeng, *et al.* Effects of moisture on diffusion kinetics in Chinese coals during methane desorption[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, 21: 1005–1014.
- [33] LIU Huihu, FARID I I, SANG Shuxun, *et al.* Synthetical study on the difference and reason for the pore structure of the No. 3 coal reservoir from the southern Qinshui Basin, China, using mercury intrusion porosimetry, low-temperature N₂ adsorption, low field nuclear magnetic resonance, and nuclear magnetic resonance cryoporometry[J]. *Energy Reports*, 2020, 6: 1876–1887.
- [34] MAHAJAN O P, WALKER P L. Water adsorption on coals[J]. *Fuel*, 1971, 50(3): 308–317.
- [35] 柳先锋, 宋大钊, 何学秋, 等. 微结构对软硬煤瓦斯吸附特性的影响[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(1): 155–161.
- LIU Xianfeng, SONG Dazhao, HE Xueqiu, *et al.* Effect of microstructures on methane adsorption characteristics of soft and hard coal[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(1): 155–161.
- [36] 李波. 不同变质程度的软硬煤瓦斯解吸规律研究[J]. *煤*, 2019, 28(1): 32–34.
- LI Bo. Study on gas desorption law of soft and hard coal with different degrees of metamorphism[J]. *Coal*, 2019, 28(1): 32–34.
- [37] 田敬, 林晓英, 苏现波, 等. 软硬煤孔隙结构特征及对变解压吸规律的影响[J]. *煤矿安全*, 2018, 49(12): 21–26.
- TIAN Jing, LIN Xiaoying, SU Xianbo, *et al.* Pore structure of soft and hard coal and its influence on gas desorption characteristics under variable pressure[J]. *Safety in Coal Mines*, 2018, 49(12): 21–26.
- [38] LIU Yanwei, WANG Dandan, HAO Fuchang, *et al.* Constitutive model for methane desorption and diffusion based on pore structure differences between soft and hard coal[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27(6): 937–944.
- [39] LU Shouqing, CHENG Yuanping, QIN Liming, *et al.* Gas desorption characteristics of the high-rank intact coal and fractured coal[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2015, 25(5): 819–825.
- [40] GUO Haijun, CHENG Yuanping, REN Ting, *et al.* Pulverization characteristics of coal from a strong outburst-prone coal seam and their impact on gas desorption and diffusion properties[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 33: 867–878.
- [41] 朱庆忠, 张小东, 杨延辉, 等. 影响沁南—中南煤层气井解吸压力的地质因素及其作用机制[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(2): 41–49.
- ZHU Qingzhong, ZHANG Xiaodong, YANG Yanhui, *et al.* Geological factors affecting desorption pressure of CBM wells in the southern and central-southern Qinshui Basin and their influencing mechanism[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2018, 42(2): 41–49.
- [42] LI Fengli, JIANG Bo, CHENG Guoxi, *et al.* Structural and evolutionary characteristics of pores-microfractures and their influence on coalbed methane exploitation in high-rank brittle tectonically deformed coals of the Yangquan mining area, northeastern Qinshui basin, China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 174: 1290–1302.
- [43] 王海超. 沁水盆地中南部煤系气储层物性及叠置成藏模式[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- WANG Haichao. Reservoir physical properties and superimposed accumulation model of coal measure gas in central-south Qinshui Basin[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [44] 陶树. 沁南煤储层渗透率动态变化效应及气井产能响应[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- TAO Shu. Dynamic variation effects of coal reservoir permeability and the response of gas productivity in southern Qinshui Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2011.
- [45] LIU Shiqi, SANG Shuxun, LIU Huihu, *et al.* Growth characteristics and genetic types of pores and fractures in a high-rank coal reservoir of the southern Qinshui basin[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 64: 140–151.
- [46] 刘曰武, 苏中良, 方虹斌, 等. 煤层气的解吸/吸附机理研究综述[J]. *油气井测试*, 2010, 19(6): 37–44.
- LIU Yuwu, SU Zhongliang, FANG Hongbin, *et al.* Review on CBM desorption/adsorption mechanism[J]. *Well Testing*, 2010, 19(6): 37–44.
- [47] 牟新竹, 陈振乾. 多尺度分形多孔介质气体有效扩散系数的数学模型[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(3): 520–526.
- MOU Xinzhu, CHEN Zhenqian. Mathematical model for effective gas diffusion coefficient in multi-scale fractal porous media[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2019, 49(3): 520–526.
- [48] 蔺亚兵, 贾雪梅, 马东民. 煤层气解吸滞后效应及其评判方法研究[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(S1): 160–163.
- LIN Yabing, JIA Xuemei, MA Dongmin. Research on CBM desorption hysteresis effects and its evaluation methods[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(S1): 160–163.
- [49] 张小东, 李朋朋, 张硕. 不同煤体结构煤的瓦斯放散特征及其影响机理[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(9): 93–98.
- ZHANG Xiaodong, LI Pengpeng, ZHANG Shuo. Gas emission features of coals with different coalbody structure and their influencing mechanism[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(9): 93–98.
- [50] 刘珊珊, 孟召平. 等温吸附过程中不同煤体结构煤能量变化规律[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(6): 1422–1427.
- LIU Shanshan, MENG Zhaoping. Study on energy variation of different coal-body structure coals in the process of isothermal adsorption[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(6): 1422–1427.
- [51] 赵文珍. 材料表面工程导论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
- ZHAO Wenzhen. Introduction to material surface engineering[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1998.

- [52] 康志勤,李翔,李伟,等. 煤体结构与甲烷吸附/解吸规律相关性实验研究及启示[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1400-1407.
KANG Zhiqin, LI Xiang, LI Wei, *et al.* Experimental investigation of methane adsorption/desorption behavior in coals with different coal-body structure and its revelation[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1400-1407.
- [53] 桑树勋,朱炎铭,张井,等. 煤吸附气体的固气作用机理(II)-煤吸附气体的物理过程与理论模型[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 16-18,21.
SANG Shuxun, ZHU Yanming, ZHANG Jing, *et al.* Solid-gas Interaction mechanism of coal-adsorbed gas(II)- Physical process and theoretical model of coal-adsorbed gas[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 16-18,21.
- [54] 张家平. 吸附剂的作用机理研究[J]. 中国化工贸易, 2017, 9(26): 245.
ZHANG Jiaping. Study on the mechanism of adsorbent[J]. China Chemical Trade, 2017, 9(26): 245.
- [55] 向玲,李立松,李新,等. 炭基催化剂比表面积、孔径与硫容关系研究[J]. 四川环境, 2014, 33(1): 18-21.
XIANG Ling, LI Lisong, LI Xin, *et al.* Study on the relationship between specific surface area, pore volume and sulfur capacity of activated carbon catalyst[J]. Sichuan Environment, 2014, 33(1): 18-21.
- [56] 王林. 不同变质程度煤高温高压条件下甲烷扩散动力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
WANG Lin. Study on dynamic characteristics of methane diffusion in various rank coals under high temperature and high pressure[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [57] 叶建平,张兵, WANG S. 山西沁水盆地柿庄北区块3[#]煤层注入埋藏CO₂提高煤层气采收率试验和评价[J]. 中国工程科学, 2012(2): 38-44.
YE Jianping, ZHANG Bing, WANG S. Test of and evaluation on elevation of coalbed methane recovery ratio by injecting and burying CO₂ for 3[#] coal seam of north section of Shizhuang, Qingshui Basin, Shanxi[J]. Engineering Science, 2012(2): 38-44.
- [58] 张凯飞,刘汉涛,雷广平,等. 赵庄3[#]煤中甲烷吸附特性的分子模拟[J]. 中国科技论文, 2020, 15(1): 94-99.
ZHANG Kaifei, LIU Hantao, LEI Guangping, *et al.* Molecular simulation of adsorption properties for methane in Zhaozhuang coal 3[#][J]. China Sciencepaper, 2020, 15(1): 94-99.
- [59] 王传涛. 黄陇煤田镜煤与暗煤CH₄解吸机理研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
WANG Chuantao. CH₄ desorption mechanism of vitrain and durain in Huangling-Longxian coalfield[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [60] 马东民,李沛,张辉,等. 长焰煤中镜煤与暗煤吸附/解吸特征对比[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(6): 852-862.
MA Dongmin, LI Pei, ZHANG Hui, *et al.* Comparison on characteristics of adsorption/desorption of vitrain and durain in long-flame coal[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(6): 852-862.
- [61] 张文静, 琚宜文, 孔祥文, 等. 沁水盆地南部高煤级变形煤结构组成特征及其对吸附/解吸的影响[J]. 中国科学院大学学报, 2014, 31(1): 98-107.
ZHANG Wenjing, JU Yiwen, KONG Xiangwen, *et al.* Structure and composition characteristics of deformed high-rank coals in the south of Qinsui Basin and their influence on CBM adsorption/desorption[J]. Journal of University of Chinese Academy of Science, 2014, 31(1): 98-107.
- [62] 降文萍. 煤阶对煤吸附能力影响的微观机理研究[J]. 中国煤层气, 2009, 6(2): 19-22,34.
JIANG Wenping. Microscopic mechanism study on the influence of coal rank on adsorption capacity[J]. China Coalbed Methane, 2009, 6(2): 19-22,34.
- [63] 王凤林,袁玉,张遂安,等. 不同含水及负压条件下煤层气等温吸附解吸规律[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(6): 158-163.
WANG Fenglin, YUAN Yu, ZHANG Suian, *et al.* Isothermal adsorption and desorption of coalbed methane under different water saturation and negative pressure[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(6): 158-163.
- [64] 张时音,桑树勋,杨志刚. 液态水对煤吸附甲烷影响的机理分析[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(5): 707-712.
ZHANG Shiyin, SANG Shuxun, YANG Zhigang. Mechanism analysis on the effect of liquid water on coal adsorbing methane[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(5): 707-712.
- [65] XIE Jianlin, ZHAO Yangsheng, LI Xiangchun, *et al.* The experiment of gas adsorption and desorption under the action of high temperature and high pressure water[J]. Procedia Engineering, 2011, 26: 1547-1553.
- [66] 李树刚,赵鹏翔,潘宏宇,等. 不同含水量对煤吸附甲烷的影响[J]. 西安科技大学学报, 2011, 31(4): 379-382,387.
LI Shugang, ZHAO Pengxiang, PAN Hongyu, *et al.* Effect of moisture on adsorption of methane on coal[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2011, 31(4): 379-382,387.
- [67] 高正,马东民,陈跃,等. 含水率对不同宏观煤岩类型甲烷吸附/解吸特征的影响[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(8): 97-105.
GAO Zheng, MA Dongmin, CHEN Yue, *et al.* Effect of water content on adsorption/desorption of methane of different macroscopic lithotypes[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(8): 97-105.
- [68] 刘俊刚,刘大猛,姚艳斌,等. 韩城示范区煤层气解吸规律及其地质影响因素[J]. 高校地质学报, 2012, 18(3): 490-494.
LIU Jungang, LIU Dameng, YAO Yanbin, *et al.* Desorption and its geological controls of coalbed methane in Hancheng demonstration area[J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(3): 490-494.
- [69] 王公达,REN Tingxiang,齐庆新,等. 吸附解吸迟滞现象机理及其对深部煤层气开发的影响[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 49-56.
WANG Gongda, REN Tingxiang, QI Qingxin, *et al.* Mechanism of adsorption-desorption hysteresis and its influence on deep CBM recovery[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 49-56.
- [70] 马东民,高正,陈跃,等. 不同温度下低、中、高阶煤储层甲烷吸附解吸特征差异[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(4): 17-24,38.
MA Dongmin, GAO Zheng, CHEN Yue, *et al.* Differences in methane adsorption and desorption characteristics of low, medium and high rank coal reservoirs at different temperatures[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(4): 17-24,38.