

煤的多尺度孔隙结构特征及其对渗透率的影响

潘结南^{1,2} 张召召^{1,2} 李 猛^{1,2} 毋亚文^{1,2} 王 凯^{1,2}

1. 河南理工大学资源环境学院 2. 中原经济区煤层(页岩)气河南省协同创新中心

摘 要 煤中孔隙大小分布不均且分布范围较广, 因而利用单一的方法难以对煤的多尺度孔隙结构进行有效地表征。为此, 综合运用扫描电镜、低温液氮吸附、高压压汞、恒速压汞等实验方法, 对煤的多尺度孔隙结构特征进行综合分析, 并揭示变质作用对煤孔体积、孔比表面积的影响, 以及煤岩渗透率与孔隙结构特征参数的关系。研究结果表明: ①随煤变质程度增强, 煤中纳米孔体积及孔比表面积均呈现先减小后增大的趋势, 并且在 $R_{o,max}$ 为 1.8% 左右时达到最小值; ②煤样孔隙半径、喉道半径整体均呈现正态分布, 并且随着煤变质程度的增加, 最大分布频率对应的孔隙半径增大; ③低煤阶烟煤煤样的喉道半径分布范围最宽, 最大连通喉道半径及喉道半径平均值均最大; ④无烟煤煤样的喉道半径分布范围最窄且最大连通喉道半径最小; ⑤低、中煤阶烟煤煤样的孔喉比分布存在着单一主峰, 并且主峰对应孔喉比相对较小; ⑥煤岩渗透率与孔隙度、喉道半径平均值表现出了较好的正相关关系, 其与孔喉比平均值呈负相关关系, 而与孔隙半径平均值的的关系则不明显。

关键词 煤 多尺度孔隙结构 扫描电镜 液氮-压汞联合实验 恒速压汞 渗透率 变质程度

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2019.01.007

Characteristics of multi-scale pore structure of coal and its influence on permeability

Pan Jienan^{1,2}, Zhang Zhaozhao^{1,2}, Li Meng^{1,2}, Wu Yawen^{1,2} & Wang Kai^{1,2}

(1. Institute of Resources & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 2. Henan Collaborative Innovation Center of Coalbed Methane and Shale Gas for Central Plains Economic Region, Jiaozuo, Henan 454000, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 39, ISSUE 1, pp.64-73, 1/25/2019. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Due to the uneven distribution of pore size in coal and its wide distribution range, it is difficult to effectively characterize the multi-scale pore structure of coal by a single method. In this paper, the multi-scale pore structure characteristics of coal were analyzed comprehensively by using scanning electron microscope, low-temperature liquid nitrogen adsorption, high-pressure mercury intrusion and constant-rate mercury intrusion. In addition, the effects of metamorphism on the volume and specific surface area of pores in coal were revealed, and the relationships between coal rock permeability and pore structure characteristic parameters were described. And the following research results were obtained. First, with the increase of coal metamorphism, the volume and specific surface area of nanopores in coal decrease first and then increase, and they reach the minimum value when $R_{o,max}$ is about 1.8%. Second, the pore and throat radii of coal samples are overall in the form of normal distribution. And with the increase of coal metamorphism, the pore radius corresponding to the maximum distribution frequency increases. Third, the samples of low-rank bituminous coal are the highest in throat radius distribution range, connected throat radius and average throat radius. Fourth, the samples of anthracite coal are the lowest in throat radius distribution range and connected throat radius. Fifth, there is a single main peak in the distribution of pore throat ratios of low- and medium-rank bituminous coal samples, and the pore throat ratios corresponding to the main peak is relatively low. Sixth, the permeability of coal is in a positive correlation with porosity and an average throat radius, and in a negative correlation with an average pore throat ratio, but in no obvious correlation with an average pore radius.

Keywords: Coal; Multi-scale pore structure; Scanning electron microscope; Combined liquid nitrogen adsorption and high-pressure mercury intrusion; Constant-rate mercury intrusion; Permeability; Degree of metamorphism

基金项目: 国家自然科学基金项目“构造煤微裂隙结构演化特征及对煤储层渗透性控制”(编号: 41772162)、河南省高校科技创新团队支持计划项目“煤层气储层物性及其地质控制”(编号: 17IRTSTHN025)。

作者简介: 潘结南, 1972 年生, 教授, 博士生导师; 主要从事煤与煤层气地质方面的研究工作。地址: (454003) 河南省焦作市高新区世纪大道 2001 号。ORCID: 0000-0001-7995-0129。E-mail: panjienan@163.com

通信作者: 张召召, 1991 年生, 硕士; 主要从事煤与煤层气地质方面的研究工作。地址: (454003) 河南省焦作市高新区世纪大道 2001 号。E-mail: zhangzhao_2017@163.com

0 引言

煤是一种复杂的多孔介质,孔隙的发育程度影响着煤中甲烷气体的储集和运移,研究其孔隙结构特征对煤层气资源评价与开发有着重要意义^[1-5]。目前,国内外学者对煤孔隙结构的研究很多,采用的实验方法也较为多样,常见的方法有压汞^[6-10]、低温液氮吸附^[8,11-12]、扫描电镜^[13-15]、小角 X 射线散射^[16-17]、原子力显微镜^[18]、X 射线计算机层析扫描^[19-21]及核磁共振^[7,22]等。然而,煤中孔隙大小分布不均且分布范围较广,以上方法在煤孔隙结构研究中都存在一定的局限性。比如,在扫描电镜下虽然能够直观看到孔隙的形态和大小,但却不能给出定量描述;传统的高压压汞实验在微孔(小于 10 nm)及部分小孔(介于 10~100 nm)的测定中存在孔隙“屏蔽效应”“煤基质压缩效应”,并且高压易导致孔隙结构发生变形和破坏^[7-9];低温液氮吸附实验只能测得一个较小的孔径分布范围,以纳米孔为主^[8,12]。因此,仅利用单一方法很难对煤多尺度孔隙结构进行有效表征,须利用多种方法进行联合测定。

恒速压汞法是一种确定储层岩石精细孔隙结构的有效方法,通过恒速压汞实验可以得到具有真正力学意义的岩石孔隙结构参数^[23-25],如:孔隙半径、喉道半径和孔喉比。近年来,该方法在致密油气储层孔隙结构研究中已有应用^[26-27],但在煤孔隙结构研究中应用较少。

本文综合扫描电镜、低温液氮吸附、高压压汞、恒速压汞等实验对不同变质程度煤样孔隙结构特征

进行综合研究,并对煤岩渗透率与孔隙结构特征参数的关系进行研究,以期对不同煤阶煤层进行煤层气的资源评价与开发提供必要的理论基础。

1 实验样品及方法

1.1 实验样品

煤样选自我国不同地区的 8 个矿井 10 个不同变质程度的煤样,为了消除变形对煤样孔隙结构的影响,样品选用原生结构煤。为定量分析不同煤样的煤岩组分及变质程度,实验使用 OPTON-II 类 MPV-3 型显微镜,测得煤样最大镜质组反射率($R_{o,max}$)及煤岩组成。同时,为了研究煤孔隙结构对煤岩渗透率的影响,对其中 5 个煤样(FKQ、SJZ、HB02、DC、SH01)进行氦气孔隙度和空气渗透率测定。依据最大镜质组反射率将煤样划分为 5 个煤阶:低煤阶烟煤、中煤阶烟煤、中高煤阶烟煤、高煤阶烟煤和无烟煤。煤样的基础信息如表 1 所示。

1.2 实验方法

1) 岩心常规分析法:实验过程均参照石油天然气行业标准《岩心常规分析方法》SY/T 5336—2006^[28],所有样品测试前均在 105 °C 下烘干至恒重,并用已知体积的标准块进行校正。氦气孔隙度测定采用氦气孔隙度仪 CAT113。空气渗透率测定采用气体渗透率仪 CAT112,在 1.38 MPa 环压下将样品密封在哈斯勒夹持器中,让干燥的空气稳定地通过样品,测得其进出口压力和空气的流速。依据达西定律,计算煤岩渗透率,即

表 1 煤样基础信息表

编号	采样位置	组成				$R_{o,max}$	氦气 孔隙度	空气 渗透率 / mD	煤 阶
		镜质组	壳质组	惰质组	矿物质				
FKQ	新疆阜康 气煤一井	83.37%	1.55%	10.15%	4.93%	0.57%	5.72%	4.439	低煤阶烟煤
BD	山西保德矿	60.90%	15.10%	23.50%	0.50%	0.75%	—	—	低煤阶烟煤
SJZ	山西申家庄矿	86.80%	0	10.40%	2.80%	1.15%	2.02%	0.044	中煤阶烟煤
HB01	河南鹤壁四矿	86.48%	0	6.97%	6.55%	1.55%	—	—	中高煤阶烟煤
HB02		90.88%	0	7.15%	1.97%	1.86%	3.92%	0.174	高煤阶烟煤
DC	四川大村矿	95.44%	0	0.33%	4.23%	1.92%	3.87%	0.288	高煤阶烟煤
ZZ	山西赵庄矿	94.55%	0	0.37%	5.08%	2.16%	—	—	高煤阶烟煤
SH01	山西寺河矿	84.67%	0	0.36%	14.97%	2.53%	4.26%	0.211	无烟煤
SH02		95.31%	0	1.87%	2.82%	2.80%	—	—	无烟煤
FH	山西凤凰山矿	93.20%	0	2.70%	4.10%	3.77%	—	—	无烟煤

$$K = 2\,000 \frac{p_0 \mu Q_a L}{A(p_1^2 - p_2^2)} \quad (1)$$

式中 K 表示渗透率, mD; p_0 表示大气压, 近似取值为 0.1 MPa; μ 表示气体黏度, mPa·s; Q_a 表示流速, cm³/s; L 表示长度, cm; A 表示截面积, cm²; p_1 、 p_2 分别表示进口、出口压力, 10⁻¹ MPa。

2) 扫描电镜法: 实验使用 Quanta 250FEG-SEM 场发射扫描电镜, 对样品表面进行二次电子成像观察, 分析不同尺度的孔隙发育形貌特征。该仪器最大分辨率 1.0 nm。

3) 低温液氮吸附法: 实验使用 ASAP2020M 型全自动比表面积及物理吸附分析仪, 实验过程参照 GB/T 21650.2—2008^[29]。本文所用的低温液氮吸附实验数据是基于 Barrett-Joyner-Halenda 算法 (以下简称 BJH 法) 所得的煤样孔体积、孔比表面积和孔径分布。BJH 法是基于圆筒孔模型和 Kelvin 方程应用的一种经典的孔隙表征方法, 表征的孔径范围主要是 2 ~ 50 nm^[30]。

4) 高压压汞法: 实验使用 AUTOPORE 9505 压汞仪, 其加压范围介于 0 ~ 228.00 MPa, 测试孔径范围介于 5.5 nm ~ 360 μm。实验过程参照 GB/T 21650.1—2008^[31]。

高压压汞法在煤孔隙测定中, 把煤中孔隙理想化为由大小不一的圆柱形毛细孔组成, 根据 Washburn 方程^[32], 汞所受压力 (p) 和孔隙直径 (d_p , 以下简称孔径) 的关系式为:

$$d_p = \frac{-4\gamma\cos\theta}{p} \quad (2)$$

式中 d_p 表示孔径, nm; γ 表示汞的表面张力, 取 0.480 N/m; θ 表示汞与所测煤样的润湿角, 取 140°; p 表示进汞压力, MPa。

5) 恒速压汞法: 恒速压汞是在注入汞的速度极低且恒定的条件下测定岩石毛细管压力曲线。恒定低速使得进汞过程可以近似为准静态过程, 汞经细小喉道进入到大孔隙时, 压力会降低而发生跳跃, 压力跳跃得到的进汞增量对应孔隙体积^[33]。整个过程把喉道视为毛细管状, 进汞过程与高压压汞法相似, 由式 (2) 计算得喉道半径; 孔隙被理想化为空心球体且与喉道连通, 汞经喉道进入到孔隙, 通过进汞体积计算出孔隙半径。实验使用 ASPE-730 恒速压汞仪, 进汞速度为 5×10^{-5} mL/min, 最大进汞压力 6.2 MPa, 对应的最小喉道半径 0.12 μm。

2 煤孔隙结构特征

2.1 煤孔隙表面形态特征

通过扫描电镜对煤中孔隙进行观察, 发现煤中存在多种显微孔隙且孔径大小分布不一 (图 1)。结合前人研究成果^[14,34-35], 依据孔隙成因类型将煤中孔隙划分为原生孔、气孔、矿物溶蚀孔、矿物铸模孔、粒间孔、微裂隙等 6 类。原生孔主要是成煤植物本身所具有的细胞结构孔, 其孔径大小主要在 1 μm 左右 (图 1-a)。气孔主要是煤化作用阶段由生气和聚气作用而形成的, 有时孤立出现 (图 1-e), 有时成群出现 (图 1-c), 气孔之间很少连通, 其孔径大小主要在 0.1 ~ 3 μm。矿物溶蚀孔是煤中可溶性矿物质 (碳酸盐岩类, 长石等) 在长期气、水作用下被溶蚀而形成的孔 (图 1-b), 其孔径从几微米到几十微米, 有些溶蚀孔与微裂隙连通。矿物铸模孔是煤中原生矿物质 (如常见的方解石、黄铁矿等) 在有机质中因硬度差异而铸成的印坑, 其孔径大小往往受矿物颗粒影响 (图 1-d)。粒间孔主要是在经历成岩作用后各种成煤物质颗粒之间保存下来的孔隙, 孔径大小不一、形态各异 (图 1-e)。煤中发育的微裂隙主要为内生裂隙, 伴随成煤过程形成, 在基质镜质体和镜煤中最为发育, 裂隙有时与孔隙连通形成主要渗流通道 (图 1-b)。

2.2 煤孔体积与变质程度的关系

从扫描电镜结果可以看出, 煤中孔隙类型较多且大小分布不一, 单一的实验方法很难确定煤样的多尺度孔隙结构分布。低温液氮吸附法、高压压汞法是煤孔隙结构特征研究中较为常用的两种方法, 且有研究认为高压压汞法在微孔及部分小孔段的测定中存在孔隙“屏蔽效应”“煤基质压缩效应”, 同时该孔径段进汞压力较大易导致孔隙结构发生变形和破坏^[7-9]。此次研究为避免高压压汞法应用在该孔径段孔隙岩样测试中的缺点, 同时考虑低温液氮吸附实验 BJH 法所测孔径分布 (2 ~ 50 nm), 以孔径 50 nm 为分界点有效整合两种方法的实验数据, 从而得到煤样多尺度孔体积、孔比表面积分布情况。

整合实验数据后, 根据孔径大小将孔隙划分为 3 类: 纳米孔 (2 ~ 100 nm)、过渡孔 (100 ~ 1 000 nm)、微米孔 (大于 1 000 nm)。10 个煤样不同类型孔体积之间存在一定的差异, 纳米孔体积占比介于 3.79% ~ 32.46%, 平均值为 12.28%; 过渡孔体积占比介于 2.93% ~ 23.02%, 平均值为 8.29%; 微米孔体积占比介于 45.54% ~ 91.32%, 平均值为 79.43%。

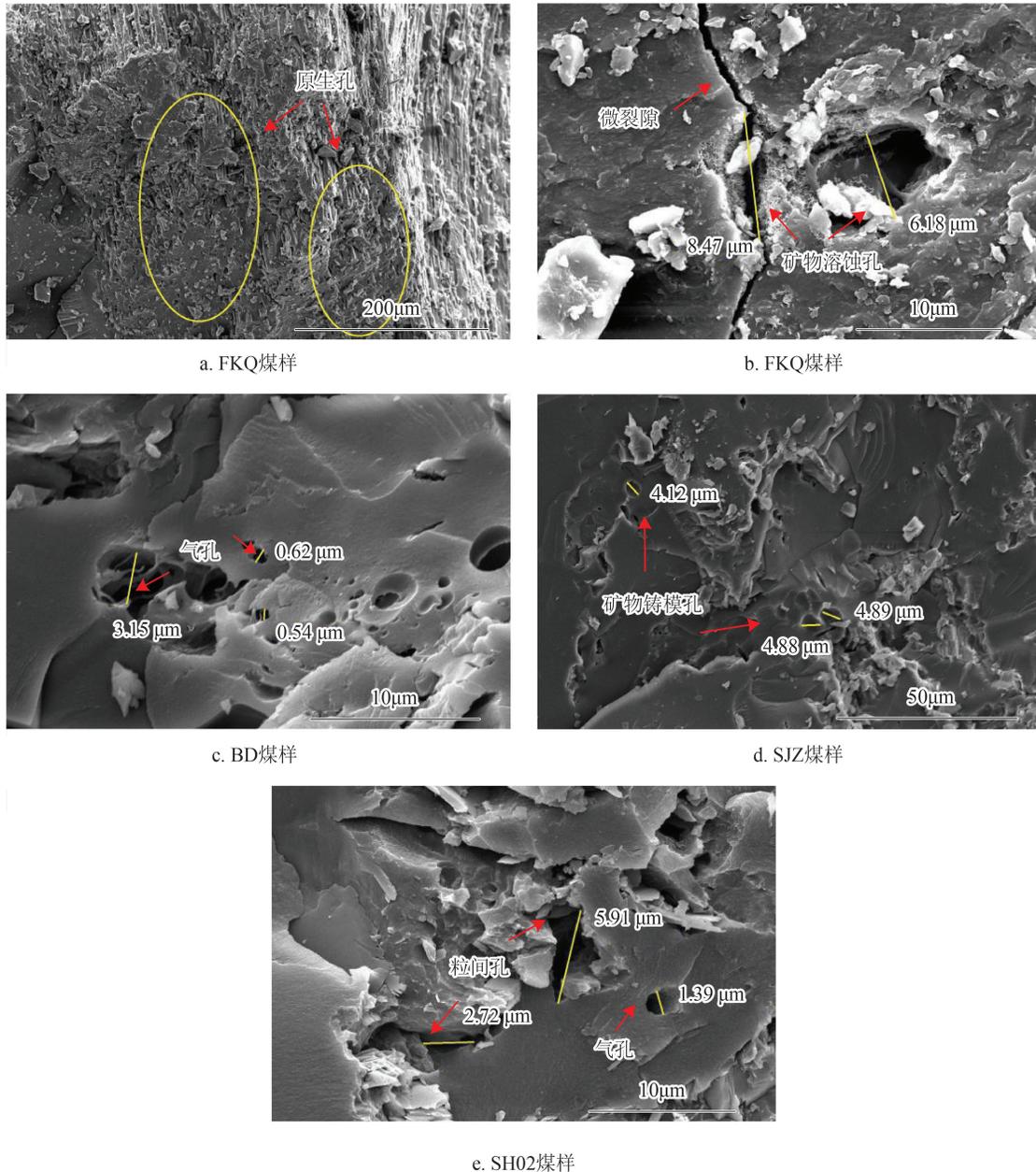


图 1 扫描电镜下煤样孔隙照片

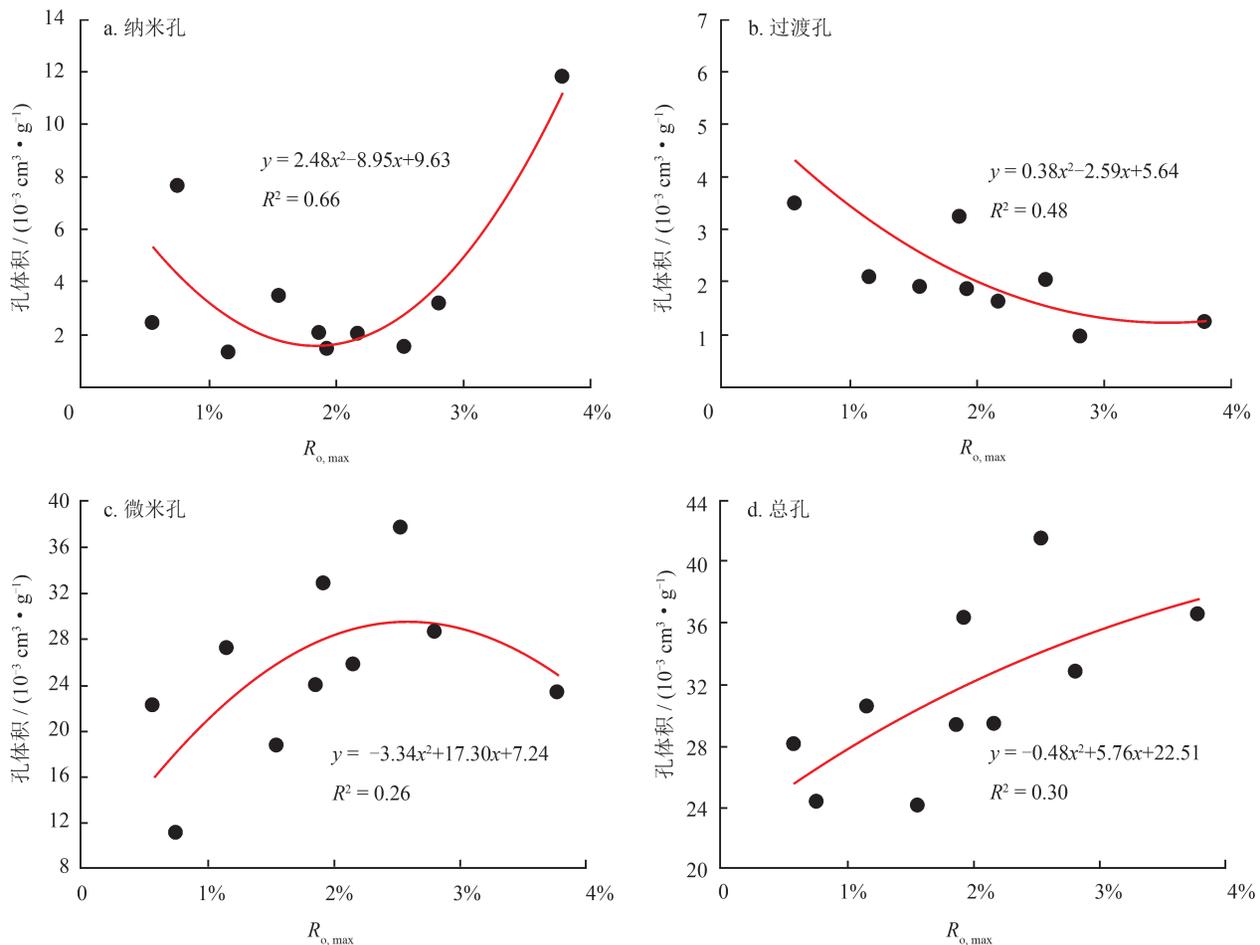
由此看出,煤中孔体积主要由微米孔提供,其次是纳米孔,过渡孔占比最小,微米孔为煤层气赋存提供了储集空间,同时也为气体渗流提供了主要通道。针对所选煤样建立不同类型孔、总孔的孔体积与 $R_{o,max}$ 的关系曲线(图 2),可以看出,纳米孔体积随变质程度增强(即 $R_{o,max}$ 增大),呈现先减小后增大的趋势且在 $R_{o,max}$ 为 1.8% 左右时达到最小值(图 2-a);微米孔体积与 $R_{o,max}$ 的相关关系则相反,且在 $R_{o,max}$ 为 2.5% 左右时达到最大值(图 2-c);过渡孔体积随变质程度增强,整体呈现减小的趋势(图 2-b);而总孔体积整体呈现增大的趋势(图 2-d)。但是,结合二项式拟合的相关系数 R^2 来看,变质作用对纳米孔

和过渡孔的孔体积变化影响较大,而对微米孔和总孔的孔体积变化影响较小。

2.3 煤孔比表面积与变质程度的关系

类似孔体积分布,10 个煤样不同类型孔比表面积之间亦存在一定的差异。纳米孔比表面积占比为 72.07% ~ 99.78%,平均值为 88.29%;过渡孔比表面积占比介于 0.20% ~ 25.19%,平均值为 10.74%;微米孔比表面积占比介于 0.02% ~ 2.74%,平均值为 0.97%。与煤中孔体积分布有所不同,煤中孔比表面积主要由纳米孔提供,而微米孔占比最小,纳米孔构成了煤的主要吸附容积。

建立所选煤样不同类型孔比表面积与煤样 $R_{o,max}$

图 2 孔体积和 $R_{o, \max}$ 的关系图

关系曲线(图3),可以看出,随变质程度增强,纳米孔比表面积及总孔比表面积呈现先减小后增大的趋势,且相关性较好(图3-a、d)。过渡孔比表面积及微米孔比表面积随变质程度增强整体呈现减小的趋势,且相关性较差(图3-b、c)。 $R_{o, \max}$ 在1.80%左右时,纳米孔比表面积及总孔比表面积均达到最小值,进一步说明了煤中总孔比表面积主要由纳米孔提供。

煤孔体积、比表面积随变质程度的变化可以归结到煤大分子结构和成煤作用上来解释^[36-37]。在低煤阶烟煤段,由于煤的埋深比较浅、温度低、上覆岩层压力小,煤整体结构较为疏松,煤中纳米孔、过渡孔、微米孔均有发育。随着煤层埋深的增加,温度升高、上覆岩层压力增大,从低煤阶烟煤到高煤阶烟煤段,纳米孔、过渡孔体积逐渐变小,对应的孔比表面积也逐渐变小。随着煤化作用进一步增强,到无烟煤阶段由于异常的高温作用使大分子的脂环和侧链快速热解和断裂,大量的气孔形成,同时芳香体系的芳构化和缩合程度不断增高,煤中原有微米孔及过

渡孔在压力作用下受挤压孔隙变小。因此无烟煤阶段纳米孔体积及比表面积都比较高。

3 煤孔隙结构特征

3.1 恒速压汞曲线特征

恒速压汞曲线包含总毛细管压力曲线、喉道压力曲线和孔隙压力曲线,压汞曲线形态一定程度上反映了煤样孔喉结构特征。对比5个不同变质程度煤样的压汞曲线,可将样品划分为两类。FKQ煤样单独属于一类。如图4-a所示,进汞压力较小时,进汞饱和度主要受孔隙控制,随进汞压力增加,总体毛细管压力曲线与喉道毛细管压力曲线趋于一致,进汞饱和度主要受喉道控制;总体压汞曲线中间段长且平,对应毛细管压力值低,说明孔隙喉道的分布集中,分选性较好;孔隙进汞饱和度为19.98%,喉道进汞饱和度为33.88%,可见样品中存在相当数量的大喉道。SJZ、HB02、DC、SH01煤样则属于另一类。如图4-b所示,随着进汞压力增加,总体毛细管压力曲

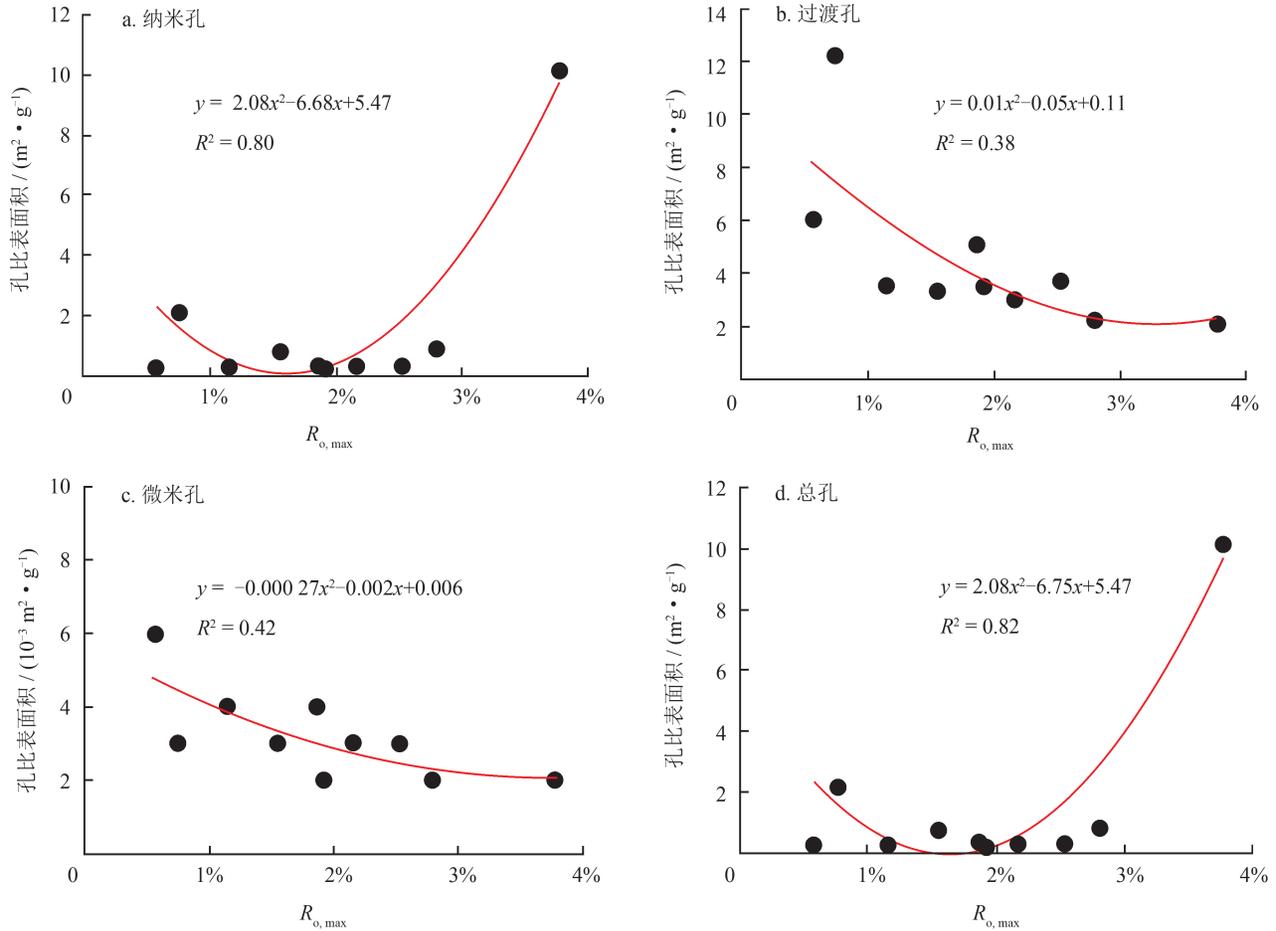


图 3 孔比表面积和 $R_{o,max}$ 关系图

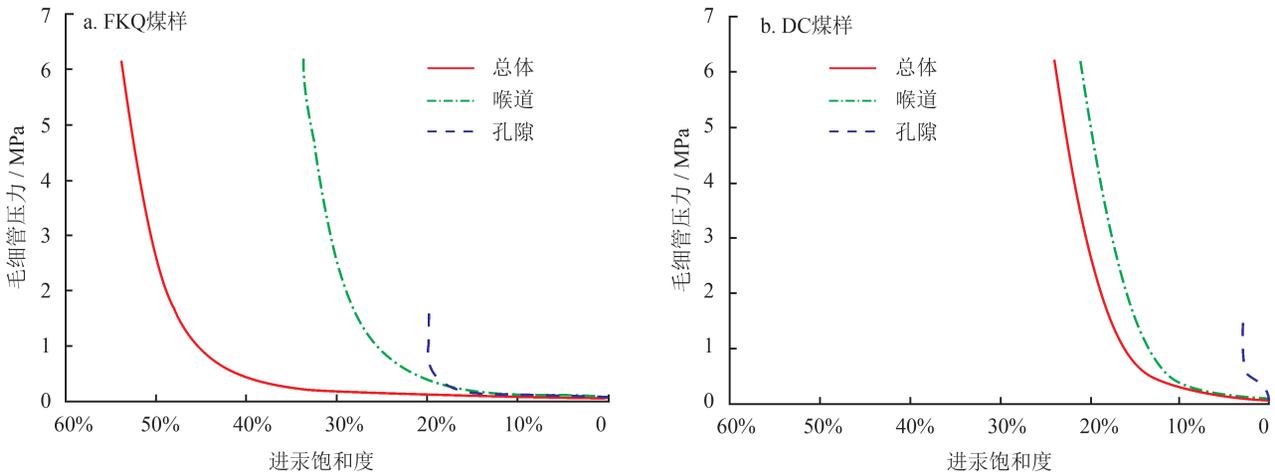


图 4 煤样恒速压汞曲线图

线与喉道毛细管压力曲线较接近，孔隙进汞饱和度仅 2.99%，说明该类样品中孔隙较少。

3.2 孔喉分布及孔喉比

根据恒速压汞实验数据绘制煤样的孔隙半径、喉道半径及孔喉比（即孔隙半径和喉道半径之比）频率分布图（图 5）。由图 5-a 可知，煤样孔隙半径

整体呈现正态分布，其主要分布范围介于 $100 \sim 300 \mu\text{m}$ ，孔隙半径均值分布范围为 $159.48 \sim 210 \mu\text{m}$ ，不同煤样孔隙半径峰值存在一定差异，且随着变质程度增强煤样最大分布频率对应的孔隙半径增大。由图 5-b 可以看出，喉道半径主要分布范围介于 $0.72 \sim 8.66 \mu\text{m}$ ，喉道半径均值范围为 $2.95 \sim 4.69 \mu\text{m}$ ，喉道半径整体亦呈现正态分布，不同煤样喉道半径分布情况

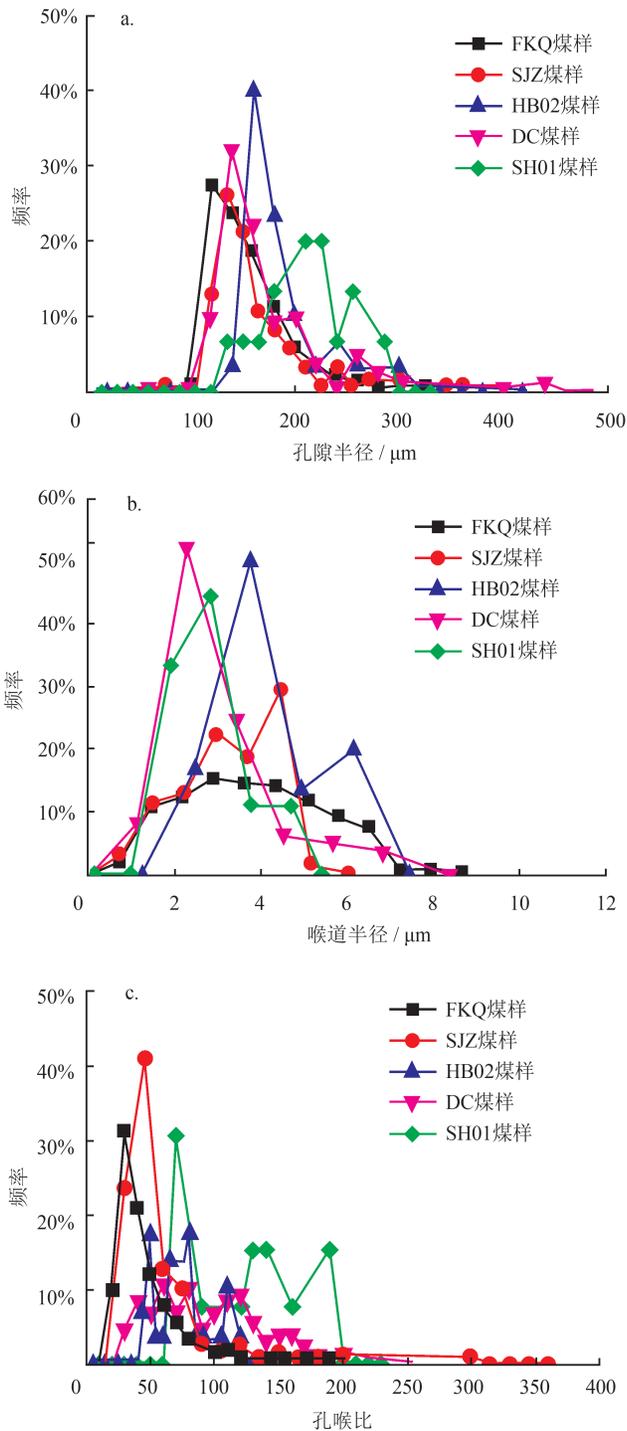


图 5 煤样孔隙结构特征参数频率分布图

差别较大。通过对比，可以看出低煤阶烟煤 FKQ 煤样 ($R_{o,max}=0.57\%$) 的喉道半径分布范围最宽，最大连通喉道半径及喉道半径均值均最大；无烟煤 SH01 煤样 ($R_{o,max}=2.53\%$) 的喉道半径分布范围最窄，且最大连通喉道半径最小。孔隙和喉道半径之间的差异变化导致煤样具有不同的孔喉比分布。由图 5-c 可知孔喉比主要分布范围介于 10 ~ 300，均值范围为 47.57 ~ 93.75。低煤阶烟煤 FKQ 煤样和中煤阶烟煤

SJZ 煤样 ($R_{o,max}=1.15\%$) 的孔喉比分布存在单一主峰，且主峰对应孔喉比相对较小，分别为 30 和 45。

煤孔喉结构特征随煤阶发生变化亦可从成煤作用上来解释。在低煤阶烟煤阶段，煤的埋深比较浅、温度低、上覆岩层压力小，煤中孔隙、喉道多为原始形态，喉道与孔隙之间连通性较好，且内生裂隙发育提高了煤岩渗透性。在无烟煤阶段，伴随着芳香化程度和分子排列规则化程度的提高，煤岩结构更加致密，煤中孔隙、喉道发生变形甚至闭合，喉道与孔隙的连通性也因此受影响。

3.3 煤岩渗透率与孔隙结构特征参数的关系

在不考虑其他因素影响的情况下，基于达西稳定流法测定不同变质程度煤岩的空气渗透率 (表 1)。建立渗透率与孔隙结构特征参数的关系曲线，分析影响煤岩渗透率的主要因素。

由图 6-a 可以看出，煤岩渗透率与孔隙度具有较好的指数函数关系，相关系数 R^2 为 0.92。随孔隙度的增大，渗透率整体上呈增大趋势，但在孔隙度 4% 以下的区域，渗透率的变化幅度较小。这是因为孔隙度的大小虽从某种程度上代表煤中孔隙的发育程度，但是很难表征孔径大小、孔隙形状、连通性等特征，另外，煤中裂隙发育与否也直接影响着渗透率。但从整体上看，孔隙越多，孔隙度越大，煤岩渗透性越好。由图 6-b 可以看出，煤岩渗透率与孔隙半径均值的相关性较差，数据点分布较为离散，说明煤岩渗透率受孔隙半径均值的影响较弱。这是因为煤中孔隙多与喉道连通，煤岩渗透率应受喉道半径的影响。由图 6-c 可以看出，煤岩渗透率与喉道半径均值具有较好的指数函数关系，相关系数 R^2 为 0.81。随喉道半径均值的增大，煤岩渗透率整体上呈增大趋势。喉道反映了孔隙之间的连通情况，通过分析喉道的变化特征可以从本质上揭示煤样孔喉结构的变化，从而更好地评估煤岩渗透性。孔喉比反映了孔隙和喉道之间的配置关系，孔喉比的大小一定程度上也反映了煤岩渗透率的大小。由图 6-d 可以看出，煤岩渗透率与孔喉比均值呈负相关关系，相关系数 R^2 为 0.80。随孔喉比均值的增大，煤岩渗透率整体上呈减小趋势。

4 结论

1) 综合低温液氮吸附和高压压汞实验数据，可见煤纳米孔体积、孔比表面积随变质程度的增强，均呈现先减小后增大的趋势，且在 $R_{o,max}$ 为 1.8% 左右

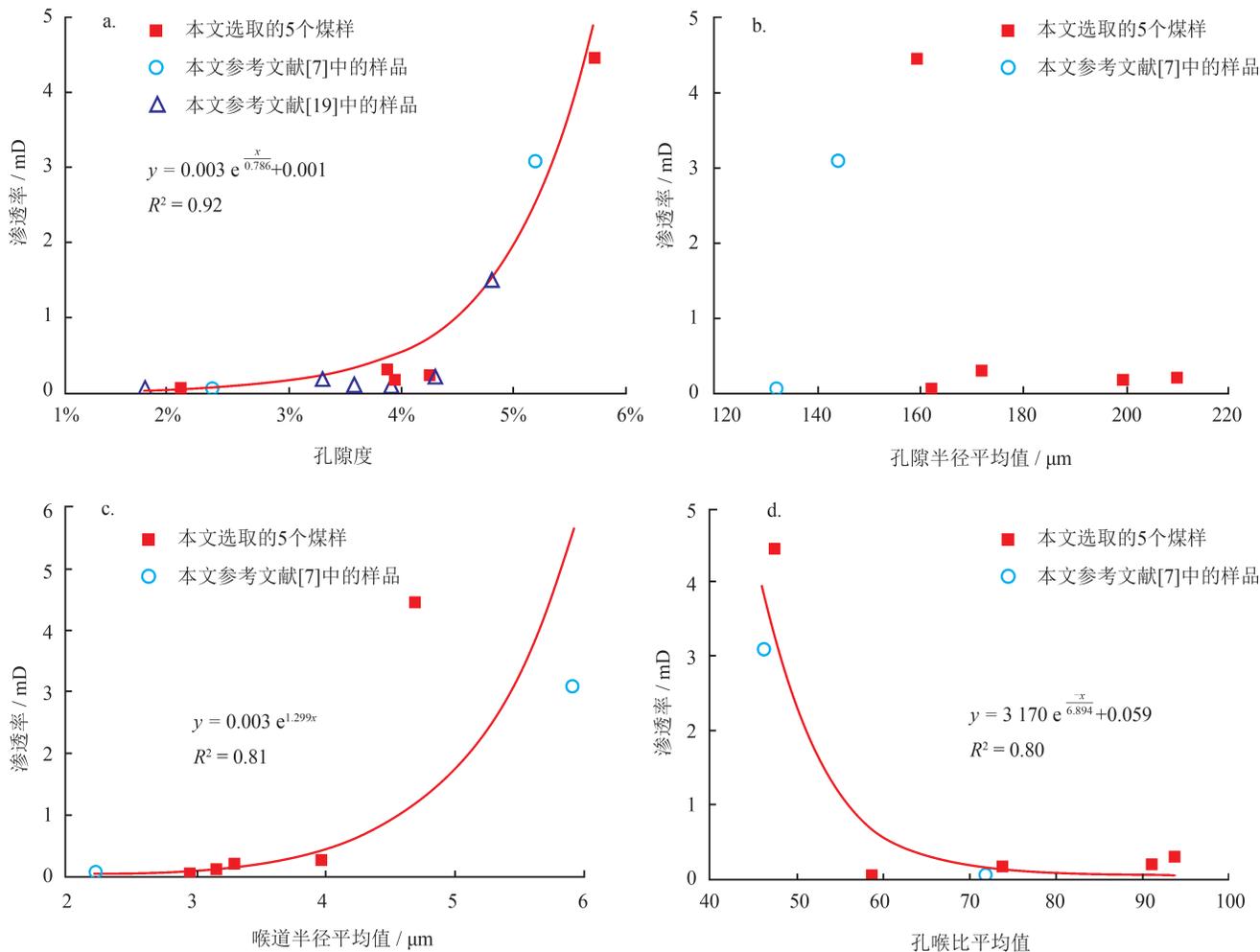


图 6 煤岩渗透率与孔隙结构特征参数关系曲线图

达到最小值。

2) 依据恒速压汞实验, 不同变质程度煤样孔隙半径、喉道半径整体均呈现正态分布特征, 且随着煤变质程度的增强, 最大分布频率对应的孔隙半径增大; 低煤阶烟煤煤样的喉道半径分布范围最宽, 最大连通喉道半径及喉道半径平均值均最大; 无烟煤煤样的喉道半径分布范围最窄, 且最大连通喉道半径最小; 低煤阶烟煤和中煤阶烟煤煤样的孔喉比分布存在单一主峰, 且主峰对应孔喉比相对较小。

3) 煤岩渗透率与孔隙度及喉道半径平均值均表现出较好的正相关关系, 而与孔隙半径平均值的相关性不明显。孔喉比反映了孔隙和喉道之间的配置关系, 孔喉比平均值越小煤岩渗透率越大。

参 考 文 献

[1] Clarkson CR & Bustin RM. The effect of pore structure and gas pressure upon the transport properties of coal: A laboratory and modeling study. 1. Isotherms and pore volume distributions[J].

Fuel, 1999, 78(11): 1333-1344.

[2] Pillalamarri M, Harpalani S & Liu SM. Gas diffusion behavior of coal and its impact on production from coalbed methane reservoirs[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 86(4): 342-348.

[3] 王生维, 段连秀, 陈钟惠, 张明. 煤层气勘探开发中的煤储层评价 [J]. 天然气工业, 2004, 24(5): 82-84.

Wang Shengwei, Duan Lianxiu, Chen Zhonghui & Zhang Ming. Reservoir evaluation for exploration and development of coal-bed gas[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(5): 82-84.

[4] 朱苏阳, 杜志敏, 李传亮, 彭小龙, 王超文. 煤层气吸附—解吸规律研究进展 [J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 2017, 39(4): 104-112.

Zhu Suyang, Du Zhimin, Li Chuanliang, Peng Xiaolong & Wang Chaowen. The adsorption and desorption of coal bed methane: A review[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2017, 39(4): 104-112.

[5] 李勇, 孟尚志, 吴鹏, 牛鑫磊. 煤层气成藏机理及气藏类型划分——以鄂尔多斯盆地东缘为例 [J]. 天然气工业, 2017, 37(8): 22-30.

Li Yong, Meng Shangzhi, Wu Peng & Niu Xinlei. Accumulation mechanisms and classification of CBM reservoir types: A case

- study from the eastern margin of the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(8): 22-30.
- [6] 唐书恒, 蔡超, 朱宝存, 段利江, 张佳赞. 煤变质程度对煤储层物性的控制作用[J]. *天然气工业*, 2008, 28(12): 30-33.
Tang Shuheng, Cai Chao, Zhu Baocun, Duan Lijiang & Zhang Jiazan. Control effect of coal metamorphic degree on physical properties of coal reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(12): 30-33.
- [7] Yao YB & Liu DM. Comparison of low-field NMR and mercury intrusion porosimetry in characterizing pore size distributions of coals[J]. *Fuel*, 2012, 95(1): 152-158.
- [8] 戚灵灵, 王兆丰, 杨宏民, 陈向军. 基于低温氮吸附法和压汞法的煤样孔隙研究[J]. *煤炭科学技术*, 2012, 40(8): 36-39.
Qi Lingling, Wang Zhaofeng, Yang Hongmin & Chen Xiangjun. Study on porosity of coal samples based on low temperature nitrogen adsorption method and mercury porosimetry[J]. *Coal Science and Technology*, 2012, 40(8): 36-39.
- [9] Li YH, Lu GQ & Rudolph V. Compressibility and fractal dimension of fine coal particles in relation to pore structure characterisation using mercury porosimetry[J]. *Particle & Particle Systems Characterization*, 1999, 16(1): 25-31.
- [10] Peng C, Zou CC, Yang YQ, Zhang GH & Wang WW. Fractal analysis of high rank coal from Southeast Qinshui Basin by using gas adsorption and mercury porosimetry[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2017, 156: 235-249.
- [11] 降文萍, 张群, 姜在炳, 韩保山. 构造煤孔隙结构对煤层气产气特征的影响[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(1): 173-179.
Jiang Wenping, Zhang Qun, Jiang Zaibing & Han Baoshan. Effect on CBM drainage characteristics of pore structure of tectonic coal[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(1): 173-179.
- [12] Pan JN, Zhao YQ, Hou QL & Jin Y. Nanoscale pores in coal related to coal rank and deformation structures[J]. *Transport in Porous Media*, 2015, 107(2): 543-554.
- [13] Nie BS, Liu XF, Yang LL, Meng JQ & Li XC. Pore structure characterization of different rank coals using gas adsorption and scanning electron microscopy[J]. *Fuel*, 2015, 158: 908-917.
- [14] 张慧. 煤孔隙的成因类型及其研究[J]. *煤炭学报*, 2001, 26(1): 40-44.
Zhang Hui. Genetical type of pores in coal reservoir and its research significance[J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(1): 40-44.
- [15] Gan H, Nandi SP & Walker PL Jr. Nature of the porosity in American coals[J]. *Fuel*, 1972, 51(4): 272-277.
- [16] Zhao YX, Liu SM, Elsworth D, Jiang YD & Zhu J. Pore structure characterization of coal by synchrotron small-angle X-ray scattering and transmission electron microscopy[J]. *Energy Fuels*, 2014, 28(6): 3704-3711.
- [17] Pan JN, Niu QH, Wang K, Shi XH & Li M. The closed pores of tectonically deformed coal studied by small-angle X-ray scattering and liquid nitrogen adsorption[J]. *Microporous & Mesoporous Materials*, 2016, 224: 245-252.
- [18] Pan JN, Zhu HT, Hou QL, Wang HC & Wang S. Macromolecular and pore structures of Chinese tectonically deformed coal studied by atomic force microscopy[J]. *Fuel*, 2015, 139: 94-101.
- [19] Shi XH, Pan JN, Hou QL, Jin Y, Wang ZZ, Niu QH, et al. Micrometer-scale fractures in coal related to coal rank based on micro-CT scanning and fractal theory[J]. *Fuel*, 2018, 212: 162-172.
- [20] Mazumder S, Wolf KHAA, Elewaut K & Ephraim R. Application of X-ray computed tomography for analyzing cleat spacing and cleat aperture in coal samples[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2006, 68(3/4): 205-222.
- [21] 宋党育, 何凯凯, 吉小峰, 李云波, 赵豪田. 基于CT扫描的煤中孔裂隙精细表征[J]. *天然气工业*, 2018, 38(3): 41-49.
Song Danguyu, He Kaikai, Ji Xiaofeng, Li Yunbo & Zhao Haotian. Fine characterization of pores and fractures in coal based on a CT scan[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(3): 41-49.
- [22] Zheng SJ, Yao YB, Liu DM, Cai YD & Liu Y. Characterizations of full-scale pore size distribution, porosity and permeability of coals: A novel methodology by nuclear magnetic resonance and fractal analysis theory[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 196: 148-158.
- [23] Yuan HH & Swanson BF. Resolving pore-space characteristics by rate-controlled porosimetry[J]. *SPE Formation Evaluation*, 1989, 4(1): 17-24.
- [24] Yuan HH. Advances in APEX technology: Determination of cementation exponent and absolute permeability[J]. *The Log Analyst*, 1991, 32(5): 557-570.
- [25] Yuan HH. Pore-scale heterogeneity from mercury porosimetry data[J]. *SPE Formation Evaluation*, 1991, 6(2): 233-240.
- [26] 肖佃师, 卢双舫, 陆正元, 黄文彪, 谷美维. 联合核磁共振和恒速压汞方法测定致密砂岩孔喉结构[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(6): 961-970.
Xiao Dianshi, Lu Shuangfang, Lu Zhengyuan, Huang Wenbiao & Gu Meiwei. Combining nuclear magnetic resonance and rate-controlled porosimetry to probe the pore-throat structure of tight sandstones[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(6): 961-970.
- [27] Zhao HW, Ning ZF, Wang Q, Zhang R, Zhao TY, Niu TF, et al. Petrophysical characterization of tight oil reservoirs using pressure-controlled porosimetry combined with rate-controlled porosimetry[J]. *Fuel*, 2015, 154: 233-242.
- [28] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 岩心分析方法: SY/T 5336—2006[S]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
National Development and Reform Commission. Practices for core analysis: SY/T 5336-2006[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [29] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中华人民共和国国家标准化管理委员会. 压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度 第2部分: 气体吸附法分析介孔和大孔: GB/T 21650.2—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC & Standardization Administration of the PRC. Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption—Part 2: Analysis of mesopores and macropores by gas adsorption: GB/T 21650.2-2008[S]. Beijing: Standard Press of China, 2008.

- [30] Barrett EP, Joyner LG & Halenda PP. The determination of pore volume and area distributions in porous substances. I. Computations from nitrogen isotherms[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1951, 73(1): 373-380.
- [31] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中华人民共和国国家标准化委员会. 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: GB/T 21650.1—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC & Standardization Administration of the PRC. Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption—Part 1: Mercury porosimetry: GB/T 21650.1-2008[S]. Beijing: Standard Press of China, 2008.
- [32] Washburn EW. The dynamics of capillary flow[J]. *The Physical Review*, 1921, 17(3): 273-283.
- [33] 王新江. 恒速法——岩石毛管压力曲线测定标准方法探讨 [J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2013(20): 79, 83.
Wang Xinjiang. Discussion on the standard method for determining capillary pressure curve of rock by constant velocity method[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2013(20): 79, 83.
- [34] 郝琦. 煤的显微孔隙形态特征及其成因探讨 [J]. *煤炭学报*, 1987(4): 53-58.
- Hao Qi. On morphological character and origin of micropores in coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 1987(4): 53-58.
- [35] 王生维, 陈钟惠, 张明. 煤基岩块孔隙特征及其在煤层气产出中的意义 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 1995, 20(5): 557-561.
Wang Shengwei, Chen Zhonghui & Zhang Ming. Pore and microfracture of coal matrix block and their effects on the recovery of methane from coal[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1995, 20(5): 557-561.
- [36] 据宜文, 姜波, 侯泉林, 王桂梁, 方爱民. 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, 79(2): 269-285.
Ju Yiwen, Jiang Bo, Hou Quanlin, Wang Guiliang & Fang Aim-in. Structural evolution of nano-scale pores of tectonic coals in Southern North China and its mechanism[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(2): 269-285.
- [37] 赵兴龙, 汤达祯, 许浩, 陶树, 陈贞龙. 煤变质作用对煤储层孔隙系统发育的影响 [J]. *煤炭学报*, 2010, 35(9): 1506-1511.
Zhao Xinglong, Tang Dazhen, Xu Hao, Tao Shu & Chen Zhenlong. Effect of coal metamorphic process on pore system of coal reservoirs[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(9): 1506-1511.

(修改回稿日期 2018-11-19 编辑 孔 玲)

山西省煤层气产量突破 $56 \times 10^8 \text{ m}^3$

截至 2018 年 12 月 29 日, 山西省煤层气产量达到 $56.3 \times 10^8 \text{ m}^3$, 首次突破 $56 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。山西省是全国煤层气资源富集程度最高、开发潜力最大的省份之一。统计数字显示, 山西省境内埋深 2 000 m 以浅的煤层气地质资源量约 $8.31 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。截至目前, 山西省煤层气累计探明储量 $6 675 \times 10^8 \text{ m}^3$, 致密砂岩气探明储量 $3 509 \times 10^8 \text{ m}^3$, 运行钻井达到 1.5 万余口。

山西省对煤层气的勘查开发较早, 煤层气行业在全国一直处于领先地位。自 20 世纪 50 年代起, 山西省就开始了小规模井下瓦斯抽采。20 世纪 80 年代后期, 进入地面抽采试验阶段。2005 年以来, 高煤阶、中低煤阶煤层的煤层气和致密气开发利用技术相继突破, 煤层气勘查开采进入产能建设和规模开发阶段。到 2006 年, 产量突破 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2010 年突破 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2015 年突破 $40 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2017 年突破 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$, 利用量约占全国的 90%。

2017 年, 山西省招标出让 10 个煤层气区块, 目前已有 9 个取得实质性进展, 其中, 柳林石西、和顺西、武乡东 3 个区块已成功出气点火。2018 年重点推进大宁—吉县、沁南等 10 个重大煤层气项目, 目前已完成投入 21 亿元, 新建产能 $6 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。山西省煤层气的发展为优化能源结构、保障煤矿安全生产、保护生态环境、弥补冬季天然气供应缺口等提供了重要的支撑。

(天工 摘编自中国能源网)