



移动扫码阅读

秦全灵,李 鑫,吴 斌,等.库拜煤田中低阶煤中孔-大孔发育控制因素[J].煤炭科学技术,2022,50(4): 195-205.

QIN Quanling,LI Xin,WU Bin,*et al.*Control factors of mesopore-macropore development in medium-and low-rank coal in Cubey Coalfield[J].Coal Science and Technology,2022,50(4):195-205.

## 库拜煤田中低阶煤中孔-大孔发育控制因素

秦全灵<sup>1</sup>,李 鑫<sup>1</sup>,吴 斌<sup>2</sup>,田继军<sup>1</sup>

(1.新疆大学 地质与矿业工程学院,新疆 乌鲁木齐 830047;2.新疆维吾尔自治区煤田地质局 一六一煤田地质勘探队,新疆 乌鲁木齐 830009)

**摘 要:**库拜煤田是新疆煤层气勘探的重点目标区之一。中孔、大孔为煤储层主要渗流孔隙,其发育程度是决定煤层气是否具有开发价值的重要因素。为厘清库拜煤田中低阶煤中孔-大孔发育控制因素,采集库拜煤田 9 口煤层气井取芯样品,开展了 45 次高压压汞试验、31 次煤岩组分分析、32 次煤岩成熟度测试以及 45 块取芯样品煤体结构特征描述,提取了库拜煤田中孔、大孔孔隙体积,并分析了控制其发育的地质因素。结果表明:①镜质组含量与成熟度对中孔、大孔的体积控制作用较弱;②原生结构煤、碎裂煤、碎粒煤中孔、大孔体积接近,糜棱煤中孔、大孔体积明显高出;③镜质组含量大于 70%时,随镜质组含量增大,中孔和大孔结构的复杂程度趋于增大;④煤体结构对中孔结构的复杂程度影响微弱,但与大孔结构的复杂程度呈正相关关系;⑤成熟度对中孔的复杂程度控制作用较明显,对大孔的复杂程度控制作用微弱。研究成果可为库拜煤田高渗煤储层的科学评价提供理论支撑。

**关键词:**煤层气;煤储层;煤体结构;孔隙体积;中低阶煤

中图分类号:P571;P611.2

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2022)04-0195-11

### Control factors of mesopore-macropore development in medium-and low-rank coal in Cubey Coalfield

QIN Quanling<sup>1</sup>,LI Xin<sup>1</sup>,WU Bin<sup>2</sup>,TIAN Jijun<sup>1</sup>

(1.College of Geology and Mining Engineering,Xinjiang University,Urumqi 830047,China;

2.No.161 Coalfield Geological Exploration Team,Coalfield Geology Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region,Urumqi 830009,China)

**Abstract:**The Cubey Coalfield is one of the key targets for coalbed methane (CBM) exploration in Xinjiang Uygur Autonomous Region. The meso-pores and macro-pores are the main seepage channels in coal reservoir and their development degrees are key factors determining coal reservoir development potential. In this paper, in order to clarify the factors controlling the development of mesopore and macropore in the medium and low-rank coals of the Cubey Coalfield, coal samples drilled from nine CBM wells were collected, and experiments including high-pressure mercury intrusion porosimetry tests (forty-five samples), coal maceral analyses (thirty-one samples), and maturity tests (thirty-two samples) were carried out. In addition, coal structural characteristics of forty-five samples were described. Based on the analyses above, the volumes of meso-pore and macro-pore were extracted, and the geological factors controlling their development degrees were discussed. The results showed that: ① the vitrinite content and maturity of coal had a weak influence on the development of meso-pores and macro-pores; ② the meso-pore and macro-pore volumes of primary structural coal, cataclastic coal and pulverized coal were close, while those of mylonitized coal were relatively greater; ③ the complexities of meso-pore and macro-pore structure tended to increase with the increased of vitrinite content when vitrinite content was greater than 70%; ④ the coal structure had a slight influence on the complexity of meso-pore structure, while it was positively correlated with the complexity of macro-pore structure; ⑤ maturity had an obvious controlling effect on the complexity of meso-pore structure, while its effect on the structural complexity of macro-pore was weak. Results of this study can provide theoretical support for the scientific evaluation of high permeability coal reservoir in the Cubey Coalfield.

**Key words:** coalbed methane; coal reservoir; coal structure; pore volume; medium-and low-rank coal

收稿日期:2021-12-01

责任编辑:周子博

DOI:10.13199/j.cnki.cst.2020-1304

基金项目:新疆维吾尔自治区高校科研计划资助项目(XJEDU2019Y010);国家自然科学基金资助项目(U1903303,42002188)

作者简介:秦全灵(1997—),男,四川广安人,硕士研究生。E-mail: qinquanling1312@163.com

通讯作者:李 鑫(1990—),男,山西晋城人,副教授,博士。E-mail: lixinwaxj@xju.edu.cn

## 0 引言

孔隙结构影响着煤储层吸附、解吸、扩散及渗透率,是煤储层研究的核心问题之一<sup>[1-2]</sup>。我国煤层受多期次构造运动影响,构造煤发育,煤孔隙大小分布在毫米至纳米级,孔隙结构较复杂,不同尺度孔隙控制着煤层气的解吸、扩散与渗流等过程<sup>[3]</sup>。库拜煤田是我国南疆缺煤地区重要的煤炭资源产地与煤层气资源开发潜力区,但针对库拜煤田煤储层孔隙特征方面的研究相对较少,难以指导当地煤层气储层评价。

研究煤中孔隙的控制地质因素可间接促进煤层气的商业化开采。SAKUROV等<sup>[4]</sup>研究了澳大利亚煤的孔隙分布,发现孔隙受煤阶影响较大,并且在某些孔径范围内,镜质组含量会对孔隙产生影响。陈向军等<sup>[5]</sup>选取了不同矿区、不同变质程度的煤样进行了压汞测试,结果表明煤的变质程度对大孔体积产生影响较大。张洲等<sup>[6]</sup>对库拜煤田主要煤储层的孔隙系统进行了研究,发现主要煤储层的中孔和大孔较发育,并且孔隙连通性较好,有利于煤层气的运移。安庆等<sup>[7]</sup>对库拜煤田中部储层孔隙特征进行了研究,发现不同类型裂隙对煤层气运移有不同程度的影响,大裂隙是渗透率的主要贡献者,也是决定煤层气是否具有开采价值的关键因素。

库拜煤田煤层气资源潜力巨大,其商业开采可为

当地经济发展提供长期的能源保障。通过开展高压压汞试验、工业分析、煤岩组分测定、显微组分定量分析、煤体宏观描述等实验和分析,围绕库拜煤田中低阶煤中孔-大孔发育及其控制地质因素展开研究,讨论了镜质组含量、成熟度、煤体结构等对中孔及大孔孔隙体积及结构复杂程度的影响。研究成果有助于揭示库拜煤田高渗储层发育特征并促进当地煤层气开发。

## 1 地质背景

库拜煤田位于塔里木盆地的北缘,面积约1 585 km<sup>2</sup>,属于塔里木盆地北部的一个次级构造单元-库车山前中新世坳陷(图1),区内含煤地层为向南倾斜的单斜构造,倾角为30°~89°,库车县境内煤层倾角较缓,拜城县境内地层倾角较大。煤田以北紧邻深大断裂形成的F1逆断层,以南为2条深大断裂,F2和F3正断层,以及大型含气褶皱带构造。区内的岩性主要由石英砂岩、粗砂岩、砂砾岩、细砂岩、粉砂岩和煤层组成,中生界侏罗系的塔里奇克组厚度为177~256 m,阳霞组厚度为200~571 m,侏罗系的克孜尔组厚度为294~838 m,是库拜煤田的主要含煤地层(图2)。由于不同程度的区域变质作用和动力变质作用,使得煤样煤化程度跨度较大,由东向西煤变质程度逐渐增加<sup>[8]</sup>。

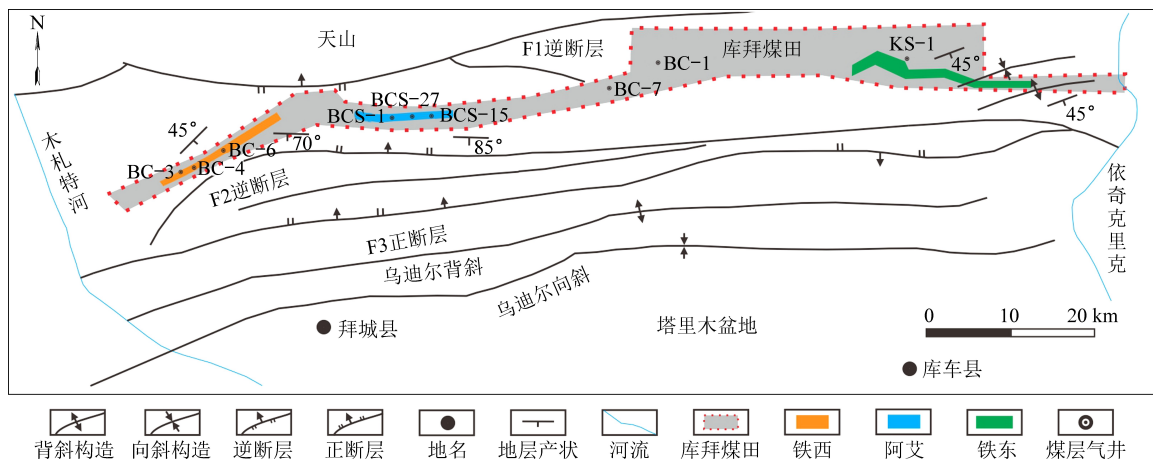


图1 库拜煤田构造纲要<sup>[9]</sup>(据文献[9]修改)

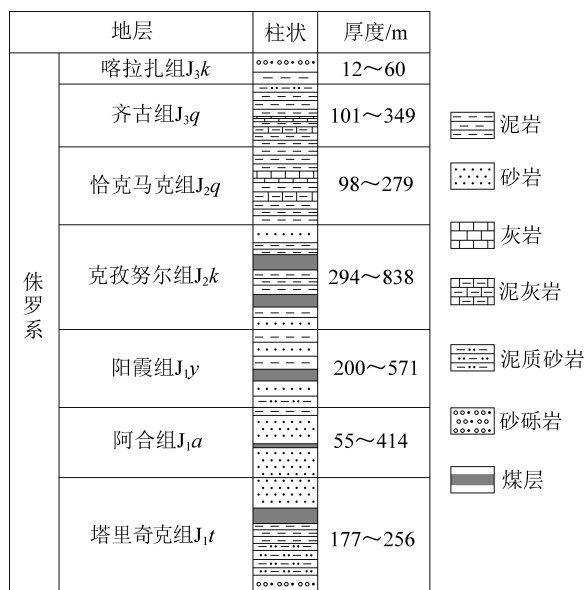
Fig. 1 Tectonic outline figure of Cubey Coalfield<sup>[9]</sup>

## 2 试验

### 2.1 取样及样品基本信息

样品取自于库拜煤田的铁西、阿艾、铁东3个矿区(图1)9口煤层气参数井,根据煤体结构的不同(图3)开展了45次高压压汞试验。样品包含原生结构煤15块、碎裂结构煤19块、碎粒结构煤3块

和糜棱结构煤8块。铁西矿区宏观煤岩类型主要为暗淡煤、半暗煤和半亮煤,属低变质到中等变质阶段,埋深介于582.00~969.25 m,分布于A1、A3、A5~A10、B、B1、C和C2煤层。阿艾矿区宏观煤岩类型主要为半暗煤、半亮煤和亮煤,属中等变质阶段,埋深介于951.60~1 103.75 m,分布于下5和下10煤层。铁东矿区宏观煤岩类型主要为暗淡煤、半

图2 库拜煤田煤系柱状图<sup>[10]</sup>(据文献[10]修改)Fig. 2 Strata column of coal measures in Cubey Coalfield<sup>[10]</sup>

暗煤和半亮煤,属低变质到中等变质阶段,埋深介于533.95~952.96 m,分布于A3、A5、A7、A8、A9-10和A10煤层。

对库拜煤田不同煤体结构的煤岩样品进行煤质基础信息测试,其中水分( $M_{ad}$ )、挥发分( $V_{daf}$ )和灰分( $A_d$ )测试遵照GB/T 212—2008国家标准进行;煤的镜质组最大反射率( $R_{o,max}$ )利用显微镜在油浸物镜下测定,遵照GB/T 6948—2008;煤岩显微组分定量在偏光显微镜下进行,遵照GB/T 8899—1998。煤质基础测试结果显示样品 $M_{ad}$ 变化范围较小,为0.34%~1.68%,平均1.10%; $V_{daf}$ 变化范围较大,为6.22%~38.84%,平均24.14%; $A_d$ 变化范围较大,为1.

38%~44.5%,大部分在10%以下,个别样品达到44.5%,平均8.64%;镜质组最大反射率 $R_{o,max}$ 为0.30%~1.96%,平均1.04%;镜质组含量为20.6%~93.6%,变化范围较大,平均74.9%;惰质组含量为5.0%~79.4%,平均24.8%;壳质组含量为0~1.4%,平均0.3%。

## 2.2 高压压汞试验

高压压汞法是在一定压力下将液态汞压入煤岩中,压入汞的量能代表孔隙的体积,通过压力与压入汞的体积的关系曲线可以得到一系列表征样品孔隙特征的参数<sup>[11]</sup>。压汞法操作简单有效,试验时间较短,一直被广泛应用于多孔材料的孔隙特征和分布等方面的研究<sup>[12]</sup>。孔隙分类方法采用苏联学者霍多特<sup>[13]</sup>孔径分类划分方案,即微孔孔径<10 nm、过渡孔孔径10~100 nm、中孔孔径100~1 000 nm、大孔孔径>1 000 nm。本次试验遵照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》执行。在进行高压压汞试验时,随着注入压力的增大,样品的原生孔隙结构会被破坏,微孔、过渡孔测定会出现较大误差,但是对中孔和大孔等较大孔隙的分析较准确<sup>[14-15]</sup>。压汞误差来源主要有2个方面:①高压阶段煤基质压缩和未进汞孔隙压缩,导致压汞测得微孔、过渡孔体积偏大<sup>[16]</sup>。但本次研究未分析微孔和过渡孔,主要分析中孔和大孔;②低压阶段的麻皮效应,使得汞在样品表面的粗糙处消耗部分汞,导致低压段进汞量增大,几十微米以上的孔隙异常发育<sup>[17]</sup>。针对此,采取粒径3~6 mm表面平直煤颗粒作为样品,并设置最低汞注入压力为0.01 MPa,尽可能弱化麻皮效应导致的误差。此外,由于高压压汞可实现快速、低成本地对大量样品中孔、过渡孔进行分析,因此本次工作采用了高压压汞法,并且采取上述措施后尽可能地减小了压汞试验误差。

## 3 中孔和大孔发育程度地质控制

通过高压压汞试验获得了样品的孔隙体积、退汞效率等参数,结果显示:测试样品的大孔体积为0.000 2~0.400 0 cm<sup>3</sup>,平均0.040 1 cm<sup>3</sup>,中孔体积为0.001 6~0.786 0 cm<sup>3</sup>,平均0.087 5 cm<sup>3</sup>,退汞效率为15.43%~80.08%,平均47.98%。中孔体积约是大孔体积的两倍,孔体积变化范围较大,相差2~3个数量级,退汞效率变化范围较大,总体较低。

### 3.1 煤岩组分对中孔、大孔体积的控制作用

由图4可知,随镜质组含量的增加,中孔体积、大孔体积以及中孔、大孔体积和呈现微弱增大趋势,

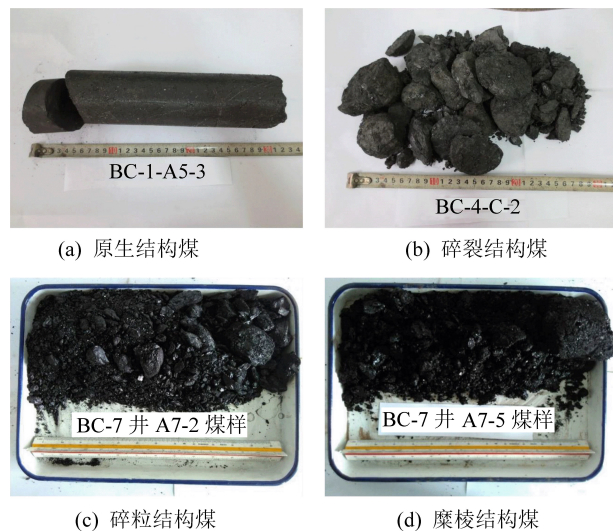


图3 不同煤体结构煤样照片

Fig. 3 Photographs of coal samples with different structures



煤岩组分对中孔、大孔孔隙体积具有一定控制作用。吕志发等<sup>[18]</sup>早在1991年就对块煤的孔隙特征及其影响因素做了研究,在分析煤的孔隙特征与有机显微组分时,发现镜质组孔隙主要是微孔和小孔,中孔和大孔主要发育在惰质组中。刘娜等<sup>[19]</sup>在研究煤岩孔隙度主控地质因素时,发现中大孔比例与孔隙度呈良好正相关关系,而镜质组含量又与孔隙度呈负相关关系,由此推断出镜质组含量与中孔、大孔体积呈负相关关系。图4所示的结果与前人研究成果不一致,可能原因是当镜质组含量增多时,镜质组生

烃留下大量原生孔隙,在成岩演化过程或外力的作用下,原生微孔和过渡孔破坏并部分转换为中孔和大孔,从而导致高镜质组含量煤中孔、大孔体积较高<sup>[20]</sup>。此外,图4中出现了异常高点,均为糜棱煤,姜家钰<sup>[21]</sup>通过压汞法得出不同构造程度的煤体压汞曲线特征,发现随构造作用的增强,各阶段的孔容都有所增加,大孔和中孔增幅分别为537.5%和1300%,构造作用对煤中大孔和中孔有明显改造。因此,经过构造作用形成的糜棱煤出现了较高的中孔和大孔体积。

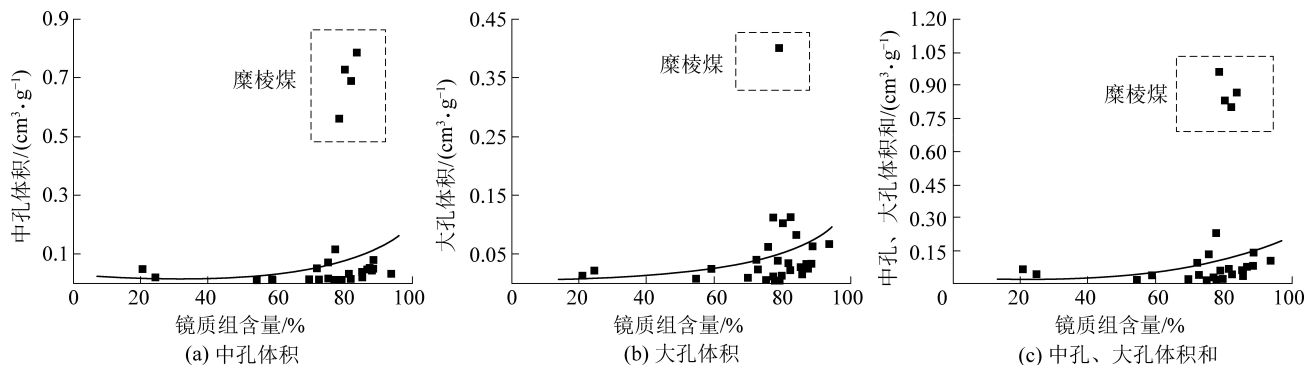


图4 中孔及大孔体积随镜质组含量变化

Fig. 4 Volume variations of meso-pore and macro-pore as vitrinite content increases

### 3.2 成熟度对中孔、大孔体积的控制作用

图5分别表示了成熟度对中孔体积、大孔体积、中孔与大孔体积和的控制作用,结果显示:成熟度对中孔、大孔、中孔大孔体积和的控制作用并不明显;成熟度与中孔大孔体积呈现出弱相关性。成熟度增高对有机质孔的发育有促进作用<sup>[1]</sup>,刘娜等<sup>[19]</sup>认为成熟度对孔隙影响较为复杂,从低成熟度阶段到高成熟度阶段平均中大孔所占比例呈现先减小再增大再减小的趋势。

杜玉娥<sup>[22]</sup>在研究煤孔隙特征对煤层气解吸的影响时发现,当 $R_{o,max}$ 大于1.3%时,煤芳香化程度显

著提高,这种分子结构形成了一系列微孔和小孔,同时也导致大、中孔减少,随成熟度增加大孔体积出现先减小再增大的结果与图5b中所示基本符合。图5中出现异常高点均为糜棱煤, $R_o$ 大致介于张吉振等<sup>[23]</sup>划分的成熟生烃溶蚀阶段( $0.7\% < R_o < 1.3\%$ ),在此阶段,有机质产生的酸会溶蚀碳酸岩、长石等易溶矿物,增加了无机矿物间的孔隙,同时,地质历史时期的构造运动在形成糜棱煤的过程中,构造运动改造了煤层,促进了煤岩中微裂隙的发育<sup>[24]</sup>,矿物溶解以及构造运动的共同作用,可能导致了这些构造煤中孔、大孔体积显著增加。

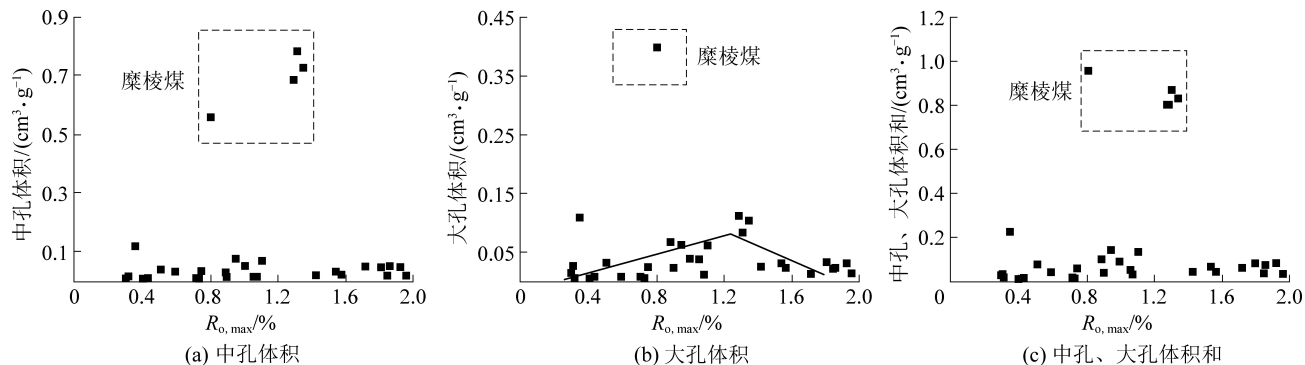


图5 中孔及大孔体积随成熟度变化

Fig. 5 The volume variations of meso-pore and macro-pore as maturity increases



### 3.3 煤体结构对中孔、大孔体积的控制作用

由图6可知,原生结构煤、碎裂煤、碎粒煤中孔、大孔体积接近,糜棱煤中孔、大孔体积明显高出。秦修培等<sup>[25]</sup>在研究构造变形对煤孔隙发育特征影响时发现随着构造变形程度的增加,煤体孔径结构分布发生

变化,开放孔逐渐增多,半封闭孔逐渐减少,中孔和大孔发育逐渐增多。李明等<sup>[26]</sup>发现随着构造变形程度的加强,从原生结构到碎粒结构,各孔径段的孔容分布相对均匀,而到糜棱煤,出现中孔异常发育且大孔发育较好现象,这与研究结果有较好的一致性。

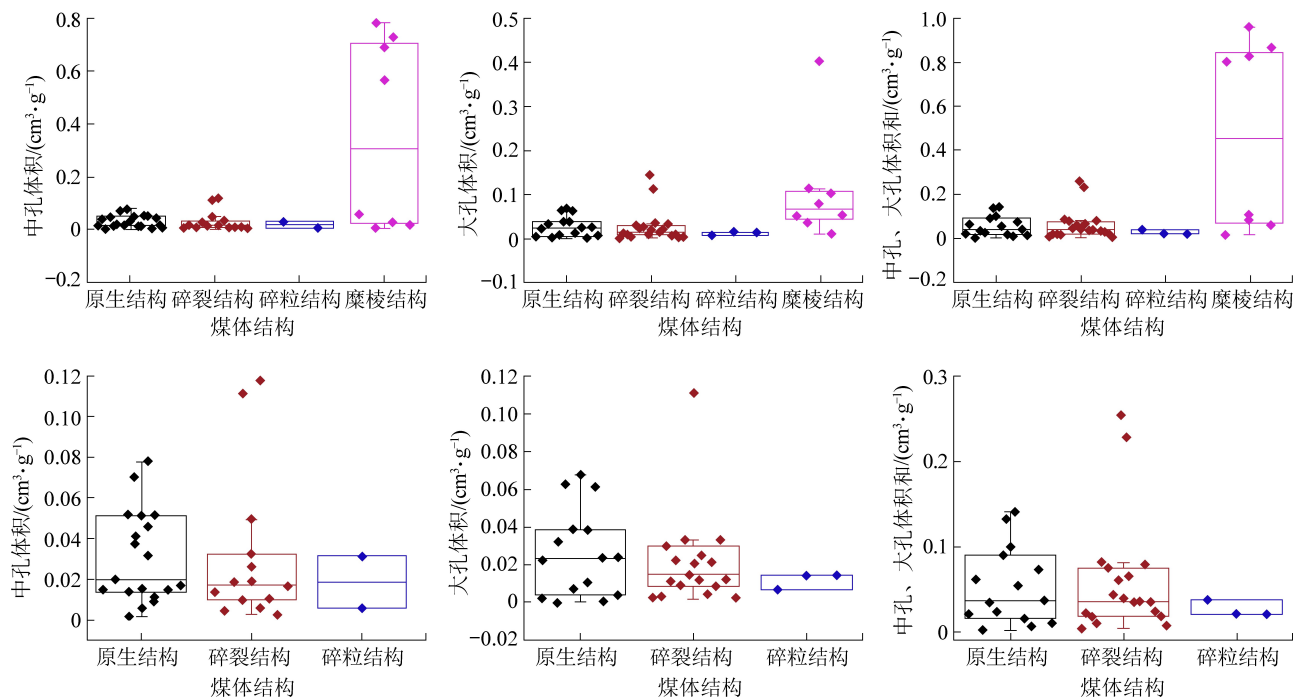


图6 煤体结构与中孔及大孔体积关系箱型图

Fig. 6 Box diagrams of relationship between coal structures and volumes of meso-pore and macro-pore

## 4 孔隙结构复杂程度地质控制

分形理论能够准确地定量描述孔隙的内部复杂结构,多孔固体介质中分形维数越大,孔隙结构越复杂,非均质性越强<sup>[27]</sup>。对于用压汞法测得的数据可以采用 Friesen 等引入的 Menger 海绵模型<sup>[28]</sup>,并结合 Washburn 方程处理可以得公式

$$\lg\left(\frac{dV}{dP}\right) = \lg k + (D - 4) \lg P \quad (1)$$

其中: $V$ 为孔隙体积, $\text{cm}^3$ ;  $P$ 为压力, $\text{MPa}$ ;  $D$ 为分形维数,可通过下式计算:

$$D = k + 4 \quad (2)$$

其中: $k$ 为 $y$ 与 $x$ 函数的斜率, $y$ 为孔隙体积对压力的积分取对数 $\lg(dV/dP)$ , $x$ 为对压力取对数 $\lg P$ 。利用公式分析压汞数据并构建 $\lg(dV/dP)$ 与 $\lg P$ 的分布散点图。由于压汞数据众多,限于篇幅在图7展示了部分样品的分形维数计算拟合过程,计算出中孔的分形维数 $D_3$ 和大孔的分形维数 $D_4$ (表1),据此分别表征中孔和大孔孔隙结构复杂程度。经计算可知中孔的分形维数 $D_3$ 为2.30~3.93,平均3.19;大孔

的分形维数 $D_4$ 为2.10~3.77,平均2.98。

### 4.1 镜质组含量对孔隙结构复杂程度的控制

从褐煤到长焰煤的成煤过程中,褐煤中的腐植体逐渐转化为镜质组,按照我国煤炭行业标准 MT/T 1160—2011 煤的镜质组含量分级,试验样品属于中高镜质组煤。样品中孔分形维数大部分大于3,大孔分形维数也有相当一部分大于3,这可能是由于压缩效应导致煤的孔隙结构遭到破坏引起的<sup>[29]</sup>。由图8a和图8b可以看出,样品镜质组含量占比表现为集中分布,大都在70%以上,并且这部分镜质组含量与中孔、大孔的复杂程度呈正相关关系;镜质组含量在70%以下的的数据较少,本文不做讨论。镜质组含量大于70%时,中孔和大孔的分形维数 $D_3$ 、 $D_4$ 随镜质组含量的增加呈增大的趋势。这一现象可能由以下原因导致:当镜质组含量较低时,其自身较均质化孔隙所占比例较高,孔隙复杂程度相应较低;当镜质组含量较高时,大量脆性的镜质组受构造影响可能产生别的类型的孔隙,煤岩中孔和大孔的随机分布性和复杂性相对于镜质组较低时有所加强<sup>[20,30]</sup>。

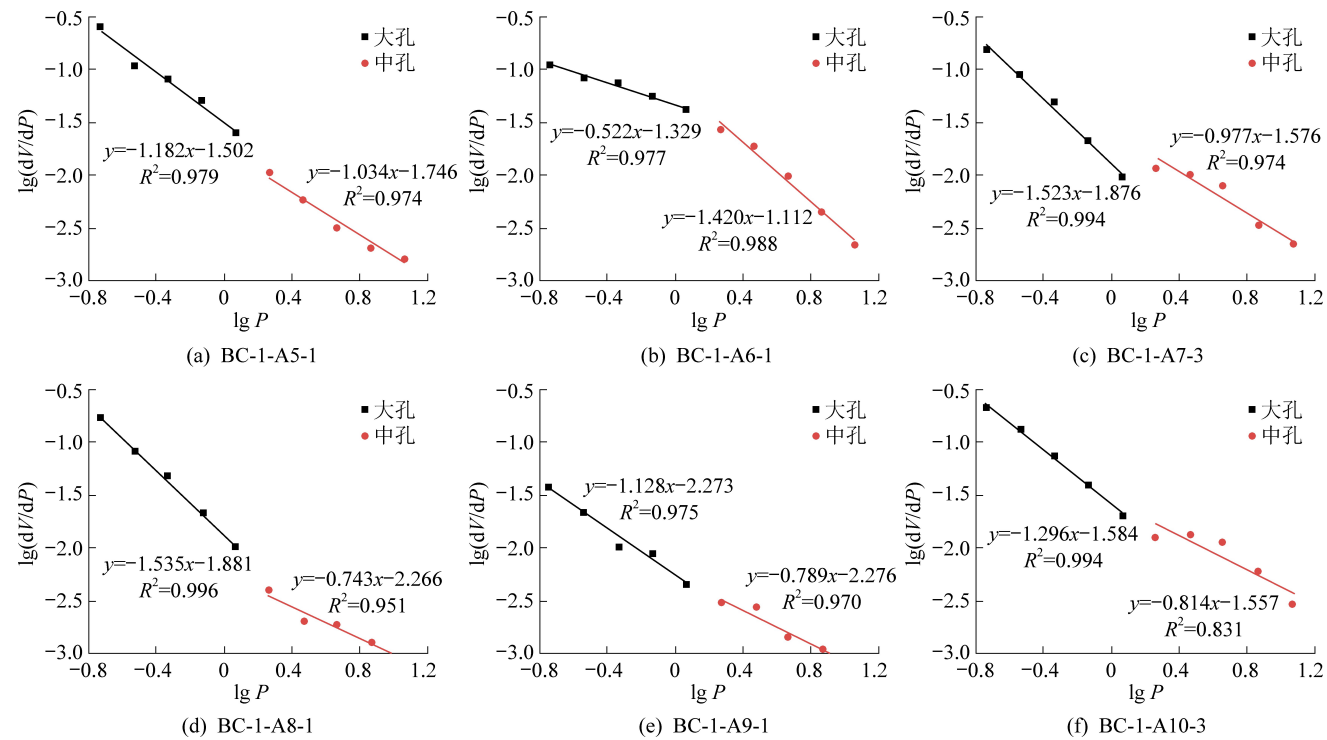


图 7 不同样品  $\lg(dV/dP)$  与  $\lg P$  的分布

Fig. 7 Scatter plot between  $\lg(dV/dP)$  and  $\lg P$

表 1 中孔、大孔分形维数分布

Table 1 Fractal dimensions of meso-pore and macro-pore

样品号	中孔分形 维数 $D_3$	大孔分形 维数 $D_4$	样品号	中孔分形维数 $D_3$	大孔分形 维数 $D_4$
BC-1-A5-1	2.97	2.82	BC-4-C-1	3.80	2.47
BC-1-A6-1	2.58	3.48	BC-4-C-2	3.21	2.71
BC-1-A7-3	3.02	2.48	BC-4-C-3	3.24	3.72
BC-1-A8-1	3.26	2.47	BC-4-C-4	3.16	3.47
BC-1-A9-1	3.21	2.87	BC-4-C-5	3.45	3.70
BC-1-A10-3	3.19	2.70	BC-4-B-1	3.53	2.83
BC-3-A1-1	3.58	2.89	BC-4-B-2	3.92	2.87
BC-3-A1-2	2.91	2.50	BC-4-B-3	3.52	2.12
BC-3-A3-1	3.31	2.91	BC-4-B-4	3.93	2.80
BC-3-A3-2	3.83	2.87	BC-4-B-5	3.30	3.37
BC-6-B1-1	3.68	—	BC-7-A5-4-4	2.73	—
BC-6-B1-12	3.52	—	BC-7-A7-2	2.63	3.47
BC-6-C2-1	3.14	2.75	BC-7-A7-5	3.39	2.10
BC-6-C2-3	—	3.06	BCS-1-A10-1	3.20	3.30
KS-1 下 5-1	3.38	3.02	BCS-1-A10-6	3.54	2.70
KS-1 下 5-2	3.61	2.81	BCS-1-A8-1	3.09	2.97
KS-1 下 10-1	3.16	2.83	BCS-1-A8-2	3.32	2.51
KS-1 下 10-2	3.35	2.52	BCS-1-A7-5	2.47	3.58
BC-7-A3-2-2	2.59	3.59	BCS-1-A7-9	2.77	3.12
BC-7-A5-4-1	3.35	3.65	BCS-15-A7-1	2.56	—
BC-7-A5-4-3	2.87	3.09	BCS-15-A7-4	2.30	—
BCS-15-A9-10	2.30	—	BCS-27-A9-10-8	3.23	3.77
BCS-27-A9-10-2	3.27	3.29			

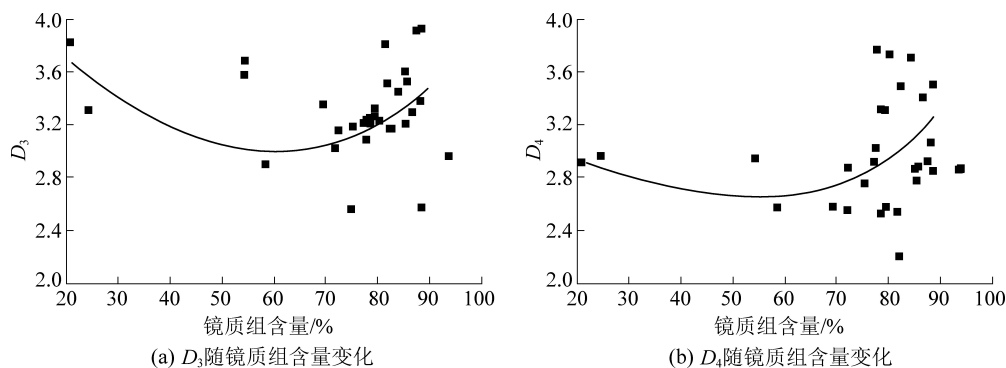


图 8 孔隙复杂程度随镜质组含量变化

Fig. 8 Pore structural complexity variation as vitrinite content increases

#### 4.2 成熟度对孔隙结构复杂程度的控制

试验样品在未成熟到高成熟阶段均有分布,大部分样品处于成熟到高成熟阶段。图 9a 中,成熟度与中孔的复杂程度表现出良好的正相关关系,表明成熟度对中孔的复杂程度控制作用较明显,图 9b 中,成熟度与大孔复杂程度表现为弱负

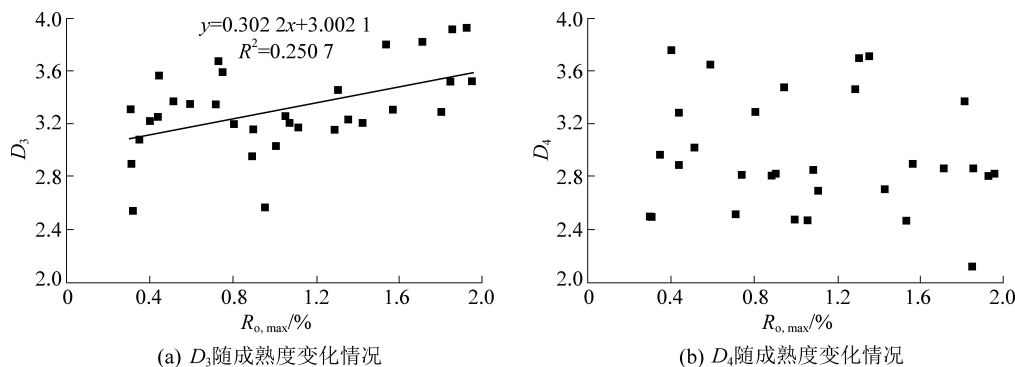


图 9 孔隙复杂程度随成熟度变化

Fig. 9 Pore structural complexity variation of as vitrinite content increases

#### 4.3 煤体结构对孔隙复杂程度的控制

根据煤岩破坏的程度,可将煤样分成 4 种类型,分别是原生结构煤、碎裂结构煤、碎粒结构煤和糜棱结构煤<sup>[32]</sup>。图 10 展示了库拜煤田不同煤体结构煤岩中孔分形维数和大孔分形维数,可知不同煤体结构

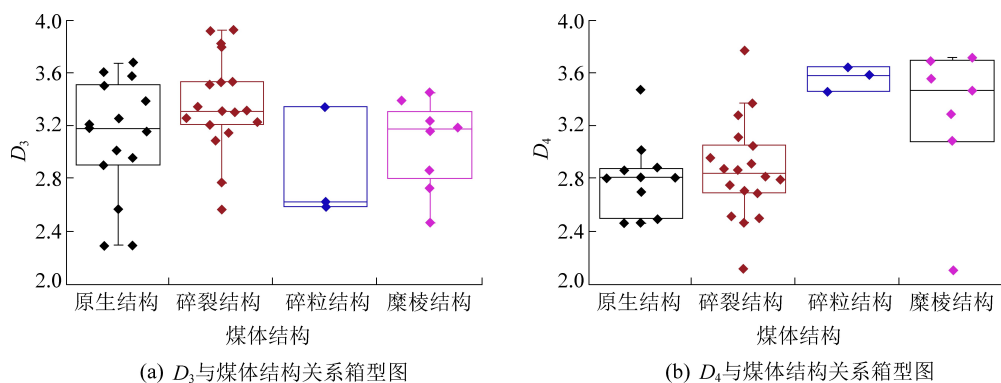


图 10 孔隙复杂程度与煤体结构关系箱型图

Fig. 10 Box diagrams of the relationship between pore structural complexity and coal structures

相关性,表明成熟度对大孔复杂程度控制作用不明显,与张少锋等<sup>[31]</sup>研究的大孔复杂程度受成熟度影响不大的结果一致。可能原因是成熟度并不是大孔复杂程度的主控因素,而是由镜质组含量和煤体结构等综合因素影响控制着大孔的复杂程度。

对应的中孔分形维数变化不大,表明库拜煤田煤岩中孔结构复杂程度并不受煤体结构的控制。由图 10b 可知,原生结构煤和碎裂煤的大孔结构复杂程度接近,糜棱煤与碎粒煤的大孔结构复杂程度较高,表明煤体受破坏程度影响着大孔结构的复杂程度,结合



4.2节可知,成熟度不是影响大孔复杂程度的主要因素,而煤体结构对大孔的复杂程度影响较大。

原生结构煤(图 11a、11b、11c)和碎裂结构煤(图 11d、11e、11f)压汞曲线划分为Ⅰ类,进汞和退汞曲线形态大致相似,基本没有分离段,退汞效率为 39.60%~76.96%。

碎粒结构煤压汞曲线(图 11g、图 11h、图 11i)可被划分为Ⅱ类,进退汞曲线形态差异较大,出现了明

显的分离段,退汞效率为 20.31%~39.65%。糜棱结构煤压汞曲线(图 11j、图 11k、图 11l)可被划分为Ⅲ类,进退汞曲线形态相似程度不高,但是出现了阶段性的突变特征,退汞效率为 47.11%~58.36%。随着构造作用的加强,煤岩孔容的比例也在发生转化,中孔和大孔所占比例有不同程度的增加,孔隙形态和类型也在发生变化,从而增加了中孔大孔的复杂程度,进而使得糜棱煤的退汞效率相对于原生结构煤

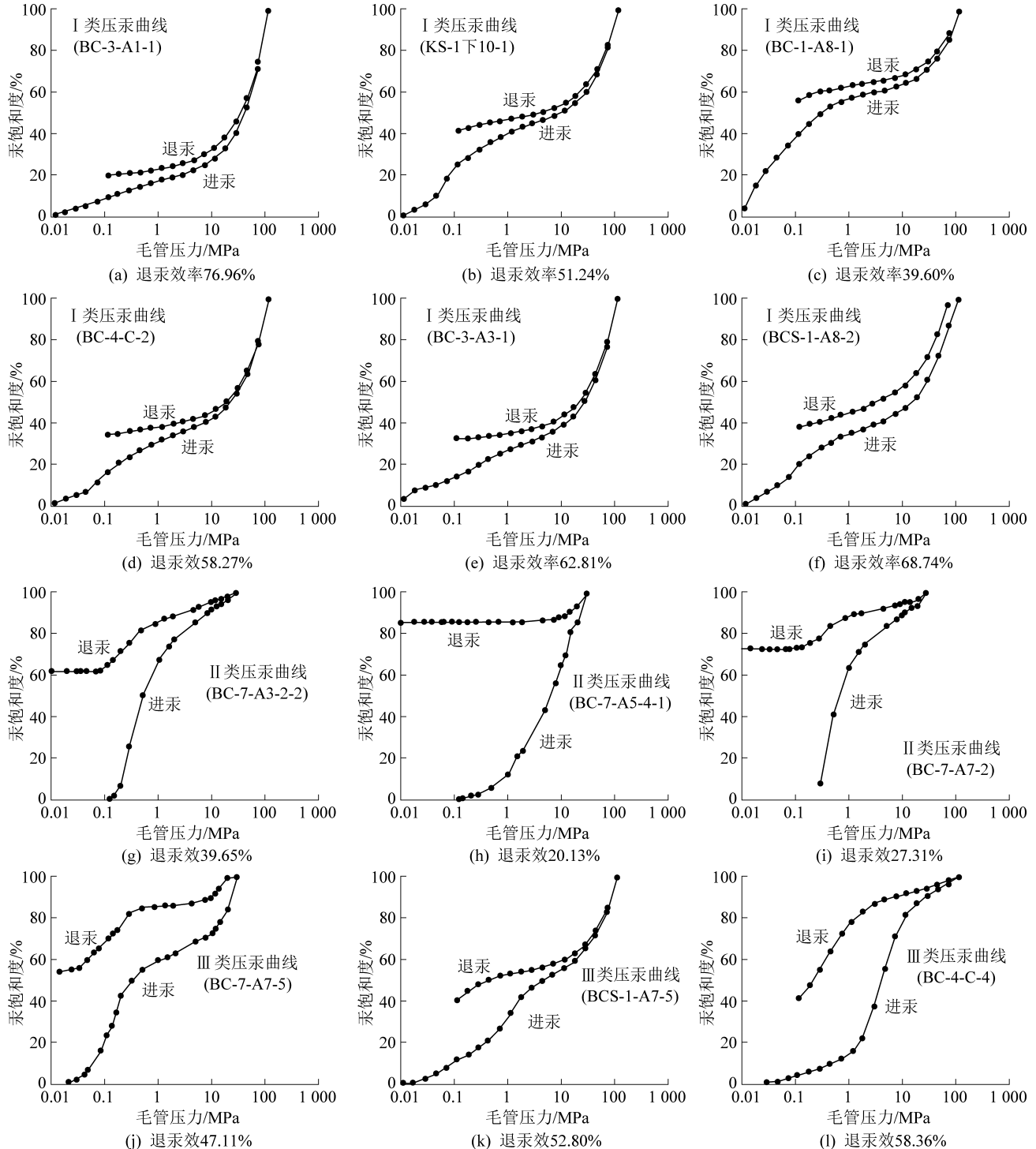


图 11 不同煤体结构煤压汞曲线特征

Fig. 11 Mercury intrusion and withdraw curves of coals with structures

较低<sup>[25]</sup>。

图12展示了原生结构煤、碎裂结构煤、碎粒结构煤和糜棱结构煤的孔径分布特征,相比之下,构造煤大孔更发育;结合不同煤体结构压汞曲线,随煤体结构复杂程度增大,压汞曲线滞后回线逐

渐明显,表明煤岩中孔隙形态发生了转变,从管状或平板形态为主转向以墨水瓶形态为主<sup>[33]</sup>。构造煤促进了大孔的发育,也增加了孔隙形态的多样性,因此,与大孔孔隙的复杂程度表现出了正相关关系。

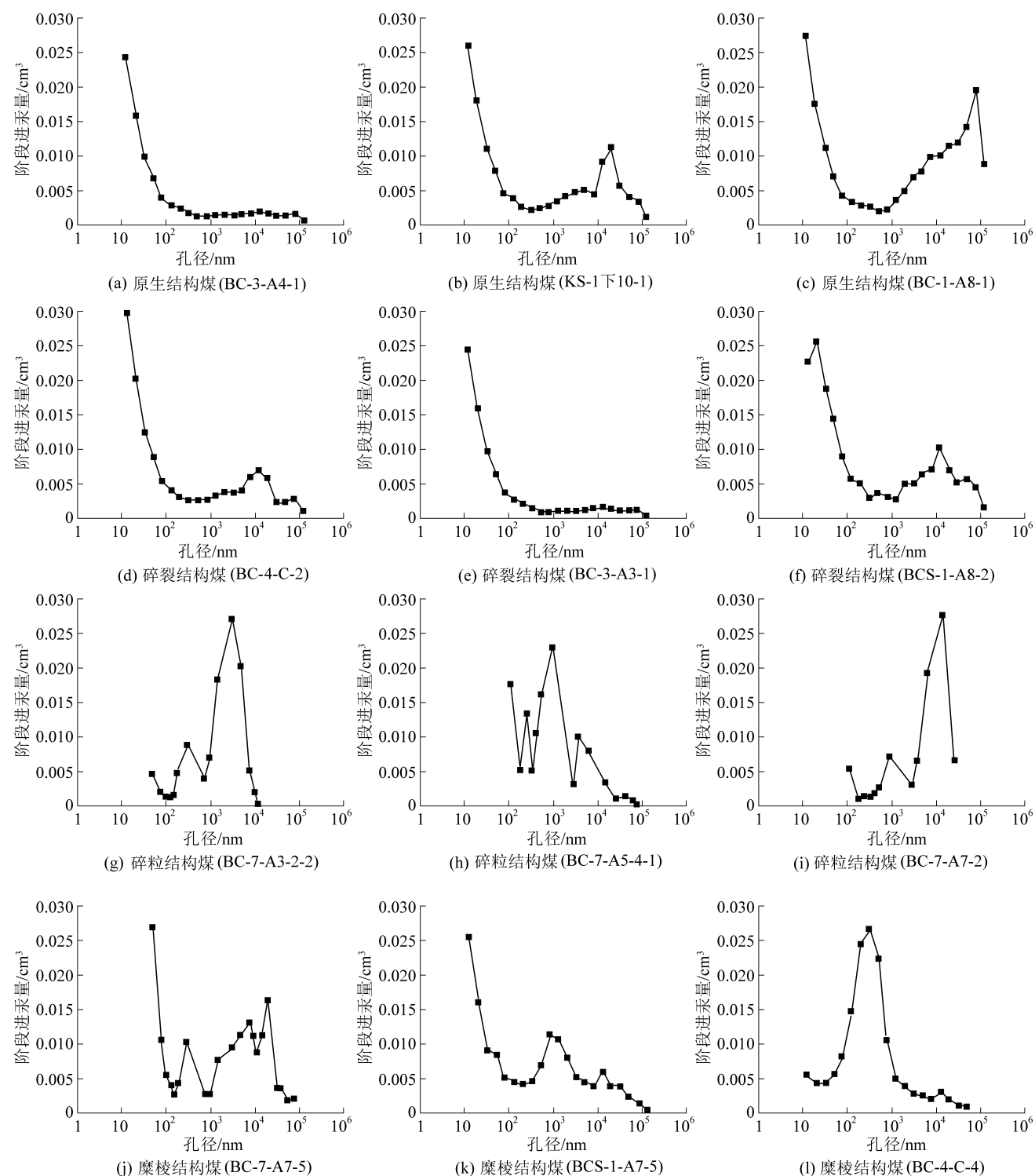


图12 不同煤体结构孔径分布特征

Fig. 12 Pore diameter distribution characteristics of coals with structures

## 5 结 论

1) 镜质组含量和成熟度不是控制库拜煤田中低阶煤中孔、大孔体积的主要因素; 原生结构煤、碎裂煤、碎粒煤中孔、大孔体积接近, 糜棱煤中孔、大孔体积明显高出。

2) 镜质组含量大于 70% 时, 随镜质组含量增大, 中孔和大孔结构的复杂程度趋于增大, 可能导致储层渗透率偏低。

3) 煤体结构与中孔的结构复杂程度关系微弱, 但煤体结构影响了大孔结构的复杂程度; 煤岩成熟度控制了中孔结构的复杂程度, 但对大孔结构复杂程度控制作用较弱。

## 参考文献 (References):

- [1] 刘金霖, 李怀滨, 张雪冰, 等. 鸡西盆地煤储层孔隙特征及主控因素[J]. 石油实验地质, 2018, 40(5): 691-698.  
LIU Jinlin, LI Huaibin, ZHANG Xuebing, *et al.* Pore characteristics and controlling factors of coal reservoirs from Jixi Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(5): 691-698.
- [2] 张尚虎, 汤达祯, 王明寿. 沁水盆地煤储层孔隙差异发育主控因素[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 37-40.  
ZHANG Shanghu, TANG Dazhen, WANG Mingshou. Main controlling factors of differential development of coal reservoirs in Qinshui Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(1): 37-40.
- [3] 李 阳, 张玉贵, 张 浪, 等. 基于压汞、低温  $N_2$  吸附和  $CO_2$  吸附的构造煤孔隙结构表征[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 1188-1196.  
LI Yang, ZHANG Yugui, ZHANG Lang, *et al.* Characterization on pore structure of tectonic coals based on the method of mercury intrusion, carbon dioxide adsorption and nitrogen adsorption [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(4): 1188-1196.
- [4] SAKUROVS R, HE Lilin, MELNICHENKO Y, *et al.* Pore size distribution and accessible pore size distribution in bituminous coals [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 100: 51-64.
- [5] 陈向军, 刘 军, 王 林, 等. 不同变质程度煤的孔径分布及其对吸附常数的影响[J]. 煤炭学报, 2013, 38(2): 294-300.  
CHEN Xiangjun, LIU Jun, WANG Lin, *et al.* Influence of pore size distribution of different metamorphic grade of coal on adsorption constant [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(2): 294-300.
- [6] 张 洲, 王生维, 王学坚, 等. 新疆库拜煤田煤储层物性特征及勘探开发前景[J]. 煤炭技术, 2016, 35(5): 117-119.  
ZHANG Zhou, WANG Shengwei, WANG Xuejian, *et al.* Physical characteristics of coal reservoir and prospects in exploration and development of Kuqa - Bay Coalfield, Xinjiang [J]. *Coal Technology*, 2016, 35(5): 117-119.
- [7] 安 庆, 张 洲, 吴 斌, 等. 新疆库拜煤田煤储层特征及开采技术建议[J]. 新疆地质, 2016, 34(2): 286-290.  
AN Qing, ZHANG Zhou, WU Bin, *et al.* The research of coal reservoir characteristics and mining technology of Kuqa-Bay Coalfield, Xinjiang [J]. *Xinjiang Geology*, 2016, 34(2): 286-290.
- [8] 姜云辉, 杨万志, 程遂欣. 新疆煤类分布、变质规律及变质作用分析[J]. 新疆地质, 2008(3): 301-304.  
JIANG Yunhui, YANG Wanzhi, CHENG Suixin. Analysis on distributing, orderliness of the degenerative and metamorphism of the coal in xinjian [J]. *Xinjiang Geology*, 2008(3): 301-304.
- [9] 周梓欣, 杨曙光, 张 伟. 库拜煤田瓦斯地质规律与瓦斯分布特征初步研究[J]. 中国煤层气, 2012, 9(2): 29-31.  
ZHOU Zixin, YANG Shuguang, ZHANG Wei. Preliminary research on rules of gasgeology and character of gas distribution in Kubai coal field [J]. *China Coalbed Methane*, 2012, 9(2): 29-31.
- [10] 何登发, 周新源, 杨海军, 等. 库车坳陷的地质结构及其对大油气田的控制作用[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1): 19-32.  
HE Dengfa, ZHOU Xinyuan, YANG Haijun, *et al.* Geological structure and its controls on giant oil and gas fields in Kuqa depression, Tarim Basin: A clue from new shot seismic data [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33(1): 19-32.
- [11] 赵丽娟, 秦 勇. 鄂尔多斯盆地东部煤岩孔隙特征实验分析[J]. 中国煤炭地质, 2014, 26(1): 22-25.  
ZHAO Lijuan, QIN Yong. Experimental analysis of coal and rock pore characteristics in eastern Ordos Basin [J]. *China Coal Geology*, 2014, 26(1): 22-25.
- [12] 汤永净, 汪鹏飞, 邵振东. 压汞试验和误差分析[J]. 实验技术与管理, 2015, 32(5): 50-54.  
TANG Yongjing, WANG Pengfei, SHAO Zhendong. Mercury intrusion porosimetry and error analysis [J]. *Experimental Technology and Management*, 2015, 32(5): 50-54.
- [13] B. B. 霍多特. 煤与瓦斯突出 [M]. 北京: 中国工业出版社, 1966: 27-28.
- [14] 王 阳. 上扬子区龙马溪组页岩微孔隙结构演化与页岩气赋存 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.  
WANG Yang. Nanoscale pore structure evolution and shale gas occurrence of Longmaxi Formation in upper Yangtze Area [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [15] 谢晓永, 唐洪明, 王春华, 等. 氮气吸附法和压汞法在测试泥页岩孔径分布中的对比[J]. 天然气工业, 2006(12): 100-102, 202-203.  
XIE Xiaoyong, TANG Hongming, WANG Chunhua, *et al.* Comparison of nitrogen adsorption method and mercury injection method in testing pore size distribution of shale [J]. *Natural Gas Industry*, 2006(12): 100-102, 202-203.
- [16] YAO Yanbin, LIU Dameng. Comparison of low-field NMR and mercury intrusion porosimetry in characterizing pore size distributions of coals [J]. *Fuel*, 2012, 95(1): 152-158.
- [17] 宋党育, 李云波, 何凯凯, 等. 基于压汞试验的煤中孔隙校正方法 [P]. 中国专利, CN201811484633, 2019-02-15.
- [18] 吕志发, 张新民, 钟铃文, 等. 块煤的孔隙特征及其影响因素 [J]. 中国矿业大学学报, 1991(3): 48-57.  
LU Zhifa, ZHANG Xinmin, ZHONG Lingwen, *et al.* The pore features of lump coal and Its influence factors [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 1991(3): 48-57.



- [19] 刘娜,康永尚,李喆,等.煤岩孔隙度主控地质因素及其对煤层气开发的影响[J].现代地质,2018,32(5):963-974.  
LIU Na, KANG Yongshang, LI Zhe, *et al.* Geological controlling factors of coal pore system and its significance in CBM development[J].Modern Geology, 2018, 32(5):963-974.
- [20] 王宇航,王有智.煤储层特征及其对吸附能力的影响—以鸡西盆地城子河组为例[J].中国煤炭地质,2016,28(8):33-37,67.  
WANG Yuhang, WANG Youzhi. Coal reservoir characteristics and their impacts on adsorptivity: a case study of Chengzihe Formation in Jixi Basin[J].China Coal Geology, 2016, 28(8):33-37, 67.
- [21] 姜家钰.构造煤结构演化及其对瓦斯特性的控制[D].焦作:河南理工大学,2014.  
JIANG Jiayu. The deformed coal structural evolution and its control to gas properties[D].Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2014.
- [22] 杜玉娥.煤的孔隙特征对煤层气解吸的影响[D].西安:西安科技大学,2010.  
DU Yue. The affect about pore characteristics of coal to the coal-bed methane desorption[D].Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2010.
- [23] 张吉振,李贤庆,张学庆,等.煤系页岩储层孔隙结构特征和演化[J].煤炭学报,2019,44(S1):195-204.  
ZHANG Jizhen, LI Xianqing, ZHANG Xueqing, *et al.* Microscopic characteristics of pore structure and evolution in the coal bearing shale[J].Journal of China Coal Society, 2019, 44(S1):195-204.
- [24] 王向浩,王延斌,高莎莎,等.构造煤与原生结构煤的孔隙结构及吸附性差异[J].高校地质学报,2012,18(3):528-532.  
WANG Xianghao, WANG Yanbin, GAO Shasha, *et al.* Differences in pore structures and absorptivity between tectonically deformed and undeformed coals [J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(3):528-532.
- [25] 秦修培,邹艳,汪吉林.构造变形对煤孔隙发育特征影响的研究[J].煤炭科学技术,2017,45(4):155-159.  
QIN Xiupei, ZOU Yan, WANG Jilin. Study on influences of tectonic deformation on developing characteristics of coal pores [J].Coal Science and Technology, 2017, 45(4):155-159.
- [26] 李明,姜波,兰凤娟,等.黔西—滇东地区不同变形程度煤的孔隙结构及其构造控制效应[J].高校地质学报,2012,18(3):533-538.  
LI Ming, JIANG Bo, LAN Fengjuan, *et al.* Pore structures and structural control of coals wit-h different degrees of deformation from wes-tern Guizhou and eastern Yunnan [J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(3):533-538.
- [27] YAO Yanbin, LIU Dameng, TANG Dazhen, *et al.* Fractal characterization of seepage-pores of coals from China: an investigation on permeability of coals [J].Computers and Geosciences, 2009, 35(6):1159-1166.
- [28] FRIESEN W, MILKULAR R. Fractal dimensions of coal particles [J].Colloid Interface Science.1987, 120(1):263-271.
- [29] 刘顺喜,吴财芳.比德-三塘盆地煤储层不同尺度孔隙分形特征研究[J].煤炭科学技术,2016,44(2):33-38.  
LIU Shunxi, WU Caifang. Study on fractal characteristics of different scales pore coal reservoir in Bide-Santang Basin [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(2):33-38.
- [30] 李波波,王斌,杨康,等.煤岩孔裂隙结构分形特征及渗透率模型研究[J].煤炭科学技术,2021,49(2):226-231.  
LI Bobo, WANG Bin, YANG Kang, *et al.* Study on fractal characteristics of coal and rock pore fissure structure and permeability model [J].Coal Science and Technology, 2021, 49(2):226-231.
- [31] 张少锋,李雅阁,秦兴林.沁水盆地煤储层孔隙分形特征及其对瓦斯吸附的影响[J].煤炭科学技术,2019,47(3):163-167.  
ZHANG Shaofeng, LI Yage, QIN Xinglin. Pore fractal characteristic of coal reservoirs in Qinshui Basin and its influence on methane adsorption property [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3):163-167.
- [32] 薛光武,刘鸿福,要惠芳,等.韩城地区构造煤类型与孔隙特征[J].煤炭学报,2011,36(11):1845-1851.  
XUE Guangwu, LIU Hongfu, YAO Huifang, *et al.* The types of tectonic coals and pore characters in Hancheng [J].Journal of China Coal Society, 2011, 36(11):1845-1851.
- [33] 郭品坤,程远平,卢守青,等.基于分形维数的原生煤与构造煤孔隙结构特征分析[J].中国煤炭,2013,39(6):73-77.