

文章编号: 1000-0747(2014)04-0414-07 DOI: 10.11698/PED.2014.04.04

# 典型构造煤变形特征及储集层物性

要惠芳, 康志勤, 李伟

(太原理工大学)

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX05062-009; 2011ZX05062-009)

**摘要:**以鄂尔多斯盆地东缘渭北韩城地区的煤岩样品为研究对象,采用扫描电镜、显微CT观测和压汞、低温液氮吸附等实验方法对构造煤变形和孔隙结构进行表征,对块状构造煤进行吸附实验,研究构造煤储气机理。研究结果表明:碎裂煤、碎粒煤原始层理可辨,由剪切作用形成的煤颗粒较粗(1~3 cm),脆韧性变形的鳞片煤和韧性变形糜棱煤煤岩原始层理和结构均被破坏,由剪切、层间滑动、揉皱形成的煤颗粒较细,构造变形造成的定向排列明显;随着构造煤变形程度的增大,孔容、孔隙比表面积和微孔比例从碎裂煤、碎粒煤到鳞片煤、糜棱煤逐渐增大,孔隙连通性增强。随构造变形强度增大,从脆性到脆韧性、韧性,煤对甲烷的吸附能力呈逐渐增强趋势,构造煤煤岩结构、孔隙-裂隙系统共同制约了煤对甲烷的吸附能力。图5表2参35

**关键词:**构造煤;变形特征;孔隙结构;吸附规律

中图分类号: TE122.23

文献标识码: A

## Deformation and reservoir properties of tectonically deformed coals

Yao Huifang, Kang Zhiqin, Li Wei

(Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Tectonic deformation and pore structure characteristics of tectonically deformed coals (TDC) collected from the Hancheng area, Weibei block, eastern Ordos Basin were characterized through scanning electron microscope, micro-CT, mercury porosimetry and low-temperature nitrogen adsorption experiments. The isothermal adsorption experiment of lumpy TDC was also performed to investigate the gas storage behavior. The results show that the primary layer structure can be observed in cataclastic coals and granulated coals. These coals show sub-angular particles of 1-3 cm. For scaled coals and mylonitic coals, the primary structure and coal bedding have been destroyed, and the coal is sheared with directional arrangement of grains. The pore volume, pore surface area, micro-pore volume and pore connectivity increase with the increase in deformation extent. The CH<sub>4</sub> adsorption capacity of coals shows an increasing trend from brittle deformation to ductile deformation. It is concluded that the coal structure, pore and fracture characteristics of TDC control the gas adsorption capacity of coals.

**Key words:** tectonically deformed coal (TDC); deformation characteristics; pore structure; adsorption

## 0 引言

构造煤是原生结构煤在构造应力作用下形成的具有新生结构和构造特征的变形煤,可根据变形特征划分为不同类型<sup>[1-5]</sup>。据宜文等<sup>[6]</sup>提出了既适合于煤层气开发又适合煤与瓦斯突出防治的构造煤结构-成因分类方案,该方案以构造煤的手标本或钻井煤心为尺度,将构造煤分为3个序列10个类型:脆性变形序列,包括碎裂煤、碎斑煤、碎粒煤、碎粉煤、片状煤和薄片煤;韧性变形序列,包括揉皱煤、糜棱煤和韧性结构煤;脆韧性过渡型变形序列,由鳞片煤构成。

构造煤具有强度低、渗透率低、应力敏感性强等特点。研究表明,构造煤对煤与瓦斯突出影响重大<sup>[7-8]</sup>;同时构造煤对煤层气地面开采也有很大影响,经常导

致出粉煤、卡钻等事故,构造煤发育地区甚至被视为煤层气开发的禁区<sup>[9]</sup>。实际上,一定碎裂程度的构造煤常具有含气量高、割理发育的特点,因此,在构造煤发育区寻找有利的煤层气资源地质背景,将构造应力作用下煤结构的演化、储集层物性特征和控气地质条件结合起来进行研究,将有望在构造煤发育区发现煤层气资源。

中国大多数含煤盆地经历了多期次构造作用的叠加改造<sup>[10-11]</sup>,使煤体结构遭受不同程度变形,形成了不同类型的构造煤<sup>[12]</sup>。本文以鄂尔多斯盆地东缘渭北韩城地区的煤岩样品为研究对象,通过扫描电镜、显微CT观测和压汞、低温液氮吸附等实验方法对构造煤变形和孔隙结构进行表征,对块状构造煤进行吸附实验,以期揭示构造煤储气机理,为构造煤发育区煤层气的

勘探开发提供科学依据。

## 1 样品与实验方法

本文研究样品采自鄂尔多斯盆地东缘渭北韩城地

区煤矿井下石炭系太原组 11 号和 5 号煤层、二叠系山西组 3 号煤层及少量钻孔岩心，构造煤类型包括脆性变形的碎裂煤、碎粒煤，脆韧性过渡型的鳞片煤和韧性变形的糜棱煤（见表 1）。

表 1 不同类型构造煤样品参数及孔隙结构定量检测结果

类型	样品编号	采样位置	煤层	氮气吸附				显微 CT			压汞		
				孔容/ ( $10^{-3} \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ )	比表面积/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	各孔径段孔隙体积比例/%		各孔径段孔隙数量比例/%			排驱压力/ MPa	进汞饱和度/%	退汞效率/%
						<10 nm	10~100 nm	1~5 $\mu\text{m}$	5~10 $\mu\text{m}$	>10 $\mu\text{m}$			
原生结构煤	SSP-36	桑树坪	11					85.15	14.58	0.27			
	XYK-29	下峪口煤矿	3					76.80	21.99	1.21	0.44	47.54	88.08
	HS10-21	韩试 10 井	3								0.81	34.22	94.48
碎裂煤	XS-22	象山煤矿	3								0.44	37.39	86.01
	XS-23	象山煤矿	3	0.69	0.062	23.90	76.10					25.28	86.24
	XS-31	象山煤矿	11	2.11	0.289	9.71	90.29					30.17	96.40
	SSP-26	桑树坪煤矿	11	1.29	0.081	5.64	94.36					24.82	86.27
碎粒煤	XS-7	象山煤矿	3	1.63	0.177	14.16	85.84					21.88	78.85
	XS-9	象山煤矿	11	3.55	0.467	24.33	75.67				0.32	31.78	67.96
	XS-27	象山煤矿	5	2.16	0.326	10.52	89.48	73.01	25.54	1.45	0.43	41.98	76.13
	XS-4	象山煤矿	11	2.40	0.312	12.50	87.50						
鳞片煤	SSP-17	桑树坪煤矿	3	0.55	0.046	5.57	90.43	79.36	19.91	0.69	0.60	45.06	64.02
	XS-10	象山煤矿	11	4.09	0.791	25.40	74.60				0.44	45.17	70.59
糜棱煤	WLQ-11	五里桥煤矿	11	6.03	3.508	61.69	38.31					63.30	66.87
	HS20-5	韩试 20 井	5	9.22	2.602	38.72	61.28					58.65	63.60
	XS-12	象山煤矿	3	13.00	6.584	49.09	50.91	89.57	9.91	0.52	0.44	55.74	43.82
	XS-44	象山煤矿	3	14.50	7.479	56.54	43.46						
	XS-8	象山煤矿	11					87.66	11.95	0.39			
	SSP-16	桑树坪煤矿	3	5.06	0.950	14.63	85.37				0.60	75.81	57.62

对井下采矿面和手标本进行样品宏观变形特征观察。在 TESCAN 公司 VEGA\\LMU 扫描电镜下对镀金样品进行微观变形特征观察，扫描电镜加速电压为 20 kV，样品束流 10~20 pc，束斑尺寸 50 nm。

构造煤的孔隙定量表征采用低温氮气吸附、微米 CT 和压汞相结合的方法，不同方法表征的孔径分布不同<sup>[13-14]</sup>。低温氮气吸附实验主要用于表征纳米孔隙的分布特征，其实验流程为：将 10~20 g 粒径为 1~2 mm 的样品经过高温抽真空处理后，以纯度大于 99.999% 的氮气为吸附质，采用 ASAP 2020 全自动比表面及孔径分析仪，在低温（-196 ℃）和低压（小于 0.127 MPa）条件下测量平衡蒸汽压下样品表面的氮气吸附量和脱附量，根据 BET 方程计算煤岩比表面积；在假定孔隙是圆柱形模型的情况下，根据脱附等温线，应用 BJH 理论和 Kelvin 方程，可得到孔径分布<sup>[15-16]</sup>。

微米 CT 主要用于观察煤样中孔径大于 1  $\mu\text{m}$  的孔隙结构，采用仪器为美国生产的 Xradia X 射线微米 CT。实验流程为：首先将 3~5 mm 的煤样经 X 射线照射获得不同角度的二维图像，然后采用 Xradia ExamineRT Workstation 软件对 CT 扫描获取的原始数据进行预处理以得到 3D 数字模型，计算出不同孔径的孔隙分布。

压汞法利用外加压力使汞克服表面张力进入孔隙从而测得其孔径分布信息<sup>[17-19]</sup>。测量仪器为美国麦克尔公司 9410 型全自动压汞仪，仪器可自动记录进汞饱和度、排驱压力。实验进汞压力最高达 49.97 MPa，对应的最小孔隙半径约 15 nm。实验前，所有煤样在 75 ℃ 下干燥 48 h。

本文通过综合运用显微 CT、压汞法、低温氮吸附法分别获得不同类型构造煤渗流孔（孔径大于 100 nm）和吸附孔（孔径小于 100 nm）的孔隙分布特征，从不同尺度研究了不同煤体的孔隙结构。压汞法和低温氮吸附法可以获得孔隙比表面积、总孔容、孔径分布、各阶段孔径所占的孔容比例及平均中值孔径等参数<sup>[20-21]</sup>，从孔隙结构的分布形态可以判断煤体对煤层气的储集能力和运移能力<sup>[22-24]</sup>。

构造煤的甲烷等温吸附实验在太原理工大学自主研制的吸附解吸仪上进行，实验温度为 25 ℃，样品未进行干燥和饱和水处理，实验流程为：先测定装块煤样的实验模型内的自由体积，然后充注 2.4 MPa 压力的甲烷气体，断开气源，记录不同时间由于吸附产生的压降，直到压力不再降低、达到饱和吸附时记录对应压力的饱和吸附量。

## 2 构造煤变形特征

### 2.1 构造煤宏观变形特征

构造煤由于发生了构造变形,其宏观煤岩类型、条带状结构、构造裂隙、揉皱和破碎性等方面都与原生结构煤有明显区别,总体表现为原生层状、条带状结构被破坏,煤中有机质和矿物成分受构造变形影响定向排列明显,煤颗粒变细,揉皱构造发育。

碎裂煤层理较完整,条带状结构较明显,穿层裂隙发育,煤岩层常被切成小碎块,煤质较硬,用手可掰成1~3 cm碎块,基本保持在2 cm左右。有时见构造擦痕,擦痕面上常形成裂隙网,煤岩层间可见错动(见图1a)。

碎粒煤以半暗煤为主,构造擦痕发育,常形成光亮镜面、阶步。煤体上发现“X型”剪节理,煤被切

成楔状、条状。层间滑移明显,发生顺层剪切,煤被切割成尖棱状、楔状细小颗粒。煤质松软,手拭强度低,可捏成粉末或小于1 mm颗粒(见图1b)。

鳞片煤原生结构消失,受不同方向剪切作用影响破碎成鳞片状,整体常呈薄饼形态。构造擦痕顺层发育,鳞片上下可见清晰的光亮滑移面,间距均小于1 cm。受韧性剪切作用,颗粒发生旋转、牵引弯曲,形成微褶皱,S型弯曲。煤质软,手掰可成厚度小于1 mm碎片,灰分较高时,硬度稍加强,但仍呈小鳞片(见图1c)。

糜棱煤光泽较暗,以暗淡煤为主,煤岩成分不易区分,可呈鳞片状、碎粉状。揉皱构造发育,形成褶皱,煤层中夹有透镜状矸石,呈旋转状态,连续夹矸出现小肠状褶皱,可见构造擦痕和滑动镜面,手拭强度低,手捏呈粉末,与夹矸揉搓混合而稍有强度,亦可捏成碎粒状、粉末状(见图1d)。

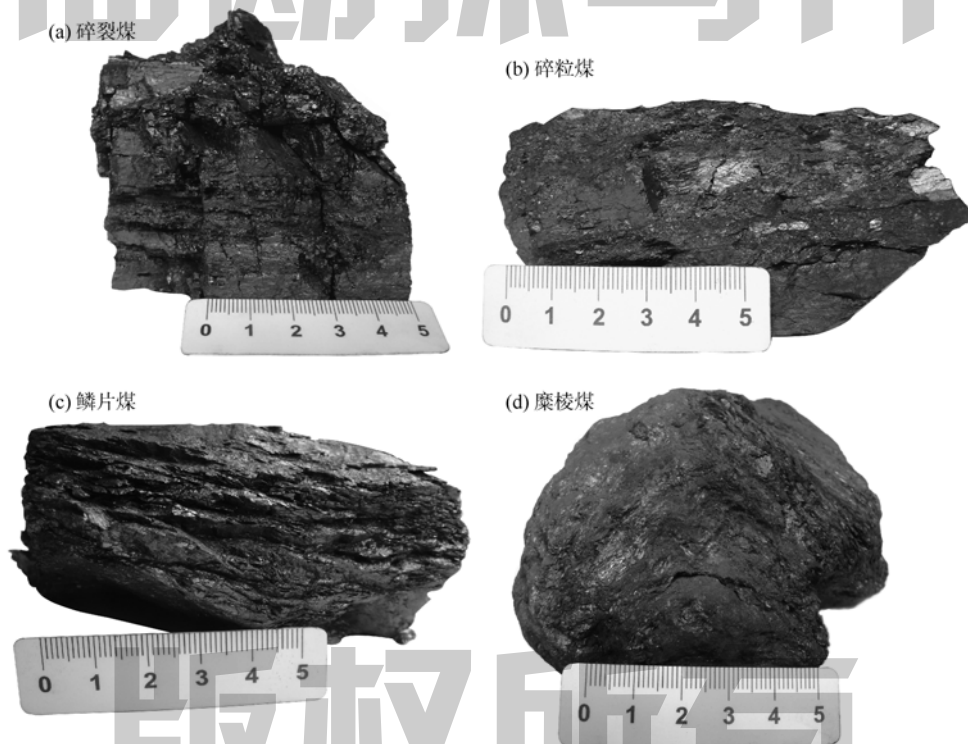


图1 典型构造煤宏观变形照片

### 2.2 构造煤微观变形特征

构造煤微观特征可通过扫描电镜观察。

碎裂煤原生结构保留,条带状结构明显,可见矿物条带,丝质体条带受压,胞腔孔变扁,显示定向排列。层理、内生裂隙发育,张性裂隙发育,相互交叉且呈开启状,部分裂隙被矿物充填。煤发生脆性变形出现贝壳状断口,煤被切成碎裂状,裂隙交会处呈角砾,破碎角砾间呈现一定位移和错开,角砾大小100 μm左右(见图2a)。

碎粒煤保留微细层结构,层理不连续,延伸一定

长度后就成为楔状。煤颗粒之间发生明显位移,受压发生弯曲。受脆性剪切变形影响,剪切裂隙发育,煤被切割成板条状、楔状、碎粒状,且煤颗粒发生旋转。层面发生顺层剪切,煤被切成鳞片状,鳞片厚度约10 μm,呈棱角状。煤颗粒表面擦痕发育,有时呈鱼刺状,构造摩擦面出现,形成摩擦孔。可见阶梯状断口(见图2b)。

鳞片煤受强烈剪切作用,煤被切割成鳞片状,并定向排列,鳞片上下擦痕发育。煤中鳞片状颗粒发生弯曲,揉皱丝质体被压扁,定向排列后揉皱。构造摩擦面、脱落膜发育,形成摩擦孔、微裂隙(见图2c)。

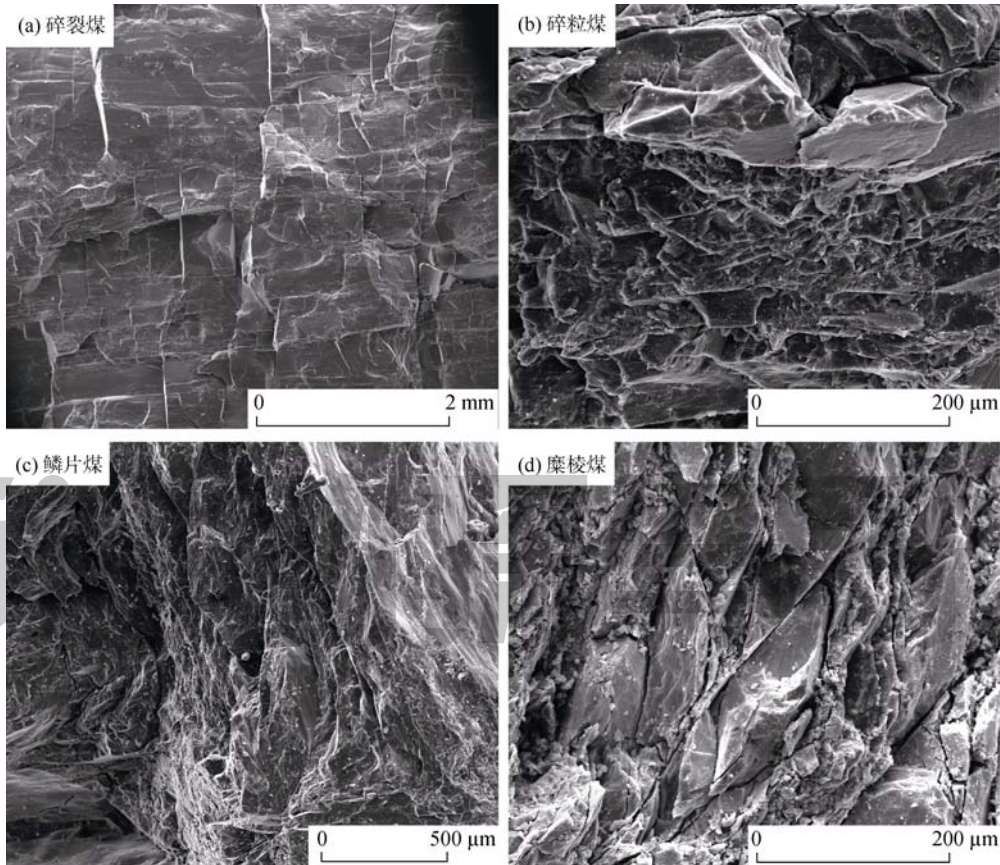


图2 典型构造煤微观变形扫描电镜照片

糜棱煤在剪切应力作用下发生强烈塑性变形，呈细小鳞片、糜棱质，鳞片定向排列。镜质体发生破碎并定向排列，呈细条带状产出。煤韧性剪切揉皱，具S-C构造，挤压破碎呈鳞片。具滑移面，糜棱煤鳞片间滑移明显，矿物质受滑动作用影响而呈薄膜。煤中擦痕、摩擦面发育（见图2d）。

### 3 构造煤孔隙结构表征

煤层气储集层物性评价主要包括两方面内容：①在压力作用下吸附和容纳气体的能力；②孔-裂隙系统中气体流动的能力<sup>[25]</sup>。构造煤比原生结构煤的裂隙更为发育，随着变形强度的增加，构造煤微孔隙更加发育，甚至影响到纳米级的孔隙结构<sup>[26-31]</sup>。

#### 3.1 低温氮吸附与孔径小于10 nm的煤孔隙分布特征

低温氮吸附实验结果表明，随着构造煤变形程度的增大，孔隙结构发生了明显变化，主要表现为孔容、孔隙比表面积和孔径小于10 nm孔隙的比例从碎裂煤、碎粒煤到鳞片煤和糜棱煤逐渐增大（见表1、图3），4种变形煤孔容均值分别为0.0017 mL/g、0.0021 mL/g、0.0041 mL/g和0.0107 mL/g，孔隙比表面积均值分别为0.185 m<sup>2</sup>/g、0.272 m<sup>2</sup>/g、0.791 m<sup>2</sup>/g和3.639 m<sup>2</sup>/g，

小于10 nm孔隙的比例分别为7.7%、12.4%、25.4%、51.5%。糜棱煤中微孔发育是其孔隙比表面积增大的主要原因，最终会导致煤吸附甲烷能力的增强。

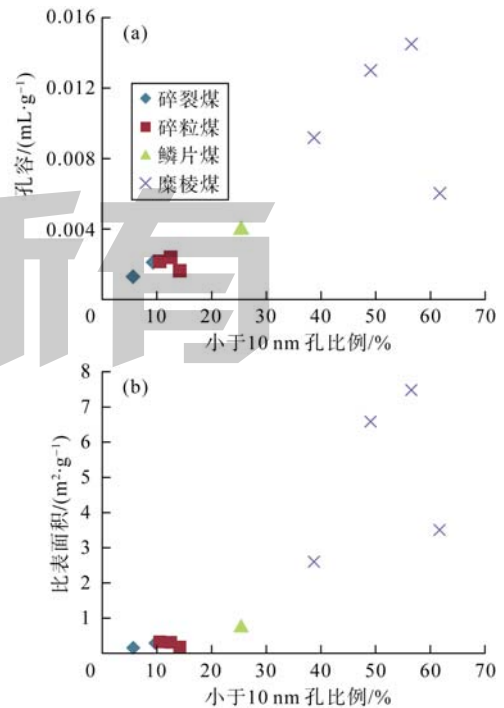


图3 构造煤孔径小于10 nm的孔容和比表面积相关图

由吸附和凝聚理论可知,低温氮吸附回线的形状反映了一定的孔隙结构<sup>[32-34]</sup>。实验表明,对于脆性变形序列的碎裂煤和碎粒煤,在整个相对压力段,吸附、解吸分支基本保持平行而不存在明显的滞后环(见图 4a、4b);对于脆韧性变形序列鳞片煤和韧性变形序列糜棱煤,吸附回线特点是吸附、解吸分支在相对压力 0.5 左右出现明显的滞后环(见图 4c、4d)。按照 De Boer<sup>[35]</sup>提出的划分方案,碎裂煤和碎粒煤吸附

回线具有 B 型回线特征;而鳞片煤和糜棱煤具有 B 型和 D 型回线特征,反映孔隙结构较为复杂,微孔主要为一端封闭型,而大孔则既有封闭型又有开放型,随着韧性变形程度加强,开放型孔和细颈瓶形孔数量增多,表现为回线的拐点更加明显。实际上,煤孔隙类型多样、结构复杂,氮气吸附/脱附曲线产生的滞后环应该是以某种类型孔隙为主体、多种类型孔隙复合的结果。

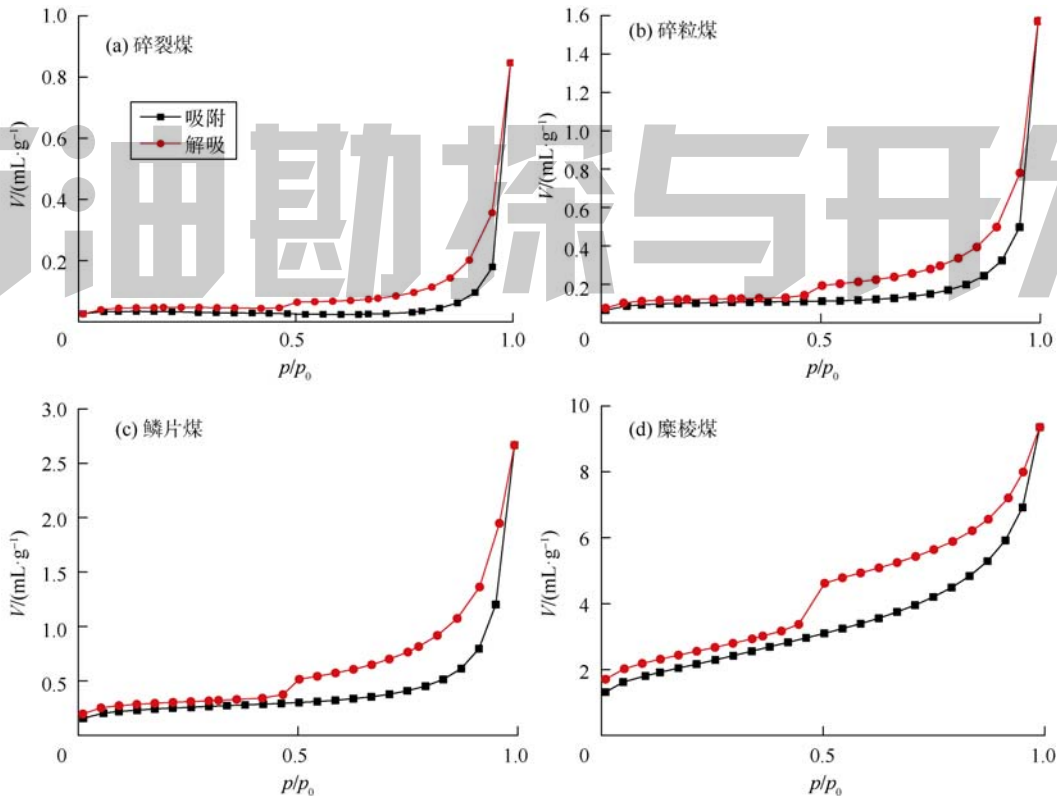


图 4 构造煤低温氮吸附回线图 ( $V$ —孔隙;  $p/p_0$ —相对压力)

### 3.2 微米 CT 检测与煤中孔径大于 $1\ \mu\text{m}$ 孔隙分布特征

微米 CT 技术可以直观检测到构造煤中孔径大于  $1\ \mu\text{m}$  的渗流孔隙,通过软件可以得出其孔隙分布特征(见表 1)。结果表明,不同类型构造煤孔径均以  $1\sim 5\ \mu\text{m}$  为主,原生结构煤和不同类型变形煤  $1\sim 5\ \mu\text{m}$  孔隙数量所占比例为  $73.01\%\sim 89.57\%$ 。随构造变形程度增强,碎粒孔、微裂隙在碎粒煤中大量出现,导致  $5\sim 10\ \mu\text{m}$  和大于  $10\ \mu\text{m}$  孔隙数量显著升高,分别从原生结构煤的  $14.58\%$  和  $0.27\%$  提高到  $25.54\%$  和  $1.45\%$ 。脆韧性变形的鳞片煤和韧性变形糜棱煤则因强烈的剪切变形导致大量微观孔发育,大于  $5\ \mu\text{m}$  孔隙减少,  $1\sim 5\ \mu\text{m}$  孔隙大量增加,糜棱煤中  $1\sim 5\ \mu\text{m}$  孔隙比例可高达  $89.57\%$ ,  $5\sim 10\ \mu\text{m}$  和大于  $10\ \mu\text{m}$  孔隙比例分别减少到  $9.91\%$  和  $0.39\%$ (见表 1)。

### 3.3 压汞实验与孔隙连通性

压汞实验可以反映孔径大于  $100\ \text{nm}$  构造煤的孔隙特征,实验结果表明:随着构造变形程度的增大,最大进汞饱和度逐渐增大,退汞效率逐渐降低(见表 1);碎裂煤、碎粒煤以大、中孔为主,渗流孔占主导地位;鳞片煤、糜棱煤以微孔为主,吸附孔占主导地位。

构造煤压汞曲线分析表明:碎裂煤进汞曲线与退汞曲线近平行,进汞量最小,进汞饱和度平均为  $32.3\%$ ,退汞效率最高,平均为  $88.9\%$ ,表明渗流孔含量较少,孔隙连通性差。碎粒煤进汞曲线与退汞曲线呈分离状,进汞量较小,进汞饱和度平均为  $38.6\%$ ,退汞效率较高,平均为  $68.8\%$ ,吸附孔较发育,而渗流孔含量相对碎裂煤增加,孔隙间连通性增强。鳞片煤进汞曲线与退汞曲线分离度加大,进汞量较大,进汞饱和度平均为

45.1%，退汞效率较高，平均为67.3%，吸附孔占据主导地位，且常产生“瓶颈”现象，这种孔隙结构中渗流孔内部连通性较好，但渗流孔与吸附孔之间的连通性差。糜棱煤压汞滞后环最宽，进汞量最大，进汞饱和度平均为65.8%，退汞效率最低，平均为50.7%，孔间连通性较好（见图5）。

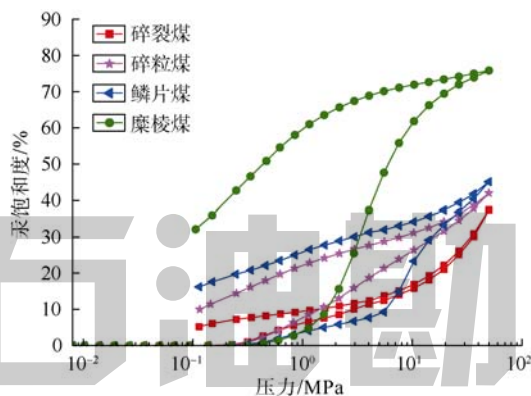


图5 构造煤压汞曲线组合图

#### 4 构造煤甲烷吸附特征

从煤的饱和甲烷吸附实验可以看出，单位质量原生结构煤甲烷吸附量仅为糜棱煤、碎裂煤和鳞片煤的1/1.96、1/2.22和1/2.50，从原生结构到脆性变形和脆韧性变形煤，随构造变形强度增大，煤对甲烷的吸附能力呈逐渐增强趋势（见表2）。而韧性变形糜棱煤甲烷吸附量较脆韧性变形鳞片煤和脆性变形碎裂煤低，这主要是受实验条件所限，在对块状煤的甲烷吸附实验中，甲烷仅能吸附在块状煤体表面，很难进入内部微孔隙中，这对糜棱煤的影响较碎裂煤和鳞片煤大，导致糜棱煤吸附量较碎裂煤和鳞片煤小。但是，糜棱煤颗粒表面粗糙，煤颗粒表面积大，因此其吸附量仍高于原生结构煤。氮气吸附实验表明，糜棱煤吸附量最高（见图4），这与其大量发育微孔有关。

表2 甲烷气体吸附实验结果

样号	煤样	密度/ ( $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ )	质量/ g	吸附量/ mL	单位质量吸附量/ ( $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ )
SSP-36	原生结构煤	1.429 0	493.0	2 074.90	4.21
XYK3-29	碎裂煤	1.398 6	482.5	4 599.74	9.53
SSP3-17	鳞片煤	1.414 5	488.0	5 187.25	10.63
XS11-8	糜棱煤	1.314 8	453.6	3 674.01	8.10

#### 5 结论

通过研究脆性变形的碎裂煤、碎粒煤，脆韧性变形的鳞片煤和韧性变形的糜棱煤变形、孔隙结构和吸附特征，取得以下认识：碎裂煤、碎粒煤原始层理可辨，

由剪切作用形成的煤颗粒较粗（1~3 cm），脆韧性变形的鳞片煤和韧性变形糜棱煤煤岩原始层理和结构均被破坏，由剪切、层间滑动、揉皱形成的煤颗粒较细，构造变形造成的定向排列明显；随着构造煤变形程度的增大，孔容、孔隙比表面积和微孔的比例从碎裂煤、碎粒煤到鳞片煤、糜棱煤逐渐增大，孔隙连通性增强，煤对甲烷的吸附能力呈逐渐增强的趋势。构造煤煤岩结构、孔隙-裂隙系统共同制约了煤对甲烷的吸附能力。

#### 参考文献：

- [1] 琚宜文, 姜波, 王桂梁, 等. 构造煤结构及储层物性[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005.  
Ju Yiwen, Jiang Bo, Wang Guiliang, et al. Tectonic coals: Structure and physical properties of reservoirs[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2005.
- [2] Stach E, Murchison D. Stach's textbook of coal petrology[M]. Berlin: Borntraeger, 1975.
- [3] 杨起, 韩德馨. 中国煤田地质学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1979.  
Yang Qi, Han Dexin. Geology of China coalfield[M]. Beijing: Press of Coal Industry, 1979.
- [4] 王桂梁, 朱炎铭. 论煤层流变[J]. 中国矿业学院学报, 1988, 17(3): 16-25.  
Wang Guiliang, Zhu Yanming. Study on the rheology of coal bed[J]. Journal of China Mining Institute, 1988, 17(3): 16-25.
- [5] 陈善庆. 鄂、湘、粤、桂二叠纪构造煤特征及其成因分析[J]. 煤炭学报, 1989, 14(4): 1-9.  
Chen Shanqing. Characteristics of tectonically deformed Permian coal in Hubei, Hu'nan, Guangdong and Guangxi provinces and analysis of its origin[J]. Journal of China Coal Society, 1989, 14(4): 1-9.
- [6] 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.  
Ju Yiwen, Jiang Bo, Hou Quanlin, et al. The new structure-genetic classification system in tectonically deformed coals and its geological significance[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(5): 513-517.
- [7] 袁崇孚. 构造煤和煤与瓦斯突出[J]. 煤炭科学技术, 1986, 14(1): 32-33.  
Yuan Chongfu. Tectonically deformed coal and gas burst[J]. Coal Science and Technology, 1986, 14(1): 32-33.
- [8] Liu Dameng, Yao Yanbin, Tang Dazhen, et al. Coal reservoir characteristics and coalbed methane resource assessment in Huainan and Huaibei coalfields, Southern North China[J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 79(3): 97-112.
- [9] 杨陆武, 孙茂远. 中国煤层气藏的特殊性及其开发技术要求[J]. 天然气工业, 2001, 21(6): 18-19.  
Yang Luwu, Sun Maoyuan. Peculiarities of China CBM reservoirs and their dictation on CBM production technology[J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(6): 18-19.
- [10] 刘池洋, 赵重远, 杨兴科. 活动性强、深部作用活跃: 中国沉积盆地的两个重要特点[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(1): 1-6, 23.  
Liu Chiyang, Zhao Zhongyuan, Yang Xingke. Strong activity and active deep action: Two important features of Chinese sedimentary basins[J]. Oil and Gas Geology, 2000, 21(1): 1-6, 23.
- [11] 赵文智, 胡素云, 王红军, 等. 中国中低丰度油气资源大型化成

- 藏与分布[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 1-13.
- Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Wang Hongjun, et al. Large-scale accumulation and distribution of medium-low abundance hydrocarbon resources in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 1-13.
- [12] 曹代勇, 王佟, 琚宜文, 等. 中国煤田构造研究现状与展望[J]. 中国煤炭地质, 2008, 20(10): 1-6.
- Cao Daiyong, Wang Tong, Ju Yiwen, et al. Current research status and prospect of coalfield structural study in China[J]. Coal Geology of China, 2008, 20(10): 1-6.
- [13] 侯泉林, 李会军, 范俊佳, 等. 构造煤结构与煤层气赋存研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(10): 1487-1495.
- Hou Quanlin, Li Huijun, Fan Junjia, et al. Structure and coalbed methane occurrence in tectonically deformed coals[J]. Science in China: Earth Science, 2012, 55(11): 1755-1763.
- [14] 程庆迎, 黄炳香, 李增华. 煤岩体孔隙裂隙实验方法研究进展[J]. 中国矿业, 2012, 21(1): 115-118.
- Cheng Qingying, Huang Bingxiang, Li Zenghua. The research progress in coal or rock pore and fractures[J]. China Mining Magazine, 2012, 21(1): 115-118.
- [15] 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 & Geosciences, 2009, 35(6): 1159-1166.
- [16] Brunauer S, Emmett P H, Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers[J]. Journal of American Chemical Society, 1938, 60(2): 309-319.
- [17] Barrett E P, Joyner L G, Halenda P P. The determination of pore volume and area distributions in porous substances I: Computations from nitrogen isotherms[J]. Journal of American Chemical Society, 1951, 73(1): 373-380.
- [18] Suuberg E M, Deevi S C, Yun Y. Elastic behavior of coals studied by mercury porosimetry[J]. Fuel, 1995, 74: 1522-1530.
- [19] Friesen W J, Oguniola O I. Mercury porosimetry of upgraded western Canadian coals[J]. Fuel, 1995, 74: 604-609.
- [20] Li Yonghua, Lu Gaoqing, Rudolph V. Compressibility and fractal dimension of fine coal particles in relation to pore structure characterisation using mercury porosimetry[J]. Particle and Particle System Characterization, 1999, 16(1): 25-31.
- [21] 姚艳斌, 刘大猛, 黄文辉, 等. 两淮煤田煤储层孔-裂隙系统与煤层气产出性能研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(2): 163-168.
- Yao Yanbin, Liu Dameng, Huang Wenhui, et al. Research on the pore-fractures system properties of coalbed methane reservoirs and recovery in Huainan and Huaibei coal-fields[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(2): 163-168.
- [22] 赵志根, 唐修义. 低温液氮吸附法测试煤中微孔隙及其意义[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29(5): 28-30.
- Zhao Zhigen, Tang Xiuyi. Study of micropore in coal by low-temperature nitrogen adsorption method and its significance[J]. Coal Geology & Exploration, 2001, 29(5): 28-30.
- [23] 吴俊. 煤微孔隙特征及其与油气运移集集关系的研究[J]. 中国科学: B 辑, 1993, 23(1): 77-84.
- Wu Jun. Characteristics of micro pores in coal and its relation to migration and accumulation of oil and gas[J]. Science in China: Series B, 1993, 23(1): 77-84.
- [24] 周龙刚, 吴财芳. 黔西比德-三塘盆地主采煤层孔隙特征[J]. 煤炭学报, 2012, 37(11): 1878-1884.
- Zhou Longgang, Wu Caifang. Pore characteristics of the main coal seams in Bide-Santang Basin in Western Guizhou province[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(11): 1878-1884.
- [25] 降文萍, 宋孝忠, 钟玲文. 基于低温液氮实验的不同煤体结构煤的孔隙特征及其对瓦斯突出影响[J]. 煤炭学报, 2011, 36(4): 609-614.
- Jiang Wenping, Song Xiaozhong, Zhong Lingwen. Research on the pore properties of different coal body structure coals and the effects on gas outburst based on the low temperature nitrogen adsorption method[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 609-614.
- [26] 钱凯, 赵庆波. 煤层甲烷气勘探开发理论与实验测试技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- Qian Kai, Zhao Qingbo. Exploration and development theory and experiment techniques of coalbed methane[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [27] 吴俊. 突出煤的显微结构及表面特征研究[J]. 煤炭学报, 1987, 12(2): 40-46.
- Wu Jun. Study on micro structure and surface features of coal prone to outburst[J]. Journal of China Coal Society, 1987, 12(2): 40-46.
- [28] 李康, 钟大赉. 煤岩的显微构造特征及其与瓦斯突出的关系: 以南桐鱼田堡煤矿为例[J]. 地质学报, 1992, 66(2): 148-157.
- Li Kang, Zhong Dalai. Microstructures of coal and their relation with gas outbursts: A case study of the Yutianbao coal mine, Nantong[J]. Acta Geologica Sinica, 1992, 66(2): 148-157.
- [29] Gamson P D, Beamish B, Johnson D P. Coal microstructure and microporosity and their effects on natural gas recovery[J]. Fuel, 1993, 72(1): 87-99.
- [30] 张井, 于冰, 聂继红, 等. 富烃煤的孔隙结构分析[J]. 中国矿业大学学报, 1993, 22(A12): 71-77.
- Zhang Jing, Yu Bing, Nie Jihong, et al. Experimental analysis of pore structure of hydrocarbon-rich coal[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1993, 22(A12): 71-77.
- [31] Li Huoyin, Ogawa Y. Pore structure of sheared coals and related coalbed methane[J]. Environmental Geology, 2001, 40(11): 1455-1461.
- [32] Li Huoyin, Ogawa Y, Shimada S. Mechanism of methane flow through sheared coals and its role on methane recovery[J]. Fuel, 2003, 82(10): 1271-1279.
- [33] 邹才能, 张国生, 杨智, 等. 非常规油气概念、特征、潜力及技术: 兼论非常规油气地质学[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(4): 385-399, 454.
- Zou Caineng, Zhang Guosheng, Yang Zhi, et al. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: On unconventional petroleum geology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4): 385-399, 454.
- [34] 宋叙, 王思波, 曹涛涛, 等. 扬子地台寒武系泥页岩甲烷吸附特征[J]. 地质学报, 2013, 87(7): 1041-1048.
- Song Xu, Wang Sibao, Cao Taotao, et al. The methane adsorption features of Cambrian shales in the Yangtze platform[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(7): 1041-1048.
- [35] De Boer J H. The shape of capillaries[M]//Everett D H, Ottewill R H. The structure and properties of porous materials[M]. London: Butterworths, 1958: 68-94.

第一作者简介: 要惠芳(1959-), 女, 山西汾西人, 太原理工大学地球科学系教授, 从事资源勘查教学与煤层气地质研究工作。地址: 山西省太原市迎泽西大街新矿院路 18 号, 太原理工大学地球科学系, 邮政编码: 030024。E-mail: yhf5908@163.com

收稿日期: 2013-12-26 修回日期: 2014-06-13

(编辑 黄昌武 绘图 刘方方)