

# 黔西滇东地区不同煤阶煤储层物性特征分析

郭乐乐 汤达祯 许 浩 李 松 高丽军

(中国地质大学(北京)煤层气开发利用国家工程研究中心 北京 100083)

**摘 要:** 为了分析煤阶对黔西滇东地区煤储层孔隙性和渗透性的控制作用,对不同煤阶煤样的孔-裂隙结构、吸附能力和孔渗特征进行了探讨。结果表明:镜质组反射率小于2.5%时,随着煤阶升高,煤岩压实程度不断增强,煤中吸附孔含量逐渐增多,BET比表面积和BJH总孔体积逐渐增大,致使煤岩吸附能力逐渐增强,而渗流孔含量相对减少,渗流孔隙结构变差,渗透率随煤阶升高而减小;镜质组反射率大于2.5%时,随着煤阶升高,煤中吸附孔含量减少,BET比表面积和BJH总孔体积呈下降趋势,吸附能力减弱,而煤岩后期演化过程中产生了再生孔隙,致使煤岩渗流孔含量增加、渗流孔隙结构变好,总孔隙度升高,渗流能力增强。

**关键词:** 煤阶;煤储层物性;裂隙结构;吸附能力;孔渗特征

**中图分类号:** TE132.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2014)08-0099-05

## Analysis on Physical Property Features of Different Coal Rank Coal Reservoirs in Western Guizhou and Eastern Yunnan Area

GUO Le-le, TANG Da-zhen, XU Hao, LI Song, Gao Li-jun

(National Engineering Research Center of Coalbed Methane Development and Utilization, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to analyze the control role of the coal rank to the physical properties of coal reservoir taking the samples from western Guizhou and eastern Yunnan area as examples, many different experiment methods were applied to discuss the pore and crack structure, adsorption and desorption capacity and pore permeability features of the different coal rank coal samples. The results showed that when the reflection rate of vitrinite was less than 2.5%, with the coal rank improved, the compaction degree of the coal and rock would be continuously increased, the gas content of the adsorption pores in seam would be steadily increased, the BET specific surface area and BJH total pore volume would be steadily increased. Thus the adsorption capacity of the coal and rock would be steadily enhanced, the content of the seepage pores would be relatively reduced, the crack structure of the seepage pore would be getting poor, the seepage capacity of the coal and rock would be reduced and the permeability would be reduced with the coal rank increased. When the reflection rate of vitrinite was higher than 2.5%, with the coal rank improved, the gas content of the adsorption pores in seam would be reduced, the BET specific surface area and BJH total pore volume would be in a reducing tendency and the adsorption capacity would be reduced. However, regenerated cracks occurred in the late evolution process of the coal and rock would make the content of the seepage pores in the coal and rock increased, the structure would be better, the total cracks of the pore would be increased and the seepage capacity would be improved.

**Key words:** coal rank; physical property of coal reservoirs; fracture structure; adsorption capacity; porosity and permeability characteristic

## 0 引 言

黔西滇东地区属晚二叠世上扬子沉积盆地的一部分,面积 $2.58 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,是我国南方潜在的煤层气生产基地。该区含煤地层为长兴组和龙潭组,主

要可采煤层位于长兴组下部、龙潭组上段的中下部和龙潭组的中部,埋深在200~1 500 m的煤层气资源量达 $2.9 \times 10^{12} \text{ m}^3$ <sup>[1-2]</sup>。煤层气勘探实践证明:不同煤阶的煤层气藏在煤层气成因、煤储层物性及成藏过程等方面存在着显著差异<sup>[3-6]</sup>,特别是煤储

收稿日期:2014-03-01;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2014.08.025

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41272175);国家科技重大专项资助项目(2008ZX05034)

作者简介:郭乐乐(1988—),男,山西临汾人,硕士研究生。Tel:010-82322011, E-mail: zgdxgll@163.com

引用格式:郭乐乐,汤达祯,许浩,等.黔西滇东地区不同煤阶煤储层物性特征分析[J].煤炭科学技术,2014,42(8):99-103.

GUO Le-le, TANG Da-zhen, XU Hao, et al. Analysis on Physical Property Features of Different Coal Rank Coal Reservoirs in Western Guizhou and Eastern Yunnan Area[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(8): 99-103.

层物性的差异影响了煤层气的聚集成藏、解吸-渗流-产出的全过程<sup>[7]</sup>。该区煤变质作用主要受沉积埋藏、岩浆作用和构造运动等多种因素控制,区域上煤阶差别很大<sup>[8]</sup>,镜质组反射率  $R_o$  为 0.68% ~ 3.31%。顾成亮等<sup>[9]</sup>认为煤阶和煤岩类型是影响该区割理分布的主要原因,中变质光亮型和半亮型煤层中割理最发育,具有较高的渗透率。蔡佳丽等<sup>[10]</sup>发现煤阶是影响孔隙的主控因素,孔隙度随煤阶升高有增大趋势。陈贞龙等<sup>[11]</sup>认为,由于区域性构造和变质程度的影响,该区煤储层孔渗发育呈明显的区域性差异,孔隙度受区域变质影响显著。由此可见煤阶对煤储层物性有重要的控制作用,但系统分析煤阶对煤储层物性控制作用的研究还较为少见。笔者以煤储层物性为出发点,详细分析煤阶对煤储

层物性的控制作用,查清不同煤阶煤储层物性特征,以期为该区域煤层气勘探、开发和选区提供理论参考。

## 1 样品采集与测试

黔西滇东地区共划分为 5 个矿区。区域内煤变质作用很不均匀,整体上具有 NE-SW 向高,中间低的特点<sup>[8]</sup>。此次研究共选取 32 个煤样,其中盘关矿区 7 个(编号 QD-1、2、3、4、6、9、11),恩洪矿区 5 个(编号 QD-5、8、10、13、14),格目底矿区 6 个(编号 QD-7、15、17、18、19、23),老厂矿区 6 个(编号 QD-12、16、21、22、25、26),织纳矿区 8 个(编号 QD-20、24、27、28、29、30、31、32)。对 32 个采集样品进行了镜质组反射率  $R_o$  测定、压汞孔隙测试、低温氮比表面积测试、甲烷等温吸附测试及孔渗性测试(表 1)。

表 1 黔西滇东地区煤样测试数据

样品编号	$R_o$ /%	孔隙度 /%	渗透率 / ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	排驱压 力 /MPa	进汞饱和 度 /%	退汞效 率 /%	比表面积 / ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	总孔体积 / ( $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ )	兰氏体积 / ( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )	兰氏压 力 /MPa
QD-1	0.68	—	0.520	—	29.02	70.50	—	—	9.59	1.41
QD-2	0.71	—	0.200	—	27.97	58.92	0.464 0	0.001 0	10.52	1.34
QD-3	0.81	6.9	14.700	1.97	43.28	26.57	0.368 0	0.001 3	—	—
QD-4	0.87	7.7	5.860	—	—	—	0.167 5	0.000 9	21.38	3.16
QD-5	0.88	7.5	3.080	0.99	48.47	38.68	0.458 0	0.001 7	—	—
QD-6	0.89	4.3	0.727	0.08	36.01	39.32	0.264 0	0.000 9	—	—
QD-7	1.16	—	0.510	0.05	55.59	36.25	—	—	—	—
QD-8	1.22	3.1	0.102	0.09	35.38	45.42	0.304 0	0.001 0	—	—
QD-9	1.23	7.9	0.319	1.03	44.25	43.46	0.567 0	0.002 3	—	—
QD-10	1.26	7.0	0.037	0.99	33.13	50.05	0.444 0	0.001 8	—	—
QD-11	1.27	7.0	3.490	0.13	40.90	31.05	0.331 0	0.001 2	—	—
QD-12	1.37	10.1	6.100	0.26	31.72	31.75	—	—	17.56	1.47
QD-13	1.38	5.2	0.053	—	30.89	42.38	0.530 0	0.002 4	25.14	4.14
QD-14	1.39	5.9	0.674	0.08	30.55	37.09	0.331 0	0.001 2	13.96	1.60
QD-15	1.41	5.7	2.220	0.25	21.04	36.26	0.253 0	0.000 9	16.97	1.29
QD-16	1.48	8.1	0.610	0.28	42.12	39.46	1.001 0	0.004 0	—	—
QD-17	1.52	4.9	0.784	0.05	27.73	32.35	0.303 0	0.001 1	—	—
QD-18	1.54	8.1	0.703	1.97	49.84	25.30	0.681 0	0.002 5	—	—
QD-19	1.55	9.7	1.370	1.65	42.65	28.51	0.492 0	0.001 2	—	—
QD-20	1.64	4.6	0.118	0.07	32.78	31.24	—	—	—	—
QD-21	1.65	7.3	0.090	—	32.49	50.38	0.912 0	0.003 6	—	—
QD-22	1.75	—	2.710	0.64	54.35	25.13	0.973 0	0.005 0	10.36	1.25
QD-23	1.89	6.0	0.270	0.76	16.32	39.95	—	—	15.34	1.43
QD-24	2.03	1.8	0.017	4.66	29.21	75.73	—	—	—	—
QD-25	2.04	5.5	0.047	—	38.38	20.92	1.157 0	0.003 6	—	—
QD-26	2.32	6.6	1.290	6.31	17.16	39.04	0.735 0	0.003 4	19.92	1.19
QD-27	2.51	1.8	0.017	—	67.62	34.59	1.310 0	0.005 2	—	—
QD-28	2.54	3.1	12.500	—	38.56	38.33	1.452 0	0.005 5	—	—
QD-29	2.64	2.3	0.013	—	30.57	80.95	1.444 0	0.005 1	35.73	2.74
QD-30	3.03	9.5	5.213	2.78	21.21	35.93	1.300 0	0.004 3	28.36	2.37
QD-31	3.14	6.6	3.560	6.31	17.77	42.04	1.210 0	0.004 0	31.61	3.53
QD-32	3.31	4.7	0.530	3.92	34.77	41.16	1.058 0	0.003 8	27.17	2.08

## 2 试验结果与讨论

黔西滇东地区煤的 $R_o$ 为0.68%~3.31%,笔者采用煤阶分类方法如下:①0.5% $<R_o\leq 1.5\%$ 为低阶烟煤,包括长焰煤、气煤、肥煤、部分焦煤;②1.5% $<R_o\leq 2.5\%$ 为高阶烟煤,包括部分焦煤、瘦煤、贫煤;③ $R_o>2.5\%$ 为无烟煤。

### 2.1 不同煤阶煤的孔隙结构

采用Ходот的孔隙结构分类方案,将煤中孔隙划分为大孔( $r>1000\text{ nm}$ )、中孔( $100\text{ nm}\leq r<1000\text{ nm}$ )、小孔( $10\text{ nm}\leq r<100\text{ nm}$ )和微孔( $r\leq 10\text{ nm}$ )。其中 $r$ 为孔径,微孔构成煤的主要吸附空间,小孔主要为煤层毛细凝结和扩散区域,中孔体现为煤层气缓慢渗流区域,大孔为煤层气强烈层流区域。将孔径小于100 nm的孔隙称为吸附孔隙,孔径大于100 nm的孔隙称为渗流孔隙。

#### 2.1.1 吸附孔隙结构

随着煤阶的升高,煤的BET比表面积和BJH总孔体积呈低—高—低的变化趋势,极大值均出现在 $R_o=2.5\%$ 附近(图1)。 $R_o<2.5\%$ 时,随着煤阶的升高,煤岩压实程度不断增强,部分渗流孔转变成吸附孔,同时生烃作用产生大量气孔,使煤中吸附孔含量逐渐增多,BET比表面积和BJH总孔体积逐渐增大; $R_o>2.5\%$ 时,由于煤的生烃能力显著下降,新气孔的生成微弱,而高温高压下进一步变质作用引起的大规模缩聚作用导致吸附孔减少<sup>[12]</sup>,BET比表面积和BJH总孔体积呈下降趋势。

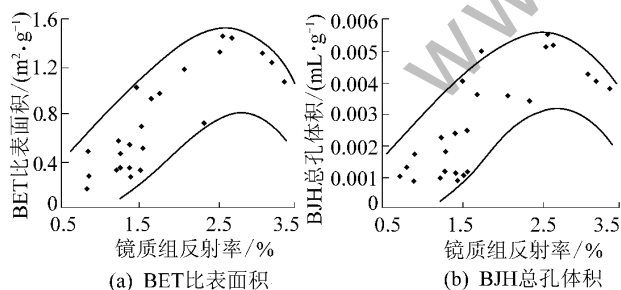


图1 BET比表面积、BJH总孔体积与煤阶的关系

煤的吸/脱附曲线特征能够反映煤的吸附孔隙形态,据此可确定不同类型的吸附孔隙模型<sup>[13]</sup>。笔者将黔西滇东地区煤岩吸附孔隙划分为A、B、C三种类型(图2a),其中类型A以样品QD-25为例,BET比表面积和BJH总孔体积最大,且最大吸附量明显高于其他2种类型,吸/脱附曲线存在明显的吸附回线,吸附孔隙多以两端开口的形式存在;类型B以QD-13为例,BET比表面积、BJH总孔体积和最

大吸附量均比类型A小,有吸附回线,但没A型明显,吸附孔隙也多以两端开口的形式存在;类型C以QD-7为例,BET比表面积和BJH总孔体积最小,导致最大吸附量很小,吸附回线很不明显,吸附孔隙多以一端封闭的形式存在。

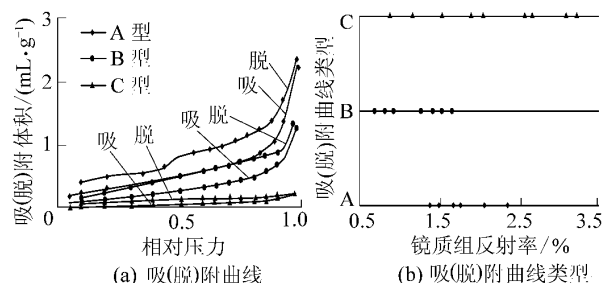


图2 液氮吸/脱附曲线分类及其类型与煤阶的关系

3种吸附孔隙类型中,A型最有利于煤层气聚集、解吸和扩散,B、C型依次变差。A型分布在1.3% $<R_o<2.5\%$ 的煤储层中,B型分布在 $R_o<1.7\%$ 的煤储层中;C型在各个变质阶段均有分布(图2b)。

#### 2.1.2 渗流孔隙结构

排驱压力可反映渗透性的好坏,渗透性好的岩石排驱压力均比较低。黔西滇东地区 $R_o<2\%$ 的煤储层,排驱压力均小于2 MPa; $R_o>2\%$ 的煤储层,排驱压力均大于2 MPa(图3)。 $R_o<2\%$ 时,煤储层压实程度低,渗流孔隙及裂隙比较发育,渗透性较好(排驱压力 $<2\text{ MPa}$ )。而 $R_o>2\%$ 时,煤储层压实程度高,渗流孔隙和裂隙受压闭合,渗透性较差(排驱压力 $>2\text{ MPa}$ )。

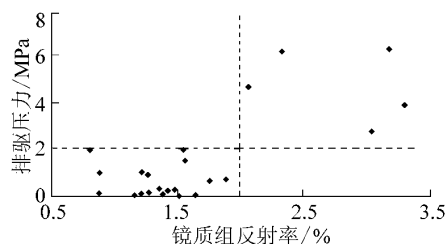


图3 排驱压力随煤阶升高的分布

压汞曲线可以区分不同的孔隙结构特征<sup>[14-15]</sup>,划分不同的储层类型,在常规油气领域有了较为成熟的应用。笔者通过压汞曲线分析煤样的渗流孔隙结构,总结出3种典型的压汞孔隙类型(图4a)。

1) 类型A:以QD-5为代表,孔隙结构好,各类孔隙连续发育,排驱压力较小,孔喉直径平均值大,进汞饱和度在40%以上。压汞曲线呈三段式:压力约1 MPa以下为一段较缓的斜线,表明煤中的大孔和微裂隙很发育,约占总进汞量的57%;压力1~10

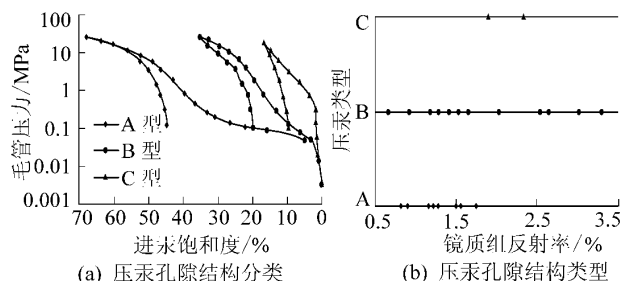


图 4 压汞孔隙结构分类及其与煤阶的关系

MPa 为一段较陡的斜线,约占总进汞量的 28%,说明中孔也较为发育;压力大于 10 MPa 后进汞较少,约占总进汞量的 15%,表明微孔和小孔相对发育较少,退汞效率为 25% ~ 43%,孔隙间连通性较好。该类孔隙最有利于煤层气的产出。

2) 类型 B: 以 QD-8 为代表,孔隙结构中等,排驱压力较小,孔喉直径平均值较大,进汞饱和度为 20% ~ 40%,压汞曲线呈两段式或不太典型的三段式,整体进汞较慢,退汞效率较高,一般为 30% ~ 50%。微小孔最发育,中孔次之,大孔最差,孔隙之间连通性较好。该类孔隙较有利于煤层气的产出。

3) 类型 C: 以 QD-23 为代表,孔隙结构差,排驱压力较大,孔喉直径平均值较小,进汞饱和度很低(10% ~ 20%)。压汞曲线呈两段式,整体进汞缓慢,中孔发育,微小孔次之,大孔几乎不发育,该类孔隙对煤层气的产出不利。

综上所述,  $R_o = 0.5\% \sim 1.5\%$  的煤储层以 A、B 型渗流孔为主,渗流孔结构最好;  $R_o = 1.5\% \sim 2.5\%$  的煤储层以 B、C 型渗流孔为主,渗流孔结构最差;  $R_o > 2.5\%$  的煤储层以 B 型渗流孔为主,渗流孔结构较好(图 4b)。

### 2.1.3 微裂隙

在研究该区煤的微裂隙时,按观察结果将其分为 4 种类型:  $A_1$  型,宽  $W \geq 5 \mu\text{m}$  且长  $L \geq 10 \text{ mm}$ ,为较大微裂隙,连续性好,延伸长;  $A_2$  型,  $W \geq 5 \mu\text{m}$  且  $L < 10 \text{ mm}$ ,为中等微裂隙,多呈树枝状或羽状,宽度较大,多为树枝状裂隙的枝干;  $A_3$  型,  $W < 5 \mu\text{m}$  且  $L \geq 300 \mu\text{m}$ ,为中等微裂隙,也多呈树枝状或羽状出现,较细而延伸长,多为树枝状裂隙的树杈或树枝;  $A_4$  型,  $W < 5 \mu\text{m}$  且  $L < 300 \mu\text{m}$ ,为较小微裂隙,多呈树枝状与其他 3 类微裂隙沟通,其方向性和连通性劣于其他类型。

黔西滇东地区微裂隙以 D 型为主, C 型和 B 型次之, A 型极少(表 2)。煤样微裂隙密度为 30 ~ 60 条/( $9 \text{ cm}^2$ ),个别高达 72 条/( $9 \text{ cm}^2$ )。随煤阶升

高,微裂隙密度呈小—大—小变化趋势。其中:  $R_o$  约为 1.3% 时达到最大值;  $R_o < 1.3\%$  时,烃类气体(甲烷)的大量生成和煤变质过程中煤分子结构的变化,煤的收缩内应力及孔隙流体压力不断增大,因而割理不断增多;而  $R_o > 1.3\%$  时,煤的生烃量逐渐减少,收缩内应力下降,同时气体通过已有割理逸散,不足以产生高孔隙流体压力,致使新割理难以形成。

表 2 黔西滇东地区微裂隙测试结果

样品编号	$R_o / \%$	微裂隙密度/[条·( $9 \text{ cm}^{-2}$ )]				
		$A_1$ 型	$A_2$ 型	$A_3$ 型	$A_4$ 型	总计
QD-5	0.88	1	2	7	24	34
QD-7	1.16	0	4	11	15	30
QD-8	1.22	0	6	16	19	41
QD-10	1.26	1	6	26	31	64
QD-14	1.39	0	1	31	40	72
QD-16	1.48	3	1	19	35	58
QD-18	1.54	0	1	19	34	54
QD-20	1.64	0	2	10	29	41
QD-24	2.03	0	2	5	39	46
QD-28	2.54	0	4	11	18	33
QD-29	2.64	0	1	4	11	16

### 2.2 煤储层吸附能力和孔渗特征

1) 煤储层吸附能力。通常用等温吸附试验的兰氏体积和兰氏压力评价煤储层的吸附性能<sup>[3]</sup>。兰氏体积可代表煤样的最大吸附量,其先随煤阶升高而增大,  $R_o = 2.5\%$  时达到极大值,随后开始减小(图 5a),表明煤的吸附能力随煤阶的升高有先增强、后减弱的变化趋势。兰氏压力是吸附相当于最大吸附量 50% 的气体时所对应的压力,其大小反映了煤层气解吸的难易程度。兰氏压力大于 2 MPa 的煤储层  $R_o$  均大于 2.5% (图 5b),表明高煤阶煤储层的解吸能力优于中低煤阶煤储层。

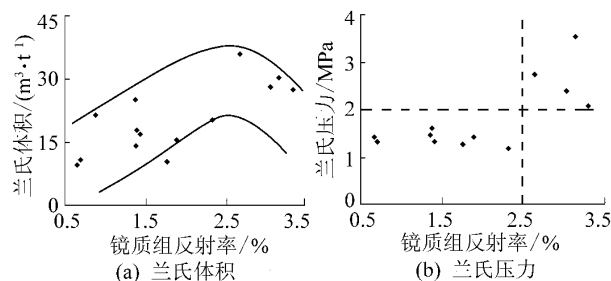


图 5 兰氏体积、兰氏压力随煤阶升高的变化规律

织纳矿区煤样兰氏体积为 27.17 ~ 35.73  $\text{m}^3/\text{t}$ , 平均 30.72  $\text{m}^3/\text{t}$ , 兰氏压力 2.08 ~ 3.53 MPa, 平均 2.68 MPa。织纳矿区的煤储层具有最强吸附能力,

恩洪、格目底、老厂、盘关等地区的煤储层吸附能力依次减弱。

2) 煤储层孔渗特征。黔西滇东地区煤储层的孔隙度随煤阶升高呈大一小的变化规律,  $R_0 = 2.5\%$  时达到极小值(图 6a)。较低煤阶时, 煤储层压实、收缩不够强烈, 结构疏松, 水分含量高, 孔隙度较大, 渗流能力较强; 随着煤阶的升高, 上覆岩层的压实作用占主导地位, 煤储层压实、收缩变强烈, 水分含量降低, 部分孔隙闭合, 造成孔隙度减小, 渗流能力减弱。在后期演化过程中( $R_0 > 2.5\%$ ), 受岩浆作用影响<sup>[8]</sup>, 煤层再次生烃, 产生气孔, 使其孔隙度增大。

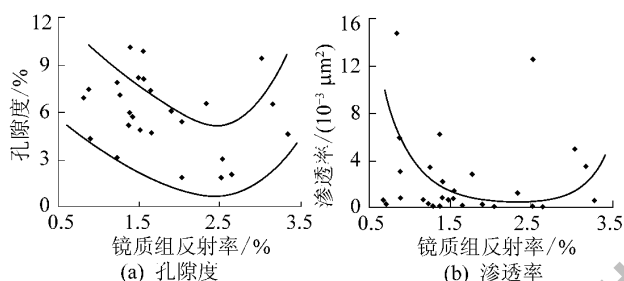


图 6 孔隙度、渗透率随煤阶升高的变化规律

渗透率是反映煤层中流体渗透性能的重要参数, 它决定着煤层的运移和产出。黔西滇东地区煤储层的渗透率介于  $0.2 \times 10^{-3} \sim 6.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 平均  $2.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。试验测得的大部分样品渗透率小于  $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 部分样品的渗透率大于  $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 主要出现在中低煤阶区和高煤阶区(图 6b)。中低煤阶( $R_0 = 0.5\% \sim 1.5\%$ ) 煤储层由于原生大中孔隙发育, 渗透率较高; 高煤阶( $R_0 > 2.5\%$ ) 煤储层受岩浆作用影响, 孔渗条件得到改善。

盘关地区煤的变质程度最低( $R_0 = 0.68\% \sim 1.27\%$ , 平均  $0.92\%$ ), 其煤储层具有最好的渗透性, 平均渗透率为  $3.69 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; 织纳矿区煤的变质程度虽然高( $R_0 = 1.64\% \sim 3.31\%$ , 平均  $2.61\%$ ), 但煤储层后期受岩浆作用改造, 渗透性也较好, 平均渗透率为  $2.75 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。老厂、格目底、恩洪等地区的煤样平均渗透率依次降低。

### 3 结 论

1) 黔西滇东地区煤的吸附孔结构随煤阶升高呈先变好、后变差的规律, 致使煤储层吸附能力随煤阶升高有类似变化趋势。 $R_0 < 2.5\%$  时, 煤的 BET 比表面积和 BJH 总孔体积随煤阶升高而增大, 表明煤中吸附孔含量增加, 导致煤储层吸附能力随煤阶

升高而增强;  $R_0 > 2.5\%$  时, 煤的 BET 比表面积和 BJH 总孔体积随煤阶升高而减小, 吸附孔结构变差, 造成煤储层吸附能力随煤阶升高而减弱。

2) 由于煤中渗流孔结构的演化和后期改造, 致使煤储层的渗流能力随煤阶升高呈现出先变差、后变好的变化趋势。 $R_0 = 0.5\% \sim 1.5\%$  的煤储层排驱压力低, 渗流孔隙结构好, 渗流能力强。随着煤层埋深增大,  $R_0 = 1.5\% \sim 2.5\%$  的煤储层渗流孔隙闭合, 孔隙度变小, 渗流能力变差。而  $R_0 > 2.5\%$  的煤储层受岩浆作用改造, 孔渗条件变好。

3) 织纳矿区煤样的孔渗结构相对较好, 兰氏体积较大, 其煤储层具有较好的渗透性和吸附能力, 因此有利于煤层气的勘探和开发, 而盘关矿区虽然煤储层渗透性好, 但煤样兰氏体积较小、吸附能力较差, 不利于煤层气开发。

### 参考文献:

- [1] 桂宝林. 滇东黔西煤层气选区及勘探目标评价[J]. 云南地质, 2004, 23(4): 410-420.
- [2] 顾成亮. 滇东、黔西地区煤层气地质特征及远景评价[J]. 新疆石油地质, 2002, 23(2): 106-110.
- [3] 唐书恒, 蔡超, 朱宝存, 等. 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.
- [4] 张新民, 庄军, 张遂安. 中国煤层气地质与资源评价[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 38-39.
- [5] 苏现波, 张丽萍, 林晓英. 煤阶对煤的吸附能力的影响[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 19-21.
- [6] 陈鹏. 中国煤炭性质、分类和利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 81-83.
- [7] 李松, 汤达祯, 许浩, 等. 云南恩洪与老厂地区煤储层孔隙-裂隙系统对比分析[J]. 高校地质学报, 2012, 18(3): 516-521.
- [8] 陶树, 汤达祯, 秦勇, 等. 黔西滇东典型矿区含煤地层热演化史分析[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(6): 17-21.
- [9] 顾成亮, 桂宝林. 滇东-黔西地区晚二叠世煤层割理研究及其在煤层气勘探中的意义[J]. 云南地质, 2000, 19(4): 352-362.
- [10] 蔡佳丽, 汤达祯, 许浩, 等. 黔西上二叠统煤的孔隙特征及其控制因素[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(5): 6-12.
- [11] 陈贞龙, 汤达祯, 许浩, 等. 黔西滇东地区煤层气储层孔隙系统与可采性[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 158-163.
- [12] 苏现波, 林晓英. 煤层气地质学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007: 20-21.
- [13] 姚艳斌, 刘大锰, 汤达祯, 等. 两淮煤田煤储层孔隙-裂隙系统与煤层气产出性能研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(2): 163-168.
- [14] 张松航, 唐书恒, 汤达祯, 等. 鄂尔多斯东缘煤储层渗流孔隙分形特征[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(5): 713-718.
- [15] 傅雪海, 秦勇, 薛秀谦, 等. 煤储层孔隙-裂隙系统分形研究[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(3): 225-228.