

文章编号: 1001-1986(2012)04-0029-05

# 云南恩洪地区煤储层孔裂隙特征及孔渗性分析

吴建国<sup>1,2</sup>, 汤达祯<sup>2</sup>, 李松<sup>2</sup>, 王爱<sup>2</sup>, 唐海量<sup>2</sup>

(1. 海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 中国地质大学能源学院, 北京 100083)

**摘要:** 研究煤中孔隙和裂隙, 对煤层气勘探开发至关重要。云南恩洪地区煤层气资源丰富, 具有较好的开发前景。通过多种测试手段对该区煤层气储层的孔隙、裂隙进行了表征, 分析了煤储层的孔渗特征, 并探讨了煤中显微组分及不同类型的孔隙对储层孔渗性的影响。研究表明: 恩洪地区煤层厚度大, 煤级适中, 微小孔发育, 吸附能力强, 有利于煤层气的吸附; 渗流孔隙结构单一, 非均质性不高, 渗流能力相对较好, 显微裂隙以较小微裂隙(D型)为主, 定向性和连通性较差, 可能造成渗流通道不连续和受阻等问题, 导致渗透性变差, 对将来煤层气的开发产生不利影响。

**关键词:** 恩洪地区; 煤储层; 孔裂隙; 孔隙度; 渗透率

**中图分类号:** P618.11 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2012.04.007

## Characteristics of the pore-microfracture system of coal reservoirs in Enhong area, Yunnan province

WU Jianguo<sup>1,2</sup>, TANG Dazhen<sup>2</sup>, LI Song<sup>2</sup>, WANG Ai<sup>2</sup>, TANG Hailiang<sup>2</sup>

(1. Laboratory of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Accumulation Mechanism of the Ministry of Education, Beijing 100083, China; 2. School of Energy Resource, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** As the largest medium and high volatile bituminite coalfield in Yunnan province, Enhong area is rich in CBM resources. Employing multiple testing methods, such as mercury intrusion porosimetry (MIP) and liquid nitrogen adsorption, this paper described the pore-microfracture system of the coal reservoirs in Enhong area, analyzed the characteristics of the porosity and permeability, and studied the influencing factors of porosity and permeability. Results showed that: the coal reservoirs in Enhong area have big thickness and medium coal metamorphism, micropores and transition pores are well developed, which are favorable for the methane sorption. The structure of the seepage pores is simple, and the permeability is relatively good with weaker heterogeneity. Microfractures are dominated by type D, which have poor directivity and connectivity that may result in the decrease of permeability, and is not favorable for the further development of the CBM.

**Key words:** Enhong area; coal reservoirs; pore-microfracture system; porosity; permeability

一直以来, 煤层气储层描述与评价都是煤层气勘探开发的热点研究领域之一。煤储层可看作是由孔隙、裂隙组成的连续的“双重孔隙”介质<sup>[1]</sup>, 基质孔隙是煤层气的赋存空间, 而裂隙对煤层气运移和产出具有决定作用。因此, 系统研究和认识煤中的孔隙和裂隙, 对煤层气勘探开发至关重要。

### 1 研究区概况

恩洪地区位于云南省东部的曲靖市麒麟区富源县境内(图1)。全区呈北东—西南向的带状展布, 长53 km, 宽9~20 km, 面积620 km<sup>2[2-3]</sup>。区域上,

该区整体受板块构造的挤压作用, 压扭性、张扭性和走向断层发育<sup>[4]</sup>。恩洪地区是云南省最大的中—高挥发分烟煤矿区, 其主要含煤岩系为晚二叠世宣威组, 煤层总厚15.99~67.68 m, 平均32 m。埋深小于2 000 m的煤层气资源量为613亿m<sup>3</sup>, 其中80%以上的煤层气资源埋深小于1 000 m, 具有较好的煤层气开发前景<sup>[5]</sup>。

### 2 实验与样品

样品采集充分考虑到地域分布和主采煤层等因素, 共采集7块煤样, 分别分布于本区河东煤矿(HD)、

收稿日期: 2011-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(40730422)

作者简介: 吴建国(1988—), 男, 山东济阳人, 硕士研究生, 研究方向为矿产普查与勘探。

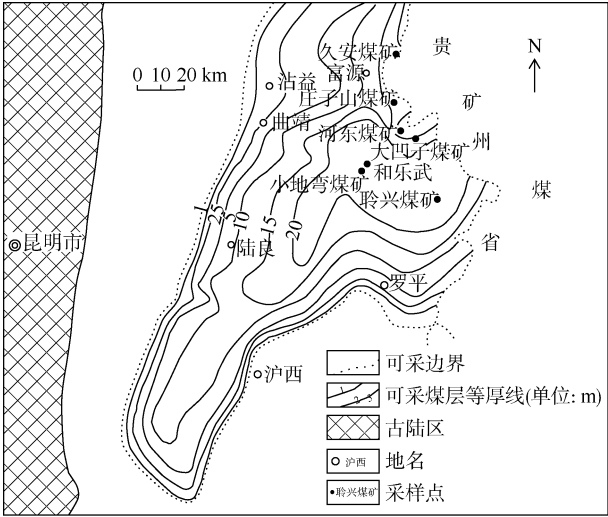


图 1 研究区位置及采样点分布图

Fig.1 Location of sampling points of the study area

聆兴煤矿(LX)、庄子山煤矿(ZZS)、久安煤矿(JA)、合乐武煤矿(HLW)、小地弯煤矿(XDW)和大凹子煤矿(DAZ)(图 1)。本次研究对这些煤样进行了镜质组反射率测试、显微组分分析、工业分析、常规孔渗测试、压汞孔隙测试、液氮比表面测试、孔径测试和显微裂隙测试等,有关测试结果见表 1。实验充分保证了各尺度孔、裂隙均可得到连续、全面的测试,并且在测试

过程中避免对煤样结构的破坏,此外,对部分样品做了重复性试验,以确保实验数据的准确性。

3 煤储层孔隙系统特征

按霍多特<sup>[6]</sup>的分类方案,煤的孔隙系统可分成大孔(孔径>1 000 nm)、中孔(孔径 100~1 000 nm)、过渡孔或小孔(孔径 10~100 nm)、微孔(孔径<10 nm)4 个等级。在这个分类方法的基础上,将孔径大于 100 nm 的孔隙归为渗流孔隙,将孔径小于 100 nm 的孔隙归为吸附孔隙。吸附孔隙主要影响煤层气的吸附和解吸,而渗流孔隙主要影响煤层气的解吸、扩散和渗流。

3.1 吸附孔隙结构及模型特征

煤的吸附孔的表征参数主要包括孔比表面积、总孔体积、孔径结构和孔隙形态等。液氮吸附法能够有效地区分吸附孔中的微孔和小孔,对研究煤储层吸附孔径结构具有一定的优势。

3.1.1 比表面及孔体积特征

液氮比表面及孔体积测试结果表明(表 2):恩洪地区煤储层的 BET 比表面为 0.304~1.939 m<sup>2</sup>/g,平均为 0.738 m<sup>2</sup>/g;BJH 总孔体积为 0.001~0.005 5 mL/g,平均为 0.002 5 mL/g;平均孔径为 12.04 nm。吸附孔隙类型以微孔为主,平均占 59.10%,高于小孔含量。总体来看,该区的煤储层的 BET 比表面和

表 1 恩洪地区煤样测试数据表  
Table 1 Testing data of the coal samples in Enhong area

样品号	$R_o$ /%	显微组分/%				工业分析/%				孔隙度 /%	渗透率 /mD
		镜质组	惰质组	壳质组	矿物	$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{ad}$	$FC_{ad}$		
ZZS	0.88	74.4	6.8	18.40	0.4	0.43	13.86	25.42	60.29	7.5	3.080
HD	1.22	81.2	16.3	1.60	0.9	0.48	11.01	18.72	69.79	3.1	0.102
HLW	1.26	88.8	8.6	1.20	1.4	0.43	12.93	19.71	66.93	7.0	0.037
DAZ	1.37	76.2	8.1	-	15.8	0.16	7.02	17.86	74.96	10.1	6.100
JA	1.38	90.2	4.3	-	5.5	0.36	18.30	16.68	64.66	5.2	0.053
XDW	1.39	84.2	15.5	-	0.3	0.31	10.33	16.28	73.08	5.9	0.674
LX	2.04	66.2	30.7	-	3.1	0.80	20.96	9.04	69.20	5.5	0.047
平均值	1.36	80.17	12.90	7.07	3.91	0.42	13.49	17.67	68.42	6.33	1.44

表 2 恩洪地区煤样液氮吸附实验测试数据  
Table 2 Testing data of the low-temperature N<sub>2</sub> isotherm adsorption/ desorption analyses

样品号	BET 比表面 /(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	BJH 总孔体积 /(mL·g <sup>-1</sup> )	平均孔直径/nm	孔径段孔隙含量/%		吸/脱曲线 类型
				小孔	微孔	
ZZS	0.458	0.001 7	11.56	28.00	72.00	C
HD	0.304	0.001 0	9.06	15.52	84.48	C
HLW	0.444	0.001 8	13.66	44.38	55.62	B
DAZ	1.939	0.005 5	9.11	54.00	46.00	A
JA	0.530	0.002 4	15.66	44.67	55.33	B
XDW	0.331	0.001 2	12.68	41.63	58.37	C
LX	1.157	0.003 6	12.57	58.10	41.90	A
平均值	0.738	0.002 5	12.04	40.90	59.10	

BJH 总孔体积相对较高,孔隙结构对煤层气的吸附聚集都较为有利。

3.1.2 吸附孔隙结构模型

煤的吸/脱附曲线特征能够反映孔隙形态,可据其确定不同的孔隙模型。恩洪地区煤样的液氮吸/脱附曲线可划分为 A、B、C 等 3 种类型(图 2)。类型 A 以样品 LX 为典型,该类样品孔隙的比表面积和孔体积最大,孔喉直径中等,小孔含量相对较高,最大吸附量明显高于 B、C 两种类型,吸/脱附曲线存在较为明显的吸附回线,孔隙类型多为开放型孔;类型 B 以样品 JA 为典型,该类样品孔隙的比表面积和孔体积中等,孔喉直径一般较大,微孔含量略高于小孔,最大吸附量介于 A、C 两种类型之间,孔隙多为开放型孔;类型 C 以样品 XDW 为典型,该类样品孔隙的比表面积和孔体积都很小,平均孔径也是 3 种类型中最小的,微孔含量明显多于小孔,由此导致最大吸附量很小,孔隙类型主要为一端封闭型孔。3 种类型孔隙模型中,A 和 B 型较有利于煤层气的储集、解吸和扩散。

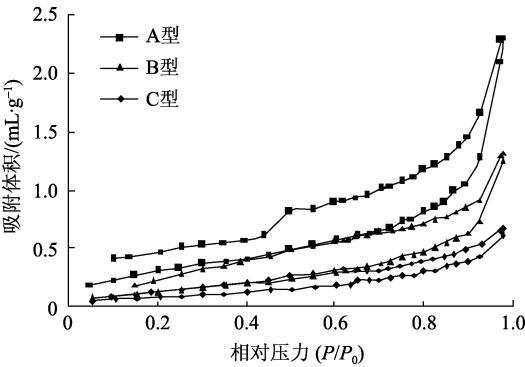


图 2 恩洪地区典型液氮孔隙模型

Fig.2 Typical models of the low-temperature N<sub>2</sub> isotherm adsorption / desorption test in Enhong area

3.2 渗流孔隙结构及模型特征

煤储层渗流孔隙主要为大孔和中孔。在测试煤的大、中孔的孔径结构上,压汞测试方法具有一定

优势。渗流孔隙的表征参数主要包括排驱压力、进汞饱和度和退汞效率。一般认为,汞进入煤孔隙的排驱压力越低,进汞饱和度和退汞效率越高,煤的渗透性越好。

3.2.1 渗流孔隙结构发育特征

恩洪地区煤储层孔隙结构中渗流孔和吸附孔分布均匀而连续(表 3)。煤岩进汞饱和度 30.38%~48.47%,平均 35.50%;退汞效率为 20.92%~50.05%,平均 38.04%。整体来看,煤层各类孔径结构分布均匀,煤岩非均质性相对较低,有利于煤层气的高效产出。

3.2.2 渗流孔隙结构模型

压汞曲线可用来区分不同的孔隙结构特征,对恩洪地区样品的压汞曲线分析统计后,总结了常见的 3 种典型的压汞孔隙结构模型(图 3)。类型 A 以 ZZS 样品为代表,特点是孔隙结构好,累积进汞饱和度达 48%;退汞效率一般,为 40%左右,表明孔隙之间的连通性很好,该类孔隙对煤层气的产出运移最为有利。类型 B 以 HLW 样品为代表,进汞饱和度在 33%左右,表明微小孔发育,大孔和中孔发育相对较差;退汞效率一般,在 40%左右,有的可达 50%,表明各孔径孔隙发育连续,连通性相对较好,有利于煤层气的产出运移。类型 C 以 LX 样品为代表,压汞的进汞量为 38%;退汞效率很低,在 20%左右,该类曲线的孔隙结构具有典型的“双峰”分布特点,微、小孔发育,大孔明显多于中孔,这种孔径特点极易导致渗流的“瓶颈”问题,从而降低孔隙的渗透性,该类孔隙对煤层气的产出不利。恩洪地区煤储层渗流孔隙类型以 B 型为主,A、C 两种类型发育很少,说明该区煤岩非均质性较低,煤储层渗流能力相对较好,有利于煤层气的产出运移。

3.3 煤岩孔隙发育的控制因素

对测试数据统计分析后发现,随着镜质组含量增高,煤中微小孔隙的发育程度也相应增加,这说明吸附孔隙主要来源于镜质组(图 4a);煤中大孔的发育程度随惰质组含量增高而增加,说明渗流孔隙主要来源于惰质组(图 4b)。在成煤过程中,镜质

表 3 恩洪地区煤样压汞测试数据  
Table 3 Data of mercury intrusion of samples in Enhong area

样品号	进汞饱和度 /%	退汞效率 /%	排驱压力/MPa	压汞孔隙/%			压汞 类型
				大孔	中孔	微小孔	
ZZS	48.47	38.68	0.99	9.60	26.77	63.63	A
HD	35.38	45.42	0.09	16.02	7.94	76.04	B
HLW	33.13	50.05	0.99	10.65	11.54	77.81	B
DAZ	31.72	31.75	0.26	11.27	16.07	72.66	B
JA	30.89	42.38	2.14	6.87	10.53	82.60	B
XDW	30.55	37.09	0.08	14.16	7.92	77.92	B
LX	38.38	20.92	0.06	23.40	6.66	69.94	C
平均值	35.50	38.04	0.66	13.14	12.49	74.37	

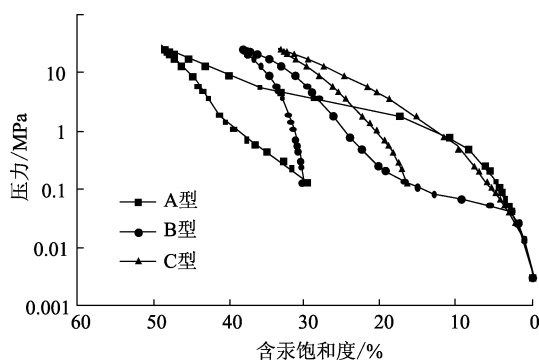


图 3 恩洪地区煤的典型压汞曲线类型

Fig.3 Types of mercury intrusion of coal in Enhong area

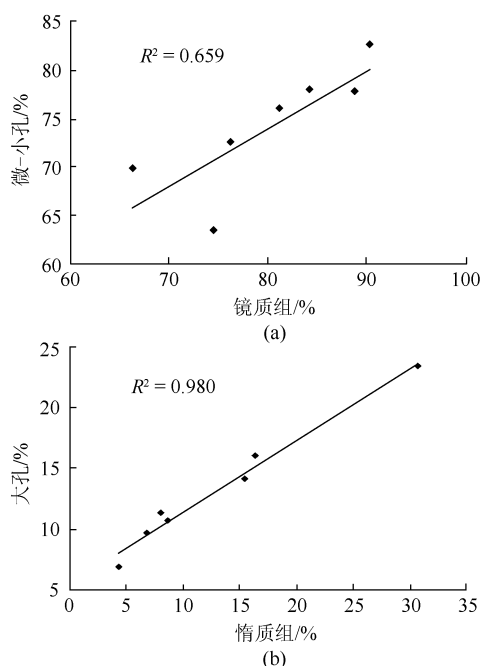


图 4 镜质组(a)及惰质组(b)含量对不同直径孔隙的影响

Fig.4 The influence of vitrinite(a) and inertinite(b) on pores

组中的植物组织被破坏分解, 气体和液体排出时, 形成 100 nm 以下的微小气孔。惰质组的植物胞腔相对较大, 有的未被充填, 就会构成以大于 100 nm 为主的渗流孔隙<sup>[7]</sup>。

#### 4 煤储层显微裂隙发育特征

显微裂隙的发育程度影响煤储层的渗透性能, 借助于光学显微镜可直观地对比煤中微米级显微裂隙的大小与形态。显微裂隙可划分为 A、B、C、D 等 4 种类型: 类型 A 为较大微裂隙, 其宽度( $W$ )  $> 5 \mu\text{m}$ , 且长度  $L > 10 \text{ mm}$ , 连续性好, 延伸远; 类型 B 和 C 为中等微裂隙, 其中 B 型  $W > 5 \mu\text{m}$ , 且  $L < 10 \text{ mm}$ , C 型  $W < 5 \mu\text{m}$ , 且  $L < 300 \mu\text{m}$ 。这两类多呈树枝状或羽状组合出现, 其中类型 B 多为树枝状裂隙的树干部分, 而裂隙 C 多为树枝状裂隙的树枝或树杈部分, 两种类型裂隙间的连通状况较好; 类型 D 为较小微裂隙( $W < 5 \mu\text{m}$ , 且  $L < 300 \mu\text{m}$ ), 多呈树枝状与其他 3 类裂隙沟通, 该类裂隙的方向性和连通性相对其他类型较差<sup>[8-9]</sup>。

表 4 显示, 恩洪地区储层显微裂隙发育密度为 22 ~ 658 条/ $9 \text{ cm}^2$ , 平均 203 条/ $9 \text{ cm}^2$ , 其中煤样 JA 和 LX 的裂隙密度分别为 658 条/ $9 \text{ cm}^2$  和 231 条/ $9 \text{ cm}^2$ 。这表明, 该区的裂隙密度总体较高, 有利于煤储层的渗透性。裂隙类型中 D 型含量最多, C 型次之, B 型很少, A 型裂隙几乎不发育, 这与一般煤岩的裂隙类型分布相似。D 型裂隙的宽度和长度都较小, 这种微裂隙对储层渗透性的影响具有双重性, 如果定向性好, 则对煤储层的渗透性有利, 然而如果裂隙定向性和连通性较差, 则对渗透性不利<sup>[10-11]</sup>。恩洪地区部分煤样 D 型裂隙过度发育(高达 80%以上), 且镜下观察发现其定向性和连通性较差, 导致煤储层的渗透性变差, 不利于后期煤层气的开采。

#### 5 煤储层孔渗性

##### 5.1 孔隙度特征

恩洪地区煤层处于中变质阶段, 孔隙度范围为 3.1% ~ 10.1%, 平均 6.3%(表 1), 孔隙度较高。进一步分析发现, 煤的孔隙度与中孔含量和矿物质含量之间具有较强的相关关系, 而与其他组分含量的

表 4 恩洪地区煤的微裂隙类型统计表

Table 4 Statistics of different types of microfractures of the coal samples in Enhong area

样品号	各类裂隙密度/(条·( $9 \text{ cm}^2$ ) <sup>-1</sup> )					各类裂隙所占比例/%			
	A 型	B 型	C 型	D 型	总计	A 型	B 型	C 型	D 型
ZZS	1	2	22	55	80	1.3	2.5	27.5	68.7
HD	0	6	27	51	84	0	7.1	32.1	60.8
HLW	1	6	36	101	144	0.7	4.2	25.0	70.1
JA	0	15	64	579	658	0	2.3	9.7	88.0
XDW	0	1	13	8	22	0	4.6	59.0	36.4
LX	0	5	21	205	231	0	2.2	9.0	88.8
平均值	0.33	5.83	30.50	166.5	203.16	0.33	3.82	27.05	68.8

相关性较差。随着中孔含量的升高, 孔隙度明显增大(图 5a), 说明中孔对孔隙度的贡献最大。而煤中矿物质对孔隙度发育不利<sup>[12]</sup>, 矿物含量的增大会造成孔隙度的减小(图 5b), 这是因为矿物会充填于孔隙内, 占据孔隙空间。

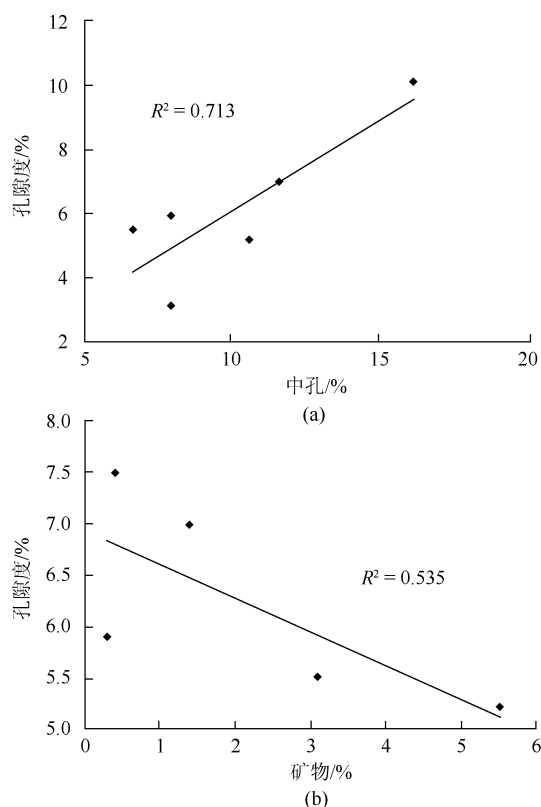


图5 中孔含量(a)及矿物含量(b)与孔隙度的关系  
Fig.5 The influence of mesopore(a) and mineral contents(b) on porosity

## 5.2 渗透率特征

煤的渗透率在在一定程度上直接反映了煤储层的渗透性能。恩洪地区煤储层渗透率为 0.037 ~ 6.1 mD。如前所述, 该区裂隙密度较高, 渗流孔径相对均匀, 非均质性不高, 渗流能力较好, 但是局部地区由于发育定向性和连通性较差的 D 型裂隙, 造成渗透率变差。分析发现, 渗透率大小受到大、中孔含量的影响, 大、中孔比例越高, 渗透率也相应越大(图 6)。煤样 LX 的大、中孔含量较高(30.1%), 而渗透率却很低(0.047 mD, 表 1), 这是因煤中过高的灰分(20.96%, 表 1)充填在裂隙中, 不但占据了裂隙空间, 还导致裂隙连通性下降, 渗透率降低。

## 6 结论

a. 恩洪地区煤储层吸附孔发育, 比表面积和总孔体积大, 有利于煤层气的吸附和解吸。本区渗流

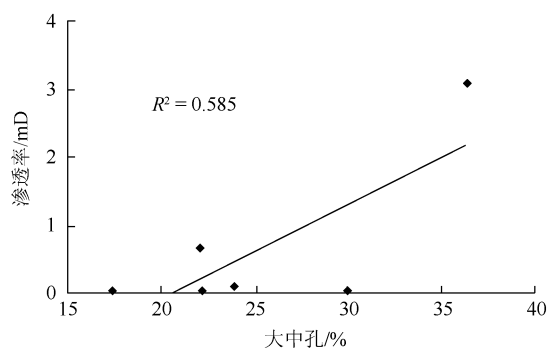


图6 大中孔含量与渗透率的关系  
Fig.6 Relationship between macropores and mesopores contents and permeability

孔孔径相对均匀, 非均质性不高, 整体渗流能力相对较好; 但由于定向性和连通性较差的 D 型微裂隙发育, 导致局部渗透性变差, 对后期煤层气的开发产生不利影响。

b. 测试数据分析发现: 煤岩显微组分对孔隙发育的影响较大, 其中, 镜质组的增加会使吸附孔增多, 而惰质组的增加则使渗流孔增多; 中孔对孔隙度贡献很大, 中孔的增加会造成孔隙度的增大, 而煤中矿物增多会充填孔隙, 导致孔隙度减小; 储层渗透性与大、中孔含量有较好的正相关关系。

## 参考文献

- [1] CLOSE JC. Natural fracture in coal. In: Hydrocarbons from coal [J]. Law B E and Rice D D eds. AAPG, 1993, 38: 119-132.
- [2] 邓明国. 云南省煤层气资源评价[R]. 昆明: 云南省煤田地质局, 2001.
- [3] 王巨民, 邓明国. 滇东地区煤层气资源评价[R]. 昆明: 云南省煤田地质局, 2000.
- [4] 王朝栋, 桂宝林, 郭秀钦, 等. 恩洪煤层气盆地构造特征[J]. 云南地质, 2004, 23(4): 471-478.
- [5] 陈励, 孔德宏. 云南恩洪盆地煤层气异常分析[J]. 云南师范大学学报, 2004, 24(1): 3-7.
- [6] XoJloT B B. 煤与瓦斯突出[M]. 宋世钊, 王佑安, 译. 北京: 中国工业出版社, 1996: 27-30.
- [7] 李树刚, 张天军, 陈占清, 等. 高瓦斯煤的渗透性试验[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 34(4): 8-11.
- [8] 杨起, 刘大锰, 黄文辉, 等. 中国西北煤层气地质与资源综合评价[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [9] 姚艳斌, 刘大锰, 汤达祯, 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.
- [10] 孙粉锦, 赵庆波, 邓攀. 影响中国无烟煤区煤层气勘探的主要因素[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(1): 32-34.
- [11] 张遂安. 有关煤层气勘探过程中的理论误导剖析[J]. 中国煤层气, 2004, 1(2): 7-8.
- [12] 李彦, 李静, 杨利军, 等. 铁法煤田煤储层渗透性预测[J]. 煤田地质与勘探, 1998, 26(1): 34-36.