

文章编号:1671-251X(2017)04-0032-05 DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2017.04.008
徐林,袁梅,杨萌萌,等.贵州省突出煤层孔隙分形特征研究[J].工矿自动化,2017,43(4):32-36.

贵州省突出煤层孔隙分形特征研究

徐林¹, 袁梅^{1,2,3,4}, 杨萌萌¹, 许石青^{1,2,3,4}, 王玉丽¹, 李闯¹

(1. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州省非金属矿产资源综合利用重点实验室, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州省优势矿产资源高效利用工程实验室, 贵州 贵阳 550025; 4. 复杂地质矿山开采安全技术工程中心, 贵州 贵阳 550025)

摘要:以贵州省富煤区6个突出煤层为研究对象,采用液氮吸附实验和压汞实验,分析了各煤层煤样的孔隙大小分级,计算了煤样分形维数,并分析了各煤层煤样孔隙分形特征及其与瓦斯吸附量、煤样渗透性的关系。结果表明:6个煤层煤样不同级别的孔隙具有良好的分形特征,能够显示孔隙大小及孔隙分布特征,验证了采用分形维数可以定量分析煤样孔隙特征;微孔分形维数与煤样瓦斯吸附量呈正相关关系,不同煤田煤样瓦斯吸附能力差异较大;小孔分形维数反映了煤样孔隙结构较简单,煤样间孔隙结构复杂程度相似;中孔、大孔、显微裂隙和微裂隙分形维数显示煤样孔隙分布趋势基本一致,存在某些级别孔隙发育很差的情况,需要增透以提高抽采效果。

关键词:煤炭开采;突出煤层;孔隙;瓦斯吸附;分形维数

中图分类号:TD712 文献标志码:A 网络出版时间:2017-03-28 17:16

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20170328.1716.008.html>

Research on pore fractal characteristics of outburst coal seam in Guizhou province

XU Lin¹, YUAN Mei^{1,2,3,4}, YANG Mengmeng¹, XU Shiqing^{1,2,3,4}, WANG Yuli¹, LI Chuang¹

(1. Mining College, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Guizhou Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Non-metallic Mineral Resources, Guiyang 550025, China; 3. Guizhou Engineering Lab of Advantage Mineral Resources Efficient Utilization, Guiyang 550025, China; 4. Engineering Center for Safe Mining Technology under Complex Geologic Conditions, Guiyang 550025, China)

Abstract:Coal samples of six outburst coal seams in coal-rich areas in Guizhou province were taken as research objects to analyze size grade of pore, fractal dimension, fractal characteristics and relationship between the fractal characteristics and gas adsorption or coal permeability by use of liquid nitrogen adsorption experiment and mercury intrusion experiment. The experimental results show that pores of the coal samples with different grades have good fractal characteristics, which can show porosity and pore distribution characteristics. The fractal dimension can be used to quantitatively analyze pore characteristics of coal samples. There is a positive correlation between the fractal dimension of micro pore of the coal samples and gas adsorption value. Gas adsorption capacity of coal samples in different coals is quite different. The fractal dimension of small pore reflects simple pore structures of coal samples and pore similarity among coal samples. The fractal dimensions of medium pore, large pore, pore fracture and micro fracture

收稿日期:2016-12-02;修回日期:2017-02-19;责任编辑:李明。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51574093);贵州省高校工程技术研究中心建设项目(黔教合KY字[2013]112);贵州大学引进人才科研基金资助项目(贵大人基合字[2015]30号);贵州大学矿业学院研究生创新基金资助项目(院研20160102)。

作者简介:徐林(1990—),男,贵州贵阳人,硕士研究生,研究方向为安全技术,E-mail:linuxulin@126.com。通信作者:袁梅(1973—),女,贵州贵阳人,教授,博士,主要从事安全技术及工程的教学及科研工作,E-mail:gutyuanmei@126.com。

show that pore distribution trend of each coal sample is similar. Pores with some size grades develop badly, so measure for increasing the permeability of coal seam are needed to improve gas drainage effect.

Key words: coal mining; outburst coal seam; pore; gas adsorption; fractal dimension

0 引言

贵州省煤炭和煤层气资源丰富,但贵州省煤层赋存条件十分复杂,开采煤层多属薄及中厚煤层群,瓦斯含量高,构造复杂,断层等构造发育,构造煤普遍发育,大多为煤与瓦斯突出(以下简称突出)煤层,瓦斯抽采困难,突出严重^[1-5]。

突出是一种十分复杂的动力现象^[6],瓦斯在突出过程中起到重要作用,而瓦斯在煤中的赋存和产出均与煤的孔隙结构密切相关。煤中孔隙的分布具备复杂性和随机性,传统的几何方法很难准确对其进行描述和定量分析。分形理论能够定量描述煤中存在的0.1~10⁵ nm孔隙^[7]。许多文献都采用分形理论分析了煤层孔隙结构的分形维数与瓦斯吸附运移的关系^[8-10],并针对不同矿区的煤进行了研究^[11-12]。

本文通过低温液氮吸附实验和压汞实验,分析了贵州省富煤区6个突出煤层的孔隙大小分级,结合分形理论计算了孔隙分形维数,探究了上述煤层分形维数与煤层瓦斯吸附能力及煤层渗透性的关系。

1 煤样来源、特征及实验设备

1.1 煤样来源、特征

贵州省煤炭资源分布相对集中区域位于西部,其次在黔北,中部和黔西南地区也有较多产出分布。根据贵州省含煤地层分布情况,将全省划分为9大煤田,其中兴义煤田、六盘水煤田、织纳煤田、黔北煤田为富煤区,黔西北煤田和贵阳煤田为含煤区,黔东北煤田、黔南煤田和黔东南煤田为贫煤区。根据贵州省矿区矿井的瓦斯等级情况,将全省矿区划分为高突瓦斯带和低瓦斯带^[13],如图1所示。

贵州省高突瓦斯带和富煤区分布基本一致,实验煤样取自兴义煤田、六盘水煤田、织纳煤田和黔北煤田等富煤区煤田。采样时充分考虑了地域分布、突出危险性,所有煤样都进行了工业分析和瓦斯吸附量测定,结果见表1。

1.2 实验设备

液氮吸附实验采用3H-2000PS2型比表面及

孔径分析仪,其测量范围为0.35~500 nm;压汞实验采用PoreMaster系列压汞仪,在不考虑样品压缩性的情况下,其测量孔径最小可达3 nm,最大可达1 000 μm。

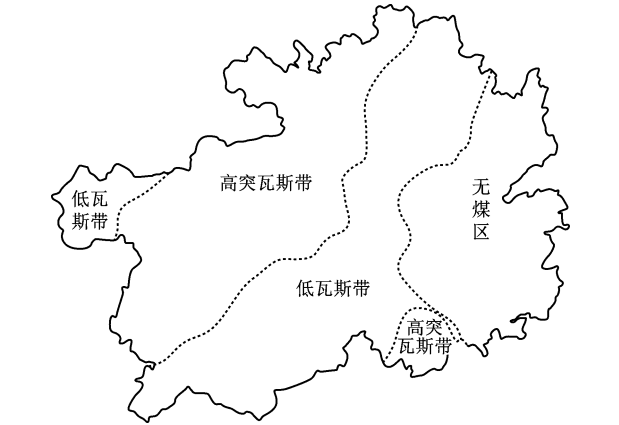


图1 贵州省煤层瓦斯分带

表1 煤样工业分析及瓦斯吸附量测定结果

煤样 编号	所属 煤田	水分/ %	灰分/ %	挥发 分/%	固定 碳/%	瓦斯吸附量/ (cm ³ ·g ⁻¹)
A	兴义	2.28	7.94	10.90	79.91	22.98
B	六盘水	1.83	9.07	11.65	78.73	25.10
C	六盘水	1.50	9.26	29.37	63.03	9.38
D	六盘水	1.22	7.91	18.76	73.81	14.09
E	织纳	1.95	18.06	8.36	73.35	21.91
F	黔北	2.33	8.62	5.45	84.31	35.16

2 分形维数计算

2.1 液氮吸附实验孔隙分形维数计算

液氮吸附是利用气体吸附原理研究孔隙比表面积、孔体积、孔径、孔分布等的实验方法。根据PFEIFER等提出的理论,用气体吸附原理可以计算分形表面的分形维数。采用FHH(Frenkel-Halsey-Hill)方程来计算煤样分形表面的分形维数^[14]:

$$\ln \frac{V}{\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}} = (D - 3) \ln(\ln(p_0/p)) + C \quad (1)$$

式中:V为平衡压力p下的气体吸附量,cm³/g;D为孔隙分形维数;p₀为饱和蒸气压力,MPa;C为常数。

2.2 压汞实验孔隙分形维数计算

压汞实验也是研究煤孔径结构的常用方法。许

多学者推导了压汞数据计算分形维数的公式。ANGULO 提出,建立单位进汞体积 V_{Hg} 及其对应压力 P_{Hg} 的双对数图,可以计算出孔隙分形维数:

$$V_{Hg} = A(P_{Hg} - P_t)^{3-D}$$

(2)

式中: A 为常数; P_t 为门限压力,MPa。

对式(2)取对数:

$$\ln \frac{V_{Hg}}{\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}} = (3 - D) \ln \frac{P_{Hg} - P_t}{\text{MPa}} + \ln A$$

(3)

根据压汞数据拟合直线,即可计算孔隙分形维数 D 。

3 实验结果分析

3.1 孔隙大小分类

液氮吸附实验和压汞实验测量的孔径范围见表 2。可看出液氮吸附实验实际测量到 1~150 nm 孔径,而压汞实验低压实际测量到 5~200 μm 孔径,高压实际测量到 14~10⁴ nm 孔径。压汞实验对于纳米级别孔进汞的测定并不准确,高压可能造成部分微孔坍塌或部分闭孔被打开等情况,导致误差^[15]。因此,100 nm 以下的孔隙采用液氮吸附实验数据进行分析,以避免压汞实验中高压对煤体破坏产生的误差;100 nm 以上的孔隙采用压汞实验数据进行分析,以便快速分析较大孔分布。

表 2 液氮吸附实验和压汞实验测量的孔径范围

煤样 编号	液氮吸附实验 实测孔径/nm	压汞实验实测孔径	
		高压/nm	低压/ μm
A	1.8~126.5	14.15~9.158×10 ³	5.365~190.2
B	1.9~147.0	14.19~8.617×10 ³	5.373~196.1
C	1.7~136.4	14.20~7.036×10 ³	5.357~193.2
D	1.7~118.2	14.17~5.815×10 ³	5.360~180.6
E	1.7~102.9	14.18~8.554×10 ³	5.345~192.4
F	1.8~116.2	14.19~9.939×10 ³	5.361~193.2

液氮吸附实验数据能够准确反映煤的微小孔隙分布, $p/p_0 < 0.5$ 时,气体主要靠范德华力吸附在微孔中; $p/p_0 \geq 0.5$ 时,高压造成孔隙中发生毛细管凝聚现象。对于液氮吸附实验,当 $p/p_0 < 0.5$ 时,氮气主要作用于孔径小于 10 nm 的孔隙,结合表 2,将孔径小于 10 nm 的孔隙分类为微孔,10~100 nm 的孔隙分类为小孔,其分形维数分别记为 D_1, D_2 。

高压进退汞曲线如图 2 所示。可看出进汞曲线大致可分为 14~100 nm,0.1~1 μm ,1~10 μm 孔径这 3 段。煤样 C,D 的退汞量变化非常小,但从煤

样 A,B,E,F 的退汞曲线可看出,其基本也可划分为 14~100 nm,0.1~1 μm ,1~10 μm 孔径这 3 段。结合表 2,将孔径为 0.1~1 μm 的孔隙分类为中孔,1~10 μm 的孔隙分类为大孔,采用高压进汞数据分别计算其分形维数 D_3, D_4 。

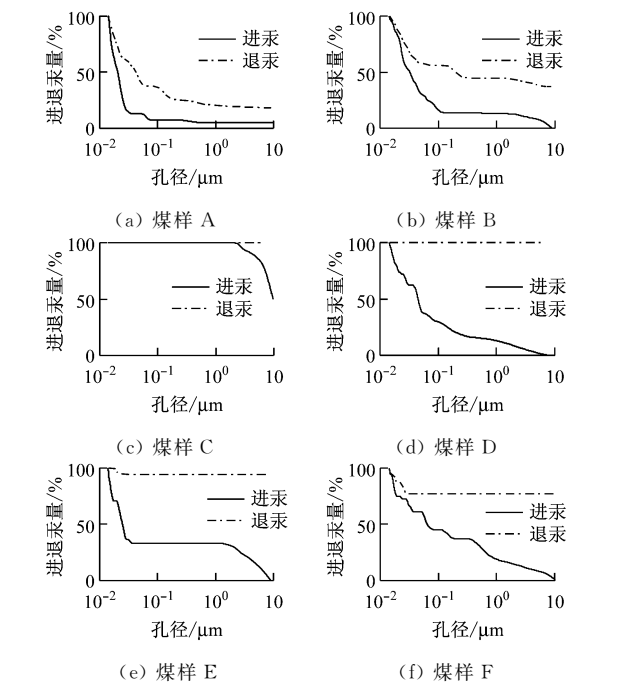


图 2 煤样高压进退汞曲线

低压进汞曲线如图 3 所示。可看出该曲线大致可分为 2 段:第一段曲线比较平缓,进汞量增加缓慢,此时汞进入煤中显微裂隙(宽度为微米级^[16]);第二段曲线比较陡峭,进汞量增加非常快,此时汞进入煤中微裂隙(宽度为十几微米到几十微米)。由于裂隙宽度远小于长度,且限于压汞实验原理,图 3 中的孔径是裂隙的等效孔径,并非实际孔径,10~200 μm 范围为煤中裂隙。采用低压进汞数据分别计算显微裂隙和微裂隙的分形维数 D_5, D_6 。

3.2 煤样的孔隙分形特征

根据液氮吸附实验数据计算 $\ln(\ln(p_0/p))$ 和 $\ln \frac{V}{\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}}$,绘制散点图,拟合直线,可计算出微孔和小孔的分形维数;依据压汞实验数据计算 $\ln \frac{P_{Hg} - P_t}{\text{MPa}}$ 和 $\ln \frac{V_{Hg}}{\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}}$,绘制散点图,可计算出中孔、大孔、显微裂隙和微裂隙的分形维数。计算结果见表 3,拟合优度 R^2 最低为 0.790 86,最高为 1,大部分拟合优度 R^2 为 0.96 以上,总体拟合程度较好,说明煤样各尺度孔隙/裂隙具有较好的分形特

表3 煤样孔隙/裂隙分形维数计算结果

煤样 编号	微孔		小孔		中孔		大孔		显微裂隙		微裂隙	
	D_1	R^2	D_2	R^2	D_3	R^2	D_4	R^2	D_5	R^2	D_6	R^2
A	2.701	0.977 17	2.437	0.992 67	2.482	0.989 00	3.000	1.000 00	2.979	0.837 27	2.754	0.951 60
B	2.704	0.790 86	2.485	0.994 56	3.000	1.000 00	2.729	0.943 92	2.828	0.822 02	2.186	0.995 19
C	2.478	0.992 38	2.533	0.994 72	3.000	1.000 00	2.901	0.960 09	3.000	1.000 00	2.333	0.964 15
D	2.532	0.985 41	2.485	0.992 74	2.648	0.937 14	2.242	0.969 28	2.990	0.869 09	2.287	0.994 72
E	2.630	0.991 70	2.570	0.998 21	3.000	1.000 00	2.582	0.935 33	2.925	0.835 06	2.473	0.979 08
F	2.766	0.965 17	2.580	0.996 84	2.693	0.868 55	2.629	0.988 37	2.853	0.868 50	2.304	0.991 26
平均值	2.635	—	2.515	—	2.804	—	2.681	—	2.929	—	2.390	—

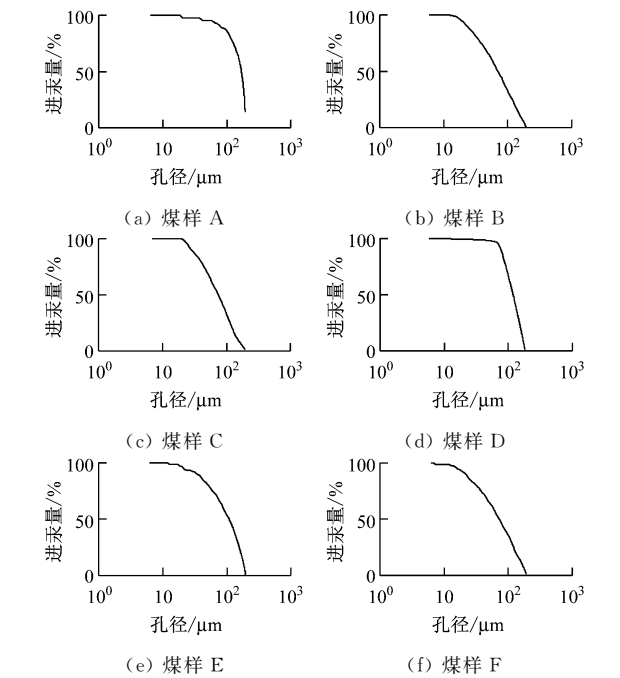


图3 煤样低压进汞曲线

性,可采用分形维数定量描述其特征。

3.2.1 煤样瓦斯吸附量与孔隙分形特征

瓦斯吸附量主要与微孔和小孔有关。微孔由吸附作用测得,分形维数 D_1 为孔隙表面分形维数;小孔主要由毛细管凝聚现象测得,还包括部分吸附作用,分形维数 D_2 包含表面分形维数和体积分形维数。研究表明, D_1 反映煤样微孔分形特征,也代表了煤样孔隙表面的分形特征,微孔是吸附孔,吸附能力与孔隙比表面积相关; D_2 则反映煤样小孔(过渡孔)分形特征,同时代表了煤样孔隙结构的分形特征^[17]。

微孔分形维数 D_1 为 2.478~2.766,平均 2.635。 D_1 与瓦斯吸附量拟合结果如图 4 所示。可看出 D_1 与瓦斯吸附量呈正相关关系,拟合优度 $R^2=0.908\ 62$,拟合效果较好,说明 D_1 在一定程度上能够代表煤样的瓦斯吸附能力。 D_1 越接近 2,孔

隙表面越光滑; D_1 越接近 3,孔隙表面越复杂,瓦斯吸附量越大。同时 D_1 大小分布范围较大,说明不同煤样瓦斯吸附能力存在较大差异。

小孔分形维数 D_2 为 2.437~2.580,平均 2.515,说明各煤样孔隙结构复杂程度相似,小于门格海绵的分形维数 2.73,表明煤样孔隙结构较简单。 D_1 与 D_2 较为接近,说明煤样孔隙表面与孔隙结构复杂性相差不大。

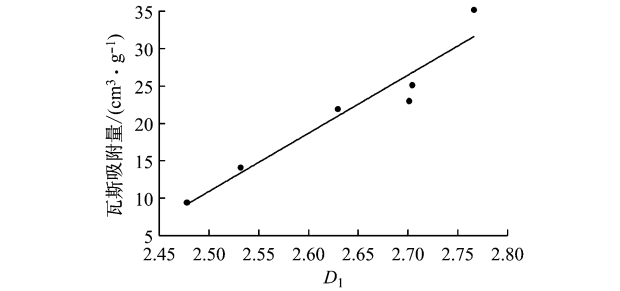


图4 微孔分形维数 D_1 与瓦斯吸附量拟合结果

3.2.2 煤样渗透性与孔隙分形特征

煤中瓦斯运移主要与中孔、大孔、显微裂隙和微裂隙有关。中孔、大孔、显微裂隙和微裂隙的分形维数由进汞数据计算, D_3 — D_6 代表了孔隙发育情况和孔隙结构。分形维数越接近 2,则孔隙越发育,孔隙结构越简单,渗透性也越好;分形维数越接近 3,孔隙越不发育,孔隙结构越复杂,渗透性越差。

从表 3 中可知煤样 B,C,E 中孔分形维数 D_3 为 3.000,说明这 3 个煤样几乎没有中孔,其余 3 个煤样分形维数 D_3 为 2.482~2.693;大孔分形维数 D_4 为 2.242~3.000,平均 2.681;显微裂隙分形维数 D_5 为 2.828~3.000,平均 2.929;微裂隙分形维数 D_6 为 2.186~2.754,平均 2.390,除煤样 A 外微裂隙分形维数均在 2.5 以下。

煤层瓦斯产出过程中,存在扩散和流动运动形

式的多次交替,某一尺度的孔隙如果不发育,瓦斯需要依赖更小的孔隙来进入更大的孔隙,导致煤层的渗透性降低,抽采效果下降。孔隙级别与分形维数的关系如图5所示。可看出显微裂隙分形维数都大于门格海绵的分形维数 2.73,显微裂隙非常少,而微裂隙的分形维数除煤样 A 外都小于 2.73,大孔和中孔则有一定区别。煤样孔隙/裂隙尺度从小到大,除煤样 A 稍有不同外,其余煤样孔隙分布趋势相似,渗透性基本属同一种类型;每个煤样都存在部分尺度孔隙/裂隙发育较差的情况,需要采取增透措施,以提高瓦斯抽采效果。

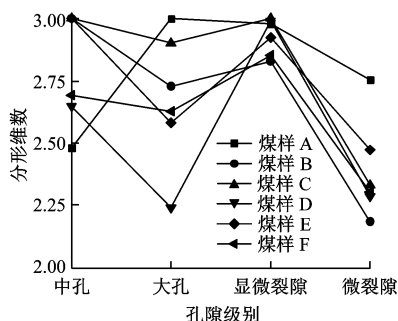


图5 孔隙级别与分形维数的关系

4 结论

(1) 借助液氮吸附实验和压汞实验,对贵州省富煤区突出煤层 6 个煤样孔隙/裂隙进行分类研究。拟合计算了不同级别孔隙/裂隙的分形维数,结果表明煤样具有良好的分形特征,可用分形维数定量描述其孔隙特征。

(2) 煤样微孔分形维数 D_1 为 2.478~2.766,平均 2.635,与瓦斯吸附量存在较好的正相关关系,另一方面,虽同属突出煤层,但不同煤田突出煤层瓦斯吸附能力并不相同;小孔分形维数 D_2 为 2.437~2.580,平均 2.515,表明煤样孔隙结构复杂程度相似,孔隙结构较简单。

(3) 结果表明,除煤样 A 稍有变化,其余煤样变化趋势相似,渗透性基本属同一种类型。煤样显微裂隙分形维数都在 2.73 以上,微裂隙分形维数除煤样 A 外均在 2.73 以下,大孔和中孔有好有差。煤样某些级别孔隙发育很差,煤样渗透性会受到影响,需要采取增透措施。

参考文献:

- [1] 王忠奎,罗泽卫. 贵州煤层气抽采及综合利用模式分析[J]. 中国煤层气,2011,8(2):43-45.
- [2] 衡献伟,李绍泉,李青松. 贵州煤与瓦斯突出特征及影响因素研究[J]. 煤矿安全,2013,33(10):7-10.
- [3] 韩用,吴桂义. 煤与瓦斯共采技术在贵州煤层气开发中的应用研究[J]. 煤矿现代化,2012(3):16-18.
- [4] 马帅,李绍泉,秦震东,等. 贵州煤与瓦斯突出事故规律性研究[J]. 洁净煤技术,2011,17(6):89-91.
- [5] 孔慤,吴桂义,钟锋,等. 贵州矿区煤与瓦斯突出特征及其防治对策[J]. 工矿自动化,2016,42(2):22-26.
- [6] 谢雄刚,冯涛,王永,等. 煤与瓦斯突出过程中能量动态平衡[J]. 煤炭学报,2010,35(7):1120-1124.
- [7] 孙波,王魁军,张兴华. 煤的分形孔隙结构特征的研究[J]. 煤矿安全,1999,30(1):38-40.
- [8] 傅雪海,秦勇,薛秀谦,等. 煤储层孔、裂隙系统分形研究[J]. 中国矿业大学学报,2001,30(3):11-14.
- [9] 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.
- [10] 郎伟伟,宋志敏,刘高峰,等. 基于低温液氮吸附实验的变形煤孔隙分布及其分形特征[J]. 河南工程学院学报(自然科学版),2015(2):34-37.
- [11] 张晓辉,要惠芳,李伟,等. 韩城矿区构造煤纳米级孔隙结构的分形特征[J]. 煤田地质与勘探,2014,42(5):4-8.
- [12] 吴财芳,刘顺喜. 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.
- [13] 黄政祥,龙祖根. 贵州煤矿瓦斯地质规律研究[C]//全国瓦斯地质学术年会,南戴河,2013:37-43.
- [14] 李子文,郝志勇,庞源,等. 煤的分形维数及其对瓦斯吸附的影响[J]. 煤炭学报,2015,40(4):863-869.
- [15] 戚灵灵,王兆丰,杨宏民,等. 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.
- [16] 孙维吉. 不同孔径下瓦斯流动机理及模型研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2007.
- [17] 孟召平,刘珊珊,王保玉,等. 不同煤体结构煤的吸附性能及其孔隙结构特征[J]. 煤炭学报,2015,40(8):1865-1870.