

文章编号: 1000-582X(2011)09-081-09

不同颗粒粒径下型煤孔隙及发育程度分形特征

许江, 陆漆, 吴鑫, 刘东

(重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室;
西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 煤是一种非均匀多孔介质, 其孔隙特征及其发育程度与煤层中瓦斯的吸附解吸特性及流动特征密切相关。为探讨型煤的孔隙结构, 实验以颗粒粒径分别为 4.00~1.70 mm、1.70~0.38 mm 及 0.38~0.18 mm 的煤颗粒制作而成的型煤为研究对象, 利用 CF-2000P 偏光分析软件和 Fractalfox2.0 分形分析软件对由不同粒径煤颗粒压制成的型煤孔隙特征及发育程度开展了系统研究。结果表明, 随着型煤颗粒粒径逐渐减小, 型煤中的孔隙半径逐渐减小, 孔隙总数逐渐增多, 分形维数值逐渐增大, 孔隙发育程度逐渐增大, 孔隙分布均匀程度逐渐增大。

关键词: 粒径; 孔隙大小; 型煤; 分形维数

中图分类号: TD 713.2

文献标志码: A

The fractal characteristics of the pore and development of briquettes with different coal particle sizes

XU Jiang, LU Qi, WU Xin, LIU Dong

(State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control;
Key Laboratory for the Exploitation of Southwest Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Coal is a non-uniform porous medium. The degree of porous development is closely related to absorption-desorption characteristics and flow characteristics of coal seam gas. In order to investigate pore structure of briquette, it is studied the characteristics of porous development of briquette with different coal particle sizes like 4.00~1.70 mm, 1.70~0.38 mm and 0.38~0.18 mm by using CF-2000P polarization analysis software and Fractalfox2.0 fractal analysis software. Testing result shows that with the decrease of coal particle size, briquette pore radius decreases, the total number of pores and fractal dimension increase. And the more the pore develops, the more uniform the pore distributes.

Key words: coal particle size; pore size; briquette; fractal dimensions

煤是一种无序的非均匀孔隙介质, 煤体中的孔隙是煤层瓦斯的储集场所与运移通道, 其结构特征(孔隙数量、单个孔隙大小、孔隙分布特征及孔隙连

通程度等)直接影响着煤层瓦斯的运移与富集^[1]。近年来, 笔者所在学术团队对煤与瓦斯突出进行了相关的模拟实验研究^[2], 实验表明, 煤体的物理力学

收稿日期: 2011-04-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50974141); 国家科技重大专项项目(2008ZX05034-002); 国家自然科学基金重点项目(50534080); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB201203)

作者简介: 许江(1960-), 男, 博士, 重庆大学教授、博士生导师, 主要从事岩石力学、煤与瓦斯突出机理及预测研究工作, (E-mail)jiangxu@cqu.edu.cn。

性质对煤与瓦斯突出有着重要的影响,而煤体的孔隙结构是煤体物理力学性质较重要的一个方面,同时,目前较多的实验都是以型煤为研究对象,因此,开展型煤颗粒孔隙及其发育特征方面的研究具有重要的学术价值,可为进一步研究煤与瓦斯突出规律提供相应的理论指导。

目前,国内外学者对原煤的孔隙结构特征进行了大量的实验研究,王晓亮等^[3]为研究煤粉热解过程中孔隙分形维数的变化规律,更好地预测煤焦的燃烧行为,建立了基于颗粒分形孔隙的热解模型,对煤颗粒热解过程中孔隙分形维数的变化进行数值模拟;程军等^[4]利用氮气吸附仪、沉降炉、扫描电镜(SEM)和X-射线能谱仪(EDS)研究了动力配煤的孔隙分形结构对着火和燃烧特性的影响;王文峰等^[5]通过对淮南、淮北两个研究区内不同煤级煤样的研究表明用分形维数可以表示煤的孔隙结构特征;蒋林等^[6]应用压汞测孔法结合分形理论描述类似生物质型煤孔体系的孔结构,此外还有很多学者利用电子显微术、密度法、压汞法等实验方法对原煤的孔隙特征进行了研究,并取得了一定的成果^[7-14]。但目前为止,分析型煤煤样孔隙特征的文献则相对较少。基于此,拟以不同粒径下的型煤为研究对象,利用CF-2000P偏光分析软件和Fractalfox2.0分形分析软件对型煤的孔隙特征进行研究,以探讨煤颗粒粒径对型煤孔隙结构的影响,为进一步研究煤体物理力学性质对煤与瓦斯突出的影响规律及瓦斯在型煤中的富集和运移规律奠定基础。

1 煤样制作及图像采集

实验所用煤样取自重庆松藻煤电公司打通一矿8号煤层,该煤层位于煤系中部,平均厚2.85 m,属煤与瓦斯突出煤层,其工业分析见表1,表中M代表水分,A代表灰分,V代表挥发分, F_c 代表固定碳,ad代表空气干燥基。

所取原煤经破碎机破碎后通过振动筛筛分出粒径分别为4.00~1.70 mm、1.70~0.38 mm以及0.38~0.18 mm 3种煤颗粒,然后分别将这些煤颗粒在4.0 MPa成型压力条件下压制成 $\phi 50$ mm \times 50 mm的型煤试件备用。

按照下述步骤采集图像素材:1)采用1 080万像素的高分辨率数码相机对每个型煤试件的圆柱端面拍照,图1为3种粒径型煤试件的圆柱端面的典型图像;2)选取7个图像观测点,圆柱端面的圆心为第一个观测点,其余6个观测点均匀地分布在半径为15 mm的圆周上,如图2所示;3)以各观测点为中心截取10 mm \times 10 mm的分析用图像,图3则具体给出了不同粒径条件下型煤试件各观测点的典型图像。

表1 8号煤层煤样的工业分析 %

M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	$F_{c,ad}$
1.66	20.66	8.71	80.64

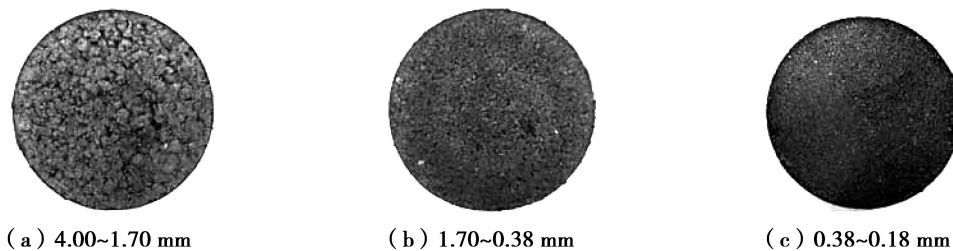


图1 型煤表面图样采集示例

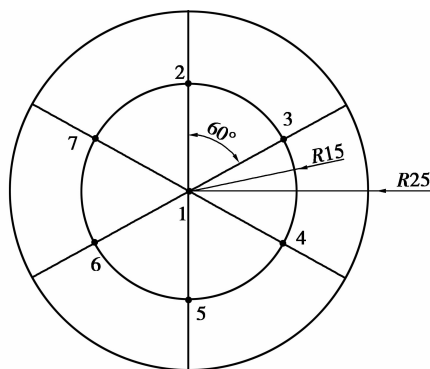


图2 观测点示意图

2 孔隙特征分析

2.1 CF-2000P 偏光分析软件简介

CF-2000P偏光分析软件主要用来分析固体材料的孔隙结构特征,其基本原理是以视频采集卡或数码相机等设备来采集材料结构图片,再对采集到的图片进行处理和分析,得到材料最大、最小孔隙半径以及孔隙率等相关检验结果。该软件还带有专用的图像分析软件功能模块。

本实验主要研究型煤的孔隙特征,因此选用该

软件中的铸体薄片孔隙特征分析模块进行实验,其基本原理是:在选定铸体薄片孔隙特征分析模块后,通过对导入的图像进行孔隙色度提取、去除杂点、色彩还原等处理,最后通过软件自动计算测定型煤孔隙率及孔隙半径等参数。

2.2 孔隙特征分析

经 CF-2000P 偏光分析软件对截取自各型煤端

面照片的 7 个 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 小图样进行分析后,获得了各型煤煤样表面孔隙结构特征参数,图 4 分别给出了 3 种不同粒径型煤的孔隙结构特征典型图像,其相应的平均孔隙总数、平均最大孔隙半径、平均最小孔隙半径、平均孔隙半径以及平均孔隙率等孔隙结构特征参数的测试值、平均值及其标准偏差参见表 2、3。

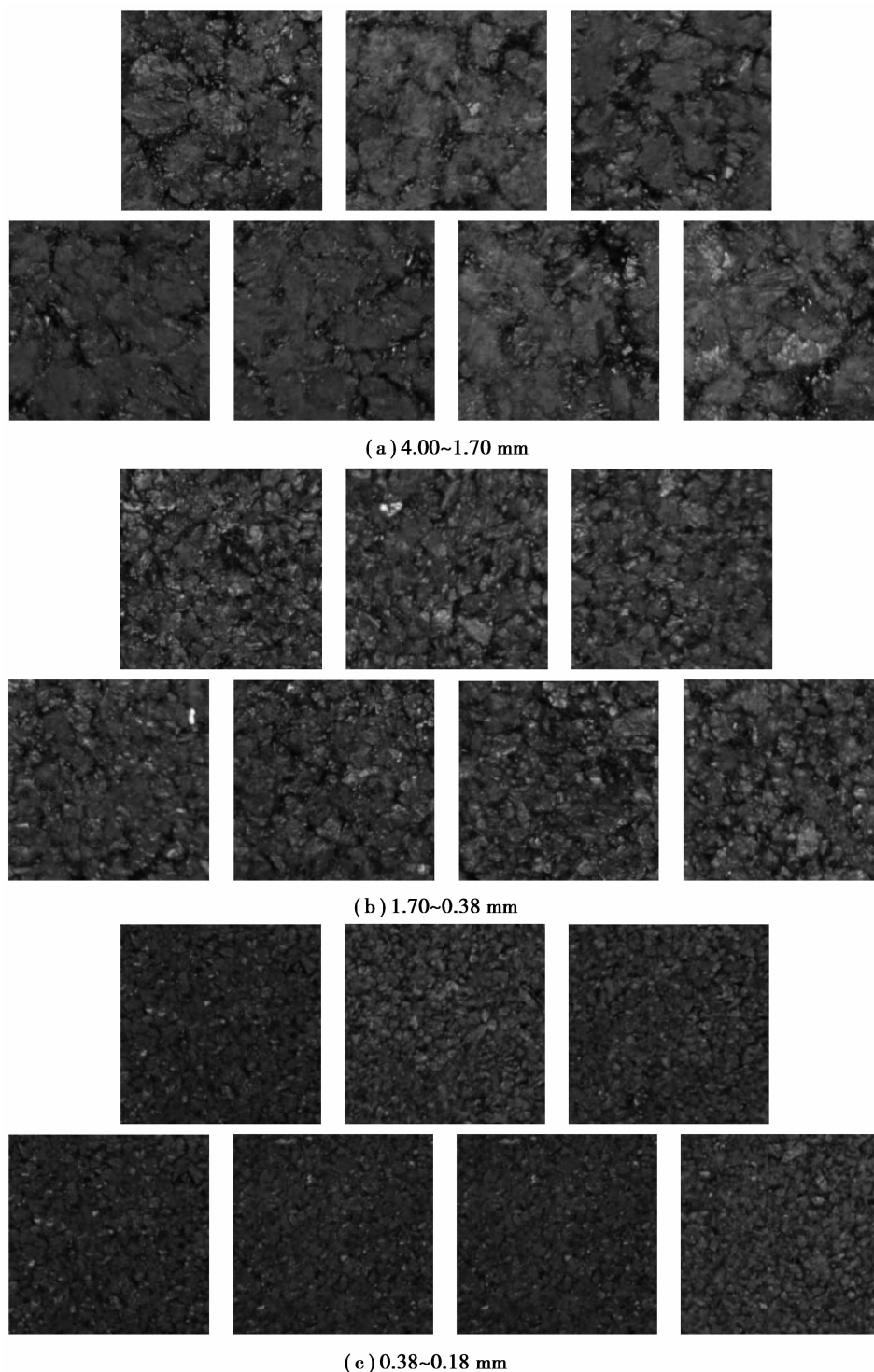


图 3 型煤分析用图样采集示例 ($10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$)

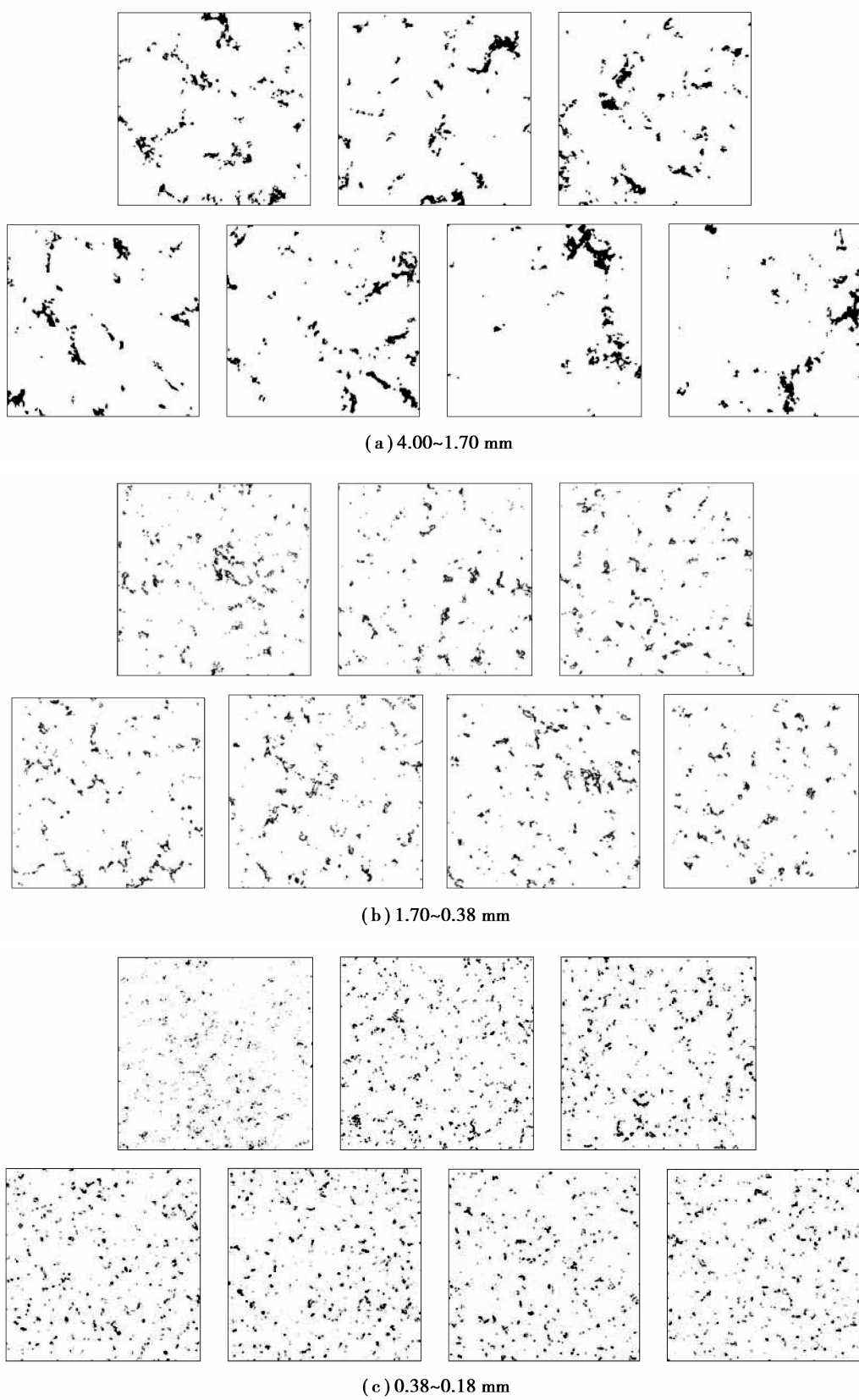


图 4 型煤孔隙结构图(10 mm×10 mm)

表2 型煤表面孔隙特征测试结果

试件 编号	观测点 图样 编号	4.00~1.70 mm					1.70~0.38 mm					0.38~0.18 mm				
		孔隙 总数 /个	最大孔 隙半径 /μm	最小孔 隙半径 /μm	孔隙 半径 /μm	孔隙 率/%	孔隙 总数 /个	最大孔 隙半径 /μm	最小孔 隙半径 /μm	孔隙 半径 /μm	孔隙 率/%	孔隙 总数 /个	最大孔 隙半径 /μm	最小孔 隙半径 /μm	孔隙 半径 /μm	孔隙 率/%
1	1	141	399.26	29.85	75.65	3.88	341	215.35	10.81	41.81	2.46	916	71.65	11.78	15.58	0.84
	2	88	506.14	31.92	87.22	3.59	224	248.12	10.81	46.79	2.31	591	88.93	11.78	28.13	1.66
	3	126	363.54	31.92	76.87	3.72	240	193.34	18.72	49.30	2.41	460	93.49	11.78	32.47	1.81
	4	87	373.90	11.28	85.6	3.45	243	196.04	15.29	49.28	2.59	564	88.14	11.78	27.26	1.66
	5	101	440.07	25.23	83.26	3.84	305	195.75	15.29	44.18	2.75	781	95.69	11.78	23.30	1.94
	6	70	758.28	25.23	84.86	3.45	253	356.67	15.29	51.78	2.99	397	116.60	11.78	31.98	1.58
	7	70	524.06	31.92	88.47	3.25	194	177.60	15.29	49.43	2.05	569	97.13	11.78	26.25	1.51
2	1	169	405.25	11.44	67.88	3.83	284	191.13	11.13	46.64	2.80	493	91.24	11.78	25.06	1.16
	2	69	337.16	25.59	93.05	3.07	242	242.78	15.74	50.33	2.70	694	99.25	11.78	22.33	1.54
	3	116	358.62	19.82	75.36	3.57	256	196.56	15.74	46.08	2.56	957	74.49	11.78	18.82	1.40
	4	126	410.71	16.18	74.33	3.79	142	215.21	11.13	56.83	2.19	717	119.54	11.78	24.35	1.61
	5	95	287.24	16.18	80.51	3.14	214	335.14	15.74	45.21	2.11	822	98.55	11.78	23.70	1.73
	6	109	332.07	25.29	75.02	3.40	237	190.81	15.74	44.41	2.04	528	100.64	11.78	24.34	1.18
	7	72	352.91	25.59	89.38	3.09	293	167.29	11.13	39.52	2.02	394	205.03	11.78	30.30	1.57
3	1	141	297.88	20.86	71.49	3.47	186	222.53	24.54	57.82	2.26	742	93.67	11.44	23.73	1.59
	2	77	401.57	14.75	99.26	3.55	174	182.68	10.98	56.18	2.00	494	109.77	11.44	29.99	1.85
	3	85	462.01	10.43	91.23	3.85	160	184.98	15.52	57.65	1.94	450	84.10	11.44	27.39	1.19
	4	96	366.16	14.75	81.07	3.30	202	153.28	26.89	55.08	2.21	546	84.87	11.44	25.78	1.42
	5	126	412.39	29.49	73.73	3.82	140	240.73	32.93	56.33	1.72	452	106.13	16.18	28.68	1.49
	6	119	288.04	29.49	78.18	3.25	156	199.70	41.07	69.65	2.55	497	107.35	11.44	27.43	1.53
	7	99	395.71	29.49	82.27	3.43	169	170.05	31.05	58.05	2.05	425	99.11	19.82	29.53	1.35
4	1	120	378.70	30.63	75.71	3.35	189	230.02	30.28	57.05	2.23	660	123.42	11.13	21.86	1.45
	2	75	579.43	18.76	88.37	3.23	104	204.72	34.33	72.03	2.03	450	104.98	15.74	28.25	1.42
	3	95	363.38	15.31	81.00	3.11	132	259.20	34.33	71.57	2.47	329	101.99	11.13	29.72	1.06
	4	72	402.86	30.63	88.07	2.77	286	163.85	11.44	39.22	1.84	358	105.57	11.13	32.49	1.46
	5	101	323.24	21.66	84.55	3.59	158	239.78	28.03	63.81	2.27	399	149.71	15.74	30.02	1.57
	6	165	385.46	10.83	61.50	3.80	162	248.63	22.89	65.63	2.61	442	124.41	15.74	28.83	1.53
	7	135	366.91	10.83	58.22	2.99	135	375.74	34.33	67.60	2.42	580	141.64	11.13	22.92	1.50

表3 型煤表面孔隙特征平均值及其标准偏差

煤颗粒 粒径/mm	平均孔隙总数/个		平均最大孔隙半径/μm		平均最小孔隙半径/μm		平均孔隙半径/μm		平均孔隙率/%	
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
4.00~1.70	105.18	4.99	402.61	55.27	21.98	3.26	80.43	0.92	3.45	0.15
1.70~0.38	207.89	46.28	221.35	21.70	20.59	7.50	53.90	7.49	2.31	0.17
0.38~0.18	560.96	89.86	106.32	13.20	12.50	0.83	26.45	1.65	1.49	0.06

分析表2、3所给出的计算结果可知,随着颗粒粒径的变化,型煤孔隙特征参数也随之发生如下相应变化:1)粒径为4.00~1.70 mm的型煤,其平均孔隙总数为105个,粒径为1.70~0.38 mm的型煤为208个,然后又增加到0.38~0.18 mm时的561个,将近成倍的增大;2)平均最大孔隙半径由粒径4.00~1.70 mm时的402.61 μm 减小到1.70~0.38 mm时的221.35 μm ,直到0.38~0.18 mm时的106.32 μm ;3)平均最小孔隙半径由粒径4.00~1.70 mm的21.98 μm 减小到1.70~0.38 mm的20.59 μm ,再减小到0.38~0.18 mm的12.50 μm ;4)平均孔隙半径由粒径为4.00~1.70 mm的80.43 μm 减小到1.70~0.38 mm的53.90 μm ,再减小到0.38~0.18 mm的26.45 μm ;5)平均孔隙率则由粒径4.00~1.70 mm的3.45%降低到1.70~0.38 mm的2.31%,最后又降到0.38~0.18 mm的1.49%。

通过偏光分析软件对型煤表面孔隙测试表明,随着煤颗粒粒径的逐渐减小,型煤的孔隙总数越来越多,但型煤的平均最大孔隙半径、平均最小孔隙半径和平均孔隙半径都在逐渐减小,型煤的孔隙率也逐渐减小。且从上表计算的数据结果可以明显的看出,型煤孔隙特征的各项参数随着粒径的不同也有着如上所述的显著规律性的改变。

3 型煤孔隙发育程度的分形特征

3.1 孔隙分形维数的计算

分形理论于20世纪70年代由Mandelbrot^[14]创立,其研究对象为自然界和社会生活中广泛存在的无序(无规则)而具有自相似性的系统。至今已经发展出了十多种不同的维数,包括拓扑维、Hausdorff维、自相似维、盒子维、信息维、关联维等^[15-18]。

煤是一种无序的非均匀孔隙介质,由于其孔隙结构的随机性,难以用传统的欧几里德理论予以描述,分形几何学理论的出现为煤孔隙结构的研究提供了一种全新方法。它将不规则而又具有一定自相似或者自仿射形态的几何体集合视为分形体,按分形几何学的方法就可以定量求解出分形体的空间分布特征参数——分形维数,从而准确、有效地刻画出几何体的形态。笔者将采用Kolomogrov容量维即盒维数来表征成型煤样表面孔隙的分形特征。

容量维又可称为盒维数(Box-counting dimension),是Hausdorff的一种具体表现。设 (X, d) 为一距离空间, $A \in \xi(X)$, 对每一个 $\epsilon > 0$, 设

$N(A, \epsilon)$ 表示用来覆盖 A 的半径为 ϵ 的最小闭球数, 如果下式存在:

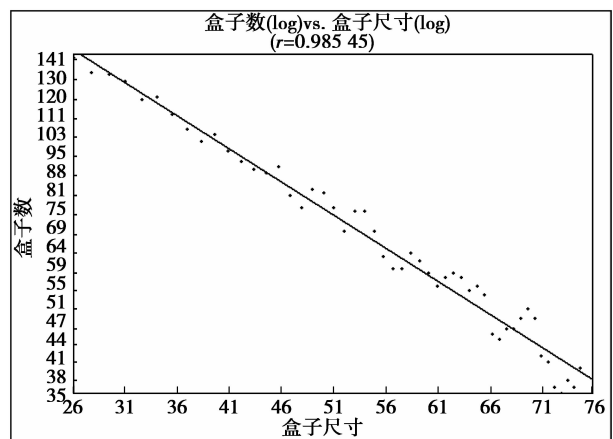
$$D_f = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(A, \epsilon)}{\ln 1/\epsilon}, \quad (1)$$

则称 D_f 为 A 的Kolomogrov容量维。

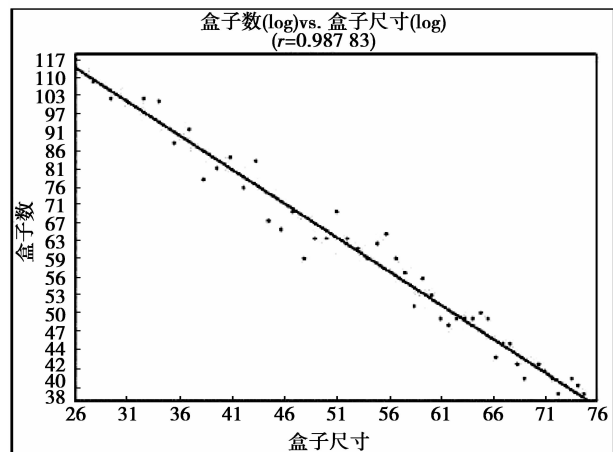
3.2 型煤表面孔隙发育程度的分形分析

根据盒维数的计算原理,利用Fractalbox2.0分形软件对3种不同颗粒粒径的型煤进行了分形维数的计算,图5为4.00~1.70 mm煤颗粒粒径下一个型煤煤样各观测点的孔隙分形维数计算示意图,图6为3种粒径煤颗粒型煤孔隙分形维数示意图,图中横坐标表示盒子的尺寸,纵坐标表示某盒子尺寸下孔隙所占据的盒子数,图中拟合直线斜率的绝对值即为该粒径下型煤孔隙结构特征的分形维数, r 为拟合直线的相关系数。

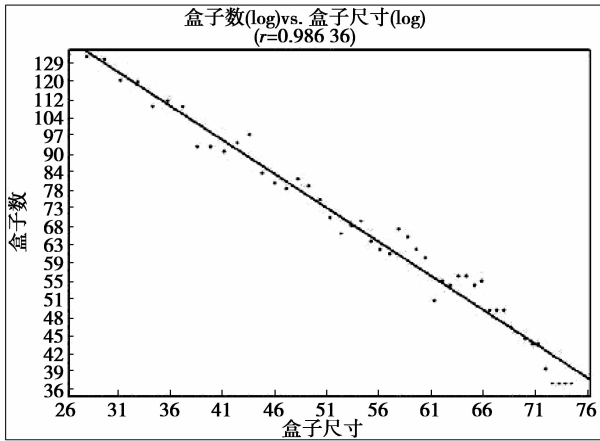
通过计算,图6所示的粒径为4.00~1.70 mm型煤表面孔隙结构特征的分维值为1.06,相关系数为0.9855,可见该型煤在此观察尺度范围内具有统计意义上的分形特征。



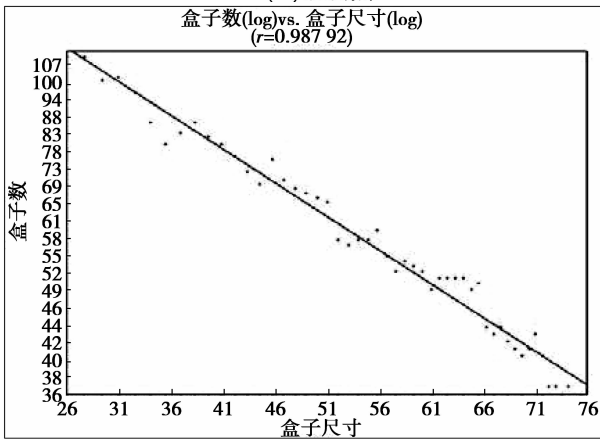
(a) 观测点1



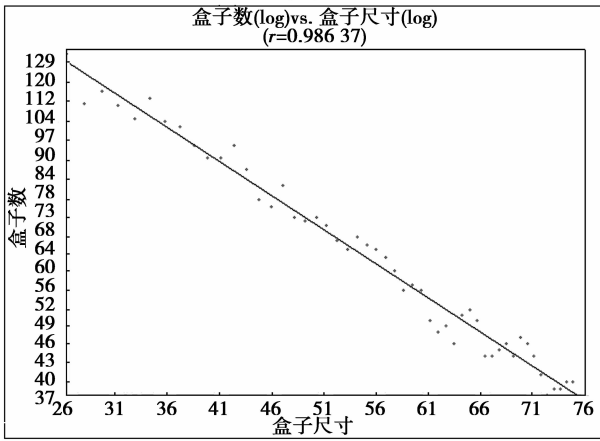
(b) 观测点2



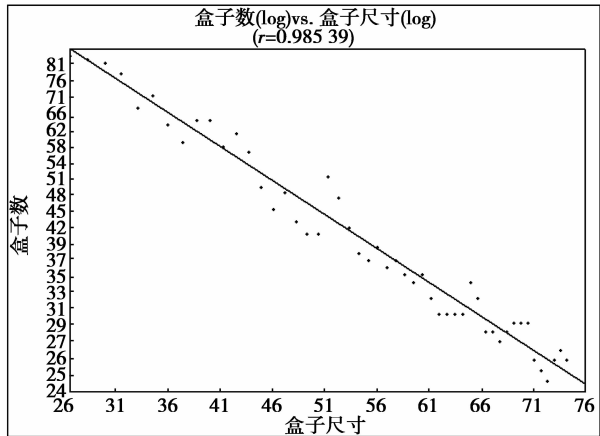
(c) 观测点3



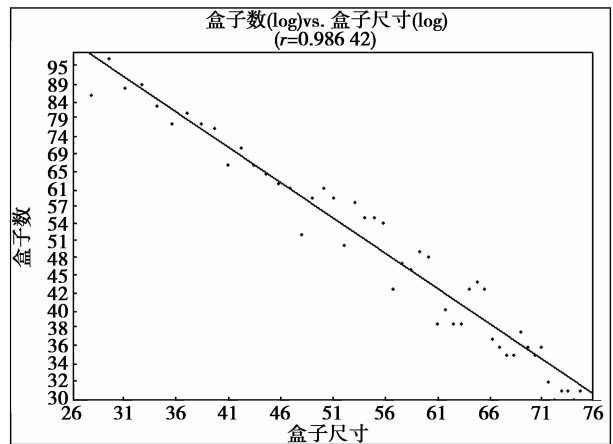
(d) 观测点4



(e) 观测点5

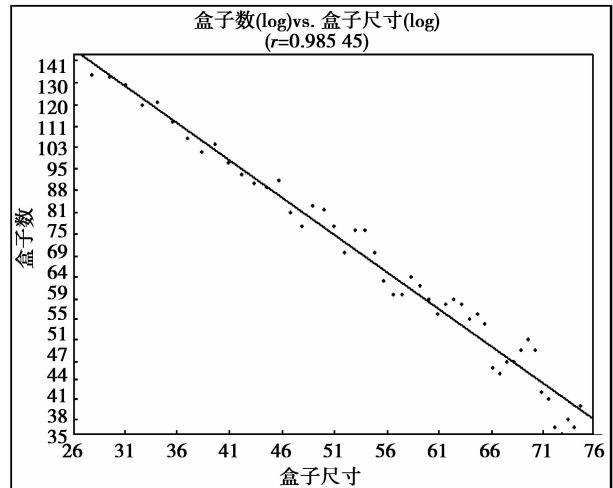


(f) 观测点6

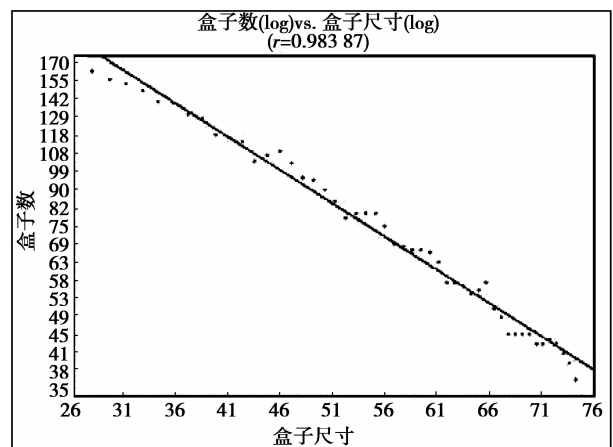


(g) 观测点7

图5 4.00~1.70 mm 型煤表面孔隙分形维数计算示例



(a) 4.00~1.70 mm



(b) 1.70~0.38 mm

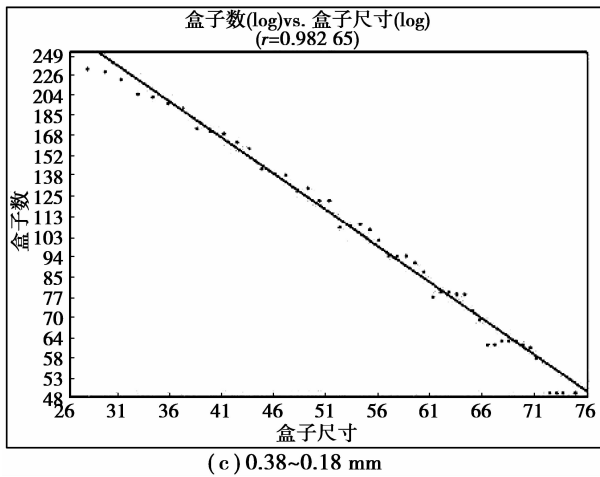


图 6 不同颗粒粒径型煤表面孔隙分布分形维数计算示例

由分形理论可知,煤样表面孔隙分布的分维值越大,其孔隙越发育,分布越均匀。从表 4 中可以看出,颗粒粒径由 4.00~1.70 mm 减小到 0.38~0.18 mm 时,型煤的分形维数相应地由 1.06 增加到 1.45,说明随着煤颗粒粒径的逐渐减小,型煤的孔隙越发育,孔隙分布越均匀。而在上节中通过对不同粒径煤颗粒型煤的孔隙特征研究也发现随着颗粒粒径的减小,型煤孔隙总数逐渐增加,孔隙分布均匀程度逐渐增大。同时,通过对型煤各个煤样的圆柱端面进行观察发现,颗粒粒径为 0.38~0.18 mm 的型煤,其孔隙数比粒径为 4.00~1.70 mm 及 1.70~0.38 mm 的型煤要多,且孔隙分布比另外两种粒径的型煤要均匀,说明用分形维数的大小来表征不同粒径下型煤的孔隙发育程度是符合实际的。

表 4 型煤样表面孔隙分布分形维数

试件编号	观测点 图样 编号	4.00~1.70 mm			1.70~0.38 mm			0.38~0.18 mm		
		分形 维数	平均分 形维数	标准 偏差	分形 维数	平均分 形维数	标准 偏差	分形 维数	平均分 形维数	标准 偏差
1	1	1.20			1.36			1.55		
	2	0.97			1.24			1.59		
	3	1.12			1.32			1.51		
	4	0.96			1.27			1.54		
	5	1.10			1.34			1.49		
	6	1.06			1.31			1.45		
	7	1.04			1.24			1.47		
2	1	1.23			1.38			1.30		
	2	1.04			1.31			1.34		
	3	1.15			1.27			1.37		
	4	1.06			1.09			1.55		
	5	0.97			1.24			1.59		
	6	1.08			1.21			1.32		
	7	1.01	1.06	0.01	1.36	1.24	0.06	1.25	1.45	0.05
3	1	1.08			1.26			1.49		
	2	1.09			1.17			1.45		
	3	1.10			1.14			1.48		
	4	1.00			1.28			1.38		
	5	1.11			1.11			1.43		
	6	1.14			1.20			1.34		
	7	1.02			1.18			1.43		
4	1	1.07			1.25			1.48		
	2	1.02			0.99			1.51		
	3	1.03			1.15			1.49		
	4	0.98			1.31			1.45		
	5	1.11			1.28			1.44		
	6	1.11			1.22			1.49		
	7	1.01			1.13			1.45		

5 结 语

以不同粒径下的型煤为研究对象,利用 CF-2000P 偏光分析软及 Fractalfox2.0 分形软件分别对不同粒径下的型煤孔隙结构特征及其孔隙发育程度进行了研究,所得主要结论如下:

1)将 CF-2000P 偏光分析软件及 Fractalfox2.0 软件首次应用于对不同颗粒粒径的型煤进行孔隙结构特征的分析,分析结果与实际煤样较吻合,说明采用该方法研究型煤表面孔隙特征及其发育程度具有一定的可行性;

2)对于同种煤质的煤,在相同成型条件下,颗粒粒径越大的型煤,其孔隙总数越少,孔隙半径越大,孔隙率也越大;

3)用分形维数的大小可表征不同粒径下型煤的孔隙发育程度。对于同种煤质的煤,在相同成型条件下,颗粒粒径越大的型煤,其孔隙的分形维数越小,表明孔隙越不发育,分布也越不均匀。

参考文献:

- [1] MEYERS R A. Coal structure [M]. New York: Academic Press, 1982: 78-83.
- [2] 许江,陶云奇,尹光志,等. 煤与瓦斯突出模拟试验台的研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2354-2362.
XU JIANG, TAO YUN-QI, YIN GUANG-ZHI, et al. Development and application of coal and gas outburst simulation test device[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2354-2362.
- [3] 王晓亮,何榕,陈永利. 煤颗粒热解过程中孔隙分形维数变化的数值模拟[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2008, 48(2): 244-247.
WANG XIAO-LIANG, HE RONG, CHEN YONG-LI. Numerical simulation of pore fractal dimension evolution during coal pyrolysis[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2008, 48(2): 244-247.
- [4] 程军,潘华引,黄镇宇,等. 神华配煤孔隙分形对燃烧特性的影响[J]. 浙江大学学报:工学版, 2009(5): 920-925.
CHENG JUN, PAN HUA-YIN, HUANG ZHEN-YU, et al. Effects of pore fractal structures on combustion of Shenhua coal blends [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2009(5): 920-925.
- [5] 王文峰,徐磊,傅雪海. 应用分形理论研究煤孔隙结构[J]. 中国煤田地质, 2002, 14(2): 26-27.
WANG WEN-FENG, XU LEI, FU XUE-HAI. Study on pore texture of coal with fractal theory [J]. Coal Geology of China, 2002, 14(2): 26-27.
- [6] 蒋林,骆仲泱,方航宇,等. 基于孔隙分形几何的生物质型煤固硫性能研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2002, 26(1): 69-73.
JIANG LIN, LUO ZHONG-YANG, FANG YU-HANG, et al. Research on sulfur retention of bio-briquette based on pore fractal geometry [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2002, 26(1): 69-73.
- [7] 傅雪海,秦勇,周荣福,等. 基于煤层气运移的煤孔隙分形分类及自然分类研究[J]. 科学通报, 2005, 50(s1): 51-55.
FU XUE-HAI, QIN YONG, ZHOU RONG-FU, et al. Study on fractal and natural classify of coal porosity based on CBM [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(s1): 51-55.
- [8] 张玉涛,王德明,仲晓星. 煤孔隙分形特征及其随温度的变化规律[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(11): 73-76.
ZHANG YU-TAO, WANG DE-MING, ZHONG XIAO-XING. Features of fissure sharp in coal borehole and variation law with temperature [J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(11): 73-76.
- [9] MA HAMUD M M, NOVO M F. The use of fractal analysis in the textural characterization of coals [J]. Fuel, 2008, 87(2): 222-231.
- [10] YAO Y B, LIU D M, TANG D Z, et al. Fractal characterization of adsorption-pores of coals from North China: an investigation on CH₄ adsorption capacity of coals [J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 73(1): 27-42.
- [11] 平传娟,周俊虎,程军,等. 混煤热解过程中的表面形态[J]. 化工学报, 2007, 58(7): 1798-1804.
PING CHUAN-JUAN, ZHOU JUN-HU, CHEN JUN, et al. Surface structure of blended coals during pyrolysis [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007, 58(7): 1798-1804.
- [12] 郭立稳,肖藏岩,刘永新. 煤孔隙结构对煤层中 CO 扩散的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(5): 636-640.
GUO LI-WEN, XIAO CANG-YAN, LIU YONG-XIN. Effect of coal pore structure on the CO [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 36(5): 636-640.
- [13] WANG X L, HE R. Comparisons of fractal properties of porous structures during coal devolatilization [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2007, 24(3): 466-470.
- [14] MANDELBROT B B. Fractal, Form, Chance, and Dimension [M]. San Francisco: W. H. Freeman, 1977.
- [15] KARACAN C. An effective method for resolving spatial distribution of adsorption kinetics in heterogeneous porous media: application for carbon dioxide sequestration in coal [J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58(20): 4689-4692.
- [16] FRIESEN W I, MIKULE R J. Fractal dimensions of coal particles [J]. Journal of colloid and Interface Science, 1987, 20(1): 263-271.
- [17] LIANG Z G, HE R, CHEN Q, et al. Fractal generation of char pores through random walk [J]. Combustion Science and Technology, 2007, 179(3): 637-661.
- [18] 陈颀,陈凌. 分形几何学 [M]. 北京:地震出版社, 2005.