

李娇阳,李凯琦.煤表面润湿性的影响因素[J].煤炭学报,2016,41(S2):448-453.doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.1656

Li Jiaoyang, Li Kaiqi. Influence factors of coal surface wettability [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S2): 448-453. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.1656

## 煤表面润湿性的影响因素

李娇阳 李凯琦

(河南理工大学 资源环境学院 河南 焦作 454000)

**摘要:** 为了深入研究煤表面润湿性的影响机理, 选用 16 种不同变质程度的煤样, 利用 JC2000C1 接触角测量仪表征润湿性大小。通过煤尘的镜质组反射率测定、工业分析、元素分析、红外光谱实验、激光粒度仪测定, 研究了煤的变质程度(煤阶)、化学组成、含氧官能团、粒度分形维数、比表面积等性质, 并用最小二乘法与接触角建立线性拟合。研究表明: 煤表面润湿性主要取决于氧含量、水分、灰分和含氧官能团; 亲水性含氧官能团主要为  $910 \sim 940 \text{ cm}^{-1}$  羟基变形振动和  $3\,400 \sim 3\,450 \text{ cm}^{-1}$  芳香羟基伸缩, 在所测煤样中羰基和羧基表现不明显; 同时随着煤阶、碳含量、固定碳的增大, 其接触角逐渐增大, 润湿性变差; 利用分形维数表征粒度分布, 随着煤粒径  $D_{10}$ 、 $D_{50}$ 、 $D_{90}$  变小, 分形维数增大, 接触角变大, 润湿性变差。

**关键词:** 煤; 润湿性; 接触角; 影响因素

中图分类号: TD714 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2016)S2-0448-06

### Influence factors of coal surface wettability

LI Jiao-yang, LI Kai-qi

(School of Resource and Environment Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** In order to study the influence mechanism of coal surface wettability, 16 kinds of coals with different metamorphic degrees were characterized by the measurement of contact angle. Metamorphic of coal (rank), chemical composition, oxygen containing functional groups, the fractal dimension of coal, and the specific surface area were studied by means of vitrinite reflectance determination, industry analysis, elemental analysis, infrared spectrum experiment, and the determination of laser granulometer. The least square method and the contact angle were used to establish the linear fitting. The results verify that coal surface wettability mainly depends on oxygen content, moisture, ash and the content of functional groups. The hydrophilic functional groups mainly include the  $910\text{--}940 \text{ cm}^{-1}$  hydroxyl deformation and the  $3\,400\text{--}3\,450 \text{ cm}^{-1}$  aromatic hydroxyl extension, carbonyl and carboxyl groups were not obvious in the samples. At the same time, along with the increase of coal rank, carbon content and fixed carbon, the contact angle increase and the wetting property becomes worse. Fractal dimension is used to characterize particle size distribution, with the coal particle size  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  and  $D_{90}$  becoming smaller, the fractal dimension increases, the contact angle becomes larger, and the wetting property becomes worse.

**Key words:** coal; wettability; contact angle; influence factors

煤尘的润湿特性是有效降尘、防突、防瓦斯的关键。在防尘、防瓦斯措施中,常采用煤层注水、喷雾洒水、添加表面活性剂、泡沫除尘等措施来提高煤水的

润湿性,达到防尘、防突的效果<sup>[1-4]</sup>。在煤层气开采过程中,添加合适的表面活性剂对煤体的润湿特性进行改造,最大限度地改善煤层气渗流通道和解吸条

件,从而提高煤层气产量<sup>[5]</sup>。在煤的深加工方面,煤的浮选和煤粉改性做橡胶制品等都与煤表面润湿性密切相关;浮选分离的依据是润湿性,通过使不欲浮的矿物表面变得更加亲水,抑制上浮,根据其不同矿物的润湿性合理的添加浮选药剂和矿浆<sup>[6]</sup>。煤粉改性做橡胶制品,使煤粉研磨至超细颗粒,经偶联剂改性后,其表面亲水性变为疏水性,同时其活性增大,分散程度提高,达到制作橡胶的目的<sup>[7]</sup>。因此煤表面润湿性的研究非常重要。

对于煤的润湿机理,一些学者做了以下研究。杨静<sup>[8]</sup>研究了煤尘表面化学结构、表面电性与表面润湿性的关系,阐述了溶液润湿煤尘的微观本质。董平<sup>[9]</sup>研究了超细煤粉表面的润湿性,不同变质程度的超细煤粉表面当粒度发生改变的时候,都变成了强疏水表面。孙银宇等<sup>[10]</sup>研究了表面活性剂种类、最佳浓度和表面张力以及煤尘的表面基团。本文在前人研究的基础上从煤尘组成、煤阶、官能团、粒度、比表面积,这五部分分析研究煤表面润湿性的影响因素。

## 1 实验样品和实验方法

### 1.1 实验样品

实验选用 16 种不同煤质的煤样,分别为平顶山

矿区、安阳矿区和山西矿区。煤样以及编号如下:平煤一矿丁组(1)、平煤一矿戊组亮煤(2)、平煤一矿戊组暗煤(3)、平煤二矿己组(4)、平煤二矿庚组(5)、平煤三矿己组丝炭(6)、平煤三矿己组亮煤(7)、平煤三矿己组暗煤(8)、平煤八矿丁组(9)、平煤八矿戊组(10)、平煤八矿己组(11)、安阳主焦煤(12)、安阳贺陀煤矿(13)、安阳红岭煤矿(14)、山西气煤(15)、山西长焰煤(16)。将 16 种煤样分别通过球磨机破碎煤体,再由 300 目标标准筛进行筛分,制得实验煤粉。

### 1.2 实验方法

(1) 煤表面润湿性的测定:采用 JC2000C1 接触角测量仪,利用成型煤粉法<sup>[11-12]</sup>,取 200 mg 煤粉在 10 MPa 压力下压制成直径 13 mm,厚度 2 mm 的具有光滑平面的圆柱体煤片,用洗耳球吹去煤片上的煤粉,测定接触角。接触角表征润湿性,接触角越小,亲水性越好。见表 1。

(2) 煤工业分析、元素分析测定:参照国家标准 GB/T 212—2001《煤的工业分析方法》和 GB/T 476—2001《煤的元素分析方法》对 16 种实验煤粉进行煤质特征分析,见表 2。

(3) 煤镜质组反射率测定:采用 Leitz MPV-3 型显微分光光度计测定 16 种煤样的镜质体反射率,见表 2。

表 1 16 种煤样的煤表面接触角

Table 1 16 kinds of contact angle of coal samples

煤样编号	接触角/(°)	煤样编号	接触角/(°)	煤样编号	接触角/(°)	煤样编号	接触角/(°)
1	68.00	5	69.76	9	71.26	13	73.00
2	65.00	6	65.00	10	70.00	14	72.00
3	62.00	7	72.09	11	72.03	15	68.80
4	70.56	8	70.00	12	72.76	16	64.00

(4) 煤的 FTIR 光谱测定:采用 Bruker TENSOR 27 光谱仪,将 16 种煤粉和 KBr 分别在 100 °C 的真空干燥箱中烘干 10 h,后取出煤粉和 KBr 按 1:200 比例混合在一起,在玛瑙研钵中均匀研磨,研磨后再在烘箱中烘干 1 h,制得的混合物放入压片磨具中压制成片<sup>[13]</sup>,放置于 Bruker TENSOR 27(扫描范围:8 000~350 cm<sup>-1</sup>;分辨率:4 cm<sup>-1</sup>) 红外光谱仪中进行测试。

(5) 煤粒度分布测定:采用 Winner 3001 激光粒度测试仪,对 6 号(1/3 焦煤)、13 号(贫煤)、16 号(长焰煤)3 个不同变质程度的煤样,经过标准筛筛分成 200~300 目、300~400 目、500 目以下 3 个粒度级别的煤样,6 号煤样 200~300 目、300~400 目、500 目分别标记为 6-1、6-2 和 6-3,13 号和 16 号煤样同

理。将不同粒度级别的煤样由激光粒度仪进行测定,分析其粒度分布。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 煤润湿性的表征

煤表面润湿性最直接的表征方法就是接触角,是液滴接触固体表面,在气-液、固-液三相交界处,气-液界面和固-液界面之间的夹角。一种液体在固体表面的润湿能力受界面自由能控制<sup>[14]</sup>。不同的固体表面的润湿性受其自身性质决定。测得 16 种实验煤粉与蒸馏水的接触角,实验数据见表 1。

### 2.2 煤的化学组成对润湿性的影响

将表 2 工业分析、元素分析测得的相关数据与接触角用最小二乘法进行一元回归分析,经计算建立一系列回归方程,见表 3。

表 2 煤样的工业分析、元素分析和镜质组反射率

Table 2 Industrial analysis, element analysis and vitrinite reflectance of coal samples

%

煤样编号	工业分析				元素分析					$R_{\max}^o$
	$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{ad}$	$FC_{ad}$	$C_{daf}$	$H_{daf}$	$O_{daf}$	$N_{daf}$	$S_{daf}$	
1	1.72	15.53	25.85	56.90	73.01	5.14	20.47	0.93	0.45	0.994 0
2	2.48	17.25	26.33	53.95	69.26	5.14	23.81	0.95	0.84	1.051 0
3	1.60	41.67	18.04	38.69	47.86	3.56	48.58	0	0	1.057 0
4	1.40	11.92	25.99	60.69	75.70	5.64	16.69	1.19	0.78	1.076 0
5	0.92	4.05	27.80	67.23	82.67	5.83	7.47	0.84	3.19	0.936 6
6	1.70	7.70	24.55	66.05	70.77	5.40	22.02	1.10	0.71	1.068 0
7	1.80	7.19	25.52	65.50	81.19	5.79	11.24	1.20	0.58	1.051 0
8	1.79	7.70	24.67	65.84	76.88	5.55	16.45	1.12	0	1.064 0
9	1.34	8.99	19.61	70.05	81.39	5.00	13.47	0.14	0	1.095 0
10	0.86	13.72	26.90	58.52	81.67	5.46	11.59	1.28	0	1.015 0
11	1.20	8.04	21.27	69.50	75.47	5.20	18.08	0.63	0.62	1.309 0
12	0.88	8.07	18.08	72.97	83.54	5.38	9.32	1.24	0.52	1.371 6
13	1.05	8.29	15.68	74.00	86.45	4.70	7.32	1.20	0.33	1.807 6
14	0.97	9.45	16.26	73.32	81.77	5.17	11.42	1.25	0.39	1.592 0
15	1.50	7.54	33.82	57.14	77.85	5.40	15.65	1.10	0	0.770 0
16	1.49	18.49	28.45	48.67	68.46	4.50	26.04	1.00	0	0.540 0

表 3 煤水接触角与组分间的关系

Table 3 Relationship between contact angle and the chemical composition

组成	回归方程	相关系数 $R^2$
$M_{ad}$	$\theta = 75.287 - 4.331 7M_{ad}$	0.307 9
$A_{ad}$	$\theta = 72.561 - 0.279 7A_{ad}$	0.523 1
$V_{ad}$	$\theta = 73.994 - 0.205 V_{ad}$	0.091 3
$FC_{ad}$	$\theta = 50.454 + 0.299 3FC_{ad}$	0.733 4
C	$\theta = 44.542 + 0.324 2C_C$	0.762 2
H	$\theta = 51.312 + 3.442 8C_H$	0.319 7
O	$\theta = 74.208 - 0.289 9C_O$	0.727 6
N	$\theta = 65.911 + 3.406 9C_N$	0.147 2

由表 3 可知,工业分析和润湿性:固定碳和接触角成正相关,是疏水因素;灰分、水分与接触角成负相关,是亲水因素,相关系数分别为 0.523 1 和 0.307 9;在同一采区,暗煤的亲水性一般优于亮煤,主要原因是暗煤灰分高,固定碳含量低,例如 2 号和 3 号煤样,3 号煤质较差,其灰分含量多,为 41.67%,碳含量仅为 38.69%,其接触角为 62°,亲水性较强;煤中的灰分主要由黏土矿物为主,蒙脱石、水云母、绿泥石等黏土矿物离子交换能力较强,具亲水性<sup>[15]</sup>。

元素含量和润湿性:碳含量、氢含量与接触角成正相关,是疏水因素;氧含量与接触角成负相关,是亲水因素,氧元素相关性较大为 0.727 6,氧元素是组成煤中含氧官能团的重要组成元素,以—OH、—COOH、—O—、—OCH<sub>3</sub>、C=O 等形式存在,是煤

重要的亲水基团;氮、硫元素与接触角相关性较小,对润湿性影响不大。

### 2.3 煤阶对润湿性的影响

煤阶(变质程度)指煤中以镜质组为代表的化学结构演化的阶段或程度,是影响煤性质的主要因素。同时镜质组反射率变化与煤的变质程度分类之间有良好的相关性,二者之间存在内在联系。

由表 2 可知,根据煤的挥发分和镜质组反射率,可以大致推断煤的变质程度:1,2,3,4,6 号为 1/3 焦煤;5,9,10 号为肥煤;11,12 号为焦煤;13 号为贫瘦煤;15 号为气煤;16 号为长焰煤。

由图 1 可知,随着镜质组反射率的增加,接触角逐渐增大,润湿性变差,即 16 号为长焰煤,其接触角为 64°,镜质组反射率最低,为 0.54,13 号为贫瘦煤,接触角为 73°,镜质组反射率最高,为 1.807 6;煤的润湿性与煤阶密切相关,在褐煤阶段,褐煤的表面含氧官能团相对多,润湿性好,接触角较小,随着煤阶的增高,其表面含氧官能团逐渐在减少,润湿性便随之下降,在烟煤阶段,烟煤的芳香环开始变多,烟煤的疏水性变大。

### 2.4 煤表面官能团的分析及对润湿性的影响

#### 2.4.1 煤表面官能团的分析

由图 2 可知,其图谱的形状十分相似,其结构骨架特征峰基本一致,说明煤的结构具有相似性,详细

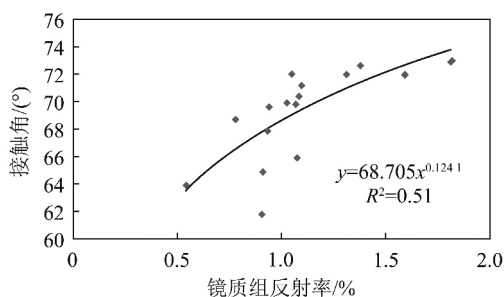


图 1 镜质组反射率与接触角的关系

Fig. 1 Relationship between vitrinite reflectance and contact angle

分析,由图 3 可知,758, 873, 1 623  $\text{cm}^{-1}$ 处出现的是芳香烃; 919  $\text{cm}^{-1}$ 处出现的是羟基变形振动; 1 026, 1 096  $\text{cm}^{-1}$ 处出现的是醚键; 1 380  $\text{cm}^{-1}$ 处出现的是  $-\text{CH}_3$ 的特征峰; 2 850, 2 920  $\text{cm}^{-1}$ 处出现的是脂肪烃; 3 414  $\text{cm}^{-1}$ 出现的是羟基伸缩特征吸收峰,且占的比例最大; 吸收峰 1 700  $\text{cm}^{-1}$ 附近的羰基和羧基吸收峰在所测煤样中无明显吸收峰,不做研究。

2.4.2 煤表面含氧官能团对润湿性的影响

基于 Origin8.5 红外光谱定量分析的数据处理,对 16 种煤样的吸收峰 910~940  $\text{cm}^{-1}$ 羟基变形振动和 3 400~3 450  $\text{cm}^{-1}$ 芳香羟基伸缩数据做拟合

得出峰面积,见表 4。总峰面积和接触角关系如图 4 所示。

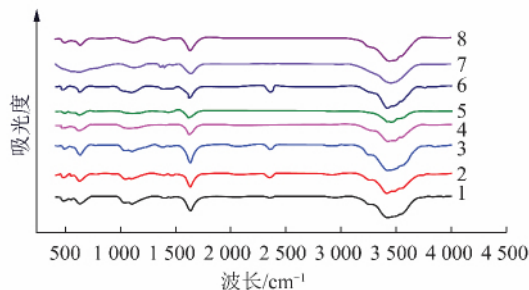


图 2 不同煤阶煤样的红外光谱

Fig. 2 Infrared spectrum of different coal rank

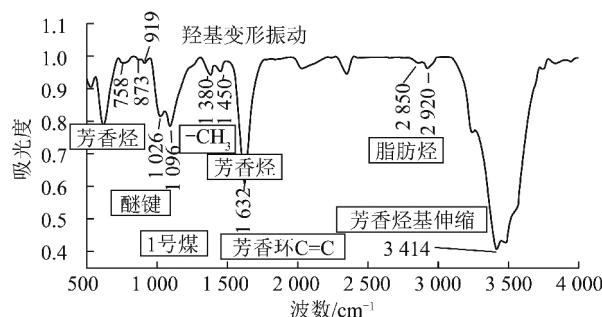


图 3 1号煤样红外光谱

Fig. 3 Infrared spectrum of No. 1 coal sample

表 4 煤样的红外光谱中含氧官能团峰值及峰面积数据

Table 4 Peak data of infrared spectrum of coal dust samples

煤样号	910~940 $\text{cm}^{-1}$		3 400~3 450 $\text{cm}^{-1}$		总峰面积/ $\text{mm}^2$	煤样号	910~940 $\text{cm}^{-1}$		3 400~3 450 $\text{cm}^{-1}$		总峰面积/ $\text{mm}^2$
	峰高/ $\text{mm}$	峰面积/ $\text{mm}^2$	峰高/ $\text{mm}$	峰面积/ $\text{mm}^2$			峰高/ $\text{mm}$	峰面积/ $\text{mm}^2$	峰高/ $\text{mm}$	峰面积/ $\text{mm}^2$	
1	0.981	161.95	0.410	193.81	355.76	9	0.996	14.414	0.541	130.97	145.384
2	0.983	164.59	0.467	172.350	336.94	10	不明显		0.601	105.18	105.18
3	0.9159	189.42	0.443	170.117	359.54	11	不明显		0.696	71.786	71.786
4	0.9808	124.98	0.4642	159.87	284.85	12	不明显		0.621	99.535	99.535
5	0.999	17.1615	0.529	118.588	135.75	13	不明显		0.4022	145.29	145.29
6	0.9887	147.47	0.2952	232.668	380.14	14	不明显		0.510	135.425	135.425
7	0.9962	16.009	0.5339	134.803	150.81	15	不明显		0.490	170.00	170.00
8	0.9974	13.413	0.6228	104.00	117.41	16	不明显		0.370	203.00	203.00

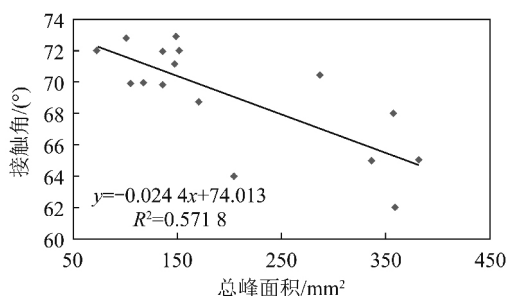


图 4 含氧官能团的总峰面积和接触角的关系

Fig. 4 Relationship between total peak area and contact angle

由表 4、图 4 可知,随着峰高的增加,其峰面积逐

渐减小;随着煤阶的增加,含氧官能团减少,总峰面积减少;煤水接触角随着含氧官能团总峰面积的增加,其接触角逐渐减低,亲水性增强。

2.5 煤粒度分布的分形维数对润湿性的影响

粒度是影响煤润湿性的一个重要的因素,徐英峰和冯海明<sup>[16]</sup>经过试验分析后认为,在确定的润湿时间内,粗尘的润湿效果要好于细尘。李庆钊,林柏泉等<sup>[17]</sup>分析了粒度及表面结构分形维数对颗粒表面润湿特性的影响,发现粒径小于 10  $\mu\text{m}$  的煤尘润湿性最为显著。郁可等<sup>[18]</sup>应用分形几何理论,研究了粉体的粒度分布特征。研究发现,粒度分布具有较好的自

相似性,即具有典型的分形结构特征,公式如下:

$$Y_w(x) \propto x^{3-D} \quad (1)$$

式中,  $x$  为颗粒直径;  $Y_w(x)$  为直径小于  $x$  粒子总质量与颗粒体系粒子总质量之比;  $D$  为分形维数。

若在双对数坐标系下  $Y_w(x) \sim x$  呈现直线关系,  $R^2$  为相关性系数。则表示粉体粒度分布具有分形结构, 设拟合直线斜率为  $b$  则有  $D=3-b$ 。

由表 4 可知, 3 种煤样不同粒度分布的分形维数都在 1.827 4~2.005 4 之间, 且  $R$  都在 0.980 6 以上, 相关性很好。3 种煤样的粒度分形维数和特征粒径的相关性如图 5 所示。由图 5 可知: 随着粒径的减小, 其粒径分形维数逐渐增大, 分形维数增大即粉体的颗粒的分布越集中, 不同粉体不同粒径的分形维数

有一定差异, 因此用分形维数能很好的表征粉体粒度的特性。

表 5 煤样的分布分形维数

Table 5 Distribution fractal dimension of coal

煤种	$D_{50}$ 粒径/ $\mu\text{m}$	$b$	$D$	$R$
6-3	14.34	0.994 6	2.005 4	0.980 6
6-2	24.23	1.054 5	1.945 5	0.980 7
6-1	38.60	1.127 0	1.8730	0.960 9
13-3	13.07	1.008 4	1.991 6	0.980 6
13-2	17.18	1.049 6	1.950 4	0.980 7
13-1	21.99	1.093 0	1.907 0	0.980 6
16-3	12.09	1.073 0	1.927 0	0.980 8
16-2	25.46	1.108 2	1.891 8	0.980 9
16-1	51.05	1.172 6	1.827 4	0.981 1

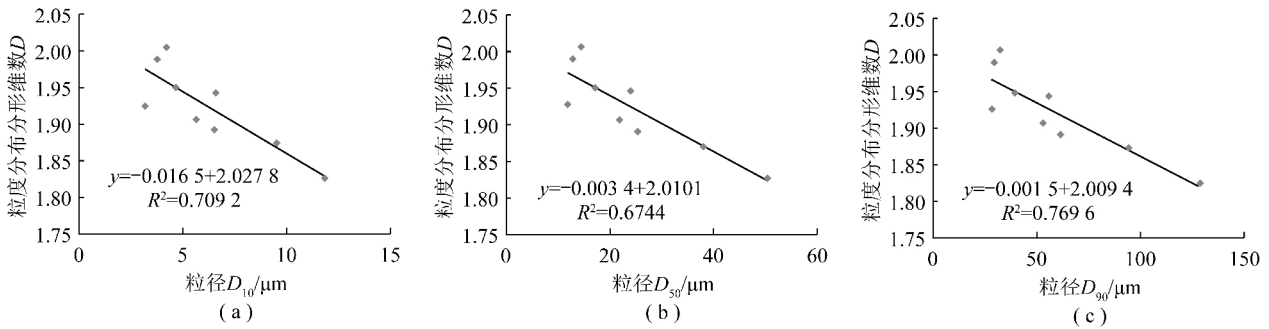


图 5  $D_{10}$   $D_{50}$   $D_{90}$ 与粒度分形维数  $D$  的关系

Fig. 5 Relationship between  $D_{10}$   $D_{50}$   $D_{90}$  and  $D$

3 种煤样的不同粒度级别的煤样分别测试在蒸馏水下的接触角, 并建立粒度分布的分形维数、比表面积和接触角关系的线性拟合, 中粒径与比表面积的线性关系, 如图 6~8 所示。

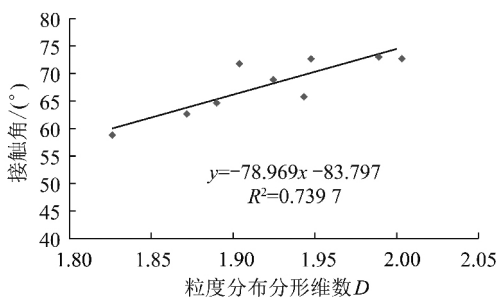


图 6 粒度分布分形维数与接触角的关系

Fig. 6 Relationship between  $D$  and contact angle

由图可知, 随着粒度分形维数的增加, 煤表面的接触角逐渐增加, 润湿性变差; 在煤粉碎细化的过程中, 随着粒径的减少, 煤尘内部的一些盲孔被打开, 比表面积增大, 接触角增大, 其润湿性变差, 研究表明是表面上不完整分子或不饱和原子团增多, 外露基团增多, 碳元素含量增大, 氧元素含量降低所致<sup>[19]</sup>; 同一煤中, 颗粒煤样的润湿性优于细颗粒。

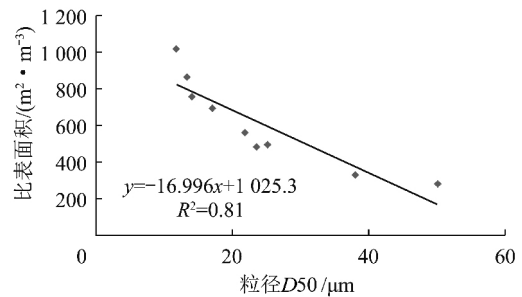


图 7 中粒径  $D_{50}$  和比表面积的关系

Fig. 7 Relationship between  $D_{50}$  and specific surface area

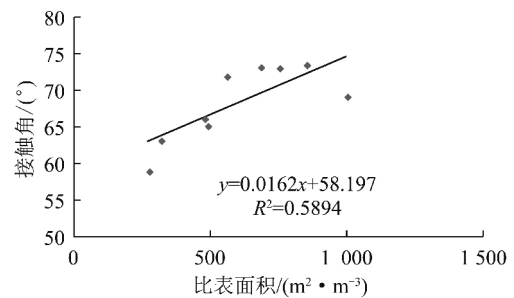


图 8 比表面积和接触角的关系

Fig. 8 Relationship between specific surface area and contact angle

### 3 结 论

(1) 煤的化学组成对润湿性影响较大。其中,灰分、水分、氧元素含量和润湿性成正相关,固定碳、碳含量、氢含量与润湿性成负相关。灰分,水分和氧元素是亲水因素。

(2) 随着煤阶的增高,吸附于煤表面的含氧官能团减少,接触角变大,亲水性下降。

(3) 含氧官能团是煤亲水的根本原因,其中  $910\sim 940\text{ cm}^{-1}$  羟基变形振动和  $3\ 400\sim 3\ 450\text{ cm}^{-1}$  芳香羟基伸缩是所测煤样的主要亲水基团,随着含氧官能团总峰面积的增加,煤的亲水性增大。

(4) 煤的粒度分布表现出典型的分形特征,随着粒度分形维数的增加,接触角变大,润湿性越差。煤的粒径与比表面积成负相关,且比表面积越大,接触角越大,润湿性越差。

#### 参考文献:

- [1] 程燕,蒋仲安,陈仲秋.煤层注水中添加表面活性剂的研究[J].煤矿安全,2006,37(3):9-12.  
Cheng Yan, Jiang Zhong'an, Chen Zhongqiu. Coal seam water injection adding surfactant research [J]. Safety in Coal Mines, 2006, 37(3): 9-12.
- [2] 李满.表面活性剂促进煤尘润湿的作用研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2008.
- [3] 肖国权,王兆丰.煤层注水防治煤与瓦斯突出机理的研究现状与进展[J].中国安全科学学报,2009,19(10):151-158.  
Xiao Zhiguo, Wang Zhaofeng. The mechanism of coal seam water injection prevention and cure of coal and gas outburst research status and progress [J]. China Safety Science Journal, 2009, 19(10): 151-158.
- [4] 王开松.综采工作面的煤尘综合防治[J].炭科学技术,2005,33(1):48-50.  
Wang Kaisong. Comprehensive coal dust control of fully mechanized coal mining face [J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(1): 48-50.
- [5] 杨林江,欧阳云丽,柯文丽,等.煤岩润湿性影响因素研究[J].煤,2001,21(8):4-5.  
Yang Linjiang, Ouyang Yunli, Ke Wenli, et al. Research on the impact factors of coal wettability [J]. Coal, 2001, 21(8): 4-5.
- [6] 谢广元.选矿学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2010:388-400.
- [7] 乔铁虎.粉煤灰做橡胶补强填料的研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2007.
- [8] 杨静,谭允祯,王振华,等.煤尘表面特性及润湿机理的研究[J].煤炭学报,2007,32(7):737-740.  
Yang Jing, Tan Yunzhen, Wang Zhenhua, et al. Study on the coal dust surface characteristics and wetting mechanism [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7): 737-740.
- [9] 董平,单忠健,李哲.超细煤粉表面润湿性的研究[J].煤炭学报,2004,29(3):346-349.  
Dong Ping, Shan Zhongjian, Li Zhe. Study on the surface wet characteristic of ultrafine coal powder [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(3): 346-349.
- [10] 孙银宇,聂容春,马帅.煤尘润湿性影响因素的研究[J].选煤技术,2013(2):31-33.  
Sun Yinyu, Nie Rongchun, Ma Shuai. Study on the influencing factor of wettability of coal dust [J]. Coal Preparation Technology, 2013(2): 31-33.
- [11] 杨静,谭允祯,伍修银,等.煤尘润湿动力学模型的研究[J].煤炭学报,2009,34(8):1105-1109.  
Yang Jing, Tan Yunzhen, Wu Xiuyin, et al. Study on the dynamic model of wetting coal dust [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(8): 1105-1109.
- [12] 解兴智,傅贵.煤润湿性测量方法的探讨[J].煤炭科学技术,2004,32(2):65-67.  
Jie Xingzhi, Fu Gui. The measuring methods of coal wetting are discussed [J]. Coal Science and Technology, 2004, 32(2): 65-67.
- [13] 王超群,林柏泉,李庆钊,等.煤尘表面含氧官能团对煤尘润湿性能的影响[J].煤矿安全,2014,45(5):173-176.  
Wang Chaoqun, Lin Baiquan, Li Qingzhao, et al. Coal dust oxygen containing functional groups on coal surface wettability [J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(5): 173-176.
- [14] 何杰.煤的表面结构与润湿性[J].选煤技术,2000(5):13-15.  
He Jie. The surface of coal structure and wettability [J]. Coal Preparation Technology, 2000(5): 13-15.
- [15] 李展峰,任晓娟,张阳,等.低渗储层油测渗透率与气测渗透率关系的实验研究[J].辽宁石油化工大学学报,2015,35(2):50-52.  
Li Zhanfeng, Ren Xiaojuan, Zhang Yang, et al. Low permeability oil reservoir permeability measurement and experimental study of the relationship between gas logging permeability [J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2015, 35(2): 50-52.
- [16] 徐英峰,冯海明.对润湿剂润湿煤尘影响因素的研究[J].中国煤炭,2005,31(3):39-40.  
Xu Yingfeng, Feng Haiming. Research on the influence factor of wet dust wetting agent [J]. China Coal, 2005, 31(3): 39-40.
- [17] 李庆钊,林柏泉.矿井煤尘的分形特征及其表面润湿性能的影响[J].煤炭学报,2012,37(1):39-42.  
Li Qingzhao, Lin Baiquan. Mine coal dust fractal characteristics and influence on its surface wettability [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 39-42.
- [18] 郁可,郑中山.粉体粒度分布的分形特征[J].材料科学与工程,1995,13(13):30-34.  
Yu Ke, Zheng Zhongshan. Fractal characteristics on granularity distribution of powder [J]. Chinese Journal of Materials Research, 1995, 13(13): 30-34.
- [19] 冯杰,李文英,谢克昌.傅里叶红外光谱法对煤结构的研究[J].中国矿业大学学报,2002,31(5):362-366.  
Feng Jie, Li Wenying, Xie Kechang. Research on coal structure using FTIR [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(5): 362-366.