

研究简报

# 低阶煤高温高压水热处理改性及其成浆特性

赵卫东, 刘建忠, 周俊虎, 曹晓哲, 张光学, 岑可法  
(能源清洁利用国家重点实验室(浙江大学), 浙江 杭州 310027)

关键词: 低阶煤; 水煤浆; 水热处理; 含氧基团; 接触角

中图分类号: TQ 536.9

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157(2009)06-0000-0

## Investigation on hot water treatment of low rank coal in high temperature and high pressure reactor and its slurry ability

ZHAO Weidong, LIU Jianzhong, ZHOU Junhu, CAO Xiaozhe, ZHANG Guangxue, CEN Kefa

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization (Zhejiang University), Hangzhou 310027, Zhejiang, China)

**Abstract:** The coal water slurry (CWS) prepared from low rank coals (LRC), such as lignite or subbituminous coals always has a higher viscosity and poor fluidity while the solid concentration is smaller than high rank coal water slurry. The reason is there are larger inherent moisture and oxygen composition in LRC. Under high temperature and high pressure conditions, LRC was be upgraded in hot water in a short time period of an hour. The heating value of LRC was also be increased in such a process, and the physical and chemical characteristics of LRC changed meanwhile to improve its slurry ability which meant a higher solid concentration with a lower viscosity. The results showed that after hot water treatments, the maximum solid concentration of Xiaolongtan CWS increased from 44.6% to 64.55%, while that of MIP CWS increased from 39.71% to 64.61%. The improvement of LRC slurry ability depended much on the final temperature of hot water treatments. The mechanism was explained by the chemical analysis of oxygen-containing groups and the measurement of contact angle between coal surface and water.

**Key words:** low rank coal; coal water slurry; hot water treatment; oxygen-containing groups; contact angle

### 引 言

随着能源的不断消耗, 工业以及电力行业主要依赖的烟煤、无烟煤等硬煤资源, 目前已开采过度, 在全球能源日趋紧张的形势下, 褐煤、亚烟煤等低阶煤的经济价值及相关加工生产技术被世界能源届所重视。

拥有褐煤资源的国家正积极研究褐煤的使

用<sup>[1-3]</sup>, 其中德国、美国、俄罗斯、澳大利亚等储量大国, 均将褐煤作为未来的重要战略资源开发和利用。

东亚、东南亚的印度、泰国、印度尼西亚等有着丰富的低阶煤资源, 其中印尼有 210 亿吨褐煤, 占其煤炭储量的 58.7%。目前印尼正在进行褐煤开采和高效利用方面的研究<sup>[4]</sup>。

我国已发现的褐煤资源量为 1291.32 亿吨, 约

2008-12-05 收到初稿, 2009-03-16 收到修改稿。

联系人: 刘建忠。第一作者: 赵卫东 (1980-), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2004CB217701)。

Received date: 2008-12-05.

Corresponding author: Prof. LIU Jianzhong. E-mail: jzliu@zju.edu.cn

Foundation item: supported by the National Basic Research Program of China (2004CB217701).

占我国煤炭保有资源量的 12.7%，主要分布在内蒙古东部、云南东部和黑龙江东部地区<sup>[5]</sup>。另外，在陕西北部、内蒙古部分地区存在大量较年轻的亚烟煤，如神华煤、神木煤等。低阶煤，尤其是褐煤，含水量大，不适合长途运输，目前多用于坑口电厂直接燃烧发电，如云南的小龙潭坑口电厂以及内蒙古霍林河坑口电厂等。

将褐煤等低阶煤制备成浆体燃料，可以拓宽其利用途径，同时提高其技术含量和经济价值。但由于低阶煤含有较高氧含量和内在水分，很难制备出高浓度的浆体燃料，褐煤原煤一般最大成浆浓度仅为 30%~40%。水热脱水的方法可以有效降低低阶煤的内在水分和氧含量，从而提高其成浆性能。运用水热处理的方法，Schuhmacher 等<sup>[6]</sup>对木材、纤维素、褐煤等在 225℃ 和水介质中密闭加热，进行了脱水和碳化方面的研究，并指出 O/C 和 H/C 对比谱图可以作为碳化程度的反映。常鸿雁等<sup>[7]</sup>在高压反应釜内水蒸气条件下对 4 种年轻煤进行了改性研究，表明处理后煤样的氧含量以及内在水分明显降低，热值和碳含量则有所提高。但由于水热反应是在高温高压条件下进行的，如果仅是用于低阶煤的脱水和干燥，经济性较差。将低阶煤改性后的固体产物制备水煤浆，利用低阶煤原煤价格低的优势，则可以提高水热处理工艺的经济性。Favas 等<sup>[8]</sup>曾通过水热改性的方法将澳大利亚褐煤的成浆浓度提高到了 60% 以上，但其对成浆特性改善的原因仅从孔隙结构角度稍进行了分析。

本文采用高压反应釜对两种低阶煤进行水热处理，并对固体产物进行了成浆性实验，重点从含氧基团和表面润湿特性两个方面对改性提高低阶煤成浆性能进行探讨。

## 1 水热反应装置、实验方法介绍

### 1.1 反应釜

低阶煤的高温高压水热处理实验在高压反应釜中进行，反应釜由山东威海自控反应釜有限公司生产，采用静密封结构，搅拌器与电机传动间采用磁力偶合器连接，采用磁力搅拌，使整个介质和搅拌部件完全处于绝对密封的状态下工作。

主要技术参数为：容积 1 L；工作压力  $\leq 35$  MPa；工作温度  $\leq 350$ ℃；加热方式采用电加热；加热功率 2 kW；搅拌转速 20~750 r·min<sup>-1</sup> 可调。实验流程如图 1。

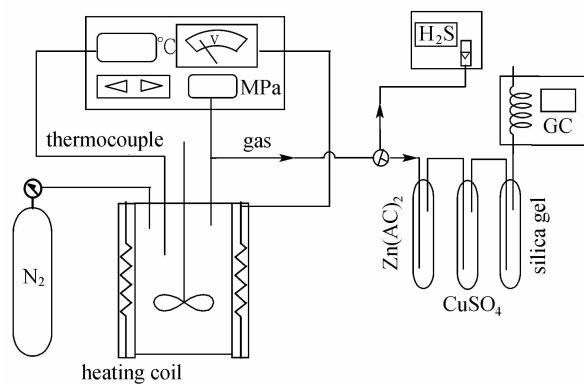


图 1 水热处理实验流程图

Fig. 1 Diagram of process of hot water treatments

### 1.2 水热处理实验方法

将原煤破碎至 2 mm 以下，以干煤水比 1 : 2.75 加入到反应釜中，煤样品量 200 g。将反应釜密封后，首先通入 4 MPa N<sub>2</sub> 进行检漏实验，如果 2 h 后反应釜内压力未变化，表明反应釜不漏气，通过排气三通阀门排放 N<sub>2</sub> 后即可进行升温加热；如果 2 h 后反应釜压力有所下降，则需拆卸反应釜，重新进行密封和检漏。

将样品在反应釜中由室温加热到预定的反应终温 (320、300、250、200℃)，并在预定温度停留 1 h，样品加热过程中，水受热蒸发形成反应釜压力，由于煤样受热分解出部分气体，釜内压力略高于相应温度下的水饱和蒸气压，4 个温度条件分别对应 12~13、8.5~9、4~5 和 1.6~2 MPa。

加热完成后，自然冷却至室温。打开反应釜，取出煤样，通过滤纸过滤后，进行空气干燥。将空气干燥后的煤样制粉，并进行相应的分析和制浆实验。

### 1.3 含氧基团的化学分析方法

采用化学分析和滴定的方法确定煤样的总酸性、羧基值和酚羟基值<sup>[9]</sup>。

煤样总酸性的测定原理是煤样中的总酸性基与过量的氢氧化钡反应，然后用过量的标准浓度的盐酸和剩余的氢氧化钡反应，最后用标准浓度的氢氧化钠溶液回滴过量的盐酸。

煤样羧基的测定原理是煤中羧基与醋酸钙反应，释放出醋酸，然后用标准碱溶液滴定。

煤样酚羟基的含量一般用总酸性基和羧基之差计算得到。

总酸性基误差为  $\pm 0.02$  mmol·(g 干煤)<sup>-1</sup>；羧基误差为  $\pm 0.02$  mmol·(g 干煤)<sup>-1</sup>。

表 1 煤粉样品的工业/元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of coal samples

Samples	Conditions	Proximate analysis/%				$Q_{b,ad}$ /kJ · kg <sup>-1</sup>	Ultimate analysis/%				
		M <sub>ad</sub>	A <sub>ad</sub>	V <sub>ad</sub>	FC <sub>ad</sub>		C <sub>daf</sub>	H <sub>daf</sub>	N <sub>daf</sub>	S <sub>daf</sub>	O <sub>daf</sub>
Xiaolongtan lignite	raw coal	17.02	10.38	41.52	31.08	18659	67.09	4.21	1.93	2.25	24.52
	200 C	15.45	9.19	41.31	34.05	19867	67.49	4.10	2.10	2.00	24.31
	250 C	12.87	9.99	41.04	36.10	21280	70.02	4.91	1.91	1.96	21.21
	300 C	9.08	9.84	39.42	41.66	23931	74.25	3.93	1.85	1.59	18.38
	320 C	7.21	9.67	36.75	46.37	25707	76.43	4.15	1.88	1.67	15.87
MIP subbituminous coal	raw coal	12.90	4.52	44.12	38.47	24390	71.84	3.79	1.02	0.16	23.19
	200 C	12.63	4.22	43.45	39.70	25021	73.28	2.84	0.63	0.26	22.99
	250 C	9.86	4.4	43.86	41.88	24031	73.11	5.19	0.58	0.29	20.83
	300 C	6.82	4.81	42.85	45.52	26990	72.94	6.98	0.60	0.28	19.20
	320 C	5.66	4.72	42.09	47.53	27868	77.47	5.58	0.61	0.29	16.05

1.4 接触角分析方法

将破碎成制浆用的煤粉用加压成型模具压制直径为 13 mm、厚约 2 mm 的具有压光平面的圆柱体试片，装样量 400 mg。然后将试片在接触角系统表面分析仪上通过照相-量角法测定，误差为 ± 2°。煤水接触角是从水滴与煤样接触面经过水滴再到水滴与空气接触面的夹角<sup>[10]</sup>。

2 水热反应前后样品元素/工业分析

取空气干燥后的煤粉样品进行工业分析和元素分析，结果如表 1。

由表 1 中数据发现，随水热反应终温的升高，低阶煤的内在水分（空干基水分）逐渐降低。挥发分（V<sub>ad</sub>）含量随反应终温的升高而降低；固定碳（FC<sub>ad</sub>）含量则逐渐升高；样品热值（Q<sub>b,ad</sub>）随水热反应终温升高而升高。元素碳和氧的含量随反应终温升高呈相反方向的变化趋势，分别升高和降低。元素氮的含量在水热反应后有降低的趋势，如 MIP 亚烟煤以及小龙潭褐煤 250、300 和 320℃ 条件，这主要是由于改性过程挥发分释放，煤中的 N 以 HCN 或 NH<sub>3</sub> 形式少量析出造成的<sup>[11]</sup>。小龙潭褐煤在改性后，元素硫含量降低，这是因为改性过程中硫化氢的释放引起的，MIP 亚烟煤由于硫元素含量较少，H<sub>2</sub>S 释放量相应较少，改性后，硫含量有所升高，可能是因为氧含量降低幅度较大，引起了硫元素含量在比例上升高。

定义与煤阶相关的参数为：O/C 原子比 A<sub>O/C</sub> = 样品含氧原子的量/碳原子的量<sup>[12]</sup>；煤的芳香度取决于煤的煤化程度，一般定义为芳香碳与总碳含量之比，但挥发分含量和元素碳的含量在宏观

上也可以表达芳香度，即芳香度  $f_a = \frac{1200(100 - V_{daf})}{1240C_{daf}}$ 。有研究表明，A<sub>O/C</sub> 越低，则样品的煤阶越高，煤化程度越高；f<sub>a</sub> 数值越高，样品的煤阶越高<sup>[13]</sup>。

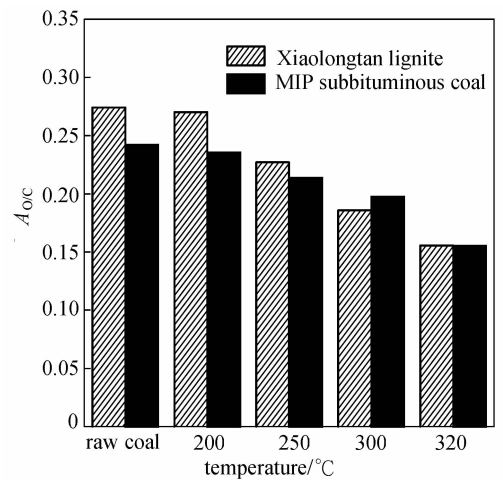


图 2 氧/碳原子比随反应终温的变化

Fig. 2 Relationship between final reaction temperature and atomic ratio of oxygen and carbon, A<sub>O/C</sub>

图 2 显示，随水热反应终温的升高，两种低阶煤的 A<sub>O/C</sub> 都呈下降的趋势，并且小龙潭褐煤下降趋势更明显；两种低阶煤的 A<sub>O/C</sub> 均在 320℃ 出现最小值。说明随水热反应终温的升高，低阶煤经历了逐步成熟的过程，煤阶逐渐升高。

图 3 表明随水热反应终温的升高，煤样的芳香度呈升高的趋势，小龙潭褐煤在 320℃，印尼 MIP 亚烟煤在 300℃ 分别达到最高值，芳香度升高表明煤样成熟度增加，煤阶升高。

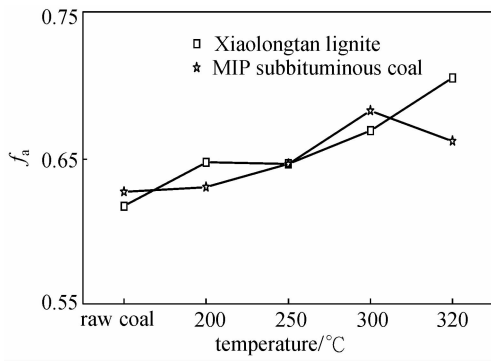


图 3 芳香度随反应终温的变化

Fig. 3 Relationship between final reaction temperature and aromaticity,  $f_a$

### 3 成浆性实验、结果、分析

#### 3.1 成浆特性实验方法

将水热改性后的煤样以及低阶煤原煤样分别破碎制粉，煤粉颗粒的粒度分布和平均粒径见表 2。同一种煤改性前后样品的平均粒径和粒度分布基本接近。

将破碎好的煤粉和水按一定比例，添加干煤基 0.8% 的安阳双环 NC 添加剂，用可调速搅拌器在  $1000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  下，搅拌 10 min 后成浆，静置 15 min 后，搅拌均匀并用哈克黏度计测定各浆体样品的黏度（测试时温度保持为  $20^\circ\text{C}$ ）。

表 2 样品的粒度分布和平均粒径

Table 2 Particle size distribution and average particle diameters of coal samples

Samples	Conditions	Particle size distribution / $\mu\text{m}$			Average particle diameters / $\mu\text{m}$
		$<35 \mu\text{m}$	35~74 $\mu\text{m}$	74~350 $\mu\text{m}$	
Xiaolongtan lignite	raw coal	61	18	21	50
	200 °C	54	16	30	57
	250 °C	53	18	29	54
	300 °C	57	17	26	54
	320 °C	51	17	32	60
MIP subbituminous coal	raw coal	59	17	24	50
	200 °C	55	18	27	52
	250 °C	54	18	28	58
	300 °C	56	16	28	53
	320 °C	56	19	25	53

#### 3.2 改性前后煤样的黏浓特性

图 4 和图 5 表明，水热反应后煤样的成浆浓度得到了较大程度提高，水热反应终温越高，成浆浓度提高的幅度越大。以  $20^\circ\text{C}$  表观黏度 800 mPas 对应的浓度作为最大成浆浓度进行对比，小龙潭褐煤最大成浆浓度由 44.6%（原煤）提高到 64.55%

（ $320^\circ\text{C}$ ，1 h）；印尼 MIP 亚烟煤最大成浆浓度则由 39.71%（原煤）提高到 64.61%（ $320^\circ\text{C}$ ，1 h）。

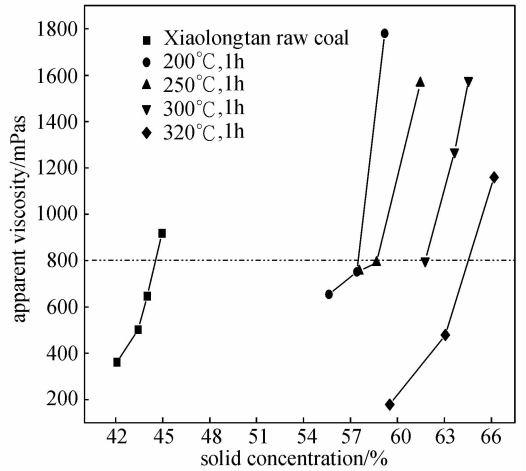


图 4 小龙潭褐煤改性前后成浆黏浓特性

Fig. 4 Influence of solid concentration on viscosity of Xiaolongtan CWS prepared from raw coal and samples after hot water treatments at different temperatures

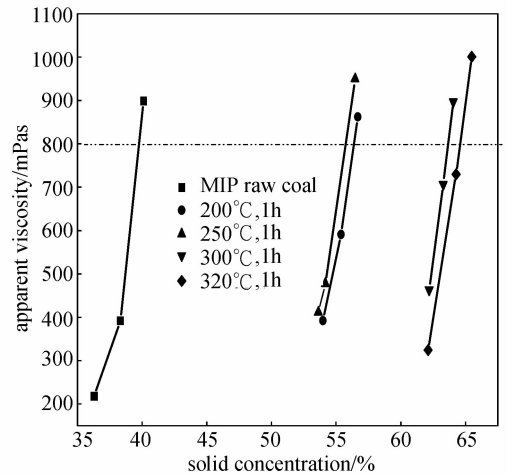


图 5 印尼 MIP 亚烟煤改性前后成浆黏浓特性

Fig. 5 Influence of solid concentration on viscosity of MIP CWS prepared from raw coal and samples after hot water treatments at different temperatures

#### 3.3 浆体的流动性以及稳定性

用样品勺取相同质量的水煤浆，并使之自由流落，目测水煤浆浆体的流动性。按照其流动的快慢、流线状态可以分为以下几个等级<sup>[14]</sup>：

连续流动，流线均匀：A（流动迅速，A+；流动较慢，A-）；间断流动，流线稍粗：B（流线间断，流线较粗，B-；流线间断并且流线较细，B+）；不流动，浆体黏稠：C。

表 3 小龙潭褐煤经过热水改性后的流动性和稳定性

Table 3 Fluidity and stability of Xiaolongtan CWS prepared from coal samples after hot water treatments

Conditions	Solid concentration/%	Fluidity of fresh samples	Fluidity after 21 days	Stability after 21 days
320 °C	59.51	A+	A	no sedimentation
	63.06	A-	A-	no sedimentation
	66.18	B	C	no sedimentation
300 °C	61.77	A-	B	no sedimentation
	63.65	C+	C	no sedimentation
	64.54	C	C	no sedimentation
250 °C	57.56	A-	C	no sedimentation
	58.67	B-	C	no sedimentation
	61.46	C	C	no sedimentation
200 °C	55.63	B+	C	no sedimentation
	57.41	B-	C	hard sedimentation
	59.19	C	C	hard sedimentation

表 3 是小龙潭褐煤经过水热反应后制备浆体的流动性、静置 21 d 重新搅拌均匀后在室温下的流动性以及稳定性。

表 3 中数据表明，随水热反应终温的降低，相近流动性等级对应的成浆浓度明显降低，在 320 °C 反应终温条件下，煤浆浓度达到 63.06% 时，仍有较好的流动性 (A-)；当水热反应终温降低至 200 °C 时，55.63% 浓度煤浆样品的流动性已经变得稍差 (B+)。浆体样品静置 21 d 后重新搅拌，通过对流动性观察发现，较高的反应终温有利于保持浆体的流动性，320 °C 和 300 °C 水热反应后煤样制备所得浆体在浓度相对较低时 (63.06% 和 61.77%) 仍具备一定的流动性；250 °C 和 200 °C 对应的浆体样品经过 21 d 静置后，失去流动性。21 d 后的稳定性结果表明，较低的水热反应温度 (200 °C) 不利于浆体稳定性的保持。

较高的水热反应终温可以较大程度提高低阶煤的煤阶，这可以从表 1 和图 2 看出。水热反应终温越高，所得煤样的空干基水分越小，氧元素含量越低，越有利于煤样成浆浓度的提高<sup>[15]</sup>，同时提高煤浆样品的流动性。煤样在较高的温度下进行水热反应，其改性程度越深也越彻底，煤样重新吸水的能力下降，煤浆体系中能够保持足够的自由水以保证煤颗粒分散从而维持较好的流动性和稳定性<sup>[16]</sup>。

#### 4 含氧基团化学分析、煤/水界面接触角分析

##### 4.1 煤样含氧基团的化学分析

煤样含氧基团数量 (N)，尤其是亲水性的羧

基、羟基等的多寡与煤样的吸水、束缚水能力直接相关<sup>[17]</sup>，表面亲水特征进而影响样品的成浆性能。

图 6 和图 7 是低阶煤水热反应前后的总酸性基、羧基、酚羟基的变化情况。

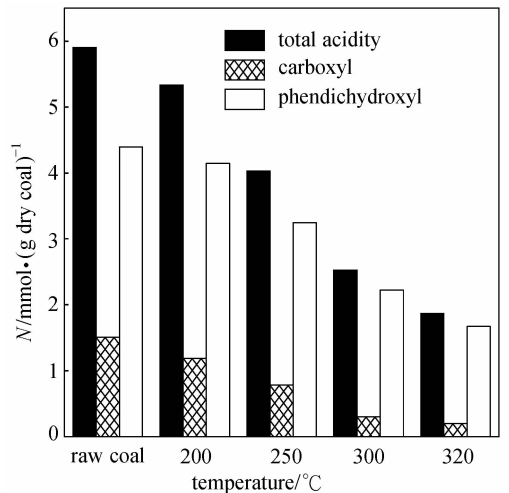


图 6 小龙潭褐煤含氧基团与水热反应终温的关系  
Fig. 6 Oxygen-containing groups (N) of Xiaolongtan lignite before and after hot water treatments

图 6 和图 7 显示，两种低阶煤的总酸性基、羧基以及酚羟基随水热反应终温的升高，变化趋势一致，均降低。原煤经过 200 °C 改性后含氧基团数量 (N) 变化不明显，300 ~ 320 °C 的终温条件使煤样的含氧基团数量出现大幅度减少。含氧基团的减少导致煤样亲水性下降，煤样吸水、束缚水的能力下降，表现为煤样空干基含水量降低，如图 8 所示，煤样的空干基含水量  $M_{ad}$  与含氧基团呈现良好的正相关特征。

另外，煤样的含氧基团数量与煤阶也存在相关

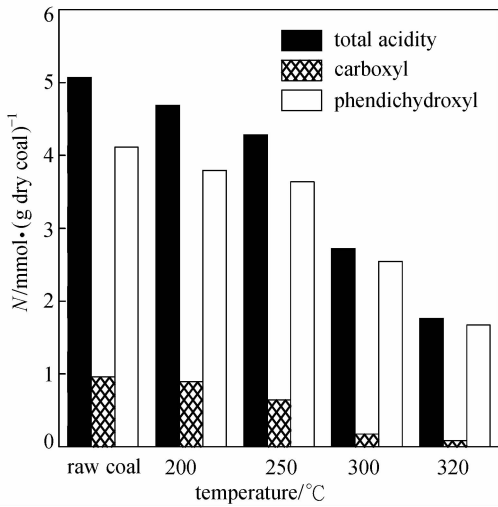


图 7 MIP 亚烟煤含氧基团与水热反应终温的关系

Fig. 7 Oxygen-containing groups (N) of MIP subbituminous coal before and after hot water treatments

性，如图 9 所示，即随煤阶的升高（表现为  $A_{O/C}$  降低），煤样成熟度增加，一些活性较强的含氧基团在成熟过程中不断分解，如羧基分解释放出  $CO_2$ ，酚羟基分解释放出  $H_2O$  等，导致含氧基团数量逐渐减少。

随煤样煤阶的升高，含氧基团数量减少，亲水性降低，吸水、束缚水能力降低。当煤样制备浆体时，相同质量浓度条件下，煤、水体系中可以有更多的水分充当自由水，而不会被煤样表面束缚，从而降低煤颗粒与水之间的摩擦力，降低浆体的黏度，改善浆体的流动性<sup>[18-19]</sup>。

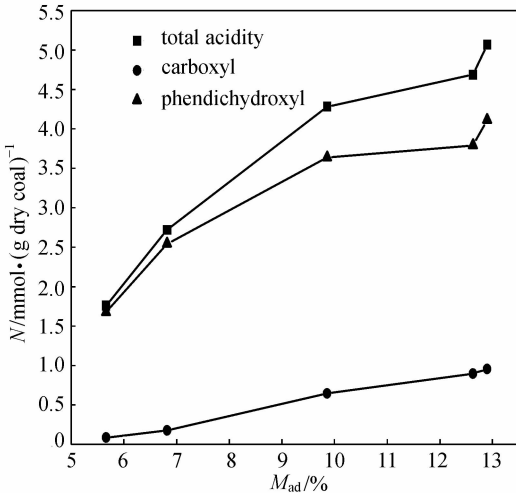


图 8 含氧基团与空干基含水量关系 (MIP 亚烟煤)

Fig. 8 Relationship between oxygen-containing groups and  $M_{ad}$  of MIP coal samples before and after hot water treatments

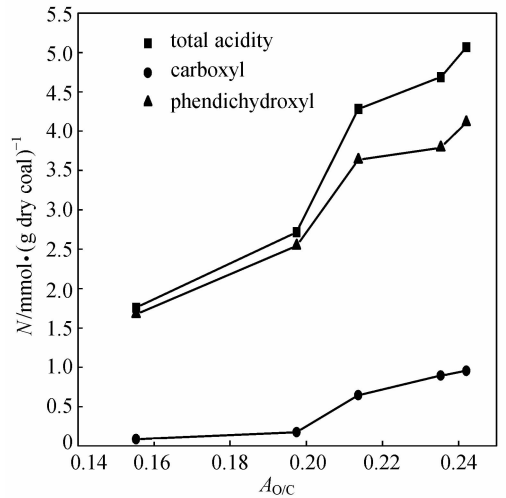


图 9 含氧基团与煤阶参数  $A_{O/C}$  (MIP 亚烟煤)

Fig. 9 Relationship between oxygen-containing groups and  $A_{O/C}$  of MIP coal samples before and after hot water treatments

#### 4.2 煤/水接触角分析

如图 10 和图 11 所示，由于低阶煤原煤属于年轻煤，其氧含量较高（如表 1），相应的活性含氧基团数量较大（如图 6 和图 7），导致煤样表面的亲水性较强、吸水能力强。当相同直径的水滴滴到煤样表面时，如果煤样亲水性强，则水滴就会比较容易平铺在煤样表面，从而使煤/水接触角的数值较小。相反，随水热反应终温的升高，吸水性强的含氧基团数量逐渐减少，煤样表面吸引水的作用力减小，甚至表现出一定的斥水性，则水滴滴落至煤样表面时，不易平铺，而是团成球状，从而使煤/水接触角的数值较大。液滴在煤表面平铺或是团成球状，取决于液滴分子间的相互作用力（内聚力）和液固分子间的吸引力（黏附力）的相对大小，若后者较大，则液滴在固体表面容易铺展；若前者占优势，液滴则不易铺展而团成球状。村田逞<sup>[20]</sup>在其研究中也指出，对于褐煤、亚烟煤等低阶煤，其润湿特性与煤中亲水性的含氧基团存在相关性，低阶煤与水的接触角和氧/碳原子比呈负相关特征。随水热反应终温的升高，含氧基团数量减少，导致煤样表面的亲水性降低，吸水、束缚水的能力减弱，煤水界面接触角相应增加。即水热反应后煤样表面与水的作用逐渐表现出一定的斥水（疏水）特征，表面斥水（疏水）作用的增加使低阶煤成浆浓度得以提高<sup>[21]</sup>，进一步通过添加分散剂调整煤表面的润湿性，可以改善煤粉颗粒的分散性，提高浆

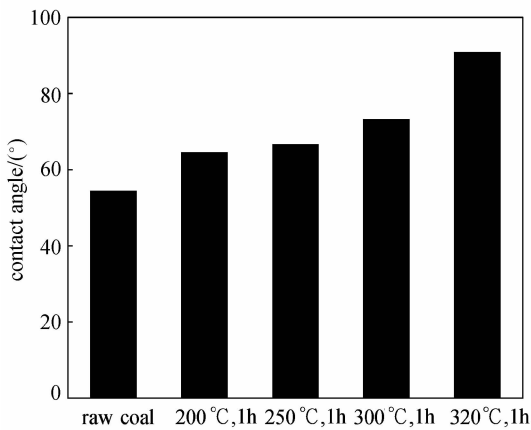


图 10 小龙潭褐煤/水接触角

Fig. 10 Contact angles of water and Xiaolongtan coal before and after hot water treatments

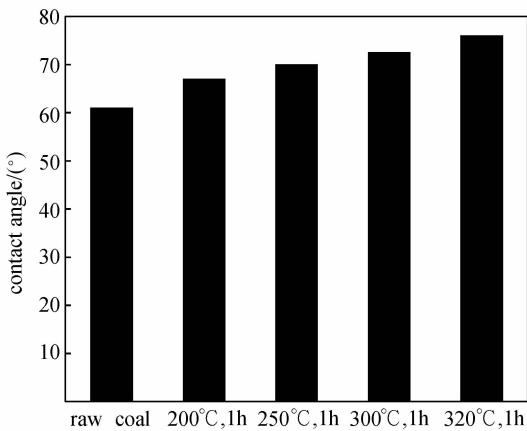


图 11 印尼 MIP 亚烟煤/水接触角

Fig. 11 Contact angles of water and MIP coal before and after hot water treatments

体的流动性和稳定性。

## 5 结 论

(1) 高温高压水热反应可以提高低阶煤的煤阶和热值。氧/碳原子比  $A_{O/C}$  和芳香度  $f_a$  表明, 随水热反应终温的升高, 改性后煤阶升高, 同时表现为空干基水分含量(内水含量)降低、氧含量减少, 进而提高了低阶煤的成浆性能。小龙潭褐煤最大成浆浓度由 44.6% (原煤) 提高到 64.55% (320°C, 1 h); 印尼 MIP 亚烟煤最大成浆浓度则由 39.71% (原煤) 提高到 64.61% (320°C, 1 h)。

(2) 水热反应终温的升高有利于较大程度提高低阶煤的最大成浆浓度, 并且有利于维持浆体的流动性和稳定性。

(3) 水热反应前后低阶煤的含氧基团数量

(N) 发生了较明显的变化, 煤样的总酸值下降, 亲水性的酚羟基、羧基含量也明显下降, 并且随水热反应终温的升高, 下降幅度提高。亲水性含氧基团数量的减少, 可以使低阶煤、水体系释放更多的束缚水成为自由水, 降低浆体的黏度, 改善其流动性。含氧基团数量与煤样空干基水分含量以及  $A_{O/C}$  存在正相关关系。

(4) 煤/水界面接触角测定结果表明, 随水热反应终温的升高, 由于改性后低阶煤样品的含氧基团减少, 煤/水界面接触角逐渐升高, 煤表面的亲水性减弱。煤表面束缚水、吸水能力减弱, 有利于提高其成浆性能。

## References

- [1] Bergins C. Kinetics and mechanism during mechanical/thermal dewatering of lignite. *Fuel*, 2003, **82** (4): 355-364
- [2] Walsh D E, Owens H, Mokka J R, Noirot O. Characterization of hydrothermally dried low-rank coals. *Minerals & Metallurgical Processing*, 1999, **16** (1): 48-56
- [3] Bongers G D, Jackson W R, Woskoboenko F. Pressurised steam drying of Australian low-rank coals (Part 1): Equilibrium moisture contents. *Fuel Processing Technology*, 1998, **57** (1): 41-54
- [4] Umar D F, Usui H, Daulay B. Change of combustion characteristics of Indonesian low rank coal due to upgraded brown coal process. *Fuel Processing Technology*, 2006, **87** (11): 1007-1011
- [5] Zhao Zhenxin (赵振新), Zhu Shuquan (朱书全), Ma Mingjie (马名杰), Zhang Heng (张恒), Wang Luning (王路宁), Yan Shujuan (颜淑娟), Du Xiaojing (杜晓静). Comprehensive and optimal utilization of lignite in China. *Clean Coal Technology* (洁净煤技术), 2008, **14** (1): 28-31
- [6] Schuhmacher J P, Huntjens F J, Van Krevelen D W. Chemical structure and properties of coal (26): Studies on artificial coalification. *Fuel*, 1960, **39** (3): 223-234
- [7] Chang Hongyan (常鸿雁), Xu Wenjuan (徐文娟), Zhang Dexiang (张德祥), Gao Jinsheng (高晋生). Study on the deoxy-modification of low rank coals under pressurized vapour conditions. *Coal Conversion* (煤炭转化), 2005, **28** (1): 25-29
- [8] Favas G, Jackson W R, Marshall M. Hydrothermal dewatering of lower rank coals (3): High-concentration slurries from hydrothermally treated lower rank coals. *Fuel*, 2003, **82** (1): 71-79
- [9] Schafer H N S. Carboxyl groups and ion exchange in low-rank coals. *Fuel*, 1970, **49** (2): 197-213
- [10] Fu Gui (傅贵), Zhang Yinghua (张英华), Zou Dezhi (邹

- 得志). The measurement and analysis of the balanced contact angle between coal and pure water. *Coal Conversion* (煤炭转化), 1997, **20** (4): 60-62
- [11] Chang Liping (常丽萍), Xie Zongli, Xie Kechang (谢克昌), Li Chunzhu. Some factors influencing formation of HCN and  $\text{NH}_3$  during pyrolysis of brown coal. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2003, **54** (6): 863-867
- [12] Liu Caifang (刘彩芳). The matching disciplinarian of the CWM additive or industrial wastes and coal [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007
- [13] Xie Kechang (谢克昌). Coal Structure and Its Reactivity (煤的结构与反应性). Beijing: Science Press, 2002: 97
- [14] Zhou Mingsong (周明松), Yang Dongjie (杨东杰), Qiu Xueqing (邱学青). Effect of the sodium lignosulphonate from different material on rheological behavior of coal water slurry. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities* (高校化学工程学报), 2007, **21** (3): 386-391
- [15] Zhang Rongzeng (张荣曾). Coal Water Fuel Preparation Technology (水煤浆制浆技术). Beijing: Science Press, 1996: 22
- [16] Roh N S, Shin D H, Kim D C, Kim J D. Rheological behaviour of coal-water mixtures (1): Effects of coal type, loading and particle size. *Fuel*, 1995, **74** (8): 1220-1225
- [17] Atesok G, Boylu F, Sirkeci A A, Dincer H. The effect of coal properties on the viscosity of coal-water slurries. *Fuel*, 2002, **81** (14): 1855-1858
- [18] Tiwari K K, Basu S K, Bit K C, Banerjee S, Mishra K K. High-concentration coal-water slurry from Indian coals using newly developed additives. *Fuel Processing Technology*, 2004, **85** (1): 31-42
- [19] Ahmed S F, Hasan A R. Rheology of low-rank coal-water slurries at both high and low shear rates. *Fuel*, 1993, **72** (6): 763-769
- [20] Toshiaki Murate (村田逞途). Research and Utilization of Coal Wettability (煤的润湿性研究及其应用). Zhu Chunsheng (朱春笙), Gong Zhenxiang (龚祯祥), trans. Beijing: Coal Industry Press, 1992: 48-53
- [21] Sun Chenggong (孙成功), Wu Jiashan (吴家珊), Li Baoqing (李保庆). Surface properties of thermally upgraded low-rank coals and their effect on the rheological behavior of coal water slurry. *Journal of Fuel Chemistry and Technology* (燃料化学学报), 1996, **24** (2): 174-180