

兖州煤气化半焦表面官能团特征试验研究

石金明, 孙路石, 向军, 胡松, 赵清森, 苏胜, 许凯, 卢腾飞

(煤燃烧国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

Experimental Study on Surface Functional Groups Characteristics of Yanzhou Semi-cokes of Gasification

SHI Jin-ming, SUN Lu-shi, XIANG Jun, HU Song, ZHAO Qing-sen, SU Sheng, XU Kai, LU Teng-fei

(State Key Laboratory of Coal Combustion (Huazhong University of Science and Technology),

Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: In order to reveal the changing rule of coal structure during coal gasification, the Yanzhou semi-cokes were made in tube furnace at 300~1 000 °C, and the infrared spectrums were monitored by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) at different gasification conditions, to analyze the surface functional groups of Yanzhou coal. It was found that limited aliphatic structure in coal lead to small hydrocarbon capacity during coal gasification at low temperature, but the synergy of aromatic structure cracking and condensation could increase the hydrogen-enriched degree of semi-cokes at high temperature; aliphatic structure and aromatic structure are affected little at low temperature, and the original aliphatic structure break off firstly with temperature increasing, while at high temperature, aromatic structure begin to crack to aliphatic structure and to break off gradually; CO₂ participating in gasification, intervening C=O group of phenols, ethers, alcohols and esters, could influence the total-oxygen-enriched efficiency of semi-cokes.

KEY WORDS: coal surface structure; aliphatic structure; aromatic structure; char-making temperature; Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

摘要: 为揭示煤气化过程中煤焦结构的变化规律, 在管式炉中分别在不同温度(300~1 000 °C)下制取了兖州煤半焦, 并采用傅里叶变换红外分析获得不同气化条件下样品的红外光谱, 测定兖州煤颗粒表面官能团。实验结果表明, 煤的脂肪族构成有限, 导致煤低温气化生烃能力较小, 而高温气化下芳香结构的裂解和缩合协同效应提高了半焦富氢程度; 低温时脂肪结构和芳环结构都不受影响, 随着温度的升高, 原

始脂肪结构首先脱落, 当温度较高时芳环才开始开链成脂肪结构并逐渐脱落; CO₂参与气化反应, 介入酚、醚、醇、酯的C=O基官能团中, 影响气化半焦的富总氧度。

关键词: 煤表面结构; 脂肪结构; 芳环结构; 制焦温度; 傅里叶变换红外光谱法

0 引言

煤作为宝贵的自然资源, 其结构复杂, 人们对其研究和认识经过了漫长的探索过程^[1-2]。在 20 世纪 80 年代, 傅里叶变换红外光谱法(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)的发展提高了测试的信噪比和探测极限, 才使得该方法真正应用于煤和煤的化学成分和结构的研究^[3]。FTIR是一种灵敏而有效的技术, 目前已被广泛用来研究煤显微组分和源岩中煤的化学结构, 确定有机质的成熟度, 划分煤的类型, 以及评价油气源岩生油气的潜力等。据宜文等应用 FTIR 对不同构造煤结构成分的应力效应进行分析, 并在构造煤结构成分应力效应的研究方面取得较满意的效果^[4]。张蕤应用石英管生烃气化实验 FTIR, 对吐哈盆地柯柯亚地区的煤样在不同气化温度下煤化学结构的变化特征进行研究^[5]。余海洋应用 FTIR 对江西乐平晚二叠世煤矿煤样在不同气化温度下的结构组成变化特征及规律进行研究, 结合镜下显微组分的观察和统计结果, 剖析乐平晚二叠煤的生烃机制, 对该区煤成烃资源进行了初步评价^[6]。

煤气化技术是未来洁净煤电发电技术的基础, 国内外研究者对此进行大量的研究^[7-14]。由于目前主要针对高温气化剂条件下气化工艺参数(如气化温度、压力、空气系数及汽煤比等)匹配与优化研究, 而煤气化过程中煤焦微观结构变化尚不清楚。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50721005, 50525619); 国家重点基础研究发展规划项目(2004CB217704)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50721005, 50525619); Project Subsidized by the Special Funds for Major State Basic Research Projects of China (2004CB217704)。

本文利用 FTIR 获得不同气化条件下样品的红外光谱, 测定兖州煤颗粒表面官能团, 通过分析确定煤气化过程中主要官能团的变化规律, 从而掌握有机官能团的迁移规律, 为更好地获得煤气化过程中碳转化与气化机制提供参考。

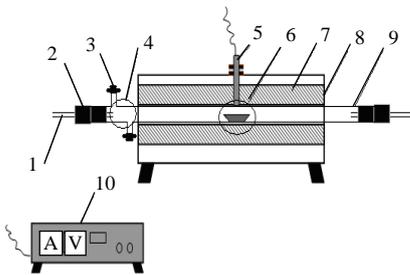
1 样品制备与实验方法

实验选用兖州煤, 原煤的元素分析与工业分析数据如表 1 所示。兖州煤的半焦(气化焦)制备是在管式炉中进行的, 如图 1 所示, 通入CO₂, 将载有均匀铺开的煤粉的瓷舟放置在石英管内B区域, 吹扫煤层中的杂质(包括空气), 实验设置反应终温分别为 300~1000 °C。从室温程序升温至终温, 反应 90 min, 再迅速从另一端推出瓷舟至A区域, 用鼓风机吹扫管壁冷却至室温, 取出装样。

表 1 兖州煤工业分析和元素分析

Tab. 1 Proximate analysis and ultimate analysis %

工业分析			元素分析			
A _d	V _d	FC _d	C _d	H _d	N _d	S _{t,d}
12.90	38.82	48.28	66.63	4.70	0.94	2.49



1—导管; 2—橡皮管; 3—活塞; 4—A 区域; 5—热电偶; 6—B 区域; 7—保温层; 8—炉体; 9—石英管; 10—温控装置。

图 1 管式炉制焦装置

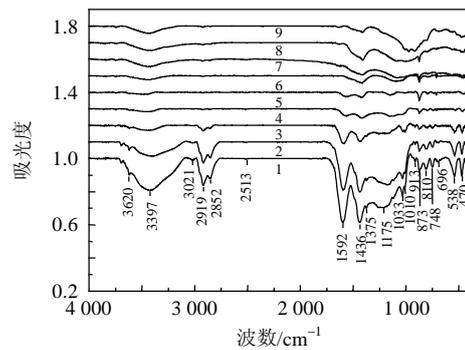
Fig. 1 Char-making equipment of tube furnace

将制备的煤焦样品进行红外光谱测定, 实验采用华中科技大学分析测试中心的德国 Bruker 公司 VERTEX 70 傅里叶变换显微红外光谱仪, 扫描范围为 4 000~400 cm⁻¹, 目镜为 10 倍, 物镜为 15 倍, 测试方式为透射式。

2 红外谱图分析和参数选择

2.1 红外谱图分析

红外光谱是由物质分子中成键原子的振动能级跃迁所引起的吸收光谱, 其红外吸收带的位置和相对强度, 是原子组成、键合情况及振动性质的反映, 表征着试样中化学基团的组成和结构特点。图 2 为原始样品(标记为 25 °C)和 8 份不同气化温度下样品的红外光谱图。结合众多研究者的研究成果^[4-6,15-20], 可列出兖州煤的红外光谱特征吸收峰的归属, 如表 2 所示。



1—原煤; 2—300 °C; 3—400 °C; 4—500 °C; 5—600 °C; 6—700 °C; 7—750 °C; 8—950 °C; 9—1000 °C。

图 2 不同温度下制取的原煤半焦样的 FTIR 分析谱图

Fig. 2 FTIR spectrum of raw-coal semi-coke at different temperature

表 2 红外光谱的吸收峰归属

Tab. 2 Band assignments in FTIR spectra of coal macerals

编号	吸收峰/cm ⁻¹		代号	吸收峰归属
	峰位	波动范围		
1	3 395	3 419~3 359	A	醇、酚、羧酸等的 OH 或 NH 伸缩振动
2	3 028	3 100~3 000	B	芳香性 C—H 的伸缩振动 ^[20]
3	2 930	2 930~2 950	C	脂肪族 CH ₃ 不对称伸缩振动
4	2 920	2 918~2 915	D	主要是 CH ₂ 不对称伸缩振动
5	2 860	2 961~2 855	E	CH ₂ 对称伸缩振动
6	2 515	2 510~2 520	F	游离 SH 伸缩振动
7	1 730	1 730~1 740	G	脂肪族中的 C=O 伸缩振动
8	1 705	1 700~1 710	H	芳香族中的酯、酸、醛、酮的 C=O 伸缩振动
9	1 600	1 589~1 593	I	芳香族中芳核的 C=C 伸缩振动
10	1 435	1 380~1 460	J	芳香性烷键结构上的 CH ₂ 、CH ₃ 变形振动
11	1 157	800~1 200	K	与不同桥氧原子相连的 SiO ₄ 四面体的 Si—O—Si 和 Si—O— 伸缩振动 ^[15,17-18] 或 =C=O 和 —O— 的伸缩振动 ^[20]
12	872	867~862	L	芳核上 1 个 H 面外变形振动(I 类氢原子)
13	814	812~810	M	芳核上 2 个相邻 H 面外变形振动(II 类氢原子)
14	748	750~747	N	芳核上 4 个相邻 H 面外变形振动(III 类氢原子)
15	539, 471	400~600	O	Si—O—Si 和 Si—O— 的弯曲振动 ^[15,18] 或有机硫(芳香族双硫醚—S—S—或—SH)伸缩振动 ^[20]

2.2 参数选择

对煤样红外光谱各峰位比值的研究主要是为了反映脂肪度、芳香度和有机质对氧原子或含氧基团的固结能力。根据国内外一些学者的研究成果，并结合本文中的煤热演化过程中的成烃特征，以及各显微组分官能团的成烃演化规律，选择以下 4 组红外光谱参数^[6,21]，根据积分面积A可以计算：

1) 富氢程度参数。

① $I_{H_0} = (A_{V(CH_2)} + A_{V(CH_3)}) / A_{V(C=C)}$ ：表征脂肪烃含量及生烃潜力。2950 和 2920、2850 cm^{-1} 是类脂结构 CH_3 和 CH_2 的伸缩振动吸收峰，计算方法为 $(A_{C+D}+A_E+A_I)/A_I$ 。

② $I_{H_1} = A_{V(CH_3)} / A_{V(C=C)}$ ：表征样品富 CH_3 度，计算方法为 A_{C+D}/A_I 。

③ $I_{H_2} = A_{V(CH_2)} / A_{V(C=C)}$ ：表征样品富 CH_2 度，计算方法为 A_E/A_I 。

2) 脂肪结构参数。

参数 L_{AL} 和 K_{AL} 都可用来表征煤样的富脂状况，它们分别代表了煤中脂肪链长的程度及支链化程度。其计算方法为： $L_{AL} = A_{C+D}/A_E$ ； $K_{AL} = A_{C+D}+A_E$ 。

3) 芳构化程度参数。

$I_{Ar} = A_{V(CH_2+CH_3)} / A_{V(C=C)}$ ：该比值表征有机质热演化程度。此处为 1380~1460 cm^{-1} 的 CH_2 和 CH_3 共同贡献，反映的是芳核上的脂族结构。煤样的芳构化参数包括缩合比值 I_{Ar_1} 和脂芳比值 I_{Ar_2} 。计算方法： $I_{Ar_1} = (A_L + A_M + A_N) / A_I$ ， $I_{Ar_2} = A_J / A_I$ 。

4) 富氧程度参数。

用来描述煤样富氧程度的参数有 I_{O_1} ， I_{O_2} 和 I_{O_3} ，它们分别代表煤的富脂肪族 $C=O$ 度，富芳香族 $C=O$ 度及富总氧度。计算方法： $I_{O_1} = A_G / A_I$ ， $I_{O_2} = A_H / A_I$ ， $I_{O_3} = (A_G + A_H + A_K) / A_I$ 。

3 红外参数分析

3.1 富氢程度参数

表 3 列出了不同特征吸收峰的积分面积 A，其中的代号也与表 2 中的代号一一对应。如图 3 所示， I_{H_0} ， I_{H_1} 和 I_{H_2} 在 300~600 $^{\circ}C$ 之间都随温度的增高而不断减小，但是程度并不明显，这主要是由于处于低温热解阶段，只有脂肪结构逐渐被裂解，有机官能团碎片很快形成分子裂解出去，富氢程度稍微降低。因为脂肪结构的活化能比芳香结构的活化能要小很多，容易受热裂解，而芳香结构则需要较高

温度才有可能发生变化^[5]。

表 3 不同温度下主要红外吸收峰积分面积
Tab. 3 Areas of major FTIR peaks at different temperature

温度/ $^{\circ}C$	C+D	E	G	H	I	J	K	L	M	N
25	10.799	6.823	0.000	0	41.593	40.071	79.861	2.703	2.370	1.263
300	8.027	5.265	0.000	0	30.681	30.537	74.499	1.813	1.604	0.652
400	1.886	0.630	0.000	0	10.055	9.217	5.987	0.704	0.563	0.440
500	0.151	0.082	0.045	0	4.798	8.456	8.846	0.730	0.312	0.219
600	0.105	0.030	0.004	0	2.977	2.341	1.259	1.145	0.179	0.091
700	0.216	0.060	0.056	0	0.049	6.156	5.601	0.943	0.346	0.519
850	0.488	0.372	1.044	0	4.124	21.417	19.954	7.018	7.194	2.949
950	0.766	0.394	0.086	0	0.538	17.533	23.979	5.005	3.879	1.060
1000	0.227	0.054	0.000	0	0.364	5.328	23.978	0.000	7.110	0.000

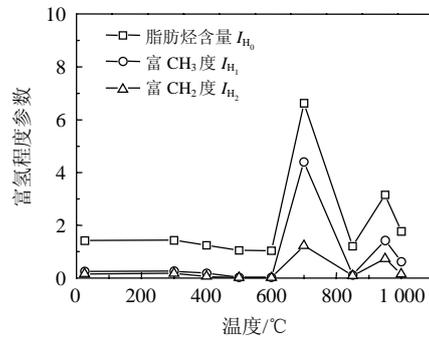


图 3 富氢程度参数随温度的变化图

Fig. 3 changes of hydrogen-enriched degree parameters with temperature

600 $^{\circ}C$ 之后， I_{H_1} 和 I_{H_2} 的波峰呈振荡减小，这与芳核的裂解反应和缩合反应有关，与文献[5]中的 600 $^{\circ}C$ 时有明显的缩合作用结果一致。参数的振荡变化主要是由于此实验过程包括热解过程的裂解与芳构化和缩合及气化过程的加速芳环开裂，基团在不同的反应过程会生成又逐渐消失。余海洋等^[5]也认为煤结构在 400 $^{\circ}C$ 之前以脂肪链裂解脱除为主，而之后煤的芳构化和缩聚作用占主导地位。

另外，850 $^{\circ}C$ 之后， I_{H_0} ， I_{H_1} 和 I_{H_2} 值开始增加，这部分以气化反应为主，高温气化使芳环开链加速，但由于反应物质的消耗，基团总含量也随之减少，到 1000 $^{\circ}C$ 时又都降低了很多，也表明了缩合作用已比较明显，出现参数值减小现象。

3.2 富脂族链参数

由图 4 可以看到，随着温度的升高， L_{AL} 和 K_{AL} 的变化趋势完全不同。对于 L_{AL} 参数，初始加热时其值基本无变化，但是从 300 $^{\circ}C$ 开始有了较明显的变化，400 $^{\circ}C$ 出现一次极值，而且 600 和 700 $^{\circ}C$ 的参数值也无太大差距，但是 850 $^{\circ}C$ 时达到最小值，1000 $^{\circ}C$ 时达到最大值。这是因为开始时温度较低，

尚未达到脂肪结构脱落温度；400 °C左右脂肪结构大量开链，扩大了脂肪链长的程度，但是到了500 °C时才开始裂解出大量的脂肪烃，煤焦结构中只有少量的脂肪结构；温度升高至600和700 °C时，活化能低的杂环裂解，形成了脂肪结构，而温度的继续升高又会使这些脂肪结构脱落。这与胡松等^[22]研究低阶煤燃烧时的官能团演化现象一致。

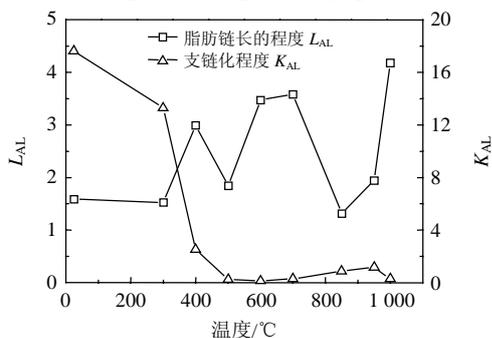


图4 富脂族链参数随温度的变化图
Fig. 4 Changes of aliphatic-chain-enriched parameters with temperature

850 °C之后的脂肪结构扩展主要是由于CO₂参与，反应加剧，加速了芳环的开裂，因此1000 °C的 L_{AL} 值最大。 K_{AL} 值随温度升高而减小，说明其支链化程度不断降低。

参数 L_{AL} 和 K_{AL} 的变化并不矛盾，而且还可以由此判断煤焦结构的断裂次序：300~500 °C， L_{AL} 随温度升高而增大， K_{AL} 减小，主要是煤焦中脂肪结构自身的脂肪链扩展造成的，非芳环结构的贡献，煤焦的芳香度基本不变化；600~850 °C， K_{AL} 增大，也证实了600和700 °C时，活化能低的杂环裂解形成了支链脂肪结构，增加了脂肪链长的程度和支链化程度；850 °C之后， L_{AL} 随温度升高而增大， K_{AL} 先增后减，主要是煤焦中芳环的加速开裂，支链增加，缩合重整增大了脂肪链长又使得支链减少。

3.3 芳构化参数

从图5的曲线趋势上看，在600 °C之前，缩合比值 I_{Ar1} 基本上没有太大变化，700 °C达到最大值，这说明煤的缩合和芳构化在600 °C之后比较明显，与富氢程度参数变化一致。700 °C的缩合和芳构化程度最大时，使得煤焦结构中的支链化程度降低，与图4中 K_{AL} 表现的一致。850 °C之后由于CO₂参与反应增加了反应速度，减少了缩合和芳构化反应的发生。

对脂芳比值 I_{Ar2} 而言，600 °C之后增加，说明煤焦中芳环在缩合和芳构化(从 I_{Ar1} 可以看出)的同时也在进行裂解，使得芳环上的脂肪结构增加，这

样就增加了支链化程度，芳环结构减少，与 K_{AL} 的变化一致。而950 °C时，结合图4可以看出，脂肪结构主要表现为长链，而芳核也在气化中减少，导致比值 I_{Ar2} 要小于700 °C的 I_{Ar2} 。这也表明了煤焦气化过程中有机质的热演化程度受到了温度和反应气氛介质的影响。

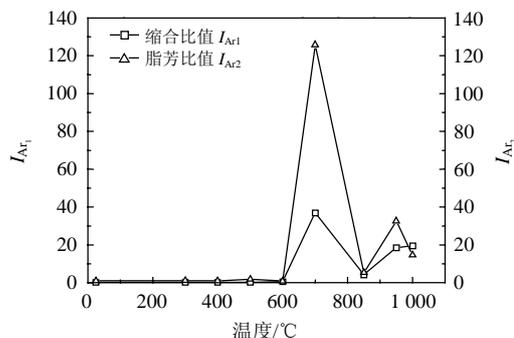


图5 芳构化参数随温度的变化图
Fig. 5 Changes of the aromatization parameters with temperature

3.4 富氧程度参数

图6反映了富氧程度参数随温度的变化，在原煤中没有发现脂肪族C=O和芳香族C=O，而C=O在600 °C之前的含量很低，这主要是化学吸附的CO₂，而高温下通过芳环裂解和CO₂反应生成脂肪族C=O。

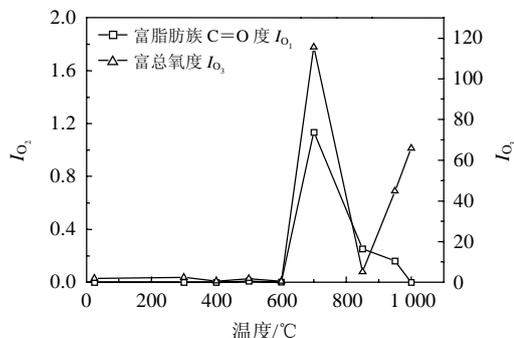


图6 富氧程度参数随温度的变化图
Fig. 6 Changes of oxygen-enriched degree parameters with temperature

由表3比较 I_{O1} 和 I_{O3} ，发现在同一温度下前者比后者小得多，说明煤焦中虽然含有脂肪族所含C=O基团，但是含量有限。另外，对表征气化半焦的富总氧度的 I_{O3} 在700 °C处的出现的最大值比富脂肪族C=O度 I_{O1} 大得多不能用来衡量原煤中的含氧量，因为CO₂的参与提供了氧。

从图3~6中发现官能团特性参数在600和850 °C附近2处发生显著的变化，主要因为这个实验过程可以分为2个阶段，600 °C处于热解阶段，而

850 ℃主要为气化过程开始阶段, 而且应该说 850 ℃是热解和气化的分界, 这 2 个温度之间即存在热解也存在气化, 所以煤焦结构变化最大。850 ℃之后由于气化比热解反应剧烈, 所以煤焦结构变化相对明显。

4 结论

通过对煤气化过程中煤焦表面官能团各红外参数进行比较, 得出以下结论:

1) 随着温度的升高, 含N和含O基团逐渐消失, 但是CH₂基团一直存在, 游离的SH会在高温下消失, 但是有机硫不受影响。

2) 煤的富氢程度与煤结构有关, 高温气化半焦富氢程度的提高主要来自于芳香结构的裂解和缩合协同作用的结果。气化使芳环裂解加剧可增大富氢程度;

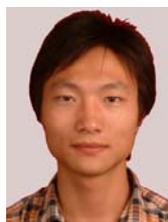
3) 温度较低时脂肪结构不会脱落, 芳环也不受影响。随着温度的升高, 煤焦中原始脂肪结构脱落, 但芳香度不变。而高温下芳环开链成脂肪结构也逐渐脱落, 同时增加了脂肪链长的程度和支链化程度, 但是高温下气化存在芳环加速开裂反应和缩合重整反应竞争;

4) 参数的振荡变化主要是由于此实验过程包括热解过程的裂解与芳构化和缩合及气化过程的加速芳环开裂, 基团在不同的反应过程会生成又逐渐消失; 而由于反应物质的消耗, 基团含量也随之减少, 出现参数值减小现象。

参考文献

- [1] 叶翠平, 冯杰, 谢克昌. 煤的溶剂抽提与抽提物性质的研究[J]. 煤炭转化, 2002, 25(3): 1-5.
Ye Cuiping, Feng Jie, Xie Kechang. Studies on solvent extraction of coal and the properties of extracts[J]. Coal Conversion, 2002, 25(3): 1-5(in Chinese).
- [2] 张双全. 煤化学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004: 48-50.
Zhang Shuangquan. Coal chemistry[J]. Xuzhou: Press of China University of Mining and Technology, 2004: 48-50.
- [3] Lis G P, Mastalerz M, Schimmelmann A, et al. FTIR absorption indices for thermal maturity in comparison with vitrinite reflectance R₀ in type-II kerogens from Devonian black shales[J]. Organic Geochemistry, 2005, 36(11): 1533-1552.
- [4] 据宜文, 姜波, 侯泉林, 等. 构造煤结构成分应力效应的傅里叶变换红外光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(8): 1216-1220.
Ju Yiwen, Jiang Bo, Hou Quanlin, et al. FTIR spectroscopic study on the stress effect of compositions of macromolecular structure in tectonically deformed coals[J]. Spectroscopic and Spectral Analysis, 2005, 25(8): 1216-1220(in Chinese).
- [5] 张葵, 孙旭光. 新疆吐哈盆地侏罗纪煤生烃模式的红外光谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(1): 61-66.
Zhang Rui, Sun Xuguang. FTIR study on the hydrocarbon-generation mode of jurassic coals from turpan-hami basin, Xinjiang[J]. Spectroscopic and Spectral Analysis, 2008, 28(1): 61-66(in Chinese).
- [6] 余海洋, 孙旭光. 江西乐平晚二叠世煤成烃机制红外光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(5): 858-862.
Yu Haiyang, Sun Xuguang. Research on hydrocarbon-generation mechanism of upper permian coals from leping, jiangxi, based on infrared spectroscopy[J]. Spectroscopic and Spectral Analysis, 2007, 27(5): 858-862(in Chinese).
- [7] 陈晓利, 吴少华, 李振中, 等. 整体煤气化联合循环系统变工况特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(14): 6-11.
Chen Xiaoli, Wu Shaohua, Li Zhenzhong, et al. Research on off-design characteristics of integrated gasification combined cycle system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(14): 6-11(in Chinese).
- [8] 关键, 王勤辉, 骆仲决, 等. 新型近零排放煤气化燃烧利用系统的优化及性能预测[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 7-13.
Guan Jian, Wang Qinhuai, Luo Zhongyang, et al. Optimization and performance prediction of a new near zero emissions coal utilization system with combined gasification and combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 7-13(in Chinese).
- [9] 黄亚继, 金保升, 仲兆平, 等. 煤气化过程中痕量元素迁移规律与气化温度的关系[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 10-15.
Huang Yaji, Jin Baosheng, Zhong Zhaoping, et al. The relationship between occurrence of trace elements and gasification temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4): 10-15(in Chinese).
- [10] 夏鲲鹏, 陈汉平, 王贤华, 等. 气流床煤气化技术的现状及发展[J]. 煤炭转化, 2005, 8(4): 69-73.
Xia Kunpeng, Chen Hanping, Wang Xianhua, et al. Entrained-bed coal gasification technology and its development tendency[J]. Coal Conversion, 2005, 8(4): 69-73(in Chinese).
- [11] 向文国, 狄藤藤, 肖军, 等. 新型煤气化间接燃烧联合循环研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 170-174.
Xiang Wenguo, Di Tengfeng, Xiao Jun, et al. Investigation of a novel gasification chemical looping combustion combined cycle[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 170-174(in Chinese).
- [12] 向文国, 牟建茂, 狄藤藤. 两种煤气化工艺下 Ni 基载氧体链式燃烧联合循环性能模拟[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(29): 28-33.
Xiang Wenguo, Mou Jianmao, Di Tengfeng. Performance simulation of ni-based chemical looping combustion combined cycle with different gasification processes[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(29): 28-33(in Chinese).
- [13] 肖睿, 金保升, 周宏仓, 等. 高温气化剂加压喷动流化床煤气化试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 100-105.
Xiao Rui, Jin Baosheng, Zhou Hongcang, et al. Coal gasification using high temperature preheated gasifying agent in a pressurized spout-fluid bed[J]. Processes. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(23): 100-105(in Chinese).
- [14] 张荣光, 那永洁, 吕清刚. 循环流化床煤气化平衡模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 80-85.
Zhang Rongguang, Na Yongjie, Lü Qinggang. Equilibrium model of coal gasification in a circulating fluidized bed[J]. Proceedings of the

- CSEE, 2005, 25(18): 80-85(in Chinese).
- [15] 刘心宇, 陈国华. CaO-Al₂O₃-SiO₂玻璃晶化过程的红外光谱分析[J]. 矿产综合利用, 2003(3): 20-23.
Liu Xinyu, Chen Guohua. Study on infrared spectra of crystallization of CaO-Al₂O₃-SiO₂ glass[J]. Multipurpose Utilization Of Mineral Resources, 2003(3): 20-23(in Chinese).
- [16] 孟令芝, 龚淑玲, 何永炳. 有机波谱分析[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003: 214-232.
Meng Lingzhi, Gong Shuling, He Yongbing. Organic spectral analysis[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003: 214-232
- [17] 彭琳, 赵高凌, 应浩, 等. 无碱铝硼硅系玻璃结构的红外光谱[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(7): 856-861.
Peng Lin, Zhao Gaoling, Ying Hao, et al. Infrared spectra of alkali-free aluminoborosilicate glass structure[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(7): 856-861(in Chinese).
- [18] 吴忠荣, 程汉亨. SiO₂-Al₂O₃-CaO-CaF₂-P玻璃的红外光谱研究[J]. 生物医学工程研究, 2006, 25(3): 166-169.
Wu Zhongrong, Cheng Hanting. FTIR study on the glass in the system of SiO₂-Al₂O₃-CaO-CaF₂-P[J]. Journal of Biomedical Engineering Research, 2006, 25(3): 166-169(in Chinese).
- [19] 赵志明, 王志光. A. Benyagoub, 等. 高能 Pb 离子辐照注碳 SiO₂ 的红外谱研究[J]. 高能物理与核物理, 2005, 29(8): 824-829.
Zhao Zhiming, Wang Zhiguang, Benyagoub A, et al. FTIR study of C-implanted SiO₂ after high-energy Pb-ion irradiation[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2005, 29(8): 824-829(in Chinese).
- [20] 朱红, 李虎林, 欧泽深, 等. 不同煤阶煤表面改性的 FTIR 谱研究[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(4): 366-370.
Zhu Hong, Li Hulin, Ou Zeshen, et al. Study on surface modification of different rank coals by using FTIR[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2001, 30(4): 366-370(in Chinese).
- [21] 孙旭光, 陈建平, 郝多虎. 塔里木盆地煤显微组分显微傅里叶红外光谱特征及意义[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2001, 37(6): 832-838.
Sun Xuguang, Chen Jianpi, Hao Duohu. Micro-FTIR spectroscopy of macerals in coals from the tarim basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2001, 37(6): 832-838(in Chinese).
- [22] 胡松. 煤颗粒的化学结构及其在燃烧过程中的演化行为[R]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
Hu Song. The chemical structure and evolution behavior of coal particle during coal combustion[R]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006(in Chinese).



石金明

收稿日期: 2009-09-08。

作者简介:

石金明(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事煤气化基础研究, jmshi0012@smail.hust.edu.cn;

孙路石(1969—), 男, 副教授, 主要从事洁净煤燃烧和固体废弃物能源化研究;

向军(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事洁净煤燃烧和燃烧理论与污染物生成控制研究。

胡松(1973—), 男, 副教授, 主要从事煤物理化学结构特性和可再生能源利用的研究。

(责任编辑 王庆霞)