

典型煤种加压热解与气化实验研究

杨海平, 陈汉平, 鞠付栋, 王 静, 张世红

(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 湖北省 武汉市 430074)

Study on Pressurized Pyrolysis and Gasification of Chinese Typical Coal Samples

YANG Hai-ping, CHEN Han-ping, JU Fu-dong, WANG Jing, ZHANG Shi-hong

(State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: To understand the influence of pressure on the pyrolysis characteristics and the gasification reactivity of the resultant solid coal char, the pyrolysis of 4 typical Chinese coals samples were carried out at ambient pressure and 3Mpa using pressurized thermogravimetric analyzer, and the pore structure characteristics and elemental components of the resultant char were measured. Simultaneously, the isothermal gasification behavior of solid char particles was investigated using ambient thermal analyzer with CO₂ as gasifying agent. It can be observed the pyrolysis of coal particles was suppressed with pyrolysis pressure increasing from ambient to 3Mpa, and the solid charcoal yield was enhanced. H content of the resultant charcoal decreased while C content increased greatly. The gasification reactivity of solid charcoal was decreased greatly with pyrolysis pressure increasing.

KEY WORDS: coal particles; pyrolysis; pressure; coal-char; surface porosity; gasification reactivity

摘要: 为了解压力对煤粉颗粒热解特性与固体煤焦的气化活性的影响, 及其与煤粉颗粒特性的关联关系, 采用加压热重分析仪在常压和3MPa下分析了4种我国典型工业用煤的热解失重特性, 同时对煤焦的孔隙结构和化学组成进行了分析, 并采用常压热分析仪比较了所得煤焦的CO₂气化特性。结果显示高压不利于煤颗粒的热解, 增加了煤焦的产量, 而煤焦中H元素的含量明显降低; 煤焦的气化活性也有明显降低。压力对不同煤种的影响因煤特性而异, 褐煤焦的比表面积明显减少, 而烟煤、无烟煤与贫煤的比表面积却有所增加, 进而对煤焦气化特性的影响也有明显不同。

关键词: 煤粉颗粒; 热解; 压力; 煤焦; 表面孔隙; 气化活性

0 引言

煤的气化是十分复杂的过程, 包括煤的热解和煤焦气化两部分^[1]。热解是煤燃烧、气化转化的根

本, 煤的气化反应性很大程度上取决于煤的热解过程^[2-5]。煤焦的气化活性不仅受煤种的影响, 而且还与运行压力、终温及停留时间等操作条件有关^[4-13]。Kajitani和Ahn等研究发现增加气化压力促进了气化反应的进行, 煤焦的表面反应及孔内部气体扩散是控制气化反应的主要因素^[14-15]。Wall等人发现气化压力对挥发分的析出和煤焦的膨化有显著影响, 从而影响煤焦的表面孔隙结构, 而煤焦结构特性对其气化速率和灰的形成有重要影响^[9,16]。Messenböck等研究发现随热解与气化压力的增大, 煤焦的燃烧活性逐渐减小^[17]。原煤的物化特性对粉煤颗粒的热解与气化过程也有着重要的影响, 且与运行条件对煤的热化学转化的影响有很强的交互作用^[6,11,18-19]。因此对不同煤种的热解、气化特性以及煤种与压力、温度等相互作用的研究就显得尤为重要。本文对4种我国典型煤种的热解与气化特性及其压力的影响进行了研究, 从煤焦的物化特性方面深层次分析煤焦的气化活性, 对压力与原煤物性对煤焦气化特性的影响有了一定的了解, 有利于煤气化技术的发展。

1 试验样品和试验方法

1.1 样品

本研究中采用小龙潭褐煤(XLT)、神府烟煤(SF)、坪寨无烟煤(PZ)和合山贫煤(HS), 为取自不同煤阶的4种我国典型工业用煤。所用煤样颗粒是经过破碎、筛分, 所选样品颗粒都小于100目, 其工业分析和元素分析结果见表1。从表中可以看出XLT煤的挥发分很高, 而其固定碳量很低, PZ有很高的固定碳量(约80%), 而HS煤中灰的含量很高, 占煤粉颗粒的50%以上。

基金项目: 国家重点基础研究专项经费项目(2004CB217704)。

Project Supported by Project Supported by Special Fund of the National Priority Basic Research of China (2004CB217704).

表1 煤样的工业分析和元素分析
Tab. 1 Proximate and ultimate analyses of coal samples

样品	工业分析 w _{ad} /%				元素分析 w _{ad} /%				
	M	V	A	FC	C	H	N	S	O
XLT	16.16	48.90	24.76	26.34	41.35	3.46	3.04	1.18	10.05
SF	10.19	31.62	5.84	52.35	68.84	5.06	0.91	0.28	8.88
PZ	2.83	9.42	6.82	80.93	78.38	3.29	0.99	2.34	5.35
HS	3.10	11.94	51.89	35.88	33.06	1.73	0.50	6.00	3.72

1.2 试验方法

1.2.1 煤样的热解方法

煤样的热解是在加压热重分析仪(pTGA, Thermal Max 500, Thermal Cahn, USA)上进行的, 载气为 Ar (100mL/min), 煤样的热解分别在常压(0.1MPa)和3MPa下进行。具体工况为: 升温速率 10°C/min, 终温1000°C, 并停留10min, 样品量为1g左右。

随着煤粉颗粒温度的升高, 挥发分逐渐析出, 在固体样品颗粒的表面和颗粒内部形成大量的孔隙。在加速比表面及孔径分析仪(ASAP 2020, USA)上采用液氮进行等温吸附法(77K)分析了煤焦的表面孔隙特性, 同时采用 Vario EL II CNHS/O (Germany)元素分析仪对煤焦的化学组成进行分析, 以深层次的探索原煤特性与热解条件对煤焦气化活性的影响。

1.2.2 煤焦的气化

采用常压热分析仪(STA 409C, Netsch Germany)对于不同煤种在常压和加压下热解得到的煤焦的气化特性进行研究, 采用CO₂等温气化法。在惰性环境(Ar 100mL/min)中煤焦颗粒从室温快速(50°C/min)升至1000°C, 开始通入CO₂ (100mL/min), 气化反应开始。为保证煤焦颗粒完全气化, 设定反应时间为60min。气化试验样品量每次约为20mg。

随着气化反应的进行, 煤焦快速失重, 日本的研究者Takarada在研究34种煤的气化活性时指出活性因子K可用于定量、准确地描述样品的气化活性^[20]:

$$K = 2 / \tau_{0.5} \quad (1)$$

其中 $\tau_{0.5}$ 是煤焦气化过程中炭转化率达到50%的时间, K值越大就表明焦的气化活性越高。

2 实验结果与分析

2.1 煤的热解特性

4种煤粉颗粒的常压热解曲线见图1 (TG) 和图2 (DTG), 可以看出煤的热解主要分为3个阶段。当温度低于300°C时, 主要为煤颗粒的干燥、脱水过程, XLT褐煤和SF烟煤含有较高的水分, 与工业分析一致。随着温度的继续升高(>300°C), 挥发分逐渐析

出, 一次热解开始, 在300~700°C, DTG曲线有一明显的失重速率峰, 主要是一些较弱的化学键的断裂、重组, 形成气体析出。主要气体产物有CO₂、CO、CH₄、水和一些脂肪族化合物。当温度高于700°C, DTG曲线上出现另外一个峰(约800°C), 主要由煤的二次裂解引起的, CO和H₂是主要的气体产物^[16]。而煤种不同, 挥发分析出的起始温度稍有差异, 褐煤和烟煤的析出温度较低(约300°C), 在450和512°C分别取得最大失重速率, 而无烟煤和贫煤的析出温度较高(约400°C), 且挥发分析出很慢, 在600°C左右得到最大失重速率, 且失重量较少, 整个过程才有约10%的失重。比较XLT和SF煤热解DTG曲线发现XLT的一次裂解峰的最大值(0.125%/°C)明显高于SF的0.084%/°C, 而二次裂解峰却小于SF煤, 这与煤颗粒的内部化学组成有关。按样品颗粒热解难易, 4种煤样的热解的排序为: 褐煤>烟煤>无烟煤>贫煤。

而随着热解压力的升高(图3和图4), 热解温度升高(约50°C), 且一次热解速率降低, 最大失重速率也明显减少, 煤焦残余量明显增加(10%)。这是因为系统压力升高阻碍了挥发分的析出, 不利于热解反应的进行, 尤其对于挥发分含量较高的XLT褐煤; 然而压力的升高, 延长了挥发分在固体颗粒内的停留时间, 从而促进了挥发分的二次热裂解, 形成更多的小分子气体析出。但对于坪寨无烟煤和合山贫煤而言, 压力的升高对热解特性的影响不明显, 这可能是因为这两种煤所含挥发分的量较低, 热解比较困难(见图1和图2)。

热解速率对煤的气化过程有着显著的作用, 而热解条件对样品颗粒热解机理有着重要的影响^[21]。煤颗粒热解的动力学参数采用积分法进行计算^[22], 结果见表2。其中E为各段活化能, A为指前因子, n为反应级数, R为相关系数, E_m为热解反应的总表观活化能。随着压力的增加, 4种煤粉颗粒显示出相同的趋势, 活化能随热解压力的增大而有所增大, 而总的失重量明显减少, 即: 高压不利于挥发分的析出, 与图1~4得到的结果一致。XLT和SF的热解为2级反应, 而PZ和HS为1级反应, 这可能与其组成有关, XLT和SF煤含有较高的挥发分, 热解反应较为复杂, 而PZ和HS的挥发分量较少, 热解反应相对简单。

各煤焦的BET比表面积(S_{BET})和平均孔径(d_m)列于表3, 可以看出小龙潭煤焦的表面积最大, 并随

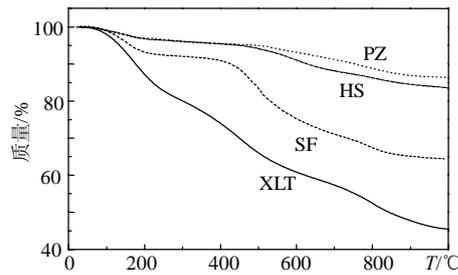


图1 煤颗粒常压热解TG曲线

Fig. 1 TG curves of coal sample pyrolysis at ambient pressure

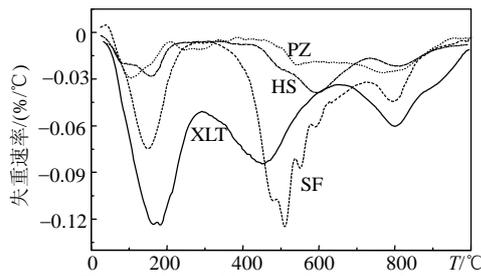


图2 煤颗粒常压热解DTG曲线

Fig. 2 DTG curves of coal sample pyrolysis at ambient pressure

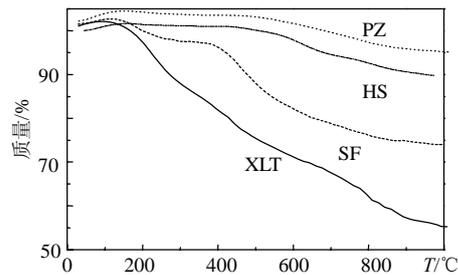


图3 煤颗粒加压热解TG曲线(3MPa)

Fig. 3 TG curves of coal particles pyrolysis at 3MPa

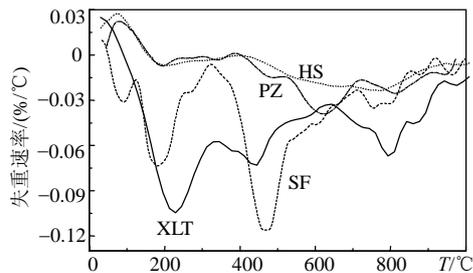


图4 煤颗粒加压热解DTG曲线(3MPa)

Fig. 4 DTG curves of coal particles pyrolysis at 3MPa

随着热解压力的升高而降低,而其他3种煤焦的比表面积随热解压力从常压升高到3MPa而有所增加,并且增加幅度随原煤挥发分量的减少而减少,因此,压力对热解煤焦表面结构的影响与原煤的物性组成有着密切的联系。煤焦的元素组成见表4,随热解压力升高,煤焦中C元素的含量增加而H元素的含量明显降低,因为高压促进挥发分及煤焦的二次裂解,而造成更多的含氢化合物析出,从而H含量明显降低,C的量反而升高;即煤焦的石墨化程度增加。

表2 煤颗粒的热解动力学参数

Tab. 2 Kinetics parameters of 4 different coals pyrolysis

样品	P/MPa	T/°C	n	E/(kJ/mol)	A/(s ⁻¹)	R	失重/%	E _m /(kJ/mol)
XLT	0.1	220~410	2	3.34	0.0142	0.9659	12.01	
		410~790	2	10.86	0.189	0.9902	16.14	42.63
		490~1000	2	128.19	1.65×10 ⁶	0.9459	11.51	
	3	260~690	2	10.84	0.138	0.9861	23.08	
		690~1000	2	139.56	6.7×10 ⁶	0.9101	12.57	56.23
		430~540	2	44.15	7.06×10 ¹	0.9927	10.12	
SF	0.1	540~760	2	30.82	7.25×10 ⁰	0.9989	10.7	54.73
		760~1000	2	126.62	1.84×10 ⁶	0.9958	4.92	
		390~540	2	62.64	1.88×10 ³	0.9973	11.71	
	3	540~740	2	33.94	1.30×10 ¹	0.9993	7.29	60.22
		740~850	2	118.28	9.26×10 ⁵	0.9903	2.81	
		460~730	1	18.09	0.264	0.991	7.23	20.40
HS	3	730~1000	1	24.21	0.662	0.9954	4.37	
	3	440~1000	1	30.46	1.27	0.9634	10.84	30.46
PZ	0.1	490~700	1	10.79	0.0469	0.999	3.92	
	3	700~910	1	26.85	0.815	0.9978	4.24	19.13
3	500~920	1	30.46	1.18	0.9681	8.51	30.46	

表3 煤焦的表面结构特性参数

Tab. 3 Surface structure parameters of solid charcoals

样品	P/MPa	S _{BET} (m ² /g)	d _m /nm
XLT	0.1	79.18	2.960
	3	47.45	4.758
SF	0.1	0.736	25.055
	3	1.87	14.970
PZ	0.1	0.34	15.193
	3	0.84	16.318
HS	0.1	1.82	15.420
	3	2.31	15.583

表4 煤焦的元素分析

Tab. 4 Ultimate analysis of char from different coals pyrolysis

样品	P/MPa	w(C _a)/%	w(H _a)/%	w(N _a)/%	w(S _a)/%
XLT	0.1	47.89	0.535	0.691	6.131
	3	47.81	0.396	0.461	6.987
SF	0.1	79.71	0.483	0.707	0.527
	3	81.46	0.361	0.751	0.567
PZ	0.1	81.05	0.681	0.903	2.177
	3	82.27	0.803	0.801	2.17
HS	0.1	34.55	0.514	0.328	5.681
	3	35.29	0.329	0.384	5.268

2.2 煤焦的气化特性研究

煤焦的气化曲线见图5~8,当温度低于1 000°C时属于热解后段,主要为外在水分和煤焦颗粒表面附着的焦油残余物的析出,XLT和SF煤焦有少许失重,而HS和PZ因原煤含挥发分很低无明显失重。从图5和图6可以看出XLT和HS的常压煤焦的CO₂气化反应较快,DTG曲线的峰窄而尖,在7min内气化已结束,而SF煤焦的气化反应较慢,气化速率峰宽而矮(约20min)。与前3种煤焦气化的单峰不同,PZ煤焦的气化的起始阶段很快,在5~6min内约有24%的失重,随后气化速度减缓(约1.23%/min)并保持,直到气化试验结束,此阶段的失重量占煤焦重量的60%,这与原煤及煤焦的物化特性有关。PZ煤为无

烟煤，固定碳含量较高(约 80%)，热解所得煤焦的较密实，比表面积很小(0.34m²/g)，SF煤焦与之类似，比表面积小且碳含量高，气化反应也相对较慢；而XLT和HS煤样的固定碳含量较低(约30%~40%)，煤焦的孔隙就相对丰富，而碳结构也相应疏松，易于C-CO₂的气化反应。

与常压煤焦的气化相比，加压热解煤焦的气化速率较慢，最大气化速率大幅度减小，特别是对于PZ和HS煤焦，DTG曲线无明显的气化峰，在整个过程DTG曲线都比较平直(见图7和图8)。

不同煤焦CO₂气化的活性因子采用式(1)进行计算，结果见表5。从表中可以得知4种煤常压热解焦的气化活性为：XLT>HS>SF>PZ，即：褐煤的气化活性最高，贫煤次之，而无烟煤的气化活性最差，与图3所得的结果相似，这主要与煤焦的物化特性：焦的C/H摩尔比与表面结构特性有关。从表5可以看出C/H的摩尔比越大，焦的气化活性越小，而比表面积越大，焦的气化活性越高。同时煤焦的气化活性还可能与煤中灰特性的不同有关，因内在灰的存在对焦的气化有一定的促进作用^[19,23]。因为运行条件相同，因此煤焦气化特性的差异主要取决于原煤的物化特性的差异。

当热解压力升高到3MPa时，XLT、HS和PZ煤焦的气化活性明显降低，而SF煤焦的活性却明显增大。煤焦气化主要为煤焦表面的C-CO₂的反应，为气固两相反应，焦的孔隙结构特性对其有着重要的作用，而热解压力的增大明显改变了焦的孔隙结构，从而影响了其气化反应特性^[16]。对于SF、PZ和HS煤焦表面积随压力增大而明显增大，因此压力增大一方面增大了3种煤焦的气化活性，而对于XLT煤样而言压力增大到3MPa，焦的气化活性降低；从另一方面讲，煤焦的碳晶结构、石墨化程度对焦的气化活性也有着至关重要的作用，而压力增加减少了焦内有机官能团的含量(表4，C增多而H减少)，从而加强了焦的石墨化，也在一定程度上降低了焦的气化活性，两方面的交互作用使得煤焦的显示出不同

表 5 煤焦的气化活性指数

Tab. 5 The gasification parameters of solid charcoal			
样品	P/MPa	n(C)/n(H)	K/h ⁻¹
XLT	0.1	7.46	9.12
	3	10.06	7.92
SF	0.1	13.75	1.74
	3	18.80	3.90
PZ	0.1	9.92	3.84
	3	8.54	1.14
HS	0.1	5.60	5.46
	3	8.94	1.36

的气化特性。当热解压力为3MPa时，各煤焦的气化活性为：XLT>SF>HS>PZ，也即：褐煤焦的气化活性最高，烟煤次之，而无烟煤焦的气化活性仍然最低。

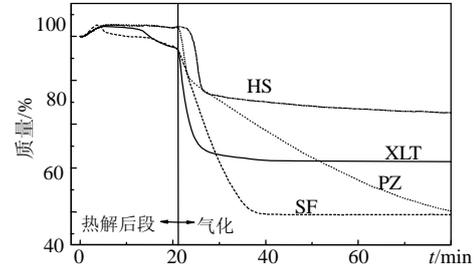


图 5 常压煤焦气化TG曲线

Fig. 5 TG curves of ambient char gasification

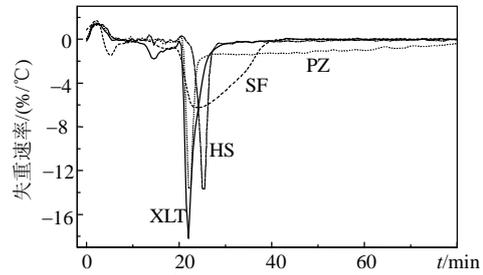


图 6 常压煤焦气化DTG曲线

Fig. 6 DTG curves of ambient char gasification

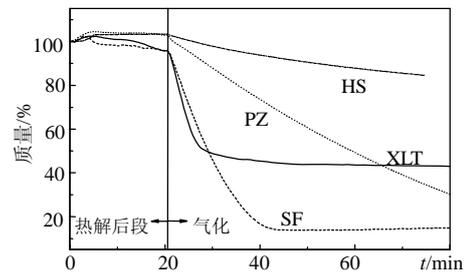


图 7 加压热解煤焦气化的TG曲线

Fig. 7 TG curve of pressurized char gasification

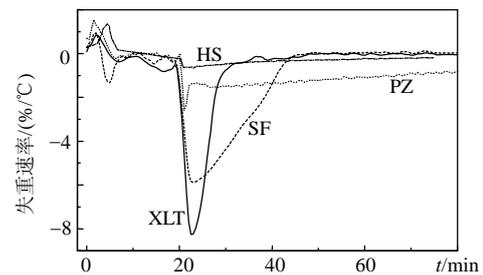


图 8 加压热解煤焦气化的DTG曲线

Fig. 8 DTG curve of pressurized char gasification

3 结论

煤种特性和热解压力对煤的热解、煤焦的物化特性与气化反应活性有很大的影响。煤的热解主要由300~700℃时煤粉颗粒的一次热解和700~1000℃的挥发分与煤焦的二次裂解组成；小龙潭褐煤易于热解，坪寨无烟煤和合山贫煤难于热解。高的热解

压力(3MPa)阻碍了挥发分的析出,使得煤样的热解速度减慢,并在一定程度上增加了固体焦的产量。随热解压力升高,焦内H的含量明显减少,而C的含量却有所增加;表面孔隙结构也有明显的改变,但4种煤样的变化趋势明显不同,神府、合山和坪寨煤的比表面积有明显增加,而小龙潭褐煤的表面积明显减小。当热解压力为常压时,小龙潭褐煤、合山贫煤的热解焦的气化反应很快,坪寨无烟煤焦在气化初始阶段也很快,都有一个尖而窄气化峰,而神府烟煤的气化较慢,所需时间相对较长。随着热解压力和煤种的不同,所得煤焦气化活性也有很大的差异,热解压力的增大使得煤焦的气化活性降低。热解压力和煤种的变化改变了煤焦的物化特性,从而间接的影响了焦的气化活性,且压力对煤粉颗粒热转化特性的影响也随原煤特性的不同而有所不同,具体量化关系还需进一步的深入研究。

参考文献

- [1] Miura K, Nakagawa H, Nakai SI, et al. Analysis of gasification reaction of coke formed using a miniature tubing-bomb reactor and a pressurized drop tube furnace at high pressure and high temperature [J]. *Chemical Engineering Science*, 2004, 59(19): 5261-5268.
- [2] Alonso J G, Borrego A G, Alvarez D, et al. Influence of pyrolysis temperature on char optical texture and reactivity [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2001, 58-59(1): 887-909.
- [3] Jamil K, Hayashi J I, Li C-Z. Pyrolysis of a Victorian brown coal and gasification of nascent char in CO₂ atmosphere in a wire-mesh reactor [J]. *Fuel*, 2004, 83(7-8): 833-843.
- [4] 唐黎华, 吴勇强, 朱学栋, 等. 高温下制焦温度对煤焦气化活性的影响[J]. *燃料化学学报*, 2002, 30(1): 16-20.
Tang Lihua, Wu Yongqiang, Zhu Xuedong, et al. Effect of char making temperature on char gasification activity in higher temperature [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2002, 30(1): 16-20(in Chinese).
- [5] 范晓雷, 周志杰, 王辅臣, 等. 热解条件对煤焦气化活性影响的研究进展[J]. *煤炭转化*, 2005, 28(3): 74-79.
Fan Xiaolei, Zhou Zhijie, Wang Fuchen, et al. Study on influence of pyrolysis conditions on char gasification reactivity[J]. *Coal Conversion*, 2005, 28(3): 74-79(in Chinese).
- [6] Hanson S, Patrick J W, Walker A. The effect of coal particle size on pyrolysis and steam gasification [J]. *Fuel*, 2002, 81(5): 531-537.
- [7] Yu J, Harris D, Lucas J, et al. Effect of pressure on char formation during pyrolysis of pulverized coal [J]. *Energy & Fuels*, 2004, 18(5): 1346-1353.
- [8] Harris D J, Roberts D G, Henderson D G. Gasification behaviour of Australian coals at high temperature and pressure [J]. *Fuel*, 2006, 85(2): 134-142.
- [9] Wu H, Bryant G, Benfell K, et al. An experimental study on the effect of system pressure on char structure of an Australian bituminous coal [J]. *Energy & Fuels*, 2000, 14(2): 282-290.
- [10] Liu H, Kaneko M, Luo C, et al. Effect of pyrolysis time on the gasification reactivity of char with CO₂ at elevated temperatures [J]. *Fuel*, 2004, 83(7-8): 1055-1061.
- [11] Sun Q, Li W, Chen H, et al. The variation of structural characteristics of macerals during pyrolysis [J]. *Fuel*, 2003, 82(6): 669-676.
- [12] 肖睿, 金保升, 周宏仓, 等. 气化剂预热温度对加压喷动流化床煤部分气化的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(22): 109-113.
Xiao Rui, Jin Baosheng, Zhou Hongcang, et al. Effect of gasifying agent preheated temperature on partial gasification of coal in pressurized spout-fluid bed [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(22): 109-113(in Chinese).
- [13] Mermoud F, Salvador S, Van de Steene L, et al. Influence of the pyrolysis heating rate on the steam gasification rate of large wood char particles [J]. *Fuel*, 2006, 85(10-11): 1473-1482.
- [14] Ahn D, Gibbs B, Ko K, et al. Gasification kinetics of an Indonesian subbituminous coal char with CO₂ at elevated pressure [J]. *Fuel*, 2001, 80(11): 1651-1658.
- [15] Kajitani S, Hara S, Matsuda H. Gasification rate analysis of coal char with a pressurized drop tube furnace[J]. *Fuel*, 2002, 81(5): 539-546.
- [16] Wall T F, Liu G S, Wu H W. The effects of pressure on coal reactions during pulverized coal combustion and gasification [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2002, 28(5): 405-433.
- [17] Messenbock R C, Paterson N P, Dugwell D R, et al. Factors governing reactivity in low temperature coal gasification. Part 1. An attempt to correlate results from a suite of coals with experiments on maceral concentrates [J]. *Fuel*, 2000, 79(2): 109-121.
- [18] Cloke M, Lester E, Leney M. Effect of volatile retention on the products from low temperature pyrolysis in a fixed bed batch reactor [J]. *Fuel*, 1999, 78(14): 1719-1728.
- [19] Lemaigen L, Zhuo Y, Reed GP, et al. Factors governing reactivity in low temperature coal gasification. Part II. An attempt to correlate conversions with inorganic and mineral constituents [J]. *Fuel*, 2002, 81(3): 315-326.
- [20] 谢客昌. 煤的结构与煤的反应性[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [21] Seebauer V, Petek J, Staudinger G. Effects of particle size, heating rate and pressure on measurement of pyrolysis kinetics by thermogravimetric analysis [J]. *Fuel*, 1997, 76(13): 1277-1282.
- [22] Yang H P, Yan R, Chin T, et al. TGA-FTIR analysis of palm oil wastes pyrolysis [J]. *Energy & Fuels*, 2004, 18(6): 1814-1821.
- [23] Erincin D, Sinag A, Misirlioglu Z, et al. Characterization of burning and CO₂ gasification of chars from mixtures of Zonguldak (Turkey) and Australian bituminous coals[J]. *Energy Conversion and Management*, 2005, 46(17): 2748-2761.

收稿日期: 2007-02-03.

作者简介:

杨海平(1977—), 女, 博士后, 主要从事煤/生物质的热化学转化利用的研究, yhp2002@163.com;

陈汉平(1962—), 男, 博士生导师, 主要从事流化床的气固分离、燃烧、气化与液化及污染控制等方面的研究;

鞠付栋(1981—), 男, 博士研究生, 主要进行煤气化的相关研究工作;

王静(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事煤气化与富氧燃烧的研究工作;

张世红(1966—), 男, 教授, 从事流化床设计理论、污染物控制机理和燃煤联合循环高温除尘机理等方面的研究工作。

(编辑 王庆霞)