

文章编号:1672-9331(2019)01-0085-08

# 富氧条件下贫煤燃烧过程中煤焦结构的变化规律

鄢晓忠<sup>1</sup>, 彭 博<sup>1</sup>, 徐慧芳<sup>1</sup>, 邓 彬<sup>1</sup>, 蔡旖旎<sup>1</sup>, 樊希林<sup>2</sup>, 吴爱军<sup>2</sup>

(1.长沙理工大学 能源与动力工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.国电湖南宝庆煤电有限公司, 湖南 邵阳 422000)

**摘 要:** 为研究富氧燃烧后煤焦的孔隙结构及其在燃烧过程中的变化情况,选取贵阳贫煤作为研究对象,利用红外光谱仪、比表面积及孔隙度分析仪分别分析了焦炭样品官能团变化和表面孔隙分布,讨论了不同富氧燃烧条件和不同燃烧阶段对官能团和孔隙结构的影响。研究表明,在氧气浓度不变的情况下,随着试验温度的升高,羟基数量明显减少;在同一比例的富氧气氛下,随着反应温度的升高,焦炭吸附等温线由Ⅱ型向Ⅲ型转变;氧气浓度为40%的气氛条件下,在400℃时焦炭表面主要是两端都开放的微孔,900℃时由于部分孔道坍塌,形成了大量一端封闭的孔隙。

**关键词:** 贫煤; 煤焦结构;  $O_2/N_2$  气氛; 富氧燃烧; 孔隙结构; 官能团; 吸附等温线

中图分类号: TQ534.2

文献标识码: A

## Change of pore structure of coke under oxy-combustion conditions of typical bituminous coal

YAN Xiao-zhong<sup>1</sup>, PENG Bo<sup>1</sup>, XU Hui-fang<sup>1</sup>, DENG Bin<sup>1</sup>,  
CAI Yi-ni<sup>1</sup>, FAN Xi-lin<sup>2</sup>, WU Ai-jun<sup>2</sup>

(1.School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Guodian Hunan Baoqing Coal Power Co. Ltd., Shaoyang 422000, China)

**Abstract:** To study the coke pore structure and changes in the process, Guiyang lean coal was selected as the research object, samples were made under two different oxygen-enriched atmospheres and three different combustion reaction temperatures. The functional group changes and surface pore distribution of coke samples were analyzed by the FTIR and specific surface area and porosity analyzer respectively. The effects of oxygen-enriched combustion conditions on functional groups and pore structures and the characteristics of combustion products at different reaction temperatures in oxygen-enriched combustion atmospheres were discussed. The results show that the number of hydroxyl groups decreases with the increase of the experimental temperature. In the same ratio of oxygen-enriched atmosphere, with the increase of reaction temperature, coke adsorption isotherm changes from type Ⅱ to type Ⅲ. With the progress of the reaction, the number of micropores and large pores in coal samples changes a lot. When the oxygen concentration is 40%, many micropores which are

收稿日期: 2018-11-21

基金项目: 湖南省教育厅科研项目(16hnjy028)

通讯作者: 鄢晓忠(1963—), 男, 湖南桃源人, 长沙理工大学教授, 主要从事燃烧理论与低质煤高效稳燃技术等方面的研究。E-mail: csyxanz7206@126.com

open at both ends are on the coke surface, a large number of closed pores at one end formed due to the collapse of part of the channels at 900 °C.

**Key words:** lean coal; coal char structure; O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> atmosphere; oxygen-enriched combustion; pore structure; functional group; adsorption isotherm

富氧燃烧是指以高于空气氧气含量(20.947%)的含氧气体进行燃烧,是一种高效的节能燃烧技术。它能够改善燃烧的条件,稳定着火,加速燃烧,提高煤粉燃尽度,也能达到节能减排的效果,因此在世界各地得到了广泛的应用。煤是由大量官能团以及化学键互不相同的化合物组成的混合物,煤的属性与官能团种类、数量都有密切的关系<sup>[1]</sup>。在燃烧过程中,挥发分的析出与着火很大程度上改变了煤焦的孔隙结构,同时孔隙结构的变化又影响着燃烧过程。在煤的官能团结构方面,韩峰等<sup>[2]</sup>通过对云南地区6种褐煤的FTIR谱图分析,得到了煤的FTIR结构参数;王海燕等<sup>[3]</sup>通过对长焰煤和无烟煤的红外光谱进行分峰拟合,发现随着变质程度的提高,煤中的芳香环的聚合程度增强,有机质的成熟度增大;Sobkowiak等<sup>[4]</sup>利用红外光谱技术分析了煤中含氧官能团的分布特征。但是,对于煤在不同燃烧阶段过程中官能团变化的研究却鲜有报道。在煤的孔隙结构方面,涂湘巍<sup>[5]</sup>采用吸附法对淮南煤焦的比表面

积和孔隙结构进行测定,得到了煤焦中孔形态;还有学者<sup>[6-8]</sup>利用固定床反应器与高温沉降炉中或是生物质碳化制得煤焦,考察了升温速率、热解温度等对煤焦比表面积和孔隙分布的影响。但已有的研究对不同燃烧阶段燃烧产物进行分析的较少,因此作者选取贵阳贫煤为研究对象,结合傅里叶红外光谱和氮气吸附法等手段,探究不同氧气浓度和不同燃烧阶段对官能团和孔隙结构的影响。

## 1 试验样品及研究方法

### 1.1 煤种选取与煤焦样制备

综合中南地区企业燃煤使用情况,选取贵阳贫煤为研究对象,该煤种挥发分较低,含硫量高,发热量较高。为避免试样氧化,所有试样均密封取回实验室,利用密封式制样机按照标准制取200目(0.074 mm)分析试样。煤样煤质特性分析结果见表1。

表1 贵阳煤的煤质特性分析

Table 1 Analysis of coal quality characteristics of Guiyang coal

煤样	工业分析/%				元素分析/%					发热量/ (MJ·kg <sup>-1</sup> )
	M <sub>ad</sub>	A <sub>ad</sub>	FC <sub>ad</sub>	V <sub>daf</sub>	C <sub>daf</sub>	H <sub>daf</sub>	O <sub>daf</sub>	N <sub>daf</sub>	S <sub>daf</sub>	Q <sub>ar,net</sub>
贵阳	2.07	15.74	70.83	13.82	69.57	3.33	0.78	0.80	3.53	27.12

煤样选取制备后,为准备获取富氧条件下的不同燃烧阶段的焦样,将实验室的卧式管式炉进行必要的改造,改造后的煤焦样品制取系统如图1所示,包括气体单元、气体混合控制单元和高温加热单元。由于煤样在不同燃烧温度下的燃尽度不同,通过气体混合控制单元控制管式炉的气体氛围,通过管式加热炉的温控程序升温,500 °C以下升温速率≤5 °C/min,500~800 °C升温速率≤10 °C/min,800~900 °C升温速率≤5 °C/min,在达到反应终温后停止通入O<sub>2</sub>,并减少N<sub>2</sub>流量,快

速取出,从而得到不同燃烧温度阶段下的煤焦样品,分别代表煤焦的不同燃烧阶段,并记录残留质量分数。煤焦样品制备过程中选取2种气氛条件和3种反应温度共6个不同工况,总气体流量为1 L/min,工况条件如表2所示。

### 1.2 试验仪器与煤焦样测试方法

在煤焦样的官能团测试中,采用美国赛默飞公司生产的Nicolet iS10傅立叶红外光谱仪测试,测试范围波数为4 000~400 cm<sup>-1</sup>,分辨率为4 cm<sup>-1</sup>,扫描次数为32次。并借助Origin处理软件对数

据进行处理。在煤焦样比表面积及结构分析中,主要采用 V—Sorb2800 型比表面积及孔径分析仪进行分析。借助分析仪提取吸附/脱附等温线,然后通过 BET 和 BJH 分析比表面积 SSA、平均孔径、孔径分布和孔体积<sup>[9-10]</sup>。

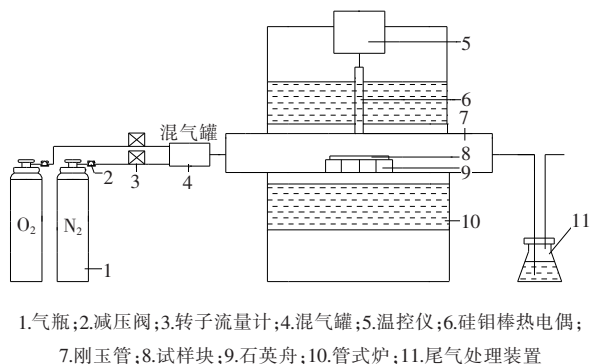


图 1 煤焦样品制备系统

Fig. 1 Coal char sample preparation system

表 2 煤焦样品制备工况条件

Table 2 Preparation conditions of coal char samples

工况	气氛条件/%		加热终温/℃
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	
工况 1	24	76	400
工况 2	24	76	650
工况 3	24	76	900
工况 4	40	60	400
工况 5	40	60	650
工况 6	40	60	900

## 2 试验结果与分析

### 2.1 燃烧过程中煤焦样官能团的结构变化

原煤的红外光谱吸收峰归属如表 3 所示。不同富氧燃烧条件下各煤焦样的红外光谱分析光谱如图 2~7 所示。

图 2 为 400 ℃ 贵阳煤在 24% O<sub>2</sub>/76% N<sub>2</sub> 气氛下燃烧后焦炭的红外光谱图。由图 2 可见,400 ℃ 样品中存在大量的有机官能团,包括羟基(3 450 cm<sup>-1</sup>)、羰基(1 700 cm<sup>-1</sup>)、大部分的芳烃(1 590~1 470 cm<sup>-1</sup>)、酚醇醚酯的 C—O(1 330~1 110 cm<sup>-1</sup>)、取代芳烃 CH、灰分(815 cm<sup>-1</sup>)等。煤中羟基一般都是氢键化的,故谱峰的位置由一般羟基出现的 3 300 cm<sup>-1</sup> 峰移到 3 450 cm<sup>-1</sup><sup>[8]</sup>。

表 3 煤红外光谱吸收峰归属

Table 3 Infrared spectral absorption peak assignment of coal

波数/cm <sup>-1</sup>	波长/μm	谱峰归属
3 300	3.00	氢键缔合的—OH(—NH);酚类
3 030	3.30	芳烃 CH
2 950	3.38	—CH <sub>3</sub>
2 920~2 860	3.42~3.50	环烷烃或脂肪烃 CH <sub>2</sub>
2 780~2 350	3.60~4.52	羧基
1 900~1 780	5.25~5.60	芳香烃,主要是 1,2-取代和 1,2,4-取代羰基
1 700	5.90	羰基
1 610	6.20	为氢键缔合的羰基; 具—O—取代的芳烃 C=C
1 590~1 470	6.30~6.80	大部分的芳烃
1 460	6.85	—CH <sub>2</sub> 或—CH <sub>3</sub> ,或无机碳酸盐
1 375	7.27	—CH <sub>3</sub>
1 330~1 110	7.50~9.00	酚、醇、醚、酯的 C—O
1 040~910	9.60~11.00	
833(弱)	12.60	取代芳烃 CH,灰分
815	12.30	
700(弱)	14.30	

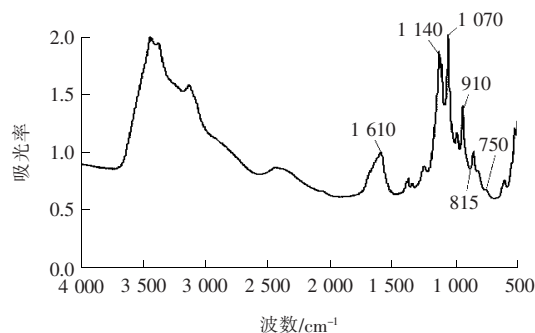


图 2 24% O<sub>2</sub>/76% N<sub>2</sub>, 400 ℃ 样品的红外光谱图

Fig. 2 IR spectrum of 24% O<sub>2</sub>/76% N<sub>2</sub>, 400 ℃ sample

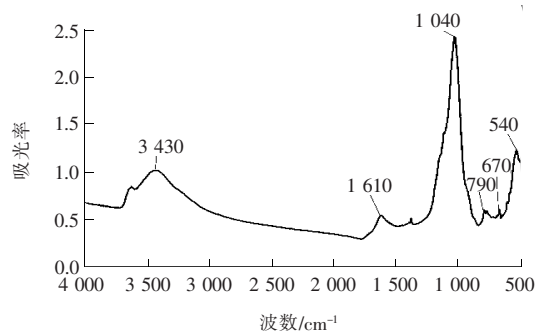


图 3 24% O<sub>2</sub>/76% N<sub>2</sub>, 650 ℃ 样品的红外光谱图

Fig. 3 IR spectrum of 24% O<sub>2</sub>/76% N<sub>2</sub>, 650 ℃ sample

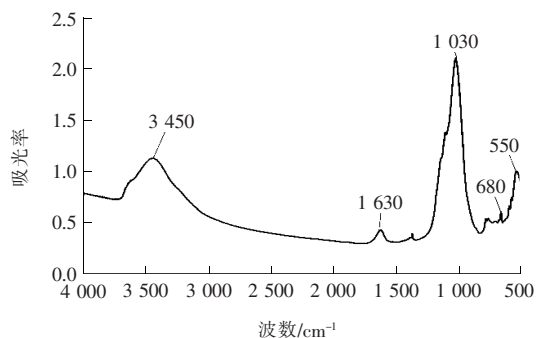
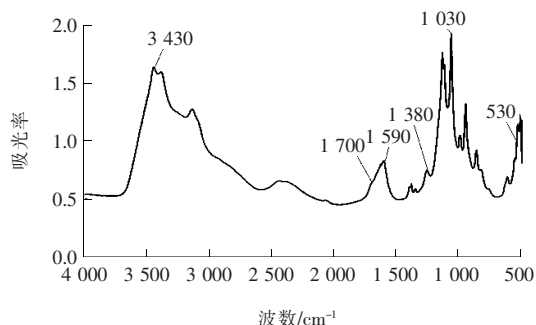
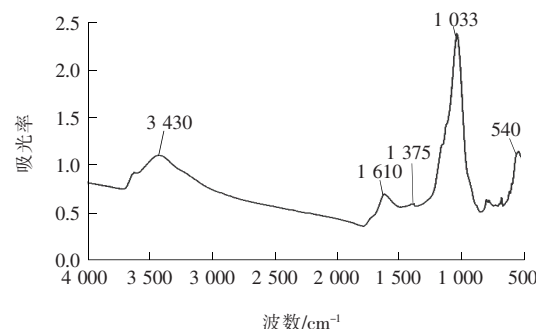
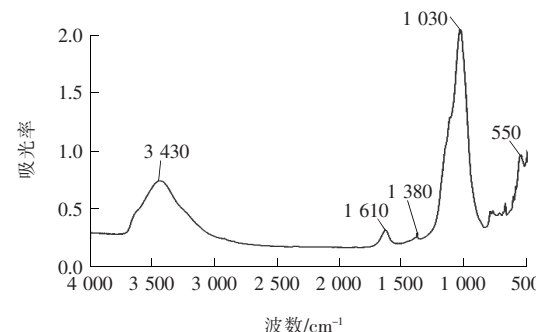
图4 24% O<sub>2</sub>/76% N<sub>2</sub>, 900 °C 样品的红外光谱图Fig. 4 IR spectrum of 24% O<sub>2</sub>/76% N<sub>2</sub>, 900 °C sample图5 40% O<sub>2</sub>/60% N<sub>2</sub>, 400 °C 样品的红外光谱图Fig. 5 IR spectrum of 40% O<sub>2</sub>/60% N<sub>2</sub>, 400 °C sample图6 40% O<sub>2</sub>/60% N<sub>2</sub>, 650 °C 样品的红外光谱图Fig. 6 IR spectrum of 40% O<sub>2</sub>/60% N<sub>2</sub>, 650 °C sample图7 40% O<sub>2</sub>/60% N<sub>2</sub>, 900 °C 样品的红外光谱图Fig. 7 IR spectrum of 40% O<sub>2</sub>/60% N<sub>2</sub>, 900 °C sample

图3为650 °C贵阳煤在24% O<sub>2</sub>/76% N<sub>2</sub>气氛下燃烧后焦炭的红外光谱图。由图3可见,在3430 cm<sup>-1</sup>附近有羟基吸收峰;1610 cm<sup>-1</sup>附近可能是氢键缔合的羰基或者是具—O—取代的芳烃;1300~1000 cm<sup>-1</sup>区间出现醚吸收峰;900~650 cm<sup>-1</sup>出现宽的芳香环吸收峰。

图4为900 °C贵阳煤在24% O<sub>2</sub>/76% N<sub>2</sub>气氛下燃烧后焦炭的红外光谱图。由图4可见,900 °C样品红外光谱图与650 °C吸收峰相似,有羰基(1610 cm<sup>-1</sup>)、羟基(3450 cm<sup>-1</sup>)和醚吸收峰(1030 cm<sup>-1</sup>)。

图5为400 °C贵阳煤在40% O<sub>2</sub>/60% N<sub>2</sub>气氛下燃烧后焦炭的红外光谱图。由图5可见,红外光谱图中有羟基(3430 cm<sup>-1</sup>)、烯烃(1590 cm<sup>-1</sup>)、乙烯基酯(1700 cm<sup>-1</sup>)、环丙烷(1030 cm<sup>-1</sup>)、3,3双支链烷烃(530 cm<sup>-1</sup>)和非甲基或乙基的双支链烷烃。

图6为650 °C贵阳煤在40% O<sub>2</sub>/60% N<sub>2</sub>气氛下燃烧后焦炭的红外光谱图。由图6可见,煤焦中存在羟基(3430 cm<sup>-1</sup>)、烯烃(1610 cm<sup>-1</sup>)、环丙烷(1030 cm<sup>-1</sup>)、3,3双支链烷烃(530 cm<sup>-1</sup>)和非甲基或乙基的双支链烷烃。

图7为900 °C贵阳煤在40% O<sub>2</sub>/60% N<sub>2</sub>气氛下燃烧后焦炭的红外光谱图。由图7可见,煤焦中存在的官能团与相同气氛650 °C燃烧温度下的相同。

6种工况下的煤焦样品的残留质量分数列于表4中。随着加热温度的升高,煤粉残留质量分数不断减少,但650 °C与900 °C相差不大;随着氧气浓度的增加,残留质量分数减少,说明燃尽度提高了。6种不同工况条件下制得的煤焦样官能团分布列于表5中。不同氧化温度及氧量条件下焦样的红外光谱分析图谱如图8~10所示。

表4 6种工况下煤焦样品残留质量分数

Table 4 Residual mass fraction of coal char sample under 6 working conditions

工况	残留质量分数/%	工况	残留质量分数/%
工况1	85.13	工况2	26.70
工况3	19.37	工况4	83.61
工况5	24.58	工况6	18.94

表 5 6 种煤焦样品官能团分布

Table 5 Distribution of functional groups in six coal char samples

煤焦样编号	波数/ $\text{cm}^{-1}$	官能团
1	3 450	羟基
	1 700	羰基
	1 590~1 470	芳烃
	1 330~1 110	酚醇醚酯的 C—O
	815	取代芳烃 CH、灰分
2	3 430	羟基
	1 610	氢键缔合羰基
	1 300~1 000	醚基
	900~650	芳香环
3	3 430	羟基
	1 610	氢键缔合羰基
	1 300~1 000	醚基
4	3 430	羟基
	1 590	烯烃
	1 700	乙烯基酯
	1 030	环丙烷
	530	3,3 双支链烷烃
5	3 430	羟基
	1 610	烯烃
	1 375	烷烃对称变形
	1 030	环丙烷
6	3 430	羟基
	1 610	烯烃
	1 030	环丙烷

由图 8~10 可以看出,在 400 °C 条件下,两种气氛下的特征吸收峰基本相同,但随着氧气比例的增加,各吸收峰峰值均有一定程度的减弱;且在 3 430  $\text{cm}^{-1}$  附近的羟基吸收峰弱化最明显,说明随着氧气浓度的增加,燃尽度不断提高,煤焦中羟基含量显著减少;1 330~1 110  $\text{cm}^{-1}$  附近吸收峰也有一定程度的弱化;在 650 °C 条件下,1 250~500  $\text{cm}^{-1}$  区间内官能团数目、种类相差无几,但剩余部分中,随着氧气浓度的增加,各官能团特征峰如羟基(3 430  $\text{cm}^{-1}$ )、烯烃(1 610  $\text{cm}^{-1}$ )、烷烃(1 375  $\text{cm}^{-1}$ )的数量增加了;在 900 °C 条件下,1 250~500  $\text{cm}^{-1}$  区间内官能团数目、种类相差无几,红外光谱图呈现几乎重合的状态,但剩余部分中,随着氧气浓度的增加,羟基(3 430  $\text{cm}^{-1}$ )等特征吸收峰均减弱,说明在富氧燃烧条件下,随着氧气

浓度的增加,煤焦表面羟基等官能团的数量减少了。

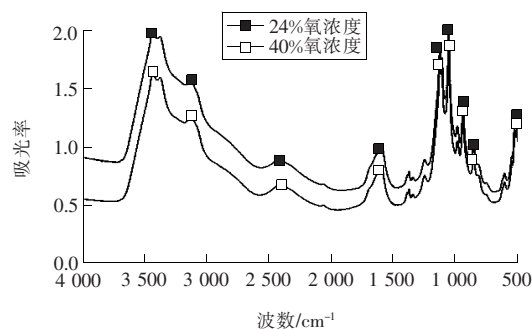


图 8 400 °C 不同氧气浓度红外光谱图

Fig. 8 IR spectrum of different oxygen concentrations at 400 °C

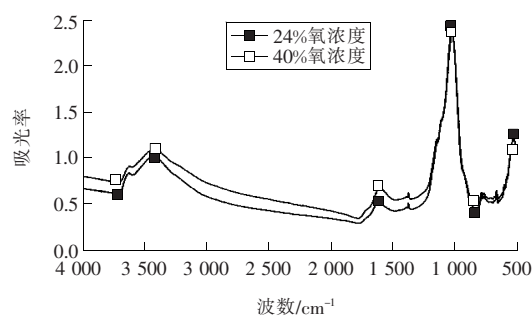


图 9 650 °C 不同氧气浓度红外光谱图

Fig. 9 IR spectrum of different oxygen concentrations at 650 °C

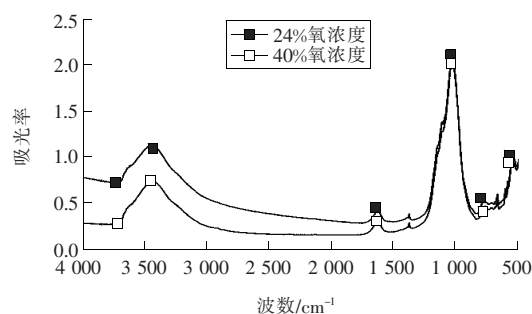


图 10 900 °C 不同氧气浓度红外光谱图

Fig. 10 IR spectrum of different oxygen concentrations at 900 °C

从图 8~10 还可以看到,400,650,900 °C 样品中所含官能团种类基本相同。但随着温度的升高,煤样残留质量分数不断减少,波长为 3 430  $\text{cm}^{-1}$  的羟基吸收峰逐渐减弱,由双峰变成了单峰,说明煤焦表面羟基数量减少较多;波长在 1 300~1 000  $\text{cm}^{-1}$  区域内的强吸收峰随着温度的上升整体呈上升趋势。因为随着燃烧的进行,形成了大量较稳定的含有 C—O 键的脂、醇、酚、醚化合物;波长为 1 610  $\text{cm}^{-1}$  对应特征吸收峰为甲

基-CH<sub>3</sub>,随着温度的升高,反应进行逐渐减弱,直至接近消失。

## 2.2 燃烧过程中比表面积及孔隙结构变化

图 11 和图 12 分别为贵阳贫煤在富氧条件下 400 °C 和 900 °C 燃烧后煤焦吸附等温线。由图 11 可见,400 °C 时,当  $0 < P/P_0 < 0.1$  时,吸附量逐渐增加,但是增长速度较小;当  $P/P_0$  达到 0.3 左右时,单层吸附饱和,变为多分子层吸附; $P/P_0$  继续增大,氮气冷凝,孔壁逐渐湿润,在孔内发生凝聚;相对压力处于 0.8~1 区间时,可以观察到吸附量迅速上升。这是因为凝聚现象发生在更大的孔隙内。由图 12 可见,900 °C 时,当  $P/P_0$  处于 0~0.9 区间时,吸附量较小且变化不大;在  $P/P_0$  数值为 0.9 之后,吸附量呈指数型增长,是在  $P/P_0$  不变的情况下反应温度较低时的数百倍。这是因为随着燃烧的不断进行,900 °C 情况下挥发分析出,导致出现了更多的孔,从而使得吸附量变大。

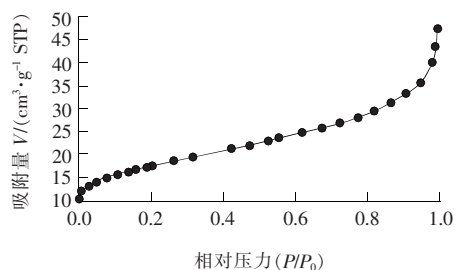


图 11 400 °C 燃烧吸附等温线

Fig. 11 400 °C combustion adsorption isotherm

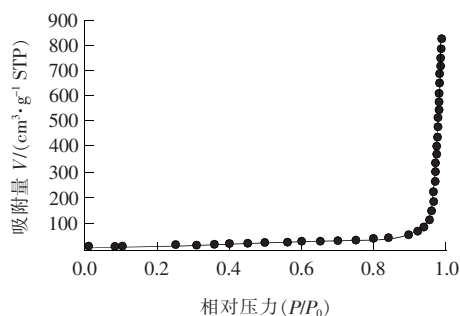


图 12 900 °C 燃烧吸附等温线

Fig. 12 900 °C combustion adsorption isotherm

贵阳贫煤在 400 °C 和 900 °C 下燃烧后焦炭的吸附回线如图 13 和图 14 所示。吸附分支和脱附分支的分离发生在相对压力处于中值时,这是因为煤焦样品中有一种典型的孔结构为两端都开放的管状毛细孔<sup>[11]</sup>。吸附时在有效半径对应的某个相对压力下,毛细孔发生凝聚,脱附时又在相对应

压力处发生结凝,因此出现这种形态的吸附回线。形成这种形态吸附回线的主要原因是煤焦表面存在较多一端封闭的不透气的孔,这类孔是开始时贫煤表面挥发分析出的,析出后会出现比较多的开放性的孔;随着温度的不断升高,反应继续进行,挥发分和一些可燃物燃烧,造成了孔隙的破坏和坍塌,继而出现大量不透气的孔。

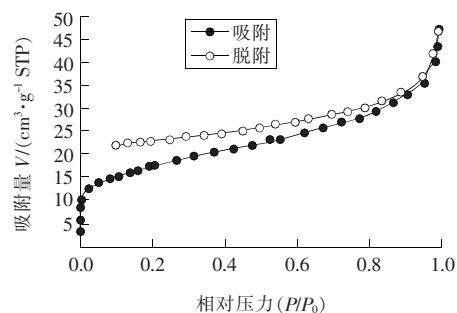


图 13 400 °C 燃烧吸附回线

Fig. 13 400 °C combustion adsorption loop

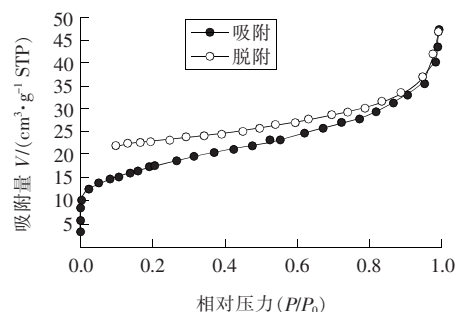


图 14 900 °C 燃烧吸附回线

Fig. 14 900 °C combustion adsorption loop

贵阳贫煤在 40% 氧气气氛、燃烧温度为 400 °C 的条件下制取的煤焦比表面积为 61.548 078 m<sup>2</sup>/g, 在反应温度为 900 °C 条件下制取的煤焦比表面积为 38.324 873 m<sup>2</sup>/g。结合相关文献资料<sup>[8,9]</sup>可知,煤焦比表面积在某个中间温度达到最大值。这是因为燃烧初期挥发分大量析出,在煤焦表面形成了大量的孔隙,因此比表面积较大;而随着反应温度的提高即某种程度上的反应继续进行,挥发分和其他可燃物发生燃烧,导致孔隙出现坍塌,从而导致比表面积减小。

通用 V-T 曲线如图 15 所示。如果试验样品表面不存在孔隙,吸附时比表面积不变,即为 I 曲线;当吸附剂表面存在微孔,相对压力增加时,出现毛细孔填充现象或凝聚现象,则会出现 II 或 III 曲线<sup>[12]</sup>。



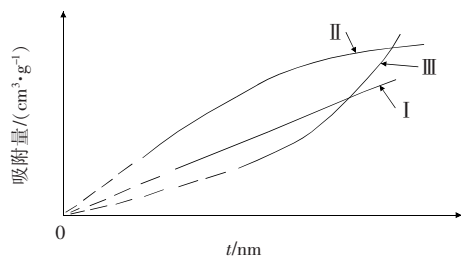


图 15 V-T 典型曲线

Fig. 15 V-T typical curve

贵阳贫煤在富氧条件下,400 °C 和 900 °C 时发生燃烧反应的 V-T 曲线如图 16 和图 17 所示。由图 16 和图 17 可见,400 °C 时的曲线符合 II 曲线形态,说明煤焦样品表面出现微孔,发生了毛细孔填充或凝聚现象;900 °C 时的曲线符合 III 曲线形态,说明煤焦样品表面一定发生了毛细孔凝聚现象。通过  $t$  曲线的分析可知,煤焦样品表面存在大量的微孔。孔的直径大于 50 nm 为大孔,直径小于 2 nm 为微孔,介于两者之间的为中孔。

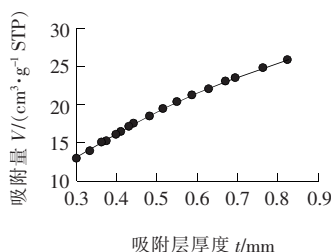


图 16 400 °C V-T 曲线

Fig. 16 400 °C V-T curve

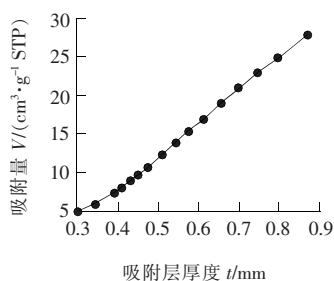


图 17 900 °C V-T 曲线

Fig. 17 900 °C V-T curve

在 400 °C 的反应温度下,孔容积随孔宽的变化如图 18 所示。由图 18 可见,孔容积分布没有明显的峰值,但在孔宽大于 10 nm 后,微分孔容积几乎为 0。

在 900 °C 的反应温度下,孔容积随孔宽的变化如图 19 所示。由图 19 可见,孔容积有明显的

先增大后减小的趋势,孔宽为 60~70 nm 的孔对孔容积贡献最大。

综合图 17 和图 18 可见,随着燃烧反应的进行,微孔数量大量减少,而大孔数量增加了。

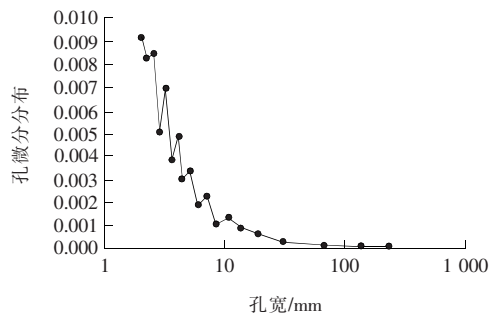


图 18 400 °C 孔容积随孔宽变化图

Fig. 18 Hole volume variation with hole width at 400 °C

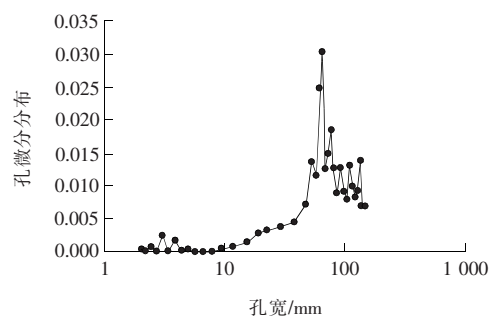


图 19 900 °C 微分孔容积随孔宽变化

Fig. 19 Hole volume variation with hole width at 900 °C

### 3 结论

1) 贵阳贫煤中所含官能团大致是羟基、羰基、醚基团、脂类和烷烃及烯烃,其中羟基(-OH)相对含量最多。在氧气浓度不变的情况下,随着试验温度的不断升高,羟基数量明显减少;在反应温度相同的条件下,随着氧气浓度的增加,残留质量分数减少,燃尽度提高,各特征吸收峰均有一定程度的减少。

2) 不同温度下煤焦的吸附回线差异明显,400 °C 时主要是两端都开放的微孔,900 °C 时由于部分孔道坍塌,形成了大量一端封闭的孔隙。反应开始时,挥发分析出,比表面积增大;随着反应的进行,部分孔崩塌,使比表面积逐渐减小。

3) 结合  $t$  曲线分析,发现煤焦表面存在微孔,且发生了毛细孔填充和凝聚现象。随着试验温度的升高,40% 氧气气氛下煤焦样品的吸附等温线

由Ⅱ型向Ⅲ型转变。通过对微分孔容积随孔宽变化的曲线进行分析,发现随着反应的进行,煤焦颗粒的比表面积和小孔数量先增加后减少;中孔和大孔的数量在燃烧初期波动,总的趋势是中孔和大孔的相对数量增加。

### 〔参考文献〕

- [1] 鄢晓忠,邱靖,尹艳山,等.褐煤中官能团对其燃烧特性的影响[J].煤炭科学技术,2016,44(4):169-174.  
YAN Xiao-zhong, QIU Jing, YIN Yan-shan, et al. The effect of functional groups in lignite on its combustion characteristics[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(4): 169-174.
- [2] 韩峰,张衍国,蒙爱红,等.云南褐煤结构的 FTIR 分析[J].煤炭学报,2014,39(11):2293-2299.  
HAN Feng, ZHANG Yan-guo, MENG Ai-hong, et al. FTIR analysis of lignite structure in Yunnan[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(11): 2293-2299.
- [3] 王海燕,樊少武,姚海飞.2 种不同变质程度煤表面化学结构红外光谱分析[J].煤矿安全,2018,49(1):194-197.  
WANG Hai-yan, FAN Shao-wu, YAO Hai-fei. Infrared spectroscopy analysis of chemical structure of coal with two different metamorphic degrees[J]. Coal Mine Safety, 2018, 49(1): 194-197.
- [4] Sobkowiak M, Reisser E, Given P, et al. Determination of aromatic and aliphatic CH groups in coal by FT-IR: 1. Studies of coal extracts[J]. Fuel, 1984(9):1245.
- [5] 涂湘巍,黄胜,曹琴,等.煤焦孔隙结构的表征及分析方法的构建[J].华东理工大学学报:自然科学版,2015,41(5):611-616.  
TU Xiang-yu, HUANG Sheng, GAO Qin, et al. Characterization of coal char pore structure and construction of analytical methods[J]. Journal of East China University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2015, 41(5): 611-616.
- [6] 高晨,鄢晓忠,许龙泉.富氧条件下温度对煤焦结构中官能团和孔隙结构变化影响的实验研究[J].煤炭技术,2018,37(7):301-304.  
GAO Chen, YAN Xiao-zhong, XU Long-quan. Experimental study on the effect of temperature on the change of functional groups and pore structure in coal char structure under oxygen-rich conditions[J]. Coal Technology, 2018, 37(7): 301-304.
- [7] 张辉,钟志光,张海峰.近红外光谱技术在煤质分析中的应用及展望[J].洁净煤技术,2015,21(6):40-42, 51.  
ZHANG Hui, ZHONG Zhi-guang, ZHANG Hai-feng. Application and prospect of near infrared spectroscopy in coal quality analysis[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(6): 40-42, 51.
- [8] 高英,袁巧霞,陈汉平,等.水葫芦水热碳化过程中焦炭物化结构演变特性[J].华中科技大学学报:自然科学版,2015,43(6):116-121.  
GAO Ying, YUAN Qiao-xia, CHEN Han-ping, et al. Evolution characteristics of coke physicochemical structure during hydrothermal carbonization of water hyacinth[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science, 2015, 43(6): 116-121.
- [9] 陈向军,刘军,王林,等.不同变质程度煤的孔径分布及其对吸附常数的影响[J].煤炭学报,2013,38(2):294-300.  
CHEN Xiang-jun, LIU Jun, Wang Lin, et al. Pore size distribution of coal with different metamorphic degrees and its influence on adsorption constant[J]. Journal of the Coal Society, 2013, 38(2): 294-300.
- [10] 高旭.基于低温氮吸附法的焦煤孔隙表面分形特征[J].煤矿安全,2014,45(12):20-23.  
GAO Xu. Fractal characteristics of coking coal pore surface based on low temperature nitrogen adsorption method[J]. Coal Mine Safety, 2014, 45(12): 20-23.
- [11] 严继民,张启元.吸附与凝聚 固体的表面与孔[M].北京:科学出版社,1979.  
YAN Ji-min, ZHANG Qi-yuan. Adsorption and condensation of solid surfaces and pores[M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [12] 孟召平,刘珊珊,王保玉,等.不同煤体结构煤的吸附性能及其孔隙结构特征[J].煤炭学报,2015,40(8):1865-1870.  
MENG Zhao-ping, LIU Shan-shan, WANG Bao-yu, et al. Adsorption properties and pore structure characteristics of different coal structure coals[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1865-1870.