

流化床内油页岩半焦燃烧过程孔隙特性分析

秦宏, 孙佰仲, 王擎, 周明正, 刘洪鹏, 李少华

(东北电力大学能源与机械工程学院, 吉林省 吉林市 132012)

Analysis on Influence Factors of the Characteristic of Pore Structure During Combustion of Oil Shale Semi-coke

QIN Hong, SUN Bai-zhong, WANG Qing, ZHOU Ming-zheng, LIU Hong-peng, LI Shao-hua

(School of Energy and mechanical engineering, Northeast Dianli university, Jilin 132012, Jilin Province, China)

ABSTRACT: Combustion experiments with semi-coke of Huadian and Wangqing oil shale were conducted in a bench-scale FBC reactor. Ash samples were obtained under different combustion conditions. Adsorption isotherms were determined by Micromeritics Gemini 2380 specific area analyzer under nitrogen atmosphere. The pore size distribution of samples was determined on the basis of BJH theory. Influence factors on pore structure of ash, such as different semi-coke, bed temperature, particle size, apparent fluidized velocity and batch feeding quantity of the above-mentioned semi-coke were investigated. The result shows that pore structure of semi-coke was already well developed and the total porous volume of the fuel decreased gradually during combustion. The pore size distribution of different semi-coke presents obvious difference. Low bed temperature favors the formation of porous structure. Batch feeding quantity has effect on the process of porous structure, but couldn't change the ultimate ash pore structure. Higher fluidized velocity and smaller particle size lead to more pores destroyed.

KEY WORDS: oil shale; semi-coke; fluidized combustion; porous structure; fractal dimension

摘要: 在自行设计搭建的小型流化床试验台上进行吉林桦甸、汪清的油页岩半焦燃烧试验, 得到不同工况下的灰样, 在 Gemini 2380 快速比表面积分析仪上测得灰样吸附等温线, 采用 BJH 法计算孔分布。根据测试结果, 分析了半焦种类、流化床温、半焦粒径、流化风速、加料量等因素对半焦孔隙结构的影响, 并对灰样进行电镜扫描和分形分析。结果发现, 半焦原样的孔隙结构已经非常发达, 燃烧过程中半焦的孔体积整体呈逐渐减小的趋势; 较低的燃烧温度更有利于形成发达的孔结构; 不同种类半焦的孔分布曲线差别较

大; 一次加料量影响孔隙生成的进程, 但不会改变灰样的最终孔隙结构; 较大风速和较小半焦粒径, 都容易破坏孔结构。

关键词: 油页岩; 半焦; 流化燃烧; 孔隙结构; 分形维数

0 引言

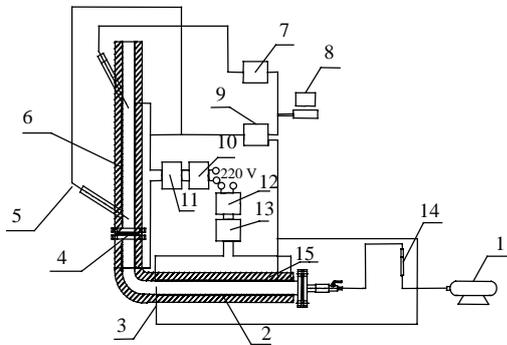
随着各国工业的迅速发展, 石油消耗越来越大。油页岩是一种富含有机物的沉积岩, 其资源储量十分丰富且分布集中, 具有作为接替能源的巨大潜力和有利条件^[1]。实践证明, 围绕油页岩“炼油-发电-建材”联产的技术路线是发展油页岩工业的有效途径^[2]。其中, 油页岩及其干馏后固体废弃物(半焦)的循环流化床燃烧是实现油页岩综合利用的重要环节^[3-5]。已有对油页岩半焦研究表明, 半焦的孔隙结构对半焦的反应性和半焦的燃尽时间都有重要的影响。因此在许多场合, 半焦的平均孔径及孔径分布常被用作半焦的特征参数^[6-10]。半焦在流化床燃烧过程中, 料层温度、物料粒度、流化风速以及停留时间等参数对半焦的孔隙特性都有很大的影响。本文根据基于气体热载体的巴西PETROSIX干馏技术, 用吉林桦甸和汪清(汪清油页岩主要用于不同种类油页岩半焦的比较)两个矿区的油页岩为原料, 制取终温为500℃油页岩半焦。其中, 半焦在流化床燃烧试验台上燃烧后, 利用快速比表面积分析仪对灰渣颗粒表面特性进行研究, 从而分析各因素对半焦流化燃烧过程中比表面积及孔隙特性等参数的影响, 为油页岩半焦的流化燃烧及综合利用提供基础依据。

1 试验方法

1.1 流化燃烧试验装置

本文根据Avedesian和Davidson的碳和半焦燃

烧技术^[11]，自行搭建试验台(图 1)。该试验台主体是由上下两部分构成，上部为流化床反应器，试验样品在此参加反应。下部为流化床预热炉，将气体预热到接近试验所需工况的温度。预热段和反应段均采用 $\phi 51 \times 3$ mm耐热钢管。采用外热式电炉丝加



1—空气压缩机；2—预热段；3—热电偶 1；4—布风板；
5—热电偶 2；6—加热段；7—烟气分析仪；8—计算机；9—数据采集；10—电压控制器 1；11—温度控制器 1；12—电压控制器 2；
13—温度控制器 2；14—流量计；15—保温层。

图 1 流化床反应器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the fluidized bed reactor

热，电加热总功率为 2.3 kW 左右。电炉丝采用 0Cr27A17Mo2 型电热合金，耐温 1400 °C。布风板采用孔径 0.065 mm 不锈钢细丝网制作而成，用螺钉固定在两个法兰之间。

1.2 试验样品制备

试验用油页岩来自吉林桦甸大城子 4 层和汪清罗子沟，将其在气体热载体干馏炉上制得 500 °C 半焦，放在磨口瓶中备用。制焦过程如文献[4]所述。油页岩和半焦基础特性见表 1。

流化燃烧试验床料采用粒度为 0.35~0.5 mm 的石英砂，重量 300 g。试验先将反应炉加热至 300 °C 左右，加入石英砂，打开空气阀，调整至合适风量，继续加热。升至预定温度后恒温，并加入半焦样品，控制不同的燃烧时间，将燃烧气氛切换为氮气，终止反应并迅速冷却至室温，即得到不同燃烧时间下的灰样。流化试验考察因素和水平如表 2 所示。试验工况以桦甸 500 °C 半焦，床温 850 °C、粒度 1~3 mm、一次给料量 6 g、表观风速 0.66 m/s 为主线，再针对不同的考察因素改变相应的试验条件。

表 1 油页岩及其半焦的工业分析和元素分析

Tab. 1 Proximate and ultimate analysis of oil shale and semi-coke

样品	工业分析/%				元素分析/%				发热量 $Q_{ar.net}/(kJ \cdot kg^{-1})$
	M_{ar}	A_{ar}	V_{ar}	FC_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	N_{ar}	S_{ar}	
桦甸页岩	5.25	52.09	37.40	5.08	27.68	4.07	0.63	1.18	11 512.57
桦甸半焦	0.67	77.59	10.83	10.91	15.93	0.33	0.82	1.00	5 180.88
汪清页岩	4.46	76.51	16.41	2.62	11.19	0.64	0.65	0.16	4 507.63
汪清半焦	0.1	89.35	8.47	2.08	4.91	0.3	0.37	0.11	1 546.12

表 2 半焦燃烧试验考察的因素和水平

Tab. 2 Investigation factors and levels of experiment

半焦种类	床温/°C	半焦粒度/mm	加入样品量/g	表观风速/(m/s)	燃烧时间/s
桦甸, 汪清	750, 800, 850	0.8~1.0, 1.0~3.0, 3.0~5.0	2, 6, 10	0.53, 0.66, 0.79	10, 20, 30, 60, 180

1.3 低温氮吸附等温线测定

灰样的比表面积和孔结构参数在 Micromeritics 公司 Gemini 2380 全自动表面测定仪上测定，该仪器在液氮饱和温度下 77.4 K，以氮(99.99%)为吸附介质，在相对压力 p/p_0 (p , p_0 分别为氮低温吸附的平衡压力及饱和压力)为 0.01~0.995 之间，进行等温吸附和脱附的测量，获得吸附、脱附等温线。通过对吸附等温线形态的分析可以获得煤焦孔隙结构的信息。灰样的孔径分布(孔体积按孔尺寸大小的分布)(1.7~300 nm 范围)由仪器自带的软件根据氮吸附等温线脱附分支数据采用 BJH 方法计算获得。

2 试验结果与分析

2.1 吸附等温线及孔隙结构变化

如图 2 所示，各吸附等温线形状虽然形态上稍有差别，但都呈反 S 型，根据吸附等温线的 BET 分类方法，曲线为典型的 II 型吸附等温线^[12]。曲线的前半段在相对压力小于 0.1 处均呈向上凸形状，而后缓慢上升或略呈饱和趋势，表明了吸附量增长，该阶段主要是气体在微孔孔壁吸附，并逐渐达到单层吸附饱和状态，吸附过程主要受分子间范德华力作用^[13]。半径越小的孔越先被凝聚液充满，随着气体的相对压力不断升高，则半径较大一些的孔

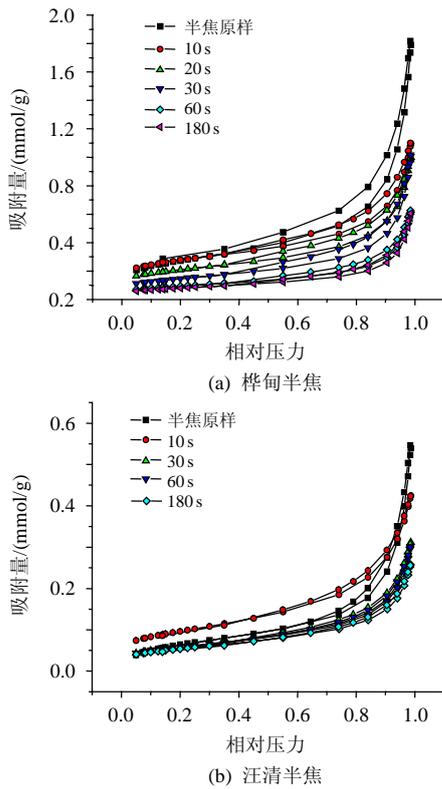


图2 不同燃烧时间下灰样吸附等温线

Fig. 2 Adsorption isotherm of char samples from different resident time

也相继被凝聚液充满,而半径更大的一些孔,孔壁吸附层则继续增厚。曲线后半段,相对压力在0.8附近处,曲线急剧上升表明在较大孔里发生了毛细凝聚,造成吸附量急剧增长^[14]。从吸附回线上可以看出,半焦原样回线与De beor提供的B类回线相近^[15],说明孔隙主要为开放性透气孔,随着燃烧的进行回线逐渐变化为多个标准回线叠加的非标准形态,表明孔隙结构逐渐呈多样化。

从图2还可以看出,床内停留时间对灰样的吸附能力影响很大。随着燃烧的进行,灰样总的孔体积逐渐降低。这主要是因为半焦在制备的过程中,大量挥发分析出形成丰富的孔结构,且制焦过程中没有剧烈的碰撞、摩擦等破坏孔结构的因素,使得总的孔体积值很大。然而,送入燃烧室后,一方面油页岩半焦迅速与高温床料混合摩擦、传热,使得样品内部部分骨架塌陷,孔结构遭到破坏;另一方面,半焦中少量剩余挥发分的析出和固定碳的燃烧又使得孔结构有所发展。由于半焦中挥发分的含量相对较少,由此产生的孔增长并不能阻止孔体积的整体减少。如图3(a)所示,燃烧初期,5 nm以上孔迅速减少,但3 nm附近的孔体积几乎不变,2 nm附近微孔的孔体积还有所增加。比较60和180 s的

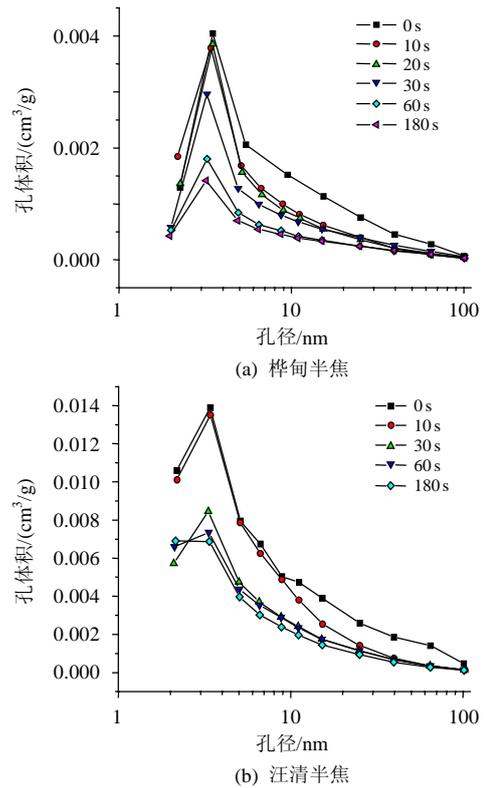


图3 不同燃烧时间下灰样孔分布

Fig. 3 Pore distribution of char samples from different resident time

曲线可以发现,燃烧60 s后除3 nm附近孔体积稍有减小外,其他孔径的孔体积不再变化,说明燃烧接近完成,摩擦力,热应力等作用也不足以使孔结构发生大的变化。

2.2 页岩种类对孔隙结构影响

相同工况下,由于油页岩种类不同,制成的半焦孔隙结构差别很大,对半焦的燃烧过程影响显著。由于汪清油页岩挥发分含量低,且析出温度高,导致汪清半焦的各孔径的孔体积明显小于桦甸半焦孔体积,如图3所示。两种半焦的孔分布曲线以及燃烧过程中变化情况基本相似,但与桦甸半焦相比,汪清半焦2 nm附近微孔所占比例明显较大。

2.3 床层温度对孔隙结构影响

燃烧温度对半焦灰样孔隙结构的影响很大,温度越高,半焦燃烧就越剧烈,灰样的热应力也越大,灰样发生破碎、塌陷等对孔结构造成破坏就越厉害。相比之下温度相对较低时,反应条件缓和,更容易生长较发达的孔结构^[16]。如图4所示桦甸油页岩500 °C半焦在750、800、850 °C床温下燃烧10 s后的孔分布。从图中可以看出,随着温度降低,灰样各孔径的孔体积都有所增加,但影响最大的还

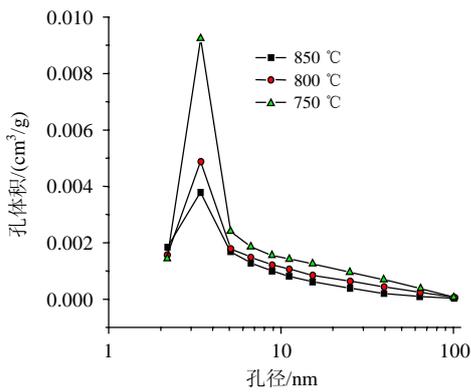


图 4 桦甸半焦在不同温度下燃烧 10 s 后孔分布
Fig. 4 Pore distribution of Huadian char samples from different bed temperature after 10 s

是孔径为 3 nm 左右的中孔, 温度 750 °C 时尤为突出。比较图 5 中 180 s 后的孔分布发现, 孔径在 20 nm 以上的孔体积含量类似, 3 nm 峰值附近的孔分布趋势几乎不变, 说明燃烧温度对页岩半焦流化燃烧后的灰渣的孔结构有很大影响。

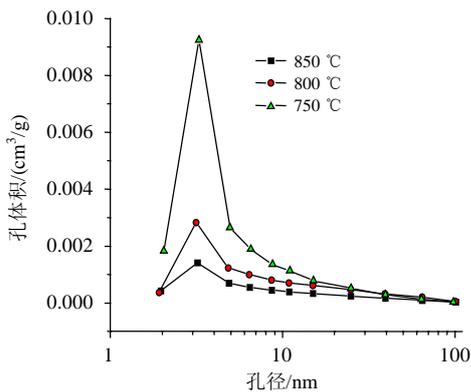


图 5 桦甸半焦在不同温度下燃烧 180 s 后孔分布
Fig. 5 Pore distribution of Huadian char samples from different bed temperature after 180 s

2.4 粒径对孔隙结构影响

油页岩半焦的颗粒粒度对半焦的燃烧特性有一定的影响。定性来讲, 颗粒越细, 挥发分的析出也越容易, 半焦参加化学反应的相对表面积也越大, 内外表面的温度差能快速达到平衡, 化学反应越容易进行。但当煤颗粒尺寸太小时, 一旦进入床层便很快被吹出炉膛, 往来不及参与反应, 这样细颗粒孔隙的发展就不会太完全, 因此本文选用最小 0.8 mm 的粒径作为试验样品。如图 6、7 所示, 随着粒径的增加, 孔分布线的峰值以及较大孔径部分均有不同程度的上升, 而在 2 nm 附近情况却刚好相反, 可见粒径较小者微孔含量反而高, 这可能是因为粒径较大的半焦的大部分微孔都扩展成较大孔所致。

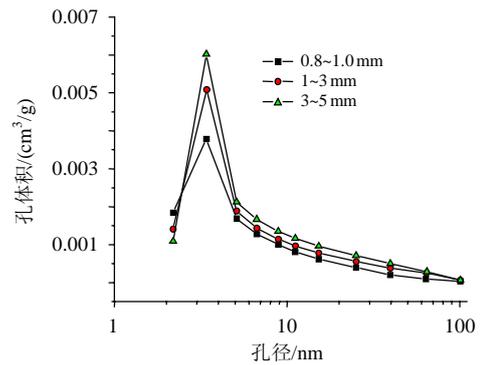


图 6 不同粒径桦甸半焦燃烧 10 s 后孔分布
Fig. 6 Pore distribution of Huadian char samples from different particle size after 10 s

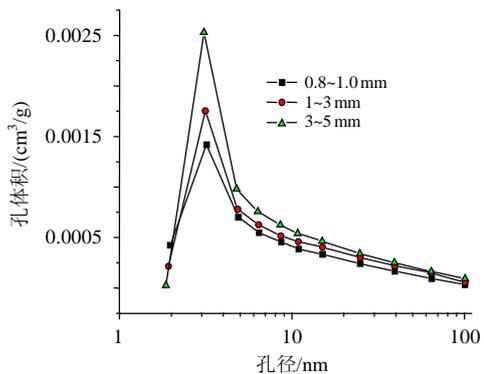


图 7 不同粒径桦甸半焦燃烧 180 s 后孔分布
Fig. 7 Pore distribution of Huadian char samples from different particle size after 180 s

2.5 流化风速对孔隙结构影响

不同的流化风速下, 床料在炉膛内的流化特性不同, 半焦颗粒与床料的摩擦、传热等特性也有所差别。如图 8 所示, 燃烧前期, 随着风速的增加, 孔分布线上 3 nm 附近的峰值逐渐降低, 其他孔径的孔体积变化很小。可见风速的变化主要影响了 3 nm 附近的中孔。比较图 9 中 180 s 后的灰样孔分布发现, 燃尽后灰样孔体积分布曲线相对形状几乎不变。表观风速也是决定半焦燃烧过程中以及燃尽

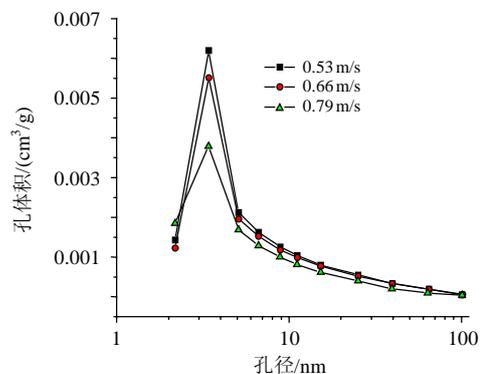


图 8 不同流化风速下燃烧 10 s 后灰样孔分布
Fig. 8 Pore distribution of Huadian char samples from different air velocity after 10 s

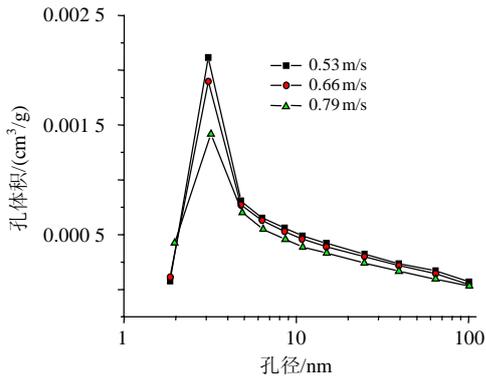


图9 不同流化风速下燃烧180s后灰样孔分布
Fig. 9 Pore distribution of Huadian char samples from different air velocity after 180 s

后灰样孔隙结构的重要因素之一。

2.6 给料量对孔隙结构影响

在相同的床温和风量下，考察一次加料量对燃烧后灰样孔径分布的影响，结果如图10所示。燃烧前期，同样在燃烧10s时，加料量越大，所形成的孔结构越发达。这可解释为，在相同的空气量下，加料量少，过量空气系数大，半焦更易与氧气接触发生反应，使得孔隙迅速扩展后塌陷。而到了燃烧后期，样品与氧气都进行了充分接触与反应，各加料量下的灰样孔结构几乎一致，如图11所示。可

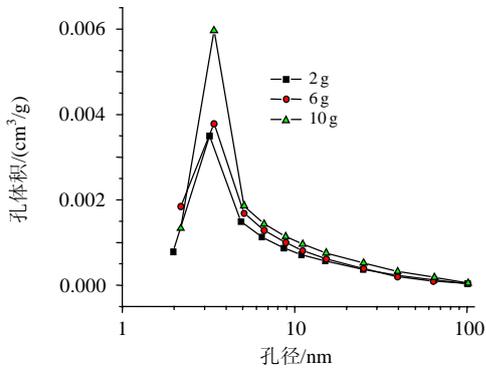


图10 不同质量桦甸半焦燃烧10s后孔分布
Fig. 10 Pore distribution of Huadian char samples from different char mass after 10 s

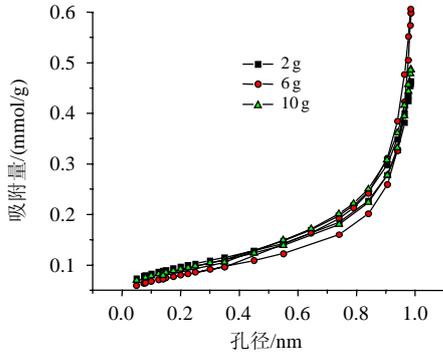


图11 不同质量桦甸半焦燃烧180s后等温吸附线
Fig. 11 Adsorption isotherm of Huadian char samples from different char mass after 180 s

见加料量多少只能影响孔隙形成的进程，并不会改变最终的孔隙结构。

3 燃烧过程中灰样电镜观察与分形分析

3.1 灰样表面电镜观察

扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)是近代研究表面微观世界的一种全能电子光学仪器，目前常用于表面结构的测定。国内外有很多学者借助SEM，从不同角度研究了固体燃料在燃烧过程中的表面结构变化情况，认为扫描电镜在研究固体燃料的孔隙、裂隙、矿物质、显微构造等方面很有优势，弥补了光学显微镜的不足，能较全面地揭示固体燃料的微观世界^[17]。图12为桦甸页岩500℃半焦原样及其燃烧时间分别为10、20、30、60、180s灰样的电镜照片。由于半焦在制备的过程中，大量挥发分析出形成丰富的孔结构，且制焦过程中没有剧烈的碰撞、摩擦等破坏孔结构的因素，半焦原样的表面孔结构非常丰富，且孔分布相对比

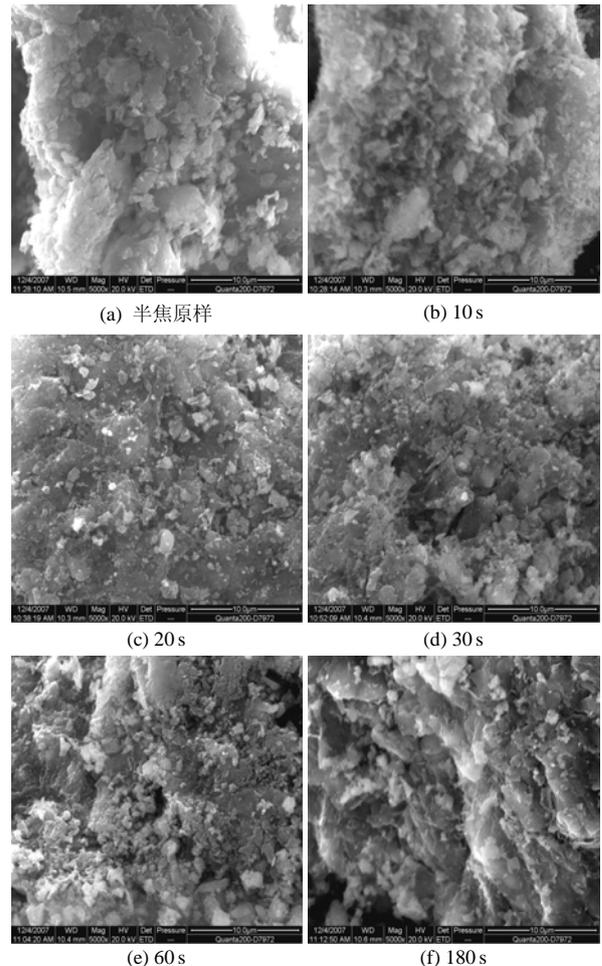


图12 桦甸页岩半焦燃烧过程中各灰样SEM图片
Fig. 12 Samples SEM images during combustion of Huadian oil shale semi-coke

较规整，以半封闭型孔居多。燃烧开始后，内部孔结构不断拓展，孔型也逐渐转向开放型孔。随后孔结构变得更加复杂，但空间结构减弱，180s后小孔明显减少，开放型孔逐渐转化为狭缝型，这也是破碎的因素之一。

3.2 图像分形分析

分形几何作为描述图像信息的工具主要应用分形维数作为特征参数来量化表面形貌的特性^[18]。本文采用盒子维法计算三维表面图像的分形维数^[19]。基于测度维数的定义，集合A的分形维数D可以定义为：

$$D = \log(N_r) / \log(1/r) \quad (1)$$

式中： N_r 为用“尺子” r 量度A时的量度结果。用不同的尺子度量A，可得到不同的结果 N_r ，由此可计算出分形维数D。本文以Matlab为平台编译程序分析计算半焦燃烧过程中电镜图片的分形维数。在计算分形维时，需要考虑子图像窗口的选择和计算分形维尺度的选择。窗口子图像尺寸太小会丢失重要的纹理特性；若窗口子图像尺寸太大，则边缘像素和图像区域的其他像素混合，影响纹理特征的选取。

图 13 为桦甸油页岩半焦流化燃烧过程中表面分形维数的变化。如图 13 中所示，桦甸油页岩 500 °C 半焦燃烧过程中，表面分形维数呈先迅速增大再逐渐降低，而后维持稳定的变化。前 20 s 由于剩余挥发分的析出以及焦炭的燃烧，使得维数逐渐增大。随后孔结构变得越来越复杂，但维数没有太大变化。

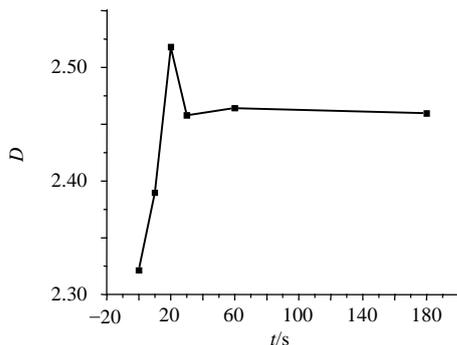


图 13 半焦燃烧过程中表面分形维数变化

Fig. 13 Change of fractal dimension during semi-coke combustion

4 结论

在流化床试验台上对吉林桦甸和汪清油页岩半焦进行流化燃烧试验，对燃烧后产生的灰样进行表面结构特性和分形分析，得到如下结论：

1) 半焦原样的孔隙结构已经非常发达，在燃烧过程中，半焦的孔体积整体呈逐渐减小的趋势，由于少量挥发分的析出使得在燃烧初期 3nm 附近的孔体积能维持原来水平。燃烧 60s 后孔分布几乎不再变化。

2) 不同种类油页岩制成的半焦差别很大，制焦过程挥发分析出温度越低，析出量越大，孔结构越发达，但不同半焦在燃烧过程中的变化趋势基本一致。

3) 温度对油页岩半焦燃烧过程中的孔隙结构影响最为明显，较低的燃烧温度有利于更发达的孔结构的形成；随着粒径的增加，孔分布线的峰值以及较大孔径部分均有不同程度的上升，但微孔数量反而逐渐减少；表观流化风速越大，孔隙越容易受到破坏；不同的加料量会影响孔隙形成的进程，但不会改变最终的孔隙结构。

4) 通过对半焦及其灰样电镜图片分形维数进行分析发现，燃烧前期，起初空间结构还会进一步发展，分形维数还会增大，而燃烧后期孔结构越来越复杂，维数几乎不再变化。

参考文献

- [1] 李丹梅, 汤达祯. 油页岩资源的研究、开发与利用进展[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(6): 657-670.
Li Danmei, Tang Dazhe. Advances in oil-shale resources: development and utilization[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(6): 657-670(in Chinese).
- [2] 何永光, 宋岩. 油页岩的综合利用[J]. 煤炭加工与综合利用, 2005, (1): 53-56.
He Yongguang, Song Yan. Comprehensive utilization of oil shale[J]. Coal Processing and Comprehensive utilization, 2005, (1): 53-56(in Chinese).
- [3] 王擎, 孙佰仲, 吴吓华. 油页岩半焦燃烧反应活性分析[J]. 化学工程, 2006, 34(11): 16-19.
Wang Qing, Sun Baizhong, Wu Xiaohua. Analysis of combustion reaction activation of oil shale semi-coke[J]. Chemical Engineering, 2006, 34(11): 16-19(in Chinese).
- [4] 孙佰仲, 王擎, 李少华, 等. 油页岩及其半焦混合燃料燃烧特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 108-112.
Sun Baizhong, Wang Qing, Li Shaohua, et al. Experiment study on combustion performance of oil shale and semi-coke blends [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 108-112(in Chinese).
- [5] 韩向新, 姜秀民, 崔志刚, 等. 油页岩半焦燃烧特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 106-110.
Han Xiangxin, Jiang Xiumin, Cui Zhigang, et al. Study of combustion performance of oil shale semi-coke[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 106-110(in Chinese).
- [6] 姜秀民, 杨海平, 闫澈, 等. 超细化煤粉表面形态分形特征[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 165-169.

- Jiang Xiumin, Yang Haiping, Yan Che, et al. Fractal characteristic of surface structure of micro-pulverized coal[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 165-169(in Chinese).
- [7] 韩向新, 姜秀民, 崔志刚, 等. 油页岩颗粒孔隙结构在燃烧过程中的变化[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 26-30.
Han Xiangxin, Jiang Xiumin, Cui Zhigang, et al. Evolution of pore structure of oil shale particles during combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(2): 26-30(in Chinese).
- [8] 刘辉, 吴少华, 孙锐, 等. 快速热解褐煤焦的比表面积及孔隙结构[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 86-90.
Liu Hui, Wu Shaohua, Sun Rui, et al. Specific area and pore structure of lignite char under the condition of fast pyrolysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 86-90(in Chinese).
- [9] 付志新, 郭占成. 焦化过程半焦孔隙结构时空变化规律的实验研究——孔隙率、比表面积、孔径分布的变化[J]. 燃料化学学报, 2007, 35(3): 273-279.
Fu Zhixin, Guo Zhancheng. Variation of pore structure of semi-coke with temperature and spatial location during pyrolysis—Porosity, specific surface area and pore size distribution[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2007, 35(3): 273-279(in Chinese).
- [10] 尉迟唯, 李保庆, 李文, 等. 煤孔结构特性对水煤浆性质的影响分析[J]. 燃料化学学报, 2006, 34(1): 5-9.
Yu Chiwei, Li Baoqing, Li Wen, et al. Effect of pore structure on the properties of coal water slurry[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2006, 34(1): 5-9(in Chinese).
- [11] Avedesian M M, Davidson J F. Combustion of carbon particles in a fluidized bed[J]. Trans. Ins. Chem. Eng, 1973, 51(4): 121-125.
- [12] Gregg S J, Sing K S W. Adsorption surface area and porosity [M]. London: Academic Press, 1982: 105-109.
- [13] 严继民. 吸附与凝聚[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 182-195.
- [14] 张占存. 煤的吸附特征及煤中孔隙的分布规律[J]. 煤矿安全, 2006(9): 1-3.
- Zhang Zhancun. Adsorption characteristic of coal and distribution rules of pore of coal[J]. Safety in Coal Mines, 2006(9): 1-3(in Chinese).
- [15] Boer D. The dynamical character of adsorption[M]. The Clarendon Press, Oxford, 1953: 203-205.
- [16] 谢克昌. 煤的结构与反应性[M]. 北京: 科学出版社, 2002, 84-85.
- [17] Guptar C, Moghtaderi B. Effect of pyrolysis pressure and heating rate on radiatepine char structure an apparent gasification reactivity [J]. Fuel, 2005, 84(15): 1324-1334.
- [18] 李平, 张延安, 汪秉宏, 等. 灰度阈值对图像分形特征参数提取的分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(1): 57-60.
Li Ping, Zhang Tingan, Wang Binghong. Grey level threshold used to extract fractal characteristic parameter of surface to pography image[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2006, 27(1): 57-60(in Chinese).
- [19] Ajay K B, Jibitesh M. On calculation of fractal dimension of images[J]. Pattern Recognition Letters, 2001, 22(6-7): 631-637.



秦宏

收稿日期: 2008-04-08。

作者简介:

秦宏(1970—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为油页岩的综合开发和高效洁净利用, qinhong01@163.com;

王擎(1964—), 男, 教授, 博士后, 研究方向为洁净煤燃烧技术, 油页岩的综合开发和高效洁净利用技术, 生物质清洁利用技术, 本文通讯作者, rszx@mail.nedu.edu.cn。

(责任编辑 王庆霞)