

工业半焦水蒸气活化孔隙结构的变迁

邢德山, 阎维平

(华北电力大学能源与动力工程学院, 河北省 保定市 071003)

Variations in Pore Structure of Activated Semi-cokes With Water Steam

XING De-shan, YAN Wei-ping

(School of Energy and Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

ABSTRACT: To improve the pore structure and enhance adsorption capability of semi-cokes, two industrial semi-coke samples were activated with water steam and then tested with PoreMaster-60. The results indicate that the pore structure of the samples is developed and more perfect after activation. The intruded volume and specific surface area of activated samples are about 4 times or 3 times of original samples respectively. The intruded volume and the specific surface area of micropore increase more remarkably than those of larger radius pores. The intruded volumes of pores with radius of less than 10nm are about two times of those of the original samples. The radiuses of the most pores are around 3nm in activated samples. Samples are of fractal characteristic whether activated or not, but the fractal characteristic of activated samples is more remarkable than the original samples, and have larger calculated fractal dimensions.

KEY WORDS: semi-coke; pore structure; specific surface area; intruded volume; fractal dimension

摘要: 为进一步改善工业半焦的孔隙结构, 增强吸附性能, 对两种工业半焦样品进行了水蒸气活化实验并运用 PoreMaster-60 型孔隙度分析仪对样品活化前后的孔隙结构进行了分析。分析结果表明, 工业半焦经过水蒸气活化之后孔隙进一步发展, 结构趋于完善合理。2个样品的压汞法分析比表面积和注汞体积分别是活化前的4倍和3倍多; 样品经过活化之后微孔容积和比表面积明显增多, 孔半径小于10nm的注汞体积百分数较活化前增大1倍多, 显示出活化过程的造孔、通孔作用大于扩孔作用。活化样品在孔半径为3nm附近形成孔的密集分布。通过对样品的分形维数进行计算分析表明, 工业半焦活化前后均具有分形特征, 活化样品的分形特征更为显著, 分形维数进一步增大。

关键词: 半焦; 孔隙结构; 比表面积; 注汞体积; 分形维数

0 引言

半焦是煤在较低温度(600~700 °C)下热解的产

物。我国的山西、内蒙古、陕西、甘肃和云南等地蕴藏着大量的弱粘结煤, 其气化副产品多为半焦^[1]。此外, 煤部分气化-燃烧集成优化技术中的煤部分气化后的固体残留物也是半焦^[2-3]。半焦的灰分、固定碳高而挥发分很少, 因此着火温度高, 难于燃尽, 故半焦的合理利用尚有一定困难。关于用活性半焦吸附脱除烟气中的SO₂的研究最早报道在20世纪70年代初, 90年代末国内也开始进行活性半焦吸附SO₂的研究^[4]。半焦作为吸附剂具有原料价廉易得、强度高、可多次再生等特点。工业半焦已经经过低温炭化, 简化了吸附剂的制备过程, 从而可降低其生产成本。半焦作为吸附剂用于锅炉烟气污染控制, 不仅吸附SO₂, 还可以吸附SO₃, 同时对NO_x也有吸附作用, 吸附产物解吸后可回收利用。失效的半焦颗粒最终可以直接作为炉窑的燃料, 基本不产生废弃物, 所以半焦有望成为一种性能价格比较高的脱硫脱氮吸附剂。

半焦的孔隙结构是表征半焦吸附性能的重要指标^[5-9]。用压汞法对典型工业半焦进行孔隙结构分析表明工业半焦的孔隙结构不发达, 如直接用作吸附剂, 其吸附能力很有限, 因此, 有必要进一步活化, 增大孔容和比表面积^[10-12]。

活化就是借助活化剂的氧化或脱水作用消除吸附剂表面的杂质, 使吸附剂表面被覆盖或堵塞的微孔开启、暴露或通透, 并有可能通过活化剂与吸附剂表面的反应增大微孔的数量, 也可能使吸附剂的孔隙结构和分形特征发生变化, 从而达到增大比表面积和微孔容积以进一步改善吸附剂的吸附性能的目的。炭基吸附剂的活化方法分为物理活化法和化学活化法。物理活化常用的活性气体有水蒸气、CO₂、空气等。H₂O分子小, 易扩散, 反应速度快。

水蒸气活化制得的多孔吸附剂具有较大的吸附容量和较宽的孔径分布^[13]。

锅炉是生产水蒸气的能量转换装置。用水蒸气作为活化剂对工业半焦进行活化并用于锅炉烟气的脱硫脱氮，具有活化蒸汽源方便易得等特点，是一种值得深入探讨的工业半焦物理活化方法。本文选取 2 种典型工业半焦，比较这 2 种半焦在水蒸气活化前后孔隙结构的变迁情况，以便更深入地了解水蒸气活化过程对半焦孔隙结构的影响。

1 实验样品和实验装置

1.1 实验样品

实验样品分别取自山西大同煤气化公司和生产半焦的焦化厂。样品的工业分析结果见表 1，元素分析结果见表 2。

表 1 样品工业分析结果
Tab. 1 Contents of samples (proximate analysis) %

样品名称	M _{ad}	A _{ad}	V _{ad}	FC _{ad}
DTMQ	4.78	11.58	5.23	78.41
XWJH	7.72	9.28	4.32	78.68

表 2 样品元素分析结果
Tab. 2 Contents of samples (ultimate analysis) %

样品名称	C _{ad}	H _{ad}	O _{ad}	N _{ad}	S _{ad}
DTMQ	78.79	1.42	2.38	0.61	0.44
XWJH	79.01	1.29	1.21	0.61	0.88

孔隙结构参数的测定结果与样品的粒径分布有关。本实验所用的样品在活化前先经过粉碎，破碎后的颗粒呈不规则多边形，然后用 6 目筛进行筛分，筛下部分再用 8 目筛进行筛分，取筛上剩余的半焦颗粒作为分析用样品，其粒径约 2.36~3.35 mm。

1.2 实验系统

水蒸气活化实验所用的实验系统如图 1 所示。该实验系统组要由马弗炉、刚玉管、蒸汽发生器、石英玻璃管、固定床以及温度显示和控制等元件组成。蒸汽发生器产生的蒸汽经连接导管和石英玻璃管送到置于马弗炉中的刚玉管底部，然后转而沿刚玉管内部向上运动，在此过程中被加热至所需的温度(最高可达 900 °C)。之后蒸汽穿过固定床上的半焦层，在穿越过程中蒸汽与半焦发生活化反应。通过控制蒸汽与半焦接触时的温度、活化作用持续时间和水蒸气流量等活化参数，可使工业半焦的孔隙结构发生一定程度的变化。实验表明，图示装置当装料量在 4~40 g 内可保证稳定的活化效果。本课题的前期研究已表明，工业半焦的原料煤煤种和生产工艺的差异，均可影响半焦活化的难易程度。本文

所选的两个样品原料煤均为烟煤，但生产工艺不同，DTMQ 是煤气化副产品，而 XWJH 是焦化产品，前者比后者更容易活化。因此在确定活化参数时，DTMQ 的活化时间较 XWJH 的少 1h。另外，在制定活化参数时，既要考虑活化效果，也要考虑到活化之后的烧失率不能过大(<35%)以及半焦颗粒的强度不能有明显降低等因素。样品的水蒸气活化参数见表 3。这些参数是经过一系列实验之后，在分析活化参数与活化效果之间的关系的基础上，通过参数优化确定的。

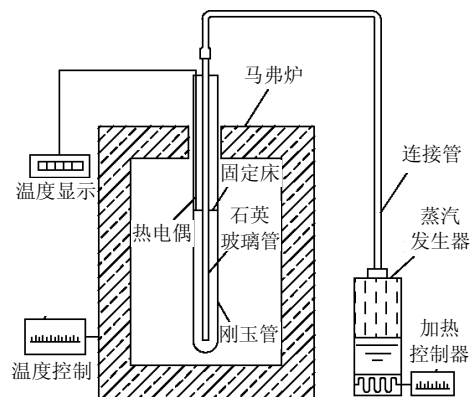


图 1 工业半焦水蒸气活化系统示意图

Fig. 1 Water steam activation system sketch

表 3 半焦水蒸气活化参数

Tab. 3 Activation parameters of samples

样品名称	活化温度/°C	活化时间/h	水蒸气流量/(mL/min)
DTMQ	800	2	5.65
XWJH	800	3	5.65

样品孔隙结构参数的测定是在 PoreMaster-60 型压汞仪上进行的。压汞仪通过对样品在一定范围内由小到大逐步施加压力，并记录在加压过程中注入样品孔隙中汞的体积，得到压力与注入汞体积之间的关系曲线。通过分析该曲线，可以得到一系列表征样品孔隙特性的参数。PoreMaster-60 型压汞仪的加压范围为 0~414 MPa，可以测量直径在 0.003 5~1 000 μm 内变化的孔容^[14-17]。

2 孔隙结构的比较

2.1 主要孔隙结构参数比较

经过对样品半焦在活化前后的孔隙度和孔隙结构分析表明，样品的主要孔隙结构参数如比表面积、注汞体积、平均孔径等都有较大幅度的变化，如表 4 所示。

可以看出，经过活化之后 2 个样品的比表面积和注汞体积都有大幅度的增大，DTMQ 活化后的比表面积和注汞体积分别为活化前的 4.2 倍和 3.7 倍；而 XWJH 活化后的比表面积和注汞体积则分别为

活化前的4倍和3.3倍。2个样品活化后平均孔径均减小,这说明活化后比表面积增大要比注汞体积增加得多。从而可以认为对于上述2个工业半焦样品所采用的水蒸气活化方法是有效的。

表4 半焦水蒸气活化前后主要孔隙结构参数

Tab. 4 Main pore structure characteristics of samples before and after activation

样品名称	比表面积/(m ² /g)		注汞体积/(cm ³ /g)		平均孔径/nm	
	活化前	活化后	活化前	活化后	活化前	活化后
DTMQ	14.023	58.942	0.1250	0.4587	35.7	31.1
XWJH	9.8540	39.2	0.0901	0.3048	36.6	31.1

需要说明的是,用压汞法测量工业半焦的比表面积和孔容所得到的数值要比用BET法测量得到的数值小得多。本文所选的2个样品经用BET法测量,经过活化的DTMQ和XWJH样品的总比表面积分别达到了630和682 m²/g。

2.2 孔体积积累曲线的比较

用压汞法测量孔隙参数时,测量过程产生的基本数据是压力-体积关系数据,而孔体积积累曲线则是压力-体积关系的直观表现,这一关系包含所有可经过处理而得到的孔隙结构信息。如,根据Washburn方程

$$pr = -2\gamma \cos \theta \quad (1)$$

式中: γ 、 θ 分别为汞的表面张力和接触角; p 为对样品所施加的压力; r 为孔半径。

图2给出了2个样品在活化前后孔体积积累曲线的比较。在测量过程中,汞的表面张力和接触角可以认为是常数,则压力和孔半径的乘积是一个定

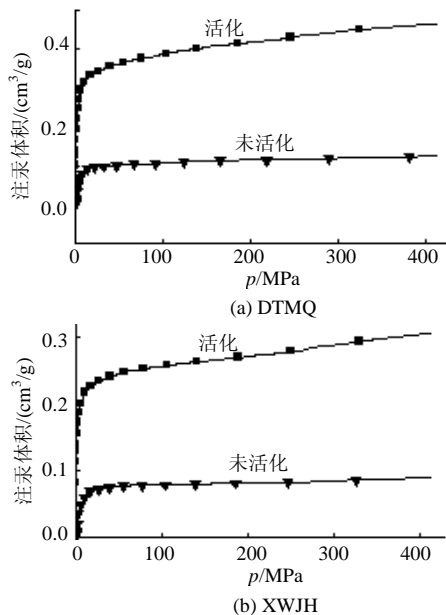


图2 孔体积积累曲线

Fig. 2 Normalized volume vs. pressure

值,即由压力-体积关系即可得到孔径-体积关系,进而推知孔径-孔体积-表面积关系。

从图中看出,样品活化前后的孔体积积累曲线最明显的特点就是对应同一压力,活化后比活化前可以注入更多的汞,即具有与该压力对应的孔径的孔的数目更多了。另外,活化后孔体积积累曲线的高压部分斜率较活化前大,说明与高压部分对应的微孔数目增多。

2.3 孔体积分布的比较

由式(2)所确定的函数为孔体积分布函数:

$$D_v(r) = \frac{dV}{dr} \quad (2)$$

根据体积分布函数通过积分可计算一定孔半径区间的注汞体积

$$V = \int_{r_1}^{r_2} D_v(r) dr \quad (3)$$

研究表明,工业半焦在孔半径大于100 nm时的数值很小。图3给出了样品在活化前后孔半径小于100 nm区间内的 $D_v(r)$ - r 关系。

从图中可以看出,2个样品在活化前当孔半径小于10 nm时,随着孔半径的减小, $D_v(r)$ 呈现曲折上升的趋势,但当孔半径小于2 nm时, $D_v(r)$ 随孔半径的减小有开始有下降的趋势。这说明,活化前样品在孔半径为2~10 nm之间孔的分布较密集。活化之后,在孔半径为2~40 nm之间,样品的 $D_v(r)$ 均明显大于各自在活化前的 $D_v(r)$ 值。2个样品均在

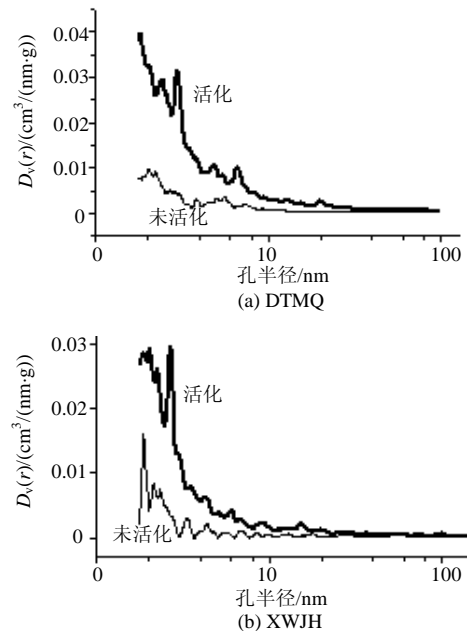


图3 样品在孔半径<100 nm区间的 $D_v(r)$ 曲线
Fig. 3 $D_v(r)$ of samples with radius < 100 nm

3 nm处出现了 $D_v(r)$ 的一个峰值。另外一个很重要的现象是,活化后样品的 $D_v(r)$ 值在孔半径小于 2 nm时并没有明显下降的迹象,这预示样品在孔半径小于 2 nm时,仍可能有孔的密集分布,只不过用压汞法无法测量而已。

此外,还可以从注汞体积百分数柱形图(图 4)看出样品在不同孔半径区间注汞体积占全部注汞体积的百分数。

图 4 显示出 2 个样品在活化前后在孔半径为 1.78~10 nm 注汞体积百分数有很大变化,即活化后在这一区间的注汞体积百分数比活化前增大 1 倍以上,说明活化的结果使样品微孔数目急剧增多。对于 XWJH,这一特点体现得尤为明显。

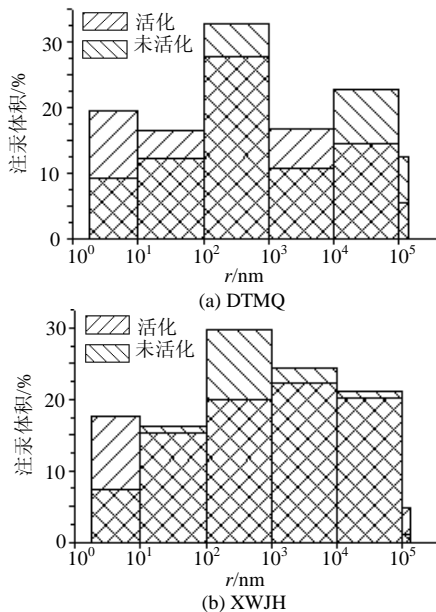


图 4 注汞体积百分数柱形图

Fig. 4 Normalized volume vs. pore radius histogram

2.4 比表面积的比较

由 Washburn 方程可推得:

$$S = \frac{1}{\gamma |\cos \theta|} \int_0^V p dV \quad (4)$$

式中: S 为被测样品孔隙的表面积; V 为注入样品孔隙中汞的体积。

孔表面积分布函数定义为

$$D_s(r) = \frac{dS}{dr} \quad (5)$$

根据孔表面积分布函数通过积分可计算一定孔半径区间的表面积:

$$S = \int_{r_1}^{r_2} D_s(r) dr \quad (6)$$

通过对样品的压汞分析数据进行研究发

现,工业半焦在孔半径大于 20 nm 时, $D_s(r)$ 很小,因此,图 5 给出了样品活化前后孔半径在 1.78~20 nm 的 $D_s(r)$ 曲线。分析这 2 个样品的 $D_s(r)$ 曲线可以发现:首先,2 个样品活化后的 $D_s(r)$ 均大于各自在活化前的 $D_s(r)$,且随着孔半径的减小, $D_s(r)$ 均呈曲折上升趋势;其次,样品活化前的 $D_s(r)$ 在孔半径小于 2 nm 时 $D_s(r)$ 有减少趋势,但活化后样品的 $D_s(r)$ 在孔半径小于 2 nm 时仍呈现上升趋势;最后,2 个样品在孔半径为 3 nm 附近 $D_s(r)$ 均出现峰值。结合 $D_v(r)$ 分布特点可知,样品活化后在孔半径为 3 nm 附近出现了较密集的孔分布。

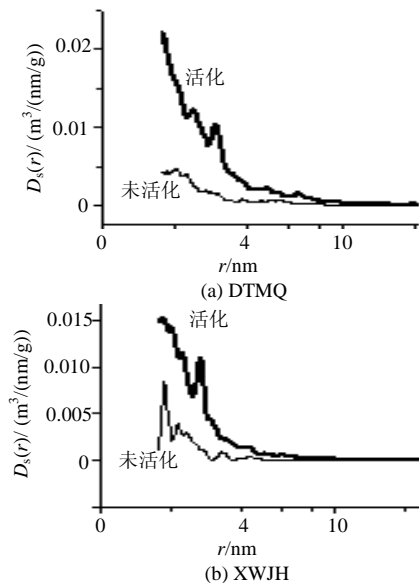


图 5 样品在孔半径 < 20 nm 区间的 $D_s(r)$ 曲线
Fig. 5 $D_s(r)$ of samples with radius < 20 nm

2.5 分形维数的比较

分形维数 D 是表征固体表面粗糙度的参数^[18-23]。

根据分形理论,实际固体的表面积应正比于 R^D ,分形维数 D 在 2(平展的表面)和 3(极其粗糙的表面)之间变化。也就是说,孔壁表面的分形维数 D 取值介于 2 到 3 之间。对于多孔物质的孔壁来说,其表面越粗糙,则其分形维数 D 值越接近 3,反之,其表面越光滑,其分形维数 D 值则越接近 2。 D 值与压力、注汞体积之间的关系可表示为

$$\ln \frac{dV}{dp} = \ln(k) + (D - 4) \ln p \quad (7)$$

式中: k 为常数。

从 $\ln(dV/dp)$ 对 $\ln(p)$ 作出的直线的斜率可得到 D 值。分形维数的数值及相关系数列于表 5。

样品的孔隙结构是否具有分形特征可以通过由拟合直线与实验数据之间的相关性来判断。从表 5 所给数据可以看出,样品的相关系数最小为

0.9569, 最大为 0.9912, 均呈较强的正相关, 所以, 可以认为, 样品具有分形特征, 并且可以通过式(7)计算其分形维数。

从表 5 还可以看出, 2 个样品在活化后的分形维数都比活化前大, 孔壁表面更加粗糙。而且活化后相关系数也比活化前大, 说明活化后的半焦分形特征更为显著。结合图 6 可以更加清楚地看到这一现象。

从图 6 还可以看出, 活化后实验数据点均匀地散布在拟合直线的附近, 无过大的离散点, 因而拟合的相关系数较大。另外, 活化后拟合直线斜率的绝对值较小, 因此分形维数计算值较大。

表 5 样品活化前后的分形维数计算值
Tab. 5 Fractal dimensions of samples(calculated)

样品	D		相关系数	
	活化前	活化后	活化前	活化后
DTMQ	2.9154	2.9953	0.9805	0.9912
XWJH	2.8303	2.9918	0.9569	0.9845

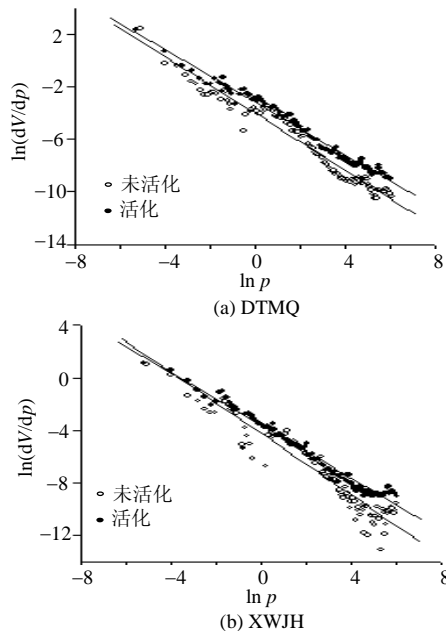


图 6 样品的分形维数的比较

Fig. 6 Comparison of fractal dimensions of samples

3 讨论

工业半焦属于多孔物质, 水蒸气活化工业半焦的过程实际上是水蒸气在半焦表面及其孔道内进行扩散-吸附-反应的过程。因此, 在活化过程中保持足够高的温度是增强水蒸气的扩散能力和反应能力的必要条件。工业半焦颗粒的孔隙结构符合分形特征, 半焦颗粒是一种分形体。分形理论表明^[24]: 当水蒸气分子通过孔道扩散并在孔壁上进行反应时, 不是所有的点都以相等的概率接触反应分子。在分

形体表面及孔道不规则的奇异处, 如阶梯、缺陷、孔洞等处, 可形成活化反应过程的活性位。分形体的分形维数越大, 说明表面及孔道内壁的活性点的分布越趋均匀而细密。因此, 在活化过程中, 水蒸气分子首先可能在上述这些活性位上与半焦中的C原子进行反应, 而反应的结果则有可能形成新的阶梯、缺陷、孔洞等, 这样就使得经过一定时间活化的半焦样品其微孔数目进一步增多, 分形维数也进一步增大。从该意义上来说, 水蒸气活化的造孔、通孔作用比扩孔作用更为显著。

4 结论

(1) 工业半焦DTMQ和XWJH经过水蒸气活化之后孔隙结构参数发生了明显的变化。用压汞法分析表明: DTMQ活化后的比表面积和注汞体积分别为活化前的 4.2 倍和 3.7 倍; 而XWJH活化后的比表面积和注汞体积则分别为活化前的 4 倍和 3.3 倍。活化之后, 2 个样品的平均孔径均有所减少。而用 BET法测量经过活化的DTMQ和XWJH样品的总比表面积则分别达到了 630 和 682 m²/g。

(2) 活化样品孔半径小于 10 nm 的孔的数目增加较多。在活化之后在孔半径为 3 nm 附近出现了孔的密集分布, 这一现象在活化之前是没有的。此外, 活化后样品的 $D_v(r)-r$ 、 $D_s(r)-r$ 关系曲线在孔半径小于 2 nm 时仍呈现随孔半径减少而上升的趋势, 预示着样品还有压汞法所不能分析的孔径更小的微孔的密集分布。这些都说明半焦经过水蒸气活化其孔隙结构朝着期望的方向发展, 活化有益于增强半焦作为脱硫脱氮吸附剂的性能。

(3) 工业半焦在活化前后的孔隙结构均符合分形结构特征, 半焦经水蒸气活化之后, 其分形特征更加明显。在活化过程中分形维数的增加意味着活化后的半焦作为吸附剂其吸附活性位更加丰富发达, 有助于增强吸附剂的吸附性能。

参考文献

- [1] 沈芳, 上官炬, 李春虎, 等. 改性半焦烟气脱硫的研究[J]. 太原理工大学学报, 2003, 34(3): 279-281.
Shen Fang, Shang guanju, Li Chunhu, et al. Study on the removal of SO₂ from flue gas with modified semi-coke[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2003, 34(3): 279-281(in Chinese).
- [2] 刘典福, 张静伟, 王阳, 等. 半焦在内循环流化床中燃烧特性的研究[C]. 中国工程热物理学会第十一届学术会议论文集—燃烧学, 北京, 2005.
Liu Dianfu, Zhang Jingwei, Wang Yang, et al. Study on combustion characteristics of semi-coke in internally circulating fluidized beds

- [C]. The Proceeding of 11th Academic Annual Meetings of CSET (Combustion), Beijing, 2005(in Chinese).
- [3] 周宏仓, 金保升, 仲兆平, 等. 三种煤的部分气化生成多环芳烃的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 156-160.
Zhou Hongcang, Jin Baosheng, Zhong Zhaoping, et al. Experimental study on polynuclear aromatic hydrocarbons emission from partial gasification of three types of coals[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 156-160(in Chinese).
- [4] 李文华, 刘昌见, 王志忠. 用褐煤半焦脱除烟气中SO₂的研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(3): 321-326.
Li Wenhua, Liu Changjian, Wang Zhizhong. Removal of SO₂ in flue gas using semi-coke from lignite[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(3): 321-326(in Chinese).
- [5] 刘妮, 骆仲决, 程乐鸣, 等. 干性条件下脱硫反应中孔分布模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 25(4): 147-151.
Liu Ni, Luo Zhongyang, Cheng Leming, et al. Pore size distribution model for sulfation of calcium-based sorbent[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 25(4): 147-151(in Chinese).
- [6] 格雷格 S J, 辛 K S W. 吸附、比表面和孔隙率[M]. 高敬琮, 刘希尧, 译. 北京: 化学工业出版社, 1989.
- [7] 张守玉, 吕俊复, 岳光溪, 等. 煤种及炭化条件对活性焦孔隙结构的影响[J]. 煤炭学报, 2003, 28(2): 167-172.
Zhang Shouyu, Lu Junfu, Yue Guangxi, et al. The effects of coal type and carbonization conditions on the porous texture of activated char derive[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(2): 167-172(in Chinese).
- [8] Parra J B, Sousa J C de, Pis J J, et al. Effect of gasification on the porous characteristics of activated carbons from a semianthracite [J]. Carbon, 1995, 33 (6): 801-807.
- [9] Pis J J, Mahamud M, Parra J B, et al. Preparation of active carbons from coal. Part II. Carbonization of oxidized coal[J]. Fuel Proc. Techno., 1997, 50(2): 249-260.
- [10] De Bore J H. The structure and properties of porous materials [M]. London: Butterworth, 1958.
- [11] 段钰锋, 周毅, 陈晓平, 等. 煤气化半焦的孔隙结构[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2005, 35 (1): 135-139.
Duan Yufeng, Zhou Yi, Chen Xiaoping, et al. Pore structure of gasified coal-char[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2005, 35 (1): 135-139(in Chinese).
- [12] 周毅, 段钰锋, 陈晓平, 等. 半焦孔隙结构的影响因素[J]. 锅炉技术, 2005, 36 (4): 34-36.
Zhou Yi, Duan Yufeng, Chen Xiaoping, et al. Influential factor on pore structure of coal-char[J]. Boiler Technology, 2005, 36(4): 34-36(in Chinese).
- [13] 黄正宏, 康飞宇, 郝吉明. KOH活化与CO₂活化的ACF的孔结构[J]. 碳素, 2005, 121(1): 23-26.
Huang Zhenghong, Kang Feiyu, Hao Jiming. ACF pore structure for activation KOH and CO₂[J]. Carbon, 2005, 121(1): 23-26(in Chinese).
- [14] Carlos A, Leon y L New perspectives in mercury porosimetry [J]. Advances in Colloid & Interface Science, 1998, 76-77(1): 341-372.
- [15] 常东武. 压汞法测量孔隙时减小误差的方法及分析[J]. 实验技术与管理, 2003, 20(5): 76-80.
Chang Dongwu. Methods and analysis to reduce errors in use of mercury porosimetry[J]. Journal of Experiment Technology and Management, 2003, 20(5): 76-80(in Chinese).
- [16] 刘培生. 多孔材料孔率的测定方法[J]. 钛工业进展, 2005, 22(6): 34-37.
Liu Peisheng. Determining methods for porosity of porous material [J]. Titanium Industry Progress, 2005, 22(6): 34-37(in Chinese).
- [17] 王玉珑, 曹振雷, 王燕忠. 采用汞压入法测量纸张微孔分布和孔隙率[J]. 中国造纸, 2006, 25(3): 19-21.
Wang Yulong, Cao Zhenlei, Wang Yanzhong. Use of mercury porosimetry to characterize pore size and porosity[J]. China Pulp & Paper, 2006, 25(3): 19-21(in Chinese).
- [18] 陈三强, 刘永忠, 程光旭, 等. 压汞法计算冻干物料的表面分形维数[J]. 食品科学, 2004, 25(7): 25-28.
Chen Sanqiang, Liu Yongzhong, Cheng Guangxu, et al. Computation on surface fractal dimension of freeze-dried product by mercury porosimetry[J]. Food Science, 2004, 25(7): 25-28(in Chinese).
- [19] Avnir D. The fractal approach to heterogeneous chemistry [M]. New York: Wiley, 1989.
- [20] 蒋林, 骆仲决, 方航宇, 等. 基于孔隙分形几何的生物质型煤固硫性能研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(1): 69-73.
Jiang Lin, Luo Zhongyang, Fang Hangyu, et al. Research on sulfur retention of bio-briquette based on pore fractal geometry[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2002, 36(1): 69-73(in Chinese).
- [21] 李永鑫, 陈益民, 贺行洋, 等. 粉煤灰-水泥浆体的孔体积分形维数及其与孔结构和强度的关系[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(8): 774-779.
Li Yongxin, Chen Yimin, He Xingyang, et al. Pore volume fractal dimension of fly ash-cement paste and its relationship between the pore structure and strength[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2003, 31(8): 774-779 (in Chinese).
- [22] Mahamud M M. Textural characterization of active carbons using fractal analysis[J]. Fuel Processing Technology, 2006, 87(10): 907-917.
- [23] Pfeiffer P, Avnir D. Chemistry in non-integer dimensions between 2 and 3.I. Fractal theory of heterogeneous surfaces[J]. Journal of Chemical Physics. 1983, 79(7): 3558-3571.
- [24] 刘代俊. 分形理论在化学工程中的应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

收稿日期: 2007-11-01。

作者简介:

邢德山(1960—), 男, 汉族, 山西大同人, 博士研究生, 副教授, 主要从事高效清洁燃烧与大气污染控制研究, xingdeshan@sina.com;

阎维平(1955—), 男, 汉族, 北京人, 教授, 博士生导师, 主要从事高效清洁燃烧与大气污染控制研究。

(编辑 王庆霞)