

柴油机排气颗粒表面特征与吸附能力分析

王 忠,刘理凡,刘 帅*,李瑞娜,贾 茹 (江苏大学汽车与交通工程学院,江苏 镇江 212013)

摘要: 利用全自动比表面积与孔隙分析仪和光学接触角测量仪,分别对炭黑和柴油机排气颗粒的比表面积与孔隙以及接触角等表面特征参数进行了测量,并对炭黑和柴油机排气颗粒的分形维数和表面张力进行了计算,对比分析了炭黑和柴油机排气颗粒的吸附能力,探讨了柴油机排气颗粒表面特征参数与吸附能力之间的关系.通过检测与分析,炭黑和柴油机排气颗粒的比表面积分别为 78.003 和 65.408m²/g,平均孔径分别为 13.845 和 14.483nm,分形维数分别为 2.5885 和 2.5515,在 0.985s 时刻的表面张力分别为 51.1 和 56.6mJ/m²,结果表明炭黑与柴油机排气颗粒的比表面积,孔径分布,分形维数和表面张力均相似.炭黑和柴油机排气颗粒均表现了极强的亲油性,轻微亲水性.柴油机排气颗粒亲水性略强,表面更为光滑,吸附能力略低于炭黑.

关键词: 柴油机; 炭黑; 排气颗粒; 表面特征; 吸附能力

中图分类号: X505 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2019)09-3701-06

Surface characteristics and adsorption capability of diesel engine exhaust particulate matter. WANG Zhong, LIU Li-fan, LIU Shuai*, LI Rui-na, JIA Ru (School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China). *China Environmental Science*, 2019,39(9): 3701~3706

Abstract: The surface characteristic parameters of carbon black and diesel exhaust particulate matter (PM), such as specific surface area, pore and contact angle, were measured by automatic specific surface area and pore analyser and optical contact angle measuring instrument respectively. The fractal dimension and surface tension of carbon black and PM were calculated. The adsorption capacity of carbon black and PM was compared and analysed, and the relationship between surface characteristic parameters and adsorption capacity of PM was discussed. Via detection and analysis, for carbon and PM, the specific surface area is 78.003 and 65.408m²/g, and average pore size is 13.845 and 14.483nm, and fractal dimension is 2.5885 and 2.5515, and surface tension at 0.985s is 51.1 and 56.6mJ/m², respectively. The results show that the specific surface area, pore size distribution, fractal dimension and surface tension of carbon black and diesel exhaust particles are similar. Both carbon black and PM show strong oil affinity and slight hydrophilicity. The PM have a slightly stronger hydrophilicity, a smoother surface and a slightly lower adsorption capacity than carbon black.

Key words: diesel; carbon black; exhaust particulate matter; surface characteristics; adsorption capacity

柴油车排气颗粒是机动车颗粒物排放的主要来源,同时也是大气中 PM_{2.5} 的主要来源之一^[1-2].柴油机排气颗粒主要由可溶性有机物(SOF),干碳烟(DS)和灰分等物质组成^[3],颗粒中 SOF 质量百分比为 3%~15%^[4],含有超过 16 种多环芳香烃(PAHs)类物质^[5].在柴油机排气过程中,颗粒吸附废气中的 HC 等气体物质,进入大气环境后,在紫外线作用下发生二次化学反应,形成污染颗粒物^[6].吸附过程一般发生于固体的表面,固体的表面结构与颗粒物的吸附性能具有一定的联系^[7].

固体的表面特征可通过比表面积、孔隙结构、分形维数和表面张力等物理量进行定量表征.国内外的学者针对氧化锰、活性炭的吸附性能开展了研究,对其比表面积、孔隙结构和分形维数进行了定量分析,建立了物质表面结构特征参数与其吸附能力之间的关系.Ma 等^[8]研究认为,MnO_x 对 SO₂ 和 NH₃ 的吸附能力主要取决于固体的比表面积;李兵等^[9]

研究认为粉末状活性炭对 SO₂ 的吸附量与其孔径具有明确的关系,吸附量随孔径的减小而增大.针对柴油机排气颗粒,Wei 等^[10]和张澍等^[11]采用扫描电镜对排气颗粒表面特征进行了分析,提出了柴油机排气颗粒由大量基本炭粒子团絮而成,形成了大量的孔隙;Rothenberg 等^[12]开展了柴油机排气颗粒对二甲苯的吸附研究,研究结果表明:柴油机排气颗粒呈海绵状结构,对二甲苯的吸附等温线属于第 II 类等温吸附曲线.

目前,学者们针对活性炭、煤粉以及炭黑等典型吸附剂固体的表面特征和吸附情况进行研究,对柴油机排气颗粒吸附能力与表面特征之间的关系研究相对较少.本文以柴油机排气颗粒和炭黑为研究

收稿日期: 2019-02-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51776089);江苏省高等学校自然科学基金项目(18KJB470006);中国博士后科学基金项目(2019M651732)

* 责任作者, 讲师, lstcls@ujs.edu.cn

对象,通过氮气吸附和接触角试验,对柴油机排气颗粒、炭黑的比表面积、孔容积、孔径、分形维数和表面张力参数与吸附量进行了定量分析,对比分析了柴油机排气颗粒与炭黑的吸附能力.

1 材料与方法

1.1 表面特征与吸附能力参数

1.1.1 比表面积与孔隙 基于 N₂ 吸附,比表面积采用多点 BET 法,孔隙结构通过 DFT 法获得.多点 BET 法的表达式为^[13]:

$$\frac{1}{w\left(\frac{P_0}{P}-1\right)}=\frac{C-1}{W_m C}\left(\frac{P}{P_0}\right)+\frac{1}{W_m C}$$

(1)

式中: P_0 为 N₂ 在某温度时的蒸汽饱和压力,Pa; P 为试验过程中 N₂ 压力,Pa; W 为在相对压力为 P/P_0 时 N₂ 的吸附量,cm³/g; W_m 为单分子层饱和吸附量,cm³/g; C 为常数,与吸附质-吸附剂间的作用强弱有关.

1.1.2 分形维数 基于 N₂ 吸附,采用 FHH 方程对吸附数据进行拟合计算得到炭黑和颗粒的分形维数. FHH 方程的表达式为^[14]:

$$\ln V=k \ln \left[\ln \left(\frac{P_0}{P}\right)\right]+C$$

(2)

式中: V 为在平衡压力为 P 时的吸附量,cm³/g; P_0 为吸附温度下的饱和蒸气压力,Pa; k 为与温度,吸附层厚度和固体表面性质有关的系数; C 为一常数.其中,若气体与颗粒之间的主要作用力为范德华力时,分形维数 D 与 k 的关系为^[15]:

$$D=3+3k$$

(3)

若气体与颗粒之间的主要作用力为毛细凝结力时, D 与 k 之间的关系为:

$$D=3+k$$

(4)

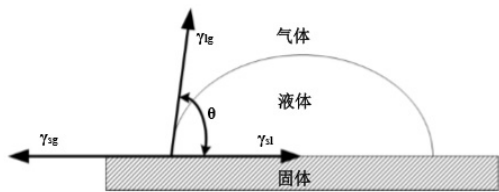


图 1 接触角与液-固张力平衡示意
Fig.1 Contact angle and liquid-solid tension balance diagram

1.1.3 接触角与表面张力 基于接触角(如图 1 所示),通过朱定一等^[16]推导的方法进行颗粒物表面张

力的计算.其表达式为:

$$\gamma_{sl}=\frac{\gamma_{lg}}{2}\left(\sqrt{1+\sin ^2 \theta}-\cos \theta\right), \quad 0 \leq \theta \leq 180^{\circ}$$

(5)

$$\gamma_{sg}=\frac{\gamma_{lg}}{2}\left(\sqrt{1+\sin ^2 \theta}+\cos \theta\right), \quad 0 \leq \theta \leq 180^{\circ}$$

(6)

式中: γ_{sg} 、 γ_{sl} 、 γ_{lg} 分别为固-气、固-液、液-气界面张力,mJ/m²; θ 为接触角;水滴的 γ_{lg} 值为 70.8mJ/m².

1.2 测量方法与设备

柴油机排气颗粒是通过 186F 柴油机采集的.186F 柴油机的结构与性能参数如表 1 所示.通过在 186F 单缸柴油机排气管端安装滤芯式颗粒采集仪,对标定工况的柴油机排气颗粒进行采集.

商用炭黑颗粒 Printex U 购买于德国赛公司,商用炭黑颗粒的相关参数见表 2.N₂ 吸附采用美国康塔公司(Quantachrome)的 NOVA4000e 型全自动比表面积与孔径分布分析仪进行测量.根据 BET 测试流程,为保证测试结果的准确性,样品质量应大于 100mg,试验中炭黑和柴油机排气颗粒样品质量分别为 178 和 198mg.进行 N₂ 吸附试验之前,分别对炭黑和柴油机排气颗粒进行了脱气处理去除孔隙中吸附的水蒸汽和可溶性有机物,脱气温度为 300℃.根据对颗粒物的热重分析,柴油机排气颗粒经过脱气后仍有少量可溶性有机物残留,残留量约为 4.52%,测量结果偏小.接触角采用芬兰 Attention 公司的 KSV-CM200 型光学接触角仪进行测量,进行接触角测量前将颗粒物放于载玻片并施加一定压力进行压片制样.

表 1 186F 柴油机参数

Table 1 Parameters of 186F diesel engine

参数	数值
缸径×行程(mm×mm)	86×70
排量(L)	0.406
压缩比	19
喷油正时(BTDC)	17
燃烧室形状	ω 型
标定功率(kW)	5.7
标定转速(r/min)	3000
最大扭矩(N/m)	20.3
最大扭矩点转速(r/min)	1800

表 2 炭黑参数

Table 2 parameters of carbon black

黑度 My 值	挥发物质量分数(%)	灰分质量分数(%)	原生粒径(nm)
244	6	0.04	25

2 结果与讨论

2.1 比表面积与孔径分析

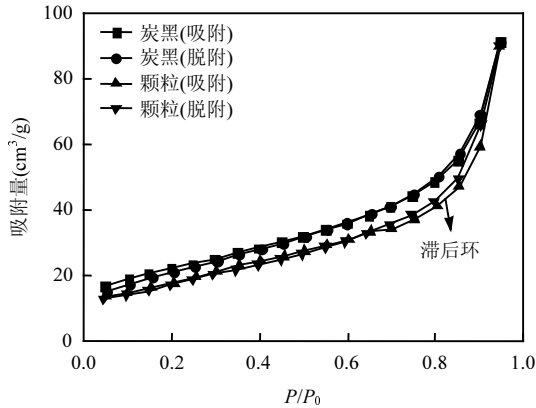


图2 N₂ 吸附与脱附等温线
Fig.2 N₂ adsorption and desorption isotherms

如图 2 所示,炭黑与柴油机排气颗粒对 N₂ 的吸附速率随 N₂ 相对压力升高呈快速增加的趋势,由于毛细凝结作用,在相对压力接近 1 时吸附速率急剧增加,这种吸附趋势为第 II 类等温吸附类型,属于多孔介质多层吸附的情况^[17-18].N₂ 相对压力为 0.04~0.9 时,炭黑对 N₂ 的吸附量比柴油机排气颗粒高,当相对压力超过 0.9,两者对 N₂ 的吸附量相当.这说明了炭黑的吸附性能总体略高于柴油机排气颗粒.另外,炭黑的吸附与脱附曲线之间没有明显的滞后环,而柴油机排气颗粒的吸附与脱附曲线之间有较为明显的滞后环.可能的原因是:根据 Kelvin 公式^[7],炭黑中的孔近似为一端开口的圆筒形,吸附与脱附接近可逆,故而没有明显的滞后环.而柴油机排气颗粒的孔近似为两端开口的圆管状孔,由于在脱附时孔两端存在凹液面,吸附质从孔中脱离具有一定的延迟,形成了滞后环.

当采用多点 BET 法计算固体的比表面积时相对压力范围通常选择为 0.005~0.300,拟合相关系数 r 应大于 0.999.图 3(a)为采用多点 BET 法对炭黑与柴油机排气颗粒对 N₂ 吸附数据的拟合结果.可以看出,采用 BET 法对炭黑和柴油机排气颗粒的吸附数据拟合较好,相关系数 r 满足测试要求,比表面积计算结果统计于表 3.从表中可以看出,炭黑与柴油机排气颗粒的比表面积值比较接近,炭黑略高于柴油机排气颗粒,高约 19.3%.

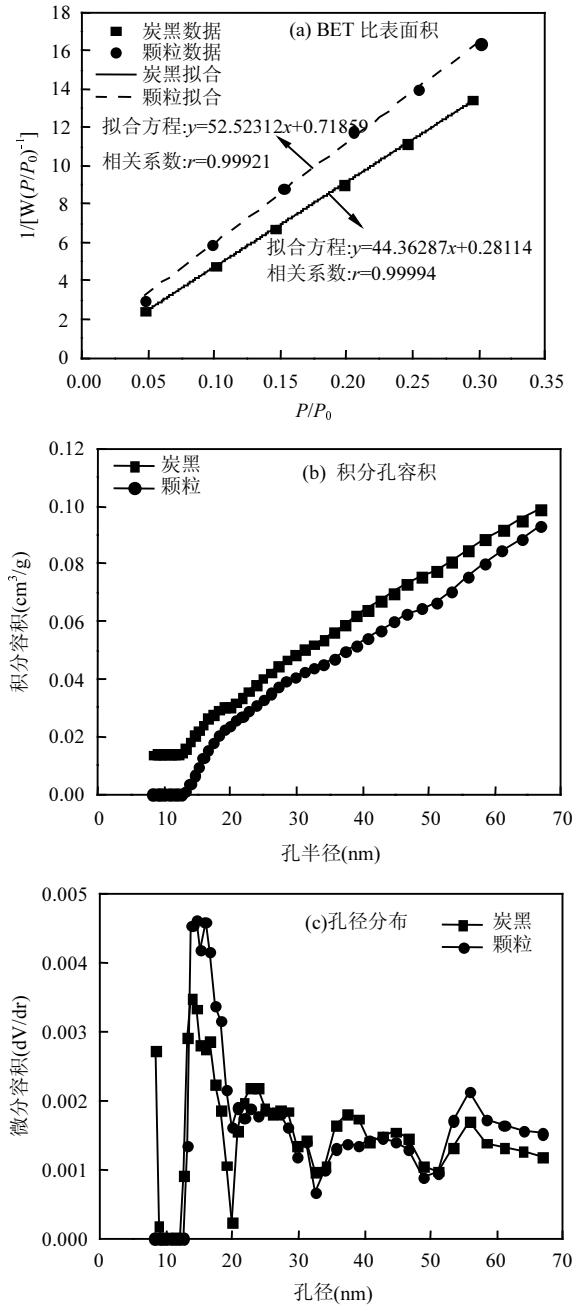


图3 炭黑与颗粒的比表面积和孔径
Fig.3 Specific surface area and pore diameter of carbon black and particulate matter

表3 炭黑与颗粒的比表面积和孔隙
Table 3 Specific surface area and porosity of carbon black and particulate matter

样品	比表面(m²/g)	总孔容积(cm³/g)	平均孔径(nm)
炭黑	78.003	0.099	13.845
颗粒	65.408	0.093	14.483

从图 3(b)中可以看出,炭黑和柴油机排气颗粒均含有孔隙,孔隙形成的原因主要有 2 个:一是由于

柴油机排气颗粒的基本炭粒子由多层石墨烯结构组成,炭层之间存有间隙^[19-20];二是因为排气颗粒由大量的基本炭粒子在缸内以及排气管中经过碰撞凝并作用^[21],呈团絮堆叠状,形成了类似“海绵”的结构^[12,22].炭黑与柴油机排气颗粒的孔隙参数如表 3 所示,可以看出炭黑与柴油机排气颗粒孔径分布比较相近,炭黑的总孔容积略大于柴油机排气颗粒,其总孔容积分别为 0.099 和 0.093cm³/g,高约 6%.这可能是由于炭黑与柴油机排气颗粒基本粒子的组成以及基本粒子之间的团絮堆叠情况的差异所引起的;另外,经过脱气后柴油机排气颗粒中仍残留少量 SOF 物质,部分孔隙被 SOF 所填充.从图 3(c)中可以看出,炭黑与柴油机排气颗粒的孔径分布均为连续的多峰分布,分布于 8~70nm 范围内,孔类型属于中孔和大孔类(孔的分类为:孔径小于 2nm 为微孔,2~50nm 为中孔,大于 50nm 为大孔).炭黑的孔径主要分布于 8nm 和 10~20nm,柴油机排气颗粒的孔径主要分布于 10~20nm,且炭黑的平均孔径略小于柴油机排气颗粒,比柴油机排气颗粒约小 4.4%.比表面积与孔容积越大,吸附剂的表面可容纳更多的吸附质分子,吸附量越大.因此,从比表面积和孔容积来看,炭黑的吸附能力略高于柴油机排气颗粒.

2.2 分形维数结果分析

采用 FHH 方程计算炭黑与柴油机排气颗粒的分形维数.图 4 为采用式(2)和式(4)对炭黑以及柴油机排气颗粒的 N₂ 吸附数据拟合的结果,可以看出 FHH 方程对炭黑以及柴油机排气颗粒的数据拟合结果均较好,炭黑和柴油机排气颗粒的分形维数分别为 2.5885 和 2.5515.分形维数值介于 2~3 之间,值越小颗粒物的表面越光滑,孔径分布越宽;反之表面

越粗糙,孔径分布越窄^[23].可以看出,炭黑颗粒的分形维数值略大于柴油机排气颗粒,比柴油机排气颗粒高约 1.6%,主要是因为炭黑颗粒的原生粒径更小,粒子间团絮更为紧凑.因此,炭黑的表面比柴油机排气颗粒的表面更为粗糙,孔径分布更窄,更有利于吸附质分子被吸附于表面.

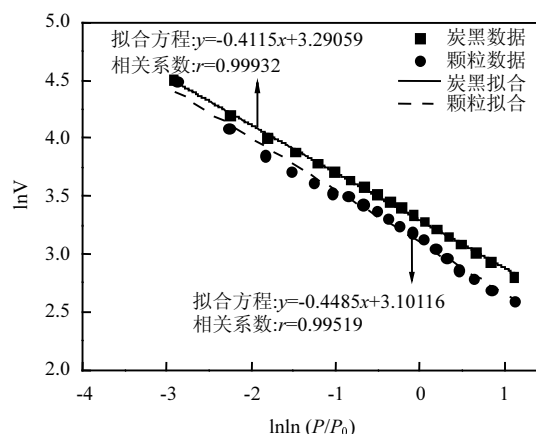


图 4 FHH 方程拟合结果

Fig.4 Fitting results of FHH equation

2.3 接触角与表面张力

如图 5 所示,当水滴滴于炭黑与颗粒物表面时均呈球冠形,随着时间的推移球冠状水滴逐渐变小,最终完全被吸收.如图 6 所示,当柴油液滴与炭黑和颗粒表面接触时,瞬间被完全吸收.是由于炭黑和柴油机排气颗粒存在孔隙,使得水滴和柴油液滴逐渐填充了这些孔隙.另外,通过比较水滴和柴油液滴的浸润速度可以看出,炭黑和柴油机排气颗粒均表现出了极强的亲油性,水滴与柴油液滴的差异性可能是由于水分子极性较强,柴油分子极性较弱造成的^[24-25].

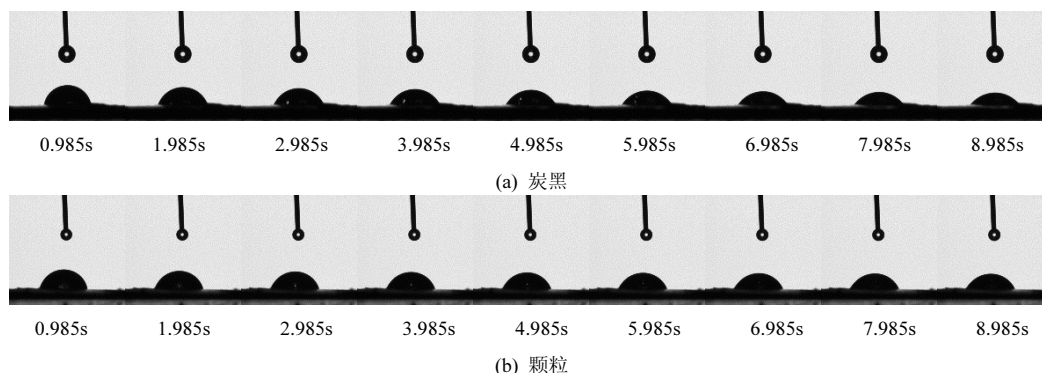


图 5 炭黑和颗粒吸附水滴的过程

Fig.5 Adsorption of water droplets by carbon black and particulate matter

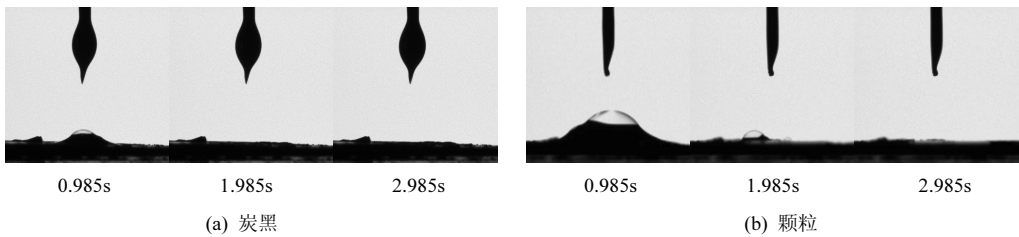


图 6 炭黑和颗粒吸附柴油油滴的过程

Fig.6 Adsorption of diesel droplets by carbon black and particulate matter

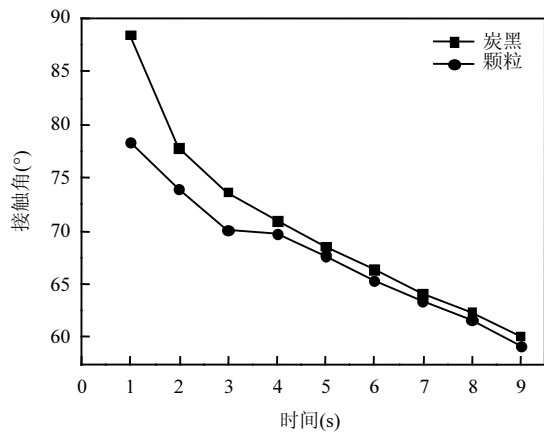


图 7 水滴接触角随时间的变化关系

Fig.7 The relationship between contact angle of water droplets and time

为了定量地分析炭黑与柴油机排气颗粒的表面张力,对图 5 中所得到的液滴轮廓图像进行拟合计算,得到了如图 7 所示接触角随时间的变化关系.可以看出,炭黑与柴油机排气颗粒的接触角随时间的推移呈近似线性递减的趋势,主要是因为炭黑和柴油机排气颗粒均存在孔隙,当液滴与其接触后逐渐填充这些孔隙.接触角与亲水性的关系为^[26]:以 90°为分界线,接触角超过 90°为疏水表面,当接触角大于 150°时为超疏水表面;反之,接触角小于 90°为亲水表面,当接触角小于 5°时为超亲水表面.从图中可以看出,炭黑与柴油机排气颗粒的接触角均小于 90°,表现为轻微亲水,相比之下柴油机排气颗粒的亲水性略强.另外,由于炭黑和排气颗粒的接触角均随时间的变化而变化,因此选择了 0.985s 时刻的接触角状态,通过式(5)和式(6)进行表面张力计算,计算结果统计于表 4.从表中可以看出,炭黑的表面张力略小于柴油机排气颗粒,约小 9.7%.表面张力的大小取决于分子间作用力与分子结构,炭黑与柴油机排气颗粒均主要由碳组成,因此可以看出炭黑与柴油机排气颗粒碳层结构具有一定差异.

表 4 炭黑与颗粒的表面张力			
Table 4 Surface tension of carbon black and particulate matter			
样品	接触角(°)	$\gamma_{\text{sg}}(\text{mJ}/\text{m}^2)$	$\gamma_{\text{sl}}(\text{mJ}/\text{m}^2)$
炭黑	88.3	51.1	49.0
颗粒	78.5	56.6	42.5

3 结论

- 3.1 柴油机排气颗粒和炭黑对 N₂ 的吸附为同类型吸附,属于第 II 类等温吸附,均具有一定的吸附能力,且炭黑的吸附能力略高于柴油机排气颗粒.
- 3.2 柴油机排气颗粒和炭黑的比表面积,孔径分布和分形维数具有较大的相似性.比表面积分别为 78.003 和 65.408m²/g,孔隙分布为多峰连续分布,平均孔径分别为 13.845 和 14.483nm,均属于中孔范畴;分形维数分别为 2.5885 和 2.5515,柴油机排气颗粒与炭黑表面均为粗糙表面,炭黑表面更为粗糙.
- 3.3 柴油机排气颗粒和炭黑对水的接触角均随时间的推移呈减小趋势,在时间为 0.985s 时接触角分别为 88.3°和 78.5°,此时计算得到的炭黑与柴油机排气颗粒的表面张力分别为 51.1 和 56.6mJ/m²,柴油机排气颗粒和炭黑表面均表现为极强的亲油性和轻微的亲水性,柴油机排气颗粒亲水性略强.

参考文献:

[1] 范武波,陈军辉,李媛,等.四川省非道路移动源大气污染物排放清单研究[J]. 中国环境科学, 2018,38(12):60-68.
Fan Wubo, Chen Junhui, Li Xin, et al. Study on the non-road mobile source emission inventory for sichuan province [J]. China Environmental Science, 2018,38(12):60-68.

[2] Nam E, Kishan S, Baldauf R W, et al. Temperature effects on particulate matter emissions from light-duty, gasoline-powered motor vehicles [J]. Environmental Science & Technology, 2010,44(12):4672-4682.

[3] 楼狄明,耿小雨,谭丕强,等.公交车燃用不同比例生物柴油的颗粒物组分特性研究[J]. 中国环境科学, 2017,37(9):3285-3291.
Lou Diming, Geng Xiaoyu, Tan Piqiang, et al. Particulates

- composition characteristics from a bus fueled with different proportions of biodiesel [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(9): 3285–3291.
- [4] 孟忠伟,杨冬,闫妍,等.柴油机尾气颗粒和碳黑颗粒氧化特性的分析比较[J]. *燃烧科学与技术*, 2016,(1):71–76.
- Meng Zhongwei, Yang Dong, Yan Yan, et al. Comparison of Oxidation Characteristics Analysis Between Diesel Soot and Carbon Black [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2016,(1):71–76.
- [5] 张华伟,宋崇林,吕刚,等.柴油机排放多环芳香烃气/颗粒相分配研究[J]. *环境工程学报*, 2011,5(10):2315–2320.
- Zhang Huawei, Song Chonglin, Lü Gang, et al. Study on gas/particle phase distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in diesel engine emissions [J]. 2011,5(10):2315–2320.
- [6] 蒋斌,陈多宏,王伯光,等.鹤山大气超级站旱季单颗粒气溶胶化学特征研究[J]. *中国环境科学*, 2016,36(3):670–678.
- Jiang Bin, Chen Duohong, Wang Boguang, et al. Single-particle chemical characterization of aerosols at the Heshan atmospheric supersite during the dry season [J]. 2016,36(3):670–678.
- [7] 赵振国.吸附作用应用原理[M]. 化学工业出版社化学与应用化学出版中心, 2005.
- Zhao Zhenguo. Application principle of adsorption[M]. Chemical Industry Press of Chemistry and Applied Chemistry Publishing Center, 2005.
- [8] Ma X, Jing L, Rankin M A, et al. Highly porous MnO_x prepared from $\text{Mn}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ as an adsorbent for the removal of SO_2 and NH_3 [J]. *Microporous & Mesoporous Materials*, 2016,244:192–198.
- [9] 李兵,薛建明,许月阳,等.粉末活性炭孔隙结构和表面化学性质对吸附 SO_2 的影响[J]. *环境工程*, 2014,(S1):548–553.
- Li Bin, Xue Jianming, Xu Yueyang, et al. Effect of pore structure and surface chemistry of powder activated carbon on SO_2 adsorption [J]. *Environmental Engineering*, 2014,(S1):548–553.
- [10] Wei J, Song C, Gang L, et al. A comparative study of the physical properties of in-cylinder soot generated from the combustion of n-heptane and toluene/n-heptane in a diesel engine [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015,35(2):1939–1946.
- [11] 张澍,李晓林,宋伟民.汽车尾气中含铂颗粒物的表面特征分析[J]. *中国环境科学*, 2006,26(B07):61–64.
- Zhang Shu, Li Xiaolin, Song Weimin. Analysis of the on surface characters of platinum particles containing platinum in the motor tail gas [J]. *China Environmental Science*, 2006,26(B07):61–64.
- [12] Rothenberg S J, Kittelson D B, Cheng Y S, et al. Adsorption of nitrogen and xylene by light-duty diesel exhaust samples [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1985,4(4):383–400.
- [13] Guryanov V V, Petukhova G A, Kurilkin A A, et al. Interrelation of the parameters of equations of multilayer adsorption and BET [J]. *Protection of Metals & Physical Chemistry of Surfaces*, 2015,51(5): 762–766.
- [14] Avnir D, Jaroniec M. An isotherm equation for adsorption on fractal surfaces of heterogeneous porous materials [J]. *Langmuir*, 1989,5(6): 1431–1433.
- [15] Zofia Sokołowska, Małgorzata Borówko, Reszkozygmunt J, et al. Adsorption of nitrogen and water vapor by alluvial soils [J]. *Geoderma*, 2002,107(1):33–54.
- [16] 朱定一,张远超,戴品强,等.润湿性表征体系及液固界面张力计算的新方法(II) [J]. *科学技术与工程*, 2007,7(13):3063–3069.
- Zhu Dingyi, Zhang Yuanchao, Dai Pinqiang, et al. Novel characterization of wetting properties and the calculation of liquid-solid interface tension(II) [J]. *Science Technology and Engineering*, 2007,7(13):3063–3069.
- [17] Zhen-Guo Z. Surface fractal analysis of silica gel by using adsorption data [J]. *Chemical Research in Chinese Universities*, 2003,24(11): 2051–2055.
- [18] Fang H W, Chen M H, Chen Z H. Surface pore tension and adsorption characteristics of polluted sediment [J]. *Science in China Series G (Physics, Mechanics and Astronomy)*, 2008,51(8):1022–1028.
- [19] 张健,王忠,何丽娜,等.柴油机排放颗粒物中石墨烯结构分析[J]. *农业工程学报*, 2015,31(18):79–84.
- Zhang Jian, Wang Zhong, He Lina, et al. Analysis of graphene structure in particulate matter emitted from diesel engine [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015,31(18):79–84.
- [20] 高鉴.基于润滑油添加剂的柴油机颗粒物排放特征研究[D]. 苏州,苏州大学, 2018.
- Gao Jian. Study on particulate emission characteristics of diesel Engine based on lubricating oil additives [D]. Suzhou, Suzhou University, 2018.
- [21] 杨芳玲,王忠,赵洋,等.柴油燃烧颗粒碰撞凝并过程[J]. *内燃机学报*, 2015,(6):496–501.
- Yang Fangling, Wang Zhong, Zhao Yang, et al. Particle collision and coalescence during diesel fuel combustion process [J]. *Transactions of CSICE*, 2015(6):496–501.
- [22] 杨冬.柴油机颗粒氧化动力学特性研究[D]. 成都,西华大学, 2015.
- Yang Dong. Investigation on the oxidation kinetics of diesel particulate [D]. Chengdu, Xihua University, 2015.
- [23] Terzyk A P, Gauden P A, Rychlicki G, et al. Fractal dimension of microporous carbon on the basis of the Polanyi–Dubinin theory of adsorption. Part 3: Adsorption and adsorption thermodynamics in the micropores of fractal carbons [J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 1998,227(2):482–494.
- [24] 王菲,孙红文.生物炭对极性与非极性有机污染物的吸附机理[J]. *环境化学*, 2016,35(6):1134–1141.
- Wang Fei, Sun Hongwen. Sorption mechanisms of polar and apolar organic contaminants onto biochars [J]. *Environmental Chemistry*, 2016,35(6):1134–1141.
- [25] Dechene A, Rosendahl I, Laabs V, et al. Sorption of polar herbicides and herbicide metabolites by biochar-amended soil [J]. *Chemosphere*, 2014,109:180–186.
- [26] 赵宁,卢晓英,张晓艳,等.超疏水表面的研究进展[J]. *化学进展*, 2007,19(6):860–870.
- Zhao Ning, Lu Xiaoyin, Zhao Xiaoyan, et al. Progress in superhydrophobic surfaces [J]. *Progress in Chemistry*, 2007,19(6): 860–870.

作者简介: 王忠(1961–),江苏镇江人,教授,博士,主要从事内燃机清洁燃料燃烧与排放污染物控制研究.发表论文 100 余篇.