

DOI: 10.7652/xjtuxb202003017

柴油机排气颗粒吸附与结构特征试验研究

刘理凡, 王忠, 刘帅, 李瑞娜, 李游
(江苏大学汽车与交通工程学院, 212013, 江苏镇江)

摘要: 针对柴油机排气颗粒的吸附能力以及与吸附相关的结构特征研究不足的现状,对柴油机不同工况排气颗粒的吸附能力和结构特征进行了测量与分析。通过柴油机试验台架采集了柴油机不同工况(100%负荷下转速分别为1 500、2 700、3 600 r/min)下的排气颗粒,采用氮气吸附法对柴油机排气颗粒的吸附性能进行了测量,通过多点 BET 法、DFT 法、FHH 法分别对柴油机排气颗粒的比表面积、孔隙结构、分形维数进行了表征,探讨了颗粒的结构特征参数随柴油机转速的变化规律,并运用透射和扫描电镜对颗粒结构特征参数随柴油机转速变化的规律进行了分析。结果表明:柴油机排气颗粒具有吸附能力,氮气吸附等温线属第 II 类等温吸附趋势,随着柴油机转速的增加,颗粒吸附能力增强;颗粒的孔径分布呈多峰连续分布,孔径分布于 8~80 nm,属中孔和大孔范畴;当柴油机转速为 1 500、2 700、3 600 r/min 时,比表面积分别为 65.408、78.562、101.885 m²/g,孔容积分别为 0.093、0.113、0.152 mL/g,分形维数分别为 2.551 5、2.561 3、2.584 9,平均孔径分别为 14.483、13.236、10.736 nm;颗粒的比表面积、累积孔容积和分形维数随柴油机转速的增加而增大,平均孔径随柴油机转速的增加而减小。

关键词: 柴油机;排气颗粒;氮气吸附;结构特征

中图分类号: TK421 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)03-0134-09

Experimental Study on Adsorption and Structural Feature of Diesel Engine Exhaust Particles

LIU Lifan, WANG Zhong, LIU Shuai, LI Ruina, LI You
(School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: In view of the current situation that the researches the adsorption capacity of diesel engine exhaust particles and the structural characteristics related to adsorption are insufficient, the adsorption capacity and structural feature of diesel engine exhaust particles under different working conditions were measured and analyzed. Particles in diesel engine exhaust under different operating conditions (100% load, 1 500 r/min, 2 700 r/min, 3 600 r/min) were collected by diesel engine test bench. The adsorption performance of the diesel engine exhaust particles was measured by nitrogen adsorption method. The specific surface area, pore structure parameters and fractal dimension of the diesel engine exhaust particles were measured by multi-point BET method, DFT method and FHH method, respectively. The change law of particulate structure characteristic parameters with diesel engine speed was discussed, and the change law of

particulate structure characteristic parameters with diesel engine speed was analyzed by transmission and scanning electron microscopy. The results show that the diesel exhaust particles have a certain adsorption capacity, and the nitrogen adsorption isotherm belongs to the category II isotherm adsorption trend. With the increase of diesel engine speed, the adsorption capacity of the particles increases. The pore size distribution of the particles gets multimodal and continuous, and pore size distribution ranges from 8 to 80 nm, belonging to the categories of mesopore and macropore. When the speed of diesel engine is at 1 500, 2 700 and 3 600 r/min, the specific surface area is 65.408, 78.562 and 101.885 m^2/g , the cumulative pore volume is 0.093, 0.113 and 0.152 mL/g , the fractal dimension is 2.551 5, 2.561 3 and 2.584 9, and the average pore diameter is 14.483, 13.236 and 10.736 nm, respectively. The specific surface area, cumulative pore volume and fractal dimension of the particles increase with increasing diesel engine speed, while the average pore size decreases.

Keywords: diesel; exhaust particle; nitrogen adsorption; structural feature

柴油机排气颗粒粒径小、数量多,是大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源之一,对人类身体健康具有较大威胁^[1-2]。《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》的实施,同时对柴油机颗粒物排放的质量浓度、数量浓度提出了严格要求。目前,减少柴油机颗粒物排放的主要技术手段为采用颗粒捕集器(DPF)对颗粒进行捕集,当被捕集的颗粒达到一定量时,在DPF中对颗粒进行氧化。颗粒粒径和氧化活性分别对DPF的捕集效率和再生具有重要的影响;DPF对大粒径颗粒的捕集效果更好^[3-4];颗粒的氧化活性越高,颗粒越容易发生氧化,DPF的再生效果更好。颗粒在排气过程中的吸附行为会对颗粒的粒径和组分产生一定的影响^[5-6],颗粒的比表面积、孔隙等结构特征与其氧化活性也存在一定的关联^[7-8]。开展颗粒吸附与结构特征的研究,探究柴油机工况对颗粒吸附性能和结构特征的影响,可深入了解在DPF中,颗粒、贵金属催化剂、氧气三者的作用方式,为DPF中贵金属催化剂在孔道壁面的涂敷以及优化DPF的再生提供理论参考。

国内外学者针对固体的结构特征开展了相关的研究,主要对比表面积、孔隙结构和分形维数进行了表征,并探究了结构特征参数与吸附能力之间的关系。Ma等认为, MnO_x 对 SO_2 和 NH_3 的吸附能力主要取决于其比表面积^[9]。李兵等认为,粉末状活性炭对 SO_2 的吸附量随孔径的减小而增大^[10]。Zhang等采用Frenkele-Halseye-Hill(FHH)方法分析了不同地区煤粉的分形维数,结果表明煤粉的分形维数介于2.22~2.77之间,且煤粉的分形维数与煤粉的比表面积呈正相关,与孔径分布呈负相关^[11]。王毅力等分别采用FHH法和热力学方法探究了某

地区水库不同地点的水体悬浮沉积物的分形维数,结果表明采用两种方法获得的分形维数具有相同的变化趋势^[12]。针对柴油机排气颗粒,Liati等和刘军恒等利用扫描电镜(SEM)对颗粒的微观结构进行了测量与分析,结果表明柴油机排气颗粒由大量的基本粒子组成,且柴油机排气颗粒呈多孔的海绵状结构^[13-14],其中,基本粒子是指颗粒电镜图片中构成颗粒更小的单元体,由无定形的内核和石墨化的外壳组成^[8,15]。

由于国内外学者针对柴油机排气颗粒的结构特征研究主要集中于通过SEM或透射电镜(TEM)进行定性分析,而定量研究相对较少,所以本文通过柴油机试验台架,采集了柴油机不同工况的颗粒进行定量分析。基于氮气吸附试验,对所采集的颗粒进行了结构特征的表征,分析计算了颗粒的比表面积、孔径分布、平均孔径、累积孔容积、分形维数等结构特征参数,探讨了结构特征参数随柴油机转速变化的规律。

1 结构特征参数

颗粒的结构特征能够影响颗粒的氧化过程和吸附性能,如比表面积越大,颗粒与氧气或其他物质的接触机会就越大,越利于物质在颗粒表面的停留。本文选取了比表面积、孔隙结构参数、分形维数,定量地说明柴油机排气颗粒的结构特征。

1.1 比表面积

对颗粒比表面积的测量与计算通常采用吸附法。基于颗粒在一定的条件下对氮气或氩气的等温吸附试验数据,通过单点或多点Brunauer-Emmett-Teller(BET)法对试验数据进行处理,进而获得颗

粒的比表面积,BET 方程的表达式^[16]为

$$W\left(\frac{P_0}{P}-1\right)^{-1}=\frac{1}{W_m C_1}+\frac{C_1-1}{W_m C_1}\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (1)$$

式中: P 和 P_0 分别为吸附质在一定温度下的蒸汽压力和饱和蒸汽压力(Pa); W 是在相对压力 P/P_0 下的吸附气体质量(cm^3/g); W_m 为吸附质单层饱和吸附质量(cm^3/g); C_1 为吸附常数,与第一吸附层上的吸附能有关。

1.2 孔隙结构

基于氮气的等温吸附和脱附数据,采用相关的孔隙计算模型可获得颗粒的孔径分布、平均孔径、累积孔容积等孔隙相关参数。相关计算方法有 Barrett-Joyner-Halenda (BJH) 法、Horvath-Kawazoe (HK) 法、Dollimore-Heal (DH) 法、Dubinin-Radushkevich (DR) 法、Density-Functional-Theory (DFT) 法等。BJH 法由 Kelvin 方程推导而来,目前已广泛应用于介孔固体的孔隙的分析。HK 法、DH 法和 DR 法适用于微孔介质的孔隙结构参数分析。DFT 法可同时获得微孔和介孔的分布情况。本文采用 DFT 法对颗粒的孔隙结构参进行分析,DFT 法的数学表达式^[17]为

$$N(P/P_0)=\int_{H_{\min}}^{H_{\max}} N_1(P/P_0, H) f(H) dH \quad (2)$$

式中: $N(P/P_0)$ 为试验的等温吸附量(cm^3/g); H 为孔宽度(nm); $N_1(P/P_0, H)$ 为孔宽为 H 时的等温吸附量(cm^3/g); $f(H)$ 为孔径分布函数。

结合等温吸附试验数据,通过快速的非负最小二乘法对式(2)进行求解可获得颗粒的孔径分布,进而可对平均孔径等参数进行计算。

1.3 分形维数

在基于吸附法得到的等温吸附数据上,结合一定的理论和方法可获得颗粒的分形维数。通过吸附法获得分形维数通常有两种方法,即 FHH 法和热力学法。本文采用 FHH 法对颗粒的分形维数进行计算分析,其表达式^[18]为

$$\ln W=k \ln \left(\ln \frac{P}{P_0}\right)+C_2 \quad (3)$$

式中 C_2 为一常数。若吸附质和吸附剂之间的主要作用力为范德华力,则分形维数 D 与 k 的关系^[19]为

$$D=3+3 k \quad (4)$$

若吸附质与吸附剂之间的主要作用力为毛细凝结力,则 D 与 k 的关系为

$$D=3+k \quad (5)$$

式中 k 为与温度、吸附层厚度、固体表面性质有关的系数。

2 试验方法与设备

颗粒通过柴油机试验台架进行采集,图 1 为柴油机试验台架示意图。试验样机为 186FA 型柴油机,柴油机的性能与结构参数如表 1 所示。通过测功机控制系统调节柴油机的工况,试验工况为柴油机 100% 负荷下转速分别为 1 500、2 700、3 600 r/min。采用滤芯式颗粒采样装置进行颗粒的采集,采集时长约 60 min。

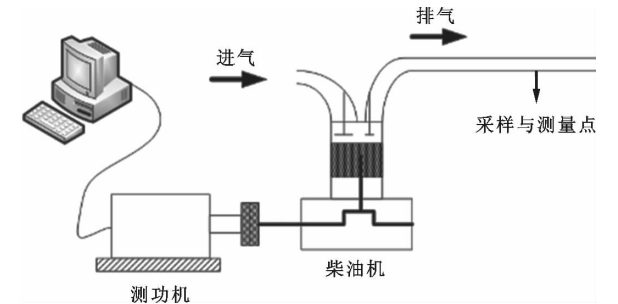


图 1 柴油机台架示意图

表 1 186FA 型柴油机参数

参数	数值或类型
缸径/mm	86
行程/mm	72
压缩比	19
冷却方式	风冷
燃烧室形状	ω 形
标定功率/kW	6.3
标定工况对应的柴油机转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	3 600
最大扭矩/($\text{N} \cdot \text{m}$)	20.1
最大扭矩工况对应的柴油机转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	2 700

柴油机排气颗粒是一种有吸附能力的多孔介质。颗粒在排气管中运动,存在着吸附和脱附的行为。由于氮气的化学性质稳定,排气管废气中也存在大量的氮气组分,为了避免多组分气体之间的相互影响,选择纯氮气作为吸附质来研究颗粒的吸附特性。对采集的不同工况的柴油机排气颗粒,基于氮气吸附法,采用美国康塔公司的 NOVA3000e 型比表面积与孔径分布分析仪进行测量。根据仪器测试精度要求,待测样品的质量应大于 100 mg,柴油机转速为 1 500、2 700、3 600 r/min 时产生的颗粒质量分别为 198、136、152 mg。在进行氮气吸附之前,需对颗粒进行脱气处理,去除颗粒孔隙中的水蒸气以及可溶有机物组分。脱气环境为真空环境,脱气温度均为 300 $^{\circ}\text{C}$,脱气时长为 3 h。

分别采用 SEM 和 TEM 对颗粒的形貌和微观结构进行测量与分析。在电镜拍摄前,需对颗粒进行离散处理,便于成像。离散处理的方法为:取少量颗粒于试管中,滴入一定量的乙醇溶液,振荡形成悬浊液;将盛有悬浊液的试管置于超声振荡机中进行 30 min 超声振荡处理;将经过超声振荡处理后的混合溶液置于离心机中进行离心处理,利用滴管取上层少量清液分别滴于硅片和铜网表面,分别用于 SEM 和 TEM 照片拍摄。

3 结果分析

3.1 氮气吸附与脱附

在吸附温度为 77.35 K 条件下,柴油机不同工况排放的颗粒氮气吸附和脱附等温曲线如图 2 所示。可以看出:颗粒的吸附量随氮气相对压力的升高呈逐渐增加的趋势;当相对压力接近 1 时,颗粒的吸附量急剧增加,这种吸附趋势为第 II 类等温吸附曲线,属于多孔介质多层的吸附情况^[20-21],这是由氮气在一定压力下发生的毛细凝结作用而引起的。3 个试验工况排放的颗粒等温吸附曲线和等温脱附曲线均发生了分离,出现了明显的滞后环。根据 Kelvin 理论,出现滞后环说明吸附与脱附是不可逆的,吸附和脱附可逆与否取决于孔的形状和结构^[22]。从图 2 中还可以看出,随着柴油机转速的提高,在相同吸附条件下颗粒对氮气的吸附量也随之增加,由此可知高转速下颗粒的吸附能力高于低转速下颗粒的吸附能力。

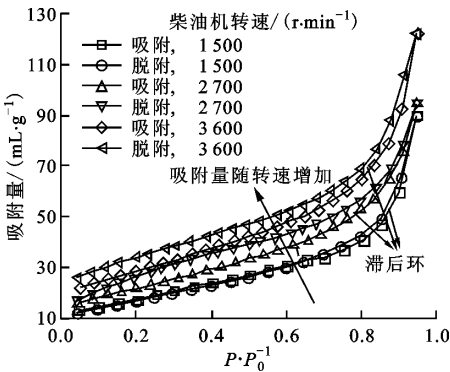


图 2 氮气吸附和脱附等温曲线

3.2 比表面积

图 3 为采用多点 BET 法(式(1))对柴油机排气颗粒的氮气等温吸附数据进行拟合的结果。采用 BET 法获得固体比表面积时,通常相对压力 P/P_0 的取值范围为 0.05~0.35,为保证结果的准确性,BET 方程对试验数据的拟合相关系数应高于 0.999^[23]。

表 2 为采用 BET 方程对相对压力为 0.05~0.35 的颗粒等温吸附数据进行拟合的结果,从表中可以看出,3 个柴油机工况颗粒的 BET 拟合结果较为理想,可进行颗粒比表面积的计算与分析。

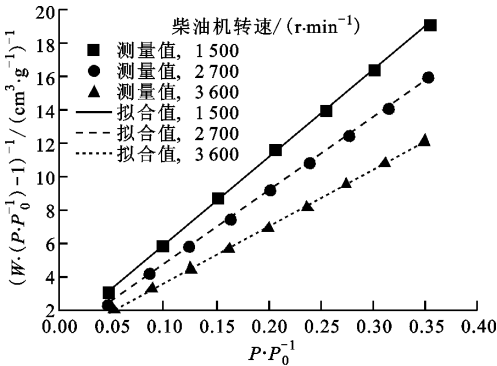


图 3 BET 方程拟合曲线

表 2 BET 线性拟合结果

柴油机转速/ (r·min ⁻¹)	拟合方程	相关系数
1 500	$(W(P/P_0)-1)^{-1}=52.104(P/P_0)+0.774$	0.999 4
2 700	$(W(P/P_0)-1)^{-1}=43.915(P/P_0)+0.413$	0.999 9
3 600	$(W(P/P_0)-1)^{-1}=33.999(P/P_0)+0.181$	0.999 9

图 4 为柴油机 3 个试验工况下排放颗粒的比表面积,可以看出:柴油机排气颗粒比表面积较大,与比表面积测量使用的碳黑标准物质的比表面积相近^[24-25];随着柴油机转速的增加,颗粒的比表面积呈增加的趋势,比表面积分别为 65.408、78.562、101.885 m²/g;相比于柴油机转速为 1 500 r/min 时,2 700、3 600 r/min 时颗粒的比表面积分别增加了 20.1%、55.8%。由此可以看出,柴油机转速的增加对颗粒物比表面积具有促进的作用。采用多点 BET 法获得的比表面积属于广义的比表面积,即包

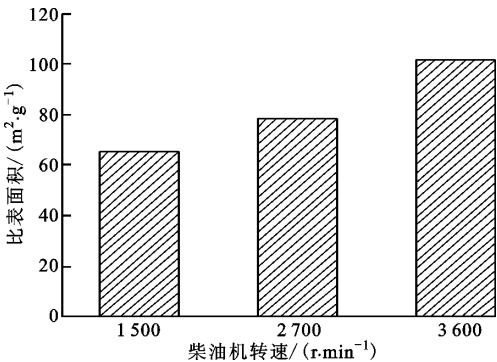
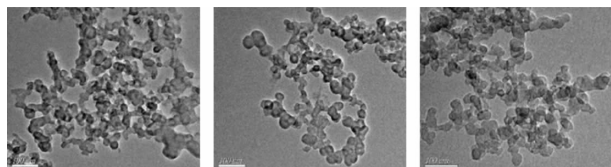


图 4 颗粒比表面积

含了两部分的表面积,分别为颗粒表面的面积和孔隙壁面面积。根据文献[26]可知,通常近似地将柴油机排气颗粒几何形状视为球形,球形颗粒的比表面积与颗粒半径呈反比关系。

采用 TEM 对柴油机排气颗粒进行拍摄,结果如图 5 所示。采用 Nano-Messurer 软件对基本粒子几何平均粒径进行了分析,发现当柴油机转速为 1 500、2 700、3 600 r/min 时,基本碳粒子的平均直径分别为 26.14、25.35、21.62 nm。由此可以看出,随着柴油机转速的增加,基本粒子几何平均粒径减小。这是因为柴油机转速的增加使得颗粒在缸内以及输运过程中经历的时间减少,从而表面生长作用减弱,粒径减小[27]。由于球状物体的比表面积随半径的减小而增大,所以颗粒基本碳粒子粒径减小是引起颗粒比表面积增加的原因之一。



(a) 1 500 r/min (b) 2 700 r/min (c) 3 600 r/min

图 5 TEM 拍摄的不同柴油机转速下的排气颗粒

3.3 孔径和累积孔容积

图 6 为采用 DFT 法对颗粒等温脱附数据的拟合结果与试验结果的对比。分析可知:DFT 法对柴油机 3 个试验工况排放颗粒的等温脱附数据拟合结果较好,仅在相对压力较低(在 0.2 附近)时有明显的偏离;1 500、2 700、3 600 r/min 转速下的拟合误差分别为 0.947%、0.637%、0.778%。由此可以看出,采用 DFT 法获得的颗粒孔隙结构参数具有较高的可靠性。

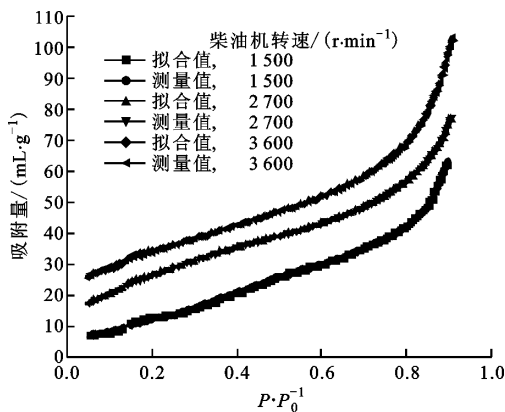


图 6 DFT 拟合与试验结果对比

图 7 为采用 DFT 法获得的 3 个试验工况的颗粒孔径分布曲线,图中 V 为颗粒的孔隙容积, r 为孔

径。可以看出,3 个工况的颗粒孔径呈多峰连续分布,分布范围在 8~80 nm 之间。根据孔径大小对颗粒进行分类,孔径小于 2 nm 属于微孔,孔径介于 2~50 nm 范围属于中孔,孔径大于 50 nm 属于大孔[28]。由此可以看出,颗粒属于中孔和大孔颗粒,无微孔颗粒的出现。

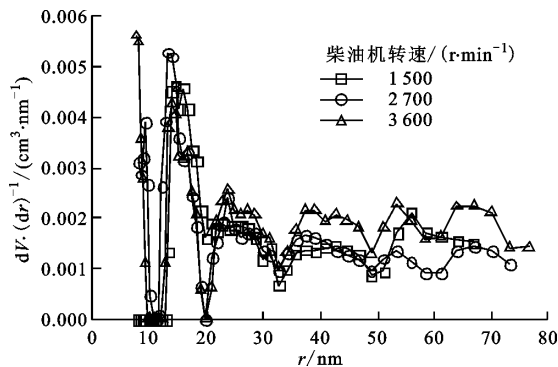
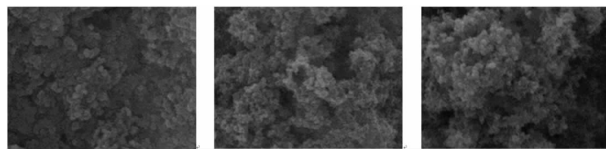


图 7 颗粒孔径分布

为寻找颗粒孔隙形成的原因,采用 SEM 拍摄了颗粒的电镜图片,结果如图 8 所示。可以看出,柴油机排气颗粒由大量的基本粒子在缸内经过碰撞凝并作用团聚堆叠而成。孔隙形成的原因有两点:一是由于基本粒子之间的堆叠形成了类似海绵状的结构,颗粒间形成了大量的缝隙;二是根据张健等的研究,构成颗粒的基本碳粒子由多层石墨烯组成,石墨烯层之间存在一定的间隙[29]。



(a) 1 500 r/min (b) 2 700 r/min (c) 3 600 r/min

图 8 SEM 拍摄的不同柴油机转速下的排气颗粒

图 9 和图 10 分别为 3 个试验工况的颗粒平均孔径和累积孔容积。可以看出:随着柴油机转速的增加,颗粒的平均孔径随之减小,累积孔容积增大;当转速为 1 500、2 700、3 600 r/min 时,平均粒径分别为 14.483、13.236、10.736,累积孔容积分别为 0.093、0.113、0.152 mL/g;相比于 1 500 r/min 转速下颗粒的平均孔径,2 700、3 600 r/min 转速下颗粒的平均孔径分别降低了 8.6%、25.8%,累积孔容积依次增加了 21.5%、63.4%。颗粒累积孔容积的增加,使得颗粒内表面积增多,进而使得颗粒的比表面积增大。

计盒维数能够定量地对颗粒的团聚情况进行描述,一般介于 1~2 之间,计盒维数越大说明颗粒间

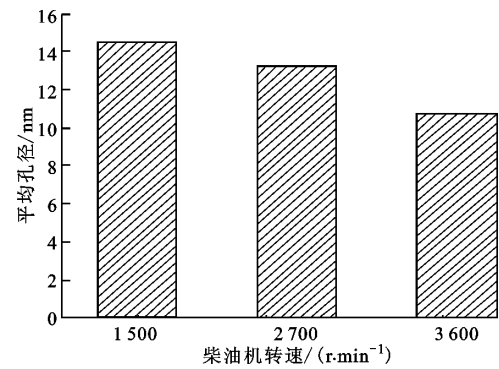


图 9 颗粒平均孔径

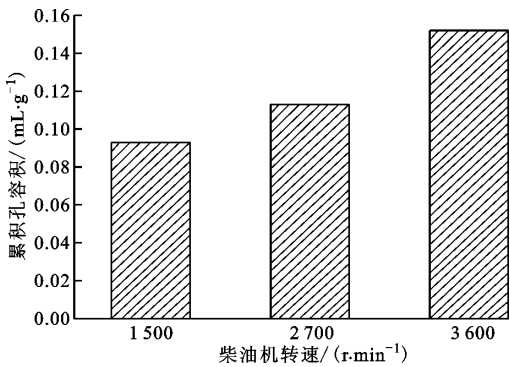


图 10 颗粒累积孔容积

团絮越紧密^[30]。为对柴油机不同工况颗粒的平均孔径进行分析,采用文献[31]中的方法,通过 Matlab 编程对拍摄的颗粒 SEM 图像进行处理,得到颗粒的计盒维数,结果如表 3 所示,表中 r_1 为正方盒子边长, $N_2(r_1)$ 为用边长为 r_1 的正方形盒子覆盖整个图形区域所需的盒子数。从表中可以看出,颗粒计盒维数随柴油机转速的增加而增大。可能的原因是柴油机转速增大,缸内燃烧时间减少,使得燃料燃烧不充分,导致柴油机碳氢排放增加,颗粒中含有的可溶有机物进而增加^[32]。颗粒中可溶有机物的增加使得颗粒表面黏附力增大^[33],导致了基本粒子间团絮紧密,因此颗粒之间的缝隙减小,最终使得颗粒的平均孔径降低。

表 3 颗粒的计盒维数

柴油机转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	拟合方程	相关 系数	计盒 维数
1 500	$\lg r_1 =$	0.997 6	1.880
	$-1.880 \lg N_2(r_1) + 13.469$		
2 700	$\lg r_1 =$	0.998 8	1.949
	$-1.949 \lg N_2(r_1) + 13.755$		
3 600	$\lg r_1 =$	0.998 7	1.953
	$-1.953 \lg N_2(r_1) + 13.771$		

3.4 分形维数

图 11 为采用式(3)和式(5)对柴油机 3 个试验工况的颗粒等温吸附数据的线性拟合结果,拟合方程以及拟合相关系数如表 4 所示。由图 11 和表 4 可以看出,采用 FHH 方程对颗粒等温吸附数据进行拟合的结果较好,可进行后续分形维数的计算。通过吸附法获得的分形维数与固体吸附剂的表面粗糙度等有关,分形维数通常介于 2~3 之间。分形维数为 2 时,固体吸附剂表面为光滑表面;分形维数为 3 时,固体吸附剂表面为粗糙表面。分形维数越大,固体吸附剂表面越粗糙,反之越光滑^[22]。从表 4 可以看出,颗粒的分形维数在 2.55~2.58 之间,差别很小。可能的原因是柴油机排气颗粒的粒径分布在 10~100 nm^[34]之间,柴油机排气颗粒由更小的基本粒子通过碰撞和凝并作用堆叠而成,所形成颗粒的表面粗糙度差异较小,稳定在某一个值附近。随着柴油机转速的增加,颗粒的分形维数也呈现出增加的趋势,即柴油机的转速能够使得颗粒表面的粗糙度增大。鞠洪玲等和宋金瓯等认为,柴油机缸内活塞凹坑边缘附近的气流速度最高,此处颗粒粒径增长速度较快^[35-36]。杨芳玲建立了柴油机缸内颗粒的碰撞和凝并模型,认为柴油机缸内气流速度的增大

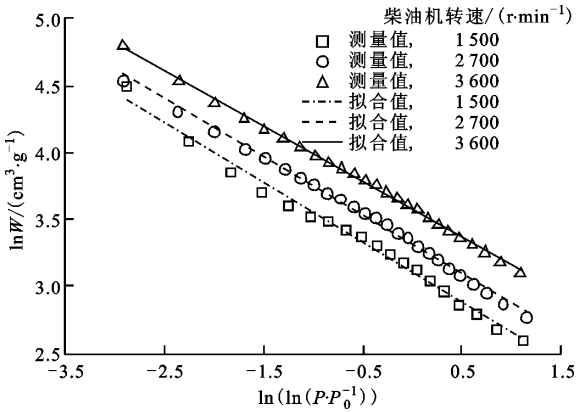


图 11 FHH 方程拟合曲线

表 4 FHH 方程线性拟合结果

柴油机转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	拟合方程	相关 系数	分形 维数
1 500	$\ln W = -0.448 5 \cdot$	0.995 2	2.551 5
	$\ln(\ln(P/P_0)) + 3.101 2$		
2 700	$\ln W = -0.436 9 \cdot$	0.998 1	2.563 1
	$\ln(\ln(P/P_0)) + 3.310 3$		
3 600	$\ln W = -0.415 1 \cdot$	0.999 2	2.584 9
	$\ln(\ln(P/P_0)) + 3.569 8$		

使得颗粒碰撞频率增加,颗粒更加容易发生凝并^[37]。另外,颗粒在缸内生成的同时伴随着氧化燃烧的过程。根据陈亮等的研究,缸内颗粒的浓度和粒径在燃烧后期趋于某一稳定值,氧化燃烧对颗粒无显著影响^[38]。因此,颗粒分形维数的增加可能是缸内颗粒碰撞和凝并作用加剧的结果。

4 结 论

采用氮气吸附的方法,对柴油机3个工况的颗粒进行了比表面积、孔隙结构性质、分形维数进行了测量和表征,对颗粒的结构特征、吸附能力进行了分析,得到的结论如下。

(1)柴油机排气颗粒具有吸附能力,随着氮气相对压力的增大,颗粒对氮气的吸附量会增大,并在相对压力接近1时吸附量急剧增加,属于第II类等温吸附趋势。随着柴油机转速的增加,颗粒对氮气的吸附量增大,吸附能力增强。

(2)柴油机排气颗粒比表面积较大,与碳黑标准物质的比表面积相近。随着柴油机转速的增加,颗粒粒径减小,孔隙容积增大,颗粒的比表面积增大。当柴油机转速为1 500、2 700、3 600 r/min时,比表面积分别为65.408、78.562、101.885 m²/g。

(3)柴油机排气颗粒由大量的基本碳粒子团聚堆叠而成,呈海绵状结构,属于多孔介质,孔径分布呈连续多峰分布,孔径属于中孔和大孔范畴。随着柴油机转速的增加,组成颗粒的基本碳粒子之间的团聚程度增加,颗粒平均孔径减小,累积孔容积增大。当柴油机转速为1 500、2 700、3 600 r/min时,颗粒的平均孔径分别为14.483、13.236、10.736 nm,累积孔容积分别为0.093、0.113、0.152 mL/g。

(4)柴油机排气颗粒的分形维数介于2~3之间,颗粒表面为粗糙表面。随着柴油机转速的增加,颗粒的分形维数会逐渐增加,表面粗糙度也会增加。当柴油机转速为1 500、2 700、3 600 r/min时,颗粒的分形维数分别为2.551 5、2.563 1、2.584 9。

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 Yuan, 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. Tem-

perature effects on particulate matter emissions from light-duty, gasoline-powered motor vehicles [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(12): 4672-4677.

- [3] 谭丕强,胡志远,楼狄明,等.柴油机捕集器结构参数对不同粒径微粒过滤特性的影响[J].机械工程学报,2008(2):181-187.
TAN Piqiang, HU Zhiyuan, LOU Diming, et al. Effects of diesel particulate filter structural parameters on filtration performance of different size particles [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008(2): 181-187.
- [4] 田晶,蔡忆昔,濮晓宇,等.掺混聚甲氧基二甲醚对柴油机排放的影响[J].中国环境科学,2018,38(1):73-82.
TIAN Jing, CAI Yixi, PU Xiaoyu, et al. Effects of polyoxymethylene dimethyl ethers/diesel blends on emissions of diesel engine [J]. China Environmental Science, 2018, 38(1): 73-82.
- [5] 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.
- [6] 王忠,孙波,赵洋,等.小型非道路柴油机排气管内颗粒的粒径分布与氧化特性[J].农业工程学报,2016,32(10):41-46.
WANG Zhong, SUN Bo, ZHAO Yang, et al. Characteristics of particle coagulation and oxidation in exhaust pipe of diesel engine [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(10): 41-46.
- [7] 梅德清,赵翔,王书龙,等.柴油机排放颗粒物的热重特性分析[J].农业工程学报,2013,29(16):50-56.
MEI Deqing, ZHAO Xiang, WANG Shu, et al. Thermogravimetric characteristics analysis of particulate matter of emission of divided diesel [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(16): 50-56.
- [8] 马志豪,李磊,钞莹,等.柴油机颗粒的微观结构和成分对其氧化活性的影响[J].内燃机学报,2015(2):123-128.
MA Zhihao, LI Lei, CHAO Ying, et al. Effects of micro-structure and components of diesel particulates on oxidation reactivity [J]. Transactions of CSICE, 2015(2): 123-128.
- [9] MA X W, LI J, RANKIN M A, et al. Highly porous MnO_x prepared from Mn(C₂O₄)·3H₂O as an adsor-

- bent for the removal of SO_2 and NH_3 [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2017, 244: 192-198.
- [10] 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 Bing, 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.
- [11] ZHANG S H, TANG S H, TANG D Z, et al. Determining fractal dimensions of coal pores by FHH model: problems and effects [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, 21: 929-939.
- [12] 王毅力, 芦家娟, 周岩梅, 等. 沉积物颗粒表面分形特征的研究 [J]. *环境科学学报*, 2005, 25(4): 457-463.
- WANG Yili, LU Jiajuan, ZHOU Yanmei, et al. Study on the particle surface fractal characteristics of sediments [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(4): 457-463.
- [13] LIATI A, DIMOPOULOS EGGENSCHWILER P, MÜLLER GUBLER E, et al. Investigation of diesel ash particulate matter: a scanning electron microscope and transmission electron microscope study [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 49: 391-402.
- [14] 刘军恒, 孙平, 嵇乾, 等. 柴油机燃用 Ce 基 FBC 燃油颗粒物微观结构与化学分析 [J]. *农业机械学报*, 2017, 48(2): 342-347, 293.
- LIU Junheng, SUN Ping, JI Qian, et al. Microstructure and chemical properties of particulate from diesel engine fueled with Ce-based FBC fuel [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(2): 342-347, 293.
- [15] 董立辉. 润滑油对柴油机颗粒物排放及活塞积碳的影响研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014: 43-48.
- [16] SAHBAZ F, PALAZOGLU T K, UZMAN D. Moisture sorption and the applicability of the Brunauer-Emmet-Teller (BET) equation for blanched and unblanched mushrooms [J]. *Nahrung*, 1999, 43(5): 325-329.
- [17] 朱子文, 郑青榕, 陈武, 等. 基于密度泛函理论的活性炭孔径分布改进算法 [J]. *化工学报*, 2017, 68(9): 3328-3335.
- ZHU Ziwen, ZHENG Qingrong, CHEN Wu, et al. Modified approach of determining pore size distribution of activated carbon by using density functional theory [J]. *CIESC Journal*, 2017, 68(9): 3328-3335.
- [18] AVNIR D, JARONIEC M. An isotherm equation for adsorption on fractal surfaces of heterogeneous porous materials [J]. *Langmuir*, 1989, 5(6): 1431-1433.
- [19] SOKOŁOWSKA Z, BORÓWKO M, RESZKO-ZYGMUNT J, et al. Adsorption of nitrogen and water vapor by alluvial soils [J]. *Geoderma*, 2002, 107(1/2): 33-54.
- [20] ZHEN G Z. Surface fractal analysis of silica gel by using adsorption data [J]. *Chemical Research in Chinese Universities*, 2003, 24(11): 2051-2055.
- [21] 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.
- [22] 赵振国. 吸附作用应用原理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 487-488.
- [23] 刘丽萍. 多点 BET 法计算比表面积的相对压力取值范围 [J]. *中国粉体技术*, 2014, 20(4): 68-73.
- LIU Liping. Relative pressure ranges of multi-point BET method for specific surface area calculation [J]. *China Powder Science and Technology*, 2014, 20(4): 68-73.
- [24] SING K S W. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity [J]. *Pure and Applied Chemistry*, 1985, 57(4): 603-619.
- [25] 王海, 冯颖, 宋小平, 等. 碳黑比表面积标准物质的研制 [J]. *中国粉体技术*, 2011, 17(1): 72-75.
- WANG Hai, FENG Ying, SONG Xiaoping, et al. Development of certified reference materials for specific surface area of carbon black [J]. *China Powder Science and Technology*, 2011, 17(1): 72-75.
- [26] 宁智, 卢晓, 付娟, 等. 层流管流中不同入口类型下柴油机微粒的热泳沉降 [J]. *燃烧科学与技术*, 2010, 16(1): 11-17.
- NING Zhi, LU Xiao, FU Juan, et al. Thermophoresis deposition of diesel particulates in laminar flow tube under different entrance conditions [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2010, 16(1): 11-17.
- [27] 陆小明, 葛蕴珊, 韩秀坤, 等. 生物柴油发动机颗粒排放物粒径及其分布试验研究 [J]. *环境科学*, 2007(4): 701-705.
- LU Xiaoming, GE Yunshan, HAN Xiukun, et al. Experimental study on particle size distributions of an engine fueled with blends of biodiesel [J]. *Environmental Science*, 2007(4): 701-705.
- [28] 李子文, 林柏泉, 郝志勇, 等. 煤体孔径分布特征及其对瓦斯吸附的影响 [J]. *中国矿业大学学报*, 2013

- (6): 1047-1053.
- LI Ziwen, LIN Boquan, HAO Zhiyong, et al. Characteristics of pore size distribution of coal and its impact on gas adsorption [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013(6): 1047-1053.
- [29] 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 CSAE, 2015, 31(18): 79-84.
- [30] 杨书申, 邵龙义. MATLAB 环境下图像分形维数的计算 [J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(4): 478-482.
- YANG Shushen, SHAO Longyi. Estimation of fractal dimensions of images based on MATLAB [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(4): 478-482.
- [31] 陈髯, 梅德清, 顾萌, 等. 基于分形理论和热重分析的柴油机颗粒物物理特性研究 [J]. 内燃机工程, 2016(6): 50-55.
- CHENG Zong, MEI Deqing, GU Meng, et al. Study on physical features of diesel particulates based upon fractal theory and thermo-gravimetric analysis [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2016(6): 50-55.
- [32] 王武林, 张旭东, 匡欣, 等. 柴油机燃用生物柴油的燃烧和排放性能研究 [J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2017(2): 58-62.
- WANG Wulin, ZHANG Xudong, KUANG Xin, et al. Investigation on combustion and emissions characteristics of diesel engine fueled with biodiesel [J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2017(2): 58-62.
- [33] 赵怀北, 王忠, 刘帅, 等. 柴油机排气颗粒物的力学特征与空间结构 [J]. 内燃机学报, 2018(2): 120-126.
- ZHAO Huaibei, WANG Zhong, LIU Shuai, et al. Mechanical characteristics and spatial structure of diesel engine exhaust particles [J]. Transactions of CSICE, 2018(2): 120-126.
- [34] 李新令, 黄震, 王嘉松, 等. 柴油机排气颗粒浓度和粒径分布特征试验研究 [J]. 内燃机学报, 2007, 25(2): 113-117.
- LI Xinling, HUANG Zhen, WANG Jiasong, et al. Investigation on concentrations and size distribution characteristic of particles from diesel engine [J]. Transactions of CSICE, 2007, 25(2): 113-117.
- [35] 鞠洪玲, 成晓北, 陈亮, 等. 柴油机缸内碳烟颗粒形成过程与尺寸分布特性 [J]. 内燃机工程, 2011(6): 24-30.
- JU Hongling, CHENG Xiaobei, CHEN Liang, et al. Soot particle formation process and size distribution characteristics in cylinder of diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2011(6): 24-30.
- [36] 宋金瓯, 姜泽军, 姚春德, 等. 采用简化燃烧室研究柴油机缸内流动 [J]. 工程热物理学报, 2008, 29(8): 1411-1414.
- SONG Jinou, JIANG Zejun, YAO Chunde, et al. Numerical analysis of swirl in a diesel engine with simplified combustion chambers [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(8): 1411-1414.
- [37] 杨芳玲. 柴油机缸内颗粒碰撞与凝并过程研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2017: 34-35.
- [38] 陈亮, 成晓北, 颜方沁, 等. 基于改进的详细碳烟模型的柴油燃烧碳烟颗粒物的生成特性 [J]. 燃烧科学与技术, 2013, 19(3): 234-240.
- CHEN Liang, CHENG Xiaobei, YAN Fangqin, et al. Soot formation characteristics in diesel combustion process based on an improved detailed soot model [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2013, 19(3): 234-240.

(编辑 陶晴 荆树蓉)