柴油机排气颗粒的力学特征与形貌分析

赵怀北^{1*}, 王忠¹, 刘帅¹, 李瑞娜¹, 冯渊²

1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013;

2. 无锡职业技术学院汽车与交通学院, 无锡 214121

* 联系人, E-mail: huaibei_zhao@126.com

2017-01-07 收稿, 2017-05-02 修回, 2017-05-02 接受, 2017-07-17 网络版发表

国家自然科学基金(51376083)和江苏省高校自然科学研究面上项目(15KJB470001)资助

摘要 采用Hamaker等理论模型计算分析了理想状态下颗粒-颗粒间的作用力; 采用原子力显微镜以及透射电子显微镜试验的方法, 考察了干燥环境下(相对湿度 $RH \leq 20\%$)排气颗粒间总的吸引力、黏附力以及黏附能, 探究了排气颗粒粒径对粒子间作用力及颗粒形貌的影响关系. 结果表明: 颗粒粒径由25 nm增加到45 nm过程中, 单颗粒之间的范德华力增加4.6倍, 静电力增大9.9倍, 相比范德华力, 静电力较小. 颗粒间黏附力与黏附能均增加了1.8倍. 通过AFM试验, 对平均粒径分别为30, 37, 46 nm的团簇颗粒进行测量, 发现随着粒径增大, 颗粒间总的吸引力 F_{at} 逐渐增大, 为1.04~1.38 nN, 范德华力 F_{vdw} 是 F_{at} 中的主要作用力, 库仑力较小. 吸引力 F_{ad} 与黏附能 W_{ad} 随着颗粒粒径增大而增加, F_{at} 由3.21 nN增大到3.75 nN, 增大约16.8%, W_{ad} 由 2.03×10^{-16} J 增大到 2.20×10^{-16} J, 增大约8.4%, F_{ad} 与 W_{ad} 的增大充分反映了颗粒间的黏附性增强, 颗粒间能量势垒增大, 团簇颗粒间更为稳定. 随着颗粒平均粒径的增大, 导致了颗粒间吸引力、黏附力及黏附能增大, 颗粒逐渐团聚, 由枝状向簇状转变, 逐渐呈山峰状堆积, 颗粒致密度、团簇大小均增大, 说明颗粒间作用力的变化与颗粒形貌之间存在一定的影响关系.

关键词 柴油机, 排气颗粒, 力学特征, 颗粒形貌

柴油机排气颗粒物是大气污染物 $PM_{2.5}$ 的主要来源之一, 对人体与环境都将造成一定危害^[1]. 随着国五排放法规的实施, 对柴油机颗粒排放的质量和数量提出了更加严格的限制. 柴油机排气颗粒经历着成核、表面生长、团聚等过程, 其中团聚过程对颗粒数密度与尺度等影响较大^[2,3]. 有必要开展柴油机排气颗粒间的作用力研究, 探讨作用力与颗粒团聚的影响关系.

颗粒间作用力是影响颗粒团聚过程和相关特性参数变化的重要因素, 主要的作用力包括范德华力、静电力和液桥力等^[4,5]. 围绕柴油机排气颗粒的力学特征与形貌, 国内外学者开展了相关研究工作. 文献[6]提出, 碳烟颗粒间吸引力(F_{at})和黏附力(F_{ad})是

颗粒团聚特性重要表征参数, F_{at} 的大小反映了颗粒间因相互吸引而发生团聚的难易程度, F_{ad} 的大小说明了颗粒间的团聚程度. 文献[7]对颗粒间的作用力展开了研究, 结果表明, 在干燥环境下, 颗粒间液桥力消失, 范德华力是颗粒间相互吸引的主要贡献力, 其次为库仑力. 文献[8]采用原子力显微镜, 研究了柴油机火焰中碳烟颗粒的形貌特征, 基于二维/三维图像分析了颗粒表面形貌与粒径分布, 结果表明原子力显微镜在测量微观颗粒物形貌特征方面具有较高的准确度. 文献[9]中采用原子力显微镜, 研究了柴油机颗粒形貌, 从颗粒的堆积程度、团簇大小、致密度等方面表征颗粒形貌特征.

为深入研究柴油机排气颗粒间的微作用力与形

引用格式: 赵怀北, 王忠, 刘帅, 等. 柴油机排气颗粒的力学特征与形貌分析. 科学通报, 2017, 62: 3498–3505

Zhao H B, Wang Z, Liu S, et al. Analysis on the morphology and mechanical characteristics of agglomerated particles emitted from the diesel exhaust process (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 3498–3505, doi: 10.1360/N972017-00023

貌特征,笔者主要采用Hamaker^[10]理论,对理想状态下不同粒径颗粒间范德华力、静电力、黏附力和黏附能进行了研究,并分析了变化规律;采用原子力显微镜结合高倍透射电子显微镜对团簇颗粒间作用力与形貌特征进行测量.通过对排气颗粒间作用力与形貌的研究,以期获得二者的变化规律与影响关系.

1 颗粒力学特征

一般认为柴油机排气颗粒为非刚性球体,变形距离一定,且处于平衡状态^[11],黏附力则主要取决于颗粒间接触面积^[4].在考虑环境湿度为RH≤20%情况下,颗粒团聚过程主要受到范德华力、静电力、黏附力的影响,黏附能的大小反映了颗粒间能垒的高低,是反应颗粒黏结稳定性的重要参数.颗粒间范德华力大小主要取决于粒径、颗粒间距等参数;静电力主要受到颗粒中心间距、所带电荷量等因素的影响.

1.1 样本颗粒的粒径分布

为研究柴油机排气颗粒间作用力与颗粒形貌的影响关系,以186FA单缸柴油机为试验用机,采集靠近排气口约为5倍排气管处的颗粒物,并对采集后的颗粒进行密封、避光保存,以避免环境因素对颗粒相关物性的影响.图1为186FA单缸试验用柴油机在最大扭矩转速2700 r/min,75%负荷下采集颗粒的粒径分布曲线.如图所示,颗粒粒径分布近似呈现正态分布,主要集中在粒径为20~50 nm的颗粒物,其中25~45 nm颗粒最多,粒径>50 nm的颗粒数相对较少.

本文针对柴油机排气颗粒,选取粒径25~45 nm颗

图1 颗粒粒径分布

Figure 1 Particulate matter diameter distribution

粒,分析了颗粒间的力学特征与颗粒形貌,并探讨了二者的影响关系.

1.2 颗粒力学特征参数

(i) 范德华力. 根据Hamaker^[10]的研究,颗粒是由大量原子和分子组成,原子或分子在靠近接触时,在电偶极作用下将产生相互吸引的范德华势能.当颗粒相互靠近,间距在1~100 nm时,在颗粒间产生相互吸引的作用力,即颗粒-颗粒间的范德华力,计算方程如下式所示:

$$F_{\text{vdw}} = -\frac{H_a}{3} \frac{32R^6(d+2R)}{d^2(d+4R)^2(d^2+4Rd+4R^2)^2}, \quad (1)$$

式中, R 为颗粒半径,单位nm. d 为颗粒间距离,一般取16.5~40 nm^[12], H_a 为Hamaker常数.

(ii) 静电力. 流场中运动的颗粒由于相间摩擦、阴阳离子吸附等作用而带有一定的电荷.当两个颗粒分别带电荷量为 q 、中心间距为 $(R+d)$ 时,颗粒-颗粒间的静电力为^[13]

$$F_c = k \frac{q^2}{(R+d)^2}. \quad (2)$$

Kitteson等人^[14]基于一台单缸试验用柴油机,研究了排气颗粒自然带电量 q_{PM} 与粒径 $(2R)$ 的关系,自然带电量与颗粒粒径成正比.相关理论公式如下式所示:

$$q_{PM} \propto (2R)^{3/4}, \quad (3)$$

$$\frac{dq_{PM}}{dt} = \frac{e}{4\epsilon_0} \mu_i n_i q_s \left(1 - \frac{q_{PM}}{q_s}\right)^2, \quad (4)$$

$$q_s = \left(1 + 2 \frac{\epsilon_{PM} - 1}{\epsilon_{PM} + 2}\right) \frac{\epsilon_0}{e} (2R)^2, \quad (5)$$

式中, q_s 为颗粒饱和电荷量, e 为基本电荷, μ_i 为离子迁移率, n_i 为离子数密度, ϵ_{PM} 相对介电系数, ϵ_0 介电系数^[15].

(iii) 黏附力. 如图2(a)所示,当两个颗粒相互接触时,若接触表面具有一定黏性或产生黏结键,颗粒间产生了黏附力,使得颗粒不易发生分离.黏附力的大小不仅受到颗粒本身的影响,如分子结构、化学成分、表面特性,还受到外部环境的影响.计算公式如下式所示^[4,16]:

$$F_N = \lambda \frac{\partial u(y - \Delta y / z)}{\partial y} \Delta y \Delta z. \quad (6)$$

团聚体颗粒处于平衡状态,故式(6)转换为

图2 黏附与破碎示意图. (a) 黏附状态; (b) 破碎过程

Figure 2 Schematic diagrams of particles adhesion and fragmentation. (a) and (b) are adhesion state and crushing process

$$F_N = \lambda u A_0, \quad (7)$$

$$A_0 = \pi r_0^2 = \pi \left[R^2 - (R-x)^2 \right], \quad (8)$$

式中, r_0 为接触面的半径, R 为颗粒半径, x 取压缩距离 S 的一半^[11], 为简便计算暂且考虑 $x < R$ 情况. A_0 为两颗粒接触面积, 是与颗粒接触面积相关的函数, λ 为黏附系数, u 为团聚体颗粒平衡速度^[17].

(iv) 黏附能. 黏附能是反映粘连颗粒克服彼此束缚而发生相互脱离时所需的最低能量势垒^[18]. 如图2(b)所示, 根据Kevin等人^[19]和Chen等人^[20]的研究结果, 假设在黏附颗粒两侧施加作用力 F ($F = F_n + \Delta F$), 当 ΔF 大于零时, 黏附颗粒将发生相对反向位移, 直至破碎. 根据假设, 当 $\lim \Delta F \rightarrow 0^+$, 即 $F \rightarrow F_n$, 颗粒发生破碎, 记 F_n 在相对位移 S 上做的功表示颗粒间黏附能垒, 表示黏附颗粒发生在破碎时, 需要克服的最低能量势垒. 黏附能的大小充分反映了颗粒团聚的紧密程度, 当黏附能越大时, 颗粒间的粘连越稳固, 不易发生破碎.

$$W_n = \int_0^S F_n dx. \quad (9)$$

2 作用力与形貌测量

2.1 原子力显微镜

如图3(a)为原子力显微镜(atomic force microscope, AFM), 主要工作原理是利用微悬臂接触试验样品, 通过对微悬臂的弯曲变形进行测量, 再将悬臂的形变信号转换成光电信号并进行放大处理, 从而可获得尖细探针与受测样品间的微弱作用力与被测样品表面形貌等信息. 试验选用美国Bruker公司的Dimension Icon型原子力显微镜, 如图3(a)所示. 选用NSG-10型单晶硅接触式探针, 探针曲率半径为10 nm, 悬臂长450 μm , 弹性常数 K_c 为3.1~37.6 N/m, 测

图3 (网络版彩色)试验仪器. (a) 原子力显微镜; (b) 高分辨率透射电子显微镜

Figure 3 (Color online) The test equipments (a) and (b) are atomic force microscopy and high-resolution transmission electron microscopy

定前用热调制法确定探针的具体 K_c 值. 在Peak Force Tapping TM模式下, 分别测量颗粒样品的二维/三维形貌和力-位移曲线. 整个测试的过程是在25 $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度约20%的条件下完成的.

2.2 高分辨率透射电子显微镜

如图3(b)所示, 高分辨率透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM)是一种以短波为照明光源, 以电磁场为透镜, 具有分辨率和放大倍数高等优点的光学显微镜, 可对试验样品微观形貌与结构进行测量. 试验采用日本JEOL公司的JEM-2100 (HR)型高分辨透射电子显微镜对颗粒样品的微观形貌进行拍摄, 如图3(b)所示. JEM-2100(HR)型透射电子显微镜的加速电压为200 kV, 放大倍数为2000倍~150万倍, 点分辨率为0.24 nm, 晶格分辨率为0.14 nm.

3 结果与分析

3.1 单颗粒间作用力分析

(i) 范德华力与静电力. 图4所示为粒径25~45 nm颗粒间的范德华力与静电力随颗粒间距的变化关系. 从图中可以看出, 范德华力大小为 1×10^{-15} N, 静电力大小为 1×10^{-17} N. 随着颗粒粒径的增大, 颗粒-颗粒间的范德华力增加, 由25 nm的 1.08×10^{-15} N增大到45 nm的 4.95×10^{-15} N; 静电力增大, 由25 nm的 1.11×10^{-17} N增大到45 nm的 11.82×10^{-17} N. 范德华力和静电力均为颗粒间相互吸引的作用力, 由于柴油机排气颗粒在自然状态下, 所带净电荷较少, 其产生的静电力较微弱, 相比范德华力低2个数量级. 文献[13]的研究同样表明了颗粒间距为纳米级时, 范德华力与静电力的差距将接近或超过2个数量级, 范德华力是导致颗粒间吸附的主要作用力.

图4 (网络版彩色)范德华力及静电力随粒径的变化关系
Figure 4 (Color online) The Van der Waals forces and electrostatic forces under different compression diameters

(ii) 黏附力与黏附能. 图5所示为颗粒-颗粒间黏附力及黏附能随颗粒粒径的变化关系. 根据理论模型, 选取颗粒间压缩距离 S 为 $1\text{ nm}^{[11]}$, 考虑颗粒处于相对平衡的静止状态, 获得颗粒间黏附力与黏附能的变化规律. 可以看出, 随着颗粒粒径的增加, 颗粒间黏附力与黏附能呈现出线性增大的趋势, 黏附力与黏附能分别为 $0.154 \times 10^{-15} \sim 0.281 \times 10^{-15}\text{ N}$ 和 $0.151 \times 10^{-15} \sim 0.277 \times 10^{-15}\text{ J}$. 这反映了, 随着颗粒粒径的增加, 颗粒-颗粒间的黏结作用加强, 颗粒间能量势垒增大, 黏结颗粒发生破碎时所需克服的最低能量势垒升高, 黏结的颗粒趋于稳固.

3.2 作用力测量与分析

(i) 吸附力与黏附力. 根据高倍透射电子显微镜测量结果, 获得3组颗粒平均粒径分别为30, 37, 46

图5 (网络版彩色)颗粒间黏附力及黏附能随颗粒粒径的变化
Figure 5 (Color online) The adhesion forces and adhesion energy under different compression diameters

nm, 依次标记为a, b, c, 分别采用原子力显微镜对3组团簇颗粒作用力的测量试验. 图6(a)为团簇颗粒a的原子力测量过程, 图6(b)和(c)为采取与图6(a)相同的测量条件和步骤所获得的数据. 从图6中可以看出, 在横坐标0附近, 接近和撤回过程的力-位移曲线均出现明显跳动, 分别表示探针“Jump-on”阶段的吸引

图6 (网络版彩色)团簇颗粒的力-位移曲线. (a) 颗粒样品a; (b) 颗粒样品b; (c) 颗粒样品c
Figure 6 (Color online) The force-displacement curve of particles. (a) Particle sample a; (b) particle sample b; (c) particle sample c

力 F_{at} 和“Pull-of”阶段的黏附力 F_{ad} , 且黏附力 F_{ad} 显著大于吸引力 F_{at} , 黏附力的 F_{ad} 作用范围明显大于吸引力 F_{at} . 图6为 F_{at} 和 F_{ad} 随颗粒粒径的变化曲线, 可以看出, 随着颗粒粒径的增大, 吸引力 F_{at} 与黏附力 F_{ad} 均有所增大, 分别为1.04, 1.22, 1.38 nN和3.21, 3.57, 3.75 nN. 颗粒与探针靠近时, 范德华力对吸引力 F_{at} 起着主要贡献作用, 贡献率超过65%^[19]; 黏附力 F_{ad} 的增大, 主要是由于颗粒粒径增大, 使得颗粒/探针间的接触面积相应增加, 颗粒对探针的包裹与黏附作用增强. 此外 F_{ad} 明显大于 F_{at} , 这主要是由于探针/颗粒接触区域产生一定黏结键^[21], 以及力-位移曲线滞后引起的^[22].

(ii) 黏附能. 如图6(a)所示, 探针由C点撤回D点的过程可分为两个明显阶段: $C \rightarrow X_1$ 阶段, 该过程主要是悬臂由弯曲到自由状态的恢复阶段; $X_1 \rightarrow D$ 阶段, 该过程悬臂克服颗粒对探针的黏附阶段. 采用积分方法获得探针/颗粒分离时克服的黏附能, 以此可较好地反映柴油排气过程中, 颗粒之间黏附能的变化规律, 其数值可用图6(a)中积分面积表示. 积分公式^[7]如下式所示:

$$W_{ad} = \int_{X_2}^{X_1} f_{ad(i)} dz, \quad (10)$$

式中, $f_{ad(i)}$ (i 取a, b, c)分别为a, b, c 3组团簇颗粒的力-位移曲线 $X_1 \rightarrow D$ 段. 图7所示为排气颗粒与探针在脱离过程中所产生的黏附能. 可以看出, 黏附能在 $2.03 \times 10^{-16} \sim 2.20 \times 10^{-16}$ J范围内, 随颗粒平均粒径的增大, 黏附能增加, 说明探针从团簇颗粒中脱离时做功增加, 同时也反映了颗粒粒径的增大使得颗粒间黏附作用将增强、能量势垒升高.

图7 颗粒/探针间黏附能

Figure 7 The adhesion energy of particles at different sampling points

3.3 颗粒形貌

图8为采用高倍透射电子显微镜和原子力显微镜得到的3组颗粒的TEM 2D和AFM 3D图像. 根据TEM图像, 可以看出, 3组团簇颗粒均由一定数量的准球形碳粒子相互粘连组成, 最终形成了状态各异的颗粒微团. a, b, c 3组团簇颗粒, 堆叠渐趋明显, 颗粒平均粒径有所增大, 依次为30, 37, 46 nm. 相关研究^[23,24]表明, 颗粒碰撞与凝并效率主要受初态颗粒粒径与颗粒数的影响, 表现为粒径差异越大、初态粒子数越多, 颗粒碰撞与凝并的效率越高, 导致了形成的次生颗粒粒径的增大. 因此, 颗粒的平均粒径增大, 可能是由于初态粒子的粒径差异与颗粒数增大造成的. 通过颗粒的AFM形貌图像可以看出, 3组颗粒在基板

图8 团簇颗粒的TEM与AFM形貌图. (a) 颗粒样品a; (b) 颗粒样品b; (c) 颗粒样品c

Figure 8 The TEM and AFM morphology of particles. (a) Particle sample a; (b) particle sample b; (c) particle sample c

上呈现出不同程度的聚集分布,随着颗粒平均粒径的增大,颗粒聚集程度有所增强,颗粒形貌呈现出不同分布特征,颗粒致密度逐渐增大。

结合颗粒间的力学特征,分析认为,颗粒粒径增大,在相同的作用距离下,颗粒-颗粒间的范德华力增大4.6倍,库仑力增大9.9倍,由于范德华力对颗粒间总的吸引力起主要贡献作用,这使得颗粒间吸引作用加强,颗粒更易发生团聚。颗粒粒径增大,考虑颗粒间压缩距离基本不变的情况下,颗粒间接触面积增大,颗粒间黏附力与黏附能显著增大,颗粒间的粘连作用增强,能量势垒增加,使得颗粒发生破碎时需克服的最低能垒升高,颗粒团聚更加稳固。

4 结论

针对186FA试验用柴油机,研究了其最大扭矩点,75%负荷下的3组不同的排气团簇颗粒a, b, c,分析了颗粒物的力学特性与形貌,得出如下结论:

(1) 采用Hamaker等理论模型研究了单颗粒间作

用力的变化规律。随着颗粒粒径增大,在相同作用距离下,颗粒间范德华力增大4.6倍,静电力增大9.9倍,静电力较为微弱,相比范德华力低两个数量级;黏附力与黏附能增大,分别为 $0.154 \times 10^{-15} \sim 0.281 \times 10^{-15}$ N和 $0.151 \times 10^{-15} \sim 0.277 \times 10^{-15}$ J。

(2) 基于试验的方法,进行了颗粒间吸引力、黏附力及能垒的测量。随着颗粒粒径的增大,团簇颗粒与探针间总的吸引力 F_{at} 增大,范德华力是其中主导作用力,贡献率在65%以上;黏附力 F_{ad} 与黏附能 W_{ad} 增大,分别为 $3.21 \sim 3.75$ nN, $2.03 \times 10^{-16} \sim 2.20 \times 10^{-16}$ J,说明颗粒间的黏附作用更明显,发生相互脱离时需克服的最低能量势垒更高。

(3) 颗粒粒径的不同导致颗粒间吸引力、黏附力等发生变化,使得颗粒的团聚程度和排列致密度出现差异。颗粒粒径增大,使得颗粒间吸引力、黏附力及黏附能增加,颗粒易于发生团聚,由枝状逐渐向簇状转变,且颗粒粘连作用增强,团簇颗粒致密度增大,山峰状堆积渐趋明显,颗粒间更加稳固。

参考文献

- Kennedy I M. Models of soot formation and oxidation. *Progress Energy Combustion Sci*, 1997, 23: 95–132
- Hong L. Study on the Morphological and Nanostructural Characterization and Agglomeration Forces of Soot Particles Formed in pre-mixed Flames (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Tianjin: Tianjin University, 2012 [洪亮. 预混火焰碳烟颗粒的形貌结构特征及团聚力的研究. 硕士学位论文. 天津: 天津大学, 2012]
- Wang X C, Ge Y S, Tan J W, et al. Research on PM from diesel engine fueled with biodiesel based on size distribution (in Chinese). *Vehicle Power Tech*, 2009, 4: 52–57 [王小臣, 葛蕴杉, 谭建伟, 等. 基于尺寸分布的生物柴油排气微粒形态研究. 车辆与动力技术, 2009, 4: 52–57]
- Wei F. Study on Sub-Micron Particle Formation and Agglomeration Mechanism from Coal Combustion (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2005 [魏凤. 燃煤亚微米颗粒的形成和团聚机制的研究. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2005]
- Dobias B. Coagulation and Flocculation: Theory and Applications. New York: Marcel Dekker, 1993. 263–320
- D'Alessio A, Barone A C, Cau R, et al. Surface deposition and coagulation efficiency of combustion generated nanoparticles in the size range from 1 to 10 nm. *Proc Combust Inst*, 2005, 30: 2595–2603
- Price R, Young P M, Edge S, et al. The influence of relative humidity on particulate interactions in carrier-based dry powder inhaler formulations. *Int J Pharmaceut*, 2002, 246: 47–59
- Barone A C, D'Alessio A, D'Anna A. Morphological characterization of the early process of soot formation by atomic force microscopy. *Combust Flame*, 2003, 132: 181–187
- Zhao Y, Xu G J, Li M D, et al. An analysis on the micro-morphology and structure rigidity of particulates emitted from a diesel engine with EGR (in Chinese). *Aut Eng*, 2016, 38: 1052–1058 [赵洋, 许广举, 李铭迪, 等. 柴油机 EGR 氛围下颗粒微观结构与结构刚度的分析. 汽车工程, 2016, 38: 1052–1058]
- Hamaker H C. The London-Van Der Waals attraction between spherical particles. *Physica*, 1937, 4: 1058–1072
- Yang F L, Wang Z, Zhao Y, et al. Coalescence features of planar collision between particulate matters of same diameter from diesel engine (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 1379–1385 [杨芳玲, 王忠, 赵洋, 等. 柴油机等径颗粒平面碰撞过程凝并特征. 科学通报, 2016, 61: 1379–1385]
- Zhang W B, Qi H Y, You C F, et al. Mechanical analysis of agglomeration and fragmentation of particles during collisions (in Chinese).

- Tsinghua Sci Tech, 2002, 42: 1639–1643 [张文斌, 祁海英, 由长福, 等. 碰撞诱发颗粒团聚及破碎的力学分析. 清华大学学报, 2002, 42: 1639–1643]
- 13 Liu G Q. Discrete Element Methods of Fine in Presence of Van Der Waals and Electrostatic Forces (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Tsinghua University, 2011 [柳冠青. 范德华力和静电力下的细颗粒离散动力学研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2011]
- 14 Kitteson D, Pui D, Moon K. Electrostatic collection of diesel particles. SAE Paper No. 860009, 1986
- 15 Liu B Y, Yeh H C. On the theory of charging aerosol particles in an electric field. J Appl Phys, 1968, 39: 3
- 16 Wang Y M, Lin J Z. Collision efficiency of two nanoparticles with different diameters in the Brownian coagulation (in Chinese). Appl Math Mech, 2011, 32: 956–963 [王玉明, 林建中. Brown 凝并中两个不同直径纳米颗粒的碰撞系数. 应用数学和力学, 2011, 32: 956–963]
- 17 Ning Z, Zi X Y, Wang X C. Study on the effect of fluctuant exhaust on the aggregation of diesel exhaust particulate (in Chinese). J Combust Sci Tech, 2002, 8: 503–506 [宁智, 资新运, 王宪成. 脉动排气对柴油机微粒凝并作用的研究. 燃烧科学与技术, 2002, 8: 503–506]
- 18 Wang H C, Kasper G. Filtration efficiency of nanometer-size aerosol particles. J Aerosol Sci, 1991, 22: 31–41
- 19 Kevin K, Carl S. Adhesion and aggregation of fine particles. Powder Tech, 2001, 121: 223–229
- 20 Chen N, Song C L, Lv G, et al. Atom force microscopy analysis of the morphology, attractive force, adhesive force and Young's modulus of diesel in-cylinder soot particles. Combust Flame, 2015, 162: 4649–4659
- 21 Burnham N A, Dominguez D D, Mowery R L, et al. Probing the surface forces of monolayer films with an atomic-force microscope. Phys Rev Lett, 1990, 64: 1931–1934
- 22 Weisenhorn A L, Maivald P, Butt H, et al. Measuring adhesion, attraction, and repulsion between surfaces in liquids with an atomic-force microscope. Phys Rev B, 1992, 45: 11226–11232
- 23 Fan J R, Yao J, Zhang X Y, et al. Modeling particle-to-particle interactions in gas-solid flows (in Chinese). J Eng Therm, 2002, 42: 1639–1643 [樊建人, 姚军, 张新育, 等. 气固两相流中颗粒-颗粒随机碰撞新模型. 工程热物理学报, 2002, 42: 1639–1643]
- 24 Yang F L, Wang Z, Zhao Y, et al. Particle collision and coalescence during diesel fuel combustion process (in Chinese). Transact CSICE, 2015, 33: 496–501 [杨芳玲, 王忠, 赵洋, 等. 柴油机燃烧颗粒碰撞凝并过程. 内燃机学报, 2015, 33: 496–501]

Summary for “柴油机排气颗粒的力学特征与形貌分析”

Analysis on the morphology and mechanical characteristics of agglomerated particles emitted from the diesel exhaust process

ZHAO HuaiBei^{1*}, WANG Zhong¹, LIU Shuai¹, LI RuiNa¹ & FENG Yuan²

¹ School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

² School of Automotive and Traffic, Wuxi Institute of Technology, Wuxi 214121, China

* Corresponding author, E-mail: huaibei_zhao@126.com

The diesel engine particulate which is one of the major sources of PM, affects the development of human health and production activities seriously. With the continuous strict of emission regulations, the diesel engine particles are subject to strict restriction in terms of quality and quantity. At present, the diesel particulate filter technology is an important technical measure to reduce the exhaust particulate matter of the diesel engine. And the efficient capture of particles is one of the key technologies for the diesel particulate filter. Diesel engine exhaust particles undergo nucleation, surface growth, agglomeration and other processes, in which the degree of agglomeration of exhaust particles will directly affect its number density, scale and the trapping efficiency of the filter and so on. The reason why particles can be agglomerated is mainly due to the interaction between the particles. Therefore, to explore the relationship between the force and the effect of particle agglomeration, it is necessary to carry out the study on the interaction between the exhaust particles of diesel engines. The interaction between particles will affect the process of particle agglomeration and related parameters significantly. The main forces include van der Waals force, electrostatic force and liquid bridge force. In this paper, theoretical models of Hamaker and some others are used to analyze the force between particles in the ideal state. The test methods of atomic force microscopy (AFM) and transmission electron microscopy (TEM) are used to investigate the total attraction force, adhesion force and adhesion energy between diesel exhaust particulates in dry environment (relative humidity $RH \leq 20\%$), and measure the total attraction force, adhesion force and adhesion between particles, and explore the relationship between particle size and particle size. The results show that the particle size increases from 25 to 45 nm, the Van der Waals force increases about 4.6 times, the electrostatic force increases about 9.9 times, and the electrostatic force is smaller than the electrostatic force. The adhesion between particles and adhesion energy both increased about 1.8 times. The particles with the average particle size of 30, 37 and 46 nm are measured by AFM. With the increase of the particle size, the total attraction F_{at} between the particle and the probe increases gradually, which is 1.04–1.38 nN. Van der Waals force F_{vdw} is the main force of the F_{at} , and Coulomb force is smaller. The attraction force F_{at} and the adhesion energy W_{ad} increase with the increase of particle size, F_{at} increases from 3.21–3.75 nN, about 16.8%, while W_{ad} increases from 2.03×10^{-16} J to 2.20×10^{-16} J, about 8.4%. The increase of F_{ad} and W_{ad} indicate that the adhesion as well as the energy barrier between the particles is increased, and the particle agglomeration is stable. With the increase of the average particle size, the particles agglomerate gradually and change from branch to cluster, showing a hill-like accumulation, and the particle density as well as the cluster size are increased, which indicates that there was a certain influence between the change of particle force and particle morphology.

diesel engine, exhaust particle, mechanical characteristics, particle morphology

doi: 10.1360/N972017-00023