DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2017.07.020

装有 NTP 装置的柴油机排放颗粒物的热重特性

高建兵1,马朝臣1,邢世凯2,刘江权1,孙丽玮1,葛蕴珊1

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081;2. 河北师范大学 职业技术学院, 石家庄 050024)

摘 要:为解决低温等离子体(NTP)发生器再生的问题,用热重分析仪研究发动机不同工况下采集颗粒物的氧化特性.结果 表明:不同负荷下,原始颗粒物中挥发性有机成分(VOC)质量分数差别较大,微粒聚集体中 VOC 质量分数差别较小;对于原 始颗粒物和微粒聚集体,高挥发性有机成分(HVOC)在 VOC 中所占比重随负荷的增加而增加;原始颗粒物的热重曲线随负荷 的增加变化不明显,微粒聚集体的热重曲线显著左移;微粒聚集体氧化所需的时间较原始颗粒物长;不同柴油机负荷,在恒温 氧化条件下,原始颗粒和微粒聚集体的活化能变化不明显,流经 NTP 发生器后逃逸到大气中的颗粒物的活化能显著高于原始 颗粒物和微粒聚集体的活化能.

关键词:柴油机颗粒物;低温等离子体;热重特性;氧化活性;反应动力学

中图分类号:TK421.2 文献标志码:A 文章编号:0367-6234(2017)07-0125-06

Thermogravimetric characteristics of particulate matter emitted by a diesel engine with NTP technology

GAO Jianbing¹, MA Chaochen¹, XING Shikai², LIU Jiangquan¹, SUN Liwei¹, GE Yunshan¹

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Vocational and Technical, Hebei Normal University, Shijiazhuang, 050024, China)

Abstract: To resolve the regeneration problem of non-thermal plasma (NTP) reactor, the oxidation behaviors of particulate matter (PM) sampled at different engine loads were investigated using thermogravimetric analyzer. The results showed that the content of volatile organic compounds (VOC) differed great at different engine loads in raw PM but little in PM aggregation, and the percentage of the high volatile organic compounds (HVOC) in VOC increased with engine load. Little difference was observed for the oxidation behaviors of raw PM collected at different engine loads while the profiles of oxidation activity of PM aggregation moved toward left when increasing engine load. Longer time was needed to oxidize PM aggregation than raw PM. At isothermal condition, the activation energy was similar for raw PM and PM aggregation, however, the activation energy of the PM escaping from non-thermal plasma reactor was higher than that of raw PM and PM aggregation.

Keywords: diesel particulate matter; non-thermal plasma; thermogravimetric; oxidation reactivity; reaction kinetics

柴油机燃烧效率高,动力性强,使用寿命长,在 市场上所占的份额逐年提高,欧洲国家,柴油机所占 比重高达 53%^[1].与汽油机相比,柴油机颗粒物的排 放因子较高,且附着有大量有毒、有害物质,颗粒物 是近年来雾霾形成的主要因素之一,给环境和人类 健康带来严重的危害.低温等离子体作为一种有效 的柴油机后处理技术,能有效净化柴油机尾气中的 颗粒物^[2-5].低温等离子体对柴油机颗粒物的净化作 用主要包括捕集和氧化:尾气流经低温等离子发生 器(NTP发生器)的等离子体区域时,部分颗粒物在 大量的高能电子和活性粒子的作用下,被氧化为 CO₂(或 CO)和 H₂O;部分颗粒物在电场力的作用 下,被捕集到 NTP 发生器的极板上.极板上颗粒物 聚集到一定程度时,会引起反电晕现象的发生,进而 导致集尘再飞散,使 NTP 发生器对颗粒物的净化效 果显著降低^[6-9].为了使 NTP 发生器保持较高的净 化效率,实现 NTP 发生器的再生,需要及时氧化掉 附着于极板上的颗粒物.目前的研究主要集中于提 高 NTP 发生器的效率和新型结构的设计^[10-13],而 对于附着于 NTP 发生器极板上颗粒物的氧化特性, 研究得较少.

笔者基于电晕放电原理设计了低温等离子体发 生器,以微粒聚集体、原始颗粒和经过等离子发生器 后逃逸到大气中的颗粒为研究对象,通过恒温加热的 方法,研究了不同工况下微粒聚集体的氧化特性,并 与柴油机原始颗粒物的氧化特性进行了对比;基于阿 伦尼乌斯方程,获得了颗粒物的反应动力学参数.

收稿日期: 2016-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(51476012);

河北省科技计划项目(15273703D)

作者简介:高建兵(1990—),男,博士研究生; 马朝臣(1959—),男,教授,博士生导师

通信作者:马朝臣,mcc1900@bit.edu.cn

1 试验设备与方法

1.1 试验装置

试验所用的柴油机为小排量柴油发电机组,型 号为 KD186FA.柴油机的排量为 0.418 L,转速为 3 000 r/min,额定功率对应的油耗<1.75 L/h;发电 机输出电压为 220 V,输出的额定功率为 5.0 kW.通 过改变发电机的输出功率来调节柴油机的负荷.

图 1 为颗粒物采集装置示意图,为了便于颗粒 的采集,对柴油机原排气系统进行了改造.NTP 发生 器如图中虚线所示.文中设计的 NTP 发生器为针板 式发生器,当放电针与极板间施加高电压时,放电针 与极板间的部分空气被电离,产生大量的高能电子 和活性粒子,当柴油机尾气流经该区域时,尾气中的 部分颗粒物在高能电子和活性粒子的作用下被氧 化;部分流经的颗粒物在等离子区域附着一定量的 带电粒子,在电场力的作用下被捕集到极板上.



图 1 颗粒物采集装置示意图

Fig.1 Scheme of PM sampling

放电针与极板间施加的电压为-7000 V,针板 间距为10mm,采样点 a、b 两点的温度为50 ℃,流 量为30 L/min,采样时间120min,将采集的颗粒物 样品用锡纸包裹,低温密封保存.a、b 两点安装有团 状的细密金属网,用于采集流经 a、b 两点的颗粒物, 每次采集样品时需要更换新的金属网.金属网的直 径为7.5 cm 左右,对柴油机颗粒物的捕集效率 >95%.表1为样品 A~G 的采样条件,发动机转速 为3000 r/min,柴油机负荷分别为60%、80%、 100%.

表1 样品采集条件

Tab.1	Conditions	of	sampl	ling
-------	------------	----	-------	------

样品	柴油机负荷/%	采样位置(图 1)
А	60	a 点
В	60	极板
С	80	a 点
D	80	b 点
Е	80	极板
F	100	a 点
G	100	极板

1.2 热重分析

研究所用热重分析仪型号为 TG-DTA 6200,精 度为 0.001 μ g. 采用三氧化二铝坩埚,载气流量均为 100 mL/min,取样质量为 5 mg.每次热重试验前,热 重分析仪需要加热空烧至 800 °C,恒温 10 min,确保 上次试验残留对本次试验结果没有影响.样品 A、B、 C、E、F、G 在 N₂氛围中,以 15 °C/min 的升温速率, 从室温加热至 450 °C后,自然降温至室温,通过热重 过程中的失重率,确定颗粒物中挥发性有机物 (VOC)的质量分数,研究不同工况下,颗粒物中有 机成分随温度的变化情况.

恒温法:在 N₂氛围中,将每个样品从室温以 15 ℃/min的升温速率分别加热至 600、650、700 ℃ 后恒温,同时将 N₂切换为空气,直至质量不变后,再 降温至室温,样品加热到目标温度时的质量为颗粒 物的初始质量;恒升温速率法:在空气氛围中,以 5、 10、15 ℃/min 的升温速率持续加热,直至质量不变 后,自然降温至室温.样品 C、E、F、G 采用恒温法,研 究不同工况下,原始颗粒和微粒聚集体的氧化特性; 样品 D 同时采用两种方法获得其氧化特性,对比采 用两种方法获得的活化能.

2 结果与分析

2.1 颗粒物中挥发性有机成分的变化

当柴油机尾气流经 NTP 发生器时,部分柴油机 颗粒物在电场力的作用下被捕集到 NTP 发生器的 极板上.等离子体具有强氧化性,由于极板上的颗粒 物在采集过程中长时间处于等离子体区域,与原始 颗粒相比,其物化特性发生了显著的变化.柴油机颗 粒物的主要成分包括水分、有机成分、碳烟、盐类、微 量金属等.在热重分析过程中,挥发温度低于 200 ℃ 的有机成分为高挥发性有机成分(HVOC),挥发温 度为 200~450 ℃ 的有机成分为低挥发性有机成分 (LVOC)^[14].将热重试验中的挥发性有机成分进行 归一化处理,得到 HVOC、LVOC 在热重试验过程中 随温度的变化曲线. 图 2 为 3 种不同发动机负荷下 采集的原始颗粒物和微粒聚集体中挥发性有机成分 随温度的变化关系.

对于发动机原始颗粒物,发动机负荷为 60%, 80%,100%时,VOC 所占比例分别为 53.5%,20.5%, 29.6%;HVOC 在 VOC 中所占比重随发动机负荷的 增加而增加.发动机负荷增大时,缸内的燃烧温度较 高,较高的缸内温度有利于大分子量有机成分的分 解,使 100%负荷时,VOC 的质量分数较 80%负荷时 高.对于 60%、80%负荷,颗粒物在 150 ℃时热重曲 线开始显著下降;热重过程初期,100%负荷采集的 颗粒物的失重速率较 60%、80%负荷采集的颗粒物的失重速率大.



图 2 样品 A、B、C、E、F、G 中挥发性有机成分随温度的变化 Fig.2 VOC content of samples A, B, C, E, F, G along with temperature

对于微粒聚集体,VOC 在 3 种负荷下所占的比 重分别为 14.7%,13.2%,18.7%,VOC 质量分数显著 降低.样品采集过程中,微粒聚集体长时间处于等离 子体区域,等离子区域含有大量的活性粒子和高能 电子,导致微粒聚集体在等离子体区域缓慢氧化,由 于不同负荷下颗粒的活性不同,氧化程度也不同.氧 化过程中,颗粒物的孔隙率、比表面积的变化随氧化 程度的不同,变化情况也不同,使得颗粒物对 VOC 的附着特性发生了改变.80%、100%负荷时,HVOC 在 VOC 中的比例与原始颗粒物相比变化不大,60% 负荷时,HVOC 的比重显著下降.

2.2 颗粒物的氧化特性

在 N₂氛围中,以 15 ℃/min 的升温速率加热至特 定温度后恒温,同时将 N₂切换为空气,观察颗粒物的 质量随时间的变化关系.图 3 和图 4 分别为 80%柴油 机负荷,样品 C、E 在不同恒温(600、650、700 ℃)条件 下,质量分数、失重速率随时间的变化关系.



图 3 样品 C 在不同恒温条件下质量分数及失重速率随时 间的变化

Fig.3 Mass and mass loss rate of sample C at isothermal condition



图 4 样品 E 在不同恒温条件下质量分数及失重速率随时 间的变化

Fig.4 Mass and mass loss rate of sample E at isothermal condition 颗粒物的失重速率曲线呈单峰状分布,恒温温

度越高,颗粒物的热重曲线、失重速率曲线越陡,失 重速率越大,氧化速率越快;原始颗粒物最大失重速 率点对应的时间分别为240、330、480 s.与原始颗粒 物相比,微粒聚集体热重曲线、失重速率曲线显著右 移,最大失重速率点对应的时间增加,氧化速率显著 降低.微粒聚集体长时间处于等离子体环境中,等离 子体区域含有大量的高能电子和活性粒子,使得微 粒聚集体在等离子体区域缓慢氧化,随着氧化程度 的增加,微粒聚集体的石墨化程度加剧,晶体排列结 构更为有序^[15-17],导致颗粒物的活性降低,在相同 加热条件下氧化速率更加缓慢.

图 5 和图 6 为柴油机负荷为 100%时,在恒温条 件下,颗粒物 F、G 在氧化氛围中,热重曲线、失重速 率曲线随时间的变化关系.





Fig.5 Mass and mass loss rate of sample F at isothermal condition

样品在 N₂氛围升温过程中,颗粒物中可挥发性 有机成分和不可挥发性有机成分在高温下逐渐挥发 或分解.颗粒物中的含氧有机成分为颗粒物提供了 活性位点,活性位点有利于颗粒的氧化燃烧;同时, 颗粒物中的无定形碳主要是由于含氧有机成分引起 的,颗粒物中无定形碳质量分数的减少会导致颗粒 物活性的降低. 发动机负荷为 80% 和 100% 的工况 下,原始颗粒物的热重曲线基本不变,说明对于原始 颗粒物中炭黑成分,在 80%、100% 的负荷下,活性差 别不太显著.相比于 80% 发动机负荷,微粒聚集体的 热重曲线右移,且 650 ℃和 700 ℃的偏移程度更为 显著;与 80% 负荷情况相似,微粒聚集体的热重曲 线、失重速率曲线与原始颗粒物相比,显著右移.



图 6 样品 G 在不同恒温条件下的质量分数及失重速率随 时间的变化

Fig. 6 Mass and mass loss rate of sample G at isothermal condition

恒升温速率的热重试验:样品在氧化氛围中持续升温的过程中,对于挥发性有机成分,在450℃范围内,挥发和氧化现象同时发生.图7和图8对比了颗粒物D在恒升温速率氧化条件和恒温氧化条件下颗粒物的热重特性曲线.可见颗粒物在低温度范围内质量变化较为缓慢,主要发生VOC的挥发和氧化;当温度加热至450℃以上时,颗粒物的失重率显著增加,主要是在高温氧化氛围下,炭黑成分快速氧化^[14].





Fig.7 Mass of sample D at non-isothermal condition 升温速率升高时,颗粒物的氧化时间缩短,导致 颗粒物的热重曲线随升温速率的提高而右移.颗粒 物 D 为 80%负荷下,经过等离子体区域后,逃逸到 大气中的颗粒物.与原始颗粒相比,样品 D 的热重 曲线略微右移,但偏移程度较相应工况下的微粒聚 集体的偏移程度小.微粒聚集体氧化所需的时间与 温度、发动机负荷紧密相关,发动机实际运转过程 中,运行工况频繁变化.NTP发生器的再生温度过低 会使微粒聚集体氧化所需的时间显著延长,影响 NTP发生器对尾气中颗粒物的净化效果,甚至导致 NTP发生器再生不完全;再生温度过高,对NTP发 生器耐高温特性提出较高的要求,同时还要求其绝 缘部件在高温下保持良好的绝缘性能.在发动机实 际运行中,应该监测NTP发生器再生前期发动机运 行工况的分布,根据发动机的主要运行工况点和相 应工况点颗粒物的氧化特性确定NTP再生所需的 温度.NTP发生器应该尽可能地布置于发动机排气 管上游位置(靠近排气门),上游位置较高的排气温 度有利于NTP发生器的快速再生.当采用主动方法 再生(电加热再生、缸内后喷再生等)时,上游位置 的布置形式可以降低再生时额外能量的消耗.



图 8 样品 D 在不同恒温条件下的质量分数及失重速率随 时间的变化

Fig. 8 Mass and mass loss rate of sample D at isothermal condition

2.3 颗粒物的氧化动力学分析

计算反应动力学参数的方法有恒温法和恒升温 速率法,这两种方法均是基于 Arrhenius 方程^[18]:

$$-\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t} = km^{n}p_{0_{2}}^{r} = A\exp(-\frac{E}{RT})m^{n}p_{0_{2}}^{r}.$$
 (1)

式中: *m* 为样品的质量,*t* 为时间,*k* 为反应速率常数,*A* 为指前因子,*E* 为活化能,*T* 为时间 *t* 对应的温度,*R* 为理想气体常数,*p*₀₂ 为氧分压,*n*,*r* 分别为碳和氧的反应级数.对于简化的化学反应动力学方程,碳和氧的反应级数一般取 1^[18-20].

在恒温条件下,式(1)可变形为式(2)^[18],

$$-\ln t = \ln \left[\frac{Ap_{0_2}}{-\ln(1-\alpha)} \right] - \frac{E}{RT} \quad . \tag{2}$$

式中 α 为时间t对应的失重率,当 α 为定值时,1/T与 ln t成正比,在不同恒温温度下,通过斜率和截距即 可求得样品的活化能 E 和指前因子A.式(2)为恒温 条件下动力学方程.

恒升温速率情况下,升温速率 $\beta = dT/dt$,失重

率 $\alpha = 1 - (1 - m/m_0), m_0$ 为样品的初始质量, 式(1) 可变形为

$$\ln \frac{\beta d\alpha}{dT} = \ln \left[A p_{0_2} (1 - \alpha) \right] - \frac{E}{RT}.$$
 (3)

式(3)称为微分形式的动力学方程.当失重率 α 为定值时,1/T与 ln βdα/dT 成正比,通过斜率和截 距可求得动力学参数 A 和 E. 在恒温条件下,通过 式(1)计算了颗粒物的活化能. 拟合曲线的相关系 数如表 2 所示. 拟合的曲线的相关系数均>0.94.4 种颗粒物的活化能为 70 kJ/mol 左右.不同发动机负 荷下采集的颗粒物,在各失重率下求得的活化能见 表 2.

表 2 活化能计算结果

Tab.2 Results of activation energy

生玉玄	活化能/(kJ・mol ⁻¹)					
大里平 -	С	D	Е	F	G	\mathbf{D}^n
0.10	75.59	92.98	68.65	87.46	90.14	143.33
0.20	68.51	91.78	69.84	77.32	70.44	85.99
0.30	65.49	90.19	71.54	71.38	65.07	92.78
0.40	64.46	88.36	72.84	67.77	63.21	93.93
0.50	64.55	88.17	73.43	67.58	62.48	95.03
0.60	64.96	88.36	74.8	66.45	62.85	98.41
0.70	66.21	89.33	76.42	66.45	63.58	112.27
0.80	68.76	90.26	78.03	66.45	64.9	116.19
0.90	73.17	92.48	78.88	68.55	66.01	124.62
0.95	76.74	94.22	78.79	69.75	66.8	126.7
平均值	73.17	90.61	74.32	70.92	67.55	108.92
相关性	>0.94	>0.98	>0.96	>0.96	>0.95	>0.85

注: Dⁿ 为恒加热速率条件下求得的颗粒物样品 D 的活化能.

不同失重率下对应的活化能变化不大,100%负 荷下采集的原始颗粒物的活化能略小于 80%负荷 下的原始颗粒物的活化能;80%负荷下,原始颗粒物 的活化能较微粒聚集体略小,100%负荷下的原始颗 粒物的活化能较微粒聚集体略大.由表2可知,由于 微分热重曲线容易受外界试验条件的影响,恒升温 速率条件下的 Arrhenius 曲线的相关性较差.逃逸到 大气中的颗粒物 D 的活化能比原始颗粒物和微粒 聚集体高.相比于原始颗粒物,颗粒物 D 流经等离子 区域时,在高能电子和活性粒子的作用下发生了一 定程度的氧化:与微粒聚集体相比,由于其在等离子 体区域停留时间很短,在等离子体区域,微粒上附着 的活性粒子较少,在热重试验过程中,附着的活性粒 子有助于提高颗粒物的活性.在恒温条件下求得的 活化能较恒升温速率下求得的活化能小,由于升温 过程中,颗粒物上附着的 VOC 完全挥发,使颗粒物 与氧气的接触面积增加,引起颗粒物活性的增加,活

化能降低.采用恒升温速率法时,获得的热重曲线包含了物理挥发过程和氧化过程,而活化能的计算应只包含氧化过程,且微分热重法对实验精度依赖性较强,导致低转化率下计算的活化能与真实值有一定差距.文中采用恒温法、恒升温速率法推导动力学方程过程中均没有进行近似处理,动力学参数计算结果的误差由热重试验的误差引起,由于热重试验严重依赖于外界环境(噪声、振动),外界环境较大的变化均会导致大的计算误差.

在颗粒物氧化过程中,颗粒物的物化特性发生 了显著的变化(如孔隙率、比表面积、含氧有机成 分、微观结构、石墨化程度、无定形程度),颗粒物的 物化特性严重影响其动力学参数的变化^[21-22].与本 文计算结果相同,文献[23]表明,颗粒物的动力学 参数在氧化过程中一直变化.文献[18]采用了单一 升温速率法、多升温速率法、恒温法计算了不同种类 的碳烟的动力学参数,在多升温速率法中,由于其采 用4种不同升温速率拟合获得了动力学曲线,使得 其拟合曲线的相关系数较本文的相关系数偏低.采 用多升温速率法、恒温法计算得到的碳黑 Printex-U 的活化能与本文计算结果相近.

3 结 论

1)负荷为60%、80%、100%的发动机工况下,柴 油机原始颗粒物中,VOC的质量分数分别为53.5%、 20.5%、29.6%;微粒聚集体中,VOC的质量分数分别 为14.7%、13.2%、18.7%;原始颗粒物、微粒聚集体 中的 HVOC,在 VOC 中的比重随负荷的增加而 增加.

2)在恒温氧化条件下,颗粒物的失重速率曲线 呈单峰状分布,最大失重速率点随恒温温度的升高 向时间较小的方向移动;原始颗粒物在不同柴油机 负荷时,热重曲线变化不明显;随着柴油机负荷的增 加,微粒聚集体的热重曲线显著左移;微粒聚集体氧 化的速率比原始颗粒氧化速率缓慢;流经 NTP 发生 器逃逸到大气中的颗粒物的热重曲线较原始颗粒物 略微右移,但偏移程度较微粒聚集体小.

3)在恒温氧化条件下,不同柴油机负荷时,原 始颗粒物和微粒聚集体的活化能差距较小;80%负 荷时,逃逸到大气中的颗粒物的活化能比原始颗粒 物的活化能大 16.83 kJ/mol;通过恒升温速率试验 计算得到的活化能比恒温条件下计算得到的活化能 大20.2%.

参考文献

[1] BENSAID S, CAROCA C, RUSSO N, et al. Detailed investigation

of non-catalytic DPF regeneration [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2011, 89 (2): 401 - 407. DOI: 10.1002/ cice.20408.

- [2] KUROKI T, ISHIDATE M, OKUBO M, et al. Charge-to-mass ratio and dendrite structure of diesel particulate matter charged by corona discharge [J]. Carbon, 2010, 48 (1): 184 - 190. DOI: 10.1016/j. carbon.2009.09.002.
- [3] HAYASHI H, TAKASAKI Y, KAWAHARA K, et al. Electrostatic charging and precipitation of diesel soot[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(1):331-335. DOI:10.1109/TIA. 2010.2090846.
- [4] HOŁUB M, KALISIAK S, BORKOWSKI T, et al. The influence of direct non-thermal plasma treatment on particulate matter (PM) and NO_x in the exhaust of marine diesel engines [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2010, 19:1199-1211.
- [5] 邢世凯, 马朝臣, 马松. 低温等离子体对柴油机排气微粒数量 和质量影响的试验研究[J]. 内燃机工程, 2013, 34(1):8-12. DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2013.01.007.

XING Shikai, MA Chaochen, MA Song. Experimental study of effects of non-thermal plasma on exhaust PM quantity and mass in diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2013,34(1);8-12. DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2013.01.007.

- [6] THONGLEK N, DECHTHUMMARONG C, KIATSIRIROAT T. Soot treatment by using high voltage pulse energized electrostatic precipitator [J]. Energy Procedia, 2011, 9: 292 - 298. DOI: 10.1016/j. egypro.2011.09.031.
- [7] YAMAMOTO T, MIMURA T, OTSUKA N, et al. Diesel PM collection for marine and automobile emissions using EHD electrostatic precipitators [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010,46(4):1606-1612. DOI: 10.1109/TIA.2010.2049970.
- [8] ZUKERAN A, IKEDA Y, EHARA Y, et al. Two-stage-type electrostatic precipitator re-entrainment phenomena under diesel flue gases [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(2): 346-351. DOI: 10.1109/28.753627.
- [9] LEE J B, HWANG J H, BAE G N. Soot particle re-entrainment in a corona discharge reactor [J]. JSME International Journal Series B, 2000,43(4):602-607. DOI: 10.1299/jsmeb.43.602.
- [10] SUDRAJAD A, YUSOF A F. Review of electrostatic precipitator device for reduce of diesel engine particulate matter[J]. Energy Procedia, 2015,68:370-380. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.03.268.
- [11] WEN T Y, KRICHTAFOVITCH I, MAMISHEV A V. The key energy performance of novel electrostatic precipitators [J]. Journal of Building Engineering, 2015,2(4):77-84. DOI: 10.1016/j.jobe. 2015.04.006.
- [12] HOLUB M, BORKOWSKI T, JAKUBOWSKI T, et al. Experimental results of a combined DBD reactor-catalyst assembly for a direct marine diesel-engine exhaust treatment [J]. IEEE Transactions on

Plasma Science, 2013, 41 (5): 1562-1569. DOI: 10.1109/TPS. 2013.2254133.

- [13] BABAIE M, DAVARI P, ZARE F, et al. Effect of pulsed power on particle matter in diesel engine exhaust using a DBD plasma reactor [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(8): 2349-2358. DOI: 10.1109/TPS.2013.2270015.
- [14] WANG Chongming, XU Hongming, HERREROS J M, et al. Fuel effect on particulate matter composition and soot oxidation in a direct-injection spark ignition (DISI) engine [J]. Energy & Fuels, 2014,28(3):2003-2012. DOI: 10.1021/ef402234z.
- [15] RUIZ M, DE VILLORIA R G, MILLERA A, et al. Influence of the temperature on the properties of the soot formed from C2H2 pyrolysis [J]. Chemical Engineering Journal, 2007, 127(1):1-9. DOI: 10. 1016/j.cej.2006.09.006.
- [16] ZOLIN A, JENSEN A D, JENSEN P A, et al. Experimental study of char thermal deactivation [J]. Fuel, 2002,81(8):1065-1075. DOI: 10.1016/S0016-2361(02)00009-1.
- [17] JARAMILLO I C, GADDAM C K, VANDER WAL R L, et al. Effect of nanostructure, oxidative pressure and extent of oxidation on model carbon reactivity [J]. Combustion and Flame, 2015, 162(5): 1848-1856. DOI: 10.1016/j.combustflame.2014.12.006.
- [18] SHARMA H N, PAHALAGEDARA L, JOSHI A, et al. Experimental study of carbon black and diesel engine soot oxidation kinetics using thermogravimetric analysis[J]. Energy & Fuels, 2012,26 (9):5613-5625. DOI: 10.1021/ef3009025.
- [19] RODRIGUEZ F J, OLIVA F, VAZQUEZ R. Characterization of the diesel soot oxidation process through an optimized thermogravimetric method [J]. Energy & Fuels, 2011,25(5);2039-2048. DOI: 10. 1021/ef200194m.
- [20] STANMORE B R, BRILHAC J F, GILOT P. The oxidation of soot: a review of experiments, mechanisms and models [J]. Carbon, 2001,39 (15): 2247 - 2268. DOI: 10.1016/S0008 - 6223 (01) 00109 - 9.
- [21] MÜHLBAUER W, ZÖLLNER C, LEHMANN S, et al. Correlations between physicochemical properties of emitted diesel particulate matter and its reactivity [J]. Combustion and Flame, 2016, 167. 39-51. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.02.029.
- [22] MA Chaochen, GAO Jianbing, ZHONG Lei, et al. Experimental investigation of the oxidation behaviour and thermal kinetics of diesel particulate matter with non-thermal plasma [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 99: 1110-1118. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.165.
- [23] MENG Zhongwei, YANG Dong, YAN Yan. Study of carbon black oxidation behavior under different heating rates [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2014, 118(1):551-559. DOI: 10. 1007/s10973-014-4020-z.

(编辑

杨

波)