

DOI: 10.7652/xjtuxb201609012

氧气流量控制策略对低温等离子体技术 再生柴油机微粒捕集器的影响

施蕴曦, 蔡忆昔, 李弘扬, 李小华, 徐辉, 李伟俊

(江苏大学汽车与交通工程学院, 212013, 江苏镇江)

摘要: 以 O_2 为气源, 利用自行设计的低温等离子体喷射系统对柴油机微粒捕集器(DPF)进行再生试验研究; 在 O_2 总量相同、 O_2 流量为 3~7 L/min 时, 设计了 3 种 O_2 流量控制策略, 即恒流量法、递增流量法和递减流量法; 通过监测再生产物中 CO 、 CO_2 体积流量变化, 分析了 O_2 流量控制策略对微粒(PM)的氧化分解和 DPF 再生效果的影响。研究表明, O_2 流量增大, O_3 流量增大, 进入 DPF 的 O_3 增多, PM 的氧化得到促进。反应初始时 3 种流量控制方案下 CO 、 CO_2 流量均急剧上升; 随着反应的进行, 恒流量法的 CO 、 CO_2 流量趋于平稳; 递增、递减流量法的 CO 、 CO_2 体积流量在跨越试验阶段分别呈直线上升、下降趋势, 在同一个试验阶段保持稳定。 CO 、 CO_2 、 $CO+CO_2$ 中 C 的质量变化趋势相同, 质量大小由高到低为递减流量法—递增流量法—恒流量法。变 O_2 流量法的 DPF 再生效果优于恒 O_2 流量法, 采用递减流量法时 PM 被分解的质量最多且其控制的 O_2 流量随再生阶段由大到小变化时可达到较优的 DPF 再生效果。

关键词: 柴油机; 微粒捕集器; 低温等离子体技术; 再生

中图分类号: TK421.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)09-0074-06

Effect of Oxygen Flow Control Strategy on Diesel Particulate Filter Regeneration by Non-Thermal Plasma Technology

SHI Yunxi, CAI Yixi, LI Hongyang, LI Xiaohua, XU Hui, LI Weijun

(School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: Regeneration of diesel particulate filter (DPF) is experimentally investigated by a self-designed non-thermal plasma (NTP) injection system with oxygen as the gas source. Three control schemes of oxygen flow are proposed — the oxygen flow for scheme 1 remains constant at 5 L/min; increases from 3 L/min to 7 L/min for scheme 2; and decreases from 7 L/min to 3 L/min for scheme 3. The total oxygen amount for three schemes keeps equal. The effects of the oxidation of PM and DPF regeneration are discussed by measuring the volume fractions of CO and CO_2 during the regeneration process. The results reveal that the mass flow rate of O_3 increases remarkably with the increasing oxygen flow to promote the oxidation of PM. The volume fractions of CO and CO_2 for scheme 1 rise sharply and then remain stable; the volume fractions of CO and CO_2 for scheme 2 tend upward by three steps; the volume fractions of CO and CO_2 for scheme 3 tend downward by three steps. The mass of carbon in CO , CO_2 , and $CO+CO_2$ has same varying trend, and the total carbon is in descending order of scheme 3, scheme 2 and scheme

收稿日期: 2016-02-02。 作者简介: 施蕴曦(1988—), 女, 博士生; 蔡忆昔(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51176067); 江苏省高校优势学科建设项目(PDPA); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(KYLX15_1070)。

网络出版时间: 2016-06-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160614.1719.010.html>

1. The variable flow control has better regeneration effect of DPF than the constant flow control. The remarkable effect of DPF regeneration can be reached by gradually making oxygen flow decrease during the experimental period.

Keywords: diesel engine; particulate filter; non-thermal plasma technology; regeneration

根据环保部《关于实施第五阶段机动车排放标准的公告》,自 2016 年 4 月 1 日起,包括北京市在内的东部 11 省市,所有进口、销售和注册登记的轻型汽油车、轻型柴油客车、重型柴油车(仅公交、环卫、邮政用途),须符合国五标准要求。国五排放标准除了对国四现有的排放指标限值更为严格外,还新增了颗粒物粒子数量(PN)限值要求。新法规的实行,必将对颗粒物排放控制技术提出更高的要求。柴油机微粒捕集器(DPF)凭借其其对微粒(PM)的高效捕捉能力,已成为汽车后处理排放控制技术的必然选择,而该技术的关键在于实现 DPF 的再生^[1-3]。DPF 再生是指将已沉积的 PM 通过燃烧或氧化方法去除,避免堵塞通道内壁,保持正常的捕集效率,以免造成较高的排气背压,恶化燃油经济性。

低温等离子体(NTP)技术能够有效降低 NO_x 和 PM 排放,且不会产生二次污染,在汽车尾气治理方面展现出巨大的应用前景^[4-6]。将 NTP 技术应用用于 DPF 再生,也成为近年来 DPF 再生领域一个新的研究热点。已有研究表明^[7-15],NTP 活性物质具有强氧化性,在 200 ℃ 以下可氧化分解 PM,生成 CO 和 CO₂,实现 DPF 的再生。目前,应用较为广泛的 DPF 再生方法主要分为两类:主动再生和被动再生^[16-22]。主动再生通常要求 DPF 的温度达到 650 ℃ 以上,而 PM 的燃烧是个放热反应,再生过程中的热冲击会导致 DPF 出现热融化及内部坍塌现象。被动再生通过催化剂可使 PM 的燃烧温度降低到 400 ℃ 甚至更低,但这类方法多采用贵金属做催化剂,需反复添加或涂覆催化剂,成本较高,且存在 DPF 再生不完全等问题。通过对比可以看出,NTP 技术实现了 DPF 的低温再生,且使用不受限制,展现出巨大的优势。

本文在前期的研究基础上^[15,23-24],以 O₂ 为气源,选取 80 ℃ 为试验温度,利用自行设计的 NTP 喷射系统,对 DPF 进行再生试验。在 O₂ 总量相同的条件下,设计了 3 种 O₂ 流量控制策略:恒流量法、递增流量法和递减流量法,O₂ 流量变化范围为 3~7 L/min。通过监测再生产物中 CO_x 的浓度变化,对 PM 的氧化和 DPF 再生效果进行了研究,以寻求更为合理的气源控制策略,提高氧气的利用率,进一

步降低 DPF 的再生成本。

1 试验系统与方法

1.1 DPF 采样试验

试验所用柴油机型号为 YD480Q,主要技术参数见表 1。图 1 为 DPF 采样系统。试验所用 DPF 为壁流式蜂窝陶瓷,材料为堇青石,尺寸为 $\Phi 144\text{ mm}\times 152.4\text{ mm}$,孔密度为 15.5 个/cm²。对 DPF 进行采样试验时,发动机转速为 2 500 r/min,负荷为 75%。每次采样均选用洁净的 DPF,采样时间均为 120 min,待 DPF 冷却后取出。

表 1 柴油机主要技术参数

参数	数值	参数	数值
缸径/mm×行程/mm	80×90	标定功率/kW	29
压缩比	18	标定转速/r·min ⁻¹	3 000

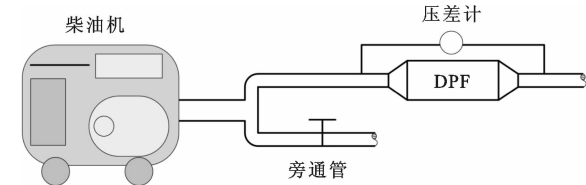


图 1 DPF 采样系统

1.2 DPF 再生试验

图 2 为 DPF 再生试验系统,由 NTP 喷射系统、电学参数测量系统以及 DPF 再生系统组成。

NTP 喷射系统包括 O₂ 供给装置、等离子体电源、NTP 发生器、风冷装置、水冷装置及红外测温仪,其中:O₂ 供给装置包括氧气瓶、传输管路及流量计,流量计用于监测 O₂ 流量;等离子体电源采用 CTP-2000K 智能电子冲击机(0~25 kV,7~20 kHz);NTP 发生器采用同轴圆柱结构,低压极采用外径为 32 mm 的不锈钢管,阻挡介质采用壁厚为 2 mm、内径为 36 mm 的石英管,高压极采用轴长为 100 mm 的细铁丝网,紧贴于石英管外壁上,放电间隙为 2 mm;风冷装置为冷却风机;水冷装置包括水泵、水阀和传输管路,管路中通以冷却水,冷却风机和冷却水用于降低放电电极表面的温度;红外测温仪 TASI 用于测量 NTP 发生器放电区表面温度。电学参数测量系统由 TDS3034B 型数字示波器和分压电路组成,示波器用于监测 NTP 发生器放电

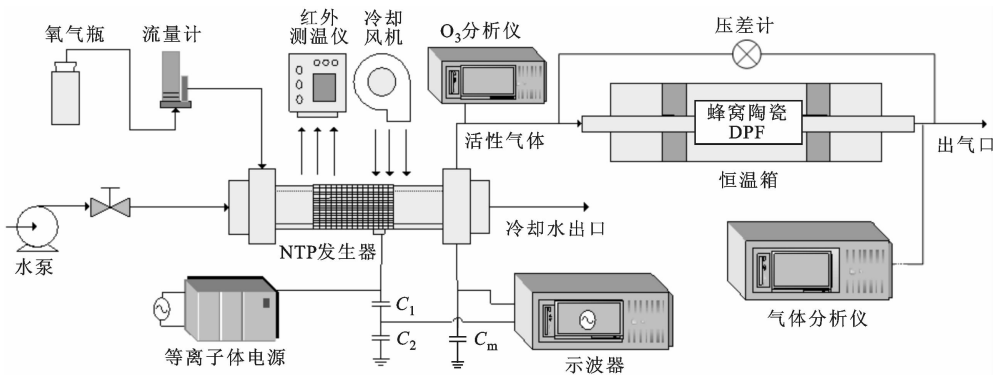


图 2 DPF 再生试验系统

过程中的工作电压与频率。DPF 再生系统由温控装置、压差计、O₃ 分析仪和气体分析仪组成,其中温控装置用于控制 DPF 的试验环境温度,压差计用于测量 DPF 两端的压差,O₃ 分析仪用于测量 NTP 活性气体中 O₃ 的质量浓度,气体分析仪用于测量 PM 的氧化分解产物 CO 和 CO₂ 的体积分数。

试验时开启等离子体电源,调节 NTP 发生器使之工作电压为 20 kV、工作频率为 9 kHz,控制放电表面温度为 90 ℃。O₂ 经 NTP 发生器放电后产生氧化性极强的活性气体,将活性气体通入已加热至试验温度的 DPF 中与捕集的 PM 进行反应,从而实现 DPF 的再生。温控装置控制 DPF 环境温度为 80 ℃。

DPF 再生试验均进行 120 min,在 O₂ 总消耗量相同的条件下,设计了 3 种 O₂ 流量控制策略,即恒流量法、递增流量法和递减流量法。试验分为 3 个阶段,每阶段均进行 40 min,如表 2 所示。由表 2 可知:恒流量法控制的 O₂ 流量在各阶段均保持 5 L/min 不变;递增流量法控制的 O₂ 流量随各试验阶段由 3 L/min 递增至 7 L/min;递减流量法控制的 O₂ 流量随各试验阶段由 7 L/min 递减至 3 L/min。

表 2 O₂ 流量控制策略 L/min

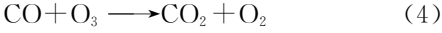
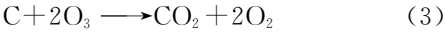
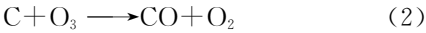
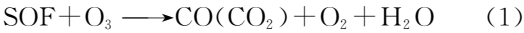
控制策略	Q _v (O ₂)		
	第 I 阶段 (0~40 min)	第 II 阶段 (40~80 min)	第 III 阶段 (80~120 min)
恒流量	5	5	5
递增流量	3	5	7
递减流量	7	5	3

2 试验结果及分析

2.1 O₂ 流量控制策略对 PM 氧化分解的影响

柴油机颗粒物的化学组分可分为两类,一类为

可溶性有机组分(SOF),另一类为不可溶性有机组分(IOF),其主要成分为干碳烟(DS)。O₂ 经 NTP 发生器放电击穿后产生活性物质 O₃、O 等,可分解转化 PM 中的烟尘和 SOF,实现 DPF 的再生,其中 O₃ 对 PM 的氧化起主要作用^[11,25],主要化学反应方程式如下^[9-11]



由式(1)~式(4)可见,PM 的主要分解产物为 CO 和 CO₂,对 CO 和 CO₂ 的监测可以反映 PM 的分解情况。由于各气体流量不同,所以气体分析仪测得的 CO、CO₂ 的体积分数反映了各气体的浓度,不能直接反映 CO、CO₂ 的产量。本文采用 CO、CO₂ 的体积流量作为 PM 分解效果的指标,其计算方法如下

$$Q_{v1}(\text{CO}) = c_1 v \quad (5)$$

$$Q_{v2}(\text{CO}_2) = c_2 v \quad (6)$$

式中:c₁ 为 CO 的体积分数;c₂ 为 CO₂ 的体积分数;v 为气体的流量,根据表 2 取值。图 3 和图 4 为 3 种 O₂ 流量控制策略下生成的 CO、CO₂ 体积流量随再生试验阶段的变化。

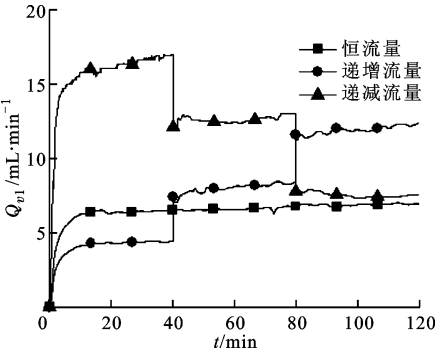


图 3 CO 体积流量随再生试验阶段的变化

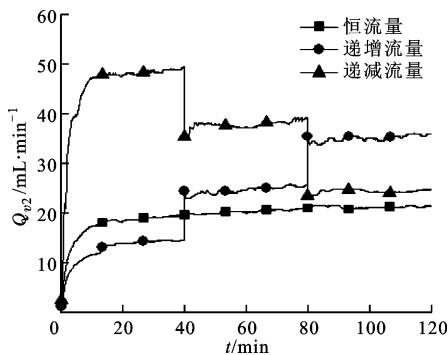


图 4 CO₂ 体积流量随再生试验阶段的变化

不同的 O₂ 流量 $Q_v(O_2)$ 对应产生的 O₃ 质量浓度 $w(O_3)$ 及质量流量 $Q_m(O_3)$ 如表 3 所示。由表 3 可知,随着 O₂ 流量的增大,O₃ 质量浓度减小,O₃ 质量流量增大,相同时间内进入 DPF 的 O₃ 质量增大。经计算,3 种策略进入 DPF 的 O₃ 总质量分别为 24.6 g、24.2 g、24.2 g,可见递增流量法和递减流量法进入 DPF 的 O₃ 总质量相同,恒流量法的 O₃ 总质量略高于递增流量法和递减流量法。

表 3 O₃ 质量浓度及质量流量随 O₂ 流量的变化

$Q_v(O_2)/$ $L \cdot min^{-1}$	$w(O_3)/$ $mg \cdot L^{-1}$	$Q_m(O_3)/$ $mg \cdot min^{-1}$
3	45	135
5	41	205
7	37.8	264.6

由图 3 和图 4 可见,同一 O₂ 流量控制策略下,CO 和 CO₂ 的体积流量的变化趋势基本一致。在反应初始时,3 种策略下 CO、CO₂ 体积流量均急剧上升;随着反应的进行,恒流量法的 CO、CO₂ 体积流量趋于平稳,递增流量法的 CO、CO₂ 体积流量在转向下一个试验阶段时直线上升,递减流量法的 CO、CO₂ 体积流量在转向下一个试验阶段时直线下降;递增流量法和递减流量法的 CO、CO₂ 体积流量在同一个试验阶段内基本保持稳定。第 I 阶段 3 种策略的 CO 和 CO₂ 体积流量从大到小排序:递减流量法(7 L/min) — 恒流量法(5 L/min) — 递增流量法(3 L/min)。第 I 阶段初始时,CO、CO₂ 的体积流量均急剧升高,可见活性物质一经通入 DPF,就立即与 PM 发生氧化分解反应。由表 3 还可知,O₂ 的流量越大,O₃ 的质量流量越大,进入 DPF 的活性物质越多。第 I 阶段反应初始,由于 DPF 内 PM 的沉积量与分布情况相同,故进入 DPF 内的 O₃ 越多,PM 的氧化分解反应越剧烈。第 II 阶段 3 种策略的 CO 和 CO₂ 体积流量从大到小排序:递减流量法(5 L/

min) — 递增流量法(5 L/min) — 恒流量法(5 L/min)。3 种策略在第 II 阶段 O₂ 的流量相同,O₃ 的质量流量也相同,但 PM 的分解产物 CO 和 CO₂ 的体积流量却存在差异。由此可见,前阶段反应对后续阶段反应的影响很大。第 III 阶段 3 种策略的 CO 和 CO₂ 体积流量从大到小排序:递增流量法(7 L/min) — 递减流量法(3 L/min) — 恒流量法(5 L/min)。与前 2 个阶段相比,第 III 阶段 3 种策略的 CO 和 CO₂ 的体积流量的差值减小。对比恒流量法和递减流量法可知,递减流量法的气源流量低于恒流量法,进入 DPF 的 O₃ 的质量流量小,但递减流量法中 CO 和 CO₂ 的体积流量却高于恒流量法。可见,合理的 O₂ 流量控制策略可以提高 NTP 活性物质的利用率,有助于 NTP 对 PM 的氧化分解反应。NTP 与 PM 的氧化分解反应受多项因素的影响,如气源流量、NTP 活性物质的浓度、PM 的沉积量与分布以及反应温度等。PM 的氧化分解反应为放热反应,反应本身放出的热量会提高 DPF 内部温度,也会对后期反应造成影响。第 I 阶段初始时,只有 O₂ 流量这一因素存在差异,随着反应的进行,各项影响因素发生变化,所以每个阶段的 CO 和 CO₂ 的产量是各项因素综合作用的结果。

2.2 O₂ 流量控制策略对 DPF 再生效果的影响

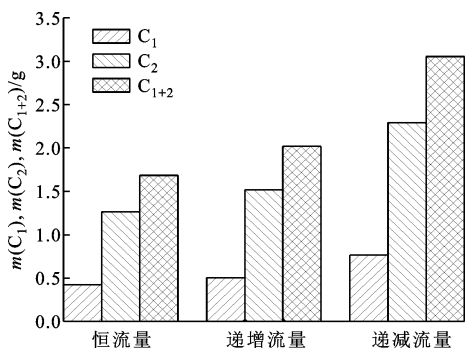
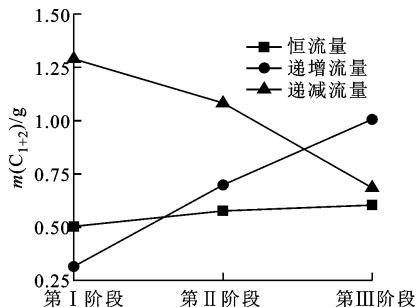
由于 DPF 的初始积碳量相同,PM 被分解得越多,DPF 的再生效果越好。由式(1)~式(4)可见,PM 氧化分解的主要产物为 CO 和 CO₂,可近似认为 CO 和 CO₂ 中 C 的质量便是 PM 被分解的质量,并作为评价 DPF 再生效果的指标。C₁ 为 CO 中的 C,C₂ 为 CO₂ 中的 C,C₁₊₂ 为 CO 和 CO₂ 中的 C,计算方法如下

$$m(C_1) = \int Q_{v1} dt \tag{7}$$

$$m(C_2) = \int Q_{v2} dt \tag{8}$$

$$m(C_{1+2}) = m(C_1) + m(C_2) \tag{9}$$

图 5 为 3 种策略下 C₁、C₂ 和 C₁₊₂ 的质量变化。由图 5 可见,3 种策略下 C₁、C₂、C₁₊₂ 的质量变化趋势相同,从质量大小上看递减流量法最大、递增流量法次之、恒流量法最小。所以,采用递减流量法时 DPF 的再生效果最为显著,被氧化分解的 PM 质量为恒流量法的 1.82 倍。为进一步分析 3 种策略下 C₁₊₂ 质量差异的原因,按式(7)~式(9)计算再生试验各阶段中 C₁₊₂ 的质量,得出 C₁₊₂ 质量随再生试验阶段的变化,如图 6 所示。

图5 不同 O_2 流量控制策略下 C_1 、 C_2 和 C_{1+2} 质量图6 C_{1+2} 质量随再生试验阶段的变化

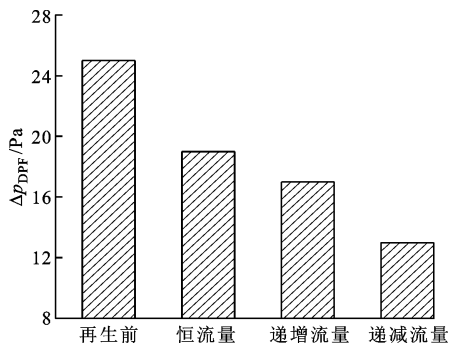
由图6可见:采用恒流量法时 C_{1+2} 质量随试验阶段的进行基本保持平稳,仅略微增大,这是恒流量法控制的 O_2 流量在各阶段均保持5 L/min不变,NTP活性气体与PM的反应较为平稳的缘故;采用递增流量法时, C_{1+2} 质量随着试验阶段的进行显著升高;采用递减流量法时, C_{1+2} 质量随着试验阶段的进行显著降低。这些均与各阶段 O_2 流量的变化趋势一致。虽然第I阶段中递增流量法的 C_{1+2} 质量比恒流量法小,但 O_2 流量随着试验阶段的递增, O_3 的质量流量增大,PM被氧化的量增多,使 C_{1+2} 质量亦随试验阶段递增。因此,在整个再生过程中递增流量法的 C_{1+2} 质量比恒流量法大。

采用递减流量法时 C_{1+2} 质量随试验阶段递减,这是递减流量法控制的 O_2 流量随试验阶段递减, O_3 质量流量减小,PM被氧化的量减少的缘故。虽然 C_{1+2} 质量随试验阶段递减,但在整个再生过程中递减流量法的 C_{1+2} 质量比递增流量法大,这是递减流量法的 O_2 流量在第I阶段中取较大值7 L/min,而较大流量的 O_2 经NTP发生器放电击穿后产生质量流量较大的 O_3 ,使位于DPF内部孔道前端的大量PM被氧化,有利于活性气体在第II、III阶段与DPF较深处的PM接触并发生氧化反应的缘故。递增流量法的 O_2 流量在第I阶段中取较小值3 L/min,位于DPF内部孔道前端的PM被氧化的量较少,不利于活性气体与DPF较深处的PM直接接触

并发生氧化反应。因此,在整个再生过程中递减流量法的 C_{1+2} 质量比递增流量法大。

为验证3种策略对DPF的再生效果,在再生试验前后分别向DPF通入10 L/min的 O_2 ,测量DPF两端压差,如图7所示。

由图7可见,进行再生试验后,恒流量法的DPF两端压差最大,递增流量法次之,递减流量法最小,故采用递减流量法时DPF的背压下降的值最大。由于DPF再生前的积碳量相同,PM被氧化得越多,DPF的再生效果越好,DPF两端压差就越小。因此,递减流量法的DPF再生效果最好,递增流量法次之,恒流量法最差。这与前文以 C_{1+2} 质量为评价指标对DPF再生效果的分析结果相吻合。

图7 再生试验前后DPF两端压差 Δp_{DPF} 的变化

综上所述可知,在 O_2 总量相同的条件下,变 O_2 流量法的DPF再生效果优于恒 O_2 流量法。控制的 O_2 流量随再生阶段由大到小变化,可达到较佳的DPF再生效果。

3 结 论

以 O_2 为气源,利用自行设计的NTP喷射系统对DPF进行了再生试验。在 O_2 总量相同的条件下,设计了3种 O_2 流量控制策略:恒流量法控制的 O_2 流量保持5 L/min不变,递增流量法控制的 O_2 流量由3 L/min递增至7 L/min,递减流量法控制的 O_2 流量由7 L/min递减至3 L/min。通过对PM分解产物CO、 CO_2 的监测,研究了3种策略对NTP再生DPF的影响,结论如下。

(1)随着 O_2 流量的增大, O_3 质量浓度减小, O_3 质量流量增大,在相同的时间内进入DPF的 O_3 质量增多,有利于PM的氧化分解。

(2)CO和 CO_2 的体积流量变化趋势基本一致:恒流量法的CO、 CO_2 体积流量均先急剧升高后基本趋于平稳;递增流量法的CO、 CO_2 体积流量均先急剧升高后呈阶梯状上升;递减流量法的CO、 CO_2

体积流量均先急剧升高后呈阶梯状下降。

(3)3种策略下 CO 、 C_2 、 $\text{CO}+\text{CO}_2$ 中的C的质量变化趋势相同,从大到小排序:递减流量法—递增流量法—恒流量法。可见,变 O_2 流量法的DPF再生效果优于恒 O_2 流量法。采用递减流量法时PM被分解的质量最多,在控制 O_2 流量随再生阶段由大到小变化时,可达到较佳的DPF再生效果。

参考文献:

- [1] KNECHT W. Diesel engine development in view of reduced emission standards [J]. *Energy*, 2008, 33(2): 264-271.
- [2] TWIGG M V. Progress and future challenges in controlling automotive exhaust gas emissions [J]. *Applied Catalysis: B Environmental*, 2007, 70(1/2/3/4): 2-15.
- [3] MENG Z W, GUO D, SONG Q, et al. Experimental investigation on the influence of wall-flow diesel particulate filter parameters on filter performance [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29(1): 171-173.
- [4] GRUNDMANN J, MULLER S, ZAHN R J. Treatment of soot by dielectric barrier discharges and ozone [J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2005, 25(5): 455-466.
- [5] 王攀, 蔡忆昔, 李小花, 等. NPAC技术降低柴油机 NO_x 和碳烟排放的试验研究 [J]. *内燃机工程*, 2011, 32(3): 29-31.
WANG Pan, CAI Yixi, LI Xiaohua, et al. Experimental study on reducing NO_x and soot emissions of diesel engine using non-thermal plasma assisted catalyst [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2011, 32(3): 29-31.
- [6] 雷利利, 蔡忆昔, 王攀, 等. NTP技术对柴油机颗粒物组分及热重特性的影响 [J]. *内燃机学报*, 2013, 31(2): 144-147.
LEI Lili, CAI Yixi, WANG Pan, et al. Influence on component and thermo-gravimetric characteristics of diesel particulate matter by NTP technology [J]. *Transactions of CSICE*, 2013, 31(2): 144-147.
- [7] 曾科, 刘兵, 蔡丽红, 等. 脉冲电晕技术降低柴油机微粒排放的实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2002, 36(11): 1111-1137.
ZENG Ke, LIU Bing, CAI Lihong, et al. Experimental investigation on the removal of particulates in diesel engines by using pulsed corona technology [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2002, 36(11): 1111-1137.
- [8] KUWAHARA T, NISHII S, KUROKI T, et al. Complete regeneration characteristics of diesel particulate filter using ozone injection [J]. *Applied Energy*, 2013, 111: 652-656.
- [9] FUSHIMI C, MADOKORO K, YAO S, et al. Influence of polarity and rise time of pulse voltage waveforms on diesel particulate matter removal using an uneven dielectric barrier discharge reactor [J]. *Plasma Chem Plasma Process*, 2008, 28(4): 511-522.
- [10] OKUBO M, KUROKI T, MIYAIRI Y, et al. Low-temperature soot incineration of diesel particulate filter using remote non-thermal plasma induced by a pulsed barrier discharge [J]. *IEEE Trans Ind Appl*, 2004, 40(6): 1504-1512.
- [11] OKUBO M, ARITA N, KUROKI T, et al. Carbon particulate matter incineration in diesel engine emissions using indirect nonthermal plasma processing [J]. *Thin Solid Films*, 2007, 515(9): 4289-4295.
- [12] OKUBO M, ARITA N, KUROKI T, et al. Total diesel emission control technology using ozone injection and plasma desorption [J]. *Plasma Chem Plasma Process*, 2008, 28(2): 173-187.
- [13] OKUBO M, KUWAHARA T, KANNAKA Y, et al. Improvement of NO_x reduction efficiency in diesel emission using nonthermal plasma-exhaust gas recirculation combined after treatment [C]// *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2010: 1-7.
- [14] 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.
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.
- [15] SHI Y X, CAI Y X, LI X H, et al. Mechanism and method of DPF regeneration by oxygen radical generated by NTP technology [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2014, 15(6): 871-876.
- [16] CHEN P G, IBRAHIM U, WANG J M. Experimental investigation of diesel and biodiesel post injections during active diesel particulate filter regenerations [J]. *Fuel*, 2014, 130: 286-295.
- [17] CHEN K, MARTIROSYAN K S, LUSS D. Temperature excursions during soot combustion in a diesel

(下转第118页)