

## 低温等离子体发生器工作参数优化

施蕴曦, 蔡忆昔<sup>\*</sup>, 李小华, 陈亚运, 丁道伟

(江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013)

**摘 要:** 低温等离子体(non-thermal plasma, NTP)发生器放电产生的活性物质可有效去除柴油机颗粒捕集器(diesel particulate filter, DPF)中沉积的颗粒物(particulate matter, PM), 而发生器的参数直接影响活性物质的浓度, 选取合适的工作参数有利于活性物质的产生。该文以空气为气源, 考察了放电区表面温度、放电电压、放电频率、空气流量 4 个因素对 NTP 发生器产生活性物质浓度的影响。以  $O_3$  质量浓度作为试验指标, 进行了正交试验设计, 并对试验结果进行单因素影响规律的分析、极差分析以及方差分析。研究表明: 较低的放电区表面温度和放电频率有利于  $O_3$  的生成,  $O_3$  质量浓度随着空气流量的增大先升高后降低, 随放电电压的变化没有明显的增减趋势; 放电区表面温度、空气流量为显著因素, 放电电压和放电频率为不显著因素; 各因素对试验结果影响的大小顺序为: 空气流量 > 放电区表面温度 > 放电频率 > 放电电压; NTP 反应器产生活性物质的较优组合是: 放电区表面温度  $40^\circ\text{C}$ 、放电电压  $19\text{ kV}$ 、放电频率  $7\text{ kHz}$ 、空气流量  $5\text{ L/min}$ 。研究结果对开发用于分解柴油机 PM 的 NTP 系统、优化 NTP 技术再生 DPF 的研究有重要的指导意义。

**关键词:** 柴油机, 排放控制, 臭氧, 低温等离子体, 颗粒捕集器

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.14.008

中图分类号: TK423

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-14-0060-07

施蕴曦, 蔡忆昔, 李小华, 等. 低温等离子体发生器工作参数优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 60—66.  
Shi Yunxi, Cai Yixi, Li Xiaohua, et al. Optimization of working parameters for non-thermal plasma reactor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(14): 60—66. (in Chinese with English abstract)

### 0 引 言

柴油机以其优越的燃油经济性和动力性, 被广泛应用于工农业生产和交通运输等领域。为了满足未来更为严格的排放法规, 如何有效降低柴油机颗粒物(particulate matter, PM)排放已经成为人们日益关注的问题<sup>[1]</sup>。柴油机颗粒捕集器(diesel particulate filter, DPF)技术相对成熟, 被认为是降低颗粒物排放最为有效的手段。但随着 PM 捕集量的增加, DPF 压降增加, 达到一定程度后会影响发动机的正常排放, 故 DPF 的关键问题为捕集器的再生技术<sup>[2-3]</sup>。

DPF 的再生技术主要包括热再生、催化再生、连续再生等几类, 国内外学者对此作了相关研究。

杨德胜等<sup>[4]</sup>研究了热再生技术, 该技术一般要求温度达到  $600^\circ\text{C}$  以上, 故要求高功率的车载电源, 且存在再生时加热不均等问题; 王天友等<sup>[5]</sup>研究了催化再生技术, 该技术要求燃油含硫量低于  $50\text{ ppm}$ , 国内柴油的硫含量较高, 短期内无法满足该技术的要求; Triana 等<sup>[6]</sup>研究了连续再生技术, 先利用催化剂将柴油机排气中的  $\text{NO}$  转化为  $\text{NO}_2$ , 再利用  $\text{NO}_2$  的强氧化性氧化 PM, 该技术对燃油含硫量要求较高, 存在催化剂中毒而无法实现再生的问题。传统的再生方法由于自身存在的缺点, 使用均受到限制。因此, 研发适合国情的高效 DPF 再生技术是中国未来柴油机排放控制领域面临的一个重要的挑战和机遇。

低温等离子体(non-thermal plasma, NTP)技术是一种新型的工业去污手段, 所产生的活性物质可使常规条件下很难实现的化学反应得以启动, 具有使用范围广泛、转化效率高、耗能低、无二次污染等优势, 有可能成为一种新型的柴油机后处理技术手段<sup>[7-10]</sup>。NTP 再生 DPF 技术是近年来 DPF 再生方法研究的热点之一。Masaaki Okubo 等<sup>[11-14]</sup>将 NTP 发生器产生的活性物质喷入到排气管中 DPF 上游, 通过监测 DPF 两端压差及对 DPF 的质量称量来判断 DPF 的再生效应, 发现利用 NTP 技术在

收稿日期: 2013-03-01 修订日期: 2013-06-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51176067); 教育部博士点基金项目(20113227120016); 江苏省自然科学基金项目(BK2010330); 江苏省高校优势学科建设项目(苏政办发〔2011〕6号)

作者简介: 施蕴曦(1988—), 女, 江苏南通人, 研究方向: 发动机工作过程及排放控制。镇江 江苏大学汽车与交通工程学院, 212013。

Email: shiyunxi880527@126.com

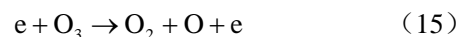
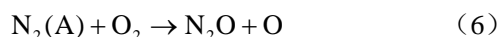
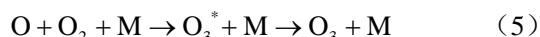
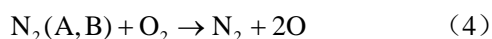
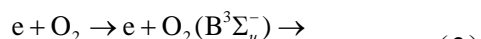
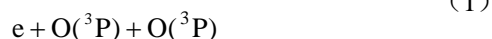
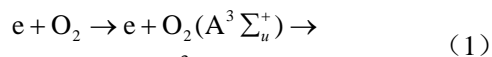
※通信作者: 蔡忆昔(1957—), 男, 江苏昆山人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 发动机工作过程及排放控制。镇江 江苏大学汽车与交通工程学院, 212013。Email: qc001@ujs.edu.cn

温度为 200℃ 时即可实现 DPF 再生。Grundmann J 等<sup>[15-16]</sup>开展了平行板式 NTP 发生器分解柴油机 PM 的试验, 利用 X 射线光电子谱 (x-ray photoelectron spectroscopy, XPS) 诊断技术探测 PM 的氧化分解过程, 指出当温度 < 160℃ 时, NO<sub>2</sub> 的氧化效果急剧减弱, 温度 > 160℃ 时, NO<sub>2</sub> 及 O<sub>3</sub> 对 PM 均有较强的氧化效果。黄震<sup>[17]</sup>等开展了集成式 NTP 催化反应技术有效去除柴油机 PM 的试验工作, 指出具有强氧化性的活性物质, 如 O、O<sub>3</sub> 等, 在 215℃ 时即可有效氧化 PM 中的 SOF 和 soot 成分, 使之转化为 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O。综合国内外研究工作可以看出, NTP 再生技术能够有效降低 DPF 再生温度, 且不存在催化剂中毒现象, 有效地避免了传统再生所面临的问题。研究表明, NTP 发生器产生的活性物质对 DPF 的再生起主要作用<sup>[18]</sup>, 故活性物质的高效产生, 有利于促进 DPF 的再生。而 NTP 发生器的工作参数直接影响活性物质的产量, 故选取合适的工作参数尤为重要。

本文以空气为气源, 对自行设计的同轴圆柱型 INTP 发生器进行试验, 选取发生器放电电压、放电频率、放电区表面温度、空气流量 4 个因素, 采用 L<sub>16</sub>(4<sup>5</sup>) 正交试验优选 NTP 发生器的工作参数, 为 NTP 技术再生 DPF 的试验研究提供参考。

## 1 NTP 系统化学反应模型

空气经 NTP 发生器放电击穿后产生大量的活性物质 (粒子、电子、光子、亚稳态分子等), 其化学反应模型如下所示<sup>[19-21]</sup>



放电过程中 O<sub>3</sub> 的合成, 通常认为经过 2 个步骤。第 1 步形成新生态的氧原子, 如式 (1)、式 (2) 和式 (4) 所示。其中式 (1)、式 (2) 为电子撞击分子的反应, 形成基态粒子 O(<sup>3</sup>P) 和激发态粒子 O(<sup>1</sup>D), 式 (4) 为亚稳态 N<sub>2</sub> 分子撞击 O<sub>2</sub> 分子生成 O 原子的反应。第 2 步则为这些氧原子自由基参与三体反应合成臭氧, 如式 (5) 所示, M 为参加反应的第 3 种物质。NO<sub>2</sub> 主要通过反应式 (10) 和式 (11) 生成, 所需的 NO 和 N<sub>2</sub>O 由反应式 (6) ~ 式 (9) 提供。当 O 原子浓度过高时, 发生式 (12) ~ 式 (14) 的反应, 对 O<sub>3</sub> 的生成起抑制作用。研究表明, 高能电子促进 O<sub>3</sub> 的生成, 低能电子则参与 O<sub>3</sub> 的分解反应<sup>[22]</sup>。实际所产生的 O<sub>3</sub> 是 NTP 反应器放电过程中 O<sub>3</sub> 合成与分解过程共同作用的结果。

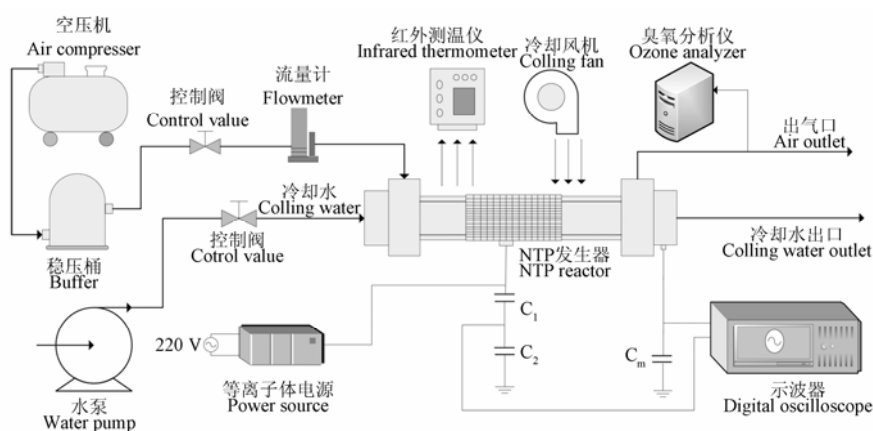
## 2 试验系统与方法

试验系统主要由 NTP 发生器、空气供给系统、温度测控系统、电学参数测量系统和气体测量装置组成, 如图 1 所示。

NTP 发生器为同轴圆柱结构, 内电极外径 32 mm 的无缝不锈钢管; 阻挡介质为内径 36 mm、壁厚 2 mm 的石英管; 外电极为轴向长度为 100 mm 的不锈钢网, 紧贴于石英管外壁; 放电气隙为 2 mm。空气供给系统由空气压缩机、稳压筒、传输管路、控制阀和转子式流量计组成, 流量计用于监测气体流量。温度控制系统由水冷装置、风冷装置和温度测量装置组成。其中, 水冷装置包括水泵、传输管路和控制阀, 管路中通以冷却水; 风冷装置为冷却风机; 温度测量装置采用美国雷泰公司生产的 MX4 红外测温仪, 用于监测 NTP 发生器放电区表面温度, 精度为 ±1℃, 发光率为 0.7。电学参数测量系统由低温等离子电源、通电电路和美国泰克 TDS3034B 数字示波器组成。其中, 低温等离子电源采用南京苏曼电子有限公司生产的 CTP-2000K 智能电子冲击机, 工作电压为 0~25 kV, 频率为 7~20 kHz 连续可调; 电路中分压电容 C<sub>1</sub>=47 pf, C<sub>2</sub>=47 nf, 传输电荷测量电容 C<sub>m</sub>=0.47 μf; TDS3034B 示波器的采样频率为 50 MHz, 输出波形平均次数设定为 250 次, 利用美国泰克 TekP6139A 高压探头测取放电电压和放电频率。气体测量装置采用美国 INUSA 公司生产的 Mini-HiCon 高浓度臭氧分析仪, 用于检测 O<sub>3</sub> 的浓度, 精度为 0.1 mg/L。



a. 试验现场  
a. Testing site



b. 试验系统示意图  
b. Experimental system sketch  
图 1 试验系统

Fig.1 Experimental system

试验时, 调节流量控制阀, 使空气流量稳定在设定值。打开低温等离子体电源, 调节供电电压和频率。压缩空气经 NTP 反应器高压放电后, 产生活性物质。由于活性物质的浓度受 NTP 反应器表面温度影响较大<sup>[23]</sup>, 可通过调节风机大小和冷却水的流量共同控制反应器表面温度。

### 3 正交试验设计

#### 3.1 试验指标

空气经 NTP 反应器放电后产生大量的活性物质, 其中  $O_3$  和  $NO_2$  是氧化 PM 的主要物质<sup>[11-13]</sup>。

试验表明,  $NO_2$  产量远小于  $O_3$  产量, 且  $NO_2$  与  $O_3$  具有相似的变化规律<sup>[24]</sup>, 故试验选取  $O_3$  质量浓度为衡量试验结果的指标,  $O_3$  质量浓度越高, 试验条件越好。

#### 3.2 试验因素及水平

试验选取 NTP 反应器放电区表面温度、放电电压、放电频率、空气流量 4 个影响活性物质浓度的因素, 根据试验经验和条件, 对 4 个因素各选取 4 个水平, 表 1 为因素水平表。

#### 3.3 正交表

试验选用正交表  $L_{16}(4^5)$ 。

表 1 因素水平表  
Table 1 Factors and levels

水平 Level	放电区表面温度 A Surface temperature of discharge area/ $^{\circ}C$	放电电压 B Discharge voltage/kV	放电频率 C Discharge frequency/kHz	空气流量 D Air flow/( $L \cdot min^{-1}$ )
1	40 ( $A_1$ )	17 ( $B_1$ )	7 ( $C_1$ )	3 ( $D_1$ )
2	50 ( $A_2$ )	18 ( $B_2$ )	8 ( $C_2$ )	5 ( $D_2$ )
3	60 ( $A_3$ )	19 ( $B_3$ )	9 ( $C_3$ )	7 ( $D_3$ )
4	70 ( $A_4$ )	20 ( $B_4$ )	10 ( $C_4$ )	9 ( $D_4$ )

## 4 结果与分析

### 4.1 单因素影响规律分析

按照各因素所取水平不同, 将正交试验数据分成 4 组, 求得各组  $O_3$  质量浓度的算术平均值, 并进行成组比较, 得出 NTP 发生器放电区表面温度、放电电压、放电频率、空气流量对  $O_3$  质量浓度的单因素影响规律。

#### 4.1.1 放电区表面温度对 $O_3$ 质量浓度的影响

放电区表面温度对  $O_3$  质量浓度的影响如图 2 所示。由图 2 可见, 放电区表面温度由  $40^\circ\text{C}$  升高到  $70^\circ\text{C}$  时,  $O_3$  质量浓度整体呈降低的趋势。

$O_3$  由于温度的升高会自行分解, 其反应如式 (18) 所示



最终产生的  $O_3$  是反应式 (5)、式 (13) ~ 式 (15) 和式 (16) 共同作用的结果, 且不同能量的电子对于  $O_3$  的生成具有不同的效果。至今为止, 电子和臭氧分子的碰撞截面还没有一致的结果, 还未能完全明确电子对于臭氧分子的分解过程。当放电区表面温度从  $40^\circ\text{C}$  升高到  $50^\circ\text{C}$  时,  $O_3$  质量浓度急剧下降。此时,  $O_3$  的热分解反应占主导作用。而在  $50^\circ\text{C}$  到  $70^\circ\text{C}$  范围内,  $O_3$  质量浓度先升高后降低。可能是由于当放电区表面温度为  $60^\circ\text{C}$  时, 有利于  $O_3$  生成的电子数量较多, 此时  $O_3$  的合成占主要作用。从整体降低的趋势可知, 较低的放电区温度有利于  $O_3$  的产生, 应尽量降低放电区的温度。

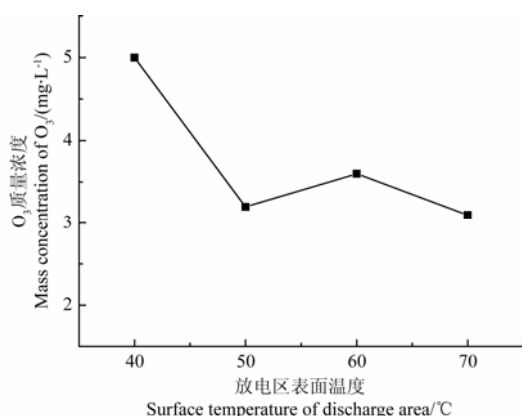


图 2 放电区表面温度对  $O_3$  质量浓度的影响

Fig.2 Influence of surface temperature of discharge area on the mass concentration of  $O_3$

#### 4.1.2 放电电压对 $O_3$ 质量浓度的影响

放电电压对  $O_3$  质量浓度的影响如图 3 所示。由图 3 可见, 放电电压由  $17\text{ kV}$  升高为  $20\text{ kV}$  时,  $O_3$  质量浓度在  $3.5\sim 3.8\text{ mg/L}$  的范围内变化, 整体趋势较平稳。可见, 在所选择的电压范围内,  $O_3$

的合成作用与分解作用相当, 可根据实际条件来选择放电电压。

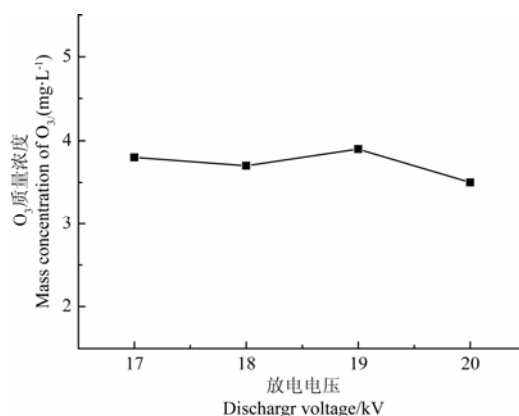


图 3 放电电压对  $O_3$  质量浓度的影响

Fig.3 Influence of discharge voltage on mass concentration of  $O_3$

#### 4.1.3 放电频率对 $O_3$ 质量浓度的影响

放电频率对  $O_3$  质量浓度的影响如图 4 所示。由图 4 可见, 放电频率由  $7\text{ kHz}$  上升为  $10\text{ kHz}$  时,  $O_3$  质量浓度呈先降低后趋于平缓的趋势。

随着放电频率的升高, 放电区表面温度升高, 折合电场强度降低。温度的升高促进了  $O_3$  的热分解, 折合电场强度降低使得促进  $O_3$  生成的高能电子数量减少, 所以  $O_3$  质量浓度下降。放电频率继续升高, 折合电场强度降低趋缓, 所以  $O_3$  质量浓度的降低趋势平缓。

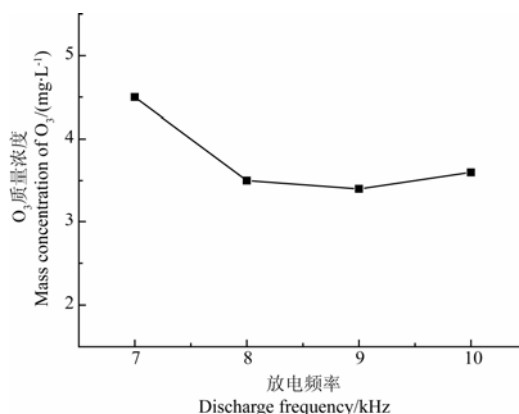


图 4 放电频率对  $O_3$  质量浓度的影响

Fig.4 Influence of discharge frequency on mass concentration of  $O_3$

#### 4.1.4 空气流量对 $O_3$ 质量浓度的影响

空气流量对  $O_3$  质量浓度的影响如图 5 所示。由图 5 可见, 空气流量由  $3\text{ L/min}$  升高为  $9\text{ L/min}$  时,  $O_3$  质量浓度呈先升高后降低的趋势。

当空气流量小于  $5\text{ L/min}$  时, 随着空气流量增加,  $O_2$  分子数量增多, 反应式 (1)、式 (2) 所示

的反应加强,为三体碰撞提供了更多的 O 原子,反应式(5)加强, O<sub>3</sub> 质量浓度升高。当空气流量大于 5 L/min 时,随着流量的增大,过高 O 原子浓度反而抑制了 O<sub>3</sub> 的生成,所以 O<sub>3</sub> 质量浓度降低。

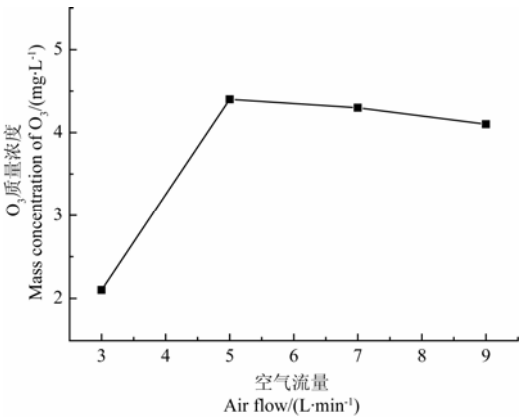


图5 空气流量对 O<sub>3</sub> 质量浓度的影响

Fig.5 Influence of air flow rate on mass concentration of O<sub>3</sub>

4.2 极差分析

正交试验结果的极差分析如表 2 所示。

由表 2 可知,各因素对 O<sub>3</sub> 质量浓度影响的大小顺序为:空气流量>放电区表面温度>放电频率>放电电压;生成 O<sub>3</sub> 质量浓度最高的试验条件即最优组合为:放电区表面温度 40℃、放电电压 19 kV、放电频率 7 kHz、空气流量 5 L/min。

4.3 方差分析

正交试验结果的方差分析如表 3 所示。

由表 3 可知,各因素对 O<sub>3</sub> 质量浓度影响的大小顺序为:空气流量>放电区表面温度>放电频率

>放电电压,与极差分析结果一致。其中放电区表面温度、空气流量的显著性水平  $\alpha<0.05$ ,为显著因素,放电电压和放电频率为不显著因素。

表 2 正交试验极差分析

Table 2 Range analysis of orthogonal test					
试验号 Test number	A/℃	B/kV	C/kHz	D (L·min <sup>-1</sup> )	臭氧质量浓度 Mass concentration of O <sub>3</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )
1	40	17	7	3	4.6
2	40	18	8	5	5.1
3	40	19	9	7	5.2
4	40	20	10	9	4.9
5	50	17	8	9	3.3
6	50	18	7	7	4.4
7	50	19	10	5	4.3
8	50	20	9	3	0.7
9	60	17	9	5	3.9
10	60	18	10	3	1.6
11	60	19	7	9	4.7
12	60	20	8	7	4.3
13	70	17	10	7	3.4
14	70	18	9	9	3.6
15	70	19	8	3	1.4
16	70	20	7	5	4.1
$k_{m1}$	19.8	15.2	17.8	8.3	
$k_{m2}$	12.7	14.7	14.1	17.4	
$k_{m3}$	14.5	15.6	13.4	17.3	
$k_{m4}$	12.5	14.0	14.2	16.5	
$R_m$	1.8	0.4	1.1	2.3	
优水平 Optimum level	A <sub>1</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	
主次因素 Primary and secondary factors	D, A, C, B				

注:  $k_{mn}$  表示  $m$  因素  $n$  水平下 O<sub>3</sub> 浓度的和,  $R_m$  表示  $m$  因素的极差。  
Notes:  $k_{mn}$  is sum of the conc-entration of O<sub>3</sub> of  $n$  level of  $m$  factor,  $R_m$  is the range of  $m$  factor.

表 3 正交试验方差分析

Table 3 Variance analysis of orthogonal test

方差来源 Source of variation	列偏差平方和 $S_j$ Column error sum of squares	自由度 $f$ Degree of freedom	均方和 Mean sum of square	$F$ 值	显著性水平 $\alpha$ Level of significance
A	8.692	3	2.897	6.702	<0.1
B	0.357	3	0.119	0.275	>0.25
C	2.947	3	0.982	2.272	>0.25
D	14.532	3	4.844	11.205	<0.05
误差	1.297	3	0.432	-	-

注:  $F_{0.05}(3,3)=9.28$ ;  $F_{0.1}(3,3)=5.39$ ;  $F_{0.25}(3,3)=2.36$ 。

确定最优组合时,选取显著因素的优水平。对于不显著因素,可结合实际试验选取适当水平。结合表 2 和表 3 可知较优组合为:放电区表面温度 40℃、放电电压 19 kV、放电频率 7 kHz、空气流量 5 L/min。

5 验证试验

为进一步考察各因素最优组合的可靠性和稳定性,按较优组合进行验证试验。较优组合条件下测得的 O<sub>3</sub> 为 5.4 mg/L,大于正交试验任一试验结

果,故该较优组合可靠且稳定。

6 结 论

本试验研究以空气为气源,考察 NTP 反应器放电区表面温度、放电电压、放电频率、空气流量 4 个因素对活性物质浓度的影响。

1) O<sub>3</sub> 质量浓度随放电区表面温度的升高整体呈降低趋势,随放电频率的升高先降低后趋于平缓。所以较低的放电区表面温度和放电频率有利于 O<sub>3</sub> 的生成。随着空气流量的增大, O<sub>3</sub> 质量浓度呈

先升高后降低的趋势。放电电压的变化对  $O_3$  质量浓度的影响相对较弱, 没有明显的增减趋势。

2) 4 个因素对臭氧质量浓度影响的大小顺序为: 空气流量 > 放电区表面温度 > 放电频率 > 放电电压。其中放电区表面温度、空气流量为显著因素, 放电电压和放电频率为不显著因素。

3) 通过正交试验分析结果, 得到 NTP 发生器产生活性物质的较优组合: 放电区表面温度  $40^\circ\text{C}$ 、放电电压  $19\text{ kV}$ 、放电频率  $7\text{ kHz}$ 、空气流量  $5\text{ L/min}$ 。经试验验证, 该较优组合条件的  $O_3$  质量浓度为  $5.4\text{ mg/L}$ , 大于正交试验任一试验结果, 该较优组合可靠且稳定。

#### [参 考 文 献]

- [1] 张德满, 李舜酩, 李凯, 等. DOC 辅助 DPF 再生方法研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(24): 107—110.  
Zhang Deman, Li Shunming, Li Kai, et al. Study on DOC auxiliary DPF regeneration method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(24): 107—110. (in Chinese with English abstract)
- [2] Walter K. Diesel engine development in view of reduced emission standards[J]. Energy, 2008, 33(2): 264—271.
- [3] Martyn V T. Progress and future challenges in controlling automotive exhaust gas emissions[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2007, 70(1): 2—15.
- [4] 杨德胜, 高希彦, 王宪成, 等. 柴油机微粒陶瓷过滤器红外再生的试验研究[J]. 内燃机学报, 2003, 21(3): 243—246.  
Yang Desheng, Gao Xiyang, Wang Xiancheng, et al. An experiment research about infrared regeneration method for diesel exhaust particulate ceramic filter[J]. Transactions of CSICE, 2003, 21(3): 243—246. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王天友, Ericlim K S, 林漫群, 等. 燃油催化微粒捕集器微粒捕集与强制再生特性的研究[J]. 内燃机学报, 2007, 25(6): 527—531.  
Wang Tianyou, Ericlim K S, Lin Manqun, et al. A research on the filtration and regeneration of fuel borne catalyst diesel particulate filter of diesel engine[J]. Transactions of CSICE, 2007, 25(6): 527—531. (in Chinese with English abstract)
- [6] Triana A P, Johnson J H, Yang S L. An experimental and numerical study of the performance characteristics of the diesel oxidation catalyst in a continuously regenerating particulate filter[C]// SAE Paper, 2003.
- [7] Yoshioka Y, Sano K, Teshima K.  $\text{NO}_x$  removal from diesel engine exhaust by ozone injection method[J]. Journal of Advanced Oxidation Technologies, 2003, 6(2): 143—149.
- [8] Young S M. Direct and indirect application of dielectric barrier discharge plasma to catalytic reduction of nitrogen oxides from exhaust gas[J]. Plasma Science and Technology, 2006, 8(2): 207—212.
- [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 Chemistry and Plasma Processing, 2008, 28(4): 511—512.
- [10] 蔡忆昔, 雷利利, 王攀, 等. 低温等离子体协同纳米催化技术降低柴油机  $\text{NO}_x$  排放[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 67—71.  
Cai Yixi, Lei Lili, Wang Pan, et al.  $\text{NO}_x$  conversion of engine with non-thermal plasma assisted nano-catalyst[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(13): 67—71. (in Chinese with English abstract)
- [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 Chemistry and Plasma Processing, 2008, 28(2): 173—187.
- [13] Okubo M, Kuroki T, Kawasaki S, et al. Continuous regeneration of ceramic particulate filter in stationary diesel engine by nonthermal-plasma-induced ozone injection[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(5): 1568—1574.
- [14] Okubo M, Kuwahara T, Kannaka Y, et al. Improvement of  $\text{NO}_x$  reduction efficiency in diesel emission using non-thermal plasma-exhaust gas recirculation combined after-treatment[C]// Industry Applications Society Annual Meeting(IAS), IEEE, 2010: 1—7.
- [15] Grundmann J, Müller S, Zahn R J. Treatment of soot by dielectric barrier discharges and ozone[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2005, 25(5): 455—466.
- [16] Grundmann J, Müller S, Zahn R J, et al. Decomposition of soot by ozone and nitrogen oxides[J]. Topics in Catalysis, 2007, 42-43(1/4): 303—305.
- [17] Lin H, Huang Z, Shangguan W, et al. Temperature-programmed oxidation of diesel particulate matter in a hybrid catalysis-plasma reactor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 3335—3342.
- [18] 温佐华, 杨国华, 刘大海.  $\text{NO}_2$  和  $\text{O}_3$  氧化柴油机微粒的对比试验研究[J]. 机电工程, 2009, 26(6): 104—106.  
Wen Zuohua, Yang Guohua, Liu Dahai. Experiment on contrast  $\text{O}_3$  to  $\text{NO}_2$  oxidation of diesel particulate matter[J]. Mechanical and Electrical Engineering Magazine, 2009, 26(6): 104—106. (in Chinese with English abstract)
- [19] Yagi S, Tanaka M. Mechanism of ozone generation in air-fed ozonisers[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1979, 12(9): 1509—1520.
- [20] Takaki K, Chang J S, Kostov KG. Atmospheric pressure of nitrogen plasmas in a ferro-electric packed bed barrier discharge reactor[J]. IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(3): 481—490.
- [21] 丁伟, 何立明, 宋振兴. 常压空气介质阻挡放电的能量传递过程[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 745—751.  
Ding Wei, He Liming, Song Zhenxing. Energy transfer processes in atmospheric dielectric barrier discharge in air[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3): 745—751. (in Chinese with English abstract)
- [22] 初庆东. 臭氧发生器放电功率诊断及剩余臭氧分解研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2002.  
Chu Qingdong. The Research on the Power Diagnostic of Ozone Producer Discharge and Dissociation of Residual Ozone Gas[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2002. (in Chinese with English abstract)
- [23] 韩文赫, 蔡忆昔, 王军, 等. 空气介质阻挡放电型间接低温等离子体系统性能试验分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 3065—3069.  
Han Wenhe, Cai Yixi, Wang Jun, et al. Experimental

- analysis on the character of air-fed indirect non-thermal plasma system using dielectric barrier discharge[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 3065—3069. (in Chinese with English abstract)
- [24] 李康华, 蔡忆昔, 李小华, 等. 水冷式低温等离子体反应器性能的试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 69—75.
- Li Kanghua, Cai Yixi, Li Xiaohua, et al. Experimental study on the performance of a water-cooled non-thermal plasma reactor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(22): 69—75. (in Chinese with English abstract)

## Optimization of working parameters for non-thermal plasma reactor

Shi Yunxi, Cai Yixi<sup>\*</sup>, Li Xiaohua, Chen Yayun, Ding Daowei

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

**Abstract:** Diesel engines are widely used in the field of industrial and agricultural production and transportation for their good economy and dynamic performance. However, with emission regulation becoming gradually stricter, how to reduce diesel particulate matter (PM) emissions effectively has become a growing concern of people. Diesel particulate filter (DPF) are considered to be the most effective means to reduce emissions of particulate matter, and the key of DPF lies in their regeneration. DPF regeneration is usually divided into two categories: active regeneration and passive regeneration. Active regeneration refers to the combustion of PM directly heated by external energy and the temperature is usually above 650°C. There are many methods of active regeneration, such as electric heating, microwave heating and combustion heating with the injected fuel. But there are many problems of these methods of regeneration, such as energy consumption, high cost and thermal damage of the carrier structure. Passive regeneration means to achieve regeneration by improving exhaust temperature to reach the minimum combustion temperature of the regeneration without the external auxiliary. There are many problems of passive regeneration problem, such as sulfur poisoning of the catalyst and low regeneration efficiency. Non-thermal plasma (NTP) technology can effectively remove the PM deposited in the DPF and it provides a new method for the DPF regeneration. The oxidation of the active substances produced by NTP reactor is stronger than O<sub>2</sub> and PM can be well oxidized by these active substances. The working parameters of NTP reactor directly affect the concentration of the active substances, so suitable working parameters are conducive to the regeneration of active substances.

This article discusses four working parameters of NTP reactor which affect the concentration of the active substances. The four factors are the surface temperature of discharge area, discharge voltage, discharge frequency and air flow. For the multi-factor experiment, orthogonal experimental design is an effective method of scientific experiments where part of the ones can reflect the comprehensive experiments. In this article, an experimental study on the performances of NTP Reactor was conducted, where air as the gas source. The optimal conditions of working parameters for Non-thermal plasma Reactor were determined by orthogonal design. Under the conditions of the concentration of O<sub>3</sub> as the test indicators, the surface temperature of discharge area, discharge voltage, discharge frequency and air flow were optimized. The experiment results were analyzed by range analysis and variance analysis, and the influence of single factor was analyzed. The results revealed that the surface temperature of discharge area and air flow were remarkable factors, while the discharge frequency and discharge voltage had inapparent affection. Lower surface temperature of discharge area and discharge frequency would increase the concentrations of O<sub>3</sub>. With the increasing of air flow rate, the concentrations of O<sub>3</sub> increases first and then decreases. There is no obvious trend of the concentrations of O<sub>3</sub> with changes in discharge voltage. The effects on the concentration of O<sub>3</sub> were in the order of air flow > surface temperature of discharge area > discharge frequency > discharge voltage. The optimal combination were surface temperature of discharge area: 40°C, discharge voltage: 19kV, discharge frequency: 7 kHz, air flow: 5 L/min. It was proved by the experiment that the optimal combination was reliable and stable. The results obtained in this study has established the foundation for DPF regeneration based on non-thermal plasma technology. These results are of great significance for development of NTP system used to decompose the PM of diesel engines and optimization of DPF regeneration based on NTP Technology.

**Key words:** diesel engines, emission control, ozone, non-thermal plasma, diesel particulate filter

(责任编辑: 鲍洪杰)

