

直接低温等离子体技术降低柴油机醛酮类污染物排放

江 飞, 蔡忆昔*, 韩文赫, 董森, 李小华, 陈亚运

(江苏大学 汽车与交通工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为了研究直接低温等离子体(DNTP)技术去除柴油机排气中醛、酮类污染物的效率,采用2,4-二硝基苯肼(DNPH)衍生法和高效液相色谱(HPLC)分析技术,分析了柴油机4种工况原机和DNTP技术处理后醛、酮类污染物比排放量的变化规律。结果表明,DNTP处理前,醛、酮类污染物比排放量随负荷的增加呈先减少后增加的趋势;DNTP处理后,柴油机醛、酮类污染物比排放量显著降低,醛、酮类污染物在75%负荷时的总去除率可达93.8%,25%负荷、50%负荷、75%负荷时,丙烯醛和丙酮、丁醛和丁酮去除率达到100%。

关键词: 柴油机, 排放控制, 试验, 低温等离子体, 高效液相色谱, 醛、酮类污染物

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.13.005

中图分类号: TK421.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-13-0031-07

江 飞, 蔡忆昔, 韩文赫, 等. 直接低温等离子体技术降低柴油机醛酮类污染物排放[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13): 31-37.

Jiang Fei, Cai Yixi, Han Wenhe, et al. Direct non-thermal plasma technology reduces emission of aldehyde and ketone in diesel engine exhaust[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(13): 31-37. (in Chinese with English abstract)

0 引言

柴油机在工作过程中会产生醛、酮类非常规排放物,虽然目前的排放法规没有对其进行限制,但醛、酮类污染物会毒害人体的呼吸系统、神经系统和免疫系统,甚至具有致畸和致癌作用,对人体危害很大^[1-3],其排放日益引起人们的关注,美国、日本等国已将其列进重点污染物名单。

醛、酮污染物的检测方法主要有光度法、气相色谱—质谱(gas chromatograph-mass spectrometer, GC-MS)联用法、高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)^[4]。其中 HPLC 技术是利用衍生剂 2,4-二硝基苯肼(2,4-dinitrophenylhydrazine, DNPH)与醛、酮类物质中羰基的专一性反应,先将待测物质转化为衍生物,最终通过色谱分离进行分析。

低温等离子体(non-thermal plasma, NTP)技术^[5-6],是一种很有发展前景且具有挑战性的技术,该技术通过气体放电产生大量的活性物质,然后与

污染物反应,从而去除污染物,具有成本低,二次污染小,去除效率高等优点。目前 NTP 技术在柴油机有害排放领域的应用可以分为直接低温等离子体(direct non-thermal plasma, DNTP)技术和间接低温等离子体技术(indirect non-thermal plasma, INTP)^[7-9];DNTP 是将柴油机排气直接通入 NTP 反应器进行处理,INTP 是将低温等离子体生成的活性物质喷入排气管中,对排放污染物进行处理。采用 DNTP 技术时,污染物在放电区域中进行反应,高能电子直接激发离解污染物质,因此处理效果好,能量利用率高。

国内外学者对 NTP 技术处理柴油机排气中醛、酮类污染物的研究比较少,主要工作集中在利用 NTP 技术处理空气中的甲醛或利用 NTP 技术处理不同模拟气氛下的醛、酮类污染物。朱天乐等研究了电晕放电去除空气中低浓度甲醛,结果表明,等离子体能够有效去除空气中的甲醛,且对甲醛的去除效率随湿度的增加而增加^[10]。梁文俊等^[11]利用 NTP 技术去除甲醛,总结了 NTP 去除甲醛的机理,分析了电场强度、进口浓度等因素对甲醛去除效率的影响。Alina Silvia Chiper 等^[12]在 N₂, N₂/O₂ 氛围下,对等离子体去除 2-庚酮进行了研究,分析了放电模式、O₂ 浓度对 2-庚酮去除效率的影响。

本研究利用 DNTP 技术对柴油机 4 种工况下的排气进行处理,利用 DNPH 衍生法结合 HPLC 技术考察了 DNTP 技术对柴油机排气中醛、酮类污染物的去除效果,分析了 DNTP 去除醛、酮类污染物的

收稿日期: 2013-01-23 修订日期: 2013-06-06

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: 江 飞(1989—),男,江苏常州人,主要从事发动机排放控制。镇江 江苏大学 汽车与交通工程学院,212013。

Email: jiangfeizk@126.com

*通信作者: 蔡忆昔(1957—),男,江苏昆山人,教授,博士生导师,主要从事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

反应机理,为进一步研究 DNTP 技术降低柴油机排放提供参考依据。

1 试验设备与方案

1.1 试验设备

试验设备包括试验用单缸风冷柴油机、CWF25U 型测功机(太原市中成动力测试设备厂)、PC4020N-24V 型真空泵(中国泰亚赛福)、LZB-10 型流量计(常州市瑞明仪表厂)、KQ-500DE 型超声波清洗机(昆山市超声仪器设备有限公司)、RE-2000A 型旋转蒸发器(上海亚荣生化仪器厂)、CTO-10AS 型高效液相色谱仪(日本岛津公司)、紫外检测器(工作波长为 360 nm,日本岛津公司)、

表 1 柴油机主要技术参数
Table 1 Diesel engine specifications

名称 Name	参数 Parameter
发动机型号 Engine type	186FA
缸径×行程 Bore×stroke/mm	86×72
压缩比 Compression ratio	19
排量 Displacement/L	0.418
标定功率 Rated power/kW	6
标定转速 Rated rotating speed/(r·min ⁻¹)	3 600

LpDNPH 脱臭氧管(美国 Supelco 公司)、Cleanert DNPH-Silica 气体采样管(200mg/1ml,天津博纳艾杰尔科技有限公司)。

1.2 试验方案

图 1 为采样系统示意图。DNTP 发生器工作频率为 9.4kHz,电压峰-峰值为 18 kV,功率为 123 W,柴油机转速稳定为 2 500 r/min,当负荷分别为 25%、50%、75%、100%时,运转 30 min 后,在 DNTP 反应器前后端采样。柴油机排气分流后进入 DNTP 反应器,采样流量为 4.2 L/min,采样时间限定为 10 min。为避免 O₃ 与 DNPH、羰基化合物发生氧化反应,导致检测结果偏低,同时避免柴油机排气中水汽和颗粒物的影响,在采样管前端联接水汽滤芯、颗粒过滤器和臭氧去除小柱。采样结束后,将采样管中吸附的颗粒取出,置于 50 mL 乙腈中,进行超声萃取 30 min,将获取的溶液旋转蒸发定容至 10 mL,避光冷藏。

色谱条件: C18 柱,流动相为乙腈和去离子水,流速为 1.2 mL/min,柱温为 30℃;采用梯度淋洗方法,梯度淋洗程序为: 0~10 min,乙腈和去离子水体积比为 50:50,10~45 min,乙腈在流动相中的体积比逐渐过渡到 100:0,外标法定量。

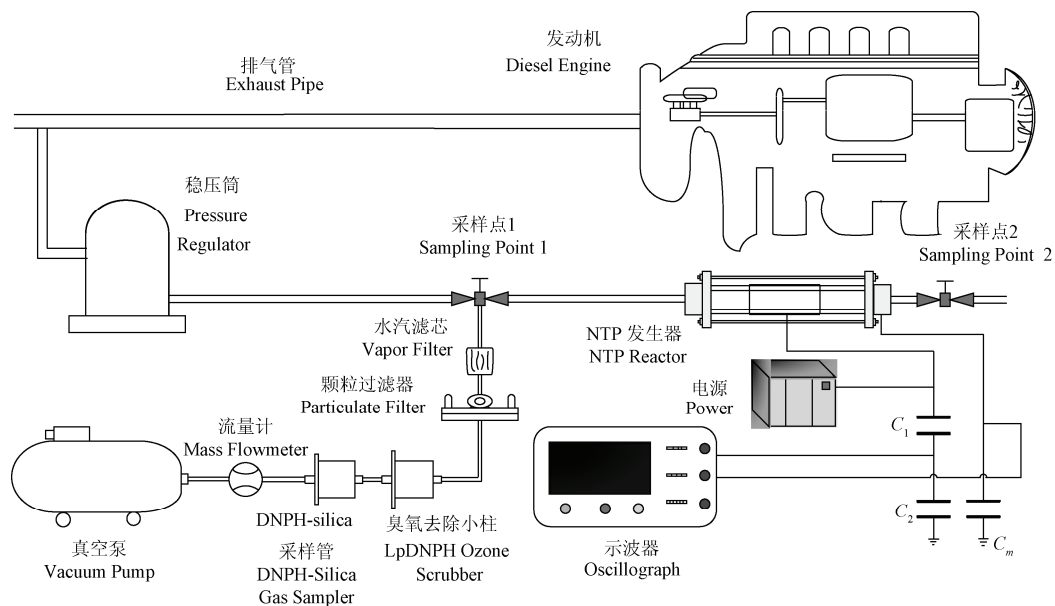


图 1 试验系统布置示意图

Fig.1 Schematic drawing of experimental apparatus

2 试验结果与分析

2.1 醛、酮类污染物检测结果与分析

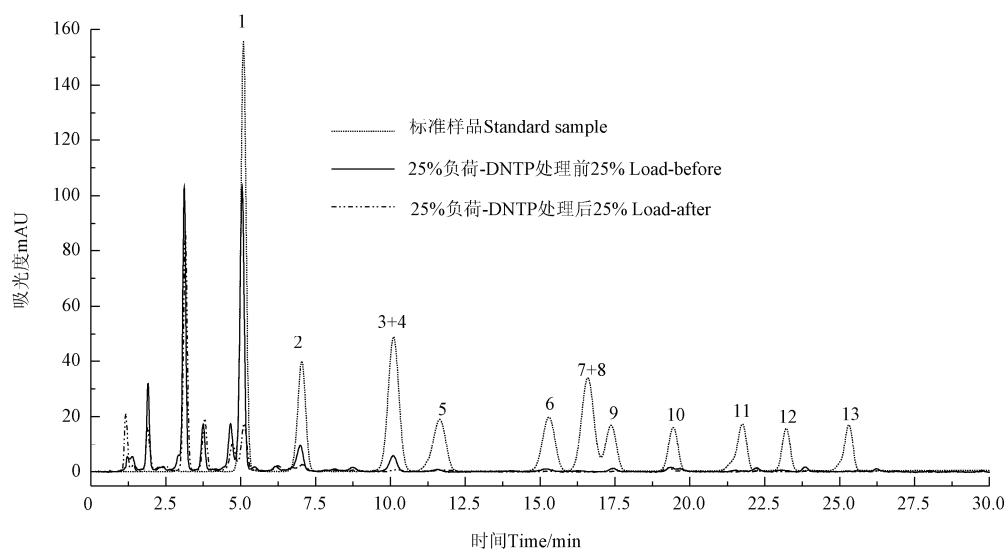
图 2 为标准样品、25%负荷原机样品和 DNTP 处理后样品的色谱分离图。采用 HPLC 技术对样品中的醛、酮类污染物进行检测,可以检测到 13 种

醛、酮类污染物,由于丙烯醛和丙酮、丁醛和丁酮较难分离,故在本研究采用的色谱条件下,将丙烯醛和丙酮、丁醛和丁酮合在一起计量。

表 2 列出了处理前 13 种醛、酮类污染物的比排放量。由表 2 可见,醛、酮类污染物比排放量随负荷的增加呈先减少后增加的趋势,因此醛、酮类

污染物总比排放量随柴油机负荷的增加亦呈先减少后增加的趋势。同一负荷下甲醛的比排放量均为最大, 4 种工况下分别为 83.22、15.26、25.06、27.58 mg/(kW·h), 乙醛的比排放量居第二位, 分别为 12.03、3.47、8.92、19.97 mg/(kW·h), 丙烯醛和丙酮、丙醛、巴豆醛、丁醛和丁酮、甲基丙烯醛、苯甲醛、戊醛的比排放量在 50% 负荷时达到最小值, 分别为 0.43、0.78、0.96、0、0.25、0.28、0.23 mg/(kW·h), 对甲基苯甲醛和己醛的比排放量在 75% 负荷时达到最小值, 分别为 0.08、0.04 mg/(kW·h)。由于高分子 HC 在氧化过程中一般生成低分子 HC, 而不是其氧化物, 因此在发动机排放物中, 低分子醛、酮类化合物较多, 特别是甲醛^[13]。柴油机小负

荷运转时, 空燃比较大, 混合气温度较低, 氧化作用较弱, 燃料不完全燃烧, 同时燃烧室壁面温度低, 形成的较厚淬熄层是低温氧化反应的温床, 其中存在大量醛、酮类污染物^[14-15]。因此, 小负荷时柴油机醛、酮类污染物的生成量较多; 随着负荷的增大, 柴油机缸内的温度, 压力大幅升高, 气流运动不断加强, 燃料滞燃期缩短, 醛、酮类污染物被再次氧化的几率增加, 且排气温度升高, 醛、酮类污染物后期氧化加强^[16-17], 因此醛、酮类污染物生成量随着负荷的增加有所减少; 但随着负荷的进一步增加, 缸内混合气较浓, 油气混合质量劣化, 燃料氧化不完全造成醛、酮类污染物生成量再次升高^[18]。



注: 1.甲醛-DNPH; 2.乙醛-DNPH; 3+4.丙酮-DNPH+丙烯醛-DNPH; 5.丙醛-DNPH; 6.巴豆醛-DNPH; 7+8.丁醛-DNPH+2-丁酮-DNPH; 9.甲基丙烯醛-DNPH; 10.苯甲醛-DNPH; 11.戊醛-DNPH; 12.对甲基苯甲醛-DNPH; 13.己醛-DNPH.

Note: 1. Formaldehyde-DNPH; 2. Acetaldehyde-DNPH; 3+4. Acrolein-DNPH+Acetone-DNPH; 5. Propionaldehyde-DNPH; 6. Crotonaldehyde-DNPH; 7+8. Butyraldehyde-DNPH+2-butanone-DNPH; 9. Methacrolein-DNPH; 10. Benzaldehyde-DNPH; 11. Valeraldehyde-DNPH; 12. *p*-tolualdehyde-DNPH; 13. Hexaldehyde-DNPH.

图 2 标准样品和 25% 负荷时 DNTP 处理前后样品的色谱分离图

Fig.2 Chromatography of standard sample, before and after the treatment of DNTP at 25% load

表 2 DNTP 处理前醛、酮类污染物比排放量

Table 2 Specific aldehyde and ketone emissions before treatment of DNTP

名称 Name	25%负荷(25% load)	50%负荷(50% load)	75%负荷(75% load)	100%负荷(100%load)
甲醛 Formaldehyde	83.22	15.26	25.06	27.58
乙醛 Acetaldehyde	12.03	3.47	8.92	19.97
丙烯醛+丙酮 Acrolein+ acetone	3.80	0.43	1.54	2.02
丙醛 Propionaldehyde	3.81	0.78	1.97	2.31
巴豆醛 Crotonaldehyde	2.21	0.96	1.19	3.59
丁醛+丁酮 Butyraldehyde+2-butanone	0.93	0	0	0.99
甲基丙烯醛 Methacrolein	2.83	0.25	0.77	1.39
苯甲醛 Benzaldehyde	1.70	0.28	0.40	0.05
戊醛 Valeraldehyde	2.47	0.23	0.49	1.96
对甲基苯甲醛 <i>p</i> -tolualdehyde	2.17	0.19	0.08	1.19
己醛 Hexaldehyde	0.96	0.45	0.04	2.53
总量 Total	116.11	22.29	40.45	63.53

表 3 DNTP 处理后醛、酮类污染物比排放量
Table 3 Specific aldehyde and ketone emissions after treatment of DNTP

名称 Name	25%负荷(25% load)	50%负荷(50% load)	75%负荷(75% load)	100%负荷(100%load)
甲醛 Formaldehyde	19.31	8.19	1.46	18.24
乙醛 Acetaldehyde	3.00	0.50	0.15	5.62
丙烯醛+丙酮 Acrolein+ acetone	0	0	0	1.77
丙醛 Propionaldehyde	1.12	0.37	0.20	0.54
巴豆醛 Crotonaldehyde	1.22	0.62	0.42	0.46
丁醛+丁酮 Butyraldehyde+2-butanone	0	0	0	0.23
甲基丙烯醛 Methacrolein	0.47	0.14	0.03	0.44
苯甲醛 Benzaldehyde	0.51	0.36	0.25	0.55
戊醛 Valeraldehyde	0	0.38	0	0.10
对甲基苯甲醛 P-tolualdehyde	0.14	0	0	0.13
己醛 Hexaldehyde	0	0.24	0	0.10
总量 Total	25.26	8.81	2.50	27.82

表 3 列出了 DNTP 处理后 13 种醛、酮类污染物的比排放量。由表 3 可见，柴油机醛、酮类污染物的比排放量明显降低，在 75% 负荷时，甲醛、乙醛去除率达到最大值，分别为 94.2%、98.3%。25%、50% 和 75% 负荷时丙烯醛和丙酮、丁醛和丁酮可完全去除，醛、酮类污染物比排放量随柴油机负荷的增加整体上呈先减少后增加的趋势，但与原机相比，变化较为缓和。这归因于介质阻挡放电 (dielectric barrier discharge, DBD) 过程中产生的大量的活性物质 (高能电子、离子、激发态原子、激发态分子)^[19]，可与排气中的醛、酮类物质发生反应，生成 CO、CO₂ 和 H₂O。影响 DNTP 去除醛、酮类污染物的因素很多，如排气中 O₂ 浓度、排气温度、排气在反应器中的滞留时间、醛、酮类物质的初始浓度等。一方面 O₂ 的存在可促进醛、酮类污染物的氧化去除，另一方面由于 O₂ 的电负性较强，浓度过高会明显降低 DNTP 中的电子密度^[20]，影响放电区域的电场分布^[21]，从而降低醛、酮污染物的去除效果。有研究表明，当 O₂ 浓度小于 5% 时，甲醛的去除效率随 O₂ 浓度的升高而升高；当 O₂ 浓度大于 5% 时，随着 O₂ 浓度的增大，甲醛的去除效率降低^[22]。柴油机实际排气中 O₂ 浓度通常大于 5%，随着负荷的增加，排气中的 O₂ 含量降低，DNTP 对醛、酮类污染物的去除能力增强，故仅从 O₂ 因素考虑，DNTP 对醛、酮类污染物的去除能力随着负荷的增加而增加。柴油机小负荷运转时，与大负荷相比产生较多的醛、酮类污染物，试验时 DBD 上所加的电压，频率始终保持一定值，产生的活性物质的含量基本不变，因此随着负荷的增加，醛、酮类污染物与活性物质碰撞反应几率变大^[23]，去除效率增强。柴油机负荷增大，排气温度升高，O 原子和 OH 基活性增强，增强了 DNTP 对醛、酮类污染

物的去除能力^[24]，因此当负荷小于 75% 时，随着负荷的增加，醛、酮类污染物比排放量逐渐降低；随着负荷继续升高，平均有效压力增大，排气道压差增大，排气温度升高，排气流速增加，醛、酮类污染物浓度回升，气体在 DNTP 反应器中滞留时间减少，亚稳态 N₂ 分子减少，同时 O₃ 分解成 O₂ 的速率加快，削弱了 DNTP 对醛、酮类污染物的去除能力^[25]。当负荷大于 75% 时，这种抑制作用占主导地位，故随着负荷的增加，醛、酮类污染物的比排放量逐渐增加。甲醛的氧化所需能量较高，不易氧化^[26]，并且各个负荷下的甲醛浓度都很高，这导致了 DNTP 处理后甲醛的比排放量仍高于其他几种醛、酮类污染物。

2.2 臭氧生成活性

空气中的有机物可以参与 O₃ 的生成，而不同的有机物对 O₃ 生成的促进能力不同。美国加利福尼亚州“低排放和清洁燃料”法规使用最大臭氧生成活性值 (maximum incremental reactivity, MIR) 估算反应性调整因子 (reactivity adjustment factors, RAFs)^[27-29]，以此评估代用燃料车辆排放的非甲烷有机气体 (non-methane organic gases, NMOG) 对环境的危害。醛、酮类化合物具有比较高的臭氧活性，对大气环境造成的污染较为严重。柴油机排气中非甲烷有机物质的总臭氧生成反应活性 MIR_{sum} 可按式 (1) 计算。

$$MIR_{sum} = \sum(NMOG_i \cdot MIR_i) \quad (1)$$

式中， $NMOG_i$ 表示某种非甲烷有机气体的比排放量值， MIR_i 表示某种非甲烷有机气体的最大生成臭氧活性值。

本文考察的 13 种醛、酮类化合物的 MIR 如表 4 所示^[13,27]；根据式 (1) 计算出的 DNTP 处理前后的 MIR_{sum} 如表 5 所示。

表 4 13 种醛、酮类污染物的臭氧生成反应活性 MIR
Table 4 MIR of 13 kinds of aldehyde and ketone emissions

污染物名称 Name	MIR	污染物名称 Name	MIR
甲醛 Formaldehyde	7.2	己醛 Hexaldehyde	3.79
乙醛 Acetaldehyde	5.5	苯甲醛 Benzaldehyde	-0.57
丙烯醛 Acrolein	6.77	丁酮 2-butanone	1.18
丙醛 Propionaldehyde	6.53	甲基丙烯醛 Methacrolein	6.77
丙酮 Acetone	0.56	戊醛 Valeraldehyde	4.41
丁醛 Butyraldehyde	5.26	对甲基苯甲醛 P-tolualdehyde	-0.57
巴豆醛 Crotonaldehyde	5.42		

表 5 醛、酮类污染物的总臭氧生成反应活性 MIR_{sum}
Table 5 MIR_{sum} of aldehyde and ketone emissions

工况 Conditions/%	MIR_{sum}	MIR_{sum}
	(处理前 Before treatment)	(处理后 After treatment)
25	764	172
50	145	56
75	262	15
100	381	179

由表 5 可见, DNTP 处理后, MIR_{sum} 明显降低, 平均降幅达 72.8%, 其中在 75% 负荷时达 94.3%。因此, DNTP 可有效降低柴油机醛、酮类污染物排放, 减轻对环境的危害。

3 结 论

利用 HPLC 技术研究了不同工况下, DNTP 对柴油机排气中醛、酮类污染物的去除效果, 得出以下结论:

1) 在本研究的试验条件下, 可以检测到 13 种醛、酮类污染物, 其中甲醛含量最高, 其余 12 种醛、酮类污染物含量较少。

2) 随着负荷的增加, DNTP 处理前, 醛、酮类污染物比排放量随负荷的增加呈先减少后增加的趋势; DNTP 处理后, 25% 负荷、50% 负荷、75% 负荷时, 丙烯醛、丙酮、丁醛和丁酮能完全去除, 醛、酮类污染物总比排放量随柴油机负荷的增加亦呈先减少后增加的趋势, 但变化趋势较原机缓和。

3) DNTP 处理后, 柴油机排气中醛、酮类污染物的总臭氧生成反应活性 MIR_{sum} 明显降低, 平均降幅达 72.8%, 75% 负荷时达 94.3%。因此, DNTP 可有效降低柴油机醛、酮类污染物排放, 减轻对环境的危害。

[参 考 文 献]

[1] Sergio Machado Correa, Graciela Arbilla. Carbonyl emissions in diesel and biodiesel exhaust[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(2): 769—775.
[2] James P Szybist, Andre L Boehman, Daniel C Haworth, et al. Premixed ignition behavior of alternative diesel

fuel-relevant compounds in a motored engine experiment[J]. Combustion and Flame, 2007, 149(1/2): 112—128.

- [3] Peng Chiungyu Yang Hishsien, Lan Chenghang, et al. Effects of the biodiesel blend fuel on aldehyde emissions from diesel engine exhaust[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(2): 906—915.
[4] 国家环保总局. 空气和废气检测和分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003: 679—682.
[5] 裴梅香, 林赫, 黄震. 柴油机排气后处理技术及发展方向[J]. 小型内燃机与摩托车, 2003, 23(2): 35—38. Pei Meixiang, Lin he, Huang Zhen. Technology and development trends in after treatment of diesel exhausts[J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2003, 23(2): 35—38. (in Chinese with English abstract)
[6] Bai Yanhong, Chen Jierong, Li, Xiaoyong, et al. Non-thermal plasma chemistry as a tool for environmental pollutant abatement[J]. Reviews of environmental contamination and toxicology, 2009, 201: 117—136.
[7] Yoshioka Y, Sano K, Teshima K. 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 applications 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—522.
[10] Yajuan Wan, Xing Fan, Tianle Zhu. Removal of low-concentration formaldehyde in air by DC corona discharge plasma[J]. Chemical engineering journal, 2011, 171(1): 314—319.
[11] 梁文俊, 李坚, 金毓峯, 等. 低温等离子体法处理甲醛气体[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(4): 50—52. Liang Wenjun, Li Jian, Jin Yuquan, et al. Treatment of formaldehyde with cold plasma[J]. Techniques and equipment for environmental pollution control, 2005, 6(4): 50—52. (in Chinese with English abstract)
[12] Alina Silvia Chiper, Nicole Blin-simiand, Michel Heninger, et al. Detailed characterization of 2-Heptanone conversion by dielectric barrier discharge in N₂ and N₂/O₂ mixture[J]. American chemical society, 2010, 114(1): 397—407.

- [13] 何超, 葛蕴珊, 谭建伟, 等. 生物柴油醛酮类化合物的排放特性研究[R]. 长春: 中国内燃机学会燃烧、节能、净化分会, 2008.
- [14] 刘巽俊. 内燃机排放与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 11—14.
- [15] 李方成, 宋崇林, 刘成, 等. 柴油机燃用含甲醇的柴油混合燃料羰基污染物的排放特性[J]. 燃烧科学与技术, 2008, 14(2): 157—164.
Li Fangcheng, Song Chonglin, Liu Cheng, et al. Characteristic of carbonyl compounds emissions from a diesel engine fueled with methanol-containing diesel[J]. Journal of combustion science and technology, 2008, 14(2): 157—164. (in Chinese with English abstract)
- [16] Kristine Drobot, Wai K Cheng, Frederick H trinker, et al. Hydrocarbon oxidation in the exhaust port and runner of a spark ignition engine[J]. Combustion and flame, 1994, 99(2): 422—430.
- [17] 王忠, 许广举, 施爱平, 等. 柴油机醛酮污染物排放规律的试验研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(1): 177—179.
Wang Zhong, Xu Guangju, Shi Aiping, et al. Experimental study on aldehydes and ketones emission characteristic of diesel engine[J]. Journal of engineering thermophysics, 2011, 32(1): 177—179. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李博, 楼狄明, 谭丕强, 等. 发动机燃用生物柴油的常规和非常规排放特性[J]. 内燃机工程, 2009, 30(5): 22—26.
Li Bo, Lou Diming, Tan Piqiang, et al. Regulated and non-regulated emission characteristics of an engine fuelled with bio-diesel[J]. Internal combustion engine engineering, 2009, 30(5): 22—26. (in Chinese with English abstract)
- [19] Koeta O, Blin-Simiand N, Faider W, et al. Decomposition of acetaldehyde in atmospheric pressure filamentary nitrogen plasma[J]. Plasma chemistry and plasma processing, 2012, 32(5): 991—1023.
- [20] Ding Huixian, Zhu Aimin, Lu Fugong, et al. Low-temperature plasma-catalytic oxidadtion of formaldehyde in atmospheric pressure gas streams[J]. Institute of physics publishing, 2006, 39(16): 3603—3608.
- [21] How Ming Lee, Moo Been Chang. Gas-phase removal of acetaldehyde via packed-bed dielectric barrier discharge reactor[J]. Plasma chemistry and plasma processing, 2001, 21(3): 9—343.
- [22] Ding Huixian, Zhu Aimin, Yang Xuefeng, et al. Removal of formaldehyde from gas streams via packed-bed dielectric barrier discharge plasma[J]. Institute of physics publishing, 2005, 38(23): 4160—4167.
- [23] Ou Hongxiang, Yi Chengwu, Qu Wenming, et al. Study on formaldehyde degradation using strong ionization discharge[J]. IEEE, 2010, 2094—2097.
- [24] N Blin-Simiand, S Pasquiers, F Jorand, et al. Removal of formaldehyde in nitrogen and in dry air by a DBD: Importance of temperature and role of nitrogen metastable states[J]. Journal of Physics D: Appl. Phys. 2009, 42(12): 1—5.
- [25] Jintawat Chaichanawong, Wiwut Tanthapanichakoon, Tawatchai Charinpanitkul, et al. High-temperature simultaneous removal of acetaldehyde and ammonia gases using corona discharge[J]. Science and technology of advanced materials, 2005, 6: 319—324.
- [26] 彭美春, 王贤烽, 王海龙. 柴油-生物柴油-乙醇混合燃料发动机的醛类化合物排放特性研究[J]. 内燃机学报, 2010, 28(2): 127—132.
Peng Meichun, Wang Xianfeng, Wang Hailong. Study on aldehydes emissions of BE-D blend fuel engine[J]. Transactions of CSICE, 2010, 28(2): 127—132. (in Chinese with English abstract)
- [27] William P L Carter. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. Journal of the air and waste management association, 1994, 44(7): 881—899.
- [28] 尤可为, 葛蕴珊, 何超, 等. 柴油机燃用生物柴油的非常规污染物排放特性[J]. 内燃机学报, 2010, 28(6): 506—509.
You Kewei, Ge Yunshan, He Chao, et al. Unregulated emissions from a diesel engine fueled with biodiesel[J]. Transactions of CSICE, 2010, 28(6): 506—509. (in Chinese with English abstract)
- [29] Chang Chihchung, Lo Jiunnguang, Wang Jialin. Assessment of reducing ozone forming potential for vehicles using liquefied petroleum gas as an alternative fuel[J]. Atmospheric environment, 2001, 35(35): 6201—6211.

Direct non-thermal plasma technology reduces emission of aldehyde and ketone in diesel engine exhaust

Jiang Fei, Cai Yixi^{*}, Han Wenhe, Dong Miao, Li Xiaohua, Chen Yayun

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

Abstract: A non-thermal plasma (NTP) technique has currently been investigated intensively as a promising technology for a diesel engine after treatment to abate PM, HC and NO_x. However, there is little research about NTP technique treating the aldehyde and ketone emissions of a diesel engine. In this study, Direct Non-thermal Plasma (DNTP) technique is employed to treat the single cylinder diesel exhaust. The variation of the specific aldehyde and ketone emissions of a diesel engine at four loads before and after the treatment of DNTP is studied with 2, 4-dinitrophenylhydrazine (DNPH) derivatization method and a high performance liquid chromatography (HPLC) analysis technique. The results show that 13 kinds of aldehyde and ketone emissions could be detected under this experimental condition. Before the treatment of DNTP, with the growth of the diesel load, the specific aldehyde and ketone emissions decrease first and then increase. The specific emissions of formaldehyde are 83.22, 15.26, 25.06, 27.58 mg/(kW·h) and at each load are the largest. The specific emissions of acetaldehyde are 12.03, 3.47, 8.92, 19.97 mg/(kW·h). The minimum specific emissions of acrolein and acetone, propionaldehyde, crotonaldehyde, butyraldehyde and butanone, methacrolein, benzaldehyde, valeraldehyde are 0.43, 0.78, 0.96, 0, 0.25, 0.28, 0.23 mg/(kW·h) respectively at 50% load. The minimum specific emissions of p-tolualdehyde and hexaldehyde are 0.08, 0.04 mg/(kW·h) respectively at 75% load. After the treatment of DNTP, the specific aldehyde and ketone emissions decreases first and then increases with the growth of the diesel load, but the trend becomes mild and the specific aldehyde and ketone emissions reduce remarkably. Total removal efficiency of aldehyde and ketone emissions could reach 93.8% at 25% load, 50% load, and 75% load. Removal efficiency of acrolein and acetone, butyraldehyde and 2-butanone could reach almost 100%. At the same time, total ozone formation potentials decrease dramatically. These results provide a reference for reducing the diesel engine exhaust emissions with a DNTP technique.

Key words: diesel engine, emission control, experiments, non-thermal plasma, high performance liquid chromatography, aldehyde and ketone emissions

(责任编辑: 信世强)