DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.003

柴油机燃用乙醇-生物柴油-柴油的醛酮类排放物研究*

张学敏[1]　裘　博[1]　谭建伟[2]　王晓燕[1]　李洪文[1]

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 北京理工大学汽车动力性与排放测试国家专业实验室, 北京 100081)

【摘要】 利用高效液相色谱仪对柴油机燃用普通柴油(D)和乙醇-生物柴油-柴油(EBD)排放物中的醛酮类化合物进行比较分析。研究结果表明:标定转速,10% 和 50% 负荷下,EBD 总排放量比 D 分别降低了 2.98% 和 16.42%,全负荷下,升高了 11.79%;排放物以甲醛、乙醛、丙烯醛和丙酮等 C1 ~ C3 污染物为主,占醛酮排放物 91.9% 以上;负荷增加或转速降低,醛酮类排放物减少。

关键词: 生物柴油　乙醇　柴油　非常规排放　醛酮排放物

中图分类号: TK421.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2012)07-0013-06

Carbonyl Compounds Emission from Engine Fueled with Ethanol – Biodiesel – Diesel

Zhang Xuemin[1]　Qiu Bo[1]　Tan Jianwei[2]　Wang Xiaoyan[1]　Li Hongwen[1]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*

2. *National Laboratory of Auto Performance & Emission Test*, *Beijing Institute of Technology*, *Beijing* 100081, *China*)

Abstract

The different carbonyl compounds emission from ethanol – biodiesel – diesel and diesel were investigated using high-performance liquid chromatography. The result showed that at rated speed, the overall specific emission of carbonyl compounds decreased by 2.98% at 10% load and 16.42% at 50% load, meanwhile, increased by 11.79% at full load. The C1 ~ C3 pollutants of formaldehyde, acetaldehyde, acrolein-acetone are the main carbonyl compounds, and up to 91.9% among carbonyl compounds emission. In general, the emission of carbonay compounds decreased as load increasing or speed decreasing.

Key words　Bio-diesel fuel, Ethanol, Diesel, Unregulated emission, Carbonyl compounds

引言

生物柴油和乙醇作为可再生资源,替代一部分柴油燃料,有助于缓解柴油供应紧张的局面,且能改善大气的污染状况,可以明显地降低二氧化硫和碳烟微粒的排放量,因此近年来受到关注[1]。

然而,对燃烧乙醇燃料尾气中的非常规排放物,譬如醛类和酮类的排放研究较少,对醛酮类化合物的监测和研究一直是环境科学的研究重点,大多数的醛酮类化合物还具有较高的臭氧活性,容易形成二次污染,破坏大气环境。这些非常规排放物虽属微量排放物(排放体积分数量级为 $0 \sim 1 \times 10^{-4}$),但它们在乙醇燃料大规模燃用中的累积排放量及其对环境的潜在影响仍不可忽视[2~5]。

本试验依据美国环保署(EPA)发布的标准方法 TO-11A[6],对发动机燃用乙醇-生物柴油-柴油(EBD)进行稀释采样后,对经过前处理的排放物中的 14 种醛酮化合物样品利用安捷伦高效液相色谱仪(HPLC)进行分析处理。

收稿日期: 2011-09-03　修回日期: 2011-10-14

*国家自然科学基金资助项目(50876013)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2012QJ013)

作者简介: 张学敏,副教授,主要从事车辆动力与能源、农业机械节能与环保技术研究,E-mail: xuemin_zh@cau.edu.cn

通讯作者: 李洪文,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作技术研究,E-mail: lhw@cau.edu.cn

1 原理

依据 EPA 的标准方法 TO－11A,采用表面涂有 2,4-二硝基苯肼(2,4-DNPH)吸附剂的采样管(美国 Supelco 公司)采集发动机排气中低碳数羰基化合物样品。样品中的醛酮类化合物在酸性条件下与固体吸附剂表面涂附的 2,4-二硝基苯肼反应,形成稳定有色的腙衍生物而被保留。样品由液相色谱仪进行分析[7]。

高效液相色谱仪(HPLC)包括:在线真空脱气机、紫外检测器、柱温箱、四元泵和自动进样器,色谱柱为 Agilent Eclipse XDB－C18(4.6 mm×150 mm,5 μm)。紫外检测器中装置有可发射 190～600 nm 紫外线的氘弧放电灯作为辐射源[8]。具体的采样分析条件为:流速 1.0 mL/min,进样体积 25 μL,流动相 60% 乙腈/40% 水,检测波长为 360 nm。

在规定的色谱分析条件下,根据保留时间的不同,采用含有 14 种醛酮腙衍生物的标准溶液对试验采集样品中的未知醛酮组分进行定性分析。标准溶液中的 14 种醛酮类化合物为:乙醛、丙酮、丙烯醛、苯甲醛、2-丁酮、丁醛、丁烯醛、甲醛、正己醛、甲基丙烯醛、戊醛、丙醛、甲基苯甲醛、环己酮,各物质(与 DNPH 反应)质量浓度见表 1。

表 1 标准溶液中醛酮-二硝基苯肼的质量浓度

Tab.1 Carbonyl compounds concentration in standard solution

化学物质	质量浓度/μg·mL^{-1}	纯度/%
乙醛	2.000±0.08	99.3
丙酮	2.002±0.08	99.9
丙烯醛	2.062±0.08	97.1
苯甲醛	2.004±0.08	99.7
2-丁酮	2.008±0.08	98.0
丁醛	2.000±0.08	99.6
丁烯醛	2.008±0.08	98.6
甲醛	4.000±0.16	100
正己醛	2.004±0.08	99.6
甲基丙烯醛	2.004±0.08	98.9
戊醛	2.002±0.08	99.2
丙醛	2.000±0.08	99.7
甲基苯甲醛	2.000±0.08	99.3
环己酮	5.000±0.20	100

图 1 是 14 种醛酮化合物在 XDB－C18 柱上的标准色谱图,除丙烯醛和丙酮的保留时间几乎相同,导致在色谱柱中很难分开以外,其余醛酮化合物都可以较好地被分离。试验条件下,同一种类组分的保留时间相同,因此将采集样品中各未知组分出峰

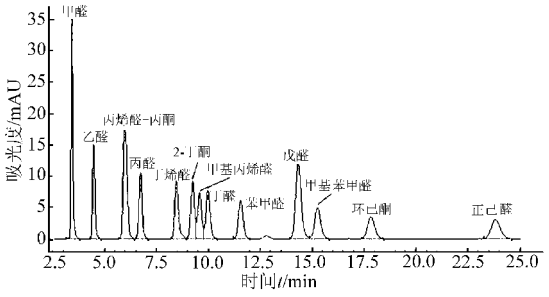

图 1 醛酮腙衍生物在 XDB－C18 柱上的标准色谱图

Fig.1 Carbonyl compounds standard chromatogram on column XDB－C18

的保留时间与标样进行对比,即可对样品定性。由于每次进样时存在不可避免的仪器误差,允许保留时间有一定的偏差。

对于样品中醛酮化合物的定量分析,采用峰面积外标法。高效液相色谱仪中设置的标液进样体积分别为 0.5、1、2、5、10、20 μL,在给定的色谱条件下进行分析,并记录其峰面积。为便于计算,根据各类醛酮腙衍生物的反应方程式,将其含量换算,得出对应的醛酮化合物的含量(n_g)。以醛酮化合物目标组分的含量(n_g)为横坐标,以扣除空白响应后的峰面积平均值为纵坐标绘制出标准曲线。图 2 是试验中所用的甲醛标准曲线。

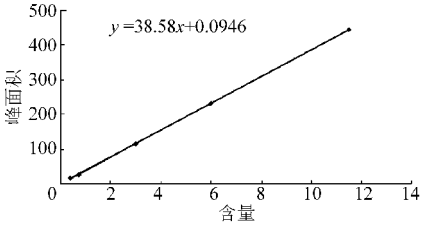

图 2 甲醛标准曲线

Fig.2 Formaldehyde standard curve

根据标准曲线,对采集样品各组分的峰面积含量进行回归,从而达到定量分析的目的。但是由于 2,4-DNPH 采样管极易吸附空气中的醛酮化合物,导致醛酮空白值增高。因此测量前需对采样管进行空白试验,扣除空白管中醛酮各组分的含量,避免其对分析结果的影响。

14 种化学物质的曲线方程及相关系数见表 2。可见在所配制的浓度范围内,得到了良好的线性关系,相关系数大于 0.999。

相对偏差计算式为

$$R=\sqrt{\frac{\sum(X_i-X)^2}{n-1}}\frac{1}{X}\times 100\% \qquad (1)$$

式中 X_i——第 i 次测得的保留时间或峰面积

X——n 次测量结果的算术平均值

i——测量序号

n——测量次数

表 2　醛酮类化合物的标准曲线($n=5$)

Tab. 2　Carbonyl compounds standard curve ($n=5$)

化学物质	标准曲线方程	相关系数	R/%
甲醛	$Y=39.583\,155\,4+0.094\,579\,8$	0.999 9	0.31
乙醛	$Y=29.411\,820\,2x+0.311\,986$	0.999 9	0.27
丙烯醛 + 丙酮	$Y=50.565\,250\,2x-0.169\,209\,6$	0.999 9	0.22
丙醛	$Y=23.041\,271\,4x-0.270\,252\,5$	0.999 9	0.23
丁烯醛	$Y=20.990\,819\,7x+0.125\,744\,9$	0.999 9	0.19
2-丁酮	$Y=22.272\,890\,7x-2.269\,031\,3$	0.999 1	0.28
甲基丙烯醛	$Y=16.895\,953x+1.447\,746\,2$	0.999 5	0.29
丁醛	$Y=18.991\,974\,7x+0.619\,941\,1$	0.999 9	0.84
苯甲醛	$Y=13.380\,110\,6x-0.109\,131\,3$	0.999 9	0.14
戊醛	$Y=35.823\,550\,2x-0.007\,246\,6$	0.999 9	0.19
甲基苯甲醛	$Y=12.969\,312\,6x-0.258\,260\,9$	0.999 9	0.31
环己酮	$Y=4.867\,506\,69x-0.014\,475\,2$	0.999 8	0.26
正己醛	$Y=13.150\,529\,9x-0.044\,724\,4$	0.999 9	0.16

通过安捷伦高效液相色谱仪(HPLC)的分析试验,可以得到试验所采集的醛酮化合物含量,再根据采样流量、总排气流量、稀释比,即可计算得到各工况下燃烧 EBD 和 D 的醛酮化合物总排放质量。

$$M=\frac{16.67mQ_Eq}{Q_S} \tag{2}$$

式中　M——醛酮化合物的总排放质量,mg

m——DNPH 所采集的醛酮质量,μg

Q_E——发动机稀释后总排气流量,m^3/h

Q_s——采样流量,mL/min

q——稀释比

根据发动机功率和采样试验时间,得到比排放量

$$B=\frac{M}{P_m\Delta t} \tag{3}$$

式中　P_m——发动机功率,kW

Δt——采样时间,h

2　试验

2.1　试验系统

发动机非常规排放物的采样系统如图 3 所示。采用一个射流式稀释器(芬兰 Dekati 公司)对部分排气进行稀释,稀释比大约为 8,实际稀释比通过测量稀释前后的 CO_2 体积分数计算求得。通过 2,4-DNPH 采样管采集醛酮化合物。为了加大采样流量,试验中采用恒流量采样泵(美国 SKC 公司,AirChek2000)提供采样动力。为了确保流量恒定,采样开始与结束前使用皂膜流量计(美国 SKC 公司)进行流量校准,保证流量偏差小于 5%。

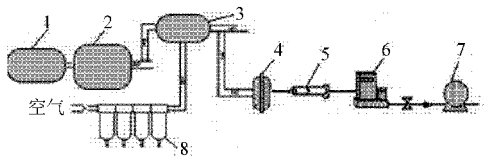

图 3　排放测试系统

Fig. 3　Emission testing system

1. 测功机　2. 发动机　3. 稀释器　4. 滤纸架　5. 2,4-DNPH　6. 流量计　7. 采样泵　8. 空气滤清器

本试验使用的发动机台架包括常州柴油机厂生产的 S195 型单缸柴油机和凯迈机电公司生产的 CW50 型电涡流测功机。发动机主要技术参数如表 3。

表 3　发动机主要技术参数

Tab. 3　Engine technical parameters

参数	数值
型式	单缸水冷直喷式
缸径 × 行程/mm × mm	95 × 115
吸气方式	自然吸气
排量/L	0.815
压缩比	20
标定功率(转速)/kW(r/min)	8.8(2 000)
最大转矩(转速)/N·m(r/min)	53.4(1 700)
供油提前角/(°)	18
喷油泵型式	柱塞式

2.2　试验燃料

试验采用两种燃料:石化柴油(D);生物乙醇柴油(EBD)混合燃料由 20% 乙醇、35% 生物柴油、40% 柴油,并添加正丁醇和异辛醇混合而成。乙醇是 95% 的含水乙醇。经过验证,这种配比的燃料稳定性和经济性最佳。燃料的主要性能如表 4 所示。

表 4　燃油的主要特性

Tab. 4　Specification of fuel

参数	柴油	生物乙醇柴油	标准
密度/$kg\cdot m^{-3}$	834.8	837.0	SH/T 0604—2000
粘度(20℃)/$mm^2\cdot s^{-1}$	3.79	3.57	GB/T 265—1988
闪点	76	20	GB/T 261—2008
十六烷值	51.1	41.4	GB/T 386—2010
热值/$MJ\cdot kg^{-1}$	42.8	37.23	GB/T 384—1981

2.3　试验内容

本试验选取 5 个典型工况进行采样,每个工况采样 10 min,各工况见表 5。试验中分别对 0 号柴油和混合燃料的排放进行采样和定性定量分析,然后对两种燃料的排放进行比较分析。

表 5 试验工况

Tab. 5 Testing modes

工况序号	发动机转速/r·min^{-1}	负荷百分比/%	采样时间/min
1	2 000	100	10
2	2 000	50	10
3	2 000	10	10
4	1 700	100	10
5	1 700	50	10

2.4 采样及分析方法

(1)醛酮类化合物的采样方法

采样泵流量设为 110 mL/min,各工况采样时间由排气浓度而定。采样结束后,将 DNPH 样品用铝箔袋封装,避光置于冰箱内 -10℃保存,留待分析。

(2)醛酮类化合物的分析方法

试验中先对采集样品进行前处理,用乙腈作为溶剂萃取采样管中醛酮腙衍生物,洗脱液在 4℃条件下可保存 30 d。采用配备有紫外检测器的高效液相色谱仪(HPLC)对洗脱液进行分析。采用保留时间和峰面积外标法对 14 种醛酮腙衍生物标准样品(表 1)进行定性定量分析。

3 试验结果

表 6 是最大功率工况下 D 和 EBD 的醛酮化合物各成分比排放量对比情况。从表中可以得出:甲醛是醛酮排放物主要成分,占整个排放物的 44% 以上;EBD 排放物中乙醛和丙烯醛 + 丙酮的排放物高于 D。EBD 的甲醛排放量低于 D,分别降低了 18.05%;而乙醛排放量高于 D,分别升高了 39.68%。丙烯醛 + 丙酮升高了 184.8%。分析原因:EBD 的含氧作用促进了燃烧,使得一部分甲醛进一步得到氧化,排放相对降低。同时,EBD 中含有 20% 的工业乙醇,导致生成的乙醛的排放比 D 升高得多。

表 7 是最大转矩工况下两种燃料醛酮排放物比排放量,从表中得出:乙醛排放物最多,占主要比例,达 39.93% 以上,该工况下,乙醛氧化速度变缓,也是造成乙醛排放大的原因;柴油排放物的甲醛和丙烯醛 + 丙酮高于 EBD 排放。EBD 相对于 D,乙醛排放升高 11.4%,主要原因是 EBD 中含有 20% 乙醇,在反应过程中分解氧化成乙醛。

表 6 最大功率工况醛酮化合物比排放量

Tab. 6 Carbonyl compounds specific emission at rated power g/(kW·h)

燃料	甲醛	乙醛	丙烯醛 + 丙酮	丙醛	丁烯醛	2-丁酮	甲基丙烯醛	丁醛	苯甲醛	戊醛	甲基苯甲醛	环己酮	己醛
D	3.07	1.30	0.36	0.045	0.04	0.046	0.037	0.036	0.035	0.029	0.021	0.014	0.012
EBD	2.52	1.82	1.02	0.042	0.038	0.043	0.042	0.026	0.027	0.013	0.014	0.018	0.022

表 7 最大转矩工况醛酮化合物比排放量

Tab. 7 Carbonyl compounds specific emission at maximum torque g/(kW·h)

燃料	甲醛	乙醛	丙烯醛 + 丙酮	丙醛	丁烯醛	2-丁酮	甲基丙烯醛	丁醛	苯甲醛	戊醛	甲基苯甲醛	环己酮	己醛
D	1.57	1.85	0.99	0.031	0.029	0.026	0.039	0.021	0.025	0.014	0.016	0.012	0.010
EBD	1.53	2.06	0.82	0.043	0.036	0.033	0.043	0.029	0.023	0.015	0.019	0.017	0.015

由表 6 和表 7 看出,最大转矩工况下乙醛含量高于标定工况下乙醛含量,分析原因:物质反应与时间、温度、压力有关。该工况每循环时间增加,平均有效压力较大,但是缸内温度低于额定工况,使乙醛氧化分解速度降低,从而造成乙醛含量较高。说明在乙醛氧化过程中,温度是主要影响因素。这与表 7 中,柴油和混合燃料的乙醛排放量都呈增加的原因是一致的。Wagner 和 Wyszynski[9] 的研究也表明缸内温度对 HC 化合物的影响程度较大。物质反应相对复杂,后续工作需要研究压力、温度对物质反应的影响,从而探讨醛酮化合物生成机理。

图 4 是两种燃料在 2 000 r/min 转速下的醛酮化合物总比排放量随负荷的变化曲线。由图所示:

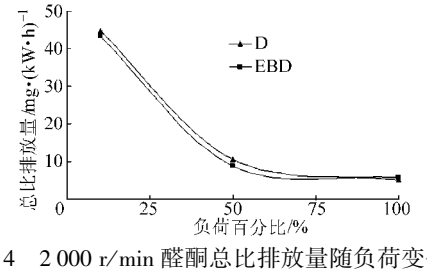

图 4 2 000 r/min 醛酮总比排放量随负荷变化曲线

Fig. 4 Carbonyl compounds emission curve with load

D 和 EBD 的醛酮总比排放量都随负荷的增加而减小。分析其原因:在发动机低负荷工况下,此时喷油量减少,燃烧放热量减少,温度降低,使得低负荷时醛酮化合物的排放量较高;缸内温度较低,火焰容易在壁面上淬熄,不完全燃烧现象比较严重,部分氧化

产物增多[10]。随着负荷的升高，燃料不完全燃烧现象减少，燃烧稳定性得到改善，醛酮化合物的排放水平因此得以降低。可见负荷是影响柴油机醛类排放的重要因素[11]。

在中小负荷下 EBD 对降低醛类化合物的排放有益，在 10% 负荷下，EBD 醛酮排放比 D 降低 2.98%，在 50% 负荷下，EBD 醛酮排放比 D 降低 16.42%。分析原因：低负荷时喷油量少，温度相对较低，不利于促进醛酮化合物的氧化，但是由于混合燃料的富氧作用，有利于醛酮物质的氧化，使其醛酮排放较柴油低。全负荷工况下，EBD 醛酮排放比 D 高 11.79%，主要原因是：缸内温度足够高，即使生成醛酮化合物，也使生成的大部分化合物由于高温而得到氧化。此时由于 EBD 含有较多的乙醇和生物柴油，使得乙醛、丙烯醛和丙酮的排放量较高，从而导致醛酮化合物的总排放量高于 D。

图 5 是所有试验工况下 D 和 EBD 醛酮的总比排放量对比图。可见在全负荷（工况 1、4）下醛酮排放总量随转速升高而增加，D 增加了 8.9%，EBD 增加了 20.4%。部分负荷（工况 2、5）也表现出相同的趋势。主要原因是：随着转速升高，每循环所占时间相对减少，在燃烧过程中生成的醛酮化合物后期氧化时间相应缩短，导致其排放随转速增加而增加。

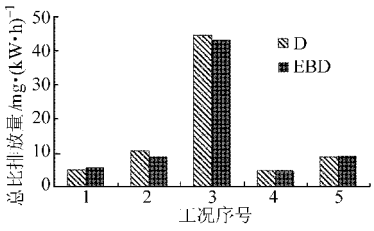

图 5　各工况下醛酮化合物总比排放量

Fig. 5　Carbonyl compounds overall specific emission at experimental modes

图 5 表明，在 1 700 r/min，100% 负荷，EBD 醛酮排放比 D 高 1.1%；50% 负荷工况下，EBD 醛酮排放比 D 高 3.0%，表明二者的醛酮排放量基本相当。原因分析：相对标定转速，此时转速降低，每循环时间增加，EBD 富氧造成醛酮排放降低的作用增加；但燃用 EBD 中乙醇的汽化潜热大、十六烷值低，会造成其不完全燃烧情况增加，增加醛酮排放物。由于后一项作用的影响，产生上述结果。

表 8、9 是两种燃料在各试验工况下的醛酮化合物各成分的相对含量。所有工况下，两种燃料的主要醛酮类排放物都是甲醛、乙醛、丙烯醛和丙酮等 C1 ~ C3（碳原子数量）的醛酮类化合物，占总醛酮排放物的 91.9% 以上，而其它组分的排放量都非常小。可见 C1 ~ C3 的醛酮类化合物均是发动机排气中醛酮总量的主要部分，而 C3 以上的醛酮化合物占排放中醛酮总量的比例较小，表明这些物质在燃烧过程中不易生成或存在时间短。

表 8　燃油 D 醛酮化合物排放各成分质量分数

Tab. 8　Mass fraction of carbonyl compounds emission from diesel　%

工况序号	甲醛	乙醛	丙烯醛 + 丙酮	丙醛	丁烯醛	2-丁酮	甲基丙烯醛	丁醛	苯甲醛	戊醛	甲基苯甲醛	环己酮	己醛
1	60.83	25.79	7.11	0.9	0.82	0.91	0.74	0.71	0.69	0.57	0.42	0.29	0.24
2	31.61	40.78	19.19	0.37	0.34	0.29	6.23	0.27	0.24	0.18	0.14	0.13	0.23
3	36.97	44.78	17.64	0.09	0.07	0.08	0.1	0.07	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03
4	33.8	39.93	21.44	0.67	0.62	0.56	0.84	0.46	0.54	0.31	0.34	0.27	0.23
5	36.81	50.46	9.61	0.38	0.4	0.43	0.41	0.36	0.28	0.25	0.3	0.16	0.15

表 9　燃油 EBD 醛酮化合物排放各成分质量分数

Tab. 9　Mass fraction of carbonyl compounds emission from fuel EBD　%

工况序号	甲醛	乙醛	丙烯醛 + 丙酮	丙醛	丁烯醛	2-丁酮	甲基丙烯醛	丁醛	苯甲醛	戊醛	甲基苯甲醛	环己酮	己醛
1	44.59	32.22	18.1	0.74	0.67	0.77	0.75	0.49	0.49	0.23	0.25	0.31	0.39
2	33.56	41.23	22.05	0.42	0.38	0.4	0.51	0.33	0.31	0.24	0.15	0.18	0.25
3	36.85	44.41	18.11	0.1	0.08	0.07	0.1	0.07	0.05	0.04	0.04	0.03	0.04
4	32.58	43.99	17.56	0.92	0.78	0.71	0.92	0.63	0.49	0.32	0.41	0.37	0.32
5	36.74	37.94	22.23	0.49	0.41	0.4	0.53	0.37	0.28	0.16	0.14	0.14	0.18

4　结论

（1）两种燃料的醛酮化合物排放以 C1 ~ C3 的醛酮类化合物为主，占总排放物 91.9% 以上。

（2）负荷增加或转速降低，醛酮类排放物减少。

（3）对醛酮化合物排放的试验结果分析发现：总排放量方面，标定转速下，10% 和 50% 负荷下，

EBD 比 D 分别降低了 2.98% 和 16.42%，全负荷下，EBD 比 D 升高了 11.79%。

（4）在 1 700 r/min 下，两种燃料的排放量基本相当。可见 EBD 在醛酮化合物的减排方面优势主要体现在中低负荷下，同时由于掺烧了 20% 的工业乙醇而使得乙醛的排放量相对升高。

参 考 文 献

1 杨蓓兰. 替代燃料的现状与发展趋势[J]. 上海化工，2009，34(5)：25～32.

2 董敬，庄志，常思勤. 汽车拖拉机发动机[M]. 北京：机械工业出版社，2005：182～183.

3 World Health Organization (WHO). Indoor air quality: organic pollutants[J]. Environmental Technology Letters, 1989, 10(9):855～858.

4 AMS-FRL-6924-1—2001. Federal register 40 CFR parts 80, and 86, control of emission of hazardous air pollutants from mobile sources [S]. 2001.

5 陆小明. 生物柴油发动机燃烧过程与 PAHs 排放特性研究[D]. 北京：北京理工大学，2006.

6 U. S. EPA Compendium Method TO-11A. Determination of formaldehyde in ambient air using adsorbent cartridge followed by high performance liquid chromatography [S]. USA, EPA, 1999.

7 Hennion M C. Solid-phase extraction: method development, sorbents, and coupling with liquid chromatography [J]. Journal of Chromatography A, 1999, 856(1～2): 3～54.

8 U. S. EPA. EPA/625/R-96/010b (TO-11A) Determination of formaldehyde in ambient air using adsorbent cartridge followed by high performance liquid chromatography (HPLC) [S]. USA, EPA, 1999.

9 Wagner T, Wyszynski M L. Aldehydes and ketones in engine exhaust emissions-a review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering, 1996, 210(2):109～122.

10 蒋德明. 内燃机燃烧与排放学[M]. 西安：西安交通大学出版社，2002.

11 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 emission of BE-D Blend fuel engine[J]. Transactions of CSICE, 2010, 28(2):127～132. (in Chinese)

(上接第 27 页)

3 Korakianitis T, Namasivayam A M, Crookes R J. Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions [J]. Combustion Science, 2011, 37(1):89～112.

4 陈红岩，李婷. 柴油机活塞-缸套-冷却水系统固流耦合传热研究[J]. 农业机械学报，2006，37(5)：37～40.
Chen Hongyan, Li Ting. Diesel engine piston-liner-coolant system fluid-solid coupling heat transfer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5):37～40. (in Chinese)

5 李迎. 内燃机流固耦合传热数值仿真研究[D]. 杭州：浙江大学，2006：39～45.
Li Ying. Simulation and application of solid-liquid coupled heat transfer in internal combustion engines[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006:39～45. (in Chinese)

6 傅松，胡玉平，李新才，等. 柴油机缸盖水腔流动与沸腾传热的流固耦合数值模拟[J]. 农业机械学报，2010，41(4)：26～30.
Fu Song, Hu Yuping, Li Xincai, et al. Fluid-solid coupling numerical simulation on flow and boiling heat transfer of cooling weter-jacteet in cylinder head of diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4):26～30. (in Chinese)

7 杨万里，许敏，辛军，等. 发动机缸盖耦合热应力分析[J]. 内燃机工程，2007，28(2)：47～50.
Yang Wanli, Xu Min, Xin Jun, et al. Coupling thermal stress analysis of engine cylinder head[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2007, 28(2):47～50. (in Chinese)

8 Woschni G A. Experimental investigation of the heat transfer in internal combustion engines with insulated combustion chamber walls, in heat and mass transfer in gasoline and diesel engines[M]. New York: Hemispher Publ. Corp, 1989.

9 Woschni G A. Universally applicable equation for the instantaneous heat transfer coefficient in the internal combustion engine[C]. SAE Paper 670931, 1967.

10 Morel T, Fort E, Blumberg P. Effect of insulation strategy and design parameters on diesel heat rejection and performance[C]. SAE Paper 850506, 1985.