

重型柴油机燃用改性柴油的排放污染物研究

赵梓钊¹, 刘帅^{1,2}, 王忠¹, 张启霞¹, 张礼斌¹, 何仁¹

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 212013, 江苏镇江; 2. 清华大学苏州汽车研究院, 215200, 江苏苏州)

摘要: 在一台重型柴油机上燃用3种不同理化特性的柴油,分别为国五柴油与2种改性柴油,用来探明改性柴油对排放污染物的影响。分析了工况、空燃比及改性柴油对重型柴油机常规污染物NO_x、CO₂、THC的影响;用XAD-2吸附管采集气相多环芳香烃污染物,活性炭吸附管采集单环芳香烃污染物,DNPH吸附管采集醛酮类化合物,探讨工况、空燃比与改性柴油对非常规污染物排放影响;用石英滤膜采集颗粒物进行碳质组分分析,讨论了工况、空燃比与改性柴油对颗粒物碳质组分的影响。结果表明:相比于低转速25%负荷工况,额定转速25%负荷工况下空燃比更高,常规污染物排放更低,醛酮类化合物与芳香烃排放更高,醛酮类化合物上升约13%,有机碳与元素碳排放略微升高;相比于国五柴油,在较高空燃比工况下,低芳香烃的柴油NO_x排放上升15%左右,CO₂排放略微上升,THC排放略微降低,较低汽化潜热的柴油NO_x排放上升30%左右,CO₂排放上升13%左右,THC排放降低28%左右,较低芳香烃的柴油多环芳香烃排放下降约50%,较低汽化潜热的柴油多环芳香烃排放下降约25%;2种改性柴油相比国五柴油的醛酮类化合物排放量均下降15%左右,2种改性柴油的有机碳与元素碳排放都小于国五柴油15%左右。

关键词: 汽化潜热;多环芳香烃;常规污染物;非常规污染物;颗粒物

中图分类号: TK428.9 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202201005 **文章编号:** 0253-987X(2022)01-0041-10



OSID 码

Effects of Modified Diesel Fuels on Pollutant Emissions from a Heavy-Duty Diesel Engine

ZHAO Zichuan¹, LIU Shuai^{1,2}, WANGg Zhong¹, ZHANG Qixia¹, ZHANG Libin¹, HE Ren¹

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

2. Suzhou Automotive Research Institute, Tsinghua University, Suzhou, Jiangsu 215200, China)

Abstract: In a heavy-duty diesel engine, 3 types of diesel fuel (automotive National-V diesel fuel and 2 types of modified diesel fuel) with different physicochemical characteristics were burned to investigate the effects of the modified diesel fuels on the emission of pollutants. The effects of operating condition, air-to-fuel ratio and modified diesel fuel on the conventional pollutants NO_x, CO₂ and THC from heavy-duty diesel engine were analyzed. The effects of working condition, air-to-fuel ratio and modified diesel fuel on the carbon components in particulate matter were discussed. The results show that compared with the low speed-25% load condition, the rated speed-25% load condition has higher air-to-fuel ratio, lower emission of conventional pollutants, and higher emission of aldehydes, ketones and aromatic hydrocarbons, e. g. about 13% increase

收稿日期: 2021-07-19。 作者简介: 赵梓钊(1997—),男,硕士生;刘帅(通信作者),男,讲师,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51776089);镇江市重点研发计划-社会发展资助项目(SH202006);江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(SJCX21_1711)。

网络出版时间: 2021-09-22 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20210919.1724.003.html>

in aldehydes and ketones, and slightly higher emission of organic carbon and elemental carbon. Compared with the automotive National-V diesel, under higher air-to-fuel ratio condition, the NO_x emission of the diesel with low aromatic hydrocarbon content increases by about 15%, CO_2 emission increases slightly, and THC emission decreases slightly; the NO_x emission of the diesel with lower latent heat of vaporization increases by about 30%, CO_2 emission increases by about 13%, and THC emission decreases by about 28%; and the PAH emission of the diesel with lower aromatic hydrocarbon decreases by about 50%, and the PAH emission of the diesel with lower latent heat of vaporization decreases by about 25%. The emission of aldehydes and ketones of the 2 modified diesel fuels is decreased by about 15% compared with that of the National-V diesel fuels.

Keywords: latent heat of vaporization; polycyclic aromatic hydrocarbons; conventional pollutants; unconventional pollutants; particulate matter

重型柴油机在低负荷工况运行时缸内燃烧温度较低,适宜采用活性较高的燃料来改善燃烧活性,且由于燃料的汽化潜热特性会对燃烧效率产生一定的影响,从而影响 HC 与 CO 排放^[1];同时,低负荷工况下滞燃期的影响作用会加大,并随燃料的总芳香烃含量的增加而延长,故柴油机排在低负荷工况下对总芳香烃含量更加敏感^[2];最后,柴油机低负荷工况下的排气温度对柴油机后处理系统有重要的影响^[3]。

柴油品质对于降低柴油机排放有着重要的影响。柴油的汽化潜热直接影响柴油的蒸发和空气混合的质量,影响燃烧和常规与非常规排放污染物的形成^[4];柴油机中的多环芳香烃含量会直接影响柴油机的颗粒物排放^[5]。开展柴油品质的研究,对于降低柴油机的排放污染物具有十分重要的意义。

单环芳香烃(MAHs)是指仅含有 1 个苯环的烃;多环芳香烃(PAHs)是指 2 个以上苯环以稠环形式相连的化合物,它是柴油机排放颗粒物的碳核前驱体组成成分^[6]。醛酮类化合物是碳氢类燃料燃烧过程中氧化反应的重要活性物质与中间氧化产物^[6]。颗粒物中包含的碳质组分有有机碳(OC)与元素碳(EC),OC 主要来源于燃油和氧物质燃烧的直接产物及一次颗粒物经历光化学反应后的产物,EC 只来源于石化燃料及其他可燃生物物质不完全燃烧的产物^[7]。

目前,国内外学者在针对柴油中汽化潜热及 PAHs 含量的研究中,许广举等通过对柴油添加润滑油得出柴油多环芳香烃含量越低,排放颗粒粒径越小的结论^[8]。刘博在柴油-生物柴油燃料中添加正丁醇来降低燃油芳香烃,结果表明可以有效减少 PM 排放^[9]。梅德清等在生物柴油中加氢燃烧,结

果表明加氢生物柴油的热值略微上升,缸内最大爆发压力下降,HC、CO、碳烟排放均下降 10%~15%, NO_x 排放上升^[10]。肖九长等研究了生物柴油抑制芳香烃生成的原理,结论为生物柴油本身的低芳香烃含量使 PAHs 排放下^[11]。张超等通过对汽油的芳香烃改性,发现 PM 排放与颗粒前驱体数量上升 250%左右^[12]。史程等在柴油中掺混二甲基呋喃后汽化潜热降低,喷雾质量改善,使得缸内燃烧更完全^[13]。姚春德等在汽油中掺混甲醇后汽化潜热明显上升,甲醛排放随着掺混比上升而上升^[14]。楼狄明等在柴油中掺混煤制油、天然气制油与丁醇后,形成的混合燃油汽化潜热均有不同程度的降低,高车速加速时混合燃油相比柴油 NO_x 排放上升 25%左右^[15]。耿莉敏等研究了生物柴油、柴油和乙醇混合燃料的燃烧与排放特性,结果表明小负荷时,混合燃料的缸内最大压力和最大瞬时放热率均高于柴油,随着负荷增大缸内最大压力和最大瞬时放热率低于柴油,燃烧持续期缩短,HC 排放降低, NO_x 排放略微上升^[16]。Hasan 等研究了甲醇/柴油混合燃料的尾气排放,结果表明添加甲醇后可以提高发动机功率,改善发动机性能,减少排放^[17]。Feng 等以 10-十一醛(UNL)为改性剂,在环己烷溶剂中用硫酸氢钾(KHSO_4)为催化剂对 CTP 进行改性,以降低多环芳烃含量,通过热重分析(TGA)、差热分析(DTA)、傅里叶变换红外光谱(FTIR)、X 射线衍射(XRD)和 ^{13}C 核磁共振谱(NMR)研究了改性前后 CTP 的结构变化,结果表明多环芳烃与 UNL 的烷基化反应可显著降低 CTP 中 16 种优先多环芳烃的含量^[18]。这些研究大都是从燃料添加剂本身的特性来分析对排放的影响,少有关关注有关柴油自身特性的变化对污染物排放的影响。

在国五柴油的基础上,加入 2 种化学试剂对其进行改性,分别为低汽化潜热柴油(LLHV)和低多环芳香烃柴油(LAHC),在潍柴重型柴油机 WP13 上,选用 2 种工况进行了试验研究。采集常规污染物与非常规污染物,探讨了常规污染物排放、非常规气体污染物排放及颗粒物碳质组分中 OC 与 EC 的变化规律,并分析了不同工况和柴油的汽化潜热与 PAHs 含量对排放特性的影响。

1 试验设置与方案

1.1 柴油机参数与试验工况

试验所用柴油机排量为 13 L,额定转速为1 900 r/min,最大扭矩为2 400 N·m;最大输出功率为368 kW,压缩比为 17:1,柴油机上安装了氧化催化装置(DOC)、废气再循环装置(EGR)的排气后处理装置。

考虑到 DOC 中用于氧化转换的工作温度范围,选取的工况将柴油机的排气温度控制在 300 ℃ 以下。同时,所选工况也为重型柴油机高速路段常用工况^[19-20]。

本次试验选取的工况分别为1 000 r/min、25% 负荷工况(工况 1)和1 900 r/min、25%负荷工况(工

况 2)。在转速为1 900 r/min 时,柴油的空气流量为 487 kg/h,燃油流量为 20.9 kg/h;在转速为1 000 r/min 时,柴油的空气流量为 264.2 kg/h,燃油流量为 12.5 kg/h。不同工况下的空燃比数据如图 1 所示,空燃比由 21.1 上升至 23.3。

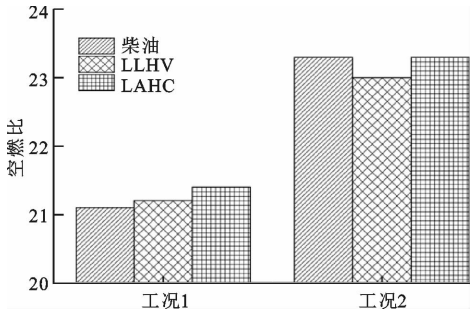


图 1 不同工况下空燃比数据

Fig. 1 Air-to-fuel ratio data under two working conditions

1.2 柴油理化性质

试验柴油为国五柴油及 2 种改性柴油,通过国五柴油中掺混脂类燃料降低其芳香烃含量,在国五柴油中添加 F-T 柴油及醇类燃料降低其汽化潜热。采用美国 Agilent7890B-5977A 气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)测量 3 种柴油中的 PAHs 含量。3 种柴油的理化参数如表 1 所示。

表 1 3 种柴油的理化特性

Table 1 Physicochemical properties of three diesel fuels

燃料	十六烷值	密度/(kg·m ⁻³)	热值/(MJ·kg ⁻¹)	汽化潜热/(kJ·kg ⁻¹)	PAHs 质量分数/%
国五柴油	51.0	830	52	305	10.1
LLHV	52.3	780	53	276	7.3
LAHC	51.5	820	51	353	3.5

1.3 采样系统

采样装置如图 2 所示,用活性炭吸附管采集气相 MAHs,XAD-2 吸附管采集气相 PAHs,水汽滤芯与特氟龙滤膜排除排气中颗粒与水蒸气的干扰,真空泵控制的采样流速固定为 4 L/min,采样时间为 5 min。样品采集完成后,避光保存。

醛酮类采样柴油机排气依次通过水汽滤芯、特氟龙滤膜、去臭氧小柱、真空泵,水器滤芯与特氟龙滤膜排除排气中颗粒与水蒸气干扰,去臭氧小柱排除臭氧的干扰,真空泵控制的采样流量固定在 0.8 L/min,采样时间为 5 min。

采样结束后,采样管两端用聚四氟乙烯帽封口,避光冷藏。为了排除水对样品分析的影响,颗粒采样装置由水汽滤芯过滤排气中的水蒸气,使用石英滤膜采集颗粒物。真空泵的采样流量固定在 20 L/min,

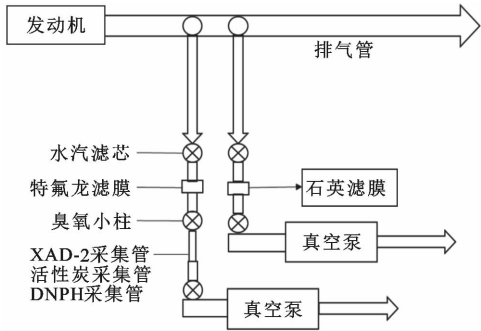


图 2 芳香烃及醛酮类化合物及排气颗粒采样装置

Fig. 2 Sampling device for aromatic hydrocarbons, aldehydes, ketones and exhaust particles

采样时间为 10 min。样品采集完成后,烘干保存。

1.4 试验分析系统

采用美国安捷伦 1200 液相色谱分析仪测量芳

香烃和醛酮类化合物。测量芳香烃时,采用 Acquity UPLC BEH Phenyl C18 柱分离甲醇溶解固相萃取后的溶液,设置乙腈用量为 0.1 mL,解吸液流速为 0.128 mL/min,样品溶液流速为 0.15 mL/min。根据 16 种 PAHs 检测限,采用外标法得到柴油中的 PAHs 质量分数。测量醛酮类化合物时,样品经强酸催化并与涂渍于硅胶上的 DNPH 反应,生成稳定有颜色的腙类衍生物。使用乙腈洗脱 DNPH 小柱,保留时间定性,峰面积定量,采用色谱峰面积外标法得到质量浓度。

采用 DRI2015 元素碳/有机碳分析仪对碳组分进行测量分析。应用热光法测量颗粒物碳质组分的原理为:先将氦气通入热光炉中,在无氧气氛条件下逐渐升温,当温度分别达到 140、280、480 和 580 $^{\circ}\text{C}$ 时,对应地检测出 OC1、OC2、OC3 和 OC4;然后,通入体积分数为 98% 氦气和 2% 氧气的混合气体作为工作气氛,按照 580、740 和 840 $^{\circ}\text{C}$ 三个温度阶梯逐渐加热,将元素碳氧化成 CO_2 , CO_2 通过 NDIR 检测器进行定量检测。所用 7 个波段的 2 级激光管可从 405 到 980 nm 测定每个被测滤膜上颗粒物的 OPR 和 OPT 值,实时监测样品的反射和透射光信号,准确分离 OC 和 EC。同时,根据 IMPROVE 协议,总有机碳 TOC 定义为 $\text{OC1}+\text{OC2}+\text{OC3}+\text{OC4}+\text{OCPyro}$,总元素碳 TEC 定义为 $\text{EC1}+\text{EC2}+\text{EC3}-\text{OCPyro}$ 。在 OC 与 EC 排放占比分析中,OC1 在总碳中的占比按其 TOC+TEC 中的质量占比来计算,因为 TOC+TEC 抵消了 OCPyro 的影响,故可以不考虑裂解碳的影响。

2 结果分析与讨论

2.1 常规排放分析

图 3 为不同工况下燃用 2 种改性柴油与国五柴油的 CO_2 排放量,从 3 种油品来看,LLHV 有着较

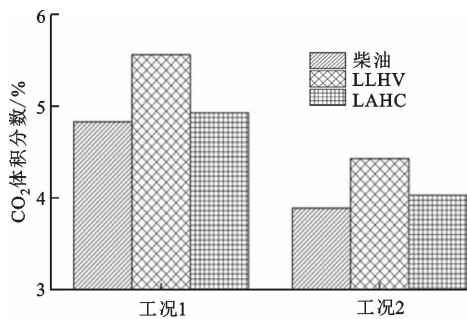


图 3 不同工况下 CO_2 排放对比

Fig. 3 Comparison of CO_2 emission under two working conditions

低的汽化潜热,燃烧更为充分, CO_2 排放量最大,在工况 1 下达到了 5.56%,比柴油高大约 15%,LAHC 的低芳香烃使得燃油燃烧时蒸发吸热更少,燃烧更加充分, CO_2 排放相比柴油较高。

图 4 为不同工况下燃用 2 种改性燃油与国五柴油的燃油消耗率。从图中可以看出,转速及空燃比上升后,燃油消耗率略微升高。结合上述 CO_2 排放趋势来看,转速升高后,燃油消耗率略微上升,空气流量上升,空燃比提高,混合器变稀,燃烧恶化,不完全燃烧加剧,导致 CO_2 排量下降。3 种油品对比而言,LLHV 有着最高的燃油消耗率,工况 2 下达到 228.8 $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,国五柴油燃油消耗率最低,工况 1 下为 208.72 $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。结合 CO_2 排放分析,LLHV 本身汽化潜热低,燃烧较为完全,燃油消耗率高, CO_2 排放最高;国五柴油的燃油消耗率最低,本身的燃烧条件对比而言最为恶劣, CO_2 排放较低。3 种油品的燃油消耗率趋势与 CO_2 排放趋势一致。

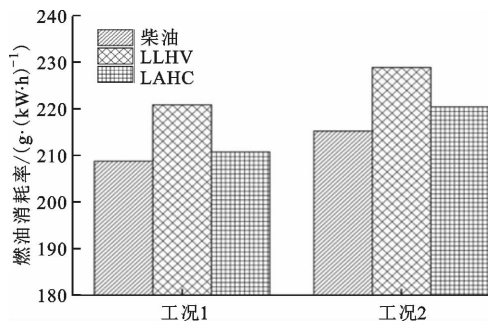


图 4 不同工况下燃油消耗率对比

Fig. 4 Comparison of fuel consumption rates under two working conditions

图 5 为不同工况下燃用 2 种改性柴油与国五柴油的 THC 排放量。由图可以看出,转速及空燃比上升后,缸内混合气更加稀薄,燃烧更不完全,空气流量增大,缸内空气流通速度更快,柴油机壁面淬熄效应变强,THC 排放明显上升。

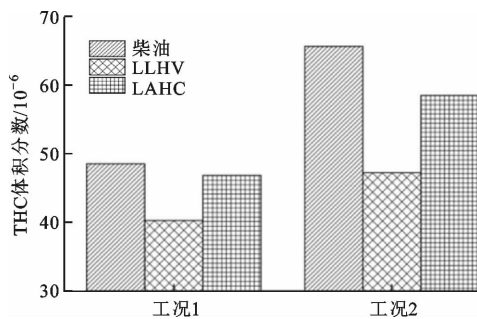


图 5 不同工况下 THC 排放对比

Fig. 5 Comparison of THC emission under two operating conditions

从 3 种油品来看,LAHC 的 PAHs 质量分数低,而 PAHs 与 HC 排放密切相关,LAHC 的 THC 排放低。LLHV 有着更低的汽化潜热,燃烧更为充分,THC 排放更低,约比国五柴油低 28%。

图 6 为不同工况下燃用 2 种改性柴油与国五柴油的 NO_x 排放量。由图可以看出,工况 2 的 NO_x 排放量要小于工况 1。NO_x 形成原因为高温富氧,高转速时缸内温度较低,空燃比更大,混合气也较稀,气流速度快,氧气在缸内停留时间短,燃烧反应时间短,造成 NO_x 排放低。

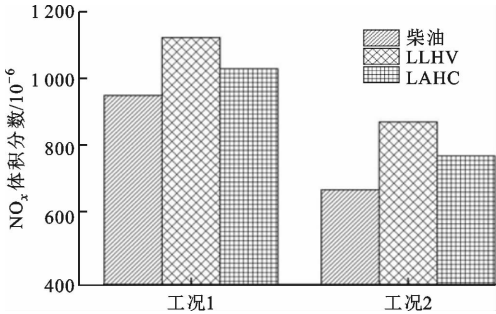


图 6 不同工况下 NO_x 排放对比

Fig. 6 Comparison of NO_x emission under two working conditions

对比 3 种油品,可以看出改性的 2 种柴油 NO_x 排在工况 2 下要高于国五柴油。NO_x 产生原因为高温富氧,LLHV 在制备过程中用了一定的醇类燃料,氧含量相比国五柴油要高,同时汽化潜热低,燃油进入缸内燃烧的蒸发吸热比较低,导致其燃烧温度较高,产生的 NO_x 排放相比国五柴油要高。LAHC 的 PAHs 含量少,生成的颗粒参与氧化吸收的温度比较少,NO_x 排放较多。

2.2 醛酮类化合物排放分析

图 7 为不同工况下燃用 2 种改性柴油与国五柴油的甲醛与乙醛排放量,3 种油品对比而言,LLHV 的 THC 排放低,醛酮类化合物为 HC 化合物前驱

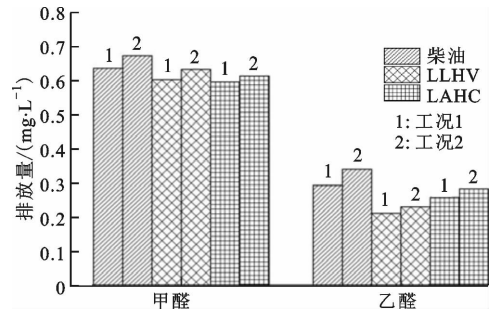


图 7 不同工况下甲醛与乙醛排放对比

Fig. 7 Comparison of formaldehyde and acetaldehyde emissions under two working conditions

体,LLHV 生成的甲醛与乙醛质量浓度最低。国五柴油的甲醛与乙醛排放量最大,在工况 2 时分别达到 0.673 6 mg/L 和 0.340 2 mg/L。

图 8 为不同工况下燃用 2 种改性柴油与国五柴油的丙酮与丙烯醛排放量,可以看出,在工况 2 下,国五柴油丙烯醛排放量达到 0.123 mg/L,比工况 1 高出 0.059 mg/L。

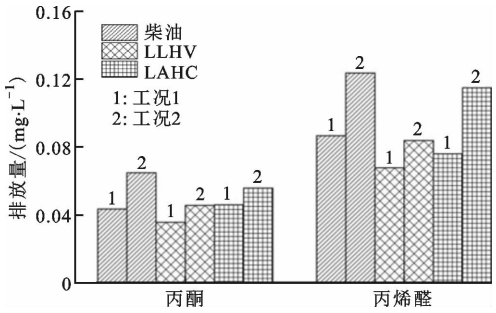


图 8 不同工况下丙酮与丙烯醛排放对比

Fig. 8 Comparison of acetone and acrolein emissions under two working conditions

从 3 种柴油的丙酮与丙烯醛质量浓度对比来看,其排放趋势与甲醛与乙醛相似,LLHV 的 2 种污染物质量浓度最低。LAHC 有着较小的 PAHs 含量,PAHs 可以增加燃烧室沉积物的形成,促使 HC 排放增加,而醛酮类化合物为 HC 的前驱体,使得丙烯醛与丙酮排放量比国五柴油低。

图 9 为上述 4 种排放物的质量浓度,可以看出,转速升高后,3 种柴油的醛酮类化合物排放质量浓度均上升^[21-22]。转速升高会使每循环所占时间相对较少,燃烧过程后期分给醛酮类化合物氧化的时间较短,壁面淬熄效应增加,同时空燃比的升高使混合气更加稀薄,燃烧不完全情况加剧,导致排放量上升。LAHC 的醛酮类排放量略高于 LLHV,而国五柴油要高于这 2 种柴油。国五柴油有着较高的汽化潜热,不完全燃烧情况相较于 LLHV 更严重,醛酮排

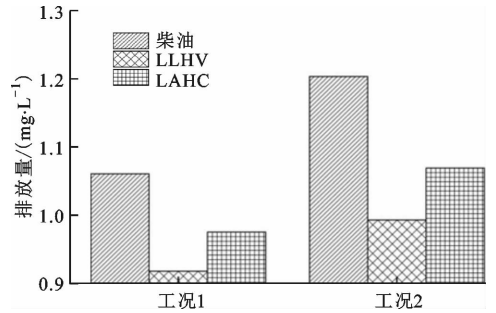


图 9 不同工况下醛酮类化合物排放对比

Fig. 9 Comparison of aldehydes and ketones emissions under two working conditions

放物高于 LLHV; LLHV 有着较低的汽化潜热, 燃烧更加充分, 醛酮类化合物排放量相对较少。分析可知, 甲醛与乙醛比其他 2 种排放物的质量浓度要高出许多, 占 4 种排放物总质量浓度的 80%~90%^[23]。

2.3 芳香烃排放分析

图 10 为不同工况下燃用 2 种改性柴油与国五柴油的甲苯排放量, 3 种柴油在工况 2 时, LLHV 有着较低的汽化潜热, 燃烧更为完全, 且额定转速下燃烧室内高温缺氧的区域增加, 颗粒排放上升, 单环芳香烃为颗粒的前驱体, 所以甲苯质量浓度最高。

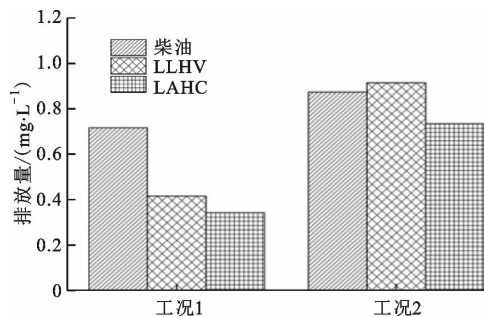
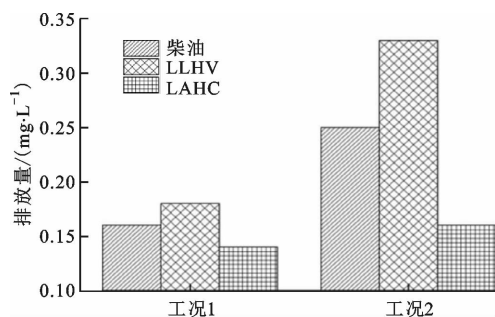


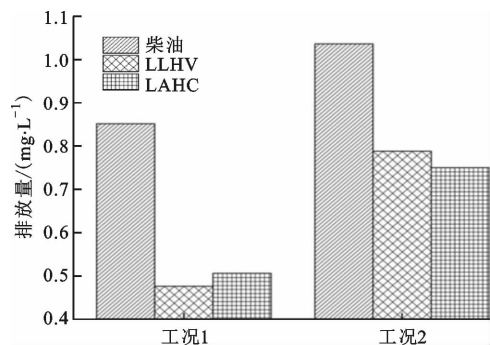
图 10 不同工况下甲苯排放对比

Fig. 10 Comparison of benzene emission under two working conditions

图 11 为不同工况下燃用 2 种改性柴油与国五



(a) 菲



(b) 萘

图 11 不同工况下菲与萘排放对比

Fig. 11 Comparison of phenanthrene and naphthalene emissions under two working conditions

柴油的菲与萘排放量, 可以看出在工况 1 时, LLHV 缸内燃烧较充分, 菲与萘排放都较低。在较高空燃比时, LLHV 缸内燃烧恶化, 高温缺氧区域增多, 菲排放最多。芳香烃具有比其他烃类更高的沸点和汽化潜热, 在燃烧过程中更易降低周围燃油燃烧温度^[24]。国五柴油本身 PAHs 含量多, 导致其在任意工况下菲与萘的排放都较多。LAHC 由于本身的 PAHs 含量少, 菲与萘排放都较少。

图 12 为不同工况下燃用 2 种改性柴油与国五柴油的芘与荧蒹排放量, 可以看出 3 种燃油的芘排放上升 0.004~0.012 mg/L。对比 3 种柴油可以看出, LLHV 的芘质量浓度最高。LAHC 有着更低的芳香烃含量, 其燃烧生成的芘与荧蒹相较于其他柴油较少, 芳香烃具有更高的沸点与汽化潜热, 较低的芳香烃含量使 LAHC 燃烧更完全, 生成的芘与荧蒹更少。

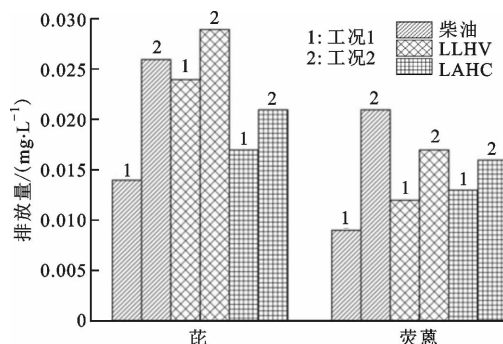


图 12 不同工况下芘与荧蒹排放对比

Fig. 12 Comparison of pyrene and fluoranthene emissions under two working conditions

图 13 为不同工况下多环芳香烃排放对比, 可以看出 PAHs 中萘的质量浓度最高, 几乎达到芳香烃质量浓度的 80%~90%, 这与郭红松等的研究结果^[25]相似。转速及空燃比升高时, 气体流动加快, 混合气更稀, 同时在缸内停留时间变短, PAHs 形成

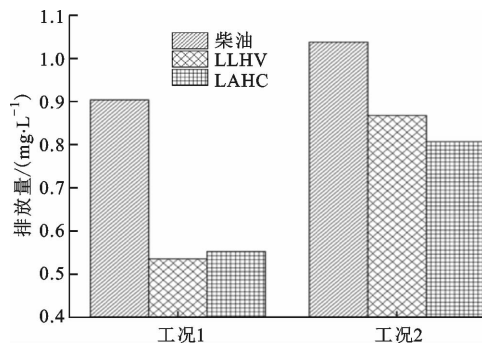


图 13 不同工况下多环芳香烃排放对比

Fig. 13 Comparison of polycyclic aromatic hydrocarbon emission under two working conditions

要素之一为高温缺氧^[26],醛酮类化合物排放也增加,导致 3 种燃油的 PAHs 排放都增加。3 种柴油对比而言,国五柴油由于其芳香烃含量较高,所以排放出的 PAHs 质量浓度最高。缸内温度及燃料的芳香烃含量对尾气中 PAHs 生成影响较大^[28],LAHC 自身的 PAHs 含量低,导致芳香烃排放也低;LLHV 缸内燃烧较好,芳香烃排量也低于国五柴油。从试验数据可以得到,3 种油品的 PAHs 排放中菲、芘、茚大约占总质量浓度的 80%~90%,其他成分浓度较低^[27]。

2.4 OC 与 EC 排放分析

图 14 为国五柴油分别在 2 种工况下的 OC 与 EC 排放对比。由图可以看出,在工况 2 下,国五柴油排放的 OC 与 EC 各碳质组分含量略大于工况 1^[29]。工况 2 下,气缸内燃烧温度偏低,相对于工况 1,碳质组分无法有效地被氧化;OC2 在工况 2 下的排放量略大于工况 1,OC2 易挥发,在工况 2 下空气流动更快,导致 OC2 挥发,使得 OC2 排放量更大。

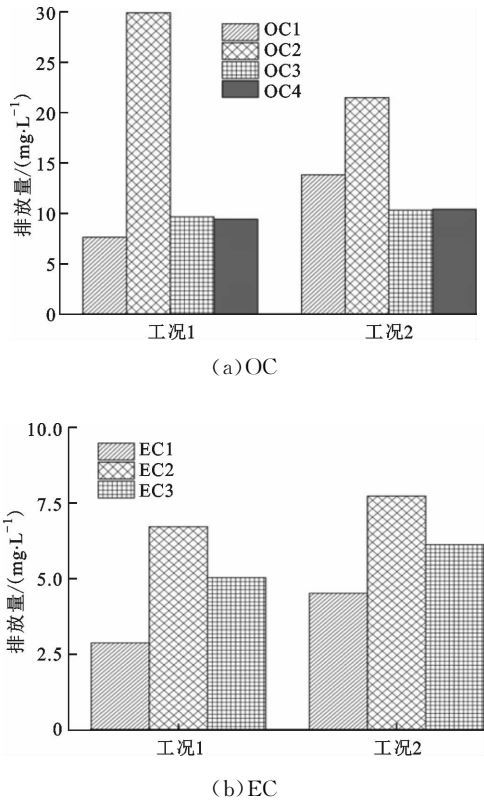


图 14 不同工况下国五柴油 OC 与 EC 排放对比
Fig. 14 Comparison of National-V diesel's OC and EC emissions under two working conditions

图 15 为同一工况下国五柴油与其他 2 种改性柴油的 OC 与 EC 排放量,结果表明,OC 的排放量大小依次为 LLHV>国五柴油>LAHC。从图中

来看,LLHV 的 OC2 排放量明显高于另外 2 种燃料,而 OC2、OC3 略高于其他 2 种燃料。含氧燃料燃烧直接排放的一次有机碳是 OC 的重要来源之一,LLHV 的燃烧温度较高,氧含量相比其他 2 种燃料而言更高,燃烧生成的含氧有机物较高,导致其 OC 排放量高于其他 2 种燃料。LAHC 的 PAHs 含量较低,缸内燃烧较完全,同时芳香烃是形成碳质组分的重要前驱体,导致 LAHC 的 OC 与 EC 排放总量比较低。

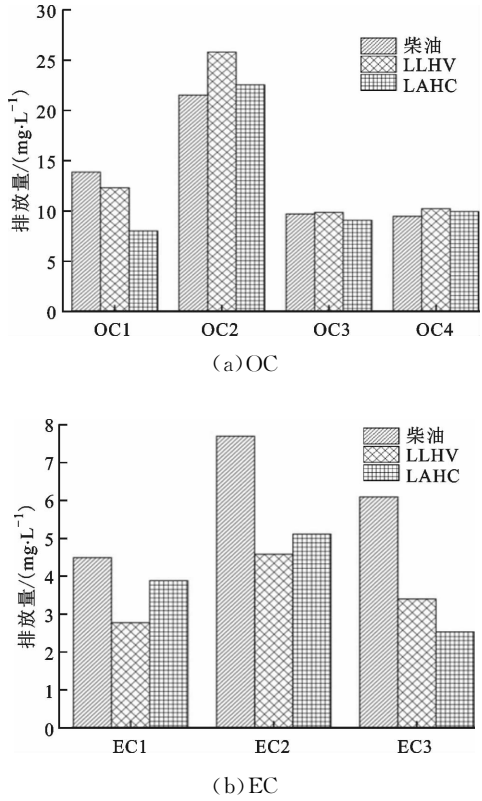


图 15 同一工况下不同柴油 OC 与 EC 排放对比
Fig. 15 Comparison of OC and EC emissions from different diesel fuels under the same operating condition

Watson 等将 EC1 定义为 char-EC,将 EC2、EC3 定义为 soot-EC^[27]。从图 15 中可以明显看出,LLHV 的 char-EC 含量变化程度很大。这是因为 char-EC 主要是在较低温度下形成的,LLHV 燃烧较充分,使得 char-EC 排放量下降。soot-EC 主要是由于排放颗粒中互相影响生成的,较高的燃烧温度可以促进 soot-EC 的氧化,LLHV 缸内燃烧温度高,导致其生成的 soot-EC 含量较低。

图 16 为燃用 2 种改性柴油与国五柴油时在工况 2 下的各组分占比。从图中可以看出,柴油机颗粒物碳质组分中 OC 占比较高,且 OC2 占 OC 与 EC 排放总量的 30%~40%,排气颗粒中的碳质组分主

要以燃烧生成的 OC 为主^[30]。其次,较高的燃烧温度促进了碳烟的氧化,从而抑制了 EC 的生成。随着油品的改性,较低汽化潜热的 LLHV 与较低 PAHs 含量的 LAHC 所生成的 OC 组分占比越高,EC 组分占比随之降低。

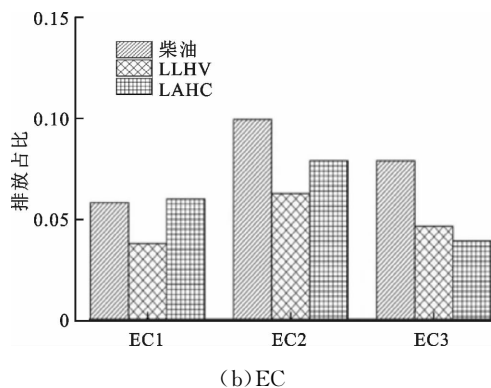
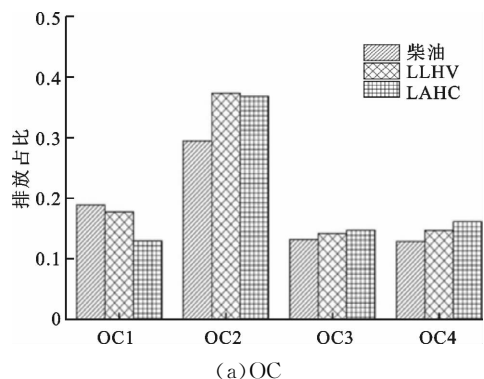


图 16 不同燃油的 OC 与 EC 排放占比

Fig. 16 Percentage of OC and EC emissions from different fuels

3 结 论

(1) 重型柴油机燃烧 3 种柴油在转速及空燃比升高后, CO_2 排放均下降, THC 排放上升, NO_x 排放下降, LLHV 与 LAHC 的 THC 与 NO_x 排放量下降较明显;对比国五柴油, THC 排放量下降 25% 左右, NO_x 下降 35% 左右。

(2) 国五柴油、LLHV、LAHC 排放的甲醛和乙醛占醛酮类排放物的 90% 以上。随着柴油机转速及空燃比升高, 醛酮类污染物排放增加, 相比于国五柴油, LLHV 与 LAHC 醛酮类污染物排放下降 15% 左右。

(3) 在工况 1 下, LLHV 的芳香烃排放低于国五柴油 40% 以上, 工况 2 下, LAHC 的 PAHs 排放相较于国五柴油下降 50% 以上。

(4) 同一工况下, OC 与 EC 排放量大小依次为

国五柴油 > LLHV > LAHC; 碳质组分排放物中大部分为 OC 排放, OC2 占 OC 排放总量的 60% ~ 70%。相对于国五柴油, 2 种改性柴油均可以使 OC 与 EC 排放量下降约 15%。

参考文献:

- [1] 韩伟强, 李博仑, 董超, 等. 不同喷油定时乙醇/柴油 RCCI 低负荷燃烧与排放特性 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 59-66.
HAN Weiqiang, LI Bolun, DONG Chao, et al. Low-load combustion and emission characteristics of ethanol/diesel RCCI at different start of injection timing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(20): 59-66.
- [2] 刘海峰, 王灿, 孔祥恩, 等. 柴油烃类组分对柴油机排放的影响 [J]. 环境科学学报, 2020, 40(2): 479-491.
LIU Haifeng, WANG Can, KONG Xiangen, et al. Effect of diesel hydrocarbon group components on diesel engine emissions [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(2): 479-491.
- [3] 李丕茂, 耿宗起, 吕志华, 等. 燃油喷射对柴油机低负荷点排气温度的影响 [J]. 内燃机与动力装置, 2019, 36(3): 1-6, 12.
LI Pimao, GENG Zongqi, LÜ Zhihua, et al. Influence of fuel injection on exhaust temperature of diesel engine at low load point [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2019, 36(3): 1-6, 12.
- [4] 刘军恒, 杨军, 周海磊, 等. 聚甲氧基二甲醚-甲醇混合燃料的燃烧与排放特性研究 [J]. 内燃机工程, 2021, 42(2): 16-22.
LIU Junheng, YANG Jun, ZHOU Hailei, et al. Investigation on combustion and emission characteristics of polyoxymethylene dimethyl ethers-methanol blends [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2021, 42(2): 16-22.
- [5] NISHIGAI H, KONDO K, YAMAGUCHI T, et al. Morphology of JIS # 2 and Fischer-Tropsch diesel (FTD) soot in spray flames via transmission electron microscopy (TEM) [C] // The Eighth International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems. Tokyo, Japan: The Japan Society of Mechanical Engineers, 2012: 464-469.
- [6] 许广举, 李铭迪, 李学智, 等. 不同掺混比例生物柴油的非常规污染物排放特性 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 227-232.
XU Guangju, LI Mingdi, LI Xuezhi, et al. Characteristics of unregulated emissions from biodiesel fuel with

- different mixing proportion [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(21): 227-232.
- [7] LIM S, LEE M, KIM S W, et al. Absorption and scattering properties of organic carbon versus sulfate dominant aerosols at Gosan climate observatory in Northeast Asia [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(15): 7781-7793.
- [8] 许广举, 高鉴, 李铭迪, 等. 润滑油添加剂对柴油机颗粒物微观物理特性的影响研究 [J]. 汽车工程, 2020, 42(11): 1545-1551.
- XU Guangju, GAO Jian, LI Mingdi, et al. Study on the effect of lubricating oil additives on the microphysical properties of diesel particulate matter [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(11): 1545-1551.
- [9] 刘博. 正丁醇添加于柴油-生物柴油对柴油机性能及颗粒物排放的影响研究 [J]. 河南科技, 2018(20): 129-132.
- LIU Bo. Study on N-butanol addition to diesel-biodiesel effecting on engine performance and particulates emissions [J]. Henan Science and Technology, 2018(20): 129-132.
- [10] 梅德清, 张起, 睢志轩, 等. 部分加氢生物柴油改善柴油机的燃烧与排放 [J]. 中国公路学报, 2019, 32(2): 184-190.
- MEI Deqing, ZHANG Qi, JU Zhixuan, et al. Improving combustion and emission performances of a diesel engine fueled with partially hydrogenated biodiesel [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(2): 184-190.
- [11] 肖九长, 姜水生, 胡琦山. 生物柴油抑制多环芳香烃生成的机理分析 [J]. 车用发动机, 2014(5): 12-16.
- XIAO Jiuchang, JIANG Shuisheng, HU Qishan. Mechanism of PAHs suppression for biodiesel [J]. Vehicle Engine, 2014(5): 12-16.
- [12] 张超, 夏淳, 方俊华, 等. 汽油芳香烃含量对颗粒物排放及其微观理化特性的影响 [J]. 内燃机工程, 2018, 39(1): 8-14.
- ZHANG Chao, XIA Chun, FANG Junhua, et al. Effect of aromatics on concentration and nanostructure of particulate matter from gasoline direct Injection engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2018, 39(1): 8-14.
- [13] 史程, 张鹏, 黄豪中. 汽化潜热和黏度对含氧燃料喷雾特性影响研究 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16(35): 211-214, 230.
- SHI Cheng, ZHANG Peng, HUANG Haozhong. Investigation on effects of latent heat of vaporization and viscosity on spray characteristics of oxygenated fuels [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(35): 211-214, 230.
- [14] 姚春德, 曾丽丽, 耿鹏, 等. 甲醇汽油发动机燃烧及其醇醛排放特性的研究 [J]. 汽车工程, 2014, 36(6): 657-662.
- YAO Chunde, ZENG Lili, GENG Peng, et al. A study on the combustion and methanol and formaldehyde emission characteristics of methanol gasoline engine [J]. Automotive Engineering, 2014, 36(6): 657-662.
- [15] 楼狄明, 冯谦, 谭丕强, 等. 柴油替代燃料乘用车实际道路气态物排放特性 [J]. 汽车工程, 2014, 36(9): 1034-1039.
- LOU Diming, FENG Qian, TAN Piqiang, et al. Emission characteristics of gaseous pollutants from diesel car fueled with alternative fuels in real road conditions [J]. Automotive Engineering, 2014, 36(9): 1034-1039.
- [16] 耿莉敏, 程清波, 陈阳, 等. 生物柴油-柴油-乙醇混合燃料的燃烧与排放特性 [J]. 中国公路学报, 2018, 31(11): 236-243.
- GENG Limin, CHENG Qingbo, CHEN Yang, et al. Combustion and emission characteristics of biodiesel-diesel-ethanol fuel blends [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(11): 236-243.
- [17] HASAN A O, OSMAN A I, AL-MUHTASEB A H, et al. An experimental study of engine characteristics and tailpipe emissions from modern DI diesel engine fuelled with methanol/diesel blends [J]. Fuel Processing Technology, 2021, 220: 106901.
- [18] FENG Yonghui, WANG Yugao, LIU Gang, et al. Modification of coal-tar pitch with 10-undecenal to reduce the content of environmental pollutants of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 2544-2552.
- [19] ISHII M, SHIMOKAWA K, MACHIDA K, 等. 高速公路长途运输卡车专用重型柴油机的燃油耗改善研究 [J]. 国外内燃机, 2016, 48(3): 9-16.
- [20] 黄成, 陈长虹, 景启国, 等. 重型柴油车实际道路排放与行驶工况的相关性研究 [J]. 环境科学学报, 2007, 27(2): 177-184.
- HUANG Cheng, CHEN Changhong, JING Qiguo, et al. On-board emission from heavy-duty diesel vehicle and its relationship with driving behavior [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(2): 177-184.
- [21] 梅莲, 王忠, 刘帅, 等. 煤液化柴油掺混甲醇柴油机试验研究 [J]. 煤炭转化, 2018, 41(5): 38-44, 51.

- MEI Lian, WANG Zhong, LIU Shuai, et al. Study on engine fueled with mixture of coal liquefied diesel and methanol [J]. *Coal Conversion*, 2018, 41(5): 38-44, 51.
- [22] 张学敏, 裘博, 谭建伟, 等. 柴油机燃用乙醇-生物柴油-柴油的醛酮类排放物研究 [J]. *农业机械学报*, 2012, 43(7): 13-18.
- ZHANG Xuemin, QIU Bo, TAN Jianwei, et al. Carbonyl compounds emission from engine fueled with ethanol-biodiesel-diesel [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(7): 13-18.
- [23] 李方成. 醇类/柴油混合燃料羰基化合物排放特性及生成机理的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [24] WANG Yinhui, ZHENG Rong, QIN Yanhong, et al. The impact of fuel compositions on the particulate emissions of direct injection gasoline engine [J]. *Fuel*, 2016, 166: 543-552.
- [25] 郭红松, 史永万, 陆红雨, 等. 柴油油品对发动机颗粒物中 SOF 及 PAHs 排放的影响研究 [J]. *小型内燃机与摩托车*, 2013, 42(1): 70-73, 78.
- GUO Hongsong, SHI Yongwan, LIU Hongyu, et al. Study of the effects of diesel fuel quality on SOF and PAHs of particle matter for Chinese V heavy-duty diesel engine [J]. *Small Internal Combustion Engine and Motorcycle*, 2013, 42(1): 70-73, 78.
- [26] VOJTISEK-LOM M, PECHOUT M, DITTRICH L, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and their genotoxicity in exhaust emissions from a diesel engine during extended low-load operation on diesel and biodiesel fuels [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 109: 9-18.
- [27] XU Zhen, LI Xinling, GUAN Chun, et al. Characteristics of exhaust diesel particles from different oxygenated fuels [J]. *Energy & Fuels*, 2013, 27(12): 7579-7586.
- [28] 王忠, 安玉光, 许广举, 等. 不同燃料柴油机多环芳烃排放特征的试验研究 [J]. *环境科学*, 2011, 32(7): 1888-1893.
- WANG Zhong, AN Yuguang, XU Guangju, et al. Experimental study on the characteristics polycyclic aromatic hydrocarbon emissions of diesel engine burnt by different fuels [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(7): 1888-1893.
- [29] 黄成, 胡磬遥, 鲁君. 轻型汽油车尾气 OC 和 EC 排放因子实测研究 [J]. *环境科学*, 2018, 39(7): 3110-3117.
- HUANG Cheng, HU Qingyao, LU Jun. Measurements of OC and EC emission factors for light-duty gasoline vehicles [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(7): 3110-3117.
- [30] 黄震, 李新令, 吕田, 等. 燃料特性对柴油机排放颗粒物理化特性影响的研究 [J]. *内燃机学报*, 2016, 34(2): 97-104.
- HUANG Zhen, LI Xinling, LV Tian, et al. Effect of fuel properties on physicochemical characteristics of diesel engine exhaust PM [J]. *Transactions of CSICE*, 2016, 34(2): 97-104.

(编辑 荆树蓉)