

DOI: 10.7652/xjtuxb201305002

柴油机颗粒物可溶有机组分来源研究

魏衍举, 汪文瑞, 黄瑾, 陈晓, 王坤, 刘圣华

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 在一台欧 II 排放水平的增压中冷 SOFIM8140 柴油机上, 利用气相色谱法研究了柴油和润滑油对发动机颗粒排放中可溶有机物(SOF)组分的影响, 考察了发动机运转参数对 SOF 组分的影响规律。实验结果表明: SOF 组分的碳数分布在 $C_{14} \sim C_{30}$ 范围内, 其中大部分质量集中于 $C_{23} \sim C_{30}$, 为润滑油成分; 转速一定时, 随着发动机负荷的增加, 润滑油组分增加, 柴油组分降低, 润滑油组分占 SOF 总量的比例(质量分数)由 60% 增加到 88%; 全负荷时, 随着发动机转速的提高, 柴油组分降低, 润滑油组分先大幅降低后略微增加, 润滑油组分占 SOF 总量的 80% 以上且随转速变化不大。

关键词: 柴油机; 润滑油; 颗粒物; 可溶有机物; 色谱分析

中图分类号: TK421 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)05-0006-06

Study on the Origination of Soluble Organic Fractions in Diesel Engine-Out Particulate Matters

WEI Yanju, WANG Wenrui, HUANG Jin, CHEN Xiao, WANG Kun, LIU Shenghua

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The origination of the soluble organic fraction (SOF) in the particulate matter (PM) was chromatographically analyzed, and the effects of diesel fuel, lubricant oil, and the operating parameters on the SOF components were investigated on a EURO II SOFIM8140 diesel engine. The experimental results show that the main compositions of SOF were $C_{14} \sim C_{30}$ paraffin matters in which the $C_{23} \sim C_{30}$ ones originated from lubricant oil were dominant in mass. At the fixed engine speed, with an increase in engine load, the content of lubricant-originated SOF (SOF_{Lube}) in particulate matters increased and the diesel-originated SOF (SOF_{Diesel}) decreased, and the ratio (mass fraction) of SOF_{Lube} in total SOF increased from 60% to 88%. At the full load with an increase in engine speed, the content of SOF_{Diesel} decreased, however, the content of SOF_{Lube} decreased first and then increased slightly, and the ratio of SOF_{Lube} in total SOF varied little and was over 80%.

Keywords: diesel engine; lubricant oil; particulate matter; soluble organic fraction; chromatographic analysis

传统柴油发动机排放的细微颗粒物(PM)呈现复杂的链状或团絮状, 吸附着多环芳烃、醛酮类等有毒物质, 其颗粒数浓度高达 $10^7 \sim 10^9$ 个/ cm^3 , 且长

期悬浮在空中。

一般认为, 润滑油的消耗仅为燃油的 0.2% 左右, 但它对柴油机 PM 排放的影响却很大。研究发

收稿日期: 2012-09-18。 作者简介: 魏衍举(1982—), 男, 博士, 讲师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51176151); 西安交通大学新教师科研支持计划资助项目(0103-08141013)。

网络出版时间: 2013-03-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130307.0802.010.html>

现,润滑油有可能造成高达 70% 的 PM 排放^[1]以及 90% 的可溶有机物(SOF)排放^[2]。随着柴油机技术的不断进步,柴油燃烧生成 PM 的量越来越低,然而发动机缸内润滑模式造成的 PM 排放变化不大,因此润滑油造成的 PM 排放重新受到重视。

在国外,Buchholz 等在未区分干碳烟(DS)和 SOF 的情况下考察了润滑油对 PM 中总碳的贡献率^[3],Lapuerta 等在一台非直喷柴油机上研究了燃料对 SOF 的影响^[4],Sidhu 等在激波管上从燃烧角度考察了润滑油对 PM 生成的影响^[5],Brandenberger 等研究了环境温度下润滑油对轻型柴油车催化后 PM 排放中 SOF 含量的影响^[6],Osada 等在单缸柴油机上实验考察了废气再循环(EGR)和氧化催化器对 PM 排放的影响^[7]。

在国内,陈虎等分析了 SOF 的主要成分^[8],谭建伟等考察了微粒中各粒径段挥发性物质的含量^[9],陈敏东等研究了 SOF 中有机物类型^[10],高俊华等研究了 PM 中多环芳香烃的含量^[11]。

本文利用气相色谱法对 PM 萃取液进行了分析,在一台增压中冷柴油机上研究了不同工况下燃油和润滑油对颗粒物中 SOF 的影响,从而获得了颗粒物中 SOF 组分随发动机工况的变化规律。

1 实验台

实验用发动机是南京依维柯车用增压中冷 SOFIM-8140.45 型柴油机,主要的标称结构和性能参数见表 1。

表 1 发动机主要结构和性能参数

燃烧室类型	直喷 ω 型	最大扭矩/N·m	300
缸径/mm	97.7	最大扭矩下转速/r·min ⁻¹	1 800
行程/mm	100	额定功率/kW	95
缸数	4	额定功率下转速/r·min ⁻¹	3 600
排量/L	2.998	发动机净质量/kg	240
压缩比	18.5	排放标准	欧 II

实验燃油为 0 号柴油,润滑油为 CF-4 级三类基础油,黏度等级为 15W-40。实验中样气利用自制颗粒采集仪直接从发动机排气管内采集,抽气流量控制在(400±0.5) L·h⁻¹,采样时间均为 10 min,采样滤纸为普通化学定量滤纸。采样结束后立即将滤纸取下、剪碎,然后放入 5 mL 正己烷(天津市科密欧化学试剂有限公司生产,纯度(质量分数)≥95%)的试管中进行萃取,萃取时浸泡 24 h 以上,保证

SOF 完全获取。

萃取物用岛津 GC-2010 气相色谱仪进行检测。进样萃取液为 1 μL,色谱仪的气化室温度为 300℃,分流比为 5,载气流速为 50 cm·s⁻¹。柱箱升温用程序控制,初始温度为 50℃,保持 2 min,再以 12℃·min⁻¹的速率升至 300℃,保持 10 min,总检测时间为 32.8 min。色谱柱为安捷伦 GS-OxyPLOT 型(10 m×0.53 mm 内径×10 μm 膜厚)强极性毛细柱,脉冲放电氦离子化检测器为 pdHID,载气为掺混 2%(体积分数)氩气的氦气,其中氦气和氩气的纯度(体积分数)均为 99.999%。

2 色谱分析

为了精确分析颗粒物种 SOF 组分及含量,实验前先对萃取剂正己烷和空白滤纸进行了多次色谱分析,以排除杂质对试样检测的影响,然后分别用体积分数为 5% 的柴油和 5% 的润滑油,以及 2.5% 的柴油、2.5% 的润滑油混合物试样对 SOF 中的柴油和润滑油的量进行了标定。

2.1 正己烷和空白滤纸

图 1 为正己烷和空白滤纸试样色谱图。从图 1 可以看出,萃取剂正己烷(质量分数仅为 95%)在 3.5 min 和 8.7 min 时各产生了一个杂质峰,空白滤纸在 13 min 时产生了一个较大的杂质峰。正己烷杂质的出峰时间早于柴油最早出峰的时间,而且含量较小,所以对 SOF 的影响可以忽略不计,但滤纸杂质峰则必须剔除。因此,SOF 定量时仅需剔除 13.8 min 处的杂质峰。

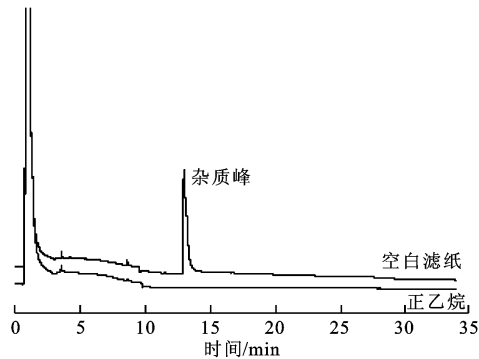


图 1 空白滤纸和正己烷色谱

2.2 柴油、润滑油及其混合物

图 2 为柴油润滑油混合物的分离色谱,图 3 为标准碳氢混合物分析色谱^[12]。对比图 2、图 3 可以发现:0 号柴油主要由正构烷烃组成;柱温升温速率为 12℃·min⁻¹,载气流速为 50 cm·s⁻¹;标准色谱温升

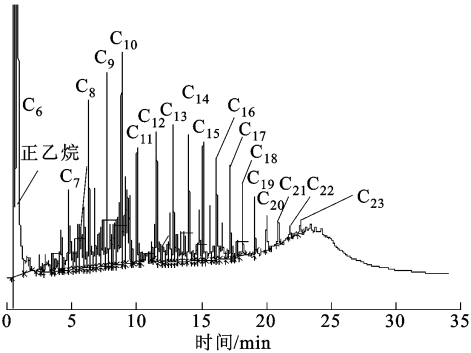


图 2 柴油润滑油混合物分析色谱

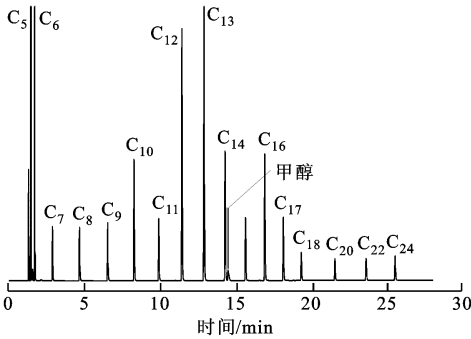


图 3 标准碳氢混合物分析色谱

速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$,载气流速为 $40\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$;柴油润滑油混合物中各烷烃的色谱出峰时间与标准碳氢混合物不同。因此,无法用绝对保留时间来确定各烷烃分子中的碳数。表 2 为 2 种混合物组分的出峰时间与出峰温度相对保留值。从表 2 可以看出:程序升

温使相对保留时间逐渐缩短,随着柱箱温度升高稳定在 1.0 附近;相对保留温度受程序升温影响较小,逐渐稳定在 1.1 左右。结合恒温条件下的同系物的调整,保留值与其对应碳数存在线性关系,可以确定所测柴油润滑油混合物中正构烷烃组分的名称。

表 2 柴油润滑油混合物与标准碳氢混合物色谱峰保留参数对比

不同碳数的 正构烷烃	t_{R1}/min	t'_{R1}/min	$T_1/^{\circ}\text{C}$	t_{R2}/min	t'_{R2}/min	$T_2/^{\circ}\text{C}$	$t'_{R2}\cdot t'_{R1}{}^{-1}$ $T_2\cdot T_1{}^{-1}$	
	标准碳氢混合物			柴油润滑油混合物				
	1.447	0	50					
C ₅	1.612	0.165	50	0.512	0	50		
C ₆	1.86	0.413	50	0.739	0.227	50		
C ₇	2.935	1.488	59.35	4.688	4.176	82.26	2.806	1.386
C ₈	4.721	3.274	77.21	6.277	5.765	101.32	1.761	1.312
C ₉	6.572	5.125	95.72	7.676	7.164	118.11	1.398	1.234
C ₁₀	8.294	6.847	112.94	8.807	8.295	131.68	1.211	1.166
C ₁₁	9.953	8.506	129.53	10.019	9.507	146.23	1.118	1.129
C ₁₂	11.453	10.006	144.53	11.498	10.986	163.98	1.098	1.135
C ₁₃	12.92	11.473	159.2	12.8	12.288	179.60	1.071	1.128
C ₁₄	14.292	12.845	172.92	13.984	13.472	193.81	1.049	1.121
C ₁₅	15.664	14.217	186.64	15.093	14.581	207.12	1.026	1.110
C ₁₆	16.908	15.461	199.08	16.149	15.637	219.79	1.011	1.104
C ₁₇	18.152	16.705	211.52	17.162	16.65	231.94	0.997	1.097
C ₁₈	19.333	17.886	223.33	18.137	17.625	243.64	0.985	1.091
C ₁₉				19.082	18.57	254.98		
C ₂₀	21.534	20.087	245.34	20.009	19.497	266.11	0.971	1.085
C ₂₁				20.909	20.397	276.91		
C ₂₂	23.575	22.128	265.75	21.785	21.273	287.42	0.961	1.082
C ₂₃				22.622	22.11	297.46		
C ₂₄	25.49	24.043	284.9					

注: t_R 为保留时间; t'_R 为校正保留时间; T 为保留温度;下角标 1、2 分别表示 2 种混合物。

图 4 为柴油、润滑油及其混合物的色谱。从图 4 可以看出,柴油和润滑油的色谱有明显差异,这是因为柴油的主要组分碳数为 $C_7\sim C_{20}$ (C_x 的下角 x

表示正烷烃分子中碳原子的个数)的正烷烃,以 C_{10} 为界分为轻质组分和重质组分,重质组分中 C_{13} 的质量分数最大,出峰时间可以延续到 20 min 以后;

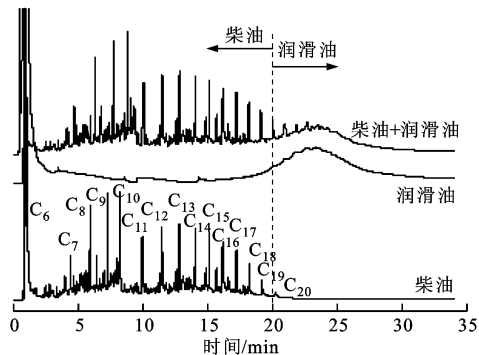


图 4 柴油、润滑油及其混合物的色谱

润滑油的出峰时间在 17 min (C_{17}) 之后,组分的碳数分布在 $C_{17} \sim C_{35}$ 范围内且按正态分布,其中 C_{24} 的质量分数最大。润滑油中长链烷烃的分子量过大,在色谱柱内的吸附力过强,各组分沿载气气流方向扩散程度较高,因此很难看到针状色谱峰,只有较为平滑的基线状的融合峰。柴油和润滑油组分的出峰时间有重叠,色谱分析中一般根据检测试样组分特点设定某个出峰时间为分界线^[7],本文设定柴油和润滑油的时间分界线为 20 min。

pdHID 检测器对分子中的碳有良好的等摩尔响应特性^[13],对于长链烷烃,可以认为柴油和润滑油中各组分的质量比等于其色谱峰面积之比,因此通过分析计算萃取液中各柴油和润滑油组分色谱峰总面积,即可获得 SOF 中柴油和润滑油各自的质量分数及其比值。

2.3 发动机排气样品

图 5 为最大扭矩下实测色谱与柴油润滑油标准混合物色谱的对比。从图 5 可以看出,颗粒物 SOF 的主要成分是未燃烧的润滑油,以及部分 C_{14} 以上柴油的重质成分。这说明发动机在运行过程中,柴油的轻质组分燃烧比较充分,少量未燃烧部分也以气体形式排放,未吸附在干碳上形成颗粒物 SOF,而部分未燃重质组分则是 SOF 的来源。在主燃烧

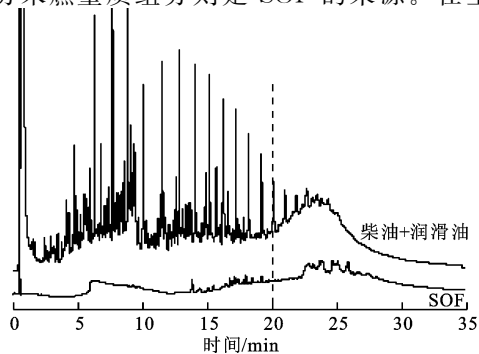


图 5 典型 SOF 检测色谱

完成后缸内的高温 and 气流运动的共同作用下,润滑油从气缸内壁挥发出来形成油气。此时,由于活塞下行,缸内温度降低,加上氧气缺乏,润滑油氧化作用较弱,所以挥发出来的润滑油基本上原封不动地排出缸外,并随着温度的进一步降低吸附在凝结核上,成为颗粒物 SOF 的主要来源。

3 实验结果分析

3.1 负荷特性

结合图 5 可知,柴油对 SOF 的贡献主要来自重质组分。当发动机转速一定时,随着负荷率的增加,循环喷油量增加,过量空气系数降低。燃油油束在与空气混合及燃烧的过程中,轻质组分首先燃烧,且氧化路径比重质组分的短,因而完全燃烧较易实现。重质组分由于完全氧化所需时间较长,随着燃烧的进行,混合气中氧气量减少,温度快速升高,因此,越到扩散燃烧后期,重质组分蒸气逐渐趋向于通过脱氢和聚合反应生成碳烟,并不以蒸气的形式排出缸外。虽然喷油量增加使其蒸气量增加,但温度升高和含氧量降低使燃油蒸气碳化的因素却占据主导。因此,由柴油造成的颗粒物中 SOF 排放浓度 c_{SOF} 逐渐降低。图 6 为 c_{SOF} 随负荷率的变化。从图 6 可以看出,在 $1400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速下,由柴油造成的 c_{SOF} 从 $11.5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 $4.5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

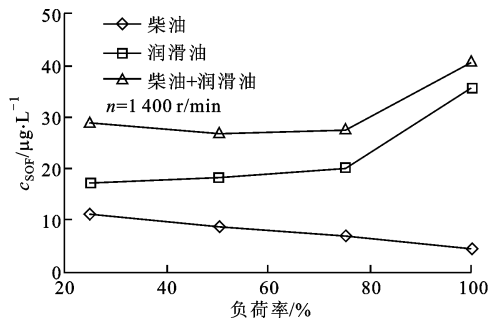


图 6 颗粒物中 SOF 排放浓度随负荷率的变化

润滑油生成 SOF 的机理与燃油完全不同。润滑油主要通过润滑油膜蒸发、曲轴箱窜气和惯性飞溅^[14]进入缸内并最终生成 SOF。在发动机转速一定时,曲轴箱窜气和惯性飞溅的影响不大,随着负荷增加,缸内温度升高造成润滑油膜蒸发量增加。在缓燃期后期,缸内温度最高,此时活塞快速下行,温度快速下降,蒸发后的燃油更多的是以蒸气的形式保留下来,而不是缩聚为碳烟,这部分蒸气随着缸内温度的继续降低逐渐吸附于碳烟和硫化物等凝结核上,形成颗粒排放。因此,负荷的增加使润滑油造成

的 c_{SOF} 增加,由 25% 负荷率时的 $17.4\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到全负荷时的 $35.5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

从图 6 还可以看出,润滑油的 c_{SOF} 大于柴油,负荷越大,二者的差距越大。图 7 为润滑油造成的 SOF 占总 SOF 的比例 r 。从图 7 可以看出,润滑油对 SOF 的贡献率将由 25% 负荷率时的 60.2% 增加到全负荷时的 88.1%,表明柴油机颗粒物的 SOF 组分主要源自润滑油,与文献[4-5]所得结论一致。文献[10]的结果表明,SO_F 主要源于柴油,看似此结论与本文结果相悖,但实则相同。本文与文献[10]中燃油、润滑油及 SOF 组分的碳数分布如表 3 所示。从表 3 可以看出,文献[10]中 SOF 的碳数分布为 $\text{C}_{13}\sim\text{C}_{26}$,质量集中于 $\text{C}_{19}\sim\text{C}_{26}$,而本实验中 SOF 的碳数分布为 $\text{C}_{13}\sim\text{C}_{31}$,质量也集中于 $\text{C}_{24}\sim\text{C}_{31}$,二者碳数分布相似,只是本文整体前移 6 个碳原子。文献[10]中柴油的碳数覆盖了 SOF 的碳数,但本文中却没有,因此文献[10]在忽略润滑油碳数分布的情况下将 SOF 的主要来源归结于柴油,而本文将 SOF 的主要来源归结于润滑油。

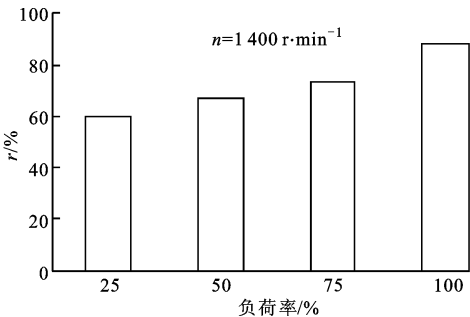


图 7 润滑油造成的 SOF 占总 SOF 的比例

表 3 燃油、润滑油及 SOF 组分的碳数分布

方法	碳数分布			
	柴油	润滑油	SOF	SOF 质量集中处
文献[10]	$\text{C}_{10}\sim\text{C}_{30}$	$\text{C}_{15}\sim\text{C}_{45}$	$\text{C}_{13}\sim\text{C}_{26}$	$\text{C}_{19}\sim\text{C}_{26}$
本文	$\text{C}_7\sim\text{C}_{20}$	$\text{C}_{17}\sim\text{C}_{35}$	$\text{C}_{13}\sim\text{C}_{31}$	$\text{C}_{23}\sim\text{C}_{30}$

当发动机转速为 $1\,900\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $2\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,SO_F 的绝对排放量大幅降低,润滑油组分在色谱柱内扩散严重,色谱峰淹没在色谱基线之内,此时即使采用增加样品量及萃取液浓度的方法,将采样时间延长至 20 min,萃取液的体积减小至 2 mL,也无法将润滑油组分的色谱图与基线分离,因此无法计算柴油和润滑油组分之间的比例。

3.2 速度特性

图 8 为最大油门开度下颗粒物中 SOF 排放浓

度随转速的变化。从图 8 可以看出,当油门开度保持在最大位置时,随着发动机转速的提高,循环喷油量变化不大,而散热量减少使得缸内温度升高,空气运动增强,柴油蒸发及其与空气的混合速度加快,燃烧更加充分,排气温度升高,排气管内后氧化作用增强,柴油蒸气的残存量降低,最终导致柴油的 c_{SOF} 有所降低。

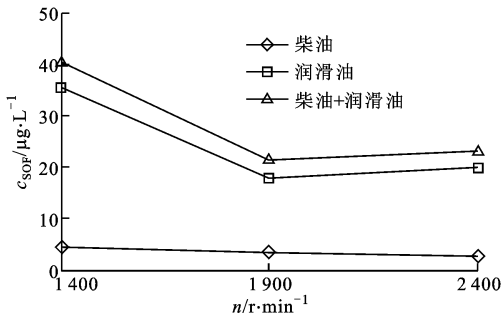


图 8 最大油门开度下颗粒物中 SOF 排放浓度随转速的变化

转速对润滑油的作用比较复杂。随着转速的提高,活塞环刮油引起的惯性飞溅作用增强,然而刮油作用导致气缸壁油膜变薄,又削弱了飞溅强度。缸内温度升高,使润滑油膜蒸发的时间缩短;转速提高,使活塞环缺口处的节流作用增强,曲轴箱窜气量减少。总体上:转速较低时,提高转速削弱了对润滑油蒸发的作用,转速较高时,增强和削弱作用基本处于平衡(见图 8);润滑油的 c_{SOF} 随着转速的提高先大幅降低,而后略有增加,在最大扭矩下的 $1\,900\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 处最低。

全负荷时柴油的 c_{SOF} 远低于润滑油的 c_{SOF} ,因此润滑油的 c_{SOF} 在总 SOF 中所占的比例主要取决于润滑油的 c_{SOF} 。图 9 为最大油门开度下润滑油造成的 SOF 占总 SOF 的比例。从图 9 可以看出,当 $r>80\%$ 时,润滑油的 c_{SOF} 随转速变化不大。

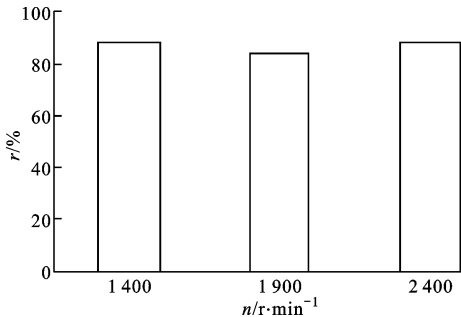


图 9 最大油门开度下润滑油造成的 SOF 占总 SOF 的比例

4 结 论

本文在欧Ⅱ排放水平的SOFIM8140.45柴油机上,通过气相色谱法分析了颗粒物中SOF的组分及其来源,研究了柴油和润滑油对SOF的贡献率及贡献率随发动机转速(全负荷下)和负荷($n=1\ 400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时)的变化规律,得到以下结论。

(1)实验所用柴油和润滑油的主要组分的碳数分布分别为 $C_7\sim C_{20}$ 和 $C_{17}\sim C_{35}$,颗粒排放中SOF组分的碳数分布为 $C_{14}\sim C_{30}$,其中大部分质量集中于 $C_{23}\sim C_{30}$,为润滑油组分。

(2)源自柴油部分的SOF排放随发动机转速和负荷的增加而降低。

(3)润滑油是SOF的主要来源,当 r 在60%~88%时,润滑油对SOF的贡献率随发动机负荷的增加而增大,随转速的增加先降低后略微增大,在最大扭矩转速附近存在最小值。

参考文献:

- [1] CARTELLIERI W P, WACHTER W F. Status report on a preliminary survey of strategies to meet US-1991 HD diesel emission standards without exhaust gas aftertreatment, SAE 870342 [R]. Washington DC, USA: SAE, 1987.
- [2] CARTELLIERI W P, TRITTHART P. Particulate analysis of light duty diesel engines (IDI & DI) with particular reference to the lube oil particulate fraction, SAE 840418 [R], Washington DC, USA: SAE, 1984.
- [3] BUCHHOLZ B A, DIBBLE R W, RICH D, et al. Quantifying the contribution of lubrication oil carbon to particulate emissions from a diesel engine, SAE 2003-01-1987 [R]. Washington DC, USA: SAE, 2003.
- [4] LAPUERTAL M, HERNANDEZ J J, BALLESTEROS R, et al. Composition and size of diesel particulate emissions from a commercial European engine tested with present and future fuels [J]. Proc Instn Mech Engrs: Part D J Automobile Engineering, 2003, 217(10): 907-918.
- [5] KAHANDAWALA M S P, GRAHAM J L, SIDHUA S S. Impact of lubricating oil on particulates formed during combustion of diesel fuel: a shock tube study [J]. Fuel, 2004, 83(13): 1829-1835.
- [6] BRANDENBERGER S, MOHR M, GROB K, et al. Contribution of unburned lubricating oil and diesel fuel

to particulate emission from passenger cars [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(37): 6985-6994.

- [7] OSADA H, AOYAGI Y, SHIMADA K, et al. SOF component of lubricant oil on diesel PM in a high boosted and cooled EGR engine, SAE 2007-01-0123 [R]. Washington DC, USA: SAE, 2007.
- [8] 陈虎, 陈文淼, 王建昕, 等. 柴油机燃用乙醇-柴油含氧燃料时微粒特性的分析 [J]. 内燃机学报, 2005, 23(4): 307-312.
CHEN Hu, CHEN Wenmiao, WANG Jianxin, et al. Study on PM emission characteristics of diesel engine fueled with ethanol-diesel blend [J]. Transactions of CSICE, 2005, 23(4): 307-312.
- [9] 谭建伟, 葛蕴珊, 何超, 等. 基于尺寸分布的生物柴油排气微粒组分研究 [J]. 内燃机工程, 2010, 31(1): 17-20, 26.
TAN Jianwei, GE Yunshan, HE Chao, et al. Research on PM component of diesel engine fueled with biodiesel based on PM size distribution [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, 31(1): 17-20, 26.
- [10] 陈敏东, 李芳, 李红双, 等. 柴油发动机颗粒排放物分析及来源解析 [J]. 南京信息工程大学学报, 2010, 2(2): 138-142.
CHEN Mindong, LI Fang, LI Hongshuang, et al. Studies on the composition and source of diesel particulate emission [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology, 2010, 2(2): 138-142.
- [11] 高俊华, 方茂东, 张仲荣, 等. 柴油机排气微粒中多环芳香烃的色谱质谱分析 [J]. 内燃机学报, 2009, 27(5): 423-429.
GAO Junhua, FANG Maodong, ZHANG Zhongrong, et al. Analysis of PAHs in particulate matter of a diesel engine by gas chromatography-mass spectrometry [J]. Transactions of CSICE, 2009, 27(5): 423-429.
- [12] 邹云, 蔡敏. 关于安捷伦 GS-OxyPLOT 气相色谱柱特有的选择性和稳定性的调查报告 [R/OL]. [2012-02-11]. <http://www.chem.agilent.com/Library/applications/5989-8771CHC N.pdf>.
- [13] 吴烈钧. 气相色谱检测方法 [M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2005: 248-250.
- [14] YILMAZ E, TIAN T, WONG V W, et al. The contribution of different oil consumption sources to total oil consumption in a spark ignition engine, SAE 2004-01-2909 [R]. Washington DC, USA: SAE, 2004.

(编辑 苗凌)