

· 低碳内燃动力系统减排技术 ·

预混比对乙醇/柴油 RCCI 排气颗粒物化学成分的影响

班智博¹, 唐国强², 韩伟强³, 罗 强⁴, 方 嘉³

(1. 广西玉柴机器股份有限公司, 广西 玉林 530000; 2. 中车资阳机车有限公司, 四川 资阳 641300; 3. 汽车测控与安全四川省重点实验室(西华大学), 四川 成都 610039; 4. 四川启涅科技有限公司, 四川 广元 628000)

摘 要: 通过对一台六缸重型柴油发动机进行改装, 进行乙醇/柴油活性控制压缩点火(reactivity controlled compression ignition,RCCI)试验, 分析预混比(premix ratio, R_p)对乙醇/柴油 RCCI 排气颗粒物化学成分的影响。结果表明: RCCI 颗粒物元素组成主要包括 C、O、Si 元素, 还检测出微量金属 Zr; 随着 R_p 的增加, RCCI 颗粒物 C 和 O 元素均增加, Si 和 Cu 元素均减小, Zr 元素减少至消失。本文的研究结果有助于加深对 RCCI 颗粒物化学成分生成理论的理解, 为减少 RCCI 颗粒物排放提供技术支撑。

关键词: 预混比; 乙醇; RCCI; 排气颗粒物; 化学成分

中图分类号: TK427 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2022)05-0028-06

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.4589

Effects of Premixing Ratio on the Chemical Composition of Ethanol/Diesel RCCI Exhaust Particulate Matter

BAN Zhibo¹, TANG Guoqiang², HAN Weiqiang³, LUO Qiang⁴, FANG Jia³

(1. Guangxi Yuchai Machinery Co., Ltd., Yulin 530000 China;

2. CRRC Ziyang Locomotive Co., Ltd., Ziyang 641300 China;

3. Key Laboratory of Automotive Measurement, Control and Safety, Xihua University, Chengdu 610039 China;

4. Sichuan Qinie Technology Co., Ltd., Guangyuan 628000 China)

Abstract: On a modified a six-cylinder heavy-duty diesel engine, the ethanol/diesel Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI) experiment was carried out to study the effects of premixing ratio on the chemical composition of ethanol/diesel RCCI exhaust particulate matter. The results show that the elemental composition of RCCI particles mainly includes C, O, Si elements, and trace metal Zr is also detected; with the increase of R_p , the elements of C and O in the RCCI particles increase, and the elements of Si and Cu decrease, and the element of Zr decreases to disappear. The research will deepen the understanding of RCCI particulate matter chemical composition's generation theory and provide technical support for re-

收稿日期: 2022-06-20

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目资助(52006182); 四川省自然科学基金项目资助(2022NSFSC0196); 广元市科技计划重点研发项目资助(21ZDYF0025); 四川省科技计划资助(2021YJ0332); 机械装备高性能智能制造关键技术湖南省重点实验室(长沙理工大学)开放基金项目资助。

第一作者: 班智博(1984—), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为柴油机燃烧及排放控制。

ORCID: 0000-0002-9217-9698 E-mail: banzhibo@163.com

引用格式: 班智博, 唐国强, 韩伟强, 等. 预混比对乙醇/柴油 RCCI 排气颗粒物化学成分的影响[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2022, 41(5): 28-33.

BAN Zhibo, TANG Guoqiang, HAN Weiqiang, et al. Effects of Premixing Ratio on the Chemical Composition of Ethanol/Diesel RCCI Exhaust Particulate Matter [J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2022, 41(5): 28-33.

ducing RCCI particulate matter emissions.

Keywords: premixing ratio; ethanol; RCCI; exhaust particulate matter; chemical composition

内燃机作为一种动力装置因其可靠性、耐用性和更高的燃油热效率等优点被广泛应用于工程、机械以及农业等多个领域。大量柴油机的使用会造成氮氧化物(NO_x)和颗粒物(PM)的过高排放,并且排出的颗粒物直径普遍小于 $1 \mu\text{m}$,是 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源之一^[1]。研究发现,颗粒物对全球温室效应的影响仅次于二氧化碳,是名副其实的“暖宝宝”^[2]。除此之外,颗粒物还是导致雾霾天气的重要原因,人体吸附有害物质的较小颗粒物容易引发冠心病和呼吸道疾病,还会导致免疫功能受损^[3-5]。

学者们致力于从废气再循环(exhaust gas recalculation, EGR)、喷油策略和新型燃烧模式等手段来改善发动机排放^[6-8]。其中,新型燃烧模式——活性控制压缩点火(reactivity controlled compression ignition, RCCI)能够有效避免 NO_x 与 PM 的彼消此长问题,并且燃料选择具有高度灵活性。研究证实,在特定条件下 RCCI 可以实现 NO_x 和 PM 同时近零排放,是一种极具发展潜力、燃烧可控和排放友好的柴油机燃烧模式^[9-10],成为了当下学者们的研究热点。

汽油作为一种石油基燃料,有着广泛的市场,因此是第一个在 RCCI 发动机上应用的低活性燃料。然而,化石燃料的短缺限制了汽油在 RCCI 上的应用。此外,汽油中含有多环芳香烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAH),容易形成碳烟^[11]。为了解决这个问题,研究人员正在寻找其他替代燃料,醇类燃料因其含氧和可再生,逐渐发展成为潜在的低活性燃料^[12-13]。其中,乙醇作为一种二元醇,因其节能环保、价格低廉,被广泛应用于内燃机和汽车领域上,具有很好的推广应用价值。目前,乙醇广泛应用于 RCCI 上,在提高热效率和降低排放上极具潜力。Zhu 等^[8]在一台单缸发动机上进行了正庚烷/汽油类燃料 RCCI 发动机燃烧和排放特性的试验研究。结果发现,与汽油相比,乙醇/正庚烷 RCCI 的 NO_x 和 PM 排放量同时减少了 50%。这是因为在相同的喷射策略下,乙醇/正庚烷 RCCI 存在更好的冷却效果和更高的氧含量。

Hanson 等^[14]在一台轻型多缸压燃式发动机上进行了 RCCI 燃烧试验,结果发现在向汽油中添加 20% 的乙醇后,制动热效率(BTE)提高了约 5%。此外,Hanson 等还发现,与汽油相比,由于乙醇的低反应性增加了反应活性梯度,从而降低了压力上升率(PRR),提高了低负荷下的燃烧效率。

缸内混合气分层和分布受预混比影响很大,学者们发现预混比的提高能够显著降低 NO_x 和 PM 排放。Li 等^[15]在甲醇/柴油 RCCI 的参数优化研究中发现,在预混比、EGR 率、喷油定时、进气门关闭时的初始缸内压力和温度几个因素中,初始温度和 EGR 率对发动机整体性能和排放的影响最为显著,而预混比和喷油定时通过改变缸内局部富集燃料和高温区域会显著影响 NO_x 和 PM 排放。Işık 等^[16]开展了 R_p 对乙醇/柴油 RCCI 燃烧影响的试验,研究发现随着 R_p 的增加,缸内燃烧温度下降, NO_x 大幅降低,同时还提高了热效率。

综上所述,乙醇作为低活性燃料应用于 RCCI 时在降低排放、提高热效率和拓宽负荷上表现优异,是一种具有广阔发展前景的替代燃料。然而,目前研究大多集中在 RCCI 燃烧和排放方面,针对颗粒物化学成分的研究比较匮乏,需要进一步探索和揭示。因此,本文基于一台改装过的六缸重型柴油发动机,维持循环总能量为 4000 J/cyc ,转速恒定为 1500 r/min ,喷油定时为 -10°CA ATDC ,预混比分别为 30%、40% 和 50%,研究预混比对乙醇/柴油 RCCI 排气颗粒物化学成分的影响。本文的试验结果将丰富和发展颗粒物化学成分生成理论,为减少 RCCI 颗粒物排放的研究提供参考。

1 实验设备与方法

1.1 实验设备

本研究基于一台六缸高压共轨柴油发动机进行改装,使用两套独立的燃油喷射系统,通过进气道喷射低活性(高辛烷值)乙醇燃料,缸内直接喷射高活性(高十六烷值)柴油燃料,从而实现 RCCI 燃烧。实验发动机基本参数如表 1 所示,涉及燃料主要理化特性如表 2 所示。低活性燃料喷射系统主

要包括低压油轨和低活性燃料喷油器,控制低活性燃料喷油压力为 0.5 MPa,选取孔数为 4、喷射角度为 15°的喷油器。

表 1 实验发动机基本参数

参数	数值
发动机类型	六缸、涡轮增压、直列、气门顶置
发动机型号	YC6L260-50
排量/L	8.424
压缩比	17.5
缸径×行程/(mm×mm)	113×140
燃油供给形式	高压共轨
燃烧室形状	ω型
额定转速/(r/min)	2 200
最大扭矩/(N·m)	1 030

图 1 显示了 RCCI 发动机实验平台示意图。该实验平台主要包括发动机动力和测控系统、温度压力监控系统、两套燃油供给系统、ECU 喷油策略控制系统以及颗粒物采集装置系统,发动机工况通过 DW630 型电涡流测功机进行控制。

颗粒物采集装置示意图见图 2。具体操作如下:首先用胶带将 TEM 微栅黏贴在普通定性滤纸上,然后放入取样器中。发动机尾气由真空泵抽取,使得含有颗粒物的尾气流过 TEM 微栅,从而使

表 2 试验用燃料主要理化特性

特性	柴油	乙醇
分子结构	C ₁₂ -C ₂₅	∠OH
含氧量/%	0	34.73
密度/(kg/m ³)	820	789
十六烷值	51	11
辛烷值	17	109
化学计量空燃比	14.3	9.02
低热值/(MJ/kg)	42.8	26.83
汽化潜热/(MJ/kg)	0.27	0.90
自燃温度/°C	200~250	420
闪点/°C	55	17
沸点/°C	189~344	78

颗粒物直接固定在 TEM 微栅上,最后取下 TEM 微栅放入微栅盒中,密封后放入冰箱以备检测。本研究采用的 TEM 微栅是厚度为 15~20 nm 的 300 目铜网微栅。此外,为了制备合格的颗粒物样品,取样时间和流量应当分别控制在 10~15 s 和 3 L/min。

Talos F200S (S) TEM 可实现具有多功能性和高通量的 STEM 成像,可用于精确 EDS 分析,如图 3 所示。为确保样品数据可靠真实,减小不确定性,将曝光时间设置为 10 s,能量范围(色散)控制在 20 keV(5 eV),成形时间常数 3 μs,电子噪声为

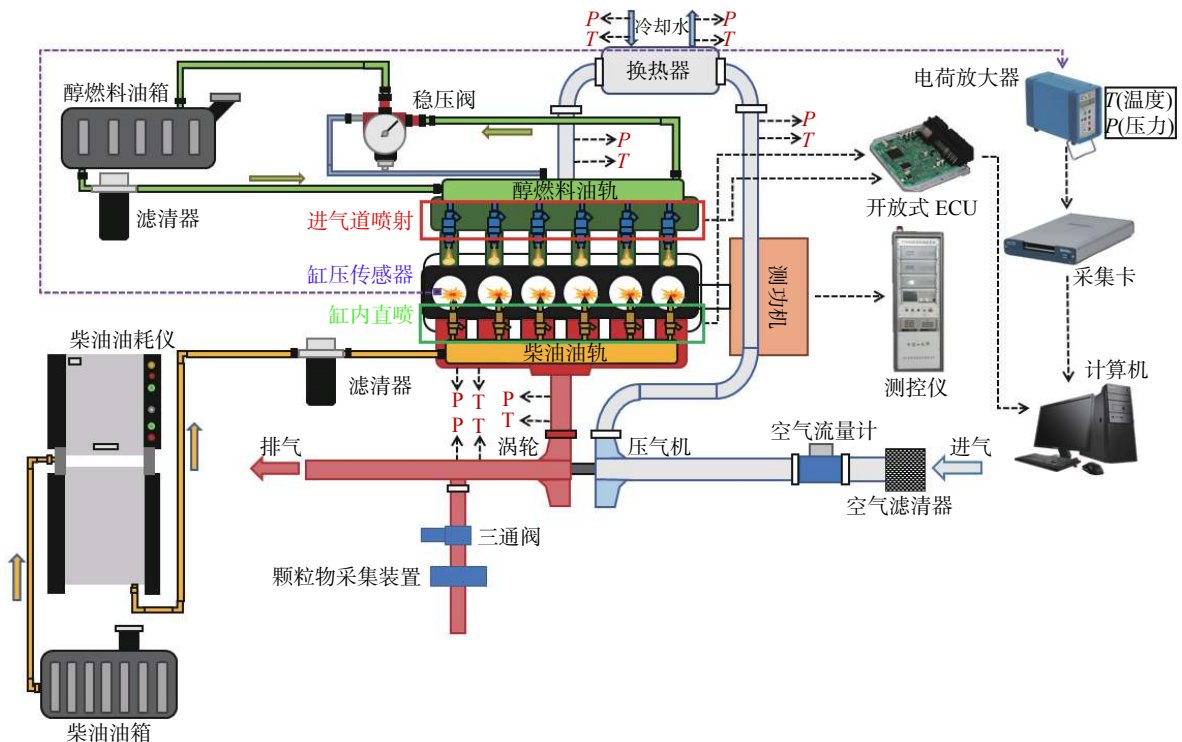


图 1 RCCI 发动机实验平台示意图

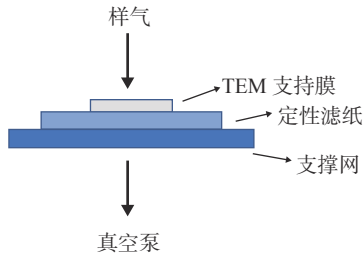


图 2 颗粒物采集装置示意图

28 eV。颗粒物元素组成通过能量色散 X 射线光谱仪 (EDS) 半定量分析确定, 它可以检测单个粒子中原子序数大于 5(B) 的元素, 由于 TEM-EDS 无法检测氢元素, 因此该元素不会出现在 TEM-EDS 光谱中^[17]。本研究一共测量了 3 个样本, 为了确保所分析的颗粒物能够代表整个尺寸范围, 在单个颗粒物上, 至少对颗粒物的中心和外围的 3 个不同位置进行扫描^[18]。此外, EDS 测试时间为 30 s, 以尽量减少辐射暴露和潜在电子束流损伤。



图 3 Talos F200S 透射电子显微镜

1.2 实验方法

如表 3 所示, 试验期间一系列参数保持不变。发动机转速保持 1500 r/min 不变, 柴油直喷压力 (direct injection DI) 恒定为 100 MPa, 而通过进气道进入气缸参与燃烧的乙醇燃料的喷油定时和喷油压力分别为 $-360^{\circ}\text{CA ATDC}$ 和 0.55 MPa。在实验过程中, 进气温度保持在 $30\pm 1^{\circ}\text{C}$, 冷却水和润滑油的温度分别恒定在 $90\pm 1^{\circ}\text{C}$ 和 $80\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。为了保证实验的可靠性和真实性, 颗粒物的采集是在每个工况下发动机连续稳定运转 5 min 后进行的。在本

研究中, 循环总能量维持在 4000 J/cyc 不变, 喷油定时选定 $-10^{\circ}\text{CA ATDC}$ 。循环总能量是每个循环供应到发动机中的醇类燃料和柴油的能量之和, 其定义如公式(1)所示。预混比会对 RCCI 燃烧和排放特性有直接影响, 进而影响颗粒物的理化特性, 因此本研究选择了 3 种预混比, 即 30%、40% 和 50%。在本研究中, R_p 被视为端口醇类燃料能量与 E_{total} 的比值, 其计算公式见式(2)。

$$E_{\text{total}} = m_a \cdot H_a + m_d \cdot H_d \quad (1)$$

$$R_p = \frac{m_a \cdot H_a}{m_a \cdot Q_a + m_d \cdot Q_d} \times 100\% \quad (2)$$

式中: H_a 和 H_d 分别代表醇类燃料和柴油的低热值 (LHVs), MJ/kg; m_a 是每个发动机循环中注入进气歧管的醇类质量; m_d 是每个发动机循环中喷入气缸的柴油质量, kg/h; E_{total} 是每个循环供应到发动机中的醇类和柴油的能量总和。

表 3 发动机控制参数

控制参数	数值
发动机转速/(r/min)	1 500
循环总能量/(J/cyc)	4 000
喷油定时/ $(^{\circ}\text{CA ATDC})$	-10
预混比/%	30/40/50
柴油直喷压力/MPa	100
醇类燃料喷油压力/MPa	0.55
醇类燃料喷油时刻/ $(^{\circ}\text{CA ATDC})$	-360
进气温度/ $^{\circ}\text{C}$	30 ± 1
冷却水温度/ $^{\circ}\text{C}$	90 ± 1
机油温度/ $^{\circ}\text{C}$	80 ± 1

2 预混比对 RCCI 颗粒物元素成分和含量的影响

颗粒物也称为元素碳或黑碳, 是燃料不完全或不充分燃烧的产物, 主要由 C 和 O 元素组成。它是由粒径为 10~100 nm 的小球形颗粒物团聚而成, 以链状、簇状或葡萄状的形式存在, 具有很高的辨识度。图 4 显示了 RCCI 典型颗粒物 EDS 能谱图, 其余工况条件与此类情况相似。由于受到铜网微栅的影响, 实际测得的金属铜元素含量偏大, 可能为颗粒物实际铜元素和铜网微栅共同作用的结果。尽管测试值不能反映实际真实情况, 但考虑是探究某一影响因素对其变化的影响, 因此纳入分析中。

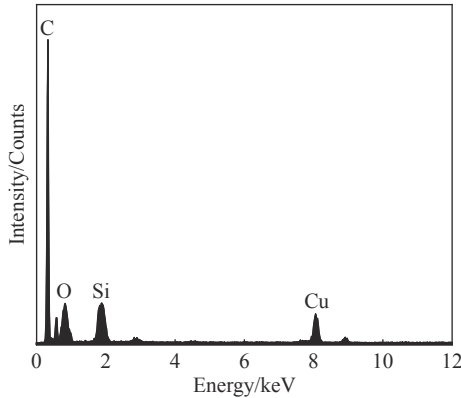
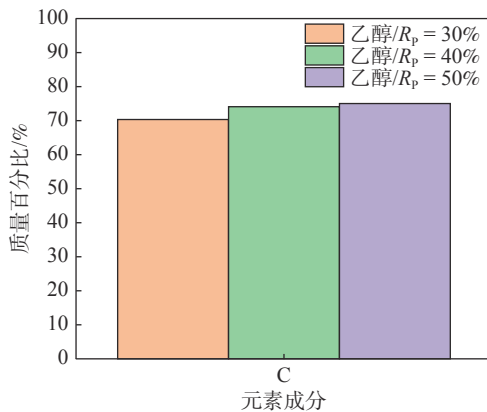
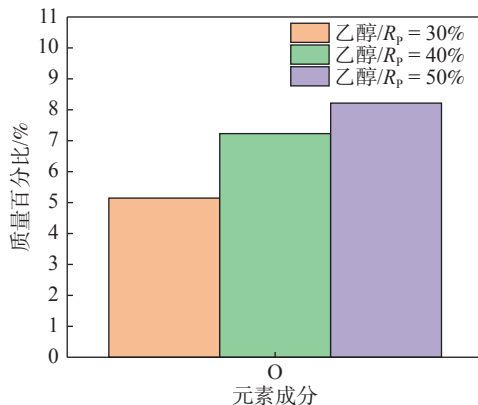
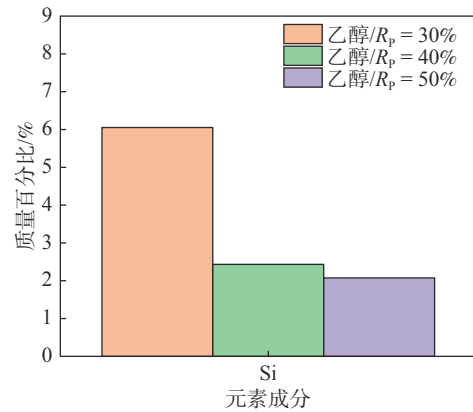
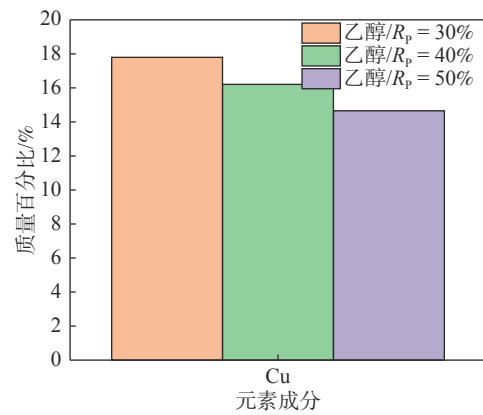
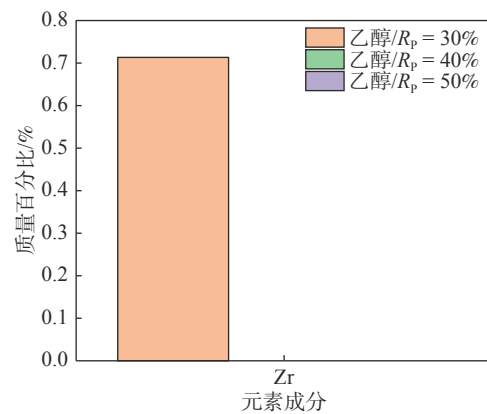


图4 RCCI 典型颗粒物 EDS 能谱图

图 5—9 显示了预混比对 RCCI 排气颗粒物各元素成分的影响。从图中可以看出, RCCI 颗粒物元素组成主要包括 C、O、Si 元素。除此之外,随着 R_p 的减少,乙醇/柴油 RCCI 颗粒物检测出 Zr 元素。

如图 5 所示,随着 R_p 的增加, RCCI 颗粒物 C 元素含量小幅增加。这是因为 R_p 的增加会导致不完全燃烧的增加,从而形成更多的碳烟前驱体,颗粒物相应增加,导致 C 元素含量呈小幅增加趋势,这与 Lee 等^[19]的研究一致。

图5 R_p 对 RCCI 排气颗粒物 C 元素的影响图6 R_p 对 RCCI 排气颗粒物 O 元素的影响图7 R_p 对 RCCI 排气颗粒物 Si 元素的影响图8 R_p 对 RCCI 排气颗粒物 Cu 元素的影响图9 R_p 对 RCCI 排气颗粒物 Zr 元素的影响

如图 6 所示,随着 R_p 的增加, RCCI 颗粒物 O 元素含量增加。这是因为 R_p 的增加提高了醇类燃料预混燃烧比例,更多的醇类燃料参与整个燃烧过程,进而提高了颗粒物的 O 元素含量。此外,还会增加润滑油在燃烧过程中的氧化速率,特别是在燃烧温度较高的情况下。

如图 7 所示,随着 R_p 的增加, RCCI 颗粒物 Si 元素含量减少。一些学者在报告中说道, Si 元素可能来自于从生物质提取(如单质醇燃料)过程中

的无机成分或有机络合物^[20],在燃烧过程中可以转化为气溶胶。而预混比例增加后,缸内燃料中氧含量增加,改善了燃烧过程,缸内燃烧温度和压力增加,促进 Si 元素在燃烧过程中转化为气溶胶,最终导致 Si 含量降低。

如图 8 所示,随着 R_p 的增加,RCCI 颗粒物 Cu 元素含量减少。在柴油发动机排放的 PM 中金属元素的主要来源可分为 3 部分:燃料、润滑油、金属运动件。本试验所用乙醇燃料为无水乙醇,几乎不含金属元素,因此在柴油发动机使用乙醇替代柴油降低了 PM 中的金属元素,从而导致随着预混比例的增加,Cu 含量降低。此外,乙醇预混比例增加后,燃料混合气中氧含量增加,在高燃烧温度下可以提高润滑油在燃烧过程中的氧化速率,因此预混比例增加,Cu 的含量降低。

如图 9 所示,随着 R_p 的增加,RCCI 颗粒物 Zr 元素含量减少直至消失。在 $R_p=30\%$ 时产生的颗粒物含有特殊金属 Zr 元素,这是由于润滑油在高氧浓度和高温环境的协同作用下被氧化,然后这些金属氧化物会促进颗粒物氧化,导致颗粒晶体结构发生改变。

3 结论

本文在一台改装过的六缸重型高压共轨柴油发动机上,选取乙醇作为低活性燃料实现 RCCI 燃烧,探讨了预混比对乙醇/柴油 RCCI 排气颗粒物化学成分的影响,主要结论如下。

1)与传统颗粒物不同,RCCI 颗粒物除了主要包括 C 和 O 元素外,还含有 Si 元素。

2)随着 R_p 的减少,RCCI 颗粒物检测出 Zr 元素,并引起其余元素含量变化。

3)随着 R_p 的增大,RCCI 颗粒物 C 元素含量呈小幅增加,O 元素含量增加,Si 元素和 Cu 元素含量减少,且微量元素 Zr 含量减少直至消失。

参 考 文 献

[1] BOND T C. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2004, 109: D14203.

[2] JACOBSON M Z. Strong radiative heating due to

the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols[J]. *Nature*, 2001, 409(6821): 695 – 697.

[3] AVON P. Exposure to traffic and the onset of myocardial infarction[J]. *New England Journal of Medicine*, 2005, 351(17): 1721 – 1730.

[4] O'Connor G T, NEAS L, VAUGHN B, et al. Acute respiratory health effects of air pollution on children with asthma in US inner cities[J]. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 2008, 121(5): 1133 – 1139.

[5] XIA T, KOVOCHICH M, NEL A E. Impairment of mitochondrial function by particulate matter (PM) and their toxic components: implications for PM-induced cardiovascular and lung disease[J]. *Frontiers in Bioscience A Journal & Virtual Library*, 2007, 12(4): 1238.

[6] ZHENG Z, LANG Y, LIU H, et al. Effect of two-stage injection on combustion and emissions under high EGR rate on a diesel engine by fueling blends of diesel/gasoline, diesel/n-butanol, diesel/gasoline/n-butanol and pure diesel[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 90: 1 – 11.

[7] LIU H, MA S, ZHONG Z, et al. Study of the control strategies on soot reduction under early-injection conditions on a diesel engine[J]. *Fuel*, 2015, 139(1): 472 – 481.

[8] ZHU L, QIAN Y, WANG X, et al. Effects of direct injection timing and premixed ratio on combustion and emissions characteristics of RCCI (Reactivity Controlled Compression Ignition) with N-heptane/gasoline-like fuels[J]. *Energy*, 2015, 93: 383 – 392.

[9] SPLITTER D, WISSINK M, DAN D V, et al. RCCI engine operation towards 60% thermal efficiency[J]. *Sae Technical Papers*, 2013, 1: 0279.

[10] REITZ R D, DURAISAMY G. Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in internal combustion engines[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2015, 46: 12 – 71.

[11] BENAJES J, MOLINA S, GARCÍA A, et al. An investigation on RCCI combustion in a heavy duty diesel engine using in-cylinder blending of diesel and gasoline fuels [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 63(1): 66 – 76.

[12] ZHANG P, HE J, CHEN H, et al. Improved combustion and emission characteristics of ethylene glycol/diesel dual-fuel engine by port injection timing and direct injection timing - ScienceDirect[J]. *Fuel Processing Technology*, 2020, 199: 106289.

(下转第 72 页)