

DOI:10.11784/tdxbz202503006

煤制油/碳酸二甲酯双燃料发动机排放特性研究

黄豪中¹, 李佳蔚¹, 郭晓宇², 卢华林¹

(1. 广西大学机械工程学院, 南宁 530004; 2. 广西玉柴机器股份有限公司, 玉林 537005)

摘要: 煤制油可作为传统石油燃料的替代品, 在发动机上使用能够更好地保障国家能源安全, 同时推动煤炭的高效清洁利用. 通过发动机台架试验, 探讨了不同负荷下煤制油掺混碳酸二甲酯对排放特性的影响. 结果表明: 增加碳酸二甲酯混合比例, 混合燃料着火时刻提前, 燃烧效率上升. 其中, 在中低负荷下, 添加碳酸二甲酯对燃烧效率的提升相较于高负荷下更加显著. 在煤制油中掺混 30% 的碳酸二甲酯, CO 排放最高降低 50.9%, 为 0.108 g/(kW·h); 烟度最低值为 0.015 FSN, 与煤制油相比降低 78.3%; NO_x 排放增加. 颗粒物排放数量浓度随着碳酸二甲酯掺混比例增加显著降低. 其中, 积聚态颗粒(100~1 000 nm)数量浓度降幅最大, 核态颗粒(23~100 nm)次之, 超细颗粒(0~23 nm)降幅最小. 在 20% 负荷工况下 3 种颗粒物下降最为明显, 超细颗粒、核态颗粒和积聚态颗粒的降幅分别为 70.1%、54.6% 和 43.9%. 颗粒物几何平均直径随碳酸二甲酯混合比例的上升而下降. 当发动机处于更高负荷工况下, 燃料着火更早, 燃烧效率上升; CO、THC 排放和烟度下降, 其中 3 种混合燃料的烟度分别下降 31.3%、42.9% 和 46.4%; NO_x 排放增加; 总排放颗粒数浓度降低, 但 3 种颗粒物所占比例没有明显变化, 几何平均直径呈现小幅增加. 在 20%~60% 负荷工况下, 碳酸二甲酯的添加具有明显的颗粒数浓度和 NO_x 权衡关系. 相较于负荷改变, 碳酸二甲酯混合比例对减少颗粒物生成的效果更为显著.

关键词: 煤制油; 碳酸二甲酯; 柴油机; 排放特性

中图分类号: TK428.9

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)07-0723-08

Emission Characteristics of Coal-to-Liquid/Dimethyl Carbonate Dual-Fuel Engine

Huang Haozhong¹, Li Jiawei¹, Guo Xiaoyu², Lu Hualin¹

(1. School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Guangxi Yuchai Machinery Co., Ltd., Yulin 537005, China)

Abstract: Coal-to-liquid (CTL) fuels can be used as alternatives to conventional petroleum-based fuels, enhancing national energy security and promoting the efficient and clean utilization of coal in engines. Engine bench tests were conducted to investigate the effects of dimethyl carbonate (DMC) blending in CTL on the emission characteristics using different loads. The results reveal that increasing the DMC blending ratio advances the ignition timing and enhances combustion efficiency. This enhancement is more significant at low and medium loadings than at high loads. Further, blending 30% DMC into CTL yields a maximum carbon monoxide (CO) emission reduction of 50.9%, reaching 0.108 g/(kW·h). The lowest soot is 0.015 FSN, representing a 78.3% reduction compared with CTL. However, increased NO_x emissions are observed. Additionally, the particle number concentration considerably decreases with higher DMC blending ratios. The accumulation-mode particles (100—1 000 nm) exhibit the highest reduction, followed by nucleation-mode particles (23—100 nm). Notably, the ultrafine particles (0—23 nm) exhibit the smallest decrease. At a 20% load, the most significant reductions in the three particle size groups are observed, with the decrease of the ultrafine, nucleation-mode, and accumulation-mode particles being 70.1%, 54.6%, and

收稿日期: 2025-03-05; 修回日期: 2025-06-19.

作者简介: 黄豪中 (1976—), 男, 博士, 教授.

通信作者: 黄豪中, hhz421@gxu.edu.cn.

基金项目: 广西科技重大专项资助项目 (桂科 AA23062090, 桂科 AA23062012); 国家自然科学基金资助项目 (52366007).

Supported by the Guangxi Science and Technology Major Project (No. GuiKeAA23062090, No. GuiKeAA23062012), the National Natural Science Foundation of China (No. 52366007).

43.9%, respectively. The geometric mean diameter of the particles decreases with the increasing DMC blending ratio. At higher engine loads, the fuel ignites faster, with enhanced combustion efficiency. Additionally, the CO, tetrahydrocannabinol (THC), and soot emissions decrease, with the soots of the three mixed fuels decreasing by 31.3%, 42.9%, and 46.4%, respectively. Further, the NO_x emissions increase while the total particle number concentration decreases, although the proportions of the three particles do not change substantially, and the geometric mean diameter increases slightly. A clear trade-off relationship is observed between the particle number concentration and NO_x emissions at loads of 20%—60%. Compared with load variations, the DMC blending ratio exerts a more significant effect on the suppression of particle formation.

Keywords: coal-to-liquid (CTL); dimethyl carbonate (DMC); diesel engine; emission characteristics

我国总体的能源结构呈现“富煤、少气、贫油”的特点,其中石油的对外依存度已超过 70%。在美丽中国建设的背景下,同时为了降低国内化石能源对于外国进口的依赖,保障能源安全,近些年来,众多专家学者纷纷倡导开发新的石油替代燃料^[1-2]。根据我国富煤的特点,从煤炭中制取燃油能够更好地保障国家能源安全,同时推动煤炭的高效清洁利用。

煤制油具有十六烷值高,硫和芳烃的含量低等特点^[3-4]。由工厂生产出来的煤制油无需加工,可直接作为柴油机燃料^[5]。Cai 等^[6]发现,煤制油/柴油混合燃料较柴油具有更好的点火性能,在低负荷下,混合燃料发动机运行平缓,能够明显降低 NO_x 和碳烟排放。Geng 等^[7-8]比较柴油和煤制油的颗粒物排放发现,煤制油的超细颗粒数浓度更低,几何平均粒径小,成核型粒子比例高。Zhang 等^[9]和 Sun 等^[10]使用汽油/煤制油燃料发现,使用煤制油作为主燃料有利于降低颗粒物排放,提高发动机热效率,降低压力上升率和变异系数。

面对日益严格的排放法规,在煤制油中添加含氧燃料添加剂有望进一步降低颗粒物排放。例如, Hua 等^[11]发现,15%甲醇/煤制油混合燃料相较于煤制油的烷烃、烯烃、芳香烃等碳烟前驱物的排放分别降低 28%、38.3%和 23.7%。Sun 等^[12]发现,在煤制油中添加正丁醇,能够增加核态颗粒物的比例,同时抑制煤制油燃烧过程中颗粒物的排放。碳酸二甲酯作为可持续再生能源,可由二氧化碳合成而来,具有含氧量高、易挥发性的特点,同时具有减少内燃机碳烟排放的潜力^[13-14]。Wei 等^[15]发现,柴油中添加碳酸二甲酯能够减少碳核的数量和直径,增强碳烟的氧化反应性。

综上所述,煤制油与碳酸二甲酯混合燃烧的研究鲜有报道。因此,本文在一台四缸柴油机上开展了不同负荷工况下柴油、煤制油和煤制油/碳酸二甲酯的燃烧和排放特性研究,并进行对比分析,研究结果对促进煤制油代替石油产品,降低柴油机的颗粒物排放具有重大意义。

1 试验装置和方法

1.1 试验发动机与测量设备

在一台由广西玉柴生产的 YCK05240-60 四缸柴油机上开展台架试验研究,发动机试验台架布置示意图如图 1 所示。发动机主要参数如表 1 所示。发动机的扭矩和转速由电涡流测功机 CW-260E 和控制系统 FST4 控制。喷油量、喷油正时等喷油参数由软件 INCA 7.2 和 ECU 进行控制。使用 Kistler 6052CU20 缸压传感器、燃烧分析仪 DEWE-800-CA 和电荷放大器获得缸内压力和放热率;采用 AVL415SE 烟度计

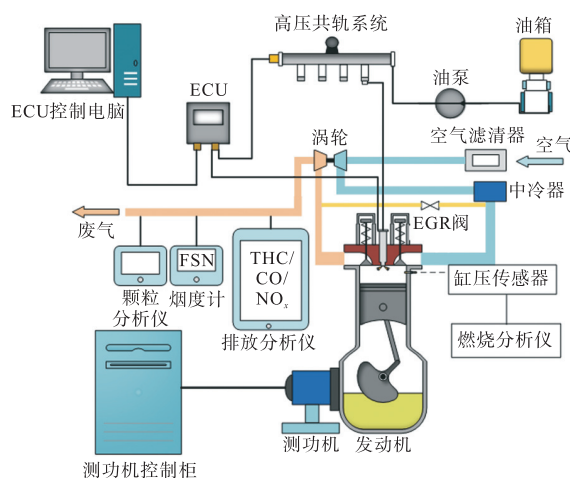


图 1 发动机台架示意

Fig.1 Schematic of the engine bench

表 1 发动机主要参数

Tab.1 Main specifications of the test engine

参数	数值
缸数	4
缸径 × 行程/(mm × mm)	110 × 135
排量/L	5.13
每缸气门数	4
压缩比	17.2
标定扭矩/(N · m)	900
标定功率/kW	176
标定转速/(r/min)	2 200

和 MEXA-7100DEGR 排放分析仪测量排放气体的烟度、 NO_x 、THC 和 CO ; 快速颗粒分析仪 Cambustion 测量颗粒物排放。测量设备的不确定性和采集分辨率如表 2 所示。

表 2 测量设备的不确定度和采集分辨率^[16]

Tab.2 Uncertainty and resolutions of the measurement equipment^[16]

设备	不确定度	采集分辨率
MEXA 7100DEGR 排放分析仪	-0.5% ~ 0.5%	1×10^{-6}
AVL 415SE 烟度计	-0.1% ~ 0.1%	0.001 FSN
Kistler 6052CU20 缸压传感器	-0.1% ~ 0.1%	0.1 CAD
电涡流测功机(扭矩)	-0.2% ~ 0.2%	0.01 N·m
电涡流测功机(转速)	-0.1% ~ 0.1%	1 r/min

表 3 测试燃料的物化性质

Tab.3 Physical and chemical properties of the test fuels

项目	密度/(kg/m^3)	十六烷值	低热值/(MJ/kg)	黏度/(mm^2/s)	沸点/ $^{\circ}\text{C}$	汽化潜热/(kJ/kg)	理论空燃比
CTL	757.0	75.4	43.07	2.14	257.8	235	14.96
碳酸二甲酯	1 069.0	35.0	15.50	0.63	90.1	369	4.59
正丁醇	805.5	25.0	33.19	11.20	117.7	626	11.20
D100	840.0	52.9	42.69	2.77	360.0	280	14.30

1.3 试验条件与方法

试验参照发动机日常使用工况。在试验过程中, 发动机转速为 1 200 r/min, 使用单次喷射模式, 喷射正时为 4°CA BTDC , 喷油压力为 110 MPa, 冷却液温度保持在 $(80 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, 进气温度保持在 $(40 \pm 1)^{\circ}\text{C}$, EGR 阀保持关闭状态。待发动机达到目标运行条件并稳定运行 2 min, 开始采集实验数据。在 20% ~ 70% (180 、 270 、 360 、 450 、 540 、 $630 \text{ N} \cdot \text{m}$) 负荷工况下, 研究 D100、CTL、CD10、CD20 和 CD30 的燃烧与排放特性。为了保证试验的准确性, 每个试验重复进行 3 次, 并取平均值作为最终数据。

引入了燃烧效率 e_c 表示燃料充分燃烧的程度, 即

$$e_c = 1 - \frac{P}{10^3} \left[(E_{\text{CO}} \text{LHV}_{\text{CO}} + E_{\text{HC}} \text{LHV}_{\text{HC}} + E_{\text{soot}} \text{LHV}_{\text{soot}}) / (m_{\text{mix}} \text{LHV}_{\text{mix}}) \right] \quad (1)$$

式中: E_{CO} 、 E_{HC} 、 E_{soot} 分别为 CO 、 HC 和碳烟的排放量; LHV_{CO} 、 LHV_{HC} 和 LHV_{soot} 分别为 CO 、 HC 和碳烟的低热值; m_{mix} 为混合燃料的质量; LHV_{mix} 为混合燃料的低热值, 其计算公式为

$$\text{LHV}_{\text{mix}} = (m_{\text{CTL}} \text{LHV}_{\text{CTL}} + m_{\text{DMC}} \text{LHV}_{\text{DMC}} + m_{\text{n-butanol}} \text{LHV}_{\text{n-butanol}}) / (m_{\text{CTL}} + m_{\text{DMC}} + m_{\text{n-butanol}}) \quad (2)$$

式中: m_{CTL} 、 m_{DMC} 和 $m_{\text{n-butanol}}$ 分别为 CTL、碳酸二甲酯和正丁醇的质量; LHV_{CTL} 、 LHV_{DMC} 和 $\text{LHV}_{\text{n-butanol}}$ 分别为 CTL、碳酸二甲酯和正丁醇的低热值。

1.2 试验燃料

采用柴油、煤制油和煤制油/碳酸二甲酯混合燃料作为试验燃料。柴油和煤制油分别用 D100 和 CTL 表示。碳酸二甲酯不能直接与 CTL 互溶, 且掺混比例过高会导致混合燃料能量密度降低, 发动机动力受到影响。在 CTL 与碳酸二甲酯的混合燃料中以体积分数为 8% 的正丁醇作为助溶剂; 混合燃料 CD10、CD20、CD30 对应的碳酸二甲酯体积分数分别为 10%、20%、30%。本研究的 CTL 为间接液化 CTL, 其中, 链烷烃占 95.8%, 环烷烃占 3.4%, 多环芳烃占 0.5%, 单环芳烃占 0.3%。CTL、碳酸二甲酯、正丁醇和 D100 的主要物化性质如表 3 所示。

2 试验结果与分析

2.1 缸压、放热率和燃烧效率

不同负荷下 CTL 和 CD30 的缸压与放热率如图 2 所示。在更高负荷下, 较高的初始压力和初始缸内

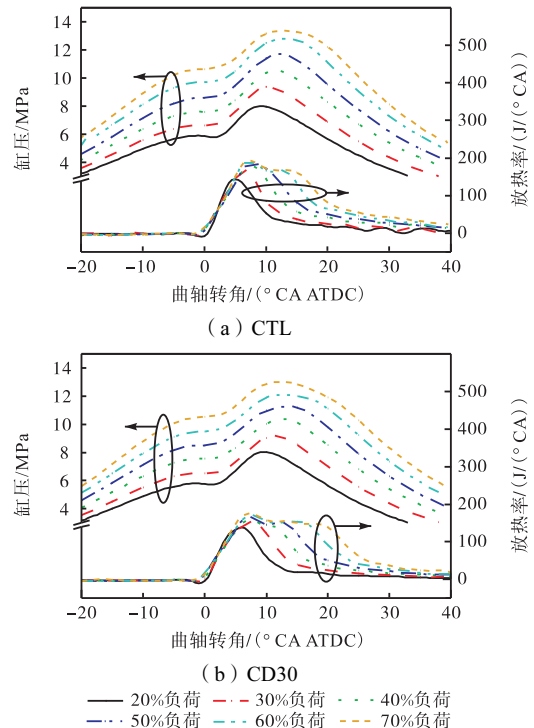


图 2 不同负荷下 CTL 与 CD30 的缸压与放热率

Fig.2 Cylinder pressures and heat release rates of CTL and CD30 at different loads

温度有助于燃料更快达到自燃条件,提前了 CTL 和 CD30 的着火时刻.观察图 2(a)、(b)中的放热率曲线可以发现,在 20%负荷时缸内放热率峰值最接近上止点,而随着负荷增加,两种燃料的燃烧中心均有所延迟.试验燃料在中低负荷(30%)、中负荷(50%)和中高负荷(70%)的缸压和放热率如图 3 所示.由图 3 可以发现,在中低负荷下,十六烷值最低的 D100 着火最晚.在高负荷下缸内温度较高,十六烷值不同对着火的推迟情况改善,试验燃料几乎同时着火.随着碳酸二甲酯混合比例上升,混合燃料的热值降低,能量密

度下降,燃烧放热量减少,缸内压力峰值和预混燃烧阶段放热率峰值降低.此外,混合燃料汽化潜热增加,在喷雾蒸发阶段吸收更多热量,导致燃烧初期的反应速率减慢,峰值压力也会下降.相较于中低负荷,在中高负荷时,混合燃料的放热率出现双峰特征,扩散燃烧更加明显.在混合燃料中,随着碳酸二甲酯混合比例增加,中长碳链烷烃的比例减少,导致扩散燃烧阶段的热量释放缓慢,放热率曲线的第 2 峰峰值降低.

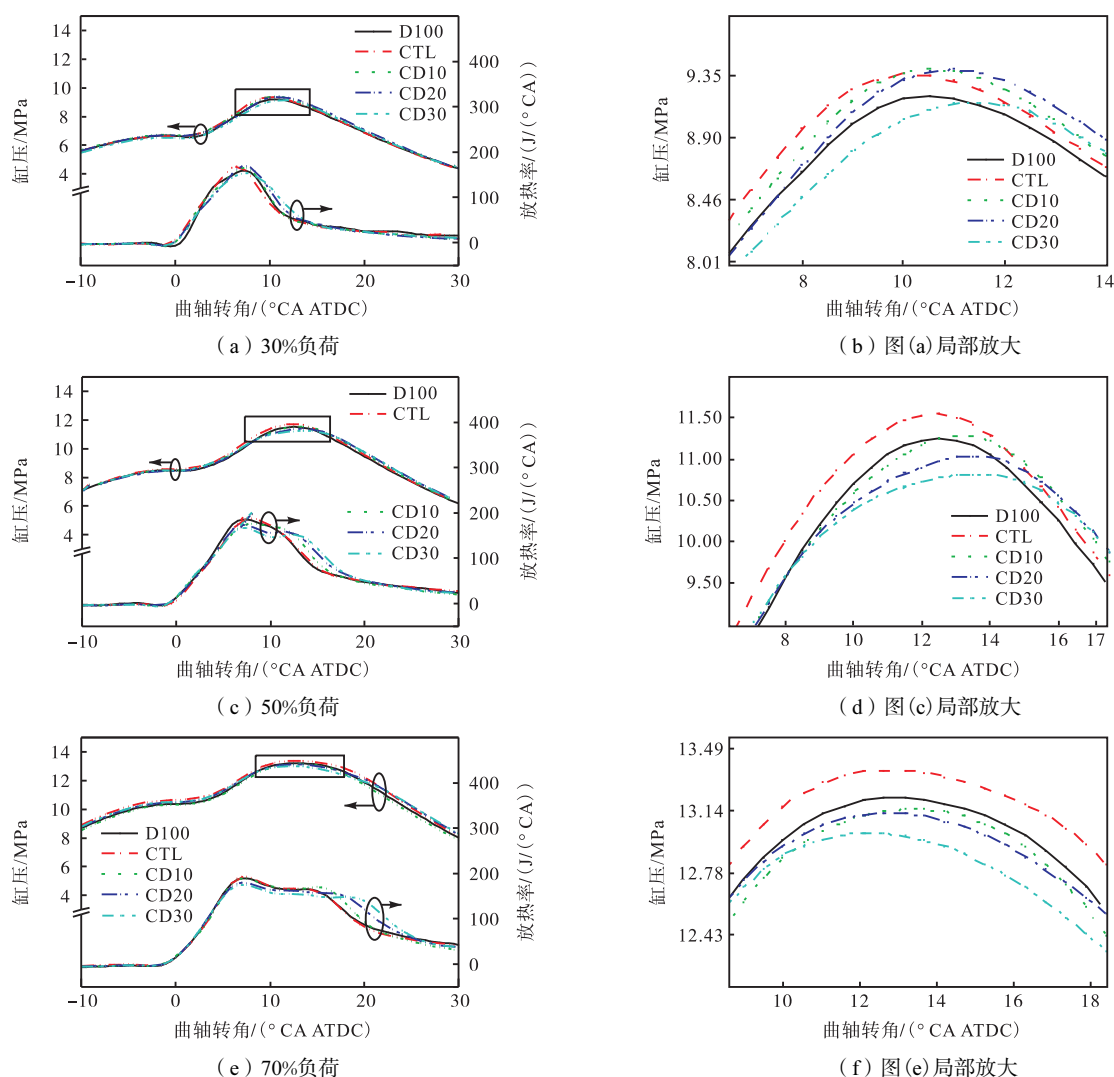


图 3 不同碳酸二甲酯掺混比例下试验燃料的缸压和放热率

Fig.3 Cylinder pressures and heat release rates of test fuels with different DMC blending ratios

试验燃料在不同负荷下的燃烧效率如图 4 所示.在试验工况下,CTL 的燃烧效率均高于 D100,这是因为 CTL 的十六烷值更高,燃料易于着火,有利于缸内燃烧更加完全.当碳酸二甲酯混合比例升高时,由于其低温受热分解产生活性含氧自由基,有助于混合燃料的充分燃烧,燃烧效率上升.随着负荷增大,试

验燃料的燃烧效率升高.其中,在中低负荷下,燃烧效率的提升相较于高负荷下更加显著.

2.2 排放分析

不同负荷下测试燃料的 CO、THC 和 NO_x 排放量,如图 5 所示.如图 5(a)和(b)所示,柴油的 CO 和 THC 排放量最高,其次是 CTL.与 D100 相比,CTL

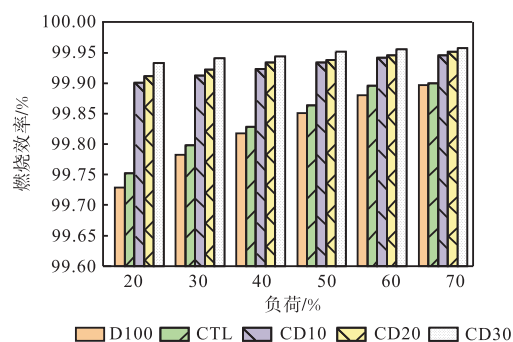
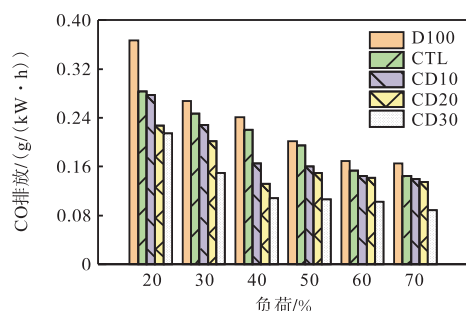
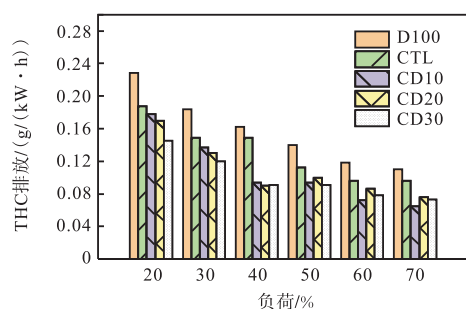


图4 试验燃料的燃烧效率

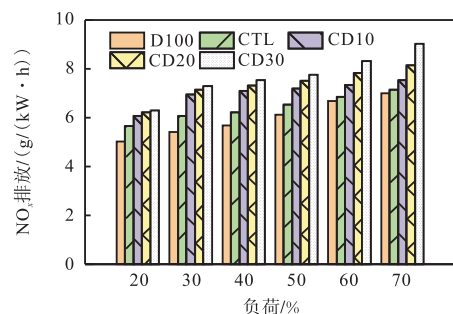
Fig.4 Combustion efficiencies of the test fuels



(a) CO 排放



(b) THC 排放

(c) NO_x 排放图5 试验燃料的CO、THC和NO_x排放对比Fig.5 Comparisons of the CO, THC, and NO_x emissions of the test fuels

较低的蒸馏温度和较高挥发性减少了气缸中富油区域,缸内燃烧氛围更好,有助于抑制CO和THC排放的产生.随着发动机负荷的增加,D100和CTL之间的CO排放差异变小.在低负荷条件下气缸内温度较低,CTL的燃料特性优势更加明显,更有利于燃烧,这与图4中的结果一致.在中高负荷,缸内压力和温

度增加,具有更好的热环境,满足CO氧化的条件,D100和CTL的CO排放差别不大.CTL中掺入碳酸二甲酯,混合燃料黏度降低,可以促进燃料的雾化,减弱狭缝效应,使THC排放保持在相对较低的水平.此外,由于碳酸二甲酯热值低,延长缸内燃烧持续期,这有助于碳酸二甲酯中含氧自由基更好地参与燃烧,促进CO转化为CO₂以及THC的二次氧化.在40%负荷下,添加碳酸二甲酯对减少CO排放的影响最为明显;与CTL相比,CD30的CO排放量下降了50.9%,为0.108 g/(kW·h).

由图5(c)可知,随着发动机负荷的增加,5种燃料的NO_x排放均增加.在更高负荷下,CTL和D100的燃烧温度和氧气供应接近,使得两种燃料的NO_x排放的差距变小.相较于D100和CTL,掺混碳酸二甲酯在气缸内提供了富氧环境.随着发动机负荷的增加,混合燃料的NO_x排放增长更加显著.与20%负荷相比,CTL和CD30在70%负荷下的NO_x排放分别增加了25.9%和43.4%.

试验燃料在不同负荷下的烟度如图6所示.与其他试验燃料相比,D100的芳香烃含量最高,燃烧过程中生成的多环芳烃经过凝聚后形成碳烟,导致其烟度最高.混合燃料的烟度低于CTL,且随着碳酸二甲酯混合比例的增加而减少.这是因为增加碳酸二甲酯的比例,混合燃料中含氧组分比例增加,同时芳香烃等碳烟前驱物的含量减少,导致碳烟的生成量减少.当负荷增加时,所有试验燃料的烟度下降.与20%负荷相比,70%负荷下的CD10、CD20和CD30烟度分别下降了31.3%、42.9%和46.4%.相较于负荷的改变,碳酸二甲酯混合比例对烟度的影响更加显著.试验燃料中,负荷为70%时CD30的烟度最低,为0.015FSN,相较于CTL降低了78.3%.

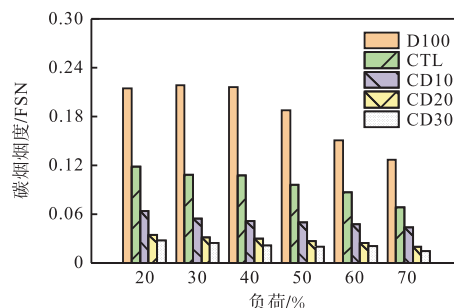


图6 试验燃料的碳烟烟度

Fig.6 Soot emissions of the test fuels

不同负荷下试验燃料的颗粒粒径分布浓度如图7所示.图中N表示颗粒物粒子数.与大颗粒物相比,直径 D_p 小于100 nm的颗粒物对人体的危害更大^[17].但是根据目前实行的柴油机国六排放法规,直径小于

23 nm 的颗粒物没有被纳入法规监管范围. 研究显示, 这部分颗粒在颗粒物排放总量中占据着不可忽视的比例^[18]. 因此, 为了研究碳酸二甲酯混合比例对颗

粒物粒径分布浓度的影响机制, 本文根据粒径大小将颗粒物分为 3 种: 超细颗粒(0 ~ 23 nm)、核态颗粒(23 ~ 100 nm)和积聚态颗粒(100 ~ 1 000 nm).

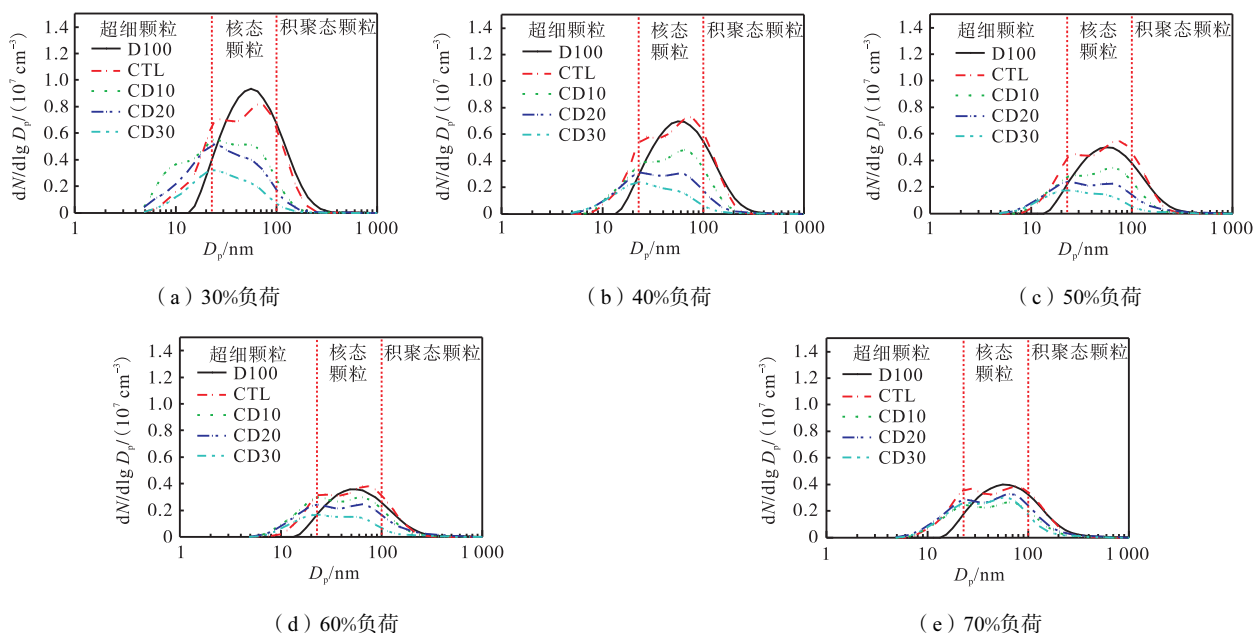


图 7 不同碳酸二甲酯掺混比例的颗粒物粒径分布浓度

Fig.7 Particle size distribution concentrations of different DMC blending ratios

D100 的颗粒粒径分布浓度呈现单峰特征, 其他 4 种燃料为双峰特征, 且两个峰的峰值都在核态颗粒区间. D100 中的芳香烃和硫含量高于其他几种试验燃料, 易生成碳烟, 其主要为核态颗粒. 使用混合燃料时, 核态颗粒主要是 CTL 中生成的碳烟颗粒; 超细颗粒主要是达到饱和状态的未燃 HC 和未完全燃烧产生的挥发性有机物. 随着碳酸二甲酯混合比例的增加, 相同粒径下的颗粒数浓度降低. 其中, 在 30% ~ 50% 负荷下, 与超细颗粒相比, 核态颗粒和积聚态颗粒的下降幅度更加明显. 这是因为一方面, 混合燃料中芳香烃含量随着混合比例上升而减少, 核态和积聚态的碳烟颗粒数浓度随之降低; 另一方面, 碳酸二甲酯的添加导致燃料中直链正构烷烃减少, 易于裂解生成更多的碳核和挥发性有机物等超细颗粒. 此外, 更高的氧含量导致缸内未燃 HC 更易达到饱和状态, 经过凝结后形成超细颗粒. 当负荷增加时, 3 种颗粒数浓度下降. 其中, 相较于 30% ~ 50% 负荷, 60% ~ 70% 负荷下颗粒数浓度的下降幅度并不明显. 与负荷变化相比, 碳酸二甲酯混合比例在降低颗粒数浓度方面的效果更为显著

图 8 为试验燃料的 3 种颗粒数浓度和比例. 在更高负荷下, 更好的热氛围有助于 3 种粒径颗粒物的氧化, 总颗粒数浓度下降, 但 3 种颗粒物所占比例没有明显变化. 随着碳酸二甲酯混合比例上升, 总颗粒、

核态和积聚态颗粒数浓度下降; 核态颗粒比例增加, 积聚态颗粒比例下降; 其中, 在 20% 负荷工况下 3 种颗粒数浓度下降最为明显, 与 CTL 相比分别下降了 70.1%、54.6% 和 43.9%. 碳酸二甲酯中的氧组分会抑

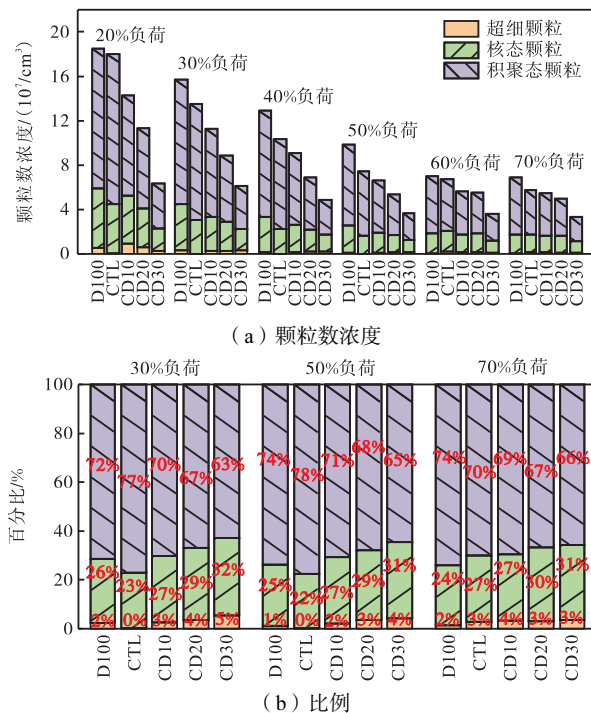


图 8 不同碳酸二甲酯掺混比例的颗粒数浓度和比例
Fig.8 Particle number concentrations and proportions with different DMC blending ratios

制核态颗粒向积聚态颗粒的转化,减少积聚态颗粒物浓度的比例.与D100和CTL相比,混合燃料的超细颗粒比例更高,且随着混合比例上升,这部分颗粒数的比例上升.

图9展示了在不同负荷下试验燃料的几何平均直径.和其他试验燃料相比,D100中硫和芳香烃含量高,十六烷值低,导致更多颗粒物生成的同时抑制颗粒物的氧化,颗粒物经过积聚,几何平均直径明显高于其他4种燃料.增加碳酸二甲酯混合比例,有助于积聚态颗粒物高温氧化,同时减少颗粒之间的凝结和聚集,几何平均直径下降.在更高负荷下,几何平均直径随之上升,这是因为喷油量增加,导致燃油分布不均,缸内局部混合气过浓,增强颗粒物的积聚效应;另一方面,可能出现部分未完全燃烧的燃料液滴被仪器统计为颗粒物,也会增加几何平均直径.结合图8(b)可以发现,积聚态颗粒比例越大,几何平均直径越大.

图10展示了不同负荷下试验燃料的颗粒数浓度

和 NO_x 排放的权衡关系.20%~60%负荷下,与CTL相比,D100的十六烷值小,缸内燃烧温度较低,有助于抑制热力型 NO_x 排放的生成, NO_x 排放减少,但颗粒数浓度增加;随着碳酸二甲酯的添加,颗粒数浓度排放减少,而碳酸二甲酯中的氧原子官能团会增加缸内氧浓度,导致 NO_x 排放上升,具有显著的颗粒数浓度和 NO_x 权衡关系.

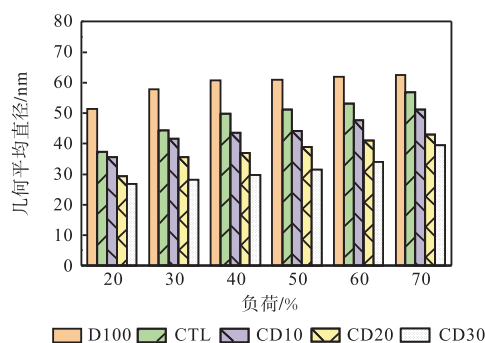


图9 试验燃料的几何平均直径

Fig.9 Geometric mean diameter of the test fuels

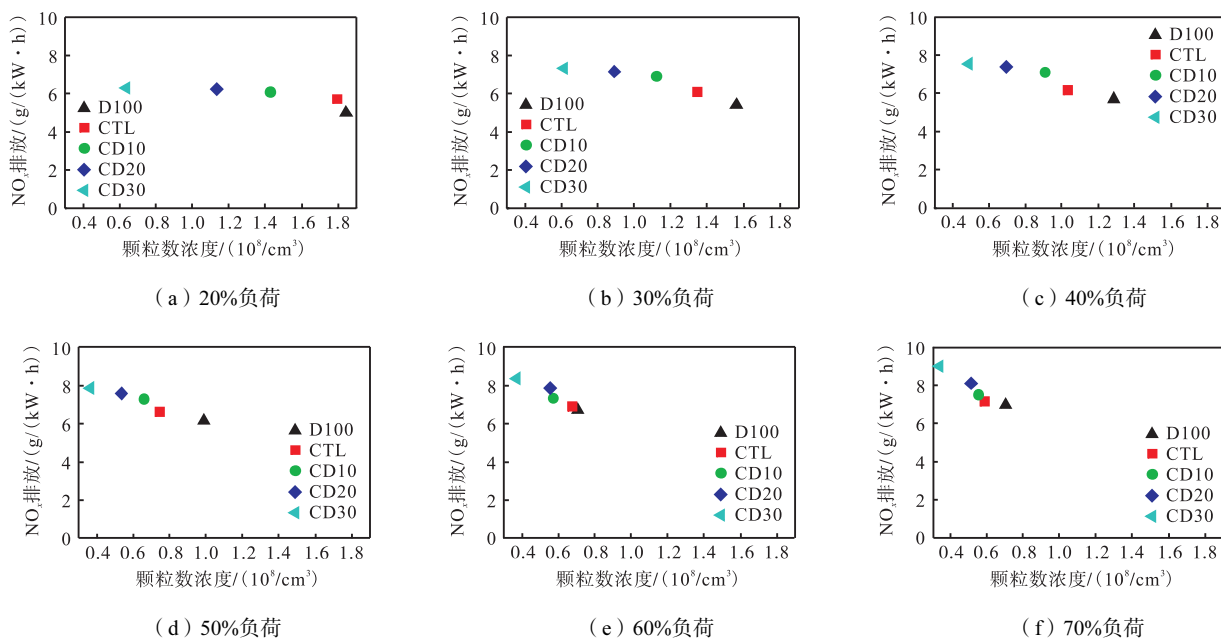


图10 颗粒物数浓度和 NO_x 排放的权衡关系

Fig.10 Trade-off relation between particle number concentration and NO_x emissions

3 结论

本文通过发动机台架试验,研究了不同负荷下煤制油掺混碳酸二甲酯对排放特性的影响,得出以下结论.

(1) 随着碳酸二甲酯混合比例上升,缸内压力和放热率峰值下降,着火时刻提前,燃烧效率上升.相较于D100,CTL的缸压峰值、放热率峰值和燃烧效

率更高.

(2) 使用D100燃料时,CO、THC和烟度最高, NO_x 排放最低.CTL中掺混碳酸二甲酯能有效降低CO排放,40%负荷下的影响最为明显,CD30的CO排放相较于CTL下降了50.9%,为 $0.108 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$.当发动机在更高负荷工况或使用更高碳酸二甲酯混合比例的燃料时,烟度下降,但 NO_x 排放增加.与负荷工况的改变相比,混合比例对烟度的影响更为明显.在本文中,70%负荷下,CD30的烟度最低,仅为

0.015 FSN, 相较于 CTL 降低了 78.3%。

(3) D100 的粒径分布浓度曲线呈现单峰特征, 而 CTL 和混合燃料的表现均为双峰特征。随着碳酸二甲酯混合比例增加, 积聚态颗粒数浓度比例减少, 超细颗粒和核态颗粒数浓度比例增加。这种变化导致几何平均直径下降。在更高负荷下, 颗粒总数量浓度减少, 但 3 种颗粒数浓度比例变化不明显。

(4) 20 ~ 60% 负荷下, 随着碳酸二甲酯的添加, 颗粒数浓度减少, NO_x 排放增加, 体现了显著的颗粒数浓度和 NO_x 的权衡关系。

参考文献:

- [1] Zhou L, Duan M S, Yu Y D, et al. Learning rates and cost reduction potential of indirect coal-to-liquid technology coupled with CO_2 capture[J]. *Energy*, 2018, 165: 21-32.
- [2] Kong Z Y, Dong X C, Jiang Q Z. The net energy impact of substituting imported oil with coal-to-liquid in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 198: 80-90.
- [3] Gill S S, Tsolakis A, Dearn K D, et al. Combustion characteristics and emissions of Fischer-Tropsch diesel fuels in IC engines[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2011, 37(4): 503-523.
- [4] 刘立东, 宋崇林, 吕刚, 等. F-T 柴油对电控高压共轨柴油机燃烧特性的影响[J]. *天津大学学报*, 2011, 44(9): 810-815.
Liu Lidong, Song Chonglin, Lü Gang, et al. Effects of Fischer-Tropsch diesel fuel on combustion characteristics of diesel engine with high-pressure common rail system[J]. *Journal of Tianjin University*, 2011, 44(9): 810-815 (in Chinese).
- [5] Mantripragada H C, Rubin E S. Performance, cost and emissions of coal-to-liquids(CTLs) plants using low-quality coals under carbon constraints[J]. *Fuel*, 2013, 103: 805-813.
- [6] Cai P P, Zhang C H, Jing Z, et al. Effects of Fischer-Tropsch diesel blending in petrochemical diesel on combustion and emissions of a common-rail diesel engine[J]. *Fuel*, 2021, 305: 121587.
- [7] Geng L M, Xiao Y G, Li S J, et al. Effects of injection timing and rail pressure on particulate size-number distribution of a common rail DI engine fueled with Fischer-Tropsch diesel synthesized from coal[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2021, 95: 219-230.
- [8] Geng L M, Li S J, Xiao Y G, et al. Effects of injection timing and rail pressure on combustion characteristics and cyclic variations of a common rail DI engine fuelled with F-T diesel synthesized from coal[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2020, 93(6): 2148-2162.
- [9] Zhang H, Sun W C, Guo L, et al. An experimental study of using coal to liquid(CTL) and diesel as pilot fuels for gasoline dual-fuel combustion[J]. *Fuel*, 2021, 289: 119962.
- [10] Sun W C, Zeng W P, Guo L, et al. Experimental investigation into the effects of pilot fuel and intake condition on combustion and emission characteristics of RCCI engine [J]. *Fuel*, 2022, 325: 124912.
- [11] Hua Y, Liu S, Li R N, et al. Experimental study of regulated and unregulated emissions from a diesel engine using coal-based fuels[J]. *Fuel*, 2020, 280: 118658.
- [12] Sun W C, Sun Y, Guo L, et al. Comparative assessment of n-butanol addition in CTL on performance and exhaust emissions of a CI engine[J]. *Fuel*, 2021, 303: 121223.
- [13] Pan M Z, Qian W W, Zheng Z Y, et al. The potential of dimethyl carbonate(DMC) as an alternative fuel for compression ignition engines with different EGR rates [J]. *Fuel*, 2019, 257: 115920.
- [14] Kontou V, Grimekis D, Braimakis K, et al. Techno-economic assessment of dimethyl carbonate production based on carbon capture and utilization and power-to-fuel technology[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 157: 112006.
- [15] Wei J J, Lu W J, Pan M Z, et al. Physical properties of exhaust soot from dimethyl carbonate-diesel blends: Characterizations and impact on soot oxidation behavior [J]. *Fuel*, 2020, 279: 118441.
- [16] Guo X Y, Chen Y J, Wang Y, et al. Analysis of the performance and emissions generation mechanism of natural gas/diesel dual-fuel under different strategies by combining experiments and mechanisms[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2023, 111: 101425.
- [17] Deng L F, Hao C F, Luo Y M, et al. Effect of air and exhaust gas dilutions on ultra-fine particulate emissions in different combustion modes[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 843: 156865.
- [18] Toumasatos Z, Kontses A, Doulgeris S, et al. Particle emissions measurements on CNG vehicles focusing on sub-23 nm[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2021, 55(2): 182-193.

(责任编辑: 王晓燕)