

# 生物柴油-柴油-DEC混合燃料发动机的 喷雾、燃烧与排放性能分析

赵礼飞, 祝先标, 王云鹏

安徽江淮汽车集团股份有限公司, 安徽 合肥 230601

**摘要:**应用纹影法观察高压共轨系统下燃料的宏观喷雾特性,在高压共轨柴油机上开展外特性下燃烧和排放试验,分析生物柴油-柴油-碳酸二乙酯(diethyl carbonate, DEC)混合燃料的喷雾、燃烧与排放特性,生物柴油和柴油按体积比为3:7混合后的燃料记为B30,DEC和B30按体积比2:8掺混后的燃料记为B30DEC20。试验结果表明:混合性燃料B30DEC20的雾化效果明显提升,喷雾形态匀称、饱满,喷雾锥角、喷雾浓度等接近柴油;外特性运行时,燃用B30DEC20的发动机转矩比燃用柴油低 $27.4\text{ N}\cdot\text{m}$ ,但其热效率比燃用柴油高,转速为 $2\ 400\text{ r/min}$ 时,燃用B30DEC20的发动机热效率比燃用柴油高 $1.5\%$ ;B30DEC20的含氧属性使其具有较低的颗粒物(particulate matter, PM)和CO排放,燃用该燃料的发动机PM排放比燃用柴油降低 $65\%\sim 85\%$ ,THC排放低于燃用柴油;虽然燃用B30DEC20发动机的 $\text{NO}_x$ 比排放大于燃用其他燃料,但当发动机转速大于 $2\ 400\text{ r/min}$ 后,燃用B30DEC20发动机的 $\text{NO}_x$ 排放低于燃用柴油。

**关键词:**生物柴油;柴油;DEC;喷雾;燃烧;排放

**中图分类号:**TK401

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-6397(2024)01-0002-09

**引用格式:**赵礼飞,祝先标,王云鹏.生物柴油-柴油-DEC混合燃料发动机的喷雾、燃烧与排放性能分析[J].内燃机与动力装置,2024,41(1):8-16.

ZHAO Lifei, ZHU Xianbiao, WANG Yunpeng. Analysis of spray, combustion and emission performance of biodiesel-diesel-DEC fuel blends[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024,41(1):8-16.

## 0 引言

石油和天然气资源短缺造成的能源危机严重威胁社会经济发展,化石能源燃烧严重污染环境,危害人体健康,研究和开发绿色可再生能源不仅减少人们对传统能源的依赖,促进经济发展,也有利于改善环境。与化石燃料不同,生物柴油是一种可再生的生物质燃料,原材料来源广泛,植物油、动物脂肪、某些富含脂类的藻类和废弃的餐饮油都可以用来制备生物柴油<sup>[1]</sup>。生物柴油几乎不含芳香烃和硫,能够明显减少颗粒物(particulate matter, PM)等有害物质排放。生物柴油中的碳主要由植物光合作用从大气中吸收,通常被认为是一种广义上的碳中和燃料。罗祎青等<sup>[2]</sup>应用全生命周期分析方法,分析了微藻生物柴油整个生产过程中的碳平衡,发现生物柴油整个生产加工过程中固定的 $\text{CO}_2$ 多于产生的 $\text{CO}_2$ 。最重要的是生物柴油可以和现有的能源基础设施兼容,可与柴油以任意比例掺混后直接用在柴油机上,不需要对发动机做任何改动。

生物柴油的黏度高,雾化性差,导致燃料与空气混合不足,燃料燃烧不充分<sup>[3]</sup>。为了降低生物柴油的黏度,改善燃烧效果,通常把生物柴油和柴油掺混或者掺混低黏度的含氧添加剂。Çelik<sup>[4]</sup>研究了大豆生物柴油-榛子生物柴油-柴油混合物,发现混合燃料的放热率和气缸内的峰值压力降低、 $\text{NO}_x$ 排放增加、CO

收稿日期:2023-09-12

第一作者简介:赵礼飞(1985—),男,安徽濉溪人,高级工程师,主要研究方向为内燃机替代燃料开发,E-mail:zhaolifei\_1154@163.com。

和 THC 排放减少,这和生物柴油的氧含量高、热值低有关。Zhang 等<sup>[5]</sup>研究了柴油中添加不同比例的生物柴油后发动机性能和排放的变化,发现  $\text{NO}_x$  排放和有效燃油消耗率增加,缸内压力峰值随着生物柴油混合比的增加而降低。王继文等<sup>[6]</sup>在大功率柴油机上研究柴油与不同配比的生物柴油掺混,发现发动机转矩随生物柴油配比增加而降低,燃用 B20(生物柴油在混合燃料中的体积分数为 20%)、B50(生物柴油在混合燃料中的体积分数为 50%)的发动机转矩比柴油分别降低 1.59% 和 7.90%,燃用 B50 的发动机  $\text{NO}_x$  排放增加 58.60%、碳烟排放降低 35.10%。刘少华等<sup>[7]</sup>研究生物柴油和柴油混合物在高原缺氧环境下的燃烧特性,发现生物柴油的含氧特性使燃烧过程得到改善,在转速为 2 200 r/min、负荷为发动机最大输出转矩的 60%时(简称负荷比为 60%),燃用 B50 发动机的缸压和放热率峰值高于柴油。近年来,碳酸二乙酯(diethyl carbonate, DEC)和生物柴油混合后可用于替代化石燃料,减少发动机的  $\text{CO}_2$  和 PM 排放,DEC 作为添加剂的研究逐渐增多<sup>[8-9]</sup>。Deblas-debas<sup>[10]</sup>研究了 DEC 与植物油混合的燃烧排放,认为 DEC 与植物油的混合物可以完全取代柴油,虽然其热值比柴油低,输出功率降低,但 PM 排放降低 92%~95%,几乎为零排放;Bridjesh 等<sup>[11]</sup>研究表明,将 DEC 和废塑料油按一定比例混合到柴油中,可以降低发动机燃油消耗率,提高热效率,并显著减少  $\text{NO}_x$ 、CO 和 HC 排放。

本文将生物柴油和柴油按体积比 3:7 混合后的燃料记为 B30,将含氧添加剂 DEC 和 B30 按体积比为 1:9 和 2:8 混合后的燃料分别记为 B30DEC10、B30DEC20,通过试验分析不同混合燃料的喷雾特性、燃烧与排放性能的变化,为生物柴油作为替代燃料的推广应用提供依据。

## 1 燃料的理化属性

燃料的密度、黏度、表面张力、热值、十六烷值、汽化潜热和氧含量等热物理属性对燃料的喷雾、燃烧与排放性能有重要影响。本文中试验使用的生物柴油为大豆油中提取的脂肪酸甲酯(记为 B100),购自某生物工程有限公司,柴油为某加油站购买的 0# 国六柴油(记为 B0),DEC 由某国药集团公司生产。不同燃料的理化属性如表 1 所示。

表 1 燃料的理化特性

燃料类型	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	黏度/ ( $\text{MPa}\cdot\text{s}$ )	表面张力/ ( $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	低热值/ ( $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	十六烷值	汽化潜热/ ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	含氧量/%
B0	830	3.11	28.3	42.5	56.0	260	0
B100	848	5.90	30.6	37.5	52.0	300	10.0
B30	836	4.10	28.9	41.0	54.1	272	3.0
B30DEC10	846	3.71	28.7	38.6	54.4	283	7.5
B30DEC20	857	3.48	28.4	36.3	54.7	294	12.0

注:含氧量指燃油中氧原子的质量与所有原子质量的比。

## 2 喷雾特性

将喷油器固定在定容弹中,利用纹影法观察高压共轨系统下各燃料的宏观喷雾特性。喷雾试验工况如表 2 所示。

表 2 喷雾试验工况

喷嘴内径/mm	喷射压力 $p_{inj}$ /MPa	环境背压 $p_{amb}$ /MPa	环境热力学温度/K	燃油热力学温度/K
0.3	100,120	2,3	298	298

本试验分析的喷雾参数包括喷雾贯穿距离  $d_{st}$ 、喷雾锥角  $\alpha$ 、喷雾投影面积和喷雾浓度等。喷雾贯穿距离指从喷嘴到喷雾边缘底部的距离,喷雾锥角为喷雾贯穿距离的二分之一处喷雾边缘轮廓和喷嘴形成的夹角,喷雾投影面积为垂直于平行光方向喷雾平面的投影面积<sup>[12]</sup>。基于纹影法图像处理原理,光线通过不同的喷雾浓度投影到高速相机上,即产生不同灰度。本文中选取灰度小于30的区域为液核区,将液核区占总喷雾投影面积的百分比定义为喷雾浓度。燃料雾化性越好,透光性越差,灰度越小,喷雾浓度越大。喷雾特性参数定义如图1所示。

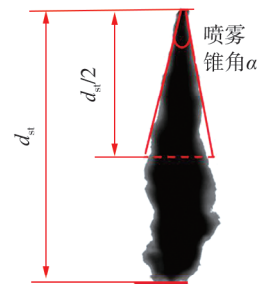


图1 喷雾特性参数示意图

## 2.1 喷雾形态

喷射压力为120 MPa、环境背压为3 MPa时,不同燃料的喷雾形态如图2~6所示。

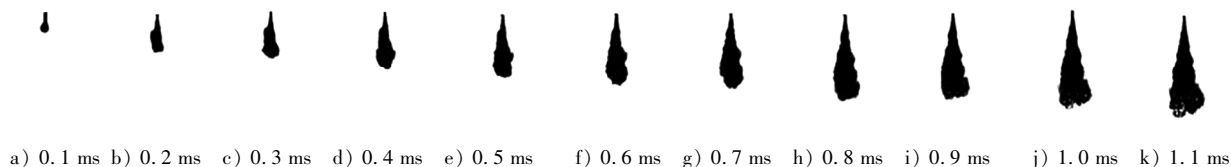


图2 燃料B0的喷雾形态

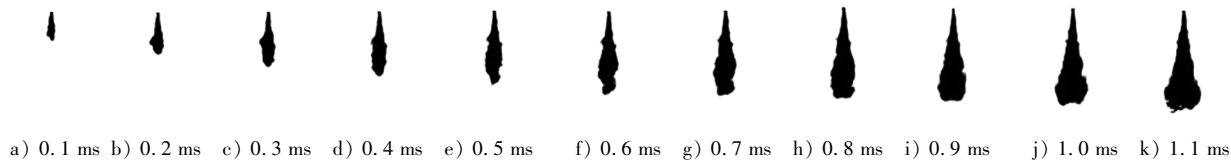


图3 燃料B30的喷雾形态

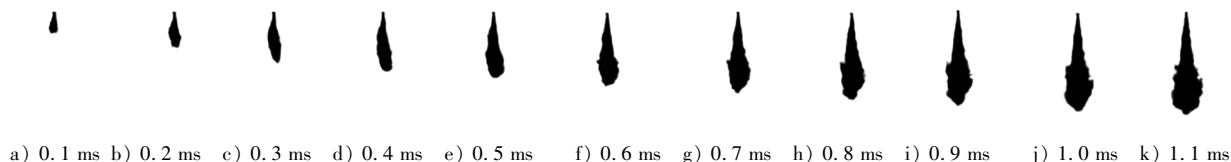


图4 燃料B100的喷雾形态

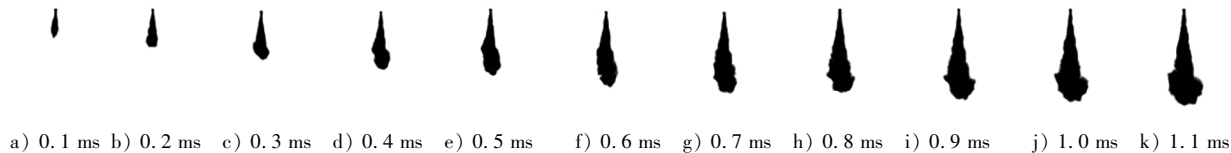


图5 燃料B30DEC10的喷雾形态

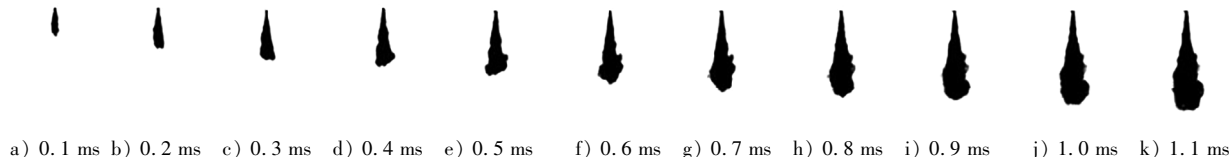


图6 燃料B30DEC20的喷雾形态

由图2~6可知:B30和B0形状相近,但B30的喷雾锥角略微收窄,经过0.5 ms后喷雾贯穿距离有增大的趋势;B100的喷雾锥角进一步收窄,上半部分呈细长型,表明B100的雾化能力最差;在B30中添加DEC后,喷雾边缘新增很多毛刺状,表明混合燃料的波动增大,增加了混合燃料的破碎;B30DEC10的头部喷雾面积较大,头部呈哑铃状,这可能是由于DEC的密度较大,将DEC掺混到B30后,增大了混合燃料的密度,使燃料燃烧时火焰纵向迅速发展,液体燃料集中在头部;B30DEC20的最大喷雾宽度更靠近喷

嘴处,且 B30DEC20 的体态匀称、饱满,表明掺混 DEC 后,燃料的黏度降低,此时 DEC 低黏度的作用大于密度的作用;B30DEC20 燃料的雾化能力增强,燃料扩散效果好。

## 2.2 喷雾特性

### 2.2.1 喷雾贯穿距离

不同工况下各燃料的喷雾贯穿距离如图 7 所示。

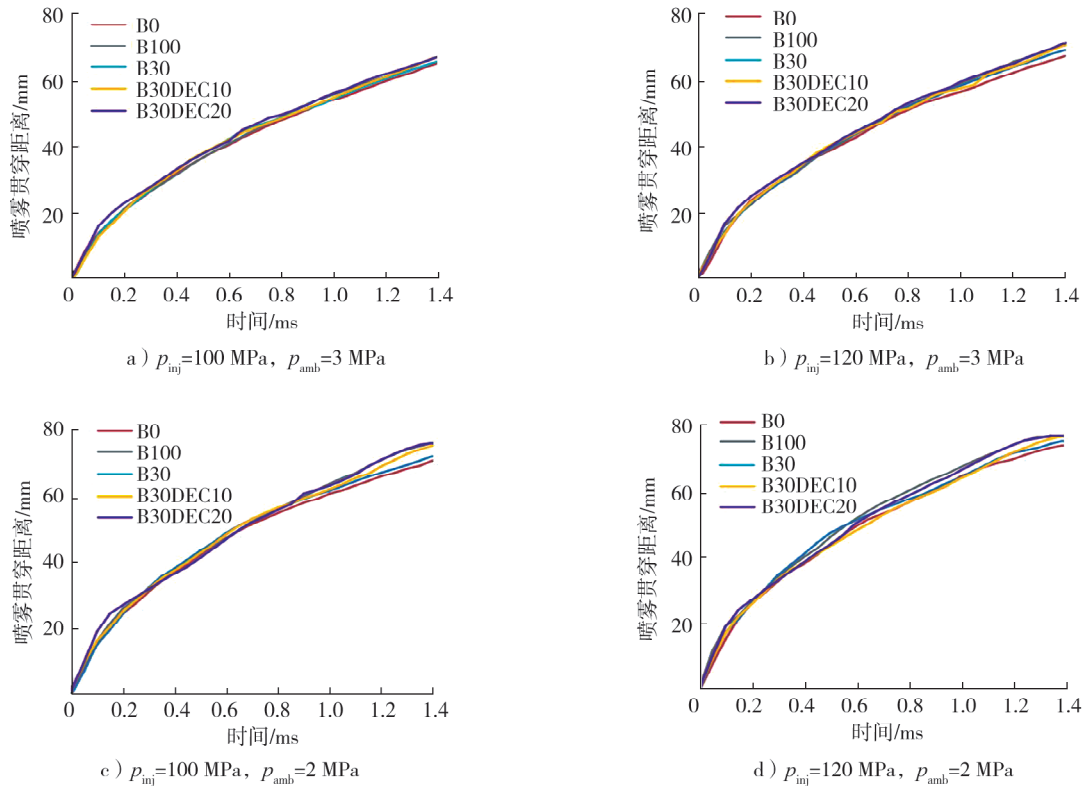
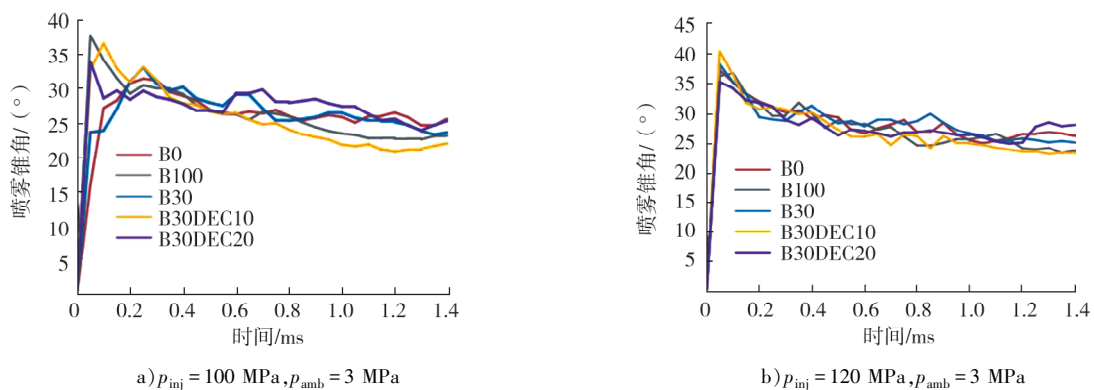


图 7 不同工况下各燃料的喷雾贯穿距离对比

由图 7 可知:在 B30 中掺混 DEC 后,混合燃料密度增大,喷雾贯穿距离增大;B30DEC20 的喷雾贯穿距离最大,柴油的喷雾贯穿距离最小。喷雾贯穿距离由大到小分别为 B30DEC20、B30DEC10、B30、B0。分析原因为:DEC 的黏度较小,在 B30 中掺混 DEC 有利于降低混合燃料的黏度,促进燃料破碎,在一定程度上阻碍喷雾向前发展。但是从试验结果可以看出,燃料密度对喷雾贯穿距离的影响最大,这是因为燃料的密度越大,燃料离开喷嘴时的初始动能越大,有利于喷雾向前发展<sup>[13-14]</sup>。

### 2.2.2 喷雾锥角

不同工况下各燃料的喷雾锥角对比如图 8 所示。



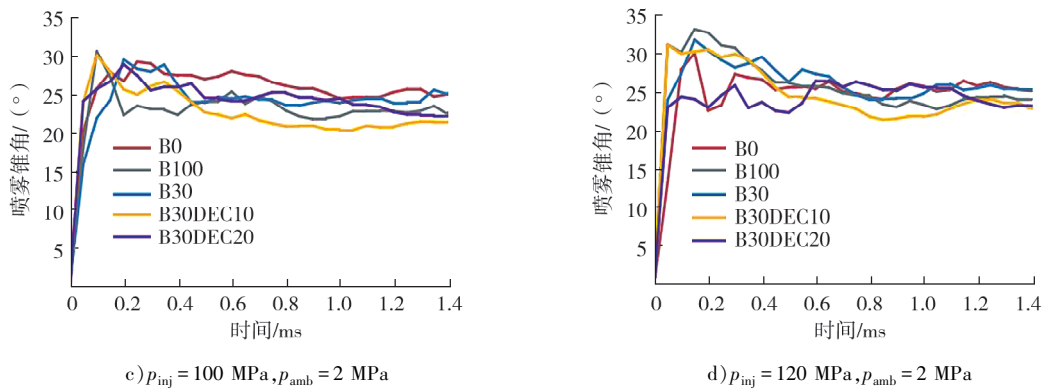


图8 不同工况下各燃料的喷雾锥角对比

由图8可知:随时间增加,燃料的喷雾锥角先增大后减小并趋于稳定,喷射经过0.6 ms后,各燃料的喷雾锥角出现差异,B0的喷雾锥角大于B100,B30的喷雾锥角略小于B0。在B30中掺混DEC后,进一步降低了燃料的黏度和表面张力,燃料的雾化能力增强,使B30DEC20的喷雾锥角比B30大,接近B0。虽然B30DEC10的黏度和表面张力也比B30小,但是B30DEC10的密度较大,B30DEC10的喷雾纵向发展迅速,使B30DEC10的喷雾锥角最低。

### 2.2.3 喷雾投影面积

不同工况下各燃料的喷雾投影面积对比如图9所示。

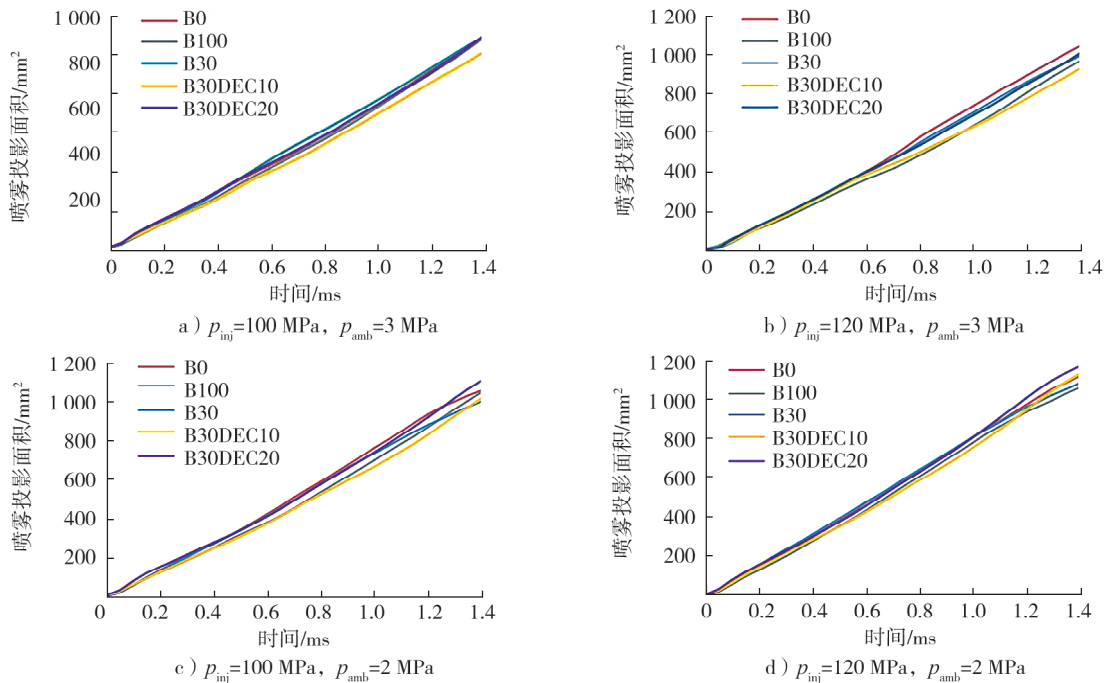


图9 不同工况下各燃料的喷雾投影面积对比

由图9可知:B30DEC10的喷雾投影面积小于B30,这和B30DEC10的喷雾锥角最小有关;B30DEC20的喷雾投影面积大于B30,更接近柴油,B30DEC20混合燃料的雾化效果明显提升;随着喷射压力的增大,喷雾贯穿距离增大,喷雾投影面积增大;随着环境背压的增大,抑制了喷雾贯穿距离的增加,喷雾投影面积减小<sup>[15]</sup>。

### 2.2.4 喷雾浓度

不同工况下各燃料的喷雾浓度对比如图10所示。

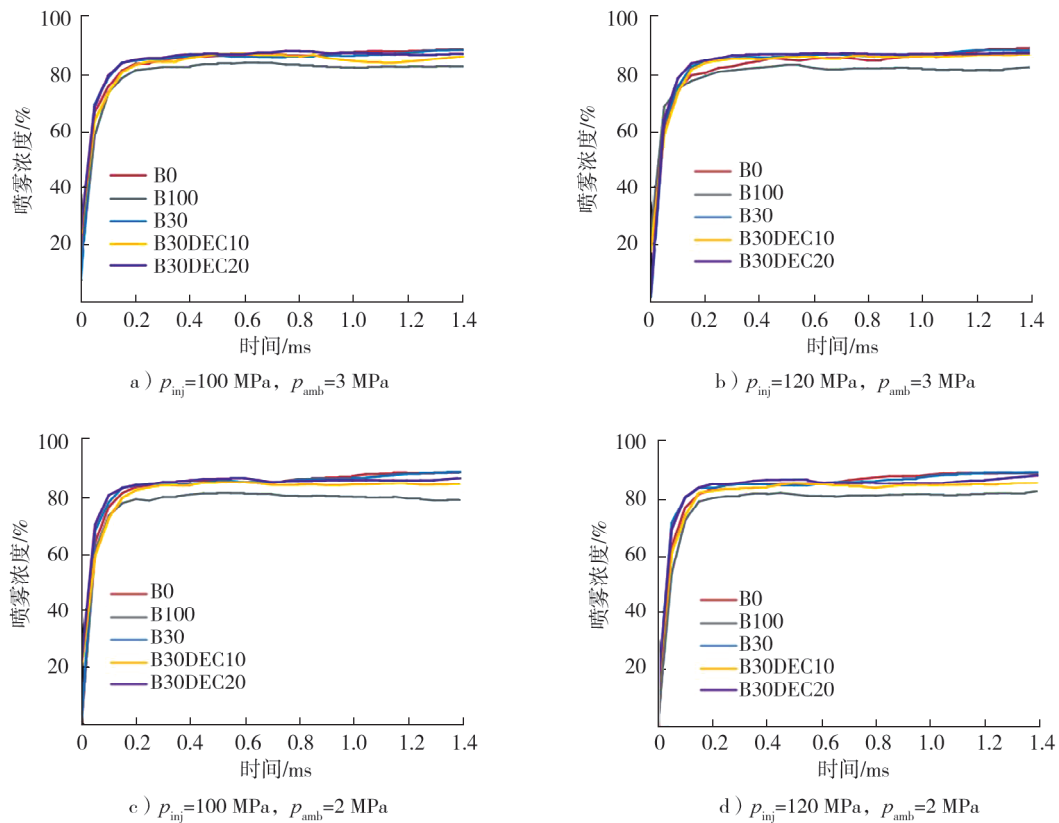


图 10 不同工况下各燃料的喷雾浓度对比

由图 10 可知: B30DEC10 的喷雾浓度略小于 B30DEC20, B30DEC20 的喷雾浓度更接近柴油。这可能是由于混合燃料中 DEC 的体积分数为 10% 时, 燃料的密度和动能增大, 燃料更容易向前发展, 而横向扩散能力减弱; 当混合燃料中 DEC 的体积分数增大到 20% 后, 混合燃料的黏度进一步降低, 混合燃料的破碎能力和雾化效果明显提升, 喷雾均匀性提高, 使得液核和喷雾投影面积比增大<sup>[16]</sup>, 接近 B0; 生物柴油 B100 的喷雾浓度最小, 这也说明生物柴油的雾化能力最差。

### 3 燃烧及排放性能分析

在满足国六排放标准的直列 4 缸、增压中冷、高压共轨、废气再循环 (exhaust gas recirculation, EGR) 柴油机上进行燃烧与排放性能试验, 柴油机的基本技术参数如表 3 所示。

表 3 柴油机基本技术参数

排量/ L	缸径/ mm	行程/ mm	压缩比	最大扭矩/ (N·m)	额定功率/ kW	额定转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	喷射压力/ MPa	预喷时刻/ (°)	主喷时刻/ (°)
1.997	86	86	16.5	360	95	3 200	120	-17	-4

注: 预喷时刻和主喷时刻均为对应的上止点后曲轴转角。

保持燃料喷射量不变, 分别测试不同燃料在外特性下的燃烧及排放性能。试验前, 发动机预热 30 min, 当水温为 (85±2) °C、油温为 (90±2) °C, 排放测试系统预热完成后, 开始试验并记录数据。每次更换燃油之前, 清空油箱和油耗仪中剩余的燃油; 更换燃油后, 对发动机进行预热 30 min, 清洁油管中残留的燃油。试验在发动机台架上进行, 发动机台架试验系统测试原理如图 11 所示。

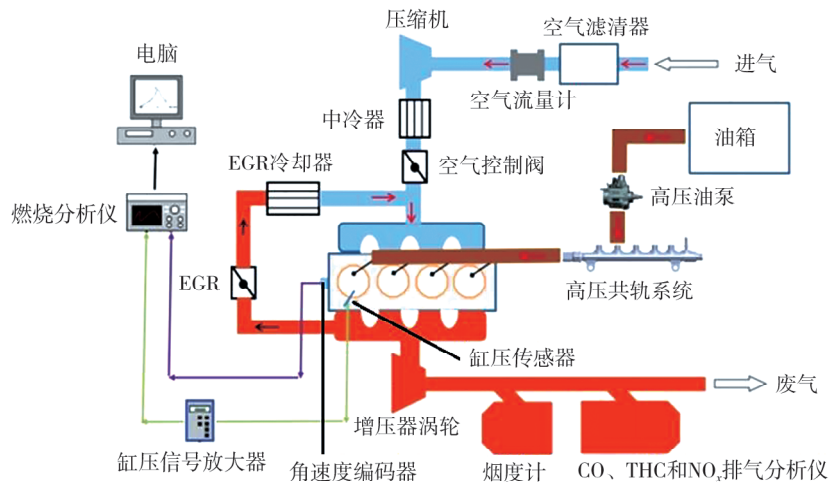


图 11 发动机台架试验系统测试原理图

### 3.1 燃烧性能

外特性下燃用不同燃料的发动机性能对比如图 12 所示。

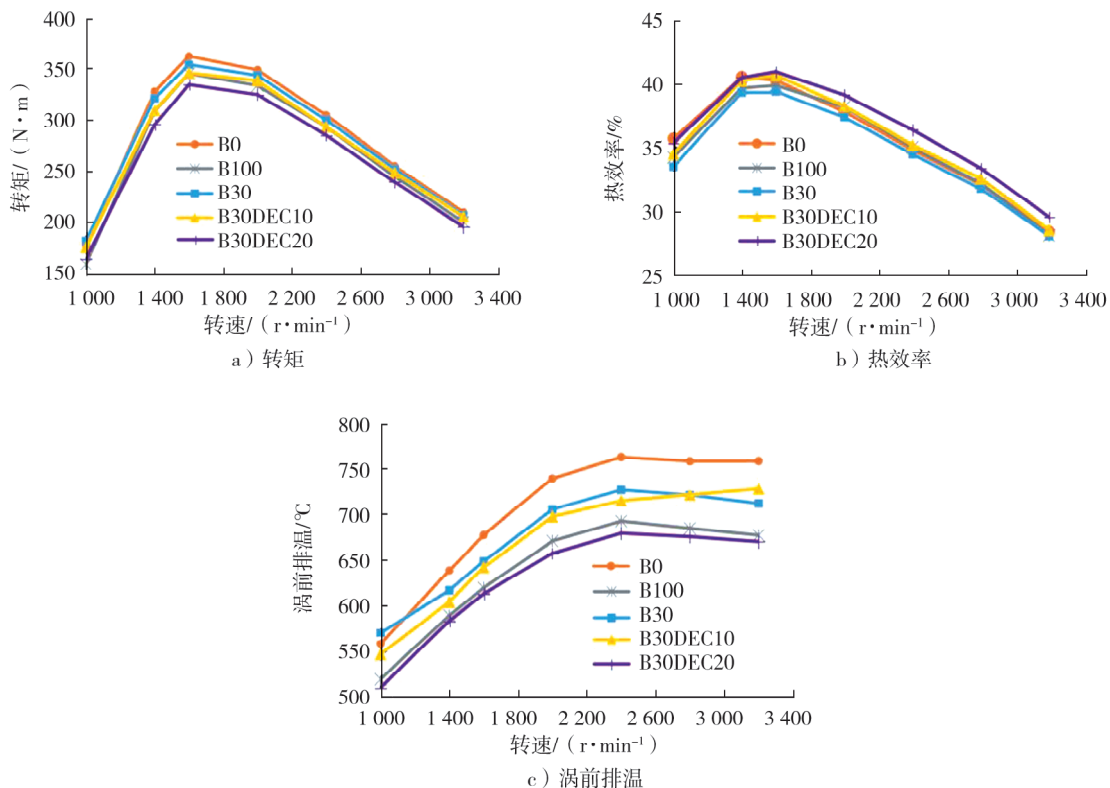


图 12 外特性下燃用不同燃料的发动机性能对比

由图 12a) 可知: 燃用 B0 的发动机转矩最大, B30 的转矩略小于 B0; 随着混合燃料中 DEC 比例的增大, 转矩逐渐下降, 燃用 B30DEC20 的发动机转矩最小; 发动机转速为 1 600 r/min 时, 燃用 B30DEC20 的发动机转矩比柴油低 27.4 N·m, 比 B30 低 19.3 N·m。这是因为柴油的热值最大, 生物柴油的热值比柴油小 12%, DEC 的热值最小, 喷油量相同时, 燃料热值越小, 输出转矩越小<sup>[17]</sup>。由图 12b) 可知: 在 B30 中掺混 DEC 后, 混合燃料的热效率提高, 燃用 B30DEC20 的发动机热效率高于柴油; 转速 2 400 r/min 时, 燃用 B30DEC20 的发动机热效率比柴油高 1.5%。这可能是因为在 B30 中掺混 DEC 后, 混合燃料的黏度降低, 提升了燃料的雾化性能, 有利于燃料和空气充分混合; B30DEC20 的含氧量最大, 燃料燃烧更加充分,



有利于提升热效率<sup>[18]</sup>。由图12c)可知:随着燃料热值降低,涡前排温逐渐降低,燃用柴油的发动机涡前排温最高,B30DEC20的涡前排温最低。

### 3.2 排放特性

外特性下燃用不同燃料发动机的PM比排放 $e(\text{PM})$ 、 $\text{NO}_x$ 比排放 $e(\text{NO}_x)$ 、THC比排放 $e(\text{THC})$ 、CO比排放 $e(\text{CO})$ 对比如图13所示。

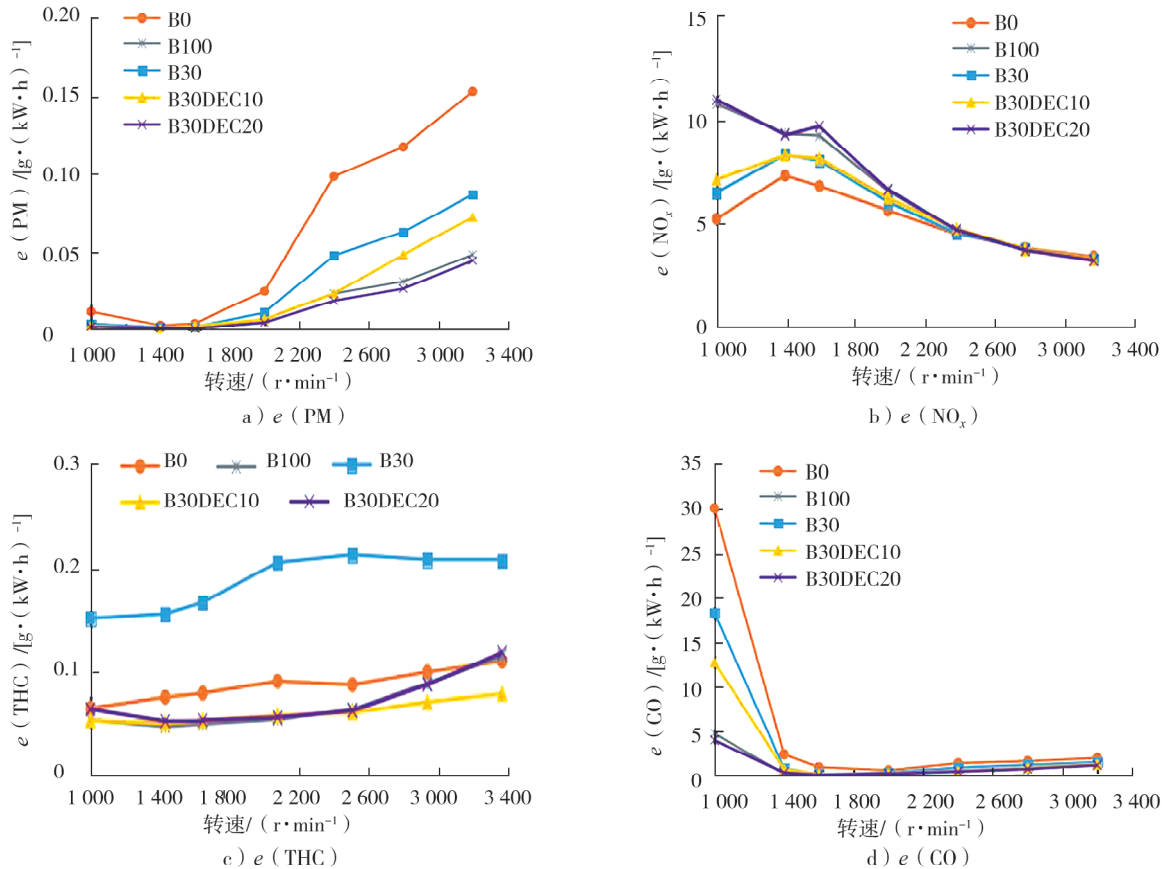


图13 外特性下燃用不同燃料的发动机排放对比

由图13a)、b)可知:在B30中添加DEC后,混合燃料的含氧量增大,抑制了PM生成,燃用B30DEC20发动机的PM比排放比B30减少了50%~60%,比柴油机PM排放减少了65%~85%;混合燃料具有一定的含氧量,增加了燃烧室内混合气体的局部氧浓度,促进了 $\text{NO}_x$ 生成,且随着燃料中含氧量增加, $\text{NO}_x$ 排放逐渐增大,燃用B30DEC20和生物柴油的发动机 $\text{NO}_x$ 排放较高;但在转速大于2400 r/min后,燃用混合燃料发动机的 $\text{NO}_x$ 排放比柴油低,这可能是因为在高转速下燃料的燃烧温度较低。由图13c)、d)可知:燃用混合燃料发动机的THC、CO排放比柴油低,这是因为混合燃料自身的含氧量有利于促进THC和CO氧化,减少发动机的THC和CO排放<sup>[19]</sup>;B30DEC20发动机的CO排放最小,在部分转速下B30DEC20发动机的THC排放略大于B30DEC10,这可能是因为在B30DEC20的密度最大,更容易进入活塞与气缸间的狭隙或者接触到气缸壁产生湿壁,从而产生壁冷效应,使THC排放增大<sup>[20]</sup>。

## 4 结论

1) B30和B0的喷雾形态形状相近,但是B30的喷雾锥角略微收窄,B100的喷雾锥角进一步收窄,上半部分呈细长型;B30DEC10喷雾的纵向发展迅速,液体燃料集中在头部,头部呈哑铃状;B30DEC20喷雾的体态匀称、饱满,燃料的雾化能力增强,燃料扩散效果好。

2) 根据喷雾特性分析,燃料密度对喷雾贯穿距离的影响最大,B30DEC20具有最大的喷雾贯穿距离;



同时 B30DEC20 的喷雾锥角比 B30 大,喷雾浓度更接近柴油。

3)根据外特性下发动机的性能和排放分析,燃用 B30DEC20 的发动机外特性下转矩比燃用柴油时低 27.4 N·m,但其热效率比燃用柴油高,转速为 2 400 r/min 时燃用 B30DEC20 发动机热效率比燃用柴油高 1.5%; B30DEC20 的含氧属性使其 PM 和 CO 排放最低,PM 排放比柴油减少了 65%~85%,THC 排放也低于柴油;虽然燃用 B30DEC20 时,NO<sub>x</sub> 排放增大,但是试验发现转速大于 2 400 r/min 后,NO<sub>x</sub> 排放低于柴油。

4)在不改变柴油机结构的前提下,采用 B30DEC20 替代柴油有效,虽然动力性能略有下降,但发动机的热效率提升,并且 PM 和 CO 排放较低。

#### 参考文献:

- [1] TAMILSELVAN P, NALLUSAMY N, RAJKUMAR S. A comprehensive review on performance, combustion, and emission characteristics of biodiesel fueled diesel engines [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 9:1134-1159.
- [2] 罗祎青,王雪,袁希钢. 微藻生物柴油生命周期的能量平衡与碳平衡分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2018, 58(3):324-329.
- [3] 付炜. 生物柴油及其混合性燃料的喷雾特性研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2019.
- [4] ÇELİK M, ÖNDER ÖZG REN Y. The determination of effects of soybean and hazelnut methyl ester addition to the diesel fuel on the engine performance and exhaust emissions [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 124:124-35.
- [5] ZHANG Y, ZHONG Y, WANG J, et al. Effects of different biodiesel-diesel blend fuel on combustion and emission characteristics of a diesel engine[J]. *Processes*, 2021, 9(11):1984.
- [6] 王继文,谭雪友,李钟婷,等. 大功率机车柴油机燃用生物柴油的试验分析[J]. *广西科技大学学报*, 2022, 33(1):1-6.
- [7] 刘少华,柴丽田,申立中,等. 高原缺氧环境下生物柴油-柴油混合燃料对柴油机燃烧特性的影响[J]. *车用发动机*, 2022(5):21-26.
- [8] NAKAMURA H, CURRAN H J, ANGEL POLO C, et al. An experimental and modeling study of diethyl carbonate oxidation[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(4):1395-1405.
- [9] MEI D Q, WU H, REN H, et al. Combustion cycle-by-cycle variations in a common rail direct injection engine fueled with dimethyl carbonate-diesel blend[J]. *Journal of Energy Engineering*, 2016, 142(1):4014059. 1-4014059. 11.
- [10] AGUADO-DEBLAS L, HIDALGO-CARRILLO J, BAUTISTA F M, et al. Biofuels from diethyl carbonate and vegetable oils for use in triple blends with diesel fuel: effect on performance and smoke emissions of a diesel engine[J]. *Energies*, 2020, 13(24):1-15.
- [11] BRIDJESH P, GEETHA N K. Effect of diethyl carbonate as additive to waste plastic oil on performance and emission of a diesel engine[J]. *Oriental Journal of Chemistry*, 2020, 36(1):189-194.
- [12] 黄豪中,史程,张鹏,等. 喷射压力及环境背压对松油-柴油混合燃料喷雾特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(17):55-61.
- [13] FU W, LI F Y, LIU Y J, et al. Effect of in-cylinder environment on spray characteristics of diesel and biodiesel[J]. *Energy Sources: Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2023, 45(2):3464-3474.
- [14] LI D H, GAO Y X, LIU S H, et al. Effect of polyoxymethylene dimethyl ethers addition on spray and atomization characteristics using a common rail diesel injection system [J]. *Fuel*, 2016, 186:235-247.
- [15] 刘燕菊. 柴油-生物柴油-正丁醚混合燃料喷雾特性的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2020.
- [16] ZHANG Q K, XIA J, HE Z Y, et al. Experimental study on spray characteristics of six-component diesel surrogate fuel under sub/trans/supercritical conditions with different injection pressures[J]. *Energy*, 2021, 218:119474. 1-119474. 17.
- [17] 黄晓冬. 柴油机燃用正戊醇-柴油混合燃料的燃烧与排放特性研究[D]. 镇江:江苏大学, 2022.
- [18] HYUN MIN B, HYUN MIN L. Spray behavior, combustion, and emission characteristics of jet propellant-5 and biodiesel fuels with multiple split injection strategies[J]. *Energies*, 2022, 15(7):2540.
- [19] 郭振杰. 轻卡柴油机含氧添加剂降低排放的研究[D]. 淄博:山东理工大学, 2008.
- [20] ELKELAWY M, BASTAWISSI A E, ESMAEIL K K, et al. Maximization of biodiesel production from sunflower and soybean oils and prediction of diesel engine performance and emission characteristics through response surface methodology [J]. *Fuel*, 2020, 266:117072.

(下转第 29 页)