

喷油参数对生物柴油-柴油混合燃料燃烧和排放特性的影响

季宏¹, 王传厚², 孟繁衍¹, 王保力¹, 徐文珂¹, 孟建^{1*}

1. 山东理工大学 交通与车辆工程学院, 山东 淄博 255049;

2. 山东泰开汽车制造有限公司, 山东 泰安 271000

摘要:为了研究低负荷下喷油压力和喷油时刻对餐余废油生物柴油混合燃料的燃烧、排放特性的影响,制备餐余废油生物柴油-柴油混合燃料(混合燃料中生物柴油体积分数为 30%,记为 B30),在一台高压共轨四缸柴油机上进行纯柴油和 B30 的对比试验。试验结果表明:在最大转矩转速为 1540 r/min、25% 负荷工况,喷油压力和喷油时刻相同时,相比于纯柴油,B30 燃烧时最大缸压和放热率峰值分别下降了 0.67% 和 0.92%,且放热率峰值后移,B30 的 CO、THC、Soot、NO₂、CH₄、C₂H₄ 和 CH₂O 排放略微降低,NO_x 排放增加;随着喷油压力增加和喷油时刻提前,B30 的燃烧得到改善,最大缸压和放热率峰值均增大且前移,CO、THC、Soot、NO₂、CH₄、C₂H₄ 和 CH₂O 排放大幅度降低,NO_x 排放增加。

关键词:餐余废油;燃烧;排放;喷油压力;喷油时刻

中图分类号:TK421

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)06-0001-06

引用格式:季宏,王传厚,孟繁衍,等. 喷油参数对生物柴油-柴油混合燃料燃烧和排放特性的影响[J]. 内燃机与动力装置,2022,39(6):1-6.

Ji Hong, WANG Chuanhou, MENG Fanyan, et al. Effect of fuel injection parameters on the combustion and emission characteristics of biodiesel-diesel blend[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022, 39(6):1-6.

0 引言

柴油发动机热效率高、经济性好,广泛应用于发电、农业、汽车等领域,柴油机的普及加速了化石燃料的使用^[1]。由于交通用柴油需求增加、化石燃料储量减少、柴油价格上涨等,柴油的节能替代燃料的开发日益受到重视。生物柴油的主要成分是脂肪酸酯,是以油料作物、动物油脂及餐余废油等为原材料通过酯交换工艺制成^[2]。生物柴油可直接应用于柴油机,也可以和柴油以任意比例掺混使用^[3]。以餐余废油作为生物柴油的原料,可以降低生物柴油的制造成本,同时可以解决餐余废油的处理问题^[4]。餐余废油生物柴油具有富氧性、十六烷值高等特点,在柴油机上掺混使用时可以促进燃烧,降低 CO 和碳烟的排放;但在低负荷工况下,随着餐余废油生物柴油掺混比例的增加,混合燃料黏度过大,可导致喷雾能力下降,发动机燃烧恶化,排放升高。

本文中对一台燃用生物柴油-柴油混合燃料的四缸高压共轨柴油发动机进行台架试验,利用 INCA 软件控制喷油压力和喷油时刻,对比分析低负荷条件下喷油压力和喷油时刻对餐余废油生物柴油混合燃料和

收稿日期:2022-09-16

基金项目:山东省自然科学基金青年项目(ZR2020QE190)

第一作者简介:季宏(1997—),男,江苏常熟人,硕士研究生,主要研究方向为柴油机排放控制,E-mail:1301269845@qq.com。

***通信作者简介:**孟建(1979—),男,山东滕州人,工学硕士,副教授,主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制,E-mail:tzwmj@163.com

纯柴油燃烧、常规排放和非常规排放的影响,从而为改善餐余废油生物柴油低负荷下在柴油机上的燃烧和排放提供参考。

1 试验装置和方法

1.1 试验装置

试验样机为四缸高压共轨柴油机,主要技术参数如表 1 所示。燃烧及排放测试系统如图 1 所示,主要包括台架系统、测量系统等。台架系统主要包括 CAC250 程控式电力测功机,用来控制柴油机转速和转矩,从而获得所需的工况;测量系统主要包括:AVL INDIMOU-622 燃烧分析仪;AVL GH14P 型缸压传感器,缸压信号经 KISTLER 5011 型电荷放大器处理后输入燃烧分析仪;AVL 415S 滤纸式烟度计,测量排气烟度;HORIBA MEXA-7200D 型排气分析仪,测量发动机排气中的 NO_x 、THC、CO 排放;AVL SESAM i60FT 多组分气体排放傅里叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared, FTIR),动态同步测量发动机排气中的 NO_2 、 CH_2O 、 CH_4 等非常规排放物。

表 1 试验样机主要技术参数

缸径/mm	行程/mm	排量/L	压缩比	燃烧室型式	最大扭矩/(N·m)	最大扭矩下转速/(r·min ⁻¹)
95	115	3.26	17.5	ω 型	300	1540

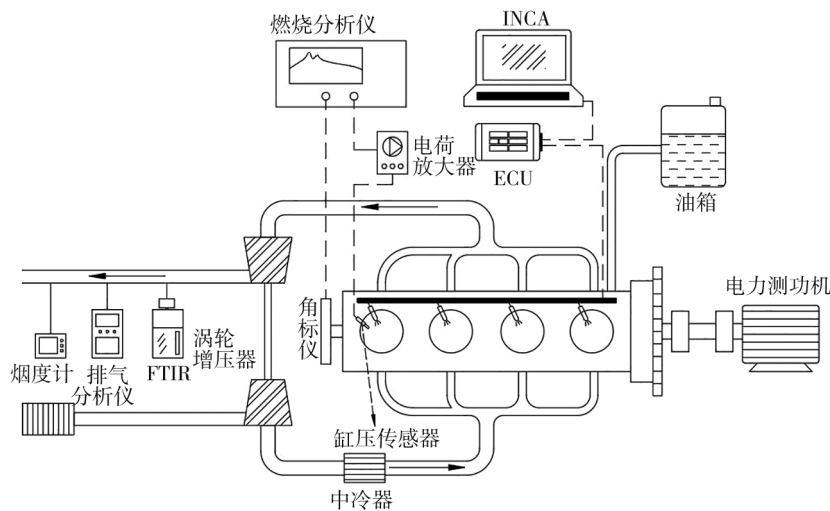


图 1 燃烧及排放测试系统

1.2 试验方法

选用市售国 VI 0[#]柴油和 WOC(欧标 EN14214)餐余废油生物柴油作为基础燃料,2 种燃料的理化特性如表 2 所示。将国 VI 0[#]柴油记为 B0,将 WOC 餐余废油生物柴油以体积分数为 30% 掺入纯柴油中制成新混合燃料,记为 B30。

表 2 试验燃料理化特性

燃料	密度 ^① /(g·cm ⁻³)	黏度 ^② /(mm ² ·s ⁻¹)	低热值/(MJ·kg ⁻¹)	闪点/°C	十六烷值	氧的质量分数/%
0 [#] 柴油	0.829	3.4	42.6	65	51	0
WOC 生物柴油	0.871	5.0	39.5	172	56	11.21

注:①燃料密度为环境温度为 20 °C 时测得。

②燃料黏度为环境温度为 40 °C 时测得。

试验工况为最大转矩转速、25%负荷工况。在试验过程中:1)保持冷却液温度为 $(80\pm 2)^\circ\text{C}$,进气温度为 $(40\pm 1)^\circ\text{C}$;2)发动机在目标工况下稳定运行2 min后,连续采集200个循环的缸压并计算平均缸压来消除缸内燃烧周期变化影响,获得缸压曲线;3)发动机在最大转矩转速1540 r/min下稳定运行,主喷时刻定义为上止点前(before top dead center, BTDC)曲轴转角 4° (本文中BTDC曲轴转角一律简记为曲轴转角),研究不同喷油压力(130、140、150、160 MPa)对2种燃料(B0和B30)燃烧、常规与非常规排放特性的影响;4)发动机在最大转矩转速1540 r/min下稳定运行,主喷压力为130 MPa,研究不同喷油时刻(曲轴转角分别为 4° 、 6° 、 8° 、 10° 、 12°)对2种燃料燃烧、常规与非常规排放特性的影响。在每个试验过程中,每个试验点进行5次重复测量,并将整个试验过程重复2次,以保证再现性和重复性^[5]。

2 试验结果及分析

2.1 燃烧特性

不同喷油压力下2种燃料燃烧时的缸压和放热率随曲轴转角的变化曲线如图2所示。由图2可知:1)相同喷油压力(130 MPa)下,相比于纯柴油B0,B30混合燃料的最大缸内压力和放热率峰值分别下降了0.67%和0.92%,且对应的曲轴转角均略微后移,原因为在低负荷条件下,缸内温度和压力较低,餐余废油生物柴油黏度较大,使得喷射入气缸中的B30的雾化效果较差,引起燃烧恶化,滞燃期变长,但餐余废油生物柴油的高含氧量特性可改善燃烧,最终导致燃用B30时缸内最大压力和放热率峰值相比于纯柴油仅略微下降且后移^[6];2)随着喷油压力提高,B30燃烧时的最大缸内压力和放热率峰值均升高且前移,相比于喷油压力为130 MPa时,B30在燃油喷射压力为160 MPa时最大缸压和放热率峰值分别提高了3.83%和4.06%,且对应的曲轴转角均前移 $1^\circ\sim 2^\circ$,其原因为:燃油喷射压力提高,喷射时间缩短,燃油雾化效果得到改善,促进了空气与燃料的混合,从而增加了缸内预混的空气与燃料的混合比例^[7],在预混燃烧阶段燃烧了更多的燃料,使得最大缸内压力和放热率峰值均升高且前移。

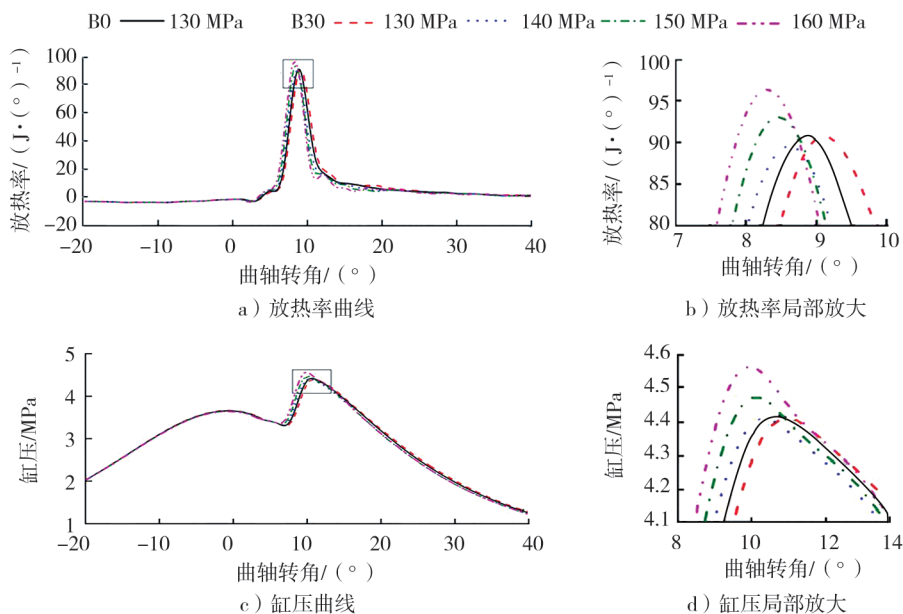


图2 不同喷油压力下2种燃料燃烧放热率、缸内压力随曲轴转角变化

不同喷油时刻下2种燃料燃烧缸内压力、放热率随曲轴转角变化曲线如图3所示。由图3可知:随着喷油时刻提前,缸内压力逐渐增加,压力峰值出现时刻提前,B30在喷油时刻的曲轴转角为 12° 的最大缸内压力较 4° 时升高22.1%;随着喷油角提前,放热率逐渐升高,在曲轴转角为 10° 时放热率达到最大。其原因为随着喷油时刻的提前,燃油能够更早喷入缸内,与空气形成预混气,缸内的油气分布更均匀,缸内的燃油燃烧更完全^[8]。

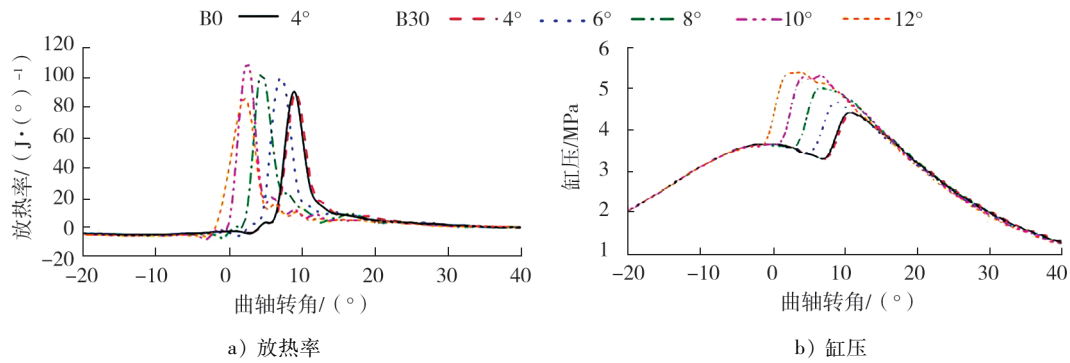


图3 不同喷油时刻下2种燃料燃烧缸内压力、放热率随曲轴转角变化

2.2 常规排放特性

转速为 1540 r/min、25% 负荷工况下, 喷油压力对 CO、THC、碳烟和 NO_x 排放的影响如表 3 所示(本文中各污染物常规、非常规排放数据均为体积分数)。由表 3 可知, 在相同喷油压力和时刻条件下, 相比于 B0, B30 的 CO、THC 和碳烟排放略微下降; B30 的 CO、THC 和碳烟排放随着喷油压力的提高而降低, 在喷油压力为 160 MPa 时, CO、THC 和碳烟排放较 130 MPa 时分别降低了 22.7%、24.7% 和 48.8%; NO_x 排放随着喷油压力的升高而升高, 在喷油压力为 160 MPa 时达到最高。其原因为: 随着喷油压力的提高, 通过产生细小的液滴, 燃料的雾化效果增强, 结合燃料中的氧分子改善了空气与燃料的混合, 促进了低负荷下混合燃料的燃烧, 且生物柴油本身含氧量高, 可提高低负荷时的空燃比, 燃烧后期燃料中的氧分子促进了 CO 和 THC 的氧化, 使得 CO 和 THC 的排放下降^[9]; 餐余废油生物柴油不含芳香烃且硫含量低, 一定程度上减少了碳烟前驱物的生成, 所以碳烟排放降低; 尽管低负荷下燃用 B30 时缸内温度低, 但是 B30 中较高的氧含量对促进 NO_x 生成的效果大于低温对 NO_x 生成的抑制效果, 最终 NO_x 排放升高^[10]。

表3 喷油压力对 CO、THC、碳烟和 NO_x 排放的影响

燃油类型	喷油压力/MPa	NO_x 排放/ 10^{-6}	FSN 烟度	CO 排放/ 10^{-6}	THC 排放/ 10^{-6}
B0	130	105.4	0.476	885.98	97.985
	130	106.8	0.440	867.24	97.102
B30	140	108.1	0.338	732.56	88.296
	150	111.8	0.267	698.72	81.775
	160	116.0	0.255	669.92	73.166

转速为 1540 r/min、25% 负荷工况下, 喷油时刻对 CO、THC、碳烟和 NO_x 排放的影响如表 4 所示。由表 4 可知: 随着喷油时刻的提前, 相比于喷油时刻的曲轴转角为 4° , B30 在 12° 时 CO、THC 和碳烟排放分别降低了 59.4%、65.5% 和 56.0%, 但 NO_x 排放升高了 86.3%。其原因为: 喷油时刻提前, 混合燃料喷射入气缸的时间提前, 且混合燃料中的氧分子含量高, 使得空气和燃料的混合更加充分, 导致缸内燃烧充分, 缸内温度和压力升高^[11]。

表4 喷油时刻对 CO、THC、碳烟和 NO_x 排放的影响

燃油类型	喷油时刻/ $^\circ$	NO_x 排放/ 10^{-6}	FSN 烟度	CO 排放/ 10^{-6}	THC 排放/ 10^{-6}
B0	4	105.4	0.476	885.98	97.985
	4	106.6	0.460	864.24	97.220
B30	6	121.7	0.405	632.08	71.994
	8	145.6	0.316	530.50	47.479
	10	171.5	0.305	411.50	37.966
	12	198.6	0.207	358.72	33.506

2.3 非常规排放特性

转速 1540 r/min、25%负荷工况下,喷油压力和喷油时刻的变化对 NO_2 、 CH_4 、 C_2H_4 和 CH_2O 排放的影响分别如表 5、6 所示。由表 5、6 可知,在相同喷油压力和时刻条件下,相比于 B0, B30 的 NO_2 、 CH_4 、 C_2H_4 和 CH_2O 排放略微下降;在不同喷油压力和时刻条件下, B30 的 NO_2 、 CH_4 、 C_2H_4 和 CH_2O 排放随着喷油压力的增大略微下降,随着喷油时刻的提前大幅下降。

表 5 喷油压力对 NO_2 、 CH_4 、 C_2H_4 和 CH_2O 排放的影响

燃油类型	喷油压力/MPa	NO_2 排放/ 10^{-6}	CH_4 排放/ 10^{-6}	C_2H_4 排放/ 10^{-6}	CH_2O 排放/ 10^{-6}
B0	130	24.20	8.86	17.54	17.97
	130	22.10	8.16	17.23	17.22
B30	140	13.64	7.36	12.75	12.45
	150	11.60	7.08	11.92	11.41
	160	8.23	6.35	10.29	9.14

表 6 喷油时刻对 NO_2 、 CH_4 、 C_2H_4 和 CH_2O 排放的影响

燃油类型	喷油时刻/ $^\circ$	NO_2 排放/ 10^{-6}	CH_4 排放/ 10^{-6}	C_2H_4 排放/ 10^{-6}	CH_2O 排放/ 10^{-6}
B0	4	24.20	8.86	17.54	17.97
	4	22.30	8.22	17.16	17.36
B30	6	19.90	5.62	7.98	7.98
	8	10.22	4.18	4.74	4.74
	10	8.01	3.64	3.31	3.31
	12	7.76	3.53	2.67	2.67

NO_2 通常在低温缺氧环境下生成,只占 NO_x 排放的一小部分^[12]。随着喷油压力升高和喷油时刻提前,缸内混合气均匀程度增加,燃烧更加充分,缸内温度和压力升高,促使 NO_2 在高温富氧环境下转化为 NO ,降低 NO_2 排放。

CH_4 是低温稀燃条件下的产物,低负荷且缸内温度较低的工况下,更多的燃料进入稀薄淬熄区域,促进 CH_4 生成^[13]。混合燃料虽然挥发性较低,在低负荷下易形成稀薄淬熄区域,但随着喷油压力升高和喷油时刻提前,缸内空气与燃料混合更加充分,燃烧更加充分,燃烧温度提升与燃料中氧分子增加减少了稀薄淬熄区的存在,使 CH_4 排放降低。

C_2H_4 主要来源于燃料的不充分燃烧。随着喷油压力的提升,燃料在缸内雾化效果增强,燃烧充分,缸内温度升高, C_2H_4 在高温富氧环境下具有较高的活性,易分解^[14-15],所以 B30 的 C_2H_4 排放逐渐降低。在 160 MPa 时, B30 的 C_2H_4 排放较 130 MPa 时降低了 40.7%;相比于喷油时刻的曲轴转角为 4° , B30 混合燃料在曲轴转角为 12° 的 C_2H_4 排放降低了 84.6%。

CH_2O 是产生光化学烟雾的重要来源,严重污染环境。当发动机低负荷运行时,缸内温度和压力较低,燃烧室壁面易形成含有许多醛类化合物的厚淬熄层,导致 CH_2O 排放较高^[16-17]。随着喷油压力的增加,喷油雾化效果较好,燃烧更加充分,同时餐余废油生物柴油具有富氧特性,在高温环境下促进 CH_2O 氧化成 H_2O 和 CO_2 ,燃烧室壁面的淬熄层变薄, CH_2O 排放降低。相比于 130 MPa 时, B30 在 160 MPa 时的 CH_2O 排放降低了 46.9%;相比于喷油时刻的曲轴转角为 4° , B30 在 12° 时 CH_2O 排放降低了 84.6%。

3 结论

在一台高压共轨四缸柴油机上进行了台架试验,研究低负荷下喷油压力和喷油时刻对餐余废油生物

柴油混合燃料的燃烧特性、常规和非常规排放的影响。

1) 低负荷时,相同喷油压力和时刻条件下,相比于纯柴油 B0, B30 混合燃料最大缸内压力和放热率峰值分别下降了 0.67% 和 0.92%,且对应曲轴转角后移;相比于纯柴油, B30 混合燃料 CO、THC、碳烟、NO₂、CH₄、C₂H₄ 和 CH₂O 排放略微降低, NO_x 排放增加。

2) 随着喷油压力的增加和喷油时刻的提前,燃油雾化效果增强,缸内燃料和空气的混合更加均匀,缸内燃烧得到改善, B30 混合燃料缸内压力和放热率增大且对应曲轴转角前移。

3) CO、THC、碳烟、NO₂、CH₄、C₂H₄ 和 CH₂O 排放随喷油压力的增大略微降低,随喷油时刻的提前而大幅降低,但 NO_x 排放逐渐增大。

参考文献:

- [1] HUANG J, XIAO H, YANG X, et al. Effects of methanol blending on combustion characteristics and various emissions of a diesel engine fueled with soybean biodiesel[J]. Fuel, 2020, 282: 118734.
- [2] UYUMAZ A. Combustion, performance and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with mustard oil biodiesel fuel blends at different engine loads[J]. Fuel, 2018, 212: 256–267.
- [3] MUBARAK M, SHAHJA A, SUCHITHRA T V. Experimental evaluation of *Salvinia molesta* oil biodiesel/diesel blends fuel on combustion, performance and emission analysis of diesel engine[J]. Fuel, 2021, 287: 119526.
- [4] 贺献忠, 王欣, 江国和, 等. 餐厨废弃油脂生物柴油对船舶柴油机性能影响的试验研究[J/OL]. 中国油脂(2021-12-15) [2022-01-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1099.TS.20211214.1659.013.html>
- [5] LIU J, WU P, JI Q, et al. Experimental study on effects of pilot injection strategy on combustion and emission characteristics of diesel/methanol dual-fuel engine under low load[J]. Energy, 2022, 247: 123464.
- [6] 毛功平, 蒋红坤, 王威, 等. 柴油机燃用低比例小球藻生物柴油-柴油混合燃料的试验研究[J]. 可再生能源, 2021, 39(3): 285–293.
- [7] SARAVANAN C G, RAJ K K, VIKNESWARAN M, et al. Impact of fuel injection pressure on the engine characteristics of CRDI engine powered by pine oil biodiesel blend[J]. Fuel, 2020, 264: 116760.
- [8] 王刚, 赵福芹, 李同楠. 轨压和喷油提前角对柴油机排放影响的试验研究[J]. 内燃机与动力装置, 2020, 37(3): 20–25.
- [9] KUMAR S, DINESHA P, ROSEN M A. Effect of injection pressure on the combustion, performance and emission characteristics of a biodiesel engine with cerium oxide nanoparticle additive[J]. Energy, 2019, 185: 1163–1173.
- [10] WEI L, CHENG R, MAO H, et al. Combustion process and NO_x emissions of a marine auxiliary diesel engine fuelled with waste cooking oil biodiesel blends[J]. Energy, 2018, 144: 73–80.
- [11] KULANDAIVEL D, RAHAMATHULLAH I G, SATHIYAGNANAM A P, et al. Effect of retarded injection timing and EGR on performance, combustion and emission characteristics of a CRDi diesel engine fueled with WHDPE oil/diesel blends[J]. Fuel, 2020, 278: 118304.
- [12] GOWTHAM M, PRAKASH R. Control of regulated and unregulated emissions from a CI engine using reformulated nano fuel emulsions[J]. Fuel, 2020, 271: 117596.
- [13] TRIPATHI G, SHARMA P, DHAR A. Effect of methane augmentation on combustion stability and unregulated emissions in compression ignition engine[J]. Fuel, 2020, 263: 116672.
- [14] AGARWAL A K, PRASHUMN D, VALERA H, et al. Di-ethyl ether-diesel blends fuelled off-road tractor engine: Part-II: unregulated and particulate emission characteristics[J]. Fuel, 2022, 308: 121973.
- [15] ZUO L, WANG J, MEI D, et al. Experimental investigation on combustion and (regulated and unregulated) emissions performance of a common-rail diesel engine using partially hydrogenated biodiesel-ethanol-diesel ternary blend[J]. Renewable Energy, 2022, 185: 1272–1283.
- [16] 胡志远, 林建军, 谭丕强, 等. 喷油参数对生物柴油发动机燃烧性能影响的试验研究[C]//中国高等教育学会工程热物理专业委员会. 高等学校工程热物理第十九届全国学术会议论文集. 天津: 中国高等教育学会工程热物理专业委员会, 2013: 842–851.
- [17] REDDY B R, REDDY N R P, MANNAE B, et al. Performance, combustion and emission characteristics of a diesel engine fueled with *Schizochytrium* micro-algae biodiesel and its blends[J]. International Journal of Ambient Energy, 2020(3): 1–20.

(下转第 36 页)