

预喷策略对乙醇/F-T 柴油双燃料发动机燃烧和排放的影响

陈东东, 杨甜甜, 王铁, 李国兴
(太原理工大学 车辆工程系, 太原 030024)

Effect of pilot injection strategy on combustion and emissions of ethanol/F-T diesel dual-fuel engine

CHEN Dongdong, YANG Tiantian, WANG Tie, LI Guoxing

(Vehicle Engineering Department, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The effects of F-T diesel pilot injection strategy on combustion and emission performance of an ethanol /F-T dual-fuel engine were studied experimentally on a four-cylinder four-stroke common rail diesel engine modified by ethanol injection system. The results show that the combustion characteristics change nonlinear with the change of pilot injection timing, and the difference is small. With the advance of pilot injection timing, soot, carbon oxides (NO_x) and carbon monoxide (CO) tended to decrease; With the increase of pilot injection amount, the peak value of combustion pressure, combustion duration, CO and soot increased, CA50 was closer to top dead center (TDC), the peak value of heat release rate decreased, and the ignition delay period shortened. The influence of pre-injection amount on ethanol /F-T diesel dual fuel engine is more significant.

摘要: 在一台经乙醇喷射系统改造的四缸四冲程共轨柴油机上通过试验研究了柴油预喷策略对乙醇/F-T 双燃料发动机燃烧和排放性能的影响。结果表明: 燃烧特性参数随预喷正时的变化呈非线性变化, 且差异较小; 随着预喷正时的提前, 碳烟 (soot)、碳氧化物 (NO_x) 和一氧化碳 (CO) 有降低的趋势; 随着预喷油量的增加, 燃烧压力峰值、燃烧持续期、CO 和 soot 增加, CA50 更接近上止点 (TDC), 放热率峰值减小, 滞燃期缩短。预喷油量对乙醇/F-T 柴油双燃料发动机的影响更为显著。

关键词: 预喷策略; 双燃料燃烧模式; 乙醇/F-T 柴油; 燃烧和排放

Key words: pilot injection strategy; dual-fuel combustion mode; ethanol/F-T diesel; combustion and emissions

中图分类号: TK473.1

文献标识码: A

0 概述

柴油机广泛应用于农业、工业、交通运输等领域。由于能源危机、碳排放要求和严格的排放法规, 以及当今世界复杂的石油环境, 能源安全无法得到保障, 因此对柴油替代燃料的研究非常广泛^[1]。柴油机典型燃烧过程中产生的氮氧化物和烟尘排放是一个备受诟病、亟待解决的问题。在中国, 煤炭储量相对较大, 而煤制油是解决煤炭粗放利用造成环境污染的关键措施之一。根据中国的能源特点, 以煤炭清洁利用为基础生产的燃料更受青睐^[2]。

F-T 柴油是通过费-托 (Fischer-Tropsch) 技术将煤间接液化合成的。与石油基柴油相比, F-T 柴油具有更高的 H/C 比、十六烷值、更低的硫含量和芳烃含量, 因此 F-T 柴油在缸内燃烧时可缩短发动机的燃烧延迟期, 并可在一定程度上降低燃烧温度, 实现低温燃烧。此外, F-T 柴油可以获得更低的 NO_x 、CO 和 Soot 排放^[2,3]。此外, F-T 柴油无需任何改装即可用于常规柴油机, 发动机效率的提高可以忽略不计或微乎其微^[4]。F-T 柴油也可以与其他燃料混合,

收稿日期: 2023-06-30

作者简介: 陈东东 (1992-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为清洁代用燃料, 混合动力技术, E-mail: chendd92@163.com; 王铁 (联系人), E-mail: wangtie57@163.com.

以进一步提高发动机性能。总之，F-T 柴油是一种很有前途的柴油机代用燃料。

乙醇燃料作为石油基燃料的添加剂已被广泛使用，具有能源独立、减排和能源可持续性的巨大可能性^[5,6]。此外，乙醇燃料的高汽化潜热和较低的火焰温度可能是增加功率输出和减少热损失的有前途的方法。乙醇由于氧含量高且不含芳香族化合物，可以减少 CO、NO_x 和 PM 的排放，在内燃机中得到了广泛的研究。当乙醇以混合方式使用时，需要乳化剂，且无法随操作灵活调整乙醇燃料的比例。因此在进气道低压喷射乙醇的双燃料燃烧方式成为一个有趣的选择^[7,8]。

通过缸内直喷柴油机的喷射控制，可以进一步提高发动机性能^[9]。单阶段喷射柴油点燃预混合乙醇燃料的双燃料燃烧，由于其压力升高率过高，限制了发动机的工作范围。柴油机多阶段喷射可以显著降低气缸内的压力升高率，从而降低工作过程中的振动和噪声。此外，通过优化多阶段喷射控制参数可以改善 NO_x 和烟尘排放。采用预喷策略，可以明显降低发动机的压力升高率^[10]。

综上所述，在使用清洁代用燃料的同时，可以通过优化发动机参数，实现更好的发动机性能和更清洁的排放，实现更低成本的节能减排。虽然总体上主喷参数对燃烧和排放的影响较大，但燃油量相对较少的预喷阶段对主喷阶段燃油蒸发燃烧的影响也较大。合理的预喷正时可以同时降低 NO_x 排放、烟尘排放和燃油消耗，提高发动机的经济性，这是多次喷射技术的优势。本文通过试验研究了在固定乙醇取代率（ESR）和运行条件下预喷参数对 F-T 柴油和乙醇双燃料燃烧模式下发动机燃烧和排放性能的影响。

1 试验装置及方法

1.1 试验装置

本文的试验是在一台四缸、四行程、高压共轨柴油发动机上进行的。柴油机的主要技术指标如表 1 所示。试验所用燃料的主要理化参数如表 2 所示。该发动机可实现多次 F-T 柴油喷射，其主要技术指

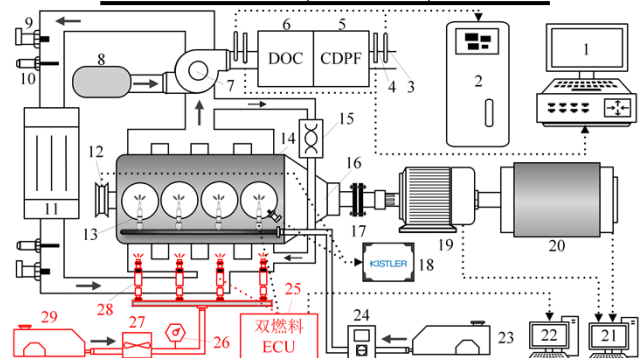
标见表 1。试验工况下原发动机预喷正时 (t_{pil}) 和预喷油量 (q_{pil}) 分别为 12.3 °CA BTDC 和 1.5 mg/cyc。本文研究了在 EGR 为 15%、ESR 为 20% 的工况下，高活性燃油在缸内直喷的预喷策略对乙醇/F-T 柴油双燃料模式燃烧及排放特性的影响。为了实现双燃料燃烧模式，在柴油机进气歧管上增加了 4 个乙醇喷油器，实现了乙醇的多点喷射。喷射参数由一个开源的集成双燃料电子控制单元控制。试验台架示意图如图 1 所示。

表 1 发动机主要技术指标

项目	参数
发动机型式	高压共轨
缸径/mm×行程/mm	92×94
排量/L	2.499
压缩比	16.6:1
标定功率/kW	85
标定功率转速/r·min ⁻¹	3200
最大扭矩/N·m	320
最大扭矩转速/r·min ⁻¹	1300~2800

表 2 燃油主要理化特性

项目	F-T 柴油	乙醇
密度/g·cm ⁻³	0.757	0.789
十六烷值	74.8	6
研究法辛烷值	-	111
低热值/MJ·kg ⁻¹	43.07	26.79
蒸发潜热/MJ·kg ⁻¹	-	847
氧含量/(w)	0	34.8
当量空燃比	14.96	9.0



1.AVL 483烟度计；2.AVL i60排放仪；3.i60探头；4.483探头；5.CDPF；6.DOC；7.涡轮增压；8.空气滤清；9.压力传感器；10.温度传感器；11.中冷器；12.光电编码器；13.高活性燃料喷嘴；14.双燃料发动机；15.EGR；16.液压离合器；17.联轴器；18.KiBOX燃烧分析仪；19.ISG电机；20.电力测功机；21.测控系统；22.ECU上位机；23.高活性燃料箱；24.高活性燃料流量计；25.双燃料ECU；26.调压阀；27.低活性燃料流量计；28.低活性燃料喷嘴；29.低活性燃料箱

图 1 发动机台架示意图

发动机转速和转矩通过 ET4000 发动机控制系统控制。在发动机曲轴上安装了精密曲轴位置编码器，

以确定活塞与曲轴的精确位置。采用 Kistler 6125B 气缸压力传感器和 Kistler 燃烧分析仪进行缸内压力采集和放热分析。在不同曲轴转角位置测量的缸内燃烧压力用于计算放热率。气体排放测量多组分废气排放分析仪 (AVL SES-AM i60 FT)。采用 AVL 微烟尘传感器 483 微烟尘排放测试系统对 soot 排放进行测量。

1.2 分析方法

试验工况为最大转矩对应的转速为 2000 r/min, 负荷率为 75%。发动机燃油温度设置为 20 °C, 冷却液温度和润滑油温度设置为 90 °C。根据封闭系统热力学第一定律的应用, 根据状态方程, 将气缸内工质视为理想气体的条件下, 由气缸内压力计算出瞬时放热率。忽略壁面换热、缝隙体积、吹气量和燃油喷射效应等因素, 按式 (1) [1] 计算得到净放热率用于研究分析。

$$\text{HRR} = \frac{1}{\gamma - 1} \left(\gamma p \frac{dV}{d\phi} + V \frac{dp}{d\phi} \right) \quad (1)$$

式中, γ 为比热比, p 为气缸压力传感器测得的气缸内瞬时压力, 单位为 Pa, V 为气缸瞬时体积, 单位为 m^3 。

采用 ESR 计算进气口乙醇添加量, 实现双燃料燃烧模式。ESR 的计算公式如式 (2) 所示:

$$\text{ESR} = \frac{\dot{m}_E \cdot h_E}{\dot{m}_E \cdot h_E + \dot{m}_{FT} \cdot h_{FT}} \times 100\% \quad (2)$$

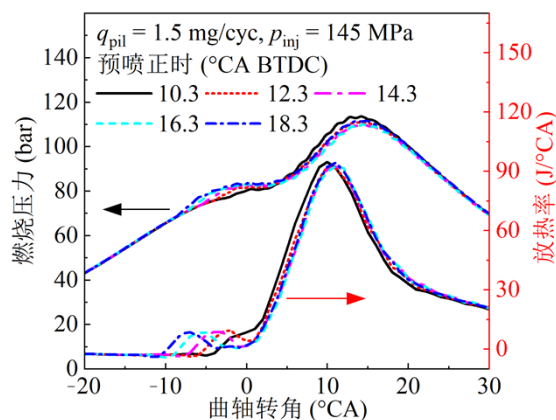
式中, \dot{m}_E 为乙醇喷射速率, 单位为 kg/h, \dot{m}_{FT} 为 F-T 柴油喷射速率, 单位为 kg/h, h_E 为乙醇的低热值, h_{FT} 为 F-T 柴油的低热值, 单位为 MJ/kg。

通常将累计放热率达到 5% (CA05) 和 90% (CA90) 时对应的曲轴转角位置分别视为燃烧始点和燃烧终点用于计算燃烧持续时间。此外, 累计放热率达到 50% 时所对应的曲轴转角位置 (CA50), 称为燃烧中心, 对燃烧过程的分析也很重要。从主喷正时到 CA05 的曲柄角可以计算出滞燃期。

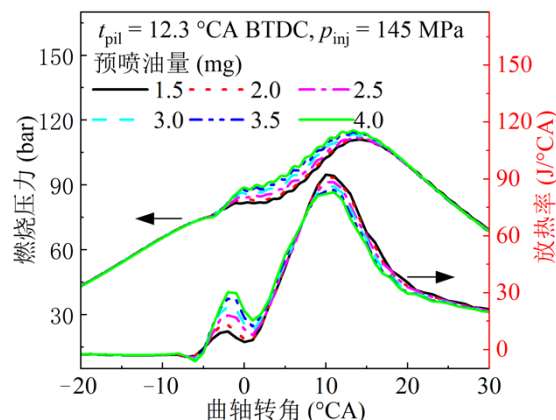
2 试验结果及分析

2.1 燃烧特性

采用 200 个连续循环的平均缸内压力数据计算放热率、燃烧持续时间、滞燃期等燃烧特性参数。图 2 为不同预喷正时 (图 2 (a)) 和预喷油量 (图 2 (b)) 下的缸内压力和放热率随曲轴转角变化的曲线。



(a) 不同预喷正时的影响



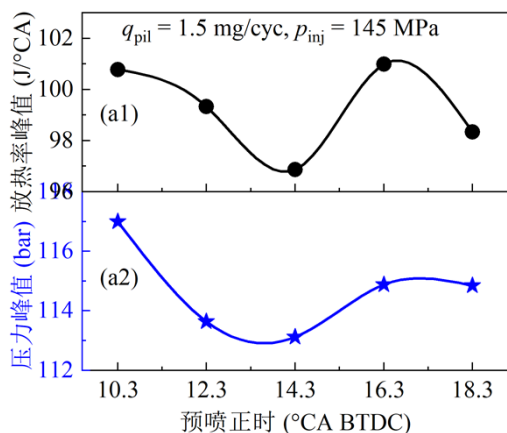
(b) 不同预喷油量的影响

图 2 预喷参数对双燃料发动机燃烧压力和放热率的影响

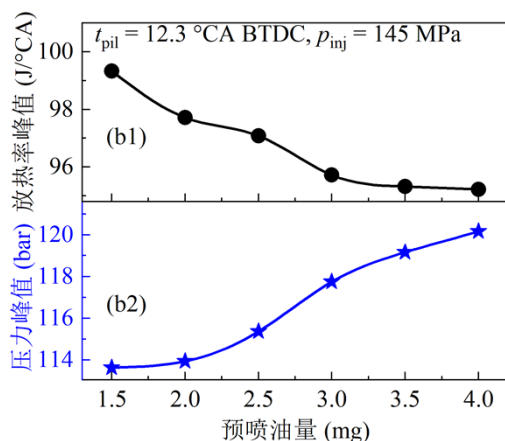
放热率曲线呈现多级放热的趋势。预喷策略对燃烧前期有显著影响, 然后间接影响燃烧中后期的放热规律。从图 2 (a) 可以看出, 预喷阶段放热率相位变化明显, 而主喷阶段压力峰值和放热率峰值均相差不大。但是, 当预喷正时为 10.3 °CA BTDC 时, 与上止点太接近, 使得预喷与主喷间隔过短, 燃烧阶段边界不明显。主喷阶段压力升高率过高, 导致发动机运转粗暴, 无法实现低温燃烧。从图 2 (b) 可以看出, 预喷阶段的放热率峰值位于 3 °CA BTDC 附近。随着预喷油量的增加, 预喷阶段的放热率峰值增大, 主喷阶段的放热量减小。压力峰值随预喷

油量的增加而逐渐增大。这是因为随着预喷油量的增加，用于点燃缸内乙醇均质混合气的能量增加，导致更多的预混合 F-T 柴油被点燃。

为了更详细地分析燃烧过程参数，提取各预喷参数下的压力峰值、放热率峰值（如图 3 所示），以及 CA50、滞燃期和燃烧持续期（如表 3 所示）。



(a) 不同预喷正时的影响



(b) 不同预喷油量的影响

图 3 预喷参数对双燃料发动机燃烧参数的影响

图 3 (a) 显示了预喷正时对燃烧参数的影响。随着预喷正时的提前，使得预喷阶段的 F-T 柴油有足够的时间在气缸内雾化蒸发，使燃油与空气的混合更加充分。在主喷阶段之前，在气缸内形成一个热氛围。由图 3 (b) 可以看出，放热率峰值和压力峰值随预喷正时的变化趋势相同，最小值出现在 14.3 °CA BTDC 附近。当预喷正时更接近上止点时，气缸内预喷阶段产生的热氛围对主喷阶段燃油的加热和蒸发作用更强，主喷阶段的滞燃期略短，这使得压力峰值和放热率峰值略有增加，CA50 略接近上止点（表 3）。

图 3 (b) 显示了预喷正时为 12.3 °CA BTDC 时

预喷油量对燃烧过程参数的影响规律。由图 3 (b) 可以看出，随着预喷油量的增加，预喷阶段的放热率峰值和压力峰值逐渐增大，而主喷阶段的放热率峰值则不断减小。

一方面，随着 F-T 柴油预喷油量的增加，燃烧室会积累大量的活性自由基和氧化活性物质，这削弱了乙醇对 F-T 柴油点火的抑制作用，增加了多点同时点火的可能性，增强了燃烧过程的氧化和反应速率，从而缩短了主喷段的滞燃期（表 3）。由于主喷阶段滞燃期缩短，在当前喷射参数下，主喷阶段的 F-T 柴油将更多地参与扩散燃烧，并且由于预喷阶段大量燃烧，主喷阶段时气缸中废气的比例增加，因此瞬时放热率峰值显著降低，燃烧持续期延长（表 3）。

另一方面，当主喷阶段燃油量减少时，整个燃烧过程的扩散燃烧比例降低，平均燃烧速率增加，燃烧更加集中，CA50 更接近上止点（表 3），因此压力峰值增大。然而，燃烧阶段的提前可能导致更高的壁面传热损失，这将不利于发动机的效率提升。

表 3 预喷参数对双燃料发动机燃烧计算参数的影响

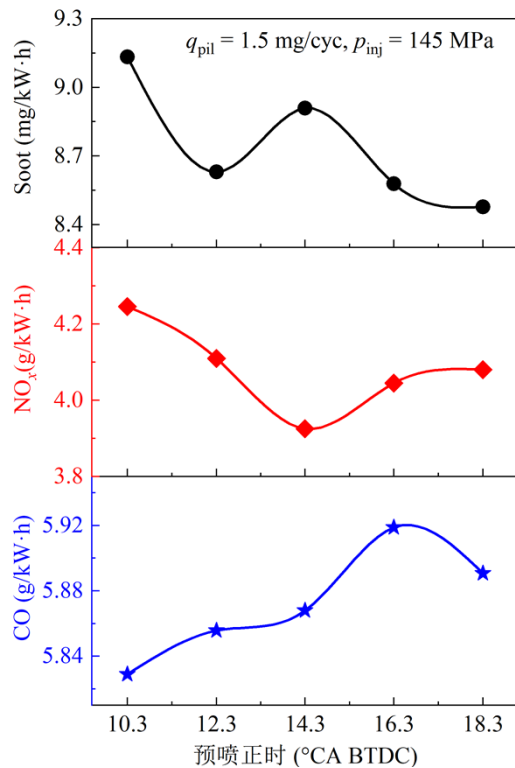
项目	CA50/°CA	燃烧持续期 /°CA	滞燃期/°CA	
预喷正时 /°CA BTDC	10.3	14.7	42.8	10.3
	12.3	15.2	43	10.5
	14.3	15.6	42.5	10.7
	16.3	15.7	42.8	10.9
	18.3	15.2	42.5	10.5
预喷油量 /mg	1.5	15.2	43	10.5
	2.0	4.5	43.2	10.1
	2.5	3.9	43.8	9.5
	3.0	3.3	44.3	8.9
	3.5	2.8	45.2	8.4
	4.0	2.1	45.5	7.7

2.2 排放特性

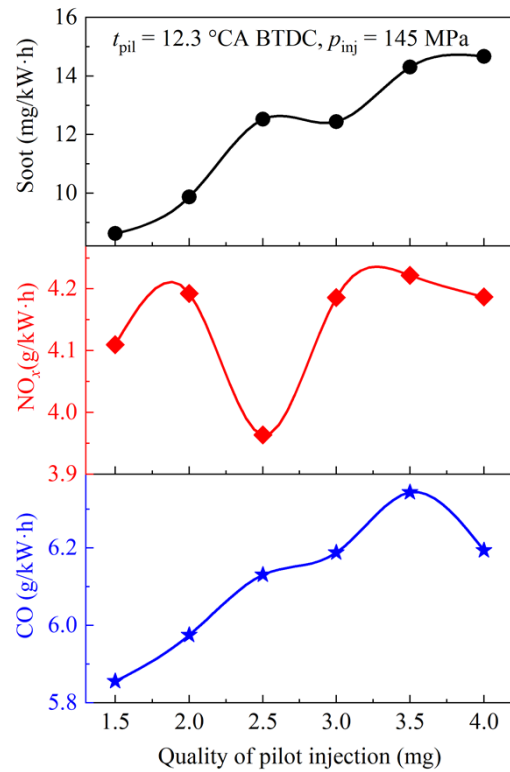
由于柴油机的压缩比高，缸内燃烧温度高，等效空燃比大，因此会比汽油机生成更多的 NO_x。碳烟 (soot) 是由于燃料在高温和富燃混合物下的部分氧化和热裂解而产生的。CO 是烃类燃料燃烧过程中产生的主要中间产物。如果气缸内混合物的氧气浓度和温度足够高，化学反应所占用的时间足够长，CO

就会被氧化成 CO_2 。图 4 显示了乙醇/F-T 柴油双燃料模式下预喷参数对 soot、 NO_x 和 CO 排放的影响。

如图 4 (a) 所示, 排放随预喷正时的变化规律是非线性的, 但总体上污染物排放随着预喷正时的提前而降低。特别是在预喷正时为 18.3°CA BTDC 时, 由于燃油在预喷阶段有足够的时间形成均匀的混合物, 燃烧更充分, 三种排放都较小。在预喷正时为 14.3°CA BTDC 时, soot 与 NO_x 排放呈显著的权衡关系。从图 3 (b) 也可以看出, 该预喷正时下的压力峰值最小。与 14.3°CA BTDC 相比, 18.3°CA BTDC 的预喷正时将导致压缩行程结束时温度和压力升高。



(a) 不同预喷正时的影响



(b) 不同预喷油量的影响

图 4 预喷参数对双燃料发动机排放特性的影响

从图 4 (b) 可以看出, 排放量随预喷油量的变化规律也是非线性的, 但总体来看, soot 和 CO 排放量随着预喷油量的增加而增加。当预喷油量为 2.5 mg 时, NO_x 排放量显著降低, 而在其它预喷油量参数下, NO_x 排放量变化不大。如表 3 所示, 随着预喷油量的增加, 主喷阶段的滞燃期缩短, 导致主喷阶段燃油参与扩散燃烧的比例增大。燃料与空气的混合相对不均匀, 局部富燃料区域增加, 因此 soot 和 CO 排放量有增加的趋势。

综上所述, 在稍提前的预喷正时和稍大的预喷油量的条件下, 可以显著降低 NO_x 排放, 这将为进一步提高乙醇/F-T 柴油双燃料发动机的性能提供方向。

3 结论

研究了预喷策略对乙醇/F-T 柴油双燃料发动机燃烧和排放特性的影响。探讨了乙醇/F-T 柴油双燃料模式的发展潜力。主要结论如下:

(1) 随着预喷正时的提前, 燃烧过程参数的变

化呈非线性，且参数差异较小。当预喷正时为 $14.3^{\circ}\text{CA BTDC}$ 时，获得了最大压力峰值和最小放热率峰值。随着预喷正时的提前，soot、 NO_x 、CO均呈下降趋势。

(2) 随着预喷油量的增加，压力峰值、燃烧持续期、CO、soot均增加，CA50更接近TDC，而放热率峰值减小和滞燃期缩短。当预喷油量为 2.5 mg 时， NO_x 排放量显著下降。

综上所述，在ESR和运行条件不变的情况下，调整预喷参数可以在不恶化缸内燃烧的情况下，显著降低 NO_x 排放。对今后煤基替代燃料在双燃料模式下的应用具有指导意义。

参考文献：

- [1] Xu J, Yang Y, Li Y-W. Recent development in converting coal to clean fuels in China[J]. Fuel, Oxford: Elsevier Sci Ltd, 2015, 152: 122–130.
- [2] Geng L, Li S, Xiao Y, 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.
- [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] Song C, Gong G, Song J, et al. Potential for Reduction of Exhaust Emissions in a Common-Rail Direct-Injection Diesel Engine by Fueling with Fischer–Tropsch Diesel Fuel Synthesized from Coal[J]. Energy & Fuels, American Chemical Society, 2012, 26(1): 530–535.
- [5] Agarwal A K. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2007, 33(3): 233–271.
- [6] Wang X, Gao J, Chen Z, et al. Evaluation of hydrous ethanol as a fuel for internal combustion engines: A review[J]. Renewable Energy, 2022, 194: 504–525.
- [7] Imran A, Varman M, Masjuki H H, et al. Review on alcohol fumigation on diesel engine: A viable alternative dual fuel technology for satisfactory engine performance and reduction of environment concerning emission[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 26: 739–751.
- [8] Padala S, Woo C, Kook S, et al. Ethanol utilisation in a diesel engine using dual-fuelling technology[J]. Fuel, 2013, 109: 597–607.
- [9] Pedrozo V, May I, Zhao H. Characterization of Low Load Ethanol Dual-Fuel Combustion using Single and Split Diesel Injections on a Heavy-Duty Engine[A]. SAE 2016 World Congress and Exhibition, April 12, 2016 - April 14, 2016[C]. Detroit, MI, United states: SAE International, 2016, 2016-April(April).
- [10] Pedrozo V B, May I, Zhao H. Exploring the mid-load potential of ethanol-diesel dual-fuel combustion with and without EGR[J]. Applied Energy, 2017, 193: 263–275.
- [11] Tutak W, Lukács K, Szwaja S, et al. Alcohol–diesel fuel combustion in the compression ignition engine[J]. Fuel, 2015, 154: 196–206.