

高压喷射乙二醇双燃料发动机的燃烧与排放特性研究

谢秋霞, 陈昊, 韦泽富, 张鹏
(长安大学 能源与电气工程学院, 西安 710000)

Combustion and Emission Characteristics of a Diesel Dual Fuel Engine with High Pressure Injection of Ethylene Glycol

XIE Qiuxia, CHEN Hao, WEI Zefu, ZHANG Peng

(School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710000, China)

Abstract: In order to improve the engine's power performance and reduce pollutant emissions, the effects of different high-pressure injection of ethylene glycol (EGP5, EGP10, EGP20) on the engine's combustion and emission characteristics under different substitution rates (EG0, EG5, EG10, EG15) were studied on an inline 4-cylinder turbocharged common rail diesel engine. The research results show that under the same ethylene glycol injection pressure (EGP), the peak pressure and peak heat release rate in the cylinder show a trend of first decreasing and then increasing with the increase of ethylene glycol substitution rate; As the injection pressure of ethylene glycol increases, the average temperature in the cylinder also increases, and the ignition delay period remains basically unchanged. The combustion duration is slightly shortened, and NOx emissions decrease with the increase of substitution rate. The weighted average particle size of ultrafine particles shows a trend of first increasing and then decreasing; At the same substitution rate, with the increase of EGP, the peak pressure in the cylinder slightly decreases, while the effective thermal efficiency increases, and the average effective thermal efficiency of EGP20 is 1.6% higher than that of EG5. In summary, when the injection pressure of ethylene glycol is 20MPa, it can effectively balance the combustion and emission performance of the engine.

摘要: 为了提高发动机的动力性能以及降低污染物排放水平, 在一台直列 4 缸涡轮增压共轨柴油机上, 研究不同高压喷射乙二醇 (EGP5、EGP10、EGP20) 在不同替代率 (EG0、EG5、EG10、EG15) 下对发动机燃烧与排放特性的影响。研究表明: 在相同喷射压力 (EGP) 下, 缸内峰值压力和峰值放热率随着乙二醇替代率的增加, 呈先下降后上升的趋势; 随着乙二醇喷射压力的增加, 缸内平均温度也随之增加, 滞燃期基本不变, 燃烧持续期略微缩短, 而且 NOx 排放量随着替代率的增加而下降; 在相同替代率下, 随着 EGP 的增加, 缸内峰值压力略微下降, 而有效热效率越大, 且 EGP20 的有效热效率平均比 EG5 高出 1.6%。总而言之, 当乙二醇的喷射压力为 20MPa 时, 发动机的燃烧与排放性能得到较好的平衡。

关键词: 高压喷射; 乙二醇; 双燃料发动机; 燃烧特性; 排放特性

Key words: high pressure injection; ethylene glycol; dual fuel engine; combustion characteristics; emission characteristics

中图分类号: TK46

文献标识码: A

收稿日期: 2023-6-29

基金项目: 陕西省创新能力支撑计划项目 (项目编号: 2021TD-28)

作者简介: 谢秋霞 (1998-), 女, 硕士生, 主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制, E-mail: xieqiuxia56@163.com;

陈昊 (联系人), E-mail: chen hao@chd.edu.cn.

0 概述

随着我国经济和工业水平的提升,汽车产业也正经历着不断的发展与革新。据有关数据统计,2022 年全国机动车保有量达 4.17 亿辆,其中汽车 3.19 亿辆,占机动车总量 76.59%,汽车保有量相比 2021 年增长 5.81%^[1]。与此同时,伴随汽车保有量的增长,能源消耗以及污染物排放问题也接踵而至。据 BP《世界能源统计年鉴》统计,2021 年全球能源消耗量增长 5.8%,且能源消费的碳排放量同比增加 5.9%,达到 339 亿吨二氧化碳当量^[2],能源与排放问题仍面临巨大挑战。

目前,内燃机仍占汽车主体地位,其中,柴油机因热效率以及比功率高^[3]等优点,普遍应用于交通运输中,但其也具有工作粗暴,污染物排放严重等问题,其中 NO_x 和碳烟颗粒物占比非常大。随着排放法规要求愈加严格,越来越多的学者对柴油机高效清洁燃烧技术展开了一系列的研究,其中双燃料燃烧模式已成为近年来研究的热点^{[3]-[7]}。醇/柴油双燃料发动机是目前研究最多的模式,提高柴油机的喷射压力可以进一步降低 PM 排放。

选择合适的燃料对于双燃料发动机来说是很重要的,含氧燃料的运用在降低碳烟颗粒物和氮氧化物方面具有优势,与甲醇相比,乙二醇具有较高的含氧量、腐蚀性较低、且不产生 C=C 产物,此外,还具有较高的汽化潜热和十六烷值,能有效改善柴油机的燃烧性能、降低 NO_x 以及碳烟等污染物排放。与此同时,乙二醇的使用也存在一些问题,例如具有较大的运动粘度,需要较高的喷射压力才能使得乙二醇混合均匀。所以,喷射压力是最重要的喷射参数之一,它对燃油蒸发、混合气形成、燃烧过程和排放都有重要影响^{[3][8][9]}。

目前,许多学者对不同喷射压力下发动机的燃烧特性和排放进行了研究。Yao^[10]等人对柴油的燃烧特性进行了实验研究,发现随着喷射压力的增加,火焰浮起长度增加,着火延迟和燃烧持续时间缩短。Pandian^[11]等人研究了喷射压力对双缸压燃式直喷发动机性能和排放特性的影响,结果表明,一定程度上提高喷射压力,可以提高有效热效率,且减少 CO、HC 和碳烟的排放。王斌^[12]等人采用不同喷射压力对柴油和甲醇的双燃料发动机进行燃烧和排放

的研究。结果表明,提高喷射压力,放热率也随之增加,同时可降低 CO 的排放,而且碳烟排放降低了 35%。Chen^[13]等人研究了不同乙二醇替代率(EG5、EG10、EG15)对发动机的燃烧与排放特性影响,结果表明,随着乙二醇替代率的增加,燃烧持续期反而减小,且 NO_x 和碳烟的排放量也随之减少。

目前有关乙二醇双燃料发动机的研究较少,特别是较高喷射压力下的乙二醇更是屈指可数,为了促进乙二醇油滴雾化蒸发效果,研究高压喷射乙二醇具有重要意义,且提高喷射压力是改善燃油机经济性、燃烧效率、减少碳烟形成、实现低排放的有效途径。因此,研究不同高压喷射下的乙二醇对提高发动机性能和减少排放具有重要意义。因此,本文采用三种较高的乙二醇喷射压力(EGP5、EGP10、EGP20),研究不同替代率下乙二醇对发动机的燃烧和排放影响。

1 实验装置和方法

设定发动机转速为 1600r、平均有效压力(BMEP)为 0.70MPa,乙二醇的喷射压力分别为 5MPa、10MPa、20MPa。由于乙二醇较大的运动粘度,低压喷射时导致雾化效果差,因而采取较高的喷射压力来改善雾化质量^{[14]-[15]}。在发动机工况稳定的情况下,调节乙二醇喷射压力以及不同替代率(EG0、EG5、EG10、EG15),并记录对燃烧和排放性能的影响结果。

双燃料发动机实验系统如图 1 所示,主要包括实验台架(柴油发动机、电涡流测功机和与之适配的测控机)、乙二醇供给系统、电控系统、燃烧分析系统和排放物检测设备等。发动机具体参数如表 1 所示。

表 1 发动机参数

项目	参数
发动机型号	WP4G154E330
发动机转速(r/min)	1600
平均有效压力(MPa)	0.70
喷醇压力(MPa)	5、10、20
喷油压力(MPa)	82

收稿日期: 2023-6-29

基金项目: 陕西省创新能力支撑计划项目(项目编号: 2021TD-28)

作者简介: 谢秋霞(1998-),女,硕士生,主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制, E-mail: xieqiuxia56@163.com;

陈昊(联系人), E-mail: chenhao@chd.edu.cn。

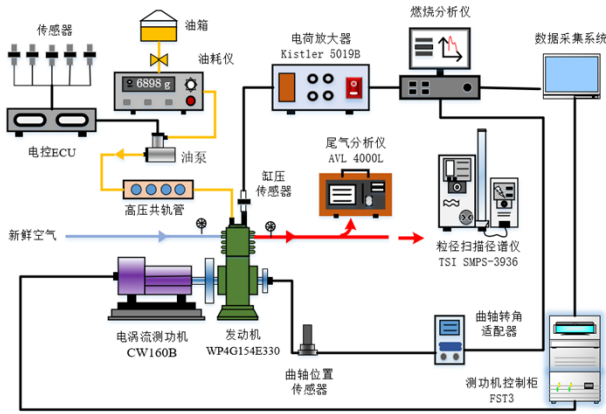


图1 双燃料发动机实验系统

2 结果与讨论

2.1 燃烧特性

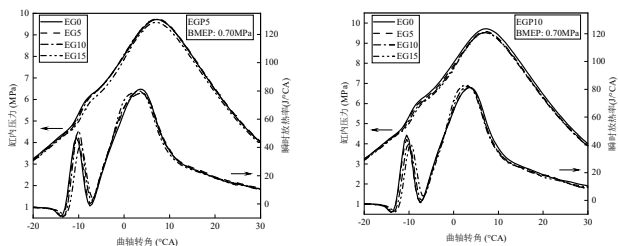
2.1.1 缸内压力与瞬时放热率

如图2所示,分析结果如下:

(1) 乙二醇喷射压力一定时,对比不同乙二醇替代率,缸内压力的变化规律基本一致;随着乙二醇替代率的增加,缸内峰值压力和峰值放热率略微下降再上升。其中EG0峰值压力最大,EG15主喷阶段的峰值放热率最大。这主要归因于乙二醇较高的汽化潜热,进气道喷射乙二醇在一定程度上会降低进气温度,并对缸内燃烧反应产生不利影响,所以造成缸内峰值压力略微降低现象^[16]。与此同时,乙二醇具有较高的含氧量,随着替代率增加,燃料含氧量越高,进而促进燃烧反应,使得峰值压力上升。

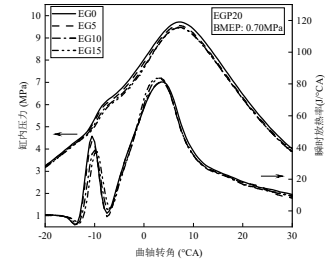
(2) 在不同乙二醇喷射压力下,燃烧放热始点会随着乙二醇替代率的增加而逐渐推迟。主要是因为替代率增大时,乙二醇雾化蒸发向周围环境吸收的热量就越多,进而降低了缸内温度,使得预混合燃烧的过程缓慢。

(3) 乙二醇替代率一定时,缸内峰值压力随着乙二醇喷射压力的增加略微下降,总体上无明显差别。由此可见,在喷射压力为5MPa时,乙二醇雾化效果较好,进一步增加喷射压力对燃烧性能的影响较小。



(a)EGP=5MPa

(b)EGP=10MPa

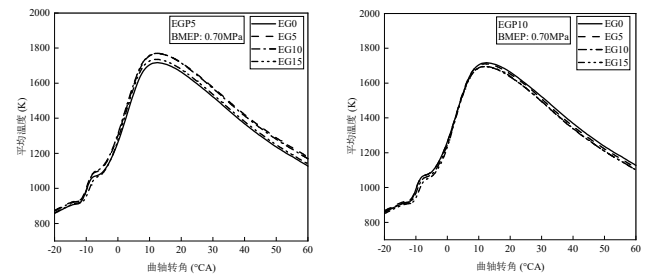


(c)EGP=20MPa

图2 乙二醇替代率和喷射压力对缸内压力和瞬时放热率影响

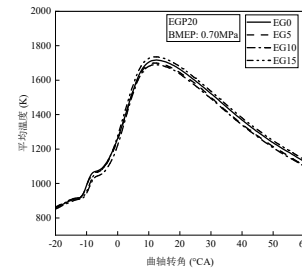
2.1.2 缸内平均温度

如图3所示,随着乙二醇替代率的增加EGP5的缸内峰值温度先增加再减小。其中替代率为EG0的缸内峰值温度最小;缸内平均温度也随喷射压力的增加而增加,其中替代率为EG15的峰值温度最大,EG10的峰值温度最小,这主要影响也来自于乙二醇的高汽化潜热,降低进气温度的同时也降低缸内燃烧温度,从而导致放热量减少,所以在低替代率时缸内平均温度会先降低。随着替代率增加,由于乙二醇的高含氧量对燃烧放热的促进作用,缸内平均温度呈现上升状态。



(a)EGP=5MP

(a)EGP=10MP



(a)EGP=20MP

图3 乙二醇替代率和喷射压力对缸内平均温度的影响

2.1.3 滞燃期和燃烧持续期

如图4所示,随着乙二醇喷射压力的增加,滞燃期基本不变,燃烧持续期略微缩短;当乙二醇喷射压力一定时,滞燃期会随着乙二醇替代率增加而延长,燃烧持续期大体上呈降低的趋势。因为乙二醇较高的汽化潜热值,且十六烷值高于柴油,乙二

醇的替代率增加，导致混合燃料着火性变差，且乙二醇蒸发雾化时会吸收部分热量，从而降低了进气温度，所以缸内温度也降低、滞燃期延长。此外，乙二醇混合燃料的高含氧量，在燃烧过程中将产生更多的活性自由基，进一步加快燃烧反应速度以及缸内层流火焰的传播速度^[17]。且预混燃烧在实际循环燃烧过程中的占比也增大，因此随着替代率的增加燃烧持续期缩短^[18]。

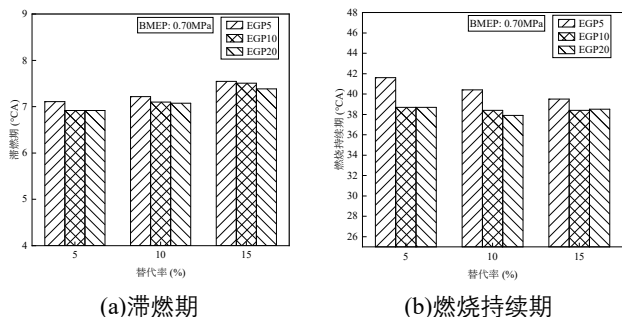


图4 不同喷射压力对滞燃期和燃烧持续期的影响

2.1.4 有效热效率

如图5所示，在相同喷射压力下，有效热效率随着乙二醇替代率的增加而降低，其中喷射压力EGP20下的有效热效率随替代率增加共降低了2.56%，喷射压力EGP5下的有效热效率降低了4.23%，且替代率为EG0至EG10之间的降幅较小，当替代率增至EG15时，降幅则较大。主要还是因为乙二醇较高的汽化潜热值，当发动机通过工质热膨胀来推动活塞做功时，由于乙二醇汽化吸热导致进气温度和缸内温度降低，进而减弱了一部分工质热膨胀做工的能力^[3]，而且替代率越大，被减弱的效果越强，因此有效热效率下降。此外，随着乙二醇替代率的增加，实际进入气缸的进气量会有所减少，过量空气系数会变小，导致燃烧不充分，所以有效热效率下降。

不同喷射压力下，可以看出EGP20和EGP10随替代率的降幅差别不大，而与EGP5之间呈现较大的差距，且有效热效率由高到低为：EGP20>EGP10>EGP5，同一替代率下EGP20的有效热效率平均比EG5高出1.6%。由此可见，在一定乙二醇替代率下，喷射压力越高，有效热效率越大。这主要是因为高压喷射下使得燃料贯穿距离长、雾化效果好，有助于充分燃烧，由此提高有效热效率。

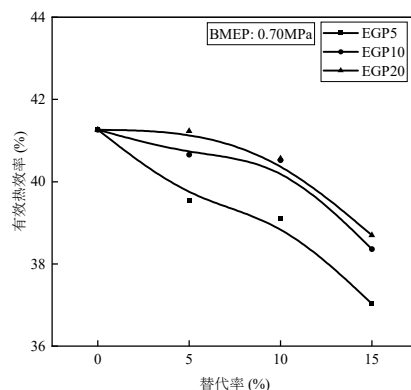


图5 不同喷射压力对有效热效率的影响

2.1.5 压力升高率

如图6所示，当喷射压力为5MPa时，随着乙二醇替代率的增加，主喷阶段的峰值压力升高率明显提升，最大达到0.373MPa/°CA，对应曲轴转角也明显前移。主要是因为乙二醇含氧量高、自燃点较低，进而更容易压缩自燃，导致发动机工作粗暴、振动噪声较大，使用寿命缩短。

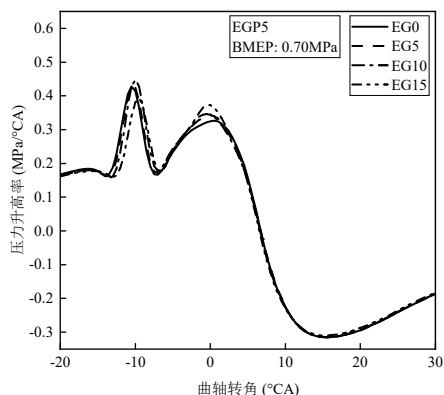


图6 EGP5下不同替代率对有效热效率的影响

2.2 排放特性

2.2.1 NOx 排放

如图7所示，给出了在不同喷射压力下的NOx排放随替代率的变化情况。从图中可以看出：三种喷射压力下的NOx排放量变化趋势皆随着替代率的增加而下降，其中，EGP10和EGP20的降幅基本一致且高于EGP5的降幅。并且喷射压力EGP5下的NOx排放量随替代率增加共降低了23.9%，喷射压力EGP10下的有效热效率降低了20.3%。NOx的生成总量主要与燃烧温度、氧气浓度和反应时间有关，由于乙二醇较高汽化潜热的性质，决定了其喷入气道后会因为蒸发汽化吸收热量，而降低缸内燃烧的温度，一定程度上削弱了燃烧能力，因此NOx排放量会逐渐降低。与此同时，随着乙二醇替代率的增加，进气量会减少，进而减少了缸内的氧浓度^[19]，

所以 NO_x 排放量也随之降低。此外，随乙二醇替代率的增加，燃烧持续期会而略微缩短，导致燃烧反应时间缩短，从而进一步降低 NO_x 的排放量。

在同一替代率下，采用 5MPa 的喷射压力下的 NO_x 排放量远高于 10MPa 和 20MPa，其中 EGP5 的 NO_x 排放量平均比 EGP20 高出 3.7%，而 EGP10 和 EGP20 基本一致。主要是源于喷射压力对燃料贯穿距产生的影响，由于 EGP5 相比 EGP10 和 EGP20 的贯穿距离较短，所以 EGP5 的索特直径大于 EGP10 和 EGP20，以至于油滴比表面积小，从而 EGP5 单位时间内汽化吸收的热量相对而言较少，对缸内燃烧温度的削弱作用较小。

综上所述，当乙二醇替代率一定时，提高乙二醇的喷射压力可以一定程度上减少 NO_x 的排放，但在同等条件下，喷醇压力过高对降低 NO_x 排放量并无明显效果，所以应该选择一个相对合适的喷醇压力，以提高经济性和动力性的同时达到节能减排的目的。

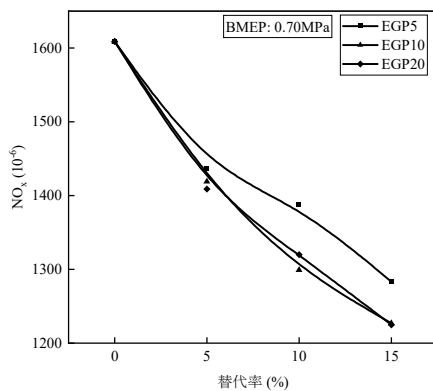


图 7 不同替代率及喷醇压力下的 NO_x 排放

2.2.2 超细颗粒物排放

(1) 不同粒径的颗粒物数量浓度

如图 8 所示，在不同乙二醇喷射压力下，随着乙二醇替代率的增加，超细颗粒物的数量浓度皆呈现增大的趋势，但数量浓度的最大值所对应的粒径会出现减小的趋势。主要是由于乙二醇替代率增加的同时会降低发动机的有效热效率，所以输出功率基本一致；但这会导致当量总燃油消耗量上升，所以缸内具有较多不完全燃烧的燃油。此外，由于乙二醇具有较高的汽化潜热，随着替代率的增加，汽化所吸收的热量更多，使得缸内温度较低、燃烧条件变差，从而不完全燃烧加剧，进一步增加了颗粒物的数量浓度。在相同乙二醇替代率下，峰值数量浓度依次为：EGP5>EGP10>EGP20。主要是因为较低的喷射压力^[20]燃油雾化、汽化质量变差，导致燃烧不充分，超细颗粒物的数量浓度也相对较高。

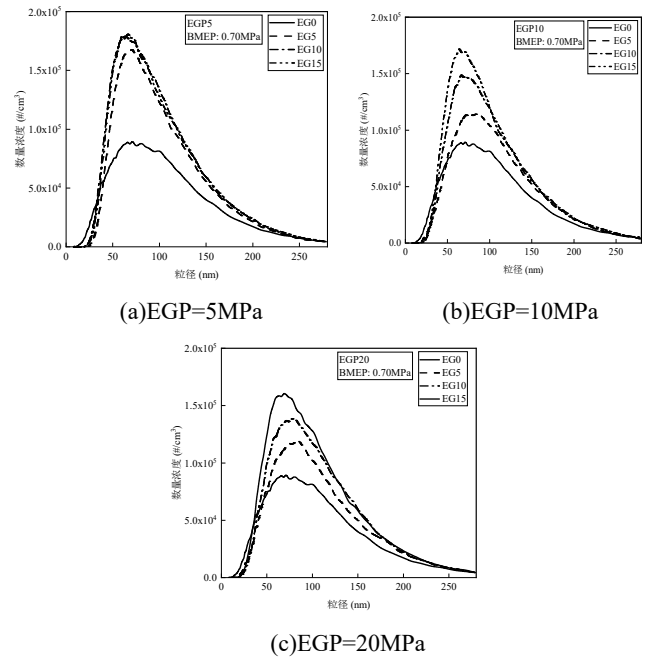


图 8 不同喷醇压力下的超细颗粒物数量浓度

(2) 超细颗粒物的总数

如图 9 所示，在 EGP5 下，超细颗粒物的总数随替代率呈现先增后减的趋势，而在 EGP10 和 EGP20 下，超细颗粒物的总数随乙二醇替代率的增加而增加。由于乙二醇较大的汽化潜热和运动粘度，雾化蒸发以及缸内燃烧条件较严苛，所以过大的乙二醇替代率会使得缸内温度降低，导致不完全燃烧，从而增加未燃烧的大粒径燃料分子，同时也会使得超细颗粒物的总数下降。

其中，EGP5 下的超细颗粒物总数远大于 EGP10 和 EGP20，而 EGP10 和 EGP20 的超细颗粒物总数基本相同。较大的喷射压力有利于油滴的破碎，从而提高乙二醇的雾化质量并使得燃料充分混合，所以 EGP10 和 EGP20 的超细颗粒物总数低于 EGP5。

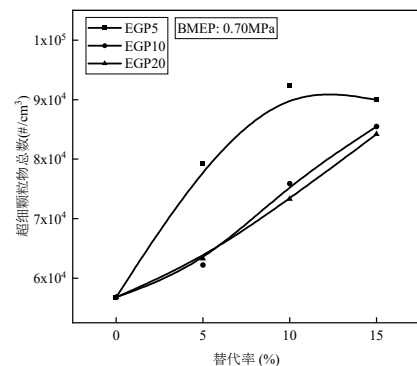


图 9 不同喷醇压力下的超细颗粒物总数

3 结论

(1) 在相同喷射压力 (EGP) 下, 随着乙二醇替代率的增加, 缸内峰值压力和峰值放热率均呈略微下降再上升的变化趋势, 而缸内峰值温度和有效热效率随着乙二醇替代率的增加而先增加再降低, 燃烧持续期略微缩短; 与此同时, 随着替代率的增加, NO_x 排放量反而下降, 而超细颗粒物的数量浓度随之增大, 且峰值浓度所对应的粒径呈减小的趋势。

(2) 在不同喷射压力 (EGP) 下, 燃烧放热始点会随着乙二醇替代率的增加而逐渐推迟, 缸内平均温度随曲轴转角的变化规律基本一致; 随着乙二醇喷射压力的增加, 缸内平均温度也随之增加, 滞燃期基本不变, 燃烧持续期略微缩短。与此同时, NO_x 排放量随着替代率的增加而下降, 且 EGP10 和 EGP20 的降幅高于 EGP5 的降幅。

(3) 在一定乙二醇替代率下, 随着 EGP 的增加, 缸内峰值压力略微下降, 而有效热效率越大, 有效热效率由高到低为: EGP20>EGP10>EGP5, EGP20 的有效热效率平均比 EGP5 高出 1.6%; 提高乙二醇的喷射压力可以一定程度上减少 NO_x 的排放, 但喷射压力过高对降低 NO_x 排放量并无明显效果; 与此同时, EGP5 下的超细颗粒物总数远大于 EGP10 和 EGP20, 而 EGP10 和 EGP20 的超细颗粒物总数基本相同。

综上所述, 当乙二醇喷射压力为 20MPa 时, 可以有效提高发动机效率, 降低 NO_x 和颗粒物的排放, 所以选择高压喷射乙二醇对提高发动机的动力性以及改善燃烧和降低排放具有重大意义。

参考文献:

[1] 全国机动车保有量达 4.17 亿辆 驾驶人超过 5 亿人 [EB/OL]. (2023-1-11)
https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/11/content_5736278.htm

[2] 英国石油公司. BP 世界能源统计年鉴[M]. 2021.

[3] 韦泽富. 气道高压喷射乙二醇/直喷柴油双燃料发动机的燃烧与排放特性研究[D]. 长安大学, 2021.

[4] 陈英杰, 蒙小聪, 朱赞等. 双燃料发动机的燃烧和排放特性研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2020, 45(02): 351-358.

[5] Ambarita H. Performance and emission characteristics of a small diesel engine run in dual-fuel (diesel-biogas) mode[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2017, 10: 179-191.

[6] 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[J]. Fuel Processing Technology, 2020, 199: 106289.

[7] [Di Blasio G, Belgiorno G, Beatrice C. Effects on performances, emissions and particle size distributions of a dual fuel (methane-diesel) light-duty engine varying the compression ratio[J]. Applied Energy, 2017, 204: 726-740.

[8] Du W, Zhang Q, Zhang Z, et al. Effects of injection pressure on ignition and combustion characteristics of impinging diesel spray[J]. Applied Energy, 2018, 226: 1163-1168.

[9] Aalam C S, Saravanan C G, Anand B P. Impact of high fuel injection pressure on the characteristics of CRDI diesel engine powered by mahua methyl ester blend[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 106: 702-711.

[10] Yao C, Hu J, Geng P, et al. Effects of injection pressure on ignition and combustion characteristics of diesel in a premixed methanol/air mixture atmosphere in a constant volume combustion chamber[J]. Fuel, 2017, 206: 593-602.

[11] Pandian M, Sivapirakasam S P, Udayakumar M. Investigation on the effect of injection system parameters on performance and emission characteristics of a twin cylinder compression ignition direct injection engine fuelled with pongamia biodiesel-diesel blend using response surface methodology[J]. Applied Energy, 2011, 88(8): 2663-2676.

[12] 王斌, 姚安仁, 姚春德, 等. 柴油喷射压力对柴油/甲醇二元燃料发动机燃烧和排放影响的试验研究[J]. 内燃机工程, 2017, 38(03): 23-28.

[13] Chen H, Zhang P, Liu Y. Investigation on combustion and emission performance of a common rail diesel engine fueled with diesel-ethylene glycol dual fuel[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 142: 43-55.

[14] 张光超, 伏广功, 蒋齐秦, 等. 柴油机替代燃料的喷雾特性研究综述[J]. 内燃机与配件, 2017(04): 27-29.

[15] 袁志远, 崔明利, 李雪松, 等. 缸内直喷发动机燃油喷射压力对闪沸喷雾特性的影响研究[J]. 车用发动机, 2020(05): 11-14.

[16] 马玉坡, 刘福水, 何旭, 等. 进气道喷射乙醇柴油引燃的燃烧特性可视化[J]. 内燃机学报, 2014, 32(04): 296-301.

[17] 冯是全, 胡以怀, 金浩. 甲醇柴油双燃料发动机的燃烧特性分析[J]. 环境工程, 2016, 34(S1): 593-596.

[18] 王辉, 姚安仁, 王斌, 等. 船舶柴油机掺烧甲醇对碳烟和氮氧化物排放影响的试验分析[J]. 船海工程, 2019, 48(04): 68-72.

[19] 董诚, 申立中, 封其超. 天然气-柴油双燃料发动机 RCCI 燃烧性能研究[J]. 车用发动机, 2019(02): 72-76+84.

[20] Lin QJ, Tay KL, Yu WB, et al. Effects of polyoxymethylene dimethyl ether 3 (PODE₃) addition and injection pressure on combustion performance and particle size distributions in a diesel engine[J]. Fuel, 2021, 283.