

甲醇替代率对两段喷射 F-T 柴油/甲醇双燃料发动机排放的影响

陈尧, 王铁, 陈东东, 乔天佑, 杨甜甜
(太原理工大学 机械与运载工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 以一台高压共轨柴油机为基础,在进气歧管处加装甲醇喷射系统,同时缸内两段直喷(预喷+主喷)煤制费托合成柴油(F-T柴油),搭建 F-T柴油/甲醇(F/M)双燃料发动机试验台架,在转速为 2 000 r/min,负荷为 25%,50%,75%和 100%的工况下分别探究甲醇替代率对发动机排放性能的影响,同时为实现 F-T柴油/甲醇反应活性控制压燃模式探寻理论基础。研究表明:在中高负荷下,F/M双燃料发动机的燃油经济性较好;与单燃料压燃模式相比,F/M双燃料燃烧模式的 HC,CO,Soot,甲醇和甲醛排放量均有所增加,且随着甲醇替代率的增大而增加,随着负荷的升高而下降;CO₂,NO_x和 NO 的排放量随着甲醇替代率的增大而减小,随着负荷的升高而增加;NO₂的排放量随着甲醇替代率和负荷的增大而增加。

关键词: F-T柴油; 甲醇; 两段喷射; 双燃料; 替代率; 排放特性

中图分类号: TK6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)02-0159-08

0 引言

柴油机工作时会产生大量的碳烟、NO_x等污染物,通常须加装后处理系统以减少其污染物排放。国VI排放标准和“双碳”战略的提出,表明柴油机仅仅依赖后处理系统将逐渐无法应对日益严苛的排放法规。寻求多元的清洁代用燃料,追求高效的清洁燃烧方式,是从根源上减少柴油机有害物排放的有效途径。

作为煤炭资源大国,发展煤制燃料可以促进煤炭能源的低碳化合理应用,缓解我国对石油进口依存度的压力,提高国家能源安全。煤制费托合成柴油(Fischer-Tropsch diesel,简称 F-T柴油)具有较高的十六烷值和良好的燃烧性能,由煤炭深加工所得,可在不改变普通柴油机结构的情况下代替 0#柴油使用。与燃用 0#柴油时相比,燃用 F-T柴油时的缸内燃烧压力峰值和压力升高速率均有所降低,燃用 F-T柴油能使 CO、碳烟和 NO_x等污染物的排放量降低^[1]。当不同种类的含氧燃料与 F-T柴油掺混后,能改善燃料燃烧质量,降低碳烟和 NO_x的排放量^[2]。F-T柴油与聚甲氧基二甲醚(PODE)掺混燃用后,在低负荷工况下,降低 CO和碳烟排放量的效果比较明显^[3]。由此可知,选用合

适的含氧燃料与 F-T柴油结合应用可有效优化发动机的排放性能。在诸多含氧燃料中,甲醇是一种清洁代用燃料,可通过煤炭大规模生产,具有成本低、辛烷值和含氧量较高等优点,将其应用于柴油机,可提高发动机燃烧质量,且其单位碳排放较柴油更低,对降低污染物排放十分有效^[4]。与 F-T柴油掺混时,随着甲醇体积分数的上升,发动机的点火延迟期加长,压升速率加快,燃烧起始点推迟,能够改善发动机性能^[5]。

柴油与甲醇难以互溶,须加助溶剂才能配制形成掺混燃料,为使二者的结合应用更加广泛,内燃机行业从业者们不断探寻不同的燃烧方式,提出了柴油/甲醇双燃料燃烧模式。该燃烧模式通过进气道喷射低反应活性的甲醇燃料,缸内直喷高反应活性的柴油燃料,实现二者混合燃烧,其能降低碳烟和 NO_x排放量的显著优势已得到证明^[6]。柴油/甲醇双燃料发动机能改善燃烧状况,增加有效传热,提高了燃料燃烧效率^[7]。与普通单燃料压燃发动机相比,柴油/甲醇双燃料发动机的碳烟,CO₂,NO_x,NO 和非甲烷碳氢化合物的排放量均有不同程度的降低,但甲醇和甲醛的排放量有所增加^[8-11]。

收稿日期: 2022-04-28。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51805353);山西省研究生创新项目(2021Y165)。

通信作者: 王铁(1957-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为混合动力系统、新能源汽车和先进汽车设计。

E-mail: wangtie57@163.com

目前,对于 F-T 柴油/甲醇(F/M)双燃料发动机的研究较少,对该发动机的性能以及不同甲醇替代率下的排放特性鲜有深入探究。本文基于 F/M 双燃料发动机平台,通过调节甲醇喷射脉宽,研究不同甲醇替代率与 F/M 双燃料发动机排放特性的关系,为 F-T 柴油与甲醇结合应用实现反应活性控制压燃模式 (Reactivity Controlled Compression Ignition, RCCI) 以及后期优化提供参考。

1 试验设备及方法

1.1 试验设备

采用某高压共轨柴油机,在进气歧管处加装 4 个 24 V 甲醇喷嘴,甲醇燃料采用进气歧管喷射方式与缸内 F-T 柴油形成混合气,喷射压力为 0.35 MPa,通过专用电控单元(ECU)控制发动机的喷油参数,搭建 F-T 柴油/甲醇双燃料发动机试验台架。基于该台架进行甲醇替代率对 F/M 双燃料发动机排放特性影响的探究试验。图 1 为台架示意图。

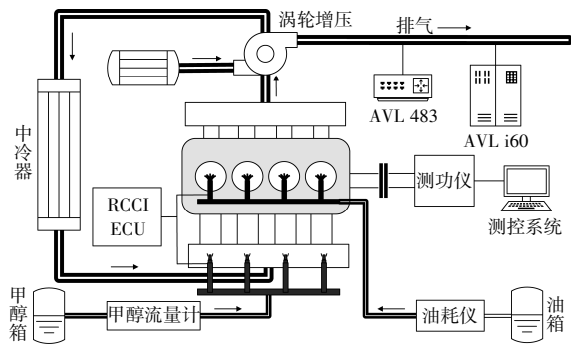


图 1 F/M 双燃料发动机台架示意图

Fig.1 Schematic diagram of F/M dual-fuel engine test stand

试验所用测试设备主要有:ET4000 型发动机测控系统、160 kW 电力测功机、SES-AM i60 FT 型多组份尾气排放分析仪和 Micro Soot Sensor 483 型微碳烟排放测试系统。

发动机主要规格见表 1。所用燃料的典型特性见表 2。

表 1 发动机主要规格

Table 1 The primary specifications of the engine

参数	数值
排量/L	2.499
缸径×冲程/mm×mm	92×94
气缸数/个	4
压缩比	16:1
最大转矩(N·m)/转速(r/min)	320/1 300~2 800
最大输出功率/kW	85

表 2 燃料的典型特性

Table 2 The typical characteristics of fuel

理化特征	F-T 柴油	甲醇
十六烷值	74.8	<5
低热值/MJ·kg ⁻¹	43.9	19.7
密度(20℃)/g·cm ⁻³	0.76	0.81
汽化潜热/kJ·kg ⁻¹		1 178
H 与 C 物质的量之比	2.15	0.33
氧质量分数/%	0	50

1.2 试验方法

采用常规 F-T 柴油和纯度为 99% 的甲醇燃料,选取柴油机最大转矩转速(2 000 r/min),分别在 25%, 50%, 75% 和 100% 的负荷下开展探究试验。先进行单燃料压燃模式的试验,记录甲醇替代率为 0 时的各项排放数据并以此作为对比参照。此后打开甲醇供给系统,利用甲醇泵实现甲醇燃料的进气道低压喷射,通过调节其喷射脉宽达到不同替代率要求,缸内直喷 F-T 柴油进行引燃,实现双燃料燃烧模式,待发动机稳定运行后记录该组试验数据,以此方法依次进行不同甲醇替代率下的排放性能试验,记录各项排放试验数据。需要说明的是,为了探究在现有柴油机上直接加装甲醇喷射系统进行燃烧的可行性,缸内直喷的策略为两段喷射策略,即原机的预喷+主喷,喷射时刻和原机保持一致,根据循环油量进行调节。为了保证发动机运行的稳定性,本试验的甲醇替代率为 0~50%,试验的工况信息如表 3 所示。

表 3 试验工况信息

Table 3 Experimental operating conditions information

负荷/%	甲醇替代率/%
25	0, 20, 30, 40, 50
50	0, 10, 20, 30, 40, 50
75	0, 10, 20, 30, 40, 50
100	0, 10, 20, 30, 40

注:在 25% 负荷下,当甲醇替代率为 10% 时,缸内燃烧不稳定,甲醇替代率无法稳定控制在 10%,故在本试验中不采用此工况;在 100% 负荷下,当甲醇替代率为 50% 时,缸内燃烧不稳定,故该负荷下的最大甲醇替代率为 40%。

将一次循环下喷入的甲醇燃烧供能占该循环总燃料燃烧能量的比值定义为甲醇替代率 λ_M , λ_M 的计算式为

$$\lambda_M = \frac{Q_M L_M}{Q_M L_M + Q_F L_F} \times 100\% \quad (1)$$

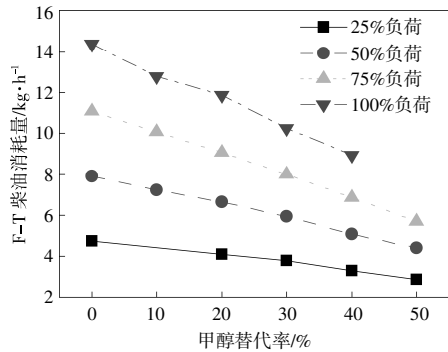
式中: Q_M 为甲醇的低热值, $Q_M = 19.7 \text{ MJ/kg}$; L_M 为甲

醇喷射量,kg/h; Q_F 为 F-T 柴油的低热值, $Q_F=43.9$ MJ/kg; L_F 为 F-T 柴油喷射量,kg/h。

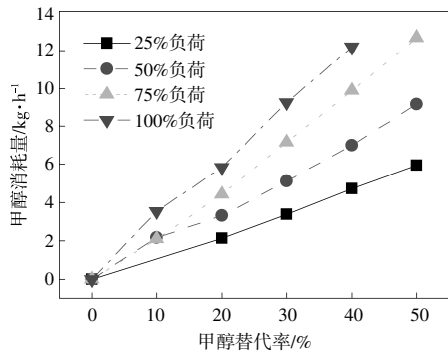
2 结果分析

2.1 燃油经济性分析

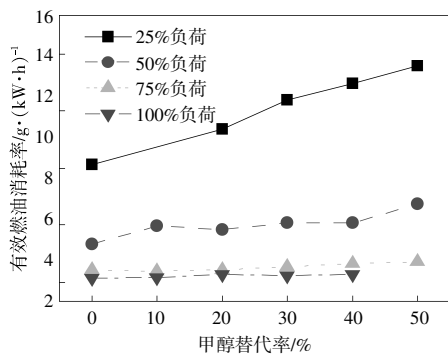
不同负荷下 F-T 柴油消耗量、甲醇消耗量和有效燃油消耗率随甲醇替代率变化如图 2 所示。由图 2 可知:随着甲醇替代率的增大,F-T 柴油消耗量逐渐减小,而甲醇消耗量逐渐增加;在同一甲醇替代率下,F-T 柴油和甲醇消耗量均随着负荷的上升而增加;随着甲醇替代率的增大,有效燃油消耗率逐渐增加,但在中高负荷(负荷>50%)下,变化幅度较小,在 100%负荷下,当替代率从 0 增加



(a) F-T 柴油消耗量



(b) 甲醇消耗量



(c) 有效燃油消耗率

图 2 燃油经济性
Fig.2 Fuel economy

至 40%时,有效燃油消耗率仅增加了 1.8 g/(kW·h);在同一甲醇替代率下,有效燃油消耗率随着负荷的上升而减小,表明燃油经济性有所提升。

由 F/M 双燃料发动机的性质可知,作为第二燃料的甲醇加入燃烧后将提供部分动力,使得在工况不变的情况下,F-T 柴油的供油量将有所降低,形成“醇进油退”的趋势。因此,在同一工况下,随着甲醇替代率的上升,F-T 柴油消耗量和甲醇消耗量呈此消彼长的变化规律。在此规律下,当负荷>75%时,有效燃油消耗率较小负荷工况更低,并且随着甲醇替代率的增加,其增加幅度极小,即有效燃油消耗量几乎不变,但成本较为低廉的甲醇逐量增加,不断代替了 F-T 柴油,使得在满足动力性的同时降低了燃料成本,提高了发动机的经济性,从而表明 F/M 双燃料发动机更适宜在中高负荷下运行。

2.2 常规排放分析

2.2.1 HC 排放特性

不同负荷下甲醇替代率对 HC 排放量的影响如图 3 所示。从图 3 可以看出:随着甲醇替代率的增加,HC 排放量逐渐增加,在高负荷工况下,HC 排放量的增加相对较缓;当负荷为 25%,甲醇替代率为 0~40%时,HC 排放量从 3.13×10^{-5} 增加到 4.78×10^{-4} ,增加了 14.3 倍;当负荷为 100%,甲醇替代率为 40%时,与单燃料压燃模式(甲醇替代率为 0)相比,HC 排放量增加了 2.2 倍;在同一甲醇替代率下,随着负荷的升高,HC 排放量逐渐降低,在 30%的甲醇替代率下,当负荷为 25%时,HC 排放量为 2.83×10^{-4} ,当负荷为 100%时,HC 排放量仅为 7.65×10^{-5} 。

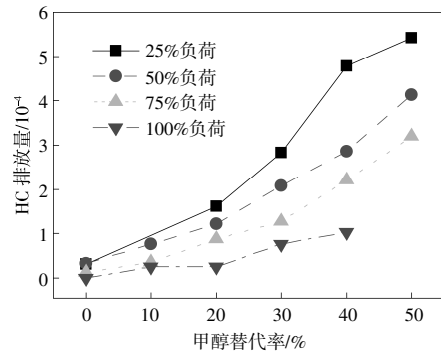


图 3 HC 排放特性

Fig.3 Characteristics of HC emissions

在低负荷下,由 F-T 柴油的消耗量可知,此

时所需供油量较少,随着甲醇替代率的升高,甲醇汽化吸热的影响逐渐增大,使缸内温度降低,破坏了反应链,延长了滞燃期,不利于 HC 氧化;此外,进气冲程的燃料燃烧不完全即以未燃形式被直接排出缸外,导致发动机的 HC 排放量增多。当负荷增大时,有效燃油消耗率降低,此时发动机处于较为经济的运行区间,燃料的燃烧质量有所改善,甲醇的汽化冷却效应得到弱化,缸内燃烧温度较高,燃烧更加充分,使得缸内壁面的温度升高,且存在更大面积的高温区域^[12],促进了 HC 的氧化。因此,在同一甲醇替代率下,随着负荷的升高,HC 排放量逐渐降低。

2.2.2 CO 排放特性

不同负荷下甲醇替代率对 CO 排放量的影响如图 4 所示。由图 4 可知:随着甲醇替代率的增加,CO 排放量随之升高;在 25%的负荷下,与单燃料压燃模式相比,当甲醇替代率分别 20%, 30%,40%,50%时,CO 排放量分别增加了 13.5 倍, 22.7 倍,32.9 倍,39.1 倍;在同一甲醇替代率下,随着负荷增大,CO 排放量随之降低,当甲醇替代率为 40%时,100%负荷下的 CO 排放量较 25%负荷降低了 39.7%。

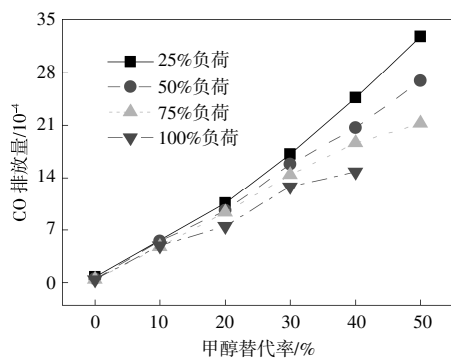


图 4 CO 排放特性

Fig.4 CO emission characteristics

甲醇汽化所产生的吸热效应会降低混合气温度,使缸内出现低温燃烧,随着甲醇替代率升高,甲醇消耗量增大,不断增加的甲醇使其吸热效应增强,混合气的燃烧效果变差,并且甲醇能将活跃的自由基 OH 暂时化合为相对不活跃的 H₂O₂^[13],不利于 CO 的进一步氧化,导致其排放量呈现逐步升高的情况,且在低负荷下尤为明显。当负荷升高时,混合气燃烧质量提高,有足够的条件使 CO 进一步氧化,使得 CO 的排放量较低,负荷降低。

2.2.3 Soot 排放特性

不同负荷下 Soot 排放量随甲醇替代率的变化如图 5 所示。由图 5 可知:随着甲醇替代率的增加,Soot 排放量随之增加,且在中高负荷下(负荷>50%)增幅较大;当甲醇替代率从 0 增加至 50%时,25%负荷下的 Soot 排放量增加了 27%,75%负荷下的 Soot 排放量增加了 144%;在同一替代率下,当负荷增大时,Soot 排放量降低,但是,当替代率小于 40%时,相较于 75%负荷,100%负荷下的 Soot 排放量相对较大。

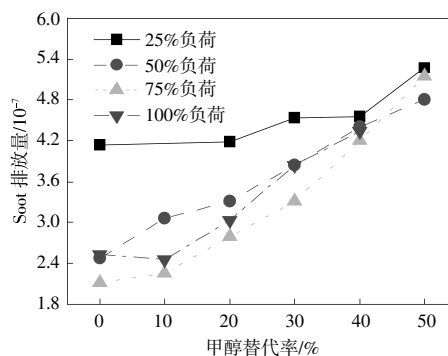


图 5 Soot 排放特性

Fig.5 Soot emission characteristics

随着甲醇替代率的增加,逐量增加的甲醇占据了一部分进气流量,使得混合气的氧含量有所降低;此外,低负荷下的涡轮增压器速度和空气输入速度较低,进一步降低了混合气的氧含量^[14],缺氧环境致使燃料燃烧不完全,导致 Soot 生成增多。与此同时,预喷过程中缸内温度升高,部分甲醇先行燃烧,消耗了空气中的一些氧气,到了主喷阶段,喷入缸内的 F-T 柴油在燃烧时出现局部高温缺氧裂解,并脱氢变成以碳为主要成分的微粒,促进了 Soot 的生成。随着甲醇替代率的增加,甲醇消耗量逐渐增加,缺氧问题更加严重,因此, Soot 排放量随着甲醇替代率的增加而增加。随着负荷增大,进气压力升高,进气流速增快,混合气的氧含量有所上升,同时有效燃油消耗率不断减小,发动机的经济性提高,缸内燃烧状况得到改善,使得同一甲醇替代率下,较低负荷时 Soot 排放量有所降低。

由前人研究^[10]可知,柴油/甲醇双燃料发动机的 Soot 排放量随着甲醇替代率的增大而下降,这与本试验结论有所不同,究其原因,F-T 柴油比 0# 柴油的空燃比更大,本试验没有进行 F-T 柴油的

燃烧标定,因而上述的缺氧因素对 F-T 柴油燃烧质量的影响更加明显;同时,本试验采用两段喷射,由不同工况自适应喷油策略,证明 F/M 双燃料发动机的燃烧性能和排放特性受喷油策略的影响。以此为参考,在此后的工作中增加混合气氧含量以及控制适当的甲醇喷入量和喷入角度将是 F/M 双燃料发动机优化 Soot 排放的有效途径之一,同时,重新标定匹配的喷油策略才能实现 F-T 柴油/甲醇 RCCI 燃烧模式。

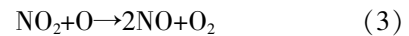
2.2.4 NO_x 排放特性

不同负荷下 NO_x,NO 和 NO₂ 排放量随甲醇替代率的变化如图 6 所示。由图 6 可知:随着甲醇

替代率的增加,NO_x 和 NO 排放量均有所下降,NO₂ 排放量逐渐上升;在 25%的负荷下,当甲醇替代率从 0 升至 50%时,NO_x 和 NO 排放量达到最大降幅,分别为 38.6%和 95.8%,NO₂ 排放量升高了 8.4 倍;在同一甲醇替代率下,随着负荷增大,NO_x,NO 和 NO₂ 排放量均逐渐增加;当甲醇替代率为 40%时,100%负荷下的 NO_x,NO 和 NO₂ 排放量分别比 25%负荷下增加了 1.3 倍,7.9 倍和 0.8 倍。

相较于 F-T 柴油,甲醇反应路径简单,缸内混合气的燃烧反应速率更快,因而使高温持续时间缩短,且燃烧温度峰值降低,不具备生成 NO_x 所需的高温 and 高温持续时间,降低了 NO_x 的生成,因而甲醇替代率越高,对 NO_x 的减排效果越明显。在同一甲醇替代率下,随着负荷升高,甲醇冷却效应减弱,缸内温度升高,有利于 NO_x 的生成,故 NO_x 排放量呈现升高趋势。

研究表明^[15],在双燃料模式下,发动机中会发生如下反应:



根据捷式反应(Zeldovich Reaction)机理,F-T 柴油燃烧过程中 NO 的生成过程为



作为含氧燃料,甲醇的燃烧会产生大量的 HO₂,因此,随着甲醇替代率的增加,甲醇消耗量增加,即生成 HO₂ 的反应物增加,进而增加生成物 HO₂,推动了 NO 向 NO₂ 的转化;由于式(3)的发生受温度影响大,甲醇的汽化潜热降低了缸内燃烧温度,抑制了该反应的进行,不利于 NO₂ 向 NO 的转化^[16],因此,随着甲醇替代率的增加,NO 和 NO₂ 的排放量呈现此消彼长的趋势。随着负荷上升,缸内进气量增加,促进了式(4),(5)反应的进行,使 NO 排放量有所增加;同时,甲醇燃料喷射量不断增加,进一步促进了反应(2),使 NO₂ 排放量增加;此外,高负荷下的燃烧速率加快,高温燃烧区域变大,燃烧状况改善带来的温度增加高于甲醇的冷却降温,使缸内温度升高,从而抵消了对反应(3)的抑制,使 NO 排放量增加。因此,随着负荷上升,NO 和 NO₂ 排放量均随之增加。

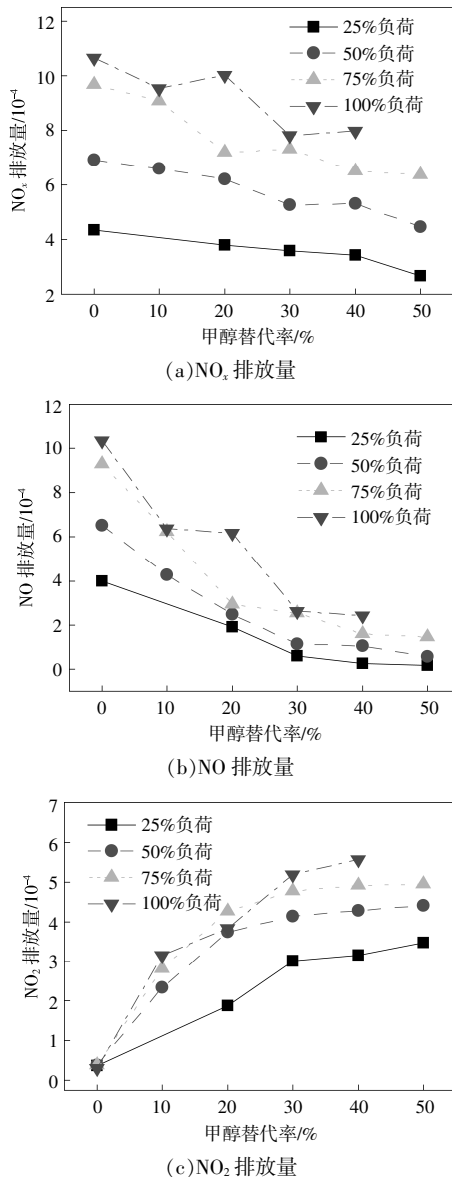


图 6 NO_x 排放特性

Fig.6 Characteristics of NO_x emissions

2.3 非常规排放分析

2.3.1 CO₂ 排放特性

不同负荷下甲醇替代率对 CO₂ 排放量的影响如图 7 所示。由图 7 可知:随着甲醇替代率的增加,CO₂ 排放量逐渐下降,且 4 种负荷下的排放差异较大;在 25%的负荷下,当甲醇替代率为 50%时,CO₂ 排放量比单燃料压燃模式降低了 10.7%;在 100%的负荷下,当甲醇替代率逐步增加至 40%时,CO₂ 排放量比单燃料压燃模式降低了 8.9%;在同一甲醇替代率下,随着负荷的升高,CO₂ 排放量大幅增加,当甲醇替代率为 40%时,25%和 100%负荷下的 CO₂ 排放量分别为 4.07×10^{-5} 和 7.61×10^{-5} 。

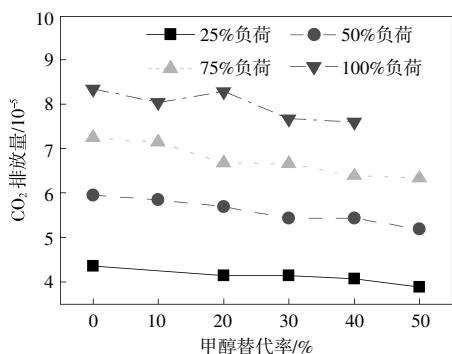


图 7 CO₂ 排放特性

Fig.7 Characteristics of CO₂ emissions

与柴油相比,甲醇的含碳量较低,仅为柴油的 43.5%,甲醇定热燃烧的 CO₂ 排放量低于柴油。因此,随着甲醇替代率的增加,甲醇消耗量和 F-T 柴油消耗量此消彼长,不断增多的甲醇将减少 F-T 柴油喷射量,有利于降低 CO₂ 排放量。作为发动机燃料完全燃烧后的终产物之一,燃烧反应中间产物的后期氧化效果会影响 CO₂ 的排放量,由前文 CO 的排放特性可知,甲醇的加入不利于中间产物 CO 的进一步氧化,会阻碍其氧化生成 CO₂,因此,随着甲醇替代率的升高,CO₂ 排放量下降。当负荷增大时,发动机燃烧状况有所改善,缸内温度升高,甲醇对于 CO 氧化的抑制作用消失,中间产物的进一步氧化效果得到改善,因而有更多的 CO 向 CO₂ 转化,故随着负荷升高 CO₂ 排放量增加。

2.3.2 甲醇排放特性

不同负荷下甲醇替代率与甲醇(MeOH)排放量的关系如图 8 所示。由图 8 可知:随着甲醇替代

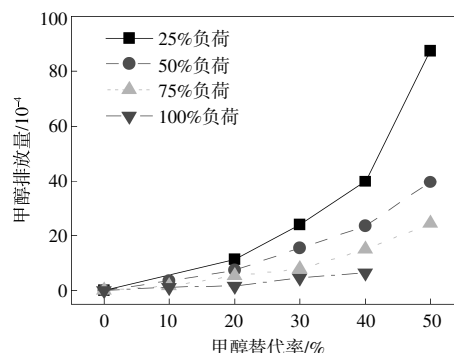


图 8 甲醇排放特性

Fig.8 Characteristics of methanol emissions

率的增加,甲醇排放量均有不同程度的增加,且低负荷(<50%)、高替代率(>30%)下的甲醇排放量增加幅度更大;当甲醇替代率从 0 升至 40%时,25%负荷下的甲醇排放量增加了 999 倍,100%负荷下的甲醇排放量增幅仅为 226 倍;在同一甲醇替代率下,随着负荷升高,甲醇排放量逐渐下降,当甲醇替代率为 40%时,100%负荷下的甲醇排放量比 25%负荷下降了 83.9%

在单燃料压燃模式下,25%、50%、75%和 100%负荷下的甲醇排放量分别为 3.9×10^{-6} 、 4.3×10^{-6} 、 3.2×10^{-6} 和 2.8×10^{-6} ,由此可见,柴油本身燃烧后产生的甲醇极少,因此,F/M 双燃料模式发动机的甲醇排放主要为未燃甲醇。随着甲醇替代率的增加,甲醇消耗量随之增加,逐渐加强的甲醇吸热效应会使缸内温度急剧下降,火焰传播速率降低,部分甲醇燃烧不完全或未参与燃烧即被排出,使得甲醇排放量增多。随着负荷增大,两种燃料的消耗量均有所增加,混合气浓度的升高使得燃烧状态得到改善,燃烧更加充分,缸内温度升高且高过甲醇的汽化降温效应,由此改善了混合气的不完全燃烧问题,使甲醇更好地氧化分解,因此,随着负荷增大,甲醇排放量呈现降低趋势。与前文对于甲醇消耗量的分析结论相一致,证明 F/M 双燃料发动机不适宜在低负荷工况下运行。

2.3.3 甲醛排放特性

不同负荷下甲醇替代率对甲醛(HCHO)排放量的影响如图 9 所示。由图 9 可知:随着甲醇替代率的增加,甲醛排放量逐渐增加;在同一甲醇替代率下,甲醛排放量随着负荷的上升而下降;在 25%负荷下,当甲醇替代率为 50%时,甲醛排放量较单燃料压燃模式增加了 186 倍;在 100%负荷

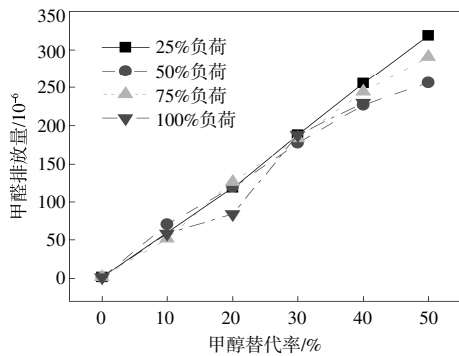
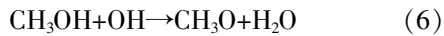


图9 甲醛排放特性

Fig.9 Characteristics of formaldehyde emissions

下,当甲醇替代率分别为10%,20%,30%和40%替代率时,甲醛排放量较单燃料压燃模式分别增加了37倍,54倍,122倍和149倍,较低负荷而言,高负荷下的甲醛排放量受甲醇替代率影响的波动较小。

双燃料模式发动机工作时,甲醇脱氢生成甲醛的反应路径为



由反应路径可知,随着甲醇替代率的增加,反应物增加,反应生成的甲醛随之增加。在低负荷下,缸内温度较低,高温区域较小,燃料燃烧不完全,阻碍了甲醇的完全氧化,由此生成大量甲醛;此外,尾气中本身包含了不断增加的未燃甲醇,低负荷下的气体交换量较小,因而尾气中的部分未燃甲醇在排气管内停留时间较长,而此时的排温并不能使甲醇完全氧化,此部分未燃甲醇也是甲醛生成的源头,由此加剧了甲醛排放。随着负荷增大,缸内燃烧温度升高,有利于甲醇的充分燃烧氧化,降低了甲醛的生成;同时,高负荷下未燃甲醇的排放量相对降低,排气温度和排气流量也逐渐增加,尾气中的未燃甲醇有条件完全氧化,从而降低了甲醛的生成,使得甲醛排放量随负荷上升而呈下降趋势。

3 结论

①两段喷射 F/M 双燃料发动机在中高负荷下的有效燃油消耗率相对较低,经济性较好。

②与单燃料压燃模式相比,两段喷射 F/M 双燃料发动机能有效降低 CO_2 , NO_x 和 NO 的排放量。

③两段喷射 F/M 双燃料发动机的 HC , CO 和 Soot 排放量随着甲醇替代率的增大而增加,随着负荷的升高而降低,其中 Soot 排放量在中高负荷下的增加幅度受甲醇替代率影响更大; NO_x 和 NO 排放量随着甲醇替代率的增大而逐渐减少,随着负荷的升高而增多,而 NO_2 排放量随着甲醇替代率和负荷的增大而增加。

④两段喷射 F/M 双燃料发动机的 CO_2 排放量随着甲醇替代率的增加而降低,随着负荷的增加而明显上升;甲醇和甲醛排放量随着甲醇替代率的增大而增加,随着负荷的升高而降低;在低负荷下,甲醇排放量较单燃料压燃模式上升幅度较大,有大量甲醇未能燃烧,表明两段喷射 F/M 双燃料发动机不适宜在低负荷工况下运行。

参考文献:

- [1] 孙万臣,张曙光,郭亮,等.柴油机燃用 F-T 合成柴油时的燃烧与排放特性分析 [J]. 汽车工程,2016,38(10):1177-1183.
- [2] 刘颖,王铁,乔靖,等.F-T 柴油掺混合氧燃料对高压共轨柴油机性能的影响 [J]. 可再生能源,2019,37(2):179-183.
- [3] 陈东东,张翠平,张瑞亮,等.F-T 柴油/PODE 混合燃料的燃烧和排放特性研究[J].可再生能源,2018,36(5):644-649.
- [4] 姚春德,危红媛,王全刚,等.柴油/甲醇二元燃料发动机的非常规排放特性研究[J].环境科学学报,2016,36(6):2201-2209.
- [5] Wu Z, Wang T, Zuo P, et al. Impact of Fischer-Tropsch diesel and methanol blended fuel on diesel engine performance[J]. Thermal Science, 2019, 23: 2651-2658.
- [6] Reitz R D, Duraisamy G. Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in internal combustion engines [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2015, 46: 12-71.
- [7] Li Y, Jia M, Chang Y, et al. Towards a comprehensive understanding of the influence of fuel properties on the combustion characteristics of a RCCI (reactivity controlled compression ignition) engine [J]. Energy, 2016, 99: 69-82.
- [8] 夏琦,姚春德,魏立江,等.柴油/甲醇组合燃烧发动机的氮氧化物排放研究[J].环境科学学报,2014,34(2):345-348.
- [9] 黄粉莲,杨群,王正江,等.甲醇替代率对柴油/甲醇反应活性控制压燃发动机性能的影响[J].内燃机工程,

- 2022, 43(1):48–57.
- [10] 刘军恒, 姚春德, 魏立江, 等. 柴油/甲醇二元燃料燃烧特性及烟度排放研究 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(11):2183–2188.
- [11] 黄粉莲, 田茂盛, 万明定, 等. 过量空气系数对柴油/甲醇 RCCI 发动机非常规排放特性的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8):52–61.
- [12] 李耀鹏. 甲醇/柴油活性控制压燃式发动机的数值研究及热力学分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [13] 许汉君, 姚春德, 徐广兰. 正庚烷-甲醇二元燃料着火的 23 步反应模型[J]. 内燃机学报, 2011, 29(5):391–397.
- [14] Peng G, Yao C, Wei L, et al. Reduction of PM emissions from a heavy-duty diesel engine with diesel/methanol dual fuel[J]. Fuel, 2014, 123:1–11.
- [15] Wei L, Yao C, Wang Q, et al. Combustion and emission characteristics of a turbocharged diesel engine using high premixed ratio of methanol and diesel fuel[J]. Fuel, 2015, 140:156–163.
- [16] 刘明宽, 陈超, 姚安仁, 等. DMCC 发动机实车工况下实现国 IV 排放的试验研究 [J]. 环境科学学报, 2019, 39(1):252–258.

The impact of methanol substitution rate on emissions of two-stage injection Fischer–Tropsch diesel/methanol dual-fuel engine

Chen Yao, Wang Tie, Chen Dongdong, Qiao Tianyou, Yang Tiantian

(College school of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Based on a high-pressure common rail diesel engine, a methanol injection system is installed at the intake manifold. A two-stage direct injection (pre-injection + main injection) of coal-to-Fischer–Tropsch (F–T) diesel is installed in the cylinder. A two-stage injection F–T diesel/methanol (F/M) dual-fuel engine test stand is built to explore the effect of different methanol substitution rates on engine emission performance at 2 000 r/min and loads of 25%, 50%, 75% and 100%. Simultaneously, the theoretical basis for realizing the F–T diesel/methanol reactivity controlled compression ignition (RCCI) mode is explored. The results indicates that the fuel economy of the F/M dual-fuel engine is better at medium and high loads. The emissions of HC, CO, Soot, methanol and formaldehyde increase in the F/M dual-fuel combustion mode compared with the single-fuel compression-ignition mode. These emissions increase with the augmentation methanol substitution rate and decrease with an increase in load. In contrast, the emissions of CO₂, NO_x and NO decrease with an increase in methanol substitution rate but increase with an increase in load. The emissions of NO₂ increase with both the rise in methanol substitution rate and load. The test results show that simply adding a methanol injection system to the intake manifold cannot achieve an efficient and low-emission RCCI combustion mode, and its fuel injection strategy needs to be calibrated.

Keywords: Fischer–Tropsch diesel; methanol; two-stage injection; dual fuel; substitution rate; emission characteristics