

甲醇/柴油双燃料发动机催化型颗粒捕集器 主动再生特性研究

黄粉莲,王永佳,万明定,周正伟,雷基林
(昆明理工大学 云南省内燃机重点实验室,昆明 650500)

Study on the Active Regeneration Characteristics of Catalytic Diesel Particulate Filter in a Methanol/Diesel Dual Fuel Engine

HUANG Fenlian, WANG Yongjia, WAN Mingding, ZHOU Zhengwei, LEI Jilin
(Yunnan Key Laboratory of Internal Combustion Engine, Kunming University of Science and
Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: A simulation model of a methanol/diesel dual fuel engine with diesel oxidation catalyst (DOC) and catalytic diesel particulate filter (CDPF) was established based on GT-Power. The effects of different methanol substitution rates, regeneration target temperatures and initial soot load on the pressure drop and temperature characteristics, complete regeneration duration and cumulative diesel consumption of the CDPF in a methanol/diesel dual fuel engine during active regeneration were investigated. The results show that the regeneration target temperatures, methanol substitution rates, and initial carbon load have significant impacts on the active regeneration of CDPF. With the increase of regeneration target temperature, the rate of pressure drop decreases. Higher regeneration target temperature can easily lead to temperature peaks in CDPF. When regeneration occurs at 650 °C, the peak temperature of CDPF is 85 °C higher than the target temperature. As the methanol substitution rate increases, the pressure drops during the regeneration process slightly increases and the peak temperature of the CDPF decreases. As the initial soot load increases, the reaction rate of CDPF accelerates, the peak temperature of the CDPF and the pressure drop rate increase, and the uniformity of the internal temperature of the carrier is improved. The increase of regeneration target temperature can significantly shorten the duration of complete regeneration and reduce the cumulative diesel fuel consumption, while the methanol substitution rate has less effect on the duration of complete regeneration. With the methanol substitution rate increases from 0% to 30%, the cumulative diesel fuel consumption for complete regeneration reduces by 27.8%. Under the condition of 600 °C regeneration target temperature, 30% methanol substitution rate, and 20 g initial soot load, high regeneration efficiency and regeneration safety with less regeneration energy consumption can be achieved.

摘要: 基于 GT-Power 构建了甲醇/柴油双燃料发动机匹配后处理系统的仿真模型,系统研究了不同甲醇替代率、再生目标温度和初始炭载量对双燃料发动机催化型颗粒捕集器(catalytic diesel particulate filter, CDPF)主动再生时压降特性、温度特性、完全再生持续时间及累计柴油消耗量的影响规律。结果表明:再生目标温度、甲醇替代率和初始炭载量均对 CDPF 主动再

收稿日期: 2024-06-24

修回日期: 2024-07-25

基金项目: 云南省基础研究计划项目(202301AT070435);兴滇英才支持计划项目

Foundation Item: Yunnan Fundamental Research Projects (202301AT070435); Yunnan Revitalization Talent Support Program Project

作者简介: 黄粉莲(1986—)女,副教授,主要研究方向为内燃机低碳和零碳燃料应用, E-mail: 429019788@qq.com;

万明定(通信作者), E-mail: 915389147@qq.com。

生具有显著影响。随着再生目标温度升高,CDPF 压降下降速率加快,较高的再生目标温度易导致 CDPF 内出现温度值“尖峰”现象,650℃再生时 CDPF 峰值温度较目标温度高 85℃。随甲醇替代率增加,再生过程压降略微增加,载体峰值温度降低。随初始炭载量增加,CDPF 主动再生反应速率加快,载体峰值温度升高,CDPF 压降下降速率增大,载体内部温度的均匀性提高。提高再生目标温度可缩短完全再生持续时间,减少累计柴油消耗量。甲醇替代率对完全再生持续时间的影响较小,甲醇替代率从 0% 增至 30%,累计柴油消耗量减少 27.8%。600℃再生目标温度、30% 甲醇替代率、20 g 初始炭载量条件下可实现高效安全再生的同时降低再生能耗。

关键词: 催化型柴油机颗粒捕集器;甲醇替代率;再生目标温度;初始炭载量;主动再生

Key words: catalytic diesel particulate filter (CDPF); methanol substitution rate; regeneration target temperature; initial soot load; active regeneration

DOI: 10.13949/j.cnki.njgc.2025.02.009

中图分类号: TK422

0 概述

碳中和愿景下,实现稳定高效燃烧和低碳、近零碳排放是内燃机发展的必由之路^[1]。传统柴油机具有动力强劲、热效率高、全生命周期碳排放低等突出优势,是交通运输、工农机械、船舶及发电机组、国防装备的主导动力^[2]。然而,随着“双碳”战略目标的提出和排放法规的日趋严苛,降低氮氧化物(nitrogen oxides, NO_x)、颗粒物(particulate matter, PM)和 CO₂ 排放已成为传统柴油机迫切需要解决的问题^[3],采用可再生碳中性燃料与高效清洁燃烧技术已成为柴油动力实现节能减排的关键技术路径。甲醇作为一种低碳、来源广、清洁可再生的碳中性液体燃料,具有含氧量高、辛烷值高、碳氢比较小、汽化潜热高、可燃极限较宽、燃烧速度快等特点,燃烧无烟无焰,燃用甲醇燃料的发动机具有热效率高和排放清洁的特性^[4-5]。通过电解水制绿氢再与捕获到的 CO₂ 结合制作的电力合成甲醇燃料,是非生物来源可再生燃料能量载体的主要部分^[6]。

与传统柴油机相比,甲醇/柴油双燃料发动机具有热效率高、NO_x 和颗粒物排放低、运行负荷范围宽等优势^[7]。低反应性、高挥发性的低碳甲醇燃料采用进气道低压喷射,柴油采用缸内直喷策略,缸内燃油混合过程形成燃料物理浓度分层和化学反应活性分层,可实现多发性均匀性着火和理想的低温均燃,在有限工况范围内同时达到高效率与机内排放净化^[8-10]。文献[11]中研究表明:最佳甲醇预混合比例耦合适当的引燃柴油喷射策略可以显著改善双燃料模式下发动机缸内燃烧过程、性能和排放特性。文献[12]中研究表明:随着甲醇替代率的增加,不同海拔条件下发动机当量有效燃油消耗率降低,有效

热效率升高,NO_x 和碳烟排放大幅降低,总碳氢化合物(total hydrocarbons, THC)和 CO 排放增加。文献[13]中研究表明:不同负荷工况下,随甲醇替代率增大,NO_x 排放和烟度大幅降低,CO₂ 排放量减少,CO、甲醇和甲醛排放量增加,采用甲醇/柴油双燃料模式可同时降低发动机 CO₂、NO_x 排放和烟度。

然而,采用高效清洁的缸内净化技术仍不能满足日益严苛的排放法规要求。柴油机颗粒捕集器(diesel particulate filter, DPF)是柴油机满足国六排放法规 PM 及颗粒物数量(particle number, PN)限值要求的关键后处理装置,其对 PM 的过滤效率可达 95%^[14]。随着 DPF 中捕集的 PM 增多,发动机排气背压增大,导致发动机性能恶化^[15],需要定期对 DPF 进行再生,使其恢复到低阻力状态。DPF 再生方式主要分为被动再生和主动再生。主动再生一般是通过喷油助燃或电加热等手段将 DPF 入口温度提升到 550℃或更高,使 DPF 中的碳烟与尾气中的氧气发生反应,从而快速清除 DPF 中累积的碳烟。被动再生则是通过在 DPF 载体内部涂覆 Pt、Pd 等贵金属催化剂降低碳烟氧化反应的活化能,在催化剂的作用下利用发动机排气中 NO₂ 在相对较低的温度下将碳烟氧化^[16]。被动再生温度较低,可以减少额外的燃料消耗和延长再生周期。然而,被动再生需要适当的排气 NO_x 与 PM 比例^[17],且当其长时间在被动再生平衡点温度以下工作后,CDPF 仍需进行主动再生以清除所累积的颗粒物^[18]。考虑到低负荷下排气温度和 NO₂ 浓度较低,DPF 中 PM 易积累的倾向,通常采用主动再生方式^[19]。

初始炭载量、再生目标温度、排气氧浓度等参数是影响 DPF 主动再生的关键因素^[20]。文献[18]中

对比分析了不同再生温度和炭载量下 DPF 和催化型 DPF(catalytic DPF, CDPF)主动再生排放特性,结果表明:相同炭载量条件下,CDPF 更易产生温度波峰,且再生效率略高于 DPF,再生过程中几乎没有 CO 生成。文献[21]中试验研究了柴油机氧化催化器(diesel oxidation catalyst, DOC)入口氧浓度对 DPF 主动再生时的入口温升特性、有效再生时间和再生过程燃油消耗的影响,结果表明排气氧浓度的降低导致 DPF 温升速率增大,恒定 DPF 碳烟负载量和再生温度的前提下,当排气氧体积分数为 11.0% 时 DPF 主动再生时间最短,再生过程燃油消耗最少。文献[22]中运用 GT-Power 软件建立后处理系统模型探究主动再生过程中再生温度对 DPF 载体的温度特性、再生效率和再生油耗的影响,及不同炭载量下进行再生时 DPF 的载体温度特性。结果表明:初始炭载量相同时,再生温度越高,再生用时越短,再生效率越高,再生油耗越低,但再生温度的升高会导致 DPF 载体峰值温度增大,载体存在损坏风险;初始炭载量越高,载体峰值温度越高。

综上可知,现有 DPF 再生特性研究主要针对传统柴油机,仿真研究主要围绕单 DPF 或 DOC+DPF 模型。然而,甲醇/柴油双燃料发动机的 CDPF 再生特性及关键控制参数的影响规律尚不清楚,有必要深入研究甲醇/柴油双燃料发动机 DPF 主动再生特性。本研究中采用缸内喷油助燃再生方式,构建双燃料发动机匹配后处理系统的仿真模型,仿真分析不同甲醇替代率、不同再生温度及不同初始炭载量对 CDPF 主动再生压降、温度分布特性、完全再生持续时间及累计柴油消耗量的影响,以期为甲醇/柴油双燃料发动机后处理系统优化与工程应用提供科学理论指导。

1 仿真模型建立

1.1 发动机及后处理系统主要技术参数

试验基于一台改装的 4 缸增压中冷甲醇/柴油双燃料发动机,并配备了 DOC+CDPF 后处理系统,发动机主要技术参数如表 1 所示。甲醇燃料通过进气歧管多点顺序喷射,引燃柴油采用缸内高压直喷。甲醇喷射及柴油喷射由双燃料发动机集成控制器进行调控,通过协调控制两种燃料的喷射比例、喷射时刻和缸内燃空当量,实现燃烧相位和燃烧速率的控制。DOC 载体材料为堇青石,结构为蜂窝状,涂层材料为三氧化二铝,催化剂材料为贵金属铂、

钯。CDPF 载体材料为碳化硅,结构为壁流式蜂窝状,涂覆的催化剂材料为贵金属铂,允许的最大炭载量为 20 g。DOC 和 CDPF 的主要技术参数如表 2 所示。

表 1 发动机主要技术参数
Table 1 Engine technical parameters

项目	参数
发动机型式	直列 4 缸,增压中冷
缸径/mm	95
行程/mm	105
压缩比	16.6
排量/L	2.977
最大扭矩/(N·m)	450(1 600~2 400 r/min)
标定功率/kW	115(3 200 r/min)

表 2 DOC 和 CDPF 主要技术参数
Table 2 Main specifications of DOC and CDPF

项目	参数	
催化器	DOC	CDPF
载体长度/mm	152.4	177.8
载体直径/mm	143.8	190.5
载体体积/L	2.473	5.065
孔密度/(个·cm ⁻²)	61.996(400个/in ²)	46.497(300个/in ²)
过滤体壁厚/mm	—	0.3
孔隙率/%	—	0.53
最大炭载量/g	—	20

1.2 发动机及 DOC、CDPF 仿真模型建立

基于 GT-Power 建立甲醇/柴油双燃料发动机一维仿真模型。GT-Power 基于单向气体动力学,计算气缸、管道和相关部件中的流量和传热。模型输入主要由进气参数、发动机和气缸参数、涡轮增压器系统、喷油器参数、排气参数及后处理系统参数等组成^[23]。入口和出口环境边界条件设置均与试验环境保持一致,大气压力为 80 kPa,环境温度为 300 K。甲醇/柴油双燃料发动机一维仿真模型如图 1 所示。

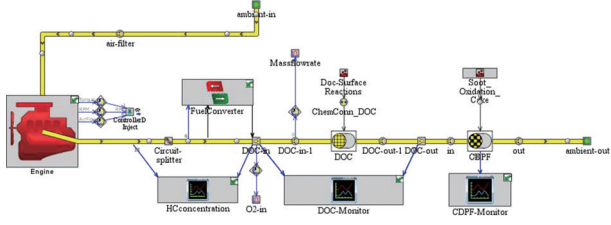


图 1 发动机一维仿真模型

Figure 1 One-dimensional simulation model of engine

采用 GT-Power 中的 ControllerDInject-Injector Controller 组件控制发动机目标转矩,通过传感器采集发动机当前转速、转矩、空气流量信号来控制喷油器,调整喷油量以锁定部分负荷运行时的发动机性能参数。采用 DI pulse 燃烧模型预测具有单脉冲和多脉冲喷射事件的直喷柴油发动机燃烧速率^[23-24]。

通过在仿真模型进气道上加装 InjRateConn Connection 组件实现甲醇燃料喷射。甲醇替代率 M_R 定义为每循环掺烧的甲醇提供的化学能量占燃烧总化学能的比例^[12],计算公式如式(1)所示。

$$M_R = \frac{m_M M_{LHV}}{m_M M_{LHV} + m_D D_{LHV}} \quad (1)$$

式中, M_R 为甲醇替代率,%; m_M 和 m_D 分别为甲醇和柴油质量流量, kg/h; M_{LHV} 和 D_{LHV} 分别为甲醇和柴油的低热值, MJ/kg。

为研究再生目标温度、甲醇替代率及初始炭载量对 CDPF 再生过程压降、温度分布等的影响,建立 DOC+CDPF 仿真模块,主要组成部分如下。

Circuit-splitter 模块。由于 DOC 与 CDPF 均使用外部表面反应机理,且后处理系统使用的流动求解器、求解时间步长与发动机模块不同,因此使用 Circuit-splitter 模块对发动机与后处理系统进行连接。

FuelConverter 模块。在 GT-Power 中,由于后喷柴油并不能被燃烧模型直接分解为 HC,因此使用 FuelConverter 模块在发动机涡轮后通过传感器检测排气中气体柴油和液体柴油的量,并进行抽取,然后根据相对分子质量比例转换为等量的 C_3H_6 、 O_2 等,通过喷射模块注入 DOC 前端管道中,为 DOC 提供 HC 和 O_2 。

DOC 及 Doc-SurfaceReactions 模块。DOC 模块用于对 DOC 内部化学反应过程进行仿真计算; Doc-SurfaceReactions 模块用于建立 DOC 催化表面反应动力学模型,主要参与反应的物质有 HC、CO、NO 等,其反应遵循 Arrhenius 定律,如式(2)所示。

$$k = A e^{-E_a/RT} \quad (2)$$

式中, A 为指前因子; k 为反应速率常数; R 为通用气体常数, J/(mol·K); T 为催化剂表面平均温度, K; E_a 为表观活化能, J/mol。

由于其反应涉及催化剂表面多相催化反应,由式(2)可得表面催化反应的速率表达式如式(3)所示。

$$R_i = A_i \cdot T_i^b \cdot \exp(-T_a/T_i) \cdot C_{(i)} G_{(i)} \theta_{(i)} \quad (3)$$

式中, i 为反应物质; R_i 为反应速率, mol/s; A_i 为 i 反应物的指前因子; T_a 为活化温度, K; b 为活化能, kJ/mol;

T_i 为壁面温度, K; $C_{(i)}$ 为物质浓度表达式; $G_{(i)}$ 为一般函数和抑制函数; $\theta_{(i)}$ 为涂覆率表达式。

CDPF 及 CDPF-Monitor 模块。CDPF 模块用于对 CDPF 内部的化学反应、再生过程压降及温度进行计算; CDPF-Monitor 模块用于对 CDPF 再生过程压降、再生过程中温度分布等相关参数进行实时监测及显示。发动机排气流经 CDPF 的总压降 Δp 满足达西定律,主要由 7 个部分组成,其计算公式^[25]如式(4)所示。

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 + \Delta p_4 + \Delta p_5 + \Delta p_6 + \Delta p_7 \quad (4)$$

式中, Δp_1 、 Δp_7 分别为气体流入通道时的收缩损失和流出通道时的膨胀损失; Δp_2 、 Δp_6 分别为入口和出口通道中摩擦引起的压力损失; Δp_3 为气体通过颗粒层的压力损失; Δp_4 为气体通过烟灰层的压力损失; Δp_5 为气体通过过滤层的压力损失。

CDPF 主动再生过程中主要涉及 2 个化学反应,如式(5)、式(6)所示。



图 2 为 CDPF 轴向温度测点布置图。沿 CDPF 中心轴线方向均匀设置 5 个温度测点,以检测 CDPF 再生过程中内部温度变化情况。考虑到稳态再生过程中峰值温度特性、载体壁厚等因素^[26],测点 1~测点 5 分别位于 CDPF 轴线长度 10%、30%、50%、70% 及 90% 处,对应温度为 $T_1 \sim T_5$ 。

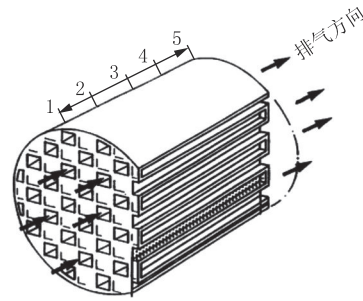


图 2 CDPF 轴向温度测点布置图

Figure 2 Layout of CDPF axial temperature measurement

2 模型验证及再生工况选取

2.1 仿真模型验证

通过对比 1 600 r/min、50% 负荷、0% 甲醇替代率工况下的台架试验数据与仿真结果,对甲醇/柴油双燃料发动机一维仿真模型的准确性进行验证。图 3、图 4、图 5 和图 6 分别为缸压、放热率、DOC 入口温度、CDPF 入口温度、CDPF 主动再生压降特性和

CDPF 主动再生温度特性的试验值与仿真值对比结果。由图分析可知,仿真值与试验值的平均误差均小于 5%,表明所建立的甲醇/柴油双燃料发动机一维仿真模型准确有效,可用于进一步的 CDPF 再生特性研究。

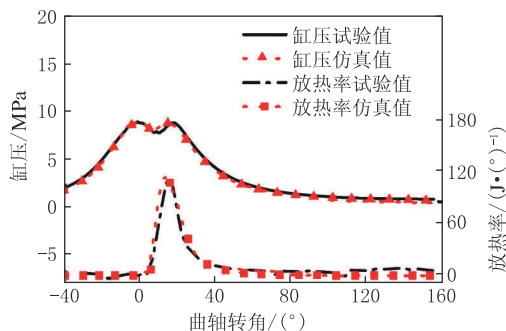


图3 缸压、放热率试验值与仿真值对比(50%负荷,0%甲醇替代率)

Figure 3 Comparison of in-cylinder pressures and heat release rates between simulation and measurement at 50% load with 0% methanol substitution rate

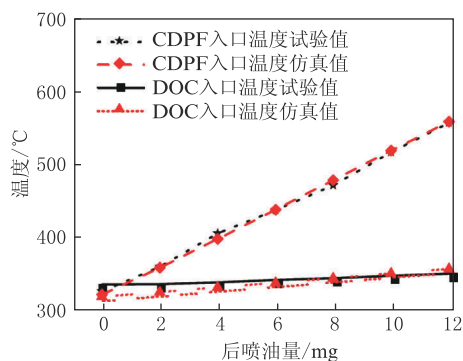


图4 DOC入口温度、CDPF入口温度试验值与仿真值对比(50%负荷,0%甲醇替代率)

Figure 4 Comparison of DOC inlet temperature and CDPF inlet temperature between simulation and measurement at 50% load with 0% methanol substitution rate

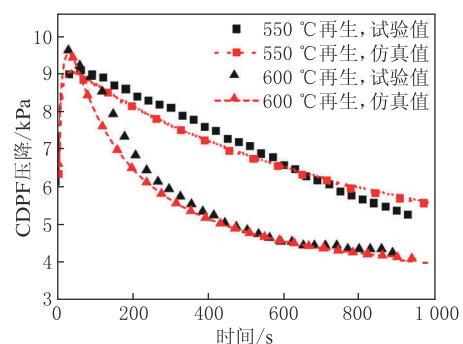


图5 CDPF 主动再生压降特性试验值与仿真值对比(50%负荷,0%甲醇替代率)

Figure 5 Comparison of CDPF active regenerative pressure drop characteristics between simulation and measurement at 50% load with 0% methanol substitution rate

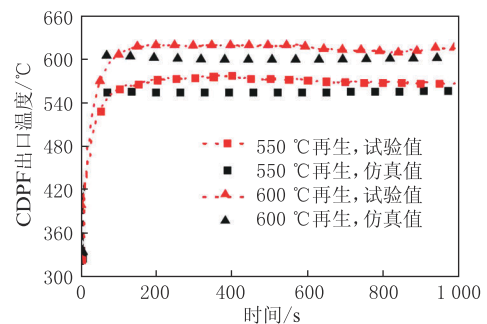


图6 CDPF 主动再生温度特性试验值与仿真值对比(50%负荷,0%甲醇替代率)

Figure 6 Comparison of CDPF active regenerative temperature characteristics between simulation and measurement at 50% load with 0% methanol substitution rate

2.2 再生工况选取

本研究中主动再生策略为 DOC 结合缸内后喷柴油提升 CDPF 入口温度,达到碳烟高温氧化温度后,碳烟与 O_2 发生高温氧化反应,从而清除 CDPF 内捕集的 PM。选择主动再生工况时,应综合考虑能达到 CDPF 入口温度及氧浓度需求的工况。低负荷工况下 CDPF 入口温度难以达到再生需求温度,且后喷燃油利用率较低;高负荷下较低的氧浓度会抑制主动再生速率。权衡 CDPF 再生温度及排气氧浓度需求,选取最大转矩转速 1 600 r/min、50% 负荷作为主动再生工况。该工况下,试验排气氧体积分数约为 11.0%,CDPF 入口温度为 320.9 °C;仿真排气氧体积分数为 12.5%,CDPF 入口温度为 316.5 °C。为排除燃油喷射参数对结果的影响,仿真时燃油喷射参数设置与试验过程一致,主喷正时固定为上止点后 1.5°,喷油压力固定为 80 MPa。为提高后喷燃油的能量利用率,应选取后喷燃油基本不发生氧化反应时对应的后喷正时,本研究选取的后喷正时为 140°。主动再生过程持续时间均为 1 000 s。试验与仿真过程再生工况及边界条件的对比如表 3 所示。进行单因素影响研究时采用控制变量法,其余两个参数保持不变,仿真计算控制参数设置如表 4 所示。

表 3 再生工况参数及边界条件

Table 3 Regeneration condition parameters and boundary conditions

项目	试验值	仿真值
转速/($r \cdot \min^{-1}$)	1 600	1 600
转矩/($N \cdot m$)	225	225
主喷正时/(°)	1.5	1.5
后喷正时/(°)	140	140
喷油压力/MPa	80	80
排气氧体积分数/%	11.0	12.5
CDPF 入口温度/°C	320.9	316.5

表 4 仿真计算控制参数设置

Table 4 Control parameter settings for simulation calculation

项目	参数		
	方案1	方案2	方案3
再生目标温度/℃	550、600、650	600	600
甲醇替代率/%	15	0、15、30	15
初始炭载量/g	20	20	10、15、20

3 结果与讨论

3.1 目标温度对 CDPF 再生性能的影响

DPF 压降是评估主动再生完整性的关键参数。图 7 为 15% 甲醇替代率、20 g 初始炭载量时不同再生目标温度对 CDPF 主动再生期间压降的影响。由图 7 可知,主动再生开始时,压降迅速增加,随后到达峰值。峰值压降随着目标温度的增加而增加,550℃、600℃、650℃目标温度对应峰值压降分别为 9.20 kPa、9.53 kPa、9.87 kPa。

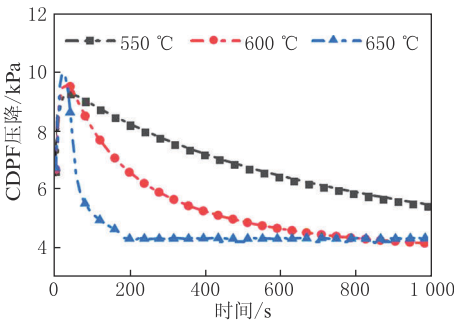


图 7 再生目标温度对 CDPF 压降的影响

Figure 7 Effects of regeneration target temperatures on CDPF pressure drop

前 50 s 持续时间内为升温阶段,CDPF 压降的快速上升是因为后喷柴油经过 DOC 被氧化后,随着后喷油量的增加,CDPF 入口温度快速达到目标温度。由于载体传热特性,CDPF 温度持续上升。由理想气体状态方程可知,体积不变时,气体温度升高会使气体压力增大,因此 CDPF 压降随着 CDPF 入口温度升高而快速增大,且再生温度越高对应的压降越大。

相同再生持续时间内,随着再生目标温度升高,CDPF 压降下降速率均加快,且 600℃、650℃再生结束时对应的 CDPF 压降较 550℃时更低。550℃再生时,碳烟氧化活性较低,1 000 s 再生持续时间内再生不完全,再生结束时压降为 5.36 kPa。再生目标温度为 600℃时,碳烟氧化活性提高有利于加快碳烟燃烧速率,CDPF 主动再生速率提高,1 000 s 持续时间内碳烟基本完全氧化。650℃再生结束时,CDPF 对应的压降较 600℃略高,主要是因为较高

的再生温度所要求的后喷燃油量较大,排气流量也较大。当压差减小到一定程度且保持不变或波动在±0.10 kPa 内时,再生完成,此时的压差与排气流量有关。因此,600℃再生结束时,CDPF 对应的压降较 550℃时略高。总体而言,随着再生目标温度升高,CDPF 主动再生速率、再生效率均提高。

图 8 为 15% 甲醇替代率、20 g 初始炭载量时不同再生目标温度对主动再生期间 CDPF 温度分布的影响。由图 8 可知,相同再生持续时间内,550℃、600℃和 650℃再生目标温度下 CDPF 测点峰值温度分别为 557.8℃、613.8℃和 735.0℃,较目标温度分别高 7.8℃、13.8℃、85.0℃。

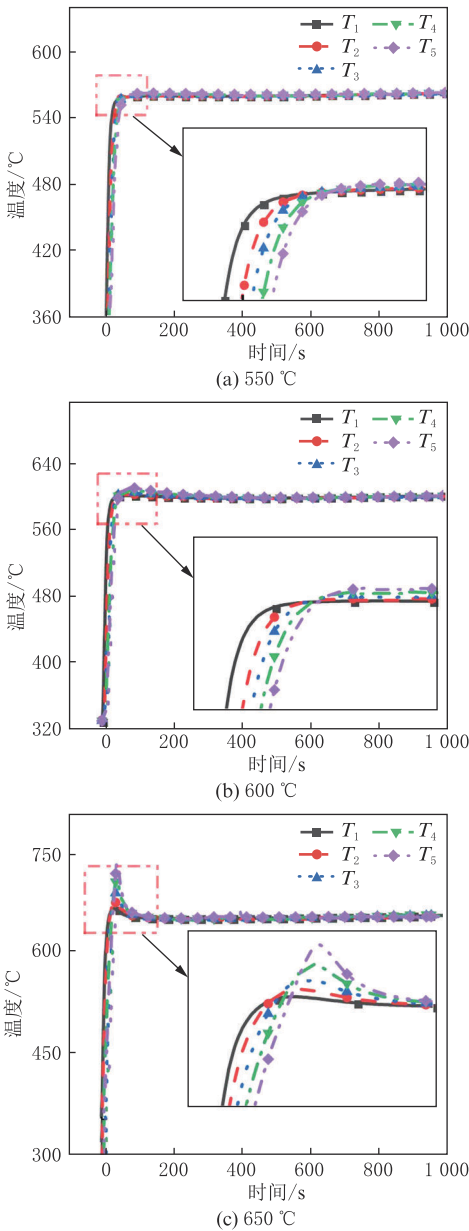


图 8 再生目标温度对 CDPF 温度分布的影响

Figure 8 Effects of regeneration target temperature on CDPF temperature distribution

相同再生持续时间内,轴向上 CDPF 载体温度均由 CDPF 入口中心向 CDPF 出口中心逐渐增加,且随着目标温度的增加,CDPF 内轴向易出现温度波峰,载体峰值温度通常出现在 CDPF 出口中心末端。再生目标温度越高时,碳烟氧化速率越快,放热速率越快,短时间内碳烟氧化超过一定量时,排气气流无法在短时间内将热量带走,CDPF 内易形成局部热点,此局部热点通常出现在 CDPF 中心末端(测点 5 处)^[20],热点区域温度峰值高于其他区域,因此随再生目标温度升高,CDPF 内易出现温度值“尖峰”现象。这是因为经 DOC 氧化后,后喷柴油迅速放热,CDPF 入口温度升高。CDPF 入口端沉积的碳烟接触高温气流后发生高温氧化反应释放热量,热量沿气流方向向后端传递并积累,导致出口端沉积的大量碳烟迅速燃烧,从而致使出口端载体温度迅速升高。由于仿真过程中碳烟累积设计为均匀分布,且忽略传热迟滞性,因此 200 s 至 1 000 s 再生持续时间内温度分布趋于一致。在 CDPF 主动再生过程中,若再生目标温度过高,会导致局部热点温度过高,CDPF 内碳烟燃烧剧烈,这种热不均匀性会对催化剂和载体产生损害;若再生目标温度过低,则再生效率低,再生能耗较高。CDPF 再生过程中,应兼顾再生效率的同时寻求低温条件再生,因此选择再生目标温度为 600 °C 进行甲醇替代率和初始炭载量的影响研究。

3.2 甲醇替代率对 CDPF 再生性能的影响

图 9 为 600 °C 再生目标温度、20 g 初始炭载量时不同甲醇替代率对 CDPF 主动再生期间压降的影响。随着甲醇替代率的增加,升温阶段峰值压降、再生过程压降均略微增加,0%、15%、30% 甲醇替代率下对应峰值压降分别为 9.50 kPa、9.53 kPa、9.76 kPa。

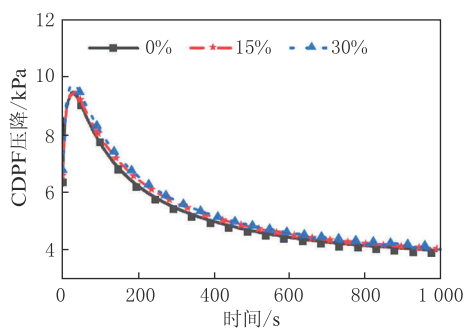


图9 甲醇替代率对 CDPF 压降的影响

Figure 9 Effects of methanol substitution rate on CDPF pressure drop

在升温阶段碳烟尚未开始燃烧,不同甲醇替代率下压降曲线趋势基本一致。随着甲醇替代率增加,甲醇的汽化吸热作用一定程度上会导致进气歧管内的温度降低,有利于提高进气密度,增加的进气

量在燃烧后会产生更多的废气,排气流量略微增加,导致 CDPF 内部的压力损失略微增加^[17]。因此相同再生持续时间内,600 °C 再生目标温度时,升温阶段峰值压降、再生过程压降均随着甲醇替代率的增加而略微增加。

图 10 为 600 °C 再生目标温度、20 g 初始炭载量时甲醇替代率对 CDPF 主动再生期间温度分布的影响。由图 10 可知,相同再生持续时间内,0%、15%、30% 甲醇替代率再生时 CDPF 测点峰值温度分别为 615.9 °C、613.8 °C 和 608.2 °C,比目标温度分别高 15.9 °C、13.8 °C、8.2 °C。

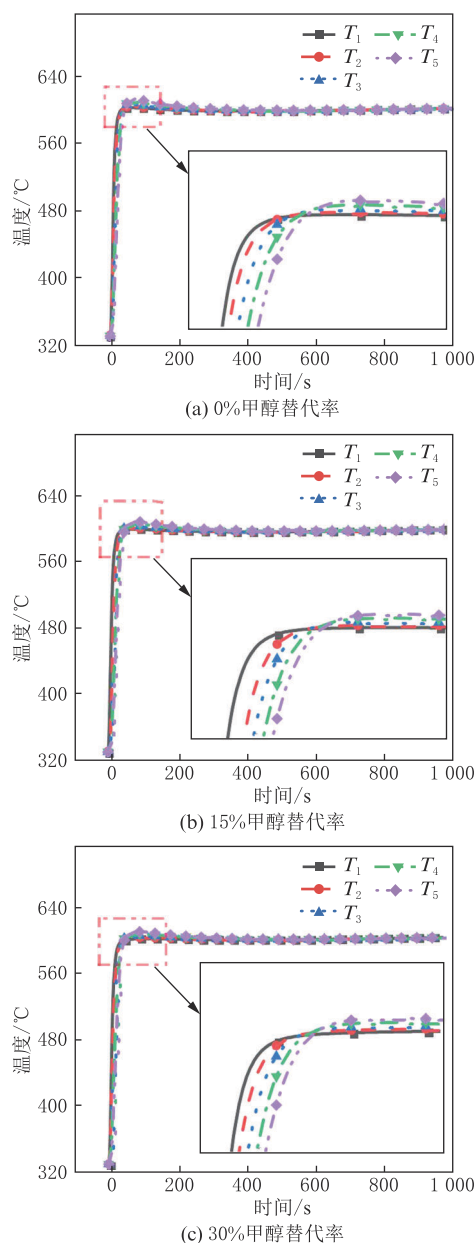


图10 甲醇替代率对 CDPF 温度分布的影响

Figure 10 Effects of methanol substitution rates on CDPF temperature distribution

不同甲醇替代率下再生时 CDPF 轴向温度分布规律一致,即由 CDPF 入口中心向出口中心逐渐增加,载体峰值温度出现在测点 5 位置处,但整体温度分布随甲醇替代率的增加并未出现较明显的波动。CDPF 温度分布的差异是由排气流量的略微增加造成的。仿真过程中碳烟在 CDPF 中的沉积设置为均匀分布,相同条件下,排气流量增加导致 CDPF 内碳烟氧化燃烧产生的热量驻留时间缩短,CDPF 内换热损失增加,因此载体峰值温度随甲醇替代率的增加略微降低。

3.3 初始炭载量对 CDPF 再生性能的影响

图 11 为 15% 甲醇替代率、600 °C 再生目标温度时初始炭载量对 CDPF 主动再生期间压降的影响。由图 11 可知,随着初始炭载量的增加,升温阶段峰值压降、快速再生期峰值压降均显著增加,再生结束时压降保持一致,压降与初始炭载量整体呈正相关,10 g、15 g、20 g 初始炭载量对应峰值压降分别为 6.78 kPa、8.10 kPa、9.53 kPa。

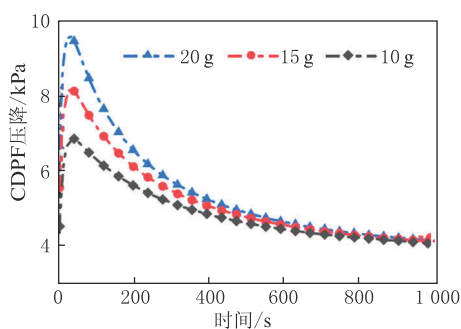


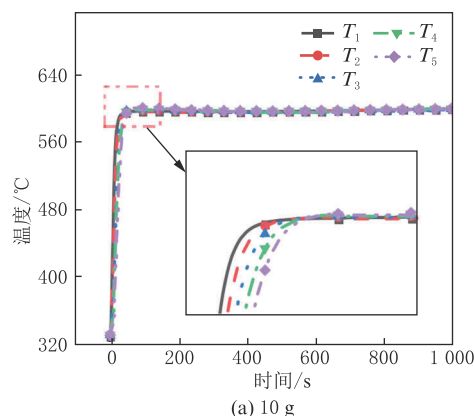
图 11 初始炭载量对 CDPF 压降的影响

Figure 11 Effects of initial soot load on CDPF pressure drop

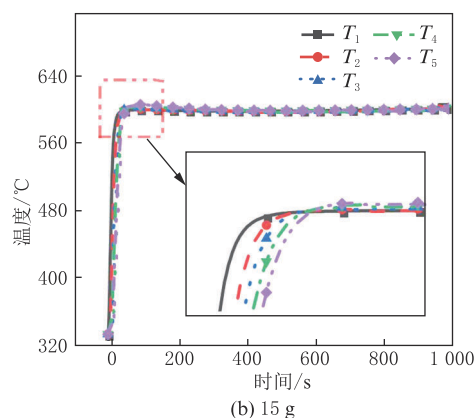
前 50 s 持续时间内为升温阶段。CDPF 压降主要是由壁面、深床碳烟层和滤饼碳烟层造成的压降^[27],随着初始炭载量的增加,碳烟层厚度的增加使得 CDPF 孔道直径变小,排气气流阻力增大,因此升温阶段随初始炭载量的增加,峰值压降增幅较为明显。当 CDPF 入口温度达到碳烟氧化温度,CDPF 压降先保持一段时间不变,后迅速降低,该阶段为再生过渡段,持续时间较短。50 s 至 500 s 时间段为快速再生期,该阶段内碳烟快速氧化,压降快速降低。随着初始炭载量的增加,参与反应的反应物越多,反应速率越快,而再生目标温度保持不变,因此快速再生期间不同初始炭载量对应压降差值逐渐缩小。而随着 CDPF 载体内碳烟不断消耗,炭载量下降导致排气气流与碳烟接触面积变小,使碳烟燃烧速率减缓,该阶段称为缓慢再生期,约为 500 s 至 1 000 s 时间段。缓慢再生期结束后,碳烟基本完全氧化,

CDPF 压降保持不变,不同初始炭载量再生结束时对应压降保持一致。

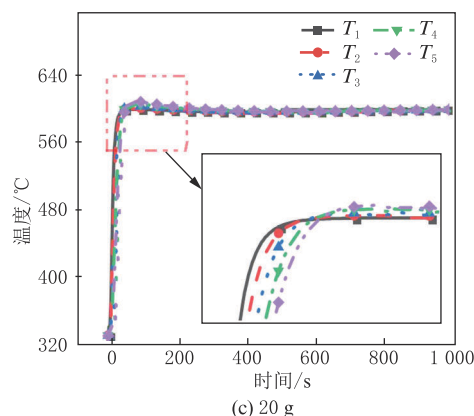
图 12 为 15% 甲醇替代率、600 °C 再生目标温度时初始炭载量对 CDPF 主动再生期间温度分布的影响。由图 12 可知,相同再生持续时间内,10 g、15 g、20 g 初始炭载量再生时 CDPF 测点峰值温度分别为 604.7 °C、608.8 °C 和 613.8 °C,较目标温度分别高 4.7 °C、8.8 °C、13.8 °C。



(a) 10 g



(b) 15 g



(c) 20 g

图 12 初始炭载量对 CDPF 温度分布的影响

Figure 12 Effects of initial soot load on CDPF temperature distribution

初始炭载量是 CDPF 主动再生过程的重要影响因素。初始炭载量过高,CDPF 再生过程载体温度较高,易导致 CDPF 载体老化,从而降低 CDPF 的

捕集效率。初始炭载量过低,则主动再生频繁,易导致发动机燃油经济性恶化。随着初始炭载量增加,CDPF 载体内各温度测点的峰值温度均升高,但载体各测点的峰值温度差异较小,载体内部温度的均匀性提高,3 种炭载量下 CDPF 内均无温度波峰出现。初始炭载量的增加使参与反应的反应物增加,反应速率加快,再生期间 CDPF 内部温度较高。由式(2)可知,温度是化学反应的指数函数,温度的增加促进载体内碳烟的快速氧化,且此种促进作用会随着炭载量的增加而显著。结果表明,3 种初始炭载量均可在此工况下进行安全再生,初始炭载量越高,CDPF 压降降低速率越快,再生效果越好。

3.4 完全再生持续时间、累计柴油消耗量

文献[28]研究结果表明:初始炭载量对燃油经济性的影响并不显著,因此重点分析再生目标温度和甲醇替代率对 CDPF 完全再生持续时间及完全再生期间累计柴油消耗量的影响。图 13 为 15% 甲醇替代率、20 g 炭载量、不同再生目标温度下完全再生持续时间及累计柴油消耗量。图 14 为 600 °C 再生目标温度、20 g 炭载量、不同甲醇替代率下完全再生持续时间及累计柴油消耗量。

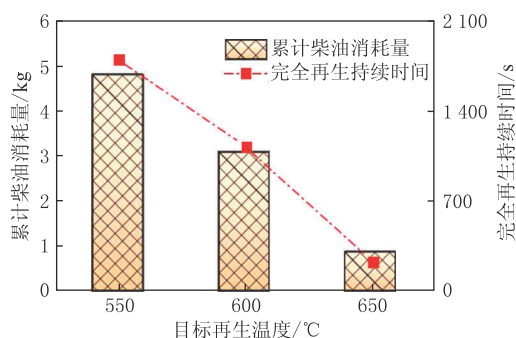


图 13 不同再生目标温度下完全再生持续时间及累计柴油消耗量

Figure 13 Duration of complete regeneration and cumulative diesel consumptions at different regeneration target temperatures

由图 13 可知,再生结束时,550 °C、600 °C 和 650 °C 再生目标温度下的累计柴油消耗量分别为 4.80 kg、3.10 kg、0.88 kg,完全再生持续时间分别为 1 830 s、1 132 s、254 s。分析图 14 可知,再生结束时,0%、15%、30% 甲醇替代率下累计柴油消耗量分别为 3.77 kg、3.12 kg、2.72 kg,完全再生持续时间分别为 1 067 s、1 132 s、1 154 s。甲醇替代率从 0% 增至 30%,累计柴油消耗量减少 27.8%。固定甲醇替代率时,再生目标温度越高,为达到相应目标温度

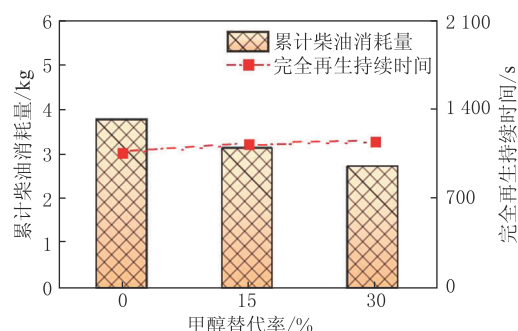


图 14 不同甲醇替代率下完全再生持续时间及累计柴油消耗量

Figure 14 Duration of complete regeneration and cumulative diesel consumptions with different methanol substitution rate

所需的后喷油量越多,但相应的再生持续时间显著缩短,因此累计柴油消耗量随再生目标温度的增加而显著降低。而当固定再生目标温度为 600 °C 时,随着甲醇替代率的增加,尾气中含有大量的碳氢化合物,经 DOC 氧化后 CDPF 前温度显著提升,因此为达到再生目标温度所需后喷油量减少。随着甲醇替代率增高,甲醇的喷射量增多,则柴油的喷射量相应减少,因此随甲醇替代率的增加再生时累计柴油消耗量显著降低。综上可知,550 °C 再生时完全再生持续时间长,再生效率低,再生不完全;650 °C 再生可显著提高再生效率,缩短完全再生持续时间,载体所受的热冲击和热应力较大,不能保证载体在主动再生过程中安全可靠。甲醇替代率的增加可以降低载体内部的峰值温度,减少再生期间累计柴油消耗量。因此 600 °C 再生目标温度、30% 甲醇替代率、20 g 初始炭载量条件下可以实现高再生效率及再生安全性,并兼顾较好的再生能耗。

4 结论

(1) 再生目标温度对 CDPF 主动再生具有显著影响。随着再生目标温度升高,碳烟燃烧速率加快,CDPF 压降快速下降,较高的再生目标温度易导致 CDPF 内出现温度值“尖峰”现象,600 °C 再生目标温度可在保持高再生效率的同时实现低温再生。

(2) 固定再生目标温度的条件下,随甲醇替代率增加,CDPF 再生过程中升温阶段峰值压降、再生过程压降均略微增加,载体峰值温度略微降低,CDPF 轴向温度分布均沿入口中心向出口中心逐渐增高最后趋于稳定。

(3) 随初始炭载量增加,CDPF 主动再生反应速率加快,载体峰值温度升高,CDPF 压降下降速率增大,载体内部温度的均匀性提高。快速再生期 20 g

炭载量压降下降速率较快,缓慢再生期压降趋于一致。

(4) 随着再生目标温度的提高,完全再生持续时间显著缩短,累计柴油消耗量减少。固定再生目标温度的条件下,甲醇替代率对完全再生持续时间的影响较小。600℃再生目标温度、30% 甲醇替代率、20 g 初始炭载量条件下可在实现高效安全再生的同时兼顾较低的再生能耗。

参考文献:

- [1] 王长通,张韧,李卫,等. 掺混策略对聚甲氧基二甲醚/甲醇双燃料燃烧影响的可视化研究[J]. 内燃机工程,2024,45(3):21-29. WANG C T, ZHANG R, LI W, et al. An optical investigation on the effects of blending strategies on polyoxymethylene dimethyl ethers/methanol dual-fuel combustion [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2024, 45(3): 21-29.
- [2] 帅石金,王志,马骁,等. 碳中和背景下内燃机低碳和零碳技术路径及关键技术[J]. 汽车安全与节能学报,2021,12(4):417-439. SHUAI S J, WANG Z, MA X, et al. Low carbon and zero carbon technology paths and key technologies of ICEs under the background of carbon neutrality [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2021, 12(4): 417-439.
- [3] TAN P Q, LIU T P, DUAN L S, et al. Characteristics of ash formed by different lubricant additives and its effect on DPF performance [J/OL]. Fuel, 2024, 358: 130287 (2024-02-15) [2024-06-10]. DOI:10.1016/j.fuel.2023.130287.
- [4] DIERICKX J, DEJAEGERE Q, PEETERS J, et al. Performance and emissions of a high-speed marine dual-fuel engine operating with methanol-water blends as a fuel[J/OL]. Fuel, 2023, 333: 126349 (2023-02-01) [2024-06-10]. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.126349.
- [5] TIAN Z, WANG Y, ZHEN X D, et al. The effect of methanol production and application in internal combustion engines on emissions in the context of carbon neutrality: a review[J/OL]. Fuel, 2022, 320: 123902 (2022-07-15) [2024-06-10]. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123902.
- [6] 徐宏明. 欧洲汽车动力系统多元化的发展趋势和展望[J]. 汽车安全与节能学报,2024,15(2):137-153. XU H M. Development trends and outlook of diversified powertrains in Europe [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2024, 15(2): 137-153.
- [7] 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. HUANG F L, YANG Q, WANG Z J, et al. Effects of methanol substitution rate on performance of diesel-methanol reactivity controlled compression ignition engines [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2022, 43(1): 48-57.
- [8] PANDA K, RAMESH A. Parametric investigations to establish the potential of methanol based RCCI engine and comparison with the conventional dual fuel mode[J/OL]. Fuel, 2022, 308: 122025 (2022-01-15) [2024-06-10]. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122025.
- [9] KRISHNAN M, RAJKUMAR S, DEVARAJAN Y, et al. A comprehensive review on advancement and challenges of renewable biofuelled reactivity controlled compression ignition (RCCI) engine[J/OL]. Journal of the Energy Institute, 2024, 113: 101540 (2024-01-20) [2024-06-10]. DOI: 10.1016/j.joei.2024.101540.
- [10] HUANG F L, XIA D S, LI L L, et al. Experimental investigation of the performance and unburned methanol, formaldehyde, and carbon dioxide emissions of a methanol-diesel dual-fuel engine [J/OL]. Journal of the Energy Engineering, 2023, 149(3): 04023013 (2023-04-13) [2024-06-10]. DOI:10.1061/JLEED9.EYENG-4859.
- [11] AGARWAL A K, SINGH A P, KUMAR V. Effect of pilot injection strategy on the methanol-mineral diesel fueled reactivity controlled compression ignition combustion engine [J/OL]. Fuel, 2023, 338: 127115 (2024-04-15) [2024-06-10]. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.127115.
- [12] 黄粉莲,余超杰,万明定,等. 不同海拔条件下甲醇替代率和主喷正时对甲醇/柴油RCCI发动机性能的影响[J]. 农业工程学报,2024,40(5):71-81. HUANG F L, SHE C J, WAN M D, et al. Effects of methanol substitution rate and main injection timing on the performance of methanol/diesel RCCI engine under different altitude conditions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(5): 71-81.
- [13] 黄粉莲,周长登,申立忠,等. 过量空气系数对甲醇/柴油反应活性控制压燃发动机性能的影响[J]. 内燃机工程,2022,43(2):30-40,48. HUANG F L, ZHOU C D, SHEN L Z, et al. Effect of excess air coefficient on performances of methanol/diesel reactivity controlled compression ignition engines [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2022, 43(2): 30-40, 48.
- [14] LI X, XUE C F, GENG J, et al. Study on regenerative exothermic process in ash containing DPF structure based on lattice Boltzmann method [J/OL]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024: 104105 (2024-02-07) [2024-06-10]. DOI: 10.1016/j.csite.2024.104105.
- [15] JI L, CAI Y X, SHI Y X, et al. Effects of nonthermal plasma on microstructure and oxidation characteristics of particulate matter[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(4): 2510-2519.
- [16] JUAN O, MENG Z W, HU Y Z, et al. Experimental investigation on the variation characteristics of soot layer thickness and pressure drop during DPF/CDPF active regeneration [J/OL]. Chemical Engineering Science, 2021, 241: 116682 (2021-09-21) [2024-06-10]. DOI:10.1016/j.ces.2021.116682.
- [17] YANG S C, WAN M D, SHEN L Z, et al. Investigation of the impacts of regeneration temperature and methanol substitution rate on the active regeneration of diesel particulate filter in a diesel-methanol dual-fuel engine [J/OL]. Energy, 2024: 131657 (2024-05-14) [2024-06-10]. DOI:10.1016/j.energy.2024.131657.
- [18] 孟忠伟,曾渤淞,冉格萌,等. DPF和CDPF主动再生排放特性对比分析[J]. 内燃机学报,2024,42(1):35-43. MENG Z W, ZENG B S, RAN G M, et al. Comparative analysis of active regenerative emission characteristics of DPF and CDPF [J]. Transactions of CSICE, 2024, 42(1): 35-43.
- [19] SUN H, LIU Y S, LI N, et al. Study on characteristics and control strategy of diesel particulate filters based on engine bench [J/OL]. Processes, 2022, 10(7): 1246 (2022-06-22) [2024-06-01]. DOI:10.3390/pr10071246.
- [20] LIU G L, LIU W Q, HE Y B, et al. Research on influence of exhaust characteristics and control strategy to DOC-assisted active regeneration of DPF [J/OL]. Processes, 2021, 9(8): 1403 (2021-08-13) [2024-06-01]. DOI:10.3390/pr9081403.

(下转第93页)