变海拔下柴油机颗粒捕集器及灰分对柴油机瞬态特性的影响

陈贵升[1],金纳俊哲[1],罗国焱[1],龚 航[2],杨 森[1],彭益源[3]

(1.昆明理工大学 云南省内燃机重点实验室,昆明 650500;2.昆明理工大学 工程训练中心,昆明 650500;3.云南菲尔特环保科技有限公司,昆明 650300)

摘 要:基于GT-Power搭建耦合柴油机颗粒捕集器(DPF)的国六柴油机一维瞬态模型,探讨了变海拔下DPF对柴油机恒转速变扭矩瞬态特性的影响,并研究了灰分层渗透率变化对柴油机瞬态性能及DPF工作特性的影响,同时对DPF载体配比及直径范围进行了优化。结果显示,DPF会导致柴油机瞬态进气流量、扭矩和热效率低于原机,燃油消耗率则高于原机,在高海拔及恒转速增扭矩工况后期尤为明显。钙基灰分对瞬态特性的影响最大,在变海拔恒转速增扭矩工况后期,镁基和锌基灰分会导致DPF压降出现转折。当载体配比超过1.2和载体直径大于190 mm时,DPF对附加燃油消耗率的影响趋于平缓,碳载量的增加会加剧这一趋势。

关键词:动力机械工程;柴油机颗粒物捕集器;国六柴油机;瞬态特性;灰分

中图分类号:TK422 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5497(2026)02-0333-12

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240837

Effects of altitude variation on diesel engine transient characteristics with consideration of particulate filters and ash

CHEN Gui-sheng[1],JIN Na-jun-zhe[1],LUO Guo-yan[1],GONG Hang[2],YANG Sen[1],PENG Yi-yuan[3]

(1. *Yunnan Key Laboratory of Internal Combustion Engine*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*; 2. *Engineering Training Centre*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*; 3. *Yunnan Filter Environment Protection Science & Technology Corporation Limited*, *Kunming* 650300, *China*)

Abstract: A one-dimensional transient model of a China VI diesel engine equipped with a diesel particulate filter (DPF) was developed using GT-Power. This study explores the effects of DPF on diesel engine transient characteristics under varying altitudes, specifically focusing on constant-speed, varying-torque scenarios. It also examines how changes in ash layer permeability impact engine transient performance and DPF operation, while optimizing the DPF substrate ratio and diameter range. The results show that the DPF reduces transient intake flow, torque, and thermal efficiency compared to the original engine, while increasing fuel consumption, particularly at high altitudes and in the later stages of constant-speed, increasing-torque conditions. Calcium-based ash has the most significant impact on transient

收稿日期:2024-07-24.

基金项目:云南省基础研究计划重点项目(202401AS070102);大学生创新创业计划项目(S202210674147).

作者简介:陈贵升(1979-),男,教授,博士.研究方向:内燃机排放与控制.E-mail:cgs_yly@163.com

通信作者:龚航(1989-),男,实验师,硕士.研究方向:汽车动力系统设计及排放控制术.E-mail:834319423@qq.com

characteristics. During the later stages of these conditions under varying altitudes, magnesium- and zinc-based ash cause a shift in DPF pressure drop. When the substrate ratio exceeds 1.2 and the substrate diameter exceeds 190 mm, the impact on additional fuel consumption stabilizes, although increased carbon loading intensifies this trend.

Key words: power machinery and engineering; diesel particulate filter (DPF); China VI diesel engine; transient characteristicse; ash

0 引 言

柴油机因其卓越的动力输出性和经济性在众多领域被广泛应用,但同时也存在着较高颗粒物(Particulate matter, PM)排放[1]。为满足国六和最新出台的欧七排放法规限值,须配合高效的后处理设备,以降低排放物中的PM[2]。柴油机微粒捕集器(Diesel particulate filter, DPF)因其具备高效的颗粒物捕集储存能力,被视为目前去除颗粒物最有效的手段,并得以广泛应用[3]。

DPF对柴油机性能的影响实质在于加装后处理系统后,高排气背压会对柴油机的进气产生阻碍,而瞬态工况下因增压器响应迟滞导致此问题更加突出。Han等[4]通过试验从进气边界与缸内燃烧角度分析不同瞬态工况各项性能参数滞后情况。杨凯等[5]的研究表明,涡轮增压器的响应迟滞会导致柴油机瞬态性能的恶化,尤其是进气流量滞后于喷油量,进一步导致燃烧重心和燃烧重点的推迟。Rakopoulos等[6]通过模型搭建分析了瞬态工况下NO和碳烟的形成。Yum等[7]通过试验研究了柴油机负荷变化对燃油效率的影响,发现柴油机在瞬态工况下的有效燃油消耗率(BSFC)最大恶化程度为4.7%,与稳态工况相比显著增加。Liu等[8]研究发现通过改良喷油策略能有效降低瞬态工况下发生的柴油机性能恶化等问题。陈贵升等[9]研究了不同结构DPF对发动机性能的影响和不同碳载量时DPF的压降特性。李志军等[10]建立评价函数研究了灰分分布对DPF压降的影响。

在DPF整个生命周期内的再生过程中,灰分会逐渐累积,显著影响DPF的压降、过滤性能及再生效率[11]。DPF中灰分层的渗透率,即灰分层对气流的阻碍程度,是影响DPF性能的关键因素之一[12]。Sappok等[13]研究了不同配方润滑油产生的灰分对DPF压降的影响,发现使用钙基清洁剂的润滑油生成的灰分渗透率显著低于镁基清洁剂的润滑油,导致钙基润滑油引起的DPF压降增幅更大。Gurel等[14]利用瞬态机动优化空燃比极限标定方法,平衡碳烟排放与发动机性能,并通过多目标优化方法优化空燃比限值。Hu等[15]采用梯度算法对柴油机瞬态增压系统进行控制。孙万臣等[16]研究了不同转速下带催化剂涂层的DPF安装前后的微粒粒度分布特征,分析DPF对不同粒径微粒的捕集效率。

目前,国内外专家对DPF的研究主要集中在稳态工况下的压降、再生和捕集性能,而对柴油机瞬态工况性能的研究多聚焦于整机模块,针对DPF影响的研究较为有限。为此,基于柴油机瞬态工况,本文探讨了国六柴油机加装DPF后对其瞬态特性的影响。考虑到灰分累积问题,建立了一维整机瞬态模型与DPF仿真模型进行耦合计算,分析DPF及其灰分层渗透率对柴油机瞬态性能的影响,并对DPF载体配比和直径进行优化,为下一阶段排放法规要求下的DPF载体选型和设计提供理论指导。

1 模型建立

1.1 整机模型的构建

以某高压共轨柴油机(排量3.0 L)为试验机型,搭建后处理系统试验台架,针对国六柴油机加装后处理系统进行恒转速变扭矩瞬态试验,通过瞬态试验基础数据对GT-Power仿真软件构建的瞬态模型进行验证,并且耦合后处理系统对柴油机瞬态工况进行研究。进行恒转速变扭矩试验时,恒转速增扭矩工况具体转速为1 800 $r\cdot min^{-1}$,负荷从25%上升到70%,恒转速减扭矩转速为1 800 $r\cdot min^{-1}$,负荷从70%下降到25%。基于GT-Power搭建一维热力学整机模型,燃烧模型选用直喷多脉冲燃烧模型,该模型预测燃烧精度更精确;传热模型选用WoschniGT传热模型。

1.2 压降模型

图1为DPF压降的组成图。DPF压降主要

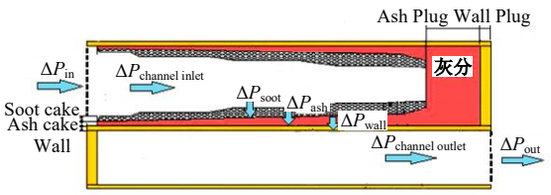

图 1　DPF 压降组成图

Fig. 1　DPF pressure drop composition diagram

是由进口孔道和出口孔道内产生的黏性阻力压降 $\Delta P_{\text{channel inlet}}/\Delta P_{\text{channel outlet}}$，气流流经孔道内缩口产生的压降 ΔP_{inl}，扩口导致的压降 ΔP_{out}，多孔介质壁面压降 ΔP_{wall}，气流通过灰分层、碳烟层产生的压降 ΔP_{ash}、ΔP_{soot} 组成。

进口孔道压降 Δp_{inl}、出口孔道压降 Δp_{out} 主要由摩擦损失导致，具体公式如下：

$$\Delta p_{\text{inl}} = \zeta_{\text{inl}} \cdot \frac{\rho_{\text{inl}} \cdot v_{\text{inl}}^2}{2} \tag{1}$$

$$\Delta p_{\text{out}} = \zeta_{\text{out}} \cdot \frac{\rho_{\text{out}} \cdot v_{\text{out}}^2}{2} \tag{2}$$

式中：ζ_{inl}、ζ_{out} 分别为缩口、扩口压降摩擦损失系数；v_{inl} 为进口初始速率；v_{out} 为出口终端速度。

颗粒捕集器孔道内部黏性阻力压降主要为：

$$\Delta P_{\text{channel inlet}} = \frac{1}{l_{\text{eff}}} \int_0^{l_{\text{eff}}} P_{\text{g},1}(z=0) - P_{\text{g},1}(z)\,\mathrm{d}z \tag{3}$$

$$\Delta P_{\text{channel outlet}} = \frac{1}{l_{\text{eff}}} \int_0^{l_{\text{eff}}} P_{\text{g},2}(z=0) - P_{\text{g},2}(z)\,\mathrm{d}z \tag{4}$$

柴油机颗粒捕集器内部碳烟层、灰分层视为特殊多孔介质层，根据达西定律，气体穿过载体过滤壁面、碳烟层与灰分层之间的压力差为：

$$\begin{aligned} p_{\text{g},1} - p_{\text{g},2} &= \Delta p_{\text{w}} + \Delta p_{\text{sd}} + \Delta p_{\text{ac}} + \Delta p_{\text{sc}} = \\ & v_{\text{w},1} \cdot \mu \cdot \left(\frac{F_{\text{nfw,A}} \cdot d_1 - F_{\text{nfw,B}} \cdot \delta_{\text{sc}} - F_{\text{nfw,B}} \cdot \delta_{\text{ac}}}{F_{\text{nfw,A}} \cdot d_1} \right) \cdot \\ & \frac{\rho_{\text{g},1}}{\rho_{\text{g},2}} \cdot \left(\frac{\delta_{\text{w}}}{k_{\text{w}}} + \frac{\delta_{\text{sd}}}{k_{\text{sd}}} \right) + \frac{F_{\text{nfw,A}} \cdot d_1}{F_{\text{nfw,B}} \cdot k_{\text{ac}}} \cdot \\ & \ln\left(\frac{F_{\text{nfw,A}} \cdot d_1}{F_{\text{nfw,A}} \cdot d_2 - F_{\text{nfw,B}} \cdot \delta_{\text{ac}}} \right) + \frac{F_{\text{nfw,A}} \cdot d_1}{F_{\text{nfw,B}} \cdot k_{\text{sc}}} \cdot \\ & \ln\left(\frac{F_{\text{nfw,A}} \cdot d_1 - F_{\text{nfw,B}} \cdot \delta_{\text{ac}}}{F_{\text{nfw,A}} \cdot d_1 - F_{\text{nfw,B}} \cdot \delta_{\text{sc}} - F_{\text{nfw,B}} \cdot \delta_{\text{ac}}} \right) \end{aligned} \tag{5}$$

Δp_{w} 为载体过滤壁面压降，公式如下：

$$\Delta p_{\text{w}} = v_{\text{w},1} \cdot \mu \cdot \frac{d_1 - 2\delta_{\text{sc}}}{d_1} \cdot \frac{\delta_{\text{w}}}{k_{\text{w}}} \tag{6}$$

Δp_{sd} 为深床过滤层压降，公式如下：

$$\Delta p_{\text{sd}} = v_{\text{w},1} \cdot \mu \cdot \frac{d_1 - 2\delta_{\text{sc}}}{d_1} \cdot \frac{\delta_{\text{sd}}}{k_{\text{sd}}} \tag{7}$$

Δp_{sc} 为碳饼层过滤层压降，公式如下：

$$\Delta p_{\text{sc}} = v_{\text{w},1} \cdot \mu \cdot \frac{d_1 - 2\delta_{\text{sc}}}{d_1} \cdot \frac{d_1}{2k_{\text{sc}}} \cdot \ln \frac{d_1}{d_1 - 2\delta_{\text{sc}}} \tag{8}$$

式中：δ_{sc} 为碳饼层厚度；k_{sc} 为碳烟层渗透率；δ_{sd} 为深床碳烟捕集层厚度；k_{sd} 为深床碳烟捕集层渗透率；δ_{ac} 为灰分层厚度；k_{ac} 为灰分层渗透率；δ_{w} 为载体壁面厚度；k_{w} 为载体壁面渗透率；μ 为流体的运动黏性系数；$\rho_{\text{g},1}$、$\rho_{\text{g},2}$ 分别为进、出口孔道中气流气体密度；$F_{\text{nfw,A}}$、$F_{\text{nfw,B}}$ 为载体孔道内几何系数。

2　仿真模型可靠性验证

采用国六高压共轨柴油机为试验机型，其主要技术参数如表 1 所示。

对柴油机加装后处理系统进行恒转速变扭矩试验，搭建整机耦合后处理一维热力学瞬态模型，对柴油机瞬态模型进行试验数据验证。试验采用国六碳化硅 DPF 载体，其主要参数如表 2 所示。

在恒转速 1 800 r/min 增扭矩、减扭矩工况下，一维热力学柴油机整机模型中进气流量、扭矩、燃油消耗率、NO_x、DPF 压降试验值与模拟值对比如图 2、图 3 所示（彩图参见电子版，以下同）。图 2 为恒转速增扭矩试验值与模拟值对比，负荷短时间内从 25% 上升到 70%；图 3 为恒转速减扭矩试验值与模拟值对比，负荷短时间内从 70% 下降到 25%。两种工况下柴油机瞬态进气流量、扭矩、燃油消耗率、NO_x 排放、DPF 压降试验值与模

表 1　发动机主要技术参数

Table 1　Primary technical parameters of the engine

名　称	参　数
发动机机型	直列 4 缸
燃油喷射系统	电控高压共轨系统
进气形式	增压中冷
压缩比	16.60
排量/L	2.97
额定功率/kW	125/(2 800 r•min^{-1})
最大转矩/(N•m)	500/(1 200～2 200 r•min^{-1})

表 2　DPF 技术参数

Table 2　DPF technical parameters

名称	参数
材质	碳化硅
直径/in	7.5
长度/in	5
孔密度/cpsi	300
体积/L	3.62
壁厚/mil	10
配比/%	1.22

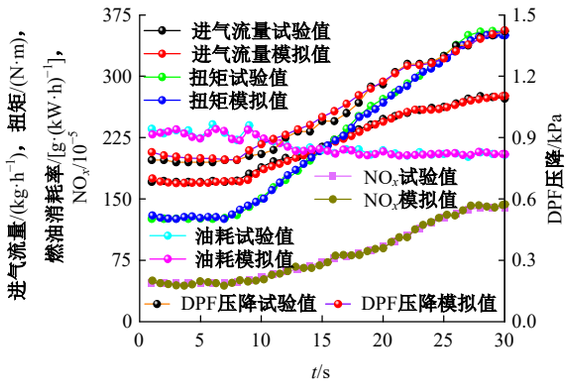

图 2 恒转速增扭矩工况试验值和模拟值对比

Fig. 2 Comparison of experimental and simulated torque values under constant speed increasing torque conditions

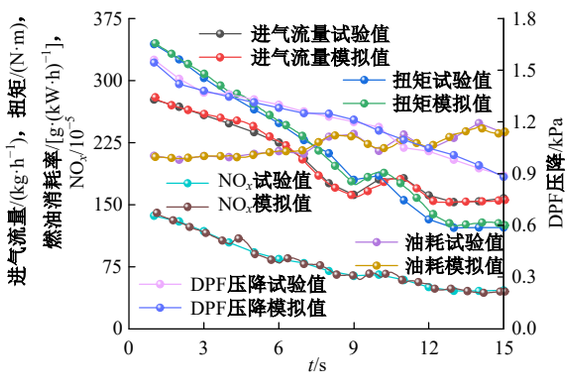

图 3 恒转速减扭矩工况试验值和模拟值对比

Fig. 3 Comparison of experimental and simulated torque values under constant speed decreasing torque conditions

拟值整体趋势基本相同,误差均在5%以内,说明该恒转速增扭矩、减扭矩瞬态模型精度较高,满足后续方案的计算。

3 加装 DPF 及不同灰分对柴油机瞬态性能的影响

3.1 加装 DPF 对柴油机瞬态性能的影响

针对不同海拔下加装 DPF 对柴油机瞬态特性的影响进行分析,并与原机下进行对比。设定初始碳载量为 6 g/L,灰分量为 33 g/L。

恒转速增转矩工况下对柴油机性能的影响如图 4 所示,图中:Initial 为原机;Initial+A 为柴油机加装后处理系统。图 4(a)显示了进气流量的变化。加装后处理系统后,相比于原机,进气流量更低,这种影响在工况瞬变初期较小,但在工况瞬变中后期较为明显。此外,后处理系统对柴油机瞬

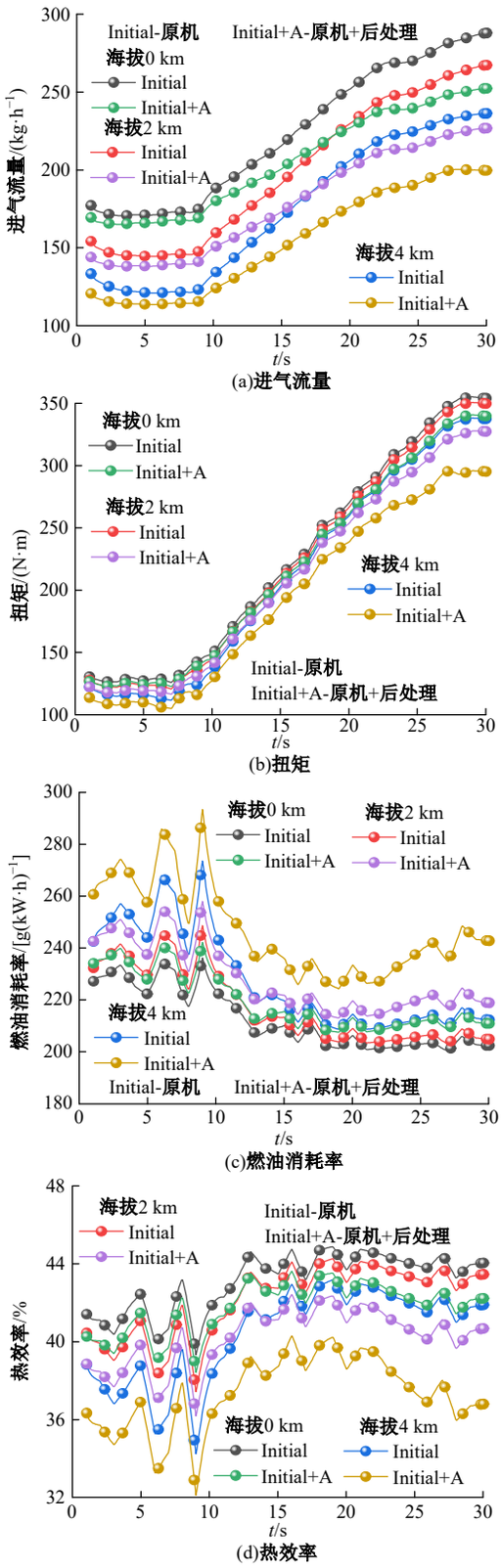

图 4 恒转速增扭矩下对柴油机性能的影响

Fig. 4 Impact of constant speed increasing torque on diesel engine performance

态进气流量的影响会随海拔升高而变大。此现象一是因为加装后处理系统会增加发动机排气背

压,从而进气效果下降;二是由于高海拔时大气压力降低,进气流量也会相应减小。

图 4(b)显示加装后处理系统后扭矩相比原机更低,且海拔越高扭矩越小。这一趋势在工况中后期更为显著。首先,由于在瞬态条件下,燃料供给无法立即响应负载变化而导致一段时间内扭矩不能立即提高到期望水平;其次,由于高海拔地区大气压力较低,机械部件的承受能力可能会有所下降,从而影响到柴油机的扭矩输出。

由图 4(c)可看出,在恒转速增扭矩工况下,燃油消耗率随海拔升高而增加。加装后处理系统后,瞬时燃油消耗率高于原机,尤其在瞬变工况中后期影响更为显著。这是由于排气背压随负荷增加而升高,使涡轮增压器接近喘振边界,从而导致进气流量落后于原机,进而降低燃烧效率。同时,高海拔环境也影响了柴油机的进气,降低了混合气质量,导致更多的燃油浪费;而在工况初期会出现燃油消耗率的较大波动是因为初期发动机处于冷机状态,在此阶段没有后期的热机状态稳定,导致了燃油消耗率的波动。

图 4(d)为恒转速增扭矩时柴油机的热效率,加装后处理系统后柴油机热效率在不同海拔下均低于原机。虽然喷油量持续增加,但由于增压器的迟滞响应问题,空燃比下降,导致油气不匹配,工况瞬变后期燃烧恶劣;后处理系统的加入使排气背压增加,进气状态更加糟糕,再加之工况初期柴油机处于冷机状态,致使工况瞬变后期,加装后处理系统的柴油机热效率低于原机的变化趋势更加明显。

在恒转速减扭矩的情况下柴油机性能的变化如图 5 所示。图 5(a)显示,原机与加装后处理系统的柴油机进气流量在工况瞬变的初始阶段呈现明显波动,且随着海拔升高,进气流量逐渐减小。这是因为工况瞬变初始阶段负载较大,DPF 的压降远高于中后期,从而使燃烧更加充分,减少了碳烟生成量,降低了排气背压,因此进气流量较高;而随着海拔的升高,大气压力下降,导致进气流量减少。

图 5(b)为恒转速减扭矩工况下后处理系统对柴油机扭矩的影响,整体趋势与进气流量相同。瞬态过程中由于增压器迟滞等原因,导致增压压力和进气量出现不同程度延迟而偏离目标值,并且在瞬态工况下,过量空气系数会由于进气延迟而下降,从而影响发动机的扭矩;而在高海拔下发动机进气量较低,因此这一现象更为严重,致使高海拔情况下后处理系统对柴油机瞬态工况扭矩影响较大。

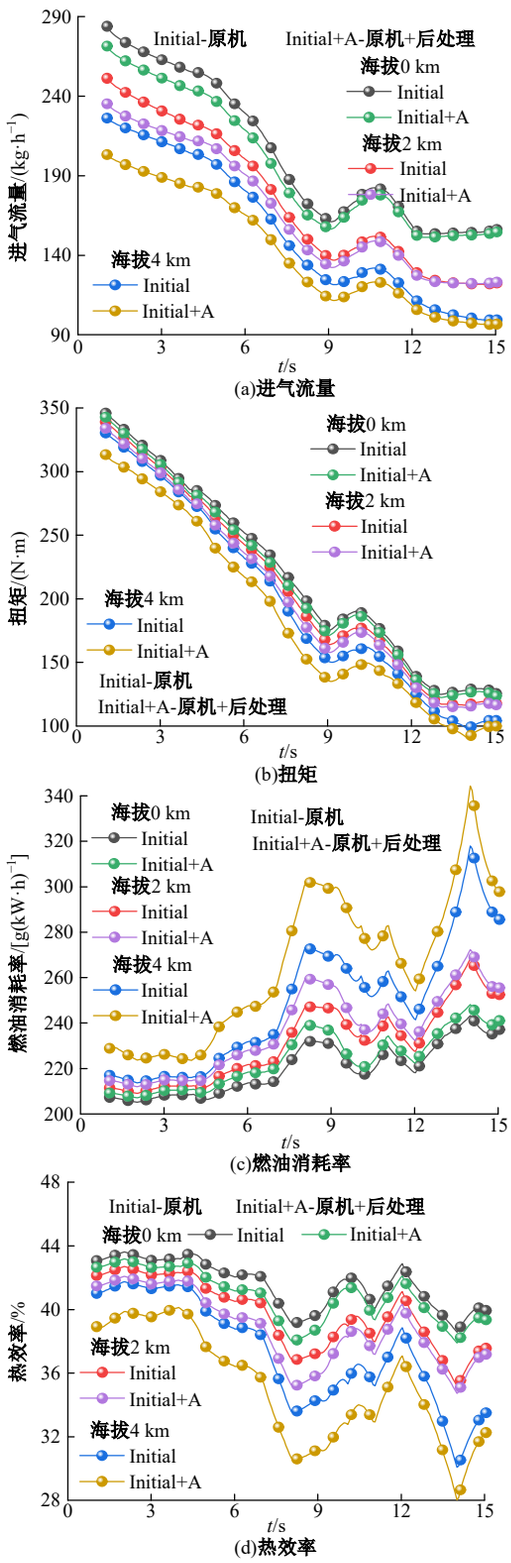

图 5　恒转速减扭矩下对柴油机性能的影响

Fig. 5　Impact of constant speed decreasing torque on diesel engine performance

图 5(c)为恒转速减扭矩时的燃油消耗率,加装后处理系统后燃油消耗率均大于原机,且在中后期和高海拔时达到较大值。首先,由于 DPF 会增加排气系统阻力,从而增加发动机的负荷,导致发动机在恒转速下需要更多的燃料来维持相同的输出功率而增加了燃油消耗率;其次,DPF 会引入额外的热量到排气系统中,有助于促进颗粒物的氧化和燃烧。然而,这会导致一些未完全氧化的燃料分子进入排气中,增加了燃料消耗。在高海拔地区由于气温较低,氧气不足会限制燃料的完全燃烧,降低燃烧效率,从而增加燃料消耗率。加装 DPF 后会增加排气系统的阻力,进一步影响柴油机性能。

图 5(d)显示减扭矩时的热效率波动幅度相对于增扭矩时较小,恒转速减扭矩工况时油气匹配较好,增压器的响应滞后影响小,对进气流量的影响较低。加装后处理系统后对热效率的影响主要位置在工况瞬变中后期,这时柴油机扭矩下降,进气流量减少,燃烧没有工况初期好,与增扭矩时呈现出相反的变化趋势。海拔较高时同样会因进气流量和扭矩下降导致热效率相对较低。

3.2 不同灰分层渗透率对柴油机瞬态性能的影响

本节通过对比含钙基(Ca)、锌基(Zn)和镁基(Mg)添加剂的润滑油产生的灰分,针对不同灰分层渗透率对柴油机瞬态性能及 DPF 压降的影响进行研究。碳载量选择 6 g/L,研究镁基(Mg)、锌基(Zn)2 种灰分时灰分量选择 33 g/L,研究钙基(Ca)灰分时灰分量选择 22 g/L,探究 3 种不同灰分层渗透率对柴油机瞬态特性的影响。3 种灰分层渗透率如表 3 所示。

恒转速增扭矩工况下灰分层渗透率对柴油机瞬态性能的影响如图 6 所示。图 6(a)显示,高渗透率的灰分层对柴油机瞬态特性的影响最小,而低渗透率的灰分层对瞬态特性的负面影响最大。主要是灰分层渗透率会影响到 DPF 内部对碳烟颗粒的捕集效率,灰分层渗透率越大,捕集到的碳烟颗粒粒径越大,导致小粒径碳烟无法捕集,捕集效果变差,更多的小粒径颗粒通过排气被排出,致使 DPF 压降变小,此时 DPF 排气背压更低,对柴

表 3 不同润滑油添加剂形成的灰分层渗透率[17]

Table 3 Ash permeability formed by different lubricating oil additives[17]

灰分层类型	润滑油添加剂	灰分层渗透率/m^2
Ca基灰分层	Ca基润滑油	1.67×10^{-14}
Zn基灰分层	Zn基润滑油	8.56×10^{-14}
Mg基灰分层	Mg基润滑油	5.74×10^{-13}

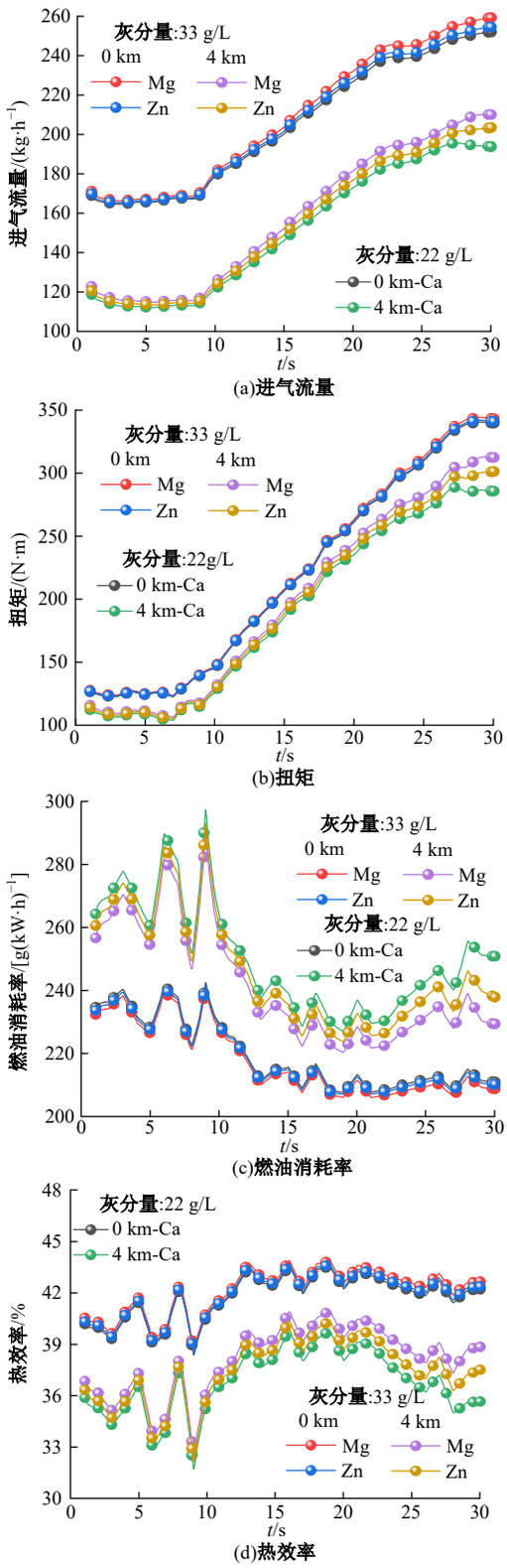

图 6 恒转速增扭矩下灰分层渗透率对柴油机性能的影响

Fig. 6 Impact of ash layer permeability on diesel engine performance under constant speed increasing torque

油机瞬态工况下的进气流量影响较小。在工况瞬变初期,对进气流量影响不大,而3种灰分层在工况瞬变中后期对柴油机瞬态进气流量的影响逐渐增加,并且在高海拔工况时,Ca基灰分形成的灰分层对增压器的影响最大。工况瞬变中后期,进气流量随负荷的增加而上升,导致排气流量变大,使DPF压降增大产生更大的排气背压;加上瞬态工况下增压器的响应迟滞问题,3种不同的灰分层对柴油机的进气流量影响越来越大。高海拔下,柴油机的进气质量下降,排气背压随着负荷的增加而上升,燃烧恶化,碳烟颗粒生成量和排气温度增加,导致DPF压降升高,从而影响柴油机进气流量。

由图6(b)可知,灰分层渗透率越大,柴油机瞬态工况扭矩越大。在低海拔时,钙基灰分对柴油机瞬态扭矩的影响效果最大。首先,润滑油添加剂中主要是Zn基和Mg基时,灰分层渗透率较大,此时DPF内部相较于Ca基灰分层时捕集的碳烟颗粒较少,灰分层产生的压降较低,排气背压较低,此时进气流量较大,使缸内燃烧更加充分,柴油机输出扭矩更大;其次,缸内燃烧更加充分时,燃烧产生的碳烟颗粒少,DPF捕集的碳烟颗粒少,压降低,对排气背压影响小,碳烟颗粒、进气流量、排气背压三者相互影响。柴油机瞬态工况下,高海拔下的扭矩更低,且工况瞬变中后期灰分类型对柴油机扭矩影响更大。高海拔下进气环境恶化,致使进入缸内的新鲜充量低,此时喷油量随着负荷的增加持续增加,但增压器响应迟滞问题导致空燃比下降,燃烧不充分,产生更多碳烟颗粒后被DPF所捕集,排气背压也因此升高,造成柴油机瞬态扭矩的影响在瞬变中后期较大。

图6(c)为恒转速增扭矩下,燃油消耗率的变化情况。燃油消耗率随负荷的增加而逐渐降低,低海拔情况下,3种不同灰分层对柴油机瞬态的燃油消耗率影响较小,在高海拔情况下,对燃油消耗率的影响较大。Ca基灰分因为灰分层渗透率较小,DPF压降较大,排气背压较高,影响进气流量,缸内燃烧恶化,致使更多的燃油被浪费。

由图6(d)可知,恒转速增扭矩工况下,工况初期热效率差别较小,中后期Ca基灰分因为灰分渗透率较小导致DPF压降大,燃油浪费较多,热效率也较小;而高海拔时由于进气量较低,热效率也相对较小,并且在工况初期由于处于冷机状态,因此会对燃油消耗率和热效率产生影响,出现一个波动值。

恒转速减扭矩工况下灰分层渗透率对柴油机性能的影响如图7所示。图7(a)显示,恒转速减

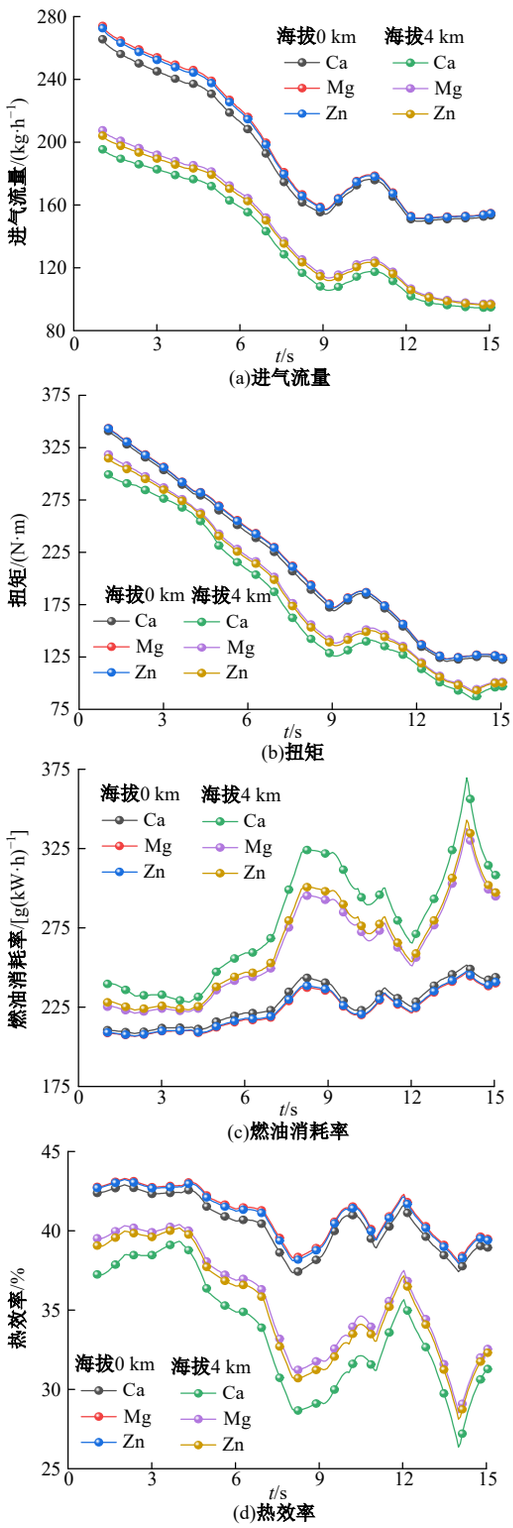

图7　恒转速减扭矩下灰分层渗透率对柴油机性能的影响

Fig. 7　Impact of ash layer permeability on diesel engine performance under constant speed decreasing torque

扭矩工况下,3种灰分层渗透率对进气流量的影响主要在工况瞬变初期,并且在工况中对进气流量的影响越来越小。这是因为DPF压降随着负荷的降低而减小,所以排气背压变小。由此可见,在恒转速减扭矩工况下,灰分层渗透率在进气流量较大时较为敏感。图7(b)为恒转速减扭矩工况下,3种灰分层渗透率对柴油机扭矩的影响,整体变化趋势与柴油机恒转速减扭矩工况下进气流量相似。

图7(c)为恒转速减扭矩工况下,灰分层渗透率对柴油机燃油消耗率的影响,燃油消耗率随负荷的增加逐渐上升,高海拔下变化趋势较为明显,低海拔下不同灰分层渗透率对燃油消耗率的影响不大。这是因为恒转速减扭矩中,低负荷时燃油消耗率较高,而高海拔下燃油消耗率波动幅度大是因为进气质量下降影响缸内燃烧,使燃油消耗率上升。图7(d)为恒转速减扭矩工况下热效率的变化趋势,灰分层渗透率越小,热效率越小,海拔升高还会导致热效率下降,且发动机在高海拔工作时的不稳定性,在工况后期会导致热效率的波动。

3.3 载体壁厚及灰分层渗透率对DPF压降的影响

图8、图9为恒转速增扭矩、减扭矩工况下,变海拔下壁厚对DPF压降的影响。壁厚越厚,DPF压降越高:一方面,壁厚越厚,载体孔道内部可流通的面积越小,从管道进入孔道的排气流量越多,导致流动损失越大;另一方面,壁厚越厚,会导致过滤壁面越大,增强载体内部捕集的作用,造成DPF压降越高。

如图8所示,在恒转矩增扭矩工况中,高海拔下压降在瞬变初期相较于低海拔较低,在工况瞬变后期会发生转折。在瞬变初期,高海拔下的排气流量小于低海拔,此时虽然因高海拔下缸内燃烧恶化产生的碳烟颗粒多,但排气流量才是影响压降的主导因素,所以高海拔下的压降较低;工况瞬变中后期,由于增压器的响应迟滞问题,空燃比下降,生成碳烟量与缸内高温废气增加,载体内部的温度逐渐上升,此时高海拔下排气温度高于低海拔,孔道内部分子由于温度的提升运动剧烈,流动损失增加,DPF压降发生转折现象。

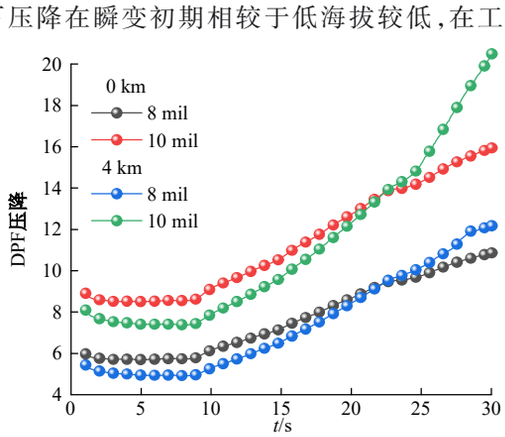

图8 恒转速增扭矩下DPF壁厚对DPF压降的影响

Fig. 8 Impact of DPF wall thickness on DPF pressure drop under constant speed increasing torque

如图9所示,由于进气流量是受到海拔影响的,低海拔下排气流量较大,DPF压降高,加上恒转速减扭矩工况下缸内燃烧较好,生成碳烟量低,所以在恒转速减扭矩的过程中,低海拔下压降更高。

图10、图11为恒转速增扭矩、恒转速减扭矩时灰分层渗透率对DPF压降的影响。如图10所示,灰分层渗透率越低,DPF压降越大,DPF压降随灰分层渗透率的变小而逐渐增加。在低海拔

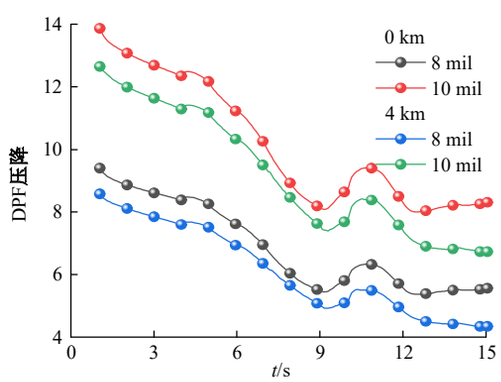

图9 恒转速减扭矩下DPF壁厚对DPF压降的影响

Fig. 9 Impact of DPF wall thickness on DPF pressure drop under constant speed decreasing torque

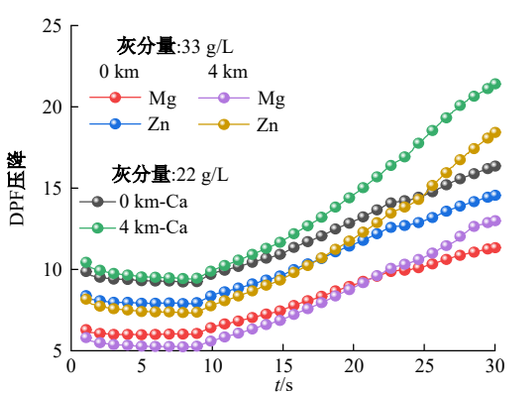

图10 恒转速增扭矩下灰分层渗透率对DPF压降的影响

Fig. 10 Impact of ash layer permeability on DPF pressure drop under constant speed increasing torque

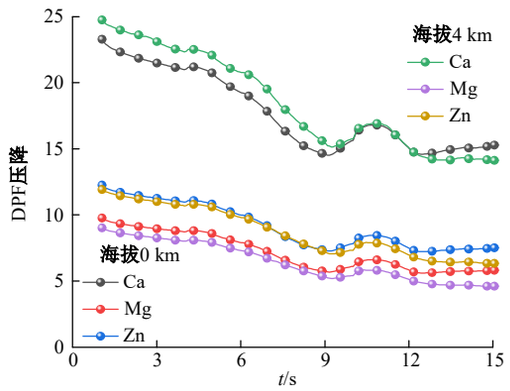

图 11　恒转速减扭矩下灰分层渗透率对 DPF 压降的影响

Fig. 11　Impact of ash layer permeability on DPF pressure drop under constant speed decreasing torque

时，Mg 基、Zn 基灰分在恒转速增扭矩工况瞬变初期高于高海拔，但在工况瞬变后期，趋势发生逆转，高海拔下 DPF 压降在负荷后期较大。这是因为在工况瞬变初期，低海拔下的排气流量高于高海拔，虽然此时的缸内燃烧更加充分，产生碳烟颗粒少，但影响 DPF 压降的关键因素是进气流量。在工况瞬变中后期，空燃比下降，缸内燃烧产生更多碳烟颗粒数，并且高海拔下进气流量较低，缸内燃烧恶化，缸内高温废气增加，此时 DPF 孔道内温度上升，分子运动更加剧烈，造成压力损失增加，使工况后期高海拔时 DPF 压降高于低海拔。Ca 基灰分量低于 Mg 基、Zn 基灰分，但 DPF 压降更高，意味着选取含 Ca 基灰分的润滑油添加剂，更易导致 DPF 压降升高，再生频繁，缩短载体的工作寿命年限。

如图 11 所示，恒转速减扭矩工况时，灰分渗透率对 DPF 压降的影响在工况瞬变前期的变化趋势大于工况瞬变后期。工况初期进气流量较大，导致排气气流从管道进入孔道内部气流速度加快，颗粒运动更加剧烈致使 DPF 压降变化趋势明显。Ca 基灰分对 DPF 压降的影响相较于其他 2 种类型的灰分更大，且 DPF 压降的变化趋势整体在前端，此时排气流量是 DPF 压降变化的主要原因。

4　DPF 载体结构选型优化

4.1　基于附加燃油消耗率对 DPF 载体配比选型优化

基于附加燃油消耗率对 DPF 载体结构选型进行优化，首先设定 5 种不同载体配比（载体配比为载体体积与发动机排量之比），探究加装后处理系统后，不同载体配比及不同载体直径对柴油机附加燃油消耗率的影响，附加燃油消耗率指加载后处理系统增加的燃油消耗率。载体配比具体参数如表 4 所示。

不同载体配比在不同海拔下对附加燃油消耗率的影响如图 12 所示。图 12(a)显示，低海拔下 DPF 附加燃油消耗率随着配比的增加而逐渐下降；在碳载量为 0 g、配比分别为 1.1 和 1.5 时，Ca 基灰分导致的附加燃油消耗率分别为 2.99% 和 2.02%；相比之下，Zn 基灰分的消耗率分别为

表 4　不同 DPF 配比载体参数

Table 4　Different carrier parameters of DPF

参数	配比				
	1.1	1.2	1.35	1.44	1.53
直径/mm	143.8	190.5	170.2	190.5	170.2
载体长度/mm	203.2	127.0	177.8	152.4	203.2
载体体积/L	3.30	3.60	4.05	4.34	4.60
总灰分量/g	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30
总碳载量/g	0/18	0/18	0/18	0/18	0/18

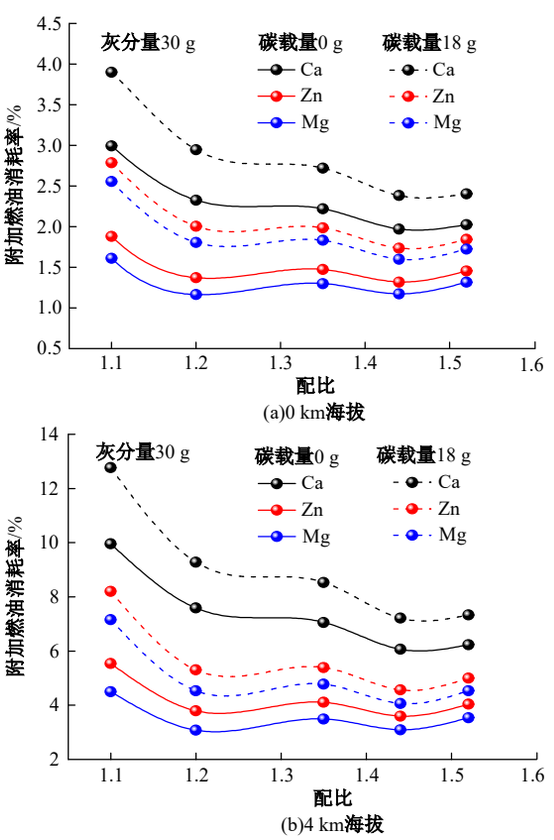

图 12　不同海拔下载体配比对附加燃油消耗率的影响

Fig. 12　Impact of substrate ratio on additional fuel consumption at different altitudes

1.87%和1.45%,Mg基灰分分别为1.61%和1.31%。可以明显看出,Ca基灰分的变化幅度最大。这是因为灰分中含有Ca基时,灰分层的渗透率相对较低,更有助于捕集较小粒径的颗粒物,所以DPF的压降升高,从而提升柴油机的排气背压,最终引起DPF附加燃油消耗率的增加。相同灰分层渗透率下,有碳烟加载时DPF附加燃油消耗率明显高于无碳烟加载,配比为1.1时,3种灰分成分在有无碳烟加载时附加燃油消耗率分别相差0.91%、0.91%、0.94%,配比为1.5时附加燃油消耗率分别为0.38%、0.39%、0.41%,载体配比越小,对附加燃油消耗率越敏感。这是因为在相同灰分加载条件下,配比越小,孔道内部的碳容灰能力越低。当碳烟加载时,碳烟层与灰分层会进一步减少孔道的流通面积。一方面,排气气流进入孔道时,由于气流速度的突然变化,会增加流动损失;另一方面,排气气流通过壁面多孔介质时,压力损失也会增加。这些因素导致DPF压降上升,进而提高柴油机的排气背压,影响柴油机的燃油经济性。

图12(b)为高海拔下载体配比对DPF附加燃油消耗率的影响。附加燃油消耗率的变化趋势随配比增加而减少,高海拔下DPF附加燃油消耗率数值总体高于低海拔,高海拔配比为1.1时DPF附加燃油消耗率最高达到12.7%。高海拔时柴油机瞬态工况以及大气环境导致进气条件进一步恶劣,燃烧恶化。

4.2 基于附加燃油消耗率对DPF载体直径选型优化

不同海拔条件下,载体直径对附加燃油消耗率的影响如图13所示。图13(a)显示,在低海拔时,随着载体直径的增大,附加燃油消耗率逐渐降低。其中,Ca基灰分对附加燃油消耗率的影响最大,且当碳载量为15 g时,其影响程度大于无碳载量。造成这一现象的原因有两方面:首先,在相同载体长度下,载体直径越大,气流通过的截面积相对越小,导致DPF压降越小;其次,随着载体直径的增加,在相同孔目数下,孔道数量也增加,碳载量和灰分量相同的情况下,单孔道内形成的碳饼层和灰分层较薄,使气流通过壁面时的能量损失较小,进一步降低了DPF压降。这2个因素共同作用,使柴油机排气背压下降,进气流量增加,从

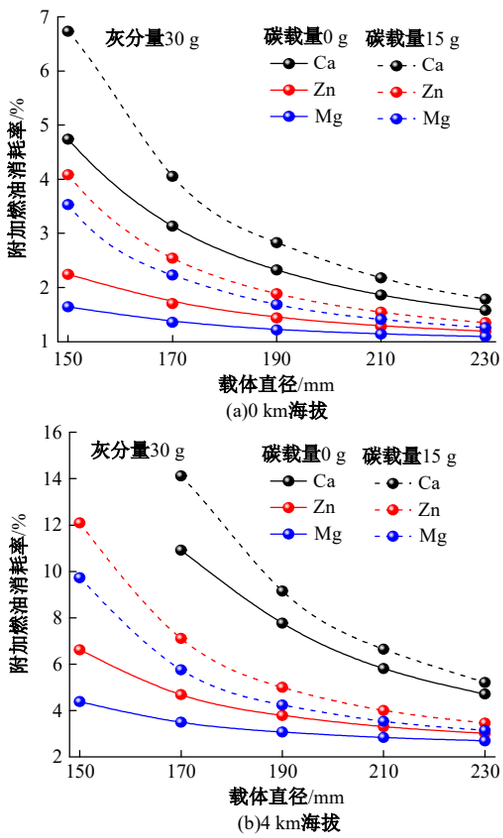

图13 不同海拔下载体直径对附加燃油消耗率的影响

Fig. 13 Impact of substrate diameter on additional fuel consumption at different altitudes

而降低了DPF附加燃油消耗率。Ca基灰分的灰分层渗透率较低,在载体孔道内更容易捕集较小颗粒物,从而导致柴油机排气背压上升,影响进气流量,最终导致附加燃油消耗率升高。

载体直径大于190 mm时,DPF附加燃油消耗率逐渐平缓,低海拔时Ca基灰分导致的附加燃油消耗率均低于2%;而载体直径为150、170 mm时,附加燃油消耗率达到4.7%、3.13%,接近2倍,并且在有碳载量时,DPF附加燃油消耗率会变得更敏感。

图13(b)显示,在高海拔条件下,DPF附加燃油消耗率整体呈现上升趋势。当载体直径大于190 mm时,由Ca基灰分引起的附加燃油消耗率均超过4.5%,约为低海拔条件下的2倍;而当载体直径为170 mm时,附加燃油消耗率达到10%,显著高于低海拔条件下的水平。

5 结 论

(1)在恒转速增扭矩工况下,后处理系统会导

致柴油机的进气流量、扭矩和热效率低于原机,同时使柴油燃油消耗率高于原机。海拔越高,瞬态工况中后期对柴油机性能的影响越显著;而在恒转速减扭矩工况下,后处理系统对柴油机瞬态特性的影响主要集中在负荷瞬变的初期。

(2)高渗透率的灰分层对柴油机瞬态特性的影响较小,而低渗透率的灰分层则对瞬态特性产生较大的负面影响。随着灰分层渗透率的降低,DPF 压降增大,特别是在恒转速增扭矩工况下,对柴油机瞬态特性的影响更加显著。此外,这种影响随着海拔和负荷的增加而进一步加剧。

(3)随着灰分层渗透率的提高,DPF 载体的容灰能力也随之增加。当灰分量为 22 g/L 时,由 Ca 基灰分产生的压降依然高于 Mg 基和 Zn 基灰分在灰分量为 33 g/L 时产生的压降。

(4)低海拔条件下,DPF 对附加燃油消耗率的影响较小。载体配比增大,DPF 对柴油机附加燃油消耗率的影响减小,载体配比超过 1.2 和直径超过 190 mm 后影响趋缓。从附加燃油消耗率的角度考虑,最佳载体载体配比为 1.2～1.3。

参考文献:

[1] Meng Z, Chen C, Li J, et al. Particle emission characteristics of DPF regeneration from DPF regeneration bench and diesel engine bench measurements[J]. Fuel, 2020, 262: No. 116589.

[2] 张韦, 陈朝辉, 孔孟茜, 等. 柴油机催化型颗粒捕集器喷油助燃再生特征[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 92-99.
Zhang Wei, Chen Zhao-hui, Kong Meng-qian, et al. Diesel engine catalytic particle trap injection combustion regeneration characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(8): 92-99.

[3] Yamamoto K, Sakai T. Simulation of continuously regenerating trap with catalyzed DPF[J]. Catalysis Today, 2015, 242: 357-362.

[4] Han Y, Zhang L, Liu Z, et al. Investigation of transient deterioration mechanism and improved method for turbocharged diesel engine[J]. Energy, 2016, 116: 250-264.

[5] 杨凯, 霍柏琦, 姚晔, 等. 船用大功率柴油机瞬态工况油气响应及燃烧特性研究[J]. 推进技术, 2022, 43(8): 410-415.
Yang Kai, Huo Bo-qi, Yao Ye, et al. Oil and gas response and combustion characteristics of marine high power diesel engine under transient conditions[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(8): 410-415.

[6] Rakopoulos C D, Dimaratos A M, Giakoumis E G, et al. Exhaust emissions estimation during transient turbocharged diesel engine operation using a two-zone combustion model[J]. International Journal of Vehicle Design, 2009, 49(1-3): 125-149.

[7] Yum K K, Lefebvre N, Pedersen E. An experimental investigation of the effects of cyclic transient loads on a turbocharged diesel engine[J]. Applied Energy, 2017, 185: 472-481.

[8] Liu Z C, Yu K B, Tian J, et al. Influence of rail pressure on a two-stage turbocharged heavy-duty diesel engine under transient operation[J]. International Journal of Automotive Technology, 2017, 18(1): 19-29.

[9] 陈贵升, 李青, 陈春林, 等. 灰分沉积对不同结构 CDPF 再生特性的影响[J]. 汽车工程, 2020, 42(6): 725-733.
Chen Gui-sheng, Li Qing, Chen Chun-lin, et al. Effect of ash deposition on the regeneration properties of CDPF with different structures[J]. Automotive Engineering, 2020, 42(6): 725-733.

[10] 李志军, 何丽, 姜瑞, 等. 柴油机微粒捕集器灰分分布对其压降的影响评价[J]. 吉林大学学报:工学版, 2017, 47(6): 1760-1766.
Li Zhi-jun, He Li, Jiang Rui, et al. Evaluation of influence of ash distribution on diesel particulate filter pressure drop[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2017, 47(6): 1760-1766.

[11] 张俊, 帅石金, 肖建华. 灰分对柴油机颗粒捕集器性能影响研究综述[J]. 内燃机工程, 2018, 39(6): 11-23.
Zhang Jun, Shuai Shi-jin, Xiao Jian-hua. A review of ash effects on DPF performance[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2018, 39(6): 11-23.

[12] 蒲云飞, 孟忠伟. DPF 内颗粒沉积特性分析[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2018, 47(5): 92-96.
Pu Yun-fei, Meng Zhong-wei. Analysis of particulate deposition characteristics in the DPF[J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2018, 47(5): 92-96.

[13] Sappok A, Munnis S, Wong V W. Individual and synergistic effects of lubricant additive components on diesel particulate filter ash accumulation and performance[C]// Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conferenc, Torino, Italy, 2012: 531-546.

[14] Gurel C, Ozmen E, Yilmaz M, et al. Multi-objective optimization of transient air-fuel ratio limitation of a diesel engine using DoE based Pareto-optimal approach[J]. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2017, 10: 299-307.

[15] Hu B, Yang J, Li J, et al. Intelligent control strategy for transient response of a variable geometry turbocharger system based on deep reinforcement learning[J]. Processes, 2019, 7(9): 601.

[16] 孙万臣, 刘高, 郭亮, 等. 微粒捕集器对高压共轨柴油机超细微粒捕集特性[J]. 吉林大学学报:工学版, 2016, 46(1): 133-139.
Sun Wan-chen, Liu Gao, Guo Liang, et al. Efficiency of DPF on ultrafine particles in a common-rail diesel engine[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2016, 46(1): 133-139.

[17] Wang Y, Wong V, Sappok A, et al. The sensitivity of DPF performance to the spatial distribution of ash inside DPF inlet channels[C]// SAE Technical Paper, Detroit, America, 2013:No. 2013011584.