

上海市船舶与海洋工程学会 2018 年学术年会轮机专场论文专栏

生物柴油发动机的催化型连续再生系统的仿真研究

郑 烨, 乔信起, 李新令

(上海交通大学动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200240)

摘 要: 建立了 CCRT 系统模型, 并根据试验参数对模型进行了标定。分别比较了不同工况下, 燃用 B20、BD50、BD100 时 DOC 对常规排放气体的转化效率以及 CPF 的颗粒物再生情况。发现: DOC 对 NO 的转换效率各工况差别较大, 主要受排气温度影响; 对 CO 及 HC 整体转化效率处于较高水平, 去除效果较为理想。平衡时 CPF 内残留的颗粒物质量随转速升高而增加, 随负荷增加而减少; 低负荷、高转速工况是 CPF 再生效果最差的工况。随着生物柴油掺混比例的上升, DOC 的 NO₂ 出口浓度及 NO 转化效率上升, 而对 DOC 的 HC 和 CO 去除效果影响较小; CPF 残留颗粒物质量在高转速区域有所下降, 而在中低负荷区域有所上升。主要原因是燃用生物柴油引发的排气温度降低和颗粒物排放降低。低负荷、高转速工况下, 燃用 BD50 时 CPF 的再生效果最佳。

关键词: 催化型连续再生系统; 生物柴油; 柴油机

中图分类号: TK421⁺.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4357(2019)02-0001-07

Simulation of Catalyzed Continuously Regenerating Trap for Biodiesel Engine

Zheng Ye, Qiao Xinqi, Li Xinling

(Key Laboratory of Power Machinery and Engineering, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: The model of CCRT system was established and calibrated according to the experimental parameters. The conventional gas emission conversion efficiency of DOC and the performance of the particle regeneration of CPF were compared under different working conditions, and with different fuels such as B20, BD50 and BD100. The results indicated that the NO conversion efficiency of DOC varied greatly among different working conditions, which was mainly affected by exhaust temperature, and the conversion efficiency of CO and HC was high and its removal efficiency was relatively ideal. The quality of residual particles in CPF at equilibrium increased with the increase of speed and decreased with the increase of load. The condition of low load and high speed was the one with the worst regeneration effect of CPF. With the increase of the proportion of biodiesel mixing, the density of NO₂ export of DOC and the conversion efficiency of NO increased, while had little effect on the removal effect of HC and CO of DOC. As the proportion of biodiesel mixing increased, the quality of CPF residual particles decreased in the high speed and increased in the middle and low load. The main reason could be the reduction of exhaust temperature and emission of particulate matter caused by biodiesel. Under the condition of low load and high speed, CPF had the best regeneration effect when burning BD50.

Key words: CCRT; biodiesel; diesel engine

收稿日期: 2018-10-08

基金项目: 国家自然科学基金 (91741122), 上海市科学技术委员会科研计划项目 (16dz1206703)。

作者简介: 郑烨(1990-), 男, 硕士, 主要研究方向为内燃机排放后处理技术, zhengye@sjtu.edu.cn。

0 引 言

近年来机动车排放带来的环境问题,以及能源危机问题是全世界关注的热点。颗粒物捕集技术被认为是降低机动车颗粒物排放的一项可靠技术;而生物柴油作为车用代用燃料不但可以缓解能源问题,还可以减少污染物排放^[1-2]。近年来,国内外对颗粒物捕集技术,特别是颗粒物捕集器的再生问题,进行了大量研究,取得了丰富的成果。催化型连续捕集系统(Catalyzed Continuously Regenerating Trap, CCRT)通过将氧化催化器(Diesel Oxidation Catalyst, DOC)置于上游,在氧化排气中的 HC 和 CO 等污染物的同时,将尾气中 90% 以上的 NO 氧化为 NO₂;将催化颗粒物捕集器(Catalyzed diesel Particulate Filter, CPF)置于下游,在捕集颗粒物同时利用上游 DOC 及 CPF 催化剂涂层氧化的 NO₂,实现对颗粒物的持续氧化。相较于其他后处理装置,CCRT 技术能高效地去除尾气中的 PM、HC 等污染物,且能源消耗更低,具有巨大的发展潜力和应用前景。Andrew 等人将 DOC 与 CPF 模型结合^[3],建立了 CCRT 系统的数学模型,并验证了 CCRT 系统在较低的排气温度和较低的 NO_x/PM 比值的工况条件下的适应性。在此基础上,Venkata 等人^[4]通过试验的方式,研究了装有 CCRT 系统的重型柴油机的排放特性。唐韬等人^[5]对 CCRT 系统在 ESC 测试工况下的捕集和再生特性进行了试验研究。另一方面,国内外对生物柴油也进行了大量研究。Schumacher 等人^[6]将大豆生物柴油燃料应用于重型柴油机,研究了不同掺混比例的生物柴油的排放特性。张允华等人对装有 CCRT 系统的掺混生物柴油的公交车在城市道路下的颗粒物^[7]和气态污染物^[8]排放特性进行了试验研究。

目前的研究多集中于单独的 CCRT 系统技术或者生物柴油技术,对于两者相结合的研究较少,且多以试验研究方式为主,而较少采用模拟仿真的研究方式。与试验相比,仿真模拟具有效率高、成本低等优势,因此本文采用仿真方式,以 GT-Power 软件为平台,建立了 CCRT 系统的一维仿真模型,研究了 CCRT 系统在燃用生物柴油发动机上的应用。

1 CCRT 系统模型建立及标定

1.1 CCRT 系统模型建立

图 1 为本文模拟的 CCRT 系统的外观。图 2 为利用 GT-Power 软件平台,建立的 CCRT 一维仿真

模型。CCRT 系统模型由 DOC 模型和 CPF 模型两部分组成,两部分间隔 40 mm,DOC 和 CPF 模型的相关参数见表 1。



图 1 CCRT 系统外观

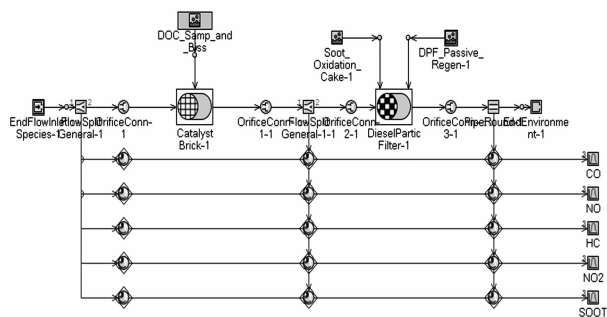


图 2 基于 GT-Power 的 CCRT 系统模型

在本文采用的化学反应动力学模型中,将排气中的 HC 简化为 C₃H₆,同时忽略氢、硫等的氧化,用 NO 和 NO₂的总和代表所有的 NO_x^[9]。表 2 列举了本文所采用的 DOC 及 CPF 内发生的化学反应及反应速率。在 DOC 中主要发生的反应是反应 1、反应 2 和反应 3;反应 4 和反应 5 为发生在 CPF 壁面和碳烟层的热氧化反应和 NO₂辅助氧化反应。根据 Andrew 等人的研究^[10]:NO 二次转化为 NO₂的反应主要发生在壁面内部,因此 CPF 的壁面除发生反应 4 和反应 5 外,还发生反应 3。

表 1 DOC 及 CPF 主要参数

项目	DOC 参数	CPF 参数
载体材料	FeCrAl	堇青石
载体直径/mm	274	266.7
载体长度/mm	150	286
孔密度	300	200
孔道壁厚/mm	0.177 8	0.33
贵金属	Pt: Pd = 5: 1	Pt: Pd = 5: 1
涂覆量/(g·m ⁻³)	883	353
孔隙度	50%	50%

在各反应速率的表达式中,C 为气体浓度;A

为反应指前因子； E 为反应活化能； T 为温度； R 为理想气体常数； K_{eq} 为平衡常数； C_R 为 1 气压（参考压力）下的浓度； f 为 PM (O_2) 氧化反应的 CO 选择系数； g 为 PM (NO_2) 氧化反应的 CO 选

择系数； G 为抑制项，可表达为^[11]：

$$G = (1 + K_{CO} C_{CO})^2 (1 + K_{NO} C_{NO}) \quad (1)$$

式中： K 为吸附常数，可用阿累尼乌斯公式表示。

表 2 模型中应用的化学反应及反应速率

序号	描述	化学反应方程式	反应速率
1	CO 氧化	$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$	$R_1 = \frac{A_{CO} e^{-\frac{E_{CO}}{RT}} C_{CO} C_{O_2}^{[11]}}{G}$
2	HC 氧化	$C_3 H_6 + \frac{9}{2} O_2 \rightarrow 3CO_2 + 3H_2 O$	$R_2 = \frac{A_{C_3H_6} e^{-\frac{E_{C_3H_6}}{RT}} C_{C_3H_6} C_{O_2}^{[11]}}{G}$
3	NO 氧化	$NO + \frac{1}{2} O_2 \rightleftharpoons NO_2$	$R_3 = \frac{A_{NO} e^{-\frac{E_{NO}}{RT}} \sqrt{C_{O_2}} C_{NO}}{G} (1 - (\frac{C_{NO_2}}{C_{NO} K_{eq}} \sqrt{\frac{C_R}{C_{O_2}}}))^{[11]}$
4	PM (O_2) 热氧化	$C + (1 - \frac{f_{CO}}{2}) O_2 \rightarrow f_{CO} CO + (1 - f_{CO}) CO_2$	$R_4 = C_{O_2} A_{th} e^{-\frac{E_{th}}{RT}}^{[12]}$
5	PM (NO_2) 氧化	$C + (2 - g_{co}) NO_2 \rightarrow g_{co} CO + (1 - g_{co}) CO_2 + (2 - g_{co}) NO$	$R_5 = C_{NO_2} A_{NO_2} e^{-\frac{E_{NO_2}}{RT}}^{[12]}$

1.2 CCRT 系统模型标定

本文以文献 [13] 所列的标准 DOC 和 CPF 台架测试中 75% 负荷条件下，800、1 100、1 400、1 700、2 000、2 300 ($r \cdot \min^{-1}$) 转速工况点的测试结果，对上述建立的 CCRT 系统模型进行标定。以台架测试结果中 DOC 入口处的尾气质量流量、温度、各气体组分质量分数等参数作为 DOC 模型的入口条件；以 DOC 出口温度和各气体组分质量分数等参数作为标准值，通过 GT-Power 的“Direct Optimizer”优化功能，对 DOC 中发生的各反应的指前因子、反应活化能以及外对流换热系数进行标定。采用相类似的方式，以 CPF 进出口压差和 NO 质量分数等参数作为标准值对 CPF 进行标定。从标定结果（图 3）看：模型仿真结果与试验结果的变化规律相似，数值基本一致，且误差较小，因此可认为所建立的 CCRT 模型是有效的，可代表实际 CCRT 系统。

2 生物柴油机 CCRT 系统模拟结果与分析

为考察不同转速和负荷下，燃用不同掺混比例的生物柴油机的 CCRT 系统的污染物转换效率和再生性能，本文选择文献 [14] 中燃用 BD20、BD50 及 BD100 三种生物柴油的柴油机外特性，以及 1 400 ($r \cdot \min^{-1}$) 及 2 200 ($r \cdot \min^{-1}$) 两个负荷特性的试验数据作为入口条件，进行仿真模拟。

2.1 燃用 BD20 时 CCRT 系统的转换效率和再生性能

图 4 为燃用 BD20 时 DOC 前后 NO 和 NO_2 浓度

变化，以及主要污染物转化效率的仿真结果。从仿真结果来看：入口 NO_2 浓度很低，NO 占入口 NO_x 总浓度的 90% 以上，而出口的 NO_2 由于 DOC 的催化氧化作用，占比大幅提高。尽管 NO_x 浓度在各工况条件下不尽相同，但是除 2 200 ($r \cdot \min^{-1}$)、10% 负荷工况点， NO_2 出口浓度均高于 400×10^{-6} ，保证了下游 CPF 被动再生的进行。通过观察 NO 的转化效率可以发现：在外特性下，NO 的转换效率成上升趋势；在 1 400 ($r \cdot \min^{-1}$) 负荷特性下呈下降趋势，在 2 200 ($r \cdot \min^{-1}$) 负荷特性下呈先上升再下降的趋势。结合各工况点的温度可以发现：温度是影响 NO 转换效率的一个主要因素。这是由于在低温时，NO 的氧化主要由动力学控制，随着温度的上升，NO 的转换效率逐渐到达峰值，之后由于反应逐渐变为由热力学控制，转换效率开始下降。研究认为：NO 的转换效率的峰值温度为 280 $^{\circ}C$ 左右^[15]，而外特性以及 1 400 ($r \cdot \min^{-1}$) 负荷特性下，排气温度高于此峰值温度，故 NO 转化效率随温度升高而降低；而 2 200 ($r \cdot \min^{-1}$) 负荷特性下，峰值温度处于排气温度变化范围，因此，NO 转化效率呈先上升再下降的趋势。在 2 200 ($r \cdot \min^{-1}$)、10% 负荷工况点，NO 的转换效率仅为 20.4%，加之入口 NO_x 浓度低，使得 NO_2 出口浓度仅为 3.27×10^{-6} ，对下游 CPF 被动再生造成不利的影响，因此此工况点可能是 CPF 再生条件最恶劣的工况点。在外特性和负荷特性下，DOC 对于 CO 的去除效果明显，CO 转换效率均在 99% 以上；HC 受排气温度影响，温度的下降导致 HC 转换效

率有所下降,但除 $2\,200\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 、10% 负荷工况点,DOC 对于 HC 的整体去除效果也较为理想,HC 的转化效率均高于 83%。

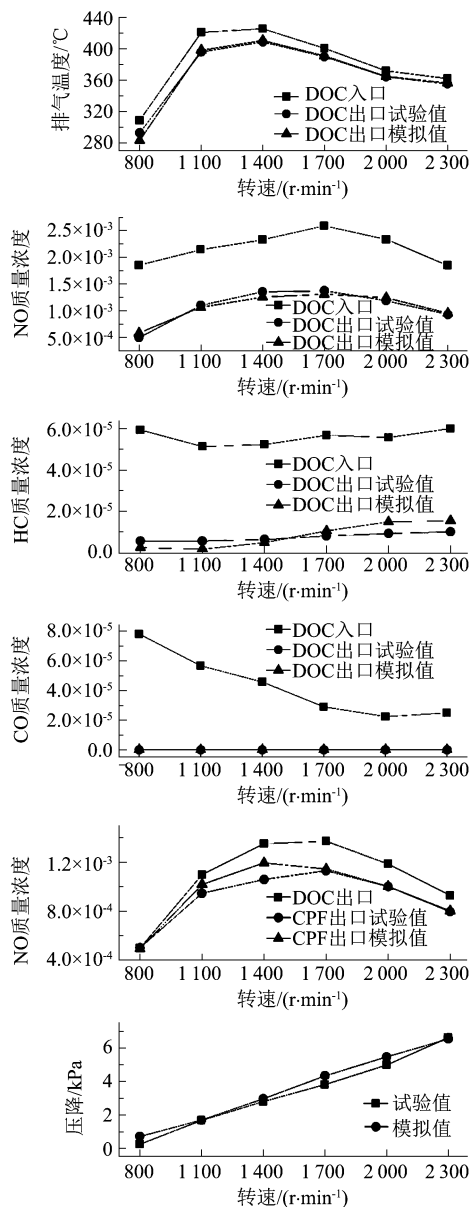


图3 CCRT 模型仿真结果与试验结果对比

图5为燃用BD20时CPF内残留颗粒物质量变化及CPF压降的仿真结果。CCRT系统采用的再生方式是一种边过滤边再生的被动再生方式。因此CPF内残留的颗粒物质量,特别是某一工况下平衡时CPF内残留的颗粒物质量,是表征CCRT再生能力的重要指标。从仿真结果来看:外特性下,随着转速的升高,各工况平衡时的CPF内残留的颗粒物质量增多,压降增大。原因之一是排气温度随转速上升而下降,导致NO转换效率下降以及颗粒物再生速率下降;原因之二是转速上升使排气流量和颗粒物浓度上升,使须要再生的颗粒物的量增多。

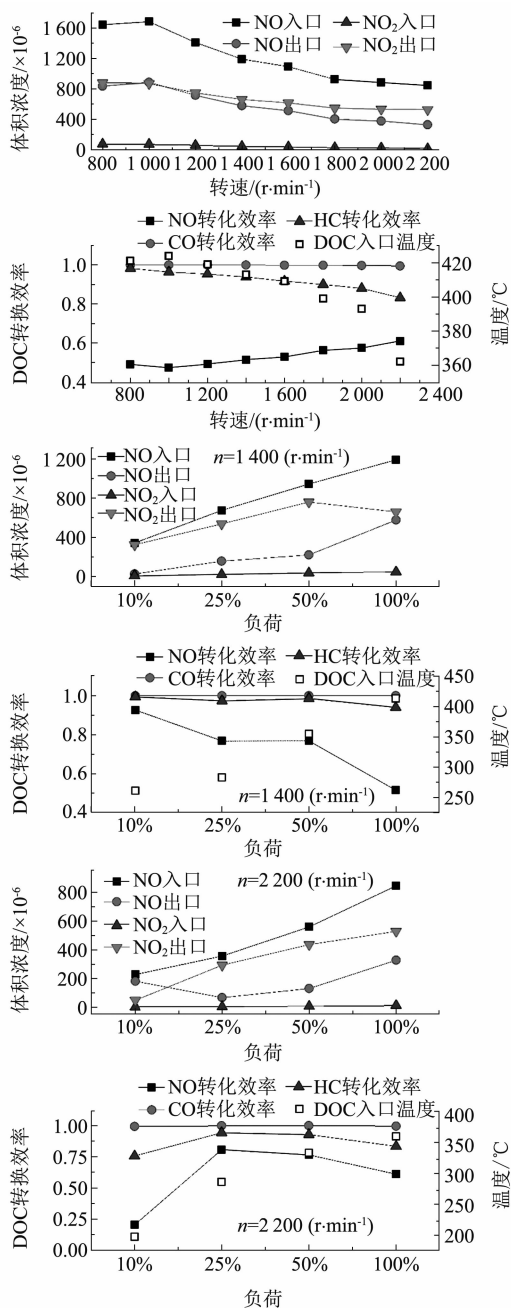


图4 燃用BD20时DOC前后NO和NO₂浓度变化及主要污染物转化效率仿真结果

观察 $1\,400\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 负荷特性,可以发现:随着负荷的增加,各工况平衡时的CPF内残留的颗粒物质量减少,达到平衡所需的时间缩短,压降增大;而从 $2\,200\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 的负荷特性中可以发现:整体平衡时CPF内残留颗粒物质量和压降的变化趋势与 $1\,400\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 负荷特性时相同,但是10%负荷的CPF内残留颗粒物质量没有达到平衡,同时,100%负荷平衡时的CPF内残留颗粒物质量超过了50%负荷平衡时的CPF内残留颗粒物质量。从仿真结果来看:负荷特性中CPF内残留颗粒物质量

随负荷增加而下降的原因可能是, 排气温度上升带来的有利影响超过了颗粒物浓度和排气流量上升带来的不利影响; 但是高负荷高转速时, 颗粒物浓度大幅上升, 其造成的不利影响可能会大幅上升。由于被动再生平衡时 CPF 内残留颗粒物质量较少, 因此, 排气流量的增大是压降随负荷及转速增大而增大的主要原因。综合外特性和负荷特性可以发现: 低负荷、高转速工况是 CPF 再生效果最差的工况。

2.2 不同生物柴油掺混比例对 CCRT 系统转换效率和再生性能的影响

图 6 为不同生物柴油掺混比例在外特性和 $1\,400\text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$ 负荷特性下, DOC 的 NO_2 出口浓度及各污染物转换效率变化情况。从仿真结果来看: 外特性下和 $1\,400\text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$ 负荷特性下, 随着生物柴油掺混比例的增加, NO_2 出口浓度、NO 转化效率都有所上升。由于生物柴油热值较低, 掺混比例上升会导致排气温度下降, 在外特性和 $1\,400\text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$ 负荷特性下, 排气温度一般高于 NO 转化效率的峰值温度, 故掺混比例的增加使 NO 的转化效率上升。另一方面, 关于 EPA 的大量试验结果显示: 随着掺混比例的上升, NO_x 排放会增加, 而 CO、HC、PM 排放会下降^[16]。NO 转化效率上升与 NO_x 排放增加的共同作用使 NO_2 出口浓度随着掺混比例的上升而上升。在外特性下和负荷特性下, 不同的生物柴油掺混比例下对于 HC 和 CO 去除效果的影响较小。

图 7 为外特性及 $1\,400\text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$ 负荷特性下平衡时 CPF 残留颗粒物质量仿真结果。外特性下, $1\,600\text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$ 以下的中低转速区间, 不同掺混比例, CPF 平衡时残留颗粒物质量差别较小; $1\,600\text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$ 以上的高转速区间, CPF 残留颗粒物质量随掺混比例的上升而下降。可能的原因是生物柴油本身黏度大于柴油, 在中低转速时, 气流扰动较小, 生物柴油自身黏度对于雾化的影响较大, 致使对颗粒物的减排作用有所减弱; 而高转速时, 剧烈的气流扰动减弱了生物柴油黏度对雾化的影响, 使生物柴油对颗粒物的减排作用更加明显。 $1\,400\text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$ 负荷特性下, 平衡时 CPF 残留颗粒物质量随生物柴油掺混比例的上升而下降, 且差别主要出现在 50% 负荷以下的中低负荷区域。中低负荷下原机颗粒物排放较少, 生物柴油对颗粒物的减排效果不明显, 而高负荷下颗粒物排放增大, 由于生物柴油含氧等优势, 降低颗粒物质量浓度的效果显著^[17-18]。因此在 50% 负荷以下的中低负荷, 生物柴油对颗粒物的减排效果减弱, 而降低排气温度的影响凸

显, 掺混比例增加对 CPF 被动再生不利; 在 100% 负荷下, 生物柴油对颗粒物的减排效果增强, 消除了部分排气温度降低的负面影响。

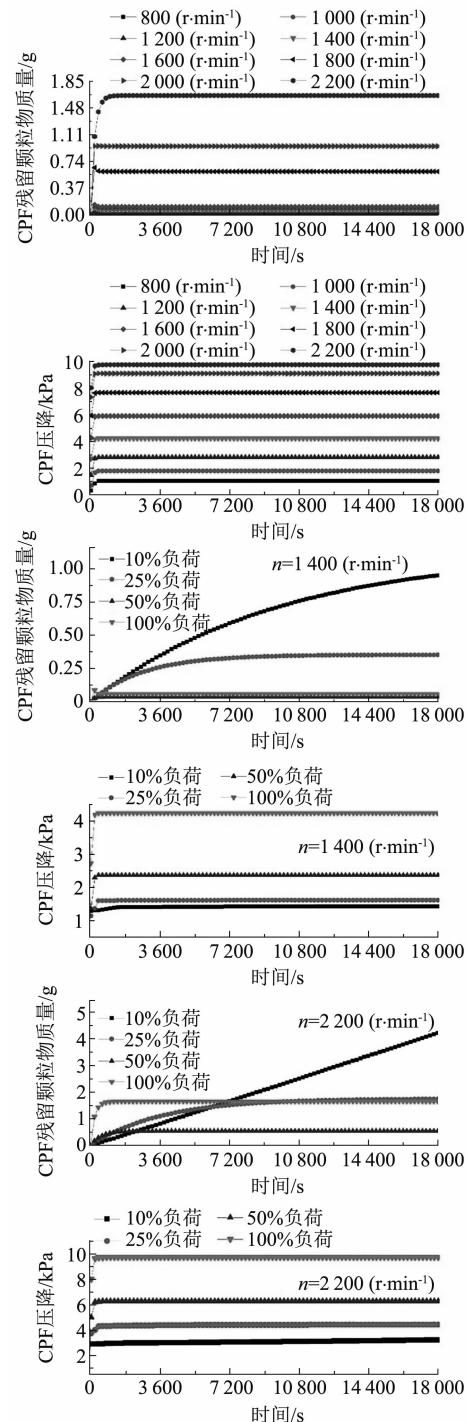


图 5 燃用 BD20 时 CPF 内残留颗粒物质量和 CPF 前后压差仿真结果

图 8 为 $2\,200\text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$ 、10% 工况下, CPF 残留颗粒物质量变化情况。由 2.1 可知: $2\,200\text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$ 、10% 负荷工况是整个 CPF 再生性能最差的一个工况点, 因此此工况具有代表性。从图 8 中可以发现: BD20 的 CPF 残留颗粒物质量没有达到平衡, 而 BD50

和BD100的CPF残留颗粒物质量达到平衡；但是从量上看：BD50的残留颗粒物的量小于BD100，达到平衡所用的时间BD50少于BD100。生物柴油比例的增加使得颗粒物浓度降低，CPF残留颗粒物质量更容易达到平衡，相应的达到平衡所需的时间越短，沉积速率越低；另一方面生物柴油比例的增加使得排气温度降低，初始NO转化效率以及颗粒物氧化速率下降，因而需要更多的残留颗粒物使得NO转化效率上升，达到颗粒物的沉积速率。上述两方面因素相互作用，相互影响。就仿真结果来看：2 200 ($r \cdot \min^{-1}$)、10%负荷工况下，燃用BD50的再生效果最佳。

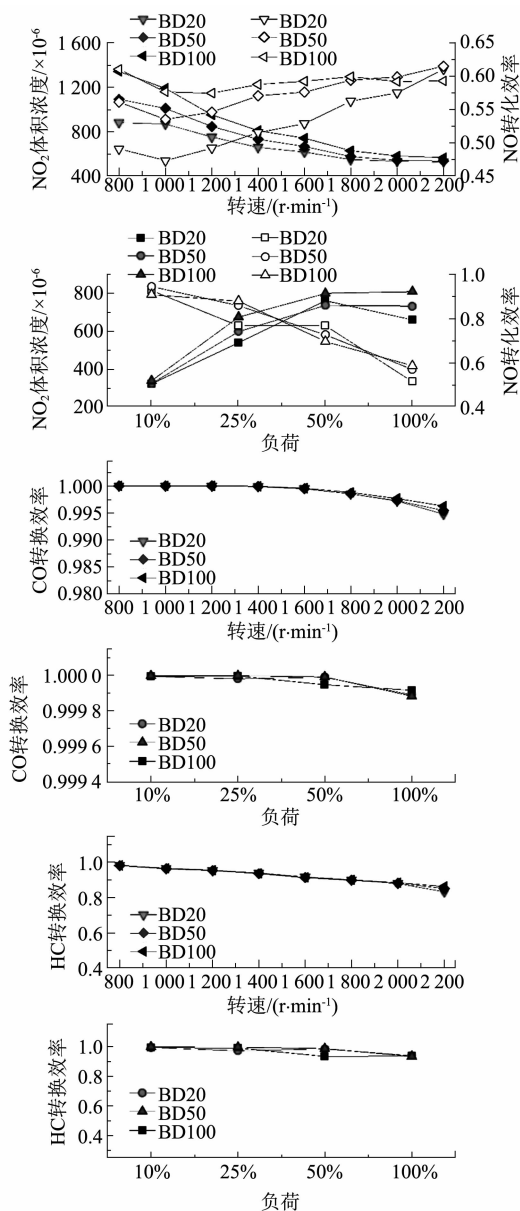


图6 不同生物柴油掺混比例在外特性和1 400 ($r \cdot \min^{-1}$) 负荷特性下DOC的NO₂出口浓度及各污染物转换效率仿真结果

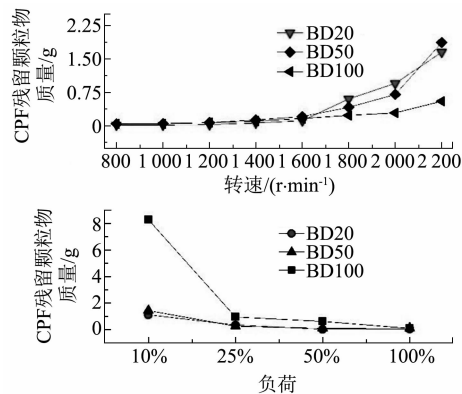


图7 外特性及1 400 ($r \cdot \min^{-1}$) 负荷特性下平衡时CPF残留颗粒物质量仿真结果

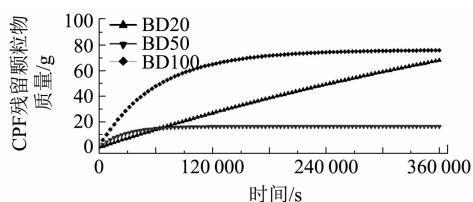


图8 2 200 ($r \cdot \min^{-1}$)、10%工况下CPF残留颗粒物质量变化

3 结论

(1) 在外特性下，NO的转换效率随转速上升而上升；在1 400 ($r \cdot \min^{-1}$) 负荷特性下随负荷上升而下降，在2 200 ($r \cdot \min^{-1}$) 负荷特性下，随负荷上升呈先上升再下降的趋势。在2 200 ($r \cdot \min^{-1}$)、10%负荷工况点，NO的转换效率及入口NO_x浓度均为各工况下最低，是CPF再生条件最恶劣的工况点。DOC对于CO及HC的整体去除效果较为理想，各工况点的CO转换效率均在99%以上；除2 200 ($r \cdot \min^{-1}$)、10%负荷工况点，HC的转化效率均高于83%。

(2) 整体来看，随着转速的升高，平衡时CPF内残留的颗粒物质量增加，压降增大；随着负荷的增加，平衡时CPF内残留颗粒物质量减少，达到平衡所需的时间缩短，压降增大。综合外特性和负荷特性可以发现：低负荷、高转速工况是CPF再生效果最差的工况。

(3) 随着生物柴油掺混比例的增加，DOC的NO₂出口浓度、NO转化效率都有所上升。其主要原因为掺混生物柴油使排气温度降低的同时NO_x排放增加。不同掺混比例对于DOC的HC和CO去除效果影响较小。

(4) 外特性下，1 600 ($r \cdot \min^{-1}$) 以下的中

低转速阶段,不同掺混比例,CPF平衡时残留颗粒物质量差别较小;1 600 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)以上高转速阶段,CPF残留颗粒物质量随掺混比例的上升而下降。负荷特性下,平衡时CPF残留颗粒物质量随掺混比例的上升而下降,且差别主要出现在50%负荷以下的中低负荷区域。在2 200 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)、10%负荷工况点下,燃用BD50时CPF的再生效果最佳。

鸣谢

感谢同济大学楼狄明教授团队提供大量试验数据,为本文中的模型标定提供了参考标准;为仿真模拟提供了入口条件及边界条件;为本文的顺利完成提供了极大的帮助与支持。

参考文献

- [1] ALPTEKIN E, CANAKCI M, OZSEZEN A N, et al. Using waste animal fat based biodiesels - bioethanol - diesel fuel blends in a DI diesel engine [J]. Fuel, 2015, 157: 245-254.
- [2] NAJAFI G. Diesel engine combustion characteristics using nano-particles in biodiesel-diesel blends [J]. Fuel, 2018, 212: 668-678.
- [3] YORK A P E, AHMADINEJAD M, WATLING T C, et al. Modeling of the catalyzed continuously regenerating diesel particulate filter (CCR-DPF) system: model development and passive regeneration studies [C]. SAE Technical Papers, 2007.
- [4] LAKKIREDDY V R, MOHAMMED H, JOHNSON J H, et al. The effect of a diesel oxidation catalyst and a catalyzed particulate filter on the emissions from a heavy duty diesel engine [C]. SAE Technical Papers, 2006.
- [5] TANG T, ZHANG J, CAO D X, et al. Experimental study on filtration and continuous regeneration of a particulate filter system for heavy-duty diesel engines [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26 (12): 2434-2439.
- [6] SCHUMACHER L G, BORGEIT S C, FOSSEEN D, et al. Heavy-duty engine exhaust emission tests using methyl ester soybean oil/diesel fuel blends [J]. Bioresource Technology, 1996, 57 (1): 31-36.
- [7] ZHANG Y, LOU D M, TAN P Q, et al. Experimental study on particulate emission characteristics of an urban bus equipped with ccrt after-treatment system fuelled with biodiesel blend [C]. SAE Technical Papers, 2017, 2017-March (March).
- [8] 楼狄明,张允华,谭丕强,等.基于DOC+CDPF技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性[J].环境科学,2016(12):4545-4551.
- [9] TRIANA A P, JOHNSON J H, YANG S L, et al. An experimental and numerical study of the performance characteristics of the diesel oxidation catalyst in a continuously regenerating particulate filter [C]. Powertrain and Fluid Systems Conference and Exhibition, 2003.
- [10] YORK A P E, AHMADINEJAD M, WATLING T C, et al. Modeling of the catalyzed continuously regenerating diesel particulate filter (CCR-DPF) system: model development and passive regeneration studies [C]. SAE Technical Papers, 2007.
- [11] SAMPARA C S, BISSETT E J, CHMIELEWSKI M, et al. Global kinetics for platinum diesel oxidation catalysts [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46 (24): 7993-8003.
- [12] RAGHAVAN K, JOHNSON J, NABER J. An experimental investigation into the effect of no2 and temperature on the passive oxidation and active regeneration of particulate matter in a diesel particulate filter [J]. Emission Control Science and Technology, 2018, 4 (1): 45-63.
- [13] 耿小雨.结构参数对重型柴油机DOC+CDPF性能影响研究[D].上海:同济大学,2018.
- [14] 强蕾.国V排放生物柴油专用发动机的性能研究[D].上海:同济大学,2013.
- [15] KANDYLAS I P, KOLTSAKIS G C. Simulation of continuously regenerating diesel particulate filters in transient driving cycles [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2002, 216 (7): 591-606.
- [16] Office of Transportation And Air Quality U E. A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions [R]. EPA Report, 420-P-02-001, Cincinnati, USA: Environmental Protection Agency, 2002.
- [17] MUELLER C J, PITZ W J, PICKETT L M, et al. Effects of oxygenates on soot processes in DI diesel engines: experiments and numerical simulations [C]. SAE International, 2003-01-1791.
- [18] PHAM P X, BODISCO T A, STEVANOVIC S, et al. Engine performance characteristics for biodiesels of different degrees of saturation and carbon chain lengths [C]. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2013, 6 (1): 188-198.