

柴油机微粒捕集器碳载量估计与分布特性研究

刘洪岐¹ 高莹¹ 姜鸿澎² 陈金军² 裴卡斯² 郑德源²

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130025; 2. 中国重型汽车集团有限公司, 济南 250101)

摘要: 建立了一种考虑催化再生的微粒捕集器碳烟沉积量估计模型。通过试验数据辨识出 NO₂ 与碳烟的反应以及热催化再生反应参数和载体捕集特性参数。在不同工况下, 碳烟沉积量估计模型的计算值与实际碳载量称量值相比, 误差可以控制在 10% 以内。经过计算, 随着排气温度的不断提升, 碳烟再生量权重不断提升, 催化再生有效地降低了颗粒物沉积量, 延长了主动再生周期。通过深床层离散分层和饼层累积碳载量计算, 碳烟加载量主要分布在饼层, 深床层占比较少, 且深床层碳烟量主要集中在离散层的第 1 层中。经过验证, 引入 NO₂ 辅助再生及热催化再生反应的模型有效地估计了碳烟加载量并对碳载量分布特性给出了有效的分析, 为微粒捕集器内碳烟颗粒物主动再生时机的判断提供了参考。

关键词: 柴油机; 微粒捕集器; 加载量; 温度; 再生; 估计

中图分类号: TK421+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)06-0349-07

Particulate Matter Load Estimation and Distribution Characteristics of Diesel Particulate Filter

LIU Hongqi¹ GAO Ying¹ JIANG Hongpeng² CHEN Jinjun² PEI Kasi² ZHENG Deyuan²

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China

2. China National Heavy Duty Truck Group Co., Ltd., Ji'nan 250101, China)

Abstract: A particulate matter estimation model was established to calculate the particulate retained in diesel particulate filter with consideration of catalytic reaction in filter. The filtration and catalytic regeneration parameters were identified by engine dynamometer test data, including permeability of carrier and activation energy and pre-exponential factors of the NO₂ catalytic reaction and thermal catalytic reaction. The estimation model was validated under different operation conditions and model error was less than 10%. Analysis based on the catalytic reaction sub-model approved that the weight of catalytic regeneration was increased with the rise of temperature. At 442℃, percentage of regeneration mass in all engine emission was risen to 45.42%. The regeneration during filtration can effectively prolong the active regeneration cycle. After thorough analysis of the model, most of the particulate mass was distributed in cake layer, accounting more than 98%. The particulate mass in deep bed was discrete in five slabs and mass distribution in deep bed was mainly in the first slab. Under different test conditions, the mass in the first slab accounted more than 85%. And the permeability of the first slab was less than half of those of the other slabs. At 272℃, the particulate mass in different slabs remained stable quickly and the second to the fifth slabs were decreased more than 35% at 442℃. Chemical catalytic reaction at high temperature was the reason for decreasing. For the first slab, cake layer can effectively replenish the regeneration mass. After the theoretical analysis and practical verify, the estimation model included NO₂ catalytic reaction and thermal catalytic reaction can effectively predict the retained particulate mass in filter.

Key words: diesel engine; particulate filter; loading capacity; temperature; regeneration; estimation

收稿日期: 2017-03-22 修回日期: 2017-04-14

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAG11B00)

作者简介: 刘洪岐(1988—),男,博士生,主要从事发动机后处理系统控制及诊断研究,E-mail: jllihongqi@163.com

通信作者: 高莹(1972—),女,教授,博士生导师,主要从事汽车动力系统及后处理系统仿真与控制研究,E-mail: gaoying@jlu.edu.cn

引言

随着机动车排放法规的不断升级以及亟待解决的大气污染等问题,重型柴油车污染物作为机动车污染的主要来源,其排放需要进行严格控制^[1]。目前,机外净化方式中,微粒捕集器作为一种解决尾气颗粒物的有效手段,在柴油车辆上得到了广泛使用^[2-3]。

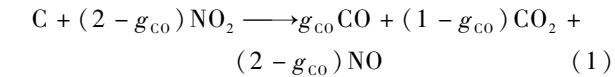
在实际车辆运行过程中,随着运行时间和里程的增加,柴油机微粒过滤器(Diesel particulate filter, DPF)内部颗粒物累积量增加,发动机排气阻力增大,进而导致排气不畅,新鲜进气量不足,燃烧恶化,颗粒物及气态污染物排放加剧,此时需要通过碳烟再生降低排气阻力。如果再生时载体内部碳烟量过大,将会引起再生峰值温度过高,导致载体过热烧结损坏;如果载体内部碳烟量过少,再生过程燃油经济性下降。因此,通过准确估计载体内部碳烟加载量进行再生时机判断,可有效保障再生安全性和经济性^[4-6]。

本文从碳烟加载和再生机理角度出发,研究不同排气状态下,催化氧化作用对碳烟颗粒物再生的影响,结合碳烟捕集机理,建立考虑再生反应的催化型 DPF 碳烟沉积量估计模型,实现对 DPF 内部沉积碳烟质量的准确估计,并进行碳载量分布特性研究,为 DPF 再生时机判断及控制提供基础。

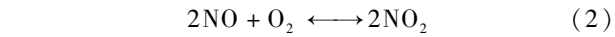
1 DPF 碳烟加载量估计模型建立

1.1 微粒捕集器捕集及催化再生反应

碳烟进入捕集器载体过程中,从洁净状态开始,首先进入深床层,深床层捕集完成后开始饼层捕集,当总捕集量达到一定程度后需要进行再生^[7]。但是,在碳烟捕集过程中,随着排气温度的变化,碳烟颗粒会发生不同的反应,其中参与反应的氧化剂主要是 O₂ 与 NO₂^[8]。当温度在 250℃ 以下时,所有碳烟再生反应均不发生,当排气温度在 250 ~ 350℃ 之间时,由于发动机原始排气中有 NO₂ 存在,其具有强氧化性^[9],设定为 NO₂ 氧化再生,其反应为



式中 g_{CO} 为生成 CO 的比例,考虑到 NO₂ 强氧化性,载体加载过程中的碳烟加载量估计需要考虑其再生带来的影响^[10]。对于催化型 DPF,在载体贵金属涂覆区域会发生 NO 到 NO₂ 的转化



该反应会进一步促进 NO₂ 与颗粒物的反应。

随着温度的进一步提升,载体内部会发生颗粒物催化氧化,氧气开始参与再生反应^[11]



式中 f_{CO}^{cat} ——碳烟颗粒发生催化氧化时生成 CO 的比例^[12]

当温度达到 550℃ 以上时微粒捕集器内部将会发生碳烟颗粒的热氧化,即主动再生^[13],此时碳载量快速下降,载体温度快速上升,因此通过建立碳烟捕集与 NO₂ 辅助氧化、热催化氧化反应模型,形成碳烟加载量估计模型,可为主动再生提供合理的再生时机。

1.2 捕集与再生建模

为准确预测微粒捕集器主动再生反应时机,综合考虑上述反应,载体内部的碳烟沉积量在发生主动再生之前可以根据进入载体的碳烟量、排出载体比例以及发生 NO₂ 氧化以及催化氧化再生的反应量进行计算。碳烟总体分配如图 1 所示,将 DPF 看成一个整体,图中左边是催化型 DPF 入口。

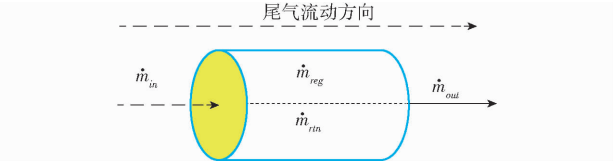


图 1 DPF 碳烟质量平衡示意图

Fig. 1 Schematic of particulate mass balance in DPF

微粒捕集器内碳烟质量平衡方程为

$$\dot{m}_{rtn} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{reg} - \dot{m}_{out}$$

(4)

式中 $\dot{m}_{in}$ ——微粒捕集器入口碳烟质量变化率
 $\dot{m}_{reg}$ ——微粒捕集器内碳烟再生量变化率
 $\dot{m}_{rtn}$ ——微粒捕集器内碳烟沉积量变化率
 $\dot{m}_{out}$ ——微粒捕集器出口碳烟质量变化率

假定反应发生在恒定温度条件下,则方程(4)为常微分方程,设定载体的初始状态为时间 $t = 0$,初始质量 $m(0) = m_0$,求解得

$$m_{rtn} = \frac{\dot{m}_{rtn}}{K_R}(1 - e^{-K_R t}) + m_0 e^{-K_R t}$$

(5)

式中 K_R ——颗粒物反应速率

NO₂ 与碳烟的反应和碳烟催化氧化反应速率遵循阿累尼乌斯方程,反应速率 $K_R^{NO_2}$ 和 K_{cat} 的表达式为^[14-15]

$$K_R^{NO_2} = k_{0,NO_2} y_{NO_2}^n T e^{-\frac{E_{NO_2}}{RT}}$$

(6)

$$K_{cat} = k_{0,cat} T e^{-\frac{E_{cat}}{RT}}$$

(7)

式中 $K_R^{NO_2}$ ——NO₂ 氧化反应速率
 k_{0,NO_2} ——NO₂ 氧化反应常数
 E_{NO_2} ——NO₂ 反应活化能
 $k_{0,cat}$ ——催化氧化本征反应常数
 y_{NO_2} ——NO₂ 浓度

E_{cat} ——催化氧化反应活化能

n ——反应级数,取 1

对于碳烟颗粒物捕集过程,通过建立基于填充床捕集理论的碳烟捕集模型,可有效地计算碳烟捕集量^[16]。将壁面层离散分层,对每一层等效为多个捕集单元,离散过程如图 2 所示。

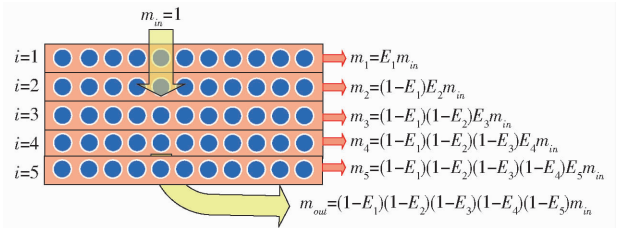


图 2 深床层分层捕集示意图

Fig. 2 Schematic of deep bed slabs

由于碳烟捕集过程主要是受布朗扩散和直接拦截作用影响,但每个颗粒物只能被一种捕集机理所捕集^[17],因此载体单个捕集单元的综合捕集效率表达式为

$$\eta_{DR} = \eta_D + \eta_R - \eta_D \eta_R \quad (8)$$

其中 $\eta_D = 3.5 \left(\frac{\varepsilon}{K} \right)^{\frac{1}{3}} Pe^{-\frac{2}{3}}$ (9)

$$\eta_R = \frac{3}{2} N_R^2 \frac{\frac{\varepsilon}{K}}{(1 + N_R)^{\frac{3-2\varepsilon}{3\varepsilon}}} \quad (10)$$

$$K = 2 - \varepsilon - \frac{9}{5}(1 - \varepsilon)^{\frac{1}{3}} - \frac{1}{5}(1 - \varepsilon)^2 \quad (11)$$

式中 η_D ——布朗扩散捕集效率

η_R ——直接拦截捕集效率

Pe ——贝克来数 ε ——孔隙率

N_R ——碳烟颗粒直接拦截系数

K ——Kuwabara 流体动力学因子^[18]

当载体处于新鲜状态时,捕集效率与载体壁面厚度 ω 有关,总捕集效率为^[19]

$$E = 1 - \exp \frac{-3\eta_{DR}(1 - \varepsilon_0)\omega}{2\varepsilon_0 d_{c0}} \quad (12)$$

其中 $d_{c0} = 1.5(1 - \varepsilon_0) d_{pore} / \varepsilon_0$ (13)

式中 d_{c0} ——球形单元捕集体初始直径

ω ——洁净壁面厚度

d_{pore} ——多孔介质微孔直径

ε_0 ——洁净壁面的孔隙率

随着碳烟颗粒的不断沉积, t 时刻第 i 层薄壁单元层中“球形单元捕集体”的直径不断增加,加载过程直径变化表达式为^[20]

$$d_c(i, t) = 2 \left[\frac{3}{4\pi} \frac{m_\omega(i, t)}{\rho_{soot, \omega}} + \left(\frac{d_{c0}}{2} \right)^3 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

式中 $m_\omega(i, t)$ —— t 时刻第 i 层中球形单元捕集体碳烟沉积量

$\rho_{soot, \omega}$ ——壁面内沉积的碳烟颗粒密度

随着碳烟颗粒在载体壁面内部沉积,第 i 层薄壁单元层的局部渗透率也随时间发生变化,渗透率变化过程为

$$\frac{k(i, t)}{k_0} = \left(\frac{d_c(i, t)}{d_{c0}} \right)^2 H(\varepsilon(i, t)) \frac{1 - \varepsilon(i, t)}{1 - \varepsilon_0} \quad (15)$$

式中 k_0 ——洁净状态渗透率

$k(i, t)$ —— i 层 t 时刻的渗透率

$H(\varepsilon(i, t))$ ——平滑因子

第 i 层捕集效率计算公式为

$$E(i, t) = 1 - \exp \frac{-3\eta_{DR}(i, t)(1 - \varepsilon(i, t))\omega_i}{2\varepsilon(i, t)d_c(i, t)} \quad (16)$$

式中 ω_i ——薄壁单元层的厚度

依据碳烟质量平衡、碳烟捕集和再生机理建立 Simulink 模型,如图 3 所示,用于碳烟加载量估计。

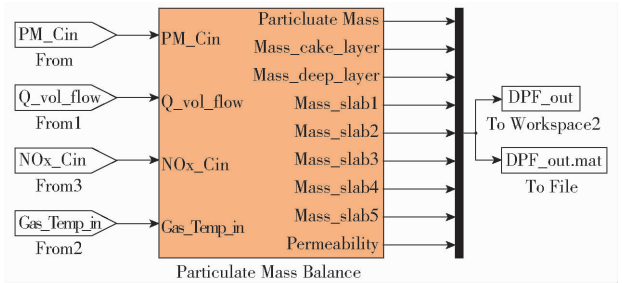


图 3 碳烟加载量估计模型

Fig. 3 Particulate loading estimation model

2 试验设计及模型验证

根据模型需要,应进行加载试验和催化再生试验,用于校核捕集过程的模型参数和被动再生反应的化学反应动力学参数。试验台架如图 4 所示,其中发动机参数如表 1 所示,DPF 载体参数如表 2 所示。选用 HORIBA 7100DEGR 型排气分析仪监测气体组分,K 型热电偶测量排气温度,使用 AVL-483 型烟度计测量排气颗粒物浓度,采用 PTQ-A30000 型天平进行载体称量,称量时确保在试验台架上载

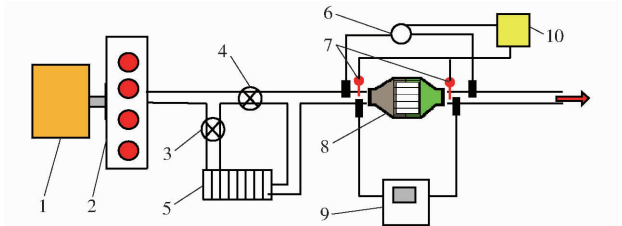


图 4 试验台架测试系统

Fig. 4 Schematic of test cell setup

1. 测功机 2. 发动机 3. 排气调节阀 1 4. 排气调节阀 2 5. 散热器 6. 压差传感器 7. 温度传感器 8. DPF 载体 9. 废气分析仪 10. 数据采集系统

体温度保持在 300℃ 以上,通过拆解快接卡箍保证载体拆卸在短时间内完成,进入密闭室测量载体质量变化,保证载体称量温度高于 125℃^[21]。

表 1 试验用发动机参数
Tab.1 Engine specifications for test

参数	数值
缸径×行程/(mm×mm)	130×163
排量/L	13
压缩比	19
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 900
额定功率/kW	388

表 2 催化型 DPF 参数
Tab.2 Catalyst DPF specifications

参数	数值
DPF 载体材料	堇青石
直径/mm	306.4
总长度/mm	350.4
总容积/mL	25 836.4
壁厚/mm	0.304 8
孔隙率/%	59
孔密度/(个·in ⁻²)	200
通道宽度/mm	1.5
壁面微孔孔径/μm	14

试验过程中,后处理系统只加装催化型 DPF,且通过控制排气调节阀调整进入载体内部的排气温度。采用排气调节阀确保加载试验中,排气温度控制低于 250℃。再生试验过程选取排气温度在 300~350℃ 之间校核 NO₂ 催化再生反应,400~450℃ 的排气状态校核热催化再生参数,保证碳烟加载过程中有催化氧化再生的发生。

根据分析选取 1 000 r/min 和 1 900 r/min 2 个转速下 25%、50%、75% 和 100% 4 个负荷工况点进行试验。利用试验数据辨识模型中的参数,使用最小二乘法校核得到的饼层碳烟密度和渗透率分别为 $\rho_{soot} = 115 \text{ kg/m}^3$, $k_{soot} = 1.95 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 。经过迭代优化计算得到 $k_0 = 2.14 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 。由连续再生反应校核的 NO₂ 与碳烟反应的活化能参数和指前因子分别为 $E_{NO_2} = 7.103 \times 10^4 \text{ J/mol}$, $k_{0,NO_2} = 3.62 \times 10^3 \text{ K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 催化氧化再生反应的活化能和指前因子分别为 $E_{cat} = 1.5 \times 10^5 \text{ J/mol}$, $k_{0,cat} = 2 \times 10^4 \text{ K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

将捕集参数直接代入未考虑再生影响的模型中进行计算,并与引入再生影响的模型进行比较,模型估计结果与试验测量结果对比如图 5 所示。引入再生影响模型和无再生影响模型估计值与实际碳烟加载量的相对误差曲线如图 6 所示。将引入再生影响的碳烟估计模型定义为模型 1,未考虑再生影响的

碳烟估计模型定义为模型 2。通过结果对比分析可以发现,在 1 000 r/min、575 N·m 和 1 900 r/min、450 N·m 工况点即两种转速下的 25% 负荷点,排气温度仅为 225℃ 和 246℃,且 NO_x 浓度体积分数为 2.59×10^{-4} 和 1.47×10^{-4} ,此时模型 1 和模型 2 估计值与试验值误差均小于 5%。

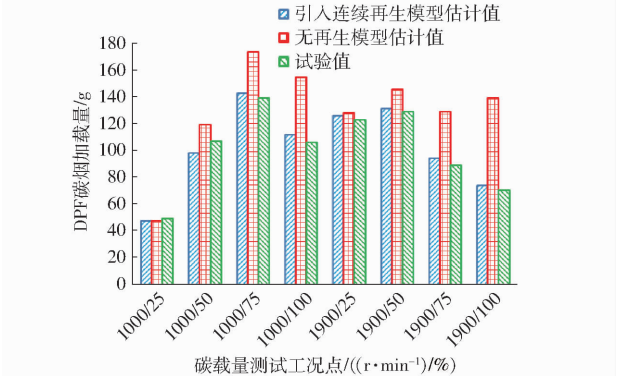


图 5 碳载加载量估计值与试验值对比
Fig.5 Comparison of particulate loading estimation and measured value

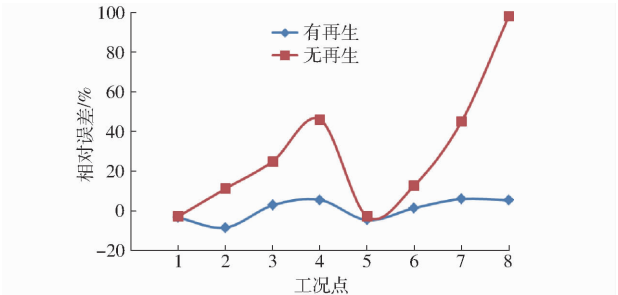


图 6 碳载量估计误差曲线
Fig.6 Estimation error curves of particulate loading

在 1 000 r/min、2 300 N·m 外特性工况下,排气温度达到 490℃,NO_x 体积分数为 3.60×10^{-4} ,催化再生作用增强,模型 2 估计值与实际加载量的相对误差达到 46%,而模型 1 的相对误差为 5.46%。在 1 900 r/min、1 800 N·m 外特性工况点,排气温度为 420℃,NO_x 体积分数为 4.57×10^{-4} 时,模型 1 估计值的相对误差为 5.23%,模型 2 估计值的相对误差达到 98.1%。

分析可以发现随着发动机排气温度的不断提升,未考虑催化再生影响的模型在发动机排气温度较高的工况下已无法给出准确的碳烟估计量,引入再生影响的碳烟估计模型可以有效地计算碳烟加载量,通过试验标定及验证,模型相对误差在 10% 以内。

3 碳烟加载量估计与分布特性分析

3.1 碳烟加载量估计结果分析

经过模型参数校核,进一步选取 1 700 r/min 转

速点下的 25%、50%、75% 和 100% 负荷工况点进行碳烟加载量估计分析,1 700 r/min 工况下外特性点扭矩为 2 000 N·m。4 种工况下排气温度分别为 272℃、326℃、377℃ 和 442℃,NO_x 体积分数分别为 1.59×10^{-4} 、 2.37×10^{-4} 、 3.26×10^{-4} 和 4.62×10^{-4} 。在该转速下碳载量估计值与实际加载量测量如图 7 所示。从结果可以看出,4 种模式下的模型估计相对误差分别为 3.46%、6.19%、3.09% 和 4.88%。模型估计值可以在不同发动机排气状态下有效地估计实际碳烟加载量。

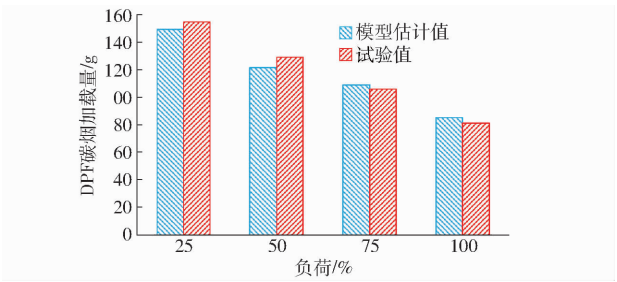


图 7 碳载量预测值与实际值对比

Fig. 7 Comparison of particulate loading estimation and measured value

分析碳烟捕集过程中受催化再生影响的碳烟量变化规律,4 种工况下的加载过程如图 8 所示。各工况下的碳烟再生曲线显示,随着排气温度的不断提升,再生氧化的碳烟量不断增加,再生量占总的排气碳烟量的比重分别为 3.38%、10.86%、26.60% 和 45.42%。在低排温区间基本呈现线性再生趋势,当排温达到 377℃ 和 442℃ 时呈现出明显的高次函数再生趋势。原因在于,随着排温的提升除了 NO₂ 的强氧化作用外,热催化氧化作用起到明显作用,有效地加

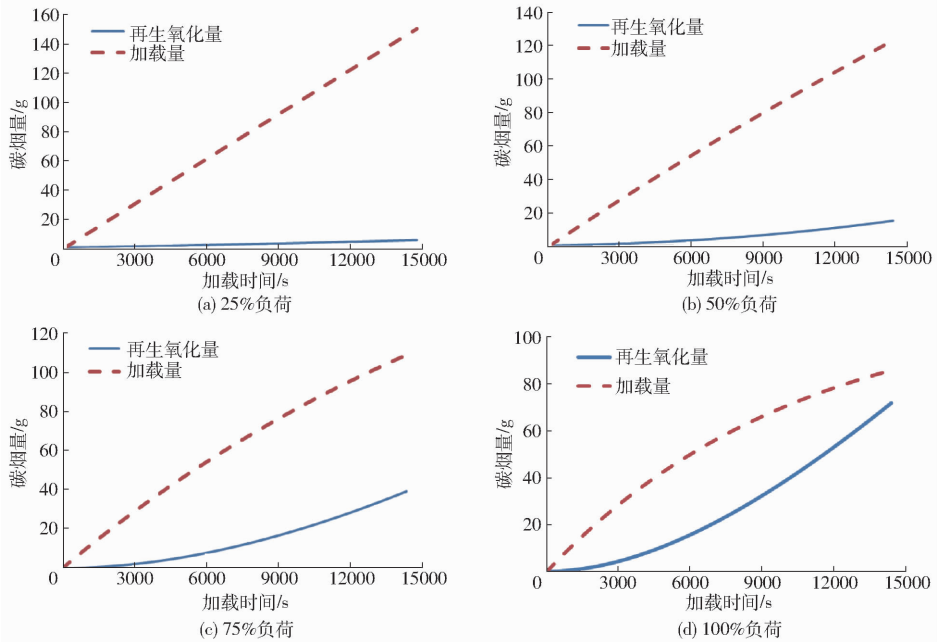


图 8 碳烟加载及催化再生过程

Fig. 8 Particulate loading and catalytic regeneration process

快了碳烟颗粒物的再生,在 442℃ 条件下接近延长一倍的再生周期。

3.2 碳烟加载量分布特性分析

为研究碳烟在微粒捕集器内部的分布特性,模型通过捕集体半径的变化判断出深床捕集的结束状态,进而可以分析深床层和饼层碳烟的沉积量。图 9 和图 10 分别显示了 4 种工况下的碳烟饼层沉积量和深床层沉积量。结果显示,再生反应量的减少主要是饼层沉积量的下降,同时深床层所占权重极小,4 种工况下的比例分别为 0.81%、0.76%、0.93% 和 1.23%,但是深床层捕集是碳烟捕集的起始阶段,其对载体压降及捕集效率的影响较大。

由于对微粒捕集器深床层进行了分层处理,本文中将深床层离散为 5 层,经过计算,4 种工况下的各离散层最终碳烟质量分布状态如图 11 所示。结果表明,深床层碳烟沉积量主要分布在第 1 层,即最贴入口孔道的位置,4 种工况下第 1 层分别占深床层总捕集质量的 86.25%、86.20%、85.69% 和 87.94%。同时由于深床层碳烟分布特性的规律,各层对应的渗透率最终状态如图 12 所示。深床层第 1 层渗透率分别为 $3.32 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 、 $3.38 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 、 $3.41 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 和 $3.66 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 。对于第 2~5 层,渗透率变化范围为 $1.98 \times 10^{-13} \sim 2.08 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 。与第 1 层相比,其渗透率要高 1 个数量级,原因在于深床层碳烟主要分布在第 1 层,导致第 1 层捕集体直径变大,孔隙率下降,引起颗粒物透过能力下降,进而使第 2~5 层颗粒物沉积量较少。同时由于第 1 层的渗透率快速下降,饼层过滤层迅速形成,进一步降低了颗粒物向深层扩散的能力,因此,碳烟主要沉积在饼层。

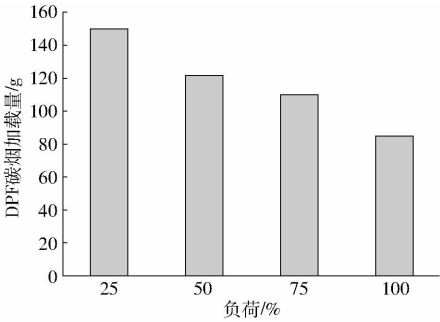


图9 饼层碳载量

Fig.9 Particulate mass in cake layer

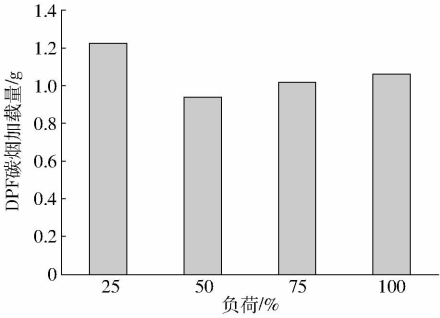


图10 深床层碳载量

Fig.10 Particulate mass in deep bed

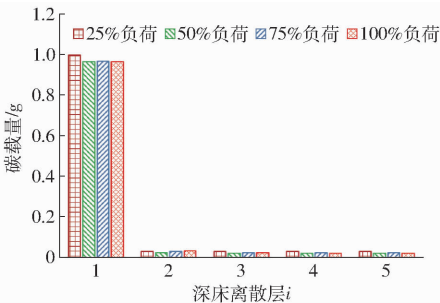


图11 深床层碳烟分布

Fig.11 Particulate mass distribution in different slabs

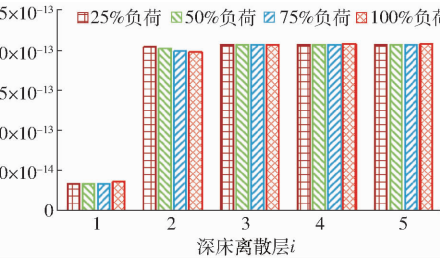
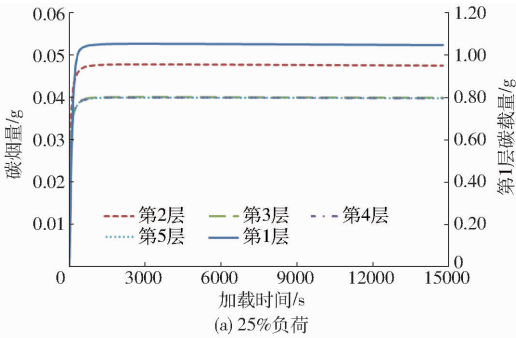


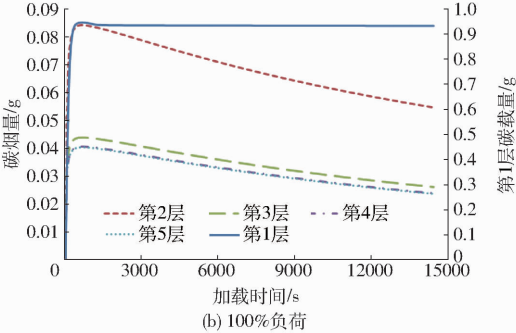
图12 各离散层渗透率

Fig.12 Permeability at different slabs

选取1700 r/min、25%负荷和100%负荷工况点进一步分析碳烟捕集过程中深床层变化规律,深床层碳烟沉积量变化过程如图13所示,渗透率变化过程如图14所示。结果显示,25%负荷工况下,深床层各层均处于稳定状态,由于此状态下排气温度较低,NO₂催化再生作用较弱,其渗透率也保持在稳定状态。在100%负荷工况点,除深床层第1层碳载量和渗透率基本保持稳定外,第2~5层碳载量在第1阶



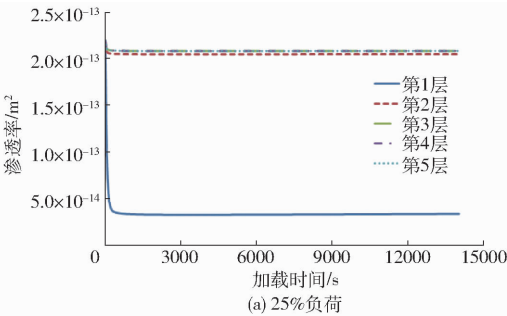
(a) 25%负荷



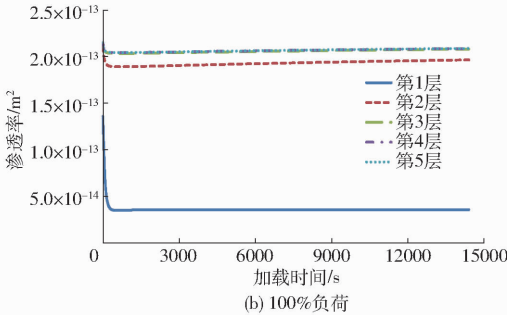
(b) 100%负荷

图13 各离散层碳烟沉积量变化过程

Fig.13 Particulate mass filtration process in different slabs



(a) 25%负荷



(b) 100%负荷

图14 各离散层渗透率变化过程

Fig.14 Permeability variation process in different slabs

段加载完成后有逐步下降的过程,第2层下降35.36%,第3层下降40.8%,第4层和第5层下降41.44%,同时各层渗透率逐渐上升。原因在于第1层靠近饼层碳烟,当发生催化再生后可以快速补充,但是饼层的形成和深床层第1层的低渗透率使得第2~5层的碳烟发生催化反应后无法继续补充,造成了内部碳烟量的单向下降和渗透率的上升。

4 结论

(1)建立了引入NO₂催化氧化再生及热催化再

生后微粒捕集器碳烟加载量估计模型,在不同排气状态下碳载量估计误差可控制在10%以内,模型可有效估计实际碳烟加载量。

(2)排气温度的提升可以有效地增强 NO_2 氧化再生及热催化再生,在 442°C 条件下再生比例可达到总碳烟量的45.32%,有效地降低了颗粒物加载

量,可延长微粒捕集器主动再生周期。

(3)饼层碳烟量占总碳烟沉积量的98%以上,深床层加载后基本处于稳定状态,且深床层碳烟主要分布在靠近微粒捕集器入口孔道壁面的位置,离散后的第1层渗透率快速下降导致第2~5层碳烟加载量过低。

参 考 文 献

- 1 机动车污染防治技术专业委员会. 机动车污染防治行业2015年发展综述[J]. 中国环保产业, 2016(11):14-19. Specialty Committee of Vehicle Pollution Prevention Technology. Development report on vehicle pollution prevention industry in 2015 [J]. China Environmental Protection Industry, 2016(11):14-19. (in Chinese)
- 2 JOHNSON T. Review of vehicular emissions trends[J]. SAE International Journal of Engines, 2015, 8(3):1152-1167.
- 3 帅石金, 唐韬, 赵彦光, 等. 柴油车排放法规及后处理技术的现状与展望[J]. 汽车安全与节能学报, 2012, 3(3):200-217. SHUAI Shijin, TANG Tao, ZHAO Yanguang, et al. State of the art and outlook of diesel emission regulations and aftertreatment technologies[J]. Automotive Safety and Energy, 2012, 3(3):200-217. (in Chinese)
- 4 DOMINIK R, THORSTEN B. Different approaches to soot estimation as key requirement for DPF applications[C]. SAE Paper 2009-01-1262, 2009.
- 5 SINGH N, MANDARAPU S. DPF soot estimation challenges and mitigation strategies and assessment of available DPF technologies [C]. SAE Paper 2013-01-0838, 2013.
- 6 BENAICHA F, BENCHERIF K, SORINE M, et al. Model based mass soot observer of diesel particle filter[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2011, 44(1):10647-10652.
- 7 CHOI S, KYEONG L. Detailed investigation of soot deposition and oxidation characteristics in a diesel particulate filter using optical visualization[C]. SAE Paper 2013-01-0528, 2013.
- 8 KONSTANDOPOULOS A G, KOSTOGLU M, SKAPERDAS E, et al. Fundamental studies of diesel particulate filters: transient loading, regeneration, and aging[C]. SAE Paper 2000-01-1016, 2000.
- 9 HUTTON C, JOHNSON J H, NABER J, et al. Procedure development and experimental study of passive particulate matter oxidation in a diesel catalyzed particulate filter[C]. SAE Paper 2012-01-0851, 2012.
- 10 JACQUOT F, LOGIE V, BRILHAC J F, et al. Kinetics of the oxidation of carbon black by NO_2 influence of the presence of water and oxygen[J]. Carbon, 2002, 40(3):335-343.
- 11 LEE J, LEE H, SONG S, et al. Experimental investigation of soot oxidation characteristic with NO_2 and O_2 using a flow reactor simulating DPF[C]. SAE Paper 2007-01-1270, 2007.
- 12 ATHANASIOS G, KONSTANDOPOULOS A G, MARGARITIS K. Reciprocating flow regeneration of soot filters[J]. Combustion and Flame, 2000, 121(3):488-500.
- 13 李志军, 杨士超, 焦鹏昊, 等. 催化型微粒捕集器主被动再生性能数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(5):37-43. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140506&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.006.
- 14 LI Zhijun, YANG Shichao, JIAO Penghao, et al. Computational investigation in active and passive regeneration characteristics of catalytic particulate filter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5):37-43. (in Chinese)
- 15 HUYNH C T, JOHNSON J H, YANG S L, et al. A one-dimensional computational model for studying the filtration and regeneration characteristics of a catalyzed wall-flow diesel particulate filter[C]. SAE Paper 2003-01-0841, 2003.
- 16 刘洪岐, 高莹, 姜鸿澎, 等. NO_2 扩散作用对催化型微粒捕集器再生的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12):354-360. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161244&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.044.
- 17 LIU Hongqi, GAO Ying, JIANG Hongpeng, et al. The effects of NO_2 diffusion for catalyst diesel particulate filter regeneration [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12):354-360. (in Chinese)
- 18 SHENDE A S, JOHNSON J H, YANG S L, et al. The filtration and particulate matter oxidation characteristics of a catalyzed wall-flow diesel particulate filter[C]. SAE Paper 2005-01-0949, 2005.
- 19 PREMCHAND K C, JOHNSON J H, YANG S L, et al. A study of the filtration and oxidation characteristics of a diesel oxidation catalyst and a catalyzed particulate filter[C]. SAE Paper 2007-01-1123, 2007.
- 20 ZHONG D, HE S, PUSHKAR T, et al. Measurement and prediction of filtration efficiency evolution of soot loaded diesel particulate filters[C]. SAE Paper 2013-01-0528, 2013.
- 21 LEE K W, GIESEKE J A. Collection of aerosol particles by packed beds[J]. Environmental Science & Technology, 1979, 13(4):466-470.
- 22 EVDXIA A, KLADOPOULOU, SONG L Y, et al. A study describing the performance of diesel particulate filters during loading and regeneration—a lumped parameter model for control applications[C]. SAE Paper 2003-01-0842, 2003.
- 23 胡毅, 李孟良, 李军, 等. 柴油车排气后处理装置性能试验研究[J]. 汽车工程, 2010, 32(5):451-454. HU Yi, LI Mengliang, LI Jun, et al. An experimental study on the performance of exhaust aftertreatment devices in diesel vehicle [J]. Automotive Engineering, 2010, 32(5):451-454. (in Chinese)
- 24 KONSTANDOPOULOS A G, SKAPERDAS E, MASOUDI M. Microstructural properties of soot deposits in diesel particulate traps [C]. SAE Paper 2002-01-1015, 2002.