

NO₂ 扩散作用对催化型微粒捕集器再生的影响

刘洪岐¹ 高莹¹ 姜鸿澎² 方茂东³ 麻斌¹ 陈伟¹

(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;
3. 中国汽车技术研究中心, 天津 300300)

摘要: 针对催化型微粒捕集器被动再生反应机理的问题, 采用试验和仿真研究了 NO₂ 扩散作用对壁面和碳烟层再生产生的影响。由于壁面层产生 NO₂, 饼层消耗 NO₂, 形成的浓度梯度作为驱动力产生反向扩散扩用, 在多孔介质中发生孔扩散及努森扩散, NO₂ 多次参与了碳烟的被动再生反应。研究结果反映考虑扩散作用的被动再生模型与试验值相比, 再生模型反应压降偏差可控制在 7.0% 以内, NO₂ 偏差小于 7.3%。NO₂ 扩散作用随入口温度的升高更加明显, 载体入口气体温度增加 100℃ 时的 NO₂ 增加率约为增加 50℃ 时 NO₂ 增加率的 1.90 ~ 1.95 倍。425℃ 时, $z/L=0.9$, $H=0.1829$ mm 处 NO₂ 浓度最高, NO₂ 质量分数最高为 5.69×10^{-4} 。分析碳烟再生过程发现, 排气温度提升增强了 NO₂ 扩散作用, 进而促进了颗粒物再生。425℃ 条件下, 1 000 s 内完成了 55.94% 的碳烟再生, 深床层完成了 80.53%, 总再生量是 325℃ 条件下的 3.68 倍。NO₂ 扩散作用有效提升了载体的被动再生能力, 延长了主动再生周期, 改善了载体耐久性能。

关键词: 微粒捕集器; NO₂; 扩散; 温度; 再生

中图分类号: TK421+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0354-07

Effects of NO₂ Diffusion on Catalyst Diesel Particulate Filter Regeneration

Liu Hongqi¹ Gao Ying¹ Jiang Hongpeng² Fang Maodong³ Ma Bin¹ Chen Wei¹

(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
3. China Automotive Technology and Research Center, Tianjin 300300, China)

Abstract: Aiming to explain passive regeneration reaction mechanism of catalytic diesel particulate filter, the diffusion mechanism of nitrogen dioxide is studied by experiment and simulation. Due to the wall layers are coated by precious metal, a chemical reaction is genesis in 300℃ between nitric oxide and oxygen. And reaction can produce nitrogen dioxide. In cake layer, passive regeneration consumes nitrogen dioxide. Therefore, concentration gradient of nitrogen dioxide is formed. The gradient comes into a driving force of the reverse diffusion. Diffusion mechanism includes pore diffusion and Knudsen diffusion in porous media of particulate filter. Because of back diffusion of nitrogen dioxide, it can participate in passive regeneration of soot many times. Research results show that the pressure drop of filter can be controlled within 7.0% offset and NO₂ concentration can be controlled within 7.3% compared the experimental values with the passive regeneration model which considering the diffusion mechanism. The nitrogen dioxide diffusion effect is more obvious with the increase of inlet temperature. When inlet temperature is increased by 100℃, the increasing rate of NO₂ concentration is 1.90 ~ 1.95 times of that when temperature is increased by 50℃. The maximum concentration of NO₂ is 5.69×10^{-4} at the position of $z/L=0.9$, $H=0.1829$ mm. Analysis of regeneration process of soot retained in the

收稿日期: 2016-09-13 修回日期: 2016-10-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700800)

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: ygao2000@vip.163.com

filter shows that a rise in temperature of inlet gas results enhancement of NO₂ diffusion, and the passive regeneration rate is accelerated. Soot mass retained in the filter is decreased by 55.94% in the first 1 000 s at 425°C, and soot mass in the filter layer reacts 80.53%. The total decreased soot mass is 3.68 times of the reactive mass at 325°C. The variation of concentration for NO₂ and the reaction rates of soot show that diffusion of NO₂ can effectively increase the passive regeneration rate and extend the active regeneration period.

Key words: particulate filter; nitrogen dioxide; diffusion; temperature; regeneration

引言

微粒捕集器作为一种有效降低柴油机颗粒物排放的技术手段,在柴油机领域已得到了广泛应用^[1]。但随着微粒捕集器捕集量的不断增加,发动机排气背压上升,致使发动机燃烧恶化,各项性能指标急剧下降。为了保证发动机性能,需要对沉积在微粒捕集器中的碳烟进行再生^[2-3]。再生方式分为主动再生和被动再生,其中主动再生的控制及载体的耐高温性能一直是技术难点,而被动再生是基于尾气中 NO₂ 的强氧化性,在 300°C 左右可以进行安全可靠的再生反应^[4-6]。微粒捕集器内部,碳烟的沉积分为饼层和深床层,深床层部分涂覆有贵金属,在涂覆区域可以发生 NO 到 NO₂ 的反应,形成 NO₂ 高浓度区域,饼层部分 NO₂ 与碳烟发生反应,变为 NO₂ 低浓度区。NO₂ 的浓度差会驱动 NO₂ 的扩散,进行被动再生的多次反应。

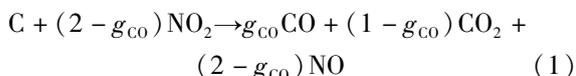
目前国内的建模主要是综合考虑再生模型,将扩散作用的影响综合到被动再生的反应过程中^[7],该方法难以体现 NO₂ 的实际反应过程。HASAN 等^[8]根据载体涂覆和碳烟沉积特点建立了 DPF 的 1 维 2 层模型;ANDREW 等^[9]通过定义反映对流与扩散作用量级的佩克莱特数来评价 NO₂ 扩散能力;HARALAMPOUS 等^[10-12]针对可控和不可控再生过程研究了微粒捕集器中气体扩散对主动再生作用的影响。

本文结合被动再生反应原理,研究深床层与饼层 NO₂ 扩散作用,建立 NO₂ 扩散模型,研究温度对扩散作用影响规律,进而分析再生反应速度的变化,探索载体内部 NO₂ 的变化过程。

1 NO₂ 扩散机理建模

1.1 催化型微粒捕集器再生反应

催化型微粒捕集器可以在相对低温条件下发生 NO₂ 与碳烟反应



式中 g_{CO} ——生成 CO 的比例

该反应可以降低单位时间内碳烟在载体内部的沉积量,有效降低排气背压,延长主动再生周期。

碳烟与 NO₂ 的反应不仅发生在深床层,碳烟形成的壁面滤饼层也会伴随有 NO₂ 与碳烟的反应。由于在捕集器内部深床层涂覆贵金属,可以有效地促进 NO 到 NO₂ 的形成,同时由于 NO₂ 形成的浓度梯度,当空速在一定的范围内时,会发生 NO₂ 的反向扩散,即 NO₂ 再次进入碳烟层参与碳烟与 NO₂ 的连续再生反应^[13],其反应过程如图 1 所示。

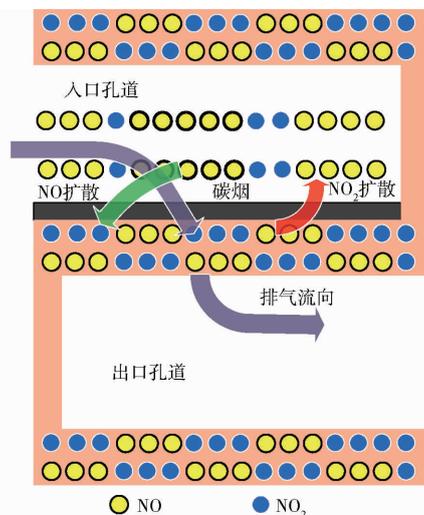


图 1 被动再生反应示意图

Fig. 1 Schematic of passive regeneration process

NO₂ 与碳烟的反应速率遵循阿累尼乌斯方程,反应速率 R_{C-NO_2} 的表达式^[14]为

$$R_{C-NO_2} = k_{NO_2} \exp\left(-\frac{E_{a,NO_2}}{RT_w}\right) C_{NO_2} \quad (2)$$

式中 k_{NO_2} ——指前因子 C_{NO_2} ——NO₂ 浓度
 T_w ——反应温度
 E_{a,NO_2} ——反应活化能
 R ——气体常量,8.314 J/(mol·k)

由于催化器内部 NO 到 NO₂ 的反应是可逆反应,因此在一定温度范围内 NO₂ 的生成呈上升趋势,当超过一定温度范围后,会发生 NO₂ 到 NO 的逆反应^[15],因此温度将成为 NO₂ 生成的重要影响因素,同时会直接对扩散作用产生影响。

NO 到 NO₂ 的反应方程为



NO 与 O₂ 反应生成 NO₂ 的反应速率表达式^[16]为

$$R_{(\text{NO}-\text{O}_2)} = A_{\text{NO}_2} \exp\left(-\frac{E_a}{RT_s}\right) \left(P_{\text{NO}}P_{\text{O}_2}^{0.5} - \frac{P_{\text{NO}_2}^{1.5}}{K_{eq}}\right) \quad (4)$$

式中 A_{NO_2} ——化学平衡反应指前因子

E_a ——NO 到 NO₂ 转化的活化能

K_{eq} ——化学平衡常数

P_{atm} ——大气压力, 101 325 Pa

T_s ——NO 到 NO₂ 转化温度

P_{NO} ——NO 分压 P_{O_2} ——O₂ 分压

1.2 NO₂ 扩散作用建模

NO₂ 流过载体饼层和壁面过程中, 建立 NO₂ 的质量平衡方程^[17], 其中饼层平衡方程为

$$-v_w \frac{\partial c_{\text{NO}_2}}{\partial x} + D_{e, \text{cake}} \frac{\partial^2 c_{\text{NO}_2}}{\partial x^2} - k_{\text{C-NO}_2, \text{cake}} c_{\text{NO}_2} = 0 \quad (5)$$

深床层平衡方程为

$$r_{\text{NO}_2} - v_w \frac{\partial c_{\text{NO}_2}}{\partial x} + D_{e, \text{deep}} \frac{\partial^2 c_{\text{NO}_2}}{\partial x^2} - k_{\text{C-NO}_2, \text{deep}} c_{\text{NO}_2} = 0 \quad (6)$$

式中 c_{NO_2} ——NO₂ 浓度

v_w ——气体进入壁面流速

$k_{\text{C-NO}_2, \text{cake}}$ ——碳烟与 NO₂ 在饼层反应的速率

$k_{\text{C-NO}_2, \text{deep}}$ ——碳烟与 NO₂ 在深床层反应的速率

$D_{e, \text{cake}}$ ——NO₂ 在饼层的有效扩散系数

$D_{e, \text{deep}}$ ——NO₂ 在深床层的有效扩散系数

2 个方程差异项在于深床层平衡方程中有了 NO₂ 的生成。

由于深床层质量平衡方程中出现了产生 NO₂ 的项 r_{NO_2} , 形成了新的浓度差, 将会在多孔介质内发生扩散作用, NO₂ 与 NO 进行孔扩散及努森扩散^[18]。综合扩散系数 D_j 计算公式为

$$\frac{1}{D_j} = \frac{\tau}{\varepsilon_p} \left(\frac{1}{D_{\text{mol}, j}} + \frac{1 - b\eta_A}{D_{\text{knud}, j}} \right) \quad (7)$$

$$b = 1 + \frac{N_B}{N_A} \quad (8)$$

式中 τ ——曲折因子, 取典型值 3

ε_p ——孔隙率

N_A, N_B ——气体 A、B 的扩散通量

η_A ——气体 A 的摩尔分率

当 $N_A = -N_B$ 时, 此时处于等分子扩散状态, 综合扩散系数为

$$\frac{1}{D_j} = \frac{\tau}{\varepsilon_p} \left(\frac{1}{D_{\text{mol}, j}} + \frac{1}{D_{\text{knud}, j}} \right) \quad (9)$$

式中 $D_{\text{mol}, j}$ ——分子孔扩散系数

$D_{\text{knud}, j}$ ——努森扩散系数

发动机尾气在微粒捕集器载体进口孔道和出口孔道内的传输特性按照层流计算, 入口和出口孔道气体的传质特征传递方程为

$$\frac{\partial}{\partial z}(v_1 y_{1,j}) = -\frac{1}{df_w^2} v_w y_{1,j} + \frac{1}{df_w} k_{1,j} (y_{1s,j} - y_{1,j}) \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(v_2 y_{2,j}) = -\frac{1}{df_{w_s}^2} v_w y_{2,j} + \frac{1}{df_{w_s}} k_{2,j} (y_{2s,j} - y_{2,j}) \quad (11)$$

$$\text{其中 } k_{i,j} = \frac{Sh D_j}{d_i} \quad f_w = \frac{d_i - 2d_{\text{soot}}}{d_i} \quad f_{w_s} = 1$$

式中 $k_{i,j}$ ——入口和出口孔道的传质系数

Sh ——舍伍德数, 用于表征分子扩散阻力与对流传质阻力之比

$y_{i,j}$ ——物质摩尔分数

d_i ——洁净状态孔道宽度

d_{soot} ——碳烟层厚度

考虑系统传质过程边界条件, 入口孔道与碳烟层及出口孔道与出口壁面的分子流动传质方程为

$$v_w y_{1s,j} - D_j f_w \frac{\partial y_j}{\partial x} \Big|_{1s} = -df_w^2 \frac{\partial}{\partial z}(v_1 y_{1,j}) \quad (12)$$

$$v_w y_{2s,j} - D_j f_{w_s} \frac{\partial y_j}{\partial x} \Big|_{2s} = -df_{w_s}^2 \frac{\partial}{\partial z}(v_2 y_{2,j}) \quad (13)$$

结合孔道内流动的对流传质方程, 求解入口孔道边界条件和出口孔道边界条件为

$$v_w y_{1s,j} - D_j f_w \frac{\partial y_j}{\partial x} \Big|_{1s} = v_w y_{1,j} - k_{1,j} f_w (y_{1s,j} - y_{1,j}) \quad (14)$$

$$-D_j f_{w_s} \frac{\partial y_j}{\partial x} \Big|_{2s} = k_{1,j} (y_{2s,j} - y_{2,j}) \quad (15)$$

2 试验设计

搭建催化型微粒捕集器连续再生试验平台。根据 NO₂ 反应机理, 在发动机台架进行被动再生试验, 以验证 NO₂ 扩散作用模型。试验台架如图 2 所示, 载体材料为堇青石, 安装如图 3 所示。其中发动机参数如表 1 所示, CDPF 载体参数如表 2 所示。选用 HORIBA 7100 DEGR 系统监测气体组分, K 型热

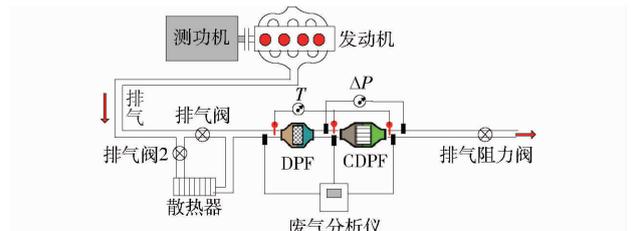


图 2 试验台架示意图

Fig. 2 Schematic of test cell setup

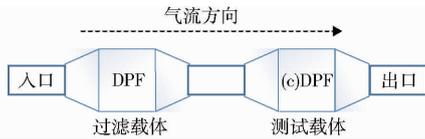


图 3 后处理系统载体安装示意图

Fig. 3 Schematic of after treatment system

表 1 试验用发动机参数

Tab. 1 Engine specifications in test

参数	数值
型号	QSB4.5
缸径 × 行程 / (mm × mm)	107 × 124
排量 / L	4.5
压缩比	17.2
额定转速 / (r · min ⁻¹)	2 500
额定功率 / kW	119

表 2 CDPF 主要参数

Tab. 2 CDPF specifications

参数	数值
直径 / mm	190.5
总长度 / mm	203.2
总容积 / L	5.791 7
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

电偶测量排气温度及载体床温。

为验证 NO₂ 扩散作用对微粒捕集器的影响,后处理系统中,在排气系统最前端加装一个 DPF 进行颗粒物过滤,如图 3 所示,确保进入测量载体内部的排气组分中颗粒物可以忽略,同时控制排气温度低于 450℃,排除氧气参与的主动再生反应,载体内部仅发生 NO₂ 与碳烟的再生反应。通过试验连续再生反应的速率及压降变化,分析 NO 及 NO₂ 在载体前后端的变化规律,验证模型预测的有效性。

3 模型验证

建立带有扩散作用和非扩散作用的 CDPF 再生模型,验证仿真数据与试验数据的差异性,确定系统模型的有效性。仿真与试验结果如图 4 所示,其中,无扩散作用的模型再生效果较弱,压降仅下降 0.266 kPa,试验数据显示压降实际下降 3.482 kPa,带有扩散作用的模型计算压降下降了 3.449 kPa。从图 4 可看出,NO₂ 扩散作用起到了明显的再生作用。

从图 4 试验和仿真结果可以看出,当催化型微粒捕集器入口 NO₂ 的体积分数为 6 × 10⁻⁶ 时,扩散作用可以强化 NO₂ 进行碳烟再生氧化的作用,NO₂ 存在反向扩散的作用,即 NO 在壁面层发生了向

NO₂ 的转化,进而形成浓度差,扩散至饼层,再次参与碳烟的再生反应。

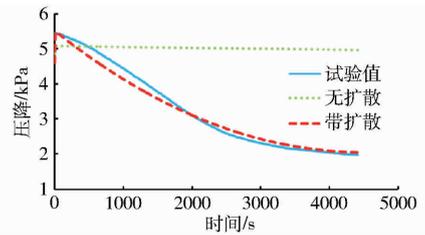


图 4 被动再生压降变化曲线

Fig. 4 Changing curves of passive regeneration pressure drop

从图 5 可以看出带有扩散作用的模型仿真结果与试验结果的偏差可以控制在 7.0% 以内,能够准确代表催化型微粒捕集器的连续再生 NO₂ 扩散作用的特征。

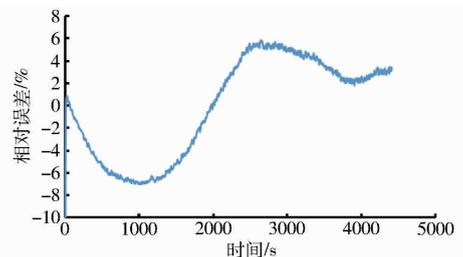


图 5 被动再生过程带扩散模型的相对误差曲线

Fig. 5 Relative pressure drop error curve of passive regeneration with NO₂ diffusion

由图 4 和图 5 可看出,模型仿真结果在 2 000 s 之前压降下降速率始终高于试验值。由于在连续再生起始阶段,载体内部需要一段时间稳定,当载体温度升高到一定数值后,连续再生反应产生放热影响,载体内部排气温度会高于入口排气温度。引起床温升高,促进 NO₂ 分子扩散作用的提升,在此温度范围内试验过程压降下降速率增加,高于模型仿真结果。经过验证,模型碳烟再生速率与实际误差小于 7.0%。

从图 6 可看出载体出口处 NO 及 NO₂ 浓度变化有很好符合度,其中 NO 最大体积浓度偏差发生在起始阶段第 17 秒时,数值为 4.9 × 10⁻⁵,当测量稳定后,试验值与测量值偏差稳定在低于 3.0 × 10⁻⁵ 的范围内,相对偏差小于 6.6%。NO₂ 出口浓度最大

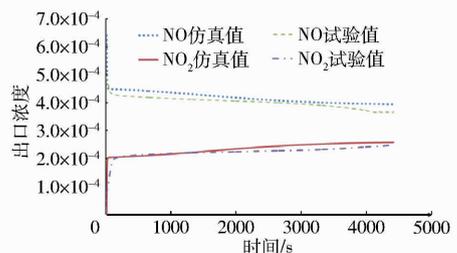


图 6 载体出口 NO 及 NO₂ 浓度

Fig. 6 Concentrations of NO and NO₂ at CDPF downstream outlet

偏差为 3.7×10^{-5} , 发生在 $t = 72$ s 时, 当稳定后, 实际偏差小于 2.0×10^{-5} , 相对偏差不超过 7.3%。根据仿真与试验结果比较, 模型可以有效表征载体 NO 以及 NO_2 变化特征。

4 NO_2 扩散及碳烟再生特性分析

从系统再生反应速率方程及扩散机理模型中可以看出, 温度是影响再生反应剂扩散作用的关键参数。本文重点研究温度对 NO_2 扩散作用的影响规律及在考虑扩散作用的影响下连续再生碳烟质量变化规律。

4.1 NO_2 变化规律

针对入口处 ($z/L = 0.1$)、中间位置 ($z/L = 0.5$) 及出口处 ($z/L = 0.9$) 3 个位置分析 NO_2 沿碳烟层到壁面层的变化规律, 如图 7 所示, 探讨排气温度在 325℃、375℃ 和 425℃ 条件下 NO_2 浓度变化规律。为避免实际发生再生反应, 影响碳烟层厚度变化, NO_2 分布规律产生差异, 在该仿真过程中关闭再生反应, 仅研究 NO_2 的扩散分布情况。

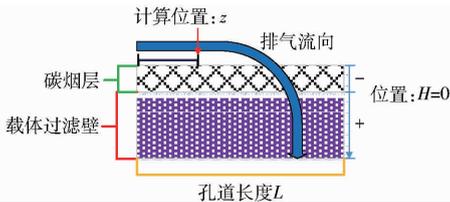


图7 碳烟层及过滤壁示意图

Fig.7 Schematic of cake layer and filter layer

根据仿真结果, 提取碳烟层与载体过滤壁面处 (即 $H = 0$ 处) 的 NO_2 浓度变化, 如表 3 所示。可以看出, 随着温度的提升, 分子布朗运动加剧, 扩散作用得到提升。在 $z/L = 0.1$ 处, 温度升高 50℃ 和 100℃, NO_2 质量分数分别提升 28.35% 和 55.37%; $z/L = 0.5$ 处, NO_2 质量分数分别提升 17.81% 和 33.89%; $z/L = 0.9$ 处, NO_2 质量分数分别提升 6.16% 和 11.75%。随着位置的后移, $H = 0$ 处的 NO_2 质量分数增加, 但是温度的提升带来的相对增加率下降。同时温度增加 100℃ 时 NO_2 增加率约为

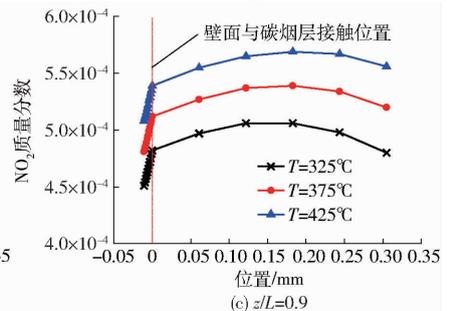
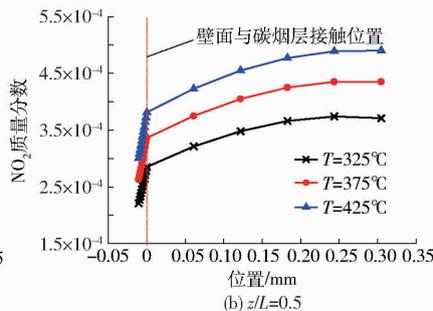
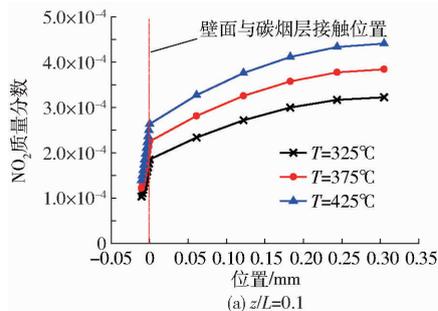


图8 NO_2 质量分数变化曲线

Fig.8 Changing curves of NO_2 concentration

增加 50℃ 时 NO_2 增加率的 1.90 ~ 1.95 倍。 NO_2 绝对增加量在 $z/L = 0.1$ 和 0.5 处变化近似相等, 偏差仅为 0.02 和 0.01, 在 $z/L = 0.9$ 处, 绝对增加量分别为 3.0×10^{-5} 和 5.7×10^{-5} 。原因在于排气组分到达 $z/L = 0.9$ 处时, NO 到 NO_2 的反应时间充分, 且在前端已经发生扩散反应, 对后端 NO_2 浓度的变化影响较弱。

表3 $H = 0$ 处 NO_2 质量分数

Tab.3 Concentration of NO_2 at $H = 0$

z/L	温度/℃		
	325	375	425
0.1	1.72×10^{-4}	2.21×10^{-4}	2.67×10^{-4}
0.5	2.85×10^{-4}	3.36×10^{-4}	3.81×10^{-4}
0.9	4.82×10^{-4}	5.12×10^{-4}	5.39×10^{-4}

为进一步分析 NO_2 随排气流向的变化规律, 提取 NO_2 沿 H 为 $-0.012 \sim 0.3048$ mm 的变化规律, 如图 8 所示。从图 8a、8b 可以看出, 从碳烟层到壁面再到与排气孔道接触的壁面位置, NO_2 浓度是处于上升的状态。从碳烟层到与壁面接触位置, NO_2 质量分数上升速率明显高于载体过滤比内部的增加速率。随着温度的提升, NO_2 浓度增加。在 $z/L = 0.1$ 处温度提升 50℃ NO_2 增加比例范围为 23.18% ~ 28.35%; 温度提升 100℃ 增加范围为 44.09% ~ 55.37%。 NO_2 最大增加率位置为 $H = 0$ 处。在 $z/L = 0.5$ 处, 温度提升 50℃ 和 100℃, NO_2 增加范围分别为 16.14% ~ 18.71% 和 30.29% ~ 35.67%。 NO_2 最大增加率位置为 $H = -0.012$ mm 处。

在 $z/L = 0.9$ 处, NO_2 沿 H 为 $-0.012 \sim 0.3048$ mm 处的变化规律呈现抛物线型。当 NO_2 接近过滤壁面出口位置时, 出现了 NO_2 浓度的下降。 NO_2 最高浓度出现在 $H = 0.1829$ mm 处。根据仿真结果, 温度的提升带来了 NO_2 浓度的增加, 温度提升 50℃ 和 100℃, NO_2 增加范围分别为 6.03% ~ 8.46% 和 11.49% ~ 15.90%。 NO_2 最大增加率位置为 $H = 0.3048$ mm 处。

在相同温度下, 不同位置处 NO_2 浓度的变化规

律如图 9 所示。温度等同的条件下,入口孔道方向, z/L 为 0.1、0.5 和 0.9 3 处变化分析可知,由于 NO₂ 到达 z/L 为 0.5 和 0.9 处时分子扩散作用会在流动过程中产生 NO 到 NO₂ 的转化,因此沿轴向方向

NO₂ 浓度逐渐增加。3 个位置相比, $z/L = 0.9$ 处浓度最高,在 325、375、425℃ 时,NO₂ 质量分数最高分别为 5.06×10^{-4} 、 5.39×10^{-4} 和 5.69×10^{-4} ,所处位置分别为 0.243 8 mm、0.182 9 mm 和 0.182 9 mm。

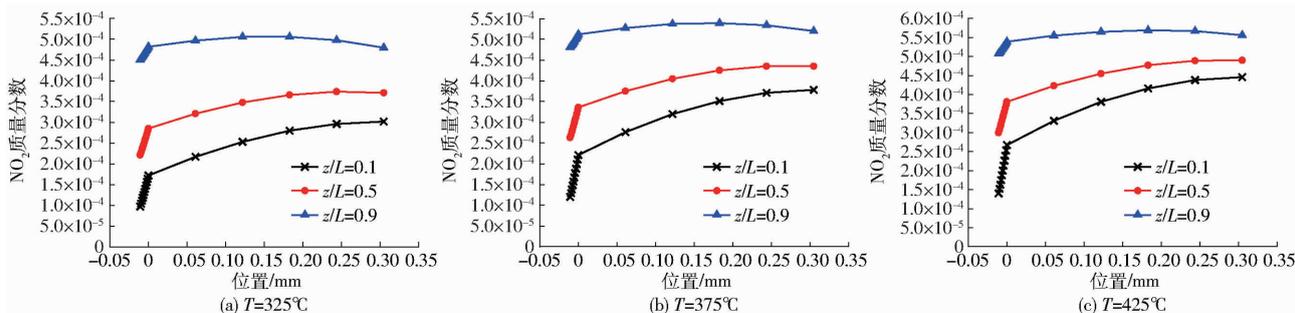


图 9 NO₂ 质量浓度变化曲线

Fig. 9 Changing curves of NO₂ concentration

不同位置在相同温度条件下的 NO₂ 质量分数变化范围如表 4 所示。以 $z/L = 0.1$ 处为基准值,设定为 1,分析可知在 3 种温度条件下,NO₂ 增加比例最大值均发生在 $H = -0.012$ mm 处,最小值发生在 $H = 0.304 8$ mm 处。原因在于 $z/L = 0.1$ 处 NO₂ 仅受入口处 NO₂ 扩散作用的影响,其影响能力较弱,且原始排气中的 NO₂ 含量较低,造成了浓度绝对基准数值低。因此 $z/L = 0.5$ 和 0.9 处 $H = -0.012$ mm 处的相对增加率达到最大。 $z/L = 0.9$ 在 325、375、425℃ 条件下最大增加率分别为 363.43%、300.95% 和 262.06%。

表 4 不同位置 NO₂ 质量分数增加比例

Tab. 4 NO₂ mass fraction increase ratio at different positions %

z/L	温度/℃		
	325	375	425
0.5	23.16 ~	20.92 ~	9.98 ~
	127.42	119.17	114.12
0.9	59.08 ~	53.51 ~	24.76 ~
	363.43	300.95	262.06

由于在 $z/L = 0.1$ 处,入口处的排气经过载体过滤壁面后会发生 NO 到 NO₂ 的转化,提升了 $H = 0.304 8$ mm 处的浓度基数,同时到达 $z/L = 0.5$ 和 0.9, $H = 0.304 8$ mm 处时浓度变化已趋于稳定,因此最小浓度差异, $z/L = 0.9$ 在 325、375、425℃ 条件下最小增加率分别为 59.08%、53.51% 和 24.76%。

综合分析温度对 NO₂ 扩散作用带来了明显的影响,结合扩散模型中分子扩散和努森扩散作用机理,分析可以得出,温度增加会明显增强扩散作用,引起 NO₂ 在载体内部的浓度增加。同时综合评定可以看出,温度提升对 NO₂ 扩散作用影响明显高于温度带来的 NO 到 NO₂ 转化的抑制作用。

4.2 再生过程分析

为分析不同温度引起的 NO₂ 变化对碳烟再生产生的影响,开启再生反应模块,分析 325、375、425℃ 条件下的载体内部碳烟沉积量变化规律。设定初始碳烟沉积量为 18 g。

不同温度时碳烟再生过程质量变化规律如图 10 所示。从图 10 可看出载体碳烟再生量不断下降,第 1 个 1 000 s 内,325、375、425℃ 再生量分别为 2.74、5.97、10.07 g。温度引起 NO₂ 的浓度产生差异,进而被动再生速率产生明显的变化。排气入口温度为 425℃ 时,第 1 个 1 000 s 内完成了 55.94% 碳烟再生,而在 375℃ 和 325℃ 条件下,分别完成 33.17% 和 15.22% 的碳烟再生。随着反应的不进行,颗粒物沉积量不断下降,到 3 000 ~ 4 000 s 时,425℃ 仅下降 0.49 g,仅占总量的 2.72%,375℃ 和 325℃ 分别下降 1.84 g 和 1.69 g,占总沉积量的 10.22% 和 9.39%。单位时间内再生量下降原因是起始阶段碳烟累积量大,深床层快速参与反应,如图 11 所示,气流中 NO₂ 与颗粒物接触频繁,可以多次参与反应,425℃ 时,深床层在 1 000 s 时已完成 80.53%,而 375℃ 和 325℃ 时分别仅完成 50.8% 和 23.07%。随着反应的进行,由于载体内部碳烟量跟贵金属涂覆壁面接触,产生的 NO₂ 直接参与快速反应,后期壁面沉

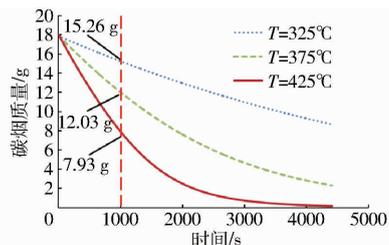


图 10 再生过程碳烟沉积量变化

Fig. 10 Changing of total soot mass retained during passive regeneration

积的碳烟反应需要依靠 NO_2 的扩散才可更有效地发生,且壁面层反应后,气体流通性更好, NO 与 O_2 在催化层的反应时间下降,扩散作用强度下降,因此反应速率会有一定的影响。

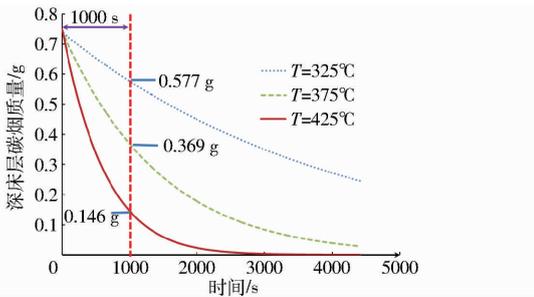


图 11 壁面层碳烟沉积量变化

Fig. 11 Changing of soot mass retained in filter layer during passive regeneration

5 结论

(1)建立了微粒捕集器 NO_2 扩散机理模型,模

型压降特征精度保持在 7.0% 以内, NO_2 浓度偏差控制在 7.3% 以内。

(2)排气温度升高提升了 NO_2 分子扩散和努森扩散能力。载体入口气体温度升高 100°C 时 NO_2 增加率约为增加 50°C 时 NO_2 增加率的 1.90 ~ 1.95 倍。在 3 种入口温度条件下, 425°C 时, $z/L = 0.9$, $H = 0.1829$ mm 处 NO_2 浓度最高, NO_2 质量分数最高为 5.69×10^{-4} , 比 425°C , $z/L = 0.1$, $H = -0.012$ mm 处 NO_2 质量分数高 262.06%。

(3)排气温度提升加速了颗粒物再生速度。 425°C 条件下, 1 000 s 内完成了 55.94% 的碳烟再生, 深床层完成了 80.53%, 总再生量及深床层再生量是 325°C 条件下的 3.68 倍和 3.49 倍。温度升高带来扩散作用的提升明显影响了 NO_2 辅助再生的速率。

参 考 文 献

- JOHNSON T. Vehicular emissions in review [J]. SAE International Journal of Engines, 2016, 9(2): 1258 - 1275.
- 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)
- 王涛, 姚章涛, 杨宁, 等. 柴油机排放控制及后处理技术综述 [J]. 重型汽车, 2012(4): 10 - 12. WANG Tao, YAO Zhangtao, YANG Ning, et al. Review of diesel emission control and aftertreatment technology [J]. Heavy Truck, 2012(4): 10 - 12. (in Chinese)
- KOLTSAKIS G C, HARALAMPOUS O A, DARDIOTIS C K, et al. Performance of catalyzed particulate filters without upstream oxidation catalyst [C]. SAE Paper 2005 - 01 - 0952, 2005.
- KOLTASKIS G, HARALAMPOUS O A, DEPCIK C, et al. Catalyzed diesel particulate filter modeling [J]. Reviews in Chemical Engineering, 2013, 29(1): 1 - 61.
- 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.
- 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]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 107 - 112. LI Zhijun, YANG Shichao, JIAO Penghao, et al. Computational investigation in active and passive regeneration characteristics of catalytic particulate filter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 107 - 112. (in Chinese)
- HASAN M, ANTONIO P T, YANG Songlin, et al. An advanced 1D 2-layer catalyzed diesel particulate filter model to simulate: filtration by the wall and particulate cake, oxidation in the wall and particulate cake by NO_2 and O_2 , and regeneration by heat addition [C]. SAE Paper 2006 - 01 - 0467, 2006.
- YORK APE, 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 Paper 2007 - 01 - 0043, 2007.
- HARALAMPOUS O A, KOLTSAKIS G C, SAMARAS Z C, et al. Modeling and experimental study of uncontrolled regenerations in SiC filters with fuel borne catalyst [C]. SAE Paper 2004 - 01 - 0697, 2004
- HARALAMPOUS O A, KOLTSAKIS G C. Oxygen diffusion modeling in diesel particulate filter regeneration [J]. AIChE Journal, 2004, 50(9): 2008 - 2019.
- KANDYLAS I P, HARALAMPOUS O A, KOLTSAKIS G C. Diesel soot oxidation with NO_2 : engine experiments and simulations [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2002, 41(22): 5372 - 5384.
- YU M, LUSS D, BALAKOTAIAH V. Analysis of flow distribution and heat transfer in a diesel particulate filter [J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 226: 68 - 78.
- 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.

- 10 王文成,刘晓论,孙威,等. 双节距齿形输送链条设计与试验[J]. 农业机械学报,2013,44(2):243-247.
WANG Wencheng, LIU Xiaolun, SUN Wei, et al. Design and experiment of double-pitch silent chain for conveyors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(2):243-247. (in Chinese)
- 11 叶斌,邢建恒. 发动机正时链系统优化设计计算[J]. 机械传动,2012,36(1):32-34.
YE Bin, XING Jianheng. Calculation and optimization design of engine timing chain system[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2012, 36(1):32-34. (in Chinese)
- 12 程亚兵,王洋,李磊,等. 汽车V型发动机用正时链传动系统的设计[J]. 吉林大学学报:工学版,2015,45(1):139-144.
CHENG Yabing, WANG Yang, LI Lei, et al. Design of V type engine timing chain system[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2015,45(1):139-144. (in Chinese)
- 13 付振明,金玉漠,孟繁忠. 一种V型发动机正时链系统的设计方法[J]. 中国机械工程,2011,22(17):2132-2135.
FU Zhenming, JIN Yumo, MENG Fanzhong. Design method of a V type engine timing chain system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 22(17): 2132-2135. (in Chinese)
- 14 王淑坤,孟繁忠,程亚兵,等. 汽车发动机正时链的多冲特性[J]. 哈尔滨工业大学学报,2005,37(4):495-497.
WANG Shukun, MENG Fanzhong, CHENG Yabing, et al. Multicycle impact property of automotive engine timing chain[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005,37(4):495-497. (in Chinese)
- 15 李宝林. 发动机正时链系统设计方法与性能试验[D]. 长春:吉林大学,2006.
LI Baolin. Design method and performance experiments of automotive engine timing chain system[D]. Changchun: Jilin University, 2006. (in Chinese)
- 16 董成国. 汽车正时齿形链系统设计与仿真分析及试验研究[D]. 长春:吉林大学,2010.
DONG Chengguo. Design method and study on simulation and experiment of automotive timing silent chain system[D]. Changchun: Jilin University, 2010. (in Chinese)
- 17 孟繁忠,李宝林,吕翔,等. 汽车发动机正时链系统设计方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,41(5):121-124.
MENG Fanzhong, LI Baolin, LÜ Xiang, et al. Design method of timing chain system for automotive engine[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009,41(5):121-124. (in Chinese)
- 18 许树新,周晓勤,李静秋. 链条耐磨损寿命可靠性评定方法[J]. 农业机械学报,2008,39(8):182-185.
XU Shuxin, ZHOU Xiaolin, LI Jingqiu. Evaluation method of chain wear-resistant reliability[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(8):182-185. (in Chinese)
- 19 李启海,孟繁忠,冯增铭. 新型Hy-Vo齿形链的噪声试验研究[J]. 中国机械工程,2009,20(2):131-133.
LI Qihai, MENG Fanzhong, FENG Zengming. Research on noise test of new Hy-Vo silent chain[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009,20(2):131-133. (in Chinese)
- 20 王淑坤,孟繁忠,李启海,等. 汽车发动机滚子链的噪声测试与分析[J]. 兵工学报,2009,30(6):759-763.
WANG Shukun, MENG Fanzhong, LI Qihai, et al. Noise testing and analysis of automotive engine timing chain[J]. Acta Armamentarii, 2009,30(6):759-763. (in Chinese)

~~~~~  
(上接第360页)

- 15 MLADENOV N, KOOP J, TISCHER S, et al. Modeling of transport and chemistry in channel flows of automotive catalytic converters[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(2): 812-826.
- 16 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.
- 17 SCHEJBAL M, STEPANEK J, MAREK M, et al. Modelling of soot oxidation by NO<sub>2</sub> in various types of diesel particulate filters[J]. Fuel, 2010, 89(9): 2365-2375.
- 18 HARALAMPOUS O A, DARDIOTIS C K, KOLTSAKIS G C, et al. Study of catalytic regeneration mechanisms in diesel particulate filters using coupled reaction-diffusion modeling[C]. SAE Paper 2004-01-1941, 2004.