

DPF 主动再生过程压差及温度场特性试验研究

丁晓辉^{1,2}, 徐文秀^{1,2}, 尹相恺^{1,2}, 董光雷^{1,2}, 郑雪^{1,2}

1. 内燃机与动力系统全国重点实验室, 山东 潍坊 261061; 2. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061

摘要:为提高柴油机颗粒捕集器(diesel particulate filter, DPF)的可靠性并为其主动再生控制提供参考,通过发动机台架试验研究 DPF 积碳过程的压差特性以及主动再生时 DPF 内部温度的变化规律。结果表明:DPF 在不同积碳阶段的压差特性存在较大差异,再生后再次积碳过程的 DPF 压差较再生前平均降低约 2 hPa;正常主动再生过程中,DPF 内部轴向温度从前向后依次升高,DPF 后端面位置的温度最高,为 715 °C,径向温度分布存在差异,表明 DPF 内部燃烧不均匀;再生过程降怠速(drop to idle, DTI)工况下 DPF 内部温度快速升高,可达到 1 034 °C;当碳载量大于 4 g/L 时,DPF 内部温度随碳载量呈线性快速上升趋势;较高的氧化催化剂起燃速率使得 DPF 内部温度短时间内快速升高,当起燃速率为 6.5 °C/s 时,DPF 内部温度达到 1 076 °C;主动再生 DTI 工况、较大的碳载量及较高的起燃速率,是增大 DPF 再生过程热风险的主要因素,在实际应用中应合理控制。

关键词:DPF; 积碳; 主动再生; DTI

中图分类号:TK421.5

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2026)01-0045-05

引用格式:丁晓辉,徐文秀,尹相恺,等. DPF 主动再生过程压差及温度场特性试验研究[J]. 内燃机与动力装置, 2026, 43(1): 45-49.

DING Xiaohui, XU Wenxiu, YIN Xiangkai, et al. Experimental study on pressure difference and temperature field characteristics during active regeneration of DPF [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2026, 43(1): 45-49.

0 引言

柴油机排放物中的颗粒物(particulate matter, PM)是大气污染的重要来源,严重危害人类健康^[1]。柴油机颗粒捕集器(diesel particulate filter, DPF)可有效降低 PM 排放,是满足国六排放标准要求的关键技术之一^[2]。DPF 载体材料主要为堇青石或碳化硅,其内部为疏松多孔结构。载体通道入口和出口分别错位封堵,气流从入口流入后必须穿过载体壁面才能从出口排出,在此过程中通过扩散、拦截及惯性撞击的复合机制将 PM 高效捕集,捕集效率高于 99%^[3-4]。

PM 的成分主要为碳烟、可溶性有机物(soluble organic fraction, SOF)和灰分^[5]。柴油机氧化催化剂(diesel oxidation catalyst, DOC)可氧化并去除 SOF;采用主动再生或被动再生措施,碳烟也可被氧化燃烧去除;然而,灰分无法通过氧化过程脱除,最终残留在载体中。随着发动机运行时间增加,DPF 中捕集的积碳不断积累,导致 DPF 压降增大,进而引发发动机排气背压升高以及油耗增加^[6]。因此需要通过再生的方式及时清除 DPF 载体内累积的积碳颗粒。

DPF 再生方式主要有被动再生和主动再生两种方式。被动再生是在适宜温度下,利用催化剂促使碳烟与 NO_x 发生氧化反应。但当发动机长期处于低排温工况时,被动再生难以启动,无法彻底去除碳烟。主动再生是利用缸内后喷或尾管后喷 HC,利用 HC 在 DOC 内发生氧化反应释放的热量提高进入 DPF 的气流温度,使碳烟在高温下氧化去除。但是,该过程中积碳的迅速氧化会释放大量热量,可能在 DPF 载

收稿日期:2025-11-03

第一作者简介:丁晓辉(1987—),女,山东聊城人,工学硕士,工程师,主要研究方向为柴油机性能提升及排放控制技术, E-mail: dingxiaoh@ weichai.com。

体内部产生局部高温,严重时可能造成载体烧结或熔裂,因此,必须对主动再生过程实施有效控制。

积碳对 DPF 性能和可靠性的影响显著^[7],本文中通过台架试验对 DPF 碳烟捕集过程的压差特性和主动再生过程的温度场进行分析,以提高 DPF 可靠性并满足柴油机国六排放标准要求。

1 试验装置及方法

试验台测功机、发动机、后处理系统和传感器等设备连接如图 1 所示,其中后处理系统主要由 DOC、DPF 和选择性催化还原(selective catalytic reduction,SCR)组成。试验用发动机为 WP12 系列直列 6 缸柴油机,排量为 12.05 L,额定转速为 1 900 r/min,额定功率为 341 kW,满足国六排放标准。在涡轮增压器后安装 HC 喷嘴,用于在主动再生过程中向排气尾管中喷入 HC;DPF 压差传感器用于测量 DPF 前后的压力差。DPF 载体为堇青石,直径约为 22.9 cm,长度约为 30.5 cm,壁厚约为 0.3 cm,载体截面上每平方米分布大约 31 个孔道(200 目)。

DPF 载体内部布置 K 型热电偶传感器,最高测量温度为 1 500 °C。载体内部布置 11 个测温点,如图 2 所示。图 2 中,测点 1~5 沿着载体中心轴向均匀布置,测点 1-1、1-2、1-3 位于载体前端面距中心三分之二半径处并间隔 120°均匀分布,测点 5-1、5-2、5-3 位于后端面距中心三分之二半径处并间隔 120°均匀分布。

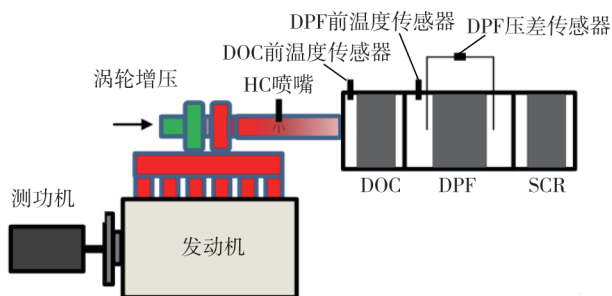


图 1 试验设备连接示意图

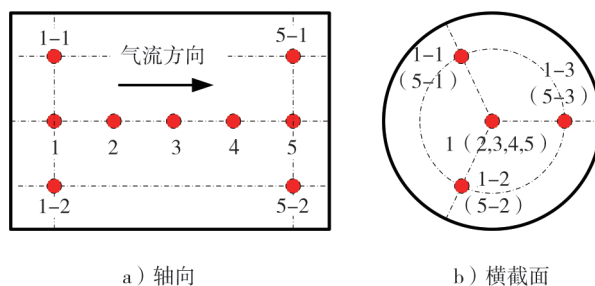


图 2 DPF 内部测温点布置示意图

2 DPF 积碳过程压差分析

基于全球统一瞬态测试循环(world harmonized transient cycle, WHTC)进行 DPF 积碳加载试验。试验进行两次,第一次积碳加载过程结束后进行主动再生,将积碳全部燃烧,随后在相同工况下进行第二次积碳加载。

两次积碳加载过程中 DPF 压差变化曲线如图 3 所示。由图 3 可知:1)第一次积碳加载初期(第 I 阶段),随着碳烟颗粒进入 DPF 内部并产生“深床捕捉”效应,气流通过载体的流动阻力随之增大,导致 DPF 压差快速增大;“深床捕捉”阶段结束后进入第 II 阶段,载体内部孔隙被碳烟颗粒填充后,碳烟颗粒逐渐在通道壁面过滤孔周围积聚,直至通道表面形成连续的积碳层,整个过程中压差增大速度较前一阶段有所减缓;随着碳载量继续增加,过滤进入第 III 阶段,载体通道表面被碳烟颗粒覆盖,积碳层逐渐变厚,此时压差和碳载量呈近似线性增长关系。2)第二次积碳过程中,第 I 阶段的“深床捕捉”效应相比第一次积碳过程明显减弱,第 II、III 阶段的压差变化趋势虽与第一次积碳过程类似,但整体数值降低约 2 hPa。主要原因为:主动再生过程中已将载体孔隙中的积碳颗粒燃烧去除,残留的不可

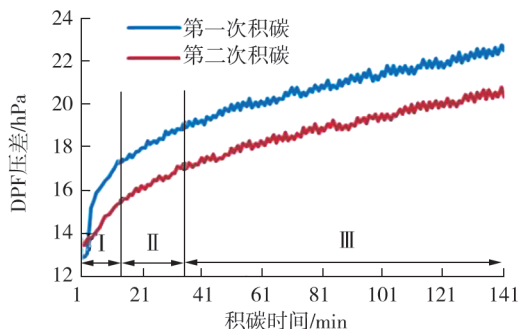


图 3 DPF 积碳过程压差变化曲线

燃烧灰分颗粒的粒径以及密度均大于碳烟颗粒,在一定程度上改善了载体的气体渗透性。

3 DPF 主动再生过程温度场分析

3.1 正常主动再生温度场

正常主动再生试验条件为:DPF 积碳加载至 5 g/L,DOC 后的温度起燃速率为 4 °C/s,起燃最高温度为 600 °C,在额定工况下触发主动再生。正常主动再生过程中各测点温度变化如图 4 所示。

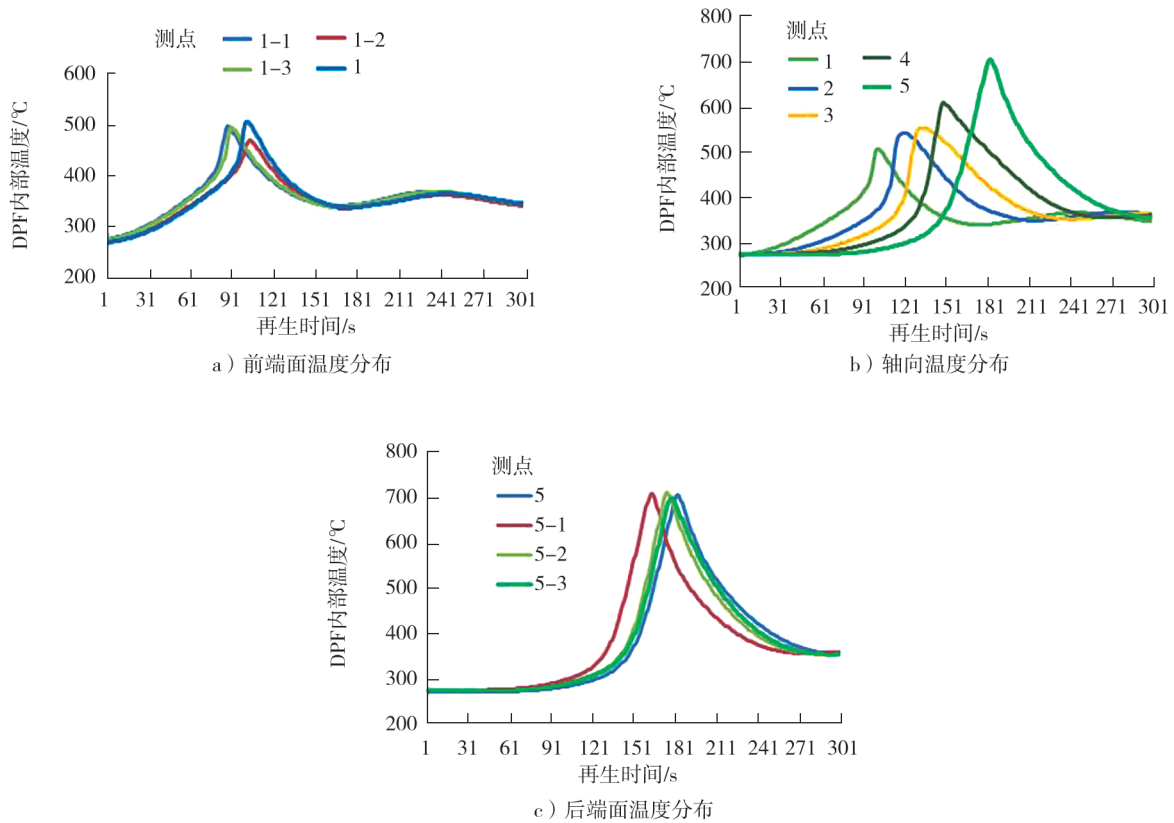


图4 正常主动再生过程 DPF 内部温度变化

由图 4a)可知:DPF 前端面 4 个测点温度整体偏低;测点 1-1、1-3 的温度变化同步,测点 1、1-2 的温度变化同步;测点 1-2 的最高温度较其他测点低 30 °C。

由图 4b)可知:随着再生过程的进行,DPF 轴向各测点温度从前端到后端依次升高;当测点 1 温度升至峰值时,其后相邻的测点 2 温度仍在持续上升,在测点 1 达到峰值约 15 s 后,测点 2 达到其温度峰值;此后,测点 3、4、5 依照相同规律依次达到各自的峰值温度;载体内部的最高温度出现在测点 5,为 715 °C。

由图 4c)可知:DPF 后端面 4 个测点的峰值温度非常接近;除测点 5-1 外,其余 3 个测点的温度变化过程基本同步。

在 DPF 主动再生过程中,高温气体促使载体通道内的积碳由前向后依次燃烧,该过程释放大量热量,致使 DPF 内部温度在短时间内迅速上升。热量沿轴向向后传递,使得各测点温度按顺序逐步升高。由于载体内部燃烧与放热并不完全均匀,因此沿径向位置的温度分布亦存在一定差异。

3.2 主动再生降怠速工况温度场

DPF 再生过程中若温度超过安全阈值时,载体存在烧损的风险,因此,后处理系统研究的重点与难点是确定 DPF 的最高许用温度并在此条件下延长其使用寿命^[9]。在主动再生阶段,发动机转速突然降至怠速的特殊工况称为降怠速(drop to idle, DTI)工况^[10]。在 DPF 积碳加载至 4 g/L、内部温度达到起燃温度后执行 DTI 操作,测量主动再生 DTI 工况下轴向测点的温度,如图 5 所示。由图 5 可知:主动再生 DTI

工况下,DPF 内部温度显著高于正常主动再生,且温度沿轴向由前向后越来越高;其中,测点 4 的最高温度为 1 009 °C,测点 5 的温度最高,达到 1 034 °C。原因为:主动再生初期,氧化反应已经开始,DPF 内部处于富氧燃烧状态,积碳燃烧释放出大量热量,若此时执行 DTI 操作,排气流量突然大幅下降,大部分热量无法被气流及时带走,使得系统散热能力急剧降低,极易出现载体环状开裂、表面裂纹,甚至烧融等热损坏情况。

3.3 碳载量和起燃速率对主动再生温度场的影响

DPF 中碳载量越高表明积碳越多,主动再生过程中燃烧放热也相应增加,导致 DPF 载体温度升高。DPF 再生峰值温度和碳载量的关系如图 6 中所示。由图 6 可知:碳载量低于 3 g/L 时,DPF 载体峰值温度没有明显上升,当碳载量大于 4 g/L 时,载体内部峰值温度明显呈线性增长。原因为:当积碳较少时,再生过程中积碳燃烧放热少,并且无法连续燃烧;随碳载量增加,再生燃烧过程放热量增多,推动载体温度持续升高。

DOC 起燃速率是指 DPF 入口处温度的上升速率(DPF 前入口温度与时间的比)。起燃速率越快,意味着进入 DPF 的气流温度升高越迅速,相应的 HC 喷射量也需相应增大。DPF 再生峰值温度、HC 喷射量和 DOC 起燃速率的关系如图 7 中所示。由图 7 可知:当 DOC 起燃速率低于 3 °C/s 时,DPF 入口温度上升缓慢,燃烧过程中放热速率较低,DPF 内部峰值温度没有明显变化;当起燃速率大于 4 °C/s 时,DPF 入口温度快速升高,同时较多 HC 喷射进入进一步起到引燃和助燃作用,促使积碳快速燃烧并释放大热量,载体温度快速升高;当起燃速率为 6.5 °C/s 时,载体峰值温度达到最高,为 1 076 °C。

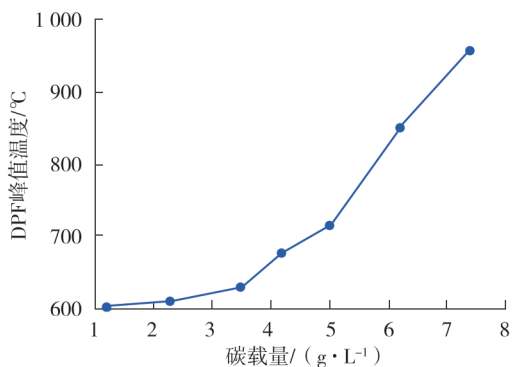


图6 再生峰值温度和碳载量的关系

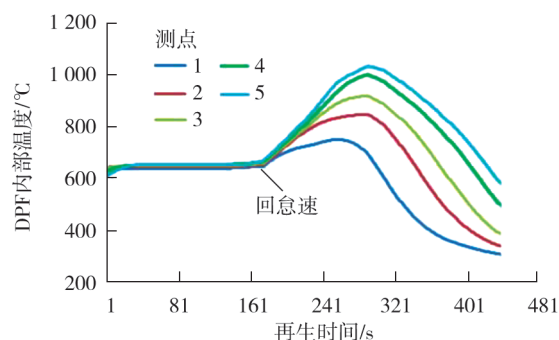


图5 主动再生 DTI 工况下 DPF 内部温度变化

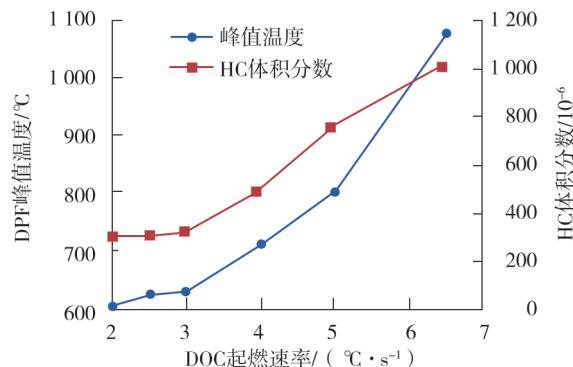


图7 DPF 再生峰值温度、HC 喷射量和 DOC 起燃速率的关系

4 结论

1) 不同积碳阶段的 DPF 压差特性存在较大差异。DPF 第一次积碳的初始阶段出现“深床捕捉”效应,使得压差迅速增大;随着积碳增多,载体表面积碳层增厚,压差随碳载量增加呈近似线性小幅增长;再生后由于载体孔隙被粒径较大的灰分颗粒填充,提高了载体渗透性,使得再次积碳过程的压差较第一次积碳过程降低约 2 hPa。

2) 正常 DPF 主动再生过程中,轴向各测点温度由前向后依次升高,最高温度出现在 DPF 后端面位置,为 715 °C;径向上各测点温升过程不完全同步且最高温度不同,说明载体内部燃烧过程不均匀。

3) 主动再生 DTI 工况下,由于碳颗粒富氧燃烧且系统散热性能下降,导致 DPF 内部温度短时间内急剧升高,最高可达到 1 034 °C,严重威胁 DPF 可靠性。

4)碳载量小于 3 g/L 时,碳烟颗粒在载体内部难以形成连续的积碳层,主动再生过程中燃烧难以持续且放热量有限,所以 DPF 内部温度无明显上升;当碳载量大于 4 g/L 时,有利于主动再生过程中燃烧并放出大量热量,DPF 内部温度随之升高,最高温度与碳载量呈线性相关。

5)较高的 DOC 起燃速率使得 DPF 入口温度快速升高,同时喷射的 HC 起到引燃和助燃作用,使得碳烟颗粒快速燃烧放热,DPF 内部温度短时间内快速升高,当起燃速率为 6.5 °C/s 时,DPF 内部最高温度达到 1 076 °C,DPF 面临较高的热损伤风险。

6)主动再生 DTI 工况、较大的碳载量、较高的 DOC 起燃速率是增大 DPF 再生过程热风险的主要因素,在实际应用中必须加以合理控制。

参考文献:

- [1] 张凤扬,陈爱国,贺玉海. 柴油机尾气颗粒物再生技术研究进展综述[J]. 广州航海学院学报,2018,26(4):1-5.
- [2] SAPPOK A G. The nature of lubricant derived ash related emissions and their impact on diesel aftertreatment system performance[D]. Cambridge, Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2009.
- [3] MENG Z W, LI J S, FANG J, et al. Experimental study on regeneration performance and particle emission characteristics of DPF with different inlet transition sections lengths[J]. Fuel, 2020, 262: 116487.
- [4] 汤东,李天祥,施盛耀. 耦合颗粒物传感器的柴油机颗粒捕集器故障诊断策略[J]. 西安交通大学学报,2023,57(9): 87-97.
- [5] YU M T, LUSS D, BALAKOTAIAH V. Analysis of ignition in a diesel particulate filter[J]. Catalysis Today, 2013, 216: 158-168.
- [6] CHOI S, KYEONG L. Detailed investigation of soot deposition and oxidation characteristics in a diesel particulate filter using optical visualization[C]//Proceedings of SAE 2013 World Congress & Exhibition. Detroit, USA: SAE International, 2013.
- [7] 黄铁雄,胡广地,郭峰,等. DPF 热再生过程温度控制与试验[J]. 内燃机学报,2020,38(3):257-264.
- [8] KURIEN C, SRIVASTAVA A K, GANDIGUDI N, et al. Soot deposition effects and microwave regeneration modelling of diesel particulate filtration system[J]. Journal of the Energy Institute, 2020, 93(2): 463-473.
- [9] BAI S Z, WANG C K, LI D, et al. Influence of the idle-up strategy on the thermal management of diesel particulate filter regeneration during a drop to the idle process[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 141: 976-980.
- [10] 苗磊,陈超. DPF 主动再生 DTI 工况试验研究[J]. 现代车用动力,2020(4):25-29.

Experimental study on pressure difference and temperature field characteristics during active regeneration of DPF

DING Xiaohui^{1,2}, XU Wenxiu^{1,2}, YIN Xiangkai^{1,2}, DONG Guanglei^{1,2}, ZHENG Xue^{1,2}

1. State Key Laboratory of Engine and Powertrain System, Weifang 261061, China;

2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

Abstract: In order to enhance the reliability of diesel particulate filters (DPF) and provide guidance for the active regeneration control, bench tests are conducted to investigate the pressure difference characteristics during the soot accumulation process of DPF and the internal temperature variation patterns during active regeneration. The results indicate significant differences in the pressure difference characteristics of DPF during different soot accumulation stages. The pressure difference of the DPF during the re-accumulation process after regeneration is on average about 2 hPa lower than before regeneration. During normal active regeneration, the axial temperature inside the DPF increases sequentially from the front to the rear, with the highest temperature point occurring at

(下转第 55 页)

A calculation method for the reliability of a fuel injection pump based on dynamic simulation

GONG Jiru^{1,2}, CHEN Guoqiang^{1,2}, SUN Jiuyang^{1,2}, FENG Yong^{1,2}, HUANG Tianyi^{1,2}

1. State Key Laboratory of Engine and Powertrain System, Weifang 261061, China;

2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

Abstract: In order to accurately assess the reliability of the diesel injection pump, a method of dynamical calculation of the injection pump is proposed, and a dynamical model of a diesel injection pump through AVL Excite software is developed. Taking into account the impact of factors such as fluctuations in speed, fuel pressure, the stiffness of the components, a dynamic analysis is conducted on the thickness of the liner oil film, the strength of the camshaft, and the output torque, and the simulation results are compared with the test results. The results show that the camshaft bushing oil film thickness and camshaft strength calculated using this method correspond to the actual failure condition, the relative error of the simulated calculated output torque of the injection pump is approximately 5% relative to the average peak of the test results, and the design of the injection pump model can be used to calculate the dynamics of the injection pump.

Keywords: fuel injection pump; reliability; camshaft; bushing; fatigue strength

(责任编辑:刘丽君)

(上接第44页)

products of NH_3 over ASC are analyzed. By introducing inhibition factors related to NO concentration in the reactions of NH_3 oxidation to N_2 and N_2O to distribute the NH_3 oxidation pathways, an ASC kinetic model is established and simulated, and verified by bench tests. The simulation results show that when the reaction temperature is lower than $350\text{ }^\circ\text{C}$, the main products of NH_3 oxidation are N_2 and N_2O ; the volume fraction of generated N_2O reaches the maximum at $250\text{ }^\circ\text{C}$. When the reaction temperature exceeds $350\text{ }^\circ\text{C}$, the selectivity of NH_3 oxidation products increasing NO_x emission. Reactor tests and bench tests indicate that the ASC kinetic model can predict the volume fraction of NO_x and N_2O downstream of ASC, and the prediction error is no less than $\pm 10\%$ for NH_3 oxidation conversion rate. The model can accurately reflect the experimental characteristics of ASC.

Keywords: diesel engine aftertreatment; ASC; NH_3 oxidation; volume fraction of NO_x ; volume fraction of N_2O

(责任编辑:胡晓燕)

(上接第49页)

the rear end face of the DPF, reaching $715\text{ }^\circ\text{C}$. The inconsistency of radial temperature indicate uneven combustion inside the DPF. During active regeneration process under drop to idle (DTI) operating conditions, the internal temperature of the DPF rises rapidly, reaching up to $1\ 034\text{ }^\circ\text{C}$. When the soot loading exceeds 4 g/L , the internal temperature of the DPF increases linearly and rapidly with the soot loading. A higher DOC light-off rate causes the internal temperature of the DPF to rise rapidly in a short period of time. When the light-off rate is $6.5\text{ }^\circ\text{C/s}$, the internal temperature of the DPF reaches $1\ 076\text{ }^\circ\text{C}$. DTI operating conditions during active regeneration process, higher soot loading, and a higher DOC light-off rate are the main factors that increase the thermal risk during DPF regeneration, which must be reasonably controlled in practical applications.

Keywords: DPF; ash; active regeneration; DTI

(责任编辑:臧发业)