

DPF 分区再生性能的试验研究

孟忠伟¹, 陈超¹, 李路¹, 吴辉², 闫妍¹

(1. 西华大学 汽车与交通学院 汽车测控与安全四川重点实验室 四川汽车关键零部件
协同创新中心, 成都 610039; 2. 广西玉柴机器股份有限公司, 玉林 537005)

Experimental Study on DPF Partial Regeneration

MENG Zhongwei¹, CHEN Chao¹, LI Lu¹, WU Hui², YAN Yan¹

(1. Sichuan Collaborative Innovation Center for Automotive Key Components, Vehicle Measurement,
Control and Safety Key Laboratory of Sichuan Province, School of Automobile and Transportation,
Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. Guangxi Yuchai Machinery Co., Ltd., Yulin 537005, China)

Abstract: Based on a diesel particulate filter (DPF) regeneration testing bench with additional heating sources, the influence of a partial deposited DPF on its regeneration performance and heat transfer characteristics were experimentally investigated. The results show that with single region deposition, the maximum temperature and maximum temperature gradient present with high values when carbon black deposits Region I in the axial center of the DPF or in Region II next to Region I, leading to high regeneration efficiency. The regeneration efficiency decreases when a deposited region moves from the center to the edge of the DPF. When carbon black deposits in two regions, the DPF would be easily oxidized, and the regeneration efficiency would go higher if the distance of the two regions is smaller and the two regions are closer to the center of the DPF. With multi-region deposition, when carbon black deposits in other regions than Region II, the maximum temperature and the maximum temperature gradient would be relatively lower, but the regeneration efficiency would not be reduced greatly. The regeneration heat is mainly concentrated in the rear center point of the DPF. If the heat is greatly concentrated at the rear center of the DPF, the heat would transfer reversely from the rear to the front.

摘要: 基于外加热源再生性能测试台架, 探索了柴油机颗粒捕集器 (DPF) 分区再生对再生性能的影响及其传热规律。试验结果表明: 单区沉积再生时, I 区沉积和 II 区沉积时容易出现较高的最高温度和最大温度梯度, 同时再生效率也较高; 沉积区域越偏离轴心, 其再生效率越低。双区沉积再生时, 沉积区域间距越小且越靠近轴心则越利于再生, 再生效率也越高。多区沉积再生时, 相比其他沉积情况, 当 II 区不沉积颗粒时, 最高温度和最大温度梯度较低, 同时具有较高的再生效率。DPF 内部热量主要聚集在轴心末端位置, 当 DPF 末端发生剧烈再生时热量具有向前传递的趋势。

收稿日期: 2015-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51676167, 51106130); 四川省科技厅青年科技创新研究团队项目 (2017TD0026, 2015TD0021); 四川省教育厅科研创新团队项目 (17TD0035); 教育部“春晖计划”合作科研项目 (Z2014058); 新能源汽车电控技术四川省青年科技创新研究团队项目 (2015TD0021); 发动机燃料电控系统及尾气后处理系统产业集群项目 (成财教[2013]265); 西华大学研究生创新基金项目 (YCJJ2015040, YCJJ2016087)

Fund Project: National Natural Science Foundation of China (51676167, 51106130); Science & Technology Department of Sichuan Province (2017TD0026, 2015TD0021); The Sichuan Provincial Scientific Research Innovation Team Program (17TD0035); The Chun-hui Plan of the Ministry of Education of China (Z2014058); Science and Technology Department of Sichuan Province (2015TD0021); The Industry Cluster Project for Electronic Engine Control Systems and Aftertreatment Systems of Chengdu, China ([2013]265); The Innovation Foundation of Xihua University (YCJJ2015040, YCJJ2016087)

作者简介: 孟忠伟 (1980—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为柴油机颗粒物捕集器, E-mail: mengzw@mail.xhu.edu.cn;
陈超 (联系人), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为柴油机颗粒捕集器再生, E-mail: chenexhu@163.com。

关键词：内燃机；柴油机颗粒捕集器；分区再生；再生温度；再生效率；热量传递

Key words: IC engine; diesel particulate filter (DPF); partial regeneration; regeneration temperature; regeneration efficiency; heat transfer

DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2017.04.008

中图分类号：TK421+.5

文献标识码：A

0 概述

柴油机颗粒捕集器(DPF)是公认的降低颗粒物(PM)排放最有效的装置之一^[1],而壁流式蜂窝陶瓷过滤体具有高达 95% 以上的过滤效率^[2-4]且具有高结构强度的优点,被广泛应用。随着颗粒的不断沉积,DPF 的压降增加,影响发动机性能,此时需要加入能量脉冲以氧化燃烧捕集器中沉积的颗粒物,实现捕集器的再生^[5-8]。热再生过程中,堇青石材料易因局部热量累积而出现烧熔或者烧裂,而分区再生可以有效降低热再生时的局部高温。针对此方面的研究文献较少:基于文献[9]设计的分区式连续微波再生颗粒捕集器,文献[10]进一步对该捕集器的气流流动、颗粒捕集、再生过程控制等方面进行了系统研究;文献[11]采用电加热再生方式将 DPF 前端的加热器进行分区,研究了不同区域加热、不同传热系数过滤体、不同进气管长度对过滤体内部温度分布的影响,并将试验结果和数值仿真结果进行了对比。上述研究均未涉及分区沉积对整体再生性能及其传热特性的影响研究。

本文基于外加热源再生性能测试台架,试验研究了 DPF 分区再生时对载体整体再生性能的影响及其传热特性,为 DPF 的可靠高效再生提供试验参考和指导。

1 试验设备及试验方法

1.1 试验台架

本试验中主要使用 2 个试验台架:颗粒加载装置和外加热源再生性能测试台架。前者是对 DPF 载体进行颗粒加载,后者是对加载颗粒后的载体进行再生性能测试。

颗粒加载装置如图 1 所示^[12]。装置包括颗粒发

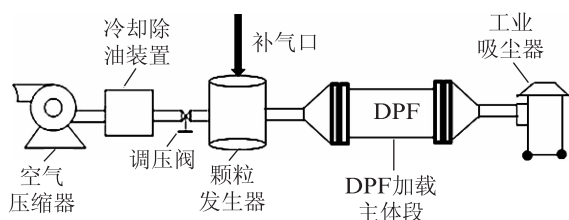


图 1 DPF 加载装置整体示意图

生段、加载主体段和抽吸段 3 部分。空气压缩机提供高压干燥空气,在流量调节阀的调节下,进入颗粒发生器,将其内部的炭黑扬起,形成气溶胶;在工业吸尘器的抽吸下,气溶胶进入 DPF 主体段,使得颗粒在 DPF 内沉积,实现颗粒的加载。

外加热源再生性能测试台架如图 2 所示。该台架主要包括流量控制系统、加热系统、再生主体段、数据采集系统 4 部分。空气压缩机提供的高压干燥空气,在质量流量计精确控制下,经加热器加热后,进入 DPF 再生主体段加热载体,然后排入大气。主体段内部温度场变化由温度传感器测量,通过数据采集卡和 LabVIEW 软件采集,在线显示和存储数据。

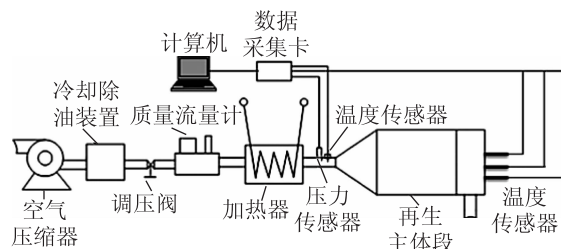


图 2 外加热源再生性能测试台架

1.2 试验材料

本试验将以商用炭黑(Printex-U)模拟柴油机碳烟。这一方面是因为台架加载真实柴油机碳烟的代价高且耗时长;另一方面是因为商用炭黑的理化性质十分接近柴油机碳烟,被广泛用于模拟柴油机排放颗粒^[13]。该试验所采用炭黑的主要参数如表 1 所示,其中比表面积(BET)指 1 g 固体所占有的总表面积。试验选用的 DPF 载体为某国产堇青石壁流式非催化型载体,其参数如表 2 所示。

表 1 炭黑主要参数

项目	参数
类型	Printex-U
吸油量/ 10^{-2}	420
灰质量含量/%	0.04
密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	130
比表面积(BET)/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	100
原生粒径/nm	25

表 2 DPF 载体主要参数

项目	参数
类型	堇青石,非催化型
直径 D/mm	144
长度 L/mm	152
孔道宽度 a/mm	2.06
孔壁厚度 δ/mm	0.48
孔密度/ cm^{-2}	15.5(100 目)
过滤面积 S/m^2	1.58

1.3 试验方法

试验中需要对载体进行炭黑加载,担载量为 5 g/L.进行再生试验时,来流氧体积分数为 21%,来流温度为 550 °C,来流流量为 16.8 g/s,来流温度脉冲持续时间为 1 000 s^[14]。

载体内部的测点分布如图 3 所示。测试总共布置 14 个温度测点,轴心布置上均布 5 个测点,末端径向均布 4 个测点。用“ $\Phi 35-1$ ”表示在 DPF 直径 35 mm、出口处 $x/L=1.00$ 的位置,其余各测点标识方法依此类推。

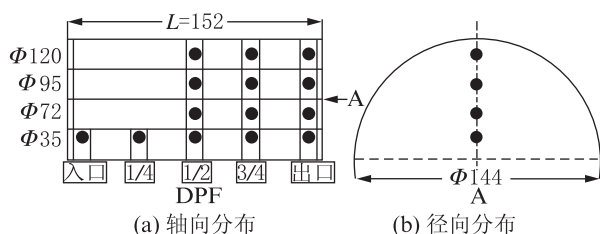


图 3 温度测点布置示意图

根据温度测点将 DPF 载体按照径向均布分为如下的 5 个区域:Ⅰ区, $\Phi 0 \text{ mm} \sim \Phi 35 \text{ mm}$;Ⅱ区, $\Phi 35 \text{ mm} \sim \Phi 72 \text{ mm}$;Ⅲ区, $\Phi 72 \text{ mm} \sim \Phi 95 \text{ mm}$;Ⅳ区, $\Phi 95 \text{ mm} \sim \Phi 120 \text{ mm}$;Ⅴ区, $\Phi 120 \text{ mm} \sim \Phi 144 \text{ mm}$,分区实物图和示意图如图 4 所示。

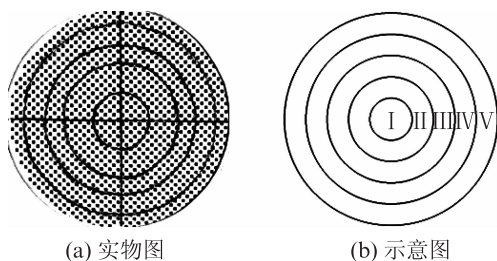


图 4 DPF 分区图

根据上述分区方式和 5 g/L 的担载量,计算得每个区域理论炭黑沉积量,与实测的试验沉积量数据对比如表 3 所示。由表 3 可见,最大相对偏差在 9% 以内。

以Ⅱ+Ⅳ双区沉积为例:先用灰胶带封住其他 3

表 3 炭黑在各区域的沉积量

区域	占总面积百分比/%	炭黑沉积理论值/g	炭黑沉积实际值/g
I	5.91	0.73	0.8
II	19.09	2.38	2.4
III	18.52	2.27	2.3
IV	25.88	3.22	3.2
V	30.60	3.80	3.8

个区域,然后分别封住Ⅱ区或Ⅳ区,先后对这两个区域进行加载,如图 5 所示。该沉积方法可保证加载的均匀性和可重复性。

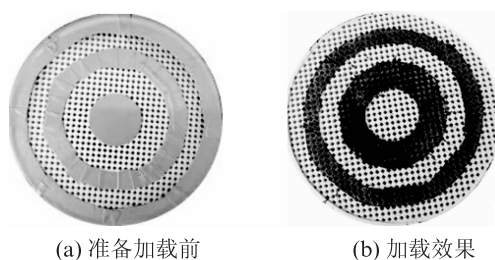


图 5 Ⅱ+Ⅳ双区加载图

为分析载体的再生性能,定义以下参数:载体内部达到的最高温度为 $T_{\max}$;以相邻测点的温度差除以两测点间距得到温度梯度,并获得温度梯度最大值 $(dT/dx)_{\max}$;利用称重法得到再生前后的质量差除以初始沉积量,即可得到整个再生过程的再生效率 η 。

2 试验结果及分析

2.1 单区再生性能结果

单区沉积对再生性能的影响如图 6 所示。只有Ⅱ区沉积炭黑时,其再生的最高温度最大, $T_{\max} = 643.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$,其他 4 种情况最高温度相对较低且均未超过 590 °C;单区沉积的炭黑量少,因而出现的最大温度梯度较小,分布在 15.9~24.5 °C/cm 范围内;最高的再生效率出现在Ⅱ区沉积时,达到 84.6%,而最外侧的Ⅴ区再生效率仅有 21%,说明越靠近外侧再生效率越低。分析其原因:(1) 炭黑沉积量决定最高再生温度,炭黑沉积越多的区域再生过程中产生的热量也越多,最高温度也越高;(2) 相比边缘区域,轴心区域散热少,热量容易累积,使其再生效率较高,同时也容易出现较高的温度梯度。由图 6 还可见,相比Ⅳ区沉积,由于Ⅴ区是 DPF 最外侧区域,其内外侧温差较大,所以容易出现较大的温度梯度。

2.2 双区再生性能结果

双区沉积对再生性能的影响如图 7 所示。4 种

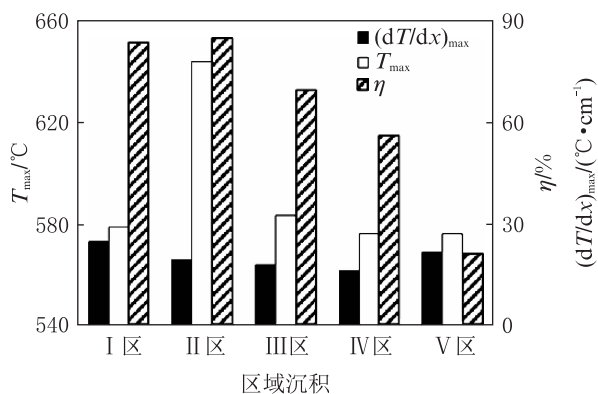


图6 单区再生时的再生性能

情况的最高温度在 582~632 $^{\circ}\text{C}$ 之间;双区再生时的最大温度梯度分布在 15.0~20.8 $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 范围内;再生效率方面,两区域的间距越大且越靠近外侧其再生效率越低,如 II 区和 V 区共同沉积再生时,再生效率下降到了 31.1%,远远低于其他 3 种分区再生的再生效率,再次说明炭黑在载体边缘加载对 DPF 再生不利。沉积区域间距越小且越靠近轴心区域越有利于再生,再生效率也越高。分析其原因是:越靠近轴心的区域来流轴向速度大,受到来流的热冲击(单位时间的受热量)也大,且由于中心散热少,更有利于再生效率的提高。

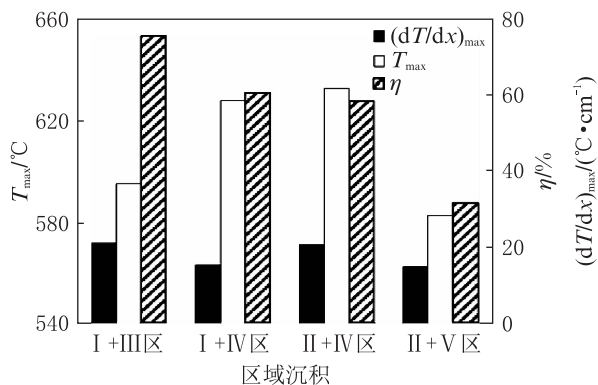


图7 双区再生时的再生性能

2.3 多区再生性能结果

多区沉积对再生性能的影响如图 8 所示。最大的最高温度出现在 I 区不沉积时,其极值为 745 $^{\circ}\text{C}$; II 区不沉积时其最高温度最低,为 643.3 $^{\circ}\text{C}$; III 区不沉积时出现最大的温度梯度为 40.2 $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$,根据文献[15]的研究,此时 DPF 仍在安全范围之内;多区沉积时最高再生效率为 64.9%,最低为 50%。试验结果表明:II 区不沉积时,最高温度和最大温度梯度均较低,但具有相对较高的再生效率。分析其原因是:II 区不沉积炭黑有效减少了 DPF 再生时轴心位置热量的产生,使其最高温度和最大温度梯度

降低,同时因 II 区未沉积炭黑,再生过程中其气流通过性较好,这有利于 I 区、III 区的再生,使得在 II 区不沉积炭黑时具有较高的再生效率。综上,阻止颗粒在 II 区沉积,有利于降低再生温度和温度梯度,也可有效防止载体再生过程中烧熔或烧裂现象的发生。

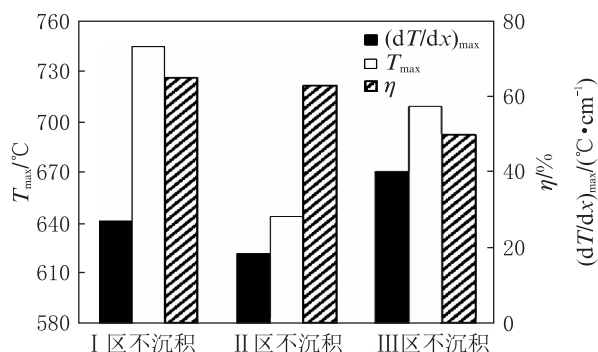


图8 多区再生时的再生性能

2.4 DPF 分区再生的传热性能

炭黑沉积区域不仅会影响载体内部的最高温度,同时也会影响其形成热点的位置和热点的形状。图 9 是 I 区不沉积情况下再生过程的温度变化曲线(因测点较多,只取部分典型曲线作代表)。图 10 为 I 区不沉积时对应图 9 中第 500 s 和第 570 s 时 DPF 内部的温度分布云图。可知:在加热初期(500 s 以前)的温度急剧上升阶段, $\Phi 72-1$ 处的温度上升相对滞后;当载体加热到接近来流温度时, $\Phi 35-1$ 和 $\Phi 72-1$ 处出现了峰值,且前者温度峰值先于后者出现,其峰值温度分别为 745.0 $^{\circ}\text{C}$ 、689.5 $^{\circ}\text{C}$ 。从图 10(a)可以看到 $t=500$ s 时 DPF 内温度场的分布较为均匀;从图 10(b)可以看到在载体末端有呈径向分布的热点出现,存在于 $\Phi 35-1$ 和 $\Phi 72-1$ 之间,随后此温度热点将受到来流空气(550 $^{\circ}\text{C}$)的冷却作用逐渐向末端缩小直至消失。

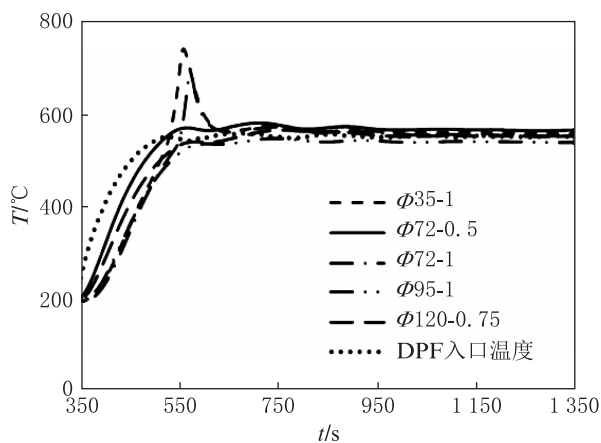


图9 I 区不沉积时过滤体内测点温度变化曲线

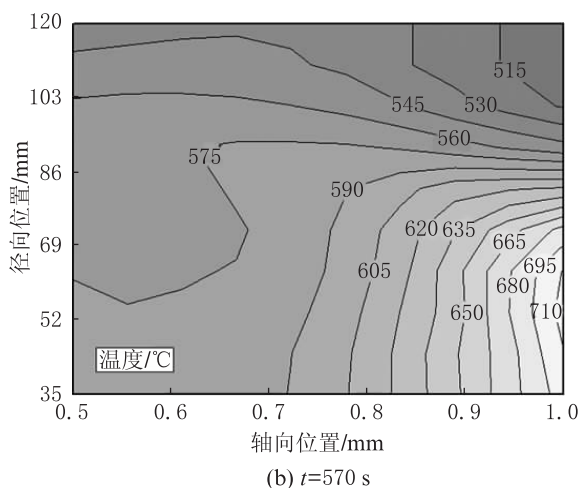
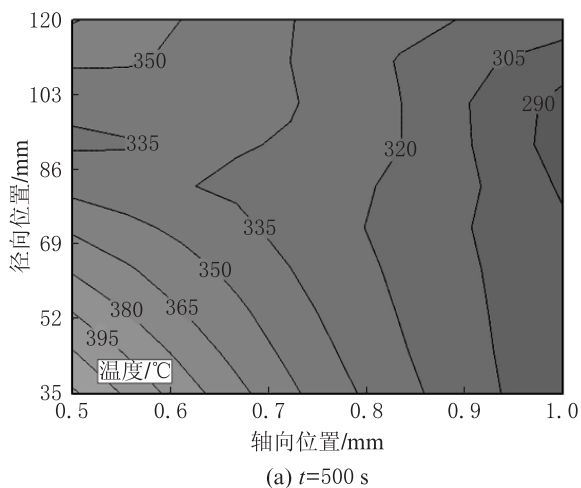


图 10 I 区不沉积时 DPF 内部温度场分布

图 11 是 II 区不沉积情况下再生过程的温度变化曲线。图 12 为 II 区不沉积时对应图 11 中第 500 s、第 625 s 和第 640 s 时 DPF 内部的温度场分布云图。从图 11 和图 12(a) 可以看出,在加热初期 (500 s 以前),由于 II 区没有沉积炭黑故其前端温度上升较快;当载体加热到接近来流温度时,仅 $\Phi 72-1$ 处出现峰值,其峰值温度为 $T_{\max}=643.3^{\circ}\text{C}$,在图 12(b) 中反映为热点的出现;而靠近中心的 $\Phi 35-1$ 处与其他情况不同,没有出现峰值热点,主要是由于 II 区没有沉积炭黑,无热量释放,使得 $\Phi 35-1$ 没有出现尖锐的温度波峰。从图 12(b) 和图 12(c) 看出,再生剧烈时,随着再生的继续进行,温度热点会逆着来流方向向前扩散,即热量会向前进行传递。这主要是由于当 II 区外边缘 (III 区内边缘) 的末端热点形成后,热量聚集向四方传递,尽管受来流的冷却作用,但仍然具有向前传递的趋势,说明 DPF 再生剧烈时,在末端起燃的颗粒会因剧烈释放热量而引燃沉积在其前端的颗粒。

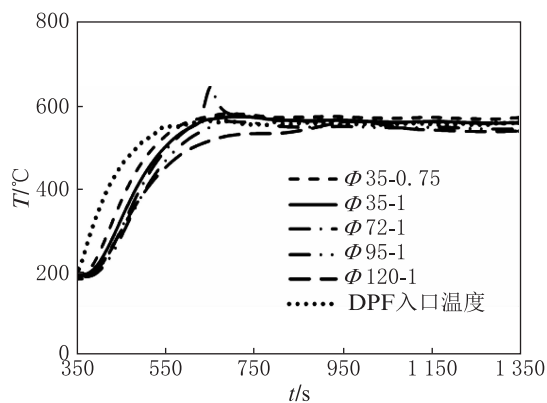
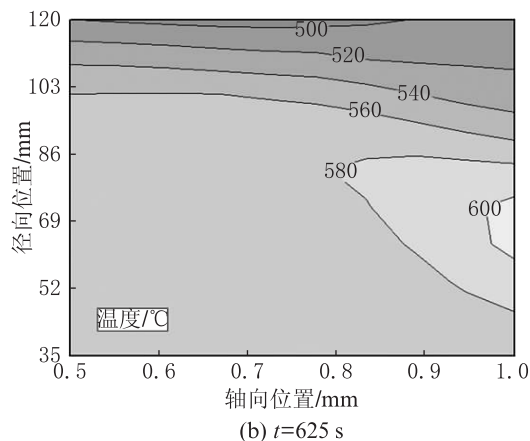
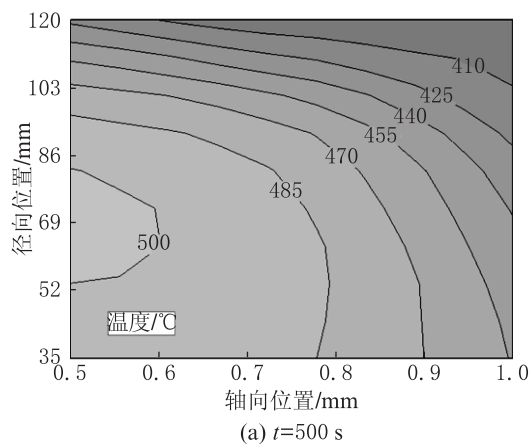


图 11 II 区不沉积时过滤体内测点温度变化曲线



3 结 论

(1) 基于柴油机颗粒捕集器外加热源再生性能测试台架,通过分区(单区、双区、多区)再生试验探索了 DPF 各种分区方式对再生性能和传热性能的影响。单区沉积再生时,Ⅰ区沉积和Ⅱ区沉积时容易出现较高的再生温度和温度梯度,同时再生效率也高;沉积区域越偏离轴心,其再生效率越低。

(2) 双区沉积再生时,沉积区域间距越小且越靠近轴心则越利于再生,再生效率也越高。

(3) 多区沉积再生时,相比其他沉积情况,Ⅱ区不沉积颗粒时的最高温度和最大温度梯度较低,同时具有较高的再生效率。

(4) DPF 内部的热量主要聚集在轴心位置末端位置;当 DPF 末端发生剧烈再生时,热量反而具有向前传递的趋势。

参考文献:

- [1] 张德满,汪正清,马世虎,等. 怠速工况下氧化型催化转化器辅助 DPF 再生方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 24-27.
ZHANG D M, WANG Z Q, MA S H, et al. DOC assisted DPF regeneration under idle condition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 24-27.
- [2] CHEN K, MARTIROSYAN K S, LUSS D. Transient temperature rise during regeneration of diesel particulate filters[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 176/177: 144-150.
- [3] YU M T, LUSS D, BALAKOTAIAH V. Analysis of ignition in a diesel particulate filter[J]. Catalysis Today, 2013, 216: 158-168.
- [4] CHEN K, MARTIROSYAN K S, LUSS D. Temperature gradients within a soot layer during DPF regeneration[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66: 2968-2973.
- [5] BUONO D, SENATORE A, PRATI M V. Particulate filter behavior of a diesel engine fueled with biodiesel[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 49: 147-153.
- [6] KARIN P, SONGSAENGCHAN Y, LAOSUWAN S. Nanostructure investigation of particle emission by using tem image processing method[J]. Energy Procedia, 2013, 34: 757-766.
- [7] MILLER R K, HABERKAMP W C, BADEAU K M, et al. Design, development and performance of a composite diesel particulate filter[J]. SAE Transactions, Section 4, Journal of Fuels and Lubricants, 2002, 111: 132-147.
- [8] 孟忠伟,覃宗胜,付锐. 柴油机微粒过滤体内部温度梯度的数值模拟[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2013, 34(4): 267-271.
MENG Z W, QIN Z S, FU R. Numerical simulations on temperature gradient inside diesel particulate filter[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2013, 34(3): 267-271.
- [9] 龚金科,王曙辉,鄂加强,等. 一种消减柴油机微粒物质排放的方法及其装置: 200710035168. 6[P]. 2008-09-17.
- [10] 吴钢. 微粒捕集器分区微波再生过程优化与控制系统研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [11] KIM G S, PARK S C. A study on the characteristics of temperature distribution according to material and position of filter in a diesel particulate filter[J]. Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology & Engineers, 2012, 21(6): 903-909.
- [12] YOUNG D M, HICKMAN D L, BHATIA G, et al. Ash storage concept for diesel particulate filters[C]//SAE Paper. Detroit, Michigan, USA, 2004, 2004-01-0948.
- [13] 陈鹏,孟忠伟,李路. DPF 来流参数对其再生性能影响的实验研究[C]//成都: CSICE2014 论文集, 2014.
- [14] 陈鹏. DPF 稳态再生性能的试验研究[D]. 成都: 西华大学, 2014.
- [15] MURTAGH M J, SHERWOOD D L, SOCHA L S. Development of a diesel particulate filter composition and its effect on thermal durability and filtration performance[C]//SAE Paper. Detroit, Michigan, USA, 1994, 940235.