

# 基于 GT-Power 的 DPF 喷油催化燃烧再生仿真技术

侯献军<sup>1</sup> 马义<sup>1</sup> 彭辅明<sup>1</sup> 颜伏伍<sup>1</sup> 张献安<sup>2</sup>

(1、武汉理工大学汽车工程学院, 湖北 武汉, 430070)

2、平原航空设备有限公司, 河南 新乡 453019)

**摘要:** 利用GT-Power软件建立了DPF喷油催化燃烧再生系统仿真模型, 从喷油率和补气策略两方面对DPF提温过程进行了优化, 优化后的DPF提温时间缩短了37.9%, 提温能力增加了3.4%。建立了DPF微粒燃烧模型, 分析了再生微粒燃烧过程中载体壁面温度及微粒(PM)层厚度分布情况。计算结果表明: 载体温度由前端向后依次升高, 最高温度出现在载体后端中心, 微粒由载体前端向后逐渐燃烧, 后端微粒燃烧速度快于前端。

**关键词:** GT-Power; 微粒捕集器; 再生; 仿真

中图分类号: 文献标识码: 文章编号:

## Numerical Study on Catalyst Regeneration of DPF Based on GT-Power

HOU Xian-jun<sup>1</sup>, MA Yi<sup>1</sup>, PENG Fu-ming<sup>1</sup>, YAN Fu-wu<sup>1</sup>, ZHANG Xian-an<sup>2</sup>

(1.School of Automobile Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2.Ping Yuan Aviation Equipment CO .LTD, Xinxiang, 453019, China)

**Abstract:** The catalyst regeneration of DPF simulation model is established and simulated by GT-Power. The regeneration process has been optimized from the injection rate and auxiliary air strategy. Then the time for raising temperature had been shorten by 37.9%, the capacity for raising temperature had been increased by 3.4%.The PM combustion model of DPF is set up, the temperature of filter and thickness of PM layer during regeneration process were also analyzed. The calculation results indicate that temperature is gradually increase from the front end to the back end of filter, the max value appear at the back end center of filter, the PM is gradually burning from front end to the back end of filter, and the back end PM burning faster than the front end of filter.

**Key words:** GT-Power; DPF; regeneration; simulation

## 0 概述

微粒(PM)是柴油机主要的排放污染物,微粒捕集器(DPF)被认为是目前降低柴油机微粒排放的最为有效的后处理技术,其关键技术是过滤材料和捕集器再生<sup>[1-2]</sup>。目前,过滤材料的研究已经取得了较大的突破,已开发出很多商品化的过滤体材料,如美国Corning公司、日本NGK公司研究的壁流式蜂窝陶瓷过滤体,美国3M公司研究的编织陶瓷纤维过滤体以及BDEN公司采用的碳化硅(SiC)等<sup>[3-5]</sup>。而微粒捕集器应用所面临的最大挑战是捕集器再生问题,采取一定的措施清除微粒捕集器内的微粒,以恢复其捕集功能的过程就称为捕集器再生,再生过程可分为提温和微粒燃烧过程。笔者提出喷油催化燃烧再生方式及再生控制方案,并应用GT-Power软件对再生过程进行了仿真和优化。

## 1 喷油催化燃烧再生技术

### 1.1 再生原理及优点

喷油催化燃烧再生的原理是在DPF前加装氧化催化器(DOC),当发动机排气背压达到所设定和允许背压值时,系统启动再生程序,由喷油器向DOC前喷入一定量的燃油,通过DOC对未燃HC等的催化氧化作用来提高排气温度达再生温度,点燃微粒从而完成再生过程<sup>[6]</sup>。喷油催化燃烧再生直接以柴油机燃油为燃料,容易实现在用车的改造,且适合在高硫条件下使用,符合我国燃油含硫量较高的国情;采用夹气喷射的喷油方式,在喷油之前油气已经均匀混合,因而燃烧的过程中温度

场的梯度较小，避免了过滤体因局部过热而造成的热损坏；同时加装在DPF前端的DOC也降低了HC和CO的排放。

## 1.2 喷油率控制

喷入DOC的燃油被氧化所放出的热量 $Q$ ，一部分用来提高排气温度至PM起燃温度（ $T$ ），另一部分以辐射和对流换热的方式散失到大气中。排气的比热容用空气平均比热容近似计算，忽略燃油吸热量。 $Q$ 可用燃油的低热值计算<sup>[7]</sup>，如式（1）：

$$Q = M_{\text{fuel}} \cdot \varphi \cdot \eta \quad (1)$$

排气所吸收的热量 $Q_1$ 可用式（2）计算

$$Q_1 = M_{\text{air}} \cdot C_p \cdot (T - T_{\text{air}}) + M_{\text{exh}} \cdot C_p \cdot (T - T_{\text{exh}}) \quad (2)$$

再生系统向周围环境的热量损失 $Q_2$ 可用式（3）计算

$$Q_2 = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 + h \cdot A \cdot (T - T_{\text{amb}}) \quad (3)$$

根据上述公式可以近似计算出DPF提温的喷油率为

$$M_{\text{fuel}} = [M_{\text{air}} \cdot C_p \cdot (T - T_{\text{air}}) + M_{\text{exh}} \cdot C_p \cdot (T - T_{\text{exh}}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 + h \cdot A \cdot (T - T_{\text{amb}})] / (\varphi \cdot \eta) \quad (4)$$

式中：

- $M_{\text{fuel}}$  —— 喷油率
- $\varphi$  —— 柴油的低热值
- $\eta$  —— DOC催化转化效率
- $\sigma$  —— 斯蒂芬-玻尔兹曼常数
- $h$  —— 对流换热系数
- $C_p$  —— 空气平均比热容
- $\varepsilon, A$  —— DOC, DPF壳体发射率和表面积
- $M_{\text{air}}, T_{\text{air}}$  —— 二次空气质量流量和初始温度
- $M_{\text{exh}}, T_{\text{exh}}$  —— 发动机排气质量流量和初始温度

## 2 发动机模型建立和校准

试验用柴油机为YN4100QB-1A，其主要参数见表1。

表1 YN4100QB-1A柴油机主要参数

项目	参数
发动机型式	四缸，直列，水冷，四冲程
缸径×冲程（mm×mm）	100×105
排量（L）	3.298
压缩比	17.5
额定功率（kW）	62.5
额定转速（r/min）	3400

所建立的发动机GT-Power模型如图1所示，图2、图3为发动机外特性中功率、有效燃油消耗率的试验值与仿真计算值的校准图。

从图2、图3可以看出模拟值与试验值最大误差为5%，说明GT-Power软件可以准确模拟发动机运行工况，所建立的发动机模型是可靠的，通过仿真计算，可以提取发动机不同工况下排气出口的边界条件（排气成分、温度、流量等）来作为再生系统模型的入口环境。

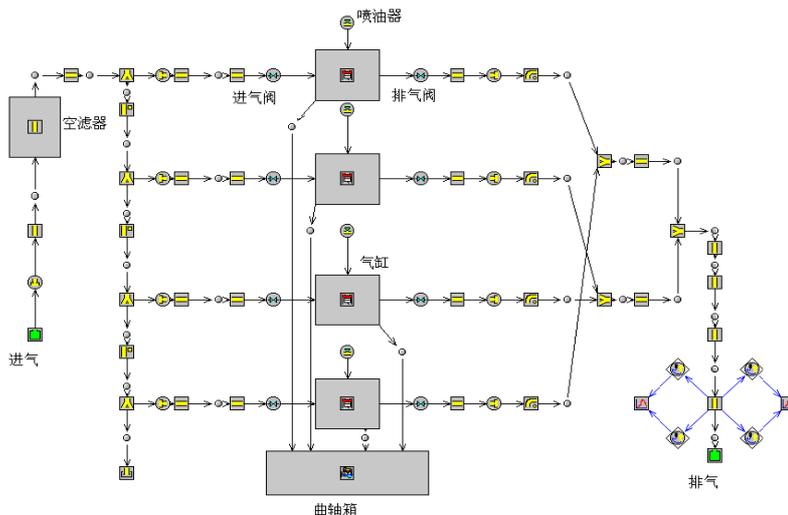


图1 YN4100QB-1A柴油机GT-Power模型

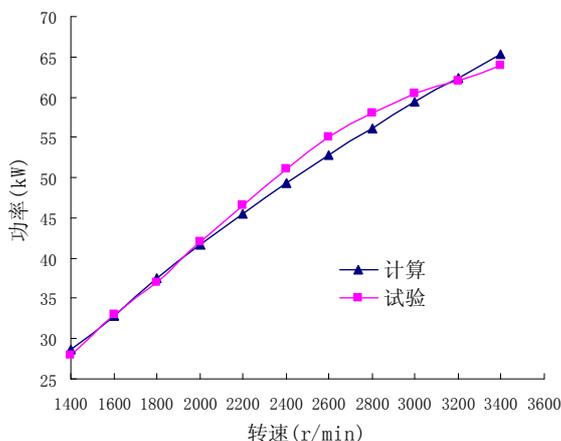


图2 发动机功率校准曲线

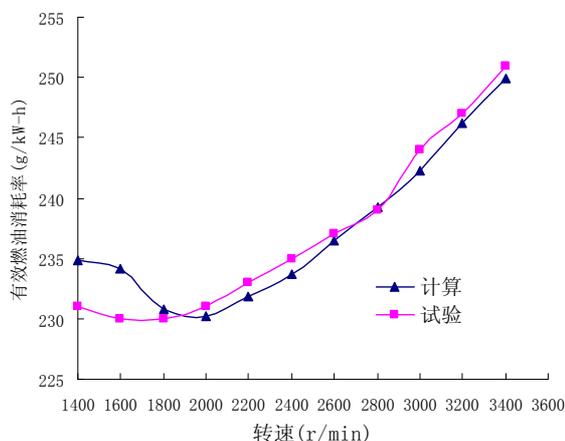


图3 有效燃油消耗率校准曲线

### 3 DPF再生仿真及优化

#### 3.1 DPF提温模型

试验时发动机的转速为1700r/min时，转矩96N·m，采用双通道同时提温再生系统，DOC、DPF基本参数如表2、表3。喷油方式为夹气喷射，二次空气由气泵供给，再生喷油率为65mL/min，当DOC入口温度达250° C时，启动再生系统，由喷油器向排气管内喷入燃油。试验发现，在温度较低时喷入过量的燃油会产生大量白烟，造成严重二次污染，因此应对喷油率进行分段控制，即伴随温度的提高，喷油率应由小变大。图4为试验喷油率和补气流量随DPF出口温度变化情况，所建立的DPF再生系统GT-Power提温模型如图5所示。

表2 DOC基本参数

项目	参数
载体材料	堇青石
载体直径(mm)	144
载体长度(mm)	76
孔道壁厚(mm)	0.22
孔道密度(cps)	400

表3 DPF基本参数

项目	参数
载体材料	碳化硅
载体直径(mm)	144
载体长度(mm)	254
平均微孔直径(μm)	12
孔道边长(mm)	1.0
孔道壁厚(mm)	0.37
孔道密度(cps)	200

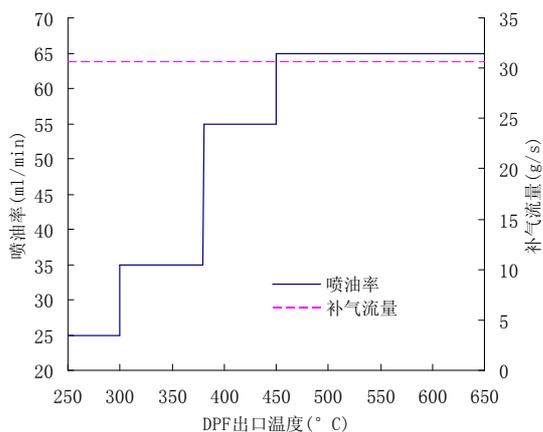


图4 喷油率和补气流量随DPF出口温度变化曲线

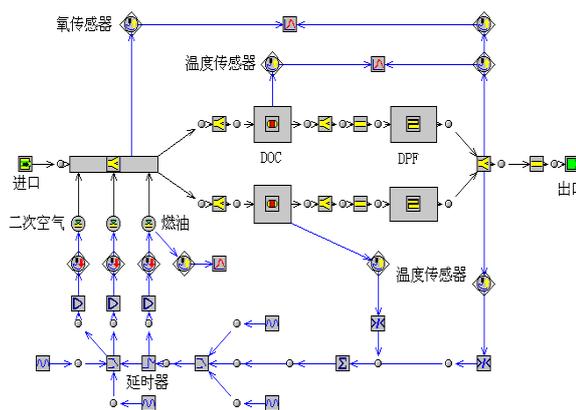


图5 DPF提温模型

### 3.1.1 DPF提温仿真

图6为曲线，从该图可以看出，DPF提温过程仿真结果与试验结果吻合较好，DPF提温初期，由于催化剂催化转化效率较低且喷油量少故温度上升缓慢，60s后随着催化剂转化效率迅速提高以及喷油量的增加温度急剧上升，600s后又趋向平缓。总提温时间在660s左右，提温能力（DPF出口最高温度）为595° C。图7为提温结束后再生系统内部平均温度分布图，从图中可以看出，二次空气对排气有冷却作用，DOC进口温度较低，排气经DOC加热后温度达到最高值642° C，由于再生系统对环境有热量损失，因此DPF出口温度较DOC出口温度要低。

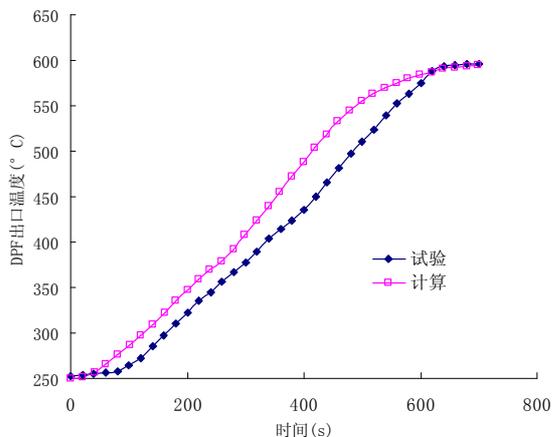


图6 DPF出口温度变化曲线

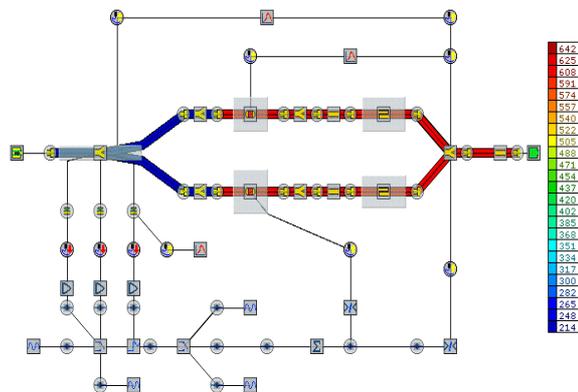


图7 再生系统内部平均温度分布图

### 3.1.2 DPF提温优化

为了进一步缩短DPF提温时间，减少再生燃油消耗量和二次污染，笔者主要从喷油率和补气策

略这两方面加以优化。

试验中每次实现喷油率切换时，DPF出口都有大量白烟或是蓝烟冒出，因此可以将对喷油率的分段控制改为连续变化，同时考虑到二次空气对排气的冷却作用，且喷油率小时所需氧也较少，补气流量随温度变化也改为连续变化，如图8所示；另外提高二次空气的初始温度有利于加速提温过程，随着涡轮增压发动机的普及，可从压气机的出口取热空气作为补气气源，这样既省去了气泵，又有利于DPF提温<sup>[8]</sup>，仿真时设压气机出口温度为100° C。图9为优化前后DPF提温情况对比，其中补气流量优化是在喷油率连续基础上进行的，各方案提温效果在表3中列出，优化方案能使再生系统的提温时间缩短37.9%，提温能力增加3.4%。

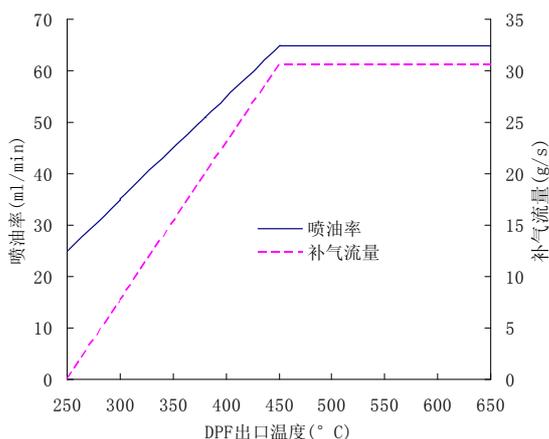


图8 优化后喷油率和补气流量随DPF出口温度变化曲线

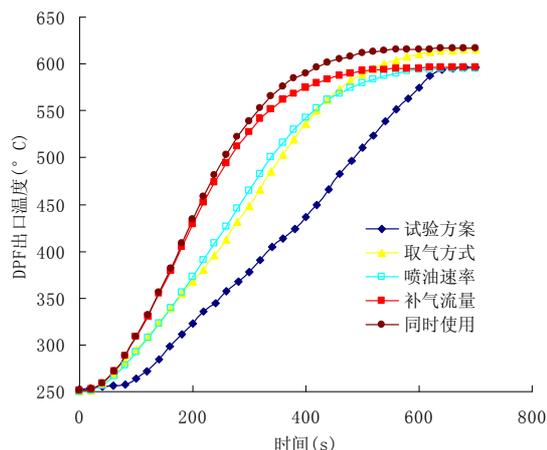


图9 优化前后DPF提温曲线对比

表3 优化方案对比

项目	提温时间 (s)	改善比例 (%)	提温能力 (° C)	改善比例 (%)
喷油速率连续	580	12.1	595	0
改变取气方式	530	19.7	615	3.4
补气流量连续	500	24.2	595	0
以上同时使用	410	37.9	615	3.4

### 3.2 DPF微粒燃烧模型

图10为DPF微粒燃烧模型<sup>[9]</sup>，载体有限元网格划分模型如图11所示。图12、图13分别为给定4g/L的PM加载密度后DPF再生过程中载体壁面温度、PM层厚度沿载体轴向随时间变化的分布规律（Z/L=0.0表示入口，Z/L=1.0表示出口），图14、图15分别为载体壁面温度分布和PM层厚度分布三维图。

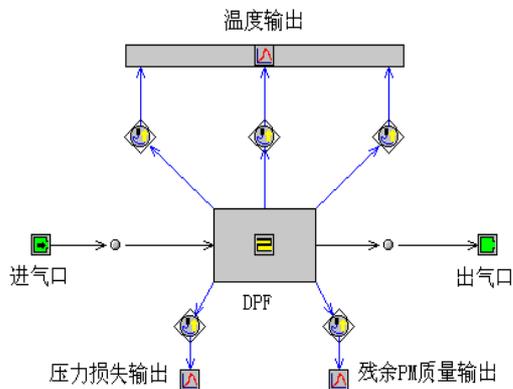


图10 DPF微粒燃烧模型

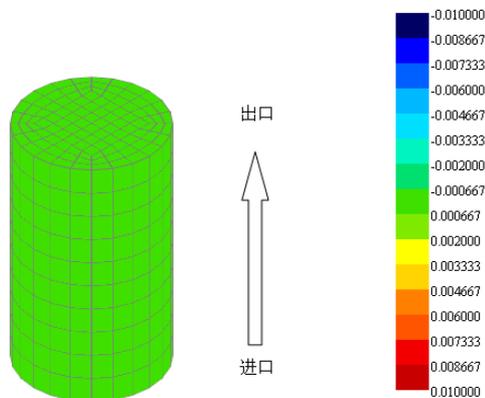


图11 DPF载体有限元网格模型

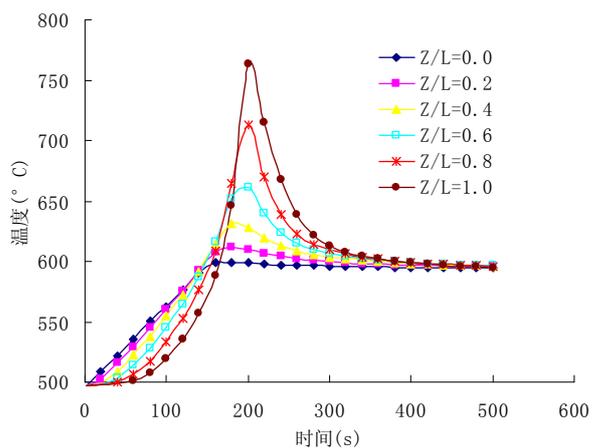


图12 再生过程中载体壁面温度分布

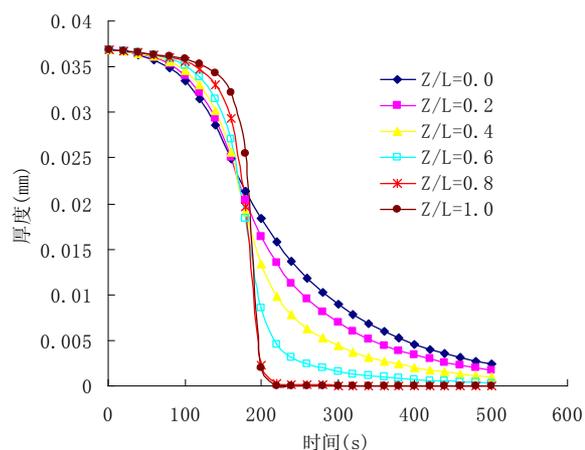


图13 再生过程中PM层厚度分布

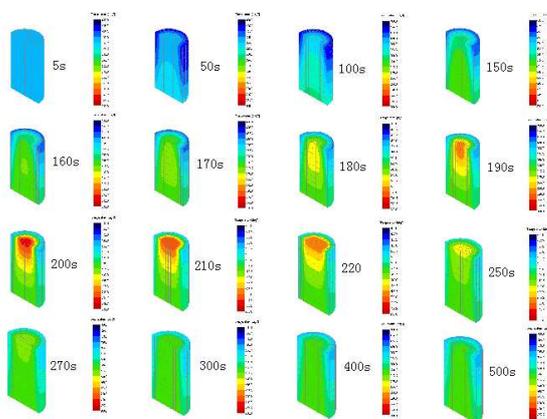


图14 载体壁面温度分布三维图

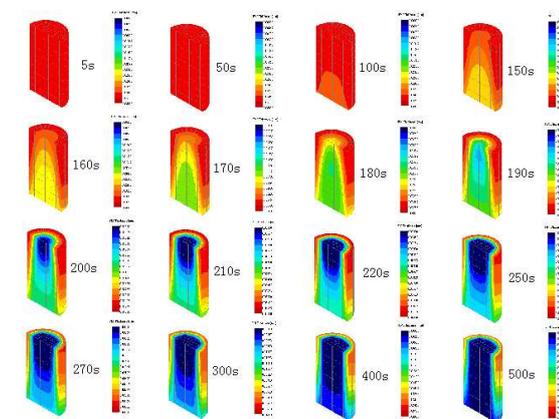


图15 PM层厚度分布三维图

从图12-图15可以看出,随着DPF提温的进行,载体入口中心部分先达到PM起燃温度,该处PM开始缓慢燃烧(100s),燃烧放出的热量不断沿轴向向后传递,将中后端大量PM引燃(200s),致使载体温度急剧升高,随着PM燃烧殆尽,载体温度总体下降并趋向稳定。由图还可以发现,载体后端的PM燃烧速度最快,载体轴向中心PM比靠近边缘PM燃烧快,载体轴向中心温度比边缘温度高,最高温度(765°C)出现在轴向后端中心,PM剧烈燃烧时会产生较大温度梯度,可能导致载体产生裂纹。因此,可根据载体温度分布情况,综合考虑排气流量、排气温度、氧气浓度以及PM加载密度等因素对再生时机和再生控制策略做出合理的选择。

## 4 结论

- 1) 首次建立DPF喷油催化燃烧再生系统GT-Power仿真模型,并对DPF提温过程进行了模拟验证,计算结果与试验情况基本吻合。
- 2) 提出的DPF提温优化方案能使DPF提温时间缩短37.9%,再生系统提温能力增加3.4%。从涡轮增压发动机的压气机出口取气提高了二次空气初始温度,利于DPF提温,但是否对发动机性能造成影响,则需要进一步试验验证。
- 3) 微粒燃烧计算结果表明:载体温度由前端向后依次升高,最高温度出现在载体后端中心,微粒由载体前端向后逐渐燃烧,后端微粒燃烧速度快于前端。

### 参考文献

- [1] 姜大海,张春润,资新运等.柴油机排气微粒捕集器燃气再生可行性研究.车用发动机[J],2002(4):51-53.
- [2] 王天友,林漫群,张玉倩等.燃油催化微粒捕集器微粒捕集与强制再生特性的研究[J].内燃机学报,2007,

- 25(6):527-531.
- [3] 资新运, 宁智, 欧阳明高. 柴油车微粒捕捉器逆向喷气再生的关键技术[J]. 内燃机工程, 2002, 23(6) : 69 - 70.
  - [4] Takahiko Ido, Kazutake Ogyu, etc. Study on the Filter Structure of SiC - DPF with Gas Permeability for EmissionControl[C]. SAE2005 - 01 - 0578.
  - [5] 兰昌尧, 郭梦超, 韩国胜. 柴油机微粒捕集器再生技术研究综述[J]. 内燃机与动力装置, 2008(2):36-39.
  - [6] Xianjun Hou, Yi Ma, Fuming Peng, etc. Research on Temperature Characteristics of DPF Regeneration Technology Based on Catalytic Combustion of Fuel Injection. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu: APPEEC 2010.
  - [7] 李新, 资新运, 姚广涛. 柴油机排气微粒捕集器燃烧器再生技术研究[J]. 内燃机学报, 2008, 26(6):538-542.
  - [8] 资新运, 王琛, 姚广涛. 柴油机微粒捕集器再生系统工作模式判别研究[J]. 车用发动机, 2008(2):83-86.
  - [9] 楼狄明, 赵泳生, 谭丕强. 基于GT-Power柴油机颗粒捕集器捕集性能的仿真研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(1):173-177.