

柴油机单元块旋转式过滤体 DPF 微波再生研究*

龚金科 余明果 王曙辉 龙罡 伏军 吁璇

(湖南大学机械与运载工程学院, 长沙 410082)

【摘要】 提出一种柴油机排气微粒捕集器过滤体布置方式, 捕集器中采用若干端截面为扇形的单元块过滤体, 呈圆周排列并在微波再生时作轴向旋转。分析了单元块旋转式过滤体捕集器的过滤及再生机理, 并与传统的整体式过滤体微粒捕集器的压降特性及捕集效率进行比较, 对其再生效果进行评价。试验研究表明, 采用单元块旋转式过滤体能较好地实现微粒捕集器连续再生, 其性能优于整体式过滤体, 并有效地解决了车载电源功率对微波再生技术的限制。

关键词: 柴油机 微粒捕集器 单元块 压降特性 微波再生

中图分类号: TK421⁺.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)01-0002-06

Rotary Unit-block Diesel Particulate Filter Regeneration with Microwave

Gong Jinke Yu Mingguo Wang Shuhui Long Gang Fu Jun Yu Xuan

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract

A new rotary unit-block diesel particulate filter (DPF) was developed. There were several unit blocks with fan-shaped cross-section in the filter. These blocks were arranged in a circle and axial rotation during regeneration with microwave. The mechanism of the rotary unit-block DPF on the filtration and regeneration were analyzed and the filtration efficiency, the pressure drop characteristic were compared with the traditional overall body filter. The experimental study shows that rotary unit-block DPF is a better solution to continuous regeneration and has better performance. It is able to break the power restriction when used for vehicle.

Key words Diesel, Particulate filter, Unit-block, Pressure drop characteristic, Microwave regeneration

引言

微粒(PM)是柴油机主要的排放污染物,随着柴油车日益广泛的应用和柴油车排放标准的日益严格,仅靠机内净化技术已不能满足日趋严格的排放法规,必须同时采用后处理装置。微粒捕集器(DPF)是解决柴油机排放PM污染最有效和最具有发展前景的后处理技术,在DPF技术研究中,过滤体的再生是其关键技术^[1-3]。

微粒捕集器过滤体的再生技术是限制微粒捕集器广泛使用的瓶颈,微波再生方式利用了陶瓷材料过滤体对微波的吸收能力较差,微粒对微波的吸收

能力很强的特点来对微粒捕集器进行再生^[4]。采用微波对DPF进行加热时,微粒是主要的被加热对象,微波加热再生具有能提高能量利用率、延长过滤体寿命、提高再生效率且加热均匀等优点^[5]。但由于微波功率源即实用车载电瓶的问题,使得这一再生技术实施的难度极大。针对微波再生的这一技术瓶颈,龚金科^[6]等改变传统微波再生方式中对过滤体进行整体加热的方法,提出过滤体的单元化设计以及旋转式再生方案,以减小过滤体再生加热时的体积,降低微波源的消耗功率,实现一般车载电源可直接使用。本文对这一方案所提出的微粒捕集器的工作过程及过滤机理进行阐述,对其主要性能指标

收稿日期: 2010-01-07 修回日期: 2010-02-01

* 国家自然科学基金资助项目(50876027)和国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2008AA11A116)

作者简介: 龚金科, 教授, 博士生导师, 主要从事发动机排放污染与控制研究, E-mail: gongjinke@126.com

进行研究。

1 单元块旋转式过滤体 DPF 的结构及原理

微粒捕集器内由八块过滤体单元组成,单元块之间由钢板及涂层隔开,以有效防止微波能量的散失,微波源入口固定在壳体上,其结构原理如图 1 所示。

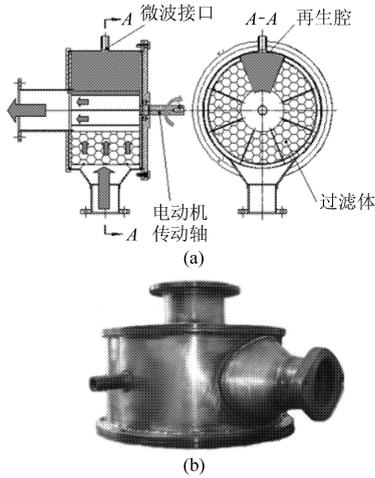


图 1 单元块旋转式过滤体 DPF 结构图

Fig. 1 Structure of the rotary unit-block DPF

(a) 内部结构原理图 (b) 微粒捕集器壳体

柴油机尾气沿径向流入圆筒形过滤体,排气中的微粒被过滤后,从导出管排出。当排气背压达到限定值需要再生时,可旋转的过滤体总保持至少一个过滤单元处于再生腔中进行加热再生,其他则处于过滤工作状态。

再生系统采用微波再生,在微波能量的作用下,再生腔中过滤单元上沉积的微粒物质自燃后被除去,该过滤单元块得到再生;圆盘形过滤体支架在步进电动机的作用下,适时旋转,使各过滤单元依次进入微波能量作用的区域,在微波的作用下使过滤体得到连续再生。

2 试验装置与方法

柴油机微粒捕集器的性能指标主要有过滤体的捕集效率、再生效率和整个微粒捕集器的气流阻力特性等,而捕集效率主要与过滤体采用的材料有关^[7-8],本文提出的微粒捕集器过滤体为泡沫陶瓷材料制成的通流式过滤体,主要参数如表 1 所示。

为了验证单元块旋转式过滤体微粒捕集器的可行性及性能,进行了试验验证。试验系统如图 2 所示,主要由柴油机、DPF、微波功率源、步进电动机、控制系统、压力测量设备以及温度测量设备等组成。过滤体入口和出口处安装的 MYD-5510 型压力传感器可得到再生时排气态背压。柴油机为排量 3 L

的 CYQD32 型,AVL 烟度计用于对过滤前后的烟度进行采样测量。电源为 220 V 交流经变压及整流后的 24 V 直流电源,以模拟车载电源,利用 NC-600-M 型逆变器及微波控制器便可产生 0~600 W 的微波功率。

表 1 过滤体主要参数

Tab. 1 Main parameters of the filter

参数	过滤体总体积/L	过滤块内直径/mm	过滤块外直径/mm	长度/mm	孔道密度/cell·in ⁻²	孔隙率/%
数值	3.429	80	200	100	100	65~70

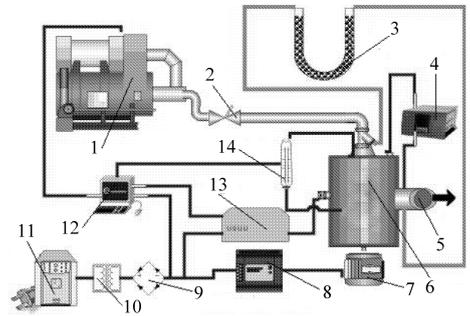


图 2 DPF 试验台架示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

1. 柴油机 2. 气阀 3. 压力计 4. 烟度仪 5. 排气口 6. 捕集器 7. 步进电动机 8. 步进电动机控制器 9. 整流器 10. 变压器 11. 电源 12. 发动机控制器 13. 微波源 14. 温度仪

微波再生过程中过滤体内部空间存在很强的电磁场,利用热电偶测量过滤体温度不仅会影响电磁场的空间分布和加热再生效果,还会影响热电偶测温的准确性;另外,微波再生具有加热均匀的特点,且外圆面为气流出口面,加热再生时温度极高。为此采用抗微波红外测温探头对再生过程中过滤体表面不同点的温度进行测定,测试位置分布如图 3 所示,测试值取三者最大值。

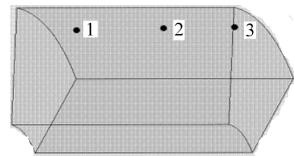


图 3 过滤体温度测试点位置

Fig. 3 Temperature sensor location on filter

再生试验过程中,过滤体单元依次进入再生腔,保持静止并被加热一定时间后,步进电动机在电机控制器的控制下旋转 45°,进行下一个过滤体单元块的加热,单个单元块的加热时间由本文中的分析结果确定。

试验时,不同发动机转速与负荷采用同样的再生方法,但不同转速及负荷下的排气气流特征不同,排气气流速度、温度等特征对加热再生会有重要

影响^[9]。

3 试验结果与分析

3.1 过滤体阻力特性分析

为了评价旋转式过滤体微粒捕集器的阻力特性,将单元块旋转式结构的捕集器与传统整体式结构的微粒捕集器进行比较。一般应用于微粒捕集器的过滤体的体积至少等于柴油机的排量,适宜的体积的排量的1~1.5倍。对比的传统整体式过滤体材料参数与旋转式过滤体一致,其过滤能力也相同。通流式过滤体和壁流式过滤体是目前DPF发展的两个主要方向^[10-12]。从节省空间和保证较低的排气背压出发,试验中采用的整体式碳化硅陶瓷过滤体,尺寸为 $\phi 144\text{ mm} \times 205\text{ mm}$ 圆柱形过滤体,体积约为3.34 L,物性参数与单元块旋转式过滤体一致。

传统的整体式微粒捕集器一般为轴向过滤结构,由于必须保证足够的气流通过面积,直径较大(图4),捕集器排气背压较大,在一定程度上影响发动机整机性能。当进行再生时,需对整个过滤体加热,微波加热升温慢,且易造成过滤体内部温度梯度大,易于脆损、开裂。当过滤体的厚度达到一定程度后,其加热效率并不随着微波功率的增加而增长,导致较大的热量损失。两种微粒捕集器排气背压在不同的工况下随时间变化关系如图5所示。

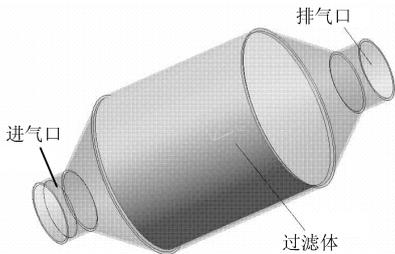


图4 传统整体式过滤体DPF

Fig.4 Traditional overall body filter DPF

从图5a中可以看出,在发动机转速和负荷较低的工况,传统整体式过滤体微粒捕集器的排气背压上升速率与本文提出的单元块旋转式过滤体微粒捕集器的排气背压上升速率大致相当,呈比较缓慢的上升趋势。在图5b与图5c中,随着发动机转速与负荷的增长,整体式过滤体的排气背压上升速率加快,曲线呈拱形,而单元块旋转式过滤体的排气背压曲线仍保持较慢的增长趋势。图5中可见两种不同结构的过滤体排气背压值保持着一定的差值,整体式过滤体的排气背压要高于单元块旋转式过滤体的排气背压;随着发动机转速和负荷的增加,背压均增大。整体式过滤体较快的排气背压上升速率说明其再生频率相比于单元块旋转式过滤体会更高,从而

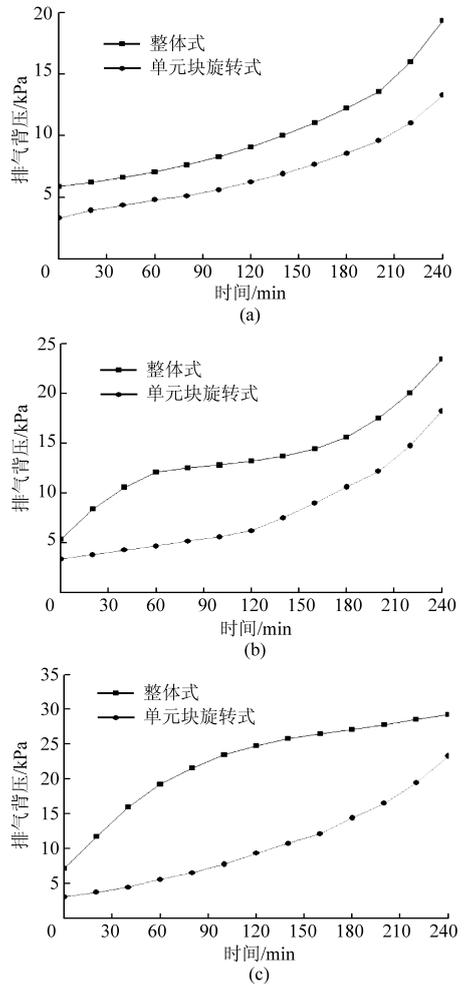


图5 单元块旋转式过滤体与整体式过滤体DPF不同工况下的背压变化

Fig.5 Back pressure changes of rotary unit block filter and overall body filter

(a) 50% 负荷, 1200 r/min (b) 50% 负荷, 1600 r/min
(c) 75% 负荷, 1600 r/min

对微粒捕集器的寿命和再生能量利用造成不利影响。造成以上现象的原因是传统整体式过滤体微粒捕集器采用轴向过滤,气流通过的有效过滤面积小,过滤阻力大,而单元块旋转式过滤体过滤面为其内侧弧形面,气流作径向流动。在过滤体总体积相同的情况下,单元块旋转式过滤体过滤面积大,排气阻力减小,排气背压上升速率减小。

3.2 过滤体微粒捕集特性分析

为计算微粒捕集器的捕集效率,采用AVL烟度计对微粒捕集器过滤体前后的烟度进行测量,捕集效率为

$$\eta_1 = \frac{G_a - G_b}{G_a} \times 100\% \quad (1)$$

式中 G_a 、 G_b ——过滤前、后的烟度

图6给出了同体积的整体式过滤体和单元块旋转式过滤体的微粒捕集效率在50%负荷下随转速

变化的情况,从图 6 中可以看出,发动机在转速约 1 000 ~ 1 500 r/min 的工况时,单元块旋转式过滤体的捕集效率略低于整体式过滤体的捕集效率,但在转速 1 500 ~ 2 200 r/min 时,单元块旋转式过滤体的捕集效率高于整体式过滤体的效率,且随着转速增大,捕集效率差别越明显,两种过滤体的捕集效率都随转速增加而降低,整体式过滤体捕集效率下降速率高于单元块旋转式过滤体的。因为 DPF 的捕集效率主要取决于过滤体材料与结构尺寸,当过滤体材料物性参数一致时,同体积的整体式过滤体轴向尺寸大于单元块旋转式过滤体的轴向尺寸,而有效过滤面积远低于单元块旋转式过滤体的。当微粒直径小于 1 μm 时,需考虑微粒的扩散作用,当微粒直径小于 0.1 μm 时,扩散作用在捕集机理中起主导作用,由于柴油机的排气微粒大部分属于亚微米范畴,因此对于柴油机的排气微粒过滤,扩散捕集是十分重要的。发动机转速越高,其排气流速越高,由于排气流速决定微粒在过滤体内滞留的时间,因此气流速度对扩散捕集效率影响非常明显,排气流速越低,扩散捕集效率越高。

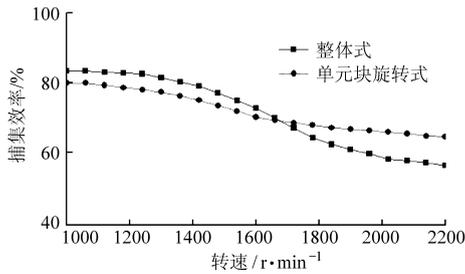


图 6 捕集效率随转速变化曲线

Fig. 6 Filtration efficiency change with engine speeds

在发动机低速工况下,微粒在两种过滤体内都能被较高效率地捕集,由于整体式过滤体轴向尺寸更长,显然微粒滞留时间也 longer,有利于微粒的扩散捕集,因此整体式过滤体捕集效率略高。在发动机高速工况下,当排气气流的速度超过一定值后,由于单元块旋转式过滤体的有效过滤面积远大于整体式过滤体的,对高速工况下的排气气流具有较大的减速作用,高速气流进入单元块旋转式过滤体捕集器后,流速减低,对扩散捕集效率影响小,因而在高速工况时其捕集效率高于整体式过滤体。

4 过滤体微波再生分析

4.1 再生时间分析

微粒捕集器再生试验时,柴油机的工况稳定在转速 1 500 r/min、负荷 50% 下,排气流量 21 kg/h,排气温度为 573 K,柴油机废气中的氧含量在不同负荷下为 8% ~ 15%,负荷越高,含量越低,当废气中

含氧量在 10% 以上时能保证微粒充分燃烧。每个过滤单元块须在有隔板的再生腔中停留一定时间后由步进电动机旋转 45°,带动下一块过滤单元块进入再生腔加热,过滤单元块一次加热时间是影响微粒捕集器整体再生效率和能量消耗的重要因素。再生效率或再生质量由再生前、后过滤体中微粒沉积质量来评价^[13]。过滤体能否良好再生,是整个 DPF 正常使用的关键。通常用再生效率来评价过滤体再生性能,过滤体再生效率为

$$\eta_2 = \frac{m_1 - m_2}{m_1} = \frac{\Delta m}{m_1} \quad (2)$$

式中 m_1 、 m_2 ——再生前、后过滤体内捕集 PM 质量
 Δm ——再生除去的 PM 质量

由于柴油机运行过程中, m_1 和 m_2 不能直接测量,而柴油机排气微粒过滤器其再生前、后微粒质量会直接影响到排气管的排气背压,随着微粒沉积量的增加,排气管的排气背压会逐渐上升^[14],因而评估 DPF 工作时的再生效率,可通过检测过滤体工作时的背压变化,间接地获得过滤体吸附和沉积的排气微粒的量^[15],过滤体再生效率为

$$\eta_3 = \frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中 p_1 、 p_2 、 p_0 ——再生前、再生后与洁净过滤体的排气背压

图 7 给出了再生效率随单个过滤单元块再生加热时间的变化曲线。图中可看出,再生 3 min 内效率较低,当过滤单元块一次加热时间为 3 ~ 8 min 时,再生效率达到 80% 以上,当超过 8 min 时再生效率开始大幅度下降,这是由于微波加热过滤体需要一段时间才能达到微粒大量燃烧,随着加热时间增加,微粒反应获得的能量增加,使再生效率也增大,但时间过长(大于 8 min),由于发动机仍处于工作状态,其中某个过滤单元块再生时,其余过滤块中微粒的积累效应已开始接近消除效应,从而使再生效率下降。由于已被加热再生的过滤单元块实质上已经将沉积微粒清除,达到预期再生效果,这种效率下降只会造成不利的能量消耗。

单元块旋转式过滤体应用于车载的优势在于每个过滤单元块加热时间短,能在 3 min 左右达到较好的再生效率。车载电瓶电量不足一直是 DPF 微波再生广泛应用的技术瓶颈,单元块旋转式微粒捕集器能实现分时再生,基于对传统整体式微粒捕集器再生时出现电池电量不足导致再生不完全和电源电量消耗过大的考虑,可以先对部分过滤单元块再生,降低排气背压,提升发动机性能,当经过一定时间车载蓄电池电量充足后,再次对剩余过滤单元块

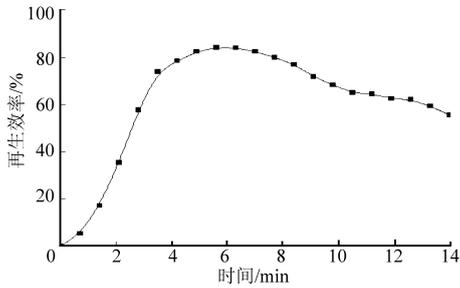


图7 再生效率随过滤单元块再生时间的变化曲线

Fig.7 Regeneration efficiency change with time

再生,有效地解决汽车车载电源功率不足的问题。

4.2 过滤体初始温度的影响

单个过滤块初始温度对壁面峰值温度和再生效率变化历程的影响,如图8、图9所示。从图8可看到,当过滤体初始温度从300 K上升到500 K时,峰值温度最高值出现的时刻略微提前,其最高值不断升高;当过滤体初始温度从500 K上升到650 K时,峰值温度最高值出现的时刻迅速提前,而其最高值却不断下降。产生该现象的原因可结合图9进行说明。图9中显示,当过滤体初始温度分别为300、400、500、600和650 K时,过滤体再生效率达到1%时所需时间分别为63、60、50、10和2 s。由此可知,当初始温度低于500 K时,过滤体在不同初始温度下的预热时间比较接近,因而峰值温度出现最高值的时刻大致相同。此外,由于预热时间比较接近,故在预热阶段吸收的热量大致相同,因此初始温度越高,峰值温度的最高值越高;当初始温度超过500 K时,过滤体预热时间迅速缩短,从而使峰值温度出现最高值的时刻迅速提前。预热阶段的缩短,导致预热阶段吸收的热量减少,从而使得峰值温度最高值下降。

从图9可以看出,提高过滤体初始温度,能提高过滤体的最终再生效率和再生速率。当过滤体初始温度低于500 K时,初始温度对最终再生效率的作用较大,而对再生速率的作用较小;当过滤体初始温度高于500 K时,初始温度对最终再生效率的作用

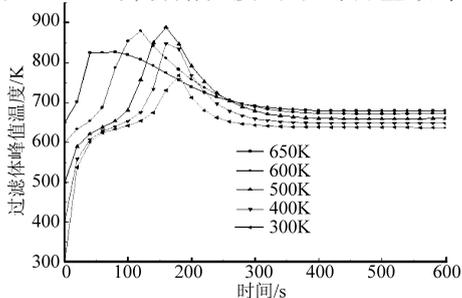


图8 过滤体初始温度对过滤壁面峰值温度变化历程的影响

Fig.8 Effect of filter initial temperature on wall maximum temperature

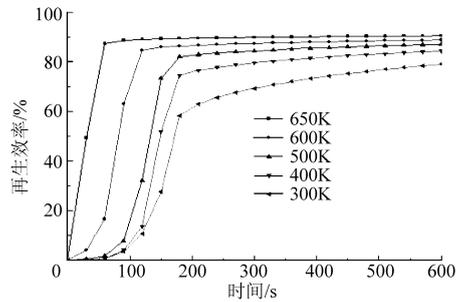


图9 过滤体初始温度对再生效率变化历程的影响

Fig.9 Effect of filter initial temperature on regeneration efficiency

较小,而对再生速率的作用较大。

综上所述,当过滤体初始温度过低时,尤其是冷却后,由于微粒吸附柴油机排气中冷凝的水蒸气,再生缓慢,再生效率低,这对微波源以及车载电源的容量的要求更严。相反,过滤体初始温度越高,则再生越容易(即预热时间短)、再生速率越快、再生效率越高,而且车载电源消耗的能量越少。尤其是当过滤体初始温度超过500 K时,进一步提高初始温度还可以降低过滤体峰值温度。因此,从优化微波再生过程的角度出发,应尽量将过滤体初始温度保持在500 K以上。在实际应用过程中,可通过在排气管外加装隔热罩、在微粒捕集器外壳包裹石棉砂布等方法来保证过滤体有较高的初始温度。

5 结论

(1)将微粒捕集器过滤体分割成单元块,气流从轴向通入后从侧面流出实现径向过滤,在过滤体体积相同的情况下,径向过滤的过滤面积比横向过滤高,因此其排气背压与过滤阻力小,有利于发动机性能的提高。

(2)发动机低速度与低负荷工况时,单元块旋转式过滤体排气阻力上升速率与整体式过滤体相当;高速与高负荷工况下,传统整体式过滤体排气阻力上升速率更大;单元块旋转式过滤体排气阻力小于整体式过滤体。

(3)发动机低速工况时,单元块旋转式过滤体的捕集效率略低于整体式的捕集效率,高速工况时前者高于后者;两者捕集效率都随发动机转速增加而降低,整体式过滤体下降速率更快。

(4)单元块旋转式微粒捕集器能实现分时段加热再生,可有效解决车载电瓶电量不足的技术瓶颈,加热3~8 min时,单个过滤块再生效率达80%以上。

(5)过滤体初始温度越高,则再生越容易进行、且再生速率快、再生效率高,车载电源消耗的能量少。尤其是当过滤体初始温度超过500 K时,进一步提高初始温度还可以降低过滤体峰值温度。

参 考 文 献

- 1 龚金科,刘云卿,龙罡,等. 柴油机壁流式过滤体捕集与流阻性能影响规律[J]. 农业机械学报,2009,40(12):1~7,18.
Gong Jinke, Liu Yunqing, Long Gang, et al. Characteristics of filtration and flow-resistance of wall-flow diesel particulate filter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 1~7, 18. (in Chinese)
- 2 龚金科,吁璇,伏军,等. 柴油机喷油助燃再生系统微粒捕集器油气匹配研究[J]. 农业机械学报,2010,41(4):1~5.
Gong Jinke, Yu Xuan, Fu Jun, et al. Study on fuel-air matching forms in burner-type diesel particulate filter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 1~5. (in Chinese)
- 3 龚金科,伏军,王曙辉,等. 柴油机微粒捕集器背压信号采集系统动态响应特性的研究[J]. 内燃机工程,2008,29(5):62~66.
Gong Jinke, Fu Jun, Wang Shuhui, et al. Study on dynamic response characteristic of back-pressure signal acquisition system for diesel particulate filter [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2008, 29(5): 62~66. (in Chinese)
- 4 张春润,邵玉平,孙海东,等. 壁流式过滤体的流动阻力分析及再生效率研究[J]. 车用发动机,2005(5):65~67.
Zhang Chunrun, Shao Yuping, Sun Haidong, et al. Flow resistance analysis of wall-flow filter and study of its regenerative efficiency [J]. Vehicle Engine, 2005(5): 65~67. (in Chinese)
- 5 Ma Jianxin, Fang Ming, Li Ping, et al. Microwave-assisted catalytic combustion of diesel soot [J]. Applied Catalysis A, 1997, 159(1~2): 211~228.
- 6 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:中国,ZL200710035168. 6[P]. 2008-09-17.
- 7 宁智,资新运,欧阳明高,等. 柴油机排气微粒过滤体的评价与选择[J]. 环境工程,2001,19(2):60~62.
Ning Zhi, Zi Xinyun, Ouyang Minggao, et al. Evaluation and selection of diesel engine emission particulate filter [J]. Environmental Engineering, 2001, 19(2): 60~62. (in Chinese)
- 8 宁智,资新运,高希颜,等. 泡沫陶瓷过滤体微波再生过程的理论分析[J]. 燃烧科学与技术,1998,4(3):320~326.
Ning Zhi, Zi Xinyun, Gao Xiyan, et al. Modeling of microwave regeneration for ceramic foam particulate filter [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 1998, 4(3): 320~326. (in Chinese)
- 9 龚金科,王曙辉,李林科,等. 气流特征对柴油机微粒捕集器微波再生的影响研究[J]. 内燃机学报,2008,26(3):249~254.
Gong Jinke, Wang Shuhui, Li Linke, et al. Effects of airflow characteristic on the performance of diesel particle filter regeneration with microwave [J]. Transactions of CSICE, 2008, 26(3): 249~254. (in Chinese)
- 10 Choi YonOaek, Dang Zhongyuan, Stone Ron, et al. New flow-through trap system targeting 50% PM removal for diesel emission control [C]. SAE Paper 2007-01-0232, 2007.
- 11 Gyubaek Cho. PM reduction performance and regeneration characteristics of catalyzed metal foam filters for a 3 L diesel passenger vehicle[C]. SAE Paper 2007-01-3456, 2007.
- 12 Koltsakis G C, Katsaounis D K, Samaras Z C, et al. Filtration and regeneration performance of a catalyzed metal foam particulate filter[C]. SAE Paper 2006-01-1524, 2006.
- 13 Gadde S B, Johnson J H. A computational model describing the performance of a ceramic diesel particulate trap in steady-state operation and over a transient cycle [C]. SAE Paper 1999-01-0465, 1999.
- 14 赵斌娟,袁寿其,加藤征三,等. 壁流式蜂窝陶瓷微粒过滤器压力损失公式的建立[J]. 农业机械学报,2004,35(6):44~47.
Zhao Binjuan, Yuan Shouqi, Kato Seizo, et al. Establishment of the pressure drop equation for honeycomb wall-flow diesel particulate filters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(6): 44~47. (in Chinese)
- 15 贺宇,张春润,吴良勤,等. 二次空气对柴油机排气颗粒过滤体微波再生过程的影响[J]. 内燃机工程,2001,22(1):58~62.
He Yu, Zhang Chunrun, Wu Liangqin, et al. Effects of secondary air on the microwave regeneration of diesel engine exhaust particulate filter[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2001, 22(1): 58~62. (in Chinese)