

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.005

进气和压缩气反吹缸内燃烧再生的柴油机微粒过滤器*

方显忠 李国良 阎淑芳 姜北平

(吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130025)

【摘要】 设计了一种以耐高温滤袋为过滤元件的柴油机排气微粒双过滤器系统。利用柴油机工作时大量进气流的反吹过程把沉积在滤袋上的微粒(PM)送回到气缸内,辅助用压缩气体喷嘴扫描反吹方法强制把沉积的PM彻底从滤袋上分开而随进气流回到气缸中,在燃烧室内烧掉PM实现袋式过滤器再生,达到袋滤器彻底再生的目的。在一台单缸柴油机上进行了验证性试验。结果表明,袋滤器能保证82%~94%的过滤效率。在过滤时间和再生时间相等的稳定工况下,袋滤器的进、排气阻力得到彻底恢复,能增加再生后所维持的过滤时间而减少再生频率,表明进气加上压缩气体反吹过程不仅能把滤袋捕集的微粒重新送回气缸中,而且微粒能在燃烧室中烧掉实现系统有效再生。

关键词: 柴油机微粒过滤器 进气过程 压缩气体反吹 再生

中图分类号: TK411+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)03-0022-06

Bag-type DPF Regenerated by Intake Flow and High-pressure Air Reverse Blow and In-cylinder Combustion of Particulate

Fang Xianzhong Li Guoliang Yan Shufang Jiang Beiping

(State Key Laboratory of Automobile Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract

A dual diesel particulate filter system was developed by using the heat resistant filter bag as filtering element. The intake fresh air of the diesel engine was used to blow off the deposited particulate matters (PM) and send them back to the cylinder. The blow-off PM in the filter was assisted by high-pressure air scanning reverse flow. The PM burning in the cylinder realized the regeneration of the filter. The verification tests were performed in the dynamometer test bed with a single-cylinder diesel engine. Under the steady operating condition, and the filtering time span was equaled to the regeneration time span, the resistance of intake and exhaust of bag-type-filter rehabilitated thoroughly. It showed that the intake process of the intake fresh air and high-pressure air could blow off the deposited PM on the outer surface of the bag, ensure the successful regeneration of the bag-type-filter with filtering efficiency of 82% ~ 94%.

Key words Diesel particulate filter, Air intake process, Compress air reverse blow, Regeneration

引言

在传统固定喷嘴反吹再生的车用微粒过滤器(DPF)方式中^[1],因受压缩气泵容量的限制,对面积型过滤材料反吹再生存在以下难以克服的缺点:小喷嘴面积相对整个过滤表面的平均压强太小;反吹

气体射束方向性太差,无法直接吹到整个过滤材料表面;从喷嘴到达过滤材料表面的距离长短无法均匀一致,反吹强度不均匀;反吹气体经过过滤材料后必须有个很大的膨胀空间,而对运动汽车而言为反吹气体提供足够大的膨胀空间非常困难,而且随着膨胀空间内的压力升高,会阻碍反吹气体的膨胀过

收稿日期:2011-01-10 修回日期:2011-07-19

* 吉林省科技发展计划资助项目(2002636)

作者简介:方显忠,研究员,主要从事内燃机排放控制研究,E-mail:fangxz@jlu.edu.cn

程而降低反吹效果;还需要另外的专门过滤器收集被吹掉的微粒;对收集过滤器上的微粒还要进行处理。如果采用定期的热再生方法,需要额外消耗能源还有可能产生二次环境污染,当采用专门燃烧器时其复杂程度不亚于柴油机的燃料供给系统^[2],热再生方法的控制过程非常复杂并且制造成本特别高^[3-5]。

本文开发的双滤袋式DPF再生系统^[6-7],或称微粒再循环(PMR)系统是利用柴油机工作时的大量进气流反吹把沉积在滤袋上的微粒(PM)送回到气缸内在燃烧室内烧掉,并辅助用压缩气体喷嘴扫描反吹方法强制把沉积的PM彻底从滤袋上分开而

随进气流回到气缸中^[8],既能保证很高的过滤效率,还能把滤袋的进、排气阻力彻底恢复。

1 进气和高压气体反吹的双滤袋式DPF系统原理

图1所示的带有压缩空气喷嘴的双滤袋式DPF系统,包括进、排气口2、1,微粒滤袋12、17,阀门4~8,过渡空滤器3和在导向套15中可以左右移动及往复转动的压缩空气喷管16,以及各种测量用接口等。2个滤袋的结构完全相同,可分别轮流和柴油机的进、排气管相连通,一个排气过滤时,另一个进气再生,反之亦然。两个滤袋分别命名为A袋和B袋。

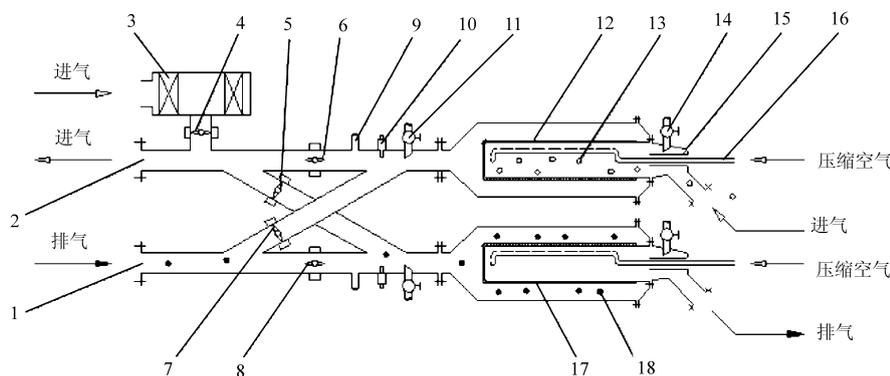


图1 带有压缩空气喷嘴的双滤袋式DPF系统

Fig.1 Dual-bag-type DPF system with compress air nozzle

1. 柴油机排气口 2. 柴油机进气口 3. 过渡空滤器 K 4~8. 阀门 9. 压力测量接口 10. 温度传感器 11、14. 烟度采样口
12. 滤袋 A 13. 大气灰尘 15. 喷管导向套 16. 压缩空气喷管 17. 滤袋 B 18. 排气微粒

当阀门4、5、7关闭,阀门6、8开启时,滤袋A与进气口相通,大气中灰尘可沉积在A袋的内表面,干净的空气进入柴油机的气缸。与此同时,柴油机的排气经过B袋排入大气,而PM沉积在B袋的外表面上。当B袋阻力增大使柴油机的排气背压达到标定的最大允许值时,打开阀门5、7,关闭6、8,使B袋为进气滤袋,大量的脉动进气流和由喷嘴反向吹出的压缩气体把B袋外表面上的沉积PM吹掉,PM随新鲜空气进入柴油机的气缸中被烧掉,开始了对B袋外表面微粒的连续清除和烧掉过程;而A袋变为排气滤袋,利用大量的排气流可把沉积在A袋内表面的灰尘吹掉,开始对内表面灰尘的连续清除过程。其中,进气流量的特点是流量大、压强小,同时具有吹掉微粒并运送到气缸内的功能;而扫描气体的特点是流量小、压强大,主要作用是强制把黏结在B袋外表面的微粒彻底吹掉。

当A、B袋进行工作模式转换时,例如B袋从微粒过滤模式转换到微粒反吹再生模式,而A袋从反吹再生模式转换到过滤模式时,不能瞬间完成转换,而是首先打开阀门4由过渡空滤器K暂时为发动机提供所需空气量,以保证柴油机原工作状态不变,

然后才交换A、B袋的工作模式。其A、B、K3个过滤器的交替变换方式为:先参与后退出。先由K参与保证进气,然后A袋可以退出进气而变为排气,再后B袋退出排气而变为进气,最后K退出进气,存在A、K同时进气和A、B同时排气以及B、K同时进气的连续衔接过程。其中B袋从排气变为进气过程中,B袋17内到阀门5之间的整个管道中充满残留废气。因此,B袋开始参与和K同时进气时,要求阀门5的开启过程应持续30s左右,慢开启可避免残留废气突然进入气缸比例大而影响柴油机正常工作。

2 双滤袋式DPF试验系统

2.1 试验设备

以图2所示的DPF系统配备莱阳动力机械总厂生产的T1115型单缸卧式柴油机进行验证试验。柴油机主要参数如表1所示。功率测量用南峰CW150型测功机,PM过滤前、后的排气烟度用奥地利AVL439型消光烟度计测量,排气温度用数字式温度表监控,进气真空度和排气阻力用“U”型水柱压力计测定。

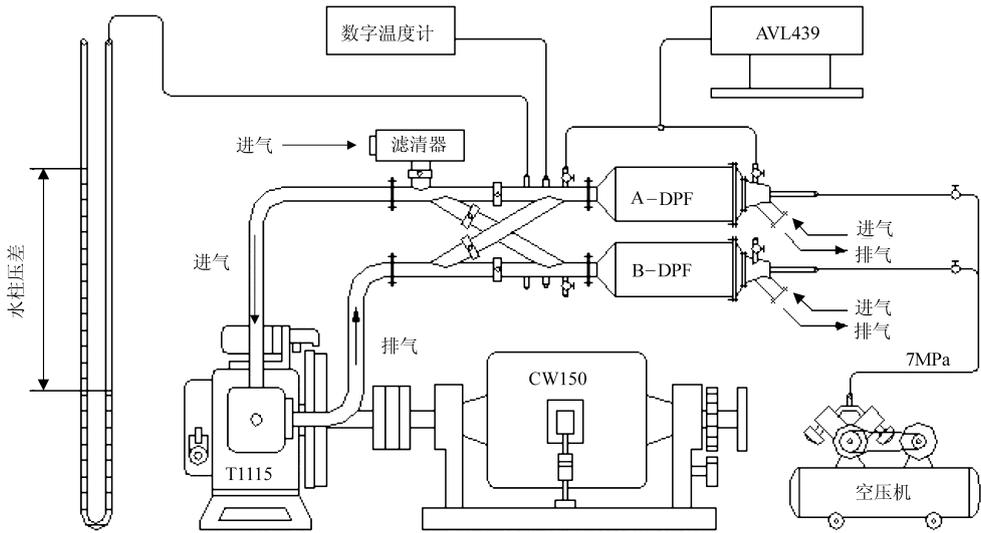


图2 再生试验系统

Fig. 2 Experiment system of the regeneration

表1 试验柴油机主要参数

Tab.1 Technical specifications of test diesel engine

参数	数值
型式	单缸直喷,4冲程
缸径×行程/mm×mm	115×115
排量/L	1.194
压缩比	17
额定功率/kW	16.2
标定转速/r·min ⁻¹	2000
燃油启喷压力/MPa	18
燃烧室型式	ω

表2 系统过滤和再生模式变换过程

Tab.2 System exchange mode of filtering and regeneration

时序	模式变换描述	阀门序号				
		4	5	6	7	8
①	初始过滤状态,K关闭 A进气,B排气	关	关	开	关	开
②	K参与进气 A进气,B排气	开	关	开	关	开
③	A退出进气 B排气,K进气	开	关	关	关	开
④	A参与排气 B排气,K进气	开	关	关	开	开
⑤	B退出排气 A排气,K进气	开	关	关	开	关
⑥	B参与进气 A排气,K进气	开	开	关	开	关
⑦	K退出进气 B进气,A排气 完成A、B转换, 压缩空气反吹	关	开	关	开	关

试验滤袋用耐热纤维针刺毡制成,在210℃的温度下其物理性能保持不变,允许峰值温度为250℃^[9]。滤袋直径为120mm,长度为450mm,有效过滤面积约为0.16m²。滤袋内腔用不锈钢丝骨架支撑,保持必要的抗压力。反吹气流压强0.7MPa,压缩空气喷管内径 $\phi=8$ mm,喷管朝着滤袋方向分布10个直径 $\phi=2$ mm的喷孔。当压缩空气喷管16在导向套15内左右移动和往复转动时实现对滤袋的扫描反吹。

2.2 试验方法

DPF的理想试验工况是柴油机的大负荷高转速工况,但由于所用滤袋材料的耐热性限制,试验在排气温度为200℃的工况下进行,对应柴油机转速 $n=1600$ r/min、转矩 $T=30$ N·m。作为工作原理的验证性试验,DPF的各阀门和压缩空气喷管暂时都由人工操作,系统过滤和再生模式变换过程的阀门开闭时序描述如表2所示。DPF的过滤效率根据排气过滤前、后烟度的下降率确定。滤袋的PM沉积用排气系统的阻力(即柴油机的排气背压)表征。

3 试验结果与分析

3.1 再生对进、排气阻力的影响

图3为A袋3个连续循环周期的进、排气阻力曲线。每循环周期方式为:先进气再生、后排气过滤,前面较低位置的0~46min为第1循环周期的进气阻力,由低到高的47~93min为第1循环周期的排气阻力。其中,进气初始点阻力1.43kPa,进气終了点阻力0.73kPa,转变为排气过滤时初始点(47min)阻力1.25kPa,排气終了(93min)阻力为15kPa。3个循环周期进、排气阻力曲线的特点都是

排气阻力大而进气阻力小。

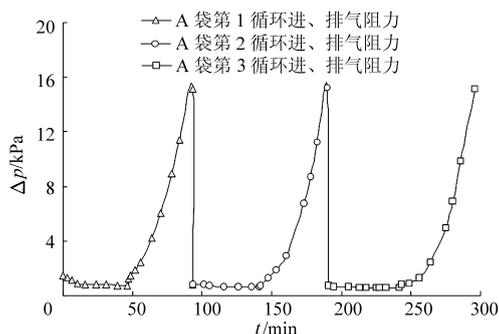


图3 A袋3个循环的进、排气阻力曲线

Fig. 3 Resistance of bag-A intake and exhaust regeneration

图4为与图3 A袋工作时对应的B袋工作情况。每循环周期方式为:先排气过滤、后进气再生,前面由低到高0~46 min为第1循环周期的排气阻力,较低位置47~93 min为第1循环周期的进气阻力。其中,排气阻力从初始点1.37 kPa积累到15 kPa,转变为进气再生时其阻力从初始点0.93 kPa减低到0.59 kPa。3个循环周期进、排气阻力曲线的特点也都是排气阻力大而进气阻力小。

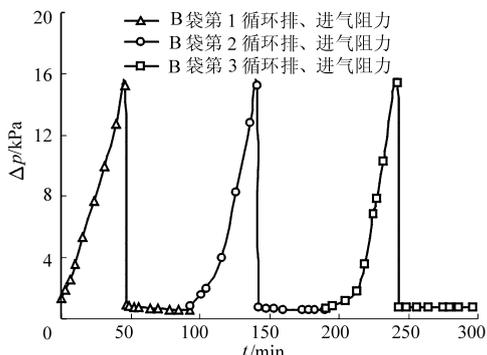


图4 B袋3个循环的排、进气阻力曲线

Fig. 4 Resistance of bag-B exhaust and intake regeneration

A、B袋在过滤模式捕集了大量微粒使排气阻力达到15 kPa,当转变为进气再生模式时,其进气阻力却很小,该现象对过滤模式变换为再生模式的进气过程非常有利。沉积微粒滤袋对进、排气阻力具有“单向阀”现象的主要原因为:①与滤袋捕集微粒的方向以及气体流动方向有关,滤袋的过滤表面结构是毛状纤维,表面上沉积微粒层对进、排气的流动方向非常敏感,气体流动方向对阻力影响很大,当把沉积层推近到滤袋表面的方向其流动阻力大,而把沉积层推开滤袋表面的方向就使流动阻力小。②可能与流动气体温度有关,200℃的排气使沉积层的每个微粒体积膨胀造成整体通透性变差,而34℃的进气使沉积层的每个微粒体积都缩小,使得整体通透性变好。③可能与滤袋的凸凹方向有关,排气过程把滤袋压向内腔支撑骨架,滤袋呈现内凹状态使沉积层的大部分外表面受挤压作用,而进气过程把滤

袋吹成外凸状态使所有沉积层外表面受拉伸作用,因沉积层受挤压变成被拉伸使得进气阻力变小。④A、B袋在模式变换中先由过渡空滤器K参与进气工作,为K、B空滤器同时进气过程,可以有效减小系统初始的进气阻力,当部分新鲜空气开始流经B袋时可先再生一部分容易脱落的微粒,当空滤器K退出进气工作时由B袋单独作为进气滤清器时已经使得进气阻力比较低。由于滤袋进、排气阻力具有非常明显的“单向阀”现象,进气阻力很小。因此,在控制A、B袋工作模式交换时可不考核进气阻力大小,只需根据排气阻力临界值控制A、B袋的工作模式变换。

为比较B袋3个循环之间再生后的排气阻力变化,图5把B袋的3个排气循环阻力曲线放在同一个坐标进行比较。可看出曲线之间有3个特点:①3个曲线开始排气阻力分别为1.37 kPa、0.8 kPa、0.69 kPa,开始排气阻力随着再生次数增加而减少。而新袋最初进、排气阻力分别为0.72 kPa、0.74 kPa,表明再生后排气阻力得到很好的恢复。②后面循环的过滤时间都较前面循环长,在排气阻力同样都积累到15 kPa时的维持过滤时间依次为46、48、52 min。即第2循环过滤时间较第1循环增长2 min,而第3循环过滤时间又较第2循环增长4 min。表明进气再生微粒循环的有效性。③在相同时间坐标位置其排气阻力值存在较大差别,如同样在第20 min过滤时间点第1、3循环之间的阻力值相差5.6 kPa,排气阻力小有利于柴油机工作。该结果也进一步说明微粒再生过程的有效性和可靠性。在经过3次扫描反吹以后滤袋的排气阻力完全恢复到新袋时的阻力状态。因此,在进气再生循环中可以减少压缩气体反吹时间或压强,可有效减少反吹气体消耗量。

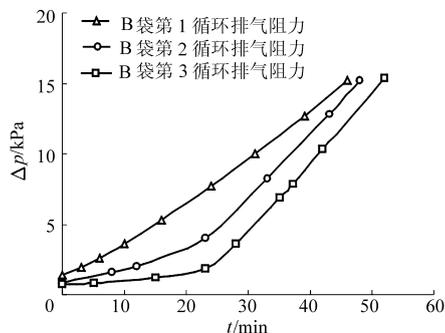


图5 B袋3个排气循环阻力曲线

Fig. 5 Exhaust resistance comparison between 3 regeneration cycles of bag-B

图6把A袋的3个进气循环阻力曲线(与图3相同)放在同一个坐标进行比较。A袋第1循环进气阻力由开始1.43 kPa降到0.73 kPa,第2循环由

开始 0.86 kPa 降低到 0.62 kPa, 第 3 循环由开始 0.72 kPa 降低到 0.57 kPa, 3 个循环的进气阻力逐渐减小又进一步证明微粒再生过程的有效性和可靠性。

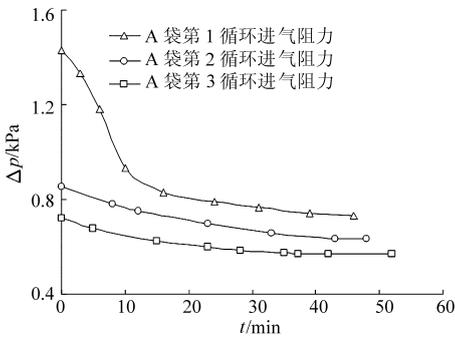


图 6 A 袋 3 个进气循环阻力曲线

Fig. 6 Intake resistance comparison between 3 regeneration cycles of bag-A

图 7 为再生前、后 A 袋微粒沉积图片。图 7a 为排气阻力积累到 15 kPa 时滤袋上的微粒沉积情况, 排气气流从袋的外面进入到袋的内部, 15 kPa 的排气压力把布袋压向内部支撑架呈现内凹状, 微粒沉积在布袋丝线之间和周围表面, 外露丝线上沾满微粒使丝线直径明显变粗, 滤袋上很多地方被微粒几乎填满, 沉积了较厚的微粒层。图 7b 为被进气和压缩空气反吹再生以后的微粒沉积情况, 大量脉动进气流和少量扫描压缩空气流从袋的内部吹向外部, 在两股气流双重作用下已经把袋的内凹部分吹凸出来变成比较圆的桶状, 滤袋丝线之间和表面沉积的大量微粒已经被吹掉, 滤袋丝线都比较均匀竖立起来, 不再沾满微粒的丝线直径明显变细, 进、排气阻力得到彻底恢复。

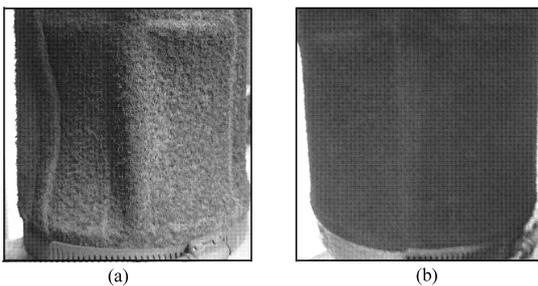


图 7 再生前、后 A 滤袋沉积微粒

Fig. 7 Particulate of loaded on bag-A before and after regeneration

(a) 再生前 (b) 再生后

3.2 微粒过滤效率

A、B 滤袋相互交替工作的进、排气阻力曲线如图 8 所示。A 袋有 3 个先进气、后排气的工作循环周期, 而 B 袋有 3 个先排气、后进气的工作循环周期, 联合在一起共有 6 段进气循环和 6 段排气循环曲线。

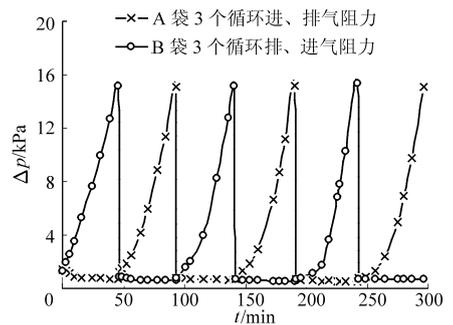


图 8 A、B 袋联合的阻力变化历程

Fig. 8 Combination resistance histories of bag-A and B

图 9 表示 A、B 滤袋交替工作时对应过滤前、后的烟度。消光烟度计的线性分度值用 N 表示, 其中上面 6 个排气循环过滤前烟度范围 N 在 11.3 ~ 15.7 之间, 下面对应过滤后烟度范围在 0.72 ~ 1.8 之间, 6 个排气循环周期中其平均过滤效率在 82% ~ 94% 之间。表明进气过程和扫描反吹再生方法不仅能对滤袋沉积微粒进行有效再生, 而且可保持很高的过滤效率。

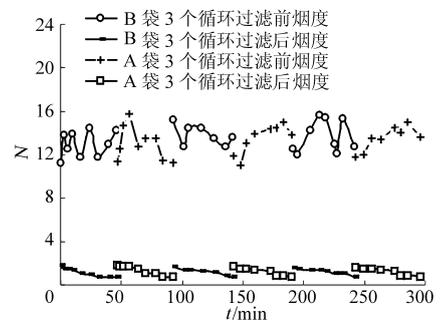


图 9 A、B 袋联合的过滤前、后烟度比较

Fig. 9 Exhaust smoke opacity comparison of combination of bag-A and B up- and down-stream

4 结论

(1) 虽然文中柴油机转速 1 600 r/min、转矩 30 N·m 为单一试验工况, 但却验证了利用发动机自然进气过程和压缩空气扫描反吹在气缸内燃烧 PM 方法的可行性和有效性, 该方法可以被应用于其它各种面积型的微粒过滤器上。合理地利用气缸中的高温条件烧掉微粒, 合理地利用进气过程中的大量新鲜空气以及利用柴油卡车上的压缩空气源, 通过控制几个阀门和移动压缩空气喷嘴就能把过滤器捕集的微粒强制送回气缸中进行燃烧再生, 与专门的燃料燃烧器相比较其结构简单、制造成本低。

(2) 不仅能够对袋滤器沉积微粒进行有效再生, 而且能保持 82% ~ 94% 的过滤效率。

(3) 本方法能够使袋滤器恢复到新袋初始的进、排气阻力。

参 考 文 献

- 1 王建昕,傅立新,黎维彬.汽车排气污染治理及催化转化器[M].北京:化学工业出版社,2000:298~299.
- 2 Yougen Kong, Chris Huffmeyer, Randy Johnson, et al. Applications of an active diesel particulate filter regeneration system [C]. SAE Paper 2004-01-2660, 2004.
- 3 中华人民共和国交通部公路司.汽车排放污染物控制实用技术[M].北京:人民交通出版社,1999:156~158.
- 4 刘瑞祥,高希彦,杨德胜,等.柴油机微粒陶瓷过滤器红外加热再生的优化[J].内燃机学报,2004,22(6):481~485.
Liu Ruixiang, Gao Xiyan, Yang Desheng, et al. Optimization of infrared regeneration exhaust particulate ceramic filter for diesel engine[J]. Transactions of CSICE, 2004, 22(6): 481~485. (in Chinese)
- 5 宁智,张广龙,刘军民,等.柴油机排气微粒过滤器微波再生试验研究(1)[J].内燃机学报,1997,15(1):28~33.
Ning Zhi, Zhang Guanglong, Liu Junmin, et al. Experimental study on microwave regeneration for diesel exhaust particulate filter (1)[J]. Transactions of CSICE, 1997,15(1):28~33. (in Chinese)
- 6 吉林大学.利用发动机进排气过程再生进排气过滤器系统:中国,200510119052.1[P].2008-03-12.
- 7 方显忠,李国良,许允,等.利用进气反吹缸内燃烧再生的柴油机微粒过滤器[J].内燃机,2011(4):43~46.
Fang Xianzhong, Li Guoliang, Xu Yun, et al. Bag-type diesel particulate filter regenerated by intake flow reverse blow and in-cylinder combustion of particulate[J]. Internal Combustion Engines, 2011(4):43~46. (in Chinese)
- 8 吉林大学.辅助扫描反吹式分离排气微粒过滤器:中国,200910067532.6[P].2009-09-15.
- 9 肖福明,刘巽俊,季雨,等.公共汽车柴油机袋式消烟器的开发[J].内燃机工程,1991,12(2):36~39.
Xiao Fuming, Liu Xunjun, Ji Yu, et al. Development of a multi-bag particulate collector for diesel buses[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 1991,12(2):36~39. (in Chinese)

(上接第15页)

- 8 汪淼,王建昕,沈义涛,等.汽油喷雾碰壁和油膜形成的可视化试验与数值模拟[J].车用发动机,2006(6):24~28.
Wang Miao, Wang Jianxin, Shen Yitao, et al. Visualization research of the gasoline spray-wall interaction and wall film formation and numerical simulation[J]. Vehicle Engine, 2006(6):24~28. (in Chinese)
- 9 Daniele Tamagna, Roberto Gentil, Youngchul Ra, et al. Multidimensional simulation of the influence of fuel mixture composition and injection timing in gasoline-diesel dual-fuel applications[C]. SAE Paper 2008-01-0031, 2008.
- 10 Daniele Tamagna, Youngchul Ra, Rolf Reitz. Multidimensional simulation of PCCI combustion using gasoline and dual-fuel direct injection with detailed chemical kinetics[C]. SAE Paper 2007-01-0190, 2007.
- 11 马宗正,程勇,纪少波.汽油机启动工况附壁油膜挥发过程的计算分析[J].燃烧科学与技术,2010,16(6):503~507.
Ma Zongzheng, Cheng Yong, Ji Shaobo. Study on wall-film evaporation of gasoline engine during start[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2010, 16(6):503~507. (in Chinese)