

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.03.005

怠速工况下氧化型催化转换器辅助 DPF 再生方法*

张德满¹ 汪正清¹ 马士虎¹ 李伟¹ 鲍晓峰² 李凯²

(1. 武汉第二船舶设计研究所, 武汉 430064; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 在柴油机颗粒物捕集器(DPF)前端安装氧化型催化转换器(DOC),通过在氧化型催化转换器前端喷入柴油来提高柴油机尾气温度,并通过降低柴油机尾气流量进一步提高尾气温度,可以实现柴油机颗粒物捕集器再生。整个再生系统由喷油器、氧化型催化转换器和柴油机颗粒物捕集器组成。在发动机台架上对该再生方法进行系统试验研究,包括再生时氧化型催化转换器的升温特性、喷油流量与温度升高幅度的关系、DPF再生过程和再生方法的燃油经济性及二次污染。结果表明怠速工况下DOC辅助DPF再生能顺利实现,再生过程消耗柴油120.5g,再生过程中排放的CO和HC分别为12.4g和1.1g。

关键词: 柴油机 颗粒物捕集器 再生 氧化型催化转换器

中图分类号: TK421+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)03-0024-04

DOC Assisted DPF Regeneration under Idle Condition

Zhang Deman¹ Wang Zhengqing¹ Ma Shihu¹ Li Wei¹ Bao Xiaofeng² Li Kai²

(1. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, China)

(2. Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Diesel oxidation catalyst was installed in front of diesel particulate filter. The engine exhaust temperature was improved by insufflating diesel oil into vent-pipe upriver diesel oxidation catalyst. The engine exhaust flow was reduced to further improve the exhaust gas temperature and achieve the regeneration of diesel particulate filter. The system was consisted of fuel injector, diesel oxidation catalyst and diesel particulate filters. Study on regeneration characteristics of this system on engine test-bed, including the temperature characteristics of the diesel oxidation catalyst in regeneration, the relationship of injection flow rate and temperature, DPF regeneration process and the fuel economy and secondary pollution of regeneration. The results demonstrates that DOC assisted DPF regeneration can be successfully achieved under idle condition, diesel oil consumption under regeneration process is 120.5 g, emissions of CO and HC under regeneration process are 12.4 g and 1.1 g, respectively.

Key words: Diesel engine Diesel particulate filter Regeneration Diesel oxidation catalyst

引言

颗粒物是柴油机尾气中主要污染物之一^[1-2]。柴油机颗粒物捕集器(Diesel particulate filter, DPF)是公认的降低柴油机颗粒物排放最有效、技术相对最成熟的柴油机尾气后处理装置^[3-4]。通过在柴油机排气管上加装DPF来降低颗粒物排放的方法,存在的关键技术是DPF的再生技术^[5]。针对DPF再

生技术,国内外研究者做了大量的工作:使用发动机低转速、大功率工况进行再生^[3];在DPF前安装助燃器辅助点燃DPF中颗粒物^[6-7];在DPF载体上涂催化剂或在柴油中添加催化剂,以降低颗粒物着火点^[8];在DPF前或DPF四周安装加热装置,通过加热发动机尾气或直接加热DPF中颗粒物实现DPF再生^[9];DPF连续再生技术等^[10]。但是由于自身缺点的限制,上述再生技术都未能在国内非道路柴油

收稿日期: 2012-07-22 修回日期: 2012-09-29

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2006AA060302)

作者简介: 张德满,工程师,博士,主要从事内燃机排放研究,E-mail: lin1985101@sina.com

机上得到广泛使用。针对上述情况并结合非道路柴油机的使用特点,本文提出怠速工况下柴油机氧化型催化转换器(Diesel oxidation catalyst, DOC)辅助DPF再生方法。

1 再生系统与设备

1.1 再生系统

再生系统如图1所示,控制系统测量DPF前端的排气背压,结合发动机工况,可以判断DPF的再生时机。当DPF需要再生时,控制系统开启油泵,喷油器前的油路中产生500 kPa的油压,此时控制系统监测DOC前端的尾气温度,当该温度达到DOC中催化剂的启燃温度时,喷油器将柴油喷入DOC前端一段400 mm长直管中,喷入的柴油与发动机尾气在直管中充分混合,并进入DOC。柴油在DOC中催化剂的催化作用下,被氧气氧化并放出大量热能,大幅提高DOC后端的尾气温度,使之达到PM的着火点温度,点燃颗粒物,实现DPF再生^[10]。

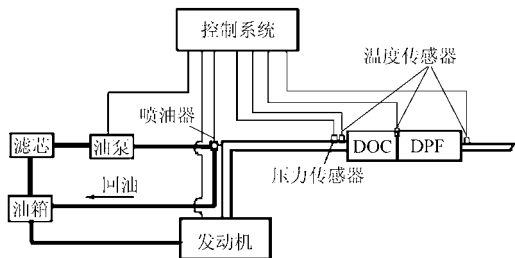


图1 DOC辅助DPF怠速再生系统原理图

Fig. 1 System principle diagram of DOC assisted DPF regeneration under idle condition

再生过程中,不考虑散热,理论上尾气温度升高幅度 ΔT_l 为

$$\Delta T_l = \frac{P_p q_c}{c_k P_w \rho_k} \quad (1)$$

式中 q_c ——柴油热值, 4×10^7 J/kg

c_k ——空气比热容, $1\ 003$ J/(kg·K)

ρ_k ——空气密度, 1.297 kg/m³

P_p ——喷油流量, g/min

P_w ——发动机尾气流量, L/min

由式(1)可知,其它参数不变时,理论升温幅度与尾气流量成反比。当需要的升温幅度不变时,发动机尾气流量越低则需要的喷油流量越小。发动机怠速工况时,尾气流量最低,本文选择该工况进行试验研究。由此可以设计怠速工况下DOC辅助DPF再生技术:DOC前尾气温度达到DOC的起燃温度之后,在DOC前端喷入少量柴油,柴油在DOC中氧化放出热能,然后将发动机设置到怠速状态,此时发动机排气流量迅速降低,而柴油氧化放出的热能不

变,DOC载体和DOC后尾气温度会急速上升。理论上可以将再生过程中柴油消耗量降到最低。

1.2 试验设备

试验用柴油机为一台达到欧III排放标准的直列4缸柴油机,其相关技术参数见表1;DOC为美国巴斯夫公司产品,载体材料为堇青石,体积为2.4 L,催化剂为Pt,催化剂涂载量为0.7 g/L,端面孔密度为400 cpsi;DPF为美国康宁公司产品,载体材料为堇青石,体积为3.3 L,端面孔密度为300 cpsi;喷油器为美国天奈克公司产品,喷油频率为15 Hz,喷油压力为0.5 MPa;控制系统为湘仪公司的FC2000测控系统;温度传感器为K型热电偶,测量误差小于0.75%;压力传感器为电阻应变式压力传感器,测量误差小于0.5%。

表1 柴油机参数

Tab. 1 Parameters of diesel engine

参数	数值
柴油机排量/L	2.7
柴油机压缩比	17.5
最大转速/r·min ⁻¹	3 600
最大扭矩/N·m	220
最大功率/kW	85

2 DOC特性研究

2.1 升温特性

当柴油机尾气背压达到再生压力时,喷油器开始在DOC前端喷入柴油对DPF进行再生。开始再生时选择发动机转速为2 000 r/min、扭矩为75 N·m。图2为整个再生过程中DOC前尾气温度、DOC后尾气温度以及喷油流量的变化曲线,待DOC前尾气温度达到260℃时,为充分提高DOC中催化剂的活性,喷油器先以9 g/min流量将柴油喷入DOC前端的直管道中,此时DOC载体温度以及DOC后端尾气温度会因为柴油氧化放热而升高。当DOC后端尾气温度升高到330℃时,将喷油器的喷油流量改为30 g/min,当DOC后端尾气温度达到450℃时,控制系统将发动机设置为怠速状态,发动机的排气流量与排气温度同时降低,前者有利于DOC后端尾气温度升高,后者会使DOC后端尾气温度降低,两者的共同作用使得DOC后端温度有大约35 s的稳定,之后DOC后端尾气温度急速升高到860℃,然后缓慢下降,直到DPF再生结束。

2.2 喷油流量与最高温度的关系

怠速再生过程中DOC后温度达到最高点时,发动机处于怠速状态,其尾气流量为一固定值,因此喷油流量决定DOC后尾气所能达到的最高温度。设计以下试验研究喷油流量与DOC后尾气温度所能

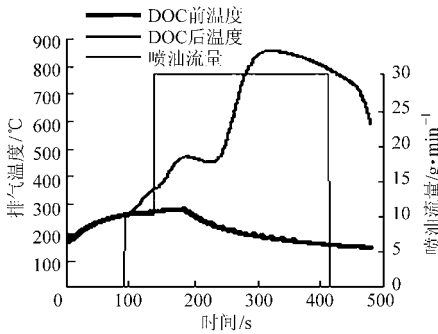


图2 喷油流量及DOC前后温度变化曲线

Fig.2 Curves of injection flow and temperature before and after DOC

达到的最高值之间的关系:采用2.1节所述的方法,当DOC后端尾气温度升高到330℃时,喷油器的喷油流量分别设置为10、15、20、25、30 g/min,测量DOC后尾气温度能达到的最大值。图3为试验结果,试验结果显示,喷油流量与DOC后尾气温度的最大值基本呈线性关系。

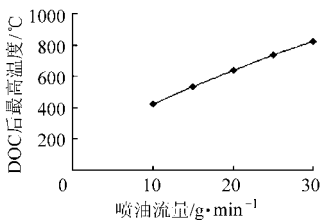


图3 DOC后最高温度随喷油流量的变化曲线

Fig.3 Highest temperature after DOC with different injection flows

3 DPF 再生特性研究

3.1 喷油流量的选择

DPF 再生过程中,流经 DOC 和 DPF 载体的尾气温度的最大值过高会直接降低 DOC 和 DPF 的使用寿命,同时也会使再生方法的燃油经济性变差。因此应该在保证 DPF 再生效果的情况下,尽量降低再生过程中流经 DOC 和 DPF 载体的尾气温度。采用2.1节所述的方法,选择适合的喷油流量使 DOC 后尾气温度的最大值分别为 660、680、700、720、740℃,测量并计算 DPF 在这些温度下再生时的再生效率。图4为试验结果,可见700℃为明显的转折点,低于此温度时,DPF 再生不彻底;高于此温度时,DPF 再生效率基本无变化。因此700℃是比较理想的温度,此时喷油流量为22 g/min。

3.2 DPF 再生过程

按照2.1节的步骤,选择22 g/min的喷油流速对满载的DPF进行再生。测得DPF前(DOC后)的尾气温度及DPF前尾气背压如图5所示。开始时DPF前背压随DPF前的尾气温度升高而升高,在

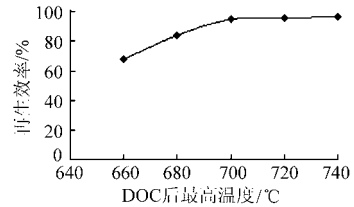


图4 再生效率随最高温度变化曲线

Fig.4 Regeneration efficiency curve with the maximum temperature

185 s时,控制系统将发动机设置为怠速状态,背压由18 kPa降到4 kPa左右。随着尾气温度进一步升高,背压上升到6 kPa左右,此时尾气温度达到600℃左右,DPF中的颗粒物开始燃烧,背压降低到4 kPa左右,之后DPF中颗粒物在高温尾气中继续燃烧,尾气背压缓慢降低,尾气温度降到650℃时停止喷油,完成再生。

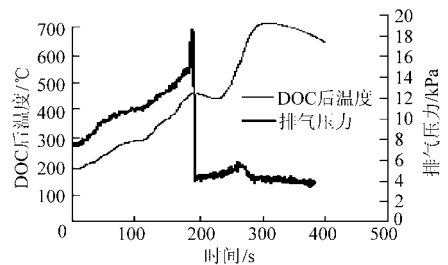


图5 DPF背压与DOC后温度变化曲线

Fig.5 Curves of DPF backpressure and temperature after DOC

再生过程中,喷油流量为9 g/min的喷油时间为50 s,喷油流量为22 g/min的喷油时间为300 s,整个再生过程为350 s。

4 再生方法的经济性和二次污染分析

由3.2节的试验结果,计算可得每次再生喷入DOC前端的柴油为120.5 g。测量3.2节所述再生过程中DPF后端尾气中CO和HC的排放量,结果如图6所示。由图可知,CO体积分数最高达到 3.19×10^{-3} ;HC体积分数最高为 6.72×10^{-4} 。再生过程中发动机尾气流量为980 L/min,计算得再生

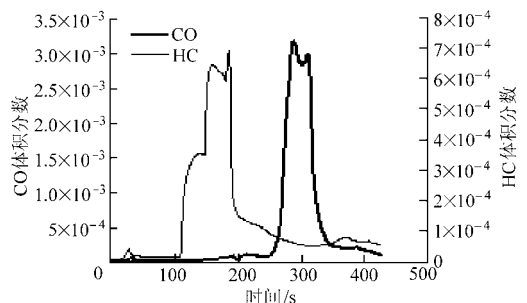


图6 怠速再生过程中的二次污染试验结果

Fig.6 Secondary pollution curves under idle regeneration process

过程中 CO 和 HC 排放质量分别为 12.4 g 和 1.1 g。本文与文献[11]中使用的柴油机为同一台柴油机,且再生前 DPF 背压、颗粒负载量以及再生后的背压一致,与文献[11]中的再生方法相比,本文所述再生方法的燃油经济性提高了 28%,CO 和 HC 的排放量分别降低了 20.0% 和 69.4%。

5 结论

(1) 怠速工况下 DOC 辅助 DPF 再生方法的再生过程需要发动机工况的转换进行配合,因此该再

生方法主要适用于非道路柴油机。

(2) 按照特定的步骤,在 DOC 前喷入少量柴油,待发动机尾气温度升高后,再使发动机突然回到怠速工况,可以实现 DPF 再生。

(3) 由于发动机怠速工况的尾气流量低,选择 22 g/min 的喷油流速就可以使 DOC 后端的尾气温度升高到 700℃,DPF 的再生效率达到 96%。

(4) 与已有的再生方法相比,怠速工况下 DOC 辅助 DPF 再生方法的燃油经济性更高,再生过程中污染物排放更少。

参 考 文 献

- 1 谭丕强,胡志远,陆家祥,等. 柴油机尾气微粒可溶有机组分的色谱质谱分析[J]. 机械工程学报,2006,42(5):75~80.
Tan Piqiang, Hu Zhiyuan, Lu Jiexiang, et al. Analysis of soluble organic fraction in particulate matter from a diesel engine by gas chromatography-mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2006,42(5):75~80. (in Chinese)
- 2 Walter Knecht. Diesel engine development in view of reduced emission standards[J]. Energy, 2008, 33(2):264~271.
- 3 谭丕强,胡志远,楼狄明,等. 微粒捕集器再生技术的研究动态和发展趋势[J]. 车用发动机,2005(5):6~9.
Tan Piqiang, Hu Zhiyuan, Lou Diming, et al. A review of regeneration technology for diesel particulate filters[J]. Vehicle Engine, 2005(5):6~9. (in Chinese)
- 4 谭丕强,胡志远,楼狄明,等. 柴油机捕集器结构参数对不同粒径微粒过滤特性的影响[J]. 机械工程学报,2008,44(2):175~181.
Tan Piqiang, Hu Zhiyuan, Lou Diming, et al. Effects of diesel particulate filter structural parameters on filtration performance of different size particles[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008,44(2):175~181. (in Chinese)
- 5 Argun Yetkin, Adam Kotrba, Tim Gardner. Experimental evaluation of DOC light-off behavior using secondary fuel injection[J]. SAE, Paper 2007-01-0084, 2007.
- 6 李新,资新运,姚广涛,等. 柴油机尾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.
Li Xin, Zi Xinyun, Yao Guangtao, et al. Investigation on regeneration of a burner in diesel particulate trap[J]. Transactions of CSICE,2008,26(6):538~542. (in Chinese)
- 7 伏军,龚金科,吴钢,等. 喷油助燃再生 DPF 过滤体入口废气温度条件研究[J]. 农业机械学报,2011,42(3):1~5.
Fu Jun, Gong Jinke, Wu Gang, et al. Inlet exhaust gas temperature condition for a burner-type DPF at the low and moderate load steady state[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(3):1~5. (in Chinese)
- 8 王天友,Eric Lim Khim Song,林漫群,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.
Wang Tianyou, Eric Lim Khim Song, Lin Manqun, et al. A research on the filtration and regeneration of fuel borne catalyst diesel particulate filter of diesel engine[J]. Transactions of CSICE,2007,25(6):527~531. (in Chinese)
- 9 杨德胜,高希彦,王宪成,等. 柴油机颗粒物陶瓷捕集器红外再生的试验研究[J]. 内燃机学报,2003,21(3):243~246.
Yang Desheng, Gao Xiyan, Wang Xiancheng, et al. An experiment research about infrared regeneration method for diesel exhaust particulate ceramic filter[J]. Transactions of CSICE, 2003, 21(3):243~246. (in Chinese)
- 10 Walker A P, Allansson R, Blakeman P G, et al. Optimizing the low temperature performance and regeneration efficiency of the continuously regenerating diesel particulate filter system[C]. SAE Paper 2002-01-0428, 2002.
- 11 张德满,李舜楼,李凯,等. DOC 辅助 DPF 再生方法研究[J]. 机械工程学报,2010,46(24):505~510.
Zhang Deman, Li Shunming, Li Kai, et al. Study on DOC auxiliary DPF regeneration method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(24):505~510. (in Chinese)