

柴油机颗粒捕集器快速积灰试验研究

董光雷¹, 刘海滨², 张俊龙¹, 吕志华¹, 贾德民¹

1. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061; 2. 潍柴动力扬州柴油机有限责任公司, 江苏 扬州 225000

摘要:为了研究柴油机灰分积累过多对颗粒捕集器(diesel particulate filter, DPF)压降的影响,采用提高机油耗、燃烧器快速积灰、模拟灰分、机油掺烧和进气管滴油 5 种不同快速积灰方式,测量 DPF 压降,与台架耐久试验及整车试验件对比分析。结果表明:提高机油耗的灰分分布和 DPF 压降与整车试验件最为近似,积灰时间缩短 50%;燃烧器快速积灰方式压降小幅度高于整车试验件;模拟灰分在低灰载量时压降接近整车试验件,在高灰分量时压降略低于整车试验件;机油掺烧和进气管滴油 2 种快速方式产生的灰分压降大幅度高于整车试验件。

关键词:柴油机;颗粒捕集器;快速积灰;灰分;压降

中图分类号:TK421.5

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)04-0029-06

引用格式:董光雷,刘海滨,张俊龙,等.柴油机颗粒捕集器快速积灰试验研究[J].内燃机与动力装置,2022,39(4):29-34.

DONG Guanglei, LIU Haibin, ZHANG Junlong, et al. Experimental study on rapid ash accumulation of diesel engine particulate filter[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022, 39(4): 29-34.

0 引言

柴油机排放物中的颗粒物(particulate matter, PM)是大气污染的重要来源,柴油机颗粒捕集器(diesel particulate filter, DPF)可有效降低 PM 排放,是满足国六排放标准的必备技术之一^[1]。DPF 载体材料主要是堇青石或碳化硅,通过将通道入口和出口分别错位封堵,使气流从进口流入后经载体壁流出,载体内部结构疏松多孔,通过扩散、拦截和惯性撞击等不同方式将 PM 捕集^[2],PM 过滤效率可达 90%,颗粒物数量(particle number, PN)过滤效率^[3]达到 99%。

PM 的成分主要是碳烟、可溶性有机物(soluble organic fraction, SOF)和灰分^[4],碳烟及 SOF 可氧化去除,但灰分不可氧化,最终残留在 DPF 载体中^[5-6]。灰分积累过多,影响 DPF 压降,严重影响发动机正常工作。为满足发动机和 DPF 正常工作,当 DPF 压降达到一定值后,应及时清除灰分,一般是固定的里程或者运行时长间隔。清灰之前,需获知当前 DPF 中灰分量,进行碳载量计算、控制优化主动再生过程,然后提醒用户进行清灰。某重型柴油发动机行驶 10⁶ km 以上,灰分积累过多,DPF 压降增大,估计碳载量偏高,主动再生过程提前^[5],严重影响发动机正常工作。发动机灰分的形成主要来自机油燃烧,但正常工作下机油消耗量较少,在发动机台架进行灰分相关模型标定时,耗费时间过长,需要探索一种灰分快速加载方式,且制作的积灰件适合 DPF 碳载量评估试验。

1 灰分产生机理

发动机机油添加剂是 DPF 灰分的主要来源^[6],发动机工作过程中,部分机油从活塞环组与缸套之间进入燃烧室,与柴油共同燃烧,发动机大部分灰分为机油添加剂中的 S、P、Ca、Mg、Zn 等燃烧后形成^[7],很

收稿日期:2022-03-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB3503205)

第一作者简介:董光雷(1987—),男,山东日照人,工程师,主要研究方向为发动机排放控制,E-mail:donggl@weichai.com.

小一部分来自发动机磨屑、柴油中无机添加剂、排气管路锈蚀和通过空滤的微粒。

灰分在 DPF 中的分布主要在通道壁面、载体孔道和通道末端,如图 1 所示。灰分形态受发动机机油消耗率、发动机使用工况、DPF 再生方式等因素影响,DPF 主动再生过程产生的高温可能使灰分烧结在通道表面,造成通道堵塞^[8],积碳和灰分无法进入 DPF,DPF 有效使用体积明显缩小,局部碳载量升高,且灰分层使气体流动阻力增大,载体散热能力减弱,DPF 内部可能产生局部高温^[9-11],严重时导致 DPF 损坏。

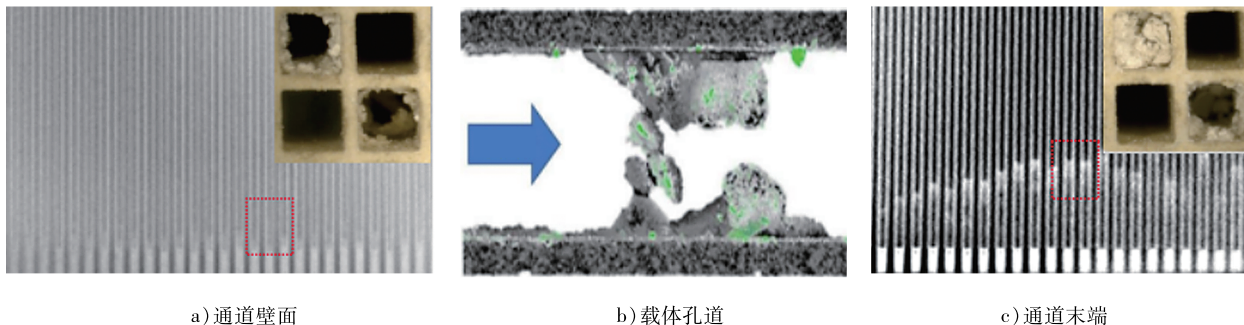


图 1 灰分在 DPF 中分布示意图

在捕集初期,灰分颗粒进入载体孔道后使 DPF 压降快速增加,并随着通道壁面灰分层厚度的增加而逐渐增大,在形成积碳前,DPF 压降增加与积灰量呈线性关系,积灰量较大时灰分在通道末端堵塞,导致压降快速增大。实际使用过程中,DPF 中灰分和积碳同时存在,当灰分较少时,灰分会在通道壁面形成一层灰分层,灰分层阻止积碳深床捕集过程发生,出现膜层效应^[12],如图 2 所示,此时 DPF 压降比无灰分时降低。通常 DPF 碳载量估计方法是基于压降和碳载量线性关系计算,但灰分的存在改变了压降特性,使估计碳载量高于实际碳载量,此时若按照估计碳载量判断并触发主动再生,将导致主动再生触发过早^[13],再生频繁,造成不必要的燃油消耗及高温安全隐患。

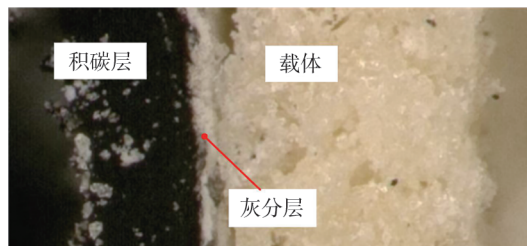


图 2 灰分沉积在壁面膜层效应示意图

2 试验方案

正常情况下灰分来自机油燃烧,快速积灰的目的是加速灰分积累速率。为了对比不同积灰方式对 DPF 压降的影响,制定了提高机油耗、燃烧器快速积灰、模拟灰分、机油掺烧、进气管滴油共 5 种 DPF 快速积灰试验方案,分别测量各种快速积灰方案的 DPF 压降,并与原发动机的台架耐久试验和整车真实测量数据进行对比。试验用发动机为某满足国六排放标准的增压中冷、直列 6 缸、四冲程、高压共轨柴油机,柴油机主要技术参数如表 1 所示。DPF 材料为堇青石,参数如表 2 所示。

表 1 试验用柴油机主要技术参数

排量/L	额定功率/kW	额定转速/(r·min ⁻¹)
10	276	1900

表 2 DPF 参数

直径/mm	长度/mm	孔密度/(个·cm ⁻²)	壁厚/mm
304.8	228.6	31	0.304 8

2.1 提高机油耗

发动机运行过程中,活塞组件的机油消耗占总机油消耗的 80% 左右^[14],提高机油耗试验通过降低油环弹力,减少油环在活塞下行过程中的刮油量,使进入燃烧室的机油增加。本试验中机油耗增加 50%,试验用机油型号为 CK-4 15W-40,机油添加剂的质量分数为 2%,积灰过程中发动机运行工况为额定转速且满油门,DPF 前温度高于 450 ℃。

2.2 燃烧器

燃烧器快速积灰设备方案如图3所示。柴油和压缩空气注入燃烧室内,火焰后温度不低于1200℃。调节稀释空气1路进入量,减少燃烧产生的碳烟,机油在高压空气作用下雾化后于火焰中心处喷入,机油雾化后粒径不大于80 μm,在高温下燃烧生成灰分;调节稀释空气2路进入量,使DPF前温度不高于550℃;调节机油喷入量实现灰分生成速率控制,每运行5 h后将DPF称重以确定积灰量。

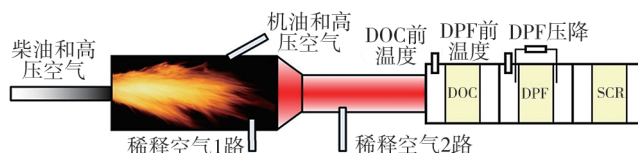


图3 燃烧器快速积灰设备示意图

2.3 模拟灰分

模拟灰分快速积灰设备方案如图4所示,模拟灰分成分为 Al_2O_3 ,颗粒直径为5~10 μm,在高压空气作用下,模拟灰分在颗粒气溶胶混合装置中均匀混合,负压吸气装置将混有模拟灰分颗粒的气溶胶气体吸出,气体经过DPF,模拟粉末颗粒被捕集,通过调节气溶胶中颗粒浓度及气体流量调节灰分加载速率,整个加载过程在冷态下完成。

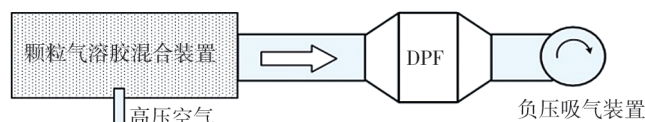


图4 模拟灰分快速积灰设备示意图

2.4 机油掺烧

机油掺烧方式快速积灰是将机油加注到燃油中搅拌均匀,通过燃油系统把机油喷入燃烧室,在额定转速满油门工况进行灰分加载。试验中掺混机油质量分数分别为0.5%和1.0%,由于机油黏度比柴油大,若掺混比过高,可能导致雾化效果差且容易堵塞喷油器。

2.5 进气管滴油

进气管滴油快速积灰示意如图5所示。机油从涡轮增压器压端前注入,由于压端进气为负压,利于机油吸入,机油在增压器叶轮快速旋转下加速破碎雾化,通过调节机油注入量调节灰分生成速率,积灰过程中发动机运行工况为额定转速且满油门。

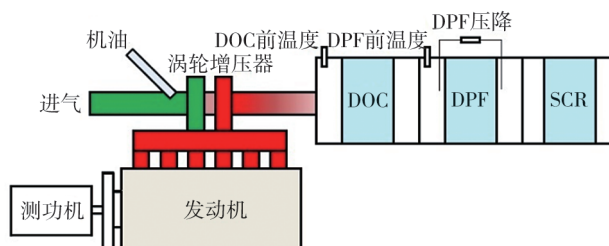


图5 机油注入进气管快速积灰示意图

2.6 台架耐久试验

发动机在台架进行1000 h耐久试验,DPF

在试验过程中捕集发动机正常机油消耗产生的灰分。试验工况为怠速、额定转速、最大扭矩最高转速、最大扭矩最低转速和最高空车转速之间循环运行,其中额定工况和最大扭矩工况满油门。

2.7 整车试验

整车试验使用与表1、2中同规格的发动机和DPF,用户在真实使用场景下驾驶车辆,行驶路况主要为国道。

3 试验结果及数据分析

DPF积灰后压降接近真实使用情况,才能进行积碳和灰分相关控制模型标定,提高模型精度,更好控制DPF工作。发动机为额定工况且满油门时,不同积灰方式下的DPF压降随灰载量的变化如图6所示。

由图6可知:1)整车试验的最小灰载量为5 g/L,对应压降为42 hPa;最大灰载量为15 g/L,对应压降为60 hPa;2)提高机油耗试验件DPF压降介于台架耐久试验件和整车试验件之间,灰载量为5 g/L时DPF压降为46 hPa左右,灰载量为15 g/L时DPF压降为62 hPa左右,且比整车试验件大2 hPa,DPF压降和灰载量成线性关系且与整车试验件近似,在纯灰分状态下,提高机油耗方式产生灰分的DPF压降较

接近整车试验件,且基本与台架耐久搭载件的DPF压降相同;提高机油耗快速积灰方式没有改变灰分产生原理^[15],但灰分积累速率比正常耐久发动机仅提高50%左右,若达到标定高灰分量,所需时间更长;3)燃烧器试验件灰载量为5 g/L时DPF压降为47 hPa,灰载量15 g/L时DPF压降为67 hPa,比整车试验件大7 hPa,压降整体稍高于整车试验件;4)模拟灰分试验件灰载量为5 g/L时DPF压降为43 hPa,灰载量为15 g/L时DPF压降为55 hPa,比整车试验件小5 hPa;5)机油掺烧和进气管滴油试验件产生的DPF压降均大幅高于整车试验件,主要原因是灰分在沉积过程中出现堵孔;6)台架耐久试验件灰载量为5 g/L时DPF压降为45 hPa左右,灰载量为15 g/L时DPF压降为63 hPa左右,且比整车试验件大3 hPa,DPF压降和灰载量成线性关系且与整车试验件几乎相同。

灰载量为15 g/L时,整车试验件、燃烧器试验件、模拟灰分试验件电子计算机断层扫描(computed tomography, CT)图像分别如图7~9所示。

由图7可知:整车试验件气流方向为从上向下,灰分未见在通道末端积聚。由图8可知:燃烧器试验件未见灰分在通道末端积聚,燃烧器试验件与整车试验件宏观灰分分布未见明显差异,但由于CT扫描精度较低,无法清晰展示壁面层灰分分布,且燃烧器产生的灰分粒径及形态与正常燃烧存在差异,可能导致燃烧器试验件压降与整车试验件存在差异。由图9可知:部分模拟灰分颗粒在通道末端沉积。由于灰分在壁面沉积产生的DPF压降大于末端沉积,所以模拟灰分在低灰载量时DPF压降接近整车试验件,但灰载量较高时DPF压降低于整车试验件。

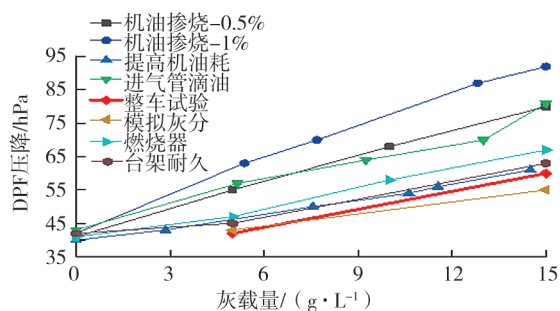


图6 不同积灰方式DPF压降对比

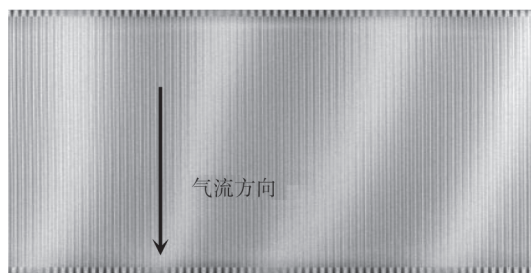


图7 整车试验件CT



图8 燃烧器试验件CT

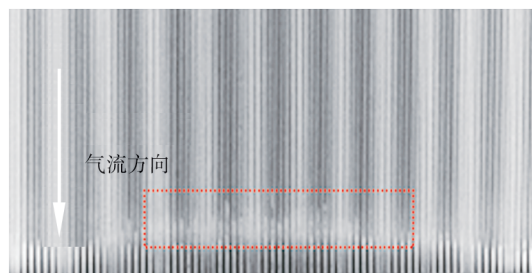
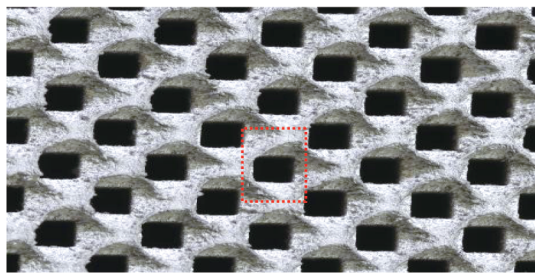
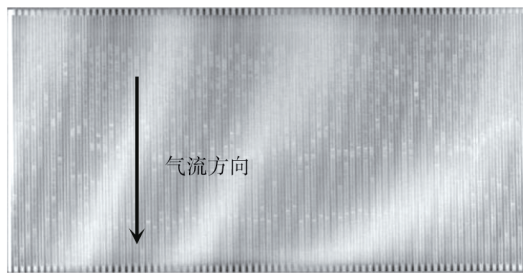


图9 模拟灰分试验件CT

机油掺烧比为0.5%,试验件灰载量分别为10、15 g/L时,积灰异常CT图像如图10所示。



a) 灰载量 10 g/L



b) 灰载量 15 g/L

图10 机油掺烧比为0.5%时试验件快速积灰异常CT图像

由图 10a)可知,灰载量为 10 g/L 时,试验件 CT 图像显示 DPF 前端面灰分大量在进气口沉积,灰分厚度约 2 mm;图 10b)可知,灰载量为 15 g/L 时,试验件 CT 图像显示灰分堵塞通道,在整个载体中出现不连续沉积。进气管滴油压降与机油掺烧比 0.5% 时近似,但压降和灰载量不再成线性关系,有一定波动,原因是机油进入增压器经中冷管路期间,部分机油被吸附在管壁,无法全部进入燃烧室。

不同积灰方式的 DPF 压降和积灰效率对比如表 3 所示,其中整车试验作为其他积灰方式对比基准,+数量越多代表指标越好。

表 3 不同方案的 DPF 压降和积灰效率对比

方案	积灰速率	压降效果	方案	积灰速率	压降效果
提高机油耗	+++	++++	进气管滴油	+++	++
燃烧器	++++	+++	台架耐久试验	++	++++
模拟灰分	+++++	+++	整车试验	+	+++++
机油掺烧	+++	+			

由表 3 可知:提高机油耗的积灰速率相比台架耐久试验有所提高,且 DPF 压降效果接近整车试验。燃烧器和模拟灰分 2 种积灰方式的积灰速率较快,但 DPF 压降效果比整车试验略有偏差。机油掺烧和进气管滴油 2 种积灰方式的 DPF 压降效果大幅度偏离整车试验。

4 结语

在积灰样件制作时间充足情况下,提高机油耗方式是快速制作积灰件的最佳方式;其次是模拟灰分和燃烧器 2 种积灰方式,机油掺烧和进气管滴油方式产生的灰分无法应用于台架模型标定。本研究为后期精确计算 DPF 积灰量、优化灰分模型、深入研究主动控制提供试验依据。

参考文献:

- [1] 帅石金,唐韬,赵彦光,等. 柴油车排放法规及后处理技术的现状与展望[J]. 汽车安全与节能学报,2012(3):200-217.
- [2] OHARA E, MIZUNO Y, MIYAIRI Y, et al. Filtration behavior of diesel particulate filters [C]//SAE World Congress & Exhibition 2007. Detroit, USA; SAE International, 2007.
- [3] KHAIR M. A review of diesel particulate filter technologies [C]//SAE World Congress & Exhibition 2003. Costa Mesa, USA: SAE International, 2003.
- [4] 王丹. 柴油机微粒捕集器及其再生技术研究[D]. 长春:吉林大学,2013.
- [5] 郎建平,刘倩,张治强,等. 灰分对柴油机微粒捕集器性能及再生的影响[J]. 内燃机与动力装置,2019,36(4):75-79.
- [6] 张俊,帅石金,肖建华. 灰分对柴油机颗粒捕集器性能影响研究综述[J]. 内燃机工程,2018,39(6):11-23.
- [7] SAPPOK A. The nature of lubricant derived ash related emissions and their impact on diesel after treatment system performance [D]. Massachusetts:Massachusetts Institute of Technology, 2009.
- [8] TRACY I P. Performance effects and causal mechanisms of mid-channel congestion in diesel particulate filters [D]. Massachusetts:Massachusetts Institute of Technology, 2021.
- [9] 吕誉,陈春林,陈贵升,等. 灰分对柴油机颗粒物捕集器性能的影响[J]. 内燃机学报,2020,38(3):249-256.
- [10] 吕誉,沈颖刚,李青,等. 灰分分布系数对柴油机性能的影响研究[J]. 内燃机工程,2021,42(1):15-21.
- [11] 张俊. 灰分对 DPF 性能影响机理及其相关应用问题研究[D]. 北京:清华大学,2019.
- [12] 杨帆. 灰分沉积及其对 DPF 性能影响机理研究[D]. 长春:吉林大学,2017.
- [13] 田强. 润滑油对车用柴油机颗粒排放特性影响的试验研究[D]. 上海:上海交通大学,2018.
- [14] 宋树峰,王国华,付强,等. 活塞参数对天然气发动机怠速工况机油消耗的影响[J]. 内燃机与动力装置,2021,38(4):47-53.
- [15] SONNTAG F, EILTS P. Evaluation of accelerated ash loading procedures for diesel particulate filters [C]//SAE World Congress & Exhibition 2016. Detroit, USA; SAE International, 2016.

Experimental study on rapid ash accumulation of diesel engine particulate filter

DONG Guanglei¹, LIU Haibin², ZHANG Junlong¹,
LÜ Zhihua¹, JIA Demin¹

1. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China;

2. Weichai Power Yangzhou Diesel Engine Co., Ltd., Yangzhou 225000, China

Abstract: In order to study the effect on the pressure drop of excessive accumulation of ash in diesel particulate filter (DPF), five different rapid ash deposition models, including increase oil consumption, rapid ash deposition through the burner, simulated ash, oil blending and oil dripping in the intake pipe, are used to measure the pressure drop characteristics, and compared with the bench durability test and the vehicle test. The results show that the ash distribution and DPF pressure drop for increasing oil consumption are the closest to those of the vehicle test, and the ash deposition time is shortened by 50%. The pressure drop of the burner rapid ash deposition method is slightly higher than that of the vehicle test. The pressure drop at lower load is close to that of the vehicle test, and slightly lower than that of the vehicle test when the ash content is high. The ash pressure drop produced by the two fast methods of oil blending and oil dripping from the intake pipe is much higher than that of the vehicle test. The research could provide valuable references for the optimal control of DPF.

Keywords: engine; diesel particulate filter; rapid ash deposition; ash; pressure drop

(责任编辑:郎伟锋)

.....
(上接第 28 页)

Influence of sealing cone angle on deformation and stress of sealing surface of needle valve couples

YANG Hongwei, YANG Xianfeng, CHEN Xiaohuan, GAO Yi, MA Liang,
KANG Yanhong, LI Huale, XU Dan

China North Engine Research Institute (Tianjin), Tianjin 300400, China

Abstract: This paper takes the injector needle valve couples as the research object, the finite element model of the needle valve and the needle valve couples are established by ANSYS analysis software. The deformation and equivalent stress of the needle valve and the needle valve couples, as well as the equivalent stress of the needle valve couples in the state of static contact and collision, are simulated and analyzed, and the effects of different sealing cone angles on the wear of the sealing surface of the injector are compared. The results show that the equivalent contact stress of the needle valve couples is the smallest when the sealing cone angle of the needle valve coupling is 60°, and the largest when the sealing cone angle is 120° which is most likely to cause the wear failure of the injector needle valve couples.

Keywords: needle valve couples; sealing cone angle; equivalent stress; deformation

(责任编辑:张啸虎)