第 15 卷　第 25 期　2015 年 9 月
1671—1815(2015)25-0044-04

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 15　No. 25　Sep. 2015
ⓒ　2015　Sci. Tech. Engrg.

动力技术

曲轴箱窜气对柴油机尾气微粒排放影响

崔凯程　曲大为*　刘　宇　范鲁艳
(吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室,长春 130025)

摘　要　针对一台 2.0 L 柴油机搭建了试验台架,通过控制曲轴箱窜气直接排入大气或是引入进气系统,采用尾气粒径谱仪对两种情况相应的尾气微粒数量浓度进行测量,分析比较试验结果来研究曲轴箱窜气对内燃机微粒排放的影响。结果表明:曲轴箱窜气引入进气主要影响柴油机尾气中核模态微粒及 100 nm 以下集聚态微粒的粒径数量浓度分布,主要表现在高峰峰值的增加和新峰值区域的形成。另一方面,曲轴箱窜气引入进气使柴油机各工况下尾气微粒总数量浓度增加,中、大窜气量工况微粒绝对数量增加明显,增幅分别为 44.2% 和 38.5%。

关键词　柴油机　曲轴箱窜气　微粒排放　数量浓度
中图法分类号　TK421.5;　　**文献标志码**　B

在柴油机正常工作过程中,气缸内一部分未燃烧的可燃混合气和燃烧废气会不可避免地经过活塞环端隙、活塞环和气缸间隙以及活塞环和环槽间隙等途径进入曲轴箱,并与曲轴箱内因飞溅润滑产生的机油油雾和高温下蒸发的机油蒸汽相混合,形成曲轴箱窜气[1]。如果将窜气未经处理直接排入大气,将引起严重的环境污染。所以现阶段排放法规已明确要求车用柴油机必须采用闭式曲轴箱强制通风系统,即将曲轴箱窜气经由进气系统引入燃烧室进行二次燃烧[2]。这一举措避免了窜气对大气的直接污染,但也引发了一系列新的问题,其中非常重要的一点是窜气中机油的燃烧会产生大量微粒,不仅增加了柴油机后处理系统的负担,而且其中的纳米级微粒会对人体造成严重伤害[3,4]。因此,在当前阶段单独对曲轴箱窜气污染物的统计已经意义不大,迫切需要有新的手段来评估窜气对柴油机微粒排放的影响。本文将针对一台 2.0 L 柴油机,借助台架试验的方法,通过控制曲轴箱窜气的流向来研究窜气直排大气和引入进气两种情况下柴油机尾气微粒数量浓度的变化,从而将窜气对微粒排放的影响进行量化分析。

1　试验设备与方法

1.1　试验设备

2015 年 5 月 27 日收到　　国家自然科学基金项目(51306069)资助
第一作者简介:崔凯程(1990—),男,硕士。研究方向:内燃机污染物排放控制。E-mail:465339866@qq.com。
* 通信作者简介:曲大为(1983—),讲师,博士。研究方向:汽车动力仿真与控制。E-mail:eewang404@163.com。

试验所用柴油机具体技术参数见表 1。

表 1　柴油机主要技术参数
Table 1　Specifications of the diesel engines

类型	2.0 L 柴油机
型式	直列四缸、增压中冷
燃油系统	电控高压共轨
缸径×行程	83.1 mm×92.0 mm
压缩比	16.7:1
标定功率/kW	110
标定功率转速/(r·min^{-1})	4 000
最大扭矩/(N·m)	310
最大扭矩转速/(r·min^{-1})	1 800~2 800

试验所用粒径测量仪器是美国 TSI 公司生产的 EEPS™(3090)尾气粒径谱仪,具体技术参数见表 2[5]。

表 2　尾气粒径谱仪主要技术参数
Table 2　Specifications of exhaust particle spectrometer

型号	EEPS™(3090)
粒径分辨率	16 通道/10 倍粒径
通道数量	32 通道
测量方式	多静电计同时测量
采样频率	10 Hz
粒径测量范围	5.6~560 nm
浓度测量范围	10^3~10^7

在对柴油机尾气进行采样测试时,为避免过高的微粒浓度损坏尾气粒径谱仪,需要将尾气进行稀释处理[6]。因此,本系列试验采用了二级稀释方法对尾气进行稀释,其中一级稀释采用分流稀释,二级稀释采用全流稀释。通过测量稀释前后 CO_2 的浓度,可以计算并控制系统的稀释比[7]。图 1 是尾气

微粒稀释及测控系统示意图。

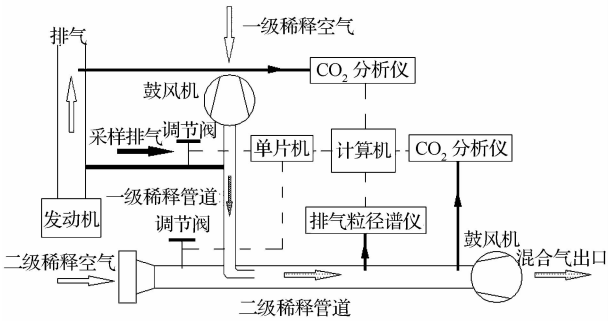

图 1　尾气微粒稀释及测控系统示意图

Fig. 1　Exhaust dilution and measurement & control system

1.2　试验方法

采用的试验工况是根据柴油机曲轴箱窜气量大小选定的。表 3 中列出了各个试验工况,分别对应柴油机的小、中、大的窜气量。

表 3　柴油机试验工况及窜气量

Table 3　Test conditions and volume flow rate of blow-by

工况编号	转速 /(r · min^{-1})	扭矩 /(N · m)	窜气量 /(L · min^{-1})
1	1 400	50	31.6
2	2 000	150	53.5
3	2 500	230	73.4

开始试验时首先调节柴油机到某一目标工况,将窜气从曲轴箱中引出排到室外,待柴油机运行稳定后,记录尾气粒径谱仪所显示的二级稀释管道中微粒粒径数量浓度分布情况,并根据实时的 CO_2 稀释比,计算出尾气中微粒数量浓度分布情况;然后在相同工况下,将窜气引入到进气道内,待柴油机稳定运行 3 min 之后,再次记录尾气粒径谱仪所显示微粒数量浓度分布以及实时的 CO_2 稀释比,计算出尾气中微粒数量浓度分布情况,并与之前所得结果进行比较。

2　试验结果与分析

2.1　曲轴箱窜气对尾气微粒粒径数量浓度分布影响

图 2 表示柴油机不同试验工况时,窜气直排大气以及窜气引入进气两种不同情况下微粒粒径数量浓度分布对比图。横坐标表示微粒直径 d_p,纵坐标表示每 cm^3 内微粒对数数量 $dN/d\lg d_p$。从图 2 中可以看出,窜气引入柴油机进气系统主要影响 5 ~ 100 nm 微粒数量浓度分布。窜气引入使得各工况下微粒粒径数量浓度的高峰峰值显著增加,并促使新峰值区域的形成,在某些工况下还使微粒浓度峰值区域发生偏移。

在柴油机 1 400 r · min^{-1}、50 N · m 小窜气量工况下,当窜气直排大气时尾气中微粒粒径数量浓度呈双峰分布,峰值区域分别为 6 ~ 10 nm 以及 30 ~ 50 nm;当窜气引入进气时,柴油机尾气中微粒数量浓度呈双峰分布,峰值区域分别为 15 ~ 20 nm 以及 25 ~ 45 nm,且双峰峰值与窜气直排大气情况相比分别增加了 174.6% 和 124.2%。从微粒增加的绝对数量来看,窜气引入进气后 10 ~ 50 nm 直径的核模态微粒数量显著增加。导致上述差异的原因是窜气中的机油成分影响了内燃机的燃烧并促进了微粒的生成。微粒生成主要经过成核、生长和氧化过程[8]。在窜气直排大气情况下,未完全燃烧的燃料氧化裂解形成了核模态微粒核心,缸内未燃 HC 吸附在其表面促进微粒生长,微粒之间又通过碰撞凝聚形成直径更大的集聚态微粒,最终使微粒浓度呈现双峰分布[9]。而在窜气引入进气的情况下,由于内燃机处于低转速低负荷工况,缸内温度较低,气流运动较弱,窜气中一部分机油油雾的不完全燃烧促进更多核模态微粒核心在缸内生成;另一部分未参与燃烧的机油油雾在排气过程中凝结吸附在已有微粒表面促使其进一步生长。所以小窜气量工况下,窜气引入进气后微粒数量双峰向 15 ~ 45 nm 之间聚拢。

在柴油机 2 000 r · min^{-1}、150 N · m 中窜气量工况下,窜气直排大气时柴油机尾气中微粒粒径数量浓度呈单峰分布,峰值区域为 25 ~ 60 nm;窜气引入进气时柴油机尾气中微粒数量浓度呈双峰分布,峰值区域分别为 9 ~ 12 nm 以及 50 ~ 100 nm,高峰峰值增大 12.5% 且向大粒径方向移动。从微粒增加的绝对数量来看,窜气引入进气后 9 ~ 12 nm 核模态微粒和 50 ~ 120 nm 直径的集聚态微粒数量明显增加。在窜气直排大气的情况下,随着柴油机转速和负荷增大,缸内温度升高,由于不完全燃烧生成的直径较小的核模态微粒核心被迅速氧化,较高的尾气温度也抑制了未燃 HC 的凝结过程,所以小粒径核模态微粒相对数量减小,微粒数量浓度成单峰分布。而对于窜气引入进气的情况,柴油机转速和负荷的增大使得机油温度升高,曲轴箱压力增大,窜气量增大,随窜气进入燃烧室的机油油雾增多,核模态微粒成核速度要大于氧化速度,促使小粒径核模态微粒数量增多;未燃的机油又会吸附和凝聚在微粒表面促进微粒生长,使集聚态微粒数量增加,且峰值向大粒径方向移动。所以在中窜气量工况下,窜气引入进气使尾气中核模态和集聚态微粒数量都有明

显增加。

在柴油机 2 500 r · min^{-1}、230 N · m 大窜气量工况下，窜气直排大气时尾气中粒径微粒数量浓度呈双峰分布，峰值区域分别为 8 ~ 12 nm 以及 25 ~ 50 nm；窜气引入进气时柴油机尾气中微粒数量浓度呈双峰分布，峰值区域分别为 8 ~ 15 nm 以及 30 ~ 60 nm，15 ~ 50 nm 区间内的核模态微粒数量明显增加，高峰峰值较窜气直排大气情况增大了 47.0%。随着柴油机转速和负荷进一步升高，虽然缸内温度的升高有利于核模态微粒核心氧化，但由于燃烧时间缩短，燃烧不均匀性加剧，小粒径核模态微粒成核速度要高于氧化速度，所以当窜气直排大气时出现了小粒径核模态峰值区域。而在窜气引入进气的情况下，机油温度和窜气量的升高使得更多的机油油雾进入了燃烧室，使原本就不均匀的燃烧进一步恶化，缸内的高温和较强的气流运动增加了微粒间碰撞的频率，促进了小粒径核模态微粒的聚合又无法形成稳定的大粒径集聚态微粒。所以相对于窜气直排大气的情况，窜气引入进气时 15 ~ 50 nm 核模态微粒增加明显，而小于 15 nm 核模态微粒数量以及集聚态微粒数量变化不大。

2.2 曲轴箱窜气对尾气微粒总数量浓度影响

图 3 表示各试验工况下，曲轴箱窜气直排大气或引入进气时尾气微粒总数量浓度对比图。横坐标表示不同试验工况，纵坐标表示每 cm^3 内微粒对数数量 $dN/d\lg d_p$。从试验工况角度分析，无论窜气是否引入进气，中、大窜气量工况与小窜气量工况相比，尾气微粒总数量浓度要高出一个数量级。这是由于随着柴油机负荷的升高，每循环向缸内的喷油量增加，空燃比减小，且缸内温度升高，形成了高温缺氧的环境条件，更有利于微粒成核和生长过程，微粒总数量急剧增加。从窜气流向角度分析，当曲轴箱窜气引入进气时不同试验工况下总微粒数量浓度均有增加。对于 1 400 r · min^{-1}、50 N · m 小窜气工况，窜气引入进气时尾气微粒绝对数量浓度虽然增加有限，但相对数量浓度增幅达到 107.1%；对于 2 000 r · min^{-1}、150 N · m 中窜气量工况以及 2 500 r · min^{-1}、230 N · m 大窜气量工况，窜气引入进气时微粒总数量浓度增幅分别为 44.2% 和 38.5%，较窜气直排大气的情况有明显提高。可见，由于曲轴箱窜气含有机油成分，将其引入进气后使柴油机缸内燃烧环境恶化，促使各工况下尾气微粒总数量浓度升高。

3 结论

（1）曲轴箱窜气引入进气会影响柴油机尾气中微粒粒径数量浓度的分布，主要表现在高峰峰值的增加和新峰值区域的形成。窜气的引入主要影响核模态微粒及 100 nm 以下集聚态微粒的数量浓度分布，小、中、大窜气量工况高峰峰值增幅分别为 124.2%、12.5%、47.0%，中窜气量工况出现新的核模态微粒峰值区域。

（2）曲轴箱窜气引入进气使柴油机各工况下尾气微粒总数量浓度增加。小窜气量工况微粒相对数量的增幅较大，幅值为 107.1%，中、大窜气量工况微粒绝对数量的增加更为明显，增幅分别为 44.2% 和 38.5%。

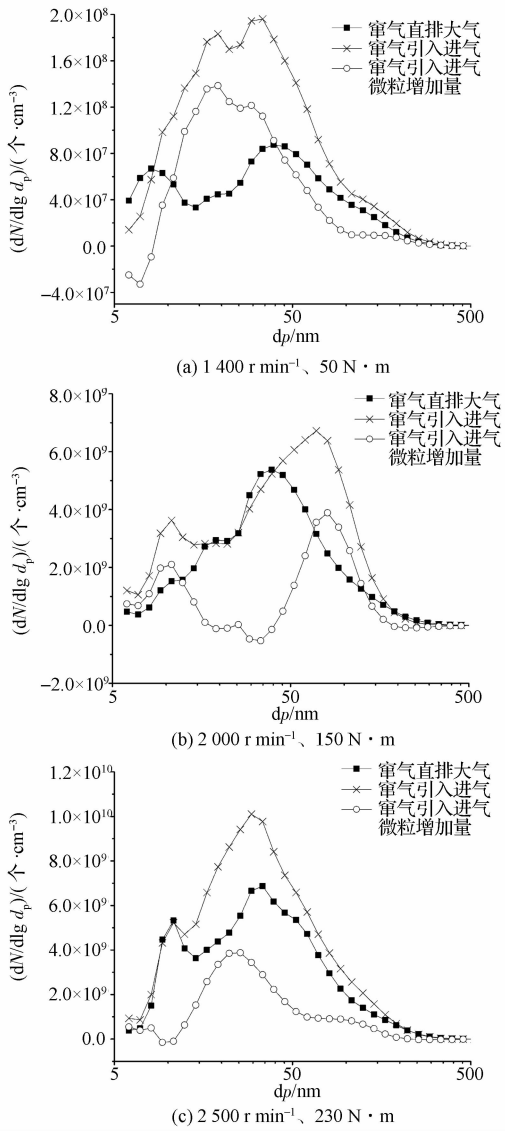

图 2 柴油机不同工况下改变窜气流向微粒粒径数量浓度对比图

Fig. 2 Variation of particle number concentration with different blow-by flow direction in several operating conditions for diesel engine

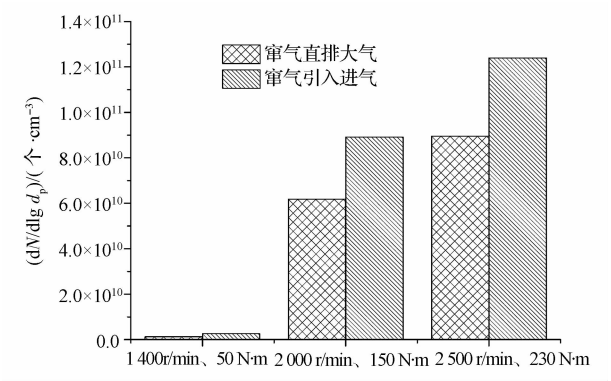

图 3　各工况微粒总数量浓度对比图

Fig. 3　Comparison of particle total number concentration in all conditions

参　考　文　献

1　Kolhe V, Sharma M, Veeramani K . Development of advanced oil separator to give uniform oil separation efficiency across engine speed and load conditions. SAE, 2012-01-0179,2012

2　王　骏. 曲轴箱强制通风系统构成和发展趋势. 柴油机设计与制造, 2012; 18(2):1—8
Wang Jun. Structure ofblow-by ventilation system and its development trend. Design & Manufacture of Diesel Engine, 2012; 18(2):1—8

3　Kokko J, Rantanen L, Pentikäinen J. Reduced particulate emissions with reformulated gasoline. SAE, 2000-01-2017, 2000

4　Gildemeister A E, Hopke P K, Kim E. Sources of fine urban particulate matter in Ddetroit, MI. Chemosphere, 2007; 69 (7): 1064—1074

5　赖春杰, 孙万臣, 李国良. BTL/柴油混合燃料对柴油机瞬态工况微粒粒度分布的影响. 内燃机工程, 2012;33(6):46—57
Lai Chunjie, Sun Wanchen, Li Guoliang. Effect of BTL-Diesel blended fuel on emitted particle size distribution common-rail diesel engine under transient conditions. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2012; 33(6):46—57

6　王晓燕, 李　芳, 葛蕴珊. 甲醇柴油与生物柴油微粒排放粒径分布特性. 农业机械学报, 2009;40(8):7—12
Wang Xiaoyan, Li Fang, Ge Yunshan. Particle size distribution of particulate matter emission from the diesel engine burning methanol-diesel fuel and biodiesel. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009; 40(8):7—12

7　李新令, 黄　震, 王嘉松. 柴油机尾气颗粒浓度和粒径分布特征试验研究. 内燃机学报, 2007; 25(2):113—117
Li Xinling, Huang Zhen, Wang Jiasong. Investigation on concentrations and size distribution characteristic of particles from diesel engine. Transactions of CSICE, 2007; 25(2):113—117

8　Rabute R, Tian T. Challenges involved in piston top ring designs for modern SI engines. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2001;123(2):448—459

9　Amin V, Kitae Y, Wagner U. Investigations of the formation and oxidation of soot inside a direct injection spark ignition engine using advanced laser-techniques. SAE, 2010-01-0352, 2010

Effect of Crankcase Blow-by on Particle Emission of Diesel Engine

CUI Kai-cheng , QU Da-wei, LIU Yu, FAN Lu-yan

(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, P. R. China)

[**Abstract**]　By controlling the flow of crankcase blow-by to atmosphere or intake system, particle number concentration distribution was measured in the situations above in a 2.0 L diesel engine, to investigate the effect of crankcase blow-by on particle emission in different blow-by leakage conditions. The results show that taking crankcase blow-by into the intake system of diesel engine mainly affects the concentration distribution of nuclei model particle and accumulation mode particle below 100 nm. The maximum value of partical number concentration increases and new concentration peak area is developed. In addition, taking crankcase blow-by into the intake system leads to the increase in the total number concentration of diesel engine exhaust particle in all conditions. The increases of total number concentration in the conditions of middle and high blow-by leakage reach up to 44.2% and 38.5% respectively.

[**Key words**]　diesel engine　　blow-by　　particle emission　　number concentration