

连续再生颗粒捕集器对柴油机颗粒排放的影响

楼狄明¹, 温 雅¹, 谭丕强¹, 纪丽伟²

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 上海柴油机股份有限公司, 上海 200438)

摘要: 以某重型柴油机为原机, 研究氧化催化转化器(DOC)与催化型颗粒捕集器(CDPF)耦合而成的连续再生颗粒捕集器(CR-DPF)对柴油机颗粒排放规律的影响。研究表明, CR-DPF 的安装导致排气温度升高; 原机测点颗粒数量浓度呈双峰对数正态分布, CR-DPF 的前测点为三峰对数正态分布, 后测点则呈多峰对数正态分布; 前测点粒径小于 191nm 颗粒数量浓度及核态颗粒数量浓度分数均高于原机测点; CR-DPF 除对 7~15 nm 粒径颗粒的捕集效率相对较低, 对其他粒径颗粒具有显著的降低作用; 对聚集态颗粒的捕集效果优于核态颗粒, 导致后测点核态颗粒数量浓度分数高于前测点。

关键词: 连续再生颗粒捕集器; 颗粒数量浓度; 粒径分布; 捕集效率

中图分类号: TK427

文献标志码: A

Effects of Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter on Characteristics of Particle Size Distribution from a Diesel Engine

LOU Diming¹, WEN Ya¹, TAN Piqiang¹, JI Liwei²

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Diesel Engine Co. Ltd., Shanghai 200438, China)

Abstract: A heavy diesel engine was tested on the engine test bench to analyze the two different particulate emissions results of the original engine and the engine with continuously regenerating Diesel Particulate Filter CR-DPF equipment. Results show that the application of CR-DPF increases the exhaust temperature. The particle number size distribution of original engine clearly shows a bimodal and lognormal. The particle number size distribution upstream of the CR-DPF shows trimodal and turns into multimodal across the CR-DPF. The test engine with CR-DPF generates more particles in diameter below 191nm than the original one. The nuclei mode particles upstream of CR-DPF give a larger fraction than the

original one. Particulate emission decreases dramatically across the CR-DPF except the particles in diameter ranging from 7nm to 15nm. The reduction ratio of accumulation mode particles is higher than that of nuclei mode particles. This leads to an increase in the proportion of nuclei mode particles downstream.

Key words: continuously regenerating diesel particulate filter; particle number concentration; size distribution; reduction ratio

大量研究表明, 柴油机排放的颗粒存在着不同粒径, 分布集中在 10 μ m 以下^[1-2]。这些颗粒能够穿透肺泡参与血气交换, 其本身含有有毒重金属元素、多环芳烃类化合物, 可被血液和人体组织吸收, 对人体健康造成危害, 同时也对大气环境造成危害^[3]。因此, 如何降低发动机细颗粒排放对环境和人体健康都有很重要的意义。但是, 无论电控高压燃油喷射系统还是清洁燃料技术对柴油机颗粒排放的降低能力都是有限的, 且在减小颗粒质量排放的同时常伴有粒径小于 100nm 颗粒数量的增加^[4-5]。因此除了对颗粒质量排放的限制外, 欧 V 及欧 VI 型式认证和生产一致性排放限值还引入了对颗粒数量排放的限制。因此为了满足越来越严格的排放法规必须要加装后处理装置。

颗粒捕集器(DPF)是公认的能大幅降低柴油机颗粒排放且技术成熟的后处理装置^[4-7]。本文所使用的连续再生颗粒捕集器(CR-DPF)^[8]由氧化催化转化器(DOC)与催化型颗粒捕集器(CDPF)耦合而成。DOC 氧化 NO 得到的 NO₂ 比 O₂ 氧化性更强, 更易于碳粒的低温燃烧以实现 CDPF 的被动再生^[9]。CDPF 载体入口孔道壁面分布的催化剂进一步降低碳粒燃烧所需的温度, 试验表明只需在 200~300 °C

收稿日期: 2013-09-29

基金项目: 上海市科技人才计划(13XD1403800)

第一作者: 楼狄明(1863—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为汽车发动机替代燃料应用技术、发动机 CAD/CAE 技术和发动机排放控制后处理技术。E-mail: loudiming@tongji.edu.cn

的温度即可实现微粒捕集器的再生^[10],保证了 CR-DPF 工作的可靠性. 此外 CDPF 前的 DOC 能将 HC、CO 等有害物质氧化成 CO_2 和 H_2O , 还能同时脱去颗粒中可溶性有机成分(SOF)^[11-12]. 因此 CR-DPF 被认为是一种结构简单且具有良好效果的后处理装置^[9-12].

研究 CR-DPF 对颗粒的捕集特性非常重要,特别是对不同粒径颗粒的捕集效率. 本文对某高压共轨柴油机在不同工况下原机测点及 CR-DPF 前、后测点的排气温度、颗粒数量浓度分布特征、对不同粒径颗粒的捕集效率、总颗粒及核态和聚集态颗粒数量浓度以及核态颗粒数量浓度分数进行了试验研究.

1 试验设计

图 1 所示为发动机台架试验装置、发动机废气排放颗粒粒径谱仪(engine exhaust particle sizer, EEPS)颗粒物采集系统的布置以及 EEPS 采样点位置. 台架系统由李斯特内燃机及测试设备公司(AVL List GmbH)的 PUMA 全自动试验控制台、电力测功机以及台架辅助设备构成. 该系统为电力测功机与发动机直接耦合,可根据需要设定发动机不同的转速和转矩,使发动机在所需要的工况下运转,并实

时记录相关数据.

颗粒排放测试仪采用美国 TSI 公司的 3090 型 EEPS. 该仪器检测粒径范围为 5.6 nm 至 560 nm. 瞬态响应优越,在 0.1 s 内即可获得一个完整的颗粒粒径分布图谱,并同步输出 32 个粒径通道的颗粒数量浓度.

需对进入测试设备前的发动机排气颗粒进行稀释,采用二级稀释,总稀释体积比为 250:1,稀释温度为 80 °C.

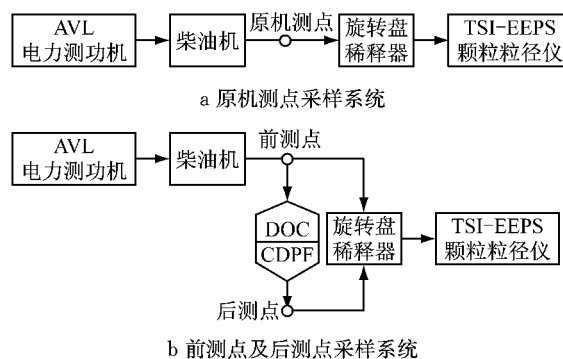


图 1 发动机台架试验系统

Fig.1 Engine test bench system

1.1 后处理装置

试验采用后处理装置是由 DOC 与 CDPF 两部分耦合而成的 CR-DPF,主要技术参数如表 1 所示.

表 1 后处理装置技术参数

Tab.1 Specifications of the after-treatments

后处理装置	载体长度/mm	载体直径/mm	载体孔密度/目	载体主要材料	涂层成分	催化剂主要成分
CDPF	304.8	285.8	200	堇青石	Al_2O_3	贵金属
DOC	295.0	90.0	300	FeCrAl	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	贵金属

CDPF 为壁流式蜂窝陶瓷载体结构,其两相邻孔道中,一个孔道入口被堵住,另一个孔道出口被堵住,迫使排气穿过壁面,颗粒被捕集在孔道的壁面上. 在 DOC 载体孔道及 CDPF 载体入口孔道壁面均分布有贵金属催化剂.

1.2 试验样机及试验方案

试验样机为某 8.8 L 排量、电控高压共轨、废气涡轮增压中冷车用柴油机,其主要技术参数如表 2 所示.

表 2 试验样机主要技术参数

Tab.2 Specifications of the test engine

排量/L	汽缸	缸径/mm	行程/mm	压缩比	最大扭矩/(N·m)	最大扭矩时转速/(r·min ⁻¹)
8.82	直列 6 缸,每缸 4 气门	114	144	18:1	1 000	1 400

试验采用满足中华人民共和国国家环境保护标准 GWKB1.2—2011 车用柴油有害物质控制标准(第 5 阶段)要求的纯柴油. 试验工况为该发动机外特性工况,如表 3 所示,其最大扭矩下转速为 1 400 r·min⁻¹ 的 4 个不同负荷点如表 4 所示.

2 试验结果与分析

2.1 排气温度和排气背压

由表 3 可知,原机测点及 CR-DPF 前测点的排

气温度在 $800 \sim 1\,200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速范围内均随转速升高而上升;当转速大于 $1\,200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,它随转速升高而下降. 安装 CR-DPF 后缸内废气增加,使 CR-DPF 前测点的排气温度略高于原机测点的排气温度. $800 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时温升相对较低,约为 5°C ; $1\,000 \sim 2\,200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时温升为 $15 \sim 28^\circ\text{C}$. 最大转矩下转速为 $1\,400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时原机测点及 CR-DPF 前测点排气温度随负荷升高而上升. $1\,400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下负荷特性时 CR-DPF 前测点相对于原机测点的温升小于外特性,约为 $2 \sim 12^\circ\text{C}$. 排气温度的升高会影响排气中氧化成分对颗粒的氧化作用、催化剂的活性以及生成核态颗粒的均质形核作用等,从而影响颗粒数量浓度粒径分布. 由表 4 可见,原机测点及 CR-DPF 前测点的排气背压随转速和负荷的升高而均上升. CR-DPF 产生的流动阻力使发动机的排气背压高于原机,其升幅在 $0 \sim 6 \text{ kPa}$ 范围内,且升幅随转速及负荷的升高而上升. 排气背压升高会影响发动机正常的换气过程,部分废气在排气背压的作用下回流到气缸内,链式反应速率下降,燃烧恶化.

表 3 外特性时排气温度及排气背压

Tab.3 Exhaust temperature and pressure with external characteristic

转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	平均有效压力/ MPa	原机测点		CR-DPF 前测点	
		排气温度/ $^\circ\text{C}$	排气背压/ kPa	排气温度/ $^\circ\text{C}$	排气背压/ kPa
800	1.96	465	6.4	470	6.4
1 000	2.16	467	7.4	482	7.7
1 200	2.32	461	9.8	483	10.7
1 400	2.40	450	13.0	472	14.6
1 600	2.37	438	16.5	457	19.4
1 800	2.26	431	20.2	450	24.2
2 000	2.09	426	23.7	446	28.5
2 200	1.94	411	25.6	439	31.6

表 4 最大转矩下转速 $1\,400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时排气温度及排气背压Tab.4 Exhaust temperature and pressure at the maximum torque speed $1\,400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$

平均有效压力/ MPa	原机测点		CR-DPF 前测点	
	排气温度/ $^\circ\text{C}$	排气背压/ kPa	排气温度/ $^\circ\text{C}$	排气背压/ kPa
0.24	207	6.8	208	7.3
0.61	251	7.6	277	8.1
1.22	325	8.9	352	10.4
1.83	351	10.9	416	13.1

2.2 CR-DPF 对颗粒粒径数量浓度的影响

2.2.1 外特性下颗粒数量浓度粒径分布

图 2 中 U_0 为原机测点颗粒数量浓度, U_s 、 D_s 分别为 CR-DPF 前、后测点颗粒数量浓度, R 为捕集效率.

$$R = \frac{U_s - D_s}{U_s} \quad (1)$$

由图 2 可见,外特性时 U_0 呈核态和聚集态双峰对数正态分布,峰值对应的粒径分别为 20 nm 和 60 nm 左右,数量级为 $10^7 \sim 10^8$. U_s 呈三峰对数正态分布,峰值粒径分别为 10 nm , 17 nm 和 60 nm 左右,数量级与原机测点相同. 核态颗粒数量浓度在 10 nm 左右出现一个新峰值是由于排气温度高于原机测点,不利于气态碳氢在微粒表面的凝结,导致此粒径附近的核态颗粒数量浓度增加. 外特性时各转速下 U_s 粒径小于 191 nm 的颗粒数量浓度均高于 U_0 . 这是由于安装 CR-DPF 后发动机排气背压增大,废气不能顺利排出,缸内空燃比下降,燃烧恶化导致颗粒增多. 但是粒径在 191 nm 以上的聚集态颗粒数量浓度略低于 U_0 . 这是由于前测点排气温度高于原机测点,有利于排气中氧化成分对大粒径颗粒的氧化作用,使颗粒向小粒径方向移动.

D_s 呈多峰对数正态分布,在粒径 10 , 20 和 60 nm 附近出现颗粒数量浓度峰值,数量级为 $10^5 \sim 10^6$. 与 U_s 相比, D_s 显著下降. 各转速下 CR-DPF 对粒径大于 15 nm 颗粒的 R 始终保持在较高水平,在 $98.2\% \sim 99.9\%$ 范围内波动. 但是对于 $7 \sim 15 \text{ nm}$ 颗粒 R 相对较低,原因在于 DOC 及 CDPF 涂层表面的催化剂将 SO_2 氧化,促进硫酸盐的生成,而导致小粒径的颗粒增多. 从图 3 还可以发现,在不同转速下,粒径小于 7 nm 颗粒的 R 均高于 96.1% ,这是由于颗粒粒径很小,CDPF 对颗粒捕集的扩散机理以及催化剂对 SOF 的氧化作用占主导作用.

由图 3a 可见,总颗粒数量浓度是核态和聚集态颗粒综合作用的结果. 对于总颗粒, U_s 、 D_s 均随转速升高而上升, D_s 与 U_s 相比显著下降. R 随转速升高而上升,在各转速下 R 分别为 97.7% , 98.1% , 98.8% , 99.2% , 99.2% , 99.3% , 99.2% , 99.3% . 这是 CDPF 对颗粒捕集的拦截机理、惯性碰撞机理、扩散机理等以及 DOC 和 CDPF 孔道壁面的催化剂综合作用的结果.

通常认为核态颗粒是由燃烧室内形成的一次碳粒以及硫酸盐或 HC 等均质成核形成的二次颗粒. 由图 3b 可见,对于核态颗粒 U_s 、 D_s 均随转速升高呈波动上升的趋势, D_s 与 U_s 相比显著下降. R 随转速变化不大,在 $800 \sim 2\,200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 各转速下捕集效率分别为 97.9% , 98.1% , 98.6% , 98.8% , 98.7% , 98.7% , 98.7% , 98.7% . 这是 CDPF 对颗粒捕集的扩散机理以及催化剂对于 SOF 的氧化作用的结果.

聚集态颗粒数主要是由柴油或润滑油经不完全

燃烧而产生的一次碳粒聚积成团并凝结部分 HC 和硫酸盐等半挥发组分形成的. 由图 3c 可见,对于聚集态颗粒 U_s 随转速升高而上升. 这是因为转速增加会使每循环空燃比下降,每循环时间缩短生成的一次碳粒来不及氧化就被排出发动机. 而 D_s 随转速没

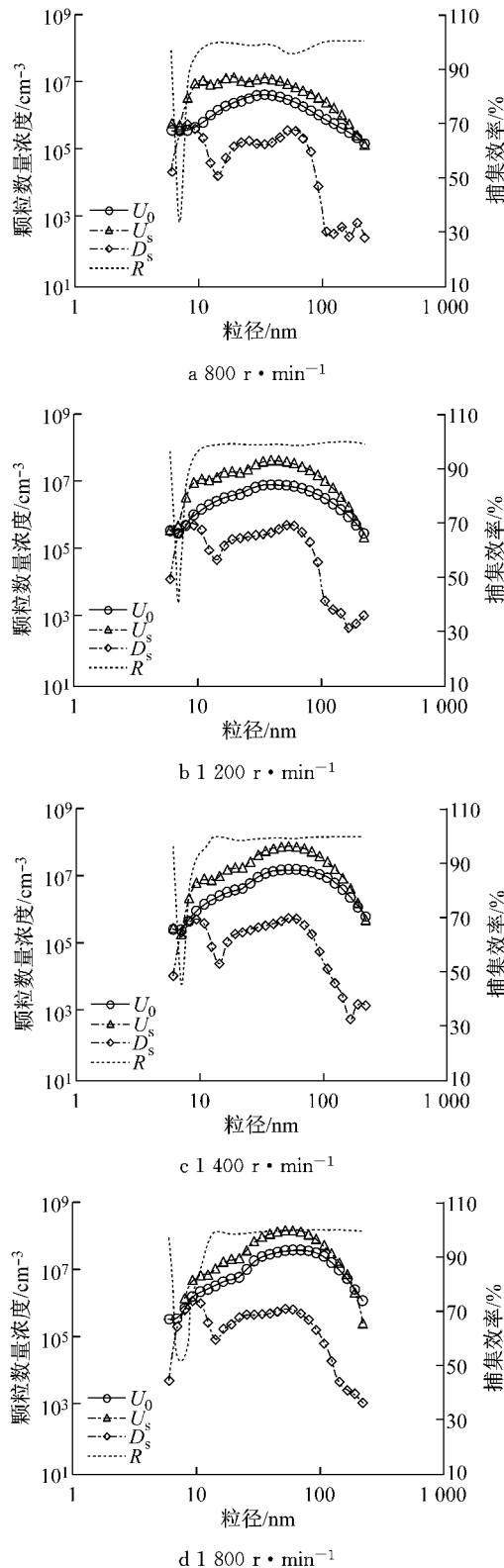


图 2 外特性时颗粒数量浓度及捕集效率与粒径分布的关系
Fig.2 Particle number and reduction ratio weighted size distribution with external characteristic

有明显的变化趋势,与 U_s 相比显著下降. R 随转速升高而上升,在各转速下 R 分别为 97.1%, 98.1%, 99.0%, 99.5%, 99.6%, 99.7%, 99.6%, 99.8%.

由以上数据可见,外特性各转速下 CR-DPF 对聚集态颗粒的捕集效率均高于核态颗粒. 一方面是由于催化剂的作用:DOC 及 CDPF 孔道表面的催化剂将聚集态颗粒表面的 SOF 氧化,使颗粒向小粒径方向移动,促进 SO_2 氧化,增加了硫酸盐的生成量,同时促进排气中氧化成分对碳颗粒的氧化作用,不仅使长碳链断开成短碳链,还使排气中碳核心数量浓度下降,其吸附挥发性组分的吸附能力下降,导致颗粒均质形核作用增强. 另一方面,虽然聚集态颗粒粒径大于核态颗粒,导致 CDPF 对其捕集的扩散机理作用下降,但是同时惯性碰撞和拦截机理作用增强.

由表 5 可见,原机测点和前测点核态颗粒数量浓度分数均随转速升高而下降. 原因在于高转速下碳颗粒的浓度较高,碳烟比表面积增加,对硫酸和 HC 等挥发及半挥发物质的吸附能力上升,因此排气中核态颗粒数量逐渐下降. 前测点核态颗粒数量浓度分数高于原机,这是因为安装 CR-DPF 后排气温度高于原机,有利于排气中的氧化成分对颗粒的氧化作用,使颗粒向小粒径方向移动. 后测点核态颗粒数量浓度分数随转速的变化不大. CR-DPF 后测点与前测点相比核态颗粒数量浓度分数有所增加,这与 CR-DPF 对聚集态的捕集效率高于核态颗粒有关.

2.2.2 负荷特性下颗粒数量浓度粒径分布

图 4 中 p_{me} 为平均有效压力. 由图 4 可见,在负荷特性下, U_0 呈核态和聚集态的双峰对数正态分布,峰值数量级为 $10^6 \sim 10^7$. U_s 呈三峰对数正态分

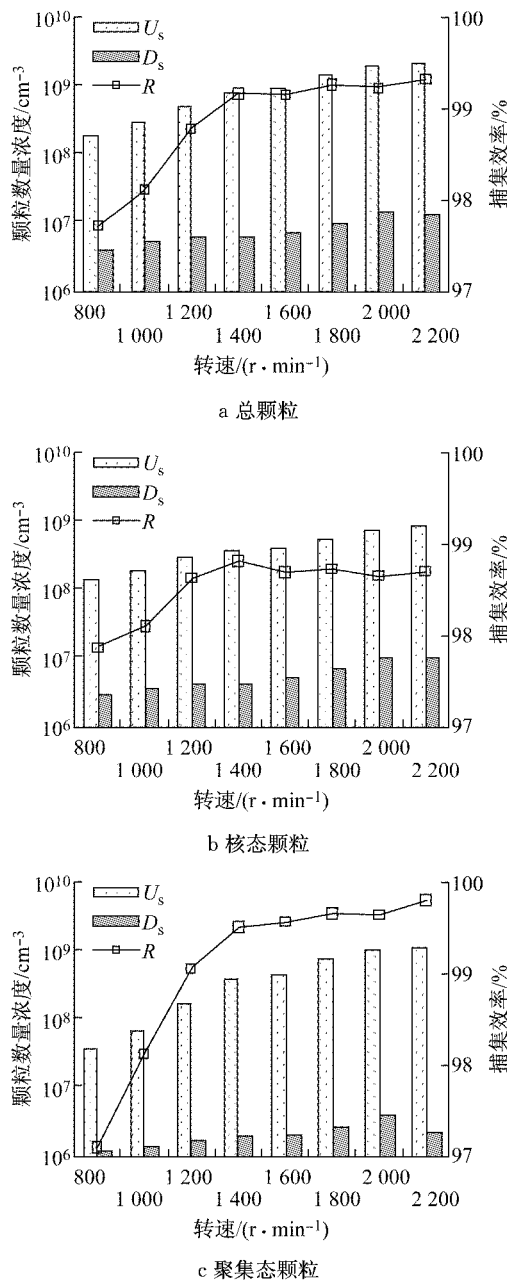


图 3 外特性时颗粒数量浓度及捕集效率与转速的关系

Fig. 3 Influence of engine speed on particle number concentration and reduction ratio with external characteristic

表 5 外特性时核态颗粒数量浓度分数

Tab.5 Fraction of nuclei mode particles number concentration with external characteristic

转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	平均有效 压力/MPa	数量浓度分数/%		
		原机测点	前测点	后测点
800	1.96	70.9	79.3	73.6
1 000	2.16	67.2	74.2	74.2
1 200	2.32	58.3	63.9	71.6
1 400	2.40	44.6	49.3	69.5
1 600	2.37	41.5	46.9	72.2
1 800	2.26	36.9	42.8	73.3
2 000	2.09	35.0	41.6	72.5
2 200	1.94	37.8	43.9	83.3

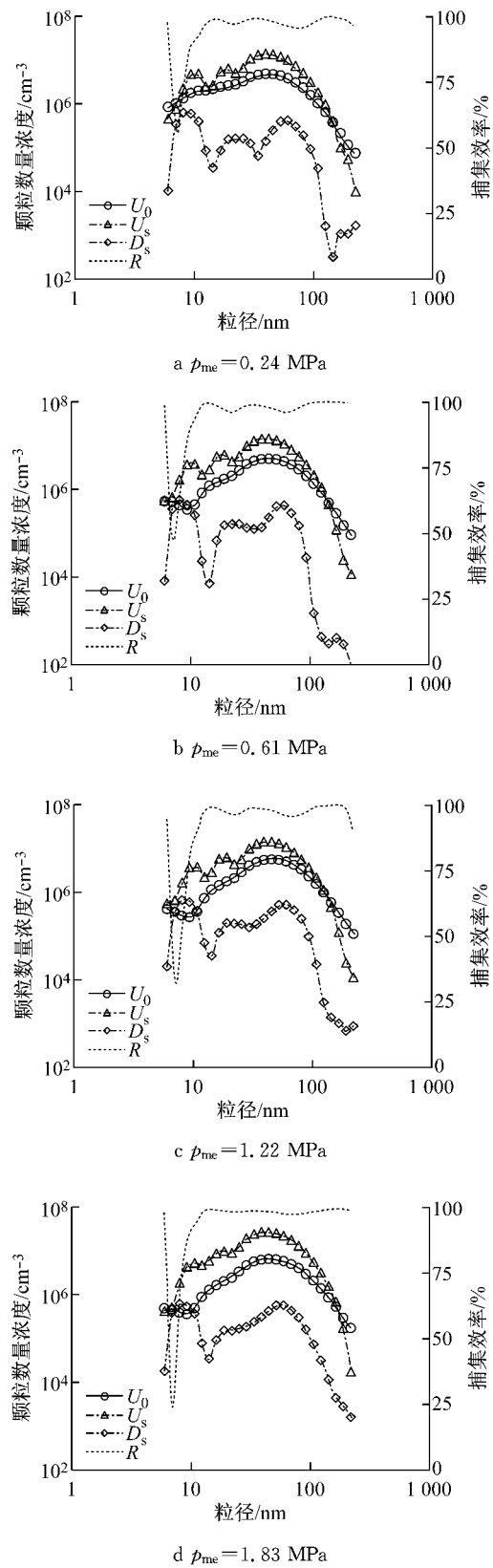


图 4 最大扭矩下转速 $1\,400\,r \cdot \min^{-1}$ 时颗粒数量浓度及捕集效率与粒径的关系

Fig.4 Particle number size distribution and reduction ratio weighted at the maximum torque speed $1\,400\,r \cdot \min^{-1}$

布,峰值粒径分别为 10,20 和 45 nm 左右,数量级也与 U_0 相同. 和外特性一样,各负荷工况下除大粒径颗粒, U_s 均高于 U_0 .

由图 4 可见, D_s 呈多峰对数正态分布. 在粒径 10,20 和 60 nm 附近出现颗粒数量浓度峰值. 与 U_s 相比, D_s 显著下降,峰值数量级降至 $10^5 \sim 10^6$. 在各负荷工况下,该装置对小于 7 nm 的颗粒 R 在 94.6% 以上;对于 7 nm 左右的颗粒, R 最低,这是由于催化剂的作用导致该粒径处的颗粒数量相对较多;对粒径为 7~15 nm 的颗粒, R 随粒径增大逐渐上升;对大于 15 nm 的颗粒, R 均保持较高水平,在 95.9%~99.9% 的范围内波动,且波动幅度比外特性时大. 负荷特性时该装置对 14,34 和 124 nm 粒径附近的颗粒捕集效率最高.

由图 5a 可见,对于总颗粒, U_s 随负荷升高略有上升; D_s 随负荷升高没有明显变化规律. 在各负荷工况下 CR-DPF 对总颗粒 R 分别为 96.5%, 96.9%, 96.6%, 97.7%. 外特性时比负荷特性时捕集效率高,是因为排气温度随负荷升高而上升,催化剂活性增强,有利于 NO 氧化为 NO_2 ,促进了碳粒的低温燃烧^[9].

由图 5b 可见对于核态颗粒 U_s 与 D_s 随负荷没有明显规律. 在各负荷工况下 R 分别为 96.5%, 96.8%, 96.5%, 97.7%. 由图 5c 可见,对于聚集态

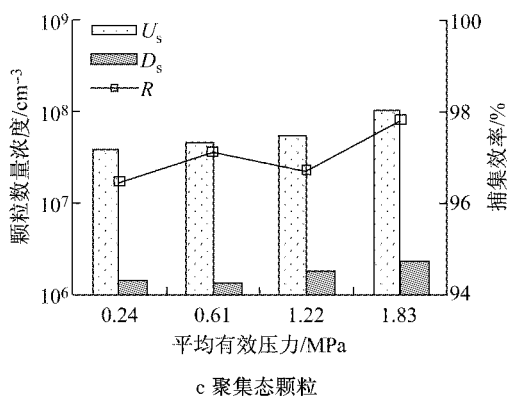


图 5 最大转矩下转速 $1400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时颗粒数量浓度及捕集效率与平均有效压力的关系

Fig. 5 Influence of engine load on particle number concentration and reduction ratio at the maximum torque speed $1400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$

颗粒, U_s 随负荷升高而上升,原因在于随着负荷升高每循环供油量增加,燃空比增加,燃烧向缺氧方向发展,促进了聚集态颗粒的生成. D_s 显著低于 U_s ,随负荷升高呈波动增加的趋势. 在各负荷工况下对于聚集态颗粒, R 分别为 96.5%, 97.1%, 96.7%, 97.8%. 同外特性时一样,CR-DPF 对聚集态颗粒的捕集效率略优于对核态颗粒的.

由表 6 可见,原机测点和前测点核态颗粒数量浓度分数随负荷的升高而下降. 同外特性时一样,前测点核态颗粒数量浓度分数高于原机. 后测点核态颗粒数量浓度分数也随负荷升高而下降. CR-DPF 后测点与前测点相比核态颗粒数量浓度分数有所增加,这是由于 CR-DPF 对聚集态的捕集效率高于核态颗粒造成的.

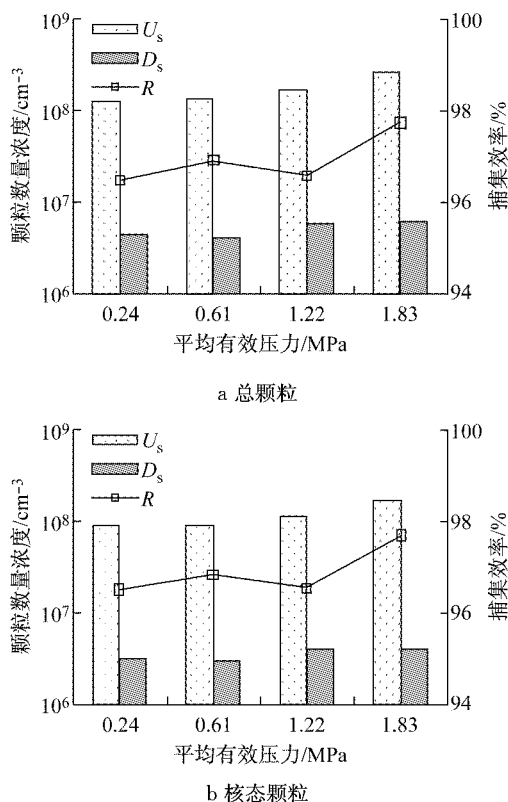
表 6 最大转矩下转速 $1400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时核态颗粒数量浓度分数

Tab.6 Fraction of nuclei mode particles number concentration at the maximum torque speed $1400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$

平均有效压力/MPa	数量浓度分数/%		
	原机测点	前测点	后测点
0.24	69.4	69.1	68.9
0.61	58.9	66.3	68.4
1.22	56.6	66.6	67.9
1.83	55.4	62.0	63.5

3 结论

(1) CR-DPF 的安装改变了发动机的排气状态,使得前测点排气温度高于原机测点的排气温度. 负荷特性时前测点相对于原机测点的温升为 2~12



℃, 小于外特性的温升。

(2) 燃用满足车用柴油有害物质控制标准(第 5 阶段)柴油时发动机原机测点颗粒数量浓度呈双峰对数正态分布。安装 CR-DPF 后, 前测点颗粒数量浓度呈三峰对数正态分布, 后测点的则呈多峰对数正态分布。

(3) 在安装 CR-DPF 后, 由于排气背压升高, 其前测点粒径小于 191 nm 颗粒的数量浓度均高于原机测点。但是由于排气温度升高, 氧化作用增强, 大粒径颗粒的数量浓度略低于原机测点。前测点核态颗粒数量浓度分数高于原机测点, 但对最终排入大气中的颗粒分布影响不大。

(4) CR-DPF 对柴油机排放颗粒的数量浓度具有显著的降低作用。外特性时其对总颗粒的捕集效率为 97.7%~99.3%; 转速为 $1\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 情况下负荷特性时该值相对较低, 为 96.5%~97.7%。

(5) CR-DPF 对于颗粒的捕集效率受到颗粒粒径的影响。由于催化剂的作用, 对于 7~15 nm 粒径颗粒的捕集效率相对较低。而对于其他粒径颗粒, 其捕集效率保持在 89.5% 以上。无论在外特性还是负荷特性下, CR-DPF 对聚集态颗粒的捕集效果均优于核态颗粒, 使后测点核态颗粒数量浓度分数高于前测点。

参考文献:

- [1] 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.
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.
- [2] 李新令, 黄震, 王嘉松, 等. 柴油机排气颗粒浓度和粒径分布特征试验研究[J]. 内燃机学报, 2007, 25(2): 113.
LI Xinling, HUANG Zhen, WANG Jiasong, *et al.* Investigation on concentrations and size distribution characteristic of particles from diesel engine[J]. Transactions of CSICE, 2007, 25(2): 113.
- [3] Elias V, Leonidas N, Panayiotis P, *et al.* An investigation on the physical, chemical and ecotoxicological characteristics[J]. Environmental Pollution, 2009, 157: 2320.
- [4] Liu Z H, Ge Y S, Tan J W, *et al.* Impacts of continuously regenerating trap and particle oxidation catalyst on the NO_2 and particulate matter emissions emitted from diesel engine[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(4): 624.
- [5] Carlo B, Silvana D I, Chiara G, *et al.* Detailed characterization of particulate emissions of an automotive catalyzed DPF using actual regeneration strategies [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012, 39: 45.
- [6] 尹超, 高俊华. 采用不同后处理装置的柴油机减排效果分析[J]. 小型内燃机与摩托车, 2011, 40(6): 13.
Yin C, Gao J H. Emission reduction effect of diesels using different after-treatment systems [J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2011, 40(6): 13.
- [7] Federico M, Davide V, Theodoros V, *et al.* Particle number and size distribution from a small displacement automotive diesel engine during DPF regeneration [C]//SAE. [S. l.]: SAE, 2010; 2010-01-1552.
- [8] Johnson Matthey Public Limited Company. Exhaust system for an internal combustion engine; WO 2003081000 A1[P]. 2003-10-02.
- [9] Kandylas I P, Haralampous O A, Koltsakis G C. Diesel soot oxidation with NO_2 : engine experiments and simulations[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2002, 41(22): 5372.
- [10] Gill S S, Chatha G S, Tsolakis A. Analysis of reformed EGR on the performance of a diesel particulate filter[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(16): 10089.
- [11] Liu Z H, Shah A N, Ge Y S, *et al.* Effects of continuously regenerating diesel particulate filters on regulated emissions and number-size distribution of particles emitted from a diesel engine[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(5): 798.
- [12] Hwanam K, Yongha S, Kilsung J, *et al.* Size distributions and number concentrations of particles from the DOC and CDPF [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22: 1793.