

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.01.024

柴油机富氧燃烧粒径分布和颗粒物排放特性研究

姚佳岩¹, 刘浩业², 肖建华², 朱荣福¹, 林明¹

(1. 黑龙江工程学院 汽车与交通工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150050;

2. 清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为了研究柴油发动机颗粒物排放特性, 在柴油机上利用不同进气氧体积分数, 实现发动机富氧燃烧。试验中进气氧体积分数分别为 21%, 23%, 25%, 27% 和 29%, 采用 DMS500 型快速颗粒光谱仪测试分析了发动机在不同负荷时的颗粒物数量浓度、质量浓度及粒径分布。研究结果表明: 随进气氧体积分数的增加, 颗粒物质量浓度降低; 富氧燃烧的柴油发动机颗粒物的数量浓度在大、中负荷明显降低, 小负荷呈升高趋势; 富氧燃烧发动机的排放颗粒物呈核态和凝聚态的双峰分布特征, 富氧燃烧核态数量浓度所占比例高于氧体积分数为 21% 的核态数量浓度, 凝聚态的质量浓度所占比例低于氧体积分数为 21% 的质量浓度; 富氧燃烧颗粒物的几何平均直径小于氧体积分数为 21% 颗粒物的几何平均直径。

关键词: 汽车工程; 颗粒物排放; 富氧燃烧; 柴油机; 粒径分布

中图分类号: TK464

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2016) 01-0153-06

Study on Particle Size Distribution and Particulate Matter Emission Characteristics in Oxygen-enriched Combustion of Diesel Engine

YAO Jia-yan¹, LIU Hao-ye², XIAO Jian-hua², ZHU Rong-fu¹, LIN Ming¹

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150050, China;

2. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy Conservation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To study the characteristics of particulate matter emission of diesel engine, oxygen-enriched combustion is realized in a diesel engine by controlling different intake oxygen volume fraction. 21%, 23%, 25%, 27% and 29% intake oxygen volume fractions are used in the test, the particle number (PN) concentration, particle mass (PM) concentration, and particle size distribution are measured by DMS500 particulate spectrometer. The result shows that (1) PM concentration decreased with the increase of intake oxygen volume fraction; (2) the PN concentration decreased significantly under high and medium loads, while it increased under low loads; (3) bimodal distribution is observed corresponding to nucleation mode and accumulation mode of the particles, comparing with 21% intake oxygen volume fraction, oxygen-enriched combustion exhibited higher percentage of nucleation mode PN emissions and lower percentage of accumulation mode PM emission. Also, oxygen-enriched combustion exhibited smaller particulate mean diameter than that of 21% intake oxygen volume fraction.

Key words: automobile engineering; particulate matter emission; oxygen-enriched combustion; diesel engine; particle size distribution

收稿日期: 2015-07-09

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目 (E201457)

作者简介: 姚佳岩 (1963-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 副教授, 博士. (yaojiayan777@163.com)

0 引言

与汽油机相比,柴油机具有热效率高、低速转矩大以及功率覆盖面广的优点,因而在车用动力中得到广泛的应用^[1]。柴油车的尾气排放,是颗粒物排放的最重要来源,颗粒物是引起灰霾天气和大气能见度降低的主要因素,对人体健康有重大危害。颗粒物的粒径尺寸小于 1 000 nm 吸入人体肺部,可增大呼吸系统、心脏病、肺气肿等各种疾病的发病率^[2-3]。

研究柴油机细微颗粒物的理化特性,探索其生成机理,是控制大气污染、改善大气质量的基础。特别是当前全球机动车的排放法规日益严格,新的欧五法规将开始限制排放颗粒物的数量,引起了国内外学者对发动机排放颗粒物的生成规律和数量测试方法的日益重视。

富氧燃烧是增加进气氧体积分数,使新鲜充气量增大,残余废气量减少,改善燃烧、降低 THC 和 CO 的排放^[4]。研究证实富氧燃烧作为具有发展前景的进气富氧技术,可以使 PM、THC 和 CO 排放降低,对此受到国内外学者的关注。Byun 等^[5]研究表明富氧燃烧能有效地降低 PM、THC 和 CO 的排放,但 NO_x 排放增加。国内学者针对不同乳化柴油、EGR 与进气富氧、柴油机富氧燃烧的粒径分布等都是在进气氧体积分数 21% ~ 24% 范围内进行分析^[6-7]。研究表明:缸内富氧环境能抑制碳烟表面生长,使较大尺寸的碳烟颗粒数减少,但 10 nm 左右的小颗粒数增多。而不同的发动机类型、运行工况、燃烧特性和氧体积分数等都会对柴油机颗粒物的排放特性有较大影响。

总体来说,对富氧燃烧颗粒物的排放特性研究尚缺乏氧体积分数的系统数据积累,如 21% ~ 29%,尤其是面向最新排放法规的国 IV 及以上柴油机的试验研究。

1 试验设计与方法

1.1 试验用发动机

试验用发动机是一台四缸轻型柴油机改造而成的单缸机,发动机技术参数如表 1 所示。对发动机的第 1 缸设计了独立的进排气系统,独立的供油系统,而对其他 3 缸不供油。发动机台架测试系统如图 1 所示。

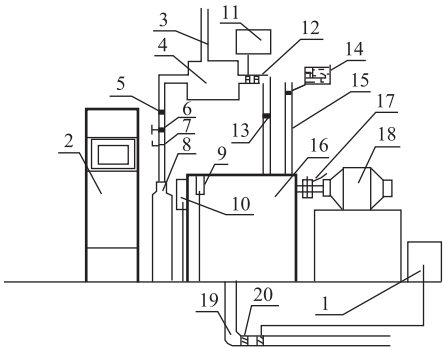
1.2 颗粒物采集测量装置

颗粒物排放特性测量采用的是英国 Combustion 公司生产的 DMS500 型快速颗粒分析仪。该仪器通

表 1 发动机技术参数

Tab. 1 Technical parameters of engine

发动机 型号	单缸 排量/L	行程/ mm	缸径/ mm	压缩比	气门数	喷油系统
GW4D20	0.499	92	83.1	16.7:1	4	电控共轨



1. Combustion DMS500 颗粒分析仪; 2. 测控柜; 3. 进气管; 4. 气体混合室; 5. 浮子流量计; 6. 控制阀; 7. 减压阀; 8. 氧气瓶; 9. 缸压传感器; 10. 转角传感器; 11. 控氧仪; 12. 空气流量计; 13. 进气温度传感器; 14. 油箱; 15. 油管; 16. 发动机; 17. 联轴器; 18. 测功机; 19. 排气管; 20. 排气温度传感器

图 1 发动机试验台架装置

Fig. 1 Technical parameters of engine

过柴油机排气首先由导电橡胶取样管引入旋风分离器,去除粒子直径大于 1 000 nm 的大颗粒,避免大颗粒堵塞仪器,在进入稀释器对排气进行稀释,稀释后的取样气体进入分级器中,并根据电子迁移率对带电的颗粒物进行分级,分级后的颗粒物将在静电计内产生相应的电流,从而确定不同粒径颗粒物的数密度,可测量粒径范围在 5 ~ 1 000 nm 内的微粒,能够对实测颗粒的核态和凝聚态颗粒数进行对数正态拟合,从而得到颗粒物的数量浓度和粒径分布^[8]。该设备还能够测量颗粒的体积分数,与 Combustion 公司提供的颗粒物的经验密度相乘可得到颗粒物的质量浓度。在本试验中,该经验密度的取值为 0.524 kg/m³。

1.3 燃料

试验采用燃料为北京市场出售 0#柴油,该 0#柴油的详细参数见表 2。

表 2 燃料主要特性

Tab. 2 Main properties of fuel

燃料	柴油	燃料	柴油
密度/(g·cm ⁻³)	0.829 8	ω _C /%	86.45
馏程/℃	176 ~ 328	ω _H /%	13.49
十六烷值	56.5	ω _O /%	0.06
低热值/(kJ·kg ⁻¹)	42.68	S/(mg·L ⁻¹)	4.3

注: ω_C, ω_H, ω_O 分别为气体 C, H, O 的质量分数。

1.4 进气氧测量装置

试验采用不同进气氧体积分数使燃料在发动机内燃烧。Poola 等^[9]根据发动机进气富氧特点, 开发了中选择性、高渗透性系列的富氧膜。Poola 和 Virk 等^[10-13]对富氧膜法技术在柴油机上应用进行了许多研究, 使富氧技术应用于发动机上成为可能。利用膜分离技术得到的空气中氧浓度最高可达 35%, 可满足发动机富氧燃烧的需要。但是氧渗透膜还存在分离效率偏低、气体通过阻力大、成本相对较高等缺点。目前在内燃机富氧燃烧的研究中大部分采取富氧进气的供氧方式^[5-7], 其原理是利用高压氧气瓶并联供氧以实现灵活且稳定的氧气供给, 便于试验过程中准确控制掺氧量。本文采用浮子流量计控制高压氧气瓶的流量, 发动机工作过程中氧气和空气同时进入气体混合室, 均匀混合后, 再由 KY-2F 控氧仪测定不同进气氧体积分数, 形成预定比例的富氧空气经空气流量计进入发动机气缸。

1.5 试验方案

试验用高压氧气瓶并联供氧, 对发动机实现不同的进气氧体积分数。随着进气氧体积分数逐渐提高, 火焰温度增加幅度逐渐减缓, 在绝热状态下, 氧体积分数从 23% 增加到 25% 时, 火焰温度增加大

约 100 K; 而氧体积分数从 25% 增加到 27% 时, 火焰温度仅增加 30 K^[14]。由于氧体积分数较高时, 火焰温度增加较少, 而制氧投资等费用猛增, 氧体积分数最好不超过 30%^[15]。所以本文选取 5 种不同氧体积分数为 21%, 23%, 25%, 27%, 29% 进行试验研究。

发动机试验工况的选择: 转速为 1 600 r/min、喷油时刻为 -6 CAD BTDC、4 种不同负荷 (IMEP) 分别为 200, 400, 600, 800 kPa 和 5 种不同进气氧体积分数的对比试验。试验过程中冷却水和机油温度都维持在 $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$, 进气温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。

2 结果分析

2.1 颗粒物数量浓度和粒径分布

图 2 给出了转速为 1 600 r/min、不同负荷颗粒物数量浓度的粒径分布规律。从图 2 中可以看出, 从不同负荷和富氧浓度分布特征上来看, 呈现双峰形态, 分别对应核态和凝聚态, 核态微粒的峰值范围为 3 ~ 30 nm, 凝聚态微粒的峰值范围为 30 ~ 100 nm; 且随着负荷的增大, 颗粒物数量浓度峰值从粒径较小的核态移向粒径较大的凝聚态, 颗粒物数量浓度减少。

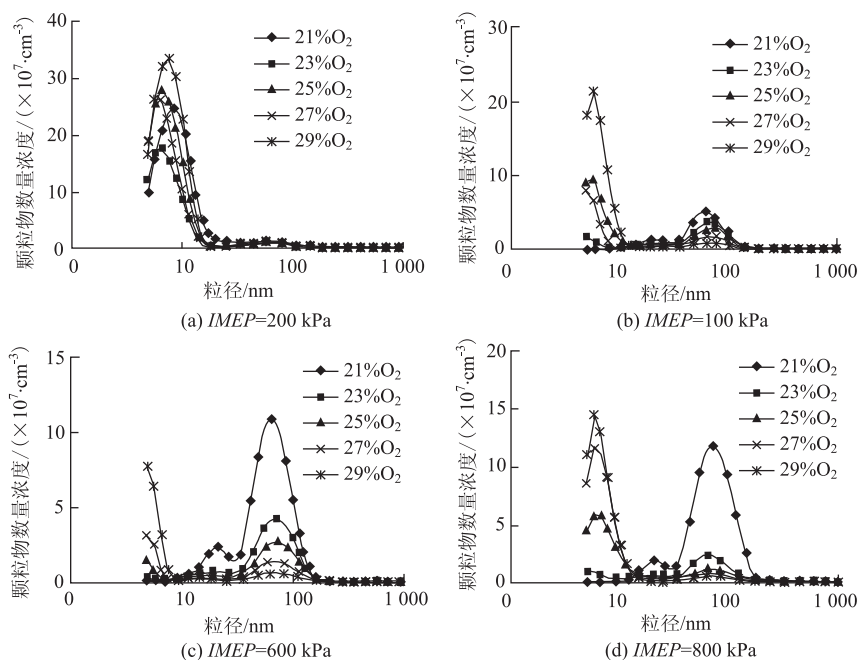


图2 不同负荷颗粒物数量浓度的粒径分布规律

Fig. 2 Particle size distribution patterns of particle number concentration under different loads

在氧体积分数变化方面比较, 随着氧体积分数的增加, 核态微粒数量增大, 凝聚态微粒数量减少。在平均指示压力为 600 kPa 和 800 kPa 时, 核态微粒

数量随氧体积分数的增大而增加, 凝聚态微粒数量随氧体积分数的增大而减少; 5 种氧体积分数的核态颗粒物数量逐渐减少, 而凝聚态的数量逐渐增多,

峰值粒径逐渐增大。在平均指示压力较小 ($IMEP = 200 \text{ kPa}$) 时, 颗粒物数量浓度主要以核态颗粒物为主, 且随氧体积分数增大而增大; 大负荷时, 各种氧体积分数 PM 的数量排放整体降低, 较大氧体积分数 (25%, 27%, 29%) 的颗粒物数量浓度主要以核态颗粒物为主, 较小氧体积分数的颗粒物数量浓度主要是凝聚态颗粒物为主。

图3为1600 r/min 转速、5种氧体积分数下不同负荷的总颗粒物数量浓度。每种氧体积分数的总颗粒物数量浓度由核态颗粒数 (柱状图的下半部

分) 和凝聚态颗粒数 (柱状图的上半部) 组成。如图3所示, 负荷一定时, 随氧体积分数的增加, 核态颗粒物数量呈增加趋势, 凝聚态颗粒物数量呈减少趋势, 这与参考文献 [9] 的试验结论一致。由于氧含量增加, 对柴油机扩散燃烧阶段中炭烟颗粒的生成有明显的抑制作用, 减少了凝聚态的颗粒物数量浓度比例。同时由于氧体积分数的增加, 改善了燃烧室中的局部空燃比, 减少了凝聚态颗粒物的生成, 导致由可挥发性成分组成的核态颗粒物数量增加。

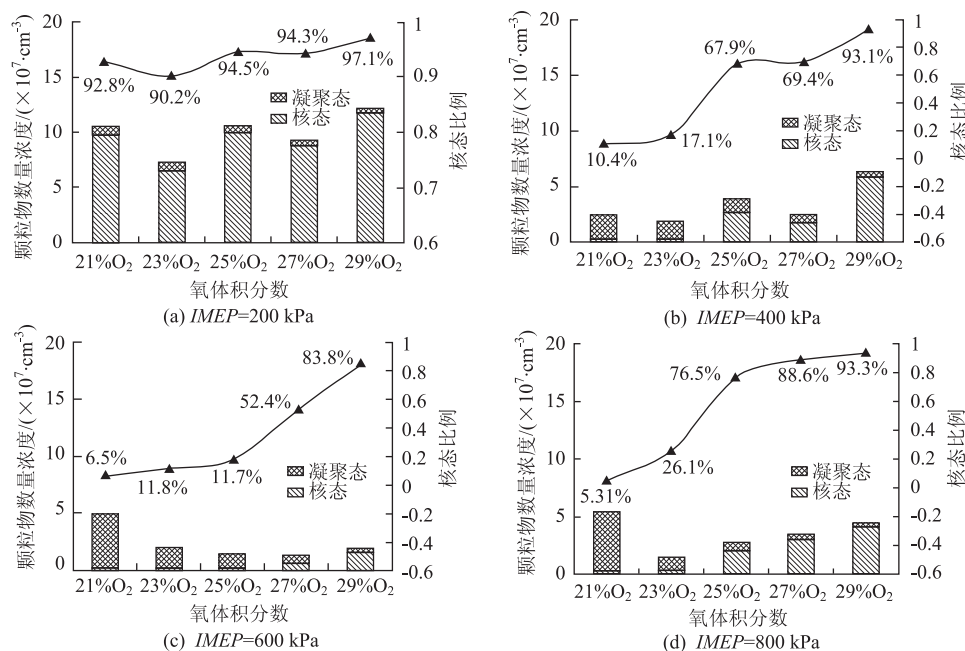


图3 不同负荷总颗粒物数量浓度和核态比例

Fig. 3 Total particle number concentrations and nucleation mode proportions under different loads

在氧体积分数一定时, 柴油发动机的颗粒物数量浓度的最大值都出现在 $IMEP$ 为 200 kPa 负荷工况, 主要是因为小负荷时缸内燃烧温度相对较低, 不利于颗粒物的后期氧化。在 21% 氧体积分数下, 颗粒物数量浓度随负荷增加, 核态颗粒物数量减小, 凝聚态颗粒物数量增加; 其他 4 种氧体积分数, 都是随负荷增加, 核态颗粒物数量先减小到负荷 $IMEP$ 为 800 kPa 时又增大。

2.2 颗粒物质量浓度

图4分别为1600 r/min 转速、5种氧体积分数下不同负荷的总颗粒物质量浓度。由图4所示, 小负荷 (a) 时, 5种氧体积分数的颗粒物质量浓度都较低, 23% 氧体积分数的颗粒物质量浓度最高为 $0.0016 \mu\text{g}/\text{cm}^3$, 29% 氧体积分数的颗粒物质量浓度最低为 $0.0010 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ 。在其他负荷时, 随氧体积

分数增加, 颗粒物质量浓度呈明显下降趋势; 在不同负荷下, 氧体积分数的颗粒物质量浓度最高出现在图 (d) 中 21% 氧体积分数其值为 $0.018 \mu\text{g}/\text{cm}^3$, 在图 (a) 中 21% 氧体积分数的颗粒物质量浓度最低为 $0.0012 \mu\text{g}/\text{cm}^3$, 小负荷 (a) 氧体积分数的颗粒物质量浓度相比于大负荷 (d) 降低了 9.1% ~ 92.8%。

以上结果主要是由于试验用柴油机喷油压力较高, 雾化和燃烧更充分, 小负荷下原机颗粒物质量浓度排放较少, 故燃用富氧气体后颗粒物的质量浓度变化不明显, 但高负荷时, 由于缸内燃烧温度高、局部的空燃比降低, 造成 PM 排放增大, 此时氧体积分数增加, 高温缺氧的区域降低, 使柴油分子和氧分子接触的概率提高, 缸内燃烧状态的改善起到了降低颗粒物质量浓度的明显效果。

由图4不同负荷的颗粒物质量浓度中凝聚态组

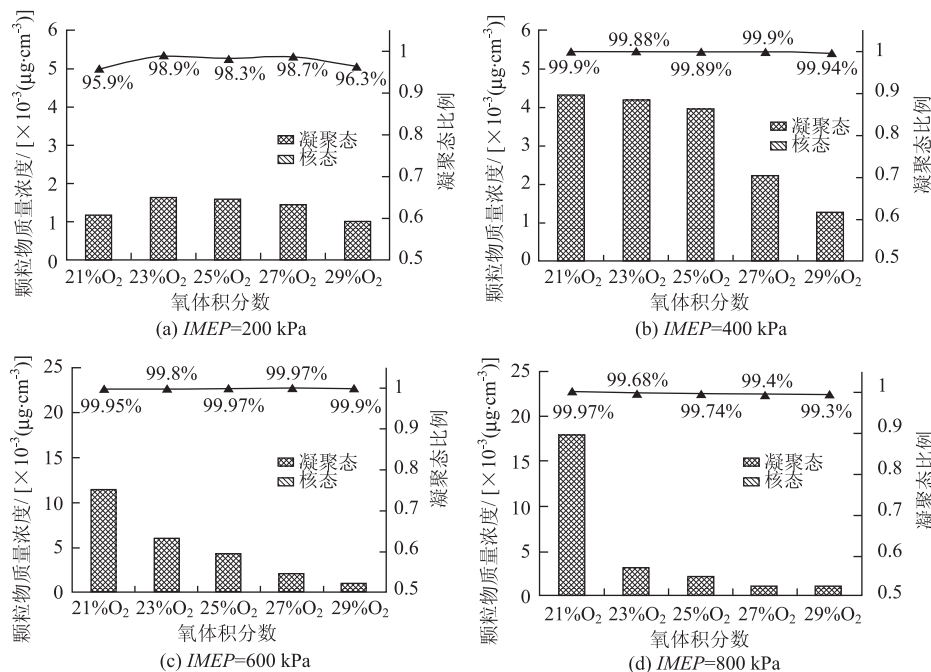


图4 不同负荷颗粒物质量浓度和凝聚态比例

Fig. 4 Particle mass concentrations and accumulation mode proportions under different loads

分比例可见, 5种氧体积分数的颗粒物质量排放的主体都集中在凝聚态微粒, 而颗粒物质量浓度排放主体在低负荷时集中在核态微粒。核态微粒主要由可挥发性成分 THC、硫酸组成, 尺寸范围主要在 3 ~ 30 nm 之间, 富氧燃烧的核态颗粒物只占总颗粒物质量的 0.03% ~ 3.7%, 但数量比例在 11% ~ 97%。对于凝聚态微粒由炭烟、可溶性有机成分和硫酸盐组成, 尺寸范围为 30 ~ 500 nm, 富氧燃烧的凝聚态颗粒物占总颗粒物质量浓度的 95% 以上, 但排放的数量比例在 3% ~ 88%。

2.3 颗粒物的几何平均直径

图5为 1600 r/min 转速、5种氧体积分分数下不同负荷的颗粒物的几何平均直径。由图5可见, 指示平均压力为 200 kPa, 颗粒物几何平均直径在 8 ~ 10 nm 之间; 指示平均压力为 400 kPa, 颗粒物几何平均直径在 8 ~ 45 nm 之间; 指示平均压力为 600 kPa, 颗粒物几何平均直径在 11 ~ 55 nm 之间; 指示平均压力为 800 kPa, 颗粒物几何平均直径在 8 ~ 60 nm 之间。随着平均指示压力的增加, 几何平均粒径增大, 21% 氧体积分数的几何平均粒径总体呈明显增大趋势。在同一指示平均压力时随氧体积分分数增加, 几何平均粒径呈下降趋势, 且 29% 氧体积分数的几何平均粒径变化很小, 在 8 ~ 11 nm 之间。从图中各个负荷下显示, 柴油机的富氧燃烧能对颗粒物的生长(表面增长)起到较为明显的抑制作用。

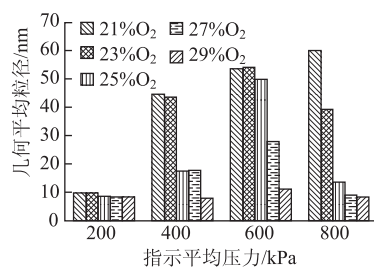


图5 不同负荷颗粒物的几何平均直径

Fig. 5 Particle mean diameters under different loads

3 结论

(1) 发动机富氧燃烧的颗粒物排放呈现双峰形态的分布特征, 分别对应核态和凝聚态。低负荷时, 颗粒物数量浓度峰值主要集中在核态颗粒物的 4 ~ 10 nm 的范围内, 高负荷、低氧体积分分数(21%, 23%)时颗粒物数量浓度峰值主要集中在凝聚态颗粒物的 60 ~ 80 nm 的范围内, 高负荷、高氧体积分分数(25%, 27%, 29%)时主要集中在核态颗粒物的 4 ~ 20 nm 范围内。这说明随着负荷增大, 基于低氧体积分分数数量浓度的颗粒物粒径分布的峰值由核态向凝聚态转移, 高氧体积分分数粒径分布的峰值保持核态不变。

(2) 对于质量浓度而言, 随氧体积分分数增加颗粒物的质量浓度逐渐降低, 氧体积分分数 29% 颗粒物质量浓度比氧体积分分数 21% 降低了 15.4% ~ 93.9%。不同进气氧体积分数的颗粒物质量排放的主体都是

凝聚态微粒 ($>95\%$)。小负荷 ($IMEP = 200 \text{ kPa}$) 时颗粒物核态比例高于大、中负荷; 大、中负荷时颗粒物的核态比例都较低 ($<1\%$), 差异不大。

(3) 对于数量浓度而言, 随氧体积分数增加, 颗粒物中核态比例增大, 凝聚态的比例减小。富氧燃烧发动机颗粒物的变化规律和发动机的负荷参数相关, 小负荷 ($IMEP = 200 \text{ kPa}$) 总颗粒物的数量浓度高于大、中负荷, 且小负荷 ($IMEP = 200 \text{ kPa}$) 数量排放的主体都集中在核态颗粒物 ($>90\%$)。

(4) 原机排放颗粒物的几何平均直径总体大于富氧燃烧发动机, 且随负荷的增加, 氧体积分数21%的几何平均直径增大; 同时排放中颗粒物的几何平均直径随氧体积分数的升高呈下降趋势。

参考文献:

References:

- [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 (3): 200-217.
SHUAI Shi-jin, TANG Tao, ZHAO Yan-guang, et al. State of the Art and Outlook of Diesel Emission Regulations and Aftertreatment Technologies [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2012, 3 (3): 200-217.
- [2] AGARWAL A K, GUPTA T, KOTHARI A. Particulate Emissions from Biodiesel vs. Diesel Fuelled Compression Ignition Engine [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2001, 15 (1): 3278-3300.
- [3] 陈仁杰, 陈秉衡, 阚海东. 我国113个城市大气颗粒物污染的健康经济学评价 [J]. 中国环境科学, 2010, 30 (3): 410-415.
CHEN Ren-jie, CHEN Bing-heng, HAN Hai-dong. A Health-based Economic Assessment of Particulate Air Pollution in 113 Chinese Cities [J]. China Environmental Science, 2010, 30 (3): 410-415.
- [4] PEREZ P L, BOEHMAN A L. Performance of a Single-cylinder Diesel Engine Using Oxygen-enriched Intake Air at Simulated High Altitude Conditions [J]. Aerospace Science and Technology, 2010, 14 (2): 83-94.
- [5] BYUN H, HONG B, LEE B. The Effect of Oxygen Enriched Air Obtained by Gas Separation Membranes from the Emission Gas of Diesel Engines [J]. Desalination, 2006, 193 (1): 73-81.
- [6] 张伟, 舒歌群, 韩睿, 等. 高比率冷EGR与进气富氧对柴油机燃烧及排放特性的影响 [J]. 内燃机工程, 2011, 32 (4): 12-16.
ZHANG Wei, SHU Ge-qun, HAN Rui, et al. Influence of High-rate Cold EGR & Oxygen-enriched Intake on Diesel Engine Combustion and Emission Characteristics [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2011, 32 (4): 12-16.
- [7] 张伟, 舒歌群, 徐彪, 等. 柴油机富氧燃烧的粒径分布及多环芳香烃的演化历程研究 [J]. 内燃机工程, 2013, 34 (3): 1-8.
ZHANG Wei, SHU Ge-qun, XU Biao, et al. Study on Particle Size Distribution and PAHs Formation History in Oxygen-enriched Combustion Process of Diesel Engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2013, 34 (3): 1-8.
- [8] CHUEPENG S, XU H, TSOLAKIS A, et al. Particulate Matter Size Distribution in the Exhaust Gas of a Modern Diesel Engine Fuelled with a Biodiesel Blend [J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35 (3): 4280-4289.
- [9] POOLA R B, STORK K C, SEKAR R, et al. Variable Air Composition with Polymer Membrane: A New Low Emissions Tool [J]. SAE Transactions, 1998, 107 (3): 332-346.
- [10] POOLA R B, SEKAR R. Reduction of NO_x and Particulate Emissions by Using Oxygen-enriched Combustion Air in a Locomotive Diesel Engine [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125 (2): 524-533.
- [11] 林向东, 陈新海, 黄飞, 等. 富氧膜技术及其装置试验研究 [J]. 热能动力工程, 1999, 14 (80): 99-101.
LIN Xiang-dong, CHEN Xin-hai, HUANG Fei, et al. An Experimental Study of Oxygen-rich Membrane Technology and Related Equipment [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 1999, 14 (80): 99-101.
- [12] 陈勇, 王从厚, 吴鸣. 气体膜分离技术与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 2-5.
CHEN Yong, WANG Cong-hou, WU Ming. Gas Membrane Separation Technology and Application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001: 2-5.
- [13] VIRK K S, KOKTURK U, BARTELS C R. Effects of Oxygen-enriched Air on Diesel Engine Exhaust Emissions and Engine Performance [EB/OL]. [2015-06-06]. <http://papers.sae.org/931004/>.
- [14] POOLA R B. Utilizing Intake Air Oxygen-enrichment Technology to Reduce Cold-phase Emissions [J]. SAE Transactions, 1995, 104 (4): 1255-1269.
- [15] HOKE B C Jr. Comparison of Oxygen Enhanced Combustion Technologies [C]//62nd Conference on Glass Problems: Ceramic Engineering and Science Proceedings. Westerville, U. S.: John Wiley & Sons, 2009.