

生物柴油发动机颗粒排放物粒径及其分布试验研究

陆小明^{1,2}, 葛蕴珊¹, 韩秀坤¹, 吴思进¹, 朱荣福¹, 何超¹

(1. 北京理工大学机械与车辆工程学院, 北京 100081; 2. 集美大学机械工程学院, 厦门 361021)

摘要:为获取燃用不同比例生物柴油的发动机排放颗粒物粒径及其分布特性,对 1 台增压直喷式车用柴油机进行了台架测试. 用 80 L/min 定量泵和装有直径 90 mm 的玻纤滤膜采样器在排气管内采样 10 min,用激光粒度仪测量与分析颗粒粒径和分布. 结果表明,随着发动机转速提高,排放颗粒粒径变小且分布更集中. 干法众数对应的粒径级较大(约 10 ~ 12 μm)且较集中,湿法众数的较小(约 4 ~ 10 μm)且分散. 用干法分析,发动机低速时, B100 的 Sauter 平均直径 d_{32} 最大,纯柴油最小,而 B20 的结果介于二者之间. 而高速时 B20 的粒径最大,纯柴油次之, B100 最小. 中数粒径 $d(0.5)$ 的结果也反映这一趋势. 用湿法分析,除了 2 000 r/min 点外, B20 的 d_{32} 最大, B100 次之,柴油最小. 湿法众数比干法分散,因而 d_{32} 也较大.

关键词:柴油机; 生物柴油; 颗粒物排放; 粒径; 分布

中图分类号: X382.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)04-0701-05

Experimental Study on Particle Size Distributions of an Engine Fueled with Blends of Biodiesel

LU Xiao-ming^{1,2}, GE Yun-shan¹, HAN Xiu-kun¹, WU Si-jin¹, ZHU Rong-fu¹, HE Chao¹

(1. School of Mechanical & Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. School of Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The purpose of this study is to obtain the particle size distributions of an engine fueled biodiesel and its blends. A turbocharged DI diesel engine was tested on a dynamometer. A pump of 80 L/min and fiber glass filters with diameter of 90 mm were used to sample engine particles in exhaust pipe. Sampling duration was 10 minutes. Particle size distributions were measured by a laser diffraction particle size analyzer. Results indicated that higher engine speed resulted in smaller particle sizes and narrower distributions. The modes on distribution curves and mode variation were larger with dry samples than with wet samples (dry: around 10 ~ 12 μm vs. wet: around 4 ~ 10 μm). At low speed, Sauter mean diameter d_{32} of dry samples was the biggest with B100, the smallest with diesel fuel, and among them with B20, while at high speed, d_{32} the biggest with B20, the smallest with B100, and in middle with diesel. Median diameter $d(0.5)$ also reflected the results. Except for 2 000 r/min, d_{32} of wet with B20 is the biggest, the smallest with diesel, and in middle with B100. The large mode variation resulted in increase of d_{32} .

Key words: diesel engine; biodiesel; particle emission; particle size; distribution

柴油机因热效率高、动力性好而被广泛使用. 但另一方面, 国际癌症研究组织已经把柴油机的排放物列为对实验动物具有致癌性和对人类具有潜在的致癌作用^[1]. 许多致突变和致癌性的物质, 如 PAHs, 就是由排放颗粒表面所携带进而被吸入体内.

在发动机常规排放中, 颗粒物总量是受控的. 因此, 颗粒物数目和颗粒粒径分布越来越受到关注, 属于非常规排放, 迄今还未见法规对其限制. 而对于 1 种有前景的代用燃料, 生物柴油, 不仅要研究其常规排放, 而且还必须考察其排放颗粒物的大小及分布. 国外这方面开展了广泛的研究^[2~5]. 迄今为止, 国内学者仅对生物柴油发动机的动力性、经济性和常规排放等开展研究^[6~9], 而生物柴油与矿物柴油的排放物颗粒粒径及分布对比研究还鲜见报道. 因此, 本研究试图通过试验分析和比较生物柴油和柴油燃料的排放颗粒物尺度及分布.

1 材料与方法

1.1 发动机参数

本研究采用的发动机技术参数见表 1. 发动机未做任何改动和调整.

表 1 发动机主要技术参数

Table 1 Specification of engines

项目	参数
型式	增压、直喷、四冲程
缸数/缸径/行程/mm	4/100/105
排量/L	3.298
压缩比	17.5
标定功率/kW	73.5(3 200 r·min ⁻¹)
最大扭矩/N·m	245/(2 000 ~ 2 200 r·min ⁻¹)

收稿日期: 2006-05-17; 修订日期: 2006-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(50576003)

作者简介: 陆小明(1962 ~), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为代用燃料及燃烧与排放控制, E-mail: luxiaomi@jmu.edu.cn

1.2 燃料

所使用的柴油为市售 0# 柴油(D),生物柴油(B100)由国内一家生物能源有限公司以菜油下脚料为原料生产.B20 为体积含量 20%的 B100 和 80%的柴油之混合燃料.柴油和生物柴油主要指标如表 2 所示.

表 2 生物柴油和柴油主要特性指标

Table 2 Main properties of test fuels			
项目	B100	D	标准
硫含量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	25	264	SH/T 0253-92
密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	886.4	834.8	SH/T 0604
粘度(20℃)/ $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	8.067	3.393	GB/T265
十六烷值	60.1	51.1	GB/T 386-91
低热值/ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	37.3	42.8	GB/T 384
氧含量/%	11.33	0	元素分析仪

1.3 试验方法及主要仪器

用不同燃料,在最大负荷不同转速条件下,即外特性运行发动机.用 80 L/min的定量泵连接带有直径 90 mm,0.3 μm 的玻纤滤膜采样器.在发动机稳定工况下,从发动机排气管内直接采样 10 min,取出滤膜.根据进样量,剪下滤膜的 1/3 用于分析仪湿法测量,剩下 2/3 用于干法测量.

试验用主要仪器和设备有:MASTERSIZER 2000 激光粒度仪^[10,11](Malvern,英国,量程:0.02 ~ 2 000 μm);BKH-2 型刮板大流量采样泵(北京迪克公司);TSP PM10-2 型颗粒物采样器(北京迪克公司).

2 结果与分析

2.1 粒径分布

图 1~3 示出了 B100、B20 和柴油 3 种燃料分别在全负荷 1 600、2 000、2 400 和 2 800 r/min 下,采用 MASTERSIZER 2000 激光粒度仪干法分析得出的粒径级和体积百分比关系曲线的对比.由图 1~3 可见,3 种燃料随着发动机转速的提高,曲线的面心往坐标轴左移,即向更小粒径方向移动.其原因有 2 个:一是高速时发动机燃烧室空气运动加强有利于可燃混合气的形成与燃烧,高速燃烧完善,PM 排放较少,所形成的粒径也较小;二是高速时,从排气门到采样滤纸处颗粒飞行所花费的时间较短,小颗粒聚合成较大颗粒的时间较短,因而总体上粒径较小.

采用湿法分析也得出同样的趋势结果,如图 4~6 所示.与干法相比,湿法得出的粒径较小.不同转速干法的众数(Mode)对应的粒径级较大且较集中,范围约为 10 ~ 12 μm ;而湿法范围约为 4 ~ 10

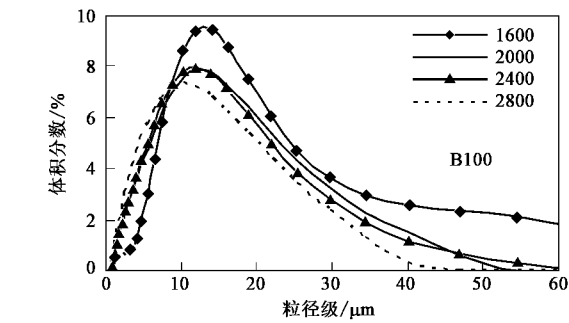


图 1 B100 不同转速干法颗粒尺度分布对比

Fig.1 Particle size distribution comparison with different speeds and dry samples with B100

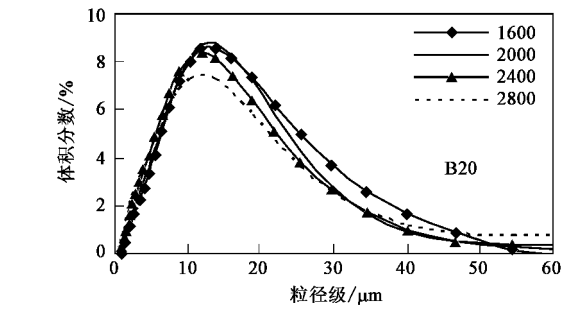


图 2 B20 不同转速干法颗粒尺度分布对比

Fig.2 Particle size distribution comparison with different speeds and dry samples with B20

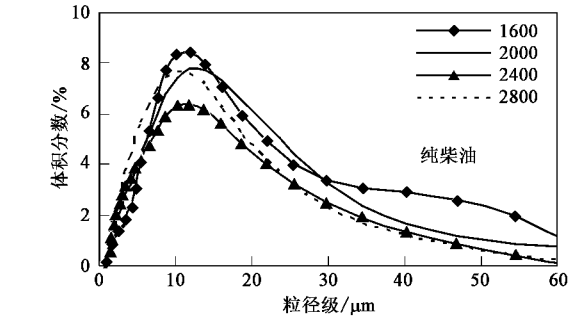


图 3 纯柴油不同转速干法颗粒尺度分布对比

Fig.3 Particle size distribution comparison with different speeds and dry samples with diesel

μm ,而且表现为更分散.

不同转速,发动机燃用 B100、B20 和柴油 3 种燃料时,同一粒径范围的体积分数差别不大,干法在 10 μm 粒径级以下,如图 7 和图 8 所示.图 9 和图 10 示出了湿法排气颗粒尺度分布对比.由图 9 和图 10 可见,在低速 1 600 r/min 时,柴油的粒径最细,B100 次之,B20 的粒径最粗;高速时,B20 的粒径最粗,柴油次之,而 B100 最细.分析结果与国外许多研究结

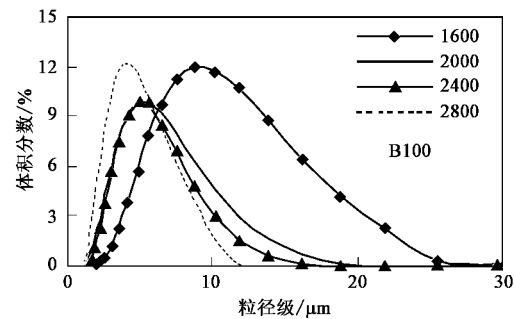


图 4 B100 不同转速湿法颗粒尺度分布对比

Fig.4 Particle size distribution comparison with different speeds and wet samples with B100

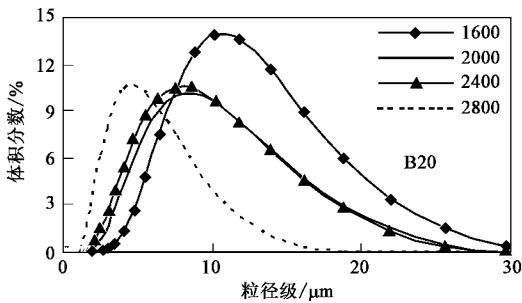


图 5 B20 不同转速湿法颗粒尺度分布对比

Fig.5 Particle size distribution comparison with different speeds and wet samples with B20

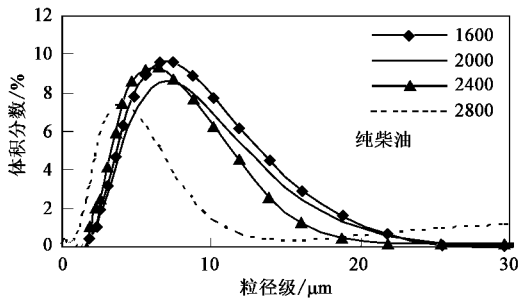


图 6 纯柴油不同转速湿法颗粒尺度分布对比

Fig.6 Particle size distribution comparison with different speeds and wet samples with diesel

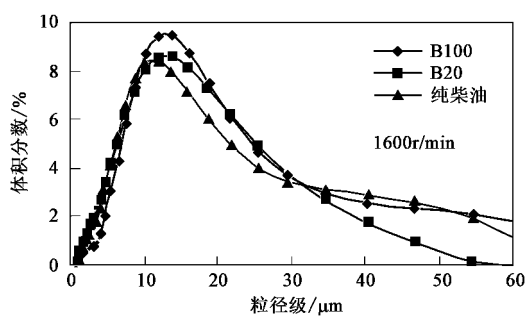


图 7 转速1 600 r/min不同燃料干法颗粒分布对比

Fig.7 Particle size distribution comparison with different fuels and dry samples at 1 600 r/min

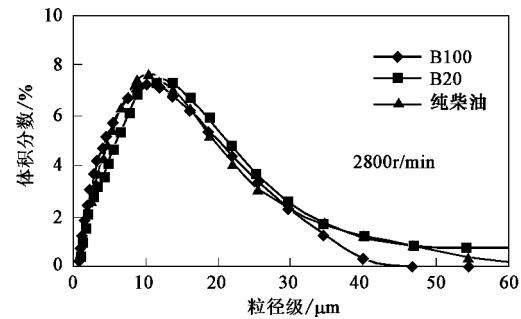


图 8 转速2 800 r/min不同燃料干法颗粒分布对比

Fig.8 Particle size distribution comparison with different fuels and dry samples at 2 800 r/min

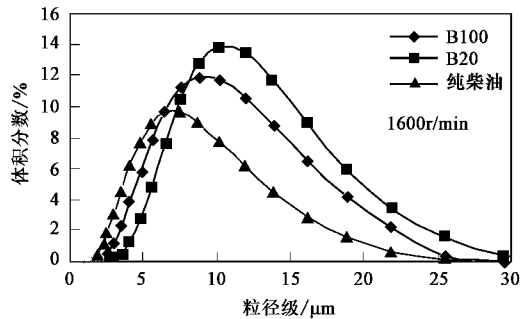


图 9 转速1 600 r/min不同燃料湿法颗粒分布对比

Fig.9 Particle size distribution comparison with different fuels and wet samples at 1 600 r/min

果基本相同^[12~16]。

由图 9 和图 10 明显看出,随着发动机转速的提高,粒径分布曲线相应变窄,即分布变得相对集中,同时曲线下面的面积中心也随之向坐标原点靠近,即粒径变小。

2.2 粒径统计分析

干法分析结果表明,1 600 r/min B100 的 Sauter 平均直径 d_{32} 为 9.093 μm ; 纯柴油为 7.412 μm ; 而

B20 的结果结于这二者之间. 如图 11 所示. 由此可见,低速时, B100 排放总体颗粒物粒径较大; 而高速时 B20 的粒径最大, d_{32} 为 5.836 μm , B100 为 5.275 μm , 纯柴油为 5.552 μm . 中数粒径 $d(0.5)$ 对比也反映了这样的结果, 如图 12 所示。

图 13 和图 14 示出了湿法测量分析的结果. 与干法不同, 除了 2 000 r/min 点外, 湿法 B20 的 d_{32} 最

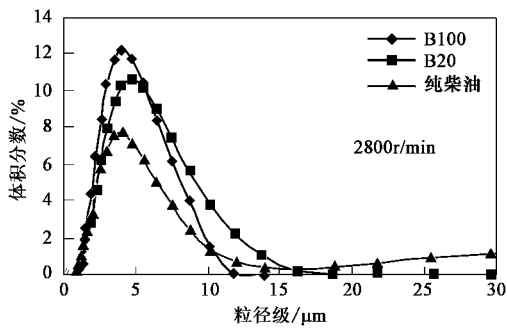


图 10 转速2 800 r/min不同燃料湿法颗粒分布对比

Fig.10 Particle size distribution comparison with different fuels and wet samples at 2 800 r/min

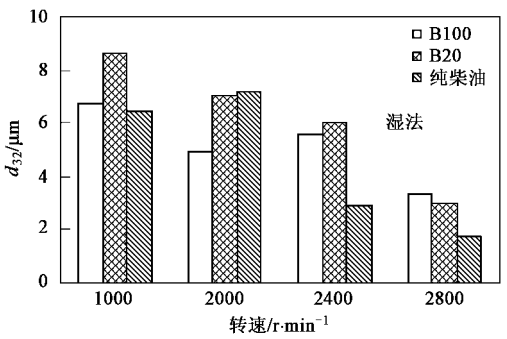


图 13 湿法 Sauter 平均直径 d_{32} 对比

Fig.13 Sauter mean diameter d_{32} comparison with wet samples

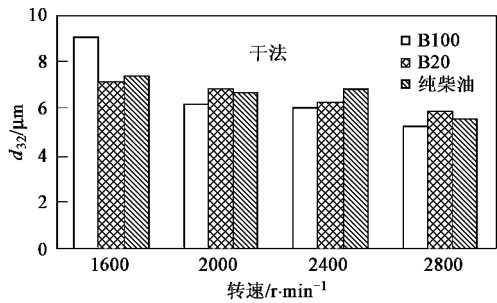


图 11 干法 Sauter 平均直径 d_{32} 对比

Fig.11 Sauter mean diameter d_{32} comparison with dry samples

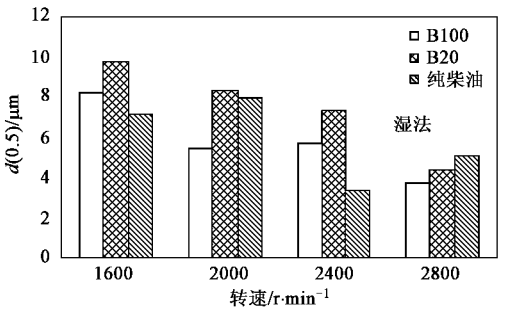


图 14 不同燃料湿法 $d(0.5)$ 对比

Fig.14 Median diameter $d(0.5)$ comparison with wet samples

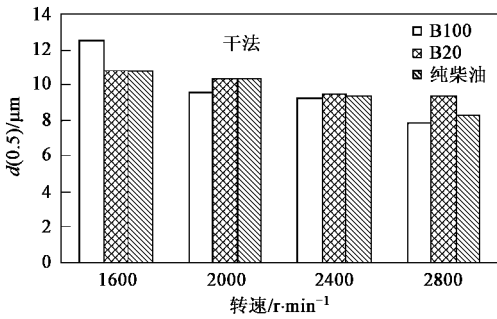


图 12 不同燃料干法 $d(0.5)$ 对比

Fig.12 Median diameter $d(0.5)$ comparison with dry samples

本研究采用的是激光衍射法测量发动机颗粒粒径分布,是1种非在线实时然而又相当简单易行的分析法,所以得出的结果与实际飞行中的颗粒显然有差别.从试过滤电镜扫描照片看,虽然 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 孔径的滤膜可能会使一些小于该尺度颗粒穿透滤膜,但滤膜上仍然截留了大量的粒径小于 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 的微小颗粒.本研究得出粒径偏大的结果是由于进样条件所限.尽管如此,用该方法对发动机燃用不同燃料在同等条件下进行排气颗粒尺度测量、分析并做相对比较,所得出粒径结果和分布趋势是有意义的.

3 结论

(1)随着发动机转速的提高,3种燃料排放颗粒粒径分布曲线的面心往坐标轴左移,即向更小粒径方向移动.

(2)不同转速干法的众数(Mode)对应的粒径级较大且较集中, $10\sim12\text{ }\mu\text{m}$;湿法众数较小且分散, $4\sim10\text{ }\mu\text{m}$.

(3)用干法分析,低速时,B100的Sauter平均直径最大,纯柴油最小;而B20的结果介于这二者之间;而高速时B20的粒径最大,纯柴油次之,B100最小.

大,B100次之,柴油最小.

与干法相比,湿法结果对于不同燃料不同转速波动较大,即湿法众数(Mode)更加分散,所以体现在Sauter平均直径 d_{32} 有较大的差别.

发动机颗粒物从在气缸内生成到排放至大气中经历了粒子成核、生长以及颗粒间随气体流动过程中相互碰撞、聚合等一系列,包括气体动力学等,复杂过程.因此,真实和动态反映发动机废气中颗粒尺度及分布的测量手段和条件的获取是相当困难的.

(4)用湿法分析,除了2 000 r/min点外,湿法 B20 的 d_{32} 最大,B100 次之,柴油最小.

(5)与干法相比,湿法众数更加分散,因而体现在 Sauter 平均直径 d_{32} 有较大的差异.

致谢:感谢清华大学热能工程系常东武老师在 MASTERSIZER 2000 激光粒度仪使用方面提供的帮助.

参考文献:

[1] Diesel and gasoline engine exhausts and some nitroarenes: summary of data reported and evaluation[R]. Lyon: Volume 46, IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. IARC of WHO, 1998. 2 ~ 24

[2] Olaf Schröder, Jürgen Krahel, Axel Munack. Environmental and health effects caused by the use of biodiesel[J]. SAE, 1999, **108** (4):1756 ~ 1766.

[3] Morey C J, Mark J. Diesel passenger vehicles: can they meet air quality needs and climate change goals? [J]. SAE, 2000, **109** (44):869 ~ 882.

[4] Kent Nord. Particles and unregulated emissions from CI engines subjected to emission control [D]. Luleå: Luleå University of Technology, 2005. 27 ~ 32.

[5] Charles H Hobbs. Testing of biodiesel exhaust emissions [R]. Jefferson City: National Biodiesel Board (NBB), 2000. 34 ~ 38.

[6] 葛蕴珊,陆小明,吴思进,等. 车用增压柴油机燃用不同掺混比生物柴油的试验研究[J]. 汽车工程,2005,**27**:278 ~ 280.

[7] 葛蕴珊,陆小明,吴思进,等. 废食用油生物柴油的制备及其

掺烧的动力与排放特性[J]. 环境科学,2005, **26**(3):12 ~ 15.

[8] 葛蕴珊,张世鹰,郝利君. 生物柴油在柴油机中的应用研究 [J]. 内燃机工程,2004, **2**: 12 ~ 14.

[9] 袁银南,江清阳,孙平,等. 柴油机燃用生物柴油的排放特性研究[J]. 内燃机学报,2003, **6**: 223 ~ 227.

[10] Alan Rawle. Basic principles of particle size analysis [Z]. Worcestershire: Malvern Instruments Limited, 2001.

[11] 张炳花,唐太平,杨正红. 马尔文激光粒度分析技术及其在石化行业中的应用优势[J]. 现代科学仪器,2000, **2**: 68 ~ 71.

[12] Jürgen Krahel, Axel Munack, Olaf Schröder, *et al.* Influence of biodiesel and different designed diesel fuels on the exhaust gas emissions and health effects[J]. SAE, 2003-01-3199.

[13] Dong Gang, Chan Tat Leung. Particle number and particle size distributions along the vehicular exhaust plume from a light duty diesel vehicle[J]. Trans Actions of CSICE, 2006, **1**:50 ~ 56.

[14] Maricq M, Podsiadlik D, Chase R. Particle size Distributions of Motor Vehicle Exhaust PM: A comparison between ELPI and SMPS measurements[J]. Aerosol Science and Technology, 2000, **33**: 239 ~ 260.

[15] Thomas D Durbin, Kathy Cocker, John F. Collins, *et al.* Evaluation of the effects of biodiesel and biodiesel blends on exhaust emission rates and reactivity-2[R]. Diamond Bar: South Coast Air Quality Management District Technology Advancement Office, 2001. 25 ~ 29.

[16] Anne Smekens, Ricardo Henrique Moreton Godoi, Patrick Berghmans, *et al.* Characterization of soot emitted by domestic heating, aircraft and cars using diesel or biodiesel[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2005, **52**: 45 ~ 62.