

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.11.002

柴油机燃用小桐子油燃烧与排放研究*

罗福强¹ 王子玉¹ 梁昱² 郭健¹

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013; 2. 贵阳学院机电系, 贵阳 550003)

【摘要】 分析了小桐子油的主要成分及理化性质。以 ZH1115 型直喷柴油机作为试验样机,用不同比例的油料作为燃料,测量了气缸压力及 NO_x、HC、CO 和烟度等废气排放,分析其负荷特性。燃用小桐子油与燃用柴油时相比,发动机气缸压力和压力升高率,NO_x、HC 排放和排温均较低,烟度相当,只有 CO 排放略高。供油提前角提前时,燃用小桐子油的发动机气缸压力和压力升高率增大,NO_x 排放量增加,排气温度略有降低,CO 排放量变化不大,HC 排放量减少。

关键词: 柴油机 小桐子油 燃烧 排放

中图分类号: TK421+.2; S216.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)11-0008-05

Investigations of Combustion and Exhaust Emissions of a Diesel Engine Using *Jatropha curcas* Oil

Luo Fuqiang¹ Wang Ziyu¹ Liang Yu² Guo Jian¹

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
2. Department of Mechanical and Electronic Engineering, Guiyang University, Guiyang 550003, China)

Abstract

The main components and properties of physics and chemistry of *Jatropha curcas* oil were analyzed. The characteristics of performances, combustion and exhaust emissions of a ZH1115 diesel engine using different fuels were measured. It is found that when the engine using *Jatropha curcas* oil, the cylinder pressure, the pressure rise rate, emissions of NO_x and HC, and the exhaust temperature were all lower than using diesel, the smoke was at equivalent level; however, the CO emissions was higher. The cylinder pressure and pressure rise rate and its NO_x emission increased, but when the advance angle of fuel supply increased, the exhaust temperature decreased a little, the CO emission had little change, and HC emission reduced.

Key words Diesel engine, *Jatropha curcas* oil, Combustion, Emission

引言

能源植物具有资源丰富、种类广泛、不受地域限制、生长快、周期短、抗逆性强、生物质能含量高、供给稳定等优点,可为未来大规模利用提供稳定的原料,其中植物油作为一种可再生能源,是一种很有前途的代用燃料^[1~3]。与常用的几种油料作物相比,

小桐子作为燃料的成本较低,而且其副产品种类丰富,利用价值高,有很高的经济价值,所以它是世界公认的生物能源树。

小桐子又名麻疯树、膏桐、小油桐、绿玉树等,为大戟科麻疯树,属落叶灌木或小乔木,树高一般 2~5 m,雌雄同株。原产于热带美洲,现广泛分布于亚热带及干热河谷地区。小桐子是喜光阳性植物,因

收稿日期: 2009-12-31 修回日期: 2010-02-26
* 贵州省科学技术基金资助项目(黔科合 J 字[2008]2036)和江苏省动力机械清洁能源与应用重点实验室对外开放基金资助项目(QK08001)
作者简介: 罗福强,教授,博士生导师,主要从事发动机工作过程与排放控制研究,E-mail: luofq@ujs.edu.cn

其根系粗壮发达,具有较强耐干旱能力。小桐子种仁含油率 40% ~60% ,最高可达 66. 32% ,经加工可制成优良油料,其副产品可为生物农药、医药、饲料、活性炭等综合利用。利用小桐子进行燃料开发和利用有很大的意义和必要性^[4~5]。本文对燃用小桐子油的柴油机在几种工况下的缸内压力与排放进行测量与分析,以求对小桐子油作为柴油机燃料的应用提供参考依据。

1 小桐子油的理化性质分析

表 1 给出了小桐子油和柴油理化特性的比较^[6~7]。

表 1 0 号柴油和小桐子油的性质比较
Tab.1 Characteristics comparison between 0# diesel oil and *Jatropha curcas* oil

参数	数值	
	0 号柴油	小桐子油
平均相对分子质量	200 ~ 240	850 ~ 900
密度(20℃)/g·cm ⁻³	0. 839	0. 912
运动黏度(40℃)/mm ² ·s ⁻¹	3. 048	33. 49
质量低热值/MJ·kg ⁻¹	42. 5	37. 55
十六烷值	40 ~ 55	51
理论空燃比	14. 3	12. 3
冷滤点/℃	4	8
闪点/℃	67	279
凝点/℃	0	-9
硫含量/%	0. 051 7	0. 002 43
碳含量/%	86. 92	78. 09
氢含量/%	13. 06	11. 14
氧含量/%	<0. 4	10. 77
馏程 50% 回收温度/℃	≤300	
馏程 90% 回收温度/℃	≤355	
馏程 95% 回收温度/℃	≤365	

由表 1 所列数据可知,与常规柴油相比,小桐子油作为发动机代用燃料,具有如下特点:

(1) 主要化学成分是由脂肪酸和甘油化合而成的天然高分子甘油三酸脂,粘度较高,从而导致燃油流动性和挥发雾化性能较差。其脂肪酸成分为直链脂肪酸酯(主要以 C16 和 C18 为主),不含支链结构,也几乎不含 S 和 N,对降低 PM 和 NO_x 排放有利,同时也为安装进一步降低排放的后处理装置提供了保障。

(2) 十六烷值较高,且分子结构中含氧,从而使理论空燃比比柴油小,燃烧更完全,能量利用率较高。

(3) 密度比柴油大,但质量低热值比柴油低 11% 左右,两者乘积(体积低热值)之比为 0. 96(即

小桐子油单位体积包含能量约为柴油的 0. 96 倍),因此燃用小桐子油实际上对柴油机的动力性能影响并不大。

(4) 其主要成分是油酸和亚油酸等沸点较低的脂肪酸,故而燃料挥发性能较好,有利于扩散燃烧。

(5) 作为生物质能,有别于石油燃料的最大特点是可再生且降解率高。由于小桐子在生长过程中是通过吸收大气中的 CO₂进行光合作用来合成有机物的,因此将小桐子油作为柴油机代用燃料,对大气中的 CO₂含量没有影响,可以缓解温室效应。

此外,与其他植物油相比,小桐子油具有以下优良特性:具有较高的十六烷值;与大豆油相比,具有更低的酸值和运动粘度及更好的氧化稳定性;与蓖麻油相比,具有更低的运动粘度;与棕榈油相比,具有更佳的低温特性。小桐子油及其生物柴油的粘度、密度及游离脂肪酸在储藏期间很稳定^[8]。

2 试验装置及试验方案

试验所用柴油机为 ZH1115 型直喷式柴油机,主要技术参数见表 2。试验中保持发动机参数不变。试验利用江淮动力 JDEMS-2000 排放测试分析系统和 FQD-102A 数字式烟度计分别对该机的 CO、HC、NO_x 和碳烟进行了测试。利用自行开发的内燃机工作过程测量分析系统^[9],对柴油机示功图进行了测录分析。

表 2 ZH1115 型直喷式柴油机主要技术参数
Tab.2 Main technical parameters of ZH1115 diesel engine

参数	数值
型式	单缸卧式、水冷、四冲程
进气方式	自然吸气
缸径×冲程/mm×mm	115×115
压缩比	16. 5
连杆长度/mm	185
燃烧室型式	ω
发动机排量/L	1. 194
涡流比	2. 7
额定功率/kW (r/min)	14. 7(2 200)
最大转矩/N·m (r/min)	71. 47(1 760)

图 1 为试验台架布置图。其中副油箱 6 可以更换不同燃料。试验燃料分别为柴油和小桐子油。测试了不同燃料的柴油机性能和排放。

3 燃烧过程及排放分析

图 2 为不同供油提前角下燃用不同燃料时的发

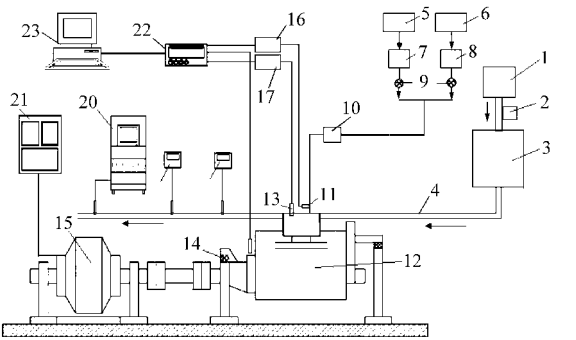


图1 试验台架布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of test bed

1. 空气滤清器 2. 进气流量计 3. 稳压箱 4. 进气管 5. 柴油箱 6. 副油箱 7,8. 油耗仪 9. 阀门 10. 可控加热装置 11. 热阻式温度传感器 12. 数显表 10. 油滤器 11. 燃油压力传感器 12. 柴油机 13. 气缸压力传感器 14. 角标及转速传感器 15. 测功机 16,17. 电荷放大器 18. 排温表 19. 烟度计 20. 排气分析仪 21. 测功机操控系统 22. 数据采集器 23. 计算机

动机在标定工况时的气缸压力对比。图3为不同供油提前角下燃用不同燃料时的发动机在标定工况下的压力升高率的对比。由图2a、图3a可知,原机供油提前角下,燃用小桐子油时的气缸压力峰值和最大压力升高率均略低于燃用柴油时,并且所在相位有所提前,因而燃烧较柔和。这是由于小桐子油的粘度较大,实际喷油的时刻较柴油略微滞后,滞燃期短,在滞燃期形成的可燃混合气的量较少,浓度较低。另外,小桐子油的低热值略低于柴油,而且小桐子油的粘度大,导致在扩散燃烧时,也会消耗比柴油更多的热量。而在图2b、图3b中可以看出当供油提前角提前时,气缸压力峰值和最大压力升高率都是燃用小桐子油比燃用柴油时更大。这主要是由于喷油提前导致小桐子油着火始点提前,使得急速燃烧期更接近于上止点,使得最高燃烧压力高于柴油。同时小桐子油为含氧燃料,因此一旦着火,燃烧较

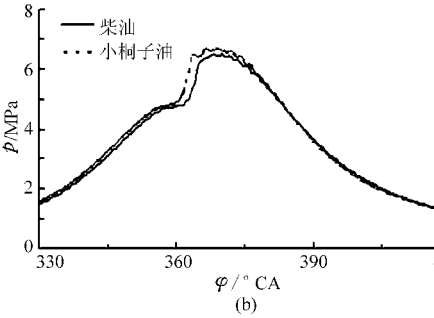
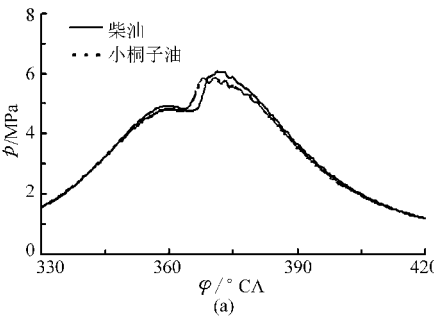


图2 标定工况下不同燃料的气缸压力对比曲线

Fig.2 Cylinder pressure of different fuels at their rated conditions

(a) 原机供油提前角 (b) 供油提前角提前3°CA

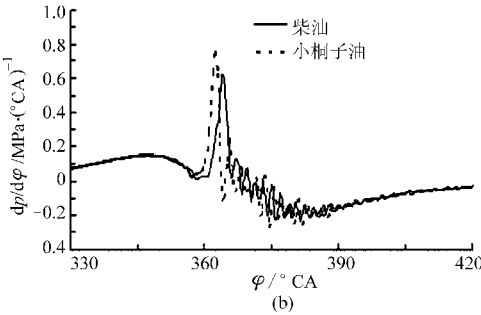
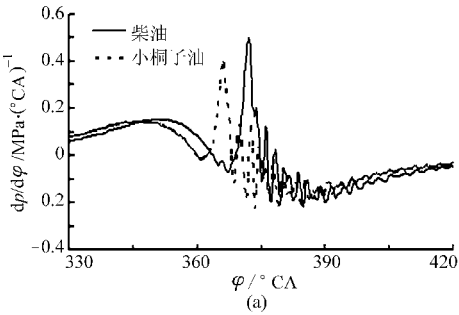


图3 标定工况下不同燃料的压力升高率对比曲线

Fig.3 Pressure rise rate of different fuels at their rated conditions

(a) 原机供油提前角 (b) 供油提前角提前3°CA

猛,导致最大增加压力升高率陡峭。由于含氧燃料的特性是燃烧速率较快,因而更接近等容燃烧^[10]。而且喷油时刻延迟的影响对燃烧的影响降低,所以燃用小桐子油时的发动机燃烧变得更充分,气缸压力峰值、最大压力升高率都略高于柴油。

图4为不同供油提前角下燃用不同试验燃料在2 200 r/min 负荷特性时的排气温度。由图可知,不

同试验燃料的排气温度相差不大,在原机供油提前角下,小桐子油略高于柴油。这是由于小桐子油的挥发性能较差,在扩散燃烧中,燃烧持续期更长,所以排温相应更高。供油提前角提前时,在负荷较大的工况下,不同燃料的燃烧更加充分,柴油的排温升高,而小桐子油由于含氧量高,在速燃期内燃烧的燃料量比柴油多,导致小桐子油有较高程度的预混燃

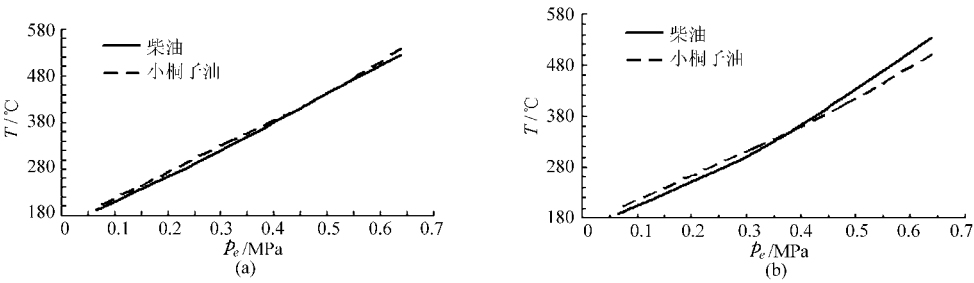


图 4 不同燃料的排温对比曲线

Fig.4 Exhaust temperatures of different fuels

(a) 原机供油提前角 (b) 供油提前角提前 3°CA

烧和较低程度的扩散燃烧,燃烧的等容度高,过后燃烧减少,热量利用率好,排气温度降低。

图 5 为发动机燃用不同燃料在 2 200 r/min 时负荷特性下的烟度变化,由图可知,在原机供油提前下,燃用柴油时的烟度稍大,其原因是,小桐子油的含碳量比柴油少,氢碳原子数又比柴油高,燃烧烟度比柴油低。供油提前后,燃用小桐子油的发动机在负荷较大时烟度升高速度较快,这是由于供油提前后燃烧更充分,小桐子油燃烧速度很快,快速燃烧导致烟度的迅速增大。而负荷较小时,缸内温度较低,且由于含氧量高的缘故使小桐子油燃烧比较平稳,所以在供油提前后,负荷较小的区域,燃用小桐子油的烟度变化不大。

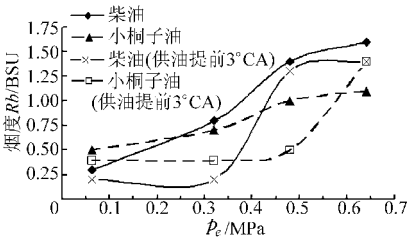


图 5 不同燃料的烟度对比曲线

Fig.5 Smokes of different fuels

图 6 为发动机燃用不同试验燃料在 2 200 r/min 时负荷特性下的排放对比。由图 6a 可知在原机供油提前角下,燃用小桐子油时发动机的 NO_x 排放放在各种负荷下均比柴油低。虽然小桐子油含氧有利于

NO_x 的生成,但如前所述,柴油机燃用小桐子油的燃烧始点比柴油提前,并且燃烧速度快,高温持续时间短,再加上小桐子油的热值较低,几乎不含具有环状结构的芳香烃,导致局部绝热燃烧温度较低^[11],最高燃烧温度也比柴油低(燃烧峰值压力较低,一般会导致更低的燃烧温度),使得 NO_x 的“冻结”时间提前,从而在一定程度上有效地抑制了 NO_x 的生成,综合的影响使 NO_x 排放比燃用柴油时有所降低。其原因是小桐子油的燃烧速度较慢,缸内最高压力、温度比柴油低,故其 NO_x 比柴油机要低一些,特别是在负荷小,燃烧组织不良的工况下,当供油提前角提前时,缸内最高压力、温度增加,因此 NO_x 排放增加。供油提前角的提前,导致燃用小桐子油时发动机燃烧速度增大,速燃期的缸内温度也随之增大,使得 NO_x 的排放也增加。

由图 6b 可以看出发动机燃用不同燃料的 CO 排放。燃用小桐子油时发动机的 CO 排放放在各种负荷下均比柴油略高。在中低负荷时,两者差距较大,在大负荷时,小桐子油的 CO 排放降低幅度较大。由于柴油是由各种烃类组成的混合物,而小桐子油是由各类脂肪酸组成,粘度大,雾化性能差,其喷射油束在高温下会发生一系列化学反应,其中包括热裂解(产生更轻的挥发性化合物)和高温喷雾核心的聚合反应(产生低挥发性的重质化合物)^[12]。产生的难于雾化的重质化合物会影响油气混合过程,

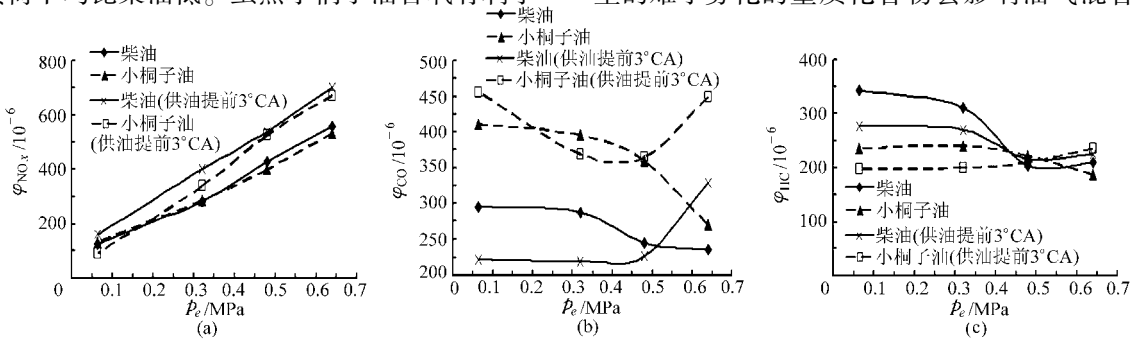


图 6 不同燃料的排放对比曲线

Fig.6 Emission comparison of different fuels at their rated conditions

(a) NO_x (b) CO (c) HC

从而在燃烧过程中由于局部富油缺氧而产生较多的 CO。中低负荷时,缸内温度相对较低,再加上小桐子油的粘度大,油滴索特平均直径也较大(约为柴油的 1.8 倍),使得油滴的蒸发时间增长,从而降低油气混合速率,导致不完全燃烧^[13]。而大负荷时,缸内温度相对较高,燃烧得到改善。但供油提前提前,燃用小桐子的燃烧情况恰恰相反,特别是负荷较大的工况,小桐子油的快速燃烧必将导致不完全燃烧,CO 的排放量也迅速增加。

由图 6c 可以看出,与 0 号柴油相比,在所有的工况点上,燃用小桐子油时的 HC 排放分别平均降低了 15.3%。这是因为,直喷式柴油机的 HC 排放主要来源于油束中火焰难以传播的混合气过稀区和不完全燃烧的过浓区以及发生火焰淬熄的油束碰壁激冷区,而小桐子油的滞燃期较短,在滞燃期内产生的过稀混合气区域较小;再加上含氧,使扩散燃烧阶

段的氧化作用增强。但在供油提前角提前后,在负荷较大时,也是由于快速燃烧的缘故,过浓区燃烧的比例增大,因而,燃用小桐子油时 HC 排放增大,甚至略高于燃用柴油时的 HC 排放。

4 结束语

通过对燃用小桐子油的发动机试验,研究其燃烧、排放特性,结果表明:由于小桐子油的粘度较高,从而导致燃油流动性和挥发雾化性能较差,其燃烧的低热值较低,而且为含氧燃料,氢碳原子数比较高。所以,与燃用柴油的发动机相比,燃用小桐子油的发动机其气缸压力峰值、最大压力升高率较低,NO_x 排放较低,烟度相当,HC 排放和排温均较低,只有 CO 排放略高。供油提前角提前时,燃用小桐子油的发动机气缸压力峰值增大,NO_x 排放量增加,CO 排放量变化不大,HC 排放量减少。

参 考 文 献

- 1 钱叶剑,左承基. 柴油机燃用生物燃料的研究现状与展望[J]. 拖拉机与农用运输车,2006(3): 12~16.
Qian Yejian, Zuo Chengji. Review of researches on biofuel as fuels for diesel engines[J]. Tractor & Farm Transporter, 2006(3): 12~16. (in Chinese)
- 2 吴创之,周肇秋,阴秀丽,等. 我国生物质能源发展现状与思考[J]. 农业机械学报,2009,40(1): 91~99.
Wu Chuangzhi, Zhou Zhaoqiu, Yin Xiuli, et al. Current status of biomass energy development in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(1): 91~99. (in Chinese)
- 3 Seppo A Niemi, Timo T Murtonen, Mika J Lauren. Exhaust particulate emissions of a mustard seed oil driven tractor engine [C]. SAE Paper 020866, 2002.
- 4 于曙明,孙建昌,陈波涛. 贵州的麻疯树资源及其开发利用研究[J]. 西部林业科学, 2006, 35(3): 14~17.
Yu Shuming, Sun Jianchang, Chen Botao. Exploration and utilization of *Jatropha curcas* resources in Guizhou Province[J]. Journal of West China Forestry Science, 2006, 35(3): 14~17. (in Chinese)
- 5 苏有勇,刘士清,张无敌,等. 小桐油制备生物柴油的研究[J]. 新能源及工艺,2006(1): 22~26.
Su Youyong, Liu Shiqing, Zhang Wudi, et al. Study on preparation of biodiesel with *Jatropha curcas* oil [J]. Energy Engineering, 2006(1): 22~26. (in Chinese)
- 6 余珠花,刘大川,刘金波,等. 麻风树籽油理化特性和脂肪酸组成分析[J]. 中国油脂, 2005,30(5): 30~31.
She Zhuhua, Liu Dachuan, Liu Jinbo, et al. Physicochemical properties and fatty acid composition of *Jatropha curcas* seed oil[J]. China Oils and Fats, 2005,30(5): 30~31. (in Chinese)
- 7 罗福强,王子玉,梁昱,等. 作为燃油的小桐子油的物化性质及黏温特性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 227~231.
- 8 Neyda C Om Tapanesa, Donato A Gomes Arandaa, José W de Mesquita Carneiro, et al. Transesterification of *Jatropha curcas* oil glycerides: theoretical and experimental studies of biodiesel reaction[J]. Fuel, 2008, 87(10~11): 2 286~2 295.
- 9 罗福强,高宗英. 柴油机瞬变工况瞬时转速及工作过程测量分析系统[J]. 内燃机工程,1996, 17(1): 13~17.
- 10 张强. 柴油机直接使用植物油燃料的性能及燃烧过程[J]. 内燃机学报,1991, 9(4): 358~362.
Zhang Qiang. Performances and combustion process of diesel engine operating on plant oil fuel[J]. Transactions of CSICE, 1991,9(4): 358~362. (in Chinese)
- 11 黄勇成,潘克煜,李永旺,等. 直喷式柴油机燃用 F-T 柴油时的性能与排放[J]. 内燃机学报, 2005,23(6): 497~502.
Huang Yongcheng, Pan Keyu, Li Yongwang, et al. Performance and emissions of a direct injection diesel engine operating on Fischer-Tropsch (F-T) diesel fuel[J]. Transactions of CSICE, 2005,23(6): 497~502. (in Chinese)
- 12 Bari S, Lim T H, Yu C W. Effects of preheating of crude palm oil (CPO) on injection system performance and emission of a diesel engine[J]. Renewable Energy, 2002,27(3): 339~351.
- 13 Pugazhavadivu M, Jeyachandran K. Investigations on the performance and exhaust emissions of a diesel engine using preheated waste frying oil as fuel[J]. Renewable Energy, 2005,30(14): 2 189~2 202.