

使用基于生物柴油的含氧混合燃料降低柴油机排放

Using Biodiesel Based Oxygenated Blend Fuels for Reducing Emissions from Diesel Engines

(申请清华大学工学硕士学位论文)

培 养 单 位 : 汽车工程系

学 科 : 动力工程及工程热物理

研 究 生 : 吴 复 甲

指 导 教 师 : 王 建 昕 教 授

二〇〇八年五月

使用基于生物柴油的含氧混合燃料降低柴油
机排放

吴复甲

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：

清华大学拥有在著作权法规定范围内学位论文的使用权，其中包括：（1）已获学位的研究生必须按学校规定提交学位论文，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文；（2）为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所供校内师生阅读，或在校园网上供校内师生浏览部分内容。

本人保证遵守上述规定。

（保密的论文在解密后遵守此规定）

作者签名： _____ 导师签名： _____

日 期： _____ 日 期： _____

摘 要

生物柴油是一种可再生的清洁含氧替代燃料，在柴油机上使用不但有很好的石油燃料替代意义，而且能够降低碳烟和微粒排放。日益严格的排放法规迫使柴油机后处理系统越来越复杂，成本也越来越高。从燃料设计角度降低柴油机排放从而减轻对后处理系统的依赖也许能为柴油机寻找新的出路。

本论文围绕基于生物柴油的含氧混合燃料设计以降低柴油机排放这一思路，以发动机台架试验的形式研究了不同来源生物柴油以及基于生物柴油的含氧混合燃料的动力性、燃油经济性和排放特性，分析了燃料理化参数对柴油机排放的影响，并在此基础上在一台经过特殊标定的柴油机上进行了 ESC 循环测试，探索了柴油机不采用后处理满足国四排放法规的可能性。

本文研究的 5 种不同来源的生物柴油包括棉籽油甲酯、大豆油甲酯、菜籽油甲酯、棕榈油甲酯和地沟油甲酯。研究表明，不同来源生物柴油的 PM 排放有较大区别，相对于柴油平均降低 53%~69%不等。造成 PM 排放差异的主要理化参数是氧含量、十六烷值和粘度，其中氧含量和粘度主要影响 PM 中的碳烟成份 DS，而十六烷值则主要影响非碳烟成份 NSF。

本文研究的含氧混合燃料包括生物柴油-柴油混合燃料、生物柴油-乙醇混合燃料、生物柴油-DMC 混合燃料以及生物柴油-DMM 混合燃料。研究表明，DS 排放随氧含量的增加而降低，但并不是线性关系。十六烷值影响 NSF 排放，在 EGR 条件下则更加明显。通过燃料设计实现柴油机不采用后处理满足国四排放标准希望很大。含氧混合燃料设计应主要考虑燃料的氧含量、十六烷值和粘度。

关键词：生物柴油；含氧混合燃料；柴油机排放；燃料设计

Abstract

Biodiesel is renewable, clean and alternative oxygenated fuel. Combusting biodiesel could not only partly replace petroleum, but could also reduce smoke and particulate emissions. Stringent regulations have forced diesel engine aftertreatment systems to be more and more complex and costly. Reducing emissions by fuel design to lessen the dependence on aftertreatment may be a new way out for diesel engines.

This study was based on the concept of designing biodiesel-based oxygenated blend fuels to reduce diesel engine emissions. On engine test bench, biodiesels of different origins and different biodiesel-based oxygenated blend fuels were tested. Engine performance, fuel economy and emissions characteristics were investigated and their relationship with fuel physicochemical properties were then discussed. On the basis of this, ESC cycle tests were conducted on a specially calibrated engine to look for the possibility of meeting the phase IV standard without aftertreatment.

Five different biodiesels was studied: cottonseed methyl ester, soybean methyl ester, rapeseed methyl ester, palm oil methyl ester and waste cooking oil methyl ester. Results revealed that using different biodiesels resulted in PM reductions ranging from 53% to 69% compared to diesel fuel. Oxygen content and viscosity mainly affected dry soot (DS) in PM, while cetane number mainly affected nonsoot fraction (NSF) in PM.

The oxygenated blend fuels studied included biodiesel-diesel, biodiesel-ethanol, biodiesel-DMC and biodiesel-DMM blends. Results revealed that DS was reduced as oxygen content increased, although not linearly. Cetane number mainly affected NSF emission, especially when EGR was used. By using biodiesel-based oxygenated blend fuel, it has a very high possibility for diesel engines to meet the phase IV standard without aftertreatment. Fuel design should first consider oxygen content, cetane number and viscosity.

Key words: biodiesel; oxygenated blend fuel; diesel emissions; fuel design

目 录

第1章 引言	1
1.1 课题的背景及意义	1
1.2 生物柴油在柴油机上应用研究进展	5
1.2.1 国外研究进展	6
1.2.2 国内研究进展	9
1.2.3 国内外研究进展总结	11
1.3 研究内容及本文结构	12
第2章 试验装置及排放测试方法	14
2.1 发动机性能试验台架	14
2.1.1 试验发动机	15
2.1.2 主要测试仪器	16
2.2 气态排放物测试方法	18
2.3 微粒采集及其组分分离方法	20
2.3.1 微粒稀释与采集系统	20
2.3.2 微粒组分分离方法	21
2.4 本章小结	23
第3章 不同来源生物柴油性能与排放特性对比	24
3.1 试验用燃料理化特性	24
3.2 试验方案	26
3.3 结果与讨论	27
3.3.1 动力性	27
3.3.2 燃油经济性	28
3.3.3 PM 及其组分排放特性	31
3.3.4 NO _x 排放特性	34
3.3.5 HC 排放特性	36
3.3.6 CO 排放特性	39
3.4 本章小结	39
第4章 基于生物柴油的含氧混合燃料排放特性	41
4.1 混合燃料的制备	41

目 录

4.2 试验方案	45
4.3 结果与讨论	45
4.3.1 燃油经济性	45
4.3.2 PM 及其组分排放特性	48
4.3.3 NO _x 排放特性	50
4.3.4 HC 排放特性	52
4.3.5 CO 排放特性	54
4.3 本章小结	55
第 5 章 发动机燃用含氧混合燃料 ESC 循环测试	57
5.1 试验用燃料	57
5.2 试验方案	58
5.3 结果与讨论	59
5.3.1 PM 及其组分排放特性	59
5.3.2 NO _x 排放特性	63
5.3.3 HC 排放特性	64
5.3.4 CO 排放特性	65
5.3 本章小结	66
第 6 章 结论	68
6.1 研究总结	68
6.2 需进一步展开的工作	69
参考文献	70
致谢与声明	73
个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果	74

第1章 引言

1.1 课题的背景及意义

石油资源的枯竭和大气环境的恶化自从上世纪 70 年代起就一直是人类社会可持续发展面临的两大难题。石油燃料为不可再生能源，只会越来越少。另一方面，内燃机产生的有害排放物在大气污染源中占的比重也越来越高。车用内燃机的发展受到能源利用效率和日趋严格的排放法规的双重挑战。

我国是一个石油资源持续短缺的国家，而我国的石油消费量却快速增长，从 1990 年的 1.15 亿吨增加到 2006 年的 3.49 亿吨，居世界第二位，其中原油及石油产品净进口量 1.68 亿吨，占总消耗量的 48%^[1]。国务院发展研究中心和国家发改委能源所研究表明，到 2020 年，在采取各种节能措施、控制国内汽车保有量在 1 亿辆的前提下，国内石油需求量为 4.5 亿吨，年石油进口量可能达到 2.8 亿吨，对外依存度为 60%^[2]。随着国民经济的快速发展，我国石油燃料依赖进口的程度还将扩大，国际石油资源日益减少的不可逆转的变化将对我国的国民经济产生巨大影响，直接威胁到我国的能源安全。汽车作为能源的消耗大户，2010 年消耗的石油能源约为当年全国石油总需求的一半左右。因此，解决汽车能源问题对我国意义特别大，从长远来看，寻求替代燃料是降低汽车使用石化燃料比重的重要途径，同时也是从根本上解决汽车能源问题的唯一方式。

汽车排放物已成为空气污染的重要来源之一。美国目前约有各种车辆 1.7 亿辆，在主要大气污染物中，汽车排出的一氧化碳(CO)占 66%、氮氧化物(NO_x)占 43%、碳氢化物(HC)占 31%、微粒(PM)占 20%^[3]。而且近年来随着汽车保有量的迅速增加，我国的生态环境和大气环境将进一步恶化。同时我国汽车保有量增长飞速，2004 年我国汽车保有量为 2693 万辆，而到 2006 年仅两年时间就已增长为 3697 万辆^[1]。我国汽车主要集中在大中城市，由于城市道路建设滞后，车辆行驶速度相对较低，卡车超载现象普遍，加重了汽车的污染物排放。据环保部门统计，1998 年我国机动车排放对大气污染的分担率在北京 CO 达 63%，NO_x 达 37%，HC 达 74%，在上海分别达 86%，56%和 96%。控制我国汽车尾气有害物质的排放刻不容缓。

基于能源和环境因素的严峻形势，近十几年来许多国家竞相展开了替代燃

料的研究和应用工作。目前已开发的替代燃料种类很多,根据使用情况可以把它分为三大类^[4]: (1) 气体燃料,包括天然气、氢气、沼气等; (2) 合成油,即由煤和天然气或生物质物质生产的液体燃油; (3) 含氧替代燃料,包括醇、醚和酯类,如甲醇、乙醇、二甲醚、生物柴油等。

天然气的主要成份是甲烷(CH_4),大多数天然气的甲烷含量在90%以上。天然气的使用形式主要有压缩天然气(CNG),液化天然气(LPG)。天然气具有比汽油高的多的辛烷值,在汽油机上可以提高压缩比。天然气本身也是一种清洁燃料,由于是气体燃料,很容易和空气混合形成均质混合气,在发动机运转范围内几乎不会产生炭烟。但是无论是压缩天然气还是液化天然气,作为发动机替代燃料的运输、储存成本很高,而且由于天然气发动机的续驶里程较短,势必要重新建立比石化燃料更复杂的加气网络。

氢气是替代燃料中唯一不含碳的燃料,燃烧后的直接产物是水(H_2O),有害排放物只有 NO_x ,只有 NO_x 的后处理比较简单,对环境保护具有重要意义。而且氢是宇宙中最丰富的物质之一,可以说它的储量是无穷无尽的。有人认为氢能是21世纪最有前景的替代能源。氢能源早在20世纪70年代就引起人们的关注,目前已是新能源的研究热点之一。但是目前制取氢的成本和能耗仍然很高,而且氢气作为汽车燃料其安全的储存和运输将十分困难,目前要大幅度推广氢气在发动机上的应用不太现实。

合成油一般是指利用F-T(Fischer-Tropsch)方法将煤炭、天然气或者生物质等资源转化为可供发动机使用的液体燃料,根据原料来源不同分别称为Coal-to-liquid(CTL)、Gas-to-liquid(GTL)、Biomass-to-liquid(BTL)^[5]。F-T合成油的主要成份是直链饱和烃,硫含量极小,十六烷值(CN)较高,是一种高质量的柴油。使用F-T合成油柴油机的供油系统不必做过多改动,而且可以和普通柴油以任意比例掺混使用^[4, 5]。但是目前F-T的主要缺点是低温流动性差、润滑性较差,而且生产成本仍然很高。

甲醇是含氧燃料的一种,它主要以煤炭为原料生产,目前工艺比较成熟^[4]。甲醇可以作为汽油机替代燃料也可以作为柴油机替代燃料。甲醇的辛烷值比汽油高,可以提高压缩比改善热效率。但是甲醇的热值比汽油低很多,因此实际替代燃料供给系统需要做相应改变。甲醇的十六烷值低,而且和柴油混合比较困难,不太适合在柴油机上使用。甲醇作为替代燃料的主要问题是由于甲醇的毒性难以被使用者接受,而且运输储存成本较高。另外美国EPA还对甲醇燃烧

后的非常规排放物有所担心。

二甲醚也是含氧替代燃料的一种，它可以由甲醇经过脱水制成，因此也可以煤炭为原料生产。二甲醚十六烷值较高，多数研究认为二甲醚是柴油机的理想替代燃料。二甲醚由于含氧能使燃烧更充分，同时也不会产生炭烟，而且二甲醚的蒸发潜热比柴油大，有利于降低燃烧最高温度，使 NO_x 排放降低。但是作为柴油替代燃料的最大问题是由于其沸点低、粘度小、润滑性能差，热值低等特性，需要对发动机供油系统做较大调整，这大大增加了现有发动机的改装成本。

乙醇和生物柴油是由生物资源制成的含氧燃料，由于具有可再生和来源广泛等特点受到了很多国家的重视和研究，得到了快速发展。在各国的能源战略中，都将生物质替代能源作为化石能源之后、新能源解决方案出现之前的缓冲能源。目前生物乙醇是在汽车上应用最广泛的生物质替代燃料，在巴西、美国、欧盟一些主要国家均已成功的进入市场，在我国的很多省份也已经推广使用。制取燃料乙醇的生物质原料资源主要有玉米、高粱、小麦等淀粉类资源或者糖类资源。乙醇和汽油能直接互溶，目前乙醇和汽油掺混在汽油机上使用的技术已经比较成熟。乙醇加入汽油后能提高辛烷值，使之燃烧得更加充分，从而降低尾气中 CO 和 HC 化合物的含量。由于乙醇的理化特性与柴油相差较大，在柴油机上的应用具有一定难度，正处于研究阶段^[6]。

生物柴油（Biodiesel）是通过可再生的天然油脂资源生产的一种柴油替代燃料，它的化学成份是长链脂肪酸酯。不做任何处理的天然油脂由长直链脂肪酸的甘油三酯组成，其特性许多方面不适合柴油机的要求^[4, 7]。但是天然油脂与甲醇或者乙醇进行酯交换反应后，生成的脂肪酸甲酯或脂肪酸乙酯分子量与柴油十分接近，可以作为柴油机替代燃料。

生物柴油的来源多种多样，所有能得到天然油脂的资源都可以用来制备生物柴油。我国化石能源资源十分短缺，但是生物质能资源丰富。在我国生产生物柴油的天然油脂可以来自于油料作物，如菜籽油、棉籽油、大豆油等；也可以来自于木本植物所生产的油料，如棕榈油、椰子油、麻风树仁油等；还可以来自于动物脂肪、餐饮废弃油脂或者工业废弃油脂下脚料等^[8]。由于我国地域辽阔，有丰富的天然资源，在我国发展生物质替代燃油具有很重要的现实意义。

生物柴油作为柴油机替代燃料有诸多优势。生物柴油分子的碳链长度在 C_{18}

左右,而柴油的碳链长度在 $C_{16}\sim C_{23}$ 之间^[9],相比于其他柴油替代燃料其理化特性与普通柴油更为接近。生物柴油还可以和柴油以任意比例互溶。许多研究表明,生物柴油能以任何比例和柴油掺混或者直接在柴油机上使用,而不用对柴油机做较大调整^[7, 10],大规模供应也不用对现有燃料供应链做较大调整。生物柴油的十六烷值与柴油接近甚至更高,具有良好的发火性能。另外,生物柴油基本不含硫和芳烃,比柴油更清洁。同时这些长链脂肪酸酯可生物降解,而且闪点高、无毒、挥发性有机成份(VOC)低,具有优良的润滑性能和溶解性能^[7, 11-13]。

不仅如此,发展生物柴油还具有重要的环境意义。生物柴油由于含氧能够部分降低发动机的排放,特别是显著降低柴油机的碳烟排放。美国环保署(EPA)公布的数据表明,生物柴油含有 10%左右的氧,在柴油机中使用能有效降低 HC、CO 和 PM 排放, NO_x 略有上升^[12]。另外生物柴油是可再生资源,能量来源于天然油料植物的光合作用,生产过程中吸收大量 CO_2 ,间接起到了减排温室气体的效果。因此,增加生物柴油的供应比重也会缓解未来温室气体的排放总量。

综上所述可以看出在各种代用燃料中,生物柴油由于理化特性与柴油最为接近,而且具有重要的可再生和降低排放的意义,是替代柴油作为发动机燃料的理想选择。大力发展生物柴油替代燃料具有广阔的前景。

柴油机以其传统汽油机相比的热效率高、燃油经济性好、低速转矩大和良好的耐久性和可靠性等优势,广泛应用于汽车、轮船、工程机械和固定源发电机等各种场合,是目前世界上难以代替的主要动力之一。但随着排放法规的不断加严(如图 1.1 所示),柴油机排放控制技术仍受到巨大的挑战。

柴油机排放物控制的主要目标 PM 和 NO_x ,而这两者本身又具有 trade-off 关系,这给柴油机排放控制带来了很大难度。目前,欧 IV 及其以上排放水平的柴油机基本上采用两种方式控制排放物生成:一是利用高压喷射、增压中冷等措施在缸内控制 PM 的生成,同时采用选择性催化还原(SCR)或者吸附还原(LNT)等后处理装置降低 NO_x 排放;二是利用废气再循环(EGR)、推迟喷油提前角控制在缸内 NO_x 生成,然后利用微粒捕集器(DPF)降低 PM 排放。这两种方式都必须依靠复杂昂贵的后处理装置,而且无论是高压共轨还是 EGR 系统,其成本也都很高。这使得柴油机的生产成本将随着排放法规的加严越来越高。

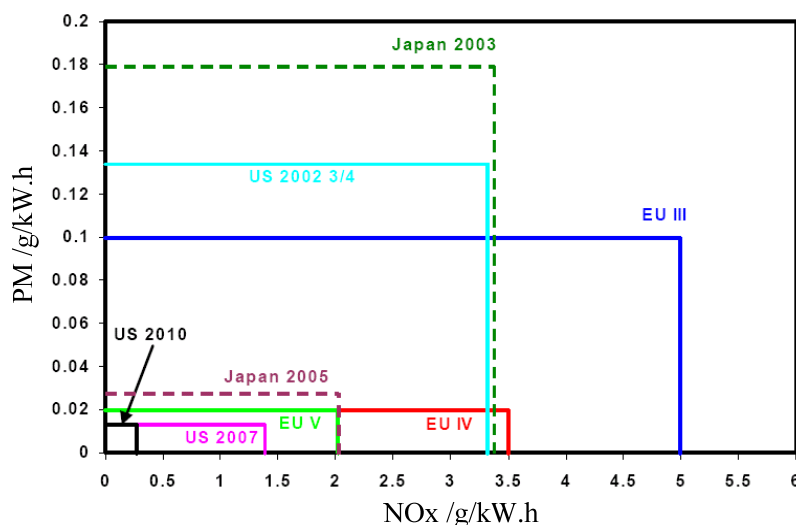


图 1.1 欧、美、日重型柴油机排放法规中 PM 和 NO_x 限值演变^[14]

生物柴油含有 10%左右的氧,能较大幅度的降低柴油机的炭烟和 PM 排放,而对 NO_x 的影响却不大。如果基于生物柴油从燃料设计角度能在缸内控制 PM 排放,则有可能打破 PM 和 NO_x 对于传统柴油的 trade-off 关系,从而在不使用后处理的情况下使柴油机满足更严格的排放标准。从燃料设计角度控制排放物生成也许能为柴油机的发展寻找新的出路。

1.2 生物柴油在柴油机上应用研究进展

生物柴油的发展虽然历史并不长。1983 年,美国人 Graham Quick 首先将亚麻子油的甲酯用于柴油机,开创了生物柴油的研究^[15]。但是生物柴油真正成为研究热点是在 2000 年以后。图 1.2 列出了历年 SAE 关于生物柴油在发动机上的应用的文献数目。可以看出,自从 2000 年以后关于生物柴油在发动机上应用的文章除 2006 年之外基本每年都有大幅增长,其中 2008 年仅统计了春季大会就有 38 篇之多。利用天然油脂制备生物柴油的技术及其在发动机上的应用受到了世界各国越来越多的关注。生物柴油产业也发展很快,即将成为未来替代能源的重要组成部分,在世界各国的能源战略中,都把生物柴油作为后石油时代的一种新能源。

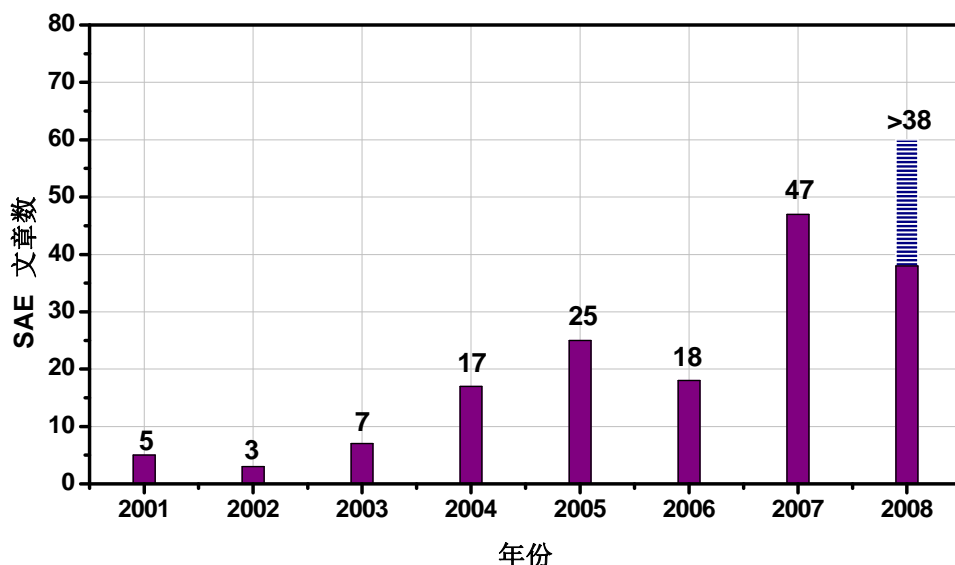


图 1.2 历年 SAE 关于生物柴油在发动机上应用研究的文献

1.2.1 国外研究进展

国外关于生物柴油在柴油机上的应用进行过大量研究，主要研究了柴油机燃用生物柴油的动力性、经济性、燃烧特性与排放特性。美国是最早研究生物柴油的国家，主要以大豆油为来源生产生物柴油。美国联邦政府、国会以及有关州政府通过政令和法案，支持生物柴油的生产和消费，并采取补贴等措施，使生物柴油产业迅速发展起来。欧盟各国关于生物柴油的研究和应用最为广泛，生产原料主要是菜籽油。欧盟各个国家也相继对替代燃料给予立法支持，并对菜籽生产予以补贴，促进了欧盟生物柴油产业的快速发展。日本虽然是一个缺乏生物资源的国家，但也在积极考虑使用生物替代能源，主要是利用废食用油作为生物柴油的原料。

表 1.1 列出了关于生物柴油在发动机上应用的国外部分主要研究机构的研究情况。美国西南研究院 Christopher A. Sharp 等人使用三台增压中冷直喷式柴油机研究使用大豆甲酯生物柴油 B20(20%大豆甲酯+80%柴油)和 B100(100%大豆甲酯+80%柴油)对柴油机 FTP 瞬态循环排放性能的影响^[16]。三台试验用柴油机包括电控单体泵喷射 1997 Cummins N14、1997 DDC Series 50 柴油机和机械泵供油的 1995 Cummins B5.9 柴油机。研究表明，在不使用后处理装置的情况下，同基础柴油相比，B20 使得 CO 降低 7%~21%，NO_x 上升 2%~4%，PM

降低 4%~15%，PM 包含的有机成份上升 13%~31%、硫酸盐降低 10%~30%、干炭烟降低 20%，Cummins N14 和 Cummins B5.9 的 HC 排放分别降低 17%和 32%而 DDC Series 50 的 HC 排放保持不变。B100 使得使得 CO 降低 38%~45%，HC 排放降低 0%~32%，NO_x 上升 4%~13%，PM 降低 28%~50%，PM 中可溶性有机成份 SOF 上升 17%~64%、干炭烟降低 61%~71%。

表 1.1 国外部分主要相关研究机构研究情况

研究单位	发动机	试验生物柴油	掺混比例
美国西南研究院	1. Cummins N14 柴油机 2. DDC Series 50 柴油机 3. Cummins B5.9 柴油机	大豆甲酯	B20,B100
美国明尼苏达大学	1. Cummins ISM 柴油机 2. Caterpillar 3406B 柴油机	大豆甲酯	B20,B85
美国宾州州立大学	Cummins B5.9 柴油机	大豆甲酯	B20
加拿大 BIOBUS	1. Cummins98 机械泵柴油机 2. Cummins2000 电控增压中冷柴油机	3 种不同来源甲酯	B5,B20
FEV 公司	Navistar 7.3L HEUI 柴油机	大豆甲酯	B10,B20 B50,B100
英国伯明翰大学	单缸直喷柴油机	菜籽油甲酯	B100
比利时法兰德斯技术研究院	2 辆乘用车和 3 辆载货车	纯废弃油甲酯	B100
西班牙哈恩大学	Perkins AD3-152 三缸直喷柴油机	废橄榄油甲酯	B100
日本 JOMO 中心	增压中冷直喷柴油机	大豆甲酯	B10,B20 B30,B50

美国明尼苏达大学 Zarling 等人使用 Cummins ISM 和 Caterpillar 3406B 两台柴油机试验研究 B20 和 B85 大豆甲酯生物柴油对柴油机性能影响^[17]。试验表明，Cummins ISM 使用 B20 大豆甲酯生物柴油不同工况下 NO_x 上升 6%、PM 降低 11~18%，PM 中 SOF 成份上升 14%、非挥发性 PM 下降 29~36%；Caterpillar

3406B 使用 B20 不同工况下 NO_x 上升 3~7%, CO 降低 23~27%, PM 降低 43~46%。

美国宾夕法尼亚州立大学 Alam 等人使用 Cummins ISB 5.9L 商品化六缸四气门增压中冷直喷式柴油机研究使用分别以低硫柴油(325×10^{-6})和超低硫柴油(15×10^{-6})为基础柴油的 B20 生物柴油对 AVL 8 工况循环排放性能的影响^[18]。研究表明,同基础柴油相比,使用 B20 生物柴油使得循环加权排放 CO 平均降低 11%、 NO_x 平均降低 4.4%、PM 平均降低 20%、HC 平均降低 16%。

加拿大环境部 BIOBUS 项目,使用分别装配电控燃油泵和机械泵的两台 Cummins 增压中冷柴油机研究以植物油、动物油脂和烹饪油为原料的三种生物柴油的 B5、B20 混合燃料对柴油机 EPA 瞬态循环排放性能的影响^[19]。同纯柴油相比,三种不同原料的 B20 生物柴油使得机械泵柴油机 HC 降低 7.0%~12.6%, CO 降低 17.4%~24.9%, NO_x 变化范围为 -1.5%~+1.1%, 硫酸盐排放降低 12.3%~17.2%; 电控燃油泵柴油机, HC 降低 21%~30%, CO 降低 24.7%~31.4%, NO_x 变化范围为 -4.5%~+1.7%, PM 中元素碳成份降低 17%~23%、有机碳成份上升 1%~12%、硫酸盐降低 14.8%~18.0%、多环芳香烃降低 10%~30%。

德国 FEV 公司在 Navistar 7.3L HEUI 型直喷式柴油机上运行稳态十三工况,研究不同生物柴油掺混量的混合燃料相对于纯柴油的 CO、HC、 NO_x 和 PM 排放变化^[20],表 1.2 为其研究结果。可以看出,掺混不同比例的生物柴油,均能有效降低 CO、HC 和 PM 排放,特别是 HC 的降低效果十分明显,PM 降低效果也比较明显,但缺乏规律性。另一方面,随生物柴油掺混量的增加 NO_x 排放升高。

表 1.2 FEV 公司生物柴油研究结果^[20]

掺混比例/ %	B10	B20	B30	B50	B100
CO/ %	-10.6	-8.1	-18.8	-6.9	-13.8
HC/ %	-28	-32	-53	-50.7	-75.5
NO_x / %	3.5	5.3	6.9	15.8	28.2
PM/ %	-33.9	-24.1	-37.5	-26.8	-33.2

英国伯明翰大学 A. Tsolakis 等人在一台单缸直喷柴油机上研究了 B100 菜籽油甲酯生物柴油对柴油机排放的影响^[21]。研究表明,相对于普通柴油,菜籽油甲酯使发动机排气烟度降低 65%~81%, CO 排放降低 34%~50%, HC 降低

58%，而 NO_x 排放升高 47%~70%，燃油消耗率升高 14%~16%。

比利时法兰德斯技术研究院 Erik Verhaeven 等人在 2 辆乘用车和 3 辆载货车上研究了燃用纯废弃油甲酯对排放的影响^[22]。研究表明，相比于普通柴油，燃用生物柴油后柴油机的 PM 排放能降低 20%，其中非可溶性成份（NSOF）降低 32%， NO_x 上升 24%，HC 降低 40%，CO 降低 25%。

西班牙哈恩大学 M.P. Dorado 等人在一台 Perkins AD3-152 三缸直喷柴油机上研究了 B100 废弃橄榄油甲酯的排放特性，并与普通柴油进行对比^[23]。研究表明，相比于普通柴油，柴油机燃用生物柴油后燃油消耗率上升 8.5%，CO 降低 59%， NO_x 降低 32%，且烟度大幅下降。

日本 JOMO 技术中心 Yukio Akasaka 等人使用一台 1994 年商品化增压中冷直喷式柴油机考察不同掺混比例的大豆甲酯生物柴油对柴油机运行日本 D-13 工况排放性能的影响^[24]。研究表明，同基础柴油相比，B20 使得加权 HC 降低 6.3%，CO 降低 3.5%， NO_x 上升 3.2%，PM 降低 8.9%，可溶性有机成份 SOF 上升 24.2%，且部分工况下 SOF 的上升造成 PM 排放上升。

1.2.2 国内研究进展

我国政府十分重视发展生物柴油作为替代燃料。国家已与 2007 年 5 月颁布并实施了调和用生物柴油的国家标准^[25]。2007 年公布的《国家可再生能源十一五规划》已明确强调，要大力发展以非粮原料生产生物柴油的产业，主要鼓励生产以小桐子、黄连木、棉籽等油料作物为原料的生物柴油。

国内关于生物柴油的研究主要在 2000 年以后，且发展较为迅速。国内关于生物柴油在柴油机上的应用研究主要以高校为主。表 1.3 列出了国内主要研究机构的研究结果。

本课题组曾经和中国科学院合作，在一台满足欧 II 排放法规的 Sofim 8140 43C 直喷式柴油机上进行了大豆甲酯生物柴油 B20 以及乙醇-甲酯-柴油混合燃料的性能试验^[26, 27]。研究结果表明：同普通柴油相比，燃用 B20 生物柴油在外特性条件下使得 Bosch 烟度降低 20%， NO_x 整体无变化，HC 降低 21%，额定功率点 PM 降低 34%、最大转距点 PM 降低 17%，CO 在低转速外特性时上升（14%~40%）但高转速时下降（5%~15%）；1900r/min 负荷特性时，B20 使得 NO_x 平均上升 6%，HC 降低 23%，CO 降低 0%~20%，小负荷时 Bosch 烟度降至 0。

本课题组也与 2006 年在一台满足国三排放法规的 Cummins ISBe250 增压中冷共轨发动机和一台单缸可视化发动机上进行过 B20 生物柴油的燃烧及排放特性研究^[28]。研究结果表明,在发动机不作任何改动的情况下,由于 B20 热值较低,造成全负荷转矩、功率相对纯柴油下降约 2%;比油耗上升约 2%,燃烧效率同纯柴油基本相同。与纯柴油相比,柴油机燃用 B20 生物柴油的 CO、PM 排放量降低,NO_x 排放量基本不变,HC 排放量大负荷时上升、小负荷时降低。

表 1.3 国内生物柴油主要相关研究及主要结论

研究单位	测试发动机	试验生物柴油	掺混比
清华大学 和中科院	Sofim 8140.43C 直喷式 柴油机	1. 大豆油甲酯 2. 乙醇-甲酯-柴油 混合燃料	B20 E10B, E20B, E30B
清华大学	Cummins ISBe250 增压中冷柴油机	大豆油甲酯	B20
北京理工大学	1. V 型增压中冷柴油机 2. 直列增压中冷柴油机	自制废食用油生物 柴油	B20 B50
江苏大学	YZ4102QF 自然吸气直 喷式柴油机	大豆油甲酯	B100
武汉理工大学	R175 单缸柴油机	自制生物柴油	B10 B20 B30
同济大学	三缸非直喷发动机	大豆油甲酯	B5 B20 B80 B100

北京理工大学葛蕴珊等人分别在一台 V 型增压中冷柴油机和一台直列增压中冷柴油机上研究了自制的废食用油生物柴油的排放特性^[29]。研究表明,同基准柴油相比,发动机燃用 B20 和 B50 的十三工况 PM 排放分别下降 13%和 12%,CO 排放分别下降 8%和 11%,NO_x 排放分别上升 7%和 27%。燃用 B50 十三工况 HC 排放相比基准柴油下降 29%。发动机外特性烟度相比基准柴油下降 36%~65%,外特性 HC 排放下降 25%~33%。

江苏大学袁银南等人一台 YZ4102QF 自然吸气直喷式柴油机上研究了 B100 大豆油甲酯生物柴油排放特性^[30]。研究表明,同基础柴油相比,大豆油

甲酯生物柴油 CO 排放降低 38.3%，HC 排放降低 41.4%，PM 降低 38.7%，NO_x 上升 5.6%。

武汉理工大学徐元浩等人在一台 R175 单缸机上研究了自制的生物柴油 B10、B20 和 B30 的排放特性^[31]。研究结果表明，相比基准柴油，柴油机在最大负荷处 B10、B20 和 B30 的 CO 排放分别降低了 20%、33%和 83%，HC 排放分别降低了 41.7%、41.7%和 45.8%，而碳烟则排放分别降低了 16%、52%和 64%。柴油机燃用 B10、B20 和 B30 的 NO_x 排放略有上升。

同济大学谭丕强等人在一台三缸非直喷发动机上研究了大豆油甲酯生物柴油 B5、B20、B80 和 B100 对柴油机碳烟和 NO_x 排放的影响^[32]。研究结果表明，外特性时，B5、B20、B80 和 B100 的烟度与柴油相比分别下降了 6%、16%、35%和 47%，而 NO_x 排放则分别上升了 3.5%、5%、19%和 23%；3500r/min 负荷特性时，B5、B20、B80 和 B100 的烟度与柴油相比分别下降了 6%、15%、32%和 41%，而 NO_x 排放则分别上升了 3.2%、4%、18%和 22%。

1.2.3 国内外研究进展总结

通过以上分析可以看出，国内外的大多数研究都表明，燃用生物柴油后发动机外特性转矩会因生物柴油较低的热值而略有下降，但通过对发动机喷油系统重新标定可以使发动机动力性恢复原机水平。燃用生物柴油的燃油消耗率会明显上升，但发动机的能量消耗率基本保持不变。

柴油机燃用生物柴油后的 HC、CO 和碳烟排放都有明显的降低，且降低幅度随掺混比例的增加而增大。多数研究表明，生物柴油的 PM 排放相比普通柴油有不同程度的降低；少数研究表明生物柴油的 PM 会略有上升。部分研究表明 PM 中碳烟部分排放大幅降低，但可溶性有机成份有不同程度的上升。部分研究表明，柴油机燃用生物柴油后的 NO_x 排放略有上升，而另一部分研究表明生物柴油的 NO_x 排放与柴油相比基本保持不变。

综合国内外研究可以看出，虽然对生物柴油在柴油机上的应用研究较多，但是对于不同来源生物柴油之间的性能差异的研究较少。然而，由于制备生物柴油原料的多种多样，会造成其热值、密度、氧含量、十六烷值、粘度、蒸馏温度等理化特性的不同，这些不同很有可能对发动机的燃烧与排放造成影响。因此，有必要在同一台发动机上进行不同来源生物柴油的台架试验，以考察它们在动力性、经济性以及排放特性方面的差异。

另外,虽然国内外对于生物柴油的 PM 排放研究较多,但对于生物柴油 PM 的具体分析较少,国内对于生物柴油 PM 分析的研究则基本没有,而且有些研究受测试手段限制,只测试了柴油碳烟排放。由于生物柴油含氧,因而在降低柴油机 PM 排放方面有很大潜力。但是由于柴油机 PM 的成份比较复杂,PM 中各部分(如干碳烟 DS、硫酸盐、SOF 等)的生成机理相差较大,若想基于生物柴油从燃料设计角度大幅降低柴油机 PM 排放,则有必要对 PM 的成份进行具体分析。

1.3 研究内容及本文结构

本文的研究内容是国家 863 课题“车用生物柴油测试评价技术与开发”(课题编号 2006AA11A1A3)和清华-康明斯国际合作项目“应用生物质含氧燃料降低柴油机排放”研究工作的一个组成部分。

本论文以台架试验的形式,研究了不同来源生物柴油的动力性、经济性与排放特性,并且分析了其排放特性差异与燃料理化参数之间的关系。5 种生物柴油分别为:棉籽油甲酯、大豆油甲酯、菜子油甲酯、棕榈油甲酯和地沟油甲酯。在此基础上,针对生物柴油的理化特性,在生物柴油中掺混了不同比例的含氧添加剂和十六烷值改进剂,并进行欧洲稳态循环(ESC)测试,探索了基于生物柴油从燃料设计角度实现柴油机不采用后处理满足国四排放法规的可能性。

围绕本研究的内容,论文的章节安排如下:

第 1 章(即本章)为引言,主要论述课题背景和意义,提出本课题主要研究工作和研究目标。简要综述了生物柴油在发动机上应用的国内外研究进展和现状,总结了国内外研究现状的特点,为本研究提供依据。在此基础上提出了本文的研究内容。

第 2 章介绍了试验装置及排放测试方法。首先介绍了发动机性能试验台架,包括试验发动机和主要测试仪器,然后阐述了气态排放物的测试方法及原理,最后详细介绍了微粒的采集及其组分分离方法。

第 3 章为不同来源生物柴油性能与排放特性对比。首先介绍了不同来源生物柴油和用于对比的基准柴油的理化特性,然后通过外特性和负荷特性试验分别考查了生物柴油的动力性、经济性和排放特性,并和基准柴油比较,最后分析了造成不同来源生物柴油排放特性差异的主要理化参数以及它们对排放特性

的影响。

第4章为基于生物柴油的含氧混合燃料排放特性。首先讨论了柴油-生物柴油混合燃料、生物柴油-含氧添加剂混合燃料的制备方法及其理化特性，然后在康明斯 ISBe6 发动机上进行了性能试验，测试并分析了不同含氧混合燃料的燃油经济性和排放特性，在氧含量 0%~20% 的范围内考查了不同氧含量的混合燃料的排放特性，分析了含氧混合燃料的理化参数对排放的影响。

第5章为发动机燃用含氧混合燃料 ESC 循环测试。在一台经过特殊标定的发动机上进行了燃用生物柴油以及含氧混合燃料的 ESC 循环测试，测试分析了 ESC 循环各排放物并对 ESC 循环 PM 进行了组分分析，继续探索柴油机不采用后处理满足国四排放标准的可能性。

第6章为总结与展望。总结了本论文的主要研究工作，并对基于生物柴油的含氧混合燃料设计的下一步研究工作进行了展望。

第2章 试验装置及排放测试方法

本章主要介绍试验装置以及排放测试方法。发动机性能试验台架包括试验发动机和主要测试仪器。排放测试方法包括气态排放物测试仪器及原理、微粒（PM）采集方法以及 PM 的组分分离方法。

2.1 发动机性能试验台架

图 2.1 为实验台架的总体布置图。主要包括以下几个部分：发动机、测功机及其控制系统、燃油供给及油耗测量系统、增压中冷及发动机水温控制系统，同时包括后续进行排放研究要用的气体排放分析仪、微粒采集系统。

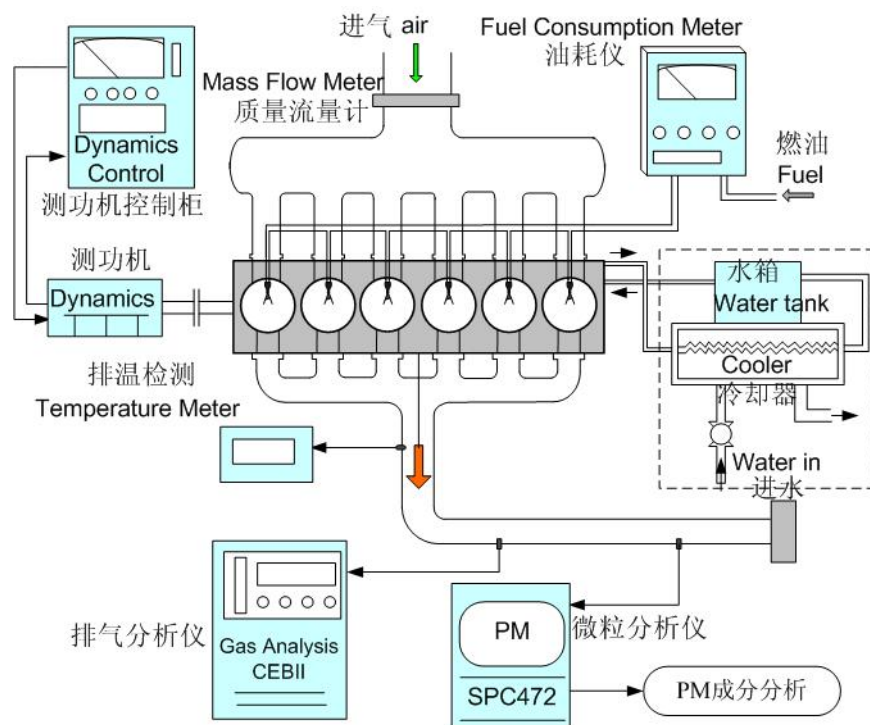


图 2.1 试验台架总体布局图

2.1.1 试验发动机

本研究中先后使用了两台康明斯柴油机。一台为康明斯 ISBe6 系列发动机，该发动机不采用任何后处理装置能满足国三排放标准，图 2.2 为其实物照片，表 2.1 为其主要参数。另一台发动机为康明斯 ISB2007 系列发动机，该发动机采用微粒捕集器（DPF）后能美国第二阶段排放标准，图 2.3 为其实物照片，表 2.2 为其主要参数。相对于国内外其他研究报道来看，本次研究采用了最新型的柴油机。



图 2.2 康明斯 ISBe6 发动机实物照片



图 2.3 康明斯 ISB2007 发动机实物照片

表 2.1 康明斯 ISBe6 发动机性能参数

发动机型号	Cummins ISBe6
型式	4 冲程，直列直喷，增压中冷
EGR 型式	无
燃油系统	电控高压共轨
燃烧室型式	Ω 燃烧室
汽缸数	6
排量 (L)	5.9
缸径 (mm) \times 行程 (mm)	102 \times 120
压缩比	17.5
额定功率 (kW / (r/min))	136 / 2500
最大扭矩 (kW / (r/min))	670 / 1500

表 2.2 康明斯 ISB2007 发动机性能参数

发动机型号	Cummins ISB2007
型式	4 冲程，直列直喷，增压中冷
EGR 型式	中冷外部 EGR
燃油系统	电控高压共轨
燃烧室型式	Ω 燃烧室
汽缸数	6
排量 (L)	6.7
缸径 (mm) \times 行程 (mm)	107 \times 124
压缩比	17.5
额定功率 (kW / (r/min))	192 / 2600
最大扭矩 (kW / (r/min))	840 / 1500

2.1.2 主要测试仪器

发动机台架试验中所有需要测量和监控的参数及测量装置如图 2.4 所示，其中主要测试仪器的参数如表 2.3 所示。台架主要测试装置包括测功机、油耗测量

装置、进气流量测量装置。功率和转矩测量采用湘仪 GW300 电涡流型测功机，油耗测量采用湘仪 FC2210 自动油耗仪，空气流量测量采用 ToCeiL20N 热式质量流量计。另外，试验时还要对环境参数和发动机的运转情况进行监控。其中，温度量测量采用 KEU 型电偶式传感器和 PT100 型电阻式传感器，压力量测量采用 ZHP118 型压力变送器和 YTZ-150 型远传压力表，湿度量测量采用 JWSL-2AT-E 型温湿度变送器。

表 2.3 发动机台架主要测试仪器

名称	型号	主要参数	备注
测功机	湘仪 GW300	转矩：0~1600N.m 转速：0~4500/min 转矩测量精度：±0.4% 转速测量精度：±1r/min	电涡流型
油耗仪	湘仪 FC2210	测量范围：0~40kg 测量精度：±0.4%	体积法
空气流量计	ToCeiL20N	量程：0~1200kg/h 精度：±1% 重复性：±0.24%	热式质量流量计
电偶式传感器	KEU 型	温度范围：0~1000℃ 线性精度：±1%	铠装热电偶 电压输出
电阻式传感器	PT100	温度范围：0~200℃ 线性精度：±0.5%	铂电阻式 电阻输出
压力变送器	ZHP118	量程：0-300kPa 精度：±0.3%	电流输出
远传压力表	YTZ-150	量程：0-600kPa 精度：±1.5%	电阻输出
温湿度变送器	JWSL-2AT-E	温度量程：0-50℃ 湿度量程：0%-100% 温度精度：±1% 湿度精度：±1%	电流输出

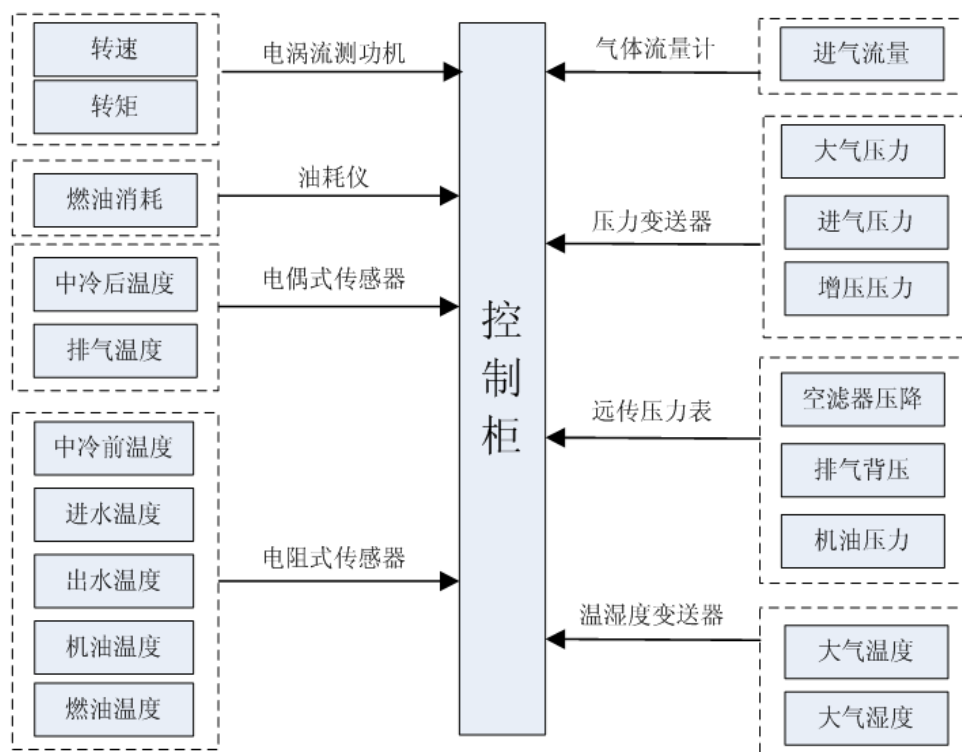


图 2.4 发动机台架测量及监控参数及测量装置

2.2 气态排放物测试方法

试验采用 AVL CEB II 排气分析仪对排气中的 CO 、 CO_2 、 O_2 、 HC 和 NO_x 浓度进行测量。其中， CO 和 CO_2 采用非分光红外线吸收型分析仪（NDIR）， HC 排放采用氢火焰离子化型分析仪（FID）， NO_x 采用化学发光型分析仪（CLD）。

NDIR 分析方法是基于某种待测气体对特定波长红外辐射的吸收程度与浓度相关这一原理来进行工作的。NDIR 方法是目前测定 CO 的最常用的方法。其测量上限的浓度为 100%，下限可进行微量（ 10^{-6} ）以至痕量（ 10^{-9} ）分析。在一定的量程范围内，即使气体浓度有极小的变化也能够检测出来。当 CO 排放浓度较高时，排气中干扰成份对测定值的影响可以忽略不计。NDIR 还可以用来测定 CO_2 和 HC 的浓度，也能分析 NO ，但测量精度远不及测定 CO 时的精度。

FID 是目前测定内燃机排气中碳氢化合物的最常用的方法。FID 的工作原理是基于大多数有机碳氢化合物在氢火焰产生大量电离的现象来测定 HC 的，电离

度与引入氢火焰的碳氢化合物分子中碳原子数成正比。其检测极限最小可达 10^{-9} 数量级，有很高的灵敏度（比热导检测器精度约高一千倍），对环境温度及大气压力不敏感，除了单独作为碳氢化合物总质量测定之用外，还常常作为气相色谱仪的检测器附件，利用色谱分析的条件，对各种碳氢化合物含量分别进行检测。CLD 是目前测定 NO_x 浓度的最常用的方法。其工作原理如下：首先使被测气体中的 NO 与 O_3 反应，生成 NO_2^* 分子，在 NO_2^* 由激发态衰减到基态的过程中，会发出波长为 $0.6\sim 3\mu\text{m}$ 的光量子（即近红外光谱线），称为化学发光。这种化学发光的强度与 NO 浓度成正比，因而通过检测发光强度就可确定被测气体中 NO 的浓度。CLD 从原理上讲只能测量 NO ，而无法测量 NO_2 。实际应用中可以先通过适当的转换将 NO_2 还原成 NO ，然后再进行上述分析过程。采用 CLD 测量 NO_x 具有敏感度高（约 0.1×10^{-6} ），反应速度快（一般为 2 秒~4 秒），在 $0\sim 1\times 10^{-2}$ 范围内输出特性呈线性关系，适于低浓度连续分析等优点。而测量 NO 的 NDIR 法和测量 NO_x 的 NDUVR（不分光紫外共谐吸收）法，均因输出特性不呈线性关系和干扰组分影响大，已经退居次要地位了。

AVL CEB II 排气分析仪的标定首先用标气对每个量程的满量程进行标定，其中 CO 为 235×10^{-6} 、 2290×10^{-6} 、 23400×10^{-6} ， CO_2 为 13%， O_2 为 1.01%、20.6%， THC 为 240.3×10^{-6} 、 2109×10^{-6} 、 4620×10^{-6} ， NO_x 为 96.20×10^{-6} 、 793×10^{-6} 、 3950×10^{-6} ；然后用气体分割器对标气进行浓度等分，再对此量程进行线性标定。

使用排放仪分析柴油机排放出的 HC 、 CO 、 NO_x 时，读取的数据单位均为 10^{-6} ，表示排放物占排气的体积分数。GB17691-2005《车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法》排放法规中对排放限值的规定均以 g/kW.h 为单位，并给出了将排放物从体积分数转化为比排放量的计算公式^[33]。假设排气在 273K（0℃）和 101.3kPa 下的密度为 1.293kg/m^3 ，则某工况下排放物的比排放量（ g/kW.h ）计算公式如下：

$$\text{NO}_{\text{xmass}} = 0.001587 \times \text{NO}_{\text{xconc}} \times K_{\text{H,D}} \times G_{\text{EXHW}} / P_e \quad (2-1)$$

$$\text{CO}_{\text{mass}} = 0.000966 \times \text{CO}_{\text{conc}} \times G_{\text{EXHW}} / P_e \quad (2-2)$$

$$\text{HC}_{\text{mass}} = 0.000479 \times \text{HC}_{\text{conc}} \times G_{\text{EXHW}} / P_e \quad (2-3)$$

式中 NO_{xconc} 、 CO_{conc} 、 HC_{conc} (10^{-6}) 为仪器测量得到的 NO_x 、 CO 、 HC 在原始排气中的平均浓度。 $K_{\text{H,D}}$ 为 NO_x 的湿度和温度校正系数，计算公式如下：

$$K_{H,D} = \frac{1}{1 + A \times (H_a - 10.71) + B \times (T_a - 298)} \quad (2-4)$$

式中：

$$A = 0.309 G_{\text{FUEL}} / G_{\text{AIRD}} - 0.0266 \quad (2-5)$$

$$B = -0.209 G_{\text{FUEL}} / G_{\text{AIRD}} + 0.00954 \quad (2-6)$$

H_a 为进气湿度，计算公式如下：

$$H_a = \frac{6.220 \times R_a \times P_a}{P_B - P_a \times R_a \times 10^{-2}} \quad (2-7)$$

式中具体参数含义和单位如下： R_a ，进气相对湿度，%； P_a ，进气饱和蒸气压，kPa； P_B ，总大气压，kPa； T_a ，空气温度，K； G_{FUEL} ，燃料质量流量，kg/h； G_{AIRD} ，进气质量流量（干基），kg/h； G_{EXHW} ，排气质量流量（湿基），kg/h； P_e ，发动机有效功率，kW。通过上述一系列法规中提供的计算公式可以将排放物数值从体积分数转化为比排放值。

2.3 微粒采集及其组分分离方法

2.3.1 微粒稀释与采集系统

本研究采用 AVL 公司的 SPC 472 排气微粒稀释与采集系统，对柴油机尾气中的微粒进行稀释和采集。整个系统包含三大组成部分：稀释风道系统、PM 过滤采样系统和控制系统。

SPC 472 排气微粒稀释与采集系统采用分流式稀释风道。从排气管道中抽取少量（一般小于 1%）的尾气，尾气流经加热管，与通过进气口与从控制柜流入的稀释空气在管道内混合。相对于全流式稀释风道而言，分流式稀释风道的面积与体积比更大，热量损失较多，故为了保持温度与定容采样装置 CVS 的相似，允许对管道进行加热。稀释系统的流量能力应足以完全消除水在稀释和采样系统中的凝结，并使紧靠滤纸保持架上游处的稀释排气温度维持在 $\leq 325\text{K}$ (52°C)。稀释空气温度应在 $298\text{K} \pm 5\text{K}$ ($25^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$)。

过滤器中布置了一对串联布置的滤纸（初级滤纸和次级滤纸），对稀释排气进行取样，次级滤纸不与初级滤纸接触，并布置在初级滤纸下游不超过 100mm

处。过滤器中的滤纸将气流中的微粒阻拦并捕集。滤膜由下层的玻璃纤维基体和上层的滤纸两部分粘结而成。上层滤纸表面纤维呈网状，落在其上的微粒被网状的滤纸纤维牢牢固定住，不会反弹或脱落。滤膜直径 70mm，沾污直径 62mm。

SPC 472 的最大采样流量为 1.5g/s，为使精度最高所有测试均选用 1.5g/s 的采样流量。对于单点测试试验，一般选择稀释比为 5，这样能保证采样比最大。而对于欧洲稳态循环（ESC）循环试验，由于要保证所有工况点的采样比相同，稀释比在 5~70 之间进行选择。

使用一台瑞典 METTLER TOLEDO 公司的 MX/UMX 电子天平定量测量采集到的微粒质量，天平感量为 10μg。按国家测试标准^[33]，在滤纸进行预处理和称重的整个期间，微粒滤纸预处理和称重用的称量室，其温度应保持在 295K±3K（22 °C±3 °C）。其湿度应保持在 282.5K±3K（9.5 °C±3 °C）的露点和 45%±8%的相对湿度。试验前至少一小时，应将每张（对）滤纸置于一个有盖但不密封的培替氏培养皿里，放入称量室进行稳定。稳定结束后，应称量每张（对）滤纸的重量并记录毛重。然后应把该张（对）滤纸存放在盖住的培替氏培养皿或密封的滤纸保持架中，直至试验需用时。如该张（对）滤纸在称量室取出后的八小时内没有使用，则必须在使用前重新预处理和称重。采样完成后，滤纸应返回称重室至少 1 小时，但不超过 80 小时，然后称重。记录滤纸的总重，减去滤纸的毛重。微粒质量是初级滤纸和副滤纸上收集的微粒质量的总和。

排放法规中对排放限值的规定均以 g/kW.h 为单位，而法规规定 PM 无需进行校正。因此，PM 排放的比排放量(g/kW.h)计算公式如下：

$$PM_{xmass} = \frac{3600 \times (M_{after} - M_{before}) \times G_{EXHW} \times q}{t \times G_{TOT} \times P_e} \quad (2-8)$$

式中具体参数含义和单位如下： M_{after} ，采样后滤纸质量，g； M_{before} ，采样前滤纸质量，g； G_{EXHW} ，排气质量流量，kg/h； G_{TOT} ，SPC 472 采样流量，kg/h； q ，稀释比； P_e ，发动机有效功率，kW。通过 2-8 计算公式可将天平称量数值转化为 PM 的比排放值。

2.3.2 微粒组分分离方法

柴油机 PM 排放中的成份比较复杂，包括固态部分和液态部分，含有有机

成份和无机成份，如图 2.5 所示^[34]。固态部分主要由小粒径球状的碳粒组成，也叫做固体碳（SOL）或者干碳烟（DS）。液态部分主要包括有机物或者部分 HC 和硫酸盐的水合物，还包括一些硫酸盐的阳离子。除了 SO_4 与水的结晶物外，还有硫酸盐和氧化物包括 H_2O 、 NO_3 、 PO_4 等，也包含微量的 Fe、Ca、Zn 等元素。在排气的过程中、稀释通道里或者采集滤纸上，气态或者液体 HC 被 DS 吸附成为 PM 的一部分，通常叫做 SOF。

多数对生物柴油的研究主要集中在其对尾气的烟度和 PM 总质量的影响上，较少研究对 PM 的各组分排放规律进行深入探讨和分析，但分析生物柴油 PM 的各组分有助于探讨生物柴油与柴油在 PM 形成机理上的不同。而且，对 PM 组分分析，分析燃料理化特性对各组分的影响，为含氧混合燃料的设计提供依据，以求进一步降低柴油 PM 排放。

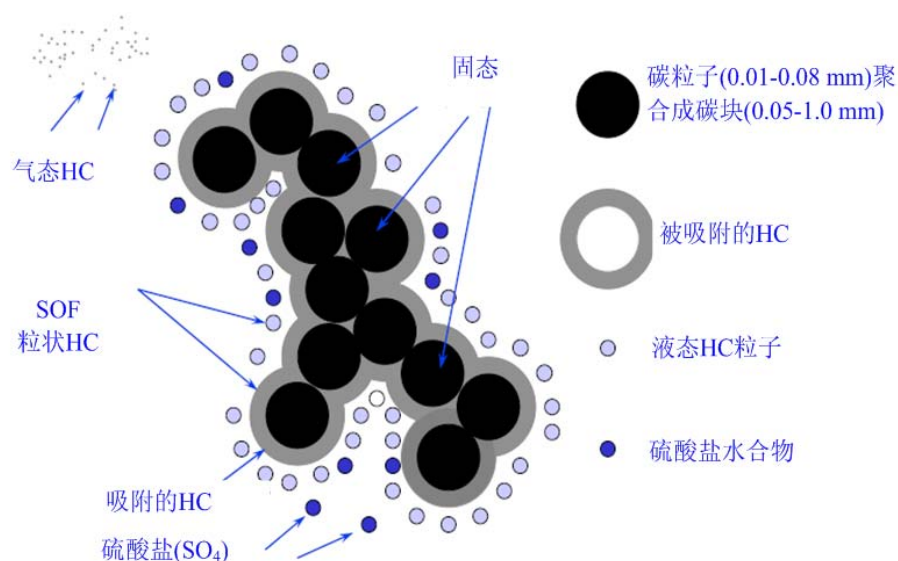


图 2.5 柴油机微粒组成示意图^[34]

本研究根据以往文献对 PM 的分析方法^[6, 35, 36]、前期实验和研究的需要，建立了一套分离 PM 中 SOF、Sulfate、DS 三种主要组分的分离流程：首先对 PM 进行采集，称量采集前后的采样滤纸质量，得到微粒样品总质量；微粒样品经过有机溶剂(CH_2Cl_2)萃取后将 SOF 分离出来，通过称量萃取前后的滤纸质量得出微粒中的 SOF 质量；除去 SOF 的滤纸和样品，经过去离子水萃取将硫酸盐分离出来，通过萃取前后的称重得出微粒中包含的硫酸盐质量。经过去离

子水萃取后滤纸上的成份则为 DS。

2.4 本章小结

本章对本研究用到的 2 台康明斯发动机、主要测试装置、气态排放物测量装置以及 PM 采集和组分分离方法逐个进行介绍。康明斯发动机提供的两台柴油机适合进行含氧混合燃料的研究，发动机台架中主要测试装置的精度及响应也能基本满足本文研究工作的要求。本研究使用的气态分析仪 AVL CEB II 能测试排气中的 CO、CO₂、O₂、HC 和 NO_x。本研究根据现有条件，建立了一套简单而又能满足需要的 PM 采集和组分分离方法。

第3章 不同来源生物柴油性能与排放特性对比

本章介绍了试验用的5种不同来源生物柴油和基准柴油的理化特性，在康明斯ISBe6发动机上进行了外特性和负荷特性试验，分别考查了5种生物柴油的动力性、燃油经济性和排放特性，并同基准柴油进行比较，最后分析了造成不同来源生物柴油排放特性差异的主要理化参数以及它们对排放特性的影响。

3.1 试验用燃料理化特性

本研究所用5种生物柴油由湖南海纳百川生物工程有限公司生产并提供，分别为棉籽油甲酯、大豆油甲酯、菜籽油甲酯、棕榈油甲酯及地沟油甲酯，分别记为CME、SME、RME、PME和WME。本研究用于对比的基准柴油购于北京柴油市场，硫含量为 160×10^{-6} ，记为D160。5种生物柴油和基准柴油的理化特性如表3.1所示。

十六烷值是衡量燃料在压燃式发动机中自燃着火性能好坏的重要指标。十六烷值越高，燃料的着火特性越好。我国2007年5月颁布的生物柴油标准^[25]中规定生物柴油的十六烷值不低于49。可见，本研究的5种生物柴油的十六烷值都满足该标准。但是，不同来源生物柴油的十六烷值差别较大，本研究的生物柴油十六烷值从51到64不等，其中棕榈油甲酯的十六烷值最高，而大豆油甲酯的十六烷值最低。

燃料低热值是表征燃料能量密度的指标。生物柴油由于含10%的氧，其热值要比普通柴油低。本研究的5种生物柴油的热值基本相当，差别在0.5%以内，比基准柴油的低热值低约8%左右。

粘度是衡量燃料流动性能与雾化效果的重要指标。粘度过高，燃料流动性变差，且会造成喷雾时液滴直径过大，使混合气不均匀、燃烧不完全、微粒排放会恶化。生物柴油由于碳链长度长于石化柴油，粘度要比普通柴油稍高。本研究的5种生物柴油的粘度比基准柴油分别高出70%~83%，这对其燃烧和排放会有一定影响。

燃料中的硫是普通柴油尾气中 SO_2 和硫酸盐排放形成的主要原因，同时也是造成催化器中毒的主要原因之一。生物柴油由于来源于天然油脂，基本不含

硫, 本研究的 5 种生物柴油的硫含量都在 10×10^{-6} 以下, 远远低于国家标准的要求。生物柴油不含硫的优点将对降低柴油机 PM 排放十分有利。

表 3.1 试验用生物柴油和基准柴油的理化特性

项目	测试方法	D160	CME	SME	RME	PME	WME
十六烷值	GB/T386	55	54	51	53	64	56
低热值 (kJ/kg)	GB/T384	43140	39787	39950	39837	40063	40055
20℃ 粘度 (mm ² /s)	GB/T265	3.763	6.381	6.624	6.380	7.114	6.897
硫含量 ($\times 10^{-6}$)	SH/T0253	160	5	1	6	1	7
T90 (°C)	GB/T6536	318.5	343	343.5	341.5	334.9	342.5
冷滤点 (°C)	SH/T0248	--	7	-8	0	14	5
20℃ 密度 (kg/m ³)	GB/T2540	830	880	873	873	878	870
氧含量 (Wt. %)	元素分析仪	0	10.6	10.7	10.6	11.2	11.3
氢含量 (Wt. %)	SH/T0656	86.4	--	--	--	76.6	76.3
碳含量 (Wt. %)	SH/T0656	13.6	--	--	--	12.4	12.4
闪点 (°C)	GB/T261	--	169	170	170	168	170
酸值 (mgKOH/g)	GB/T5530	--	0.3	0.26	0.67	0.42	0.3
10%残碳 (Wt. %)	GB/T17144	--	0.2	0.14	0.28	0.17	0.37
水份 (Wt. %)	GB/T18619	--	0.047	0.044	0.042	0.049	0.048

注: --表示未检测项目

燃料的 90%质量蒸发完毕温度 T90 表征燃料所含重质成份的多少, 重质成份难以燃烧完全, 重馏分燃料含量过多会导致结焦并增加柴油机 PM 排放。国家标准的要求是 T90 不高于 360°C, 本研究的 5 种生物柴油都满足国家标准。但是它们之间的差别小于 1%, 可见来源不同对于 T90 影响不大。

生物柴油的密度一般比普通柴油要高。本研究的 5 种生物柴油的密度区别不大, 差别小于 1%, 且都满足国家标准 820~900kg/m³ 的要求。可以看出, 生物柴油的来源虽然不同, 但是密度相差不大。

一般认为生物柴油含 10%左右的氧是其能大幅 PM、HC 和 CO 排放的主要原因。含氧还能使燃烧相比普通石油更充分, 一定程度上提高热效率。本研

究 5 种生物柴油的氧含量略有区别，一定程度上会对排放造成影响。

生物柴油的冷滤点与其原料油的饱和程度有关，原料油的饱和程度越高，生产的生物柴油冷滤点也越高。本研究的 5 种生物柴油的冷滤点有较大差别，其中棕榈油甲酯、棉籽油甲酯和地沟油甲酯的冷滤点都在 0°C 以上，这说明原料油对生物柴油的冷滤点影响较大。因此，使用时需要根据原料和产品销售地区的气候状况采取措施解决生物柴油的冷滤点问题。

闪点是衡量生物柴油储存、运输和使用过程中安全程度的指标。本研究的生物柴油闪点差别不大，都在 170°C 左右，高于国家标准要求，且远高于普通柴油的 60°C 。生物柴油在运输、存储和使用过程中的安全性比普通柴油要好。

酸值是衡量燃料腐蚀性和使用性能的重要指标，酸值过高会对发动机造成腐蚀。本研究的生物柴油酸值均低于国家标准的 0.8mgKOH/g ，且远远低于普通柴油水平。

残炭是评价生物柴油在高温条件下生成焦炭倾向的指标。残炭主要是由油品中的胶质、沥青质、多环芳烃及灰分形成。本研究的生物柴油的 10% 残炭质量分数除地沟油甲酯外均满足国标规定，且远远低于普通柴油水平。地沟油甲酯可能由于其原料油种杂质成份较高造成的。

生物柴油在制备过程中可能会产生一定的水份。水份过高也会对发动机造成腐蚀。本研究的 5 种生物柴油的水含量均满足国家标准要求，但是都十分接近于限值。

3.2 试验方案

不同来源生物柴油排放特性比较试验在康明斯 ISBe6 发动机上进行。试验过程中发动机不做任何调整。分别燃用 100% 的 5 种生物柴油和基准柴油，进行外特性试验考查动力性，进行 1500r/min 的负荷特性试验考查燃油经济性和排放特性。测量发动机的动力性、燃油经济性、气态排放物和微粒总量。由于生物柴油基本不含硫，微粒中硫酸盐成份较少，为避免不必要的误差只在进行有机溶剂萃取和去离子萃取后再进行滤纸称量，将微粒分为干炭烟（DS）和非炭烟成份（None Soot Fraction, NSF）。对于柴油来说 NSF 包括 SOF、硫酸盐，而对于生物柴油来说 NSF 只包括 SOF。

发动机试验时的一般条件，按国家标准 GB/T 18297-2001《汽车发动机性

能试验方法》和康明斯公司相关试验规定进行控制：冷却液的出口温度控制在 $88^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ ；机油温度控制在 $90^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ ；柴油温度控制在 $35^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ ；额定功率点（2500r/min）中冷后温度控制在 $49^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ ；燃用柴油额定功率点中冷器压降 9.25kPa、排气背压 10.6kPa。

3.3 结果与讨论

3.3.1 动力性

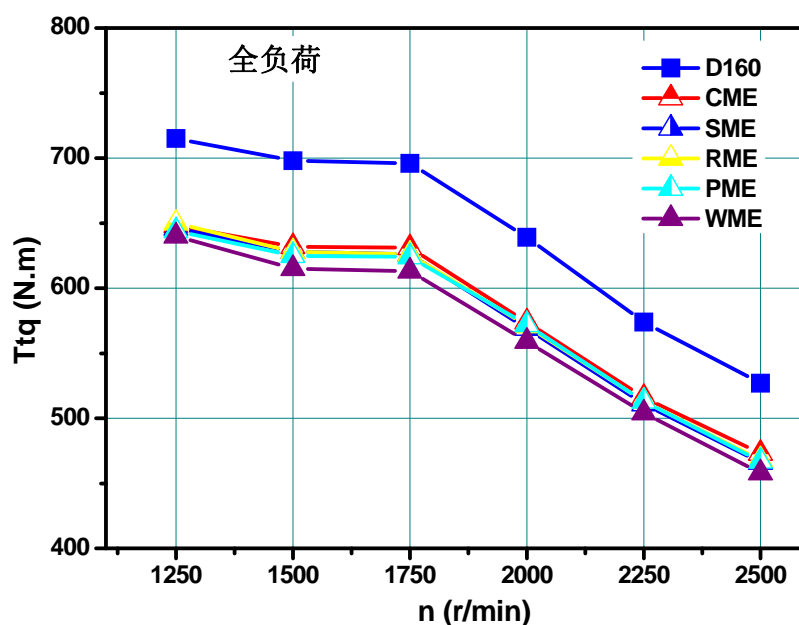


图 3.1 康明斯 ISBe6 发动机燃用柴油和不同生物柴油外特性扭矩

康明斯 ISBe6 发动机燃用柴油和不同生物柴油的外特性扭矩曲线如图 3.1 所示。可以看出，发动机燃用生物柴油的外特扭矩相比柴油有一定程度下降。相比于 D160 柴油，发动机燃用生物柴油外特性扭矩平均降低 9%~12%，不同生物柴油之间有 3% 的差别，其中棉籽油甲酯下降最小，地沟油甲酯下降最多。从表 3.1 可以看出，不同生物柴油的热值相差不到 1%，而动力性却有 3% 的差别。这说明燃料除热值之外的其它理化参数也对动力性有较大影响。影响动力性的燃料理化参数主要有两个方面。一方面，燃料密度和粘度会影响外特性喷油量，从而影响动力性。图 3.2 列出了发动机燃用不同生

物柴油在各转速的扭矩平均值与密度的关系。可以看出，随着生物柴油密度增加，发动机的外特性平均扭矩总体上有上升的趋势。由于发动机没有做任何调整，在相同喷油脉宽的情况下，燃油密度越大，喷入缸内燃油的质量也越大。

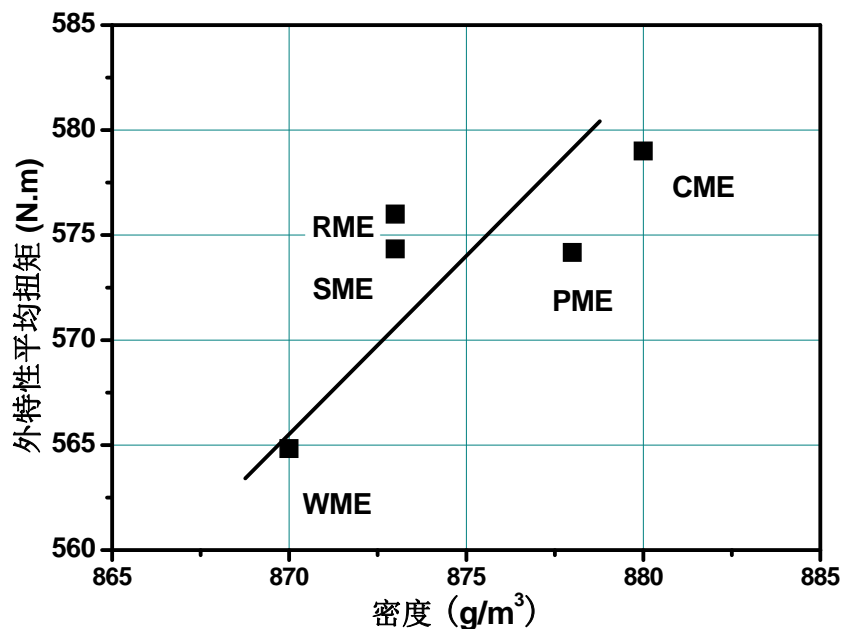


图 3.2 不同生物柴油外特性平均扭矩与密度的关系

3.3.2 燃油经济性

康明斯 ISBe6 发动机燃用柴油和不同生物柴油的 1500r/min 燃油消耗率曲线如图 3.3 所示。从图中可以看出，生物柴油燃油消耗率相比柴油有一定程度增加，相比 D160 发动机使用生物柴油燃油消耗率平均增加 13%~15%，不同生物柴油之间有 2% 的差别，其中地沟油甲酯增加最小，棉籽油甲酯增加最多。

由燃料的热值可以计算出发动机的有效热效率，计算公式如下：

$$\eta_{et} = \frac{3.6 \times 10^6}{b_e \times H_u} \quad (3-1)$$

其中 η_{et} 为有效热效率， b_e 为燃油消耗率，单位为 g/kW.h， H_u 为燃料低热值，单位为 kJ/kg。

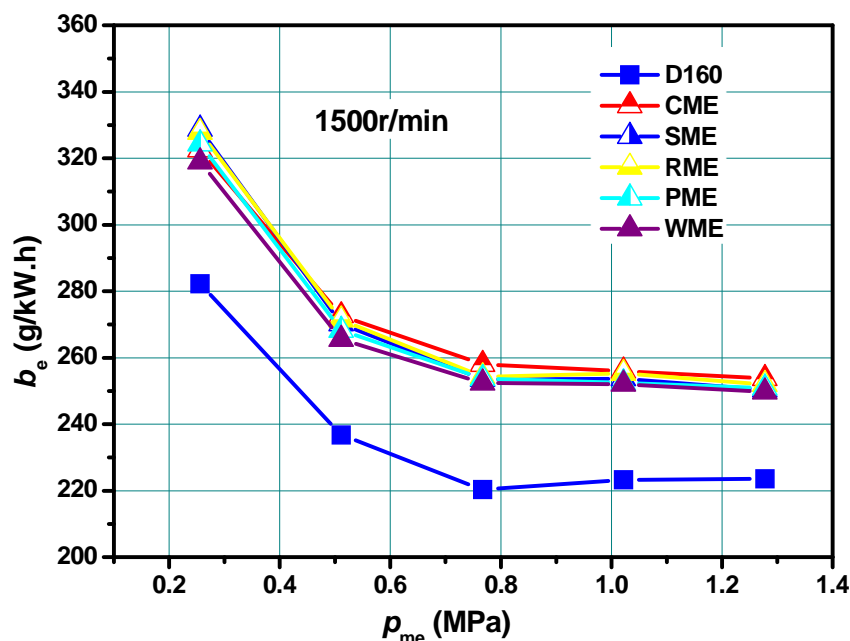


图 3.3 康明斯 ISBe6 发动机燃用柴油和不同生物柴油燃油消耗率 (1500r/min)

图 3.4 列出了康明斯 ISBe6 发动机燃用柴油和不同生物柴油的 1500r/min 负荷特性有效热效率曲线。从图 3.4 中可以看出, 发动机使用生物柴油的有效热效率在各负荷均低于普通柴油。发动机燃用 D160 柴油负荷特性各点平均有效热效率为 35.5%, 而燃用生物柴油负荷特性各点平均有效热效率为 33.4%~33.9%, 相比 D160 降低了 1.6%~2.1%, 其中地沟油甲酯降低最少, 棉籽油甲酯降低最多。

有研究表明发动机在不做任何调整的情况下燃用生物柴油时, 燃烧相位和燃烧持续期可能发生改变, 导致燃烧等容度下降, 循环热效率降低^[11, 21, 37]。但是, 生物柴油含氧, 又能起到改善燃烧的作用, 一定程度上提高燃烧效率。图 3.5 示出了发动机燃用 5 种生物柴油的平均热效率和氧含量的关系。可以看出, 有效热效率总体上随氧含量有上升的趋势。氧含量最高的 WME 生物柴油的热效率在 5 种生物柴油中也最高。对于与 WME 氧含量相同的 PME 生物柴油来说, 其热效率比 WME 低的原因可能是其十六烷值过高(63)造成了燃烧更加提前。因此, 虽然生物柴油的一大优势是可以不对发动机做任何调整, 仍应根据具体燃料的理化特性对发动机的喷射系统或者喷油定时略作优化。

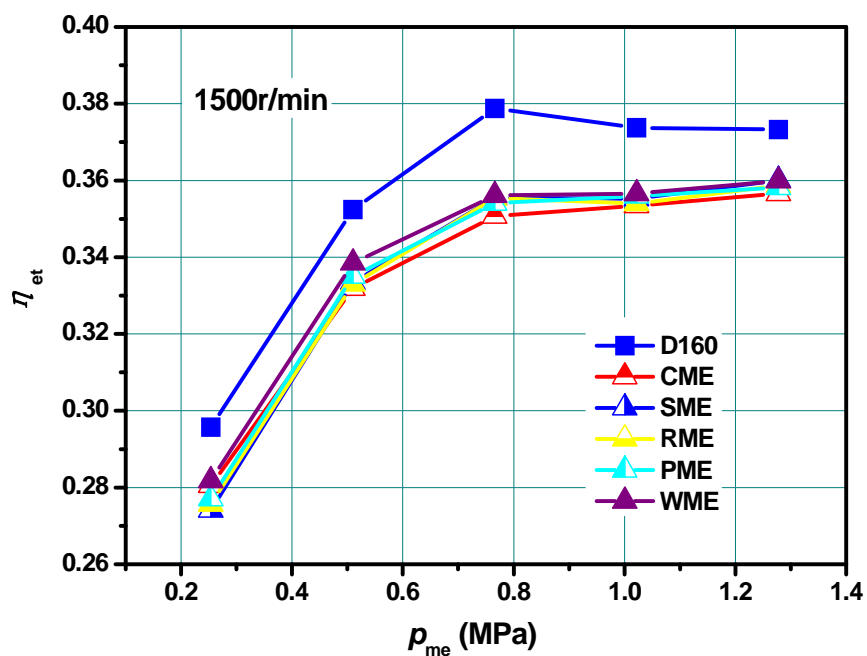


图 3.4 康明斯 ISBe6 发动机燃用柴油和不同生物柴油有效热效率（1500r/min）

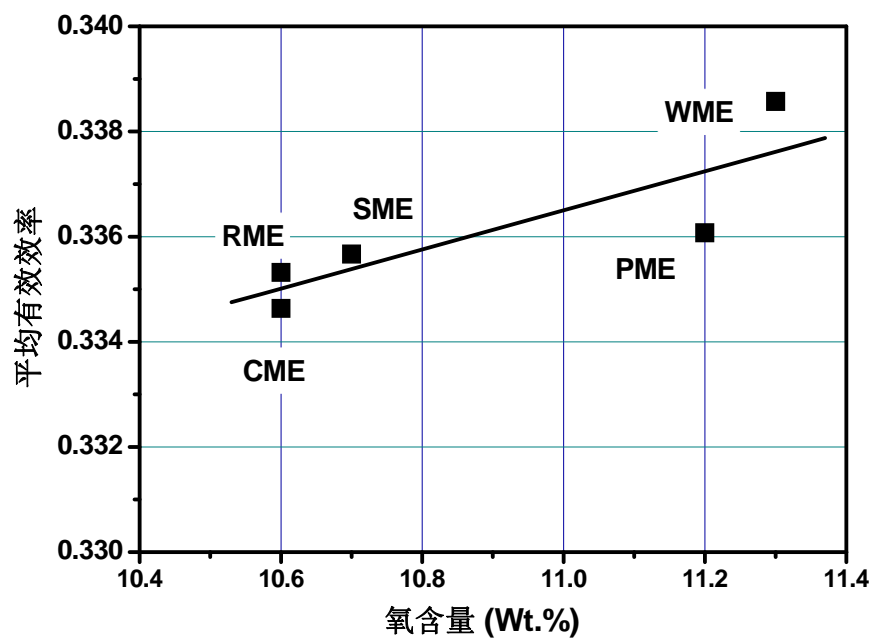


图 3.5 不同生物柴油的平均有效热效率与氧含量的关系（1500r/min）

3.3.3 PM及其组分排放特性

康明斯 ISBe6 发动机燃用柴油和不同生物柴油在 1500r/min 负荷特性的 PM、DS 和 NSF 排放如图 3.6 所示。从 PM 总量上来看，生物柴油的 PM 排放在各负荷都比柴油有大幅下降，其中大负荷降低程度最大，中负荷次之，小负荷时生物柴油降低 PM 排放的程度最小。另外，不同生物柴油之间的 PM 排放区别也比较明显。从平均值来看，不同生物柴油的 PM 排放相比 D160 降低 53%~69%。PM 排放降低程度由多至少依次为：地沟油甲酯、棕榈油甲酯、棉籽油甲酯、菜籽油甲酯、大豆油甲酯。可以看出，若选用 PM 排放较低的生物柴油，使其相对于普通柴油的 PM 排放能降低 60%以上，就有可能在一定程度上代替 DPF 后处理装置从而使发动机满足更高水平的排放标准。关于不同生物柴油 PM 总量排放的不同的原因将在对 PM 组分的讨论中进行分析。

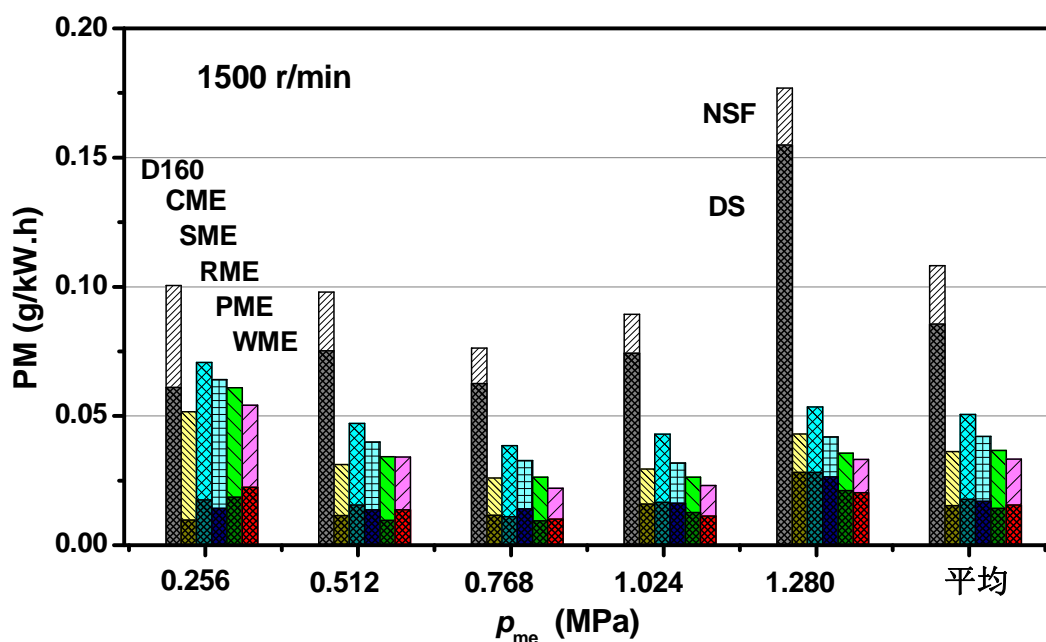


图 3.6 康明斯 ISBe6 发动机燃用不同生物柴油 PM、DS 和 NSF 排放 (1500r/min)

发动机燃用柴油和不同生物柴油的 DS 和 NSF 排放也如图 3.6 所示。生物柴油的 DS 排放在各负荷都比柴油有大幅下降，也是大负荷降低程度最大，中负荷次之，小负荷降低程度最小。相对于普通柴油，生物柴油 DS 排放的降低幅度大于 PM 总量。从平均值看，不同生物柴油的 DS 排放相比 D160 降低

80%~82%。DS 排放降低程度由多至少依次为：棕榈油甲酯、地沟油甲酯、棉籽油甲酯、大豆油甲酯。

直接影响生物柴油 DS 排放的主要原因有三点：首先，生物柴油由于含氧，会加速过浓区域燃油的氧化，从而大幅降低炭烟生成^[7, 11, 38]；其次，生物柴油基本不含芳烃，在过浓区域不易产生烟度排放^[11, 37]；另外，生物柴油的粘度比柴油高，而粘度过高可能会在一定程度上影响喷雾效果和混合气形成速度，使 PM 和 DS 排放升高^[7, 11, 27]。虽然从平均值上来看，本实验的 5 种不同生物柴油的 DS 排放水平比较接近，但是在不同负荷 DS 排放在不同生物柴油之间的存在一定区别。图 3.7 示出了大负荷时不同生物柴油 DS 排放与氧含量的关系。可以看出，大负荷时 DS 排放受氧含量影响较大，总体上随着氧含量的增加而降低。氧含量较高的棕榈油甲酯和地沟油甲酯的 DS 排放比其他三种生物柴油明显要低，差别约为基准柴油 DS 排放的 6% 左右。图 3.8 示出了小负荷时不同生物柴油 DS 排放与运动粘度的关系。可以看出，小负荷时 DS 排放随着粘度的增加有上升的趋势。粘度较低的棉籽油甲酯和菜籽油甲酯的 DS 排放则相对较低，差别约为基准柴油 DS 排放的 15% 左右。

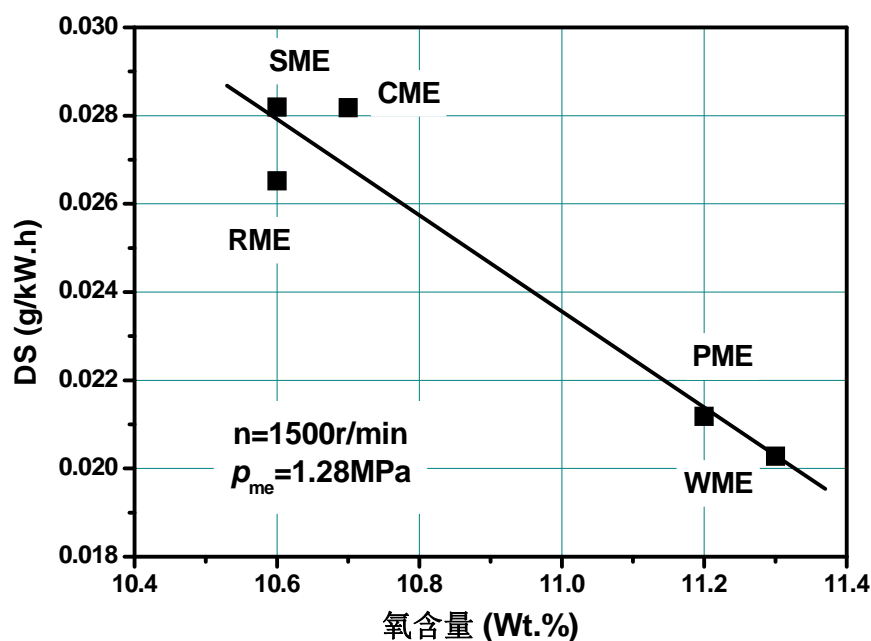


图 3.7 大负荷 DS 排放与氧含量的关系(1500r/min, 1.28MPa)

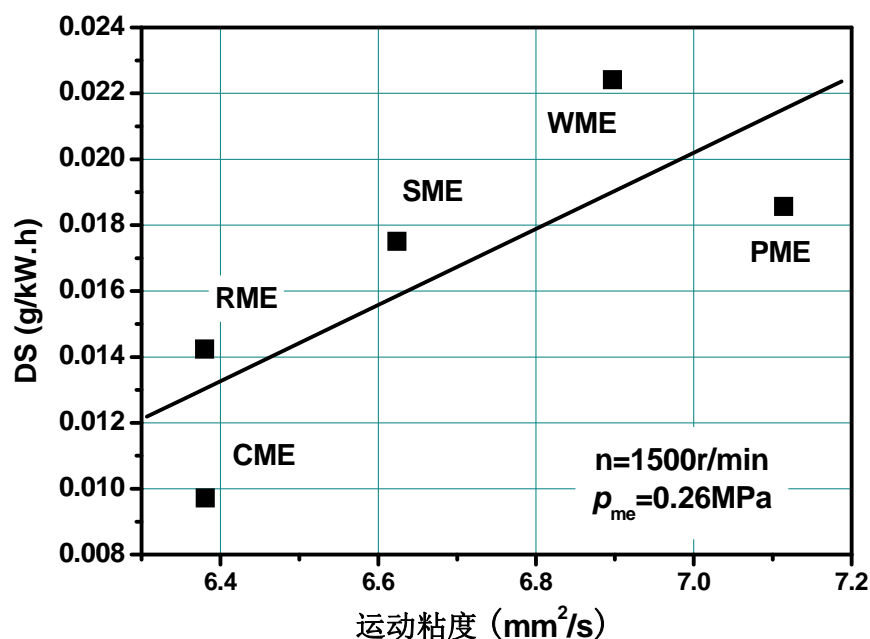


图 3.8 小负荷 DS 排放与运动粘度的关系(1500r/min, 0.26MPa)

以上结果表明,大负荷时生物柴油 DS 排放受氧含量影响较大,而小负荷时 DS 排放受粘度影响较大。这可以从不同负荷的混合气形成角度得到很好的解释:大负荷时缸内过浓区域较多,此时氧含量高能加速 Soot 的氧化从而有效的降低 DS 生成;而小负荷时缸内混合气较稀,燃料含氧对燃烧的改善的效果减弱,而缸内温度较低,燃油雾化和蒸发速度较慢,生物柴油的高粘度对喷雾的恶化效果被放大。因此对于生物柴油,若要在各种负荷都能较大程度的降低 DS 排放,除需要保证较高的氧含量之外,粘度也不能过高。

柴油非碳烟成份 NSF 包括可溶性有机成份 SOF 和硫酸盐,而生物柴油由于基本不含硫,NSF 则主要是 SOF。从图 3.6 可以看出,发动机的 NSF 排放因不同生物柴油有很大不同。大豆油甲酯和菜籽油甲酯的 NSF 排放比柴油高,相比于 D160 分别上升了 11%和 45%;棕榈油甲酯的 NSF 排放与柴油差别不大;而棉籽油甲酯和地沟油甲酯的 NSF 排放则比基准柴油低,相比于 D160 分别降低了 8%和 21%。

多数研究表明柴油机不做任何调整燃用纯生物柴油会造成 SOF 的上升^[16, 22, 39],但是原因尚不明确。一般认为, SOF 的主要成份是被 Soot 吸收或者被采样滤纸吸收的未燃 HC,因此与 HC 排放会存在类似的规律^[6, 40]。图 3.9 示出了除

PME 外不同生物柴油 NSF 排放与十六烷值的关系。为方便比较，图中也示出了 HC 排放与十六烷值的关系。可以看出，生物柴油 NSF 排放总体上随着十六烷值的增加而下降。其中棉籽油甲酯、大豆油甲酯、菜籽油甲酯和地沟油甲酯随十六烷值的增加几乎线性降低。但是，十六烷值过高的棕榈油甲酯的 NSF 排放相比其他生物柴油又有增加的趋势。这可能是由于十六烷值过高导致燃烧相位提前，使缸内温度下降，未燃燃油比例增加。另外，图中还可以看出发动机的 NSF 排放与 HC 排放有较大的相关性：除大豆油甲酯之外，在其他 4 种生物柴油之间都具有相同的变化趋势。这进一步说明了 NSF 与 HC 之间的关系，即 NSF 排放形成的主要原因是碳烟吸附排放中未燃重质 HC。

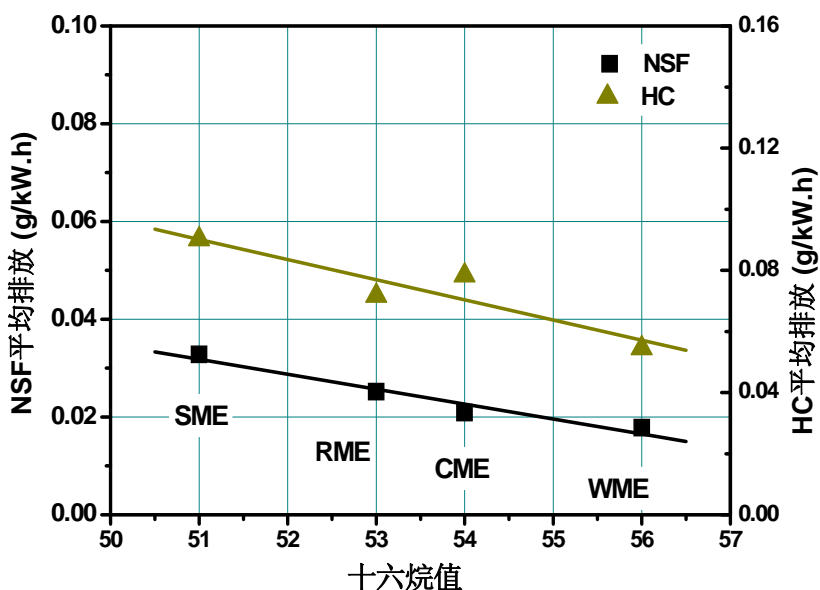


图 3.9 不同生物柴油 NSF 与 HC 平均排放与十六烷值的关系 (1500r/min)

3.3.4 NO_x排放特性

康明斯 ISBe6 发动机燃用柴油和不同生物柴油在 1500r/min 负荷特性的 NO_x 排放特性如图 3.10 所示。可以看出，不同生物柴油的 NO_x 排放均比柴油有不同程度的上升。相比 D160，不同生物柴油 NO_x 排放平均上升 10%~23%。NO_x 排放上升程度由少至多依次为：棉籽油甲酯、棕榈油甲酯、大豆油甲酯、地沟油甲酯和菜籽油甲酯。

关于生物柴油国内外进行过较多研究，其中大多数研究的结果表明生物柴

油的 NO_x 排放比柴油高^[11, 16, 21, 22, 37]，但是具体原因尚不明确。部分研究认为生物柴油含氧增加了缸内的氧化氛围，从而增加了 NO_x 生成；另有一部分研究认为由于生物柴油含氧，抑制了作为热辐射体 PM 和 Soot 的生成，从而增加了缸内温度，导致 NO_x 排放上升。图 3.11 示出了大负荷时发动机燃用不同生物柴油 NO_x 排放与氧含量的关系。可以看出， NO_x 排放随氧含量的增加总体上有上升的趋势。但是，棕榈油甲酯和地沟油甲酯的氧含量几乎一样，但前者的 NO_x 比后者明显要低。这说明，氧含量不是导致生物柴油 NO_x 排放上升的唯一原因。造成棕榈油甲酯和地沟油甲酯 NO_x 差异的可能原因是因为棕榈油甲酯十六烷值较高(64)，滞燃期短，预混合燃烧比例小，缸内温度相对较低。尽管菜籽油甲酯和大豆油甲酯的氧含量都小于棕榈油甲酯，但是由于十六烷值较低，它们的 NO_x 排放和棕榈油相当。棉籽油甲酯的 NO_x 在 5 种生物柴油中最低，原因尚不清楚。

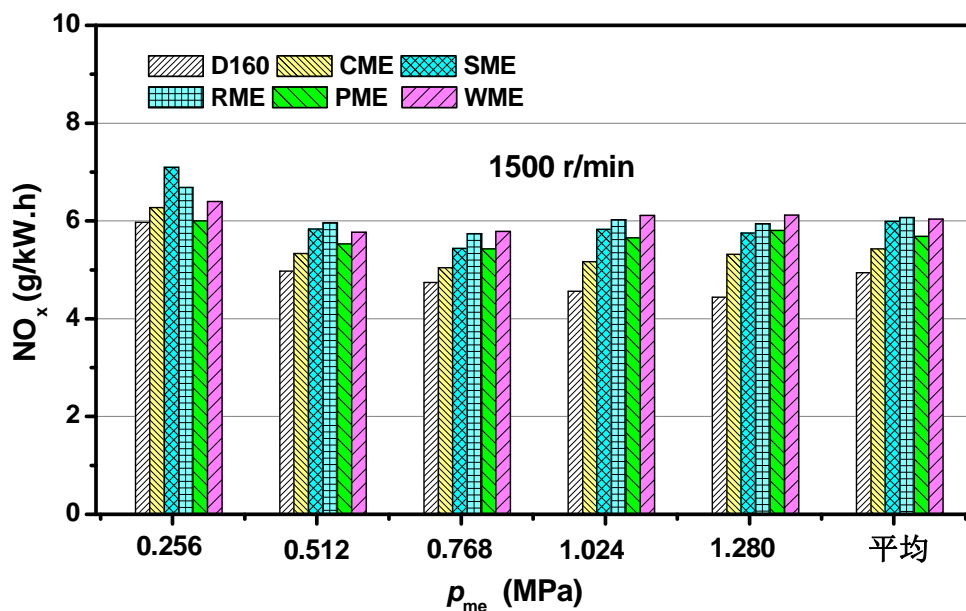
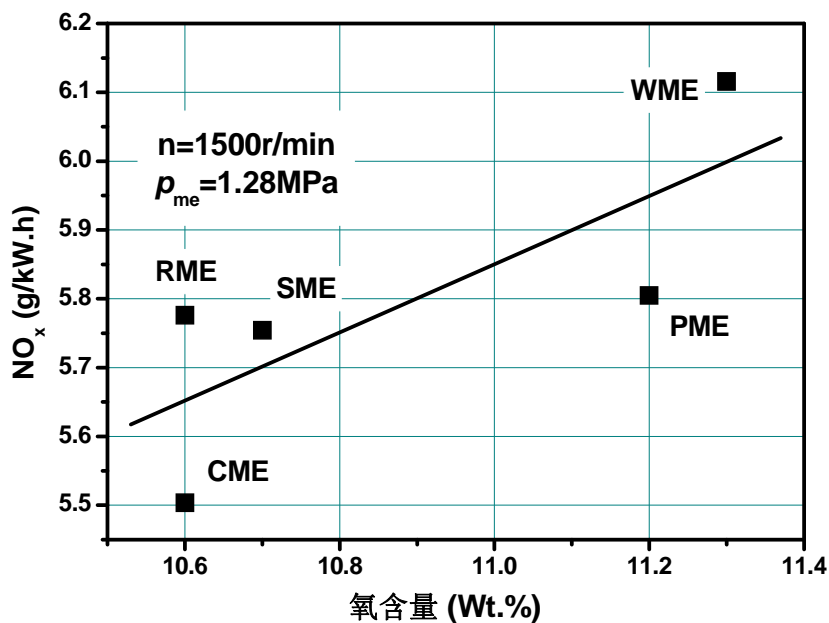


图 3.10 康明斯 ISBe6 发动机燃用柴油和不同生物柴油 NO_x 排放 (1500r/min)

图 3.11 大负荷 NO_x 排放与氧含量的关系(1500r/min, 1.28MPa)

3.3.5 HC排放特性

康明斯 ISBe6 发动机燃用柴油和不同生物柴油在 1500r/min 负荷特性的 HC 排放特性如图 3.12 所示。可以看出，柴油和生物柴油的小负荷 HC 排放都远远大于大负荷，这是由柴油机的燃烧模式决定的，小负荷时混合气较稀，局部失火情况较多。从图 3.12 中可以看出，不同生物柴油的 HC 排放均比柴油有不同程度的降低。相比于 D160 柴油，生物柴油 HC 排放平均降低 45%~67%。HC 排放降低程度由多至少依次为：棕榈油甲酯、地沟油甲酯、菜籽油甲酯、棉籽油甲酯、大豆油甲酯。

较多研究结果也表明生物柴油 HC 排放比普通柴油低^[16, 22, 39, 40]。根据柴油机 HC 形成机理，生物柴油对 HC 排放的影响主要有如下因素：一方面，十六烷值表示燃料的着火性能，不同生物柴油在十六烷值上的差异会影响 HC 排放，相同着火条件下，燃料十六烷值越高，HC 排放越低；另一方面，生物柴油由于含氧，改善了混合气的局部空燃比，这有利于燃料的氧化，降低 HC 排放。图 3.14 和图 3.15 分别示出了发动机燃用不同生物柴油的 HC 平均排放与十六烷值和氧含量的关系。可以看出，生物柴油 HC 排放随着十六烷值的增加，氧含量的增加都有降低的趋势，其中随十六烷值变化规律的线性程度更高。这表明，

对于生物柴油来说, HC 排放同时受燃料的十六烷值和氧含量影响, 受十六烷值的影响更大。

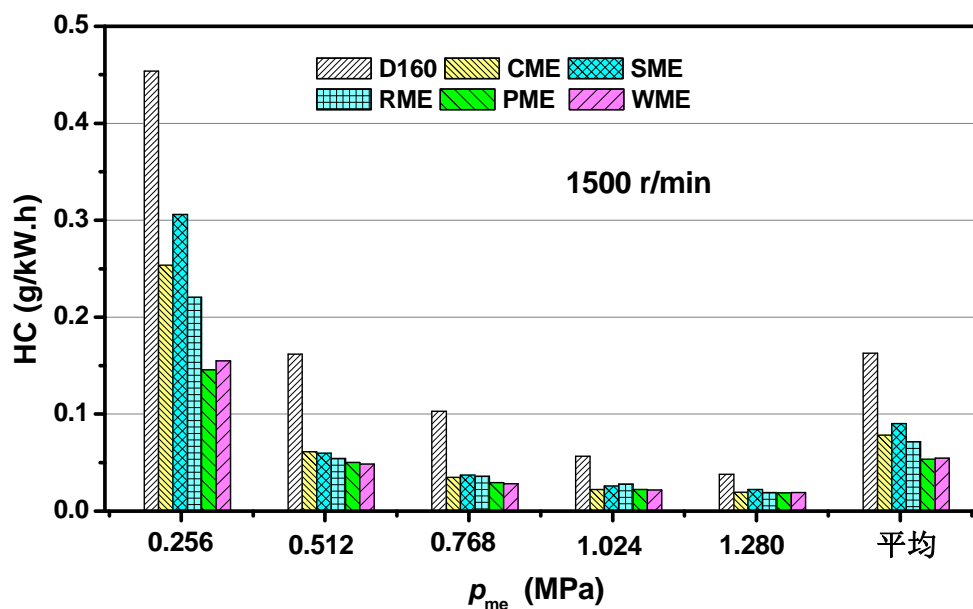


图 3.12 康明斯 ISBe6 发动机燃用柴油和不同生物柴油 HC 排放 (1500r/min)

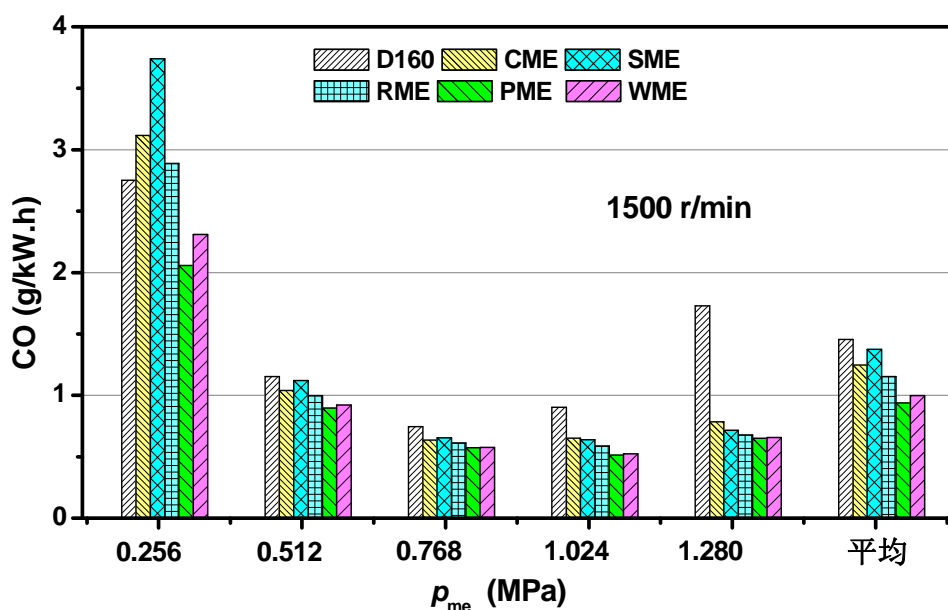


图 3.13 康明斯 ISBe6 发动机燃用柴油和不同生物柴油 CO 排放 (1500r/min)

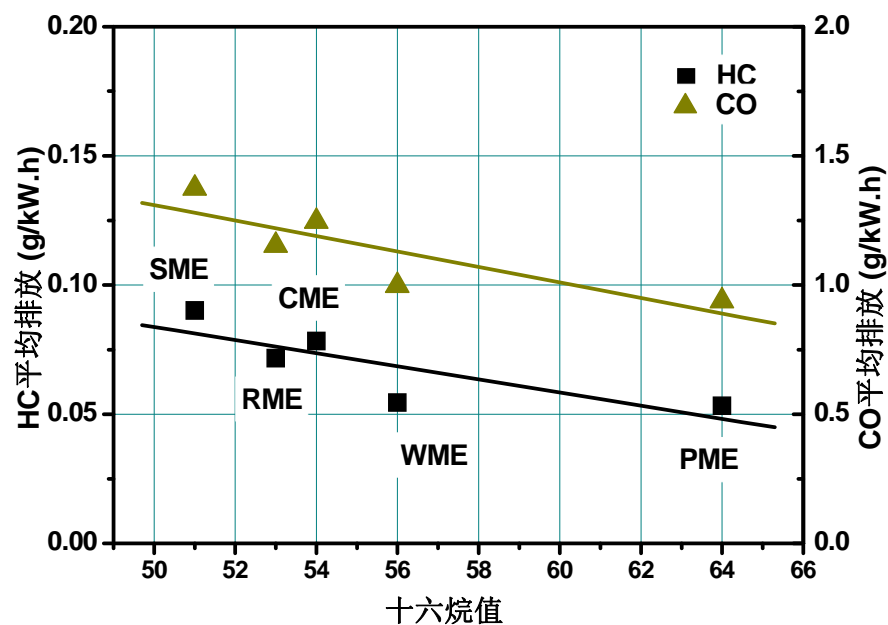


图 3.14 不同生物柴油 HC 与 CO 平均排放与十六烷值的关系 (1500r/min)

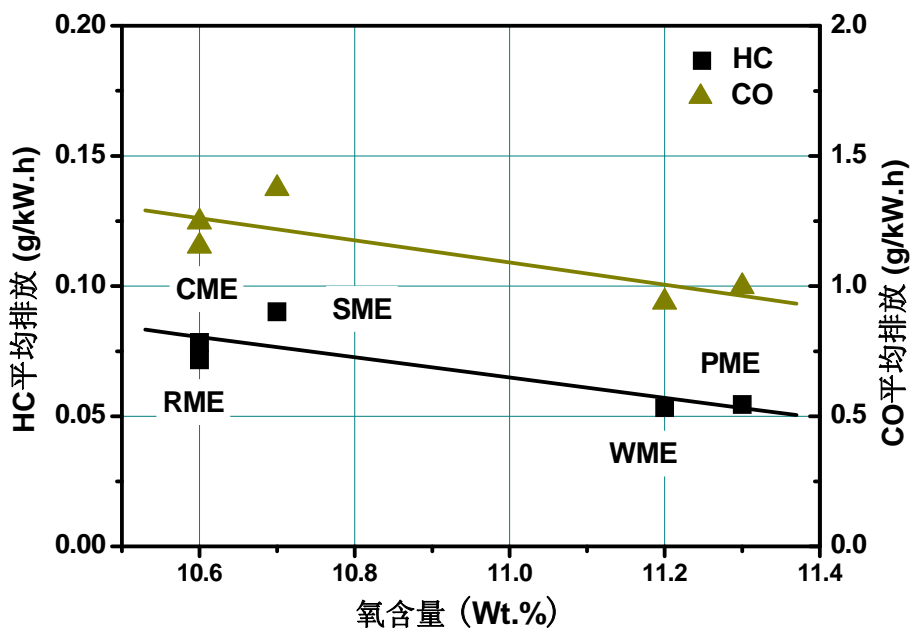


图 3.15 不同生物柴油 HC 与 CO 平均排放与氧含量的关系 (1500r/min)

3.3.6 CO排放特性

康明斯 ISBe6 发动机燃用柴油和不同生物柴油在 1500r/min 负荷特性的 CO 排放特性如图 3.13 所示。由图可见，大中负荷时发动机使用生物柴油后 CO 降低，且降低程度随负荷增大而增大。但是，小负荷时不同生物柴油间区别较大，棕榈油甲酯和地沟油甲酯 CO 排放比普通柴油低，而其它三种生物柴油比普通柴油高。相比于 D160 柴油，生物柴油 CO 排放平均降低 4%~16%。CO 排放降低程度由多至少依次为：棕榈油甲酯、地沟油甲酯、菜籽油甲酯、棉籽油甲酯、大豆油甲酯。

图 3.14 和图 3.15 还分别示出了发动机燃用不同生物柴油的 CO 平均排放与十六烷值和氧含量的关系。可见，CO 排放与 HC 排放具有非常类似的关系，同时受氧含量和十六烷值的影响，每种生物柴油之间都具有相同的变化规律。这种类似的关系主要是因为柴油机中二者具有类似的生成机理。

3.4 本章小结

本章首先介绍了进行排放特性试验的 5 种生物柴油的理化特性并进行了简要分析，然后在康明斯 ISBe6 发动机上进行了 100%比例的 5 种具有不同来源生物柴油的试验，测试了动力性、燃油经济性、气态排放物、PM 排放以及对 PM 的组分进行了分析。通过试验，得到如下结论：

1) 康明斯 ISBe6 发动机燃用不同生物柴油动力性相比基准柴油有不同程度下降，平均降低 9%~12%。结果显示随着生物柴油密度的增加发动机动力性有提升的趋势。发动机燃用生物柴油燃油消耗率相比基准柴油平均增加 13%~15%。发动机燃用生物柴油有效热效率相比基准柴油平均降低约 2%，原因可能是发动机不做任何调整时，燃用生物柴油的燃烧相位和燃烧持续期发生改变，燃烧等容度下降。

2) 康明斯 ISBe6 发动机燃用不同生物柴油 PM 排放有大幅下降，相比于基准柴油，PM 排放平均降低 53%~69%。不同生物柴油的 PM 排放有明显区别，PM 降低程度由多至少依次为：地沟油甲酯、棕榈油甲酯、棉籽油甲酯、大豆油甲酯。若生物柴油能降低 60%以上的 PM，则有可能替代 DPF 而使发动机满足到更高水平的排放标准。

3) 生物柴油的 DS 排放大幅降低，且降低幅度大于 PM，相比于基准柴油

分别降低 80%~82%。生物柴油的 NSF 排放随燃料有很大不同，相比基准柴油的变化幅度在-21%~+45%之间。

4) 康明斯 ISBe6 发动机燃用不同生物柴油 NO_x 排放有不同程度上升，相比于基准柴油平均上升 10%~23%。不同生物柴油 HC 排放相比基准柴油大幅降低，平均降低 45%~67%。不同生物柴油 CO 排放相比基准柴油略有降低，平均降低 4%~16%。

5) 通过不同生物柴油排放特性与理化参数的比较可发现，造成不同生物柴油之间差别的主要原因是它们的理化特性在氧含量、十六烷值和粘度上的差别。下面总结了氧含量、十六烷值和粘度对排放影响规律：

①生物柴油由于含氧，能改善燃烧，提高缸内的氧化氛围，加速过浓区域燃油的氧化。研究表明，随着生物柴油氧含量的增加，发动机有效效率有上升的趋势，大负荷时发动机 DS 排放呈明显的降低规律，但是 NO_x 排放有上升的趋势。另外，结果也显示发动机 HC 排放和 CO 排放随氧含量增加均有降低的趋势。

②生物柴油的十六烷值衡量燃料的着火性能，十六烷值越高，越有利于局部过稀区域燃料的氧化。研究表明，随着生物柴油十六烷值增加，发动机 HC 排放和 CO 排放均有明显的降低规律。另外，由于 NSF 排放来源于被吸附的未燃 HC，随十六烷值增加发动机 NSF 排放也有降低的趋势。

③粘度影响燃料喷雾效果，粘度过高喷雾效果变差，会增加 PM 和 DS 排放。小负荷时粘度的影响更明显。研究表明，小负荷时发动机 DS 排放随粘度增加有明显的上升趋势。

第4章 基于生物柴油的含氧混合燃料排放特性

本章根据前一章的结论总结出的含氧混合燃料的设计原则，进行了含氧混合燃料的性能试验。首先介绍了柴油-生物柴油混合燃料、生物柴油-含氧添加剂混合燃料的制备方法及理化特性，然后在康明斯 ISBe6 发动机上测试并分析了发动机燃用不同含氧混合燃料的燃油经济性和排放特性，在氧含量 0%~20% 的范围内考查了不同氧含量的混合燃料的排放特性，分析了含氧混合燃料的理化参数对排放的影响。

4.1 混合燃料的制备

以降低柴油机 PM 排放为目的，根据第三章所得结论，可得以下混合燃料设计原则：

- ①混合燃料需保证较高的氧含量，以大幅降低 PM 和 DS 排放；
- ②混合燃料的十六烷值不能过低，否则 NSF 排放将会大幅上升，PM 总量的降低幅度将会减小；
- ③混合燃料的粘度不能过高，否则喷雾效果和燃烧都会恶化，混合燃料的粘度最好比纯生物柴油低。

根据以上准则，本章选用 PM 排放较低、氧含量较高的棕榈油甲酯生物柴油和地沟油甲酯生物柴油作为基础燃料，在其中分别添加普通柴油以及乙醇、碳酸二甲酯（DMC）、甲缩醛（DMM）三种含氧添加剂，以得到具有不同理化参数的含氧混合燃料。在生物柴油中添加不同比例的普通柴油可以得到氧含量低于纯生物柴油的混合燃料，以全面考查氧含量对性能和排放特性的影响。在生物柴油中添加氧含量较高的含氧添加剂可以得到氧含量高于纯生物柴油的混合燃料，以考查进一步提高氧含量的效果。另外，乙醇、碳酸二甲酯（DMC）和甲缩醛（DMM）的粘度都比柴油和生物柴油低，和生物柴油混合使用能降低混合燃料的粘度，一定程度上改善喷雾效果。乙醇、碳酸二甲酯（DMC）和甲缩醛（DMM）的理化参数如表 4.1 所示。所有含氧混合燃料中各成份的比例及代号如表 4.2 所示。所用所有含氧混合燃料均能长期放置不会分层。

表 4.1 含氧添加剂的理化特性^[41]

中文名	乙醇	碳酸二甲酯	甲缩醛
英文名简称	Ethanol	DMC	DMM
分子式	C ₂ H ₅ OH	CH ₃ CO ₃ CH ₃	CH ₃ OCH ₂ OCH ₃
20°C 密度 (g/L)	794	1070	860
沸点 (°C)	78	91	43
低热值 (kJ/kg)	27000	15780	22400
十六烷值	8	36	30
粘度 (cp)	1.06	0.63	0.34
氧含量 (Wt. %)	34.8	53.3	42.1
碳含量 (Wt. %)	52.2	40.0	46.2
氢含量 (Wt. %)	13.0	6.7	11.7

表 4.2 试验用含氧混合燃料各成份比例及代号

含氧混合燃料	体积比 (Vol. %)	代号
基准柴油	100	D160
基准柴油: 棕榈油甲酯	90:10	PME10
基准柴油: 棕榈油甲酯	80:20	PME20
基准柴油: 棕榈油甲酯	50:50	PME50
基准柴油: 棕榈油甲酯	20:80	PME80
基准柴油: 棕榈油甲酯	100	PME100
棕榈油甲酯: 乙醇	90:10	PME90E10
棕榈油甲酯: 乙醇	80:20	PME80E20
棕榈油甲酯: 乙醇	70:30	PME70E30
地沟油甲酯: DMC	90:10	WME90DMC10
地沟油甲酯: DMC	80:20	WME80DMC20
地沟油甲酯: DMM	90:10	WME90DMM10
地沟油甲酯: DMM	80:20	WME80DMM20

根据混合燃料中各成份的比例,可以对混合燃料的部分理化特性进行估算,估算公式如下:

(1) 密度

$$\rho_H = \sum_i \rho_i * x_i \quad (4-1)$$

式中 ρ_i 为混合燃料中各成份的密度, x_i 为混合燃料中各成份的体积比。

(2) 氧含量

$$C(O)_H = \frac{\sum_i \rho_i * x_i * C(O)_i}{\sum_i \rho_i * x_i} \quad (4-2)$$

式中 $C(O)_H$ 为混合燃料氧含量, $C(O)_i$ 为混合燃料中各成份的氧含量。

(3) 碳含量

$$C(C)_H = \frac{\sum_i \rho_i * x_i * C(C)_i}{\sum_i \rho_i * x_i} \quad (4-3)$$

式中 $C(C)_H$ 为混合燃料碳含量, $C(C)_i$ 为混合燃料中各成份的碳含量。

(4) 氢含量

$$C(H)_H = \frac{\sum_i \rho_i * x_i * C(H)_i}{\sum_i \rho_i * x_i} \quad (4-4)$$

式中 $C(H)_H$ 为混合燃料氢含量, $C(H)_i$ 为混合燃料中各成份的氢含量。

(5) 低热值

$$H_H = \frac{\sum_i \rho_i * x_i * H_i}{\sum_i \rho_i * x_i} \quad (4-5)$$

式中 H_H 为混合燃料的低热值， H_i 为混合燃料中各成份的低热值。

(6) 十六烷值

$$CN_H = \sum_i CN_i * x_i \quad (4-6)$$

式中 CN_H 为混合燃料的十六烷值， CN_i 为混合燃料中各成份的十六烷值。根据此式估算的十六烷值可能与实际测量十六烷值有一定差异，但是从趋势上能大致反映混合燃料的着火特性。

表 4.3 混合燃料部分理化特性估算值

燃料	密度 kJ/kg	十六烷值	低热值 kJ/kg	氧含量 Wt. %	碳含量 Wt. %	氢含量 Wt. %
D160	832.0	55.0	43140	0.00	86.40	13.60
PME10	836.6	55.9	42817	1.18	85.37	13.47
PME20	841.2	56.8	42498	2.34	84.35	13.35
PME50	855.0	59.5	41560	5.75	81.37	12.98
PME80	868.8	62.2	40652	9.05	78.48	12.63
PME100	878.0	64.0	40063	11.20	76.60	12.40
PME90E10	870.0	58.4	38870	13.30	74.30	12.40
PME80E20	861.0	52.8	37654	15.50	72.10	12.40
PME70E30	853.0	47.2	36414	17.70	69.80	12.50
WME90DMC10	890.0	54.0	37137	16.20	71.90	12.40
WME80DMC20	910.0	52.0	34346	21.10	67.80	11.70
WME90DMM10	869.0	53.4	38308	14.20	73.30	13.00
WME80DMM20	868.0	50.8	36557	17.30	70.30	12.90

根据表 3.1 和表 4.1 中燃料的理化特性以及 4-1 至 4-6 的估算公式, 可以计算出混合燃料的部分理化特性, 如表 4.3 中所示。

4.2 试验方案

由于本次试验的燃料总量限制, 无法进行外特性试验考查动力性, 故只在 1500r/min 转速上选择大负荷和小负荷两个工况点作为比较。大负荷工况点转速为 1500r/min, 平均有效压力为 1.28MPa; 小负荷工况点转速为 1500r/min, 平均有效压力为 0.26Mpa。测量发动机的燃油经济性、气态排放物和微粒总量。进行有机溶剂萃取和去离子萃取后将微粒分为 DS 和非炭烟成份 NSF。

试验过程中发动机不做任何调整。发动机试验时的一般条件, 按国家标准 GB/T 18297-2001《汽车发动机性能试验方法》和康明斯公司相关试验规定进行控制: 冷却液的出口温度控制在 $88^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$; 机油温度控制在 $90^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$; 柴油温度控制在 $35^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$; 额定功率点 (2500r/min) 中冷后温度控制在 $49^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$; 额定功率点中冷器压降 9.25kPa、排气背压 10.6kPa。

4.3 结果与讨论

4.3.1 燃油经济性

康明斯 ISBe6 发动机燃用不同含氧混合燃料在大负荷和小负荷的燃油消耗率分别如图 4.1 和图 4.2 所示, 发动机的有效热效率分别如图 4.3 和图 4.4 所示。发动机有效热效率按公式 3-1 计算。从图 4.1 到图 4.3 中可以看出, 无论是在大负荷还是小负荷, 发动机燃油消耗率基本上随着氧含量增加而线性增加, 而发动机有效热效率基本保持不变。造成发动机燃油消耗率随氧含量增加而上升主要是因为燃料低热值随氧含量增加而降低。要使发动机发出相同的功率, 自然需要消耗更多的低热值较低燃料。从这一角度来看, 发动机燃用不同含氧混合燃料的能量利用率基本保持不变, 如果能对发动机作适当调整, 甚至有可能提高有效热效率。

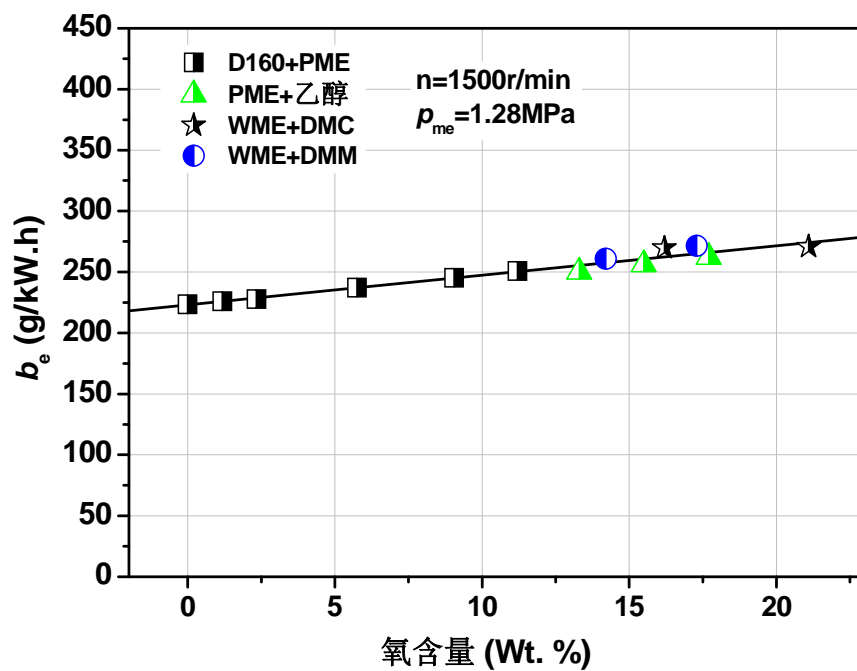


图 4.1 康明斯 ISBe6 发动机燃用含氧混合燃料燃油消耗率（大负荷）

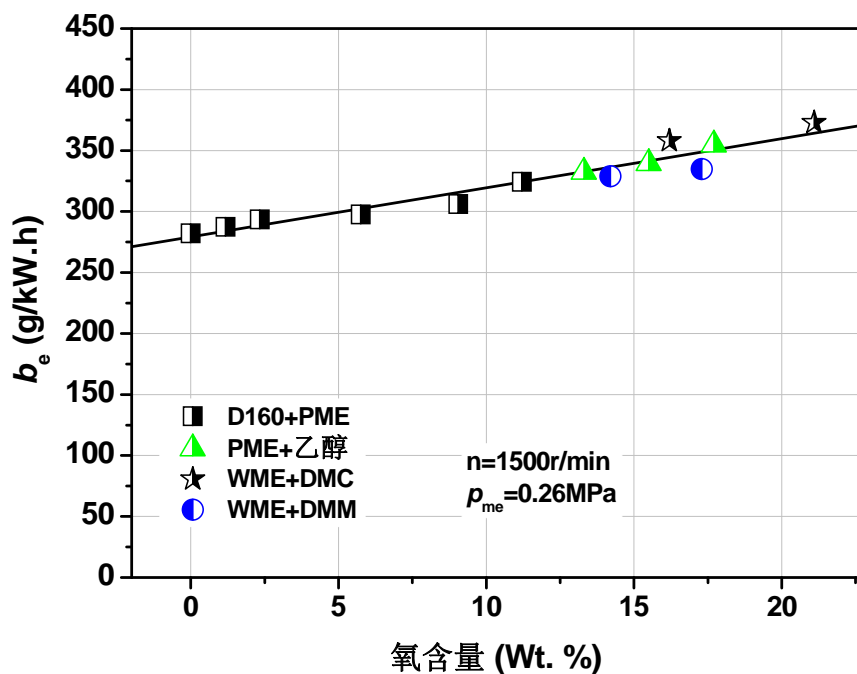


图 4.2 康明斯 ISBe6 发动机燃用含氧混合燃料燃油消耗率（小负荷）

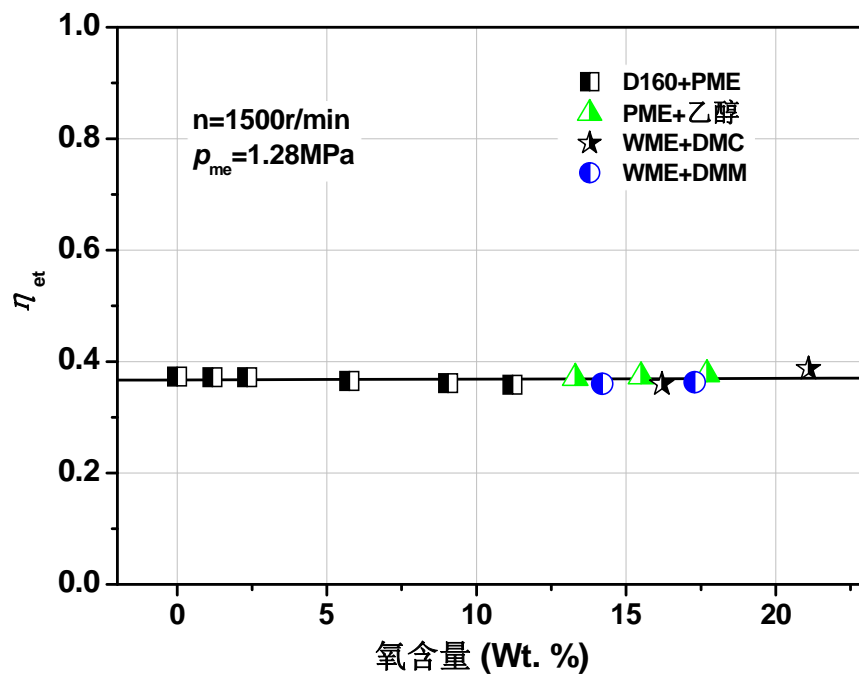


图 4.3 康明斯 ISBe6 发动机燃用含氧混合燃料有效效率（大负荷）

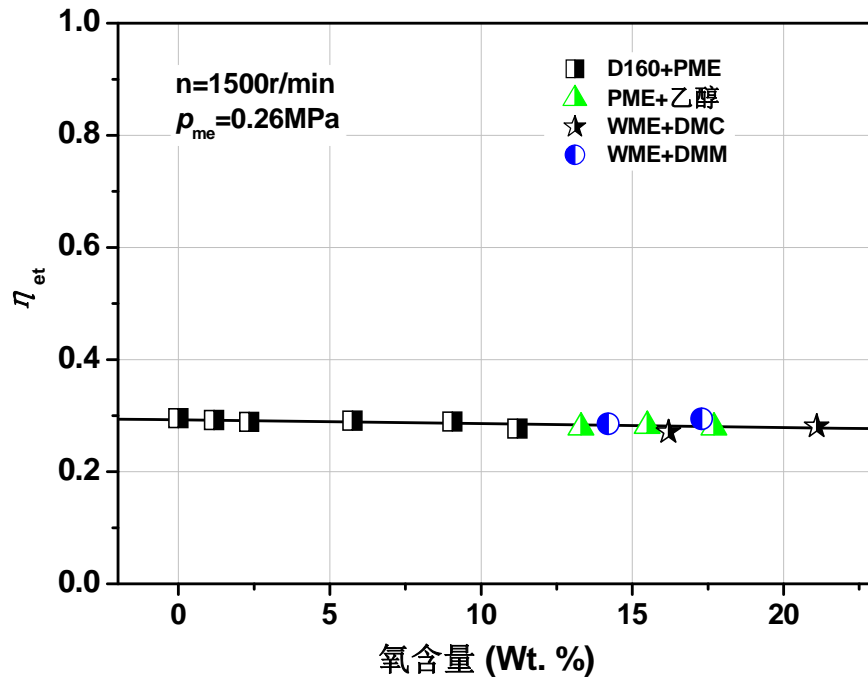


图 4.4 康明斯 ISBe6 发动机燃用含氧混合燃料有效效率（小负荷）

4.3.2 PM及其组分排放特性

康明斯 ISBe6 发动机燃用不同含氧混合燃料在大负荷和小负荷的 PM 排放特性如图 4.5 和图 4.6 所示。可以看出,总体上 PM 排放随着氧含量的增加而降低,当氧含量达 15%以上时,大负荷时 PM 相对于的柴油降低幅度可达 85%以上,小负荷时 PM 相对于柴油的降低幅度可达 60%以上,平均来看 PM 相对于柴油的降低幅度可达 70%以上。但是,PM 和氧含量二者并不是理想的线性关系,下面将进行具体分析。

首先,从图 4.5 和图 4.6 中可以看出,大负荷时 PM 随氧含量增加而降低的速度比小负荷快。由于采用 g/kW.h 为单位,当氧含量高于 5%时,小负荷由于输出功率较小,其 PM 排放甚至比大负荷还高。这说明燃料中含氧对 PM 排放的降低作用在大负荷时更加明显。这从原理上也很好解释:大负荷时空燃比较小,缸内混合气较浓,局部过浓区域也较多,此时燃料分子中的氧加速燃油分子的氧化作用也更明显。这也和第三章得出的结论类似。

另外,氧含量较低时,PM 随氧含量的增加而降低的速度较快,而当氧含量较高,PM 的降低速度变缓。大负荷时,氧含量为 5%,PM 排放相比基准柴油降低 60%;而当氧含量增加到 15%时,PM 排放相比基准柴油降低 85%左右,降低速度明显比氧含量小于 5%时慢;当氧含量大于 15%时,继续提高氧含量 PM 则基本没有变化。小负荷时也有类似的规律。这说明并不是氧含量越高 PM 越低,氧含量高到一定水平后,继续提高氧含量降低 PM 的效果已经不明显,此时 PM 甚至不会随氧含量的增加而继续降低,反而会造成动力性上更大的损失。因此设计含氧混合燃料时,当氧含量高到一定水平后,如果还需要继续降低 PM,则需考虑对除氧含量之外的其它理化参数。下面将对 PM 的组分进行分析讨论,进一步探讨含氧混合燃料对 PM 的影响。

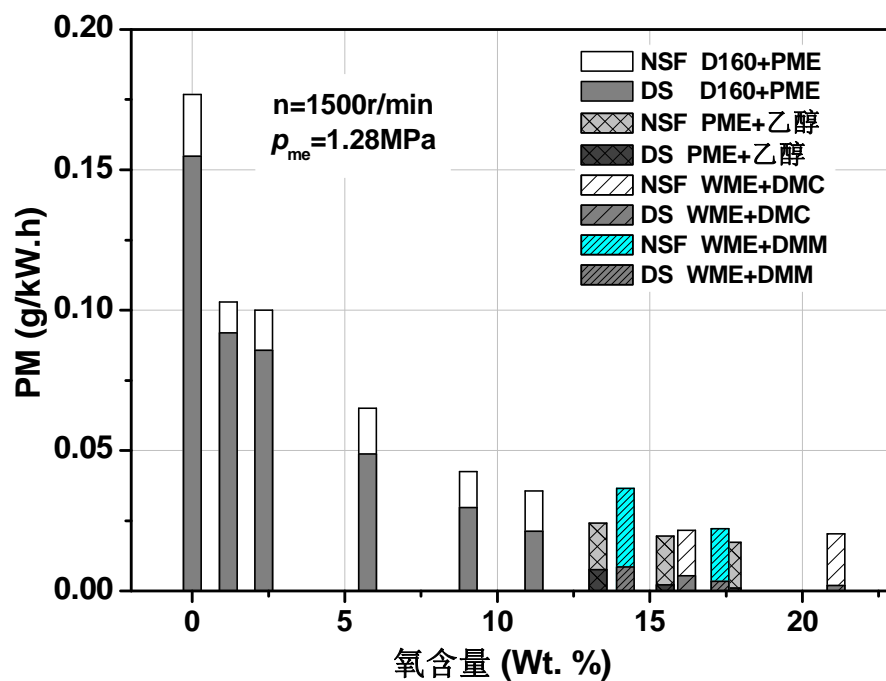


图 4.5 康明斯 ISBe6 发动机燃用含氧混合燃料 PM 排放（大负荷）

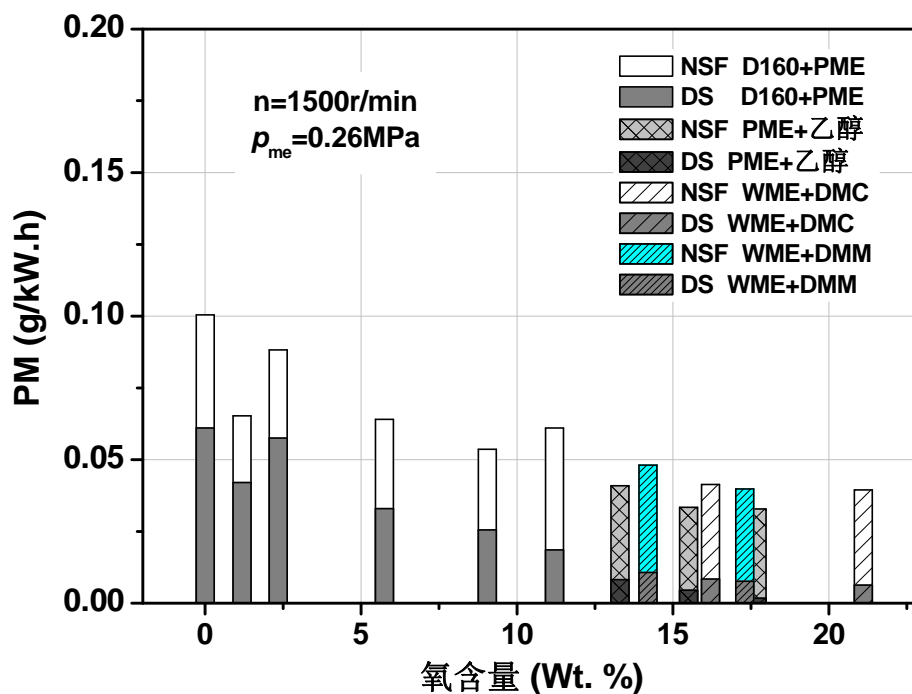


图 4.6 康明斯 ISBe6 发动机燃用含氧混合燃料 PM 排放（小负荷）

图 4.5 和图 4.6 还列出了 PM 组分分析的结果,即发动机的 DS 和 NSF 排放特性。图中可以看出,混合燃料的 DS 排放也随氧含量的增加而降低,而且降低幅度大于 PM 排放。当氧含量达 15%时,大负荷的 DS 排放相对于柴油的降低幅度可达 95%以上,基本为零,而小负荷时 DS 排放相对于柴油的降低幅度也可达 90%左右。这从采集滤纸颜色上也可以看出,当氧含量达 15%以上时滤纸基本纯白。整体来看,含氧混合燃料具有很好的降低柴油机 DS 排放的效果。这也可以说明燃料氧含量与 DS 排放之间的关系是含氧混合燃料降低柴油机 PM 的主要原因。

对于生物柴油-柴油混合燃料,NSF 成份包括 SOF 和硫酸盐,对于生物柴油-含氧添加剂混合燃料,NSF 则主要为 SOF。各混合燃料的 NSF 排放随氧含量的变化规律与 PM 和 DS 有很大不同。大负荷时,生物柴油-含氧添加剂混合燃料的 NSF 排放比生物柴油-柴油混合燃料明显要高;小负荷时,生物柴油-含氧添加剂混合燃料的 NSF 排放与生物柴油-柴油混合燃料基本相当,没有随氧含量变化的明显规律。值得注意的是,随着氧含量的增加,DS 排放逐渐降低,而 NSF 保持不变甚至有上升的趋势。当氧含量增加到一定程度后 NSF 成为了 PM 中的主要成份。对于生物柴油-柴油混合燃料,大负荷和小负荷的 NSF 比重分别为 10%~40%和 30%~65%,而对于生物柴油-含氧添加剂混合燃料,大负荷和小负荷的 NSF 比重则分别上升到了 75%~100%和 80%~100%。因此,对于含氧混合燃料来说,DS 已经不是 PM 中的主要部分,要继续降低柴油机 PM 排放,应采取措施降低 NSF 的排放。根据第三章的结论 NSF 受十六烷值影响较大,因此在提高燃料氧含量的同时,同时要提高燃料的十六烷值,才能使 DS 排放和 NSF 排放同时降低。

4.3.3 NO_x排放特性

关于含氧燃料对 NO_x排放的影响进行过很多研究,但是一直未有统一的结论。主要是因为研究用的发动机排放水平、含氧燃料类型、运行工况以及采用的测试循环都不明确或者说不统一,而 NO_x排放与这些因素都有密切的关系。一般认为,燃料分子中含氧会增加缸内的氧化氛围,增大了局部空燃比,这有利于 NO_x的生成,同时加快燃烧速度,使瞬时燃烧温度提升,在其它条件相同的情况下会使 NO_x排放上升;其次,不同燃料的蒸发潜热不同会影响缸内燃烧温度,从而影响 NO_x排放。

康明斯 ISBe6 发动机燃用不同含氧混合燃料大负荷和小负荷的 NO_x 排放特性如图 4.7 和图 4.8 所示。大负荷时，混合燃料的 NO_x 排放随氧含量的增加呈上升趋势。其中，WME90DMM10、WME80DMM20 和 WME80DMC20 三种混合燃料升高较为明显。三种生物柴油-含氧添加剂混合燃料中，生物柴油-乙醇混合燃料的 NO_x 排放比其它两种低，这可能是因为乙醇的蒸发潜热远远大于生物柴油和柴油，在蒸发过程中会降低周围环境的温度，这对于降低 NO_x 生成非常有利。混合燃料中的乙醇一定程度上缓解了燃料中含氧使 NO_x 排放上升的影响。从图 4.8 可以看出，小负荷时随着氧含量增加各含氧混合燃料的 NO_x 排放无明显变化规律。除 PME20 和 WME90DMM10 的 NO_x 较高，WME80DMC20 的 NO_x 较高之外，其他则基本保持和柴油处于相同水平。这可能是因为小负荷时，喷油量较少且缸内燃烧温度不高，此时理化参数的影响变小。

综上，发动机若在不做任何调整的情况下，燃用含氧混合燃料 NO_x 排放总体上随氧含量增加略有上升。生物柴油-含氧添加剂混合燃料的 NO_x 排放纯生物柴油基础上随氧含量继续上升，其中生物柴油-DMC 混合燃料、生物柴油-DMM 混合燃料的上升幅度较大，而生物柴油-乙醇混合燃料的上升幅度较小。

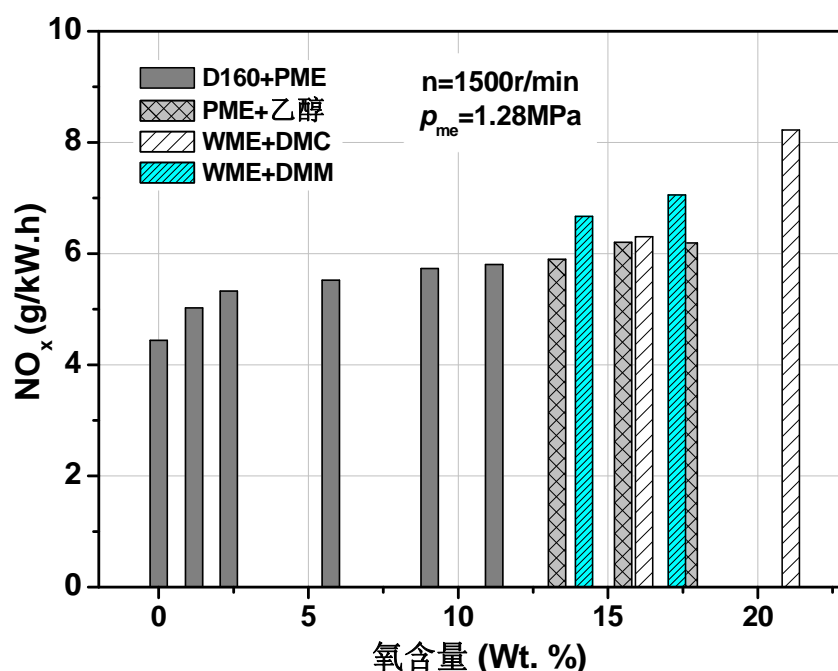
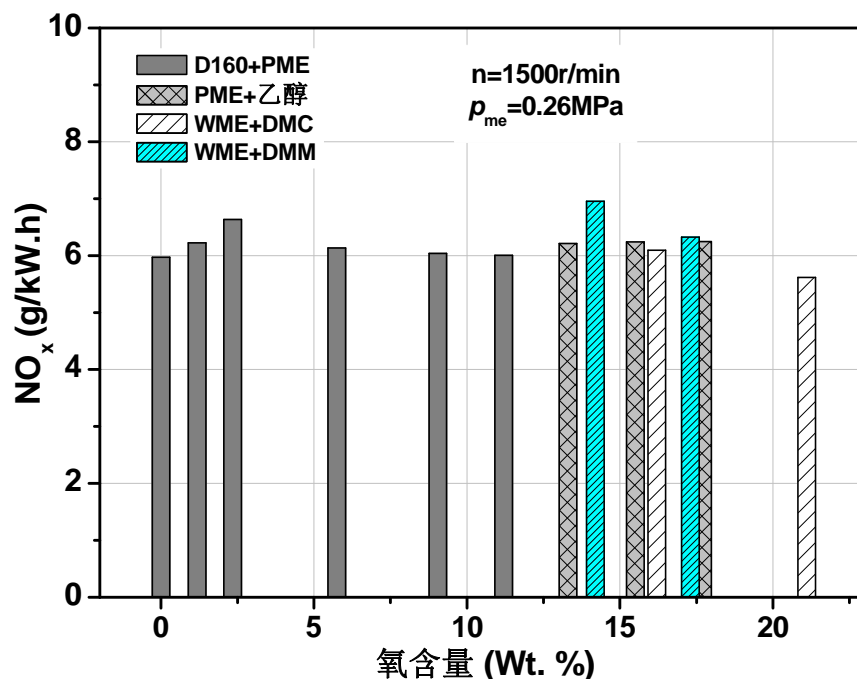


图 4.7 康明斯 ISBe6 发动机燃用含氧混合燃料 NO_x 排放（大负荷）

图 4.8 康明斯 ISBe6 发动机燃用含氧混合燃料 NO_x 排放 (小负荷)

4.3.4 HC 排放特性

康明斯 ISBe6 发动机燃用不同含氧混合燃料大负荷和小负荷的 HC 排放特性如图 4.9 和图 4.10 所示。柴油机的 HC 排放与缝隙区激冷有关, 与空燃比、缸内燃烧温度以及燃料的着火限值有很大关系^[6]。图中可以看出, 大负荷时柴油机的 HC 排放要远远低于小负荷。这主要是因为负荷越大, 缸内的过量空气系数越小, 缸内燃烧温度越高, 越有利于燃料裂解过程中小分子的氧化, 因而 HC 排放越少。从各混合燃料小负荷时的 HC 排放可以看出, 对于生物柴油-柴油混合燃料, HC 随氧含量的增加而降低; 而对于生物柴油-含氧添加剂混合燃料, HC 排放随氧含量的增加而上升。可见, 生物柴油和三种含氧添加剂对于柴油机 HC 排放有相反的影响。生物柴油由于含氧, 改善了混合气的局部空燃比, 这有利于燃烧过程中燃料的氧化, 使 HC 降低。而三种生物柴油-含氧添加剂混合燃料中虽然同样含氧, 但是它们的十六烷值都较低, 着火极限较窄, 增加了局部失火或者火焰淬熄的现象, 从而导致 HC 排放上升。被吸附的未燃 HC 是柴油机 NSF 的主要来源, HC 排放上升也会造成 NSF 排放上升。

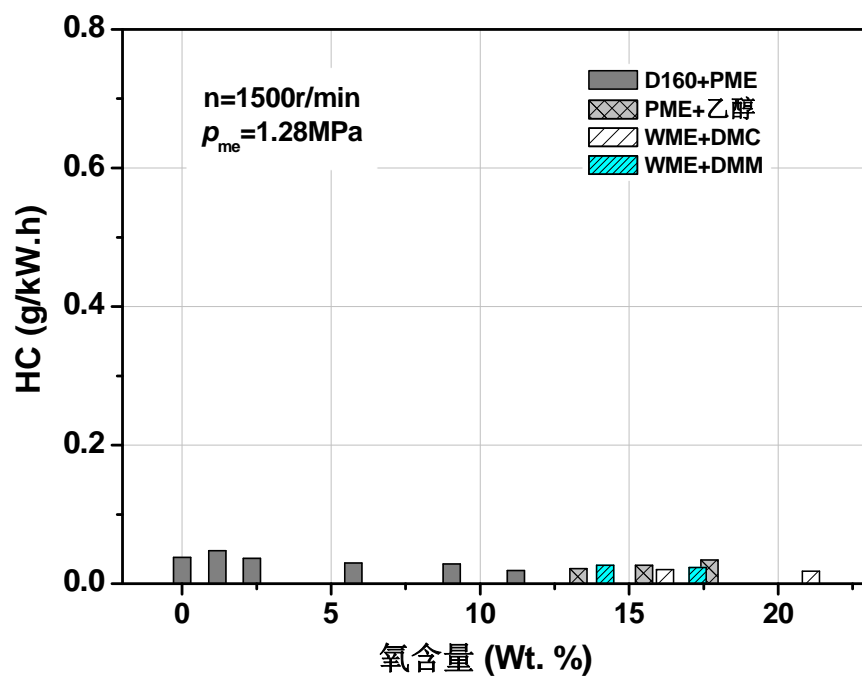


图 4.9 康明斯 ISBe6 发动机燃用含氧混合燃料 HC 排放（大负荷）

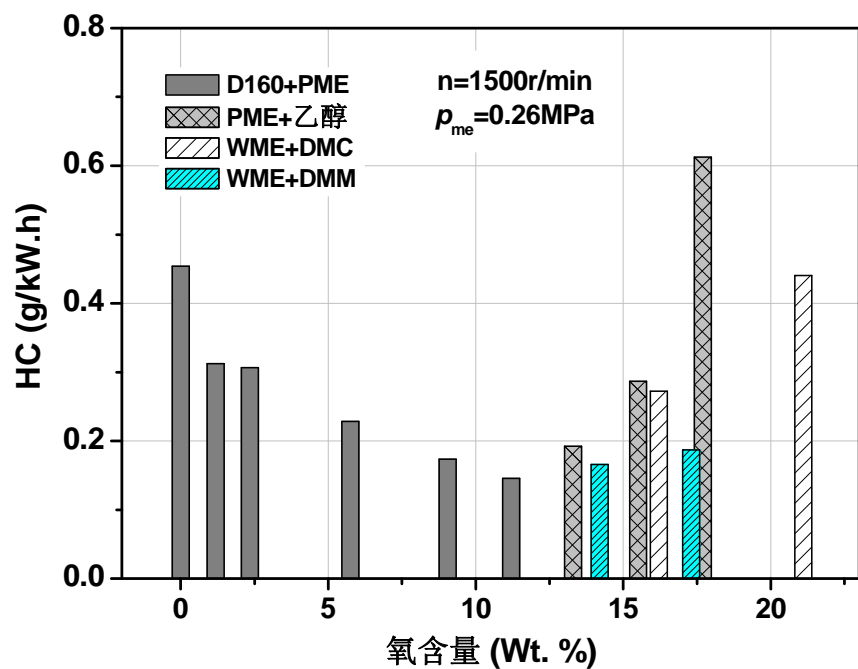


图 4.10 康明斯 ISBe6 发动机燃用含氧混合燃料 HC 排放（小负荷）

4.3.5 CO排放特性

康明斯 ISBe6 发动机燃用不同含氧混合燃料大负荷和小负荷的 CO 排放特性如图 4.11 和图 4.12 所示。柴油机 CO 的生成机理与 HC 比较类似。图中可以看出，小负荷时发动机的 CO 排放也同样远远大于大负荷，而且随着氧含量的增加，这种差别越大。氧含量对混合燃料 CO 排放的影响规律在大负荷时和小负荷时差别较大。大负荷时，无论何种混合燃料，CO 排放都随氧含量的增加近似线性的降低。这是因为，大负荷时混合气较浓，缸内燃烧温度较高，氧含量增加能改善了缸内的氧化环境，使得 CO 降低。但是在小负荷时，对于生物柴油-柴油混合燃料来说，CO 随氧含量增加而降低，而对于生物柴油-含氧添加剂混合燃料来说，CO 随氧含量的增加而上升。这说明燃料中的生物柴油具有降低 CO 排放的作用，而燃料中的含氧添加剂有增加 CO 排放的作用。这同 HC 排放的规律十分相似。其原因同样是因为 CO 排放受氧含量和十六烷值的共同影响，生物柴油含氧的同时十六烷值保持与柴油相当的水平，但是含氧添加剂虽然含氧，但是十六烷值比柴油低很多。

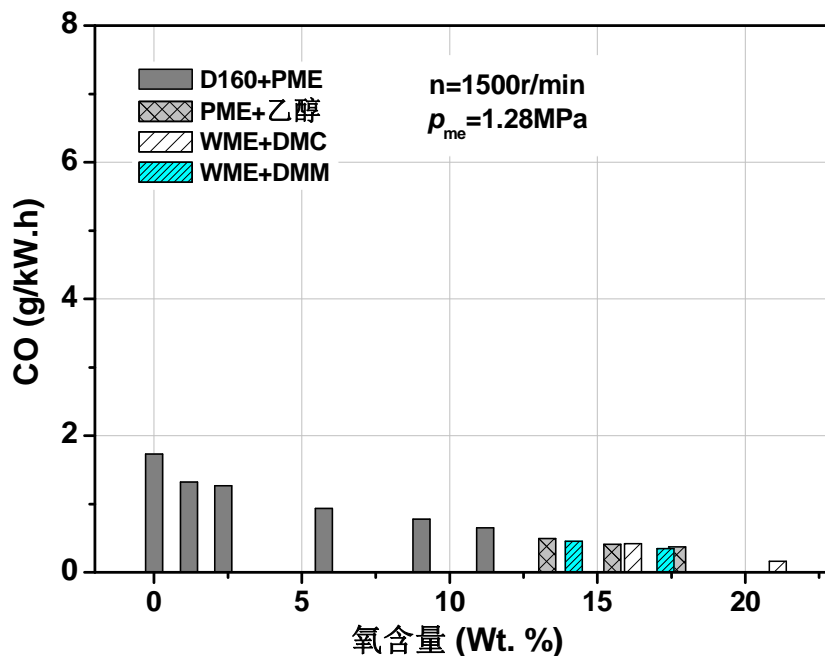


图 4.11 康明斯 ISBe6 发动机燃用含氧混合燃料 CO 排放（大负荷）

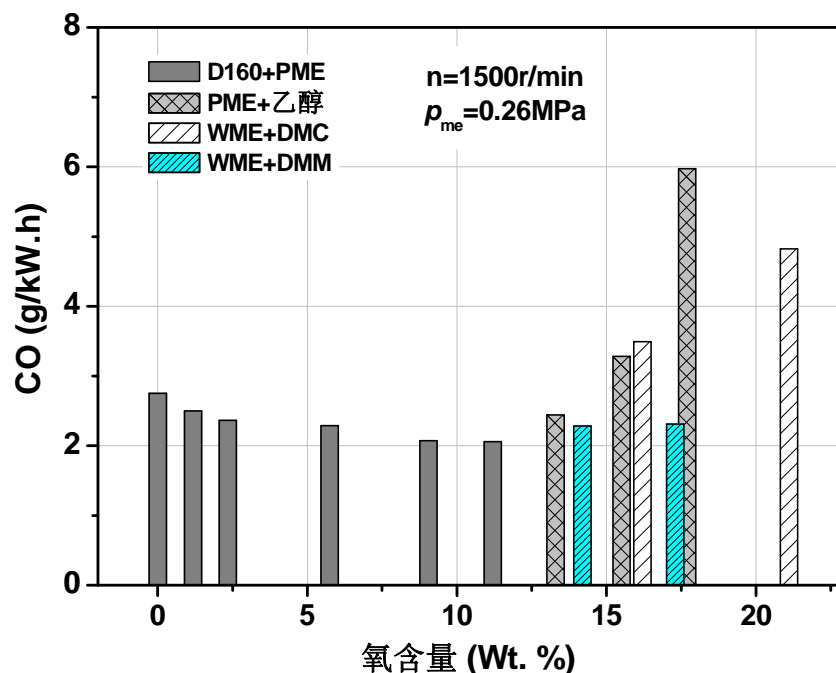


图 4.12 康明斯 ISBe6 发动机燃用含氧混合燃料 CO 排放 (小负荷)

4.3 本章小结

本章介绍了柴油-生物柴油混合燃料、生物柴油-含氧添加剂混合燃料的制备方法及其理化特性，在康明斯 ISBe6 发动机上进行了混合燃料的性能试验，测量了发动机的燃油经济性、气态排放物和 PM 及其组分排放特性。基于试验，可以得出以下几点结论：

1) 康明斯 ISBe6 发动机燃油各混合燃料的燃油消耗率基本上随着氧含量增加而增加，但有效热效率基本保持不变。这说明，发动机燃用不同混合燃料的能量利用率基本不变。

2) 总体上 PM 排放随着氧含量的增加而降低。当氧含量达 15% 以上，大负荷时 PM 相对于柴油的降低幅度可达 85% 以上，小负荷时 PM 相对于柴油的降低幅度可达 60% 以上。但是随着氧含量的增加，PM 降低速度变缓，氧含量达 15% 时，氧含量继续增加 PM 不再降低。

3) 含氧混合燃料的 DS 排放也随氧含量的增加而降低，且降低幅度大于 PM 排放。当氧含量达 15% 时，大负荷 DS 排放相对于柴油的降低幅度可达 95%

以上，小负荷的 DS 排放相对于柴油的降低幅度可达 90%以上。大负荷时含氧混合燃料的 NSF 排放随氧含量升高有上升的趋势，而小负荷时没有明显规律。随着混合燃料氧含量的增加，NSF 逐渐成为 PM 的主要成份，要继续降低 PM 排放则应采取措施降低 NSF 排放。

4) 含氧混合燃料 NO_x 排放总体上随氧含量增加略有上升。生物柴油-含氧添加剂混合燃料的 NO_x 排在纯生物柴油基础上随氧含量的增加继续上升，其中生物柴油-DMC 混合燃料、生物柴油-DMM 混合燃料上升幅度较大，而生物柴油-乙醇混合燃料上升幅度较小。

5) 混合燃料大负荷时的 HC 排放远远小于小负荷 HC 排放。对于生物柴油-柴油混合燃料，由于生物柴油含氧且十六烷值与柴油相当，其 HC 排放随氧含量的增加而降低；但对于生物柴油-含氧添加剂混合燃料，由于含氧添加剂十六烷值过低，HC 随氧含量的增加而上升。

6) 大负荷时 CO 排放随氧含量的增加而近似线性降低。小负荷时，同 HC 规律类似，对于生物柴油-柴油混合燃料，CO 随氧含量的增加而降低；而对于生物柴油-含氧添加剂混合燃料，CO 随氧含量的增加而上升。

第5章 发动机燃用含氧混合燃料 ESC 循环测试

根据前两章的结论，康明斯 ISBe6 发动机燃用纯生物柴油能降低 60%左右的 PM 排放，而燃用氧含量大于 15%的含氧混合燃料时平均能降低 70%的 PM 排放。本章在康明斯 ISB2007 发动机上进行了燃用生物柴油以及基于生物柴油的含氧混合燃料的 ESC 循环测试，测试分析了 ESC 循环各排放物并对 ESC 循环 PM 进行了组分分析，继续探索柴油机不采用后处理满足国四排放标准的可行性。

康明斯 ISB2007 发动机带有中冷 EGR 系统，能将 NO_x 控制在国四排放限值以内。该发动机配备微粒捕集器(DPF)后处理装置时能够满足美国 EPA Tier2 排放标准。试验前康明斯工程师对该发动机的喷油提前角、EGR 率进行过特殊标定，依据 ISBe6 发动机上的研究结果，使其燃用柴油的 PM 排放处于适当水平，并且 NO_x 排放标定值相对国四限值留有一定余量。

5.1 试验用燃料

用于康明斯 ISB2007 发动机 ESC 循环测试的燃料包括基准柴油、两种生物柴油和三种含氧混合燃料。基准柴油仍然是第三章和第四章中所使用的 D160 柴油。生物柴油中的一种是购于河南省生物柴油市场，这里简称为河南生物柴油，代号 HEBD；另一种生物柴油是第三章和第四章中使用的地沟油甲酯，代号 WME。除此之外，还进行了三种生物柴油-含氧添加剂混合燃料的 ESC 循环测试。含氧混合燃料的各成份比例及代号如表 5.1 所示，用于 ESC 循环测试的所有燃料的理化特性如表 5.2 所示。

表 5.1 ESC 循环测试的含氧混合燃料各成份比例及代号

混合燃料	体积比 (Vol. %)	代号
河南生物柴油: DMC	90:10	BDMC10
河南生物柴油: DMC	80:20	BDMC20
河南生物柴油: 乙醇	70:30	BE30

表 5.2 用于 ESC 循环测试的燃料理化特性

项目	D160	HNBD	WME	BDMC10	BDMC20	BE30
十六烷值	55	51	56	49.5	48.0	38.1
低热值 (kJ/kg)	43140	38674	40055	35941	33323	35411
20 °C 粘度 (mm ² /s)	3.763	--	6.897	--	--	--
40 °C 粘度 (mm ² /s)	--	4.44	--	--	--	--
硫含量 (×10 ⁻⁶)	160	10	7	--	--	--
T90 (°C)	318.5	344.2	342.5	--	--	--
冷滤点 (°C)	--	4	5	--	--	--
20 °C 密度 (kg/m ³)	830	877	870	896.3	915.6	852.1
氧含量 (Wt. %)	0	10.8	11.3	15.87	20.73	17.51
氢含量 (Wt. %)	86.4	76.6	76.3	72.23	68.05	69.78
碳含量 (Wt. %)	13.6	12.6	12.4	11.90	11.22	12.71

注：其中含氧混合燃料的理化特性由按公式 4-1 至 4-6 计算而得。

5.2 试验方案

从含氧混合燃料对柴油机动力性的影响可以看出,由于含氧燃料热值较低,功率会有所降低,对 ESC 循环的工况点也有影响,因此发动机每换一种燃料要重新确定 ESC 循环工况点。确定 ESC 循环工况点按照 GB17691-2005《车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法》^[33]确定 ESC 循环工况点。结果来看,发动机燃用不同燃料的 ESC 循环 A、B、C 三个转速的差别均在 1%以内,因此,本章将不同燃料 ESC 循环的 A、B、C 三个转速统一确定为 1538r/min、1915r/min 和 2293r/min。不同混合燃料 ESC 循环的工况点只在扭矩上有差别,以 D160、HNBD、BDMC20 三种燃料为例,它们的 ESC 循环工况点如图 5.1 所示。

试验过程中发动机不做任何调整。测量发动机的气态排放物和微粒总量。对采样滤纸进行有机溶剂萃取和去离子水萃取后将微粒分为干炭烟 (DS) 和非炭烟成份 (NSF)。其中基准柴油和两种生物柴油分别进行了 2 遍 ESC 循环测试,而含氧混合燃料由于燃料总量限制只进行了一次 ESC 循环测试。

发动机试验时的一般条件，按国家标准 GB/T 18297-2001《汽车发动机性能试验方法》和康明斯公司相关试验规定进行控制：冷却液的出口温度控制在 $88^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ ；机油温度控制在 $90^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ ；柴油温度控制在 $35^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ ；额定功率点（2500r/min）中冷后温度控制在 $49^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ ；燃用柴油额定功率点中冷器压降 9.25kPa、排气背压 10.6kPa。

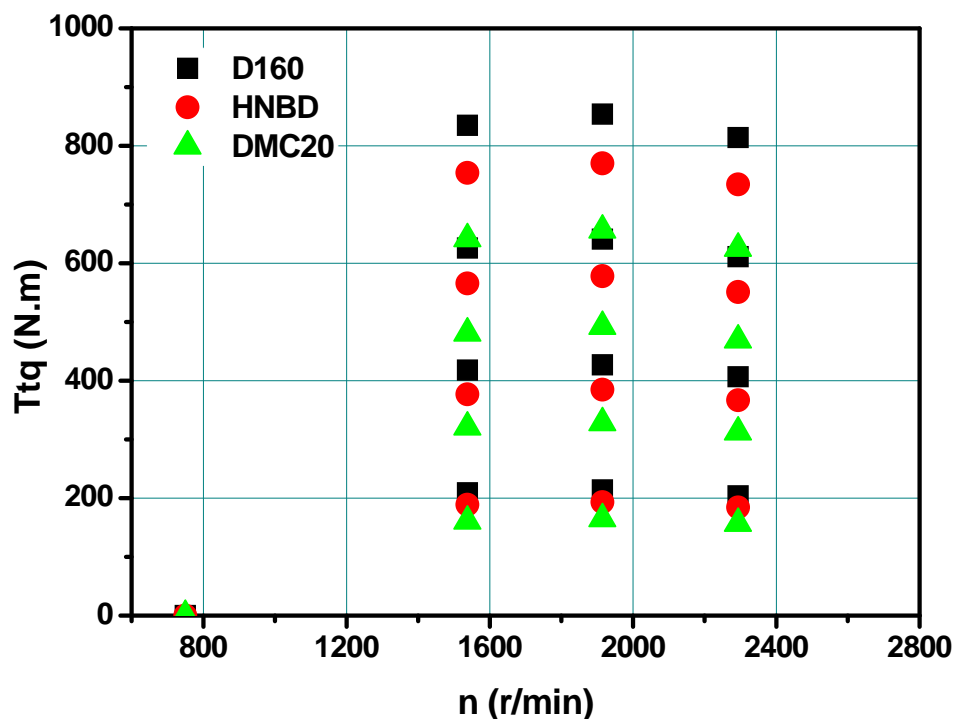


图 5.1 发动机燃用 D160、HNBD、BDMC20 三种燃料 ESC 循环工况点

5.3 结果与讨论

5.3.1 PM及其组分排放特性

康明斯 ISB2007 发动机燃用不同燃料的 ESC 循环 PM 排放特性如图 5.2 所示。测试结果显示，HNBD 生物柴油 PM 排放略高于国四限值，而 WME 生物柴油的 PM 排放则与国四限值十分接近。HNBD 生物柴油的 PM 排放相对于基准柴油平均降低了 44%，而 WME 生物柴油的 PM 排放相对于基准柴油平均降低了 49%。生物柴油在 ISB2007 发动机上降低 PM 的效果与在 ISBe6 发动机

上的结果有一定差距，而且两种生物柴油之间的 PM 排放也有一定差距。如果按照生物柴油在 ISBe6 发动机上的预测结果，生物柴油能够降低 60% 的 PM 排放，那么 ISB2007 的 ESC 循环 PM 排放将低于国四限值，且能保持一定余量。下面将对 ESC 循环 PM 的组分进行具体分析。

图 5.2 还列出了对 ESC 循环 PM 组分分析的结果。HNBD 生物柴油的 ESC 循环 DS 排放相对于基准柴油降低了 72%，而 WME 生物柴油的 ESC 循环 DS 排放相对于基准柴油降低了 73%。可见，两种生物柴油的 ESC 循环 DS 排放相差不多。ESC 循环 PM 中 DS 所占质量比例由燃用柴油时的 70% 降低到燃用生物柴油时的 35% 左右。

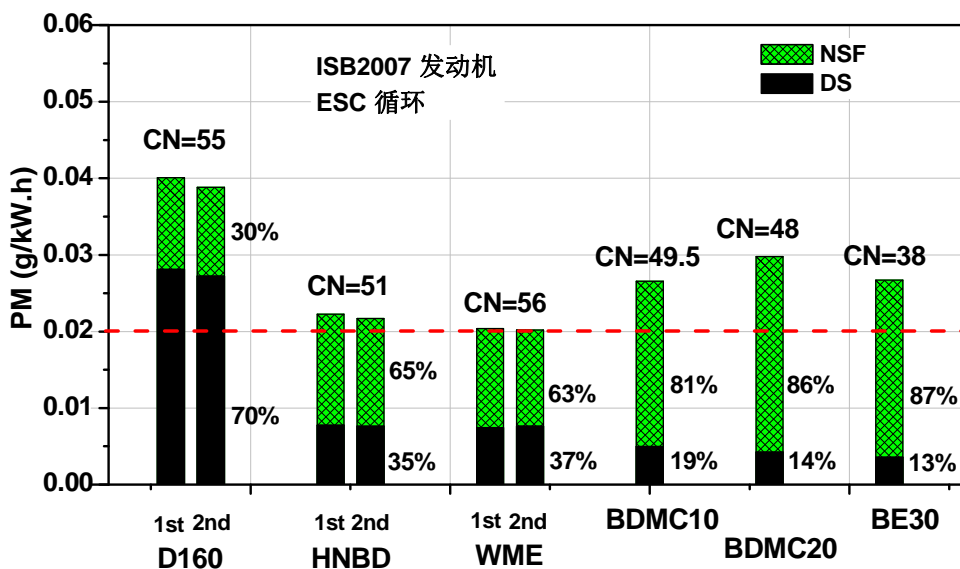


图 5.2 ISB2007 发动机燃用不同混合燃料 ESC 循环 PM 排放

造成两种生物柴油 PM 排放不同的主要原因是二者 NSF 排放的差异。HNBD 生物柴油的 ESC 循环 NSF 排放相对于基准柴油上升了 21%，而 WME 生物柴油的 ESC 循环 NSF 排放相对于基准柴油只上升了 8%。WME 生物柴油的 NSF 排放比 HNBD 生物柴油低 10% 左右。造成两种生物柴油 NSF 排放差异的原因可能是二者十六烷值的差异。WME 生物柴油的十六烷值为 56，与十六烷值为 55 的基准柴油比较接近；而 HNBD 生物柴油的十六烷值只有 51。WME 生物柴油的 NSF 排放相对于 HNBD 生物柴油降低了约 10%。这从理论上也可以得到很好的解释：生物柴油 NSF 的主要成份是 SOF，根据陈虎等人^[6, 42]的研

究结果, SOF 主要是由吸附炭烟上的重质 HC 组成, SOF 排放与 HC 排放有很大相关性, 而 HC 排放又与燃料的着火极限有很大关系。ISB2007 是一台带中冷 EGR 系统的发动机, 在 EGR 条件下, 燃料十六烷值的影响将更明显, 燃料十六烷值降低其 SOF 排放将升高。

另外, 三种含氧混合燃料的 ESC 循环 PM 排放也与 ISBe6 发动机上的测试结果不同。虽然 BDMC10、BDMC20、BE30 三种含氧混合燃料的氧含量分别为 15.87%、20.73%和 17.51%, 均比纯生物柴油要高, 但是它们的 ESC 循环 PM 排放均比两种生物柴油要高, 相对于基准柴油分别只降低了 33%、25%和 32%, 相对于纯生物柴油则分别上升了 25%、41%和 26%, 离国四排放限值较远。可见, 并不是一般认为的氧含量越高, PM 排放越低, 设计低 PM 排放的含氧混合燃料不能只着眼于燃料的氧含量, 还要综合考虑其它理化特性参数。

三种生物柴油-含氧添加剂混合燃料的 DS 排放仍然随着氧含量的增加而继续降低, 相比于基准柴油分别降低了 82%、85%和 87%, 相对于纯生物柴油分别降低了 35%、44%和 53%。这一结果与本文第四章以及许多其它相关研究的结果类似。含氧燃料的一大优势就是能大幅降低柴油机的 DS 排放。

图 5.2 还显示了含氧混合燃料的 NSF 排放。可见, 三种生物柴油-含氧添加剂混合燃料的 ESC 循环 NSF 排放相比柴油和生物柴油大幅上升。BDMC10、BDMC20 和 BE30 三种含氧混合燃料的 NSF 排放相对于基准柴油分别上升了 83%、117%和 96%, 相对于纯生物柴油分别分别上升了 60%、89%和 71%。NSF 成份的上升是造成含氧混合燃料 ESC 循环 PM 排放升高的原因。

从这三种混合燃料来看, NSF 排放随着氧含量即含氧添加剂比例的增加而升高。第四章的研究结果中也可以看出, 含氧混合燃料的 NSF 排放随着氧含量的增加有上升的趋势, 但是上升幅度较少, PM 排放总体上仍然比纯生物柴油低。而本次 ESC 循环的测试结果显示, 含氧混合燃料的 NSF 排放的上升幅度已经远远大于 DS 排放的降低幅度, 导致 PM 总量排放高于纯生物柴油。

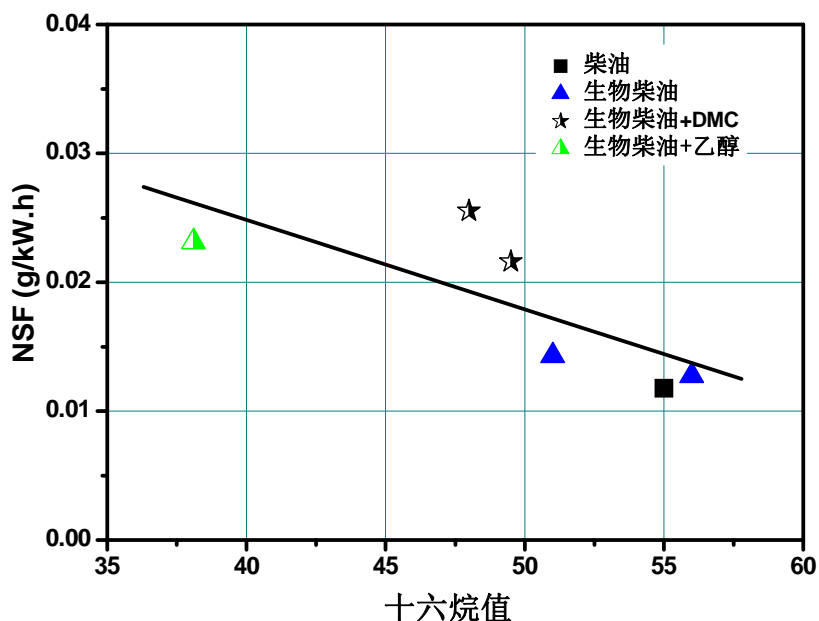


图 5.3 ESC 循环 NSF 排放与十六烷值的关系

造成 NSF 排放大幅上升的原因可能是含氧混合燃料的十六烷值过低导致的。图 5.3 示出了所有燃料的 NSF 排放与十六烷值的关系。可以看出, 随着十六烷值的增加 NSF 排放总体上有上升的趋势。由于各燃料在其它理化特性上的不同, NSF 排放随十六烷值变化的规律并不线性。本研究使用的三种含氧添加剂的十六烷值都比较低, 与生物柴油掺混使用降低了混合燃料的十六烷值 (见表 5.2)。而燃料十六烷值越低, 着火限值越窄, 使得缸内局部失火的情况增多, 未燃 HC 排放和 NSF 排放上升。十六烷值影响 NSF 排放的效果在康明斯 ISB2007 发动机的 EGR 环境下更加明显。从理论上分析, 进气中增加一部分经过中冷的废气, 一部分可用于燃烧的氧气被不可发生反应的废气替代, 将进一步增加缸内局部失火情况, 此时燃料的着火特性则显得更加重要。因此, 对于带 EGR 系统的柴油机, 燃料的十六烷值不可过低, 否则将大幅增加 NSF 排放。考虑到 EGR 系统是目前唯一能在缸内降低 NO_x 排放使发动机满足国四以上排放法规的手段, 将来的大部分柴油都会采用, 那么, 通过燃料设计实现更低的 PM 排放对含氧混合燃料的十六烷值要求更高。

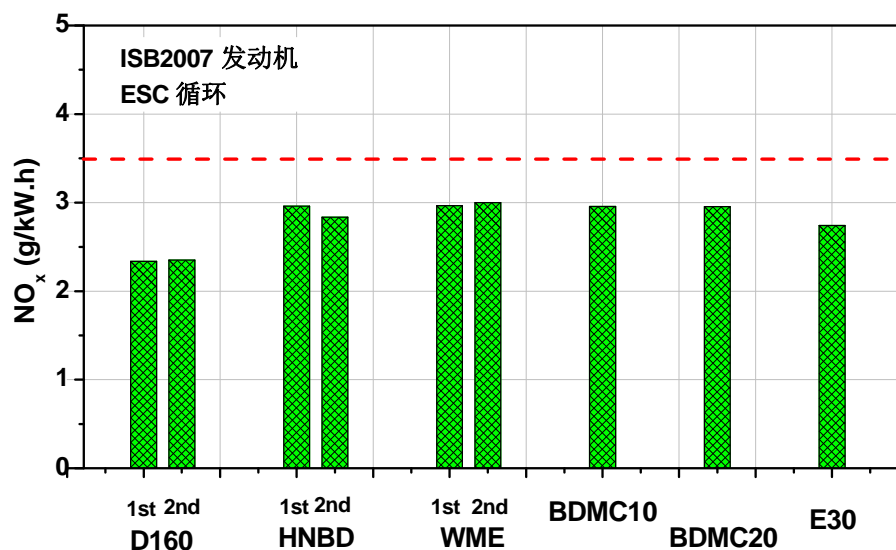
综上所述, 从本次研究结果来看, ESC 循环 PM 排放受氧含量和十六烷值的影响较大。氧含量主要影响柴油机 DS 排放。ESC 循环的 DS 排放随氧含量增加而降低。十六烷值主要影响柴油机 NSF 排放, 且十六烷值的作用在 EGR

环境下更为明显。ISB2007 发动机燃用两种不同生物柴油时，十六烷值较高的生物柴油的 NSF 较低。ISB2007 燃用含氧混合燃料时，由于三种含氧添加剂的十六烷值都比较低，NSF 排放随着含氧添加剂比例的增加而明显上升。从含氧混合燃料设计的角度降低柴油机 PM 排放，不能只考虑燃料的氧含量，同时还要考虑混合燃料的十六烷值，在 EGR 环境下对含氧混合燃料十六烷值的要求必不可少。

5.3.2 NO_x排放特性

康明斯 ISB2007 发动机燃用不同燃料的 ESC 循环 NO_x 排放特性如图 5.4 所示。HNBD 生物柴油和 WME 生物柴油的 NO_x 排放相对于基准柴油分别升高了 24% 和 27%，但是仍然低于国四排放法规的限值且保持一定余量。两种不同比例的生物柴油-DMC 混合燃料的 ESC 循环 NO_x 排放相对于纯生物柴油基本保持不变，这与第四章的结果有略有区别。而生物柴油-乙醇混合燃料的 ESC 循环 NO_x 排放相比于纯生物柴油则略有降低，相对于基准柴油只上升了 17%，相对于纯生物柴油则降低了 7%，与第四章的结果类似。造成生物柴油-乙醇混合燃料 NO_x 低的主要原因是乙醇的汽化潜热远远大于柴油和生物柴油，在蒸发过程中会吸收更多的热量，一定程度上降低缸内燃烧温度，从而降低 NO_x 排放。

从 ESC 循环 NO_x 排放测试结果来看，所有燃料的 NO_x 排放都低于国四排放限值且有一定余量。由于 NO_x 和 PM 的 trade-off 关系，这使得降低 PM 排放还存在一定潜力，即通过调整发动机喷油提前角、EGR 率等参数存在继续降低 PM 而保证 NO_x 低于排放限值的可能性。

图 5.4 ISB2007 发动机燃用不同混合燃料 ESC 循环 NO_x 排放

5.3.3 HC 排放特性

康明斯 ISB2007 发动机燃用不同燃料的 ESC 循环 HC 排放特性如图 5.5 所示。可以看出，两种生物柴油的 ESC 循环 HC 排放相比基准柴油有大幅降低。HNBD 生物柴油和 WME 生物柴油的 ESC 循环 HC 排放相对于基准柴油分别降低了 42% 和 45%。WME 生物柴油的 HC 排放略低于 HNBD 生物柴油，这和二者 NSF 排放的结果很类似，进一步验证了 HC 排放与 SOF 排放的关系。

康明斯 ISB2007 发动机燃用 BDMC10 的 ESC 循环 HC 排放相比于纯生物柴油基本保持不变，而其它两种含氧混合燃料的 HC 排放则比纯生物柴油有所上升，其中 BDMC20 的 ESC 循环 HC 排放相对于基准柴油只降低了 23%，而 BE10 的 HC 排放相对于基准柴油则上升了 29%。同第四章的结论类似，乙醇和 BDMC 由于十六烷值较低，和生物柴油掺混使用会增加发动机的 HC 排放。

总体来看，康明斯 ISB2007 发动机燃用不同燃料的 ESC 循环 HC 排放仍然比国四排放标准限值 0.46g/kW.h 低很多。但是较高的 HC 排放值可能意味着较高的 NSF 排放，从而使 PM 总量排放增高。

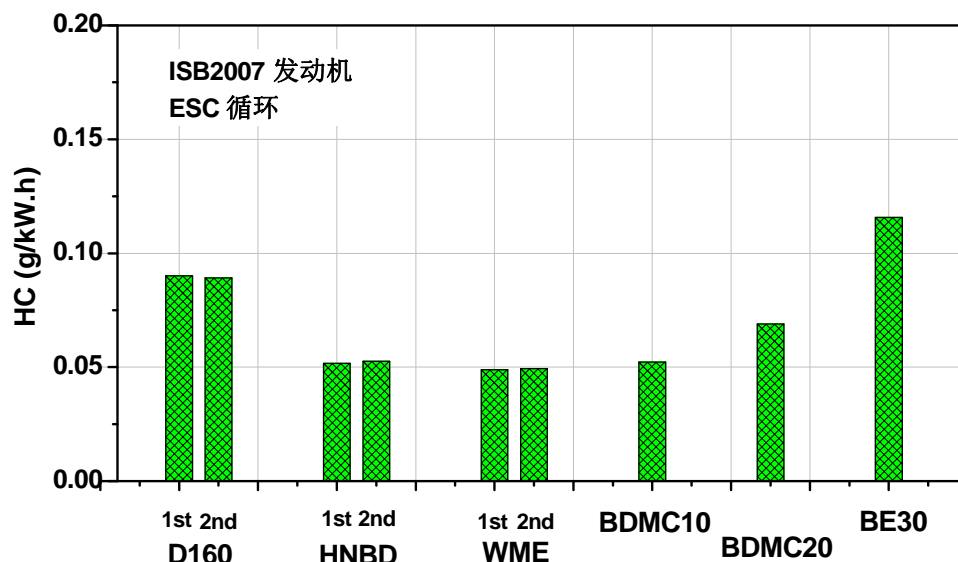


图 5.5 ISB2007 发动机燃用不同混合燃料 ESC 循环 HC 排放

5.3.4 CO排放特性

康明斯 ISB2007 发动机燃用不同燃料的 ESC 循环 CO 排放特性如图 5.6 所示。HNBD 生物柴油和 WME 生物柴油的 ESC 循环 CO 排放相对于基准柴油分别降低了 20%和 22%，而 BDMC10、BDMC20 和 BE30 的 ESC 循环 CO 相对于基准柴油则分别上升了 74%、48%和 128%。比较可以发现，发动机燃用不同燃料的 ESC 循环 CO 排放与 HC 排放十分类似。一方面，氧含量增加改善了缸内的氧化环境从而使 CO 排放降低；另一方面，由于含氧添加剂的十六烷值较低，增加了含氧混合燃料的 CO 排放。

总体来看，康明斯 ISB2007 发动机燃用不同燃料的 ESC 循环 CO 排放仍然比国四排放标准限值 1.5g/kW.h 低很多。

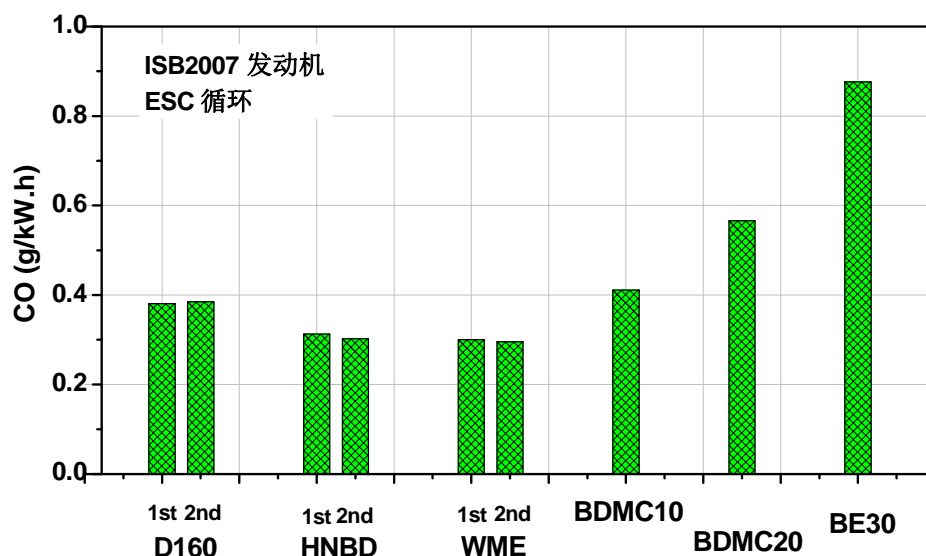


图 5.6 ISB2007 发动机燃用不同混合燃料 ESC 循环 CO 排放

5.3 本章小结

本章介绍了用于 ESC 循环测试的柴油、生物柴油及三种混合燃料的制备及理化特性，在康明斯 ISB2007 发动机上测量了 ESC 循环的各排放物，并对 ESC 循环的 PM 组分进行了分析。基于试验，可以得出以下几点结论：

1) HNBD 生物柴油和 WME 生物柴油的 PM 排放相对于基准柴油分别降低了 44% 和 49%，其中 HNBD 生物柴油 PM 排放略高于国四限值，而 WME 生物柴油的 PM 排放与国四限值十分接近。

2) BDMC10、BDMC20、BE30 三种含氧混合燃料的 PM 排放效果不如纯生物柴油，相对于柴油分别只降低了 33%、25% 和 32%，相对于纯生物柴油则分别上升了 25%、41% 和 26%，离国四排放限值较远。

3) ESC 循环 DS 排放随氧含量的增加而降低。其中，两种生物柴油的 DS 排放相差不大，相对于基准柴油分别降低了 72% 和 73%。三种生物柴油-含氧添加剂混合燃料的 ESC 循环 DS 排放 在纯生物柴油的基础上继续降低，相比于基准柴油分别降低了 82%、85% 和 87%，相对于纯生物柴油分别降低了 35%、44% 和 53%。

4) 十六烷值对 ESC 循环 NSF 排放影响较大，在 EGR 条件下则更为明显。十六烷值较高的 WME 生物柴油的 ESC 循环 NSF 排放比十六烷值较低的 HNBD

生物柴油的 NSF 排放低约 10%左右。由于含氧添加剂的十六烷值较低，三种生物柴油-含氧添加剂混合燃料的 NSF 排放大幅上升，相对于基准柴油分别上升了 83%、117%和 96%，相对于纯生物柴油分别上升了 60%、89%和 71%。设计含氧混合燃料时不能只考虑氧含量，尤其在 EGR 环境下对含氧混合燃料的十六烷值的要求必不可少。

5) HNBD 生物柴油和 WME 生物柴油的 NO_x 排放相对于基准柴油分别升高了 24%和 27%，但是仍然低于国四排放法规的限值且有一定余量。BDMC10 和 BDMC20 的 NO_x 排放相对于纯生物柴油基本保持不变，而 BE30 的 NO_x 排放相对于纯生物柴油降低 7%，主要原因是乙醇的蒸发潜热较大，降低了缸内燃烧温度。

6) 两种生物柴油的 HC 排放和 CO 排放相对于基准柴油有一定程度下降，而三种含氧混合燃料由于十六烷值较低，其 HC 排放和 CO 排放相对于纯生物柴油会有所上升，但是仍然远远低于国四排放限值。

第6章 结论

6.1 研究总结

本论文工作围绕基于生物柴油的含氧混合燃料设计以降低柴油机排放这一思路,以发动机台架试验的形式研究了不同来源生物柴油以及基于生物柴油的含氧混合燃料的排放特性,分析了含氧混合燃料理化参数对柴油机主要排放物的影响,并在此基础上在一台经过特殊标定的柴油机上进行了 ESC 循环测试,探索了柴油机不采用后处理满足国四排放法规的可能性。论文的主要结论可以总结为以下几点:

1) 发动机燃用不同来源生物柴油的 PM 排放有较大区别,相对于柴油平均降低 53%~69%不等。PM 降低程度由多至少依次为:地沟油甲酯、棕榈油甲酯、棉籽油甲酯、大豆油甲酯。造成 PM 排放区别的主要理化参数是氧含量、粘度和十六烷值。PM 中 DS 排放与燃料的氧含量和粘度关系密切,其中大负荷时氧含量的影响较大,小负荷时粘度的影响较大。PM 中的 NSF 排放与十六烷值有关,其它条件相同的情况下,十六烷值越高,生物柴油的 NSF 排放越低。

2) 生物柴油-含氧添加剂混合燃料在 ISBe6 发动机上降低 PM 的效果较好。氧含量达 15%以上,大负荷时 PM 相对于柴油的降低幅度可达 85%以上,小负荷时 PM 相对于柴油的降低幅度可达 60%以上。生物柴油-含氧添加剂混合燃料在 ISB2007 发动机上的降低 PM 的效果较差,其 ESC 循环 PM 排放相对于纯生物柴油则分别上升了 25%、41%和 26%。

3) PM 中 DS 成份基本上随燃料氧含量的增加而降低。ISBe6 发动机的测试结果显示,当氧含量达 15%时,大负荷的 DS 排放相对于柴油的降低幅度可达 95%以上,小负荷的 DS 排放相对于柴油的降低幅度可达 90%以上。ISB2007 发动机的 ESC 循环测试结果显示,当氧含量达 15%时,ESC 循环的 DS 排放相对于柴油的降低幅度可达 85%以上。但当氧含量达 15%以上时,继续提高氧含量效果不明显。

4) 十六烷值主要影响柴油机 PM 中 NSF 成份,在 EGR 条件下则更加明显。ISB2007 发动机 ESC 测试结果显示,生物柴油十六烷值从 51 增加到 56, NSF 排放降低约 10%。由于三种含氧添加剂的十六烷值较低,造成生物柴油-含氧添

加剂混合燃料的 NSF 排放大幅上升, 相对于纯生物柴油分别分别上升了 60%、89%和 71%。

5) 从本文研究结果来看, 通过对基于生物柴油的含氧混合燃料设计来实现柴油机不采用后处理满足国四排放标准希望很大。依据本文研究结果, 提出以下含氧混合燃料设计原则:

①含氧混合燃料首先需保证较高的氧含量。提高氧含量的主要作用在于大幅降低柴油机 DS 排放。但当氧含量提升到一定程度后, 继续提高氧含量的效果不明显。

②含氧混合燃料还需保证较高的十六烷值。当氧含量增加到一定幅度后, 十六烷值成为主要影响因素。十六烷值主要作用在于降低柴油机 NSF 排放。在 EGR 条件下对十六烷值的要求则更高。

③含氧混合燃料的粘度不能过高。粘度过高, 喷雾恶化, 也会增加柴油机的 PM 和 DS 排放。

6.2 需进一步展开的工作

本文就基于生物柴油的含氧混合燃料设计进行了探索性的研究, 将来的工作可从以下几个方面展开:

1) 采用高十六烷值(十六烷值至少 50 以上)的含氧添加剂代替乙醇、DMC 和 DMM 与生物柴油掺混使用, 考查在相同氧含量情况下提高十六烷值的效果, 进一步降低柴油机的 PM 排放;

2) 在目前的三种含氧混合燃料中掺混部分比例的高十六烷值燃料(十六烷值 70 以上), 以提高混合燃料的十六烷值, 进一步降低柴油机 PM 排放;

3) 进一步研究 EGR 条件下含氧混合燃料的排放特性, 考查 EGR 率对含氧混合燃料排放特性的影响;

4) 在具有缸压测试条件的发动机或者可视化发动机上研究不同生物柴油以及含氧混合燃料的燃烧特性, 给含氧混合燃料的设计提供依据;

5) 通过喷雾可视化研究不同生物柴油以及含氧混合燃料的喷雾特性, 考查粘度对燃料喷雾特性的影响, 给含氧混合燃料的设计提供依据。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2007. 北京:中国统计出版社, 2007.
- [2] 国家发改委能源所"中国能源需求情景分析"课题组. 2020 年中国能源需求情景分析. "能源战略和改革"专题国际研讨会, 2004.
- [3] 王建昕, 傅立新, 黎维彬. 汽车排气污染治理及催化转化器. 北京:化学工业出版社, 2000.
- [4] 蒋德明, 黄佐华. 内燃机替代燃料燃烧学. 西安:西安交通大学出版社, 2007.
- [5] Teresa L. Alleman, Robert L. McCormick. Fischer-Tropsch Diesel Fuels - Properties and Exhaust Emissions: a Literature Review. SAE Paper, No.2003-01-0763.
- [6] 陈虎. 乙醇柴油的喷雾燃烧与排放特性研究[博士学位论文]. 清华大学, 2006.
- [7] AK. Babu, G. Devaradjane. Vegetable Oils And Their Derivatives As Fuels For CI Engines: An Overview. SAE Paper, No.2003-01-0767.
- [8] 付玉杰, 祖元刚. 生物柴油. 北京:科学出版社, 2006.
- [9] 刘峥, 王建昕. 汽车发动机原理. 北京:清华大学出版社, 2001.
- [10] CD Rakopoulos, KA Antonopoulos, DC Rakopoulos, etc. Comparative performance and emissions study of a direct injection Diesel engine using blends of Diesel fuel with vegetable oils or bio-diesels of various origins. Energy Convers Manage, 2006, 47: 3272-3287.
- [11] MS.Graboski, RL. McCormick. Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1998, 24(2):125-164.
- [12] EPA, United States. A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions. EPA-Draft Technical Report, EPA420-P-02-001, October 2002.
- [13] Directorate General for Research, European Commission. Biofuels in the European Union: A vision for 2030 and beyond. Final report of the Biofuels Research Advisory Council, 2006.
- [14] Johnson, Timothy V. Diesel Emission Control Technology-2003 in Review. SAE Paper, No.2004-01-0070.
- [15] 徐桂转, 张百良. 生物柴油的研究与使用. 陕西:中国能源网, 2008.
- [16] Christopher A. Sharp, Steve A. Howell, Joe Jobe. The Effect of Biodiesel Fuels on Transient Emissions from Modern Diesel Engines, Part I Regulated Emissions and Performance. SAE Paper, No.2000-01-1967.
- [17] Darrick D. Zarling, Kenneth L. Bickel, et al. Improving Air Quality by Using Biodiesel

- in Generators. SAE Paper, No.2004-01-3032.
- [18] M. Alam, J. Song, et al. Combustion and Emissions Performance of Low Sulfur, Ultra Low Sulfur and Biodiesel Blends in a DI Diesel Engine. SAE Paper, No.2004-01-3024.
- [19] Michel Souligny, Lisa Graham, et al. Heavy-Duty Diesel Engine Performance and Comparative Emission Measurements for Different Biodiesel Blends Used in the Montreal BIOBUS Project. SAE Paper, No.2004-01-1861.
- [20] FEV Engine Technology, Inc. Emissions and performance characteristics of the Navistar T444E DI engine fueled with blends of biodiesel and low sulfur diesel. Phase 1 Final Report to National Biodiesel Board, 1994.
- [21] A. Tsolakis, A. Megaritis, M.L. Wyszynski, K. Theinnoi. Engine performance and emissions of a diesel engine operating on diesel-RME (rapeseed methyl ester) blends with EGR (exhaust gas recirculation). *Energy*, 2007, 32:2072-2080.
- [22] Erik Verhaeven, Luc Pelkmans, Leen Govaerts, Rudolf Lamers, Frans Theunissen. Results of demonstration and evaluation projects of biodiesel from rapeseed and used frying oil on light and heavy duty vehicles. SAE Paper, No.2005-01-2201.
- [23] M.P. Doradoa, E. Ballesterosb, J.M. Arnalc, J. Gomez, F.J. Lopez. Exhaust emissions from a Diesel engine fueled with transesterified waste olive oil. *Fuel*, 2003, 82:1311-1315.
- [24] Yukio Akasaka, Teruo Suzuki, et al. Exhaust Emissions of a DI Diesel Engine Fueled with Blends of Biodiesel and Low Sulfur Diesel Fuel. SAE Paper, No.972998.
- [25] 中国国家标准化管理委员会. 柴油机燃用调和生物柴油 (GB20828-2007). 北京: 中国环境出版社, 2007.
- [26] X. Shi, Y. Yu, et al. Emission characteristics using methyl soyate-ethanol-diesel fuel blends on a diesel engine. *Fuel*, 2005, 84:1543-1549.
- [27] Chen Hu, Wang Jian-Xin, Shuai Shi-Jin, An Xin-Liang and Chen Wen-Miao. Effects of Ethanol in Ester-Ethanol-Diesel Blended Fuels on Spray Behavior and PM Emission. SAE Paper, No.2006-01-0236.
- [28] 陈文淼, 陈虎, 王建昕, 帅石金. B20 生物柴油发动机性能及燃烧可视化. 2006 代用燃料汽车国际学术会议论文集, 2006.
- [29] 葛蕴珊, 陆小明, 高力平, 韩秀坤, 冀星. 废食用油生物柴油的制备及其掺烧时的动力与排放特性. *环境科学*, 2005, 26(3):12-15.
- [30] 袁银南, 江清阳, 孙平. 直喷柴油机燃用生物柴油燃烧特性的研究. *内燃机学报*, 2007, 25(1):43-46.
- [31] 徐元浩, 叶盛焱, 陈忠祥. 生物柴油的实用性研究. *武汉理工大学学报*, 2005, 27(5):90-93.

- [32] 谭丕强, 胡志远, 楼狄明, 万钢. 非直喷式增压柴油机燃用生物柴油的性能与排放特性. 内燃机学报, 2006, 24(2):111-115.
- [33] 国家环境保护总局. 车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法 (GB17691-2005). 北京: 中国环境出版社, 2005.
- [34] Hohnson J H, Bagley S T, Gratz L D. A Review of Diesel Particulate Control Technology and Emissions Effects-1992 Horning Memorial Award Lecture. SAE Paper, No.940233.
- [35] Lucas A D, Duran A, Carmona M, et al. Characterization of Soluble Organic Fraction in DPM: Optimization of the Extraction Method. SAE Paper, No.1999-01-3532.
- [36] 陈文淼. 柴油机微粒排放的测试分析方法[本科学位论文]. 清华大学, 2006.
- [37] Robert L. McCormick, Michael S. Graboski. Impact of Biodiesel Source Material and Chemical Structure on Emission of Criteria Pollutants from a Heavy-Duty Engine. Environmental Science and Technology, 2001, 35:1472-7.
- [38] M. A. Ahmed, C. E. Ejim, B. A. Fleck, A. Amirfazli. Effect of Biodiesel Fuel Properties and Its Blends on Atomization. SAE Paper, No.2006-01-0893.
- [39] A. S. Cheng, Bruce A. Buchholz, Robert W. Dibble. Isotopic Tracing of Fuel Carbon in the Emissions of a Compression-Ignition Engine Fueled with Biodiesel Blends. SAE Paper, No.2003-01-2282.
- [40] David Y. Chang. Determination of Particulate and Unburned Hydrocarbon Emissions from Diesel Engines Fueled with Biodiesel. . SAE Paper, No.982527.
- [41] 吕兴才, 张武高, 乔信起, 黄震. 燃料设计改善发动机燃烧和排放的研究. 内燃机学报, Vol. 22 (2004) No.3.
- [42] Hu Chen, Shi-Jin Shuai, Jian-Xin Wang. Study on combustion characteristics and PM emission of diesel engines using ester-ethanol-diesel blended fuels. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31:2981-2989.

致 谢

衷心感谢导师王建昕教授对本人的精心指导。他的言传身教将使我终生受益。

感谢帅石金教授、庄人隼老师、肖建华老师、徐仲伦老师在试验台建设和分析测试等方面给予的帮助和建议。

感谢在本课题的相关研究中董红义师兄、陈文淼师兄在实验方面给予的帮助。

感谢本组所有同学在学习生活上的热情支持和帮助。

本课题承蒙国家 863 课题“车用生物柴油测试评价技术与开发”和清华-康明斯国际合作项目“应用生物质含氧燃料降低柴油机排放”项目资助，特致诚挚的谢意。尤其要感谢康明斯发动机公司在整个期间提供的大力技术支持。



声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名：_____日 期：_____

个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果

个人简历

1985 年 2 月 9 日出生于安徽省宣城市广德县。

2002 年 9 月考入清华大学汽车系车辆工程专业，2006 年 7 月本科毕业并获得工学学士学位。

2006 年 9 月免试进入清华大学汽车工程系动力机械及工程热物理专业攻读硕士学位。

攻读硕士学位期间发表的学术论文

- [1] Fujia Wu, Jianxin Wang, Wenmiao Chen, Shijin Shuai. Effects of Different Biodiesels and Their Blends With Oxygenated Additives on Emissions from a Diesel Engine. SAE Paper, No. 2008-01-1812
- [2] Fujia Wu, Jianxin Wang, Wenmiao Chen, Shijin Shuai. A study on emissions performance of a diesel engine fueled with five typical methyl ester biodiesels. Atmospheric Environment (投稿中, SCI 源刊)
- [3] Xu He, Xiao Ma, Fujia Wu, Jian-Xin Wang, Shi-jin Shuai. Investigation of Soot Formation in Laminar Diesel Diffusion Flame by Two-color Laser Induced Incandescence. SAE Paper, No. 2008-01-1064
- [4] Wenmiao Chen, Jianxin Wang, Shijin Shuai, Fujia Wu. Effects of Fuel Quality on Euro IV Diesel Engine with SCR Aftertreatment. SAE Paper, No. 2008-01-0638