

癸酸甲酯与正丁醇在低速柴油机中 均质压燃燃烧与排放*

王时野¹, 姚 丽², 张均东¹

(1. 大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026;
2. 上海海事大学 商船学院, 上海 201306)

摘要: 通过向生物柴油替代燃料癸酸甲酯 (MD) 中掺入一定比例的正丁醇 (NBA), 达到降低氮氧化物 (NO_x) 排放的目的。针对二冲程低速船用柴油机, 建立了癸酸甲酯和正丁醇的混合燃料燃烧反应机理, 并将Zeldovich氮氧化物反应机理作为子机理添加到燃烧反应机理中。构建出一个包含癸酸甲酯、正丁醇和详细的氮氧化物反应的完整燃烧反应机理。在燃料总摩尔分数一定的条件下, 固定发动机转速与空气过量系数, 将癸酸甲酯与正丁醇按不同比例进行混合, 研究癸酸甲酯与正丁醇混合燃料在二冲程低速船用柴油机充量均质压燃 (HCCI) 模式下的燃烧与氮氧化物排放特性。结果显示, 癸酸甲酯与正丁醇混合燃料HCCI燃烧产生的氮氧化物随正丁醇掺混比例的增加而减少。研究表明, 在燃料总摩尔分数保持不变时, 随着正丁醇混合比例的增加, 燃料总热值减少, 排气温度和缸内最高燃烧温度降低, 对氮氧化物的生成有抑制作用, 氮氧化物反应速率降低, 排放量下降。同时, 由于正丁醇掺混比例的增加导致混合燃料的C/H比下降, 可以有效地降低燃烧过程中 CO_2 的排放。在保证发动机燃烧效率的条件下, 癸酸甲酯和正丁醇的混合比例为1:1时, 混合燃料在二冲程低速船用柴油机中HCCI燃烧的NO与 NO_2 排放量最低。

关键词: 癸酸甲酯; 二冲程低速柴油机; 正丁醇; 充量均质压燃; 氮氧化物排放

中图分类号: U664.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2020) 11-2558-08

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.200367

Homogeneous Charge Compression Ignition Combustion and Emissions of Methyl Decanoate and *n*-Butanol in Low-Speed Diesel Engine

WANG Shi-ye¹, YAO Li², ZHANG Jun-dong¹

(1. College of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
2. College of Merchant Marine, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Nitrogen oxide (NO_x) emissions can be reduced by adding a certain proportion of *n*-butanol (NBA) into alternative fuel methyl decanoate (MD). The combustion reaction mechanism of methyl decanoate and *n*-butanol was established for two-stroke low-speed marine diesel engine, and the Zeldovich NO_x reaction

* 收稿日期: 2020-05-26; 修订日期: 2020-07-07。

基金项目: 国家自然科学基金 (U1905212)。

作者简介: 王时野, 博士生, 研究领域为新型船用燃料氮氧化物排放特性与机理。E-mail: 675891906@qq.com

通讯作者: 张均东, 博士, 教授, 博士生导师, 研究领域为燃料燃烧化学反应动力学机理。E-mail: zhjundong@dlnu.edu.cn

引用格式: 王时野, 姚 丽, 张均东. 癸酸甲酯与正丁醇在低速柴油机中均质压燃燃烧与排放[J]. 推进技术, 2020, 41(11): 2558-2565. (WANG Shi-ye, YAO Li, ZHANG Jun-dong. Homogeneous Charge Compression Ignition Combustion and Emissions of Methyl Decanoate and *n*-Butanol in Low-Speed Diesel Engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(11):2558-2565.)

mechanism was added to the combustion reaction mechanism as a sub-mechanism, which constructed a complete combustion reaction mechanism containing methyl decanoate, *n*-butanol and detailed NO_x reaction. Under the condition that the total mole fraction of fuel is certain, fixed the engine speed and excess air coefficient, mixed methyl decanoate and *n*-butanol in different proportions, and explored the combustion and NO_x emission characteristics of methyl decanoate and *n*-butanol mixed fuel in two-stroke low-speed marine diesel engine with homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion. The results show that the emissions of NO_x produced by HCCI combustion of methyl decanoate and *n*-butanol mixture decrease with the increase of *n*-butanol blending ratio. The present research indicates when the total mole fraction of fuel remains unchanged, with the increase of *n*-butanol mixing ratio, the total heating value decrease, leading to the decrease of the exhaust temperature and in-cylinder peak temperature, the formation of NO_x is inhibited, the reaction rate of NO_x declines and the emission declines. Meanwhile, due to the increase of *n*-butanol blending ratio, it leads to the C/H ratio of mixed fuel decrease, which can effectively reduce CO_2 emissions during combustion. Under the condition of ensuring the engine combustion efficiency, when the mixing ratio of methyl decanoate and *n*-butanol is 1:1, the NO and NO_2 emissions in two-stroke low-speed marine diesel engine HCCI combustion are the lowest.

Key words: Methyl decanoate; Two-stroke low speed diesel engine; *n*-Butanol; Homogeneous charge compression ignition; NO_x emission

1 引言

未来几年,发展中国家对能源的需求预计会不断增加。由于作为主要能源的化石燃料正在快速大量地消耗,来源于化石燃料的柴油资源正在逐渐减少。为了满足日益增长的能源需求,各国正积极地寻求开发可再生能源和替代能源的解决方案^[1-2]。化石燃料的燃烧会导致大量的温室气体, NO_x 和酸雨产生。 NO_x ,CO和 CO_2 是发动机燃烧过程中的重要排放物。 NO_x 的形成更为复杂,有害的 NO_x 主要包括 NO , NO_2 和 N_2O ^[3]。为了减少温室气体和 NO_x ,世界各地对柴油机的排放标准有着严格的要求。然而在当前条件下,许多柴油机燃料很难实现清洁燃烧。

在过去的几十年中,生物柴油的开发与利用引起了人们的广泛关注。作为一种潜在的可再生燃料,它的性质与柴油相似。通过研究,已经提出了柴油发动机燃用生物柴油的一些优势,生物柴油是碳中性的,可生物降解,不含硫且无毒,与常规柴油相比具有很大的优势^[4]。使用生物柴油可以有效地减少颗粒物(PM)、CO和未燃碳氢化合物的排放^[5-11]。同时,生物柴油既可以作为燃料单独使用,也可以与柴油按照任意比例进行混合。只需对柴油发动机稍微进行改动,就可以在现有的柴油发动机中进行使用。

当前已经开发了大量的化学动力学机理用来模拟生物柴油的燃烧过程。丁酸甲酯(MB, $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_2$)是最早被提出用来作为生物柴油替代燃料的物质之

一,Fisher等提出用丁酸甲酯作为生物柴油的替代物^[12]。但是,研究发现,在各种压力流动反应器(VPFR)和射流搅拌反应器(JSR)中,负温度系数(NTC)在实验和理论上几乎不存在^[13]。因此,MB不适合在低温条件下用作生物柴油的替代燃料。目前,已经开发了一些复杂的酯类化合物用来作为生物柴油的替代物,例如庚酸甲酯(MH, $\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}_2$)和辛酸甲酯(MO, $\text{C}_9\text{H}_{18}\text{O}_2$)^[14-15]。最近,Herbinet等^[16]开发了癸酸甲酯(MD, $\text{C}_{11}\text{H}_{22}\text{O}_2$)的化学反应机理,用癸酸甲酯作为生物柴油的替代燃料。癸酸甲酯在燃烧中的表现与实际的生物柴油十分接近,其燃烧过程和 CO_2 早期的形成与常规柴油非常相似。与石油柴油相比,生物柴油也有一定的缺点。首先,燃用生物柴油产生的 NO_x 排放量略有增加^[17-19]。其次,生物柴油的黏度要高于石油柴油,增加了沉积物的产生,可能导致过滤器堵塞和燃料喷雾雾化的恶化^[20-21]。

近年来,新型清洁替代燃料正丁醇(NBA, $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$)的开发与使用引起了国内外学者的广泛关注^[22-23]。正丁醇的腐蚀性较小,具有较高的安全性。作为含氧燃料,燃用正丁醇可以有效地降低碳烟的排放^[24]。正丁醇的黏度要低于柴油,同时由于其与柴油之间较好的互溶性,只需对发动机进行较小的改动便可以在柴油机上实现混合燃烧,这使得正丁醇可以与生物柴油按照一定比例进行混合燃烧,有助于改善生物柴油黏度较高堵塞过滤器、导致柴油机器件恶化的问题。在环境保护方面,正丁醇作为一种生物燃料,可以通过生物方法来进行制取,能够

有效地解决化石燃料资源大量消耗的问题,正丁醇的可再生性具有较高的研究价值和广泛的应用前景。

充量均质压燃(HCCI)模型由于其较低的 NO_x 排放和较高的燃烧效率而受到人们的广泛关注。HCCI燃烧同时具有火花点火(SI)发动机和直喷压燃(DI-CI)发动机的优点。并且燃烧产生的 NO_x 和PM排放量较低^[25]。化学反应动力学对HCCI点火有十分重要的影响。目前已经研究了大量的方法用来控制点火和燃烧速率^[26]。可以使用不同比例的替代燃料和燃料混合物来控制点火和燃烧速率。与纯燃料相比,混合燃料可以在较宽的范围内更好地控制HCCI点火^[27]。

为了减轻对化石燃料的依赖,开发与使用新型清洁替代燃料来提升柴油机的燃烧效率,同时降低燃料在燃烧过程中产生的 NO_x 和 CO_2 等,本文将癸酸甲酯与正丁醇两种生物燃料按不同比例进行混合,采用HCCI燃烧来提升发动机的燃烧效率,达到降低低速二冲程船用柴油机 NO_x 排放的目的。正丁醇与癸酸甲酯均为液体燃料,二者可以互溶。在HCCI燃烧开始前,发动机中会形成均匀混合气,将混合燃料喷入柴油机,燃料与空气进行混合,随着压缩过程中温度的升高,混合燃料将自动点火进行燃烧。

2 研究方法

2.1 反应机理与发动机参数

本研究选用低速二冲程,直喷式船用柴油机MAN B&W 6S70MC进行HCCI燃烧,发动机的规格及主要参数如表1所示。

Table 1 Test engine specifications

Item	Data
Effective power/kW	13364
Engine speed/(r/min)	85
Mean effective pressure/MPa	1.527
Number of cylinders	6
Stroke/mm	2674
Cylinder diameter/mm	700
Connecting rod length/mm	3066

建立癸酸甲酯和正丁醇的混合燃料燃烧反应机理,癸酸甲酯化学反应机理来源于美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL),该机理涉及3012种反应和8820种反应,包含了低温和高温阶段的所有反应,其中高温反应(HTR)部分为主要反应过程。正丁醇化

学反应机理来自于爱尔兰国立大学。在反应机理中添加Zeldovich的 NO_x 反应机制来研究燃烧过程中的 NO_x 排放特性。总反应机理中包含了详细的动力学和热力学数据。癸酸甲酯和正丁醇的性质见表2。

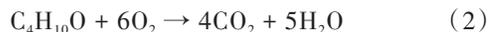
Table 2 Properties of MD and NBA

Property	MD	NBA
Molecular formula	$\text{C}_{11}\text{H}_{22}\text{O}_2$	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$
Relative molecular weight/(kg/kmol)	186	74
Lower heating value/(MJ/kg)	34	35.1
Oxygen content/(%weight)	17.2	21.6
Boiling point/ $^{\circ}\text{C}$	94	117
Density/($\text{g}/\text{cm}^3, 20^{\circ}\text{C}$)	0.873	0.810
Cetane number	58.6	12

2.2 模型与计算参数

二冲程低速船用柴油机在航行期间,为了实现完全燃烧,通常将空气过量系数定在2.0~2.2之间。本研究中为了与实际值保持一致,将空气过量系数设置为2.1。

在CHEMKIN-PRO的闭式HCCI内燃机反应器中研究癸酸甲酯和正丁醇混合燃料的HCCI燃烧。设定反应初始温度为400K,在发动机负载相同的条件下,将发动机转速固定在85r/min。保持混合物总摩尔分数不变,将癸酸甲酯与正丁醇按照不同比例进行混合,逐渐增加混合燃料中正丁醇的掺混比例,分别为0%,10%,20%,30%,40%,50%,癸酸甲酯与正丁醇完全燃烧的化学反应如下:



计算在空气过量系数为2.1时,不同混合比例下癸酸甲酯与正丁醇完全燃烧时消耗空气的量。表3中给出了混合燃料与空气组成成分的摩尔分数和十六烷值。为了使混合燃料总摩尔分数保持不变,使用氩气(Ar)作为保护气体或填充气体。在柴油机进气口附近安装电磁阀控制的氩气喷射器,对氩气进行加压,通过单向阀将氩气压入进气口。氩气是惰性气体,在整个燃烧过程中不参与相关反应,也不会对整个燃烧过程产生影响。燃料的十六烷值对柴油机的整个燃烧过程有十分重要的影响。十六烷值代表着柴油的着火性能。十六烷值过高会导致点火延迟时间缩短,在进气量不足的情况下过早着火,导致大量积碳。十六烷值过低则会导致点火延迟时间过长,柴油机启动困难,造成燃料的损耗。因此,为确保柴油机正常高效工作,必须根据所用柴油机的特

性选用十六烷值符合要求的柴油。大型低速船用柴油机所用柴油十六烷值一般在30~35。表3显示,当癸酸甲酯与正丁醇混合比例为1:1时,燃料十六烷值最接近低速柴油机所用燃油的十六烷值。

3 结果与讨论

3.1 癸酸甲酯与正丁醇混合燃料对缸内温度和压力的影响

在发动机转速为85r/min,空气过量系数2.1时,癸酸甲酯与正丁醇混合燃料在二冲程低速船用柴油机中进行HCCI燃烧。图1显示了不同掺混比例下的燃料在燃烧过程中缸内燃烧温度的分布情况。发动机在85r/min的额定转速下,随着正丁醇掺混比例的增加,缸内最高燃烧温度和排气温度均有所降低。癸酸甲酯的低热值与正丁醇的低热值相近(表2),但是癸酸甲酯的摩尔质量要远大于正丁醇。在混合燃料总摩尔分数保持不变的条件下,燃料总热值随正丁醇掺混比例的增加而减小。从而导致缸内燃烧温度降低。癸酸甲酯的十六烷值高于正丁醇(表2),随着正丁醇混合比的增加,混合燃料的十六烷值降低(表3),混合燃料的自燃温度升高,点火延迟时间略有增加,燃料可以在缸内进行更为充分均匀的混合,从而提高了燃料的燃烧效率。同时,降低缸内温度可以有效地减少振动,延长发动机零件的使用寿命。

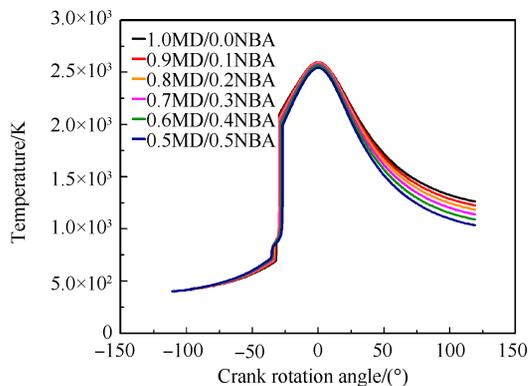


Fig. 1 Effect of NBA percentage on in-cylinder temperature

图2显示了正丁醇掺混比例对缸内压力的影响情况。HCCI燃烧的压缩介质是均匀的预混合气体。由于是理想的燃烧模型,因此当温度达到着火点时,燃料开始快速燃烧,整个燃烧过程迅速进行,缸内压力陡然升高。结果显示,随着正丁醇掺混的比例增加,缸内燃烧的峰值压力略有降低,缸内峰值压力的降低可以减少爆震的频率。

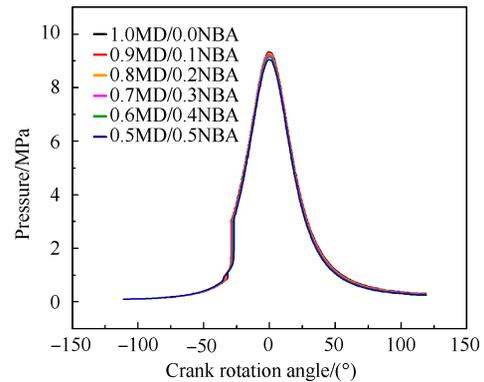


Fig. 2 Effect of NBA percentage on in-cylinder pressure

模拟结果表明,癸酸甲酯和正丁醇的混合比例对柴油机HCCI燃烧特性有重要的影响。在保证发动机燃烧效率的前提下,选用癸酸甲酯和正丁醇的混合比例为1:1时,可以优化燃烧过程,达到最优的燃烧效率。

3.2 癸酸甲酯和正丁醇混合比例对柴油机HCCI燃烧NO_x排放的影响

在总摩尔分数保持不变的条件下,癸酸甲酯和正丁醇混合比例对二冲程低速船用柴油机HCCI燃烧产生的NO_x排放具有一定的影响。图3显示,在不同比例的混合燃料中,随着正丁醇掺混比例的增加,NO排放量明显减少。同时,NO₂与N₂O的排放趋势与NO一致。在总摩尔分数一定时,随着正丁醇掺混比例的增加,NO₂排放明显降低(图4),N₂O的最大生成量降低(图5)。

燃料在燃烧过程中生成的NO_x主要是热力型NO_x,而高温、富氧和长时间燃烧是导致NO_x排放量增

Table 3 Cetane number and species mole fraction of mixtures

Mole fraction of MD	Mole fraction of NBA	Mole fraction of O ₂	Mole fraction of N ₂	Mole fraction of Ar	Mixture cetane number
1.0	0.0	32.55	122.45	0.00	58.6
0.9	0.1	30.56	114.96	9.48	53.9
0.8	0.2	28.56	107.44	19.00	49.3
0.7	0.3	26.57	99.95	28.48	44.6
0.6	0.4	24.57	92.43	38.00	40.0
0.5	0.5	22.58	84.94	47.48	35.3

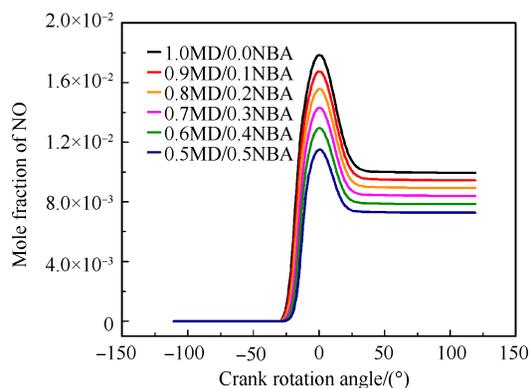
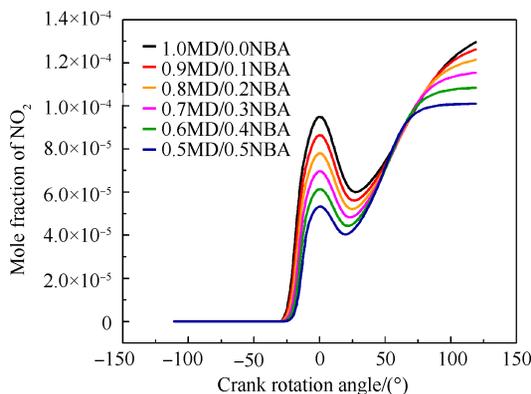
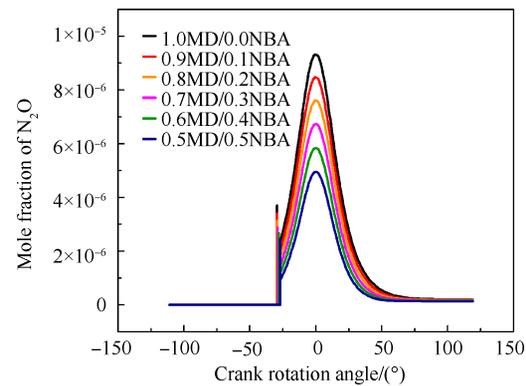


Fig. 3 Effect of NBA percentage on NO emissions

Fig. 4 Effect of NBA percentage on NO₂ emissionsFig. 5 Effect of NBA percentage on N₂O emissions

加的主要原因。因此,缸内燃烧温度与排放温度对热力型NO_x的形成具有非常重要的影响。从图6可以看出,在混合燃料总摩尔分数保持不变的条件下,燃料总热值随正丁醇掺混比例的增加而减小,缸内最高燃烧温度降低。NO在上止点附近的生成量随着缸内最高燃烧温度的降低呈现出明显的下降趋势。图7显示的是NO的最终排放量随排气温度的变化情况,从图中可以看到随着混合燃料中正丁醇掺混比例的增加,NO的最终排放量随排气温度的降低明显减少。

图8和图9分别给出了NO₂随缸内最高燃烧温度和排气温度的变化情况。从图中可以看出,NO₂在上

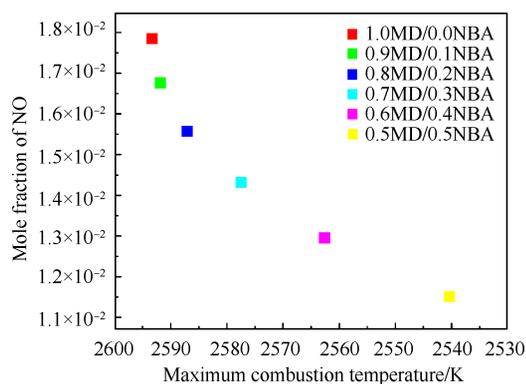


Fig. 6 Effect of maximum combustion temperature on NO

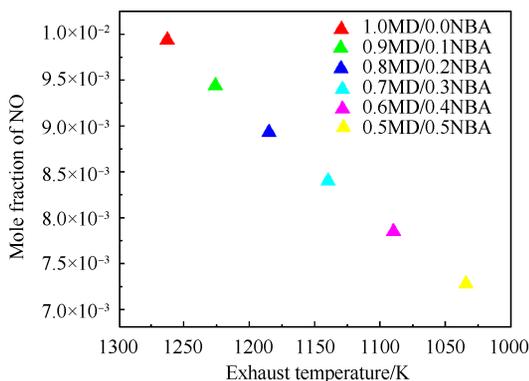
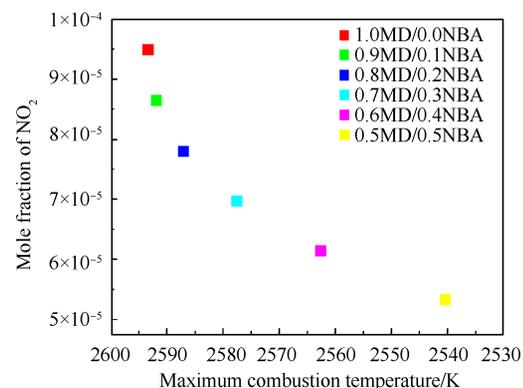


Fig. 7 Effect of exhaust combustion temperature on NO

止点附近的生成量随着缸内最高燃烧温度的降低呈现出明显的下降趋势,NO₂最终排放量随着排气温度的降低下降明显。研究结果表明,总摩尔分数一定时,随着混合燃料中正丁醇掺混比例的增加,燃料的总热值降低,缸内峰值燃烧温度与排放温度下降,温度的降低对NO_x的生成有抑制作用,从而导致了NO_x排放量的减少。

Fig. 8 Effect of maximum combustion temperature on NO₂

3.3 癸酸甲酯和正丁醇混合比例对HCCI燃烧NO_x反应速率的影响

发动机转速为85r/min时,纯癸酸甲酯HCCI燃烧在上止点附近产生大量的NO_x。NO和NO₂在上止点

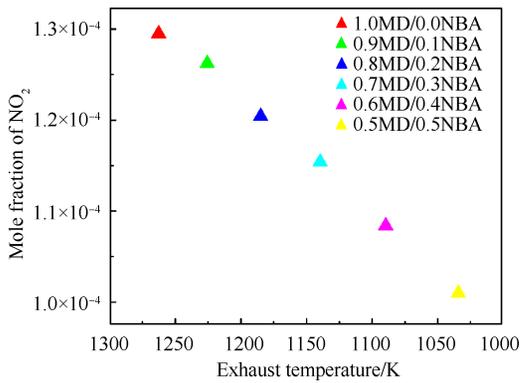


Fig. 9 Effect of exhaust combustion temperature on NO₂

附近的绝对反应速率如图 10 所示,从反应速率可以看出 NO 的产生主要来自 NO₂ 的反应,主要反应化学方程式为



而 NO₂ 的产生主要来自 NO 的反应,主要反应化学方程式为

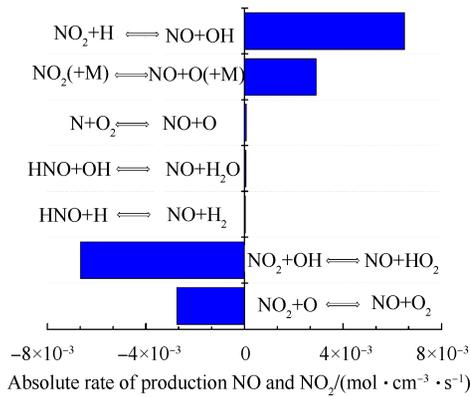
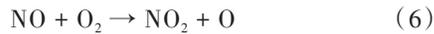
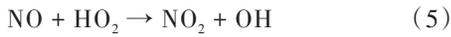
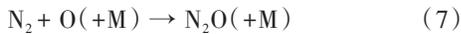


Fig. 10 Absolute rate of main NO and NO₂ reaction

N₂O 和 N₂ 在上止点附近的绝对反应速率如图 11 所示,从反应速率可以看出 N₂O 的产生主要来自 N₂ 和 NO,主要反应化学方程式为



而 N₂ 的产生主要来自于 N₂O 和 N₂H,主要反应的化学方程式为



图 12 给出了在上述主要反应过程中癸酸甲酯和正丁醇的混合比例对 NO 反应速率的影响。从图中可看到,上止点附近 NO 的燃烧反应速率随正丁醇掺

混比例的增加而降低,NO 反应速率降低的原因是由于缸内燃烧温度随正丁醇掺混比例的增加有所下降。燃烧温度的降低削弱了气缸中气体的扰动,NO 的反应速率降低,从而导致 NO 排放量降低。

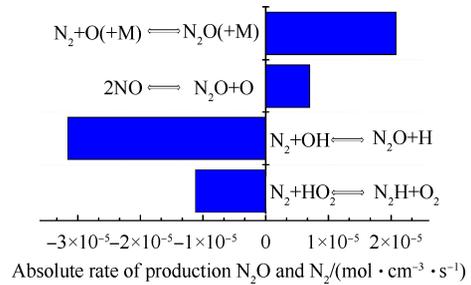


Fig. 11 Absolute rate of main N₂O and N₂ reaction

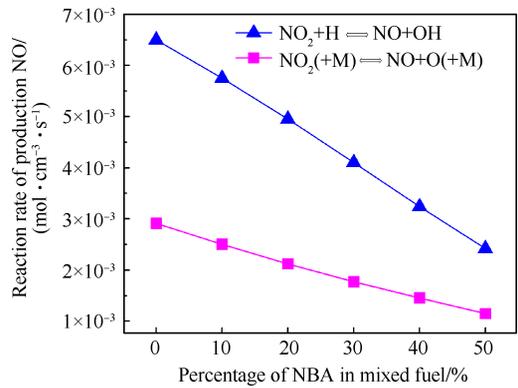


Fig. 12 Effect of NBA mixing ratio on NO₂ reaction rate

在总摩尔分数一定的条件下,癸酸甲酯和正丁醇混合比例对主要反应过程中 NO₂ 反应速率的影响如图 13 所示。随着混合燃料中正丁醇百分比的增加,缸内燃烧温度下降,NO₂ 的反应速率随燃烧温度的降低而下降,导致 NO₂ 排放量的减少。

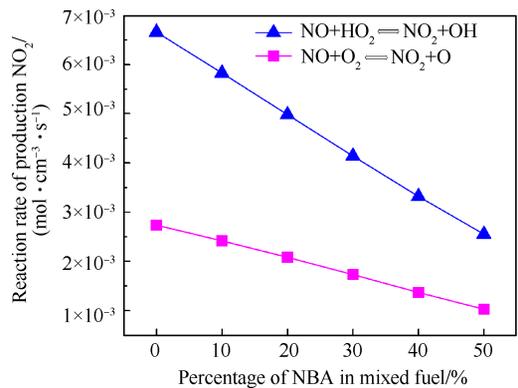


Fig. 13 Effect of NBA mixing ratio on NO₂ reaction rate

研究结果表明,在混合燃料总摩尔分数一定的条件下,NO_x 的反应速率随着正丁醇掺混比例的增加而明显降低。原因是随着混合燃料中正丁醇掺混比例的增加,燃料的总热值降低,缸内峰值燃烧温度与

排放温度下降,温度的降低导致 NO_x 反应速率下降, NO_x 的排放量减少。因此,在保证发动机燃烧效率的前提下,癸酸甲酯和正丁醇的混合比例为1:1时,混合燃料在二冲程低速船用柴油机中HCCI燃烧的 NO 与 NO_2 排放量最低。

3.4 癸酸甲酯和正丁醇混合比例对柴油机HCCI燃烧 CO_2 排放的影响

图14显示了在总摩尔分数一定的条件下,癸酸甲酯和正丁醇混合比例对 CO_2 排放的影响。从图中可以看出,随着正丁醇掺混比例的增加, CO_2 排放量明显减少。与癸酸甲酯相比,正丁醇燃料具有较低的C/H比,正丁醇掺混比例的增加降低了混合燃料的C/H比,有效地减少了燃烧过程中 CO_2 的排放。从图15可以看出 CO_2 的排放量随混合燃料C/H比下降而明显减少。研究表明,在保证发动机燃烧效率的前提下,癸酸甲酯和正丁醇的混合比例为1:1时,混合燃料在二冲程低速船用柴油机中HCCI燃烧的 CO_2 排放量最低。

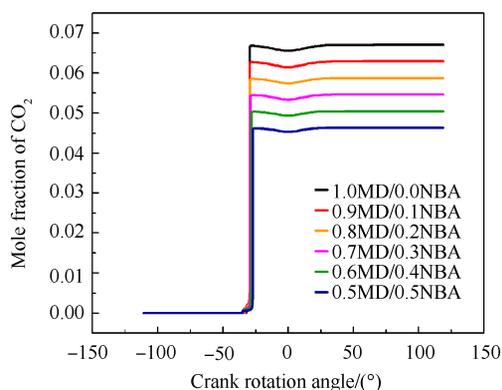


Fig. 14 Effect of NBA percentage on CO_2 emissions

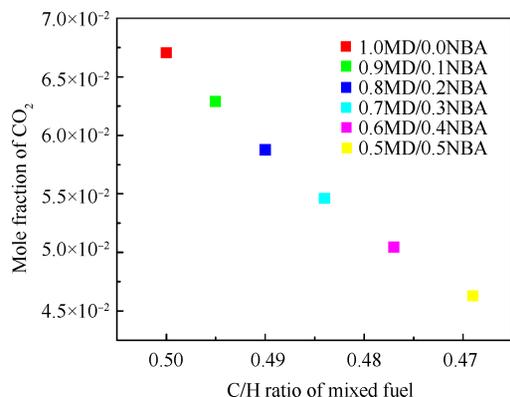


Fig. 15 Effect of C/H ratio on CO_2 emissions

4 结论

本文对癸酸甲酯与正丁醇混合燃料在二冲程低速船用柴油机中的HCCI燃烧与排放特性进行了研究,可以得到以下结论:

(1)混合燃料总摩尔分数一定,对癸酸甲酯和正丁醇混合燃料进行按比例混合,混合燃料的十六烷值随着正丁醇混合比的增加而下降,混合燃料的自燃温度升高,点火延迟时间略有增加,燃料可以在缸内进行更为充分均匀的混合,从而提高了燃料的燃烧效率。研究表明,癸酸甲酯和正丁醇的混合比例为1:1时,燃料的十六烷值与大型低速船用柴油机所用燃料的十六烷值最为接近。

(2)在总摩尔分数一定的条件下,固定发动机转速为85r/min,空气过量系数2.1,不同比例的癸酸甲酯与正丁醇混合燃料在二冲程低速船用柴油机中进行HCCI燃烧。结果表明,混合燃料HCCI燃烧的 NO_x 排放随着正丁醇掺混比例的增加而降低。由于混合燃料总热值随正丁醇掺混比例的增加而减小,较低的热值导致缸内燃烧温度降低。温度的降低对 NO_x 的生成有抑制作用,从而导致了 NO_x 反应速率降低, NO_x 排放量减少。在保证发动机燃烧效率的前提下,癸酸甲酯和正丁醇的混合比例为1:1时,混合燃料在二冲程低速船用柴油机中HCCI燃烧的 NO 与 NO_2 排放量最低。

(3)总摩尔分数一定的条件下,随着正丁醇掺混比例的增加,混合燃料的C/H比下降, CO_2 排放量明显减少。较低的C/H比可以有效地减少燃烧过程中 CO_2 的排放。在保证发动机燃烧效率的前提下,癸酸甲酯和正丁醇的混合比例为1:1时,混合燃料在二冲程低速船用柴油机中HCCI燃烧的 CO_2 排放量最低。

(4)本研究建立了癸酸甲酯-正丁醇混合燃料燃烧反应机理,将混合燃料在HCCI燃烧与二冲程低速船用柴油机相结合的条件下进行燃烧。既可以采用HCCI燃烧来减少低速船用柴油机燃用生物柴油过程中氮氧化物的排放,又可以有效地利用二冲程低速柴油机作为船用主机运行更稳定、经济性更好的优点。确定了最优混合比例,为下一步进行燃料燃烧实验验证提供了重要的理论依据。

致谢:感谢国家自然科学基金的资助。

参考文献

- [1] Demirbas A. Importance of Biodiesel as Transportation Fuel[J]. *Energy Policy*, 2007, 35(9): 4661-4670.
- [2] Pienkos P T, Darzins A. The Promise and Challenges of Microalgal-Derived Biofuels [J]. *Biofuels Bioproducts and Biorefining*, 2009, 3(4): 431-440.
- [3] Jeon J, Lee J T, Park S. Nitrogen Compounds (NO , NO_2 , N_2O and NH_3) in NO_x Emissions from Commercial EURO VI Type Heavy-Duty Diesel Engines with a Urea-

- Selective Catalytic Reduction System[J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(8): 6828–6834.
- [4] Wang X, Liu H F, Zheng Z Q, et al. A Skeletal Mechanism of a Biodiesel Surrogate Fuel for Compression Ignition Engines[J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29(2): 1160–1171.
- [5] Rajasekar E, Murugesan A, Subramanian R, et al. Review of NO_x Reduction Technologies in CI Engines Fuelled with Oxygenated Biomass Fuels[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(7): 2113–2121.
- [6] He C, Ge Y S, Tan J W, et al. Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emissions of Diesel Engine Fueled with Biodiesel and Diesel[J]. *Fuel*, 2010, 89(8): 2040–2046.
- [7] Buyukkaya E. Effects of Biodiesel on a DI Diesel Engine Performance, Emission and Combustion Characteristics [J]. *Fuel*, 2010, 89(10): 3099–3105.
- [8] Ng J H, Ng H K, Gan S Y. Characterisation of Engine – Out Responses from a Lightduty Diesel Engine Fuelled with Palm Methyl Ester (PME) [J]. *Applied Energy*, 2012, 90(1): 58–67.
- [9] Haas M J, Scott K M, Alleman T L, et al. Engine Performance of Biodiesel Fuel Prepared from Soybean Soapstock: A High Quality Renewable Fuel Produced from a Waste Feedstock [J]. *Energy & Fuels*, 2001, 15(5): 1207–1212.
- [10] Koshe–Hoinghaus K, Osswald P, Cool T, et al. Biofuel Combustion Chemistry: From Ethanol to Biodiesel [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2010, 49(21): 3572–3597.
- [11] Lai J Y W, Lin K C, Violi A. Biodiesel Combustion: Advances in Chemical Kinetic Modeling[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2011, 37(1): 1–14.
- [12] Fisher E M, Pitz W J, Curran H J, et al. Detailed Chemical Kinetic Mechanisms for Combustion of Oxygenated Fuel[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, 28(2): 1579–1586.
- [13] Gaïl S, Thomson M J, Sarathy S M, et al. A Wide – Ranging Kinetic Modeling Study of Methyl Butanoate Combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(1): 305–311.
- [14] Dayma G, Togbé C, Dagaut P. Detailed Kinetic Mechanism for the Oxidation of Vegetable Oil Methyl Esters: New Evidence from Methyl Heptanoate[J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23(9): 4254–4268.
- [15] Togbé C, May–Carle J–B, Dayma G, et al. Chemical Kinetic Study of the Oxidation of a Biodiesel–Bioethanol Surrogate Fuel: Methyl Octanoate–Ethanol Mixtures [J]. *Journal of Physical Chemistry A*, 2010, 114(11): 3896–3908.
- [16] Herbinet O, Pitz W J, Westbrook C K. Detailed Chemical Kinetic Oxidation Mechanism for a Biodiesel Surrogate [J]. *Combustion and Flame*, 2008, 154(3): 507–528.
- [17] Sun J F, Caton J A, Jacobs T J. Oxides of Nitrogen Emissions from Biodiesel–Fuelled Diesel Engines [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, 36(6): 677–695.
- [18] Xue J L, Grift T E, Hansen A C. Effect of Biodiesel on Engine Performances and Emissions [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(2): 1098–1116.
- [19] Szybist J P, Kirby S R, Boehman A L. NO_x Emissions of Alternative Diesel Fuels: A Comparative Analysis of Biodiesel and FT Diesel [J]. *Energy & Fuels*, 2005, 19(4): 1484–1492.
- [20] Ramadhas A S, Jayaraj S, Muraleedharan C. Characterization and Effect of Using Rubber Seed Oil as Fuel in the Compression Ignition Engines [J]. *Renewable Energy*, 2005, 30(5): 795–803.
- [21] Lee C S, Park S W, Kwon S. An Experimental Study on the Atomization and Combustion Characteristics of Biodiesel – Blended Fuels [J]. *Energy & Fuels*, 2005, 19(5): 2201–2208.
- [22] Yao Mingfa, Wang Hu, Zheng Zunqing, et al. Experimental Study of *N*-Butanol Additive and Multi–Injection on HD Diesel Engine Performance and Emissions [J]. *Fuel*, 2010, 89(9): 2191–2201.
- [23] Rakopoulos C D, Dimaratos A M, Giakoumis E G. Study of Turbocharged Diesel Engine Operation, Pollutant Emissions and Combustion Noise Radiation During Starting with Bio–Diesel or *N*-butanol Diesel Fuel Blends [J]. *Applied Energy*, 2011, 88(11): 3905–3916.
- [24] Huang Z H, Lu H B, Jiang D M, et al. Performance and Emissions of a DI Diesel Engine Operating on Diesel/ methanol Blends [J]. *内燃机学报*, 2004, 22(1): 7–16.
- [25] Ma J J, Lue X C, Ji L B. An Experimental Study of HC–CI–DI Combustion and Emissions in a Diesel Engine with Dual Fuel [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2008, 47(9): 1235–1242.
- [26] Yao M F, Zheng Z L, Liu H F. Progress and Recent Trends in Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engines [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009, 35(5): 398–437.
- [27] Lu X C, Han D, Huang Z. Fuel Design and Management for the Control of Advanced Compression–Ignition Combustion Modes [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2011, 37(6): 741–783.