

柴油机掺烧生物柴油 NO_x 和碳烟排放数值模拟^{*}

汤 东 李昌远 葛建林 沈 飞 刘胜吉
(江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013)

【摘要】 利用 CFD 软件 FIRE v2008 对 186FA 型柴油机燃用纯柴油和 B20 燃油时的燃烧过程进行 NO_x 和碳烟的三维数值模拟,描述了两种燃油的 NO_x 和碳烟生成规律和分布。通过实测示功图对比,验证了氮氧化物模型和碳烟生成模型的准确性。根据数值模拟结果对原柴油机燃用 B20 时的涡流比和喷油提前角进行了优化,并提出了能同时降低两种排放物的技术方案,涡流比 2.7、供油提前角 352.5°时,NO_x 和碳烟排放最优。

关键词: 非道路用柴油机 生物柴油 排放 数值模拟
中图分类号: TK464 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)07-0001-04

NO_x and Particulate Emissions Numerical Simulation of Diesel Blended with Biodiesel

Tang Dong Li Changyuan Ge Jianlin Shen Fei Liu Shengji
(School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

3-D numerical simulation on NO_x and soot emissions of 186FA diesel fueling with pure diesel and B20 fuel was carried out by using CFD software FIRE v2008, the generating rule and distribution of NO_x and soot of two fuels were described. Through comparison of the measured indicator diagram, the accuracy of the model was verified. Based on the simulation of the original diesel engine fueling with B20, the swirl ratio and injection advance angle were optimized and the technical programs were proposed to reduce two kinds of emissions simultaneously, which optimized the emissions of NO_x and soot when the swirl ratio was 2.7 and injection advance angle was 352.5°.

Key words Non-road diesel, Bio-diesel, Emission, Numerical simulation

引言

生物柴油以其良好的动力性、经济性以及排放性能正成为柴油机最有潜力的替代燃料之一。在小型柴油机上推广使用生物柴油,在改善环境的同时,对促进我国农业经济的发展也是不可估量的。国内外已经有很多关于生物柴油的研究成果,主要集中在生物柴油的燃烧与喷雾特性方面^[1~4],但对柴油机掺烧生物柴油开展多维数值模拟的研究还较少。本文应用 AVL 公司的 FIRE 软件对小型柴油机掺烧生物柴油的燃烧过程进行数值模拟并对其排放进行数值解析,根据所得出的结论提出改善排放的措施

并进行验证。

1 网格建立

选用 186FA 型风冷柴油机为模拟计算样机,其主要技术参数见表 1。在柴油机的模拟计算中,因为柴油机螺旋气道的特性,在进气门关时,缸内可形成比较明显的涡流,比较容易给定初始流场(即在初始条件里给定一个涡流,其转速可通过参照最大气门升程时的涡流比转速给定)。模拟的重点在喷雾与燃烧过程,计算过程只涉及压缩和做功冲程(闭口系),移动网格的建立相对容易,建模时不考虑进、排气门。计算过程为进气门关(224.5°CA)到

收稿日期: 2010-09-14 修回日期: 2010-11-19
^{*} 国家高新技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA11A1B4)、江苏省高校自然科学重大基础研究项目(08KJA480001)、江苏大学高级人才科研资金资助项目(07JDC086)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)
作者简介: 汤东,教授,主要从事发动机工作过程与代用燃料研究,E-mail: jsdx-td@hotmail.com

排气门开(484.5°CA)。

表 1 186FA 型风冷柴油机技术参数
Tab.1 Parameters of 186FA diesel engine

参数	数值
型式	直喷、强制风冷、四冲程
缸径×行程/mm×mm	86×72
排量/L	0.418
压缩比	19
标定功率/kW(r/min)	6.0/(3 600)
供油提前角/°CA	27

由于燃烧室偏心布置,利用 FIRE 的自动网格划分工具对整个燃烧室空间进行了网格划分,建立了 180°CA~540°CA 动网格。为了保证网格质量,忽略了气门关闭时伸入燃烧室部分和喷油器伸入燃烧室部分。并对几个关键曲轴转角位置进行了再分区处理。上止点时的计算网格数为 120 195,结点数 为 124 587。网格模型见图 1。



图 1 上止点网格模型
Fig.1 Top dead center mesh model

2 计算模型

NO_x 生成包括 NO 和 NO₂,但以 NO 为主,主要考虑热 NO、瞬发 NO 和燃料 NO,NO_x 的生成模型选用基于反应机理 Extended Zeldovich + prompt + Fule^[5] 的模型;碳烟生成模型选用基于简化的碳烟生成和氧化反应机理 Frolov Kinetic 模型;数值计算方法:二阶迎风差分格式离散对流项,中心差分格式离散扩散项,全隐式格式离散非稳态项。SIMPLE 算法处理压力-速度迭代校正。空气由 21% O₂ 与 79% N₂组成,所采用燃料为 FIRE 燃料库中的 diesel(以下用 B0 表示)和 B20(B20 指体积分数为 20%生物柴油与 80%0 号柴油的混合油),两种燃油的主要理化指标见表 2。

表 2 两种燃油的主要理化指标
Tab.2 Properties of two fuel types

参数	0 号柴油	生物柴油(B20)
20℃ 密度/g·cm ⁻³	0.84	0.88
40℃ 运动黏度/mm ² ·s ⁻¹	4~8	7.93
十六烷值	52.8	60
低热值/MJ·kg ⁻¹	42.4	39.0
氧质量分数/%	0	11
闪点/℃	72	144

3 模型验证

3.1 初始条件和边界条件

对于只计算高压循环的柴油机,初始条件决定了气缸内的初始质量和气体状态。在计算中,初始条件包括初始气体温度、压力,初始涡流比参考气道稳流试验台上实测的涡流比值给定。湍动能 TKE 和湍流长度尺度 TLS 参照 AVL 给出的经验公式^[6] 确定。

边界条件包括速度边界和温度边界。温度边界采用恒温边界,分别取缸盖底部温度 556 K、活塞凹坑温度 590 K、气缸壁温度 423 K。速度边界,气缸盖、气缸壁为静止,速度为 0。活塞顶的速度等于活塞运动速度。

根据泵端压力和嘴端压力计算得出的喷油提前角,其中 B0 为 352.5°CA,B20 为 352.3°CA。模拟工况为标定点工况。对于 B20 喷雾特性的设置,修改了 FIRE 燃料库中的燃料属性文件,主要包括密度、动力粘度、表面张力、蒸发潜热。根据生物柴油和柴油的体积分数设置燃料的物性参数,将计算得到数据定义 B20 燃料属性文件。

3.2 模型验证

由图 2 可以看出两种燃油模拟计算结果和实测值曲线走向基本相同,数值基本吻合,整个曲轴转角范围数值计算误差在 5% 以内,验证了氮氧化物生成模型和碳烟生成模型选取的合理性。由图中可以看出掺烧生物柴油后缸内最大爆发压力增大,对应的曲轴转角略有提前,且 B20 压力开始上升的时间早于 B0。

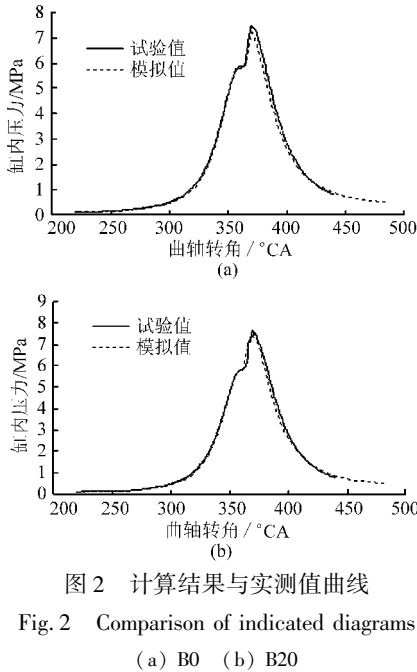


图 2 计算结果与实测值曲线
Fig.2 Comparison of indicated diagrams
(a) B0 (b) B20

4 排放数值解析

4.1 NO_x 排放分析

图 3 为两种燃油 NO_x 分布对比,从图中可以看出,NO_x 主要分布在已经燃烧的区域,因为在燃烧过程中,生成的 NO_x 在已燃区内积累,未燃区域因为温度较低,NO_x 的生成量少,质量分数很低。且大部分 NO_x 都是在燃烧过程后期生成。在各个曲轴转角下,B20 的 NO_x 分布浓度都要比 B0 大,分布范围也比 B0 大。一方面,B20 局部燃烧温度比 B0 高;另一方面,生物柴油含有约 11% 的氧,这使得 B20 的含氧量加大;NO_x 生成速率(图 4)总是在火焰前锋面扫过的区域时最大。因为在这些区域内,燃烧温度很高,而且氧含量也比较充裕,相比未燃烧区域,虽然氧含量没有未燃区高,但燃烧的瞬时温度较高,同时满足了高温和富氧的条件。B20 的生成速率明显比 B0 大,而且 B20 中 NO_x 生成速率较大的区域也比 B0 饱满。

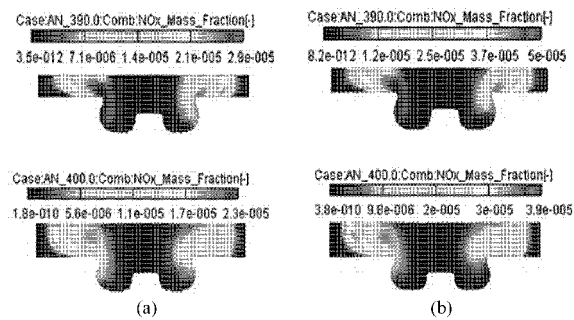


图 3 NO_x 的分布对比
Fig. 3 Comparison of NO_x distributions
(a) B0 (b) B20

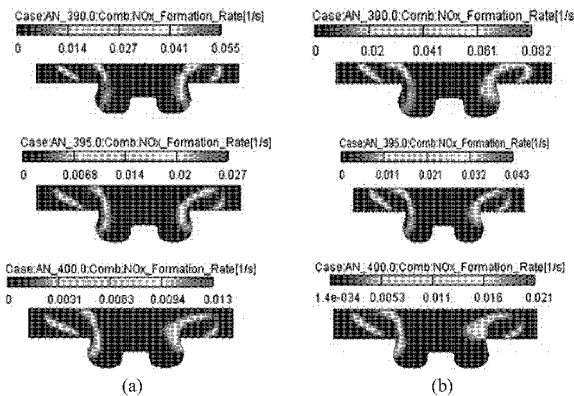


图 4 NO_x 生成速率对比
Fig. 4 Comparison of NO_x formation rates
(a) B0 (b) B20

4.2 碳烟排放分析

从图 5 中可看出,碳烟的生成速率分布和变化始终与燃油较浓和燃烧温度高的区域一致,在这些区域的外围,燃烧反应正在进行,由于 B20 的密度

比 B0 大,质量和沿喷射方向的动量大于 B0,导致 B20 的贯穿距离比 B0 大;由于生物柴油的粘度大于纯柴油,导致 B20 油气混合状态比 B0 差;生物柴油的挥发性差,不利于油束前端的横向扩展。密度、粘度、挥发性 B20 的喷雾前端没有 B0 饱满,且扩散程度不及柴油,所以区域内部燃油与空气的混合较差,空气难以到达的高温区域成为碳烟生成速率较高的区域。特别是在扩散燃烧阶段,燃烧速率受油气混合速率的影响,碳烟生成速率迅速增加。从图 5 中可看出,碳烟出现在油气混合较差的区域,即燃烧室壁面,由于燃烧室涡流的作用,碳烟随着气流运动而漂浮,但始终与富碳区和富油区保持一致^[6]。图 6 中 B0 和 B20 两种燃油碳烟生成速率基本相同,这是因为 B20 中生物柴油的含氧量不及纯生物柴油,含氧量不足以改变部分区域空燃比较低的状态,试验测得在全速全负荷 B0 的 Bosch 烟度为 1.6, B20 为 1.9,与模拟预测结果相同。这也说明少量生物柴油的掺烧在全速全负荷对碳烟排放改善有限。

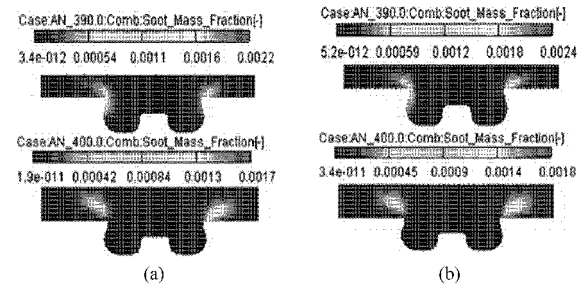


图 5 碳烟分布对比
Fig. 5 Comparison of soot distributions
(a) B0 (b) B20

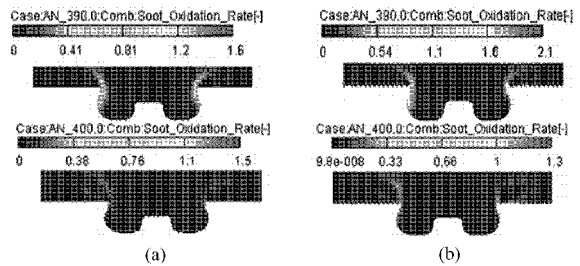


图 6 碳烟氧化速率对比
Fig. 6 Comparison of soot oxidation rates
(a) B0 (b) B20

4.3 涡流比与喷油提前角对排放的影响

柴油机排放控制的难点在于氮氧化物和颗粒物生成机理的相互制约关系。许多降低碳烟排放有效的措施往往会引起氮氧化物排放的增加,反之亦然。解决上述问题的关键是合理控制燃烧室内的燃烧过程。在现有的喷油压力条件下,为了对比分析涡流比和喷油提前角对掺烧生物柴油后的氮氧化物和微粒排放的影响,列出了表 3 中的 4 种方案,并对这 4

种方案下的 NO_x 和碳烟生成量进行了模拟预测。

表 3 模拟计算方案
Tab. 3 Simulation schemes

	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
燃油	B20	B20	B20	B20
喷油提前角/°CA	352.0	352.5	352.5	351.0
涡流比	2.5	2.5	2.7	2.7

图 7 为 NO_x 排放特性曲线。从图中可看出, NO_x 生成速率在上止点后 10° CA 开始增大, 到 400° CA 时, NO_x 总量开始保持不变。喷油提前角的变化对 NO_x 的影响很大, 喷油推迟 NO_x 生成量显著减少, 涡流比增大时, NO_x 也有不同程度的增加。方案 2 的 NO_x 排放量最少。

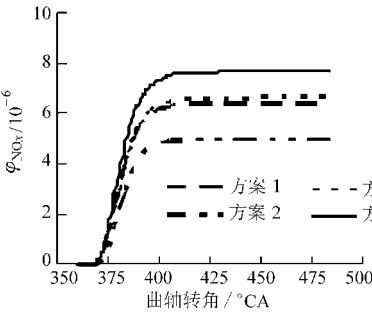


图 7 NO_x 排放量对比
Fig. 7 NO_x emission

图 8 为碳烟排放特性曲线。可以看到, 推迟喷油和增大涡流比可以减少碳烟的最终排放量。从曲线走势看, 掺烧生物柴油后碳烟的出现主要是在喷油过程的前期, 大量的燃油碰壁, 这些碰壁的燃油由于受蒸发速率和燃料与氧混合速率的限制, 在短时

间内难以完全燃烧, 从而生成大量碳烟。而在后期, B20 中碳烟的氧化速率明显要高于 B0。掺烧生物柴油后, 增大涡流比可以减小碳烟的生成。考虑到 NO_x 和碳烟排放的优化组合, 方案 3 为可选用的掺烧生物柴油后有效控制方案。

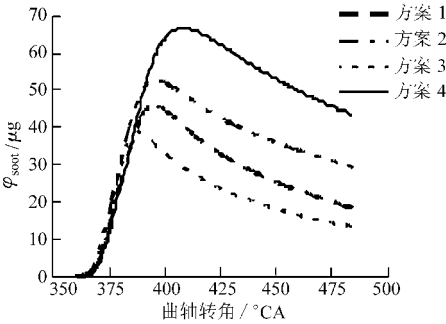


图 8 碳烟排放量对比
Fig. 8 Soot emission

5 结论

(1) 应用多维分析方法对柴油机燃烧排放特性掺烧生物柴油进行了模拟预测, 通过实测示功图的对比较验证了模型的准确性。

(2) 燃用 B20 燃油时 NO_x 生成量增加, 在全负荷时, 碳烟排放量也有所增大。NO_x 生成速率总是在火焰前锋面扫过的区域时最大。碳烟的生成速率分布和变化始终与燃油较浓和燃烧温度高的区域一致。

(3) 在燃用 B20 燃油时, 适当推迟喷油和增大初始涡流比可以同时控制 NO_x 和碳烟排放。并提出了同时减少 NO_x 和碳烟排放量的方案, 涡流比 2.7、供油提前角 352.5° 时 NO_x 和碳烟排放最优。

参 考 文 献

1 袁银南, 张恬, 梅德清, 等. 直喷式柴油机燃用生物柴油燃烧特性的研究[J]. 内燃机学报, 2007, 25(1): 43 ~ 46.
Yuan Yinnan, Zhang Tian, Mei Deqing, et al. Investigation on combustion characteristics of direct injection diesel engine fuelled with biodiesel[J]. Transactions of CSICE, 2007, 25(1): 43 ~ 46. (in Chinese)

2 袁银南, 陈汉玉, 张春丰, 等. 生物柴油喷雾特性试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(7): 1 ~ 4.
Yuan Yinnan, Chen Hanyu, Zhang Chunfeng, et al. Experimental study on spray characteristics of biodiesel [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7): 1 ~ 4. (in Chinese)

3 张旭升, 李理光, 邓俊, 等. 生物柴油喷雾特性的试验研究[J]. 内燃机学报, 2007, 25(2): 172 ~ 176.
Zhang Xusheng, Li Liguang, Deng Jun, et al. An experimental study of bio-diesel spray characteristics[J]. Transactions of CSICE, 2007, 25(2): 172 ~ 176. (in Chinese)

4 Senatore A, Cardone M, Rocco V, et al. A comparative analysis of combustion process in DI diesel engine fueled with biodiesel and diesel fuel[C]. SAE Paper 2000-01-0691, 2000.

5 解茂昭. 内燃机计算燃烧学[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2005.

6 赵奎翰, 魏建勤, 息树和, 等. 小缸径直喷式柴油机喷雾、燃烧和碳粒生成过程试验研究[J]. 内燃机学报, 1997, 15(2): 151 ~ 158.
Zhao Kuihan, Wei Jianqin, Xi Shuhe, et al. An experimental study of spray, combustion and carbon generation process of small bore injection diesel engine [J]. Transactions of CSICE, 1997, 15(2): 151 ~ 158. (in Chinese)