

## 车用生物燃料应用性能仿真研究进展

张永辉<sup>1</sup>, 闵永军<sup>1</sup>, 徐俊明<sup>2</sup>

(1.南京林业大学汽车与交通工程学院,江苏南京 210037;2.中国林业科学研究院林产化学工业研究所,江苏南京 210042)

**摘要:**车用生物燃料是可再生替代能源之一,仿真研究是车用生物燃料应用研究的主要方法,燃烧放热规律及内燃机条件下的燃烧排放生成过程是车用生物燃料应用仿真研究的重要内容,研究成果对生物燃料的提质改性及推广具有重要意义。基于当前车用生物燃料应用仿真研究成果,阐述了燃烧化学反应机理以及内燃机燃烧条件下计算流体力学仿真研究的发展,分析了生物燃料燃烧机理构建与简化的技术思路以及机理简化成果,梳理了耦合化学反机理的 CFD 仿真模型在生物燃料的应用进展;进一步指出基于生物燃料多组分特征的燃烧化学反应机理的构建及机理简化是应用仿真研究的重要基础,内燃机工作条件下燃料多组分特征对燃烧和排放性能的影响是深入开展仿真研究的重要方向。

**关键词:**生物能;生物燃料;应用性能;仿真研究;反应机理

**中图分类号:**TQ645;TK63 **文献标志码:**A

## Research progress of simulation research on application performance of vehicle-biofuels

ZHANG Yonghui<sup>1</sup>, MIN Yongjun<sup>1</sup>, XU Junming<sup>2</sup>

(1.College of Automobile and Traffic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China;2.Institute of Chemical Industry of Forestry Products, Chinese Academy of Forestry, Nanjing, Jiangsu 210042, China)

**Abstract:** In order to promote the in-depth development of simulation research of biofuel application, the development of the chemical reaction mechanism of biofuel combustion was explained, and application of Computational Fluid Dynamics Model in Combustion Simulation of Internal Combustion Engines were also explored. The technical idea of biofuel combustion mechanism construction and simplification was analyzed. The research progress of biofuel combustion simulation based on CFD combustion model was explored. By calling the biofuel combustion mechanism, Study on the combustion process and emission generation law of internal combustion engine was effective. The review showed that the chemical kinetics of biofuel combustion can be generated by the coupling and simplification of a typical single component combustion mechanism. By calling this synthesis mechanism, the combustion process analysis and emission generation analysis of biofuel can be realized. Research showed that simula-

收稿日期:2018-09-30;修回日期:2019-04-10;责任编辑:张 军

基金项目:国家自然科学基金(31770612)

第一作者简介:张永辉(1977—),男,江苏徐州人,讲师,博士,主要从事汽车节能减排及生物质替代燃料应用方面的研究。

通信作者:闵永军教授。E-mail:Myj@njfu.edu.cn

张永辉,闵永军,徐俊明.车用生物燃料应用性能仿真研究进展[J].河北科技大学学报,2019,40(3):279-284.

ZHANG Yonghui, MIN Yongjun, XU Junming. Research progress of simulation research on application performance of vehicle-biofuels[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2019, 40(3): 279-284.

tion research was an important technical approach to achieve biofuel application research.

**Keywords:** bioenergy; biofuel; application performance; simulation study; chemical kinetic mechanisms

生物燃料是替代燃料的重要类型之一,其原料来源丰富且可再生,根据生物燃料的制备技术及原材料的差异,生物质燃料主要包括生物油(bio-oil)、生物柴油(bio-diesel)、生物醇类等<sup>[1]</sup>。

基于运行工况特征和排放法规,车用发动机对燃油的理化性能有着较高的要求。原料和制备工艺的差异直接决定了燃油组分及特性的不同<sup>[2]</sup>,开展生物燃料的车用发动机应用性能仿真研究,分析生物燃料组分对发动机燃烧及排放机理的影响,对推动生物燃料的实用化进程具有重要意义。生物燃料组分的多样性决定了其燃烧过程是一种非常复杂的物理化学作用过程,宏观的实验难以从微观层面上分析燃油的应用性能。开展燃烧过程的化学动力学计算以及虚拟燃烧环境下的燃烧过程仿真是生物燃料应用性能研究的技术途径和方法<sup>[3]</sup>,有助于深入研究燃油组分特征及燃烧环境条件对发动机动力性能、排放性能的影响。

以车用为目的的生物燃料应用性能仿真研究主要从2个方面进行,一是对生物燃料燃烧过程中放热规律、反应速率、分子(基团)浓度变化规律等的计算,实现这一模拟过程离不开生物燃料化学动力学的计算机理;二是在发动机燃烧环境下,以计算流体动力学(CFD)为基础,生物燃料的燃烧特性对发动机性能的影响研究。

## 1 生物燃料的燃烧机理研究

### 1.1 燃烧过程分析

燃烧是一种剧烈化学反应,通过生物燃料的燃烧计算可描述内燃机燃烧室内燃烧的基本过程,研究燃烧的化学反应过程、热量的释放和质量转移规律。仿真研究是分析影响燃烧过程的重要技术手段之一。燃烧输送特性(热量和物质的流动特性)影响热量和物质在燃烧室内的转移,进而影响燃烧室的温度场分布或者温度-质量分布。生物燃料的燃烧化学特性影响了自燃特性、燃烧率和排放物的生成。综合来看,开始燃烧的热力学条件包括压力、温度和成分浓度,燃烧过程中的具体反应路径和中间产物影响了排放污染物的构成,建立化学反应路径,描述在不同的反应条件下,生物燃料与空气混合后的氧化物特征,是当前研究的重要内容,比如通过化学反应机理及化学反应速率的研究模拟燃烧过程。当前对某些特定可燃成分有着比较成熟的燃烧机理、反应速率及热力学数据,比如 $H_2O$ , $CH_4$ 等。生物燃料化学反应的机理研究历史较短,考虑到生物燃料的多样性以及成分的复杂性,生物燃料燃烧过程描述所需的燃烧反应机理正逐渐被开发,详细化学反应机理的精简有较多困难<sup>[4]</sup>。

### 1.2 生物燃料燃烧机理的开发

多种单一组分耦合生成多组分燃料的化学动力学机理,是当前生物燃料燃烧机理开发的主要技术路线。美国能源部下属的劳伦斯利福摩尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory)开发了癸酸甲酯(methyl decanoate, MD)、癸烯酸甲酯(methyl decenoate, MD9D, MD5D)、硬脂酸甲酯(methyl stearate)和油酸(oleate)等单一组分的燃烧化学反应机理<sup>[5]</sup>,在燃烧研究领域,被广泛作为饱和组分和不饱和组分的替代组分;CONAIRE等<sup>[6]</sup>对正庚烷机理作了较为深入的研究。这些典型组分的成熟机理为多组分机理的研究开发奠定了重要基础。HERBINET等<sup>[7]</sup>将癸酸甲酯、癸烯酸甲酯以及正庚烷烃的燃烧机理进行融合,构建了详细的化学动力学机理,在射流搅拌反应器(JSR)燃烧条件下,将该组合机理的模拟燃烧结果与菜籽油甲酯的燃烧反应结果进行比对。结果表明,不饱和组分含量较高的菜籽油甲酯的燃烧过程与组合机理的模拟结果基本一致。文献<sup>[5]</sup>指出,MD,MD9D,MD5D等组分对大豆生物柴油具有良好的替代性。燃油组分的不饱和度是影响燃烧性能的重要因素之一,MD,MD9D,MD5D, $C_7H_{16}$ 的组合机理能较好地模拟饱和度差异导致的燃烧特性差异<sup>[8]</sup>,这一研究方法对组分特征复杂的各类生物燃料的燃烧反应机理研究开发提供了重要的技术途径。

### 1.3 燃烧简化机理的发展

生物柴油是生物燃料的典型代表,主要由饱和和非饱和的甲酯组成,典型代表组分是棕榈酸甲酯、硬脂

酸甲酯、油酸甲酯、亚油酸甲酯和亚麻酸甲酯 5 个成分,目前还不具备详实描述此类典型成分燃烧化学反应过程的能力,在长碳链组分燃烧机理的构建中一般是以短碳链组分作为替代。丁酸甲酯(methyl butanoate, MB)有着  $RC(=O)OCH_3$  的化学结构,相比生物柴油甲基酯类成分的碳链长度,MB 的碳链较短,反应中存在快速异构化反应,这是低温燃烧化学中重要的反应,控制着燃油的自动着火时间。基于这一燃烧特性,丁酸甲酯可作为生物柴油的替代组分之一。为了调节燃油的分子质量和氧含量,BRAKORA 等<sup>[9]</sup>设定生物柴油中的 MB 和正庚烷(*n*-heptane,  $C_7H_{16}$ )的物质的量比为 1:2,基于一个修正的方法,GOLOVITCHEV 等<sup>[10]</sup>以 MB,  $C_7H_{16}$  和甲苯(toluene,  $C_7H_8O$ )3 种组分构建了包括 88 种基本物质和 363 个反应的化学反应机理,再嵌入 soot 和  $NO_x$  的形成机理<sup>[11]</sup>,仿真研究了菜籽油甲基酯在 Volvo D12C 发动机上的应用性能和排放性能。基于 MD, MD9D 和 MD5D 的化学反应机理,LUO 等<sup>[12]</sup>开发了包括 MD, MD9D 和 *n*-heptane 生物柴油的简化三元替代机理,机理包括 115 种物质和 460 个基本反应。对于原材料差异所制备的不同生物柴油,可通过改变饱和与不饱和成分的质量组成比例,实现不同饱和度生物柴油燃烧反应机理的替代。WANG 等<sup>[13]</sup>研究了正丁醇与生物柴油的掺混燃料燃烧反应,其中生物柴油的燃烧机理用癸酸甲酯(MD)的燃烧机理代替,构建了正丁醇和生物柴油联合的仿真机理,包括 175 种物质和 765 个反应。ISMAIL 等<sup>[14]</sup>开发了包括 MD 和 MD9D 组分的 BOS-V2 机理,包括 113 个物质和 399 个反应。LI 等<sup>[15]</sup>假定生物柴油是由正庚烷、癸酸甲酯(MD)和 9-癸烯酸甲酯(MD9D)组成,物质的量比为 2:1:1,利用多成分化学反应动力学机理,生成了包括 69 种物质和 204 个反应的燃烧化学反应机理。

针对化学反应机理的简化技术研究,朱继贞<sup>[16]</sup>在替代燃料燃烧机理构建研究中,利用敏感性分析法和反应路径分析法简化得到了组分丁基苯的燃烧反应机理。LU 等<sup>[17]</sup>基于误差传播的有向关系图(DRGP)法和敏感性分析法进行了机理的简化。SAGGESE 等<sup>[18]</sup>构建了丁酸甲酯(MB)和癸酸甲酯(MD)的集成化学动力学方案,在一个较宽的试验范围内进行了修正,也证明了以这 2 种成分作为参考成分的可能性。何邦全等<sup>[19]</sup>在进行温度敏感性分析基础上,构建了包括正庚烷和异辛烷的汽油替代物简化化学反应机理,并进行了验证。王秧等<sup>[20]</sup>针对航空煤油的三组分替代模型,采用物质产率分析法和直接关系图法简化得到半详细机理,并进行了模拟与实验的对比验证。

以上研究拓宽了生物燃料机理的研究领域,组分替代的技术思路为开展生物燃料的多组分化学反应机理构建提供了基础。

## 2 生物燃料的燃烧仿真研究

以生物燃料的燃烧化学反应机理为基础,进一步开展内燃机条件下生物燃料的应用仿真研究是生物燃料应用研究的持续推进方向。内燃机条件下的仿真研究是以复杂燃烧模型、燃油喷射模型等为基础,同时调用生物燃料燃烧化学反应机理而进行的模拟计算,实现内燃机的放热过程、排放生成的过程仿真,对推进生物燃料的应用进程有重要意义。

### 2.1 生物燃料燃烧过程的模拟

基于生物燃料的应用研究,开展燃烧模型构建及燃烧过程仿真的研究尤为重要,当前的研究各有所侧重。MUSTHAFA 等<sup>[21]</sup>利用热力学模型,对生物柴油内燃机条件下的燃烧过程模拟,分析了进排气相位、放热率及压缩比等对燃烧规律的影响,取得了有价值的计算结果。有学者利用多区域模型,在缸内压力、热量释放率和排放等参数上取得了较一致的试验结果和仿真结果。燃烧化学反应机理是构建生物燃料热力学模型的重要基础,决定了内燃机应用条件下仿真研究的准确性和可靠性。

多维计算流体动力学(CFD)代码是重要的仿真工具。EHLESKOG 等<sup>[22]</sup>基于 KIVA-3 代码和替代燃料燃烧机理,仿真研究了固定转速和 25% 负载下的直喷柴油机多维度湍流化学反应,在高压共轨压电喷嘴喷射条件下,研究了燃油喷射条件及方式对 NO 排放的影响。HELMANTEL 等<sup>[23]</sup>利用 3D-CFD 模型、KIVA-4 代码,建立了多维计算流体动力学模型、多成分燃油蒸发模型等,调用掺混生物燃料的化学动力学机理,进行了喷油策略的仿真。MAGHBOULI 等<sup>[24]</sup>对燃油喷射破碎和碰撞模型采用了改进的 KH-RT 和 O'Rourke 模型,模拟仿真了不同负载及转速工况下的喷油情况,再现了燃烧室内不同时间和空间位置下的当



量比分布,研究结论能够对不同工况点下的发动机动力性能、排放性的变化进行合理解释。

上述研究成果基于生物燃料的应用,以 CFD 模型与燃烧化学反应动力学模型的耦合为研究重点,为仿真研究提供了较为成熟的技术路线,燃烧仿真结果的准确性得到了提高。

## 2.2 发动机燃烧条件下的生物燃料应用仿真研究进展

COSKUN 等<sup>[25]</sup>在研究燃烧的中间产物  $H_2O_2$  和  $HO_2$  的分布规律时,利用计算流体动力学(CFD)软件与化学动力学计算器(CHEMKIN),运用燃料燃烧的化学反应机理,详细探讨了仿真燃烧产物  $H_2O_2$  和  $HO_2$  的空间分布以及燃烧室内的温度分布,与通过激光诱发的荧光图片实验手段获得的实验结果基本一致。

在考虑生物柴油不同掺混比下的燃烧机理基础上,CHOU 等<sup>[26]</sup>通过精准测绘发动机相关部件尺寸,建立了几何三维模型,开发的动态网格主要包括活塞和进排气门的运动;利用 ANSYS Fluent 流体分析软件,进行了发动机 2 000 r/m 下的瞬态仿真,研究了生物柴油掺混比对发动机性能的影响。结果表明,随着掺混比的增加,缸内压力和温度逐渐下降,但  $NO_x$  排放量是逐渐上升的。

靳德才等<sup>[27]</sup>利用 CFD 分析软件 AVL,对高压共轨柴油机燃用掺比 20% 生物柴油的燃烧过程进行模拟,研究了不同喷油提前角下燃用该燃料的燃烧过程,以及高压喷射对燃油喷雾和燃烧的影响,并对模型的准确性进行了验证。黄昭明等<sup>[28]</sup>在 AVL-FIRE 软件中建立了耦合化学反应机理的 CFD 仿真模型,分析了生物柴油着火滞燃期、燃烧持续期等特性的变化,深入探讨了排放规律。徐波峰<sup>[29]</sup>基于 CONVERGE 软件平台,构建了三维 CFD 仿真计算模型,并调用乙醇/生物柴油化学动力学组合模型,仿真研究了不同乙醇掺混比条件下 EGR 率和海拔变化对生物柴油发动机燃烧与排放特性的影响。

LI 等<sup>[30]</sup>基于机理简化和 CFD 仿真,重点研究了生物燃料饱和度对排放的影响,仿真研究中通过调节特定组分含量实现不饱和度的模拟,结合实验研究了不饱和度对燃烧过程、碳烟生成以及  $NO$  生成的影响。为开展仿真研究,作者团队前期相继开发了单一组分及多组分融合的复杂化学反应机理,进行了机理有效验证,并利用 CHEMKIN 计算软件开展了理想燃烧条件下的燃烧规律研究。

以上研究成果较好地证明了发动机条件下的仿真研究与实验结果具有良好的一致性,内燃机条件下的生物燃料应用仿真研究是可行有效的,为深入开展生物燃料应用研究奠定了基础。复杂化学反应机理的简化是实现内燃机燃烧条件下 CFD 仿真的必要基础。鉴于生物燃料类型的多样性及成分的复杂性,典型组分的选择、组分比例的选定是多组分机理耦合过程中需要考虑的因素,多组分耦合的生物燃料替代机理需有效反映生物燃料饱和度及含氧量特征,在此基础上进行机理简化并应用与内燃机条件下的 CFD 仿真,可提高生物燃料的燃烧效率及排放仿真计算的准确性<sup>[31]</sup>。当前针对生物柴油的应用研究,技术思路相对成熟,但在制备工艺和组分特征方面,生物燃料与生物柴油有着较大的差异性,在典型组分选择、燃烧机理构建、燃烧机理简化及验证以及 CFD 仿真计算等方面需持续进行研究。不饱和度作为区分不同生物燃料的重要指标,已被应用到多组分燃烧机理的构建过程中,相比生物柴油,广义上的生物燃料组分更为复杂,组分间的燃烧干扰性对燃烧过程模拟准确性的影响也是仿真研究需考虑的因素之一。

## 3 总结与展望

车用生物燃料原料范围从传统的油脂扩大到生物质材料,制备方法经历了酯化反应、催化裂解等工艺变化,所制备的生物燃料组分也是复杂多变的,对生物燃料的应用特性产生了重大影响。仿真作为技术手段,被广泛应用到生物燃料燃烧过程等相关研究方面。

生物燃料燃烧机理是燃烧仿真研究的重要基础,综述分析了癸酸甲酯、癸烯酸甲酯、硬脂酸甲酯和油酸等单一组分在生物燃料燃烧机理中的基础地位,对多组分合成机理的开发奠定了重要基础。多组分机理耦合技术和机理简化技术推动了生物燃料应用仿真的发展,也为内燃机条件的燃烧仿真研究奠定了工程基础。内燃机条件下的 CFD 仿真研究成果表明基于改善生物燃料燃烧性能和排放性能的仿真研究成为可能,仿真研究作为生物燃料应用研究的技术途径是可行的。

为提高仿真研究的高效性和准确性,在生物燃料的应用仿真方面可进一步开展以下研究。

1)优化生物燃料的燃烧化学反应机理。生物燃料理化特性的变化影响了发动机条件下的 CFD 建模仿真,燃烧化学反应机理影响了 CFD 仿真结果的准确性。

2)燃烧化学反应机理的简化方法研究。从技术途径上很难构建包括所有组分的化学动力学反应机理,动力学模型也几乎无法实现数值模拟计算,简化的燃烧化学反应机理是开展工程领域燃烧仿真的基础。

3)内燃机工作条件下的排放物生成过程的仿真研究。对排放的影响研究中,开展生物燃料燃油分子不饱和度和氧含量等特性对着火延迟和预混燃烧影响的量化研究,碳链长度、不饱和度及含氧量与  $\text{NO}_x$  浓度、颗粒物质量和数量之间的量化关系尚不明确。通过仿真研究,可进一步探究生物燃料的排放生成机理,推进生物燃料的应用进程。

## 参考文献/References:

- [1] 刘雪艳,苏忠亮.微藻生物燃料的研究进展[J].化学与生物工程,2017,34(3):11-14.  
LIU Xueyan, SU Zhongliang. Research progress on microalgae biofuel[J]. Chemistry and Bioengineering, 2017,34(3):11-14.
- [2] 张永辉,闵永军,徐俊明.车用典型生物燃料的组分及理化特性对比研究[J]. 新能源进展,2018,6(6):461-466.  
ZHANG Yonghui, MIN Yongjun, XU Junming. Comparative study on composition and physic-chemical properties of typical biofuels for vehicles[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2018,6(6):461-466.
- [3] 段俊法,唐建鹏,张宇,等. 燃烧方式对氢内燃机燃烧和排放的影响研究[J]. 车用发动机,2018(5):89-93.  
DUAN Junfa, TANG Jianpeng, ZHANG Yu, et al. Effect of different combustion modes on combustion and emission characteristics of hydrogen internal combustion engine[J]. Vehicle Engine, 2018(5):89-93.
- [4] HOSSAIN A K, DAVIES P A. Pyrolysis liquids and gases as alternative fuels in internal combustion engines——A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 21(5):165-189.
- [5] WESTBROOK C K, NAIK C V, HERBINET O, et al. Detailed chemical kinetic reaction mechanisms for soy and rapeseed biodiesel fuels [J]. Combustion and Flame, 2011, 158(4): 742-755.
- [6] CONAIRE O M, CURRAN H J, SIMMIE J M, et al. A comprehensive modeling study of hydrogen oxidation[J]. International Journal of Chemical Kinetics, 2010, 36(11):603-622.
- [7] HERBINET O, PITZ W J, WESTBROOK C K. Detailed chemical kinetic mechanism for the oxidation of biodiesel fuels blend surrogate [J]. Combustion and Flame, 2010, 157(5): 893-908.
- [8] LI Han, YANG Wenming, ZHOU Dezhi, et al. Skeletal mechanism construction for heavy saturated methyl esters in real biodiesel fuels [J]. Fuel, 2019,239:263-271.
- [9] BRAKORA J L, YOUNGCHUL R, REITZ R D, et al. Development and validation of a reduced reaction mechanism[J]. Journal of the Society of Automotive Engineers of Japan, 2008, 1(1):132-139.
- [10] GOLOVITCHEV V I, YANG Junfeng. Construction of combustion models for rapeseed methyl ester bio-diesel fuel for internal combustion engine applications[J]. Biotechnology Advances, 2009, 27(5): 641-655.
- [11] AN Hui, YANG Wenming, LI Jing, et al. A numerical modeling on the emission characteristics of a diesel engine fueled by diesel and biodiesel blend fuels[J]. Applied Energy, 2014, 130(5): 458-465.
- [12] LUO Zhaoyu, PLOMER M, LU Tianfeng, et al. A reduced mechanism for biodiesel surrogates for compression ignition engine applications[J]. Fuel, 2012, 99(2): 143-153.
- [13] WANG Xin, LIU Haifeng, ZHENG Zunqing, et al. Development of a reduced n-butanol/biodiesel mechanism for a dual fuel engine[J]. Fuel, 2015, 157:87-96.
- [14] ISMAIL H M, NG H K, GAN Suyin, et al. Computational study of biodiesel-diesel fuel blends on emission characteristics for a light-duty diesel engine using OpenFOAM[J]. Applied Energy, 2013, 111(4): 827-841.
- [15] LI J, YANG W M, AN H, et al. Effects of piston bowl geometry on combustion and emission characteristics of biodiesel fueled diesel engines[J]. Fuel, 2014, 120(1): 66-73.
- [16] 朱继贞. 柴油替代燃料碳烟生成机理数值模拟与试验研究[D]. 南宁:广西大学,2017.  
ZHU Jizhen. Numerical and Experimental Study on the Soot Formation Mechanism of Diesel Surrogate Fuel[D]. Nanning: Guangxi University, 2017.
- [17] LU Tianfeng, LAW C K. A directed relation graph method for mechanism reduction[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(1): 1333-1341.
- [18] SAGGESE C, FRASSOLDATI A, CUOCI A, et al. A lumped approach to the kinetic modeling of pyrolysis and combustion of biodiesel

- fuels[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(1): 427-434.
- [19] 何邦全, 李晓. 废气稀释下正庚烷-异辛烷高温反应过程的模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2018, 24(3): 199-207.  
HE Bangquan, LI Xiao. Simulation of high-temperature reaction processes of *n*-heptane and iso-cotane mixtures diluted by exhaust gases [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2018, 24(3): 199-207.
- [20] 王秧, 王静波, 李象远. RP-3 航空燃料中低温燃烧机理构建及动力学模拟[J]. 化学研究与应用, 2018, 30(6): 946-952.  
WANG Yang, WANG Jingbo, LI Xiangyuan. Low and intermediate-temperature mechanism and simulation for the combustion of RP-3 Kerosene[J]. Chemical Research and Application, 2018, 30(6): 946-952.
- [21] MUSTHAFA M M, KUMAR T A, MOHANRAJ T, et al. A comparative study on performance, combustion and emission characteristics of diesel engine fuelled by biodiesel blends with and without an additive[J]. Fuel, 2018, 225: 343-348.
- [22] EHLESKOG R, GOLOVITCHEV V, DENBRATT I, et al. Experimental and numerical investigation of split injections at low load in an HDDI diesel engine equipped with a piezo injector[J]. SAE Technical Paper Series, 2006: 2006-01-3433.
- [23] HELMANTEL A, GOLOVITCHEV V. Injection strategy optimization for a light duty di diesel engine in medium load conditions with high EGR rates[J]. SAE Technical Paper Series, 2009-01-1441.
- [24] MAGHBOULI A, YANG Wenming, AN Hui, et al. An advanced combustion model coupled with detailed chemical reaction mechanism for D.I diesel engine simulation[J]. Applied Energy, 2013, 111(4): 758-770.
- [25] COSKUN G, JONSSON M, BOOD J, et al. Analysis of in-cylinder H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and HO<sub>2</sub> distributions in an HCCI engine-Comparison of laser-diagnostic results with CFD and SRM simulations[J]. Combustion and Flame, 2015, 162(9): 3131-3139.
- [26] CHOU C C, TZENG P S, WANG G J, et al. Numerical study of a turbo-charged common-rail diesel engine fueled with various biodiesel blends[J]. Energy Procedia, 2014, 61: 1146-1149.
- [27] 靳德才, 谭泽飞, 卢长春, 等. 喷油提前角对生物柴油高压共轨柴油机能影响的数值模拟[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(1): 162-166.  
JIN Decai, TAN Zefei, LU Changchun, et al. Numerical simulation of the influence of spray advance angle on the performance of biodiesel high pressure common rail diesel engine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(1): 162-166.
- [28] 黄昭明, 苏荻, 王利. 生物柴油发动机燃烧和排放的数值模拟[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2016, 33(3): 266-271.  
HUANG Zhaoming, SU Hong, WANG Li. Numerical simulation for combustion and emission of an engine fueled with biodiesel[J]. Journal of Anhui University of Technology(Natural Science), 2016, 33(3): 266-271.
- [29] 徐波峰. 乙醇/生物柴油混合燃料化学动力学模型构建及数值模拟研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.  
XU Bofeng. Research on Construction of Chemical Kinetic Model and Numerical Simulation of Ethanol/Biodiesel Blend Fuel[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [30] LI Han, YANG Wenming, ZHOU Dezhi, et al. Numerical study of the effects of biodiesel unsaturation on combustion and emission characteristics in diesel engine[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 137(5): 310-318.
- [31] 张永辉. 改性生物基燃油对车用柴油机 NO 排放影响的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2018.  
ZHANG Yonghui. Study on NO Emission Characteristics of Modified Bio-based Fuel for Vehicle Diesel Engine[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2018.