

燃油喷射参数对生物柴油发动机燃烧与排放特性影响研究

周磊, 杨昆, 张萍, 赵建华, 聂涛

(海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要:在通过超高压燃油喷射装置双电磁阀控制策略实现超高压力和可调喷油规律喷射的基础上,建立了生物柴油发动机燃烧过程模型,并基于试验数据对模型展开了准确性验证,而后研究了生物柴油发动机燃烧排放性能随喷油特性(喷油压力和喷油规律)的变化规律。结果表明:当采用一定的控制策略,调整喷油器和电控增压器中的电磁阀开启和关闭时序后,能够实现超高压力和可变喷油规律喷射;靴形喷油规律下,喷油压力较大有利于缸内燃油和空气的混合,提升燃油雾化效果,降低 Soot 排放;当喷油规律由矩形变为斜坡形,再转变为靴形时,生物柴油发动机缸压和缸温最高值逐渐降低,缸内油气混合效果更好,燃烧更充分,并且 NO_x 生成量下降 42.8%,而 Soot 生成量仅上升 1.8%。

关键词:生物柴油发动机;喷油压力;喷油规律;燃烧排放

中图分类号:TK421.8

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2025)04-0794-08

随着发动机强制性排放法规的日渐严苛和能源消耗的持续增长,世界各国对发动机的经济性和排放性提出了更高的要求^[1-3]。在上述背景下,生物柴油引起广泛关注^[4],它是一种碳中和燃料,具有来源广泛、低温起动性好、燃烧完全等优点^[5]。同时,良好的燃油喷射特性(喷射压力和喷油规律)也是优化缸内燃烧和改进柴油机整体性能的关键^[6]。

喷油压力提高后,能够改善雾化质量,进而有效降低碳烟排放,但压力升高也就意味着喷油速率的提高,会导致预混阶段放热率急剧上升,造成 NO_x 排放和燃烧噪声的增大,这就需要通过调整喷油规律的有效调整来控制预混阶段的油量,形成更加均匀的可燃混合气^[7-8]。现行的高压共轨系统喷油压力较低,无法实现超高压喷射,并且喷油规律近似于矩形,难以灵活调整^[9]。基于此,海军工程大学设计了超高压燃油喷射装置^[10],有效实现了 220 MPa 以上的超高压和矩形、斜坡形以及靴形等灵活可调的

喷油规律喷射。

国内外学者围绕生物柴油和喷油特性已经开展了相关研究。赵礼飞等^[11]以高压共轨柴油机为对象,分析了柴油/生物柴油混合燃料的排放性能,结果表明:当柴油和生物柴油占比各 50% 时, NO_x 和颗粒物排放总量达到最低,并且当喷油提前角增大后,更有利于 NO_x 排放量的减少。Ahmet^[12]研究了不同负荷下亚麻油生物柴油-柴油混合燃料(D100, L10, L20, L30)对柴油机性能的影响,结果表明:除全负荷工况外, L10 混合燃料获得最高缸内压力;在排放方面,全负荷时 L30 混合燃料的 NO_x 排放量比 D100 增加了 12.7%。熊彪等^[13]分析了靴形喷油速率耦合喷孔数对柴油机燃烧排放特性的影响,结果表明:靴形喷油规律下,适当增加喷孔数可以细化油束,减小油滴直径,有利于缸内油气混合和燃烧,降低柴油机排放。Reddy 等^[14]利用 Converge 软件研究了喷射压力等参数对直喷式发动机性能的影响,得出了喷射压力升高,系统燃烧过程的峰值放热率和 NO_x 排放会增高、Soot 排放会显著降低的结论。

综合上述分析可知,国内外关于生物柴油和喷油特性对发动机性能影响的研究较多,但大多只是在常规压力和固定喷油规律条件下,针对超高压

收稿日期:2024-08-27

基金项目:湖北省自然科学基金(2024282010)与海军工程大学自主立项基金(2023502070)资助

作者简介:周磊(1991—),副教授

通信作者:杨昆(1981—),副教授 e-mail:15345811275@163.com

和可变喷油规律条件下生物柴油发动机的性能研究较少。为此,本文以实现了超高压力和可调喷油规律喷射的超高压燃油喷射装置为基础,建立了生物柴油发动机燃烧过程模型,并基于试验数据对模型展开了准确性验证,而后研究了生物柴油发动机燃烧排放性能随喷油特性(喷油压力和喷油规律)的影响规律和成因机理。

1 超高压力和可调喷油规律喷射的实现

超高压力和可调喷油规律喷射是基于超高压燃油喷射装置实现的,该装置结构见图 1。

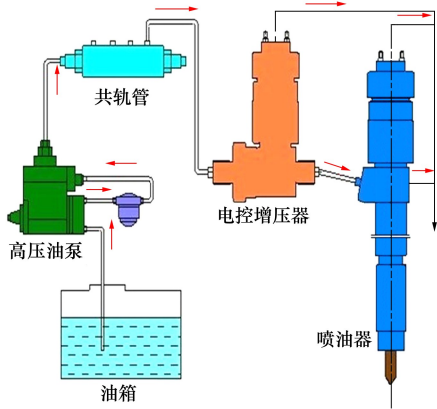


图 1 超高压燃油喷射装置结构图

装置在保留常规高压燃油喷射系统主体部分的基础上,增加了自行开发的电控增压器(位于共轨管与喷油器中间)。电控增压器和喷油器中均配备有电磁阀,当电控增压器中的电磁阀开启后,能够实现大于 220 MPa 的超高压喷射(见图 2);当采用一

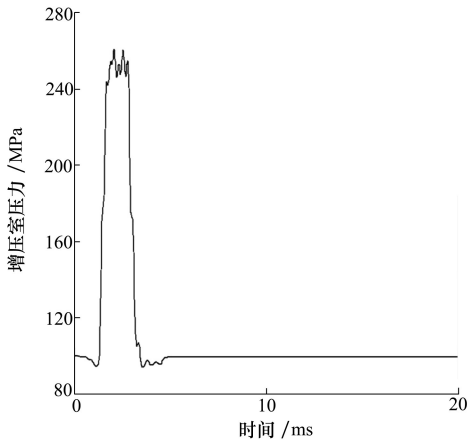


图 2 喷油压力曲线

定的控制策略,调整喷油器和电控增压器中的电磁阀开启和关闭时序时,能够实现可调喷油规律喷射(见图 3)。

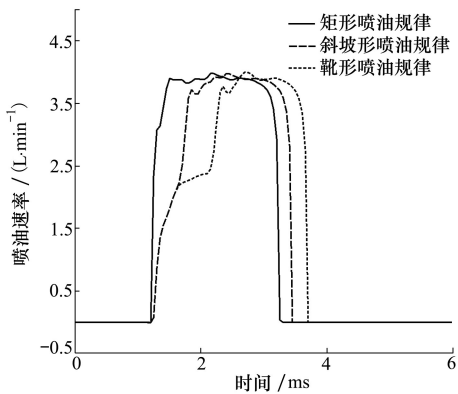


图 3 喷油规律曲线

2 生物柴油发动机燃烧过程模型的建立和验证

2.1 模型建立

基于燃烧室整体结构图,画出燃烧室 3D 模型,而后导出为 STL 文件。当使用 Converge 软件读取 STL 文件时,3D 模型会自适应生成网格^[15]。为提高网格的计算效率和准确性,通过软件自带的加密手段,对活塞、缸盖和喷嘴等重要部位进行了加密处理。考虑到原机喷油器含有 8 个喷孔且分布距离相等,本文按照 1/8 燃烧室为基础划分网格并开展计算,划分网格后的表面模型见图 4。柴油机及其喷油器的主要参数见表 1。

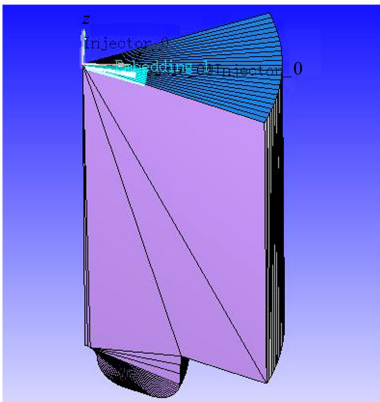


图 4 燃烧室表面网格模型

表 1 柴油机及其喷油器的主要参数

参数	数值
气缸数	6
缸径/mm×冲程/mm	128×140
连杆长度/mm	255
标定转速/(r·min ⁻¹)	1 500
标定功率/kW	186
压缩比	15
喷孔直径/mm	0.2
喷孔数	8
油束夹角/(°)	128
涡流比	1.8

建立生物柴油发动机燃烧过程模型时,缸内初始压力和初始温度、活塞组件壁面温度等初始和边界参数的确定,对模型的精确度会产生重要影响,具体的数值选取见表 2。

表 2 初始和边界参数数值选取

初始和边界条件	参数值
初始压力/MPa	0.25
初始温度/K	368
活塞壁面温度/K	565
气缸盖壁面温度/K	565
气缸套壁面温度/K	458

同时,合适的数学模型对于燃烧过程的准确模拟也十分必要,所需的数学模型主要包括:湍流模型、喷雾模型(蒸发、碰撞、动态阻力以及破碎模型)、燃烧模型、NO_x 和 Soot 排放模型等,具体的模型选取见表 3。仿真计算时间设置为进气门关闭



图 5 生物柴油发动机试验台架

(上止点前-135°CA TDC)到排气门开启(上止点后 130°CA TDC)。

表 3 数学模型选取

数学模型	名称
湍流模型	RNG $k-\varepsilon$
蒸发模型	Frossling
碰撞模型	O'Rourke
动态阻力模型	Dynamic drag
破碎模型	KH-RT
燃烧模型	SAGE
NO _x 排放模型	Zeldovich
Soot 排放模型	Hiroyasu

2.2 模型验证

为验证所建模型的准确性,搭建了生物柴油发动机测试台架(见图 5),该台架主要由超高压燃油喷射装置和发动机数据测量与采集系统两大部分组成。超高压燃油喷射装置包含高压油泵、燃油增压器以及喷油器等,可实现超高压力和可调喷油规律喷射。发动机数据测量与采集系统包含计算机、缸压传感器以及燃烧分析仪等,可获取并记录生物柴油发动机燃烧过程参数(缸内压力、放热率等)。

在保证试验和仿真工况相同的条件下,利用该试验台架,测量的生物柴油发动机缸内压力和放热率曲线对比见图 6~7。图中显示缸内压力和放热率的试验和仿真结果的变化趋势均基本一致,说明生物柴油发动机燃烧过程仿真模型的准确性较高,可用于开展后续研究。

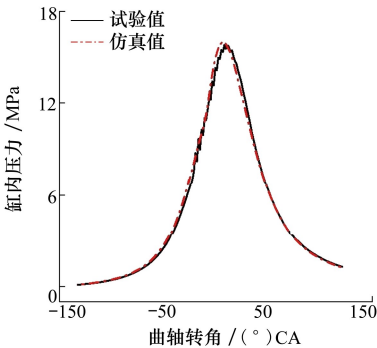


图 6 缸内压力对比

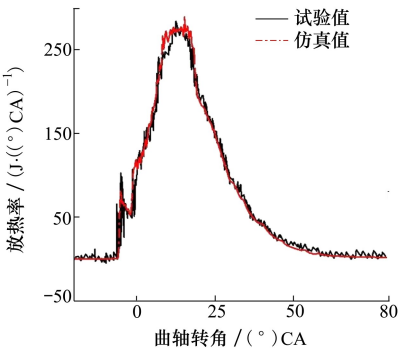


图 7 放热率对比

3 仿真结果与分析

3.1 喷油压力对生物柴油发动机燃烧排放性影响

为分析生物柴油发动机燃烧排放性能随喷油压

力的变化规律,在靴形喷油规律和定转速满负荷工况下,针对 5 种喷油压力(210, 220, 230, 240, 250 MPa)下的缸内压力和温度分别进行了计算。图 8 与图 9 展示了喷油压力对生物柴油发动机

缸内压力及温度的影响。观察图 8~9 可知:伴随喷油压力的升高,缸内压力和温度的峰值均呈现逐步增加的趋势,同时,缸内温度达到最高值的时刻出现了提前。

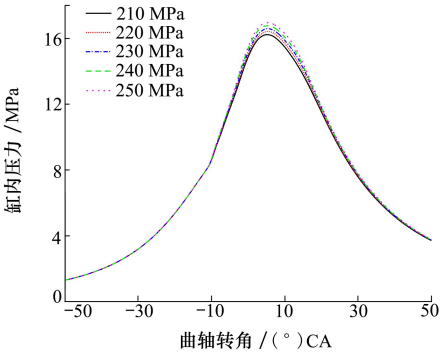


图 8 喷油压力对缸压的影响

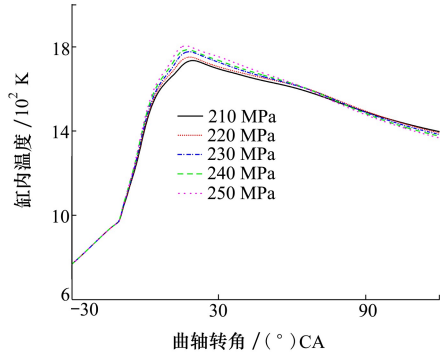


图 9 喷油压力对缸温的影响

结合缸内的当量比和速度场分布云图可以看出(见图 10~11),在上止点前 2°CA 和上止点后 8°CA 时,喷油压力增大后,燃烧室内的油束更长,即喷油

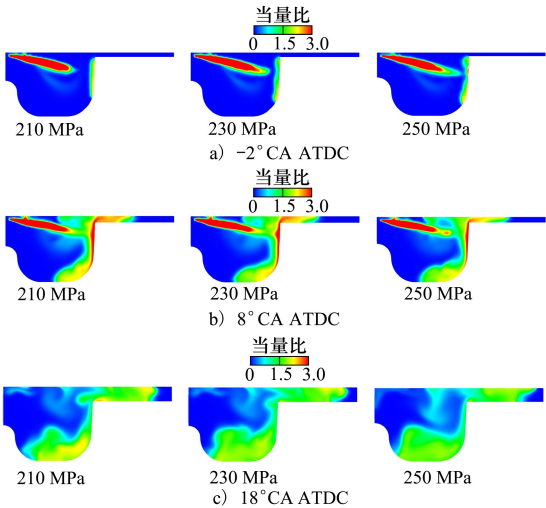


图 10 不同喷油压力当量比分布

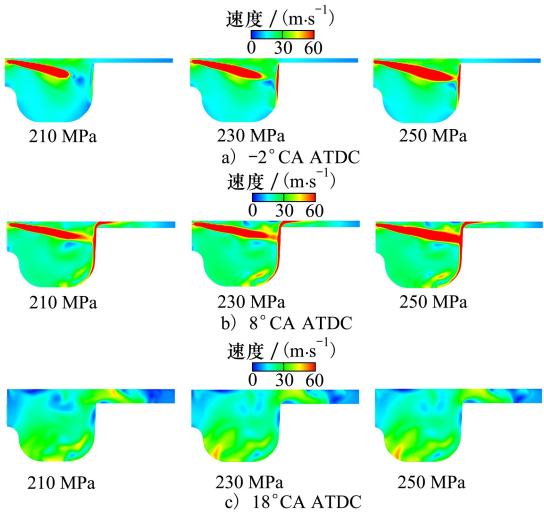


图 11 不同喷油压力速度场分布

贯穿距更长,燃油和空气的接触面积更大,燃油颗粒得到细化,有利于燃油和空气的混合,提升了燃油雾化效果,缸内燃烧更为充分。并且,高喷射压力下缸内油气混合物的扩散速度更快,燃油可以更为迅速地到达燃烧室壁面和凹坑底部等边缘部位,有效缩短了滞燃期和燃烧持续期,有利于缸内燃烧过程的进行。

图 12 所示为喷油压力对 NO_x 和 Soot 排放的影响规律,通过瞬时生成量可知,随着喷油压力升高,NO_x 瞬时排放增大,Soot 瞬时排放减少,并且 2 种排放物达到峰值时刻均有所提前。结合排放物总量图可以看出,喷油压力为 250 MPa 时 Soot 总生成量最低,相较于生成量最多(喷油压力为 210 MPa)时降低了 16.1%,而 NO_x 总生成量升高了 15.7%。

结合当量比和温度场分布云图可知(见图 10 和图 13),随着喷油压力提高,燃烧室内高温区域面积增大,NO_x 生成量也随之上升,并且随着燃烧时间的增长,高温区域逐渐由壁面向余隙上方和缸底转移。由于喷射压力升高促进了燃烧室内燃油和空气混合,提高了油气混合速率,使得燃烧初期高喷射压力下 Soot 瞬时生成量高于另外 2 个工况,而随着燃烧时间推移,高喷射压力工况下缸内油气混合更均匀,空气利用率更高,Soot 氧化效果更好,因此 Soot 总生成量降低。

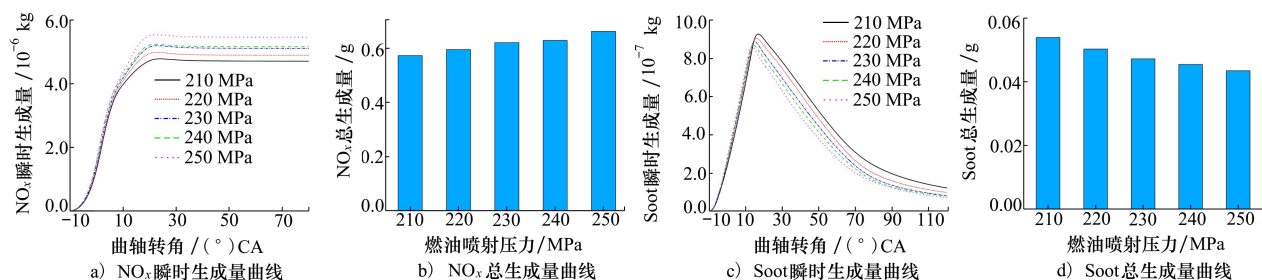


图 12 喷油压力对排放的影响

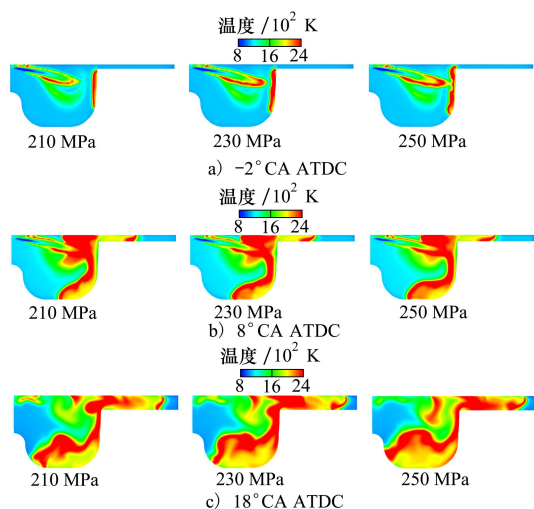


图 13 不同喷油压力温度场分布

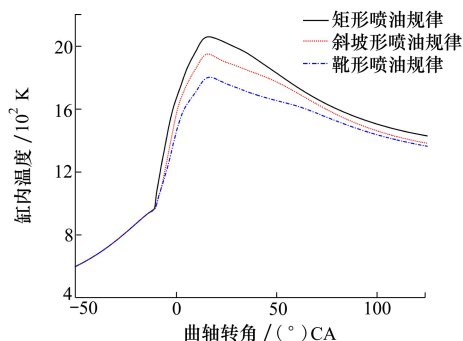


图 15 喷油规律对缸温的影响

3.2 喷油规律对生物柴油发动机燃烧排放性能影响

为分析喷油规律对生物柴油发动机燃烧排放性能的影响,在 220 MPa 喷油压力和额定转速满负荷工况下,针对 3 种喷油规律(矩形、斜坡形以及靴形,见图 3)下的缸内压力和温度分别进行了计算。

图 14 与图 15 展示了喷油规律对生物柴油发动机缸内压力及温度的影响。观察图 14~15 可知:当

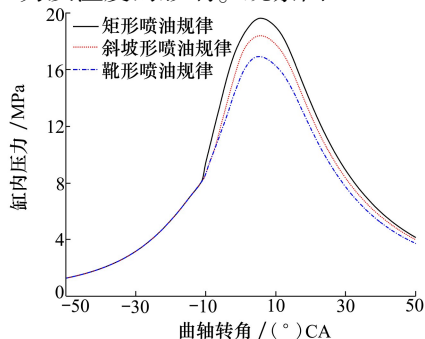


图 14 喷油规律对缸压的影响

喷油规律由矩形变为斜坡形再转变为靴形时,缸压力和缸内温度的最高值和上升速率均下降,这是由于 3 种喷油规律的增压和喷油时序控制不同所致。矩形喷油规律下,系统先增压后喷油,持续保持高喷射压力,在燃烧前期就有更多的燃油喷射到缸内,因此缸内压力和缸内温度峰值更高。

结合图 16 和图 17 缸内的当量比和速度场分布云图也可以看出,在上止点前 2°CA 时,矩形喷油规律下燃烧室内油气混合物最多,分布范围更广,气流运动更强,燃烧过程更剧烈,从而导致缸内压力和温度的上升速率更快,峰值更高。但是,靴形喷油规律下缸内燃油贯穿距最长,燃油和空气的接触面积更大,更有利于燃油和空气的混合。并且,在上止点后 8°CA 至 18°CA 时,靴形喷油规律下缸内燃空当量比分布更均匀,表明靴形喷油规律下缸内油气混合更充分,燃烧过程更好。

图 18 为喷油规律对 NO_x 和 Soot 排放的影响规律,通过瞬时生成量可知,随着喷油规律由矩形变为靴形,NO_x 瞬时生成量显著降低,Soot 瞬时生成量先升高后降低。结合排放物总量图可以看出,靴形喷油规律下 NO_x 总生成量最低,相较于生成量最多的矩形喷油规律减少了 42.8%,而 Soot 生成量仅增加

了 1.8%。

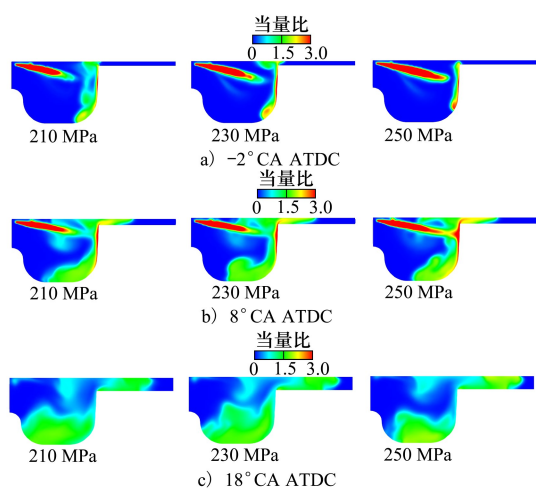


图 16 不同喷油规律当量比分布

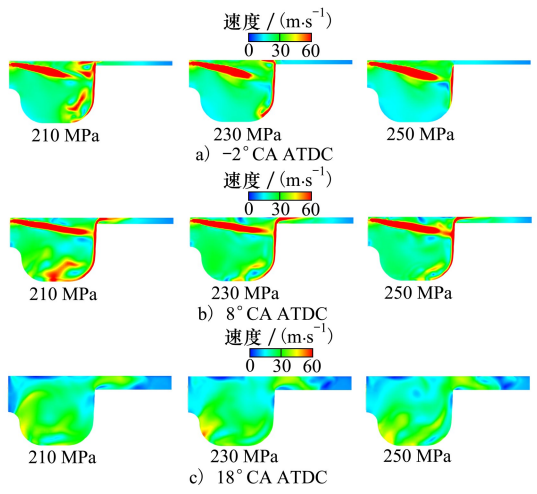


图 17 不同喷油规律速度场分布

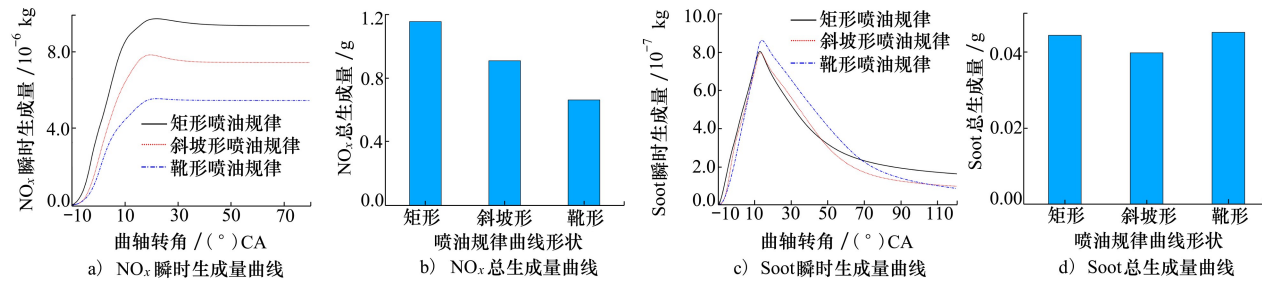


图 18 喷油规律对排放的影响

结合图 16 和图 19 缸内的当量比和温度场分布云图可知,喷油规律从矩形变化到靴形,燃烧室内油气分布更均匀,高温区域分布变少,NO_x 生成的 2 个因素(高温和富氧)得到了抑制,因此 NO_x 生成量有效降低。靴形喷油规律下,缸内温度虽然有所下降,

抑制了 Soot 生成的高温条件,但是由于增压时刻过于滞后,导致燃烧前期缸内的油气混合不够充分,促进了 Soot 的生成,但随着燃烧过程的进行,缸内油气混合效果更好,有利于 Soot 颗粒氧化,最终 Soot 总生成量仅略微升高。

4 结 论

- 1) 当打开超高压燃油喷射装置中电控增压器的电磁阀后,能够实现大于 220 MPa 的超高压喷射;当采用一定的控制策略,通过调整喷油器和电控增压器中的电磁阀开启和关闭时序后,能够实现可变喷油规律喷射。
- 2) 靴形喷油规律下,喷油压力较大有利于缸内燃油和空气的混合,提升燃油雾化效果,降低 Soot 排放,并且可以缩短燃烧滞燃期和持续期,促进缸内燃烧过程的进行。
- 3) 随着喷油规律由矩形变为斜坡形再转变为靴形,生物柴油发动机缸压和缸温最高值逐渐降低,

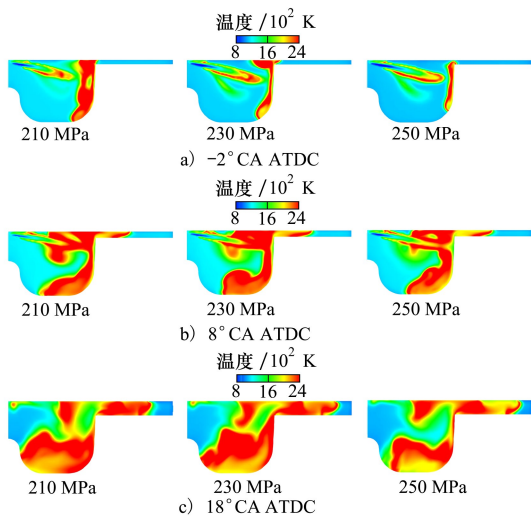


图 19 不同喷油规律温度场分布

缸内油气混合效果更好,燃烧更充分,并且 NO_x 生成量下降 42.8%,而 Soot 生成量仅上升 1.8%。结果

表明靴形喷油规律下生物柴油发动机的燃烧排放特性更优。

参考文献:

- [1] 沈娟亚, 霍金禄, 潘耕龙, 等. 点燃式氨氢燃料发动机燃烧与排放模拟研究[J]. 内燃机工程, 2024, 45(3): 39-49
SHEN Juanya, HUO Jinlu, PAN Genglong, et al. Numerical study on combustion and emissions of a spark-ignition engine fueled with ammonia/hydrogen blends[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2024, 45(3): 39-49 (in Chinese)
- [2] SILAMBARASAN R, RATCHAGARAJA D, SIVAKUMAR J, et al. Effect of injection timing on combustion, emission and performance characteristics of safflower methyl ester in CI engine[J]. Results in Engineering, 2023, 20: 101599-101615
- [3] 黄福军, 孔文俊. 掺氢对自由活塞发动机性能及排放的影响研究[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(11): 3016-3022
HUANG Fujun, KONG Wenjun. Effect of hydrogen addition on the operating and emission characteristics of a free piston linear engine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(11): 3016-3022 (in Chinese)
- [4] SAMUEL T, RAMAYYA V A, RAJENDIRAN G, et al. Emission and performance analysis of diesel engine running with CO_2 nanoparticle additive blended into castor oil biodiesel as a substitute fuel[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 7634-7654
- [5] 董振宇. 生物柴油燃烧积炭形成机制研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023
DONG Zhenyu. Study on the formation mechanism of carbon accumulation in biodiesel combustion[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023 (in Chinese)
- [6] 刘宇, 王向阳, 李兴华, 等. 喷油压力与喷孔参数对柴油机性能协同影响的仿真研究[J]. 车用发动机, 2023, 2: 11-17
LIU Yu, WANG Xiangyang, LI Xinghua, et al. Simulation of synergistic effect of injection pressure and injection hole parameters on diesel engine performance[J]. Vehicle Engine, 2023, 2: 11-17 (in Chinese)
- [7] SONACHALAM M, JAYAPRAKASH R, MANIENIYAN V, et al. Impact of injection pressure on a dual-fuel engine using acetylene gas and microalgae blends of *Chlorella protothecoides* [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 60: 104653-104673
- [8] KE C, CHANGWEI J, SHUOFENG W, et al. Numerical investigation of the combined effect of injection angle and injection pressure in a gasoline direct injection rotary engine[J]. Energy, 2022, 254: 124371-124388
- [9] 刘琦, 刘云生, 陈新传, 等. 超高压喷射条件下非常态燃油缸内喷雾特性[J]. 中南大学学报, 2019, 50(2): 480-486
LIU Qi, LIU Yunsheng, CHEN Xinzhuang, et al. Spray characteristics of non-normal fuel in-cylinder under condition of super-high pressure injection[J]. Journal of Central South University, 2019, 50(2): 480-486 (in Chinese)
- [10] 周磊. 面向可调喷油规律的超高压共轨系统实现及其特性研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2018
ZHOU Lei. Realization and characteristics research of ultra high pressure common rail system for adjustable fuel injection law [D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2018 (in Chinese)
- [11] 赵礼飞, 祝先标, 王云鹏. 生物柴油/柴油混合燃料燃烧与排放特性的试验研究[J]. 内燃机, 2023, 39(6): 6-15
ZHAO Lifei, ZHU Xianbiao, WANG Yunpeng. Experimental study on the combustion and emission characteristics of biodiesel/diesel blended fuel[J]. Internal Combustion Engines, 2023, 39(6): 6-15 (in Chinese)
- [12] AHMET U. Experimental evaluation of linseed oil biodiesel/diesel fuel blends on combustion, performance and emission characteristics in a DI diesel engine[J]. Fuel, 2020, 267: 117150-117168
- [13] 熊彪, 杨昆, 赵建华, 等. 靴形喷射耦合喷油参数对生物柴油发动机燃烧排放性能的影响[J]. 海军工程大学学报, 2022, 34(6): 48-54
XIONG Biao, YANG Kun, ZHAO Jianhua, et al. Influence of saddle-shaped injection coupled fuel injection parameters on diesel engine combustion and emission performance[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2022, 34(6): 48-54 (in Chinese)
- [14] REDDY A A, MALLIKARJUNA J M. Parametric study on a gasoline direct injection engine-A CFD analysis[C]//Symposium on International Automotive Technology, 2017
- [15] 张镇信. 基于 CONVERGE 软件对某柴油机喷油器的研究分析[D]. 大连: 大连交通大学, 2023
ZHANG Zhenxin. Research and analysis of a diesel engine injector based on CONVERGE software[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2023 (in Chinese)

Study on influence of fuel injection parameters on combustion and emission characteristics of biodiesel engine

ZHOU Lei, YANG Kun, ZHANG Ping, ZHAO Jianhua, NIE Tao

(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Based on the dual solenoid valve control strategy of ultra-high pressure fuel injection device to achieve ultra-high pressure and variable law injection, a simulation model of the combustion process of biodiesel engine was established, and the model was modified and verified by experimental data. Then, the influence of the combustion and emission performance of biodiesel engine on the injection characteristics (injection pressure and injection law) was studied. The results indicate that when a certain control strategy is adopted to adjust the opening and closing timing of the solenoid valves in the fuel injector and electronic supercharger, ultra-high pressure and variable injection law can be achieved. Under the saddle-shaped fuel injection law, a higher injection pressure is beneficial for the mixing of fuel and air in the cylinder, which can improve fuel atomization and reducing soot emissions. When the fuel injection law changes from rectangular shape to sloping shape, and then to saddle-shaped, the maximum cylinder pressure and cylinder temperature of the biodiesel engine gradually decrease, resulting in better fuel air mixing and more complete combustion, additionally the NO_x generation decreases by 42.8% while the soot generation only increases by 1.8%.

Keywords: biodiesel engine; injection pressure; injection law; combustion and emission

引用格式:周磊, 杨昆, 张萍, 等. 燃油喷射参数对生物柴油发动机燃烧与排放特性影响研究[J]. 西北工业大学学报, 2025, 43(4): 794-801
ZHOU Lei, YANG Kun, ZHANG Ping, et al. Study on influence of fuel injection parameters on combustion and emission characteristics of biodiesel engine[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2025, 43(4): 794-801 (in Chinese)