

起动过程中喷油规律对汽油/生物柴油 RCCI 发动机性能的影响

罗义豪¹, 谭玉松¹, 陈海富¹, 王伟发², 李晶^{3*}, 杨文明⁴

1. 国能(清远)清洁能源有限公司, 广东 清远 511500; 2. 深圳市怡昌动力技术有限公司, 广东 深圳 518109;
3. 南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816; 4. 新加坡国立大学机械工程系, 新加坡 117576

摘要:基于三维数值模拟方法, 仿真分析起动过程中喷油规律曲线的靴形长度和进气温度对汽油/生物柴油反应活性控制压燃(reactivity controlled compression ignition, RCCI)发动机燃烧及排放特性的影响规律。结果表明:增大喷油规律中的靴形长度可提高喷油后期的喷射速率, 促进生物柴油的雾化和混合, 进而提高缸内压力、热释放率峰值、指示平均有效压力, 减少 CO 排放, 但导致 NO 排放增加; 当进气温度较低时, 可采用长靴形的喷油规律曲线形状, 提高燃烧效率, 以防失火; 较高的进气温度有助于改善燃烧稳定性, 减弱喷油规律曲线形状对燃烧过程的作用, 并显著降低 CO 排放。

关键词:汽油; 生物柴油; RCCI 发动机; 喷油规律曲线形状; 起动过程

中图分类号:TK464

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)05-0038-08

引用格式:罗义豪, 谭玉松, 陈海富, 等. 起动过程中喷油规律对汽油/生物柴油 RCCI 发动机性能的影响[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(5): 38-45.

LUO Yihao, TAN Yusong, CHEN Haifu, et al. Effect of fuel injection rate on the performance of a gasoline/biodiesel RCCI engine during the starting process[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(5): 38-45.

0 引言

柴油发电机组作为重要的能源供应设备, 广泛应用于移动电源车、应急备用电源和微电网系统等领域^[1]。柴油发电机组具有起动迅速、运行可靠等优点, 常作为大型燃气轮机黑起动电源^[2]。在此类应急供电领域, 柴油机的起动性能直接影响燃气轮机黑起动的成功率, 因此保证柴油机在起动时的燃烧稳定性具有重要意义^[3]。

柴油机燃烧过程中产生大量 NO_x 和碳烟排放, 且不可避免地产生二氧化碳排放。面对日益严峻的能源短缺和环境污染问题, 需要在开发先进柴油机燃烧技术的同时寻求替代燃料。汽油/柴油反应活性控制压燃(reactivity controlled compression ignition, RCCI)是一种先进的柴油机燃烧技术, 能够同时降低 NO_x 和碳烟排放, 且热效率高于传统柴油机^[4]。由于生物柴油具有生命周期内的零碳排放特性, 用其替代汽油/柴油 RCCI 发动机中的柴油^[5], 有助于进一步降低碳排放。将汽油/生物柴油 RCCI 发动机应用于发电领域, 有助于提高发电设备的经济环保性^[6]。

虽然生物柴油具有可再生性, 但其黏度、密度和表面张力较高^[7], 不利于雾化, 影响发动机起动过程

收稿日期: 2025-08-20

基金项目: 国家能源集团广东电力有限公司科技创新项目(GDGS-25-05)

第一作者简介: 罗义豪(1982—), 男, 河南南阳人, 工程师, 主要研究方向为火电厂热能与动力, E-mail: 16100189@ceic.com。

*通信作者简介: 李晶(1988—), 女, 河南沁阳人, 工学博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为发动机建模和优化, E-mail: jingli@njtech.edu.cn。

中的燃烧稳定性。通过优化喷射策略可以改善生物柴油的雾化特性,如多次喷射^[8]、调整喷射正时^[9]、改变喷油规律曲线形状^[10]等。Xu 等^[11]在冷起动条件下研究了汽油/生物柴油 RCCI 发动机的多次喷射策略,并在不同喷射正时下进行了对比分析,最终确定冷起动阶段采用主喷射燃油占 30%、预喷射燃油占 70%的方案。

进气温度是影响发动机起动的关键因素之一^[12]。Liu 等^[13]研究了进气温度对双燃料发动机燃烧和排放特性的影响,发现提高进气温度可以改善燃烧稳定性。

发动机起动初期,缸内壁面温度和进气温度较低,不利于燃烧过程的稳定进行^[14]。本文中以一台汽油/生物柴油 RCCI 发动机为研究对象,在转速为 1 400 r/min 时,通过调整喷油规律曲线形状和进气温度,系统研究喷油规律曲线的靴形长度和进气温度对发动机性能的影响,为改善汽油/生物柴油 RCCI 发动机起动时的燃烧与排放特性提供参考。

1 建模及方案设计

1.1 数值模型构建及验证

本文中以一台单缸汽油/生物柴油双燃料发动机为研究对象,其主要技术参数如表 1^[15]所示。该双燃料发动机由一台四缸柴油机改造而成,汽油通过进气道喷射进入气缸,生物柴油采用直喷方式供给。汽油和生物柴油的燃料性质如表 2 所示。发动机喷油压力、喷油持续时间等参数可通过开放电子控制单元进行调节。

表 1 双燃料发动机主要技术参数

缸径/mm	行程/mm	排量/L	压缩比	汽油喷射压力/MPa	生物柴油喷射压力/MPa	喷油器孔数
83.1	92	0.5	16.7	0.2~0.3	40~180	7

表 2 燃料性质

燃料类型	低热值/(MJ·kg ⁻¹)	十六烷值	研究法辛烷值	黏度 ^① /(mm ² ·s ⁻¹)	密度 ^① /(kg·m ⁻³)
汽油	43.5		94.0		753.0
生物柴油	38.3	61.7		7.2	871.4

①温度为 20 ℃。

基于 KIVA-CHEMKIN 耦合仿真软件建立该双燃料发动机的三维数值模型,其中计算流体动力学仿真软件 KIVA 用于求解发动机内的流动、喷雾、燃烧及污染物生成过程,化学反应动力学软件 CHEMKIN 用于耦合详细的化学反应机理^[16],提高汽油/生物柴油双燃料燃烧过程模拟的准确性。选用的多组分化学反应机理由 Li 等^[17]开发,其中异辛烷用于表征汽油,癸酸甲酯、9-癸烯酸甲酯和正庚烷的混合物用于表征生物柴油。采用 KH-RT 模型模拟燃油喷雾过程,RNG $k-\varepsilon$ 模型模拟缸内湍流流动。

为了降低计算成本,根据喷油器孔数和燃烧室几何结构的对称性,构建一个角度为 51.43°(360°/7)的扇形网格作为计算区域,上止点处双燃料发动机网格模型如图 1 所示。

用于验证数值模型可靠性的工况如表 3 所示,两个工况的指示平均有效压力(indicated mean effective pressure, IMEP)均为 300 kPa。

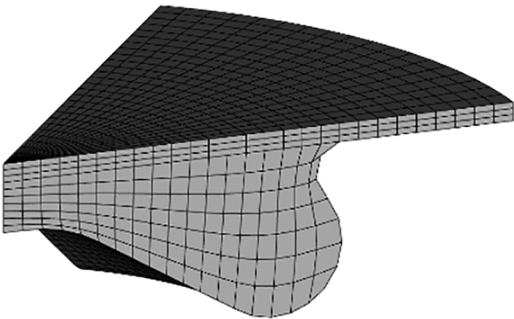


图 1 上止点处双燃料发动机网格模型

表 3 汽油/生物柴油双燃料发动机验证工况

工况	转速/(r·min ⁻¹)	喷射正时 ^③ / (°)	喷油持续期/ μ s	汽油油耗/(kg·h ⁻¹)	生物柴油油耗/(kg·h ⁻¹)	初始压力/kPa
1 ^①	1 400	-7	405	0	0.45	110
2 ^②	1 400	-9	330	0.24	0.26	110

①工况 1 为纯生物柴油模式。
②工况 2 为汽油/生物柴油双燃料模式,汽油预混能量比(汽油热值与总燃料热值的比)为 51%。
③喷油正时对应的曲轴转角为上止点后曲轴转角。

不同工况下缸内压力和热释放率(heat release rate, HRR)的仿真计算结果与试验结果对比如图 2、3 所示,图中曲轴转角为上止点后曲轴转角。

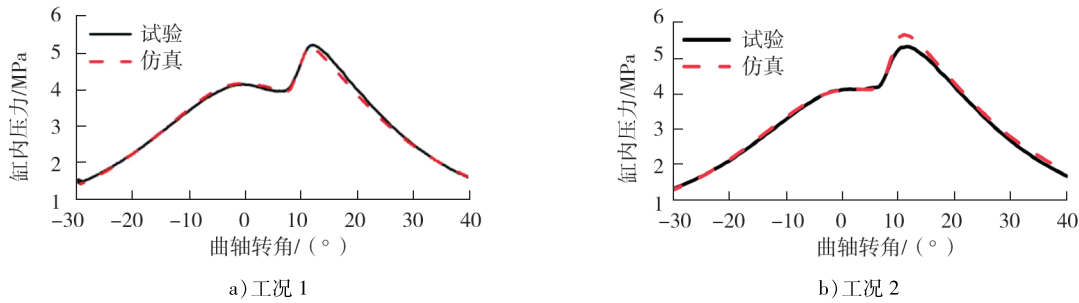


图 2 不同工况下仿真计算的缸内压力和试验结果对比

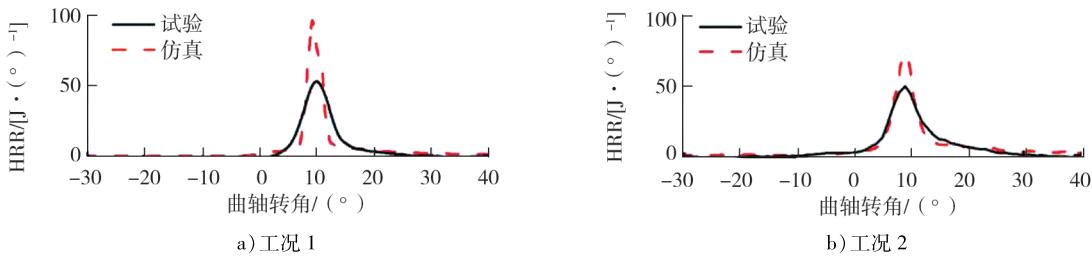


图 3 不同工况下仿真计算的 HRR 和试验结果对比

由图 2、3 可知:在纯生物柴油模式和汽油-生物柴油双燃料模式下,仿真计算的缸压曲线与试验结果较为吻合,仿真计算的 HRR 峰值均高于试验值,这主要是由于该模型假设预混汽油与空气在气缸内充分预混,实际燃烧过程存在局部富燃或稀燃混合等现象。总体而言,构建的模型能够较好地再现缸内燃烧过程,证明了该模型具有较高的可靠性。

1.2 方案设计

在验证工况基础上,将汽油预混能量比设为 50%,喷油正时提前至上止点前曲轴转角 35°以实现 RCCI 燃烧模式。为模拟发动机起动过程,将发动机壁温边界条件设置为 333 K,进气温度分别设置为 340、360 K。为研究喷油规律曲线中靴形长度对发动机性能的影响,设计长、中、短 3 种靴形长度,且 3 种方案下生物柴油喷油量一致。喷油规律曲线形状设计如图 4 所示。

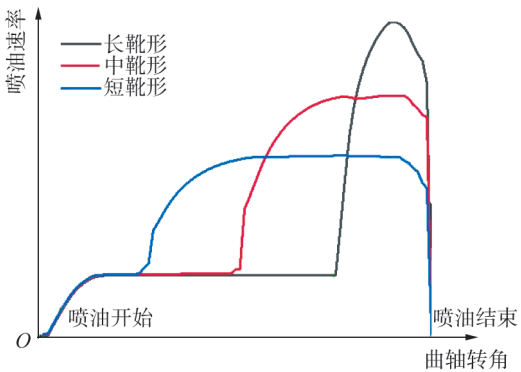


图 4 喷油规律曲线形状设计

2 结果与讨论

2.1 缸内压力和热释放率

不同喷油规律曲线形状在不同进气温度的缸内压力和 HRR 曲线如图 5 所示。

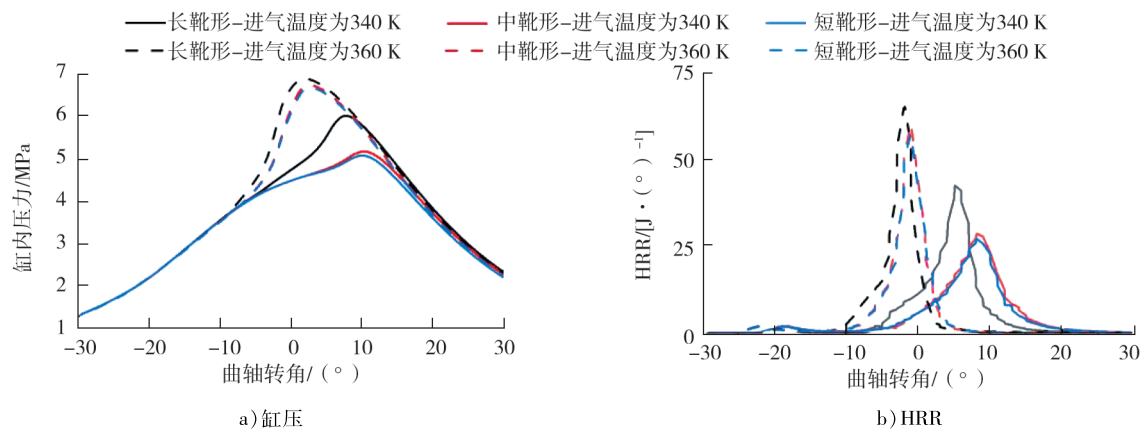


图 5 不同喷油规律曲线形状在不同进气温度下的缸内压力和 HRR 曲线

由图 5 可知:不同进气温度下,缸压峰值均与喷油后期的喷射速率正相关,即后期生物柴油喷射速率越快,缸压峰值越大。这是由于加快喷射速率能够更好地促进生物柴油与预混汽油/空气混合气的混合,从而提高燃烧效率。当进气温度为 340 K 时,喷油规律曲线为长靴形时的缸压和 HRR 峰值明显高于其它两种喷油规律曲线。由此可知:当起动发动机时,若进气温度偏低,应采用长靴形喷油规律曲线,以防发动机失火。

当进气温度升高至 360 K 时,着火点前移,缸压和 HRR 峰值均增大,这一现象可能由两方面原因造成:1) 进气温度升高能够使预混燃料具有更高的热能,更容易达到自燃温度,从而缩短着火延迟;2) 较高的进气温度有利于生物柴油雾化,促进其与预混汽油更快地混合,进而提高燃烧效率^[18]。

随着进气温度升高,3 种靴形喷油规律曲线下的缸压差异减小,但长靴形喷油规律曲线对应的缸压峰值仍最大,其次为中靴形,短靴形最小。这表明提高进气温度不仅有利于发动机着火,还会减弱靴形长度对燃烧过程的影响。

2.2 燃烧相位

不同进气温度下靴形长度对滞燃期和燃烧持续期的影响如表 4 所示。由表 4 可知:1) 进气温度较低时,长靴形喷油规律的滞燃期明显短于中靴形和短靴形,主要是由于长靴形有利于生物柴油的雾化和燃烧;中靴形和短靴形喷油规律的滞燃期几乎相同;当进气温度升高至 360 K 时,由于高温促进了燃料着火,滞燃期显著缩短,靴形长度对滞燃期的影响明显减弱。2) 升高进气温度能够提高燃料雾化效果和燃烧速率,显著缩短燃烧持续期。在不同进气温度下,长靴形喷油规律的燃烧持续期略低于中靴形和短靴形,这与其喷油方式能够改善生物柴油雾化效果密切相关。

表 4 不同进气温度下靴形长度对滞燃期和燃烧持续期的影响

喷油规律曲线	滞燃期/(°)		燃烧持续期/(°)	
	进气温度为 340 K	进气温度为 360 K	进气温度为 340 K	进气温度为 360 K
长靴形	14. 82	10. 05	28. 92	25. 21
中靴形	18. 88	9. 99	29. 60	26. 35
短靴形	18. 66	10. 17	29. 44	26. 47

2.3 压力升高率

不同进气温度下靴形长度对最大压力升高率的影响如表 5 所示。由表 5 可知:1) 进气温度为 340 K 时,长靴形喷油规律对应的最大压力升高率显著高于中靴形和短靴形,中靴形与短靴形的最大压力升高率差异不大。这主要是由于长靴形有利于生物柴油的快速雾化和燃烧,缸压上升速率更快。2) 当进气温度升高至 360 K 时,高温条件进一步促进了燃烧,缸压上升速率明显加快,使最大压力升高率显著提高。

此时,靴形长度对最大压力升高率的影响趋势与低温条件下保持一致。

2.4 IMEP

不同进气温度下靴形长度对 IMEP 的影响如表 6 所示。由表 6 可知:1)IMEP 随靴形长度的增加而升高。IMEP 反映发动机的做功能力,缸压峰值越高,做功能力越强,因此,IMEP 也与喷油规律曲线后期的喷射速率正相关。2)喷油规律曲线为中靴形和短靴形时,进气温度为 360 K 时的 IMEP 高于 340 K 时,原因也可以从缸压峰值结果推断得出;采用长靴形喷油规律曲线时,进气温度为 360 K 时的 IMEP 略低于 340 K 时,主要原因在于高进气温度导致着火过早,产生一定的负功损失,使 IMEP 略低于低温条件。该结果进一步表明,当进气温度为 340 K 时,采用长靴形喷油规律曲线能够实现良好的着火和做功能力。

2.5 NO 和 CO 排放

不同进气温度下靴形长度对 NO 和 CO 排放的影响如表 7 所示。由表 7 可知:在 340 K 和 360 K 的进气温度条件下,CO 排放随着靴形长度的增加而减少,NO 排放随着靴形长度的增加而增大。

表 5 不同进气温度下靴形长度对压力升高率的影响

喷油规律曲线	压力升高率/[kPa·(°) ⁻¹]	
	进气温度为 340 K	进气温度为 360 K
长靴形	2.73	6.55
中靴形	1.06	5.19
短靴形	0.94	4.93

表 6 不同进气温度下靴形长度对 IMEP 的影响

喷油规律曲线	IMEP/kPa	
	进气温度为 340 K	进气温度为 360 K
长靴形	286	282
中靴形	256	267
短靴形	234	263

表 7 不同进气温度下靴形长度对 NO、CO 排放的影响

喷油规律曲线	NO 体积分数/10 ⁻⁶		CO 体积分数/10 ⁻⁶	
	进气温度为 340 K	进气温度为 360 K	进气温度为 340 K	进气温度为 360 K
长靴形	0.013	1.38	728.7	19.4
中靴形	0.003	0.15	2 487.1	46.8
短靴形	0.002	0.12	2 691.8	87.0

上止点后曲轴转角 35°时不同进气温度、喷油规律下的缸内温度、CO 和 NO 排放的分布如图 6~8 所示。

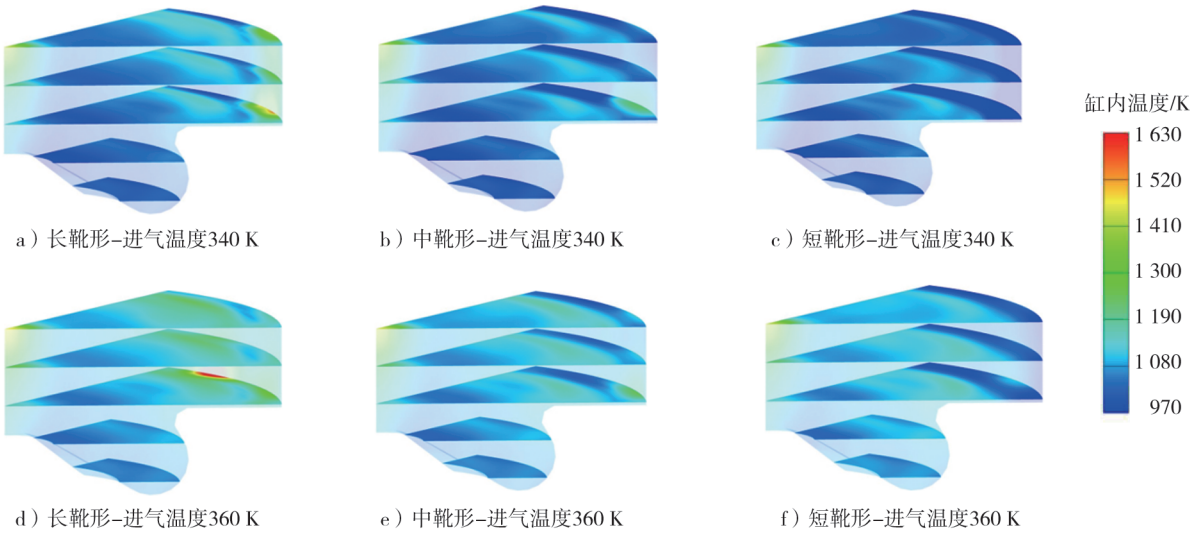
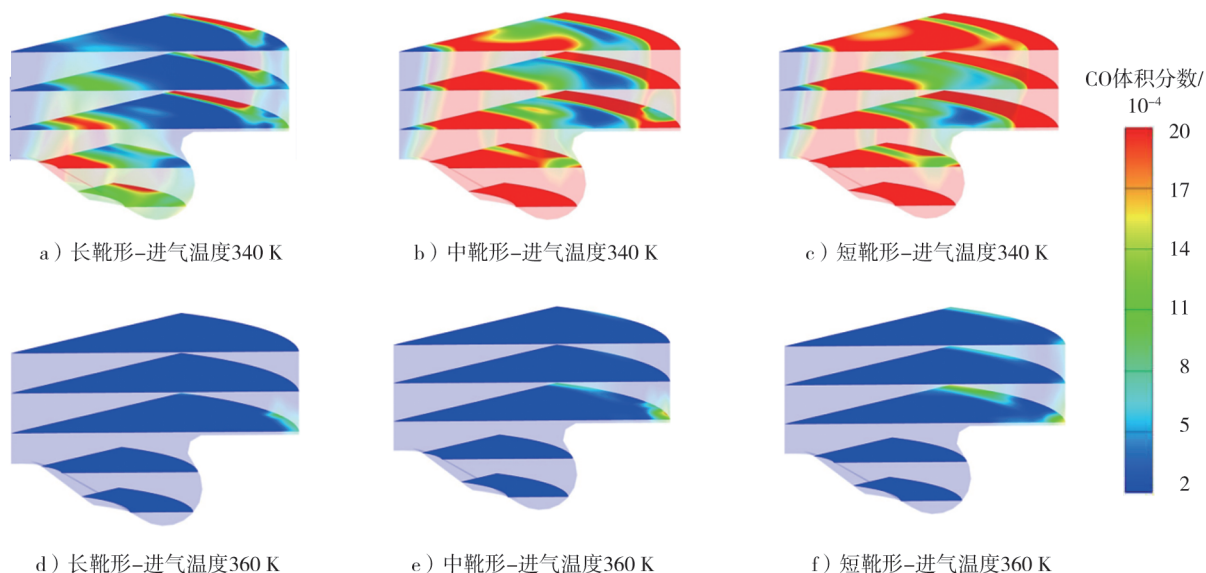
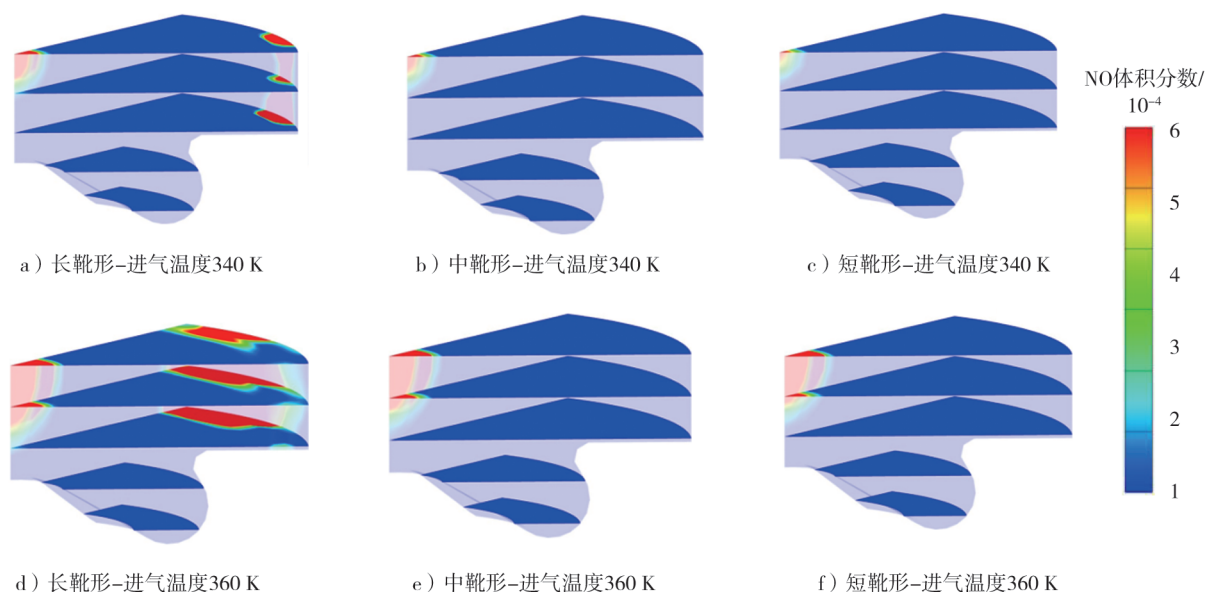


图 6 上止点后曲轴转角 35°时,不同进气温度、喷油规律曲线下的缸内温度分布

图7 上止点后曲轴转角 35° 时,不同进气温度、喷油规律曲线下的缸内 CO 分布图8 上止点后曲轴转角 35° 时,不同进气温度、喷油规律曲线下的 NO 分布

由图6~8可知:1)长靴形喷油规律曲线对应的缸内温度最高,其次是中靴形,最低的是短靴形;2)由于发动机中NO排放主要来源于热力型NO,其生成量与缸内燃烧温度呈正相关,由于长靴形喷油规律曲线有利于生物柴油的雾化和混合,缸内燃烧温度最高,因此生成的NO最多;3)发动机中的CO是不完全燃烧的产物,靴形越短,其后期的生物柴油喷射速率越低,不利于生物柴油的雾化及其与汽油的混合,进而导致燃烧不完全,生成了更多的CO。

进气温度分别为340、360 K时的NO和CO排放相差非常大;进气温度为340 K时,缸内燃烧温度更低,生成的热力型NO非常少;与此同时,生物柴油在低温下蒸发速度慢,不利于喷雾过程,汽油和生物柴油难以充分混合,导致燃烧不完全,生成更多CO,CO广泛分布于气缸内;进气温度升到360 K时,缓解了生物柴油难以充分雾化的问题,提高了燃烧效率和燃烧温度,进而减少了CO排放,但导致更多的热力型NO生成。

3 结论

1) 在保持生物柴油喷油量不变的前提下,随着靴形长度增加,喷油后期的喷射速率升高,有利于生物柴油雾化并与预混汽油进行更充分混合,使着火提前,缸内压力和 HRR 峰值提高,IMEP 增加且 CO 排放减少,但 NO 排放有所上升。

2) 较低进气温度下,缸内压力和 HRR 峰值均低于进气温度较高时,且 CO 排放显著增加,NO 排放极低。采用长靴形喷油规律曲线时,进气温度较低时的 IMEP 高于进气温度较高时。

3) 起动阶段采用长靴形喷油规律曲线有助于保证低进气温度条件下的顺利着火和较高的 IMEP;同时,提高进气温度能够改善燃烧稳定性,并显著降低 CO 排放。

参考文献:

- [1] 王大健,于笑,李晶. 正辛醇柴油机发电的喷射策略优化研究[J]. 电力科技与环保,2022,38(4):307-316.
- [2] 魏家柱. 不同支撑电源下 9F 级燃机黑启动方案与技术分析[J]. 电工电气,2024(8):21-25.
- [3] 吕恩雨,余磊,朱波,等. 低温环境下柴油机冷起动机性能试验研究[J]. 内燃机与动力装置,2024,41(1):23-29.
- [4] KOKJOHN S L, MUSCULUS M P B, REITZ R D. Evaluating temperature and fuel stratification for heat-release rate control in a reactivity-controlled compression-ignition engine using optical diagnostics and chemical kinetics modeling [J]. Combustion and Flame,2015,162(6):2729-2742.
- [5] 刘旭,钟汶君,姜鹏,等. 乙醇汽油/加氢催化生物柴油双燃料发动机着火燃烧及碳烟生成特性研究[J]. 工程热物理学报,2022,43(8):2143-2151.
- [6] AYDIN H. An innovative research on variable compression ratio in RCCI strategy on a power generator diesel engine using CNG-safflower biodiesel[J]. Energy,2021,231:121002.
- [7] HOANG A T. Prediction of the density and viscosity of biodiesel and the influence of biodiesel properties on a diesel engine fuel supply system[J]. Journal of Marine Engineering & Technology,2021,20(5):299-311.
- [8] 孙梦婷,成晓北,王兆文,等. 后喷射策略下生物柴油对发动机燃烧和排放影响的数值模拟[J]. 内燃机工程,2017,38(4):14-19.
- [9] 曹礼轩,王谦,钟汶君,等. 冷态下喷油策略对双燃料发动机燃烧特性影响的可视化研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2023,37(3):138-146.
- [10] 朱浩月,王春海,方俊华,等. 生物柴油高压共轨喷油规律与喷雾特性的试验研究[J]. 内燃机工程,2013,34(增刊1):9-12.
- [11] XU M,JIANG P,ZHONG W J, et al. An optical investigation on the effects of split-injection on hydrogenated catalytic biodiesel/gasoline dual-fuel engine under cold start conditions[J]. Applied Thermal Engineering,2024,236:121707.
- [12] 朱海荣,张凯伦,刘晓阳,等. 柴油机低温启动过程关键影响参数研究[J]. 河北科技大学学报,2024,45(3):243-251.
- [13] LIU X,WANG Q,ZHONG W J, et al. An optical investigation of the effects of diesel injection pressure and intake air temperature in an ammonia-diesel dual-fuel engine under low-load conditions[J]. Applied Thermal Engineering,2025,261:125174.
- [14] LI J,YU X,XIE J C, et al. Mitigation of high pressure rise rate by varying IVC timing and EGR rate in an RCCI engine with high premixed fuel ratio[J]. Energy,2020,192:116659.
- [15] YU C,WANG J X, YU W B, et al. Research on low temperature combustion of homogeneous charge induced ignition (HCCI) in a light-duty diesel engine[C]//Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress. Berlin, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg,2013:195-204.
- [16] 叶映,吴朝晖,刘海峰,等. 双燃料低速船机火焰发展和污染物生成机理[J]. 内燃机学报,2022,40(1):1-9.
- [17] LI J,YANG W M,AN H, et al. Numerical investigation on the effect of reactivity gradient in an RCCI engine fueled with gasoline and diesel[J]. Energy Conversion and Management,2015,92:342-352.
- [18] 姜晨旭. 基于燃料理化特性与燃烧技术协同控制的汽油压缩着火燃烧的试验研究[D]. 上海:上海交通大学,2019.

Effect of fuel injection rate on the performance of a gasoline/biodiesel RCCI engine during the starting process

LUO Yihao¹, TAN Yusong¹, CHEN Haifu¹, WANG Weifa², LI Jing^{3*}, YANG Wenming⁴

1. Guoneng (Qingyuan) Clean Energy Co., Ltd., Qingyuan 511500, China;

2. Shenzhen Yicheong Power Co., Ltd., Shenzhen 518109, China;

3. School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

4. Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, Singapore 117576, Singapore

Abstract: Based on three-dimensional numerical simulations, the effects of injection rate shapes with different boot lengths and intake temperatures on the combustion and emission characteristics of a gasoline/biodiesel reactivity controlled compression ignition (RCCI) engine during the starting process are investigated. The results indicate that increasing the boot length increases the late-stage injection rate promotes the atomization and mixing of biodiesel, thereby increases in-cylinder pressure, peak heat release rate, and indicates mean effective pressure while reduces CO emissions, which leads to increased NO emissions. Under the low intake temperature condition, employing a long boot length can improve combustion efficiency and prevent misfire. A higher intake temperature helps improve combustion stability, mitigates the influence of injection rate shape, and significantly reduces CO emission.

Keywords: gasoline; biodiesel; RCCI engine; injection rate shape; starting process

(责任编辑:刘丽君)

(上接第 37 页)

method and signal analysis technology are used. By changing the operating state parameters such as diesel engine speed, torque and oil temperature and the cylinder clearance, the combustion pressure in the cylinder and the vibration acceleration signal of the body are measured. The vibration acceleration signals are decomposed into 16 frequency bands using wavelet packet decomposition (WPD), and the energy distribution of each band is compared with the cylinder pressure signals. The study identifies the variation patterns of wavelet packet energy distribution under different influencing factors and determines the frequency bands sensitive to combustion state and piston slap. The results indicate that: As engine speed increases, the reciprocating inertia force of the piston rises. When the speed increases from 1 000 r/min to 1 600 r/min, the energy of frequency band 16 increases by 3.55 times. With increasing torque, the energy of all frequency bands shows an upward trend. As oil temperature rises, most frequency bands exhibit no significant energy variation, but bands 15 and 16 still demonstrate an increasing trend. With larger piston-to-cylinder clearance, the energy of bands 6, 7, 8, 10, 15, and 16 increases significantly.

Keywords: engine block vibration signal; wavelet packet decomposition; operating condition; piston-liner clearance

(责任编辑:刘丽君)