

基于双直喷策略的低负荷下活性控制 压燃燃烧特性的数值研究

康佳明, 王 谦, 相英杰, 李子烨

(江苏大学 能源与动力工程学院, 镇江 212013)

Numerical Study on Reactivity Controlled Compression Ignition Combustion Characteristics with Dual-Direct Injection at Low Loads

KANG Jiaming, WANG Qian, XIANG Yingjie, LI Ziye

(School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Numerical simulation of second generation biodiesel/gasoline reactivity controlled compression ignition(RCCI) combustion mode with dual-direct injection strategy at low loads was carried out based on the fluid simulation software CONVERGE. The combustion characteristics of RCCI with dual-direct injection and RCCI with conventional intake port injection were compared, and the effect of dual fuel injection timings on combustion was discussed. The results show that compared with the conventional intake port gasoline injection RCCI, the dual-direct injection RCCI can effectively control the distribution of in-cylinder gasoline mixture and reduce incomplete combustion. With the delay of start of injection(SOI) of gasoline, stratified combustion weakens, combustion duration shortens, combustion efficiency is reduced, indicated thermal efficiency declines first and then increases and finally decreases again, NO_x emissions is reduced and soot emissions increases. With the delay of SOI of the second generation biodiesel, stratified combustion intensifies, combustion duration is prolonged, combustion efficiency increases, indicated thermal efficiency increases first and then decreases, NO_x emissions rise and soot emissions fall.

摘要: 采用流体仿真软件 CONVERGE 开展了基于双直喷策略的低负荷工况下二代生物柴油/汽油活性控制压燃(reactivity controlled compression ignition, RCCI)燃烧模式的数值模拟研究,对比了常规进气道喷射汽油 RCCI 和双直喷 RCCI 的燃烧特性,并探讨了双燃料喷射时刻对双直喷 RCCI 燃烧的影响。结果表明:相比常规进气道喷射汽油 RCCI,双直喷 RCCI 能够有效控制缸内汽油混合气分布,改善不完全燃烧现象;随着汽油直喷时刻的推迟,分层燃烧减弱,燃烧持续期缩短,燃烧效率降低,热效率先减小再增大后又减小, NO_x 排放减少而碳烟排放增加;随着二代生物柴油喷射时刻的推迟,分层燃烧加剧,燃烧持续期延长,燃烧效率升高,热效率先增大而后减小, NO_x 排放增加而碳烟排放减少。

关键词: 活性控制压燃;双直喷策略;二代生物柴油;低负荷;燃烧特性;排放

Key words: reactivity controlled compression ignition (RCCI); dual direct injection strategy; second generation biodiesel; low load; combustion characteristics; emission

DOI: 10. 13949/j. cnki. nrjgc. 2020. 03. 003

中图分类号: TK421

收稿日期: 2019-08-10

修回日期: 2019-09-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51876083)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China(51876083)

作者简介: 康佳明(1993—),男,硕士生,主要研究方向为活性控制压燃燃烧方式, E-mail: kangjiaming1993@outlook. com;

王 谦(通信作者), E-mail: qwang@ujs. edu. cn.

0 概述

随着汽车产业高速发展带来的能源短缺和环境污染等问题的加剧,活性控制压燃(reactivity controlled compression ignition, RCCI)作为清洁高效的新型内燃机燃烧方式应运而生^[1]。区别于传统柴油机,RCCI 发动机采用两种活性迥异的燃料,低活性燃料进气道喷射,高活性燃料缸内直喷,从而在缸内构建活性和当量比分层,燃烧过程沿着活性和当量比梯度进行^[2-3]。RCCI 发动机缸内混合气浓度较低,本质上属于低温预混燃烧,通过改变直喷燃油喷射时刻和预混燃油比例来控制缸内分层和燃烧相位,可以在中等负荷下保持较高热效率的同时避开 NO_x 和碳烟生成区域,实现几乎为零的 NO_x 和碳烟排放^[4-5]。但在高负荷下 RCCI 存在压力升高率过大和爆震的现象,而在低负荷下则会发生显著的不完全燃烧现象,因而载荷拓展问题成为制约 RCCI 实际应用的关键。

目前,针对低活性燃料进气道喷射的常规 RCCI 发动机高负荷下的燃烧优化,研究者们已经进行了诸多尝试^[6-8]。文献[9]中在一台单缸试验机上首先开展了双燃料缸内直喷耦合汽油进气道喷射策略对 RCCI 燃烧和排放特性的试验研究,继而文献[10]在试验基础上开展了数值模拟研究,讨论了汽油缸内直喷两段喷射时刻及比例的影响。其研究发现:提高汽油第一段喷射质量占比以将大部分汽油喷入挤流区域,剩余汽油通过第二段喷射喷入活塞凹坑内,能够显著降低燃烧速率;通过优化双燃料喷射时刻可以将指示平均有效压力拓展至 2.1 MPa。天津大学也开展了双直喷策略(同轴喷射策略)结合汽油进气道喷射拓展 RCCI 负荷上限的数值研究工作^[11],其结果也显示双直喷策略能够改善缸内混合气分层,在保证高热效率和低排放的前提下,拓展负荷上限。上述研究表明,RCCI 发动机中采用汽油直喷策略能够更有效地控制缸内浓度和活性分层,从而达到优化燃烧及排放的目的。

对于低负荷下 RCCI 燃烧而言,低活性燃料在着火前均匀分布于燃烧室内,混合气过于稀薄,燃烧温度低,因而出现显著的不完全燃烧现象,产生大量 HC 和 CO 排放^[7,12]。目前针对低负荷下 RCCI 燃烧优化的研究较少,主要是通过增大高活性燃料比例^[12]或者增大高活性燃油喷射提前角^[13]来改善燃烧效率,降低 HC 和 CO 排放,但会增加 NO_x 和碳烟排放。而双直喷策略能够有效控制缸内混合气分布,尤其是能够避免低活性燃料喷入挤流区域,从而改善燃烧效率,具有优化低负荷下 RCCI 燃烧性能

的潜力。

加氢催化生物柴油(hydrogenated catalytic biodiesel, HCB)为二代生物柴油,主要组分为 C15~C17 的正构烷烃,有超高的反应活性(十六烷值约为 103),具有改善发动机着火性能的潜力^[14-15]。本文以 HCB 作为高活性燃油,开展基于双直喷策略的 HCB/汽油低负荷工况下(指示平均有效压力约为 0.2 MPa)RCCI 燃烧的模拟研究工作,探讨了双燃料直喷时刻的影响,对于低负荷下 RCCI 燃烧特性的优化具有重要意义。

1 模型验证

双燃料同轴喷射器由加拿大西港创新公司研发,但因技术封锁等原因,本研究未能采用该种喷射器开展试验验证,因此采用常规柴油喷射器在一台重型柴油机上开展了低负荷下 HCB/汽油混合燃料缸内直喷的试验验证工作。文献[16]中的研究表明,HCB/汽油混合燃料燃烧反应的过程是 HCB 首先发生反应,随后汽油组分发生反应,与 RCCI 燃烧过程类似;同时 HCB/汽油混合燃料直喷所形成的混合气分布与本文所研究的双直喷工况也类似,因此该试验验证具有一定的可行性。燃油属性和发动机运行参数分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 燃油属性

项目	参数	
燃油	HCB	汽油
密度(20℃)/(kg·mm ⁻³)	780	700
黏度(20℃)/(mm ² ·s ⁻¹)	4.7	0.7
低热值/(MJ·kg ⁻¹)	44	43~45
十六烷值	103	15

表 2 发动机运行参数

项目	参数值
缸径/mm×行程/mm	114×130
几何压缩比	18.0
燃烧室形状	ω形
转速/(r·min ⁻¹)	1600
进气门关闭时刻/(°)	-145
排气门开启时刻/(°)	112
喷孔直径/mm	0.176
喷孔数目	7
喷雾夹角/(°)	130
喷射压力/MPa	60
喷射时刻/(°)	-7,-9,-11
指示平均有效压力/MPa	0.20±0.02
每循环燃油总能量/J	641
每循环汽油能量占比/%	80

试验发动机采用 7 孔喷油器,为节省计算时间,模拟计算区域为发动机燃烧室的 $1/7$,即 51.43° 的扇形燃烧室。燃烧室基础网格为 2 mm ,对燃烧过程中速度和温度梯度进行自适应网格加密,并对燃油喷射过程进行局部网格细化。上止点时燃烧室网格如图 1 所示。采用三维流动仿真软件 CONVERGE 开展数值模拟研究,计算中所设置的各项物理模型如表 3 所示。汽油的化学反应机理和物理性质均采用单组分异辛烷替代^[5]。正十六烷是 HCB 的主要成分之一,与 HCB 有着相近的低热值和十六烷值,因而采用正十六烷作为 HCB 化学反应替代物,而 HCB 的物理性质则使用正十五烷、正十六烷和正十七烷混合物替代。模拟采用的燃烧反应机理为文献[17]所发展的包含异辛烷和正十六烷组分的内燃机燃烧反应机理。

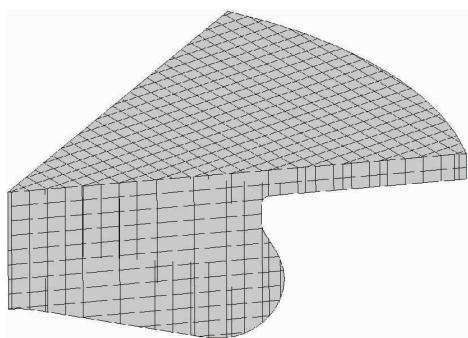


图 1 上止点时燃烧室网格示意图

表 3 计算中采用的物理模型

物理模型	模型名称
湍流模型	RNG $k-\epsilon$
喷雾破碎模型	KH-RT
碰撞模型	NTC Collision
液滴拖拽模型	Dynamic drop drag
撞壁模型	Wall film
燃烧模型	SAGE 详细化学动力学求解器
氮氧化物模型	扩展 Zeldovich 机理
碳烟生成模型	Hiroyasu 模型

本文开展了不同喷射时刻(start of injection, SOI)下的模型验证,验证结果如图 2 及图 3 所示,图中 SOI-7、SOI-9、SOI-11 分别表示喷射时刻为上止点前 7° 、上止点前 9° 、上止点前 11° 的工况。从整体上看,模拟结果的缸压和放热率与试验结果基本一致。尽管排放模拟结果在数值上与试验结果存在较大差异,但成功捕捉到了 NO_x 、CO 及 HC 排放随喷射时刻变化的趋势,验证了模型的可用性。由于缺少碳烟的试验数据故未展示其模型验证结果。

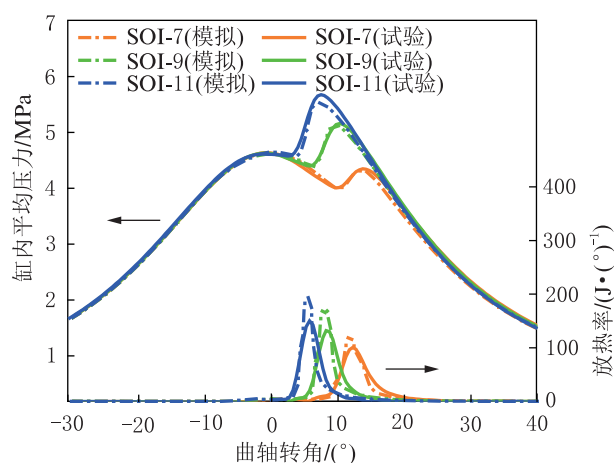
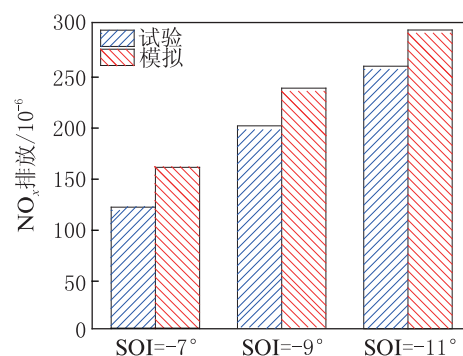
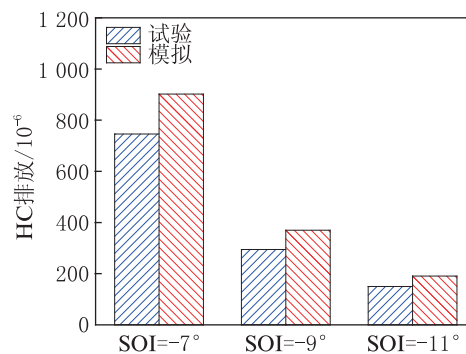


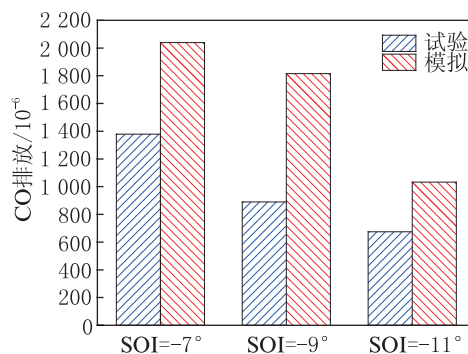
图 2 缸压和放热率模型验证结果



(a) NO_x 排放验证



(b) HC 排放验证



(c) CO 排放验证

图 3 NO_x 、HC 及 CO 排放验证结果

2 喷射方式

本文将在已验证的发动机模型上采用 HCB/汽油同轴喷射策略^[11]展开研究。为避免在较大的喷射提前角下燃油进入挤流区域,分别减小 HCB 和汽油喷孔锥角至 90° 和 70° ,喷射方式如图 4 所示。基于此喷射方式,在保持如表 3 所示的原机型其余各项基本参数不变的情况下,对比了低负荷工况下常规 RCCI 和双直喷 RCCI 燃烧特性,并开展了双燃料喷射时刻对燃烧特性影响的研究。

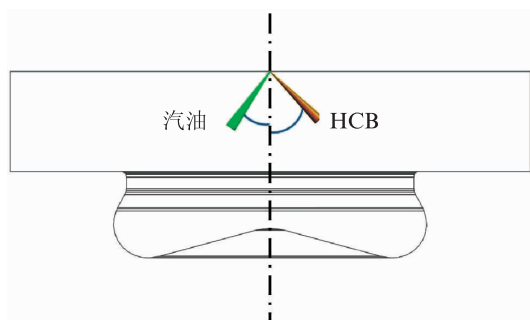


图 4 双燃料喷射方式示意图

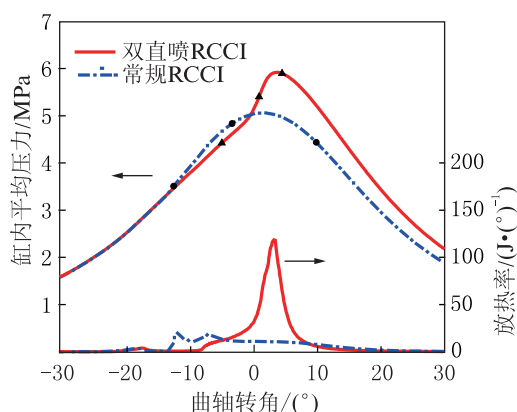
3 结果与讨论

3.1 燃烧特性对比

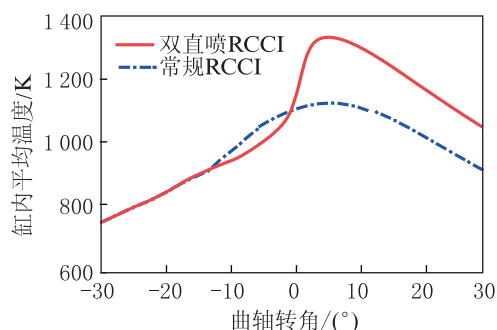
本节对比了低负荷下常规进气道喷射汽油预混合 RCCI 和双燃料缸内直喷 RCCI 的燃烧及排放特性。两种算例中 HCB 喷射时刻均为上止点前 25° , 记为 -25° , 依此类推。常规 RCCI 中假定汽油在进气门关闭时刻已均匀混合在缸内, 而双直喷 RCCI 中汽油通过缸内直喷进入燃烧室, 喷射时刻为上止点前 45° , 其余各初始条件均相同。

图 5 为两种 RCCI 模式的缸内压力、放热率及缸内平均燃烧温度的对比, 其中各缸压曲线上的 3 个点依次表示放热量达到总放热量 10%、50%、90% 时对应的曲轴转角, 依次记为 CA10、CA50 和 CA90。可以看出, 常规 RCCI 着火时刻相对提前, 而缸压峰值、放热率峰值及缸内平均温度均低于双直喷 RCCI。如图 6、图 7 所示, 常规 RCCI 的燃烧效率和热效率均低于双直喷 RCCI, 同时存在大量的未燃 HC 和 CO 排放, 表明在低负荷工况下常规 RCCI 存在着显著的不完全燃烧。

图 8 展示了两个算例中 HCB 喷射前 (-25° 曲轴转角时) 和 CA10 时刻缸内当量比的分布。在 HCB 喷射前, 常规 RCCI 缸内混合气分布均匀且当量比低, 而双直喷 RCCI 缸内混合气集中分布于活



(a) 常规RCCI和双直喷RCCI缸压及放热率对比



(b) 常规RCCI和双直喷RCCI缸压平均温度对比

图 5 低负荷工况下常规 RCCI 和双直喷 RCCI 缸压、放热率及缸内平均温度对比

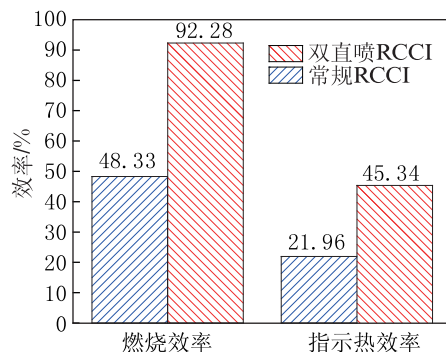


图 6 常规 RCCI 和双直喷 RCCI 燃烧效率及热效率对比

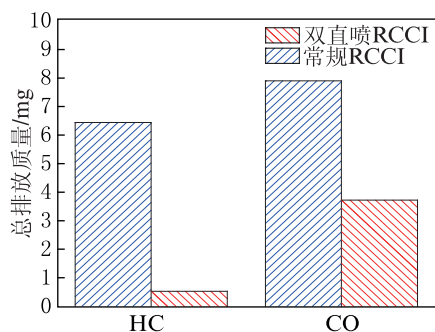


图 7 常规 RCCI 和双直喷 RCCI 的 HC 及 CO 排放对比

塞凹坑处。图 8(a)和图 8(b)中的箭头表示速度矢量,可以发现直喷汽油显著改变了缸内气流运动。双直喷 RCCI 中,设置较小的喷孔锥角时,汽油撞壁位置处在燃烧室底部斜面上,依据喷雾撞壁理论,大部分汽油会沿着斜面向下运动^[18],随后受活塞壁面的影响而产生涡旋,极大增强了缸内速度场。而文献[10]表明,直喷汽油所形成的速度场将促进随后直喷柴油的雾化及混合,因而双直喷 RCCI 中 HCB 在缸内混合更加均匀。所以,如图 8 所示,CA10 时刻双直喷 RCCI 缸内的 HCB 与汽油混合气混合相对均匀,当量比峰值相对较低,意味着缸内的活性峰值也较低。此外直喷汽油较大的汽化潜热会降低缸内温度,两种因素共同造成双直喷 RCCI 的着火时刻晚于常规 RCCI。

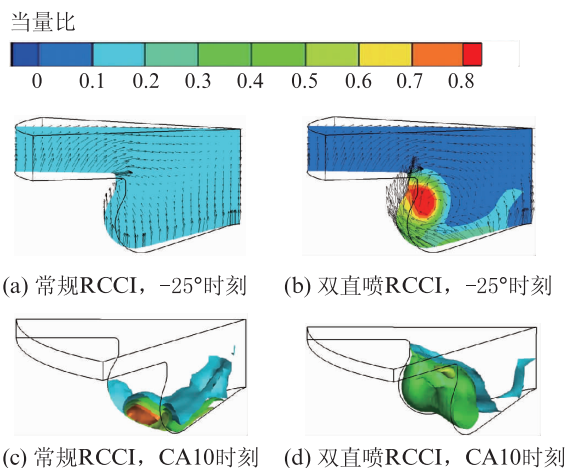


图 8 HCB 喷射前和 CA10 时缸内混合气当量比分布

图 9 展示了两种燃烧模式燃烧过程中的缸内温度分布情况。在 HCB 喷射前,常规 RCCI 燃烧室内汽油混合气均匀分布于缸内,当量比较低;HCB 喷入燃烧室后,因其具有超高的活性,经过较短的滞燃期后开始出现自燃并引燃其周围的汽油混合气;但随后因缸内混合气过于稀薄,导致燃烧缓慢,整个燃烧过程中仅 HCB 周围少量的混合气被引燃,随着活塞下行,大量低活性燃油达不到着火条件,尤其是挤流区域的汽油混合气因火焰传播难以达到而无法被引燃,降低了燃烧效率和热效率。而双直喷 RCCI 采用了汽油直喷策略,在 HCB 喷射前汽油集中分布于燃烧室凹坑处,在局部形成当量比适中且易于引燃的混合气,而挤流区没有燃料的分布, HCB 燃烧后迅速引燃其周围混合气,随后剩余混合气达到着火条件同时着火,不完全燃烧情况得到明显改善。

上述分析表明,相比常规 RCCI,低负荷工况下采用双直喷策略能够提升发动机热效率并降低 HC 和 CO 排放。采用双燃料同轴喷射器时仍可搭配进

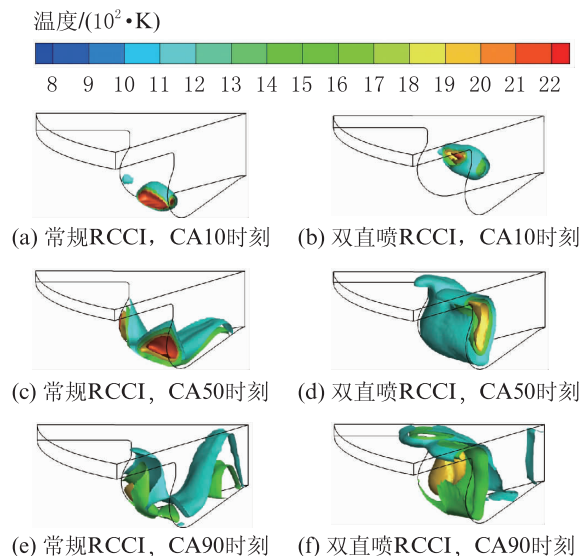


图 9 常规 RCCI 和双直喷 RCCI 燃烧过程缸内温度对比

气道喷射器,结合现有的研究^[4-5,9-11]可知,针对不同的负荷工况采用不同的双燃料喷射策略具有优化 RCCI 全负荷工况燃烧特性的潜力。

3.2 汽油喷射时刻的影响

低活性燃油喷射时刻是双直喷 RCCI 燃烧中重要的控制策略之一^[10],本节保持 HCB 直喷时刻为 -25° 不变,探讨了汽油喷射时刻对双直喷 RCCI 燃烧及排放特性的影响。

如图 10 和图 11 所示,随着汽油喷射时刻从 -60° 推迟至 -40° ,缸压峰值下降,放热率峰值逐渐升高,同时着火时刻 CA10 和燃烧重心 CA50 也随之滞后,燃烧持续期缩短,表明改变汽油直喷时刻能够有效地控制燃烧相位和放热过程。为分析上述现象,对比不同汽油直喷时刻下着火前缸内 HCB 质量分数及混合气当量比分布情况,如图 12 和图 13 所示。从图中可以看出直喷汽油所形成的缸内速度场能够促进 HCB 的扩散与混合,随着汽油喷射时刻的提前,双燃料喷射间隔增大,增大的双燃料喷射间隔将减弱直喷汽油对随后直喷柴油扩散与混合的促进作用,这与文献[10]的结论类似。因而,随着汽油喷射时刻从 -45° 提前至 -60° ,HCB 的混合效果变差,未充分混合的 HCB 在壁面处逐渐形成更大的浓度较高的区域,较高的 HCB 浓度代表着较大的活性峰值,因而使得着火时刻提前,并且形成了更显著的当量比和活性分层。增强的缸内混合气分层会产生更明显的分层燃烧现象,能够降低燃烧速率和放热率峰值,并延长燃烧持续期。

图 14 是汽油直喷时刻对燃烧效率和热效率的影响。由图 14 可知,随着汽油直喷时刻的提前,燃烧效率略有提升。如图 15 所示,HC 和 CO 排放均

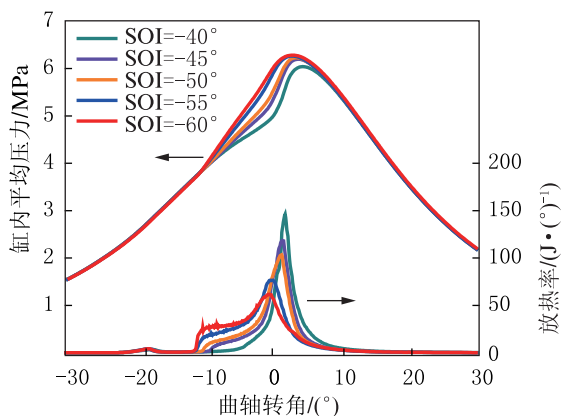


图10 不同汽油直喷时刻下缸压和放热率

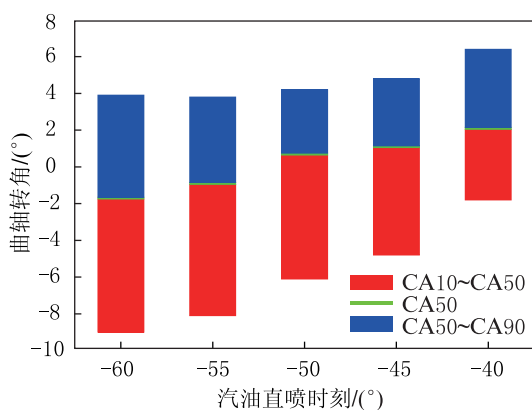


图11 汽油直喷时刻对燃烧相位的影响

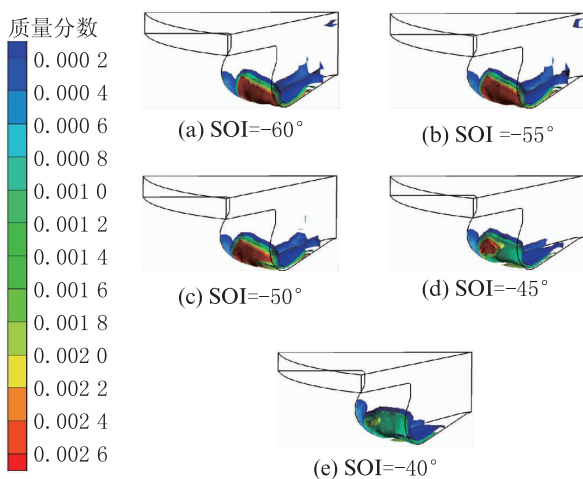


图12 不同汽油直喷时刻下-15°时 HCB 质量分数分布

随着汽油直喷时刻提前而有所降低,因而燃烧效率提升。HC 排放的生成主要归因于缸内较低的燃烧温度,尤其是低温壁面附近更容易形成 HC;而 CO 的生成与燃烧温度和燃油浓度有关^[5],但如图 13 所示,在低负荷工况下缸内混合气稀薄,空气充足,因而燃烧温度对 CO 的排放起着决定性作用。分析认为,提前的汽油直喷时刻使 CA50 出现在上止点前,燃烧过程大部分发生于压缩冲程,避免了活塞下行

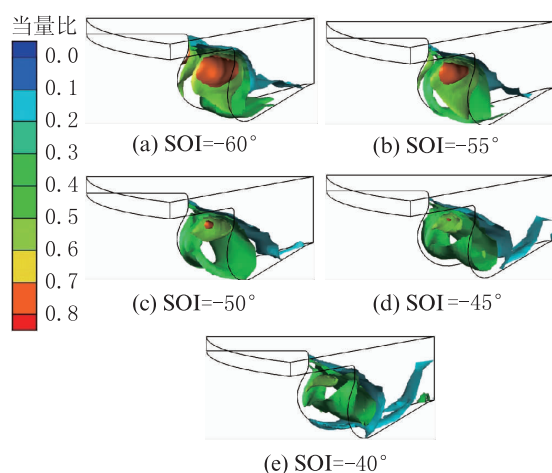


图13 不同汽油直喷时刻下-9°时混合气当量比分布

对燃烧过程的冷却作用导致的未燃 HC 和 CO 增加;其次,如图 13 和图 16 所示,随着汽油直喷时刻提前,HCb 会在燃烧室壁面附近形成更多浓度较高的区域,燃烧过程高温区域也随之增加,降低了低温壁面所导致的 HC 的生成量,也促进了 CO 的氧化。图 14 还显示,尽管燃烧效率随汽油直喷时刻的推迟而降低,但指示热效率却不遵从这一规律,而是随着汽油直喷时刻的推迟呈现先减小后增大再减小的趋势。分析认为,汽油直喷时刻的提前虽然提升了燃烧效率,但如前文所述,混合气分层度也随之增强,分层燃烧现象加剧,导致较提前的着火时刻和较长的燃烧持续期,减弱了燃烧的定容度,削弱了做功能力^[5],即指示热效率会受燃烧效率和燃烧定容度两者的共同作用。汽油直喷时刻从-60°推迟至-55°时,尽管燃烧定容程度有所提升,但燃烧效率下降较为明显,因而指示热效率呈下降趋势;汽油直喷时刻从-55°推迟至-45°时,燃烧效率虽略有下降但差别很小,定容度的提升使得指示热效率有所上升;汽油直喷时刻从-45°推迟至-40°时,燃烧效率又有较为明显地下降,燃烧效率的下降起到主导作用,造成指示热效率略有降低。

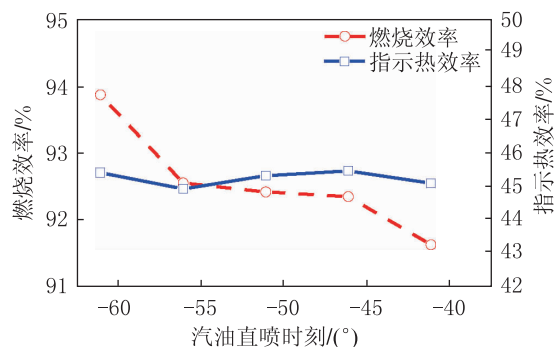


图14 汽油直喷时刻对燃烧效率和热效率的影响

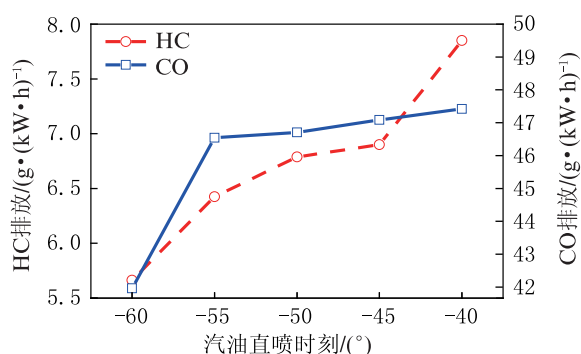


图 15 汽油直喷时刻对 HC 和 CO 排放的影响

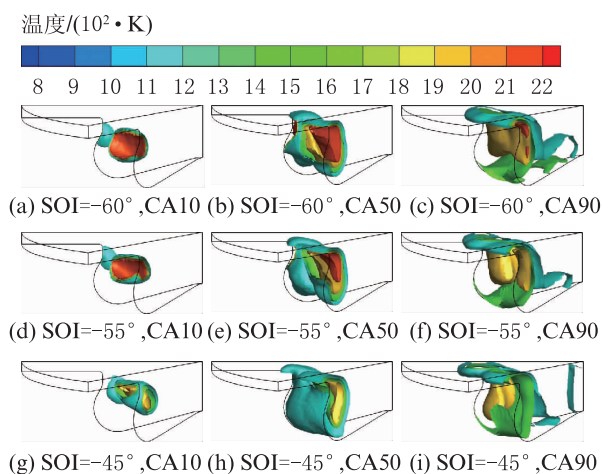
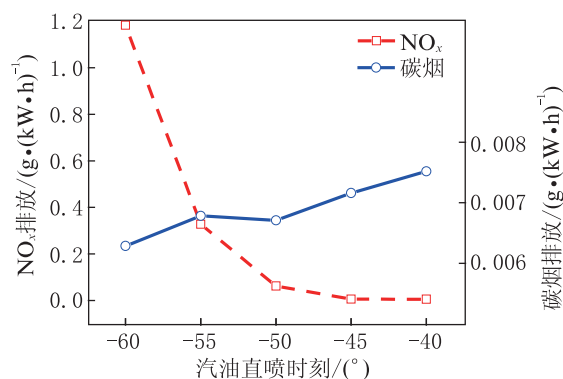


图 16 不同汽油直喷时刻下燃烧过程中温度分布

图 17 为汽油直喷时刻对 NO_x 和碳烟排放的影响。随着汽油直喷时刻提前, NO_x 排放显著增加。 NO_x 的生成与缸内燃烧温度及高温停留时间有关。结合图 12 和图 16 可以看出, 汽油直喷时刻的提前减弱了直喷汽油所形成的速度场对 HCB 混合的促进作用, 导致了局部当量比较高区域的出现, 在燃烧过程中, 当量比较高的区域燃烧反应更快, 燃烧温度更高。随着汽油直喷时刻的推迟, 燃油分布更均匀, 缸内局部高温区也逐渐减小, 如图 16 所示, 当汽油直喷时刻推迟至 -45° 以后时, 缸内几乎观察不到温度大于 2200 K 的区域, 而 2200 K 是 NO_x 大量生成的临界温度。此外, 汽油直喷时刻的推迟使得燃烧过程更均质, 缩短了燃烧持续期, 减少了缸内高温停留时间, 因而汽油直喷时刻的推迟显著降低了 NO_x 的排放。从图 17 可以看出, 在不同的汽油直喷时刻下, 碳烟排放都保持在极低的水平, 均低于欧 VI 的排放限值 $0.01\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, 这也是 RCCI 燃烧的显著优势之一^[5]。碳烟主要形成于燃烧过程中混合气当量比大于 2 的局部富燃区, 而对于本文所研究的低负荷工况而言, 燃油喷射量少, 并且采用早喷的策略, 在着火发生前燃油有充裕的时间与空气进行混合, 燃烧过程中

几乎不存在当量比大于 2 的局部富燃区, 使得碳烟排放很低。碳烟排放随着汽油直喷时刻的提前而有所降低, 这是由于汽油直喷时刻的提前会提高缸内燃烧温度并增大燃烧持续期, 有助于已生成碳烟的氧化。综上所述, 汽油直喷时刻的提前会增加 NO_x 排放并降低碳烟排放, NO_x 和碳烟排放随汽油直喷时刻的变化呈现出此消彼长的关系。

图 17 汽油直喷时刻对 NO_x 和碳烟排放的影响

3.3 HCB 喷射时刻的影响

RCCI 发动机中, 高活性燃料喷射时刻是控制燃烧相位、发动机性能及排放的重要参数之一, 本节保持汽油直喷时刻为 -45° 不变, 研究 HCB 喷射时刻对燃烧及排放特性的影响。

图 18 和图 19 分别为不同 HCB 喷射时刻下缸压、放热率变化规律及燃烧相位的变化。随着 HCB 喷射时刻从 -20° 提前至 -30° , 缸压和放热率呈现出较为明显的变化趋势, 即缸压峰值逐渐降低, 放热过程逐渐推迟, 放热率峰值升高, 着火时刻 CA10 和燃烧重心 CA50 随之滞后, 燃烧持续期缩短。当 HCB 喷射时刻从 -30° 提前至 -35° 时, 尽管着火时刻和燃烧重心随之滞后, 但放热率峰值降低, 燃烧持续期增加。当 HCB 喷射时刻推迟至 -15° 时, 燃烧过程呈现出明显的两阶段放热特征, 燃烧持续期延长。

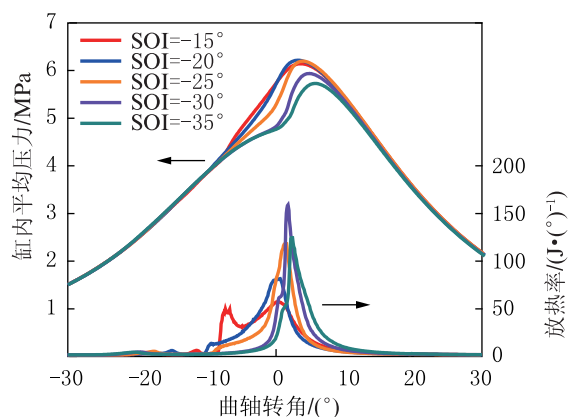


图 18 不同 HCB 喷射时刻下缸压和放热率

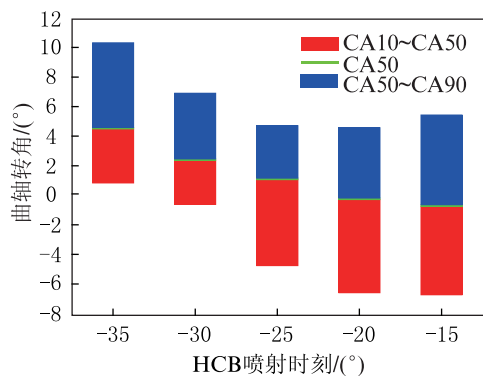


图 19 HCB 喷射时刻对燃烧相位的影响

同样利用着火前混合气分布情况来分析上述现象的原因。图 20 对比了 3 种 HCB 喷油时刻下 -7° (着火前)时刻缸内当量比分布图。喷油时刻的提前有助于燃油的混合扩散^[4-5],采用早喷策略(SOI = -30°)时,HCB 有充裕的时间进行混合,并且双燃料喷射间隔短,直喷汽油所形成的速度场对 HCB 的混合有较强的促进作用,如图 20 所示,缸内混合气分布较为均匀,当量比峰值和活性峰值低,因而着火时刻较晚,如图 21 所示其燃烧过程更均质,因而放热集中,燃烧持续期短,放热率峰值较大。可以推断,继续提前 HCB 喷射时刻至 -35° 时,HCB 和汽油相互混合更为均匀,缸内混合气状态类似于一种活性介于 HCB 和汽油之间的燃油的均质混合气;且 HCB 所占比例较小,因而混合气整体活性较低,使得着火时刻推迟至上止点后,活塞下行较强的冷却作用会降低燃油反应速率^[5],使燃烧持续期延长。采用 HCB 晚喷策略时,双燃料喷射间隔大,直喷汽油对 HCB 扩散混合的促进作用微弱,HCB 被喷入缸内后未充分混合便因其超高的活性而迅速达到着火条件开始燃烧,放热率出现第一个峰值,而此时大部分汽油因其活性较低仍未开始燃烧。随着燃烧的进行和火焰的传播,剩余未燃混合气逐渐达到着火条件开始燃烧,放热率出现第二个峰值。此外,从图 20 还可以看出,采用 HCB 晚喷策略时,缸内混合气分层度增加,能够产生更低的放热率峰值并延长燃烧持续期。文献[19]也表明,RCCI 燃烧中采用高活性燃料晚喷策略能够增强缸内浓度和活性梯度,呈现两阶段放热的规律,并延长燃烧持续期。

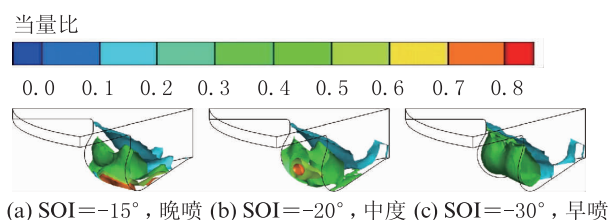
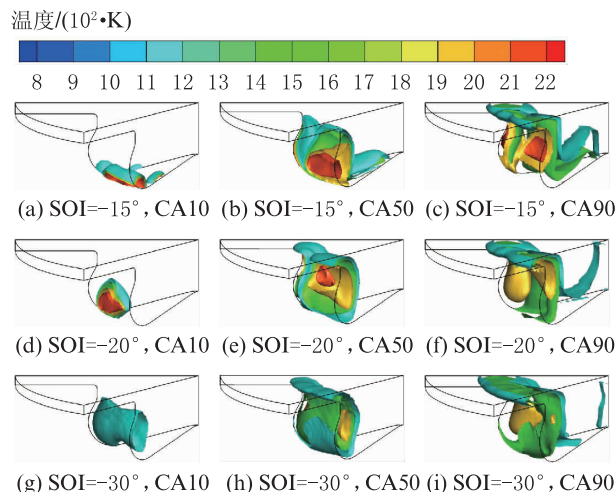
图 20 不同 HCB 时刻下 -7° 时混合气当量比分布

图 21 不同 HCB 喷射时刻下燃烧过程中温度分布

图 22 为 HCB 喷射时刻对燃烧效率和热效率的影响。随着 HCB 喷射时刻的推迟,燃烧效率呈现上升趋势。如图 20 和图 21 所示,分析认为,喷射时刻的推迟使得 HCB 在壁面附近形成更大的富积区域,燃烧过程中高温区域增大,能够促进低活性燃料充分燃烧,同时着火时刻提前,燃烧过程更多发生于上止点前,减弱了活塞下行对混合气冷却作用的影响。因而,如图 23 所示,推迟 HCB 喷射时刻能够降低 HC 和 CO 的排放,提升燃烧效率。但 HCB 喷射时刻的推迟会延长燃烧持续期,减弱定容度,不利于热效率的提升。而当 HCB 喷射时刻提前至 -30° 之前时,着火时刻过晚,大部分燃烧过程发生于上止点后,导致更严重的不完全燃烧,也会降低指示热效率。整体而言,指示热效率随 HCB 喷射时刻的推迟先增大后减小,喷射时刻为 -25° 时获得了最高的指示热效率。

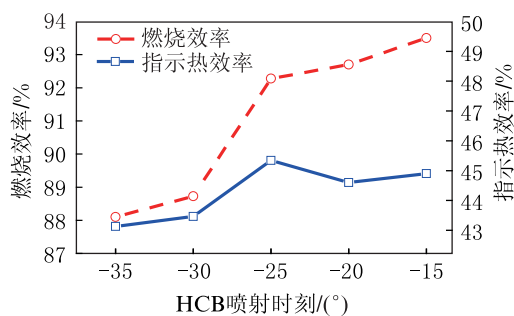


图 22 HCB 喷射时刻对燃烧效率和热效率的影响

如图 24 所示,HCB 喷射时刻的推迟会增加 NO_x 排放而降低碳烟排放。从图 20 和图 21 可以看出,较晚的 HCB 喷射时刻会影响 HCB 的扩散和混合,形成更多的浓度较高的区域,因而燃烧过程中缸内高温区域也更大,并且较长的燃烧持续期使得缸内高温停留时间较长,受这两方面因素影响 HCB 喷

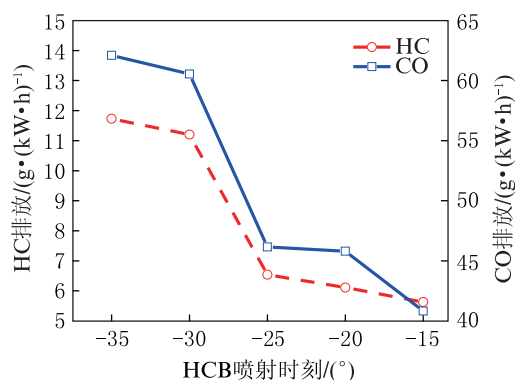
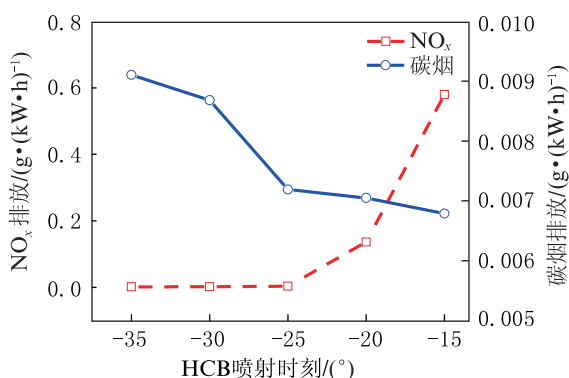


图 23 HCB 喷射时刻对 HC 和 CO 排放的影响

射时刻的推迟会增加 NO_x 排放。如前文所述,低负荷工况下燃油量少,属于稀薄燃烧,避开了碳烟生成区,因此不同 HCB 喷射时刻下碳烟排放均很低。 NO_x 和碳烟排放存在着此消彼长的关系,HCB 喷射时刻的推迟使得碳烟排放略有降低,这是因为推迟的 HCB 喷射时刻使得缸内燃烧温度升高,有助于已形成的碳烟的氧化。

图 24 HCB 喷射时刻对 NO_x 和碳烟排放的影响

4 结论

(1) 低负荷工况下常规进气道喷射汽油 RCCI 因汽油混合气过于稀薄而难以燃烧,而双直喷 RCCI 能够使汽油集中分布于活塞凹坑处,形成当量比适中、易于引燃的混合气,从而改善不完全燃烧,同时直喷汽油所形成的缸内流场有助于高活性燃料的扩散与混合。

(2) 汽油直喷时刻的推迟会促进 HCB 的扩散与混合,降低缸内混合气分层度,燃烧更均质,着火时刻延迟,燃烧持续期缩短,燃烧过程中高温区域减小,导致燃烧效率降低并增加 HC 和 CO 排放,指示热效率先减小后增大。随着汽油直喷时刻的推迟, NO_x 排放显著降低,碳烟排放则略有增多。

(3) HCB 喷射时刻的推迟使得 HCB 混合扩散效果变差,缸内混合气分层度增加,着火时刻和燃烧

重心均提前,缸内高温区域增加,燃烧效率提高,指示热效率先增大后减小,HC 和 CO 排放减少, NO_x 排放增加而碳烟排放减少。此外,过迟的 HCB 喷射时刻会导致两阶段放热特征的出现。

参考文献:

- [1] KOKJOHN S, HANSON R, SPLITTER D, et al. Fuel reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in light- and heavy-duty engines [C/OL]//SAE Paper, 2011, 2011-01-0357. (2011-04-12). <https://doi.org/10.4271/2011-01-0357>.
- [2] KOKJOHN S L, MARK 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: 2729-2742.
- [3] LIU H F, TANG Q L, RAN X W, et al. Optical diagnostics on the reactivity controlled compression ignition (RCCI) with micro direct-injection strategy[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(4): 4767-4775.
- [4] LI J, YANG W M, AN H, et al. Effects of fuel ratio and injection timing on gasoline/biodiesel fueled RCCI engine: A modeling study[J]. Applied Energy, 2015, 155: 59-67.
- [5] 李耀鹏. 甲醇/柴油活性控制压燃式发动机的数值研究及热力学分析[D]. 大连:大连理工大学, 2017.
LI Y P. Numerical study and thermodynamic analysis on methanol/diesel reactivity controlled compression ignition(RCCI) engine[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [6] SPLITTER D, HANSON R, KOKJOHN S, et al. Reactivity controlled compression ignition(RCCI) heavy-duty engine operation at mid-and high-loads with conventional and alternative fuels[C/OL]//SAE Paper, 2011, 2011-01-0363. (2011-04-12). <https://doi.org/10.4271/2011-01-0363>.
- [7] SPLITTER D, WISSINK M, KOKJOHN S, et al. Effect of compression ratio and piston geometry on RCCI load limits and efficiency[C/OL]//SAE Paper, 2012, 2012-01-0383. (2012-04-16). <https://doi.org/10.4271/2012-01-0383>.
- [8] 童来会,王洪,贾国瑞,等. PODE/汽油双燃料 RCCI 高负荷扩展的试验研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 39(9): 2011-2017.
TONG L H, WANG H, JIA G R, et al. Experimental study on high-load extension of PODE/gasoline dual-fuel RCCI operation[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 39(9): 2011-2017.
- [9] WISSINK M, REITZ R D. Direct dual fuel stratification, a path to combine the benefits of RCCI and PPC [C/OL]//SAE Paper, 2015, 2015-01-0856. (2015-04-14). <https://doi.org/10.4271/2015-01-0856>.
- [10] LIM J H, REITZ R D. High load (21 bar IMEP) dual fuel RCCI combustion using dual direct injection[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 136(10): 101514.
- [11] 米珊,王洪,李彩云,等. 直喷汽油对反应活性控制压燃负荷拓展影响的数值模拟研究[J]. 内燃机工程, 2019, 30(2): 97-103.
MI S, WANG H, LI C Y, et al. Numerical simulation study of the

(下转第 34 页)