

基于 RANS 和 LES 的汽油、柴油及其掺混燃料压燃燃烧特性数值模拟研究

王 浒, 张晓林, 郑尊清, 闫博文, 李彩云
(天津大学 内燃机国家重点实验室, 天津 300072)

Numerical Investigation on Compression Ignition Combustion and Emissions Characteristics of Diesel, Gasoline and Their Blend Using RANS and LES

WANG Hu, ZHANG Xiaolin, ZHENG Zunqing, YAN Bowen, LI Caiyun
(State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A parametric study was first performed to validate the spray model of diesel, gasoline and their blend using two turbulence models of the Reynolds average navier-stokes(RANS) and large eddy simulation(LES). Based on the results from the spray simulation, the combustions of three fuels were simulated with both RANS and LES. The effects of the two turbulence models on flow in cylinder, fuel transport and combustion process were revealed by comparing the partial-premixed combustion processes of RANS and LES. The results show that both RANS and LES can well predict the combustion processes of diesel and blended fuel. However, the prediction of the ignition delay and combustion process of gasoline is more accurate with LES. At the same time, the calculated NO_x emissions are closer to the test results for all three fuels when LES is used. This is mainly because of the different positions of in-cylinder heat release when different turbulence models are applied.

摘要: 研究中首先采用 RANS 和 LES 两种湍流模型对汽油、柴油及汽柴油掺混燃料的喷雾进行了气液相贯穿距的标定。基于标定好的喷雾模型,采用 RANS 与 LES 对 3 种燃料在发动机中的燃烧过程开展了数值模拟研究。通过对比 RANS 与 LES 对部分预混燃烧数值模拟的差异,揭示了两种湍流模型对缸内流动、燃料输运及燃烧过程的影响机理。结果表明, RANS 与 LES 都能够对柴油及掺混燃料的燃烧过程实现较好的预测,其中 LES 对汽油部分预混燃烧中滞燃期及放热规律的预测与试验更为接近。同时,LES 对 3 种燃料 NO_x 排放的计算结果都与试验更加接近,这与燃料在缸内放热的位置密切相关。

关键词: 喷雾标定;湍流模型;雷诺平均;大涡模拟;部分预混燃烧

Key words: spray validation; turbulence model; Reynolds averaged navier-stokes equations; large eddy simulation; partial premixed combustion

DOI: 10.13949/j.cnki.njgc.2018.05.004

中图分类号: TK428.9

文献标识码: A

0 概述

为了降低机内有害物的排放,减少发动机对后

处理系统的依赖程度,研究者们提出了一系列低温燃烧的概念,如均质混合气压燃(homogeneous charge compression ignition,HCCI)^[1]、预混合充量压燃(premixed

收稿日期: 2017-09-18

修回日期: 2017-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51506145,51576138)

Fund Project: National Natural Science Foundation of China(51506145,51576138)

作者简介: 王 浒(1982—),男,副教授,博士生,主要研究方向为内燃机燃烧理论, E-mail: wang_hu@tju.edu.cn。

charge compression ignition)^[2]、部分预混燃烧(partial premixed combustion, PPC)^[3]。其中 PPC 主要是利用低活性燃料滞燃期较长的特点,在压缩着火前形成更加均匀的混合气从而有效降低碳烟排放,在此基础上引入废气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)能够同时降低 NO_x 排放。相比于 HCCI, PPC 能够更好地控制燃烧始点及燃烧相位。此外,由于 PPC 方式下混合气预混比例较高,放热速率较快,因此可同时获得较高热效率。尽管如此, PPC 却存在着高负荷压升率过高、低负荷不容易着火等缺点。汽油压燃(gasoline compression ignition, GCI)^[4]属于一种比较典型的 PPC 燃烧模式,国内外对其开展了大量的研究^[5-6]。

LES 与 RANS 是广受关注的两种湍流模型。相比 RANS, LES 能够在流场中捕捉到更多细小的涡结构,进而可对缸内流场实现更加精确的预测,因此近年来国内外对于 LES 在内燃机数值模拟中的应用展开了大量相关研究^[7-8]。

目前对于 GCI 的数值模拟大都采用 RANS 来进行。文献[9-10]采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型对 GCI 燃烧过程进行了多维数值模拟,研究喷油参数、EGR、进气温度及增压压力对 GCI 燃烧和排放的影响。文献[11]采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型对 GCI 燃烧过程进行了多维数值模拟,通过遗传算法对影响燃烧过程的多个主要参数同时进行优化。虽然 RANS 能够对 GCI 中的预混燃烧进行较好的预测,但是对中、高负荷 GCI 喷油过程中着火的部分预混燃烧的研究还比较少。同时,文献[12-14]通过对汽、柴油喷雾进行数值模拟发现,相比 RANS, 采用 LES 能够更好地预测喷雾的气、液相分布。由于喷雾混合过程对部分预混燃烧中着火及放热规律的影响尤其重要,因此有必要进一步探究 LES 对部分预混燃烧模式下燃烧过程数值模拟的影响,尤其是针对 GCI 模式下的中高负荷工况。

基于上述分析,本文主要探究了采用 LES 对不同辛烷值燃料燃烧过程数值模拟的影响,并与 RANS^[15]进行了对比。研究中首先基于容弹试验数据分别采用 RANS 与 LES 对汽油、柴油及汽柴油混合物的喷雾进行了模型标定。随后基于 3 种燃料在发动机中的燃烧和排放试验结果,分别采用 RANS 与 LES 进行了模拟计算,对比分析了两种湍流模型对燃烧过程的预测能力,同时更好地揭示了 GCI 在中高负荷工况下部分预混燃烧的机理。

1 模型建立

本文的计算采用 Converge Science 公司的 CFD 软

件 CONVERGE。其中输运方程采用 PISO 算法求解。在计算过程中采用可变时间步长,根据喷雾过程中最大允许的 CFL(courant-friedrichs-lewy)和蒸发过程中的时间步长来自动调节计算中每一步所需的时间步长。文中所有的计算都采用并行运算的方法,通过使用信息传递接口(message passing interface, MPI)来平均分配计算所需的储存空间。CONVERGE 中有自适应加密网格的功能,该软件能够根据计算区域内速度和温度的需求对网格进行自动加密。在本文的计算中,只在喷油器附近的小块区域使用固定加密,从而尽量减少计算负荷,通过自适应加密来保证后续计算对网格尺寸的要求。

1.1 物理模型及化学机理

本文采用拉格朗日粒子团来对喷雾液滴进行模拟,在计算过程中所有喷雾粒子被组成拉格朗日粒子团,并在整个计算域中对粒子团进行跟踪^[16]。液滴破碎模型采用 Kelvin-Helmholtz 和 Rayleigh-Taylor (KH-RT)模型^[17]。该破碎模型通过比较液滴表面的 KH 波与 RT 波,进而选取较强的一个表面波来对液滴的破碎过程进行模拟。此外,本文采用了 O'Rourke 液滴碰撞模型^[15]、Frossling 液滴蒸发模型^[18]及动态拖曳模型^[19]。燃烧模型采用了 SAGE 详细化学动力学模型。SAGE 的化学反应机理文件采用 CHEMKIN 标准格式,描述物质热力学性质的文件也与 CHEMKIN 使用相同的格式,因此 SAGE 对化学反应进程的描述与 CHEMKIN 基本类似。燃料的替代物采用了文献[20]的 PRF 机理,由于此机理已经对不同燃料燃烧的滞燃期、火焰传播速度、物质组分及发动机中的 HCCI 和 PPCI 燃烧过程都进行了验证,可认为此机理能够对本文汽油、柴油及汽柴油掺混燃料的着火及燃烧过程实现较好的预测。与此同时,对 NO_x 排放的预测采用简化的 GRI 3.0 NO_x 生成机理^[21],该简化 NO_x 生成机理共有 4 种组分和 12 步反应,其中 3 个反应是拓展的 Zeldovich 生成机理,其他反应则代表了其余 NO_x 热生成反应路径。对碳烟的预测,则采用文献[22]提出的碳烟生成/氧化两步法模型。上述物理模型及化学模型的详细信息及参考文献介绍见表 1。

文献[13]认为在 RANS 和 LES 两种不同的湍流模型下拉格朗日模型中液滴的破碎、拖曳、蒸发和碰撞的作用是相似的。LES 的影响是通过质量、动量和能量等源项来作用于拉格朗日粒子团的,因此目前的拉格朗日模型可以同时用于 RANS 和 LES 模型。

本文中采用的 RANS 模型为 RNG $k-\epsilon$ 模型,此

表 1 物理模型及化学机理

物理过程	模型
湍流	LES ^[7] /RANS ^[15]
喷雾	Blob ^[16]
破碎	KH-RT ^[17]
蒸发	Frossling ^[18]
碰撞	O'Rourke ^[15]
液滴拖曳	Dynamic drop drag ^[19]
化学机理	PRF 简化机理 ^[20]
NO _x 模型	Zeldovich ^[21]
碳烟模型	Hiroyasu/NSC ^[22]

湍流模型采用湍流黏度和平均应变速率来计算各向异性的雷诺应力：

$$\tau_{ij}^r = -2v_T \overline{S_{ij}} \quad (1)$$

式中, v_T 为湍流黏度; $\overline{S_{ij}}$ 为平均应变速率。此处的湍流黏度是按式(2)定义的：

$$v_T = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2)$$

式中, C_μ 为模型中的常数; k 为湍动能(turbulence kinetic energy, TKE); ϵ 为耗散率。这些参数都是求解来用于输运方程的。更多关于 RANS 湍流和喷雾的模型见文献[15-17]。

本文使用的 LES 模型为动态结构的 LES 模型。此模型不使用湍流黏度的概念,对于亚格子应力的求解是通过亚格子湍动能和 Favre 平均速度来实现的。亚格子的湍动能 k 通过式(3)计算：

$$\frac{\partial \bar{\rho} k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu}{Pr_{sgs}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tau_{ij} \overline{S_{ij}} - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$k = \frac{1}{2} (\widetilde{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j) \quad (4)$$

$$\epsilon = C_\epsilon \frac{k^{1.5}}{\Delta} \quad (5)$$

$$\tau_{ij} = 2k \bar{\rho} \frac{L_{ij}}{L_{kk}} \quad (6)$$

$$L_{ij} = \widetilde{u_i u_j} - \hat{u}_i \hat{u}_j \quad (7)$$

式中, ϵ 为亚格子耗散率; Pr_{sgs} 设为 1; $\mathbf{u}$ 为速度; μ 为黏度; ρ 为密度; C_ϵ 为模型中设为 1 的常数; Δ 为网格尺寸; τ_{ij} 为亚网格应力; L_{ij} 为 Leonard 应力; “ $\sim$ ”表示测试,关于 LES 动态结构模型的详细描述见参考文献[17]; “ $\sim$ ”表示在空间上取平均。

1.2 喷雾模型建立

为了确保本文的喷雾模型能够较好地预测混合气在缸内的分布情况,需要对喷雾模型进行标定。对于喷雾过程的数值模拟在容弹中进行,容弹的三

维模型如图 1 所示,容弹及喷油器的具体参数见表 2,表中 G100、D100、G75 分别代表汽油、柴油及汽柴油掺混燃料 3 种不同燃料的替代物。

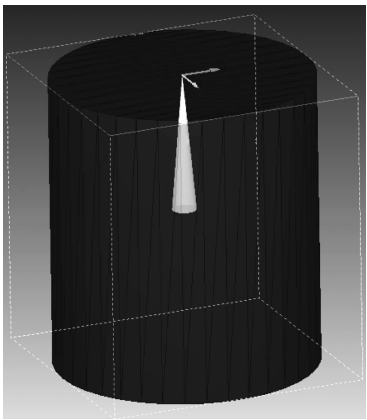


图 1 CONVERGE 中的喷雾模型

表 2 喷雾模型参数

项目	参数		
燃料	G100	G75	D100
燃料质量比 (异辛烷/正庚烷)	100 : 0	75 : 25	0 : 100
喷孔数目	8	1	1
喷油压力/MPa	20	100	100
容弹中组分质量比 (N ₂ /CO ₂ /H ₂ O)	89.7 : 6.5 : 3.8	100 : 0 : 0	100 : 0 : 0
容弹温度/K	573	820	820
容弹压力/MPa	0.6	4.0	4.0

对喷雾模型进行标定之前,首先分别对采用两种湍流模型时的网格与时间步长进行敏感性分析。图 2 为采用 RANS 时的网格敏感性分析。如图 2 所示,通过在 0.125~4.000 mm 范围内调整最小网格尺寸,发现当最小网格尺寸为 0.250 mm 时喷雾贯穿距基本收敛,因此 RANS 中最小网格尺寸设置为 0.250 mm。调整最大时间步长使其在 10⁻⁴ s~10⁻⁷ s 范围内变化,发现对喷雾贯穿距基本无影响,因此取最大时间步长为 10⁻⁴ s。如图 3 所示,当最小时间步长在 10⁻⁸ s~10⁻⁶ s 范围内变化时喷雾贯穿距有了明显的变化。当最小时间步长大于 10⁻⁷ s 时,喷雾贯穿距会明显变短,因此取最小时间步长为 10⁻⁷ s,以此在满足计算精度的前提下提高计算效率。同样,对采用 LES 时的喷雾模型进行网格及时间步长敏感性分析。图 4 为采用 LES 时网格敏感性分析的结果。如图 4 所示,当最小网格尺寸等于 0.125 mm 时,喷雾贯穿距基本收敛,因此采用 LES 时的最小网格尺寸取 0.125 mm。采用 LES 时模型的时间步长敏感性分析与 RANS 的结果基本一致,不再赘述。

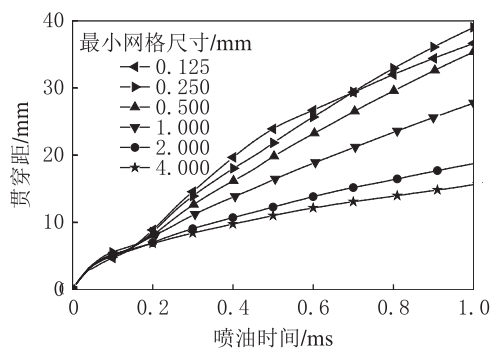


图2 RANS的网格敏感性分析

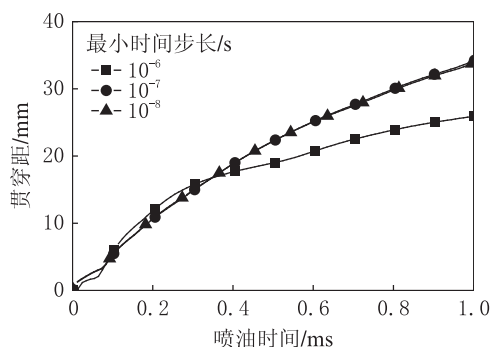


图3 RANS的最小时间步长敏感性分析

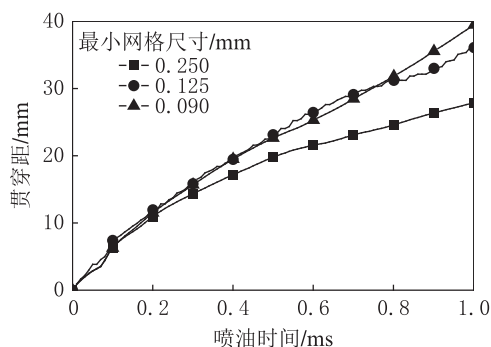


图4 LES的网格敏感性分析

1.3 发动机模型建立

为了提高计算效率,本研究采用整个气缸 1/8 的扇形网格来进行计算,具体模型如图 5 所示。发动机主要规格参数见表 3。本文中曲轴转角正值代表上止点后(ATDC),负值代表上止点前。缸内燃烧计算所采用的燃料与前文中标定喷雾过程中使用的燃料一致,发动机运行的边界条件见表 4。

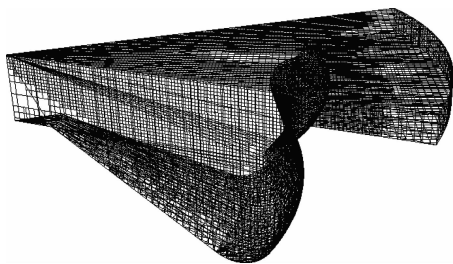


图5 发动机模型的计算网格

表3 发动机参数

项目	参数
排量/L	6.5
缸径/mm×行程/mm	105×125
压缩比	16
进气门关闭时刻/(°)	-133
排气门关闭时刻/(°)	125
喷油器孔数	8
喷油孔直径/mm	0.15
喷油油束包角/(°)	150

表4 发动机运行边界条件

项目	参数
转速/(r·min⁻¹)	1 500
燃料	G100, G75, D100
循环喷油量/mg	70
喷油时刻/(°)	-6
进气温度/K	340
进气压力/MPa	0.243
喷油压力/MPa	90

2 计算结果及分析

2.1 喷雾模型标定结果

为了保证本文所使用的喷雾模型能够对各种燃料的喷射过程都实现较好的预测,需要对 3 种燃料的喷雾模型进行标定。本文通过调整 KH-RT 破碎模型中 B_0 、 B_1 、 C_τ 、 C_{RT} 、 C_{bl} 等 5 个参数来对喷雾模型进行标定。图 6 为 3 种燃料喷雾模型标定的计算结果与试验结果的对比。如图 6(a) 所示,两种湍流模型的计算结果都与试验较为接近,其中 LES 的结果与 ANL(Argonne National Laboratory)^[14] 的结果更为接近。此外,采用 LES 得到的液相贯穿距比 RANS 中的液相贯穿距略长,这与文献[24]的喷雾模拟结果类似。这是由于 RNG $k-\epsilon$ 模型中引入湍流黏度来计算雷诺应力,而动态结构的 LES 模型没有采用湍流黏度来计算亚格子应力,因此 LES 模型中的耗散项较低,从而使得喷雾贯穿距较长。

G75、D100 两种燃料采用 RANS 与 LES 得到的气液相贯穿距都与试验结果较为接近。采用 LES 时气相贯穿距比采用 RANS 时普遍要长,且与试验更为接近。这是由于 LES 对湍流黏度与湍流耗散的预测比 RANS 要小,因此液滴保持初始速度的能力较大,贯穿距较长。此外,采用 LES 液相贯穿距的波动较大,这是由于采用大涡模拟能够捕捉到流场中更多的涡团结构,局部的涡流结构使得燃料空间分布不均,从而出现较多的波动。图 7 为 G75 喷雾的三维剖面图与试验结果的对比。从图 7 中可以

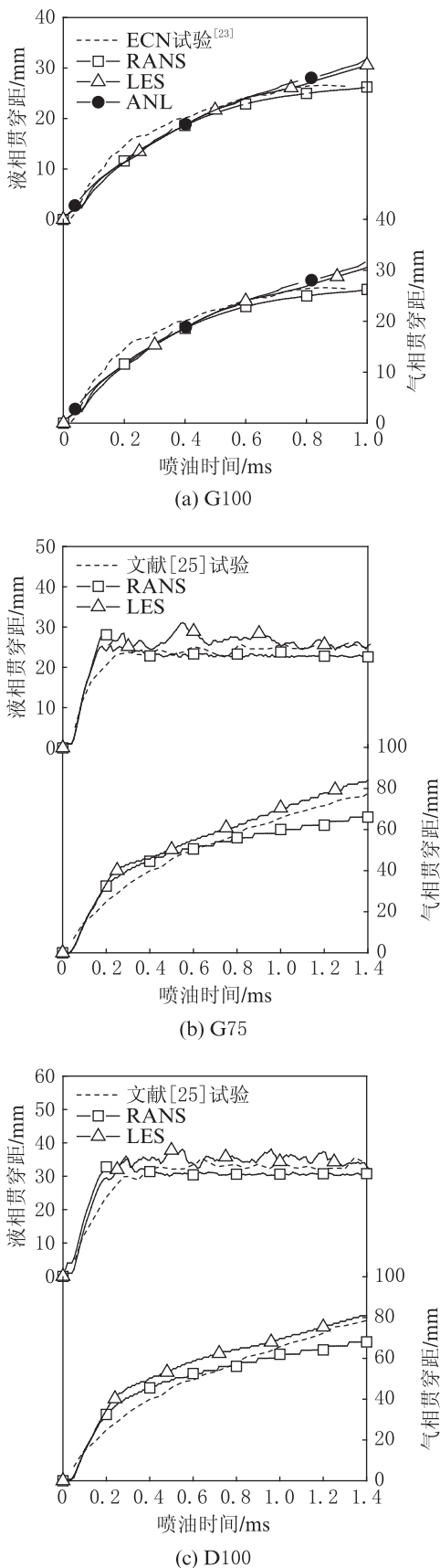


图6 3种燃料喷雾模拟与试验的气液相贯穿距

看出,采用两种湍流模型得到的喷雾贯穿距接近,但是喷雾形态有一定的差别。采用LES后混合气在

空间的分布呈现各向异性,而采用RANS时燃料在各个方向的扩散都较为均匀,这是由于RANS中采用空间平均的结果。

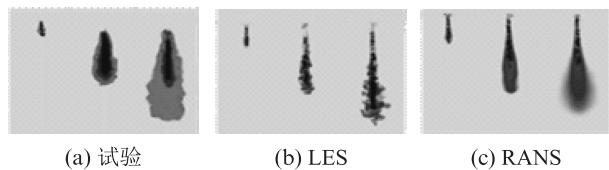


图7 掺混燃料喷雾的剖面图

通过对3种辛烷值燃料气液相贯穿距的标定,使计算中采用的模型都能够对喷雾过程及混合气分布情况进行较好的预测。此后基于标定好的喷雾模型进一步研究不同湍流模型下缸内流动、燃料混合对部分预混燃烧的影响机理。

2.2 RANS与LES对柴油燃烧的影响

首先,采用RANS与LES对柴油燃料在表4所示工况下的燃烧进行分析,如图8所示。从图8中可以看出,由于柴油的活性较高,滞燃期较短,因此燃烧过程主要表现为扩散燃烧。采用两种不同的湍流模型得到的缸压和放热率曲线与试验结果都较为接近,这说明两种湍流模型对扩散燃烧过程的预测都较好。为了进一步比较两种湍流模型对柴油混合和燃烧过程的影响,对两种不同湍流模型下缸内的流场进行分析。

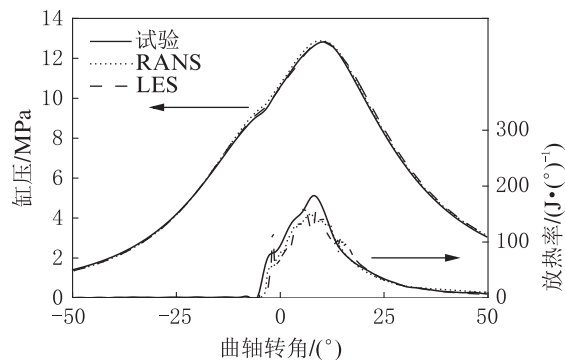


图8 柴油试验与计算的缸压与放热率曲线

图9为采用两种湍流模型时在 -1° 曲轴转角(即上止点前 1° 曲轴转角)时刻缸内的流线、当量比与温度分布图。从流线分布图中可以看出两种湍流模型对缸内流场的预测有一定差异。采用RANS时,在油束周围的涡团个数较少;而采用LES时在喷雾后部有多个小尺度涡团。油束周围湍流结构的差异对混合气的分布产生了较大的影响:采用RANS时当量比的分布在空间各个方向上较为均匀,同时当量比由浓到稀的过渡较为平滑;而采用LES时,当量比在空间上的分布由于受到局部涡流

的影响而呈现出明显的各向异性,燃料分布的差异进一步导致了放热位置也有一定的差异。

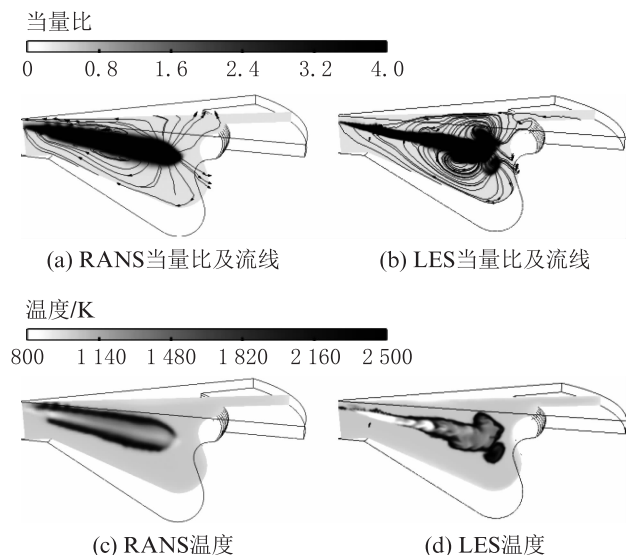


图 9 -1° 曲轴转角时缸内当量比、流线及温度分布

图 10 为采用两种湍流模型计算的热效率 (GIE)、最大压升率 (PPRR) 和排放与试验结果的对比。如图 10 所示,采用两种湍流模型虽然得到的热效率和最大压升率接近,但 NO_x 排放有一定差异。采用 LES 后得到的 NO_x 排放相对较低且与试验结果更为接近,这与燃料在缸内放热的位置有关。从图 9 可知,LES 中高温区域主要分布在离喷孔较远的位置,而 RANS 中高温区域更加接近喷孔,RANS 中较大的高温区域面积导致了较高的 NO_x 排放。

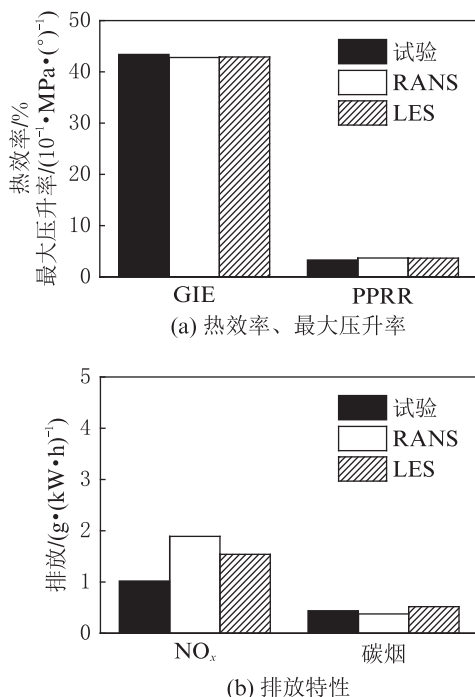


图 10 柴油试验与计算的热效率、最大压升率和排放特性

2.3 RANS 与 LES 对掺混燃料燃烧的影响

向柴油中掺混汽油降低燃料活性,研究与柴油相同工况下汽柴油掺混燃料采用 RANS 与 LES 时的燃烧与排放情况,如图 11 所示。与柴油相比,掺混汽油后燃料的滞燃期明显增长,使得在滞燃期内燃料预混的比例变多,预混燃烧的比例明显增加。

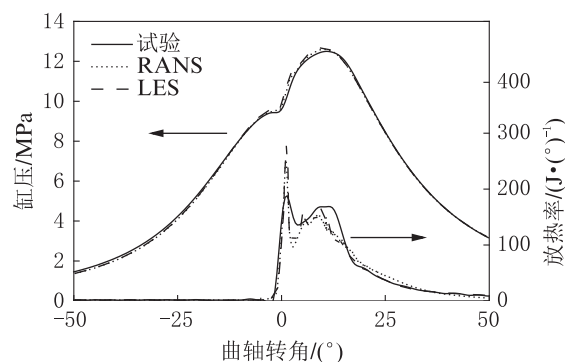


图 11 掺混燃料试验与计算的缸压与放热率曲线

虽然两种湍流模型对缸压、放热率的预测结果差异较小,但是在缸内的着火位置及燃烧过程上有较大的差异。图 12 为上止点后 1° 曲轴转角时采用两种湍流模型缸内当量比、流线和温度分布图。从图 12(c) 和图 12(d) 可以看出,采用 RANS 时燃料的着火区域较为均匀地包裹着整个油束,而采用 LES 时着火位置分布得较为分散,并且靠近燃烧室壁面位置。这种着火位置的差异主要与缸内的燃料分布密切相关:采用 LES 时模型中预测的湍流黏度和湍流扩散较小,从而使得燃料组分较少地向油束的外围扩散;同时,由图 12(a) 和图 12(b) 可见,采用 LES 后能够在油束周围捕捉更多的小涡团,这些小涡团的存在也在一定程度上导致了燃料在空间分布上的不均匀。

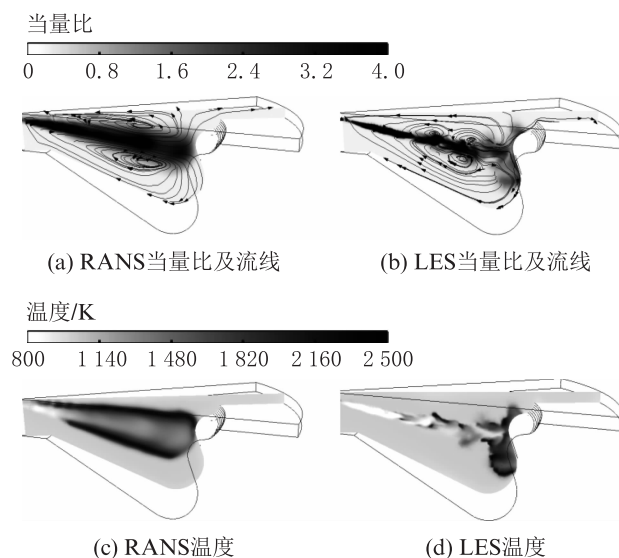


图 12 1° 曲轴转角时缸内当量比、流线和温度分布图

图13为两种湍流模型下汽柴油掺混燃料的热效率、最大压升率和排放与试验结果的对比。虽然采用两种湍流模型的热效率、最大压升率与碳烟排放都接近,但是采用LES后 NO_x 排放较低且与试验结果更为接近。这是由LES中高温区域较为分散,且在缸内分布的区域较小引起的。

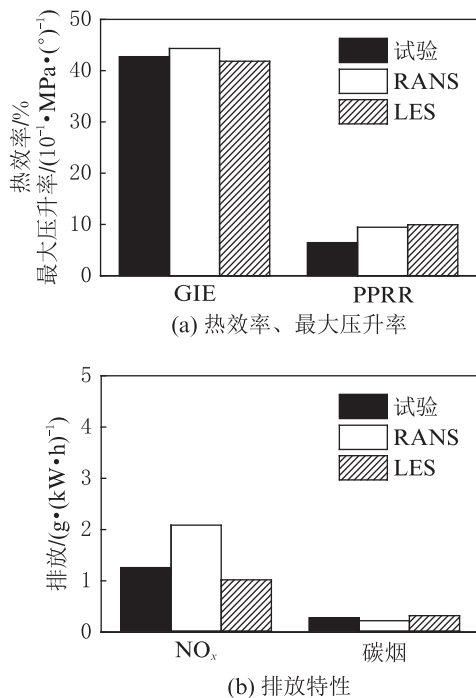


图13 掺混燃料试验与计算的热效率、最大压升率和排放特性

2.4 RANS 与 LES 对汽油燃烧的影响

由上文可见,随燃料辛烷值的逐渐增加,RANS与LES两种湍流模型对于燃烧过程预测的差异也逐渐凸显。因此,在前文相同工况下继续增加燃料的辛烷值,进一步分析两种湍流模型对汽油部分预混燃烧的影响。

图14为采用RANS与LES两种湍流模型对汽油燃烧计算的缸压、放热率曲线与试验结果的对比。如图14所示,采用两种湍流模型所得到的放热率曲线均与试验有一定的偏差,但是采用LES的结果与试验更为接近。对比RANS与LES结果可以看出:采用RANS时燃料的滞燃期较长,放热时刻相对推迟,整个高温放热过程呈现为明显的单峰预混放热;而采用LES时着火时刻相对提前,整个放热过程则呈现为预混燃烧与扩散燃烧的结合,在上止点后 10° 曲轴转角前燃料的燃烧呈现为预混燃烧形式的快速放热,而在上止点后 10° 之后燃烧过程与扩散燃烧较为接近。为了对RANS与LES中这种差异进行解释,需要对缸内的燃烧情况进行进一步的分析。

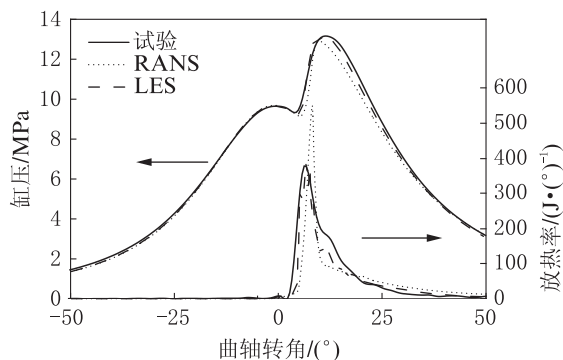


图14 汽油试验与计算的缸压与放热率曲线

首先对LES中着火时刻较早的原因进行分析。图15为上止点后 5° 曲轴转角时采用两种湍流模型在喷雾轴线方向的当量比、流线与温度分布俯视图。从图15中可以看出,当采用LES时油束末端的混合气已经开始着火,而采用RANS时燃料还未着火,这是由不同湍流模型下燃料混合的差异导致的。从图15(a)和图15(b)的流线图可以看出,采用LES时油束末端能够捕捉到比RANS更多的小涡团结构,这些涡团结构促进了局部可燃混合气的形成,从而加速了局部燃料的着火,因此采用LES时着火时刻较早。

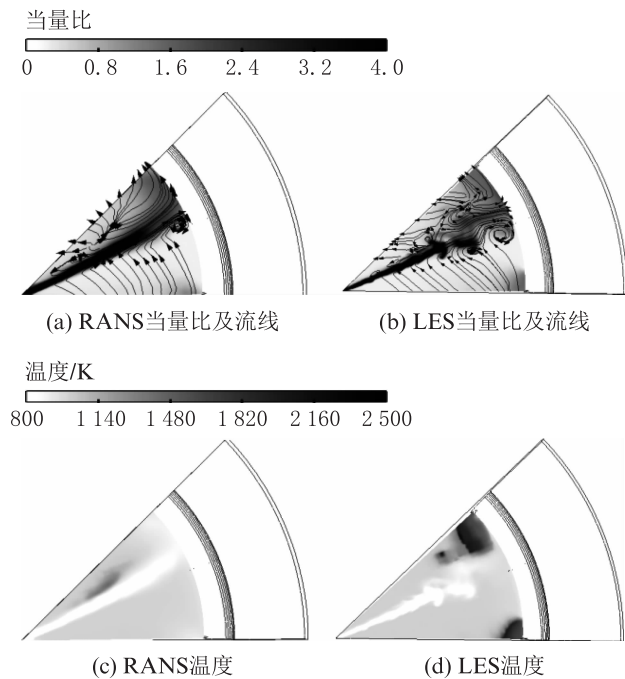


图15 5° 曲轴转角时缸内当量比、流线与温度分布图

进一步对采用LES时预混与扩散燃烧结合的放热规律进行分析。图16为上止点后 11° 曲轴转角时两种湍流模型下缸内的温度分布图。如图16所示,RANS中黑色的高温区域延伸到与喷嘴接近的位置,而LES中高温放热区域与喷嘴保持一段距离。这段距离使得采用LES时喷入缸内的燃料有

一段混合的时间,从而使随后喷入缸内燃料的燃烧更加充分,这也正是图 14 中圆圈内 LES 放热率比采用 RANS 时高的原因。

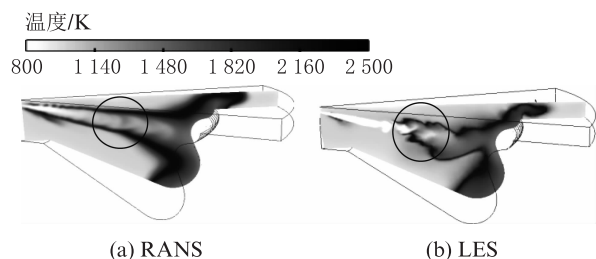


图 16 上止点后 11°曲轴转角时缸内温度分布图

为了揭示产生这种现象的原因,对两种湍流模型下图 16 圆圈区域内的局部进行进一步分析,如图 17 所示。由于 RANS 模型中的黏性耗散较强,油束向外扩散较多,油束整体相对较“粗”;而本文所采用的动态结构的 LES 模型由于不采用湍流黏度,在靠近喷嘴位置时油束较“细”,在油束后部周围较多的小涡团结构促进了燃料的混合过程,从而加速了油束的向外扩散。 OH^- 产生的放热区域主要集中在当量比 0.8~1.2 的范围内;采用 RANS 时这一当量比范围沿油束较为均匀的分布;而采用 LES 时这一当量比范围主要集中在喷雾后部,在靠近喷嘴位置范围较窄,因此采用 LES 后放热主要发生在喷雾的后部,使得后期燃烧表现为扩散燃烧形式。

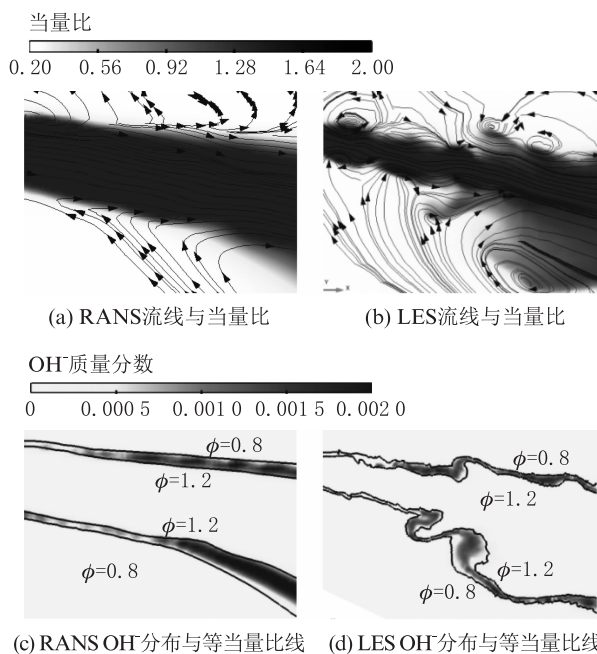
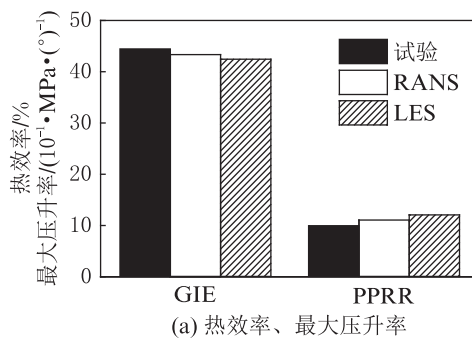


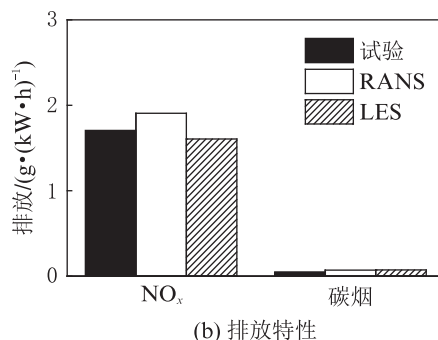
图 17 上止点后 11°曲轴转角时缸内当量比、流线与 OH^- 分布图

图 18 为两种湍流模型下汽油的热效率、最大压升率和排放特性与试验结果的对比。与柴油和掺混燃料类似,采用两种不同的湍流模型后虽然热效率、

最大压升率与碳烟排放都与试验结果接近,但 NO_x 排放相对较低。这与图 16 中缸内高温区域的分布有关。采用 RANS 时高温区域分布在从燃烧室壁面到喷孔的较广的区域,而采用 LES 时高温区域只分布在燃烧室壁面附近,因此 NO_x 排放较低。



(a) 热效率、最大压升率



(b) 排放特性

图 18 汽油试验与计算的热效率、最大压升率和排放特性

3 结论

(1) 基于发动机试验数据采用 RANS 和 LES 对柴油、汽柴油混合燃料及汽油 3 种燃料的燃烧过程进行计算,结果表明:采用 LES 能够较好预测到喷雾周围更小尺度的涡团结构,喷雾形态与试验结果更为接近。

(2) 相比 RANS,采用 LES 能够更好地预测高辛烷值燃料部分预混燃烧模式下的着火时刻、放热规律与排放特性。

(3) 采用 LES 可以更好地预测 GCI 喷雾周围小涡团对燃料的输运与混合的促进作用,从而使其预测的滞燃期相比 RANS 较短。LES 中较低的黏性耗散及喷雾后部的小涡团结构将使得燃烧区域主要分布在离燃烧室中心较远的位置。

(4) 采用 LES 计算得到的高温放热主要发生在离燃烧室中心较远的位置,而 RANS 计算得到的高温放热区域则相对较大,因而相应 NO_x 排放较高。

参考文献:

- [1] YAO M F, ZHENG Z Q, LIU H F. Progress and recent

- trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009, 35(5):398-437.
- [2] AOYAMA T, HATTORI Y, MIZUTA J, et al. An experimental study on premixed-charge compression ignition gasoline engine[J]. *JSAE Review*, 1995, 16(3):314.
- [3] KIMURA S, AOKI O, KITAHARA Y, et al. Ultra-clean combustion technology combining a low-temperature and premixed combustion concept for meeting future emission standards[C/OL]. SAE Paper, 2001, 2001-01-0200. (2001-03-05) [2017-09-01]. <http://papers.sae.org/2001-01-0200>.
- [4] KALGHATGI G T, RISBERG P, ÅNGSTROM H E. Advantages of fuels with high resistance to auto-ignition in late-injection, low-temperature, compression ignition combustion[C/OL]. SAE Paper, 2006, 2006-01-3385. (2006-10-16) [2017-09-01]. <http://papers.sae.org/2006-01-3385>.
- [5] JANGI M, SOLSJO R, JOHANSSON B, et al. On large eddy simulation of diesel spray for internal combustion engines[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2015, 53:68-80.
- [6] RUTLAND C J. Large-eddy simulations for internal combustion engines—a review[J]. *International Journal of Engine Research*, 2011, 12(5):421-451.
- [7] POMRANING E, RUTLAND C J. Dynamic one-equation nonviscosity large-eddy simulation model[J]. *AIAA Journal*, 2012, 40(4):689-701.
- [8] 周磊,解茂昭,罗开红,等. 大涡模拟在内燃机中应用的研究进展[J]. *力学学报*, 2013, 45(4):467-482.
- ZHOU L, XIE M Z, LUO K H, et al. Application of large eddy simulation in internal combustion engines[J]. *Journal of Mechanics*, 2013, 45(4):467-482.
- [9] RA Y, JEONG E Y, REITZ R D. Numerical parametric study of diesel engine operation with gasoline[J]. *Combustion Science & Technology*, 2009, 181(2):350-378.
- [10] RA Y, LOEPER P, ANDRIE M, et al. Gasoline DICI engine operation in the LTC regime using triple-pulse injection[J]. *SAE International Journal of Engines*, 2012, 5:1109-1132.
- [11] DEMPSEY A B, REITZ R D. Computational optimization of a heavy-duty compression ignition engine fueled with conventional gasoline[J]. *SAE International Journal of Engines*, 2011, 4:338-359.
- [12] SOM S, LONGMAN D E, LUO Z, et al. Simulating flame lift-off characteristics of diesel and biodiesel fuels using detailed chemical-kinetic mechanisms and large eddy simulation turbulence model[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2012, 134(3):032204.
- [13] SOM S, WANG Z, PEI Y, et al. LES of vaporizing gasoline sprays considering multi-injection averaging and grid-convergent mesh resolution [C]//Houston: ASME 2015 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, 2015, ICEF2015-1003.
- [14] VAN D N, RUTLAND C. Adapting diesel large-eddy simulation spray models for direct-injection spark-ignition applications[J]. *International Journal of Engine Research*, 2016, 17(3):291-315.
- [15] AMSDEN A A, OROURKE P J, Butler T D. KIVA-2: a computer program for chemically reactive flows with sprays[R]. NASA STI/recon Technical Report N, 1989:89.
- [16] REITZ R D, DIWAKAR R. Structure of high-pressure fuel sprays[C/OL]. SAE Paper, 1987, 870598. (1987-02-01) [2017-09-01]. <http://papers.sae.org/870598>.
- [17] REITZ R D. Modeling atomization processes in high-pressure vaporizing sprays[J]. *Atomisation Spray Technology*, 1987, 3:309-337.
- [18] FROSSLING N. Über die verdunstungfallender tropfen[J]. *Gerl Beitr Geophys*, 1938; 52(1):170-216.
- [19] LIU A B, MATHER D, REITZ R D. Modeling the effects of drop drag and breakup on fuel sprays[C/OL]. SAE Paper, 1993, 930072. (1993-03-01) [2017-09-01]. <http://papers.sae.org/930072>.
- [20] WANG H, YAO M F, REITZ R D. Development of a reduced primary reference fuel mechanism for internal combustion engine combustion simulations[J]. *Energy & Fuels*, 2013, 27(12):7843-7853.
- [21] SMITH G P, GOLDEN D M, FRENKLACH M, et al. GRI-Mech 3. 0. [EB/OL]. (2009-01-01) [2017-09-01]. <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/>.
- [22] HIROYASU H, KADOTA T. Models for combustion and formation of nitric oxide and soot in DI diesel engines[C/OL]. SAE Paper, 1976, 760129. (1976-02-01) [2017-09-01]. <http://papers.sae.org/760129>.
- [23] PAYRI R, SALVADOR F J, MARTI-ALDARAVI P, et al. ECN spray G external spray visualization and spray collapse description through penetration and morphology analysis[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 112:304-316.
- [24] VALENTINO M, JIANG X, ZHAO H. A comparative RANS/LES study of transient gas jets and sprays under diesel conditions[J]. *Atomization & Sprays*, 2007, 17(5):451-472.
- [25] MA X, ZHENG L, LI Y F, et al. High speed imaging study on the spray characteristics of diesel at elevated temperatures and back pressures[J]. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 2014, 7:159-166.