

富氢重整气对天然气发动机燃烧反应过程的影响

张韩余阳, 张尊华, 龙焱祥, 李格升

(武汉理工大学能源与动力工程学院, 430063, 武汉)

摘要: 为研究基于废气重整再循环(ReGR)技术的天然气发动机燃烧排放调控机制,开展了富氢重整气添加对点燃式天然气发动机缸内燃烧过程影响的数值模拟研究。结果表明,添加富氢重整气与增大过量空气系数对天然气发动机的燃烧过程的影响规律相反。增大重整气添加率可使燃料着火时刻提前 1.42° ,燃烧持续期缩短;增大过量空气系数则会使缸内平均压力峰值和放热率峰值降低,着火时刻滞后 2.24° 。ReGR 率增加到 16% 时可使总碳氢化合物排放降低 26.98%, NO_x 排放降低 62.52%,但会导致发动机功率降低 9.52%。基于此,从化学动力学角度进一步解析 ReGR 率对天然气发动机缸内燃料燃烧反应过程与污染物生成演化过程的影响。结果表明,随 ReGR 率增大,OH 自由基参与 CH_4 消耗反应占比增大,从而加快基元反应速率,使燃烧相位提前,并使未燃 HC 排放降低。

关键词: 天然气发动机;废气重整再循环;燃烧反应过程;化学动力学分析

中图分类号: TK46 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202109017 **文章编号:** 0253-987X(2021)09-0152-09



OSID 码

Effects of Hydrogen-Rich Reformed Gas on the Combustion Reaction Process in a Natural Gas Engine

ZHANG Hanyuyang, ZHANG Zunhua, LONG Yanxiang, LI Gesheng

(School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: To investigate the regulation mechanism of reformed exhaust gas recirculation (ReGR) technology on the combustion and emission of natural gas engines, a numerical simulation study on the combustion process of the spark-ignition natural gas engine was conducted. The results show that the effects of hydrogen-rich reformed gas addition on the combustion process of natural gas engines are inverse to that of increasing excess air coefficient. Specifically, the ignition time of fuel advances by 1.42° and the combustion duration is shortened with the increase of the reformed gas addition rate (ReGR rate). However, with the increase of excess air coefficient, the in-cylinder pressure and the heat release rate both decrease, and also, the ignition time is delayed by 2.24° . When ReGR rate increases by 16%, the total hydrocarbon (THC) and NO_x emission are reduced by 26.98% and 62.52%, respectively; but the engine power will be reduced by 9.52%. Thereout, the influences of ReGR rate on the fuel combustion process and pollutant formation process of liquefied natural gas engines were further analyzed from the perspective of chemical kinetics. It shows that the proportion of OH radical participating in CH_4 consumption reaction increases with the ReGR rate. Consequently, the combustion phase is advanced by

收稿日期: 2020-12-30。 作者简介: 张韩余阳(1999—),女,硕士生;李格升(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51979212);工业和信息化部高技术船舶研究项目绿色智能内河船舶创新专项。

网络出版时间: 2021-05-25

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20210524.1644.002.html>

accelerating the elementary reaction rate, and the unburned HC emission is reduced as well.

Keywords: natural gas engine; reformed exhaust gas recirculation; combustion reaction process; chemical kinetics analysis

目前大部分船舶使用石油基燃料作为动力能源,但石油燃料的燃烧所产生的二氧化碳、氮氧化物、碳烟颗粒等污染物排放会带来诸多环境问题,成为传统柴油机燃烧的一大弊端。由于天然气储蓄量大且燃烧产物清洁,逐步被用作船用发动机的清洁替代燃料^[1]。然而,天然气的燃烧温度较高,易导致氮氧化物的排放恶化。采用稀薄燃烧和废气再循环(EGR)技术可降低燃烧温度,合理控制天然气发动机的排放^[2]。天然气的稀燃能力较弱,通常需要向混合气中添加氢气,以提高可燃混合气的稀燃能力,达到稳定稀薄燃烧^[3]。基于此背景,提出了 LNG 发动机重整废气再循环(REGR)技术方案。该技术将废气再循环与燃料重整相结合,可以实现天然气发动机的实时掺氢稀薄燃烧,显著降低 NO_x 排放。

为阐明 REGR 技术对天然气发动机整体性能的影响规律,国内外学者开展了一系列研究。黄彬与陈浩等通过对天然气掺氢发动机结合 EGR 技术的台架试验,证明了天然气掺氢在改善发动机循环变动、提高燃烧稳定性方面的优势^[4-5]。Yap 与钟绍华等在天然气 HCCI 发动机上进行了闭环重整制氢的试验研究,结果表明富氢重整气添加可使天然气发动机燃烧相位提前、负载范围扩大、NO_x 排放量降低,证实了在线制氢的可行性^[6-7]。毛立通与 Long 等进行了富氢混合气对点燃式天然气发动机性能与排放影响的模拟研究,发现随着 REGR 率的提高,缸内压力峰值增大,THC 排放量减小,CO 排放量增加^[8-9]。

然而,上述研究主要获取了 REGR 技术对天然气发动机缸内燃烧过程以及污染物排放等宏观参数的影响规律,富氢重整气添加对缸内燃烧过程的微观影响机制研究较少,因此可以借助化学动力学分析方法(例如通过缸内燃烧过程的反应途径分析)来进一步解析。部分学者采用 CHEMKIN 软件建立了缸内燃烧的零维/一维模型,对影响掺氢天然气发动机燃烧过程的重要基元反应以及重要组分形成过程进行了分析^[10-11]。也有学者采用三维 CFD 模型耦合缸内反应路径分析的方案,将缸内燃烧微观反应细节与发动机宏观工作特征相结合,以进一步揭示实际燃烧过程中缸内反应途径对发动机燃烧特性的影响规律^[12-14]。现有关于发动机缸内燃料燃烧的

反应动力学分析主要集中于解析柴油机缸内燃料着火与燃烧过程,而对于基于 REGR 技术的天然气发动机燃烧微观分析却鲜有报道,因此本研究将首先结合 CONVERGE 模型分析说明基于 REGR 技术下重整气添加率以及过量空气系数对船用 LNG 发动机燃烧性能的影响规律,在此基础上通过 MATLAB 软件对 CFD 三维计算结果进行数据提取与处理,调用 Cantera 动力学分析软件的零维均质求解器^[15],模拟计算发动机燃烧室不同区域的瞬态燃烧反应过程,从而结合缸内燃烧过程中燃料消耗的瞬时反应路径分析,阐明富氢重整气对天然气发动机缸内燃烧调控的动力学机制。

1 数值计算模型的建立与验证

1.1 模型的建立

本研究以玉柴公司生产的 YC6MK200NL-C20 为原型建立三维仿真模型,该发动机为六缸、预混合、搭载水冷设施、配置涡轮增压系统的点燃式天然气发动机,具体发动机基本参数见表 1。

表 1 YC6MK 200NL-C20 型发动机参数
Table 1 Parameters of YC6MK 200NL-C20 engine

参数	数值
缸径×冲程/mm×mm	123×145
排量/L	10.338
压缩比	11.5
功率/kW	147
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500
点火提前角/(°)	-27.5
进气门开启时刻/(°)	-372
进气门关闭时刻/(°)	-142
排气门开启时刻/(°)	126
排气门关闭时刻/(°)	372

本研究建立的模型如图 1 所示,采用 CONVERGE 自动生成笛卡尔坐标理想正六面体网格,设置基础网格边长(4~8 mm)后在火花塞附近区域网格加密至 0.4 mm,同时启用网格自适应加密功能,对燃烧过程中温度梯度和速度梯度较大区域加密至 0.4 mm,这种网格尺寸设定方法在节省计算时间的同时也能保证一定的计算精度^[16]。

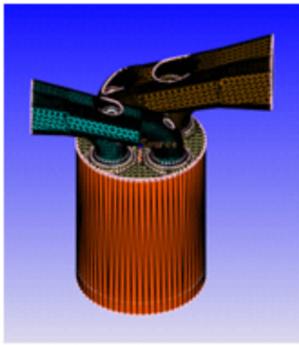


图 1 发动机模型
Fig. 1 Engine model

数值模型中的湍流模型选用 RNG $k-\epsilon$ 模型^[17], 运用 SAGE 详细化学动力学求解器计算缸内燃料燃烧过程^[18]。计算所用化学动力学机理为用于天然气燃烧计算的 GRI-MECH 3.0 机理^[19]。

1.2 模型的验证

定义重整气添加率(REGR 率) R_{re} 为每循环添加的重整气量与吸入气缸的进气总量的比值

$$R_{re} = \frac{n_{re}}{n_{re} + n_1} \tag{1}$$

式中: n_{re} 为添加重整气的量; n_1 为吸入缸内空气的量。

为验证所建立的模型,模拟 REGR 率为 5%(组分 H_2 、 CO 、 CH_4 和 N_2 的体积分数分别为 24%、12%、8%和 56%)时发动机在 75%负荷(110 kW、1 362 r·min⁻¹)下的燃烧过程,将采用不同基础网格尺寸模拟得到的缸压曲线和放热率曲线与本课题组 Long 等的试验数据^[9]进行对比,结果如图 2 所示。由图可见,气缸平均压力与瞬时放热率的模拟值与试验值整体吻合较好。考虑到计算机时与计算精度,选择基础网格尺寸为 6.4 mm 的模型进行后

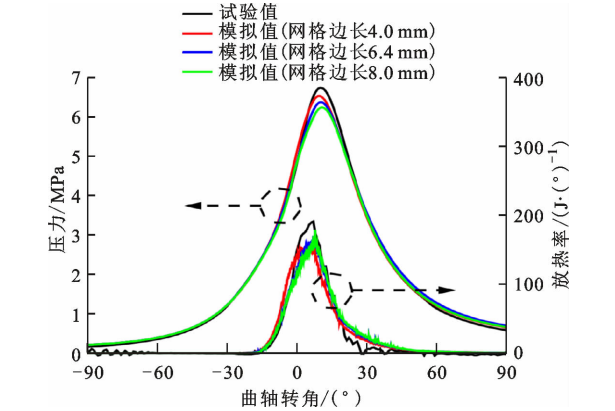


图 2 缸内压力和放热率模拟值与试验值对比
Fig. 2 Comparison of pressure and heat release rate between simulated and experimental values

续模拟工作,其缸压峰值与试验值绝对误差为 0.34 MPa(相对误差低于 6%)。缸内燃烧产物浓度的模拟值与试验值对比如表 2 所示,尾气常规排放物 NO_x 和 CH_4 的相对误差在 5%以内,CO 排放的误差也在可接受范围内。综上,可用该模型进行后续模拟计算。

表 2 污染物排放的模拟值与试验值对比
Table 2 Comparison of simulated and experimental values of emissions

排放量	$x(NO_x)/10^{-6}$	$x(CH_4)/10^{-6}$	$x(CO)/10^{-6}$
试验值	2 697	663.9	227.0
模拟值	2 596	667.4	168.5
相对误差/%	3.74	0.53	25.80

1.3 化学动力学分析方法

为获取针对特定燃烧区域的反应路径,结合 MATLAB 与开源化学动力学计算软件 Cantera 开展缸内不同时刻燃烧反应特性研究。点燃式 LNG 发动机可分为已燃区、火焰面区域和未燃区 3 个区域,根据 CFD 模拟结果中 $T>1\,800\text{ K}$ 、 $x(CH_2O)>2.5\times 10^{-4}$ 筛选出火焰面区域网格数据;根据 $T>1\,800\text{ K}$ 、 $x(CH_4)<1\times 10^{-4}$ 筛选出已燃区域网格数据。运用燃烧机理与 Cantera 定容均质求解器求解不同区域瞬时反应路径,以解析燃料消耗以及污染物形成过程^[20]。

在 Cantera 中, K 种组分的基元反应可用下式表示

$$\sum_{k=1}^K v'_{k,i} n(X_k) \rightleftharpoons \sum_{k=1}^K v''_{k,i} n(X_k), \quad i = 1, 2, \dots, I \tag{2}$$

式中: $v'_{k,i}$ 为第 i 个基元反应中第 k 种组分的正向化学计量系数; $v''_{k,i}$ 为第 i 个基元反应中第 k 种组分的逆向化学计量系数; X_k 为第 k 种组分的化学符号。

由式(2)可以得到通过第 i 个基元反应消耗的第 k 种组分的消耗速率表达式

$$\dot{\omega}_{k,i} = (v'_{k,i} - v''_{k,i}) \left(k_{fi} \prod_{k=1}^K \omega_k v'_{k,i} - k_{ri} \prod_{k=1}^K \omega_k v''_{k,i} \right) \tag{3}$$

式中: k_{fi} 为第 k 种组分的正向化学反应常数; k_{ri} 为第 k 种组分的逆向化学反应常数; ω_k 为第 k 种组分的质量分数。

第 k 种组分可通过第 i 个基元反应的总消耗量 n_k 求出

$$n_k = v'_{k,i} \dot{\omega}_{k,i} V \Delta t \tag{4}$$

式中: Δt 为反应时间; V 为反应所占的空间体积。

对于组分 A ,将筛选出的每个网格中通过第 i 个基元反应的消耗量相加,得到组分 A 通过该反应的总消耗量。计算出组分 A 通过每条反应通道的消耗量后即可得到某条反应通道的消耗量所占比例,在后续的路径分析中,以百分比形式表示各基元反应的消耗量。

1.4 模拟工况点

基于典型 LNG 发动机废气-燃料重整气的组分^[21-22],本模拟研究中重整气组分体积比 $V_{H_2}:V_{CO}:V_{N_2}=1:4:20$ 。根据稀燃式天然气发动机 REGR 率^[8,23]与过量空气系数 λ ^[24]一般范围等增量取值,通过改变发动机进气组分来模拟不同工况下的进气边界条件,以此研究富氢混合气添加对稀燃式天然气发动机缸内燃烧过程与污染物排放的影响规律,模拟工况点如表 3 所示,其中一自变量改变时另一变量固定不变,共模拟了 20 组工况。

表 3 模拟工况点

Table 3 Simulation parameters

$R_{re}/\%$	0	4	8	12	16
λ	1.37	1.43	1.49	1.55	

2 结果与讨论

2.1 燃烧特性分析

过量空气系数为 1.43 时,不同 REGR 率下的混合气平均热值见表 4,重整气添加造成缸内混合气中氢气量增多,同时甲烷量减少,使得可燃混合气总热值降低,不同 REGR 率下发动机缸压与放热率曲线如图 3 所示。由图可知,相比于纯甲烷工况(REGR 率为 0%),添加富氢重整气后发动机缸压与放热率峰值增大,且不同 REGR 率工况下发动机缸压与放热量接近。由于与甲烷相比氢气反应活性更高,火焰传播速率更快,因此添加氢气后混合气放热速率更快,使缸压与放热率峰值增大,而加入重整气后混合气热值降低使总放热量减小,两者共同影响使缸压与放热率峰值维持在较接近水平。此外,由放热率曲线可看出,随着 REGR 率的增大,缸内燃烧持续期缩短。REGR 率为 12% 时不同过量空气系数下的缸压曲线如图 4 所示。由图可知,随过量空气系数增大,缸内平均压力峰值和缸内瞬时放热率峰值均降低,且各峰值所对应的曲轴转角增大。过量空气系数增大导致可燃混合气浓度减小,着火时间延迟,且火焰传播速度减慢,造成发动机的动力

表 4 混合气平均热值

Table 4 Average heat value of mixture

$R_{re}/\%$	0	4	8	12	16
热值/($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	1.950	1.909	1.856	1.803	1749

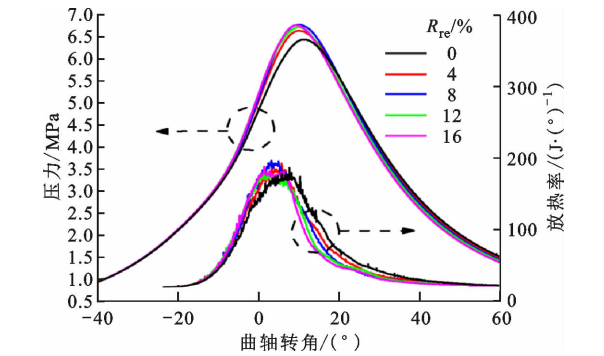


图 3 $\lambda=1.43$ 时不同 REGR 率下的缸压和放热率
Fig. 3 Pressure and heat release rate with different REGR rates when $\lambda=1.43$

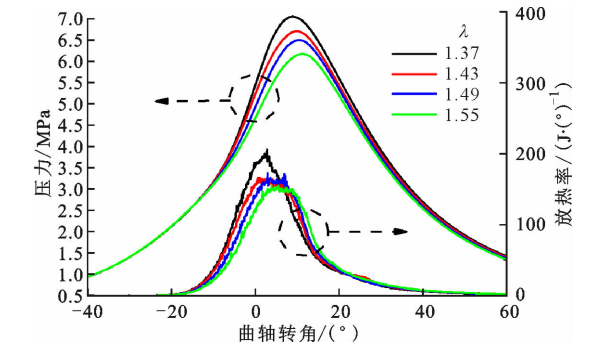


图 4 $R_{re}=12\%$ 时不同过量空气系数下的缸压和放热率
Fig. 4 Pressure and heat release rate with different excess air coefficients when $R_{re}=12\%$

性变差。图 5 为不同模拟工况下的发动机功率,可知 REGR 率与过量空气系数的增大均会导致发动机功率下降,过量空气系数为 1.37、REGR 率为 16% 时会导致发动机功率下降 9.52%。

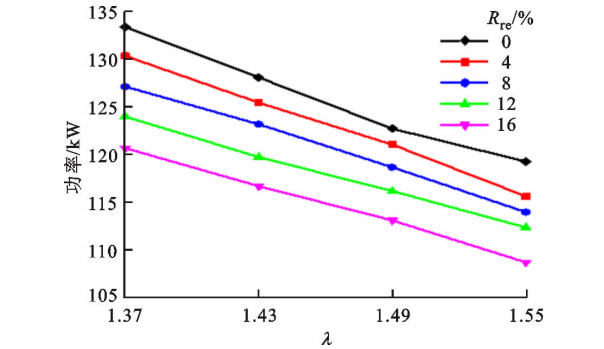


图 5 不同 REGR 率与过量空气系数条件下的功率
Fig. 5 Power at different REGR rates and excess air coefficients

以缸内放热量达到累计放热量的 5% 时的曲轴转角作为着火时刻并定义为 CA5; 以缸内放热量达到累计放热量的 50% 时的曲轴转角作为燃料达到燃烧重心的时刻并定义为 CA50。不同 REGR 率与不同过量空气系数下的燃烧相位对比见图 6, REGR 率一定时 CA5 与 CA50 相位均随过量空气系数的增大而滞后 (REGR 率为 8% 时, 着火时刻滞后 2.24° , 燃烧重心时刻滞后 4.49°), 且两者间隔时间缩短, 与文献[25]中结论一致。由于过量空气系数增大, 可燃混合气浓度降低, 使缸内燃烧化学准备时间增长, 燃烧放热率降低, 导致燃烧相位滞后, 燃烧持续期增加。当过量空气系数一定时, CA5 的相位在 REGR 率由 0% 增大到 12% 的过程中不断提前 (过量空气系数为 1.55 时着火时刻提前 1.42°), REGR 率达到 16% 时出现滞后趋势, CA50 的相位随 REGR 率增大不断提前。由于重整气中的 H_2 可缩短天然气着火时间, 但添加率增大会使甲烷浓度降低, REGR 率为 4%~12% 时 H_2 对着火的促进作用占主导, CA5 时刻提前; REGR 率达到 16% 时甲烷浓度降低对着火的抑制作用占主导, CA5 时刻滞后。随 REGR 率增大, H_2 浓度增大, 火焰传播速率增大, CA50 的相位提前。

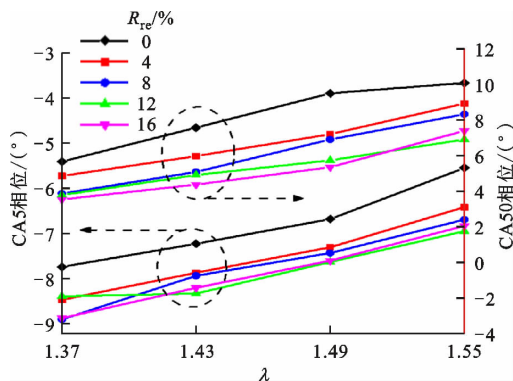


图 6 不同 REGR 率与过量空气系数下的燃烧相位

Fig. 6 Combustion phase at different REGR rates and excess air coefficients

2.2 排放特性分析

2.2.1 THC 排放分析 图 7 是 CA5 和 CA50 时刻不同 REGR 率下缸内 CH_4 浓度分布云图, 由图可知火花塞点火后, 火焰由点火中心向四周传播, 已燃区域甲烷的浓度极小, 可根据甲烷浓度分界线判断火焰面的发展。缸内放热到达 CA50 时, 大部分 CH_4 已燃烧殆尽, 但靠近气缸壁面处以及活塞环间隙区域温度较低, 有部分 CH_4 燃料还未被燃烧, 该处的未燃 CH_4 是 HC 排放的主要来源^[9]。图 8 为

缸内甲烷浓度变化曲线, 可知随 REGR 率增大, 燃烧结束时缸内甲烷浓度越小。

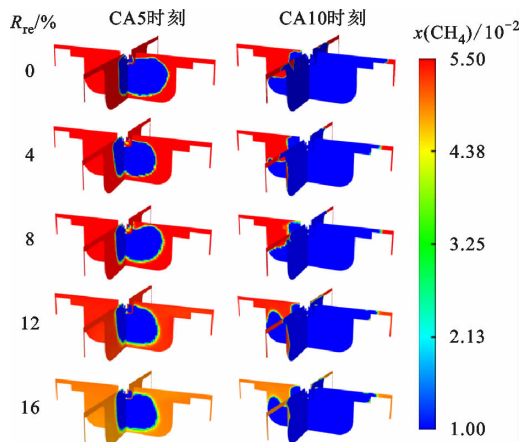


图 7 不同 REGR 率下缸内 CH_4 浓度分布云图

Fig. 7 Concentration of CH_4 in cylinder at different REGR rates

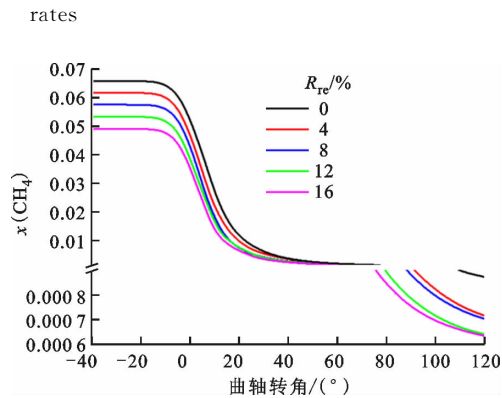


图 8 $\lambda=1.43$ 时不同 REGR 率下缸内 $x(CH_4)$

Fig. 8 Mole fraction of CH_4 in cylinder at different REGR rates

在进行 HC 排放分析时, 以 CH_4 、 CH_2O 、 C_2H_6 这 3 种组分的排放量之和 (占实际 THC 排放的 99% 以上) 表征 THC 排放量, 结果如图 9 所示。由图可知, 过量空气系数为 1.43、REGR 率为 16% 时

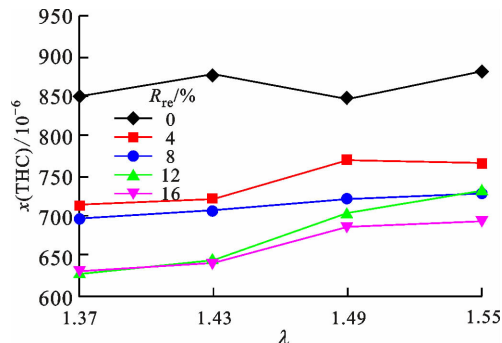


图 9 不同 REGR 率与过量空气系数下 THC 排放量

Fig. 9 THC emission at different REGR rates and excess air coefficients

可使 THC 排放量降低 26.98%。在 REGR 率一定的情况下,随过量空气系数增大,火焰传播不稳定性增大,失火概率增加,缸内平均温度降低,抑制了 THC 后期氧化^[9,26],且靠近气缸壁面的缝隙区温度更低,其中未燃的 HC 量增多,导致 THC 排放量略有增大。过量空气系数一定时,随 REGR 率增大,THC 排放量减少。由于 REGR 率增大,进入缸内的甲烷量减少,未燃区域的 HC 浓度降低,燃烧结束后狭缝区 HC 量减小,使最终 THC 排放量降低。

2.2.2 NO_x 排放分析 热力型 NO 占 NO_x 排放的 80% 以上,而其形成主要与缸内温度环境相关^[27]。图 10 是不同 REGR 率下缸内最高温度变化曲线,可知随 REGR 率增大,缸内最高温度降低。图 11 是不同 REGR 率下缸内 NO 浓度分布云图,随 REGR 率增大,CA 5 时刻缸内高 NO 浓度区域面积减小,CA50 时刻靠近壁面处 NO 浓度减小。在进行 NO_x 排放分析时,以 NO 与 NO₂ 排放量之和表征 NO_x 排放量。图 12 为不同 REGR 率与过量空气系数下 NO_x 排放量。由于增大 REGR 率造成缸内燃料热值降低,使燃烧过程中缸内最高温度降低,且燃烧速率增大,燃烧持续期缩短,使 NO_x 排放量减小。不同模拟工况下 NO_x 摩尔分数改变范围较大,过量空气系数为 1.55、REGR 率为 16% 时可使 NO_x 排放量降低 62.52%,因此在选择合适 REGR 率和过量空气系数范围时,应重点考虑其对 NO_x 排放量的影响。

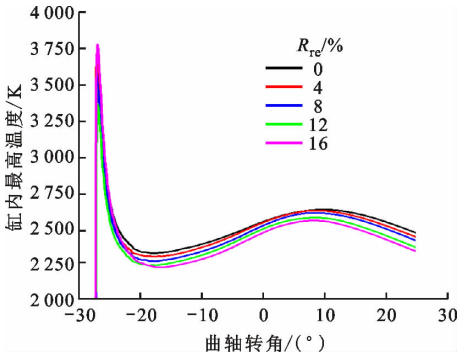


图 10 λ=1.43 时缸内最高温度曲线

Fig. 10 Maximum temperature in cylinder when λ=1.43

2.2.3 CO 排放分析 影响 CO 生成的主要因素是过量空气系数和最高燃烧温度^[28]。本模拟研究中所取的过量空气系数较大,进入气缸的氧气量相对燃料的富余量大,对 CO 的生成速率影响较小,因此造成 CO 排放增大的主要因素是缸内最高温度。由图 13 可知,随 REGR 率和过量空气系数增大,CO 排放量增大。REGR 率和过量空气系数增大,均可

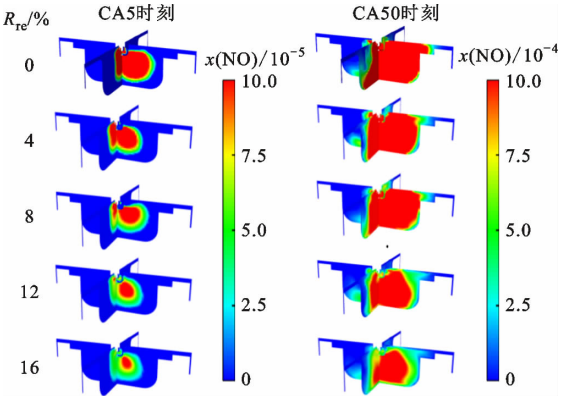


图 11 不同 REGR 率下缸内 NO 浓度分布云图

Fig. 11 Concentration of NO in cylinder at different REGR rates

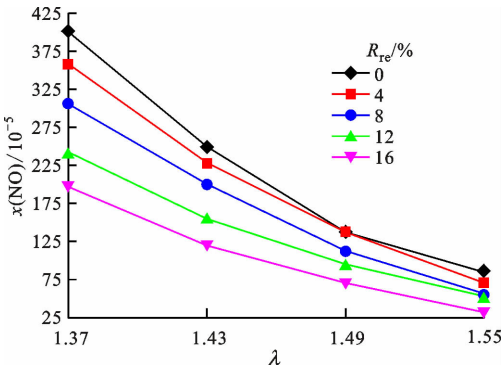


图 12 不同 REGR 率与过量空气系数下 NO_x 排放量

Fig. 12 NO_x emission at different REGR rates and excess air coefficients

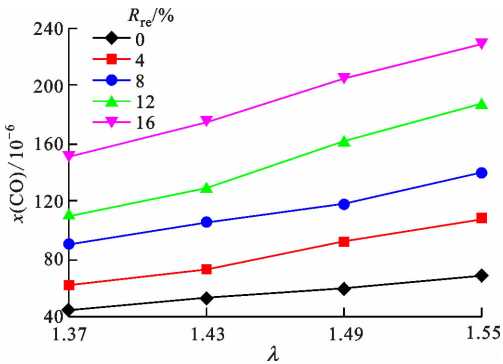


图 13 不同 REGR 率与过量空气系数下 CO 排放量

Fig. 13 CO emission at different REGR rates and excess air coefficients

使缸内可燃混合气浓度降低,燃烧过程中缸内最高温度降低,CO 的生成量减少,且由于重整气中含有相当一部分 CO,REGR 率增大使进入气缸内的 CO 量增大,狭缝中未被氧化的 CO 增多^[9],也会导致 CO 排放增多。除此之外,可观察到 CO 排放量几乎随过量空气系数增加而线性增加。

综上所述,缸压、放热率、燃烧相位以及各污染物排放量随过量空气系数单调变化,可知过量空气系数对天然气发动机缸内燃烧的影响机制较简单,而 REGR 率对燃烧过程的影响更加复杂,因此在后续仅对 REGR 率这一变量做化学动力学分析,以阐明其对天然气发动机燃烧过程的影响机制。

2.3 发动机缸内燃烧过程化学动力学分析

2.3.1 火焰面区域路径分析 采用瞬时反应路径分析方法对符合火焰面区域条件的网格数据进行分析,得到 CA50 时刻火焰面区域内甲烷的反应路径,结果如图 14 所示。在图 14 中,CH₄ 首先与 O、OH 反应生成 CH₃,其中 80% 以上的 CH₄ 通过反应 CH₄+OH⇌CH₃+H₂O 消耗。CH₃ 的主要消耗路径有 5 条,最重要的路径为 CH₃ 与 O 反应生成 CH₂O,然后再经 HCO 生成 CO 和 CO₂;其他支链反应的生成物有 CH₃OH、CH₂OH、CH₃O 以及 CO,各组分之间能够互相转化,最终生成 CO₂。CH₄ 消耗路径中,燃料及大部分中间产物的消耗都是通过与 OH 发生脱氢反应实现的,OH 浓度越大则正向反应速率越快。对比不同 REGR 率下路径中反应占比情况可知,在 CH₄、CH₃、CH₃OH 以及 CH₂O 的消耗反应中,随 REGR 率的增大,OH 参与的基元反应占比增大,O 参与的基元反应占比减小,说明富氢重整气的添加使缸内 H₂ 浓度增大,OH 自由基浓度增大,通过影响支链反应,改变了自由基池中自由基浓度,促进各反应朝正向进行^[29-30],从而加快了火焰传播速率,从微观角度解释了 2.1 节中

REGR 率对燃烧相位的影响规律。

2.3.2 已燃区域路径分析 采用瞬时反应路径分析方法,对符合已燃区域条件的网格数据进行分析,得到 CA50 时刻已燃区域内甲烷的反应路径,结果如图 15 所示。由图 15 可知,相比火焰面区域,由于已燃区域 O₂ 浓度较低,CH₄、CH₃、CH₂O、HCO 等组分的消耗反应中 O 或 O₂ 参与反应的比例明显减少,此时 OH 自由基浓度对 CH₄ 消耗反应的影响占主导。随 REGR 率增大,OH 自由基浓度增大,CH₄ 消耗路径中 OH 参与反应占比增大,说明增大 REGR 率会加快已燃区域 CH₄ 的消耗速率,使 CH₄ 燃烧更加完全,可降低未燃 CH₄ 浓度,减少 THC 排放。

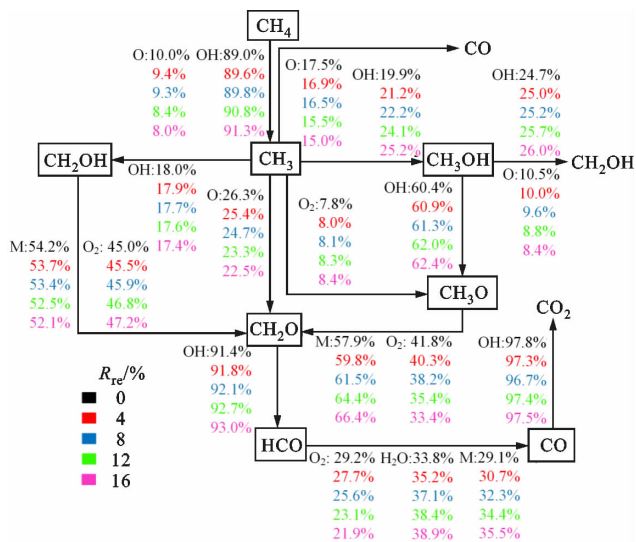


图 15 CA50 时刻不同 REGR 率下已燃区域 CH₄ 消耗路径

Fig. 15 Consumption paths of CH₄ in the burnt area at different REGR rates at CA50

3 结论

基于 YC6MK200NL-C20 天然气发动机建立了 CFD 三维仿真模型,验证其合理性后模拟了不同 REGR 率和过量空气系数下的缸内燃烧过程,并分析了其对发动机动力性能及排放性能的影响规律,在此基础上耦合化学动力学分析方法,通过缸内瞬时燃烧反应状态探究了该影响规律的内在机制,所得主要结论如下。

(1) 添加富氢重整气会改善天然气发动机的燃烧特性,增大缸内平均压力峰值,提高瞬时放热率,使燃烧相位提前。增大过量空气系数会抵消富氢重整气对燃料燃烧的促进作用,使缸内平均压力峰值降低,瞬时放热率峰值降低,燃烧相位滞后。

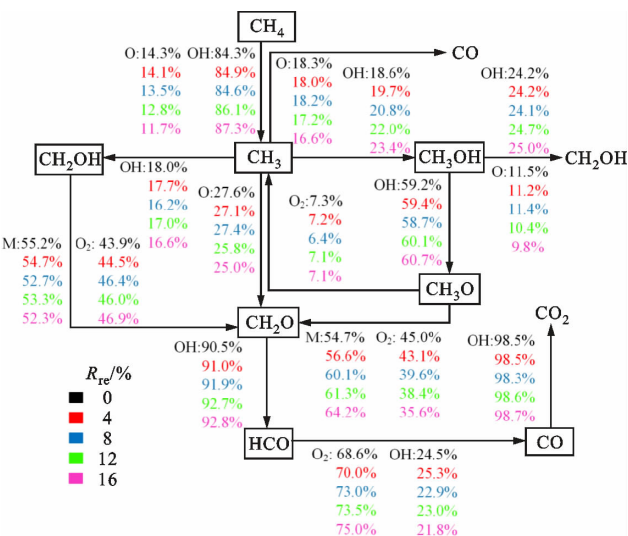


图 14 CA50 时刻不同 REGR 率下火焰面区域 CH₄ 消耗路径

Fig. 14 Consumption paths of CH₄ in the flame area at different REGR rates at CA50

(2)重整气添加可缩短燃烧持续期,使燃料燃烧更加完全,降低 THC 与 NO_x 排放量,但会导致未燃 CO 增多;随过量空气系数增大,缸内平均温度降低, NO_x 排放量降低,但燃烧不稳定性增大,导致 THC 和 CO 排放增多。

(3)由缸内燃烧反应路径分析可知,随 REGR 率增大,OH 自由基参与 CH_4 消耗反应占比增大,通过加快基元反应速率进而影响火焰传播速率,使燃烧相位提前,并可降低未燃 HC 排放。

参考文献:

- [1] AYDIN M. Natural gas consumption and economic growth nexus for top 10 natural gas-consuming countries: a granger causality analysis in the frequency domain [J]. *Energy*, 2018, 165: 179-18.
- [2] 黄丫. 缸内直喷 CNG 发动机稀薄燃烧特性的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [3] 贾朋朋. LNG 发动机废气重整制氢反应器数值模拟研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- [4] 黄彬, 胡二江, 黄佐华, 等. 火花点火天然气掺氢发动机结合 EGR 时的循环变动规律 [J]. *内燃机学报*, 2011, 29(1): 16-22.
HUANG Bin, HU Erjiang, HUANG Zuohua, et al. Cycle-by-cycle variations of a spark ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends combined with EGR [J]. *Transactions of CSICE*, 2011, 29(1): 16-22.
- [5] 陈浩, 刘兵, 王金华, 等. 火花点火发动机燃用天然气掺氢混合燃料循环变动研究 [J]. *内燃机学报*, 2009, 27(1): 18-24.
CHEN Hao, LIU Bing, WANG Jinhua, et al. Study of cycle-by-cycle variations of a spark ignition engine fueled with natural gas/hydrogen blends [J]. *Transactions of CSICE*, 2009, 27(1): 18-24.
- [6] YAP D, PEUCHERET S M, MEGARITIS A, et al. Natural gas HCCI engine operation with exhaust gas fuel reforming [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2006, 31(5): 587-595.
- [7] 钟绍华, 蒋芬, MIROSLA W W. 天然气闭环燃料重整的均质压燃(HCCI)试验研究 [J]. *内燃机工程*, 2008(2): 1-5.
ZHONG Shaohua, JIANG Fen, MIROSLA W W. Experimental research on natural gas HCCI with closed-loop fuel reforming [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2008(2): 1-5.
- [8] 毛立通, 张尊华, 梁俊杰, 等. REGR 成分对船用 LNG 发动机燃烧与排放特性的影响模拟 [J]. *中国航海*, 2018, 41(3): 21-25.
- MAO Litong, ZHANG Zunhua, LIANG Junjie, et al. Simulation on effects of REGR composition on combustion and emission characteristics of marine LNG engine [J]. *Navigation of China*, 2018, 41(3): 21-25.
- [9] LONG Yanxiang, LI Gesheng, ZHANG Zunhua, et al. Effects of reformed exhaust gas recirculation on the HC and CO emissions of a spark-ignition engine fueled with LNG [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(45): 21070-21078.
- [10] HU Erjiang, HUANG Zuohua, HE Jiajia, et al. Experimental and numerical study on laminar burning characteristics of premixed methane-hydrogen-air flames [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(11): 4876-4888.
- [11] WANG Jinhua, HUANG Zuohua, TANG Chenglong, et al. Numerical study of the effect of hydrogen addition on methane-air mixtures combustion [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(2): 1084-1096.
- [12] LI Yu, LI Hailin, GUO Hongsheng, et al. A numerical study on the chemical kinetics process during auto-ignition of n-heptane in a direct injection compression ignition engine [J]. *Applied Energy*, 2018, 212: 909-918.
- [13] LIU Xinlei, WANG Hu, YAO Mingfa. Investigation of the chemical kinetics process of diesel combustion in a compression ignition engine using the large eddy simulation approach [J]. *Fuel*, 2020, 270: 117544.
- [14] TANG Qinglong, LIU Xinlei, LIU Haifeng, et al. Investigation on the dual-fuel active-thermal atmosphere combustion strategy based on optical diagnostics and numerical simulations [J]. *Fuel*, 2020, 276: 118023.
- [15] DAVID G G, RAYMOND L S, HARRY K M, et al. Cantera: an object-oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes [EB/OL]. [2020-12-01]. <https://www.cantera.org>.
- [16] LIU Xinlei, KOKJOHN S, LI Yu, et al. A numerical investigation of the combustion kinetics of reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in an optical engine [J]. *Fuel*, 2019, 241: 753-766.
- [17] HAN Z, REITZ R D. Turbulence modeling of internal combustion engines using RNG $k-\epsilon$ models [J]. *Combustion Science and Technology*, 1995, 106: 267-95.
- [18] SENECA P K, POMRANING E, RICHARDS K J, et al. Multi-dimensional modeling of direct-injection diesel spray liquid length and flame lift-off length using CFD and parallel detailed chemistry [J]. *SAE Techni-*

- cal Paper, 2003, 112: 1331-1351.
- [19] SMITH G P, GOLDEN D M, FRENKLACH M, et al. Gri-mech 3.0 [EB/OL]. [2020-12-01]. http://www.me.berkeley.edu/gri_mech.
- [20] WANG Hu, YAO Mingfa, YUE Zongyu, et al. A reduced toluene reference fuel chemical kinetic mechanism for combustion and polycyclic-aromatic hydrocarbon predictions [J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(6): 2390-2404.
- [21] HAMED M R, TSOLAKIS A, LAU C S. Biogas upgrading for on-board hydrogen production: reforming process CFD modelling [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(24): 12532-12540.
- [22] SHUDO T, SHIMA Y, FUJII T. Production of dimethyl ether and hydrogen by methanol reforming for an HCCI engine system with waste heat recovery: continuous control of fuel ignitability and utilization of exhaust gas heat [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(18): 7638-7647.
- [23] KUMARJ T S, SHARMA T K, MURTHY K M, et al. Effect of reformed EGR on the performance and emissions of a diesel engine: a numerical study [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2018, 57(2): 517-525.
- [24] 姜磊, 李兴虎, 王宇, 等. 天然气/氢气混合燃料发动机的稀燃极限和排放特性试验研究 [J]. *汽车工程*, 2008(3): 197-201.
- JIANG Lei, LI Xinghu, WANG Yu, et al. An experimental study on lean burn limits and emission characteristics of an engine fuelled with CNG/hydrogen blends [J]. *Automotive Engineering*, 2008(3): 197-201.
- [25] 王忠诚, 许乐平, 周培林, 等. 大型低速共轨电喷船用柴油机排放特性分析 [J]. *上海海事大学学报*, 2015, 36(2): 70-73.
- WANG Zhongcheng, XU Leping, ZHOU Peilin, et al. Emission characteristic analysis of large-scale low-speed common-rail marine diesel engines with electronic fuel injection [J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2015, 36(2): 70-73.
- [26] 龙焱祥, 王忠俊. 替代率对船用 LNG/柴油双燃料发动机性能的影响 [J]. *内燃机*, 2016(2): 44-47.
- LONG Yanxiang, WANG Zhongjun. Effort of replacement ratio on the performance of LNG/diesel dual-fuel engine [J]. *Internal Combustion Engines*, 2016(2): 44-47.
- [27] 赵睿, 许乐平, 冯是全, 等. 燃料掺氢对船用天然气发动机燃烧和排放的影响 [J]. *推进技术*, 2020, 41(11): 2549-2557.
- ZHAO Rui, XU Leping, FENG Shiquan, et al. Effects of hydrogen addition in fuel of marine LNG fueled engines on combustion and emissions [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(11): 2549-2557.
- [28] 朱浩月, ASSANIS D, 黄震. 低温燃烧模式生物柴油发动机 CO 和 HC 的排放 [J]. *内燃机学报*, 2014, 32(1): 1-5.
- ZHU Haoyue, ASSANIS D, HUANG Zhen. CO and HC emissions of biodiesel in low temperature combustion mode [J]. *Transactions of CSICE*, 2014, 32(1): 1-5.
- [29] WANG Du, JI Changwei, WANG Shuofeng, et al. Further understanding the premixed methane/hydrogen/air combustion by global reaction pathway analysis and sensitivity analysis [J]. *Fuel*, 2020, 259: 116190.
- [30] RAHNAMA P, PAYKANI A, BORDBARV, et al. A numerical study of the effects of reformer gas composition on the combustion and emission characteristics of a natural gas/diesel RCCI engine enriched with reformer gas [J]. *Fuel*, 2017, 209: 742-753.

(编辑 荆树蓉)