

# “发动机原理”均质充量压燃燃烧的仿真教学设计

刘春辉<sup>a</sup>, 李珊<sup>b</sup>, 易克传<sup>a</sup>, 李进<sup>a</sup>

(安徽科技学院, a.机械工程学院; b.人文学院, 凤阳 安徽 233100)

**摘要:**“发动机原理”课程中的均质充量压燃燃烧涉及大量化学动力学机理, 学生理解较为困难, 运用Chemkin软件搭建发动机均质充量压燃燃烧的仿真实验模型, 通过修改相应参数, 得到不同初始条件下的放热率、缸内温度、缸内压力等仿真结果, 针对仿真结果进行分组讨论, 得到相应结论, 并将燃料扩展到天然气, 分析参数变化对天然气发动机均质充量压燃燃烧的影响, 激发了学生的兴趣, 加深了学生对教学内容的理解。

**关键词:** 发动机原理; 均质充量压燃; 教学; 仿真

**中图分类号:** U464-4; G642      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1673-1891(2020)04-0096-04

## The Instructional Simulation Design of Homogeneous Charge Compression Ignition in the Course of Automobile Engine Principle

LIU Chunhui<sup>a</sup>, LI Shan<sup>b</sup>, YI Kechuan<sup>a</sup>, LI Jin<sup>a</sup>

(a.School of Mechanical Engineering, b. School of Humanities, Anhui Science and Technology University, Fengyang, Anhui, 233100, China)

**Abstract:** The homogeneous charge compression ignition in the course of Automobile Engine Principles involves a large amount of chemical kinetic mechanism which is difficult for students to understand. We can build a simulation experiment model of homogeneous charge compression ignition with the software Chemkin. By modifying the corresponding parameters, different simulative results of heat release rate, in-cylinder temperature, and in-cylinder pressure under different initial conditions are discussed in groups. The fuel can be replaced by natural gas, and parameter variables and their effects are analyzed for the homogeneous charge compression ignition of natural gas engines. The simulation experiment model has stimulated students' interest and deepened their understanding of homogeneous charge compression ignition..

**Keywords:** Automobile Engine Principles; homogeneous charge compression ignition; instruction; simulation

“发动机原理”作为本科院校动力工程、汽车、交通运输等专业的主干课程, 主要围绕发动机的性能指标讲解其运转过程的相关理论<sup>[1]</sup>。该课程对学生未来从事相关设计、研究工作提供了理论基础。近年来, 随着排放问题越来越受到人们关注, “发动机原理”的教学内容也作了适当扩展, 增加了一些先进的燃烧技术, 如HCCI燃烧等。HCCI燃烧只有很少的氮氧化物(NO<sub>x</sub>)和微粒(PM)排放, 而且低负荷时热效率较高, 是非常理想的燃烧方式, 但是其工作过程跟传统燃烧模式不同, HCCI燃烧属于多点着火, 燃烧速率大, 受燃料化学动力学调控, 调控关键的问题主要有两个: (1)着火时刻; (2)燃烧速

率<sup>[2-3]</sup>。本课程在人才培养方案中, 一般开设在第三学年, 此时, 学生已经学习完“高等数学”、“大学物理”等公共基础课程以及“汽车构造”、“机械原理”、“机械设计”等专业课程, 但这些课程中没有燃料化学动力学机理方面的内容, 学生缺乏这方面的知识, 而HCCI燃烧与燃料化学动力学机理紧密联系, 导致学生在听课过程中, 往往对燃料和运行工况如何影响HCCI燃烧过程难以理解。为帮助学生更好地理解HCCI燃烧过程, 在教学中尝试引入Chemkin软件创建了虚拟实验。

Chemkin由Sandia国家实验室开发, 该软件主要解决耦合化学反应动力学的燃烧问题, 而且该软

**收稿日期:** 2020-08-24

**基金项目:** 安徽科技学院人才引进项目(RCYJ201902); 车辆工程省级“六卓越、一拔尖”卓越人才培养创新项目(2019zyrc091), 省级虚拟仿真实验教学项目(2018xfyxm039)。

**作者简介:** 刘春辉(1983—), 男, 山东广饶人, 副教授, 博士, 研究方向: 新型内燃动力装置。

件上手容易,利用绘图软件可以即时绘出仿真结果。对学生而言,很容易通过修改相应参数,得到不同初始条件下的放热率、缸内温度、缸内压力等结果,可以提高学生的学习兴趣,培养学生自主探究、自主分析的能力,如果在授课过程中,增加讨论环节,还能使课堂气氛更活跃、学生更主动。此外,针对HCCI燃烧的多燃料适应性,适当引入新燃料(如天然气等)扩展教学内容,指导学生研究天然气发动机HCCI燃烧的燃烧性能,可扩展学生视野,提升学生的科研能力。

## 1 柴油发动机HCCI燃烧实验模型的建立

在Chemkin中进行HCCI燃烧的建模,需要用到封闭0维反应器中的模拟内燃机内燃烧的模块(图1)。



图1 模拟内燃机内燃烧模块



图2 机理和热物性数据导入页面

将图1模块打开后,找到图2所示页面,在“Gas-Phase Kinetics File”一栏导入柴油的化学反应机理文件,在“Thermodynamics Data file”一栏导入柴油的热力学数据。柴油的化学反应机理有很多,像单组分的正庚烷、双组分的正庚烷和甲苯<sup>[4-5]</sup>以及多组分等,这里选用双组分柴油机理。由于学生对燃料燃烧机理普遍不熟悉,可在上课前由教师整理好相关机理,并在课堂上直接给学生。

图3页面中“Reactor Physical Properties”模块需要给出仿真时间、压缩比、排量、转速、初始温度和初始压力等信息。

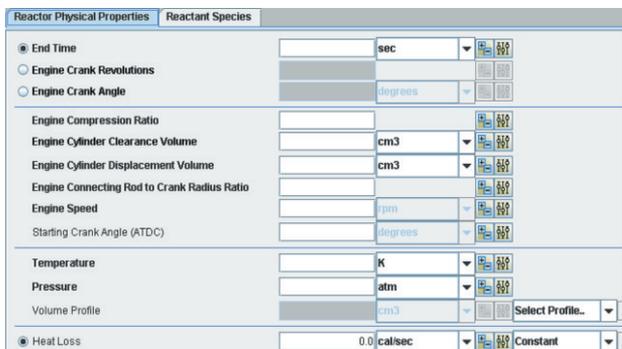


图3 Reactor Physical Properties 页面

图4页面中“Reactant Species”模块需要给出当量比、主要组分的含量等信息。

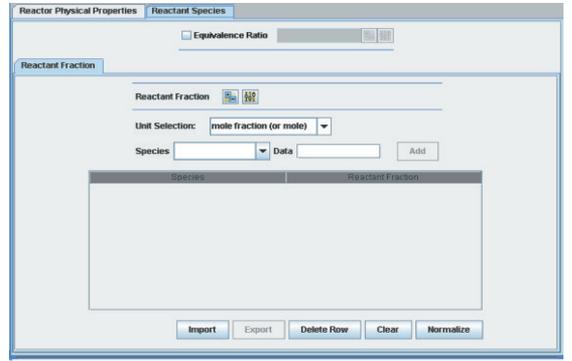


图4 Reactant Species 页面

以上信息填完,柴油发动机HCCI燃烧的实验模型就建好了,可以运行后查看仿真结果。

## 2 柴油发动机HCCI燃烧仿真模型的学生操作与分析

对照建立的实验模型,选择发动机的关键参数<sup>[6]</sup>如下:压缩比16.7,缸径127 mm,排量1 949.8 cc。工况如下:转速900 r/min,当量比0.25、初始温度345 K、初始压力0.2 MPa。仿真后得到柴油发动机HCCI燃烧的放热率和缸内温度曲线(图5)。

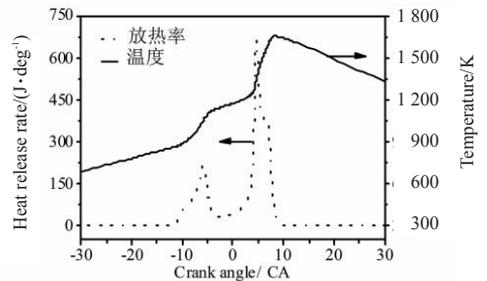


图5 柴油发动机HCCI燃烧的放热率和缸内温度曲线

下面由学生观察图5中放热率曲线,学生会发现:柴油发动机HCCI燃烧是典型的两阶段放热,即低温和高温反应放热,这一特性跟传统柴油发动机燃烧不同。得到放热率曲线后,在上述建立的实验仿真模型中,转速、当量比、初始温度和初始压力等参数都可以调整,得到不同条件下的仿真结果(调整当量比和转速后,可得如图6所示的缸内温度和图7所示的缸内压力),此时可以布置任务,让学生独自或分组完成,然后分组讨论,比较分析不同初始温度、不同初始压力、不同当量比和不同转速对放热率、缸内温度和缸内压力的影响。学生自己操作后自主讨论能更好地理解上课内容。由于柴油发动机HCCI燃烧资料较多,还可以在课前由教师准备相关资料提供给学生,也可以课后让学生查阅相关资料验证自己仿真结果和讨论情况的准确性。

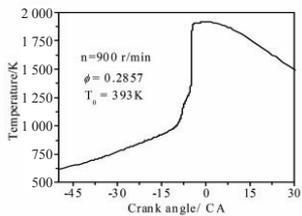


图6 缸内温度

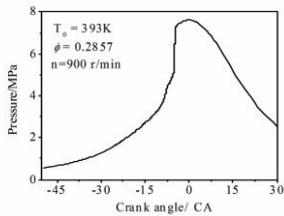


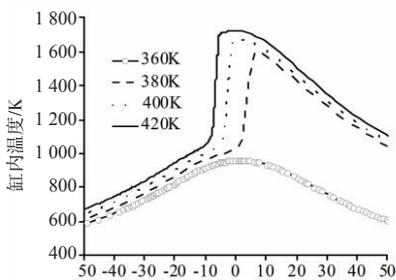
图7 缸内压力

### 3 燃料的扩展

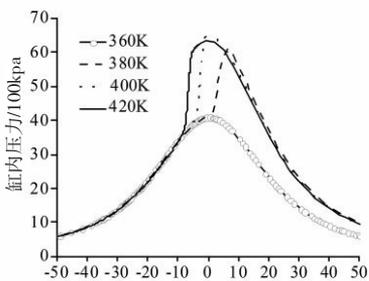
对柴油发动机HCCI燃烧实验模型掌握以后,可对燃料进行扩展,引导学生关注科学前沿,为以后从事科研工作奠定基础。选择天然气发动机HCCI燃烧作为扩展内容,给定学生燃料反应机理<sup>[7]</sup>后,指导学生调整转速、当量比、初始温度和初始压力等参数,得到不同工况下的仿真结果,并展开讨论。

直接将发动机基本参数<sup>[8]</sup>给学生:缸径 82.6 mm;冲程 114.3 mm;排量 612 cc。

#### 3.1 初始温度



(a)缸内温度



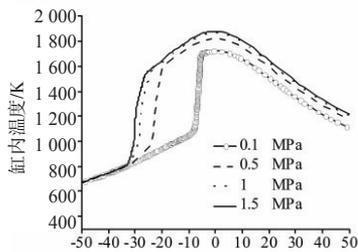
(b)缸内压力

图8 初始温度变化仿真

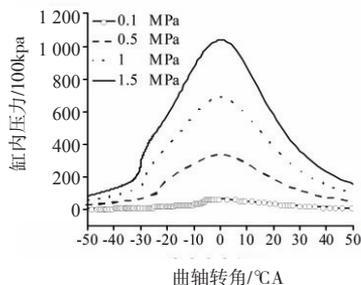
计算条件的选择:转速 600 r/min,当量比 0.2,初始压力 0.1 MPa,压缩比 16.55,可选择 4 个初始温度做对比,分别为:360、380、400、420 K。将仿真结果放到一张图中(图8)。引导学生观察初始温度对着火时刻的影响,学生会发现从 380 K 到 420 K,增加 40 K,着火时刻提前 10 °CA,此时可得出结论:随着初始温度的提高,着火时刻提前。可以让学生思考该结论的原因,作为课后的思考题。

#### 3.2 初始压力

计算条件的选择:转速 600 r/min,当量比 0.2,压缩比 16.55,初始温度 420 K,可选择 4 个初始压力做对比,分别为:0.1、0.5、1、1.5 MPa。将仿真结果放到一张图中(图9),引导学生观察初始压力对着火时刻的影响,学生可以发现:从 0.1 MPa 到 1.5 MPa,着火时刻提前 24 °CA。从而得出结论:随着初始压力的提高,着火时刻提前。让学生思考该结论的原因,作为课后的思考题。



(a)缸内温度

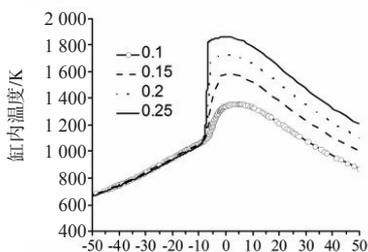


(b)缸内压力

图9 初始压力变化仿真

#### 3.3 当量比的影响

计算条件为:转速 600 r/min,压缩比 16.55,初始温度 420 K,初始压力 0.1 MPa,可选择 4 个当量比做对比,分别为:0.1、0.15、0.2、0.25。将仿真结果放到一张图中(图10),引导学生观察当量比对着火时刻的影响,学生可以发现:随着当量比的增加,着火时刻有小幅提前,缸内最大压力和最大温度明显提高。从而得出结论:随着当量比的增加,着火时刻提前。让学生思考该结论的原因,作为课后的思考题。



(a)缸内温度

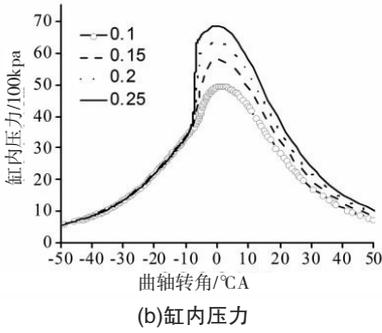


图10 当量比变化仿真

### 3.4 压缩比的影响

计算条件为:转速 600 r/min, 初始温度 420 K, 初始压力 0.1 MPa, 当量比 0.2, 可选择 4 个压缩比做对比, 分别为: 12、14、16、18。将仿真结果放到一张图中(图 11), 引导学生观察压缩比对着火时刻的影响, 学生可以发现: 压缩比增大, 缸内温度、压力明显提高, 着火时刻也随之提前, 压缩比从 14 到 18, 着火时刻提前 8°CA。压缩比为 12 时, 缸内没有实现着火。让学生思考该现象出现的原因, 作为课后的思考题。

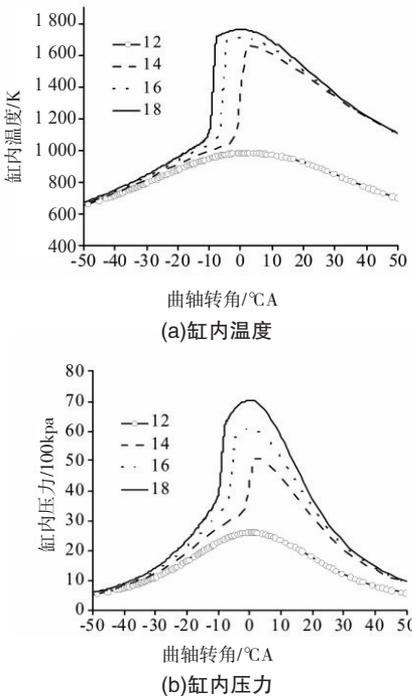


图11 压缩比变化的仿真结果

### 3.5 转速的影响

计算条件为: 初始温度 420 K, 初始压力 0.1 MPa, 当量比 0.2, 压缩比 16.55, 选择 4 个转速做对比, 分别为: 600、900、1 200、1 500 r/min。将仿真结果放到一张图中(图 12), 引导学生观察转速对着火时刻的影响, 学生可以发现: 转速从 600 r/min 到 1

500 r/min, 着火时刻延后 6.5°CA, 说明随着转速的增加, 着火时刻延后。让学生思考该现象出现的原因, 作为课后的思考题。

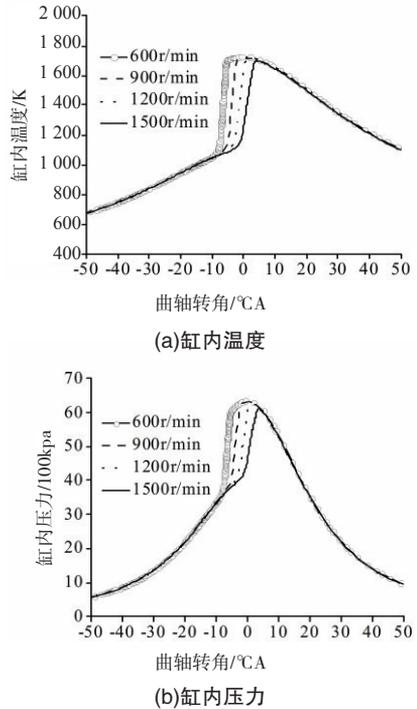


图12 转速变化的仿真结果

通过上面的操作, 学生得到了初始温度、初始压力、压缩比、当量比、转速对天然气发动机 HCCI 燃烧的着火时刻、缸内温度和缸内压力的影响, 并通过布置课后思考题, 让学生通过查阅相关资料, 找到相应参数对仿真结果影响的原因。

为了解学生学习效果, 随机在班上找了 30 名同学填写了调查问卷, 调查结果(教师指导+分组讨论)显示全部同学课堂上就掌握了所学内容, 在此基础上, 有 18 名同学表示课后继续研究“其他燃料的 HCCI 燃烧过程如何、HCCI 燃烧过程中涉及的组分如何变化”等问题。可见虚拟实验巩固了学生对 HCCI 燃烧的认识, 学生的知识得到了扩展, 部分同学还将进一步对 HCCI 燃烧的相关问题进行分析, 这将培养学生的创新意识, 为学生了解科学前沿, 掌握科研思路, 学会科研方法打下坚实的基础。

## 4 结语

发动机 HCCI 燃烧涉及化学动力学知识, 且内容抽象, 学生理解较为困难。通过在 chemkin 软件中建立 HCCI 燃烧的仿真实验模型, 通过在模型中调整初始参数, 将仿真结果以图的形式展示给学生, 可加深学生对 HCCI 燃烧放热率、缸内温度和

的主体地位,提高学生学习的积极性和主动性,增强师生之间的沟通和交流,有利于建立公平、公正的学习环境,营造“百花齐放、百家争鸣”的学习氛

围,提高学习效率,提升课程建设的质量,从而为师范院校体育学科应用型人才的培养提供强有力的支撑。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国教育部. 教育信息化十年发展规划(2011-2020年)[EB/OL].(2012-03-30)[2020-05-21].[http://www.moe.gov.cn/srcsite/A16/s3342/201203/t20120313\\_133322.html](http://www.moe.gov.cn/srcsite/A16/s3342/201203/t20120313_133322.html)
- [2] 邓美珍. 基于 SPOC 平台的混合式教学新模式研究[J]. 河北工程大学学报(社会科学版), 2017(4): 112-114.
- [3] 中华人民共和国教育部. 关于深化本科教育教学改革全面提高人才培养的的质量的意见 [EB/ OL].(2019-09-29)[2020-05-21].[http://www.moe.gov.cn/srcsite /A08/s7056/201910/t20191011\\_402759.html](http://www.moe.gov.cn/srcsite /A08/s7056/201910/t20191011_402759.html)
- [4] 华音. 高校体育学习过程性评价的探讨[J]. 武汉体育学院学报, 2005(4): 111-112.
- [5] 张芳丽, 王超. 基于云班课平台培养应用型人才的过程性考核研究[J]. 中国成人教育, 2018(13): 87-89
- [6] 王洪杰, 栗宗祥. 高校网球课程翻转课堂教学模式的实施策略与评价体系研究[J]. 体育科技文献通报, 2018(3): 23-24.
- [7] 吴恩启, 张永亮. 基于 OBE 理念的《公差配合与技术测量》过程性考核[J]. 教育教学论坛, 2019(29): 63-65.
- [8] BIGGS J B, TELFER B. The process of learning [M]. 2nd ed. Prentice Hall of Australia, 1987.
- [9] 张野, 滕亚秋. 基于微课翻转课堂的过程性评价改革探索——以《旅游美学》课程为例[J]. 戏曲之家, 2018(20): 154-155.
- [10] 杨宋华. 基于混合式教学的高校体育专业术科教学微课的设计及应用研究[J]. BULLETIN OF SPORT SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2018(3): 140-144.
- [11] 刘洋. 高校体育翻转课堂教学的实施困境与对策[J]. 体育科技文献通报, 2017(1): 25-26.

(上接第99页)

缸内压力等内容的理解。在此基础上对燃料进行扩展,建立天然气发动机HCCI燃烧的仿真实验模型,指导学生调整转速、当量比、初始温度、压缩比和初始压力等参数,得到不同工况下的仿真结果,并对仿真结果进行讨论,得出相关的结论,然后给

学生布置课后作业,找出这些结论的原因,学生对待本节课会更有兴趣,更有热情。引导学生提前学习Chemkin软件,解决实际科研问题,培养了学生的创新精神,对学生的毕业设计也有很好的促进作用。

#### 参考文献:

- [1] 郑焱, 张丹, 崔伟, 等. 发动机原理课程教学方法探讨[J]. 江苏理工学院学报, 2016, 22(4): 119-121.
- [2] 辛喆. 汽车拖拉机发动机原理[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2014.
- [3] SHIGEYUKI T, FERRAN A, JAMES C, et al. Two-stage ignition in HCCI combustion and HCCI control by fuels and additives[J]. Combustion and Flame 132 (2003) 219-239.
- [4] HU W, MINGFA Y, ZONGYU Y, 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.
- [5] J C G ANDRAE, T BRINCK, G T KALGHATGI. HCCI experiments with toluene reference fuels modeled by a semidetained chemical kinetic model[J]. Combustion and Flame, 2008, 155(4): 696-712.
- [6] KALGHATGI G, RISBERG P, ÅNGSTROM H E. A method of defining ignition quality of fuels in HCCI engines[C]. SAE Paper, 2003, 2003-01-1816.
- [7] HEALY D, DONATO N S, AUL C J, et al. N-butane: ignition delay measurements at high pressure and detailed chemical kinetic simulations [J]. Combustion and Flame, 2010, 157(8): 1526-1539.
- [8] TANET A, VOLKER S, PHILIPP W, et al. An investigation into the effect of fuel composition on HCCI combustion characteristics[C]. SAE 2002-01-2830, 2002.