

基于热氛围燃烧器的湍流射流 起升火焰基础研究进展

吴志军,赵文伯,张青

(同济大学 汽车学院,上海 201804)

摘要:描述了热氛围燃烧器的结构、特点和主要功能。介绍了国内、外关于湍流射流起升火焰特性方面研究的主要内容和成果。将基于该燃烧器的相关领域的研究按照燃料特性进行了分类总结。分析了可控活化热氛围燃烧器在湍流起升火焰特性研究上的优势和特点,并提出了该燃烧器进一步的发展方向。

关键词:工程热物理;可控活化热氛围;湍流起升火焰;燃烧稳定

中图分类号:TK121 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2016)06-1881-11

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb201606017

Progress in basic research of turbulent spray lifted flame based on controllable active thermo-atmosphere combustor

WU Zhi-jun, ZHAO Wen-bo, ZHANG Qing

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The structure, main features and functions of active thermo-atmosphere combustor are described. Then, the main topics and achievements in the research of turbulent spray auto-ignition and flame stabilization are reviewed. The studies on this type of active thermo-atmosphere combustors are classified according to the fuel characteristics. The research advantages and features of controllable active thermo-atmosphere combustor are analyzed. The directions for future research of such combustor are predicted.

Key words: engineering thermo physics; controllable active thermo-atmosphere; turbulent jet flame; combustion stability

0 引言

无论是传统往复式内燃机、转子发动机、燃气涡轮发动机还是冲压发动机,实际燃烧过程几乎都是湍流燃烧过程。因此要提高发动机的燃烧效率和燃烧稳定性、开发先进的发动机燃烧技术就必须对发动机工作过程中的湍流燃烧过程进行详

细和深入的研究。目前对湍流问题的研究尚处于探索阶段,在对其实行数学描述的过程中,除了针对个别边界层问题^[1,2]的研究有所进展,其他方面几乎没有重大突破。

湍流射流火焰作为发动机中常见的一种湍流燃烧形式是湍流燃烧问题中极为重要的研究对象,而其射流过程中湍流与化学反应动力学的相互

收稿日期:2016-07-01.

基金项目:国家自然科学基金重大项目(91441125).

作者简介:吴志军(1972-),男,教授,博士生导师。研究方向:内燃机燃烧与排放控制。E-mail:zjwu@tongji.edu.cn

影响也是研究湍流射流燃料自燃和火焰稳定的难点。当射流速度较大时,火焰将离开喷嘴口在下游形成起升火焰^[3,4]。起升火焰通常由高温产物或热氛围点燃,燃料的自燃着火和起升火焰的稳定通常受到湍流拉伸、分子输运、化学自燃以及湍流火焰传播速度等机制的共同影响。

由于对实际发动机内部燃烧的试验测量(尤其是光学测量)非常困难,目前大多采用数值模拟的方法来研究湍流反应流中自燃的发生条件、作用机理、混合过程对自燃的影响以及不同燃烧模型对自燃的预测等^[5,6]。

湍流燃烧模拟研究面临的核心挑战是控制燃烧的多种理化过程本身所具有的复杂的时间和长度尺度以及不同尺度的过程之间的耦合程度。其中流体动力学和化学反应过程是控制湍流燃烧过程最主要的因素。虽然流体动力学和化学反应动力学过程理论上是确定的,但是它们对于初始条件的敏感性导致了其具有很大的随机性,使得湍流燃烧过程难以预测。湍流流动与化学反应的耦合大大增加了问题的复杂程度。湍流燃烧过程中包括成千上万的基元反应,难以全面考虑数量庞大的基元反应路径,在实际工程问题中需要选择最重要的反应路径,从而减小计算量以达到现有的仿真手段能够处理的水平。对于化学反应机理的简化方法主要存在两个难题:①需要全面考虑所有的重要反应路径;被忽略的反应路径在简化过程中无法恢复;②反应速率常数的不确定性:数以万计的化学反应中,只有很少一部分的反应速率常数是通过试验或针对这两方面理论计算的方法得到的,其余的都是通过特殊方法估算的。因此,反应机理的简化过程存在相当的不确定性。尽管针对这两方面问题的研究已经取得很大进展,但是如何获得包含所有重要反应路径且适用于湍流燃烧模拟计算的最简化反应机理仍然是一个难题。

湍流燃烧的试验研究随着测试技术尤其是光学诊断技术的提高而快速发展。大量的燃烧基础研究数据扩充了基础试验数据库,可以对不断涌现的新燃烧理论、燃烧模型进行试验校核^[7]。用于燃烧基础研究的燃烧器也在不断发展,新的试验装置伴随着新的试验现象,使研究人员能够进一步丰富和完善现有的湍流燃烧相关理论。

本文介绍了一种用于湍流起升火焰研究的新型燃烧器,描述了其结构特点和主要功能。总结

了国内、外基于此燃烧器,针对湍流射流起升火焰特性进行的试验和仿真研究以及取得的主要成果,并按照燃料特性进行了分类。在此基础上分析了可控热氛围燃烧器在湍流起升火焰特性研究上的优势和特点,并为拓展此燃烧器的研究能力指出了未来的发展方向。

1 可控热氛围燃烧器

1.1 燃烧器研发背景

目前针对湍流燃烧试验研究常用的燃烧器有简单喷管燃烧器、引燃喷管燃烧器、钝体稳定喷管燃烧器及湍流稳定燃烧器。这些燃烧器通常由中央喷射流和外围协流两部分组成。中央喷射流一般为燃料或可燃混合气,外围协流通常使用一定速度的冷态的空气,通过与中央射流的相互作用,形成高温的再循环区域以稳定中央喷射火焰并提供其燃烧所需氧气成分^[8]。

可控活化热氛围燃烧器为射流燃烧提供了一个理化条件恒定的几何空间,解决了在实际发动机和压缩机上不能实现稳定冷焰火焰而在定容弹上不能实现稳定连续火焰燃烧的问题^[9]。目前,美国加州大学伯克利分校燃烧分析实验室^[10]、澳大利亚悉尼大学燃烧实验室^[11]和同济大学汽车学院内燃机燃料喷射与燃烧研究所分别拥有一套可控热氛围燃烧试验装置,该燃烧装置已被湍流扩散燃烧国际学术组织 TNF(Turbulent non-premixed flames) Workshop 列入了模型燃烧器(Model combustor)之一^[12]。

1.2 可控热氛围燃烧器功能特性及结构特点

可控活化热氛围燃烧器结构如图 1 所示。中央喷射流一般为燃料或可燃混合气,环绕中央射流的为 H₂/Air 混合气预混合稀薄燃烧平坦火焰的高温产物。协流的理化特性包括热氛围及氧氛围可以通过控制协流预混合燃烧来进行调节,因此可以很方便地研究不同热氛围、氧氛围下的中央喷管燃料的喷射燃烧,得出喷射燃料混合气自燃着火的理化条件,从而研究湍流反应流中的自燃现象及其燃烧稳定性。

由于中央喷管的燃料供给是独立于协流预混合气制备之外,中央射流的燃料选择具有较大的灵活性,既可以为气体燃料也可以为液体燃料。通过调节协流预混合气中氢气及空气流量可以实现热氛围温度在 500~1500 K 内变化,该温度范围基本涵盖了各种气体燃料或液体燃料的自燃

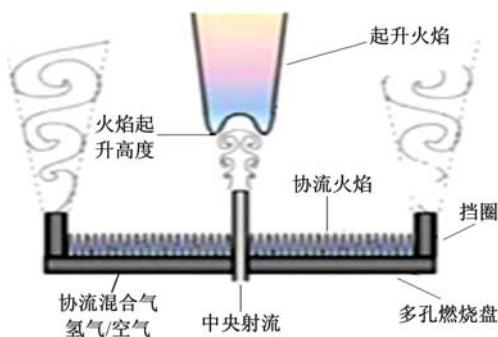


图 1 热氛围燃烧器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thermo-atmosphere combustor

点^[13]。

火焰燃烧系统总成由多孔燃烧盘、外层挡圈、中央喷嘴 3 部分组成。燃烧器简单的同轴性构造使得研究化学反应与湍流之间关系更为方便。同时,开放式的燃烧空间可以方便地进行激光精确测量,友善的边界条件及简单的同轴喷射流设计对开展数值模拟研究极为便利^[14]。

2 基于热氛围燃烧器的湍流燃烧

国内、外的专家学者利用可控热氛围燃烧器对湍流射流起升火焰燃烧特性和火焰稳定机理进行了大量的试验和模拟研究。主要的研究对象包括气体燃料、液体燃料以及混合燃料。气体燃料射流不涉及燃料的蒸发雾化过程,燃料与协流热氛围间的流体动力学过程比较简单,且针对氢气、甲烷等气体的化学反应机理的研究相对完善,如美国劳伦斯实验室提出的 USC Mech 氢气燃烧机理^[15]以及 Gri-Mech 3.0 甲烷反应机理^[16]等。因此,使用气体燃料能够更方便地研究湍流流动和化学反应动力学之间的相互作用。而目前实际发动机上使用较多的是液体燃料,液体燃烧在湍流燃烧过程中的液滴雾化和蒸发也是一个重要的研究课题,因此针对液体燃料的研究对于开发先进的发动机燃烧技术及代用燃料有着重要意义。混合燃料能够充分发挥两种燃料各自理化性的优势,弥补特定单一燃料燃烧特性方面存在的缺点。针对混合燃料喷雾及湍流燃烧特性的研究有助于新型燃料的设计,对新型发动机和新型燃烧模式的研发具有指导意义。

2.1 针对气体燃料的试验及模拟

Tacke 等^[17]利用激光诱导荧光 LIF 方法对 H_2/N_2 湍流扩散火焰的稳定起升点进行了研究。

数据表明,火焰起升高度对于火焰长度和射流远端区域几乎没有影响。提出了获取稳定起升点反应组分和温度数据的新方法,结果表明:稳定火焰起升点对于混合气体化学计量比变化不敏感,说明火焰稳定机理需要考虑大尺度湍流结构。

悉尼大学燃烧实验室在可控活化热氛围燃烧器上研究了不同气体的喷射起升火焰^[18],分别使用甲烷、丙烷和丁烷和空气预混后从燃烧器中央喷管射入热氛围,并记录火焰长度和火焰基部的位置,描述了火焰起升高度与射流出口速度和协流速度的关系。结果表明:随着稳定燃烧点远离喷嘴口,起升火焰对于射流出口速度的敏感性降低。根据试验结果制作了详细的试验数据库,为其他研究尤其是数值模拟计算提供了良好的数据支持。

加州大学伯克利分校在 Tacke 等^[17]的研究基础上,利用可控活化热氛围燃烧器对 H_2/N_2 湍流喷射火焰进行了进一步的试验研究和数值分析^[19]。通过激光诱导荧光 LIF 激光设备实现了温度以及组份质量分数的同场测量。利用涡耗散模型(EDC)和 PDF 模型对湍流燃烧进行模拟。EDC 模型假设化学反应速率与湍流混合速率相比无穷快,湍流燃烧过程由燃料和氧化剂的混合过程控制忽略了复杂的化学反应动力学作用。PDF 模型^[20]认为在湍流扩散燃烧中,燃料和氧在任何一点上是无法瞬时共存的。燃料、氧、产物以及温度在此模型假定下的瞬时值与当地的混合分数像层流一样呈线性关系。根据设定的 PDF 求积分可以得到相应的时均值。试验结果表明火焰的起升高度为 $H/d=10$,与模拟结果较为接近。通过对着火稳定区域多标量的瞬时测量以及计算得到层流火焰厚度和湍流强度,从而得出在着火稳定区有较厚的湍流部分预混合火焰的结论。

剑桥大学的 Mastorakos 等^[21]对 H_2 在热氛围中的自燃现象进行了试验和数值研究,通过检测 OH 找出了火焰起升高度的变化规律。同时还研究了背景温度对点火时间的影响。燃烧模型采用条件矩封闭模型。图 2 为点火时间随空气温度变化规律的试验和模拟结果对比。图中 L_{\min} 和 L_{ave} 分别为着火点轴向位置的最小值和平均值,它们与入流空气速度 U_a 的比值为点火时间的不同定义方式;CMC 为条件矩封闭模型模拟所得的点火时间; L_e 为湍流长度尺度; u' 为湍流速度波动。由图 3 可知模拟结果与试验吻合较好。

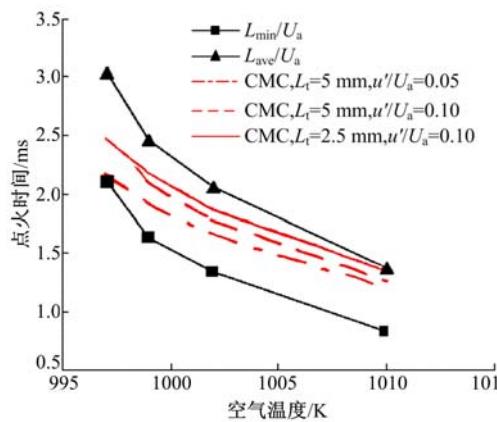
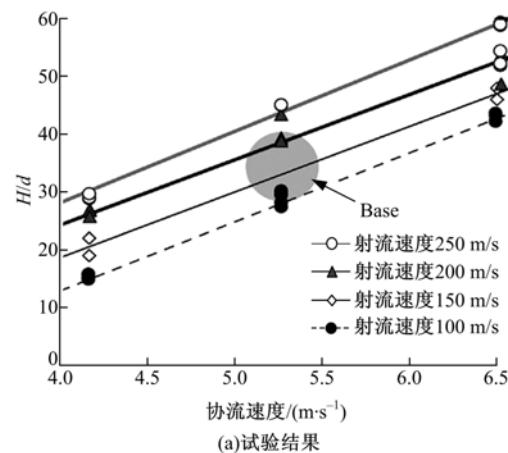


图 2 不同时间定义下的点火时间随空气温度变化的试验结果与不同入流空气湍流强度和长度尺度下的 CMC 模拟结果对比

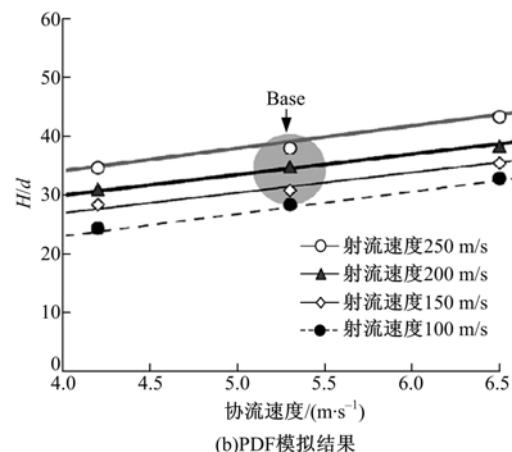
Fig. 2 Comparison of predicted with measured ignition times for different time definitions and input air turbulence intensities and lengthscales

Cabra 等^[10]在热氛围燃烧器上对 H_2/N_2 湍流起升火焰进行了试验和模拟研究。测量结果表明火焰基部存在较厚的湍流反应区域。试验和模拟结果均表明,热氛围燃烧产物与反应物之间的混合和小尺度再循环能够保证湍流预混合火焰的传播以及随后混合气的快速点燃。以上述研究为基础,Cabra 等^[22]采用相同的设备对低温下的甲烷喷雾燃烧进行了扩展研究。试验的基础工况(Base case)为:中央射流组分为体积分数 33% 的 CH_4 和体积分数 67% 的空气;射流速度为 100 m/s;协流速度为 5.4 m/s;对应的火焰起升高度 $H/d \approx 35$ (图 3 中 Base 区域),此工况下试验与模拟数据吻合良好。基础工况的试验数据显示:当探针体在稳定火焰区时,由于探针体内瞬时的起升火焰波动,反应标量呈现出拓宽的双峰分布。同时对火焰起升高度影响因素的研究表明,在一定范围内射流速度、协流速度和协流温度都与起升高度呈线性关系,并且起升高度对协流温度最为敏感。PDF 模型计算的结果与此基本一致,但该模型未能预测出协流速度对起升高度的影响,如图 3 所示。

Cornell 大学的 Cao 采用联合 PDF 方法对中央射流为 H_2/N_2 混合气的可控活化热氛围燃烧器进行了数值模拟^[23]。由试验结果可知,起升火焰的稳定高度对协流温度极为敏感,远超射流速度和燃料起始温度。模拟结果很好地体现了这种敏感度,且与速度、混合分数和产物种类的试验结



(a) 试验结果



(b) PDF 模拟结果

图 3 不同射流速度下 CH_4/air 火焰起升高度对协流速度变化的敏感度

Fig. 3 Sensitivity of CH_4/air flame liftoff height to coflow velocity, with jet exit velocity as a parameter

果符合良好。

Gordon 等^[24]使用激光多普勒测速仪(LDV)对喷入协流热氛围中的甲烷起升火焰稳定特性进行了研究,并与氢气起升火焰特性进行了对比。图 4 为不同协流速度下氢气火焰起升高度(以轴向位置与喷孔直径的比值 x/D 表示)随协流温度的变化规律。图 4 中协流速度为 3.5 m/s 时对应的(a)(b)(c)三条曲线分别为相同试验条件下的三组试验数据,其中 Wu et al 对应曲线为文献[11]中 Wu 等使用相同燃烧器针对相似火焰进行研究所得的试验数据。由图 4 可知,氢气火焰起升高度对于协流温度的敏感度较高,继续升高协流温度,火焰起升高度趋于稳定。结果表明:甲烷火焰对于协流温度和速度等控制参数的敏感度远小于氢气,且在 1375~1450 K 温度范围内随这些参数呈线性变化。与氢气不同,甲烷火焰并未出现由自然向预混合火焰传播的变化。火焰起升高

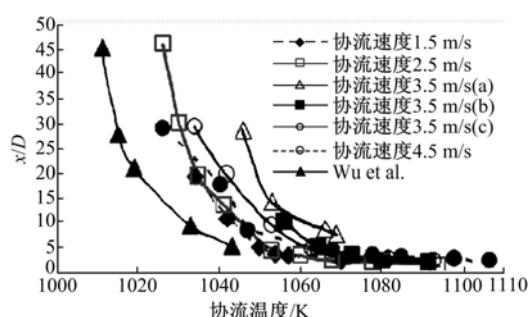


图4 不同协流速度下氢气火焰起升高度随协流温度的变化规律

Fig. 4 H₂ flame lift-off height versus coflow temperature at different coflow velocities

度的变化不会影响射流火焰的形态。

Wu 等^[25]利用 LDV 对 H₂/N₂ 射流火焰和无反应空气射流的湍流结构进行了试验研究。结果表明:对于无反应情况下的空气射流,速度核心区由于射流和协流的密度比较高而缩短;而对于 H₂/N₂ 射流,速度核心区的长度主要受到射流上游区域由火焰导致的湍流流动的影响。在射流中心线上 H₂/N₂ 射流的轴向速度高于空气射流,而相对的湍流强度则低于空气射流。

Patwardhan 等^[26]利用条件距封闭(CMC)模型对 H₂/N₂ 湍流射流起升火焰进行了模拟研究。CMC 模型是 20 世纪 90 年代 Klimenko^[27] 和 Bilger^[28] 分别独立提出的,该模型没有对标量场做任何近似假定,具有严格的理论基础,该模型方程中的化学反应源项在一阶水平上封闭,即可以采用组分和温度的条件平均值计算平均化学反应速率,流动和反应可以解耦。Patwardhan 等^[26]针对不同的射流速度和协流温度 T_c 进行了模拟,结果与试验数据吻合良好。结果表明:在 T_c 为 1025 K 和 1080 K 时,火焰区域内部化学项平衡了分子扩散项,因此火焰呈扩散火焰面结构,而预燃区域的结构取决于协流温度。在低协流温度下,火焰起升高度受到湍流预混合火焰传播过程的控制;而在高协流温度下主要受到自燃现象的控制。

Navarro-Martinez 等^[29]对协流热氛围中的甲烷火焰进行了模拟研究。使用速率控制约束平衡法(RCCE)对化学反应机理进行简化,使用大涡模拟(LES)结合条件距封闭方法(CMC)对湍流与化学反应动力学的相互作用进行建模分析。RCCE 是简化化学反应机理的系统方法,能够降低仿真计算成本。通过 RCCE 系统能够计算

CMC 方程中的条件源项。LES 是一种湍流反应流的微观模拟方法,可以揭示湍流对反应影响的微观结构,得到精确度很高的瞬态流场,且计算量比直接数值模拟小得多。模拟结果表明,热协流条件下的甲烷火焰受到自燃现象控制,对化学反应机理比较敏感。

Stankovic 等^[30]使用非稳态层流火焰面方法对经氮气稀释的氢气射流的自燃过程进行了数值分析。主要内容为自燃延迟时间和由 5 种化学反应机理得到的反应活性最高的混合物组合成分。全面地研究了协流温度、条件标量耗散率和混合物分数空间精度对自燃过程的影响。

图 5 为使用不同反应机理所得的协流温度对自燃延迟期的影响模拟结果,由图 5 可知,自燃延迟期随协流温度的升高而降低。此外,还对比了混合分数等于 0.5 时采用最大标量耗散率的 AMC 模型的模拟结果和在整个混合分数值范围内采用恒定的条件标量耗散率的模拟结果。研究结果还表明,在氮气稀释程度不高的情况下,以升高温度作为自燃发生的判据与以提高 OH 基质量分数作为自燃发生的判据所得的自燃延迟期结果基本相同。

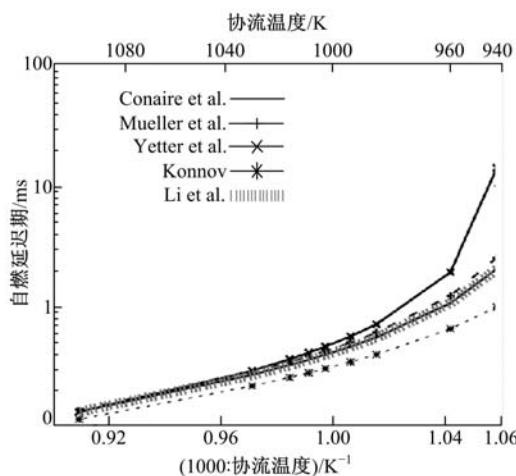


图 5 协流温度对自燃延迟时间的影响

Fig. 5 Influence of co-flow temperature on auto-ignition delay time

Johannessen 等^[31]对经氮气稀释的 H₂/Air 非稳态火焰的自燃特性进行了试验研究。非稳态射流火焰迅速点火,随后逐渐熄灭。通过噪声采集和纹影高速摄影对非稳态火焰进行研究,得出由火焰熄灭到再燃现象发生的频率是关于氮气稀释摩尔分数、协流当量比和射流速度的函数。试验结果表明:再燃火现象是由自燃主导的,点火频

率起初随着氮气稀释比例提高而增大,达到最大值后,继续增大氮气稀释比例,点火频率反而减小。若协流当量比增大,则需要更高的氮气稀释比例以使火焰达到非稳态。经过氮气稀释后的射流火焰的反应速率降低,而动量增加。非稳态射流火焰的再燃现象是由化学反应和湍流混合过程共同控制的。此外,通过噪声采集方法所得的结果与高速摄影法相符,证明了该方法可以用来研究非稳态氢气射流火焰。

2.2 针对液体燃料的试验及模拟

Dibble 等^[19]利用集成激光衍射(Ensemble light diffraction, ELD)测量技术对甲醇以及甲醇和水的混合燃料在燃烧器中活化热氛围下的喷射液滴大小进行了研究。甲醇燃料的喷射速度为 0.5 g/s;协流空气流量为 40 g/s;氢气流量为 0.35 g/s;未燃协流速度为 1 m/s。燃烧器中央热氛围温度为 955 K。在甲醇与水混合物中的研究结果表明,由于水分子的黏度比甲醇分子大,所以混合燃料中水分子体积分数越大,混合液体的颗粒大小也就越大。

Cabra 等^[32]还利用 RFA(Real-time fuel-air analyzer)装置,对甲醇在协流中喷雾的蒸发进行研究。在研究甲醇的径向扩散时,不同于 ELD 的路径平均测量,RFA 提供了三维空间上的测量信息。试验结果表明,燃料浓度的不均匀以及较高的 RMS 是局部产生 NO_x的潜在因素。

邓俊等^[33]利用高速摄影技术研究了柴油高压喷雾在活化热氛围下的自燃特性。结果表明,不同协流温度下起升火焰稳定机理不同:低协流温度下喷雾火焰的稳定受自燃现象控制;高协流温度下火焰的稳定是火焰传播速度与燃烧供应速度平衡的结果。滞燃期受协流温度的影响较大,且呈非线性关系。当协流温度低时,滞燃期随温度上升迅速减小;当协流温度高时,滞燃期随温度上升而减小的趋势变缓。

图 6 为不同协流温度下喷孔直径和启喷压力对滞燃期的影响,其中油泵转速为 800 r/min;启喷压力为 20 MPa。喷油系统参数对柴油喷雾滞燃期有一定的影响,影响程度与协流温度有关。协流温度越低,滞燃期受喷孔直径、启喷压力的影响越大。喷油系统参数对滞燃期的影响主要体现在两个方面,即改善喷雾效果从而降低物理滞燃期以及由于喷雾锥角或贯穿速率增加导致的物理滞燃期缩短。

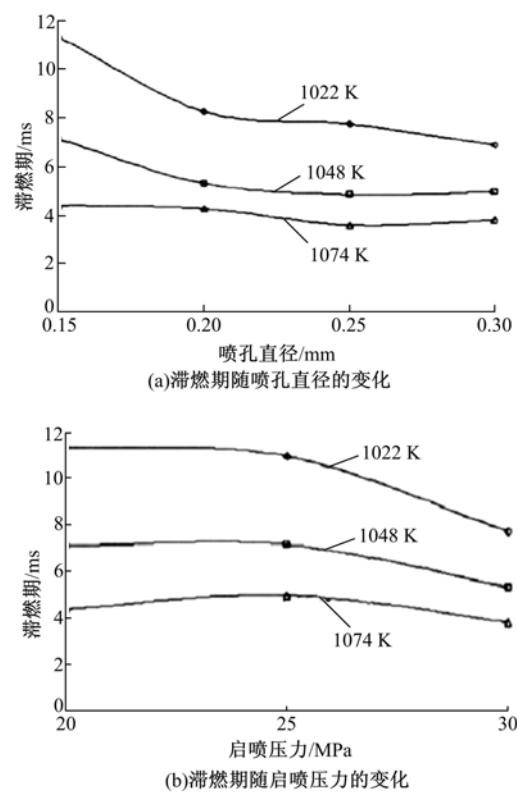


图 6 喷孔直径和启喷压力对滞燃期的影响

Fig. 6 Influence of nozzle diameter and injection pressure on auto-ignition delay

张旭升等^[34]对生物柴油在常压下的喷雾特性和在可控活化热氛围内的燃烧特性进行了研究。图 7 为不同油泵转速下生物柴油和柴油喷雾特性的对比结果(B 代表生物柴油,D 代表柴油),从图中可以看出:生物柴油的喷雾贯穿距离大于普通柴油,喷雾锥角显著小于柴油喷雾(油泵转速为 600 r/min 时,锥角仅为柴油一半)。随着生物柴油和柴油混合比的增加,混合燃料的滞燃期先减小后增大,但始终低于普通柴油,自燃点的分布更加广泛,且火焰温度低于普通柴油。在柴油单缸机上的燃烧特性表明,随着生物柴油混合比例的增加,生物柴油着火时刻提前,燃烧放热率峰值逐步降低。生物柴油混合燃料的 NO_x排放随着混合比例的增加而增加,尤其对高比例混合燃料更加明显;同时,生物柴油混合燃料的粒径分布对燃料中的硫含量非常敏感。

包堂堂等^[35]采用条件矩封闭(CMC)模型与三维计算流体动力学软件相耦合,建立了活化热氛围中的柴油喷雾燃烧模型,分析了燃料自燃临界温度随环境压力的变化,研究了临界温度附近柴油喷雾燃烧特性。结果表明,随着环境压力的

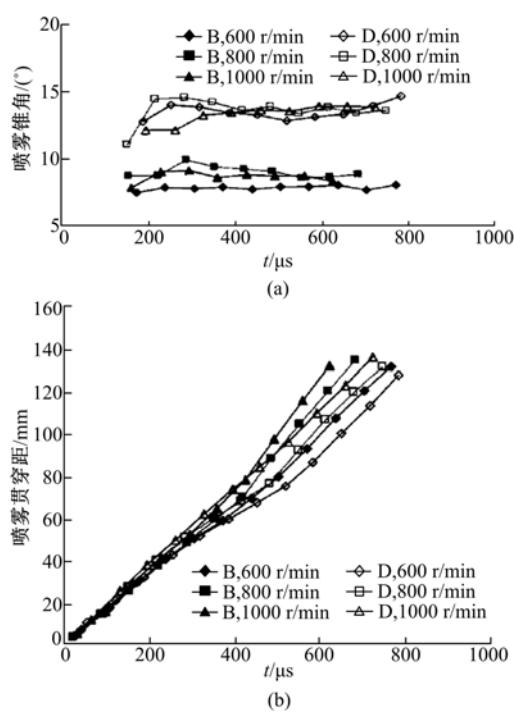


图7 生物柴油和柴油喷雾特性比较图

Fig. 7 Spray characteristics comparison between Biodiesel and Diesel

增加,自燃临界温度基本维持在1048 K附近,说明环境压力并不是影响临界温度的关键因素。在模拟条件下,当协流温度接近临界温度时,2 K的协流温度变化即可引起火焰温度及OH、H、HO₂等中间组分的分布产生较大变化(超过100%),进而对燃烧过程产生较大影响。

龚慧峰等^[36]对可控热氛围下正庚烷液滴流燃烧火焰特性进行了研究,利用超声雾化液滴流制备系统雾化成液滴群,由载气流将其从喷管喷出形成液滴流,并作为中央射流引入到热氛围燃烧器中。分析了液滴流贯穿高度、火焰起升高度、火焰高度、宽度等参数的变化规律。结果表明:液滴流燃烧时呈淡蓝色预混火焰,但液滴流浓度增大、热氛围温度升高时会产生暗红色尾焰;液滴流贯穿高度、火焰起升高度和火焰宽度都随热氛围温度升高而减小。图8为火焰起升高度随热氛围温度的变化,图中 ϕ 为正庚烷液滴流总体当量比。由图8可知,随着热氛围温度上升,火焰起升高度先减小后增大,且在高温区随当量比增大而升高。这是因为热氛围温度的升高加快了可燃混合气的形成和燃料的化学反应进程,而液滴流浓度的增大使液滴无法及时完全蒸发,因此部分液滴无法实现预混燃烧而在随载气气流运动到液滴流下游

时发生扩散燃烧,从而出现暗红色尾焰,使火焰起升高度变大。燃料流量增大使液滴流贯穿高度和火焰起升高度降低,火焰宽度增大;载气流量增大使液滴流贯穿高度减小,火焰起升高度在高温区减小,在低温区增大。

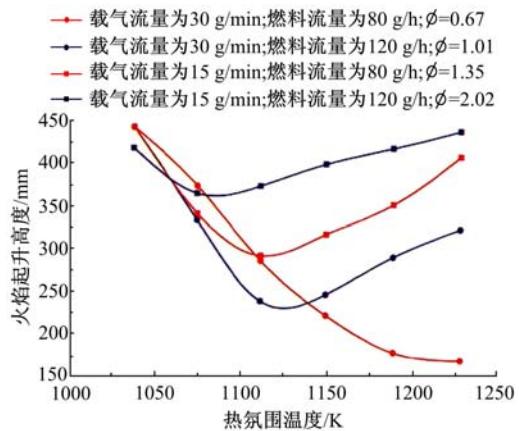


图8 正庚烷液滴流火焰高度随热氛围温度的变化

Fig. 8 Flame height of droplet streams with temperature

贺孝愚等^[37]研究了活化热氛围下润滑油的滞燃期,以探究润滑油成分对自燃特性的影响。试验发现随着温度的升高,润滑油的滞燃期显著减小。不同基础油、清净剂种类和钙含量都对润滑油的滞燃期有明显影响。随着润滑油运动黏度的增加,滞燃期增大;随着钙含量的增加,滞燃期减小;蒸发损失对滞燃期没有明显影响。

2.3 针对混合燃料的试验及模拟

张旭升等^[38]在可控活化热氛围中对生物柴油和柴油混合燃料燃烧特性进行了研究。结果表明,随着生物柴油体积分数增大,混合燃料滞燃期先减小后增大,但均低于普通柴油。随着协流温度的升高,纯生物柴油的滞燃期逐步下降。而生物柴油燃料体积分数的增大,则会逐步减小燃烧持续期;略微增加燃料氧质量分数可以明显降低燃烧持续期。同时,燃料喷射自燃的位置分布更加广泛。

Wu等^[39]通过高速摄影机对汽油/柴油混合燃料在热氛围燃烧器中的喷雾燃烧特性进行了试验研究。协流温度对不同当量比混合燃料的火焰起升高度的影响结果如图9所示。图中,D0、D20、D60、D100分别指柴油(Diesel)体积分数为0%、20%、60%、100%的柴油/汽油混合燃料。从图9可以看出:在高协流温度下,混合燃料火焰起升高度随着柴油比例增大而增大,点火延迟变长;在低协流温度下,柴油比例增加会导致火焰起升

高度降低,点火延迟变短。试验条件下柴油与汽油同时发生自燃的协流平衡温度定义为 T_s , 约为 1117 K。

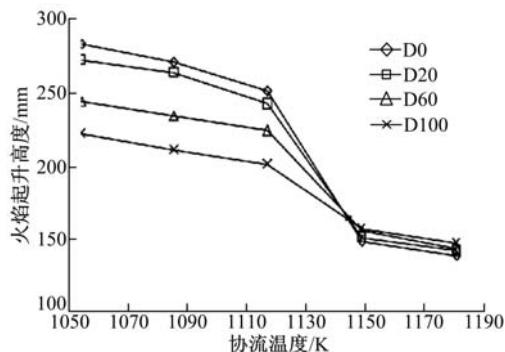


图 9 协流温度对火焰起升高度的影响

Fig. 9 Effect of co-flow temperature on lift-off height

为了进一步揭示混合燃料喷雾燃烧机理,Wu 等^[40]以试验数据为基础,使用涡耗散(EDC)模型建立了燃烧模型。模拟结果表明,在较低的协流温度下,较低的雾化速度和较低的脱氢反应活化能导致正庚烷自燃先于汽油发生;在高协流温度下,异辛烷先于正庚烷发生自燃,自燃延迟主要取决于燃油蒸发和扩散速率。增大喷射压力和背压会增大平衡温度 T_s ,且背压变化对于 T_s 的影响远高于喷射压力。

包堂堂等^[41]利用超声雾化设备制成了柴油/汽油混合燃料多液滴群,并在可控活化热氛围燃烧器上对燃烧特性进行了研究。结果表明:改变混合燃料掺混比、进给速度、空气流量,多液滴群自燃火焰形状显著改变,随着柴油掺混比的增大,火焰起升高度增加,宽度减小;改变燃料进给速度和空气流量会影响了混合燃料的燃空当量比及中央射流速度,进而影响燃料的燃烧特性。协流温度升高,混合燃料自燃起升高度降低、火焰宽度及长度减少、且亮度增加。该研究是对 Wu 等^[39]研究成果的补充和印证。

张青和包堂堂等^[42,43]利用可控热氛围燃烧系统提供的稳定均匀温度场研究了不同混合比例、背景温度和喷射压力下丙烷/柴油混合燃料的喷雾及自燃特性。结果表明,相对于纯柴油燃料混合燃料喷雾轮廓更为饱满,最大喷雾宽度出现位置更靠近喷雾前锋面。图 10 为不同混合比的 4 种燃料喷雾贯穿距和喷雾锥角随背景温度的变化情况,P0、P5、P10、P20 分别为丙烷(Propane)体积分数为 0% (即纯柴油)、5%、10%、20% 的丙烷/柴油混合燃料。对比图中曲线可知,随着丙烷

体积分数的增大,喷雾的最大贯穿距离减小,喷雾锥角变大;最大贯穿距离和喷雾锥角随背景温度的升高而减小,其中丙烷/柴油混合燃料对背景温度的变化更为敏感。混合燃料着火延迟期表现出多阶段的变化规律,在较低的协流温度下,丙烷比例增加,着火延迟期显著增大;而随着协流温度的升高和丙烷体积分数的增大,使得喷雾着火延迟期先减小后增加;协流温度继续增大后,丙烷体积分数增大,喷雾着火延迟期单调减小。

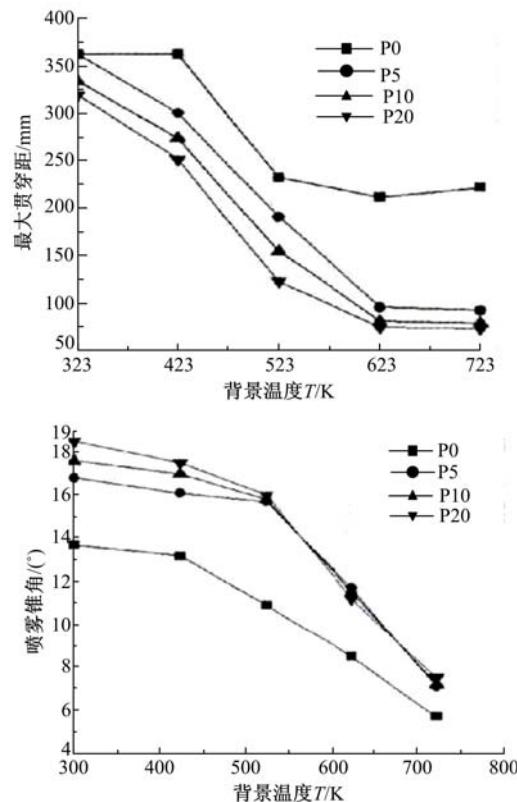


图 10 生物柴油和柴油喷雾特性比较图

Fig. 10 Spray characteristics comparison between Biodiesel and Diesel

3 可控热氛围燃烧试验系统未来研究方向

国内外相关领域的研究学者基于可控热氛围燃烧器,分别针对气体、液体和混合燃料的湍流射流起升火焰燃烧机理和火焰稳定性做了大量的试验和模拟研究。由于可控热氛围燃烧器的结构特性优势,使得数值模拟研究的复杂程度和计算成本大大降低。模拟研究中使用了 EDC 涡耗散模型、条件距封闭 CMC 模型和 PDF 模型等,对流场组分及燃烧过程中的化学反应动力学进行了较为详细的分析,揭示了化学反应机理对于射流喷

雾自燃及火焰稳定性的影响。试验研究主要借助激光多普勒测速技术(LDV)、激光诱导荧光方法(LIF)、集成激光衍射(ELD)以及高速摄影技术,针对燃料的喷雾和自燃特性进行了分析。研究了喷射压力、射流速度协流速度及温度等参数对于喷雾贯穿距,着火延迟期和火焰起升高度等关键性的影响。

目前很少有燃烧系统能实现高背压工况下的持续燃烧,高压燃烧系统的建立对于进一步模拟实际发动机的真实燃烧工况、探索湍流与燃烧的相互作用机理具有重大意义。因此,为了研究燃料射流在高压、受限空间内的燃烧过程,有必要设计配套的压力调节系统以进一步改善可控热氛围燃烧器在湍流燃烧研究领域的应用能力。目前,美国加州大学伯克利分校燃烧分析实验室和同济大学汽车学院内燃机燃料喷射与燃烧研究所均在开展相关设备的研制工作。同济大学高压热氛围燃烧器的设计示意图如图11所示。

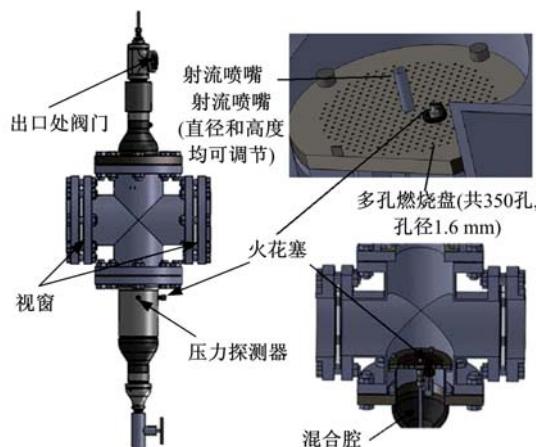


图11 高压热氛围燃烧器设计图

Fig. 11 Sketch of high pressure thermo-atmosphere combustor

该系统主要由供气、排气系统、喷油系统、冷却系统及测试系统等部分组成。为了确保各系统能达到设计要求并且安全、稳定地运行,首先利用CFD软件对进、排气系统以及燃烧室空间流场进行仿真,通过对速度场、压力场及温度场的分析研究确定系统在典型运行工况下所需的气体供应量以及喷油量;搭建各个子系统并进行实际测试,通过调节进、排气压力和进、排气量以产生试验所需的高压热氛围;调试喷油系统,以实现基础燃料高压瞬态喷雾;燃烧室壁面安装耐高温高压的石英玻璃以实现燃烧过程的可视化;对冷却系统、回火

截断系统等进行性能测试,确保高压燃烧系统安全运行。

可控热氛围燃烧器已经成为湍流燃烧基础研究的重要实验装置之一,未来的高背压可控热氛围燃烧器将进一步拓宽边界条件工况范围,使得其在湍流燃烧研究领域的应用能力获得进一步提升。

4 结束语

介绍了一种用于湍流射流起升火焰研究的新型燃烧器,总结了国内、外研究人员基于该燃烧器针对不同特性燃料开展相关研究的主要研究内容、研究方法和重要结论。该燃烧器能够直接产生稳定射流火焰所需的热氛围和氧氛围,避免了中央射流与冷态空气之间的流体力学再循环,将流体力学与化学反应动力学解耦。可以更容易地建立燃烧器的化学反应动力学模型,使得数值模拟研究的复杂程度和计算成本大大降低。

参考文献:

- [1] Schlichting H, Gersten K. Boundary Layer Theory [DB/OL]. [2016-06-20]. <http://www.doc88.com/p-9109559075001.html>.
- [2] Hinze J O. Turbulence[M]. New York: McGraw-Hill, 1975.
- [3] Vanquickenborne L, van Tiggelen A. The stabilization mechanism of lifted diffusion flames[J]. Combustion and Flame, 1966, 10(1):59-69.
- [4] Schefer R W, Goix P J. Mechanism of flame stabilization in turbulent, lifted-jet flames[J]. Combustion and Flame, 1998, 112(4):559-574.
- [5] Mastorakos E, Baritaud T A, Poinsot T J. Numerical simulations of autoignition in turbulent mixing flows[J]. Combustion and Flame, 1997, 109 (1): 198-223.
- [6] Mastorakos E, Bilger R W. Second-order conditional moment closure for the autoignition of turbulent flows[J]. Physics of Fluids, 1998, 10 (10): 1246-1248.
- [7] Bilger R W. Turbulent jet diffusion flames[J]. Energy Combus Sci, 1976, 1(2):87-109.
- [8] Brown C D, Watson K A, Lyons K M. Studies on lifted jet flames in coflow: the stabilization mechanism in the near-and far-fields[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 1999, 62(3):249-273.
- [9] 吴志军,邓俊,冯威,等. 可控活化热氛围下喷射燃

- 料自燃的研究方法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2006, 36(1):36-41.
- Wu Zhi-jun, Deng Jun, Feng Wei, et al. Research method for autoignition of fuel jet in controllable active thermo-atmosphere[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2006, 36(1):36-41.
- [10] Cabra R, Myhrvold T, Chen J Y, et al. Simultaneous laser Raman-Rayleigh-LIF measurements and numerical modeling results of a lifted turbulent H₂/N₂ jet flame in a vitiated coflow[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(2):1881-1888.
- [11] Wu Z, Starner S H, Bilger R W. Lift-off heights of turbulent H₂/N₂ jet flames in a vitiated co-flow[C]// Proceedings of the 2003 Australian Symposium on Combustion and the 8th Australian Flame Days, Australia, 2003.
- [12] Barlow R S, Pope S B, Masri A R, et al. Sixth international workshop on measurement computation of turbulent non-premixed flames[C]// Proceedings of Sixth International Workshop on Measurement and Computation of Turbulent Non premixed Flames, Sapporo, Japan, 2002.
- [13] 邓俊, 吴志军, 李理光, 等. 可控活化热氛围燃烧试验系统的研发[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2007, 37(2):307-312.
- Deng Jun, Wu Zhi-jun, Li Li-guang, et al. Development of experimental system of novel controllable active thermo-atmosphere combustor[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2007, 37(2):307-312.
- [14] 吴志军, 邓俊, 李理光. 可控活化热氛围燃烧器非标协流特性的试验研究[J]. 科学通报, 2005, 50(7): 721-724.
- Wu Zhi-jun, Deng Jun, Li Li-guang. Study on characteristics of controllable active thermo-atmosphere of a vitiated coflow combustor[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(7):721-724.
- [15] Wang H, You X, Joshi A V, et al. USC Mech Version II. High-temperature combustion reaction model of H₂/CO/C₁-C₄ Compounds[DB/OL]. [2016-06-25]. http://ignis.usc.edu/USC_Mech_II.htm.
- [16] Smith G P, Golden D M, Frenklach M, et al. GRI-Mech 3.0[DB/OL]. [2016-06-25]. <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/>.
- [17] Tacke M M, Geyer D, Hassel E P, et al. A detailed investigation of the stabilization point of lifted turbulent diffusion flames[J]. Symposium on Combustion, 1998, 27(1):1157-1165.
- [18] Brown C D, Watson K A, Lyons K M. Studies on lifted jet flames in coflow: the stabilization mechanism in the near-and far-fields[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 1999, 62(3):249-273.
- [19] Cabra R, Hamano Y, Chen J Y, et al. Ensemble diffraction measurements of spray combustion in a novel vitiated coflow turbulent jet flame burner[R]. Golden: Spring Meeting of the Western States Section of the Combustion Institute, 2000.
- [20] Smith L L, Dibble R W, Talbot L, et al. Laser Raman scattering measurements of differential molecular diffusion in turbulent nonpremixed jet flames of H₂/CO₂ fuel[J]. Combustion and Flame, 1995, 100(1/2):153-160.
- [21] Mastorakos E, Markides C, Wright Y M. Hydrogen autoignition in a turbulent duct flow: experiments and modelling[C]// The 12th International Conference on Fluid Flow Technologies, Budapest, 2003:56-62.
- [22] Cabra R, Chen J Y, Dibble R W, et al. Lifted methane-air jet flames in a vitiated coflow[J]. Combustion & Flame, 2005, 143(4):491-506.
- [23] Cao R R, Pope S B, Masri A R. Turbulent lifted flames in a vitiated coflow investigated using joint PDF calculations[J]. Combustion and Flame, 2005, 142(4):438-453.
- [24] Gordon R L, Starner S H, Masri A R, et al. Further characterisation of lifted hydrogen and methane flames issuing into a vitiated coflow[C]// Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Combustion, Adelaide, Australia, 2005:333-336.
- [25] Wu Z, Masri A R, Bilger R W. An experimental investigation of the turbulence structure of a lifted H₂/N₂ jet flame in a vitiated co-flow[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2006, 76(1):61-81.
- [26] Patwardhan S S, De S, Lakshmisha K N, et al. CMC simulations of lifted turbulent jet flame in a vitiated coflow[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2): 1705-1712.
- [27] Klimenko A Y. Multicomponent diffusion of various admixtures in turbulent flow[J]. Fluid Dynamics, 1990, 25(3):327-334.
- [28] Bilger R W. Conditional moment closure for turbulent reacting flow[J]. Physics of Fluids A, 1993, 5(2):436-444.
- [29] Navarro-Martinez S, Rigopoulos S. Large eddy simulation of a turbulent lifted flame using conditional

- moment closure and rate-controlled constrained equilibrium [J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2011, 87(2/3): 407-423.
- [30] Stanković I, Merci B. Analysis of auto-ignition of heated hydrogen-air mixtures with different detailed reaction mechanisms [J]. Combustion Theory and Modelling, 2011, 15(3): 409-436.
- [31] Johannessen B, North A, Dibble R, et al. Experimental studies of autoignition events in unsteady hydrogen-air flames [J]. Combustion & Flame, 2015, 162(9): 3210-3219.
- [32] Cabra R, Dibble R W, Chen J Y. Characterization of liquid fuel evaporation of a lifted methanol spray flame in a vitiated coflow burner [DB/OL]. [2016-06-26]. <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20030014738.pdf>.
- [33] 邓俊,吴志军,黄成杰,等. 活化热氛围下柴油喷雾多点自燃特性及影响因素的实验研究[J]. 科学通报,2006,51(22):2699-2704.
Deng Jun, Wu Zhi-jun, Huang Cheng-jie, et al. Experimental study on multi-point autoignition characteristics and influence factors of diesel spray in a controllable active thermo-atmosphere [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(22): 2699-2704.
- [34] 张旭升,李理光,邓俊,等. 生物柴油喷雾特性的试验研究[J]. 内燃机学报, 2007, 25(2): 172-176.
Zhang Xu-sheng, Li Li-guang, Deng Jun, et al. An experimental study of bio-diesel spray characteristics [J]. Transactions of Csice, 2007, 25(2): 172-176.
- [35] 包堂堂,邓俊,吴志军. 临界温度区域内柴油喷雾燃烧特性模拟[J]. 同济大学学报:自然科学版,2013, 41(8):1255-1262.
Bao Tang-tang, Deng Jun, Wu Zhi-jun. Numerical study on combustion characteristics of diesel spray crossing critical temperature range [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41 (8): 1255-1262.
- [36] 龚慧峰,胡宗杰,张青,等. 可控热氛围下正庚烷液滴流燃烧火焰特性研究[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(5): 1134-1140.
Gong Hui-Feng, Hu Zong-Jie, Zhang Qing, et al. Flame characteristics of *n*-Heptane droplet streams in a controllable active thermo-atmosphere [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37 (5): 1134-1140.
- [37] 贺孝愚,童孙禹,宛昕,等. 活化热氛围下润滑油自燃特性研究[J]. 润滑油, 2016, 31(1): 59-64.
He Xiao-yu, Tong Sun-yu, Wan Xin, et al. Research on the auto-ignition characteristics of lubricant in controllable active thermo-atmosphere [J]. Lubricating Oil, 2016, 31(1): 59-64.
- [38] 张旭升,李理光,吴志军,等. 可控活化热氛围中不同混合比生物柴油的燃烧特性[J]. 燃烧科学与技术,2008,14(2):127-131.
Zhang Xu-sheng, Li Li-guang, Wu Zhi-jun, et al. Characteristics of the biodiesel combustion in a controllable active thermo-atmosphere [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2008, 14 (2): 127-131.
- [39] Wu Zhi-jun, Bao Tang-tang, Zhang Qing, et al. Experimental study on spray combustion characteristics of gasoline-diesel blended fuel in a controllable active thermo-atmosphere [J]. Fuel, 2014, 135: 374-379.
- [40] Wu Zhi-jun, Bao Tang-tang, Zhang Qing, et al. Simulation study on spray combustion mechanism of diesel-gasoline blend fuels [J]. Fuel, 2015, 143: 301-307.
- [41] 包堂堂,胡宗杰,胡俊超,等. 基于超声雾化的柴油/汽油混合燃料液滴群燃烧特性[J]. 吉林大学学报:工学版,2013,43(4):903-908.
Bao Tang-tang, Hu Zong-jie, Hu Jun-chao, et al. Combustion characteristics of diesel-gasoline blend fuel based on ultrasonic atomization technology [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2013, 43(4): 903-908.
- [42] 张青,吴志军,赵文伯,等. 可控热氛围下丙烷柴油混合燃料喷雾特性试验研究[J]. 工程热物理学报, 2015, 33(9): 2050-2054.
Zhang Qing, Wu Zhi-jun, Zhao Wen-bo, et al. Experimental study on spray characteristics of diesel-propane blend fuel in a controllable active thermo-atmosphere [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 33(9): 2050-2054.
- [43] 包堂堂,张青,严术斌,等. 可控热氛围下柴油/丙烷混合燃料低压喷雾及自燃特性试验[J]. 内燃机学报,2014,32(4):309-315.
Bao Tang-tang, Zhang Qing, Yan Shu-bin, et al. Experiment on low pressure spray and auto-ignition characteristics of diesel-propane blends in controllable active thermo-atmosphere [J]. Transactions of Csice, 2014, 32(4): 309-315.