

微型摆动式发动机内间歇着火和火焰传播试验研究

刘秦飞^{1,2}, 蒋利桥¹, 杨卫斌¹, 苏 航¹, 赵黛青¹

(1. 中国科学院 广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

Experimental Study on Intermittent Ignition and Flame Propagation in MICSE

LIU Qinfei^{1,2}, JIANG Liqiao¹, YANG Weibin¹, SU Hang¹, ZHAO Daiqing¹

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The combustion characteristics of intermittent ignition and flame propagation in a micro internal combustion swing engine (MICSE) were experimentally investigated on a visible two-stroke single-cylinder MICSE. In order to simulate the free swing arm motion, the swing arm was driven by a mechanical system with an electric motor. A timing system based on swing arm position was established for the spark ignition. A stable intermittent ignition of the mixture of n-butane and air in the MICSE was achieved. The ignition and flame propagation in the MICSE were observed using a high speed camera and the observed flame zone area was analyzed in detail with a Matlab program. The effect of swing frequency and premixed gas flow rate on the ignition and flame propagation was investigated. The results show that the speed of flame propagation is fast at high swing arm frequency and high premixed gas flow rate.

摘要: 为了试验研究微摆发动机燃烧室内的间歇着火和火焰传播特性,设计了一套电机驱动倒拖运行的两冲程微型摆动式发动机单缸燃烧可视化试验系统,倒拖运动摆臂模拟了真实发动机自由摆臂的运动特性,并建立了对应摆臂位置的电火花正时点火系统。在微摆发动机单缸内实现了正丁烷/空气的稳定间歇着火,用高速相机拍摄火焰传播图像,并用 Matlab 程序分析图像中火焰面积变化特征。考察了摆臂频率 f 和预混气流量 Q 对着火和火焰传播的影响。研究表明:随预混气流量的增加,火焰传播越快;单次扫气量 Q/f 不变,随摆臂频率的增加,火焰传播变快。

关键词: 内燃机;微型摆动式发动机;微尺度燃烧;倒拖机构;电火花点火;火焰传播

Key words: IC engine; micro internal combustion swing engine (MISCE); micro combustion; driven device; spark ignition; flame propagation

DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2017.02.006

中图分类号: TK223.2

文献标识码: A

0 概述

如今,微电子机电技术(MEMS)发展迅速,智能

手机、军用无人机、户外作业探测设备等逐渐小型化和便携化,这与其自身微型供能系统的矛盾日益突出,要求供能系统具有能量密度与比功率较高、续

收稿日期: 2015-06-10

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划项目(2014CB239600); 国家自然科学基金重点项目(51176193); 广东省科技计划项目(2014A050503054, 2016A040403095)

作者简介: 刘秦飞(1990—),男,硕士生,主要研究方向为微尺度燃烧, E-mail: liuqf@ms.giec.ac.cn;

蒋利桥(联系人), E-mail: jianglq@ms.giec.ac.cn。

能迅速、供能稳定特点^[1]。基于燃料燃烧的微型热机系统符合上述要求。典型热机有微型燃气轮机^[2]和微型内燃机^[3-5]。其中,微型摆动式发动机由于其空间利用率与质量利用率均较高、摆动频率稳定及结构简单等特点,颇受国内外学者关注。文献[6]最先设计制作了65 W级四冲程的微型摆动式发动机(61 mm×61 mm×34 mm)系统^[6-9],对微摆发动机系统的结构制造、点火进气的正时控制等进行了深入探索分析;文献[10-12]研制了一系列的二冲程微摆发动机样机,并在结构优化、密封、点火控制和动力特性方面开展了大量研究工作;此外,文献[13]数值分析了微摆发动机的系统稳定性和运动频率特性。然而,对微型摆动式发动机连续工作下的间歇着火和火焰传播特性的试验研究较少。

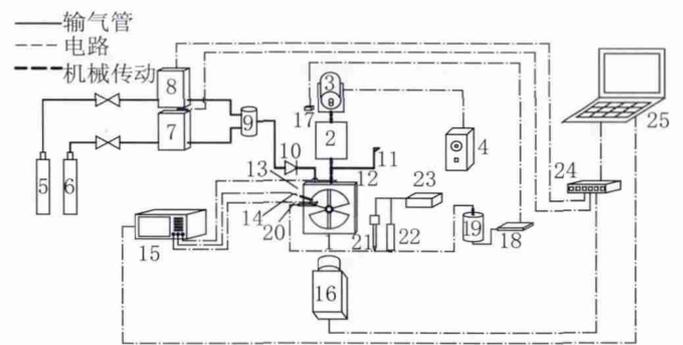
快速可靠与可控的着火,是微型摆式发动机实现化学能-热能-机械能转换的基础。微小尺度下发动机及燃烧室的面积/体积比增加,壁面散热损失和壁面化学效应均加剧,导致微小空间内着火困难及火焰传播不稳定性增加^[14-18]。目前,可用于微型发动机的点火方式有电火花点火、压燃点火和混合点火^[19]。在微小空间内采用电火花点火时,由于自身的热化学作用,壁面和电极对点火过程存在较大的影响。文献[20]采用详细化学动力学的数值方法,结合试验结果分析了电极间距、当量比及火花持续时间对甲烷/空气着火最低点活能 MIE 的影响规律,发现电极间距在小于淬熄间距时将最低点火能产生较大影响。文献[21]在试验中实现了单次工作微型均质充量压燃(HCCI)自由活塞发动机原理样机的压燃着火,并用高速相机记录了单次压燃着火与火焰传播特性,通过改变混合气初始压力可以有效地控制 HCCI 微型自由活塞发动机的着火时刻。

对于微型摆动式发动机,缸内的着火和火焰传播特性决定了发动机的功率输出特性和热效率。为此,研制了一套电机驱动的两臂微型摆式内燃发动机单缸燃烧可视化系统及其电火花点火装置,进行缸内间歇着火和火焰传播的试验研究。

1 试验装置

试验系统包括微型摆动式发动机、燃料供应系统、齿轮齿条正弦倒拖驱动机构、电火花点火正时控制系统和数据采集系统,如图1所示。

微型摆动式发动机是双摆臂四腔室结构^[6,22],上侧两个腔室设有石英玻璃观察视窗,如图2所示。摆式发动机的外形尺寸为61.00 mm×61.00 mm×



1. 发动机 2. 滑块齿轮 3. 驱动电机 4. 调速器 5. 燃料瓶 6. 压缩空气 7&8. 质量流量计 9. 混合器 10. 单向阀 11. 尾气排放 12&13&14. 微型热电偶 15. 高速数据采集仪 16. 高速相机 17. 光电传感器 18. 点火控制器 19. 高压线圈 20. 点火电极 21. 高压探头 22. 电流探头 23. 示波器 24. 交换机 25. 电脑

图1 电机驱动单缸燃烧微型摆动式发动机试验系统图

35.25 mm,燃烧室的容积为 $4 \times 3.195 \text{ cm}^3$,深15.2 mm,机体材料为304不锈钢。摆臂的截面长度为45.7 mm,宽度4.0 mm,由40Cr钢制成。微型摆式发动机的燃料/空气预混气由进气阀片控制,由燃烧室端面间歇进入燃烧室,进气量和燃料当量比由质量流量计(MKS)进行精确控制。排气口设置在燃烧室机体的上方中央处,通过摆臂运动遮挡排气口实现排气。在燃烧室侧面布置了一个外径为2 mm的双孔陶瓷管,以两根直径0.5 mm的钨丝作为电火花点火电极,试验中仅左侧的燃烧室工作,以两冲程的模式运行。

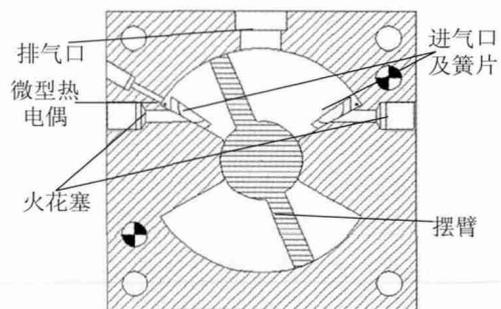


图2 摆动式发动机的燃烧室截面图

根据已有报道^[9-10],自由摆臂运动时,摆动式发动机的摆臂运动规律近似为正弦规律,中心摆的摆角绝对误差最大值出现在两个燃烧室中心线附近。为模拟自由摆臂在设定摆臂频率和摆臂幅度下的运动,本研究设计了一套能够倒拖摆臂按正弦规律摆动的机构。正弦摆动倒拖试验机构的原理如图3所示,主要由匀速驱动电机、圆盘、滑块、滑杆、齿条、齿轮等组成。图3中, R 为摇臂长度, ω 为摇臂转动角速度, A 为滑块所在的位置, O 为电机轴位置。其设计结构能实现将电机的匀速圆周运动转换为微型摆动式发动机摆臂的往复正弦摆动,摆动频率与驱动电机转

动频率一致。摇臂的离心半径为滑动式可调,从而可以实现摆臂摆动幅度(最大摆动角度)的无级调节。

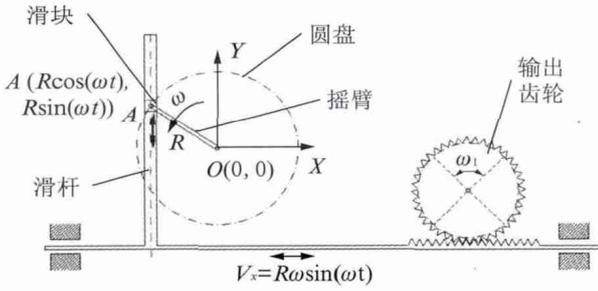


图 3 往复正弦摆动倒拖机构原理图

为实现在设定摆臂位置下的点火正时,在试验平台上集成了一套正时电火花点火控制系统。点火信号用光敏二极管 GP2S40 感应采集驱动圆盘的转动脉冲信号,在圆盘圆周上特定角度处安置位置光标,圆盘转动一周,则发出一次脉冲信号给点火控制器驱动高压线圈放电点火,可实现在不同转速下于设定的摆臂角度处点火。圆盘上的位置光标可在圆周方向调整角度位置,从而可根据需要调节点火时刻。试验中用到的点火控制器为展盛 DK-6A,高压线圈为 12 V 电感式点火线圈。

数据采集系统包括高速示波器、高速数据采集仪和高速 CCD 相机等。高速示波器为 Picoscope5000 系列,用高速示波器采集电火花放电信号电压、电流,从而可计算得到点火能与放电频率。在燃烧腔室的侧面、背面及尾气出口处分别设置了丝径 0.05 mm 的热电偶,监测火焰和尾气的温度。高速数据采集仪为 midi Logger GL900,用于采集腔室中温度测点的热电偶电压信号和光敏二极管的脉冲信号,得到测点温度的周期变化曲线和摆臂的摆动频率。高速 CCD 相机为 NAC 高速相机 HX-6,试验用高速 CCD 相机捕捉高速摆动中摆臂的运动图像及腔室中的火焰传播,拍摄频率为每秒 5 000 幅,曝光时间分别为 10 μ s 和 100 μ s。

2 摆臂运动规律测量

固定驱动电机的转速,用高速相机拍摄得到一个周期内摆臂的位置图,如图 4 所示。以燃烧室的中心线为 Y 轴,用图片测量软件测得图片中摆臂与 Y 轴的夹角 θ 作为摆角,再拟合出摆角-时间的曲线方程。

试验中测得低频率下摆臂摆动角度的规律曲线,并拟合得到摆臂运动规律的曲线方程,如图 5 所示,拟合曲线为三角函数曲线。图 5(a)得到的摆动规律方程的频率为 4.06 Hz,同时利用试验中采集的驱动圆盘转动的脉冲信号,得到实际转速对应的频率为

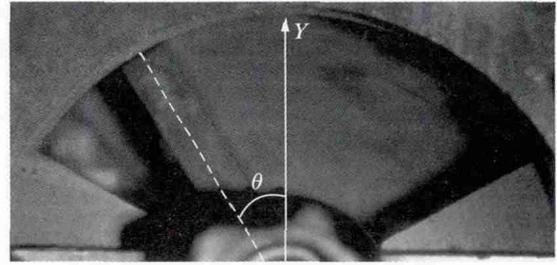
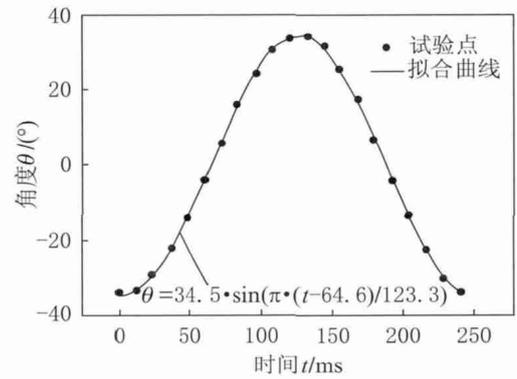
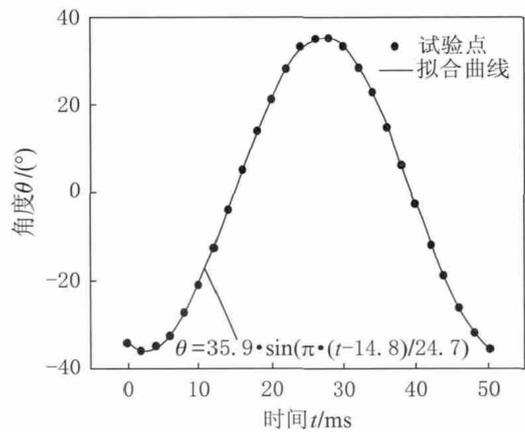


图 4 摆动中的摆臂角度位置图

4.08 Hz,两者误差为 0.7%。同样,对更高频率的摆臂运动进行拟合,如图 5(b)所示,拟合曲线依然呈三角函数规律,实现的运动规律曲线与正弦摆动曲线之间的角度误差小于 2.8%。试验结果充分说明驱动电机的转动依然保持近似匀速圆周运动,电机驱动下摆臂的运动规律符合预期设计,摆动角度与时间成三角函数关系,与文献[9]结果一致。



(a) $f=4.08$ Hz



(b) $f=20.16$ Hz

图 5 摆角拟合曲线及拟合方程

3 结果与讨论

3.1 摆臂频率的影响

以正丁烷/空气作为燃料,试验测试了不同摆动频率下微摆发动机的连续着火与火焰传播特性。试验工况为:单个腔室的预混气流量 $Q=3\ 500\text{ cm}^3/\text{min}$,

当量比 $\varphi=1$, 最大摆幅摆角 $\theta=32.8^\circ$ 。结果表明, 微摆发动机在4~12 Hz 摆臂频率下能够实现稳定的间歇着火, 一个着火周期火焰发展情况如图6所示, 火焰照片为点火后0~7 ms的火焰情况, 相邻图片间隔1 ms。电火花放电点火燃烧过程依次经历了跳火、形成火核、火核长大、火焰传播充满燃烧室, 直至火焰燃尽的一个完整过程。

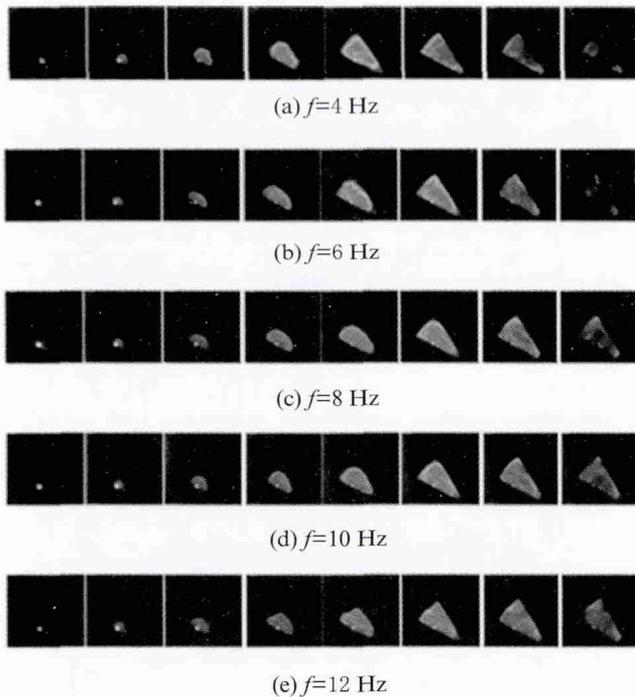


图6 摆臂频率对周期着火与火焰传播的影响

火核初期发展较慢, 其中可见电火花处高亮区持续时间约2 ms; 然后火焰传播加速, 从火核形成到火焰面传播到燃烧室四周壁面区域需要约4 ms; 随后1~2 ms 整个燃烧室区域保持火焰面基本不变, 火焰壁面区域变亮, 壁面附近与燃烧室角落的燃料燃烧; 在此时刻后, 燃尽区火焰面变暗并逐渐消失, 直至最后在靠近摆臂转轴位置处完全熄灭。

在相同的进气流量、燃料当量比和摆幅的条件下, 摆臂频率变化对着火过程存在较大的影响。随着摆臂频率的增加, 火焰发展和传播速度变慢, 如在点火后2 ms和3 ms时刻, $f=4$ Hz 火焰投影面积最大, $f=6$ Hz、 $f=8$ Hz、 $f=10$ Hz、 $f=12$ Hz 的火焰投影面积则依次递减。

通过自行编写的 Matlab 程序量化图片中火焰投影面积, 可更直观地分析各个因素对火焰传播的影响规律。将火焰图片数值化处理后, 得到火焰投影面积随时间的变化曲线, 如图7所示。在摆臂频率 $f=4$ Hz 时, 火焰面充满燃烧室的时间为4.4 ms, 而燃烧室的火焰从点火到完全熄灭所需要的时间约

为11.0 ms。在摆臂频率增加至6 Hz、8 Hz、10 Hz和12 Hz时, 从点火到火焰面充满燃烧室的时间依次为5.2、5.6、6.0、6.4 ms, 呈依次递增的趋势。

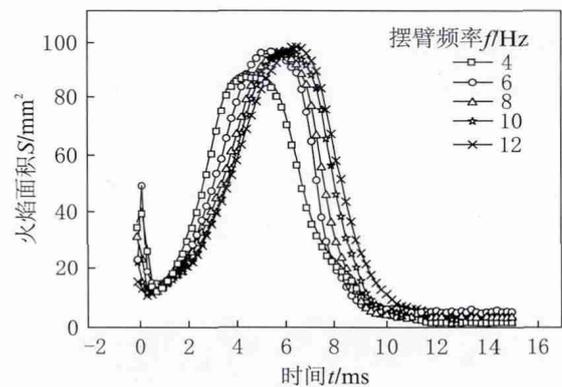


图7 摆臂频率对火焰投影面积随时间的影响

试验中还发现, 在摆臂频率较高的情况下, 存在着着火和火焰传播不稳定的现象, 表现为火焰并没有在单个燃烧周期内熄灭, 燃烧腔室的火焰持续存在, 并使得下一个摆动周期无法正时着火。其原因可能是在进气流量固定的情况下, 提高摆臂运动频率, 燃烧过程燃烧室容积变化加快, 导致进、排气换气不能充分完成, 熄灭前的火焰点燃新补充的预混气造成局部燃烧。

3.2 预混气流量的影响

微摆发动机以两冲程模式工作, 并且为了简化进气结构而采用新鲜预混燃气扫气时, 必须考虑有限量新鲜预混气的扫气效果对燃烧室的着火和火焰传播的影响。试验测试了不同进气流量下的连续着火和火焰传播特性。

在预混气当量比、摆臂频率和摆动幅度相同的条件下, 预混气流量对火焰传播过程有较明显的影响。结果如图8所示, 图8中火焰照片为点火后0~7 ms的火焰情况, 相邻图片间隔1 ms, 试验条件 $\varphi=1$, $f=10$ Hz, $\theta=32.8^\circ$ 。随着流量从2600 cm³/min 逐渐增加到3800 cm³/min, 火焰传播越来越快。如在点火后3 ms时, 随着流量的增加, 火焰投影面面积显著增大。从火焰投影面积-时间曲线图(图9)可精确得知, 预混气流量从2600 cm³/min 增加到3800 cm³/min 对应的火焰充满燃烧室的时间依次为6.8、6.6、6.4、6.2、6.0 ms, 呈递减趋势。

一个着火周期的初始, 燃烧室充满了已燃尾气, 在排气口打开后燃烧室压力下降, 新鲜预混气开始进入燃烧室, 并将残余尾气排到腔室之外。在摆臂压缩到死点开始点火时, 燃烧室内的气氛中掺混的尾气(主要是CO₂和N₂)会对连续间歇着火和火焰

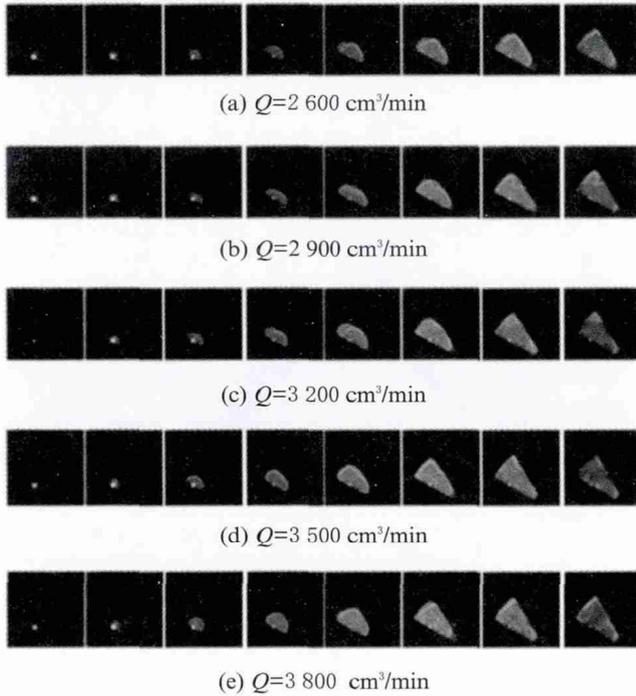


图 8 预混气流量对周期着火与火焰传播的影响

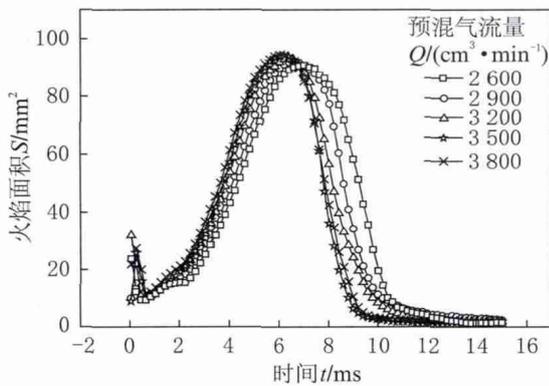


图 9 预混气流量对火焰投影面积的影响

传播产生较大影响。文献[23]对 O_2/CO_2 氛围下火焰传播速度的影响因素的研究发现, O_2/CO_2 气氛下 CO_2 对碳氢化合物的火焰传播特性有重要影响。 CO_2 是高比热容和低扩散率气体, 对火焰传播的阻碍作用比 N_2 大得多, 因此在 O_2 浓度不变的情况下, 提高燃气中 CO_2 浓度将大大降低火焰传播速度。在相同的预混气当量比、摆臂频率和摆幅的条件下, 微摆发动机中的预混燃气进气量越大, 扫气越充分, 则在压缩点火时预混燃气成分中掺混的尾气越少。此外, 尾气稀释了预混燃气, 降低了燃料浓度, 也一定程度上导致了火焰传播速度的降低。因而, 火焰传播速度与预混气扫气量的正相关关系, 本质上说明了两冲程微摆发动机尾气(主要为 CO_2 和 N_2) 掺混对着火和火焰传播的阻碍作用。

3.3 单次扫气量相同时摆臂频率的影响

由上文分析可知定摆臂频率时不同预混气流量(单次扫气量)下的火焰传播规律, 分析可知单次扫气量越大, 则火焰传播速度越快; 而定预混气流量下, 频率变化后单次扫气量是变化的, 无法单独说明摆臂频率对火焰传播的影响。为此, 试验设置单次扫气量 Q/f (预混气流量/摆臂频率) 为定值, 当量比 ($\varphi=1$) 和摆角 ($\theta=30.9^\circ$) 保持不变, 摆臂频率分别设为 4、6、8、10 和 12 Hz, 相应的预混气流量为 1 600、2 400、3 200、4 000 和 4 800 cm^3/min , 火焰投影面随时间的变化及相应的投影面积-时间曲线图如图 10 所示, 火焰充满燃烧室的时间依次为 8.4、7.8、7.0、6.4、6.6 ms, 总体呈递减趋势。

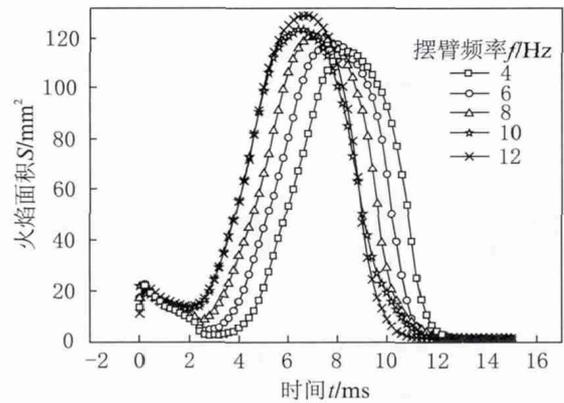


图 10 进气流量/摆臂频率一定时的火焰面积特性

试验结果充分说明了在单次扫气量一定的情况下, 摆臂频率越高则火焰传播速度越快, 火焰充满燃烧室时间越短。从流场方面来看: 一方面, 摆臂频率增加使得摆臂运动拖曳对微燃烧室内流动扰动作用增强, 减弱了层流流动的影响; 另一方面, 相同 Q/f 条件下, 频率增加使得进气流量增加, 提高了进气流速, 加强了流动扰动。而湍流对内燃机燃烧室内燃烧有较大影响, 湍流增强有助于提高燃烧室的火焰传播速度和燃料质量消耗率^[24]。

4 结论

- (1) 经试验验证, 本文设计的电机驱动微型摆式内燃发动机单缸燃烧可视化试验系统, 其倒拖机构运动规律符合三角函数规律。
- (2) 试验系统实现了摆臂频率 4~12 Hz 范围内的正丁烷/空气间歇正时着火, 并捕捉了火焰动态传播特性。
- (3) 在预混气当量比、摆幅、摆臂频率不变时, 随预混气流量(单次扫气量)的增加, 燃烧室内火焰传播加快, 火焰更快充满燃烧室。

(4) 在预混气当量比、摆幅、单次扫气量 Q/f 不变的情况下, 摆臂频率的增加使得燃烧室内火焰传播加快, 火焰充满燃烧室时间缩短。

参考文献:

- [1] JU Y, MARUTA K. Microscale combustion: technology development and fundamental research[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2011, 37(6): 669-715.
- [2] EPSTEIN A H, SENTURIA S D, ANATHASURES H G, et al. Power MEMS and microengines[C]//Chicago: Proceedings of the 1997 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, 1997.
- [3] FU K. Design and experimental results of small-scale rotary engines[C]//New York: 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2001.
- [4] AICHLMAYR H T, KITTELSON D B, ZACHARIAH M R. Micro-HCCI combustion: experimental characterization and development of a detailed chemical kinetic model with coupled piston motion [J]. Combustion and Flame, 2003, 135 (3): 227-248.
- [5] 唐刚志, 张力, 尚会超, 等. 热力参数对微尺度发动机燃烧特性影响机理分析[J]. 内燃机工程, 2015, 36(2): 103-110.
TANG G Z, ZHANG L, SHANG H C, et al. Mechanism analysis of thermodynamical parameter effect on micro scale IC engine combustion characteristics [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2015, 36(2): 103-110.
- [6] DAHM W, NI J, MIJIT K, et al. Micro internal combustion swing engine (MICSE) for portable power generation systems [C]// Reno: 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2002, A02-14192.
- [7] GU Y. Gasdynamic modeling and parametric study of mesoscale internal combustion swing engine/generator systems [D]. Michigan: University of Michigan, 2006.
- [8] ZHU H H. Design, modeling and control of micro internal combustion swing engine (MICSE)-based hybrid power system [D]. Michigan: University of Michigan, 2006.
- [9] GU Y, MAYOR J R, DAHM W J A. Turbulence-augmented minimization of combustion time in mesoscale internal combustion engines[C]//Reno: 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2006.
- [10] 郭志平, 张仕民. 新型二冲程微型摆式内燃机的设计方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 8-73.
- [11] 郭志平, 王燕飞, 张慧杰, 等. 微型摆式内燃机动力特性研究[J]. 内燃机工程, 2014, 35(2): 119-124.
GUO Z P, WANG Y F, ZHANG H J, et al. Transient dynamics analysis of micro free piston swing engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014, 35(2): 119-124.
- [12] 朱峰, 林吉靓, 郭志平. 微型摆式内燃机中心摆的热-结构耦合分析与研究[J]. 内燃机工程, 2014, 35(6): 121-124.
ZHU F, LIN J J, GUO Z P. Thermo-structure coupled analysis and research of micro-free piston swing engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014, 35(6): 121-124.
- [13] 夏必忠, 张辉, 叶佩青, 等. 微型摆式内燃发电机频率的计算与分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(2): 1-3.
XIA B Z, ZHANG H, YE P Q, et al. Frequency characteristics of micro IC swing power generator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(2): 1-3.
- [14] YANG H L, FENG Y X, WANG X H, et al. OH-PLIF investigation of wall effects on the flame quenching in a slit burner[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34 (2): 3379-3386.
- [15] MARUTA K, TAKEDA K, AHN J, et al. Extinction limits of catalytic combustion in microchannels[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(1): 957-963.
- [16] 张力, 闫云飞, 李丽仙, 等. 微型燃烧器内甲烷预混催化燃烧的数值研究[J]. 化工学报, 2009, 60(3): 627-633.
ZHANG L, YAN Y F, LI L X, et al. Numerical investigation of premixed catalytic combustion of methane in micro-combustor[J]. CIESC Journal, 2009, 60(3): 627-633.
- [17] JIANG L Q, ZHAO D Q, WANG X H, et al. Development of a self-thermal insulation miniature combustor [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(5): 1308-1313.
- [18] 林博颖, 张根炬, 刘明侯, 等. 微小空腔内气体的预混燃烧[J]. 燃烧科学与技术, 2007, 13(3): 269-274.
LIN B Y, ZHANG G X, LIU M H, et al. Premixed combustion in micro-chamber [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2007, 13(3): 269-274.
- [19] 王志, 徐帆, 阳冬波, 等. 火花点火激发均质压燃(SICI)组合燃烧的试验研究[J]. 内燃机学报, 2009, 27(1): 11-17.
WANG Z, XU F, YANG D B, et al. Experimental research of spark induced compression ignition (SICI) combustion [J]. Transactions of CSICE, 2009, 27(1): 11-17.
- [20] HAN J, YAMASHITA H, HAYASHI N. Numerical study on the spark ignition characteristics of a methane-air mixture using detailed chemical kinetics: effect of equivalence ratio, electrode gap distance, and electrode radius on MIE, quenching distance, and ignition delay[J]. Combustion and Flame, 2010, 157(7): 1414-1421.
- [21] 徐飞, 王谦, 鹿盈盈. 微型 HCCI 自由活塞发动机着火模型的研究[J]. 农机化研究, 2007(2): 210-212.
XU F, WANG Q, LU Y Y. Study on the ignition model of the micro HCCI free piston engine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(2): 210-212.
- [22] 周雄, 孔文俊. 燃烧特征参数对微型摆式发动机性能及腔内热力过程的影响研究[C]//西安: 中国工程热物理学会年会, 2014, 144451.
- [23] 钟孝蛟, 刘豪, 赵然, 等. O_2/CO_2 气氛下火焰传播速度影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(23): 54-60.
ZHONG X J, LIU H, ZHAO R, et al. Analysis of influence factors on flame speed under O_2/CO_2 atmosphere [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(23): 54-60.
- [24] 蒋德明. 高等车用发动机内燃机原理[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006: 51-73.