

Development of Rapid Compression Machine and Analysis of Ignition Delay Characteristics of Small Hydrocarbon Fuel

You Li, Piao Pan, Bin Zhou, Dong Zheng

School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan
Email: 873324773@qq.com

Received: May 29th, 2020; accepted: Jun. 11th, 2020; published: Jun. 18th, 2020

Abstract

A rapid compression machine that can be used to measure the ignition delay time was designed and built. The main components and main functions of each subsystem of fast compressor are introduced in detail. The airtightness and compression performance of fast compressors were tested. At the end of compression, the fast compressor constructed in this paper basically meets the air tightness of the combustion chamber; the compression performance basically meets the premise and requirements for accurately measuring the ignition delay time. Finally, this fast compressor was used to measure the ignition characteristics of four different small hydrocarbon fuels under the same operating conditions. The results show that: When the pressure is 28.5 ± 0.5 bar and the temperature is 828 K, the ignition delay times of the four kinds of small hydrocarbon fuels are: no ignition (methane), 150 ms (ethane), 29 ms (ethylene), 16 ms (propylene). Therefore, the difficulty of ignition of the four fuels is that methane is the most difficult to catch fire, followed by ethane, ethylene is more likely to catch fire, and propylene is the most likely to catch fire.

Keywords

Rapid Compression Machine, Performance Testing, Ignition Characteristics

快速压缩机的开发及小碳氢燃料着火延迟特性的分析

李游, 潘飘, 周斌, 郑东

西南交通大学机械工程学院, 四川 成都
Email: 873324773@qq.com

收稿日期: 2020年5月29日; 录用日期: 2020年6月11日; 发布日期: 2020年6月18日

摘要

设计并搭建了能够用于测量着火延迟时间的快速压缩机实验系统。详细的介绍了快速压缩机各个子系统主要构成和主要功能。对快速压缩机的气密性和压缩性能进行了测试,本文搭建的快速压缩机在压缩终点时,燃烧室的气密性基本合格;压缩性能满足准确测量着火延迟时间的前提和要求。最后,利用所搭建的快速压缩机测量了四种不同小碳氢燃料在相同工况下的着火特性,实验结果表明:在压力为 28.5 ± 0.5 bar、温度为828 K时,4种小碳氢燃料的着火延迟时间依次为:不着火(甲烷)、150 ms(乙烷)、29 ms(乙烯)、16 ms(丙烯)。可以得出四种燃料的着火难度为甲烷最难着火、乙烷次之、乙烯较为容易着火、丙烯最容易着火。

关键词

快速压缩机, 性能测试, 着火特性

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

着火延迟时间是表示燃料着火特性的主要参数,对改善燃料的燃烧效率、提高燃料热效率和减少污染物排放有重要影响。同时,着火延迟时间还是燃料燃烧机理的研究和化学动力学模型构建重要的参考依据,是判定和验证实际燃料表征燃料合适与否的基础[1]。目前,测量着火延迟时间的实验手段主要是快速压缩机和激波管,这两种实验装置都可以对燃料的着火延迟期进行直接的测量。但激波管内达到的压力及温度条件较高(相较于快速压缩机来讲),且由于边界层效应及反射波的影响,通常在激波管内观测到的着火延迟期被限制在较小的范围内(通常小于5 ms)。而快速压缩机是一种理想的模拟内燃机单次压缩过程的实验装置,能应用在较宽范围内的燃料与氧气的组分浓度,从极稀到过浓的当量比范围;覆盖稀氧与富氧环境,以及可以达到较长的实验测量时间(约100~200 ms),使得与其它类似实验台架相比,快速压缩机具有一定的优势[2]。

目前,国内对快速压缩机的开发研究并不多,且用于测量着火延迟时间的快速压缩机较少,少量研究详述如下:上海交通大学吕兴才等[3][4]开发快速压缩机结构,采用冲击气缸内的高压空气作为动力源,机械臂与挡块的组合作为启动与制动装置。燃烧室缸径50 mm,燃烧活塞同样采用裂缝式活塞,冲击气缸缸径120 mm,驱动气压0.3~0.8 MPa,通过调节活塞与冲击气缸之间的连杆长度,压缩比可在6.5~25之间调节。此外,清华大学也开发一台快速压缩机由何鑫和狄海生等人[5][6],整套装置分为气体压缩系统、数据采集和控制系统、气体混合系统、加热系统和中间采样系统。该快速压缩机的压缩室活塞行程为500 mm,较长的行程使得在同样的压缩比下,活塞压缩终止后燃烧室的轴向长度较长(>1.5 mm),从而燃烧室的比表面积较小,高温混合气与缸壁的热交换较慢从而温度和压力降低速度减缓,降低了因散热引起的实验误差。在近些年,北京工业大学刘昊等人[2]搭建了一台快速压缩机,采用特殊液压缓冲结构,有效的改进了实验中出现的活塞回退问题。

综上所述,国内用于测量着火延迟时间的快速压缩机数量较少,且基于快速压缩机的小碳氢燃料着火特性的研究比较匮乏。基于此,本文搭建了快速压缩机实验台架,并研究了小碳氢燃料低温下的着火特性。

2. 快速压缩机实验系统

2.1. 着火延迟时间测量原理

本文搭建的快速压缩机是通过燃烧室压力的变化来反映着火延迟时间的, 其对着火延迟时间的测量是直接的, 原理如图 1 所示。快速压缩机首先通过活塞的快速运动, 使缸内气体迅速地由初始状态(P_0, T_0)被压缩至一个高温高压(P_c, T_c)的状态, 由于这个过程所用时间很短(一般小于 25 ms), 所以理论上可以认为压缩过程近似于绝热过程[6] [7] [8] [9] [10]。此时活塞到达压缩止点(TDC)且保持静止, 缸内的气体经过一段时间的化学准备期后到达着火点, 并开始释放热量使得缸内压力再一次升高, 发生剧烈燃烧。最后根据不同的着火延迟时间定义, 一般选取从压缩止点状态(P_c, T_c)至气体某一阶跃状态(燃烧压力升高 20% 的时刻或压力升高率的峰值时刻)所经过的时间为着火延迟时间。

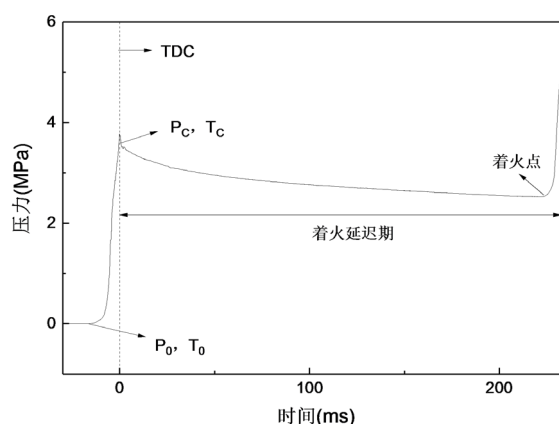


Figure 1. Ignition delay time measurement principle

图 1. 着火延迟时间测量原理

2.2. 实验系统结构及功能

本文所搭建的快速压缩机为压缩气体驱动、液压制动型。其子系统有燃烧系统、混合气配给系统、气压驱动及液压制动系统、加热保温系统、压力采集系统。图 2 和图 3 分别为快速压缩机实验系统的结构示意图和主体结构实物图。搭建的快速压缩机实验系统不仅适用于测量气体燃料的着火延迟时间, 同样适用于测量各种液体燃料的着火延迟时间。搭建完成的快速压缩机实验台架主要参数见表 1, 下面详细介绍分系统的主要构成和主要功能。

压缩段与燃烧室: 主要包括快速压缩机的燃烧室、压缩缸、活塞等部件。燃烧室是核心部件, 且测量装置(温度传感器、压力传感器)都是安装在它的上面。燃烧室内的通孔需在不影响实验的前提下实现尺寸最小化, 同时安装的测量装置应与燃烧室内壁齐平, 以减少这部分容积所占缸内压缩行程结束后余隙容积的比例。为了减小活塞在压缩过程中涡流对着火延迟测量的影响, 本文采用特殊的活塞结构, 使活塞与缸壁相对运动产生的涡流被挤入活塞侧面的凹槽中, 以减小压缩冲程结束后, 活塞与壁面之间卷起的涡流对燃烧室绝热核心区域的影响[11] [12]。

驱动及制动系统: 驱动系统主要包括高压空气气瓶、储气罐、驱动气缸、高压气运输管路等部件, 是整个快速压缩机的动力源。制动系统主要包括液压缸、油塞、行程垫片、电磁阀、油泵等部件。液压制动系统的功能主要有三点, 一是开始压缩前, 制止后端已充入高压驱动气体的气盘带动连杆整体向前移动; 二是开始压缩时, 使活塞能够快速响应, 并在活塞的快速移动中基本不产生阻力; 三是活塞压缩接近上止点处时, 通过液压缓冲使活塞减速并制止。

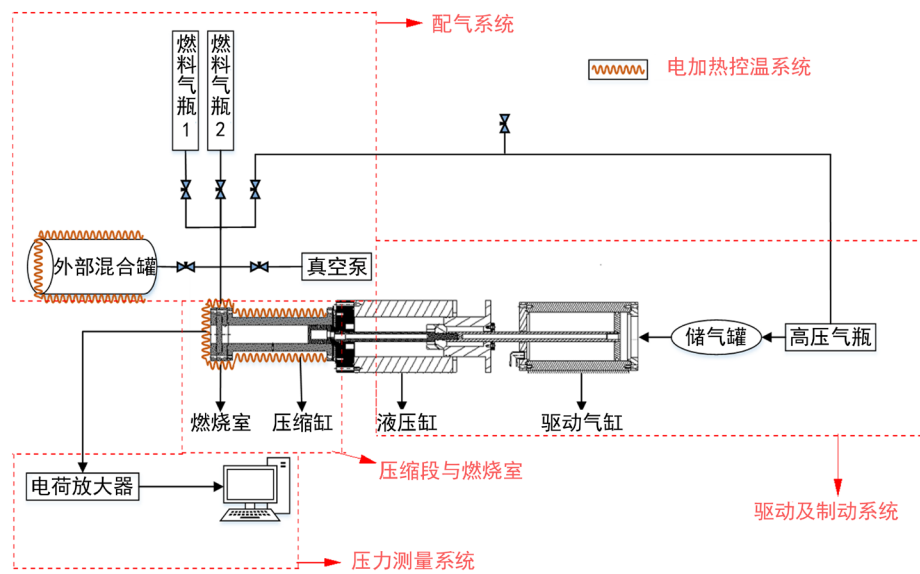


Figure 2. Rapid compression machine experiment system structure
图 2. 快速压缩机实验系统结构



Figure 3. Physical picture of the main structure of the rapid compression machine
图 3. 快速压缩机主体结构实物图

Table 1. Main parameters of rapid compression machine
表 1. 快速压缩机实验台架主要参数

| 名称 | 参数 |
|-------------------|-----------------------|
| 活塞行程(S) | 135 mm~222 mm |
| 燃烧室总容积(V) | 34.36 cm ³ |
| 压缩比(ϵ) | 10.5~16.8 |
| 平均压缩速度(v) | 11.1 m/s |
| 驱动气压(P_d) | 0.5 MPa~1.5 MPa |

配气系统：其主要作用是在燃烧室外部配置好混合气以及给燃烧室供气。系统主要包括各种气体气瓶、减压阀、压力表、针阀、球阀、真空泵、压力变送器、混合罐等，并使用三通、弯管、金属硬管等连接而成，由于实验气体为可燃或有毒气体，管路应做到绝对密封。系统根据道尔顿分压力定理，即理

想气体混合物中压力等于各组元分压力之和,因此可以根据气体混合后压力变化来配置混合气。每个输气管路都连接有针阀,各个输气管共用一个压力变送器(精度 10 pa),混合罐单独配制一个压力变送器,配置混合气之前要先对混合罐进行抽真空,通过连接真空泵的阀门调节罐内压力至设定压力。其次通过压力变送器压力值控制通入各种气体的量,完成混合气的配置。最后为保证气体混合均匀,通入气体后等待半小时才可以使用。

电加热控温系统:在燃料着火延迟期的测量实验中,初始温度是影响着火延迟期数值的重要参数。因此需要采用较为精细的电加热温度控制系统来保证实验过程中初始温度的恒定和燃烧室温度的均匀。该系统主要包含温度显示器、PID (proportion-integration-differentiation)控制器、继电器、加热器、热电偶等电子器件。热电偶测得温度信号分别送给 PID 控制器,然后 PID 控制器将温度显示在显示面板上,并通过继电器控制电加热器。

压力测量系统:快速压缩机的运行过程中燃烧室压力的曲线变化是判断设备是否正常运行以及测量着火延迟时间的关键。主要包括缸压传感器、电荷放大器、数据采集卡、电脑等。由于快速压缩机的燃烧过程与内燃机中的燃烧过程相似,燃烧室压力变化较快,且壁面温度相对较高,所以为了准确获得高动态的缸压曲线,本文采用 Kistler 旗下测量内燃机缸压曲线的瞬态压力传感器及其配套设备。

3. 实验系统性能评价

3.1. 燃烧室气密性

燃烧室的气密性对燃烧过程有着直接的影响,也决定着燃烧初始状态的判断。当活塞到达上止点后,由于热量的快速散失,以及部分的气体泄漏,使压力逐渐降低。若燃烧室气体泄漏量较大,可能导致燃料燃烧初始状态无法确定以及燃料不发生着火燃烧的现象,所以对搭建的快速压缩机进行气密性的检测评判非常重要,可以使燃烧特性的分析更加准确。

图 4 为活塞到达压缩终点后 30 ms 的压降图,红色曲线为本文在 $P_0 = 0.1 \text{ MPa}$, $T_0 = 300 \text{ K}$ 的初始状态测得的曲线,黑色曲线为文献[2]在 $P_0 = 0.06 \text{ MPa}$, $T_0 = 288 \text{ K}$ 的初始状态下,调整密封后测得的曲线,实验气体均为 N_2 。文献中 30 ms 的压降大约为 $\Delta P = 0.5 \text{ MPa}$,压力降低约为 23.8%,本文测得 30 ms 的压降大约为 $\Delta P = 0.58 \text{ MPa}$,压力降低约为 18.7%。两条曲线压缩终点温度相近,且两台快速压缩机燃烧室结构尺寸基本相同,本文压缩终点的压力相对较高,压力降低更为缓慢。所以可以认为本文搭建的快速压缩机在压缩终点时,燃烧室的气密性基本合格。

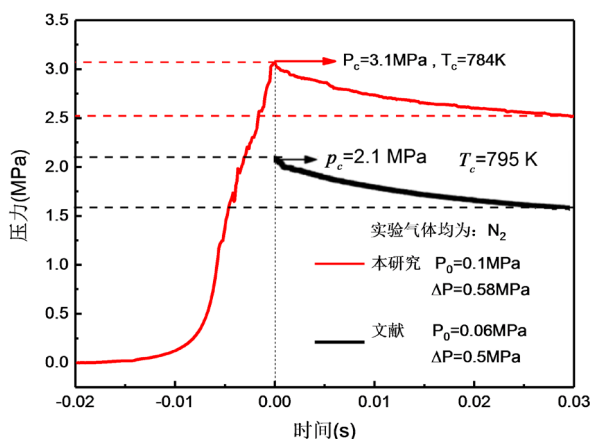


Figure 4. Combustion chamber pressure drop curve

图 4. 燃烧室压降曲线图

3.2. 压缩过程设计

压缩过程是快速压缩机中的重要过程，一般采用纯压缩曲线对压缩效果进行衡量。纯压缩曲线(空载曲线)是指快速压缩机在压缩过程中没有着火燃烧的压缩曲线，是对活塞运动特性分析时的一个标准曲线。

由于本文采用的是液压制动，所以减速齿与减速槽之间的配合尺寸是制动过程的关键，影响着快速压缩机的压缩效果。在早期实验中发现减速齿与减速槽配合的间隙尺寸如果过小，压缩曲线则会出现明显减速折点，导致减速过程过长，压缩时间增加，压缩峰值压力过小等情况，如图 5 所示。

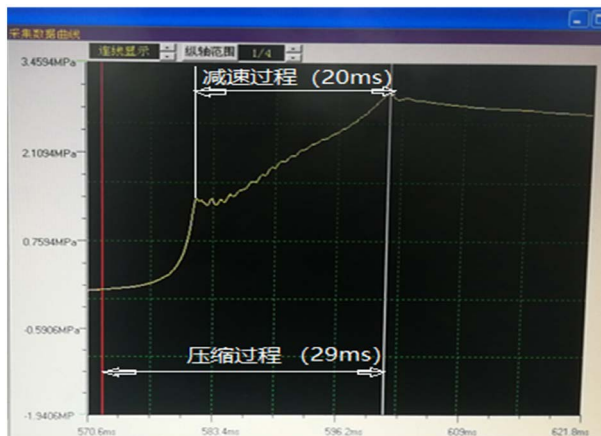


Figure 5. The deceleration effect is too obvious

图 5. 减速效果过于明显

若减速齿与减速槽配合的间隙尺寸如果过大，可能出现减速过程效果减弱，则油塞与减速盘机械碰撞加剧，导致活塞压缩到峰值时，压缩曲线出现回弹现象(甚至往复波动)，从而影响燃烧室内混合气热力学状态，最终影响燃料的着火延迟期，如图 6 所示。

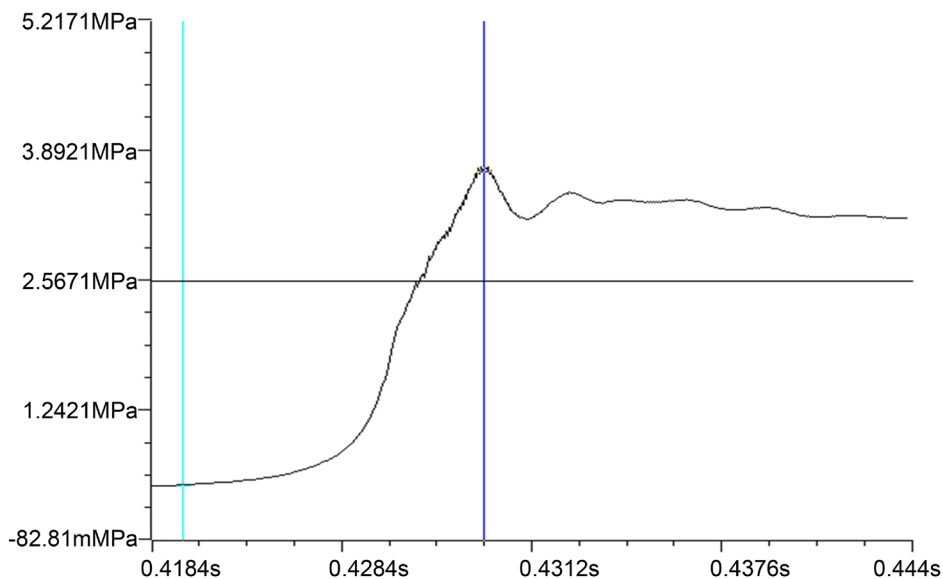


Figure 6. Slowing effect is too weak

图 6. 减速效果太弱

经过反复试验调整,确定了最佳配合尺寸。使用空气作为实验气体进行快速压缩机压缩性能实验时,燃烧缸内的压力变化情况如图7所示。其中空气的初始压力 $P_0 = 1 \text{ atm}$, 初始温度 $T_0 = 285 \text{ K}$ 。从图中可以看出,大致可将曲线划分为3个阶段:快速压缩阶段、液压缓冲阶段、热量散失降压阶段。当控制液压缸释放液压油后,活塞由下止点开始快速向前运动,经过一段时间后油塞开始进入减速槽,使得活塞开始减速。此后,由于液压缓冲效果的影响,使活塞速度急剧下降,最终活塞移动至上止点位置并制止。活塞到达上止点后,由于热量的快速散失,以及少部分的气体泄漏,使压力逐渐降低。整个压缩过程大约 20 ms ,其中半程压缩时间 $t_{\text{half}} = 4.7 \text{ ms}$ (半程压缩时间是衡量快速压缩机压缩效果的参数之一,本文取压缩压力上升至一半处的时刻)。

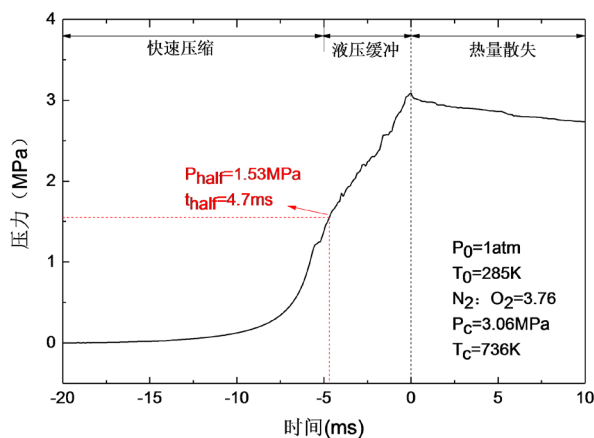


Figure 7. No-load experiment curve
图7. 空载实验曲线

在本次压缩过程中,其压缩速度较快(约 20 ms),缸内温度相对较低,传热损失会较小,可以将此次压缩过程看作是一个绝热过程,其意义是为了便于分析计算而进行的简化和抽象,又是实际过程的一种近似[13]。可以由压缩过程中的压力变化计算出压缩过程的容积变化[2]。

如图8所示为活塞压缩过程中,燃烧室容积随时间的变化曲线。从图中可以明显看出,在快速压缩阶段燃烧室容积迅速减小,但是经过 15 ms 后,容积变化曲线存在一个明显的折点,这是由于在这个时间点油塞的减速齿开始进入减速槽。此时活塞位置已基本接近上止点,所以液压缓冲阶段燃烧室容积变化很小,用时大约为 5 ms ,若液压缓冲段的持续时间较长,这对着火延迟期的测量有不利的影响。

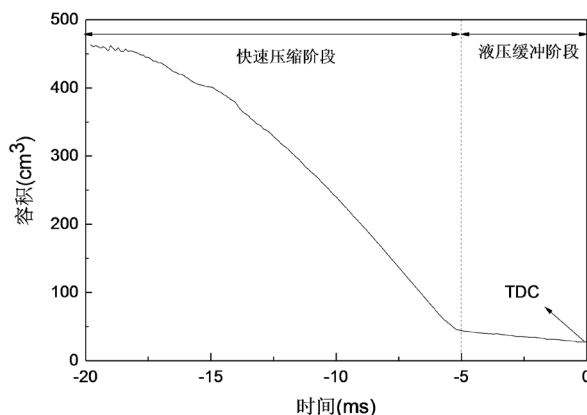


Figure 8. Combustion chamber volume change
图8. 燃烧室容积变化

由缸压曲线图(图 7)和容积变化图(图 8)不难看出:

1) 总压缩过程约 20 ms, 半程压缩时间约为 4.7 ms (最后 4.7 ms 内压力上升了约 50%)。压缩时间较短, 且压力上升迅速, 减小了压缩过程发生化学反应的可能性。

2) 液压缓冲阶段(约 5 ms)占压缩过程的 25%, 对着火延迟期的测量影响较小。

4. 小碳氢燃料着火延迟时间的测量分析

本文利用上述搭建的快速压缩机, 分别测量了甲烷(CH_4)、乙烷(C_2H_6)、乙烯(C_2H_4)、丙烯(C_3H_6)在相同工况下的着火延迟特性。图 9 为四种气体当量比 ϕ 均为 1 时与空气混合, 在压缩终点压力为 $28.5 \pm 0.5 \text{ bar}$ 、压缩终点温度为 828 K 的工况下测得的着火延迟时间。从图中可以看出, 甲烷在此工况下并不着火, 乙烷的着火延迟时间为 150 ms, 乙烯的着火延迟时间为 29 ms, 丙烯的着火延迟时间为 16 ms。不难看出, 烯烃的着火延迟时间在相同工况下比烷烃的要短得多, 所以烯烃要比烷烃更容易着火。而这四种气体着火的难易程度依次是: 甲烷最难着火、乙烷次之、乙烯较为容易着火、丙烯最容易着火。

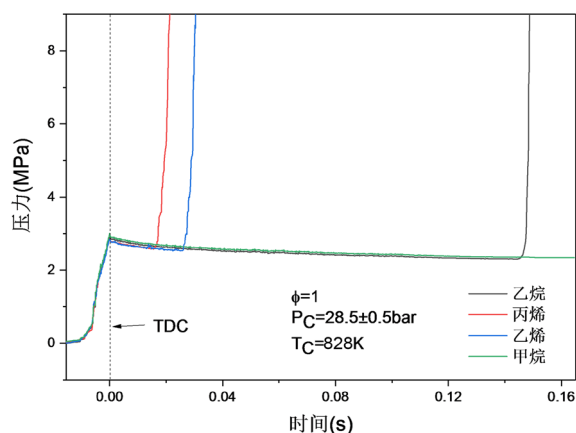


Figure 9. Fuel ignition delay curve

图 9. 燃料着火延迟曲线

5. 结论

本文搭建了一台气压驱动、液压制动型快速压缩机, 并对其气密性和压缩性能进行了测试, 在此基础上, 分别测量了甲烷(CH_4)、乙烷(C_2H_6)、乙烯(C_2H_4)、丙烯(C_3H_6)在相同工况下的着火特性。能够得到以下结论:

1) 本文搭建的快速压缩机在压缩终点时, 燃烧室的气密性基本合格; 压缩性能基本满足准确测量着火延迟时间的前提和要求。

2) 本文补充了小碳氢燃料在低温下的着火延迟时间数据。四种气体当量比 ϕ 均为 1 时与空气混合, 在压缩终点压力为 $28.5 \pm 0.5 \text{ bar}$ 、压缩终点温度为 828 K 的工况下。甲烷并不着火, 乙烷的着火延迟时间为 150 ms, 乙烯的着火延迟时间为 29 ms, 丙烯的着火延迟时间为 16 ms。

烯烃的着火延迟时间在相同工况下比烷烃的要短得多, 所以烯烃要比烷烃更容易着火。而这四种气体着火的难易程度依次是: 甲烷最难着火、乙烷次之、乙烯较为容易着火、丙烯最容易着火。

参考文献

- [1] 马洪安. 国产 RP-3 航空煤油着火与燃烧特性的实验与数值研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [2] 刘昊. 快速压缩机的开发与实验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2015

-
- [3] Huanyu, G., Zheng, Y., Zhen, H., *et al.* (2012) Experimental Study of n-Heptane Ignition Delay with Carbon Dioxide Addition in a Rapid Compression Machine Under Low-Temperature Conditions. *Chinese Science Bulletin*, **30**, 139-146.
- [4] Yang, Z., Qian, Y., Yang, X., *et al.* (2013) Autoignition of n-Butanol/n-Heptane Blend Fuels in a Rapid Compression Machine under Low-to-Medium Temperature Ranges. *Energy & Fuels*, **27**, 7800-7808.
<https://doi.org/10.1021/ef401774f>
- [5] 狄海生. 稀释气体对燃料着火燃烧过程影响特性的研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛大学, 2014.
- [6] He, X., Zigler, B.T., Walton, S.M., *et al.* (2006) A Rapid Compression Facility Study of OH Time Histories during Iso-Octane Ignition. *Combustion and Flame*, **145**, 552-570.
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2005.12.014>
- [7] 石智成, 刘昊, 张红光, 卢海涛. 基于快速压缩机的二甲醚燃烧特性研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(7): 1340-1346.
- [8] Donovan, M.T., He, X., Zigler, B.T., *et al.* (2004) Demonstration of a free-Piston Rapid Compression Facility for the Study of High Temperature Combustion Phenomena. *Combustion and Flame*, **137**, 351-365.
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2004.02.006>
- [9] He, X., Walton, S.M., Zigler, B.T., *et al.* (2007) Experimental Investigation of the Intermediates of Isooctane during Ignition. *International Journal of Chemical Kinetics*, **39**, 498-517. <https://doi.org/10.1002/kin.20254>
- [10] He, X., Donovan, M.T., Zigler, B.T., *et al.* (2005) An Experimental and Modeling Study of Iso-Octane Ignition Delay Times under Homogeneous Charge Compression Ignition Conditions. *Combustion and Flame*, **142**, 266-275.
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2005.02.014>
- [11] 刘昊, 张红光, 李嘉辰, 等. 快速压缩机的开发与性能试验研究[C]//中国内燃机学会燃烧节能净化分会 2014 年学术年会暨先进发动机节能及测试技术论坛论文集. 成都: 中国内燃机学会燃烧节能净化分会, 2014: 90-97.
- [12] Mittal, G. (2006) A Rapid Compression Machine—Design, Characterization, and Autoignition Investigations.
- [13] 张红光, 刘昊, 李嘉辰, 等. 快速压缩机试验台架设计与性能试验[J]. 农业机械学报, 2015(4): 289-295.