

快速压缩机试验台架设计与性能试验^{*}

张红光 刘昊 李嘉辰 赵光耀 姚宝峰 王焱

(北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124)

摘要:设计了一套快速压缩机试验台架,并进行了压缩性能试验。在分析液压缓冲、驱动压力等因素对快速压缩机试验台架性能的影响,并进行压缩性能优化后,快速压缩机压缩平均速度大于8 m/s,燃烧缸内压缩温度的可控范围为650~1 120 K。使用DME-O₂-N₂混合气进行了快速压缩机的燃烧性能试验,观察到了混合气两阶段放热现象与两阶段着火延迟期。在不同的压缩比、压缩温度与压缩压力条件下,对DME-O₂-N₂混合气两阶段着火延迟期、总着火延迟期的变化规律进行了研究。试验结果表明:在相同初始压力下,随着燃烧缸内压缩温度与压缩压力的增加,DME-O₂-N₂混合气的第一阶段着火延迟期与总着火延迟期均缩短;在相同压缩温度下,燃烧缸内压缩压力的增加导致混合气第二阶段着火延迟期与总着火延迟期均缩短,混合气第一阶段着火延迟期略有缩短。

关键词:快速压缩机 试验台架 性能试验 着火延迟期

中图分类号:TK401 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1298(2015)04-0289-07

Development and Performance of Rapid Compression Machine Test Bench

Zhang Hongguang Liu Hao Li Jiachen Zhao Guangyao Yao Baofeng Wang Yan

(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A rapid compression machine test bench was developed for studying the combustion characteristic of alternative fuel, and the compression performance tests were carried out. After analyzing the influences of the factors such as hydraulic buffer, driven pressure on properties of the rapid compression machine and improving the compression performance, compression speed of the rapid compression machine was higher than 8 m/s and the compressed temperature can be controlled in the range of 650 ~ 1 120 K. Combustion performance tests were carried out by using DME-O₂-N₂ mixtures. The two-stage combustion and two-stage ignition delay time of the mixtures were observed. The two-stage and overall ignition delay times of DME-O₂-N₂ mixtures were studied under varied compression ratios, compressed temperatures and compressed pressures. Results showed that with the compressed temperature and compressed pressure increased, the first and overall ignition delay times of mixtures were shorten under the same initial pressure. Under a certain compressed temperature, with increasing compressed pressure, the second and overall ignition delay times of mixtures were shorten while the first stage ignition delay time was shorten slightly.

Key words: Rapid compression machine Test bench Performance test Ignition delay time

引言

日益突出的能源危机与环境问题使得人们更加重视内燃机的燃烧与污染排放问题,如何改进内

燃机燃烧效率及降低内燃机燃烧排放污染物等问题已成为当今众多学者关注的焦点^[1-2]。为了更好地了解各种燃料的着火与燃烧特性,学者们设计了定容燃烧弹、激波管、单缸试验机、快速压缩机等多种燃

收稿日期:2014-06-19 修回日期:2014-08-06

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51376011)、北京市教育委员会科技计划重点资助项目(KZ201410005003)、北京工业大学第十二届研究生科技基金资助项目(ykj-2013-9302)和北京工业大学先进技术基金资助项目(005000514312003)

作者简介:张红光,教授,博士生导师,主要从事内燃机燃烧试验与测试研究,E-mail:zhg5912@263.net

烧试验装置。

内燃机燃料的着火延迟期是影响内燃机燃烧过程控制的一个重要参数,常规燃料的着火延迟期已经有一些经验公式及试验数据,但对大多数内燃机代用燃料而言,该领域还是一个空白^[3]。快速压缩机模拟了内燃机中活塞的单次压缩过程,由于可以方便精准地控制燃烧室的各项热力学参数,从而为燃料着火延迟期的测量提供了一个理想的试验手段。在世界范围内,快速压缩机已成为各国学者研究在低温到中温范围内各种燃料燃烧特性的工具。此外,在燃烧化学反应动力学研究方面,应用快速压缩机的试验数据可以帮助更好地了解各种燃料的详细化学反应机理,及对已有的详细化学反应机理进行验证和完善。

本文设计一套快速压缩机试验台架,并进行相应的压缩与燃烧性能试验研究。

1 快速压缩机试验台架设计

1.1 快速压缩机的结构

设计的快速压缩机试验台架整体结构如图 1 所示。

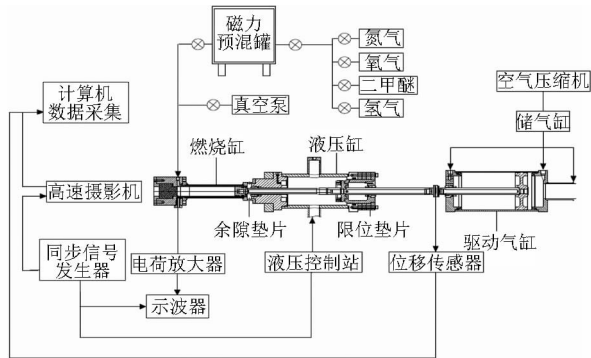


图 1 快速压缩机试验台架系统图

Fig. 1 System diagram of rapid compression machine test bench

快速压缩机是快速压缩机试验台架主体部分,主要由驱动气缸、液压缸、燃烧缸 3 部分组成。整体呈直线结构,由连杆将驱动活塞、液压活塞与燃烧活塞三者机械连接为一体。活塞及连杆整体在驱动气压的作用下由下止点快速运动到上止点后锁止,形成定容燃烧室,压缩过程开始前充入燃烧缸内的混合气在极短的时间内被压缩后燃烧。驱动气缸、液压缸与燃烧缸缸径分别为 200、150 和 50 mm,最大行程分别为 300、250 和 250 mm。驱动气缸的缸径为燃烧缸缸径的 4 倍,所以驱动活塞面积约为燃烧活塞的 16 倍,即驱动气压的 16 倍($0.7 \times 16 = 11.2 \text{ MPa}$)应该是燃烧缸内压缩与燃烧压力可达到的最大值,压缩压力与燃烧压力在小于此值的情况下,活塞与

连杆整体均不会因为压缩或燃烧压力过大而发生回退。

快速压缩机活塞与连杆整体的行程可以通过安装在液压缸后端的限位垫片(每片厚度 20 mm,共 3 片)进行调节,通过改变限位垫片与液压缸后端盖的位置来调整快速压缩机活塞与连杆整体的下止点位置,压缩总行程可在 190 ~ 250 mm 范围内调节。活塞与连杆整体运行到上止点后形成的定容燃烧室长度可通过安装在液压缸前端与燃烧缸后端之间的余隙垫片(每片厚度 1 mm,共 5 片)进行调节。通过改变余隙垫片数量,燃烧室长度可在 12 ~ 17 mm 范围内调节。通过以上两部分结构,快速压缩机的压缩比可调范围为 9.46 ~ 16.9。

驱动气缸、液压缸与燃烧缸三者的主体使用不锈钢材料。驱动活塞材料为镁合金,燃烧活塞材料为阳极氧化铝,液压活塞与活塞连杆材料为 42 铬钼(42CrMo),连杆为中空圆柱体,以减轻整体质量。快速压缩机活塞与连杆整体质量不超过 10 kg,快速压缩机活塞平均运动速度超过 8 m/s。

1.2 快速压缩机试验台架的结构及工作原理

如图 1 所示,快速压缩机试验台架主要包括气压驱动系统、液压控制系统、燃烧缸、配气系统和采集系统。

气压驱动系统主要包括空气压缩机、储气缸、驱动气缸等部件,储气缸与驱动气缸之间使用孔径为 DN80 的通道直接连通,使用蝶阀控制开闭。液压控制站、液压缸等部件组成液压控制系统,控制快速压缩机的起动、缓冲及制动等一系列动作。相对于采用弹簧装置、气垫承压、金属塑性变形等对活塞进行定位、减速及缓冲制止的方式,本文采用液压系统作为快速压缩机试验台架的运动控制系统可以减少大量的机械操纵并带来更好的性能效果^[4]。燃烧缸主要包括燃烧缸体、缸盖、石英玻璃、燃烧活塞等部件。配气系统主要包括试验气体、磁力预混罐、真空泵等部件。采集系统主要包括 kistler 6125C 型缸压传感器、温度传感器、kistler 5011 型电荷放大器、示波器、位移传感器、高速摄影机、计算机及 DG535 同步信号发生器等部件。

使用空气压缩机给储气缸充入一定压力的空气作为动力源。在磁力预混罐内配置所需混合比及当量比的可燃混合气并充分搅拌。磁力预混罐可对混合气进行适当的预加热,充入燃烧缸内的混合气可通过燃烧缸的加热系统进行初始温度的精准控制。上述过程中采用压力传感器、调节阀、温度传感器等设备精准调控各个环节的气体压力与温度。

试验开始前,位于下止点的液压活塞的后端面

与缸体后端盖形成一定的密封空腔,通过液压控制站将液压活塞前端的液压缸内充入压力为 6 MPa 液压油,液压活塞直径为 110 mm,驱动活塞面积是液压活塞面积的 3.3 倍,但液压压力至少为气压驱动压力的 8.5 倍,所以,以此液压制动力足以制止驱动气缸内的气压驱动力,从而防止活塞与连杆整体向前移动。

试验开始时,打开驱动气缸与储气缸之间的蝶阀,使用 DG535 同步信号发生器控制液压控制站释放液压油、示波器触发采集以及高速摄影机开始拍摄等一系列动作顺序进行。通过液压控制站迅速释放液压缸内的液压油,由于液压活塞与液压缸壁面之间不接触且留有一定的间隙,液压活塞前端液压油会在活塞与连杆整体向前移动时,通过活塞与壁面之间的间隙涌向液压活塞后端,从而确保在活塞快速压缩过程中,液压系统对活塞与连杆运动的影响降低至最低程度。当活塞运行至接近上止点时,通过液压缓冲使活塞与连杆整体减速并停止,并精准控制燃烧室的容积。目前,世界上很多快速压缩机仍旧采用该模式的液压系统作为快速压缩机试验台架的运行控制系统^[5-8]。

为了在试验台架搭建过程中灵活地调整液压缓冲力以获得较好的整体液压缓冲效果,本文设计了一种特殊结构的液压活塞,如图 2 所示。

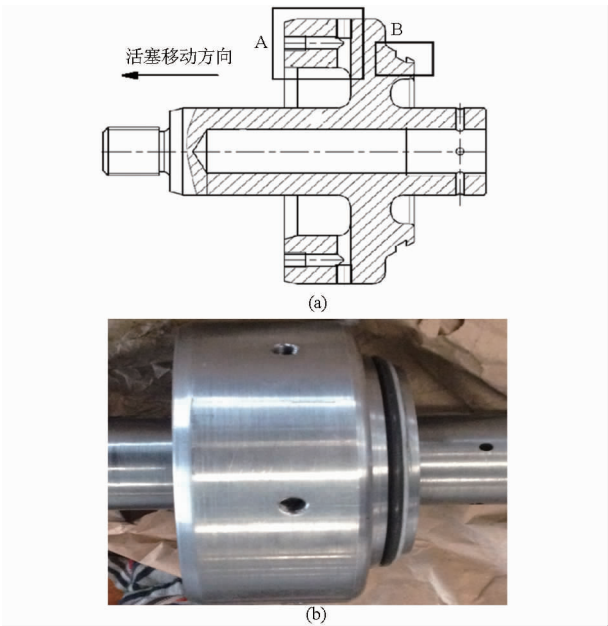


图 2 T 字型调节缓冲液压活塞

Fig. 2 T shape structure of hydraulic piston

(a) 结构图 (b) 实物图

该活塞顶部带有 6 组 T 字型结构的液压缓冲调节通道(图 2a 中 A 区域),通过调整 T 字型通道的开闭程度来调节整体液压缓冲效果。当液压活塞处于下止点时,通过斜面(图 2a 中 B 区域)与液压缸

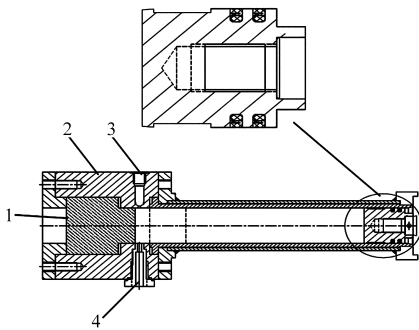


图 3 燃烧系统与活塞结构

Fig. 3 Combustion system with piston structure

1. 石英玻璃 2. 燃烧缸盖 3. 进、排气口 4. 压力传感器

后端盖组成密封空间,可以使活塞与连杆整体运动时获得良好的起动效果。

试验过程中,燃烧缸内混合气的燃烧压力由 kistler 6125C 型缸压传感器与 kistler 5011 型电荷放大器进行采集,并用示波器记录波形数据。使用高速摄影机可对燃烧缸内的燃烧情况进行拍摄。

快速压缩机的燃烧活塞采用了文献[4]中的“creviced piston”(上海交通大学等研究机构的学者将其译为“挤气活塞”^[9])结构,如图 3 所示。常规平顶活塞在快速运动中,与壁面之间会激起一股涡流,而本文的活塞结构可以有效地减轻涡流对压缩终止时燃烧室内“绝热核心区域”的影响。

此外,本文对燃烧室内进气、排气、测压等通孔都进行了周密的考虑,以尽量减少这部分体积在活塞压缩终止时所占整体余隙容积的比例。

所搭建的快速压缩机试验台架实物如图 4 所示。



图 4 快速压缩机试验台架实物图

Fig. 4 Picture of rapid compression machine test bench

2 快速压缩机的压缩性能试验

使用 N₂作为试验气体进行快速压缩机压缩性能试验时,燃烧缸内的压力变化情况如图 5 所示。其中 N₂的初始压力 $p_0 = 0.13$ MPa,初始温度 $T_0 = 293$ K(以下试验的初始温度均为 293 K),使用的驱动压力 $p_d = 0.6$ MPa,压缩比为 13.6。以压力最高点为时间零点,可将曲线划分为 3 个阶段:快速压缩

段、液压缓冲段、热散失压降段。当液压控制系统释放液压油后,活塞由下止点开始向前移动,约 30 ms 后进入液压缓冲段。此后,由于液压缓冲效果的影响,使活塞速度急剧下降;液压缓冲段期间,燃烧缸内压力上升速度减缓明显,最终活塞移动至上止点位置并制止。

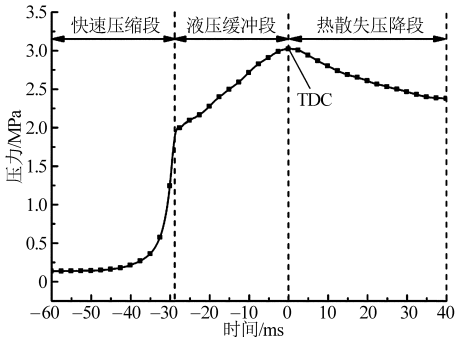


图 5 N₂ 压缩压力曲线 (未调整缓冲)

Fig. 5 Compression pressure curve of N₂ (unmodified buffer)

由于活塞从下止点行进至上止点时速度较快 (约 60 ms),期间通过燃烧缸壁面的散热较少,所以快速压缩机的压缩过程可以视为绝热压缩过程,可以由压缩过程中的压力曲线计算出压缩过程的容积曲线,计算公式为

$$\frac{p_c}{p_0} = \varepsilon^n \tag{1}$$

$$V(t) = V_0 \left(\frac{p_0}{p(t)} \right)^{1/n} \tag{2}$$

式中 V_0 ——混合气初始体积
 p_c ——压缩后混合气压缩压力
 ε ——压缩比 $p(t)$ ——混合气压缩压力
根据式(1)计算得出参数 n 后代入式(2),可计算出随时间变化的压缩体积 $V(t)$ 。

图 6 所示为根据计算结果得出的压缩容积随时间的变化情况。进入液压缓冲段时,活塞位置已较为接近上止点,缓冲过程的容积变化很小。但由于较强的液压缓冲效果,致使液压缓冲段的持续时间较长 (约 30 ms),约为活塞整体运动时间的一半,这对着火延迟期的测量有不利的影响。

在此液压缓冲效果下,不同驱动压力 (0.3 ~ 0.7 MPa) 对压缩效果的影响如图 7 所示,随着驱动压力的下降,压缩压力明显下降,液压缓冲效果对整体压缩效果的影响更加明显,液压缓冲段的持续时间更长。由此可见,需要对液压缓冲进行调整,以减少液压缓冲对整体压缩效果的影响。

在快速压缩机试验台架搭建初期,出于安全考虑而使用了较强的液压缓冲,即图 2a 中所有 T 字型通道均关闭;调整部分 T 字型通道的开启后,试验对比如图 8 所示。初始气体压力均为 $p_0 = 0.13$ MPa,调

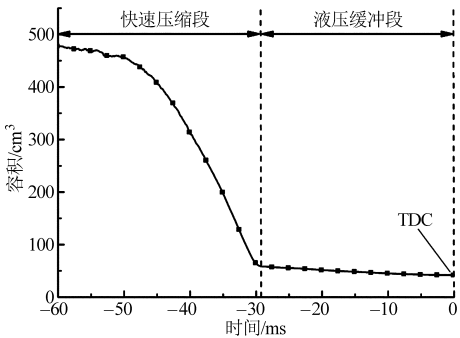


图 6 N₂ 压缩容积曲线 (未调整缓冲, $p_0 = 0.13$ MPa, $T_0 = 293$ K)

Fig. 6 Compressing volume curve of N₂ (unmodified buffer)

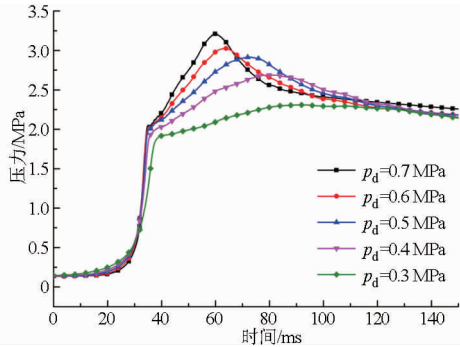


图 7 驱动压力的影响 (未调整缓冲)

Fig. 7 Influence of driving pressure (unmodified buffer)

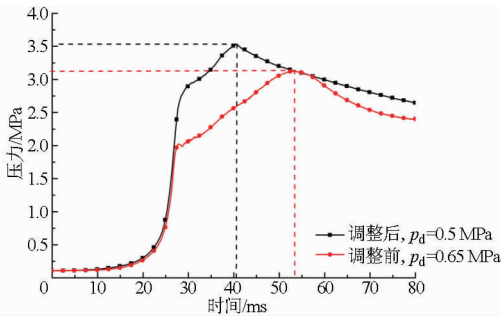


图 8 调整液压缓冲效果

Fig. 8 Effect of modifying the hydraulic buffer

整前使用的驱动气压为 $p_d = 0.65$ MPa,调整后使用的驱动气压为 $p_d = 0.5$ MPa。调整液压缓冲效果后,液压缓冲段的持续时间明显缩短 (约 15 ms),燃烧缸内最高压缩压力也随之上升。

尽管调整液压缓冲对缩短缓冲段持续时间有明显效果,但若完全消除液压缓冲效果也会带来不利影响。如图 9 所示,将液压缸内的液压油全部排空以消除液压缓冲效果后,使用驱动压力 $p_d = 0.2$ MPa 驱动活塞以相对低速前进,虽然液压缓冲段造成的不利影响完全消失,但由于液压活塞到达上止点时直接撞击前端盖,产生了较大的机械振动,甚至出现了稍许活塞回退现象 (图中 a 区域),这样会对着火延迟期的测量产生不利影响。综上所述,需要逐步精准调节液压缓冲力度以期达到最佳试验效果。

图 10 所示为液压缓冲效果最终调整完毕后,设

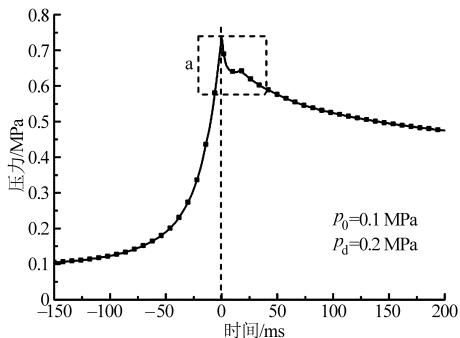


图 9 无液压缓冲试验
Fig. 9 Test without hydraulic buffer

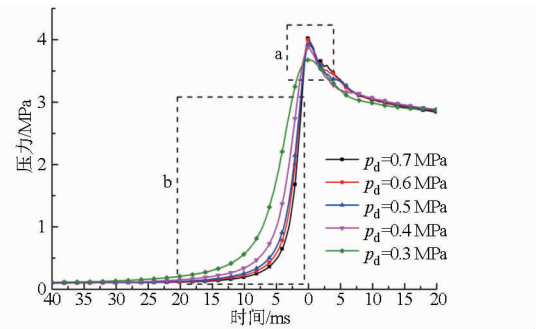


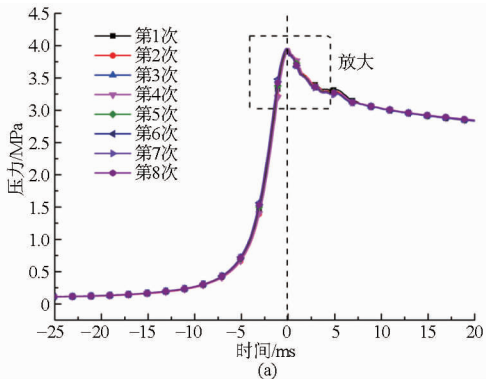
图 10 驱动压力的影响 (调整缓冲后, $p_0 = 0.1$ MPa)
Fig. 10 Influence of driving pressure
(after improving buffer, $p_0 = 0.1$ MPa)

置压缩比为 16.9 时,驱动压力 (0.3 ~ 0.7 MPa) 对压缩效果影响的试验结果。可以明显看出 (图中 a 区域), 液压缓冲对整体压缩效果已无明显影响, 且在较高的驱动压力下, 驱动压力对压缩最终压力的影响不明显。随着驱动压力的上升, 缸内压力快速上升的时间缩短 (图中 b 区域)。由图可见, 整体压缩时间小于 30 ms, 平均压缩速度大于 8 m/s。

在应用快速压缩机进行燃烧试验时, 当活塞压缩完成后, 燃烧室内压缩温度 T_c 满足^[4]

$$\int_{T_0}^{T_c} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{dT}{T} = \ln \frac{p_c}{p_0} \quad (3)$$

式中 T_c ——压缩后混合气压缩温度
 γ ——混合气比热比



试验时, 通过测量 T_0 、 p_0 以及 p_c , 可以计算出压缩温度 T_c 。

在 N_2 初始温度 $T_0 = 293$ K、初始压力 $p_0 = 0.1$ MPa 时, 使用最高压缩比为 16.9 时, 由式 (1) 可计算得出压缩温度 T_c 可达 840 K。若压缩比为 9.46, 则压缩温度 T_c 为 651 K。若将初始温度 T_0 提高至 393 K, 压缩比为 16.9 时, 压缩温度可达 1 120 K。

当驱动压力 $p_d = 0.5$ MPa、初始压力 $p_0 = 0.1$ MPa 时, 进行了 8 次重复压缩试验, 试验结果如图 11a 所示。8 次压缩过程整体趋势基本完全吻合。将图 11a 中压缩压力最高点附近区域放大, 如图 11b 所示, 在 8 次压缩试验结果中, 只有一次试验 (第 4 次) 的最高压力出现时刻与其他压缩试验结果稍有差异, 8 次试验的压力曲线及压力峰值基本一致。由此可见, 本文开发的快速压缩机的压缩性能试验结果一致性较好, 可满足之后的燃烧性能试验需要。

3 快速压缩机的燃烧性能试验

影响特定当量比下混合气着火延迟期的因素主要为混合气燃烧前的压缩温度与压缩压力, 利用快速压缩机可以方便地对不同压缩温度与压缩压力下混合气的着火延迟期进行直接测量。一般来讲, 控制压缩温度的方式有: 改变压缩比和改变混合气的初始温度。在压缩温度、混合气当量比、混合比等条件不变时, 可以通过调整混合气的初始压力实现对混合气压缩压力的调节。

采用二甲醚 (DME) 作为燃料, 配制 $DME-O_2-N_2$ 混合气, 进行了快速压缩机燃烧性能试验。在常温下, DME 的饱和蒸汽压力约为 0.5 MPa。本文购置的 DME 燃料罐罐装压力为 0.5 MPa, 在常温下已为气态。此外本文试验中 $DME-O_2-N_2$ 混合气在充入燃烧室之前, 按照先充 N_2 , 再充 O_2 , 最后充 DME 的顺序将 3 种气体按试验所需摩尔配比预先充入燃料

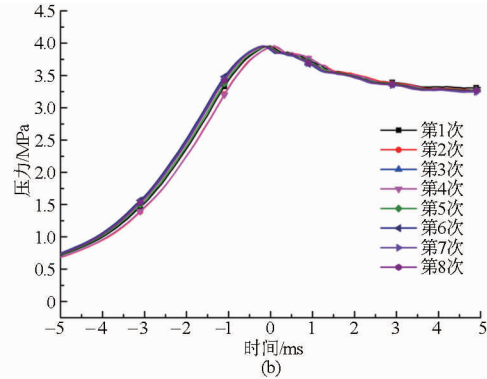


图 11 快速压缩机压缩性能的一致性

Fig. 11 Compression performance consistency of test bench

(a) 压缩曲线的一致性 (b) 峰值区域放大

预混罐中进行充分搅拌(20~30 min),充入预混罐内混合气压力一般为0.2 MPa,此时DME-O₂-N₂混合气稳定为气态。配置每种气体及每次燃烧试验前将燃烧缸与配气管路抽真空,真空度小于40 Pa,以尽量减小残余废气对试验精度的影响。

图12为使用混合气摩尔配比为DME:O₂:N₂=1:4:30(N₂作为稀释剂,当量比为0.75,本文中使用的DME-O₂-N₂混合气均采用该当量比),初始压力 $p_0=0.04$ MPa,压缩比选取11.6、14.27、16.9时的燃烧缸内压力曲线与燃烧压力变化率。压缩压力 p_c 分别为0.95、1.2和1.59 MPa,可分别计算出压

缩终止温度 T_c 为724、774和839 K。从图12a中的压力曲线可以看出,燃烧过程中出现了两阶段放热现象与两阶段着火延迟期,其中第1阶段放热为低温化学反应动力学反应,持续时间较短。第2阶段燃烧为多点同时进行,燃烧迅速且均匀。从活塞运动到上止点开始,到燃烧压力变化率第1个峰值为止,定义为第1阶段着火延迟期;从燃烧压力变化率第1个峰值开始,到快速燃烧始点为止,定义为第2阶段着火延迟期。在压缩比为11.6时,第1阶段着火延迟期较长,第2阶段着火延迟期较短,总着火延迟期约为8.8 ms。

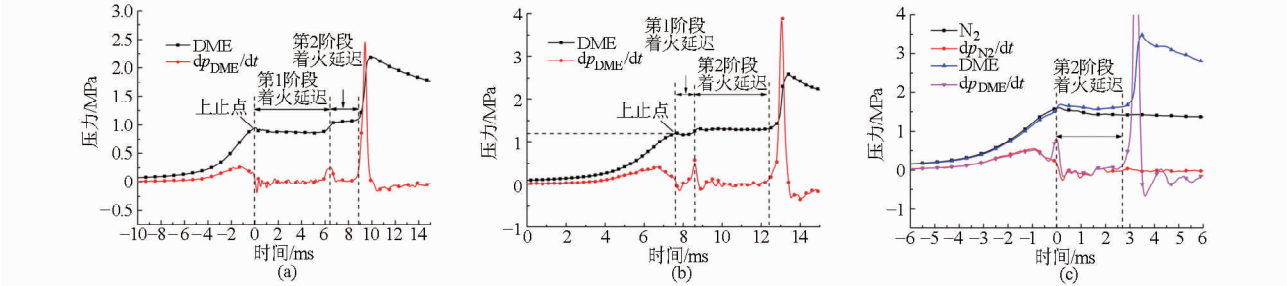


图 12 压缩比对两阶段着火延迟期的影响
Fig. 12 Influence of compression ratio on two-stage ignition delay time

(a) 压缩比 11.6, $p_c=0.95$ MPa, $T_c=724$ K (b) 压缩比 14.27, $p_c=1.2$ MPa, $T_c=774$ K
(c) 压缩比 16.9, $p_c=1.59$ MPa, $T_c=839$ K

将压缩比由11.6提高至14.27后,由图12b可见,第1阶段着火延迟期明显缩短,第2阶段着火延迟期有所延长,而总着火延迟期缩短为4.8 ms左右。
将压缩比进一步提高至16.9后,如图12c所示,使用相同初始压力的N₂压缩试验作为参照,可以看出,活塞运行至上止点后,第1阶段着火延迟期不明显,原因可能为混合气在活塞运行到上止点之前已经开始了低温化学反应。总着火延迟期进一步缩短到2.7 ms左右。

在不改变混合气的初始温度与压缩比时,计算得出的混合气的压缩温度基本不变,混合气的分子平均动能不发生改变。而混合气的初始压力变化时,单位体积内混合气的分子数量发生改变,从而使压缩后分子间的碰撞次数发生改变,这会对混合气的着火延迟期产生影响。

图13为压缩比14.27,初始压力 p_0 为0.03~0.08 MPa的DME-O₂-N₂混合气的燃烧性能试验结果。在压缩温度 T_c 为774 K情况下,随着初始压力的增加,压缩压力 p_c 逐渐上升。第1阶段与第2阶段着火延迟期均随压缩压力的上升而缩短,但第1阶段着火延迟期缩短幅度较小,而第2阶段着火延迟期缩短幅度较大。

图14为压缩比11.6,初始压力 p_0 为0.04~0.09 MPa的DME-O₂-N₂混合气燃烧性能试验结果。

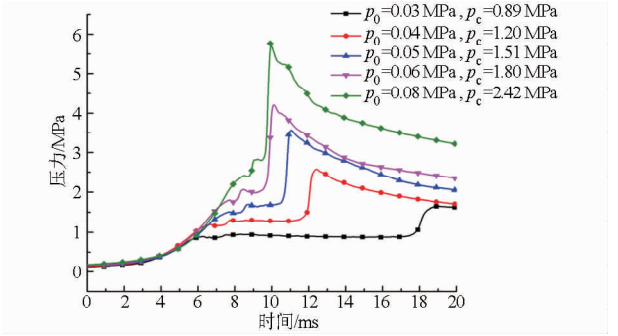


图 13 压缩压力对两阶段着火延迟期的影响(压缩比 14.27)
Fig. 13 Influence of compressed pressure on two-stage ignition delay time (compression ratio was 14.27)

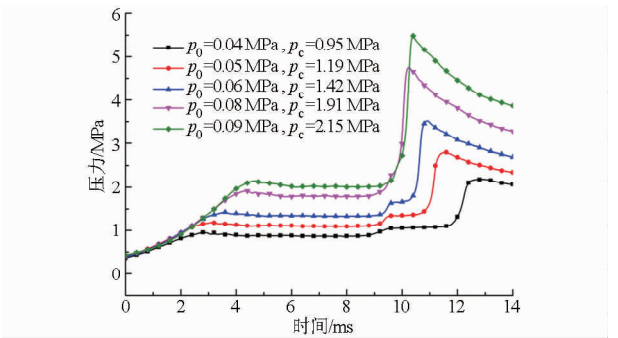


图 14 压缩压力对两阶段着火延迟期的影响(压缩比 11.6)
Fig. 14 Influence of compressed pressure on two-stage ignition delay time (compression ratio was 11.6)

在压缩温度 T_c 为 724 K 情况下,压缩压力 p_c 对 DME- O_2 - N_2 混合气第 1 阶段着火延迟期影响不明显,第 2 阶段着火延迟期随压缩压力 p_c 的上升而缩短,相对于压缩比为 14.27 时,混合气总着火延迟期缩短。

可见,在上述试验条件下,相对于混合气的第 1 阶段着火延迟期,第 2 阶段着火延迟期受压缩压力 p_c 的影响更为明显。

各国学者已经针对 DME 发动机^[10-12]、DME^[13-15]、DME- H_2 ^[16-18]、DME- CO_2 ^[19-20] 等多种不同混合比的混合气进行了相应的燃烧试验与理论研究。利用本文所开发的快速压缩机试验台架,可以针对上述及更多种混合气体,进行系统的着火延迟期测量。

4 结论

(1) 搭建的快速压缩机试验台架,整体压缩时

间小于 30 ms,平均压缩速度大于 8 m/s。

(2) 进行了详细的快速压缩机试验台架压缩性能试验研究,通过调整 T 字型缓冲通道的开度,获得了较好压缩试验效果。采用调整压缩比或加热初始气体的方式,压缩温度可控范围在 650 ~ 1 120 K 之间。快速压缩机的压缩性能试验结果一致性较好,可确保燃烧性能试验结果的可信度。

(3) 使用 DME- O_2 - N_2 混合气进行了快速压缩机试验台架的燃烧性能试验,观察到了 DME 混合气燃烧时的两阶段放热现象与两阶段着火延迟期。试验结果表明:在相同初始压力下,随着燃烧缸内压缩温度和压缩压力的增加,第 1 阶段着火延迟期与总着火延迟期均缩短;在相同压缩温度下,随着燃烧缸内压缩压力的增加,混合气第 2 阶段着火延迟期与总着火延迟期均缩短,混合气第 1 阶段着火延迟期略有缩短。

参 考 文 献

- 1 王松. 对我国汽车节能减排的思考[J]. 科技资讯, 2012(7):143.
- 2 周洲. “节能减排”背景下内燃机燃料的发展现状分析[J]. 内燃机与动力装置, 2012,130(4):50-53.
Zhou Zhou. Present situation analysis on combustion fuel under the background of “energy saving and emission reduction”[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2012,130(4):50-53. (in Chinese)
- 3 黄佐华,蒋德明,王锡斌. 内燃机燃烧研究及面临的挑战[J]. 内燃机学报, 2008,26(1):101-106.
Huang Zuohua, Jiang Deming, Wang Xibin. Combustion research in internal combustion engines and its challenges[J]. Transactions of CSICE, 2008,26(1):101-106. (in Chinese)
- 4 Gaurav Mittal. A rapid compression machine-design, characterization and autoignition investigations [D]. Cleveland:Case Western Reserve University,2006.
- 5 Apurba K Das. Ignition delay study of moist hydrogen/oxidizer mixtures using a rapid compression machine [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012,37(8):6901-6911.
- 6 Casey Allen. Advanced rapid compression machine test methods and surrogate fuel modeling for bio-derived jet diesel fuel autoignition [D]. East Lansing:Michigan State University, 2012.
- 7 Kitsopanis I, Cheng W K. Soot formation study in a rapid compression machine [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006,128:943-949.
- 8 Sante R Di. Measurements of the auto-ignition of n-heptane/toluene mixtures using a rapid compression machine [J]. Combustion and Flame, 2012,159(1):55-63.
- 9 耿壮壮. 均质充量压缩着火燃烧 HC 和 CO 生成机理的试验研究[D]. 上海:上海交通大学, 2012.
Geng Zhuangzhuang. Experiment study on HC and CO formation mechanism of homogeneous charge compression ignition combustion [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012. (in Chinese)
- 10 张强,李娜,张纪元,等. 供油系统对二甲醚发动机燃烧循环变动的影响[J]. 农业机械学报,2013,44(1):17-20.
Zhang Qiang, Li Na, Zhang Jiyuan, et al. Effect of fuel supply system on cyclical combustion variation of DME engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(1):17-20. (in Chinese)
- 11 黄瑾,魏衍举,汪文瑞,等. 发动机燃用柴油和二甲醚时颗粒排放对比研究[J]. 内燃机工程, 2014,35(4):13-17.
Huang Jin, Wei Yanju, Wang Wenrui, et al. Comparison of PM emissions of engine fueled with DME and diesel fuels [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014,35(4):13-17. (in Chinese)
- 12 盛新堂,黄瑾,王小荣,等. 自然吸气二甲醚发动机排气再循环 NO_x 满足国 IV、V 排放标准的研究[J]. 西安交通大学学报, 2013,47(7):18-22.
Sheng Xintang, Huang Jin, Wang Xiaorong, et al. Investigation of dimethyl ether engine NO_x reduction to China IV and V regulation by exhaust gas recirculation [J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2013,47(7):18-22. (in Chinese)
- 13 李德钢,黄震,乔信起,等. 压缩比对二甲醚燃料均质压缩燃烧的影响[J]. 农业机械学报,2005,36(10):5-8.
Li Degang, Huang Zhen, Qiao Xinqi, et al. Evaluation on effects of compression ratio on DME HCCI combustion experiments [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(10):5-8. (in Chinese)

(下转第 350 页)

- and local search[J]. International Journal of Production Economics, 2011,129(1):14–22.
- 11 Fonseca C M, Fleming P J. Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization[C]//Forrest S. Genetic Algorithms: Proceedings of the Fifth International Conference, 1993: 416–423.
- 12 Horn J, Nafpliotis N, Goldberg D E. A niched Pareto genetic algorithm for multi-objective optimization[C]//Proceedings of the 1st IEEE Congress on Evolutionary Computation,1994:82–87.
- 13 Srinivas N, Deb K. Multi-objective function optimization using non-dominated sorting genetic algorithm [J]. Evolutionary Computation,1995,2(3):221–248.
- 14 Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2002,6(2):182–197.
- 15 Knowles J, Corne D. The Pareto archived evolution strategy: a new baseline algorithm for multi-objective optimization[C]//Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation. Piscataway, 1999:98–105.
- 16 Zitzler E, Thiele L. Multi-objective evolutionary algorithm: a comparative case study and the strength Pareto approach[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,1999,3(4):257–271.
- 17 Corne D W. The Pareto envelope based selection algorithm for multi-objective optimization [J]. Lecture Notes in Computer Science,2000,1917:839–848.
- 18 曾三友,李晖,丁立新,等. 基于排序的非劣集合快速求解算法[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(9): 1565–1571.
Zeng Sanyou, Li Hui, Ding Lixin, et al. A fast algorithm for finding non-dominated set based on sorting[J]. Journal of Computer Research and Development, 2004, 41(9): 1565–1571. (in Chinese)
- 19 Jensen M T. Reducing the run-time complexity of multiobjective EAs: the NSGA-II and other algorithms[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2003,7(5):503–515.
- 20 肖海宁,楼佩煌,严伟国,等. 柔性作业车间中机床与自动导引车在线调度方法[J]. 农业机械学报,2013,44(4):280–286.
Xiao Haining, Lou Peihuang, Yan Weiguo, et al. On-line scheduling method for simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles in flexible job shop [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(4): 280–286. (in Chinese)
- 21 王云,冯毅雄,谭建荣,等. 基于多目标粒子群算法的柔性作业车间调度优化方法[J]. 农业机械学报,2011,42(2):190–196.
Wang Yun, Feng Yixiong, Tan Jianrong, et al. Optimization method of flexible job-shop scheduling based on multiobjective particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(2): 190–196. (in Chinese)
- 22 Xia W J, Wu Z M. An effective hybrid optimization approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problems[J]. Computers & Industrial Engineering, 2005, 48(2): 409–425.
- 23 Kacem I, Hammadi S, Borne P. Approach by localization and multiobjective evolutionary optimization for flexible job-shop scheduling problems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2002, 32(1): 1–13.
-

(上接第 295 页)

- 14 郑尊清,尧命发,汪洋,等. 二甲醚均质压燃燃烧过程的试验研究[J]. 燃烧科学与技术,2003, 9(6): 561–565.
Zheng Zunqing, Yao Mingfa, Wang Yang, et al. Experimental study of HCCI combustion process fueled with DME [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2003, 9(6): 561–565. (in Chinese)
- 15 郑朝蕾,李善良. 车载二甲醚水蒸气重整制氢热力学分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 1–6.
Zheng Zhaolei, Li Shanliang. Thermodynamics analysis of hydrogen production in vehicle DME steam reforming reaction system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9): 1–6. (in Chinese)
- 16 梁晨,纪常伟,孔令凯,等. 二甲醚-氢气混合燃料 HCCI 燃烧与排放试验[J]. 农业机械学报,2011,42(3):15–20.
Liang Chen, Ji Changwei, Kong Lingkai, et al. Combustion and emissions performance of a HCCI engine fueled with DME and hydrogen blends [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(3):15–20. (in Chinese)
- 17 Pan Lun, Hu Erjiang, Zhang Jiaxiang, et al. Experimental and kinetic study on ignition delay times of DME/H₂/O₂/Ar mixtures [J]. Combustion and Flame, 2014,161(3):735–747.
- 18 陈朝阳,耿莉敏,巩静,等. 掺氢对二甲醚预混层流燃烧特性的影响[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(6): 122–126.
Chen Zhaoyang, Geng Limin, Gong Jing, et al. Influence of hydrogen addition on combustion characteristics of premixed laminar dimethyl ether flames [J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2014, 48(6): 122–126. (in Chinese)
- 19 郑朝蕾,李善良. 二甲醚重整气对二甲醚均质压燃影响的数值模拟[J]. 内燃机学报,2013,31(4): 337–342.
Zheng Zhaolei, Li Shanliang. Numerical simulation on the effect of DME-reformed gas on dimethyl ether homogeneous compression ignition [J]. Transactions of CSICE, 2013,31(4): 337–342. (in Chinese)
- 20 陈朝阳,黄佐华,苗海燕,等. 二甲醚-空气-N₂/CO₂ 混合气燃烧特性研究[J]. 内燃机学报,2008,36(3): 207–213.
Chen Zhaoyang, Huang Zuohua, Miao Haiyan, et al. Study on combustion characteristics of dimethyl ether-air-N₂/CO₂ premixed mixtures[J]. Transactions of CSICE, 2008,36(3): 207–213. (in Chinese)