

新型空气/酒精火炬点火器设计及试验*

何修杰¹, 晏至辉², 杨 样², 陈 晨^{2,3}, 齐新华²

- (1. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072;
2. 中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000;
3. 江苏科技大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212000)

摘要: 为满足燃烧装置对点火系统低时序控制精度和运行参数宽范围可调的需求, 设计了一种能够在宽油气比范围内工作, 且对燃料和氧化剂注入时序要求较低的空气/酒精火炬点火器。该火炬点火器利用气泡雾化喷嘴组织燃料雾化, 采用电嘴进行点火, 开展了不同气液质量比和当量比下火炬点火器的热态调试, 并将其作为点火装置应用于燃烧加热器开展点火试验。结果表明: 火炬点火器在空气注入稳定后即可注入燃料点火起动, 对燃料和氧化剂注入时序要求较低; 在气液质量比5.73%~19.56%和当量比0.51~2.48内, 火炬点火器均能实现快速点火和稳定燃烧, 具备点火参数在较宽范围内调节的能力; 将火炬点火器应用于燃烧加热器, 可迅速点燃主气流, 在燃烧加热装置上有良好应用前景。

关键词: 气泡雾化; 火炬点火器; 空气; 酒精; 燃烧

中图分类号: TK16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2019) 11-2513-08

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 180818

Design and Experiment of New Air/Ethanol Torch Igniter

HE Xiu-jie¹, YAN Zhi-hui², YANG Yang², CHEN Chen^{2,3}, QI Xin-hua²

- (1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;
3. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: An air/ethanol torch igniter was designed to meet the need of lower timing control precision and wider operation parameters adjustment range of the igniter system of combustion facilities. The torch igniter could function in a wide range of equivalence ratio, and had a lower requirement of fuel and oxidant injection time. An effervescent atomizer and an electric igniter, respectively, were used to atomize and ignite the liquid fuel. Ignition tests were carried out with different gas-liquid ratio of effervescent atomizer and different equivalence ratio of torch igniter. And as an igniter device of a type of combustion heater, the torch igniter was applied to ignite the main combustion chamber. Conclusions could be obtained by the tests: Fuel could be injected and electric igniter could be started to make the torch igniter function when the air pressure got stability, which meant the torch igniter had a lower requirement of fuel and oxidant injection time. The torch igniter had a parameter adjustment ability in a wider range. It could operate within gas-liquid mass ratio of 5.73%~19.56% and equivalence ratio of 0.51~2.48. The igniter could be used as an ignition apparatus of combustion heater, and has good application prospect in combustion heating device.

* 收稿日期: 2018-12-29; 修订日期: 2019-02-25。

作者简介: 何修杰, 博士生, 工程师, 研究领域为喷雾燃烧。E-mail: hxj_83@mail.nwpu.edu.cn

通讯作者: 陈 晨, 博士, 讲师, 研究领域为喷雾燃烧。E-mail: 472914230@163.com

引用格式: 何修杰, 晏至辉, 杨 样, 等. 新型空气/酒精火炬点火器设计及试验[J]. 推进技术, 2019, 40(11):2513-2520.
(HE Xiu-jie, YAN Zhi-hui, YANG Yang, et al. Design and Experiment of New Air/Ethanol Torch Igniter[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(11):2513-2520.)

Key words: Effervescent atomization; Torch igniter; Air; Ethanol; Combustion

1 引言

作为一种间接点火方式,火炬点火器具有点火能量强、能重复起动、可靠性高等优点,在火箭发动机、超燃冲压发动机以及燃气轮机等燃烧装置上得到广泛应用。国外,Phillip等^[1]利用氢气/氧气火炬点火器,开展了一氧化氮/酒精双推进剂火箭发动机点火燃烧性能研究。Sandall等^[2]、Yamaguchi等^[3]分别开展了氢燃料的火炬点火器在超燃冲压发动机上的应用研究。Kim等^[4-5]、Battista等^[6]分别对氧气/甲烷火炬点火器开展了点火试验及应用研究。国内,俞南嘉等^[7]、王栋等^[8]、孙纪国等^[9]针对液体火箭发动机应用分别研制了氧气/煤油火炬点火器,一氧化二氮/丙烷火炬点火器以及低温高混合比火炬点火器。王铁岩等^[10]、蔡震宇等^[11]针对航空发动机应用开展了氧气/甲烷火炬点火器试验和计算研究,刘巍等^[12-13]相继开展了固体燃料冲压发动机火炬点火器设计及试验,邓维鑫等^[14]研制了一种应用于超燃冲压发动机的空气/煤油火炬点火器,杨样等^[15]研制了应用于燃烧加热器的空气/异丁烷火炬点火器。

从现有研究成果来看,火炬点火器通常为特定应用对象而研制,具有一定的参数调节能力,但对于应用对象具有多种复杂工作状态时,火炬点火器则应具有更宽的参数调节范围。从燃烧组织形式来看,目前大多数火炬点火器主要采用气/气或气/液燃烧模式,前者如氧气/氢气^[1-2,16]、氧气/甲烷^[4-5,10-11]等,后者如氧气/煤油^[7]、氧气/酒精^[13]、空气/煤油^[14]以及空气/异丁烷^[15]等。采用气/气燃烧模式的火炬点火器,气态的燃料和氧化剂能够快速混合形成可燃混合气,容易被电嘴点燃,但对于氢气、甲烷、氧气等此类易燃易爆高压气体,在存储和使用方面均存在较大的危险性和不便性。而对于气/液燃烧模式,液体燃料在存储和使用安全性和便利性方面具有一定的优势,但在燃烧前需要经历雾化、蒸发、与氧化剂混合的过程,设计火炬点火器时需要采用高性能的燃料雾化装置,如邓维鑫等^[14]、王栋等^[17]、杨样等^[15]分别选用了旋流喷嘴、气液同轴离心喷嘴和敞口式离心喷嘴。

作为一种两相流雾化喷嘴,气泡雾化喷嘴是将压缩空气注入到混合室液体燃料中,使两者形成稳定的泡状两相流动。由于喷嘴存在内外压差,气泡在流出喷孔前后经历加速、变形、急剧膨胀直至破

裂,从而将包裹在其周围的液膜破碎成为细微的液雾颗粒。各国学者对气泡雾化过程和雾化性能进行了广泛的研究。Sovani等^[18]从喷嘴结构、燃料属性、工作参数等方面对气泡雾化质量的影响因素,以及气泡雾化机理研究成果和应用情况进行了详细总结。刘联胜等^[19-22]通过试验研究了结构参数、运行参数以及物性参数等对喷嘴雾化质量的影响。孙春华^[23]通过试验和数值仿真对气泡雾化喷嘴内外的两相流形态、喷雾特性以及喷射不稳定性的影响因素进行了研究。以往研究成果表明,气泡雾化喷嘴具有低能耗、高雾化性能等优点,能够较好地适应于不同燃料的雾化需求。从目前应用情况来看,气泡雾化喷嘴主要应用于汽轮机、焚烧炉、喷涂、制药、内燃机、灭火等领域^[18],在火炬点火器上的应用还未曾见到。

鉴于气泡雾化喷嘴具有良好的雾化性能,可以考虑将其应用于火炬点火器的燃料雾化过程。本文在考虑燃料和氧化剂的使用安全性及燃烧产物清洁性的基础上,以空气和酒精分别为氧化剂和燃料,采用气泡雾化喷嘴为液体燃料雾化装置,研制了一种对氧化剂和燃料注入时序精度要求较低、运行参数可在较宽范围内调节的新型火炬点火器,针对该火炬点火器开展了不同气液质量比和当量比条件下火炬点火器的点火调试,并将其应用于燃烧加热器开展点火试验。

2 方法

2.1 点火器设计

火炬点火器将参与雾化的支路空气和酒精在气泡雾化喷嘴混合室混合后由喷嘴出口喷出,与从喷嘴周围小孔喷出的主路空气进行混合形成可燃混合物,在电嘴的作用下点火燃烧。火炬点火器在结构设计上重点关注了以下几个方面:(1)结构上便于安装,方便点火器与主燃烧室连接,利于高焓气流进入主燃烧室;(2)火炬点火器各部分拆卸方便,便于自身结构检查和部件的更换;(3)具备良好的热防护性能,保证在长时间工作时系统结构的可靠;(4)合理的点火位置及火焰稳定装置,保证火炬点火器点火成功和燃烧稳定。基于以上考虑,火炬点火器采用三段式结构,即喷注器、燃烧室和导流管等三部分,如图1所示。其中喷注器由气泡雾化喷嘴和主路空气喷注面板组成;燃烧室壁面安装有电嘴,并在身部

安装有测压管,用于测量燃烧室压力;导流管为高焓气体喷射通道,导流管出口深入主燃烧室壁面,可以将高焓气体射入主燃烧室内;火炬点火器通过法兰与主燃烧室连接。

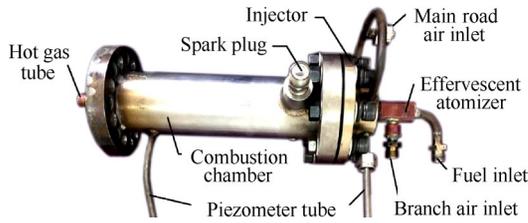


Fig. 1 Photo of torch igniter

气泡雾化喷嘴结构如图2所示,燃料入口位于喷嘴头部,空气入口位于喷嘴侧面并垂直混合室内壁面,其中混合室直径 $D = 10\text{mm}$,空气入口直径 $D_{\text{air}} = 0.5\text{mm}$,喷嘴出口直径 $D_0 = 0.5\text{mm}$ 。喷嘴安装在火炬点火器头部轴线位置,并与喷注面板通过螺纹连接。酒精和空气分别从燃料入口和空气入口进入混合室后进行混合,混合后的气液两相流从喷嘴出口喷出。作为氧化剂的主路空气进入空气集流腔后,通过均布在喷嘴周围的轴向小孔进入燃烧室,这样可以保证燃烧室内的空气分布较为均匀,并能充分与雾化后的酒精进行混合。由于燃料在气泡雾化喷嘴出口不远处即可破碎成较小的液滴,因此将电嘴安装在点火器燃烧室前端,当酒精液滴和空气混合物到达电嘴处时,被电火花点燃。沿喷嘴周围喷注进入的空气沿着壁面流动形成了一道气膜,可以对燃烧室内壁面和电嘴进行冷却,防止壁面和电嘴受到烧蚀,提高火炬点火器使用寿命。

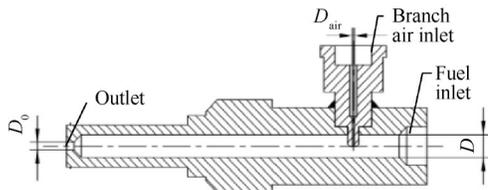


Fig. 2 Schematic of effervescent atomizer

2.2 试验系统

火炬点火器试验系统由电嘴点火系统、燃料和气体供应系统、点火器本体以及测量控制系统组成,如图3所示。高压氮气经过减压阀和手动截止阀后,将存储在燃料罐中的酒精通过汽蚀管和电磁阀挤压到点火器本体气泡雾化喷嘴混合室内;高压空气通过手动截止阀后分成两路,一路通过减压阀、气

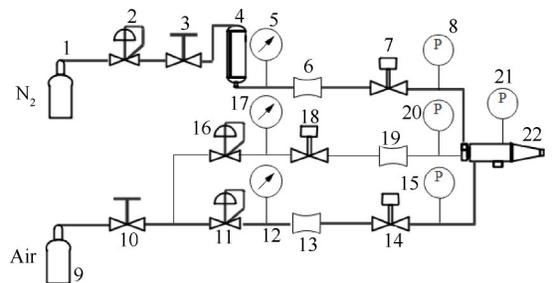
动截止阀和文氏管后进入喷嘴混合室;另一路高压空气经减压阀、文氏管和电磁阀,通过喷注面板进入火炬点火器燃烧室。酒精、空气供应管路和火炬点火器本体安装有压力表和压力传感器,用于获取酒精汽蚀管上、下游压力、空气文氏管上、下游压力以及点火器燃烧室压力。气体和燃料供应管路上的各电磁阀和电嘴在控制系统的统一作用下,按照控制时序进行工作。酒精流量 \dot{m}_f 、主路空气流量 \dot{m}_{a1} 以及支路空气流量 \dot{m}_{a2} 分别由安装在酒精和空气入口前的文氏管和汽蚀管进行限定,通过控制喉道面积及上游压力来设定酒精及空气的流量,计算式分别为

$$\dot{m}_f = C_d A_f \sqrt{2\rho_1 \cdot \Delta p} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{a1} = \frac{C_{a1} p_1 A_{a1}}{\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} Ma_1^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}} \sqrt{\frac{\gamma}{RT_1}} \quad (2)$$

$$\dot{m}_{a2} = \frac{C_{a2} p_2 A_{a2}}{\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} Ma_2^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}} \sqrt{\frac{\gamma}{RT_2}} \quad (3)$$

式中 A_f, A_{a1} 和 A_{a2} 分别为酒精、主路空气和支路空气相应喉道流通面积, p_1 和 p_2 为主路和支路空气文氏管上游压力, Ma_1, Ma_2, T_1 和 T_2 分别为主路和支路空气马赫数及温度, C_d 为酒精汽蚀管流量系数, C_{a1} 和 C_{a2} 分别为主路和支路空气文氏管流量系数, ρ_1 为酒精密度, Δp 为酒精汽蚀管上下压差, γ 和 R 分别为空气比热比和通用气体常数。采用称重法获取酒精路汽蚀管流过的质量流量 \dot{m}_f ; 采用 40.9L 的高压气瓶为标准容器, 利用 PVTt 法获取不同工作条件下文氏管流过的实际气体质量流量 \dot{m}_{a1} 和 \dot{m}_{a2} 。通过数据采集系统获取管路相关位置的压力和温度, 由式(1)~(3)可以计算出 C_d, C_{a1} 和 C_{a2} 。



- 1,9) High pressure vessel; 2,11,16) Pressure relief valve;
- 3,10) Manual globe valve; 5,12,17) Pressure gauge;
- 6,13,19) Venturi tube; 7,14,18) Solenoid valve;
- 8,15,20,21) Pressure sensor; 22) Torch igniter

Fig. 3 Diagram of torch igniter test system

3 结果与讨论

3.1 点火调试

按照试验状态需求,对所设计的火炬点火器开展了50余次点火调试,火炬点火器最大总流量为164.6g/s,酒精最大流量为17.3g/s。图4为总流量为70.0g/s、当量比 $\Phi = 1.05$ 时的火炬点火器点火试验结果。系统在 t_0 时刻打开主路空气和支路空气电磁阀,约0.50s后空气压力达到稳定状态。 $t_0 + 3.0s$ 时刻同时打开酒精管路电磁阀以及电嘴,进入燃烧室内的酒精和空气可燃混合物在电嘴的作用下开始着火。 $t_0 + 4.5s$ 时刻关闭电嘴,并保持酒精和空气的供应,直到 $t_0 + 5.0s$ 时同时关闭酒精和气体供应管路所有电磁阀,结束试验。

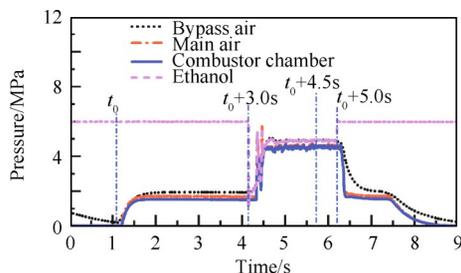


Fig.4 Key pressure measurements of torch igniter

火炬点火器工作性能主要考虑起动机能和燃烧稳定性两个方面。为研究点火器的起动机能,定义电嘴开始工作到燃烧室压力开始上升的时间间隔为点火延迟时间 Δt ,燃烧室压力开始上升到室压达到稳定值95%之间的时间间隔为着火时间 t_s 。 $\Phi = 1.05$ 时,火炬点火器点火延迟时间 Δt 和着火时间 t_s 如图5所示,此时, $\Delta t \approx 0.17s$, $t_s \approx 0.05s$,点火器具有良好的起动机能。

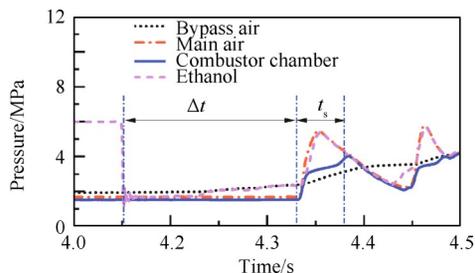


Fig.5 Typical pressure curve of torch igniter during start-up

在燃烧稳定性方面,电嘴工作后,火炬点火器燃烧室压出现轻微抖动,之后压力保持在4.50MPa左右。关闭电嘴,燃烧室压力仍然保持稳定,压力标准

差为0.043MPa,说明燃烧室内可燃气体能够保持稳定燃烧。

在时序控制方面,酒精路电磁阀和电嘴打开时间晚于空气阀打开,此时空气注入压力已经处于稳定状态长达3.5s,因此,在保证空气压力满足需求的情况下,酒精路阀门和电嘴打开时间与空气阀打开时间的间隔要求大大降低。

从点火器试验照片(见图6)可以看出,点火器出口火焰比较稳定,火焰长度不小于100mm。经多次试验后,对火炬点火器进行拆卸检查,发现电嘴及点火器内外结构正常,无烧蚀损坏现象,燃烧室内表面、喷注面板及喷嘴出口截面附着的积碳较少且比较均匀,说明在该工作状态下,环形空气膜对结构的保护比较有效,火炬点火器具有良好的结构完整性。



Fig.6 Torch igniter in testing

3.2 喷嘴气液质量比对点火器工作性能的影响

气泡雾化喷嘴的气液质量比(Gas-Liquid Ratio, GLR)对液体燃料的雾化情况具有重要的影响,气液质量比越小,燃料雾化颗粒直径越大。保持主路空气流量不变,改变气泡雾化喷嘴的气液质量比,观察火炬点火器工作性能变化情况。图7为火炬点火器在气液质量比分别为5.73%, 10.51%, 17.59%和19.56%时空气和酒精供应管路和燃烧室工作压力曲线。

从图7中的工作曲线可以看出,对于不同的GLR,燃烧室 Δt 均约为0.26s,燃烧室建压迅速, t_s 均小于0.10s;燃烧过程中室压平稳,标准差均小于0.1MPa。从火炬点火器的起动和燃烧过程可以看出,在较宽的GLR内(5.73%~19.56%),火炬点火器均具有较好的工作性能,GLR对火炬点火器性能的影响差别较小。造成这一现象的可能原因为,根据气泡雾化喷嘴的工作原理,酒精在压力作用下离开喷嘴出口后,由于内外压差的作用,混合在酒精中的气泡产生爆炸,一方面会撕裂酒精液膜,另一方面将会给破碎后的液滴提供能量,使液滴的惯性力增加,液滴韦伯数增大,当韦伯数足够大时,液滴将会在惯性力

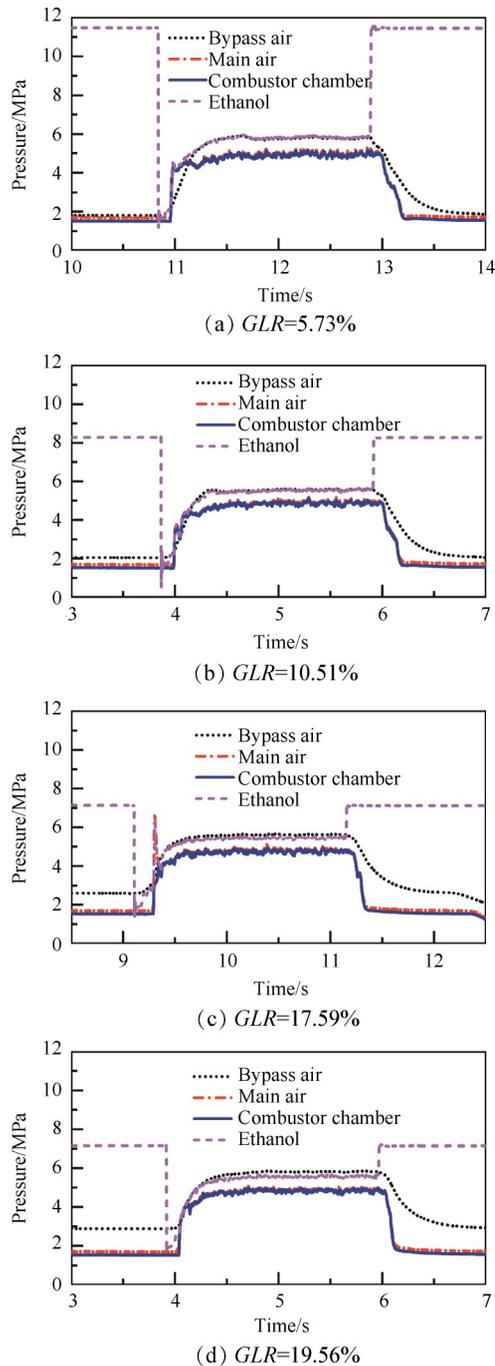


Fig. 7 Key pressure measurements of torch igniter with different GLR

的作用下挣脱表面张力的束缚而进一步破裂。 GLR 越大,液滴获得的能力也越多,破碎后的液滴直径就越小。随着 GLR 逐渐增加,液滴直径减小到使液滴的惯性力与表面张力相当时,液滴不再发生破碎,其直径趋于某一极限值。如Jewe等^[24]在实验中发现,当 $GLR=5\%$ 时,气泡雾化喷嘴出口液滴的索太尔平均直径(SMD)就已经在 $130\mu\text{m}$ 以下, $GLR=10\%$ 时, SMD 就已经减小到约 $60\mu\text{m}$, $GLR\geq 20\%$ 时, SMD 基本保持在 $40\mu\text{m}$ 左右。因此可以推测,火炬点火器在气泡雾化

喷嘴 $GLR\geq 5.73\%$,酒精已经被充分雾化,且在喷嘴周围环形空气流的剪切作用下,雾化后的液滴能够进一步破碎,有利于酒精的蒸发燃烧。因此,气泡雾化喷嘴的良好雾化性能、周围空气的剪切作用以及酒精的易挥发性,使火炬点火器在低 GLR 下便可以快速启动和稳定燃烧。尽管高气液质量比能够显著提高酒精的雾化效果,但这种雾化效果的提高对燃烧室内酒精的燃烧性能的改善作用并不明显。同时,由于参与气泡雾化的空气质量与主路空气质量相比非常小,对燃烧室内油气比的影响可以忽略。因此,当火炬点火器的当量比一定时,尽管气泡雾化喷嘴的使用促进了酒精雾化,但当 $GLR\geq 5.73\%$ 时,不同 GLR 比对火炬点火器工作性能的影响不明显。

3.3 当量比对点火器工作性能的影响

为研究火炬点火器燃烧室内酒精和空气燃烧时当量比 Φ 对点火器工作性能的影响,在保持支路空气流量不变的基础上,通过改变酒精和主路空气的质量流量开展点火试验。图8是 Φ 分别为0.51, 0.89, 1.36和2.48状态下,火炬点火器点火试验中,主路和支路空气文式管下游、酒精汽蚀管下游和燃烧室压力测点处的压力-时间曲线, GLR 分别为17.68%, 17.59%, 19.5%和6.57%。

从图8可以看出, $\Phi = 0.51 \sim 2.48$,火炬点火器燃烧室内混合燃气能够被电嘴点燃,电嘴关闭后能够继续保持燃烧状态。从起动性能来看, Φ 分别为1.05, 1.36和2.48时,如图4和图8(c), (d)所示,显示火炬点火器 t_s 均小于 0.10s , Δt 均小于 0.30s ,压力曲线基本成阶跃形状,没有出现较为剧烈的抖动。 $\Phi = 0.51$ 和 $\Phi = 0.89$ 时,如图8(a), (b)所示, $\Delta t > 0.40\text{s}$,因此, Φ 较大时火炬点火器点火相对更为快速。

在燃烧稳定性方面,图8显示,火炬点火器着火后,燃烧室压力能够保持平稳,压力标准差分别为 0.069MPa , 0.086MPa , 0.061MPa 和 0.092MPa 。

从试验结果可知,火炬点火器能够在较宽的 Φ (0.51 ~ 2.48)工作,在较大的 Φ 条件下,系统起动更为迅速;对于不同的 Φ ,着火后的燃烧室能够保持稳定燃烧。分析原因为:虽然通过喷嘴周围环状排列的小孔喷注的空气流对液滴的进一步破碎具有促进作用,但对燃料雾化粒径的大小起决定性作用的还是喷嘴自身工作特性。正如前文所述,气泡雾化喷嘴在 $GLR=5\%$ 时,燃料就已经雾化成直径较小的液滴。对于试验条件,酒精均处于良好的雾化状态,因此,能够在试验中较宽的 Φ 范围内点火稳定燃烧。 Φ 较大时,相对于周围的空气,酒精具有相对更大的流

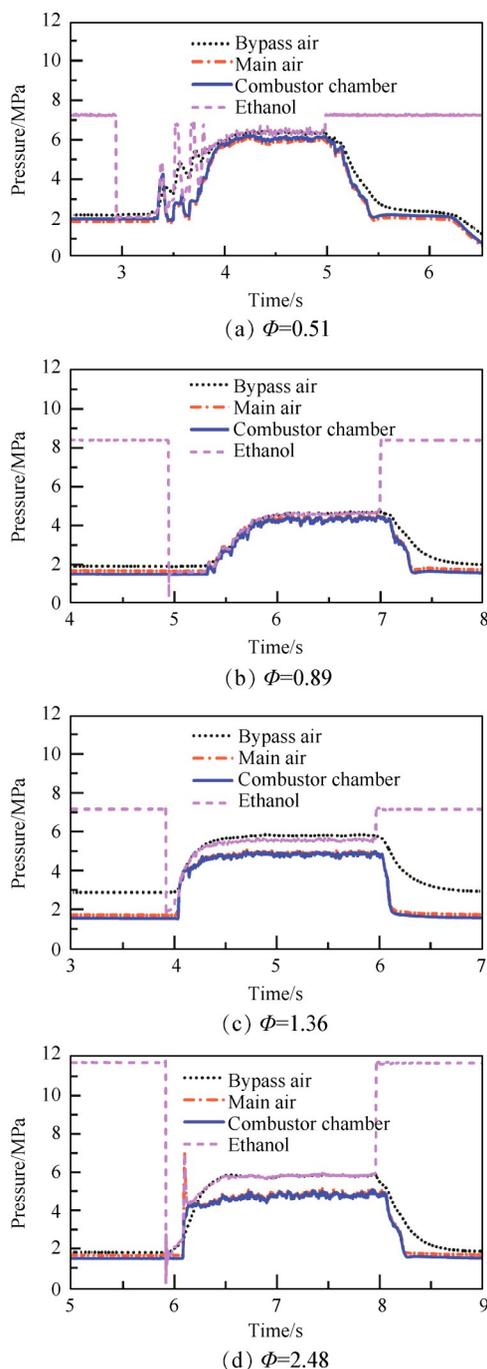


Fig. 8 Key pressure measurements of torch igniter with different equivalence ratios

量,运动的酒精液滴受到周围空气的阻力相对较小,具有较小的动量损失,因此,酒精液滴能够深入周围环状空气流,与空气更充分地进行混合,形成更为靠近点火器燃烧室内壁面的可燃混合气。由于位于燃烧室侧壁的电嘴点火出口与燃烧室内壁面平齐, ϕ 较大时,燃烧室内的混合气更容易被电火花点燃,火炬点火器的起动性能更为优越。

3.4 火炬点火器在燃烧加热器上的应用试验

为验证火炬点火器能否点燃燃烧设备主流气,

在燃烧加热器上开展了火炬点火器的应用试验。燃烧加热器喷注器采用多个气液同轴喷嘴,同轴喷嘴中心为敞口式离心喷嘴,环缝为富氧空气直流喷嘴设计。加热器燃烧室为圆筒形结构,内径为160mm,火炬点火器垂直安装在燃烧室侧面,通过法兰进行连接,点火器导流管出口与加热器内壁面平齐。加热器采用液氧和空气作为氧化剂,异丁烷为燃料,其流量分别通过文氏管和汽蚀管设定。蒸发后的液氧和空气混合形成富氧空气,与异丁烷经由加热器喷注面板喷出后,在主燃烧室内混合形成可燃的混合气。由前文可知,火炬点火器火焰长度不小于100mm,因此,点火器出口的高焓气流能够到达燃烧加热器轴心位置,进而点燃加热器燃烧室内可燃混合气流。图9为安装有火炬点火器的燃烧加热器实物图,图10为 $Ma=6$,总流量为6kg/s状态下燃烧加热器关键位置压力曲线图。

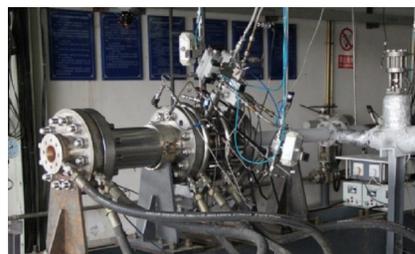


Fig. 9 Facility for testing the combustion heater

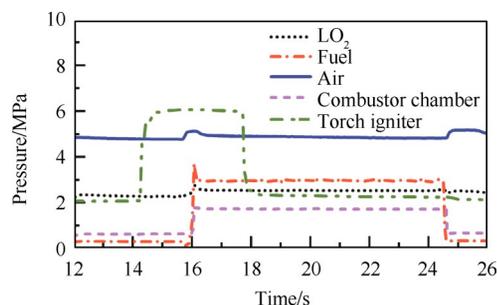


Fig. 10 Key pressure measurements of combustion heater

从图10可以看出,燃烧加热器在约13.70s时刻打开电嘴,火炬点火器开始工作,点火器 Δt 约为0.28s, t_s 约为0.09s,约16.40s时关闭电嘴,火炬点火器保持燃烧状态,约17.10s时关闭,火炬点火器燃料供应截止阀,0.20s后,火炬点火器停止工作。火炬点火器从着火到停止工作,累计时间约为3.50s,期间火炬点火器燃烧室压稳定,基本保持在6.02MPa左右。火炬点火器着火后,约15.50s时打开异丁烷供应截止阀,加热器开始工作,其点火延迟时间约为0.39s,着火时间约为0.05s,室压爬升迅速,点火启动平稳,火

炬点火器熄火后能够继续燃烧,加热器室压保持稳定,约为1.74MPa。试验表明,以气泡雾化喷嘴为基础的火炬点火器,能够迅速起动并能保持稳定燃烧,可以快速点燃燃烧加热器燃烧室内可燃混合气流,能够作为燃烧加热器的一种有效点火装置。

4 结 论

通过对不同气液质量比和不同当量比下火炬点火器点火试验以及在燃烧加热器上的应用试验,获得如下结论:

(1)所研制的火炬点火器时序控制要求较低,在保证空气入口压力稳定后,对酒精和电嘴打开的时间没有严格的限制。

(2)喷嘴的气液质量比对火炬点火器性能影响差别较小,在较宽的气液质量比(5.73%~19.56%),火炬点火器均具有较好的工作性能。

(3)火炬点火器可以在较宽的当量比(0.51~2.48)点火工作,当量比对点火器的工作性能影响较大,相较于贫油状态,火炬点火器在富油状态下点火起动过程更为平稳、迅速,燃烧过程更加稳定。

(4)火炬点火器工作时,导流管出口高温气流稳定,壁面无烧蚀损坏,结构完好。

(5)所研制的酒精/空气火炬点火器,能够顺利点燃燃烧加热器主气流,可以作为燃烧设备一种有效的点火起动装置,并在后续工作中考虑将其应用于更大尺度的燃烧加热器。

致 谢:感谢中国空气动力研究与发展中心吴运刚高级工程师和张弯洲助理研究员在试验过程中给与的支持和帮助。

参考文献:

[1] Phillip J, Youngblood S, Grubelich M, et al. Development and Testing of a Nitrous-Oxide/Ethanol Bi-Propellant Rocket Engine[C]. *Salt Lake City: 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2016.

[2] Sandall E, Kalman J, Quigley J N, et al. A Study of Solid Ramjet Fuel Containing Boron-Magnesium Mixtures [J]. *Propulsion and Power Research*, 2017, 6(4): 243-252.

[3] Yamaguchi T, Hizawa T, Ichikawa T, et al. Total Temperature Estimation of a Hydrogen/Air Burned-Gas Torch Igniter for a Scramjet Combustor [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2018, 13(2).

[4] Kim T Y, Choi S, Kim H K, et al. Combustion Properties of Gaseous CH₄/O₂ Coaxial Jet Flames in a Single-

Element Combustor[J]. *Fuel*, 2016, 184: 28-35.

[5] Choi S, Kim H K, Kim T Y, et al. Properties of Inverse Non-Premixed Pure O₂/CH₄ Coflow Flames in a Model Combustor[J]. *Energy*, 2015, 93: 1105-1115.

[6] Battista F, Ferraiuolo M, Martucci A. Modeling, Testing and Design Considerations of a GOX/GCH₄ Igniter for a HYPROB-SSBB Single Injector Thrust Chamber [J]. *Journal of the British Interplanetary Society*, 2014, 1(1).

[7] 俞南嘉, 张国舟, 刘红军, 等. 氦气谐振点火器和气氧/煤油火炬点火器研究[J]. *推进技术*, 2003, 24(6): 553-556. (YU Nan-jia, ZHANG Guo-zhou, LIU Hong-jun, et al. Investigation of Helium Resonance Ignitor and Kerosene/Oxygen Ignitor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2003, 24(6): 553-556.)

[8] 王 栋, 郭红杰, 梁国柱, 等. N₂O/C₃H₈火炬式点火器试验研究[J]. *推进技术*, 2010, 31(6): 777-782. (WANG Dong, GUO Hong-jie, LIANG Guo-zhu, et al. Experimental Investigation on Nitrous Oxide/Propane Ignition Characteristics[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2010, 31(6): 777-782.)

[9] 孙纪国, 王 珏. 高混合比火炬式电点火器试验研究[J]. *推进技术*, 2000, 21(1): 34-36. (SUN Ji-guo, WANG Jue. Experimental Study on High Mixture Ratio Torch Igniter [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2000, 21(1): 34-36.)

[10] 王铁岩, 郑孟伟, 蔡振宇. 气氧甲烷火炬式点火器稳态仿真分析[J]. *导弹与航天运载技术*, 2016, (4): 63-66.

[11] 蔡震宇, 王铁岩, 曹红娟. 一种气氧/气甲烷火炬式电点火器方案研究[J]. *载人航天*, 2016, 22(3): 338-342.

[12] 刘 巍, 杨 涛, 胡建新, 等. 固体燃料冲压发动机火炬式点火器设计[J]. *固体火箭技术*, 2008, 31(4): 336-339.

[13] 刘 巍, 杨 涛, 胡建新, 等. 气氧/酒精火炬式点火器试验[J]. *推进技术*, 2008, 29(3): 269-272. (LIU Wei, YANG Tao, HU Jian-xin, et al. Experiment on Gas-Oxygen/Ethanol Spark Torch Igniter[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2008, 29(3): 269-272.)

[14] 邓维鑫, 乐嘉陵, 杨顺华, 等. 空气/煤油火炬点火器设计及试验[J]. *航空动力学报*, 2017, 32(7): 1554-1560.

[15] 杨 样, 晏至辉, 蒲旭阳, 等. 新型液氧/空气/异丁烷燃烧加热器研制及流场校测[J]. *推进技术*, 2017, 38(12): 2830-2835. (YANG Yang, YAN Zhi-hui, PU Xu-yang, et al. A New Liquid-Oxygen/Air/Isobutane

- Combustion Heater Development and Flow Field Calibration [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38 (12): 2830-2835.)
- [16] Kim H K, Kim T Y, Kim Y H, et al. Combustion Characteristics of Gaseous Inverse O_2/H_2 Coaxial Jet Flames in a Single-Element Model Combustor [J]. *Energy*, 2018, 155: 262-271.
- [17] 王 栋, 梁国柱. N_2O/C_3H_8 火炬式点火器工作性能数值模拟研究[J]. *火箭推进*, 2016, 42(2): 13-18.
- [18] Sovani S D, Sojkaa P E, Lefebvre A H. Effervescent Atomization [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2001, (27): 483-521.
- [19] 刘联胜, 杨 华, 衡国辉, 等. 气液质量流量比对气泡雾化喷嘴燃烧特性的影响[J]. *燃烧科学与技术*, 2007, 13(1): 10-14.
- [20] 刘联胜, 吴晋湘, 韩振兴, 等. 气泡雾化喷嘴在不同液体物性下的喷雾特性研究[J]. *热科学与技术*, 2002, 1(2): 128-132.
- [21] 刘联胜, 王露露, 于 祥, 等. 混合室结构对气泡雾化喷嘴喷雾特性的影响[J]. *热科学与技术*, 2017, 16 (2): 114-119.
- [22] 刘联胜. 气泡雾化喷嘴的雾化特性及其喷雾两相流场的实验与理论研究[D]. 天津:天津大学, 2001.
- [23] 孙春华. 气泡雾化喷射中气液两相作用及射流喷雾的研究[D]. 北京:北京交通大学, 2017.
- [24] Jewe Schröder, Stefan Kraus, Bruna B R, et al. Characterization of Gelatinized Corn Starch Suspensions and Resulting Drop Size Distributions after Effervescent Atomization [J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 105: 656-662.

(编辑:朱立影)