

H₂O/CO₂污染对煤油燃料双模态超声速燃烧室影响研究*

陈亮, 宋文艳, 罗飞腾

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 在以电阻加热直连式试验系统为基础的污染对比试验平台上, 通过纯净空气来流和H₂O/CO₂污染空气来流严格对比试验, 研究了H₂O/CO₂污染对煤油燃料双模态超声速燃烧室点火、火焰稳定及稳定燃烧性能等的影响。研究发现, (1) H₂O污染对煤油燃料超声速燃烧室点火具有一定的抑制作用, 当H₂O污染含量达到11%以上时不能实现可靠点火。(2) 污染组分的存在会降低燃烧室的火焰稳定性, CO₂污染对火焰稳定性的影响比相同含量H₂O污染显著。(3) 对于燃烧室无反应流动, 纯净空气来流和污染空气来流时燃烧室壁面压力在一定范围内基本重合, 仅局部存在微小差异。(4) 污染组分的存在对煤油燃料超声速燃烧具有抑制作用, 燃烧室壁面压力低于纯净空气试验, 压力下降程度随污染水平升高而增大, 最高达12%, CO₂污染对煤油燃料超声速燃烧的抑制作用比相同含量H₂O污染显著。(5) 污染组分的存在会导致燃烧室模态转换点发生变化, 在较高的污染水平下, 燃烧室的工作模态将会从相同油气比纯净空气来流下的亚燃模态转换为超燃模态。

关键词: 污染效应; 超燃冲压发动机; 煤油燃料; 双模态; 试验

中图分类号: V235.211

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2015) 02-0253-08

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2015.02.013

Vitiation Effects of H₂O/CO₂ on Kerosene-Fueled Dual-Mode Supersonic Combustor Performance

CHEN Liang, SONG Wen-yan, LUO Fei-teng

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Through strict comparison tests in the clean and H₂O/CO₂ vitiated air, the effects of H₂O and CO₂ species on fuel ignition, flame stability, stable combustion performance and combustion mode in the kerosene-fueled dual-mode supersonic combustor were studied. The tests were carried out in the direct-connected scramjet facilities based on the clean air resistance heater. The conclusions are as follows. (1) The kerosene fuel ignition is restrained by the presence of H₂O in the vitiated airstream. When the content of H₂O is above 11%, reliable ignition cannot be achieved. (2) Compared with the clean airstream, the flame stability is reduced in the vitiated airstream. CO₂ has more influence on the flame stability than H₂O of same mole fraction. (3) At fuel-off state, the wall pressure distribution along the flow direction in the vitiated air almost coincides with the clean air and there are little differences partly. (4) Both H₂O and CO₂ have a certain inhibitory effect on the combustion. The wall pressure in the vitiated air is lower than the clean air and this drop of pressure, which is up to 12%, increases with the rising of vitiation levels. Moreover, CO₂ also has a greater impact on wall pressure drop than H₂O of same mole fraction. (5) The vitiation changes the mode transition point of the combustor. Supposing the combustor working at the scramjet mode in the clean airstream, it will transit to ramjet mode in the high level vitiated airstream with the same fuel gas equivalent ratio likely.

* 收稿日期: 2013-11-26; 修订日期: 2014-03-11。

基金项目: 西北工业大学科技创新基金 (2012KJ01004)。

作者简介: 陈亮 (1980—), 男, 博士, 助理研究员, 研究领域为超燃冲压发动机。E-mail: chenliang@nwpu.edu.cn

Key words: Vitiation effects; Scramjet; Kerosene fuel; Dual mode; Experimental

1 引言

地面试验、理论计算和飞行试验是超燃冲压发动机技术研究的三大技术手段,其中地面试验具有关键性和基础性的作用。超燃冲压发动机地面试验要求试验设备具备模拟实际飞行马赫数和飞行高度下总温和总压条件的能力,尤其是总温模拟,需要将试验气体加热到特定的高焓状态。在各种加热方式中,燃烧加热是目前最简单可行的,被广泛应用于模拟飞行马赫数4~7的超燃冲压发动机地面试验设备^[1]。但是在燃烧加热的过程中会产生以H₂O和CO₂为主,同时包含一些微量非平衡产物的污染组分,这些污染组分的存在改变了试验空气的组成,从而改变了试验空气的热物理、化学等方面的特性。相对于纯净空气来流,这些差别会在地面试验风洞喷管和试验模型流动过程中产生额外的物理和化学影响,即所谓的污染效应^[2]。污染效应主要体现在两个方面,一是使风洞设备喷管提供的试验来流条件偏离于真实飞行环境状态,体现在自由来流组分组成、热力学参数、气流状态参数的差别;二是对发动机工作过程产生影响,最终影响发动机性能。其中,燃烧室工作过程最为复杂和关键,包括有燃料/空气的混合(液态燃料还包括雾化、蒸发等过程)、点火、火焰稳定和燃烧释热等物理化学过程,这些过程对来流污染组分均表现敏感,因此大多数污染效应研究首先集中于对燃烧室工作过程和性能的影响研究。对双模态超燃冲压发动机燃烧室而言,污染效应的影响体现在以下几个方面:(1)对燃烧室点火和火焰稳定特性的影响,尤其对点火和火焰稳定边界影响;(2)对模态转换过程的影响;(3)对燃烧室释热规律、进气道起动性能的影响;(4)对发动机推阻特性方面的影响。

从20世纪60年代末开始,针对因高焓加热方式引起的地面试验中H₂O/CO₂污染效应,研究者进行了大量的理论分析和数值计算研究。Mitani等^[3]认为H₂O在小于1000K,0.1MPa条件下倾向抑制H₂-Air点火,这种影响与H₂O导致的三体碰撞效率改变和H₂-O₂爆炸极限行为紧密相关;但在大于1000K下,由于关键的反应动力学速率比混合速率快得多,H₂O对点火延迟的影响抑制作用倾向于减弱,甚至可能缩短H₂-O₂点火延迟时间^[4]。同时,H₂O能增强H₂-Air系统的非预混火焰强度^[5]和一定当量油气比范围的预

混火焰速率^[6,7],能提高火焰中靠近空气一侧边缘的当地温度,从而有利于稳焰。梁金虎等^[8]的研究表明,污染组分对乙烯点火的阻滞作用与污染组分类型和油气比高低相关。Chinitz等^[9]的预混火焰计算结果表明,H₂O对碳氢燃料点火和反应时间的影响,将更依赖于具体条件,难以得到一般性结论。与N₂相比,H₂O分子量更低,减少了进气道的流量捕获,并且H₂O更大的热容和高温下的离解,均造成氢燃料超燃发动机燃烧平衡后壁压和推力降低^[10~13]。一般认为CO₂相对惰性,对H₂-Air点火延迟通常不会产生显著影响^[4,14];但由于其热容大,可能削弱了扩散和预混火焰,不利H₂-Air火焰的稳焰^[15,16]。与N₂相比,CO₂分子量更大能略微增加进气道的流量捕获,但CO₂更大的热容和高温下的离解,造成氢燃料超燃发动机燃烧平衡后壁压和推力降低^[2,10]。对于燃烧加热方式而言,CO₂的存在总是与H₂O一起的,因此H₂O+CO₂的综合影响也是人们关注的方面,对点火、火焰稳定存在相互耦合的作用,依赖于具体的工况,有可能存在积极的作用也可能消极的作用^[2]。李建平等^[17]的计算表明,污染的存在降低了煤油燃料超声速燃烧室性能。可以看到,以上大多数研究及其结论都是针对氢燃料超燃冲压发动机的,对于碳氢燃料并不能一概而论,目前仍缺乏系统的研究。

另一方面,由于涉及到复杂的气体的相互耦合的气体动力学、热力学、化学动力学等多学科因素,到目前为止污染效应相关理论模型尚不能准确建立,人们尚未掌握其影响规律,因此仅仅依靠理论分析、计算研究还无法提出任何实用、可靠的污染效应补偿方法来评估各种污染试验设备获得的数据。在这种情况下,有效的地面试验甚至飞行试验验证是不可或缺的研究手段,目前最直接可靠的方法是针对超燃冲压发动机开展不同来流下的对比试验研究。

由于纯净空气试验能力限制、对比试验的复杂性,实施严格的对比试验往往比较困难。目前为止,国际上如日本在冲压发动机试验设备上开展的试验,美国维吉尼亚大学开展的对比试验可视为严格对比试验,即采用纯净空气(蓄热式加热或电阻加热)和污染空气来流在匹配重要参数的前提下进行对比试验,可以有效分离出试验空气中的污染效应。20世纪90年代,日本宇航院研究人员在冲压发动机试验设备上进行了模拟马赫数6.0状态下氢燃料超燃冲压发动机的整机自由射流对比试验,对点

火和火焰稳定特性及在燃烧后的平衡性能进行了研究^[18~20]。美国维吉尼亚大学研究人员利用电阻加热设备针对氢燃料超声速燃烧室开展了纯净空气来流和H₂O/CO₂污染空气来流下直连式对比试验,研究了污染组分对燃烧室壁面压力、模态转换的影响^[21~23]。在弗吉尼亚大学纯净空气来流试验基础上,日本东北大学采用氢氧燃烧加热方式针对相同燃烧室构型进一步试验研究了参数匹配方式的影响^[24]。这些对比试验研究都是针对氢燃料发动机开展的,而关于煤油燃料超燃冲压发动机的对比试验研究却未曾有公开文献报道。

本文在以西北工业大学电阻加热直连式试验系统为基础的污染对比试验平台上^[25~27],开展了针对煤油燃料双模态超声速燃烧室的纯净空气来流和H₂O/CO₂污染空气来流对比试验,研究H₂O/CO₂污染对燃烧室点火、火焰稳定及稳定燃烧性能的影响。通过严格的对比试验,对影响给出初步的评估。

2 污染对比试验

2.1 污染对比试验系统与燃烧室模型

为了评估H₂O/CO₂污染空气对燃烧室性能的影响,采用在高焓纯净空气中定量添加H₂O,CO₂组分并补氧的方式来模拟燃烧加热污染空气(只考虑H₂O,CO₂两种主要污染组分)。污染对比试验系统基于电阻加热直连式试验系统,在电阻加热器出口和设备喷管之间增加了水蒸气供应系统、二氧化碳供应系统、补氧系统、文氏管/混合器等部分,系统示意图如图1所示。试验时通过调节各部分气体供应系统,在喷管前获得满足试验状态要求、混合均匀的H₂O/CO₂污染试验空气。为了在较宽的H₂O/CO₂污染组分比例范围内获得满足所需总温的污染试验空气,H₂O在注入混合器前通过一个独立的金属管式蓄热加热器来获得温升,并以气态的形式混入主流试验空气。图2示意了H₂O/CO₂污染试验空气的合成原理。如果不额外添加任何气体组分,系统处于纯净空气来流试验状态;对于H₂O/CO₂污染空气来流试验状态,首先在混合器上游产生稳定的纯净空气来流状态,并控制H₂O,CO₂和O₂各部分气体组分的喷射,最终在喷管出口处建立稳定的污染

空气来流。这样就可以在同一试验系统上开展纯净空气来流与H₂O/CO₂污染空气来流的直连式燃烧室对比试验,避免了由于系统差异带来的误差。对比试验采用的直连式超声速燃烧室模型如图3所示。串联双凹槽作为火焰稳定装置位于燃烧室模型的下壁面,煤油喷射位置位于上游凹槽前,先锋氢气喷射位置位于上游凹槽内,火花塞在氢气喷射点之后。

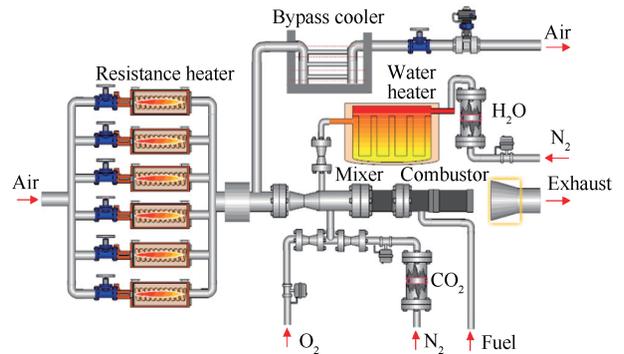


Fig.1 Schematic of the comparative experimental system

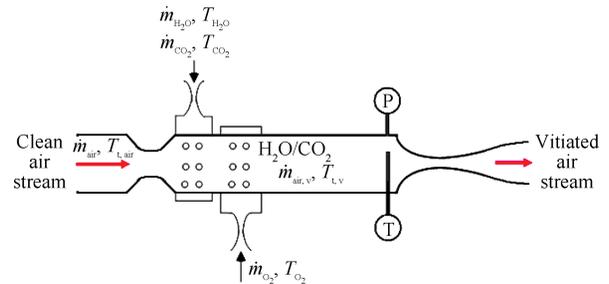


Fig.2 Schematic of producing of the vitiated air

2.2 对比试验参数匹配方案

除了在同一系统上开展试验,为了能够明确分离出来流试验空气中H₂O/CO₂污染组分的影响,需要针对纯净空气来流和H₂O/CO₂污染空气来流确定一组匹配模拟参数作为比较基准。匹配模拟参数的选择对试验结果具有很大的影响,需要根据研究目的、污染空气类型和设备能力等来确定。在这里,根据燃烧加热风洞模拟参数的关联性,结合本文直连式对比试验特点,针对燃烧室进口参数进行匹配,选择以下匹配参数:

(1)马赫数:马赫数的匹配通过使用同一设备喷管保证,对于本文采用的马赫数2喷管,试验空气来

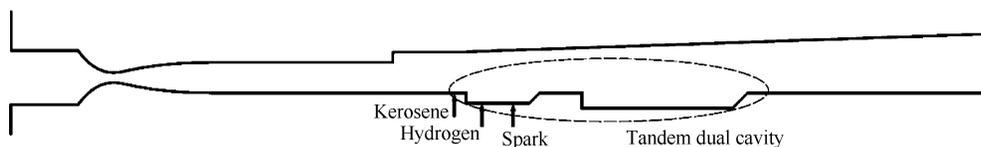


Fig.3 Schematic of the model combustor

流组分差别引起的出口马赫数差别一般可以忽略。

(2)总温:总温是气体最大内能的一种度量,燃烧加热风洞通常对总温进行模拟,本文对比试验中通过调节各部分气体的总温来获得预期的污染空气总温。

(3)总压:结合来流试验空气组分组成、总温,通过污染试验空气流量调节保证总压的模拟。

(4)氧气摩尔分数:从化学反应角度看,污染试验空气需要匹配21%的氧气摩尔分数。

(5)工作当量油气比:匹配了21%氧气摩尔分数后,污染试验空气中氧气质量分数往往与纯净空气的不同,因此燃料与污染试验空气的化学恰当比将发生变化,同时燃烧室进口气流流量与纯净空气时不相等,需要适当调节燃油流量来保证当量油气比的匹配。

2.3 污染对比试验结果

污染对比试验车次状态参数及试验结果如表1所示。从表中可以看出,在纯净空气来流下,采用先锋氢点火的方式,对于0.53,0.67和0.73三个油气比,煤油均实现了可靠点火,稳定燃烧,图4为试验中先锋氢点煤油的照片。而对于添加了H₂O和CO₂的污染空气来流来说,在某些污染水平较高的试验中,出现了煤油喷射之后火焰熄灭或者撤除先锋氢之后煤油无法自持燃烧的现象。从表中还可看到,以纯净空气来流作为匹配基准,污染空气来流的总温控制在 $827 \pm 24\text{K}$ 之内,总压控制在 $809 \pm 19\text{kPa}$ 之内,除个别情况,煤油当量油气比均在预定值 ± 0.01 以内。此外在试验中,严格控制污染空气中氧气摩尔分数接近纯净空气。这样保证了对比试验车次状态参数匹配良好,具有较好的比较基准。

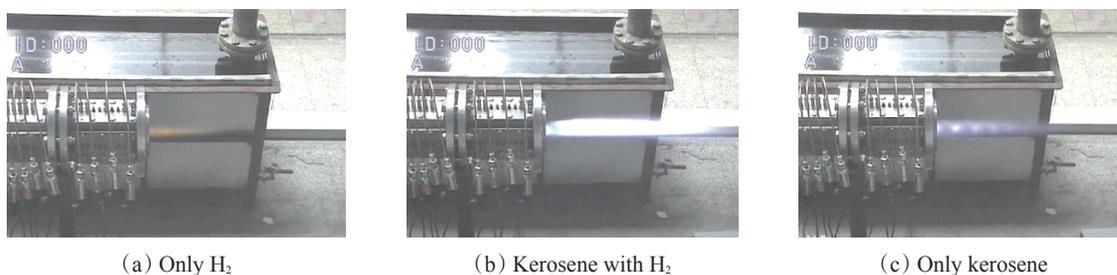


Fig. 4 Courses of the ignition of kerosene with pilot H₂

Table 1 Experimental results

Test No.	Air stream	T_t/K	p_t/kPa	Equivalent ratio		Combustion state		
				H ₂	Kerosene	H ₂	Kerosene with H ₂	Kerosene
E01	Clean	830	811	0.25	0.54	■	■	■
E02	Clean	842	824	0.20	0.67	■	■	■
E03	Clean	840	810	0.25	0.73	■	■	■
E04	4.8% H ₂ O	821	810	0.20	0.54	■	■	■
E05	5.8% H ₂ O	826	817	0.20	0.53	■	■	■
E06	8.6% H ₂ O	840	795	0.25	0.54	■	■	■
E07	11.3% H ₂ O	840	812	0.20	0.52	■	□	□
E08	11.5% H ₂ O	808	808	0.20	0.53	■	■	□
E09	11.8% H ₂ O	840	802	0.25	0.54	■	■	□
E10	5.3% H ₂ O	839	825	0.25	0.74	■	■	■
E11	8.3% H ₂ O	850	821	0.25	0.74	■	■	■
E12	3.5% CO ₂	845	815	0.20	0.51	■	■	■
E13	4.5% CO ₂	803	790	0.20	0.52	■	■	■
E14	4.3% CO ₂	839	820	0.20	0.73	■	■	■
E15	6.2% CO ₂	825	819	0.25	0.73	■	■	□
E16	4.5% H ₂ O+4.3% CO ₂	835	822	0.20	0.53	■	■	■
E17	8.0% H ₂ O+3.7% CO ₂	831	828	0.20	0.53	■	■	□
E18	4.6% H ₂ O+4.5% CO ₂	840	821	0.20	0.67	■	■	■
E19	5.2% H ₂ O+4.7% CO ₂	845	811	0.20	0.73	■	■	■

■ Represents combustion □ Represents flameout

3 污染空气对双模态燃烧室性能影响研究

3.1 污染组分对点火和火焰稳定的影响

从表1来看,对于纯净空气来流,在预定煤油当量油气比为0.53,0.67和0.73条件下,分别采用当量油气比0.25,0.20和0.25的先锋氢气火焰,均成功实现了对煤油的点火,停止喷氢后煤油能够自持稳定燃烧。

对于H₂O污染来流,在预定煤油当量比为0.53的情况下,H₂O含量分别为4.8%,5.8%和8.6%,以及预定煤油当量比为0.73的情况下,H₂O含量分别为5.3%和8.3%时,均实现了先锋氢气火焰对煤油燃料的可靠点火以及停止喷氢之后的煤油自持稳定燃烧。但是继续提高来流空气中的H₂O污染水平至11%以上时,停止先锋氢气的供应后,煤油就无法维持稳定燃烧,甚至在试验E07中,煤油喷入燃烧室后导致先锋氢火焰的熄灭。这些现象证实了H₂O污染降低了煤油燃料超声速燃烧室火焰稳定性能,在点火方面表现出了对煤油燃料点火的抑制作用,也就是说当H₂O污染组分含量达到一定比例时就会引起燃烧室从火焰稳定到不能火焰稳定的质变影响,甚至不能实现可靠点火。

对于CO₂污染来流,在预定煤油当量比为0.53的情况下,空气中污染组分为3.5%CO₂,4.5%CO₂和4.5%H₂O+4.3%CO₂时均实现了煤油点火和自持稳定燃烧,而在适量CO₂污染基础上继续提高H₂O污染组分含量即8.0%H₂O+3.7%CO₂污染时,导致煤油发生火焰稳定到不能火焰稳定的质变。在预定煤油当量比为0.73的情况下,CO₂污染组分含量从4.3%提高到6.2%也发生了煤油从火焰稳定到不能火焰稳定的质变。从总污染水平来看,在单一H₂O污染和H₂O+CO₂污染下,总污染水平超过11%时,导致煤油无法火焰稳定,而单一CO₂污染下,总污染水平达6.2%时,煤

油无法火焰稳定。

从以上分析可以看出,H₂O污染、CO₂污染以及H₂O+CO₂污染的存在会降低燃烧室的火焰稳定性,相对于纯净空气来流而言,在H₂O污染、CO₂污染以及H₂O+CO₂污染空气来流中体现的燃烧室火焰稳定性能偏于保守。也就是说,如果在污染空气中能实现煤油燃料超声速燃烧室火焰稳定的话,在纯净空气来流下一定可以实现火焰稳定燃烧,而污染空气中不能实现煤油燃料火焰稳定燃烧时,在纯净空气来流下仍有可能实现火焰稳定燃烧;在本文试验条件下,相同含量的CO₂污染对煤油超声速燃烧室火焰稳定性的影响表现要比H₂O污染更为显著。

3.2 污染组分对冷流壁面压力的影响

图5给出了纯净空气与各种H₂O/CO₂污染空气来流下燃烧室冷流状态壁面压力的对比。从图中可以看出,纯净空气来流和各种污染水平污染空气来流下燃烧室冷流状态壁面压力在一定范围内基本重合,难以分辨出明显的规律性的污染影响趋势,仅仅局部存在一定的差异,主要体现的是来流参数匹配不完全一致、试验空气组分组成、物性参数改变等因素对燃烧室冷态流动过程的物理影响。

3.3 污染组分对稳定燃烧性能的影响

图6显示了纯净空气与各种程度H₂O污染空气来流下燃烧室稳定燃烧后壁面压力的对比。从燃烧室壁面压力分布来看,H₂O污染的存在导致了燃烧室壁面压力下降,隔离段出口压力下降反映了下游燃烧区燃烧诱导压升下降、产生的背压降低促使隔离段流动结构变化,随着H₂O污染含量的增加,这种影响作用增强,表现为燃烧室稳定燃烧后壁面压力也随之逐渐下降。在煤油当量油气比0.53的试验中,在上壁面压力爬升段($x < 300\text{mm}$),4.8%H₂O污染、5.8%H₂O污染和8.6%H₂O污染导致燃烧室无量纲壁

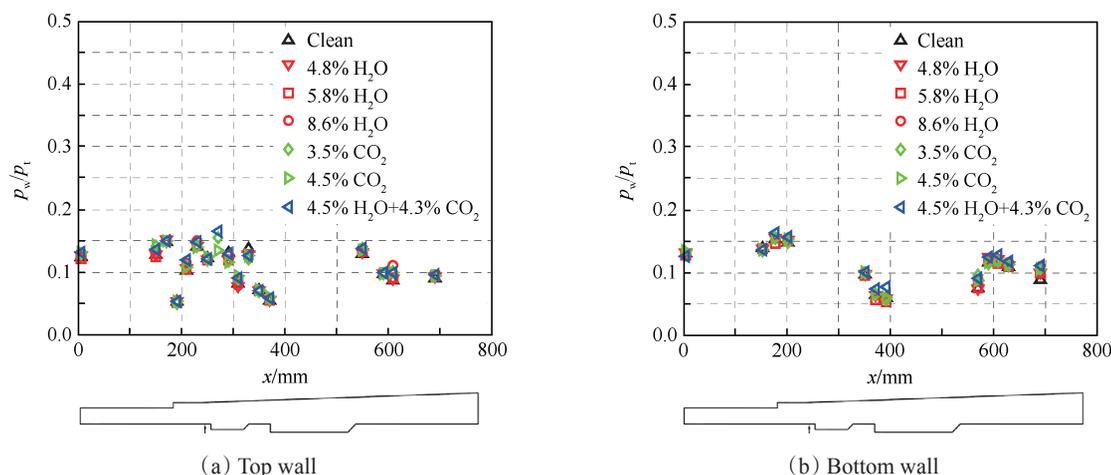


Fig. 5 Combustor wall pressure comparison at fuel-off state

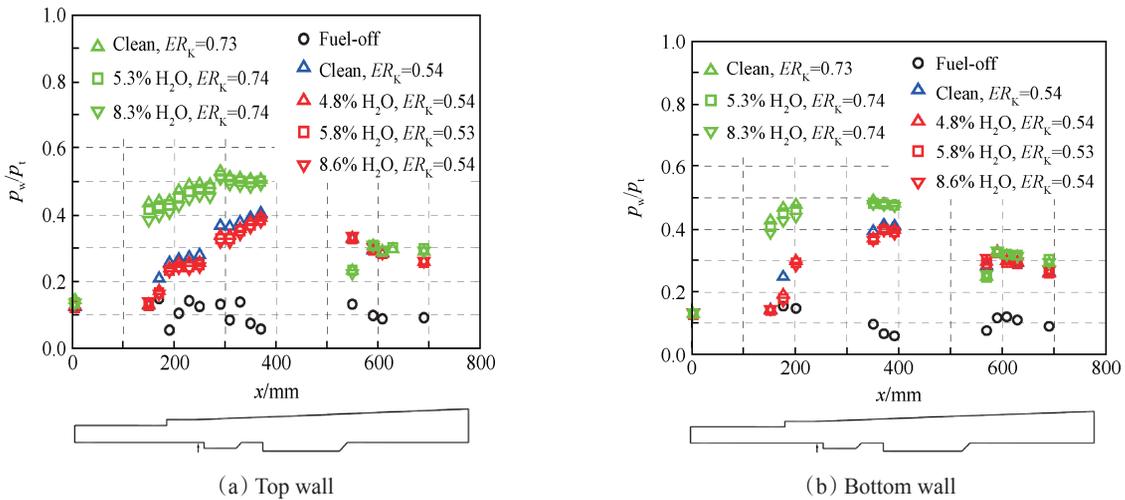


Fig. 6 Combustor wall pressure comparison of experiments with clean and H₂O vitiated airstream

面压力分别下降约2%~5%,3%~6%和4%~7%,而在燃烧室扩张段直至出口,由于污染影响导致的壁面压力分布差别趋于逐渐缩小。同样的现象也出现在煤油当量油气比0.73的试验中,在上壁面压力爬升段($x < 300\text{mm}$),5.3% H₂O污染、8.3% H₂O污染导致燃烧室无量纲壁面压力分别下降约2%~3%,3%~5%。从隔离段进、出口压力还可以看出,在高的当量油气比下,纯净空气、5.3% H₂O污染空气、8.3% H₂O污染空气来流时燃烧诱导压升均已向上游传播进入隔离段内,纯净空气来流时对隔离段进口产生了轻微扰动,而H₂O污染空气来流时未出现扰动,因此,如果直接将污染空气来流下燃烧室供油规律外推至飞行条件,会导致供油量偏大而影响到进气道的起动工作状态甚至可能导致进气道不起动。

图7给出了纯净空气与CO₂污染空气来流下燃烧室稳定燃烧后壁面压力的对比。从燃烧室壁面压力分布来看,CO₂污染的存在导致了燃烧室壁面压力的显著下降,隔离段出口压力下降至与冷流状态相

当,说明下游燃烧区燃烧诱导压升没有向上游传播至隔离段出口处。随着CO₂污染含量的增加,燃烧室壁面压力也随之下降,在上壁面压力爬升段($x < 300\text{mm}$),如不考虑其中大约0.03的当量油气比差别,3.5% CO₂污染、4.5% CO₂污染导致燃烧室无量纲壁面压力分别下降约5%~9%,6%~10%,而在燃烧室扩张段直至出口,这种壁面压力分布差别趋于逐渐缩小。这说明CO₂污染对煤油燃料超声速燃烧具有一定的抑制作用,表现为燃烧室稳定燃烧后壁面压力降低,从热力学角度分析有一部分原因是CO₂组分的热力学效应显著,在温度600K以上CO₂组分的热容要比N₂的高,而且燃烧状态下燃烧室气流温度变化剧烈,在假设相同释热量前提下燃烧室气流温升要低一些,从而引起的压升要小。

图8所示为纯净空气与H₂O/CO₂污染空气来流下燃烧室稳定燃烧后壁面压力对比,图中还加入了4.8% H₂O污染和4.5% CO₂污染的壁面压力数据。从图中可以看出,H₂O,CO₂及H₂O+CO₂污染均导致燃烧

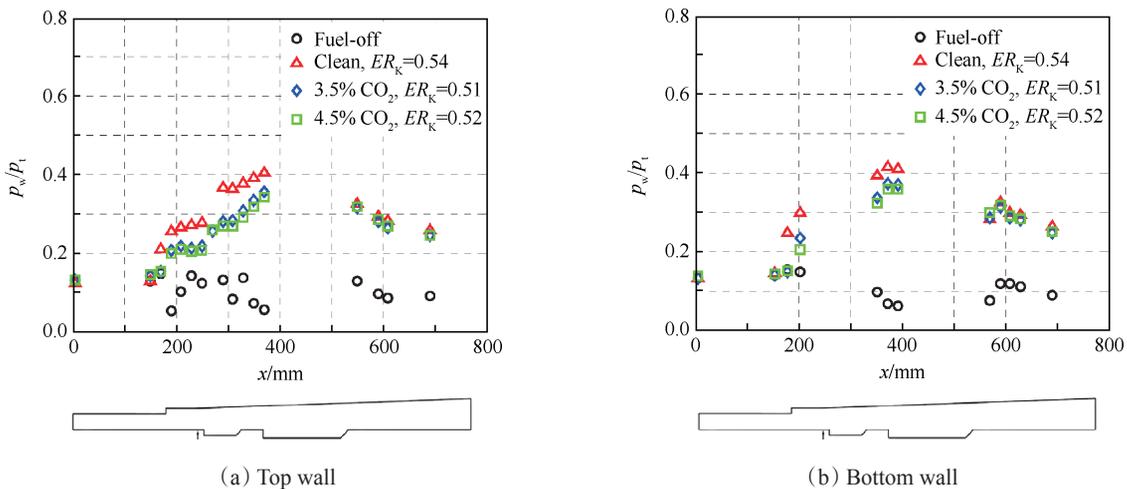


Fig. 7 Combustor wall pressure comparison of experiments with clean and CO₂ vitiated airstream

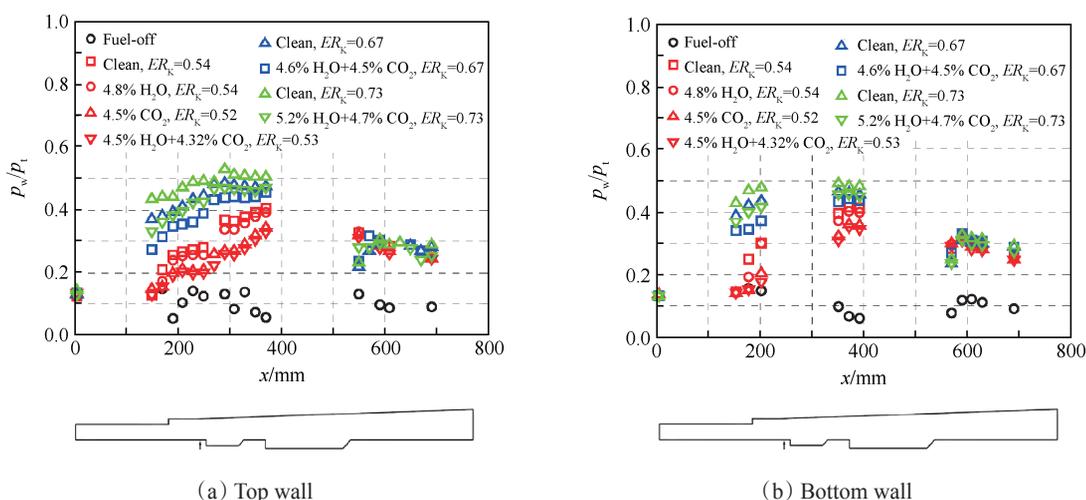


Fig. 8 Combustor wall pressure comparison of experiments with clean and vitiated airstream

室壁面压力不同程度的下降。在有 H₂O+CO₂污染的气流中,当量油气比 0.73 的煤油燃烧的壁面压力竟然低于纯净空气中当量油气比 0.67 的煤油燃烧壁面压力。煤油当量油气比 0.53 的试验中,在上壁面压力爬升段 ($x < 300\text{mm}$), 4.8% H₂O 污染、4.5% CO₂ 污染导致燃烧室无量纲壁面压力分别下降约 2% ~ 5%, 6% ~ 10%, 4.3% CO₂+4.5% H₂O 污染则导致大约 8% ~ 12% 的下降。与 H₂O 污染影响相比, CO₂ 污染对燃烧室燃烧诱导压升的抑制作用更为显著。因为在相同摩尔含量的前提下, CO₂ 质量分数要远高于 H₂O 的质量分数(以 4.5% 摩尔含量为例, H₂O, CO₂ 质量分数分别为 2.5%, 6.0%, 相差 2 倍以上), 虽说 H₂O 组分的质量热容要高于 CO₂ 的, 但总体上 CO₂ 组分的热力学效应要大于 H₂O 组分的影响, 在相同释热量前提下燃烧室升温要低一些, 从而引起的压升相对要小。另外从化学动力学角度来看, CO₂ 组分往往表现惰性, 而 H₂O 组分通常存在一定的三体碰撞效应从而促进化学反应进程。因此同样的摩尔含量, CO₂ 污染比 H₂O 污染表现出更为严重的影响。

3.4 污染组分对燃烧室工作模式的影响

在双模态超燃冲压发动机中, 燃烧室的工作模式与燃烧室的释热与压升水平紧密相关。从图 8 可以看到, 在纯净空气来流的情况下, 随着发动机燃油供给量即当量油气比的升高, 燃烧室的壁面压力逐渐升高, 燃烧诱导压升的扰动也逐渐向上游传播, 当来流空气中存在污染组分的时候, 燃烧室压力水平下降, 燃烧诱导压升的扰动向下游移动。从压力图可以看到, 污染空气来流中煤油当量油气比 0.73 时, 燃烧室壁面压力水平竟然比纯净空气来流中较低的当量油气比 0.67 时低; 而煤油当量油气比 0.53 时, H₂O+CO₂ 污染使得燃烧诱导压升导致的激波串完全从隔离段

中移出。这说明, 污染组分的存在改变了燃烧室的压升水平, 会导致燃烧室模式转换点发生变化, 在较高的污染水平下, 燃烧室的工作模式将会从相同油气比纯净空气来流下的亚燃模式转换为超燃模式。

4 结论

通过本文的研究, 得到的结论如下:

(1) 从煤油点火性能来看, 在本文试验条件下, H₂O 污染对煤油燃料超声速燃烧室点火具有一定的抑制作用, 当 H₂O 污染含量达到 11% 以上时不能实现可靠点火。

(2) 从火焰稳定角度来看, H₂O 污染、CO₂ 污染以及 H₂O+CO₂ 污染的存在均会降低燃烧室的火焰稳定性, 相对于纯净空气来流, 污染空气来流中的燃烧室火焰稳定性能较低; 在本文试验条件下, CO₂ 污染对火焰稳定性的影响比相同含量 H₂O 污染更为显著, 6.2% CO₂ 污染空气对火焰稳定性的影响与含 H₂O 且污染物总含量超过 11% 的污染空气相当, 均导致火焰不稳定。

(3) 对于燃烧室无反应流动, 纯净空气来流和各种 H₂O/CO₂ 污染空气来流时燃烧室壁面压力在一定范围内基本重合, 难以分辨出明显规律性的污染影响趋势, 仅局部存在一定的差异。

(4) H₂O, CO₂ 及 H₂O+CO₂ 污染均对煤油燃料超声速燃烧具有抑制作用, 表现为稳定燃烧后燃烧室壁面压力低于纯净空气状态, 其下降程度随污染水平升高而增大, 最高达 12%; 在本文试验条件下, CO₂ 污染对煤油燃料超声速燃烧的抑制作用比相同含量 H₂O 污染更为显著, 表现为壁面压力下降程度更大。

(5) 污染组分的存在会导致燃烧室模式转换点发生变化, 在较高的污染水平下, 燃烧室的工作模式

将会从相同油气比纯净空气来流下的亚燃模态转换为超燃模态。

参考文献:

- [1] Lu F K, Marren D E. Advanced Hypersonic Test Facilities[M]. USA: AIAA Inc, 2002.
- [2] Pellett G L, Bruno C, Chinitz W. Review of Air Viti-ation Effects on Scramjet Ignition and Flameholding Com-bustion Processes[R]. AIAA 2002-3880.
- [3] Mitani T. Ignition Problems in Scramjet Testing [J]. *Combustion and Flame*, 1995, 101(3): 347-359.
- [4] Jachimowski C J, Houghton W M. Effect of Carbon Di-oxide and Water Vapor on the Induction Period of the Hydrogen- Oxygen Reaction [R]. NASA TND- 4685, 1968.
- [5] Pellett G L, Jentzen M E, Wilson L G, et al. Effects of Water- Contaminated Air on Blowoff Limits of Opposed Jet Hydrogen-Air Diffusion Flames[R]. AIAA 88-3295.
- [6] Kuehl D K. Effects of Water on the Burning Velocity of Hydrogen- Air Flames [J]. *ARS Journal*, 1962, 32: 1724-1726.
- [7] Rasmussen C C, Driscoll J F, Hsu K Y, et al. Stability Limits of Cavity- Stabilized Flames in Supersonic Flow [J]. *Proceedings of the Combustion Institue*, 2005, 30: 2825-2833.
- [8] 梁金虎, 胡弘浩, 王 苏, 等. 空气污染组分 H₂O 和 CO₂对乙烯点火特性的影响[J]. 推进技术, 2014, 35 (2): 220- 226. (LIANG Jin- hu, HU Hong- Hao, WANG Su, et al. Effects of H₂O and CO₂ in Vitiated Air on Ignition Characteristic of Ethylene [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(2): 220-226.)
- [9] Chinitz W, Erdos J I. Test Facility Chemistry Effects on Hydrocarbon Flames and Detonations [R]. AIAA 95- 2467.
- [10] Edelman R B, Spadaccini L J. Theoretical Effects of Vi- tiated Air Contamination on Ground Testing of Hyperson- ic Airbreathing Engines [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1969, 6(12): 1442-1447.
- [11] Srinivasan S, Erickson W D. Influence of Test- Gas Viti- ation on Mixing and Combustion at Mach 7 Flight Condi- tions[R]. AIAA 94-2816.
- [12] Srinivasan S, Erickson W D. Interpretation of Viti- ation Effects on Testing at Mach 7 Flight Conditions [R]. AIAA 95-2719.
- [13] 郭帅帆, 宋文艳, 李建平, 等. 燃烧加热污染空气对超燃冲压发动机性能影响研究[J]. 推进技术, 2013, 34(4): 493-498. (GUO Shuai- fan, SONG Wen- yan, LI Jian- ping, et al. Numerical Investigation of Effects of Viti- ation Air on Scramjet Performance [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(4): 493-498.)
- [14] Lai H, Thomas S. Numerical Study of Contaminant Ef- fects on Combustion of Hydrogen, Ethane and Methane in Air[R]. AIAA 95-6097.
- [15] Pellett G L, Northam G B, Wilson L G. Strain- Induced Extinction of Hydrogen- Air Counterflow Diffusion Flames: Effects of Steam, CO₂, N₂ and O₂ Additives to Air[R]. AIAA 92-0877.
- [16] Guerra R, Pellett G L, Wilson L G, et al. Opposed Jet Burner Studies of Effects of CO, CO₂ and N₂ Air Contami- nants on Hydrogen- Air [R]. AIAA 87-1960.
- [17] 李建平, 宋文艳, 罗飞腾, 等. H₂O/CO₂污染对煤油燃 料超声速燃烧影响数值研究[J]. 推进技术, 2013, 34 (4): 562-571. (LI Jian- ping, SONG Wen- yan, LUO Fei- teng, et al. Numerical Investigation of H₂O/CO₂ Viti- ation Effects on Kerosene- Fueled Supersonic Combustion [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34 (4): 562-571.)
- [18] Mitani T, Hiraiwa T, Sato S, et al. Comparison of Sc- ramjet Engine Performance in Mach 6 Vitiated and Stor- age- Heated Air [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1997, 13(5): 635-642.
- [19] Hiraiwa T, Sato S, Tomioka S, et al. Testing of a Sc- ramjet Engine Model in Mach 6 Vitiated Air Flow [R]. AIAA 97-0292.
- [20] Tomioka Sadatake, Hiraiwa Tetsuo, Kobayashi Kan, et al. Viti- ation Effects on Scramjet Engine Performance in Mach 6 Flight Conditions [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23(4): 789-796.
- [21] McDaniel J C, Krauss R H, Whitehurst W B, et al. Test Gas Viti- ation Effects in a Dual- Mode Combustor [R]. AIAA 2003-6960.
- [22] Goyne C P, McDaniel J C, Krauss R H, et al. Test Gas Viti- ation Effects in a Dual- Mode Scramjet Combustor [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23 (3): 559-565.
- [23] Rockwell R D, Goyne C P, Haw W, et al. Experimen- tal Study of Test Medium Viti- ation Effects on Dual- Mode Scramjet Mode Transition [R]. AIAA 2010-1126.
- [24] Noda J, Tomioka S, Izumikawa M, et al. Estimation of Enthalpy Effects in Direct- Connect Dual- Mode Combustor [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2011, 6(2): 289-296.
- [25] 宋文艳, 王 颢, 陈 亮, 等. 纯净空气来流下的超 声速燃烧实验装置及其初步实验结果[J]. 实验流体 力学, 2007, 21(1): 1-6.
- [26] 罗飞腾, 宋文艳, 刘 昊. 污染空气对氢燃料超声速 燃烧室性能的影响 [J]. 推进技术, 2010, 31(4): 401-405. (LUO Fei- teng, SONG Wen- yan, LIU Hao. Experimental Investigation for Vitiated Air Effects on Hydrogen- Fueled Supersonic Combustor Performance [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2010, 31(4): 401-405.)
- [27] 刘 昊, 宋文艳, 罗飞腾. 污染空气对乙烯燃料超声 速燃烧影响的试验 [J]. 推进技术, 2011, 32(1): 70- 75. (LIU Hao, SONG Wen- yan, LUO Fei- teng. Ex- periments on Vitiated Air Effects of Ethylene- Fueled Su- personic Combustion [J]. *Journal of Propulsion Technol- ogy*, 2011, 32(1): 70-75.)

(编辑: 史亚红)