

文章编号:1001-2486(2011)04-0034-04

## N<sub>2</sub>O/C<sub>7</sub>H<sub>8</sub> 单喷嘴燃气发生器试验研究\*

翟小飞,周进,赖林

(国防科技大学 航天与材料工程学院,湖南长沙 410073)

**摘要:**以基于 N<sub>2</sub>O/C<sub>7</sub>H<sub>8</sub> 的燃烧驱动混合型气动 CO<sub>2</sub> 激光器点火试验为研究背景,设计了液态 N<sub>2</sub>O 供应系统及 N<sub>2</sub>O/C<sub>7</sub>H<sub>8</sub> 单喷嘴燃气发生器。对液态 N<sub>2</sub>O 供应系统、N<sub>2</sub>O/C<sub>7</sub>H<sub>8</sub> 的点火及燃烧性能进行了研究。试验结果表明:设计的 N<sub>2</sub>O 供应系统能够实现液态 N<sub>2</sub>O 的稳定供应;在设定的时序下,两个设计工况(余氧系数分别为 0.3 和 0.4)均能顺利点火,燃烧室压力平稳;随着余氧系数的增加,燃烧效率明显提高。

**关键词:**液态 N<sub>2</sub>O 供应系统;N<sub>2</sub>O/C<sub>7</sub>H<sub>8</sub> 单喷嘴燃气发生器;燃烧效率

中图分类号:V434.22 文献标识码:A

## Experimental Study of N<sub>2</sub>O/C<sub>7</sub>H<sub>8</sub> Mono-injector Gas Generator

ZHAI Xiao-fei, ZHOU Jin, LAI Lin

(College of Aerospace and Materials Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In order to carry out ignition experiment on combustion-driven mixing gasdynamic CO<sub>2</sub> laser based on N<sub>2</sub>O/C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>, a liquid N<sub>2</sub>O supply system and a N<sub>2</sub>O/C<sub>7</sub>H<sub>8</sub> mono-injector gas generator were designed. The liquid N<sub>2</sub>O supply system, ignition and combustion performances of N<sub>2</sub>O/C<sub>7</sub>H<sub>8</sub> were studied. Experimental results indicate that N<sub>2</sub>O can be supplied in liquid state by the designed liquid N<sub>2</sub>O supply system; ignition can be realized under two operating modes(excess oxidizer coefficient is 0.3 or 0.4) in designed time sequence and the combustor pressure is smooth. In addition, with the increase of excess oxidizer coefficient, combustion efficiency improves obviously.

**Key words:** liquid N<sub>2</sub>O supply system; N<sub>2</sub>O/C<sub>7</sub>H<sub>8</sub> mono-injector gas generator; combustion efficiency

N<sub>2</sub>O(又称笑气)是一种无毒的氧化剂。高温条件下,N<sub>2</sub>O可以分解成氮气和氧气,并释放出热量。常温下,N<sub>2</sub>O具有较高的饱和蒸汽压(25℃时,其饱和蒸汽压为5.65MPa),这使得N<sub>2</sub>O具有自增压能力并且能够以液态形式贮存而以气态形式供应。基于这些优势,N<sub>2</sub>O在小推力火箭发动机领域得到了广泛的重视和研究<sup>[1-4]</sup>(N<sub>2</sub>O既可以作为单组元推进剂,又可以作为双组元发动机中的氧化剂)。

在燃烧驱动混合型气动CO<sub>2</sub>激光器(Combustion-Driven Mixing Gasdynamic CO<sub>2</sub> Laser)试验研究中,为了获得高温氮气,通常使用N<sub>2</sub>O作为氧化剂。在燃料的选择上,分别有C<sub>4</sub>N<sub>2</sub><sup>[5]</sup>、C<sub>6</sub>H<sub>6</sub><sup>[6]</sup>、CO+H<sub>2</sub><sup>[7]</sup>等。C<sub>4</sub>N<sub>2</sub>具有很高的热值,并且自身含氮,因此最适合做燃烧驱动混合型气动CO<sub>2</sub>激光器的燃料。然而,C<sub>4</sub>N<sub>2</sub>和C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>均具有很强的毒性,因而给试验研究带来了危险;与此同

时,C<sub>4</sub>N<sub>2</sub>不易制备也成为使用的一大障碍。鉴于此,本文采用与C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>碳氢比相当而毒性较小的C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>作为燃烧驱动混合型气动CO<sub>2</sub>激光器的燃料。

本文设计了液态N<sub>2</sub>O供应系统及N<sub>2</sub>O/C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>单喷嘴燃气发生器,对液态N<sub>2</sub>O供应系统、N<sub>2</sub>O/C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>的点火及燃烧性能进行了研究,从而为基于N<sub>2</sub>O/C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>的燃烧驱动混合型气动CO<sub>2</sub>激光器试验研究打下基础。

### 1 试验系统

图1为本文设计的液态N<sub>2</sub>O供应系统。图中有两个储罐,左侧倒置的(倒置的目的是让液体N<sub>2</sub>O在下,气体N<sub>2</sub>O在上)为购买的瓶装N<sub>2</sub>O,右侧为被加注的N<sub>2</sub>O储罐。加注时,为了充分利用液位差产生的力,购买的瓶装N<sub>2</sub>O应尽量置于高处。采用氮气对N<sub>2</sub>O储罐进行增压。为了减少

\* 收稿日期:2010-02-17

作者简介:翟小飞(1982—),男,博士生。

液态 N<sub>2</sub>O 的汽化,在 N<sub>2</sub>O 储罐外层、加注管路外层及 N<sub>2</sub>O 储罐下游管路外层包覆了隔热棉(图中用虚线表示)。N<sub>2</sub>O 储罐中的液位采用差压传感

器测量。在 N<sub>2</sub>O 储罐、流量计前、文氏管前及喷嘴前(喷嘴前的容腔)四个位置处分别设置了压力传感器和温度传感器。

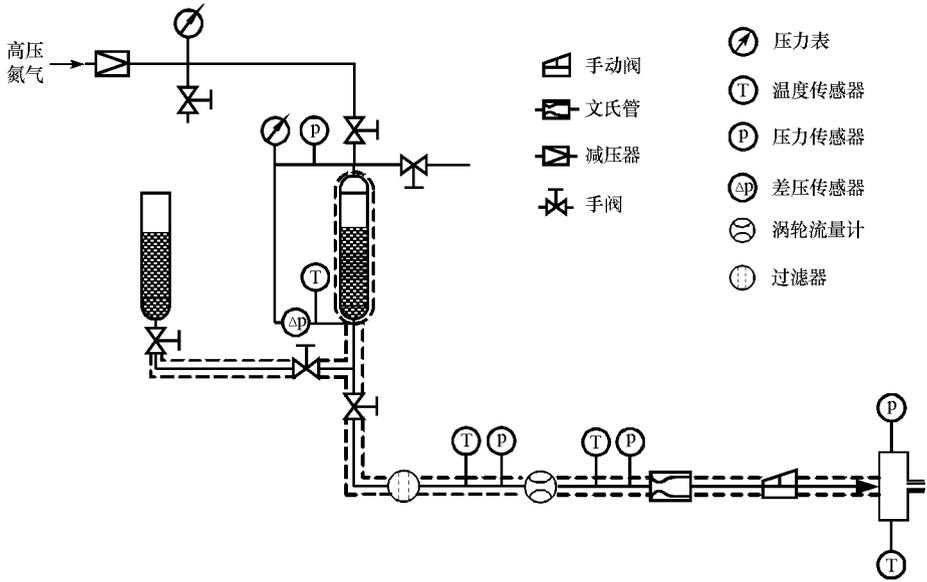


图1 液态 N<sub>2</sub>O 供应系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of liquid N<sub>2</sub>O supply system

图2为本文设计的 N<sub>2</sub>O/C<sub>7</sub>H<sub>8</sub> 单喷嘴燃气发生器。采用同轴式喷嘴,中心为 C<sub>7</sub>H<sub>8</sub> 孔,孔直径为 0.74mm;周围环缝喷 N<sub>2</sub>O,环缝外径 7mm,内径 6.33mm。喷嘴缩进 2mm,以增强燃料和氧化剂的混合。燃烧室内径 40mm,外径 80mm(壁厚大的原因是增强热防护)。喷嘴喉部直径为 14.4mm。采用高能火花塞进行点火。在燃烧室上设置了三个点火位置,本文在试验时选取距离喷嘴出口最远的点火位置(到喷嘴出口的距离为 140mm)进行点火;该位置处燃料和氧化剂的混合最好,有利于成功点火。

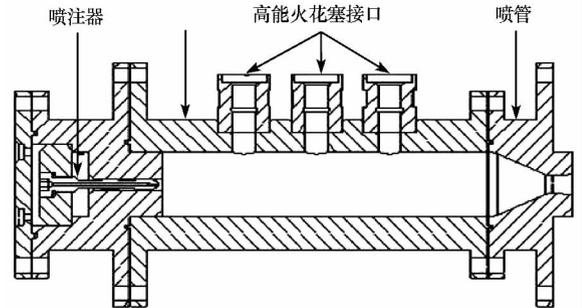


图2 N<sub>2</sub>O/C<sub>7</sub>H<sub>8</sub> 单喷嘴燃气发生器

Fig.2 N<sub>2</sub>O/C<sub>7</sub>H<sub>8</sub> mono-injector gas generator

安装图2的喷注器部分,而不接燃烧室及喷嘴部分。文氏管喉部直径为 0.83mm。N<sub>2</sub>O 储罐增压压力为 6.8MPa。1s 时,N<sub>2</sub>O 气动阀打开;16s 时,N<sub>2</sub>O 气动阀关闭。试验结果如图 3~9 所示。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 液态 N<sub>2</sub>O 供应系统试验

在进行液态 N<sub>2</sub>O 供应系统试验时,系统中只

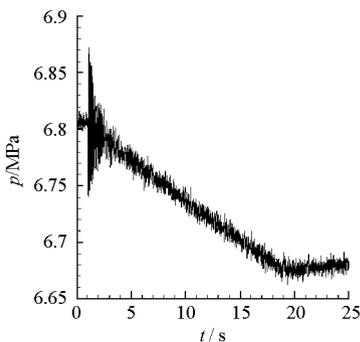


图3 流量计前压力

Fig.3 Pressure before flowmeter

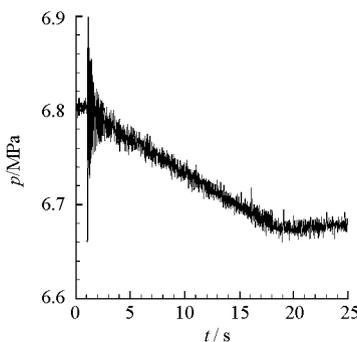


图4 文氏管前压力

Fig.4 Pressure before venturi

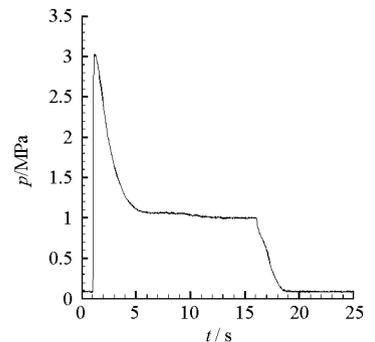


图5 N<sub>2</sub>O 喷前压力

Fig.5 Pressure before N<sub>2</sub>O injector

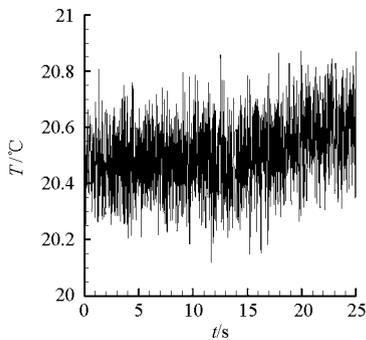


图 6 流量计前温度

Fig.6 Temperature before flowmeter

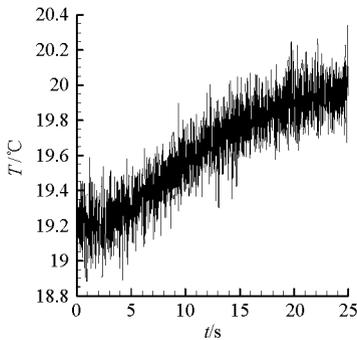


图 7 文氏管前温度

Fig.7 Temperature before venturi

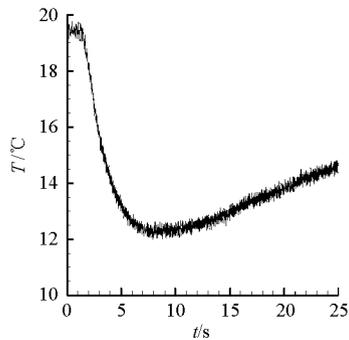


图 8 N<sub>2</sub>O 喷前温度

Fig.8 Temperature before N<sub>2</sub>O injector

由图 3、4、6、7 可以看出,在整个 N<sub>2</sub>O 喷射期,流量计前压力和文氏管前压力均高于相应位置处 N<sub>2</sub>O 的饱和蒸汽压(19°C、20°C、21°C 时 N<sub>2</sub>O 的饱和蒸汽压分别为 4.94MPa、5.05MPa、5.17MPa),由此可以判定这两个位置处的 N<sub>2</sub>O 均为液态。由图 8 可以看出,由于液态 N<sub>2</sub>O 在喷前汽化吸热,导致喷前温度不断降低;8s 之后,喷前温度又逐渐回升,这是因为此时喷前温度较低,已经没有足够的热量支持所有进入喷前的液态 N<sub>2</sub>O 气化。图 9 为涡轮流量计测得的结果,可以看出,在 2~16s,流量值变化不大,从而表明该系统能够实现稳定的流量供应。

在进行液态 N<sub>2</sub>O 供应系统试验时,对 N<sub>2</sub>O 的喷射过程进行了拍摄,如图 10 所示。气动阀开启之前,文氏管与气动阀之间管路(管道内径为 10mm,长度约 1.1m)中积存的液态 N<sub>2</sub>O 较多,因而,当气动阀开启后,有的 N<sub>2</sub>O 来不及气化,便以

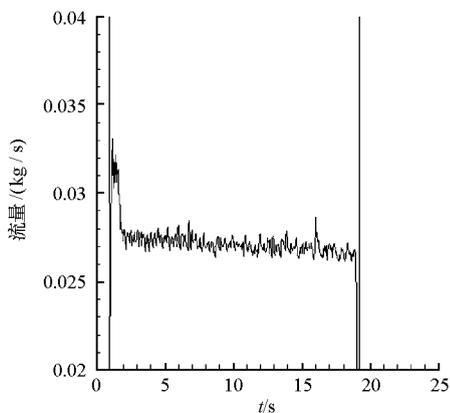


图 9 质量流量

Fig.9 Mass flow rate

液态形式喷出(如图 10 中 1.2s 所示)。当这部分积存的 N<sub>2</sub>O 喷射完之后,由于通过文氏管的 N<sub>2</sub>O 流量很小(27g/s——流量计测得的结果),N<sub>2</sub>O 便迅速气化,以气态形式喷出(4~8s 时)。

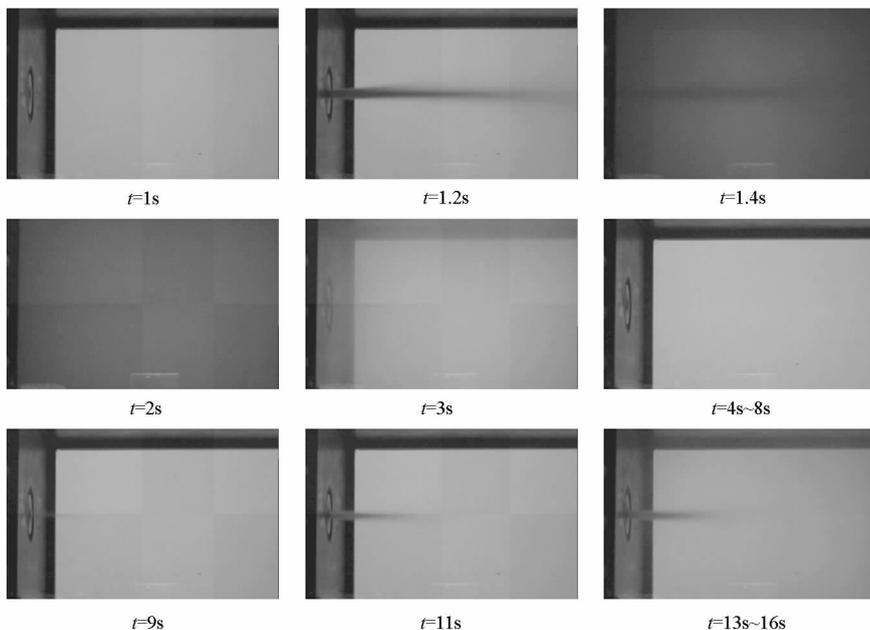


图 10 N<sub>2</sub>O 喷射图像

Fig.10 Images of N<sub>2</sub>O ejecting

9~16s 时,有液态 N<sub>2</sub>O 喷出。这是因为在 9s 之前,液态 N<sub>2</sub>O 吸热气化导致管路及喷前温度不断

降低,加之管路外层包覆了隔热棉,因而 9s 之后,已经没有足够的热量来支持所有液态 N<sub>2</sub>O 气化。

### 2.2 N<sub>2</sub>O/C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>单喷嘴燃气发生器点火试验

在进行点火试验时,文氏管的喉部直径为1.1mm(文氏管喉部直径越大,相同压力下通过文氏管的N<sub>2</sub>O流量就越大)。由于富氧工况时需要的N<sub>2</sub>O流量较大,因而本文只对两种富燃工况(余氧系数分别为0.3和0.4)进行了点火试验研究。试验结果如图11~12所示。

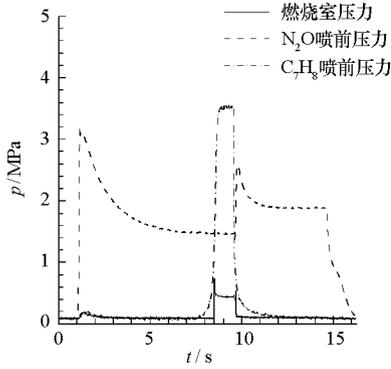


图11 余氧系数 = 0.3

Fig.11 Excess oxidizer coefficient = 0.3

高能火花塞在8.5s进行点火。选择这一时刻点火的原因是:此时N<sub>2</sub>O的喷前压力趋于稳定,

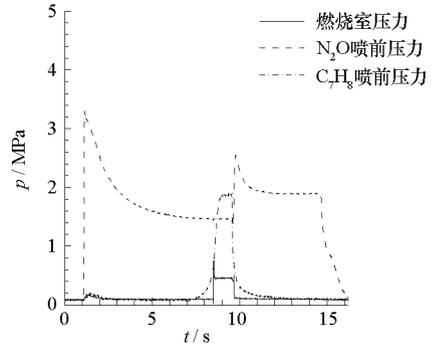


图12 余氧系数 = 0.4

Fig.12 Excess oxidizer coefficient = 0.4

从而说明N<sub>2</sub>O的流动状态趋于稳定;与此同时,C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>喷前压力处于上升段,即没有达到满流,燃烧室中没有液体C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>积存,这时点火有利于防止爆轰的发生。高能火花塞工作时间从8.5s持续到9.0s。9.0~9.5s时,燃烧过程能够自持稳定。两个工况下,燃烧室压力值均比较平稳。9.5s时,N<sub>2</sub>O气动阀和C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>气动阀同时关闭;9.6s时,N<sub>2</sub>O路吹除阀打开(使用氮气吹除)。

两个工况的工作参数和试验结果如表1所示。

表1 点火试验工作参数和试验结果

Tab.1 Running parameters and experimental results of ignition experiments

工况序号	余氧系数	N <sub>2</sub> O流量 (g/s)	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> 流量 (g/s)	燃烧室压力 (MPa)	理论燃烧温度 (K)	燃烧效率
1	0.3	46.4	17.9	0.44	2256.2	77.28%
2	0.4	46	13.4	0.455	2567.9	84.28%

燃烧效率采用特征速度燃烧效率,其计算公式为<sup>[8]</sup>:

$$\eta_c = \frac{C_{exp}^*}{C_{th}^*} \quad (1)$$

式中: $\eta_c$ 为燃烧效率, $C_{exp}^*$ 为试验得到的实际特征速度, $C_{th}^*$ 为通过热力计算得到的理论特征速度。

由表1可以看出,随着余氧系数的增加,燃烧效率明显提高。这是因为当余氧系数增加时,燃烧室温度升高,这有利于提高液滴蒸发速率和化学反应速率,从而提高燃烧效率。两个工况下,试验得到的燃烧效率并不是很高,原因有:(1)喷嘴的雾化和混合性能还有待进一步提高;(2)部分N<sub>2</sub>O以液态形式喷入燃烧室,气化时要吸收热量。

### 3 结论与展望

本文设计了液态N<sub>2</sub>O供应系统并进行了相关试验。试验结果表明,该系统能够稳定可靠地实现N<sub>2</sub>O的液态供应。设计了基于同轴式喷嘴的N<sub>2</sub>O/C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>单喷嘴燃气发生器。对余氧系数0.3和0.4两个工况进行了点火试验研究。结果表明:在设定的时序下,两个工况均能实现稳定的点火,燃烧室压力平稳;随着余氧系数的增加,燃烧

效率明显提高。

今后可以在以下几个方面展开进一步研究:(1)对富氧工况进行点火试验研究。(2)提高燃烧室压力。(3)改进喷嘴结构,以提高喷嘴的雾化和混合性能,从而提高燃烧效率。

### 参考文献:

- [1] Tokudome S, Tsuyoshi Yagishita, Hiroto Habu, et al. Experimental Study of an N<sub>2</sub>O/Ethanol Propulsion System[R]. AIAA 2007 - 5464, 2007.
- [2] 刘盛田,胡兴伟,巴俊州. N<sub>2</sub>O/C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH单喷嘴燃气发生器研究[J]. 舰船防化, 2007, (2): 30 - 34.
- [3] 刘盛田,柳琪,高磊,等. N<sub>2</sub>O/H<sub>2</sub>富燃火炬式点火器研究[J]. 舰船防化, 2007, (1): 30 - 33.
- [4] 贾月,张浩,李亚. 一氧化二氮无毒推进剂催化分解研究[J]. 火箭推进, 2008, 34(3): 58 - 62.
- [5] Lavrov A V, Ikonnikov V K, Yegoyants P A, et al. Experimental and Theoretical Investigation of the Noncomplete Combustion-Driven Downstream-Mixing CO<sub>2</sub> - GDL[R]. AIAA 96 - 2342, 1996.
- [6] Yokozawa T, Yamaguchi S, Kanazawa H, et al. Gain Characteristics of an After Mixing Gasdynamic Laser Utilizing Low Stoichiometric (Fuel Lean) Combustion of Liquid C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> and Liquid N<sub>2</sub>O[R]. AIAA 89 - 1896, 1989.
- [7] Hashimoto T, Nakano S, Hachijin M, et al. Characteristics of a Downstream-mixing CO<sub>2</sub> Gasdynamic Laser Caused by Behavior of Two Supersonic Flows in a Laser Cavity [J]. Applied Optics, 1993, 32(30): 5936 - 5943.
- [8] 钟战. 燃气发生器点火与燃烧性能研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2008: 27 - 28.