

文章编号: 1000-8055(2005) 02-0323-05

气动谐振加热基础试验

俞南嘉, 张国舟, 宋雅娜
(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

摘要: 为了进一步掌握气动谐振加热的规律, 为气动谐振点火器的研制提供试验基础, 在原有气动谐振加热初步试验研究的基础上对谐振气体流量变化, 不同的排气孔形式以及不同内径的谐振腔对谐振加热性能的影响进行了研究。通过大量的气动谐振加热基础试验, 得到了谐振加热性能随不同参数变化的规律, 为气动谐振点火器结构参数的选择提供了试验基础。

关键词: 航空、航天推进系统; 谐振管; 气动加热; 点火; 液体推进剂火箭发动机
中图分类号: V434 文献标识码: A

Experimental Investigation of Gas-Dynamic Resonance Heating

YU Nan-jia, ZHANG Guo-zhou, SONG Ya-na

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100083, China)

Abstract: In order to learn more gas-dynamic resonance heating rules and to provide experimental foundation for investigriments based upon initial tests were carried out. Factors investigated, which affect resonance heating characteristics, include variation of flow rate, different structures of exhaust hole and different diameters of connect cavity. Through lots of experiments with different design parameters, some gas-dynamic resonance heating rules were found, and optimum structure design parameters were obtained for gas-dynamic resonance igniter design.

Key words: aerospace propulsion system; resonance tube; aerodynamic heating; ignition; liquid rocket engines

气动谐振点火是基于气动谐振加热效应点燃非自燃推进剂的一种简单可靠并且响应快速的新型非电钝感点火方式。在进行气动谐振点火器的结构设计之前需要对其进行气动谐振加热基础试验以确定出最佳的结构参数和气动参数的匹配。因此谐振加热基础试验研究是气动谐振点火器研究的前提。深入了解气动谐振加热的基本规律, 可以减少点火器基础试验的工作量, 从而缩短点火

器的研制周期, 本文的工作正是基于此目的进行的。

图1所示的是气动谐振加热试验件的结构原理简图。试验件主要包括喷嘴, 谐振管和连接腔体3个部分。根据理论计算和试验研究的结果发现虽然不同气体的谐振加热速率和最高谐振加热温度不同, 但不同气体间有相似的谐振加热规律^[1, 2]。因此在进行气动谐振加热规律的机理性研究中采用

收稿日期: 2004-03-13; 修订日期: 2004-05-21

基金项目: 国家高技术航天863项目(863-2-3-4-10(4), 863-2-3-4-7); 航天科技创新基金2000年资助项目

作者简介: 俞南嘉(1974-), 男, 浙江镇海人, 北京航空航天大学航空科学与工程学院博士后, 主要从事液体火箭发动机及新型点

了空气作为谐振气体。



图1 气动谐振加热试验件结构图

Fig. 1 Structure of gas-dynamic resonance heating igniter

考虑到以前的气动谐振加热基础试验大部分是针对具体的气动谐振点火器,找到最佳的气动参数与结构参数的匹配^[3,4]。虽然也进行了一些初步的试验研究,得到了一些有价值的谐振加热性能随试验参数的变化规律^[5~7],但由于气动谐振现象所涉及到的影响因素比较多,而以前的研究成果还不能满足工程设计的要求,因此本文在此基础上进一步研究并总结出气动谐振加热的基本规律。本文的主要研究内容为改变影响气动谐振加热性能的谐振气体的流量、不同的排气孔形式及喷嘴与谐振管之间的连接腔的结构,通过试验进一步加深对气动谐振加热基本规律的认识,并为气动谐振点火器的设计提供试验基础。

1 流量变化对谐振加热性能的影响

本项试验研究是在谐振管固定的情况下,通过改变谐振气体的流量,找出谐振加热性能与谐

振气体流量之间的关系,同时找出气体流量与谐振加热性能的最佳匹配。通过改变喷嘴前的压强、改变喷嘴的尺寸等方法改变谐振气体的流量。

1.1 喷嘴前压强变化的影响

为了仅考虑喷嘴前压强变化的影响,在试验中其他影响因素均取为定值:喷嘴直径/谐振管入口直径为0.64,喷嘴与谐振管的间距/喷嘴直径(G/D)为1.78,排气面积/喷嘴面积为6,所得试验结果如表1。

在表1中计算流量为根据流量公式计算出的流量值,其中流量系数根据经验取为0.9。通过试验可以看出,随着喷嘴前压强的升高,谐振加热温度也随之升高;但从表中可以看出,随着压强的提高,谐振加热温升的差值逐渐减小。从温升与流量的比值可以看出,除喷嘴前压强在0.5~0.6 MPa时随喷嘴前压强提高温升与流量的比值增加以外,在其它压强下,随着喷嘴前压强的提高,温升与流量的比值逐渐减小,也就是说随着流量的增加,其对谐振加热温度的贡献逐渐减小。

当选择喷嘴直径/谐振管入口直径为0.71,喷嘴与谐振管间距/喷嘴直径为1.6,排气面积/喷嘴面积为6(考虑到与前面试验结果进行比较,因而排气面积与喷嘴面积的比值取为相同),所得试验结果如表2。

从表2中可以看出,当 $G/D=1.6$ 时,其规律与 $G/D=1.78$ 时相同,均是随着喷嘴前压强的提高,谐振加热温度升高,但温升与流量的比值逐渐

表1 喷嘴前压强变化试验 ($G/D=1.78$)

Table 1 Experiments result when change inlet pressure ($G/D=1.78$)

喷嘴前压强/MPa	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.6	2.0	2.2
谐振加热温度/K	682	931	1 026	1 075	1 164	1 239	1 309	1 326
计算流量/(g/s)	19.8	23.0	29.6	36.2	42.8	56.0	69.1	75.7
温升/流量	19.6	27.7	24.8	21.6	20.4	16.9	14.7	13.6

表2 喷嘴前压强变化试验 ($G/D=1.6$)

Table 2 Experiments result when change inlet pressure ($G/D=1.6$)

喷嘴前压强/MPa	0.8	1.0	1.2	1.6	2.0	2.2
谐振加热温度/K	1 073	1 127	1 192	1 260	1 325	1 345
计算流量/(g/s)	36.6	44.7	52.8	69.1	85.3	93.5
温升/流量	21.3	18.7	17.0	14.0	12.1	11.3

表3 排气面积相同时不同喷嘴直径下谐振加热温度比较

Table 3 Resonance heating temperature of different injectors with same exhaust area

喷嘴直径/ 谐振管入口直径	计算流量/(g/s)	排气面积/mm ²	谐振加热温度/K	温升/ 流量
0. 64	69. 1	95. 4	1 309	14. 7
0. 71	85. 3	95. 4	1 326	12. 1
0. 79	114. 7	95. 4	301	0. 07

表4 排气面积与喷嘴面积之比基本相同时谐振加热温度比较

Table 4 Resonance heating temperature of different injectors with similar area ratio of exhaust hole/inlet

喷嘴直径/ 谐振管入口直径	计算流量/(g/s)	排气面积/ 喷嘴面积	谐振加热温度/K	温升/ 流量
0. 64	69. 1	4. 74	1 420	16. 3
0. 71	85. 3	4. 86	1 326	12. 1
0. 79	114. 7	4. 96	1 332	9. 06

表5 不同孔径时谐振加热温度(°C)

Table 5 Resonance heating temperature with different diameter of exhaust hole (°C)

排气面积/ 喷嘴面积	G/ D= 1. 88	G/ D= 2. 03	G/ D= 2. 19	G/ D= 2. 34	G/ D= 2. 5
6. 57	690	709	747	544	
7. 03	766	724	758	723	508
7. 75	798	678	649		

降低。

1. 2 喷嘴直径变化的影响

在本项试验中, 主要通过改变喷嘴直径的方式来改变流量。由于在先期的试验中已经确定出了谐振加热性能好的谐振管的结构参数, 因此谐振管保持不变, 喷嘴与谐振管之间的间距保持为定值, 喷嘴前的压强也保持不变。根据以前的试验结果, 选取谐振加热性能好的喷嘴与谐振管的匹配, 试验中喷嘴直径/ 谐振管入口直径分别取为0. 64, 0. 71 和0. 79, 喷嘴与谐振管间距/ 喷嘴直径分别为1. 78, 1. 6 和1. 45, 喷嘴前压强取为2. 0 MPa。在试验中采取了排气面积相同以及排气面积与喷嘴面积之比基本相同两种方式进行比较, 试验结果如表3 和表4。

从表3 和表4 中可以看出, 在排气面积相同以及排气面积与喷嘴面积之比基本相同2 种情况下, 喷嘴直径/ 谐振管入口直径为0. 64 时的温升与流量的比值最高。通过试验比较认为, 在试验的结构参数下, 喷嘴直径/ 谐振管入口直径为0. 64 时具有最好的谐振加热性能, 其所消耗的气体流量最小,

因此在试验的3 种喷嘴中, 谐振加热性能最佳。

1. 3 小 结

通过改变喷嘴进口压强以及改变喷嘴直径两种方式对流量的变化对谐振加热性能的影响进行了比较。通过试验发现, 通过提高喷嘴进口压强的方式增加流量可以有效地提高谐振加热温度, 但随着流量的不断增加, 温升逐渐减小。而通过增大喷嘴的方式增加流量并不能有效地提高谐振加热温度, 通过分析认为, 这主要是受到喷嘴直径与谐振管进口直径之间匹配的影响。

2 不同排气孔形式对谐振加热性能的影响

进行不同排气孔形式对谐振加热性能影响试验的目的是寻找出谐振加热性能随排气孔形式变化而变化的规律, 找出最佳的排气孔的结构形式, 并为点火器的结构设计提供试验基础。

试验中采用的气动谐振试验件的基本尺寸为: 喷嘴直径/ 谐振管入口直径为0. 64, 喷嘴与谐振管

间距/喷嘴直径(G/D)为1.25~2.66,喷嘴入口压强约为1.6 MPa。

排气孔的形状分别为单孔(矩形孔),双孔(矩形孔)和多孔(圆孔)。

2.1 排气孔为单孔

排气孔为单孔形式的试验数据如图2所示。这里分为两种情况,孔宽为4 mm,长度变化范围为12.5~15.5 mm,相应的排气面积 S 的变化范围为50~62 mm²;孔宽为6 mm,长度变化范围为9.6~13 mm,相应的排气面积 S 的变化范围为57.6~78 mm²。试验中排气孔紧贴喷嘴。

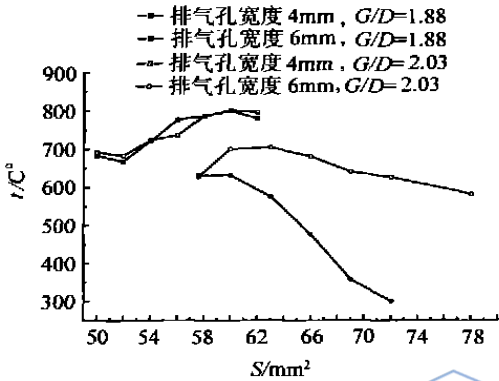


图2 两种排气孔宽度的谐振加热温度对比曲线

Fig. 2 Resonance heating temperature of two exhaust hole's size

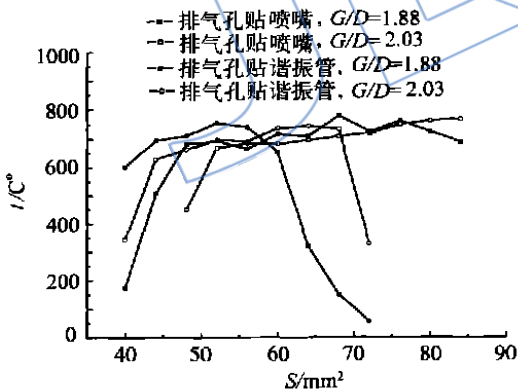


图3 排气孔不同位置的谐振加热温度对比曲线

Fig. 3 Resonance heating temperature when change the position of exhaust hole

2.2 排气孔为双孔

排气孔为双孔时的试验数据如图3,孔宽为4 mm,长度变化范围为5~10.5 mm,相应的排气面积 S 的变化范围为40~84 mm²。这里分为排气孔贴谐振管端和排气孔贴喷嘴端两种情况。

2.3 排气孔为径向多孔

排气孔为径向多孔时的试验数据见表5。

2.4 小 结

(1) 在试验参数范围内,随着排气面积/喷嘴面积比值的增大,在一定的 G/D 的范围内可以得到较好谐振温度。(2) 排气孔贴近谐振管和贴近喷嘴有明显不同的谐振效果。通过比较可以看出,排气孔贴近喷嘴无论从谐振的最高温度,还是排气面积/喷嘴面积的变化范围都具有更好的谐振性能。(3) 不同形式的排气孔具有相似的谐振性能。最高谐振温度、最佳 G/D 值以及最佳排气面积/喷嘴面积值均相差不大。

3 对不同内径尺寸谐振腔的研究

为了将点火器小型化,必须研究较小的谐振腔内径是否会对谐振加热性能产生明显的影响。为此在以前谐振加热试验优化所得几何结构参数的基础上,设计进一步减小谐振腔的内径,并减薄管腔的壁厚,对于几种内径尺寸可行的谐振管腔分别进行试验,对比这几种谐振管内径尺寸下的谐振温度特性的好坏,确定谐振温度随谐振管内径的变化特性,并初步确定一定的内径尺寸下谐振温度随谐振间距和排气孔直径/面积的变化规律,选择一个谐振温度特性相对较好的谐振腔内径尺寸值。

试验中采用的喷嘴直径/谐振管入口直径为0.64,谐振腔的内径/喷嘴直径分别为4.06,4.38和4.69,排气面积/喷嘴面积变化范围为4.5~6.125,喷嘴与谐振管之间的间距/喷嘴直径(G/D)为1.72~2.19,喷嘴前压强为1.6 MPa。

表6 谐振加热试验结果(°C)

Table 6 Experiment results of resonance heating (°C)

排气面积 /喷嘴面积	4.5	4.88	5.28	5.70	6.125
$G/D=1.72$	727	763	789	776	699
$G/D=1.88$	336	599	781	803	741
$G/D=2.03$		291	770	835	750
$G/D=2.19$			695	832	406

3.1 谐振腔内径/喷嘴直径为4.06的谐振腔

对于谐振腔内径/喷嘴直径为4.06的谐振腔,通过试验确定出在不同排气面积/喷嘴面积下,不同的 G/D 值所对应的谐振温度值。由于排气孔的中心位置距谐振端面的距离不同同时对谐振效果好

坏也有影响, 在试验中保持排气孔的中心距谐振管端面的距离为2.5 mm 不变。试验结果如表6 所示。

3. 2 谐振腔内径/喷嘴直径为4.38的谐振腔

对于谐振腔内径/喷嘴直径为4.38 的谐振腔, 试验结果如表 7 所示。

表7 谐振加热试验结果(℃)

Table 7 Experiment results of resonance heating (℃)

排气面积/ 喷嘴面积	4. 88	5. 28	5. 70	6. 125
$G/D= 1. 72$	757	576	744	716
$G/D= 1. 88$	288	614	784	747
$G/D= 2. 03$	68	719	789	789
$G/D= 2. 19$	71	326	772	782

3. 3 谐振腔内径/喷嘴直径为4.69的谐振腔

对于谐振腔内径/喷嘴直径为4.69 的谐振腔, 试验结果如表 8 所示。

表8 谐振加热试验结果(℃)

Table 8 Experiment results of resonance heating (℃)

排气面积/ 喷嘴面积	4. 88	5. 28	5. 70	6. 125
$G/D= 1. 72$	686	764	739	663
$G/D= 1. 88$		724	764	
$G/D= 2. 03$	69	620	741	
$G/D= 2. 19$		140	502	

3. 4 小 结

谐振腔内径/喷嘴直径为4.06 的谐振腔具有最好的谐振加热特性, 当排气面积/喷嘴面积为5.70, 喷嘴与谐振管之间的间距/喷嘴直径为2.03 时具有最高的谐振加热温度, 在3 个试验的谐振腔内径尺寸中, 其为最小, 有利于结构尺寸的小型化。

今后还可以考虑继续缩小谐振腔的尺寸, 但考虑到谐振腔过小, 不利于燃烧的组织, 容易产生偏烧, 因而应综合考虑各种因素后确定出点火器最终的结构。

4 结 论

(1) 通过两种方式改变谐振气体的流量, 对谐振加热特性的影响为: 通过提高喷嘴进口压强的方式增加流量可以有效地提高谐振加热温度, 但随着流量的不断增加, 温升逐渐减小。而通过增大喷嘴

的方式增加流量并不能有效地提高谐振加热温度, 通过分析认为, 这主要是受到喷嘴直径与谐振管进口直径之间匹配的影响。在试验范围内得到的最佳喷嘴直径/ 谐振管入口直径为0.64。

(2) 通过改变排气孔的形式进行的谐振加热特性试验发现, 不同形式的排气孔具有相似的谐振性能, 最高谐振温度、最佳 G/D 以及最佳排气面积/ 喷嘴面积均相差不大, 这为点火器结构设计中对于排气孔形式的安排提供了依据。

(3) 通过对不同谐振腔内径/喷嘴直径的谐振腔进行的谐振加热试验可以看出, 在试验范围内谐振腔内径/喷嘴直径为4.06 时具有最佳的谐振加热特性, 为点火器结构的小型化提供了保证。

参考文献:

[1] 梁国柱, 张振鹏, 张国舟, 等. 气动谐振管加热机理数值研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 25(6): 692~695.
LIANG Guozhu, ZHANG Zhenpeng, ZHANG Guozhou, et al. Numerical Investigation of Gas Dynamic Resonance Tube Heating [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1999, 25(6): 692~695.

[2] 梁国柱, 马彬, 张国舟, 等. 气动谐振管点火技术研究 [J]. 推进技术, 2001, 22(4): 286~289.
LIANG Guozhu, Ma Bin, ZHANG Guozhou, etc. Investigation on Gas Dynamic Resonance Tube Ignition Method [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2001, 22(4): 286~289.

[3] 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 Nanjia, ZHANG Guozhou, LIU Hongjun, etc. Investigation of Helium Resonance Ignitor and Kerosene/ Oxygen Ignitor [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2003, 24(6): 553~556.

[4] 童晓艳, 张国舟, 马彬, 等. 多推力室的气动谐振点火器研究 [J]. 推进技术, 2002, 23(5): 402~405.
TONG Xiaoyan, ZHANG Guozhou, MA Bin, etc. Research on Gas Dynamic Resonance Igniters of Multi-Thruster [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2002, 23(5): 402~405.

[5] 梁国柱, 马彬, 程显辰, 等. 气动谐振管加热效应初步实验 [J]. 推进技术, 2002, 23(1): 52- 56.
LIANG Guozhu, Ma Bin, CHENG Xianchen, etc. Preliminary Experimental Investigation on Gas Dynamic Resonance Tube Heating Effect [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2002, 23(1): 52- 56.

[6] 安联. 气动谐振加热现象及数值研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2002.

[7] 童晓艳. 气动谐振加热机理及液体火箭发动机多室多次点火技术研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2002