

氦气谐振点火器和气氧/煤油火炬点火器研究*

俞南嘉¹, 张国舟¹, 刘红军², 吕奇伟², 何伟锋¹, 马彬¹

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083; 2. 陕西动力机械设计研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 为了实现液体推进剂火箭发动机重复多次可靠启动, 研究了利用气动谐振热效应形成的高温高能点火源进行气氧/煤油等可贮存推进剂多次点火的方案。为此研制了氦气谐振点火器和气氧/煤油火炬点火器。氦气点火器在较宽的气源温度 ($-2^{\circ}\text{C} \sim 33^{\circ}\text{C}$) 变化范围、较大喷嘴入口压力 ($1.5\text{MPa} \sim 3.0\text{MPa}$) 变化范围内均具有好的谐振加热性能。气氧/煤油火炬点火器能够多次可靠地点火并生成稳定的点火火炬。由于不受谐振产生条件的限制, 气氧和煤油的流量可以在较大的范围内选择, 生成点火火炬的温度范围也很宽, 富燃点火火炬更具工程应用价值。研究结果表明氦气谐振点火器及其气氧/煤油火炬点火器具有结构简单, 可靠性高, 无毒无污染等优点, 对于重复多次启动的液体火箭发动机有着诱人的应用前景。

关键词: 液体推进剂火箭发动机; 空腔谐振器; 点火; 点火装置

中图分类号: V434.11 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2003) 06-0553-04

Investigation of helium resonance ignitor and kerosene/oxygen ignitor

YU Nan-jia¹, ZHANG Guo-zhou¹, LIU Hong-jun², LÜ Qi-wei², HE Wei-feng¹, MA Bin¹

(1. School of Astronautics, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Shaanxi Engine Design Inst., Xi'an 710100, China)

Abstract: In order to reliably realize the multiple ignition of liquid rocket engine, the gas dynamic resonance ignitor, which creates the ignition resource of high temperature and high energy, was applied to ignite kerosene/oxygen. Two ignitors were developed. The helium resonance ignitor with light and simple structure was powerful and reliable. It can be concluded from experiments that the helium resonance ignitor has good resonance performance even when gas temperature or inlet pressure has large variance, which leads to more application of helium resonance ignitor. The kerosene/oxygen ignitor, which is utilized as an indirect ignition method, is able to multiple ignition and produce ignition torch successfully. Since the flux of kerosene and oxygen and the temperature of ignition torch can be varied in a wide range, the kerosene/oxygen ignitor satisfies various ignition requirements of liquid rocket engines. The present research shows that the helium resonance ignitor and the kerosene/oxygen ignitor characterized with advantages of simple structure, high reliability, and non-poison, etc., are prospective to be applied for multiple ignition of liquid rocket engine.

Key words: Liquid propellant rocket engine; Cavity resonator; Ignition; Ignition device

1 引言

以液氧、煤油为推进剂的液体火箭发动机常用能与气氧自燃的启动燃料点火, 这一技术十分可靠, 但不能满足多次启动的要求。同时自燃燃料具有毒性, 且易燃、易爆, 不易贮存。

为了实现多次启动, 可设计专门的启动系统。但这种方案增加了发动机的重量和控制操纵的复杂性,

并影响可靠性。还可采用高能电点火系统, 但要增加很大功率的电源, 而且真空条件下高压电路系统的工作可靠性差, 难以克服静电和射频的干扰, 还会对箭上仪器产生电干扰, 造成发动机高空点火的种种困难。另外, 在推进剂中掺混添加剂可使一些非自燃的推进剂成为自燃的推进剂, 不需要专门的点火系统, 即可实现多次可靠点火, 具有一定的优势。但目前只有过氧化氢-煤油类的发动机应用, 且一般添加剂不

* 收稿日期: 2002-11-25; 修订日期: 2003-06-30。

作者简介: 俞南嘉 (1974—), 男, 博士生, 研究领域为火箭发动机, 气动谐振点火技术。

参与化学反应,会降低发动机比冲,造成发动机推力损失。通常,添加剂价格昂贵,对于小推力发动机还具有一定的应用价值,对于大推力发动机,势必会造成成本的提高。另外部分添加剂还具有毒性。

气动谐振点火是基于气动谐振加热效应的一种新型点火方式,与传统的点火技术相比,气动谐振点火器结构简单、重量轻、安全可靠、无静电和射频干扰、无毒无害、可多次点火。它能够满足多种需重复使用的液体火箭发动机的点火要求,国外已利用气动谐振点火技术进行了氢氧气体的点火^[1],气氧/煤油的点火^[2]以及煤油与空气混合物的点火^[3],目前正在向工程实用化的方向发展。我国现已研制了用于氢氧液体火箭发动机的两种同轴氢氧谐振点火器和用于塞式喷管液体火箭发动机的多管谐振点火器和由多个点火器组成的多次多室同步谐振点火系统^[4~6]。对应用气动谐振技术的两种气氧/煤油点火器方案的研究^[7]认为,间接点火方案具有结构简单,工作可靠等优点,特别是适合于工程应用。因而,本文研究了以氢气谐振热表面点火器为点火源的气氧/煤油火炬点火器方案。

2 氢气谐振热表面点火器的研制

在间接点火方案中,作为产生谐振条件的驱动气体,可以选择氧气或氢气。考虑到氢气的谐振性能好,发动机上贮备充足,使用安全可靠,因而选择氢气为热表面点火器的谐振气体。

从图 1 中可以看出,氢气的谐振加热性能明显好于氧气。在喷嘴入口处压力基本相同的情况下,氢气在较短的时间内(约 4s)可以达到更高的温度。若将喷嘴入口的压力调高,氢气的谐振温度还会明显升高,目前用氢气作为谐振气体测得热表面点火器尾端外壁面(壁厚 2mm)的最高谐振温度已达 1991K 以上。氢气谐振热表面点火器谐振管采用高温耐热合金 28[#],由北京钢铁研究院研制,尾端小圆柱段用铂铱 25 合金制成,有极好的高温抗氧化性能,其熔点超过 2073K,导热系数大、比重大,可在高温下工作。可以用来点燃火炬点火器的推进剂生成高温燃气,再用其作为主推进剂的点火火炬。氢气谐振热表面点火器外形如图 2 所示,所进行的氢气谐振加热试验如图 3 所示。

从试验中看出,当喷嘴前压力 $p_i = 1.4\text{MPa}$,谐振温度可以在 4s 内达到 1350K 以上,足以满足点燃气氧煤油混气的要求。若要提高点火器加热速度,可以

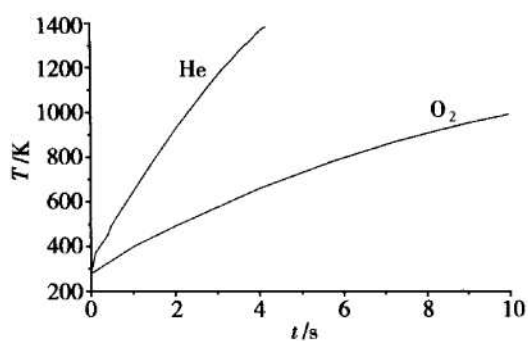


Fig. 1 Resonance temperature of helium and oxygen ($p_i = 1.33\text{MPa}$)

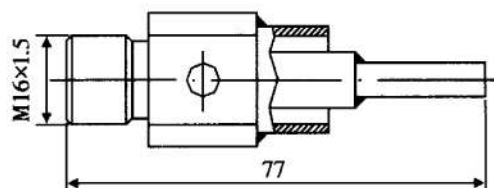


Fig. 2 Helium resonance heating surface ignitor

通过提高激励喷嘴前的压力来实现。为了进一步研究氢气谐振热表面点火器在更大喷嘴入口压力范围内的谐振加热性能,以空气作为谐振气体进行了谐振加热试验,试验中 p_i 的变化范围为 $1.5\text{MPa} \sim 3.0\text{MPa}$,结果如图 4 所示。

从图中看出,当将喷嘴入口压力提高一倍时,其谐振加热速率也可以提高约一倍。利用空气为谐振工质,研究气源温度变化对谐振加热性能的影响。试验中喷嘴前压力为 1.7MPa ,谐振时间为 5s,测温点为谐振管尾端外壁面(壁厚 2mm)。所得结果如图 5 所示。

试验发现,当气源温度在 $-2^\circ\text{C} \sim 33^\circ\text{C}$ 变化时,点火器谐振管尾端外壁面测得谐振温度变化在 30K 以内,说明点火器对气源温度有较强的适应能力,可以满足不同环境对点火器谐振加热性能的要求。

氢气谐振热表面点火器的主要技术指标为:功率为 $400\text{W} \sim 600\text{W}$,当功率为 400W 时足以点燃煤油-气氧火炬点火器。当点火器功率为 400W 时:喷嘴进口压力为 1.4MPa ,谐振 4s 热端温度达到 1350K 以上,点火器工作次数 100 余次。当点火器功率为 600W 时:喷嘴进口压力为 1.8MPa ,谐振 3s 热端温度达到 1426K。点火器端部工作温度为 $1350\text{K} \sim 1600\text{K}$,在 1350K 时完全可以点燃煤油-气氧火炬点火器,最高外壁温度超过 1991K。不计外套螺母和连接套筒,重量约为 75g。空气气源温度试验,气源温度变化范围为 $-2^\circ\text{C} \sim 33^\circ\text{C}$,谐振时间为 5s,加热温度差为 30K。

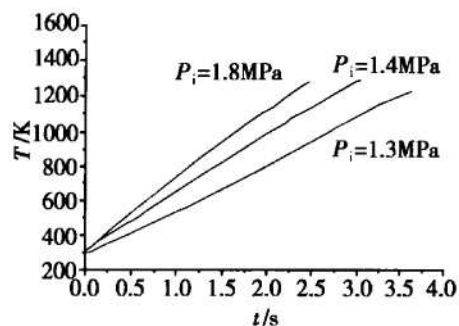


Fig. 3 Resonance heating curve of helium with different p_i

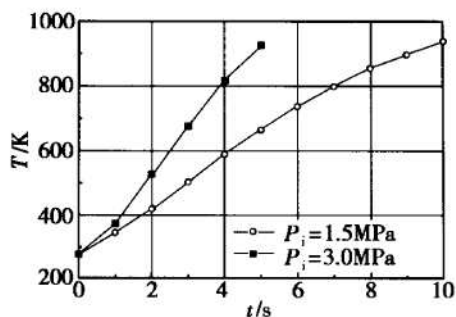


Fig. 4 Resonance heating curve of air with different p_i

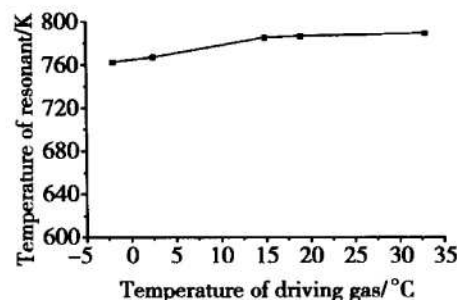


Fig. 5 Effect of temperature of driving gas to resonance heating

3 气氧/煤油火炬点火器的研制

根据间接点火方案,利用研制成功的氢气谐振热表面点火器作为高温高能的点火源,当气氧与煤油的混气遇到高温的热表面点火器即点燃并生成点火火炬。此方案产生的点火火炬可以是富氧,也可以是富燃,从而扩大了火炬点火器的应用范围。

当点火火炬为富燃时,气氧与煤油的质量混合比约为 0.4~1.25,若考虑煤油流量为 7g/s,则总流量为 9.8g/s~15.75g/s。由于气氧与煤油的质量流量不大,点火器的结构尺寸和重量都可以比较小。而且富燃燃气进入富氧环境更容易燃烧,需要点火火炬的能量小,这也降低了对点火室结构耐高温的要求,有利于结构尺寸和重量的进一步降低。试验已证实富燃燃气中游离的碳原子,会在富氧的环境中完全燃烧,不会对下游结构产生影响。同时在点火室内壁面以及热表面谐振点火器外壁面吸附的微量的碳不会影响点火器的多次可靠启动。

当点火火炬为富氧时,气氧与煤油的质量混合比约为 20~30,若考虑煤油流量约为 7g/s,则总流量为 147g/s~217g/s。富氧燃气的优点是燃气内不存在游离的碳原子,但富氧燃气进入富氧环境需要的点火火炬的能量相比于富燃情况要大得多,因此需要点火火

炬的温度更高,这使得点火室的材料要具有耐高温和耐氧化的功能。同时由于总的推进剂质量流量较大,这造成点火器的结构尺寸和重量增大。而比较大的气氧消耗量也使得供氧系统重量增大。

研制出的间接点火火炬点火器的外形图如图 6 所示。

利用这两种点火器已成功地进行了 70 余次点火试验。其中富燃情况下氧气流量为 3.6g/s~10.0g/s,煤油流量为 7.0g/s~12.0g/s,计算点火火炬温度为 1000K~1600K;富氧情况下氧气流量为 94.8g/s~100g/s,煤油流量为 7g/s,计算点火火炬温度为 2200K~2300K。在火炬为富燃情况下,只要煤油与气氧混合均匀,点火器内的积碳就会很少,不会影响点火器多次可靠点火的性能。对于富燃火炬点火器进行了 12 次连续点火试验,总点火时间达 31.5s,富氧火炬点火器进行了 7 次连续点火试验,总点火时间达 21s,其中最长一次试验工作时间达 5s,点火器均成功点火并产生了稳定的点火火炬。部分试验数据如表 1 所示,表中“*”,“**”的流量数据分别代表富燃与富氧情况下连续点火试验的试验参数。典型的氧气流量与燃烧室压力曲线如图 7 所示。试验中,煤油与氧气是同时进入燃烧室的,从图 7 中可以看出,在煤油与氧气一进入燃烧室,燃烧室即建立起了压力。



(a) Fuel-rich



(b) Fuel-lean

Fig. 6 Kerosene/oxygen ignitor with indirect ignition

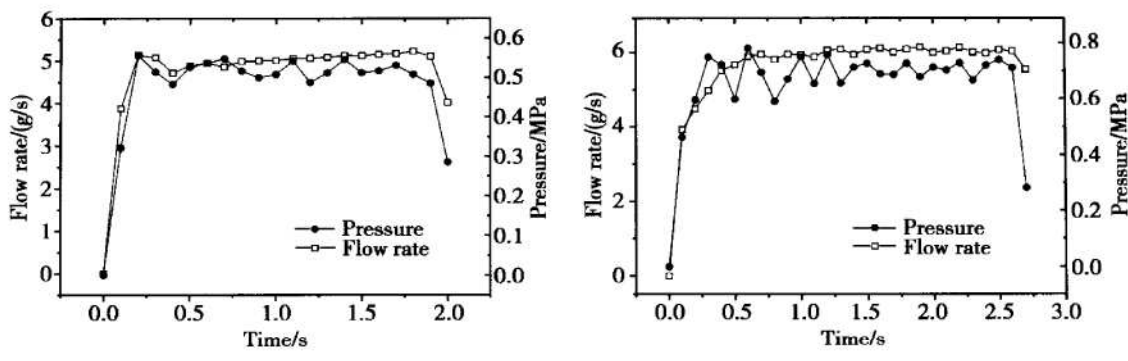


Fig. 7 Typical flow rate of oxygen and pressure of ignition chamber

Table 1 Some experiments of kerosene/ oxygen ignitor

Flow rate of oxygen/ (g/ s)	Flow rate of kerosene/ (g/ s)	Mixing rate	Result
4. 8	12. 0	0. 40	Ignition
5. 2	10. 0	0. 52	Ignition
4. 8	8. 0	0. 60	Ignition
5. 6	8. 0	0. 70	Ignition
6. 4	7. 0	0. 91	Ignition ⁺
6. 8	7. 0	0. 97	Ignition
10. 0	8. 0	1. 25	Ignition
94. 8	7. 0	13. 54	Ignition ^{**}

通过试验研究认为,可以根据不同推力液体推进剂火箭发动机对点火能量的要求,以及火炬流量和启动时间的要求,选择氧气与煤油的流量、点火火炬的温度范围和氦气谐振热表面点火器的谐振加热功率,即可达到工程上应用的要求。

4 结 论

(1) 气动谐振点火技术是基于气动谐振热效应的一种新型无毒无污染的非电钝感点火技术,能够多次可靠点火,具有广泛应用前景。

(2) 氦气谐振热表面点火器结构简单,重量轻,工作可靠。可广泛应用于非自燃液体火箭发动机的多次可靠点火。该点火器放热功率很大,达 400W~600W(有望达到 800W~1000W),远比火花塞的功率大。这类点火器容易发展为更大功率的点火器,可直接焊在火炬点火器上,采用高比强度的材料和按航天标准设计加工,还可较多的降低重量。点火器头部能预热很高的温度,并积聚相当多的热量,足以点燃煤油-气氧的混合气体。其主要缺点是启动时间较长。

(3) 应用间接点火方案设计的气氧/煤油火炬点火器点火机理简单,易于在工程上应用。由于气氧与煤油的注入与谐振产生条件无关,使得气氧与煤油可

以在更大的范围内调节流量和混合比,这也使得点火火炬的温度范围更大,由于不需要冷却,因而点火器的结构更加简单,重量更轻。而富燃情况比富氧情况所需火炬温度低,推进剂流量小,点火器的结构尺寸和重量都较小,点火系统的重量较轻。点火器内的少量积碳也可以通过气氧与煤油的更好混合而减少,少量积碳也不会影响气氧/煤油火炬点火器多次可靠的工作。因而富燃情况的气氧/煤油火炬点火器更具工程应用价值。

(4) 气氧/煤油火炬点火器不仅可以应用于煤油与氧气的点火,也可以应用于其它推进剂如气氧-甲烷以及过氧化氢与煤油的点火。铂铱合金头是很好的过氧化氢催化剂,所以对过氧化氢-煤油的点燃将更为有利。

参考文献:

[1] Rocketdyne Engineering. Advanced ignition systems final report [R]. N71-35152, 1972.

[2] Niwa M, Kessaev K, Santana Jr A, et al. Development of a resonance igniter for GO₂/kerosene ignition[R]. AIAA 2000-3302, 2000.

[3] Butorin E A. Experimental study of gas-dynamic igniter[J]. Chemical and Petroleum Engineering, 1989, 24: 340~342.

[4] 张国舟,童晓艳,梁国柱,等.液体火箭发动机气动谐振点火技术的研究[J].宇航学报,2001,22(4):81~84.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 俞南嘉,张国舟,马彬.应用气动谐振的气氧、煤油点火器的方案研究[J].北京航空航天大学学报,2003,29(8).

(编辑:梅 瑛)