

微细通道内可燃气体预混燃烧实验 与微型发动机燃烧方案

胡国新, 王明磊

(上海交通大学 航天航空工程系, 上海 200030)

摘 要: 针对微型涡轮气体发动机的研制现状, 讨论了微细通道稳定燃烧面临的难题。开展了微细通道内燃气与空气预混燃烧的火焰稳定性实验研究, 通过测试获得了氢气和乙炔燃烧的着火浓度极限。结果表明: 微细通道内可燃气体与空气的预混燃烧具有可行性, 但可燃浓度范围明显缩小; 采用增压燃烧, 可以扩大其可燃浓度范围, 提高燃烧稳定性; 与大通道相比, 微细通道不易发生回火, 但容易发生火焰吹熄, 而燃气浓度较高的混合气流相对不易被吹熄, 燃烧稳定性较好。

关 键 词: 微型发动机; 燃烧稳定性; 微细通道; 燃料空气比

中图分类号: TK16 文献标识码: A

1 引 言

近年来随着新型材料的产生及纳米技术的发展, 一个全新的领域: 微型装置的研究与开发开始发展起来。微型装置包括微马达、微型阀、压力传感器、微型加速器等^[1-2], 而在此领域最具挑战性和创新性的课题就是微型气体发动机的开发。

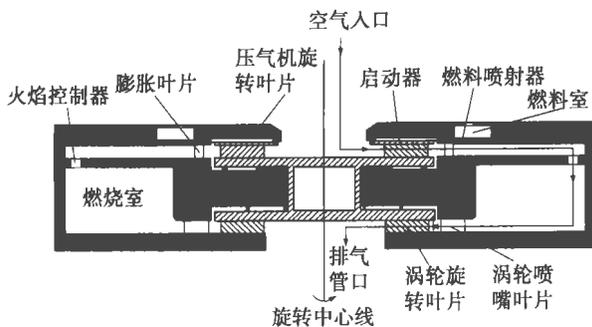


图 1 微型发动机结构简图

图 1 是微型气体涡轮发动机的结构简图, 其外形尺寸为直径 20 mm, 厚 3 mm, 此装置由安装在同一轴上的燃烧室、径向流动压气机和涡轮机构成^[3-4]。

燃烧室是发动机最重要的组成部分, 其工作过程为: 空气由入口进入压气机后被升压, 经过喷管变为高速气流与喷入的燃料在通道内充分混合, 然后经过扩压管进入燃烧室燃烧, 由燃烧室出来的高温高压气流进入涡轮机推动涡轮做功。

要想成功地开发出微型涡轮发动机系统, 必须克服许多难题, 例如, 材料的选择, 微型零件的加工, 微通道内的燃烧等。美国 MIT 和日本的东京、九州大学已开始进行这方面的研究工作, 但目前关于微型涡轮发动机的许多基础性研究还是空白, 有关文献报道极少。本文针对微型发动机燃烧关键技术, 开展微细通道气体预混燃烧的火焰稳定性实验研究, 测试微细通道中氢气(乙炔)与空气预混燃烧的燃烧浓度极限, 分析微细型腔中保证燃气火焰稳定燃烧的工作条件和影响因素, 并对微型涡轮气体发动机的燃烧方案进行讨论。

2 微型发动机燃烧技术面临的关键问题

对于常规发动机, 燃烧室壁面的金属材料的最大允许温度在 1 200 K 左右, 因此必须设置冷却系统来保证壁面不会超温。但微型装置体积非常小, 配置冷却系统几乎是不现实的。随着材料科学的发展, 已开发出耐高温的陶瓷材料, 利用这些材料制成的设备可以在温度高达 1 700 K 下运行而无需冷却。这样微型发动机就可省去冷却系统, 结构大大简化。

由于近年来微型机械的加工技术已逐渐成熟, 现今微细装置的加工制造已不成问题, 而微细空间的燃烧技术却面临着特殊的困难。对微细燃烧室来说, 首先, 燃烧效率要高, 即燃烧要充分而且散热损失小; 其次, 要保证燃烧稳定, 不熄火。这些问题都涉及到燃气在微细燃烧室的停留期和壁面散热损失。还有其它方面的要求, 诸如燃料与氧气的引入

收稿日期: 2002-10-20; 修订日期: 2003-01-13

基金项目: 中国航天科技创新基金资助项目(2000-0519-07); 中国船舶工业应用基础基金资助项目(2000-56.3.9)

作者简介: 胡国新(1963-)男, 江西进贤人, 上海交通大学副教授。

及其混合等。

2.1 燃烧停留期问题

燃料在微细通道内的燃焯时间是一个关键问题。对任何一种燃烧室,燃料的充分混合及燃烧都需要一定的时间。若停留期太短,则燃烧不完全,势必降低燃烧效率。一台常规发动机被缩小到1/500,要使其单位面积保持相同的气体流量,其气体流过燃烧室的停留期大约为0.05~0.1 ms。这与氢气和空气的反应时间(0.01~0.1 ms)大致相当。因此对于微型发动机,为提高停留期,必须提高燃烧室与发动机的相对尺寸。

如果使燃烧室的停留期增长10倍,则微型燃烧室的长度或面积要翻10番,此时停留期将达0.5~1 ms,化学燃烧反应时间的数倍。常规涡轮燃烧室的停留期为5~8 ms,而其中的3~5 ms是用于燃料的挥发混合。所以若采用预混方式,即燃料与空气在燃烧室上游混合,则停留期可以缩短。

2.2 散热损失问题

对于传统气体涡轮发动机,燃烧室壁传热所引起的能量损失通常是可以忽略不计的。而对于微细燃烧室,其表面积与体积的比值却与几何尺寸变化相反,散热损失相当大。在预混燃气中,燃烧放出的热量在气体中传递,由于散热,当传递过来的热量不足以点燃剩余的混合燃气时,火焰将熄灭。预混燃烧的研究表明^[3],若通道内径小于临界直径,火焰传播的热量被壁面吸收后将使反应终止。大于临界直径,反应放热与燃烧室壁面散热相互平衡。

3 微细通道燃烧实验

为了深入了解微细通道气体燃烧特性,我们设计了一套微细通道燃烧实验装置,开展了燃气与空气预混燃烧的火焰稳定性实验研究。通过燃气与空气的预混燃烧实验测试,获得了微细通道中燃气燃烧的浓度极限,分析了燃料浓度比对燃烧状况的影响。

3.1 微细光滑通道和环型通道内燃烧熄火浓度范围

通过调整空气体积流量和可燃气体(氢气或乙炔)流量,获得了微细通道和环型通道内预混燃气燃烧的熄火浓度上、下限,实验结果如图3~图6所示。

在大空间中,氢气与空气预混燃烧的浓度范围为4.0%~75%,乙炔为2.5%~81%。而从图3~图4可以看出,在微细通道(光滑圆管)中氢气和乙炔的可燃浓度范围与大空间相比明显缩小,但还是

有比较宽的可燃浓度范围。气体可燃浓度范围缩小主要是受到活化中心和散热的作用,活化中心数量多、散热量少有利于气体燃烧。对于传统气体涡轮发动机,由燃烧室壁传热所引起的能量损失通常是被忽略的(3%左右)。而在微细通道中,其表面积与体积的比值与几何尺寸变化相反。根据文献[2],管壁表面散热速率与管内火焰燃烧放热速率之比有以下关系:

$$\frac{\text{管壁散热速率}}{\text{管内燃烧放热速率}} \propto \frac{1}{d^{1.2}}$$

对于直径仅为几毫米的微细通道,其外表面的相对散热损失比常规燃烧室大大提高。当燃烧室越小,活化中心与燃烧室壁面碰撞的机会越多,这些活化中心被销毁的数量越多,越不利于气体维护燃烧。因此氢气和乙炔的可燃浓度范围缩小。

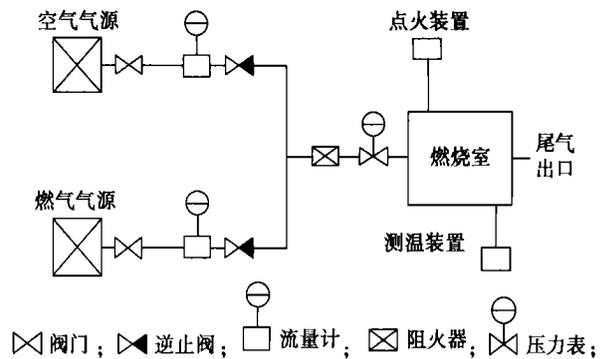


图2 微细通道燃烧实验系统图

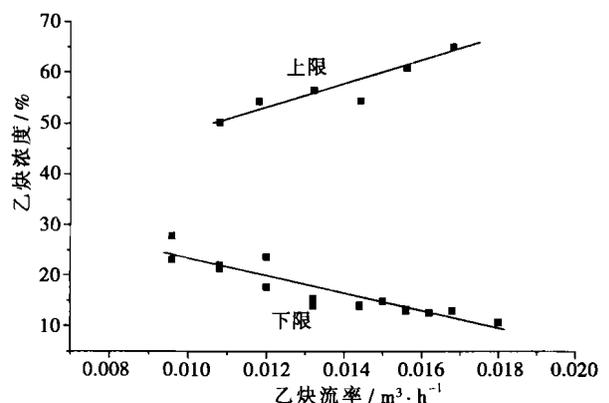


图3 微细通道内乙炔与空气预混燃烧熄火浓度范围

从图3~图4还可以看出,在微细通道内,随着乙炔和氢气流量的增加,乙炔的可燃上限浓度增加,氢气的可燃上限浓度基本保持不变,而乙炔和氢气的可燃下限浓度都减小,可燃浓度范围都增大。这是因为随着气体燃料的增加,燃烧室内温度升高,活

化中心的数量增加,就相对减少了散热损失率和活化中心的损失率,使氢气和乙炔可以在更宽的浓度范围内燃烧。

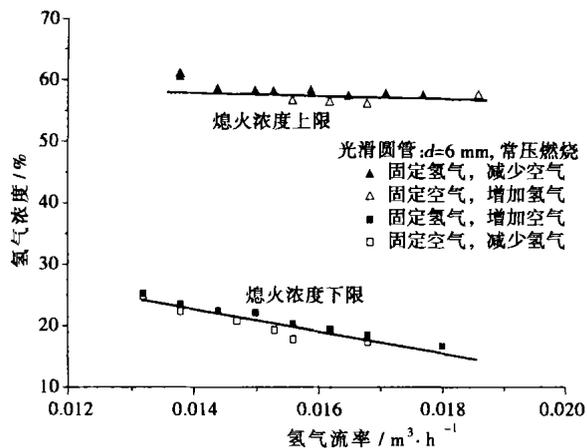


图4 微细通道内氢气与空气预混燃烧熄火浓度范围

图5~图6给出微细环型通道内氢气预混燃烧熄火浓度范围,分析图中实验数据分布,可以得出以下几点:(1)与光滑通道相比,环型通道内的可燃浓度范围大大缩小;(2)采用有压燃烧,可以增加可燃浓度范围,提高燃烧稳定性;(3)采用流量上行或下行调节方法获得的熄火浓度极限值不同,这可能是由于燃烧通道管壁的温度差别造成的。如图5所示,对于熄火浓度上限实验,当固定空气流量和增加氢气流量时,通道内开始是在小于工作点的氢气流量下燃烧;而当固定氢气流量和减小空气流量时,通道内一开始就是在该点氢气流量下燃烧,燃烧通道管壁的温度较前者高,上限浓度值也较高。对于熄火浓度下限实验,当固定空气流量和减小氢气流量时,通道内开始是在大于工作点的氢气流量下燃烧,而当固定氢气流量和增加空气流量时,通道内一开始就是在该点氢气流量下燃烧,因而前者通道管壁的温度较高,熄火浓度下限扩大。图4的实验数据也表现出类似的规律。

实验还观察到当气体燃料量波动时,乙炔较氢气更易熄火,氢气具有更好的燃烧稳定性。这是因为氢气比乙炔的燃烧化学反应速度快,在气体燃料突然减少后,新增的燃料进来时,氢气可以比乙炔更快地着火燃烧,释放热量,迅速补充燃烧所需热量,使燃烧持续进行。

另外,乙炔燃烧试验后可以看见燃烧室壁面上会有许多碳黑,对于微型涡轮发动机的微细燃烧室来说,长时间运行这些碳黑会造成堵塞。实验中观

察到氢气的火焰明显要比乙炔的火焰短,这样用氢气为燃料可以把微型涡轮发动机的燃烧室设计得更短。

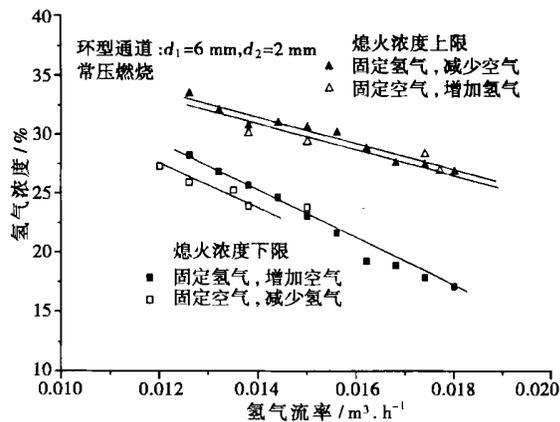


图5 环型通道内氢气与空气预混燃烧熄火浓度范围

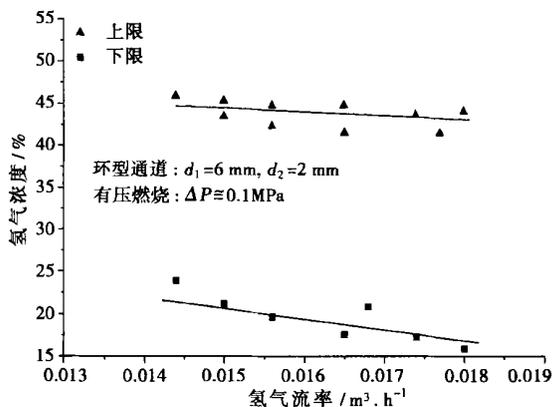


图6 环型通道内氢气与空气预混燃烧熄火浓度范围

3.2 回火与吹熄速度

当一定浓度比的预混燃气在微细通道中稳定燃烧之后,通过提高混合气流速度(保持气流浓度比不变),以观测火焰被吹熄时的气流速度。实验结果如表1所示,当稳定燃烧时进口燃气浓度较大时,火焰吹熄所需气流速度也越大。这说明燃气浓度较高的气流要达到临界吹熄工况就需要有较大的吹熄流速。所以,燃气浓度较高的混合气流不易被吹熄,燃烧稳定性较好。从试验结果还可以得出,微细通道与大通道相比不容易发生回火,但容易发生火焰的吹熄。乙炔的 S_{lmax} (最大层流火焰传播速度)为 1.7 m/s,氢气是 3.15 m/s。所以乙炔与氢气相比,较之不容易回火,但容易被吹熄。

实验观察到,在燃气浓度低的混合气流中,火焰的吹熄是经过一系列火焰焰锋形状的变化后才完成的。稳定时火焰焰锋形状接近锥形,当加大气体流量,火焰长度开始收缩,着火点开始远离燃烧室头部。如继续加大气体流量,火焰长度继续收缩,着火点更加远离燃烧室头部。最终火焰将被吹熄。

由于随着燃烧室管径的减小,火焰易于吹熄而不易回火。而在微细通道内燃气浓度较高的混合气流不易被吹熄,燃烧稳定性较好。我们认为:对于微细燃烧室,虽然采用富燃料气氛燃烧火焰不易被吹熄,但选用富燃料气氛燃烧会造成燃尽时间延长,使燃烧效率大为降低,这对微细燃烧室尤其重要,因为燃气在燃烧室内的停留期极短。实验发现对于乙炔燃料,这种常压富燃料燃烧条件已无法保证。在微细通道完全燃烧,其中大部分燃料已移出燃烧室外燃烧。因此,必须采取措施减少燃尽时间以保证微细燃烧室燃烧效率,比如采用增压燃烧或选用氢气作为燃料。

表1 微细通道内($d=8\text{ mm}$)乙炔与空气预混燃烧时燃气浓度与火焰吹熄速度关系

进口燃气浓度 (体积比)/%	相对燃气 率 ϕ	过量空气 系数 α	吹熄时混合气 流速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
6.5	0.77	1.3	3.85
8.4	1	1	4.27
10.5	1.25	0.8	5.51
14.0	1.67	0.6	5.94

4 微型发动机燃烧方案

针对微细空间燃烧的特殊问题,应采用以下燃烧策略:第一,提高燃烧室相对于发动机的尺寸以提高停留时间。第二,由于常规发动机燃烧室的停留时间相当大的一部分是用于燃料与空气的混合,所以对微型发动机要采用有效方法降低停留的限制,这些方法包括:采用燃气与空气预先混合或选用氢气作为燃料。

氢气是一种理想燃料,氢有较高的火焰燃烧速度、较低的着火温度。由于氢的着火浓度界限较宽,因而可以在贫燃料气氛下稳定燃烧。相对碳氢化合物而言,氢气在空气中有着较高的扩散速度,但仍然需要有足够的空间来混合。使微型气体发动机保持一定的增压($\sim 0.45\text{ MPa}$)和一定的入口温度(一般

为 500 K ,小于氢气与空气混合气体的自燃温度)。因此,可以在氢气和空气引入燃烧室过程中进行充分预混合。

5 结 论

论述了微型发动机燃烧技术面临的挑战,设计了一套微细通道燃烧实验装置,并实现了乙炔和氢气与空气的预混可燃气体在微细通道中的着火和稳定燃烧,通过对燃气和空气的流量控制,测试了微细光滑通道和环形通道内预混燃气燃烧的熄火浓度范围,并得出以下初步结论:(1)由于微细通道管壁表面积相对增大,火焰传播速度减小,燃气燃烧浓度界限变窄。(2)采用有压燃烧,可以增加可燃浓度范围,提高燃烧稳定性。(3)流量上行或下行调节获得的熄火浓度极限值的不同可能是由于燃烧通道管壁的温度差别造成的。(4)对于燃气浓度较高的混合气流,其对应的临界吹熄工况下的吹熄流速较大,说明燃气浓度较高的气流不易被吹熄,燃烧稳定性较好。同时,微细通道与大通道相比不容易发生回火,但容易发生火焰的吹熄。(5)对于乙炔燃料,常压富燃料燃烧条件已无法保证其在微细通道内完全燃尽,其中大部分燃料已移出燃烧室外燃烧。因此,必须采取措施缩短燃尽时间以保证微细燃烧室燃烧效率,比如采用增压燃烧或选用氢气作为燃料。

参考文献:

- [1] BRYZEK J, PETERSON K, MCCULLEY W. Micromachines on the match[J]. *IEEE Spectrum*, 1994, 31(5): 526-532.
- [2] WAITZ I A, GAUBA G, TZENG Y. Combustors for micro-gas turbine engines[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1998, 120(3): 109-117.
- [3] MEHRA A, AYON A A, WAITZ I A, *et al.* Microfabrication of high-temperature silicon devices using wafer bonding and deep reactive ion etching[J]. *IEEE Journal of Microelectromechanical systems*, 1999, 8(2): 152-160.
- [4] MEHRA A, ZHANG X, AYON A A, *et al.* A six-wafer combustion system for a silicon micro-gas turbine engine[J]. *IEEE Journal of Microelectromechanical systems*, 2000, 9(4): 517-527.
- [5] ZAMASCHIKOV V V. Combustion of gases in thin-walled small-diameter tubes[J]. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 1995, 13(1): 10-16.

(何静芳 编辑)

顶棚过热器受热面管流量偏差问题的数值模拟研究= **Numerical Simulation Study of Flow Distribution Deviation in Heating-surface Tubes of a Roof Superheater** [刊, 汉] / FAN Wei-dong, HAN Xiao-gang, HAO Wei-dong (Institute of Mechanical and Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240), HONG Mei (Shanghai Boiler Co. Ltd., Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 343 ~ 348

A detailed numerical simulation study was conducted of the flow distribution in the heating-surface tubes of a boiler roof superheater featuring a distribution header with a bent inlet. The inlet elbow has a relatively great impact on the flow distribution in the distribution header with different flow deviations occurring in tubes at different zones of the elbow. The flow rate in the tubes located at the outer side of the elbow is excessively great while that at the inner side of the elbow is excessively small. Moreover, the flow rate in the tubes of a straight-tube header adjacent to the elbow outlet will also be affected by the elbow. After a tube explosion caused by the excessively small flow rate in heating-surface tubes located in the above zone the flow rate in the nearby tubes with excessively great flow rates will be drastically reduced, thus triggering chain explosions of tubes. Finally, on the basis of calculations and analyses the causes and specific features of the flow deviations were identified and verified, and relevant measures adopted for eliminating flow deviations and solving the problem of tube explosions. **Key words:** boiler, superheater, tube explosion, numerical simulation

自激振荡脉冲射流强化换热实验研究= **Experimental Investigation of Intensified Heat Exchange Based on Self-excited Oscillating Pulse Jets** [刊, 汉] / GAO Hong, ZENG Dan-ling (Power Engineering Institute under the Zhongqing University, Zhongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 349 ~ 351

A preliminary exploratory study was conducted of the mechanism of self-excited oscillating pulse jets-based intensified heat exchange. Furthermore, a contrast test was performed of the heat exchange conditions with or without a resonant cavity. Through tests it is found that the self-excited oscillating pulse jets produced by a Helmholtz resonant cavity have intensified the dilution mixing of fluids in a tube, thus destroying boundary layers and resulting in an intensified heat exchange. During the tests it has also been discovered that the increase in pressure difference at the two ends of the resonant cavity will generate more intensified pulse flows, significantly enhancing the turbulence degree of fluids and, as a result, intensifying the in-tube flow heat exchange. **Key words:** self-excited oscillation, pulsation, jet flow, intensified heat transfer

微细通道内可燃气体预混燃烧实验与微型发动机燃烧方案= **Pre-mixed Combustion Tests of Combustible Gases in Tubules and the Combustion Scheme of a Micro Turbo-engine** [刊, 汉] / HU Guo-xin, WANG Ming-lei (Department of Aerospace & Aeronautical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 352 ~ 355

In the light of the current development state of micro turbo-engines discussed are the intractable problems related to the maintenance of stable combustion in tubules. An experimental research has been conducted with respect to the flame stability of premixed combustion of fuel gas and air in the tubules. The ignition concentration limit of hydrogen and acetylene combustion was identified through tests. The test results show that it is feasible to conduct premixed burning of combustible gas and air in the tubules, but there is a significant reduction in the range of combustible product concentrations. The use of supercharged combustion can lead to an increase in the range of combustible concentrations and may enhance combustion stability. In comparison with large channels the tubules will not easily be subject to a back-fire, but is liable to suffer from flame extinction. However, a mixed gas flow with a relatively high fuel gas concentration will not be blown out easily and also enjoys fairly good combustion stability. **Key words:** micro turbo-engine, combustion stability, micro-fine channel, fuel-air ratio