

文章编号: 1000-8055(2006)05-0843-05

微小“ I”型蒸发管在常压条件下 蒸发率研究

林宇震, 刘 俊, 许全宏, 魏文博

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 为研究微小型发动机中的 I 型蒸发管的蒸发性能, 在进口空气为常压条件下, 对微小尺寸 I 型蒸发管的蒸发性能进行了试验研究。研究了气油比、进口空气温度以及蒸发管内空气流速的变化对蒸发管燃油蒸发率的影响。试验结果表明, 气油比和蒸发管空气进口温度是蒸发率的主要影响因素, 蒸发管内空气速度影响并不显著, 气油比的增大和空气进口温度的增大都会导致燃油蒸发率的增大。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 蒸发管; 蒸发率; 微小型燃烧室

中图分类号: V231. 2

文献标识码: A

Study on vaporization rate of a mini Evaporizer under atmospheric pressure condition

LIN Yu-zhen, LIU Jun, XU Quan-hong, WEI Wen-bo

(National Key Laboratory on Aero-Engines, School of Jet Propulsion,

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

Abstract: Experimental study of vaporizing characteristics of a mini engine's "I" type vaporizer was presented. The experiments were conducted under the atmospheric air pressure. The main factors of the vaporization rates including the Air/ Fuel Ratio (AFR), vaporizer inlet air temperature and the velocity of the airflow within the vaporizer were studied extensively. From the test results, it can be concluded that the AFR and the vaporizer inlet temperature are the important parameters to the fuel vaporization rates, and the increasing of the AFR and the inlet air temperature will cause an increase of the vaporization ratio.

Key words: aerospace propulsion system; aero-engine; vaporizer; vaporization rate; mini combustor

对于微小型涡喷发动机(推力小于 50 daN)的微型燃烧室, 由于成本和空间限制, 基本采用蒸发管式供油。微小型燃烧室采用蒸发管供油方式可以在较短的燃烧停留时间条件下获得较高的燃烧性能。但是, 所采用的蒸发管供油结构独特, 例

如, 在燃烧室火焰筒内采用螺旋油管供油^[1], 采用加热油管方式蒸发燃油, 从火焰筒后端进入的直蒸发管^[1], 以及在燃烧区环形总管上的预加热小喷嘴^[2]。

大型航空发动机, 包括涡扇、涡轴和涡喷发动

收稿日期: 2005 - 08 - 30; 修订日期: 2006 - 01 - 09

作者简介: 林宇震(1969 -), 男, 浙江宁波人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院航空发动机气动热力重点实验室研究员, 主要从事航空发动机燃烧的研究。

机,推力远大于 50 daN,采用蒸发管供油方式,国内外相继作了相关的测试和研究^[2-9],对大发动机蒸发管的设计、雾化特性、蒸发过程的计算及试验在文献中都有许多论述,表明蒸发管供油方式具有优良的低污染排放,适应低油压,对燃料的多选择性和结构简单等许多优异的性能。在各种型号的航空发动机中使用情况良好。

本文对一种微小型燃烧室的蒸发管(见图 1)的喷雾性能和蒸发性能开展研究。结构与大发动机用的 I 型蒸发管类似,但尺寸要小,蒸发管长径比更大,直径小于 10 mm,长径比大于 10,这是由微小型燃烧室气动性能决定的。从燃烧性能来看,蒸发管供油方式的燃烧室要达到高效、稳定燃烧,除了合理的空气流动组织外,蒸发管的蒸发率高低,对燃烧性能有直接影响。但是,在工作条件下微小型 I 型蒸发管的蒸发率,并不是十分清楚。在本文作者掌握公开发表的文献中,未见类似论述。由于微小型蒸发管的蒸发性能对微小型燃烧室的燃烧性能如燃烧效率、点火和熄火有重要影响,因此有必要对微小发燃烧室采用 I 型蒸发管的蒸发和喷雾性能进行深入研究。

1 研究内容

本研究主要针对微小发动机的燃烧室所使用的蒸发管,推力 50 daN 以下,燃烧室容积小于 $10 \times 10^{-4} \text{ m}^3$,燃油流量小于 80 kg/h,6~8 个蒸发管供油。蒸发管为 I 型。

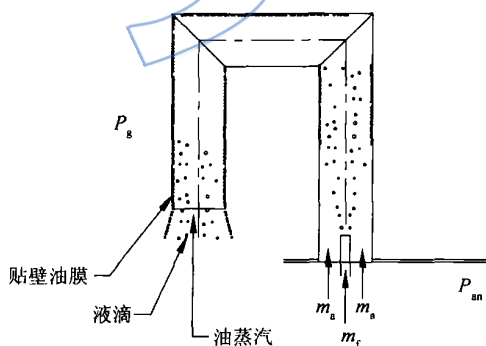


图 1 微小型蒸发管结构和蒸发雾化示意图

Fig. 1 Sketch of mini-vaporizer and atomization

图 1 同时也表达了本文研究微小型蒸发管流动和蒸发雾化物理过程的示意图。在微小型燃烧室中,通常采用一个直射式喷嘴供油,与大发蒸发管不同,大发蒸发管喷嘴通常有几个喷口。微小型蒸发管的雾化蒸发过程是直射式喷嘴,喷出燃

油,周围有空气进入,喷射出的燃油开始雾化,这个雾化属于直射式空气雾化。雾化后的燃油颗粒与进入蒸发管的空气混合。一部分燃油颗粒将撞到壁面上,形成贴壁油膜,另外一部分形成油气混合物在管内流动。在蒸发管内,燃油受热蒸发的热源来自两部分,一是进口空气对燃油颗粒蒸发,二是高温管壁对贴壁燃油薄膜蒸发。在蒸发管出口喷出的燃油包括三部分,一部分是仍然以颗粒状态随气体一起喷出,第二部分是蒸发掉的(通常认为小于 $5 \mu\text{m}$ 油颗粒是气相,因为在高温燃烧环境内,小于 $5 \mu\text{m}$ 油颗粒将迅速蒸发)油蒸汽,这部分燃油占的比例,即所谓的蒸发率,第三部分是贴在蒸发管壁面流出的燃油。

显然,蒸发率与蒸发管进口空气流速、气油比、进口空气温度、管壁温度有关。从性能上讲,蒸发率的高低,与高效和稳定燃烧直接关联。

由于蒸发管内的油气两相流动与蒸发、贴壁油膜的沸腾蒸发这一物理过程十分复杂,特别是沸腾蒸发现理论尚不完备,采用试验方法,确定微小型蒸发管蒸发率,是有效的方法。本文对不同蒸发管进口空气温度、速度和气油比等工况下的蒸发率进行了初步研究,试验蒸发管进气压力为常压。

2 试验

微小型 I 型蒸发管蒸发率的测量采用间接测量的方法。燃油经过蒸发管喷射出来包含三部分:贴壁油膜、未蒸发油珠、完全蒸发燃油。给定

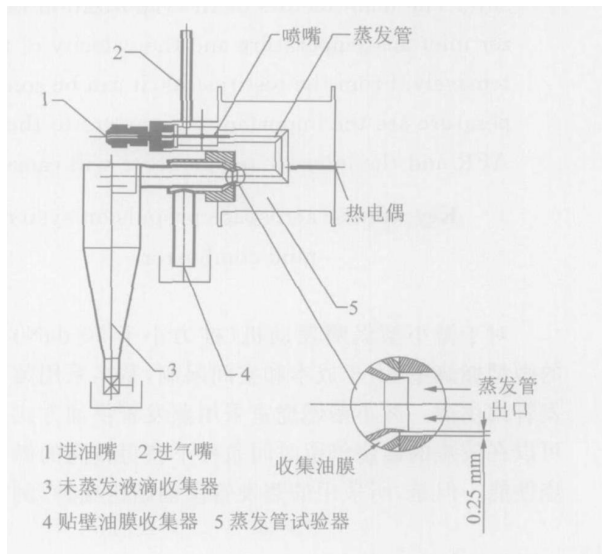


图 2 油膜和液滴收集装置

Fig. 2 Collection setup of fuel film and fuel droplets

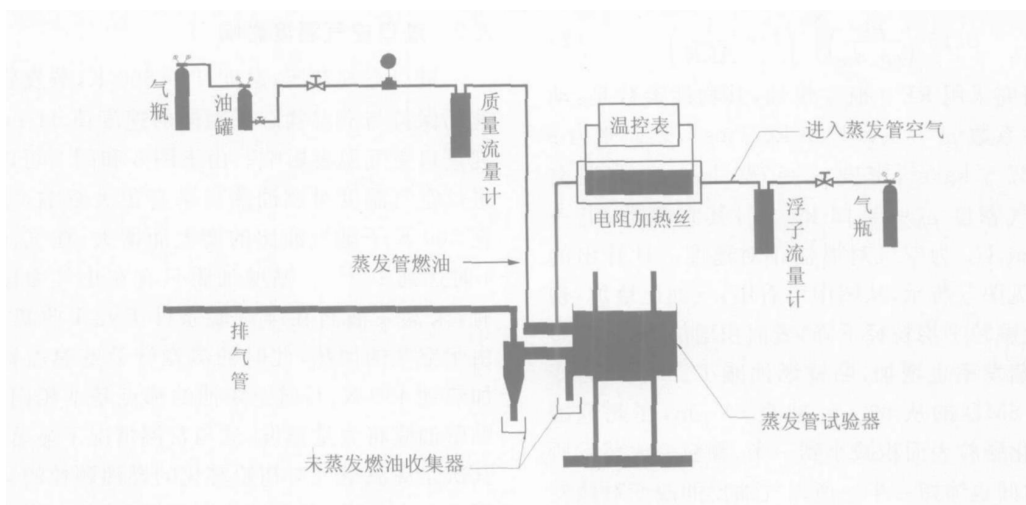


图 3 蒸发管燃油蒸发率试验台系统图

Fig. 3 Experiment setup of vaporization rate for micro Γ type vaporizer

燃油总流量,通过特殊设计装置分别采集在一定工况下的贴壁油膜和未蒸发油珠,即可计算出完全蒸发燃油,与总量相除,可得到蒸发率。

蒸发管贴壁油膜和液滴收集装置如下图 2,液滴收集装置采用一个微小型的旋风分离器,按照可以收集 $5\ \mu\text{m}$ 以上的燃油颗粒,这样夹带在蒸发管出口气体中的液滴可以通过其收集。贴在蒸发管壁面上的液膜用一个同心采样管收集,该同心采样管的直径比蒸发管出口直径小 $0.5\ \text{mm}$ 。可以将所有贴壁油膜收集。

据分析,影响蒸发率的因素主要是进口空气流速、温度、管壁温度等,这些参数应能独立控制和改变,以研究其对蒸发率影响。因此,按照这个目的设计了试验系统。系统采用气瓶供气,在蒸发管进口处设计一个前置预热段,采用电阻丝加热预热段达到试验时的蒸发管进口空气温度。

试验系统如图 3 所示。本研究分进口常温和进口加温多个试验状态。试验中温度由 K 型热电偶测量。空气流量通过调节减压阀和质量流量计前的截至阀来控制。燃油流量根据压力得以精确控制,且由质量流量计直接测出燃油流量。质量流量计测量精度是 0.2% ,采样得到的燃油质量测量采用电子天平,测量精度 0.5% 。

蒸发管试验参数如下:进口空气温度为 $300\sim 500\ \text{K}$;压力为 $0.1\ \text{MPa}$;空气流量为 $3\sim 5.5\ \text{kg/h}$;气油比为 $1.5\sim 10$ 。

3 结果与分析

$\dot{m}_{t0}$ 表示总的燃油流量, $\dot{m}_{tw}$ 表示收集的贴壁油膜流量, $\dot{m}_{td}$ 表示收集的未蒸发液滴流量,总油

量减去这两部分未蒸发燃油流量,得到燃油蒸发量,除以总流量,得到蒸发率如公式(1)所示:

$$r = \frac{\dot{m}_{te}}{\dot{m}_{t0}} \times 100\% = \frac{1 - \dot{m}_{tw} - \dot{m}_{td}}{\dot{m}_{t0}} \times 100\% \quad (1)$$

影响蒸发管的蒸发率的因素有:气油比、进口空气流速、进口空气温度、管壁温度。实验过程保持其中两个参数为特定常量,改变另一参数,分别得出该变量对蒸发率的影响。其中,管壁温度对蒸发率的影响将另文发表。

3.1 气油比的影响

在常温常压下,蒸发管内流速是 $41\ \text{m/s}$ 时气油比对蒸发率影响的研究结果见图 4。保持空气量不变,改变燃油流量,使气油比从 2.7 增加到 9.4 ,随着气油比的增大,蒸发率呈现上升趋势,蒸发率从 9.2% 增至 42% 。贴壁油膜从 78.6% 下降至 49.6% 。从气体中夹带的颗粒流量变化很小,基本在 10% 附近,而且气油比增加,变化很小。这说明从蒸发管出口的燃油主要是贴壁油膜和蒸发掉的燃油。 $A_{FR} \geq 6$ 后,蒸发率基本不变。出现这种结果的原因与初始雾化颗粒大小有关系。本微小型 Γ 蒸发管供油属于直射式空气雾化喷嘴。考虑到雾化细度对蒸发率也有比较大的影响,首先根据试验状态中 SMD 的变化做了分析。文献[10]可得直射式空气雾化喷嘴 SMD 的计算公式:

$$\frac{SMD}{d_0} = 0.48 \left(\frac{\sigma}{\rho_A U_R^2 d_0} \right)^{0.4} \left(1 + \frac{1}{ALR} \right)^{0.4} +$$

$$0.15 \left(\frac{\mu^2}{\rho_a d_0} \right)^{0.5} \left(1 + \frac{1}{ALR} \right) \quad (2)$$

研究采用 RP-3 航空煤油,其物性参数是:动力粘性系数 $\mu = 0.001\,29\text{ kg/(ms)}$,表面张力 $\sigma = 0.027\,5\text{ kg/s}^2$,密度 $\rho = 780\text{ kg/m}^3$;常温空气:空气密度 $\rho_a = 1.18\text{ kg/m}^3$,其它参数: $d_0 = 0.4\text{ mm}$, U_R 为空气对燃油相对速度。计算出的 SMD 见图 5 所示,从图中可看出,气油比增加,初始雾化颗粒平均粒径下降,表面积增加,增加传质速度,蒸发率也增加,贴壁燃油减少。 AFR 的变化时, SMD 的从 $82\text{ }\mu\text{m}$ 减至 $65\text{ }\mu\text{m}$,在此范围内,雾化颗粒表面积减小到一半,颗粒完成蒸发所需的时间也缩短一半。所以气油比的改变对蒸发率的影响,其本质是因为 SMD 的变化影响了蒸发率。

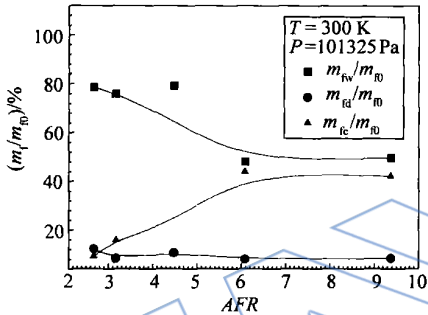


图 4 常温常压空气进口状态下气油比对蒸发率的影响

Fig. 4 Influence of Air/fuel ratio on vaporization rate with atmospheric temperature and pressure of vaporizer inlet

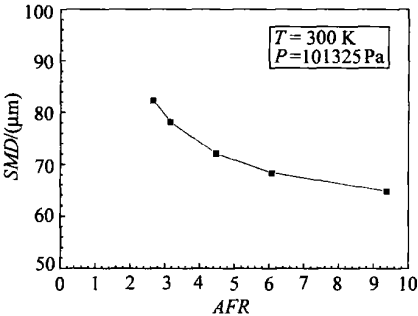


图 5 常温常压空气进口状态下直射空气雾化喷嘴的 SMD

Fig. 5 Influence of AFR on SMD with atmospheric temperature and pressure of vaporizer inlet

3.2 进口空气温度影响

进口空气常压,温度 $T_a = 500\text{ K}$,蒸发管内流速仍保持与常温状态下相同的速度值 41 m/s ,研究进口空气温度影响。由下图 6 和图 7 可以看出进口空气温度对燃油蒸发率有很大影响,蒸发率在 500 K 下随气油比的增大而增大,在气油比为 4 时达到 100% 。贴壁油膜只有在小气油比下才有,未蒸发液滴在本试验条件下几乎收集不到。由于空气的加热,此时的蒸发管管壁温度被空气加热到 450 K ,与航空煤油的沸点基本相同,这时贴壁油膜将大量蒸发,这与常温情况下显著不同。其次是高温空气对初始雾化的燃油颗粒的蒸发作用也大大加强,据文献[11],对两种状态下蒸发率计算表明,常温常压状态的蒸发常数是 $0.013\,4\text{ mm}^2/\text{s}$,而加温状态下蒸发常数是 $0.364\,7\text{ mm}^2/\text{s}$,油滴蒸发速率大大提高。总的来讲,加热的蒸发管进口空气和达到燃油沸点的管壁温度,能够大大地提高蒸发管燃油蒸发率。

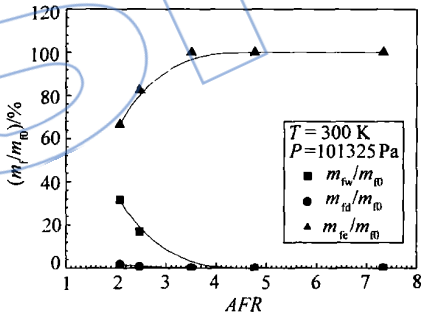


图 6 进口加温条件下气油比对蒸发率的影响

Fig. 6 Influence of Air/fuel ratio on vaporization rates with high temperature vaporizer inlet air

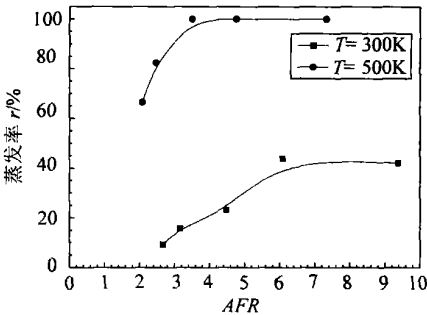


图 7 进口空气温度对蒸发率的影响

Fig. 7 Influence of vaporizer inlet air temperature on vaporization rates

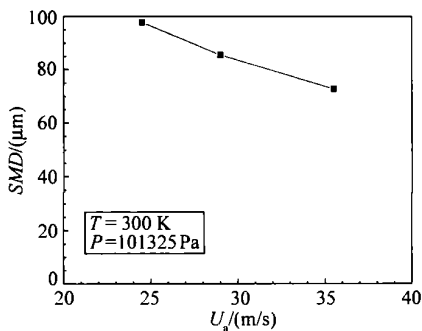


图 8 进口空气流速对 SMD 的影响

Fig. 8 Influence of vaporizer inlet air velocity on SMD

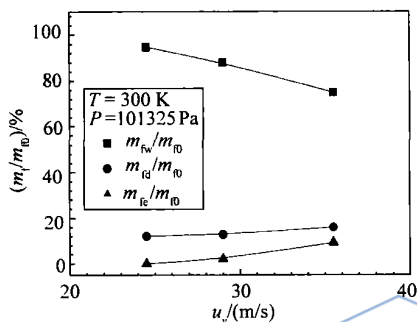


图 9 进口常温常压条件下空气流速对蒸发率的影响

Fig. 9 Influence of vaporizer inlet air velocity on vaporization rates with atmospheric temperature and pressure of vaporizer inlet

3.3 空气流速的影响

在空气进口常温下,流速从 24.5 m/s 增大至 35.5 m/s 变化。保持气油比 3 不变,根据公式 (2) 可知,此时 SMD 只受 U_R 的影响,由图 8 可看出 SMD 从 98 μm 减小到 73 μm 。由图 9 可以看出,随着流速上升,蒸发率为上升趋势,原因是空气动能增大,初始雾化颗粒度更细,增大了液滴蒸发速率的缘故。占主要部分的还是贴壁油膜。

4 结 论

对小尺寸 I 型蒸发管,在常压情况下,研究了有关气油比、进口空气温度、进口空气流量对蒸发率的影响。

在冷态情况下,随着气油比的增大,蒸发率呈

现上升趋势,从 9.2 % 增至 42 %,但占大多数的还是贴壁油膜部分。在常压下,进口空气加温 500 K,对燃油蒸发率的影响很大,蒸发率随气油比的增大而增大,从 66.5 % 增至 100 %,在气油比为 4 时达到 100 %,贴壁油膜只有在小气油比下才有。冷态下,空气流速的变化对蒸发率的影响并不显著,蒸发率随流速上升而上升,从 0 增至 9.1 %。

从实际燃烧室工作的情况来看,管壁的温度会超过本试验中的管壁温度。初步计算的管壁温度是 800 K,在这种条件下,可以预期,基本是近乎 100 % 的蒸发率,因此,蒸发管类型的微发燃烧室,虽然在微发燃烧室容积小,停留时间短的情况下,仍然能够达到高效稳定燃烧。

参考文献:

- [1] 胡正义. 航空发动机设计手册: 第九册 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.
- [2] 胡正义. 蒸发管内雾化和蒸发过程的研究 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 1989, 2(4): 45-54.
HU Zheng-yi. A Study of Atomization and Evaporation in a Fuel Vaporizer [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 1989, 2(4): 45-54.
- [3] Tamaru K Suzuki, Oppata Y. A study of a fuel vaporizer for a gas turbine engine [R]. Tokyo Joint International Gas Turbine Conference and Products Show: Tokyo, Japan; 4-7 Oct., 1971: 135-142.
- [4] 诸惠民, 赵广平. 蒸发管气动性能的试验研究 [R]. 北京: 中航学会第三届燃烧会议, 1982: 14-21.
- [5] 张洪才, 孙跃忠, 李铁菊, 等. 蒸发管喷嘴燃油雾化特性试验研究 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 1988, 1(1): 47-50.
ZHANG Hong-cai, SUN Yue-zhong, LI Tieju. An Experimental Study of Fuel Spray Atomization Characteristics of Evaporating Pipe Atomizer [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 1988, 1(1): 47-50.
- [6] Parnell E C, Williams M R. A Survey of Annular Vaporizing Combustion Chambers [R]. Combustion and Heat Transfer in Gas Turbine Systems Cranfield International Symposium Series, Pergamon: London, 1971, 11: 91-104.
- [7] Sotharan A. The Rolls-Royce annular vaporizer combustor [R]. ASME PAPER 83-GT-49, 1983.
- [8] Schreckling K. Gas turbine for model aircraft [M]. United Kingdom, Traplet Publications limited, 1994.
- [9] Gerendas M, Pfister R. Development of a very small aero-engine [R]. ASME Paper 2000-GT-0536, 2000.
- [10] Rizk N K, Lefebvre A H. Spray characteristics of plain-jet airblast atomizers [R]. ASME Paper 83-GT-138, 1983.
- [11] 金如山. 航空燃气轮机燃烧室 [M]. 北京: 宇航出版社, 1988.