

文章编号: 1000-8055(2007)08-1273-06

微小“T”型蒸发管蒸发率实验

朱 菁, 郭新华, 林宇震, 徐国强

(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: 研究了微小尺寸“T”型蒸发管燃油蒸发率在不同工况下的变化规律. 实验中蒸发管入口空气常压. 实验研究了气油比、蒸发管入口空气温度、蒸发管壁温度和蒸发管入口空气流速对蒸发率的影响. 试验结果表明, 气油比、蒸发管入口空气温度和蒸发管壁温是影响蒸发率的主要因素. 蒸发管入口空气流速对蒸发率的影响较小. 该蒸发管在管壁和进口空气同时加温, 并且气油比大于 4.5 的条件下, 蒸发率接近 100%, 蒸发效果好.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 微小型发动机; 微小 T 型蒸发管; 蒸发率

中图分类号: V231.2

文献标识码: A

Experimental research on vaporization rate of micro“T”-vaporizer

ZHU Jing, GUO Xirhua, LIN Yurzheng, XU Guoqiang

(National Key Laboratory on Aero-engines, School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The variations of vaporization rate of Micro “T”-Vaporizer under various working conditions were studied. The experiments were conducted at vaporizer inlet under normal atmospheric pressure. The main influential factors to vaporization rate were tested, which include the air/fuel ratio, inlet air temperature, vaporizer wall temperature and the velocity of the airflow into the vaporizer. The experimental results show that, the air/fuel ratio, inlet air temperature and vaporizer wall temperature are major influential factor to vaporization rate. But, the velocity of the inlet airflow is less influential. The vaporization rate of the micro T-vaporizer is nearly 100%, when inlet air and vaporizer tube wall are heated simultaneously and the air/fuel ratio is more than 4.5.

Key words: aerospace propulsion system; micro engine; micro T-vaporizer; vaporization rate

早期航空发动机燃烧室常采用压力离心喷嘴供油,但随着燃烧室工作压力越来越高,导致燃烧室出口温度分布均匀性变差,冒烟迅速增加.因此 20 世纪 60 年代发展了空气雾化和蒸发管喷嘴,较好解决了上述问题.蒸发管供油是研究重点之一,它满足了上述要求,同时还不易堵塞、供油压力低,这使得蒸发管供油在航空燃气轮机燃烧室中得到成功应用^[1],蒸发管型式也从最早的拐杖

型、“Γ”型发展到“T”型^[1].对大型航空发动机的“T”型蒸发管蒸发和雾化性能,国内外都有测试和研究,包括蒸发管内燃油蒸发的计算模型^[2,3],雾化颗粒细度性能研究^[4]、“T”型蒸发管燃烧室的燃烧性能^[1,5]等.

对微小型航空涡喷发动机燃烧室而言(推力小于 50daN),存在尺寸小,长度短的问题.由于微小型涡喷发动机本身结构功率限制,要求供油装

收稿日期: 2006-07-31; 修订日期: 2006-10-27

作者简介: 朱菁(1981-),男,重庆市人,硕士生,主要从事航空发动机燃烧室性能研究.

联系人: 林宇震

置简单, 供油压力低. 基于这两点考虑, 目前都采用了蒸发管供油. 在文献[6]中, 采用螺旋管式蒸发管供油. AMT 公司发展的微小型航空发动机燃烧室, 采用微小“T”蒸发管, 文献[7]中采用了电加热蒸发管系统, 蒸发管为环形总管加 12 个喷口, 置于燃烧室内, 启动时用电预加热. 还有的采用了从燃烧室后部进入的直蒸发管系统. 上述蒸发管系统中, 螺旋型易堵塞, 后向进入的直蒸发管蒸发率不够高, 电加热系统过于复杂. 目前还没有在微小发动机燃烧室中采用微小“T”型蒸发管供油方式的文献.

由于在大型发动机中, “T”型蒸发管供油方式较为先进, 为了进一步提高微小型燃烧室性能, 本文采用了微小尺寸“T”型蒸发管(以下简称“T”型蒸发管), 主要内容是对 50daN 以下微小型涡喷发动机燃烧室所用“T”型蒸发管蒸发性能进行实验研究, 这些研究内容在公开发表的文献中尚未见报道.

“T”型蒸发管燃油蒸发有其自身特点. 首先蒸发管内空气将分两股流动, 空气流动湍流度更大, 能得到更好的燃油蒸发性能. 而与大尺寸“T”型蒸发管相比, 微小尺寸蒸发管内部流通面积较小, 油滴更容易与管壁碰撞形成油膜, 所以影响燃油蒸发率的因素将有所不同.

本文主要研究气油比、蒸发管入口空气温度、管壁温度和入口空气速度等参数对燃油蒸发率的影响. 这些数据对研制一个高效稳定的微小型蒸发管燃烧室非常重要.

1 研究内容

微小型涡喷发动机燃烧室为获得良好的燃烧性能, 除了合理组织空气流动外, 还要有高的燃油蒸发率才能实现. 高蒸发率有利于油气混合并实现高效、稳定的燃烧, 所以需要对影响“T”型蒸发管蒸发率的气动热力因素进行研究.

“T”型蒸发管位于高温燃气环境中, 蒸发管壁温度高, 进入蒸发管的空气也有较高温. 图 1 为蒸发管内燃油蒸发过程示意图. 在本实验采用直射式燃油喷嘴, 喷嘴周围有高温空气进入, 对燃油进行初始雾化, 随后空气与燃油形成油气混合物在蒸发管内流动. 初始雾化后的燃油颗粒大小不均, 较大颗粒容易与壁面碰撞, 形成贴壁油膜沿蒸发管壁流动并蒸发, 较小颗粒容易随着高温空气流动, 形成油滴蒸发. 蒸发管内燃油蒸发由油滴蒸发和油膜蒸发两部分组成. 燃油吸热蒸发的热

源也来自两部分, 一是入口空气的热量, 空气中的油滴和沿管壁流动的油膜通过对流换热方式从空气中吸热; 二是加热管壁的热量, 贴壁油膜通过对流换热从中吸热. 从蒸发管出口喷出的燃油包括两部分, 一是未蒸发燃油; 一是燃油蒸发形成的油蒸汽, 这部分燃油所占比例, 即本文中提到的蒸发率. 图 2 是“T”型蒸发管内空气流场图, 空气流动有四次拐弯, 同时还出现了 2 个回流区.

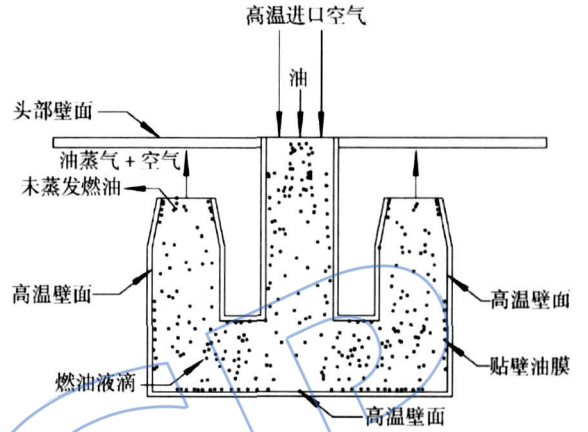


图 1 微小“T”型蒸发管结构及蒸发雾化示意图

Fig. 1 Sketch of micro“T”-vaporizer and atomization

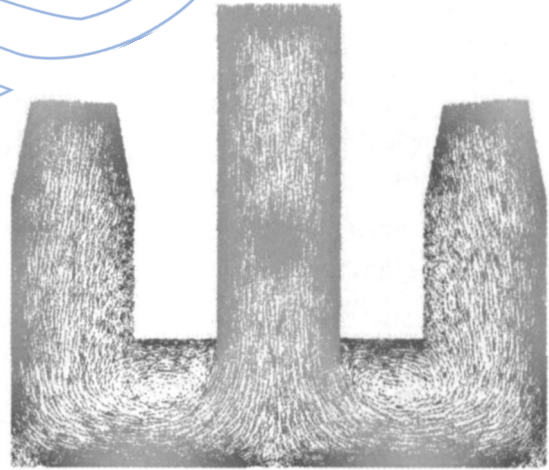


图 2 微小“T”型蒸发管流场图

Fig. 2 Flowing field of micro“T”-vaporizer

从蒸发管的工作特性分析, 蒸发率与气油比、入口空气温度、管壁温度和入口空气流速等气动热力参数有关. 要获得高蒸发率, 需要研究这些因素对蒸发率的影响. 本文在常压条件下, 首先对常温条件“T”型蒸发管的燃油蒸发率进行测量, 作为研究的基础, 然后改变气油比、蒸发管进气温度、管壁温度和进气速度, 研究其对蒸发率的影响.

2 试验系统

从“T”型蒸发管(直径小于 10 mm, 整个结构不超过 25 mm×30 mm) 出口喷射出的是燃油蒸汽与高温空气的混合气体以及未蒸发燃油. 实验装置将收集喷射出的未蒸发燃油部分, 用已知的总供油量减去未蒸发燃油, 从而计算出完全蒸发的燃油量, 得到蒸发管燃油蒸发率.

根据上述研究思路设计的试验系统如图 3. 实验中采用气罐供气, 在进入蒸发管前将空气加热到 500 K, 并对蒸发管入口空气温度(T_{in}) 进行采集监控, 保证入口空气温度稳定. 另一股空气由风机送入, 根据实验需要加热到一定温度, 加热后的高温空气流入实验件, 对蒸发管壁进行加热, 同时对蒸发管壁温度(T_w) 进行采集监控.

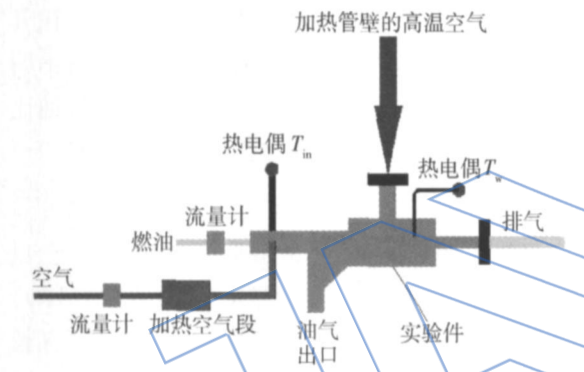


图 3 实验系统图
Fig. 3 Experiment setup of vaporization rate for micro“T” vaporizer

实验件包括油气入口、蒸发管、蒸发管加热和未蒸发燃油收集四个部分. 蒸发管水平放置. 燃油和空气从蒸发管中间入口进入, 未蒸发燃油以及油气混合气体从蒸发管两侧出口喷出后(见图 1) 进入一个收集箱, 并从收集箱底部流出. 油气混合气体流出后进入大气而不被收集, 所收集到的就是未蒸发燃油. 为得到均匀的蒸发管壁温度, 实验中高温空气通过 30 个小孔流入实验件对蒸发管壁进行冲击加热, 相邻两孔距离不到 2 mm, 可以保证加热后的蒸发管壁温度均匀, 如图 4 所示.

实验在常压下进行, 将分别研究气油比、蒸发管入口空气温度、蒸发管壁温度以及蒸发管入口空气流速对蒸发管燃油蒸发率的影响. 试验过程保持其中三个参数为常数, 改变另一参数, 得出该参数对蒸发率的影响, 气油比的选定是根据微型发动机工作范围来确定的. 试验参数见表 1. 实验

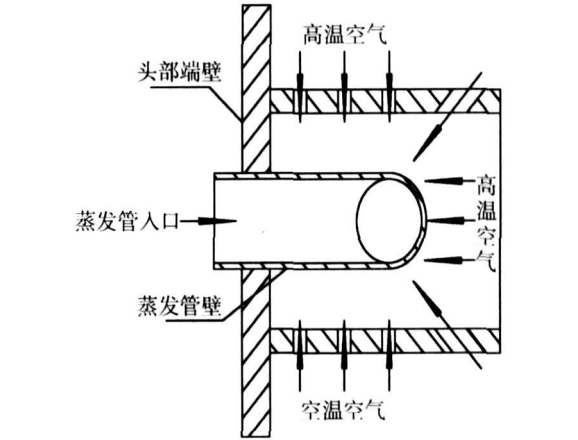


图 4 冲击加热蒸发管壁示意图
Fig. 4 Sketch of impingement heating the vaporizer's wall

中所有温度参数由 K 型热电偶采集. 蒸发管入口空气流量和燃油流量由质量流量计控制, 测量精度是 0. 2%. 收集得到的燃油质量由电子天平测量, 测量精度 0. 5%.

表 1 蒸发管试验参数
Table 1 Experiment conditions

入口空气 温度/ K	管壁 温度/ K	空气流量/ (kg/ h)	入口空气 流速/(m/ s)	气油比
300, 500	300~ 500	3. 2~ 8. 5	30~ 55	2~ 8

3 结果与分析

以下叙述中 K_{AFR} 表示气油比, $\dot{m}_f$ 表示总的燃油供给量, $\dot{m}_{fu}$ 表示收集的未蒸发燃油量, $\dot{m}_{fe}$ 为计算出的燃油蒸发量, ϕ 表示蒸发率提高的倍数, V_{inlet} 表示蒸发管入口空气流速. 用总燃油质量减去收集的未蒸发燃油量得到蒸发的燃油质量, 再除以燃油总质量, 即可得出燃油蒸发率.

$$\eta = \frac{\dot{m}_{fe}}{\dot{m}_f} \times 100\% = \frac{\dot{m}_f - \dot{m}_{fu}}{\dot{m}_f} \times 100\%$$

3. 1 气油比的影响

蒸发管入口空气流速为 41 m/ s, 入口空气加热到 500 K, 管壁不加热时蒸发率随气油比变化规律见图 5. 从图中可以看到, 燃油蒸发率随着气油比的增加而提高. 随着气油比从 2 增加到 8, 蒸发率也从 40% 左右增加到 90% 左右. 这主要与空气对燃油的初始雾化有关. 气油比增加, 将导致燃油初始雾化后颗粒直径减小, 与空气接触的燃油表面积即总的蒸发面积增加, 所以增强了燃油的吸热, 燃油蒸发率就随着气油比的增大而提高. 但在气油比大于 4. 5 以后, 蒸发率只在一定的范围

内小幅度变动. 所以在该实验条件下, 气油比的影响有一个极限, 当气油比超过某值后蒸发率变化不明显, 增加气油比对蒸发率的影响很小. 本实验中这个气油比临界值为 4.5.

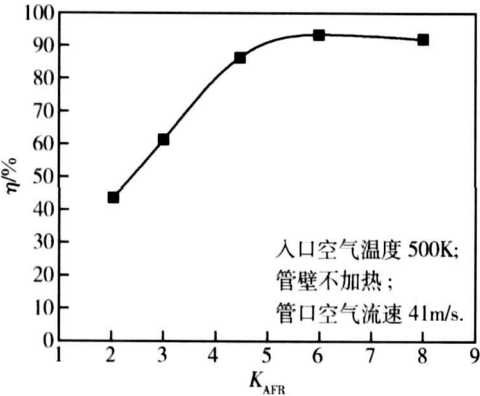


图 5 气油比对蒸发率的影响

Fig. 5 Influence of K_{AFR} on vaporization rate

3.2 温度的影响

3.2.1 蒸发管入口空气加热的影响

蒸发管壁不加热, 蒸发管入口空气流速为 41 m/s 条件下, 入口空气为常温和加热到 500 K 时蒸发率变化规律见图 6. 从图中可以看出入口空气加热后, 燃油蒸发率有较大提高. 蒸发管入口空气温度为常温时蒸发率在 20%~35% 之间, 空气加热后在 60%~90% 之间. 从图 7 中看到在相同气油比下, 由于入口空气温度提高到 500 K, 使蒸发率提高了 2.5~3.5 倍 ($\phi=2.5\sim3.5$), 在气油

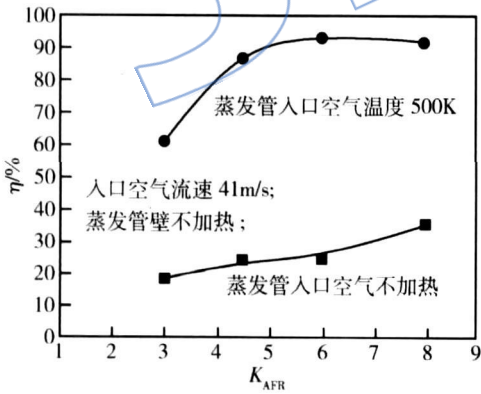


图 6 入口空气温度对蒸发率的影响

Fig. 6 Influence of inlet temperature on vaporization rate

比大于 6 时, 蒸发率提高幅度减小. “T”型蒸发管内燃油蒸发分为油滴在高温空气中的蒸发和蒸发管壁上贴壁油膜的蒸发. 蒸发管入口空气加热后, 油滴可以从空气中吸热进行蒸发雾化, 贴壁燃油与空气之间也有对流换热, 所以和常温空气条件

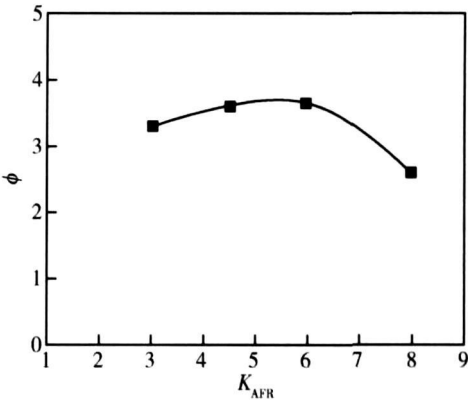


图 7 相同气油比下入口空气温度 500 K 蒸发率增加率

Fig. 7 Increasing rate of the vaporization rate with inlet air 500 K and the same K_{AFR}

下相比, 蒸发率大幅提高. 从实验结果中可以看出燃油吸收热量蒸发成为燃油雾化的主要因素. 但此时蒸发管壁没有加热, 贴壁油膜吸收热量少蒸发量小, 所以主要是空气中的油滴大量蒸发. 在气油比大于 6 之后, 空气对燃油的雾化效果提高不明显, 所以蒸发率提高幅度很小. 总的看来, 在气油比大于 4.5 之后, 就已经表现出良好的蒸发性能.

3.2.2 蒸发管壁加热的影响

在蒸发管入口空气常温, 管口空气流速 41 m/s 条件下, 不加热蒸发管壁和加热到 430 K 时蒸发率变化规律见图 8. 加热管壁后蒸发率有较大提高. 从图 9 中可以看出, 在相同气油比下与管壁不加热相比, 加热后的蒸发率提高了 2.5~3.8 倍 ($\phi=2.5\sim3.8$), 气油比较大时, 蒸发率提高幅度较小. 加热蒸发管壁对提高蒸发率的主要贡献在于提高了贴壁油膜的蒸发. 管壁温度 430 K, 大于实验所用燃油的沸点, 贴壁油膜将大量蒸发. 此时蒸发管入口空气温度为常温, 空气中的油滴吸

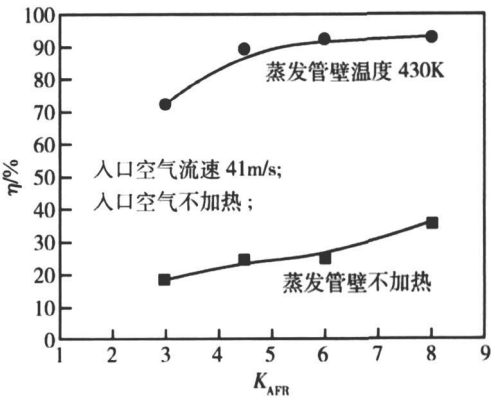


图 8 蒸发管壁温度对蒸发率的影响

Fig. 8 Influence of wall temperature on vaporization rate

热较少,所以主要是燃油碰撞管壁形成贴壁油膜蒸发量的提高导致燃油蒸发率的提高.

另外比较图 7 和图 9 可以得到,在较小气油比下,单独加热蒸发管壁导致蒸发率提高比单独加热蒸发管入口空气要多一些,但管壁温度(430 K)比入口空气温度(500 K)低,所以管壁温度对蒸发率的影响比入口空气温度的影响大.

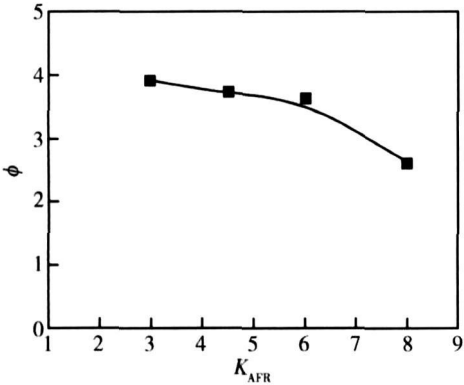


图 9 相同气油比下管壁温度 430 K 蒸发率增加率

Fig. 9 Increase rate of the vaporization rate with wall 430 K and the same K_{AFR}

3.2.3 入口空气和蒸发管壁同时加温的影响

从图 6、图 8 中看到在单独加热入口空气或者蒸发管壁时,燃油蒸发率都无法达到 100%,但是从图 10 可以看出在两者同时作用的情况下,蒸发率又有了提高.图 10 是蒸发管入口空气加热到 500 K,管口空气流速为 41 m/s,管壁温度分别加热到 430 K 和 480 K 时,蒸发率的变化规律.在气

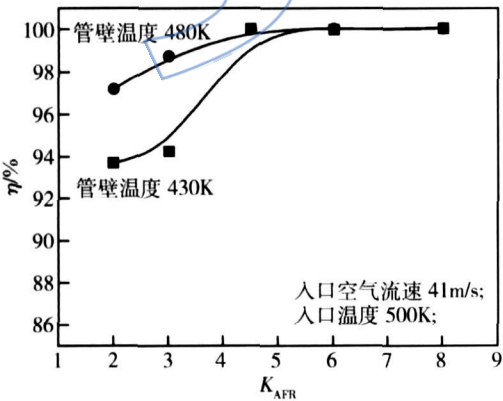


图 10 同时加热入口空气与蒸发管壁

Fig. 10 Heated the inlet air and wall at the same time

油比为 2 时,蒸发率大于 90%,在气油比为 4.5 时就收集不到未蒸发燃油.因为当入口空气和蒸发管壁同时加热时,空气中的油滴和贴壁油膜都能充分吸收热量蒸发,所以蒸发率可以达到 100%.同时从图 10 中还可以看出在其他参数相

同的条件下,蒸发管壁温度越高,蒸发效果越好.在微发燃烧室正常工作时,蒸发管入口空气温度与本文实验条件相当,而管壁温度预期还可以更高,这说明微小型“T”蒸发管在微发燃烧室正常工作时会有很高的蒸发率.

3.3 蒸发管入口空气流速的影响

图 11 是入口空气温度 500 K 不加热蒸发管壁时,不同气油比条件下蒸发率随入口空气流速的变化规律,入口空气流速从 31 m/s 变化到 51 m/s.可以看到在不同气油比下蒸发率随着空气流速的提高稍有增加,但变化并不明显.此时燃油蒸发主要来自油滴从高温空气中吸热,入口空气流速提高将导致管内空气流速提高,根据油滴蒸发理论,空气与燃油颗粒相对速度增大将加快油滴蒸发速率^[8],蒸发率应该有所提高,但是空气流速的提高同时将减少油滴在蒸发管中的停留时间,而导致吸热量减少,在两种作用的共同影响下,实验中看到的蒸发率变化不明显,在文献[2]中也有类似的结论.

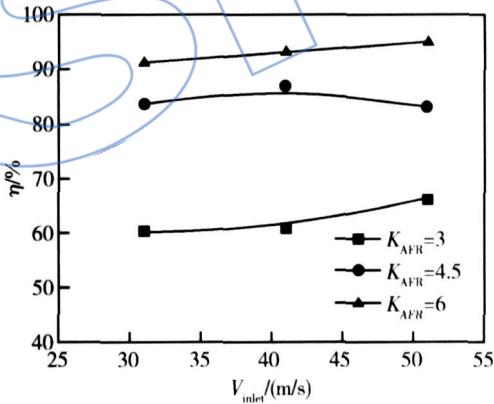


图 11 蒸发管入口空气流速对蒸发率的影响

Fig. 11 Influence of V_{inlet} on vaporization rate

4 结 论

本文研究了微小尺寸“T”型蒸发管在常压条件下,气油比、入口空气加温、管壁加温及入口空气流速对燃油蒸发率的影响.

(1) 随着气油比的增大,蒸发率呈现上升趋势,但气油比有一个临界值,超过该值后,蒸发率变化不明显.该实验条件下气油比临界值为 4.5.

(2) 温度对蒸发率有较大影响.和没有加热的常温状态下比较,单纯的加热蒸发管入口空气或者蒸发管壁都可以大幅度提高蒸发率,提高幅度与气油比有关,在大气油比条件下,蒸发率提高幅度较小.管壁温度对蒸发率的影响比入口空气

温度大.

(3) 在本实验条件下单独加热入口空气或者加热蒸发管壁, 在气油比大于 4.5 后, 蒸发率都能达到 90%, 两者同时加热并且气油比大于 4.5 时蒸发率可以达到 100%.

(4) 该实验条件下蒸发管入口空气流速对蒸发率的影响不大.

参考文献:

[1] SOTHERAN A. The Rolls-Royce annular vaporizer combustor[R]. ASME Paper 83-GT-49, 1983.

[2] 胡正义. 蒸发管内雾化和蒸发过程的研究[J]. 燃气轮机试验与研究, 1989, 2(4): 45-54.

HU Zhengyi. A study of atomization and evaporation in a fuel vaporizer[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 1989, 2(4): 45-54.

[3] 江义军. 蒸发式燃油喷射装置蒸发性能研究[J]. 航空动力

学报, 1990, 5(1): 32-34.

JIANG Yijun. Research on evaporation performance for fuel spray vaporizer[J]. Journal of Aerospace Power, 1990, 5(1): 32-34.

[4] 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]. 燃气轮机试验与研究, 1988, 1(1): 47-50.

ZHANG Hongcai, SUN Yuezhong, LI Tieju, et al. An experimental study on fuel spray atomizing characteristics of evaporation pipe atomizer[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 1988, 1(1): 47-50.

[5] 程树海. 缩短燃烧室火焰长度的试验研究[R]. 中国航空科技文献, HJB880634, 1989.

[6] Schreckling K. Gas turbine engines for model aircraft[M]. [S. l.]: Traplet Distribution USA Ltd, 1996.

[7] Gerendás M, Pfister R. Development of a very small aero engine[R]. ASME Paper 2000-GT-0536, 2000.

[8] Lefebvre A. H. Gas turbine combustion[M]. Philadelphia: Taylor & Francis, 1999.

