

文章编号:1000-8055(2012)10-2249-05

蒸发管蒸发及雾化特性

阮昌龙¹, 许全宏¹, 孙东文², 张弛¹, 林宇震¹

(1. 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国家级重点实验室, 北京 100191;

2. 中国航空工业集团公司 哈尔滨东安发动机集团公司

航空动力机械研究所, 哈尔滨 150066)

摘 要: 为了研究某型发动机中的 Γ 型蒸发管的蒸发性能, 在进口空气为常压条件下进行实验研究. 实验采用燃气加热, 模拟实际蒸发管工作环境. 实验研究气油比、进口空气温度以及蒸发管壁温度的变化对蒸发管燃油蒸发率及出口索太尔平均直径 SMD (Sauter mean diameter) 的影响. 实验结果表明: 气油比 (AFR)、蒸发管空气进口温度及蒸发管壁温对蒸发率及 SMD 都有着很大的影响, 气油比的增大和空气进口温度的增大以及蒸发管壁温的提高都会导致燃油蒸发率的增大和出口 SMD 直径的减小, 而三者中壁温的作用最为显著.

关 键 词: 航空发动机; 雾化特性; 蒸发管; 蒸发率; 索太尔平均直径

中图分类号: V231; TK474.9

文献标志码: A

Vaporization and spray characteristics of vaporizer

RUAN Chang-long¹, XU Quan-hong¹, SUN Dong-wen²,
ZHANG Chi¹, LIN Yu-zhen¹(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100191, China;2. Aviation Powerplant and Machinery Research Institute,
Harbin Dongan Engine (Group) Corporation Limited,
Aviation Industry Corporation of China, Harbin 150066, China)

Abstract: Experimental study on vaporization characteristics of a certain type of engine's " Γ " type vaporizer was presented. The experiments were conducted under the atmospheric air pressure, using hot gas to heat the vaporizer, just like what the engine did. The main factors of the vaporization rates and Sauter mean diameter (SMD) including the air/fuel ratio (AFR), vaporizer inlet air temperature and the temperature of the wall of the vaporizer were studied. From the test results, it can be concluded that all of these three factors have great effects on the vaporization rates and the SMD. The increases of these factors would cause an increase in the vaporization ratio and a decrease in the SMD, and among these factors the wall temperature plays the most significant role.

Key words: aero-engine; spray characteristics; vaporizer; vaporization rate;
Sauter mean diameter

收稿日期: 2011-11-30

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121015.1020.201210.2249_007.html

作者简介: 阮昌龙(1987—), 男, 广西博白人, 硕士生, 主要从事航空发动机燃烧室研究.

现代航空技术的进步要求发动机燃烧室长度短、供油压力低,同时出口温度分布均匀。喷嘴作为燃烧室的重要组成部分,其性能的好坏直接影响燃烧室燃烧性能和发动机性能。在航空燃烧室中,主要应用的喷嘴有离心喷嘴,空气雾化喷嘴以及蒸发管喷嘴^[1]。最早,蒸发管供油出现在 20 世纪 60 年代,蒸发管所需供油压力低,在相同压力、油量下相比于其他喷嘴能降低燃油粒径并且提高均匀度,进而提高燃烧室出口温度分布以及解决冒烟问题^[2]。以上原因使得蒸发管被广泛应用于航空燃气轮机燃烧室,蒸发管型式也发展出“拐杖型”、“T”型、“Γ”型 3 种型式^[3]。对各类航空发动机燃烧室的蒸发管蒸发性能,国内外都有很多学者用实验或数值计算的方法进行了大量的研究^[2-9],文献[2]对微小型发动机中的微小“T”型蒸发管进行实验研究,研究表明蒸发管入口空气速度对蒸发率的影响并不大。文献[4]采用电加热方案对“T”型以及弯曲型蒸发管进行蒸发率研究,研究表明燃料流量越少,高壁温对燃料的蒸发作用就越大。文献[5]中也采用电加热方案,对微小“Γ”型蒸发管的蒸发率进行实验研究,研究表明进口速度的提高并不能提高蒸发率,而气液比与进口温度对蒸发率的影响较大。

上述蒸发管系统中,均采用了电加热系统,未能模拟出蒸发管在发动机燃烧室的实际工作环境。本文采用燃气发生器模拟发动机燃烧室中“Γ”型蒸发管的实际工作环境,研究气油比、蒸发管入口空气温度和管壁温度等参数对“Γ”型蒸发管的蒸发率以及出口索太尔平均直径(SMD)的影响,并找出其最大影响因素。本文的研究为蒸发管燃烧室的优化设计提供有益的参考。

1 实验系统及方法

1.1 实验系统

本研究针对的是某型发动机燃烧室所使用的“Γ”型蒸发管,提出合适方案模拟真实的蒸发管工作环境,从而研究在相应工作工况下的蒸发率与索太尔平均直径。

实验系统如图 1 所示。系统共由四部分组成:一为蒸发管供气系统;二为蒸发管供油系统;三为蒸发管管壁加热系统;四为采集系统。其中蒸发管供气系统采用低压气源供气,空气加热采用电加热方式;供油系统采用挤压式供油;蒸发管出口未蒸发燃油采用旋风分离器收集(通常认为未蒸发燃

油粒径大于 $5\mu\text{m}$ ^[10],小于 $5\mu\text{m}$ 的油颗粒为气相)。

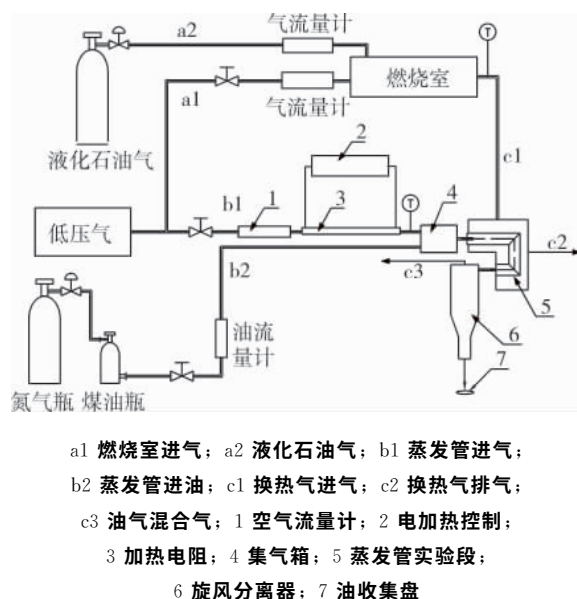


图 1 蒸发特性实验系统图

Fig. 1 Experiment setup of evaporation characteristics

如引言所述,在蒸发管蒸发特性的相关实验中,蒸发管加热方案大多使用的是电加热方案,即蒸发管管壁加热在方案中采用电阻丝直接加热方式。此方案的优点是功率容易调节、安装实验方便,但存在的问题除不能真实模拟蒸发管工作环境外,其还有加热不均匀、重复性较差、温度值浮动较大等缺点。

针对以上问题,本研究实验管壁加热方式采用燃烧器的高温燃气冲击加热。对方案进行可行性分析,计算物理模型见图 2。

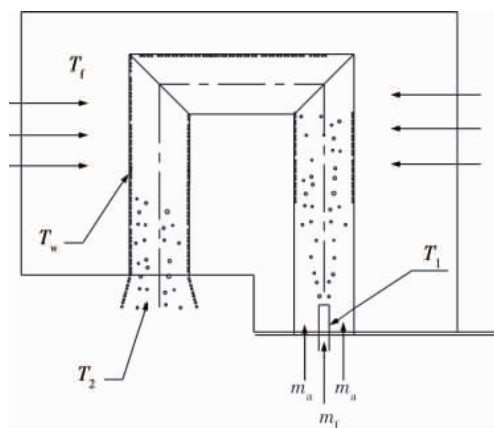


图 2 换热示意图

Fig. 2 Sketch of heat transfer

高温燃气对蒸发管外壁进行冲击换热,高温燃气将热量以对流换热的形式换热给蒸发管,而

在蒸发管内有油气混合流过,此油气混合物与蒸发管内壁也进行对流换热,不考虑加热升温过程的散热时,可以认为稳态下管内吸热与管外放热相等,即高温燃气散失的热量全部转化为油气混合物增加的热量 ϕ ^[11],即

$$\phi = h_{\text{inside}} A_{\text{inside}} (t_{\text{f-inside}} - t_{\text{w-inside}}) = h_{\text{outside}} A_{\text{outside}} (t_{\text{f-outside}} - t_{\text{w-outside}}) \quad (1)$$

式中 h , A 分别代表表面传热系数及表面传热面积, t_{f} 和 t_{w} 分别为气定性温度和壁面定性温度,inside代表蒸发管内部,outside代表外部。

为加强换热,高温燃气与蒸发管管壁之间的换热设计为冲击换热,换热公式如下^[11]:

$$\frac{h_m r}{\lambda} = Nu_r = 2Re_D^{0.5} Pr^{0.42} \cdot (1 + 0.005Re_D^{0.55})^{0.5} \frac{1 - 1.1D/r}{1 + 0.1(H/D - 6)D/r} \quad (2)$$

式中 h_m 为冲击表面的平均传热系数, r 为冲击气流滞止圆半径, λ 为气体导热系数, Re_D 为冲击雷诺数, Pr 为气体普朗特数, D 为冲击孔直径, H 为冲击孔距壁面高度。

依据给定的蒸发管最大工况计算管内流体所需热量,根据传热系数计算出所需的燃气流量与温度,燃气温度达到1300℃,蒸发管实验工况见表1所示。根据所需的高温燃气参数设计并加工了一款微型燃烧室,选择合适的燃烧室参数提供相应高温燃气。考虑尾气洁净问题,加热用燃烧室采用液化石油气作为燃烧燃料。

表 1 蒸发管实验工况

Table 1 Vaporizer test conditions

状态点	空气 压降/%	空气 温度/℃	蒸发管 壁温/℃	气液比
1	3	80.5	不加热	1.5
2	3	80.5	不加热	2.5
3	3	80.5	不加热	3.5
4	3	80.5	不加热	5.0
5	3	170	不加热	2.5
6	3	260	不加热	2.5
7	3	80.5	100	2.5
8	3	80.5	260	2.5
9	3	80.5	400	2.5

本研究中,进行了蒸发管蒸发率实验和出口索太尔平均直径实验。蒸发率与SMD值进行比

较分析,研究气液比、空气温度、壁面温度对蒸发特性的影响。在本实验中,使用间接测量方法对蒸发率进行测量,由未蒸发的燃油量反算出已蒸发的燃油量,以此获得蒸发率。

1.2 实验方法

蒸发率 r 计算公式可以表示为

$$r = \frac{\dot{m}_{\text{fe}}}{\dot{m}_{\text{fo}}} \times 100\% = \frac{1 - \dot{m}_{\text{fd}}}{\dot{m}_{\text{fo}}} \times 100\% \quad (3)$$

其中 $\dot{m}_{\text{fe}}$ 表示已蒸发的液滴流量, $\dot{m}_{\text{fo}}$ 表示总的燃油流量, $\dot{m}_{\text{fd}}$ 表示收集到的未蒸发液滴流量。

对于出口SMD的测量,使用LSA-III型激光粒度测试仪进行测量,其工作原理为利用颗粒对激光的散射特性作等效对比,所测出的等效颗粒为等效散射粒径,即用与实际被测颗粒具有相同散射效果的球形颗粒的直径来代表这个实际颗粒的大小。LSA-III型激光粒度测试仪采用Rosin-Rammler模型对所测得的液雾尺寸分布进行处理^[12],Rosin-Rammler模型是处理粒度分布最为广泛的模型之一,其数学表达式为

$$W(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{D_e}\right)^N\right] \quad (4)$$

式中 D_e 为与 x_{50} (中位径)成正比的场所, N 则决定粒度分布的范围, N 越大,粒度分布范围越窄,表示样品中颗粒分布的均匀性越好。

2 实验结果与分析

影响蒸发管的蒸发率、SMD的因素主要有进口空气流速、气油比、进口空气温度、管壁温度。已有研究表明进口空气流速对蒸发性能的影响并不大,因此本文不对进口空气流速进行研究。实验时均保持蒸发管内处于3%压降的速度流动。实验中,通过调节单一变量,从而找出该变量对蒸发性能的影响规律。蒸发率实验与SMD实验分开进行,为了找出最大影响蒸发性能的因素将两者进行比较分析。所有实验结果如图3所示。

2.1 气油比的影响

气油比(AFR,亦记为 R_{af})实验在常温、常压下进行,进口流速维持在3%压降下,试验结果见图4所示。

由图4可知,气油比 R_{af} 从1.5增加到5.0时,蒸发管蒸发率从12.1%增至33.1%,呈现上升趋势;而SMD从153.20 μm 减小到98.93 μm ,SMD呈现减小趋势;SMD变小则液滴表面积增加,增加传质速度,蒸发率也增加。由此可以说明

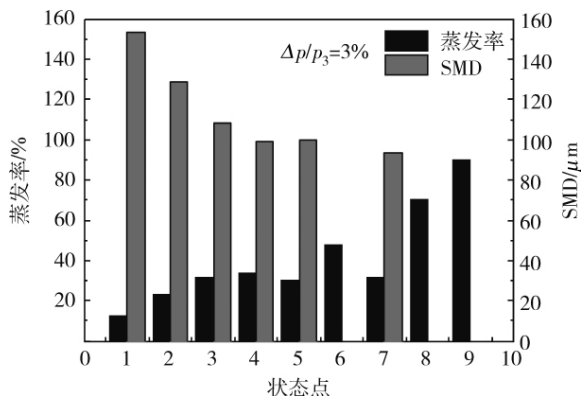


图 3 蒸发率与 SMD 实验结果

Fig. 3 Experimental results of vaporization rate and SMD

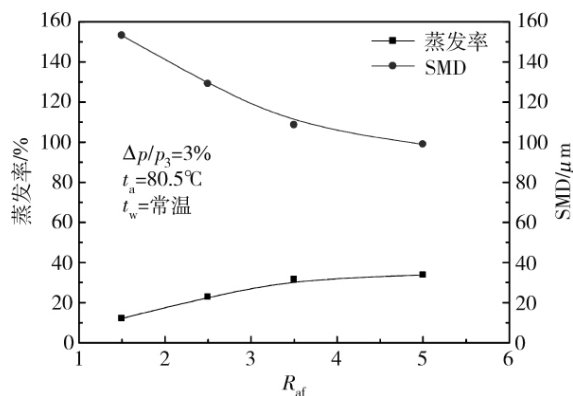


图 4 气油比对蒸发率、SMD 的影响

Fig. 4 Influence of air/fuel ratio on vaporization rate and SMD

气液比的提高对蒸发管蒸发性能的提高是有利的。图中还显示出,当气油比高到一定程度时($R_{af} > 3.5$),蒸发率的上升变得缓慢了,而 SMD 的减少也开始变得缓慢,从图中可以看出, R_{af} 由 3.5 增加到 5, SMD 只从 $108.56 \mu\text{m}$ 减小到 $98.93 \mu\text{m}$ 。以上结果的原因是气油比对油颗粒的作用在于颗粒附近空气的气动力作用,当气油比增加到一定程度时,颗粒尺寸减少到了一定程度,空气的气动力对颗粒破碎的影响已减少。

以上说明气油比的提高对蒸发管蒸发性能的提高是有利的,但作用有限。

2.2 进口空气温度影响

进口空气常压,气油比不变、管壁不加热,蒸发管进口流速仍保持 3% 压降的流速,改变进口空气温度,研究其对蒸发管蒸发率、SMD 的影响。进口空气温度对燃油蒸发率、SMD 的影响如图 5 所示。

由图 5 可以看出,随着进口空气温度的上升,

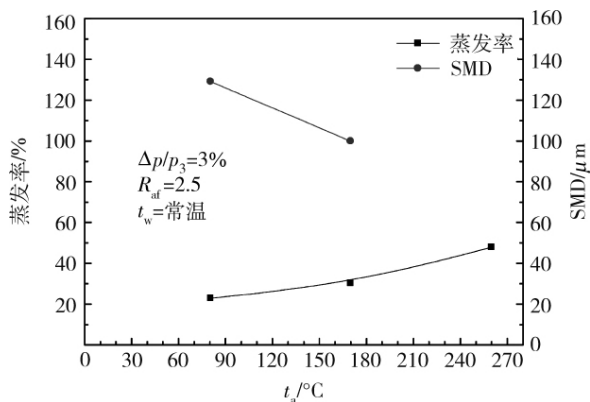


图 5 进口空气温度对蒸发率、SMD 的影响

Fig. 5 Influence of vaporizer inlet air temperature on vaporization rates and SMD

蒸发管蒸发率呈上升趋势, SMD 值随着温度的升高呈下降趋势。进口空气由 80.5°C 上升到 260°C 时,蒸发率可以由 22.9% 上升到 47.9%。说明进口空气温度的上升可以较大地提高蒸发管的蒸发率。

在图 5 中,需要说明的是:虽然本实验中所用的 LSA-III 型激光粒度测试仪其测量范围为 $5 \sim 584 \mu\text{m}$,但由 LSA-III 型激光粒度测试仪的工作原理可知其在进行颗粒测量时,仪器所射出来的光柱内要求颗粒有一定的浓度,若当此颗粒浓度低于一定值时,LSA-III 型激光粒度测试仪将失效。因为此时颗粒的散射效果很弱,LSA-III 型激光粒度测试仪无法由此判断出此时的颗粒的 SMD 值。因此,虽然在空气温度为 260°C 时,蒸发率也只有 47.9%,但由于本实验中所使用的燃油量本就少,在蒸发率约为 50% 或超过 50% 时,蒸发管出口的颗粒浓度已低到不能明显探测到,因此此时的测量就会产生比较大的误差,这里将不对其进行比较。但由前两组数据可以看出进口空气温度的升高, SMD 将减小。

2.3 管壁温度的影响

保持蒸发管进口空气流速仍在 3% 压降下的流速,进口空气温度为 80.5°C ,气油比为 2.5 下,通过燃烧室排出的燃气对蒸发管管壁进行加热,使蒸发管壁达到设计点的温度,从而研究蒸发管壁温对蒸发率、SMD 的影响,实验结果如图 6 所示。

由图 6 中可以看出:当壁温被加热到 260, 400°C 时,蒸发率分别达到约 70%, 90%。

管壁温度为 260, 400°C 时,壁温已高出航空燃油的沸点,此时管壁上的贴壁油膜将大量蒸发,相对于管壁常温的情况已大大地减少了贴壁油膜

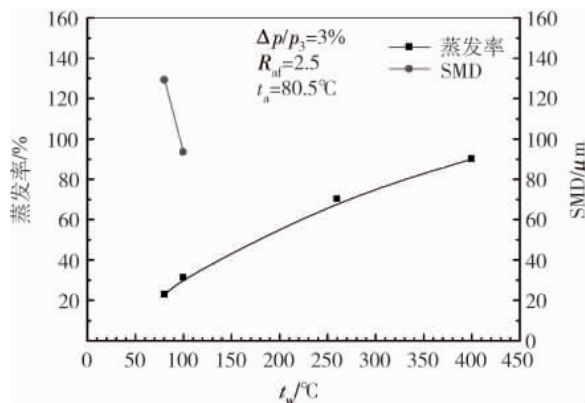


图 6 进口加温条件下壁温对蒸发率、SMD 的影响

Fig. 6 Influence of wall temperature on vaporization rate and SMD with high temperature vaporizer inlet air

的未蒸发燃油量,从而使得蒸发管蒸发率得到快速提高.在 SMD 实验中,正如前面所说,当壁温达到 260 °C 或 400 °C 时,蒸发管出口颗粒浓度未达到 LSA-III 型激光粒度测试仪的测雾要求.因此此时 LSA-III 型激光粒度测试仪测量出来的结果将不再讨论.

由以上分析可以认为管壁温度对蒸发性能的提供是有利的.

比较进口空气温度与管壁温度对蒸发性能影响实验结果可以看出:当进口空气温度或管壁温度达到 260 °C 时,此时温度已高出燃油沸点,进口空气温度只能将蒸发率提高至约 40%,而壁温能将蒸发率提高至约 70%,由此可以说明蒸发管管壁温度对蒸发性能的影响大于进口空气温度对蒸发性能的影响.该实验中还发现,在蒸发管进口参数变化在一定范围之内时,管壁温度达到 400 °C 能使蒸发率达到 90% 以上.

3 结 论

本文采用燃烧器的高温燃气对蒸发管壁进行加热,模拟蒸发管工作环境,对蒸发管进行了蒸发特性和雾化特性的研究,测试了气油比、进口空气加温及管壁加温对燃油蒸发率和出口 SMD 的影响,得到以下结论:

1) 气油比、进口空气温度的增加有利于提供蒸发性能,但该实验工况下作用有限,进口空气温度的作用略大于气油比的作用.

2) 蒸发管蒸发性能的影响因素中,蒸发管管壁温度作用最大,当蒸发管壁温度较高时,蒸发管进口空气温度及气油比对蒸发率的影响效果不明

显;在蒸发管进口参数变化在一定范围之内时,管壁温度达到 400 °C 能使蒸发率达到 90% 以上.

参考文献:

- [1] 林宇震,许全宏,刘高恩.燃气轮机燃烧室[M].北京:国防工业出版社,2008.
- [2] 朱菁,郭新华,林宇震,等.微小“T”型蒸发管蒸发率实验[J].航空动力学报,2007,22(8):1273-1277.
ZHU Jing, GUO Xinhua, LIN Yuzhen, et al. Experimental research on vaporization rate of micro “T”-vaporizer[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(8): 1273-1277. (in Chinese)
- [3] Sotheran A. The Rolls-Royce annular vaporizer combustor [R]. ASME Paper 83-GT-49, 1983.
- [4] Tamaru T, Suzuki K, Oppaty Y. A study of a fuel vaporizer for a gas turbine engine[R]. JSAE Paper 19, 1987: 135-141.
- [5] 林宇震,刘俊,许全宏,等.微小“T”型蒸发管在常压条件下蒸发率研究[J].航空动力学报,2006,21(5):843-847.
LIN Yuzhen, LIU Jun, XU Quanhong, et al. Study on vaporization rate of a mini T-vaporizer under atmospheric pressure condition[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(5): 843-847. (in Chinese)
- [6] 熊庆荣,雷雨冰,黄国平,等.厘米级微型蒸发管式燃烧室性能实验研究[J].航空动力学报,2007,22(5):733-737.
XIONG Qingrong, LEI Yubing, HUANG Guoping, et al. Experimental research on a centimeter-scale micro combustor with vaporizing tube[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(5): 733-737. (in Chinese)
- [7] 光辉,许全宏,朱菁,等.一种离心喷嘴多孔蒸发管的蒸发率实验[J].航空动力学报,2011,26(2):337-342.
GUANG Hui, XU Quanhong, ZHU Jing, et al. Experimental study of evaporation rate for multihole vaporizer with pressure swirl atomizer[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(2): 337-342. (in Chinese)
- [8] 诸惠民,赵广平.蒸发管气动性能的试验研究[C]//中国航空学会第三届燃烧会议论文集.北京:中国航空学会,1982:14-21.
- [9] 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. Research on pulverization and vaporizing process in vaporizing tube[J]. Experiment and Research of Gas Turbine, 1989, 2(4): 45-54. (in Chinese)
- [10] 斯坦因.旋风分离器——原理,设计和工程应用[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [11] 杨世铭.传热学[M].4版.北京:高等教育出版社,2008.
- [12] 张弛,张荣伟,徐国强,等.直射式双旋流空气雾化喷嘴的雾化效果[J].航空动力学报,2006,21(5):806-809.
ZHANG Chi, ZHANG Rongwei, XU Guoqiang, et al. Experimental investigation on atomization of an air-blast atomizer with plain-orifice nozzle and dual-swirl cup[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(5): 806-809. (in Chinese)