

# 蒸发管蒸发效率的试验与管内两相流动的数值模拟

李超, 雷雨冰, 潘鑫峰

(南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016)

**摘 要:** 为研究微型燃烧室蒸发管的雾化蒸发性能, 试验研究了进气温度、气油比(AFR)、管壁温度和进口空气流速对燃油蒸发率的影响。试验结果表明: 进气温度和进口空气流速是影响蒸发效率的两个主要因素; 当气油比减小到3.0时, 管内两相流型由膜态沸腾向过渡态沸腾转变, 该状态下燃油与管壁的换热效率最低。蒸发管数值仿真引入离散相模型(DPM)和液滴碰壁飞溅模型, 蒸发效率计算结果与试验数据呈现相同趋势。在此基础上研究了气动参数对燃油雾化的影响。计算结果表明, 进口空气流速的提高可以改善燃油雾化细度, 但不利于液滴分布的均匀性, 索太尔平均直径(SMD)与进口空气流速的-1.69次方成正比。

**关键词:** 微型蒸发管; 蒸发管性能; 两相流; 液滴飞溅; 附壁油膜

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

## Experiment on evaporation efficiency of vaporizer and numerical simulation of two-phase flow in vaporizer

LI Chao, LEI Yubing, PAN Xinfeng

(Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,

College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** To study the atomization and evaporation characteristics of rear intake vaporizer, the experiment researched the influences of intake temperature, air fuel ratio (AFR), wall temperature and inlet air velocity on evaporation efficiency. Result of the experiment showed that intake temperature and inlet air velocity were two major factors influencing evaporation efficiency; when AFR decreased to 3.0, the flow pattern transformed from film boiling to transition boiling, now heat efficiency was the lowest. Discrete phase model (DPM) and droplet splashing model were employed to simulate the two-phase flow in the vaporizer. Calculation of evaporation efficiency was in reasonable agreement with experimental data. The numerical results show that the increase of inlet air velocity can improve the atomization quality, but it is not conducive to the uniformity of droplet distribution. Sauter mean diameters (SMD) is proportional to the -1.69 power of inlet air velocity.

**Key words:** micro vaporizer; performance of vaporizer; two-phase flow; droplet splashing; wall-attached fuel film

收稿日期: 2017-09-08

作者简介: 李超(1992—), 男, 硕士生, 研究领域为微型涡喷发动机燃烧室。E-mail: superlechao@163.com

引用格式: 李超, 雷雨冰, 潘鑫峰. 蒸发管蒸发效率的试验与管内两相流动的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2018, 33(12): 2877-2884.  
LI Chao, LEI Yubing, PAN Xinfeng. Experiment on evaporation efficiency of vaporizer and numerical simulation of two-phase flow in vaporizer[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(12): 2877-2884.

随着航空技术的发展,微型涡喷发动机(mi-cro turbine engine, MTE)的应用日益广泛<sup>[1-3]</sup>。燃烧室作为发动机的核心部件之一,在微小型化的发展过程中,相比大型航空发动机的燃烧室有其自身的特点。

对于微型涡喷发动机的燃烧室而言,受尺寸及成本限制,一般不使用复杂的喷嘴技术,而采用蒸发管作为供油装置<sup>[4-6]</sup>。图 1 为一种典型蒸发管式微型燃烧室简图,这种类型的燃烧室具有供油压力低、火焰清洁、不容易产生积碳等优点<sup>[7]</sup>。其火焰的稳定主要依靠蒸发管射流对前端壁面的冲击和主燃孔进气所产生的涡流来实现。

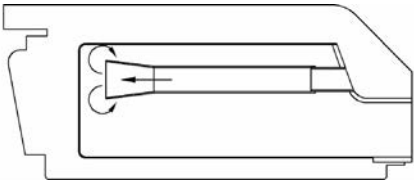


图 1 蒸发管式微型燃烧室简图

Fig. 1 Diagram of micro-combustor with vaporizer

蒸发管雾化蒸发特性对燃烧室性能有重要影响,但在工作状态下蒸发管的雾化蒸发特性并不是十分清楚,因此有必要进一步研究主要气动、热力学参数对蒸发管性能的影响规律。

1 蒸发管燃油蒸发率测试试验

1.1 蒸发管蒸发率试验系统简介

本文以内径为 9 mm,带有出口扩张段的直蒸发管作为试验对象,其结构示意图如图 2 所示。为模拟蒸发管的真实工作状态,以螺杆空气压缩机作为气源,气体经过稳压罐和管道空气加热器后进入蒸发管试验段;所采用的航空煤油种类为 RP-3,并使用微型齿轮泵供油;试验过程中在蒸发管外部缠绕电磁感应线圈,在高频发生器的作用下,线圈内产生高频交变磁场,从而在金属管壁内部产生电涡流,将电能转化为热能。从蒸发管出口喷出的油雾液滴由微小型旋风分离器进行收集,该分离器的处理能力为 40 m<sup>3</sup>/h,可收集到蒸气中 98% 以上的液体成分。图 3 为试验系统简图。

本文的蒸发管特性试验均是在 101 kPa 常压下进行的,进口空气温度范围在 370~510 K 之间;空气流量为 0.36~3.34 g/s;气油比为 2.5~8.0;外管壁温度在 600~950 K 之间。采用单一变量法,分别研究了进气温度、进口空气流速、气



图 2 蒸发管几何构型

Fig. 2 Geometrical configuration of vaporizer

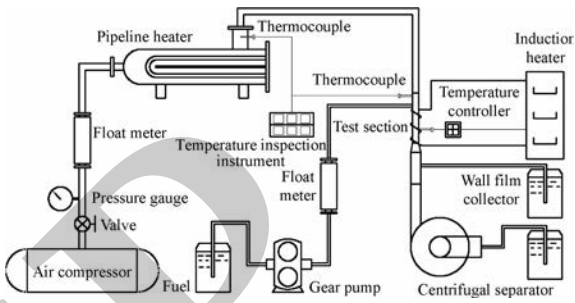


图 3 蒸发率测试试验系统简图

Fig. 3 Diagram of evaporation efficiency test system

油比和管壁温度对蒸发管燃油蒸发效率的影响。

喷入蒸发管内的液态燃油受高速气流的作用破碎细化并与高温空气掺混传递热量,除此以外还有部分燃油与高温管壁接触发生沸腾传热等一系列复杂的物理过程。在开展蒸发管特性试验研究之前,本文对针对蒸发管内的油膜形成情况,在图 3 所示试验系统的基础上,设计可视化试验件进行油膜观察。为方便石英透光片的安装,采用相同水力直径的矩形通道代替蒸发管,油膜观察段结构如图 4 所示。

在气油比为 3~7,壁温为 600~800 K 的条件下进行试验,结果表明采用侧向喷射的供油方式,燃油垂直冲击在壁面上,在管内气流和燃油射流



图 4 油膜观察试验件

Fig. 4 Fuel film observation test section

的带动下,会在管道表面形成厚度极薄的贴壁油膜,油膜在壁面上的铺展宽度和沿流向的延展长度受进气温度、燃油流量、壁面温度等多种因素影响,且只有在管壁温度和气油比极低的情况下,才会有附壁的油流从蒸发管溢出。图 5 为气油比为 4 时,不同壁面温度  $T_w$  的管内油膜形成情况,从上到下  $T_w$  分别为 600、700、800 K。L 蓝框内即油膜覆盖的区域,并以红线显示出油膜边缘,从图中可以看出随着  $T_w$  的增加,壁面热流密度升高,导致油膜贴壁流动的过程中发生干涸,干涸点之后壁面不再湿润,且随着加热功率的增大干涸点逐渐向上游移动。

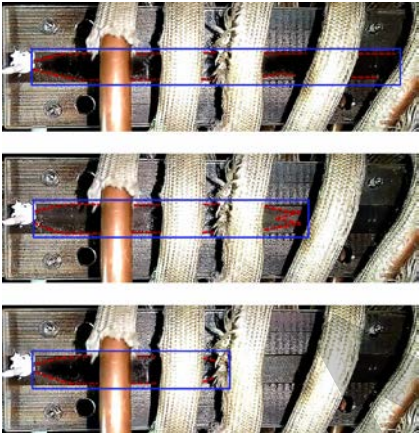


图 5 油膜观察试验图  
Fig. 5 Observation experiment of fuel film

综上所述,蒸发管燃油的去向可分为三部分:  
①已经蒸发成气态的燃油蒸气,文献[8]认为喷雾中直径小于  $5\mu\text{m}$  的液滴均可看作是气态;②在空气中受曳力作用,随气流流动的喷雾液滴群;③铺展在管道内表面的附壁油膜中从出口溢出的部分。在这种情况下,定义燃油蒸发效率的计算公式为

$$\eta_e = \left(1 - \frac{\dot{m}_t + \dot{m}_u}{\dot{m}_i}\right) \times 100\% \quad (1)$$

采用称质量法得到试验过程中的燃油喷射量及未蒸发燃油量。式(1)中  $\dot{m}_t$  为贴壁燃油溢出质量,使用与出口存在 0.5 mm 间隙的同心管道收集,在前文中提到的试验条件下,鲜少有溢出油流的情况,收集到的  $\dot{m}_t$  很小,基本可以忽略; $\dot{m}_u$  为旋风分离器收集到的油雾质量, $\dot{m}_i$  为蒸发管供油量。

1.2 试验结果与分析

1.2.1 进气温度的影响

在进口空气流速  $V_a$  分别为 25、55 m/s 的两

种流速状态下,保持恒定为 4 的气油比和 800 K 的壁面温度,研究了蒸发管进气温度  $T_a$  对燃油蒸发效率的影响。

航空煤油作为一种混合物,其中含有的链烷烃、环烷烃、烯烃等碳氢化合物所占比例的不同,决定其沸点温度也有所差异;国产 RP-3 号煤油的初馏点在 435.2 K 左右,试验中大部分状态点的空气温度已经高于该值。从图 6 中可看出,进气温度为 370 K 时,两种流速下的蒸发效率分别为 41.2% 和 43.6%,相差并不大。随着进气温度的升高,蒸发效率呈现上升趋势。 $V_a$  为 25、55 m/s 时,  $\eta_e$  分别与  $T_a^{1.85}$  和  $T_a^{2.23}$  成正比;高流速状态下,空气温度对蒸发效率的影响更大。提高进口空气流速,喷雾的雾化细度将增加,液滴的比表面积和强迫对流换热效果提升,受此影响蒸发效率上升更迅速;高流速状态与 MTE 正常工作时管内流态更加接近,设计状态下 MTE 压气机出口总温可达到 480 K,此时  $\eta_e$  已经达到 84.6%。当进气温度进一步提升至 510 K 时,  $\eta_e$  可以高达 93.4%。

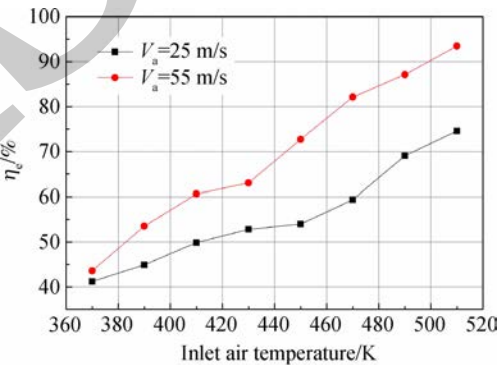


图 6 进气温度对蒸发效率的影响  
Fig. 6 Influence of inlet air temperature on vaporization efficiency

1.2.2 气油比的影响

将气油比作为控制变量,当管壁温度为 800 K,进气温度为 470 K 时,探讨流速分别为 25、55 m/s 速状态下气油比对燃油蒸发效率的影响。从图 7 中可看出,气油比在 3.0~6.5 范围内,燃油蒸发效率与气油比基本呈正比例关系。值得注意的是,当气油比由 2.5 增加到 3.0 时,蒸发效率出现逆向规律的减小。采用侧喷方式供油,燃油直接冲击在高温管壁上,油束及附壁油膜会对壁面起到冷却作用,同时燃油受管壁加热温度急剧上升,发生相变,这就涉及到管内沸腾传热等物理过

程, 换热量与壁面过热度(表面温度  $T_w$  与燃油饱和温度  $T_s$  之差)的关系如图 8 所示。附壁油膜与壁面处于过渡沸腾状态时, 当燃油流量减少, 管内壁面温度上升, 固体表面由燃油气化产生的气泡逐渐增多, 液膜流型由环状流(annular flow)逐渐转变为泡状流(bubbly flow)(见图 9), 燃油与固壁间由于气泡的产生, 使两者之间的传热能力迅速下降, 从试验数据上看, 表现为蒸发效率的下

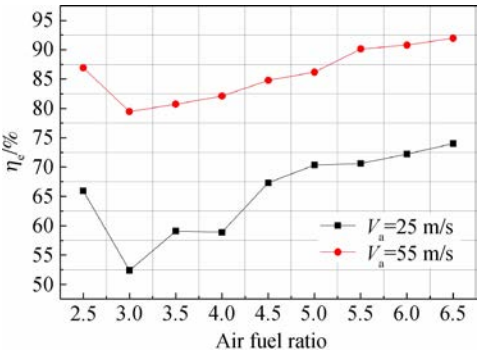


图 7 气油比对蒸发效率的影响  
Fig. 7 Influence of air fuel ratio on vaporization efficiency

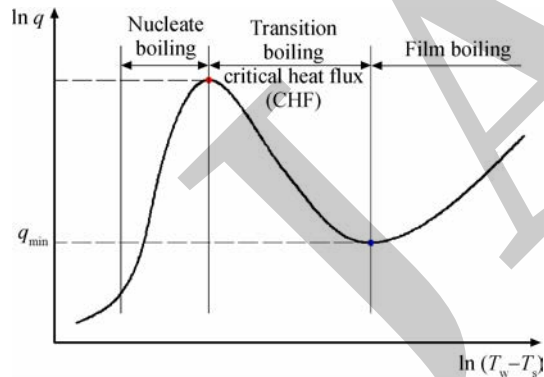


图 8 管内沸腾的  $q \sim \Delta T$  曲线  
Fig. 8  $q \sim \Delta T$  curve of in-tube boiling

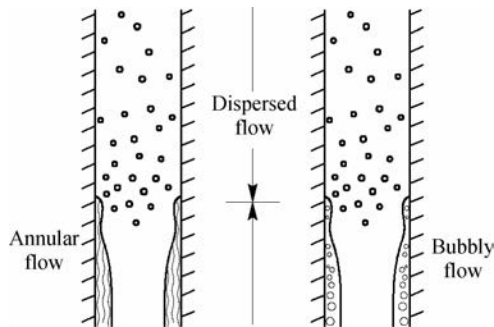


图 9 管流动沸腾的流型  
Fig. 9 Stream patterns of boiling flow in tube

降。随着气油比从 3.0 进一步增大, 燃油对壁面的冷却作用减小, 壁温继续上升, 附壁油膜与管壁分界面间逐渐形成一层连续稳定的蒸气膜, 此时燃油处于膜态沸腾状态, 壁面热量通过对流和辐射的方式传递给燃油, 换热效率随着气油比增大缓慢增长。

1.2.3 管壁温度的影响

图 10 是进气温度为 470 K, 气油比为 4 时, 两种流速状态下燃油蒸发效率随外管壁温度  $T_w$  的变化规律曲线。以燃油的饱和温度  $T_s$  为 435.2 K 计算, 各试验工况最大壁面过热度的范围在 164.8~514.8 K 之间。上文分析得到当蒸发管内气油比大于 3 时, 附壁油膜处于膜态沸腾状态, 油膜与壁面的换热效率较低。随着壁面温度的提升, 液膜沸腾逐渐加剧, 会在某处发生干涸。干涸后的区域, 有许多液滴弥散在蒸汽流中, 这些液滴撞击壁面的直接传热很小。因为, 当壁面温度高于莱登弗斯特(Leidenfrost)温度  $T_{Leid}$  时, 液滴很难接触到热壁面, 液滴的传热主要以主流蒸汽的对流传热和壁面的热辐射为主。

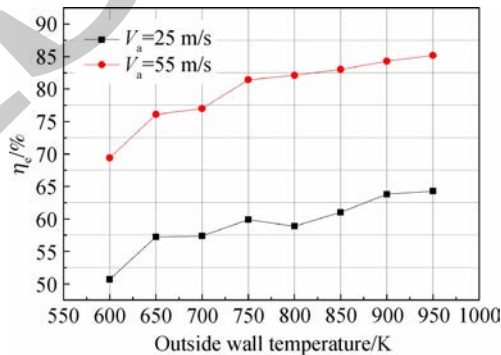


图 10 外管壁温度对蒸发效率的影响  
Fig. 10 Influence of outside wall temperature on vaporization efficiency

文献[9-10]给出了单液滴 Leidenfrost 温度的计算公式

$$T_{Leid} = T_d + \frac{(27/32)T_c - T_d}{\exp(0.00175B)\operatorname{erfc}(0.042\sqrt{B})}$$

(2)

式中  $B=1/(\rho\kappa c)$ ;  $T_d$  为碰壁前液滴温度;  $T_c$  为液滴临界温度;  $\kappa$ 、 $c$  分别为导热系数和比热容值;  $\rho$  为液滴密度(单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ )。得到煤油的莱登弗斯特温度  $T_{Leid}$  在 550.4 K 左右, 无论在本次试验中的几组状态还是在蒸发管实际工作状态下, 弥散流(dispersed flow)中的液滴都不会湿润壁

面。从图 10 的蒸发率变化曲线中可以看出,壁面温度自 600 K 增加到 950 K,大流速和小流速状态下蒸发率的增长幅度分别为 22.8% 和 26.8%,壁面温度提升有利于增加燃油蒸发效率,但其影响程度与其他因素相比较小。

1.2.4 进口空气流速的影响

分别在燃油流量为 0.36 g/s 和 0.72 g/s 固定不变的条件下,进口流速从 20 m/s 增大到 60 m/s,进气温度和壁面温度分别为 470 K 和 800 K。从图 11 中可以看出蒸发效率与进口空气流速基本呈正比例的线性关系。

雾化产生的液滴直径大小关乎着燃油气化所需要的时间,对于介质式气动雾化喷嘴,蒸发管内流动情况关乎着喷嘴的雾化情况;流速增大使作用在液滴表面的气动力增加,气流中的液滴变得容易破碎,从而改善燃油的雾化细度降低,蒸发效率上升。对于蒸发管弥散流中漂浮液滴的雾化情况,将在下文数值模拟计算结果中进一步探讨。

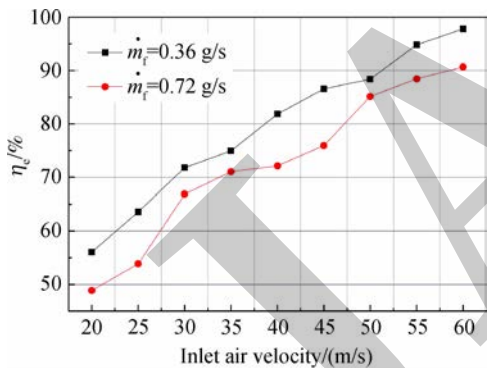


图 11 进口空气流速对蒸发效率的影响  
Fig. 11 Influence of inlet air velocity on vaporization efficiency

结合试验所测数据,欲建立蒸发效率与主要气动参数的关系式。根据控制变量为气油比  $R_{af}$  和进口空气流速  $V_a$  的两组阵列数据点,将参数无量纲化处理后,确定关系式形式为式(3)并拟合出关于数据点的三维曲面如图 12 所示。

$$\eta_e = 2.812 \left[ \ln \left( \frac{\rho_a V_a d_e}{\mu} \right) \right]^{1.852} R_{af}^{0.151} \quad (3)$$

经验公式(3)仅适用于在  $T_a = 470\text{ K}$ ,  $T_w = 800\text{ K}$ , 且  $V_a$  小于 60 m/s 的范围内适用;计算值与试验值误差控制在  $\pm 4.8\%$ 。从图中可以看出,相同气油比下,减小  $V_a$  可达到的燃油蒸发效率上限将会降低。

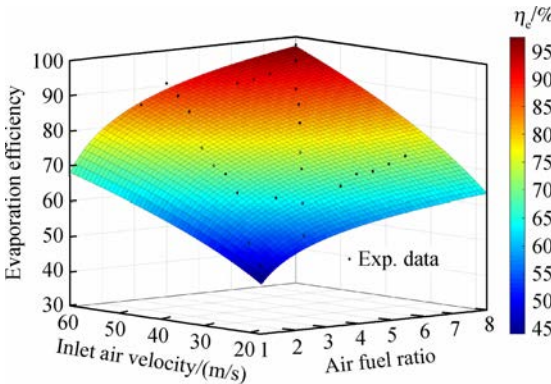


图 12 气动参数对蒸发效率的影响  
Fig. 12 Influence of aerodynamic parameters on vaporization efficiency

2 蒸发管数值模拟

2.1 计算模型与网格划分

本文采用 Fluent 进行数值模拟计算,连续相采用可实现  $k-\epsilon$  双方程湍流模型,应用 SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equations) 算法求解,由于燃烧室的压力变化不大,选用速度入口 (velocity-inlet) 及自由流出口 (out flow)<sup>[11]</sup>,为消除出口回流的影响,延长出口计算域。燃油蒸发采用航空煤油的简化分子式  $C_{12}H_{23}$ ,选用离散相 (DPM) 及组分输运模型计算蒸发管内的两相多组分流动。喷嘴模型选择直射式喷嘴 (plain orifice atomizer),考虑了液滴破碎的情况,液滴的破碎模型选 wave 模型,并使用用户自定义函数 UDF (user-defined function) 建立油滴撞击壁面破碎飞溅的模型。

图 13 为本文计算网格,采用 O 型结构化网格,近壁处网格加密,壁面  $Y^+$  小于 30,网格量约为 70 万。



图 13 蒸发管计算网格  
Fig. 13 Computational grids of vaporizer

对于微型燃烧室的蒸发管,其管径小,管道长径比大。在如此狭小的空间中,燃油喷雾与壁面发生碰撞的情况是不可避免的。

为了判断给定条件下液滴碰撞壁面的后续行为,文献[12-13]对试验数据进行归纳总结,根据韦伯数  $We$  建立液滴碰壁模型。为简化分析,本文中液滴撞击干燥壁面的模型基于以下假设。

1) 根据单液滴碰壁来研究液滴群碰壁后续

- 的行为。
- 2) 各发展形态之间界限清晰。
  - 3) 忽略周围液滴间的相互影响。
  - 4) 忽略气体边界层对撞击液滴的影响。

表述液滴撞击条件的参数有很多,如入射液滴的速度、尺寸、入射角,液滴的黏性和表面张力等物理特性以及壁面表面粗糙度等。干燥壁面条件下当液滴以较低的能量撞击壁面时,液滴会以接近油珠的形式附着在表面。随着撞击能量增大,液滴离开壁面的方式由附着转变为飞溅,并伴随着液滴破碎。

干燥壁面条件下,液滴撞击壁面后由附着转变为飞溅的过渡准则可由无量纲参数  $K$  表示,其表达式为  $K = Oh^{-0.4} We$ , 式中奥内佐格数  $Oh = \mu_l / \sqrt{\rho_l d_i \sigma}$  为表征液滴黏性力与表面张力相对大小的参数; $\mu_l$ 、 $\sigma$  分别为液滴的黏度跟表面张力这  $d_i$  为入射液滴直径;撞击壁面的能量大小用韦伯数  $We = \rho_l v^2 d_i / \sigma$  表示。当  $K$  增大到某一临界值时,即产生液滴破碎,并以进射的方式飞离壁面;临界值的表达式是基于试验数据拟合得到的,如式(4)所示。

$$K_{dry, splash} = 649 + 3.76 R_{nd}^{-0.63} \tag{4}$$

式中无量纲固壁表面粗糙度  $R_{nd}$  为平均表面粗糙度  $R$  与入射液滴直径  $d_i$  的比值。则产生飞溅的临界值可由韦伯数  $We$  表示为

$$We_{dry, splash} = Oh^{0.4} (649 + 3.76 R_{nd}^{-0.63}) \tag{5}$$

由于飞溅过程伴随着液滴破碎,因此需要确定撞壁后的液滴特征包括破碎滴液数量、液滴大小、速度等多个参数。根据吴子牛等人<sup>[14]</sup>对液滴飞溅的研究,破碎产生的二次液滴,其直径大小  $d_s$  的概率密度函数(probability density function)服从对数正态分布,即

$$f\left(\frac{d_s}{d_i}\right) = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{\pi}(d_s/d_i)} \exp\left\{-3\left[\ln\left(\frac{d_s}{d_i}\right) - \frac{1}{6} - \ln\left(\frac{d_m}{d_i}\right)\right]\right\} \tag{6}$$

以韦伯数、雷诺数表示的无量纲数  $\lambda = WeRe^{0.5}$  确定液滴破碎产生二次液滴的中间直径  $d_m$ ,以简化飞溅过程的物理分析。

$$\frac{d_m}{d_i} = \max(19.86\lambda^{-0.5}, 0.06) \tag{7}$$

并通过质量守恒的方式计算液滴包(parcel)内液滴数量。图 14 给出了飞溅液滴速度  $V_s$  的分解图<sup>[15]</sup>。飞溅后液滴的切向速度分量与入射切向速度分量的关系为  $V_{st} = \xi V_{it}$ , 其中  $\xi$  为摩擦因

数,本文中  $\xi$  在 0.75~0.95 内随机取值。决定液滴出射的另一个速度分量  $V_{sn}$ ,其大小服从 Nukiyama-Tanasawa 分布函数式(8)。

$$f(V_{sn}) = \frac{148.15}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{V_{sn}^2}{V_{in}^3} \exp\left[-\left(\frac{V_{sn}}{0.3V_{in}}\right)^2\right] \tag{8}$$

式中  $V_{in}$  为入射液滴的法向速度分量大小。文献[16]中假设二次液滴的出射角  $\theta$  在  $5^\circ \sim 50^\circ$  之间等概率取值。

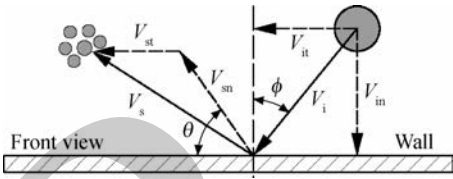


图 14 飞溅液滴速度分解简图  
Fig. 14 Schematic diagram of the velocity of splashed droplet

2.2 蒸发管雾化特性分析

工作状态下蒸发管内部燃油液滴群的雾化特性并不是十分清楚,试验条件的限制是这方面研究的障碍;下面将使用上述介绍的数值模拟方法对蒸发管内的两相流进行仿真研究。

2.2.1 计算结果校验

在进口空气流速  $V_a$  维持在 55 m/s 的状态下,保持恒定为 4 的气油比和 800 K 的外壁面温度,改变蒸发管进气温度  $T_a$ ,  $T_a$  的范围在 370~510 K;研究该参数对附壁油膜生成情况的影响。首先将燃油蒸发效率  $\eta_e$  的计算结果与试验结果进行对比校验。从图 15 中可以观察到,两种方法得到的燃油收集率拟合曲线随着  $T_a$  的增加均呈现出相同的递增趋势;进口温度较低的情况下计算结果与试验相差较大,当  $T_a$  增大到 430 K 之

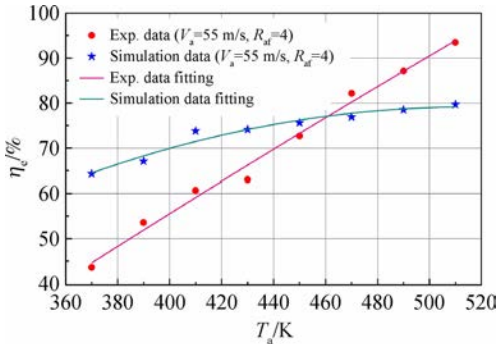


图 15 蒸发效率随进气温度的变化  
Fig. 15 Evaporation efficiency versus inlet air temperature

后,  $\eta_e$  的相对误差控制在 14% 以内。推测误差出现的原因是数值计算时煤油替代模型为单一组分的  $C_{12}H_{23}$ , 其蒸发温度为固定的 341 K, 沸腾温度为 477 K, 而真实煤油的蒸发则复杂许多, 常以馏程表述煤油蒸发性质, 其中包含各组分的沸腾临界值。RP-3 的初馏点温度在 435.2~457.2 K 之间, 终馏点温度范围为 484.2~532.2 K。试验的进气温度  $T_a$  基本涵盖了 RP-3 的馏程范围, 因此, 测得的燃油蒸发效率对进气温度的变化比较敏感。

2.2.2 进口空气流速对管内两相流动的影响

图 16 是空气温度  $T_a=470\text{ K}$ , 燃油流量  $\dot{m}_f=0.36\text{ g/s}$ , 管道壁面温度为 800 K 时, 蒸发管出口索太尔平均直径及油雾分布指数  $N$  随进口空气流速的变化规律。蒸发管内采用的是直射式喷嘴, 供油压力较低, 雾化能力有限; 燃油主要依靠蒸发管内高速气流冲击雾化混合<sup>[17]</sup>。文献[18]中提到进口空气流速对油雾细度起着决定性作用, 一般蒸发管出口索太尔平均直径之间  $d_{32} \propto V_a^{-n}$ ,  $n$  的值在 1.76~2.20 之间, 本文拟合得到的  $n$  为 1.69。由于蒸发管也属于一种介质式雾化喷嘴, 雾化绝大部分发生在通道内, 进气压力也会对蒸发管雾化性能产生影响, 因此常压下计算得到雾化质量会低于高压条件下的雾化质量。另外, 提高进口空气流速虽然可以使燃油雾化质量得到改善, 但是不利于喷雾油滴的分布均匀性。

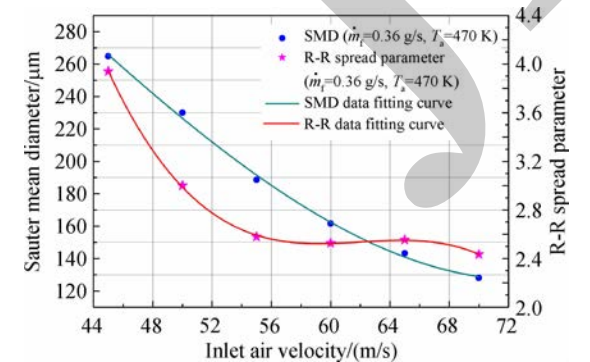


图 16 分布指数  $N$  及索太尔直径随进口空气流速的变化  
Fig. 16 Spread index  $N$  and SMD versus inlet air velocity

雾化过程油滴的破碎是气动力与液滴表面张力共同作用的结果, 其相对大小以气动韦伯数  $We_a = \rho_a v_r^2 d / \sigma$  表示; 其中  $\rho_a$  为气体密度,  $v_r$  为气流与油滴的相对速度,  $d$  为油滴直径。内聚力  $4\sigma/d$  与气动力  $\rho_a v_r^2 / 2$  达到平衡时, 即液滴破裂的临

界状态<sup>[19]</sup>, 此状态下临界气动韦伯数  $We_{a, critical}$  为 8。图 17 是蒸发管内气动韦伯数  $We_a$  的沿程变化趋势, 从图中可以看出, 在燃油喷射位置处, 液滴与来流的相对速度最大, 此处蒸发管内油雾的韦伯数达到峰值; 随着曳力作用, 油雾追随气流流动, 相对速度减小, 另外油滴也进一步分裂, 作用在油滴表面的气动力也减弱, 韦伯数逐渐下降到临界值以下。因此, 射流雾化过程主要发生在喷嘴下游一定范围之内。提高蒸发管进口空气流速可延长气动力的作用距离以及燃油喷雾的初始韦伯数, 有助于减小油雾的索太尔平均直径。

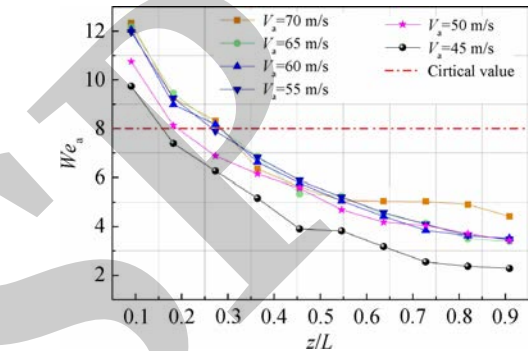


图 17 气动韦伯数的沿程变化  
Fig. 17 Variation of  $We_a$  along the distance

3 结 论

本文针对微型燃烧室中的蒸发管, 在常压条件下进行了试验和数值模拟, 分别研究了进气温 度、气油比、管壁温度以及进口空气流速对燃油蒸发的影响。在蒸发管的数值计算中, 引入了液滴飞溅模型。将进口空气流速作为影响因素, 对蒸发管内燃油雾化情况进行了研究。通过对试验数据和数值计算结果的总结分析得出如下结论:

- 1) 在试验测试的影响因素中, 进气温度  $T_a$  和进口空气流速  $V_a$  与其他两种影响因素相比较, 对燃油蒸发效率的影响较大。
- 2) 气油比较大的条件下随着油气比的增加, 燃油蒸发效率呈上升趋势。但在小气油比的情况下, 存在一个临界值, 气油比低于 3 时, 管内油膜由稳定膜态沸腾转变为过渡态沸腾, 燃油受壁面加热, 热流密度  $q$  上升, 蒸发效率的变化趋势与大气油比条件下相反。
- 3) 在气油比为 4, 进气温度为 470 K 的条件下, 管壁温度由 600 K 增加到 950 K, 航空煤油始终处于过热状态, 管内油膜为膜态沸腾的状态, 提升管壁温度对蒸发效率并没有太大幅度的提升。

4) 常压下,随着流速提升燃油雾化细度得到改善,但会使粒径均匀度下降;蒸发管出口索太尔直径与空气流速的-1.69次方成正比。

## 参考文献:

- [1] 熊庆荣,雷雨冰,黄国平,等.厘米级微型蒸发管燃烧室性能试验研究[J].航空动力学报,2007,22(5):733-738.  
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): 733-738. (in Chinese)
- [2] 黎明,吴二平,索建秦.微型涡喷发动机燃烧室的设计研究[J].航空动力学报,2009,24(1):70-74.  
LI Ming, WU Erping, SUO Jianqin. Design and study of combustor for micro-turbojet engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(1): 70-74. (in Chinese)
- [3] SUZUKI T K, OPPATA Y. A study of a fuel vaporizer for a gas turbine engine[R]. Tokyo: Tokyo Joint International Gas Turbine Conference and Products Show, 1971.
- [4] 覃文隆,樊未军.微型涡喷发动机蒸发管性能测试及燃烧室数值模拟[J].航空动力学报,2012,27(4):861-867.  
TAN Wenlong, FAN Weijun. Performance test of micro turbojet engine's evaporator and numerical simulation of the combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(4): 861-867. (in Chinese)
- [5] 樊未军,孔昭健.新型蒸发燃油喷射装置的雾化和蒸发性能[J].推进技术,2007,28(3):244-247.  
FAN Weijun, KONG Zhaojian. Performance of pulverization and evaporation of new type evaporating fuel inject equipment[J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(3): 244-247. (in Chinese)
- [6] 梁德旺,黄国平.厘米级微型涡轮喷气发动机主要研究进展[J].燃气涡轮试验与研究,2004,17(2):9-13.  
LIANG Dewang, HUANG Guoping. Recent development and key techniques of micro-turbine in centimeter size[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(2): 9-13. (in Chinese)
- [7] 诸惠民,赵广平.蒸发管气动性能的试验研究[R].北京:中国航空学会第三届燃烧会议,1982.
- [8] 林宇震,刘俊.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 Yunzhen, LIU Jun. 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)
- [9] BAUMEISTER K J, SIMON F F. Leidenfrost temperature: its correlation for liquid metals, cryogenics, hydrocarbons, and water[J]. Heat Transfer, 1973, 95(6): 118-140.
- [10] 赵治国,解茂昭,王翠华.油雾碰撞高温壁面的油滴分裂及与热壁间换热研究[J].热能动力工程,2006,21(6):598-602.  
ZHAO Zhiguo, XIE Maozhao, WANG Cuihua. A study of oil droplet fracture during the impingement of oil mist on a high-temperature wall surface and the heat exchange of the oil droplets with the high-temperature wall[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy, 2006, 21(6): 598-602. (in Chinese)
- [11] 李聪,方蜀州,张平.微型涡喷发动机燃烧室数值模拟[J].推进技术,2008,29(5):513-518.  
LI Cong, FANG Shuzhou, ZHANG Ping. Numerical simulation of annular combustion chamber for micro-turbine engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(5): 513-518. (in Chinese)
- [12] ZHANG Yanzi, JIA Ming. Development of a new spray/wall interaction model for diesel spray under PCCI-ENGINE relevant conditions[J]. Atomization and Spray, 2014, 24(1): 41-80.
- [13] COSSALI G E, COGHE A, MARENGO M. The impact of a single drop on a wetted solid surface[J]. Experiments in Fluids, 1997, 22(6): 463-472.
- [14] WU Ziniu. Prediction of the size distribution of secondary ejected droplets by crown splashing of droplets impinging on a solid wall[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2003, 18(3): 241-249.
- [15] ANDREASSI L, UBERTINI S. Experimental and numerical analysis of high pressure diesel spray-wall interaction[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2007, 33(7): 742-765.
- [16] BAI C X, RUSECHE H. Modelling of gasoline spray impingement[J]. Atomization and Spray, 2002, 12(3): 1-27.
- [17] 阮昌龙,许全宏.蒸发管蒸发及雾化特性[J].航空动力学报,2012,27(10):2249-2253.  
RUAN Changlong, XU Quanhong. Vaporization and spray characteristics of vaporizer[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(10): 2249-2253. (in Chinese)
- [18] 孙跃中.蒸发管喷嘴燃油雾化特性试验研究[J].航空动力学报,1989,4(3):277-279.  
SUN Yuezhong. An experimental study on fuel spray atomizing characteristics of evaporating pipe atomizer[J]. Journal of Aerospace Power, 1989, 4(3): 277-279. (in Chinese)
- [19] 蔡文哲,蒋雪辉.微型蒸发管中临界韦伯数研究[C]//第六届中国航空学会青年科技论坛文集.北京:中国航空学会,2014:1008-1011.

(编辑:叶青)