

空气中逸散水蒸气传热及相变过程的行为研究

谢业平¹, 刘永泉¹, 张志学¹, 童岩鹏¹, 李宝宽²

- (1. 中国航空发动机集团有限公司 沈阳发动机研究所, 沈阳 110015;
2. 东北大学 冶金学院, 沈阳 110819)

摘 要: 针对航母舰载机蒸汽弹射器滑道逸散水蒸气的传热与凝结现象,建立空气/水蒸气/凝结水三流体的流动、传热及相变过程数学模型。其中具有描述水蒸气复杂过程热力学行为的 IAPWS 模块以自定义程序并入模型中,利用 Eulerian-Eulerian 模型加入质量传递、能量传递和动量传递方程来实现水蒸气流动过程中传热传质问题的研究;在质量传递模型中加入液滴成核和生长理论模型,研究水蒸气的凝结过程。结果表明:在流动过程中,空气-水蒸气-液态水三流体混合,温度逐渐趋于一致;进气道入口压力越低,发动机对水蒸气的吸入量越大;伴随空气流动的水蒸气温度不断下降,并且会因有凝结现象发生;随着空气来流速度的增加,水蒸气的吸入量也会呈现先增加后下降的趋势;随着水蒸气流速的提高,水蒸气进气量上升,空气所占比例有所下降,但仍然是主导地位。

关 键 词: 舰载机; 蒸汽弹射; 水蒸气传热; 冷凝; IAPWS

中图分类号: V231

文献标志码: A

Heat transfer and condensation of overflow steam in air

XIE Yeping¹, LIU Yongquan¹, ZHANG Zhixue¹,
TONG Yanpeng¹, LI Baokuan²

- (1. Shenyang Engine Research Institute,
Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China;
2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: For the heat transfer and condensation of overflow steam in the aircraft steam catapult, a mathematical model was developed to understand the three-fluid flow with the air, steam and condensation water. The module of thermodynamics international association for the properties of water and steam (IAPWS) was incorporated into model system by self-developed user defined function (UDF) code. Eulerian-Eulerian model was used to solve the three fluid flow, exchange of mass, momentum, and energy was included into model equations, moreover, nucleation and growth of liquid droplet were added into mass transfer. Result showed that the mix of the air, steam and condensation water caused the temperature homogenization. Suction volume of steam increased with the decrease of inlet pressure of engine. The condensation phenomena happened with the decrease of steam temperature, and condensation water occurred. Suction volume of steam increased first and then decreased with the increase of air velocity. With the increase of steam velocity, the suction volume of

收稿日期: 2017-05-01

作者简介: 谢业平(1980—),男,高级工程师,硕士,主要从事飞发一体化及发动机整机气动稳定性。

引用格式: 谢业平, 刘永泉, 张志学, 等. 空气中逸散水蒸气传热及相变过程的行为研究[J]. 航空动力学报, 2018, 33(9): 2058-2066. XIE Yeping, LIU Yongquan, ZHANG Zhixue, et al. Heat transfer and condensation of overflow steam in air[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(9): 2058-2066.

steam increased and the air proportion decreased.

Key words: carrier-based aircraft; steam catapult; heat transfer of steam; condensation; international association for the properties of water and steam (IAPWS)

航母舰载机起飞方式主要采用滑跃式起飞、垂直短距滑跑起飞和弹射起飞三种方式^[1]。滑跃式起飞对舰载机本身发动机推力有较高的要求,对战斗机本身携带的武器数量也有严格的限制,并且飞机离舰起飞过程较为缓慢,时间间隔长。垂直短距滑跑起飞主要利用舰载航空发动机推力矢量的控制实现起飞。弹射起飞方式则是利用航母飞行甲板上安装的弹射装置在限定的距离内对舰载机施加外部推力来增加舰载机的加速度,达到舰载机的安全离舰起飞速度后起飞。采用弹射起飞可以有效避免因舰载机携带大量航空燃油和攻击性武器而使舰载机质量增加而无法起飞的弊端。弹射起飞可以使更重更大的飞机在航母上起飞,也可以缩短每次舰载机起飞的时间间隔。有利于提高航母甲板的使用效率、增加舰载机的出动架次和频率^[2]。

典型蒸汽弹射器原理如图 1 所示,气缸内高压、高温蒸汽推动活塞总成高速运动,通过气缸顶部缝隙由连接杆牵动飞机在甲板上加速滑行。

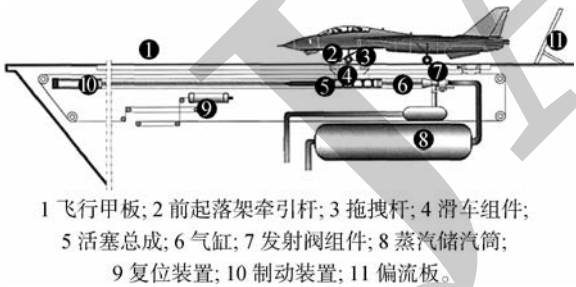


图 1 蒸汽弹射器原理图
Fig. 1 Schematic of steam catapult

国外对蒸汽弹射公布资料较少,美国海军工程研究中心的报告介绍了蒸汽弹射装置中的热力学过程。美军标 MIL-STD-2066(AS)中除了对弹射器的设计进行相关的规范,还公布了某些型号的弹射器的实验数据以及阻拦索的相关内容。美军标 MIL-L-22589D(AS)中对航母舰载机蒸汽弹射装置的相关概念及基本原理和工作过程进行了介绍。Lucas 对舰载机弹射起飞时的最低离舰速度进行了分析研究,而且在报告中对飞机在飞行过程中的姿态变化进行阐述。

此外,国外对水和水蒸气的性质研究较充分,

IAPWS-IF97^[3]公式是国际水和水蒸气协会在爱尔兰根的会议上得到授权通过,由其规定的水蒸气性质可以作用工业实际工程中使用。Wagner 等^[4]对此做出了很大贡献,公式中根据温度和压力将计算方程分为 5 个区域,实际工作点会落在这 5 个区域之一,每个区域对应不同的方程和公式,利用 IAPWS-IF97 公式可以高效计算水蒸气性质。刘继男等^[5]将 IAPWS-IF97 公式应用到了超临界汽轮机的数值仿真中。Pan 等^[6]将其应用于 600 MW 超临界循环流化床锅炉的仿真中,均取得了较准确的结果。

在国内,白建成^[7]发表了蒸汽弹射动力装置的数学模型,周清和^[8]对蒸汽弹射中的关键部件——速率阀进行了分析研究,余晓军等^[9]对航母舰载机蒸汽弹射器的动力学进行了仿真研究,齐强等^[10]对舰载机弹射装置的内部弹道进行了仿真计算。余晓军等^[9]对舰载蒸汽弹射系统进行了建模与仿真研究。高俊东等^[11]对舰载机蒸汽弹射器内的热力学过程进行仿真分析并于蒸汽弹射器的热力学过程相结合进行数学建模。总体来看,国内学者的主要研究方向为蒸汽弹射器的数学建模与仿真分析。

国内外研究重点主要关注于弹射器内部工作过程,缺少蒸汽弹射器泄漏的高温水蒸气对舰载机动力影响的研究。由弹射器的工作原理可知,弹射过程中不可避免地使气缸内部的高压高温水蒸气逸散到大气环境中,被进气道吸入后会在发动机进口产生高温以及温度畸变,降低发动机性能和稳定性,严重时会导致发动机喘振,威胁舰载机起飞安全。

为研究弹射过程泄漏高温水蒸气对发动机的影响,首先需要掌握逸散水蒸气在空气中流动、传热和凝结等行为;其次需要研究影响飞机进气道吸入高温水蒸气的因素;再次需研究水蒸气在发动机进口产生的温升以及温度畸变强度。最终研究高温以及温度畸变对发动机性能和稳定性影响。本文仅开展前两条内容的研究。

1 数学模型

1.1 边界条件

舰载机弹射过程,飞行器进排气系统中气流

温度跨度大(环境温度到超过 2 000 K)、速度跨度大(环境几米风速到超声速),同时计算进气和排气存在收敛慢、计算精度不高等缺点,考虑到本文重点研究弹射器泄漏水蒸气的在进气道附近流动传热、相变过程以及影响蒸汽吸入的因素等,且发动机喷流对此研究影响较小,本文未计算发动机喷流。同时由于本文关注的是吸入进气道之前部分水蒸气和空气之间的流动、传热和相变之间关系,进气道与发动机内流也没有包含。

计算区域如图 2 所示,各边界条件如下:

前方来流模拟舰上甲板风,设置为速度入口条件,根据需求分别计算了 5~40 m/s,压力为当地大气压 101 325 Pa,温度为 300 K;

水蒸气泄露口,设置为速度入口,是水蒸气逸

散的主要来源,在这里可以设置水蒸气和液态水的体积分数,也可以单独喷射一种物质,本文研究时将水蒸气干度设置为 1,液态水是在运动过程中凝结产生,速度分别设置为 10~40 m/s,温度为 423 K;

进气道入口,设置为压力出口,可以吸入水蒸气、液态水和空气,发动机状态越高流量越大,此处负压越大。

出口,设置为压力出口,压力为当地大气压,设置为 101 325 Pa。

其余边界设置为壁面条件。湍流模型采用标准 $k-\omega$ 模型。

1.2 控制方程

现象描述:高温高压的水蒸气从航母甲板滑道泄漏后与空气作用产生空气/水蒸气两相流现象,同时,由于温度、压力骤降,部分水蒸气凝结成水。配装舰载机的发动机工作时,会在进气道入口产生强大的负压作用,部分水蒸气(包括已凝结成水部分)随着周围空气被进气道吸入,这一问题涉及的各种现象之间的相互关系如图 3 所示。

图 3 中给出了空气相、水蒸气相和液态水相的三流体相互关系,这三种流体共同遵守质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程,而且在三流体之间互相存在能量传递和动量传递,而液态水和水蒸气不仅存在动量传递和能量传递,还有质量传递。在能量传递中主要包括温差传热和相变传热,动量传递主要包括曳力和升力,质量传递主要包括水蒸气的凝结模型。另外在水蒸气相的

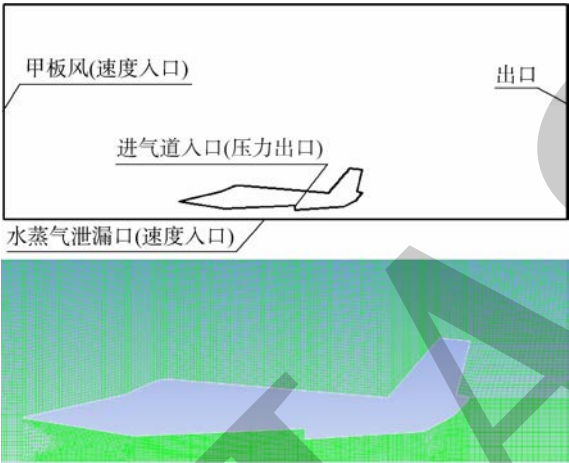


图 2 计算区域和网格

Fig. 2 Computational domain and mesh

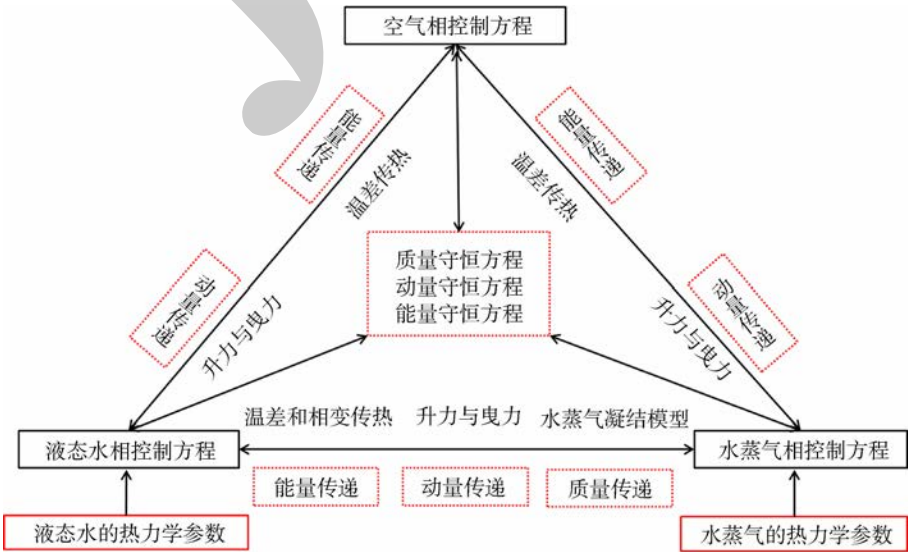


图 3 空气与逸散水蒸气之间关系

Fig. 3 Relationship of phases between air and steam

控制方程中加入水蒸气热力学参数计算模型,在液态水相加入水的热力学参数计算模型,模型中主要体现水和水蒸气随温度、压力的变化而时刻改变的热力学状态参数,应用这两个模型可以使计算结果更准确。

1.2.1 质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla(\alpha_q \rho_q \bar{v}_q) = \sum_{p=1}^n (m_{pq}^* - m_{qp}^*) + S_q \quad (1)$$

式中 α_q 表示某一相所占的体积分数; ρ_q 表示某一相中物质的密度; $\bar{v}_q$ 表示某一相的物质运动速度; $\sum_{p=1}^n (m_{pq}^* - m_{qp}^*)$ 表示质量的传递; S_q 表示附加源项,本文中为零。

由于空气不与水蒸气 and 液态水发生物质交换,因此对于空气来说,质量传递为零。对于水蒸气相的质量传递用 $m_{\text{steam} \rightarrow \text{water}}^*$ 表示,液态水相与之互为相反数。其中质量传递方程用式(2)表示

$$m_{\text{steam} \rightarrow \text{water}}^* = \frac{4}{3} \pi \rho_{\text{water}} J r^3 + 4 \pi \rho_{\text{water}} \eta r^2 \frac{\partial r}{\partial t} \quad (2)$$

式(2)是根据液滴成核理论和液滴生长模型得出的计算公式,是经 Senoo 等^[12] 进行改进的 Young-Gyarmathy 模型。

式(2)右侧第一项表示液滴成核产生的液态水质量,表达式如下:

$$J = \frac{q_c}{1 + \theta} \left(\frac{2\sigma}{\pi M_m^3} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{\rho_g^2}{\rho_l} \cdot \exp\left(\frac{-4\pi\sigma r^2}{3k_b T_g}\right) \quad (3)$$

$$r^* = \frac{2\sigma}{\rho_l RT \ln \frac{p}{p_{\text{sat}}}} \quad (4)$$

$$\theta = \frac{2(\gamma - 1)}{\gamma + 1} \cdot \frac{h_{lv}}{RT} \cdot \left(\frac{h_{lv}}{RT} - 0.5 \right) \quad (5)$$

Frenkel^[13] 对经典的成核理论进行了修正, Kantrowitz^[14] 考虑了凝结过程中的非等温效应, θ 表示非等温修正系数。

式(3)~式(5)中 J 表示成核率; r^* 表示临界成核半径; h_{lv} 表示凝结潜热; p_{sat} 表示饱和温度压力。

式(2)右侧第二项表示液滴生长产生的液态水质量,表达式如下:

$$\frac{\partial r}{\partial t} = \frac{p}{h_{lv} \rho_{\text{water}} \sqrt{2\pi RT}} \cdot \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \cdot c_p \cdot \left(1 - \frac{r^*}{r} \right) (T_{\text{sat}} - T) \quad (6)$$

$$\eta = \frac{\alpha_{\text{water}}}{(1 - \alpha_{\text{water}}) V_d \frac{\rho_{\text{water}}}{\rho_{\text{steam}}}} \quad (7)$$

$$V_d = \frac{4}{3} \pi \bar{r}^3 \quad (8)$$

$$\bar{r} = \sqrt[3]{\frac{3\alpha_{\text{water}}}{4\pi\eta(1 - \alpha_{\text{water}}) \frac{\rho_{\text{water}}}{\rho_{\text{steam}}}}} \quad (9)$$

式(6)~式(9)中 γ 表示比定压热容与比定容热容的比值; $\bar{r}$ 表示液滴平均半径; T_{sat} 表示饱和温度。

1.2.2 动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) + \nabla(\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q \mathbf{v}_q) = -\alpha_q \nabla p +$$

$$\nabla \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \mathbf{g} + \sum_{p=1}^n (\mathbf{R}_{pq} + m_{qp}^* \mathbf{v}_{qp}) + \mathbf{F}_q + \mathbf{F}_{\text{lift},q} \quad (10)$$

式中 p 表示所有相中的压力; $\mathbf{g}$ 表示重力加速度; α_q 表示某一相所占的体积分数; ρ_q 表示某一相中物质的密度; m_{pq}^* 表示从 p 相传递到 q 相中的质量; $\mathbf{R}_{pq}$ 表示相间作用力; $\mathbf{v}_{pq}$ 表示相间物质运动速度,若 $m_{pq}^* > 0$, $\mathbf{v}_{pq} = \mathbf{v}_p$, 若 $m_{pq}^* < 0$, $\mathbf{v}_{pq} = \mathbf{v}_q$; $\bar{\tau}_q$ 表示应力张量

$$\bar{\tau}_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \mathbf{v}_q + \nabla \mathbf{v}_q^T) + \alpha_q \left(\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \cdot \nabla \mathbf{v}_q \bar{I} \quad (11)$$

$$\mathbf{R}_{pq} = K_{qp} (\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_q) \quad (12)$$

$$\mathbf{F}_{\text{lift},q} = -C_l \rho_{\text{air}} \alpha_q (\mathbf{u}_{\text{air}} - \mathbf{u}_q) \times (\nabla \times \mathbf{u}_{\text{air}}) \quad (13)$$

1.2.3 能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q h_q) + \nabla(\alpha_q \rho_q \bar{u}_q h_q) = \alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} +$$

$$(\nabla \bar{u}_q - \nabla \bar{q}_q) + \sum_{p=1}^n (Q_{pq} + m_{pq}^* h_{pq}) + S_q \quad (14)$$

式中 α_q 表示某一相所占的体积分数; ρ_q 表示某一相中物质的密度; h_q 表示某一相的比焓; $\bar{u}_q$ 表示某一相的比内能; $\bar{q}_q$ 表示热流密度; m_{pq}^* 表示从 p 相传递到 q 相中的质量; h_{pq} 、 h_{qp} 表示相间能量焓值; S_q 表示附加源项, $S_q = 0$; Q_{pq} 表示相间传热强度。

相间传热包括相变过程中的热量传递和由于各相之间温度差产生的热量传递。

$$Q_{\text{steam-air}} = h_{\text{steam-air}} (T_{\text{steam}} - T_{\text{air}}) \quad (15)$$

$$Q_{\text{water-air}} = h_{\text{water-air}} (T_{\text{water}} - T_{\text{air}}) \quad (16)$$

$$-\Phi_{\text{steam} \rightarrow \text{water}} = \Phi_{\text{water} \leftarrow \text{steam}} = \rho_{\text{water}} m_{\text{steam} \rightarrow \text{water}}^* (h_1 - h_{lv}) \quad (17)$$

式中 $\Phi_{\text{steam} \rightarrow \text{water}}$ 和 $\Phi_{\text{water} \rightarrow \text{steam}}$ 表示气液两相之间的能量传递率。

若将式(17)展开来看, $\rho_{\text{water}} m_{\text{steam} \rightarrow \text{water}}^* h_1$ 表示水蒸气凝结为液态水时由质量传递引起的总焓变化; $\rho_{\text{water}} m_{\text{steam} \rightarrow \text{water}}^* h_{1v}$ 表示液滴核化凝结时会产生凝结潜热, 这部分热量会释放到水蒸气之中。

1.2.4 水和水蒸气的实际热力学参数

建立水和水蒸气的热力学物性参数计算模型, 通过 C 语言程序编写水和水蒸气随温度、压力变化的热力学参数方程。该模型以 IAPWS 公式^[3, 15-16]为基础, 将该结果通过自定义程序 (UDF) 导入到 FLUENT 中, 作为物性参数数值。如图 4 所示, 一条饱和水蒸气线将整个区域分为两个部分, 即饱和水蒸气线的左侧区域表示液态水, 右侧代表水蒸气。饱和水蒸气线方程为

$$\beta^2 \varphi^2 + n_1 \beta^2 \varphi + n_2 \beta^2 + n_3 \beta \varphi^2 + n_4 \beta \varphi + n_5 \beta + n_6 \varphi^2 + n_7 \varphi + n_8 = 0 \quad (18)$$

$$\beta = \left(\frac{p_s}{p^*} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (19)$$

$$\varphi = \frac{T_s}{T^*} + \frac{n_9}{\frac{T_s}{T^*} - n_{10}} \quad (20)$$

$n_1 \sim n_{10}$ 的数值见文献[4]。

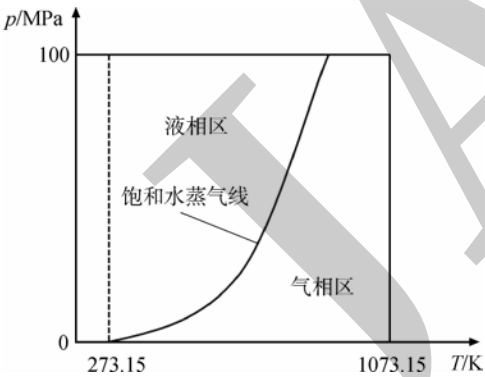


图 4 水和水蒸气实际物性参数控制模型
Fig. 4 Model of properties of water and steam

2 结果分析

2.1 典型状态点流场分析

以甲板风风速为 20 m/s, 水蒸气泄漏速度为 40 m/s, 温度为 423 K, 进气道入口压力为 -50 kPa (进气道入口压力全文均为表压) 算例为例进行流场分析。由于本文仅作为一种数值方法的探索和趋势分析, 并未考虑发动机排气的影响, 结果仅作参考。

2.1.1 温度场结果

图 5 所示为舰载机进气道附近流体的温度分

布情况, 水蒸气离开泄漏槽后与空气混合, 进行强烈换热, 水蒸气温度下降, 空气温度上升, 越靠近中心处温度越高。刚泄漏逸出的水蒸气温度迅速下降的原因主要有两点: 第一, 周围环境的空气温度较低, 仅为 300 K, 并且两者之间运动形式为湍流, 因此与空气存在强烈的换热效果, 温度下降较快; 第二, 刚逸出的水蒸气压力较大, 水蒸气会膨胀做功, 其内能会迅速减少, 因此温度也会迅速降低。由于进气道入口吸入了水蒸气, 入口温度较不存在水蒸气的情况有一定程度的升高。对比不存在水蒸气的情况, 进气道入口平均温度升高了 4 K 左右。

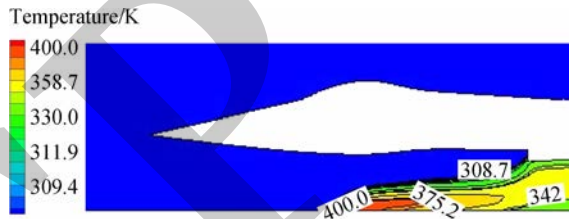


图 5 温度分布
Fig. 5 Temperature distribution

2.1.2 组分分布

如图 6 为不同时刻水蒸气的体积分数分布图。图 6(a)~图 6(d) 分别为 $t=0.25$ s、 $t=1.0$ s、 $t=3.0$ s、 $t=5.0$ s 时水蒸气的体积分数分布图, 从图中可以看出当 $t=0.25$ s 时水蒸气刚刚逸出, 随着空气的来流向右侧扩散, 水蒸气这时几乎是贴着甲板面。当 $t=1$ s 时, 流动继续发展, 由于进气道入口处的负压作用, 水蒸气会被提升向上扩散, 随着时间的推移, 当 $t=3.0$ s 时, 会有一部分水蒸气被吸入发动机内, $t=5$ s 时, 水蒸气的扩散呈现稳定状态, 当其他条件不变时, 水蒸气的组分分布如图 6(d) 所示, 经计算被吸入的水蒸气的质量流量为 1.19 kg/s, 而从气缸缝隙逸散出来的水蒸气质量流量为 3.08 kg/s, 被发动机吸入的水蒸气占总比为 38.64%。进气道入口蒸气所占空气体积

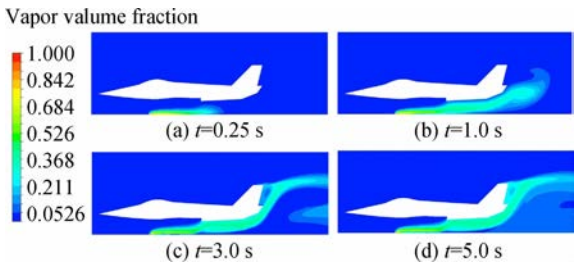


图 6 水蒸气的体积分数
Fig. 6 Steam volume fraction

分数为 8.57%，液态水占比为零。

2.2 影响进气道吸入水蒸气的因素分析

本文分别对进气道入口压力(表征发动机状态,表压)、空气来流速度、水蒸气泄漏速度、泄漏水蒸气温度对进气道水蒸气吸入量的影响规律进行分析。

2.2.1 进气道入口压力的影响

研究进气道入口压力影响时,保持水蒸气泄漏量不变,流量为 3.13 kg/s,泄漏速度为 40 m/s,甲板风速为 30 m/s。

图 7 为进气道水蒸气吸入量和占比空气流量百分比随入口压力变化图。从图中可知,当进气道入口负压小于 30 kPa 时,水蒸气吸入量很小,占比进入进气道的空气百分比小于 0.1%,进气道入口温度基本无变化。随着进气道压力的降低,水蒸气吸入量和占比空气百分比均在明显增加,当负压从 30 kPa 增加到 70 kPa 时,水蒸气吸入量从 0.069 kg/s 增加到 2.13 kg/s,占比从 2.2%逐渐增加到 99.36%,当负压达到 70 kPa 时,逸散的水蒸气几乎被完全吸入发动机内,吸入的水蒸气所占空气的百分比达到 9.05%。

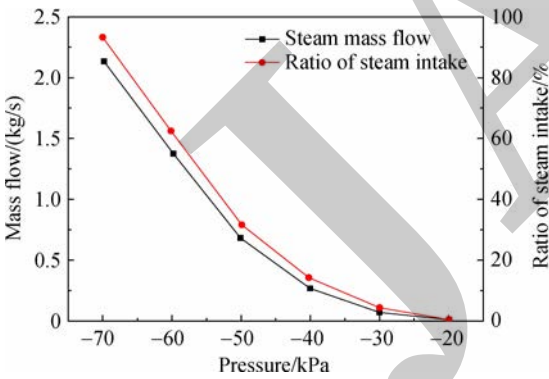


图 7 入口压力对水蒸气吸入量和比例的影响
Fig. 7 Influences of pressure for steam mass flow and ratio of steam intake

图 8 表示水蒸气的凝结量与进气道入口压力之间的关系,进气道出口的水蒸气温度为 423 K,进气道入口压力从 -20 kPa 至 -80 kPa。从图中可以看出,随着进气道入口处的负压的降低,凝结水量呈现先增加后减少的趋势,并在 -50 kPa 时达到最大值,为 11.06×10^{-3} kg/s。分析产生这一规律的原因如下:

当进气道入口处负压较大时,由于水蒸气的流速和空气的流速都较大,发动机的负压不足以将水蒸气抬升,结合上文中的分析,负压较大时,

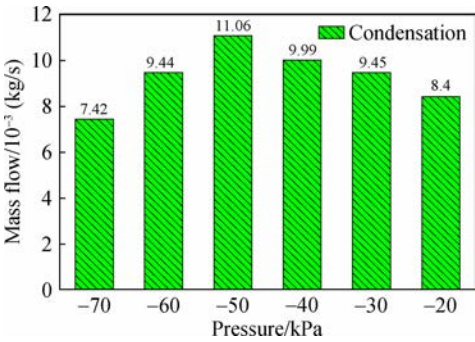


图 8 入口压力对水蒸气凝结量的影响
Fig. 8 Influences of pressure for condensed water

水蒸气几乎贴近地面流动,空中的比例较小,因此空中的凝结量较少。而当进气道入口处的负压降低时,对水蒸气的流动起到抬升的作用,而使空中的水蒸气量增加,这样水蒸气发生凝结的量也会增加;而当进气道入口处的负压足够低时,会将所有的水蒸气吸入到发动机内,这时未等水蒸气发生凝结,已经被吸入发动机内,可能会在发动机内发生凝结,这样反而对发动机不利。并不是表面上看到的进气道入口处的负压降低后水蒸气的凝结量减少而产生的有利现象。

2.2.2 空气来流速度对水蒸气吸入量的影响

研究来流速度影响时,保持水蒸气泄漏量不变,流量为 3.13 kg/s,泄漏速度为 40 m/s,温度为 423 K,进气道吸入压力为 -20 kPa。

图 9(a)为水蒸气吸入量随空气来流速变化的曲线,从中可以看出,当空气来流速度为 5 m/s 时,进入发动机的水蒸气流量为 2.17 kg/s。随着空气速度的增加,水蒸气的吸入量也会随之增加,当速度达到 10 m/s 时,水蒸气吸入量达到最高值 3.15 kg/s,15 m/s 时为 3.13 kg/s,变化不大,因此当空气来流速度为 10~15 m/s 时,水蒸气的吸入量达到一个峰值。但是随着流速的继续增加,水蒸气更易被吹向后方,导致水蒸气吸入量迅速下降,风速达到 20 m/s 时,水蒸气吸入量便下降到 1.19 kg/s,同比下降了 61.78%,风速增加到 25 m/s 时,水蒸气吸入量下降到 0.24 kg/s,可见,空气的来流速度从 15 m/s 增加到 25 m/s 这一区间内,对进气道入口处的水蒸气吸入量影响较大,当空气速度继续增加,水蒸气吸入量仍继续下降,但是下降缓慢,当风速达到 40 m/s 时,水蒸气的吸入量仅为 0.000 7 kg/s,可忽略不计。因此,当飞机达到一定速度后,水蒸气对发动机的影响很小,重点关注的是从静止加速到 40 m/s 之前的这一区间段。

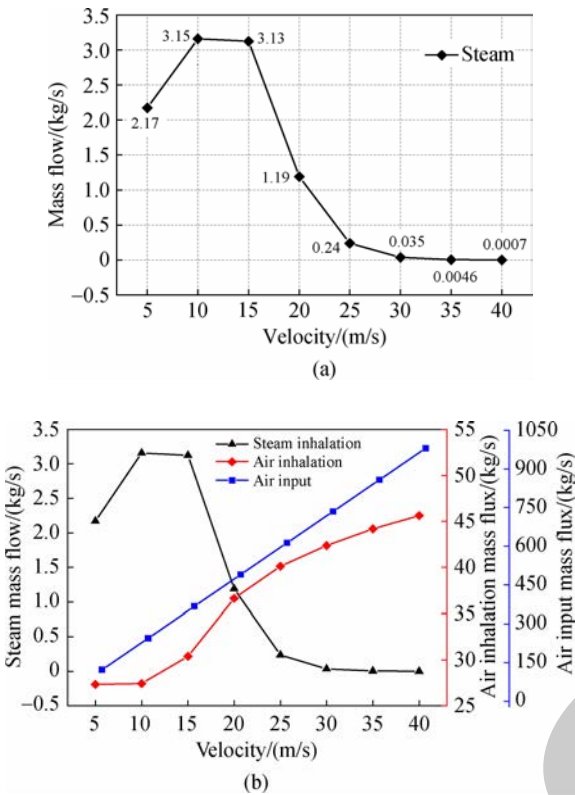


图 9 空气来流速度对水蒸气吸入量的影响
Fig. 9 Effect of air flow velocity on suction volume of steam

图 9(b)为发动机入口水蒸气以及空气的吸入随空气流速的变化趋势。空气吸入量随着流速的增加,从 5 m/s 时的 122.5 kg/s 逐渐增加到 40 m/s 的 980 kg/s;进气道入口空气的吸入量随着流速的增加呈现上升趋势,速度在 10~25 m/s 范围内,空气吸入量增加明显,当流速超过 25 m/s 时,吸入量增加变缓,从 40.12 kg/s 到 45.63 kg/s 仅变化了 5.51。将发动机空气吸入量与入口空气的质量流量做比较,流速从 5 m/s 变化到 40 m/s 的区间内,发动机进气量所占比例分别 22.31%、11.19%、8.27%、7.48%、6.55%、5.77%、5.15%、4.66%,随着流速的增加,进入发动机的空气吸入量与入口流量所占比例逐渐降低,空气吸入量最大值出现在 40 m/s 处,但是与入口空气流量相比,进入发动机的部分仅为 4.66%,占比很低,绝大部分空气从出口流出。

2.2.3 水蒸气泄漏速度对吸入量的影响分析

研究水蒸气泄漏速度影响时,保持水蒸气温度为 423 K,进气道吸入压力为 -20 kPa,来流风速为 20 m/s。

图 10 中展示了水蒸气吸入量和水蒸气进入系统的总流量随水蒸气出口速度变化规律的折线

图。从图中可以看出,水蒸气吸入量和进入系统的总流量都是随出口速度的增加而提高,水蒸气的入口流量从 0.769 kg/s 到 3.077 kg/s 几乎是线性上升。当水蒸气流速较小时,其吸入量为 0.0003 kg/s,可以认为水蒸气在此时几乎不进入到发动机内。当水蒸气速度超过 20 m/s 时,随着水蒸气流速的增加,水蒸气的进气量迅速上升,在进气道入口压力为 -20 kPa 的条件下,最大值可以达到 1.191 kg/s,占水蒸气总量的 38.71%,而实际进气道入口压力要远低于 -20 kPa,当水蒸气流速过高时,发动机进气量会进一步增加,不利于发动机的使用和保养,甚至可能造成发动机的临时停车。因此,要想减少进气吸入口水蒸气的进入量,控制水蒸气逸散口的水蒸气流速是关键。

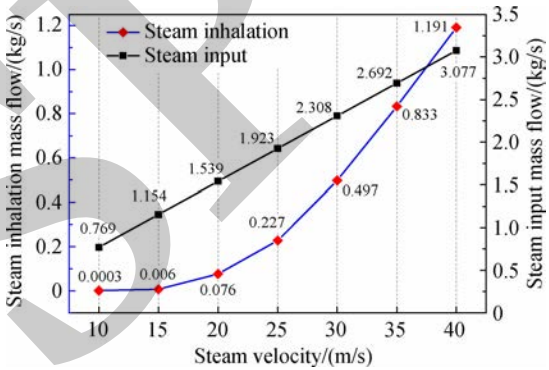


图 10 水蒸气出口速度对发动机吸入量的影响
Fig. 10 Effect of out flow velocity of steam on the steam intake of engine

图 11 表示水蒸气出口速度对空气吸入量的影响比较,空气的来流速度为 20 m/s,从图 12(a)中可以看出,随着水蒸气流速的增加,发动机对空气的吸入量整体上呈现逐渐减少的趋势,但是由于空气入口流量为 490 kg/s,是一个定值,因此水蒸气流速对空气的进气量影响不是十分明显。由

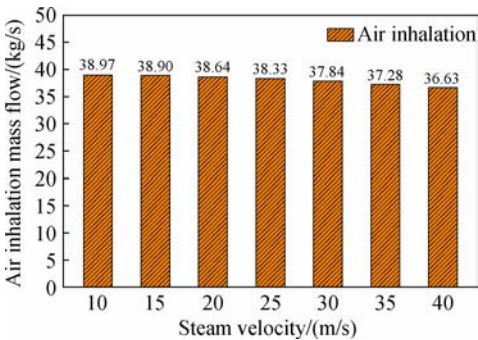


图 11 水蒸气出口速度对空气进气量的影响
Fig. 11 Effect of steam flow velocity on air inhalation mass flow of engine

于进气道入口处的负压是一定的,水蒸气流速的增加对总进气量是一个促进作用,但是增幅较小,随着水蒸气流速的增加,水蒸气吸入量上升明显,会抑制空气的进入,因此空气的进气量是逐渐减少的。

图 12 为空气流速为 20 m/s 时,水蒸气出口流速从 10 m/s 增加到 40 m/s 时,水蒸气凝结量的变化图。从图中可以看出,随着水蒸气出口流速的增加,水蒸气在空气中的凝结量也会随之增加,当水蒸气流速到达 30 m/s 后,其凝结量基本稳定在 0.001 kg/s 左右。而水蒸气的流速较低时,凝结量几乎为零,主要是由于水蒸气流速较低,流量较小,被较大的空气流速吹散到空气中,分布于空气中的水蒸气分子彼此碰撞的几率较小,因此温度降低到饱和温度以下,凝结也较为困难。另外,水蒸气流量较小时,很大一部分被吸入到发动机内,因此这也是水蒸气凝结量减少的原因。

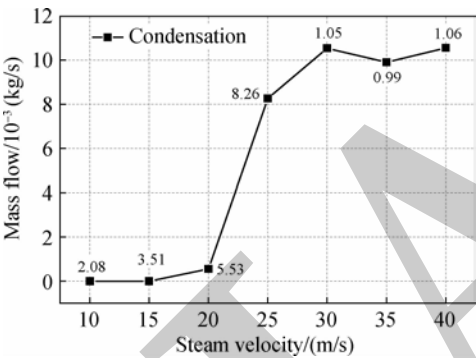


图 12 水蒸气流速对水蒸气凝结量的影响
Fig. 12 Effect of steam velocity on condensed water intake

2.2.4 泄漏水蒸气温度的影响

如图 13 所示,表示水蒸气凝结量与水蒸气出

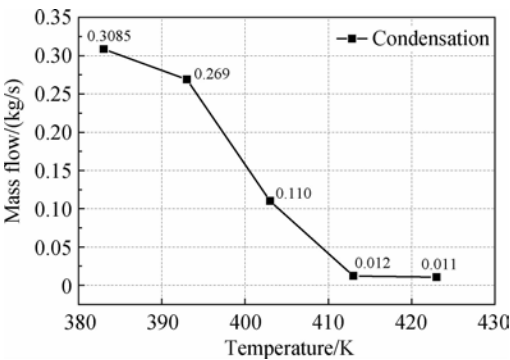


图 13 水蒸气温度对水蒸气凝结量的影响
Fig. 13 Effect of steam temperature on condensed water intake

口温度的关系,水蒸气的出口速度为 40 m/s,空气来流速度 20 m/s,进气道入口压力 -20 kPa,从图中可以看出,水蒸气的凝结量随温度的升高而下降,当温度达到 413~423 K 时,凝结量近似一致。由于水蒸气温度较高,与周围的低温空气会产生热量的传递,水蒸气的温度越低,经过相同的时间间隔换热后的下降到的温度也就越低,反过来,温度低的水蒸气下降到饱和温度所经历的时间也就越短,只有当水蒸气温度降低到饱和温度之下,再具备凝结核的条件下才会发生凝结,因此,当水蒸气出口温度下降后凝结水量会有所上升。

3 结 论

通过热力学分析得到逸散水蒸气的密度和动力黏度随温度增加而下降,比热容,导热系数和声速随温度增加而先增加后下降。

在流动过程中,空气-水蒸气-液态水三流体混合,温度逐渐趋于一致。进气道入口压力越低,发动机对水蒸气的吸入量越大;伴随空气流动的水蒸气温度不断下降,并且会因有凝结现象发生,即有液态水的产生。随着空气来流速度的增加,水蒸气的吸入量也会呈现先增加后下降的趋势。空气的速度从 15 m/s 增加到 25 m/s 这一区间内,对进气道入口处的水蒸气吸入量影响较大,空气流速继续加大,水蒸气吸入量急剧下降。因此,当飞机达到一定速度后,水蒸气对发动机的影响很小。随着水蒸气流速的提高,水蒸气吸入量上升,空气所占比例有所下降,但仍然是主导地位。

随着进气道入口压力的降低,凝结水量呈现先增加后减少的趋势,并在 -50 kPa 时达到最大值。水蒸气的凝结量随温度的升高而下降,当温度达到 413~423 K 时,凝结量近似一致。随着水蒸气出口流速的增加,水蒸气在空气中的凝结量也会随之增加,当水蒸气流速到达 30 m/s 后,其凝结量基本稳定在 0.001 kg/s 左右。

参考文献:

[1] 鸥讯. 航母的弹射装置[J]. 现代舰船, 2005(7): 99-103.
OU Xun. The ejection device of aircraft carrier[J]. Modern Ships, 2005(7): 99-103. (in Chinese)
[2] 吴懿鸣. 蒸汽弹射器[J]. 兵器知识, 2011(8): 39-41.
WU Yiming. Steam catapult[J]. Weapon Knowledge, 2011(8): 39-41. (in Chinese)
[3] COOPER J R. Revised release on the IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam[R]. Erlangen, Germany: The International

Association for the Properties of Water and Steam,1997: 42-44.

[4] WAGNER W, COOPER J R, DITTMANN A, et al. The IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,122,150-182.

[5] 刘继男,王兴刚,张静巧. IF97 公式在超临界汽轮机数值仿真中的应用研究[J]. 热力透平,2014,43(2):146-149.

LIU Jinan,WANG Xinggang,ZHANG Jingqiao. Study on IAPWS-IF97 in numerical simulation of SC steam turbines [J]. Thermal Turbine,2014,43(2):146-149. (in Chinese)

[6] PAN J, WU G, YANG D, Thermal-hydraulic calculation and analysis on water wall system of 600MW supercritical CFB boiler [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 82 (2):225-236.

[7] 白建成. 蒸汽弹射内弹道数学模型[J]. 中国造船,2001,42 (3):99-102.

BAI Jiancheng. Mathematic model for interior trajectories of steam launchers[J]. Shipbuilding of China,2001,42(3): 99-102. (in Chinese)

[8] 周清和. 蒸汽弹射器速率阀研究[J]. 液压与气动,2003 (4):3-4.

ZHOU Qinghe. Study on the velocity valve for steam launching equipment[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics,2003(4):3-4. (in Chinese)

[9] 余晓军,高翔,钟民军. 蒸汽弹射器的动力学仿真研究[J]. 船海工程,2005(3):1-4.

YU Xiaojun,GAO Xiang,ZHONG Minjun. Simulation on dynamics of the steam-powered catapult[J]. Ship & Ocean Engineering,2005(3):1-4. (in Chinese)

[10] 齐强,孙建国,周源,等. 舰载机弹射内弹道仿真计算[J]. 海军航空工程学院学报,2009,24(5):507-510.

QI Qiang,SUN Jianguo,ZHOU Yuan,et al. Inner launch-trajectory simulation for deck-landing aircrafts[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute,2009,24(5): 507-510. (in Chinese)

[11] 高俊东,崔帅,冯蕴雯,等. 舰载机蒸汽弹射器热力学仿真分析[J]. 机械科学与技术,2013,32(7):963-967.

GAO Jundong,CUI Shuai,FENG Yinwen,et al. Simula-tion and analysis of thermodynamics for carrier-based air-craft steam catapult[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering,2013,32(7):963-967. (in Chinese)

[12] SENOO S, SHIKANO Y. Two-dimensional analysis for non-equilibrium homogeneously condensing flows through steam turbine cascade[J]. JSME International Journal, Fluids and Thermal Engineering,2002,45(4):865-871.

[13] FRENKEL J. Kinetic theory of liquids[M]. New York: Dover,1995.

[14] KANTROWITZ A. Nucleation in very rapid vapor expansions [J]. Journal of Chemical Physics,1951,19(9):1097-1100.

[15] COOPER J R. Release on the IAPWS formulation 2008 for the viscosity of ordinary water substance[R]. Berlin, Ger-many;the International Association for the Properties of Water and Steam,2008.

[16] 蔡颐年,王乃宁. 湿蒸汽两相流[M]. 西安:西安交通大学出版社,1985.

(编辑:李岩梅)