

航空发动机结冰试验中水滴特性参数分析

田小江¹, 孙 玥¹, 吴 锋¹, 董 威²
(1. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 绵阳 621000;
2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 通过建立水滴在低温低马赫数气流中的传热传质以及运动数学模型, 和以 Fluent 软件解析雾化喷嘴周围气流的总压分布和速度分布的基础上, 分析了水滴直径、水滴速度、水滴表面温度和液态水含量等特性参数, 在不同的来流速度、来流温度和水滴初始温度条件下的变化。结果表明, 在来流速度、水滴初始速度以及直径大小相同条件下, 水滴与气流的温差, 是影响发动机进口截面液态水含量的主要因素。对结冰试验过程中模拟结冰云雾气象条件的参数选取进行了建议。

关键词: 航空发动机; 结冰试验; 液态水含量; 水滴特性; 水滴表面温度; 水滴直径

中图分类号: V231.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620 (2022) 01-0041-04

Characteristics of droplet in the icing test of aero-engine

TIAN Xiao-jiang¹, SUN Yue¹, WU Feng¹, DONG Wei²

(1. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang 621703, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Based on the total pressure and velocity distribution which was solved by the software Fluent, and through building the mathematic model with heat and mass transfer and kinetics of the droplet in lower temperature and Mach number, the characteristics of droplet including diameter, velocity, surface temperature of droplet and liquid water content (LWC) at different velocity, temperature of the incoming flow and different original temperature of the droplet were analyzed. The results show that with the same parameters of flow velocity, droplet velocity and diameter, the difference in temperature between droplet and flow is the main factor affecting the LWC at different section. In the end, the selection of parameters to simulate the icing test condition was suggested.

Key words: aero-engine; icing test; liquid water content; characteristics of droplet; surface temperature of droplet; droplet diameter

符号说明		m	单个水滴质量/kg
A	水滴的迎风面积/ m^2	r	水滴半径/mm
C_D	空气和水滴之间的阻力系数	R	气体常数/(J/(kg·K))
c_p	定压比热容/(J/(kg·K))	Re	雷诺数
$\vec{D}$	水滴受到的空气阻力/N	T	温度/K
h	水滴与空气间的换热系数	$\vec{u}$	速度矢量的变化量/(m/s)
L	水滴运动距离/m	β	水滴与空气间的传质系数
LWC	液态水含量/(g/cm ³)	ρ	密度/(g/cm ³)
Nu	努塞尔数	τ	时间步长/s

下标:

- g 空气
l 液态水
v 水滴表面蒸气

1 引言

航空发动机进气道、风扇叶片或帽罩结冰是危及发动机安全运行的一个主要因素,与结冰有关的飞行事故每年都有发生。为充分验证发动机的防冰能力,国外早在20世纪70年代就开始了航空发动机防冰问题研究,在结冰物理机理、防冰试验、冰撞击试验以及模拟分析方面,形成了一套完整的验证方法和评估体系;建立了众多的结冰/防冰试验台,并利用这些试验台对防冰除冰系统、结冰过程、冰脱离等进行了大量研究,建立了相应的结冰/防冰试验体系和评估标准^[1-2]。

我国在发动机防冰研究方面起步较晚,研究方向也主要集中在结冰探测、预防、水滴撞击、除冰方法等方面^[3-5],在模拟空中实际结冰云层的方法研究方面存在一定不足。 LWC 是结冰试验时模拟空中实际结冰云层的主要评价指标^[6-8], LWC 控制是决定模拟效果的主要因素。 LWC 由喷水试验设备的布局和产生的水滴参数共同决定。在相同试验设备条件下,喷入液态水参数的选取将直接影响 LWC ,因此有必要开展水滴参数在气流中的特性变化研究。本文通过对水滴参数在低速气流中的变化过程进行研究,获取水滴参数的变化特性,以支撑结冰试验的水滴参数选取提供。

2 水滴数学模型

进行航空发动机结冰试验时,首要的是模拟结冰气象条件^[9]。气象条件的模拟主要靠向低温气流中喷入液态水来实现,但喷入的水滴在低温气流中的运动过程十分复杂,涉及到多相流动、相变以及传质等过程;同时,水滴在低温气流中相互影响,与气流间还存在相互切割、发生二次破碎或融合等。为科学合理地分析水滴的特性变化,计算模拟时对水滴在低温气流中作如下假设^[10]:

- (1) 来流空气为干燥空气。
- (2) 以喷入的液态水中的单个水滴为研究对象。
- (3) 忽略水滴流动对空气主流的影响,仅考虑空气相对水滴相的单向耦合影响。
- (4) 水滴速度方向与水滴离开喷嘴的位移方向

一致,且此时空间截面上的水滴为均匀排布。

(5) 忽略水滴的重力及其表面曲率对蒸发传质的影响,水滴内部各处的温度相同。

单个水滴在低温气流中的运动过程如图1所示。根据牛顿第二定律得到水滴的运动控制方程:

$$m_l \frac{d\vec{u}_l}{d\tau} = \vec{D} \quad (1)$$

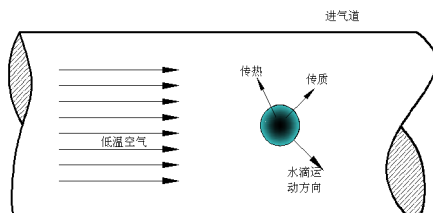


图1 单个水滴在低温气流中的运动过程

Fig.1 Movement process of single water drop in low temperature air flow

水滴受到的空气阻力可以采用下式计算:

$$\vec{D} = \frac{1}{2} C_D \rho_g |\vec{u}_g - \vec{u}_l| (\vec{u}_g - \vec{u}_l) A_l \quad (2)$$

式中:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} & Re \leq 1 \\ \frac{24(1 + 0.15 Re^{0.687})}{Re} & 1 < Re \leq 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases} \quad (3)$$

由式(1)~式(3)可简化得出水滴的运动方程:

$$\frac{d\vec{u}_l}{d\tau} = \frac{3}{8} \frac{C_D \rho_g}{r_l \rho_l} |\vec{u}_g - \vec{u}_l| (\vec{u}_g - \vec{u}_l) \quad (4)$$

由于水蒸气浓度影响,水滴在运动过程中还有传质过程(即水滴蒸发)。水滴的传质速率为:

$$\frac{dm_l}{d\tau} = \beta A (\rho_v - \rho_{vl}) \quad (5)$$

水蒸气浓度与空气相对湿度的关系采用实验关联式进行估计,并对传质速率方程进行简化,可得到水滴半径关于时间变化的关系式:

$$\frac{dr_l}{d\tau} = \frac{\beta(\rho_v - \rho_{vl})}{\rho_l} \quad (6)$$

根据能量守恒定律,水滴在低温空气中运动的能量方程为:

$$\frac{d(m_l c_{p,l} T_l)}{d\tau} = L_{lv} \frac{dm_l}{d\tau} + h A (T_g - T_l) \quad (7)$$

式(7)可简化为:

$$\frac{dT_l}{d\tau} = \frac{3}{2} \frac{Nu_D \lambda_g}{\rho_l c_{p,l} r_l^2} (T_g - T_l) + \frac{3L_{lv}}{c_{p,l} r_l} \frac{dr_l}{d\tau} \quad (8)$$

水滴蒸发必须同时满足两个条件,即水滴表面蒸气的密度必须小于饱和水蒸气的密度,空气中的水蒸气未达到饱和。若此两个条件之一不满足,则水滴

不会与周围空气交换质量,水滴直径不会减小,温度的下降只能通过水滴与空气间的对流换热来实现。

3 求解边界条件

以距喷嘴 50 mm 截面位置处的水滴为计算对象,假设水滴在喷嘴出口截面均匀分布,在运动过程中不存在二次破碎及融合等现象;水滴的速度大小与从喷孔喷出时保持一致(即各水滴速度反向延长线交汇于喷嘴的喷孔中心),水滴从喷孔喷出的初始速度为 140 m/s;水滴初始直径为 27 μm ,水滴初始温度为 20 $^{\circ}\text{C}$,气流温度为 -20 $^{\circ}\text{C}$ 。计算不同干燥气流速度条件下水滴的直径、表面温度和速度等特性参数以及液态水含量的变化。

考虑到流量管内气体的速度较低,不考虑其压缩性。喷嘴周围流场采用 Fluent 的常规模块计算,水滴运动过程采用 Fluent 的 DPM 模型模拟,运动中水滴各参数的变化模型采用 UDF 进行控制。喷嘴周围压力场和速度分布分别如图 2、图 3 所示。

4 水滴特性参数受气流影响分析

图 4 示出了来流速度为 40 m/s 时水滴各特性参数的变化。由于水滴初始温度与气流温度有 40 $^{\circ}\text{C}$ 温

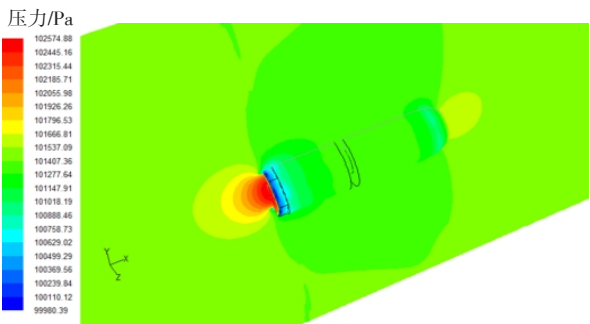


图2 来流速度 40 m/s 时喷嘴周围压力分布
Fig.2 Pressure distribution around the nozzle when the inflow velocity is 40 m/s

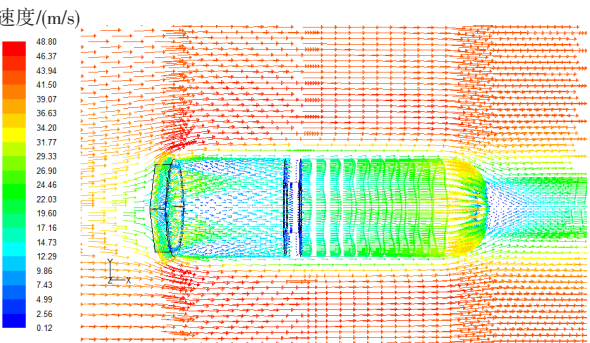


图3 来流速度 40 m/s 时喷嘴周围速度矢量分布
Fig.3 Velocity vector distribution around the nozzle when the inflow velocity is 40 m/s

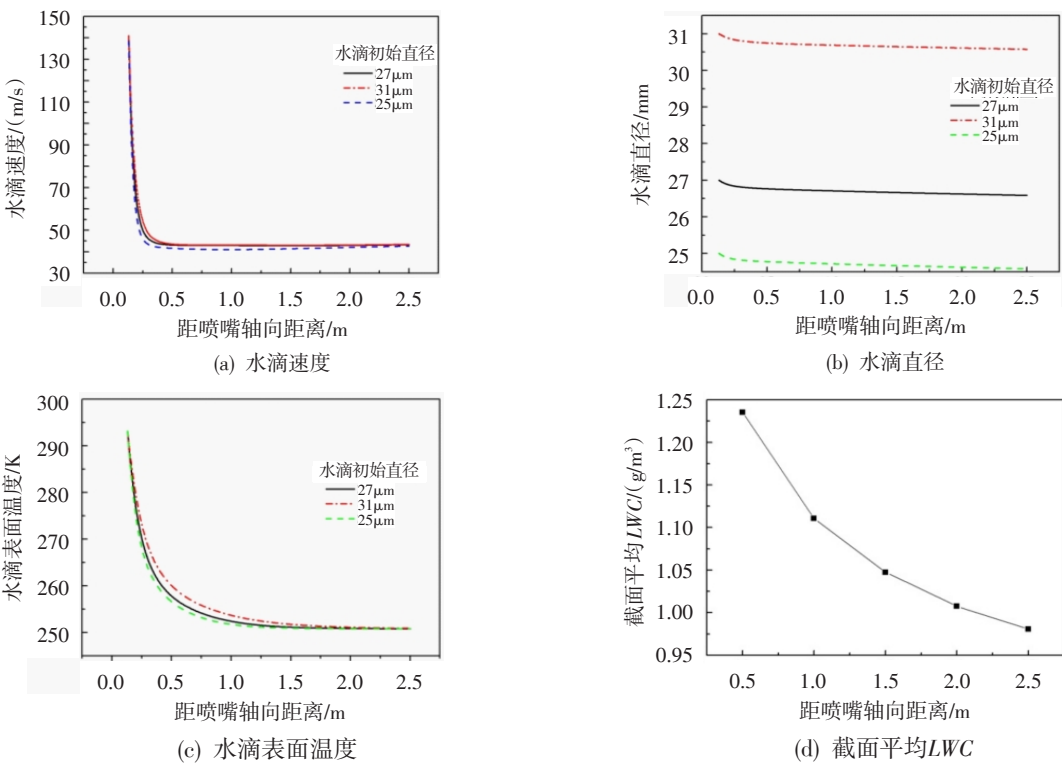


图4 来流速度 40 m/s 时水滴特性参数的变化
Fig.4 Variation of characteristic parameters of water droplets when the inflow velocity is 40 m/s

差,因此水滴与低温气流间发生传热传质作用,从而导致水滴最外层的温度在极短时间内与气流温度一致,水滴受气流影响最明显的特性参数为表面温度。水滴直径随水滴运动距离的增加而降低,但在水滴轴向运动距离为1 m的情况下,其最大直径变化小于0.5 μm (实际过程可忽略),不同截面上LWC变化约0.125 g/cm^3 (实际试验时不能忽略)。在空气阻尼作用下,水滴可在0.01 s内与来流速度一致,其速度基本不受初始直径影响。

在相同水滴直径条件下,不同水滴的初始温度、来流速度、来流温度对水滴特性参数的影响如图5所示。可见,来流速度越大,水滴与空气的热交换速率越高,水滴蒸发量越小,水滴表面温度达到气流温度的时间越短,不同截面LWC的变化越小。

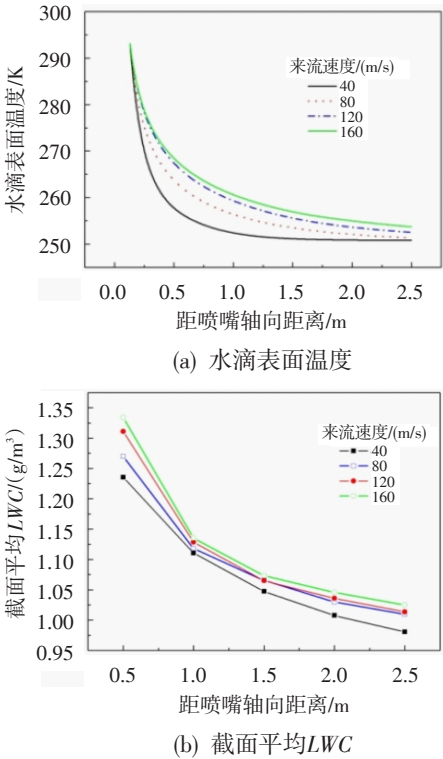


图5 不同来流速度条件下水滴特性参数的变化
Fig.5 Variation of characteristic parameters of water droplets with different inflow velocity

在相同来流速度与水滴初始温度条件下,水滴与气流初始温度温差越大,其温度达到气流温度的时间越长,但因水滴为热源,水滴的蒸发速率反而下降,各截面LWC的变化相应较小,如图6所示。

在来流速度、温度一定条件下,水滴初始温度越高,其所散发的热量越大,水滴表面温度达到气流温度的时间越长,水滴的蒸发速率也越大,故各截面LWC越低,如图7所示。

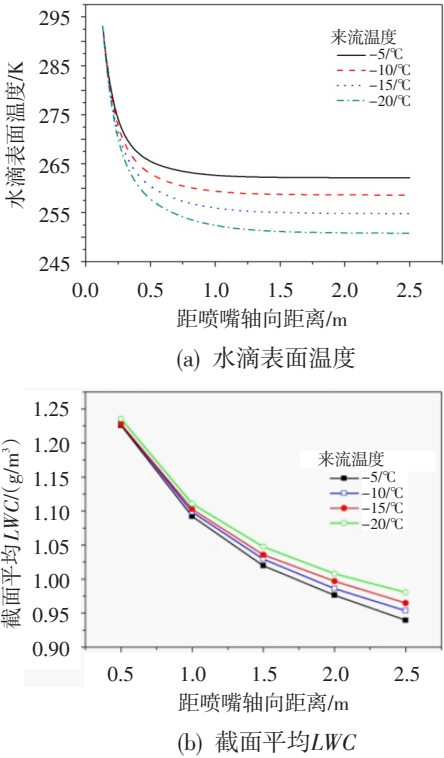


图6 不同来流温度条件下水滴特性参数的变化
Fig.6 Variation of characteristic parameters of water droplets with different inflow temperature

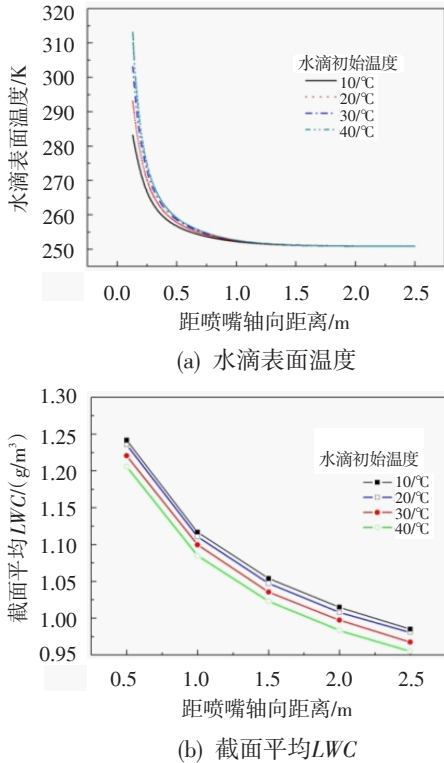


图7 水滴初始温度对特性参数的影响
Fig.7 Influence of initial temperature of water droplet on characteristic parameters

(下转第57页)