

文章编号: 1000-8055(2009)07-1449-08

结冰实验段空气-水混合流动过程的数值模拟

柯 鹏¹, 杨春信², 吴江浩¹, 张曙光¹

(1. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对结冰实验段内低温空气与高温雾化水滴的混合流动过程进行了数值模拟, 采用拉格朗日方法建立了空气-游离水滴/冰粒多相混合流动与传热传质的一维分析模型, 考虑了水滴粒径分布、相变及空气-水滴/冰粒传热传质等因素, 求解了流道内气流温度/湿度/速度、水滴温度/速度/半径等参数沿流动方向的变化, 分析了水滴粒径分布、气流温度、液态水含量、相对湿度等参数对流动与传热过程的影响, 与已有数据的对比验证了模型及结论的正确性。

关 键 词: 飞机结冰; 两相流; 传热传质; 数值模拟

中图分类号: V216.5

文献标识码: A

Numerical simulation of mixing flow of air and water droplet in the test duct of icing research tunnel

KE Peng¹, YANG Chunxin², WU Jianghao¹, ZHANG Shuguang¹

(1. School of Transportation Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. School of Aeronautics Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Numerical simulation was conducted for the flow and heat transfer process of the mixing flow in the test duct of the icing wind tunnel, where the temperature of air was low but that of the sprayed water was high to keep the nozzles from freezing. A simplified model based on Lagrangian method was built and solved, whilst the model of droplet size distribution, the phase transmission model of water freezing and solidification, the heat and mass transfer between air and water/ice droplets were considered. The variation of temperature, humidity and velocity of air and the temperature, radius and velocity of droplet during the flow process was obtained under different conditions. Furthermore, the patterns about how initial parameters affect the final flow were achieved. This model and conclusion were validated by comparison with current literatures.

Key words: aircraft icing; two-phase flow; heat and mass transfer; numerical simulation

飞机结冰会对飞行安全有严重影响, 例如升力面结冰会改变飞机气动外形, 影响气动及操纵特性^[1], 发动机结冰会恶化进气道流场特性, 影响

效能^[2]. 近年来结冰引发了多起事故, 如美国 1994 年 Roslawn ATR-72 事故^[1] 和 1997 年 Detroit Embraer 120 事故^[2-3], 我国 2000 年两架运八

收稿日期: 2008-06-22; 修订日期: 2009-01-17

基金项目: 中国博士后科学基金(20080440012)

作者简介: 柯鹏(1979-), 男, 湖北孝感人, 博士后, 主要从事飞机结冰、飞行安全和人机环境等方面研究。

飞机因尾翼结冰坠毁^[4]以及 2006 年的安徽空难^[5]. 目前飞机结冰研究仍以实验为主, 而飞行试验费用昂贵, 条件受限, 因此地面冰风洞实验在国外得到了广泛应用. 自 1945 年起, 欧美就开始冰风洞建设^[1], 实验设备和方法较成熟, 但国内的冰风洞建设和实验工作尚处于起步阶段.

NASA 结冰风洞 IRT (icing research tunnel)^[6]的喷雾段和实验段简化后如图 1 所示, 整体水平放置. 液态游离水滴在喷雾段通过单级或多级喷嘴生成, 为防止喷嘴管路结冰堵塞, 均采用常温或者高温水, 喷雾水滴与引入的冷空气均沿流动方向流动, 二者在整流段和实验段充分掺混后, 得到结冰工况模拟所需的水气混合流.

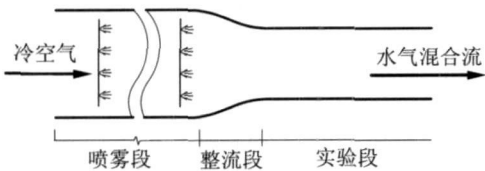


图 1 NASA IRT 实验段结构示意图

Fig. 1 Geometry schematic of the test duct of NASA IRT

结冰实验需要可模拟自然结冰条件的低温流场和过冷水滴分布, 且气流均匀、水滴尺度和温度分布均匀等. 掺混过程中由于热水滴与冷气流之间复杂的热质交换, 气流和游离水属性都发生了较大变化, 如水滴尺寸分布、液态水含量、水滴温度和相态等. 数值模拟求解气流掺混过程的流动和传热特性, 对于优化实验参数设计和设备调试很有价值.

国外开展了相关研究, 并应用到了实验台设计和建设中. Willbanks^[7]针对某涡扇发动机结冰地面模拟设备, 建立了气液一维分析模型以评估实验参数影响, 但限定了水滴尺度分布, 且未考虑水滴相变; Schulz^[8]在 Willbanks^[7]模型的基础上研究了水滴结冰机理, 通过修正均匀成核结冰理论得到了水滴凝固模型, 但应用计算和分析偏少. NASA IRT 的实验设计正是基于 Willbanks 和 Schulz 等人的研究成果^[6]; 安东诺夫等^[9]建立了类似的一维模型并详细分析了相关参数的影响, 但其数学模型的水滴尺度分布和凝固过程模型相对简单, 计算与分析均基于单一水滴尺寸, 且其初始气流与水滴速度一致的假设与实际不符.

本文针对低温空气与高温雾化水滴在结冰实验段流道内的混合流动过程进行了数值模拟. 基于质量/动量/能量守恒原理, 采用拉格朗日方法

建立了空气-游离水滴/冰晶的多相混合流动与传热传质的一维分析模型, 集成了水滴粒径分布模型、水滴凝固与蒸发模型、空气-水滴/冰晶传热传质模型等, 计算了不同条件下气流温度、湿度与速度, 水滴温度、速度和半径等参数沿流动方向的变化, 得到了初始气流温度、速度、相对湿度、水滴粒径分布等参数对流动与传热过程的影响规律. 与现有文献的对比, 验证了模型的正确性和优越性.

1 数学模型

流道内的水滴流动是一个典型的气液两相流动, 本文采用拉格朗日方法建立流道内水滴与空气的流动与传热传质模型, 获取沿流道方向上水滴与空气的热力学和动力学参数.

1.1 基本假设

为便于分析和研究问题, 做如下假设:

- 1) 水滴平行于气流方向喷入, 忽略重力和浮升力, 认为气流和水滴均为一维流动, 不考虑水滴偏转、破碎及水滴间碰撞和凝结;
- 2) 游离水滴均视作球形, 不考虑其内热阻, 认为内部温度均匀, 相变过程均匀发生;
- 3) 干空气和湿空气均视为理想气体, 仅考虑气体压力;
- 4) 不考虑水滴在流道壁面上的撞击和凝固;
- 5) 不考虑气流参数沿截面径向的变化;
- 6) 实验段管道绝热, 同外界没有热交换, 所有的能量交换只在游离水滴与湿空气间进行.

1.2 水滴粒径分布

在喷嘴产生的水雾或者自然过冷云层中, 各种大小的水滴都稳定存在. 通常采用基于质量或者体积的水滴半径分布函数描述不同大小水滴的数量. 设 $f(r)$ 是半径分布函数, 则 $f(r) \cdot dr$ 表示半径位于 $[r - dr/2, r + dr/2]$ 的水滴(简称半径为 r 的水滴)质量含量在所有水滴中的比例, 有

$$W_i/W = f(r_i) dr \tag{1}$$

式中 W_i 为半径为 r_i 的水滴所对应的液态水含量, W 为系统整体的液态水总含量.

如果某系统中所有液滴直径最大和最小半径分别为 $r_{\max}$ 和 $r_{\min}$, 显然有

$$\int_{r_{\min}}^{\max} f(r) dr = 1 \tag{2}$$

观测发现, $f(r)$ 难以用简单函数关系式来表达, 研究中通常采用 Langmuir 系列分布^[10], 如表 1 所示, 其中 r_0 为选取的质量或体积平均半径.

表 1 Langmuir 水滴尺度分布表^[10]

Table 1 Langmuir droplet size distributions(DSD)

LWC 比例 / %	r/r ₀				
	A	B	C	D	E
05 00	1 00	0.56	0.42	0.31	0.23
10 00	1 00	0.72	0.61	0.52	0.44
20 00	1 00	0.84	0.77	0.71	0.65
30 00	1 00	1.00	1.00	1.00	1.00
20 00	1 00	1.17	1.26	1.37	1.48
10 00	1 00	1.32	1.51	1.74	2.00
5 00	1 00	1.49	1.81	2.22	2.71

1.3 气流流动与传热模型

如图 2 所示,实验段流道截面积为 A ,在流道内沿流动方向选取待考察截面 JJ' ,其距离实验段起点为 x ,并选取长度 dx 的微元.图中还给出了湿空气和游离水滴的相关参数, u_i 为 JJ' 截面上半径 r_i 的游离水滴的速度 (m/s); T_i 为该截面上半径 r_i 的游离水滴温度 (K); W_i 为该截面上半径为 r_i 的游离水滴所对应的液态水含量 (kg/m^3); u_g 和 T_g 分别为该截面上气流流速 (m/s) 和温度 (K).

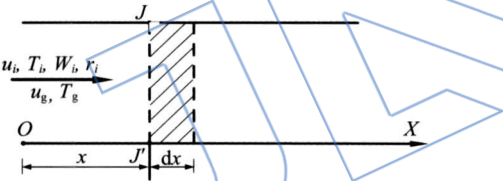


图 2 实验段流道简化分析图

Fig. 2 Simplified schematic of the flow in the duct

在稳态条件下,系统总质量守恒

$$m_w + m_g = \text{const} \tag{3}$$

式中 m_w 和 m_g 分别为流道内 JJ' 截面处游离水滴和湿空气的质量流量 (kg/s).

对于各类等截面或变截面流道,将式(3)展开,并按水滴半径分布离散后有

$$\left(\sum W_i u_i + \rho_g u_g \right) A = \text{const} \tag{4}$$

$$\rho_g = \rho_v + \rho_a \tag{5}$$

式中 ρ_g , ρ_a 和 ρ_v 分别为截面上湿空气、干空气和水蒸气的分密度 (kg/m^3); $\sum$ 表示对离散后所有半径水滴的参数进行求和.

在流动方向上干空气质量守恒,即

$$\rho_a u_g A = \text{const} \tag{6}$$

对于流道内湿空气,依据假设式(4)、式(5)

和伯努利方程,在流动方向上有

$$\rho_g u_g^2/2 + p = \text{const} \tag{7}$$

其中总压 p 是湿空气压力 (Pa),为干空气 p_a 和水蒸气分压力 p_v 之和, $p = p_a + p_v$.

结合理想气体状态方程,式(7)整理得

$$\rho_g u_g^2/2 + (\rho_v R_v + \rho_a R_a) T_g = \text{const} \tag{8}$$

其中 R_a , R_v 分别为干空气和水蒸气气体常数.

根据假设 6),流道内湿空气和游离水系统的总能量守恒,因此有

$$m_a (h_a + u_g^2/2) + m_v (h_v + u_g^2/2) + m_w \int_{r_{\min}}^{\max} (h_i + u_i^2/2) f(r) dr = \text{const} \tag{9}$$

其中 h_a , h_v 和 h_i 分别为干空气、水蒸气和半径为 r_i 的游离水的比焓,水比焓零点选择为 273.15 K.

将式(9)展开,并按水滴半径离散后,有

$$\rho_a u_g (h_a + u_g^2/2) + \rho_v u_g (h_v + u_g^2/2) + \sum W_i u_i (h_i + u_i^2/2) = \text{const} \tag{10}$$

将式(4)~式(6)、式(8)和式(10)在沿流动方向求导,可得流道内气流的温度、速度、水蒸气分密度、干空气分密度等沿程变化.

1.4 水滴流动与传热传质模型

本节将通过流道内水滴流动和传热特性分析,基于质量守恒、动量守恒和能量守恒方程建立其质量、半径、温度、流速等参数在流动方向上的变化规律.

1) 颗粒数守恒

对于半径为 r_i 的所有水滴,其连续性方程有

$$W_i u_i A = N_i m_i \tag{11}$$

其中 N_i 为单位时间内通过截面的水滴个数, ($1/\text{s}$),根据假设 1),沿流动方向上各类水滴数目应保持不变. m_i 为单个水滴的质量.

2) 相变传质分析

水滴在流道内流动时,不断与流道内空气进行热质交换,引起质量发生变化,质交换量可依据二者间质交换系数确定,即

$$dm_i/dx = \beta_i \cdot \Delta \rho \cdot 4\pi r_i^2 / u_i \tag{12}$$

式中 β_i 为传质系数 (m/s); $\beta_i = Sh \cdot D_v / (2r_i)$, D_v 为空气-水蒸气间扩散系数 (m^2/s); $Sh = 2(1 + 0.3Re^{0.5}Sc^{0.33})$;对于空气与水间的扩散情况,可认为 $Le = Pr/Sc \approx 1$; Re 由气流与水滴间相对速度确定, $Re = 2|u_i - u_g|r_i/\nu_g$, ν_g 为空气动力黏度 (m^2/s).蒸发过程中, $\Delta \rho$ 为颗粒表面饱和水蒸气

密度 $\rho_{w,s}$ 与湿空气中水蒸气分密度 ρ_v 之差;水滴凝固前后, $\rho_{w,s}$ 分别为水和冰表面饱和水蒸气密度;气流饱和后, $\Delta\rho=0$.

水滴相变传质引起的质量与半径变化关系

$$dm_i/dx = \rho_w \cdot 4\pi r_i^2 \cdot dr_i/dx \quad (13)$$

综合式(12)和式(13),可以得到因空气与水滴间相变传质导致的半径变化为

$$dr_i/dx = B \cdot \Delta\vartheta(\rho_w \cdot w) \quad (14)$$

3) 运动分析

水滴在冷气流中非定常运动时,会受多种力共同作用,例如重力、阻力、附加质量力、Basset力、浮力、Maguns力、Saffman力以及温度梯度力等^[11].但由于水滴体积较小,密度远大于空气密度,本文仅考虑水滴所受到的气动阻力,有

$$F = C_D \cdot \rho_g \cdot (u_g - w) |u_g - w| \cdot \pi r_i^2 / 2 \quad (15)$$

式中阻力系数可选用文献[11]推荐的标准阻力曲线来确定球形水滴阻力系数.

$$C_D = \begin{cases} 24/Re & Re < 0.2 \\ 24(1 + 0.15Re^{0.687})/Re & 0.2 \leq Re < 800 \\ 0.44 & 800 \leq Re \end{cases} \quad (16)$$

考虑水与湿空气间质传递,由动量定理,得

$$F = m_i \cdot du_i/dt + dm_i/dt \cdot (u_i - u_g) \quad (17)$$

整理后,可以得到沿流道方向上有

$$\frac{du_i}{dx} = \left[\frac{C_D \cdot \rho_g \cdot |u_g - u_i|}{8\rho_w u_i} + \frac{dr_i}{dx} \right] \cdot \frac{3}{r_i} (u_g - u_i) \quad (18)$$

4) 能量分析

由于与周围气流的对流换热 $Q_{f,i}$ 和因相变引起的潜热 $Q_{v,i}$ 交换,半径为 r_i 的单个水滴焓变 ΔH_i 的计算式为

$$\Delta H_i = Q_{f,i} + Q_{v,i} \quad (19)$$

$$Q_{f,i} = \alpha_i \cdot (T_g - T_i) \cdot 4\pi r_i^2 \quad (20)$$

$$Q_{v,i} = L \cdot u_i \cdot \frac{dm_i}{dx} \quad (21)$$

$$\Delta H_i = \rho_w \cdot \frac{4}{3} \pi r_i^3 \cdot u_i \cdot \frac{dh_i}{dx} \quad (22)$$

整理后可得液滴比焓的沿程变化为

$$\frac{dh_i}{dx} = \frac{3\alpha}{\rho_w r_i u_i} (T_g - T_i) + \frac{3L}{r_i} \cdot \frac{dr_i}{dx} \quad (23)$$

式中 α 为对流换热系数($\text{kW}/(\text{m}^2\text{K})$), $\alpha = 0.5 \cdot$

$Nu(r_i) \cdot \lambda_g/r_i$;对于球形物体外层流绕流有 $Nu = 2(1 + 0.3Re^{0.5}Pr^{0.33})$; h_i 和 L 分别为单位质量流量水滴比焓和相变潜热,凝固前 $L = L_{lv}$, $dh_i = c_{p,l} \cdot dT_i$;凝固后 $L = L_{sv}$, $dh_i = c_{p,s} \cdot dT_i$;凝固过程中, $L = L_{lv}$, $dT_i = 0$,其中 L_{lv} 为蒸发/凝固潜热, L_{sv} 为升华/凝华潜热, (kJ/kg); $c_{p,l}$ 和 $c_{p,s}$ 分别为水和冰的比定压热容($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$).水滴密度取决于水滴相态,液态有 $\rho_w = \rho$,固态有 $\rho_w = \rho_s$,两相混合态是依据结冰进程计算

$$\rho_w = (1 - k_c)\rho + k_c\rho_s \quad (24)$$

式中凝固比 $k_c = \Delta h_i/L_{ls}$,表达已结冰部分比例, Δh_i 为凝固过程中单位质量水滴焓变, ρ , ρ_s 分别取水和冰的密度(kg/m^3), L_{ls} 为水的融化/凝固潜热(kJ/kg).

5) 凝固过程的补充模型

相变需要推动力,水滴温度须降低到低于凝固点时才能凝固.依据异质成核理论,球形水滴凝固所需达到的过冷度 ΔT 与直径 D 的关系有^[8]

$$\Delta T = a + b \cdot \ln D \quad (25)$$

对于系数 a 和 b 的值,Schulz^[8]推荐选择 $a = 38.59$, $b = -3.11$,公式中 ΔT 的单位是K, D 的单位为 μm ,适用范围 $D < 300\mu\text{m}$.

密度变化会影响水滴半径,由质量守恒得

$$\frac{dr'}{dx} = -\frac{r}{3\rho} \frac{d\rho}{dx} \quad (26)$$

将密度过程中密度计算式(24)在沿程方向上求导后代入式(26),可得凝固过程对水滴半径影响

$$\frac{dr'_i}{dx} = -\frac{r_i}{3\rho_w} \cdot \frac{\rho_s - \rho_l}{L_{ls}} \cdot \frac{dh_i}{dx} \quad (27)$$

2 数值模拟与结果分析

2.1 模型求解

通过对式(4)~式(6)、式(8)和式(10)在沿程方向上求导得到的流道内气流的温度、速度、水蒸气分密度、干空气分密度等沿程变化计算公式,结合式(11)、式(12)、式(18)和(23)所计算的各类水滴的沿程质量、焓、速度和液态水含量的沿程变化公式及半径修正公式(14)和(27)等,联立即可采用数值方法求解微分方程组,计算流程如图3所示.

2.2 计算条件

本文基准计算条件为,等截面积实验段长3m,气流流速 $u_{g0} = 50 \text{ m/s}$,气流入口温度 $T_{g0} =$

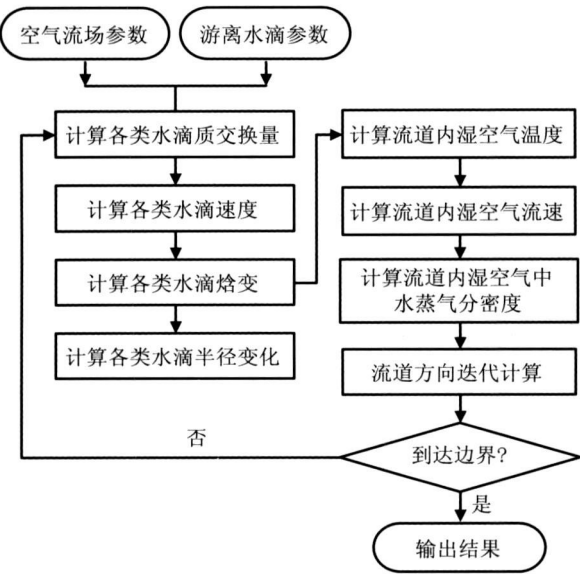


图 3 计算流程图

Fig 3 Flowchart to solve this model

- 30 ℃, 相对湿度 $\phi = 0$, 气压高度 $H = 0$ km, 游离水初始含水量 $W_0 = 2 \text{ g/m}^3$, 水滴初速度 $u_0 = 10 \text{ m/s}$. 为突出水滴半径的影响, 经适当扩展, 采用平均半径 $10 \mu\text{m}$ 的改进 Langmuir D 分布来模拟正常结冰条件, 如表 2 所示.

表 2 扩展的 Langmuir D 水滴分布
Table 2 Extended Langmuir D DSD

水滴半径 $r_0/\mu\text{m}$	LWC/ %
2.00*	0.05
5.20	0.10
7.10	0.20
10.00	0.30
13.70	0.20
17.40	0.10
40.00*	0.05

注: * 与标准 Langmuir D 分布不同.

2.3 结果与分析

本节给出在两种不同分布(扩展的 Langmuir-D 和 Langmuir A) 下, 水滴温度和相对半径、气流相对湿度和温度等参数的变化规律和分析.

1) Langmuir-D 分布

结果如图 4 所示, 可以看出 ①水滴温度最初迅速下降, 小水滴(2.00, 5.20 μm) 无法达到凝固所需过冷度, 而未结冰; 大水滴(40.0 μm) 则由于温降速度小, 未冷却到结冰温度, 仍未结冰; 其他水滴在达到过冷度后开始凝固, 最终达到凝固状

态. 水滴半径越小, 结冰发生的位置越靠前, 当水滴半径增大时, 结冰位置会向后移动. 此外, 在流道不同截面上, 各类水滴处于不同的相态, 如终端截面上的气流中将包括冰晶、过冷水滴和冷却水滴的混合物; ②随着水滴的蒸发, 水滴半径沿流动方向逐渐减小, 而且水滴越小, 其半径减小幅度越大; 相应的, 流道内湿空气内的水蒸气含量增加, 相对湿度不断增大; ③最初由于气流给水滴加速,

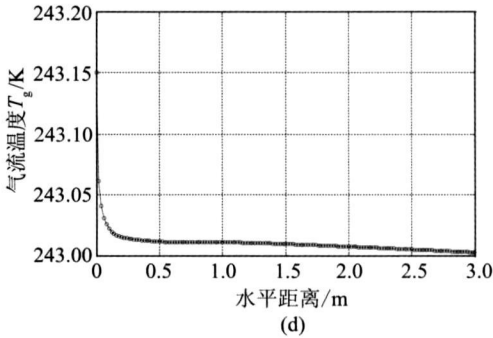
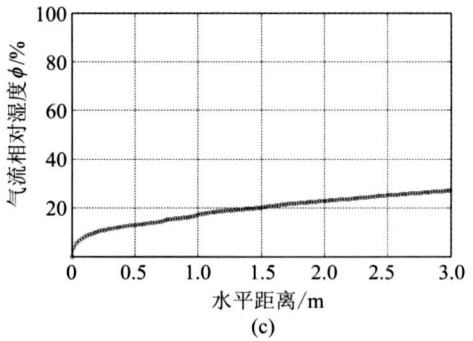
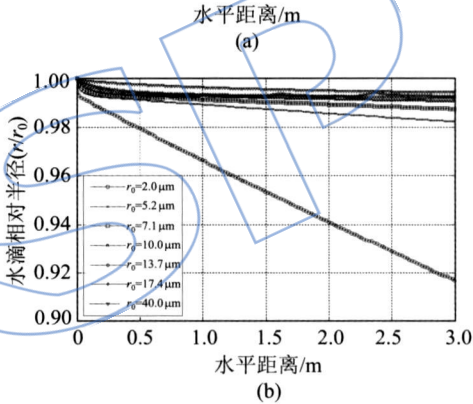
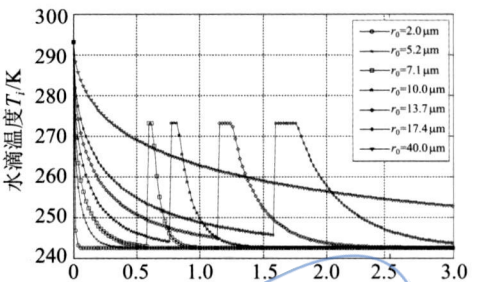


图 4 热力学参数沿程变化(Langmuir D, $T_{g0} = - 30 \text{ }^\circ\text{C}$)

Fig. 4 Parameters along the duct
(Langmuir D, $T_{g0} = - 30 \text{ }^\circ\text{C}$)

导致气流温度先有较大下降, 随后则受到水滴传热与蒸发吸热的共同影响, 先水滴温度较高, 传热占主导, 气流温度有所上升, 之后二者逐渐接近, 蒸发 / 升华吸热导致气流温度开始下降, 不过整个过程中气流温度变化幅度很小。

2) Langmuir-A 分布

Langmuir-A 分布为均匀分布, 即流道内仅有单一大小的游离水, 此时, 水滴参数的沿程变化规律与前面结果相似, 单一直径分布的计算有利于单独考察水滴大小对流场参数的影响。分别对表 2 给出的七种水滴尺寸展开计算, 其他计算条件不变, 结果如图 5 所示。

与图 4 对比可见, ①各半径水滴温度变化规律类似, 原因在于气流温度和速度变化很小。②水滴半径越小, 总蒸发面积越大, 总蒸发量越大, 气流相对湿度 ϕ 变化也越大, 当水滴处于不同相态时, ϕ 的变化幅度也有差异。与图 4 相比, 仅有小水滴(半径 $2\mu\text{m}$) 时, 由于总蒸发量大, 气流相对湿度增加快, 抑制了单个水滴蒸发, 因此相对半径减小幅度小于图 4(b) 中的等半径水滴。此外, 两相区还显示了因结冰膨胀而导致的半径增大。③最初气流对水滴加速导致温度降低, 随后由于气液间热交换, 气流温度均升高, 但二者温度趋于一致后, 蒸发导致气流温度再次降低, 而且半径越小, 蒸发量越大, 气流降温也越大。

2.4 初始条件对气流分布的影响

考虑两种不同初始条件: ①仅改变气流温度; ②仅改变气流相对湿度。

1) 改变气流初始温度

气流温度 $T_g = -5^\circ\text{C}$ 时, 结果如图 6 所示。

与图 4 对比可见, 气流温度对系统参数影响很大, 随着气流初始温度的升高 ①水滴降温速度减小, 此时流道内所有水滴均未结冰, 以过冷水滴形式存在, 其中较大的水滴甚至都没有冷却到气流温度。②气流饱和湿空气密度增大, 导致蒸发量增大, 因此水滴半径减小幅度显著增大, 其中小水滴基本上全部蒸发(当 $r/r_0 < 0.05$ 时, 剩余质量仅为 0.01%, 为了避免数值积分发散, 此时即认为完全蒸发)。相应的, 气流的相对湿度增幅明显; 气流降温也相对显著。

图 7 给出了在不同气流温度($-5, -15, -25, -30, -40^\circ\text{C}$) 条件下, 终端截面水滴粒径分布的变化图。由图 7 可见, 终端截面上大水滴所占比例均有增大, 小水滴所占比例减小, 而且气流温度越高, 比例变化幅度也越大。

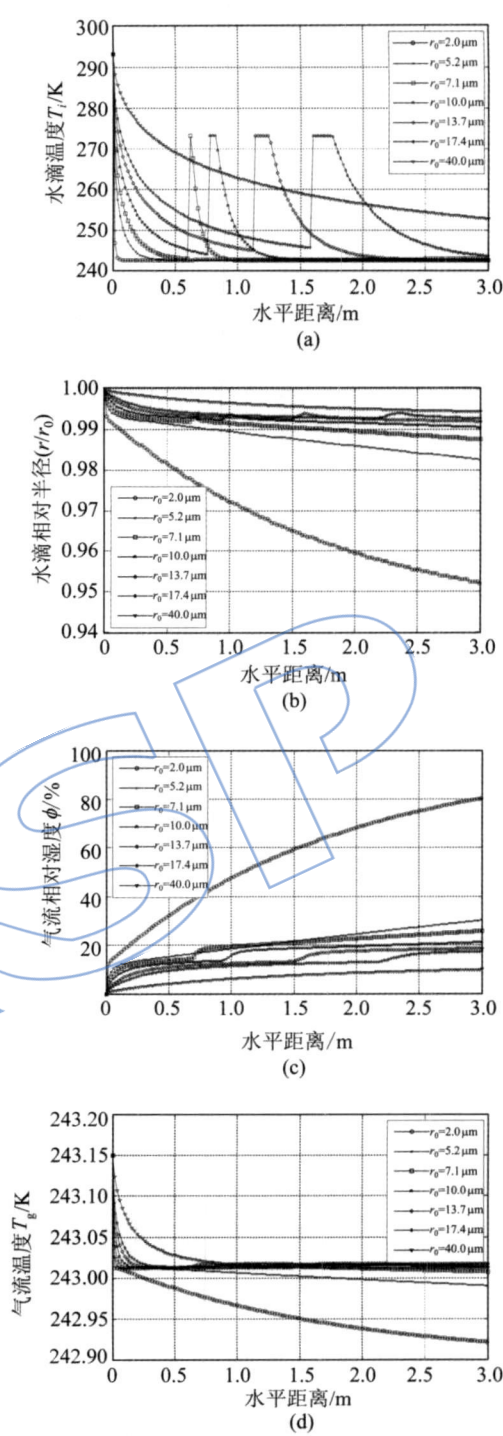


图 5 热力学参数沿程变化(Langmuir A)
Fig. 5 Parameters along the duct (Langmuir A)

2) 改变气流相对湿度

相对湿度 $\phi = 80\%$ 时, 结果如图 8 所示, 与图 4 对比可见, 气流相对湿度变化对水滴温度变化几乎没有影响, 但是由于蒸发量的降低, 导致水滴相对半径变化幅度明显减小, 气流相对湿度和温度变化也显著减小。因此, 增大气流的相对湿度, 抑制气液之间的质交换, 有利于维持气流温湿度的稳定, 减小实验器调试难度。

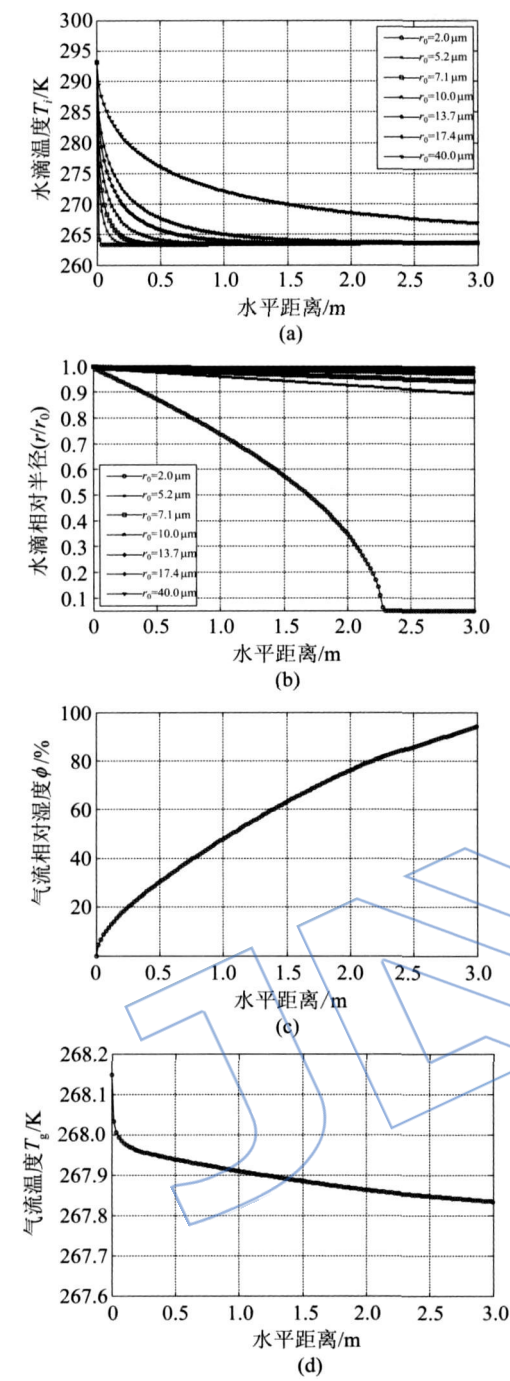


图 6 热力学参数沿程变化(Langmuir-D, $T_{g0} = -5^{\circ}\text{C}$)
Fig. 6 Parameters along the duct
(Langmuir-D, $T_{g0} = -5^{\circ}\text{C}$)

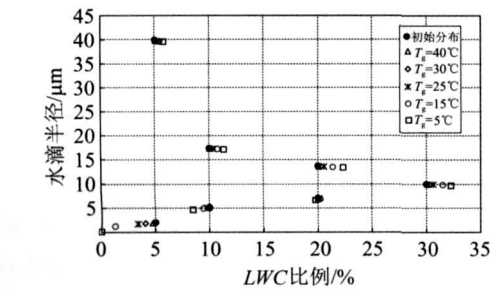


图 7 不同气流温度下终点水滴分布变化
Fig. 7 DSD variation at the end under different T_g

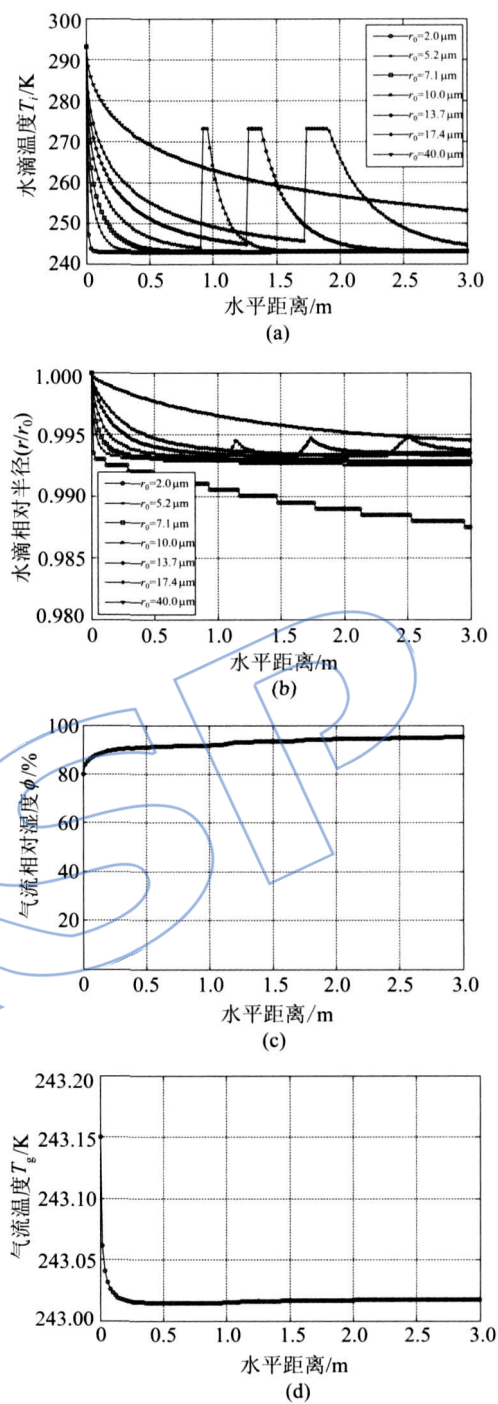


图 8 热力学参数沿程变化(Langmuir D, $\phi = 80\%$)
Fig. 8 Parameters along the duct
(Langmuir-D, $\phi = 80\%$)

2 5 与已有结果的对比

虽然流道形状与水滴尺寸分布等计算条件不同,无法精确对比,但本文所得结论和规律与各文献基本一致,如本文图 4(a)、图 5(a) 和图 8(a) 给出的水滴温度变化规律与文献[8] 中图 5, 文献[9] 中图 3. 12(a)、图 3. 15(a) 和图 3. 16(a) 一致; 图 4(b)、图 5(b) 和图 8(b) 给出的水滴尺寸变化

规律与文献[8]图4一致,与文献[9]中图3 12(b)、图3 15(b)和图3 16(b)在大水滴范围一致,这也表明文献[9]的蒸发模型在小水滴范围内(半径小于 $5\mu\text{m}$)的适用性尚有待确定.

3 结 论

本文建立了冰风洞结冰实验器流道内气流水滴/冰晶混合流的流动与传热传质分析模型,并对其进行数值求解,通过计算与分析得到如下结论:

1) 由于复杂的热质交换,水滴尺寸分布、液态水含量比、温度、相态及气流湿度等参数会沿流道发生较大变化,而且实验段需要足够的长度才能使气流温度稳定.因此,应通过专门实验或计算来选择初始设计参数和实验段长度,才能得到符合实验要求的稳定的混合流.

2) 水滴流动与传热传质特性与尺度密切相关.同样条件下,小水滴可能已完全凝固而大水滴尚未冷却到平衡温度.因此需要慎重选择合适的雾化设备和工艺,以得到满足要求的水滴分布.

3) 提高气流相对湿度有利于抑制传质,维持气流和游离水的稳定.

4) 少量水滴的喷入对气流速度和温度影响很小.计算显示,当 $LWC = 2\text{g}/\text{m}^3$ 时,气流速度变化不超过 0.07% ,温度变化小于 $0.3\text{ }^\circ\text{C}$.

本文改进了现有的理论分析模型,所得结果和规律对于冰风洞建设和实验设备调试具有重要参考价值.但是,现有研究主要针对小水滴,有一定的局限性,后续研究将扩展现有模型应用范围,考虑过冷大水滴(半径大于 $40\mu\text{m}$)工况,进一步为结冰实验模拟提供参考.

参考文献:

[1] Bragg M B, Broeren A P, Blumenthal L A. Iced airfoil aerodynamics [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2005, 41(5): 323-362

[2] Al-Khalil K, Hitzgrath R, Philippi O, et al. Icing analysis and test of a business jet engine inlet duct [R]. AIAA-2000-1040, 2000.

[3] Sabri F, Trifu O, Paraschivoiu I. Inflight ice accretion simulation in SLD conditions [R]. AIAA-2007-4282, 2007.

[4] 张大林. 人机与环境工程中若干问题的数值模拟研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002

ZHANG Dalin. Numerical simulation research of several problem in man machine and environment engineering [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautic and Astronautics, 2002 (in Chinese)

[5] 周华, 胡世良. 圆形坚冰影响翼型气动性能的数值分析 [J]. 力学季刊, 2007, (1): 28-33

ZHOU Hua, HU Shiliang. Numerical analysis of the aerodynamic performance of an airfoil with round ice [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2007, (1): 28-33 (in Chinese)

[6] Miller D R, Harold E, Addy J, et al. A study of large droplet ice accretions in the NASA Lewis IRT at near freezing conditions [R]. AIAA-1996-0934, 1996.

[7] Willbanks C E, Schulz R J. Analytical study of icing simulation for turbine engines in altitude test cells [J]. Journal of Aircraft, 1975, 12(12): 960-967

[8] Schulz R J. A model for predicting mixed phase flow in ground test facilities [R]. AIAA-1999-0308, 1999.

[9] 安东诺夫 A H, 阿克谢诺夫 H K, 格里亚切夫 A B, 等. 航空燃气涡轮发动机防冰系统设计原理和实验方法 [M]. 莫斯科: 俄罗斯中央航空发动机研究院, 2001

[10] Shah A, Patnoe M V, Berg E L. Droplet size distribution and ice shapes [R]. AIAA-1998-0487, 1998.

[11] 郭烈锦. 两相与多相流动力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002