

文章编号: 1000-8055(2009)08-1824-07

飞机结冰过程的液/固相变传热研究

杜雁霞, 桂业伟, 肖春华, 易 贤, 李 军

(中国空气动力研究与发展中心 空气动力学国家重点实验室, 绵阳 621000)

摘 要: 基于液/固相变的基本理论, 对飞机结冰过程的液/固相变传热特性进行了研究, 建立了液膜及冰层生长的分析模型, 并采用该模型对来流条件各参数对冰层生长特征及其速率的影响进行了分析. 研究表明, 在飞机结冰过程中, 冰层生长速率及不同冰型的形成不但受来流参数的影响, 而且与固、液相区的内部传热特性相关, 因而考虑各相区的传热过程是提高冰层生长预测准确性的重要途径. 所建模型考虑了液/固相变的非线性特征, 对冰层生长速率及冰型特征有着较好的预测作用.

关 键 词: 飞机; 结冰; 相变; 传热

中图分类号: V211

文献标识码: A

Investigation on liquid/ solid phase change heat transfer of aircraft icing

DU Yan-xia, GUI Ye-wei, XIAO Chun-hua, YI Xian, LI Jun

(State Key Laboratory of Aerodynamics,

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: The liquid/ solid phase change heat transfer characteristics of aircraft icing were investigated based on the theories of liquid/ solid phase change. The analysis model for the growth of film and ice was established and the influence of airflow parameters on the characteristics and rate of icing accretion was analyzed. The results indicate that the accretion rate of icing is not only influenced by the airflow parameters but also influenced by the inner heat transfer of each phase. The heat transfer in solid and liquid phase shall be taken into account as an important method to improve the precision of icing prediction. The current model predicts the ice growth rates and ice type relatively well in consideration of the nonlinear characteristics of liquid/ solid phase change.

Key words: aircraft; icing; phase change; heat transfer

飞机结冰是导致飞行安全事故的主要隐患之一. 深入研究飞机结冰过程的规律特征, 是进行结冰强度预测, 发展结冰探测、告警及防/除技术, 从而避免飞机因结冰而导致飞行事故的前提和基础.

对于结冰表面热力学过程的描述是结冰预测研究的重要部分, 而目前的大多数研究均采用的是 Messinger 热力学模型^[1]. 但研究发现, 采用该

模型计算所得到的霜冰外形与实验结果吻合较好, 而对于明冰和混合冰的预测则与实验结果有着较大的差异^[2]. 在实际中, 明冰和混合冰对飞行安全的危害比霜冰要大的多^[3]. 许多研究者在冰风洞实验的基础上提出了结冰热力学模型的改进方法^[3-4], 但多数模型适用范围有限, 不能对所有类型的结冰给出完全的解释. Myers^[5]在考虑固液相区导热的基础上对 Messinger 模型进行了改

收稿日期: 2008-07-28; 修订日期: 2009-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(10672174); 中国博士后科学基金(20080430230)

作者简介: 杜雁霞(1974-), 女, 四川成都人, 博士, 主要从事传热传质研究.

进, 并认为当考虑内部导热时, 冰层生长速率要高于不考虑内部导热工况, 但未考虑水膜的生长特性. 为了准确预测不同气象和来流条件下冰的形成和生长规律, 适应不同条件的结冰预测要求, 本文将固、液相区的传热过程及固/液相变的非线性特征考虑在内, 建立了一种较为通用的结冰传热模型, 并采用该模型分析了飞机结冰过程中冰层生长的影响因素及其作用规律.

1 模型的构建

根据来流条件的不同, 当空气中的过冷水滴撞击到飞机表面时, 通常会出现表面无液膜和液/固共存的两种结冰现象. 为了使模型具有通用性, 本文以固/液共存条件下的结冰过程作为研究对象(如图 1). 在该类结冰条件下, 表面所收集的液态水不能在瞬间完全凝固, 液/固相界面不断地向液相区移动, 同时由于来流持续不断地进入液相区域, 使液膜与空气接触的液/气相界面不断向空气区推进, 结冰过程呈现出固、液双区共存和液/固、液/气双界面同时移动的复杂相变特征. 为便于研究, 将该类结冰定义为湿模式结冰, 而将仅存在冰层固相区和气/固单界面移动的结冰过程定义为干模式结冰. 为简化问题, 作如下假设: ①认为液态水在撞击飞机表面的瞬间即完成液/固相变的结晶成核过程; ②忽略液相区因体积变化而引起的附加流动及物性参数随温度的变化; ③认为液态水为单相物质, 液/固相变过程不存在模糊区, 相变发生在单一温度点; ④忽略液相区的对流传热影响, 认为固、液相区内的传热为导热控制; ⑤不考虑表面收集水的溢流及脱落效应.

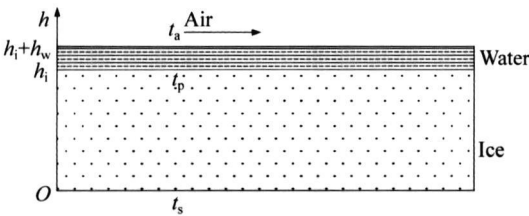


图 1 结冰表面物理模型

Fig. 1 Physical model of icing surface

根据上述假设, 湿模式结冰的一维相变传热过程可描述如下:

固相区
$$\frac{\partial t_i}{\partial \tau} = \frac{\kappa_i}{\rho_{ci}} \frac{\partial^2 t_i}{\partial h^2} \quad (1)$$

液相区
$$\frac{\partial t_w}{\partial \tau} = \frac{\kappa_w}{\rho_{cw}} \frac{\partial^2 t_w}{\partial h^2} \quad (2)$$

液/固相界面

$$\rho L_f \frac{dh_i}{d\tau} = \kappa_i \frac{\partial t_i}{\partial h} - \kappa_w \frac{\partial t_w}{\partial h} \quad (3)$$

$$t_i(h_i, \tau) = t_w(h_i, \tau) = t_p \quad (4)$$

其中 t 为温度; κ 为导热系数; ρ 为密度; c 为质量热容; h 为冰层厚度方向坐标; L_f 为相变潜热; 下标 i, w 分别表示冰和水.

液/气相界面

$$-\kappa_w \frac{\partial t_w}{\partial h} = (q_c + q_e + q_w) - (q_a + q_k) \quad (5)$$

其中 q_c 为气流与表面的对流换热量; q_e 为蒸发带走的热量; q_w 为撞击在表面的水滴自身携带的能量; q_a 为气动加热量; q_k 为撞击在表面的水滴所具有的动能.

质平衡方程

$$\rho \frac{\partial h_i}{\partial \tau} + \rho_w \frac{\partial h_w}{\partial \tau} = \varphi V \beta \quad (6)$$

其中 φ 为液态水含量(LWC); V 为来流速度; β 为水收集系数.

冰层与飞机蒙皮接触面有 $t(0, \tau) = t_s$. 若将固、液相区的导热视为准稳态过程, 则有

$$\frac{\partial^2 t_i}{\partial h^2} \approx 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 t_w}{\partial h^2} \approx 0 \quad (8)$$

对式(7)、式(8)进行积分, 并根据边界条件式(4)和式(5)可得冰层和水膜的温度分布分别为

$$t_i = \frac{t_p - t_s}{h_i} h + t_s \quad (9)$$

$$t_w = t_p + \frac{q'_{source} - \bar{q}(t_p - t_a)}{h_w \bar{q} + \kappa_w} (h - h_i) \quad (10)$$

其中 $q'_{source} = q_a + q_k$; $\bar{q} = \alpha_c + \varphi V \beta c_w + \gamma_e L_e$; α_c 为对流换热系数; γ_e 为当量蒸发系数; L_e 为蒸发潜热; 下标 p, s 和 a 分别代表相变点、飞机蒙皮表面及来流.

可以看出, 对于湿模式结冰过程, 各相区的温度分布依赖于冰层和水膜的厚度, 同时各相区的厚度变化又反过来依赖于其温度分布, 即温度分布与冰层和水膜的厚度变化是耦合的. 如将冰层生长过程分为液膜出现之前的干模式和液膜出现后的湿模式, 并定义从干模式转变为湿模式的临界时间 τ_c , 则对质平衡方程(6)在湿模式区间 $(\tau_c - \tau)$ 进行积分可得

$$\int_{\tau_c}^{\tau} (\rho_i \frac{\partial h_i}{\partial \tau} + \rho_w \frac{\partial h_w}{\partial \tau}) d\tau = \int_{\tau_c}^{\tau} \Phi V \beta d\tau \quad (11)$$

湿模式阶段, 水膜、冰层厚度与时间的关系为

$$h_w = \frac{\Phi V \beta (\tau - \tau_c) - \rho_i (h_i - h_{ic})}{\rho_w} \quad (12)$$

其中 h_{ic} 为干、湿模式临界时刻的冰层厚度.

根据式(9), (10) 及液/固相界面能量方程(3) 可得

$$\rho_i L_f \frac{dh_i}{d\tau} = \frac{\kappa_i (t_p - t_s)}{h_i} - \frac{\kappa_w [q'_{source} - \bar{q} (t_p - t_a)]}{h_w \bar{q} + \kappa_w} \quad (13)$$

将式(12)代入式(13), 即可获得冰层厚度随时间的变化关系

$$\rho_i L_f \frac{dh_i}{d\tau} = \frac{\kappa_i (t_p - t_s)}{h_i} - \frac{\rho_w \kappa_w [q'_{source} - \bar{q} (t_p - t_a)]}{[\Phi V \beta (\tau - \tau_c) - \rho_i (h_i - h_{ic})] \bar{q} + \rho_w \kappa_w} \quad (14)$$

在水膜出现的临界点, 有

$$\frac{\partial h_w}{\partial \tau} = 0; \quad t = t_p \quad (15)$$

根据式(3), (5), (6) 及式(14), (15), 可得从干模式转变为湿模式的临界冰层厚度为

$$h_{ic} = \frac{\kappa_i (t_p - t_s)}{q'_{source} - \bar{q} (t_p - t_a) + \Phi V \beta L_f} \quad (16)$$

在干模式下, $h_w = 0$, 根据式(6) 可得冰层厚度与时间的关系为

$$h_i = \Phi V \beta \tau / \rho_i \quad (17)$$

因此从干模式转变为湿模式的临界时间为

$$\tau_c = \rho_i h_{ic} / \Phi V \beta \quad (18)$$

从结冰初始时刻到 τ_c , 冰层生长模式为干模式, 在此期间, 某一时刻的冰层厚度可由式(17) 进行确定; 从 τ_c 时刻起, 冰层厚度可由式(14) 通过数值求解方法获得. 可以看出, 在湿模式下, 冰层生长速率 $dh_i/d\tau$ 受固相冰层和液膜层内导热共同作用的影响, 并与结冰表面各热量交换项的变化密切相关. 由方程(3), (10) 及式(13), 可得水膜厚度随时间的变化关系

$$\rho_w L_f \frac{dh_w}{d\tau} = \Phi V \beta L_f - \frac{\kappa_i (t_p - t_s)}{\frac{\Phi V \beta (\tau - \tau_c) - \rho_i h_w}{\rho_i} + h_{ic}} + \frac{\kappa_w [q'_{source} - \bar{q} (t_p - t_a)]}{h_w \bar{q} + \kappa_w} \quad (19)$$

2 模型的计算及验证

2.1 模型的计算

式(14) 和(19) 均为非线性常微分方程, 可采用 Runge-Kutta 法进行数值求解. 采用该模型对 $\Phi = 1.2 \text{ g/m}^3$, $V = 60 \text{ m/s}$, $\beta = 0.5$, $t_a = -10 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_s = -15 \text{ }^\circ\text{C}$, t_p 取 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下的结冰过程进行计算, 可得冰层和水膜的生长特性如图 2 所示. 可以看出, 在来流条件不变的情况下, 结冰表面各时刻所收集到的水量为一常数, 而冰、水密度相差较小, 因此冰层和水膜总厚度与时间近似呈线性关系. 在结冰初期, 由于冰层厚度相对较薄, 液/固相界面所释放出的潜热能较快地予以传输, 因而冰层生长速率相对较快而水膜生长速率相对较慢; 在结冰后期, 随着固相冰层厚度的增加, 固相区内的热阻相应增大, 液/固界面所释放出的热量在传输过程受到的热阻增加, 因而表面所收集液态水的凝固比例逐渐减小, 导致冰层生长速率的下降. 此时, 冰层生长速率相对较慢而水膜生长速率相对较快.

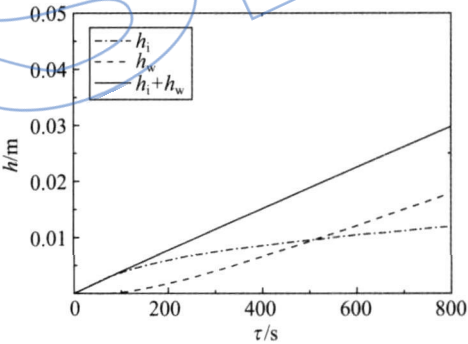


图 2 冰层和水膜的生长特性曲线

Fig. 2 Growth characteristics of ice and water film

图 3 显示了采用所建模型计算所得的液态水冻结比例和冰层生长速率的变化曲线. 可以看出, 在 $0 \sim \tau_c$ 期间的干模式阶段, 由于液态水在撞击表面的瞬间即完全凝固, 因而在此期间, 冻结比例为 1, 由于每单位时间内收集水量一定, 因此冰层生长速率为一常数; 在 τ_c 以后的阶段, 由于冰层厚度的增加, 尽管单位时间内所收集到的水量相同, 但液态水的潜热释放过程因热阻的增加而逐步减慢, 因而冻结比例与冰层生长速率均呈下降趋势, 且下降曲线随时间的延长逐渐趋于平坦, 即当结冰时间越长, 冻结过程越趋稳态过程.

图 4、图 5 分别为冰层和液膜固、液相区的温度分布及不同时刻的温度分布变化曲线. 可以看

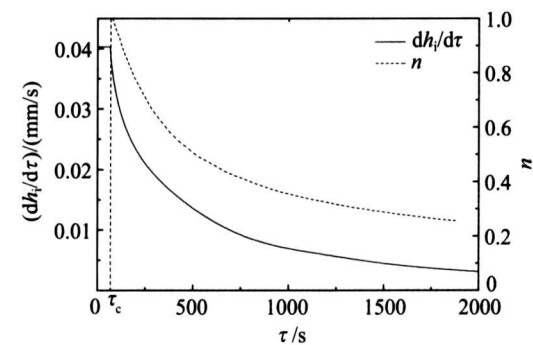


图 3 液态水冻结比例和冰层生长速率变化曲线
Fig. 3 Freezing fraction and icing rate curves

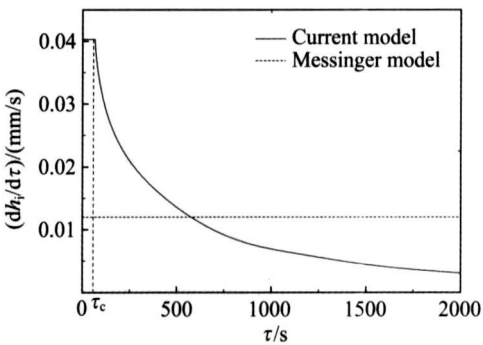


图 6 冰层生长速率与 Messinger 模型的比较
Fig. 6 Comparison of icing rate with Messinger model

出,在固相区,冰层内的温度值介于蒙皮温度 t_s 和相变温度 t_p 之间,而液膜层内的温度则介于相变温度 t_p 和来流温度 t_a 之间.说明该模型可较好地体现冰层表面未冻结液态水的过冷状态.结冰时间越长,冰层和液膜层相对越厚,且液膜层表面温度越趋于来流温度 t_a .若不考虑固、液相区的内部传热,则传热模型简化为 Messinger 模型,图 6 显示了前述计算条件下采用所建模型的计算冰层生长速率与 Messinger 模型计算值的比较.可以看出,在固液共存的结冰条件下, Messinger 模型的计算冰层生长速率为一恒定常数,而采用所建模型的计算值为一随时间逐渐下降的曲线,说明所建模型可较好地体现冰层生长的非线性特征.

2 2 模型的验证

图 7 为不同表面在本单位的小型冰风洞实验中获得 的冰型.图 7(a) 为来流温度为 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$,风速为 35 m/s 条件下圆柱表面的实验冰型;图 7(b) 为来流温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$,风速为 8 m/s 条件下电缆表面的实验冰型.可以看出,尽管结冰表面和来流条件不同,实验冰型均表现为霜冰和明冰共存的混合状态,只是结冰气象条件不同,初期的霜冰厚度有所差别.越靠近模型表面,冰型特征越接近于霜冰,而越远离结冰表面,冰型特征越接近于明冰.如果将湿模式条件下的结冰称为明冰,而将干模式下的结冰成为霜冰,则实验现象与模型计算结

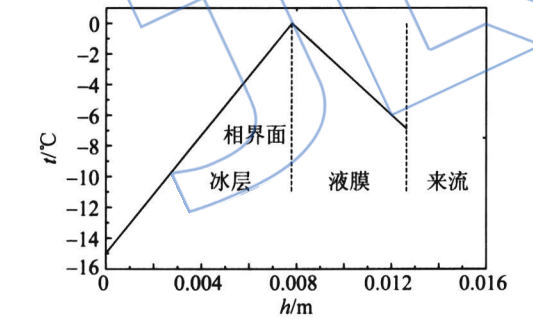


图 4 330 s 固、液相区的温度分布
Fig. 4 Temperature distribution at 330 s

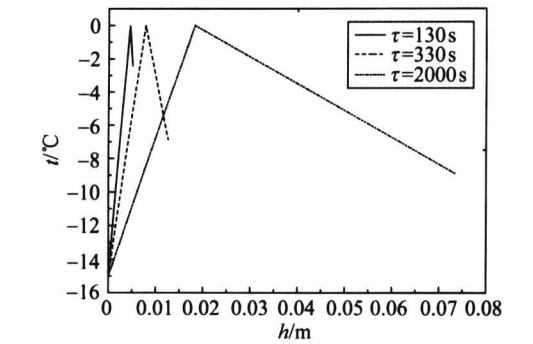
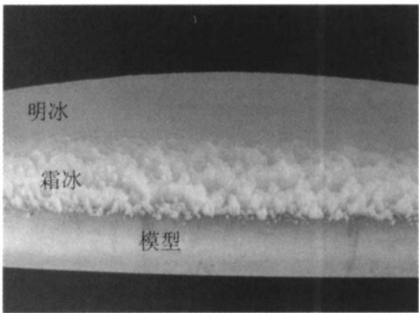
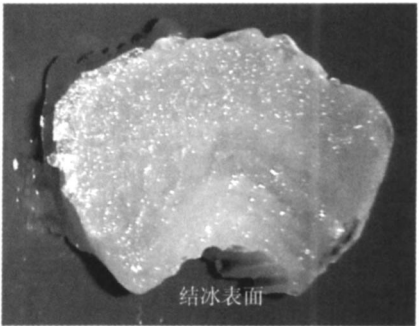


图 5 不同时刻温度分布的比较
Fig. 5 Temperature distribution at different times



(a) 圆柱表面试验冰型



(b) 电缆表面试验冰型截面

图 7 不同表面的冰风洞实验冰型

Fig. 7 Experimental icing type on different surfaces

果一致(如图 3 的冻结系数曲线). 即在结冰初期, 液态水的冻结系数接近于 1, 因而形成霜冰; 越靠近结冰后期, 冻结系数相对越小, 因而冰型逐渐向明冰过渡. 该现象说明, 在实际结冰过程中, 不同冰型的产生不仅与结冰条件有关, 而且还与结冰的内部传热过程有关. 在极限情形下, 当来流或蒙皮温度足够高时, 可能出现 $\tau_c \leq 0$ 的情形, 则认为在该条件下仅发生湿模式结冰, 生成冰型为单纯的明冰; 当飞机在结冰环境中的飞行时间 $\tau < \tau_c$ 时, 则认为仅发生干模式结冰, 生成冰型为单纯的霜冰; 当冰层生长速率 $dh_i/d\tau \leq 0$ 时, 则认为在该条件下不发生结冰.

图 8 显示了结冰时间为 2000 s 时, 采用该模型计算所得的液膜温度分布与文献[6]中液相区采用 Couette 流模型计算值的比较. 可以看出, 当液相区视为准稳态导热时, 任一时刻的温度分布为一直线; 而当考虑液相区的流动时, 温度分布为一上凸的曲线. 但总体上两模型在温度变化趋势的预测上具有较好的一致性, 且液膜温度介于液/固相变温度和来流温度之间并处于过冷态.

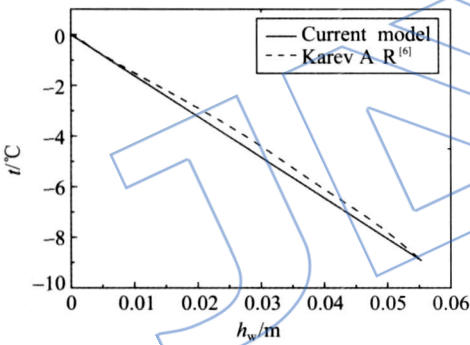


图 8 液膜层温度分布与文献值的比较
Fig. 8 Comparison of film temperature distribution with literature value

3 冰层生长的影响因素分析

3.1 来流条件对冰层生长特性的影响

为了研究来流温度对冰层生长特性的影响, 变换来流温度并保持其他条件不变进行计算, 可获得不同温度条件下的冰层生长规律(如图 9). 可以看出, 来流温度越低, 则冰层生长速率越快并越趋于线性生长, 反之则生长速率越慢, 并越偏离线性特征.

为了研究来流条件其他参数对冰层生长特性的影响, 分别变换来流速度、液态水含量及水收集系数等参数并保持其他条件不变进行计算, 可获

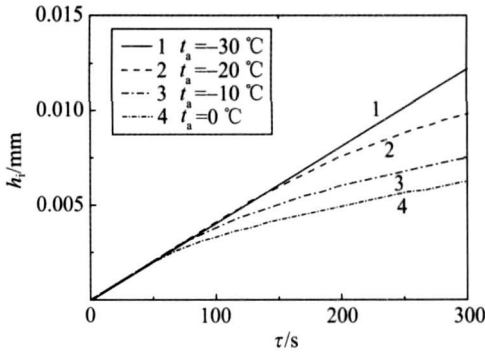


图 9 来流温度对冰层生长特性的影响
Fig. 9 Effects of airflow temperature on ice growth

得不同条件下的冰层生长规律. 图 10, 11 和 12 即为不同来流速度、液态水含量及水收集系数参数条件下冰层生长规律的比较. 可以看出, 在其他条件不变的条件下, 来流速度、液态水含量及水收集系数 3 个参数对冰层生长速率的影响均呈现出相同的趋势, 即在结冰初期, 来流速度、液态水含量及水收集系数越大则冰层生长速率越快, 而后期则逐渐减慢, 并出现来流速度、液态水含量及水收集系数越大冰层生长速率反而越慢的现象. 这是由于来流速度、液态水含量及水收集系数越大, 则表面所收集的液态水也相对越多. 在结冰初期, 由

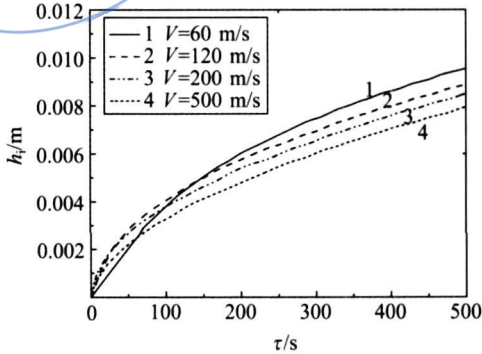


图 10 来流速度对冰层生长特性的影响
Fig. 10 Effects of airflow velocity on ice growth

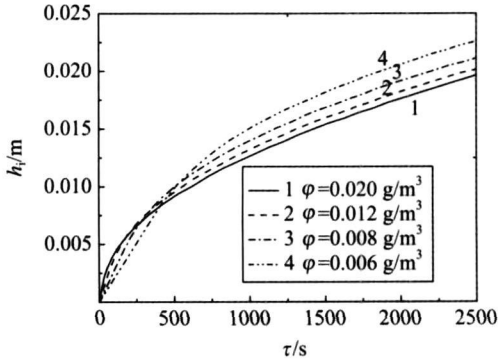


图 11 液态水含量对冰层生长特性的影响
Fig. 11 Effects of φ on ice growth

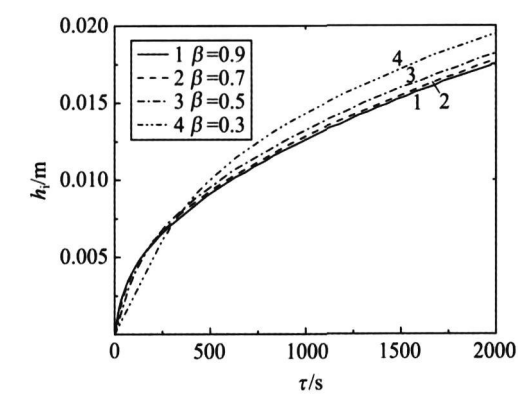


图 12 水收集系数对冰层生长特性的影响

Fig. 12 Effects of collection efficiency on ice growth

于冻结比例相对较大, 所收集的液态水可在较短时间内完成液/ 固相态转变; 在结冰后期, 由于热阻的增大和冻结比例的减小, 冰层生长速率相应减慢, 因而在高来流速度、液态水含量及水收集系数条件下, 均出现结冰初期冰层生长速率大而后后期生长速率小的现象.

3 2 干、湿模式过渡时间和临界冰层厚度的影响因素分析

为了研究不同因素对干、湿模式过渡的影响, 分别变换来流温度、液态水含量及水收集系数等参数并保持其他条件不变, 根据模型计算出不同条件下干、湿生长过渡的临界时间和临界冰层厚度, 如图 13、14 和图 15 所示. 可以看出, 随着来流温度、液态水含量和水收集系数的提高, 单位时间内所收集的液态水量增加, 完全凝固需要释放的潜热量也增加, 因而干、湿模式临界时间及临界冰层厚度均呈下降趋势.

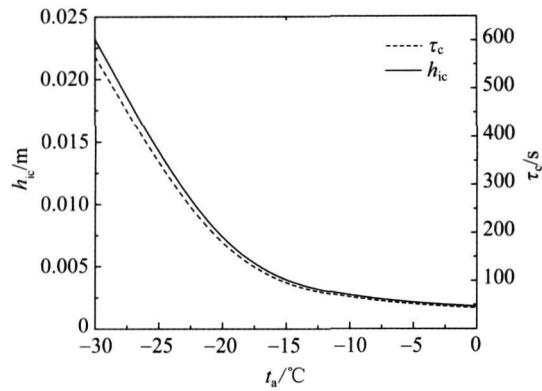


图 13 来流温度的影响

Fig. 13 Effects of airflow temperature on transition

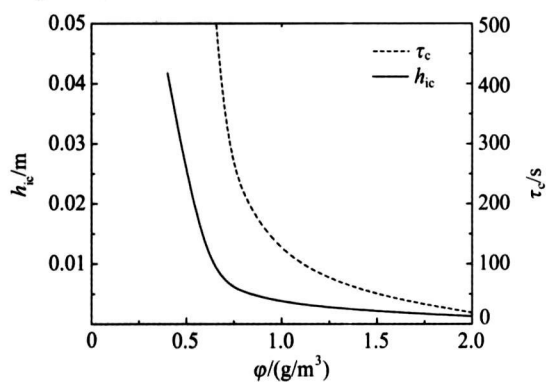


图 14 液态水含量的影响

Fig. 14 Effects of φ on transition

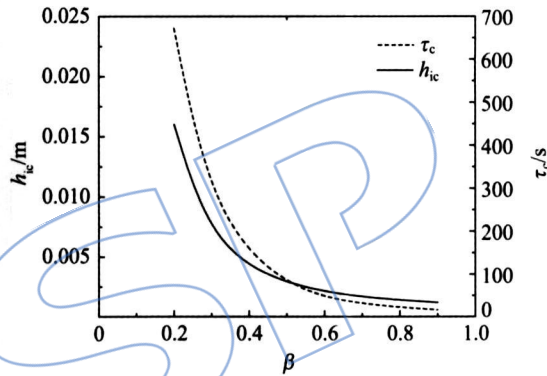


图 15 水收集系数的影响

Fig. 15 Effects of collection efficiency on transition

4 结 论

本文基于液/ 固相变基础理论, 对飞机结冰的相变传热过程进行了研究, 建立了考虑液/ 固相变非线性特征的结冰传热模型, 并采用该模型对来流各参数对冰层生长特性的影响进行了研究. 研究结果表明:

- 1) 在飞机结冰过程中, 冰层生长速率及不同冰型的形成不但受来流参数的影响, 而且与固、液相区的内部传热相关. 因此, 考虑各相区的传热过程是提高冰层生长预测准确性的重要途径. 在固、液共存的结冰条件下, 在结冰初期, 来流速度、液态水含量及水收集系数越大则冰层生长速率越快, 而在结冰后期冰层生长速率逐渐减慢, 并出现来流速度、液态水含量及水收集系数越大, 冰层生长速率反而越慢的现象.
- 2) 冰型生长从干模式向湿模式的过渡是飞机结冰的共同特征. 当过渡发生得越早, 则冰型以明冰为主, 反之则以霜冰为主. 当飞机在结冰环境中的飞行暴露时间小于临界过渡时间时, 则冰型为单纯的霜冰, 当过渡发生在结冰初始时刻, 则冰

型为单纯的明冰. 来流温度、液态水含量及水收集系数等参数均是影响干、湿模式过渡的重要因素. 在其他参数一定的条件下, 来流温度、液态水含量和水收集系数越高, 干、湿模式的过渡发生得越早, 因而临界时间及临界冰层厚度均呈下降趋势.

3) 所建传热模型考虑了液/固相变的非线性特征及结冰过程中温度分布与冰层和水膜厚度变化的耦合效应, 对于冰层生长速率及冰型特征有着较好的预测作用.

参考文献:

[1] Messinger B L. Equilibrium temperature of an unheated icing surface as a function of airspeed [J]. Journal of the

Aeronautical Science, 1953, 20 (1): 29-42
[2] Kind R J, Potapczuk M G, Feo A, et al. Experimental and computational simulation of air flight icing phenomena [J]. Progress in Aerospace Sciences, 1998, 34: 257-345
[3] Olsen W, Walker E. Experimental evidence for modifying the current physical model for ice accretion on aircraft surfaces[R]. NASA TM-87184, 1986
[4] Bilanin A J. Proposed modifications to ice accretion icing scaling theory[J]. J. Aircraft, 1991, 28: 353-359
[5] Myers T G. An extension to the Messinger model for aircraft icing[J]. AIAA Journal, 2001, 39(2), 211-218
[6] Karev A R, Farzaneh M, Lozowski E P. Character and stability of a wind-driven supercooled water film on an icing surface: I- Laminar heat transfer[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2003, 42: 481-498

