

在结霜模型推导时假定：(1) 霜层是一种多孔介质，由空气、水蒸汽和冰构成；(2) 环境中的水蒸汽借助分子扩散进入霜体，斐克定律适用；(3) 霜层中空气和水蒸汽分压力之和 $p = p_a + p_v$ 保持不变；(4) 霜的生长是瞬态的，但存在准稳态过程，在准稳态时期，认为霜层内部处于热平衡（稳定）状态；(5) 霜体密度沿空间分布是均匀的，但对时间不定常；(6) 水蒸汽服从理想气体状态方程。

2.1 扩散方程

根据扩散基本规律，霜层内沿 x 负方向水蒸汽和空气的扩散通量 m_v 和 m_a 分别可表示为

$$m_v = \frac{BD}{R_v T} \frac{dp_v}{dx} - u \frac{p_v}{R_v T}, \quad m_a = \frac{BD}{R_a T} \frac{dp_a}{dx} - u \frac{p_a}{R_a T} = \frac{d(B\rho_a x)}{d\tau}$$

式中 D 为水蒸汽在霜层内的扩散率， p 为压力， R 为气体常数， T 为开尔文温度， u 为 x 方向气体整体流速， ρ 为密度， τ 为时间， B 为霜层孔隙率即霜层中空气和水蒸汽占据的体积，由定义式 $B(\rho_a + \rho_v) + (1 - B)\rho_i = \rho_f$ 可知，其值影响霜体密度 ρ_f 的大小，下角标 a、v、i 及 f 分别表示空气、水蒸汽、冰和霜。

根据简化假定 (3) 及 (6)，由上面两式消去 μ ，经推导，水蒸汽质流通量 m_v 又可表示为

$$m_v = \frac{DB}{\tau_s} \frac{p}{p - p_v} \frac{dp_v}{dx} + \frac{p_v}{p - p_v} \frac{R_a}{R_v} \frac{d(B\rho_a x)}{d\tau} \quad (1)$$

式中右边第一项表示由水蒸汽浓度梯度引起的扩散量，其中 $\tau_s = 1.1 \sim 1.2$ 是为考虑霜层内扩散路径曲率而引入的修正系数^[2]，右边第二项反映霜层中空气减少的影响，其值远小于第一项，可略去不计。

由于水蒸汽与霜体之间处于热力学平衡状态之中，由克劳修斯-克拉贝龙方程，略去小项霜比容后，有

$$\frac{dp_v}{dT} = \frac{p_v \Delta H}{R_v T^2} \quad (2)$$

式中 ΔH 为冰的升华潜热。将式 (2) 代入式 (1)，经推导整理后，即得与霜体或霜层温度有关的水蒸汽质流通量计算式

$$m_v = \frac{DBp p_v}{(p - p_v)\tau_s R_v T^2} \left(\frac{\Delta H}{R_v T} - 1 \right) \frac{dT}{dx} \quad (3a)$$

在霜层表面 $x = x_s$ 处，有

$$(m_v)_{x=x_s} = m_{sd} = \frac{DBp p_v}{(p - p_v)\tau_s R_v T_s^2} \left(\frac{\Delta H}{R_v T_s} - 1 \right) \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=x_s} \quad (3b)$$

m_{sd} 将全部用于致密即增加霜体密度。

2.2 质量平衡方程

进入霜层的总质流通量 m_t 可借助对流传质系数 α_D 来表示

$$m_t = m_{sd} + m_1 = \alpha_D (\rho_{v,\infty} - \rho_{v,s}) \quad (4)$$

对平板， m_{sd} 与霜体平均密度 ρ_f 的关系为

$$m_{sd} = x_s \frac{d\rho}{d\tau} \quad (5a)$$

m_1 与霜层厚度 x_s 的关系为

$$m_1 = (1 - B)\rho_f \frac{dx_s}{d\tau} \quad (5b)$$

对半径为 R_0 的圆柱面, 相应的关系式为

$$m_{sd} = \frac{\pi(R_s^2 - R_0^2)}{2\pi R_s} \frac{d\rho_f}{d\tau} \quad (6a)$$

$$m_1 = (1 - B)\rho_f \frac{dR_s}{d\tau} \quad (6b)$$

2.3 能量方程

对平板, 根据结霜过程为准稳态的简化假定 (4), 得霜层热传导方程为

$$\frac{d}{dx}(\lambda_{ef} \frac{dT}{dx}) = 0 \quad (7)$$

式中 λ_{ef} 为霜层综合热导率, 在 $x=0$ 边界上, 有

$$\lambda_{ef} \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=0} = \alpha(T_\infty - T_s) + \alpha_D(\rho_{v,\infty} - \rho_{v,s})\Delta H \quad (8)$$

求积式 (7), 有

$$\int_{T_w}^{T_s} \lambda_{ef} dT = [\alpha(T_\infty - T_s) + \alpha_D(\rho_{v,\infty} - \rho_{v,s})\Delta H]x_s \quad (9)$$

对于圆柱, 可类似求解。

2.4 计算参数选取

(1) 扩散系数 D 。该参数受霜层密度影响, 本文采用文献 [3] 中的公式计算

$$D = \frac{2.256}{p} \left(\frac{T}{256} \right)^{1.81} \quad (10)$$

式中 p 为空气压力, 单位 Pa, T 为水蒸汽温度, 单位 K。

(2) 对流换热系数 α 。采用光滑管的 α 乘以增强系数 $z=1.2 \sim 1.2$ 的办法, 来考虑霜表面粗糙度以及边界层上有渗透流动和边界移动对换热的影响^[4]。

(3) 对流传质系数 α_D 。采用比拟关系式求解, 即

$$\alpha/\alpha_D = \rho c_p Le^{2/3} \quad (11)$$

式中路易斯准则 $Le = a/D$ 。

(4) 霜层热导率 λ_{ef} 。霜层综合热导率 λ_{ef} 可表示为

$$\lambda_{ef} = \lambda_e + \lambda_v \quad (12)$$

其中, 因结晶放热产生的效果为

$$\lambda_v = \frac{DB\rho p_v \Delta H}{(p - p_v)\tau_s R_v T^2} \left(\frac{\Delta H}{R_v T} - 1 \right) \quad (13)$$

作为一种混合物, 霜层本身的热导率 λ_e 与其结构模型有关, 其计算较为繁琐, 详见文献 [5]。

3 数值计算及结果分析

离散方程 (5) 和 (6), 数值求积方程 (9), 采用数值方法求解上述结霜问题。计算步骤如下: 赋初值, 由式 (9) 求解霜层表面温度 T_s , 由式 (7) 和 (8) 计算 dT/dx , 由式 (3) 求 m_{sd} , 若 $T_s < 0$, 根据式 (4)、(5) 和 (6) 求得下一时刻的霜层密度 ρ 和霜层厚度 x_s 。若 $T_s > 0$, 则令 $T_s = 0$, 在霜层总沉积量保持不变的情况下, 适当减少霜层厚度, 增加霜层密度, 以使表面温度达到 0°C 。整个计算可取时间步长 $\Delta\tau = 30\text{s} \sim 120\text{s}$ 。

作者对湿空气外掠平板和圆柱成霜规律作了数值计算, 结果如图 2 和图 3 所示。无论是

平板还是圆柱表面结霜,按本文简化模型求得的结果与实验数据相当吻合。看来,对于普冷条件强迫流动下的表面结霜过程,将霜层密度看成定常条件(沿空间),认为霜表面的实际对流换热系数等于光滑管表面的值乘以增强系数的处理办法,以及霜层中总压力与外界环境压力相等的简化假定,总体上均与实际的霜层增长过程比较接近。

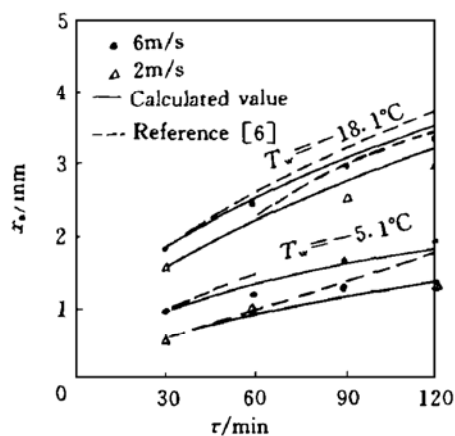


Fig. 2 Calculated results of frost layer thickness on a plate
($T_a = 25^\circ\text{C}$, $C = 0.0075\text{kg/kg}$)

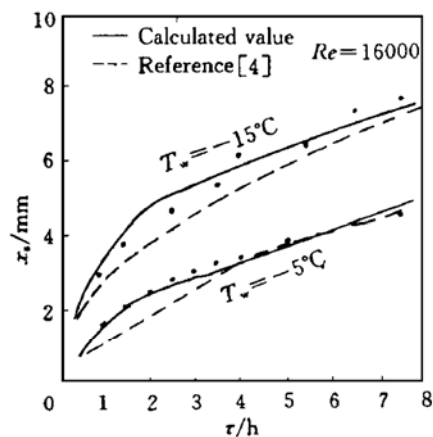


Fig. 3 Calculated results of frost layer thickness on a cylinder
($T_a = 5^\circ\text{C}$, $C = 0.0055\text{kg/kg}$)

参 考 文 献

- 1 Saito H, Tokura L. Heat transfer problem of frost layers and frosting surfaces. Heat Transfer Research (in Japanese), 1989, 28(108): 73~96.
- 2 Sami S M, Dong T. Mass and heat transfer during frost growth. ASHRAE Trans, 1989, 95: 158~165.
- 3 Sami S M, Dong T. Numerical prediction of frost formation on cooled heat exchangers. International Communication of Heat Mass Transfer, 1988, 15: 81~94.
- 4 Mogahan P F, Oosthuizen P H. Mathematical model of frost growth on a single cylinder in crossflow. Proceedings of 9th International Heat Transfer Conference, Jerusalem, Istrel, 1990.
- 5 Mark A D. Generalized correlation of the water frost thermal conductivity. Int J Heat and Mass Transfer, 1983, 26(4): 617~619.
- 6 Aoki K. Study of forst formation trans. JSME, 1979, 45(394): 869~876.

“凹槽导流片式”机匣处理的 结构尺寸优化研究*

杜 辉 朱俊强 楚武利 刘志伟

(西北工业大学航空动力与热力工程系, 西安, 710072)

摘 要: 针对一种可提高压气机裕度而又不牺牲效率的新型处理机匣, 进行了较为系统的几何尺寸优化研究。借助单级轴流压气机实验台, 详细地研究了轴向叠合量、容腔尺寸及内置导流片数目对压气机性能的影响, 归纳出若干该型处理机匣的设计准则, 具有工程实用价值。

主题词: 轴流式压缩机, 机匣⁺, 最佳结构设计, 参数最优化

分类号: V228.72, TK474.83

OPTIMIZATION OF STRUCTURAL PARAMETERS OF RECESS VANED CASING TREATMENT

Du Hui Zhu Junqiang Chu Wuli Liu Zhiwei

(Dept. of Aeroengine Engineering, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an, 710072)

Abstract: An experimental investigations have been carried out in the influence of structural parameters of recess vaned casing treatment on the efficiency and the stall margin of an axial flow rotor. Tests were conducted under the condition of different axial positions, number of vanes and different length of the casing treatment to define the optimum position. In each case, the characteristics with casing treatment were compared to that with solidwall. The increases of operating efficiency in the flow without drops were observed. The results can be used as a guide for the selection of configurations in the casing treatment design.

Subject terms: Axial flow compressor, Casing⁺, Optimum structural design, Parameter optimization

1 引 言

轴流压气机转子叶片叶尖流场的流动情况直接影响到压气机各级性能。早在 70 年代就已针对周向槽式处理机匣, 详尽地探讨了开槽的数目、深度、面积比及槽轴向位置等因素对扩稳效果的影响^[1]; 针对缝式处理机匣, 用实验研究了径向缝、叶片角向缝及不同倾斜角度的倾斜缝式处理机匣结构^[2]; 沟槽式处理机匣, 得到了效率较高的处理机匣结构^[3]。通过大量的实验研究, 得出了机匣处理可以使压气机裕度改进但同时又使压气机效率下降的结论。

90 年代以来, Cranfield 技术研究院的 Elder R L 等人设计了一种“空气分流器式”的机匣处理结构^[4], 可使低速风扇的效率和裕度均有改善, 但这种结构形式的处理机匣能否用于高

* 收稿日期: 1997-03-07, 修回日期: 1997-08-08