

刷式封严流动和换热的数值模拟*

丁水汀 陶 智 徐国强

(北京航空航天大学动力系, 北京 100083)

摘 要: 对刷式封严的流动和换热进行了数值模拟。计算中对结构复杂的刷丝部分采用多孔介质处理, 用 Darcy 定律取代动量方程, 能量方程采用改进形式, 而对其它部分采用简单的矩形网格进行完全 N-S 求解。Darcy 定律的扩散系数由所提出的实验方法确定。典型的计算结果显示所提方法是正确、合理而可行的。

主题词: 密封, 密封漏泄, 热传递, 数值仿真

分类号: V233.42

NUMERICAL SIMULATION ON FLUID FLOW AND HEAT TRANSFER OF A BRUSH SEAL CONFIGURATION

Ding Shuiting Tao Zhi Xu Guoqiang

(Dept. of Jet Propulsion, Beijing Univ. of Aeronautics & Astronautics, Beijing, 100083)

Abstract: The fluid flow and heat transfer through a brush seal configuration were numerically simulated. The brush bristles were taken as a porous material and the Darcy law was used instead of the standard momentum equation. For the rest of computational domain, the N-S equations in the original forms were applied. A simple experimental method was proposed to obtain the diffusion coefficient of the Darcy law. A typical calculation reveals that the methodology is simple and effective.

Subject terms: Sealing, Seal leakage, Heat transfer, Numerical simulation

1 引 言

热分析是刷式封严设计的关键问题之一, 计算机数值模拟可以简便快速地对各种规格的刷式封严在不同气动参数下的渗漏特性和热特性做出分析, 并给出全场的温度分布。但现有文献对刷式封严的数值模拟限于对渗漏特性的研究^[1~3], 求解重点是速度场和压力场。而热分析时, 需要求解温度场。温度场的变化基本上是由于刷丝与转子之间的相对摩擦运动产生的热量而引起的。热量分配取决于渗漏量、刷丝的材料特性和排列结构、转轴的材料特性等因

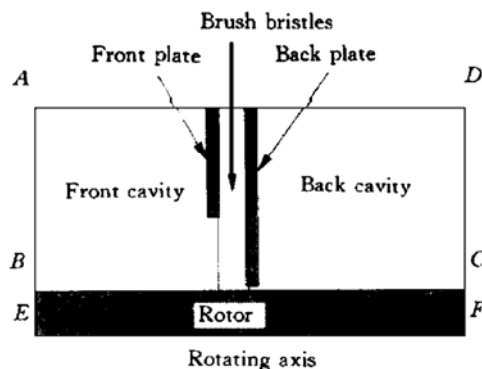


Fig. 1 Computational domain

素。因此,需要对空气和各金属部件联合求解,求解的区域见图 1。刷封内部结构非常复杂,刷丝的求解已不能采用结构化网格,完全的数值模拟需要在复杂的全三维非结构网格下对 N-S 方程求解。此外,由于流动的湍流性,合适的湍流模型对计算的准确度也有重要影响。

本文对刷式封严的渗流和换热特性进行数值模拟过程中,将刷丝部分模型化处理,视整个刷丝部分为多孔介质,通过多孔介质的流动采用 Darcy 定律,避免了非结构网格求解动量和能量方程。Darcy 定律中的系数通过对刷丝的简单实验进行确定,得到系数来取代完全求解复杂的全三维非结构网格下的 N-S 方程。对刷丝以外各部分,采用简单的矩形网格对标准 N-S 方程进行数值计算,最后给出整个计算区域的速度、压力和温度场,得到渗流和热特性。

2 控制方程及其离散

2.1 刷丝以外区域的控制方程

$$\text{连续方程: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量方程: } \frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{V}) + S_V \quad (2)$$

$$\text{能量方程: } \frac{\partial(\rho c_v T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} c_v T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_T \quad (3)$$

式中 S_V 和 S_T 为其它所有没有包括的项之和,状态方程为 $p = \rho RT$

2.2 刷丝区域的控制方程

忽略刷丝三维细微结构,将其视为具有一定空隙率的各向异性连续介质。刷丝内任一点空气流量与压差的关系为: $\vec{j} = -k \cdot \nabla p$ 。扩散系数 k 可通过一系列的简单实验确定,它是刷丝直径、刷丝紧密程度(空隙率)以及刷丝与机匣角度等参数的函数。刷丝部分的控制方程为:

$$\text{连续方程: } \frac{\partial \rho \xi_v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \xi_a) = 0 \quad (4), \quad \text{动量方程: } \vec{j} = (\rho \mathbf{V} \xi_a) = -k \cdot \nabla p \quad (5)$$

$$\text{能量方程: } \frac{\partial(\overline{\rho c_v} T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{j} c_{vg} T) = \nabla \cdot (\bar{\lambda} \nabla T) + S_T$$

$$\text{状态方程: } p = \rho_g RT \quad (7)$$

式中, ξ_v 和 ξ_a 为体空隙率和面空隙率。刷丝部分密度和热容的乘积为 $\overline{\rho c_v} = \rho_g c_{vg} \xi_v + (1 - \xi_v) \rho_s c_{vs}$ 。组合导热系数为: $\bar{\lambda} = \lambda_g \xi_a + (1 - \xi_a) \lambda_s$ 。空隙率可通过刷封的几何参数和刷丝的根数计算。体空隙率和轴向平均空隙率的表达式相同:

$$\xi_v = \bar{\xi}_{a1} = 1 - \frac{\pi d^2 n}{8L \sin \alpha} \left(\frac{1}{r_2 - r_1} \right) \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (8)$$

径向空隙率表达式为:

$$\xi_{a2} = 1 - \frac{\pi d^2 n}{8L r \sin \alpha} \quad (9)$$

式中, n, d 和 α 为刷丝总根数、直径和倾角; L 为刷封宽度; r 为径向距离。以上各组控制方程结合初始条件和边界条件即可求解。

初始条件: $t = 0, p = p_0, u = 0, v = 0, T = T_0$ 。边界条件:进口: $p = p_i, T = T_i$; 出口: $p = p_e$, 其它任意函数 ϕ 皆满足 $\partial \phi / \partial x = 0$ 。旋转轴内边界: $u = 0, v = 0, \omega = 2\pi \omega r_0, \mathcal{H} / \partial r = 0$; 旋转轴外边界: $u = 0, v = 0, \omega = 0, \mathcal{H} / \partial r = 0$ 。刷封与转轴间的摩擦力矩为 M 。

刷封与转轴间摩擦产生热的总量为 $Q = M\omega$ 。这部分热量一部分通过导热进入转轴,一部分进入刷封,由刷丝和空气带走。热量在二者之间的分配关系与刷封的结构、空气流动的速度以及转轴的材料等有关,热量的分配需要在计算中共轭求解。

对上面所列的两套控制方程采用有限控制体的方法求解, 方程的离散利用 SIMPLER 算法, 得到的 6 个方程的最终离散形式为:

$$\alpha_p \phi_p = \alpha_w \phi_w + \alpha_E \phi_E + \alpha_S \phi_S + \alpha_N \phi_N + \alpha_L \phi_L + \alpha_H \phi_H + b$$

式中 ϕ 为任一因变量, 所有的离散方程通过 ADI 求解, 得到全场分布的速度、压力和温度等。

3 计算结果和分析

在模拟计算中, 采用下面的计算参数: 转轴转速 14.4 kr/min; 摩擦力矩 10 N·m; 进口压力 0.12 MPa; 出口压力 0.1 MPa; 进口温度取环境温度 23°C, 扩散系数在 x 方向和 r 方向分别设定为 $k_x = 1.0 \times 10^{-8} \text{ s}^2$, $k_r = 2.0 \times 10^{-8} \text{ s}^2$ 。几何结构参数见图 2, 单位为 mm。刷封中有直径 0.2 mm 的刷丝 30 000 根, 刷丝和各盖板以及转子的导热系数均取为 15.0 kJ/(m²·K), 热容为 460.0 kJ/(kg²·K), 密度为 7800.0 kg/m³。

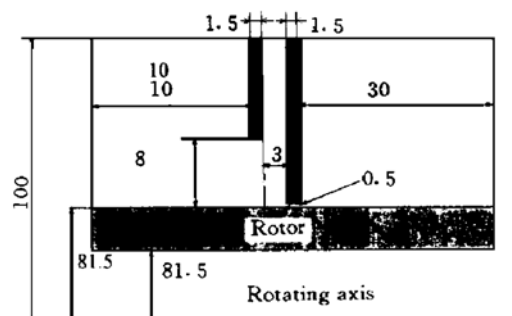


Fig. 2 Definition of geometrical parameters



Fig. 3 Pressure contour plot

图 3 为计算所得整场的压力分布图, 可以看出压降主要发生在刷封底部出流处。图 4 为全部的温度场, 可以看出摩擦面处刷丝和转轴都有相当高的温度梯度。对上面所用参数, 温度水平维持在 250 °C 左右, 若增加摩擦力矩, 则温度水平以及温度梯度都将显著提高。图 5 为整个流场的流线图。从压力、速度、温度的分布看计算结果是合理的, 证明所用方法是可行的。通过实验确定扩散系数 k , 可以对单级或多级刷式封严的渗流和换热进行准确的数值模拟。

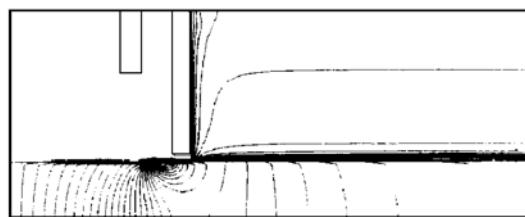


Fig. 4 Temperature contour plot

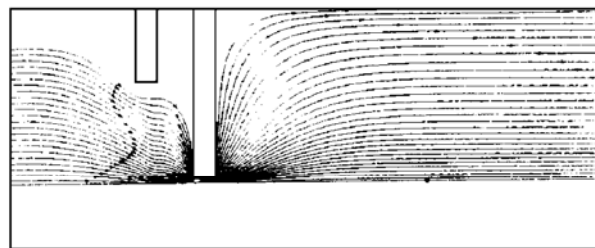


Fig. 5 Streamline

参 考 文 献

- 1 Mullen R, Braun M, Hendricks R. Numerical modeling of flows in simulated brush seal configurations. 26th Joint Propulsion Conference, Orlando, FL: 1990.
- 2 Braun M, Kudriavtsev V V. A numerical simulation of a brush seal section and some experimental results. Journal of Turbomachinery, 1995, 117
- 3 Kudriavtsev V V, Braun M. Interstage disk-cavity/brush seal numerical flow visualization study. Int. Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Houston, Texas: 1995.