低滞后刷式密封数值分析

王之栎 梁小峰 宋 飞 黄其武

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191) (四川九洲电器集团有限责任公司 第二研究所，绵阳 621000)

摘 要：针对低滞后刷式密封物理结构，应用计入刷丝变形影响的各向异性多孔介质模型，用阻抗力表示刷丝对流动介质的阻碍作用，并将其作为 Navier-Stoke 方程的源项，以有限体积法和 SIMPLE 算法为基础建立刷式密封低滞后计算模型. 通过流场计算，得到刷式密封的压力分布、速度分布以及泄漏量等. 对计算结果进行了分析研究，讨论了不同结构参数和工况参数对密封性能的影响；对低滞后模型与普通刷式密封模型密封性能的分析表明，低滞后密封结构可有效降低背板接触力，改善滞后效应，使刷丝随动自适应性增加，这对保持密封系统的工作状态是有益的。

关 键 词：刷式密封；滞后效应；阻抗力；有限体积法

中图分类号：TB 42

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)09-1080-04

Low hysteresis brush seal numerical simulations

Wang Zhili Liang Xiaofeng Song Fei

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Huang Qiwu

(The Second Research Institute, Sichuan Jiuzhou Electric Group Co., Ltd., Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to establish the calculation model of low hysteresis, an anisotropic porous model contained with the bristles bending deflections was employed based on the physical structure of low hysteresis brush seal. The effect of the bristles in the seal was considered a resistance force and was added into the N-S equation as a source term. The model was established on the basis of the finite volume method and the SIMPLE method. The pressure field, velocity vectors distribution and leakage were calculated and analysised. Based on the calculation date, the influence by the main parameters included structure and working condition was investigated. Compared with the common brush seal and low hysteresis brush seal, it is obvious that the low hysteresis brush seal can decrease the pressure between the bristle and the back ring and increase the bristle's adaptability. In the working state it is beneficial to the seal system.

Key words: brush seal; hysteresis; resistance force; finite volume method

1 研究现状

刷式密封作为一项高效动密封技术，已经越来越多地应用在航空燃气涡轮和动力引擎上[1]. 刷式密封由背板、前板及二者之间紧密排列的细刷丝构成. 刷丝与旋转的圆柱面跑道处于半接触状态以阻止气体泄漏. 刷丝的安装与径向形成一定的夹角，其倾斜方向与轴的旋转方向相匹配，使其在工作中可以提供密封所需的径向弯曲柔度和回弹.

在工作状态下，刷式密封背板前部存在的轴向压差使刷丝与刷丝、刷丝与背板紧密贴合，产生摩擦力. 当存在安装偏差、质量不平衡及运转过程中的离心或热响应，使得转子出现径向位移或跳

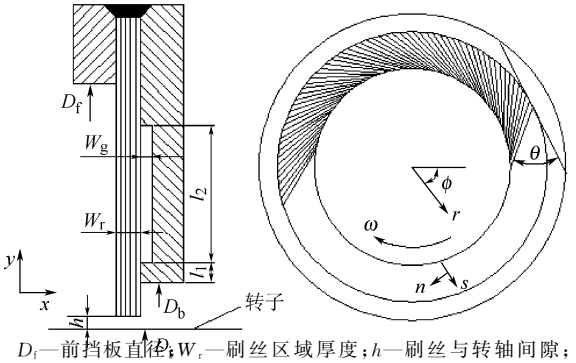
收稿日期：2007-09-10

作者简介：王之栎(1961—)，男，北京人，教授，wang_zl@buaa.edu.cn.

动时,该摩擦力将阻碍刷丝动作,产生“滞后效应”.其结果是在刷环和转轴表面之间形成较大的径向间隙,使泄漏增大或刷环和转子接触力增加,进而造成严重磨损.

为了减弱滞后效应对刷式密封性能的影响,本文采用如图 1 所示低滞后刷式密封结构.该结构在普通刷式密封背板处增加背板槽,降低刷丝在槽区的轴向压力降,从而减小刷丝与背板间的摩擦力,使刷丝能与转子随动灵活.

针对低滞后刷式密封系统,文中应用计及刷丝变形的各向异性的多孔介质模型,利用有限体积和 SIMPLE 算法,通过构造基于 VC++的计算模型,计算密封系统流场、速度场,得到其质量泄漏率,并分析低滞后结构在不同工况下,改善低滞后效应的能力及其对密封性能的影响.



D_f—前挡板直径;W_r—刷丝区域厚度;h—刷丝与转轴间隙;W_g—背板槽宽;l_2—背板槽高;l_1—背板槽到后挡板距离;D_b—后挡板直径;D_1—跑道直径;θ—刷丝倾角;ϕ—刷丝旋转角度.

图 1　刷式密封结构

2　数学模型

2.1　基本方程

刷式密封区域内气体流动满足如下假设:介质为理想气体,遵守牛顿内摩擦定理,在某一控制体内为不可压流体.考虑到密封结构的对称性,计算模型采用轴向-径向二维解域,其基本方程是连续性方程和 Navier-Stoke 方程,即

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\operatorname{div}(\rho \boldsymbol{U})=0 \tag{1}$$

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}+\operatorname{div}(\rho u \boldsymbol{U})&=\operatorname{div}(\mu \cdot \operatorname{grad} u)-\frac{\partial p}{\partial x}+S_u\\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t}+\operatorname{div}(\rho v \boldsymbol{U})&=\operatorname{div}(\mu \cdot \operatorname{grad} v)-\frac{\partial p}{\partial y}+S_v\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

其中,ρ 为密度;$\boldsymbol{U}$ 为速度矢量;u,v 为轴向(x 轴方向)和径向(y 轴方向)速度;μ 为动力粘度;S_u,S_v 为源项.

在刷式密封流场中源项为刷丝对流体的阻力,引入阻抗力 $\boldsymbol{F}$ 表示该作用力[2]:

$$\boldsymbol{F}=-\bar{\boldsymbol{A}}\mu \boldsymbol{U}-\bar{\boldsymbol{B}}\rho \mid \boldsymbol{U} \mid \boldsymbol{U} \tag{3}$$

其中 $\bar{\boldsymbol{A}}$ 和 $\bar{\boldsymbol{B}}$ 为粘性和惯性阻抗张量:

$$\bar{\boldsymbol{A}}=\begin{pmatrix} a_z & 0 \\ 0 & a_n\cos\theta+a_s\sin\theta \end{pmatrix} \tag{4}$$

$$\bar{\boldsymbol{B}}=\begin{pmatrix} b_z & 0 \\ 0 & b_n\cos\theta+b_s\sin\theta \end{pmatrix} \tag{5}$$

其中,θ 为刷丝倾角;a_n,a_z,a_s 为 r-ϕ 平面与刷丝垂直方向、沿转轴轴向和 r-ϕ 平面与刷丝平行方向的粘性阻抗系数;b_n,b_z,b_s 为对应的惯性阻抗系数.

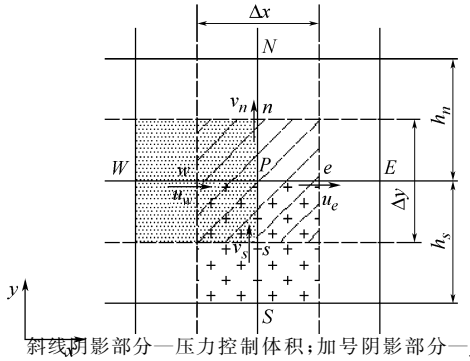
将式(4)、式(5)带入到式(3)中可得刷丝对流体的作用力沿轴向和径向的分量:

$$F_x=-\mu a_z u-\rho\sqrt{u^2+v^2}\,b_z u \tag{6}$$

$$F_y=-\mu(a_n\cos\theta+a_s\sin\theta)v-\rho\sqrt{u^2+v^2}\,(b_n\cos\theta+b_s\sin\theta)v \tag{7}$$

2.2　数值计算方法

应用有限体积法时为避免可能出现的压力锯齿波现象,采用了交错网格技术[3],即将压力值存储在以节点为中心的主控制容积中,将速度值存储在与主控制容积相差半个步长的控制容积中,如图 2 所示.划分的网格使计算区域内每个节点周围有一互不重叠的控制体,再将待解微分方程(控制方程)对每一个控制体体积积分,即可得到一组关于求解变量 u,v 和 p 的离散方程.



斜线阴影部分—压力控制体积;加号阴影部分—y 方向速度控制体积;点阴影部分—x 方向速度控制体积;P—压力控制节点;E,W,S,N—节点 P 相邻的压力控制节点;e,w,s,n—节点 P 控制体积的界面;u_w,u_e,v_s,v_n—节点 P 控制体积界面上的速度;Δx,Δy—控制体积在 x 与 y 方向的宽度;h_s,h_n—节点间的距离.

图 2　交错网格

由于速度场和压力场是相互耦合的,且耦合关系隐含在连续性方程中,没有关于压力 p 的独立方程.所以求解 Navier-Stoke 方程时,采用压力耦合方程的半隐式计算格式,即 SIMPLE 算法.

2.3 边界条件

沿固壁边界速度为零，刷丝上游边界（进口）压力为高压 p_u，刷丝下游边界（出口）处压力为低压 p_d.

3 计算结果与分析

低滞后刷式密封系统的结构尺寸和工况参数：$D_f=363$ mm，$D_i=343$ mm，$D_b=346.8$ mm，$W_r=1$ mm，$h=0.5$ mm，$W_g=0.5$ mm，$l_1=2$ mm，$l_2=10$ mm，刷丝倾角 45°，刷丝直径 0.076 mm，上游边界压力 $p_u=0.4$ MPa，下游边界压力 $p_d=0.1$ MPa.

3.1 压力场和速度场

计算得到的压力分布和速度分布如图 3 和图 4 所示. 密封间隙将取决于刷丝在压场中受力变形的大小. 上述工况下，径向压力梯度导致刷丝弯曲，端部发生径向偏移，计算表明此时刷丝端部与转轴处于接触状态，即 $h=0$.

在刷密封上部和背板槽内压力变化不大，由于背板槽内为空腔，所以槽内流场压力没有变化，全部为高压，形成高压腔. 流场压力梯度峰值无论在 x 方向还是 y 方向都主要集中在靠近背板下端的间隙处，见图 3. 因此在靠近背板间隙附近形成了较大的轴向和径向速度，见图 4. 在刷丝区域尤其是靠近背板的部分，由于沿 y 轴方向压力梯度较大，因而表现有较大的径向流动. 速度的最大值发生在靠近背板出口区域，是刷式密封泄漏的主要来源之一.

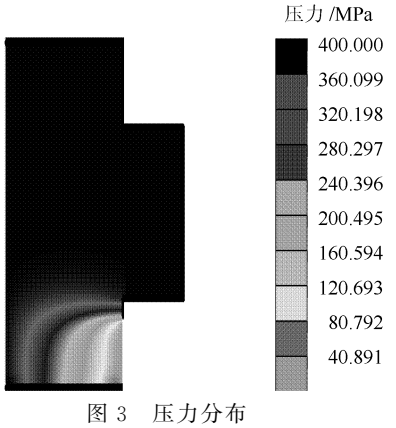


图 3 压力分布

3.2 性能分析

当出口压力均为 0.1 MPa 时，低滞后模型与普通刷式密封模型对应不同密封间隙的背板接触力与压比的关系如图 5 所示，质量泄漏率与压比的关系如图 6 所示. 图中曲线表明背板接触力和质量泄漏率与密封压比均呈线性变化关系. 低滞后模型背板接触力与普通模型接触力相比减少约 43%～48%，这将导致刷丝和背板之间的摩擦力减小，进而使滞后效应明显减弱. 同时由于低滞后模型中背板槽处产生高压腔，下游刷丝与背板之间区域压力梯度增大，在靠近背板位置处产生了更大的径向速度，泄漏量相应增大，但最大增量不超过 7%.

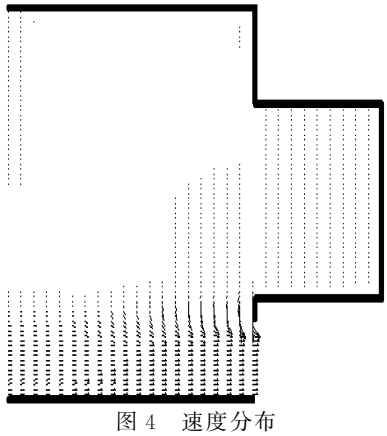


图 4 速度分布

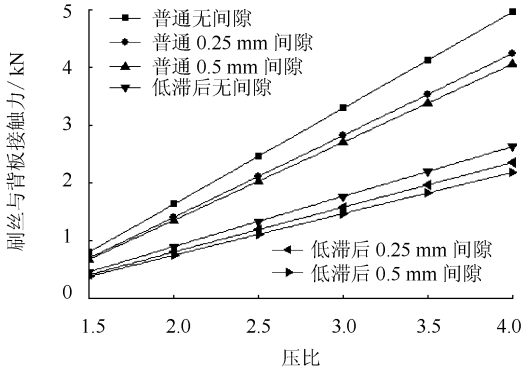


图 5 不同压比和间隙的背板接触力

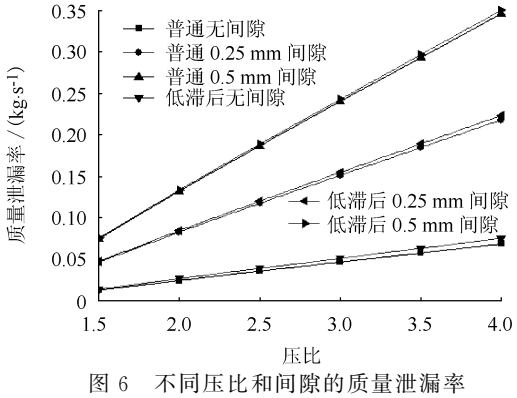


图 6 不同压比和间隙的质量泄漏率

在间隙工作状态下，主要的泄漏出现在密封间隙处，在刷丝区域压力梯度减小，使刷丝受流场作用力变小. 具体表现为当出现密封间隙和密封间隙增大时，刷丝与背板的接触力变小，见图 5. 由于密封间隙的存在导致泄漏量明显增大，通过刷丝和背板之间间隙的泄漏量占整体泄漏量比重

降低,因此当间隙增大时低滞后模型和普通模型的泄漏量差值逐渐减小,见图 6.

工作状态中无密封间隙的普通模型和低滞后模型,其不同进口压力对应的质量泄漏率曲线如图 7 所示.压比的变化导致质量泄漏率改变,小压比时,进口压力及压比的增加对泄漏的影响明显.但随着压比的增加质量泄漏率曲线趋于平缓,压比变化对泄漏率的影响减小.从图中可以看出低滞后刷式密封和普通刷式密封在大压比的情况下具有良好的工作性能,随着工作压力的增大其泄漏量可保持相对稳定.当进口压力增大时,低滞后模型与普通模型的泄漏量之差增大,说明进口压力增大使背板槽处形成更高的压力,从而导致沿背板间隙处流体向下的径向速度更大,使泄漏量增加.

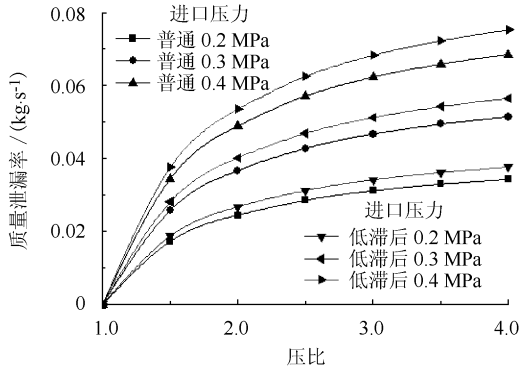


图 7　不同进口压力质量泄漏率曲线

4　结　论

1) 考虑刷丝变形的各向异性多孔介质低滞后刷式密封计算模型,计算结果合理,能较好地用于刷式密封性能分析,且可作为一种有效的研究分析手段.

2) 分析表明低滞后刷式密封可有效减小背板和刷丝接触力,从而使两者之间的摩擦力降低,滞后效应减弱.同时由于背板和刷丝间隙增大,泄漏也会有相应增加.

3) 低滞后刷式密封和普通刷式密封的密封性能表现出类似于对数的规律,当压比小于 1.5～2 时,随压比增加泄漏量增加较为明显,压比较大时,随压比增加泄漏量的相对增量降低.刷式密封的这种工作性能有利于密封系统工作稳定.

参考文献(References)

[1] Lelli D, Chew J W, Cooper P. Combined three-dementional fluid dynamic and mechanical modeling of brush seals[J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 128: 188-195

[2] Chew J W, Lapworth B L, Millener P J. Mathematical modeling of brush seals[J]. Int J Heat and Fluid Flow, 1995, 16(6): 493-500

[3] Patankar S V. 传热与流体流动的数值模拟[M]. 张政译. 北京:科学出版社, 1984
Patankar S V. Numerical heat transfer and fluid flow[M]. Translated by Zhang Zheng. Beijing: Science Press, 1984 (in Chinese)

[4] Turner M T, Chew J W, Long C A. Experiment investigation and modeling of clearance brush seal[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1998, 120: 573-579

[5] 李人宪. 有限体积法基础[M]. 北京:国防工业出版社, 2005
Li Renxian. The based of finite volume method[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005 (in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)