

文章编号: 1000-8055(2008)08-1461-05

刷式密封二维模型数值计算

王之栋¹, 梁小峰¹, 黄其武²

(1. 北京航空航天大学 机械能与自动化学院, 北京 100191;
2. 四川九洲电器集团有限责任公司 第二研究所, 绵阳 621000)

摘 要: 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, 以有限体积和 SIMPLE 算法为基础建立计算模型. 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. 并根据计算结果分析结构和工况参数对刷式密封性能的影响. 比较分析表明所述方法在刷式密封分析中具有实用价值.

关 键 词: 刷式密封; 有限体积法; SIMPLE 算法; 性能分析

中图分类号: TB42

文献标识码: A

Two-dimensional model mathematical simulation of brush seals

WANG Zhi-li¹, LIANG Xiao-feng¹, HUANG Qi-wu²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. The Second Research Institute,
Sichuan Jiuzhou Electric Group Limited Company, Mianyang 621000, China)

Abstract: The anisotropic porous model covering the bristles bending deflections was used to establish the calculation model. The effect of bristles for the flow media was considered a resistance force, which was added into N-S equation as a source term. The model was established on the basis of the Finite Volume Method and the SIMPLE method. To this effect, the pressure field, velocity vectors distribution and leakage of brush seal were obtained from calculation of flow field. The influences of main parameters, such as: structure and working condition, on the sealing performance of brush seals, were analyzed and compared, showing that this method is suitable for the study of the brush seals.

Key words: brush seal; finite volume method; SIMPLE method; performance analysis

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径向所需的弯曲柔度和回弹. 一般刷丝直径为 0.05~0.1 mm^[2].

刷式密封结构如图 1 所示. 主要组成部分为前板、背板以及夹在两者之间紧密排列的细刷丝. 刷式密封的力学行为包括密封结构与转子间的相互挤压和摩擦、刷丝与气体介质间的耦合作用, 及密封系统与转子振动的相互作用等. 刷丝主要受流场作用力, 与背板之间的支持力和摩擦力以及当与转轴接触时产生的支持力和摩擦力等.

Ferguson 的实验^[3]表明, 在同样的条件下,

收稿日期: 2007-08-13; 修订日期: 2007-10-25

作者简介: 王之栋(1961-), 男, 北京人, 教授, 主要从事机械设计及理论的研究.

力耦合方程的半隐式计算格式,即 SIMPLE 算法^[5].

1.3 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 .

2 计算结果与分析

2.1 压力和速度场计算

刷式密封系统的结构尺寸和工况参数为:
 $D_t = 363\text{ mm}$, $D_i = 343\text{ mm}$, $D_b = 346.8\text{ mm}$,
 $W_r = 1\text{ mm}$, $h = 0.5\text{ mm}$, 刷丝倾角 45° , 刷丝直径
 0.076 mm , 上游边界压力 $p_u = 0.4\text{ MPa}$, 下游边
界压力 $p_d = 0.1\text{ MPa}$. 计算得到的压力分布和速
度分布如图 3 和图 4 所示. 刷封间隙取决于刷丝
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^[6], 趋向于
与转子接触 ($h = 0$).

度, 见图 4. 在刷丝区域尤其是靠近背板的部分, 由于沿 y 轴方向阻抗力较小, 因而表现有较大的径向流动. 计算显示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. 由于刷丝的阻挡, 背板下游的出口区域压力降并不明显, 速度变化不大. 背板前部存在的轴向压力降, 使刷丝与刷丝、刷丝与背板间相互紧密接触, 而产生摩擦. 当转轴由于偏心引起径向跳动或由于离心增长和热变形引起径向偏移时, 刷丝弹性使刷孔有沿转子表面在径向随动的趋势, 但摩擦力的作用, 将可能导致刷丝不能灵活跟随转轴动作, 此时其与转轴表面间将形成一定的径向间隙, 造成泄漏增大.

由于计算程序对于刷式密封系统具有较强的针对性, 所以在相同间距网格划分的情况下, 获得计算结果与相同条件下应用 Fluent 计算所得结果比较, 所需时间明显较少, 压场分布等结果相近, 见图 3 和图 5.

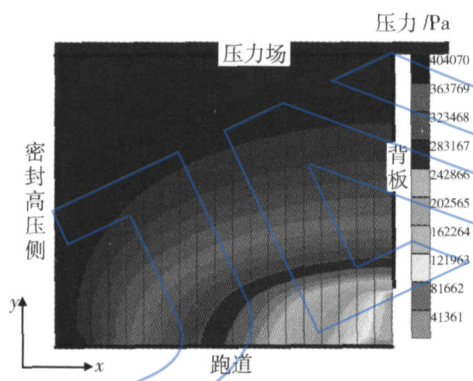


图 3 压力分布
Fig. 3 Contours of pressure

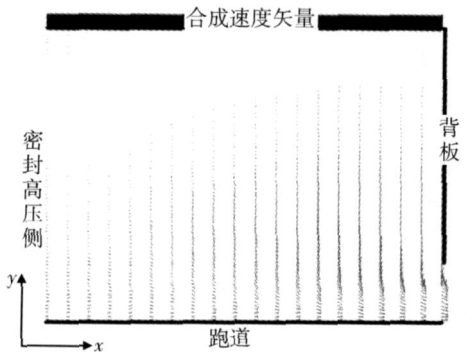


图 4 速度分布
Fig. 4 Velocity vectors

流场压力降无论在 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

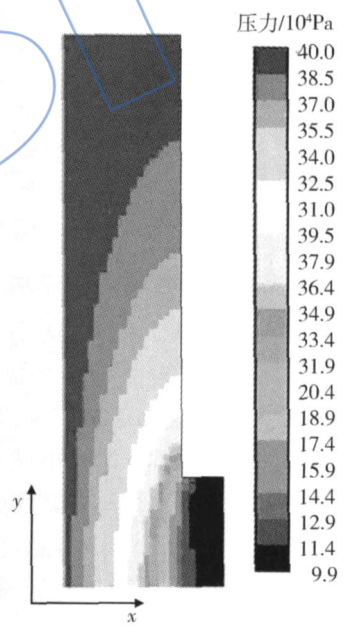


图 5 Fluent 结果
Fig. 5 Result of FLUENT

表 1 为在不同压差情况下, 计算选用的阻抗系数和对应的质量泄漏率与试验值结果^[7]的比较. 比较显示, 误差不超过 10%, 选择适当的阻抗系数, 可以使数值计算具有较好的精度.

图 6 为当与文献[4]采用相同的结构尺寸 ($D_t = 143.6\text{ mm}$, $D_i = 122.26\text{ mm}$, $D_b = 124.56\text{ mm}$, $W_r = 0.61\text{ mm}$ 和 $h = -0.25\text{ mm}$ (此时刷丝过盈 0.25 mm) 时, 在不同压比 (出口压力为 0.1 MPa) 条件下, 计算结果与文献[4]的比较. 从图中

可以看出两者结果相近,最大误差不超过 15 %.

表 1 计算结果与试验值比较

Table 1 Relation between the simulation and test data

压差/ MPa	温度/ ℃	试验值/ (kg/ s)	计算值/ (kg/ s)	误差/ %
0.05	200	0.015 71	0.014 90	5.15
0.1	300	0.023 86	0.022 82	4.36
0.25	350	0.047 08	0.046 42	1.40
0.35	400	0.060 98	0.056 04	8.10

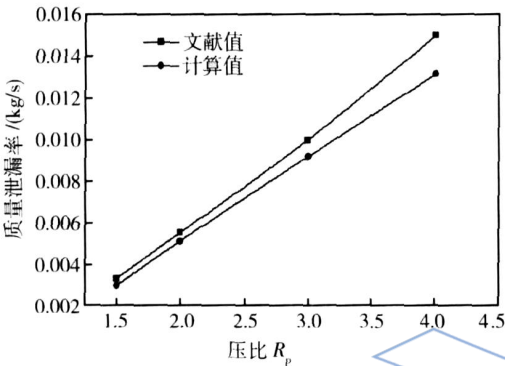


图 6 计算结果与文献[4]比较

Fig. 6 Relation between the simulation and data of paper [4]

2.2 结构和工况参数对泄漏率的影响

在出口压力为 0.1 MPa 及压差分别为 0.1, 0.2, 0.3 MPa 的情况下,刷式密封的刷丝束宽度与质量泄漏率的关系曲线如图 7 所示.可以看出,随着刷丝束宽度的增加,质量泄漏率减小.当刷丝束宽度小于 1 mm 时,随着刷丝束宽度的减小,质量泄漏率快速增大;大于 1 mm 时,随着刷丝束宽度的增加,曲线趋于平缓,泄漏量降低幅度不大.

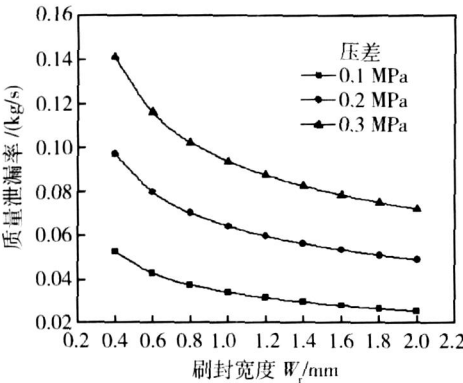


图 7 刷丝束宽度与密封质量泄漏率的关系

Fig. 7 Relation between the width of bristle pack and the mass flow

不同压差条件下刷丝倾角与质量泄漏率关系如图 8 所示,图中曲线表明,刷丝倾角对泄漏的影响在小于 30 时相对明显.大于 30 时,随着刷丝倾角的增大,泄漏量缓慢降低,变化曲线趋于平缓.由此可见,此时通过改变刷丝倾角,对减小泄漏作用不明显.

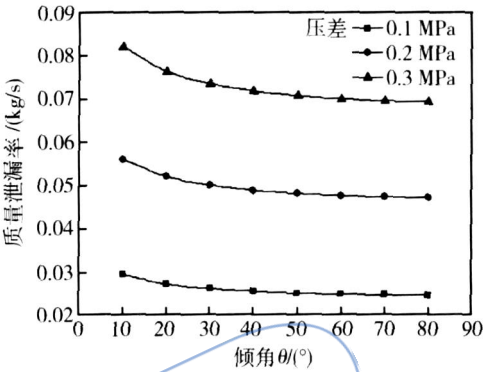


图 8 刷丝倾角与质量泄漏率关系

Fig. 8 Relation between the bristle lay angle and the mass flow

刷式密封的背板用来约束刷丝束,保证刷丝不至在高压差的情况下由于过分弯曲变形而失效.背板与转子的间隙对于密封的泄漏影响较大.背板间隙与质量泄漏率的关系如图 9 所示,从图中可以看出,质量泄漏率随背板间隙呈线性变化规律.在大压差的情况下,背板对泄漏的影响明显.但背板间隙过小,将可能导致其与转子跑道发生动态接触,进而造成局部磨损,在设计中应予避免.

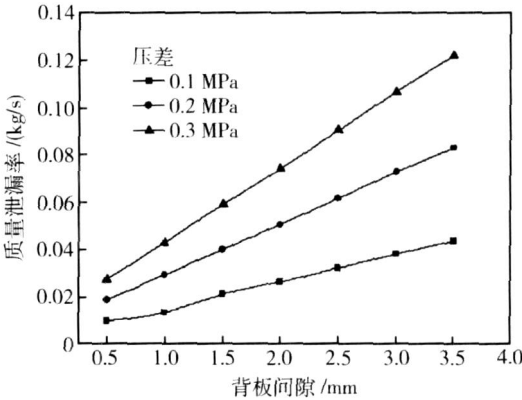


图 9 背板间隙与质量泄漏率关系

Fig. 9 Relation between the fence height and the mass flow

3 结 论

1) 考虑刷丝变形的各向异性多孔介质刷式密封系统计算模型能较好地用于刷密封性能分

析,且可作为一种有效的研究手段.

2) 本文提供的基于 VC++ 采用有限体积法求解计算模型,计算结果与文献、商用软件和试验结果吻合,且程序计算速度快,所得速度 u 、 v 和压力 p 分布及密封性能结果合理.

3) 分析表明刷丝宽度 1 mm 左右,刷丝倾角在 45°左右时,刷密封工作状态较佳.背板与转子之间间隙须考虑转子偏心、离心及热增长的影响,较小的背板间隙于密封有利.

参考文献:

- [1] Lelli D, Chew J W, Cooper P. Combined three-dimensional fluid dynamic and mechanical modeling of brush seals[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2006, 128: 188-195.
- [2] 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.
- [3] Ferguson, J G. Brushes as high performance gas turbine seals[R]. ASME Paper 88-GT-182.
- [4] 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.
- [5] 帕坦卡 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]. ZHANG Zheng. Beijing: Science Press, 1984. (in Chinese)
- [6] 黄其武. 刷式密封设计方法与性能研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2007.
HUANG Qiwu. Design method and performance of brush seals[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [7] 孙晓萍. 刷式密封性能和耐久性试验研究[J]. *航空发动机*, 2002(3): 37-41.
SUN Xiaoping. Experimental investigation of performance and durability of brush seal[J]. *Aeroengine*, 2002(3): 37-41. (in Chinese)
- [8] 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)