

混合刷式密封泄漏特性的数值研究

魏 堦, 陈照波, 焦映厚

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 150001 哈尔滨)

摘 要: 为分析某型号汽轮机改进的刷式密封结构的密封性能, 采用 non-Darcian 多孔介质模型的 Reynolds-averaged Navier-Stokes 方程数值求解方法, 对泄漏流动特性及转子表面、刷束自由高度和保护高度的压力、速度、湍流动能分布规律进行数值研究, 并与迷宫密封进行相应的比较. 结果表明: 相同的间隙和压比下, 混合刷式密封流场分布要比迷宫密封复杂, 泄漏量明显小于迷宫密封; 相同的结构和参数下, 泄漏量随着压比的上升而增加; 转子表面的轴向压力和湍流动能从进口到出口呈现阶梯状递减趋势, 保护高度的径向压力基本趋于常数值; 刷束径向速度和湍流动能随着压比的上升而增加, 刷束下半部分和后挡板保护高度对泄漏特性影响比较大. 研究结果为汽轮机刷式密封的结构设计, 改善性能, 提供了理论依据.

关键词: 混合刷式密封; non-Darcian 多孔介质模型; 泄漏流动特性; 分布规律; 数值研究

中图分类号: TK262

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)11-0047-06

Numerical study of leakage flow characteristics in hybrid brush seal

WEI Yuan, CHEN Zhaobo, JIAO Yinghou

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract: To know the sealing performance of an improved brush seal on turbine, the leakage flow characteristics and distribution on rotor surface, bristle pack free height and fence height were numerically analyzed by adopting a non-Darcian porous medium model. And a corresponding comparison between labyrinth seal and brush seal was performed. The analysis shows that at the same clearance and pressure ratio the flow fields in hybrid brush seal are more complex than that in labyrinth seal and the leakage rate of brush seal is significantly less than that of labyrinth seal, at the same structure and parameters the leakage rate increase with the rise in pressure ratio. More over, the axial static pressure and turbulent kinetic energy of rotor surface gradually decline with a ladder-like distribution from inlet to outlet, the radial static pressure of fence height tends to be constant values. The radial velocity and turbulent kinetic energy increase with the rise in pressure ratio. The lower parts of the bristle and the fence height have obvious effect on the leakage characteristics. The results provide theoretical basis for the design of brush seal structure and the improvement of performance.

Keywords: hybrid brush seal; non-Darcian porous medium model; leakage flow characteristics; distribution; numerical analysis

自上世纪 80 年代开始, 刷式密封技术已广泛地应用于航空发动机等旋转机械. 与传统的迷宫密封相比, 刷式密封具有更好的密封性能和稳定

性^[1-3]. 泄漏流动对刷式密封的性能, 包括刷丝硬化、迟滞、磨损、刚度、抗压能力等都将产生重要影响. 目前, 国内外学者对刷式密封泄漏流动的研究主要采用实验研究和数值计算两种方式. Bayley 等^[4]提出了二维多孔介质模型, 对后挡板的径向压力分布和刷束端部的轴向压力分布进行了实验研究. Turner 等^[5]进一步研究了径向间隙为 0.27 mm 和 0.75 mm 情况下的刷丝磨损和泄漏特性. Chew 等^[6-7]引入 non-Darcian 多孔介质模型对刷

收稿日期: 2013-12-06.

基金项目: 国家自然科学基金 (11272100).

作者简介: 魏 堦 (1985—), 男, 博士研究生;

陈照波 (1967—), 男, 教授, 博士生导师;

焦映厚 (1962—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 陈照波, chenzb@hit.edu.cn.

丝束内的泄漏特性进行了数值模拟。Dogu 等^[8-10]对多孔介质模型计算方法进行改进,详细研究了刷式密封的径向间隙、前挡板和后挡板结构对泄漏特性的影响。李军等^[11-12]对刷式密封泄漏流动进行了数值模拟和实验研究,分析了密封间隙、压比和转速对泄漏流动的影响。其他密封结构和刷式密封混合应用于燃气轮机等旋转机械的轴封可以改善密封性能和可靠性^[13],但当前研究多针对单环刷式进行密封,对混合刷式密封泄漏流动特性的分析并不多。

本文针对某型号汽轮机改进的刷式密封结构进行密封性能分析,采用基于 non-Darcian 多孔介质的 reynolds-averaged navier-stokes (RANS) 方程数值求解方法,对混合刷式密封泄漏流动特性及转子表面、刷束自由高度和保护高度的压力、速度、湍动能分布规律进行了数值研究,并与相同结构参数的平齿迷宫密封进行了相应对比,为刷式密封的结构设计提供了理论依据。

1 数值计算模型

混合刷式密封结构如图 1 所示,采用刷式密封来代替平齿迷宫密封中间位置的一个迷宫齿,刷束厚度为 0.8 mm,刷束底端到后挡板底部的保护高度为 1.4 mm,刷束底端到前挡板底部刷束自由高度为 8.84 mm,转子直径为 90.41 mm,齿高为 11.0 mm, ω 为转子转速 600 rad/s,迷宫齿与转子表面的径向间隙为 0.2 mm,刷束底端与转子表面的径向间隙为 0.14 mm。

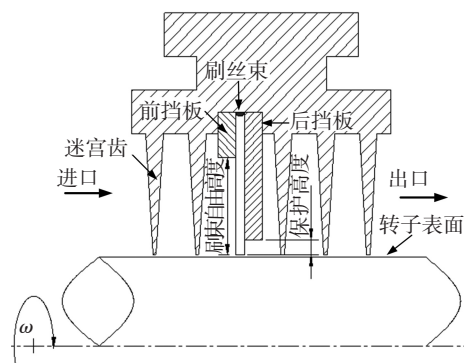


图 1 混合刷式密封结构

刷束是由大量的细刷丝紧密排列组成的,气流通过刷束时密度将发生很大的变化,因此把通过上游和下游区域的气体作为理想可压缩气体处理:

$$P = \rho RT.$$

式中: P 为气压, ρ 为气体密度, R 为气体常数, T 为

温度。

由于刷式密封的刷束区域具有各向异性多孔介质渗流的特性,其流动控制方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} &= 0, \\ \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}. \end{aligned} \quad (1)$$

式中: x_i 为流动方向; u_i 为 x_i 方向的流速; ρ 为气体密度; p 为压力; $\tau_{ij} = \mu_{\text{eff}}[(\partial u_i/\partial x_j) + (\partial u_j/\partial x_i)] - (2/3)\delta_{ij}\mu_{\text{eff}}(\partial u_1/\partial x_1)$, $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$, μ 和 μ_t 分别表示分子黏度和湍流黏度。

本文采用 non-Darcian 多孔介质模型,针对刷式密封在式(1)的基础上增加了黏性阻力项和惯性阻力项^[11,14-16]:

$$\begin{aligned} F_i &= -A_i \mu u_i - B_i \rho |u_i| u_i, \\ \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - A_i \mu u_i - B_i \rho |u_i| u_i. \end{aligned} \quad (2)$$

式中: A_i 和 B_i 分别表示刷束内部的黏性阻力和惯性阻力系数矩阵, i 表示径向、轴向和圆周 3 个方向,

$$A_i = \begin{pmatrix} a_z & 0 \\ 0 & a_n \cos \theta + a_s \sin \theta \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$B_i = \begin{pmatrix} b_z & 0 \\ 0 & b_n \cos \theta + b_s \sin \theta \end{pmatrix}. \quad (4)$$

式中: θ 为刷丝倾角, a_n 、 a_z 和 a_s 分别为垂直于刷丝方向、轴向和刷丝平行方向的黏性阻力系数, b_n 、 b_z 和 b_s 分别表示对应的惯性阻力系数。

联立式(2)~(4)可得到刷丝沿轴向和径向的作用力为

$$\begin{cases} F_u = -a_z \mu u - b_z |u| u, \\ F_v = -(a_n \cos \theta + a_s \sin \theta) \mu v - (b_n \cos \theta + b_s \sin \theta) |u| v, \\ |u| = \rho \sqrt{u^2 + v^2}. \end{cases}$$

式中 u 、 v 表示轴向和径向速度。

图 2 表示与文献[4]采用相同结构尺寸时,不同压比条件下计算流体力学(CFD)数值计算结果与 Bayley 试验数据的对比,其中刷束黏性阻力系数 A_i 和惯性阻力系数 B_i 取值是文献[11]的经验值, A_i 在径向、轴向和圆周 3 个方向分别取值为 1.5×10^5 、 5.5×10^7 和 5.5×10^7 kg/(m³s), B_i 为 1.5×10^5 、 8.0×10^6 和 8.0×10^6 kg/m⁴。由图 2 可以看出,刷式密封泄漏量数值计算值与试验数据基本一致,所选用的黏性阻力系数和惯性阻力系数能较为准确的计算泄漏量。

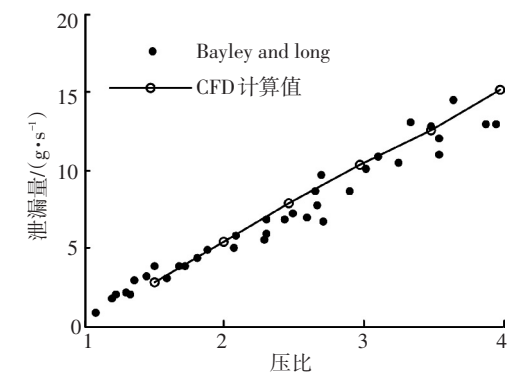


图 2 刷式密封 CFD 计算值与试验数据的对比

2 CFD 模型

刷封计算域由周向截面内的刷丝束多孔介质区域和流体区域组成,先对其进行初步的网格划分,然后不断改进,经网格独立性验证后确定的网格数为 16 万,如图 3 所示。

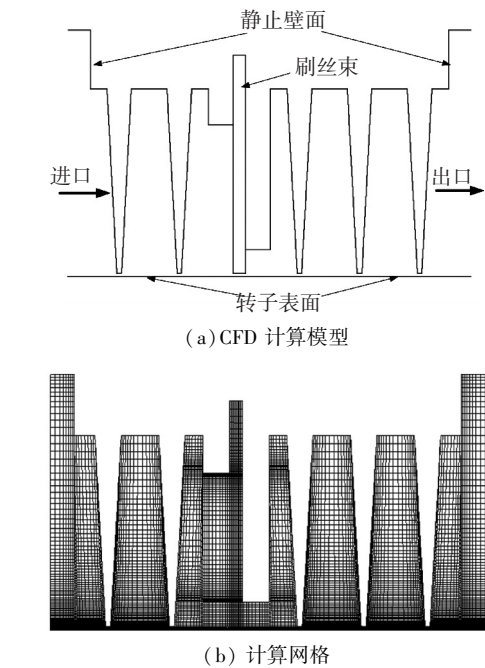


图 3 混合刷式密封计算模型

采用 CFD 软件 FLUENT 有限体积方法离散控制方程,压力耦合方程半隐式格式 SIMPLE 算法和标准 $k-\varepsilon$ 两方程紊流模型进行求解,对流项和扩散项均采用 2 阶迎风格式.转子表面和刷丝束前后挡板表面为壁面无滑移条件,转子转速依工况而定,进口温度为 20℃,进口总压为 0.1~0.8 MPa,出口静压取 0.1 MPa。

3 计算结果及分析

3.1 泄漏量

图 4 为迷宫齿径向间隙为 0.2 mm 时相同结构尺寸迷宫密封和图 1 所示混合刷式密封的泄漏

量比较, R_p 为进出口压力比值.可以看出,随着压比的增加,两者的泄漏量均上升.与迷宫密封相比,混合刷式密封泄漏量可以减小 15.3% 以上。

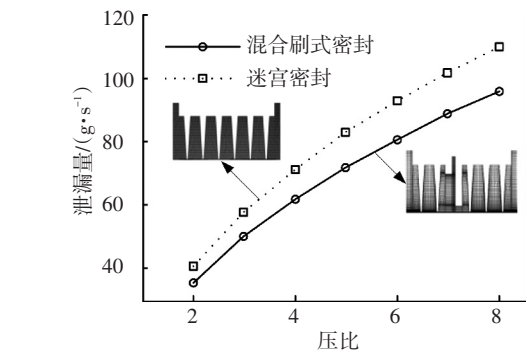


图 4 混合刷式密封和迷宫密封泄漏量对比

3.2 流场分布

图 5、6 为相同结构尺寸的混合刷式密封和迷宫密封的流场分布图,由图 5 可知,泄漏射流通过密封齿后形成一个逆时针方向的大漩涡,再进入下一个密封齿,迷宫密封的泄漏流动如此循环一直到出口.由图 6 可知,泄漏射流进入第一个密封齿后,一部分在腔室内形成 2 个顺时针方向的漩涡,另一部分沿转子壁面向前流动,遇到第二个密封齿后形成 1 个逆时针方向的漩涡.气流撞击到刷丝束后,一部分通过刷丝束内部进行渗透,另一部分通过刷丝束与转子表面的径向间隙进入下游腔室.混合刷式密封的气流依照这样的方式在内部腔室内流动。

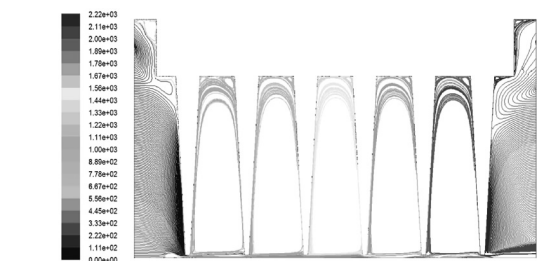


图 5 迷宫密封流场分布图 ($R_p=4$)

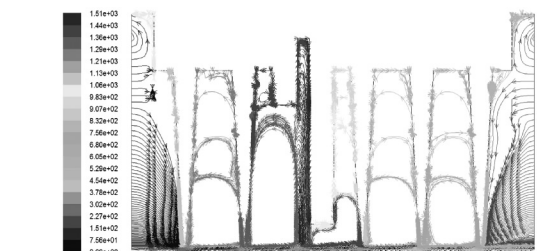


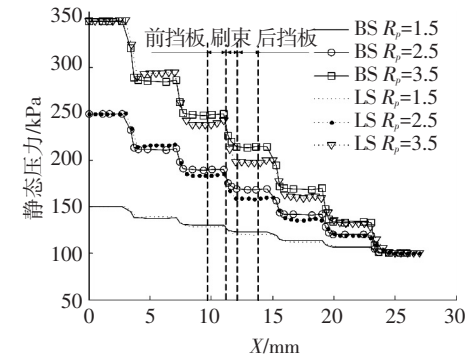
图 6 混合刷式密封流场分布图 ($R_p=4$)

3.3 压力分布

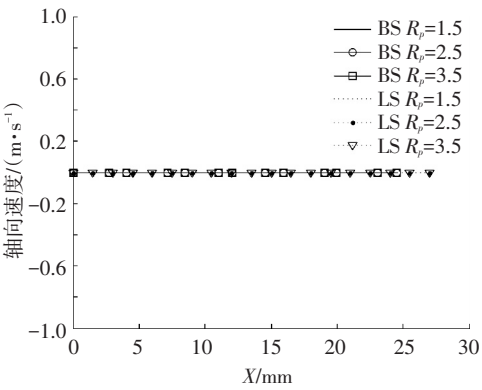
图 7 为混合刷式密封在压比为 1.5、2.5 和 3.5 时静态压力的分布情况,其中 BS 表示混合刷式密封,LS 表示迷宫密封.由图 7(a)可知,迷宫密封与混合刷式密封的静态压力基本相同,转子表面的轴向压力从进口到出口呈现阶梯状递减趋势,压降主要

是由于射流撞击密封齿和刷束而导致的,在每个腔室的其他区域,压力相对稳定,同时随着压比 R_p 的上升,压力变化的幅度增加.由图 7(b)可知,除刷束下端区域外,刷束自由高度的径向压力基本趋于常数值,这是由于径向压力产生了刷丝吹下现象,并且压力值随着压比 R_p 的上升而增加.由图 7(c)可知,保护高度区域的径向压力变化不明显.

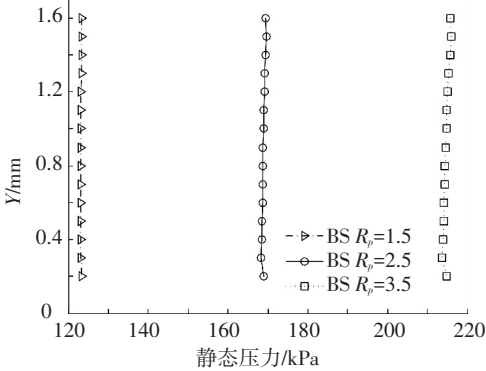
而上升.由图 8(c)可知,进口速度均匀的来流逐渐向刷丝束的下半部分偏流,在刷束内部渗透继续向后挡板保护高度区域偏流,进入保护高度区域后,由于压降以及流通间隙突缩,流体径向速度突然上升并在后挡板的前拐角处达到峰值,从保护高度中高速冲出的流体在下游区域形成逆时针方向的回流,这表明刷束的下半部分对密封性能的影响更大.同时,由于刷束自由高度远大于保护高度,随着压比的增加,自由高度区域的径向速度的变化更为明显.



(a) 转子表面轴向静态压力分布



(b) 自由高度径向静态压力分布



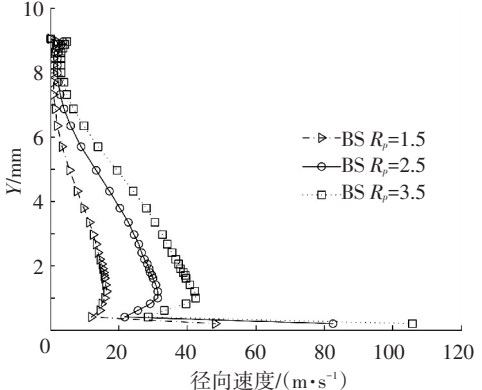
(c) 保护高度径向静态压力分布

图 7 混合刷式密封静态压力分布

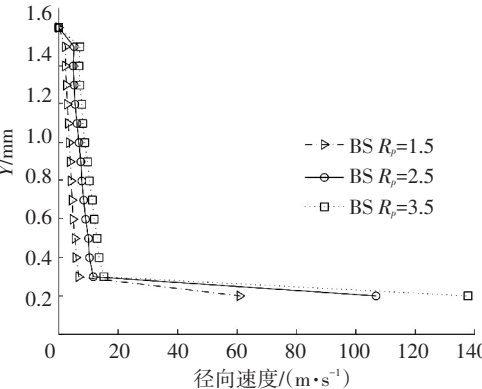
3.4 速度分布

图 8 为混合刷式密封在压差为 1.5、2.5 和 3.5 时各个位置的速度分布情况,由图 8(a)可知,迷宫密封和混合刷式密封转子表面的流体轴向速度基本趋于零,这是因为转子表面为旋转壁面,流体不能通过.由图 8(b)可知,刷束下半部分流体的径向速度明显上升,而在底部由于刷丝变形,流体径向速度开始下降,并且径向速度随着压比 R_p 的增加

(a) 转子表面轴向速度分布



(b) 刷束自由高度径向速度分布



(b) 刷束自由高度径向速度分布

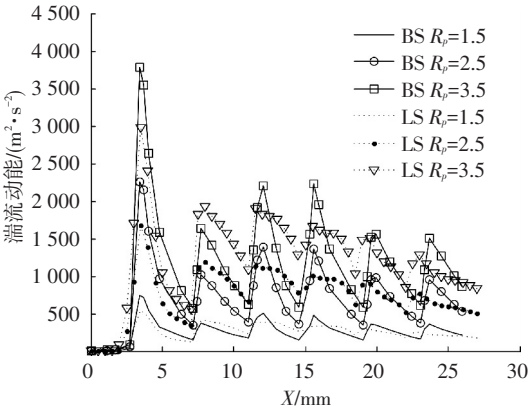
(c) 保护高度径向速度分布

图 8 混合刷式密封速度分布

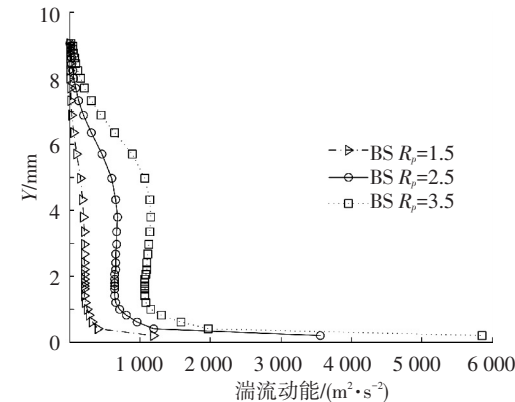
3.5 湍流动能分布

混合刷式密封 3 个位置的湍流动能分布如图 9 所示,由图 9(a)可知,混合刷式密封的湍流动能变化要比迷宫密封明显得多,而对于同一压比

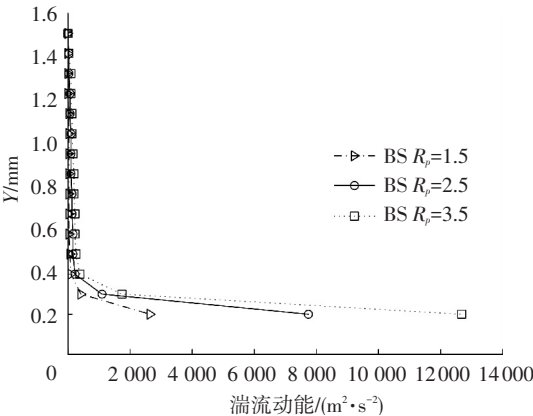
下的刷式密封,转子表面的湍流动能在迷宫齿和刷束位置出现了骤降,下降幅度逐渐降低,并且刷束区域的湍流动能明显要大于前一个迷宫齿,这使得泄漏流体的动能有效的转换为热能,以达到良好的密封效果.由图 9(b)、(c)可知,由于刷束和转子表面的径向间隙区域存在很强的射流,因此刷束自由高度和后挡板保护高度区域的底部的湍流动能明显要大于其他位置,这需要刷束具有足够的刚度以防止其过度的变形来保证密封的稳定性.由图 10 可知,减小刷束径向间隙能有效降低湍流动能,可将图 1 的刷束径向间隙设计为 0,以最大限度的保证其刚度,减小刷丝扰动的影响.



(a) 转子表面湍流动能分布



(b) 刷束自由高度湍流动能分布



(c) 保护高度湍流动能分布

图 9 混合刷式密封湍流动能分布

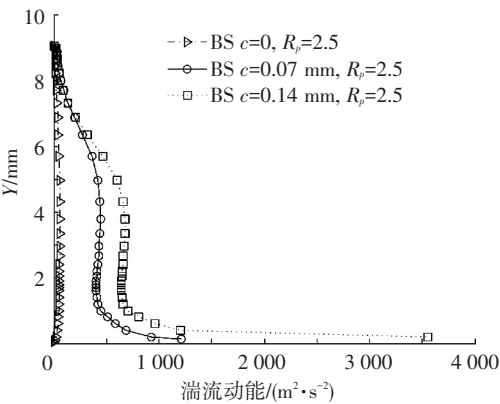


图 10 不同径向间隙下刷束自由高度湍流动能分布

4 结 论

- 1) 采用 non-Darcian 多孔介质模型的 RANS 方程数值求解方法,首次对混合刷式密封转子表面、刷束自由高度和保护高度的静态压力、速度、湍流动能分布规律同时进行了数值研究.
- 2) 数值模拟计算表明,相同结构参数条件下,泄漏量随着压比的上升而增加,混合刷式密封较迷宫密封的泄漏量减少 15.3% 以上.
- 3) 转子表面的轴向压力和湍流动能从进口到出口呈现阶梯状递减趋势,保护高度的径向压力基本趋于常数.
- 4) 由于转子表面为旋转壁面,迷宫密封和混合刷式密封转子表面流体的轴向速度基本趋于零,刷束径向速度和湍流动能随着压比的上升而增加.
- 5) 刷束下半部分和后挡板保护高度对泄漏特性影响比较明显,可以采取适当措施增加刷束下半部分对流体的阻力来降低泄漏.

参考文献

[1] CHUPP R, RAYMOND E, NELSON P. Evaluation of brush seals for limited-life engines [J]. Journal of Propulsion and Power, 1993 (9): 113-119.

[2] CHUPP R, LOEWENTHAL R G. Brush seals can improve power plant efficiency by one-fourth of a percentage point yielding huge annual savings [J]. Lubrication Engineering, 1997, 53(6): 10.

[3] DUDRIAVTSEV V, BRAUN M. Model development of the brush seal numerical simulation [J]. Journal of Propulsion and Power, 1996, 12 (1): 193-201.

[4] BAYLEY F J, LONG C A. A combined experimental and theoretical study of flow and pressure distribution in a brush seal [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1993, 115(2): 404-410.

(下转第 57 页)