

几何参数对刷式密封泄漏和 刷丝尖端力的影响

黄首清, 索双富, 李永健, 王玉明

(清华大学 机械工程学院 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 建立了一种刷式密封的切片式三维模型, 利用计算流体动力学(CFD)方法, 计算了刷丝所受的气流力并将其简化为较少量的一系列的集中力. 基于力矩平衡和线性叠加原理, 提出了气流力引起的刷丝尖端力、转矩的一种定量计算方法. 1 台刷式密封实验台和 1 只实验刷环被用于相关理论计算的实验验证. 基于上述理论计算, 利用正交实验研究了刷丝长度、刷丝间隙、刷丝排数、安装角、刷丝直径和保护间隙对泄漏率、气流力、刷丝尖端力和转矩的影响. 结果表明, 总泄漏率及转矩的计算与实验结果基本吻合, 各点误差均小于 20%. 刷丝直径、刷丝间隙、保护间隙及刷丝排数的对总泄漏率影响非常显著, 安装角对转矩的影响非常显著.

关 键 词: 刷式密封; 气流力; 刷丝尖端力; 几何参数; 正交试验

中图分类号: V233; TB42

文献标志码: A

Influences of geometric parameters on leakages and bristle tip forces in brush seals

HUANG Shou-qing, SUO Shuang-fu,

LI Yong-jian, WANG Yu-ming

(State Key Laboratory of Tribology,

School of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on a type of three-dimensional slice model of brush seals in combination with the CFD method, the aerodynamic forces applied onto bristles were analyzed and simplified to the concentration of a smaller amount of point forces. Bristle tip forces and torques caused by aerodynamic forces were quantitatively investigated using torque rebalance and linear superposition principles. A test rig and a brush seal ring were applied to verify the related theory in test. Orthogonal tests were used to study the influences of the bristle length, inter-bristle spacing, bristle row number, lay angle, bristle diameter and protection clearance on leakage rates, aerodynamic forces, bristle tip forces and torques. Results indicate that the calculated total leakage rate and torques agree with the test data, the error at each point is less than 20%. The influences of bristle diameter, inter-bristle spacing, protection clearance, bristle row number on total leakage rate are very significant, and influence of the lay angle on torques are very significant too.

Key words: brush seal; aerodynamic force; bristle tip force; geometric parameter; orthogonal test

刷式密封是近些年发展起来的一种高效密封,其泄漏量仅是传统的迷宫密封的 $1/5 \sim 1/10$ ^[1]. 刷丝的柔性允许动静部件之间瞬态严重偏心而维持良好的密封性能. 刷式密封已经越来越多的应用于航空发动机、地面及舰船燃气轮机等旋转机械中^[2].

在涡轮机械尤其是大功率涡轮机械中,泄漏流是空气动力损失的重要来源. 作用在刷丝上的气流力会导致刷丝被“吹向”转子表面,这种“吹落效应”一方面有利于闭合刷丝束和转子之间可能的小间隙,降低泄漏量,提高密封的追随性,另一面则会加剧刷丝束与转子摩擦磨损及发热,其长期影响包括加剧泄漏、缩短寿命. 可见,研究泄漏和刷丝尖端力对提高刷式密封性能有重要意义.

一些学者^[3-9]用多孔介质模型模拟刷丝束对流动的阻碍作用,并计算了刷式密封的流场分布. 此外,一些刷式密封的三维模型被用于计算刷丝束内部的流动和温度分布. Chew 等^[10]建立了刷丝束尖端很小一块区域的三维模型,并分析了刷丝间的流动. Franceschini 等^[11]建立了 4 根刷丝的三维模型,并分析了刷丝间的流动,数值计算与实验比较吻合. Lelli 等^[2]建立了 5 根刷丝的三维模型,并分析了气流力和刷丝变形. 在刷丝尖端力方面, Demiroglu 等^[12]基于线性和非线性梁理论推导了干涉导致的刷丝尖端力,并与实验进行比较. Zhao 等^[13]基于大变形接触理论计算了在均布气流力下刷丝的变形和刷丝尖端力.

目前,有关几何参数对刷式密封性能的影响的研究不多. Pekris 等^[14]针对 3 根刷丝的 CFD 模型,利用 2 水平的部分因子实验数值法研究了几何参数的影响. Dogu 等^[15-16]基于多孔介质模型研究和前板和后板的几何参数对刷式密封流场和压力场的影响. Zheng 等^[17]通过实验手段定性研究了非均一刷丝直径的刷式密封的性能.

本文基于轴向有 10 排以上刷丝的刷式密封切片式三维模型,利用 CFD 方法及力矩平衡和线性叠加原理定量计算了泄漏、接触力和转矩,利用 3 水平的正交数值试验研究了几何参数对刷式密封性能的影响.

1 实验测试系统

图 1 为刷式密封的实验系统照片. 转子与刷环为无过盈的理想接触.

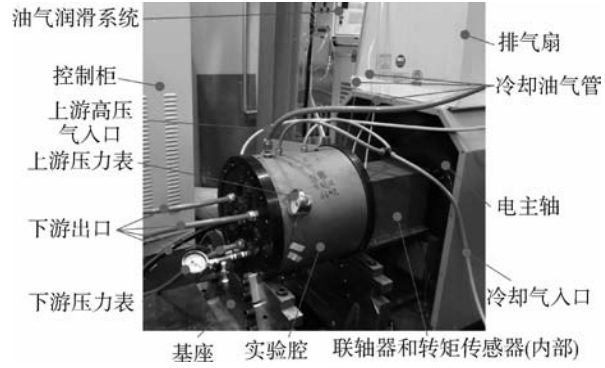


图 1 实验设备

Fig. 1 Photograph of test facility

2 理论研究

2.1 计算模型

参考图 2, 针对刷式密封在周向循环对称的结构特点, 刷式密封的 CFD 计算模型采用一种切片式三维模型, 假设刷丝为理想的有恒定间隙的正六边形排列, 且无移动和变形. 假设流体部分为可压缩理想空气. 求解器为 ANSYS-Fluent 14.0, 采用稳态 3D 求解器, 2 阶迎风差分格式, Coupled 算法.

整圈刷环的总泄漏率 L_t (g/s) 与 CFD 切片模型所计算的泄漏率 L_0 (mg/s) 的关系为

$$L_t = c \cdot L_0 / 1000 \quad (1)$$

其中周向循环数 $c = \frac{(\Phi + H_r) \cdot \pi}{(d + \delta) \cos \varphi}$.

忽略背板的摩擦力, 且不考虑刷丝变形和接触, 则刷丝尖端力与轴向气流力 (下文简称轴向力) 无关, 仅在径向-周向平面分析刷丝尖端力即可. 刷丝尖端力包括接触反力 B_i 和摩擦力 F_i . 将刷丝简化为简单梁结构, 以图 3 所示的第 i 根刷丝为例, 刷丝受到气流力 A_i , 接触反力 B_i 和摩擦力 F_i . 把长为 L 的刷丝尖端分为 m 段, 其中第 j 段受到的气流力 A_i^j , 可分解为径向气流力 (下文简称径向力) R_i^j 和周向气流力 C_i^j .

对 O 点矩平衡, 对第 i 根刷丝的第 j 段有

$$A_i^j \cdot (L' - L + L_j) - B_i^j \cdot L' \cdot \sin \varphi - F_i^j \cdot L' \cdot \cos \varphi = 0 \quad (2)$$

$$1 \leq i \leq n \quad 1 \leq j \leq m$$

其中

$$A_i^j = \sqrt{(R_i^j)^2 + (C_i^j)^2}$$

$$L_j = \frac{L(j-1/2)}{m}$$

$$F_i^j = \mu B_i^j$$

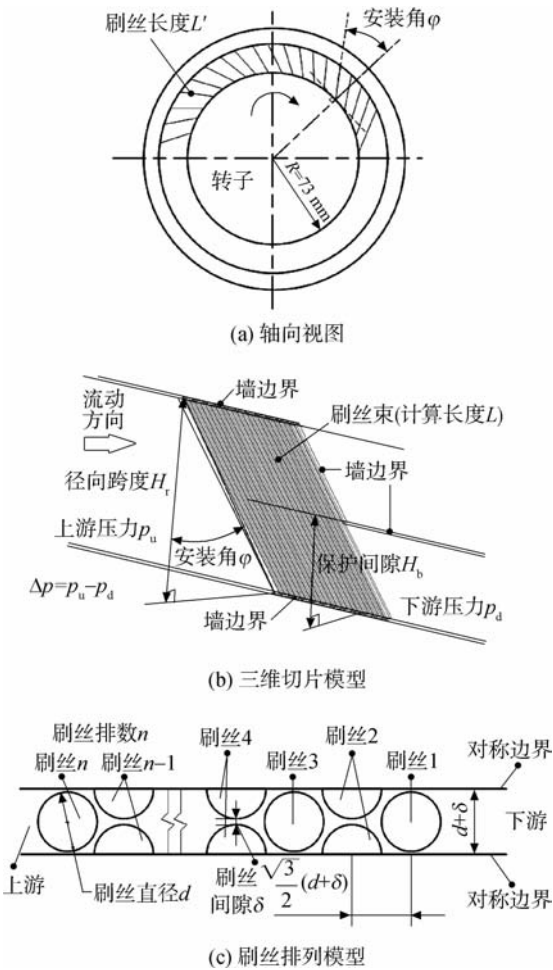


图 2 刷式密封的示意图及 CFD 模型
Fig. 2 Diagram and CFD model of brush seal

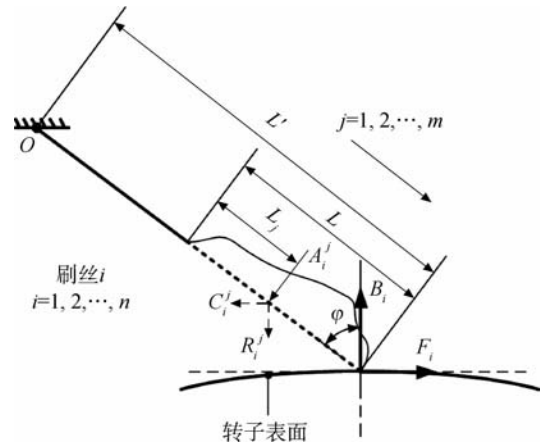


图 3 刷丝受力分析
Fig. 3 Force analysis of bristle

由此得,第 i 根刷丝的第 j 段所受气流力引起的接触反力 B_i^j 和摩擦力 F_i^j 分别为

$$B_i^j = \frac{\sqrt{(R_i^j)^2 + (C_i^j)^2} \cdot \left[L' - L + \frac{L(j-1/2)}{m} \right]}{(\sin \varphi + \mu \cdot \cos \varphi) \cdot L'} \quad (3)$$

$$F_i^j = \frac{\mu \sqrt{(R_i^j)^2 + (C_i^j)^2} \cdot \left[L' - L + \frac{L(j-1/2)}{m} \right]}{(\sin \varphi + \mu \cdot \cos \varphi) \cdot L'} \quad (4)$$

由线性叠加原理,第 i 根刷丝所受气流力引起的接触反力 B_i 和摩擦力 F_i 分别为

$$B_i = \sum_{j=1}^m \left\{ \frac{\sqrt{(R_i^j)^2 + (C_i^j)^2}}{(\sin \varphi + \mu \cdot \cos \varphi) \cdot L'} \cdot \left[L' - L + \frac{L(j-1/2)}{m} \right] \right\} \quad (5)$$

$$F_i = \sum_{j=1}^m \left\{ \frac{\mu \sqrt{(R_i^j)^2 + (C_i^j)^2}}{(\sin \varphi + \mu \cdot \cos \varphi) \cdot L'} \cdot \left[L' - L + \frac{L(j-1/2)}{m} \right] \right\} = \mu F b_i \quad (6)$$

转矩 N 可以由摩擦力 F_i 计算出

$$N = c \cdot R \cdot \sum_{i=1}^n F_i \quad (7)$$

而除了上述的力矩平衡方法,刷丝尖端力还由非线性梁理论计算,采用 ANSYS 求解器.参考图 4,将刷丝等效为悬臂梁,采用单元 beam 3,截面为直径为 d 的圆,刷丝材料 Haynes 25 的弹性模量 $E_b = 225 \text{ GPa}$,密度 $\rho_b = 9130 \text{ kg/m}^3$.假设转子表面为刚性,刷丝根部固支约束,尖端与转子形成接触对,气流力施加在刷丝上.采用 Augmented Lagrange 方法,计算时间为 1 s,载荷步为 10,开启大变形选项.

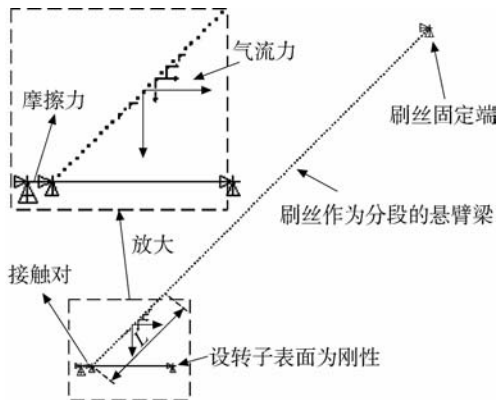


图 4 计算刷丝尖端力的 ANSYS 模型
Fig. 4 ANSYS model to calculate bristle tip forces

2.2 正交试验

为了研究几何参数(刷丝长度 L' 、刷丝间隙 δ 、刷丝排数 n 、安装角 φ 、刷丝直径 d 和保护间隙 H_b)对刷式密封性能的影响,设计了 3 水平 6 因素的正交试验表,如表 1 所示.一只实验刷环用于

相关理论计算的实验验证,其几何参数见表 1.

表 1 3 水平 6 因素的正交设计及实验刷环的几何参数
Table 1 Orthogonal design in 3 levels and 6 factors & geometric parameters of test brush seal ring

因素	水平			实验刷环 CFD 模型
	1	2	3	
L'/mm	15.0	17.5	20.0	17.68
δ/mm	0.008	0.009	0.010	0.007
n	10	14	18	22
$\varphi/(\text{^\circ})$	30	45	60	45
d/mm	0.07	0.10	0.13	0.07
H_b/mm	1.00	1.25	1.50	1.50

为了进行方差分析,正交表需要有一个空列 e ,故选择 3 水平 7 因素的正交表 $L_{18}(3^7)$,如表 2 所示.

表 2 $L_{18}(3^7)$ 正交实验排列表
Table 2 $L_{18}(3^7)$ orthogonal test table

试验号	因素						
	1	2	3	4	5	6	7
	L'/mm	δ/mm	n	$\varphi/(\text{^\circ})$	d/mm	H_b/mm	e
1	15.0	0.008	10	30	0.07	1.50	1
2	15.0	0.009	14	45	0.10	1.25	2
3	15.0	0.010	18	60	0.13	1.00	3
4	17.5	0.008	10	45	0.10	1.00	3
5	17.5	0.009	14	60	0.13	1.50	1
6	17.5	0.010	18	30	0.07	1.25	2
7	20.0	0.008	14	30	0.13	1.25	3
8	20.0	0.009	18	45	0.07	1.00	1
9	20.0	0.010	10	60	0.10	1.50	2
10	15.0	0.008	18	60	0.10	1.25	1
11	15.0	0.009	10	30	0.13	1.00	2
12	15.0	0.010	14	45	0.07	1.50	3
13	17.5	0.008	14	60	0.07	1.00	2
14	17.5	0.009	18	30	0.10	1.50	3
15	17.5	0.010	10	45	0.13	1.25	1
16	20.0	0.008	18	45	0.13	1.50	2
17	20.0	0.009	10	60	0.07	1.25	3
18	20.0	0.010	14	30	0.10	1.00	1

表 3 是刷式密封的性能指标,包括从切片 CFD 模型提取的单根刷丝所受的气流力、计算的

接触反力以和切片模型的泄漏率,进一步可以算得整个刷环的宏观性能指标,如总泄漏率和转矩.

表 3 刷式密封的性能指标及其符号
Table 3 Performance indexes and symbols of brush seal

指标	切片 CFD 模型	整个刷环
泄漏率	L_0	L_t
最下游刷丝所受轴向力	X_1	
最下游刷丝所受径向力	R_1	
最下游刷丝所受接触反力	B_1	
转矩		N

各几何参数对刷式密封的性能指标(0.2 MPa 下)的影响不同,可以通过极差分析和 F 检验来判断.极差和 F 值越大,则对应的几何参数对相应的性能指标影响越显著.因素 x 的极差 R_x 的定义为

$$R_x = \max\{\overline{K}_x^y\} - \min\{\overline{K}_x^y\} \quad x = 1, 2, \dots, 7 \quad y = 1, 2, 3 \quad (8)$$

其中 $\overline{K}_x^y$ 为因素 x 水平 y 对应的性能指标量的均值.

因素 x 的 F 值定义为

$$F_x = \frac{S_{s,x}/df_x}{S_{s,e}/df_e} \quad x = 1, 2, \dots, 6 \quad (9)$$

其中 df_x 和 $S_{s,x}$ 分别为因素 x 的自由度和离差平方和, df_e 和 $S_{s,e}$ 分别为误差 e 的自由度和离差平方和. $df_x=2, df_e=5$.查 F 分布表,显著水平为 0.1,0.05 和 0.01 的临界值分别为 $F_{0.1}(2,5)=3.78, F_{0.05}(2,5)=5.79$ 和 $F_{0.01}(2,5)=13.3$.显著度判断如下:

- 若 $F_x<3.78$,表示不显著,无标记;
- 若 $3.78<F_x<5.79$,表示轻微显著,标记为“*”;
- 若 $5.79<F_x<13.3$,表示比较显著,标记为“**”;
- 若 $F_x>13.3$,表示非常显著,标记为“***”.

3 结果讨论

3.1 泄漏率和转矩实验

实验刷环的总泄漏率和转矩、各排刷丝的接触反力分别如图 5~图 6 所示.可见总泄漏率和转矩的理论实验结果基本吻合,各点误差均小于 20%.接触反力的理论计算与仿真结果基本吻合,各点误差均小于 10%.刷丝材料和转子材料

分别为 Haynes25 和 1Cr14Mn14Ni,摩擦因数根据文献[18]的取 0.05. 在较高压差下,总泄漏率的实验值偏小而转矩的实验值偏大,这主要是由于在较高压差下,刷丝束会被压紧,故泄漏阻力和刚度增大,而计算中没有考虑刷丝的变形和移动.

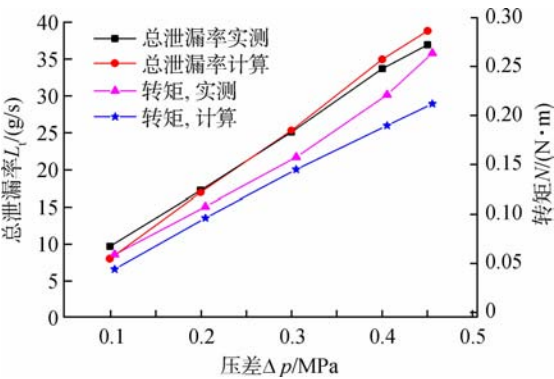


图 5 实验刷环的总泄漏率和转矩
Fig. 5 Total leakage rate and torques of the tested brush seal ring

以总泄漏率显著减小. 而安装角变大也会导致周向循环数显著变小,故安装角对总泄漏率的影响是刷丝束位于保护间隙内部分以及刷丝束周向间隙数变化的综合作用的结果.

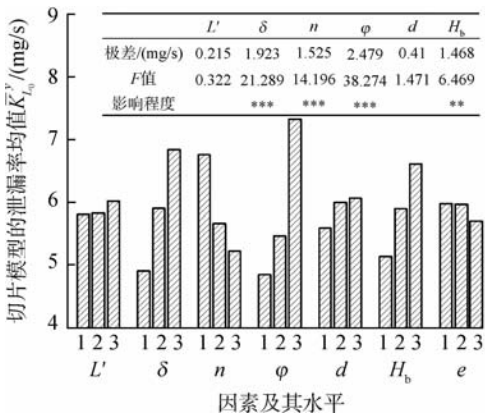


图 7 几何参数对切片模型泄漏率的影响
Fig. 7 Effects of geometric parameters on the slice leakage rate

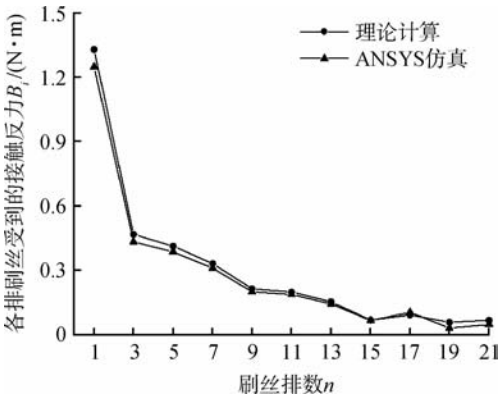


图 6 各排刷丝的接触反力
Fig. 6 Reaction forces of each bristle

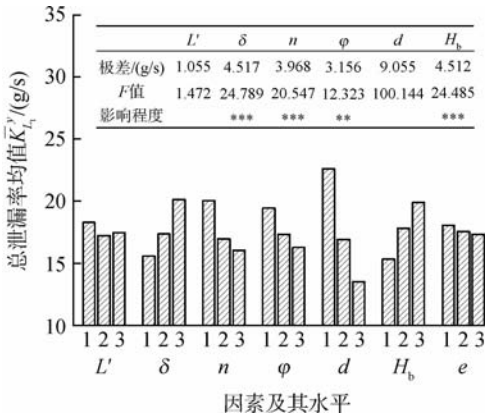


图 8 几何参数对总泄漏率的影响
Fig. 8 Effects of geometric parameters on the total leakage rate

3.2 几何参数对性能的影响

图 7 和图 8 分别是几何参数对切片模型的泄漏率和总泄漏率的影响. 对于切片模型的泄漏率, 安装角、刷丝间隙和刷丝排数的影响非常显著, 保护间隙的影响比较显著. 这是由于, 安装角越大, 刷丝倾斜更大, 切片模型位于保护间隙内的部分越大, 泄漏量也越大. 而刷丝间隙越大且刷丝排数越小, 则刷丝束的流动阻力越小, 所以泄漏量越大. 而保护间隙增大也会减小流动阻力, 从而增加泄漏. 由于考虑了周向循环数 c , 对于总泄漏率, 刷丝直径、刷丝间隙、保护间隙及刷丝排数的影响非常显著, 而安装角的影响比较显著. 直径越大, 周向循环数显著变小, 刷丝间周向间隙数变少, 所

图 9~图 11 分别是几何参数对轴向力、径向力和接触反力的影响. 刷丝直径对 3 种力的影响都非常显著, 这是因为直径大则刷丝受力面积增大, 相应的受力及接触反力也增大. 刷丝排数和安装角对轴向力的影响比较显著, 另外安装角对接触反力的影响非常显著, 而刷丝排数和保护间隙对径向力和接触反力的影响为轻微显著. 刷丝排数越大, 流动阻力越大, 最下游刷丝受到的轴向力和径向力也越小, 从而接触反力也越小. 安装角越大, 刷丝倾斜增大, 位于保护间隙内部分增大, 受到的轴向力也大, 且很小的接触反力即可平衡径向力作用于刷丝根部的力矩, 故接触反力明显变

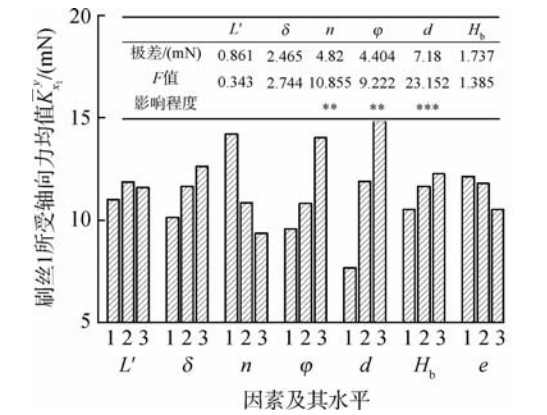


图 9 几何参数对轴向力的影响

Fig. 9 Effects of geometric parameters on axial force

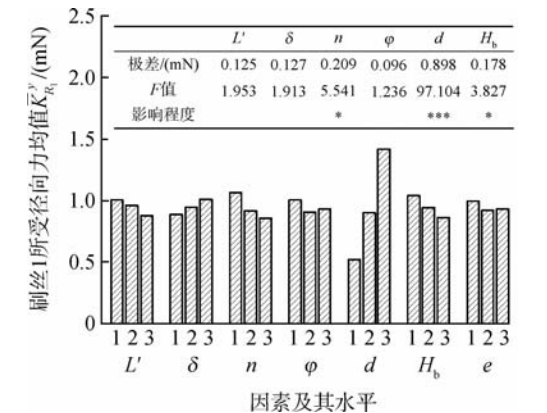


图 10 几何参数对径向力的影响

Fig. 10 Effects of geometric parameters on the radial force

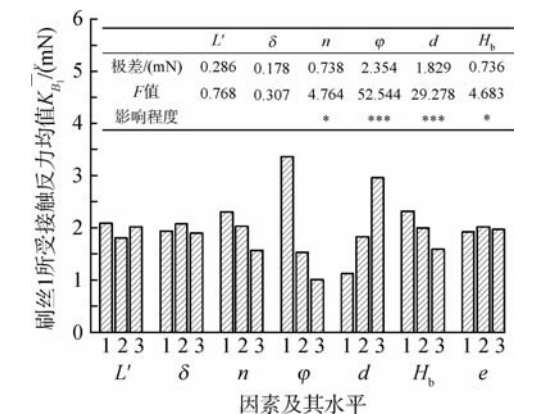


图 11 几何参数对接触反力的影响

Fig. 11 Effects of geometric parameters on reaction force

小. 保护间隙越大,更多的泄漏流通过保护间隙沿轴向流动,导致径向流动减弱及径向力有所减小,轴向力有少许增加,接触反力因径向力减小而略有减小.

转矩是摩擦力的宏观反映,图 12 是几何参数对转矩的影响. 安装角的影响远大于其他几何因素的影响. 安装角越大,刷丝受到的接触反力越小,且周向循环数减小,所以转矩显著减小.

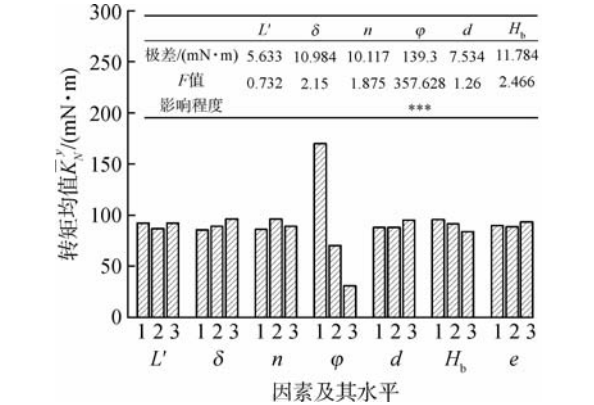


图 12 几何参数对转矩的影响

Fig. 12 Effects of geometric parameters on torque

4 结 论

- 1) 泄漏率实验校验了三维切片模型及 CFD 方法的合理性;基于非线性梁理论的有限元仿真和转矩实验证明了所提出的刷丝尖端力和转矩计算方法的合理性.
- 2) 理论计算与实验的误差主要来自于切片式三维模型引入的一些假设,如刷丝为正六边形排列、间隙恒定、没有移动和变形、忽略刷丝间、刷丝与背板间的接触和摩擦等.
- 3) 正交数值试验的主要结论为:刷丝直径、刷丝间隙、保护间隙及刷丝排数的对总泄漏率的影响非常显著,刷丝直径和刷丝排数越大、刷丝间隙和保护间隙越小,则总泄漏率越小;安装角对转矩的影响非常显著,安装角越大,转矩越小.

参考文献:

[1] Bayley F J,Long C A. A combined experimental and theoretical study of flow and pressure distributions in a brush seal[J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power,1993,115(2):404-410.

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

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

[4] Dogu Y. Investigation of brush seal flow characteristics using bulk porous medium approach[J]. Journal of Engineering for

Gas Turbines and Power,2005,127(1):136-144.

[5] 王之栋,梁小峰,黄其武. 刷式密封二维模型数值计算[J]. 航空动力学报,2008,23(8):1461-1465.

WANG Zhili, LIANG Xiaofeng, HUANG Qiwu. Two-dimensional model mathematical simulation of brush seal [J]. Journal of Aerospace Power,2008,23(8):1461-1465. (in Chinese)

[6] 曹广州,吉洪湖,袁艳平. 模拟刷式封严泄漏流动的多孔介质模型[J]. 航空动力学报,2008,23(3):443-447.

CAO Guangzhou, JI Honghu, YUAN Yanping. A porous medium model for simulating leakage flows through brush seals[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23 (3): 443-447. (in Chinese)

[7] 黄学民,史伟,王洪铭. 刷式密封中泄漏流动的多孔介质数值模型[J]. 航空动力学报,2000,15(1):55-58.

HUANG Xuemin, SHI Wei, WANG Hongming. Porous medium leakage flow model of brush seal[J]. Journal of Aerospace Power,2000,15(1):55-58. (in Chinese)

[8] Dogu Y, Aksit M, Demiroglu M, et al. Evaluation of flow behavior for clearance brush seals[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2008,130(1):012507. 1-012507. 9.

[9] Li J, Huang Y, Li Z, et al. Effects of clearances on the leakage flow characteristics of two kinds of brush seal and referenced labyrinth seal [R]. ASME Paper GT2010-22877,2010.

[10] Chew J W, Guardino C. Simulation of flow and heat transfer in the tip region of a brush seal [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow,2004,25(4):649-658.

[11] Franceschini G, Jones T V, Gillespie R H D. Improved understanding of blow-down in filament seals[R]. ASME Paper GT2008-51197,2008.

[12] Demiroglu M, Gursoy M, Tichy J A. An investigation of tip force characteristics of brush seals[R]. ASME Paper GT2007-28042,2007.

[13] Zhao H, Stango R J. Effect of flow-induced radial load on brush seal/rotor contact mechanics[J]. Journal of Tribology,2004,126(1):208-215.

[14] Pekris M J, Franceschini G, Gillespie R H D. Effect of geometric changes in an idealised contacting brush seal bristle pack on typical key performance measures [R]. Paper GT2011-46492,2011.

[15] Dogu Y, Aksit M F. Effects of geometry on brush seal pressure and flow fields;Part I front plate configurations [J]. Journal of Turbomachinery,2006,128(4):367-378.

[16] Dogu Y, Aksit M F. Effects of geometry on brush seal pressure and flow fields;Part II backing plate configurations [J]. Journal of Turbomachinery,2006,128(4):379-389.

[17] Zheng X, Mack M, Demiroglu M, et al. Design, manufacture and testing of variable bristle diameter brush seals [R]. AIAA-2013-3859,2013.

[18] Huang S, Suo S, Li Y, et al. Theoretical and experimental investigation on tip forces and temperature distributions of the brush seal coupled aerodynamic force[J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 2014, 136 (5): 052502. 1-052502. 12.

(编辑:秦理曼、王碧琚)