

刷式密封迟滞特性的数值研究

陈春新, 邱波, 李军, 丰镇平

(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 采用非线性接触模型对刷式密封的迟滞特性及其影响因素进行了研究. 采用点-面接触、梁-梁相交接触和梁-梁平行接触模拟了刷式密封中刷丝端部与转子表面接触、刷丝与背板边缘接触以及刷丝之间的接触, 建立了刷式密封的非线性接触模型, 并通过试验研究的刷式密封迟滞特性的数据验证了所建立模型的有效性. 研究分析了刷丝径向刚度一定时, 刷丝直径、刷丝长度和刷丝角度对刷式密封迟滞特性的影响规律, 结果表明, 刷丝端部压力计算值与理论值的比值可以更好地评定刷式密封迟滞特性的强弱. 当刷丝直径保持不变时, 随着刷丝角度的增加和刷丝长度的减小, 刷式密封的迟滞特性越来越弱; 当刷丝长度一定时, 随着刷丝角度和刷丝直径的增加, 刷丝的迟滞特性越来越弱; 当刷丝角度一定时, 不同刷丝直径和刷丝长度的刷式密封表现出相近的迟滞特性; 当刷丝径向刚度一定时, 刷式密封的迟滞特性强弱主要由刷丝角度决定.

关键词: 刷式密封; 迟滞特性; 数值模拟

中图分类号: TK262 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)05-0036-06

Numerical Investigations on the Hysteresis Characteristics of Brush Seals

CHEN Chunxin, QIU Bo, LI Jun, FENG Zhenping

(Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The hysteresis characteristics of brush seal and its effects were numerically investigated using nonlinear contact FEM model. A nonlinear contact model of brush seal was established using methods of node-to-surface contact, beam-to-beam contact (two beams cross each other) and beam-to-beam contact (two beams roughly parallel) simulating bristle-rotor contact, bristle-backing plate contact and inter-bristle contact respectively. The feasibility and effectiveness of the developed nonlinear contact model were demonstrated through comparison of the numerical results and measured data of the hysteresis characteristics of the experimental brush seal. The effects of bristle diameter, bristle length and bristle lay angle on hysteresis characteristics of brush seal were studied at the constant bristle radial stiffness. The obtained results show that the ratio between the numerical and theoretical data of the bristle tip pressure can be able to evaluate the level of brush seal hysteresis characteristics effectively. The strength of the brush seal hysteresis characteristics became weaker with the bristle lay angle increasing and bristle length decreasing at the constant of bristle diameter. In addition, the strength of brush seal hysteresis characteristics became weaker with the bristle lay angle and bristle diameter increasing at the constant bristle length. Furthermore, similar hysteresis characteristics of brush seal with different bristle diameter and length were observed at the constant bristle radial stiffness and lay angle. The strength of hysteresis characteristics of brush seal was mostly influenced by the bristle lay angle at the constant bristle radial stiffness according to the present results.

Keywords: brush seal; hysteresis characteristic; numerical simulation

收稿日期: 2010-07-16. 作者简介: 陈春新(1985—),男,硕士生;李军(联系人),男,教授,博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50976083).

网络出版时间: 2010-12-25 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20101225.1137.000.html>

先进密封技术的应用有助于提高透平机械的气动效率和运行安全性. 与迷宫密封相比,刷式密封具有泄漏率低、占用轴向空间小、转子动力学特性优越以及运行稳定、持久等诸多优势,使得其在透平机械领域得以广泛应用^[1]. 图1给出了典型刷式密封结构. 刷式密封主要由前夹板、刷丝束和背板3部分组成^[1],刷丝束是由与径向成 $30^\circ \sim 60^\circ$ 方向排列的细金属丝组成,前夹板为固定刷丝束所用,背板起支撑刷丝束的作用. 受到背板的支撑,刷丝束在大压差下可以维持相对较小的轴向变形,保持稳定的密封效果. 刷丝束自由端以一定角度与轴表面接触,这样既可以减小刷毛的磨损,又可以在轴发生瞬间径向位移后弹回并保持密封间隙不变,以维持良好的密封效果^[1].

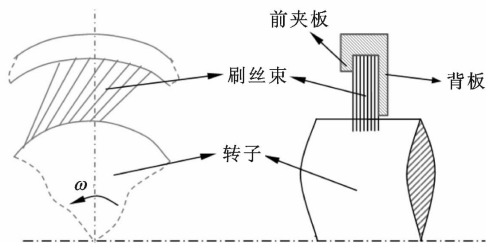


图1 典型刷式密封结构

实验研究发现,在转子偏移中心位置或升速时,受摩擦力作用,刷丝不能即时偏移,通常称之为刷丝的刚化效应. 刚化效应会增加刷丝与转轴之间的压力,加速刷丝与转轴表面的磨损,从而降低了刷式密封的性能. 在刷丝被转子径向推移后,转子脱离偏移、降速,由于受摩擦力的作用,刷丝并不能完全复位,此时刷丝与转子的接触力和转子产生偏移、升速时的有所不同,这种与载荷历史有关的差异称作刷式密封的迟滞特性. 迟滞特性会增大刷丝与转子之间的间隙,增加泄漏,从而极大地降低了密封效果^[2].

Chupp 和 Dowler^[2]在进行刷式密封实验时最先注意到迟滞特性:在给定压比下,刷式密封的泄漏特性与达到该压比的过程有关,增大和减小到给定压比时的刷式密封泄漏量有所不同. Howell 和 Latimer^[3]根据线性梁理论建立了单根刷丝弯曲模型,模拟了刷丝端部在受到集中力作用时末排刷丝与背板之间的锁定效应. Zhao 和 Stango^[4]建立了刷丝与背板之间接触的力学模型,通过与实验结果对比,验证了理论模型的有效性,并进一步对刷丝的迟滞特性进行了分析. Basu 等人^[5]讨论了刷式密封的迟滞

特性和刚化效应,给出了相关的实验结果,并设计了一种能有效减小迟滞特性和刚化效应有害影响的低迟滞刷式密封. Crudginton 等人^[6]通过数值和实验方法分析了刷丝束与转子表面的接触力随刷丝角度变化的规律,并在实验和数值计算下获得了接触力相对于转子径向位移的迟滞特性曲线.

为了进一步提高刷式密封的性能,必须清楚地认识刷式密封的迟滞特性及其影响因素,为此本文进行了数值研究,以期工程应用提供参考.

1 计算模型和数值方法

图2给出了单根刷丝在未考虑摩擦作用时的受力图,其中 L 是刷丝的长度, θ_s 表示刷丝在转子表面的安装角度(称作刷丝角度), δ_r 表示转子的径向位移, F_n 是刷丝与转子表面的法向接触力.

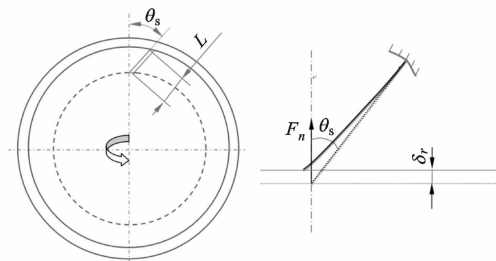


图2 单根刷丝在理想情况下的受力

由细长梁的线性纯弯曲理论^[7]和图2中的几何条件可知

$$F_n = \frac{3EI\delta_r}{L^3 \sin^2 \theta_s} \quad (1)$$

式中: E 为刷丝的弹性模量; I 为刷丝的截面惯性矩. 刷丝的截面为圆形,所以

$$I = \frac{\pi d_b^4}{64} \quad (2)$$

式中: d_b 为刷丝的直径. 刷丝端部与转子的接触面积为

$$A_{WT} = \frac{\pi d_b^2}{4 \cos \theta_s} \quad (3)$$

刷丝的径向刚度为 K_r ,即刷丝端部每发生单位径向位移时接触力的变化,有

$$K_r = \frac{F_n}{\delta_r} = \frac{Ed_b^4}{6.794L^3 \sin^2 \theta_s} \quad (4)$$

为了便于对不同直径刷丝进行比较,一般用刷丝端部压力(bristle tip pressure,简称BTP,用符号 p_{BT} 表示)替代刷丝的径向刚度,来表示刷丝端部每发生单位径向位移时接触压力的变化. 若不考虑摩擦,BTP的理论计算式为

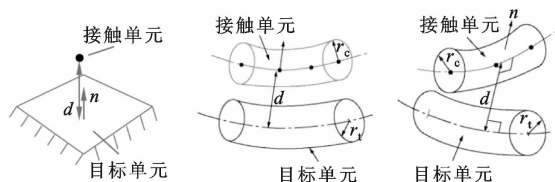
$$p_{BT} = \frac{K_r}{A_{WT}} = \frac{Ed_b^2 \cos \theta_s}{5.333L^3 \sin^2 \theta_s} \quad (5)$$

根据图3所示接触模型,在考虑了刷丝与转子表面摩擦力的情况下,可以得到单根刷丝的控制微分方程^[8]

$$I \frac{d^2 \varphi}{ds^2} = -F_{res} \sin(\varphi + \alpha + \mu) \quad (6)$$

式中: φ 是刷丝变形的转角; s 是沿刷丝中轴方向的弧长坐标; α 是刷丝与转子接触处法向与刷丝初始位置的夹角; μ 是摩擦角。

刷式密封的接触模型如图3所示,其中将刷丝与转子的接触视为点-面接触(图3a),刷丝之间的接触视为梁-梁平行接触(图3b),刷丝与背板边缘之间的接触视为梁-梁相交接触(图3c), n 为接触面的法向, d 为接触单元与目标单元之间的距离, r_c 和 r_t 分别为接触单元和目标单元的半径。



(a)点-面 (b)梁-梁平行 (c)梁-梁相交
图3 刷式密封中的接触模型

由图3可以看出:当 $d \leq 0$ mm时,点-面接触产生;当 $d - (r_c + r_t) \leq 0$ mm时,梁-梁接触产生。

模型在接触过程中必须满足不穿透的接触协调条件。如果接触单元与目标单元发生接触,从而产生法向接触力,此接触力可以将模型间的穿透控制在可接受的数值范围之内,其满足

$$F_n = \begin{cases} 0, & u_n > 0 \\ K_n u_n, & u_n \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: K_n 为法向接触刚度; u_n 为接触间隙。

由于存在摩擦力,所以在接触处还存在平行于接触面的切向摩擦力。根据不同的接触状态,摩擦力则有所不同,即

$$F_\tau = \begin{cases} K_\tau u_\tau, & |F_\tau| - \mu F_n < 0 \text{ (黏结)} \\ \mu K_n u_n, & |F_\tau| - \mu F_n = 0 \text{ (滑动)} \end{cases} \quad (8)$$

本文采用单排5根刷丝的刷式密封模型(见图4)展开了刷式密封迟滞特性及其影响因素研究。计算时,先在转子表面施加径向位移,然后释放之,同时记录刷丝与转子之间接触力的变化。刷式密封的非线性接触模型采用ANSYS软件进行求解,接触算法采用增强的拉格朗日法。

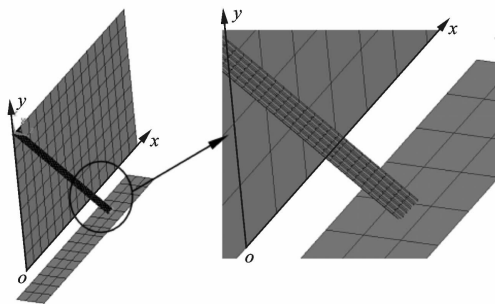


图4 刷丝迟滞特性的有限元计算模型

2 数值方法有效性验证

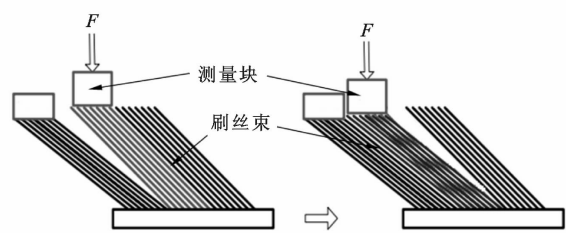
图5给出了刷式密封的实验测量步骤^[9]及本文数值模拟所得迟滞特性曲线。测量块是直径为129.54 mm、周向宽度为12.7 mm的环形金属块,实验过程中保持刷式密封圈不动,测量块沿刷式密封径向以0.2 mm/s的速率运动。当测量块压向刷丝时视为加载,反之视为卸载。计算模型中的摩擦系数根据常用刷丝材料属性选取,即 $\mu = 0.21$,其余计算参数来自于文献^[9],即刷丝的弹性模量 $E = 2.0686 \times 10^{11}$ Pa,刷丝直径 $d_b = 0.102$ mm,刷丝角度 $\theta_s = 45.67^\circ$,刷丝长度 $L = 12$ mm。实验过程中径向位移的加载和卸载速率均为0.2 mm/s。从图5可以看出,加载过程中的数值计算结果与实验结果几乎相同,误差很小,而在卸载过程中的数值计算结果与实验结果之间存在着较大的误差。这是因为,实验结果是在确定的加载和卸载速率情况下得出的,数值模拟是将计算转子径向运动分成了若干个载荷步,每一载荷步均视为平衡态,但未考虑运动和变形的时间效应。实验时,由于转子径向运动较快,在卸载过程中的刷丝不能及时跟随转子而动,从而造成了刷丝与转子表面的接触力相对于数值结果偏小。

3 结果与讨论

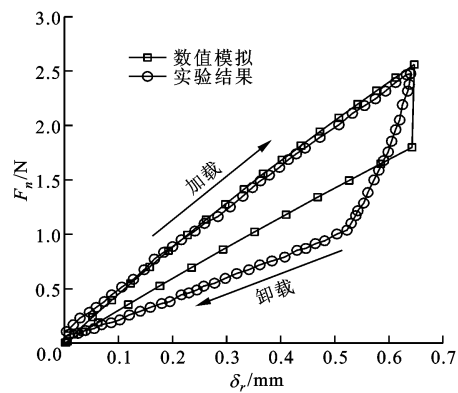
本文主要研究刷丝的角度、长度和直径对刷式密封迟滞特性的影响,为了便于比较,取刷丝的 K_r 为定值。刷丝的弹性模量为 2.0685×10^{11} Pa,刷丝径向刚度为固定值1.523 N/m,刷丝的角度、直径和长度综合文献^[10]和实际应用进行选取。

3.1 刷丝的长度和角度对迟滞特性的影响

取刷丝直径 $d_b = 0.142$ mm,按表1中的5类参数计算所得刷式密封在加载和卸载过程中的迟滞特性曲线以及BTP模拟值 p'_{BT} 与理论值 p_{BT} 的比值如图6所示。



(a) 实验测量步骤^[9]



(b) 数值模拟与实验测量结果

图 5 迟滞特性曲线数值模拟有效性验证

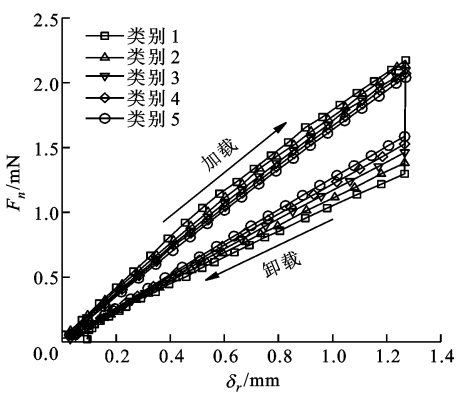
表 1 刷丝直径为 0.142 mm 时的计算参数

参数类别	L/mm	$\theta_s/^\circ$	$K_r/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	$p_{\text{BT}}/\text{kPa}\cdot\text{mm}^{-1}$
1	29.2	35	1.523	78.5
2	27.1	40	1.523	73.3
3	25.4	45	1.523	67.6
4	24.1	50	1.523	61.6
5	23.0	55	1.523	54.8

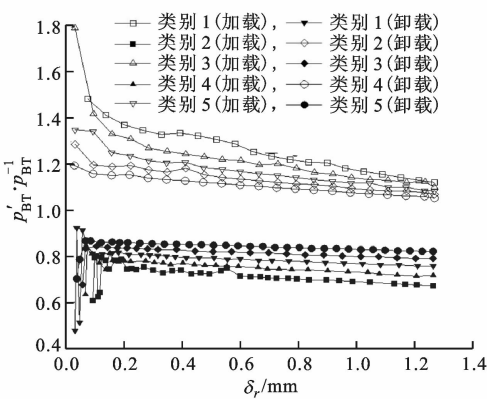
在加载和卸载过程中,利用法向接触力和 BTP 比值的差值可以判别出刷式密封迟滞特性的强弱,即当刷丝径向刚度一定时,随着刷丝角度的增加和刷丝长度的减小,刷丝接触力和 BTP 的差值越来越小,表明刷式密封的迟滞特性越来越弱。刷丝端部相对于转子表面的倾斜角度会影响接触力,该角度越小,说明摩擦力与刷丝的夹角越接近于 90° ,摩擦力的作用越明显,迟滞特性就越强。在加载过程中,随着径向位移的增加,不同刷丝角度下刷式密封 BTP 的数值结果与实验结果的比值差别越小,而在卸载过程中这种差别越来越大。

3.2 刷丝的直径和角度对迟滞特性的影响

取刷丝长度 $L=25.4\text{ mm}$,按表 2 中的 5 类参



(a) 迟滞特性曲线



(b) BTP 比值

图 6 表 1 参数下不同刷丝长度和角度的迟滞特性曲线和 BTP 比值

数计算所得刷式密封在加载和卸载过程中的迟滞特性曲线以及 BTP 模拟值与理论值的比值如图 7 所示。

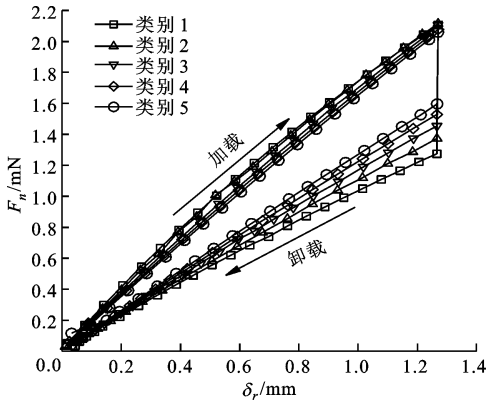
表 2 刷丝长度为 25.4 mm 时的理论计算参数

参数类别	d_b/mm	$\theta_s/^\circ$	$K_r/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	$p_{\text{BT}}/\text{kPa}\cdot\text{mm}^{-1}$
1	0.128	35	1.523	96.9
2	0.136	40	1.523	80.8
3	0.142	45	1.523	67.8
4	0.148	50	1.523	56.9
5	0.153	55	1.523	47.5

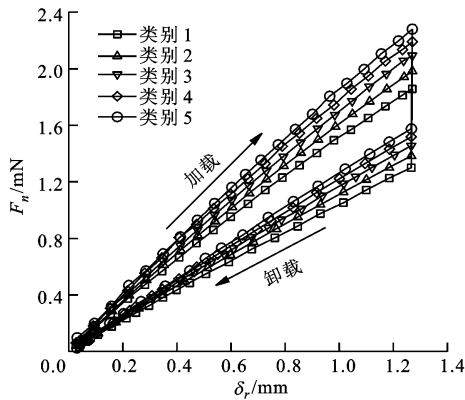
图 7 显现的结果与图 6 的很相近,即在加载和卸载过程中,当刷丝的径向刚度和刷丝长度一定时,随着刷丝的角度和直径的增加,刷丝接触力和 BTP 比值的差值越来越小,表明刷式密封的迟滞特性越来越弱。图 6 与图 7 的不同点在于,前者是刷丝直径

变化,后者是刷丝长度变化. 这说明,当刷丝角度和刷丝径向刚度相同时,刷丝直径和刷丝长度对刷式密封迟滞特性的影响较小.

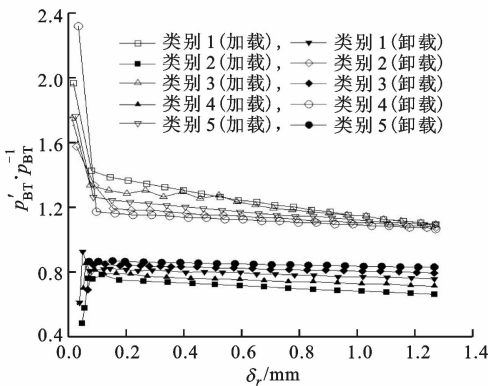
从图 7 中还可以看出,在加载过程中,随着径向位移的增加,不同刷丝角度下的 BTP 比值的差别越来越小. 当径向位移增大到 1.2 mm 左右时,不同刷丝角度下的 BTP 模拟结果与理论结果的比值的差别很小,而在卸载过程中这种差别比较大.



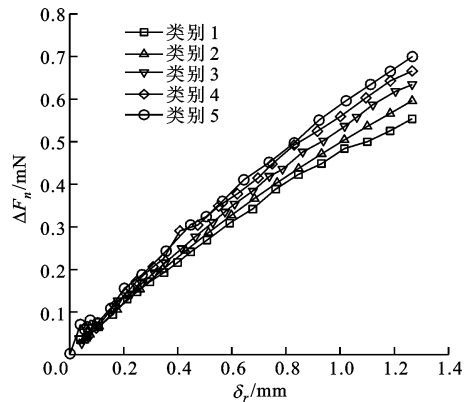
(a)迟滞特性曲线



(a)迟滞特性曲线



(b)BTP 比值



(b)刷丝接触力差值

图 7 表 2 参数下不同刷丝长度和角度的迟滞特性曲线以及 BTP 比值

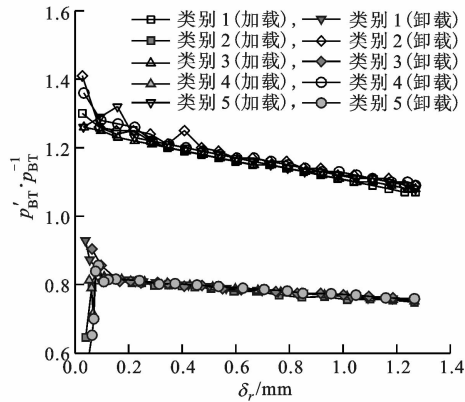
3.3 刷丝的直径和长度对迟滞特性的影响

取刷丝角度 $\theta_s=45^\circ$,按表 3 中的 5 类参数计算所得刷式密封的迟滞特性曲线、接触力差值和 BTP 模拟值与理论值的比值如图 8 所示.

在不同的刷丝长度和直径下,图 8a 不能完全显示刷式密封的迟滞特性差别. 从图 8b 中可知,随着刷丝长度和直径的增加,加载与卸载过程中的接触力差值越来越大,而图 8c 显示,不同直径和长度的刷式密封在径向刚度和刷丝角度相同情况下的

表 3 刷丝角度为 45° 时的理论计算参数

参数类别数	d_b / mm	$\theta_s / (^\circ)$	$K_r / \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	$P_{\text{BTP}} / \text{kPa} \cdot \text{mm}^{-1}$
1	0.128	22.876	1.523	83.6
2	0.136	24.217	1.523	74.6
3	0.142	25.400	1.523	67.8
4	0.148	26.438	1.523	62.6
5	0.153	27.339	1.523	58.5



(c)BTP 比值

图 8 表 3 参数下不同刷式密封的迟滞特性曲线、接触力差值和 BTP 比值

BTP 比值是基本相同的,显然图 8b、图 8c 的结果是冲突的.事实上,图 8b 未考虑刷丝与转子表面的接触面积,因为粗刷丝占据的接触面积比较大,单根刷丝产生的接触力不能有效地反映不同直径刷丝的刷式密封的迟滞特性,而 BTP 比值考虑了刷丝与转子表面的接触面积,故可对不同直径的刷丝进行比较.图 8c 显示,不同刷丝长度和直径的刷式密封迟滞特性大致相同.总结上述分析还可以得出,刷丝径向刚度一定时,刷丝角度是影响刷式密封迟滞特性的主要因素.

4 结 论

本文建立了刷式密封的摩擦数值模型,研究了刷丝径向刚度一定时,刷丝的长度、直径和角度对刷式密封迟滞特性的影响,结论如下.

(1)当刷丝直径不变时,随着刷丝角度的增加、刷丝长度的减小,刷式密封的迟滞特性越来越弱.

(2)当刷丝长度一定时,随着刷丝的角度和直径的增加,刷式密封的迟滞特性越来越弱.如果刷丝角度一定,则不同刷丝直径和长度的刷式密封表现出大致相同的迟滞特性.

(3)当刷丝径向刚度一定时,刷式密封迟滞特性取决于刷丝角度.利用 BTP 模拟结果与理论结果的比值,可以更好地评价刷式密封迟滞特性.

参考文献:

- [1] DINC S, DEMIROGLU M, TURNQUIST N, et al. Fundamental design issues of brush seals for industrial applications[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2002, 124(2): 293-300.
- [2] CHUPP R E, DOWLER C A. Performance characteristics of brush seals for limited-life engines[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1993, 115(2): 390-396.
- [3] HOWELL P D, LATTIMER T R B. Modeling bristle bending in brush seals[J]. Mathematical Engineering in Industry, 1999, 7(3):349-359.
- [4] ZHAO Haifang, STANGO R J. Analytical approach for investigating bristle/backplate hysteresis phenomenon in brush seals[J]. Journal of Propulsion and Power, 2007, 23(2):273-282.

- [5] BASU P, DATTA A, LOEWENTHAL R, et al. Hysteresis and bristle stiffening effects in brush seals [J]. Journal of Propulsion and Power, 1999, 10(4): 569-575.
- [6] CRUDGINGTON P, BOWSHER A, LLOYD D. Bristle angle effects on brush seal contact pressures [C]// Joint Propulsion Conference and Exhibit, Reston, VA, USA; AIAA, 2009: 5168.
- [7] 刘鸿文. 材料力学[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社, 2004:188.
- [8] 陈春新,李军,丰镇平. 刷式密封刷丝束与转子接触力的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(7): 23-27.
CHEN Chunxin, LI Jun, FENG Zhenping. Numerical investigation into bristle-rotor contact force of brush seals[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(7): 23-27.
- [9] DEMIROGLU M, GURSOY M, TICHY J A. An investigation of tip force characteristics of brush seals [C]// Proceedings of GT2007 ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea and Air. New York, USA; ASME, 2007: 1249-1260.
- [10] CRUDGINGTON P F, BOWSHER A. Brush seal pack hysteresis[C]// 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. New York, USA; ASME, 2002: 1-8.

[本刊相关文献链接]

- 迷宫密封泄漏特性的试验研究. 西安交通大学学报, 2011, 45(3):48-52.
- 迷宫密封泄漏对小流量离心叶轮气动性能影响的研究. 西安交通大学学报, 2010, 44(11):23-27.
- 刷式密封刷丝束与转子接触力的数值研究. 西安交通大学学报, 2010, 44(7):23-27.
- 迷宫密封泄漏特性影响因素的研究. 西安交通大学学报, 2010, 44(3):16-20.
- Bulk Flow 方法分析孔型密封转子动力特性的有效性. 西安交通大学学报, 2009, 43(1):24-28.
- 蜂窝面迷宫密封内流动和总温升特性的研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(7):823-827.
- 基于多孔介质模型的刷式密封泄漏流动特性研究. 西安交通大学学报, 2007, 41(7):768-771.

(编辑 苗凌)