

刷式密封摩擦生热温度场数值计算及试验

吴施志¹, 江平^{1,2}, 力宁^{1,2}, 潘君¹, 王智加¹

(1. 中国航空发动机集团有限公司 湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002;

2. 中国航空发动机集团有限公司 直升机传动技术重点实验室, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 在摩擦热热源条件下建立了 CFD 多孔介质数值计算模型,对某型航空发动机刷式密封摩擦生热温度场进行计算分析,开展了刷式密封装置全工况条件下摩擦生热试验研究,采用红外成像技术实现了刷式密封动态温度场实时监测。根据试验结果对摩擦生热温度场计算方法进行了修正,引入了刚度修正系数,并对刚度修正系数进行了确定及验证。总结出经过试验验证的航空发动机刷式密封摩擦生热温度场计算分析及试验方法,结果表明:与全工况试验结果相比,计算误差值从 48.15%减少到 10.67%。

关键词: 刷式密封; 摩擦热; 热流密度; 刷丝刚度; 红外成像

中图分类号: V21; TB42

文献标志码: A

Numerical calculation and experiment on temperature field of friction heat generation of brush seal

WU Shizhi¹, JIANG Ping^{1,2}, LI Ning^{1,2}, PAN Jun¹, WANG Zhijia¹

(1. Hunan Aviation Powerplant Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China;

2. Science and Technology on Helicopter Transmission Laboratory,
Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: A numerical calculation model with CFD porous media with friction heat as heat source was built. The temperature field of friction heat generation of brush seal used in a specific aero engine was analyzed. An experimental study of friction heat generation in brush seal with simulating operating conditions was conducted. A kind of technology using infrared camera was developed to get the real-time dynamic temperature field of brush seal. Experimental data was used to analyze and improve the numerical calculation model of heat generation. Based on these results, a stiffness correction factor was introduced and validated. During this study, a kind of calculation and experimental method validated by the experimental data was summarized, and could be used to analyze the temperature field of heat generation of brush seal in aero engine. Result showed that, by utilizing such methods, the error between calculation result and experimental data from simulated real operating conditions reduced from 48.15% to 10.67%.

Key words: brush seal; friction heat; heat flux; bristle stiffness; infrared imaging

收稿日期:2018-08-03

作者简介:吴施志(1963—),男,研究员,硕士,主要研究方向为航空发动机设计与试验。

通讯作者:力宁(1967—),男,研究员,硕士,主要研究方向为航空发动机密封设计与试验。E-mail:lining-608@163.com

引用格式:吴施志,江平,力宁,等.刷式密封摩擦生热温度场数值计算及试验[J].航空动力学报,2019,34(4):737-743. WU Shizhi, JIANG Ping, LI Ning, et al. Numerical calculation and experiment on temperature field of friction heat generation of brush seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(4): 737-743.

随着新一代航空发动机性能参数的不断提高,对二次流路密封装置的密封性能提出了更高的要求。刷式密封是继篦齿密封之后发展起来的一种流路密封装置,与传统的篦齿密封相比,具有更好的密封性能,因此被认为是代替传统篦齿密封最有效的方式^[1-4]。与篦齿密封不同,刷式密封是一种接触式密封,工作时刷丝与转子之间会发生相对转动,刷丝与转子之间产生剧烈摩擦,大量的摩擦热使转子表面和刷丝温度急剧升高,对刷式密封使用寿命产生重要影响,摩擦热效应是限制刷式密封技术发展的首要难题。

目前国内关于刷式密封摩擦生热的温度场研究主要集中在理论分析和原理性试验方面^[5-9]。由于航空发动机工况复杂且较难模拟,因此较少涉及全工况条件下的试验,理论分析成果尚无法直接应用于工程实际中。随着我国航空发动机用刷式密封由仿制向自主正向设计转变,急需经过试验验证的摩擦生热温度场计算方法来指导刷式密封设计。

1 刷式密封热传递分析

1.1 计算模型

刷式密封主要是由刷环和与之配对的转子跑道组成,是一种接触式密封,其基本结构如图1所示。刷环主要由前后挡板以及中间的刷丝束组成,刷丝束根部与前后挡板通过焊接联结在一起。为保证工作状态下刷丝与转子的接触状态,设计时刷丝束与转子之间存在一定的过盈量,当两者发生相对转动时,刷丝束与转子之间会产生大量的摩擦热,热量使刷丝与转子涂层机械性能下降,从而对刷式密封使用寿命产生重大影响。

依据摩擦力做功原理可得到接触表面的摩擦

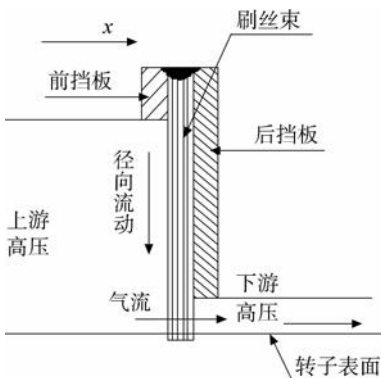


图1 刷式密封结构图

Fig. 1 Diagram of the brush seal

热 Q , 已知刷束接触面积时,可获得传入刷式密封区域摩擦热流密度 q 的计算公式^[10-12]

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{\mu F_n v}{A} = \frac{\gamma_f \cdot \mu K_r \delta_r \cdot v}{A} \quad (1)$$

式中 μ 为摩擦因数; F_n 为刷丝束法向接触力。 v 为转子表面线速度; $\mu K_r \delta_r$ 为由过盈配合引起作用在接触表面的周向摩擦力,其中 K_r 为刷丝束等效法向刚度, δ_r 为刷丝束与转子配合过盈量,即刷丝法向变形量, γ_f 为摩擦力做功转换为摩擦热的比率, A 为刷丝束与转子接触面积。在已知刷式密封结构和摩擦副材料时, K_r 成为影响热流密度和摩擦热的重要因素。

由于刷式密封为周向旋转对称结构,每根刷丝的结构均相同,通常在不考虑气动力引起的刷丝变形和刷丝之间相互作用的前提下将刷丝近似为悬臂梁^[13-14],典型刷丝受力分析如图2所示。其中 y_d 为刷丝端部挠度。

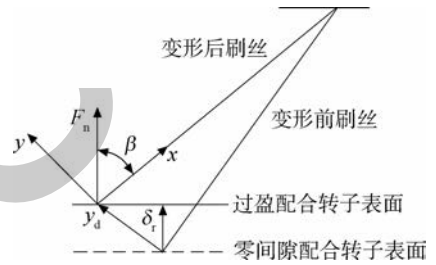


图2 刷丝受力分析图

Fig. 2 Force analysis of bristle

根据图中几何关系得到单根刷丝法向接触力 F_n

$$F_n = \frac{3\pi}{64} \cdot \frac{Ed^4}{L^3 \sin^2 \beta} \delta_r \quad (2)$$

故单根刷丝刚度为

$$k_r = \frac{F_n}{\delta_r} = \frac{3\pi}{64} \cdot \frac{Ed^4}{L^3 \sin^2 \beta} \quad (3)$$

式中 E 为刷丝材料弹性模量, d 为刷丝直径, L 为刷丝自由长度, β 为刷丝排列角度。具有一定厚度的刷丝束的整体刚度 K_r

$$K_r = Nk_r \quad (4)$$

式中 N 为刷丝总根数。综合以上分析可以得到工作状态时传入到刷丝束区域的热流密度,进而计算刷式密封温度场。

1.2 温度场数值计算

刷式密封摩擦生热温度场计算模型根据试验件实际结构建立,试验件结构如图3所示。刷式密封刷丝沿转子旋转方向成一定角度均匀排列,

其沿径向任意截面均相同,故刷式密封可近似为旋转轴对称结构,采用二维轴对称模型进行温度场计算,计算域选取如图 4 所示。其中封严直径 $\Phi=104\text{ mm}$,刷束厚度为 1.2 mm ,刷丝与对象件过盈量为 0.1 mm ,刷丝束区域采用多孔介质模型进行定义^[15],采用经过网格无关性验证的四边形网格对计算域进行离散,进出口均采用压力边界条件,计算工作状态下刷丝束区域的热流密度,并将刷丝束与转子摩擦面近似为环形热源^[16-17]。

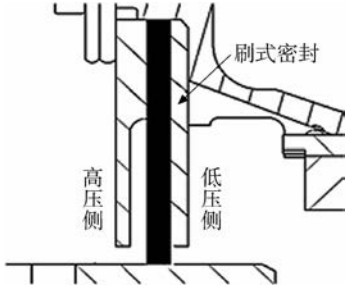


图 3 刷式密封试验件结构图

Fig. 3 Diagram of the experiment brush seal

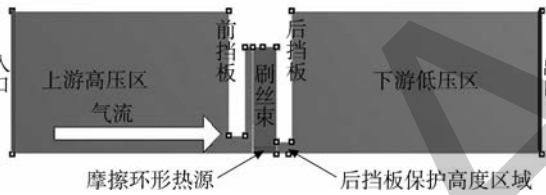


图 4 刷式密封温度场计算域

Fig. 4 Computational domains of the temperature field of the brush seal

计算室温状态下转子转速 n 为 20000 r/min ,刷式密封试验件上下游压差 Δp 分别为 $0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3\text{ MPa}$ 时刷式密封温度场,此时,单根刷丝刚度为 $1.65 \times 10^{-3}\text{ N/mm}$,摩擦面热流密度为 0.16 W/mm^2 ,典型工作状态下刷式密封温度场分布如图 5 和图 6 所示。

提取不同压差时温度场最高温度,绘制最高

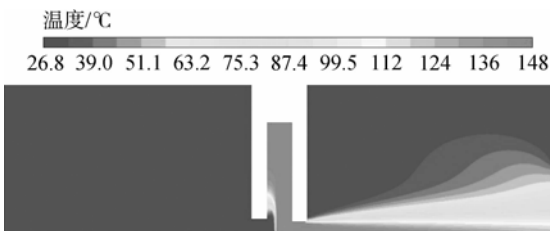


图 5 $\Delta p=0.1\text{ MPa}, n=20000\text{ r/min}$ 时温度场

Fig. 5 Temperature field at $\Delta p=0.1\text{ MPa}, n=20000\text{ r/min}$

温度随压差变化曲线如图 7 所示。

由图 7 可见,转子转速不变时,随着压差的增大,温度场最高温度逐渐降低。这是由于当压差增大时,刷式密封的泄漏量也随之增大,增大的泄漏量会带走更多的摩擦热,起到了冷却的作用。

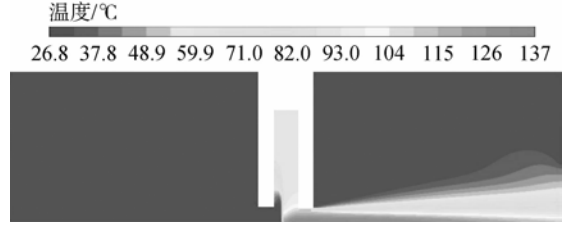


图 6 $\Delta p=0.3\text{ MPa}, n=20000\text{ r/min}$ 时温度场

Fig. 6 Temperature field at $\Delta p=0.3\text{ MPa}, n=20000\text{ r/min}$

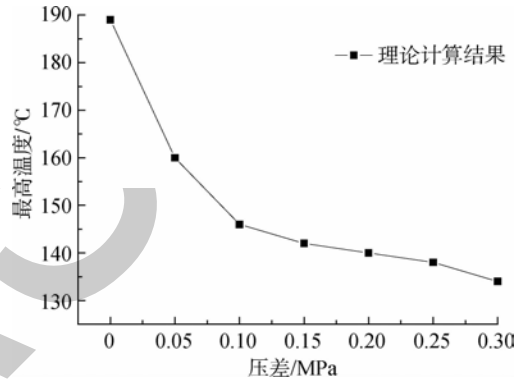


图 7 最高温度随封严压差变化曲线

Fig. 7 Maximum temperature variation curve with seal pressure difference

2 刷式密封温度场试验

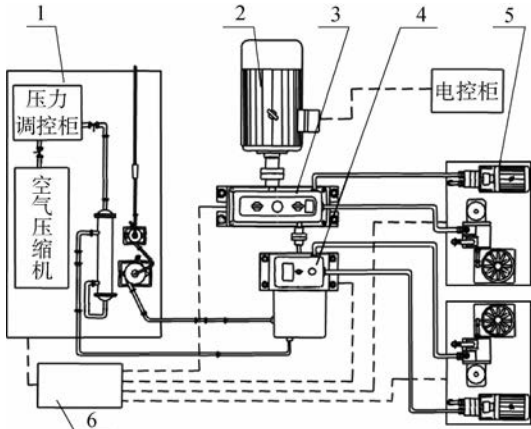
2.1 试验设备及原理

试验在中国航空发动机集团有限公司湖南动力机械研究所密封结构试验台完成,试验台主要由电动机及拖动系统、传动系统、试验台架、润滑系统、空气系统、测试与保护系统等组成,试验台原理图见图 8。试验台由电动机驱动,经传动系统带动转接段旋转轴,运转至试验要求的转速;在进行刷式密封生热特性试验时,空气系统可提供规定温度和压力的气体,模拟密封试验件的工作环境温度及内外压差^[18]。

2.2 试验过程及结果

刷式密封摩擦生热试验转接段如图 9 所示。试验中,当红外成像装置放置于图 9 所示位置一时,可获得不同工况下整个刷式密封动态温度场;

当红外测温装置放置于图 9 所示位置二时,能获得不同工况下刷丝与转子接触表面最高温度。红外成像装置将监测的数据实时传输至数据分析系统,并在计算机上显示刷式密封动态温度场及观测区域内最高温度变化曲线。刷式密封试验件在转接段中安装如图 10 所示。



1 空气系统; 2 电动机及拖动控制系统; 3 传动系统; 4 试验台架; 5 润滑系统; 6 测试与报警保护系统。

图 8 密封结构试验台原理图

Fig. 8 Schematic diagram of the seal structure experiment rig

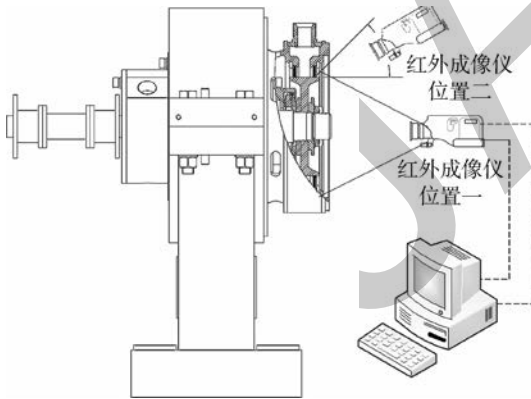


图 9 刷式密封动态温度场测量转接段示意图

Fig. 9 Diagram of transfer equipment of dynamic temperature field measurement of the brush seal

本次试验分别在 $n = 20\,000, 30\,000$ r/min 转速时测量了在 $0 \sim 0.3$ MPa 压差区间下刷式密封与对象件之间的温度场分布,部分试验结果见图 11~12。

观察刷式密封温度场可以发现,刷丝与转子表面摩擦产生的环形热源在温度场中表现为环形亮带。以此亮带为中心,刷式密封温度场沿径向向

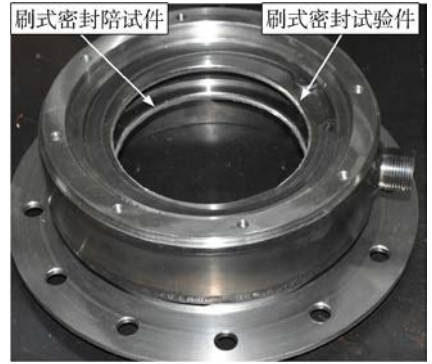


图 10 刷式密封试验件安装图

Fig. 10 Installation map of experiment piece of the brush seal

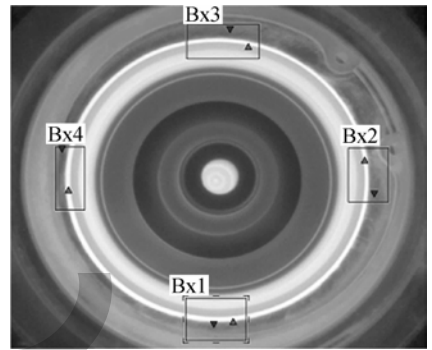


图 11 $\Delta p = 0$ MPa, $n = 20\,000$ r/min 时等温线分布
Fig. 11 Isothermal line distribution at $\Delta p = 0$ MPa, $n = 20\,000$ r/min

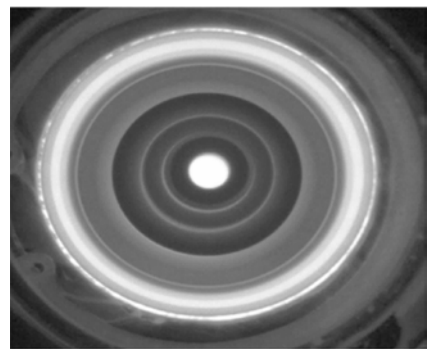


图 12 $\Delta p = 0.2$ MPa, $n = 30\,000$ r/min 时等温线分布
Fig. 12 Isothermal line distribution at $\Delta p = 0.2$ MPa, $n = 30\,000$ r/min

向外侧递减,即工作状态下刷式密封最高温度出现在刷丝与转子接触面处。

刷式密封结构中最高温度 t_{max} 一直是关注的焦点,它不仅影响了材料的使用性能,还影响了密封装置的使用寿命。取温度场中均匀分布的 4 个象限点区域为观测范围,如图 11 中所示 4 个矩形

区域,从最下方区域沿逆时针依次记为 Bx1、Bx2、Bx3 和 Bx4,取整个试验过程中 4 个区域内最高温度值为衡量指标,全工况条件下刷式密封动态温度场最高温度随试验时间变化关系如图 13 和图 14 所示。

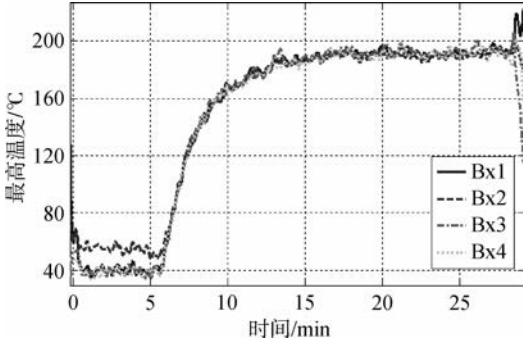


图 13 $\Delta p=0.2 \text{ MPa}, n=20000 \text{ r/min}$ 时最高温度变化曲线

Fig. 13 Maximum temperature variation curve at $\Delta p=0.2 \text{ MPa}, n=20000 \text{ r/min}$

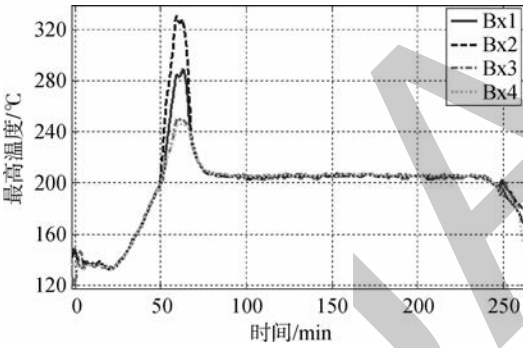


图 14 $\Delta p=0.3 \text{ MPa}, n=30000 \text{ r/min}$ 时最高温度变化曲线

Fig. 14 Maximum temperature variation curve at $\Delta p=0.3 \text{ MPa}, n=30000 \text{ r/min}$

观察刷式密封最高温度随试验时间变化曲线,摩擦热不断积聚,刷丝端部温度不断升高,随着试验的进行,最终与环境达到热平衡,此后, t_{\max} 稳定在某一温度值附近并作小范围的波动。

提取最高温度试验结果数据,绘制 $n=20000 \text{ r/min}$ 时、刷式密封最高温度随封严压差变化曲线。将试验结果与文中第 1.2 节计算结果对比,如图 15 所示。

由图 15 可见,实际试验测量结果远大于理论计算结果,计算结果与试验结果最大误差为 48.15%。可见利用文中第 1.2 节热分析对刷式密封温度场计算并不能指导工程应用。

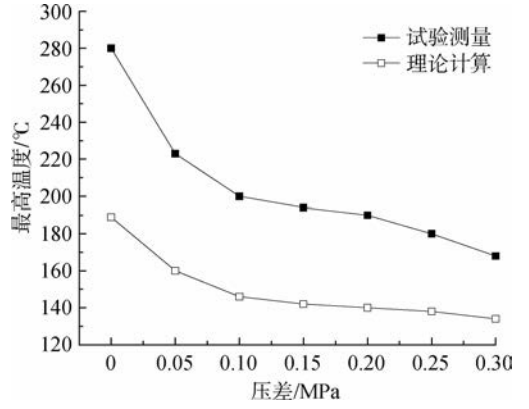


图 15 最高温度随封严压差变化试验与理论曲线

Fig. 15 Maximum temperature variation curve with seal pressure difference of experiment and theory

3 刚度修正系数 C_k 确定及验证

刷式密封工作时,在上下游压差的作用下刷丝被紧紧压在后挡板上。随着压差的变化,刷丝束被压紧的程度也随之改变,此时,刷丝间相互作用和刷丝与后挡板摩擦力的改变又引起刷丝束刚度发生变化。因此,刷丝束的整体刚度并非单根刷丝刚度的线性叠加,对于式(4),在计算刷丝束整体刚度时,需引入随压差变化的刚度修正系数 C_k 。故刷丝束整体刚度如下式所示:

$$K_r = C_k N k_r \quad (5)$$

式中 C_k 为刚度修正系数。

本文以温度场试验测量结果为依据,对比文中第 1.2 节最高温度计算值,对式(2)中刷束刚度 K_r 进行修正,即找出不同压差与刷式密封刚度修正系数 C_k 之间的关系,并对 C_k 的表达式进行拟合,其拟合图像如图 16 所示。

C_k 拟合表达式为

$$C_k = 70\Delta p^2 - 40.64\Delta p + 15.8 \quad (6)$$

用引入刚度修正系数 C_k 修正之后的模型再

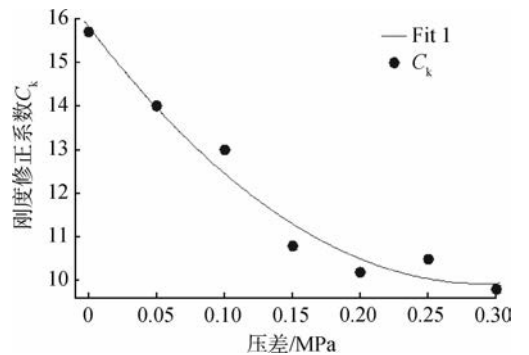


图 16 刚度修正系数 C_k 拟合曲线

Fig. 16 Fitting curve of stiffness correction factor C_k

次计算 $n=20\,000\text{ r/min}$ 时刷式密封温度场最高温度,同时利用修正后的计算模型预测转子转速 $n=30\,000\text{ r/min}$ 时的温度场最高温度,并将两者计算结果与试验结果对比。计算结果与试验结果对比曲线如图 17 所示,可以看出采用拟合后的 C_k 值对模型进行修正是有效的,所得到的结果与试验结果可以较好地吻合,计算结果与试验结果最大误差为 10.67%。

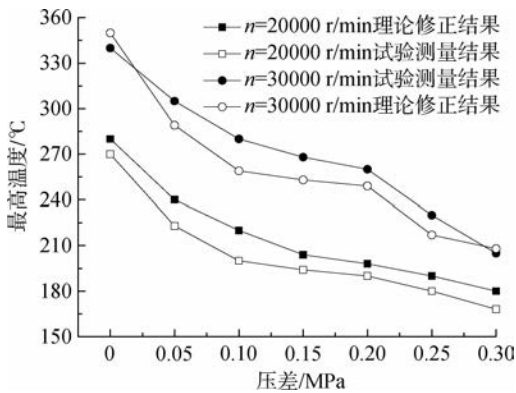


图 17 修正后的计算结果与试验结果对比曲线

Fig. 17 Comparison curve between the revised calculation results and the experiment results

4 结 论

本文采用多孔介质模型对某型航空发动机刷式密封摩擦生热效应进行计算和分析,结合全工况试验测量结果,引入了刚度修正系数 C_k ,利用拟合后的 C_k 值对计算方法进行了修正。修正后的温度场计算结果能与试验结果较好地吻合,计算误差值从 48.15% 减少到 10.67%,提高了工程计算精度。另外,针对刷式密封装置开展了工况条件下摩擦生热试验研究,工况条件下的试验数据不仅能对刷式密封温度场计算方法进行完善,还能作为刷式密封刷丝和转子表面涂层的选材依据,对航空发动机刷式密封的正向设计具有指导意义。

参考文献:

[1] 郭霖,康宁.低泄漏高寿命刷式封严的实验研究[J].航空动力学报,2003,18(4):485-487.
GUO Lin,KANG Ning. Experimental study of low leakage and high endurance brush seals[J]. Journal of Aerospace Power,2003,18(4):485-487. (in Chinese)

[2] 谢晓俊,康宁.低泄漏高寿命刷式封严的数值计算[J].航空动力学报,2003,18(6):824-826.
XIE Xiaojun,KANG Ning. Numerical computation of low leakage and high endurance brush seal[J]. Journal of Aer-

ospace Power,2003,18(6):824-826. (in Chinese)

[3] 王之栋,王宗根.航空发动机刷密封技术发展展望[J].润滑与密封,2005,171(5):203-205,209.
WANG Zhili,WANG Zonggen. Development and prospect of brush seal in aero-engine[J]. Lubrication Engineering,2005,171(5):203-205,209. (in Chinese)

[4] 邱波,李军,丰镇平.考虑刷丝变形的刷式密封摩擦热效应研究[J].工程热物理论,2013,33(1):2030-2034.
QIU Bo,LI Jun,FENG Zhenping. Investigations on frictional heat generation of brush seals with consideration of bristle deflections[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2013,33(1):2030-2034. (in Chinese)

[5] 邱波,李军,陈春新,等.基于CFD和FEM方法的刷式密封传热特性研究[J].工程热物理论,2012,32(12):2067-2071.
QIU Bo,LI Jun,CHEN Chunxin, et al. Investigations on the heat transfer characteristics of brush seals based on computational fluid dynamics and finite element analysis [J]. Journal of Engineering Thermophysics,2012,32(12):2067-2071. (in Chinese)

[6] RUGGIERO E, ALLEN J, DEMIROGLU M, et al. Heat generation characteristics of a Kevlar fiber brush seal[R]. AIAA-2007-5738,2007.

[7] 曹广州,吉洪湖,纪国剑,等.刷式密封初期使用特性的实验和数值研究[J].推进技术,2010,31(4):478-482,489.
CAO Guangzhou,JI Honghu,JI Guojian. Experimental and numerical study on the leakage characteristics of brush seals at the early stage of operating[J]. Journal of Propulsion Technology,2010,31(4):478-482,489. (in Chinese)

[8] 阳虹,杨建道,李军,等.刷式密封技术及其在汽轮机优化设计中的应用[J].动力工程,2009,29(8):737-742,764.
YANG Hong,YANG Jiandao,LI Jun, et al. Research of the brush seal technique and its application in steam turbine optimization design[J]. Journal of Power Engineering,2009,29(8):737-742,764. (in Chinese)

[9] 邱波,李军.刷式密封流动与换热及力学特性的研究进展[J].热力透平,2013,42(3):141-149.
QIU Bo,LI Jun. A review of flow and heat transfer, mechanical characteristics of brush seals[J]. Thermal Turbine,2013,42(3):141-149. (in Chinese)

[10] HENDRICKS R C, SCHLUMBERGER S, BRAUN M J, et al. A bulk flow model of a brush seal system[R]. ASME Paper 91-GT-325,1991.

[11] DOGU Y, AKSIT M F. Brush seal temperature distribution analysis[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2006,128(3):599-609.

[12] CHEW J W, LAPWORTH B L, MILLENER P J. Mathematical modeling of brush seals[J]. International Journal of Heat Fluid Flow,1995,16(6):493-500.

[13] 刘占生,叶建槐.刷式密封接触动力学特性研究[J].航空动力学报,2002,17(5):635-640.
LIU Zhansheng, YE Jianhui. Research on structural dynamic characteristics of brush seals[J]. Journal of Aero-

- space Power, 2002, 17(5): 635-640. (in Chinese)
- [14] 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. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 邱波, 李军. 刷式密封传热特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(9): 94-100.
QIU Bo, LI Jun. Investigation on the heat transfer characteristics of brush seals [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(9): 94-100. (in Chinese)
- [17] DEMIROGLU M, TICHY J A. An investigation of heat generation characteristics of brush seals [R]. ASME Paper GT2007-28043, 2007.
- [18] 力宁, 彭最花, 贺玲, 等. 航空发动机高温高速密封试验台研制[J]. 润滑与密封, 2014, 39(6): 121-123.
LI Ning, PENG Zuihua, HE Ling, et al. Development of high-temperature and high-speed seal test rig of aeroengine [J]. Lubrication Engineering, 2014, 39(6): 121-123. (in Chinese)

(编辑: 王碧琚)