# 指尖密封泄漏特性数值计算与试验研究\*

胡廷勋,周 坤,力 宁,潘 君

(中国航发湖南动力机械研究所,湖南株洲 412002)

摘 要:为了研究不同压差和转速下指尖密封的泄漏特性,建立了CFD多孔介质数值计算模型,计 算分析了某型航空发动机指尖密封泄漏特性。为有效验证数值计算模型的有效性,进行了一定压差、转 速工况下指尖密封泄漏特性试验。针对压差和转子离心膨胀导致的多孔介质参数改变,根据试验结果对 计算方法进行了分析,引入了压差修正系数 C<sub>k</sub>和离心膨胀修正系数 k,并对修正系数进行了确定及验 证。结果表明,未引入压差修正系数 C<sub>k</sub>和离心膨胀修正系数 k时,计算得到的指尖密封泄漏特性与试验 值会随着压差和转速的增加而偏离;引入压差修正系数 C<sub>k</sub>和离心膨胀修正系数 k后,计算结果与试验值 一致,未随着压差和转速的增加而偏离,最大偏差小于11%,平均偏差小于6%。

关键词: 航空发动机; 指尖密封; 泄漏特性; 数值计算; 试验 中图分类号: TB42 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2020) 05-1089-08 DOI: 10.13675/j.cnki. tijs. 190268

# Numerical Calculation and Experimental Study on Leakage Characteristic of Finger Seal

HU Ting-xun, ZHOU Kun, LI Ning, PAN Jun

(AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

**Abstract:** To study the leakage characteristic of finger seal under differential pressure and rotational speed, a numerical calculation model with CFD porous media was built in this paper. The leakage characteristic of finger seal used in a specific aero engine was analyzed. To verify the numerical calculation model, an experimental study of leakage characteristic of finger seal under simulating certain differential pressure and rotational speed was developed. To study variations of porous media parameters caused by differential pressure and centrifugal expansion of rotor, the calculation method was analyzed based on the experimental results, correction factor  $C_k$  for differential pressure and correction factor k for centrifugal expansion, calculated leakage characteristic of finger seal deviate from the experimental values with the increase of differential pressure and rotational speed. While introducing correction factor k for centrifugal expansion, the calculated results are in agreement with the experimental results, and do not deviate from the experimental results with the increase of differential pressure and rotational speed, the maximum deviation is less than 11%, and the average deviation is less than 6%.

Key words: Aero engine; Finger seal; Leakage characteristic; Numerical calculation; Experiment

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2019-04-29;修订日期: 2019-06-28。

作者简介:胡廷勋,硕士,工程师,研究领域为航空发动机密封设计与试验。E-mail: 15285596534@163.com

通讯作者:周 坤,硕士,高级工程师,研究领域为航空发动机密封设计与试验。E-mail: zk5891@126.com

引用格式: 胡廷勋,周 坤,力 宁,等. 指尖密封泄漏特性数值计算与试验研究[J]. 推进技术, 2020, 41(5):1089–1096. (HU Ting-xun, ZHOU Kun, LI Ning, et al. Numerical Calculation and Experimental Study on Leakage Characteristic of Finger Seal[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(5):1089–1096.)

## 1 引 言

指尖密封是一种新型柔性密封技术,可用于航 空发动机二次流路及轴承腔密封<sup>[1]</sup>。与传统的篦齿 密封相比,指尖密封泄漏量下降约30%~50%;在航空 发动机中用指尖密封替换篦齿密封,能有效降低航 空发动的燃油消耗1%以上,降低0.5%以上的运行成 本<sup>[2]</sup>。相比于刷式密封,在密封性能相当的情况下指 尖密封的制造成本仅为刷式密封的40%~50%;而且 可以有效避免刷丝断丝对发动机造成的损害<sup>[3-4]</sup>。正 因为相比于篦齿、刷式密封而具有良好的综合性能, 近年来指尖密封逐渐成为国内外学者的研究热点。

泄漏和磨损是指尖密封的两个重要性能指标<sup>[5]</sup>, 张延超等<sup>[6]</sup>应用 Nash 平衡优化方法研究了不同偏好 要求下密封泄漏率和磨损率的综合评判理论。指尖 密封的研究手段主要是数值计算和试验研究<sup>[7]</sup>。在 数值计算方面,王旭等<sup>[8]</sup>研究了与跑道存在一定间隙 的指尖密封在不同压差下的泄漏特性。张海等<sup>[9]</sup>、郎 达学等<sup>[10]</sup>研究了指尖靴部结构对泄漏特性的影响。 王喜春等<sup>[11]</sup>研究了周向收敛型动压式指尖密封结构 参数对泄漏率的影响。张延超等<sup>[12]</sup>研究了转子旋转 引起转子不平衡力和转子跳动时指尖密封的泄漏特 性。王莉娜等<sup>[13]</sup>研究了泄漏间隙有压流体作用对指 尖密封泄漏特性的影响。白花蕾等<sup>[14]</sup>采用多孔介质 模型分析了指尖密封 1/4环片的泄漏特性。

在试验研究方面,白花蕾等<sup>[15]</sup>采用1/4环片测试 了一定转速下不同间隙指尖密封的泄漏特性。杜春 华等<sup>[7]</sup>测试了指尖密封在间隙、过渡、过盈3种配合 状态下转子轴心轨迹对泄漏特性的影响。周坤等<sup>[16]</sup> 通过试验对比了指尖密封与刷式密封的泄漏特性。

目前国内外学者关于指尖密封泄漏特性试验研 究较少,不便于对计算方法进行直接验证。本文采 用数值模拟与试验研究相结合的方法,研究了某型 航空发动机指尖密封在一定压差、转速工况下的泄 漏特性,并总结出了经过试验验证的泄漏特性计算 方法,为指尖密封的设计提供参考。

## 2 指尖密封数值计算

## 2.1 指尖密封结构简介

指尖密封和与之配对的转子跑道形成主密封 面,是一种接触式密封<sup>[17-18]</sup>,其基本结构如图1所示。 指尖密封由前挡板、后挡板和指尖片等组成,前挡 板、后挡板和指尖片通过螺钉连接。



Fig. 1 Schematic diagram of finger seal

#### 2.2 指尖密封数值计算的数学模型

把泄漏气体作为理想可压缩气体,描述气体流场的控制方程为<sup>[19]</sup>

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \boldsymbol{\nu} \cdot \nabla \rho + \rho \nabla \cdot \boldsymbol{\nu} = 0 \\ \rho \frac{\partial \boldsymbol{\nu}}{\partial t} = \rho f + \nabla \cdot \left( \sigma_{ij} \boldsymbol{\sigma}_{i} \boldsymbol{\sigma}_{j} \right) \\ \frac{\partial \left( e + \frac{\boldsymbol{\nu}^{2}}{2} \right)}{\partial t} + \boldsymbol{\nu} \cdot \nabla \left( e + \frac{\boldsymbol{\nu}^{2}}{2} \right) = \\ f \cdot \boldsymbol{\nu} + \dot{q} + \frac{\lambda}{\rho} \cdot \Delta T + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \left( \boldsymbol{\nu} \cdot \boldsymbol{\sigma}_{ij} \boldsymbol{\sigma}_{i} \boldsymbol{\sigma}_{j} \right) \end{cases}$$
(1)

式中 $\rho$ 为气体密度,t为时间, $\nu$ 为速度矢量, $\sigma_{ij}$ 为 应力张量的分量, $\sigma_{i}$ , $\sigma_{j}$ 为单位应力分量,f为体积力 分量,e为内能,q是流体微团单位质量内的生热量, $\lambda$ 是傅里叶导热系数, $\Delta T$ 为温度梯度。

空气为牛顿型流体,其本构方程为

$$\begin{cases} P_{ij} = -p_i \delta_{ij} + 2\mu \left( S_{ij} - \frac{1}{3} S_{kk} \delta_{ij} \right) \\ S_{kk} = S_{11} + S_{22} + S_{33} \end{cases}$$
(2)

式中 $P_{ij}$ 为粘性应力张量, $\delta_{ij}$ 为应力的各向同性 部分, $p_i$ 为热力学压强, $\mu$ 为粘性系数, $S_{ij}$ 为变形率 张量。

理想气体的状态方程为

$$pV = n_{\rm w}RT \tag{3}$$

式中*p*为气体压强,*V*为体积,*n*<sub>\*</sub>为物质的量,*R* 为理想气体常数,*T*为温度。

在实际工作中,若干层指尖片交错排列,其内部 的流动难以模拟。根据指尖密封的实际结构,为计 算各指尖片间间隙导致的泄漏量,本文采用多孔介 质模型模拟指尖片区域。多孔介质的损失项为<sup>[20]</sup>

$$\eta_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha}\boldsymbol{\nu} + \frac{1}{2}C_2\rho|\boldsymbol{\nu}|\boldsymbol{\nu}\right)$$
(4)

式中η,为多孔介质附加的动量源项,等号右边

第1项为粘性损失项,第2项为惯性损失项。μ为粘 性系数,ρ为气体密度,ν为速度矢量,1/α为多孔介质 的粘性损失系数,C<sub>2</sub>为多孔介质的惯性损失系数。 多孔介质的粘性损失系数和惯性损失系数可以通过 如下公式计算

$$\begin{cases} \frac{1}{\alpha} = 5m\frac{\kappa^2}{\varepsilon^3} \\ C_2 = \frac{n}{8} \cdot \frac{\kappa}{\varepsilon^3} \end{cases}$$
(5)

式中*ε*为孔隙率, κ为单位体积的润湿面积, *m*和 *n*为系数。

 $\varepsilon,\kappa$ 的计算公式为

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{V_{\rm e} \cdot N}{V_{\rm f}} \\ \kappa = \frac{\kappa_{\rm f} \cdot N}{V_{\rm f}} \end{cases}$$
(6)

式中*V*。为单个指尖片上两个指尖梁之间的间隙,*N*为单个指尖片的间隙个数,*V*<sub>f</sub>为单个指尖片的体积,*κ*<sub>f</sub>为单个指尖梁的表面积。指尖片结构示意图如图2所示。

m,n的求解过程参照文献[14]。



Fig. 2 Structural sketch of finger element

#### 2.3 指尖密封静态泄漏特性数值计算

指尖密封静态泄漏特性即指尖密封跑道无转动 时的泄漏特性。根据指尖密封实际工作情况,建立 计算模型如图3所示,从左到右分别为高压区、多孔 介质(指尖片)、低压区。多孔介质区域的宽度为 3mm,内径为φ130.9mm,外径为φ162.4mm。初始边 界条件为:出口(Outlet)压力始终为0.1MPa,进口(Inlet)压力根据实际压差设置,多孔介质与高压区、低 压区的边界设置为接触区域,其余边界设置为壁面。

指尖密封试验件上下游压差  $\Delta p$  分别为 0.02MPa, 0.04MPa, ...., 0.40MPa时(每次间隔 0.02MPa), 计算 指尖密封的泄漏量(即计算稳定后出口的流量),并 得到稳定后压力、速度等物理量的云图。

计算得到的0.02MPa, 0.2MPa, 0.4MPa压差下指



尖密封的压力云图如图 4 所示,0.02MPa,0.2MPa, 0.4MPa压差下指尖密封的速度云图如图 5 所示。从 压力云图和速度云图可以看到,随着指尖密封前后 压差的增大,整个压力场和速度场云图梯度的变化 规律基本一致,数值不断增大。0.02MPa,0.2MPa, 0.4MPa时流场的进口压力和出口压力与初始值一 致,多孔介质区域的压力出现明显的梯度变化。 0.02MPa,0.2MPa,0.4MPa时最大速度分别为1.70m/s, 5.97m/s和8.71m/s,指尖密封靠近轴的区域出现明显 的速度梯度,前挡板与指尖片的间隙以及指尖片远 离轴的区域基本无流动。

计算得到密封跑道无转速时指尖密封泄漏量随着压差变化的曲线如图6所示。从图6可以看出,随着压差增大,指尖密封泄漏量不断增大。当压差从0.02MPa增加到0.4MPa时,泄漏量由4.27g/s增加到23.58g/s。由于压差会导致指尖密封内部结构变化, 泄漏量并非随压差线性增长。

#### 2.4 指尖密封动态泄漏特性数值计算

指尖密封动态泄漏特性为指尖密封跑道有一定 转速时的泄漏特性。指尖密封动态泄漏特性计算模 型与静态泄漏模型相似,见图3。

计算得到的5kr/min,20kr/min和26kr/min转速下 指尖密封泄漏量随着压差变化的曲线如图7所示。 从图7可以看出,相同压差情况下,指尖密封泄漏量 随着转速的升高而减小。密封跑道随着转速的增加 离心膨胀量增大,指尖梁与密封跑道的过盈量增加, 从而使指尖梁之间空隙减小,泄漏量减小。计算得 到指尖密封在0.02MPa~0.4MPa压差下,密封跑道转



速为5kr/min,20kr/min和26kr/min时的泄漏量分别相 对静态时下降5.3%,11.6%和17.8%。

## 3 指尖密封泄漏特性试验研究

## 3.1 试验设备及原理

试验在密封结构试验台<sup>[21]</sup>完成,试验台主要由 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。试验器由电机驱动,经 传动系统带动试验台架中的旋转轴,运转至试验要 求的转速。在进行气体密封静、动态试验时,空气系 统能按试验技术要求提供高温、高压气体,来模拟密 封试验件的内外压差及工作环境温度。指尖密封实 物图如图9所示。

#### 3.2 试验过程及结果

试验转接段如图 10 所示。静态泄漏试验和动态 泄漏试验的最高压差为 0.4 MPa, 动态泄漏试验的最 高转速为 26kr/min。

为更好地评价不同压差下指尖密封的密封性能,引入密封泄漏参数 **Φ**<sub>2</sub>。计算公式为<sup>[16]</sup>

$$\Phi_2 = \frac{W\sqrt{T_u}}{D_j p_u} \tag{7}$$

1093



Fig. 8 Schematic diagram of the seal tester



Fig. 9 Outside view of finger seal



Fig. 10 Diagram of transfer equipment of finger seal

式中W为质量泄漏量,kg/s; $T_u$ 为上游气体总温, K; $p_u$ 为上游气体总压,MPa; $D_j$ 为跑道外径,mm。

设不同压差下动态泄漏试验相对静态泄漏试验 的泄漏量变化为*R*<sub>a</sub>,即

$$R_{\rm d} = \frac{L_{\rm d} - L_{\rm s}}{L_{\rm s}} \tag{8}$$

式中L<sub>d</sub>为一定转速和压差下的动态泄漏量,L<sub>s</sub>相

同压差下的静态泄漏量。

试验得到的不同压差和转速条件下指尖密封的 泄漏量如图 11 所示。图 12 为不同转速下 R<sub>4</sub> 随着压 差的变化情况。不同压差和转速条件下指尖密封的 泄漏参数如图 13 所示。



Fig. 11 Leakage of finger seal (Experiments)



dynamic and static experiments



Fig. 13 Leakage characteristic curve of finger seal

从图 11,12 和 13 可以看出,室温状态时,随着压差的增大,指尖密封的泄漏量不断增大,泄漏量与压差基本成正比,密封泄漏参数  $\Phi_2$ 先增加后基本保持不变。在室温工况下,压差为 0.02 ~ 0.4MPa,转速为 5~26kr/min时,气体泄漏量为 3.43 ~ 22.36g/s,泄漏参数  $\Phi_2$ 为 0.00423 ~ 0.00690kg· $\sqrt{K}$ ·mm/(N·s)。在相同压差情况下,指尖密封的泄漏量和泄漏参数随着转速的增加而减小。5kr/min,20kr/min和 26kr/min时泄漏量相对静态时平均下降 6.66%,11.70%和 17.41%,转速对指尖密封的泄漏量有着明显的影响。

## 4 压差、离心膨胀修正系数的确定及验证

指尖密封工作时两侧的压差较高时,压差导致 的指尖片压紧及形变会使多孔介质的粘性阻力系数 和惯性阻力系数发生改变,如不进行修正,计算模型 计算得到的结果与本文的试验结果存在比较大的 偏差。

引入压差修正系数 C<sub>k</sub>,修正公式(5)中多孔介质的粘性损失系数和惯性损失系数,采用指数函数表达,即

$$C_k = A_0 \cdot \left(\Delta p\right)^{B_0} + C_0 \tag{9}$$

将 0.02MPa, 0.2MPa 和 0.3MPa 时的试验数据代 入求解待定系数 $A_0$ ,  $B_0$ 和 $C_0$ , 得到本文中指尖密封试 验件计算模型中多孔介质参数随压差变化的修正系 数 $C_k$ 的计算公式为

$$C_{k} = 5.59 \cdot (\Delta p)^{0.44} + 0.06$$

$$(\Delta p \ge 0.02 \text{MPa})$$
(10)

式中 $\Delta p$ 为指尖密封前后的压差,单位为MPa。

压差修正系数 C<sub>k</sub>修正前后计算得到的指尖密封 静态泄漏量,与试验结果对比曲线如图 14 所示。未 引入压差修正系数 C<sub>k</sub>时,数值计算结果与试验结果 在压差<0.04MPa时比较吻合,随着压差增大,数值计 算结果与实际试验测量结果不断偏离,在压差 ≥0.06MPa后,数值计算结果与实际试验测量结果的 偏差超过20%,数值计算对工程设计已无指导意义。 采用压差修正系数*C*<sub>k</sub>值对模型进行修正后,所得到 的结果与试验结果可以较好地吻合,数值计算结果 与试验结果的最小偏差为-0.38%,最大偏差为 10.67%,数值计算结果与试验结果的平均偏差仅为 5.23%,数值计算结果始终在试验结果附近波动,没 有随着压差的增大而偏离。



Fig. 14 Comparison among the unrevised results, the revised results and the experimental results

指尖密封为接触式密封,计算动态泄漏量时,由 于转子的离心膨胀,导致指尖片间结构发生变化,相 同压差下的泄漏量与静态时有着明显的区别,需要 对多孔介质参数进行修正。

分别计算 5kr/min,15kr/min,20kr/min,24kr/min和 26kr/min时转子的离心膨胀量,如表1所示。5kr/min 和 26kr/min时转子的位移云图如图 15 和图 16 所示。 可以看到,转子在 26kr/min时的最大位移仅为 8.05μm,相对流场尺寸而言很微小,指尖密封动态泄 漏特性数值计算中忽略流场尺寸改变的影响,主要 考虑转子离心膨胀导致的多孔介质参数改变。

Table1 Centrifugal expansion at different rotational speed

Rotational speed/(kr/min)	Centrifugal expansion/µm
5	0.298
15	2.680
20	4.760
24	7.040
26	8.050

获得不同转速下转子与指尖密封配合面的径向 位移后,引入离心膨胀修正系数k,修正公式(5)中多 孔介质的粘性损失系数和惯性损失系数,采用指数 函数表达,即:

$$k = A_1 + B_1 \cdot \theta^{C_1} \tag{11}$$

将压差为0.3MPa,转速分别为5kr/min,15kr/min 和20kr/min时的试验数据代入求解待定系数 $A_1, B_1$ 和  $C_1$ ,得到在转速大于或等于5kr/min时,离心膨胀修正 系数k的值为:

$$k = 1.058 + 115.53 \cdot \theta^{1.35} \tag{12}$$

式中 $\theta$ 为转子配合面的径向位移,单位为mm。

在转子转速为24kr/min时,不同压差下引入离心 膨胀修正系数 k前后计算得到的泄漏量曲线以及试 验得到的泄漏量曲线,如图 17所示。引入离心膨胀 修正系数 k前,计算结果与试验结果的最小偏差为 18.1%,最大偏差为 30.5%,平均偏差为24.5%。引入 离心膨胀修正系数 k后,计算结果与试验结果的最小 偏差为-0.4%,最大偏差为 8.8%,平均偏差为4.0%。

引入压差修正系数 $C_k$ 以及离心膨胀修正系数k计算得到的静态5kr/min,15kr/min,20kr/min,24kr/min和



0.2980

Centrifugal expansion/µm 0.0000





Centrifugal expansion/m 0.000 0.179×10<sup>-5</sup> 0.358×10<sup>-5</sup> 0.536×10<sup>-5</sup> 0.805×10<sup>-5</sup>





Fig. 17 Comparisons of the calculated results before and after correction

26kr/min时密封泄漏量与试验测量结果的偏差如图 18所示。经过修正后,5kr/min,15kr/min,20kr/min, 24kr/min和26kr/min时的泄漏量计算值与试验值的 偏差在-2.28%~10.11%,平均偏差为5.6%,数值计算 结果始终在试验结果附近波动,没有随着压差和转 速的变化而偏离。



Fig. 18 Deviation between the corrected calculation results and the experimental results

# 5 结 论

通过本文的研究,得到如下结论:

(1)本文采用多孔介质模型对某型航空发动机 指尖密封泄漏特性进行计算和分析,结合试验测量 结果,引入了压差修正系数*C*<sub>k</sub>,利用*C*<sub>k</sub>值对压差引起 的多孔介质参数变化进行修正。其他条件不变,引 入了压差修正系数*C*<sub>k</sub>后,静态泄漏量的计算值与试 验值的最大偏差由 20% 以上下降到 10.67%。

(2)在指尖密封动态泄漏特性的计算中,引入了 离心膨胀修正系数k,修正由于转子离心膨胀导致的 多孔介质参数变化。其他条件不变,引入了离心膨 胀修正系数k后,动态泄漏量的计算值与试验值的最 大偏差由 30.5% 下降到 8.8%,平均偏差仅为 5.6%。 修正后的泄漏量计算结果能与试验结果较好地吻 合,能够通过数值计算预测该指尖密封试验件泄漏 特性随着压差、转速的变化规律。

#### 参考文献

- Gibson N E, Takeuchi D. Second Generation Air-to-Air
   Mechanical Seal Design and Performance [R]. AIAA 2011-5636.
- [2] Proctor M P, Kumar A, Delgdo I R. High-Speed, High-Temperature Finger Seal Test Result [R]. NASA TM-2002-211589, 2004.
- [3] Arora G K, Proctor M P, Steinetzeta B M, et al. Pressure Balanced, Low Hysteresis, Finger Seal Test Results

[R]. NASA/TM-1999-209191: 1~9.

- [4] Delgado I R, Proctor M P. Continued Investigation of Leakage and Power Loss Test Results for Competing Turbine Engine Seals[R]. AIAA 2006-4754.
- [5] 张延超,刘 凯,胡海涛,等.基于有限元仿真的指 尖密封准动态性能分析方法[J].推进技术,2016,37 (12):2352-2358. (ZHANG Yan-chao, LIU Kai, HU Hai-tao, et al. Quasi-Dynamic Performances Analysis of Finger Seal Based on Finite Element Simulation [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(12):2352-2358.)
- [6] 张延超,陈国定,申晓龙.指尖密封性能的模糊 Nash 平衡优化[J]. 航空动力学报,2010,25(1):228-233.
- [7] 杜春华,吉洪湖,胡娅萍,等.指尖封严的转子轴心 轨迹与泄漏特性的试验[J]. 航空动力学报,2016,31 (11):2575-2584.
- [8] 王 旭,张文平,来 亮,等.指尖密封泄漏流动的数 值仿真分析[J]. 航空动力学报,2005,20(4):590-594.
- [9] 张 海,郑 群,岳国强.指尖密封靴部结构对气动 性能影响的分析[J].工程热物理学报,2012,33 (12):2076-2079.
- [10] 郎达学,苏 华.表面织构靴底流体动压指尖密封的 性能分析[J]. 航空学报, 2012, 33(8): 1540-1546.
- [11] 王喜春,苏华,宗兆科.周向收敛型动压式指尖密封的结构优化及其动态性能仿真[J].航空学报, 2011,32(2):360-367.

- [12] 张延超,刘 凯,周连杰,等.基于系统响应特征的指尖密封泄漏特性分析[J].航空动力学报,2013,28
   (1):205-210.
- [13] 王莉娜,陈国定,苏 华,等.考虑泄漏间隙有压流体作用的指尖密封瞬态性能分析[J].航空动力学报,2015,30(8):2004-2010.
- [14] 白花蕾,王 伟,张振生,等.基于多孔介质模型的指尖密封泄漏流动分析.航空动力学报,2016,31
   (6):1303-1308.
- [15] 白花蕾,吉洪湖,纪国剑.指式密封泄漏特性的实验 研究[J].航空动力学报,2009,24(3):532-536.
- [16] 周 坤,力 宁,郭 徽,等.指尖密封静动态特性 试验研究[J]. 润滑与密封, 2017, 42(4): 132-136.
- [17] Mackay C G. Wright E S. Laminated Finger Seal [P]. US:5071138, 1991.
- [18] Steinetz B M. Dunla P. 2005 NASA Seal/Secondary Air System Workshop[R]. NASA STI/Recon Technical Report N, 2006.
- [19] 张兆顺, 崔桂香. 流体力学(第3版)[M]. 北京:清华 大学出版社, 2015.
- [20] 唐家鹏. ANSYS FLUENT 16.0 超级学习手册[M]. 北京:人民邮电出版社, 2017.
- [21] 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.

(编辑:张 贺)