DOI: 10.3901/JME.2020.03.152

考虑粗糙渗流效应的指尖密封总泄漏性能分析*

赵海林 陈国定 苏 华

(西北工业大学机电学院 西安 710072)

摘要: 指尖密封作为近年来一种新型密封技术,其泄漏性能一直是密封领域的研究热点。将流体通过指尖片表面粗糙接触界面微观空隙的泄漏视为指尖密封的侧隙泄漏,基于压力流量因子和哈根-泊肃叶定律构建了指尖密封侧隙多孔介质结构渗透率的计算方法,进而建立了基于多孔介质结构的指尖密封侧隙泄漏性能分析数值模型;然后计入指尖密封侧隙泄漏的影响,构建了考虑指尖密封侧隙泄漏和主流道泄漏的指尖密封总泄漏分析方法;最后在此基础上分析了指尖片表面形貌参数、指尖密封工况参数对指尖密封侧隙泄漏、主流道泄漏和总泄漏的影响,研究了指尖密封侧隙泄漏和主泄漏的权重比例。结果表明:指尖密封侧隙泄漏随着指尖片表面均方根粗糙度、指尖密封上下压差的增加而增加;当指尖片表面纹理从横向纹理向纵向纹理变化时,指尖密封侧隙泄漏亦逐渐增加;当指尖片表面均方根粗糙度较大时,指尖密封侧隙泄漏在指尖密封总泄漏中占主要地位,当转子径向位移激励较大时,指尖密封主流道泄漏占主要地位。该研究有助于完善指尖密封泄漏分析理论体系,具有较高的学术价值和工程意义。

关键词: 指尖密封; 多孔介质; 粗糙度; 纹理; 压力流量因子

中图分类号: TB42

Analysis of Total Leakage Performance of Finger Seal Considering the Rough Seepage Effect

ZHAO Hailin CHEN Guoding SU Hua

(School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: As a new sealing technology, the leakage performance has been one of the hot topics in sealing field. The leakage through the micro voids at the contact interface between rough surfaces of finger element is regarded as the finger seal side leakage, a method of calculating the permeability of porous medium is proposed based on the pressure flow factor and Hagen-Poiseuille law, and the numerical model for calculating the side leakage based on the porous medium theory is established. Then taking into account the finger seal side leakage, the analysis method for total leakage of finger seal is developed. Finally, the influence of the surface topography parameters and the operating conditions on the side leakage, the main leakage and the total leakage is analyzed. In addition, the proportions of the side leakage and main leakage are also studied. The results show that the finger seal side leakage increases with the increase of the RMS roughness and the pressure difference between upstream and downstream finger seal, and when the finger element surface roughness texture direction changes from transverse to longitudinal, the finger seal side leakage also increases. On the other hand, the side leakage becomes dominant as the surface of finger element is rough enough, but the main leakage dominates when the radial displacement excitation of the rotor is larger. This research contributes to the improvement of the theoretical system of the finger seal leakage analysis.

Key words: finger seal; porous medium; roughness; texture feature; pressure flow factor

0 前言

随着航空界对航空发动机高推重比、低油耗要求的不断提高,控制航空发动机中密封泄漏的重要性日益凸显。先进密封技术对于提高航空发动机整

机性能的重要作用以及其优良的性能特征已得到航空界研究人员的广泛认同^[1-2]。正因为如此,众多密封工作者围绕着先进密封技术开展了深入探索和广泛研究。指尖密封是近年来出现的一种新型密封技术,能够适应转子轴向和径向跳动而不损伤密封的整体性,并且相较于篦齿密封具有更优的密封性能、相较于刷密封具有更低的制造成本,在航空发动机气路密封和主轴承腔密封中有着极大的应用前

* 国家自然科学基金资助项目(51575445)。20190514 收到初稿,20190824 收到修改稿

景, 因此受到了密封工作者的广泛关注。

指尖密封的泄漏性能是工程应用以及学术研究中最为关注的内容之一。HENDRICKS 等^[3]首先采用与刷式密封泄漏性能分析模型类似的整体流动模型分析了指尖密封的泄漏性能, 并与试验结果进行了对比。ARORA 等^[4]针对由三层指尖片交错叠置组成的指尖密封结构开展了泄漏性能试验研究, 指出指尖密封的泄漏率比典型的 $0.005 \text{ in}(1 \text{ in}=2.54 \text{ cm})$ 径向间隙的四齿篦齿密封低 $20\% \sim 70\%$ 。PROCTOR 和 DELGADO 等^[5-7]借助 NASA 格林研究中心的高温、高速密封试验设备详细研究了温度、压差和转子转速等对指尖密封泄漏性能的影响, 发现在大多数工况条件下指尖密封的泄漏因子小于 0.006 以及在耐久性试验测试中, 泄漏因子始终低于 0.004 , 满足航空发动机对先进密封技术的要求。此外他们还将指尖密封的试验结果与刷密封、环形密封以及篦齿密封的试验结果进行了对比, 结果表明指尖密封的泄漏率与刷密封相当且远低于环形密封和篦齿密封。LI 等^[8]建立了整个指尖密封的流场分析模型, 发现流体通过指尖靴/转子径向间隙的泄漏随着指尖密封轴向压差、指尖靴/转子径向间隙的增加而增大, 但转子表面线速度对其影响较小。ZHANG 等^[9]建立了流体动压指尖密封的流固耦合数值模型, 指出指尖靴底/转子径向间隙和指尖梁缝隙中的涡旋能够延缓指尖密封泄漏随压差增加而增加的趋势。苏华等^[10]采用有限元法分析了温度对指尖密封泄漏性能的影响, 发现高温状态下指尖密封的性能与不计温度状态下指尖密封的性能有很大差异, 随着温度的升高, 指尖密封的泄漏率降低。张延超等^[11]基于有限元法建立了指尖密封动态性能性能分析数值模型, 然后根据计算获得的指尖密封位移响应计算指尖密封/转子动态间隙, 构建了指尖密封动态泄漏率的计算方法。路菲等^[12]采用平均刚度法计算 C/C 复合材料的宏观弹性常数, 然后基于有限元法建立了 2.5 维 C/C 复合材料指尖密封性能分析模型, 重点研究了纱线密度和纱线编制方式对指尖密封泄漏性能的影响, 这一研究为 C/C 复合材料应用于指尖密封制备提供了理论基础和技术支持。KLINE 等^[13]分别采用试验和数值方法对流体动压指尖密封的密封性能进行分析, 发现试验获得的泄漏率比数值仿真分析计算获得的泄漏率要高一个数量级, 并将这种现象归结于指尖梁在轴向压差下发生的弯曲变形。白花蕾等^[14]将指尖密封处理为多孔介质结构, 将压力梯度作为多孔介质结构动量方程中的源项, 然后根据指尖密封泄漏试验确定源项中

的系数, 并结合指尖密封的结构参数提出了适用于指尖密封泄漏计算的多孔介质模型。王强等^[15]在白花蕾建立的指尖密封多孔介质模型的基础上, 将指尖片间的接触传热附加于固体导热中, 建立了指尖密封各向异性传热数值模型, 数值分析了热效应对指尖密封泄漏性能的影响。LI 等^[16]试验研究了 C/C 复合材料指尖密封在常温和高温下的泄漏性能, 发现在常温条件下由 2 层厚度均为 1.8 mm 的指尖片组成的指尖密封的泄漏率小于由 3 层厚度均为 1.2 mm 的指尖片组成的指尖密封的泄漏率, 但在高温条件下由 3 层厚度均为 1.2 mm 的指尖片组成的指尖密封的泄漏率更小。

到目前为止, 关于指尖密封泄漏性能的研究, 研究者们大都只关心指尖靴底/转子径向间隙的泄漏(称为主流道泄漏)。事实上指尖片表面并不光滑, 指尖片粗糙表面接触形成的微观空隙可能导致流体在指尖密封轴向压差作用力从高压侧沿微观空隙组成的泄漏通道流向低压侧, 即指尖密封还存在流体通过指尖片粗糙接触界面微观空隙的泄漏(称为侧隙泄漏)。指尖密封侧隙泄漏相较于主流道泄漏要小得多, 然而在指尖密封泄漏性能分析中, 倘若不计入指尖密封侧隙泄漏的影响, 则必然会对指尖密封泄漏分析结果的可靠性造成一定的影响。采用试验的方法虽然计入了指尖密封侧隙泄漏的影响, 但是研究者们并未意识到指尖密封侧隙泄漏的存在, 并且在现有指尖密封试验设备条件下, 研究者们既不能单独对指尖密封侧隙泄漏进行试验研究, 也无法深入探究指尖密封侧隙泄漏对指尖密封泄漏性能影响规律。白花蕾和王强等在指尖密封泄漏性能分析中虽然考虑了指尖密封侧隙泄漏的影响^[14-15], 但是他们将指尖密封的侧隙泄漏认为是流体通过指尖梁缝隙的泄漏是欠考虑的。对于指尖密封侧隙泄漏而言, 指尖片粗糙表面接触形成的微观空隙的几何尺寸远小于指尖梁缝隙的几何尺寸, 是限制其泄漏的最主要因素, 因此将指尖密封侧隙泄漏视为流体通过指尖片粗糙表面形成的微观空隙的泄漏才是正确的。

基于以上分析, 本文将流体通过指尖密封指尖片粗糙接触界面微观空隙的泄漏视为指尖密封的侧隙泄漏; 然后基于多孔介质结构建立了适用于指尖密封侧隙泄漏计算的多孔介质数值分析模型; 最后同时考虑指尖密封侧隙泄漏和主流道泄漏, 构建了指尖密封总泄漏性能的分析方法。本文提出的分析方法和进行的研究工作有助于提升和完善指尖密封泄漏分析的理论和技术, 具有较高的学术意义和工程价值。

1 指尖密封基本结构

如图 1 所示, 指尖密封主要由前、后挡板夹持的若干交错叠置的指尖片组成, 每个指尖片沿圆周方向自根圆开始加工有若干细长曲线状的指尖梁。图 2 给出了指尖密封的主要结构参数: 指尖密封外圆直径 D_w ; 指尖密封根圆直径 D_e ; 指尖密封内圆直径 D_r ; 指尖梁宽度 f_w ; 指尖梁缝隙宽度 s ; 指尖靴高度 h_x 。

图 1 指尖密封基本结构

图 2 指尖密封结构参数

2 指尖密封泄漏性能分析方法

指尖密封的泄漏分为侧隙泄漏和主流道泄漏两个部分。

对于指尖密封的侧隙泄漏分析, 本文规避了指尖片粗糙表面间形成的微观空隙的随机性和复杂性, 将流体通过指尖片粗糙表面间微观空隙的流动转化为通过多孔介质结构的渗流流动, 以多孔介质结构的渗透率表征指尖密封允许流体通过其指尖片粗糙接触界面微观空隙的能力。对于指尖密封主流道泄漏分析, 通过建立指尖密封迟滞性能分析有限元模型, 以指尖密封迟滞间隙作为指尖靴底/转子径向泄漏间隙, 计算获得指尖密封主流道泄漏。叠加指尖密封侧隙泄漏和主流道泄漏, 从而获得指尖密封的总泄漏量。

2.1 指尖密封侧隙泄漏计算

2.1.1 基于多孔介质结构的指尖密封侧隙泄漏分析数值模型

如图 3 所示, 基于多孔介质结构的指尖密封侧

隙泄漏流动数值模型计算区域, 包括高压腔和低压腔构成的流体域以及由指尖梁束结构等效转化的多孔介质结构域。考虑到指尖梁束结构域的几何形状和指尖片粗糙接触情况, 多孔介质结构域形状是环状圆柱面, 其在轴向方向的尺寸和径向方向的尺寸(内圆半径和外圆半径)分别为 L_z 、 R_{in} 和 R_{out} , 具体处理如下所述。

图 3 指尖密封侧隙泄漏流动数值模型的计算区域

多孔介质结构的轴向尺寸反映的是流体流经各层指尖片间接接触表面的路径长度。根据指尖密封的具体结构, 多孔介质结构轴向长度表示为

$$L_z = (n-1) \frac{f_w - s}{2} \quad (1)$$

式中, n 为指尖片层数。

多孔介质结构在径向方向上的尺寸则为指尖梁型线的径向投影与指尖靴高度之和, 因此多孔介质结构内圆半径和外圆半径分别为指尖密封的内圆半径和根圆半径, 即

$$R_{in} = \frac{D_r}{2} \quad (2)$$

$$R_{out} = \frac{D_e}{2} \quad (3)$$

基于指尖密封的循环对称结构特征, 将图 3 所示模型简化为二维轴对称的数值模型。为了使流动充分发展以及增强流场计算的收敛性, 高压腔和低压腔的轴向尺寸取得较大。基于多孔介质结构的指尖密封侧隙泄漏流动分析中, 采用 $k-\omega$ 模型模拟流体的湍流流动; 高压腔流体域入口截面设置压力入口边界条件; 低压腔流体域出口截面设置压力出口边界条件; 在多孔介质结构域中, 通过设置多孔介质结构的渗透率表征多孔介质允许流体通过的能力。流体域和多孔介质结构域界面上施加内部边界条件; 其余表面设置为静止壁面边界。

CFD 数值分析中, 选择基于压力法的二维旋转轴对称的显式求解器, 采用压强-速度关联算法进行指尖密封侧隙泄漏的数值计算。分析中的变量离散格式选择如下: 对梯度采用基于最小二乘单元的格式; 对压力采用二阶差分格式; 对动量和旋转速度

采用二阶迎风差分格式; 对湍动能和比耗散率采用一阶向前差分格式。

在 CFD 后处理软件中, 选择指尖密封侧隙泄漏数值分析模型的入口截面, 计算流体通过该截面的质量流量, 此即指尖密封的侧隙泄漏率 q_s 。

经网格无关性验证后, 发现当流场网格数超过 5019 后, 指尖密封侧隙泄漏率几乎保持不变, 故 CFD 分析中, 流场网格数目为 5 019。

2.1.2 多孔介质结构中渗透率的计算

(1) 多孔介质结构中流体的运输方程。

引入了多孔介质结构的指尖密封侧隙泄漏分析, 需要知道描述多孔介质结构允许流体流通能力的渗透率, 以实现流体流经多孔介质结构区域的流动分析。

根据 Darcy 多孔介质理论, 当多孔介质结构表现出高阻力特性时, 对于各向同性的多孔介质结构, 流体在多孔介质结构中的压力梯度与渗透率表示为

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K} v \quad (4)$$

式中, ΔP 为多孔介质结构上下游压力差; μ 为流体黏度; K 为多孔介质结构的渗透率; L 为多孔介质结构在流动方向上的长度; v 为多孔介质结构中的流体表观速度, 表示为

$$v = \frac{Q}{A} \quad (5)$$

式中, Q 为流经多孔介质结构某截面的体积流量; A 为多孔介质结构某流通截面的面积。

(2) 渗透率的计算

考虑到指尖密封中相邻指尖片接触状态相同, 故可通过一对指尖片相互接触的单个指尖梁间流动阻力分析获得多孔介质结构的渗透率。分析中将指尖片的指尖梁之间接触转化为如图 4 所示的两个粗糙表面的接触, 图中 h 为两粗糙表面均线之间的距离(又称为接触间隙)。若给粗糙表面两端(x 方向)施加压力差, 则流体通过两粗糙表面间隙的体积流量 Q_i 为

$$Q_i = \varphi q \quad (6)$$

式中, φ 为描述粗糙表面对流体流动影响的压力流量因子; q 为平行光滑表面间的流体体积流量; 其计算公式为

$$q = \frac{h^3 \Delta P W}{12 \mu l} \quad (7)$$

式中, l 为光滑表面在流动方向上的长度; W 为光滑表面宽度。对于指尖密封, l 和 W 分别为两指尖梁接触区域的周向长度和径向宽度, 其计算公式分别

$$l = \frac{f_w - s}{2} \quad (8)$$

$$W = h_x + l_s \quad (9)$$

式中, h_x 为指尖靴高度, l_s 为指尖梁型线长度。

图 4 两粗糙表面的接触

对于两个 Gauss 粗糙表面的接触, 压力流量因子 φ 与粗糙表面间无量纲膜厚 h/σ 的关系为^[17]

$$\varphi = \begin{cases} 1 - C e^{-r(h/\sigma)} & \gamma \leq 1 \\ 1 + C \left(\frac{h}{\sigma} \right)^{-r} & \gamma > 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中, C 和 r 为相关系数, 其取值如表 1 所示; γ 为粗糙度纹理方向参数, $\gamma < 1$ 、 $\gamma = 1$ 和 $\gamma > 1$ 分别表示粗糙表面具有横向纹理特征、各向同性特征、纵向纹理特征; σ 为两粗糙表面的等效均方根粗糙度, 对于指尖密封而言, 考虑到指尖片表面均方根粗糙度相同, 于是有

$$\sigma = \sqrt{2} \sigma_0 \quad (11)$$

式中, σ_0 为指尖片的表面均方根粗糙度。

表 1 公式(10)中系数 C 和 r ^[17]

γ	C	r	条件
1/9	1.48	0.42	$h/\sigma > 1$
1/6	1.38	0.42	$h/\sigma > 1$
1/3	1.18	0.42	$h/\sigma > 0.75$
1	0.9	0.56	$h/\sigma > 0.5$
3	0.225	1.5	$h/\sigma > 0.5$
6	0.52	1.5	$h/\sigma > 0.5$
9	0.87	1.5	$h/\sigma > 0.5$

两 Gauss 粗糙表面接触时的接触压力和膜厚比的关系为^[18, 19]

$$\begin{cases} P_{\text{con}} = K' E' \alpha \times 10^{-5} \times (4.0 - h/\sigma)^{6.804} & h/\sigma < 4 \\ P_{\text{con}} = 0 & h/\sigma \geq 4 \end{cases} \quad (12)$$

式中, K' 和 α 为常数, 分别取值为 0.003 和 4.4086; P_{con} 为接触压力, 对于指尖密封而言为指尖密封的上下游压差; E' 为两粗糙表面的当量弹性模量。

根据流体流经多孔介质结构的体积流量与流体流经粗糙接触界面的流体流量相等的原则, 由公式 (5)、(6)、(7) 可得

$$\frac{\Delta P}{l} = \frac{12 \mu \cdot A}{h^3 \cdot W \cdot \varphi} \cdot v \quad (13)$$

对指尖片指尖梁接触所等效的多孔介质结构, 多孔介质结构在流动方向上的长度 L 就是两指尖梁接触区域的周向长度 l , 因此有

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{12\mu \cdot A}{h^3 \cdot W \cdot \varphi} \cdot v \quad (14)$$

比较公式(14)和公式(4), 即可得到多孔介质结构渗透率的计算公式, 如公式(15)所示。

$$K = \frac{h^3 W \varphi}{12A} \quad (15)$$

对于指尖片一对指尖梁接触所等效的多孔介质结构, 公式(15)中的 A 的计算公式为

$$A = \pi \cdot \left[\left(\frac{D_e}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_r}{2} \right)^2 \right] / (2m) \quad (16)$$

式中, m 表示指尖梁的个数。

图 5 给出了多孔介质结构渗透率的计算流程。

图 5 多孔介质结构渗透率计算流程图

2.2 指尖密封主流道泄漏计算

指尖密封主流道泄漏间隙, 即指尖靴底/转子径向泄漏间隙是通过指尖密封迟滞性能分析而获得的。指尖密封迟滞性能分析的有限元模型如图 6 所示, 其主要边界条件有: 指尖片之间、低压指尖片与后挡板之间以及指尖靴底面与转子表面之间建立接触对; 指尖片外面表面及后挡板后表面施加全

图 6 指尖密封迟滞性能分析的有限元模型

约束; 转子前后表面施加 z 方向约束; 转子圆周方向上的两个侧面施加 x 方向约束; 高压指尖片对面施加指尖密封上下游压差; 给转子表面施加载荷步: 第一步施加转子径向位移激励 Δr , 第二步使转子复位。

有限元分析过程中, 采用六面体单元 Solid 185 对指尖密封迟滞性能分析模型进行网格划分, 为了保证计算结果的可靠性, 每个指尖梁的网格划分较为细密, 尤其是与转子表面接触的指尖靴部的网格。当指尖密封轴向压差为 0.1 MPa, 转子径向位移激励为 $15 \mu\text{m}$ 时, 图 7 给出了若干单元个数下指尖密封的迟滞量。可以看出, 当单元个数超过 30591 时, 指尖密封的迟滞量几乎不发生变化, 因此指尖密封迟滞性能有限元分析中, 网格单元个数选取为 30591。

图 7 网格无关性验证

在已知指尖靴底/转子径向泄漏间隙 Δs 的前提下, 文献[20]给出了适用于指尖密封径向间隙泄漏(即主流道泄漏)的计算公式, 如下所示。

$$q_m = 4.72 \times \left(\sqrt{\frac{\mu^2 (nt)^2}{\rho^2} + \frac{0.035 (\Delta s)^4 P_{\text{con}}}{\rho}} - \frac{\mu nt}{\rho} \right) \frac{\pi \rho (D_o + 2\Delta s)}{\Delta s} \quad (17)$$

式中, ρ 为气体密度; t 为指尖片厚度; q_m 为指尖密封主流道泄漏的泄漏率; D_o 为转子直径。

2.3 指尖密封总泄漏的计算

为分析问题的方便, 将指尖密封主流道泄漏和侧隙泄漏假定为互相独立的泄漏通道, 从而总的指尖密封泄漏率是主流道泄漏率和侧隙泄漏率的叠加, 即

$$q_{\text{total}} = q_m + q_s \quad (18)$$

式中, q_{total} 为指尖密封总泄漏率。

3 结果分析与讨论

本文以渐开线型线指尖密封为分析对象, 其主要结构参数如表 2 所示。指尖片材料为镍基高温合金 GH4169, 其弹性模量和泊松比分别 205 GPa 和 0.3; 转子和后挡板材料为钴基高温合金 GH605, 其弹性模量和泊松比分别为 231 GPa 和 0.286。分析中, 指尖密封的密封介质为空气, 其密度为 1.225 kg/m^3 , 黏度为 $1.7894 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

表 2 指尖密封主要结构参数

参数	数值
型线基圆直径 Db/mm	41
根圆直径 De/mm	272
指尖密封内径 Dr/mm	252
指尖密封外径 Dw/mm	284
指尖梁缝隙宽度 s/mm	0.3
指尖片厚度 t/mm	0.25
指尖靴高度 hx/mm	1.2
指尖片层数 n	5
指尖梁个数 m	72

3.1 指尖密封侧隙多孔介质结构的渗透率

在指尖片表面均方根粗糙度为 $1.5 \mu\text{m}$ 和指尖片表面纹理具有各向同性特征条件下, 表 3 给出了若干指尖密封上下游压差条件下多孔介质结构的渗透率。可以看出, 随着指尖密封上下游压差的增加, 多孔介质结构的渗透率逐渐减小。这主要是因为随着指尖密封上下游压差增加, 高压下指尖片间接触间隙减小, 流体流动阻力增加, 指尖片粗糙表面间微观空隙允许流体流通的能力降低, 故渗透率减小。

表 3 若干指尖密封上下游压差下多孔介质结构的渗透率

压差/MPa	渗透率/ $\times 10^{-15} \text{ m}^2$
0.1	5.08
0.2	4.34
0.3	3.91
0.4	3.61
0.5	3.38

在指尖密封上下游压差为 0.3 MPa 和指尖片表面纹理具有各向同性特征条件下, 表 4 给出了若干表面均方根粗糙度下多孔介质结构的渗透率。可以看出, 多孔介质结构的渗透率随着表面均方根粗糙度的增加而增加。这是因为表面均方根粗糙度越大, 指尖片粗糙表面上更高和更多的粗糙峰处于接触状态, 使得在同一压差作用下指尖片间接触间隙较大, 此时流体在指尖片粗糙表面间微观空隙中流动更容易, 故渗透率增大。

表 4 若干表面均方根粗糙度下多孔介质结构的渗透率

表面均方根粗糙度/ μm	渗透率/ $\times 10^{-15} \text{ m}^2$
0.5	0.15
1.5	3.91
2.5	18.09
3.5	49.65
4.5	105.52

在指尖密封上下游压差为 0.3 MPa 和指尖片表面均方根粗糙度为 $1.5 \mu\text{m}$ 的条件下, 表 5 给出了若干表面粗糙度纹理方向参数下多孔介质结构的渗透率。可以看出, 当粗糙表面具有横向纹理特征时 ($\gamma < 1$), 粗糙峰脊对流体流动有很大阻碍作用, 粗糙峰脊留出的允许流体流动的通道很少, 流通面积也很小, 导致流体不易流通, 并且粗糙表面横向纹理特征越明显 (γ 越小), 流体越不容易通过指尖片粗糙表面间微观空隙, 故渗透率越小; 相反当粗糙表面具有纵向纹理特征时 ($\gamma > 1$), 粗糙峰脊与流体流动方向一致, 粗糙峰脊之间形成的凹谷通道提供了流体流动的便利, 并且粗糙表面纵向纹理特征越明显 (γ 越大), 流体越容易通过指尖片粗糙表面间微观空隙, 故渗透率也就越大。

表 5 若干粗糙度纹理方向参数下多孔介质结构的渗透率

粗糙度纹理方向参数	渗透率/ $\times 10^{-15} \text{ m}^2$
1/6	2.65
1/3	2.99
1	3.91
3	5.22
6	5.56

3.2 指尖密封侧隙泄漏的流场分布

在指尖密封上下游压差为 0.3 MPa、指尖片表面均方根粗糙度为 $1.5 \mu\text{m}$ 以及指尖片表面纹理具有各向同性特征条件下, 图 8 和图 9 分别给出了指尖密封侧隙泄漏流动的压力分布云图以及速度矢量图。在该条件下指尖密封侧隙泄漏率为 0.043 g/s 。

从图 8 中可以看出压降主要发生在指尖梁束结构等效的多孔介质结构区域, 并在前挡板和后挡板的内缘转角处, 压力变化更为剧烈。对于前一个现象的解释是多孔介质结构本身的高阻力特性对流体流动的阻碍作用使得压降主要发生在多孔介质结构区域。对于后一个现象, 当流体刚流入到多孔结构时, 由于流动阻力突然增加, 使得在前挡板的内缘转角处压力变化较为剧烈; 当流体从多孔介质结构流出时, 由于流动阻力突然减小, 流体在后挡板内缘转角处进行加速和膨胀, 故而流体压力变化较为剧烈。

图 8 指尖密封侧隙泄漏流动的压力分布云图

从图 9 中可以看出，在前挡板下游保护高度区域，由于流道突然减小，此处流体运动较为急促、速度也较大。在多孔介质结构区域中，由于孔隙的存在还是可以看到存在着流体运动，不过由于较小的孔隙对流体流动的节流作用，所以流体流动速度比较小，运动方向也不一致。从图 9 中还可以看出，当流体从多孔介质结构流入到后挡板下游保护高度区域时，由于后挡板的约束作用，流体运动速度迅速增加。

图 9 指尖密封侧隙泄漏流动的速度矢量图

3.3 指尖密封主流道泄漏、侧隙泄漏和总泄漏的影响因素分析

(1) 指尖片表面均方根粗糙度。

在指尖密封上下游压差为 0.3 MPa、转子径向位移激励为 15 μm 以及指尖片表面纹理具有各向同性特征条件下，图 10 给出了若干指尖片表面均方根粗糙度下指尖密封主流道泄漏、侧隙泄漏和总泄漏的变化规律。可以看出，随着指尖片表面均方根粗糙度的增加，指尖密封主流道泄漏保持不变，侧隙泄漏和总泄漏均逐渐增加。前一种现象产生的原因在于指尖密封的迟滞间隙不随着表面均方根粗糙度的变化而变化，故指尖密封主流道泄漏并不受指尖片表面均方根粗糙度的影响。对于后一

种现象的解释是：指尖片表面均方根粗糙度越大，指尖片粗糙表面上有更高和更多的粗糙峰参与接触，同一压差作用下指尖片间的接触间隙越大，流体在指尖片间流体流动阻力越小，故指尖密封的侧隙泄漏增加，指尖密封侧隙泄漏的增加使得指尖密封总泄漏也增加。

图 10 不同表面均方根粗糙度下指尖密封的泄漏性能

与图 10 相对应，表 6 给出了若干指尖片表面均方根粗糙度下指尖密封主流道泄漏和侧隙泄漏比例。可以看出，指尖片表面均方根粗糙度对指尖密封主流道泄漏和侧隙泄漏比例影响显著，随着指尖片表面均方根粗糙度的增加，指尖密封主流道泄漏比例迅速减小，而侧隙泄漏比例迅速增大。这主要是由于指尖密封的侧隙泄漏随着指尖片表面均方根粗糙度的增加而快速增大的缘故。从表中还可以看出，当指尖片表面均方根粗糙度较大时，指尖密封侧隙泄漏在指尖密封总泄漏中占主要地位，而主流道泄漏占比较小。

表 6 若干表面均方根粗糙度下主流道泄漏和侧隙泄漏比例

表面均方根粗糙度 μm	主流道泄漏比例(%)	侧隙泄漏比例(%)
0.5	99.62	0.38
1.5	90.65	9.35
2.5	67.68	32.32
3.5	43.31	56.69
4.5	26.42	73.58

需要指出的是，指尖片表面为高速磨削表面，根据文献[21]可知，对于钴基高温合金 GH4169，采用高速磨削加工方法后，其表面均方根粗糙度范围为 0.3~0.8 μm 。然而指尖片经高速磨削后，还需采用线切割加工指尖梁才能形成最终的指尖片结构，因此指尖片表面的均方根粗糙度可能进一步增大。据试验测量，指尖片表面均方根粗糙度可达到 1.5 μm ，因此实际应用中，指尖片表面均方根取值范围为 0.3~1.5 μm 。在这种条件下，指尖密封侧隙泄漏与总泄漏的比值为 0.11%~9.35%。基于上述

分析可知, 实际应用中指尖密封侧隙泄漏低于主流道泄漏。

(2) 指尖片表面纹理方向。

在指尖密封上下游压差为 0.3 MPa、转子径向位移激励为 15 μm 以及指尖片表面均方根粗糙度为 1.5 μm 的条件下, 图 11 给出了指尖片表面纹理方向对指尖密封主流道泄漏、侧隙泄漏以及总泄漏的影响规律。可以看出, 当指尖片表面从横向纹理向纵向纹理变化时, 指尖密封主流道泄漏保持不变, 侧隙泄漏和总泄漏逐渐增加。前一种现象产生的原因同样在于指尖片表面纹理方向的变化不影响指尖密封迟滞效应, 故指尖密封主流道泄漏并不受指尖片表面纹理方向变化的影响。后一种现象产生的原因: 当指尖片表面具有横向纹理特征时, 由于粗糙峰脊的方向与流体流动方向垂直, 流体穿越粗糙峰脊流动通道较少, 流通面积也较小, 增大了流体流动阻力, 使得指尖密封侧隙泄漏较小; 当指尖片表面具有纵向纹理特征时, 粗糙峰脊与流体流动方向一致, 粗糙峰脊之间自然形成的凹谷通道提供了流体流动的便利, 使得流体流动阻力较小, 侧隙泄漏增大; 指尖密封侧隙泄漏的增加使得指尖密封的总泄漏增大。

图 11 不同粗糙度纹理方向下指尖密封的泄漏性能

与图 11 相对应, 表 7 给出了若干指尖片表面粗糙度纹理方向参数下指尖密封主流道泄漏和侧隙泄漏比例。可以看出, 当指尖片表面从横向纹理向纵向纹理变化时指尖密封的主流道泄漏比例逐渐减小, 侧隙泄漏比例逐渐增大。这主要是由于当指尖片表面从横向纹理向纵向纹理变化时, 流体流动阻力减小, 指尖密封侧隙泄漏增大所致。

表 7 若干粗糙度纹理参数下主流道泄漏和侧隙泄漏比例

粗糙度纹理参数	主流道泄漏比例(%)	侧隙泄漏比例(%)
1/6	93.45	6.55
1/3	92.63	7.32
1	90.65	9.35
3	87.89	12.11
6	87.18	12.82

(3) 指尖密封上下游压差。

在转子径向位移激励为 15 μm 、指尖片表面均方根粗糙度为 1.5 μm 以及指尖片表面纹理具有各向同性特征条件下, 图 12 给出了指尖密封上下游压差对指尖密封主流道泄漏、侧隙泄漏以及总泄漏的影响规律。可以看出, 随着指尖密封上下游压差的增加, 指尖密封主流道泄漏、侧隙泄漏和总泄漏均逐渐增大, 这些都是比较容易理解的。指尖密封上下游压差的增加不仅加重了指尖密封的迟滞现象, 使得指尖密封的指尖靴底/转子径向泄漏间隙变大, 也增加了流体流经指尖靴底/转子径向泄漏间隙的驱动力, 因此指尖密封主流道泄漏随着指尖密封上下游压差的增加而增大。指尖密封上下游压差的增加虽然使得指尖片间接触压力增加, 减小了指尖片粗糙表面间非接触空隙面积, 使得流体流动阻力增大, 但也增加了流体流动动力, 两者耦合作用下使得指尖密封侧隙泄漏随着指尖密封上下游压差的增加而增大。指尖密封主流道泄漏和侧隙泄漏的同时增加使得指尖密封的总泄漏增加。

图 12 不同指尖密封上下游压差下指尖密封的泄漏性能

与图 12 相对应, 表 8 给出了若干指尖密封上下游压差下指尖密封主流道泄漏和侧隙泄漏的比例。可以看出, 随着指尖密封上下游压差的增加, 指尖密封主流道泄漏比例有所减小, 而侧隙泄漏比例有所增加。这主要是由于随着指尖密封上下游压差的增加, 指尖密封侧隙泄漏增长速度更为显著所致。

表 8 若干指尖密封上下游压差下主流道泄漏和侧隙泄漏比例

压差/MPa	主流道泄漏比例(%)	侧隙泄漏比例(%)
0.1	92.58	7.42
0.2	91.97	8.03
0.3	90.65	9.35
0.4	89.60	10.40
0.5	88.61	11.39

(4) 转子径向位移激励。

在指尖密封上下游压差为 0.3 MPa、指尖片表

面均方根粗糙度为 $1.5\ \mu\text{m}$ 以及指尖片表面纹理具有各向同性特征条件下,图 13 给出了指尖密封主流道泄漏、侧隙泄漏和总泄漏相对转子径向位移激励的变化规律。可以看出,随着转子径向位移激励的增加,指尖密封主流道泄漏和总泄漏都增加,侧隙泄漏保持不变。产生这种现象的原因如下:本文分析中并未考虑指尖密封主流道泄漏和侧隙泄漏的耦合关系,因此转子径向位移激励并不影响指尖密封侧隙泄漏,故指尖密封侧隙泄漏保持不变;但是转子径向位移激励的增加增加了指尖密封的迟滞现象,导致指尖密封指尖靴底/转子径向泄漏间隙增加,故而使得指尖密封主流道泄漏增加,进而导致指尖密封总泄漏增加。

图 13 不同转子径向位移激励下指尖密封的泄漏性能

与图 13 相对应,表 9 给出了若干转子径向位移激励下指尖密封主流道泄漏和侧隙泄漏的比例。可以看出,随着转子径向位移激励的增加,指尖密封主流道泄漏比例逐渐增加,侧隙泄漏比例逐渐减小。这主要是由于指尖密封主流道泄漏随转子径向位移激励的增加逐渐增大所致。从表中还可以看出,当转子径向位移激励较大时,指尖密封主流道泄漏占主要地位,指尖密封侧隙泄漏相较而言可忽略不计。

表 9 若干转子径向位移激励下主流道泄漏和侧隙泄漏比例

径向位移激励/ μm	主流道泄漏比例(%)	侧隙泄漏比例(%)
10	46.58	53.42
15	90.65	9.35
20	97.61	2.39
25	98.92	1.08
30	99.34	0.66

4 结论

(1) 指尖密封侧隙多孔介质结构的渗透率随着指尖密封上下游压差的增加而减小,随着指尖片表面均方根粗糙度的增加而增加,当指尖片表面纹理特征从横向纹理向纵向纹理变化时,多孔介质结构

的渗透率亦逐渐增加。

(2) 指尖密封侧隙泄漏随着指尖片表面均方根粗糙度的增加而快速增加,当指尖片表面均方根粗糙度较大时($4.5\ \mu\text{m}$),指尖密封侧隙泄漏占主要地位,但受指尖片加工工艺的影响,指尖片表面均方根粗糙度取值范围为 $0.3\sim 1.5\ \mu\text{m}$,在这种条件下,针对本文所研究的指尖密封,其侧隙泄漏所占比例为 $0.11\%\sim 9.35\%$,因此实际应用中指尖密封侧隙泄漏低于指尖密封主流道泄漏。

(3) 指尖片表面纹理特征对指尖密封侧隙泄漏有重要影响,当指尖片表面具有横向纹理特征时,指尖密封侧隙泄漏较小,并且横向纹理特征越明显,指尖密封侧隙泄漏越小;当指尖片表面具有纵向纹理特征时,指尖密封侧隙泄漏率较大,并且纵向纹理特征越明显,指尖密封的侧隙泄漏率越大。

(4) 指尖密封主流道泄漏、侧隙泄漏以及总泄漏都随着指尖密封上下游压差的增加而增加,随着指尖密封上下游压差的增加,指尖密封侧隙泄漏比例也逐渐增大,但总体而言,其增长趋势较缓。

(5) 转子径向位移激励对指尖密封侧隙泄漏的比例影响较大,当转子径向位移激励较小时,指尖密封侧隙泄漏占比较大;当转子径向位移激励较大时,指尖密封主流道泄漏占主要地位,侧隙泄漏可忽略不计。

参 考 文 献

- [1] CHUPP R E, NELSON P. Evaluation of brush seals for limited-life engines[J]. Journal of Propulsion and Power, 1993, 9(1): 113-118.
- [2] STEINETZ B M, HENDRICKS R C. Engine seal technology requirements to meet NASA's Advanced Subsonic Technology program goals[J]. Journal of Propulsion and Power, 1996, 12(4): 786-793.
- [3] HENDRICKS R C, O'HALLORAN B, ARORA G K, et al. Advances in contact sealing[R]. NASA CP-3282, Cleveland, Ohio: NASA Glenn Research Center, 1994.
- [4] ARORA G K, PROCTOR M P, STEINETZ B M, et al. Pressure balanced, low hysteresis, finger seal test results [R]. NASA TM 1999-209191, Cleveland, Ohio: NASA Glenn Research Center, 1999.
- [5] PROCTOR M P, DELGADO I R. Leakage and power loss test results for competing turbine engine seals[R]. NASA/TM-2004-213049, Cleveland, Ohio: NASA Glenn Research Center, 2004.
- [6] PROCTOR M P, KUMAR A, DELGADO I R. High-speed, high-temperature finger seal test results[C].// 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference

- & Exhibit, July 7-10, 2002, Indianapolis, IN, USA. New York: ASME, 2002: 312-318.
- [7] DELGADO I R, PROCTOR M P. Continued investigation of leakage and power loss test results for competing turbine engine seals[C]//42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, July 9-12, 2006, Sacramento, CA, USA. New York: ASME, 2006: 1-14.
- [8] LI H, BRAUN M J. The sealing behavior and force analysis of a double-laminate single-padded finger seal [C]// Proceedings of ASME TURBO EXPO 2007: 2007 ASME Gas Turbine Technical Congress & Exposition, May 14-17, 2007, Montreal, Canada. New York: ASME, 2007: 1279-1290.
- [9] ZHANG H, ZHENG Q, YUE G. Study on the leakage and deformation characteristics of the finger seals by using numerical simulation[C]// ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air, June 14-18, 2010, Glasgow, UK. New York: ASME, 2010: 1179-1190.
- [10] 苏华, 陈国定. 指尖密封的温度场及热结构耦合分析[J]. 航空动力学报, 2009, 24(1): 196-203.
SU Hua, CHEN Guoding. An analysis of temperature field and coupled thermal and structure for finger seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(1): 196-203.
- [11] 张延超, 陈国定, 申晓龙. 指尖密封动态性能分析与泄漏量计算[J]. 航空学报, 2009, 30(11): 2193-2199.
ZHANG Yanchao, CHEN Guoding, SHEN Xiaolong. Analysis of dynamic performance and leakage for finger seal[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(11): 2193-2199.
- [12] 路菲, 陈国定, 苏华, 等. 2.5D 碳/碳复合材料指尖密封动态性能分析[J]. 航空学报, 2013, 34(11): 2616-2625.
LU Fei, CHEN Guoding, SU Hua, et al. Analysis of dynamic performance for 2.5D carbon-carbon composite finger seals[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(11): 2616-2625.
- [13] KLINE S E. An investigation of the performance of compliant finger seals for use in gas turbine engines using navier-stokes and reynolds equation based numerical models and experimental evaluation[D]. Akron: University of Akron, 2016.
- [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[J]. 航空动力学报, 2016, 31(06): 1303-1308.
- BAI Hualei, WANG Wei, ZHANG Zhensheng, et al. Analysis of leakage flow through finger seal based on porous medium[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(06): 1303-1308.
- [15] 王强, 胡娅萍, 吉洪湖. 基于多孔介质的指尖密封各向异性传热模型[J]. 航空动力学报, 2017, 32(11): 2585-2595.
WANG Qiang, HU Yaping, JI Honghu. Anisotropic heat transfer model of finger seal based on porous media[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(11): 2585-2595.
- [16] LI G, ZHANG Q, LEI G, et al. Leakage and wear characteristics of finger seal in hot/cold state for aero-engine[J]. Tribology International, 2018, 127(1): 209-218.
- [17] PATIR N, CHENG H S. An average flow model for determining effects of three-dimensional roughness on partial hydrodynamic lubrication[J]. Journal of Lubrication Technology, 1978, 100(1): 12-17.
- [18] PATIR N. Effects of surface roughness on partial film lubrication using an average flow model based on numerical simulation [D]. Evanston: Northwestern University, 1978.
- [19] 任晓, 吴承伟, 周平. 粗糙表面的气体密封性能研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(16): 176-181.
REN Xiao, WU Chenwei, ZHOU Ping. Gas sealing performance study of rough surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(16): 176-181.
- [20] 陈国定, 苏华, 张延超. 指尖密封的分析与设计[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2012.
CHEN Guoding, SU Hua, ZHANG Yanchao. Analysis and design of finge seal[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2002.
- [21] AKHTAR W, SUN J, CHEN W. Effect of machining parameters on surface integrity in high speed milling of super alloy GH4169/Inconel 718[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2016, 31(5): 620-627.

作者简介: 赵海林, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为润滑与密封技术。

E-mail: zhaohailin@mail.nwpu.edu.cn

陈国定, 男, 1956 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为润滑与密封技术、机电系统热分析和现代机械设计理论和方法。

E-mail: gdchen@nwpu.edu.cn

苏华(通信作者), 女, 1968 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为润滑与密封技术。

E-mail: huasu@nwpu.edu.cn