

基于流固热耦合的非金属迷宫密封泄漏特性与公式构造

周敏¹, 孙丹¹, 赵欢¹, 智强², 张国臣¹

(1. 沈阳航空航天大学 航空发动机学院

辽宁省航空推进系统先进测试技术重点实验室, 沈阳 110136;

2. 沈阳鼓风机集团股份有限公司 辽宁重大装备制造协同创新中心, 沈阳 110142)

摘 要: 建立了考虑齿变形的非金属迷宫密封泄漏特性流固热耦合数值求解模型,在验证求解模型准确性的基础上,研究了聚醚醚酮(PEEK)、填充30%碳纤维增强聚醚醚酮(PEEK-CA30)和铝合金三种材料迷宫密封在不同压比、温度下的流场特性、结构力学特性与泄漏特性,并基于Vermes公式构造了考虑齿变形的非金属迷宫密封泄漏量理论公式。研究结果表明:建立的迷宫密封流固热耦合模型可以准确计算非金属密封齿的变形量和变形后的泄漏量。在研究的三种材料中,采用PEEK-CA30材料密封齿的变形量相对较小,占密封齿径向长度的0.35%~0.67%,其密封性能较好,相比于未考虑齿变形密封的泄漏量增加1.2%~6.8%。当温度高于500 K,压比大于3时,采用铝合金材料密封齿的最大等效应力达到材料的屈服极限而引起密封件失效。所构造的泄漏量理论公式能够准确预测考虑齿变形的非金属迷宫密封泄漏量,为非金属迷宫密封泄漏特性分析提供理论依据。

关 键 词: 迷宫密封; 非金属材料; 流固热耦合; 泄漏特性; 公式构造

中图分类号: V233.5

文献标志码: A

Leakage characteristics and formula establishment of nonmetallic labyrinth seal based on fluid-solid-thermal coupling

ZHOU Min¹, SUN Dan¹, ZHAO Huan¹, ZHI Qiang², ZHANG Guochen¹

(1. Key Laboratory of Advanced Measurement and Test Technique for Aviation Propulsion System, Liaoning Province, School of Aero-engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Collaborative Innovation Center of Machine Manufacturing in Liaoning, Shenyang Blower Works Group Company Limited, Shenyang 110142, China)

Abstract: Fluid-solid-thermal coupling numerical model of nonmetallic labyrinth seal leakage characteristics was established considering the deformation of tooth. The flow field, structure mechanical characteristics and leakage characteristics of polyether ether ketone (PEEK), 30% car-

收稿日期: 2020-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(52075346, 51675351); 辽宁省自然科学基金(2019-ZD-0236);

辽宁省教育厅基础科研项目(JYT2020047)

作者简介: 周敏(1996—), 女, 硕士生, 主要从事非金属密封多物理场耦合性能研究。

通信作者: 孙丹(1981—), 男, 教授, 博士, 主要从事透平机械先进密封技术研究。E-mail: phd_sundan@163.com

引用格式: 周敏, 孙丹, 赵欢, 等. 基于流固热耦合的非金属迷宫密封泄漏特性与公式构造[J]. 航空动力学报, 2021, 36(8): 1783-1792. ZHOU Min, SUN Dan, ZHAO Huan, et al. Leakage characteristics and formula establishment of nonmetallic labyrinth seal based on fluid-solid-thermal coupling[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(8): 1783-1792.

bon fiber-filled reinforced polyether ether ketone (PEEK-CA30) and aluminium alloy in three kinds of material labyrinth seal under different pressure ratios and temperature were studied on the basis of the validation to solve the model accuracy, and based on the formula for Vermes, the non-metallic labyrinth leakage theory formula was constructed considering the deformation of tooth. The results showed that the fluid-solid-thermal coupling model of labyrinth seal can accurately calculate the deformation of nonmetallic seal teeth and the leakage rate. Among the three materials studied, PEEK-CA30 material had relatively small deformation of sealing teeth, accounting for 0.35%–0.67% of radial length of sealing teeth. Its sealing performance was good, and compared with the leakage rate without considering deformation of teeth, it only increased by 1.2%–6.8%. When the pressure ratio was more than 3 and the temperature was higher than 500 K, the equivalent stress of the seal teeth using aluminium alloy material reached the yield limit of the material, leading to the failure of the seal. The theoretical formula of leakage rate can accurately predict the leakage rate of nonmetallic labyrinth seal considering deformation of tooth, providing a theoretical basis for analysis of the leakage characteristics of nonmetallic labyrinth seal.

Key words: labyrinth seal; nonmetallic material; fluid-solid-thermal coupling; leakage characteristic; formula establishment

迷宫密封被广泛应用于航空发动机等透平机械中,起着减少工作介质泄漏的作用^[1-2]。迷宫密封通常采用铝合金、镍合金、钛合金等^[3]金属材料,为了防止迷宫密封静子与转子之间发生碰磨,密封径向间隙较大。John等^[4]通过实验发现非金属材料具有良好的塑性和摩擦学性能,可降低接触过程中的磨损,进而实现更小的密封间隙,现已逐渐应用于迷宫密封领域。

目前金属迷宫密封泄漏特性分析方法主要包括独立流场分析和多物理场耦合分析。在独立流场分析方面,Xu等^[5-6]率先研究了迷宫密封齿(下文简称为密封齿)弯曲后的曲率对密封泄漏量的影响。陈尧兴等^[7-8]研究了密封齿弯曲磨损后,密封径向间隙对其泄漏量的影响。孙丹等^[9]研究了压比、密封间隙对迷宫密封泄漏量的影响。独立流场分析仅研究了迷宫密封流场特性,并没有考虑密封齿变形对流场的影响,而研究人员发现密封齿变形与流场分布之间存在相互影响,故采用流固耦合方法研究迷宫密封流场特性和结构力学特性。在多物理场耦合分析方面,汤赫男等^[10-11]基于流固耦合方法研究了不同空腔深度对迷宫密封性能的影响。吴文健等^[12]基于流固耦合方法研究了不同偏心率下的迷宫密封流场特性。张雨等^[13]通过研究发现温度对密封齿变形量及其密封性能的影响较大。综上所述,学者们对迷宫密封泄漏特性数值研究大多基于金属迷宫密封独立流场分析或流固耦合分析,对考虑齿变形的非金属迷宫

密封流固热耦合研究较少。

在迷宫密封泄漏量公式研究方面,Martin^[14]用热力学原理分析理想密封模型的流动特性,最早提出了泄漏量理论公式。Egli^[15]通过实验修正了Martin方程,并考虑了动能载越效应。Vermes^[16]通过将边界层理论与Martin方程相结合对泄漏量公式进行了修正。胡东旭等^[17]在Vermes公式的基础上,考虑了进出口压比对泄漏系数的影响。孙丹等^[18]在Egli公式的基础上,考虑了实际气体参数对泄漏系数的影响。综上所述,研究人员所构造的迷宫密封泄漏量公式中泄漏系数大多是基于单一变量,并未同时考虑密封齿变形量、气流温度、进出口压比对泄漏系数的影响。

本文主要研究了采用聚醚醚酮(PEEK)、填充30%碳纤维增强聚醚醚酮(PEEK-CA30)和铝合金材料迷宫密封在不同进出口压比、温度下的流场分布、结构应变、应力及泄漏特性,并基于Vermes公式构造了考虑齿变形的非金属迷宫密封泄漏量理论公式,为非金属迷宫密封泄漏特性分析提供理论依据。

1 迷宫密封流固热耦合方法理论

1.1 流体域控制方程

在本文非金属迷宫密封流固热耦合计算工况下,流体域需要满足湍流流动守恒方程,包括^[19]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial X} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial Y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial Z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho U u) = \text{div}(\Gamma \text{grad } u) - \frac{\partial p}{\partial X} + S_u \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho U v) = \text{div}(\Gamma \text{grad } v) - \frac{\partial p}{\partial Y} + S_v \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho U w) = \text{div}(\Gamma \text{grad } w) - \frac{\partial p}{\partial Z} + S_w \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho t)}{\partial t} + \text{div}(\rho U T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad } T\right) + S_t \quad (3)$$

式中 ρ 为密度; t 为时间; p 为压力; u, v 和 w 是速度矢量 U 在 X, Y 和 Z 方向的分量; Γ 为扩散系数; S_u, S_v 和 S_w 为广义源项; T, k, c_p 分别为流体的温度、传热系数、比定压热容; S_t 为流体耗散项。

1.2 固体域控制方程

迷宫密封热塑性密封齿在流体作用下满足结构动力学方程^[20]

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = P(t) \quad (4)$$

式中 M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; $\ddot{x}, \dot{x}, x$ 分别为加速度、速度、位移矢量; $P(t)$ 为流体施加在密封齿上的载荷向量。

固体区域增加了由温差引起的热变形项

$$f_T = \alpha_T \cdot \nabla T \quad (5)$$

式中 α_T 为与温度相关的热膨胀系数。

1.3 传热控制方程

由热平衡可知,在流固热耦合面处的导热热通量 Q_w 与对流热通量 Q_c 相等,故 $Q_w = Q_c$,可得到以下关系^[21]

$$\begin{cases} Q_w = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \Big|_{y=0} \\ Q_c = k(T_s - T_f) = Q_w \end{cases} \quad (6)$$

式中 λ 为导热系数; T_s 为固体表面温度; T_f 为流体表面温度。

1.4 流固热耦合控制方程

迷宫密封流固热耦合界面处应满足流体与固体的位移、热流量、温度、应力相等^[22]。

$$\begin{cases} n\tau_f = n\tau_s \\ x_f = x_s \\ Q_f = Q_s \\ T_f = T_s \end{cases} \quad (7)$$

式中 τ 为应力, x 为位移, Q 为热通量, T_f 为流体表面温度, T_s 为固体表面温度,下标 s 表示固体,下标 f 表示流体。 n 为交界面的法线方向,交界面上的应力需在法线方向上达到平衡。

本文密封齿变形量是利用 fluid-solid interface

将密封流场计算得到的温度和压力耦合到密封齿表面,通过 static structural 对密封齿进行结构分析,得到密封齿变形量,变形量提取过程如图1所示。

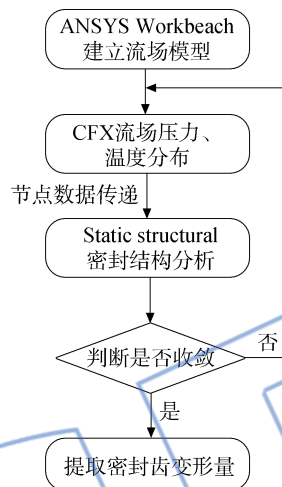


图1 密封齿变形量提取

Fig.1 Labyrinth seal tooth deformation extraction

本文考虑齿变形的非金属迷宫密封流固热耦合求解流程如图2所示。以 t_N 时刻的流场分布和密封齿径向变形量作为初始条件,流体域和固体域之间通过网格插值进行数据传递,直至载荷、位移达到收敛,则完成一次耦合迭代,继续进入下一时刻循环。否则,优化网格,重新进行上述计算。

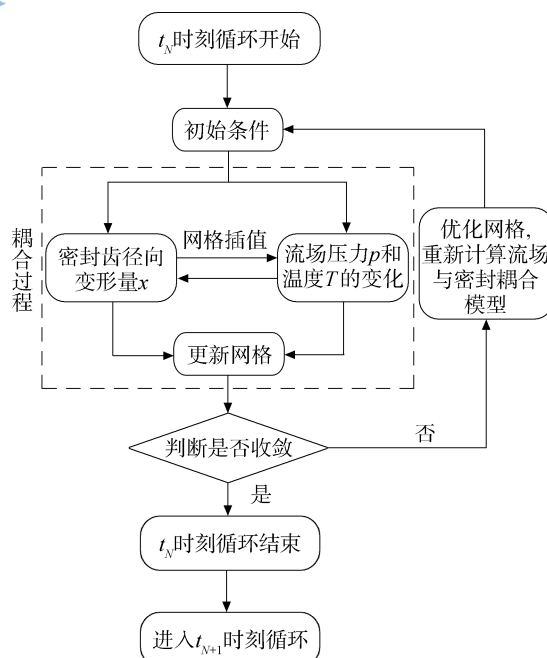


图2 迷宫密封流固热耦合计算流程图

Fig.2 Flow chart of fluid-solid-thermal coupling calculation for labyrinth seal

2 迷宫密封流固热耦合方法数值研究

2.1 求解模型

本文计算模型取自 Toshio 等^[23]的压缩机叶轮进口迷宫密封,建立了考虑齿变形的迷宫密封泄漏特性流固热耦合数值求解模型,该模型包含五个齿高、齿厚均相等的锥形直齿。迷宫密封几何参数如图 3 所示。聚芳醚酮常用来制造压缩机梳齿密封、汽轮机齿轮密封件、航空航天结构材料等^[24]。本文采用的聚芳醚酮材料为 PEEK、PEEK-CA30。迷宫密封材料性能见表 1。

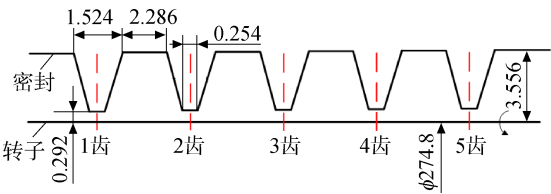


图 3 迷宫密封模型尺寸(单位:mm)
Fig. 3 Labyrinth seal model dimensions (unit:mm)

表 1 迷宫密封材料性能

Table 1 Labyrinth sealing material characteristics

参数	PEEK	PEEK-CA30	铝合金
密度/(g/cm ³)	1.3	1.4	2.9
泊松比	0.25	0.30	0.33
弹性模量/MPa	3 660	22 000	68 900
导热系数/(W/(m·K))	0.473	0.950	226
热膨胀系数/10 ⁻⁶ K ⁻¹	17.5	6.1	23.0
比定压热容/(J/(kg·K))	2 200	1 800	900

2.2 网格划分

本文求解模型采用多区域方法划分网格。图 4 为迷宫密封流固热耦合网格划分。为了得到高质量的六面体网格,对近壁面进行网格加密处理。

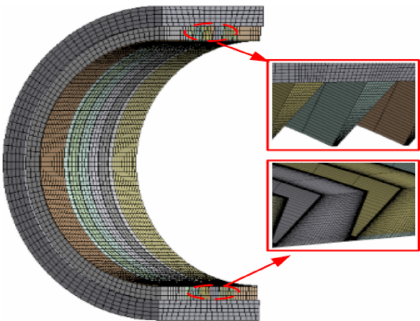


图 4 迷宫密封流固热耦合网格划分
Fig.4 Grid division of fluid-solid-thermal coupling of labyrinth seal

综合考虑求解精度及计算时间,最终确定流体域网格为 520 万,固体域网格为 350 万。

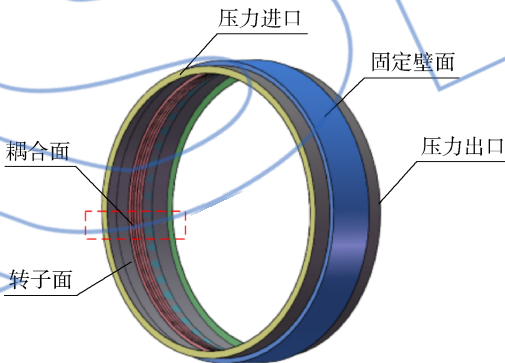
2.3 边界条件

表 2 给出了迷宫密封工况参数。图 5 给出了迷宫密封流固热耦合边界。

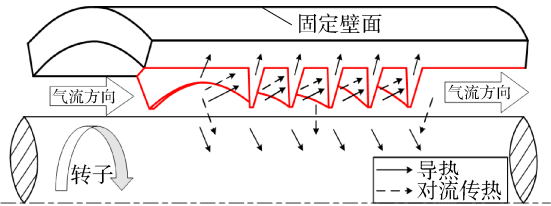
表 2 密封模型工况参数

Table 2 Operating parameters of the sealing model

参数	数值及说明
流体属性	理想空气
转子转速/(r/min)	11 097
密封齿齿数	5
静子温度/K	298
湍流模型	$k-\epsilon$
出口压力/MPa	1
进出口压比	3~7
进口温度/K	300~700



(a) 迷宫密封边界条件示意图



(b) 迷宫密封热传递示意图

图 5 迷宫密封流固热耦合边界条件

Fig. 5 Boundary conditions of fluid-solid-thermal coupling of labyrinth seal

本文模型流体域进出口采用压力边界条件,流动模型为标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,固定壁面为光滑、绝热、无滑移边界,采用高精度迎风格式进行迭代计算。固体域分别采用 PEEK、PEEK-CA30、铝合金三种材料,密封结构的固定端采用固定约束,

并将密封齿表面设定为耦合面。耦合面通过导入流场计算收敛后的气流力和温度以实现流固热耦合的载荷传递,从而将流场的压力和温度数据通过节点数据导入固体中计算。

2.4 求解模型准确性验证

表 3 给出了本文基于流固热耦合的 CFX 模型与外文文献 Tascflow 模型^[23]的密封泄漏量对比结果。图 6 给出了两种求解方法对应的密封轴向压力分布对比结果。从表 3 中可以明确看出,两种方法所求得密封泄漏量的相对误差为 0.93%。从图 6 中可以看出,CFX 求解模型得到的轴向压力结果与 Tascflow^[23]的结果相近。本文数值计算得到的泄漏量、轴向压力分布与文献[23]数值计算结果误差较小,验证了本文求解模型的准确性。

表 3 密封泄漏量对比结果

Table 3 Comparison results of seal leakage rate

求解方法	泄漏量/(kg/s)	相对误差/%
文献[23]	1.08	0
本文 CFX	1.09	0.93

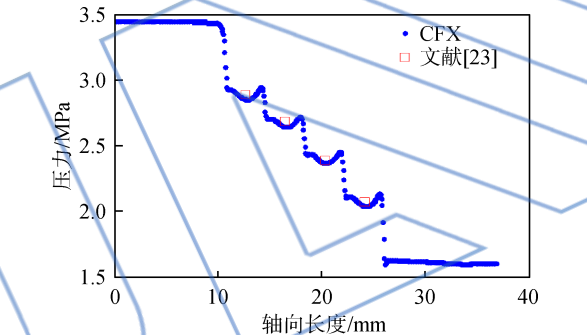


图 6 两种求解方法的压力随轴向长度变化
Fig. 6 Variation of pressure with axial length of two solve methods

3 数值计算结果分析

3.1 密封流场特性分析

图 7 分别给出了压比为 7,温度为 500 K 时,采用 PEEK-CA30 材料迷宫密封对应的流场压力云图和温度云图。图 8 给出了采用不同材料迷宫密封对应的流场压力随轴向长度变化图。从图 7(a)中可以看出,密封内流场压力从进口到出口端逐渐降低,在齿腔内的压力分布基本一致,压力能转化为动能,且密封件中最后一个密封齿的压降最大,故压力能转化为动能效果最为显著。从

图 7(b)中可以看出,密封齿腔内的温度沿轴向基本不变,而齿顶处的温度稍低于齿腔内温度,且在最后一个密封齿的齿顶处温度最低。从图 8 中可以看出,采用 PEEK-CA30 材料迷宫密封与其他两种材料相比,沿轴向的同一位置其密封流场压力相对较低,与未考虑齿变形的迷宫密封流场压力基本一致,故其密封间隙相对较小,泄漏量相对较少。

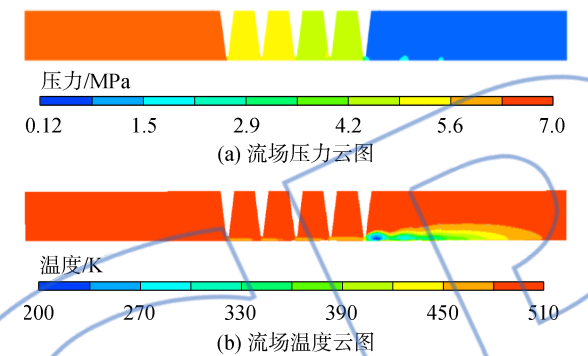


图 7 迷宫密封流场分布
Fig. 7 Flow field distribution of labyrinth seal

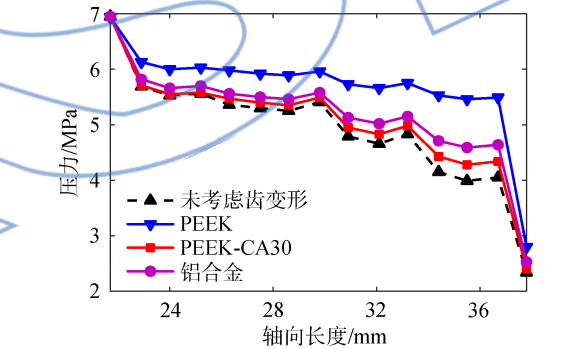


图 8 流场压力随轴向长度变化
Fig. 8 Variation of flow field pressure with axial length

3.2 密封结构力学特性分析

3.2.1 密封结构应变分析

图 9 给出了压比为 7,温度为 500 K 时,采用不同材料密封齿的应变图。从图中可以看出,密封件的变形量主要集中在密封齿上,且密封件中各齿的变形量均从其齿顶位置向齿根方向逐渐减小。由对比可以看出,采用 PEEK 材料和 PEEK-CA30 材料密封件中第一个齿的变形量最大,且沿气流方向密封齿变形量逐渐减小,而采用铝合金材料密封件中各齿的变形量无明显变化。在相同工况下采用 PEEK-CA30 材料密封齿的变形量最小。

从表 4 中可以看出,采用 PEEK 材料迷宫密

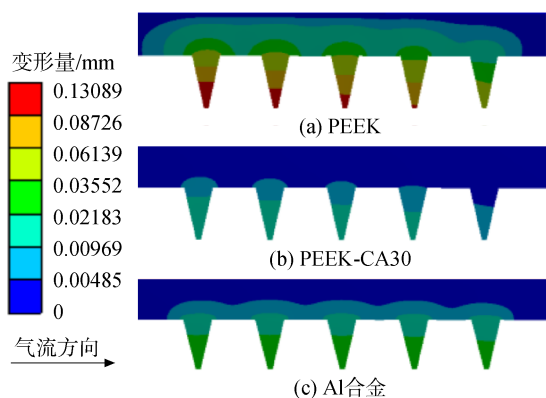


图9 不同材料密封齿的应变图

Fig. 9 Strain diagram of sealing teeth of different materials

封的径向和轴向变形量最大,主要由于该材料的弹性模量较小,使得在高压下密封齿在径向和轴向均发生较大的变形。采用铝合金材料的密封齿径向变形量相比轴向变形量大,主要由于该材料的导热系数和热膨胀系数较大。综合考虑材料的弹性模量和热膨胀系数,采用PEEK-CA30材料密封齿的各个方向变形量相对最小。

表4 三种材料密封齿在不同方向的变形量

Table 4 Deformation of the sealing teeth of the three materials in different directions

材料	变形量/mm	
	径向	轴向
PEEK	0.078 504	0.052 336
PEEK-CA30	0.012 087 0	0.009 670 2
铝合金	0.022 643	0.012 939

从图10中可以看出,考虑齿变形的密封齿不仅发生径向变形,还有轴向变形。当密封齿变形量较大,整个密封腔会连带产生变形,使密封齿向上移动,密封径向间隙变大。迷宫密封由于受到温度和压力载荷的作用发生弯曲变形,密封齿呈现圆弧形。

图11给出了不同材料迷宫密封齿最大变形量随温度和压比的变化曲线。由图11(a)和图11(b)可以对比得出,温度对采用铝合金材料密封齿的变形量影响较大,占密封齿径向长度的0.51%~1.98%,而压比对采用PEEK材料密封齿的变形量影响较大,占密封齿径向长度的1.72%~4.02%,主要是由于密封齿的变形量与材料的热膨胀系数和弹性模量均有关,且材料的热膨胀系数越低,弹性模量越高,密封齿的变形量越

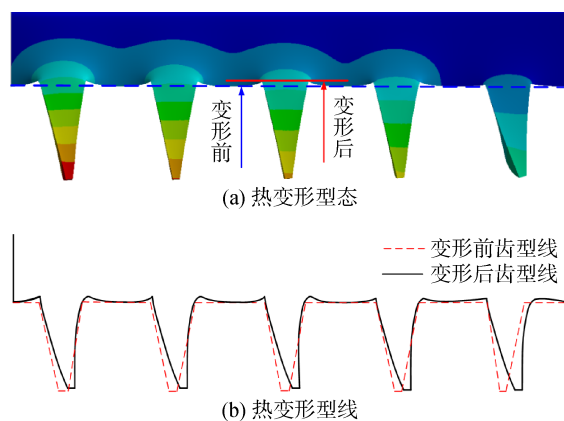
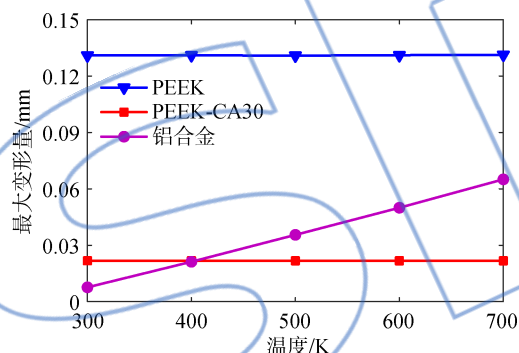
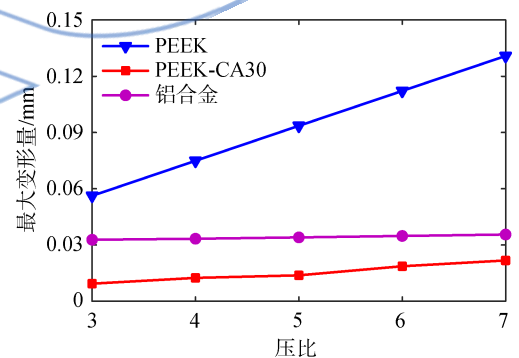


图10 密封齿热变形型态和型线放大示意图

Fig. 10 Enlargement diagram of thermal deformation pattern and profile of sealing teeth



(a) 温度对最大变形量的影响(压比为7)



(b) 压比对最大变形量的影响(温度为500 K)

图11 密封齿的应变特性

Fig. 11 Strain characteristics of labyrinth seal teeth

小。当耦合压力和温度后,采用PEEK-CA30材料密封齿的变形量相对较小,占密封齿径向长度的0.35%~0.67%。

3.2.2 密封结构应力分析

图12给出了压比为7,进口温度为500 K时,采用不同材料密封齿的应力图。从图中可以看出,等效应力的最大值分布在第一个密封齿的齿根位置,且每个密封齿的等效应力均从齿根处向

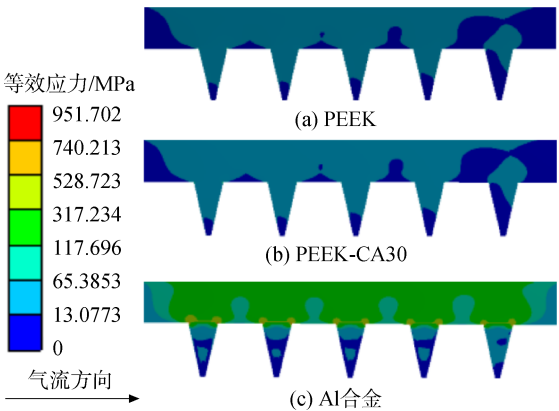
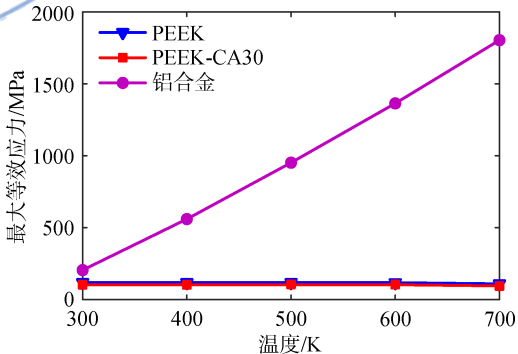


图 12 不同材料密封结构的应力图
Fig.12 Stress diagram of sealing structure of different materials

齿顶方向逐渐减小。高压使得铝合金材料密封齿根处发生应力集中,且相比于常温下,铝合金材料在高温下的屈服应力会降低,故密封件的应力超过了材料的屈服极限,密封件失效。影响铝合金材料应力的弹性模量、导热系数、热膨胀系数均与温度有关,使得铝合金材料的应力对温度敏感。

图 13 给出了不同材料密封齿最大等效应力随温度和压比的变化曲线。由图 13(a)可知,随着温度的增加,采用非金属热塑性材料密封结构的最大等效应力变化规律一致,且随温度的增加基本不变。由图 13(b)可知,随着压比的增加,采用非金属热塑性材料密封结构的最大等效应力呈小幅度增加。而采用铝合金材料密封齿的最大等效应力随着温度和压比增加而增大。从图 13(a)和图 13(b)对比可得,当温度高于 500 K,压比为 3~7 时,采用铝合金材料密封齿容易失效,这是因为其畸变能密度达到材料单向拉伸屈服时的畸



(a) 温度对最大等效应力的影响(压比为7)

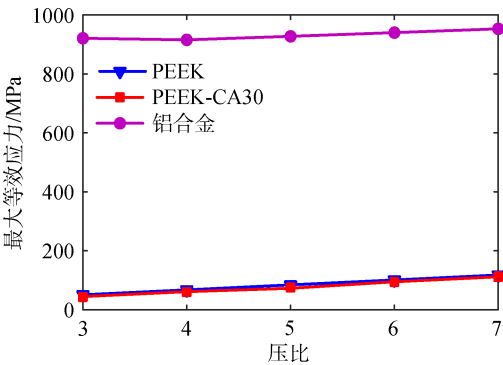


图 13 密封齿的应力特性
Fig. 13 Stress characteristics of labyrinth seal teeth

变能密度。

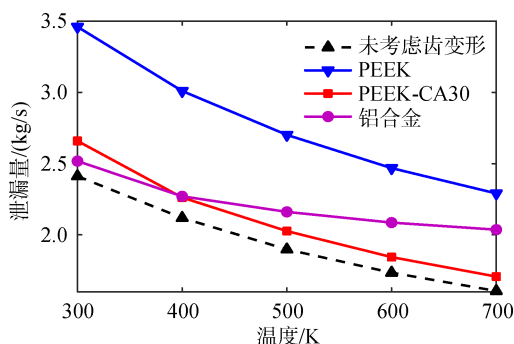
3.3 密封泄漏特性分析

采用不同材料的迷宫密封在变形后进行网格划分方法和变形前一致,得到密封齿变形前后的计算网格如表 5 所示。

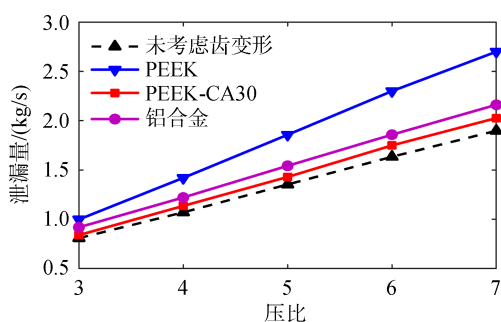
表 5 变形前后网格数量对比
Table 5 Comparison of grid quantity before and after deformation

材料	网格数量/ 10^5
变形前	52
PEEK	60
PEEK-CA30	54
铝合金	56

图 14 给出了采用不同材料密封齿的泄漏量随温度和压比的变化曲线。由图 14(a)中可以看出,随着温度的增大,泄漏量减少,主要是由于温度越高,流体黏度越大,其流动性越差。当温度较高时,采用 PEEK-CA30 材料密封结构的泄漏量相对最少,相比未考虑密封齿变形的泄漏量仅增加 1.2%~6.7%。由图 14(b)中可以看出,随着压比的增大,密封泄漏量增加。采用 PEEK-CA30 材料迷宫密封性能最好,相比未考虑密封齿变形的泄漏量仅增加 2.9%~6.8%,主要是由于该材料的热膨胀系数低,弹性模量高,密封齿变形量较小,从而密封泄漏量较少。同时也可以看出,密封齿变形对密封泄漏量的影响较大,因此,基于流固热耦合的迷宫密封泄漏特性研究具有重要的意义。



(a) 温度对泄漏量的影响(压比为7)



(b) 压比对泄漏量的影响(温度为500 K)

图14 迷宫密封结构的泄漏特性

Fig.14 Leakage characteristics of labyrinth seal structure

4 考虑齿变形的密封泄漏量公式构造

4.1 泄漏量计算分析

迷宫密封内气体在进出口压差的作用下从高压向低压流动,图15为迷宫密封的气流流动示意图,图中 p_i 为进口压力; T_i 为进口温度; p_o 为出口压力; T_o 为出口温度; δ 为未考虑齿变形的密封间隙; L 为相邻密封齿轴向间距; l 为齿顶宽度; Φ 为转轴直径。

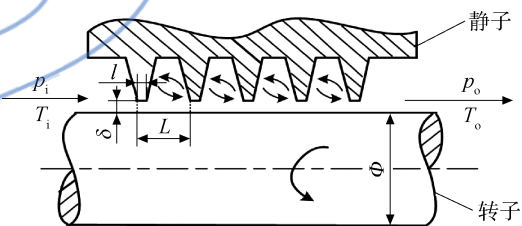


图15 迷宫密封的气流流动图

Fig. 15 Flow diagram of labyrinth seal

为了构造考虑齿变形的迷宫密封泄漏量理论公式,需引入修正系数 C_d ,通过对Vermes公式进行修正,得到考虑齿变形的迷宫密封实际泄漏量公式^[15]

$$q_m = C_d q_{m,i} \quad (8)$$

式中 q_m 为迷宫密封的实际泄漏量; $q_{m,i}$ 为Vermes公式计算得到的泄漏量,其计算公式为

$$q_{m,i} = A \frac{1}{(R_g T_i)^{1/2}} \left[\frac{1 - (p_o/p_i)^2}{n_s - \ln(p_o/p_i)} \right]^{1/2} \frac{p_i}{\sqrt{(1 - \beta)}} \quad (9)$$

式中 n_s 为迷宫密封的等效齿数; R_g 为理想气体常数; A 为流通面积; β 为透气效应因子。

4.2 泄漏量公式构造

当采用金属材料或非金属材料的密封齿发生变形时,密封的等效间隙、透气效应因子及流体有效流通面积都发生变化。

等效密封间隙 δ' 为

$$\delta' = \delta + \Delta x \quad (10)$$

修正后的透气效应因子 β' 为

$$\beta' = \frac{8.52}{\frac{L-l}{\delta'} + 7.23} \quad (11)$$

流体有效流通面积 A_i 为

$$A_i = \pi \Phi \delta' \quad (12)$$

式中 Δx 为密封齿变形量。

在本文的研究内容中,影响考虑齿变形的迷宫密封泄漏量参数有压比 π 、密封齿变形量(Δx)和进口温度 T_i ,故通过数值计算结果对修正系数 C_d 进行了公式构造

$$C_d = f_1(\pi) f_2(\Delta x) f_3(T_i) \quad (13)$$

采用修正系数法分别得到压比、密封齿变形量和进口温度对泄漏量影响的公式如下:

$$\begin{cases} f_1(\pi) = 0.31\pi - 0.075 \\ f_2(\Delta x) = 3.527\Delta x^2 + 7.654\Delta x + 1.898 \\ f_3(T_i) = 4.096 \times 10^{-6} T_i^2 - 6.419 \times 10^{-3} T_i + 4.31 \end{cases} \quad (14)$$

$$q_{m,i} =$$

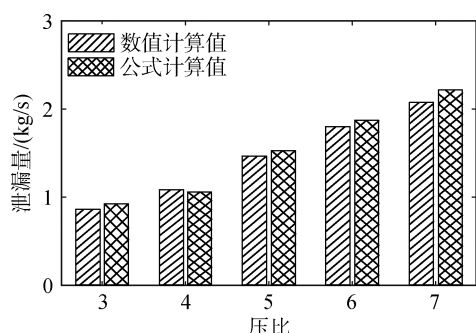
$$C_d A_i \frac{1}{(R_g T_i)^{1/2}} \left[\frac{1 - (p_o/p_i)^2}{n_s - \ln(p_o/p_i)} \right]^{1/2} \frac{p_i}{\sqrt{(1 - \beta')}} \quad (15)$$

综上,将式(11)~式(14)代入式(15)中可得到考虑齿变形的迷宫密封实际泄漏量。

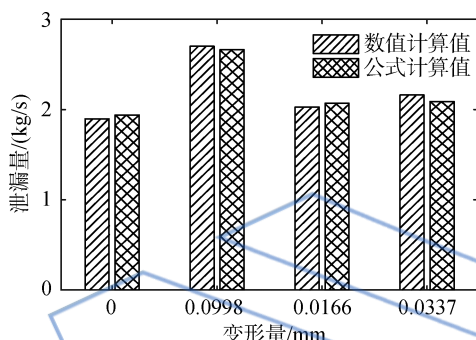
4.3 泄漏量理论公式验证

为了验证考虑齿变形的迷宫密封泄漏量理论公式的准确性,分别给出了在不同压比、密封间隙、温度下泄漏量数值计算值与公式计算值的对比,结果如图16所示。从图中可以发现,泄漏量

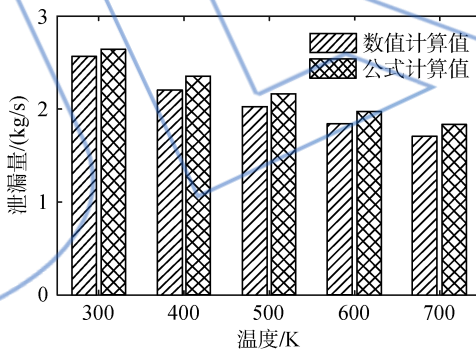
公式计算值和数值计算值的相对误差均小于6%,因此本文所构造的泄漏量公式能够很好地吻合数值计算的结果,并能够可靠地预测考虑齿变形的迷宫密封泄漏量。



(a) 压比对泄漏量影响的对比
(PEEK-CA30, 温度为500 K)



(b) 变形量对泄漏量影响的对比
(压比为7, 温度为500 K)



(c) 温度对泄漏量影响的对比
(PEEK-CA30, 压比为7)

图16 考虑齿变形的密封泄漏量结果对比

Fig. 16 Comparison of seal leakage with consideration of tooth deformation

5 结论

本文主要研究了采用PEEK、PEEK-CA30、铝合金三种材料的迷宫密封在不同压比、温度下的流场特性、泄漏特性与结构力学特性,并基于

Vermes公式构造了考虑齿变形的非金属迷宫密封泄漏量理论公式。具体结论如下:

1) 建立的迷宫密封流固热耦合模型可以准确计算非金属密封齿的变形量。在研究的三种材料中,采用PEEK-CA30材料密封齿的变形量相对较小,占密封齿径向长度的0.35%~0.67%,其密封性能较好,相比于未考虑齿变形密封的泄漏量仅增加1.2%~6.8%。

2) 当温度为500~700 K,压比为3~7时,采用铝合金材料密封齿的最大等效应力达到材料的屈服极限,密封件失效。

3) 所构造的泄漏量理论公式能够准确预测考虑齿变形的非金属迷宫密封泄漏量,为非金属迷宫密封泄漏特性分析提供理论依据。

参考文献:

- [1] 陈璐琪,张万福,顾乾磊,等.光滑环形密封阻塞流动特性研究[J].中国电机工程学报,2018,38(22):6632-6640.
CHEN Luqi, ZHANG Wanfu, GU Qianlei, et al. Research on the flow characteristics of smooth annular seal under choked flow conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22):6632-6640. (in Chinese)
- [2] 李钰洁,刘永葆,贺星.间隙变化对新型涡轮密封气动性能影响的数值分析[J].推进技术,2015,36(8):1179-1185.
LI Yujie, LIU Yongbao, HE Xing. Numerical simulation for effects of clearance change of a novel seal on aerodynamic performance of gas turbine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(8):1179-1185. (in Chinese)
- [3] 张鹏,朱强,秦鹤勇,等.航空发动机用耐高温材料的研究进展[J].材料导报,2014,28(11):27-31,37.
ZHANG Peng, ZHU Qiang, QIN Heyong, et al. Research progress of high temperature materials for aero-engines[J]. Materials Reports, 2014, 28(11):27-31, 37. (in Chinese)
- [4] JOHN K W, EDUARDO A, LESTER P. Thermoplastic labyrinth seal for centrifugal compressors[C]//Proceedings of 33rd Turbomachinery Symposium. College Station, TX, US: Texas A&M University, Turbomachinery Laboratories, 2004.
- [5] XU J, AMBROSIA M S, RHODE D L. Effect of tooth bending damage on the leakage of straight-through labyrinth seal[C]//Proceedings of ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting. Houston, TX, USA: ASME, 2005:119-124.
- [6] XU J. Effects of operating damage of labyrinth seal on seal leakage and wheelspace hot gas ingress[D]. College Station, Texas, USA: Texas A&M University, 2006.
- [7] 陈尧兴,李志刚,晏鑫,等.迷宫齿弯曲磨损时密封泄漏特性和转子动力特性系数研究[J].西安交通大学学报,2018,52(6):157-164.
CHEN Yaoping, LI Zhigang, YAN Xin, et al. Investigations on the leakage characteristics and rotordynamic coefficients of

- labyrinth seal with tooth bending damage[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(6):157-164. (in Chinese)
- [8] 陈尧兴, 李志刚, 晏鑫, 等. 迷宫齿蘑菇形磨损时密封泄漏特性和转子动力特性系数研究[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(1):40-46.
- CHEN Yaoxing, LI Zhigang, YAN Xin, et al. Investigation on the leakage performance and rotordynamic coefficients of labyrinth seal with mushroom-shaped tooth wear[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(1):40-46. (in Chinese)
- [9] 孙丹, 卢江, 王雯, 等. 基于热力学效应的迷宫密封静力机理数值研究[J]. 热力透平, 2018, 47(3):175-181.
- SUN Dan, LU Jiang, WANG Wen, et al. Numerical investigations for sealing mechanism of labyrinth seals based on thermodynamic effect[J]. Thermal Turbine, 2018, 47(3):175-181. (in Chinese)
- [10] 汤赫男, 鲁洁, 王世杰. 齿形角对迷宫密封性能影响的流固耦合分析[J]. 润滑与密封, 2015, 40(10):36-40.
- TANG Henan, LU Jie, WANG Shijie. Fluid-structure interaction analysis of tooth profile angle effect on labyrinth seal performance[J]. Lubrication Engineering, 2015, 40(10):36-40. (in Chinese)
- [11] 汤赫男, 鲁杰, 王世杰. 往复式压缩机迷宫密封中空腔深度对泄漏量的影响分析[J]. 机械设计与制造, 2017(3):122-124.
- TANG Henan, LU Jie, WANG Shijie. Analysis of the influence of cavity depth on the labyrinth seal leakage of reciprocating compressors[J]. Machinery Design and Manufacture, 2017(3):122-124. (in Chinese)
- [12] 吴文健, 应光耀, 魏晨, 等. 气流激振与转子系统的流固耦合计算[J]. 浙江电力, 2017, 36(1):43-46.
- WU Wenjian, YING Guangyao, WEI Chen, et al. Fluid-structure interaction computation of airstream excitation and rotor system[J]. Zhejiang Electric Power, 2017, 36(1):43-46. (in Chinese)
- [13] 张雨, 张开林. 结构变形对高速齿轮箱直通式迷宫密封性能的影响分析[J]. 液压与气动, 2019(3):14-18.
- ZHANG Yu, ZHANG Kailin. Influence of structural deformation on sealing performance of high-speed gearbox with straight-through labyrinth seal[J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics, 2019(3):14-18. (in Chinese)
- [14] MARTIN S. Exploring the grants labyrinth[J]. Estates Gazette, 2002(246):131-131.
- [15] EGLI A. The leakage of gases through narrow channels[J]. Journal of Applied Mechanics, 1937, 4(2):63-68.
- [16] VERMES G. A fluid mechanics approach to the labyrinth-seal leakage problem[J]. Journal of Engineering for Power, 1961, 83(2):161-169.
- [17] 胡东旭, 贾力, 杨立新. 篦齿封严泄漏特性的实验[J]. 航空动力学报, 2014, 29(3):549-555.
- HU Dongxu, JIA Li, YANG Lixin. Experiment on leakage characteristics in labyrinth seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(3):549-555. (in Chinese)
- [18] 孙丹, 邹静岚, 赵欢, 等. 实际气体参数对迷宫密封静力与动力特性影响机理研究[J]. 动力工程学报, 2020, 40(1):14-22, 30.
- SUN Dan, ZOU Jinglan, ZHAO Huan, et al. Influence mechanism of real gas parameters on static and dynamic characteristics of labyrinth seals[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(1):14-22, 30. (in Chinese)
- [19] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD软件的原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004:10-11.
- [20] 张小伟, 王延荣, 张潇, 等. 涡轮机械叶片的流固耦合数值计算方法[J]. 航空动力学报, 2009, 24(7):1622-1626.
- ZHANG Xiaowei, WANG Yanrong, ZHANG Xiao, et al. Numerical method for fluid-structure interaction in turbomachinery bladings[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(7):1622-1626. (in Chinese)
- [21] 魏炫宇, 马咏梅, 丁万, 等. 机械密封摩擦副界面热流固耦合分析[J]. 机械设计与制造工程, 2017, 46(6):89-94.
- WEI Xuanyu, MA Yongmei, DING Wan, et al. The thermal fluid and solid coupling analysis on the friction surface of mechanical seal[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2017, 46(6):89-94. (in Chinese)
- [22] 马灵童, 孟庆睿. 液黏传动摩擦副流固耦合传热分析[J]. 润滑与密封, 2019, 44(10):98-103.
- MA Lingtong, MENG Qingrui. Analysis of fluid-solid coupled heat transfer of friction pairs on hydro-viscous drive[J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(10):98-103. (in Chinese)
- [23] TOSHIO H, GUO Zenglin, KIRK R G. Application of computation fluid dynamic analysis for rotating machinery: Part II labyrinth seal analysis[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127(4):820-826.
- [24] 饶先花, 曹民, 代惊奇, 等. 国内外特种工程塑料聚芳醚酮的生产、应用及发展前景[J]. 塑料工业, 2012, 40(9):18-22.
- RAO Xianhua, CAO Min, DAI Jingqi, et al. Production, application and development prospects of special engineering plastic polyaryletherketone at home and abroad[J]. China Plastics Industry, 2012, 40(9):18-22. (in Chinese)

(编辑:陈越)