

文章编号: 1000-8055(2024)11-20220169-11

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220169

陶瓷栅板密封泄漏特性数值方法研究

金冠男¹, 孙 丹¹, 张国臣¹, 刘 胜², 满延进², 李建辉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. 北京动力机械研究所, 北京 100074)

摘 要: 理论分析了陶瓷栅板密封的泄漏特性, 提出了考虑间隙泄漏与接触泄漏的陶瓷栅板密封泄漏特性的数值计算方法, 在验证数值方法准确性基础上, 通过分析进出口压比及温度等工况参数对闭合力、流量因子及泄漏量的影响, 研究了工况参数下的陶瓷栅板密封流场、自密封效应及泄漏特性, 揭示了自密封效应的变化规律, 阐明了陶瓷栅板密封的泄漏机理。研究表明: 陶瓷栅板密封闭合力随进出口压比的增加而增大, 自密封效应随之增强, 径向闭合力高于切向闭合力; 气流温度对陶瓷栅板密封切向闭合力影响较小, 径向闭合力随着气流温度的增加而平缓减小, 径向自密封效应随之减弱; 陶瓷栅板密封泄漏量随着进出口压比增加而增大, 随着温度的增大而减小, 且间隙泄漏在泄漏系统中占主要地位。提出的数值方法能准确计算陶瓷栅板密封泄漏量, 为陶瓷栅板密封泄漏特性分析提供理论依据。

关 键 词: 陶瓷栅板密封; 间隙泄漏; 接触泄漏; 泄漏特性; 自密封效应

中图分类号: V233.5

文献标志码: A

Study on numerical method of leakage characteristics of ceramic wafer seal

JIN Guannan¹, SUN Dan¹, ZHANG Guochen¹, LIU Sheng², MAN Yanjin², LI Jianhui¹

(1. Liaoning Key Laboratory of Advanced Measurement and

Test Technology for Aviation Propulsion System, School of Aero-engine,

Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Beijing Power Machinery Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: The leakage characteristics of ceramic wafer seal were analyzed theoretically, and a numerical calculation method of leakage characteristics of ceramic wafer seal considering clearance leakage and contact leakage was proposed. On the basis of verifying the accuracy of the numerical method, the flow field, the self-sealing effect and leakage characteristics of ceramic wafer seal under working conditions were studied by analyzing the influence of inlet and outlet pressure ratio and temperature on the closing force, flow factor and leakage, revealing the changing rule of self-sealing effect and clarifying the leakage mechanism of ceramic wafer seal. The results showed that the sealing force of ceramic wafer seal increased with the increase of inlet and outlet pressure ratio, and the self-sealing effect was enhanced. The radial closing force was higher than the tangential closing force. Air flow had little influence on the tangential closing force of ceramic wafer seal, while the radial closing force decreased gently with the

收稿日期: 2022-03-30

基金项目: 国家自然科学基金(52075346); 先进航空动力创新工作站(依托中国航空发动机研究院设立)项目(HKC2020-02-030)

作者简介: 金冠男(1998—), 男, 硕士, 主要从事陶瓷栅板密封泄漏特性研究。

通信作者: 张国臣(1984—), 男, 讲师, 博士, 主要从事航空发动机先进密封技术研究。E-mail: hngchzh@126.com

引用格式: 金冠男, 孙丹, 张国臣, 等. 陶瓷栅板密封泄漏特性数值方法研究[J]. 航空动力学报, 2024, 39(11): 20220169. JIN Guannan, SUN Dan, ZHANG Guochen, et al. Study on numerical method of leakage characteristics of ceramic wafer seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(11): 20220169.

increase of air flow temperature, and the radial self-sealing effect was weakened accordingly. The leakage of ceramic wafer seal increased with the increase of inlet-outlet pressure ratio and decreased with the temperature rise, and the gap leakage played a major role in the leakage system. The numerical method proposed can accurately calculate the leakage of ceramic wafer seals, providing a theoretical basis for the analysis of leakage characteristics of ceramic wafer seal.

Keywords: ceramic wafer seal; gap leakage; contact leakage; leakage characteristics; self-sealing effect

陶瓷栅板密封具有耐高温、耐久性、可重复使用性等优点,已在航空航天及军事领域有着重要应用^[1-3]。图 1 给出了陶瓷栅板密封在空天飞机发动机的应用位置^[4]。陶瓷栅板密封结构复杂,其泄漏特性数值研究比较困难,开展陶瓷栅板密封泄漏特性数值方法研究具有重要意义。

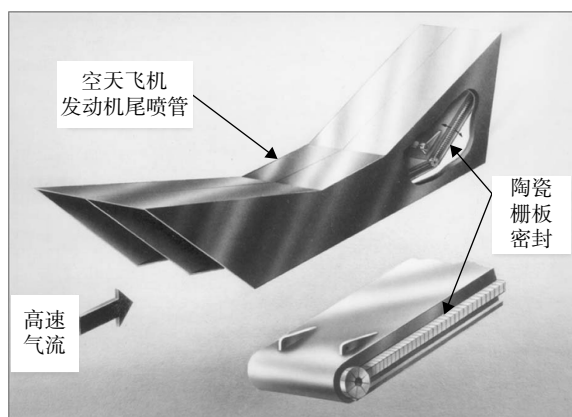


图 1 空天飞机发动机尾喷管陶瓷栅板密封结构^[4]

Fig. 1 Structure of ceramic wafer seal in aerospace aircraft engine^[4]

陶瓷栅板密封泄漏特性分析属于微小间隙流体泄漏流动问题^[5]。国外学者 Bisson 等^[6]认为层流条件下,气体润滑轴承腔微小间隙的流动状态满足忽略惯性力的雷诺方程。NASA^[5]以层流条件下的雷诺方程为基础,根据陶瓷栅板密封实际边界条件对雷诺方程进行求解,得到陶瓷栅板密封泄漏量理论公式。基于高温流道侧壁在工作状态下产生外凸变形^[7]以及陶瓷栅板自密封效应^[8],国内学者李鸿举等^[9]指出了陶瓷栅板密封存在泄漏间隙以及悬浮间隙,并分别推导出两种间隙的理论计算公式。随着 CFD 技术的发展以及理论求解的局限性,学者们利用数值方法分析了不同微小间隙密封的泄漏特性。徐洁^[10]采用数值方法对比分析了静止与旋转微小间隙密封的流体流动状态,并揭示了密封内部流体流动机理。Childs 等^[11]建立了旋转机械微小间隙的气膜密封泄漏特性数值模型,研究了气膜密封静力特性。

胡廷勋等^[12]给出了浮环密封泄漏量的定量数值计算方法。闫玉涛等^[13]应用多物理场耦合方法对微小间隙圆周密封泄漏特性进行研究分析,包超英等^[14]基于多孔介质理论建立了考虑粗糙表面接触式微小间隙的数值模型,分析了其泄漏特性。基于 Yan 等^[15]提出的分形几何 W-M 函数法,李伟平等^[16]建立了考虑粗糙表面的静止微小间隙泄漏特性数值求解模型,准确预测了微尺度密封的泄漏量。综上所述,国内外学者主要采用理论与数值方法对微小间隙密封进行分析,对陶瓷栅板密封泄漏特性的数值研究较少。

本文分析了陶瓷栅板密封的工作原理、泄漏路径及流动状态,提出了针对陶瓷栅板密封泄漏特性的数值研究方法,建立了间隙泄漏与接触泄漏的数值模型,在验证数值方法准确性的基础上,研究了工况参数下的陶瓷栅板密封流场、自密封效应及泄漏特性。

1 陶瓷栅板密封泄漏特性理论分析

1.1 陶瓷栅板密封工作原理

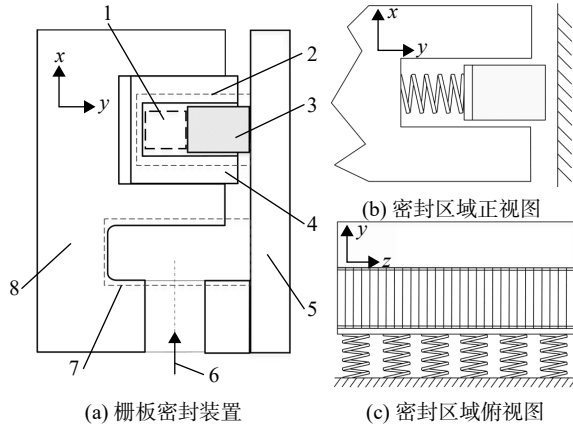
1.1.1 陶瓷栅板密封结构分析

高超声速飞行器关键的机械系统是面板边缘密封,其需要满足低泄漏、适应变形、高温、高压、滑动操作等要求,陶瓷栅板密封满足条件所需,其泄漏量很低,且陶瓷栅板可通过相对滑动来解决高温工作状态下密封面板外凸变形而产生的泄漏,其结构形式如图 2 所示,主要由密封区域、集气腔、密封衬套、分隔板及装置主体 5 部分组成,其中密封区域结构由若干陶瓷栅片、压缩弹簧、桥接元件及分隔板组成。

1.1.2 陶瓷栅板密封受力分析

图 3 给出了陶瓷栅板密封在初始平衡状态及工作平衡状态的受力分析图。

在装置初始状态陶瓷栅板因受到自身重力 G ,其末端与发动机面板贴合,同时陶瓷栅板受到面板的反作用力 F_x 。装配时弹簧会存在一定压缩



1 压缩弹簧; 2 密封区域; 3 陶瓷栅板; 4 密封衬套; 5 分隔板;
6 供给气流; 7 集气腔; 8 装置主体。

图 2 陶瓷栅板密封结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of structure of ceramic wafer seal

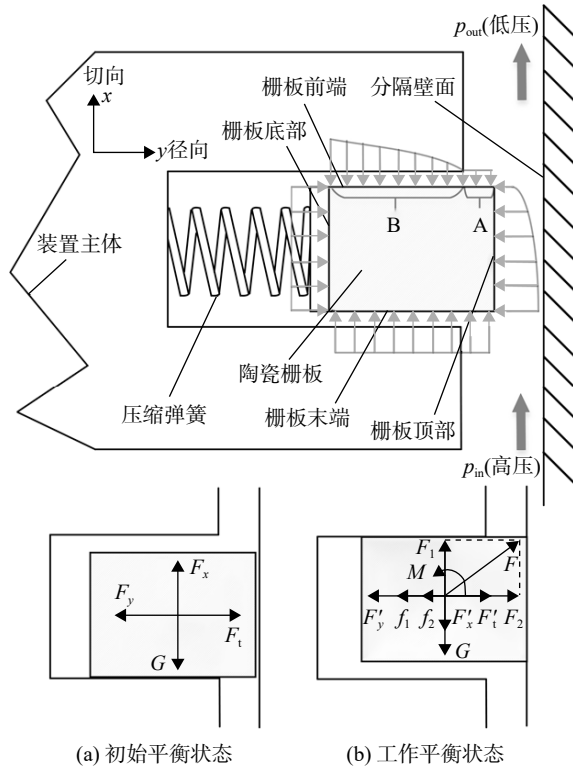


图 3 陶瓷栅板密封受力分析图

Fig. 3 Force analysis diagram of ceramic wafer seal

量,使得陶瓷栅板与隔板贴合,因此陶瓷栅板在 y 方向受到弹簧弹力 F_t 及隔板作用在陶瓷栅板的力 F_y , 尽管栅板与壁面贴合,但微尺度下仍存在微小间隙,其结构起到初始密封的作用,其栅板受力满足等式(1):

$$F_x = G \quad (1)$$

$$F_y = F_t \quad (2)$$

装置在工作状态时,流体由高压 p_{in} 侧向低压 p_{out} 侧流动,陶瓷栅板受到的压力分布如图 3 所示(图中 M 为作用在栅板上的合力所产生的扭矩),沿 y 轴正方向陶瓷栅板顶部受到呈非线性减小的压力,沿 x 轴正方向在陶瓷栅板前端表面 B 段受到非线性减小的压力,与压力出口接触的 A 段受到大小为 p_{out} 均匀压力。压力对陶瓷栅板密封表面积分形成合力 F , 其分力闭合合力 F_1 竖直向上,与自身重力 G 的方向相反,促使陶瓷栅板向 x 轴正方向移动,只有当 F_1 大于重力 G 时,栅板会离开装置主体下表面向 x 方向运动直至与上表面贴合,实现陶瓷栅板切向自密封。合力 F 水平方向的分力为 F_2 , 与摩擦力 f (栅板之间的摩擦力 f_1 与栅板与发动机面板上表面的摩擦力 f_2 之和) 方向相反,促使栅板向 y 轴正方向运动,使栅板顶部更加贴合分隔壁面,实现陶瓷栅板径向自密封,并处于稳定状态,由于陶瓷栅板发生微小移动,栅板所受弹簧力变为 F_t' 以及壁面给予的反作用力变为 F_x' 与 F_y' , 并增加了摩擦力 f_1 与 f_2 , 具体受力分析如式(3)和式(4):

x 方向为

$$F_1 = F_x' + G \quad (3)$$

y 方向为

$$F_2 + F_t' = F_y' + f_1 + f_2 \quad (4)$$

1.2 陶瓷栅板密封泄漏路径分析

陶瓷栅板存在初始密封和自密封,但微尺度下仍存在泄漏间隙,文献[5]通过对实际边界条件的简化,利用雷诺方程求解得到泄漏量理论公式及泄漏间隙计算公式,而通过 CFD 进行实体建模泄漏求解可解决理论计算的局限性,本文为便于 CFD 方法进行计算,将陶瓷栅板密封泄漏路径分为间隙泄漏与接触泄漏。

1.2.1 间隙泄漏

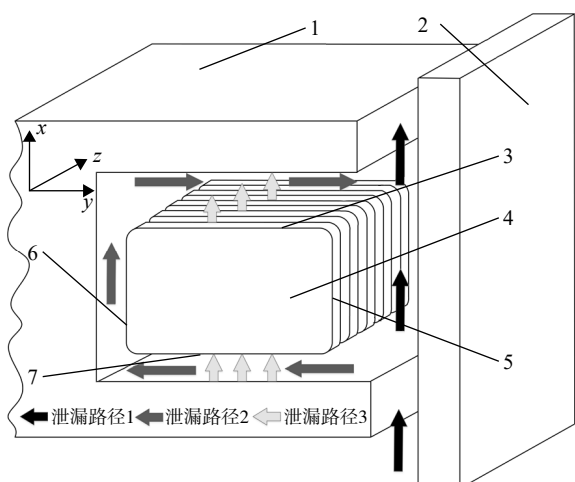
间隙泄漏路径放大后具体形式如图 4 所示。如图中所示,泄漏路径 1 为陶瓷栅板的顶部和分隔壁面之间长为 H_1 高为 h_1 的泄漏间隙。泄漏路径 2 为密封栅板前端和相邻的发动机分离壁面之间长为 H_2 高为 h_2 的泄漏间隙。由于不同的进出口压差会产生不同程度的自密封效应,因此间隙高度 h_1 与 h_2 在不同进出口压差下是不同的,文献[5]中给出了泄漏路径 1 和 2 间隙高度公式,且假设 h_1 与 h_2 相等,如式(5),同时给出间隙高度与

进出口压差的关系式(6):

$$h_1 = h_2 = \sqrt[3]{\frac{24\mu RT(Q/l)}{(p_s^2 - p_0^2)} \left(\frac{H_1 H_2}{H_1 + H_2} \right)} \quad (5)$$

$$h_1 = h_2 = 1.509 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-12} (p_{in} - p_{out}) \quad (6)$$

其中 l 为密封出口长度, m; Q 为密封系统整体泄漏量, kg/s; h_1 、 h_2 为泄漏路径 1 和 2 的间隙高度, m; p_{in} 为进气压力, Pa; p_{out} 为出口压力, Pa; μ 为泄漏路径中空气动力黏度, Pa·s; R 为空气气体常数, 取 287.06 J/(kg·K); T 为气体温度, K; p_s 为高压处压力, Pa; p_0 为低压处压力, Pa。



1 装置主体; 2 分隔板; 3 栅板前端; 4 陶瓷栅板; 5 栅板顶部;
6 栅板底部; 7 栅板末端。

图 4 陶瓷栅板密封间隙泄漏路径

Fig. 4 Gap leakage path of ceramic wafer seal

1.2.2 接触泄漏

接触泄漏路径为陶瓷栅板之间的泄漏路径, 如图 5 所示, 文献 [5] 中也给出了陶瓷栅板表面的粗糙度为 $R_a=0.8 \mu\text{m}$, 因此泄漏路径 3 为与陶瓷栅板等长等宽的泄漏路径, 同时假设间隙高度不高于 $1.6 \mu\text{m}$ 。

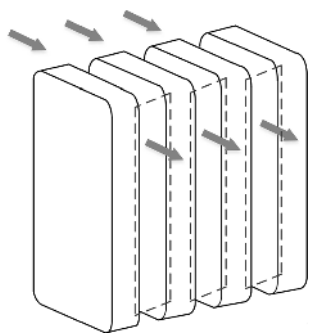


图 5 陶瓷栅板密封接触泄漏路径

Fig. 5 Contact leakage path of ceramic wafer seal

针对接触泄漏路径需要建立考虑粗糙度的流体域模型, 本文以分形函数几何 W-M 函数法建立三维粗糙表面模型, 其优点此方法建立的表面粗糙程度与尺度无关, 其形式为:

$$z(x, y) = L \left(\frac{\tilde{G}}{L} \right)^{D-2} \left(\frac{\ln \gamma}{W} \right)^{0.5} \sum_{m=1}^W \sum_{n=0}^{n_{\max}} \gamma^{(D-3)n} \cdot \left(\cos \theta_{m,n} - \cos \left\{ \frac{2\pi \gamma^n (x^2 + y^2)^{0.5}}{L} \cdot \cos \left[\arctan \left(\frac{y}{x} \right) - \frac{\pi m}{W} \right] + \theta_{m,n} \right\} \right) \quad (7)$$

$$n_{\max} = \text{int} \left[\frac{\ln(L/L_s)}{\ln \gamma} \right] \quad (8)$$

其中 L 为接触宽度, m; $\tilde{G}$ 为尺度系数, m; D 为分形维数; γ 为频率密度缩放比; W 为不同频率波叠加次数, 经验值取 10; L_s 为分辨最小的长度, m; $\theta_{m,n}$ 为随机数; int 表示取整。

根据文献 [16] 可知, 表面粗糙度 $R_a=0.8 \mu\text{m}$ 时, $\tilde{G}=1.6 \times 10^{-11}$, $D=2.5$; $\gamma=1.5$; $W=10$; $L_s=10^{-6}$ 。

1.3 陶瓷栅板密封泄漏流动分析

1.3.1 流动连续性分析

由于陶瓷栅板间隙小于 1 mm, 处于微米级的间隙, 属于微观尺度, 大于 1 mm 的尺度为宏观尺度, 微尺度下的物理现象与宏观尺度下有所不同 [17-18], 因此需要确定陶瓷栅板间隙通道下的流动特性。

克努森 (Knudsen) 数是描述流体流动连续性的无量纲参数, 即 Kn 数, 其数值大小表征流体的稀薄性, 文献 [10] 中给出其相关公式如 (9)、式 (10) 及式 (11) 所示:

$$Kn = \frac{\lambda}{L_t} \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi p \sigma^2} \quad (10)$$

$$L_t = \frac{4A}{Z} = \frac{4V/l}{S/l} = \frac{4V}{S} \quad (11)$$

其中 λ 为分子平均自由行程, m; L_t 为流动区域特征尺寸, m; k 为玻尔兹曼常数, 1.381×10^{-23} J/K; T 为气体温度, K; p 为气体压力, Pa; σ 为空气分子直径, 3.53×10^{-10} m; A 为过流断面截面积, m^2 ; Z 为过流断面上流体与壁面接触的周界长, m; V 为泄漏路径体积, m^3 ; S 为流体接触的固体壁面总面积, m^2 ; l 为密封出口长度, m。

1.3.2 流动状态分析

流体的流动状态分为层流和湍流, 雷诺 (Reynolds) 数是描述流体流动状态的重要无量纲

参数, 文献 [5] 给出计算陶瓷栅板密封 Re 数的相关公式如式(12)所示:

$$Re = \frac{\rho v L_t}{\mu} = \frac{Q/l}{\mu} \quad (12)$$

其中 ρ 为流体密度, kg/m^3 ; v 为流体的平均流动速度, m/s ; L_t 为流动区域特征尺寸, m ; μ 为流体动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; Q 为密封系统整体泄漏量, kg/s ; l 为密封出口长度, m 。

气体的动力黏度与气体温度有关, 其关系式为式(13):

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{288.15} \right)^{1.5} \frac{288.15 + B}{T + B} \quad (13)$$

其中 μ_0 为 15 °C 时的动力黏度, $1.7894 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$; T 为气体温度, K ; B 为与气体种类有关的常数, 空气的 $B=110.4 \text{ K}$ 。

1.3.3 流体域控制方程

陶瓷栅板密封流体域需要满足流动守恒方程, 包括连续方程、动量方程和能量方程。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (14)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho U u) = \text{div}(\Gamma \text{grad } u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \\ \frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho U v) = \text{div}(\Gamma \text{grad } v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \\ \frac{\partial (\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho U w) = \text{div}(\Gamma \text{grad } w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \end{cases} \quad (15)$$

$$\frac{\partial (\rho t)}{\partial t} + \text{div}(\rho U T) = \text{div}\left(\frac{\tilde{k}}{c_p} \text{grad } T\right) + S_t \quad (16)$$

其中 div 表示散度, grad 表示梯度, ρ 为密度, t 为时间, p 为流体微元体上的压力, U 为速度矢量, 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 为动量守恒方程的广义源项, c_p 为比定压热容, T 为温度, $\tilde{k}$ 为流体传热系数, S_t 为黏性耗散项。

2 陶瓷栅板密封泄漏特性数值建模

2.1 求解模型

本文数值模型分为两个部分, 针对泄漏路径 1 和 2 建立了不考虑粗糙度的间隙泄漏求解模型, 针对泄漏路径 3 建立考虑粗糙度的接触泄漏求解模型, 其数值模型的结构参数如表 1 所示。

2.1.1 间隙泄漏求解模型

如图 6 所示, 由于泄漏路径 1 与 2 为主要泄

表 1 陶瓷栅板密封结构参数

Table 1 Structural parameters of ceramic wafer seal

参数	数值
密封出口长度 l/mm	120
泄漏路径 1 高长比 h_1/H_1	$7.9 \times 10^{-4} \sim 9.8 \times 10^{-4}$
泄漏路径 2 高长比 h_2/H_2	$4.3 \times 10^{-4} \sim 5.4 \times 10^{-4}$
密封腔底部宽高比 b/h	0.7
泄漏路径 3 宽长比 b_3/l_3	1.8

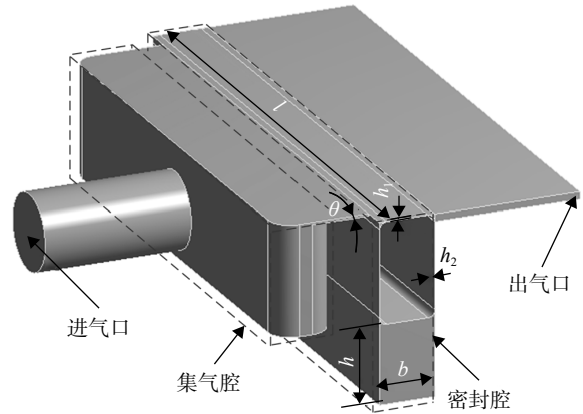


图 6 数值求解模型结构

Fig. 6 Structure of solution model

漏部位, 两处流动状态相互影响, 且对泄漏特性影响很大。由于弹簧及桥接元件对流体流动状态影响较小, 且考虑粗糙度对泄漏路径 1 与 2 的建模难度大, 因此本文针对泄漏路径 1 和 2 建立的数值模型不考虑粗糙度、压缩弹簧及桥接元件的影响。假设泄漏路径 1 和 2 的泄漏间隙高度相等, 根据式(6)可知, 泄漏路径 1 与 2 的间隙与进出口压差有关, 因此对于本文不同压差工况下的模型需要建立不同的模型, 其求解模型由进气口流体域、集气腔流体域、密封腔流体域、出口流体域等组成。

2.1.2 接触泄漏求解模型

泄漏路径 3 与前两处相比, 泄漏流动形式相对简单, 可以考虑粗糙度进行模型建立, 但是由于陶瓷栅板的长与宽的量级大约是粗糙度的 10^4 倍, 很难建立考虑粗糙度的实体建模, 因此通过建立微尺度下考虑粗糙度与不考虑粗糙度的两种泄漏模型进行数值求解, 如图 7 所示定义两粗糙表面间隙内的泄漏量为 Q' , 等长、宽和间隙高度的平行平板泄漏量为 Q , 根据式(17)从而确定流量因子 $\phi^{[19]}$, 之后通过建立不考虑粗糙度且大小与陶瓷栅板间泄漏通道相等的流体域, 并通过流量因子 ϕ 来计算陶瓷栅板间的泄漏量。

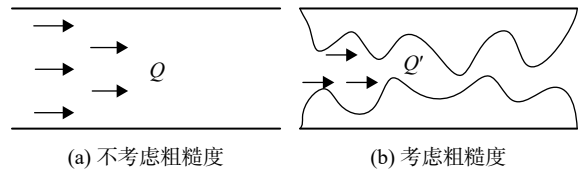


图 7 模型对比图

Fig. 7 Model comparison diagram

$$\varphi = \frac{Q'}{Q} \quad (17)$$

流量因子增长率/减小率如式(18)所示, φ_i 表示同一温度下不同进出口压比下的流量因子, φ_t 表示同一进出口压比下不同气流温度下的流量因子。

$$\Delta\varphi = \left| \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{\varphi_i} \right| \times 100\% = \left| \frac{\varphi_{t+1} - \varphi_t}{\varphi_t} \right| \times 100\% \quad (18)$$

如图 8 给出了泄漏路径 3, 即考虑粗糙度的接触间隙泄漏数值模型建立的具体过程, 首先通过 MATLAB 得到粗糙度为 0.8 且与陶瓷栅板等比例缩小 10^3 倍的 W-M 分型函数的随机矩阵, 通过将随机矩阵转换成点云数据 $z(x, y)$, 即粗糙表

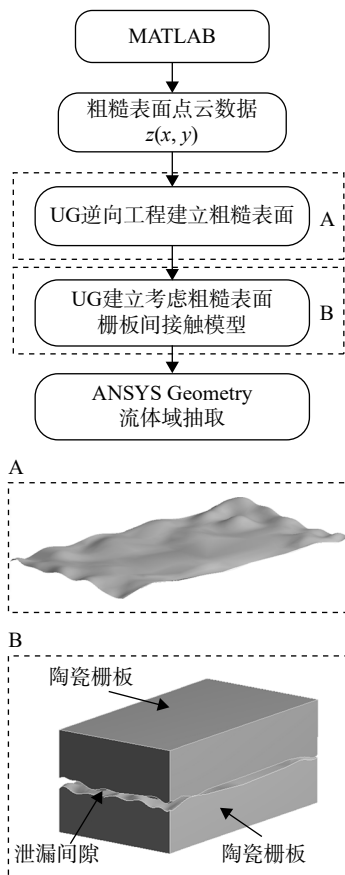


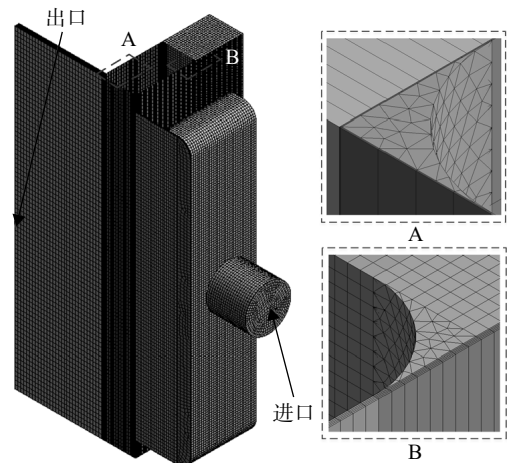
图 8 接触间隙泄漏数值模型建立过程

Fig. 8 Process of establishing a numerical model of contact gap leakage

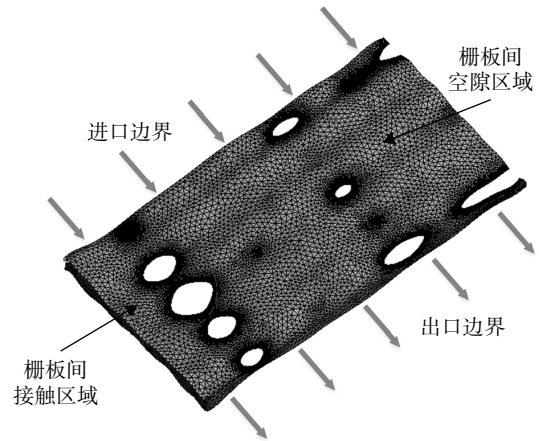
面的各点的坐标, 之后将点云数据导入三维软件 UG 中, 并通过逆向工程将计算得到的粗糙表面的点坐标生成粗糙曲面, 得到粗糙表面三维模型, 如图 8 中 A 表示, 通过得到的表面粗糙实体模型建立栅板间的接触模型, 根据文献 [5] 给出的陶瓷栅板材料可知, 其材料弹性模量较高, 因此变形很小, 本文所建立的陶瓷栅板接触泄漏模型只考虑了栅板之间接触, 忽略了压紧力对变形的影响, 如图 8 中 B 表示, 最后将模型导入 ANSYS Geometry 中完成泄漏流体域的抽取。

2.2 网格划分

本文采用 ANSYS Meshing 对陶瓷栅板密封两个三维数值模型进行网格划分, 图 9 给出了求解模型流体域的网格划分, 图 9(a)为针对泄漏路径 1 和 2 建立的流体域, 并采用六面体网格进行划分, 为了得到高质量的计算网格, 将流体域划分为不同的部分, 在泄漏路径微小间隙高度进行网格加密, 设定节点数为 5; 图 9(b)为考虑粗糙度



(a) 间隙泄漏数值模型网格划分



(b) 接触泄漏数值模型网格划分

图 9 陶瓷栅板密封网格划分

Fig. 9 Grid division of ceramic wafer seal

的泄漏路径 3 的流体域, 由图可知流体域存在部分残缺, 其部分为栅板之间的接触区域, 此区域没有流体的流动, 即流动死区^[20], 其余的部分均为栅板间的气体流动的区域, 由于此部分结构复杂, 且粗糙峰不均匀, 因此采用四面体网格的划分方法。

图 10 给出了间隙泄漏与接触泄漏网格无关性验证, 可以看出数值计算泄漏量随网格变化的趋势, 综合考虑计算效率与计算精度后, 确定数值模型 1 的网格数量约为 400 万, 数值模型 2 的网格数量约为 30 万。

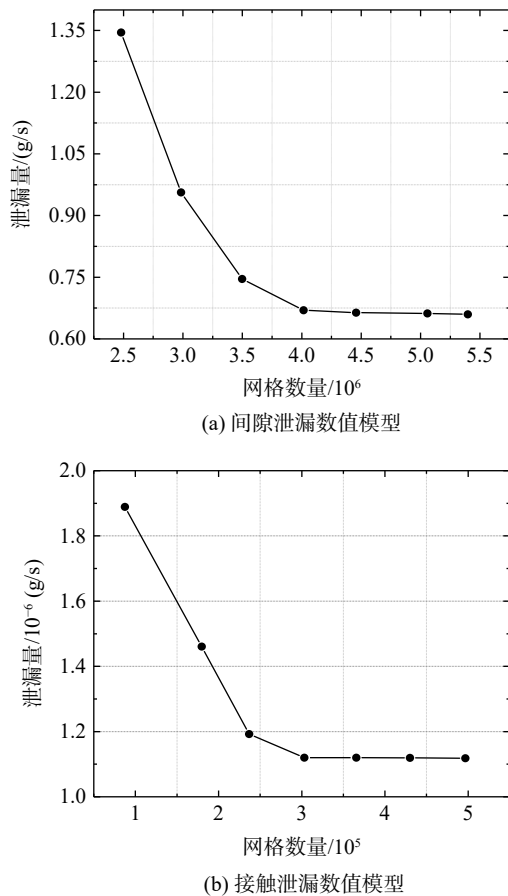


图 10 网格无关性验证

Fig. 10 Grid independence verification

2.3 边界条件

泄漏路径 1 和 2 的间隙高度不高于 1.509×10^{-5} m, 泄漏路径 3 由于栅板表面粗糙度为 $0.8 \mu\text{m}$, 间隙高度不高于 1.6×10^{-6} m, 且泄漏路径 3 与陶瓷栅板等长等宽。根据式(9)、式(10)及式(11)对不同的工况进行计算, 泄漏路径 1、2 及 3 计算的 Kn 均小于 0.01, 泄漏路径中流体流动均属连续流动, 模型流动边界条件均设置为连续且边界无

滑移^[21]。

根据式(12)和式(13)看出, 常温工况下, 气体压力越大, 密度越大, 气体运动速度越大, 同时常温下气体动力黏度最小, 因此常温工况下, 气体压力越大, 雷诺数越大, 文献 [5] 中给出了常温 298 K, 气体压力为 0.7 MPa 时 Re 为 160, 由于非圆断面流体流动临界 Re_c 为 500, 且 $Re < Re_c$ 时, 流体流动为层流状态。

表 2 给出了陶瓷栅板密封泄漏特性求解模型的边界条件, 本文求解模型流体域进出口部分采用压力边界条件, 数值方法采用连续介质模型, 且无滑移边界, 模型近壁面采用改进壁面函数法, 采用高精度迎风格式进行迭代计算。

表 2 陶瓷栅板密封边界条件

Table 2 Boundary conditions of ceramic wafer seal

参数	数值或说明
流体介质	理想空气
湍流模型	Laminar
流动区域	连续无滑移
出口压力/MPa	0.1
进出口压比	2~7
进口温度/℃	25~800

2.4 求解模型有效性验证

通过数值计算得到陶瓷栅板密封在不同压比下的泄漏量数值结果, 最终泄漏量数值结果如式(19)所示:

$$Q_a = Q_1 + NQ_2 \quad (19)$$

其中 Q_a 为数值计算最终结果, Q_1 为不考虑粗糙度的非接触间隙泄漏求解模型计算结果, Q_2 为考虑粗糙度的接触间隙泄漏求解模型计算结果, N 为陶瓷栅板接触面数量。

根据不同进出口压差, 泄漏路径 1 和 2 需建立不同数值模型并求解, 根据式(19)得到最终泄漏量总和, 并与实验结果进行对比, 图 11 给出了本文数值模型准确性验证, 数值结果与文献 [5] 中陶瓷栅板实验结果的量级一致, 且最终得到数值结果与实验结果的最大误差不超过 8.18%, 证明了数值方法的有效性, 由于在泄漏间隙 1 和 2 的数值模型中没有考虑粗糙度的影响, 同时也没有考虑密封结构中的桥接原件以及弹簧对流体域体积的影响, 因此数值结果会与文献中的实验结果

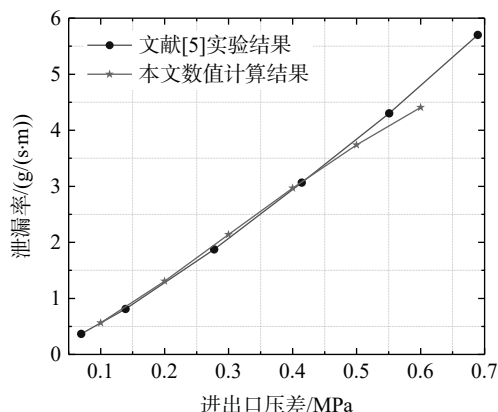


图 11 模型准确性验证

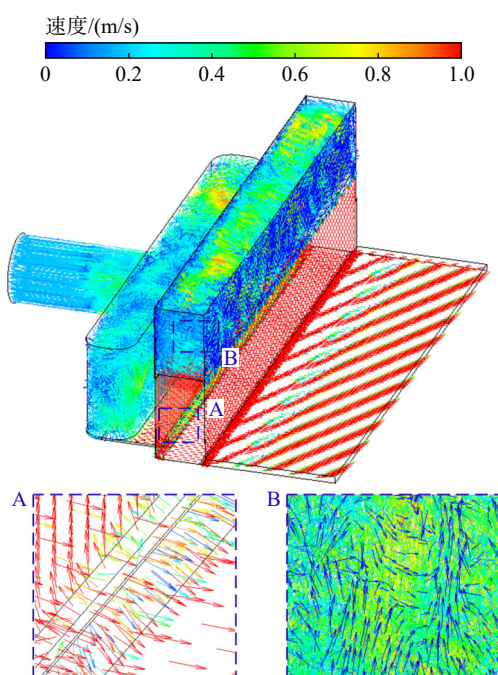
Fig. 11 Accuracy verification of model

存在一定误差。

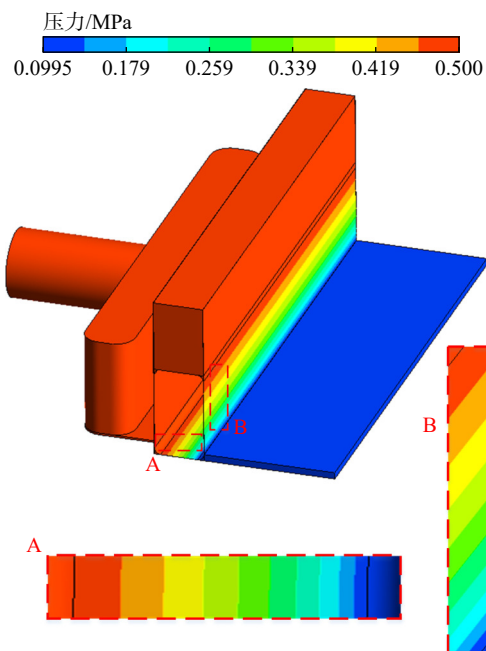
3 数值计算结果分析

3.1 陶瓷栅板密封流场特性分析

图 12 给出了陶瓷栅板密封泄漏路径 1 和 2 在进出口压比为 5, 温度为 25 ℃ 时的压力分布云图以及速度矢量图。从图 12(a) 看出, 在集气腔以及密封腔内流动状态复杂, 气流因相互碰撞和扰动产生多处的涡流, 稳定了后续气流的流动, 同时密封腔气流主要分为泄漏路径 1 和 2 两个方向。由于从大间隙的密封间隙向小间隙的泄漏间隙处过渡, 泄漏路径 1 和 2 处均产生了节流效应, 且在出口处两方向的泄漏高速气流交汇, 产生涡流, 有助于减小系统的泄漏。从图 12(b) 中看出



(a) 速度分布



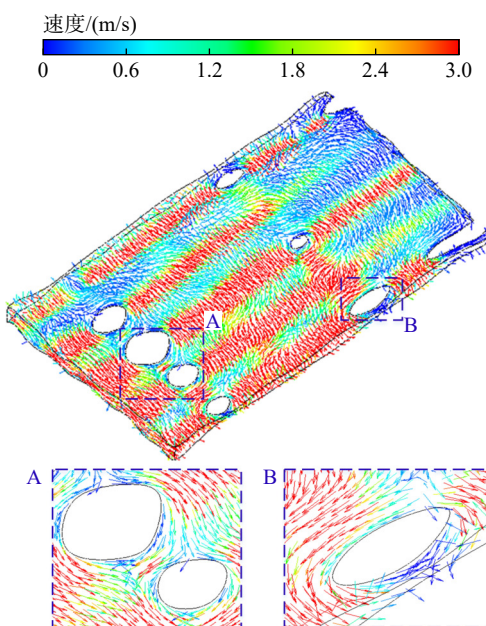
(b) 压力分布

图 12 间隙泄漏流场分布云图

Fig. 12 Flow field distribution cloud diagram of gap leakage

集气腔以及密封腔流体域压力分布均匀, 在泄漏路径 1 和 2 处发生压降, 这是由于密封间隙向泄漏间隙处过渡, 产生节流效应, 气流流速增加, 动能增大, 导致压力逐渐减小, 因此在泄漏路径 1 和 2 处发生了压降现象。

图 13 给出了陶瓷栅板密封泄漏路径 3 在进出口压比为 5, 温度为 25 ℃ 时的压力分布云图以及速度矢量图。从图 13(a) 看出随着气体流动产



(a) 速度分布

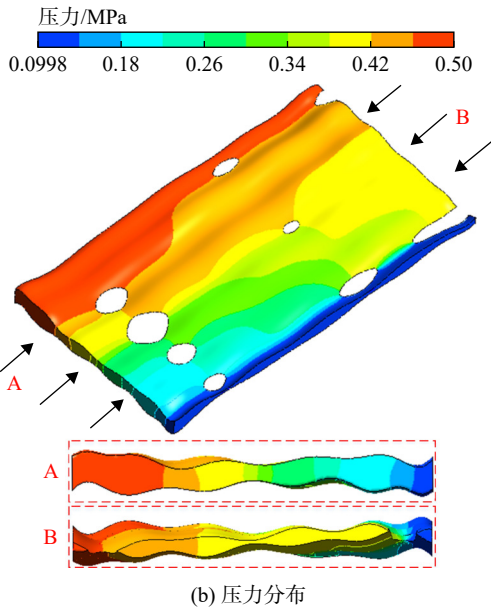


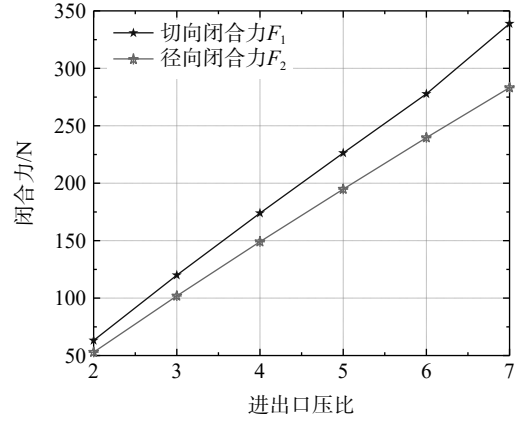
图 13 接触泄漏流场分布云图

Fig. 13 Flow field distribution cloud diagram of contact leakage

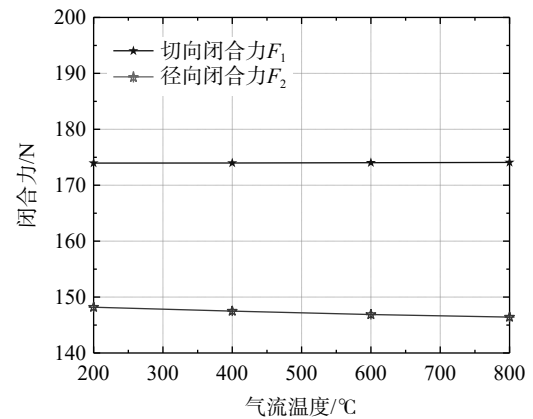
生多次速度的升降, 且气流在出口处速度达到最高, 这是由于粗糙度的存在导致间隙的大小不恒定引起的, 从一个粗糙峰向另一个粗糙峰过渡时, 产生了节流效应, 气流速度的升高。从图中看出气流在流动死区处流动方向发生改变, 并与粗糙峰的波峰与波谷共同作用阻碍气体流动, 起到了减小泄漏作用。从图 13(b) 看出气流压降分布不规则, 且产生压降的区域为一个粗糙峰向另一个粗糙峰的交界处, 这是由于交界处产生节流效应, 且粗糙度影响, 边界层厚度增大, 同时流动死区的共同作用导致流动方向改变, 增大气体流动阻力, 因此产生不规则的压降现象。

3.2 工况参数对自密封效应分析

图 14(a) 给出了气流温度为 200 °C 时, 不同进出口压比对陶瓷栅板密封切向与径向闭合力的影响, 从图中可以看出, 随着进出口压比的增加, 陶瓷栅板闭合力呈线性趋势增长, 这是由于气体作用在陶瓷栅板表面的压力增大, 其自密封的能力增强的缘故, 且进出口压差每增大 0.1 MPa, 径向闭合力 F_2 平均增长 46 N, 而切向闭合力 F_1 平均增长 55 N。从图中对比分析可得到, 切向闭合力 F_1 始终高于径向闭合力 F_2 , 随着进出口压比的增加切向闭合力 F_1 与径向闭合力 F_2 的差值也随之增大, 说明在泄漏路径 1 处的自密封能力高于泄漏路径 2 处的自密封的能力, 且随着进出口压比的增加, 此趋势逐渐增强。图 14(b) 给出了进出口压比为 4, 不同气流温度对陶瓷栅板密封切



(a) 进出口压比对闭合力的影响规律



(b) 气流温度对闭合力的影响规律

图 14 工况参数对闭合力的影响规律

Fig. 14 Influence law of working condition parameters on air force

向闭合力 F_1 与径向闭合力 F_2 的影响, 从图中可以看出随着气流温度的增加, 切向闭合力 F_1 基本不变, 而径向闭合力 F_2 有所下降, 说明气流温度对泄漏路径 2 处的自密封效应影响很小, 而泄漏路径 1 处的自密封能力随着温度升高有所下降。

3.3 工况参数对泄漏特性影响

图 15 给出了进出口压比对流量因子的影响规律(粗糙度为 0.8 μm), 从图中可以看出, 随着进出口压比的增加, 流量因子呈近似线性趋势增长, 且增长速率逐渐降低。从图中对比分析得到, 气流温度从 200 °C 增大到 800 °C, 流量因子平均增长率由 10.98% 减小到 8.03%, 说明粗糙度对泄漏流动的影响程度随着进出口压比及温度的增大而减小。从图中可以看出, 随着气流温度的增加, 流量因子呈非线性趋势减小, 且减小速率逐渐降低。通过对比图中相同进出口压比下不同气流温度下的流量因子分析得到, 其平均减小率由 7.11% 减小到 3.74%。从图中还可以看出, 在进出口压比为 2 时, 不同气流温度下的流量因子均恒

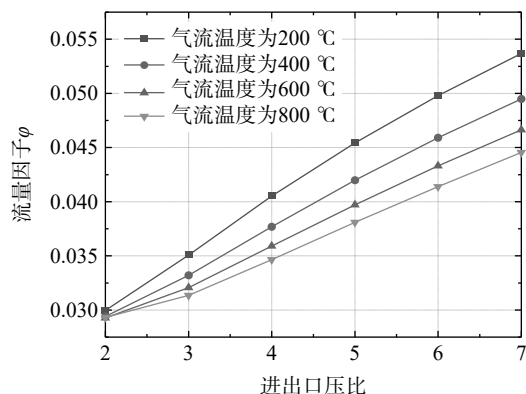


图 15 进出口压比对流量因子的影响规律

Fig. 15 Influence law of pressure ratio of input and output on flow factor

定在 0.029 5 左右,说明低压比下的气流温度对流量因子影响很小,且泄漏流动只与粗糙度本身的物理性质有关。

图 16 给出了不同温度下,进出口压比对陶瓷栅板密封泄漏特性的影响。从图中可以看出陶瓷栅板密封总泄漏量随进出口压比的增大而增大,尽管进出口压比的增加会使泄漏路径 1 和 2 的泄漏间隙减小,增强自密封性,但是进出口的压差促使气体流动速度增大,因此泄漏量仍然随之增大。从图中还可以看出在进出口压比为 2 时,气体温度对陶瓷栅板泄漏的影响很小,随着压比增加,气体温度对泄漏量的影响逐渐增大,说明气体的压力能主要影响陶瓷栅板的泄漏量。从图中还可以看出陶瓷栅板密封泄漏量随着温度的升高而减小,且温度越高,泄漏量随进出口压比的增加,其增长越缓慢,这是由于气体密度随温度升高而减小,进而使得泄漏的质量流量减小,同时高温使得气体的黏性增大,阻碍了气体的流动,

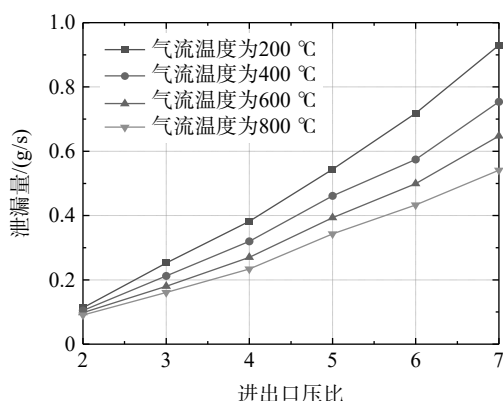


图 16 进出口压比对泄漏量的影响规律

Fig. 16 Influence law of pressure ratio of input and output on leakage

进而使得气体泄漏量减小。

4 结 论

本文理论分析了陶瓷栅板密封泄漏特性,综合考虑间隙泄漏和接触泄漏,提出了一种陶瓷栅板密封泄漏特性数值研究方法,针对不同泄漏路径建立了不同的数值求解模型,在验证数值模型准确性基础上,分析了工况参数对陶瓷栅板密封流场、自密封效应及泄漏特性的影响,得出结论如下:

1) 本文提出的考虑间隙泄漏和接触泄漏的陶瓷栅板密封数值方法能准确计算其不同工况下的泄漏量,可适用于不同栅板结构参数下的该密封形式。

2) 本文计算的陶瓷栅板密封径向闭合合力始终高于切向闭合合力,且随着进出口压比的增加,闭合合力呈线性增大趋势,自密封效应随之增强。随着气流温度的增加,切向闭合合力基本不变,而径向的闭合合力有所下降,径向自密封效应减弱。

3) 随着进出口压比增加,陶瓷栅板密封接触泄漏流量因子呈近似线性增加趋势,随着气流温度的增加,泄漏因子呈非线性减小趋势。

4) 陶瓷栅板密封泄漏量随着进出口压比增加而增大,随着气流温度的增大而减小,且间隙泄漏在泄漏系统中占主要地位。

参考文献:

- [1] 薛俊川. 高超声速飞行器陶瓷栅板式密封设计研究[J]. 飞机设计, 2016, 36(2): 48-52.
XUE Junchuan. Research of ceramic wafer seals for hypersonic vehicles[J]. Aircraft Design, 2016, 36(2): 48-52. (in Chinese)
- [2] 廖龙文, 曾鹏, 陈军燕, 等. 高超声速飞行器发展困境分析[J]. 飞航导弹, 2019(12): 22-27.
LIAO Longwen, ZENG Peng, CHEN Junyan, et al. Analysis of development dilemma of hypersonic vehicle[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2019(12): 22-27. (in Chinese)
- [3] 姜鹏, 匡宇, 谢小平, 等. 国外高超声速飞行器研究现状及发展趋势[J]. 飞航导弹, 2017(7): 19-24.
JIANG Peng, KUANG Yu, XIE Xiaoping, et al. Research status and development trend of hypersonic vehicles abroad[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2017(7): 19-24. (in Chinese)
- [4] DUNLAP P, FINKBEINER J, STEINETZ B, et al. Design study of wafer seals for future hypersonic vehicles[R]. AIAA-2005-4153, 2005.
- [5] STEINETZ B M. Evaluation of an innovative high-temperature ceramic wafer seal for hypersonic engine applications[D]. Cleveland, US: Case Western Reserve University, 1991.
- [6] BISSON E E, ANDERSON W J. Advanced bearing technology[M]. Washington: Office of Scientific and Technical Information, National Aeronautics and Space Administration, 1964.

- [7] 王昊辰. 几何可调超声速燃烧室热环境及热结构研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
WANG Haochen. The study on the thermal environment and thermal structure of ramjet variable geometry combustor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [8] STEINETZ B M. Seal technology for hypersonic vehicle and propulsion: an overview[R]. NASA-E-16776, 2008.
- [9] 李鸿举, 刘莹, 黄伟峰, 等. 栅板密封对流动侧壁变形的随动模型[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(23): 239-248.
LI Hongju, LIU Ying, HUANG Weifeng, et al. Wafer seal servo model under distorted engine panel[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(23): 239-248. (in Chinese)
- [10] 徐洁. 微尺度器件及旋转干气密封微间隙内流体流动问题的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
XU Jie. Research on flow in micro-device of mems and dry-gas seals[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese)
- [11] CHILDS D W, WADE J. Rotordynamic-coefficient and leakage characteristics for hole-pattern-stator annular gas seals—measurements versus predictions[J]. *Journal of Tribology*, 2004, 126(2): 326-333.
- [12] 胡廷勋, 周坤, 王晓燕, 等. 浮环密封泄漏特性数值计算与试验[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(4): 888-896.
HU Tingxun, ZHOU Kun, WANG Xiaoyan, et al. Numerical calculation and experiment on leakage characteristics of floating ring seal[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(4): 888-896. (in Chinese)
- [13] 闫玉涛, 魏荣, 胡广阳, 等. 考虑热流固多物理场耦合的圆周密封特性[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(2): 305-317.
YAN Yutao, WEI Rong, HU Guangyang, et al. Circumferential seal characteristics with thermal-fluid-structure multi-physics field coupling[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(2): 305-317. (in Chinese)
- [14] 包超英, 孟祥铠, 李纪云, 等. 基于多孔介质模型的机械密封静压泄漏特性分析[J]. *润滑与密封*, 2015, 40(3): 57-63.
BAO Chaoying, MENG Xiangkai, LI Jiyun, et al. The leakage performance analysis of mechanical seals under hydrostatic pressures based on porous media model[J]. *Lubrication Engineering*, 2015, 40(3): 57-63. (in Chinese)
- [15] YAN W, KOMVOPOULOS K. Contact analysis of elastic-plastic fractal surfaces[J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 84(7): 3617-3624.
- [16] 李伟平, 贾占举, 路茜, 等. 金属封严环泄漏率预测方法[J]. *航空动力学报*, 2019, 34(2): 368-375.
LI Weiping, JIA Zhanju, LU Xi, et al. Method to predict leakage rate of metal seal ring[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34(2): 368-375. (in Chinese)
- [17] 陶然, 权晓波, 徐建中. 微尺度流动研究中的几个问题[J]. *工程热物理学报*, 2001, 22(5): 575-577.
TAO Ran, QUAN Xiaobo, XU Jianzhong. Several questions in research of micro scale flow[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2001, 22(5): 575-577. (in Chinese)
- [18] 闫寒. 随机粗糙表面效应下微流体器件中的流动特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
YAN Han. Investigation on characteristics of flow in different microfluidic devices with random surface roughness[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014. (in Chinese)
- [19] 杨文健. 硬密封结构界面泄漏特性的数值分析及理论预测方法[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
YANG Wenjian. Numerical analysis and theoretical prediction method of interface leakage characteristics of hard seal structure[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [20] 吕祥奎, 杨文健, 许国良, 等. 密封结构中粗糙表面特征对其气密性的影响[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(23): 110-115.
LÜ Xiangkui, YANG Wenjian, XU Guoliang, et al. The influence of characteristic of rough surface on gas sealing performance in seal structure[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(23): 110-115. (in Chinese)
- [21] KE Yuchao, YAO Xuefeng, YANG Heng, et al. Gas leakage prediction of contact interface in fabric rubber seal based on a rectangle channel model[J]. *Tribology Transactions*, 2017, 60(1): 146-153.

(编辑: 秦理曼)