

石墨密封流固热耦合泄漏特性研究与公式构造

赵 欢¹, 张 然¹, 孙 丹¹, 王 双¹, 胡海涛², 常 城²

(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. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

摘 要: 分析了石墨密封流固热多物理场耦合理论, 建立了考虑石墨环变形的石墨密封流固热多物理场耦合数值求解模型, 在验证模型准确性基础上, 研究了碳石墨、浸锑石墨材料的石墨密封在不同压比、温度下的流场特性、结构力学特性以及泄漏特性, 比较分析了石墨环变形前后密封泄漏量, 并基于传统圆周石墨密封泄漏量公式构造了考虑石墨环变形的石墨密封泄漏量理论公式。结果表明: 建立的石墨密封流固热多物理场耦合模型考虑了石墨环变形, 可准确计算其泄漏流动特性与力学特性。流体在周向剪切流的作用下进入浅槽, 并在浅槽内经挤压形成局部高压区。高压侧石墨环变形显著, 其中碳石墨材料在高压比作用下变形明显, 浸锑材料在高温作用下变形明显。当温度为 400 K、压比为 2~4 时, 碳石墨密封环变形量相较于浸锑材料平均减小了 12.99%, 密封泄漏量相比于浸锑石墨材料最大减小了 6.89%。所构造的泄漏量理论公式可准确计算考虑石墨环变形的泄漏量, 为石墨密封泄漏特性分析提供理论依据。

关 键 词: 石墨密封; 多物理场耦合; 泄漏特性; 结构力学特性; 公式构造

中图分类号: V233.5

文献标志码: A

Study on fluid-solid-thermal coupling leakage characteristics of graphite seal and formula construction

ZHAO Huan¹, ZHANG Ran¹, SUN Dan¹, WANG Shuang¹, HU Haitao², CHANG Cheng²

(1. Liaoning Key Lab of Advanced Test Technology for Aerospace Propulsion System,

School of Aero-engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Sichuan Gas Turbine Establishment, Aero Engine Corporation of China, Chengdu 610500, China)

Abstract: The fluid-solid-thermal multi-physics coupling theory of graphite seal was analyzed, and a numerical solution model of graphite seal fluid-solid-thermal multi-physics coupling considering the deformation of graphite ring was established. On the basis of verifying the accuracy of the model, carbon graphite and antimony-impregnated graphite materials were studied. The flow field characteristics, the structural mechanical characteristics and leakage characteristics of the graphite seal at different pressure ratios and temperatures were compared and analyzed. The leakage of the graphite ring before and after the deformation was compared and analyzed, and based on the traditional circumferential graphite seal leakage formula, a theoretical formula for graphite seal leakage considering the deformation of the graphite ring was constructed. Results showed that the established graphite seal fluid-solid-thermal multi-physics coupling model considered the deformation of the graphite ring, and can accurately calculate the leakage

收稿日期: 2022-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(52075346); 先进航空动力创新工作站项目(HKC2020-02-030)

作者简介: 赵欢(1982—), 女, 副教授, 博士, 主要从事航空发动机新材料密封技术研究。E-mail: phd_zhaohuan@163.com

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

引用格式: 赵欢, 张然, 孙丹, 等. 石墨密封流固热耦合泄漏特性研究与公式构造[J]. 航空动力学报, 2023, 38(11): 2648-2658. ZHAO Huan, ZHANG Ran, SUN Dan, et al. Study on fluid-solid-thermal coupling leakage characteristics of graphite seal and formula construction[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(11): 2648-2658.

flow characteristics and mechanical characteristics. The fluid entered the shallow groove under the action of the circumferential shear flow, and formed a local high pressure area by extrusion in the shallow groove. The deformation of the graphite ring on the high pressure side was obvious, of which the carbon-graphite material deformed significantly under the action of high pressure ratio, and the antimony impregnated material deformed significantly under the action of high temperature. When the temperature was 400 K and the pressure ratio was 2—4, the deformation of the carbon-graphite sealing ring was reduced by 12.99% on average compared with the antimony-impregnated material, and the seal leakage was reduced by 6.89% compared with the antimony-impregnated graphite material. The constructed leakage theoretical formula can accurately calculate the leakage considering the deformation of the graphite ring, thus providing a theoretical basis for the analysis of the leakage characteristics of the graphite seal.

Keywords: graphite seal; multi-physics coupling; leakage characteristics; structural mechanics characteristics; formula construction

石墨密封因其具有低泄漏、高压差、耐高温等优点发展成为了航空发动机轴承腔内理想密封。石墨密封通常采用碳石墨、浸锑石墨等材料,其在高温高压气流耦合作用下会发生形变,形成较大径向封严间隙,降低密封性能^[1-2]。因此开展基于流固热多物理场耦合方法研究石墨密封泄漏特性具有重要意义。

目前石墨密封泄漏特性分析方法主要包括独立场模型和多物理场模型。在独立场模型方面,美国国家宇航局(NASA)^[3-4]基于瑞利阶梯垫数值研究了石墨环内表面开槽对石墨密封泄漏特性的影响,发现开槽会使其泄漏量增加; Arghir 等^[5]通过数值分析,研究了转速、几何参数和工况参数对密封泄漏量和摩擦功耗的影响,指出浅槽的长度和宽度对泄漏特性的影响不大; 运睿德等^[6]有限元模拟分析了周向弹簧力对石墨密封的变形及密封间隙的影响,建立了泄漏量计算模型。上述独立场模型主要研究了浅槽型石墨密封流场特性,并未考虑石墨环变形对流场影响,而研究人员^[1-2]发现石墨环变形与流场之间存在相互影响,故采用流固耦合模型研究迷宫密封流场特性和结构力学特性。在多物理场耦合模型方面,苏令等^[7]建立石墨密封数值求解模型,考虑结构参数修正完善了内开动压槽结构的石墨密封数值计算模型,得到了不同结构参数下密封性能; 胡广阳、张博等^[8-9]考虑热固耦合,对不同石墨材料的圆周密封进行接触以及热分析,研究表明考虑材料及温度后,石墨环的应力和变形均发生明显的变化,材料和温度为不可忽略的重要影响因素。综上所述,目前针对石墨密封仿真研究主要集中在流场或结构的独立场模型方面,鲜有针对考虑石墨环变形的石墨密封流固热多物理场耦合研究。

在密封泄漏量理论公式研究方面, Martin^[10]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^[11]通过实验修正了 Martin 方程,并考虑了动能载越效应。 Vermes^[12]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。王伟等^[13]也依据密封面边界摩擦状态将结构参数、加工精度等因素加入了泄漏量公式。文献 [14] 建立了圆周石墨密封泄漏量公式,但未考虑石墨环变形对泄漏量的影响,而闫玉涛等^[1]研究发现石墨环的变形对石墨密封泄漏量的影响是不可忽略的。综上所述,现有石墨密封泄漏量公式大多是基于单一变量,未考虑流固热多物理场作用下石墨环变形对其泄漏流动特性的影响。

本文建立了考虑石墨环变形的石墨密封流固热多物理场耦合数值求解模型,研究了采用碳石墨和浸锑石墨材料的石墨密封在高温高压封严气体下的流场分布、结构力学特性及泄漏特性,并基于传统圆周石墨密封泄漏量公式构造了考虑石墨环变形的石墨密封泄漏量理论公式,为石墨密封泄漏特性分析提供理论依据。

1 石墨密封流固热多物理场耦合方法理论

1.1 石墨密封多物理场耦合理论分析

航空发动机中所采用的石墨密封实际工作时主要受到流场、温度场以及结构场的多物理场耦合作用。如图 1 所示,石墨环在稳定工作时,受到封严间隙内流体产生的压力以及温度共同作用而发生明显变形。其中流体产生的压力通过耦合面进行力的传递,流体的热量主要是通过导热和对

流换热进行热量的传递,经过流体与固体相互耦合作用,石墨环发生结构上的形变,封严间隙发生变化,导致密封泄漏量增加。根据密封所处实际工作环境分析,多物理场耦合作用对航空发动机密封性能影响较大^[15],故此本文建立了石墨密封流固热多物理场耦合求解模型。

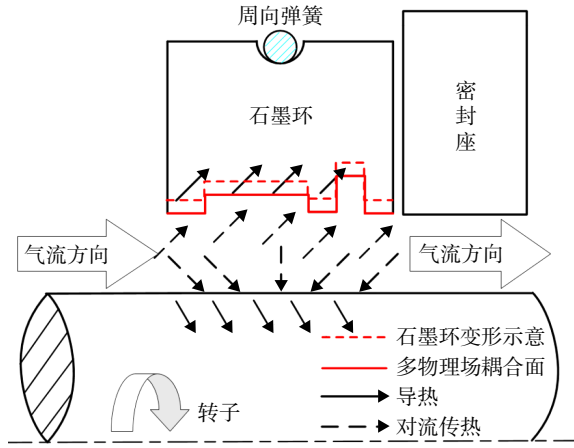


图1 石墨密封流固热多物理场耦合示意图

Fig. 1 Schematic diagram of graphite seal fluid-solid-thermal multiphysics coupling

1.2 流体域控制方程

1.2.1 流体流动控制方程

在本文石墨密封流固热耦合计算工况下,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^[16]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

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

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

式中 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。式中 div 表示散度, grad 表示梯度, c_p 为比定压热容。

1.2.2 湍流流动控制方程

发动机中转子转速很高,密封间隙内气体流

动复杂,在本文计算分析中需要选择合理的流动模型。关于两方程的湍流模型中 standard k - ε 模型并不适用于较强的旋流流动环境,因此在其基础上进行修正改进,提出了 re-normalization group (RNG) k - ε 模型,其能模拟出气体在密封间隙内较强的旋流流动,并求解出石墨密封流体域复杂流动问题^[17-19]。如下为 RNG k - ε 公式

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon \text{RNG}}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{K} (C_{\varepsilon 1 \text{RNG}} P_k - C_{\varepsilon 2 \text{RNG}} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1 \text{RNG}} P_{eb}) \quad (4)$$

1.3 固体域控制方程

石墨密封在流体作用下的响应可通过求解结构动力学方程获得,即^[20]

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = p(t) \quad (5)$$

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; $p(t)$ 为石墨密封间隙内流体产生的载荷向量。

石墨密封固体域增加了由于温差引起的热变形项,即

$$f_t = \alpha_t \cdot \nabla T \quad (6)$$

式中 α_t 为密封材料的热膨胀系数。

1.4 传热控制方程

由热力学第二定律可知,在流固热耦合界面处位置的导热热通量与对流传热量相等,故有 $q_w = q_c$,通过求解导热微分方程可得^[21]

$$\begin{cases} q_w = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \Big|_{y=0} \\ q_c = h(T_s - T_f) = q_w \end{cases} \quad (7)$$

式中 λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; h 为表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_s 为固体表面温度, K ; T_f 为流体表面温度, K 。

1.5 流固热多物理场耦合控制方程

石墨密封工作时,密封间隙内气体与石墨密封耦合面之间应满足位移、应力、热流量与温度相等^[22],其流固热多物理场耦合控制方程为

$$\begin{cases} n \cdot \tau_f = n \cdot \tau_s \\ d_f = d_s \\ Q_f = Q_s \\ T_f = T_s \end{cases} \quad (8)$$

式中 n 为交界面的法向方向,交界面上的应力分布需要在法向上达到平衡; τ 为应力, MPa ; d_f 与

型进行网格划分。图 5 分别给出了求解模型固体域与流体域网格划分。模型固体域部分采用体网格方法进行网格划分,如图 5(a)所示。模型流体域部分由于气膜厚度较薄,需要对网格进行加密处理,气膜径向节点数为 10,且网格均为六面体结构,实现了高质量网格划分,流体域网格划分如图 5(b)。经过网格无关性验证,密封泄漏量在网格数超过 340 万后逐渐趋于平稳,综合考虑计算求解精度以及计算资源,最终确定流体域网格数量为 340 万,固体域网格数量为 300 万。

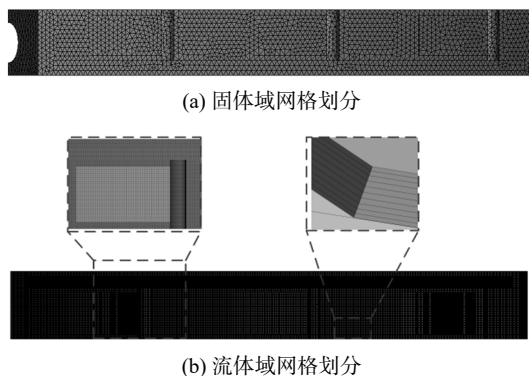


图 5 石墨密封网格划分

Fig. 5 Graphite sealing grid division

2.3 边界条件

表 2 给出了石墨密封具体工况参数,本文求解模型流体域进出口部分采用压力边界条件,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 石墨密封工况参数

Table 2 Graphite seal working condition parameters

参数	数值及详情	参数	数值及详情
流体属性	理想空气	湍流模型	RNG $k-\epsilon$
转速/(r/min)	12 000	浅槽深/ μm	20
出口压力/MPa	0.5	进出口压比	2~6
石墨温度/K	298	入口温度/K	300~500

图 6 给出了石墨密封流固热多物理场耦合边界示意图。其中固体域为碳石墨以及浸石墨两种材料,石墨环外侧壁面施加约束,内侧壁面为耦合面。耦合面通过输入流场计算收敛后的气流力和温度来实现流固热耦合载荷的传递,从而将流场压力和温度数据通过网格节点传递到固体域中进行计算。

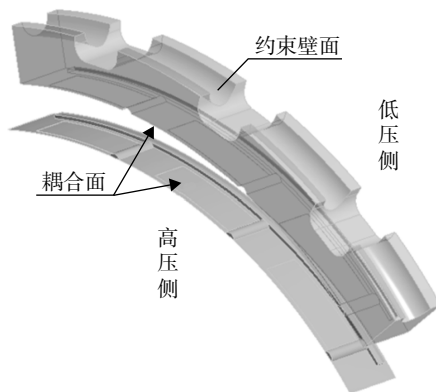


图 6 石墨密封耦合边界条件示意图

Fig. 6 Schematic diagram of graphite seal coupling boundary conditions

2.4 求解模型准确性验证

表 3 给出了本文数值模型与文献 [5] 参考模型密封泄漏量对比结果。从表中可以明确看出,本文石墨密封泄漏量结果与外文文献泄漏量结果平均相对误差为 1.8%,总体上密封泄漏量相对误差小,本文数值计算结果与外文文献结果较为吻合,验证了本文求解模型的准确性。

表 3 石墨密封泄漏量对比结果

Table 3 Comparison results of graphite seal leakage rate

浅槽槽深/ μm	泄漏量/(g/s)		相对误差/%
	本文	文献 [5]	
15	2.74	2.70	1.48
20	3.86	3.78	2.12

3 数值计算结果分析

3.1 石墨密封流场特性分析

图 7 给出了进出口压比为 5,温度为 400 K 时石墨密封对应的流场压力分布云图和温度云图。从图 7(a)中可以看出,密封流体域压力从进口端到出口端逐渐降低,在浅槽处压力出现明显上升。由于主密封面槽型的设置,高压侧的气体在压差作用下被引入到密封间隙内,在高速剪切作用下,气体从主密封面横槽位置进入到浅槽区域,同时进入浅槽的气体经台阶作用,产生显著流体动压效应,并在浅槽出口处附近产生明显的高压区。如图 7(b)所示,从整体上看,气体从入口向出口流动时温度逐渐降低,且在浅槽和环槽区域时气体温度较高。由于在浅槽与环槽处密封径向间隙较大,高温气体在槽型区域堆积形成了局部高温。

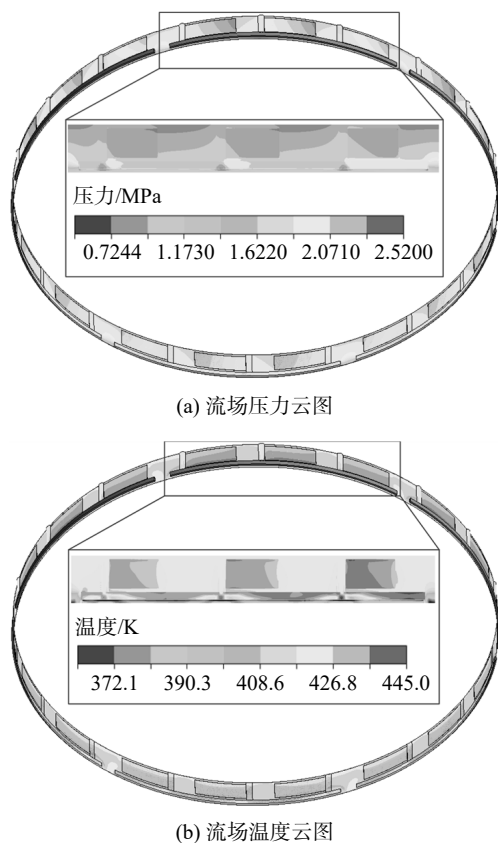


图 7 密封流场分布云图
Fig. 7 Seal flow field distribution cloud diagram

3.2 石墨密封力学特性分析

3.2.1 密封结构应变分析

图 8 给出了进出口压比为 5, 温度为 400 K 时不同材料的石墨环对应的应变情况。

如图 8(a)所示, 碳石墨材料石墨环最大形变主要发生在石墨环两侧, 在石墨环中间位置变形量较小。在外圈周向弹簧的作用下石墨环被箍紧, 在搭接头位置石墨环受力较大, 导致了在搭接头处发生大的形变。图 8(b)为浸钨石墨材料的石墨环变形情况, 从图中可发现, 其最大变形量也发生在搭接头处, 且最大变形量相较于碳石墨材料减小了 5.36%。由于两种材料石墨环环槽出口一侧材料厚度较小, 均产生了较大的变形, 且浸钨石墨环变形略大。

从表 4 中可以看出, 采用碳石墨材料的石墨密封的径向和轴向变形较大, 主要是由于该材料的弹性模量较小, 使得其在高压作用下石墨环在轴向和径向上发生较大变形。采用浸钨石墨材料变形量相较于碳石墨材料变形量更小, 主要由于该材料的弹性模量较大, 在高压环境下石墨环径向变形较小。两种材料的轴向变形

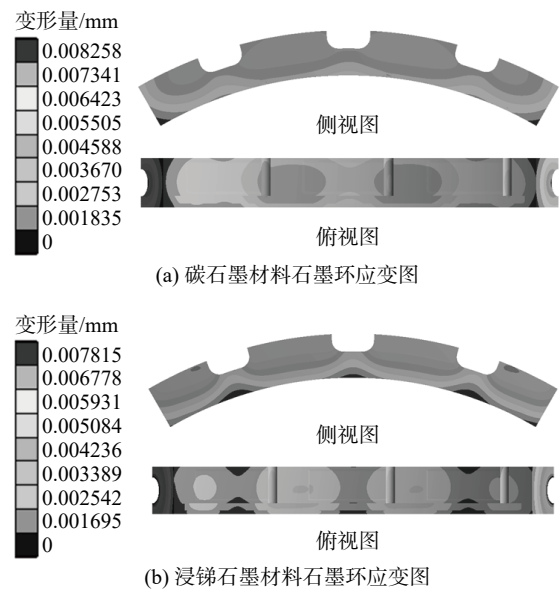


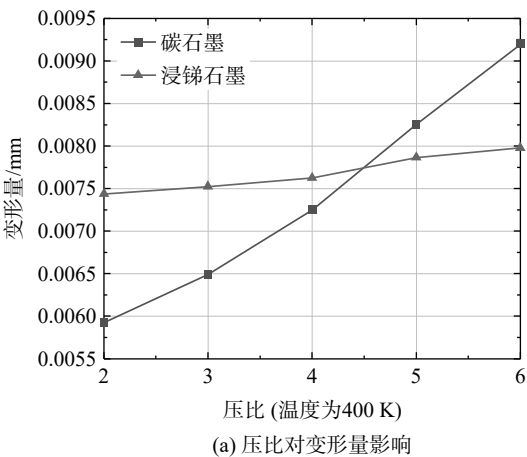
图 8 石墨环应变图
Fig. 8 Graphite ring strain diagram

表 4 两种材料石墨环在不同方向的变形量
Table 4 Deformation of graphite rings of two materials in different directions mm

参数	碳石墨	浸钨石墨
径向变形量	0.003 8	0.003 7
轴向变形量	0.007 3	0.006 4

量相较于径向更大, 主要是因材料导热系数和热膨胀系数对温度不敏感、模型进出口压差较大造成。通过接下来分析也可发现碳石墨材料与浸钨石墨材料的石墨环在不同压力以及温度下的变形量是变化的。

图 9 给出了两种材料石墨环最大变形量随压比和温度的变化曲线。



(a) 压比对变形量影响

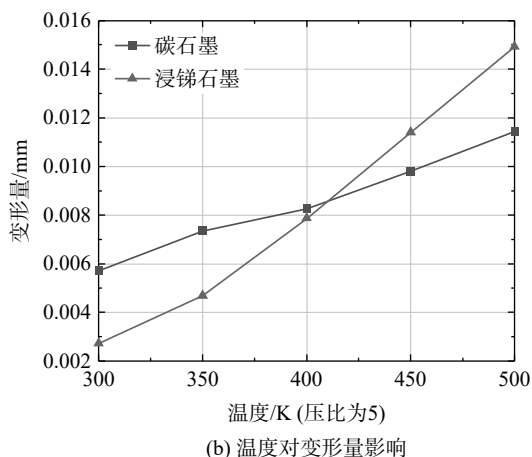


图9 石墨环的应变特性

Fig. 9 Strain characteristics of graphite ring

由图9可明显看出,压比对采用碳石墨材料石墨环的最大变形量影响更大,主要是由于碳石墨材料的弹性模量较小,其变形量受压力影响较大;而温度对采用浸锡石墨材料的石墨环的最大变形量影响更大,主要是因为浸锡石墨材料具有较大的导热系数和热膨胀系数,导致在高温下其变形量更大。综上可知,将石墨环耦合压力和温度后,石墨环的变形量与材料的导热系数、热膨胀系数和弹性模量均有关,且材料的热膨胀系数越大,弹性模量越小,石墨环的变形量越大。

3.2.2 密封结构应力分析

图10给出了进出口压比为5,温度为400 K时采用不同材料的石墨环对应的等效应力分布情况。从图中可以发现,等效应力的最大值出现在

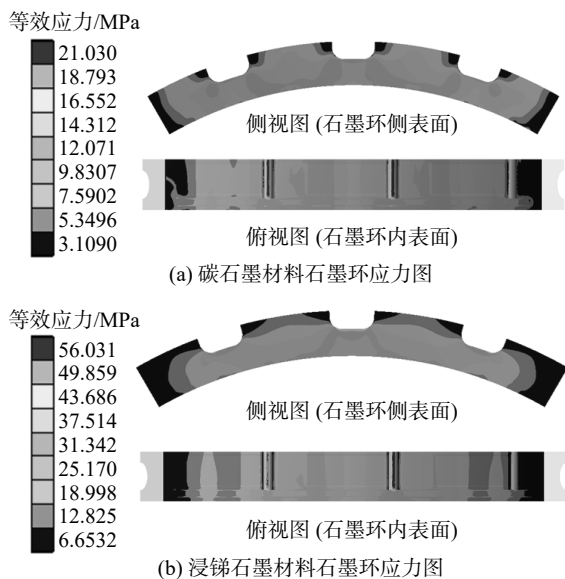


图10 石墨环应力图

Fig. 10 Graphite ring stress diagram

位于石墨环中间位置的横槽处,且等效应力均沿石墨环内侧向石墨环外侧方向逐渐减小。这主要是由于,封严间隙内动压效应主要集中在浅槽结构处,并且在石墨环的中心位置表现得更为明显,在流体域与固体域交界的附近位置,石墨环受到的封严压力更大,故而应力主要集中在石墨环中间位置,且沿径向方向逐渐减少。同时发现,高温高压使得碳石墨材料的石墨环等效应力相较于浸锡石墨材料的等效应力明显较小。主要是由于碳石墨材料的导热系数、热膨胀系数较小,在同等工况下,其受温度影响较小,故采用石墨材料石墨环等效应力更小,其具有更好的力学性能。

图11给出了不同材料的石墨环最大等效应力随进出口压比以及进口温度的变化曲线。

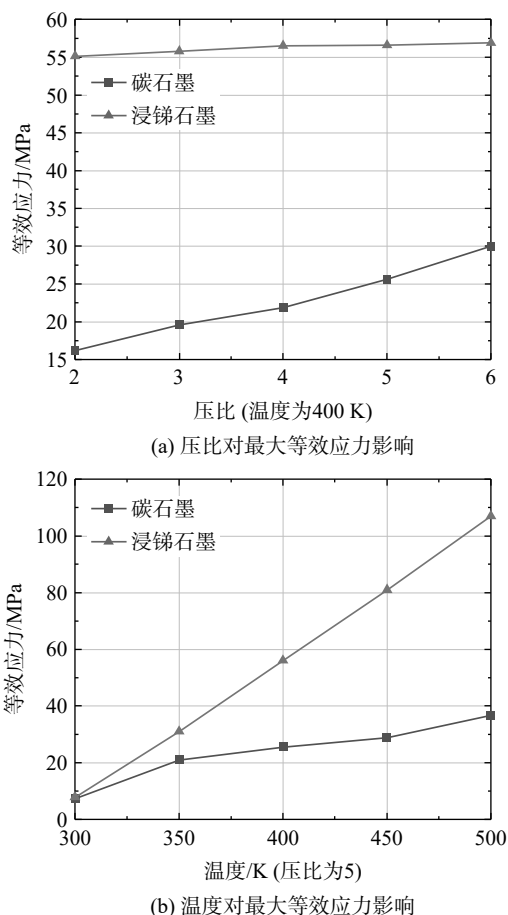


图11 石墨环的应力特性

Fig. 11 Stress characteristics of graphite ring

由图11(a)可知,随着压比的增大,采用浸锡石墨材料的石墨环最大等效应力均有小幅度增加,而采用碳石墨材料的石墨环最大等效应力随压比增加而明显增加。主要是由于浸锡石墨材料弹性模量较大,受压比影响较小,相反,碳石墨材料弹

性模量较小,受到压比的影响较大。在图 11(b)中,可明显发现,浸钨石墨材料在不同温度下石墨环的最大等效应力变化较大,而碳石墨材料的石墨环最大等效应力随温度变化而变化的幅度较小。主要是由于浸钨石墨材料的导热系数和热膨胀系数较大,其等效应力受温度影响更大引起的。综上所述,在不同温度和进出口压比下,采用碳石墨材料的石墨环有更小的最大等效应力。

3.3 石墨密封泄漏特性分析

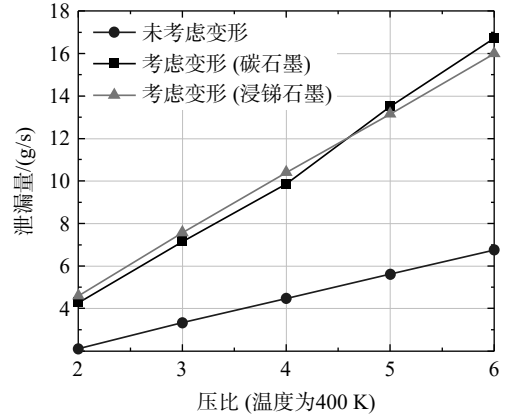
采用不同材料的石墨密封在变形后进行网格划分方法和变形前一致,如表 5 所示为石墨密封变形前后的网格数量。

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

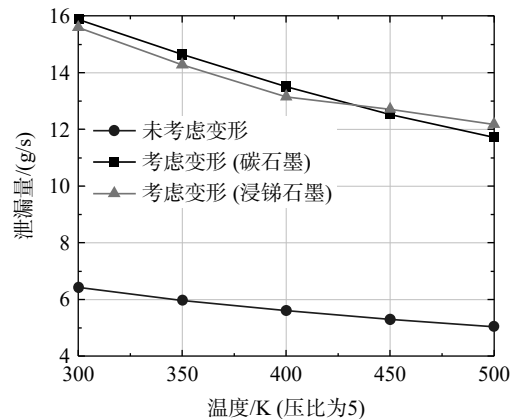
变形情况		网格数量/万
未考虑变形		340
考虑变形	碳石墨	340~350
	浸钨石墨	340~345

图 12 给出了采用不同材料密封结构的泄漏量随压比和温度的变化曲线。从图 12(a)中可以看出,随着进出口压比的增大,密封泄漏量随之增加。在进出口压比小于 4 时,采用碳石墨材料的石墨密封泄漏量相比于浸钨石墨材料更小,当进出口压比大于 4 时,浸钨石墨材料有更小的密封泄漏量,这主要是由于浸钨材料石墨环在压力影响下变形量波动相对平稳,而压力对碳石墨密封材料影响较大,石墨环的变形随着进出口压比的增大而加速增加,导致碳石墨密封泄漏量增加趋势较快,但在进出口压力小于 4 时,碳石墨相较于浸钨材料有更小的变形量,相较于浸钨材料变形量平均减小了 12.99%。

从图 12(b)中可以看出,随着温度的增加,石墨密封泄漏量随之减小,主要是因为温度越高,流体的黏度越大,气体在封严间隙内的流动性越差。同时发现碳石墨材料变形受温度影响较小,浸钨材料石墨环在温度作用下变形范围较大,且当温度较高时,浸钨石墨材料密封有更大泄漏量,温度为 500 K 时浸钨石墨密封泄漏量相较于碳石墨材料增加了 7.40%;碳石墨材料的石墨环受温度影响较小,变形量变化范围较小,有相对较低的泄漏量,相较于未变形时,密封泄漏量平均增加了 140.1%。这主要是由于浸钨石墨材料的热



(a) 压比对密封泄漏量影响



(b) 温度对密封泄漏量影响

图 12 石墨密封结构的泄漏特性

Fig. 12 Leakage characteristics of graphite seal structure

膨胀系数和导热系数较大,受温度影响较大,浸钨石墨环变形量范围较大,碳石墨材料的导热系数和热膨胀系数相对较小,石墨环变形量受温度影响较小。综上所述,同种工况下,碳石墨材料密封泄漏量受压比影响程度更大,浸钨材料石墨密封泄漏量受温度影响更大。

4 考虑变形石墨密封泄漏量计算分析模型

4.1 泄漏量计算分析

石墨密封内气体在进出口压差的作用下从高压侧向低压侧流动。为了构造考虑石墨环内表面变形的石墨密封的泄漏量理论公式,需要引入修正系数 C_d ,通过对圆周石墨密封泄漏量公式进行修正,得到考虑石墨环变形的石墨密封实际泄漏量公式

$$Q = C_d Q_i \quad (9)$$

式中 Q 为石墨密封的实际泄漏量; Q_i 为圆周石墨密封泄漏量公式^[14] 计算得到的泄漏量,其计算公式为

$$\left\{ \begin{aligned} Q_i &= \frac{\xi \varphi D P_1}{\sqrt{RT_1}} \\ \varphi &= \begin{cases} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}} & \frac{P_2}{P_1} > \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \\ \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{2}{\kappa-1}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1}} & \frac{P_2}{P_1} \leq \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \end{cases} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

式中 R 为气体常数, $\text{m}^2/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$, 对空气 $R=287.06 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_1 进口气体总温, K ; D 为密封直径, m ; p_1 为进口气体压力, Pa ; p_2 为出口气体压力, Pa ; κ 为绝热指数, 对空气 $\kappa=1.4$; φ 为流量函数; 动态系数 $\xi = 15 \times 10^{-6}$, m 。

4.2 泄漏量公式构造

当采用碳石墨以及浸钨石墨材料时石墨环内表面都会因压力和温度的共同作用发生变形, 变形后密封的等效间隙会随之发生变化, 上述分析表明碳石墨材料的石墨环具有相对更好的密封性能, 故本文针对碳石墨材料进行石墨密封泄漏量公式构造。其等效封严间隙 δ' 为

$$\delta' = \delta + \Delta x \quad (11)$$

式中 Δx 为石墨环变形量; δ 为未考虑石墨环变形的密封间隙。

在本文的研究内容中, 影响考虑石墨环变形的石墨密封泄漏量参数有石墨环变形后等效封严间隙、进出口压比和进口温度, 故通过数值计算结果对修正系数 C_d 进行了公式构造

$$C_d = f_1(\delta') f_2(\pi) f_3(T) \quad (12)$$

采用修正系数法分别得到石墨环变形后的等效封严间隙、进出口压比和进口温度对石墨密封泄漏量的影响公式如下:

$$\left\{ \begin{aligned} f_1(\delta') &= 0.35\delta' - 2.5 \\ f_2(\pi) &= 0.042\pi^3 - 0.28\pi^2 + 0.64\pi + 0.7 \\ f_3(T_1) &= -5.23e^{-10}T_1^4 + 8.25e^{-7}T_1^3 - 4.745e^{-4}T_1^2 + 0.1205T_1 - 10.2 \end{aligned} \right. \quad (13)$$

式中 δ' 为变形后等效封严间隙; π 为进出口压比。

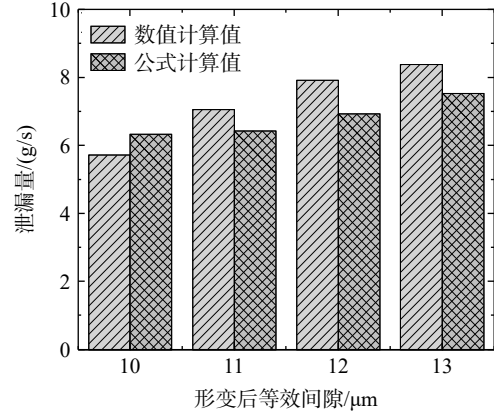
$$Q = 0.7345 C_d \frac{\xi D p_1}{\sqrt{RT_1}} \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{2}{\kappa-1}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1}} \quad (14)$$

综上, 将式(10)~式(12)代入式(13)中即可得到考虑石墨环变形的石墨密封的实际泄漏量。

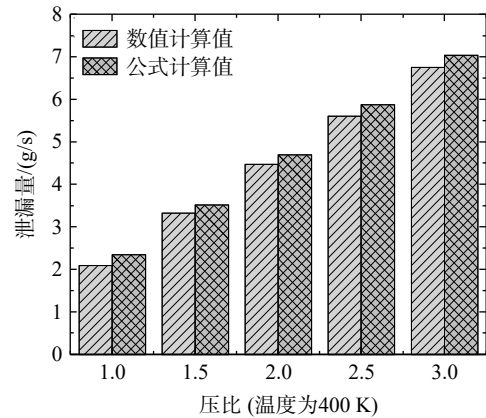
4.3 泄漏量理论公式验证

为了验证考虑石墨环变形的石墨密封泄漏量理论公式的准确性, 图13分别给出了密封等效封

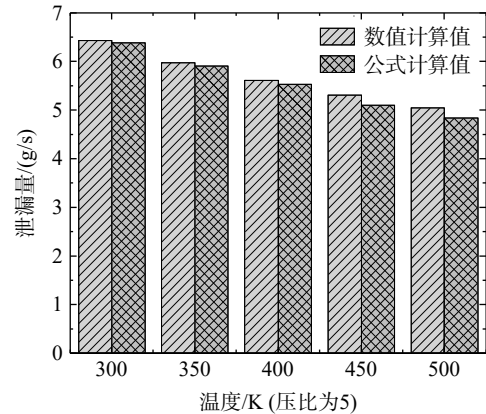
严间隙、不同进出口压比以及不同温度下密封泄漏量的数值计算与公式计算结果对比情况。从图13中可发现, 石墨密封泄漏量公式计算值与数值仿真计算结果的平均相对误差为10.9%, 本文构造的石墨密封泄漏量公式能够很好地与数值计算结果相吻合, 且弥补了传统石墨圆周密封泄漏量公式仅考虑单一变量的不足, 能够可靠预测考虑石墨环变形的石墨密封泄漏量。



(a) 变形后等效封严间隙对泄漏量影响的对比



(b) 进出口压比对泄漏量影响的对比



(c) 进口温度对泄漏量影响的对比

图13 考虑石墨环变形的石墨密封泄漏量结果对比
Fig. 13 Comparison of the leakage rate results of graphite seals considering the deformation of the graphite ring

5 结 论

建立了考虑石墨环变形的石墨密封泄漏特性多物理场耦合求解模型, 在验证求解模型准确性的基础上, 比较分析了不同材料的石墨密封在不同压比、温度下的流场特性、泄漏特性与结构力学特性, 并基于传统石墨圆周石墨密封公式构造了考虑石墨环变形的石墨密封泄漏量理论公式。具体结论如下:

1) 石墨密封封严间隙内的流体在密封周向剪切流的作用下进入浅槽内, 流体因挤压作用堆积在浅槽处, 形成局部高压区。

2) 建立的石墨密封流固热耦合模型可以准确计算石墨环的变形量。在高压侧石墨环变形较大, 并沿轴向形成楔形间隙。其中碳石墨材料在高压比下变形明显, 浸钨材料在高温作用下变形明显。

3) 温度为 400 K、进出口压力小于 4 时, 采用碳石墨材料的密封环变形量相较于浸钨材料平均减小了 12.99%, 且碳石墨材料石墨密封泄漏量相比于浸钨石墨材料最大减小了 6.89%。

4) 所构造的泄漏量理论公式可准确预测考虑石墨环变形的石墨密封泄漏量, 为石墨密封泄漏特性分析提供重要理论依据。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] 闫玉涛, 张博, 胡广阳, 等. 石墨圆周密封热-结构耦合分析[J]. 航空动力学报, 2018, 33(2): 273-281.
YAN Yutao, ZHANG Bo, HU Guangyang, et al. Analysis on thermal-structure coupling for graphite circumferential seal[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(2): 273-281. (in Chinese)
- [3] ALLEN G P. Self-acting lift-pad geometry for circumferential seals-a noncontacting concept[R]. NASA-1980-1583, 1980.
- [4] BURCHAM R E. High-speed cryogenic self-acting shaft seals for liquid rocket turbopumps[R]. NASA-1983-168194, 1983.
- [5] ARGHIR M, MARIOT A. Theoretical analysis of the static characteristics of the carbon segmented seal[J]. *Journal of Tribology*, 2017, 139(6): 062202.1-062202.11.
- [6] 运睿德, 陈志英, 刘勇, 等. 周向弹簧力分布对圆周密封装置密封性能的影响[J]. 推进技术, 2021, 42(6): 1361-1371.
YUN Ruide, CHEN Zhiying, LIU Yong, et al. Effects of circumferential spring force distribution on sealing performance of circumferential seal[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(6): 1361-1371. (in Chinese)
- [7] 苏令. 新型浅槽环瓣型浮动环密封综合性能分析及软件开发[D]. 北京: 清华大学, 2006.
SU Ling. Performance analysis and software development of a new shallow-slot split floating ring seal[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006. (in Chinese)
- [8] 胡广阳, 闫玉涛, 郑利胜, 等. 航空发动机石墨圆周密封接触特性分析[J]. 润滑与密封, 2018, 43(11): 102-107.
HU Guangyang, YAN Yutao, ZHENG Lisheng, et al. Analysis of contact characteristics for graphite circumferential seal in aero-engine[J]. *Lubrication Engineering*, 2018, 43(11): 102-107. (in Chinese)
- [9] 张博. 接触式圆周密封性能分析与参数化设计[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
ZHANG Bo. Performance analysis and parametric design of contact circumferential seal[D]. Shenyang: Northeastern University, 2017. (in Chinese)
- [10] MARTIN H M. Labyrinth packings[J]. *Engineering*, 1908, 85(3): 35-36.
- [11] EGLI A. The leakage of gases through narrow channels[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1937, 4(2): 63-68.
- [12] VERMES G. A fluid mechanics approach to the labyrinth seal leakage problem[J]. *Journal of Engineering for Power*, 1961, 83(2): 161-169.
- [13] 王伟, 赵宗坚, 张振生. 单环圆周密封装置设计和应用研究[J]. 航空发动机, 2009, 35(4): 7-11.
WANG Wei, ZHAO Zongjian, ZHANG Zhensheng. Design and application of single circumferential seal[J]. *Aeroengine*, 2009, 35(4): 7-11. (in Chinese)
- [14] 《航空发动机设计手册》总编委会编. 航空发动机设计手册: 第12册 传动及润滑系统[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
- [15] 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. (in Chinese)
- [16] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [17] YAN Yu, QIAN Xiao, HU Guang, et al. Analysis on circumferential seal ring in engine under different conditions[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 945/946/947/948/949: 343-346.
- [18] AHMED Y, ELBATRAN A. Numerical study of the flow field characteristics over a backward facing step using k-kl- ω turbulence model: comparison with different models[J]. *World Journal of Engineering*, 2018, 15(1): 173-180.
- [19] 陈永辉, 王强, 朴明波. 湍流模型的发展及其研究现状[J]. 能源与环境, 2009(2): 4-6, 21.
CHEN Yonghui, WANG Qiang, PIAO Mingbo. Development and research status of turbulence model[J]. *Energy and Environment*, 2009(2): 4-6, 21. (in Chinese)
- [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

- cal 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)

(编辑: 王碧珺)