

文章编号: 1000-8055(2024)01-20220153-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220153

基于等效间隙的机匣安装边泄漏量定量计算方法

艾延廷¹, 刘俊男¹, 田晶¹, 刘玉¹, 赵丹², 姚玉东¹

(1. 沈阳航空航天大学 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 610550)

摘 要: 结合平行平板流动理论, 结合流量因子法和粗糙面接触压力与接触间隙的关系, 提出了一种基于等效间隙、能够考虑微观粗糙形貌及受不均匀分布载荷的机匣安装边泄漏量定量计算方法; 采用有限元计算方法, 研究了内部气体压力和轴向力对机匣安装边气体泄漏量的影响规律; 研究表明, 随着内部气体压力的增加, 泄漏量增大, 随着轴向力的增加, 泄漏量略微减小; 最后将计算结果与泄漏量实验结果进行对比, 在内部气体压力和轴向力作用下的泄漏量最大误差分别为 3.5% 和 3.6%, 证明了本文计算方法的有效性。

关键词: 机匣安装边; 表面粗糙度; 流量因子; 等效间隙; 泄漏量实验

中图分类号: V235.11

文献标志码: A

Quantitative calculation method of the casing flange leakage based on equivalent clearance

AI Yanting¹, LIU Junnan¹, TIAN Jing¹, LIU Yu¹, ZHAO Dan², YAO Yudong¹

(1. Liaoning Key Laboratory of Advanced Measurement and Test Technology for Aviation Propulsion System, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;
2. Sichuan Gas Turbine Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Chengdu 610550, China)

Abstract: A quantitative calculation method of gas leakage in casing flange considering the rough surface morphology and various distributed loads was proposed by using the parallel plate flow theory, which combined the flow factor method and the relationship between contact pressure and contact gap on the rough surface. The influence of internal gas pressure and axial force on gas leakage in casing flange was studied by finite element method. The results showed that with the increase of internal gas pressure, the leakage increased, and with the increase of axial force, the leakage decreased slightly. Finally, the calculated results were compared with the experimental results of leakage, and the maximum errors of leakage under the action of internal gas pressure and axial force were 3.5% and 3.6%, respectively, which proved the effectiveness of the proposed calculation method.

Keywords: casing flange; roughness; flow factor; equivalent clearance; leakage experiment

为了满足如今国防的需求, 航空发动机的性能需要不断提高^[1]。在提高发动机性能方面, 除了提高其结构强度和材料性能外, 密封问题也越

来越受到人们的关注^[2-4]。航空发动机安装边气体泄漏会降低压气机效率和排气温度裕度, 导致发动机超温, 使发动机偏离共同工作线, 增加燃

收稿日期: 2022-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(11702177); 辽宁省自然科学基金(2020-BS-174); 辽宁省教育厅项目(JYT2020019)

作者简介: 艾延廷(1964—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事航空发动机结构强度、噪声方向的研究。

引用格式: 艾延廷, 刘俊男, 田晶, 等. 基于等效间隙的机匣安装边泄漏量定量计算方法[J]. 航空动力学报, 2024, 39(1): 20220153. AI Yanting, LIU Junnan, TIAN Jing, et al. Quantitative calculation method of the casing flange leakage based on equivalent clearance[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(1): 20220153.

油消耗率。安装边的泄漏气体定量计算是困扰发动机设计人员的难题, 目前已经成为航空发动机研发的重点之一^[5-6]。高效而准确的安装边泄漏量定量计算方法可以为航空发动机安装边的设计提供依据, 同时丰富和发展安装边连接设计体系。为此, 国内外学者进行了许多相关研究。

机匣安装边的接触表面具有一定的表面粗糙度(后文简称粗糙度), 这会极大的影响泄漏量的计算。在研究考虑粗糙度的间隙流动方面, Christensen^[7] 和 Chow 等^[8] 提出了能够描述二维粗糙表面间隙内流动特性的修正 Reynolds 方程^[9]。Patir 等^[10-11] 提出了“平均流动模型”, 该模型可用于研究三维粗糙表面间隙内的不可压缩流动。任晓等^[12] 提出了基于数值方法直接计算粗糙密封面间泄漏流动的方法, 并基于此方法研究了粗糙度对泄漏率和密封面总承载力的影响。包超英等^[13-14] 基于渗流理论建立了一种能够解决接触式机械密封端面泄漏问题的泄漏模型。

在安装边的密封性能研究方面, Lewis 等^[15] 提出了一种基于接触面间接触压力分布和实验法兰泄漏量推导泄漏通道形状的方法。Fessler 等^[16] 在 Lewis 研究的基础上, 研究了螺栓预紧力、轴向力、内部气体压力三种载荷对法兰接触面泄漏通道尺寸及形状的影响。艾延廷等^[17] 首先基于断裂力学理论推导出了法兰安装边泄漏压力的公式, 然后基于此公式分析了航空发动机机匣安装边的泄漏特性。焦磊^[18] 研究了螺栓法兰连接系统在低温和高温情况下的泄漏机理, 并分析了泄漏原因。马奔奔等^[19] 研究了纵向安装边机匣螺栓连接结构的几何参数与安装边密封性能之间的关系。

综上, 前人对航空发动机安装边密封特性的研究中, 没有考虑安装边接触粗糙度的影响。由于考虑粗糙度的机匣安装边微观接触间隙相对于总体结构的尺寸差异悬殊, 导致泄漏通道模型的建立十分困难。现有的安装边泄漏量研究主要依赖于实验数据和推导的经验公式, 还有结合逾渗理论得出临界接触压力等作为判断泄漏量大小的依据, 没有实现泄漏量定量计算。本文提出一种基于等效间隙的机匣安装边泄漏量定量预测方法。该方法基于微观粗糙接触面与平行光滑接触面的等效关系, 结合接触面处的接触应力与接触间隙分布, 建立了等效间隙泄漏通道模型。该模型能够考虑微观粗糙形貌对密封性能的影响。在此基

础上, 本文研究了不同内部气体压力及不同轴向力对机匣安装边泄漏量的影响。最后通过开展相关的机匣安装边泄漏实验, 对本文提出的方法进行验证。

1 考虑粗糙的泄漏通道模型建立

1.1 平行平板泄漏量计算公式

平行平板模型、三角沟槽模型和多孔介质模型是三种常见的密封件泄漏量计算模型^[20], 本文所研究的安装边泄漏量计算模型应采用平行平板模型。如图 1 所示, 平行平板模型假设流体介质在长为 l , 宽为 B , 高为 h_d 的平行间隙内作定常、连续的层流流动, 流速为 v 。平行平板间隙中的体积泄漏量 Q_p 可由式(1)给出^[21]:

$$Q_p = \frac{B h_d^3 \Delta p}{12 \mu l} \quad (1)$$

式中 Δp 为通道两侧的压差, p_1 和 p_2 分别为平行平板内外两侧的压力, μ 为动力黏度。

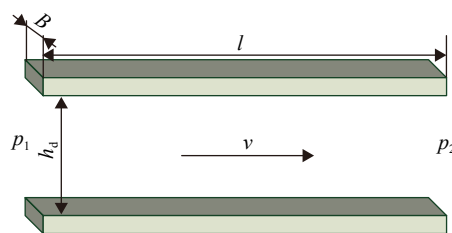


图 1 平行平板流动示意图

Fig. 1 Schematic diagram of parallel flat flow

1.2 流量因子

密封件的接触表面都存在粗糙度, 是凹凸不平的。因此, 当两密封表面相互接触时会产生一定的间隙, 当间隙足够大时, 密封介质会从高压侧向低压侧渗漏。文献[21]引用流量因子 ϕ 来描述粗糙度对两接触表面之间的泄漏量影响。流量因子法是目前研究粗糙表面密封性能的常用方法^[22-24]。定义两粗糙表面间隙内的泄漏量为 Q_s , 相同长、宽和间隙高度的平行平板泄漏量为 Q_p , 则 ϕ 的表达式如式(2):

$$\phi = \frac{Q_s}{Q_p} \quad (2)$$

文献[21]中建立了不同粗糙度和密封间隙高度的模型, 采用计算流体力学(CFD)计算了不同工况下粗糙表面间隙内的泄漏量 Q_s , 利用相同密封间隙高度的平行平板泄漏量 Q_p , 得到不同粗糙

度的流量因子 ϕ 随间隙高度 h_s 变化的曲线。最后通过指数函数拟合得到与粗糙度 σ 、自相关长度 T 和粗糙表面间隙高度 h_s 有关的流量因子 ϕ 的计算公式如式(3):

$$\phi = 1 - \exp \left[-0.5952 \cdot \left(\frac{h_s}{T} \right)^{0.3303} \cdot \left(\frac{\sigma}{T} \right)^{-0.9603} \right] \quad (3)$$

1.3 间隙高度与接触压力的关系

如图 2 所示, 根据 Roth^[25] 提出的接触模型, 可知粗糙表面接触间隙高度 h_s 与接触压力 p 之间的关系如式(4):

$$h_s = h_0 \exp \left(-\frac{p}{R_c} \right) \quad (4)$$

式中 h_0 为初始间隙高度, 数值为 3 倍的 σ , R_c 为材料的密封性能参数。

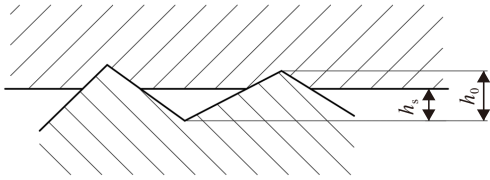


图 2 粗糙面接触示意图

Fig. 2 Rough surface contact schematic

1.4 基于等效间隙的泄漏量预测方法

机匣安装边的密封结构为金属-金属接触的干气静密封, 通过螺栓连接使两个安装边紧密连接在一起, 在外部载荷和螺栓预紧力的共同作用下, 安装边接触面产生接触压力, 当接触压力为零时视为开始出现接触间隙。本文提出一种基于等效间隙的机匣安装边泄漏量预测方法, 该方法能够考虑微观尺度下安装边接触面粗糙特征在接触应力作用下产生的间隙。具体步骤如下:

1) 建立等效关系。假设存在一个包含粗糙度特征、间隙高度为 h_s 的平行粗糙板的泄漏量为 Q_s , 一个间隙为 h_d 、光滑的平行平板泄漏量为 Q_p , 两个平板的长宽相同。当 Q_s 和 Q_p 相等时有:

$$\phi \cdot \frac{Bh_s^3 \Delta p}{12\mu l} = \frac{Bh_d^3 \Delta p}{12\mu l} \quad (5)$$

由式(5)可得式(6):

$$h_d = \sqrt[3]{\phi} \cdot h_s \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可知, 一个包含粗糙度特征、间隙为 h_s 的平行粗糙板的泄漏量可表示为一个具有相同长宽、间隙为 h_d 的光滑平行平板泄漏量。

2) 建立典型航空发动机机匣安装边有限元模型并计算。通过有限元计算得到机匣安装边的接触压力 p 的分布。

3) 建立等效间隙泄漏通道模型。当两粗糙表面完全接触但两者之间的接触应力不足够大时, 由于粗糙度的影响仍然会存在气体的泄漏通道。提取机匣安装边各点接触压力, 根据式(4)计算各点接触压力下的间隙高度 h_s , 再根据式(6)计算各点等效间隙高度 h_d 。

4) 将各点的等效间隙高度 h_d 拟合成曲面, 建立等效后的泄漏通道模型, 再进行 CFD 求解得到机匣安装边泄漏量。

该方法考虑了接触面粗糙度对泄漏量的影响, 并将粗糙度形成的不规则泄漏通道等效成光滑泄漏通道, 使泄漏量能够被定量计算。图 3 为等效平行间隙构建示意图, 图中 v 为流速。

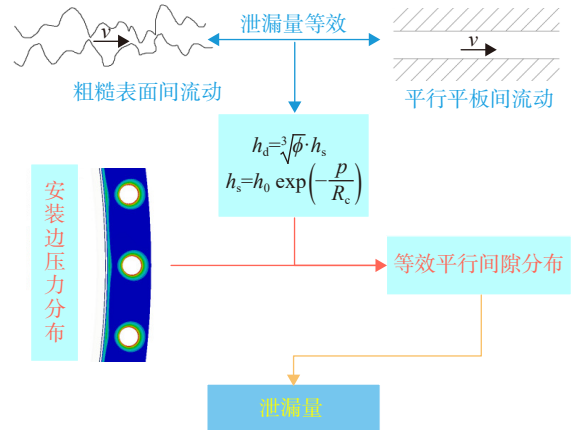


图 3 等效平行间隙构建示意图

Fig. 3 Equivalent parallel gap construction schematic

文献[21]中提出了粗糙接触表面泄漏量的计算方法, 认为圆环结构的压力分布是等值的, 采用流量因子法计算圆环结构的泄漏量。而本文所建立的方法既考虑接触面的不同压力分布, 又可以实现复杂结构的泄漏量计算, 具有非常明显的优势。

2 机匣安装边有限元模型建立

本文对某型航空发动机某分段机匣进行有限元建模研究。建立三层带止口航空发动机机匣安装边螺栓连接结构的有限元模型, 其几何参数如表 1 所示。

航空发动机的机匣为薄壁圆筒结构, 两段机匣及止口圆环采用 96 个 M8 螺栓连接。为了简

表 1 机匣安装边有限元模型几何参数
Table 1 Geometric parameters of finite element model of casing flange

参数	数值
机匣长度	100
螺栓处机匣直径	640
机匣内径	740
机匣外径	720
安装边高度	4

化计算,选取带有一个螺栓的 1/96 扇区进行分析,在计算时设置周向循环对称。模型网格划分如图 4 所示,采用 multi-zone 方法划分六面体网格,并对安装边接触面的面网格进行加密处理。最后得到的模型网格数为 29 442,节点数为 150 325,且该网格通过了网格无关性验证。安装边的约束和载荷施加如图 5 所示,机匣一端施加固定支承,另一端施加轴向力,分别为 0、20、40、60 kN。对机匣内壁施加内部气体压力分别为 0.2、0.3、0.4、0.5 MPa。轴向力变化时机匣取内部气体压力为 0.4 MPa,内部气体压力变化时设置机匣的轴向力为 0 kN。同时,设置接触面的粗糙度 σ 为 3.2。

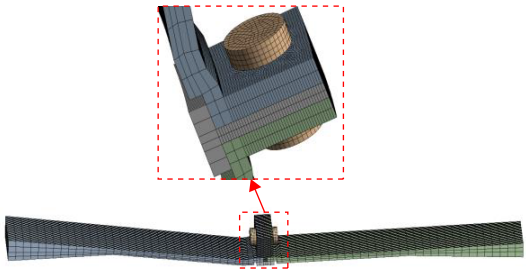


图 4 机匣安装边模型网格图
Fig. 4 Grid diagram of casing flange model

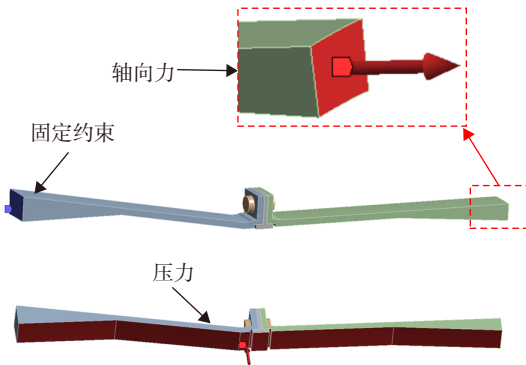


图 5 机匣安装边受力图
Fig. 5 Force diagram of the casing flange

此外,每个螺栓还施加了 22 N/m 的螺栓预紧扭矩。

3 结果和讨论

3.1 机匣安装边接触特性分析

通过有限元计算,提取在不同内部气体压力作用下机匣安装边单扇区螺栓连接结构的接触压力分布,如图 6 所示。此时在不同轴向力作用下机匣安装边单扇区螺栓连接结构的接触压力分布如图 7 所示。

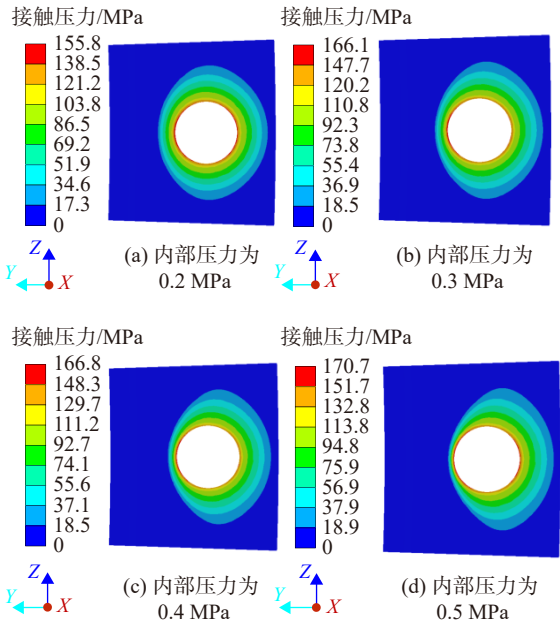


图 6 不同内部气体压力下安装边单扇区螺栓连接结构接触压力分布

Fig. 6 Contact pressure distribution of the single sector bolted structure on the mounting side under different internal gas pressures

由图 6 可知,随着内部气体压力的增加,接触压力的最大值不断提高,但提高的范围不大,接触压力的最大值为 170.7 MPa,最小值为 155.8 MPa。由图 6 可知,随着轴向力的增加,接触压力的最大值逐渐下降,范围为 170.7 MPa 到 159.1 MPa。综合图 6 和图 7 可知,接触压力的分布均为螺栓孔处最大,且随着距螺栓孔的距离增加接触压力逐渐减小。

三层螺栓连接的机匣安装边结构共有两个接触面,但两个接触面的接触压力分布和变化规律基本一致,因此,本节只取其中一个接触面进行分析。此后的接触间隙分析和泄漏通道模型分析与此类似。

通过有限元计算,提取不同内部气体压力作

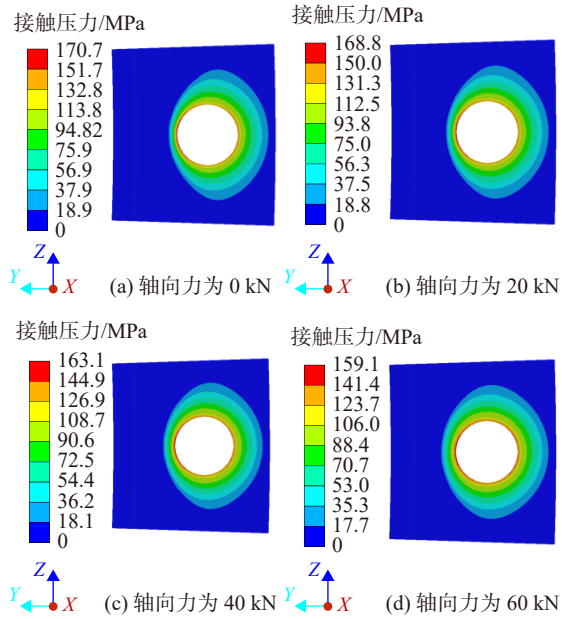


图 7 不同轴向力下安装边单扇区螺栓连接结构接触压力分布

Fig. 7 Contact pressure distribution of single sector bolted structure on the mounting side under different axial forces

用下机匣安装边单扇区螺栓连接结构的接触间隙分布, 如图 8 所示。不同轴向力作用下机匣安装边单扇区螺栓连接结构的接触间隙分布, 如图 9 所示。

由图 8 可知, 随着内部气体压力的增加, 安装边的最大接触间隙呈逐渐增大的趋势, 最小为

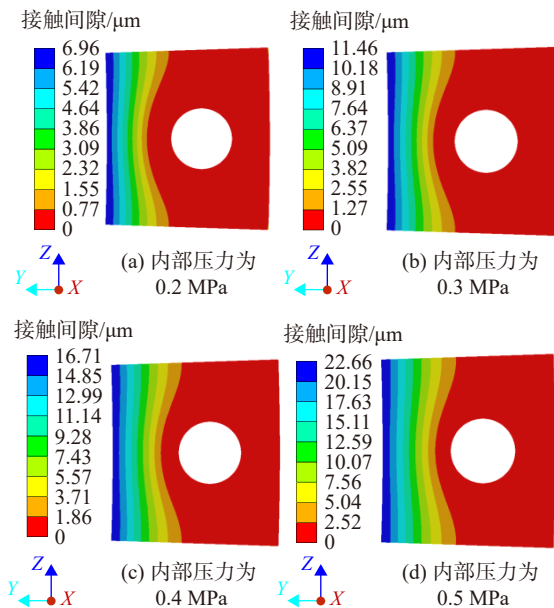


图 8 不同内部气体压力下安装边单扇区螺栓连接结构接触间隙分布

Fig. 8 Contact gap distribution of single sector bolted structure on the mounting side under different internal gas pressure

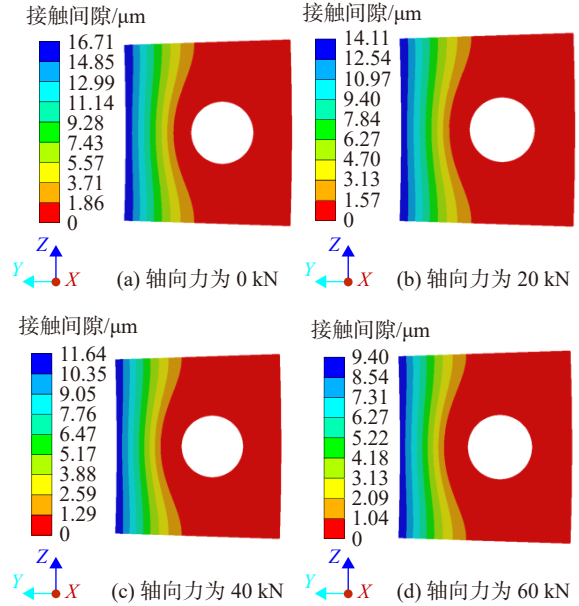


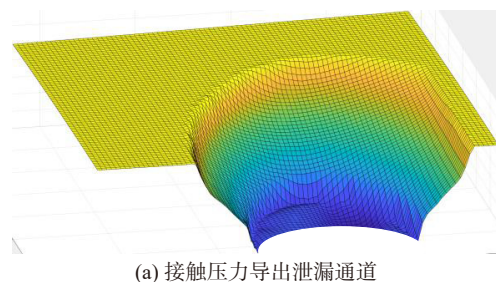
图 9 不同轴向力下安装边单扇区螺栓连接结构接触间隙分布

Fig. 9 Contact gap distribution of single sector bolted structure on the mounting side under different axial forces

6.96 μm , 最大为 22.66 μm 。由图 9 可知, 随着轴向力的增加, 安装边的最大接触间隙呈逐渐减小的趋势, 最小为 9.40 μm , 最大为 16.71 μm 。综合图 8 和图 9 可知, 接触间隙在安装边内侧最大, 并且接触间隙从内向外逐渐减小。

3.2 等效间隙模型建立

将内部气体压力为 0.5 MPa, 轴向力为 0 kN 时有限元计算得到的接触压力导入到 MATLAB 程序中, 通过式(3)、式(4)和式(6)计算得到如图 10(a)所示的泄漏通道。由图 10(a)可知靠近螺栓孔区域的泄漏通道高度较小, 远离螺栓孔的区域较大, 泄漏通道的高度分布与其接触压力分布保持一致。使用接触间隙数据, 通过式(3)和式(6)计算得到如图 10(b)所示的泄漏通道。由图 10(b)可知, 接触间隙导出的泄漏通道, 内侧高, 外侧低, 靠近螺栓孔的区域也低, 与接触间隙的分布保持一致。



(a) 接触压力导出泄漏通道

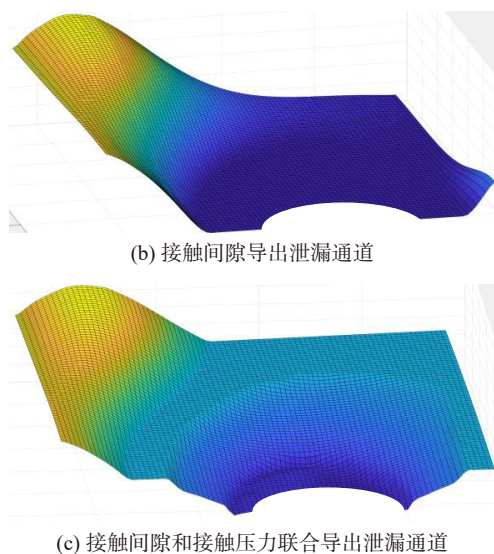


图 10 导出泄漏通道数据示意图

Fig. 10 Schematic diagram of exporting leaked channel data

在图 10(a)中还有一些平坦的区域,这是因为这些区域的接触压力为 0 kN,通过式(4)计算的泄漏通道高度一致。大范围的接触压力为 0 kN 的区域中,肯定会产生间隙。此外,由于有限元计算忽略了接触面的粗糙度带来的影响,因此间隙较大时,有限元计算的结果较为准确,而间隙过小时,使用公式计算的结果更准确。综上,本文将接触压力和接触间隙导出的泄漏通道结合起来,取两者相同位置的最大值得到如图 10(c)所示的接触间隙和接触压力联合导出的泄漏通道。(图 10 中的长、宽、高之比不是等值的,高度方向的大小与长宽差别很大,为了便于理解显示成图 10 的样子。)

由于机匣安装边的接触压力和接触间隙沿螺

栓孔中心和机匣中心连线呈轴对称分布,因此,取 1/2 扇区建立等效平行间隙泄漏通道模型。将图 10(c)所示平行等效间隙高度分布坐标导入到三维图形软件 UG 中,创建曲面并拉伸为体,建立变间隙高度的等效泄漏通道模型,如图 11 所示。

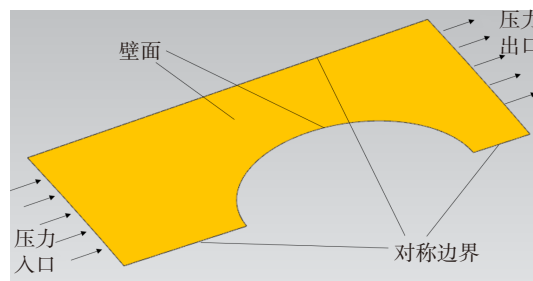


图 11 等效泄漏通道模型示意图

Fig. 11 Schematic diagram of equal leakage channel model

设置机匣安装边内壁为压力入口,压力大小与发动机内部气体压力保持一致。机匣安装边外侧设置为压力出口,压力大小为大气压力。泄漏通道模型的上下两面和圆弧侧面设置为壁面,除圆弧侧面的左右两侧设置为对称边界。采用 CFD 方法进行泄漏量的计算,在计算的过程中,认为等效间隙泄漏模型中的流动特性是均匀的,且三层安装边的上下两对接触面的密封特性基本一致。

3.3 机匣安装边密封特性实验

航空发动机机匣安装边密封性能实验结构如图 12 所示,由安装边法兰密封实验件、充气与管路系统、外载荷模拟装置以及数据采集系统 4 部分组成。实验系统实物如图 13 所示。实验所用的安装边形状以及工况与仿真保持一致。

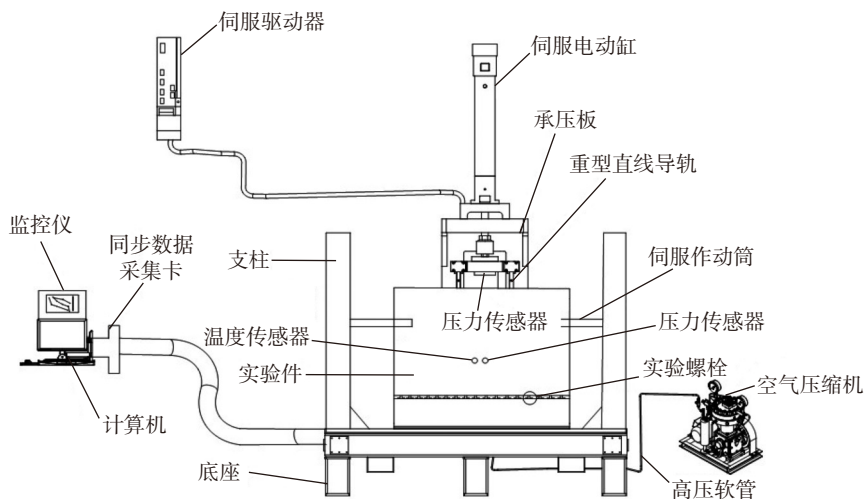


图 12 实验系统结构示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the structure of the test system



图 13 实验系统实物图

Fig. 13 Physical diagram of the test system

3.4 安装边密封特性分析

图 14 和图 15 分别显示了随内部气体压力增加, 等效间隙泄漏通道模型中流体总压 p_t 及流速 v 变化的云图。如图 14 所示, 随内部气体压力增加流体的总压增大, 但总压在泄漏通道模型中的分布基本不变, 均为从内侧到外侧逐渐减小。如图 15 所示, 随内部气体压力增加流体的最大流速逐渐增大, 最大值为 29.60 m/s, 最小值为 7.90 m/s。在不同内部气体压力作用下, 泄漏通道模型的流速分布相同, 通道中部区域的流速最大, 靠近螺栓孔的位置流速最小。

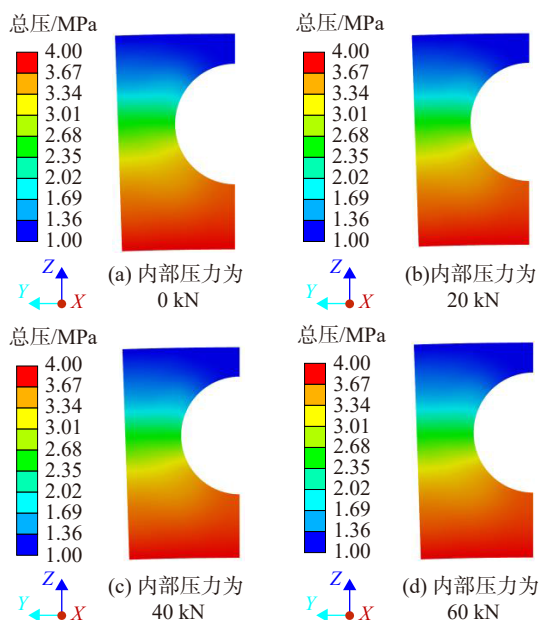


图 14 内部气体压力对总压分布的影响

Fig. 14 Effect of internal gas pressure on total pressure distribution

计算和实验得到的模型泄漏量如图 16 所示。由图 16 可知, 模型的泄漏量随着内部气体压力的增加而单调递增。这是因为泄漏量受进出口压差

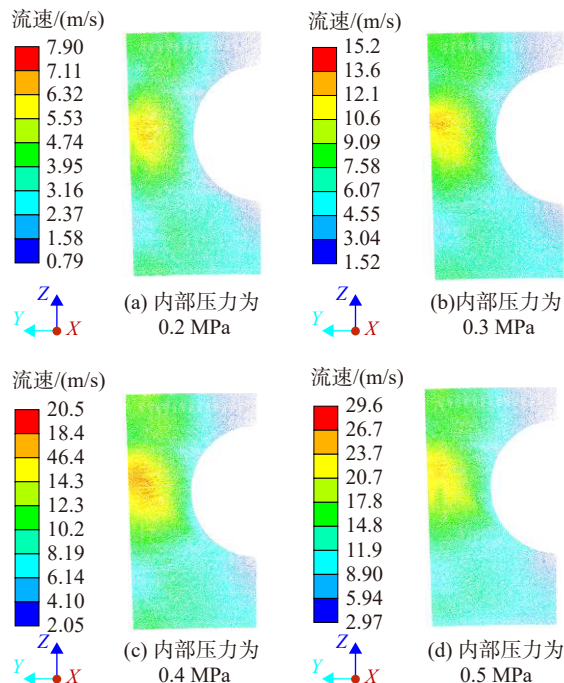


图 15 内部气体压力对流速分布的影响

Fig. 15 Effect of internal gas pressure on flow rate distribution

影响, 内部气体压力越大, 进出口压差越大, 泄漏量越大。同时, 内部气体压力的增加使安装边接触面间隙增大, 因此泄漏量增加。由图 16 可知在不同内部气体压力下泄漏量的实验结果规律与有限元结果保持一致, 均随着内部气体压力的增加而增加, 在内部气体压力为 0.5 MPa 时误差最大, 为 3.5%。

图 17 和图 18 显示了随轴向力增加, 等效平行间隙泄漏模型中流体总压 P_t 及流速 v 变化的云图。由图 17 可知, 轴向力变化对泄漏通道模型的流体总压大小和分布均无任何影响, 流体总压的分布均为从内侧到外侧逐渐降低。由图 18 可

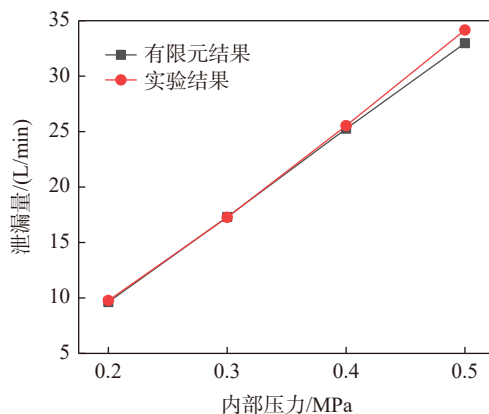


图 16 内部气体压力对泄漏量的影响

Fig. 16 Effect of internal gas pressure on leakage volume

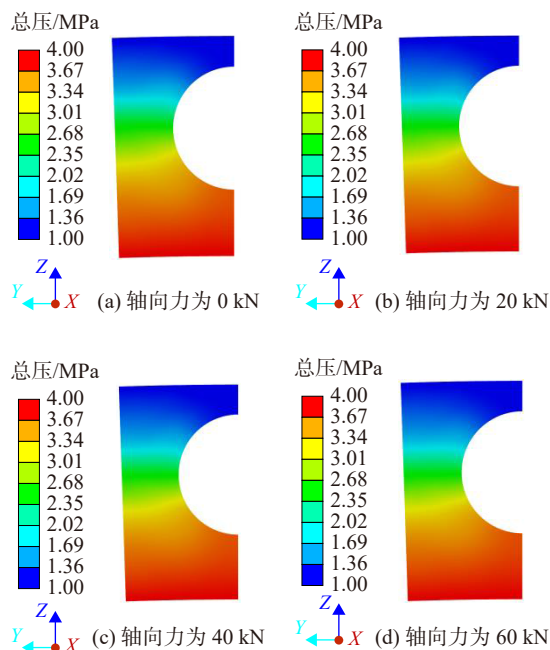


图 17 轴向力对总压分布的影响

Fig. 17 Effect of axial force on total pressure distribution

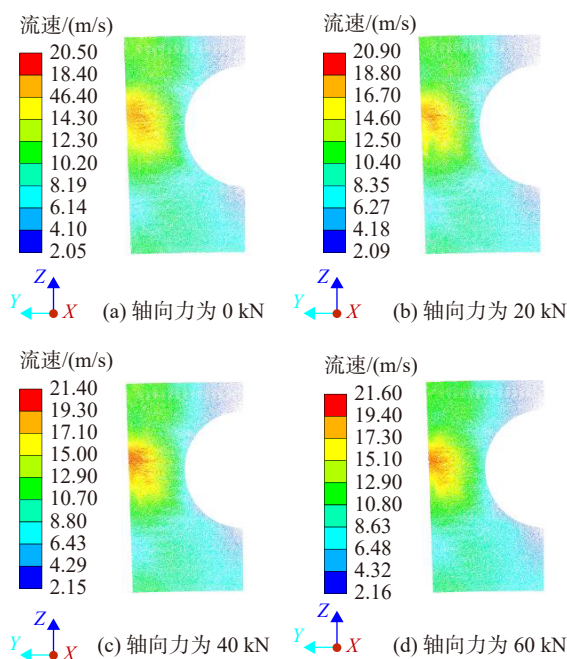


图 18 轴向力对流速分布的影响

Fig. 18 Effect of axial force on flow velocity distribution

知,随着轴向力增加,泄漏通道模型的流速会有微小的上升,这是由于轴向力改变了泄漏模型的最大间隙(见图 9),但流速的分布不变,均为通道中部区域的流速最大,靠近螺栓孔的位置流速最小。

图 19 显示了不同轴向力作用下仿真和实验的泄漏量。由图 19 可知,有限元计算的泄漏量随着轴向力的增加而减小,但总体变化很小。这是

因为向下的轴向力增加,安装边接触面间隙变小,泄漏量随之减小,但轴向力对泄漏量的影响很小。不同轴向力下泄漏量的实验结果规律与有限元结果保持一致,均随着内部气体压力的增加而略微下降,在轴向力为 40 kN 时误差最大,为 3.6%。证明了本文方法的有效性。

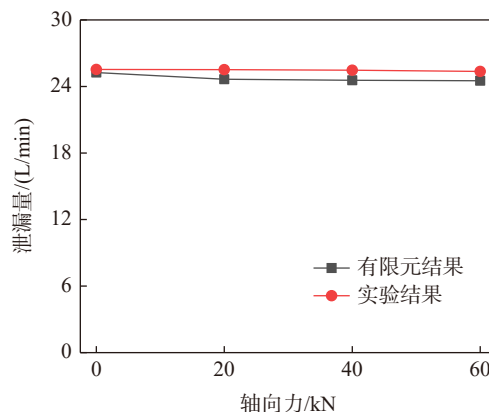


图 19 轴向力对泄漏量的影响

Fig. 19 Effect of axial force internal gas pressure on leakage volume

4 结 论

1) 本文基于平行板理论,流量因子法和接触压力与接触间隙之间的关系,结合接触面的压力和微观间隙有限元计算结果,建立了安装边等效间隙泄漏通道模型和泄漏量定量计算方法。该方法能够同时考虑尺寸差异悬殊的宏观结构和接触面粗糙度,为粗糙接触面泄漏量定量计算提供了有效手段。

2) 随着内部气体压力的增加,泄漏通道模型的最大总压、最大流速和泄漏量均增大;随着轴向力的增加泄漏通道模型的最大总压不变,最大流速有微小的上升,泄漏量略微减小。在不同的轴向力和内部气体压力下,泄漏通道模型的总压均为内侧大,外侧小,且从内到外逐渐减小。泄漏通道模型的流速均为通道中部区域的流速最大,靠近螺栓孔的位置流速最小。为航空发动机安装边泄漏机理研究提供了参考。

3) 进行了安装边密封特性计算方法的实验验证,不同工况下泄漏量的实验结果与有限元结果分布规律一致,在内部气体压力和轴向力作用下泄漏量定量计算的最大误差分别为 3.5% 和 3.6%,泄漏量计算误差较小,证明了本文方法的有效性。

参考文献:

- [1] 刘广鑫, 张定华, 姚倡锋. 钛合金切削表层微观组织研究进展[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(15): 231-245.
LIU Guangxin, ZHANG Dinghua, YAO Changfeng. Research progress of the microstructure on machined surface of titanium alloys[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(15): 231-245. (in Chinese)
- [2] 吴宝海, 郑志阳, 张阳, 等. 面向薄壁零件加工变形与振动控制的智能装夹技术研究进展[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(17): 21-34.
WU Baohai, ZHENG Zhiyang, ZHANG Yang, et al. Intelligent clamping technology for machining deformation and vibration control of thin-wall parts: a review of recent progress[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(17): 21-34. (in Chinese)
- [3] 聂祥樊, 李应红, 何卫锋, 等. 航空发动机部件激光冲击强化研究进展与展望[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(16): 293-305.
NIE Xiangfan, LI Yinghong, HE Weifeng, et al. Research progress and prospect of laser shock peening technology in aero-engine components[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(16): 293-305. (in Chinese)
- [4] 程涛涛, 王志平, 戴士杰, 等. 航空发动机陶瓷基高温封严涂层研究进展[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(10): 126-136, 147.
CHENG Taotao, WANG Zhiping, DAI Shijie, et al. Research progress of ceramic-based high temperature sealing coating for aeroengines[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(10): 126-136, 147. (in Chinese)
- [5] 艾延廷, 李传喜, 田晶, 等. 基于环形板理论的机匣安装边密封特性分析方法研究[J]. *推进技术*, 2021, 42(2): 431-439.
AI Yanting, LI Chuanxi, TIAN Jing, et al. Sealing characteristic analysis method of casing installation edge based on annular plate theory[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(2): 431-439. (in Chinese)
- [6] 艾延廷, 来纯强, 郝燕平, 等. 航空发动机安装边螺栓连接密封特性试验[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(10): 2315-2323.
AI Yanting, LAI Chunqiang, HAO Yanping, et al. Experiment on sealing characteristics of bolted flanged connections for aero-engines[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(10): 2315-2323. (in Chinese)
- [7] CHRISTENSEN H. Stochastic models for hydrodynamic lubrication of rough surfaces[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1969, 184(1): 1013-1026.
- [8] CHOW L S H, CHENG H S. The effect of surface roughness on the average film thickness between lubricated rollers[J]. *Journal of Lubrication Technology*, 1976, 98(1): 117-124.
- [9] REYNOLDS O. On the theory of lubrication and its application to Mr. Beauchamp tower's experiments, including an experimental determination of the viscosity of olive oil[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1886, 177: 157-234.
- [10] 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.
- [11] PATIR N, CHENG H S. Application of average flow model to lubrication between rough sliding surfaces[J]. *Journal of Lubrication Technology*, 1979, 101(2): 220-229.
- [12] 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 Chengwei, ZHOU Ping. Gas sealing performance study of rough surface[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(16): 176-181. (in Chinese)
- [13] 包超英, 孟祥铠, 李纪云, 等. 基于渗流原理的液体润滑机械密封的泄漏率研究[J]. *流体机械*, 2014, 42(11): 24-28, 16.
BAO Chaoying, MENG Xiangkai, LI Jiyun, et al. Study on leakage rate of liquid lubricated mechanical seal based on percolation theory[J]. *Fluid Machinery*, 2014, 42(11): 24-28, 16. (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] LEWIS L V, FESSLER H, HYDE T H. Determination of the initial gaps between flat flanges without gaskets[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Power and Process Engineering*, 1987, 201(4): 267-277.
- [16] FESSLER H, HYDE T H, LEWIS L V. Leakage through loaded flat-flanged joints without gaskets[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Power and Process Engineering*, 1988, 202(1): 1-13.
- [17] 艾延廷, 吴立夫, 孙丹, 等. 基于断裂力学理论的安装边泄漏特性分析[J]. *机械设计与制造*, 2017(2): 168-172.
AI Yanting, WU Lifu, SUN Dan, et al. Leakage characteristics analysis of aero-engine case flange based on fracture mechanics[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2017(2): 168-172. (in Chinese)
- [18] 焦磊. 压力管道法兰密封与泄漏的浅析[J]. *石油化工技术与经济*, 2012, 28(4): 26-30.
JIAO Lei. Tentative analysis on seal and emission of flange in pressure conduit[J]. *Technology & Economics in Petrochemicals*, 2012, 28(4): 26-30. (in Chinese)
- [19] 马奔奔, 李源, 王世建, 等. 纵向无垫圈螺栓连接系统的密封性分析和轻量化设计[J]. *强度与环境*, 2019, 46(4): 11-18.
MA Benben, LI Yuan, WANG Shijian, et al. Lightweight optimal design and sealing analysis for longitudinal bolted joints without gaskets[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2019, 46(4): 11-18. (in Chinese)
- [20] 张增禧, 王曙, 顾伯勤, 等. 垫片密封泄漏模型研究[J]. *压力容器*, 2001, 18(2): 4-6.
ZHANG Zengxi, WANG Shu, GU Boqin, et al. Investigation of leakage models of gasket seal[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2001, 18(2): 4-6. (in Chinese)
- [21] 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 in hard sealing structure[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [22] PEEKEN H J, KNOLL G, RIENACKER A, et al. On the numerical determination of flow factors[J]. *Journal of Tribology*, 1997, 119(2): 259-264.
- [23] WANG Q J, ZHU Dong, CHENG H S, et al. Mixed lubrication analyses by a macro-micro approach and a full-scale mixed EHL model[J]. *Journal of Tribology*, 2004, 126(1): 81-91.
- [24] SAHLIN F, LARSSON R, ALMQVIST A, et al. A mixed lubrication model incorporating measured surface topography. Part 1: theory of flow factors[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part J Journal of Engineering Tribology*, 2010, 224(4): 335-351.
- [25] ROTH A. The interface-contact vacuum sealing processes[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 1972, 9(1): 14-23.

(编辑: 秦理曼)