

文章编号:1674-8190(2021)06-147-06

# W型封严环表面粗糙度对间隙泄漏流动的影响

何少飞,王云,丁相玉,张呈,王金伟

(南昌航空大学 飞行器工程学院,南昌 330063)

**摘要:** 金属封严环密封结构的泄漏是影响发动机金属封严环间隙泄漏通道内气体流动的因素之一。本文采用有限元分析软件建立不同表面粗糙度下的泄漏通道模型;采用CFD技术对不同结构的间隙内流体流动进行数值模拟,研究表面粗糙度对泄漏流动的影响;计算封严环的泄漏率,通过密封试验验证计算结果的正确性。结果表明:气体在泄漏通道内受到表面粗糙度的影响,靠近粗糙壁面处产生明显的回流现象,降低了通道内流体的泄漏流速;在接触应力不变的条件下,密封间隙的泄漏量随表面粗糙度的增大而增大,提高封严环的加工精度能够降低表面粗糙度从而增强其密封性能。

**关键词:** 金属封严环;表面粗糙度;数值模拟;泄漏率

**中图分类号:** V231; 232.7

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.06.18

**文献标识码:** A

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Influence of the Surface Roughness of W-shaped Sealing Ring on Leakage Flow in the Gap

HE Shaofei, WANG Yun, DING Xiangyu, ZHANG Cheng, WANG Jinwei

(School of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** The leakage of metal sealing ring leak proof structure is one of the factors influencing the gas flow in leakage channel of the metal seal ring of engine. The finite element analysis software is used to establish the leakage channel model under different surface roughness, and the CFD technology is used to perform the numerical simulation of the fluid flow inside the gap of different structures to study the effect of surface roughness on the leakage flow. The leakage rate of the sealing ring is calculated, and the correctness of the calculation result is verified through the sealing test. The results show that the gas in the leakage channel is affected by the surface roughness, and the obvious backflow occurs near the rough wall surface, which can reduce the leakage flow rate of the fluid in the channel. Under the condition of constant contact stress, the leakage of the sealing gap is increased with the surface roughness. Improving the processing accuracy of the sealing ring can reduce the surface roughness so as to enhance its sealing performance.

**Key words:** metal sealing ring; surface roughness; numerical simulation; leakage rate

收稿日期:2020-11-27; 修回日期:2021-08-09

通信作者:王云, wangyun66@126.com

引用格式:何少飞,王云,丁相玉,等. W型封严环表面粗糙度对间隙泄漏流动的影响[J]. 航空工程进展, 2021, 12(6): 147-152.

HE Shaofei, WANG Yun, DING Xiangyu, et al. Influence of the surface roughness of W-shaped sealing ring on leakage flow in the gap[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(6): 147-152. (in Chinese)

## 0 引言

现代燃气涡轮发动机应具备高推重比、高燃油效率、高可靠性等性能,密封结构是影响发动机性能的重要因素之一<sup>[1]</sup>。W型金属封严环是一种独特优异的弹性金属密封零件,能够适应航空发动机中高温、高压、高振动的工况环境,而且可多次重复使用、结构不失效,有效地补偿法兰间的分离位移,具有良好的弹性补偿能力<sup>[2]</sup>。在工程实际中,金属封严环密封结构的泄漏是最关键的指标。一些研究者利用有限元软件对金属封严环进行接触计算分析,研究了轴向刚度和接触面积对金属封严环泄漏的影响<sup>[3-6]</sup>;N. Sarawate等<sup>[7]</sup>通过密封试验台测试不同结构参数封严环的泄漏量,分析了不同压缩量对封严环泄漏量的影响;邢敏杰<sup>[8]</sup>基于GW接触模型,给出了泄漏量与表面形貌和接触力的关系。还有一些研究者研究了金属封严环外部环境对密封结构泄漏量的影响,提出了一种金属封严环泄漏率的预测方法<sup>[9-11]</sup>。但是,金属封严环的间隙泄漏通道内表面粗糙度对气体流动有很大的影响,且密封结构表面粗糙度如何影响通道内气体流动未被考虑入内。

本文以某型W型金属封严环为对象,基于平行圆板微间隙流体流动理论,建立微观泄漏通道模型;采用CFD技术对不同间隙结构内流体流动进行数值模拟,分析表面粗糙度对密封间隙泄漏流动的影响,并对所得计算结果进行密封试验验证。

## 1 泄漏率的计算

### 1.1 W型封严环结构泄漏机理

W型金属封严环密封结构主要由法兰、W型封严环和紧固件等组成。W型金属封严环因加工存在粗糙度,从微观上,金属封严环与法兰平面之间的接触是封严环表面凸起与法兰表面凸起之间的接触,如图1所示。法兰面无法与金属封严环表面完全接触是导致泄漏的主要原因。

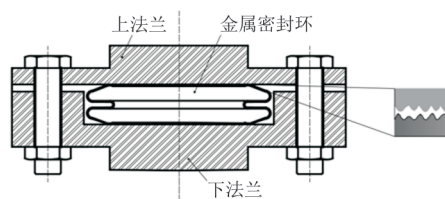


图1 宏观接触下的微观截面图  
Fig. 1 Microscopic cross-sectional view under macroscopic contact

### 1.2 流动特性分析

法兰与封严环的密封间隙中流体的泄漏量主要与压差、间隙高度、接触面积等因素有关,可近似地看作是二个静止上下两板之间的泄漏。基于平行圆板模型,将下粗糙面的均值线和上表面间的距离定义为间隙高度,即间隙高度与表面粗糙度相关,如图2所示。

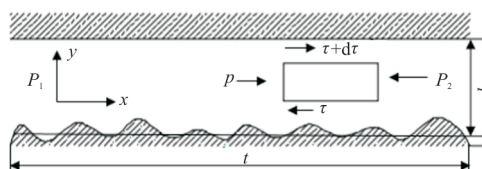


图2 密封间隙高度  
Fig. 2 Sealing gap height

金属封严环密封间隙内流体流动状况分析如图3所示。

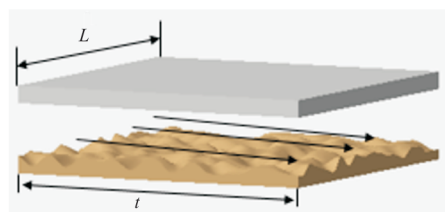


图3 间隙中流体受力分析<sup>[12]</sup>  
Fig. 3 Analysis of the force on the fluid in the gap<sup>[12]</sup>

流体的速度分布为

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} (y^2 - hy) \quad (1)$$

则流体流经泄漏通道的泄漏量为

$$Q = \frac{\rho h^3 L}{12\mu t} (P_1 - P_2) \quad (2)$$

式中: $h$ 为间隙高度; $\mu$ 为流体的动力黏度; $L$ 为泄漏模型的长度。

$$\psi = 1 - 0.9e^{-0.56h/R_a} \quad (3)$$

式中: $\psi$ 为流量因子,用来描述密封间隙中表面粗

糙度对泄漏量的影响。

粗糙表面密封间隙的泄漏量:

$$Q' = \psi \frac{\rho h^3 L}{12\mu t} (P_1 - P_2) \quad (4)$$

密封间隙的泄漏量受到表面粗糙度的影响,在间隙高度不变的情况下,表面粗糙度 $R_a$ 越大,流量因子 $\psi$ 越小,密封间隙的泄漏量越小,密封结构的密封效果更好。

## 2 密封间隙泄漏仿真计算

本文选取的W型金属封严环材料为高温合金GH4169<sup>[12]</sup>,将密封结构的上表面设置为封严环的粗糙表面,下表面为法兰的接触面,认为是光滑面。在接触应力 $\sigma_c=150$  MPa时提取的泄漏通道模型,结构参数如表1所示,设定工质为空气,温度为室温。

表1 泄漏模型结构参数

Table 1 Leakage model structure parameters

参数	数值
长/ $\mu\text{m}$	18
宽/ $\mu\text{m}$	18
表面粗糙度/ $\mu\text{m}$	0.8, 1.6, 3.2

采用非结构化方式对泄漏模型进行网格划分,选取对称边界条件为左、右两个面;前面取压力入口边界,后面取压力出口边界,如图4所示,进口压力 $P_1$ 分别取0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6和0.7 MPa;出口压力 $P_2$ 取0.1 MPa。利用Fluent软件选用压力修正SIMPLE算法进行数值求解,得到泄漏通道中的流场分布,再根据出口横截面上的速度分布积分获得流体的泄漏率。

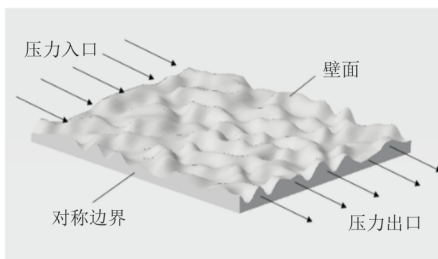


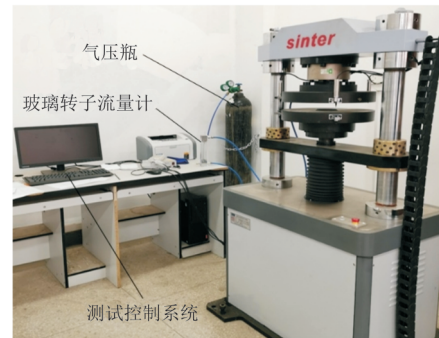
图4 模型计算区域及边界条件

Fig. 4 Model calculation area and boundary conditions

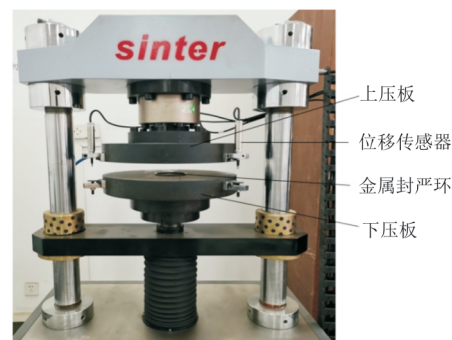
## 3 试验验证

### 3.1 试验装置

为验证数值模拟的可靠性,进行金属封严环密封试验,试验装置如图5所示。试验的W型金属封严环的结构参数如表2所示。



(a) 测试系统



(b) 试验台

图5 金属封严环的密封试验台

Fig. 5 The sealing test bench of the metal sealing ring

表2 金属封严环结构参数

Table 2 Structural parameters of metal sealing ring

W型封严环结构参数	数值
封严环半径/mm	92.50
自由高度/mm	3.60
封严环外半径/mm	0.76
壁厚/mm	0.25
波谷半径/mm	0.50
波峰半径/mm	0.50
波高/mm	2.10

试验设备由主机、上下压板、光栅尺、加压装置、泄漏测量装置、测试控制系统等组成。试验主

机可以实现加载控制、变形测量控制和位移控制三种功能。主机采用伺服电机为动力,上压板固定,伺服电机驱动下压板对金属封严环缓慢施加载荷,封严环的中间放置垫块,以防止过载损坏金属封严环。试验过程中,通过测控系统控制金属封严环的压缩量,当压缩停止时,打开气压瓶,待气压稳定,通过玻璃转子流量计读取泄漏率,调节气压瓶的气压,测试金属封严环在不同气压下的泄漏率。

### 3.2 试验数据分析

试验工况:金属封严环的表面粗糙度  $R_a=1.6 \mu\text{m}$ , 设定封严环的压缩量为  $0.2 \text{ mm}$ ; 改变封严环内外腔的压差得到不同气压下的泄漏率。封严环的数值模拟结果与试验数据的对比分析曲线如图 6 所示,可以看出:试验值与仿真值吻合良好。因此该仿真方法正确可靠,可用于金属封严环密封结构泄漏率的计算。

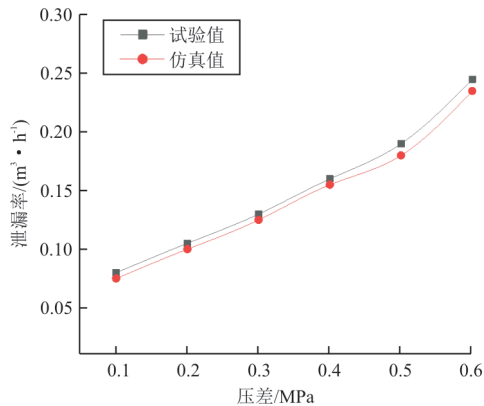


图 6 计算值与试验值的结果对比

Fig. 6 Comparison of calculated value and experimental value

## 4 结果分析

$P_1$  为  $0.2、0.7 \text{ MPa}$  下的压力云图分别如图 7~图 8 所示,可以看出:压力在整个流道中呈现出逐渐下降的趋势,而在波峰部位附近出现局部高压区,在波谷部位附近出现低压区。这是因为在微通道中的气流受到表面粗糙度的影响,边界层的厚度显著增加,改变了气体的流动方向,靠近壁面附近会产生小的涡流,这将明显增大气体流动的阻力,降低进口压力,回流现象明显减弱。

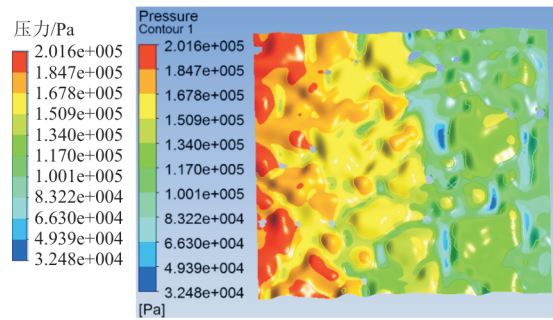


图 7  $P_1=0.2 \text{ MPa}$  的压力云图

Fig. 7 Pressure cloud diagram with  $P_1=0.2 \text{ MPa}$

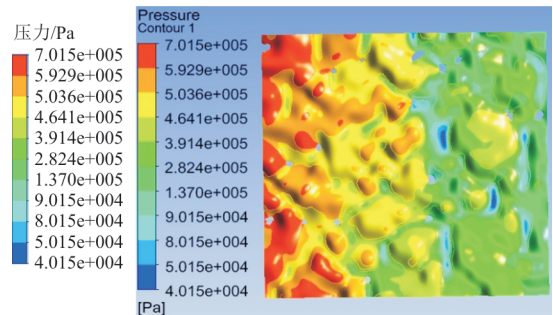


图 8  $P_1=0.7 \text{ MPa}$  的压力云图

Fig. 8 Pressure cloud diagram with  $P_1=0.7 \text{ MPa}$

$P_1$  为  $0.2、0.7 \text{ MPa}$  的速度云图如图 9~图 10

所示。

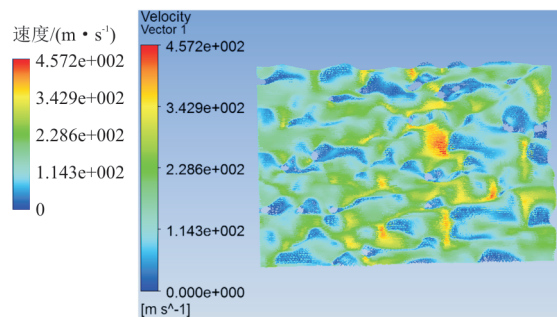


图 9  $P_1=0.2 \text{ MPa}$  速度矢量图

Fig. 9 Speed vector diagram with  $P_1=0.2 \text{ MPa}$

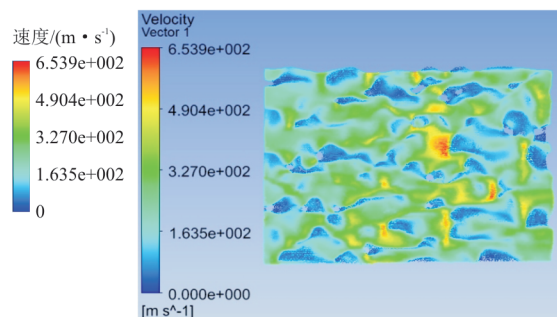


图 10  $P_1=0.7 \text{ MPa}$  速度矢量图

Fig. 10 Speed vector diagram with  $P_1=0.7 \text{ MPa}$



从图9~图10可以看出:气流流经波峰时受到粗糙壁面的阻碍作用,流动损失较大,气流速度减少;当气流由波峰过渡到波谷时,气流流动发生突扩现象,速度剧增,出现超声速流动。表面粗糙度是影响密封间隙的重要因素,在波谷附近低压区域速度较高,而波峰附近高压区域速度较低,随着进口压力的降低,气体在通道中的速度明显降低,泄漏量也随之减小。

流体泄漏流速在不同粗糙度下随压差变化的曲线如图11所示,可以看出:泄漏流速随内外压差增大呈线性变化,内外压差的增大导致泄漏流速越来越大;在压差较低时,表面粗糙度对流速的影响较小。因此粗糙度越大,粗糙表面轮廓变化就越剧烈,在局部粗糙壁面处形成了强逆压力梯度,回流现象更明显,降低了泄漏流速。

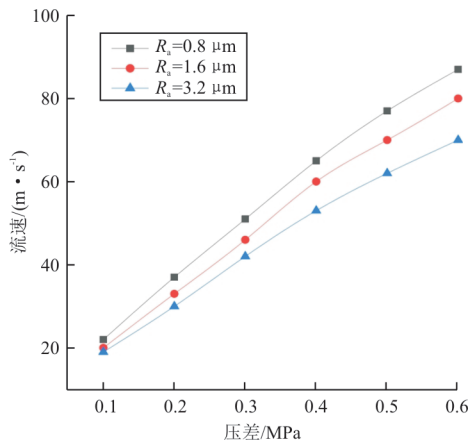


图11 表面粗糙度对泄漏流速的影响

Fig. 11 The effect of roughness on the leakage flow rate

不同表面粗糙度下泄漏率的计算结果,如图12所示。

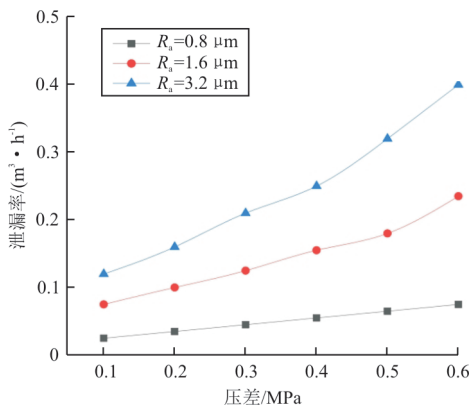


图12 表面粗糙度对泄漏率的影响

Fig. 12 The effect of rough surface on leakage rate

在接触应力不变的情况下,降低加工表面的粗糙度,其接触表面越来越光滑,凸起的粗糙峰数量较小,使得接触面更加的紧密贴合,提高了密封结构的密封性,降低了密封结构的泄漏率。说明表面粗糙度对W型金属封严环密封间隙的泄漏具有重要影响。

## 5 结论

(1) 表面粗糙度对泄漏流体的影响较大,粗糙壁面附近存在明显的回流现象,泄漏流体的流动阻力增大,降低了泄漏流速。

(2) 在接触应力不变的情况下,表面粗糙度的降低,气体流经泄漏通道的泄漏量也随之减小。因此通过提高金属封严环的加工精度,从而有效地增强其密封效果。

## 参考文献

- [1] 林基恕,张振波. 21世纪航空发动机动力传输系统的展望[J]. 航空动力学报, 2001, 16(2): 108-114, 118.  
LIN Jishu, ZHANG Zhenbo. Prospects of aeroengine power transmission system in the 21st Century[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(2): 108-114, 118. (in Chinese)
- [2] 冯秀,顾伯勤. 金属垫片密封表面形貌的分形表征[J]. 化工学报, 2006(10): 2367-2371.  
FENG Xiu, GU Boqin. Fractal characterization of seal surface topography of metallic gaskets[J]. Journal of Chemical Industry & Engineering, 2006(10): 2367-2371. (in Chinese)
- [3] 索双富,邢敏杰,薛庆,等. W形金属密封环轴向刚度影响因素研究[J]. 润滑与密封, 2016, 41(2): 14-17, 64.  
SUO Shuangfu, XING Minjie, XUE Qing, et al. Research on effect factors of axial stiffness of metallic W-ring[J]. Lubrication Engineering, 2016, 41(2): 14-17, 64. (in Chinese)
- [4] 陈京名,王云,李齐飞,等. 航空发动机W形封严环密封效果影响因素分析[J]. 航空工程进展, 2018, 9(4): 617-622.  
CHEN Jingming, WANG Yun, LI Qifei, et al. Analysis of influence factors on sealing effect of W-shaped metal seal ring in aero engine[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(4): 617-622. (in Chinese)
- [5] 龚雪婷,蔡纪宁,张秋翔,等. 金属W形密封环的弹塑性接触有限元分析[J]. 润滑与密封, 2010, 35(11): 82-85.  
GONG Xueting, CAI Jining, ZHANG Qiuxiang, et al. Elastoplastic contact finite element analysis of metal W-sealing ring[J]. Lubrication Engineering, 2010, 35(11): 82-85. (in Chinese)

- [6] 杨玉清. 航空发动机用 W 形金属密封环密封性能分析与优化[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.  
YANG Yuqing. Analysis and optimization of metal W-ring sealing performance used in aircraft engine [D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese)
- [7] SARAWATE N, WOLFE C, SEZER I, et al. Characterization of metallic W-seals for inner to outer shroud sealing in industrial gas turbines[C]// 2012 Turbine Technical Conference and Exposition. [S. l.]: American Society of Mechanical Engineers, 2012: 1855-1862.
- [8] 邢敏杰. 航空发动机中 W 形金属密封环密封性能及泄漏研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.  
XING Minjie. Study on sealing performance and leakage of metal W-ring in the aircraft engine [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [9] 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.  
LYU 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)
- [10] 崔晓杰. 金属密封技术的研究进展及密封机理分析[J]. 石油机械, 2011, 39(s1): 102-105, 108.  
CUI Xiaojie. Research progress of metal sealing technology and analysis of sealing mechanism [J]. Petroleum machinery, 2011, 39(s1): 102-105, 108. (in Chinese)
- [11] 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 Qian, et al. Method to predict leakage rate of metal seal ring [J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(2): 368-375. (in Chinese)
- [12] 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(2): 4-6.  
ZHANG Zengxi, WANG Shu, GU Boqin, et al. Investigation of leakage models of gasket seal [J]. Pressure Vessel, 2001(2): 4-6. (in Chinese)

#### 作者简介:

何少飞(1995—),男,硕士研究生。主要研究方向:航空发动机密封、试验。

王云(1966—),男,博士,教授。主要研究方向:宇航推进理论。

丁相玉(1983—),男,博士,副教授。主要研究方向:宇航推进理论。

张呈(1997—),男,硕士研究生。主要研究方向:航空发动机结构。

王金伟(1994—),男,硕士研究生。主要研究方向:航空发动机结构。

(编辑:丛艳娟)