

金属封严环泄漏率预测方法

李伟平, 贾占举, 路茜, 程家旺, 冉晶
(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘 要: 针对金属封严环设计中泄漏率估算问题,综合对密封系统宏观结构和微观表面接触变形的考量,提出一种基于数值计算的泄漏率预测方法。对密封整体结构进行计算,以计算值(接触应力、接触面积)为输入参数,以表面粗糙度为评价指标建立微观粗糙表面,使用有限元法(FEM)进行接触计算后建立泄漏通道模型,在对泄漏缝隙内流体流动特性确定后通过计算流体力学(CFD)方法计算得到泄漏率。使用密封试验台进行泄漏率试验,将计算值与试验结果相比较。研究表明:随着接触应力增加、表面粗糙度值降低以及内外腔压差增长,密封系统泄漏率逐渐减小;所提出的方法极大地摆脱了泄漏率获取对于试验仪器的依赖性,并能够较为有效地预测金属密封结构的泄漏率,对先进的金属封严环的设计和评估具有重要意义。

关 键 词: 泄漏率; 金属封严环; 数值分析; 计算流体力学; 粗糙表面形貌; 接触应力

中图分类号: V232; TB42 **文献标志码:** A

Method to predict leakage rate of metal seal ring

LI Weiping, JIA Zhanju, LU Xi, CHENG Jiawang, RAN Jing
(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body,
Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Targeting the problem of estimating the leakage rate in the design of metal seal ring, a method to predict the leakage rate based on numerical calculation was proposed. This method combined the macro-structure of the sealing system and micro-surface contact deformation considerations. The overall structure of the seal was calculated firstly, and its calculated values (contact stress, contact area) were taken as the input parameters. The rough microscopic surface with the surface roughness as the evaluation index was established. Using finite element method (FEM) for contact calculation, the leak channel model was established. After the fluid properties in the leakage gap were determined, the leakage rate was calculated by computational fluid dynamics (CFD) method. Leakage rate test was performed using a sealed test bench and the calculated values were compared with the test results. The result shows that as the contact stress increases, the surface roughness decreases, and the pressure difference increases, the leakage rate of the seal system gradually decreases. With this proposed method, the aquisition of leakage rate value relies little on the test equipment, helping to predict the leakage rate of metal seal structure effectively, while playing an important role in the design and evaluation of advanced metal seal rings.

Key words: leakage rate; metal seal ring; numerical analysis;
computational fluid dynamics; rough surface topography; contact stress

收稿日期:2018-03-20
基金项目:湖南省自然科学基金(2015JJ2029)
作者简介:李伟平(1971—),男,教授,博士,主要从事机械系统动力学和结构优化设计研究。
引用格式: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.

标志现代先进燃气涡轮发动机的高推质比、低油耗、高可靠性和长寿命要求,传统的机械传动设计难以适应。探索对提高发动机性能具有巨大潜力的发动机密封技术的改进与发展,是当今技术先进国家大力投入的技术前沿^[1]。金属封严环有着结构简易、质量轻以及自紧能力良好等优点,能适用在高温、高压、高腐蚀、高真空、强酸、强碱以及强腐蚀等极其恶劣的工作环境下,满足其他密封形式难以满足的场合,在航空发动机中有着广泛的应用^[2]。表示金属封严环性能最重要的指标是泄漏率,即单位时间内流过泄漏通道的流体的质量或者体积,当整个密封系统的泄漏率超标时,即可认为此系统已经失效^[3]。

许多研究表明,泄漏率与两接触表面之间的接触应力、接触面积、接触宽度、表面形貌等因素相关。一些学者^[4-6]在垫片优化设计中将接触应力作为泄漏率的评定参数。Persson 等计算了微观实际接触面积如何取决于滑动速度和标称接触压力,预测了大多数情况下接触面积与负载呈线性变化^[7-8],研究了接触应力对金属封严环泄漏的^[9]影响。Haruyama 等研究了接触宽度与泄漏率的关系,接触宽度的增加将会导致泄漏率的减少^[10]。还有一些学者^[11-13]研究了表面轮廓对泄漏的定量影响,发现泄漏率随着表面粗糙度的降低而降低。但是,泄漏率获取均需要依赖于相应试验仪器,且密封整体所处的外部环境的影响未被考虑入内。

因此,本文以某型号 W 型金属封严环为例,综合考虑密封系统宏观结构和微观表面接触变形,提出了一种金属封严环泄漏率预测方法,研究封严环接触应力、表面粗糙度、内外腔压差对泄漏率的影响。首先进行宏观密封结构分析,得到与泄漏率密切相关的接触应力和接触面积等参数;以表面粗糙度为评价标准,运用 Weierstrass-Mandelbrot 函数(W-M 函数)获得封严环表面形貌参数,采用逆向工程的方法重构粗糙表面,得到预压模型;以接触应力为输入条件,进行有限元接触计算,得到微观表面实际接触模型;对微流体中流体性质进行确定,运用计算流体力学方法得到金属封严环的泄漏率。最后,通过密封试验验证了本文提出的方法的可行性。

1 泄漏率计算方法

因为金属封严环加工表面粗糙度的关系,在宏观上看起来完全接触的情况,微观上只是粗糙

峰与法兰之间的接触,如图 1 所示。法兰面无法与金属封严环表面完全接触导致泄漏通道的存在,这便是泄漏产生的原因。对于泄漏率的计算,一方面需要考虑宏观条件下外部加载条件对于密封系统整体结构的影响;另一方面,又要考虑在整体结构变化的同时微观表面接触状态的变化。因此,计算泄漏率需要考虑结构形式、加工情况和外部条件等多方面因素的影响。

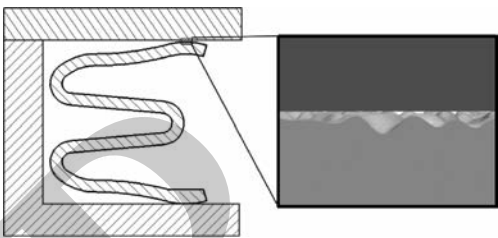


图 1 宏观接触点处微观接触情况
Fig.1 Micro-contact at macroscopic point

1.1 整体结构分析

W 形金属封严环密封结构包括法兰、W 形环和紧固件等组成。金属封严环结构参数如表 1 所示。

本文采用的 W 形金属封严环的材料为变形高温合金 GH4169,材料性能通过试验获取,如表 2 所示。

表 1 金属封严环结构参数
Table 1 Structure parameters of metal seal ring

参数	数值
外直径 d_2 /mm	172
内直径 d_1 /mm	166
环高 h /mm	3.4
波峰半径 R_1 /mm	0.2
波谷半径 R_2 /mm	0.2
波高 h_b /mm	1.92
壁厚 t /mm	0.25

表 2 GH4169 基本力学性能参数
Table 2 Basic mechanical properties parameters of GH4169

温度 T /K	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 σ_s /MPa	弹性模量 E /GPa
293	1465	1265	203
923	1180	1030	167

建立密封结构有限元模型,假设密封面是理想平坦的,忽略表面的粗糙情况,从而得到与泄漏率密切相关的接触应力 σ_c 、接触总面积 A_0 和接触宽度 l 作为微观尺度计算输入条件使用。

1.2 粗糙表面模型

对于密封界面的泄漏通道模型的构建是研究密封系统泄漏特性的重点,而构建泄漏通道模型首先需要模拟接触面的粗糙表面。

为了更加客观地描述粗糙面轮廓的特征,需要建立一种与尺度无关的模型,因此,本文以分形几何 W-M 函数法^[14]为基础来建立三维粗糙表面模型,其形式为

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

式中 L 为样本长度,本文中取接触宽度计算值 l ; G 是反映 $z(x,y)$ 大小的尺度系数,取值为 $10^{-12} \sim 10^{-9} \text{ m}^{[15]}$; D_s 为分形维数,介于2和3之间; γ 为频率密度缩放比,基于表面平整度和频率密度分布的考量, γ 一般取值为1.5; W 为不同频率波的叠加次数,经验值取10; $n_{\max}$ 为 n 的上限,有 $n_{\max} = \text{int}[\ln(L/L_s)/\ln \gamma]$; L_s 为最高分辨率,即可识别的最小长度,依据国标^[16],取 10^{-6} m ; $\varphi_{m,n}$ 为随机数。分形维数 D_s 与尺度系数 G 由被模拟的粗糙面形貌特征所决定,均不随仪器分辨率的变化而变化。

本文以表面粗糙度 R_a 作为评价指标来确定 D_s 和 G 的值, R_a 随两变量 D_s 和 G 变化的情况如图2所示,这里要说明的是由于W-M函数中随机量 $\varphi_{m,n}$ 的存在,同一点可能得到不同的 R_a 值,图中取每个点计算10次后的最大值。表3表示

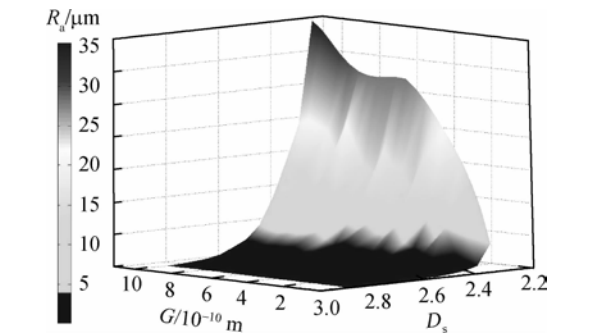


图 2 R_a 随 D_s 和 G 的变化情况
Fig. 2 Effects of R_a with G and D_s

表 3 文中不同 R_a 选取的 D_s 和 G
Table 3 R_a with different D_s and G

$R_a/\mu\text{m}$	D_s	$G/10^{-11} \text{ m}$
3.2	2.5	20.1
1.6	2.5	5.1
0.8	2.5	1.6

了本文中不同表面粗糙度下的 D_s 和 G 的取值。

使用逆向工程技术,将计算得到的粗糙表面坐标进行曲面重构,得到 $R_a=3.2 \mu\text{m}$ 条件下粗糙表面实体模型如图3所示,为保证精度,坐标与曲面误差需小于 10^{-10} m 。

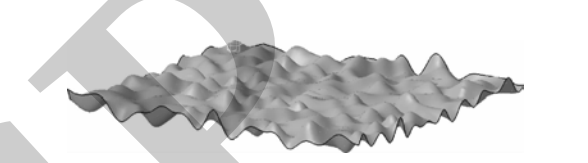


图 3 $R_a=3.2$ 粗糙表面实体模型
Fig. 3 Rough surface model under $R_a=3.2$

1.3 泄漏率计算模型

按照工程实际,金属封严环在成形后较难进行表面处理,相对于法兰表面而言表面粗糙度较高。因此只将其中的金属封严环表面视为粗糙表面,而将法兰面视为刚性的光滑平面,这样的方式能够大大简化计算,同时也能满足计算精度要求。将构建的粗糙表面经过几何处理之后,得到泄漏预压模型,如图4所示。

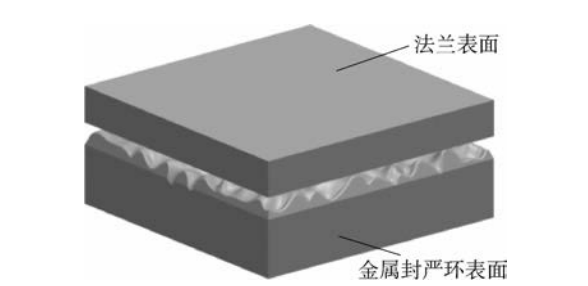


图 4 泄漏预压模型
Fig. 4 Preload leakage model

基于接触力学的粗糙表面理论计算只能得到诸如实际接触面积等总体参数^[17],无法获得工作状态较为精确的表面形貌。本文采用有限元法进行数值计算,接触载荷选用整体结构分析中得到的接触应力 σ_c ,依据应力计算公式 $\sigma_c = \frac{\Delta F}{A_0}$ 计算得到,其中 ΔF 为接触力。在有限元软件 ABAQUS 中进行接触计算,得到变形后的粗糙表面形貌。

导出模型,运用计算机辅助设计(CAD)方法抽取流道,得到最终的泄漏率计算模型。

1.4 泄漏率计算

一般情况下,大于 1 mm 的尺寸称为宏观尺度,1 μm 至 1 mm 的尺寸称为微观尺度^[18]。通过泄漏率计算模型的建模工作可以确定,泄漏率计算模型为微观尺度模型。当特征尺寸在微米量级,很多物理现象与宏观中有着显著不同^[19],需要确定流体的流动特性。

稀薄性是微流体的一个重要特性。为了描述流体的稀薄效应,引入无量纲参数 Knudsen 数 (Kn)^[20],表达式为

$$Kn = \frac{\lambda}{L_t} \tag{2}$$

式中气体分子的平均自由程 $\lambda = \frac{kT_0}{\sqrt{2}\pi d^2 p_c}$ ^[21],其中玻耳兹曼常量 $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K, T_0 为气体温度,空气分子直径 $d = 3.53 \times 10^{-10}$ m, p_c 为气体压强。 L_t 为流动区域的特征尺寸,对于一般的情况,特征长度 $L_t = \frac{4A}{P}$,其中 A 为过流断面截面积, P 为过流断面上流体与固体壁面接触的周界长度,即湿周。本文中需要计算缝隙区域的特征长度,复杂的表面形貌导致计算较为困难,采用简化算法,即 A 取平均截面积, P 取平均湿周,表示为 $L_t = 4 \frac{V/l}{S/l} = \frac{4V}{S}$,其中, V 为缝隙体积, S 为流体与固体壁面接触的总面积。

由式(2)得在各种条件下 Kn 均小于 0.01,流体流动属于连续流区,建模方法采用连续介质模型,且边界无滑移^[22]。

流体的流动状态主要有两种:层流(或滞流)和湍流(或紊流)。流体的流动状态判断的依据是雷诺数 Re ,计算公式为

$$Re = \frac{vL_t}{\nu} = \frac{\rho vL_t}{\mu} \tag{3}$$

式中 v 是流体的平均流动速度,工程实际中最大值为 150 m/s; ν 是流体的运动黏度(m^2/s); ρ 是空气密度,约为 1.20 kg/m³; μ 是流体的动力黏度,293 K 下,空气的动力黏度为 18.1×10^{-6} Pa·s。

由式(3)计算得到缝隙内不同条件下流体的最大雷诺数为 37.5。非圆断面流体流动时的临界雷诺数 $Re_c \approx 500$ ^[23], $Re < Re_c$,泄漏模型中流体为层流状态。

本文中,泄漏率计算通过 CFD 方法。模型边

界条件如图 5 所示。

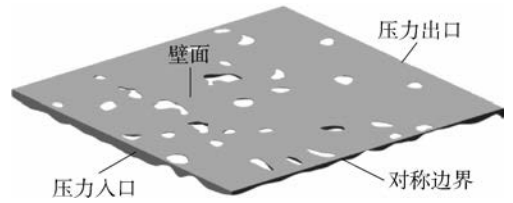


图 5 模型边界条件示意图

Fig. 5 Boundary conditions diagram of model

通过 CFD 计算可以直接获得模型缝隙出口处的质量流量,通过计算即可得到金属封严环工作状态的泄漏率,计算公式为

$$q = \frac{q_m}{\rho} \cdot \frac{2\pi R}{l} \times 2 \tag{4}$$

式中 q 为金属封严环工作状态泄漏率(m^3/h); q_m 为计算模型缝隙出口处的质量流量(kg/h); 接触区域名义半径 $R = 85$ mm。

2 试验验证

2.1 试验装置

为了验证文中方法的可行性,进行了密封试验,试验装置如图 6 所示。装置由气体处理系统(室外,图中未标出)、试验机主机、试验机压板、测试控制系统、防护板等部分组成。试验机上压板固定,载荷通过下压板施加。试验主机可以实现位移控制、变形控制和力控制三种控制功能。进行试验时,首先用水平仪对上下压板相对位置进行校准,保证载荷的均布施加;随后,控制系统根

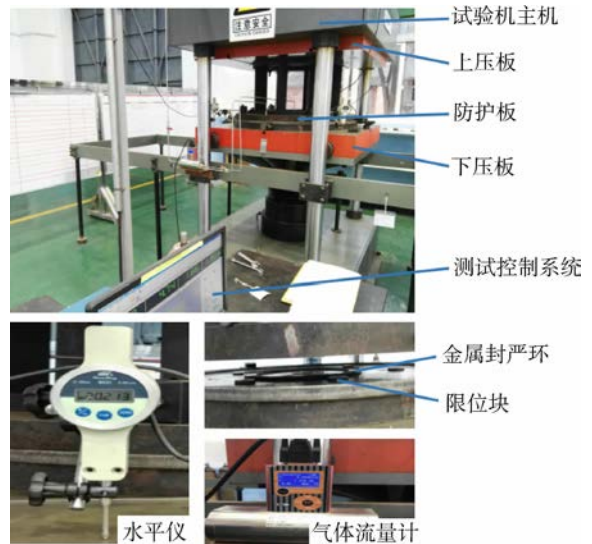


图 6 密封试验台

Fig. 6 Sealed test bench

据试验要求控制试验主机对金属封严环施加预紧载荷,并通过限位块防止过载;然后注入压缩空气进行气密性试验,泄漏气体通过气体流量计进行计量。防护板的作用是防止在卸载的瞬间,泄漏出的高速气体伤人。试验过程中,维持预紧量不变,不断提高环内气体压力,测定不同压力下金属封严环泄漏率的变化情况。

2.2 结果对比

在预紧量为 0.37 mm、表面粗糙度值 $R_a = 3.2 \mu\text{m}$ 的工况下,泄漏率随不同内外腔压差变化的计算值与试验值的比较结果如图 7 所示。由图中可以看出,本文数值计算结果与试验测试结果相差较小,验证了本文所提出的泄漏率预测方法的有效性。

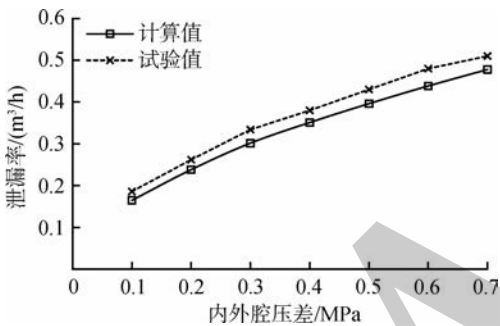


图 7 计算值与试验值结果对比

Fig. 7 Comparison of the calculated and test results

3 结果及分析

3.1 宏观结构计算分析

接触应力是反映金属封严环密封性能的一个重要参数,与泄漏率的大小息息相关。图 8 表示了随着预紧量的增加,接触应力的变化曲线。可以看出,随着预紧量的增加,接触力呈线性增加的趋势。

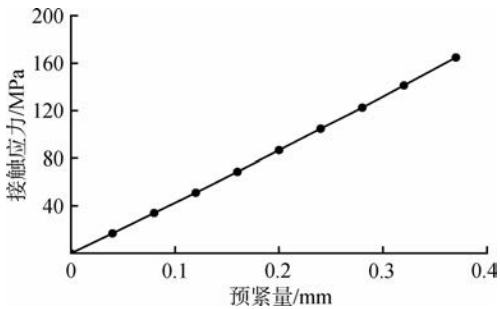


图 8 接触应力随预紧量变化曲线

Fig. 8 Variation of contact stress with preload displacement

接触区域的大小对泄漏率有着重要的影响。通过有限元计算,得到了随着加载的进行,接触区域的变化曲线,如图 9 所示。从曲线可以看出,在 W 形金属封严环与法兰面发生接触后,接触面积基本不变,这与橡胶密封有较大区别。这个结果表示在对同一型号的金属封严环进行泄漏率计算时可以省去重新构建粗糙表面的步骤,对于简化泄漏率的计算具有重要意义。此外,接触总面积呈现略微下降的趋势,下降是由于随着预紧量的增加,金属封严环顶部相切圆曲率减小引起的。

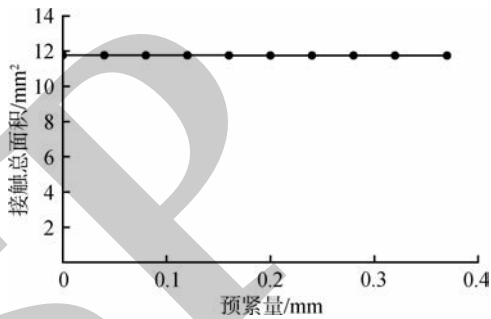


图 9 接触区域随预紧量变化曲线

Fig. 9 Variation of contact area with preload displacement

3.2 微观表面变化分析

对于微观接触模型,随着接触面之间接触应力增加,法兰面与金属封严环表面逐渐压紧,法兰相对于金属封严环表面的相对位移量是反映接触程度的一个重要参数。由接触计算得到了相对位移量随着接触应力的变化关系,如图 10 所示。

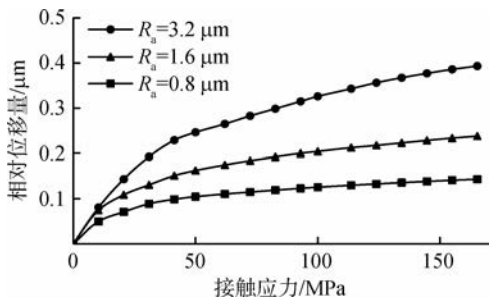


图 10 相对位移量随着接触应力的变化情况

Fig. 10 Variation of relative displacement with contact stress

不同接触应力与表面状态下表面接触情况如图 11 所示,深色区域代表两表面相接触的位置。结合图 10 和图 11 可以看出,随着接触应力的增加,相对位移量逐渐增大,但是增长的速度越来越

慢。初始位置,法兰光滑表面和金属封严环粗糙表面处于临界接触的位置,无相互作用;随着接触应力逐渐增加,一开始承受载荷的是数量较少的一些尖锐的粗糙峰,承压能力相对较差,所以相对位移量增长很快;随着载荷的增长,金属封严环粗糙面上越来越多的粗糙峰开始与法兰面接触,承压能力逐渐增强,法兰的轴向位移量的增长逐步放缓。此外,随表面粗糙度的减小,同一接触应力的情况下,轴向位移量也减小。表面粗糙度的减小意味着表面越平整,尖锐的粗糙峰数量减小,同样的接触应力条件下将会有更多粗糙峰与法兰接触,承压能力增强,相对位移量相应减小。

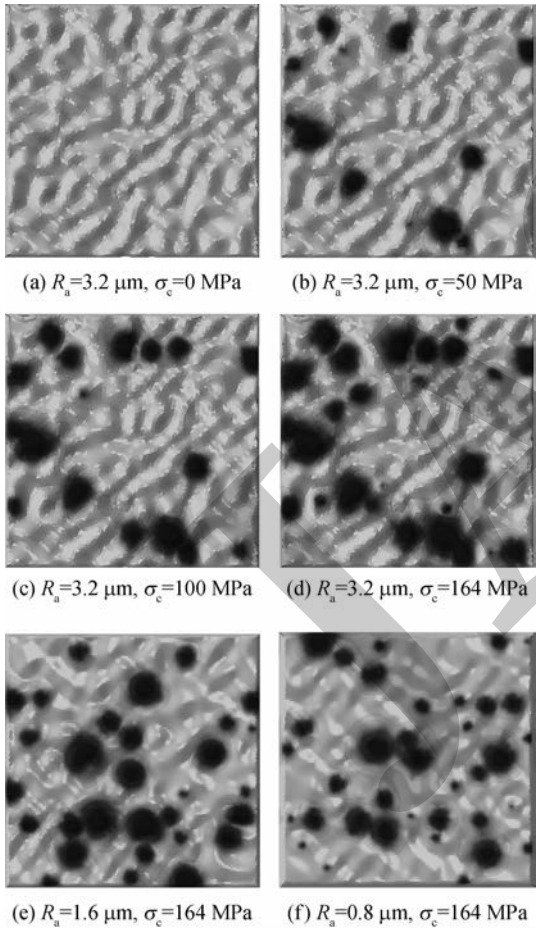


图 11 不同条件下表面接触情况

Fig. 11 Surface contact with different surface roughnesses and contact stresses

随着接触应力的增长,不同表面形貌下两表面接触总面积变化情况如图 12 所示。可以得出,随着接触应力的增长,接触面积基本呈现线性增加的趋势,这与文献[24]所述分析接触力学理论研究结果相一致;此外,表面粗糙度越小,相同载荷下接触面积越大,意味着泄漏通道越小。

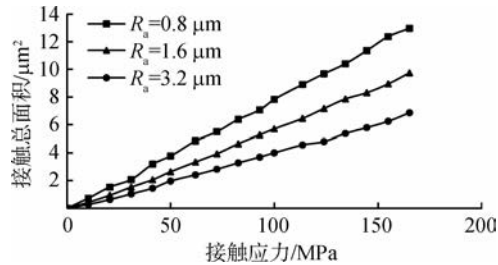


图 12 接触总面积随接触应力变化曲线

Fig. 12 Variation of total contact area with contact stress

3.3 泄漏率的影响因素

影响金属封严环泄漏率的大小主要因素有接触应力、表面粗糙度值 R_a 和内外腔压差 (Δp)。

图 13 表示 $R_a = 3.2 \mu\text{m}$ 的粗糙表面,随着接触应力的增长,不同的内外腔压差条件下,泄漏率随接触应力变化的曲线,可以得到同一压差条件下,随着接触应力的增大,泄漏率逐渐减小,且减小的速率放缓。结合图 13 和图 10,可以得出这是由于随着接触应力增大,两表面相对位移量变化速率放缓,泄漏通道变化速率相应减小导致的。此外,对比接触应力 $\sigma_c = 0 \text{ MPa}$ 和 $\sigma_c = 164 \text{ MPa}$ 处的泄漏率可以得到,忽视接触应力产生的微观接触面的变化,计算得到的泄漏率误差相当大,约为 80%。

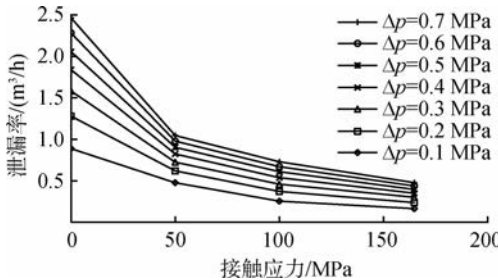


图 13 不同内外腔压差情况下泄漏率随接触应力的变化

Fig. 13 Variation of leakage rate with contact stresses under different pressures difference

文中所考虑金属封严环加工情况指的是表面粗糙度值 R_a 。金属封严环表面粗糙度值 R_a 、内外腔压差和泄漏率三者间关系如图 14 所示,图中数据在接触应力 $\sigma_c = 164 \text{ MPa}$ 的条件下获取。可以得到,金属封严环表面越粗糙,泄漏率越高,结合图 12,可以得出这是由于表面越光滑,接触面积越大,泄漏通道越小导致的。同时,表面粗糙度值 R_a 从 $3.2 \mu\text{m}$ 提升至 $1.6 \mu\text{m}$,泄漏率平均减少 42%,表面粗糙度值 R_a 从 $1.6 \mu\text{m}$ 提升至 $0.8 \mu\text{m}$,

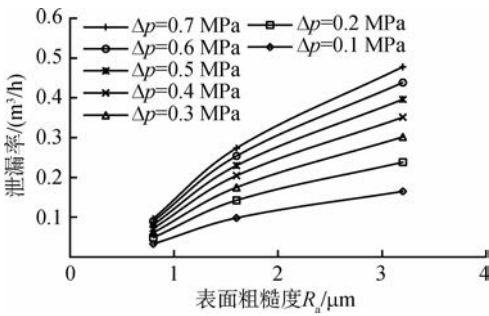


图 14 不同内外腔压差情况下泄漏率随表面粗糙度的变化

Fig. 14 Variation of leakage rate with surface roughness under different pressure difference

泄漏率平均减少 65%，提升表面精度将明显提升金属封严环密封性能。

文中进行研究的金属封严环的密封条件主要指所密封气体的内外腔压差。随着金属封严环内外腔压差的增大,不同接触应力下金属封严环泄漏率变化情况如图 15 所示,此时金属封严环 $R_a=3.2\mu\text{m}$ 。对于同一接触应力条件下,随着内外腔压差的增大,泄漏率逐渐增加,并且增加的幅度越来越小。由图 13 和图 14 可知,在接触应力较大以及表面较光滑的情况下,内外腔压差对于泄漏率的影响相对较小。

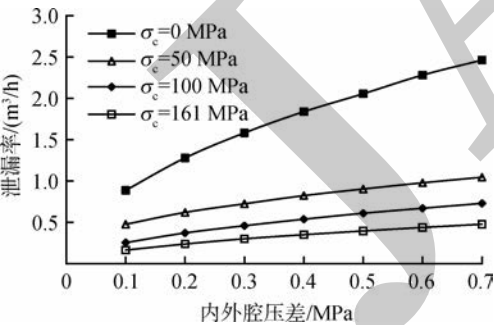


图 15 不同接触应力下泄漏率随压差变化曲线
Fig. 15 Variation of leakage rate with pressure difference under different contact stresses

4 结 论

本文在综合考虑宏观密封系统状态和微观接触表面形貌的前提下提出了一种金属封严环泄漏率预测方法,进行了泄漏率试验,研究了对密封性能有重要影响的两表面间接触应力、表面粗糙度以及内外腔压差对泄漏率的影响情况,结论如下:

1) 金属封严环的泄漏率是基于其结构形式、工作条件和表面粗糙度采用数值方法计算得到,

对试验仪器依赖程度很小。该方法构建了与封严环结构形式、加工情况和密封条件与泄漏率之间的相关关系,对金属封严环的设计和评估具有重要意义。

2) 随着接触应力增加以及表面粗糙度值降低,泄漏率逐渐减小,且趋势逐步放缓。要提升密封性能,需要综合考虑封严环结构形式和加工条件的影响。

3) 随着封严环内外腔压差的增大,封严环泄漏率逐渐增加。在接触应力较大与表面状态较好的情况下,内外腔压差对泄漏率影响很小。

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,2006,57(10):2367-2371.
FENG Xiu, GU Boqin. Fractal characterization of seal surface topography of metallic gaskets[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China),2006,57(10):2367-2371. (in Chinese)
[3] SCHMIDTHALS C. Application of a diagnostic system for mechanical seals[C] // 8th European Congress on Fluid Machinery for the Oil, Gas, and Petrochemical Industry. Hague, Netherlands: Professional Engineering Publishing Ltdbury St Edmunds,2003:177-185.
[4] NURHADIYANTO D, CHOIRON M A, HARUYAMA S, et al. Optimization of new 25A-size metal gasket design based on contact width considering forming and contact stress effect[J]. International Journal of Mechanical and Aerospace Engineering,2012,6(3):343-349.
[5] 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)
[6] 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)
[7] PERSSON B N J, BUCHER F, CHIAIA B. Elastic contact between randomly rough surfaces: comparison of theory with numerical results[J]. Physical Review Letters,2002,65(18):184106. 1-184106. 7.
[8] SCARAGGI M, PERSSON B N J. Viscoelastic contact mechanics between randomly rough surfaces[J]. Physical Re-

view Letters,2014,87(11):116101.1-116101.5.

[9] PERSSON B N J. Leakage of metallic seals;role of plastic deformations[J]. Tribology Letters,2016,63(3):1-6.

[10] HARUYAMA S,CHOIRON M A,KAMINISHI K. A study of design standard and performance evaluation on new metallic gasket[C]// Proceeding of the 2nd International Symposium on Digital Manufacturing. Wuhan:Wuhan University of Science and Technology University Press,2009:107-119.

[11] 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)

[12] HIRONAO O,TOSHIHIRO I,TADATOMO S. The influence of surface profiles on leakage in room temperature seal-bonding[J]. Sensors and Actuators A:Physical,2008,144(1):124-129.

[13] HARUYAMA S,NURHADIYANTO D,CHOIRON M A,et al. Influence of surface roughness on leakage of new metal gasket[J]. International Journal of Pressure Vessel-sand Piping,2013,111-112:146-154.

[14] YAN W,KOMVOPOULOS K. Contact analysis of elastic-plastic fractal surfaces[J]. Journal of Applied Physics,1998,84(7):3617-3624.

[15] 胡迪. 分形粗糙面的参数识别、接触建模分析及预测[D]. 西安:西安电子科技大学,2015.

HU Di. Parameters identification,contact analysis and prediction of fractal rough surface[D]. Xi'an:Xidian University,2015. (in Chinese)

[16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 产品几何技术规范(GPS) 表面结构 轮廓法 表面粗糙度参数及其数值:GB1031-2009[S]. 北京:中国标准出版社,2009:2-3.

[17] BRAKE M. An analytical elastic-perfectly plastic contact model[J]. International Journal of Solids and Structures,2012,49(22):3129-3141.

[18] 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)

[19] 闫寒. 随机粗糙表面效应下微流体器件中的流动特性[D]. 上海:上海交通大学,2014.

RAN Han. Investigation on characteristics of flow indifferent microfluidic devices with random surface roughness [D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2014. (in Chinese)

[20] KARNIADAKIS G,BESKOK A. Micro flows:fundamentals and simulation[M]. New York:Springer,2002.

[21] 张帅,宋鹏云. 基于维里系数的实际气体分子平均自由程近似计算[J]. 润滑与密封,2015,40(7):46-50.

ZHANG Shuai,SONG Pengyun. Approximate calculation of molecule mean free path of real gas based on virial coefficient[J]. Lubrication Engineering,2015,40(7):49-50. (in Chinese)

[22] 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.

[23] 张伟,陈文义. 流体力学[M]. 天津:天津大学出版社,2009.

[24] YANG C,PERSSON B N J. Molecular dynamics study of contact mechanics;contact area and interfacial separation from small to full contact [J]. Journal of Physics-Condensed Matter,2008,20(21):215-214.

(编辑:陈 越)