

DOI: 10.12382/bgxb.2025.1101



全氟橡胶密封圈装配仿真与密封性能分析

丁玉坤¹, 巩浩^{1,2,3*}, 刘检华¹, 王凯¹, 刘少丽^{1,2,3}, 敖晓辉^{1,2,3}

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学 唐山研究院 河北省智能装配与检测技术重点实验室, 河北 唐山 063000; 3. 北京理工大学(珠海) 智能制造技术研究中心, 广东 珠海 519088)

摘要: 全氟橡胶密封圈具有耐高温、耐腐蚀、耐磨损等特点, 在航空航天、兵器船舶、石油化工等领域应用广泛, 当前全氟橡胶密封圈的密封性能缺少系统评估, 为此提出面向不同温度的全氟橡胶密封圈装配仿真与密封性能分析方法, 构建从宏观装配仿真到微观接触泄漏率计算的多尺度分析框架, 建立不同温度条件下全氟醚橡胶超弹性本构关系模型, 对全氟橡胶密封圈宏观应力变形进行仿真, 并建立密封面微观接触模型, 求解微观泄漏通道。基于微通道内流体运动仿真实现全氟密封圈泄漏率精确计算, 系统研究温度、粗糙度、压缩量等因素对密封性能的影响规律。搭建了气密性实验台, 对全氟密封圈泄漏率进行了实验测试, 验证了所提仿真方法的可靠性与准确性。研究结果表明, 高温或低温均会导致全氟密封圈密封性能衰减, 且低温环境对密封性能影响更显著。

关键词: 全氟橡胶密封圈; 超弹性本构模型; 边界元方法; 计算流体力学; 泄漏率

中图分类号: O351; TQ336.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-1093(2026)08-251101-XXX

Assembly Simulation and Sealing Performance Analysis of Perfluoro Rubber Seal Rings

DING Yukun¹, GONG Hao^{1,2,3*}, LIU Jianhua¹, WANG Kai¹, LIU Shaoli^{1,2,3}, AO Xiaohui^{1,2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Hebei Key Laboratory of Intelligent Assembly and Detection Technology, Tangshan Research Institute, Beijing Institute of Technology, Tangshan 063000, Hebei, China; 3. Research Center of Intelligent Manufacturing Technology, Beijing Institute of Technology, Zhuhai 519088, Guangdong, China)

Abstract: Perfluoro rubber seal ring has the characteristics of high-temperature resistance, corrosion resistance, and wear resistance. It is widely used in the fields of aerospace, weaponry and ships, and petrochemical industries. Currently, there is a lack of systematic evaluation of the sealing performance of perfluoro rubber seal rings. Therefore, a simulation method for the assembly of perfluoro rubber sealing rings at different temperatures and an analysis method for sealing performance are proposed. A multi-scale analysis framework spanning from the macroscopic assembly simulation to the microscopic contact and leakage rate calculation is constructed. A temperature-dependent hyperelastic constitutive model for perfluoroether rubber is established. The macroscopic stress and deformation of perfluoro rubber seal ring are simulated, and a microscopic contact model of the sealing interface is developed to solve for the microscopic leakage channels. The accurate calculation of the leakage rate for perfluoro seal rings is achieved based on the simulation of fluid flow within these microchannels. The influences of temperature, roughness and compression amount on the sealing performance are systematically investigated. An airtightness test bench is built to experimentally measure the leakage rate of the perfluoro rubber seal ring, thus validating the reliability and accuracy of the proposed simulation method. The results indicate that both high and low temperatures lead to degradation in sealing performance, and the effect of low-temperature environment on sealing performance is more pronounced.

Keywords: perfluoro rubber sealing ring; hyperelastic constitutive model; boundary element method; computational fluid dynamics; leakage rate

0 引言

全氟密封圈是一种典型的橡胶密封件, 具有优

异的耐高温、耐腐蚀及耐老化特性, 广泛应用于航空航天、兵器船舶、高端化工等领域。例如, 在发

动机燃油系统^[1-2]中,全氟橡胶密封圈常被用于燃油管路接头与供油模块之间的密封连接,在螺纹预紧力作用下密封圈挤压变形,与密封界面紧密贴合,形成可靠密封。工程中,准确评估全氟橡胶密封圈的密封性能是密封圈结构优化和性能提升的基础,对于提高复杂服役工况下全氟橡胶密封圈的密封性能具有重要意义。

但发动机在实际运行过程中,由于长期承受高温燃油侵蚀、压力脉动及机械振动等复杂载荷,全氟橡胶材料性能可能退化,导致全氟密封圈出现应力松弛或局部损伤,进而引起介质泄漏,严重影响了发动机的工作效能与运行安全。

目前,主要采用实验和仿真方法评估橡胶密封圈的密封性能。在实验研究方面,Jin等^[3]测试了单应力和多应力条件下橡胶密封圈的端部接触力,计算了接触力保持率,得到了不同影响因素下端面接触力和保持率的变化规律。Zhu等^[4]通过系统性实验,重点分析了预紧力、密封圈尺寸、氢气压力与掺氢比等多种因素下的泄漏率变化规律,建立了氢气泄漏率理论模型。Zhao等^[5]针对机械密封轨道性能差的问题,设计了O型橡胶密封圈的高压水润滑振动实验,揭示了实际密封工况下橡胶圈密封性能的变化规律。在服役过程中橡胶材料老化与橡胶密封圈密封性能退化密切相关,学者们也进行了大量实验研究。Liao等^[6]针对橡胶材料性能退化与随机载荷两个因素,通过实验获取了材料老化性能与载荷分布数据,并结合密封圈的应力分析与可靠性建模揭示了时变可靠度规律。Li等^[7]设计了橡胶的老化实验和压缩实验,并对不同老化时间的摩擦副进行了实验,得到不同老化条件下橡胶工作表面形貌和接触情况,分析了热老化对密封性能的影响。

实验方法需要设计专用的设备,经济成本高昂,因此许多学者采用仿真手段进行橡胶密封圈密封性能研究。Liang等^[8]仿真获得了O形密封圈接触应力分布,当密封圈最大压缩应力低于材料极限、接触应力高于工作油压时,表明密封性能满足工况要求。Li等^[9]进一步采用有限元方法,模拟了高温高压环境下O形密封圈的密封行为,提取了平均接触应力及接触宽度等关键参数,并基于此计算了泄漏率,从而实现对密封性能的量化评价。Zhu等^[10]基于Yeoh本构模型,对O形密封圈在预紧状态与工作状态下的力学行为进行了仿真,系统分析了密封圈与上、下法兰间的接触特性,并通过接触长度与接触压力分布的综合评估,对密封性能进行了表征。Zhou等^[11]针对电机密封结构构建了有限元分析模型,采用熵值法和优劣解距离法对槽深、O型圈直径等进

行最佳拟合,利用接触应力分布评判密封性能优劣。Cheng等^[12]对组合密封圈在不同载荷下的力学性能进行了仿真计算,研究了O型橡胶密封圈工作压力和预压缩比对组合密封圈接触应力的影响规律。Tao^[13]在变温度、变压力条件下,对液压缸中往复运动的橡胶密封圈力学和热力学行为进行了仿真,系统研究了不同压缩率、摩擦系数和工作油压对最大von Mises应力和接触应力的影响。Li等^[14]基于混合润滑弹性流体动力学模型,对环杆密封进行了参数化分析,揭示了橡胶硬度对密封静、动态特性的影响机理,通过分析应力分布评判密封性能。Zhou等^[15]建立了一种考虑溶氢膨胀的有限元模型,系统研究了O型橡胶密封圈和楔形环组合密封结构在超高压气态氢气下的密封性能。Ma等^[16]建立了一种橡胶密封件的热-机械-扩散多场耦合有限元模型,探究了高压氢气设备装配、氢气膨胀和温度对接触应力、von Mises应力和接触宽度的综合影响,基于此判断橡胶材料的失效情况。

当前,主要采用密封面接触应力分布、接触宽度、接触面积评价密封性能,这是一种间接的评价方法,密封面泄漏率则是更直接的评价指标,但是缺少泄漏率的准确计算方法。此外,国内外对橡胶密封圈的研究大多聚焦于普通橡胶材料,对全氟橡胶密封圈密封性能的研究未见报道。因此,本文构建了从宏观装配仿真到微观接触泄漏率计算的多尺度分析框架,提出了面向不同温度的全氟橡胶密封圈装配仿真与密封性能分析方法,系统研究温度、表面粗糙度及压缩量对密封性能的影响规律,最后搭建气密性实验台,实验测量全氟密封圈的實際泄漏率,以验证仿真模型的有效性和可靠性。

1 全氟橡胶密封圈本构关系建模

1.1 橡胶试件单轴压缩实验

为了研究全氟醚橡胶在不同温度下的力学特性,为本构模型构建提供实测依据,本文开展了系统的单轴压缩实验,实验装置和试件如图1所示,全氟醚橡胶试样为圆柱体,直径20 mm,高10 mm,实验温度分别设定为-40℃、-20℃、0℃、25℃和50℃。在轴向压缩载荷下测试其力学响应,每个温度下分别进行3次重复实验。

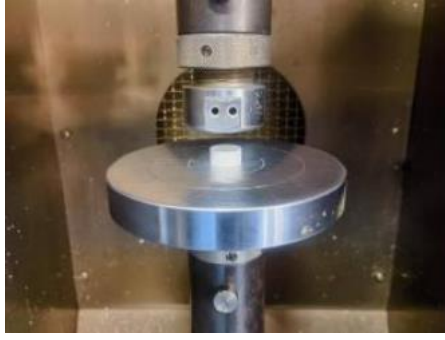


图 1 单轴压缩实验装置和试件

Fig.1 Uniaxial compression test setup and specimen

全氟醚橡胶在不同温度下均表现出显著的非线性力学行为，图 2 为不同温度下单轴压缩实验结果的平均值，展示了不同温度条件下全氟醚橡胶试件压缩初期（应变<10%）压力和位移之间的关系曲线。从图 2 中可以看出，在不同温度下材料都呈现近似的线弹性响应，但在低温条件下（-40 °C和-20 °C），图像的斜率远超过零上温度，这可能与橡胶分子链在低温下的受限运动有关。在零上温度（0 °C、25 °C、50 °C）范围内，材料的力学响应规律高度相似，表明温度对材料行为的影响在零上温度（较高温度）时趋于稳定。进一步对比发现，随着温度的升高，橡胶的初始刚度略有降低，但整体载荷-位移曲线形态保持一致，表明全氟醚橡胶在宽温域内具有稳定的超弹性本构关系。

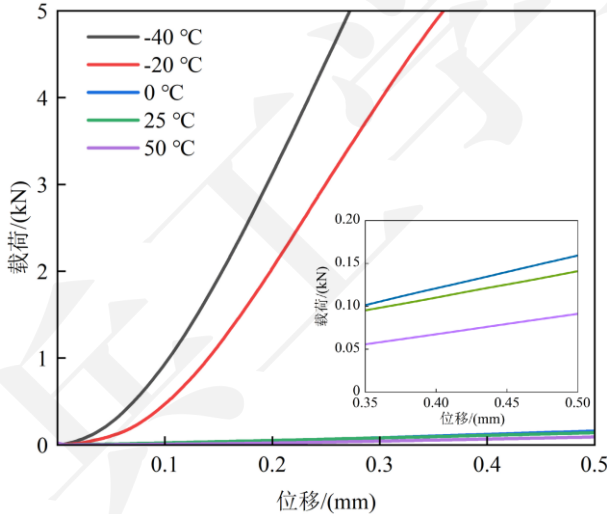


图 2 不同温度下单轴压缩实验结果

Fig.2 Uniaxial compression test results at different temperatures

1.2 温度相关的超弹性本构模型建立

通过对不同超弹性本构模型对比，最终选择 2 阶 Yeoh 模型^[17]对不同温度下全氟醚橡胶单轴压缩实验的数据进行拟合，公式如下：

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2 \quad (1)$$

式中： W 为应变能密度； I_1 为第一应变不变量； C_{10} 和 C_{20} 为与材料偏应力行为相关的材料参数，分别表征剪切变形能中对应 I_1 一次项和二次项的贡献； D_1 为体积材料参数，用于计算体积模量； J 为弹性体积比，对于不可压缩材料， $J=1$ 。图 3 展示了 2 阶 Yeoh 模型的拟合参数随温度的变化规律，从中可以看出，随着温度的升高， C_{10} 、 C_{20} 均呈现出先快速减小、后逐渐趋于平稳的趋势。

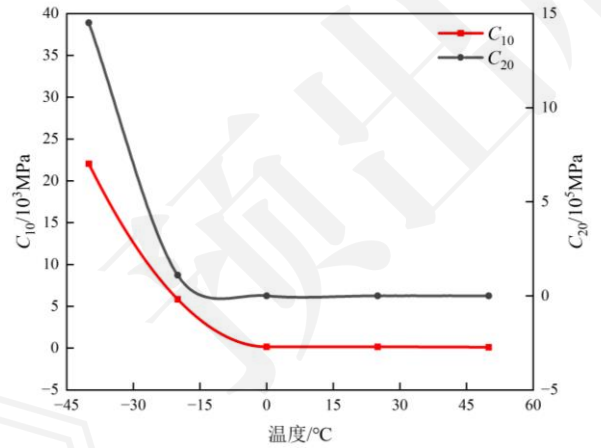


图 3 各温度下模型参数拟合结果

Fig.3 Fitting results of model parameters at different temperatures

根据上述结果分别建立 C_{10} 、 C_{20} 与温度 T 的函数，结果如下：

$$C_{10} = 52689.2e^{-0.125T} + 107.8 \quad (2)$$

$$C_{20} = 1620000e^{-0.215T} + 84500e^{-0.085T} + 112.5$$

将式(2)代入式(1)，即可获得全氟醚橡胶与温度相关的超弹性本构模型。

2 全氟密封圈宏观力学仿真

2.1 全氟密封圈有限元建模与边界条件设置

全氟密封圈密封结构由 3 个关键零件构成：O 形全氟密封圈、可移动压板和固定凹槽。其中，密封圈内径为 45 mm，线径为 5 mm，材料本构模型随温度变化，选择上述建立的与温度相关的超弹性本构模型；凹槽的槽深为 3.5 mm、槽宽为 5 mm，材料与压板均为结构钢。考虑到结构的轴对称特性，为了提高计算效率，建立二维轴对称有限元模型（见图 4），将网格单元设置为 PLANE183 单元。

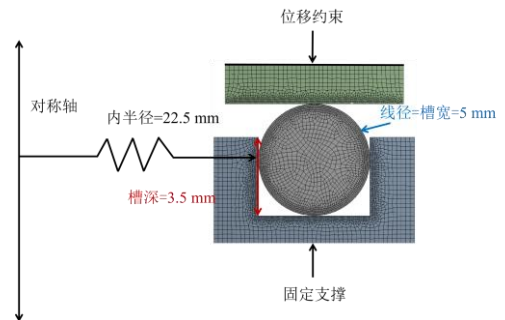


图 4 二维有限元模型

Fig.4 Two-dimensional finite element model

为了方便提取接触压力数据，在密封圈上设置 4 个独立的接触对，采用相同的接触设置（增强拉格朗日算法，摩擦系数 0.2），接触单元为 CONTA172 和 TAGE169。随后对凹槽底面施加固定约束，并对压板施加沿对称轴的位移约束。为了实现不同压缩量的仿真工况，通过逐步增加施加在压板上的位移量来模拟不同压缩量，其余仿真条件保持不变。为了探究温度对密封性能的影响，通过改变施加的环境温度场实现不同温度下的宏观仿真分析，其他仿真参数与边界条件均保持一致。此外，所有部件的温度均设置为随环境温度同步变化，以确保温度场的一致性。

2.2 宏观仿真结果讨论与分析

2.2.1 不同压缩量下的宏观仿真结果

在 2.1 节的密封结构中，上接触表面作为主密封面，直接承受轴向压力，其接触压力与变形量显著高于其他 3 个接触表面，上接触表面的压力不足会直接引发泄漏。两侧表面主要用于定位，对整体密封性能的贡献较小，并且行业标准明确要求优先考核主密封面，故本文主要针对上接触表面开展分析。

图 5 展示了在 25 °C 的环境温度下，施加不同压缩量的橡胶密封圈 von Mises 应力分布结果。由图 5 可以看出，密封圈的应力随压缩量增大而增大，结合单轴压缩实验结果，在该范围内密封圈应力的极大值均未超出橡胶材料的线性变化阶段。此外，密封圈内外侧应力分布近乎对称，但上下部分的应力分布并不对称，并且上、下部分的内部应力明显高于其他位置。进一步提取密封圈上表面的接触压力（见图 6），表面的接触宽度和接触压力都随压缩量的增大逐渐增大，但接触压力的整体分布趋势并未发生改变。

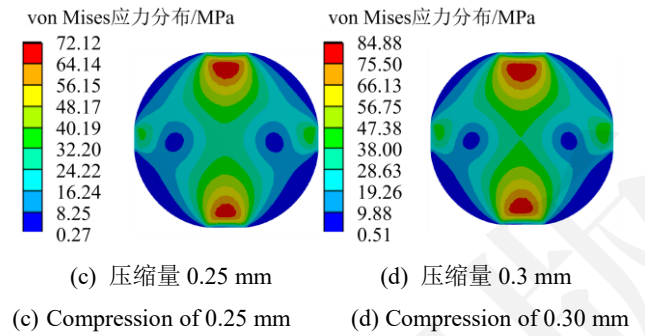
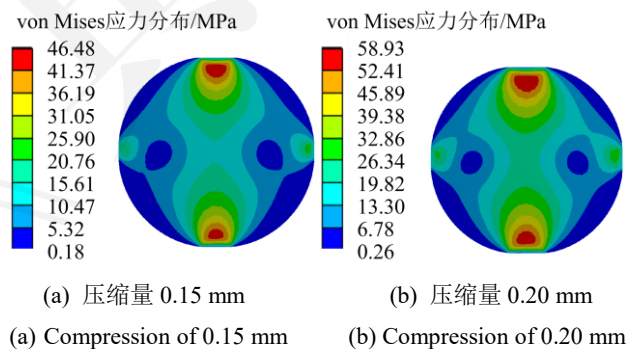


图 5 不同压缩量下密封圈应力分布

Fig.5 Distribution of stress in the seal ring under various compression levels

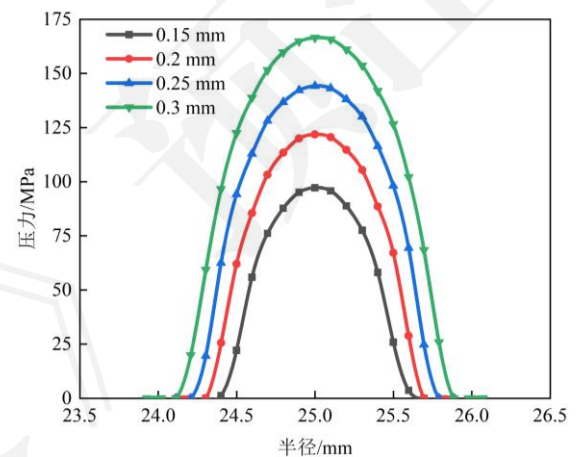


图 6 不同压缩量下接触面接触压力分布

Fig.6 Distribution of contact pressure on the interface under various compression levels

2.2.2 不同温度下的宏观仿真结果

橡胶材料具有很强的温度依赖性，尤其在低温工况下，橡胶分子链段运动冻结，橡胶表现出显著的硬化现象（模量增大）。在 25 °C 情况下，橡胶分子链段运动活跃，橡胶处于高弹态，弹性恢复能力最佳。随着温度的升高，橡胶分子链热运动加剧，材料明显软化，易发生应力松弛或蠕变变形。图 7 分别展示了压缩量为 0.2 mm 时不同温度工况下密封圈上表面接触压力分布结果。从图 7 中的数据可以看到，仿真结果与上述现象一致：从 0 °C 开始，随着温度的下降，橡胶的内部应力和接触压力迅速增大；反之，随着温度的升高，橡胶的内部应力和接触压力缓慢下降。

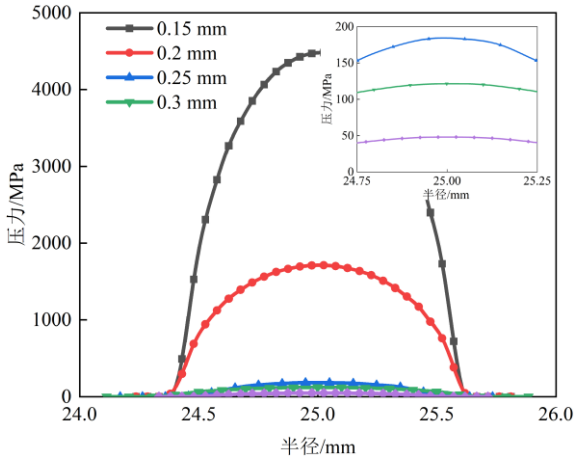


图7 不同温度下接触面接触压力分布

Fig.7 Distribution of contact pressure on the interface under various temperatures

3 微观泄漏通道求解及流体仿真计算

3.1 密封界面粗糙表面模型构建

共轭梯度法^[18]能够获取具有自仿射性的表面微观形貌，该方法是统计意义上的模拟，其本质是生成具有指定统计学分布规律的表面高度矩阵。自相关函数则用来表征该统计学分布规律，提供数据的空间几何信息以及数据之间的相关性。表面微观形貌高度值的自相关函数可表示为

$$R(\tau_x, \tau_y) = E\{z(x, y)z(x + \tau_x, y + \tau_y)\} \quad (3)$$

式中： $R(\tau_x, \tau_y)$ 表示表面微观形貌高度值的自相关函数； E 表示随机变量的数学期望； τ_x 和 τ_y 表示某点与坐标 (x, y) 的相对位置。

在实际计算过程中，表面微观形貌以离散数据点的形式表示，自相关函数的离散化形式可表示为

$$R(\tau_i, \tau_j) = \frac{\sum_{k=1}^{N-i} \sum_{l=1}^{M-j} z(x_k, y_l) z(x_{k+i}, y_{l+j})}{(N-i)(M-j)} \quad (4)$$

$$\tau_i = i\Delta x, \tau_j = j\Delta y$$

$$i = 0, 1, \dots, n; n < N;$$

$$j = 0, 1, \dots, m; m < M$$

式中： N 和 M 分别为每行、列中离散数据点的总数； x_k 和 y_l 表示位于第 k 行、第 l 列数据点的坐标； Δx 和 Δy 为单位网格长度； n 和 m 分别表示自相关长度对应的网格数量。

可通过线性变换生成大小为 $N \times M$ 的高度矩阵 $[z_{ij}]$ ，结合滑动平均模型理论，高度矩阵可由 $(N+n) \times (M+m)$ 的标准正态分布独立随机序列 $[\eta_{i+k, j+l}]$ 和 $n \times m$ 的自相关函数矩阵 $[h_{kl}]$ 获得：

$$z_{ij} = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m h_{kl} \eta_{i+k, j+l}; \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, N \\ j = 1, 2, \dots, M \end{matrix} \quad (5)$$

式中：随机序列 $[\eta_{i+k, j+l}]$ 可通过下列表达式计算，

$$E(\eta_{i,j} \eta_{k,l}) = \begin{cases} 1, i=k \text{ 且 } j=l \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

根据式(3)和式(4)可以得到如下表达式，该非线性方程组用于求解相关系数矩阵：

$$R_{p,q} = E(z_{i,j} z_{i+p, j+q})$$

$$= \sum_{k=1}^{n-p} \sum_{l=1}^{m-q} h_{k,l} h_{k+p, l+q}; \quad \begin{matrix} p = 1, 2, \dots, n-1 \\ q = 1, 2, \dots, m-1 \end{matrix} \quad (7)$$

采用共轭梯度法求解该非线性方程组，可利用方程的微分信息更加高效地获取最优解。将式(7)进行如下转换：

$$f'_{i,j} = \sum_{k=1}^{n-p} \sum_{l=1}^{m-q} h_{k,l} h_{k+p, l+q} - R_{p,q} \quad (8)$$

式中： $f'_{i,j}$ 为关于自相关系数矩阵的非线性函数。通常将余量设为负梯度的形式，则其第 i 次迭代的表达式为

$$\mathbf{r}_i = -f'_{i,j}(\mathbf{x}_i) \quad (9)$$

式中： $\mathbf{r}_i$ 为共轭梯度法迭代过程中的残差向量。非线性方程组中，变量 $\mathbf{x}$ 迭代的表达式为

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + \alpha_i \mathbf{d}_i \quad (10)$$

式中： $\mathbf{d}_i$ 为共轭梯度法的搜索方向矩阵； α_i 表示使方程 $f(\mathbf{x}_i + \alpha_i \mathbf{d}_i)$ 取得最小值的参数，

$$\alpha = -\varepsilon \frac{[f'(\mathbf{x})]^T \mathbf{d}}{[f'(\mathbf{x} + \varepsilon \mathbf{d})]^T \mathbf{d} - [f'(\mathbf{x})]^T \mathbf{d}} \quad (11)$$

ε 为任意小的非零数。搜索方向矩阵 $\mathbf{d}$ 的迭代过程如下：

$$\mathbf{r}_{i+1} = -f'(\mathbf{x}_{i+1})$$

$$\beta_{i+1} = \frac{\mathbf{r}_{i+1}^T (\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i)}{\mathbf{r}_{i+1}^T \mathbf{r}_i} \quad (12)$$

$$\mathbf{d}_{i+1} = \mathbf{r}_{i+1} + \beta_{i+1} \mathbf{d}_i$$

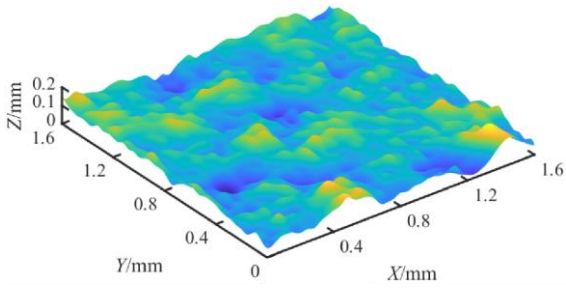
迭代过程中，自相关系数矩阵的初值可通过下列表达式获得：

$$h_{i,j}^0 = sc_{i,j}$$

$$c_{i,j} = \frac{R_{i-1, j-1}}{(n-i+1)(m-j+1)} \quad (13)$$

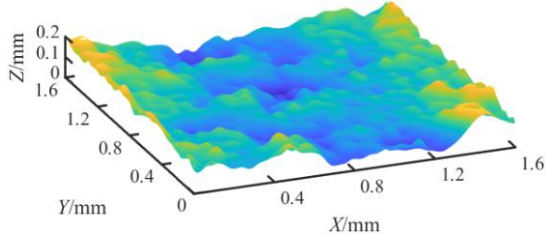
$$s^2 = \frac{R_{0,0}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij}^2}$$

共轭梯度法生成自相关长度为 $20 \mu\text{m}$ 、表面粗糙度为 $20 \mu\text{m}$ 的各向同性表面，如图8(a)所示。根据密封圈实际几何尺寸(线径 5 mm)和接触特征(最大接触宽度 1.6 mm)，建立一个相同大小的光滑弧面高度矩阵，并将得到的粗糙表面高度数据映射到弧面上，即可获得粗糙弧面，如图8(b)所示。



(a) 粗糙平面

(a) Rough surface



(b) 粗糙弧面

(b) Rough curved surface

图 8 粗糙表面模型

Fig.8 Rough surface model

3.2 粗糙表面微观接触计算

有限元仿真与单轴压缩实验结果表明,在不同温度条件下,密封圈的最大应力始终未超出橡胶材料的线性弹性区。因此,在进行微观接触计算的过程中,可将橡胶材料近似看作线弹性材料。而压板和凹槽的刚度远超于密封圈,可近似看作刚性体。此外,橡胶表面相对金属加工表面足够光滑,在接触计算过程中可不考虑密封圈的表面微观形貌。根据 Johnson 假设^[19],实际接触可等效为刚性平面与弹性粗糙弧面的接触。

本文采用基于弹性边界元理论^[20]的数值方法对等效后的模型进行接触分析,其原理是粗糙表面在外部载荷作用下相互挤压,整个系统将趋向于能量最小的平衡状态,即最小余能原理。因此,可将粗糙表面的接触问题转化为求解系统最小余能的数学优化问题,通过构建以系统余能为目标函数的优化模型,实现对界面接触力学行为的表征。

$$V^* = U_e^* - \int_{\Omega} u_i^* T_i d\Omega \quad (14)$$

式中: V^* 为系统的总余位能; U_e^* 为面下实体的内余能; Ω 表示弹性体表面的受力范围; u_i^* 为给定的表面位移; T_i 为弹性体的表面受力。

基于弹性假设条件,接触体内部的余能 U_e^* 在数值上等于其弹性应变能 U_e , 该能量可根据表面接触压力分布与变形位移场计算得出^[21]。针对刚性平面与弹性粗糙面之间的相互作用,通过引入初始间隙分布函数和刚体位移量,可以建立二者之间的相对位移场关系。此时,系统的总余位能可表示为

$$V^* = \frac{1}{2} \int_{\Omega} p(x,y) u^e(x,y) d\Omega + \int_{\Omega} p(x,y) [g_0(x,y) - \delta] d\Omega \quad (15)$$

式中: $p(x,y)$ 表示表面接触压力分布; $u^e(x,y)$ 表示粗糙表面的法向形变量; $g_0(x,y)$ 为接触界面的初始接触间隙分布; δ 为刚性平面的位移量。

根据 Boussinesq 弹性接触理论^[21], 作用于弹性半无限体表面 (x,y) 处的法向载荷会在接触区域中任意点引起法向弹性变形。在本文中,仅考虑表面法向变形分量,表面弹性形变量 u^e 可以通过表面载荷分布和材料力学参数进行解析计算。

$$u^e(x,y) = G^{ue}(x,y) * p(x,y) \quad (16)$$

式中: $G^{ue}(x,y)$ 表示表面上某点受到的法向载荷对表面上其他点法向位移的影响系数,

$$G^{ue}(x,y) = \frac{1-\nu^2}{\pi E \sqrt{x^2 + y^2}} \quad (17)$$

E 为弹性体的弹性模量, ν 为泊松比。

对式(16)进行离散化处理,可得到半无限空间表面受到的法向载荷对任意一个网格中心点 (α,β) 点的弹性形变量:

$$u_{\alpha,\beta}^e = \sum_{\zeta} \sum_{\eta} [K_{\alpha-\zeta,\beta-\eta}^{ue} p_{\zeta,\eta}] \quad (18)$$

式中: $K_{\alpha-\zeta,\beta-\eta}^{ue}$ 可通过矩形近似法进行计算,最终得到的近似解表达式如下:

$$\begin{aligned} K_{\alpha-\zeta,\beta-\eta}^{ue} / \frac{1-\nu^2}{\pi E} = & y_+ \ln[x_+ + \sqrt{x_+^2 + y_+^2}] + x_+ \ln[y_+ + \sqrt{x_+^2 + y_+^2}] \\ & - y_+ \ln[x_- + \sqrt{x_-^2 + y_+^2}] - x_- \ln[y_+ + \sqrt{x_-^2 + y_+^2}] \\ & - y_- \ln[x_+ + \sqrt{x_+^2 + y_-^2}] - x_+ \ln[y_- + \sqrt{x_+^2 + y_-^2}] \\ & + y_- \ln[x_- + \sqrt{x_-^2 + y_-^2}] + x_- \ln[y_- + \sqrt{x_-^2 + y_-^2}] \end{aligned} \quad (19)$$

式中: $x_+ = x_{\alpha} - x_{\zeta} + \Delta x/2$, $x_- = x_{\alpha} - x_{\zeta} - \Delta x/2$, $y_+ = y_{\beta} - y_{\eta} + \Delta y/2$, $y_- = y_{\beta} - y_{\eta} - \Delta y/2$ 。结合式(18)和式(19),即可计算出法向压力载荷在弹性半空间表面上任意点产生的法向弹

性变形。

基于上述理论推导,式(15)可简化为仅含单变量 $p(x,y)$ 的优化问题,且存在唯一的最优接触压力分

布使系统余位能最小。从数学角度分析，该接触问题可转化为带约束条件的二次泛函极值问题，采用共轭梯度法和快速傅里叶变换的混合算法^[22-23]，能够实现此类接触力学问题的高效求解。

基于本节的假设，将求解得到的弹性变形全部叠加到橡胶表面上即可获得变形后的橡胶表面，及密封面的三维非接触间隙，叠加过程如图9所示。

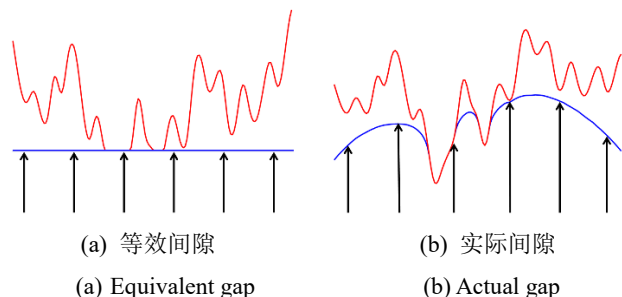


图9 实际间隙求解

Fig.9 Actual gap solution

3.3 微观泄漏通道求解

当两个密封面在载荷作用下相互挤压时，尽管其在宏观上表现为紧密接触，但在微观尺度下，实际接触区域仅发生在部分微凸体之间，未接触区域则形成许多微观间隙。相邻的微观间隙可能相互连通，进而形成贯穿整个密封界面的泄漏通道，导致介质从高压侧向低压侧渗透，产生泄漏。

本文基于微观接触计算结果，采用连通性判别算法对密封界面的泄漏通道进行搜索。该方法的基本流程如下：

首先将计算得到的三维非接触间隙投影到二维平面上，并定义一个状态矩阵来记录每个单元的接触属性。其中，接触区域对应的单元标记为0，非接触区域标记为1。

其次，采用四连通规则判断相邻单元的连通性，搜索过程以某个接触单元(X, Y)为初始点，逐个检查其相邻单元的状态。若相邻单元同样处于接触状态，则将其坐标加入当前连通合并继续迭代搜索（见图10）。

最终，将连通集合内所有单元的状态更新为2，用以标识实际参与泄漏的连通区域，即可获得能够直观表征密封界面接触与泄漏特性的状态矩阵。

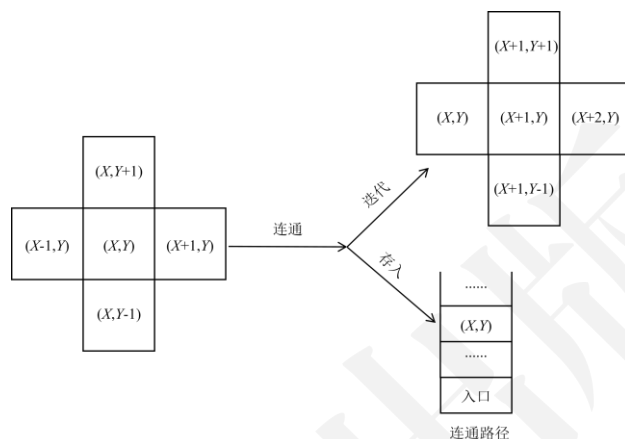
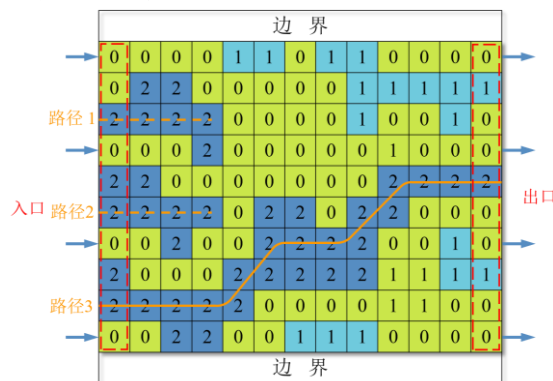


图10 四联通网格模型

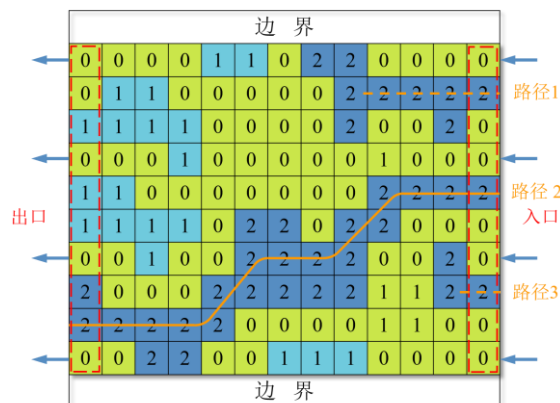
Fig.10 Four-connection grid model

特别地，在进行泄漏通道搜索前需要对接触表面进行误差处理，以消除在微观接触求解过程中引入接触区域的微小间隙误差。此外，泄漏通道的判定通过双向扫描算法实现，即分别从两侧边界对泄漏通道进行搜索，并将搜索结果重合的部分作为实际泄漏通道。其目的是排除具有封闭出口的流通过程，提取出能够双向贯通的实际泄漏通道，泄漏通道搜索示意图如图11所示。计算结果如图12所示，接触区域宽度与宏观装配仿真结果吻合良好，验证了该微观接触模型的准确性。



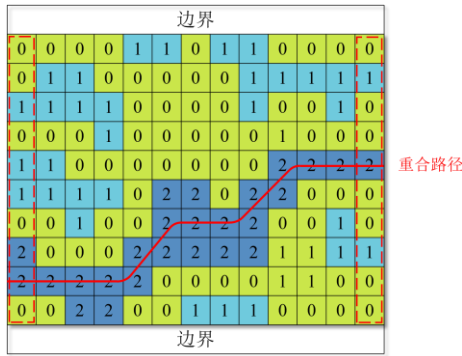
(a) 高压侧单项搜索

(a) High-pressure side search



(b) 低压侧单向搜索

(b) Low-pressure side search



(c)双向搜索

(c) Bidirectional search

图 11 泄漏通道示意图

Fig.11 Schematic diagram of leakage channels

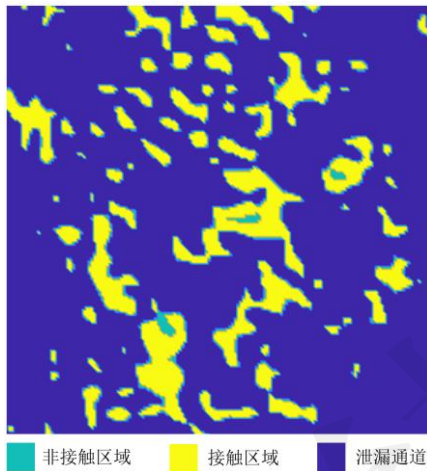


图 12 接触结果云图

Fig.12 Contour plot of contact results

3.4 全氟密封圈泄漏率计算

为了精确评估密封圈的密封性能，本文基于 Fluent 软件，对泄漏通道内流体的流动行为和泄漏率进行数值模拟。

首先，在 Hypermesh 软件中建立精确三维泄漏通道的有限元网格模型（见图 13）。接触行为主要发生在粗糙接触表面的微凸体顶端，形成离散的联系斑点。从流体动力学角度分析，这些接触区域（间隙高度=0 mm）形成流动屏障，阻止流体介质通过；而非接触区域（间隙高度>0 mm）则构成潜在的泄漏路径，若能形成贯通两侧的路径，则形成泄漏通道，造成泄漏。

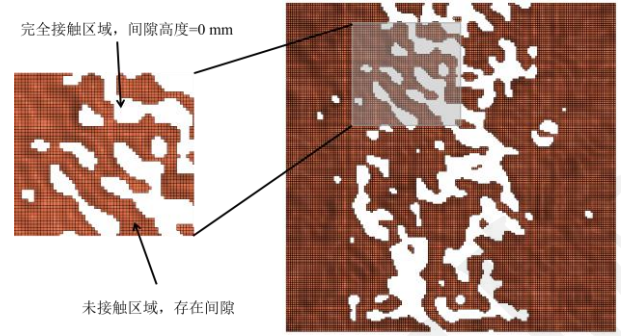


图 13 泄漏通道有限元网格模型(俯视图)

Fig.13 FEM mesh model of leakage channel (top view)

然后，将上述有限元导入 Fluent 软件并完成仿真参数设置。选用空气作为工作介质，并根据实际工况设置流体的物性，流体类型选择层流模型。进口边界采用压力入口，设定压力为 1 MPa；出口边界采用压力出口，设定压力为 0 MPa，如图 14 所示。

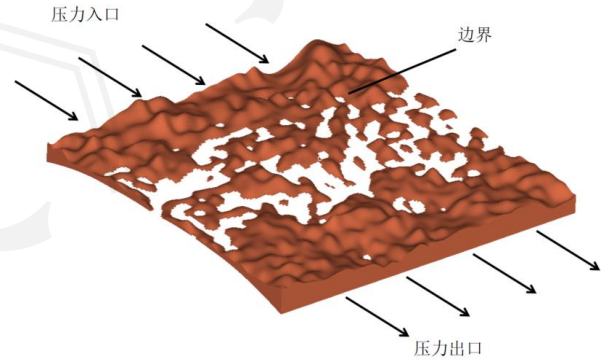


图 14 流体仿真边界条件设置

Fig.14 Boundary condition setup for fluid flow simulation

在迭代过程中，通过监测质量流量参数来控制迭代精度，当进出口质量流量差小于 5%时认为达到稳态解。计算收敛后，利用 Fluent 后处理模块导出泄漏通道内的速度场、压力分布、压力梯度及出口截面流量等关键流场参数，并基于气体物性条件，计算对应条件下的流量质量，从而实现对密封圈泄漏率的定量评估。以 25 °C、压缩量 0.2 mm 为例，泄漏通道中流速分布如图 14 所示，最终计算得到的泄漏率结果为 7.3×10^{-7} kg/s。

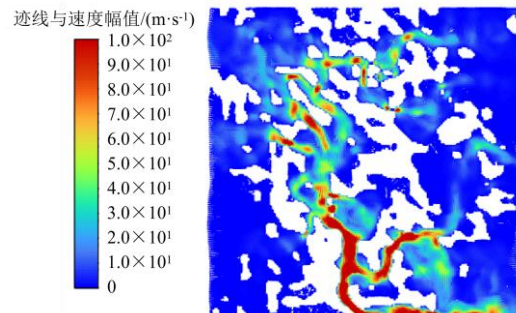


图 15 泄漏通道内流体的流速分布

Fig.15 Distribution of fluid velocity in the leakage channel

4 结果与讨论

4.1 温度对密封性能的影响

通过考虑不同温度下材料的力学性能与流体的特性参数, 本文探究了温度对全氟密封圈密封性能的影响规律。

根据宏观装配仿真中全氟密封圈在 0.2 mm 的

压缩量下获得的接触压力数据及最大接触宽度, 采用粗糙表面建模方法生成大小为 1.6 mm×1.6 mm, $Ra=20\text{ }\mu\text{m}$ 的弧形粗糙接触面, 并计算出该面积承受的实际接触载荷。表 1 系统列出了各温度工况(-40℃至 50℃)下橡胶材料的弹性模量、空气密度和黏度等关键参数, 以及对应的接触载荷。

表 1 不同温度下橡胶、空气物性参数和接触载荷

Table 1 Rubber/air properties and contact load under different temperatures

温度/℃	弹性模量/MPa	空气密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	空气黏度/ ($10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	接触载荷/N
-40	63 693	1.515	1.52	6 191
-20	40 582	1.395	1.62	2 058
0	1 171	1.293	1.72	175
25	992	1.169	1.849	156
50	694	1.093	2.963	63

根据表 1 中的参数, 采用边界元方法对粗糙表面进行微观接触计算, 获得微观接触间隙, 并借助 Fluent 软件完成对通道内流体渗流的仿真分析, 进而得到全氟密封圈在不同温度下的实际泄漏率, 结果如图 16 所示。

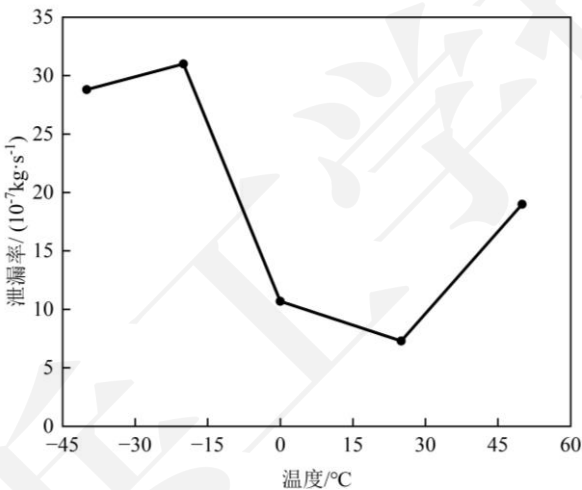


图 16 温度与泄漏率的关系

Fig.16 Leakage rate vs. temperature

由图 16 可以看出, 全氟密封圈的密封性能呈现显著的温度依赖性, 在 25℃附近密封圈的密封效果最佳, 随着温度的升高或降低, 密封圈的泄漏率显著升高。这主要是因为橡胶材料在不同温度下的力学性能具有显著差异: 在 25℃下, 橡胶分子链具有适度的热运动能力, 既具有良好的弹性, 能充分贴合密封表面, 又保持足够的刚度, 进而提供稳定的接触压力; 面对低温环境, 橡胶分子链因逐渐失去运动能力而变得僵硬, 使得材料硬度急剧升高, 虽

然能提供更高的接触压力, 但由于弹性变差, 橡胶很难填充到粗糙表面的间隙处, 使得泄漏通道显著增加; 随着温度的升高, 橡胶分子链具热运动加剧, 导致橡胶的弹性下降, 此时橡胶难以获得足够的接触压力, 泄漏率同样增加, 但相较于低温环境泄漏率增长的趋势明显放缓。

4.2 粗糙度对密封性能的影响

在加工过程中, 金属表面的形貌受到加工方式、工件产生的弹塑性变形、机床和刀具振动、受热变形等因素共同影响, 而这些高低不平的微观痕迹在很大程度上会影响密封结构的密封效果。实验与理论分析结果表明, 表面粗糙度增大会显著降低密封性能。这是因为密封界面内粗糙表面仅部分区域真正接触, 粗糙度的增大会导致接触面积的减小和接触间隙的增大, 使泄漏通道形成的概率显著增大。根据流体泄漏立方定律($Q\propto h^3\Delta p/\mu L$, Q 为泄漏率, h 为密封间隙高度, Δp 为压差, μ 为流体动力黏度, L 为密封间隙长度, 见图 17), 在压差不变的情况下, 泄漏率与间隙高度的立方呈正比, 因此微小粗糙度变化可能引发泄漏率剧增。



图 17 密封间隙高度

Fig.17 Sealing gap height

为探究粗糙度对密封性能的影响, 本文采用控制变量法, 对同一个粗糙表面的高度进行缩放, 由此得到粗糙度不同的粗糙表面。选取 5 个粗糙度 $Ra=15\text{ }\mu\text{m}$ 、 $17.5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $20\text{ }\mu\text{m}$ 、 $22.5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $25\text{ }\mu\text{m}$ 进行表

面建模、微观接触计算、泄漏通道求解及计算流体动力学仿真，最终获得的密封圈泄漏率如图 18 所示。在相同的外部条件下，接触面的粗糙度大小会直接影响粗糙表面间的密封间隙高度 h 。随着粗糙度变大，密封间隙高度增加，流体泄漏的通道越大，泄漏通道对流体的阻力越小，泄漏率呈现增长趋势。

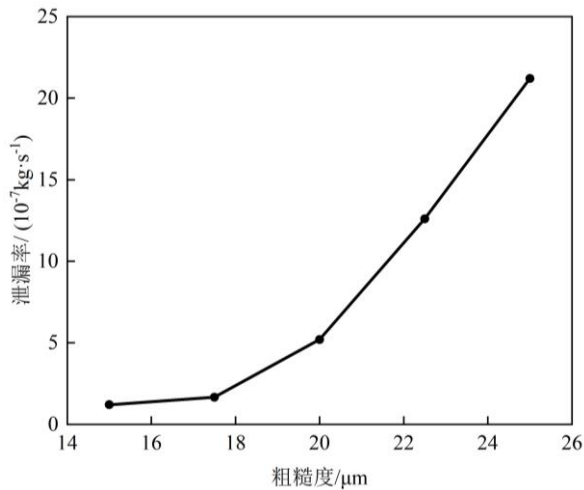


图 18 粗糙度与泄漏率的关系

Fig.18 Leakage rate vs. surface roughness

4.3 压缩量对密封性能的影响

压缩量也是影响橡胶密封圈密封性能的重要因素，其通过接触面积和间隙高度的耦合作用，改变泄漏通道的形状和分布，从而影响流体在通道内的渗流行为。

本文通过对常温下不同压缩量的密封圈泄漏率进行求解（分别取 0.10 mm、0.15 mm、0.20 mm、0.25 mm 和 0.3 mm），定量探究密封圈密封性能随压缩量的变化趋势，不同压缩量下的密封圈泄漏率如图 19 所示。图 19 表明，压缩量在 0.1~0.2 mm 的区间内，随着压缩量的增加，实际发生接触的面积快速增大、间隙高度 h 快速减小，最终导致泄漏率呈现显著的下降趋势；但随着压缩量进一步增加至 0.3 mm，接触面积和间隙高度逐步接近极限值，泄漏率的下降速率逐渐趋于平稳，继续增加形变量对改善密封效果的贡献有限。该规律表明压缩量对密封性能的影响是有限的，在实际工程应用中压缩量不是越大越好，通过合理控制压缩量，能够在确保良好密封性能的同时，避免因载荷过大导致的材料损伤和密封失效。

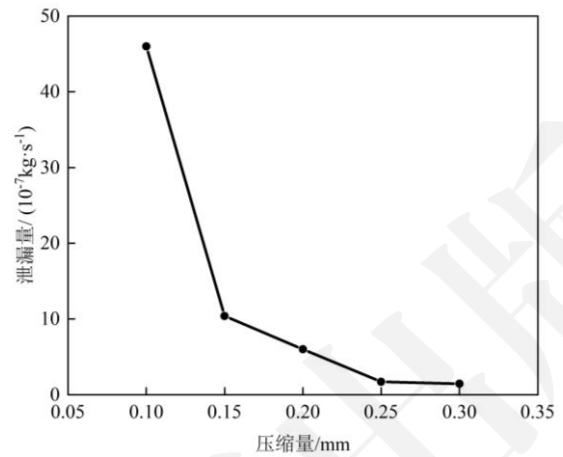


图 19 压缩量与泄漏率的关系

Fig.19 Leakage rate vs. compression

5 全氟密封圈密封性能实验

5.1 实验方法

为了验证仿真结果的准确性，本文搭建了气密性密封实验系统，整体结构如图 20 所示，该系统主要由进气增压模块、控温模块、泄漏检测模块及中央主控系统组成，可实现抽真空、充压、保压、控温与泄漏监测全流程。在实验过程中，首先通过控温模块将环境箱调节至目标温度并保持稳定，随后，增压模块对压缩气体进行调压，通过管路输送至实验工装的进气口，使密封腔内达到设定压力（例如 5 MPa）。实验系统的实物布置如图 21 所示，展示了各模块的实际连接与现场安装情况。

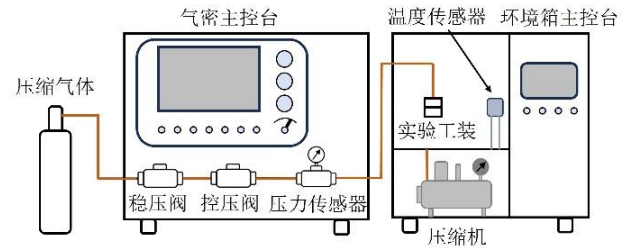


图 20 气密性密封实验台

Fig.20 Air tightness sealing test bench

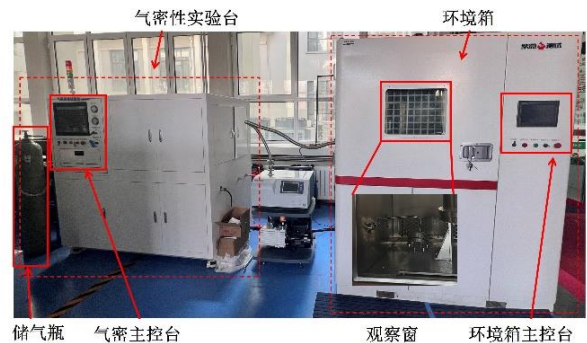


图 21 实验现场图

Fig.21 Experimental setup

本文设计了密封性能测试的实验工装，如图 22 所示，主要包括压件、底座、垫圈和密封圈等部件。其中，压件底部与密封圈接触的表面经电火花加工处理，形成具有特定粗糙度的密封界面（见图 23）。底座设有内外双凹槽，分别用于装配密封圈和安放调节垫圈，垫圈采用 C 形开口设计，避免干扰泄漏路径。

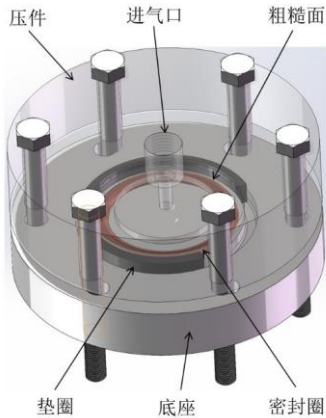


图 22 实验工装模型

Fig.22 Experimental fixture model

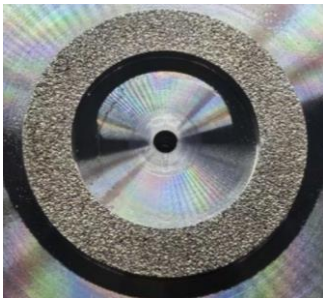


图 23 电火花加工的粗糙表面

Fig.23 EDM-textured surface

本文采用压降法进行泄漏率测量，首先将工装与密封圈置于环境箱内，控温至目标温度并保持稳定，其次按照对角方式拧紧螺栓，确保密封圈均匀受压且压缩量保持一致。通过主控系统启动真空泵，开启进气泵向密封腔内注入高压氦气，待系统压力达到设定值（5 MPa）后，关闭进气泵。若存在泄漏，密封腔内压力值将逐渐下降，此时，通过高精度气压传感器实时监测密封腔内的压力变化，记录 300 s 内密封腔内的压力变化量，并结合容积即可计算得到全氟密封圈的平均泄漏率（ $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ）。

5.2 实验结果与讨论

5.2.1 温度对密封性能的影响

通过环境箱控制温度，依次在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 共 5 个温度点开展密封实验，图 24 展示了密封圈温度与泄漏率之间的关系，从中可以看出，密封圈密封性能呈现明显的温度依赖性， $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近泄漏率最小，温度降低或升高均会导致泄

漏率显著上升，整体变化趋势与仿真结果相符，表明本文所建立的仿真模型在揭示温度影响规律方面具有较高的可靠性。实验与仿真结果之间的定量差异主要源于仿真中的模型简化与假设，例如将橡胶材料假设为线弹性材料、忽略密封圈表面微观形貌、理想化处理实验条件、未考虑橡胶圈热胀冷缩等。

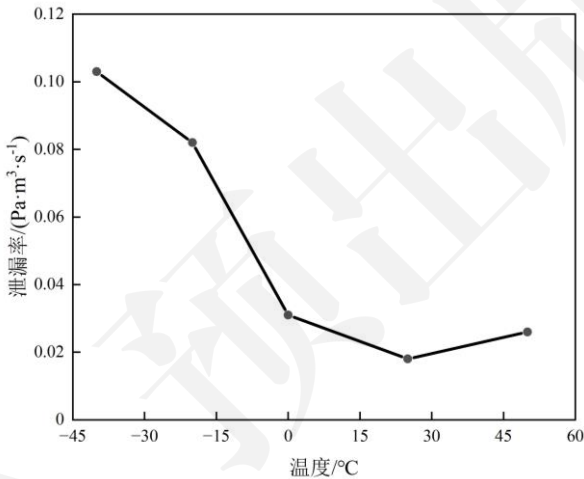


图 24 温度与泄漏率的关系

Fig.24 Leakage rate vs. temperature

5.2.2 粗糙度对密封性能的影响

本文制造 5 种不同粗糙度的压件（ $Ra=15.0\text{ }\mu\text{m}$ 、 $17.5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $20.0\text{ }\mu\text{m}$ 、 $22.5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $25.0\text{ }\mu\text{m}$ ），图 25 展示了密封界面粗糙度与泄漏率之间的关系，实验结果表明，随着粗糙度增大，泄漏率呈上升趋势，且上升速度逐渐加快，相关规律与仿真预测结果保持一致。实验中实际加工的粗糙表面在形貌分布、纹理方向等方面与仿真中采用的理想化各向同性高斯分布粗糙模型存在差异，且粗糙度参数本身也存在一定偏差，这些因素是导致实验与仿真结果出现偏差的主要原因。

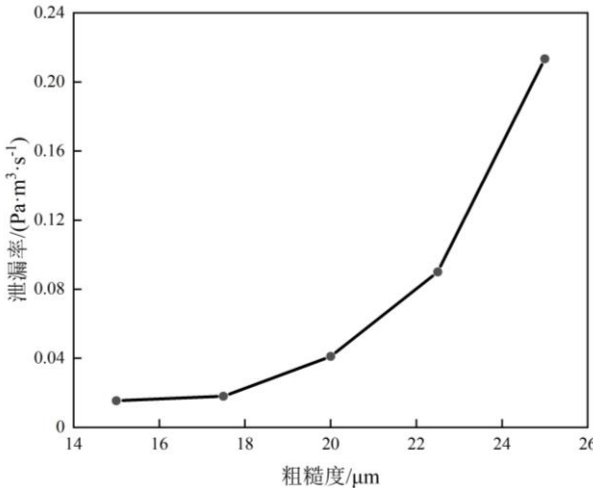


图 25 粗糙度与泄漏率的关系

Fig.25 Leakage rate vs. surface roughness

5.2.3 压缩量对密封性能的影响

通过更换 5 种不同高度（9.15 mm、9.20 mm、9.25 mm、9.30 mm 和 9.35 mm）的调节垫圈，实现密封圈压缩量的精确调节。图 26 展示了密封圈压缩量与泄漏率之间的关系。从图 26 中可以看出，随着压缩量的增加，泄漏率逐渐下降，且下降速率随压缩量增大逐渐趋于平缓，这一变化规律与前述仿真结果一致。实验中所用的垫圈存在加工误差，导致压缩量的实际控制精度受限，同时实验系统本身也存在一定的测量误差，这些因素共同导致了实验结果与仿真结果的偏差。

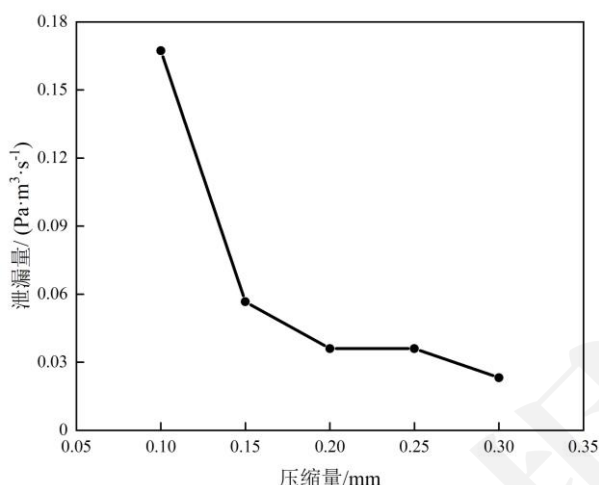


图 26 压缩量与泄漏率的关系

Fig.26 Leakage rate vs. compression

6 结论

本文提出了面向不同环境温度的全氟橡胶密封圈装配仿真与密封性能分析方法，实现了全氟密封圈宏观接触压力、微观接触间隙、微通道内流体渗流的仿真分析，通过密封圈泄漏率精确求解，系统研究了温度、粗糙度、压缩量等因素对密封性能的影响规律。得出主要结论如下：

1) 建立了从宏观装配仿真到微观接触计算的多尺度分析方法，将宏观有限元模拟获取的密封面接触压力分布作为边界条件输入微观边界元模型中，为后续泄漏通道搜索与泄漏率精确计算提供支撑。

2) 研究结果表明，全氟密封圈密封性能具有很强的温度依赖性，25℃附近全氟密封圈密封性能最优，温度升高或降低，密封圈泄漏率将显著升高，相较于高温环境，低温对密封圈泄漏率的影响更加显著。

3) 搭建了气密性综合密封实验系统，系统开展了温度、粗糙度及压缩量对全氟密封圈泄漏影响的实验研究。实验结果表明：泄漏率随温度呈现“先降后升”的变化趋势，在 25℃附近取得最小值；泄漏率随粗糙度增大而显著上升，且增速随粗糙度提

高而加快；泄漏率随压缩量增加而逐渐下降，并在压缩量超过 0.17 mm 后趋于平缓。实验结果与仿真预测的变化规律一致，验证了本文所建多尺度仿真模型的可靠性与适用性，同时也表明了实际加工、装配与测量等因素带来的偏差来源。

参考文献 (References)

- [1] 冯滢,付文娟,胡振坤,等.基于正交试验的固体火箭超燃冲压发动机优化设计[J].兵工学报, 2025, 46(9):240820.
FENG Y, FU W J, HU Z K, et al. Optimization design of solid rocket scramjet engine based on orthogonal experiments[J]. Acta Armamentarii, 2025, 46(9):240820.(in Chinese)
- [2] 曾佳进,李军伟,李强,等.触发激励下固体火箭发动机声腔特性实验[J].兵工学报, 2025, 46(2): 240162.
ZENG J J, LI J W, LI Q, et al. Experimental study on acoustic property of solid rocket motor under pulse triggering[J]. Acta Armamentarii, 2025, 46(2):240162. (in Chinese)
- [3] JIN L, CHE L D. Experimental study on stress relaxation of rubber O-ring for mechanical seal[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2691(1): 012015.
- [4] ZHU J L, ZHANG J, LU Y C, et al. Experimental and simulation study on the sealing performance of rubber O-rings exposed to hydrogen conditions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 158:150239.
- [5] ZHAO X, LIU Y, GUO F. A quantitative characterization model for nonlinear dynamic parameters of O-rings[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 224:112176.
- [6] LIAO B P, SUN B, YAN M C, et al. Time-variant reliability analysis for rubber O-ring seal considering both material degradation and random load[J]. Materials, 2017, 10(10): 1211.
- [7] LI Y D, WU J, CHEN Z H, et al. The influence of oil and thermal aging on the sealing characteristics of NBR seals[J]. Polymers, 2024, 16(17): 2501.
- [8] LIANG B L, YANG X, WANG Z L, et al. Influence of randomness in rubber materials parameters on the reliability of rubber O-ring seal[J]. Materials, 2019, 12(9): 1566.
- [9] LI M, HE L, ZHENG D K, et al. Characterization of long-term evolution of leakage rates of O-ring seals in nuclear power plant under high-temperature and high-pressure conditions[J]. Nuclear Engineering and Design, 2024, 429:113666.
- [10] ZHU M, MA D S, ZHOU Y, et al. The change of sealing property in the aging process of NBR sealing equipment based on finite element analysis[J]. Coatings, 2024, 14(9):

1178.

- [11] ZHOU W R, XIE Z H. Multi-objective optimization of motor sealing performance: numerical and experimental approach[J]. *Materials*, 2025, 18(9): 2064.
- [12] CHENG H M, CHEN X Y, CHEN X L, et al. Research on key factors of sealing performance of combined sealing ring[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(2): 714.
- [13] TAO N N. Thermodynamic and sealing performance analysis of reciprocating O-rings in hydraulic cylinders[J]. *International Journal of Heat and Technology*, 2023, 41(3): 694-700.
- [14] LI X X, WANG B Q, PENG X D, et al. Effect of nitrile butadiene rubber hardness on the sealing characteristics of hydraulic O-ring rod seals[J]. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 2024, 25(1): 63-78.
- [15] ZHOU C L, ZHENG J Y, GU C H, et al. Sealing performance analysis of rubber O-ring in high-pressure gaseous hydrogen based on finite element method[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(16): 11996-12004.
- [16] MA Y, WU L W, LI C M, et al. Thermal-mechanical-diffusion multi-field coupling behavior of rubber seals in high-pressure hydrogen environment[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 112:333-346.
- [17] 赵子涵,穆希辉,杜峰坡.橡胶履带柔性复合材料的本构模型[J].*兵工学报*, 2020, 41(9): 240162.
ZHAO Z H, MU X H, DU F P. Constitutive model of flexible composites for rubber track[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(9): 240162. (in Chinese)
- [18] MANESH K K, RAMAMOORTHY B, SINGAPERUMAL M. Numerical generation of anisotropic 3D non-Gaussian engineering surfaces with specified 3D surface roughness parameters[J]. *Wear*, 2010, 268(11/12): 1371-1379.
- [19] BARBER J R. Bounds on the electrical resistance between contacting elastic rough bodies[J]. *Proceedings of the Royal Society A-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2003, 459(2029): 53-66.
- [20] 王凯,郑孟伟,巩浩,等. 金属圈弹塑性接触计算与密封性能分析[J].*兵工学报*, 2025, 46(6): 240371.
WANG K, ZHENG M W, GONG H, et al. Elastic-plastic contact calculation and sealing performance analysis of metal sealing ring[J]. *Acta Armamentarii*, 2025, 46(6): 240371. (in Chinese)
- [21] JOHNSON K L. *Contact mechanics*[M]. Cambridge, MA, US: Cambridge University Press, 1985.
- [22] WANG Z J, WANG W Z, HU Y Z, et al. A numerical elastic-plastic contact model for rough surfaces[J]. *Tribology Transactions*, 2010, 53(2): 224-238.
- [23] LI L, TANG J Y, DING H, et al. On the linear transform technique for generating rough surfaces[J]. *Tribology International*, 2021, 163: 107182.