密封圈越孔磨损特性和失效模式研究

房泽臣* 刘向阳 陈汉雷 梁志伟 焦飞飞 杨 旋 黄武博 王 森
中国航天员科研训练中心,北京,100094

摘要:提出了一种基于分层材料模型和自适应网格的有限元模型以研究密封圈循环越孔运动的磨损行为,该分层材料模型可有效减少超弹性材料模型在自适应网格计算过程中的梯度状态变量错误。通过大规模仿真计算和实验发现,不同材料的密封圈越孔运动的受力特征、磨损特性分为两类,并产生了相应的两种失效模式:越孔运动磨损后接触失效模式和越孔运动变形后剪切失效模式。在越孔运动磨损后接触失效模式下,接触应力具有高度可预测性。进一步研究了越孔密封圈失效机理,为其可靠性设计提供了理论基础和优化策略。

关键词:密封圈;越孔运动;磨损;自适应网格;密封失效模式
中图分类号:TH117
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.09.020 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Wear Characteristics and Failure Modes for Hole-traversing Sealing Rubber Rings

FANG Zechen* LIU Xiangyang CHEN Hanlei LIANG Zhiwei JIAO Feifei YANG Xuan
HUANG Wubo WANG Sen
China Astronaut Research and Training Center, Beijing, 100094

Abstract: Targeting the wear characteristics of hole-traversing sealing, an adaptive finite element model was proposed based on a multi-layer material model. By implementing the multi-layer material model, the computational errors in gradient state variables were mitigated effectively during adaptive meshing of hyperplastic materials. Large-scale wear simulation and experiment results demonstrate that there is distinct classification characteristics in both stress state and wear morphology between different materials, which results in two corresponding sealing failure modes, contact surface wear induced sealing failure and shear failure after deformation. A predictive model was established for the contact stress under the first failure mode. Further, the mechanism of failure modes was elucidated providing fundamental basis and practical optimization strategies for enhancing seal reliability.

Key words: sealing ring; hole-traversing sealing; wear; adaptive meshing; sealing failure modes

0 引言

多通道切换装置在航空航天等领域应用广泛。多通道切换装置多以滑阀形式设计,其主通道上轴向分布有多个回路连接孔。工作时,阀芯轴套上的密封圈沿主通道轴向循环往复运动。密封圈不断在通道中进出连接孔,这种过程称为密封圈越孔行为。越孔过程包括通道运动、出孔、入孔、继续在通道中运动四个过程。出孔时,密封圈从压缩状态变为弹性膨胀状态;入孔时,密封圈由自由状态再进入压缩状态。如此循环往复下,越孔密封圈比一般动密封圈受力更加复杂,特别是密封圈压入连接孔时,自由膨胀部分容易受到剪切破坏。一般情况下,可以通过选择强度高的密封件材料来抵抗孔边缘受到的剪切力。对于地外探索等更换操作困难、长期服役可靠性高的使用场景,密封圈循环越孔行为的磨损特征和失效机理具有重要的实际意义。

密封圈越孔行为的建模涉及材料非线性(超弹性材料)、几何非线性(密封圈大变形、磨损后材料去除)与接触状态非线性(密封移动行为)等非线性行为,具有一定的难度,其建模的核心在于超弹性材料模型的磨损算法。一般情况下,材料磨损计算常使用Archard模型。自适应网格技术是Archard模型的主要算法工具。REZAEI等[1]将自适应网格有限元方法与Archard模型结合,广泛应用于金属、高分子聚合物乃至复合材料的磨损研究中。陈杰[2]利用Archard模型对不同表面形貌的H13钢进行了磨损模拟,将累计磨损量和材料变形次数进行线性拟合,建立了模具服役寿命的预测模型。张方宇[3]结合磨损模型建立顺序

收稿日期:2025-08-01
基金项目:拔尖创新团队扶持项目(先进环境控制与生命保障技术研发团队)

热力耦合有限元模型，实验结果与模拟结果较为吻合。肖博升等[4-5]通过试验与数值模拟结合的方法建立了考虑接触面温度的PEEK、PEEK/CF材料磨损模型。张传兵[6]、朱悦[7]则建立了组合密封圈中PTFE耐磨环的磨损仿真模型。

由于橡胶密封圈具有超弹性力学行为，越孔过程中除了发生材料去除，还伴随密封圈的压缩和膨胀。这导致超弹性材料模型对自适应网格算法的适用性较差，磨损计算时经常发生严重的梯度状态变量错误，最终导致计算不收敛。密封圈磨损行为的模拟研究报道相对较少。为解决该问题，本文提出一种基于分层材料模型的密封圈磨损仿真技术，既解决了仿真过程中的收敛问题，又考虑了超弹性材料的力学行为。在此基础上，通过对力学特征、磨损特性、失效模式的系统分析，揭示了越孔密封圈的失效机理。

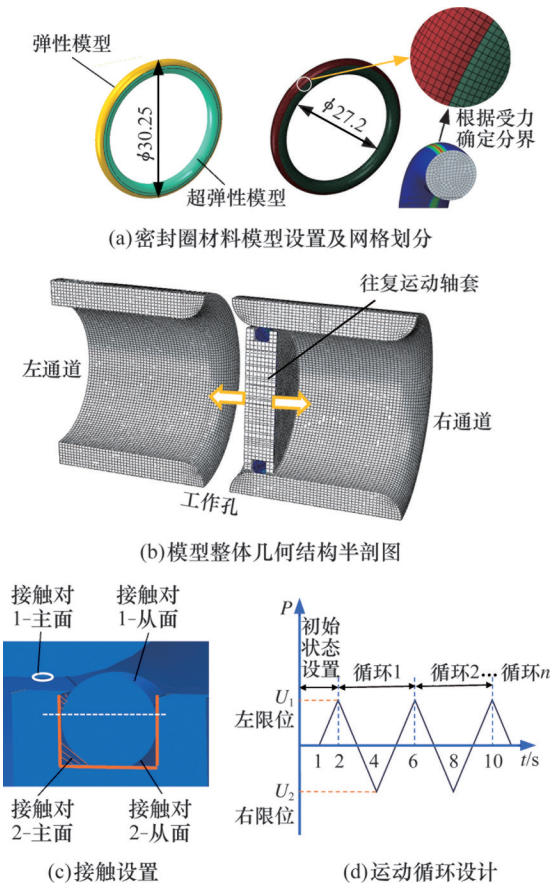
1　密封圈往复越孔磨损过程建模

密封圈往复越孔磨损模型基于Archard磨损模型和自适应网格算法。Archard磨损模型可以计算密封圈与通道内壁接触时的磨损量，对节点磨损深度和节点磨损方向进行确定。Abaqus Umeshmotion子程序结合ALE自适应网格算法，可以实现运动过程中每一次磨损后的网格更新和计算迭代。密封圈循环越孔磨损仿真的模型设置如图1所示。

模型采用全六面体混合单元(C3D8H)，使用结构化网格划分，并在过孔位置进行了网格加密，密封圈网格基本尺寸为0.01 mm。密封圈支撑轴套、左右通道的硬度远大于密封圈，故设置为刚体。设置两组接触对，分别是密封圈上顶面和通道内壁的接触对、密封圈下表面与支撑轴套内壁的接触对。接触对的设置选择面对面离散方法(surface-to-surface-discretization)，接触跟踪方法选择有限滑动方法(finite sliding)。接触面的法向行为定义为硬接触，切向摩擦滑动采用罚函数定义。设置密封圈接触区域为自适应网格区域。整个分析过程分为三个时间步加载：密封圈装配—移动至初始位置—循环运动。

1.1　密封圈分层材料模型

在数值模拟中，密封圈橡胶材料一般假设为近似不可压缩的超弹性体[8-9]。在模型中作以下假设[10-12]：为了控制计算规模，忽略橡胶材料的应力松弛特性和蠕变特性，橡胶受挤压时体积不变，密封圈受到的纵向压缩视为由约束边界的指定位移引起，密封圈与其他部件的接触边界不可穿越，



(a)密封圈材料模型设置及网格划分

(b)模型整体几何结构半剖图

(c)接触设置　(d)运动循环设计

图1　密封圈往复越孔磨损模型设置

Fig.1　Setup for wear simulation of hole-traversing sealing ring

忽略温度对橡胶材料性能的影响。

为实现基于Archard模型和自适应算法的密封圈磨损计算模型，首先需解决超弹性材料模型在自适应网格计算过程中的适用性难题。有研究采用线弹性模型来避免模型计算不收敛，但未能真实反映密封圈的超弹性本征特性[13]。橡胶的应力-应变在小变形范围内符合虎克定律[14]。在综合考虑橡胶密封圈材料的应力应变特性和自适应网格算法限制的基础上，本文提出了图1a所示的密封圈分层材料模型：密封圈与通道内壁接触的表面部分采用线弹性模型，主体部分采用基于Mooney-Rivlin模型的超弹性模型。根据圣维南原理，载荷的具体分布方式只影响其作用点附近局部区域的应力分布，在距离载荷作用区域约1～2倍特征尺寸以外，应力分布相同。对于本研究的密封圈越孔接触问题，取接触半宽为特征距离。弹性材料和超弹性材料的界限为过孔时接触半宽的两倍处，以密封圈为中心，界限的半径为密封圈外径的95%。

线弹性材料和超弹性材料的交界采用网格共节点方法处理，材料界面完全绑定，无相对分离和滑移，节点应力/位移连续，计算效率高，结果稳

定。对于网格共节点方法，在界面处获得连续、高质量的网格至关重要，故采用图1所示的结构化网格划分技术来生成节点对齐的网格。

基于唯象理论，超弹性橡胶材料的本构关系可用应变能密度函数表示为[15-16]

$$W=W(I_1,I_2,I_3) \tag{1}$$

$$\left.\begin{aligned} I_1&=\lambda_1^2+\lambda_2^2+\lambda_3^2\\ I_2&=\lambda_1^2\lambda_2^2+\lambda_2^2\lambda_3^2+\lambda_1^2\lambda_3^2\\ I_3&=\lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2=1\\ \lambda_i&=1+\gamma_i \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中：I_1、I_2、I_3分别为第一、第二和第三Green不变量；λ_1、λ_2、λ_3为主伸长比；γ_i为主轴方向应变[17-19]。

Mooney-Rivlin模型是经典的应变能密度形式[16-20]，在描述橡胶小应变和中等应变时具有较高的精度[19,21-22]。常见的橡胶材料应变能密度形式还有Ogden、Neo-Hookean和Yeoh等模型。本文选择Mooney-Rivlin模型作为密封圈分层材料模型中超弹性模型的应变能密度形式，具体形式为[20]

$$W=\sum_{i+j=1}^{N}a_{ij}(I_1-3)^i(I_2-3)^j+\sum_{k=1}^{N}\frac{1}{d_k}(I_3-3)^2 \tag{3}$$

式中：a_{ij}为Mooney-Rivlin材料常数；d_k为材料常数(体现体积不可压缩性)。

假设密封圈蠕变不引起体积的变化，$I_3=1$，可获得Mooney-Rivlin模型的二阶三项展开式：

$$W=C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3) \tag{4}$$

Mooney-Rivlin系数C_{10}和C_{01}直接决定了橡胶密封圈的力学行为，一般通过橡胶试样的单轴拉伸实验获得。本文采用丁腈橡胶、氟橡胶、硅橡胶、三元乙丙橡胶等航天常用密封胶料作为研究对象。上述材料的Mooney-Rivlin模型参数见表1[6,22-28]。

表1 四种橡胶材料Mooney-Rivlin模型参数

Tab.1 Rubber material parameters of Mooney-Rivlin model

密封圈材料	C_{10}/MPa	C_{01}/MPa	弹性模量/MPa	参考文献
丁腈橡胶(NBR)	1.87	0.47	13	[23-25]
三元乙丙橡胶(EPDM)	1.279	0.0543	8	[6,26-28]
氟橡胶(FKM)	1.206	0.294	9	[26-28]
硅橡胶(SR)	0.6976	−0.1416	2	[22]

本文分层橡胶模型既能够较为真实地反映橡胶的压缩变形力学行为，又能满足自适应网格磨损过程的求解，为研究橡胶密封圈越孔磨损特性提供了途径。

1.2 Archard磨损模型

ARCHARD[29]提出了黏着磨损理论，并根据摩擦模型推得了Archard磨损模型。在Archard磨损模型中，应力是影响磨损量的重要因素，磨损表面去除的材料和在表面滑动的颗粒所做的摩擦功成正比：

$$Q=kF_n d_t \tag{5}$$

其中，Q为磨损去除的材料体积，d_t为表面切向移动距离，F_n为接触面法向压力，k为磨损常数，定义为

$$k=K/H \tag{6}$$

其中，K为摩擦接触面的磨损因子，H为表面硬度。k值的确定主要根据滑动摩擦副的两基体材料的组成、基体摩擦表面的表面粗糙度以及摩擦条件、润滑措施等。在空气介质中，具有良好润滑的金属表面，k取10^{-8}～10^{-7}；润滑不良的表面，k取10^{-4}～10^{-5}；洁净的表面，k取10^{-3}～10^{-4}[7]。根据式(5)、式(6)，磨损深度为

$$h=Q/A=kpd_t \tag{7}$$

对式(7)两边取微分，可得极小的时间增量步下坐标$x(t)$处的节点磨损深度dh的离散形式：

$$\mathrm{d}h=kp(x,t)\mathrm{d}s \tag{8}$$

为提高计算效率，使用增量跳跃技术，假设磨损量在少量增量步中保持恒定，通过磨损增量乘以跳跃因数ΔN来模拟ΔN个增量步下的磨损量。由上可得，增量步$j+1$的节点i沿着摩擦表面法向的坐标为

$$y_{i,j+1}=y_{i,j}-h_{i,j} \tag{9}$$

Umeshmotion子程序是ABAQUS软件中定义节点位移的有力工具，通常应用于材料磨损的模拟。将当前增量步的相对滑移量和接触应力等参数传递到Umeshmotion子程序后，通过Archard模型计算节点磨损量和磨损方向，可得到去除磨损量后的节点坐标，最后通过ALE网格自适应算法实现磨损后的网格更新和计算量更新。值得注意的是，要在边缘节点处进行全局坐标系向磨损节点局部坐标系的转换。

1.3 循环加载运动模型

本研究的密封圈往复运动由步进电机驱动，其离散脉冲控制机制与连续伺服电机的机制不同，步进电机驱动减速过程仅需要2～3个脉冲即可完成，对应位移占比通常低于总行程的1%。因步距角小、响应快、减速时间极短，且加速度变化平缓，在短行程(本文为25 mm)、低频率(本文为0.5 Hz)工况下，减速引起的惯性力波动幅值较弱，故本模型聚焦匀速过孔和通道内运动引起的受力变化。如图1d所示，密封圈在第1 s即STEP 1完成状态设置，在1～2 s运动至左限位，

此后按照以下运动方程进行循环运动：

$$\left.\begin{aligned} v&=2(U_2-U_1)/n\\ t'&=\mathrm{mod}(t,n)\\ U&=\begin{cases} vt'+U & t'\leqslant n/2\\ v(n-t')+U_1 & t'>n/2\end{cases}\end{aligned}\right\} \tag{10}$$

式中：U_1为密封圈正行程最大值；U_2为负行程最大值；n为循环往复运动周期；v为运动速度；U为密封圈支撑轴套实时位移。

通过Udisp子程序将实时位移变量赋予密封圈支撑轴套带动密封圈，即可实现密封圈的往复运动。

1.4　过孔形状优化

应力是影响磨损量的重要因素，应尽量减小越孔时密封圈应力集中和避免受到过大的剪切力。一般情况下在孔的两边加工有倒角，但密封圈往复循环多次运动后依旧容易在倒角处被挤出[8]，因此，在密封圈过孔处选用图1所示的喇叭状过渡结构。

1.5　密封圈过盈装配方法

在正式分析步之前，需要将密封圈预紧装配至支撑轴套和通道中。如图2所示，本研究首先通过自动收缩式装配(automatic shrink fit)将具有一定过盈量的密封圈安装到支撑轴套上，然后借助喇叭形的工装结构，将密封圈压入运动通道中。上述过程较为真实地再现了实际的密封圈装配过程。自动收缩配合方式也可以解决常规位移

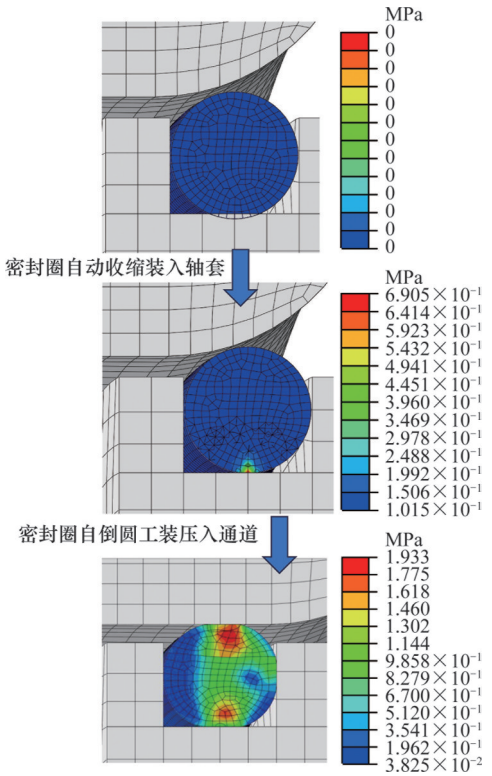


图2　密封圈装配过程

Fig.2　Sealing ring interference fit process

加载方法引起的接触压力计算不准确的问题[30]。

2　结果与分析

2.1　密封圈越孔行为的受力特征

密封圈往复运动过程中的磨损量受应力的影响大。首先对密封圈越孔过程的受力展开分析。

2.1.1　入孔过程和通道运动过程

图3所示为硅橡胶、丁腈橡胶、氟橡胶和三元乙丙橡胶四种密封圈入孔过程和通道运动过程的von Mises应力分布云图。von Mises应力反映了界面上各主应力差值的大小，von Mises应力越大，越会加速橡胶材料的松弛，造成刚度下降、出现裂纹[31]。

丁腈橡胶的弹性模量大，在相同过盈量下，丁腈橡胶密封圈安装到轴套后的应力集中幅值最大，氟橡胶、三元乙丙橡胶次之，硅橡胶最小。丁腈橡胶密封圈入孔时受到的挤压应力水平也最大，为其他3种密封圈的3～4倍。

在入孔时，应力集中出现在密封圈外圈侧面与孔内壁接触区域附近、密封圈与支撑轴套侧壁接触区域以及密封圈内圈。在完全进入通道后，丁腈橡胶、硅橡胶密封圈的应力集中区域不变，而氟橡胶和三元乙丙橡胶密封圈内圈与轴套接触处的应力增大，外圈与运动内壁接触处的应力集中程度减小。该现象的原因是氟橡胶和三元乙丙橡胶密封圈在入孔时顶端受到挤压发生镦粗变形，导致密封圈内圈的预紧增加。

2.1.2　出孔过程

图4所示为四种密封圈出孔过程的应力特征：随着密封圈向前运动出孔，外圈应力集中区域逐渐向后转移。完全出孔后，丁腈橡胶、硅橡胶密封圈外圈显示出明显的残余应力，氟橡胶和硅橡胶密封圈外圈的残余应力则不明显。

2.1.3　应力特征

由上述分析可知：在入孔过程及通道运动过程中，丁腈橡胶密封圈的等效应力最大；丁腈橡胶和硅橡胶密封圈的外圈更容易受入孔运动的影响而产生应力集中，继而发生磨损；氟橡胶和三元乙丙橡胶受到挤压后镦粗变形大，与通道内壁的接触面积更大，应力集中程度更轻微，但镦粗后增大了内圈应力集中。

丁腈橡胶、硅橡胶密封圈外圈顶部的应力集中在松弛后出现了残余应力；相比丁腈橡胶和硅橡胶，氟橡胶、三元乙丙橡胶密封圈外圈在运动过程中的应力集中程度较小，松弛后的残余应力水平低；在入孔、出孔运动时，外圈与通道接触的应

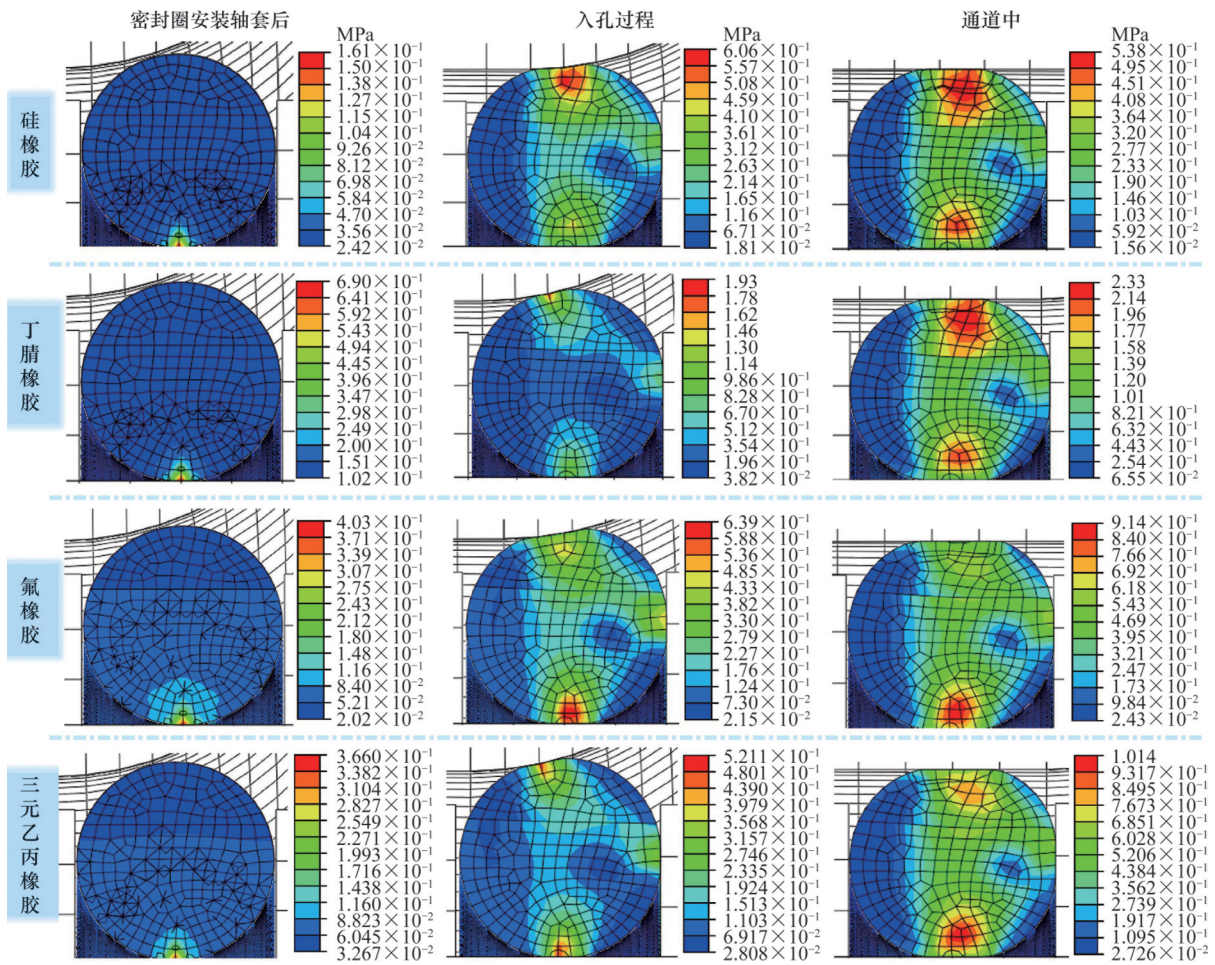


图3 不同材料密封圈入孔及通道运动过程的力学响应

Fig.3 Mechanical response of different material sealing rings during entering hole and channel movement

力集中区域随位移的变化出现周期性变化特征。

2.2 密封圈循环越孔行为的磨损特性

2.2.1 磨损后的形貌特征

如图5所示，模型计算结果显示，四种密封圈磨损后的松弛形貌特征主要分为两种：一是丁腈橡胶和硅橡胶密封圈为代表的外圈顶部磨损加横向挤压收缩特征，二是以三元乙丙橡胶和氟橡胶密封圈为代表的单纯外圈材料去除特征。

两种磨损形貌特征由材料本身的形变回复能力、应力特征共同决定。结合2.1节的应力分析可知，丁腈橡胶和硅橡胶密封圈在越孔运动时，受到的支撑轴套结构侧壁挤压力、通道内壁摩擦阻力以及连接孔结构的挤压力较大，故密封圈更容易发生横向收缩，纵向伸长的形变，再加上材料回复性能相对较差，松弛后还出现了永久变形特征。

2.2.2 磨损量化特征

图6所示为三元乙丙橡胶、氟橡胶密封圈的循环越孔运动磨损量变化情况（磨损量正负代表节点局部坐标系磨损方向）。总体上看，三元乙丙橡胶的磨损量略大于氟橡胶的磨损量，这与受力分析结果一致。三元乙丙橡胶密封圈的有效密封状态持续时间长，越孔次数远大于氟橡胶。密封圈在循环越孔运动时，磨损量和应力变化呈现一致的周期性表现：密封圈外圈上节点的磨损量主要随通道内的运动位移变化，密封圈外圈两侧节点的磨损量变化主要与入孔、出孔运动有关。随着往复运动次数的增加，外圈两侧的磨损量持续增大并远超过外圈的磨损量。这说明，随着越孔次数的增加，密封圈在入孔、出孔时造成的磨损量占据主导地位。

如图6的局部放大图所示，在循环运动初期，外圈两侧节点的磨损量最大，后续随之减小。由图3可知，密封圈在初期的通道运动中会有轻微倾斜，这导致了外圈两侧的区域成为最大受力区域，继而造成了较大的磨损量。随着往复运动增加，磨损量增加，密封圈过盈量减小，这种轻微的倾斜及相应的磨损效应逐渐减弱。

如图7所示（磨损量正负代表节点局部坐标系磨损方向），丁腈橡胶密封圈在越孔时造成的外圈磨损量最大，其磨损量变化情况与硅橡胶密封圈的磨损量变化情况较为相似：两者的磨损次数

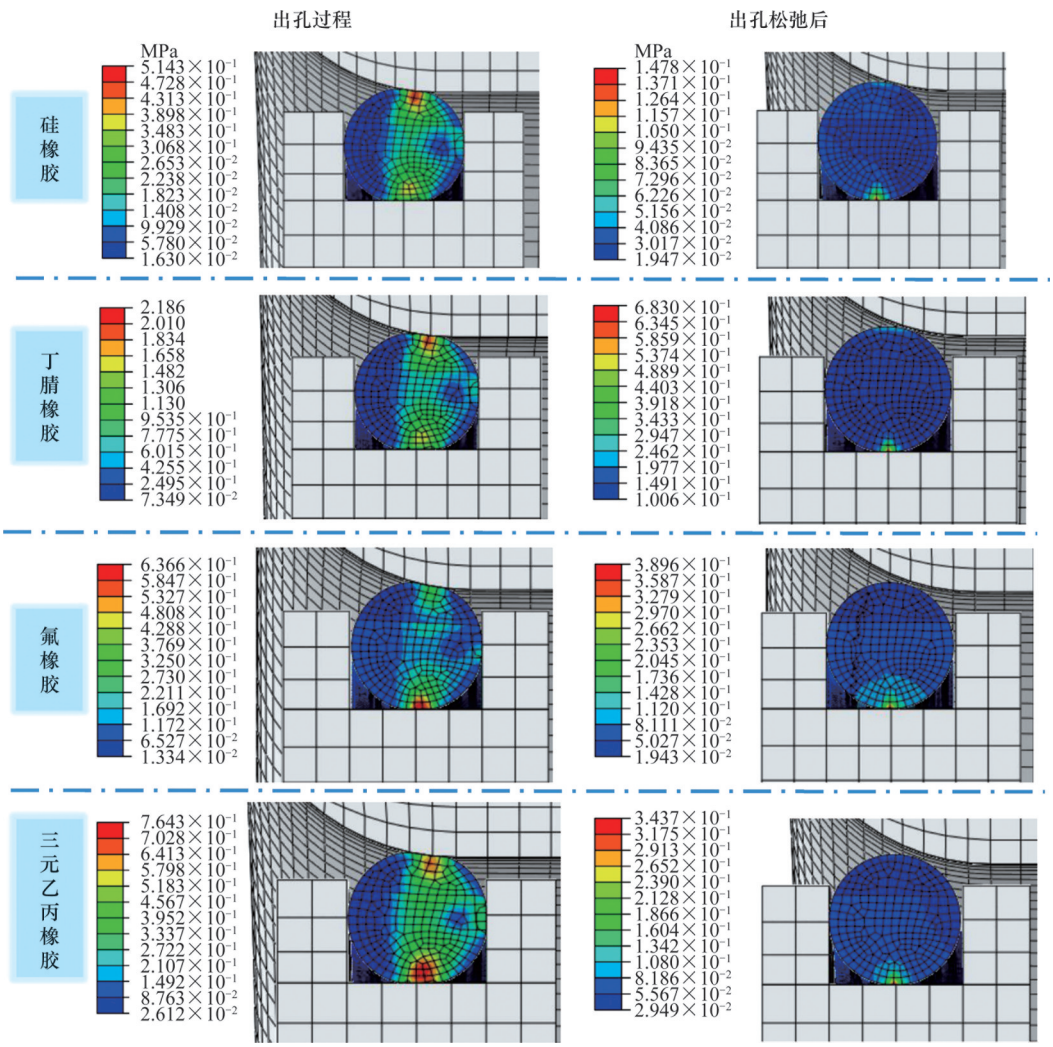


图 4　不同材料密封圈出孔过程的应力特征

Fig.4　Mechanical response of different material sealing rings during outering hole process

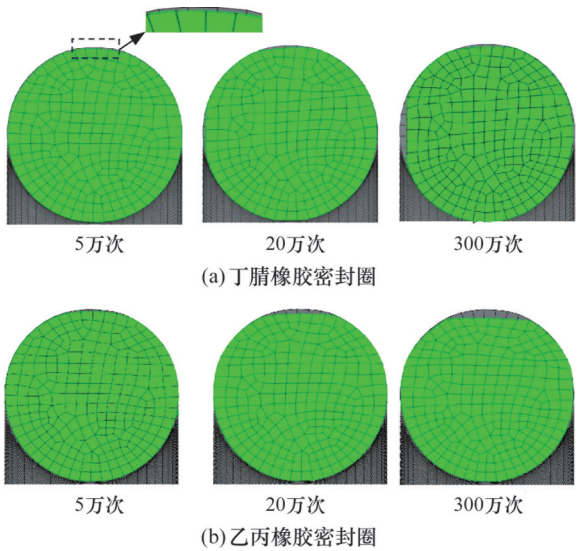


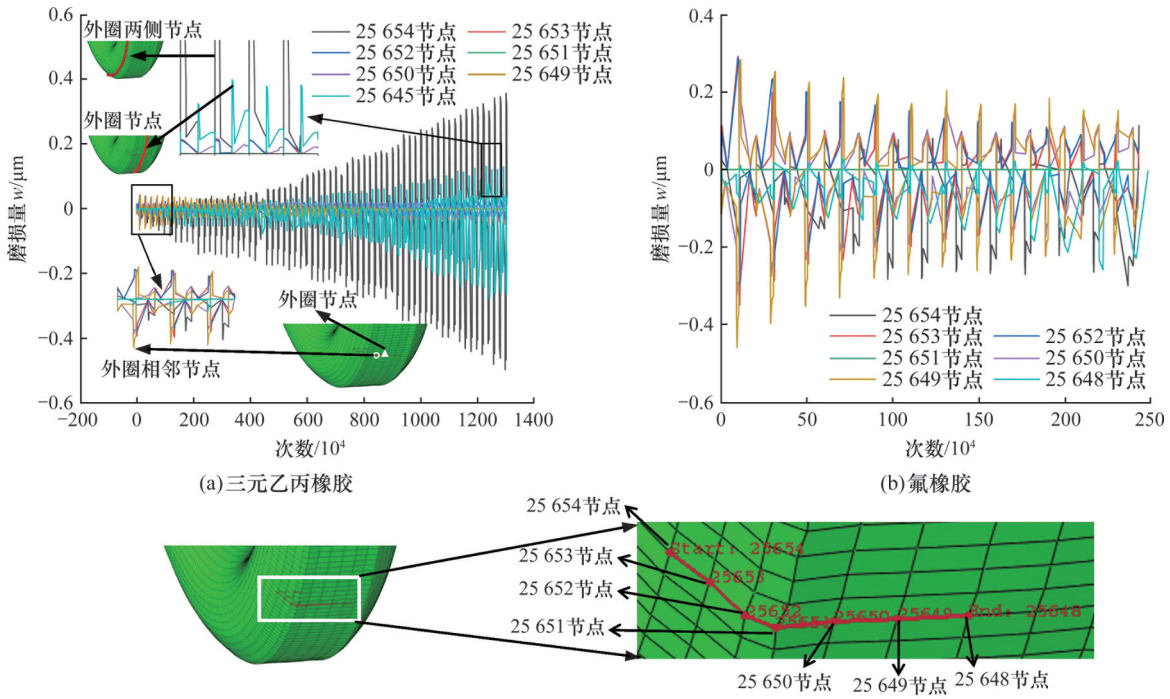
图 5　丁腈橡胶密封圈和三元乙丙橡胶密封圈磨损后松弛形貌特征对比

Fig.5　Morphology characteristics of NBR and EPDM sealing ring in relaxation state after Abrasion

基本一致，且到后期磨损量显著增大。由第 3 节的失效模式研究发现，后期磨损量的显著增加是因为密封圈畸变过大。这两种橡胶密封圈的磨损量变化规律不同点：丁腈橡胶密封圈外圈的磨损量较大，硅橡胶密封圈外圈两侧的磨损量较大。丁腈橡胶密封圈受到孔边缘的挤压而形成了较为显著的轴向收窄、径向伸长的形变，导致外圈对运动通道内壁接触方向的正应力水平较高，摩擦阻力增大，外圈及两侧的磨损随着越孔次数的增加而持续增加。硅橡胶密封圈磨损量幅值位于外圈两侧位置，这是过孔时容易产生应力集中的位置。综上可知，优化孔的结构有助于减小硅橡胶密封圈的最大磨损量；丁腈橡胶密封圈的磨损主要产生自通道运动，优化过盈量、通道运动距离、润滑条件等因素有利于减小其最大磨损量。

3　越孔密封圈失效模式

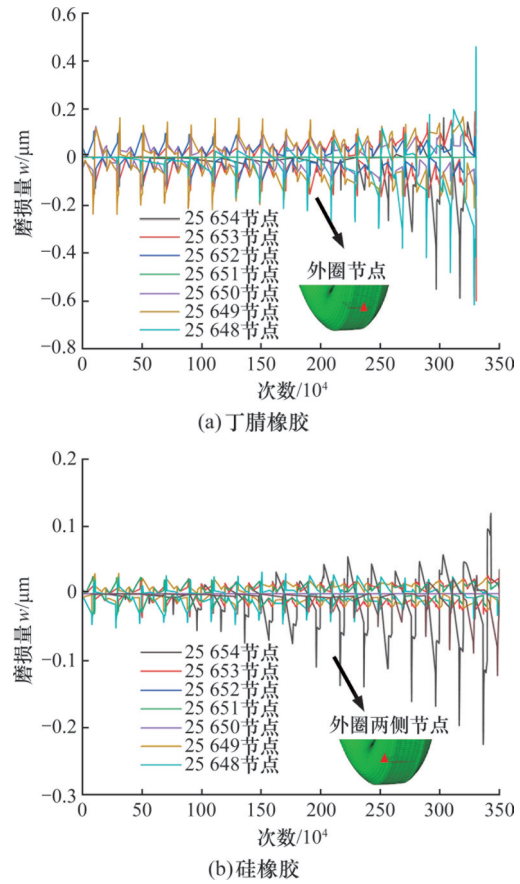
密封的必要条件是最大接触应力大于或等于工作介质压力。接触应力反映了橡胶圈的密封性。丁腈橡胶、硅橡胶、氟橡胶、三元乙丙橡胶四



(a)三元乙丙橡胶　(b)氟橡胶　(c)丁腈橡胶圈磨损后三维形貌

图6　三元乙丙橡胶和氟橡胶密封圈越孔实时磨损量化情况

Fig.6　Quantitative characteristics of real-time wear loss in EPDM and FKM hole-traversing sealing ring



(a)丁腈橡胶　(b)硅橡胶

图7　丁腈橡胶和硅橡胶密封圈越孔实时磨损量化情况

Fig. 7　Quantitative characteristics of real-time wear loss in NBR and SR hole-traversing sealing ring

种密封圈装配后的初始接触应力幅值分别为3.6、0.83、1.5、1.6 MPa。在过盈量相同的条件下，四种密封圈均可以实现0.8 MPa以下的气体密封。丁腈橡胶密封圈的密封性显著超过其余3种密封圈。氟橡胶和三元乙丙橡胶密封圈内圈与支撑轴套的接触应力大于外圈与通道的接触应力，丁腈橡胶和硅橡胶则相反，这也与2.1节受力分析结果一致。

本文进一步研究接触应力随着越孔次数的变化规律，并结合第2节的受力特征、磨损特征分析发现了两种失效模式：以氟橡胶、硅橡胶为代表的越孔运动磨损后接触失效模式，以硅橡胶、丁腈橡胶为代表的越孔运动变形后剪切失效模式。

3.1　越孔运动磨损后的接触失效模式

三元乙丙橡胶和氟橡胶密封圈越孔磨损后的形貌特征为显著的外圈磨损。越孔运动磨损后接触失效模式的主要表现为：随着磨损量的增大，外圈过盈量不足或内圈预紧力不足，导致密封圈外圈或内圈的接触应力减小、不连续，造成外圈密封或内圈密封失效。

三元乙丙橡胶密封圈磨损前后的接触应力如图8a、图8b所示。磨损后，外圈与通道之间的接触应力显著减小，接触区域扩大，外圈发生下凹形变；内圈与支撑轴套之间的接触应力有所减小，密封面积也有所减小。外圈、内圈节点的接触应力变化趋势如图8c所示：外圈、内圈的接触应力减小了0.5～0.6 MPa，外圈接触应力减至0.25 MPa（介质压力）以下后导致密封失效。

氟橡胶密封圈的失效模式和三元乙丙橡胶密封圈一致，磨损后的形貌特征也与三元乙丙橡胶的相似；不同的是，随着磨损次数的增加，氟橡胶密封圈的内圈密封最先实现失效，内圈接触应力无法稳定维持在0.25 MPa，并呈现周期性波动特征。

如图8d所示，接触应力随越孔次数（磨损次数）的变化呈现非线性减小特征，先迅速减小，然后缓慢减小。在本失效模式中，接触应力变化主要与越孔运动磨损相关，越孔磨损量化特征显示出的明显周期性规律，也预示着接触应力随越孔次数的变化具有可预测性。进一步，建立了接触应力和越孔次数的数学模型：

$$y=\exp(a+bx+cx^2) \tag{11}$$

其中，y代表接触应力，x代表磨损次数，a、b和c为特征系数。对于以三元乙丙密封圈外圈接触应力，$a=-0.229\,17$，$b=-1.854\,13^{-5}$，$c=7.499\,43^{-11}$。该模型的简化卡方值为0.00 154，相关系数R^2为0.931 38，说明模型与数据的相关性高。

综上可知，接触应力随越孔次数的变化具有较为准确的量化模型。在越孔运动引起的外圈磨损失效模式下，可通过式(11)对装置密封可靠性和寿命进行预测。

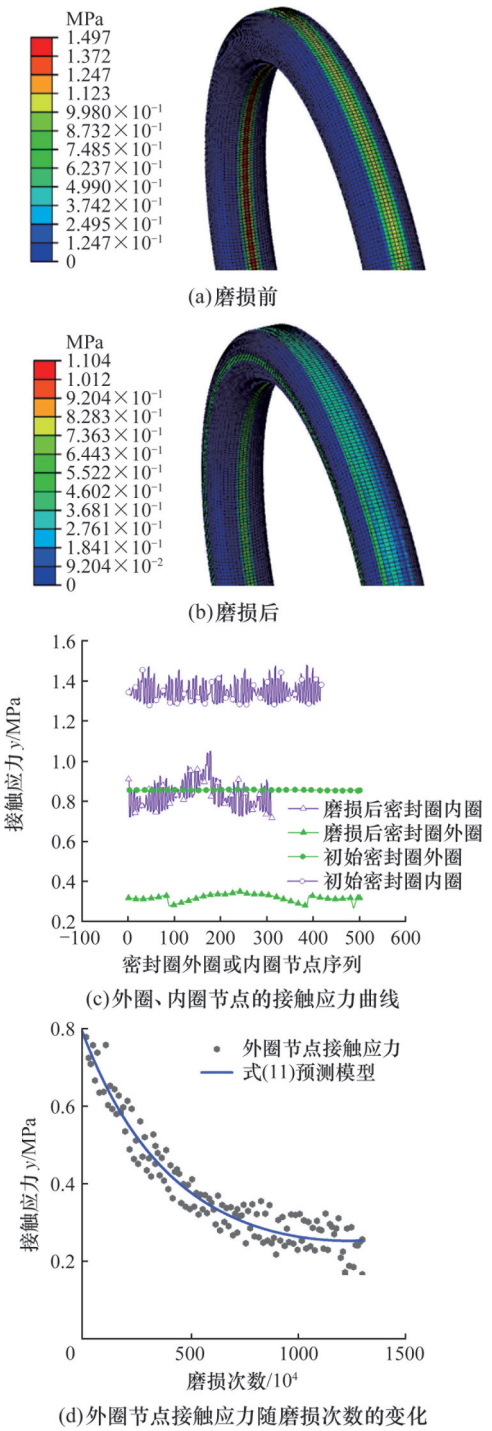


图8　三元乙丙橡胶密封圈磨损后接触应力特征

Fig.8　Characteristics of contact stress of EPDM rubber sealing ring after wearing

3.2　越孔运动变形后的剪切失效模式

如图9所示，丁腈橡胶密封圈在通道运动中发生剪切失效，密封圈外圈从通道内壁和支撑轴套之间的缝隙中挤出。由2.2节可知：丁腈橡胶、硅橡胶密封圈在反复越孔的过程中，除了外圈接触面不断磨损外，同时也受到较大的支撑结构、孔结构挤压力以及摩擦阻力。上述作用力不断变化，密封圈不断发生局部挤压、松弛等变形行为，并随着回复能力的下降，产生了轴向收缩、径向伸长的永久变形。

永久变形后的密封圈外圈顶部曲率变小、与运动通道内壁的接触面积增大，滑动摩擦力相应增大。由图9还可知，密封圈在支撑轴套结构侧壁的受力点明显上移，这导致支撑结构侧壁对密封圈的挤压力与通道运动中的摩擦阻力、孔结构的反挤压力构成了两对剪切力。随越孔次数的增加，支撑侧壁对密封圈的挤压力与通道运动中的摩擦力之间构成的剪切力增大，导致丁腈橡胶密封圈在通道运动中发生挤出，密封失效。

与丁腈橡胶密封圈不同，硅橡胶密封圈在通道运动中未发生挤出。如图10所示，大规模越孔运动循环后，硅橡胶密封圈也发生了轴向收缩、径向拉长的永久变形，并且与支撑结构侧壁的接触几乎变成平面接触。在过孔时，密封圈受到孔结构挤压产生了显著的应力集中，在支撑结构侧壁边缘的挤压力的共同作用下，密封圈向孔外间隙挤出，导致密封圈失效。

越孔运动变形后剪切失效模式可归结为：越孔运动引起密封圈永久形变，进而摩擦阻力增大；与密封圈支撑轴套的挤压应力集中增大并上移，在通道内壁的摩擦阻力或孔结构的挤压力的共同作用下发生剪切失效。

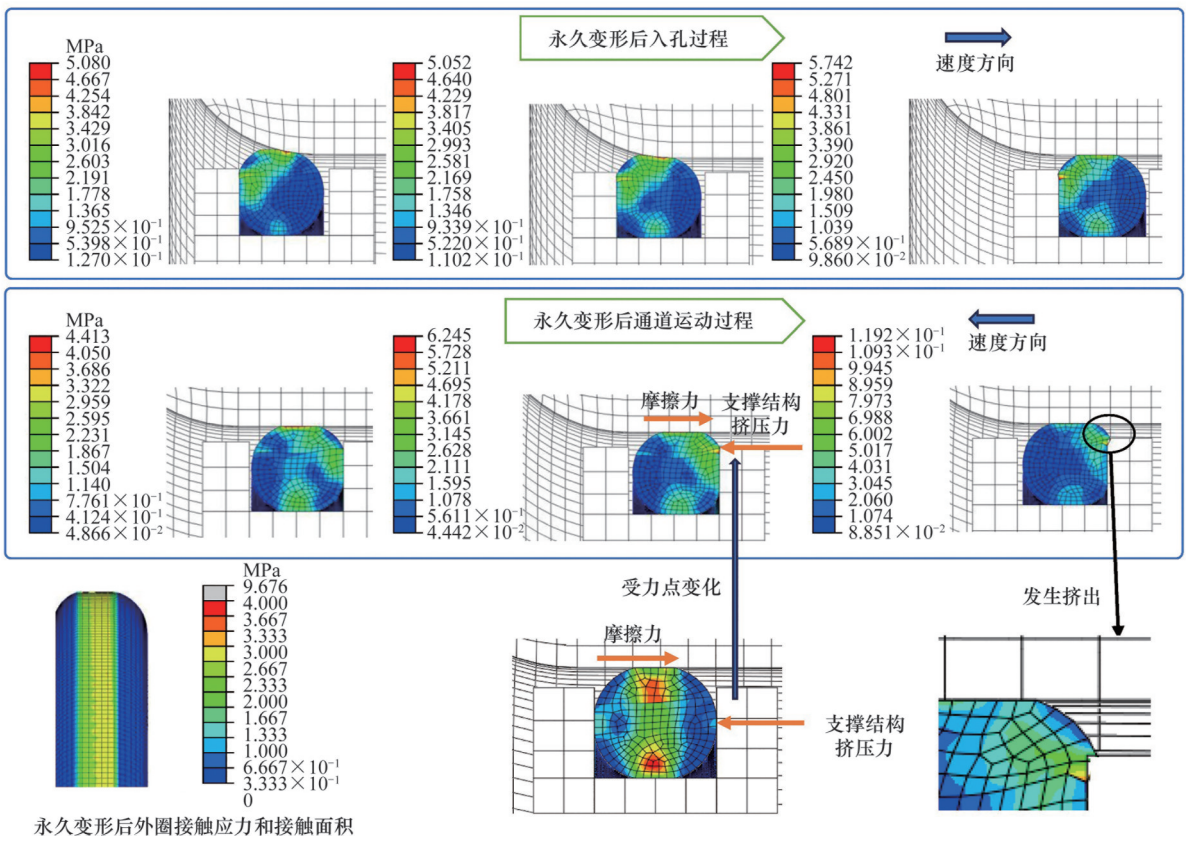


图9 丁腈橡胶密封圈在通道运动中剪切失效

Fig. 9 NBR sealing ring shear failure during tube motion

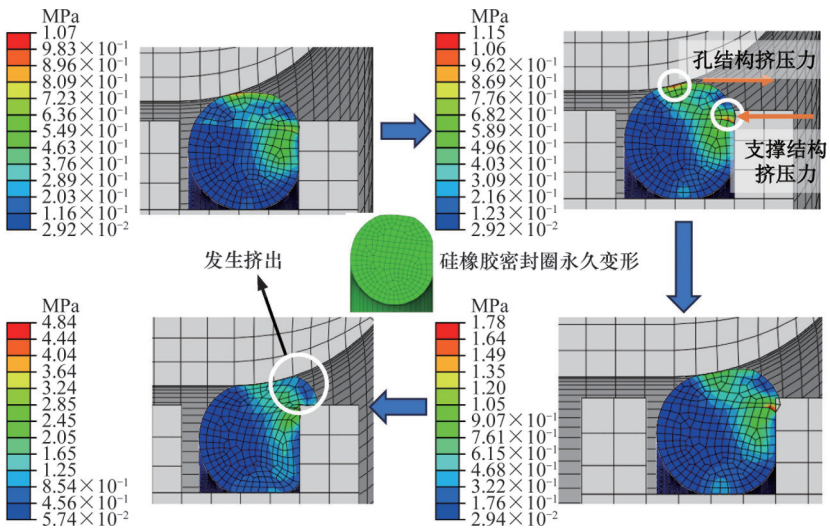


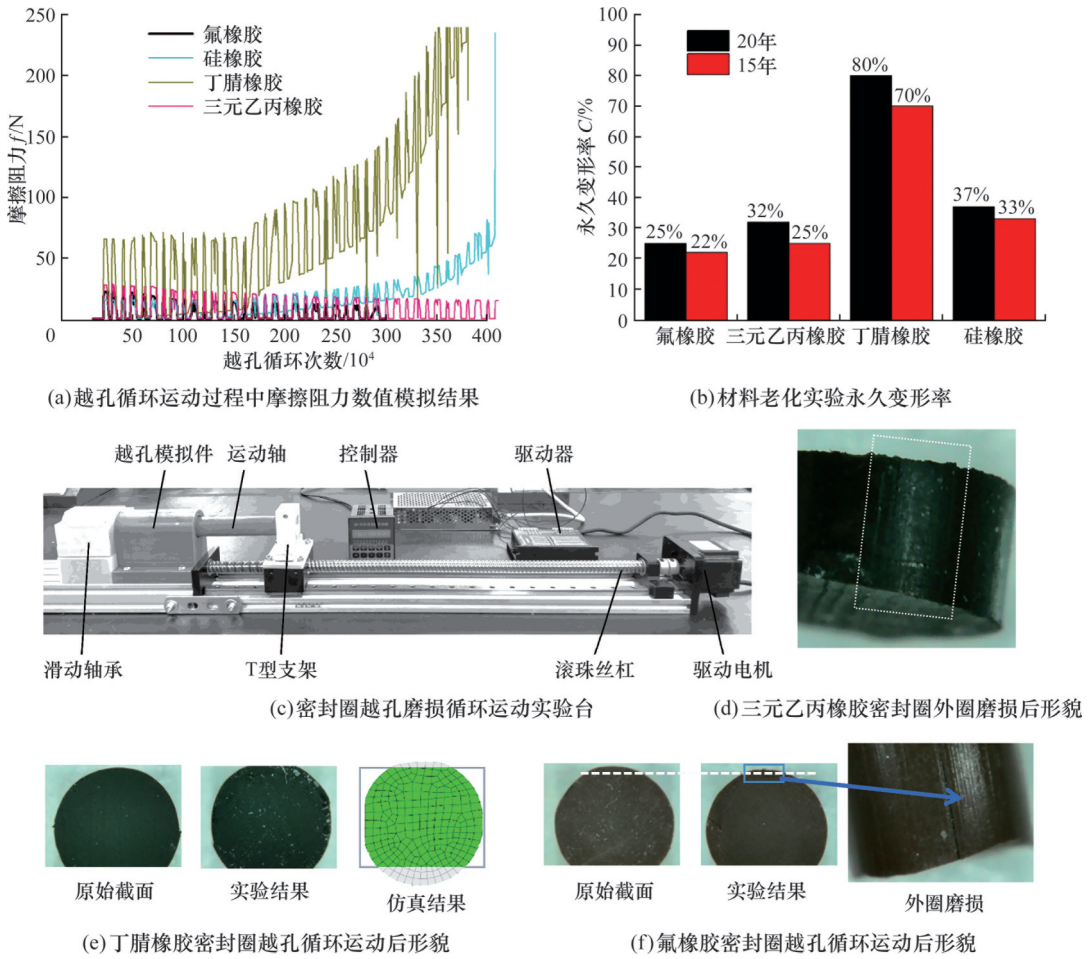
图10 硅橡胶密封圈在入孔时剪切失效

Fig.10 Silicone rubber sealing ring shear failure when entering the hole

3.3 失效机理和优化策略

图11a所示为密封圈循环越孔运动过程中摩擦阻力的变化情况：丁腈橡胶、硅橡胶密封圈所受滑动摩擦阻力呈明显的增长趋势；而氟橡胶、三元乙丙橡胶密封圈滑动摩擦阻力呈明显的减小趋势。图11b所示为四种密封圈材料的热老化加速实验结果。丁腈橡胶和硅橡胶的永久变形率显著高于另外两种材料密封圈的永久变形率，这说明丁腈橡胶和硅橡胶的变形回复能力比三元乙丙橡胶和氟橡胶差。摩擦力和变形能力的分析结果进一步揭示了两种失效模式的机理。

本文通过图11c所示实验装置对密封圈的越孔磨损行为进行了测试，实验结果与上文模型仿真结果的一致性较好。如图11d、图11f所示，三元乙丙橡胶、氟橡胶密封圈越孔磨损后表现出外圈单纯的磨损，永久变形量小，三元乙丙橡胶密封圈的磨损量小于氟橡胶密封圈的磨损量。如图11e所示，丁腈橡胶密封圈在越孔循环运动后发



(a)越孔循环运动过程中摩擦阻力数值模拟结果　(b)材料老化实验永久变形率

(c)密封圈越孔磨损循环运动实验台　(d)三元乙丙橡胶密封圈外圈磨损后形貌

(e)丁腈橡胶密封圈越孔循环运动后形貌　(f)氟橡胶密封圈越孔循环运动后形貌

图 11　密封圈往复越孔运动时滑动摩擦阻力、永久变形率、实验设置和相关结果

Fig.11　Sliding friction resistance, permanent deformation rate, experiment setup, and results of sealing rings during reciprocating cross-hole movement

生了轴向压缩、径向拉长的永久变形，与仿真结果的形貌特征一致。上述实验进一步证明了本文模型的正确性以及两种失效模式的存在。

越孔运动磨损后接触失效模式机理为：随着越孔循环运动次数的增加，密封圈外圈的磨损量增大，接触应力减小，密封失效。三元乙丙橡胶、硅橡胶密封圈的永久形变小，密封圈外圈的过盈量随着顶部磨损的减小，摩擦阻力也相应减小，失效是因为单纯的顶部磨损导致过盈量小于密封要求。

越孔运动变形后剪切失效模式则由密封圈的变形及产生受力变化引起，其机理为：随着越孔循环次数的增加，丁腈橡胶、硅橡胶密封圈运动轴向压缩、径向伸长的变形增大，且变形回复能力下降，由此在通道运动时受到的摩擦阻力和入孔时受到挤压力增大，且与支撑轴套侧壁接触产生的应力集中区域上移，剪切效应增强，导致密封圈在通道运动中挤出失效或入孔过程中挤出失效。

针对密封圈循环越孔的失效模式，提出了相应的优化策略，如图 12 所示。从整体角度来看，密封性和磨损可靠性具有一定的矛盾，选取弹性较大、过盈量较大的密封圈势必导致磨损时摩擦阻力、应力集中的增大。因此，应在可靠性指标裕度范围内选择材料弹性和过盈量，以减小漏率。从材料角度，对密封圈材料进行变形回复能力的

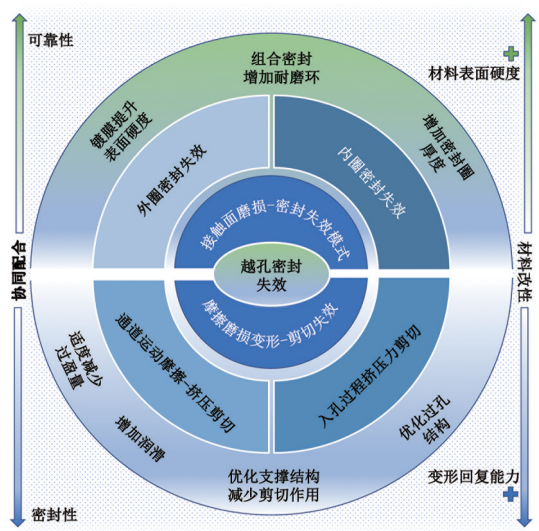


图 12　越孔密封圈可靠性优化路线

Fig.12　Reliability optimization of hole-traversing sealing ring

改性设计、对密封副进行表面镀膜设计，有望实现密封性、可靠性、润滑条件的综合提高。从机械设计角度，应针对磨损量、剪切效应、接触应力等关键特性的敏感性规律，进行相应的运动通道局部结构、密封圈结构形式优化设计。

4 结 论

1)相同过盈量下，丁腈橡胶密封圈的等效应力水平最大；丁腈橡胶和硅橡胶密封圈外圈更容易产生应力集中、残余应力；氟橡胶和三元乙丙橡胶的应力集中程度较小，但内圈底部发生应力集中。

2)丁腈橡胶和硅橡胶密封圈的循环越孔运动导致松弛且出现顶部磨损、轴向收缩和径向伸长，三元乙丙橡胶和氟橡胶密封圈为单纯的顶部磨损形貌。丁腈橡胶密封圈的单次越孔磨损量最大；三元乙丙橡胶密封圈由于密封状态持续保持，寿命远大于其他密封圈。密封圈外圈的局部磨损量呈现多周期性特征。随着循环运动次数的增加，密封圈进出孔时造成的磨损量占据主导地位。

3)密封圈的材料特性决定了失效模式。越孔运动磨损后的接触失效模式具有高度可预测性。越孔运动变形后的剪切失效模式是密封圈永久变形量增大后滑动摩擦阻力和剪切力的显著增长导致的。

4)根据上述结论，应在选择越孔密封圈材料和局部结构时综合考虑失效模式的影响。

参考文献：

[1] REZAEI A, van PAEPEGEM W, de BAETS P, et al. Adaptive Finite Element Simulation of Wear Evolution in Radial Sliding Bearings[J]. Wear, 2012, 296(1/2): 660-671.

[2] 陈杰. H13钢表面磨损行为的数值模拟研究及模具寿命预测[D]. 长春：吉林大学，2015.
CHEN Jie. Numerical Simulation Research on Surface Wear Behavior of H13Steel and Prediction of the Mould Life[D]. Changchun: Jilin University, 2015.

[3] 张方宇. 制动器热-应力-磨损耦合行为研究[D]. 北京：清华大学，2014.
ZHANG Fangyu. Study on Thermal-stress-wear Coupling Behavior of Brake [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.

[4] 肖博升. PEEK及CF/PEEK摩擦磨损性能研究[D]. 大连：大连理工大学，2018.
XIAO Bosheng. Study on Friction and Wear Properties of PEEK and CF/PEEK[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.

[5] 肖博升，王新宇，李征，等. 基于修正Archard模型的聚醚醚酮磨损数值模拟[J]. 工程塑料应用，2017，45(9)：88-92.
XIAO Bosheng, WANG Xinyu, LI Zheng, et al. Numerical Simulation of PEEK Wear Based on Modiifed Archard Model [J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(9): 88-92.

[6] 张传兵. 组合式动密封结构摩擦磨损仿真及试验研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2018.
ZHANG Chuanbing. Simulation and Experimental Study on Friction and Wear of Combined Dynamic Seal Structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.

[7] 朱悦. 基于ANSYS斯特林机的密封材料的摩擦磨损仿真分析[D]. 兰州：兰州理工大学，2018.
ZHU Yue. Friction and Wear Analysis of Sealing Materials Based on ANSYS Stirling Machine[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018.

[8] 黎伟，刘志新，陈曦，等. O形与C形组合密封圈的力学性能对比分析[J]. 应用力学学报，2021，38(1)：306-312.
LI Wei, LIU Zhixin, CHEN Xi, et al. Comparative Analysis on the Mechanical Properties of O-ring and C-ring Built-up Seals[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38(1): 306-312.

[9] 严旭，王洪波，范新中，等. 硅橡胶基防热涂层动态烧蚀行为及机理研究[J]. 宇航学报，2020，41(5)：617-623.
YAN Xu, WANG Hongbo, FAN Xinzhong, et al. Study on Dynamic Ablative Behavior and Mechanism of Silicone Rubber Based Thermal Protective Coating[J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(5): 617-623.

[10] 韩传军，张杰，黄岗，等. 往复密封中星型密封圈的密封性能分析[J]. 润滑与密封，2012，37(9)：28-32.
HAN Chuanjun, ZHANG Jie, HUANG Gang, et al. Seal Performance Analysis of a Star Sealing Ring in Reciprocating Seal[J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(9): 28-32.

[11] 莫丽，王军. O形圈动密封特性的有限元分析[J]. 机械科学与技术，2015，34(3)：386-392.
MO Li, WANG Jun. Finite Element Analysis of the Dynamic Sealing Characteristics for O-ring[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(3): 386-392.

[12] 王国荣，胡刚，何霞，等. 往复密封轴用Y形密封圈密封性能分析[J]. 机械设计与研究，2014，30(6)：37-42.
WANG Guorong, HU Gang, HE Xia, et al. Sealing Performance Analysis of Y-ring Used on Reciprocating Seal Shaft[J]. Machine Design and Research, 2014, 30(6): 37-42.

[13] 周海超，王荣乾，梁晨，等. 考虑温度影响的橡胶摩擦磨损仿真方法研究[J]. 机械工程学报，2025，61(1)：253-264.
ZHOU Haichao, WANG Rongqian, LIANG Chen, et al. Research on Simulation Method of Rubber Friction and Wear Considering Temperature Effect[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(1): 253-264.

[14] 李卓，黄琳，刘彦奎，等. 基于Mooney-Rivlin本构模型的捣固凸轮橡胶弹簧变形分析[J]. 燃料与化工，2022，53(6)：10-14.
LI Zhuo, HUANG Lin, LIU Yankui, et al. Deformation Analysis of Cam Rubber Spring for Stamping Machine Based on M-R Constitutive Model[J]. Fuel & Chemical Processes, 2022, 53(6): 10-14.

[15] 易攀，金永平，彭佑多，等. 不同滑环槽形对组合密封结构性能影响分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版)，2019，34(3)：53-60.
YI Pan, JIN Yongping, PENG Youduo, et al. Analysis of the Influence of Different Slip-ring Grooves on the Performance of Combined Sealing Structure[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(3): 53-60.

[16] MOONEY M. A Theory of Large Elastic Deformation [J]. Journal of Applied Physics, 1940, 11(9): 582-592.

[17] 王伟，邓涛，赵树高. 橡胶Mooney-Rivlin模型中材料常

数的确定[J]. 特种橡胶制品，2004，25(4)：8-10.
WANG Wei，DENG Tao，ZHAO Shugao. Determination for Material Constants of Rubber Mooney-Rivlin Model[J]. Special Purpose Rubber Products，2004，25(4)：8-10.
[18] 刘鹏，宋文杰，蒋庆林，等. 深海高压环境下O形密封圈的密封性能研究[J]. 液压与气动，2017，41(4)：66-70.
LIU Peng，SONG Wenjie，JIANG Qinglin，et al. Sealing Performance of O-ring in Deep Sea High Pressure Environment[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics，2017，41(4)：66-70.
[19] 刘萌，王青春，王国权. 橡胶Mooney-Rivlin模型中材料常数的确定[J]. 橡胶工业，2011，58(4)：241-245.
LIU Meng，WANG Qingchun，WANG Guoquan. Determination of Material Constants for Mooney-Rivlin Rubber Model[J]. China Rubber Industry，2011，58(4)：241-245.
[20] 左正兴，廖日东. 12150柴油机橡胶密封圈的有限元分析[J]. 内燃机工程，1996(2)：46-49.
ZUO Zhengxing，LIAO Ridong. Finite Element Analysis of Rubber Sealing Ring for Model 12150 Diesel Engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering，1996(2)：46-49.
[21] 黄建龙，解广娟，刘正伟. 基于Mooney-Rivlin和Yeoh模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J]. 橡塑技术与装备，2008，34(12)：22-26.
HUANG Jianlong，XIE Guangjuan，LIU Zhengwei. Finite Element Analysis of Super-elastic Rubber Materials Based on the Mooney-Rivlin and Yeoh Model[J]. China Rubber/Plastics Technology & Equipment，2008，34(12)：22-26.
[22] 张琦，时剑文，索双富，等. 基于Mooney-Rivlin模型和Yeoh模型的橡胶材料有限元分析[J]. 合成橡胶工业，2020，43(6)：468-471.
ZHANG Qi，SHI Jianwen，SUO Shuangfu，et al. Finite Element Analysis of Rubber Materials Based on Mooney-Rivlin Models and Yeoh Models[J]. China Synthetic Rubber Industry，2020，43(6)：468-471.
[23] 张教超，王敏庆，李海飞. 齿形滑环式组合密封的有限元分析[J]. 润滑与密封，2011，36(5)：59-62.
ZHANG Jiaochao，WANG Minqing，LI Haifei. The Finite Element Analysis of Tooth and Sliding Ring Combined Seal[J]. Lubrication Engineering，2011，36(5)：59-62.
[24] 陈国定，HAISER H，HAAS W，等. O形密封圈的有限元力学分析[J]. 机械科学与技术，2000，19(5)：740-741.
CHEN Guoding，HAISER H，HAAS W，et al. Analysis of Elastomeric O-ring Seals Using the Finite Element Method[J]. Mechanical Science and Technology，2000，19(5)：740-741.
[25] YU Jiuyang，GAO Jiuyang，LIN Wei，et al. Experimental Study and Finite Element Analysis of the Performance of Reciprocating Seal in Rapping Device of Gasifier[J]. Applied Mechanics and Materials，2010，42：48-53.
[26] 张心怡，贾均红，高飒飒，等. O型橡胶密封圈动密封应力分布数值模拟研究[J]. 机械科学与技术，2023，42(10)：1745-1752.
ZHANG Xinyi，JIA Junhong，GAO Sasa，et al. Numerical Simulation Study on Dynamic Sealing Stress Distribution of Rubber O-ring Seal[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering，2023，42(10)：1745-1752.
[27] 马桂勇，姜大志. Mooney-Rivlin模型在硅橡胶应力锥受力分析中的应用[J]. 胶体与聚合物，2013，31(4)：177-179.
MA Guiyong，JIANG Dazhi. Stress Analysis of Stress-cone in Cable Terminal by Mooney-Rivlin Model[J]. Chinese Journal of Colloid & Polymer，2013，31(4)：177-179.
[28] 韩斌慧. 基于Mooney-Rivlin模型的橡胶材料常数实测及应用研究[J]. 橡胶工业，2018，65(5)：499-503.
HAN Binhui. Measurement and Application of Rubber Material Constant Based on Mooney-Rivlin Model[J]. China Rubber Industry，2018，65(5)：499-503.
[29] ARCHARD J F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces[J]. Journal of Applied Physics，1953，24(8)：981-988.
[30] 张晓东，杨林，张毅，等. 基于流体压力渗透法的齿形滑环组合密封有限元分析[J]. 润滑与密封，2019，44(12)：12-17.
ZHANG Xiaodong，YANG Lin，ZHANG Yi，et al. Finite Element Analysis of Tooth-shape Combined Seal Ring Based on Fluid Pressure Penetration[J]. Lubrication Engineering，2019，44(12)：12-17.
[31] 杨春明，谢禹钧. 基于Ansys的橡胶O形密封圈的密封性能有限元分析[J]. 弹性体，2010，20(3)：49-52.
YANG Chunming，XIE Yujun. Ansys Analysis of the Sealing Performance of Rubber O-sealing Ring[J]. China Elastomerics，2010，20(3)：49-52.

（编辑　陈　勇）

作者简介：房泽臣*（通信作者），男，1993年生，助理研究员、博士。研究方向为航天器密封系统设计与制造等。E-mail：fangzechen@njust.edu.cn。

本文引用格式：

房泽臣，刘向阳，陈汉雷，等. 密封圈越孔磨损特性和失效模式研究[J]. 中国机械工程，2026，37(9)：2278-2289.

FANG Zechen，LIU Xiangyang，CHEN Hanlei，et al. Wear Characteristics and Failure Modes for Hole-traversing Sealing Rubber Rings[J]. China Mechanical Engineering，2026，37(9)：2278-2289.

（上接第2277页）

[17] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京：机械工业出版社，2017.
FEI Yetai，et al. Error Theory and Data Processing[M]. Beijing：China Machine Press，2017.

（编辑　王艳丽）

作者简介：严定伟，男，2001年生，硕士研究生。研究方向为复杂精密运动系统装配误差与精度分析。E-mail：23010301020@mail.hnust.edu.cn。**唐　皓***（通信作者），男，1988年生，教授、博士研究生导师。研究方向为复杂精密运动系统误差与精度分析等。E-mail：tanghaocsu@csu.edu.cn。

本文引用格式：

严定伟，唐皓，郑煜，等. 微行程尺度下精密线性平台装配误差解耦与定位精度优化研究[J]. 中国机械工程，2026，37(9)：2268-2277.

YAN Dingwei，TANG Hao，ZHENG Yu，et al. Research on Decoupling of Assembly Errors and Optimization of Positioning Accuracy for Precision Linear Platforms at Micro-scale[J]. China Mechanical Engineering，2026，37(9)：2268-2277.