

井口管汇旋转接头密封性能评价及优化

张冠天

长江大学机械工程学院, 湖北 荆州

收稿日期: 2026年9月29日; 录用日期: 2026年10月22日; 发布日期: 2026年10月29日

摘要

针对井下开采中井口管汇旋转接头密封性能不足的问题, 本研究以超弹性材料(氟橡胶O型密封圈)为研究对象, 通过理论分析与非线性有限元仿真, 系统评价了密封结构的性能并提出了优化设计策略。研究发现, 初始结构下O型密封圈最大接触应力仅为3.339~3.957 MPa, 远低于21 MPa的密封要求。温度升高虽对接触应力有正向促进作用(增幅 < 11%), 但不足以解决密封失效问题。通过优化密封槽几何参数(槽顶距离由7.5 mm压缩至6.63 mm, 槽宽由3.2 mm压缩至2.87 mm, O型圈截面直径由2.65 mm增大至3.55 mm), 峰值接触应力提升至28.4 MPa, 满足21 MPa密封要求, 且密封面有效接触宽度大于整个接触宽度的1/2, 无挤出现象。研究表明, 密封性能不仅取决于材料特性, 更与密封槽几何形状的精确控制及材料与配合表面的公差密切相关。本研究构建的多指标密封性能评价体系及优化设计方法, 为提升井下旋转密封结构的可靠性提供了理论依据和实用方法, 对保障超深、超高压复杂油气资源的安全高效开发具有重要工程价值。

关键词

井口管汇, 旋转接头, 密封性能评价, 有限元仿真

Evaluation and Optimization of Sealing Performance of Wellhead Manifold Rotating Connectors

Guantian Zhang

College of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou Hubei

Received: September 29, 2026; accepted: October 22, 2026; published: October 29, 2026

Abstract

To address the insufficient sealing performance of wellhead manifold rotary joints in deep and ultra-deep well exploitation, this study focuses on hyperelastic materials (fluororubber O-ring seals).

Through theoretical analysis and nonlinear finite element simulations, the sealing structure's performance was systematically evaluated, and optimization strategies were proposed. Results show that the initial design yields a maximum contact stress of only 3.339~3.957 MPa for the O-ring seal, far below the required 21 MPa sealing threshold. While elevated temperatures positively enhance contact stress (increase < 11%), this effect alone cannot resolve sealing failure. By optimizing geometric parameters of the sealing groove (reducing groove top distance from 7.5 mm to 6.63 mm, groove width from 3.2 mm to 2.87 mm, and increasing O-ring cross-sectional diameter from 2.65 mm to 3.55 mm), the peak contact stress is elevated to 28.4 MPa, meeting the 21 MPa sealing requirement. The effective contact width exceeds half of the total contact width, with no extrusion observed. This study reveals that sealing performance depends not only on the hyperelastic material's constitutive properties but also on precise geometric control of the sealing groove and tolerance matching between materials and contact surfaces. The proposed multi-index sealing performance evaluation system and optimization methodology provide a theoretical foundation and practical approach for enhancing the reliability of downhole rotary sealing structures. These findings hold significant engineering value for ensuring safe and efficient development of ultradeep, ultra-high-pressure complex oil and gas resources.

Keywords

Rotary Joint of Wellhead Manifold, Superelastic Material, Evaluation of Sealing Performance, Finite Element Simulation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着全球能源需求的增长和石油天然气资源的日益枯竭,对油气勘探和开采技术的研究与创新需求日益迫切,为满足不断增长的能源需求,深层油气资源的勘探开发进程日益加快,深井与超深井数量逐年增加。这一发展趋势对井下作业装备的运行可靠性与安全稳定性提出了更为严苛的技术要求。连续管旋转接头是连续管工程装备实现高压作业的关键部件之一,工作过程中靠其与轴和缸筒接触挤压来达到密封效果[1]-[3]。

密封装置广泛地应用于工业、农业、国防和人们的日常生活之中,深入研究石油专用管密封机理,发展密封新方法,才可能进一步提高石油专用管接头的密封性能[4][5]。旋转接头中采用超弹性材料构成的密封结构,此类材料如填充改性的聚四氟乙烯(PTFE)复合材料,因其优异的化学稳定性、宽温域适应性、低摩擦系数及良好的弹性恢复能力,已成为当前工业级旋转密封的主流选择。橡胶密封圈应用于动密封形式密封性能的研究工作大多数集中于往复密封工况超弹性本构模型能够用于表征织物增强复合材料的各向异性非线性材料行为,通过建立应力与力之间的关系,推导出整个密封圈的接触力[6]-[8]。然而,在长期服役过程中,密封结构会承受轴向载荷、径向挤压与周向剪切等多重力学作用,且结构件之间的应力会不均匀的分布[9],加之材料自身的蠕变、应力松弛及环境老化等因素,极易导致密封界面接触应力分布不均、预紧力衰减,进而引发密封失效与介质泄漏。这一问题已成为制约井下工具向更高性能、更长寿命方向发展的技术瓶颈。

截至2026年,尽管已有研究对特殊螺纹接头的密封接触强度评价、弹性元件性能衰减规律以及基于数值模拟的密封性能预测方法进行了有益探索,但针对旋转接头中超弹性材料密封结构在真实多场耦合工况下的系统性能评价与优化设计研究仍显不足。现有研究往往侧重于单一因素或静态分析,仅通过基

础计算验证密封圈的可行性[10], 缺乏对材料非线性本构行为、结构参数动态匹配及复杂载荷谱综合作用的深入考量。因此, 构建一套能够全面反映超弹性密封结构实际服役行为的性能评价体系, 并基于此发展相应的优化设计方法, 具有紧迫的理论与现实需求。

本研究的目的是开展井口管汇旋转接头超弹性材料密封结构的性能评价与优化设计研究。首先通过对超弹性材料本构行为的理论分析, 并结合旋转接头的实际工况, 系统阐明密封界面接触力学机理, 揭示泄漏演化内在规律; 构建一套综合考量材料特性、几何结构与工况条件的多指标密封性能评价体系; 最终提出基于该体系的优化设计策略, 提升旋转接头在静态保持与动态旋转工况下的密封可靠性。研究阐明超弹性材料复杂载荷密封失效机制, 完善旋转密封设计理论, 为井下密封结构设计、选材及性能评价提供参考, 助力油气钻采关键装备升级, 保障深部高压油气资源高效开发。

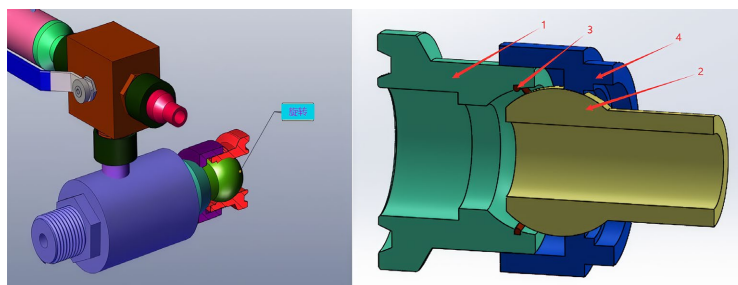


Figure 1. Rotary union manifold and sealing system components

图 1. 旋转接头管汇与密封系统组成

2. 井口管汇旋转接头装置基本结构

井口管汇旋转接头作为连接地面设备与井下工具的关键动态密封部件, 其结构主要包括进浆管、出浆管、中心管、壳体、轴承和高压密封组件等。核心功能是在承受高压流体介质的同时, 允许管柱或工具进行周向旋转运动, 是保障钻井、完井及生产作业流程顺畅的关键环节。在高温、高压、高速旋转及腐蚀性介质等多场耦合的复杂工况下, 旋转接头的密封性能直接决定了整个系统的作业效率、环境安全与装备使用寿命。

如图 1 所示, 该管汇由主体管道与旋转连接接头组成。其中, 连接单元是实现密封与调节旋转角度功能的核心部件。图 1 右侧为旋转连接处的局部放大图, 展示了其关键零部件组成: (1) 球窝压母: 依靠螺纹旋合施加轴向预紧力, 进而压缩内部密封构件, 该结构是实现初始密封的核心部件; (2) 密封腔体: 该构件设于球窝压母与 O 型密封圈之间, 可实现压紧载荷的均匀传递, 避免密封圈因局部过压出现损伤; (3) O 型密封圈: 借助橡胶自身的可压缩性能与自密封特性, 可在预紧力作用下构建稳定可靠的密封界面; (4) 球窝卡箍头: 主要用于支撑密封腔体、嵌装 O 型密封圈, 不仅能约束密封组件的轴向位移, 还可为旋转调节过程提供导向定位基准, 其轴向预紧力通过球窝压母施加。该结构可促使 O 型密封圈发生压缩形变, 进而形成可靠的密封屏障。整套连接单元在保障高压密封性能的基础上, 通过旋转接头的调节作用实现空间姿态可旋转的灵活适配, 大幅增强了井口管汇系统的工程适用性与维护便捷性。为精准评估其在 21 MPa 工况下的密封可靠程度, 以及 O 型密封圈的接触压力分布及密封比压是否符合防泄漏标准, 本文借助非线性有限元方法, 实施了密封性能的仿真分析。

3. 接触分析与建模

3.1. 接触有限元分析

本文研究的管汇旋转接头的密封结构中, 密封性能的实现完全取决于球窝压母所施加的轴向预紧

力对 O 型密封垫产生的压缩效应, 该密封系统被设计为无介质内压参与的动态密封形式。基于这一特点, 有限元建模的核心任务就是精准刻画 O 型密封圈的材料橡胶在轴向压紧过程中呈现的非线性接触特性。

在橡胶材料具有不可压缩特性且呈现各向同性变形的前提下, 其应变能函数 W 关于三个主拉伸比具有对称性, 即当任意两个自变量的符号发生改变时, 该函数的数值仍保持不变。依据这一对称特性, 可推导出应变能函数应采用主拉伸比偶数次幂构成的严格形式这一结论, 进而得到橡胶材料精确本构模型的完整数学表达式:

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1$$

通过上述理论推导可知, 不可压缩材料主拉伸比的主要变量是 I_1 和 I_2 , 第三应变不变量 I_3 对总应变能密度影响甚微, 可忽略不计, 因此二者具有较强的独立性。据此, 各向同性不可压缩材料的应变能函数 W 可用多项式形式表示, 以 I_1 和 I_2 为自变量的具体表达形式如下:

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j$$

其中 C_{ij} 为材料常数。

经过分析发现 Mooney-Rivlin 模型中的应变能函数可以表示为如下形式:

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

其中 C_{10} 、 C_{01} 为材料常数氟橡胶的 Mooney-Rivlin 本构模型系数参考值 $C_{10} = 0.29055$ 、 $C_{01} = 0.28042$ 。

该模型的关键参数通常被界定为材料特性常数, 这类参数可以借助回归分析与实验数据拟合的方式获取具体数值。得益于结构简洁、操作便捷的优势, 该模型在小应变区间内可较好地刻画可压缩弹性体的能量行为特征。

3.2. 密封系统建模

为实现对可旋转管汇密封结构预紧状态下力学行为的高效、精准模拟, 本文依据轴对称假设构建了二维有限元模型, 具体如图 2 所示。所建立的模型涵盖密封腔体、O 型密封圈、球窝压母, 球窝卡箍头构成。考虑到密封腔体与球窝压母、球窝卡箍头均采用高强度合金钢加工而成, 其刚度显著高于柔性石墨密封垫, 为进一步提高计算效率, 建模过程中将二者设定为刚体(Rigid Body), 仅保留其几何轮廓与运动约束条件, 不参与弹性变形相关计算。

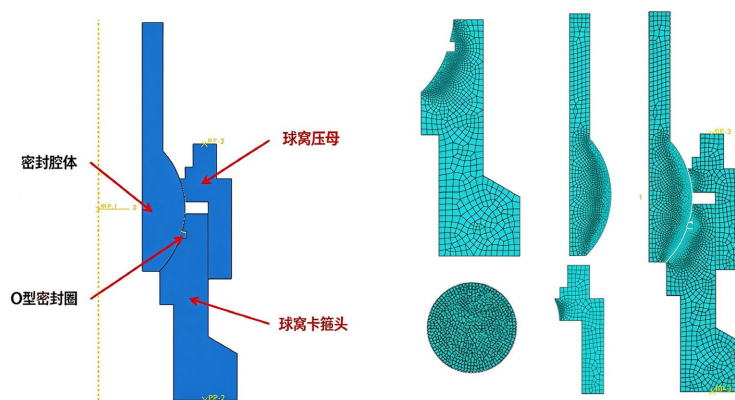


Figure 2. Finite element model of rotary joint manifold
图 2. 旋转接头管汇有限元模型

实体建模完成后,需对几何结构进行网格划分。为平衡仿真效率与计算精度,在满足关键部位高分辨率要求的基础上,适当降低整体网格密度,实现合理的资源分配。由于 O 型密封圈作为主要研究对象且具有超弹性特点,因此以高级算法中的四边形单元为主,全局种子值设为 0.1,并选用 CAX4RH 单元适配其大变形需求。对于密封腔体、球窝压母及卡箍头等次要部件,采用较粗粒度简化处理,全局种子调整为 2,接触面局部加密间距取 0.1。图 2 为组合密封系统(含所有组件)的完整网格模型,共包含 16129 个节点和 15,738 个单元。

边界条件设置及载荷添加

根据实际工作情况,对各个部分进行边界条件的定义。为保证监测到可旋转球座整个旋转过程中 O 型密封圈的接触应力,仿真分析时特设置了以下 4 个分析步(如图 3),第一个分析步设置为密封腔体逆时针旋转 40°(防止软件报错),因原始模型中 O 型密封圈与密封腔体存在过盈配合,故此分析步不设置任何相互作用。

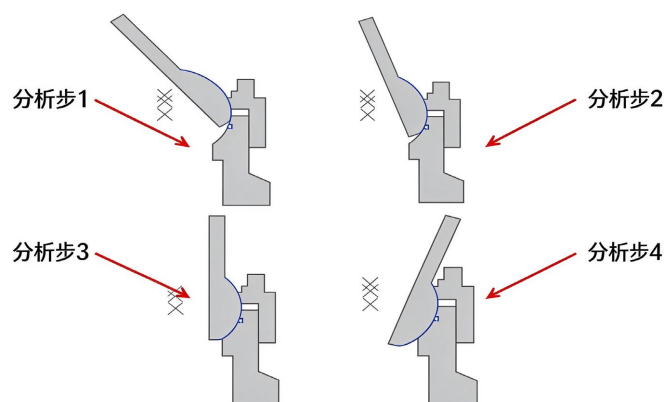


Figure 3. Analysis step settings
图 3. 分析步设置

第二个分析步设置为密封腔体在第一分析步逆时针旋转 40°的前提下顺时针旋转 20°,此时设置 O 型密封圈与各个外壳之间的面与面之间接触,摩擦使用罚函数公式,为验证本文所提方法,摩擦系数依据氟橡胶与合金钢配副的往复摩擦试验确定,取 0.1~0.3 作为工况范围进行敏感性分析,其中 0.1 对应润滑或低摩擦状态,0.3 对应干摩擦或高摩擦状态,摩擦系数在 0.1~0.3 范围内讨论。

第三个分析步设置为密封腔体在第二分析步继续顺时针旋转 20°。此时可以观察到结构处于完全水平时密封件的接触应力。第四个分析步设置为密封腔体在第三分析步继续顺时针旋转 20°,此时可以观察到密封结构旋转到另一面时密封件的接触应力。

4. 分析与讨论

4.1. 初始结构下的氟橡胶 O 型圈密封有限元仿真结果分析

本研究借助 ABAQUS 有限元分析软件,就组合密封装置的密封性能展开全面的数值模拟与量化评价,形成了一套包含两项核心评定指标的综合打分体系:

(1) Von Mises 屈服准则用于描述材料屈服的临界条件,具体而言,当节点处于某一应力状态时,若其等效应力达到特定临界数值,便会诱发材料的塑性变形。在本研究的组合密封结构中,若局部区域存在较高的等效应力,该区域部件发生损伤甚至失效的概率会显著增加。基于这一理论,可通过以下数学公式,完成对等效应力的精准量化计算:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{4}} \quad \leftrightarrow$$

其中: σ_1 - 第一主应力;

σ_2 - 第二主应力;

σ_3 - 第三主应力。

(2) 在最大接触应力准则的指导下, 密封面压强分布特性被视为评价其密封性能的核心指标。若该区域的最大接触应力高于介质工作压力——本研究中该压力设定为 21 MPa, 则可判定该密封结构具备可靠的密封性能。

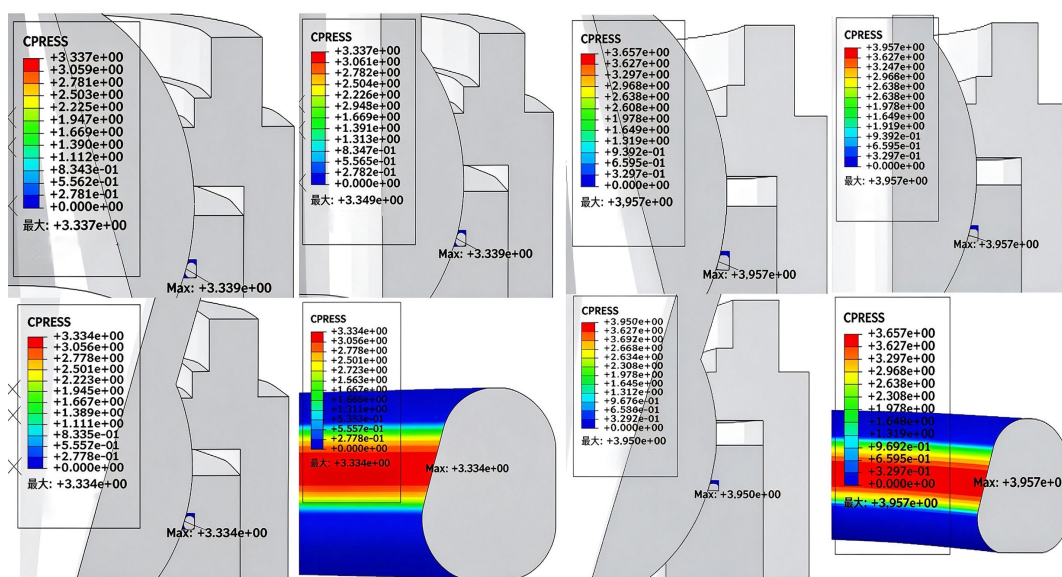


Figure 4. Finite element calculation results of the initial structure under different friction coefficients

图 4. 初始结构在不同摩擦系数下的有限元计算结果

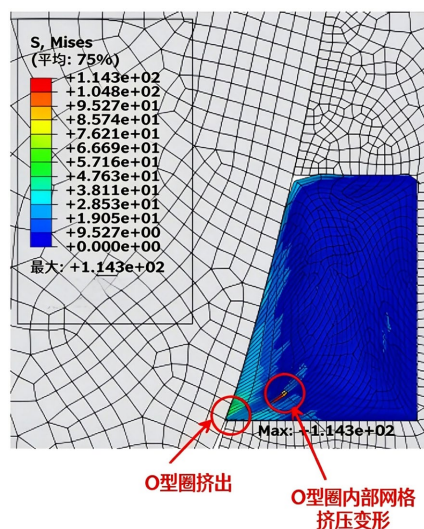


Figure 5. The O-shaped sealing ring was pushed out due to its excessively low friction coefficient

图 5. O 型密封圈因摩擦系数过小而被挤出

初始结构有限元计算结果见图 4 左(摩擦系数 0.1, 最小摩擦系数)、图 4 右(摩擦系数 0.3, 最大摩擦系数), 图 4 分别为密封腔体旋转-20°、0°、20°时接触应力图与 O 型密封圈接触应力图。摩擦系数不同, 计算得出的最大接触应力也不同, 由图 4 可知摩擦系数 0.1 时 O 型密封圈可承受最大接触应力为 3.339 MPa, 摩擦系数 0.3 时 O 型密封圈可承受最大接触应力为 3.957 MPa, 远低于 21 MPa 接触应力要求, 因此如果按照初始结构加工将无法密封要求。

摩擦系数大的接触应力大, 但摩擦系数大在槽小圈大的有限元分析中容易出现 O 型圈挤出情况, 如图 5, 故本研究将尽可能地分析两种摩擦系数的情况。整个旋转过程中接触应力见图 6。

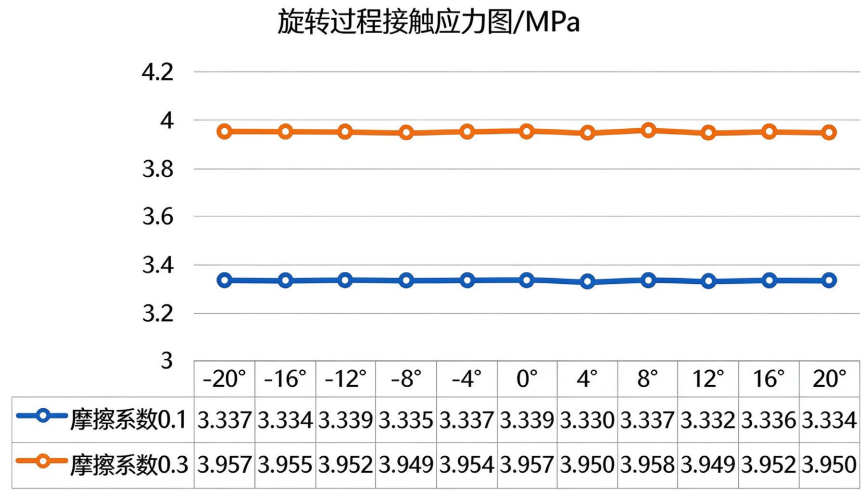


Figure 6. Analysis results of contact stress during the initial structural rotation process
图 6. 初始结构旋转过程接触应力分析结果

前序研究已系统探讨了不同的摩擦系数对氟橡胶 O 型圈接触应力与密封性能的影响, 但现场工况中, 除机械载荷外还存在明显温度波动, 温度变化会引发材料热膨胀、弹性模量下降及接触应力重分布, 进而影响密封可靠性。为全面评估密封圈实际服役条件下的性能裕度, 本节在保持槽型与压缩量不变的前提下, 引入温度场耦合, 本文热膨胀系数采用热机械分析仪测定, 测试标准参考 ASTM E831, 升温速率 5℃/min, 温度范围 20~150℃, 取 20~130℃区间的平均线膨胀系数:

$$\alpha = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dT}$$

其中

- dL : 温度变化引起的长度微小变化量;
- dT : 温度微小变化量;
- L_0 : 初始长度或参考温度下的长度。

系统分析不同温度等级对峰值接触应力的影响, 温度线膨胀系数设定完成后, 结合实验工况条件, α 取 $1.70 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ (20~140℃区间)固定摩擦系数为 0.3, 分别在 80℃、100℃、130℃种温度工况下开展仿真分析, 相关仿真数据汇总于图 7。仿真结果显示, 峰值接触应力随温度的升高呈现单调递增趋势, 其内在机理在于, 温度升高引发的热膨胀效应促使密封圈径向膨胀量显著增大, 进而导致其与密封槽之间的过盈量同步增加。从影响幅度来看, 温度升高对接触应力的提升起到正向促进作用, 但该促进幅度相对有限(增幅 < 11%), 不足以单独解决密封失效难题, 得到温度正向贡献有限, 无法单独解决密封失效, 后续仍需结合密封结构尺寸的进一步优化, 才能保障密封系统的可靠性。

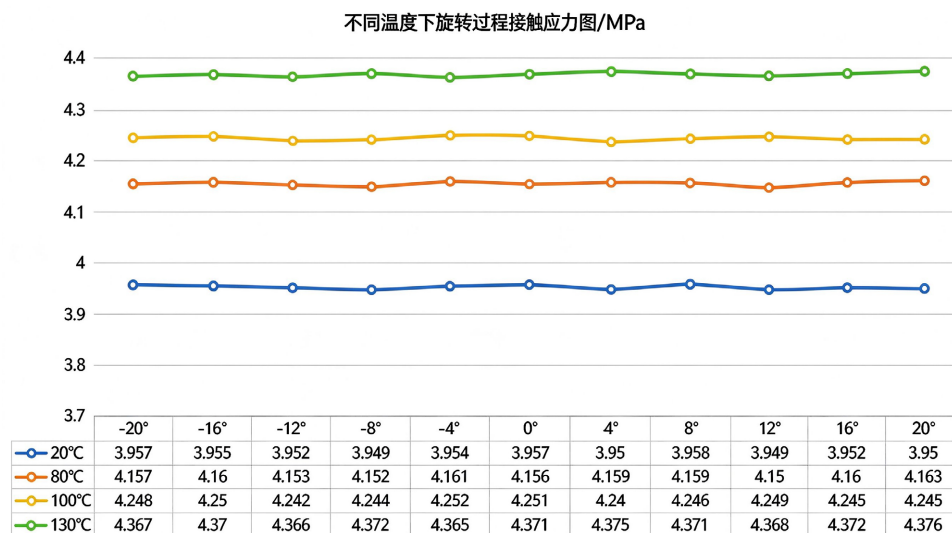


Figure 7. Contact stress diagram during rotation at different temperatures

图 7. 不同温度下旋转过程接触应力图

4.2. 优化后的氟橡胶 O 型圈密封有限元仿真结果分析

在可旋转球座结构中，O 型密封圈放置在球窝卡箍头上的槽中，我们要提高 O 型密封圈与密封腔体、球窝卡箍头之间的接触应力，应尽可能地使 O 型密封圈压缩，本节将对球窝卡箍头安放 O 型密封圈的槽进行尺寸定义，为后续改变尺寸设定标准。球窝卡箍头槽二维图如图 8。参考原始图，3.2 定义为槽宽，7.5 定义为槽顶距离，后续优化将着重针对以上尺寸进行更改使 O 型圈接触应力达到 21 MPa。

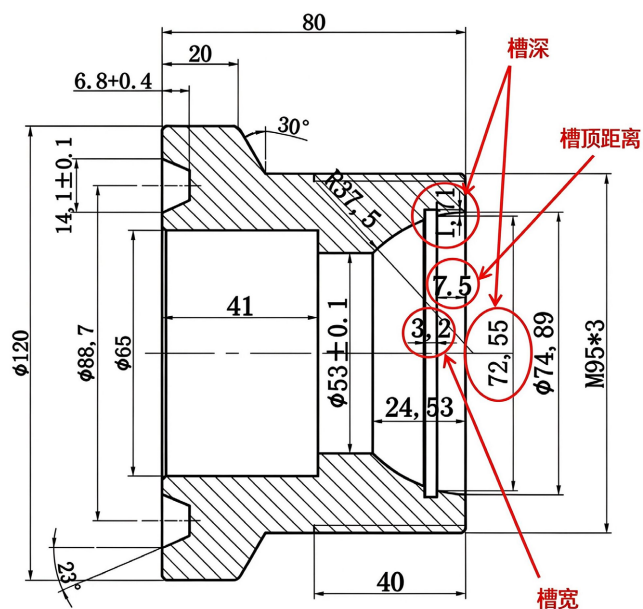


Figure 8. Two-dimensional drawing of the ball socket clamp head

图 8. 球窝卡箍头二维图

槽顶位置 6.63、槽宽 2.87、结果优化

整体方案：在保持槽深(1.71 + 72.55/2 mm)不变前提下，将槽顶距离由 7.5 mm 压缩至 6.63 mm，槽宽

由 3.2 mm 压缩至 2.87 mm，密封圈截面直径由 2.65 mm 增大至 3.55 mm 以增大 O 型圈径向过盈量；摩擦系数取下限 0.1。有限元仿真结果见图 9。

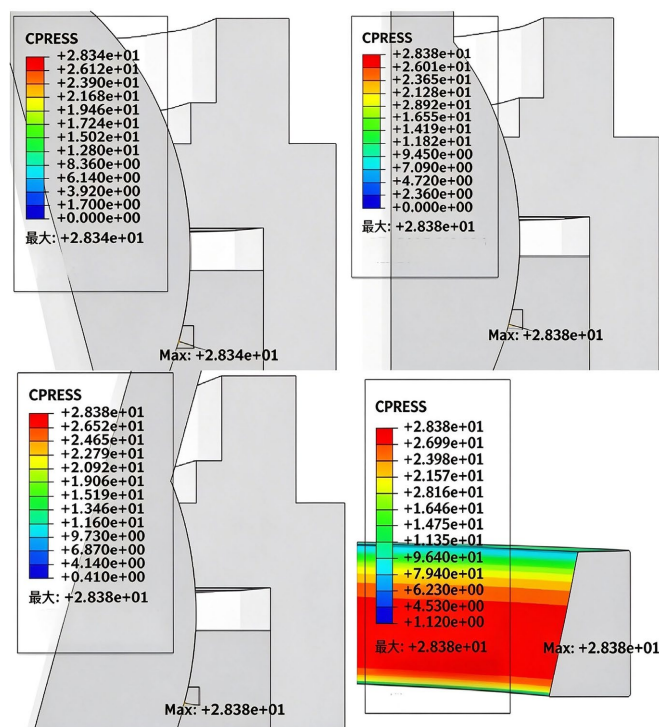


Figure 9. Finite element simulation results
图 9. 有限元仿真结果

仿真结果：峰值接触应力由 3.4 MPa 升至 28.4 MPa，提升约 8.4 倍；密封面有效接触宽度大于整个接触宽度的 1/2，无挤出现象，满足 21 MPa 接触应力要求。

4.3. 优化结构摩擦系数敏感性机理

当摩擦系数取 0.1 时，峰值接触应力达到 28.4 MPa，有效接触宽度大于总接触宽度的 1/2，且无挤出现象，满足 21 MPa 密封要求。然而，当摩擦系数增至 0.3 时，O 型圈出现明显挤出。该现象表明，优化后的高接触应力并非在所有界面摩擦状态下均能稳定实现，优化结构对摩擦系数的敏感性显著增强。其机理可以有如下解释。

(1) 橡胶材料近似不可压缩，压缩量增大后内部静水压力升高，材料必须向自由表面或间隙重分布。当槽腔剩余空间不足时，O 型圈更容易向槽口间隙流动，形成挤出。其次，高压压缩率导致内部静水压力升高，抗挤出几何裕度降低。优化方案通过增大径向过盈量提高接触应力，但同时也使 O 型圈内部应力水平升高。槽宽和槽顶距离压缩后，O 型圈与槽壁之间的过渡空间变小，抗挤出路径缩短。此时 O 型圈对间隙、圆角和摩擦条件更加敏感，较小的界面扰动即可诱发局部挤出。

(2) 高摩擦引起切向拖曳与剪切锁定。旋转过程中，密封腔体与 O 型圈接触面存在相对运动趋势。摩擦系数较低时，O 型圈可通过界面滑移释放部分切向应变；摩擦系数较高时，界面切向拖曳力增大，O 型圈表面被“粘住”，而另一侧仍可能滑动，形成滚动、扭转和剪切变形。高摩擦阻碍 O 型圈在槽内自适应回弹，使切向应变无法释放，局部剪切应力集中，最终促进橡胶向低压侧或间隙挤出。

本节基于初始结构仿真结果不满足密封应力要求的问题，对可旋转球座的关键部件——球窝卡箍

头上的密封槽结构进行了系统性优化设计。通过有限元仿真分析,验证了优化方案的有效性。(1) 通过减小槽顶距离与调整槽宽以增大 O 型圈的径向压缩率,是显著提升其接触应力的最直接、有效的技术路径。(2) 针对不同截面直径的 O 型圈,均找到了能够使最大接触应力稳定超过 21 MPa 要求的结构参数组合。证明了公差控制对性能的积极影响。(3) 摩擦系数对 O 型圈的抗挤出能力有决定性影响。在多个优化方案中,当摩擦系数为 0.3 时, O 型圈易发生挤出失效;而当摩擦系数为 0.1 时,则能保持稳定的密封形态。这为后续工况与材料配对提供了重要依据。(4) 所有成功的优化方案在获得高接触应力的同时,其密封面的有效接触宽度均大于整个接触宽度的 1/2,且未发生挤出现象,保证了密封的长期可靠性。

本次优化不仅解决了初始设计密封应力不足的问题,而且为不同尺寸 O 型圈和不同工况提供了多种可行的优化方案,并为后续的公差设计与生产制造提供了关键的数据支撑。

5. 结论与展望

本文系统性地开展了井口管汇旋转接头中超弹性材料密封结构的性能评价与优化设计工作。通过对超弹性材料本构行为的理论分析,结合旋转接头在高压、高温、等多场耦合作用下的实际工况,在此基础上,构建了一套综合考量材料非线性特性、关键结构参数与复杂工况条件的密封性能多指标评价体系,并提出了相应的优化设计方法。

研究表明,密封性能的优劣不仅取决于超弹性材料本身的本构特性,更与密封槽的几何形状的精确控制以及材料与配合表面的公差密切相关。确定合理的预压缩区间并进行材料-结构-表面的一体化协同设计,可以显著提升密封界面的接触压力均匀性与长期稳定性,从而有效增强旋转接头在静态保压与动态旋转工况下的密封可靠性与适应性。研究所提出的评价体系与优化策略,为井下旋转密封结构的设计提供了系统的理论依据与实用的工程方法,对提升相关装备的服役安全性与使用寿命具有明确的应用价值。

在未来针对超弹性材料在旋转接头中的应用,仍存在若干值得深入探索的研究方向。当前研究中对材料本构行为的描述主要基于等温、准静态假设,而实际工况中的温度循环、介质渗透与长期动态载荷谱会引致更复杂的材料性能时变。因此,能够精确刻画超弹性材料在热-力-化学多场耦合及时间效应下长期性能演变规律的高级本构模型。其次,在数值模拟方面,尽管现有有限元方法能够对宏观接触行为进行有效预测,但对微观尺度上由表面粗糙度主导的真实接触与泄漏通道的模拟精度仍有待提高。未来的研究可致力于建立融合真实表面地貌数据的高保真度微观接触力学模型,以更准确地揭示初始泄漏的发生机理。随着油气勘探开发向更深、更复杂地层拓展,对密封材料提出了耐更高温度与更强腐蚀介质的极端要求。探索新型耐高温复合材料(如特定改性的 PTFE 或浸锑石墨等)与创新密封结构(如多级组合密封)的协同应用,将是实现下一代高性能旋转接头的关键。

参考文献

- [1] 赵敏敏, 黄乐, 张岐, 等. 基于 Ansys 的 O 形橡胶密封圈密封性能及可靠性研究[J]. 橡胶工业, 2020, 67(2): 131-134.
- [2] 杜斌, 闫功臣, 李伟东, 等. 氢化丁腈橡胶在油田介质中的性能变化研究[J]. 橡胶科技, 2018, 16(10): 16-19.
- [3] 何鹏. 牙轮钻头扁平密封结构性能评价研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2024.
- [4] 蒋伟华. 基于 O 形橡胶圈密封的高压容器设计和研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [5] 王新虎, 吕永鹏, 王建东, 等. 一种石油专用管超弹性应变密封新技术[J]. 天然气工业, 2022, 42(5): 80-84.
- [6] 孙戡, 王彤, 陈云辉, 等. 织物增强橡胶基复合材料本构模型及其应用[J]. 纺织学报, 2025, 46(1): 95-102.

- [7] 蔡永朋. 旋转条件下可控柔性密封研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2016.
- [8] 陈华龙, 况雨春, 何璟彬, 等. 牙轮钻头橡胶密封接触力评价准则[J]. 润滑与密封, 2025, 50(12): 160-167.
- [9] Luo, M., Xu, T., Jiang, J., Chi, X., Wang, J. and Xue, S. (2020) Two-Layer Contact Nonlinear Mechanical Analysis of Flexible Drilling Tool in the Wellbore. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, **123**, 75-100.
<https://doi.org/10.32604/cmes.2020.09236>
- [10] He, L., Huang, S., Qiang, S., *et al.* (2016) Application of Ultrashort Radius Lateral Drilling Technique in Top Thick Reservoir Exploitation after Long Term Water Flooding. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*, Abu Dhabi, 7-10 November 2016.