

大功率工程钻机无水封机械密封结构优化与试验研究

林海江 林海波 刘皓昱

永康市开邦工具有限公司 浙江 永康 321300

【摘要】：针对大功率工程钻机传统有水封密封结构易失效、维护成本高的问题，本文以无水封机械密封为研究对象，结合非对称复杂截面密封型材特性，探究金属流动规律，分析原有结构失效机理，明确端面应力不均、金属流动偏移等核心诱因。依托金属塑性成形理论，完成密封型材模具补偿参数推演与密封环结构优化，搭建试验平台对比优化前后关键性能指标。试验表明，优化后端面最大接触应力降低 18.2%，稳态泄漏率控制在 0.03mL/h 以内，连续无故障工作时长提升 46.5%，结构适配性显著增强。研究成果可为钻机密封系统无水化改造提供理论支撑，为同类非对称金属密封型材模具设计提供参考。

【关键词】：工程钻机；大功率；无水封；机械密封；结构优化；金属流动规律；模具补偿

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.109

1 引言

大功率工程钻机广泛应用于地质勘探、基建桩基、矿山开采等工程领域，作业环境普遍存在粉尘浓度高、岩土介质硬度不均、环境温度波动大等特征。回转传动系统作为钻机核心动力单元，机械密封结构承担着阻隔外部杂质、约束内部润滑介质、维持传动腔压力稳定的关键作用。传统工程钻机多采用有水封组合密封结构，依靠水体介质实现冷却与辅助密封，在大功率持续作业条件下，水体易受污染变质，密封腔体内部产生泥沙淤积，进而造成密封端面划伤、密封件老化失效。同时，有水封结构管路布置复杂，水体补给系统占用设备空间，增加整机运维成本，无法适配干旱缺水野外施工场景。

无水封机械密封摒弃水体辅助冷却结构，依托金属型材自身结构特性与干摩擦适配能力实现密封功能，具备结构紧凑、环境适应性强、运维简便等优势，已成为工程机械密封领域的重点研究方向。当前无水封密封研究多聚焦于规则对称截面密封件设计，针对钻机专用非对称复杂截面金属密封型材的研究较为匮乏。此类型材在成型加工过程中易出现金属流动失衡、截面尺寸偏差、端面形变等问题，直接导致密封装配后接触应力分布紊乱，高压工况下泄漏风险大幅提升。此外，现有模具设计未充分考量金属塑性流动的非线性特征，模具补偿参数缺乏精准量化依据，优化方案通用性不足。

为解决上述技术痛点，本文以大功率工程钻机无水封金属机械密封为研究载体，结合非对称复杂截面型材成型特性，分析高温高压耦合工况下金属流动规律，推导模具形变补偿计算方法，完成密封本体结构与配套模具协同优化。通过理论推演确定结构优化关键参数，依托受控试验验证优化结构的密封可靠性与耐磨稳定性，旨在攻克恶劣工况下无水封密封易磨损、易畸变、密封稳定性差的技术难题，完善工程钻机无水封密封设计理论体系。

2 大功率钻机无水封密封基础理论与失效分析

2.1 无水封机械密封工作机理

无水封机械密封取消外置水循环冷却机构，依靠动静密封环紧密贴合形成密闭腔体，以干性润滑介质完成摩擦副降温减阻。钻机运转过程中，传动轴带动动环同步旋转，静环固定于密封壳体保持静止，端面微观凹凸结构相互咬合，借助金属弹性形变产生的接触压力阻隔外部粉尘、岩土碎屑，同时防止内部润滑油脂渗漏。相较于有水封结构，无水封密封摒弃水体介质传导路径，依靠金属型材自身导热性能完成热量扩散，结构集成度更高，且不会出现水体污染引发的密封腐蚀问题。在大功率载荷作用下，密封端面始终处于弹塑性耦合形变状态，非对称截面型材的应力分布特性直接决定密封服役寿命。

2.2 原有密封结构失效机理分析

通过统计工矿现场大功率钻机密封失效数据，结合拆解检测结果，归纳原有无水封密封结构三类核心失效形式。其一为端面磨损失效，钻机持续运转产生摩擦热量，干性散热条件下热量积聚于密封端面，金属表面硬度随温度升高小幅下降，外部硬质粉尘侵入摩擦副，造成端面划痕与材料剥落，磨损量随作业时长呈线性增长。其二为结构畸变失效，原有密封型材截面非对称设计未匹配金属流动特性，模具成型过程中型材壁厚偏差超标，高压负载下密封环产生不规则塑性形变，端面贴合间隙增大。其三为应力集中失效，密封转角过渡区域结构曲率设计不合理，载荷交变过程中局部应力叠加，引发金属疲劳裂纹，最终导致密封介质渗漏。

量化分析结果显示，未优化密封结构在额定工作压力三十二兆帕、转速一千八百转每分钟的工况下，端面最大接触应力可达一百二十六兆帕，应力极差偏高，应力分布均匀性系数仅为零点六二。持续作业两百小时后，端面平均磨损深度达到零点零四二毫米，稳态泄漏率维持在每小时零点一八毫升，各项性能指标无法满足长期连续施工要求。

3 非对称截面型材金属流动规律研究

3.1 型材成型力学模型构建

本次研究密封型材采用马氏体不锈钢材质,该材料具备高强度、耐磨损、抗腐蚀的综合特性,适配钻机恶劣作业环境。基于金属塑性成形基本原理,结合非对称复杂截面边界约束条件,构建型材成型力学平衡方程。充分考量模具挤压阻力、材料内部剪切应力、截面惯性矩差异带来的流动偏差,忽略微量温度波动对材料物性参数的影响,设定型材成型过程为等温准静态塑性变形过程。明确型材边缘约束、模具接触面摩擦系数、挤压速率三类边界条件,为金属流动规律推演提供理论基础。

3.2 金属流动特征与偏差成因

非对称截面型材几何结构存在壁厚不均、转角曲率差异明显的特征,金属熔体在模具腔体内流动时,薄壁区域流动阻力偏小,金属流动速率更快,厚壁区域金属堆积现象显著,截面成型后出现尺寸偏移。同时,型材弯折过渡区域存在应力集中效应,塑性变形阶段金属流向偏向低压应力区域,导致端面平整度下降。结合现场加工数据测算,原有模具成型的密封型材最大壁厚偏差达到零点三一毫米,端面平面度误差超过零点零二五毫米。此类成型偏差装配后会造成密封端面贴合紧密程度不一致,高压工况下低压贴合区域极易形成泄漏通道。

3.3 流动影响因素量化分析

采用控制变量法量化分析关键参数对金属流动的影响程度,选取模具挤压速度、型腔摩擦系数、型材截面曲率作为核心分析指标。数据分析表明,型腔摩擦系数每提升零点一,型材轴向流动均匀性系数提升百分之七点四;挤压速度控制在每秒十五至二十毫米区间时,金属塑性流动稳定性最优,过快挤压会加剧材料紊流现象,增大成型误差;截面过渡曲率维持在一点二至一点五毫米范围内,可有效弱化应力集中对金属流向的干扰。上述量化结论为后续模具补偿设计提供精准参数依据。

4 密封结构与模具补偿协同优化设计

4.1 密封本体结构优化

结合失效机理与金属流动规律,对无水封机械密封本体结构进行针对性改良。优化密封环非对称截面轮廓,调整厚薄壁过渡比例,将原有直角过渡结构替换为圆弧平滑过渡,统一过渡曲率为一点三毫米,降低局部应力集中程度。优化端面摩擦副配比,增大动静环贴合有效面积,将端面原始宽度由六点五毫米调整至七点二毫米,分散单位面积接触压力。同时精简密封外围辅助结构,去除冗余凸起结构,优化热量传导路径,提升干性工况下端面散热效率。优化后密封结构自重降低百分之八点三,结构紧凑性进一步提升,适配钻机狭小安装空间。

4.2 非对称型材模具补偿设计

针对非对称截面金属流动偏移问题,建立模具形变补偿计算模型,结合型材成型回弹量、流动偏差量完成模具参数修正。依据金属流动速率差值,对模具薄壁成型区域进行扩量补偿,补偿量设定为零点二二毫米,抑制薄壁区域金属过快流动;对厚壁堆积区域进行缩量修正,优化型腔导流结构,均衡金属分布密度。修正模具开合间隙,将间隙误差控制在零点零五毫米以内,降低成型过程中飞边缺陷产生概率。同时调整模具导向结构,优化型材脱模角度,减少成型后型材表面划痕,保障密封端面加工精度。

4.3 优化后结构力学性能推演

通过弹性力学理论推演优化后密封结构力学特性,在额定工况载荷条件下,密封端面接触应力分布均匀性系数提升至零点八九,最大接触应力降至一百零三兆帕,应力极差大幅缩小。结构形变仿真推演结果显示,高压负载下密封环最大形变量为零点零一八毫米,相较于优化前形变量降低百分之五十三点七,结构抗畸变能力显著提升。热量传导路径优化后,端面稳态工作温度控制在八十五摄氏度以内,干性摩擦工况下温升速率得到有效抑制,为延长密封服役寿命提供力学保障。

5 试验方案与结果分析

5.1 试验设备与试验参数

为验证优化结构实际工作性能,搭建钻机无水封密封综合性能试验平台,试验设备包含压力控制系统、转速调节机构、温度采集模块、微量泄漏检测装置以及磨损测量仪器。试验介质选用钻机专用干性润滑油脂,试验环境温度设定为零下十摄氏度至零上六十摄氏度,模拟野外温差工况。参照工程钻机实际作业参数,设定额定密封压力三十二兆帕,转速一千八百转每分钟,单次连续试验时长三百小时。选取未优化原始密封结构作为对照组,两组密封型材材质、加工热处理工艺保持一致,排除无关变量干扰。检测指标包含端面磨损量、接触应力、泄漏率、工作温度四项核心参数。

5.2 试验结果对比分析

试验过程中实时采集两组密封结构运行数据,优化后密封结构温升速率平缓,稳态工作温度维持在七十八摄氏度,相较于对照组降低十四摄氏度。试验结束后拆解检测,优化组密封端面平均磨损深度为零点零一八毫米,对照组磨损深度为零点零四二毫米,耐磨性能提升百分之五十七点一。接触应力检测结果显示,优化组端面应力极差大幅减小,应力分布均匀性显著优于原始结构。泄漏率检测数据表明,优化结构稳态泄漏率稳定在每小时零点零三毫升以内,远低于行业规定的每小时零点一毫升合格标准,密封阻隔性能达标。

耐久性试验数据统计显示,原始密封结构平均无故障工作时长为三百二十小时,优化后密封结构平均无故障工作时长提

升至四百六十八小时，使用寿命增幅达到百分之四十六点五。试验过程中优化结构未出现裂纹、畸变、卡顿等异常工况，温度交变环境下性能稳定性良好，适配复杂野外施工条件。

5.3 优化结构工程适用性评价

结合试验数据与工程实际应用需求，从结构可靠性、经济性、适配性三个核心维度，对优化后无水封机械密封结构进行全面系统的综合评价。在结构可靠性方面，优化后的无水封机械密封彻底取消了传统有水封结构的水体辅助冷却与补给系统，从根本上避免了水体污染引发的密封腐蚀、泥沙淤积等问题，同时通过模具补偿与结构优化，有效提升了密封型材的成型精度与结构稳定性，大幅降低了密封失效概率，满足大功率钻机长期连续作业的可靠性要求。在经济性方面，水体辅助系统的取消使整机能耗降低百分之五点二，同时减少了管路、水泵、储水装置等附属配件的采购、安装与维护成本，经测算设备运维成本整体下降百分之二十以上，批量应用后可显著降低工程施工的综合成本。在适配性方面，非对称型材模具补偿方案有效控制了成型误差，使批量加工时型材尺寸合格率提升至百分之九十八点七，确保了密封件装配的一致性与互换性；结构改良后简化了装配流程，大幅缩短了拆装维护时长，能够快速适配大功率钻机野外作业的快速检修需求。综合上述评价结果，该优化结构具备良好的工程推广价值，可广泛适配地质勘探、矿山开采、基建桩基等多场景下的大功率工程钻机作业，

能够有效解决传统密封结构的技术痛点。

6 结论

本文以大功率工程钻机无水封机械密封为研究对象，针对非对称复杂截面型材成型缺陷与密封失效问题，开展金属流动规律分析、模具补偿设计、结构优化及试验验证系统性研究，得出以下核心结论。第一，大功率钻机恶劣工况下，原有无水封密封失效核心诱因因为端面应力分布不均、金属成型偏差、摩擦升温过高，非对称截面壁厚差异会加剧金属流动失衡，增大密封畸变泄漏风险。第二，非对称金属型材成型过程中，型腔摩擦系数、挤压速率、截面曲率为金属流动核心影响因素，合理调控工艺参数可显著提升型材成型均匀性，模具差异化补偿能够有效修正截面尺寸偏差。第三，经结构与模具协同优化后，无水封密封端面接触应力、磨损量、升温幅度均显著降低，泄漏率严格控制在行业合格范围内，使用寿命接近原始结构一点五倍，综合性能大幅提升。第四，本次提出的模具补偿设计方法可适配同类非对称复杂截面金属型材加工，为工程机械密封件精密成型提供技术参考。

后续研究可聚焦极端高压、强腐蚀特殊工况，优化密封材质配比，结合智能监测技术实现密封磨损、泄漏状态实时预警，进一步提升无水封机械密封的智能化水平与极端环境适配能力，完善大功率工程机械无水密封技术体系。

参考文献:

- [1] 郑伟,孙见君,马晨波.扩压式自泵送流体动压机械密封综合性能研究[J].摩擦学学报(中英文),2024,44(05):686-695.
- [2] 王林.高速牙轮钻头螺旋组合密封排砂及密封机理研究[D].西南石油大学,2017.
- [3] 姚金结.基于响应面法的泥浆泵机械密封结构优化[J].东莞理工学院学报,2023,30(05):112-118.
- [4] 杨瑞博.全液压坑道钻机浮动式配油套密封结构研究进展[J].煤炭技术,2021,40(10):212-214.
- [5] 杨瑞博.全液压坑道钻机浮动式配油套密封结构研究进展[J].煤炭技术,2021,40(10):212-214.