

滚针凸度量对提高十字传动轴寿命的试验研究

胡伟奇¹, 郭丹丹², 宋占峰¹

1. 中原科技学院, 河南 郑州 450000

2. 许昌远东传动轴有限公司, 河南 许昌 461111

DOI: 10.61369/ERA.12254

摘要： 十字传动轴作为机械动力传输的核心部件，其寿命直接影响设备运行效率与维护成本。传统设计中，滚针轴承的凸度量参数多依赖经验公式，缺乏系统性试验验证。实际工况下，接触应力分布不均导致早期疲劳失效问题突出。本研究以工程机械传动轴为对象，通过构建不同凸度量参数的滚针轴承对比组，开展加速寿命试验与应力场仿真，探究凸度量对接触区应力梯度、表面微裂纹扩展路径的影响规律。试验发现，当凸度量处于0.015–0.025mm 区间时，最大接触应力下降约28%，显著延缓剥落损伤，研究结果为传动系统可靠性设计提供了新的参数优化方向。

关键词： 滚针凸度量；十字传动轴寿命；裂纹扩展抑制；动态监测

Experimental Study on the Metric of the Needle Roller to Improve the Life of the Cross Drive Shaft

Hu Weiqi¹, Guo Dandan², Song Zhanfeng¹

1. Zhongyuan University of Science and Technology, Zhengzhou, Henan 450000

2. Xuchang Far East Drive Shaft Co., Ltd. Xuchang, Henan 461111

Abstract: As a core component in mechanical power transmission, the service life of cross drive shafts directly affects the operational efficiency and maintenance costs of equipment. In traditional designs, the camber parameters of needle roller bearings are often determined based on empirical formulas, lacking systematic experimental verification. Under actual working conditions, uneven contact stress distribution leads to prominent early fatigue failure issues. This study takes the drive shafts of construction machinery as the research object, and through the construction of comparison groups with different camber parameters of needle roller bearings, conducts accelerated life tests and stress field simulations to explore the influence laws of camber on the stress gradient in the contact area and the crack propagation path on the surface. The experiments found that when the camber is within the range of 0.015–0.025mm, the maximum contact stress decreases by approximately 28%, significantly delaying spalling damage. The research results provide a new parameter optimization direction for the reliability design of transmission systems.

Keywords: needle convex measurement; cross drive shaft life; crack propagation suppression; dynamic monitoring

在重载传动领域，十字轴万向节的失效往往引发设备停机和重大经济损失。统计显示，约65%的传动轴故障源于滚针轴承的接触疲劳失效，而凸度量参数的合理设计直接影响应力分布形态。现有研究多集中于材料热处理工艺改进，对几何参数的动态影响机制仍缺乏定量分析。尤其在非稳态工况下，传统等截面滚针易形成边缘应力集中，导致微裂纹沿45°剪切应力方向快速扩展。通过建立凸度量–应力场–疲劳寿命的映射模型，对于提升工程机械传动系统可靠性、降低全生命周期维护成本具有重要工程价值。

一、滚针凸度量的作用机制分析

(一) 几何特性影响

滚针凸度量通过改变接触区域的几何特征，直接影响应力分布与载荷传递效率。当滚针表面引入凸度后，线接触逐渐过渡为椭圆接触，接触区应力分布由均匀分布转向梯度分布。根据修正的赫兹接触理论，接触半宽 b 可表示为：

$$b = \sqrt{\frac{4PR}{\pi E'} * \frac{1}{1 + \frac{2C}{R}}}$$

式中， C 为凸度量， R 为滚针半径， E' 为等效弹性模量， P 为线载荷。仿真结果显示，当凸度量从0.005mm 增至0.035mm 时，最大接触应力由3200MPa 降至2100MPa，降幅达34%。通过有限元分析，凸度设计使接触区边缘应力集中系数从3.2降至1.8，有效缓解了边缘剥落风险。详见表1，接触区边缘应力集中系数与凸度量关系。进一步研究表明，凸度量每增加0.01mm，接

触区载荷分布均匀性提升约15%，显著降低局部塑性变形概率。

（二）裂纹扩展抑制原理

凸度滚针通过重构次表面应力场，改变裂纹扩展方向。传统平直滚针在交变载荷下，次表面最大剪切应力 $\tau_{\max}$ 位于深度0.3b处，方向平行于滚道，导致裂纹沿45°方向向表面扩展。引入凸度后，接触区压力梯度引发应力场偏转，剪切应力方向与滚道形成15°~25°夹角。根据断裂力学J积分模型，裂纹扩展驱动力 ΔJ 可表达为：

$$\Delta J = \int_0^a (\sigma_{xy} * \frac{du}{dx}) da$$

仿真数据表明，凸度量0.02mm时，裂纹萌生寿命提升至平直滚针的2.3倍。金相观测发现，凸度滚针次表面裂纹呈现非连续“Z”形扩展路径，有效延长裂纹贯穿时间。当凸度量达到0.03mm时，最大剪切应力幅值降低28%，裂纹扩展速率 da/dN 从3.2×10⁻⁶mm/cycle 降至1.7×10⁻⁶mm/cycle。

（三）边界条件定义

基于正交试验法构建五组凸度量参数（0.005/0.015/0.020/0.025/0.035mm），采用Abaqus显式动力学模块建立1/4对称模型。滚针材料为GCr15轴承钢，弹性模量210GPa，泊松比0.3；轴套材料20CrMnTi，屈服强度850MPa。接触算法选用面-面精确接触，摩擦系数0.005。网格采用C3D10M单元，接触区局部加密至0.05mm，全局单元数约52万。载荷谱模拟实际工况：轴向预紧力5kN，交变扭矩200Nm，转速1500rpm。为验证模型可靠性，对比0.015mm凸度量试件的接触斑痕尺寸，仿真结果（长轴1.2mm/短轴0.8mm）与白光干涉仪实测值误差小于4.7%。参数敏感性分析表明，凸度量超过0.025mm后，接触区应力降幅趋缓，而边缘滑移量增加12%，需平衡抗疲劳性能与运动稳定性。

二、试验设计与方法创新

（一）加速寿命试验台架

为模拟十字传动轴实际工况的复合载荷特性，试验台架采用三自由度伺服液压系统，集成轴向推力、径向弯矩与周向扭矩的同步加载功能。轴向载荷通过比例阀控制，最大推力10kN，精度±0.5%；扭矩由磁粉制动器施加，范围0~500Nm，动态响应时间≤20ms。试验分组设定6组样本：5组凸度量（0.005/0.015/0.020/0.025/0.035mm）及1组平直滚针对照组（C=0），每组包含3个平行试样以降低离散性。载荷谱设计基于实测道路谱数据，采用雨流计数法压缩为等效梯形波，包含高频低幅振动（10Hz，±50Nm）与低频高幅循环（2Hz，±200Nm）的叠加工况。台架温控系统将润滑脂温度稳定在80±3℃，模拟高速运行热效应。详见表1，加速寿命试验载荷谱参数。

表1. 加速寿命试验载荷谱参数

载荷类型	幅值范围	频率	循环次数占比
轴向推力	2~8 kN	5 Hz	40%
径向弯矩	±150 Nm	10 Hz	30%
周向扭矩	±200 Nm	2 Hz	30%

试验终止条件定义为滚针表面出现直径≥0.3mm的剥落坑或

传动轴效率下降15%。通过该设计，试验周期从传统单向加载的1200小时缩短至360小时，加速系数达3.3倍^[1]。

（二）动态监测技术

在滚针次表面关键区域（深度0.2~0.5mm）埋设微型光纤光栅应变片（型号FOS-N-01），尺寸0.8×0.3mm，灵敏度系数1.2pm/μ ϵ ，采样频率10kHz。应变片采用激光微焊工艺固定，避免胶黏剂引入应力干扰。同时，在传动轴透明观察窗处架设Phantom VEO 710高速摄像机，以12800fps帧率、4μm像素分辨率记录滚针表面微裂纹萌生过程。为匹配应变与图像数据时序，采用PXIe-1071同步控制器，时间对齐误差≤1μs。试验数据表明，当凸度量从0.005mm增至0.020mm时，次表面剪切应变幅值由520μ ϵ 降至310μ ϵ 。高速影像分析显示，平直滚针裂纹在1.2×10⁶次循环后沿45°直线扩展，而凸度滚针（C=0.020mm）裂纹在2.5×10⁶次循环后呈现分叉转向特征。通过数字图像相关（DIC）技术提取裂纹尖端位移场，计算应力强度因子K_I误差≤7%，验证了监测系统的可靠性。详见表2，不同凸度量下应变与裂纹萌生关联数据。

表2. 不同凸度量下应变与裂纹萌生关联数据。

凸度量 (mm)	剪切应变幅 (μ ϵ)	裂纹萌生寿命 (×10 ⁶ cycles)	裂纹扩展角度 (°)
0.005	520±35	1.1±0.2	43±5
0.020	310±28	2.6±0.3	58±7
0.035	290±25	2.9±0.4	62±6

（三）仿真-试验耦合验证

基于试验数据对初始有限元模型进行多参数协同修正，通过响应面法建立输入参数（弹性模量E、摩擦系数μ、凸度量C）与输出响应（接触应力σ_{max}、裂纹扩展速率da/dN）的代理模型，采用拉丁超立方抽样生成150组样本。将台架试验中0.015mm凸度量的接触斑痕尺寸、应变分布作为基准，利用NSGA-II多目标优化算法，以均方根误差（RMSE）最小化为目标，迭代更新材料本构参数。修正后模型显示，GCr15钢的塑性硬化指数n从0.12调整为0.09，接触算法中的微滑移系数从0.008降至0.004。详见表3，模型修正前后关键参数对比。

表3. 模型修正前后关键参数对比

参数	初始值	修正值	试验值	误差(%)
接触应力 (MPa)	2450	2280	2200	3.6
裂纹速 (×10 ⁻⁶ mm/cycle)	2.1	1.8	1.7	5.9
应变幅 (μ ϵ)	340	305	298	2.3

经过3轮迭代后，仿真与试验的全局误差从18.7%降至5.2%。修正模型成功预测了0.025mm凸度量试样的疲劳寿命为2.3×10⁶ cycles，与实测值2.4×10⁶ cycles偏差仅4.3%，验证了耦合方法的工程适用性。该流程将传统经验建模的校准周期缩短60%，为复杂工况下的滚针设计提供高精度工具^[2]。

三、结果分析与关键发现

（一）应力分布可视化

通过有限元仿真与光弹实验结合，定量揭示了凸度量对接触

应力分布的重构作用。当凸度量从0增至0.015mm时,接触区最大应力从2950MPa降至2120MPa,降幅达28.1%。应力云图显示,传统平直滚针的应力分布呈现尖锐的“马鞍形”特征,而凸度滚针的应力场则过渡为平滑的“钟形”分布。接触区边缘的应力梯度由平直滚针的 $\Delta\sigma/\Delta x=12.5\text{MPa}/\mu\text{m}$ 降至 $4.8\text{MPa}/\mu\text{m}$,降幅61.6%。这一现象可通过修正的赫兹接触模型解释:凸度设计使接触半宽 b 从0.55mm扩展至0.72mm,接触面积增加31%,单位面积载荷下降显著。试验数据表明,当凸度量达到0.015mm时,滚针表面塑性变形深度从 $15\mu\text{m}$ 减少至 $8\mu\text{m}$,微凸体压溃率降低42%。进一步分析发现,凸度滚针的应力场均匀化使材料进入弹性变形主导区,次表面最大剪切应力位置从深度 $0.25b$ 转移至 $0.35b$,有效避开滚针表面缺陷密集区,这是寿命提升的核心机制之一。

(二) 寿命曲线拐点

当凸度量从0.005mm增至0.025mm时,中值寿命从 1.2×10^6 次循环提升至 2.6×10^6 次循环,增幅116%;但当凸度量继续增至0.035mm时,寿命仅提升至 2.8×10^6 次循环,增幅降至7.7%。这一拐点现象源于两方面的竞争机制:一方面,凸度量增加改善了接触应力分布;另一方面,过大的凸度导致滚针边缘滑移量从0.008mm增至0.015mm,引发二次摩擦热效应。红外热像仪监测显示,0.035mm凸度滚针接触区温度达 125°C ,比0.025mm组高 18°C ,加速润滑油氧化失效。断裂力学分析表明,当凸度量超过0.025mm时,裂纹扩展速率 da/dN 从 $1.8\times 10^{-6}\text{mm}/\text{cycle}$ 降至 $1.6\times 10^{-6}\text{mm}/\text{cycle}$,降幅仅11%,远低于0.005–0.025mm阶段的45%降幅。此拐点可作为工程设计中成本–收益平衡点,建议

凸度量控制在0.020–0.025mm区间^[3]。

(三) 失效模式对比

通过扫描电镜(SEM)与三维形貌仪对失效试件进行对比分析,平直滚针($C=0$)的失效主要表现为径向延伸的宏观剥落,平均剥落面积达 2.8mm^2 ,裂纹起源于次表面夹杂物处,沿最大剪切应力方向向表面扩展。优化组($C=0.020\text{mm}$)剥落面积降至 0.98mm^2 ,且呈现离散环状分布特征。能谱分析显示,优化组剥落坑内氧含量从12.3at%降至4.5at%,表明摩擦氧化作用减弱。裂纹路径分析表明,凸度滚针次表面的剪切应力方向偏转使裂纹扩展发生分叉。平直滚针裂纹呈单一主裂纹(长度占比85%),而优化组出现3–5条分支裂纹,主裂纹长度占比降至55%。这种多路径耗散机制使裂纹尖端能量释放率下降37%,延迟了临界断裂的发生。此外,优化组剥落坑深度从 $210\mu\text{m}$ 减至 $90\mu\text{m}$,表面损伤更趋近于可修复的轻微点蚀,为再制造工艺提供了新思路。

四、结语

试验证实,优化后的滚针凸度量设计可使十字轴疲劳寿命提升2.3倍以上。通过高速摄影捕捉到凸度滚针特有的应力自平衡现象,接触区呈现“中间密实、边缘渐变”的应力分布特征,有效抑制了次表面裂纹的萌生。研究构建的凸度量选择曲线为不同载荷谱工况提供了量化设计依据。但试验未考虑润滑膜动态特性对接触应力的影响,后续将结合弹流润滑理论开展多物理场耦合研究,验证理论模型的有效性。

参考文献

- [1] 程林,张信群,疏剑.滚针凸度修型及偏载对滚动轴承接触应力影响[J].机械设计与制造,2024,(03):125–128.
- [2] 牛杰,叶连强,董小忠,等.万向节轴承接触强度数值优化方法及试验验证[J].机械传动,2023,47(05):88–97.
- [3] 姚芳,程林.滚针凸度修型对滚动轴承应力分析的影响[J].萍乡学院学报,2021,38(06):31–34.