

带油槽型关节轴承卡滞问题分析与改进

韩齐峰

上海市轴承技术研究所有限公司 上海

【摘要】某一型号的外圈带内油槽型向心关节轴承在挤压装配后出现内外圈卡滞、轴承旋转灵活性差的问题，经分析后发现其主要原因是外圈在装配挤压过程中因轴承变形导致内油槽沟曲率减小，同时外圈内油槽与外圈内球面交接处的过度圆角沟曲率过小会导致其与内圈球面之间的接触应力增大，内圈、外圈受力发生变形导致轴承卡滞。提出改进措施：将轴承外圈内油槽沟曲率增大，同时增大外圈内油槽与外圈内球面交接处过渡圆角，优化改进后的轴承能够满足使用需求。

【关键词】向心关节轴承；卡滞；内油槽；挤压变形；沟曲率；接触应力；过渡圆角

【收稿日期】2026 年 2 月 10 日 **【出刊日期】**2026 年 3 月 18 日 **【DOI】**10.12208/j.ijme.20260002

Analysis and improvement of stuck problem of oil-immersed groove joint bearing

Qifeng Han

Shanghai Bearing Technology Research Institute Co., Ltd., Shanghai

【Abstract】A certain model of concentric bearing with an inner oil groove on the outer ring exhibited inner/outer ring jamming and reduced rotational flexibility after compression assembly. Analysis revealed that the primary cause was deformation of the outer ring during assembly, which decreased the curvature of the inner oil groove. Additionally, the excessively small curvature of the transition arc at the junction between the inner oil groove and the outer ring's inner spherical surface resulted in high contact stress between them. This deformation caused bearing jamming. The proposed improvement measures include increasing the curvature of the outer ring's inner oil groove and enlarging the fillet at the connection between the inner oil groove and the outer ring's inner spherical surface. The optimized bearing now meets operational requirements.

【Keywords】Centrifugal bearing; Clamping stagnation; Inner oil sump; Crimp; Curvature of a curve; Contact stress; Smooth transition

带油槽型向心关节轴承因其外圈存在油孔和油槽，可在工作中使用润滑介质优化摩擦副的运行性能，解决重载、摆动工况下的润滑失效、磨损过快、卡滞等问题，是工业领域重载铰接部位的核心基础件^[1-2]。在工程应用中，存在油槽根部易产生应力集中现象导致轴承疲劳寿命降低的问题，以及灵活性不足导致的轴承重载接触面出现的磨损加剧现象。如何降低油槽根部应力集中是机械加工行业需要不断改进的技术方向，在提高轴承的疲劳寿命的同时也可提高轴承运转灵活性，降低轴承重载接触面的磨损。随着工业加工技术和仿真技术的发展，许多在以往的轴承设计过程中遇到的问题有了新的解决方法，带油槽型关节轴承加工的难点在于装配后的旋

转灵活性控制。

1 带油槽型向心关节轴承结构特点

某型带油槽型向心关节轴承的结构及外圈油槽放大结构如图 1 所示，其外圈存在内油槽、外油槽、油孔结构，内圈球面同样存在内油槽和油孔结构。油槽和油孔是正常工作中润滑剂的加注与流动通道，提升轴承摩擦副之间的运行性能。

2 轴承装配中出现的卡滞问题

轴承内外圈装配过程是依靠专用模具挤压外圈产生冷塑性变形^[3-5]，从而包裹内圈，经过后续的机械加工，轴承达到图 1 所示状态。在加工过程中出现了轴承内外圈卡滞的问题，对轴承进行检查发现：

(1) 外圈内油槽存在一定程度的变形情况(图 2a)，选取 10 件轴承进行油槽沟曲率检测，结果发现检测发现内油槽沟曲率相较于挤压变形前变小(初始沟曲率为 R2.5，检测值均小于 R2.0)。

(2) 外圈内油槽与外圈内球面交接处的过渡圆角存在变形、磨痕情况(同图 2a)。

(3) 与外圈内油槽过渡圆角接触的内圈球面存在明显的环状压痕(图 2b)。

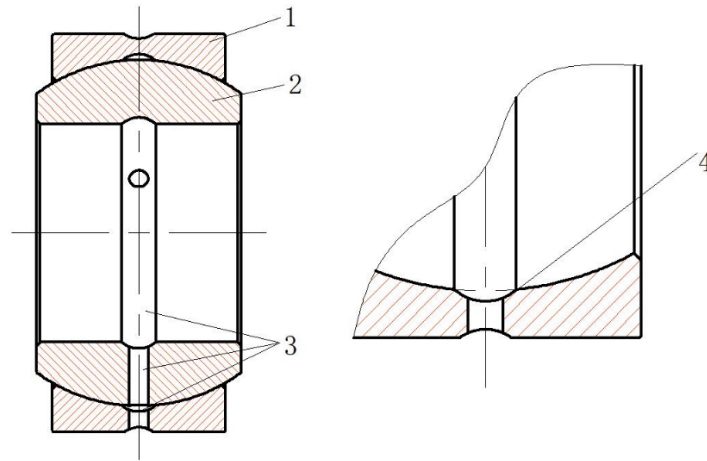
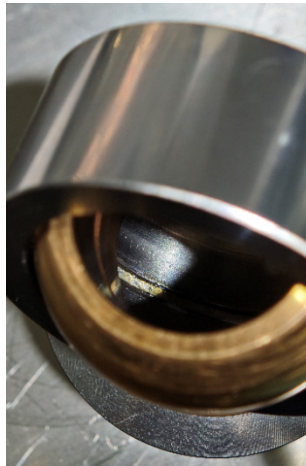


图 1 带油槽型向心关节轴承结构示意图

注：1-轴承外圈；2-轴承内圈；3-油槽及油孔结构；4-过渡圆角



(a) 内油槽及过渡圆角



(b) 内圈

图 2 卡滞轴承的外观状态

3 卡滞原因分析

分别从原材料与热处理、设计与工艺、加工制造 3 个方面查找问题原因。

3.1 原材料与热处理

质量检验部门对卡滞轴承的工艺、制造、质量等文件进行了复查，确认其产品加工信息完整受控，相应的文件、手续齐全，完全符合企业的相应的程序文件管理要求。对该批次磨皮所使用的原材料进行核

查，原材料来源均为合格供方，具备完整的质量证明文件和合格证，且通过了入厂验收。同时对轴承热处理的检测结果进行了复查，该批次轴承的热处理合格。基于以上情况，可以排除原材料与热处理不合格这一方面。

3.2 设计与工艺

对轴承的设计图纸与工艺图纸进行对比，工艺的内圈、外圈和装配工艺规程图纸的轴承尺寸及形

位公差均符合产品图纸的要求（见表 1，注，外圈外径和宽度非成品尺寸，暂不列入表格）。但考虑到该型轴承为外圈挤压变形的装配方式，装配前的外圈内油槽的沟曲率为 R2.5，过渡圆角的沟曲率为 R1，外圈塑性变形导致前者沟曲率变化，后者会在外圈塑性变形的过程中与内圈球面之间形成应力集中点。

依据上述的理论分析，存在工艺余量不足的问题。

3.3 加工制造

首先验证轴承内外圈的制造与工艺图纸的符合性，对同一批次的未装配的内外圈（5 件）进行全面复测。内测试样件的检测值见表 2，外圈测试件检测值见表 3。

表 1 轴承产品与工艺图纸的相关尺寸参数对比（单位：mm）

圈别	内圈			外圈			
	参数	内孔 d ₁	球径 D	宽度 B	内油槽 内径 d ₂ 沟曲率 R ₁	过渡圆角 R ₂	内孔 d ₃
产品尺寸	16 ⁰ _{-0.008}	26±0.015	15±0.03	27±0.05	2.5±0.1	1±0.1	26±0.015
工艺尺寸	16 ⁰ _{-0.008}	26±0.015	15±0.03	27±0.05	2.5±0.1	1±0.1	26±0.015
对比结论	一致			一致			

表 2 内圈相关尺寸检测结果（单位：mm）

样件号	1	2	3	4	5
球径 D	26.003	26.004	26.003	26.002	26.005
内孔 d	15.998	15.997	15.998	15.996	15.997
宽度 B	15.01	15.01	15.01	15.01	15.01

表 3 外圈相关尺寸检测结果（单位：mm）

样件号	1	2	3	4	5
油槽内径 d	27.01	27.02	27.00	27.01	27.03
油槽沟曲率 R ₁	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
过渡圆角 R ₂	1.1	1.1	1.2	1.2	1.1

表 2 中的检测数据显示内圈影响装配的主要尺寸均符合图纸要求，可排除内圈加工制造问题。表 3 中检测数据显示油槽沟曲率符合图纸要求，过渡圆角两件偏大，但尺寸偏差较小，分析后暂定对轴承装配影响较小，待后续试验验证。

3.4 小结

通过从原材料与热处理、设计与工艺、加工制造 3 个方面对轴承挤压装配后的卡滞问题进行原因分析，比较可能的原因是工艺设计中的内油槽的沟曲率和过渡圆角的沟曲率存在问题，需进行工艺改进，其余未见异常。因此以下重点是对外圈内油槽的沟曲率和过渡圆角尺寸对轴承装配灵活性进行计算分析。

4 试验验证与仿真分析

4.1 仿真计算

采用 ABAQUS 有限元仿真软件对其进行挤压成形过程进行分析^[6-7]，建立如图 3 所示的模型，轴承材料属性设置见表 4。

工况设置 Step1: 轴固定，上模沿着 Y 的负方向移动；下模沿着 Y 的正方向移动；Step2: 轴固定，上模沿着 Y 的正方向移动；下模沿着 Y 的负方向移动。

分析步采用 Static, General 分析方法，Quasi-Newton 迭代分析技术，用直接法的方程求解器对关节轴承挤压分析作业进行计算，分析步时间设置为 1s。为保证获取数据的均匀性，设置 history output 及 field output 的输出频率为每 0.1s 输出一个数据。

模型设置四组接触对，即关节轴承内孔与轴接触；轴承内圈与外圈接触；上模与外圈接触；下模与外圈接触。接触对均选用 surface-to-surface contact (standard) 的形式，接触对滑移方式选择有限滑移，接触离散化技术选择面对面。接触属性中法向接触压力-过盈接触方法选择“硬”接。切向接触中摩擦公式选择罚函数，金属之间的摩擦系数为 0.1。

轴承的挤压过程中形变仿真结果如图 4 所示。

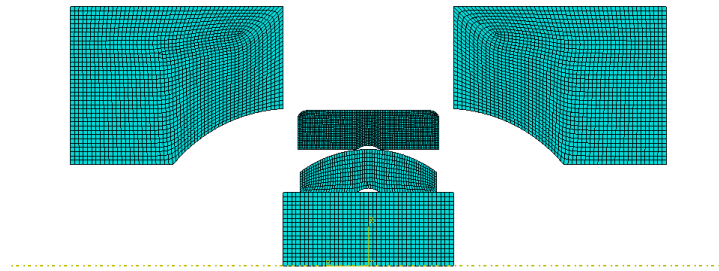


图 3 轴承挤压变形有限元模型

表 4 轴承材料属性

材料	部件	密度 (kg/m ³)	弹性模量 (MPa)	泊松比	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)
17-4PH	外圈	7900	191000	0.288	730	1067
QBe2	内圈	8300	122000	0.3	990	1250
G95Cr18	轴、R 模	7700	212000	0.3	1400	1800

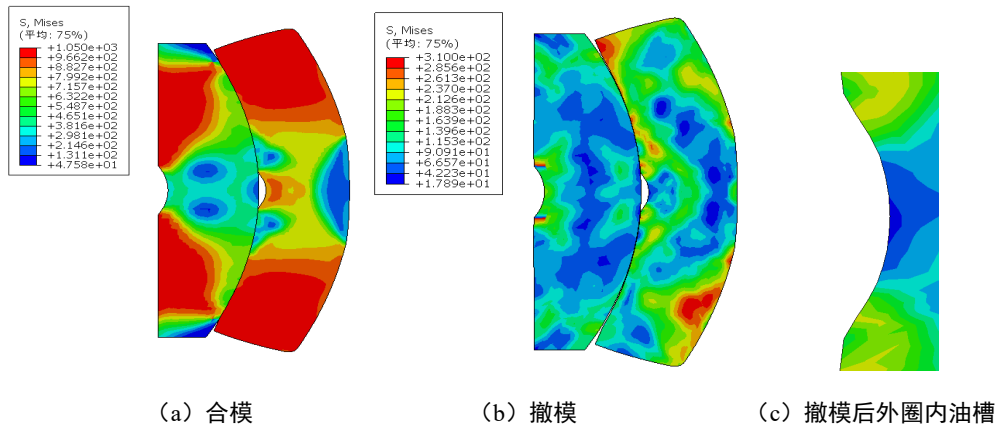


图 4 轴承挤压变形云图

根据仿真结果可以看出，在轴承合模挤压过程中，外圈和内圈之间的接触应力集中在油槽和过渡圆角处，因此在过渡圆角处易产生塑性变形。

选取五个不同数值的轴承外圈内油槽的沟曲率进行对比计算，挤压变形后的内油槽沟曲率变化情况如表 5 所示。因挤压产生的塑性变形导致油槽沟曲率减小。

表 5 外圈内油槽沟曲率挤压试验仿真数据

挤压前	R2	R2.5	R3	R3.5	R4
挤压后	1.47	1.73	2.02	2.5	2.92

五个油槽沟曲率数值中选出挤压变形后最接近产品要求的数值作为下一步过渡圆角仿真计算的数据基础，选取 5 个不同的数值的过渡圆角值进行仿

真计算，结果如表 6 所示。

表 6 外圈过渡圆角挤压试验仿真数据

挤压前	R1.0	R1.5	R2	R2.5	R3
挤压后	2.02	2.03	2.04	2.05	2.06

由上述表 5 可知：外圈内油槽的沟曲率在挤压后会发生变化，且均为变小的情况，这是因为外圈的塑性变形为内孔压缩、外径拉伸，且原外圈圆柱内孔在；过度圆角处是轴承挤压装配过程中与内圈接触面应力最大的位置，内圈和外圈易因该处应力集中发生形变产生“嵌合粘连”现象，外在直观表现为轴承挤压装配后内外圈卡滞甚至卡死状态。

4.2 试验验证

为了验证轴承挤压变形仿真分析计算结果的准

确性，准备了 10 套样件，各使用 5 套样件分别验证油槽和过渡圆角在挤压过程中的变化情况。

首先进行油槽沟曲率的变化情况验证，样件内圈状态均相同，外圈除内油槽的沟曲率不同外，其余状态均一致。油槽沟曲率对应仿真计算数值，分别为 R2, R2.5, R3, R3.5, R4。均使用相同的工艺参数进行挤压装配，使用轮廓仪对挤压后的轴承外圈内油槽进行检测，数据见表 7。由表 7 可知，在挤压装配后，外圈的内油槽沟曲率变小，符合仿真结果。

表 7 外圈内油槽沟曲率挤压试验前后变化情况

挤压前	R2	R2.5	R3	R3.5	R4
挤压后	1.51	1.82	2.11	2.58	2.96

再进行过渡圆角的挤压变化试验，同理，内圈状态和外圈除了过渡圆角尺寸外均一致。过渡圆角尺寸分别为 R1, R1.5, R2, R2.5, R3，同样对应仿真

计算参数，5 件样件均采用相同的挤压工艺参数，挤压完成后，测试内外圈转动灵活性，观察记录内圈球面和外圈内球面外观状态，结果见表 8。灵活性状态符合仿真计算的应力大小情况。

4.3 对比分析

将外圈内油槽沟曲率和过度圆角试验变化情况与仿真计算结果进行对比，如图 5 和图 6 所示，两条数据曲线基本趋势吻合，表明了仿真计算结果的准确性。

结合表 8，外圈内油槽与内孔的过渡圆角从小到大，挤压后的轴承旋转灵活性依次变好，这与仿真计算的应力从大到小情况符合^[8-9]。结合轴承内圈与外圈接触表面的外观情况，并不表明过渡圆角越大越好，圆角过大会导致外圈内油槽在塑性变形的过程中，油槽深度变浅，影响轴承使用过程中油路润滑。因此油槽过渡圆角需选取适当大小，满足灵活性要求的同时保证轴承润滑油路符合要求。

表 8 不同尺寸的过渡圆角与挤压后轴承灵活性的关系 (单位: mm)

过渡圆角	挤压前	R1	R1.5	R2	R2.5	R3
	挤压后	1.79	1.83	1.98	2.02	2.07
灵活性判定		卡滞	轻微卡滞	灵活	灵活	灵活
油槽沟底径 ($\phi 27 \pm 0.05$)		26.99	26.98	26.98	26.95	26.93
内外圈接触面压痕深度		0.03	0.01	无压痕	无压痕	无压痕

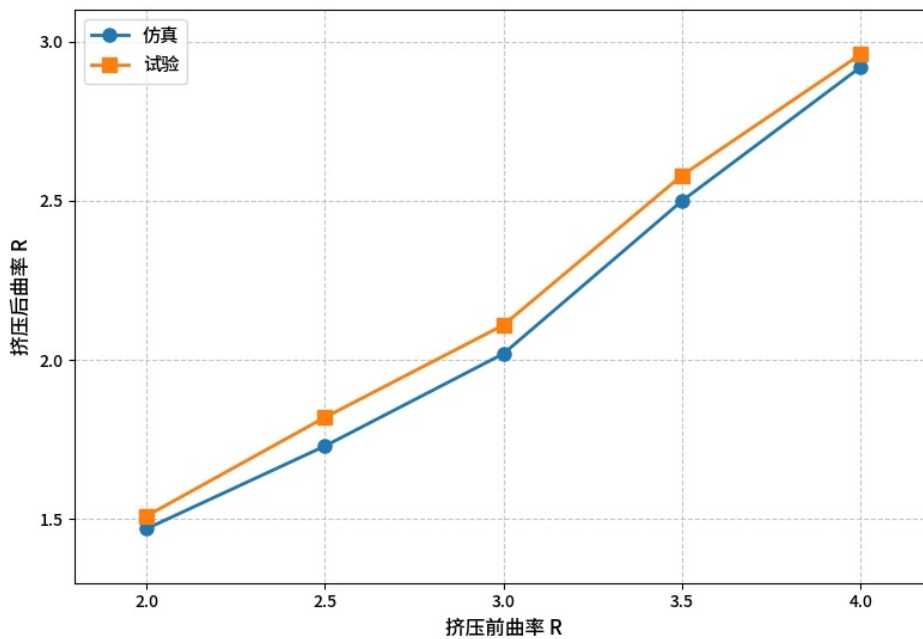


图 5 外圈内油槽沟曲率变化的试验数据和仿真结果对比

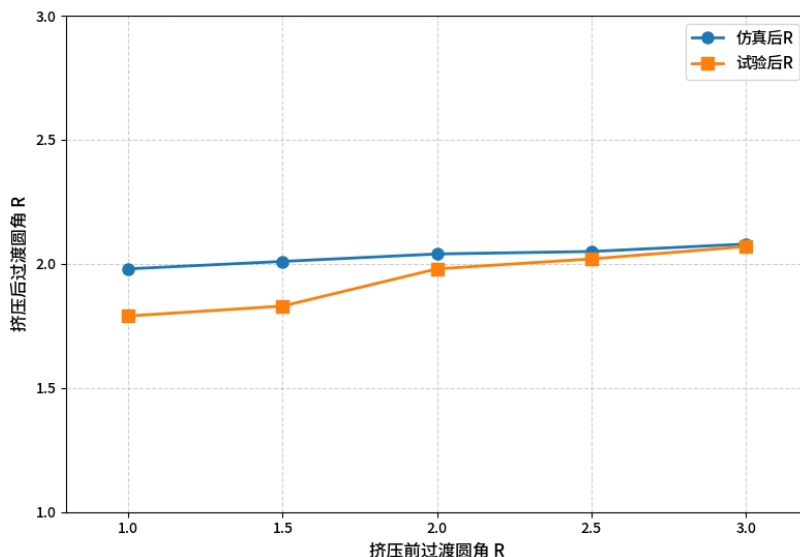


图6 外圈过渡圆角变化的试验数据和仿真结果对比

5 结束语

该型外圈带油槽型向心关节轴承在挤压变形后出现的内圈外圈卡滞问题，本次原因分析为内圈外圈之间应力过大导致套圈接触面形变，两套圈“抱住卡滞”。改进优化增大油槽过渡圆角尺寸，减小接触应力，同时增大挤压前外圈的内油槽沟曲率，保证挤压后油槽沟曲率满足要求。

参考文献

- [1] 刘香港,陈辉,张静婕,等.自润滑关节轴承成形技术研究进展[J].塑性工程学报,2024,31(2):15-23.
- [2] 张俊潇,李振,任志英,等.自润滑关节轴承及其寿命研究现状与未来展望[J].材料导报,2021,9:1-15.
- [3] 张浩然.基于多步成形法的关节轴承成形工艺研究[D].秦皇岛:燕山大学,2025.
- [4] 赖亮庆,陈高升,冯林兆,等.高精度 17-4PH 不锈钢隔碗拉伸液压胀形复合成形工艺参数优化[J].精密成形工程,2021,13(03):104-111.
- [5] 周长春,杨永生,谭德强,等.直升机变距拉杆杆端自润滑关节轴承的力学分析和损伤特性[J].航空动力学报,2022,37(5):924-933.
- [6] 王伟,庞少雄,丁士杰,等.向心关节轴承包围式单边挤压成形工艺数值模拟与实验验证[J].材料导报,2025,39(4):1-6.
- [7] 曹晓彬,华希俊,平国峰,等.不同工艺参数对整体式自润滑关节轴承旋压装配成形的影响[J].塑性工程学报,2022,29(1):94-101.
- [8] 张晶晶,黄雄荣,汪伟.关节轴承装配状态对无载启动力矩的影响[J].计算机辅助工程,2024,33(1):1-5.
- [9] 董炳武,牛荣军,徐曼君,等.高频轻载自润滑关节轴承加速寿命试验方法[J].轴承,2021(3):21-25.

版权声明：©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS