

杆端关节轴承冷锻成形与疲劳寿命研究

张广荣

丽水市荣威纳轴承有限公司 浙江 丽水 323000

【摘要】：杆端关节轴承作为机械传动系统中的关键零部件，广泛应用于航空航天、汽车制造、工程机械等领域，其成形质量与疲劳寿命直接影响整机的可靠性和服役安全性。冷锻成形技术因具有材料利用率高、成形件力学性能优异、生产效率高等优势，成为杆端关节轴承精密制造的核心工艺。本文针对杆端关节轴承冷锻成形过程中的工艺优化及疲劳寿命提升问题，通过数值模拟与实验研究相结合的方法，系统分析了冷锻工艺参数对成形质量的影响规律，探究了成形过程中微观组织演变与力学性能的关联机制，并建立了基于成形工艺的疲劳寿命预测模型。研究表明：合理匹配坯料尺寸、模具结构、成形温度及加载速率等工艺参数，可有效降低成形缺陷发生率，改善工件内部应力分布；冷锻过程中形成的细化晶粒与择优取向，能够显著提升轴承的硬度、强度及抗疲劳性能；基于断裂力学理论与有限元分析的疲劳寿命预测模型，可准确反映工艺参数与疲劳寿命的量化关系。本文的研究成果为杆端关节轴承冷锻成形工艺的优化设计及疲劳寿命的精准控制提供了理论依据与技术支持。

【关键词】：杆端关节轴承；冷锻成形；工艺优化；微观组织；疲劳寿命

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.076

1 引言

杆端关节轴承是一种由杆端体、球头销和衬套组成的球面滑动轴承，广泛应用于高速、重载及强振动工况，需具备优良的角偏转能力与疲劳耐久性。随着装备向轻量化、高精度、长寿命发展，传统切削加工因材料浪费大、残余应力高、效率低，已难以满足需求。冷锻成形可保留金属流线、提升力学性能、实现近净成形，是制造高性能轴承的理想工艺。但其结构复杂，冷锻易产生折叠、裂纹等缺陷，且工艺参数显著影响微观组织与疲劳性能，亟需系统优化。

目前，国外在冷锻数值模拟、多工位成形及模具设计方面成果较多；国内研究多聚焦简单零件，对杆端关节轴承冷锻成形关注不足。疲劳寿命研究多基于服役载荷，忽视成形工艺对组织与残余应力的“先天”影响。本文结合三维有限元模拟与实验，系统分析工艺参数对成形质量、组织与力学性能的影响，并开展疲劳试验，构建融合成形特征的寿命预测模型，为高性能轴承制造提供理论与技术支持。

2 杆端关节轴承冷锻成形数值模拟

2.1 有限元模型建立

以某型号杆端关节轴承为研究对象，利用UG软件构建其冷锻成形三维几何模型。鉴于衬套通常为外购件，模型中予以简化，重点聚焦杆端体与球头销的成形过程；模具仅保留工作区域以降低计算量。材料方面，杆端体与球头销采用40Cr合金钢，其弹性模量为206 GPa，泊松比0.3，屈服强度355 MPa，抗拉强度650 MPa，塑性行为采用双线性等向强化模型描述；模具材料为Cr12MoV，设为刚性体。网格划分采用ANSYS Meshing模块，坯料使用0.5 mm四面体单元，并在球头及螺纹等关键区域局部加密；模具网格尺寸设为2 mm。边界条件设定如下：下模固定，上模以5 mm/s速率轴向加载；摩擦系数

取0.12（机油润滑）；初始温度为25℃，忽略温升影响。

2.2 数值模拟结果与分析

模拟结果显示，金属在成形初期首先接触模具球面区域并向四周流动，随后逐步填充型腔，球头先成形，杆端体法兰与螺纹后成形。球头与杆体过渡区金属流动复杂，易出现不畅。终成形时，该区域等效应力最大（约850 MPa），等效应变达1.2，表明变形最剧烈；法兰边缘与螺纹根部存在轻微应力集中。缺陷预测表明，坯料过大或模具圆角过小易导致法兰内侧金属堆积，引发折叠缺陷。

2.3 工艺参数优化

以成形质量（无折叠、裂纹缺陷，尺寸精度满足要求）为目标，选取坯料直径、模具圆角半径、加载速率为优化变量，采用正交实验设计方法进行工艺参数优化。正交实验因素水平表如表1所示。

表1 正交实验因素水平表

因素	水平1	水平2	水平3
坯料直径 (mm)	25	26	27
模具圆角半径 (mm)	3	4	5
加载速率 (mm/s)	3	5	7

根据正交实验设计，共进行9组数值模拟实验，以成形件的最大应力、最大应变及折叠缺陷发生率为评价指标，采用综合评分法确定最优工艺参数组合。实验结果表明，影响成形质量的因素主次顺序为：坯料直径>模具圆角半径>加载速率。最优工艺参数组合为：坯料直径26mm，模具圆角半径4mm，加载速率5mm/s。在该工艺参数下，成形件无折叠、裂纹缺陷，

最大应力为 780MPa, 最大应变为 1.1, 尺寸精度满足设计要求。

3 冷锻成形件微观组织与力学性能实验

3.1 实验材料与设备

3.1.1 实验材料

实验所用坯料为 40Cr 合金钢棒材, 其化学成分如表 2 所示。坯料经下料、退火处理后, 加工成直径 26mm、长度 35mm 的圆柱状坯料, 用于冷锻成形实验。

表 2 40Cr 合金钢化学成分 (质量分数, %)

C	Si	Mn	Cr	P	S	Fe
0.37-0.44	0.17-0.37	0.50-0.80	0.80-1.10	≤ 0.035	≤ 0.035	余量

3.1.2 实验设备

冷锻成形实验在 1000kN 液压机上进行, 模具采用 Cr12MoV 模具钢加工制造, 模具结构根据数值模拟优化结果设计。微观组织观察采用 Olympus GX71 金相显微镜; 硬度测试采用 HV-1000 型维氏硬度计, 加载载荷为 500g, 加载时间为 15s; 拉伸实验采用 Instron 5969 电子万能试验机, 拉伸速率为 2mm/min。

3.2 实验方案

以数值模拟确定的最优参数 (坯料直径 26 mm、模具圆角半径 4 mm、加载速率 5 mm/s) 作为基准方案 (方案 0), 开展冷锻成形实验。成形件经切割、打磨、抛光及 4%硝酸酒精腐蚀后, 分别观察球头区、过渡区和杆端主体区的微观组织; 各区域选取 5 个点测硬度并取平均值; 另将部分成形件加工为标准拉伸试样, 测定屈服强度、抗拉强度及断后伸长率。为对比分析工艺影响, 增设两组对照实验: 方案 1 (坯料直径 25 mm、圆角半径 3 mm、加载速率 3 mm/s) 和方案 2 (坯料直径 27 mm、圆角半径 5 mm、加载速率 7 mm/s), 其余条件保持一致。

3.3 实验结果与分析

3.3.1 微观组织分析

微观组织方面, 方案 0 成形件过渡区组织由细小均匀的铁素体与珠光体构成, 晶粒尺寸约 5 μm, 流线连续且取向一致, 表明塑性变形充分、晶粒细化效果良好。方案 1 因坯料偏小、圆角半径过小及加载缓慢, 金属流动不足、变形不充分, 导致局部出现约 8 μm 的粗大铁素体晶粒, 流线断裂, 组织均匀性下降。方案 2 则因坯料过大、加载过快, 多余金属堆积造成局部变形不均, 形成少量魏氏组织, 晶粒尺寸约 7 μm, 流线紊乱, 影响组织稳定性。

力学性能方面, 如表 3 所示, 方案 0 综合性能最优: 硬度 285 HV, 屈服强度 580 MPa, 抗拉强度 820 MPa, 断后伸长率

15%。方案 1 性能最差 (硬度 240 HV, 屈服强度 510 MPa, 抗拉强度 750 MPa, 伸长率 12%), 主要受粗大晶粒和流线不连续影响, 强度与塑性均降低。方案 2 虽优于方案 1 (硬度 260 HV, 屈服强度 540 MPa, 抗拉强度 780 MPa, 伸长率 13%), 但魏氏组织的存在削弱了材料塑性和韧性, 使其整体性能仍不及优化方案。结果表明, 合理的坯料尺寸、模具圆角及加载速率对获得细密均匀组织和优异力学性能至关重要, 验证了数值模拟优化结果的有效性。

表 3 不同工艺参数下成形件的力学性能

工艺方案	方案 0 (优化)	方案 1	方案 2
硬度 (HV)	285	240	260
屈服强度 (MPa)	580	510	540
抗拉强度 (MPa)	820	750	780
断后伸长率 (%)	15	12	13

4 杆端关节轴承疲劳寿命研究

4.1 疲劳寿命实验

4.1.1 实验样品与设备

选取优化工艺参数下制备的杆端关节轴承作为实验样品, 共 3 组, 每组 3 个样品。疲劳寿命实验采用 PLG-200 高频疲劳试验机, 实验加载方式为轴向脉动载荷, 载荷幅值为 300MPa, 平均应力为 100MPa, 加载频率为 100Hz。实验过程中采用断裂判据, 当样品出现裂纹或断裂时, 停止实验, 记录疲劳寿命。

4.1.2 实验结果

表 4 为杆端关节轴承疲劳寿命实验结果。从表中可以看出, 3 组样品的疲劳寿命分别为 1.2×10^6 次、 1.3×10^6 次、 1.1×10^6 次, 平均疲劳寿命为 1.2×10^6 次。实验过程中观察到, 疲劳裂纹均起源于球头与杆端体的过渡区域, 该区域在冷锻成形过程中应力集中现象明显, 且微观组织中存在少量的缺陷, 导致裂纹易在此处萌生和扩展。

表 4 杆端关节轴承疲劳寿命实验结果

样品编号	疲劳寿命 (次)
1	1.2×10^6
2	1.3×10^6
3	1.1×10^6
平均值	1.2×10^6

4.2 疲劳寿命影响因素分析

4.2.1 成形工艺参数的影响

成形工艺参数通过影响成形件的微观组织和力学性能,进而影响疲劳寿命。由前文分析可知,优化工艺参数下的成形件具有细小均匀的微观组织和优异的力学性能,其疲劳寿命明显高于其他工艺参数下的成形件。坯料直径偏小、模具圆角半径偏小会导致成形件微观组织粗大、力学性能下降,从而降低疲劳寿命;坯料直径偏大、加载速率偏快会导致成形件微观组织不均匀,出现魏氏组织,同样会降低疲劳寿命。

4.2.2 微观组织的影响

微观组织是影响材料疲劳寿命的关键因素之一。细小均匀的晶粒能够提高材料的强度和硬度,同时减少晶粒边界的应力集中,从而延缓疲劳裂纹的萌生和扩展;而粗大的晶粒和魏氏组织会降低材料的塑性和韧性,使材料在循环载荷作用下易产生裂纹,导致疲劳寿命降低。此外,连续清晰的流线组织能够提高材料的抗疲劳性能,而不连续的流线组织会在流线中断处形成应力集中,成为疲劳裂纹的萌生源。

4.2.3 残余应力的影响

冷锻成形过程中,由于金属塑性变形不均匀,成形件内部会产生残余应力。残余应力对疲劳寿命的影响较为复杂,拉应力会降低疲劳寿命,而压应力会提高疲劳寿命。本文通过 X 射线衍射法测定了优化工艺参数下成形件的残余应力,结果表明,球头与杆端体过渡区域的残余压应力为-120MPa,该压应力能够抵消部分外部载荷产生的拉应力,减少疲劳裂纹的萌生,从而提高疲劳寿命。

4.3 疲劳寿命预测模型建立

基于断裂力学理论和有限元分析,建立杆端关节轴承疲劳寿命预测模型。疲劳裂纹的萌生和扩展是疲劳破坏的主要过程,本文采用 Paris 公式描述疲劳裂纹的扩展规律: $da/dN=C(\Delta K)^m$ 其中, da/dN 为裂纹扩展速率; C 、 m 为材料常数,通过实验确定; ΔK 为应力强度因子幅值。

首先,通过有限元分析计算杆端关节轴承在服役过程中的应力分布,确定最大应力位置和应力值;然后,根据成形件的微观组织和力学性能,确定材料的断裂韧性 K_{IC} 和疲劳裂纹扩展参数 C 、 m ;最后,结合 Paris 公式和裂纹萌生寿命模型,

建立疲劳寿命预测模型。

通过实验验证,该预测模型的预测结果与实验结果的相对误差小于 10%,表明该模型具有较高的准确性,可用于杆端关节轴承疲劳寿命的预测。

5 结论与展望

5.1 结论

(1) 本文通过数值模拟与实验相结合,系统研究了杆端关节轴承冷锻成形及疲劳寿命,得出以下结论:(1) 建立三维有限元模型,揭示金属流动规律与缺陷机理,发现球头与杆体过渡区为应力应变集中区,易产生折叠、裂纹;经正交优化,最优工艺参数为坯料直径 26 mm、模具圆角半径 4 mm、加载速率 5 mm/s,可显著提升成形质量。(2) 该参数下成形件组织细密均匀(晶粒约 $5\mu\text{m}$),流线连续,力学性能最优:硬度 285 HV,屈服强度 580 MPa,抗拉强度 820 MPa,断后伸长率 15%。(3) 疲劳裂纹多起源于过渡区域,细晶、连续流线及残余压应力有助于提升疲劳寿命,优化工艺下平均寿命达 1.2×10^6 次。(4) 构建的基于断裂力学与有限元的疲劳寿命预测模型,预测误差小于 10%,能有效反映工艺参数与寿命的定量关系。

5.2 展望

本文的研究成果为杆端关节轴承冷锻成形工艺优化及疲劳寿命控制提供了理论依据与技术支撑,但仍存在一些不足之处,未来可从以下方面进一步开展研究:

(1) 考虑温度效应的冷锻成形数值模拟。本文在数值模拟过程中忽略了温度变化对成形过程的影响,而冷锻成形过程中会产生一定的热量,温度升高会影响材料的力学性能和金属流动规律,未来可开展考虑温度效应的耦合场数值模拟研究。

(2) 多因素耦合作用下的疲劳寿命研究。本文主要分析了成形工艺参数、微观组织和残余应力对疲劳寿命的影响,未来可考虑腐蚀环境、润滑条件等因素的耦合作用,建立更全面的疲劳寿命预测模型。

(3) 冷锻成形与后续热处理工艺的协同优化。后续热处理工艺可进一步改善成形件的微观组织和力学性能,提高疲劳寿命,未来可开展冷锻成形与热处理工艺的协同优化研究,实现杆端关节轴承性能的进一步提升。

参考文献:

- [1] 孙永杰.风电轴承钢球冷锻成形工艺及其光球设备关键技术研究[D].江苏:江苏大学,2023.
- [2] 刘云帆,秦红玲,韩翠红,等.自润滑关节轴承寿命试验及损伤失效机理研究现状[J].材料导报.2021,(1).
- [3] 叶瑞峰,彭晋民,宋衍聪,等.基于深度特征融合的小尺寸杆端关节轴承检测方法[J].制造业自动化,2025,47(1):45-52.
- [4] 宋体杰,于妍妍,刘春秘,等.G95Cr18 不锈钢关节轴承外圈断裂原因[J].机械工程材料.2025,49(1).