

# 安装不当导致角接触轴承异常磨损的典型案例分析

高博思

焦作铁路电缆有限责任公司 河南 焦作 454001

**摘要：**角接触球轴承因其能同时承受径向和轴向联合载荷，并具备高转速、高精度等特性，被广泛应用于电缆制造行业的各类核心生产设备中，如拉丝机、装铠机及龙门收线的转动系统。然而，在实际生产运维中，因安装工艺不规范、技术标准执行不到位而导致的轴承早期失效问题屡见不鲜，不仅造成设备非计划停机，严重影响生产效率与产品质量，更带来高昂的维修成本与安全风险。本文以作者在电缆制造行业多年实践经验为基础，聚焦于三类典型设备（拉丝机、龙门收放线、装铠机）中因安装不当引发的角接触轴承异常磨损案例，深入剖析其失效机理、根本原因及预防对策。通过系统性地阐述正确的安装流程、关键控制点及标准化作业规范，旨在为同行业设备维护人员提供一套可操作、可复制的技术指南，从而有效提升设备可靠性，保障生产线的稳定高效运行。

**关键词：**角接触轴承；电缆制造；拉丝机；龙门收线；装铠机；异常磨损

## 引言

电缆制造业是国民经济重要基础产业，生产依赖拉丝机、装铠机等精密设备，其中角接触球轴承是支撑高速旋转轴系、传递复杂载荷的关键部件。其设计在精确预紧状态下工作，可消除内部游隙、提升刚度与旋转精度，但也因此对安装质量极为敏感<sup>[1]</sup>。过盈量、预紧力、对中、清洁度等方面的微小偏差，都可能打破其理想工作状态，引发异常磨损、疲劳剥落甚至碎裂。这种“人因”导致的早期失效隐蔽且重复，会制约企业精益生产与高质量发展。本文将结合笔者在大型电缆制造企业任设备工程师时处理的三个典型案例，还原故障、分析原因、总结教训，并提出系统预防改进措施，供行业参考。

## 1 理论基础：角接触轴承的工作特性与安装要求

### 1.1 工作特性

角接触球轴承的滚动体与内外圈滚道在接触点处形成一个特定的接触角（通常为 $15^\circ$ 、 $25^\circ$ 或 $40^\circ$ ）。这个角度决定了轴承承受轴向载荷的能力——接触角越大，轴向承载能力越强。在实际应用中，此类轴承极少单独使用，通常以背对背（DB）、面对面（DF）或串联（DT）的方式成对或成组配置，以平衡双向轴向力并提高系统刚性。

### 1.2 安装要求

正确安装的核心要素包括：（1）精确的过盈配合：内圈通常与旋转轴采用过盈配合，外圈与轴承座采用间隙或轻微过盈配合。过盈量必须严格依据轴承尺寸、转速和工作温度计算得出。过盈量不足会导致内圈在轴上“蠕动”，产生微动磨损（Fretting Corrosion）；过盈量过大则会使轴承内部游隙消失殆尽，甚至产生负游隙，导致滚动体与滚道间应力剧增，摩擦热急剧升高。（2）精准的

轴向预紧：这是角接触轴承安装成败的决定性因素。预紧力的目的是消除轴承内部的原始游隙，建立稳定的内部载荷，从而提升旋转精度、刚度和使用寿命。预紧力过小，无法有效消除游隙，设备在启停或变载时会产生冲击，加速磨损；预紧力过大，则会使轴承内部摩擦力矩显著增加，温升过高，润滑脂迅速劣化，最终导致滚动体和滚道发生严重的粘着磨损（Adhesive Wear）或疲劳点蚀。（3）严格的同轴度与垂直度：轴承座孔、轴肩、隔套等关联部件的加工精度必须保证。任何微小的偏斜都会导致轴承滚道受力不均，局部区域应力集中，形成偏磨。（4）极致的清洁度：安装环境、工具、零部件表面必须保持高度清洁<sup>[1]</sup>。微米级的硬质颗粒污染物一旦进入滚道，就会像“研磨膏”一样，在滚动体与滚道之间造成犁沟式划伤（Abrasive Wear），这是异常磨损最常见的形式之一。

## 2 典型案例剖析

2.1 案例一：拉丝机收线顶尖输入轴角接触轴承“跑圈”与微动腐蚀

### 2.1.1 设备背景

ZL25/TH2000/WS630B中拉机生产线，其收线输入轴前端采用一对7312B（DB）背对背安装的角接触球轴承。

### 2.1.2 故障现象

设备在更换轴承投入运行约8个月后，收线顶尖输入端出现持续低频异响，并伴随轻微振动。连续监测显示顶尖处轴承温度从正常的 $55^\circ\text{C}$ 缓慢爬升至 $75^\circ\text{C}$ 。拆解后发现，靠近顶尖侧的轴承内圈与轴配合面出现明显的圆周状磨损痕迹（即“跑圈”），磨损区域呈红褐色锈迹，并伴有麻点状微动腐蚀坑。轴承滚道和滚动体表面光洁，

无明显疲劳剥落。

### 2.1.3 原因剖析

直接原因是安装时未严格按照图纸要求的过盈量进行装配。根据使用场景的重载和振动工况,原设计要求内圈与轴的过盈量为 $+0.015\sim 0.023\text{mm}$ ,但实际测量发现过盈量仅为 $+0.01\text{mm}$ ,低于下限。深层原因是安装团队缺乏对轴承过盈配合重要性的认知。他们沿用了常用轴承的安装习惯,认为“能装进去就行”。在冷装过程中,未使用感应加热器均匀加热轴承内圈,而是采用局部火焰烘烤,导致内圈受热不均,膨胀量不足且存在残余应力。在巨大的交变扭矩作用下,内圈与轴之间产生了微米级的相对滑动,形成了微动腐蚀。

### 2.1.4 经验教训

对于重载、中高速旋转设备,必须严格执行轴承过盈量的计算与验证<sup>[2]</sup>。冷装或热装工艺必须规范,优先选用感应加热等均匀加热方式,并使用专用工装确保轴承平直、无冲击地套入轴上。

2.2 案例二:KD40/800高速装铠机放带压板角接触轴承因预紧力过大导致高温烧毁

### 2.2.1 设备背景

一台KD40/800高速装铠机,其放带装置运行中要高速旋转,需要压板确保钢带转动并不受离心力影响。压板中心轴采用一对7214B(DF)面对面安装的角接触球轴承,以承受绞合过程中产生的巨大反向推力。

### 2.2.2 故障现象

新更换轴承后,设备仅运行3天,轴承温度持续发热,转动异响严重,影响钢带正常工作而停机。紧急拆解发现,两轴承滚道和滚动体表面呈现大面积蓝黑色回火色,润滑脂碳化变黑,滚动体已发生轻微变形,保持架有熔焊迹象。

### 2.2.3 原因剖析

直接原因是轴承预紧力严重超标。维修人员在调整预紧时,仅凭手感拧紧锁紧螺母,未测量轴向位移量。经事后复核,实际施加的预紧力约为设计值(15kN)的2.5倍。深层原因是维修规程缺失。该厂此前从未制定针对角接触轴承预紧力的标准作业指导书(SOP),全凭老师傅经验操作。此次维修恰逢经验丰富的师傅休假,由一名年轻技工独立完成,其对预紧力的概念模糊,误以为“越紧越好”。

### 2.2.4 经验教训

预紧力的设定绝非主观臆断。必须建立明确的量化标准,并配备相应的测量工具(如千分表测量轴向位移法,或使用带刻度的锁紧螺母配合力矩扳手法)。所有相

关维修人员必须接受专项培训,理解预紧力过大与过小的危害。

2.3 案例三:龙门收线架顶尖角接触轴承因不对中导致偏磨

### 2.3.1 设备背景

2000型号龙门收线架顶尖用于护套生产线收线工作,对线盘起到转动收线和承重作用,其顶尖内部采用一对7216AC角接触轴承。

### 2.3.2 故障现象

设备运行平稳,但轴承寿命极短,平均仅2-3个月。每次更换后,短期内无异常,但寿命始终无法达到预期。多次更换不同品牌轴承均无效。最终一次拆解发现,轴承外圈一侧滚道磨损严重,另一侧几乎无磨损,呈现典型的“偏磨”特征。

### 2.3.3 原因剖析

直接原因是轴承座孔加工精度不足,同轴度超差。经三坐标测量仪检测,两个轴承座孔的同轴度误差高达0.08mm,远超轴承允许的0.02mm标准。深层原因是设备在使用过程中,该处顶尖受到外力撞击,导致轴承座孔变形。维修人员在更换轴承时,只关注了轴承本身,忽略了对箱体这一基础件的几何精度进行复测。他们错误地将问题归咎于轴承质量问题,陷入了“换轴承一坏一再换”的怪圈。

### 2.3.4 经验教训

轴承失效分析不能“头痛医头,脚痛医脚”。在更换轴承前,必须对整个轴承系统的关联件(轴、轴承座、隔套、端盖等)进行全面的几何精度和尺寸链检查。任何基础件的变形或磨损,都是轴承无法正常工作的根本障碍。

## 3 系统性预防与改进对策

基于上述案例的深刻反思,解决角接触轴承因安装不当导致的早期失效问题,不能仅仅停留在个案处理和技术补救层面,而必须构建一套覆盖人员、流程、工具和管理系统性预防与改进体系。

### 3.1 建立标准化的安装作业指导书(SOP)

首要任务是建立一套详尽、权威且易于执行的标准化作业指导书(SOP)。这份SOP不应是泛泛而谈的原则,而应是一份包含详细步骤分解图、所需专用工具清单、关键参数(如过盈量、预紧力、力矩值)及其精确公差范围、清洁度等级要求、指定润滑脂型号与填充量等具体信息的操作手册。为了便于一线维修人员理解和执行,应制作图文并茂甚至视频版的指南,并将其张贴在相应的维修工位,确保在操作的每一刻都能得到清晰的指引<sup>[3]</sup>。同

时, SOP必须是一个动态文件, 随着设备的升级改造、新轴承型号的引入或新故障模式的发现, 及时进行修订和更新, 以始终保持其先进性和适用性。

### 3.2 强化人员培训与资质认证

再完美的SOP, 若没有合格的执行者, 也只是一纸空文。因此, 必须对维修团队进行系统性的赋能。这包括组织定期的理论培训, 邀请专家或资深工程师讲解角接触轴承的工作原理、常见的失效模式、正确的安装要点, 并结合真实的案例进行深度剖析, 让维修人员从思想深处认识到规范操作的重要性。更重要的是, 必须开展严格的实操考核。可以在车间设立专门的模拟工位, 让每位维修人员在监督下完成一次完整的轴承安装流程, 只有其操作完全符合SOP要求, 并能准确回答相关技术问题, 才能获得操作特定高价值设备轴承的资格认证。此外, 应着手建立一个内部知识库, 将历年来积累的故障诊断报告、成功的维修案例和宝贵的经验心得汇编成册, 作为新员工入职培训和在职人员持续学习的核心教材, 实现知识的有效传承。

### 3.3 配置专业化的安装与检测工具

要确保安装质量, 必须为维修团队配备与之匹配的专业化工具。这包括但不限于用于均匀加热轴承内圈的感应轴承加热器、用于无损拆卸的液压拉马、用于精确测量预紧位移的高精度千分表、用于施加标准力矩的力矩扳手, 以及用于验证配合尺寸的内径/外径千分尺等。工厂管理层应认识到, 这些工具的投资并非成本, 而是对设备可靠性和生产效率的保障<sup>[4]</sup>。必须通过制度强制要求, 在所有涉及角接触轴承的关键设备维修中, 必须使用这些专业工具, 坚决摒弃用铜棒敲打、凭手感拧紧等落后且危险的“土办法”, 从硬件上为规范作业提供支撑。

### 3.4 实施轴承安装全过程的质量追溯

为了将责任落到实处, 并为未来的故障分析提供数据支持, 有必要实施轴承安装全过程的质量追溯制度。每次进行轴承更换作业时, 操作人员必须填写一份详细的《轴承安装记录卡》。这张卡片应强制记录轴承的完整型号、生产批次号、安装日期、操作人员姓名、所使用的全部工具清单, 以及最关键的实测数据, 例如轴承加热的最终温度、安装时的最大压入力、调整预紧力时所依据的轴向位移量或锁紧螺母力矩值等。这些数据不仅是本次安装合规性的证明, 更是未来进行失效分析时不

可或缺的线索。通过这种可追溯的机制, 可以有效倒逼每一位操作人员对自己的工作质量负责, 形成良好的质量文化。

### 3.5 将轴承座等基础件纳入定期点检范围

历史教训告诉我们, 轴承座孔的变形、轴的弯曲、隔套的磨损等基础问题, 往往是轴承反复失效的真正元凶。因此, 必须改变“头痛医头”的思维定式, 将轴承座、传动轴、隔套、端盖等所有关联基础件纳入设备的定期点检和大修计划中。特别是在设备经历搬迁、撞击或发生过轴承早期失效后, 应利用大修窗口, 使用三坐标测量仪、激光对中仪等专业设备, 对轴承座孔的同轴度、圆度、垂直度以及轴的直线度等关键几何精度进行检测和评估。通过建立这些基础件的状态档案, 并对其健康状况进行趋势化管理, 可以在问题萌芽阶段就进行干预, 从根本上为角接触轴承创造一个稳定、可靠的运行环境。

## 4 结语

角接触球轴承在电缆制造核心设备中应用有利有弊, 虽赋予设备高精度、高刚度性能, 却让设备可靠性与安装质量紧密相关。本文深度剖析拉丝机等三类设备因安装不当导致的轴承异常磨损案例, 揭示过盈量不足、预紧力失控和基础件不对中等三大“元凶”及其作用机理, 发现故障源于人的认知局限、流程缺失和管理漏洞, 解决需走向系统化管理变革。通过建立科学SOP、强化人员能力、配备专业工具、实施全过程追溯、关注基础件等措施, 可将“安装不当”控制在安全阈值内。如此才能释放轴承设计潜能, 让核心设备摆脱非计划停机困扰, 以更高可靠性等企业高质量发展提供保障, 这既是对设备和人员负责, 也是守护企业核心竞争力。

## 参考文献

- [1]胡天.基于数模双驱动的角度接触轴承退化状态评估研究[D].哈尔滨工业大学,2025.
- [2]江龙.角接触轴承磨损分析新方法及应用研究[D].电子科技大学,2025.
- [3]李杰.高速角接触轴承润滑油膜及滚动体油膜完整度分析[D].西安理工大学,2022.
- [4]刘冰洋,谢兴会,范强,等.高速角接触轴承保持架结构特性的数值模拟[J].太原科技大学学报,2022,43(05):427-432.