

# 铝加工包装机关键部件失效机理与预防性维护研究

许仓孝 王世博

河南中孚高精铝材有限公司 河南 郑州 451200

**摘要:** 铝加工包装机运行稳定性影响成品产量与企业效益,但高强度生产中关键部件失效易导致非计划停机。本文研究其关键部件失效机理并构建预防性维护体系:先剖析典型铝加工包装机(薄膜缠绕机等)结构与功能,识别出减速机、轴承、链条等五大类核心部件;接着分析这些部件在高负载等复杂工况下的疲劳断裂、磨损失效等主要失效模式及内在机理;最后提出融合状态监测、数据分析与智能决策的预防性维护策略,以振动分析等技术为核心监测手段,结合大数据与机器学习算法,实现关键部件健康状态实时评估与剩余寿命预测,将传统维修模式转变为预测性维护模式。该体系可降低故障率、延长部件寿命、提升生产线整体效能,助力铝加工企业智能化、精益化生产。

**关键词:** 铝加工包装机;关键部件;失效机理;预防性维护;状态监测;预测性维护

## 引言

现代制造业追求高质量、高效率与低成本,铝材凭借轻质、高强等优异性能,在多领域广泛应用。包装工序作为铝材生产最后环节,对保护产品、提升形象意义重大,铝加工包装机是完成该工序复杂操作的核心装备,涵盖自动绕膜、精确包装等全过程。但铝加工包装线经常24小时高强度运转,工作环境严苛,关键部件易性能退化或失效,一次故障轻则致产品缺陷,重则引发生产线长时间停机,造成巨大损失,非计划停机中包装设备故障占比超30%。传统的设备维护模式主要依赖于事后维修(Break down Maintenance)或基于固定周期的预防性维护(Time-based Preventive Maintenance)。前者“头痛医头,脚痛医脚”,无法避免突发故障带来的冲击;后者则存在“过度维护”或“维护不足”的风险,既浪费了人力物力,又可能因维护间隔设置不当而错过最佳干预时机。因此,深入探究铝加工包装机关键部件的失效根源,建立一套基于其失效机理、能够精准预判故障的预防性维护体系,已成为行业亟待解决的关键技术问题。

## 1 铝加工包装机关键部件识别与功能分析

铝加工包装机是一个复杂的机电一体化系统,根据其工艺流程,可大致分为以下几个功能单元,每个单元都包含若干对整机性能起决定性作用的关键部件。

### 1.1 运卷/卸卷单元

该单元负责将轧制或分切后的铝成品卷材运送至包装线,在后续包装工序中平稳展开。其核心部件包括液压马达、升降器以及升降油缸。其中,升降油缸直接承载铝卷重量并传递动力,需具备极高的刚度和强度,以确保卷材能平稳升起并运转;升降油缸和液压马达则通

过液压驱动实现升降和旋转,以便快速装卸铝卷;升降器在卷材升降期间保证平稳,是防止升降油缸缸头断裂的关键执行元件。

### 1.2 分切单元

用于将宽幅铝卷按客户要求精确分切成多个窄卷。该单元的关键部件主要包括刀轴、圆盘剪切刀及隔环。刀轴作为安装剪切刀片的精密主轴,其旋转精度和动态刚性直接决定了分切边缘的平整度与毛刺水平;圆盘剪切刀通常由一对硬质合金制成的刀片组成,通过精确控制其间隙配合实现对铝材的高效剪切;而隔环则用于在刀轴上精确定位各刀片间距,确保分切宽度的一致性,其尺寸稳定性对产品质量至关重要。

### 1.3 打带/捆扎单元

负责用钢带或塑钢带将成品铝卷进行捆扎固定。该单元由送带机构、收紧机构和熔接/扣合机构共同构成。送带机构通常由伺服电机、减速机和送带轮协同工作,确保捆扎带平稳、无褶皱地送出;收紧机构多采用电动马达,提供强大的拉紧力以保证捆扎牢固;熔接或扣合机构则在带尾完成最终连接,是整个打带循环动作的收尾环节,其可靠性直接影响捆扎成功率。

### 1.4 覆膜单元

为保护铝卷表面免受划伤和氧化,常在其外层覆盖一层塑料保护膜。该单元的核心包括绕膜机头、辊式托架和薄膜喂送机头。绕膜机头不仅支撑保护膜卷,还需具备张力调节功能,以适应不同材质和厚度的膜材;薄膜喂送机头通过特殊结构设计消除保护膜在展开过程中产生的横向褶皱;辊式托架则在适当压力下将保护膜平整、无气泡地压合到铝卷表面,确保覆膜效果均匀可靠。

综上所述,尽管各功能单元的具体部件各异,但从

失效共性和对整机影响的角度出发,可以将铝加工包装机的关键部件归纳为以下五大类:旋转支撑部件(如各类轴承)、动力传输部件(如齿轮、链条、皮带、联轴器及减速机)、执行与承载部件(如小车、刀轴、各类辊子)、流体动力部件(如液压泵、阀、气缸、油缸及其密封件)以及控制与传感部件(如PLC、伺服电机、编码器、各类位置/压力传感器)。这些部件共同构成了设备正常运行的基础,其任一环节的失效都可能引发连锁反应,导致整机功能瘫痪。

## 2 关键部件失效机理深度剖析

失效机理是指导致部件功能丧失或性能下降的根本原因和演化过程。针对上述五类关键部件,其主要失效模式及内在机理如下所述。

### 2.1 疲劳断裂

疲劳断裂主要发生在承受交变应力的金属构件上,如传动轴、刀轴、齿轮和缸杆等。在铝卷高速绕膜或运输过程中,这些部件内部会反复承受拉、压、弯、扭等多种复合交变应力的作用。即便工作应力远低于材料的静态强度极限,在几何形状突变处(如键槽、油孔、过渡圆角)形成的应力集中区域,仍会因微观裂纹的萌生与逐步扩展而最终导致突然断裂<sup>[1]</sup>。尤其在铝加工卷材包装和输运过程中,这些部件频繁受力会进一步加剧这种交变载荷的幅值和频率,显著加速疲劳损伤的累积过程,使得部件在预期寿命前发生灾难性失效。

### 2.2 磨损失效

磨损失效是铝加工包装机中最普遍且影响深远的失效形式,广泛存在于轴承、导轨、链条、齿轮副以及气缸/油缸的活塞杆与密封圈等摩擦副中。其机理复杂多样,主要包括粘着磨损、磨粒磨损和疲劳磨损。在润滑条件不佳或边界润滑状态下,接触表面的微观凸峰在高压下滑动时可能发生冷焊,随后又被剪断,导致材料转移和表面撕裂,即为粘着磨损,常见于高速运转的滚动轴承。更为突出的是磨粒磨损,由于铝加工车间空气中悬浮着大量铝屑和坚硬的氧化铝粉尘,这些硬质颗粒极易侵入摩擦界面,如同研磨剂般刮擦金属表面,形成犁沟状损伤,严重缩短部件寿命。此外,滚动轴承的滚道与滚动体在长期循环接触应力作用下,表层或次表层会产生微裂纹,裂纹扩展后导致材料剥落,形成典型的点蚀或剥落坑,属于疲劳磨损范畴。这三种磨损机制往往相互耦合,共同加速部件的性能退化。

### 2.3 腐蚀失效

腐蚀失效主要影响暴露在外的金属结构件以及液压系统内部元件。在潮湿、含冷却液雾气的车间环境中,

金属表面易形成电解质液膜,不同金属之间或同一金属的不同区域之间构成微电池,引发以电化学腐蚀为主的损伤过程。例如,碳钢机架与不锈钢紧固件接触时,碳钢作为阳极会加速溶解。此外,某些清洗剂或防锈油中的活性化学成分也可能与金属发生直接反应,造成化学腐蚀。值得注意的是,腐蚀与磨损之间存在强烈的协同效应:腐蚀产物(如铁锈)质地疏松,容易在摩擦过程中被剥离,暴露出新的活性金属表面继续腐蚀;同时,这些脱落的腐蚀产物又成为新的磨粒,进一步加剧机械磨损,形成“腐蚀—磨损—再腐蚀”的恶性循环,极大加速部件的失效进程。

### 2.4 变形失效

变形失效通常发生在刚度相对较低或长径比较大的部件上,如薄壁卷筒、细长刀轴以及大型机架等<sup>[2]</sup>。当部件所承受的外部载荷超过其材料的屈服强度,或在高温环境下长期工作时,会发生不可逆的塑性变形甚至蠕变。例如,超重铝卷可能导致卷筒产生永久性弯曲,影响卷取同心度;刀轴在高速旋转时,离心力与切削反力的共同作用可能使其产生微小挠曲,不仅降低分切精度,还可能诱发共振,加剧轴承磨损。此类变形虽未必立即导致功能丧失,但会显著降低设备的加工精度和运行稳定性,是渐进性失效的重要表现形式。

### 2.5 电气与控制失效

电气与控制系统的失效虽不涉及机械结构破坏,但对整机功能的影响同样致命。伺服驱动器、PLC模块、各类传感器及电缆接头是此类失效的高发部位。元器件随使用时间增长会发生自然老化,其电气参数逐渐漂移,最终导致功能异常。同时,车间内大功率电机频繁启停所产生的强烈电磁干扰(EMI)可能耦合进入信号线路,造成PLC误判或伺服系统失控。此外,物理损伤也不容忽视,例如拖链中反复弯折的电缆易发生内部导线断裂;位置传感器探头若被飞溅的铝屑覆盖,则无法准确反馈执行机构的位置信息,进而引发定位错误或逻辑混乱。这类失效往往具有突发性和隐蔽性,对生产连续性构成严重威胁。

## 3 基于失效机理的预防性维护策略构建

面对上述复杂的失效机理,传统的维护方式已显乏力。为此,本文提出一种以“状态监测”为基础、“数据驱动”为核心的预防性维护新范式,旨在实现从被动响应到主动预防的根本转变。

### 3.1 多维度状态监测技术体系

为全面捕捉设备健康状态的细微变化,需针对不同失效模式部署相应的监测技术,构建多维度、立体化的

感知网络。振动分析是监测旋转部件健康状况的有效手段,通过在轴承座、减速机箱体等关键位置安装加速度传感器,采集振动信号并进行频谱或包络分析,可精准识别轴承内/外圈、滚动体的早期损伤特征频率,有效预警疲劳与不平衡故障。油液分析则聚焦于润滑与液压系统的内部状态,通过定期抽取油样进行理化、污染度及光谱/铁谱分析,不仅能判断油品劣化程度,还能识别磨损颗粒的元素成分与形貌,从而追溯磨损部位与类型。红外热成像技术利用非接触方式扫描电机、轴承、电气柜等区域,通过捕捉异常温升发现因摩擦加剧、电气接触不良或冷却失效引发的潜在隐患<sup>[1]</sup>。对于裂纹萌生、微泄漏等瞬态事件,声发射技术凭借其材料内部微观结构变化释放的弹性波的高灵敏度,能够实现早期损伤的超前预警。这些技术互为补充,共同构成了覆盖机械、流体、电气等多领域的综合监测体系。

### 3.2 数据融合与智能诊断模型

单一监测手段的信息维度有限,难以全面刻画设备的复杂健康状态。因此,有必要将来自振动、油液、温度等多源异构数据进行时空对齐与特征融合,构建更鲁棒的健康评估模型。首先,通过特征工程从原始数据中提取能有效表征部件退化趋势的指标,如振动信号的均方根值(RMS)、峭度、特定频带能量,以及油液中磁性颗粒浓度等。在此基础上,引入机器学习算法进行智能诊断。监督学习方法(如支持向量机、随机森林)可利用历史标注数据训练分类模型,实现对已知故障模式的精准识别;而在缺乏充足故障样本的场景下,无监督或半监督学习方法(如自编码器、孤立森林)则通过学习正常状态的数据分布来检测异常。近年来,深度学习技术展现出强大优势,尤其是一维卷积神经网络(1D-CNN)能够直接处理原始振动时序信号,自动提取深层故障特征,实现端到端的高精度诊断,大幅降低了对人工特征工程的依赖。

### 3.3 剩余使用寿命(RUL)预测与维护决策

故障诊断的终极目标是预测。基于对部件退化轨迹的建模,可科学预测其剩余使用寿命(RUL),为维护

决策提供量化依据。虽然基于Paris裂纹扩展定律等物理模型的方法理论上可行,但在工程实践中往往受限于精确载荷谱和材料参数的获取难度<sup>[4]</sup>。相比之下,数据驱动的方法更具实用性。通过持续追踪健康指标(如振动RMS值)随时间的演变趋势,利用递归神经网络(RNN)或长短期记忆网络(LSTM)等时序模型,可以有效拟合并外推该指标的增长曲线,预测其达到预设故障阈值的时间,即为RUL。获得RUL后,维护决策系统可综合考虑设备在产线中的重要性等级、备件库存状态、当前生产计划窗口期等多重约束条件,自动生成最优的维护工单与资源调度方案,真正实现从“到期就修”到“该修才修”的精准化、智能化维护。

## 4 结语

本文研究铝加工包装机关键部件失效机理,构建了融合多源监测、数据分析与决策支持的预防性维护体系。机械部件失效主因是疲劳、磨损、腐蚀,控制系统失效源于电气干扰和元器件老化。通过部署多种监测技术,利用机器学习算法深度挖掘数据,可实时感知部件健康状态、预警故障、预测剩余寿命。该体系应用提升了设备可靠性与生产效率,带来经济效益,推动设备管理模式变革。未来研究可聚焦数字孪生技术深度融合,构建虚拟模型,提升故障预测与维护方案优化精度;探索边缘计算与云平台协同架构,形成“边-云”一体智能维护生态;整合多源知识构建知识图谱,增强智能诊断系统可解释性与推理能力,推动铝加工包装设备运维迈向更高智能化、自主化阶段。

## 参考文献

- [1]李志强,王宏伟.机械设备故障诊断与预防性维护[M].北京:机械工业出版社,2020.
- [2]张策,等.基于深度学习的滚动轴承故障诊断方法综述[J].机械工程学报,2022,58(1):1-15.
- [3]艾文.铝型材自动包装机关键结构设计与研究[D].佛山科学技术学院,2021.
- [4]钟雄权.滚板式铝塑泡罩包装机的故障分析及改进方法研究[D].广东工业大学,2019.