

涂层生产线关键辊系设备维护及故障处理实践

王二帅 丁 帅 卫 健 张 蕾

河南中孚高精铝材有限公司 河南 郑州 451200

摘 要: 涂层生产线中, 辊系设备作为承载基材传输、涂层定量施加与表面整饰的核心执行单元, 其运行稳定性直接决定产品质量与产线作业率。本文立足工程实践视角, 系统梳理涂层辊、计量辊、支撑辊及橡胶压辊等关键辊系的服役特征, 提出基于状态监测的预防性维护策略, 并针对轴承过热、辊面划伤、涂层厚度波动、振动异常及液压纠偏失效等典型故障, 给出涵盖快速诊断、应急处置与根本治理的分级处理方案。文章强调维护工作应从被动抢修向主动预控转变, 构建以精度恢复与润滑管理为主线的维护体系, 旨在为连续化涂层生产提供可靠的技术支撑。

关键词: 涂层生产线; 辊系设备; 状态监测; 预防性维护; 故障诊断

引言

涂层技术是赋予材料表面功能特性的关键手段, 广泛应用于包装、电子及新能源等领域。随着连续化产线速度突破200m/min, 辊系作为动力传递与涂布控制的核心执行环节, 其健康状态直接决定涂层质量。然而, 因维护不足导致的非计划停机占比超四成, 且衍生损失巨大。当前多数企业仍沿用事后维修模式, 缺乏系统性状态感知与分级处置预案。本文基于多年现场经验, 构建适用于关键辊系的维护与故障处理实践体系, 重点探讨维护周期确定、状态监测要点、典型故障机理及对应策略, 旨在为行业设备管理人员提供可操作的参考框架, 以提升生产稳定性与效率。

1 关键辊系的构成与功能定位

1.1 涂层辊与计量辊

涂层辊又称涂布辊或施涂辊, 通常采用镀铬或陶瓷喷涂的刚性表面, 负责将涂料从供料系统转移至基材表面。其转速与产线速度的同步精度决定涂层湿膜厚度。计量辊则与涂层辊形成精确的间隙控制副, 通过调节两辊之间的夹持力和间距, 刮除多余涂料, 实现定量涂布。这两类辊子的圆柱度、径向跳动及表面粗糙度是影响涂层均匀性的首要因素。

1.2 支撑辊与橡胶压辊

支撑辊分布在产线各段, 用于承托带材并维持其张力平稳, 多采用钢制辊体配以轴承座。橡胶压辊表面包覆聚氨酯或氯丁橡胶层, 其弹性变形可补偿基材厚度波动, 确保涂层辊与基材之间保持稳定接触压力。橡胶层的硬度、回弹性及耐磨性直接关乎压印痕迹和边缘效应的产生。

1.3 纠偏辊与导向辊

纠偏辊配合光电或气动传感器, 执行带材跑偏时的

自动对中调节, 其动作频率高、响应速度快, 对轴承游隙和气缸密封性要求严格。导向辊数量众多, 虽然结构简单, 但若转动不灵活或表面粘附异物, 同样会引发划伤和褶皱。

2 维护策略与状态监测方法

2.1 分级维护周期规划

维护工作必须依据辊系的重要程度、服役载荷大小及历史故障频率实施差异化管理。A类关键辊包含涂层辊、计量辊和主驱动压辊, 执行周检制甚至日巡制, 重点检查轴承座温升趋势、径向振动幅值和辊面目视质量; B类支撑辊与导向辊采用月检制, 侧重润滑脂补充、密封件状态及连接紧固件防松验证; C类辅助托辊按季度抽检即可^[1]。同时建立动态调整机制, 当产线提速、更换高粘度涂料或重新开机磨合期间, 应临时加密巡检间隔。每台辊系的维护档案须详细记录每次检测的径向跳动值、轴承外圈温度曲线及辊面粗糙度变化, 为后续预测性维护提供数据积累。此外, 应将基于状态的维护(CBM)理念嵌入计划体系, 将固定周期制与状态触发制有机结合, 当监测参数触及预警阈值时即时启动专项维护。

2.2 状态监测的关键参数体系

有效的状态监测依赖多物理量协同感知与交叉印证。温度监测推荐采用红外热成像仪扫描辊面轴向温度场, 同时在轴承外圈埋设PT100贴片式热电偶, 重点关注轴向温差与历史基线偏移, 当同一轴承座周向温差超过15℃或运行温升速率陡增时, 强烈提示润滑失效或过载运行。振动监测选用压电式加速度传感器, 安装于轴承座径向和轴向测点, 采样频率范围宜覆盖10Hz~10kHz, 重点分析速度有效值(mm/s)是否符合ISO10816振动评判标准, 并监测工频及其倍频能量分布, 若频谱中出

现非整数倍频边带簇,往往指示滚动体点蚀或保持架断裂。辊面质量需定期使用便携式粗糙度仪和涡流测厚仪检测涂层辊表面微观轮廓与镀层剩余厚度,防止微裂纹萌生扩展。此外,利用激光对中仪定期校准相邻辊轴线之间的平行度与水平度,偏差超过0.1mm/m时必须调整轴承座垫片;测量水平度时需注意排除地基沉降造成的系统误差,宜选取固定参考基准点复测。

2.3 润滑管理及密封维护

润滑是决定滚动轴承服役寿命的首要外部因素。高速重载辊系轴承优先推荐合成聚脲基润滑脂,其滴点高($> 250^{\circ}\text{C}$)且机械安定性及氧化安定性均优于传统锂基脂,基础油粘度等级宜选用ISOVG320,以适应低速重载工况下的油膜形成需求。加脂量和加脂周期必须依据轴承型号、转速和负载精确计算,严禁凭经验盲目加注,过量加脂反而因搅拌发热和内部压力升高引发急剧升温。换脂操作时需彻底清洗轴承室,并用新脂进行冲洗置换,直至排出的废脂无金属磨屑^[2]。对于橡胶压辊,应严格避免任何矿物油脂接触橡胶层,防止溶胀增硬导致压印恶化。密封件如骨架油封和迷宫密封需每半年检查刃口磨损量及唇部弹性,一旦发现漏脂、进水乳化物或粉尘侵入,立即成对更换,同时排查通气孔是否堵塞以避免轴承腔内外压差过大。

3 典型故障模式与处理实践

3.1 轴承过热与烧损

轴承过热是最常见的急性故障,诱因涵盖润滑脂氧化变质、加脂量过多或过少、轴承径向游隙选取偏小、轴向窜动超差以及安装对中不良。处理时应先停机,使用红外点温计测定轴承座外表面温度,若超过 80°C 则必须紧急停机,严禁水冷强制降温以防淬火开裂。拆检时若发现润滑脂呈黑色、皂纤维完全分解或含有铜合金碎末,则需用煤油或专用清洗剂反复漂洗轴承,高压气吹干后更换同型号新脂,同时通过调整压盖垫片厚度以恢复设定游隙。对于轴向窜动量超差的情形,需使用百分表在轴端打表确认窜动值,分析是否由推力轴承磨损或锁紧螺母松动引起,相应更换推力轴承并重新紧固防松垫圈。若滚动体或滚道出现麻点、剥落或保持架断裂,则必须成对更换同精度等级(通常为P5级及以上)的新轴承,并采用压铅法或塞尺法精细调整径向游隙至设计值范围。根本性根治措施为在轴承座内部埋设双金属温控开关,与主控系统超温联锁报警,将事后处置转化为事前预警。

3.2 辊面划伤与涂层缺陷

辊面划伤多源于前道清洗残留的硬质颗粒、刮刀崩

口毛刺或带材边缘毛刺的反复刮擦。轻微且未穿透镀层的划伤可采用在线油石人工打磨修复,打磨方向务必与辊面旋转线速度方向一致,且打磨后须用800~1000目金相砂纸沿周向抛光至粗糙度恢复至 $Ra \leq 0.4\mu\text{m}$ 。若划伤深度触及基体或铬层呈鱼鳞状剥落,则需安排下机重镀,重镀前须车除旧镀层并修磨辊面圆柱度,镀后必须严格执行动平衡校验,动平衡等级应不低于G6.3级。涂层厚度横向不均的工艺性故障,往往源于计量辊两端间隙受热膨胀不一致,应使用锥度塞尺在辊面有效宽度内取五点检测间隙并调整微调螺钉,确保两端及中部平行度误差小于0.02mm。若出现间距恒定的周期横纹,则确诊为涂层辊径向跳动超差,需上精密外圆磨床修磨辊面或直接更换高精度辊芯,同时检查与之对滚的支撑辊是否存在偏心磨损。

3.3 振动异常与共振问题

振动异常可大致区分为低频摆振和高频颤振。低频摆振通常由带材张力周期性波动或纠偏系统极限环振荡引发,应优先检查张力辊负荷传感器反馈信号是否含有低频噪声,并适度调整PID控制器的积分时间常数,降低比例增益以抑制超调。高频颤振则往往与辊系—机架结构固有频率耦合,当产线速度攀升至某一临界转速时振幅突然放大^[3]。处理此类问题时,可采用敲击法或扫频法测定辊系固有频率,确认共振点后,最直接的工程措施为变更橡胶压辊的硬度等级(如将邵氏A硬度从75调整为85)以改变接触刚度和阻尼比,从而使共振峰值偏移出工作转速范围,或在轴承座底板与机架安装面之间增设复合阻尼减振垫以增加结构损耗因子。同时拆解检查联轴器膜片组或梅花形弹性体是否产生疲劳裂纹,一旦发现磨损或变形应立即更换并重新找正。

3.4 液压纠偏失效与带材跑偏

纠偏系统响应迟缓或频繁无规律误动作,会直接导致带材边缘撕裂甚至断带。标准化排查程序为:先清洁光电传感器或超声波传感器检测窗口,确认无涂料飞溅遮挡,随后使用标准校准片重新标定检测零位和灵敏度阈值;其次执行液压缸保压试验,通过截止阀隔离油缸后观察压力降,若泄漏量超过5mL/min则判定活塞密封圈严重磨损,必须更换整套密封组件并检查缸筒内壁拉伤情况;再次检查电液比例阀阀芯是否因油液污染而卡滞,清洗阀体并更换回油滤芯及空气滤清器,同时排净液压管路内的残留空气以避免气蚀效应导致响应迟滞。针对偶发性跑偏,需详细观察带材接头通过时的横向偏移轨迹,必要时微调纠偏辊安装平面的前倾角(通常设 $0.5^{\circ} \sim 1.5^{\circ}$),利用楔形效应增强纠偏能力。

3.5 橡胶压辊老化与压印缺陷

橡胶压辊长期承受交变压缩应力并接触含有机溶剂的涂料,极易发生表面氧化硬化、化学溶胀或周向龟裂。硬化导致辊面硬度分布不均,进而使接触压力沿幅宽方向产生畸变,形成肉眼可见的纵向暗纹或亮带压印。处理时应使用邵氏硬度计在辊面轴向均匀布不少于三点测定硬度,若硬度变化超出原设计值 ± 5 邵氏A或回弹率显著下降,则需整体拆卸并送专业厂家重新包胶。包胶配方须针对具体涂料溶剂体系选用耐油、耐芳烃的特种聚氨酯材料,且硫化工艺完成后需进行外圆精密磨削,保证圆柱度不大于 $0.05\text{mm}^{[4]}$ 。日常运行管理中,每次长时间停机后应立即释放压辊气缸压力,避免橡胶层在静止状态下持续承受线载荷导致永久压陷变形。对于已经出现的轻微压印,可尝试用细砂纸沿轴向轻柔打磨橡胶表层去除老化层,但磨削深度不得超过 0.5mm ,否则须提前更换。

4 维护管理体系与持续改进

4.1 故障编码与知识库构建

将历次发生的所有故障按照设备编号、故障部位、现象描述、处理过程、更换备件及停机时长等字段进行结构化编码,录入电子台账,并定期运用帕累托图解析高频失效类型与根因分布。若统计分析显示轴承类故障占比持续超过30%,则应系统审查润滑周期是否匹配实际工况、轴承额定动载荷选型是否存在裕度不足。知识库还应收纳每类辊系的标准化拆装作业程序(SOP),明确热拆卸温度控制范围、压装力的最大允许值及冷缩装配时的液氮浸泡时间,同时建立维修用物料清单(BOM),确保紧急抢修时备件型号和工具可快速定位、准确领用,杜绝野蛮拆卸造成轴颈拉伤或端盖变形。

4.2 精度周期性校准

涂层产线宜每年安排一次全面精度大检查,覆盖所有关键辊系的平行度、水平度及垂直度复测。采用激光跟踪仪建立整机空间坐标基准,逐个检测各辊轴线在三维空间内的相对位姿,若发现平行偏差大于 0.1mm/m 或水平度变化超过 0.05mm/m ,则需通过调整轴承座底部可调斜铁或更换精密垫片来恢复。检测环境应维持恒温($20\pm 2^\circ\text{C}$),以排除钢制辊体热胀冷缩造成的虚假误差读数。与此同时,配合张力传感器和射线测厚仪的在线

比对校准,确保反馈至控制系统的物理量真实可靠。将每次校准数据存档并绘制精度劣化趋势曲线,若连续两次校准均显示同一方向劣化,即可提前策划预防性大修窗口,避免突发故障冲击生产。

4.3 人员培训与操作规程落地

维护体系的最终效能取决于操作岗与维修岗的密切配合及技能水平。需编制图文并茂的岗位点检卡,清晰标注每根关键辊的正常运行温度区间、振动烈度上限及听觉特征描述。培训内容应包含使用听音棒辨识轴承早期异常周期声、红外热成像仪正确调焦与发射率设置、以及快速换辊工装的标准化操作流程。同时建立“发现—上报—诊断—处理—复盘”的闭环响应文化,鼓励一线人员在第一时间记录任何微小异常现象,定期召开故障案例分享会,将个体经验转化为组织知识,有效防止同类隐患在相似工位再次放大为重大设备事故。

5 结语

涂层生产线关键辊系的维护管理是一项融合机械精度、状态感知和过程控制的综合性工作。本文从辊系功能分类出发,提出了分级维护周期、多参数状态监测及精细化润滑管理的预防性策略,并针对轴承过热、辊面划伤、振动异常、纠偏失效和橡胶压辊老化五大典型故障,系统总结了快速诊断方法与分级处理措施。实践表明,将维护重心从故障后抢修前移至状态预控,配合完善的精度校准和知识库积累,可显著降低非计划停机频次,延长辊系使用寿命,保障涂层质量的一致性。未来,随着物联网和边缘计算技术在产线的深入应用,智能化的在线诊断与自适应维护将成为辊系管理的新方向,但工程现场的扎实基础维护和人员技能培养始终是不可替代的基石。

参考文献

- [1] 王志强,刘明辉.高速涂布辊系轴承故障特征提取与预警方法研究[J].机械设计与制造,2023,(7):112-116.
- [2] 陈丽华,赵建国.橡胶压辊包胶层老化机理及寿命预测模型[J].橡胶工业,2024,71(3):205-210.
- [3] 张伟,李成刚,王鹏.涂层产线辊系振动传递路径分析与抑制技术[J].噪声与振动控制,2022,42(5):88-93.
- [4] 孙德林,周晓峰.基于激光对中的多辊平行度校准方法及应用[J].冶金设备,2023,(4):34-38.