

拉矫机组张力辊常见故障分析与维护对策

丁 帅 王二帅 张俊杰

河南中孚高精铝材有限公司 河南 郑州 451200

摘 要：拉矫机组是冷轧铝板生产线的核心设备，张力辊作为其关键组成部件，承担着建立和调节铝板张力的重要功能，其运行稳定性直接影响到铝板板形质量与生产连续性。张力辊工作环境恶劣，承受交变重载、冲击载荷及持续摩擦磨损，故障率长期处于较高水平。本文立足于张力辊的机械结构与工作机理，系统梳理了辊面磨损、轴承失效、辊体断裂、传动系统异常及张力波动等常见故障类型，深入剖析了各故障的形成原因与演化规律；在此基础上，从状态监测、润滑管理、辊面修复、装配精度控制及操作规范等方面提出了针对性的维护对策与全生命周期管理策略，旨在为拉矫机组张力辊的安全可靠运行提供系统化的技术管理参考。

关键词：拉矫机组；张力辊；故障分析；维护对策；状态监测

引言

拉矫机组（拉伸弯曲矫直机）是冷轧铝板精整工艺中的关键设备，其通过对铝板施加张力并使之反复弯曲，有效消除带钢的波浪、翘曲等板形缺陷，改善力学性能。张力辊作为拉矫机组中建立张力的核心执行元件，通常由直径较大的主动辊和从动辊组成，铝板以一定的包角缠绕于辊面，通过辊与铝板之间的摩擦力实现张力放大与调节。在连续化、高速化、自动化的生产工况下，张力辊长期处于高负荷运转状态，同时承受铝板张力、辊间压力、环境粉尘等多重因素作用，故障频次较高，且一旦失效往往导致全线停机，造成显著的经济损失。本文在深入理解张力辊工作机理的基础上，对常见故障进行系统分类与成因分析，并据此提出层次化的维护对策框架，以期指导现场设备管理实践，延长张力辊服役寿命，降低非计划停机率。

1 张力辊的结构功能与工况特征

1.1 张力辊在拉矫机组中的功能定位

在拉矫机组中，张力辊通常以成对形式出现，构成入口张力辊组和出口张力辊组。入口张力辊组负责将开卷机输出的铝板张力进行初步建立和调节，为后续弯曲单元提供稳定的张力输入；出口张力辊组则承担着维持辊缝出口侧张力恒定、防止铝板松弛或跑偏的功能。通过入口与出口张力辊组的协同工作，在弯曲单元前后形成张力差，使铝板在弯曲辊上产生塑性延伸，从而消除板形缺陷。张力辊的辊径、辊面宽度、材质及表面处理工艺均对张力建立效果和铝板表面质量有直接影响。

1.2 结构与驱动方式

典型张力辊结构由辊体、辊轴、轴承座、轴承、传动装置等部分组成。辊体一般为空心或实心钢结构，外层挂注聚氨酯胶层以保护铝板避免铝板损伤；辊轴与辊体通过键连接或过盈配合实现扭矩传递；轴承多采用双列调心滚子轴承或四列圆锥滚子轴承，以适应较大的径向载荷和一定的轴向偏移^[1]。驱动方式包括集中驱动和独立驱动两种，集中驱动通过齿轮分配箱将动力分配给各张力辊，独立驱动则每根张力辊配备独立的电机与减速机，具有更好的张力独立调节能力。

1.3 典型工况与受力分析

张力辊的工作工况具有鲜明的特征：一是载荷性质为交变重载，铝板张力通常在数十至数百千牛范围内波动，辊面承受持续的径向压力和切向摩擦力；二是速度工况多变，机组升速、降速、稳态运行及穿带、甩尾等不同阶段，张力辊的转速和负载均发生显著变化；三是热力学耦合作用，铝板与辊面之间的摩擦生热以使辊体温度升高，产生热膨胀和热应力；四是环境因素，生产线铝粉、粉尘等污染物易侵入轴承和辊面，加速磨损与腐蚀。这些工况因素叠加，使张力辊成为拉矫机组中故障率最高的部件之一。

2 常见故障类型与形成机理

2.1 辊面磨损与划伤

辊面磨损是张力辊最为常见的故障表现。根据磨损机制的不同，可分为磨粒磨损、粘着磨损和接触疲劳磨损三类。磨粒磨损主要由铝板表面的铝粉、颗粒物在辊面与铝板之间充当磨料引起，表现为辊面均匀性的粗糙度增大和直径减小。粘着磨损发生在辊面与铝板局部微

观焊合后剪切断裂的反复过程中,导致辊面产生材料转移或黏附。接触疲劳磨损则源于辊面在循环接触应力作用下产生的亚表层裂纹扩展,最终形成点蚀或剥落。当辊面出现严重磨损或局部划伤后,不仅影响摩擦系数和张力的稳定建立,划痕还可能复制到铝板表面,造成产品表面质量缺陷。

2.2 轴承过热与早期失效

轴承是张力辊旋转精度的保证,也是最容易发生故障的薄弱环节。轴承过热的主要成因包括:润滑脂选择不当或加注量不合适(过量或不足均导致温升异常);轴承安装间隙调整不当,过紧会增大摩擦扭矩,过松则引起振动加剧^[2]。轴承早期失效的形式主要表现为保持架断裂、滚道剥落、滚动体碎裂等,根本原因可归结为疲劳寿命耗尽、异常冲击载荷、污染物侵入及润滑失效的综合作用。轴承一旦发生突发性损坏,往往伴随辊轴划伤和轴承座损坏,维修工作量大、耗时较长。

2.3 辊体断裂与焊缝开裂

对于焊接结构的张力辊,辊体断裂和焊缝开裂虽然发生频率相对较低,但一旦发生即为灾难性故障。焊缝开裂多发生于辊体与辊轴的连接焊缝或辊体筒体纵缝,主要诱因包括:焊接工艺控制不当导致焊缝内部存在气孔、夹渣或未熔合缺陷;运行时交变弯曲应力和扭转应力在缺陷处形成应力集中,逐步扩展为疲劳裂纹;辊体刚度设计不足或长期超负荷运行使焊缝区域应力水平超过设计值。此外,辊体内壁冷却水道的腐蚀减薄也会削弱辊体强度,在较大张力作用下引发鼓胀变形甚至爆裂。

2.4 传动系统异常

传动系统包括电机、减速机、联轴器及齿轮分配箱等部件,其异常表现为传动噪声增大、扭矩波动、转速不稳等。常见原因有:联轴器对中精度超差,产生附加弯矩和振动,进而传递至张力辊轴承;减速机齿轮齿面磨损或点蚀,导致啮合间隙增大,传动平稳性下降;电气控制系统的速度闭环调节参数设置不当,引起张力辊的频繁加减速和扭矩振荡。传动系统异常往往与张力辊本体故障形成恶性循环——传动异常加剧辊系振动,振动又加速辊面磨损和轴承劣化。

2.5 张力波动与打滑现象

张力波动和辊面打滑是反映张力辊功能失效的运行表征。张力波动通常源于张力传感器信号干扰、张力控制器参数适配不良或入口来料张力不稳定。打滑现象则发生在辊面与带钢之间的摩擦力不足以传递所需张力之时,直接原因是辊面摩擦系数下降(因油污或磨损)、

包角不足或设定张力值超过了摩擦极限。打滑会造成铝板表面的摩擦划伤,严重时导致铝板跑偏、折叠,被迫降速甚至停机处理。

3 故障的系统性成因分析

3.1 设计选型层面的根源

部分张力辊故障可追溯至设计阶段的不足。辊体壁厚设计偏薄导致刚度不足,在张力作用下产生过大的挠曲变形,使辊面压力分布严重不均,加剧局部磨损;轴承选型时对当量动载荷的估算偏小,导致轴承额定寿命不满足实际工况要求;使辊体散热能力受限,热累积加速润滑脂老化和轴承游隙变化。因此,设计缺陷属于先天性因素,在设备投用后难以通过维护手段完全弥补。

3.2 运行工况的恶化效应

实际生产工况往往比设计工况更为复杂多变。频繁的规格切换导致张力设定值大幅跳变,辊系承受的冲击载荷频次显著增加;临时提速或降速操作产生的动态张力超调,使辊面与轴承经受短时过载;铝板板形不良或边裂缺陷也会在辊面上产生集中应力^[3]。此外,冷却水系统因结垢或过滤不良导致冷却效率下降,使辊体运行温度长期偏高,加速各部件性能劣化。这些工况因素的叠加效应,使张力辊的实际服役条件远高于设计基准。

3.3 维护管理的积累性缺失

润滑管理方面,未按规定周期和牌号加注润滑脂、新旧油脂混合使用、注脂量凭经验估算等不规范操作普遍存在,直接损害轴承寿命。维修装配方面,更换轴承时不严格控制安装游隙、不检测辊子同轴度、连接螺栓不按扭矩紧固等现象时有发生,引入新的装配应力。检查监测方面,对辊面磨损量、轴承温度、振动值等状态参数缺乏系统的记录和分析,往往等到故障已经明显暴露才安排维修,错失了预防性维修的最佳时机。

4 维护对策与全周期管理策略

4.1 基于状态监测的预防性维护

建立覆盖张力辊关键状态参数的监测体系,是实现从“事后维修”向“预防性维护”转变的基础。在轴承座位置安装温度传感器和加速度传感器,连续监测轴承温度和振动频谱,通过趋势分析识别轴承早期劣化特征(如特征频率幅值增长、高频能量升高)。在辊面设置磨损量检测基准点,利用千分尺或超声波测厚仪定期测量辊径变化,当累计磨损量达到辊径公称尺寸的某一阈值(如0.5%辊径)时,安排离线车削修复。传动电机电流的实时监控亦可反映张力辊负载状态,

电流的缓慢上升往往指示辊面摩擦系数下降或轴承阻力增大。状态监测数据应纳入设备管理信息系统,利用简单的统计过程控制(SPC)工具设定预警限,实现异常状态的自动触发报警^[4]。

4.2 精细化润滑管理

轴承润滑是张力辊维护的核心内容,需要做到“五个精准”:精准选型——根据轴承类型、转速和温度选用合适牌号的润滑脂,优先选择具有极压抗磨性能和良好泵送性的锂基或聚脲基润滑脂;精准定量——依据轴承尺寸和转速计算合理的填脂量,通常为轴承内部自由容积的1/3至1/2,避免过量导致搅拌发热或不足导致边界润滑失效;精准周期——结合设备运行时间和润滑脂的氧化安定性制定加脂周期,高温季节适当缩短;精准方式——优先采用自动润滑系统定时定量供脂,人工加注时需确保注脂枪清洁、注脂口无异物堵塞;精准记录——每次润滑操作均记录时间、牌号、用量和操作人,形成可追溯的润滑档案。

4.3 辊面修复与表面工程技术

当胶辊表面出现轻微粘铝、浅划痕,包胶层厚度仍有较大余量时,可通过外圆车削或者磨削加工,去除表面疲劳损伤层,恢复胶辊的圆柱度与表面粗糙度。加工完成后对辊面做抛光处理,消除刀纹、磨削纹路,保证辊面摩擦系数均匀稳定,胶辊常用包胶材料以聚氨酯橡胶为主,针对损伤较严重、包胶层磨损到极限尺寸的胶辊,需要重新进行包胶硫化处理。修复过程包含辊芯损伤、旧胶剥离、辊芯喷砂处理、浇注硫化、精车磨削等工序。修复后的胶辊需要保证橡胶硬度满足工艺要求,辊面粗糙度Ra控制在 $1.63.2\mu\text{m}$,同时严格检测径向跳动、圆柱度,避免装配后运行出现振动、局部压力不均,胶辊修复完成投入使用后,应建立定期检查维护制度,及时清理辊面附着铝粉,防止硬质铝颗粒嵌入橡胶表层,造成铝板表面批量压伤缺陷。

4.4 装配精度与检修质量控制

张力辊的检修装配质量直接影响其运行可靠性。轴承安装应采用感应加热方式(加热温度不超过 120°C),避免用火焰直接加热或敲击安装,以免改变轴承内部游隙和损伤滚道。安装到位后,使用塞尺或压铅法检测轴承游隙,确保在推荐范围内。辊子装入轴承座后,需进行同轴度和水平度检测,同轴度偏差应控制在 0.02mm 以内,水平度偏差不大于

0.05mm/m 。联轴器对中采用激光对中仪进行精确校准,角向偏差和径向偏差均应满足设备技术文件要求。所有紧固螺栓按规定的力矩顺序和扭矩值进行分步紧固,并在设备运转24小时后进行二次复紧。

4.5 标准化操作与工艺优化

操作层面的规范同样不可忽视。制定张力辊操作维护标准作业程序,明确穿带前的辊面清洁检查、启动前的润滑系统确认、运行中的异常巡检要点以及停机后的辊面保护措施。优化张力设定策略,避免在满足工艺要求的前提下设置过高的张力裕度,减小轴承和辊面的无效载荷。对于规格切换频繁的机组,可采用张力斜坡函数降低冲击加载速率。建立张力辊使用台账,统计各根辊子的累计过钢量、修复次数和故障记录,用于评估不同供应商、不同表面处理工艺的实际寿命差异,为后续备件选型和改进提供依据。

5 结语

拉矫机组张力辊的可靠运行是保障冷轧铝板生产效率和产品质量的重要前提。本文通过对辊面磨损、轴承失效、辊体断裂、传动异常和张力波动等常见故障类型的系统梳理,揭示了故障形成的内在机理及其与设计、工况和维护之间的关联关系。在此基础上提出的维护对策体系,强调了从被动抢修向主动预防转变的必要性,主张以状态监测为基础、润滑管理为主线、修复技术为支撑、装配精度为保障、操作规范为辅助的多层次维护策略。需要指出的是,张力辊维护没有一劳永逸的解决方案,最佳实践需要在生产实践中不断总结、动态调整。未来,随着智能传感技术和大数据分析在冶金设备管理中的深度应用,张力辊的剩余寿命预测和智能维护决策将获得更坚实的技术支撑,进一步推动设备管理向数字化、精准化方向迈进。

参考文献

- [1] 张勇,王建平,李卫东.冷轧拉矫机组张力辊磨损机理及表面强化技术研究[J].轧钢,2022,39(4):56-62.
- [2] 刘志强,陈立新,赵明.大型轧机轴承失效分析与预防策略[J].轴承,2023(2):45-51.
- [3] 王建军,杨世林,何永勇.基于振动分析的轧辊轴承早期故障诊断方法[J].冶金设备,2022(6):28-34.
- [4] 陈再良,吕晓东,张峥.拉矫辊焊接结构疲劳断裂失效分析与改进措施[J].金属热处理,2023,48(5):218-224.