

一种铝带材切边机卷轴涨缩调整锁止装置

董迎春 董海溶 王雅彬

河南中孚高精铝材有限公司 河南 郑州 451200

摘要: 在铝带材连续化生产过程中,切边机作为关键设备之一,其卷取系统的稳定性直接关系到成品质量与生产效率。卷轴作为卷取系统的核心部件,需具备快速涨缩、高精度定位及可靠锁止功能,以适应不同规格铝带材的卷取需求。然而,传统卷轴结构在高速运行或频繁换卷工况下,常出现卷轴涨缩数据偏差不到位、锁止失效、轴体偏心等问题,严重影响设备运行可靠性与产品表面质量。本文针对上述问题,提出一种新型铝带材切边机卷轴涨缩调整锁止装置。该装置采用多楔块同步驱动、液压-机械复合锁止及闭环反馈控制策略,有效提升了卷轴涨缩精度、响应速度与锁止可靠性。通过有限元仿真分析与现场试验验证,结果表明:该装置在额定负载下涨缩重复定位精度可达 $\pm 0.02\text{mm}$,锁止力矩达 $15\text{kN}\cdot\text{m}$ 以上,且在连续运行3000小时后无明显磨损或松动现象,显著优于传统结构。本设计为高精度、高效率铝带材加工设备提供了关键技术支撑,具有良好的工程应用前景。

关键词: 铝带材;切边机;卷轴;涨缩机构;锁止装置;液压驱动;闭环控制

引言

随着新能源汽车、航空航天、高端电子等产业的快速发展,对高纯度、高表面质量铝带材的需求持续增长。铝带材在轧制、清洗、分切等工序中,切边机承担着去除毛刺、修整边缘、保证宽度公差的重要任务。其中,卷取系统是切边机的核心组成部分,其性能直接影响铝带材的卷形质量、端面平整度及后续加工适应性。卷轴(也称卷筒或胀缩轴)作为卷取系统的关键执行元件,需在卷取前实现快速膨胀以夹紧套筒,在卸卷时迅速收缩以便于套筒脱出。同时,在高速卷取过程中,卷轴必须保持刚性锁止状态,防止因扭矩传递导致的轴体滑移或变形,从而避免铝卷层间错动、塔形、松卷等缺陷^[1]。目前,工业中广泛应用的卷轴结构主要包括气囊式、斜楔式、连杆式等类型。其中,斜楔式因其结构紧凑、承载能力强而被广泛采用。然而,传统斜楔式卷轴存在以下技术瓶颈:多个楔块由单一驱动源推动,易因制造误差或润滑不均导致运动不同步,造成卷轴外圆跳动超差;仅依赖摩擦力或简单机械挡块锁止,在大扭矩或冲击载荷下易发生微动或松脱;无法根据铝带材厚度、宽度及张力动态调整涨缩量与锁止力,难以适应多品种小批量生产需求;频繁拆装易导致楔块磨损、导向面划伤,影响使用寿命。因此,亟需一种集高精度涨缩、强锁止能力与智能调控于一体的新型卷轴装置。

1 装置总体结构与工作原理

1.1 总体结构设计

所提出的卷轴涨缩调整锁止装置主要由主轴体、涨缩楔块组件、同步驱动机构、液压-机械复合锁止机构以

及闭环控制系统五部分构成。主轴体采用中空结构,内部布置液压通道与传感器安装孔,外圆设有四条均布的轴向导槽,用于引导楔块径向运动。涨缩楔块组件共四组,沿周向均匀分布,每组包含一个外楔块、一个内楔块及连接销,通过精密斜面配合实现轴向位移到径向膨胀的转换。同步驱动机构由中心拉杆、同步环及四个均布的推杆组成,确保各楔块在驱动过程中保持高度同步。液压-机械复合锁止机构则包括锁止油缸、锁止销、碟簧组及机械挡块,形成双重安全保障。闭环控制系统集成位移传感器、压力传感器与PLC控制器,实现对涨缩量与锁止状态的实时监测与动态调节,从而保障整个卷取过程的稳定性与精确性。

1.2 工作原理

装置工作分为三个阶段:涨缩阶段、锁止阶段与释放阶段。

1.2.1 涨缩阶段

当需要卷取铝带材时,液压系统向中心拉杆腔供油,推动拉杆向右移动。拉杆通过同步环带动四根推杆同步向外推压内楔块。由于内楔块与外楔块之间为斜面配合(斜角 $\alpha = 7^\circ$),内楔块的轴向运动转化为外楔块的径向膨胀,使卷轴外径增大,从而撑紧套筒。位移传感器实时监测外楔块位移,反馈至PLC,实现涨缩量的闭环控制(目标涨缩量 $\Delta D = 8\sim 12\text{mm}$ 可调)。

1.2.2 锁止阶段

当外楔块达到设定位置后,锁止油缸动作,推动锁止销插入主轴体上的锁止孔,同时碟簧组提供预紧力,确保锁止销与孔壁紧密贴合。此外,在主轴体与拉杆之间

设置机械挡块,形成“液压+机械”双重锁止机制^[2]。此时,即使液压系统失压,机械挡块仍能维持卷轴膨胀状态,防止意外收缩。

1.2.3 释放阶段

卸卷时,首先解除锁止:锁止油缸回油,锁止销退回;随后,拉杆腔泄压,复位弹簧或反向油压推动拉杆左移,带动内楔块回缩,外楔块在自重与导向弹簧作用下同步收缩,卷轴外径减小,套筒可顺利脱出。

2 关键技术设计

2.1 多楔块同步驱动机构

为克服传统单点驱动导致的楔块运动不同步问题,本装置创新性地采用了“中心拉杆—同步环—多推拉杆”联动结构。中心拉杆作为主驱动件,其右端与液压缸活塞连接,左端通过螺纹与高强度合金钢制成的同步环固连。同步环外圆均布四个铰接孔,分别与四根推拉杆一端通过球面轴承铰接,推拉杆另一端则与各内楔块相连。该结构将单一驱动力均匀分配至四个楔块,理论上可实现完全同步运动。考虑到实际制造与装配过程中不可避免存在微小误差,推拉杆两端均采用球面轴承连接,允许 $\pm 2^\circ$ 的角度偏差,有效补偿装配间隙与热变形带来的影响^[3]。同时,在同步环与主轴体内壁之间设置导向键,限制其旋转自由度,仅允许轴向平移,从而确保力传递路径的稳定性与一致性。这种设计不仅显著提升了涨缩同步精度,还增强了系统在长期运行中的抗疲劳性能。

2.2 液压-机械复合锁止机构

锁止机构的可靠性直接关系到卷取过程的安全性。为此,本装置设计了一套液压与机械相结合的复合锁止机制。在正常工作状态下,锁止油缸输出推力,将锁止销精准嵌入主轴体上预先加工的锥面锁止孔中,锥角设计为 3° ,既便于对中插入,又具备自锁效应,防止因振动导致销体松动。与此同时,碟簧组施加约8kN的预紧力,持续压紧锁止销,进一步提升接触刚度。更为关键的是,在拉杆最大行程位置设置了机械限位凸台,当拉杆完全伸出时,凸台与主轴体内台阶刚性接触,形成第二道防线。即便液压系统突发故障导致压力丧失,该机械挡块仍能有效维持卷轴的膨胀状态,确保铝卷不会因意外收缩而散落。这种“液压主动锁止+机械被动冗余”的双重保障策略,大幅提升了装置在极端工况下的安全裕度,满足了现代工业对本质安全的严苛要求。

2.3 闭环反馈控制系统

为实现智能化、柔性化的卷取控制,本装置配备了基于PLC的闭环反馈控制系统。系统核心由位移传感器(LVDT,精度 $\pm 0.01\text{mm}$)、压力传感器(量程0~25MPa,

精度0.5%FS)及工业级PLC组成。在涨缩过程中,位移传感器实时监测外楔块的实际位移,并与设定值进行比较,若偏差超过0.05mm,PLC即通过调节比例阀的开度来修正液压流量,直至误差收敛。在锁止阶段,系统持续监控锁止油缸的压力,一旦低于15MPa的安全阈值,立即触发声光报警并禁止卷取启动,从源头杜绝安全隐患^[4]。卷取运行期间,系统还可通过张力信号间接估算主轴所受扭矩,若检测到异常波动(如因铝带断裂或打滑引起),则自动降速或紧急停机,保护设备与产品。此外,操作人员可通过HMI人机界面,根据不同铝带材牌号(如1060、3003、5052等)和规格,预设对应的涨缩量、锁止压力及响应时间,实现“一键切换”多品种生产,极大提升了设备的适应性与生产效率。

3 有限元仿真分析

3.1 静力学分析

为验证装置在极限工况下的结构强度,采用ANSYS Workbench对锁止状态下的卷轴进行静力学仿真。加载条件设定为最大卷取张力20kN,对应1200mm宽、1.0mm厚铝带材在150m/min速度下的典型工况。仿真结果显示,主轴体最大等效应力为186MPa,远低于42CrMo合金钢的屈服强度(930MPa),安全系数高达5.0,具备充足的强度储备。外楔块与内楔块接触区域的最大接触应力出现在斜面中部,数值为420MPa,未超过材料许用接触应力(600MPa),表明接触面设计合理,不易发生压溃或塑性变形。锁止销在承受剪切载荷时,最大剪应力为112MPa,显著低于40Cr钢的抗剪强度(360MPa),结构安全可靠。整体应力分布均匀,无明显应力集中区域,证明结构布局与材料选择科学合理。

3.2 瞬态动力学分析

为进一步评估装置的动态性能,进行了卷取启动过程的瞬态动力学仿真,模拟0~2秒内从静止加速至120m/min的全过程。仿真结果表明,四个外楔块的位移曲线高度重合,最大同步误差仅为0.015mm,充分验证了同步驱动机构的有效性。锁止销在液压驱动下于0.3秒内完成完全插入动作,响应时间远短于行业标准要求的1秒换卷节拍,满足高速生产需求。模态分析显示,系统最低阶固有频率为185Hz,而实际工作频率通常低于50Hz,两者间隔充足,有效避免了共振风险。整个动态过程中,各部件运动平稳,无剧烈冲击或振动现象,表明装置具备良好的动态稳定性与响应特性。

4 试验验证与应用效果

4.1 试验平台搭建

为全面验证装置的实际性能,在某大型铝加工企业

2300mm铝带材切边机上完成了样机试制与现场测试。试验覆盖了从0.2mm超薄铝箔到2.0mm厚板的全规格范围,卷取速度在30~150m/min之间可调,最大张力达25kN。装置连续运行3000小时,期间记录各项性能参数及故障情况,以评估其长期可靠性与适应性。

4.2 性能测试结果

经过系统测试,装置各项指标均优于设计要求。涨

缩重复定位精度实测为 $\pm 0.018\text{mm}$,优于 $\pm 0.03\text{mm}$ 的设计目标;最大锁止力矩达到 $15.6\text{kN}\cdot\text{m}$,远超 $12\text{kN}\cdot\text{m}$ 的最低要求;换卷全过程仅需1.2秒,效率提升显著;卷轴外圆跳动控制在 0.032mm 以内,保障了铝卷端面的高平整度;在长达3000小时的连续运行中,未发生任何功能性故障,故障率为零。这些数据充分证明了该装置在精度、强度、响应速度及可靠性方面的综合优势。

表1:测试结果

项目	设计指标	实测值	测试方法
涨缩重复定位精度	$\pm 0.03\text{mm}$	$\pm 0.018\text{mm}$	激光位移计测量10次
最大锁止力矩	$\geq 12\text{kN}\cdot\text{m}$	$15.6\text{kN}\cdot\text{m}$	扭矩传感器加载
换卷时间	$\leq 1.5\text{s}$	1.2s	高速摄像记录
卷轴外圆跳动	$\leq 0.05\text{mm}$	0.032mm	百分表测量
故障率(3000h)	$< 1\%$	0%	运行日志统计

4.3 应用效果

自投入运行以来,该装置显著提升了生产线的整体效能。铝卷塔形量由原先的平均 1.8mm 降至 0.6mm ,表面划伤与层间错位等缺陷大幅减少,产品一次合格率提高3.2个百分点。换卷时间的缩短使年有效作业时间增加约200小时,按当前产能计算,年增产效益超过百万元。同时,由于结构优化与材料升级,楔块等关键易损件寿命延长至两年以上,备件更换频率降低60%,维护成本显著下降。尤为突出的是,该装置无需更换核心部件即可兼容从超薄箔到厚板的全系列铝带材,真正实现了“一机多用”,为企业应对多品种、小批量的市场趋势提供了有力支撑。

5 结语

本文针对铝带材切边机卷轴在涨缩同步性、锁止可靠性及调整灵活性方面的技术难题,提出了一种新型卷轴涨缩调整锁止装置。该装置通过多楔块同步驱动、液压-机械复合锁止及闭环反馈控制三大核心技术,实现了高精度、高可靠、智能化的卷取控制。研究表明,所设计的同步驱动机构有效解决了多楔块运动不同步问题,涨缩重复定位精度达 $\pm 0.018\text{mm}$,满足高表面质量铝带材生产要求;液压-机械复合锁止机制显著提升了装置的安

全冗余,在液压失效工况下仍能维持有效锁止,最大锁止力矩达 $15.6\text{kN}\cdot\text{m}$;闭环控制系统支持参数在线调整,适应多规格铝带材柔性生产,换卷时间缩短至1.2s;现场3000小时连续运行试验表明,装置故障率为零,显著优于传统结构,具有良好的工程推广价值。未来工作将聚焦于轻量化材料应用(如碳纤维复合材料主轴)、数字孪生状态监测及与MES系统集成,进一步提升装置的智能化水平与全生命周期管理能力。

参考文献

- [1]钱勇,杨锐,冯维彦.新型切边机的应用[C]//重庆铸造行业协会,重庆市机械学会铸造分会.2022重庆市铸造年会论文集.力劲集团;,2022:466-470.
- [2]潘江春.1650mm重卷机卷轴结构优化改造[C]//中国机械工业联合会,中国机电装备维修与改造技术协会.2024中国工业设备智能运维技术大会论文集(下).酒钢东兴铝业嘉宇新材料有限公司;,2024:390-393.
- [3]徐保刚,一种航空超硬铝合金板切边机的上料装置.天津市,天津大航金属材料有限公司,2022-07-12.
- [4]詹茂杏,冷轧带钢生产线下线钢卷后续拉矫切边机组助卷器.安徽省,马鞍山北光冶金机械有限责任公司,2021-02-18.