

Mechanical calculation of cathode roller core shaft

Jian Liao

Jiujiang Defu Technology Co., Ltd., Jiujiang, Jiangxi, 430064, China

Abstract

Electrolytic copper foil is known as the “neural network” for electronic product signal and power transmission, and the quality of the cathode roller determines the quality of the electrolytic copper foil. The welding of titanium cylinder sleeves on the surface of cathode rollers has the advantages of low cost, high production efficiency, and not being affected by diameter. The process of copper foil generation first involves deposition on the surface of the cathode roller, so the roller surface state directly affects the surface state and surface quality of the copper foil. The important component supporting the cathode roller is the core shaft, which drives the entire cathode roller to rotate in the anode tank, thereby forming a copper foil surface on the surface of the cathode roller with copper sulfate solution. The weight of the cathode roller is about 10 tons, and the requirements for the straightness and circular runout of the roller surface are very strict. The cathode roller needs to be precision machined on lathes and grinders. Due to its large weight and volume, the lathe can only clamp the two ends of the core shaft during machining. Therefore, the core shaft will undergo elastic deformation under the action of gravity. This deformation has a certain impact on the accuracy of precision machining, so the smaller the elastic deformation, the more favorable it is for the accuracy of the cathode roller.

Keywords

electrolytic copper foil; cathode roller; shaft; stress; strain

阴极辊芯轴力学计算

廖建

德福科技, 中国·江西九江 430064

摘要

电解铜箔被称为电子产品信号和电力传输的“神经网络”，阴极辊的质量决定着电解铜箔的品质。阴极辊表面钛筒套焊接成型具有成本较低、生产效率高、不受直径影响等优点。铜箔生成过程首先是在阴极辊表面沉积，故辊面状态直接影响铜箔的表面状态和表面质量。支撑阴极辊的重要部件为芯轴，芯轴带动整个阴极辊在阳极槽内转动，从而将硫酸铜溶液在阴极辊的表面形成铜箔面。阴极辊重量为10吨左右，辊面直线度与圆跳动度要求非常严格。阴极辊需在车床与磨床上进行精密加工，由于阴极辊重量较大、体积大，车床加工时，只能夹住芯轴的两端。因此芯轴在重力作用下，会有弹性变形。此变形对精加工的精度有一定影响，因此弹性变形越小，对阴极辊的精度越有利。

关键词

电解铜箔、阴极辊、轴、应力、应变

1 引言

近年来，新能源产业快速发展，带动锂电池市场需求持续高速增长，铜箔作为锂电池负极集流体的关键基础材料 [1 - 5]，其性能的高低对电池具有直接影响。铜箔生成过程首先是在阴极辊表面沉积，故辊面状态直接影响铜箔的表面状态和表面质量 [6 - 9]。阴极辊表面越均匀、细腻，生产的铜箔表面越均一，微观形态更平整 [10 - 13]。电解铜箔是铜离子在阴极辊表面的电沉积结晶产物，阴极辊质量直接决定了铜箔的性能，被认为是电解铜箔成套设备的核心 [14-17]。在电解铜箔生产过程中，阴极辊易受到电化

学腐蚀，尤其是电流密度大且液温偏高的工艺条件下，阴极辊更加容易腐蚀失效。

工业纯钛 TA1 具有优异的耐腐蚀性，且质量轻，比强度高，被认为是制作阴极辊筒的最佳材料。在电解铜箔生产过程中，铜离子总是优先沉积于钛材晶界处，晶粒细小的阴极辊钛材有利获得性能优异的铜箔。电解铜箔被称为电子产品信号和电力传输的“神经网络”，阴极辊的质量决定着电解铜箔的品质，阴极辊表面钛筒套焊接成型具有成本较低、生产效率高、不受直径影响等优点。铜箔生成过程首先是在阴极辊表面沉积，故辊面状态直接影响铜箔的表面状态和表面质量。

本研究以阴极辊芯轴为研究对象，利用力学计算与有限元分析，研究轴的弹性变形，为轴的弹性变形减少提供理论依据。

【作者简介】廖建（1980-），男，中国湖北人，硕士，工程师，从事机械设计、制造，铜箔研究。

2 计算方法

2.1 研究背景

工业上阴极辊的制作方法有两种。一种采用铜钢复合结构形式阴极辊。钢筒选用铜钢复合板，其中铜层选用材质 T2，厚度不低于 4mm。铜钢复合板与钛筒采取过盈装配，装配时使用惰性气体保护钛筒防止氧化。一种采用缠绕铜带结构。缠绕铜带结构与铜钢复合板相比，可保证导电铜层均匀一致，阴极辊工作时电流在辊面分布更均匀，从而保证铜离子在阴极上均匀沉积。由于铜钢复合板工艺相对简单，故工业上有很多采用铜钢复合板结构，本文讨论的是铜钢复合板结构。支撑阴极辊的重要部件为芯轴，芯轴由减速机、齿轮等部件带动整个阴极辊在阳极槽内转动，从而将硫酸铜溶液在阴极辊的表面形成铜箔面。阴极辊重量为 10 吨左右，辊面直线度与圆跳动度要求非常严格。阴极辊需在车床与磨床上进行精密加工，由于阴极辊重量较大，体积大，车床加工时，只能夹住芯轴的两端。因此芯轴在重力作用下，会有弹性变形。此变形对精加工的精度有一定影响，因此弹性变形越小，对阴极辊的精度越有利。

由于阴极辊尺寸与重量都较大，因此阴极辊只能在卧车上进行精车。而卧车加工辊面外圆是采用两端卡爪装夹（刚性夹持固定）。芯轴受到自身重力作用，芯轴在精车过程中产生弹性变形，此弹性变形超过一定的范围，就会对阴极辊辊面精车质量造成一定质量缺陷。如辊面直线度、圆跳动控制不理想，就会对铜箔箔面质量产生影响，使箔面达不到客户要求。因此阴极辊芯轴的弹性变形越小，对于阴极辊质量提高越有利。下文针对阴极辊芯轴进行分析。由于芯轴两端套有轴承等传动部件，芯轴也不能太大。因此选用合适材料与尺寸的芯轴为本文重点研究对象。

2.2 产品结构、性能

2.2.1 阴极辊的结构

阴极辊的核心组件为辊芯，通常采用钛、铜、钢等多金属复合结构，由钢筒、钢衬环、铜套、轴、铜堵板、钢堵板等关键部件焊接而成，并通过精密车削加工确保外圆面的平整度和导电均匀性，形成连续稳定的电解界面。该辊芯在制造过程中需经历严格的组焊工艺控制，以避免因焊接残余应力导致的变形或裂纹缺陷，进而影响辊体整体刚度与使用寿命。

在实际运行中，阴极辊和阳极槽进行协同作用，在 CuSO₄ 电解液体系下完成电解沉积反应，阴极辊表面作为铜箔附着基体，要求具备良好的导电性、耐腐蚀性、热传导稳定性。钛层用于提高辊芯表面的耐酸碱性能，铜套则增强导电能力，确保电流分布均匀，钢衬环与钢堵板提供结构支撑并承担高扭矩旋转载荷的传递功能。轴部连接传动系统，保证辊芯在高速转动下的动态平衡，防止偏心而引发的振动问题。此外，辊芯端部的铜堵板与钢堵板采用过渡配合焊接工艺，提升密封性能，防止电解液渗入轴承区造成短路。

从工程应用角度看，阴极辊设计要综合考虑冷却系统、绝缘处理措施，有效维持辊体在长时间电解过程中的温度稳定，降低热膨胀产生的接触不良、薄膜厚度不均等问题。通过优化辊芯材料组合，有助于有效提升阴极辊在电解铜箔生产中的作业稳定性与成品率，尤其在薄型铜箔制备中表现突出。结合电解沉积动力学原理，合理的阴极辊结构不仅增强了电流传导效率，也保障了剥离工序的顺利进行，是现代高精度铜箔制造中不可或缺的技术支撑构件。

2.2.2 阴极辊辊芯外圆精加工技术要求

在制造工艺流程中，半精加工后需预留 2mm 单边精车余量，提高最终精加工阶段的高精度几何控制和表面质量达标。辊芯外圆精加工过程中，必须严格满足形位公差要求，包括相对于基准 A 与基准 B 的同轴度不超过 0.08mm，直线度控制在 0.08mm 以内，圆跳动误差小于 0.08mm，这些指标是保障辊体旋转平稳性和铜箔成型一致性的核心参数。在加工设备选用方面，相关人员要采用高刚性数控车床配合金刚石刀具或 CBN（立方氮化硼）刀具进行无接痕连续切削，避免传统车削中因换刀或进给不连续而产生接刀痕迹，影响铜箔剥离性能。表面粗糙度 Ra3.2 μm 为上限值，该标准不仅满足导电接触面的基本要求，也防止因表面过粗引发的铜箔附着不均问题。在加工过程中需要控制切削参数，如切削速度、进给量、背吃刀量，增强金属流动的稳定性，减少残余应力产生的变形风险。冷却润滑系统同步运行，降低刀具磨损，提升加工精度。

完成精加工后，三坐标检测辊芯外圆，利用激光干涉仪、高精度轮廓仪，科学评估几何误差，确保符合设计规范。同时，结合电解环境模拟试验验证辊芯表面在长时间工作状态下的耐腐蚀性能与导电稳定性。

3 力学理论分析

3.1 材质选择

线弹性假设：仅适用于小变形且应力低于屈服强度。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

E ：弹性模量（杨氏模量），单位 Pa

应力（ σ ，单位：Pa）：单位面积上的内力（ ε ，无量纲）：描述物体变形程度在弹性阶段，力不变的情况下，弹性模量越大，应变越小。由上述公式可知，应变与弹性模量为反比关系。由于阴极辊重总量设计在 10 吨左右，因此力基本变化很小，可视为力不变。现在分析不同材料的弹性模量：

表一 不同规格材料的弹性模量等性能对比表

材料类型	弹性模量 (GPa)	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	延展率 (%)	焊接性能
Q235	200-210	≥235	370-500	≥26%	良好
Q345	215-238	≥345	470-630	≥21%	较好
45	200-210	≥355	≥600	≤16%	差

从上表一可以看出,其中 Q235、Q345 为低碳钢,45 号钢为中碳钢。中碳钢的焊机性能较差,一般在承力与承重部件很少使用中碳钢焊接。低碳钢焊接性能好,芯轴需要进行焊接。三种材料中 45 号钢为中碳钢,不适合焊接,首先排除。

由于芯轴需要焊接,且需要承受弯矩。因此需选择延展性与焊接性能较为良好的材料。Q345 与 Q235 比较,Q345 的弹性模量较大,因此抗变形能力更强。Q345 的屈服强度比 Q235 高 47%,抗拉强度上限更高,适合重载场景;45 钢的抗拉强度最高(≥ 600 MPa),但延展性最差。Q345:适用于高载荷、低温环境。选择阴极辊芯轴材料为 Q345。加工方法为锻打,增加材料的强度。且 Q345 机械性能与延展性较好,可采用锻打工艺处理,能获得更好致密性与机械性能。

3.2 改变芯轴尺寸,进行力学分析。

此芯轴收到自身重力作用。芯轴受力状态为典型的简支梁结构。当力 F 不变情况下,弹性模量 E 与惯性矩 I 对于挠度有影响。由以上讨论可知弹性模量 E 已选定为定值,现在可改变的参数为惯性矩 I。由以上公式可知,直径越大,惯性矩越大。因此改变芯轴尺寸,可以减少挠度,即减少车床加工时的弹性变形。但由于受到上述条件限制,芯轴尺寸只能在一定范围内设计。

3.3 有限元分析

改变芯轴尺寸,将模型简化,进行有限元分析。模拟芯轴在车床两端夹住,中间在阴极辊自重下受力的有限元分析模型,这时芯轴直径 $\phi 200$ mm,自重 10 吨下(中心加载),挠度 2.32mm 说明:芯轴直径 $\phi 240$ mm,自重 10 吨下(中心加载),挠度 1.64mm;芯轴直径 $\phi 280$ mm,自重 10 吨下(中心加载),挠度 1.48mm。

3.4 试验结果分析

通过对三种芯轴直径所生产出来的阴极辊进行质量评价如下表二。

表二 三种不同直径芯轴的辊面质量分析表

三种芯轴直径的钛辊辊面质量					
序号	芯轴直径(mm)	磨床平均直线度(mm)	磨床平均圆跳度(mm)	是否存在积水不干	综合评价
1	$\phi 200$	0.08	0.10	是	较差
2	$\phi 240$	0.04	0.05	否否	生产出来铜箔质量较好
3	$\phi 280$	0.03	0.04	否	生产出来铜箔质量较好

积水不干在铜箔生产现代生产工艺上不允许。由以上表分析可知, $\phi 200$ 的芯轴生产出来的阴极辊质量较差。 $\phi 240$ 、 $\phi 280$ 尺寸的阴极辊质量差别不大,由于 $\phi 280$ 尺寸芯轴成本比 $\phi 240$ 成本高。故选择 $\phi 240$ 尺寸为阴极辊尺寸为最佳选择。

佳选择。

4 结论

通过以上分析,改善阴极辊辊面质量方法。一、材质选用 Q345 比较合适。二、增加芯轴直径,可明显改善辊面质量。直径选择 $\phi 240$ 比较合适。

参考文献

- [1] 秦丽娟,王宇,魏甲明,等. 锂电池用3D多孔铜箔研究进展[J]. 中国有色冶金, 2023, 52(2): 73-80.
- [2] 赵志朋,胡浩,宋克兴,等. PEG和MPS对电解铜箔结构和力学性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(21): 54-64.
- [3] 袁水平,朱焕林,杨蕾,等. 锂电铜箔抗氧化抗腐蚀处理技术研究现状[J]. 矿冶工程, 2023, 43(3): 145-150.
- [4] ZHANG J, CHEN H, FAN B, et al. Study on the relationship between crystal plane orientation and strength of electrolytic copper foil[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 884: 161044.
- [5] SUN Y, PAN J, LIU L, et al. Improvement of performance stability of electrolytic copper foils by bi-component additives[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2022, 52(8): 1219-1230.
- [6] 吴佩知. 电解铜箔用阴极辊在线研磨常见技术问题与解决方案[J]. 电镀与涂饰, 2022, 41(15): 1101-1106.
- [7] 张淑鸽,何秀玲,杨勃,等. 钛阴极辊质量控制要点研究[J]. 机械工程师, 2022(2): 112-113.
- [8] 任利娜,侯智敏,牛靖,等. 电解铜箔用阴极辊的研究进展及发展趋势[J]. 精密成形工程, 2020, 12(2): 84-92.
- [9] KURIHARA H, KONDO K, OKAMOTO Y. Effect of titanium cathode surface condition on initial copper deposition during electrolytic fabrication of copper foil[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2010, 43(7): 612-617.
- [10] 徐涛,苗东,王召. 电解铜箔生产用新型阴极辊在线抛磨装置的设计[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39(1): 54-56.
- [11] 任中文. 电解铜箔技术改造中的经验教训(一)[J]. 覆铜板资讯, 2010(3): 39-41.
- [12] 付文峰. 电解铜箔生产中的质量控制点[J]. 印制电路信息, 2009, 50(7): 31-32.
- [13] 韩国强,秦丽娟,孙宁磊,等. 双面光极薄电解铜箔制备及其微观组织与性能研究[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(4): 13-18.
- [14] 任利娜,张建勋,鞠鹤. 钛焊接阴极辊接头及母材均晶化研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(17): 32-35.
- [15] 黄友明,王平,黄永发. 电解铜箔表面结构及性能影响因素[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(6): 2162-2166.
- [16] 吴佩知. 电解铜箔用阴极辊在线研磨常见技术问题与解决方案[J]. 电镀与涂饰, 2022, 41(15): 1101-1106.
- [17] 周钰柱,张志远,马艳霞,等. 沉积铜箔用阴极辊钛环轧制驱动辊转速研究[J]. 材料开发与应用, 2017, 32(3): 39-45.