

锂电池锂带压延自动化设备人机协同机械设计研究

王少鹏

邢台纳科诺尔精轧科技股份有限公司, 河北 邢台 054000

[摘要]在我国锂电池锂带压延覆合工艺逐渐成熟,因为传统石墨负极理论比容量仅为 372mAh/g 已经无法满足新一代电池能力密度需求,锂金属负极具有超高容量 3860mAh/g,并能实现低氧化还原电位。因为锂离子电池首次充电的时候,有机电解液将在石墨负极表面还原分解,形成固体电解质相界面(SEI)膜,锂枝晶的生长和死锂的积聚迅速消耗了无负极锂电池中有限的活性锂,导致低的库伦效率和快速的容量衰减。为了有效解决这一关键问题,通过预锂化工艺过程对电极材料提前开始补锂,从而抵消后续形成 SEI 膜引起不可逆的锂消耗,进而提高锂离子电池的整体容量和能量密度。负极极片表面进行预补锂便是通过将已经成型完成的锂膜,利用四辊压延覆合机构,将 PET 膜上的锂膜转移到极片表面,完成负极极片预锂化工艺过程,提前补充首效过程中锂离子的消耗。固态电池技术不断更新迭代,不少科研工作者将提升电池能量密度的研究方向转向锂金属负极;把锂膜和铜箔集流体覆合成一体,制备出 3D 结构的 Li/Cu 集流体负极;通过建立数学模型,代入各个参数,开始基准理论验算判断各个设计阈值,然后对系统模型进行整体分析,继而对相关结构参数开始优化,进而搭建新的数学模型框架体系,实现交叉验证,最终进行复核,形成整个计算过程闭环,来保证锂带压延设备符合设计前期要求,使覆合后的负极极片满足容量需求和最终状态的整体稳定性。

[关键词]锂电池;压延覆合;容量;能量密度;数学建模

DOI: 10.33142/sca.v9i8.20210

中图分类号: TH122

文献标识码: A

Research on Human-machine Collaborative Mechanical Design of Lithium Strip Rolling Automation Equipment for Lithium Batteries

WANG Shaopeng

Xingtai Naknor Technology Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 054000, China

Abstract: In China, the rolling and coating process of lithium strips for lithium batteries is gradually maturing. As the theoretical specific capacity of traditional graphite negative electrodes is only 372mAh/g, it can no longer meet the capacity density requirements of the new generation of batteries. Lithium metal negative electrodes have an ultra-high capacity of 3,860mAh/g and can achieve low redox potential. Because during the first charging of lithium-ion batteries, the organic electrolyte will reduce and decompose on the surface of the graphite negative electrode, forming a solid electrolyte interface (SEI) film. The growth of lithium dendrites and the accumulation of dead lithium quickly consume the limited active lithium in the negative electrode free lithium battery, resulting in low coulombic efficiency and rapid capacity decay. In order to effectively solve this key problem, the pre-lithiation process is used to start lithium replenishment of electrode materials in advance, thereby offsetting the irreversible lithium consumption caused by the subsequent formation of SEI film and improving the overall capacity and energy density of lithium-ion batteries. Pre-lithium replenishment on the surface of the negative electrode plate is achieved by transferring the lithium film on the PET film to the surface of the electrode plate using a four roll rolling and laminating mechanism, which has already been formed. This completes the pre-lithiation process of the negative electrode plate and supplements the consumption of lithium ions during the initial effect process in advance. Solid state battery technology is constantly updating and iterating, and many researchers are shifting their focus to improving battery energy density towards lithium metal negative electrodes; Integrating lithium film and copper foil current collector to prepare a 3D structured Li/Cu current collector negative electrode; By establishing a mathematical model, substituting various parameters, starting the benchmark theoretical verification to determine various design thresholds, then conducting an overall analysis of the system model, optimizing the relevant structural parameters, and building a new mathematical model framework system, cross validation is achieved, and final review is conducted to form a closed-loop calculation process, ensuring that the lithium strip rolling

equipment meets the design requirements in the early stage, and that the negative electrode sheet after lamination meets the capacity requirements and the overall stability of the final state.

Keywords: lithium battery; rolling overlay; capacity; energy density; mathematical modeling

引言

为了研制固态电池锂膜精密成型工艺及配套设备,解决锂膜在 PET 膜与铜箔表面均匀、稳定覆合的技术难题,实现高效、精确控制锂膜厚度与分布的功能,达到提升固态电池能量密度、循环寿命及生产效率的效果。

依次对收放卷机构、张力控制机构、主机压延轧制机构、液压横推加压机构、纠偏闭环机构建立数学模型,通过代入设计参数,进行基准理论验算,再通过多维度多性能校核,判断设计阈值,然后根据数学模型的灵敏度进行系统分析,继而进行结构和相关工艺参数优化,接着根据数学模型搭建校核理论计算模型,完成交叉验证,完成推导复核。

1 国内外研究现状

锂带压延设备已经完成从传统锂电池极片辊压设备到固态电池锂金属负极专属设备的完全转型,设备精度满足微米级要求,主要针对全固态电池和半固态电池锂金属负极覆合工艺需求。主要为实现将经过多级辊压减薄后的锂膜,通过转印覆合,与负极集流体或者铜箔覆合在一起,因为锂金属本身软粘、活性高,极易出现断带和厚度不均匀的情况,通过挤压制厚带和多级辊压减薄,再加上锂带压延覆合工艺,可以有效解决以上难题^[1]。

国内先导智能通过将锂带压延、负极补锂、多材料覆合多工序整合,通过机械压延和中间过程中的张力控制、纠偏控制,实现了锂带压延设备从实验室到批量量产的产品转型。

国内赢合科技锂带压延设备已经被划分到固态电池整线解决方案计划中,更注重系统整体集成和全线自动化

控制联动。

上海联净自动化科技有限公司实现超薄锂膜多级辊压和防粘黏技术上的重要突破,可供应量产企业所需要的超宽幅连续生产设备。

2 锂带压延设备结构分析及工作原理

锂带压延设备主要作用是把锂带和铜箔集流体覆合为一体,制备出锂铜集流体负极,从而改善锂金属负极电流分布不均匀的缺点。对于锂离子电池,负极材料是决定其能量密度的关键因素之一^[2]。负极石墨之所以要进行补锂工艺,其主要作用是补充活性锂离子损失,提升固态电池的首效和循环寿命,显著提升起始 ICE 库伦效应并且抑制枝晶的风险。

首效的意思是固态电池首次进行充放电工艺时,负极表面形成 SEI 膜,会不可逆转的消耗损失很多锂离子,目前缓解初始活性锂损失最有效的策略之一是采用预锂化的方法,向电极材料中预先引入额外的锂源以补偿不可逆锂的损失^[3]。进而有效扩大了固态电池初始可使用容量。

在延长循环使用寿命方面,在循环使用过程中,活性锂离子大量连续性损耗,致使固态电池内部容量缩减,补锂工艺可以有效补充损失的锂离子,延迟容量衰减速度,进而可以延长电池循环使用寿命。

锂带压延设备主要由 5 个收放卷轴(左侧上下气涨轴为 PET 膜收放卷轴,中间上方气涨轴为锂膜收放卷轴,右侧上下气涨轴为 PET 膜/铜箔/负极极片收放卷轴),四个主辊(从左到右,依次为支撑辊、压延辊、转移辊、覆合辊),一系列导辊等组件组成,具体结构形式如图 1 所示。

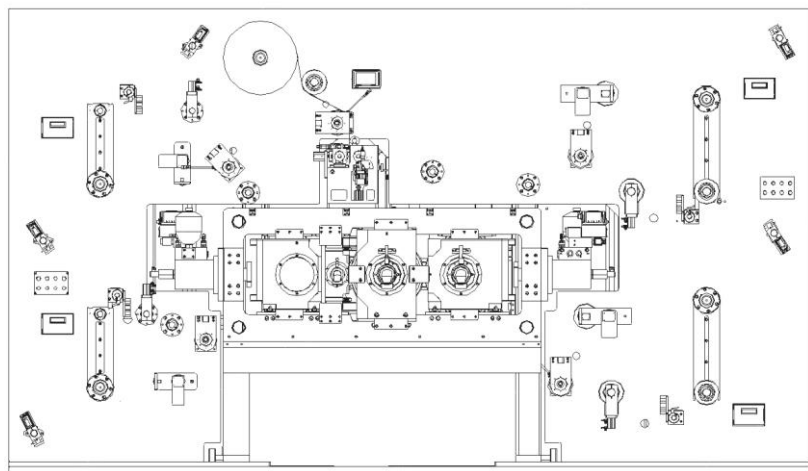


图 1 锂带压延设备结构图

锂带压延设备在工作原理上, 可实现三种工艺流程, 分别是:

1. 压延覆合机构的功能是将一定厚度, 大概是 $0.8\text{mm} \sim 2.0\text{mm}$ 的锂带通过辊压技术, 轧制成 $3\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$ 厚度的锂膜, 然后通过逗号辊涂油机构, 进行涂油工艺, 依靠逗号辊辊面凹槽存油, 依靠逗号辊升降动作来对油膜厚度进行调整, 涂油胶压辊压紧锂带与涂油钢辊接触, 锂带向下运动, 涂油钢辊向上运动, 将涂油钢辊表面的硅油

转移到锂带的表面, 完成锂带表面涂油的工艺。左侧压延辊侧上侧是 PET 排斥膜放卷, 下侧是 PET 排斥膜收卷, 排斥膜是为了防止锂膜粘黏到压延辊辊面上, 锂膜附着在转移辊的下半圆柱面上铜箔在经过转移辊与覆合辊之间的缝隙时, 在油缸压力的作用下, 将转移辊下半圆柱面上的锂膜转移到铜箔的表面, 完成锂膜覆合到铜箔表面的工艺过程, 具体工艺流程如图 2 所示。

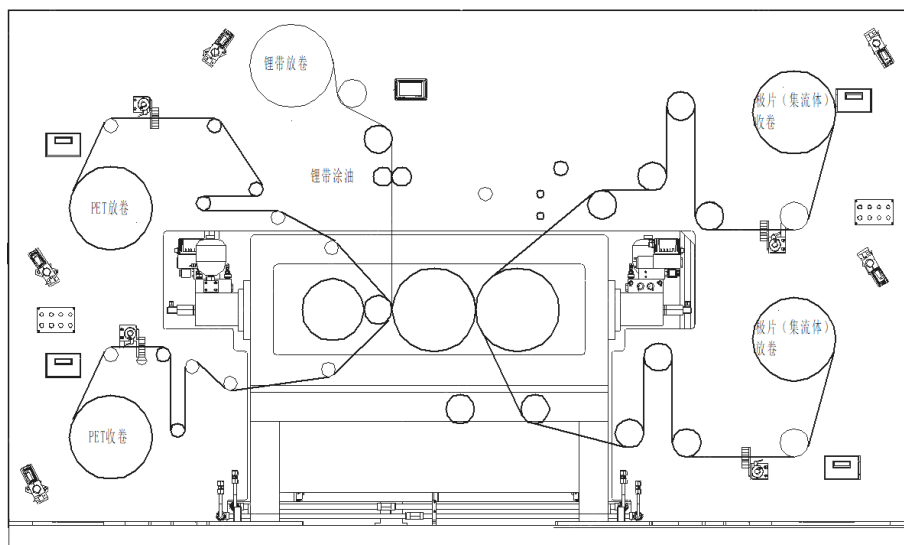


图 2 第 1 种和第 3 种工艺流程图

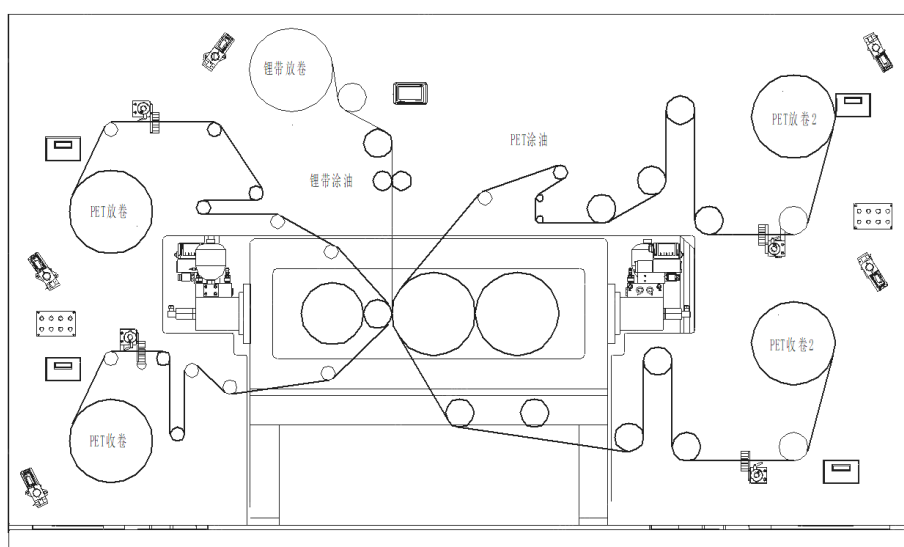


图 3 第 2 种工艺流程图

2.左侧为 PET 转移膜,右侧为 PET 排斥膜,排斥膜为了防止锂膜粘黏到转移辊面上,两侧上方均为放卷,下方为收卷,右侧转向和上述铜箔收放卷正好相反,PET 排斥膜涂油,油为带有石墨成分的二甲基硅油,为了防止和锂膜粘黏,将锂膜完成转移到 PET 转移膜上。具体使用凹版涂油方式,涂油工艺过程类似于底涂机原理,在凹版辊表面加工有存油盲孔,待凹版辊旋转至底部,依靠重力作用,油层落下,涂覆在 PET 转移膜表面,再通过压延辊与转移辊之间的速差,将锂膜转移到 PET 转移膜上,具体工艺流程如图 3 所示。

3.第三种工艺和第一种类似,只是把铜箔换成了负极极片,工艺过程为锂膜通过逗号辊涂油机构开始涂油工序,利用逗号辊表面凹槽存油,再对逗号辊进行升降调节来实现对油膜厚度的调整,涂油胶压辊压紧锂带与涂油钢辊接触,锂带向下运动,涂油钢辊向上运动,将涂油钢辊表面的硅油转移到锂带的表面,完成锂带表面涂油的工艺。左边压延辊上方是 PET 排斥膜放卷,下方是 PET 排斥膜收卷,排斥膜主要作用是避免锂膜粘黏到压延辊面上,接着锂膜附着在转移辊的下半圆柱面上,负极极片在经过转移辊与覆合辊之间的缝隙时,在油缸压力的作用下,将转移辊下半圆柱面上的锂膜转移到负极极片的表面,完成锂膜覆合到负极极片表面的工艺过程。

3 锂带压延覆合数学模型

3.1 (锂膜/覆合箔材) 收放卷数学模型

放卷机构主要是 PET 膜材、锂膜、覆合箔材、负极集流体构成的多种材料穿插放卷体系,首先计算料卷最大卷径,具体计算方程如下:

$$D_{\text{最大}} = \sqrt{D_{\text{初}}^2 + \frac{4L \cdot h}{\pi}} x_v \geq 0 \quad (1)$$

式中: $D_{\text{最大}}$ —料卷最大外径 (m); L —料卷总长度 (m); h —单条料带的厚度 (m); $D_{\text{初}}$ —料筒铜芯外径 (m)。

放卷轴驱动电机选型,首先需要确定的参数是电机与制动器的输入扭矩,具体公式如下:

$$T_1 = \frac{FD}{2i\eta} \quad (2)$$

式中: T_1 —电机与制动器输入扭矩 ($N \cdot m$); F —工艺设定的料卷张力 (N); D —料卷的实时卷径 (m); i —减速机减速比; η —机械结构之间的传递效率 (齿轮减速 0.9-0.94; 同步带 0.85-0.9)。

放卷轴驱动电机选型,其次需要确定的参数是电机与制动器需要满足的惯量值,根据料卷轴总转动惯量=卷芯惯量+缠绕材料惯量,具体公式如下:

$$J_1 = \frac{m}{8} \cdot (D_{\text{最大}}^2 - D_{\text{初}}^2) \quad (3)$$

$$J_2 = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot L \cdot R^4 \quad (4)$$

$$J_{\text{总}} = J_1 + J_2 \quad (5)$$

式中: F_1 —实时卷径状态下的张力值 (N); F_0 —料卷的初始张力 (N); D —料卷的实时卷径 (m); $D_{\text{初}}$ —料筒铜芯外径 (m); K_t —张力锥度系数 0.15-0.35。

胀紧轴主轴抗弯强度计算,其中 $[\sigma]$ 材料许用弯曲应力,45#热处理调质钢=80-120MPa,40Cr=150-200MPa,计算过程如下:

$$\sigma_b = \frac{(mg+F) \cdot L_s}{4} \div \frac{\pi d^3}{32} < [\sigma] \quad (6)$$

式中: σ_b —最大弯曲应力 (MPa); m —料卷的重量 (kg); g —重力加速度 (N/kg); F —工艺设定的料卷张力 (N); L_s —支撑跨距 (m); d —主轴外径 (m); $[\sigma]$ —主轴材料许用弯曲应力 (MPa)。

为了有效控制料卷窜动,稳定纠偏压力,需对胀紧轴主轴中点最大挠度推导,计算过程如下:

$$\xi_{\text{最大}} = \frac{(mg+F) \cdot L_s^3}{48E} \div \frac{\pi d^4}{64} < 0.05 - 0.1\text{mm} \quad (7)$$

式中: $\xi_{\text{最大}}$ —胀紧轴主轴中点最大挠度 (mm); m —料卷的重量 (kg); g —重力加速度 (N/kg); F —工艺设定的料卷张力 (N); L_s —支撑跨距 (m); d —主轴外径 (m); E —主轴材料弹性模量 (Pa),钢材一般为 (2.11×10^{11}) 。

3.2 张力控制数学模型

稳定的张力控制闭环系统是锂带压延工序的关键阶段,可以保证锂膜厚度的均匀性,严格控制卷料的压实公差,也可以避免锂带断带和出现褶皱的情况,保证轧制力的稳定输入,有效利用设备效率,均衡材料内应力,提高卷料的适配性,降低物料损失概率,有效压缩成本,张力控制是核心工艺闭环,是整个设备的核心控制系统。

为了保证料卷内送外紧,避免走带过程中,带体表面因过分拉伸造成起皱现象,对收卷轴部分进行张力锥度控制,主要通过 PLC 电控方式实现,根据张力锥度控制规律,进行公式计算如下:

$$F_1 = F_0 \cdot \left[1 - K_t \left(1 - \frac{D_0}{D} \right) \right] \quad (8)$$

式中: F_1 —实时卷径状态下的张力值 (N); F_0 —料卷的初始张力 (N); D —料卷的实时卷径 (m); $D_{\text{初}}$ —料筒铜芯外径 (m); K_t —张力锥度系数 0.15-0.35。

3.3 主机压延轧制数学模型

压延工序主要作用是将物料成型减薄,获得目标厚度的物料,改善锂膜表面的致密性,消除内部疏松空隙,消除物料表面的毛刺颗粒等缺陷,避免局部析锂现象,调整锂膜力学性能要求,保证面密度值。

使用锂电锂带通用工程数学模型,对薄板冷轧轧制力进行推导,具体计算如下:

$$F_r = 1.15 \cdot Y \cdot W \cdot \sqrt{R_1 \cdot (h_0 - h_1)} \quad (9)$$

式中: F_r —轧辊总轧制力 (N); Y —被压物料的平均变形抗力 (MPa); W —带体的有效宽度 (mm); R_1 —工作轧辊的外径 (mm); h_0 —入口带体厚度 (mm); h_1 —出口带体厚度 (mm)。

3.4 液压横推加压数学模型

机架两侧液压主缸横向推动对轧辊加压,已知轧制力和液压系统压力,求缸径,具体计算如下:

$$D_{\text{油缸}} \geq \sqrt{\frac{4 \cdot (F_r + F_f)}{n \cdot \pi \cdot P_{\text{液压}}}} \quad (10)$$

式中: $D_{\text{油缸}}$ —油缸直径 (mm); F_r —轧辊总轧制力 (N); F_f —轴承座摩擦阻力 (N); n —横推主缸数量; $P_{\text{液压}}$ —液压系统压力 (MPa)。

3.5 纠偏闭环控制数学模型

设备使用 EPC 闭环双路纠偏控制,交叉补偿,具体计算如下:

$$e = X_s - X_1 + K_c \cdot (X_2 - X_1) \quad (11)$$

式中: e —对位误差值 (mm); X_s —中心位置设定值 (mm); K_c —层间耦合补偿系数 0.1-0.3; X_2 —基材偏移 (mm); X_1 —锂带偏移 (mm);

4 结语

通过对锂带压延结构的计算分析,可得出以下结论:

(1) 计算过程逻辑自洽,符合对锂带压延设备的前提要求,满足其整体自动化需求,张力系统可以实现从收放卷张力锥度控制到张力辊检测,摆辊 PID 自适应调节。

(2) 各个关键承载部件刚性、强度、弹性变形量均符合设计标准的要求,在轧制力、整线作用的张力等共同作用的总负载下,整体机构无塑性变形、挠度弯曲等不可逆硬伤缺陷,不会存在局部超载、疲劳强度过低、局部状态失稳等问题。

(3) 张力传递均匀,完全匹配相应走带物料物理性能,不会出现物料表面应力集中,带体抖动等风险,符合设备耐久性要求,满足工艺参数上的需求。

[参考文献]

- [1] 张书豪.无负极锂金属电池中牺牲补锂剂性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2023.
- [2] 易星雨.补锂法制备高首次库伦效率 C/SiO₂ 锂电池复合负极材料[D].包头:内蒙古科技大学,2022.
- [3] 张蕾.锂离子电池电极补锂剂的制备及其性能研究[D].南昌:南昌大学,2025.

作者简介:王少鹏(1989—)男,汉族,河北邢台人,本科学历,中级工程师,研究方向:机电一体化自动化设备机械结构设计。