

大容量储能电芯制造低碳工艺技术研究

李昭锐 赵岩岩

国科能源（兰州新区）有限公司，甘肃 兰州 730207

[摘要]大容量储能电芯制造过程中碳排放控制属于储能产业低碳转型的主要方面。文章用 1kWh 电芯容量作为功能单位，计算出电芯制造各个工序的能耗构成和碳排放分布。根据分析可知，极片涂布和干燥工序在制造能耗碳排放上所占比列大于 40%，化成分容环节的电力消耗也属于重要的排放源。干法电极工艺采用无溶剂路径把干燥和溶剂回收的能耗全部消除，水基电极配合红外和热风联合干燥比传统热风干燥节能 28.1%~55.0%。化成分容采用能量回馈型设备可以将放电电能回馈到产线或者电网中，充电效率大于 88%，放电能量回收效率大于 85%。

[关键词]大容量储能电芯；制造碳排放；干法电极

DOI: 10.33142/nsr.v3i3.20388

中图分类号: TM911.51

文献标识码: A

Research on Low-carbon Process Technology for Manufacturing Large Capacity Energy Storage Cells

LI Zhaorui, ZHAO Yanyan

Guoke Energy (Lanzhou New Area) Co., Ltd., Lanzhou, Gansu, 730207, China

Abstract: Carbon emission control in the manufacturing process of large capacity energy storage cells is a major aspect of the low-carbon transformation of the energy storage industry. The article uses 1 kWh battery cell capacity as a functional unit to calculate the energy consumption composition and carbon emission distribution of each process in battery cell manufacturing. According to the analysis, the coating and drying processes of the polarizer account for more than 40% of the manufacturing energy consumption and carbon emissions, and the power consumption of the chemical and capacitive processes is also an important emission source. The dry electrode process adopts a solvent-free path to completely eliminate the energy consumption of drying and solvent recovery. The water-based electrode combined with infrared and hot air drying saves 28.1% to 55.0% energy compared to traditional hot air drying. The energy feedback type equipment used in the chemical capacity division can feed back the discharged electrical energy to the production line or power grid, with a charging efficiency greater than 88% and a discharge energy recovery efficiency greater than 85%.

Keywords: large capacity energy storage battery cells; manufacturing carbon emissions; dry electrode

引言

锂离子电池是新型储能装机的主体，2025 年 12 月中国电力储能累计装机中锂离子电池占 65.8%。欧盟电池法规和国内碳足迹管理方案都会对储能产品碳排放进行核算。电芯制造碳排放约占整个生命周期不含使用阶段总排放的 20%，涂布干燥工序占制造能耗碳排放的 42.36%。低碳工艺首先要在极片制造的高耗能环节上替代，提高化成能量回收水平并改善能源结构。

1 大容量储能电芯制造碳排放核算与现状分析

1.1 电芯制造碳排放的核算边界与功能单位

电芯制造碳排放的核算边界一般限定在摇篮到大门

阶段，即原材料获取、材料生产、电芯组装三个阶段。对于重复能量供应的储能型锂离子电池，国家认监委发布的碳足迹标识认证规则中把整个使用寿命内提供的总能量 1kWh 作为一个功能单位。广东省电化学储能碳足迹研究用 1kWh 电池容量作为功能单位，测得磷酸铁锂电池碳足迹为 64.15kgCO₂ 当量每 kWh，镍钴锰酸锂电池碳足迹为 84.46kgCO₂ 当量每 kWh，均低于全国平均水平，主要是因为再生原材料路径具有低碳排放的特点。

1.2 主要工序的能耗构成与碳排放分布

电芯制造过程中能源消耗主要为电力和天然气，电力占 60%~70%，天然气占 25%~35%。从工序角度来讲，

涂布干燥以及化成工序是两个重要的能耗节点。涂布干燥环节所耗热能主要用作溶剂蒸发和极片固化,占制造能耗排放的约 42.36%。化成工序的电力消耗是由电池的多次充放电循环造成的,在分容阶段最明显。据瑞浦兰钧碳足迹研究结果可知,用烟气余热回收、绿电替代等方式,在

2025 年单位产量的温室气体排放强度由上一年的 8041.86tCO₂e 每 GWh 降低到现在的 7163.25tCO₂e 每 GWh,降低了 39.53%。图 1 用饼图的形式给出了电芯制造各个过程的碳排放分布情况。

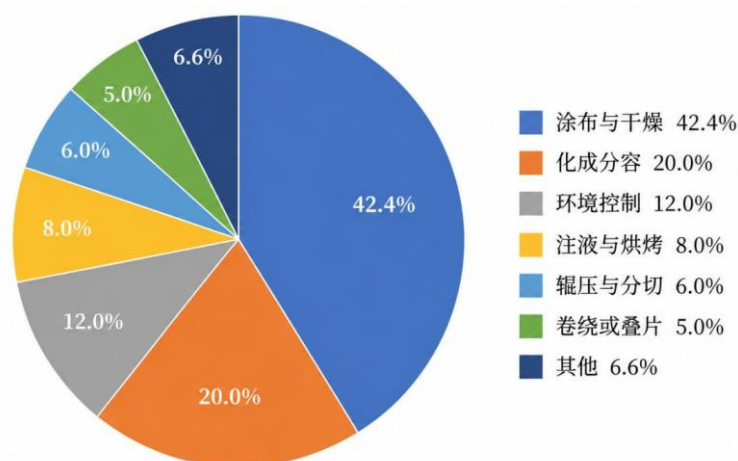


图 1 磷酸铁锂储能电芯制造阶段碳排放分布

1.3 原材料获取阶段的碳排放占比与影响

原材料获取阶段在电芯全生命周期碳足迹中所占比例较大。储能行业的碳足迹白皮书显示,原材料的获取、加工以及运营使用等各个阶段加起来占储能产品碳排放的 90%以上。正极材料前驱体冶炼和合成、电解液有机溶剂生产属于原材料阶段的主要排放源。干法电极工艺不用 NMP,既省去了制造现场的溶剂回收,又降低了 NMP 生产环节的碳排放间接影响。

1.4 碳排放核算标准与数据采集方法

核算标准上 GB/T 24067-2024 给产品碳足迹量化赋予了基本架构,DB3411/T 0051-2024 把锂离子电池碳足迹分成原材料获取和生产制造两个系统边界。传统的月度人工汇总计量粒度只包含全厂总能耗,不能拆解到车间和工序层面。青岛落地的分时分区电力碳足迹因子核算方法,用各个生产工序实际用电时间调取同一时段本地电网真实碳足迹因子,实现了生产阶段碳排放的时序化精细核算。锂电池碳足迹背景数据库 3.0 版本的数据条目多于 1200 条,包含产业链上的 28 个主要产地,主要材料碳足迹因子全部为本地化。

2 极片制造环节的低碳工艺技术

2.1 干法电极工艺:无溶剂制造技术

传统的湿法电极制造使用 NMP 做正极浆料溶剂,干燥和溶剂回收消耗总制造能耗的 47%左右。干法电极工

艺用 PTFE 等粘结剂原纤化代替溶剂分散,把混料、纤维化、压延成膜环节整合成无溶剂流程。根据生命周期评估数据可知,干法工艺比 NMP 基湿法路线节能 40%左右,生产 10kWh 电池所造成的二氧化碳排放量比 NMP 基湿法路线少约 1000kg。经过对磷酸铁锂正极的干法制造进行优化后,在干法电极电池总成本方面是 51.0 美元每 kWh,全球变暖潜值是 84.5kgCO₂ 当量每 kWh,比水基参考电池分别下降了 9.3%和 3.1%。干法工艺的电极微观结构也有优势,粘结剂分布更均匀,支持的高负载电极重量大于 500μm。该技术产业化的主要障碍就是 PTFE 纤维化对于混料温度、剪切条件的敏感性,干法膜与集流体之间的界面粘附力控制。

2.2 水基电极工艺:有机溶剂替代技术

水基电极工艺用去离子水代替 NMP 来制备正极浆料,消除了有机溶剂的使用和回收。半干法水基工艺采用挤出、压延的方式,把溶剂用量比 NMP 基方法减少约 80%。但是水基体系的干燥能耗并不比 NMP 体系低,因为水的蒸发潜热大。红外和热风联合干燥的量化分析显示,该组合方式对于水基电极的节能效果比 NMP 基电极要好一些,节能幅度为 37.6%~55.0%,比 NMP 基电极高 28.1%~42.4%。其机理就是红外辐射选择性加热电极表面,在不提高进风温度的情况下加快水分脱除,部分解耦了传统热风干燥中热量传递和质量传递的强耦合关系。水基工艺工

程难点有正极浆料对铝箔润湿性差、水高表面张力造成涂布均匀性控制困难。

2.3 涂布与干燥工序的节能技术

涂布干燥属于制造环节碳排放占比最高的工序。在热风干燥系统中,降低进风温度和传热系数虽然有利于电极质量,但是会增加干燥时间。红外辐射的加入使得权衡关系发生了改变。红外能量以电磁波的形式直接作用在涂层上,不需要先加热空气,在较低的进风温度下就可以达到足够的干燥速度。规模化工业烤箱的模拟分析结果表明,红外和热风联合干燥的最优运行参数范围是进风温度低、传热系数稍有降低、电极表面温度适当提高^[1]。在此区间内,NMP基电极的节能幅度可达28.1%~42.4%,水基电极可达37.6%~55.0%。该技术的实施条件就是对现有的

热风烤箱加装红外辐射模块,建立进风温度和辐射热流密度的协调控制逻辑。

2.4 辊压与分切工序的能效优化

辊压工序的能耗主要是液压系统、驱动电机造成的。大容量储能电芯极片宽度大,辊压压力增大造成液压系统能耗增加。用伺服电机直接驱动代替传统的液压加压方式,根据极片的厚度在线反馈来实时调节辊缝和压力,防止恒定高压运行造成的无效能耗。分切工序的能耗主要集中在激光切割或者机械刀具的驱动系统上,激光切割的能耗大于机械分切,但是切边质量好、毛刺少。对于磷酸铁锂储能电芯,极片厚度比动力电池大很多,机械分切刀具磨损速度变快,在切割质量和刀具更换能耗之间建立成本模型。图2用柱状图比较了不同的极片制造工艺的单位能耗。

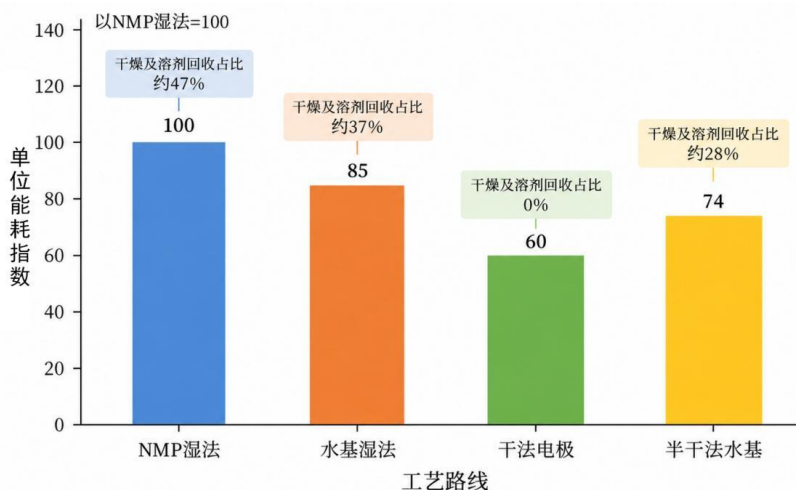


图2 不同极片制造工艺的单位能耗对比

3 电芯装配与化成分容环节的低碳技术

3.1 卷绕与叠片工艺的能耗差异与选择

卷绕工艺的生产效率比较高,一般可以达到12PPM以上,设备占地面积小;叠片效率一般为6~8PPM,设备投资和占地都比卷绕大。从电芯内部结构来看,叠片电池的极耳数量是卷绕的2倍,电子传输距离缩短,电阻降低10%以上,产热更小,对化成阶段的能耗控制有利。大容量储能电芯尺寸变大后,卷绕工艺的拐角处内应力问题更加严重,波浪状变形造成电流分布不均匀,在化成阶段还会产生额外的能量损耗。宁德时代587Ah卷绕电芯依靠机械结构与极片设计互相配合来达成96.5%的初始充放电效率。卷绕、叠片的选择要兼顾制造成本、设备效率和化成能耗这三个因素。

3.2 注液与烘烤工序的节能措施

注液前电芯烘烤的主要目的就是去除残余水分,真空

烘烤是主流方式。传统的烘烤工艺把电芯放在真空烘箱里长时间加热,能量消耗主要在保持真空环境所必需的真空泵工作和加热功率上。连续式节能电芯烘烤降温注液装置把真空烘烤箱和注液机放在同一个密闭空间里,电芯在烘烤之后不用经过外部环境的周转就直接进入注液工序,消除了降温过程中水分回吸和二次加热的需求。该方案可以把烘烤时间缩短60%~80%,注液前电芯总含水量保持在200ppm以下。注液工序可以采用等压注液或者真空注液的方式,但是后者会增加真空系统的能耗,但是注液效率高、浸润一致性好,可以减少后续化成阶段的返工能耗。

3.3 化成分容的节能技术与能量回收

化成分容是电芯制造过程中电力消耗最多的环节。分容阶段多次充放电循环把大量的电能从电池转移到充放电设备,传统的设备电能利用率低。能量回馈型化成设备

整条产线共用一套 PCS, 各个化成分容设备接入公共直流母线, 电池放电时产生的电能优先由同一个母线上处于充电状态的设备使用, 减少电能变换次数和交流电网侧损耗^[2]。泰坦新动力能量回馈型化成设备实测结果表明, 系统充电效率大于 88%, 放电能量回收效率大于 85%。使

用三电平拓扑、碳化硅功率器件之后, 充电效率可以达到 90%以上。以年产 10GWh 储能电芯产线为例, 化成分容环节电耗占制造总电耗的 20%~25%, 能量回馈系统可以将其中大于 80%的放电电能回收利用。图 3 为化成分容能量回馈系统示意图。

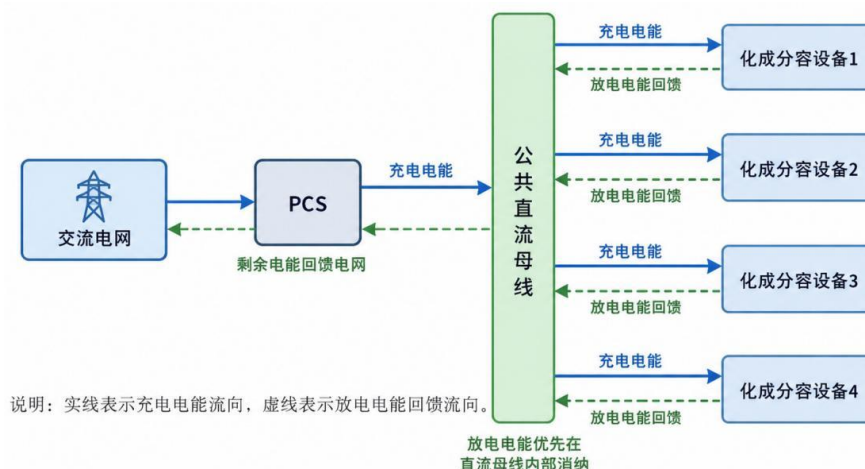


图 3 化成分容能量回馈系统示意图

3.4 生产车间环境控制的能耗优化

锂电池生产车间对环境湿度的要求比一般工业厂房高得多, 用于环境控制的能耗占车间总能耗的 43%。传统的转轮除湿机采用电加热再生转轮, 能耗高。热泵和转轮除湿耦合系统就是利用热泵制冷过程中产生的冷凝余热代替电加热器对转轮进行再生加热, 使除湿系统内部的能得以循环, 节能率达到 40%以上。在湿度要求较高的注液、化成区域, 双冷源降温方案把进风温度降到 5℃后再进入转轮除湿, 比常规方案节能 45%以上。对已有的产线加装低温直膨除湿机组代替部分普通除湿机, 可以使得整机能耗降低 20%以上。

4 制造过程能源系统与碳管理优化

4.1 绿电替代与分布式光伏应用

电芯制造的电力消耗碳排放强度同电网的碳足迹因子有关。电力碳排放因子高的地方, 绿电替代的减排效果最直接。2025 年瑞浦兰各基地光伏总发电量比上一年增加 3 倍, 绿色电力购买总量增加 40 倍, 可再生电力占总电量的 60%, 柳州基地绿电使用率大于 95%。分布式光伏的安装要考虑厂房屋顶的承重情况和阴影遮挡, 对已经建成的厂房来说, 彩钢瓦屋顶的承载能力一般不能承受常规光伏组件, 需要使用轻质柔性组件或者加强屋面结构。绿电采购是光伏装机以外的补充途径, 即签订长期购电合同来确定可再生能源电量的价格及来源。

4.2 余热回收与热能梯级利用

电芯制造的热能主要在涂布干燥、极片烘烤这两个工序上, 热源主要为天然气锅炉。烟气余热回收属于低投资改造途径。瑞浦兰钧柳州基地在锅炉烟气出口处安装水冷器, 使排烟温度由原来的 90℃以上降到 40~50℃, 回收的热水一路进入锅炉补水系统, 把 20℃冷水加热到接近 40℃, 另一路供生活热水使用。除湿机副产物蒸汽凝水的潜热被热水型溴化锂冷水机组和多级板换热系统吸收, 用作空间制冷或者工艺加热^[3]。余热梯级利用的设计原则为按温度品位逐级匹配用热需求, 高温烟气优先用于锅炉补水预热, 中温冷凝水用于除湿再生或者空间供暖, 低温排水作为热泵低位热源。

4.3 空压机、冷冻机组等通用设备的能效提升

空压系统在锂电池工厂里做极片除尘、气动控制以及物料输送等工作, 其能耗在辅助设备中所占比例较大。空压机排气压力一般会偏高一些来满足高峰用气的需求, 但是实际运行中大部分时间处于部分负荷的状态, 造成能效降低。空压系统节能改造的主要内容就是用零气耗压缩热吸干机代替传统的吸干机, 利用压缩热进行干燥剂的再生, 消除了再生耗气的损失。宁德时代同阿特拉斯·科普柯联手创建的锂电行业一级能效压缩空气站, 于 240m³/min 的需求之下配备 260m³/min 的零气耗压缩热吸干机, 并且搭配上精密过滤器来达成工艺用气品质的标准。空压机

余热回收利用属于一项可以落地的措施。电池车间 UPW 纯水冬季加热需求为 1186kW，空压机余热回收总热量为 1578kW，可以将 30m³/h 纯水由 15℃ 提高到 55℃ 以上，代替电加热纯水。冷冻机组的能效提高主要是对冷凝温度进行优化控制以及变频驱动改造。

4.4 碳足迹数字化管理与全过程监测

碳足迹数字化管理的功能不是核算本身，而是把工序级能耗、物料数据变成可以追溯、可以验证的减排依据。宁德时代 2022 年推出“时代碳链”管理工具，把厂房、财务、采购系统连起来，对近 40 道电池生产工序以及上游物料全部搜集数据，创建了上百个产品和原材料的碳排放模型。大容量储能电芯制造企业数字化碳管理的落地路径可以从工序级电表和数据采集器的加装开始，对涂布干燥、化成、除湿等重要工序的能耗数据按照班次进行采集并上传到 MES 系统，然后通过碳足迹核算模块将能耗数据乘以对应的电力碳足迹因子，得到工序级碳排放记录。

5 结语

大容量储能电芯制造的低碳工艺技术要在工序上逐项落实，不能依靠某个技术的突破。极片制造环节的减排潜力最集中，干法电极工艺彻底取消了溶剂使用和干燥工序，从源头上减少了能耗和碳排放，水基工艺配合红外热

风联合干燥，在保持湿法产线架构的基础上取得了较好的节能效果。化成分容环节能量回馈技术已经形成了成熟的设备方案，充电效率大于 88%，放电回收效率大于 85% 的实测数据显示出该途径在工程上是可行的。余热回收、空压系统改造、除湿节能等辅助系统优化虽然单位减排量小，但是投资回收期短，适合做产线改造的首选。碳足迹数字化管理不能直接产生减排效果，但是给各个工序减排措施的量化比较、持续改进提供数据支持。

[参考文献]

- [1]唐昕雅,蔡军,黄鲲,等.电动汽车电池全生命周期碳足迹[J].华南师范大学学报(自然科学版),2024,56(4):1-9.
- [2]陈鑫,李心蕊,马晓涵,等.基于空间的生命周期评价和灰色模型的锂离子电池碳足迹分析[J].环境科学,2026(1):1-19.
- [3]郝宏铭,冯子璇.新能源汽车锂电池全生命周期碳足迹分析研究[J].能源与节能,2026(6):52-57.

作者简介：李昭锐（1984—），男，土家族，北京人，博士，就职于国科能源（兰州新区）有限公司，研究方向为储能二次器件及新型电池开发；赵岩岩（1999—），男，汉族，甘肃天水人，硕士，国科能源（兰州新区）有限公司，研究方向为新能源材料与器件。