

Research on the assembly process planning of liquid flow energy storage battery stack

Siyi Zhang

Weijing Chongju Energy Technology (Zhuhai) Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong, 519000, China

Abstract

This study focuses on the overall assembly process planning for flow battery stacks, delving into key issues such as low assembly efficiency and poor consistency in the current industrialization of flow batteries. The article systematically explains the basic structural composition of flow battery stacks, thoroughly discusses layout design and equipment solutions in the overall assembly process planning, and proposes an electric stack assembly process layout plan based on lean production. Research findings indicate that through scientific process planning and advanced assembly technology, the overall assembly efficiency and assembly consistency can be significantly improved by more than 30%. Finally, this paper looks ahead to the intelligent and digital development trends of flow battery stack assembly processes, providing important references for achieving large-scale production in the industry.

Keywords

flow battery; reactor assembly; process layout; process equipment

关于液流储能电池电堆总装工艺规划研究

张似易

纬景崇聚能源科技(珠海)有限公司, 中国·广东 珠海 519000

摘 要

本研究聚焦液流储能电池电堆总装工艺规划领域, 针对当前液流电池产业化进程中面临的总装效率低下、产品一致性差等关键瓶颈问题展开系统性研究。文章首先详细阐述了液流电池电堆的基本结构组成及其工艺特性, 进而深入探讨了电堆总装工艺规划中的布局设计原则和设备选型方案, 创新性地提出了基于精益生产理念的电堆总装工艺布局优化方法。研究结果表明, 通过科学的工艺规划和先进的装配技术应用, 可显著提升电堆总装效率和装配一致性。最后, 本文前瞻性地探讨了液流电池电堆总装工艺向智能化、数字化方向发展的趋势, 为行业实现规模化、标准化生产提供了重要理论依据和实践指导。

关键词

液流电池; 电堆总装; 工艺布局; 工艺设备

1 引言

中国目前三分之二的社会用电量仍来自于高碳排放的煤电。在全球积极推进碳中和、碳达峰的大背景下, 为实现“双碳”战略目标, 优化能源结构, 满足可再生能源快速发展和电网调峰需求, 大规模储能技术的重要性日益凸显。液流电池凭借其本征安全性高、循环寿命长(可达 20 年以上)、度电成本低(< 0.3 元/kWh)以及灵活易部署等显著优势, 正逐步成为清洁能源领域的重要发展方向, 作为液流电池的核心部件, 电堆的制造工艺直接决定了电池的性能和成本。然而, 当前液流电池产业化过程中, 电堆总装面临效率低、一致性差等问题。人工装配方式不仅耗时耗力, 且

难以满足高精度的装配要求, 导致电堆产品质量参差不齐, 严重制约了液流电池的大规模应用。因此, 深入开展液流电池电堆总装工艺规划研究, 对推动液流电池产业发展具有重要意义。

2 液流电池电堆主要结构

2.1 基本结构组成

液流电池电堆根据不同的设计结构和电解液的材料不同, 结构上存在部分差异, 但主要结构基本一致, 主要由端板、流道板框、电极板、交换膜、密封件等核心部件构成。端板具备相应的刚度和强度, 作为电堆的机械支撑结构。两个端板之间由逐层的流到板框、电极板、交换膜等交替堆叠, 最终装配成一个完整的电堆^[1]。

2.2 结构工艺特性

电堆的特殊结构对总装工艺提出了严格要求:

【作者简介】张似易(1990-), 男, 中国广东汕头人, 本科, 工程师, 从事工艺规划及自动化装配研究。

①尺寸精度要求高：各层组件需要实现微米级对位（累积误差 $\leq 0.5\text{mm}$ ），任意单层错位超过 0.1mm 即可能导致电解液分布不均。

②压力控制严格：装配压力需均匀分布（偏差 $\leq \pm 10\%$ ），压力不均易引起膜电极局部变形或密封失效。

③洁净度标准高：特别是膜电极区域需达到百万级以上洁净标准，微尘污染会显著降低电池性能，同时需保证恒温恒湿环境要求。

④材料兼容性复杂：装配过程涉及金属、塑料、弹性体、复合材料等多种材质的精密配合，需采用差异化处理工艺。

这些结构特性决定了电堆总装必须实现高精度、高一致性的装配过程。研究表明，装配误差导致的电堆性能衰减占总衰减量的 30% 以上，因此优化总装工艺对提升电堆整体性能至关重要

3 电堆装配工艺规划

从上述电堆主要结构描述可以看出，电堆总装的过程是不同零部件重复堆叠的过程，不同的企业设计的单片电池单元堆叠层数从 30 到 60 不等，每一个单片电池单元由 3 到 4 层不同零部件组成，因此整个电堆的堆叠层数可达 200 层以上。采用人工堆叠的方式效率极其低下，单堆装配时间需 2~4 个小时，且堆叠精度、质量及一致性差，因此需要相应的自动化生产工艺布局规划和导入相应的自动化设备。

3.1 工艺规划布局

电堆总装工艺规划布局应以精益生产理念为指导，实现物料流、信息流和价值流的高效协同。根据电堆结构特点和生产节拍要求，可采用 2 种不同的工艺布局方案，

其中“一字型流水线+工作站”布局方案，采用直线型布置，全长约 30-50m，宽 4-6m。因电堆的堆叠、压装和拧紧、泄露测试工序耗时较长^[2]，可以在一条流水线上设置多个电堆自动堆叠工作站和多个集压装、拧紧、测试于一体的工作站，将电堆堆叠的产出节拍提高，流水线上的工位主要为人工作业工位，完成电堆配套辅件的装配工作。每个工厂根据产能需求可以并行布置多条相同的线体进行同步生产，且该种布局方式仅需要在电堆堆叠工作站所在区域设置洁净和恒温恒湿车间即可，电堆完成堆叠密封后，其余作业可在普通厂房内完成。

具体而言，在“一字型流水线+工作站”布局中，物料从流水线的一端进入，依次经过各个工作站。自动堆叠工作站采用先进的机器人装配系统，实现零部件的精确堆叠。在电堆堆叠完成后，通过流水线输送至集压装、拧紧、测试于一体的工作站，完成后续关键工序。人工作业工位则负责安装电堆的配套辅件，如线束、控制模块等。这种布局方式能够有效提高生产效率，减少物料搬运时间，并且便于对生产过程进行监控和管理。

“岛式布局”即孤岛式工作站，面积约 $10\text{m} \times 15\text{m}$ ，在

一个工作站内完成电堆的堆叠、压装、拧紧等作业，每一个工作岛产出一个电堆的时间较长，电堆完成装配后在转移到集中区域进行泄露测试。每个工厂根据产能需求集中布置多个工作岛，但该种布局方式理论上需要将所有工作岛纳入到洁净和恒温恒湿车间内，相同产能下，所需洁净和恒温恒湿车间面积相比方案一扩大一倍以上。

在“岛式布局”中，每个工作岛都是一个相对独立的生产单元，配备了完成电堆装配所需的全部设备和人员。这种布局方式的优点是灵活性高，能够快速适应不同规格电堆的生产需求。每个工作岛可以独立进行生产，互不干扰，便于进行生产调度和管理。然而，其缺点也较为明显，由于每个工作岛都需要配备完整的设备和在洁净环境下工作，导致设备投资成本和车间建设成本较高，且物料在不同工作岛之间的转运需要额外的时间和人力成本^[3]。

从半成品物流转运上看，方案一采用流水线形式，灵活度和对产品尺寸限制度较高，只能按照固定的方向流动且只能输送限制尺寸条件下的产品，若新产品的设计尺寸超出流水线的宽度尺寸，则需要对设备进行改造。方案二采用 AGV（自动导引车）进行转运，灵活度更高，对产品尺寸的限制更小。AGV 能够根据预设的路径和指令，自动将半成品在不同工作岛之间进行转运，无需人工干预，大大提高了物流转运的效率和准确性。同时，AGV 还可以根据生产需求灵活调整转运路径，适应不同的生产布局和产品规格。

3.2 工艺设备

电堆总装核心设备主要是自动堆叠设备、压装设备、拧紧设备、泄露检测设备，相应的选型应兼顾精度、效率和可靠性。

堆叠工序可采用由多台视觉引导的机器人相互配合装配系统，配备高分辨率 CCD 相机和精密运动控制模块，重复定位精度达到 $\pm 0.05\text{mm}$ 。通过机器人从料车上自动抓取零部件放置到对中台上，然后对零部件进行拍照定位，自动调整抓手移动位置，确保居中抓取零部件；每次放置安装堆叠零部件前对安装位置拍照定位，自动调整抓手移动位置，确保放置安装精度^[4]。每一层堆叠安装后通过视觉拍照计算检查，保证每一层零部件均在装配精度要求内。

该视觉引导的机器人装配系统通过先进的图像处理算法，能够快速准确地识别零部件的位置和姿态，即使在零部件放置位置存在一定偏差的情况下，也能实现精确抓取和安装。同时，系统还具备学习和优化功能，能够根据历史装配数据自动调整装配参数，提高装配效率和质量。例如，在装配过程中，因零部件涉及材质包含塑料、钢材、膜等，硬度、表面处理方式、形状差异较大，需根据根据根据不同零部件的特点，采用不同的抓取方式（如夹取、真空负压吸盘等），同时自动调整抓手的抓取力度和速度，保证零部件抓取牢靠前提下，避免对零部件造成损伤。

压装和拧紧需集成在同一个工位，压装设备应选择伺

服电动压力机,具备力-位移双重控制功能,压力控制精度 $\pm 1\%$,可实时监测并调整压装压力曲线。以压力为目标控制要求,位移为辅助监控条件。保持压装状态下,采用机器人带拧紧轴的方式完成电堆螺杆自动拧紧,设计扭矩拧紧精度可达 $\leq \pm 1\%$ 。

伺服电动压力机相比传统的液压压力机,具有更高的控制精度和响应速度,能够实现精确的压力控制和位移控制。在压装过程中,压力机可以根据预设的压力曲线进行压装,确保压装力均匀分布在电堆上。同时,通过与机器人的协同工作,在保持压装状态下完成螺杆的拧紧,能够有效避免因压装和拧紧顺序不当而导致的电堆变形等问题。

气密性检测设备主要是泄露检测仪(灵敏度达到 $1 \times 10^{-3} \text{mbar} \cdot \text{L/s}$)及密封工装,根据工艺规划需求,可与压装和拧紧工作站集成,或规划单独工位作业。通过设计非标自动化工装对电堆进出液口进行密封并接入气密性检测设备,将气密性检测与压装和拧紧工作站集成,可以减少电堆在不同工位之间的搬运次数,提高生产效率。在检测过程中,通过向电堆内充入一定压力的气体,利用泄露检测仪检测气体泄漏量,判断电堆的气密性是否符合要求。

针对大型电堆装配,需配置专用翻转工装和起重设备,减轻工人劳动强度。电堆完成压装拧紧后,需要翻转 90° 并更换托盘工装,转变放置角度从而方便人工装配作业。翻转过程中,要求电堆不会产生磕碰或撞击,翻转后落在新的工装上能放置稳妥不偏位。

设备配置方案应考虑生产柔性和扩展性。建议采用模块化设计,通过更换夹具和调整程序即可适应不同规格电堆的生产。关键设备应具备数据采集接口,接入工厂MES系统,实现工艺参数的实时监控和质量追溯。通过模块化设计,企业可以根据市场需求的变化,快速调整生产线的配置,生产不同规格的电堆。同时,通过将设备与MES系统相连,生产管理人员可以实时获取设备运行状态、工艺参数等信息,及时发现生产过程中的问题并进行调整,确保产品质量的稳定性。

4 实际应用效果

本文中提出的工艺规划方案已在某新能源科技公司的产业化项目中得到成功应用。该企业作为国内领先的液流电池制造商,在建成的年产GW级别的电堆生产线中全面采用了"一字型流水线+工作站"布局方案,并集成了多项创新性装配技术。经过实际生产验证,取得了显著的技术经济效益。

在效率提升方面,通过将机器人技术深度融入总装过程,机器人与人工配合完成精密装配作业,大幅降低劳动强度。使电堆总装由人工装配2小时/个提升到20min下线一

个电堆。同时这种设计使得产能扩展极为便利,直接复制相同的电堆生产线即可实现产能的线性提升。

在质量改善方面,通过引入3D视觉引导技术使对位精度提高到 $\pm 0.02\text{mm}$,电堆装配一致性及关键质量指标显著提升。

该案例的成功实施充分验证了本研究提出的工艺规划方案的科学性和实用性,为液流电池行业向智能制造转型提供了可复制的样板。企业反馈显示,该生产线不仅满足了当前量产需求,其柔性设计还能兼容未来三年内的产品升级,具有较强的技术前瞻性。这一实践成果也为后续研究方向的确定提供了重要参考。

5 结论及未来展望

本研究系统分析了液流电池电堆总装工艺规划的关键要素,提出了基于精益生产的电堆总装工艺布局规划方案。研究表明,科学的工艺布局和先进的装配设备是提升电堆总装效率和质量的核心因素。通过生产线的合理布局,采用视觉引导的机器人装配系统,配合智能压装工艺,可实现单台电堆装配时间缩短至1小时以内,生产效率和产品一致性显著提高。

未来研究应重点关注新型装配工艺开发应用、数字孪生技术在工艺规划中的应用、人工智能算法的参数优化以及柔性装配系统的开发等方面。数字孪生技术将成为工艺规划的重要工具,通过虚拟仿真可以优化产线布局、验证工艺方案,缩短实际投产前的调试时间,实现从工艺设计到生产运维的全生命周期数字化管理。人工智能算法将应用于工艺参数优化,通过机器学习历史生产数据,自动推荐最佳压装曲线和拧紧参数,提升产品一致性。

同时,随着物联网技术的不断发展,液流电池电堆总装工艺将实现更高效的设备互联和数据共享。通过在设备上安装传感器,实时采集设备运行数据,并将数据上传至云端进行分析和处理。生产管理人员可以通过手机或电脑随时随地查看设备运行状态和生产数据,实现远程监控和管理。不同设备之间可以实现数据共享和协同工作,提高生产系统的整体效率。

参考文献

- [1] 赵明远,何文,贾树旺,等.新型全钒液流电池浅析[J].设备管理与维修,2023,22:178-179
- [2] 李汉龙.探秘全球首个吉瓦级钒液流电池智能工厂[J].环境,2023,01:33-36
- [3] 吴浩.新时代总装车间的规划与展望[J].汽车实用技术,2023,08:207-213
- [4] 刘亮,肖泽光.结合数字化实现零件全自动安装[J].汽车实用技术,2024,04:120-124