

石墨复合材料极板模压成型自动化生产线设计*

杨文巍, 李吉刚, 纪文慧

(北京华胜信安电子科技有限公司, 北京 100085)

摘要: 双极板是质子交换膜燃料电池(PEMFC)两个重要组成部件之一,对燃料电池整体的重量、体积、功率等影响巨大,对燃料电池的整体生产成本和生产周期起到关键性的影响作用。采用模压方式生产的石墨复合材料极板可以一次成型整板,省去二次加工时间,大大提高生产效率。石墨复合材料极板模压成型自动化生产线设计包括上料段、模压段、烘干段、后处理段、检测段、包装段六部分,能满足工业化、大批量生产极板要求,满足燃料电池行业对极板的需求量。

关键词: 质子交换膜燃料电池;石墨复合材料极板;模压成型;自动化生产线

中图分类号: TP27;TK91

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.212203

中文引用格式: 杨文巍,李吉刚,纪文慧. 石墨复合材料极板模压成型自动化生产线设计[J]. 电子技术应用, 2022, 48(12): 70-73.

英文引用格式: Yang Wenwei, Li Jigang, Ji Wenhui. Design of automatic production line for graphite composite plate molding[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(12): 70-73.

Design of automatic production line for graphite composite plate molding

Yang Wenwei, Li Jigang, Ji Wenhui

(Beijing Huasun Information Security Electronic Technology Limited Company, Beijing 100085, China)

Abstract: Bipolar plate is one of the two important components of Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC). It has a great impact on the overall weight, volume and power of fuel cell, and plays a key role in the overall production cost and production cycle of fuel cell. The graphite composite plate produced by molding can form the whole plate at one time, save the secondary processing time and greatly improve the production efficiency. The design of graphite composite plate molding automatic production line includes six parts: feeding section, molding section, drying section, post-treatment section, detection section and packaging section, which can meet the industrialized and mass production of plates and the demand for plates in the fuel cell industry.

Key words: proton exchange membrane fuel cell; graphite composite bipolar plate; compression molding; automatic production line

0 引言

质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cells, PEMFC)^[1-2]是通过氢气和氧气反应生成水的简单化学反应,通过氢原子电子在移动过程中产生电流,将化学能转化成电能的新型电源^[3-5],可大范围应用在新能源电动汽车行业。双极板是 PEMFC 电堆中的关键零件,由两块极板通过粘接的方式连接到一起^[6-7]。两块双极板中间放置一块质子交换膜便形成一个简单的燃料电池单元,将电池单元串联在一起组成电堆。电堆发出的电量经过整流和稳压电路作用,可以输出所需的电压和电流。

现阶段常用的双极板分为石墨双极板、石墨复合双极板和金属双极板三大类^[8-9]。石墨因具有较高的导电

性和优异的化学稳定性,最早用于双极板,技术成熟,已实现大规模商业化应用。但石墨抗弯强度低,材料脆性大,导致石墨双极板具有厚度大、电池体积比功率低、加工成本高等缺点。复合双极板由树脂混合石墨粉和增强材料形成预浸料后注射或模压一次成型^[10],综合性能好,有较好的导电性能、防腐性能以及抗弯抗压等机械性能^[11]。金属板材经冲压形成带流道的双极板称为金属双极板,其通过表面改性获得保护层,但在长期(>1 000 h)严苛工作条件下,涂层会被腐蚀失去保护作用^[12]。本研究主要针对石墨复合材料极板模压生产线进行。

1 设计目的

石墨复合材料极板的制备方式可大致分为两类,一类是在预制的石墨平板上雕刻流道制得,极板厚度均匀,但加工周期较长,无法满足燃料电池行业蓬勃发展对极板的需求;另一类是将石墨粉料与填充材料混合制

* 基金项目:北京市科学技术委员会资助项目(Z19110004619011)

成石墨复合材料,再通过模压的方式一次成型得到极板。模压极板的制作工艺可以控制在 1~2 min/片,制作速度较快。本文以模压极板为研究方向,主要研究模压自动化生产线的设计与建设,在模压工艺及材料研发基础上,设计出满足生产要求的极板模压自动化生产线。

2 设计方法研究

本产线根据石墨复合材料极板模压成型工艺进行设计,结合模压过程中极板成型需要的设备及参数等因素,研究方向包括压力机模压段工艺及参数研究、热处理段工艺及参数研究、后处理段工艺及参数研究。本产线包括结构设计、电气设计、控制系统设计 3 部分,结构设计主要设计生产线的整体布局,包括传动机构、定位结构、检测单元及机械手单元等;电气设计包括电路设计、电路原理设计、元器件选型等;控制系统设计包括 PLC 控制单元设计、通信设计等,还预留有远程控制单元模块扩展空间。

机械结构设计需要注意设计时的尺寸精度,石墨复合材料极板尺寸通过相对应的模具尺寸精度决定,只要极板模具尺寸达到要求,制得极板都可以控制在要求范围内,板件厚度均匀。

电气结构设计采用工业常用 PLC 控制单元作为底层控制模块,控制产线生产动作、传感器感应等方面。

控制系统设计采用生产制造执行系统(Manufacturing Execution System, MES)作为总控制系统,该系统从生产线底层控制单元 PLC 采集数据,检测生产线生产过程,进行在线管理管控,通过 PC 或 APP 监管控制生产线动作,同时管理生产成本及相关数据。通过 MES 系统直接向生产线下发生产任务,管理原材料使用情况。

3 个设计部分最终可达到极板压制过程控制在 1~2 min/片,后处理过程流水线进行,产线的产出速度达到 1~2 min/片,大大提升生产效率。在极板批量生产过程中,每条产线可以满足年产 100 万片的需要,提升效率的同时,也可以保证尺寸及性能的要求。

2.1 材料及工艺研究

2.1.1 压力机模压段工艺及参数研究

极板模压条件参数主要与模压使用 BMC 材料相关,材料不同,模压控制参数不同,模压参数主要有模压温度、保压时间、压制压力、压制速度等,对 3 种不同材料进行压制试验,每种材料模压参数有轻微变化。表 1 为不同材料的压制参数表。

设计生产线参数时,需要覆盖以上材料模压参数最

表 1 不同材料的压制参数

序号	模压温度/℃	保压时间/s	压制压力/MPa	压制速度/(m/s)	质量/g
材料 1	135~160	70~90	70~90	1~1.5	18.3~18.7
材料 2	150~170	60~80	60~80	1~1.5	18.3~18.7
材料 3	120~150	100~120	55~80	1~1.5	18.3~18.7

大范围,在最大范围基础上增加 20%~50% 的冗量,为今后其余材料的压制预留足够的空间,设计产线模压温度范围为室温~250℃,保压时间范围为 0~300 s,压制压力最大为 120 MPa,压制速度范围为 0.5~3 m/s。

2.1.2 热处理段工艺及参数研究

热处理段主要是对模压的极板进行后热处理,让极板中的材料反应时间更长、成型更稳固,同时烘干极板内的有机物,提高极板强度和硬度。通过对模压材料的热处理验证得出,热处理段温度取模压段温度下限。热处理段温度设置在 150~200℃,温度范围可调节,烘干段运行速度可在 0.1~5 m/s 间调节,根据压制板件数量调整运行速度,保证每片极板烘干平均时间 30~60 min,在该时间段中,板件烘干效果是最佳的。

2.1.3 后处理段工艺及参数研究

后处理主要对模压极板进行细节调整和清洗,清洗极板表面附着物。极板使用的材料不同,极板硬度不同,后处理段的处理方式也不同。极板附着物影响极板导电性能,导电性能是影响极板乃至燃料电池整体性能的主要因素。与普通电池类似,燃料电池在发电过程中,电池内部电阻能耗是电池主要消耗,电池内部电阻主要体现在极板导电性能上,极板导电性能越好,极板内部电阻越小,燃料电池内部能耗也相应减小。所以,极板表面附着物的清洗对燃料电池性能影响是巨大的,表面清洗最大程度提高极板性能。清洗功能主要是使用去离子水对极板进行高压冲洗,通过对清洗后极板测试,极板导电性能有明显提升。通过公式计算电导率变化:

$$\text{导电性能提升率} = (\text{清洗后电导率} - \text{清洗前电导率}) / \text{清洗前原始电导率} \times 100\% \quad (1)$$

通过多次清洗,极板性能提升会降低,超过 5 次清洗后,极板提升效果趋于平缓,如图 1 所示。

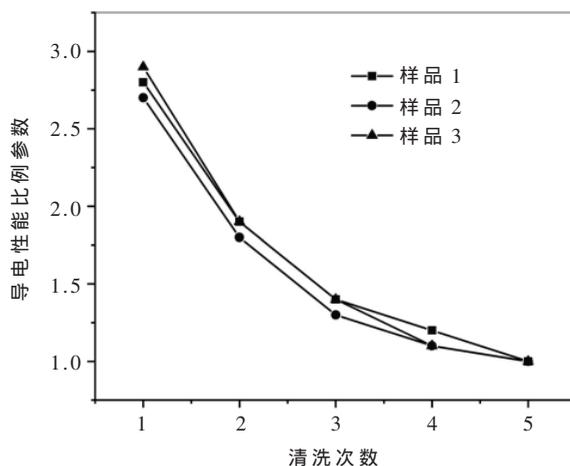


图 1 样品清洗次数与导电性能降低对比

2.2 模压生产线设计

2.2.1 结构设计

模压生产线机械结构设计主要是关键设备结构设

计、工序排布设计(根据生产工艺需要)。产线主要设备有:压机、烘干炉、后处理设备、打码设备、检测设备等。

(1)压机设备采用定制型压机,它是极板压制的主要设备,通过控制压机的尺寸精度,达到控制极板精度的要求,图2为液压机结构示意图;

- (2)烘干炉用于极板的加热和烘干处理;
- (3)后处理设备用于极板成型后的整形处理;
- (4)打码设备用于给极板进行编号;
- (5)检测设备用于检测极板的完成情况,判断极板是否符合要求。

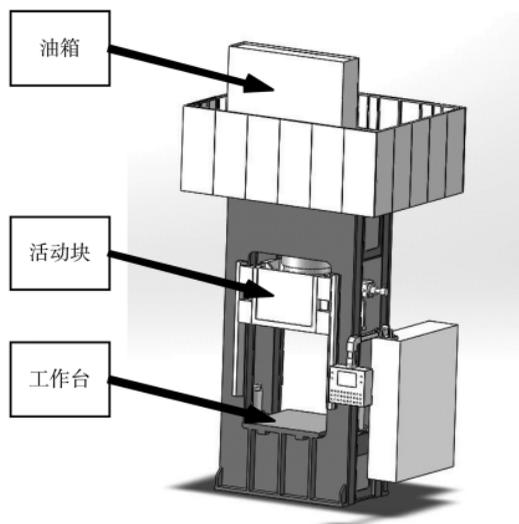


图2 液压机结构示意图

2.2.2 电气设计

产线整体控制单元使用西门子公司S7-1500型号PLC进行直接控制,使用KTP1500精简触屏面板(15英寸)进行操作面板控制,控制面板后期可根据控制参数的变化,变更为尺寸更大的触摸屏。通过PLC可控制模压设备、烘干设备、后处理设备等设备的运行,设备运行参数的设置中,也可以通过PLC调整参数运行范围,控制产线中的输送设备进行传输,控制产线中的传感器和定位装置进行运转和精确定位;控制变频电机和伺服电机进行模压压机速度的调整;控制水泵等增压设备进行水路分配和压力分配;控制气路元器件及气路传感器进行产线整体的气路分配和气压设定等工作。

2.2.3 控制系统设计

模压过程中,最主要的设备是压机,压机工作参数是主要控制参数。根据石墨复合材料不同,设置不同压制工作参数。在产线控制系统控制下,可以通过主服务器MES系统直接控制产线参数,也可以通过现场工控机进行控制。

产线的控制系统架构图如图3所示,可建立管理层与产线之间的联系,通过终端电脑直接下达指令。

产线中可根据实际需要增加附加功能,定位时可增

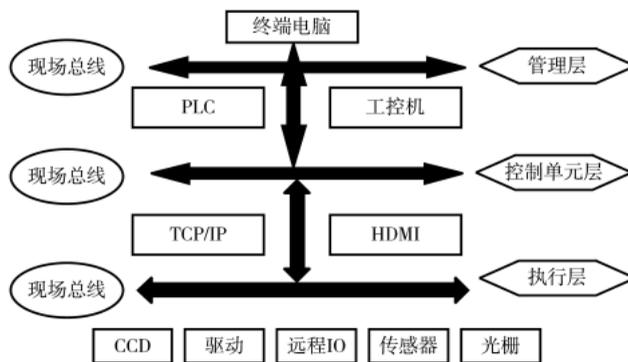


图3 控制系统架构图

加视觉系统辅助定位,检测系统也可增加视觉系统辅助检测,可增加数据库用以储存检测板件的缺陷,方便后续检测中分辨损坏板件。

根据生产线底层控制系统设计方案,设计MES系统的功能,包含产线生产任务下发、控制、排产时间、生产原材料管理及分配管理、产品信息记录、生产过程追溯等功能,可进行远程操作、产品追溯,方便后期不合格产品分析。

3 模压生产线搭建及试用

3.1 模压生产线搭建

在产线搭建过程中,对产线功能进行整合,将产线分为6个工作段,主要包括上料段、模压段、烘干段、后处理段、检测段、包装段,如图4所示。

(1)通过上料段的自动上料,为模压段提供准确重量的材料,通过定位装置准确定位在上料位置;

(2)模压段是石墨复合材料极板模压成型的关键工序,通过对模压工艺的研究,在模压段的压机上设置相应的参数,按照参数进行极板的模压成型;

(3)烘干段主要用于对压制好的极板进行烘干处理,烘干段根据设计的速度和生产节拍进行调整,根据极板的生产速度调节输送的速度,从而控制烘干速率;

(4)后处理段是对极板进行修整阶段,通过打磨、清洗等设备,对极板进行后续处理;

(5)检测段是对生产出的极板进行在线检测,也可进行单体检测,根据极板生产的速度和要求,完成对极板的在线检测;

(6)包装段是对检测合格的极板进行打包装箱操作,检测合格的极板先经过打码设备打上身份识别码,再进行装箱操作,根据极板的尺寸不同,进行不同的排布和装箱操作。

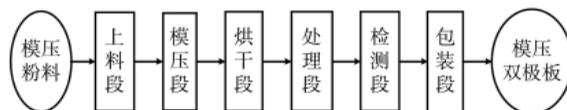


图4 石墨复合材料模压极板生产流程图

3.2 模压生产线试用及改进

经过产线设备调试后,对各个设备的功能进行试用验证,产线各部分的功能可以完成设计的动作,可完整压制出极板,板件尺寸及精度满足设计要求。表2是压制出的极板尺寸参数表。

表2 极板尺寸参数

极板序号	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm	公差/mm
设计值	325.00	128.00	1.00	±0.02
板1	325.01	128.00	1.01	0.01
板2	325.00	127.99	1.01	0.01
板3	325.00	128.00	1.02	0.02
板4	325.01	128.00	1.00	0.01
板5	325.01	127.99	1.01	0.01

但极板的生产速率不高,极板在各个设备之间的运转需要人工操作,产线的生产直通率不高。要改善产线的问题,需要增加自动化设备,增加机械手、AGV等转运设备。

产线各部分之间通过电气系统连接在一起,由控制系统进行总体控制、产线任务分配等。在实际操作过程中,考虑到后期设备自动化改造,在设备中预留有接入机械手的控制单元及通信接口。

4 结论

本设计是根据实际生产工艺研究制作的、首次提出的生产线,正在进行试线的使用和进一步完善。主要根据石墨复合材料极板模压工艺及参数进行设计,该生产线可以对模压过程进行全面控制,通过MES系统进行远程控制,大大提高石墨复合材料极板的生产效率,在大批量生产中,满足燃料电池行业对极板日益增加的需求量。

本产线主要用于生产燃料电池电堆中的极板,在燃料电池行业发展中,对极板的需求量非常巨大,每年都在飞跃式增长,本生产线的高生产效率优势将得到充分发挥,极大满足燃料电池行业发展对极板的需求,为燃料电池行业的发展提供有力保障,具有很大的市场前景和应用价值。

参考文献

[1] POURRAHMANI H, SIAVASHI M, YAVARINASAB A, et al. A review on the long-term performance of proton exchange membrane fuel cells: from degradation modeling to the effects of bipolar plates, sealings, and contaminants[J]. Energies, 2022, 15(14): 5081.

- [2] 李伟,李争显,刘林涛,等.质子交换膜燃料电池金属双极板表面改性研究进展[J].表面技术,2018,47(10):81.
- [3] 康启平,张国强,刘艳秋,等.质子交换膜燃料电池复合材料双极板研究进展[J].中北大学学报(自然科学版),2019,40(5):414.
- [4] Yao Jing, Wu Zhen, Wang Huan, et al. Design and multi-objective optimization of low-temperature proton exchange membrane fuel cells with efficient water recovery and high electrochemical performance[J]. Applied Energy, 2022, 324: 119667.
- [5] Meng Xiangchao, Ren Hong, Hao Jinkai, et al. Design and experimental research of a novel droplet flow field in proton exchange membrane fuel cell[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 450: 138276.
- [6] 樊润林,彭宇航,田豪,等.燃料电池复合石墨双极板基材的研究进展:材料、结构与性能[J].物理化学学报,2021,37(9):2009095.
- [7] BOHACKOVA T, LUDVIK J, KOURIL M. Metallic material selection and prospective surface treatments for proton exchange membrane fuel cell bipolar plates—a review[J]. Materials, 2021, 14(10): 2682.
- [8] KIM S O, KIM S Y, KIM M. Improving the electrical performance of a carbon fiber reinforced polymer bipolar plate using a resin squeeze-out preprocess[J]. Composites Communications, 2022, 32: 101156.
- [9] 冯利利,陈越,李吉刚,等.李星国碳基复合材料模压双极板研究进展[J].北京科技大学学报,2021,43(5):585-593.
- [10] Hu Bin, He Guangjian, Chang Fulu, et al. Low filler and highly conductive composite bipolar plates with synergistic segregated structure for enhanced proton exchange membrane fuel cell performance[J]. Energy, 2022, 251: 123982.
- [11] 赵秋萍,钱庆一,张斌,等.质子交换膜燃料电池金属双极板表面碳基防护镀层研究进展[J].材料导报,2020,34(S1):395-399.
- [12] RAJA S, VERMA A, RANGAPPA S M, et al. Development and experimental analysis of polymer based composite bipolar plate using Aquila Taguchi optimization: design of experiments[J]. Polymer Composites, 2022, 43(8): 5522-5533.

(收稿日期:2021-09-29)

作者简介:

杨文巍(1983-),男,硕士,工程师,主要研究方向:复合材料极板模压、控制工程。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所