

化工包装设备自动控制技术—超声波热合技术

孔令君

浙江石油化工有限公司 浙江 舟山 316000

摘要: 本文聚焦化工包装超声波热合自动控制技术, 阐述其能量转换、界面热合核心原理与关键工艺参数, 对比传统热合技术的优劣。设计模块化自动控制系统, 依托PLC与多传感器闭环调控, 适配化工防爆、防腐的特殊工况。通过正交试验优化振幅、压力、保压时间核心参数。试验表明, 该技术可有效提升包装密封强度与生产稳定性, 降低次品率, 满足化工包装高精度、高安全的自动化生产需求。

关键词: 化工包装设备; 自动控制技术; 超声波热合技术

引言: 化工包装直接关系化工物料存储、运输的安全性与密封性, 传统热合工艺存在能耗高、密封不均、易损伤材料、适配性差等缺陷, 难以适配化工车间防爆、防腐、高精度的生产要求。为解决上述痛点, 本文引入超声波热合自动控制技术, 从技术原理、系统架构、软硬件设计、工艺优化等方面展开研究, 旨在攻克传统工艺短板, 提升化工包装生产自动化水平与成品质量, 为化工包装智能化生产提供技术参考。

1 化工包装超声波热合技术理论基础

1.1 超声波热合核心工作原理

(1) 能量转换机制: 该技术依托完整的能量转化体系, 将工频电能通过换能器转换为高频机械能, 最终形成20kHz-40kHz的超声振动能, 通过焊头将高频振动精准传输至包装接触面, 为热合加工提供核心动力。(2) 界面热合机理: 高频振动促使化工包装材料接触面分子高速摩擦, 持续产生摩擦热, 配合空化效应强化热量生成, 使材料快速熔融、分子相互扩散, 再通过压力压实、冷却固化, 完整完成密封成型过程。(3) 化工包装专用热合特性: 针对化工常用塑料薄膜、复合膜、防腐包装材料的材质特性, 适配其熔点、韧性及防腐属性, 形成低温、快速、密闭的热合成型规律, 适配化工物料密封防护需求^[1]。

1.2 超声波热合关键技术参数

(1) 振动参数: 超声振幅、振动频率直接决定摩擦生热效率, 精准影响热合温度区间与密封拉伸强度, 是把控热合稳定性的核心动态参数。(2) 工艺参数: 热合压力、保压时间、冷却梯度存在耦合作用, 合理参数配比可避免虚封、溢料、开裂问题, 保障化工包装密封均匀性与牢固度。(3) 结构参数: 焊头结构、0.3-0.5mm高度、60-90°尖角导能筋及溢料槽布局, 可集中振动能量、规整熔融物料, 直接影响热合平整度与成品合格率。

1.3 超声波热合与传统热合技术对比及技术优势、发展前景

(1) 传统热合技术存在明显短板: 整体加热易引发局部过热、材料烧损, 密封均匀性差且能耗高; 依赖人工调控, 操作误差大、自动化程度低, 仅适用于平整普通膜袋; 设备易损件需定期更换, 运维成本高, 难以满足化工连续化、标准化、安全化生产需求。(2) 超声波热合自动控制技术优势突出: 依托智能调控、精准传感与闭环修正, 实现瞬时低温无明火作业, 热影响区小, 适配化工防爆工况。适配10u-300u全厚度段塑料膜袋, 支持多材质及带褶皱异形材料, 无需区分热封位置。设备无易损配件, 运维简便、使用成本低; 自动化动态纠错消除人工偏差, 密封一致性与良品率高, 低能耗低损耗, 满足化工高危高精度生产场景。(3) 传统热合仅适用于低端普通包装, 适配范围窄、运维繁琐、隐患多、经济性差。伴随化工行业智能化、绿色化升级, 超声波热合满足防腐、防爆、高洁净要求, 稳定性与经济性更优, 正逐步替代传统工艺。未来该技术将向高精度自适应、无人化集成方向发展, 在精细化工、危化品包装领域拥有广阔发展前景。

2 化工包装超声波热合自动控制系统设计

2.1 自动控制系统总体架构

(1) 系统设计目标: 结合化工包装高危、连续、高精度需求, 以多维度稳定运行为核心。通过算法实现热合压力、振幅、时长等参数高精度调控, 消除人工偏差; 具备动态自适应能力, 自动匹配不同材质包装的工艺参数。系统满足化工车间防爆、防腐蚀标准, 支持长时间连续作业, 提升效率与密封一致性。(2) 系统整体组成: 采用模块化集成设计, 含五大模块。超声发生模块输出高频电能; 振动执行模块通过换能器与焊头传导能量; 压力调控模块控制热合压力与保压; 传感检测模

块采集工况与工艺数据；PLC控制模块作为中枢，统筹全流程智能化控制^[2]。（3）化工工况适配设计：针对粉尘多、腐蚀气体、易燃易爆工况，系统专项优化。外壳及接触物料件选用防腐防尘合金，密封防护。控制程序内置化工专属逻辑，规避电火花、高温过载，优化散热与防尘，适应恶劣环境长期稳定运行。

2.2 核心硬件系统设计

（1）超声发生与换能装置选型：结合化工包装批量连续作业需求，选用高频稳定型超声发生设备，可实现20kHz-40kHz频率恒定输出，抗干扰能力强，长时间运行无频率漂移、功率衰减等问题。配套专用压电式换能装置，能量转换效率高，可将电能稳定转化为机械振动能，适配塑料复合膜、防腐包装膜等多种化工包装材料的连续热合加工，保障批量生产的热合质量统一性。（2）高精度传感器布局：系统搭载压力、位移、温度三类高精度传感器，完成热合全过程数据实时采集。压力传感器安装于焊头压力组件处，实时监测热合压力数值；位移传感器精准捕捉焊头升降行程与物料对位精度；温度传感器布置于热合工作面周边，实时采集熔融区域温度变化。多传感器协同搭建全域数据采集体系，为闭环调控提供精准数据支撑。（3）执行机构设计：执行机构采用自动化精密组件，保障设备运行精度。伺服压力调节组件可实现压力无级微调，响应速度快、控制精度高；焊头升降机构采用直线驱动结构，运行平稳、对位精准，可适配不同厚度包装物料；匀速送料机构配备调速组件，可根据热合时序匹配送料速度，实现送料、热合、出料的协同联动，保障流水线作业的稳定性^[3]。

2.3 自动控制程序设计

（1）PLC核心控制逻辑：以PLC为控制核心，搭建标准化时序控制程序，预设不同化工包装材质的工艺参数数据库。设备可根据录入的物料型号自动匹配热合振幅、压力、保压时间等核心参数，实现设备启停、送料、热合、复位等工序的联动时序控制，替代人工操作，杜绝人为操作失误，提升设备自动化水平^[4]。（2）闭环反馈调控程序：系统依托传感器实时采集的温度、压力、振动数据，搭建闭环反馈调控机制。当检测到热合温度偏低、压力波动、振幅偏移等异常情况时，程序可自动动态修正工艺参数，实时补偿偏差，确保热合过程始终处于最优工艺区间，解决传统工艺热合质量不稳定、参数无法实时调节的问题。（3）故障预警与保护程序：针对化工生产安全需求，内置多重故障保护机制。程序可实时监测设备过热、压力过载、振动失效、送料卡顿等故障状态，一旦检测到异常，立即触发声光预警并启动自动停机保护，切断超声

输出与设备动力，避免设备损坏、物料报废及安全事故，保障化工车间生产安全。

2.4 控制系统工作流程

（1）设备初始化、参数录入与工况自检流程：设备启动后自动完成系统初始化，复位各执行机构至基准位置。操作人员录入物料材质、厚度、生产速度等工艺参数，系统自动调取匹配控制程序。随后设备开展全方位工况自检，检测传感器、超声模块、执行机构的运行状态，确认无故障、工况达标后进入待机作业状态。（2）全流程自动化控制逻辑：正式作业时，系统控制送料机构自动匀速送料，完成物料精准对位后，焊头快速下行贴合物料，启动超声振动热合。达到设定热合时长后进入保压固化阶段，待物料熔融层冷却定型，焊头自动复位，出料机构完成成品输送，全工序连贯、时序精准，实现无人干预自动化作业^[5]。（3）批量作业参数自适应调整流程：批量生产过程中，系统持续采集每一次热合作业的工况数据，实时对比标准工艺参数区间。针对连续作业中出现的环境温度变化、设备轻微损耗、物料微小偏差等问题，程序自动微调振幅、压力、冷却时长等参数，实现批量作业的动态自适应调控，保证整批次产品热合质量均匀稳定。

3 工艺参数优化与性能试验分析

3.1 试验方案设计

（1）试验目的：为解决化工包装超声波热合工艺参数匹配度低、批量质量不均的问题，本次试验主要验证自研自动控制系统的运行稳定性与调控精度。通过多组试验筛选最优工艺参数组合，改善包装热合密封缺陷，全面提升化工包装的密封强度、耐腐蚀性能与批量生产一致性，为工业化应用提供数据支撑。（2）试验设备与试验材料：试验材料选用化工生产常用的多层复合防腐包装膜、防渗塑料包装材料，覆盖常规化工包装工况用材。试验设备包含超声波热合整机、高精度拉力试验机、气密性检测仪、耐腐蚀试验箱及温度压力采集设备，可完成热合性能全方位检测，保障试验数据精准可靠。（3）正交试验设计：结合前期理论与控制参数研究，选取超声振幅、热合压力、保压时间三大核心变量开展正交试验。结合设备工况设置多梯度试验水平，控制单一变量误差，通过多组对照试验，筛选适配化工包装材料的最优工艺参数区间。

3.2 核心参数优化试验

（1）超声振幅单因素试验：固定压力与保压时间参数，在5-7μm常用振幅区间设置梯度试验，探究振幅变化对热合界面熔融程度、分子结合强度的影响。试验结

果表明, 振幅过低会导致熔融不充分、虚焊脱胶, 振幅过高易造成薄膜热损伤、材质脆化, 明确该区间内适配不同材料的最优振幅数值。(2) 热合压力与保压时间耦合试验: 压力与保压时间存在显著耦合作用, 通过交叉分组试验, 分析二者协同变化对热合压实固化效果的影响, 规避压力不足贴合松散、压力过大溢料变形、保压时长不足固化不彻底等问题, 确定适配连续作业的最优参数组合。(3) 不同化工包装材料参数适配试验: 针对防腐膜、复合膜等不同材质包装材料的熔点、韧性差异, 开展针对性适配试验, 记录不同材料对应的最优工艺参数, 形成标准化参数数据库, 满足化工多品类包装的生产加工需求。

3.3 试验结果与性能分析

(1) 密封性能检测: 通过抗拉、气密、耐腐蚀测试可知, 优化后热合缝分子融合更致密, 抗拉强度显著提升, 无漏气、渗漏问题。经腐蚀环境模拟测试, 热合接

口无开裂、脱层现象, 满足化工物料存储、运输的防腐密封要求。(2) 作业性能分析: 统计自动化作业数据, 优化后系统参数调控偏差大幅降低, 设备运行稳定无卡顿。批量生产成品合格率显著提升, 作业节奏均匀, 相较于传统人工调参模式, 自动化作业效率与生产稳定性大幅改善。(3) 常见缺陷分析: 试验中主要存在溢料、虚焊、热损伤三类缺陷。溢料多为压力与振幅过大导致, 虚焊源于参数不足、振动传导不均, 热损伤由局部高温集中引发。针对各类缺陷, 对应优化参数区间、调整焊头结构与控温逻辑, 可有效消除质量问题。

3.4 工艺参数优化效果对比

(1) 优化前后工艺参数与产品性能对比分析: 参数优化前, 工艺参数波动大、适配性差, 产品密封强度不均、次品率偏高。优化后依托闭环控制系统动态调参, 工艺参数稳定可控, 热合密封强度、气密性、耐腐蚀性均实现提升, 整体产品质量显著升级。如图1。

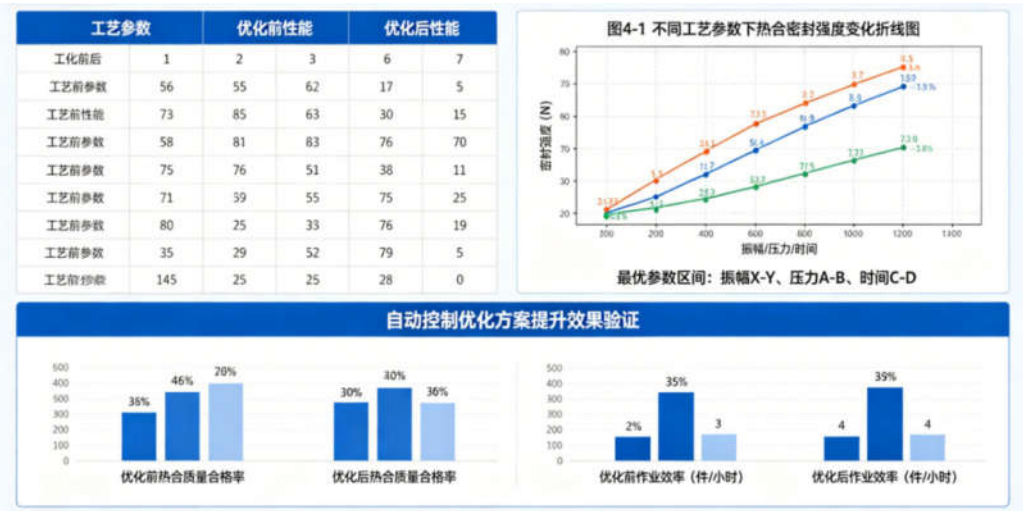


图1 工艺参数优化效果对比

(2) 优化方案效果验证: 经批量试验验证, 自动控制参数优化方案可有效适配化工恶劣工况, 彻底解决传统工艺参数滞后、调控不准的问题。不仅大幅提升包装热合质量与外观平整度, 还缩短作业时长、降低物料损耗与返工率, 实现质量与效率双重提升。

结束语

本文完成化工包装超声波热合自动控制技术的全套研究, 明确了核心技术原理与最优工艺参数组合, 搭建的自动化控制系统可实现参数自适应调控与安全防护。该技术有效解决传统工艺虚封、溢料、密封不稳等问题, 提升了包装密封性与生产效率, 适配化工恶劣工况。后续可进一步优化智能调控算法, 拓展多材质适配场景, 推动化工包

装热合工艺向高精度、智能化、安全化方向升级。

参考文献

[1]宋德生.数控加工技术在包装行业的应用研究[J].造纸装备及材料.2022,51(11):89-92.

[2]刘晨敏.基于TRIZ理论的纸盒包装机成型机构设计与分析[J].包装工程.2023,7(9):104-106.

[3]曹兴强,李超.卷烟包装设备故障监测与智能诊断系统研究[J].现代商贸工业,2024,37(30):191-192.

[4]林桂花.基于PLC技术的包装自动化生产线集成控制系统设计[J].现代制造技术与装备.2024,60(11):213-215.

[5]朱卫兴.食品包装行业自动化机械装备的应用[J].中国战略新兴产业,2022,8(32):134-136.