

# 多因素耦合作用下点胶胶点形貌控制与稳定性分析

赵 诚

西安航空制动科技有限公司 陕西 咸阳 713100

**摘要:** 本文聚焦多因素耦合作用下点胶胶点形貌控制与稳定性分析, 阐述点胶技术原理, 识别设备、材料等影响点胶过程因素, 剖析胶点形貌形成物理机制。深入分析多因素耦合作用机理, 提出多维度协同、全流程覆盖的控制策略, 包括前馈补偿、机器视觉闭环及特殊工况自适应控制。构建稳定性评估体系, 提出多方面优化措施, 为提升点胶胶点形貌控制精度与稳定性提供理论依据与实践指导。

**关键词:** 点胶工艺; 胶点形貌; 多因素耦合; 稳定性控制

**引言:** 点胶工艺作为电子制造、汽车零部件装配等高精度生产领域的关键工艺, 其胶点形貌控制至关重要。胶点形貌直接影响粘接、密封等功能效果, 而实际点胶过程受设备、材料、工艺、环境等多因素耦合影响, 导致胶点形貌不稳定。目前, 对多因素耦合作用下胶点形貌控制与稳定性研究尚不完善。本文旨在深入剖析多因素耦合机理, 提出有效控制策略与稳定性优化措施, 以提升点胶质量与生产效益。

## 1 点胶过程影响因素识别与胶点形貌形成机理

### 1.1 点胶技术核心原理

点胶技术是通过精密控制装置将胶粘剂以预设形态精准涂覆于目标区域的工艺, 其核心原理基于流体力学与精密控制技术的融合。该技术通过驱动系统为胶粘剂提供稳定动力, 使胶液克服粘度阻力与表面张力, 经点胶针头输出并在基材表面成型。根据动力来源不同, 主流技术可分为气压式、螺杆式、压电式等类型, 均需实现胶液输送、流量调控、针头定位的协同配合。在实际应用中, 胶液从针头流出后, 需经历流体断裂、基材润湿、自由铺展三个关键阶段, 各阶段的力平衡状态直接决定胶点最终形态。

### 1.2 胶点形貌关键评价指标

胶点形貌的评价需建立多维度量体系, 核心指标包括几何参数、力学特性与外观质量三类。几何参数中, 胶点直径直接影响粘接触面积, 通常要求偏差控制在 $\pm 5\%$ 以内; 胶点高度决定粘接层厚度, 需与装配间隙精准匹配; 胶点圆度反映涂覆均匀性, 偏差过大易导致应力集中。力学特性指标涵盖胶点粘接强度、剪切强度与耐疲劳性能, 需满足实际工况下的结构稳定性要求<sup>[1]</sup>。外观质量指标包括无气泡、无缺胶、无溢胶等, 表面平整光滑是保证后续工序兼容性的基础。这些指标相互关联、相互制约, 需通过系统性控制实现整体优化, 为点

胶过程的质量评估提供明确依据。

### 1.3 点胶过程影响因素识别与分类

点胶过程的影响因素可分为四大类, 涵盖设备、材料、工艺与环境等多个维度。设备因素包括点胶机的压力稳定性、针头内径与长度、运动平台定位精度等, 设备性能衰减会直接导致胶点形貌偏差。材料因素主要涉及胶粘剂的粘度、表面张力、触变性与固化特性, 粘度波动会显著影响胶液流动与铺展效果。工艺因素包含点胶压力、出胶时间、针头高度、运动速度等关键参数, 各参数的匹配度决定胶点成型质量。环境因素则有温度、湿度与洁净度, 温度变化会改变胶粘剂物理特性, 湿度超标易导致胶点出现气泡或固化不完全。通过全面识别这些影响因素, 可构建结构化的分析框架, 为后续耦合机理研究与控制策略制定奠定基础。

### 1.4 胶点形貌形成的物理机制

胶点形貌的形成是多物理场协同作用的结果, 核心涉及流体动力学与界面物理化学现象。胶液从针头挤出时, 在压力驱动下克服粘性阻力形成射流, 射流断裂过程受惯性力与表面张力的平衡关系调控, 断裂方式直接影响胶点初始形态。胶液接触基材后, 发生润湿与铺展行为, 铺展范围由胶粘剂与基材的界面张力、接触角共同决定, 接触角越小, 铺展越充分。在表面张力与重力作用下, 胶液逐渐趋于热力学稳定状态, 形成具有特定几何形状的胶点。若胶粘剂含有挥发性成分, 溶剂挥发过程会导致胶点收缩, 进一步影响最终形貌。整个物理过程涉及动量传递、质量传递与能量传递, 各阶段的力平衡与参数变化共同主导胶点形貌的形成与演化。

## 2 多因素耦合作用机理分析

### 2.1 点胶过程动力学建模

点胶过程动力学建模以流体力学理论为基础, 通过数学方程描述胶液流动、变形与成型的动态过程。模型

构建需考虑胶液的非线性粘性特性,采用幂律模型或卡森模型表征其流变行为,准确反映粘度随剪切速率的变化规律。针对胶液挤出阶段,建立压力与流量的关系方程,量化点胶压力、针头结构对出胶速率的影响;针对铺展阶段,基于润滑理论与界面张力模型,描述胶液在基材表面的流动扩散过程。建模过程中需纳入针头运动速度、基材表面粗糙度等边界条件,考虑胶液与针头、基材之间的相互作用。通过耦合流体运动方程、界面动力学方程与能量方程,构建多场耦合的动力学模型,可实现胶点形貌关键参数的预测与仿真,为工艺参数优化提供理论支撑,降低试验成本并提高控制精度。

## 2.2 关键影响因素识别与耦合关系

关键影响因素的耦合关系体现在参数间的相互作用与协同效应,需通过相关性分析与正交试验明确主次关系。设备参数中,点胶压力与针头内径存在耦合效应,相同压力下,针头内径增大易导致出胶量过多;材料参数里,胶粘剂粘度与环境温度呈负相关,温度升高会降低粘度,需同步调整点胶压力以维持流量稳定。工艺参数间的耦合更为显著,出胶时间与运动速度直接影响胶点堆积量,针头高度与点胶压力的匹配不当会导致胶点缺胶或溢胶<sup>[2]</sup>。环境温度不仅影响胶粘剂粘度,还会改变设备运动精度,形成跨维度耦合关系。通过构建耦合矩阵,量化各因素间的相互作用强度,可识别出对胶点形貌起主导作用的关键耦合对,为针对性控制提供方向。

## 2.3 形貌失稳机制

胶点形貌失稳是各影响因素偏离最优区间、耦合作用失衡导致的结果,主要表现为多种缺陷形式。常见的失稳现象包括胶点过大或过小、高度不均、出现卫星滴、缺胶、溢胶与气泡等。失稳机制可从多方面解析:设备层面,压力波动导致出胶量不稳定,针头磨损造成胶液流动受阻;材料层面,胶粘剂粘度突变引发铺展不均,触变性不足导致胶液无法维持预设形状;工艺层面,参数匹配不当使胶液挤出与铺展失衡,如压力过大易产生溢胶,出胶时间过短导致缺胶;环境层面,温度骤变引起胶液表面张力波动,导致铺展范围失控。形貌失稳的本质是胶点形成过程中的力平衡被打破,需通过识别失稳临界条件,为稳定性控制提供理论依据。

## 3 多因素耦合作用下胶点形貌控制策略

### 3.1 控制策略总体设计思路

控制策略总体设计遵循“多维度协同、全流程覆盖、自适应调整”的核心思路,构建“感知-建模-决策-执行”的闭环控制系统。首先通过传感器阵列实现设备状态、材料特性、工艺参数与环境条件的全面感知,获

取实时数据支撑;其次基于多因素耦合模型,建立胶点形貌与影响因素的映射关系,实现精准预测;然后通过智能算法对工艺参数进行优化决策,结合前馈补偿与闭环反馈实现双重控制;最后通过高精度执行机构落实控制指令,确保参数调整的及时性与准确性。设计过程中需兼顾通用性与针对性,既适用于常规工况下的标准化生产,又能应对特殊工况的动态变化,通过模块化设计提高系统兼容性与扩展性,实现点胶过程的智能化、高精度控制。

### 3.2 基于耦合模型的前馈补偿控制

基于耦合模型的前馈补偿控制通过预测性调整抵消影响因素的扰动,提升过程稳定性。该策略以多因素耦合模型为核心,根据实时采集的设备状态、材料特性与环境参数,提前计算各影响因素可能导致的胶点形貌偏差。针对可预见的扰动,如胶粘剂粘度变化、环境温度波动等,通过算法求解最优补偿参数,调整点胶压力、出胶时间等工艺参数,实现偏差预抵消<sup>[3]</sup>。例如,当检测到胶粘剂粘度升高时,自动增加点胶压力并延长出胶时间,维持出胶量稳定;当环境温度升高时,适当降低点胶压力,避免胶液过度铺展。前馈补偿控制可在扰动产生影响前进行干预,有效提高系统响应速度,减少滞后性带来的质量波动,尤其适用于扰动规律可预测的生产场景。

### 3.3 基于机器视觉的过程闭环控制

基于机器视觉的过程闭环控制以实时视觉检测为核心,实现胶点形貌的动态反馈与参数自适应调整。该系统通过高速相机采集胶点图像,利用图像处理算法提取直径、高度、圆度等关键形貌参数,与预设标准值进行对比分析,计算偏差大小与方向。根据偏差反馈信号,结合耦合模型与控制算法,自动调整相关工艺参数,如胶点直径偏大时,减小点胶压力或缩短出胶时间;胶点高度不足时,增加出胶量或降低针头高度。为保证检测精度,需采用高精度图像标定技术与抗干扰算法,消除光照变化、基材反光等因素的影响。闭环控制可实时修正过程偏差,持续优化胶点形貌,显著提高批量生产中的一致性 & 稳定性。

### 3.4 特殊工况下的自适应控制策略

特殊工况下的自适应控制策略针对极端环境、材料特性突变或复杂工件结构等场景,实现动态调整与鲁棒性控制。在高温或低温环境下,通过实时监测温度变化,建立胶粘剂粘度与温度的动态映射模型,自动补偿点胶压力与出胶时间,维持胶液流动特性稳定。针对高粘度或触变性强的胶粘剂,采用分段式压力控制策略,

初始阶段增大压力突破粘性阻力, 后续阶段降低压力避免溢胶。对于异形工件或复杂路径点胶, 结合视觉定位与路径规划算法, 动态调整运动速度与针头高度, 确保胶点在不同区域的形貌一致性。该策略通过实时感知工况变化, 自适应调整控制参数与算法模型, 有效应对不确定性因素, 保证特殊工况下的点胶质量稳定性。

#### 4 胶点形貌稳定性评估体系与优化

##### 4.1 稳定性评估指标体系构建

稳定性评估指标体系以过程稳定性与结果稳定性为核心支柱, 精心搭建起一套多层次、多维度的量化评价框架。过程稳定性指标聚焦生产流程中的关键要素。工艺参数波动系数是衡量工艺精准度的重要指标, 需严格控制在预设阈值内, 避免因参数波动影响产品质量; 设备运行稳定性关乎生产的连续性, 设备故障停机率应低于0.5%, 确保设备高效稳定运转; 材料特性一致性则保障了原材料质量的稳定, 为后续生产奠定基础。结果稳定性指标着眼于最终产品的质量表现, 胶点形貌参数的标准差能直观反映批量生产中产品的离散程度, 数值越小, 产品质量越稳定; 合格率需达到99%以上, 体现产品整体质量水平; CPK值(过程能力指数)应不小于1.33, 以此确保生产过程具备充足的能力生产出符合要求的产品。为全面评估稳定性, 还需纳入长期稳定性指标, 如连续生产8小时内的质量衰减率, 考察产品在长时间生产中的质量保持能力; 以及环境适应性指标, 如不同温湿度条件下的性能保持率, 评估产品对不同环境的适应能力。各指标均明确权重分配与评价标准, 通过综合评分, 实现对整体稳定性的全面、精准评估。

##### 4.2 稳定性影响因素分析

稳定性影响因素分析聚焦于导致点胶过程与结果波动的关键变量, 从动态变化角度解析其作用机制。设备方面, 压力传感器漂移、运动平台磨损、针头堵塞等故障会导致参数波动, 降低过程稳定性; 长期运行后设备精度衰减, 会加剧胶点形貌离散程度。材料方面, 胶粘剂批次间粘度差异、储存过程中性能变化, 会导致相同工艺参数下的成型效果不一致; 添加剂挥发或吸湿会改变胶粘剂流变特性, 影响稳定性。工艺方面, 参数设置不合理、调整频率过高或过低, 会破坏过程稳定性; 生产节拍与胶液固化速度不匹配, 会导致质量波动<sup>[4]</sup>。环境

方面, 温度与湿度的周期性变化、洁净度不足导致的污染, 会持续影响点胶过程, 降低结果稳定性。

##### 4.3 稳定性优化措施

稳定性优化需从设备、材料、工艺、管理等多方面采取系统性措施, 构建全链条保障体系。设备优化方面, 定期进行校准与维护, 更换磨损部件; 采用高精度传感器与伺服控制系统, 提升参数控制精度; 引入设备健康监测技术, 提前预警潜在故障。材料优化方面, 建立严格的供应商筛选与检验机制, 确保胶粘剂批次一致性; 优化储存条件, 控制温度、湿度与保质期; 根据实际需求调整胶粘剂配方, 改善流变特性与稳定性。工艺优化方面, 通过正交试验确定最优参数组合, 建立参数数据库; 采用自适应调整算法, 实现参数动态优化; 合理规划生产节拍, 匹配胶液固化周期。管理优化方面, 建立标准化作业流程, 加强操作人员培训; 实施全面质量管理, 定期开展稳定性检测与分析; 持续跟踪行业技术进展, 引入先进控制技术与设备, 实现稳定性的持续提升。

##### 结束语

本文围绕多因素耦合作用下点胶胶点形貌控制与稳定性展开研究, 取得一定成果。通过构建动力学模型、识别关键耦合关系, 明确了形貌失稳机制; 提出的前馈补偿、机器视觉闭环及特殊工况自适应控制策略, 有效提升了胶点形貌控制精度; 构建的稳定性评估体系与优化措施, 为保障点胶稳定性提供了系统方法。未来可进一步探索更复杂工况下的控制策略, 推动点胶技术向更高精度、更稳定方向发展。

##### 参考文献

- [1]潘俊杰, 强胜龙, 官兆虎, 汤琪芬, 李治刚, 曾未, 汪渊, 王杰, 范佳钡. 反应堆多物理耦合框架的研发及验证[J]. 核动力工程, 2024, 45(S2): 35-41.
- [2]吉美宁, 常明超. 基于梅花形点胶的表面安装元件粘接工艺改进[J]. 电子与封装, 2022, 22(01): 27-30.
- [3]乔丽, 崔海龙, 侯一雪, 曹国斌, 李浩志. 多芯片点胶贴片系统的工艺与控制特性分析[J]. 电子工艺技术, 2022, 43(01): 29-31+40.
- [4]沈洋平. 一种全自动点胶机进出料装置的设计[J]. 电世界, 2022, 63(02): 40-43.