

自动化生产工艺下树脂膜面密度稳定性控制方法

蔡明坤

中航复合材料有限责任公司, 北京 101300

DOI:10.61369/ME.2026030035

摘 要 : 热熔两步法预浸料自动化生产线中, 树脂膜面密度直接决定预浸料含胶量、厚度及外观一致性。自动化连续生产工艺下, 离型纸基重波动、树脂涂覆均匀性、涂胶辊间隙漂移、全线张力匹配偏差、树脂温度, 以及传统人工离线抽检滞后等因素, 易造成复合后树脂膜总克重失真、真实树脂上胶量无法精准判定。车间现已投用离型纸、树脂膜双路在线面密度检测系统, 实现离型纸单独扫描、涂覆后树脂膜单独扫描, 通过差值计算精准剥离离型纸基底影响, 得到真实纯树脂面密度。本文从现场实际出发, 分析自动化连续生产工艺下面密度波动核心诱因, 围绕双路在线扫描、实时差值运算、异常分级预警、工艺参数联动微调、设备精度精益保全、标准化作业管控, 构建全流程稳定性控制方法。实践表明, 双路扫描模式可消除离型纸基重干扰, 精准捕捉树脂真实涂覆量瞬时波动, 实现全过程无盲区可视化管控, 有效提升树脂膜面密度均匀性、批次一致性, 降低预浸料含胶量不良与生产报废浪费, 为预浸料自动化产线数字化、精益化质量管控提供可落地的技术参考。

关 键 词 : 预浸料自动化生产工艺; 离型纸; 树脂膜; 面密度; 双路扫描; 稳定性控制; 闭环调控

Control Method for the Stability of the Surface Density of Resin Film in Automated Production Processes

Cai Mingkun

Aviation Industry Composite Material Co., Ltd. Beijing 101300

Abstract : In the automated production line for prepreg using the hot-melt two-step method, the surface density of the resin film directly determines the resin content, thickness, and appearance consistency of the prepreg. In automated continuous production processes, factors such as fluctuations in the basis weight of the release paper, uneven resin coating, drift in the gap of the coating rollers, deviations in tension matching across the entire line, resin temperature, and the lag associated with traditional manual offline sampling inspections can easily lead to distortions in the total weight of the resin film after lamination and make it difficult to accurately determine the true resin content. The workshop has now implemented a dual-channel online surface density detection system for both release paper and resin film, enabling separate scanning of the release paper and the resin film after coating. Through differential calculations, the influence of the release paper substrate is accurately eliminated, yielding the true surface density of the pure resin. This paper, starting from on-site practical conditions, analyzes the core causes of surface density fluctuations in automated continuous production processes. It constructs a comprehensive stability control method centered around dual-channel online scanning, real-time differential calculations, abnormality classification and early warning, linkage fine-tuning of process parameters, lean maintenance of equipment precision, and standardized operation management. Practical applications have demonstrated that the dual-channel scanning mode can eliminate interference from the basis weight of the release paper, accurately capture instantaneous fluctuations in the true resin coating amount, and achieve full-process, blind-spot-free visual control. This effectively improves the uniformity and batch consistency of the resin film's surface density, reduces defects in resin content and production waste in prepreg, and provides a practical technical reference for the digital and lean quality control of automated prepreg production lines.

Keywords : automated production process for prepreg; release paper; resin film; surface density; dual-channel scanning; stability control; closed-loop regulation

引言

树脂膜是热熔两步法预浸料生产的关键中间基材，实际生产中树脂以熔融状态涂胶在离型纸表面，形成“离型纸 + 树脂”复合膜结构。传统面密度检测仅对复合成品膜进行整体称重，无法区分离型纸本身基重偏差与树脂涂覆量波动，一旦离型纸批次克重存在差异，会直接掩盖真实树脂上胶量，造成工艺误判、盲目调参。

随着自动化产线连续化、高速化运行，依靠人工定点取样、离线化验的单一检测模式，不仅存在检测盲区、数据滞后，更无法剔除离型纸基底干扰，易引发面密度局部偏差、纵向漂移等问题，面密度管控精度难以满足高端预浸料生产要求。

为解决上述痛点，车间引入双路在线面密度检测系统，配置前后两套扫描检测单元，实现离型纸前置扫描、涂覆后树脂复合膜后置扫描，通过系统自动差值运算，精准计算纯树脂面密度，从源头解决基底干扰、数据失真问题。

当前国内外学者围绕树脂膜厚度均匀性开展相关研究，在涂胶参数优化等方面取得一定进展^[1]，但针对自动化工艺下面密度稳定性的系统性控制方法研究仍较薄弱，本文立足自动化产线，依托离型纸、树脂膜双路在线扫描配置，分析面密度波动影响因素，建立适配双检测模式的稳定控制体系，形成贴合现场、可落地的工艺与设备管控方法。

一、自动化工艺下树脂膜面密度波动核心影响因素

（一）离型纸自身基重批次波动

离型纸不同生产批次、不同卷径存在固有基重偏差。若不单独检测、直接按复合膜整体判定，会把离型纸克重差异误判为树脂涂覆量波动，造成工艺参数误调整，长期引发树脂膜面密度批次混乱。

（二）树脂原料流变特性波动

树脂批次黏度、软化点、流动性存在差异，同等涂胶间隙、温度、速度条件下，树脂铺展性、涂覆厚度不一致，直接造成纯树脂面密度漂移，是质量波动的源头因素。

（三）设备运行精度偏差

产线长期连续运行易出现：涂布辊平行度偏移、辊面残胶附着造成局部间隙不均；牵引系统的速度波动、多段牵引张力不同步、收卷拉伸形变，进而引发树脂膜横向带状厚薄差、纵向周期性面密度波动。

（四）工艺参数耦合扰动

自动化工艺下，温度、速度、压力等工艺参数相互耦合，共同影响面密度稳定性。温度方面，化胶温度波动 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 会改变树脂黏度，涂胶温度不均导致局部固化速率差异，影响成膜厚度均匀性；速度方面，涂胶速度与供料速度匹配度不足，速度过快易出现薄涂、缺胶，过慢则导致堆料、面密度超标；压力方面，模腔压力波动、真空吸附压差不稳定（ $\pm 0.02\text{MPa}$ ），会破坏树脂流动稳定性，引发面密度波动^[2]。

（五）传统单一检测模式的固有缺陷

传统生产线多采用离线抽检方式或只扫描成品复合的方式，仅检测成品复合膜、无离型纸前置扫描存在明显短板：无法剥离基底重量，检测精度不足（误差 $> \pm 0.5\text{g}/\text{m}^2$ ），真实树脂上胶量无法量化；人工抽检间隔大，检测周期长、数据滞后，瞬时波动、局部带状缺陷无法捕捉；异常发现滞后，容易形成批量隐性不良；只能事后整改，无法实现事中实时调控。

二、自动化工艺下树脂膜面密度稳定性控制关键技术

（一）原料预处理与稳定性优化

1. 原料标准化管控

建立原料入库检测标准，对每批次树脂的黏度、密度、固含量及流变性能进行全面检测，筛选符合生产要求的原料，避免批次差异影响生产稳定性。采用密封恒温储存方式，将原料储存温度控制在 -18°C ，减少温度变化导致的黏度波动；生产前对原料进行充分搅拌，确保树脂组分均匀，消除局部黏度差异。

2. 流变性能适配调节

基于树脂流变曲线，结合自动化生产线涂胶速度、模唇结构，通过添加微量流变调节剂（添加量 $0.1\% - 0.5\%$ ），将树脂黏度调节至适配范围（ $1000 - 3000\text{mPa} \cdot \text{s}$ ），保证树脂流动稳定性。对高熔指树脂，适当提高填料比例（ $5\% - 10\%$ ），降低缩幅效应，减少边缘增厚现象；对低熔指树脂，添加少量增塑剂，改善流动性，避免涂胶缺胶^[4]。

（二）精密供料与涂胶设备控制

1. 供料系统精准调控

采用计量泵 + 闭环流量控制方案，选用高精度伺服驱动计量泵，转速控制精度达 $\pm 0.1\%$ ，通过 PLC 控制系统实时调节泵转速，精准控制树脂供给流量。在供料管路安装压力传感器与流量传感器，实时监测管路压力与流量变化，当压力波动超过 $\pm 0.05\text{MPa}$ 或流量偏差 $> \pm 1\%$ 时，系统自动调节计量泵转速，消除流量脉动影响。同时，定期校准计量泵（每周 1 次），检查齿轮磨损情况，避免设备老化导致的供料误差。

2. 涂胶模块精度优化

优化涂胶模块结构，采用液压驱动 + 多区微调设计，间隙控制精度达 $\pm 0.01\text{mm}$ ，通过伺服电机驱动调节螺栓，实现宽度方向间隙精准调节，保证横向出料均匀^[5]。定期清理涂胶模块（每班 1 次），去除残留树脂焦块与杂物，避免局部缺胶或堆料。

（三）工艺参数协同优化控制

1. 温度梯度精准管控

构建多区独立温控系统，化胶区、涂胶区、冷却区温度独立调节，避免温度交叉干扰。采用红外测温仪实时监测树脂温度与膜面温度，温度信号反馈至 PID 温控系统，当温度波动超过 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 时，系统自动调节加热 / 冷却功率，将温度波动控制在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内，稳定树脂黏度与固化速率^[6]。

2. 速度与张力匹配调控

建立涂胶速度、供料速度、牵引速度的联动控制模型，通过 PLC 系统实现三者同步调节，保证速度匹配度达 $\pm 0.1\%$ 。设定涂胶速度基准值（根据产品规格设定，通常为 5–20m/min），供料速度随涂胶速度线性同步调整，避免速度不匹配导致的涂胶量波动。在牵引系统安装张力传感器，实时监测膜面张力，张力波动控制在 $\pm 10\text{N}$ ，当张力波动超过 $\pm 10\text{N}$ 时，系统自动调节牵引辊转速，保持张力稳定，防止树脂膜拉伸形变。

（四）双路在线监测与智能闭环调控

1. 双路在线检测系统

搭建离型纸与树脂膜双路在线检测系统在线，实自动化生产线沿走料方向布设两套独立在线扫描检测单元：前置扫描单元位于放卷后、涂布工序前，单独扫描裸离型纸面密度；后置扫描单元位于涂胶后、收卷前，单独扫描离型纸 + 树脂复合膜面密度。两套单元独立采集、同步上传、时序匹配，实现全程连续无盲区扫描。检测精度达 $\pm 0.5\text{g}/\text{m}^2$ ，采样频率 10Hz，可实时捕捉纵向与横向面密度分布数据。

前置单元实时采集原离型纸每一点基重数据，生成横向分布云图与纵向波动曲线；涂布后后置单元同步采集复合膜总面密度；系统按同位置、同时段自动做差值运算：纯树脂面密度 = 复合膜总面密度 - 离型纸本底面密度。直接输出真实树脂涂覆克重，剔除离型纸批次、局部克重不均带来的干扰；系统内置工艺合格阈值，对离型纸基重异常、纯树脂面密度超差分别独立声光报警、弹窗预警。

2. 智能闭环反馈调控

基于 PLC 控制系统，集成卡尔曼滤波 + PID 控制算法，构建面密度智能闭环调控系统^[9]。在线监测设备实时采集面密度数据，经滤波处理去除异常值后，与目标面密度对比计算偏差，系统根据偏差大小自动调节涂胶辊转速、涂胶间隙、涂胶速度等参数，实现“监测 - 分析 - 调节”的闭环控制。

（五）生产环境与过程稳定性管控

1. 生产环境精准调控

将生产车间温度控制在 $22\pm 4^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度控制在 20%–65%，安装恒温恒湿空调系统，减少环境温湿度波动对树脂固化与膜面平整度的影响。在涂胶区安装防风装置，避免气流扰动导致树脂膜抖动，减少厚度与面密度波动；保持车间清洁，防止灰尘、杂物附着在膜面，影响检测精度与产品质量。

2. 过程标准化与异常预警

制定自动化生产线标准化作业流程（SOP），明确原料预处理、设备校准、参数设定、在线监测等各环节操作规范，减少人

为操作误差。建立异常预警机制，设定面密度、温度、速度、压力等参数的预警阈值，当参数超出阈值时，系统自动发出声光报警，并推送异常信息至操作人员终端，及时排查处理故障，避免批量不合格产品产生。

三、应用效果验证与分析

（一）应用方案

以某型号环氧树脂膜自动化生产线为研究对象，生产线设计速度 15m/min，目标面密度 $200\text{g}/\text{m}^2$ ，允许偏差 $\pm 3\%$ 。应用本文提出的稳定性控制方法，实施原料标准化管控、精密供料与涂胶设备优化、工艺参数协同调控、在线监测与闭环控制及生产环境管控，对比分析控制前后树脂膜面密度稳定性、产品合格率及生产效率。

（二）应用结果

1. 面密度稳定性

控制前，树脂膜面密度波动范围为 $192\text{--}208\text{g}/\text{m}^2$ ，偏差达 $\pm 4\%$ ，横向面密度极差（最大与最小差值）达 $8\text{g}/\text{m}^2$ ，纵向存在周期性波动；应用本文控制方法后，面密度波动范围缩小至 $196\text{--}204\text{g}/\text{m}^2$ ，偏差控制在 $\pm 2\%$ 以内，横向面密度极差 $\leq 3\text{g}/\text{m}^2$ ，纵向波动显著减小，稳定性大幅提升。

2. 产品合格率与生产效率

控制前，产品合格率为 92%，因面密度不合格导致的废品率达 8%，生产线需频繁停机调节参数，日均有效生产时间 20h；应用控制方法后，产品合格率提升至 99.5%，废品率降至 0.5%，参数调节频率减少 70%，日均有效生产时间提升至 23.5h，生产效率显著提高。

3. 稳定性持续性

连续 30 天跟踪监测应用效果，树脂膜面密度偏差始终稳定在 $\pm 2\%$ 以内，未出现大幅波动；设备运行稳定，计量泵、模唇等关键部件磨损速率降低，维护周期延长 50%，表明该控制方法具有良好的持续性与可靠性。

（三）结果分析

应用效果表明，本文提出的自动化工艺下树脂膜面密度稳定性控制方法，通过原料、设备、工艺、监测、环境多维度协同管控，有效解决了传统生产中面密度波动大、调控滞后、合格率低等问题^[9]。原料预处理优化了树脂流变性能，减少基础波动；精密设备控制消除了供料与涂胶误差；工艺参数协同调控实现了多参数匹配稳定；在线闭环调控解决了滞后性问题；环境管控减少了外部干扰，多措施耦合作用，显著提升了树脂膜面密度稳定性与产品质量。

四、结论

自动化工艺下树脂膜面密度稳定性受原料特性、设备精度、工艺参数、在线监测及生产环境等多因素耦合影响，单一控制措施难以实现稳定管控。本文构建“原料预处理 - 设备精密控制 -

工艺参数协同优化 – 双路在线检测闭环调控 – 环境标准化管控”的全流程稳定性控制体系，通过原料标准化筛选与流变调节、高精度供料涂胶设备优化、多参数联动控制、多模态在线监测与智能反馈调节，实现了树脂膜面密度的精准稳定控制。

应用实践表明，该方法可将树脂膜面密度偏差控制在 $\pm 2\%$

以内，产品合格率提升至 99.5%，生产效率显著提高，有效解决了自动化工艺下面密度波动难题。未来可进一步融合人工智能算法，优化闭环调控模型，实现参数自适应智能调节，同时探索新型在线监测技术，提升监测精度与响应速度，为树脂膜自动化生产的高质量发展提供更有力的技术支撑。

参考文献

[1] 王健, 李刚, 张磊. 一种稳定控制纤维含量的 SMC 生产系统及方法 [J]. 复合材料科学与工程, 2024, (5): 45–52.
[2] 刘辉, 陈静. 计量泵在聚酰亚胺薄膜生产线中的应用 [J]. 塑料工业, 2023, 51 (8): 123–127.
[3] 周丽, 马骏. 热熔胶膜法树脂胶膜制备工艺优化 [J]. 中国胶粘剂, 2023, 32 (9): 45–49.
[4] 孙伟, 吴涛. 全自动闭环涂胶技术在面密度控制中的应用 [J]. 现代涂料与涂装, 2024, 27 (3): 56–60.
[5] 陈晓, 林强. 流延模具结构对薄膜厚薄均匀性的影响及优化 [J]. 塑料科技, 2023, 51 (10): 89–93.
[6] 何峰, 谢明. 自动化涂胶生产线张力与速度协同控制 [J]. 制造业自动化, 2024, 46 (4): 78–82.
[7] 郭亮, 田宇. X 射线在线测厚技术在树脂膜生产中的应用 [J]. 电子测量技术, 2023, 46 (15): 120–124.
[8] 黄明, 郑凯. 树脂原料特性对涂胶膜面密度稳定性的影响 [J]. 化工新型材料, 2024, 52 (7): 210–213.
[9] 赵阳, 周明. 超薄铜箔与改性树脂膜在线复合镀膜系统控制技术 [J]. 表面技术, 2025, 54 (2): 189–196.