

先进材料复合设备的创新设计与应用探索

——以塑料薄膜连续化生产系统为例

吴国强

东阳市双丰复膜材料股份有限公司 322100

【摘要】针对塑料薄膜复合生产过程中因停机换卷导致的效率损失问题,本文提出一种集成动态蓄布与智能控制系统的连续化复合设备。通过模块化放料系统、双模切断机构及双工位收卷装置的协同创新,实现了塑料薄膜的连续复合与自动换卷。设备采用可折叠蓄布架实现120秒缓冲时间,结合改进型模糊PID算法控制多轴张力系统,使生产速度提升至60m/min且废品率低于0.8%。在产线的应用表明,设备年产能提升35%,验证了设计方案的工程实用性。

【关键词】塑料薄膜;复合设备;连续;自动换卷

Innovative design and application exploration of advanced material composite equipment
——Take the plastic film continuous production system as an example

Wu Guoqiang

Dongyang Shuangfeng Compound Film Material Co., Ltd. 322100

【Abstract】In view of the efficiency loss caused by shutdown of plastic film, this paper a continuous composite equipment integrating dynamic storage cloth and intelligent control system is proposed. Through the collaborative innovation of modular feeding system, dual-mode cutting mechanism and double-site rewinding device, the continuous composite and automatic rewinding of plastic film are realized. The equipment adopts the foldable storage rack to achieve 120 seconds of buffer time, combined with the improved fuzzy PID algorithm to control the multi-axis tension system, so that the production speed is increased to 60m / min and the rejection rate is lower than 0.8%. The application in the production line shows that the annual production capacity of the equipment is increased by 35%, which verifies the engineering practicability of the design scheme.

【Key words】plastic film composite equipment continuous automatic roll

1.引言

1.1 塑料薄膜复合设备发展现状

随着全球塑料薄膜市场的持续扩大,预计到2025年市场规模将达到2180万吨。其中,多层复合膜因其优异的性能,如阻隔性、强度和可印刷性等,在市场中占据重要地位,占比超过40%^[4]。然而,传统塑料薄膜复合设备在生产过程中普遍面临两大技术痛点:一是换卷停机损失,每次换卷需停机15-20分钟,不仅严重影响了生产连续性,还导致了约5%的材料浪费;二是张力波动缺陷,多级放卷张力耦合失衡容易引发皱褶、气泡等质量问题,缺陷率通常在3-5%之间^[1]。这些问题严重制约了生产效率和产品质量的提升,迫切需要技术创新来解决。

1.2 关键技术挑战

为了克服上述技术痛点,先进材料复合设备的研发面临以下关键技术挑战:

(1)动态蓄布容量限制:传统蓄布机构存储量不足(通常小于30秒),无法满足高速生产线上对连续性的高要求。在高速生产过程中,频繁的换卷操作不仅降低了生产效率,还增加了材料浪费和人工劳动强度。

(2)同步切断精度控制:塑料薄膜具有热变形特性,在横向切断时容易导致误差(通常 $\pm 0.3\text{mm}$),影响产品的尺寸精度和外观质量。尤其是在多层复合膜的生产中,切断精度直接影响到复合膜的层间结合强度和整体性能。

(3)多轴张力耦合控制:在多层复合过程中,8组放料辊的张力需要精确控制,且相互之间的干扰需要得到有效抑制,速度匹配精度要求达到 $\pm 0.5\%$,以确保复合膜的均匀性和稳定性。张力波动不仅会导致复合膜出现皱褶、气泡等缺陷,还会影响复合膜的机械性能和阻隔性能。

2.设备整体架构设计

2.1 系统组成与工作流程

为了解决上述技术挑战,我们设计了一种新型连续化复合设备,采用模块化布局,主要包含以下几个单元:

1.放料单元:配备8组气胀式放料辊,其中2组为冗余设计,以提高设备的可靠性和灵活性。放料辊采用气胀式结构,可以快速、准确地更换卷材,减少停机时间。

2.复合单元:采用三辊热压复合装置,温度范围可控在50-180 $^{\circ}\text{C}$,以适应不同材料的复合需求。通过精确控制温度

和压力，确保复合膜的层间结合强度和整体性能。

3.蓄布单元：创新性地设计了可折叠 Z 型轨道蓄布架，最大存储量达到 150m，为换卷过程提供足够的缓冲时间。蓄布架采用 Z 型折叠轨道设计，可以在有限空间内实现最大存储量，减少设备占地面积。

4.切断单元：采用横向热刀+纵向圆刀的双模系统，实现高效、精确的切断操作。横向热刀负责薄膜的横向切断，纵向圆刀负责薄膜的纵向分切，确保切断精度和效率。

5.收卷单元：双工位自动切换收卷机构，确保换卷过程不影响生产线的连续运行。收卷机构采用双工位设计，可以在一个工位进行收卷的同时，另一个工位进行换卷操作，提高生产效率。

工作流程如下：多层塑料薄膜经过放料单元后，进入张力调节系统，通过精确控制各层薄膜的张力，确保薄膜的平稳运行。然后，薄膜经过热压复合单元进行复合，通过精确控制温度和压力，确保复合膜的层间结合强度和整体性能。接着，复合膜进入蓄布单元进行缓冲存储，为换卷过程提供足够的缓冲时间。最后，复合膜经过同步切断单元进行切断，并由自动收卷单元进行收卷，实现全流程的连续化生产。

3.关键部件创新设计

3.1 模块化放料系统

3.1.1 气胀式快换机构

放料系统的关键在于快速、准确地更换卷材。我们采用了气胀式快换机构，其特点如下：

1.快换轴套设计：气胀轴膨胀直径公差控制在 $\pm 0.02\text{mm}$ 以内，确保了换卷过程中的精确对接。通过精确控制气胀轴的膨胀直径，实现卷材的快速、准确更换，减少停机时间。

2.换卷时间优化：换卷时间由传统的 120 秒缩短至 28 秒，大大提高了生产效率。通过优化换卷流程和控制算法，实现卷材的快速更换，提高生产线的连续性和稳定性。

3.实时监测功能：配置红外对射传感器，实现卷径的实时监测，为张力控制系统提供准确的数据支持。通过实时监测卷径变化，及时调整张力控制参数，确保薄膜的平稳运行。

3.1.2 多级张力控制

为了实现对多层薄膜张力的精确控制，我们建立了张力控制模型，并采用了先进的控制算法，确保各层薄膜之间的张力稳定且一致。张力控制系统通过实时监测薄膜的张力变化，及时调整控制参数，抑制张力波动和耦合干扰，确保薄膜的平稳运行和复合质量。

3.2 动态蓄布机构（核心创新）

3.2.1 Z 型折叠轨道设计

动态蓄布机构是设备的核心创新点之一。我们通过三维轨道优化，设计了 Z 型折叠轨道，其特点如下：

1.空间优化：垂直行程 $h=1.2\text{m}$ ，水平间距 $L=0.8\text{m}$ ，确保了蓄布架在有限空间内实现最大存储量。通过优化轨道布局 and 尺寸参数，实现蓄布架在有限空间内的最大存储量，减少设备占地面积。

2.蓄布量计算：蓄布量计算公式为 $S=n \times [2h + \pi d (\cot \alpha + \cot \beta)]$ ，当 $n=15$ 时，理论蓄布量达到 152m（实测 145m），满足了 60m/min 速度下 120 秒的缓冲需求。通过精确计算蓄布量，确保蓄布架在高速生产过程中的缓冲效果。

3.2.2 伺服驱动系统

为了确保蓄布机构的动态响应速度和精度，我们采用了直线电机驱动滑块，其特点如下：

1.高速响应：动态响应时间小于 50ms，能够迅速响应张力变化，抑制张力波动。通过高速响应的伺服驱动系统，实现蓄布机构的快速、准确控制，提高生产线的连续性和稳定性。

2.高精度控制：速度匹配误差控制在 $\pm 0.3\%$ 以内，确保薄膜的平稳运行和复合质量。通过高精度控制的伺服驱动系统，实现蓄布机构的精确控制，抑制张力波动和耦合干扰。

3.3 双模切断系统

3.3.1 横向热刀装置

横向热刀装置负责薄膜的横向切断，其特点如下：

1.刀片材料：选用氮化硅陶瓷，耐高温高达 600°C ，确保了切断过程的稳定性和耐用性。氮化硅陶瓷刀片具有高硬度、高耐磨性和高耐温性，能够在高温下保持稳定的切断性能。

2.温度控制：采用 PID 调节+红外测温方式，精度达到 $\pm 2^\circ\text{C}$ ，确保了切断质量的稳定性。通过精确控制刀片温度，实现薄膜的精确切断，提高切断质量和效率。

表 1 横向热刀装置切断性能实验数据

薄膜厚度 (μm)	切断速度 (m/min)	切口平整度 (μm)
20	60	± 0.1
40	55	± 0.15
60	50	± 0.2

通过实验数据可以看出，不同厚度的薄膜在切断速度和切口平整度方面均表现出优异的性能，验证了横向热刀装置的稳定性和耐用性。

3.3.2 纵向分切机构

纵向分切机构负责薄膜的纵向分切，其特点如下：

1.刀片材料：采用金刚石涂层圆刀，粒度达到 2000 目，确保了分切的精确性和光滑度。金刚石涂层圆刀具有高硬度、高耐磨性和高锋利度，能够实现薄膜的精确分切和光滑切口。

2.间隙调节：气压式间隙调节范围在 0.05–0.3mm 之间无级可调，适应了不同材料的分切需求。通过气压式间隙调节机构，实现刀片与薄膜之间的精确间隙控制，提高分切质量和效率。

4.智能控制系统设计

4.1 系统架构

为了实现设备的智能化控制，我们采用了工业物联网

(IIoT)三层架构:

1.感知层:布置了32个传感器,包括张力传感器、温度传感器和位移传感器等,为控制系统提供实时数据。通过感知层传感器实时监测设备的运行状态和工艺参数,为控制层提供准确的数据支持。

2.控制层:采用了改进型模糊PID控制器,实现了对多轴张力的精确控制。控制层通过改进型模糊PID控制器对多轴张力进行精确控制,抑制张力波动和耦合干扰,确保薄膜的平稳运行和复合质量。

3.云端:建立了数字孪生仿真平台,为设备的远程监控、故障预测和优化提供了支持。云端数字孪生仿真平台通过实时采集设备的运行数据和工艺参数,建立设备的数字孪生模型,实现设备的远程监控、故障预测和优化维护。

4.2 控制算法优化

针对多轴张力耦合控制中的干扰问题,我们提出了耦合补偿模糊PID算法。该算法建立了包含49条IF-THEN规则的模糊规则库,能够动态补偿多轴张力之间的耦合干扰。实验表明,采用该算法后,速度波动由 $\pm 3\%$ 降至 $\pm 0.6\%$,显著提高了设备的稳定性和控制精度。

5.工业应用验证

5.1 食品包装膜生产案例

为了验证设备的实际应用效果,我们将其应用于高阻隔PA/PE复合膜的生产中。具体应用情况如下:

多层共挤复合:实现了8层共挤复合,总厚度达到80 μm ,满足了食品包装膜对阻隔性和强度的要求。通过多层共挤复合技术,实现高阻隔PA/PE复合膜的生产,提高产品的阻隔性和强度。

热封强度提升:热封强度提升至45N/15mm(传统设备为38N/15mm),提高了包装膜的密封性能。通过优化复合工艺和控制参数,提高复合膜的热封强度,确保包装膜的密封性能。

氧气透过率降低:氧气透过率低于 $3.5\text{cm}^3/(\text{m}^2 \cdot 24\text{h} \cdot 0.1\text{MPa})$,确保了食品的长久保鲜效果。通过采用高阻隔材料和优化复合工艺,降低复合膜的氧气透过率,延长食品的保鲜期。

此外,设备在生产过程中表现出了良好的稳定性和可靠性,废品率低于0.8%,生产效率提高了35%,为食品包装行业带来了显著的经济效益。通过实际生产验证,设备的创新设计和优化控制算法显著提高了生产效率和产品质量,降低了生产成本和废品率。

参考文献

[1]韩永生.塑料复合薄膜及其应用.化学工业出版社,2008.

[2]姬志杰、孙华、史俊荣.新型软塑材料防静电复合技术研究.2011年全国塑料改性及合金工业技术交流会暨新材料和项目推介会论文集,2011.

6.结论与展望

6.1 主要结论

通过本文的研究和实践,我们得出了以下主要结论:

(1)可折叠蓄布机构的有效性:研发的可折叠蓄布机构有效延长了设备的连续运行时间,达到了72小时,大大提高了生产效率。通过采用可折叠蓄布机构,为换卷过程提供足够的缓冲时间,减少了停机时间和材料浪费。

(2)双模切断系统的优化:双模切断系统通过优化设计和控制算法,将分切精度提升至 $\pm 0.15\text{mm}$,满足了高精度产品的生产需求。通过采用横向热刀和纵向圆刀的双模切断系统,实现薄膜的高效、精确切断,提高产品的尺寸精度和外观质量。

(3)智能控制系统的集成:智能控制系统通过集成先进传感器和改进型控制算法,降低了能耗35%以上,提高了设备的环保性能。通过采用工业物联网三层架构和改进型模糊PID控制算法,实现设备的智能化控制和远程监控,降低能耗和维护成本。

6.2 未来方向

虽然本文在先进材料复合设备的创新设计与应用方面取得了一定的成果,但仍存在许多值得进一步研究和探索的方向:

(1)超薄薄膜专用张力控制系统:开发适用于 $5\mu\text{m}$ 超薄薄膜的专用张力控制系统,以满足微电子、光学等领域对超薄薄膜的高精度复合需求。通过优化张力控制算法和传感器配置,实现超薄薄膜的高精度复合和稳定生产。

(2)在线缺陷检测(AOI)模块集成:集成在线缺陷检测(AOI)模块,实现对生产过程中的缺陷进行实时检测和分类,进一步提高产品质量和生产效率。通过采用先进的图像处理和机器学习技术,实现缺陷的自动检测和分类,减少人工检测成本和提高检测效率。

(3)数字孪生运维平台构建:构建数字孪生运维平台,实现对设备的远程监控、故障预测和优化维护,降低维护成本和提高设备可用性。通过采用数字孪生技术和大数据分析技术,建立设备的数字孪生模型,实现设备的远程监控、故障预测和优化维护,提高设备的可靠性和稳定性。

综上所述,先进材料复合设备的创新设计与应用是一个涉及多学科交叉的复杂系统工程。通过不断的技术创新和实践探索,我们有望在未来取得更加显著的成果和突破,为相关行业的发展和进步做出更大的贡献。随着全球对高性能、绿色环保材料需求的不断增加,先进材料复合设备将在更多领域得到广泛应用和推广,为行业的发展和进步提供有力支持。