

工艺协同优化无溶剂复合气泡缺陷抑制研究

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.6008

张雪成¹ 吴用¹

胡立新¹ 钟云飞²

湖南雪天包装有限责任公司

湖南 长沙 410699

湖南工业大学

包装工程学院

湖南 株洲 412007

摘要:含标签类产品在无溶剂复合过程中因标签凸起易引发气泡缺陷，严重影响生产效率与包装质量。系统分析了内含标签在无溶剂复合过程的机理与影响，重点介绍了气泡形成的3重机制，分别为界面流变失稳、卷绕应力集中和固化气体逸出。为了抑制无溶剂复合过程中的气泡缺陷，采用L9(3⁴)正交试验优化工艺参数，并创新设计错位收卷机构，该协同策略有效降低层间间隙和气泡缺陷率。

关键词:无溶剂复合；气泡缺陷；界面流变；应力集中；工艺优化

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

文章编号: 1674-7100(2025)06-0061-06

引文格式: 张雪成, 吴用, 胡立新, 等. 工艺协同优化无溶剂复合气泡缺陷抑制研究 [J]. 包装学报, 2025, 17(6): 61-66.

软包装凭借其材料轻量化、结构柔性化及功能复合化的优势，被广泛应用于食品、医药、日化等众多行业。随着环保意识、健康安全意识的增强和对低碳、可持续发展的追求^[1-3]，无溶剂复合技术以其环保、节能、安全和低成本的优势，逐渐成为软包装行业的重要核心生产工艺之一，在食品、药品、化妆品等对卫生和环保要求较高的领域中占据主导地位。在采用无溶剂复合工艺生产软包装过程中，会因基材表面张力差异、复合工艺参数设置不当、真空脱泡效果不足、胶黏剂初始空气含量过高、生产环境差等因素造成气泡产生^[4-6]，尤其是在复合含有标签的软包装，严重影响包装外观、阻隔性和市场竞争力^[7-8]。目前国内外在气泡形成机理的研究上，提出了多种理论^[9]，A. J. Al-Obaidi 等^[10] 和 Wierzbicki 等^[11] 提出两种及以上基材在复合时，由于基材表面的不平整性或胶水涂布不均匀，涂胶基材与未涂胶基材之间的界面空气未能完全排出，造成复合膜的气泡缺陷。N. Bulaha^[12] 提出基材表面微孔吸附的湿气或空气在复合时，在压合

作用下被释放出来，从而形成气泡缺陷。而在设备和工艺改进研究上，有企业和研究机构通过优化涂胶工艺和复合辊结构，改善涂胶均匀性和复合压力稳定性，并通过大量实验和数据分析，确定了不同材料产品的最佳工艺参数范围，以此减少气泡的产生^[13]。也有研究人员通过提高薄膜表面质量和稳定性，调整胶水配方和生产工艺，以减少气泡的产生^[14]。这些研究对无溶剂复合工艺过程中气泡缺陷的抑制有一定的实际价值和应用前景。

本研究以含标签软包装无溶剂复合过程中，标签周边气泡缺陷的抑制为研究对象，采用先进的检测技术精确测量标签凸起高度及材料表面微观形貌，多角度探究气泡产生的原因，并基于 Young-Laplace 方程和层合板理论，深入研究界面流变失稳、卷曲应力集中以及固化气体逸出等因素在气泡形成过程中的作用机制，建立多物理场耦合模型，揭示气泡形成的动态过程，提出复合错位收卷机构的改进方案。通过理论分析和有限元模拟，优化收卷架的横向位移机构，

收稿日期: 2025-07-02

作者简介: 张雪成, 男, 工程师, 主要研究方向为软包装材料与技术, E-mail: 40261054@qq.com

通信作者: 钟云飞, 男, 教授, 主要研究方向为先进印刷包装材料与技术, E-mail: yfzhong@hut.edu.cn

确定最佳的偏移量，并对改进后的设备进行实际生产验证，为气泡缺陷抑制的后续研究提供依据。

1 无溶剂复合过程气泡成因分析

无溶剂复合技术是指利用无溶剂胶黏剂将两种或多种基材紧密结合在一起。无溶剂胶黏剂通常由按照一定比例混合的主剂和固化剂组成，主剂通常为含有活性基团的高分子聚合物，如聚氨酯预聚体；固化剂则为含有能与主剂活性基团发生反应的物质，如多异氰酸酯。基材在复合辊的压力作用下，胶黏剂中的活性基团迅速发生交联反应形成三维网状结构，将基材牢固地黏接在一起。通过检测发现，标签周边的气泡通常围绕标签呈环状或半环状分布，气泡形状呈圆形、椭圆形或细长条形，气泡尺寸小至零点几毫米，大至数毫米，平均尺寸达 $(2.8 \pm 0.3) \text{ mm}$ 。

1.1 界面张力对气泡形成的影响

在含标签软包装无溶剂复合过程中，标签通常以粘贴的方式附着在包装材料表面，通过扫描电子显微镜（SEM）的精确测量，标签凸起高度 Δh 达 $(28 \pm 3) \mu\text{m}$ ，凸起部分易导致胶黏剂分布发生改变。根据表面张力原理，液体在固体表面的接触角与表面张力密切相关，在理想的平整表面，胶黏剂铺展均匀，接触角相对稳定，而在凸起处，表面的不平整导致胶黏剂与表面的接触角增大^[15-16]。通过接触角测量仪检测，无标签区域的接触角通常为 $45^\circ \sim 55^\circ$ ，标签区域的接触角则增大至 72° ，接触角的增大使得胶黏剂在标签周围的铺展变得困难，涂布盲区的占比达到面积的19.4%，导致胶黏剂无法有效填充，为气泡的产生提供了潜在的空间。

1.2 卷绕应力分布对气泡形成的影响

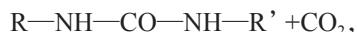
在无溶剂复合过程中，复合膜均匀卷绕，其张力、压力和应力分布均匀并能预测，但标签这类局部功能夹层的复合存在打破了分布均匀性，造成应力集中、卷径突变、刚度突变和桥接效应。基于层合板理论建立卷绕模型，通过设定边界条件，模拟复合膜在卷绕过程中的放、收卷张力和复合压力等的实际受力情况，并采用有限元分析对卷绕模型进行求解，得到标签区域的应力云图。标签凸起部位应力集中，形成高应力区域，易导致材料在受力时产生微小的裂缝或空隙，从而形成气泡。同时，不同材质薄膜的弹性模量不同，受力时的变形程度也不同，进一步加剧标签区域的应力集中。

1.3 应力波叠加对气泡形成的影响

复合膜的卷绕过程中，标签的周期性分布导致了复合膜表面的几何形状变化及应力波的叠加。根据材料力学理论，在应力波叠加的区域，界面剪切应力 τ 会显著增大。无溶剂胶黏剂的胶层黏接强度通常为1.2 MPa，当界面剪切应力超过胶层黏接强度时，两层复合材料之间的黏接就会受到破坏而出现错位和滑动现象，进而导致两层材料之间产生间隙而形成气泡，气泡又会进一步改变复合膜的受力状态，使得应力分布更加不均匀，导致更多的气泡产生，如此形成恶性循环。这充分说明了应力波叠加与气泡形成之间的密切关系。

1.4 聚氨酯胶固化反应对气泡形成的影响

在无溶剂复合过程中，聚氨酯胶是一种常用胶黏剂。聚氨酯胶在固化过程中，主剂中的异氰酸酯基团（—NCO）与固化剂中的活性氢基团（如羟基—OH、氨基—NH₂等）发生化学反应，形成交联结构而固化。除此，聚氨酯胶还会与水分发生副反应：



反应产物之一是二氧化碳（CO₂），由于复合环境并非完全密封，空气中的水分会不可避免地参与到聚氨酯胶的固化反应中。根据气体扩散理论，气体在介质中的扩散系数 D 与介质的性质、温度以及气体的浓度梯度等因素有关。实验数据表明，当上胶量 $Q > 1.8 \text{ g/m}^2$ 时，气体扩散系数 D 显著减小，气体在复合膜内部的扩散速度变慢，产生的二氧化碳气体无法及时扩散排出复合膜，就会在复合膜内部积聚，为气泡的形成提供了气体来源。随着气体积聚量的增加，气体在复合膜内部形成的压力逐渐增大，当压力突破临界值时，就会冲破复合膜内部的薄弱区域形成闭孔气泡。

2 试验准备

2.1 材料与设备

1) 基材：印刷层采用12 μm的BOPET薄膜，表面张力 $\geq 42 \text{ mN/m}$ ，符合ASTM D2578标准要求；阻隔层选用55 μm的PE薄膜，热收缩率 $MD/TD=3.5\%/2.8\%$ ，符合ISO 11501标准要求。

2) 设备：复合机采用通泽1300型无溶剂复合机，涂布精度可达 $\pm 0.05 \text{ g/m}^2$ ；张力控制系统采用Samkoon浮辊式张力系统，张力控制精度可达 $\pm 1 \text{ N}$ ；

复合错位收卷系统采用自改造的高精度伺服优化无溶剂摆动收卷机 V1.0, 可按照设定的规律缓慢且匀速地横向往复移动, 横向偏移精度控制可达 0.025 mm。

3) 仪器: 接触角测量仪, SDC-200S(全自动型), 上海中晨数字技术设备有限公司, 测量精度可达 $\pm 0.1^\circ$; 扫描电子显微镜, SEM5000, 国仪量子技术(合肥)股份有限公司, 分辨率可达 1 nm; 电子拉力机, GBL-L 单柱式, 广东标际包装设备有限公司, 测量复合剥离力, 其力值测量精度为 $\pm 0.5\%$, 力值分辨率为 1/500 000(全程分辨不变), 测试速度精度为 $\pm 1\%$, 测试速度范围为 0.1~500 mm/min(无级调速), 有效行程为 0~700 mm, 位移精度为 $\pm 0.5\%$, 位移分辨率为 0.000 25 mm。

2.2 试验方法

2.2.1 关键工艺因素的选取

在实际的无溶剂复合生产过程中, 影响气泡形成的因素众多, 且各因素之间可能存在复杂的交互作用^[17]。为了避免进行大量实验, 耗费大量时间、人力和物力, 或因实验条件的限制而难以实施, 本研究选取无溶剂复合生产过程中的 4 个关键工艺因素(上胶量、收卷张力、胶水配比(—NCO 与—OH 质量比)、复合温度)及对应的 3 个水平, 采用 L9(3⁴) 正交表进行试验, 系统地研究各关键工艺因素及其交互作用对气泡形成的影响, 为后续的工艺优化提供重要的数据支持。具体试验参数设置如表 1 所示。

表 1 关键工艺因素参数设置

Table 1 Orthogonal experimental parameter settings for key process factors

关键工艺因素	参数设置			考察内容
上胶量 / (g·m ⁻²)	1.6	2.0	2.4	不同上胶量对复合膜质量和气泡形成的影响
收卷张力 / kg	15	20	25	不同收卷张力对应力集中和气泡形成的影响
胶水配比	100:75	100:80	100:85	不同胶水配比对固化速率、产物结构及气泡形成的影响
复合温度 / °C	25	35	45	温度变化对气泡形成的影响

2.2.2 错位复合收卷与传统复合收卷测试

使用两台通泽 1300 型无溶剂复合机, 选取标签分布相同的膜材开展复合收卷测试, 其中一台采用自改造的高精度伺服优化无溶剂摆动收卷机构进行收卷, 另一台则采用传统复合收卷机构进行收卷。测试过程中, 采用最优的上胶量、收卷张力、胶水配比

及复合温度参数。每台机器各自进行复合收卷操作, 收卷长度均设定为 2000 m。待复合操作全部结束后, 从卷膜的外圈朝着卷芯方向, 分别统计两卷复合膜上每 100 m 出现的气泡数量以及气泡的具体尺寸。

2.2.3 复合膜剥离力测试

按照国家标准 GB 8808—1988《软质复合塑料材料剥离试验方法》, 对错位复合收卷与传统复合收卷两种工艺下的复合膜进行剥离力测试, 手动将试样一端预剥开约 50 mm, 分别装入电子拉力机的上下夹具, 以 300 mm/min 的速度进行测试, 取 3 次测试结果的平均值。

3 试验结果

3.1 工艺参数对气泡的影响

3.1.1 上胶量与气泡的关系

上胶量作为无溶剂复合工艺中的关键参数, 合适的上胶量范围, 能够在保证复合膜质量的前提下, 有效减少气泡的产生。表 2 反映了不同上胶量条件下气泡的产生情况、特征及对复合膜质量的影响。综合考虑气泡数量、复合膜性能和成本等因素, 上胶量在 2.0~2.2 g/m² 范围内, 气泡形成得到了较好地控制, 同时也能满足复合膜的其他性能要求。

3.1.2 收卷张力与气泡的关系

收卷张力是无溶剂复合工艺中另一个对气泡产生有重要影响的参数, 合适的收卷张力能够有效减少气泡的产生。表 3 反映了不同收卷张力下气泡的产生情况及气泡特征。当收卷张力为 20 kg 时, 既能较好地控制气泡数量, 又保证了复合膜的质量不受影响。

3.1.3 胶水配比与气泡的关系

胶水配比(—NCO 与—OH 质量比)对气泡的产生具有重要作用, 合适的胶水配比能够有效减少气泡的产生。表 4 反映了不同胶水配比下气泡的产生情况及气泡特征, 当胶水配比为 100:80 时, 能够在保证胶水性能的前提下, 有效减少气泡的产生。

3.1.4 复合温度与气泡的关系

复合温度作为无溶剂复合工艺中的重要参数, 对气泡的产生有着重要影响, 合适的复合温度能够有效减少气泡的产生。表 5 反映了不同复合温度下气泡的产生情况及气泡特征, 当复合温度在 30~35 °C 之间时, 能够在保证复合膜质量的前提下, 有效减少气泡的产生。

表2 不同上胶量下气泡产生情况

Table 2 Bubble formation under different gluing amounts

上胶量 /($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	气泡数量	气 泡 尺 寸	膜层黏接强度	原 因 分 析
1.6	1~4 个	直径 3 mm 以上, 部分呈长条状 (0.8~2.5) N/15 mm	胶黏剂无法充分填充材料表面的微小间隙	
2.0	1~2 个	直径 2~3 mm	(2.5~4.0) N/15 mm	胶黏剂的增加使得其能够更好地覆盖涂布盲区, 增强了对空气的阻隔作用
2.4	偶尔 1 个(间断性)	2 mm 以下	无法上机剥离	气泡缺陷明显改善, 但胶量过多, 使成本增加, 柔韧性下降, 影响外观, 产生橘皮纹

表3 不同收卷张力下气泡产生情况

Table 3 Bubble formation under different winding tension

收卷张力 /kg	气泡数量	气泡尺寸	原 因 分 析
15	3 个以上	直径 3 mm 以上, 局部有隧道现象	较低收卷张力无法使复合膜紧密卷绕, 导致层间隙较大, 空气易进入间隙, 给气泡的形成造成可能
20	1~3 个(间断性)	直径 2~3 mm	增加收卷张力使复合膜卷绕紧密平整, 褶皱产生减少, 层间隙减小, 降低空气进入可能性, 从而降低了气泡形成的概率
25	偶尔 1 个(出现软皱)	1~2 mm	过高收卷张力使复合膜承受过大应力, 导致复合膜出现拉伸变形、破裂等问题, 影响复合膜整体质量

表4 不同胶水配比下气泡产生情况

Table 4 Bubble formation under different glue ratios

胶水配比	气泡数量	气泡尺寸	原 因 分 析
100:75	2 个以上	直径 3 mm 以上	胶水反应速度较快, 对操作要求较高, 交联固化后胶体层较硬, 易出现白斑等
100:80	1 个以内(间断性)	直径 2 mm 以内	胶黏剂—NCO 组分和—OH 组分搭配合理, 反应速度适中, 既能保障胶水的流平性, 又能保证胶体的韧性, 能够形成很好的固化界面, 复合剥离强度佳
100:85	1~2 个(间断性)	2 mm 左右	随着—OH 组分的增加, 胶水反应速度进一步降低, 复合剥离强度差, 存在胶水不干的风险。并且因标签处应力的存在, 熟化时间延长, 卷底易出现胶水溶墨现象

表5 不同复合温度下气泡产生情况

Table 5 Bubble formation under different composite temperatures

复合温度 /℃	气泡数量	气泡尺寸	原 因 分 析
25	1~2 个	直径 3 mm 以上	复合温度较低时胶水初黏力较低, 固化速度较慢, 流动性较差, 难以充分填充材料表面微小间隙, 无法有效黏接两层材料, 易导致空气进入而形成气泡
35	1 个以内(间断性)	1 mm 左右	适当提高复合温度可提高胶水初黏力, 胶水固化速度加快, 流动性增强, 能更好地填充材料表面间隙, 减少空气进入, 从而减少气泡产生
45	1~2 个(间断性)	2 mm 左右	复合温度过高时胶水难以流平, 形成局部堆积或不足, 增加气泡产生风险, 材料热稳定性也会受影响, 复合膜易出现变形、破裂等问题

3.2 错位收卷机构改进效果

由于错位收卷过程中标签不再集中重叠, 复合膜在圆周方向上的受力更加均匀, 有效改变了复合膜的受力状态, 减少了应力集中现象。同时, 错位收卷使得复合膜层与层之间的间隙更加均匀, 胶水能够更好地流平, 填充微小间隙, 从而避免了因应力集中和复合膜层间隙不均导致的气泡产生。经验证, 收卷架的最佳横向位移量 $\Delta x=0.25L$, 其中 L 为标签在复合膜

上的周期长度, 本试验中 $L=52 \text{ mm}$, $\Delta x=13 \text{ mm}$ 。

在四项关键工艺参数(上胶量、收卷张力、胶水配比、复合温度)保持一致的条件下, 对比分析了错位收卷与传统收卷两种方式下复合膜的外观与气泡数量, 结果如表 6 所示。采用错位收卷机构, 复合膜层与层之间的黏接更加紧密, 气泡缺陷率降低了 93.7%, 剥离强度提高了约 20.0%, 充分证明了错位收卷机构的有效性。

表 6 不同收卷方式下气泡缺陷与剥离强度

Table 6 Bubble formation and peel strength under different winding methods

收卷方式	外 观	气泡缺陷率 /%	剥离强度 / (N/15 mm)
传统收卷	标签周边气泡 1~3 个, 部分气泡直径超过 3 mm, 平均直径为 2 mm。	12.6	3.5 左右
错位收卷	偶尔出现复合气泡, 且直径在 1 mm 以下	0.8	4.0 以上

4 结语

本文采用有限元分析方法, 对含标签软包装无溶剂复合过程气泡缺陷形成进行了多维度的分析和研究, 揭示了气泡产生的复杂机制, 明确了关键工艺参数对气泡产生的影响, 并通过实验证明了复合膜错位收卷方案的有效性, 确定了无溶剂复合过程中最优关键工艺参数值, 分别为: 上胶量 2.2 g/m^2 , 收卷张力 20 kg, 胶水配比 100:80, 复合温度 30°C , 收卷架横向位移量精确控制在 13 mm。对优化后的 3 号生产线进行为期 30 d 的连续产业化验证, 结果显示改进方案成效卓著。通过对生产记录的统计与分析发现: 气泡缺陷率从 12.6% 降至 0.8%, 降幅高达 93.7%; 单位胶耗由 2.1 g/m^2 减少至 1.7 g/m^2 , 节约 19.0%; 同时, 生产线速度由 150 m/min 提升至 220 m/min, 效率提升 46.7%。综上所述, 本次优化显著降低了气泡缺陷与物料消耗, 并大幅提升了生产效率, 带来了可观的经济与社会效益。

本研究主要聚焦于标签凸起、卷曲应力集中、固化气体逸出以及关键工艺参数(上胶量、收卷张力、胶水配比和复合温度)对复合膜气泡缺陷产生的影响, 未来, 将深入探讨复合设备振动频率、材料表面粗糙度及环境杂质等因素在复合膜气泡缺陷产生过程中的作用。

参考文献:

- [1] 罗雨婷, 罗瑞雪, 孙林玉, 等. 我国塑料软包装发展存在的问题及解决措施 [J]. 包装学报, 2011, 3(2): 37~39.
- [2] CIMPAN C, BJELLE E L, BUDZINSKI M, et al. Effects of Circularity Interventions in the European Plastic Packaging Sector[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(27): 9984~9995.
- [3] CORDEIRO A, HUSSAIN M, RAMACHANDRAN T, et al. Advancements in Packaging Materials: Trends, Sustainability, and Future Prospects[J]. Circular Economy and Sustainability, 2025, 5(4): 2959~2990.
- [4] 郭鹏飞, 付亚波, 何昊葳, 等. 软包装无溶剂复合技术研究进展 [J]. 包装工程, 2018, 39(9): 44~50.
- [5] INOUE T, SHIONO T, IYOTA H. Characteristics and Mechanism of Bubble Formation in Plastic Packaging for Food[J]. Japan Journal of Food Engineering, 2018, 19(3): 145~150.
- [6] 李卫来. 基于无溶剂复合混胶系统的气泡运动特性研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [7] 魏保花, 陆佳平. 微小缺陷对铝塑复合软包装材料阻隔性影响的研究 [J]. 包装工程, 2009, 30(9): 13~15, 21.
- [8] SHAH C, BOSSE S, VON HEHL A. Taxonomy of Damage Patterns in Composite Materials, Measuring Signals, and Methods for Automated Damage Diagnostics[J]. Materials, 2022, 15(13): 4645.
- [9] CHEN J, YU Z Y, JIN H R. Nondestructive Testing and Evaluation Techniques of Defects in Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review[J]. Frontiers in Materials, 2022, 9: 986645.
- [10] AL-OBAIDI A J. Ultrasonic Joining of Metal-Polymer Surfaces[D]. Sheffield: University of Sheffield, 2018.
- [11] WIERZBICKI, KULESZA J. Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering[J]. Disadvantages of Applied Lacquer Coatings on Polymer Substrate, 2012, 55(2): 291~298.
- [12] BULAH N. Analysis of Service Properties of Cylindrically Ground Surfaces, Using Standard ISO 25178-2: 2012 Surface Texture Parameters[J]. Environment Technology Resources Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, 2015, 1: 16.
- [13] WÖHNER T, ISLAM A, HANSEN H N, et al. Blister Formation in Film Insert Moulding[J]. Micromachines, 2020, 11(4): 424.
- [14] KIM S M, HONG S N, DUY NGUYEN B T, et al. Effect of Additives During Interfacial Polymerization Reaction for Fabrication of Organic Solvent Nanofiltration (OSN) Membranes[J]. Polymers, 2021, 13(11): 1716.
- [15] DALVI S, GUJRATI A, KHANAL S R, et al. Linking Energy Loss in Soft Adhesion to Surface Roughness[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(51): 25484~25490.
- [16] MA L E, MA Y J, YU K H, et al. The Effect of Substrate Roughness and Impact Angle on Droplet

- Spreading in Spraying[J]. Coatings, 2025, 15(2): 242.
[17] MESOGITIS T S, SKORDOS A A, LONG A C. Uncertainty in the Manufacturing of Fibrous Thermosetting Composites: A Review[J]. Composites

Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 57: 67-75.

(责任编辑: 廖带莲)

Study on Inhibition of Bubble Defects in Solvent-Free Lamination via Synergistic Process Optimization

ZHANG Xuecheng¹, WU Yong¹, HU Lixin¹, ZHONG Yunfei²

(1. Hunan Xuetian Packaging Co., Ltd., Changsha 410699, China;
2. School of Packaging Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Products containing labels are prone to bubble defects due to the protrusion of labels during the solvent-free lamination process, which seriously affects production efficiency and packaging quality. The mechanism and influence of the embedded label in the solvent-free lamination process were systematically analyzed, with a focus on introducing the triple mechanism of bubble formation: interfacial rheological instability, winding stress concentration and the escape of curing gas. To suppress the bubble defects in the solvent-free lamination process, the L9(3⁴) orthogonal test was adopted to optimize the process parameters, and the misaligned winding mechanism was innovatively designed. This collaborative strategy effectively reduced the interlayer gap and the bubble defect rate.

Keywords: solvent-free lamination; bubble defect; interfacial rheology; stress concentration; process optimization