

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2021.04.011

# 复合材料在涂布中的翘曲因素分析

邱尚煌

(宁波激智新材料研究院有限公司, 浙江 宁波 315040)

**摘要:** 本文从张力拉伸、穿膜方式等工艺因素, 辊径曲率、导辊导入位置等设备因素, 以及基材热收缩、胶黏剂体系等原材料因素, 综合分析引起复合材料在涂布过程产生翘曲的影响因素。翘曲问题的产生和解决往往都是多方面的, 实际工艺技术人员和生产人员需要结合现场, 做出最优的方案。

**关键词:** 复合材料; 涂布; 翘曲; 收缩; 应力

**中图分类号:** TQ9

**文献标识码:** A

## Analysis of Warping Factors of Composite Materials in Coating

QIU Shanghuang

(Ningbo Exciton Innovation Materials Research Institute Co., Ltd., Ningbo 315040, China)

**Abstract:** In this paper, the influence factors of composite materials warping in the coating process was analyzed from the technological factors of tension stretching and film piercing, the equipment factors of roll curvature and guide roll position, the material factors of thermal shrinkage and adhesives. The results showed that the generation and solution of warping problem were multifaceted, the technicians and producers needed to determine the optimal scheme according to the actual situation.

**Keywords:** composite material; coating; warping; shrink; stress

新材料为近些年发展较快的领域, 但研究和实践表明, 在很多情况下单层材料并不能提供充分的表面功能, 或者达不到综合的性能要求, 因此复合材料便应运而生且应用领域不断扩大, 如近几年以薄膜基材而兴起的光学薄膜<sup>[1]</sup>、锂电池隔膜<sup>[2]</sup>、太阳能背板<sup>[3]</sup>、汽车装饰膜<sup>[4]</sup>等新功能薄膜, 以及隔热降温材料、纳米材料<sup>[5, 6]</sup>等复合材料领域。

随着薄膜复合材料越来越多的应用到生产生活的方方面面, 由此衍生出的涂布技术也成为日益关注的焦点<sup>[7]</sup>。涂布技术分为干法涂布和湿法涂布, 本文就复合材料在湿法涂布中产生的翘曲问题进行分析。

图1为复合材料结构剖面图, 本文设定第一基材为主放卷基材, 胶黏剂涂布在第一基材上, 第二基

材为副放卷基材, 与上过涂层的第一基材进行复合。下面就几个影响翘曲的因素进行分析。

### 1 影响因素分析

#### 1.1 工艺因素

##### 1.1.1 张力拉伸

对于复合材料, 经过复合辊的第一基材和第二基材, 在复合前分别有张力拉伸作用其上, 因此要得到一个不产生翘曲的产品, 需要保证二者的应变相等, 即  $\varepsilon_{\text{第一基材}} = \varepsilon_{\text{第二基材}}$ 。若拉伸应变过大, 在拉伸过程中会导致幅宽变窄, 如图2所示, MD方向的张力, 会使CD方向产生幅宽变小的趋势, 为了抵抗这种趋势, 会产生两侧向外的应力, 该应力处于一个不平衡的状态, 与另一基材复合后, 由于力处于不平衡状

收稿日期: 2019-06-04

修回日期: 2019-08-11

作者简介: 邱尚煌, Email: qsh354@qq.com

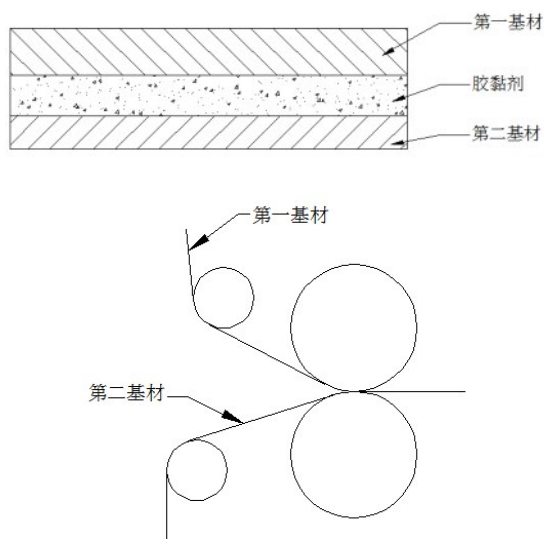


图 1 复合材料结构示意图及复合过程示意图

Fig.1 Schematic illustration of compound material and composite process

态,会慢慢释放,最终达到一种力的平衡,而应力释放会使该基材慢慢发生翘曲。

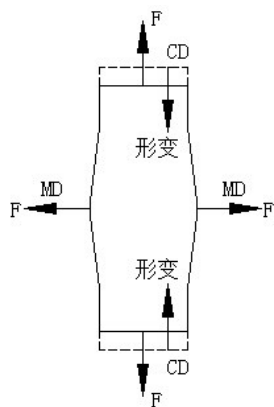


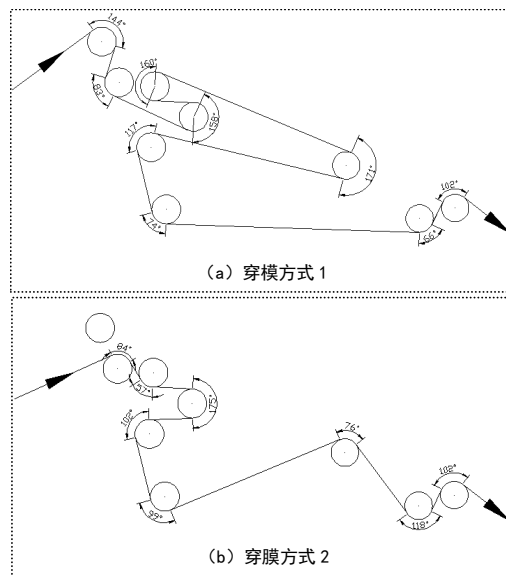
图 2 张力拉伸作用下基材受力情况

Fig.2 Force situation of base material under the effect of tension

### 1.1.2 穿膜方式影响

在相同导辊分布的情况下,采用不同的穿膜方式会有不同的包角摩擦,产生不同的摩擦接触面积,摩擦力越大其产生翘曲趋势越大。实际工程应用会以总包角来表征这一概念,具体是将工程布置图例按照 1:1 将基材走过导辊绘制成公切线,穿过某一段特定区域的导辊的所有包角相加得出总包角<sup>[8]</sup>。图 3 为采用相同一段导辊,两种穿膜方式的示意图。从图中可以得出穿膜方式 1 的总包角为 1075°,穿膜

方式 2 的总包角为 813°,可以得出方式 2 比方式 1 少了 262°的包角摩擦。因此在其他条件一致的前提下,穿膜方式 1 会产生更大的翘曲趋势。



半径为  $R$ , 则可以得出第一、第二基材形变分别为:

$$\varepsilon_1 = \frac{\frac{a}{2}}{R + b + \frac{a}{2}}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\frac{b}{2}}{R + \frac{b}{2}}$$

因此, 基材形变与橡胶辊半径成反比关系, 越大的辊径其对复合基材的形变越小, 反之越大, 这也可以解释为什么卷芯内部比卷芯外部翘曲严重。

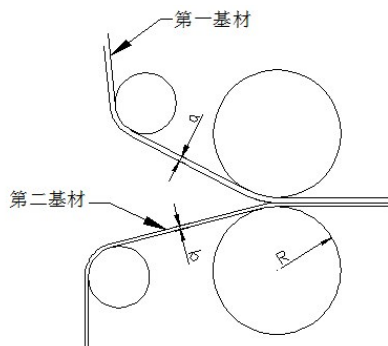


图5 辊曲率的应变示意图

Fig.5 Schematic illustration of effect of roll curvature on deformation

### 1.2.2 导辊导入位置影响

图6为导辊导入位置对材料翘曲的影响, 其中假设图示基材为第二基材。图6(a)为合格的基材导入位置, 若导入导辊存在平行度问题, 如图6(b)所示的不平行的情况(为表示清楚采取夸张画法, 实际生产中不平行问题肉眼较难观察), 则会在左边松、右边紧, 于是基材右边便存在拉伸过渡, 基材左边造成松弛, 因此按照这种导入位置生产的产品会产生右边单边往第二基材方向翘曲, 左边往第一基材方向翘曲。实际发生的不平行问题一般生产人员肉眼较难发现, 需定期由专业的工程技术人员对导辊做平行度的测量<sup>[9]</sup>。

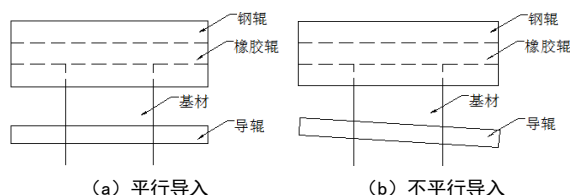


图6 导辊导入位置示意图

Fig.6 Schematic illustration of guide roll position

## 1.3 原材料因素

### 1.3.1 基材热收缩

薄膜加工时, 一般会将其加热至高聚物的高弹

态温度以上, 采用拉伸或淋膜等方式对其进行拉伸, 大分子链就会沿外力作用方向, 进行有规则的定向排列, 之后对薄膜进行冷却收卷, 分子链段的定向被冻结起来。当进入下游复合材料生产时, 处于第一放卷的基材, 涂胶进入烘箱后重新对薄膜进行加热, 由于分子链段的活动, 高聚物有一种恢复其拉伸前尺寸的趋势(记忆功能), 被拉伸定向的薄膜产生应力释放, 已定向的薄膜发生解取向, 薄膜就沿原来拉伸方向收缩恢复到初始尺寸, 产生热收缩性<sup>[10]</sup>。

实际生产过程往往在工艺上对烘箱温度进行调整来控制基材热收缩, 但本质影响因素是在基材上。因此对应涂布工艺参数, 则体现为温度越高热收缩越大, 基材翘曲趋势表现越严重; 车速越慢热收缩越大, 基材翘曲趋势表现越严重。当与第二基材进行复合时, 二者因为不同的收缩量从而产生复合成品的翘曲(往第一基材方向翘)。

实际生产结合胶黏剂溶剂挥发及固化的设计, 需要寻找到烘箱温度的平衡点。

### 1.3.2 胶黏剂影响

图7为三种基材在涂布过程中的干燥曲线, 实线表示溶剂含有率曲线, 虚线表示基材升温曲线<sup>[11]</sup>。可以看出溶剂含有率呈现极速下降后趋于稳定, 而基材温度先平稳后迅速上升, 对于任意基材此趋势是一样的。假设生产过程中胶黏剂体系中溶剂沸点偏低, 如使用乙酸甲酯之类的单一溶剂, 会使得整体的曲线往左移, 基材在高温段的热量没有被溶剂挥发吸热带走, 会使基材温度迅速上升, 造成基材热收缩。最合理的溶剂设计应该是有低沸点、中沸点、高沸点的梯度设计, 保证在中、中高、高温段均有溶剂参与挥发, 可以及时带走基材上的热量, 同时对于胶层内部的溶剂扩散有一个缓慢均匀的过程。

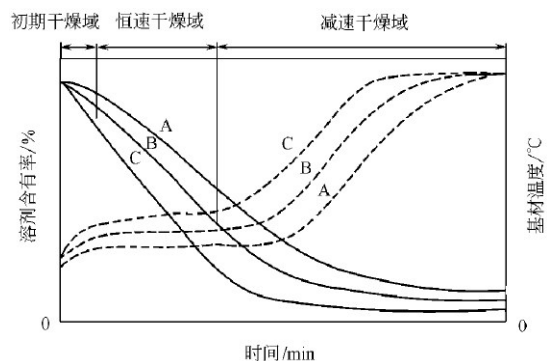


图7 三种基材的干燥曲线

Fig.7 Drying curves for three base materials

复合膜的胶黏剂涉及热固化、光固化或二者的混合体系,一般热固化的工艺收卷下线后,如果此时工艺调整为翘曲合格,那么进入熟化后,胶黏剂反应过程中会产生收缩,导致胶黏剂最终往第一基材方向翘曲,因此最佳的下线品质应该做成第二基材方向微翘曲<sup>[12]</sup>。

至于光固化体系直接在线固化,同样也会在固化后产生一定的收缩,但后续不进一步反应,因此对于该体系胶黏剂,应该将工艺调整为不翘曲下线。

由于溶剂体系和胶黏剂熟化反应的影响,因此涂层厚度越厚,往第一基材方向翘曲的趋势越严重,根据溶剂体系设计和胶黏剂熟化反应的描述,可以推断涂层越厚则收缩趋势加强,其翘曲越严重。

#### 1.4 其他

虽然以上陈述为引起翘曲的主要因素,甚至是源因素,但是产品从原材料到最终的成品,引起翘曲的因素还包含很多因素,如烘箱温度、烘箱排风、收卷方向、管芯尺寸、冷却系统、熟化温度、环境温湿度等,均会影响到产品的最终翘曲。

## 2 结 语

在新材料领域,对于模切后加工工段,对材料翘曲均有一定的要求,否则产生的生产效率低下、尺寸不对、位置偏移等一系列问题均会影响生产。另外一方面,在实际生产过程中,翘曲因素的产生和解决往往更加复杂,工艺技术人员和生产人员需要结合现场,多做总结,排除各项原因,做出最优的方案。

#### 参考文献

- [1] 吕建波. PET 光学膜紫外光固化硬涂层的制备[J]. 影像科学与光化学, 2011, 29(6): 449-455.  
Lu J B. The preparation of UV curable hard coatings on PET [J]. Imaging Science and Photochemistry, 2011, 29 (6): 449-455 (in Chinese).
- [2] 陈洪立, 焦晓宁, 柯鹏. 取向增强复合锂离子电池隔膜 的制备及其性能[J]. 纺织学报, 2018, 39(7): 8-14.  
Chen H L, Jiao X N, Ke P. Preparation and properties of orientation reinforced composite separator for lithium-ion battery [J]. Journal of Textile Research, 2018, 39(7): 8-14 (in Chinese).
- [3] 张艳, 王俊环. 背板用聚氨酯胶黏剂性能研究[J]. 信息记录材料, 2018, 19(7): 47-50.  
Zhang Y, Wang J H. Study on properties of polyurethane adhesive for backsheet [J]. Information Recording Materials, 2018, 19(7): 47-50 (in Chinese).
- [4] 李福球, 林松盛, 林凯生. 离子镀硬质装饰膜的发展与现状[J]. 电镀与涂饰, 2016, 15: 817-822.  
Li F Q, Lin S S, Lin K S. Development and current status of decorative ion-plated hard films [J]. Electroplating & Finishing, 2016, 15: 817-822 (in Chinese).
- [5] Grosshans H, Papalexandris M V. Numerical study of the influence of the powder and pipe properties on electrical charging during pneumatic conveying [J]. Powder Technology, 2017, 315: 227-235.
- [6] 肖桂花, 李好义, 李小虎, 等. 流体微分静电纺丝喷头设计的研究进展[J]. 纺织学报, 2014, 35(12): 153-158.  
Xiao G H, Li H Y, Li X H, et al. Research progress of fluid differential electrostatic spinning nozzle design [J]. Journal of Textile Research, 2014, 35(12): 153-158 (in Chinese).
- [7] 邱尚煌, 白梅, 李刚, 等. 涂布生产中的静电隐患区域及预防[J]. 上海纺织科技, 2019, 12: 35-38.  
Qiu S H, Bai M, Li G, et al. Potential electrostatic hazard areas and preventive measures in coating production process [J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2019, 12: 35-38.
- [8] 齐淑娥. 拉伸弯曲矫直过程中带钢对弯曲辊包角的理论计算[J]. 河北冶金, 2014, 2: 17-20.  
Qi S E. Theoretical Calculation for Contact Angle of Strip Steel Around Bending Roll in Tension, Bending and Straightening [J]. Hebei Metallurgy, 2014, 2: 17-20 (in Chinese).
- [9] 邱尚煌, 白梅, 张彦, 等. 涂布过程起皱原因分析及对策[J]. 棉纺织技术, 2018, 46(12): 71-74.  
Qiu S H, Bai M, Zhang Y, et al. Cause analysis and countermeasure of creping in coating process [J]. Cotton Textile Technology, 2018, 46(12): 71-74 (in Chinese).
- [10] 杨智能, 张龙, 李志刚. 塑料薄膜热收缩率测试方法[J]. 机械, 2012, 8: 70-73.  
Yang Z N, Zhang L, Li Z G. The testing method of heat shrinkage of plastic film [J]. Machinery, 2012, 8: 70-73 (in Chinese).
- [11] 杨玉昆, 吕凤亭. 压敏胶制品技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社. 2004: 411-422.
- [12] Wisnom M R, Gigliotti M, Ersoy N. Mechanisms generating residual stresses and distortion during manufacture of polymermatrix composite structures [J]. Composites Parts A: Applied Science and Manufacturing, 2006(37): 522-529.