

# 红外与热风组合干燥在水溶胶流涎机设计中的应用

郝喜海, 吴叙锐

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412008)

**摘要:** 系统分析了水溶胶干燥成膜过程与机理, 探讨了红外线在水溶胶固化成膜中的作用, 提出在水溶胶流涎机设计中采用红外与热风组合干燥设计, 通过生产实际应用证明采用红外与热风组合干燥设计可有效提高水溶胶干燥固化成膜速度。

**关键词:** PVA 水溶膜; 流涎; 红外与热风; 传热与传质

**中图分类号:** TK172

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2007)02-0008-04

## The Application on Infrared Ray-Hot Air Drying in Designing PVA Water-Soluble Glues Salivating Machinery

Hao Xihai, Wu Xurui

(College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

**Abstract:** The drying filmforming process and mechanism about PVA water-soluble glues are analyzed systemically, then, it discusses the functions of infrared ray on solidify filmforming of the PVA water-soluble glues, and brings forward a new method of infrared ray-hot air drying in its salivating machinery. In practical production, infrared ray-hot air drying method is proved to be a better way in increasing the speed of film forming PVA water-soluble glues.

**Key words:** PVA water-soluble film; salivating; infrared ray-hot air; heat transfer and mass transfer

### 0 前言

水溶性聚乙烯醇薄膜(简称PVA水溶膜)具有许多良好的性能,如良好的透明度和光泽性、非带电性、较大的拉伸强度和撕裂强度、良好的耐油性能、极好的气体阻隔性、热封性等。同时因其具有水溶性和生物降解性,因而在生产生活中的应用十分广泛,如包装、水转移印刷、刺绣、医院用的洗涤袋等等。

近年来国内PVA水溶膜的生产规模越来越大,应用领域越来越广泛,国内消费量和出口量双重骤增,对生产设备的效率要求也越来越高。

在溶液流涎法生产水溶膜中,采用钢带流涎的水溶胶流涎机是目前的主要生产设备,实际生产中使用的水溶胶流涎机一般是采用单一热风干燥成膜,参考其它同类干燥设备,依靠经验设计制造的,普遍存在

生产能力低,能耗高等亟待解决的问题。为了适应市场与生产对水溶胶流涎机的要求,本文系统分析了水溶胶的成膜过程与机理,提出采用红外与热风组合干燥设计来解决以上问题,通过理论分析与实验室试验验证,进而在生产中实际检验证明,采用红外与热风联合干燥设计可有效地提高水溶胶流涎机的生产效率,降低能耗和成本。

### 1 水溶胶干燥成膜过程与机理分析

#### 1.1 水溶胶干燥成膜过程

流涎法生产水溶性PVA薄膜是以聚乙烯醇为主要原料,添加各种助剂,如表面活性剂、增塑剂、防粘剂等。其工艺是先将原料制成固含量为13%~18%的水溶胶溶液,通过流涎装置将PVA水溶胶液流涎到钢

收稿日期: 2007-02-09

基金项目: 中国包装总公司科技开发重点项目(包科[2002]27401)

作者简介: 郝喜海(1962-),男,吉林东丰人,湖南工业大学教授,主要从事包装材料与包装机械方面的教学与研究。

带上,送入干燥箱用热风干燥到含水量(湿基)20%~25%,成膜剥离,再经压纹装置热压纹后干燥,最后收卷得到含水量(湿基)为15%~20%的成品膜。工艺中最主要的部分是干燥固化成膜,实际生产中主要采用循环热空气系统干燥,并辅以压纹加热成膜后干燥。其生产过程示意图如图1所示。

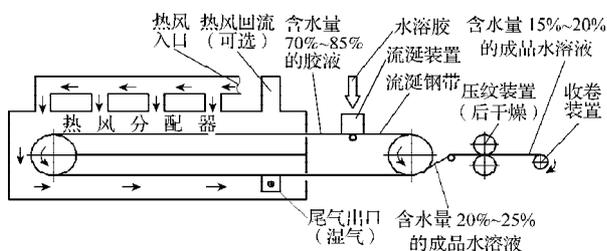


图1 流涎法生产水溶性塑料包装薄膜生产过程示意图

Fig. 1 The production process diagram of soluble plastic film by band coating

## 1.2 水溶胶干燥固化成膜机理分析

水溶胶干燥固化成膜过程实际上是一个水分迁移过程,即水溶胶中50%~60%的水分从胶液中迁移至空气中,当胶液中的水分降至20%~25%时,胶液固化成膜,可以从钢带上剥离。

在这种水分迁移过程中,其直接驱动力就是热量。胶层的干燥过程实质是传热和传质相结合的过程,作为干燥介质的热空气将热能传到水溶胶表面,再由表面传到水溶胶内部,这是两步传热过程<sup>[1]</sup>。水分从水溶胶内部以液态或气态透过水溶胶传到表面,然后通过水溶胶表面的气膜扩散到空气流的主体,这是两步传质过程。它包含胶层内部的传热传质和胶层外部的传热传质。

### 1.2.1 胶层外部传热和传质

热空气作为干燥介质在干燥器中通常处于湍流状态,可以认为,外部传热和传质的阻力都集中在成为气膜的边界层中厚度为 $\delta$ 的范围内,图2示出外部传热和传质。外部传热是在边界层中,由于存在速度梯度,所以在距胶层表面不同的距离处造成不同的温度降,即出现温度梯度,这是传热的推动力。外部传质也是对流传质,表面水蒸气分压 $P_s$ 与空气体相中水蒸气分压 $P$ 之差( $P_s-P$ )是传质的推动力。

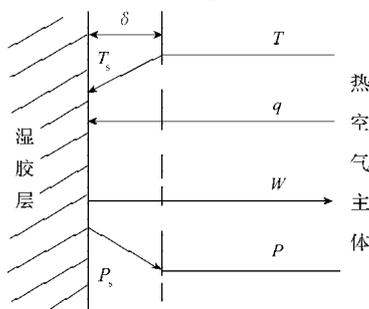


图2 干燥的外部传热和传质  
Fig. 2 Outside heat and mass transfer

### 1.2.2 胶层内部传热和传质<sup>[1]</sup>

胶层干燥过程中,加热介质将热量传给胶层表

面,使其温度升高,表面的水分吸收热量后动能增加,最后蒸发而脱离胶层表面。

在表面受热的同时,胶层本身又将热量自表面以传导的形式向温度较低的胶层中心传递,并随着这种传递的进行,能量逐渐减弱,即温度逐渐降低,这样,在胶层内部也存在一个由中心指向表面的温度梯度,处在不同温度梯度下的水分具有不同的迁移势能。干燥初期,水分均匀分布于胶层中,随着干燥的进行,表面水分逐渐减少,从而形成了自胶层内部到表面的湿度梯度,促使水分在胶层内部移动,湿度梯度越大,水分移动就越快。

采取任何干燥方式,这两种梯度场均存在于胶层内部,故水分迁移应是两种推动力共同作用的结果。

### 1.2.3 固化成膜过程的主要影响因素

干燥的目的在于除去胶层中的水分,而胶层中的水分首先需要通过胶层内部扩散至胶层表面,然后再由胶层表面汽化脱除,所以表面汽化与内部扩散的速率共同决定了干燥的速率。

不论采用哪一种脱水干燥方法,将热量传递给胶层并促使胶层组织中水分向外转移是胶层脱水干燥的基本过程,胶层干燥过程中既有热的传递也有质(即水分)的外移。为此,湿热的转移就是胶层干燥成膜基本原理的核心问题。主要因素有<sup>[1]</sup>:

#### 1) 温度

传热介质和胶层间温差愈大,热量向胶层传递的速率也愈大,水分外逸速度加快。空气温度愈高,在饱和前所能容纳的蒸汽量则愈多,显然,提高胶层附近空气温度将有利于容纳较多的水分蒸发量,同时接触的空气量愈大,吸收水分蒸发量也就愈多。

#### 2) 空气流量

提高空气流速,不仅因热空气所能容纳的水蒸气量将高于冷空气而吸收较多的蒸发水分,还能及时将聚积在胶层表面附近的饱和湿空气带走,以免阻止胶层内水分进一步蒸发,同时还因和胶层表面接触的空气量增加,而显著地加速胶层中水分的蒸发。因此,空气流速愈快,脱水也愈迅速。

#### 3) 空气湿度

脱水时,空气愈干燥,脱水速度也愈快,近于饱和的湿空气进一步吸收蒸发水分的能力远比干燥空气差。胶层的水分下降也由空气湿度所决定,胶层的水分始终要和其周围空气的湿度处于平衡状态。如低于空气湿度则胶层将进一步脱水,反之,则胶层不再脱水,反而从空气中吸取水分。

## 2 红外与热风组合干燥设计理论分析

从上面的分析可知,水溶胶固化成膜速度由其内部及外部的传热和传质速度决定,边界层是关键,提

高热风温度(或提高系统温度)及提高空气流量均可以加快水溶胶内部及外部的传热和传质过程,从而提高水溶胶成膜固化速度。实际生产中单纯提高热风温度不仅大大增加能耗,浪费能源,而且易造成钢带变形进而使薄膜厚度不均,直接影响成膜质量,设备寿命下降。而过度提高空气流量会使风的流速加快,这样热风作用时间缩短,减少热交换;传热和传质速度跟不上,也会大大增加能耗,浪费能源。同时,风流速的增加,造成湿膜表面扰动加大,直接影响水溶胶成膜固化质量。

综合考虑以上因素,提高水溶胶固化成膜速度最理想的方法,是在不提高干燥系统中热风温度及空气流量的情况下提高水溶胶湿膜边界层温度,加快表面汽化与内部扩散的速率,这样可以有效提高其内部及外部的传热和传质速度,从而有效提高水溶胶固化成膜速度。因此,采用红外与热风组合干燥设计是一个理想的选择。

### 2.1 红外线在水溶胶固化成膜中作用机理分析

红外线是波长约为  $0.76 \sim 1000 \mu\text{m}$  的光波,其最显著的特性是热效应大,能透过浓雾和较厚的气层。红外线通过胶层时部分被吸收转变为热能<sup>[2]</sup>。

在水溶胶流涎机生产中,水溶胶通过涂布到镜面不锈钢带上固化成膜,红外线光源辐射出去的红外线照射涂布在不锈钢板上的水溶胶,遵守反射、折射和吸收定律,其红外线穿过膜层的光路如图3所示。红外线束  $\alpha$  穿过空气层到达空气与胶层的介面  $A$ ,

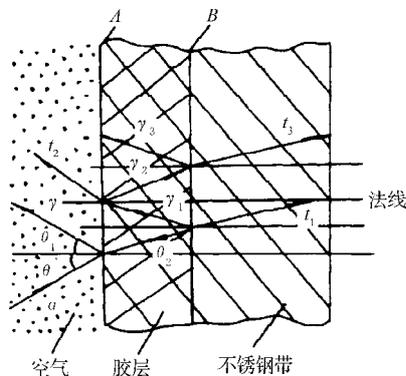


图3 红外线穿过胶层的光路  
Fig. 3 The path of the light in the glue

一部分被胶层选择性吸收,一部分光线

$\gamma$  反射到空气中,一部分光线  $t$  折射到胶层中再被胶层选择性吸收,其余部分射到胶层与不锈钢带的界面  $B$  上,一部分光线被不锈钢带选择性吸收,一部分光线  $\gamma_1$  反射到胶层中再次被胶层选择性吸收,另一部分光线  $t_1$  折射到不锈钢带中被选择性吸收……如此继续下去,经多次反射、折射、吸收后,红外线的能量在胶层和不锈钢带中基本上被充分消耗<sup>[3]</sup>。

综合以上分析可知,红外线可穿透到被干燥胶层的内部,造成胶层内部温度升高,有利于水分迁移,但更重要的是红外线大部分作用于边界层,而水溶胶固化成膜过程中外部传热和传质的阻力都集中在成为气膜的边界层中,这样通过红外线的辐射作用可有效地

消除边界层中的阻力气膜,加快水溶胶固化成膜过程中外部传热和传质过程。

需要说明的是,红外线辐射只具有单纯的加热作用,必须同时配合热风对流,才可得到满意效果。

### 2.2 红外与热风组合干燥水溶胶固化成膜中传热和传质分析

水溶胶钢带流涎成膜条件下,薄膜表面的传热与传质机理如图4所示。

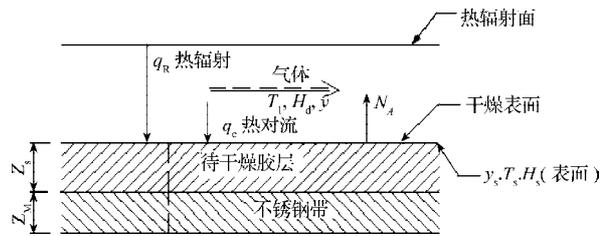


图4 干燥高分子/水溶液薄膜表面传热与传质图  
Fig. 4 Heat and mass transfer in drying surface of polymer/soluble film

设PVA水溶液薄膜厚度  $Z_s$ , 薄膜表面温度  $T_s$ , 承载钢带的厚度为  $Z_m$ , 空气温度  $T$ , 红外线加热器表面温度  $T_R$ , 则PVA水溶胶膜层所接受的总传热速率可表示为:  $q = q_c + q_R$ 。

式中,  $q_c$  是对流所造成的传热能量,可表示为:

$$q_c = h_c A (T - T_s), \quad (2)$$

其中  $h_c$  为空气的对流传热系数,单位为  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;

$q_R$  是因红外线辐射热所产生的传热能量,可表示为:  $q_R = h_R A (T - T_s)$ 。

其中  $h_R$  为辐射传热系数,单位为  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

比较式(2)与式(3)可知,由于通常情况下红外线加热器表面温度  $T_R$  远高于热风温度  $T$ ,红外线加热的传热效率必然远高于热风。

下面讨论PVA水溶胶膜层表面蒸发的传质现象,

其传质通量可表示为<sup>[3]</sup>:  $N_A = k_y \frac{M_A}{M_B} (H_s - H)$ ,

式中:  $N_A$  是传质速率;  $k_y$  是传质系数;  $M_A$  为水的分子重;  $M_B$  为空气的分子重;  $H$  为空气中的湿度。而要将这些水分蒸发的热量需求为:

$$q = M_A N_A \lambda_s A. \quad (5)$$

其中  $\lambda_s$  为水蒸发的潜热。将前面的式子代入整理,可得到下面的干燥速率方程式 ( $X_c$  为干燥速率,):

$$X_c = \frac{q}{A \lambda_s} = \frac{h_c (T - T_s) + h_R (T_R - T_s)}{\lambda_s}. \quad (6)$$

又由式(6)可知,热风/红外组合干燥中增加了  $h_R (T_R - T_s) / \lambda_s$  (红外线辐射热所产生的传热效应)项,由于  $T_R$  远高于  $T$ ,因此红外线辐射热所产生的传热效应对传质速率影响更大,热风/红外组合干燥必将有效地提高干燥速率。

### 3 红外与热风组合干燥设计在水溶胶流涎机设计中的实际应用

本试验是在由湖南工业大学包装机械研究所研发的SL-1000型水溶胶流涎机上进行的。该机主要技术参数为: 1)薄膜厚度: 0.02~0.2 mm, 幅宽 $\leq$ 1 000 mm; 2)生产速度: 3~6 m/min; 3)燃油式热风干燥成膜, 平均燃油量约: 10 kg/h; 4)烘箱长度 15 m, 流涎钢带长 34.5 m; 5)最大平均风速 2.8 m/s。

按以下条件生产: 1)水溶胶固含量: 15%; 干膜厚度: 0.03 mm; 宽度 1 100 mm; 水溶胶温度: 60  $^{\circ}$ C; 热风温度: 70  $^{\circ}$ C; 5)平均风速(流量): 2.5 m/s; 6)干膜含水量: 17%。

未加装红外装置采用单一热风干燥的水溶胶流涎机连续生产, 生产速度最高达到 5~5.5 m/min。

根据试验需要在SL-1000型水溶胶流涎机干燥箱内原热风分配器的空余位置, 加装9根可由温控器各自单独控制的石英红外加热管(每根 2 kW)和反光罩, 分3组, 分别位于烘箱的前、中、后位置(如图5所示)。

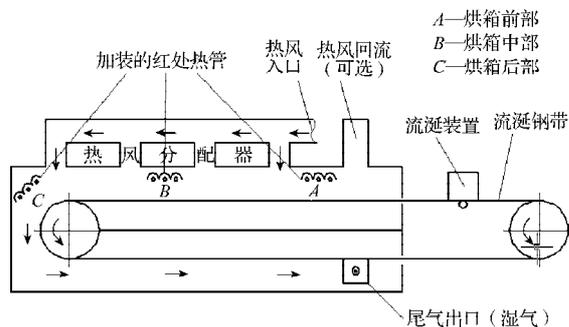


图5 红外加热管安装位置示意图

Fig. 5 Diagram of the position of Infrared lamp

在红外与热风组合干燥下水溶胶流涎机以上述相同的条件连续生产, 生产速度最高可达到 7 m/min, 水溶胶固化成膜速度提高了 20% 以上。由于加装 9 根石英红外加热管, 每小时平均增加电能消耗 12 kWh, 但

石英红外加热提高了整个干燥系统温度, 使维持热风温度的燃油量消耗下降至 8 kg/h, 按当前的市场价格计算, 两者大致相抵, 就是说不增加能源成本的情况下, 采用红外与热风组合干燥使水溶胶固化成膜速率提高了 20% 以上。

### 4 结论

通过以上的理论分析与实际生产验证, 我们可以得出以下结论:

1) 水溶胶固化成膜过程是一个传热和传质相结合的过程, 传热和传质的速率决定了水溶胶固化成膜的速率;

2) 水溶胶固化成膜过程中的传热和传质的主要影响因素是温度和风流量, 温度越高, 风速越快则传热和传质过程越快;

3) 水溶胶固化成膜过程中的传热和传质分为内部和外部两种, 热空气作为干燥介质在干燥器中通常处于湍流状态, 可以认为外部传热和传质的阻力都集中在成为气膜的边界层中;

4) 采用红外与热风组合干燥可以有效降低边界层中外部传热和传质的阻力, 从而有效地提高水溶胶固化成膜的速率;

5) 水溶胶流涎机采用红外与热风组合干燥设计, 在实际生产中的运行结果证明, 在不增加能源成本的情况下, 采用红外与热风组合干燥使水溶胶固化成膜速率提高了 20% 以上。

### 参考文献:

- [1] 柯亨 E D. 现代涂布干燥技术[M]. 赵伯元译. 北京: 中国轻工业出版社, 1999:1-50.
- [2] 潘永康. 第九届国际干燥会议简介[R]. 化工装备技术, 1994, 15(6):33-36.
- [3] 刘弘仁. 红外线在狭缝式涂布干燥上的应用[D]. 台湾新竹: 国立清华大学, 1999.