

# 聚酰胺酸液膜干燥动力学特性及 数学模型建立

贾传志<sup>1</sup>, 潘艳秋<sup>1\*</sup>, 胡知之<sup>2</sup>, 赵洪斌<sup>2</sup>, 刘岩<sup>2</sup>, 王成宇<sup>1</sup>

(1.大连理工大学化工学院, 辽宁大连 116024; 2.辽宁科技大学化学工程学院, 辽宁鞍山 114051)

**摘要:**基于PAA液膜流延段干燥工艺的参数优化的需要,开展了相关的实验及建模研究。在设计加工的实验装置上进行PAA液膜的热风干燥实验;根据得到的干燥曲线和干燥速率曲线分析溶液干燥特性,并建立PAA液膜热风干燥数学模型。结果表明,PAA液膜的干燥特性符合非多孔性物料的干燥特点,可分为恒速段和降速段且恒速段较短;风温升高、风量增大均可使干燥速率增大、临界含水量增大、干燥时间缩短,风温升高使平衡含水量降低;引入7种常用的干燥模型对实验数据拟合分析,结果表明Verma方程最适合描述PAA液膜的干燥过程,拟合出的湿分比预测模型可用于PAA液膜干燥过程的动力学描述。本研究为PI薄膜工业化生产中流延段的工艺参数优化及流延炉能效提升提供理论依据。

**关键词:**聚酰胺酸;热风干燥;干燥特性;干燥模型;聚酰亚胺

中图分类号:TQ028.6

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)01-0193-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.01.032

## Drying kinetics of polyamide acid film and establishment of mathematical model

JIA Chuan-zhi<sup>1</sup>, PAN Yan-qiu<sup>1\*</sup>, HU Zhi-zhi<sup>2</sup>, ZHAO Hong-bin<sup>2</sup>, LIU Yan<sup>2</sup>, WANG Cheng-yu<sup>1</sup>

(1.School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2.School of Chemical Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

**Abstract:**This work investigated the drying characteristics of the PAA liquid films and developed a mathematical model to meet the requirement for the parameter optimization in the casting stage. Hot air drying experiments were conducted using a self-developed experimental setup. Drying curves and drying rate curves were obtained and analyzed to characterize the solution drying behavior, and a mathematical model for the hot air drying process of PAA liquid films was established. The results show that the drying characteristics of PAA liquid films align with those of non-porous materials, with the process divided into a constant-rate period and a falling-rate period, where the constant-rate period is relatively short. The increasement of air temperature or the enhancement of the drying rate by airflow raise the critical moisture content and shorten the drying time, while higher air temperatures lead to a lower equilibrium moisture content. Furthermore, seven commonly drying models were employed to fit the experimental data. The results show that the Verma equation best described the drying process of PAA liquid films. The moisture ratio prediction model derived from this equation can be used to describe the drying kinetics of PAA liquid films. In this work, a theoretical basis was provided to optimize the process parameters of the casting stage and improve the energy efficiency of the casting furnace in the industrial production of PI films.

**Key words:** polyamide acid; hot air drying; drying characteristic; drying model; polyimide

聚酰亚胺(PI)是一种耐高温特种工程塑料,具有良好的机械性能、化学稳定性、热稳定性,以及优异的电绝缘和隔热性能,被誉为“21世纪最有希望的工程塑料”之一<sup>[1]</sup>。其中PI薄膜是最早实现商业化、市场最大的PI产品,具有优良的力学性能、介电性能、优异的耐高低温和耐辐射等特性,被誉为“黄金薄膜”<sup>[2-3]</sup>。

PI薄膜的成型制备方法主要有流延法、浸胶法和挤出拉伸法等<sup>[4]</sup>。其中流延法是早期国内企业制造PI薄膜最主流方式<sup>[5]</sup>。该法先由二胺类和二酐类反应生成PI的前驱体聚酰胺酸(PAA)溶液,再将溶液在支持体上涂布或流延,经过干燥蒸发掉大

部分溶剂,形成自支持性PAA凝胶薄膜,再经过酰亚胺化反应后转换为PI薄膜。流延法生产的PI薄膜均匀性好表面平整,可以连续化生产;缺点是对工艺条件要求苛刻、设备造价较高等。目前,国内规模PI企业已经完成了从流延法到流延双向拉伸法的过渡,流延拉伸法已经成为高性能PI薄膜的主流生产工艺。采用流延双向拉伸成型工艺制备PI薄膜时,宏观制膜、高分子链凝聚态转变和分子基团间化学反应3个过程是同时进行的。PI薄膜经过双向拉伸成型后,其物理性能、电气性能和热稳定性得到提升<sup>[6]</sup>。

在PI薄膜的连续化生产过程中,PAA液膜的

收稿日期:2025-03-19;修回日期:2025-10-21

作者简介:贾传志(2000-),男,硕士生;潘艳秋(1982-),女,博士,教授,研究方向为智能化工过程建模、化工分离过程优化与模拟、工业油水及气体混合物膜分离过程研究等,通讯联系人,yqpan@dlut.edu.cn。

干燥工序是溶剂脱除与亚胺化反应的关键控制节点,其中涉及的多种参数如干燥温度、干燥时间、薄膜厚度等会显著影响薄膜的结构和质量<sup>[7]</sup>。王伟等<sup>[4]</sup>发现干燥 PAA 液膜时温度越高,PAA 膜的拉伸强度越大,越不利于拉伸;赵伟涛等<sup>[8]</sup>研究了 PAA 液膜的干燥条件对 PI 薄膜粗糙度和拉伸强度的影响,发现升温温度梯度变化较大时会导致薄膜机械性能降低;Bulatov 等<sup>[9]</sup>研究干燥环境对制备 PI 涂层的影响,结果在氢气环境中干燥会增强涂层的强度、提高耐热性。Kingsley 等<sup>[10]</sup>研究电喷雾沉积法制备 PI 薄膜时干燥条件的影响,发现物料和溶剂一起输运得到的膜比无溶剂时有更高的介电强度和更高的光学透明度;Lin 等<sup>[11]</sup>在干燥过程对 PAA 液膜进行了预亚胺化处理,发现最终薄膜的拉伸强度、拉伸模量和断裂伸长率都随着预亚胺化程度的增加而增大。姚红等<sup>[12]</sup>研究了 PAA 液膜干燥升温过程等因素对薄膜表面形貌的影响,发现多段升温比一段升温得到的膜表面粗糙度更低。

综上所述,目前关于 PAA 干燥过程的研究多聚焦于最终薄膜的性能,对于 PAA 液膜干燥动力学的研究报道较少。国内现有 PAA 液膜干燥生产工艺参数尚缺乏理论和干燥动力学数据的支撑,对涂膜干燥过程中传质动力学机制的系统研究明显滞后<sup>[13]</sup>。本研究通过自主设计加工的热风干燥实验系统开展创新性探究,考察关键热力学参数对 PAA 液膜干燥特性的影响;基于实验数据,构建 PAA 液膜热风干燥动力学模型,阐明干燥过程中的动态规律与作用机理,为 PI 薄膜工业化生产中 PAA 液膜干燥工艺参数优化及干燥设备能效提升提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

PAA 溶液由辽宁科技大学提供,溶剂为 DMAC,固含量为 17%,黏度为 61 000 mPa·s(25℃), $M_w$  为 35 W,PDI=1.60。

### 1.2 实验装置与仪器设备

根据生产实际要求,设计 PAA 液膜干燥实验装置,如图 1 所示。该实验装置设置垂直、水平、混合方向等不同风向的进风装置,采用先进的实时测量装置实时测定并记录物料质量、干燥室内有机溶剂含量、温度和压力、流量等参数。

主要仪器:涡街流量计(LUGB-2-N100-LZY,大连新概念测控技术有限公司);离心风机(9-19-4A,

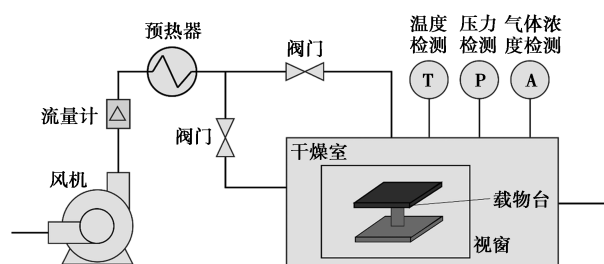


图 1 干燥动力学装置示意图

洲洲机电股份有限公司);压差传感器(三木设备有限公司);重量传感器(L6B-H,中航电测仪器股份有限公司);有机溶剂检测器(SD-D58,日本理研计器株式会社)。

### 1.3 实验方法

分别在一定风温和风量条件下,对 PAA 液膜进行热风干燥实验,考察风温、风量对过程的影响。

实验时打开各仪器,调节阀门使干燥室中的风向恒定;将干燥室内的风温、风量等条件调整到预定条件,并保持恒定;准备一块干燥、光滑、洁净的玻璃板,用涂膜机将事先准备好的 PAA 溶液均匀涂覆在玻璃板上;将涂有物料的玻璃板置入干燥室中的载物台上进行干燥,实时调整风机频率和加热器功率,保持实验条件恒定,实时采集干燥过程参数,至质量传感器示数基本稳定,本次干燥结束。

### 1.4 数据处理方法

#### 1.4.1 物料含湿量

在干燥过程中,湿物料的质量会随时间而变化,而绝干物料的质量保持不变,因此在分析干燥过程时,通常采用干基含湿(溶剂)量:

$$X = (m - m_c) / m_c \quad (1)$$

式中, $X$  为干基含湿量,g 湿分/g 绝干物料; $m$  为物料质量,g; $m_c$  为绝干物料质量,g。

#### 1.4.2 湿分比的计算

用湿分比(MR)衡量物料湿分含量,计算公式如下:

$$MR = (X - X_c) / (X_0 - X_c) \quad (2)$$

式中, $X_0$ 、 $X$ 、 $X_c$  分别为物料的初始、实时、平衡干基含湿量。

PAA 液膜干燥过程中会逐渐凝胶化,阻碍溶剂向表面迁移,使得部分溶剂难以蒸发<sup>[13-14]</sup>,所以平衡含湿量较难确定,且因最终含湿量较小,为方便计算,将式简化成式:

$$MR = X / X_0 \quad (3)$$

#### 1.4.3 干燥速率的计算

干燥速率定义为单位时间内在单位干燥面积上

物料的湿分质量变化:

$$U = (m_c dX)/(A dt) \quad (4)$$

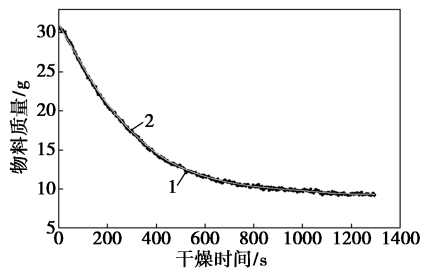
式中,  $U$  为物料的干燥速率,  $g/(m^2 \cdot s)$ ;  $m_c$  为绝干物料质量,  $g$ ;  $X$  为物料的干基湿含量;  $A$  为干燥面积,  $m^2$ ;  $t$  为干燥时间,  $s$ 。

1.4.4 干燥数据处理

实验过程中, 由于热空气的温度、湿度、流速及与物料的接触方式基本保持不变, 可视为恒定干燥条件。此条件下, 将物料的干基含湿量  $X$  对干燥时间  $t$  作图得到干燥曲线; 将物料的干燥速率  $U$  对干基含湿量  $X$  作图得到干燥速率曲线。

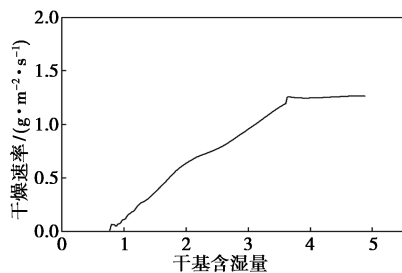
干燥速率曲线的形状对于识别和划分干燥过程的各个阶段, 以及确定恒速干燥阶段的干燥速率和临界含水量至关重要, 而这在很大程度上取决于对干燥曲线的处理方法<sup>[15]</sup>。由于实验所用质量传感器对风量变化和机器震动较敏感, 导致测得数据存在波动。在开始阶段, 溶剂蒸发量少, 物料质量较大, 因震动引起的波动影响可忽略不计, 但随着溶剂蒸发, 物料质量降低, 因震动引起的波动影响逐渐增大, 从而影响对干燥速率的计算。用平滑处理后的数据计算干燥速率可以在不改变趋势的前提下显著降低干燥速率曲线的波动, 因此需要对数据进行平滑处理, 以减小示数波动造成的影响<sup>[15]</sup>。

局部加权散点图平滑法 (LOWESS) 是一种非参数回归方法, 广泛应用于数据平滑和趋势分析<sup>[16]</sup>。图 2 为  $100^\circ C$ 、 $362 m^3/h$  条件下经平滑处理得到的



1—实验值; 2—平滑曲线

(a) 干燥曲线



(b) 干燥速率曲线

图 2 数据平滑后的干燥动力学曲线 ( $100^\circ C$ 、 $362 m^3/h$ )

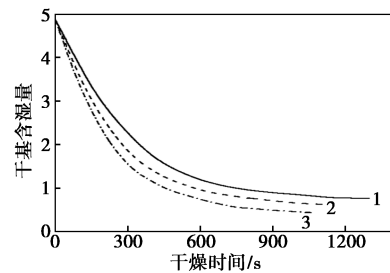
干燥曲线和干燥速率曲线, 可见处理后的曲线波动明显减小, 且趋势保持不变。其他条件下的数据做同样处理。

2 结果与分析

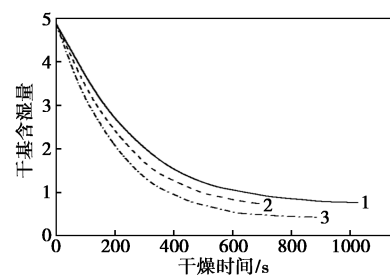
实验采用正交实验方法, 考察风温 ( $100$ 、 $120$ 、 $140^\circ C$ ) 和风量 ( $362$ 、 $486$ 、 $636 m^3/h$ ) 2 个因素对 PAA 液膜干燥过程中干燥曲线和干燥速率曲线的影响。

2.1 风温的影响

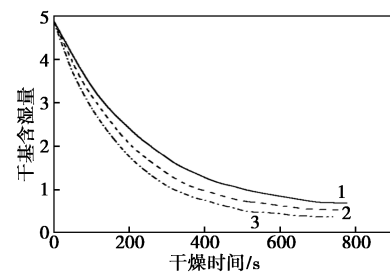
图 3 为 3 种风量条件下, 风温对 PAA 液膜干燥曲线的影响。由图 3 可知, 3 种不同风量下风温对干燥曲线的影响规律相似。如风量为  $362 m^3/h$  时, 风温为  $100$ 、 $120$ 、 $140^\circ C$  下, 在任取干燥时间为  $400 s$  时的干基含湿量分别为  $1.76$ 、 $1.42$ 、 $1.16$ , 干燥曲线到达基本恒定时对应的时间分别约为  $1200$ 、 $1100$ 、 $1000 s$ 。可见, 在任一风量下, 随着干燥时间的延长, PAA 液膜的干基含湿量逐渐下降, 干燥到一定程度后干燥曲线逐渐趋于平缓; 在  $100 \sim 140^\circ C$  范围



(a)  $362 m^3/h$



(b)  $486 m^3/h$



(c)  $636 m^3/h$

1— $100^\circ C$ ; 2— $120^\circ C$ ; 3— $140^\circ C$

图 3 风温对干燥曲线的影响

内, 风温越高, 干燥越快, 所需要的干燥时间越短, 且物料的平衡含湿量随温度的升高而降低。需要注意曲线最终接近恒定时的含湿量并非准确的平衡含湿量, 这是因为 PAA 液膜在干燥过程中表面溶剂挥发形成致密皮层, 阻碍内部湿分扩散, 导致干燥后期阶段残留湿分, 经过足够长时间湿分会逐渐排出, 最终才达到平衡含湿量<sup>[14]</sup>。为方便表达, 本文中干燥结束时的干基含湿量称为准平衡含湿量。

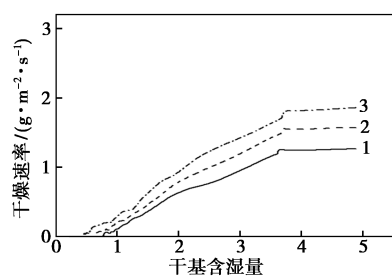
图 4 为 3 种风量条件下, 风温对 PAA 液膜干燥速率曲线的影响。从图 4 可以看出, 3 种风量条件下风温对干燥速率曲线的影响规律相似: 随着干燥的进行, 物料干基含湿量逐渐降低, 在干燥初期干燥速率保持恒定一段时间, 随后逐渐下降为零。这是由于在干燥初期, 物料表面会形成由非结合湿分构成的液膜, 此时物料表面和内部的湿分充足, 湿分由内向外迁移的速率较高, 从而维持了表面上的润湿状态, 此阶段的干燥过程类似于溶剂的表面蒸发, 干燥速率较高, 即为恒速干燥阶段。物料干燥速率开

始下降时, 便转入降速干燥阶段, 转折点对应的物料干基含湿量称为临界含湿量。根据液体扩散理论, 对于非多孔性物料, 在降速干燥阶段, 物料内部湿分向表面迁移的速率低于表面水分的蒸发速率。此时, 湿分的蒸发仅发生在物料表面, 润湿的表面开始出现干点, 且干点的数量和面积逐步增大, 干燥速率受限于物料内部湿分向外表面的扩散速率(即内扩散)。降速干燥阶段的内扩散过程较为缓慢, 并且随着含湿量的降低, 扩散速率也会逐渐减小, 物料的干燥速率逐渐降低。

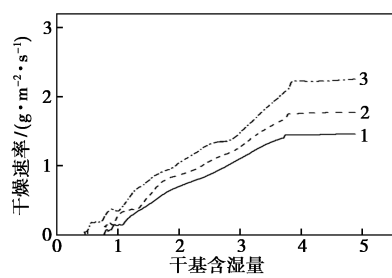
从图 4 还可以发现, 一定风量下, 物料干燥到某一相同干基含湿量时的温度越高, 物料的干燥速率越大; 最大干燥速率随温度升高而增大, 如风量 362 m<sup>3</sup>/h 时物料在 100、120、140℃ 下的最大干燥速率分别约为 1.25、1.56、1.83 g/(m<sup>2</sup>·s); 随风温升高, 临界含湿量略微增大。这可能是因为高温易导致表面加快形成致密层, 虽然表面快速干燥, 但内部湿分无法及时迁移到表面, 所以在较高含湿量时就进入降速阶段, 临界点提前出现, 使临界含湿量更高。

### 2.2 风量的影响

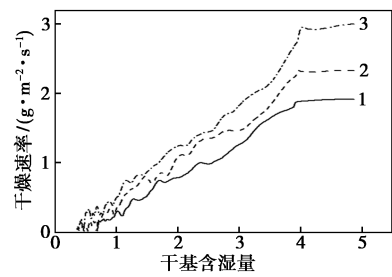
图 5 为 3 种风温条件下, 风量对 PAA 液膜干燥曲线的影响。可见, 3 种风温条件下风量对干燥曲线的影响规律相似。如风温为 100℃ 下, 风量分别为 362、486、636 m<sup>3</sup>/h 条件下, 在任取干燥时间为 400 s 处, 干基含湿量分别为 1.76、1.54、1.27, 干燥曲线到达基本恒定时所需的时间分别约为 1 200、1 000、700 s。可见, 在风量 362~636 m<sup>3</sup>/h 范围内, PAA 液膜干燥时间随风量的增大而缩短; 物料的准



(a) 362 m<sup>3</sup>/h



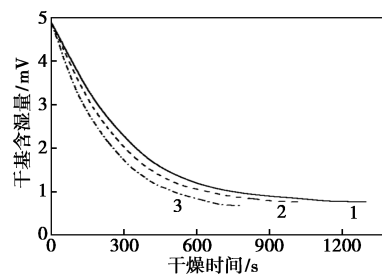
(b) 486 m<sup>3</sup>/h



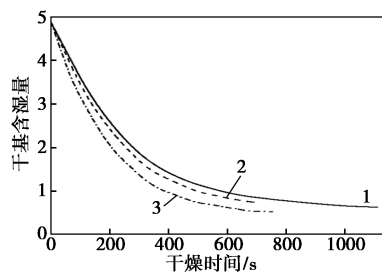
(c) 636 m<sup>3</sup>/h

1—100℃; 2—120℃; 3—140℃

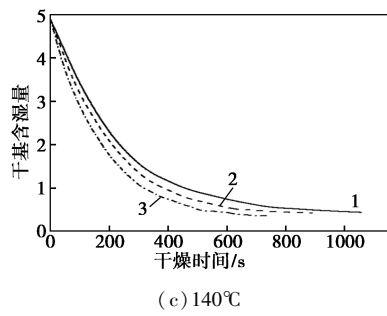
图 4 风温对干燥速率曲线的影响



(a) 100℃



(b) 120℃

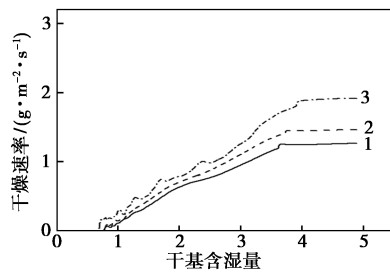


1—362 m<sup>3</sup>/h;2—486 m<sup>3</sup>/h;3—636 m<sup>3</sup>/h

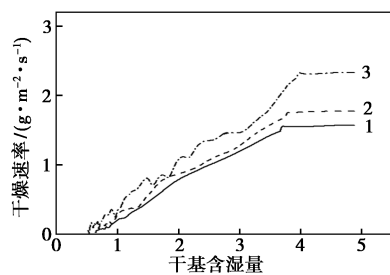
图5 风量对干燥曲线的影响

平衡含湿量随风量的增大而略有降低,这可能是随着干燥进行,物料表面会逐渐固化,导致湿分更难蒸发,风量低时因为干燥速率较小,干燥过程中表面逐渐固化,导致表面传质受阻,而风量越高干燥越快,使其能快速干燥较多湿分,反而最终的准平衡含湿量略低。

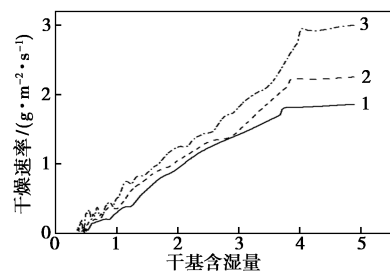
图6为3种风温条件下,风量对PAA液膜干燥速率曲线的影响。可知,3种风温条件下风量对于



(a) 100°C



(b) 120°C



(c) 140°C

1—362 m<sup>3</sup>/h;2—486 m<sup>3</sup>/h;3—636 m<sup>3</sup>/h

图6 风量对干燥速率曲线的影响

干燥速率曲线影响规律相似。可以看出,相同风温下,风量越大,干燥速率越大;随风量增大,临界含水量略微增大。这是因为风量增大导致的风速增加会提高表面水分蒸发速率(恒速阶段),而内部溶剂扩散速率不变,导致内部水分扩散无法及时补充表面水分流失,导致临界含水量增大。

### 3 PAA液膜干燥动力学模型的建立

#### 3.1 干燥模型的拟合

聚合物溶液的干燥过程涉及复杂的传热与传质机制,其机理的详细解释存在一定难度。薄层干燥模型不涉及复杂机理,因此被广泛用于描述不同物料的干燥特性<sup>[17]</sup>。通过建立干燥模型,可以对物料的干燥过程进行深入分析、预测与控制,从而为实际生产中的参数设计与优化提供指导。

将不同干燥条件下的干燥动力学曲线转变为湿分比变化曲线,选取表1中的7种薄层干燥模型对100、120、140°C和362、486、636 m<sup>3</sup>/h共9组实验条件下的实验结果进行拟合,选用决定系数 $R^2$ 、残差平方和RSS及卡方系数 $\chi^2$ 作为衡量模型拟合效果的评价指标, $R^2$ 越大、RSS和 $\chi^2$ 越小,则拟合效果越好。将每种模型在不同实验条件下的评价指标取均值,结果列于表1中,可见,Verma方程的 $R^2$ 最大、RSS和 $\chi^2$ 最小,拟合效果显著优于其他模型。

表1 薄层干燥模型拟合结果

模型	表达式	评价指标平均值		
		$R^2$	RSS	$\chi^2/10^{-4}$
Lewis方程 <sup>[18]</sup>	$MR = \exp(-kt)$	0.9752	1.381	13.480
Page方程 <sup>[18]</sup>	$MR = \exp(-kt^n)$	0.9879	0.675	6.598
修正Page方程 <sup>[19]</sup>	$MR = \exp[-(kt)^n]$	0.9879	0.674	6.583
单项扩散方程 <sup>[19]</sup>	$MR = a \exp(-kt)$	0.9784	1.205	11.740
Wang方程 <sup>[18]</sup>	$MR = 1 + bt + at^2$	0.9629	1.966	20.570
近似扩散方程 <sup>[19]</sup>	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	0.9846	0.858	8.374
Verma方程 <sup>[19]</sup>	$MR = a \exp(-gt) + (1-a) \exp(-kt)$	0.9980	0.104	1.090

注:表中, $t$ 为干燥时间,s; $k$ 、 $n$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $g$ 等参数为待定值。

#### 3.2 最适干燥模型及参数确定

对Verma方程中3个参数对风温和风量进行线性相关性检验,发现参数 $a$ 、 $g$ 分别与温度、风量均呈线性关系,参数 $k$ 约为定值。对表2中Verma方程的拟合结果进行多元线性回归分析,得出参数 $a$ 、 $g$ 、 $k$ 对风温 $T$ (°C)和风量 $V$ (m<sup>3</sup>/h)的关系式:

$$\begin{aligned} a &= 0.863\ 96 + 5.710\ 83 \times 10^{-4}T + 3.051\ 49 \times 10^{-5}V \\ g &= -0.002\ 16 + 3.291\ 67 \times 10^{-5}T + 4.670\ 89 \times 10^{-6}V \\ k &= -0.000\ 62 \end{aligned} \quad (5)$$

其中,参数  $a$  和参数  $g$  拟合结果决定系数  $R^2$  分别为 0.966 和 0.989,说明拟合效果很好。

将  $a$ 、 $k$ 、 $g$  3 个参数表达式代入 Verma 方程中,得到关联风温和风量的 PAA 液膜的湿分比预测模型:

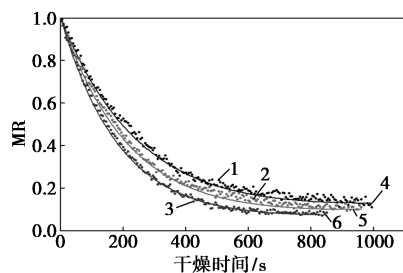
$$\begin{aligned} MR &= (0.863\ 96 + 5.710\ 83 \times 10^{-4}T + 3.051\ 49 \times \\ &10^{-5}V) \exp[-(-0.002\ 16 + 3.291\ 67 \times 10^{-5}T + \\ &4.670\ 89 \times 10^{-6}V)t] + [1 - (0.863\ 96 + 5.710\ 83 \times \\ &10^{-4}T + 3.051\ 49 \times 10^{-5}V)] \exp(0.000\ 62t) \end{aligned} \quad (6)$$

表 2 不同条件下 Verma 模型拟合结果

风温/ ℃	风量/ ( $\text{m}^3 \cdot$ $\text{h}^{-1}$ )	模型参数			评价指标		
		$a$	$k/10^{-4}$	$g/10^{-3}$	$R^2$	RSS	$\chi^2/10^{-5}$
100	362	0.9347	-6.0	2.89	0.9968	0.2133	16.47
100	486	0.9359	-6.6	3.36	0.9973	0.1500	14.65
100	636	0.9405	-6.0	4.10	0.9976	0.1004	12.95
120	362	0.9403	-6.3	3.55	0.9978	0.1330	11.99
120	486	0.9454	-6.1	3.99	0.9983	0.0674	9.63
120	636	0.9519	-6.1	4.73	0.9981	0.0846	11.25
140	362	0.9560	-6.2	4.12	0.9987	0.0778	7.37
140	486	0.9600	-6.2	4.63	0.9988	0.0627	7.06
140	636	0.9636	-6.1	5.55	0.9988	0.0504	6.83

### 3.3 数学模型的验证

为检验 PAA 液膜干燥模型的准确性,以相同原料再设置 3 组实验,通过实验数据对拟合的 Verma 方程进行验证,设定实验风量为  $609\ \text{m}^3/\text{h}$ 、风温分别为 100、120、140℃。图 7 为湿分比  $MR$  的模型预测值与实验值的对比,可见实际  $MR$  值与模拟值吻合良好,对应 3 组温度条件下模型模拟决定系数  $R^2$  分别为 0.994 3、0.993 9、0.997 7,说明预测效果良好,所建模型能够较为准确地反映 PAA 液膜热风干



1—100℃实验值;2—120℃实验值;3—140℃实验值;  
4—100℃预测值;5—120℃预测值;6—140℃预测值

图 7 MR 实验值和模型预测值随时间变化曲线

燥过程中的湿分变化规律,可用于对 PAA 液膜的干燥过程进行有效分析与预测。

## 4 结论

(1) 基于自主设计制造的热风干燥实验装置进行 PAA 液膜干燥实验,测取干燥曲线和干燥速率曲线。结果表明,风温、风量均对物料的干燥特性有显著的影响:风温在 100~140℃ 范围内,风量一定时,风温越高,临界含湿量越大,干燥速率越大,干燥结束时准平衡含湿量越小;风量在 362~636  $\text{m}^3/\text{h}$  范围内,温度一定时,风量越大,临界含湿量越大,干燥速率越大。

(2) 利用 7 种干燥模型对 PAA 液膜的干燥过程进行拟合,结果表明 Verma 方程拟合效果最好,通过多元线性回归得到实验条件下 PAA 液膜干燥过程湿分比预测方程为:

$$\begin{aligned} MR &= (0.863\ 96 + 5.710\ 83 \times 10^{-4}T + 3.051\ 49 \times \\ &10^{-5}V) \exp[-(-0.002\ 16 + 3.291\ 67 \times 10^{-5}T + \\ &4.670\ 89 \times 10^{-6}V)t] + [1 - (0.863\ 96 + 5.710\ 83 \times \\ &10^{-4}T + 3.051\ 49 \times 10^{-5}V)] \exp(0.000\ 62t) \end{aligned}$$

该模型可用于对 PAA 液膜干燥特性曲线的预测,为实际生产工艺条件的优化提供参考。

## 参考文献

- [1] Altan A, Namvari M. Multifunctional, flexible, and mechanically robust polyimide-MXene nanocomposites: A review[J]. 2D Materials, 2023, 10(4): 042001.
- [2] 董明,董霄,朱德兆,等. 聚酰亚胺发展概况与应用展望[J]. 中国塑料, 2022, 36(9): 85-95.
- [3] Liu Y Y, Wang Y K, Wu D Y. Synthetic strategies for highly transparent and colorless polyimide film[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139(28): E52604.
- [4] 王伟,来育梅,孙琳,等. 流延法制备聚酰亚胺薄膜工艺研究[J]. 塑料工业, 2006, (1): 15-17.
- [5] 耿慧彬,闫博雅,常娜,等. 聚酰亚胺气体分离膜的制备与改性研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(4): 174-182.
- [6] 马云华,秦承斌,冯勇刚,等. 聚酰亚胺薄膜流涎成型技术研究[J]. 绝缘材料, 2019, 52(3): 31-35.
- [7] Liu S Y, Chambers T G, Cutts W D. Comparison of nanostructure and nanomechanical properties of cast and air sides of polyimide films from different manufacturers[J]. Micron, 2021, 145: 103059.
- [8] 赵伟涛,邢爱,许剑,等. 高性能聚酰亚胺薄膜制备方法[J]. 信息记录材料, 2015, 16(4): 37-41.
- [9] Bulatov M I, Sosunov A V, Grigorev N S, et al. Thermal stability of carbon/polyimide coated optical fiber dried in hydrogen atmosphere[J]. Optical Fiber Technology, 2023, 81: 103556.
- [10] Kingsley B J, Chiarot P R. Polyimide films manufactured using partially wet electrospray deposition[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2023, 5(3): 1797-1809.

(下转第 206 页)

- [8] Geerligs M, Van Breemen L, Peters G, *et al.* In vitro indentation to determine the mechanical properties of epidermis[J]. *Journal of Biomechanics*, 2011, 44(6): 1176–1181.
- [9] Ma Z, Li H, Jing X, *et al.* Recent advancements in self-healing composite elastomers for flexible strain sensors; Materials, healing systems, and features[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 329: 112800.
- [10] Li W, Liu J, Wei J, *et al.* Recent progress of conductive hydrogel fibers for flexible electronics: Fabrications, applications, and perspectives[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(17): 2213485.
- [11] Li Y, Wang J, Wang Y, *et al.* Advanced electrospun hydrogel fibers for wound healing[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 223: 109101.
- [12] Yi F L, Meng F C, Li Y Q, *et al.* Highly stretchable CNT Fiber/PAAm hydrogel composite simultaneously serving as strain sensor and supercapacitor[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 198: 108246.
- [13] Sun X, Qin Z, Ye L, *et al.* Carbon nanotubes reinforced hydrogel as flexible strain sensor with high stretchability and mechanical toughness[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 382: 122832.
- [14] De Volder M F L, Tawfick S H, Baughman R H, *et al.* Carbon nanotubes; Present and future commercial applications[J]. *Science*, 2013, 339(6119): 535–539.
- [15] Song X, Ji J, Zhou N, *et al.* Stretchable conductive fibers; Design, properties and applications[J]. *Progress in Materials Science*, 2024, 144: 101288.
- [16] Wang X, Lim E G, Hoettges K, *et al.* A review of carbon nanotubes, graphene and nanodiamond based strain sensor in harsh environments[J]. *C-Journal Of Carbon Research*, 2023, 9(4): 108.
- [17] Zhang Y, Ren E, Li A, *et al.* A porous self-healing hydrogel with an island-bridge structure for strain and pressure sensors[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2021, 9(3): 719–730.
- [18] Gong Y, Hu Y, Cheng Y, *et al.* An electrically conductive polyvinyl alcohol/poly(acrylic acid-co-acrylamide)/polydopamine-decorated carbon nanotubes composite hydrogel with appropriate mechanical properties for human movement monitoring[J]. *Journal of Materials Science*, 2022, 57(27): 12947–12959.
- [19] Qin Z, Sun X, Yu Q, *et al.* Carbon nanotubes/hydrophobically associated hydrogels as ultrastretchable, highly sensitive, stable strain, and pressure sensors[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(4): 4944–4953.
- [20] Sezer H K, Eren O. FDM 3D printing of MWCNT reinforced ABS nano-composite parts with enhanced mechanical and electrical properties[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 37: 339–347.
- [21] Mercader C, Denis-Lutard V, Jestin S, *et al.* Scalable process for the spinning of PVA-carbon nanotube composite fibers[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 125(S1): E191–E196.
- [22] Zhang X, Liu T, Sreekumar T V, *et al.* Gel spinning of PVA/SWNT composite fiber[J]. *Polymer*, 2004, 45(26): 8801–8807.
- [23] Koysuren O. Preparation and characterization of polyvinyl alcohol/carbon nanotube (PVA/CNT) conductive nanofibers[J]. *Journal of Polymer Engineering*, 2012, 32(6/7): 407–413.
- [24] Michardière A S, Mateo-Mateo C, Derré A, *et al.* Carbon nanotube microfiber actuators with reduced stress relaxation[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2016, 120(12): 6851–6858.
- [25] 魏益哲, 陈书云, 邹黎明, 等. 聚乙烯醇/磺酸化碳纳米管复合纤维的制备与性能研究[J]. *合成纤维工业*, 2016, 39(5): 1–5.
- [26] Wu F, Ju X J, He X H, *et al.* A novel synthetic microfiber with controllable size for cell encapsulation and culture[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2016, 4(14): 2455–2465.
- [27] 张恒通, 黄小华, 张钰霖, 等. 多壁碳纳米管分散剂的制备及分散性能研究[J]. *材料研究与应用*, 2023, 17(1): 24–36.
- [28] Rong Q, Lei W, Chen L, *et al.* Anti-freezing, conductive self-healing organohydrogels with stable strain-sensitivity at subzero temperatures[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2017, 56(45): 14159–14163.
- [29] Zare Y. Study of nanoparticles aggregation/agglomeration in polymer particulate nanocomposites by mechanical properties[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 84: 158–164.
- [30] Li Z, Liu P, Chen S, *et al.* High-strength, freeze-resistant, recyclable, and biodegradable polyvinyl alcohol/glycol/wheat protein complex organohydrogel for wearable sensing devices[J]. *Biomacromolecules*, 2023, 24(8): 3557–3567.
- [31] Wu J, Wu Z, Lu X, *et al.* Ultrastretchable and stable strain sensors based on antifreezing and self-healing ionic organohydrogels for human motion monitoring[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(9): 9405–9414.
- [32] Lan Y, Liu H, Cao X, *et al.* Electrically conductive thermoplastic polyurethane/polypropylene nanocomposites with selectively distributed graphene[J]. *Polymer*, 2016, 97: 11–19. ■
- [15] 李中泽, 刘文芳, 王焯, 等. 干燥实验中干燥曲线的处理方式讨论[J]. *化学教育: 中英文*, 2022, 43(20): 49–56.
- [16] Zhang M, Liu H, Guan Y, *et al.* Misalignment angle calibration of semi-active laser seeker based on locally weighted scatterplot smoothing and interpolation method[J]. *Measurement*, 2022, 205: 112182.
- [17] 孔令波, 杨兴, 董继先, 等. 造纸污泥薄层干燥模型的研究进展[J]. *中国造纸*, 2019, 38(11): 70–75.
- [18] Babalis S J, Papanicolaou E, Kyriakis N, *et al.* Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*) [J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 75(2): 205–214.
- [19] 雷广平, 王宝和. 薄层干燥技术的研究进展[J]. *干燥技术与设备*, 2011, (2): 45–53. ■

(上接第 198 页)

- [11] Lin D L, Li R Y, Li T F, *et al.* Effects of pre-imidization on rheological behaviors of polyamic acid solution and thermal mechanical properties of polyimide film: An experiment and molecular dynamics simulation[J]. *Journal of Materials Science*, 2021, 56(26): 14518–14530.
- [12] 姚红, 张占文, 黄勇, 等. 聚酰亚胺薄膜表面粗糙度的影响因素[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(7): 1861–1866.
- [13] 孙琳, 朱梦冰, 王少峰, 等. 聚酰胺酸溶液成膜过程中的传质行为[J]. *南京工业大学学报: 自然科学版*, 2007, 29(3): 54–57.
- [14] 夏正斌, 涂伟萍, 杨卓如, 等. 聚合物涂膜干燥研究进展[J]. *化工学报*, 2001, 52(4): 283–287.