

机械与过程控制

浸辊涂布涂层厚度在线检测平台的机理建模与设计

包能胜¹, 张雷雷¹, 刘小山¹, 林海彬², 黄学佳³

(1. 汕头大学, 汕头 515063; 2. 广东汕樟轻工机械股份有限公司, 汕头 515063;

3. 汕头职业技术学院, 汕头 515063)

摘要: **目的** 研究实际涂布生产中涂层厚度的在线监测方法。**方法** 以非牛顿流体为基础, 对浸辊涂布过程进行数学推导和理论分析。**结果** 小型浸辊涂布的涂布头实验平台可对涂布液转移过程中形成的弯月面以及浸辊上的涂层厚度进行图像分析处理。**结论** 设计出了可以实时在线监控涂布设备的涂层厚度及质量的实验平台, 能较好地应用在实际生产中。

关键词: 浸辊涂布; 机器视觉; 弯月面; 涂层厚度

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)01-0101-09

Mechanism Modeling and Design of On-line Detection Platform of Immersion Roller Coating Thickness

BAO Neng-sheng¹, ZHANG Lei-lei¹, LIU Xiao-shan¹, LIN Hai-bin², HUANG Xue-jia³

(1. Shantou University, Shantou 515063, China; 2. Guangdong Shanzhang Light Industry Machinery Co., Ltd., Shantou 515063, China; 3. Shantou Polytechnic, Shantou 515063, China)

ABSTRACT: The work aims to study the on-line monitoring method for the coating thickness in the actual coating. Based on the non-Newtonian fluid, the mathematical derivation and theoretical analysis of immersion coating process were carried out. The coating head experimental platform for small-scale immersion roller coatings could analyze and process the images regarding the meniscus formed in the transfer process of coating solution and the coating thickness of immersion roller. The experimental platform that can monitor the coating thickness and quality of coating equipment on-line in real time is designed and it can be well applied in the actual production.

KEY WORDS: immersion roller coating; machine vision; meniscus; coating thickness

涂布技术在软包装行业的应用越来越广泛^[1]。浸辊涂布中, 涂层厚度及其均匀性的控制是涂布工艺的关键环节。国内外对浸辊涂布涂层厚度的研究主要基于牛顿流体胶黏剂^[2-6], 对于非牛顿流体胶黏剂涉足很少。对涂层的缺陷的研究主要集中在飞墨^[7-10]和竖条道^[11-15]上, 对涂层厚度和涂层均匀性的研究很少。国内, 陈克复^[16]采用试验方法研究了在高剪切涂布过程中涂料的流变特性, 梁云^[17]采用试验研究和理论推导的方法, 重点研究了涂布加工过程中胶黏剂的迁移现象, 分析了在施涂过程中胶黏剂的受力, 提出了胶

黏剂受旋转升力和剪切升力作用向涂层表面迁移的观点。以上研究仅推导了胶黏剂在施涂过程中各种受力状态, 并没有进一步分析其中的数学模型和迁移机理。国内涂布设备虽有所发展, 但对涂布的理论研究存在很大不足, 对基础性的实验研究和理论研究涉足很少。

相比国内对涂布机理研究的薄弱, 国外的许多学者和产业界都对涂布技术进行了较为深入的研究。Steven J. Weinstein 等^[18-19]对该研究领域进行了系统总结。Yue Hao^[20]利用 CFD 软件, 针对逆辊涂布稳

收稿日期: 2016-08-16

基金项目: 国家自然科学基金(51275281); 广东省高等学校产学研基地滚动项目(2013CXZDC009); 汕头大学创新强校省级重大科研项目(2014KZDXM035); 广东省科技计划(2016B020240001)

作者简介: 包能胜(1971—), 男, 博士, 汕头大学教授, 主要研究方为印刷涂布设备的设计理论与方法。

态流动进行了深入研究,得到了毛细管数对逆辊涂布流场的重要影响,给出了临界速比的理论计算值和它们的影响因子,建立的CFD计算模型给后来的学者很好的启示。Johnson^[21]在着力构建辊式涂布实验检测平台的基础上,研究了牛顿流体与非牛顿流体在顺辊涂布的流动问题,重点分析了非牛顿流体的粘弹性特性对流场分布的影响,并且做了理论上的求解和分析。Michael W. Boehm^[22]和 A. W. Mix^[23]从微观角度,在 $250\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 微小区间对涂布技术的理论基础进行了试验研究,得到了用于指导工程设计的技术参数。Chong^[12]研究了可变形顺辊涂布中辊速、辊间隙,橡胶层厚度和橡胶层材料性质对竖条道的影响。López^[24]研究了非牛顿流体流变特性与竖条道之间的关系。Mmbaga^[25]用数值模拟技术模拟了两辊辊间自由液面的运动、压力的分布等。Zavallos^[26]研究了非牛顿流体对两辊间自由液面形成的影响。Lie^[27]研究了辊间隙,涂布液的粘度,表面张力和辊的速度对竖条道不稳定性影响。Ascanio^[28]研究了在不同载荷下涂布液膜分裂和气泡对飞墨产生的影响。Owens^[29]研究了涂布液性质对飞墨尺寸数量等的影响。

在实际生产中,各设备制造厂商都在努力改进设备的生产工艺参数以此来达到减少废品率,提高产品的生产质量的目的。作为产品的重要工艺参数,对其进行科学合理的检测就显得尤为重要。当前,由于技术水平和生产成本的限制,国内企业对涂布厚度检测大都采用人工离线测量方式,其测量方法是使用取样器截取一定面积(一般为 $100\ \text{cm}^2$)的复合膜,将利用高精度的天平称取其质量;然后取同批次、未施涂胶黏剂的基材,用同样的方法取样称量,前后的差值即为胶黏剂的质量;再折算成 $1\ \text{m}^2$ 基材上胶黏剂的涂布量。还有的企业是在生产现场利用千分尺等机械测厚仪来获取产品的质量参数。在实验室,普遍采用扫描电镜测厚法,可直接用测量软件获得涂层厚度并分析出涂层的均匀性。上述离线测量方法费时费力,误差较大,成本高,效率低下,已成为制约涂布设备实现自动化的关键因素之一,因此拟设计一种可实时在线监控涂布设备的涂层厚度及质量的实验平台。

1 浸辊非牛顿流体涂布数学模型的建立

双辊浸涂过程见图1。浸辊从供料盘中将涂布液带起,以和背辊相同的方向进入狭小的辊间隙中,最终通过和背辊的相互作用将涂布液涂覆到基材上,这个过程被称为涂布。这个过程研究的区域有2个:研究区域1,涂布液被浸辊从供料盘中带起的过程;研

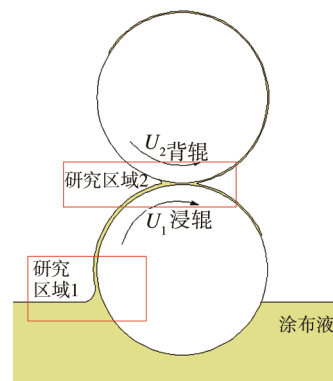


图1 双辊涂布工作原理

Fig.1 Working principles on the coating of the two rollers

究区域2,涂布液被浸辊带入两辊间的狭小辊间隙的过程。

1.1 涂布液带上浸辊的数学模型

双辊浸涂中,一级浸辊带起的涂层的质量和均匀性对产品品质来说至关重要,双辊浸涂中涂布液带上浸辊的简易图见图2。由于辊半径相较于涂布液厚度及弯月面很大,所以近似地把辊面看成平面,以涂布液水平面与辊面的交点为原点,浸辊转速方向为 x 轴,以与辊面的垂直为 y 轴。涂布液是非牛顿流体,符合非牛顿流体的中的幂率模型^[29]。

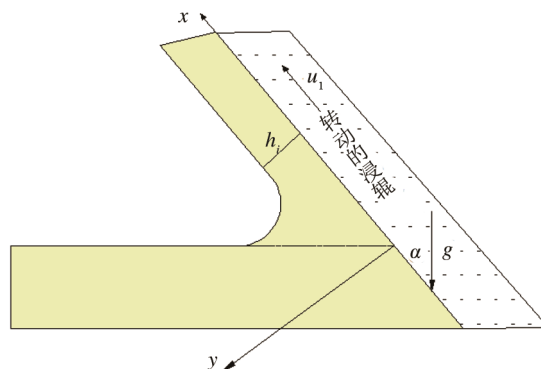


图2 流场分布区

Fig.2 The flow field distribution area

$$\tau = k \cdot \gamma^n \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力; k 为稠度系数或称为幂律系数; n 为流性指数或称为幂律指数; γ 为流体的速度梯度。

流体流动都可以用流体运动微分方程来描述,式(2)为幂律流体的运动微分方程^[30]。式中: ρ 为流体的密度; p 为流体的压力; u, v, w 为速度在3个坐标轴上的分量; K 为稠度系数; n 为流变指数; f_x, f_y, f_z 为质量力在3个坐标轴上的分量。

$$\begin{cases} \rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial[k(2\frac{\partial u}{\partial x})^n]}{\partial x} + \frac{\partial[k(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})^n]}{\partial y} + \frac{\partial[k(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x})^n]}{\partial z} + \rho f_x \\ \rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial[k(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})^n]}{\partial x} + \frac{\partial[k(2\frac{\partial v}{\partial y})^n]}{\partial y} + \frac{\partial[k(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y})^n]}{\partial z} + \rho f_y \\ \rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial[k(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x})^n]}{\partial x} + \frac{\partial[k(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y})^n]}{\partial y} + \frac{\partial[k(2\frac{\partial w}{\partial z})^n]}{\partial z} + \rho f_z \end{cases} \quad (2)$$

流体的连续性方程为：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

设流体的流动是定常层流，流体介质为均质不可压缩。涂布流场的流动情况见图 2，由流动的情况可知 $v=w=0$ 。根据式 (3) 可知 $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$ 。由以上条件简化式 (2) 得：

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial[k(\frac{\partial u}{\partial y})^n]}{\partial y} - \rho g \cos \alpha \quad (4)$$

化简式 (4) 得：

$$nk\left(\frac{du}{dy}\right)^{n-1} \frac{d^2u}{dy^2} = \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \cos \alpha \quad (5)$$

令 $\frac{du}{dy} = f$ ，则式 (5) 可以化简为：

$$f = \sqrt[n]{\frac{1}{k}\left(\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \cos \alpha\right)}(y + c_0)^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

对式 (6) 积分得：

$$u = \sqrt[n]{\frac{1}{k}\left(\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \cos \alpha\right)} \frac{n}{n+1} (y + c_0)^{\frac{n+1}{n}} + c_1 \quad (7)$$

引用文献 [29] 中的一个边界条件 $\frac{\partial u}{\partial y}|_{y=h_i} = 0, u|_{y=0} = u_1$ 。式中： u_1 为浸辊的线速度。运用边界条件得：

$$u = \sqrt[n]{\frac{1}{k}\left(\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \cos \alpha\right)} \times \frac{n}{n+1} \times \left[(y - h_i)^{\frac{n+1}{n}} - (-h_i)^{\frac{n+1}{n}} \right] + u_1 \quad (8)$$

体积流量为：

$$Q = \int_0^{h_i} u dy = \left(\frac{n}{2n+1}\right) (-h_i)^{\frac{2n+1}{n}} \times \left[\frac{1}{k}\left(\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \cos \alpha\right)\right]^{\frac{1}{n}} + u_1 h_i \quad (9)$$

化简得：

$$\frac{dp}{dx} = \frac{k(Q - u_1 h_i)^n (2n+1)^n}{n^n (-h_i)^{2n+1}} - \rho g \cos \alpha \quad (10)$$

液体在自由表面处的边界条件： $p = -\sigma \frac{1}{r}, y = h$ 。

式中： r 为弯月面的曲率，可表示为 x 的函数 $r(x)$ ，可得：

$$\frac{dp}{dx} = -\sigma \frac{d\left(\frac{1}{r}\right)}{dx} \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (10) 积分得：

$$-\sigma \frac{1}{r} = \frac{k(Q - u_1 h_i)^n (2n+1)^n}{n^n (-h_i)^{2n+1}} x - \rho g x \cos \alpha + c_0 \quad (12)$$

式中：转速为已知量； n, k, σ 都为涂布液物性参数，可通过实验测得。角度 α 可通过辊的浸深计算得到，弯月面半径可通过后期实验平台的机器视觉模块测得，建立如图 2 的坐标系，通过式 (11) 求得 dp/dx ，联立式 (9) 与式 (11)，可求得 Q 。可通过实验平台实验测得 Q 的真实值与计算值进行对比验证数学模型的正确性。

1.2 浸辊滚间隙数学模型

浸辊与背辊间隙处的流场见图 3。图 3 中 h_i 为浸辊带入到辊间隙中的厚度； h_2 为背辊带走的涂布液厚度；即最终的涂布厚度； h_1 为浸辊带回到供料盘中涂布液厚度； H 为两辊间最小间隙，非饱和型涂布流场中进入两辊间隙处的总体积流量等于浸辊带入的流体体积流量。

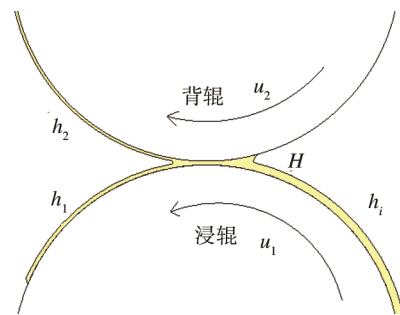


图 3 两辊间隙流场分布

Fig.3 Flow field distribution for two rollers' clearance

流体流动都可以用流体运动微分方程来描述。设流体的流动是定常的层流流动，流体介质为均质不可压缩。流体在辊间隙处的流动可以简化成在2块平行板间的流动，因此速度在 y 方向上的分量可忽略不计，则 $v=w=0$ 。根据式(3)可知 $\frac{\partial u}{\partial x}=0$ 。因为辊的宽度相对于辊间隙而言是非常大的，所以假设 u 在 z 方向上无变化，即 $\frac{\partial u}{\partial z}=0$ 。又因为是定常流动，涂布液流速不随时间而改变，所以 $\frac{\partial u}{\partial t}=0$ 。从而得知速度 u 只是 y 的函数。重力仅在 y 方向上有分量，即 $f_y=g$ 。

将上述假设代入到式(2)并化简得：

$$\begin{cases} 0 = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial [k(\frac{\partial u}{\partial y})^n]}{\partial y} \\ 0 = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g \\ 0 = -\frac{\partial p}{\partial z} \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可知，压力 p 仅是 x, y 的函数，对式(12)中第2个方程积分得：

$$p = \rho g y + f(x) \quad (14)$$

$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{df(x)}{dx}$ 是一个仅与 x 有关的函数，因为 u 仅是 y 的函数，所以对式(13)中第1个方程化简得：

$$nk(\frac{du}{dy})^{n-1} \frac{d^2u}{dy^2} = \frac{\partial p}{\partial x} \quad (15)$$

令 $\frac{du}{dy} = f$ ，则式(15)可以化简为：

$$nkf^{n-1} \frac{df}{dy} = \frac{\partial p}{\partial x}, f = \sqrt[n]{\frac{1}{k} \frac{\partial p}{\partial x} (y+c_0)^{\frac{1}{n}}} \quad (16)$$

对式(16)积分得：

$$u = \sqrt[n]{\frac{1}{k} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{n}{n+1} (y+c_0)^{\frac{n+1}{n}} + c_1} \quad (17)$$

设两辊相邻辊面之间最小的距离为 H ，将圆的一部分近似成一段抛物线，则任意相邻辊面间的距离 H_x 可以近似用式(18)来表示^[29]。

$$H_x = H_0 + \frac{x^2}{2R_1} + \frac{x^2}{2R_2} \quad (18)$$

在此将平均半径 r 定义为：

$$\frac{2}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \quad (19)$$

$$\text{则式(18)可以表示为: } H_x = H_0 + \frac{x^2}{R} \quad (20)$$

如图3所示，假设流体径向无渗透，圆周方向无

滑移，速度边界条件为：

$$1) u|_{y=H_0} = u_2, \text{ 圆周运动的径向加速度为 } a_2 = \frac{u_2^2}{R_2}.$$

$$2) u|_{y=0} = u_1, \text{ 圆周运动的径向加速度为 } a_1 = -\frac{u_1^2}{R_1}.$$

$$\text{将边界条件(1)代入式(17)得: } c_0 = \frac{k(\frac{u_2^2}{R_2})^n}{\frac{\partial p}{\partial x}} - H_0$$

$$\text{将边界条件(2)代入式(17)得: } c_0 = \frac{k(\frac{u_1^2}{R_1})^n}{\frac{\partial p}{\partial x}}$$

将该条件代入式(16)中得到：

$$\left. \begin{matrix} y=0, u=u_1 \\ y=H_0, u=u_2 \end{matrix} \right\} \Rightarrow \begin{cases} \sqrt[n]{\frac{1}{k} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{n}{n+1} \cdot c_0^{\frac{n+1}{n}} + c_1} = u_1 \\ \sqrt[n]{\frac{1}{k} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{n}{n+1} \cdot (H_0 + c_0)^{\frac{n+1}{n}} + c_1} = u_2 \end{cases} \quad (21)$$

$$\text{取 } c_0 = \frac{k(\frac{u_2^2}{R_2})^n}{\frac{\partial p}{\partial x}} - H_0, c_1 = u_1 - \frac{n}{n+1} \frac{k}{\frac{\partial p}{\partial x}} \frac{u_1^{2n+2}}{R_1^{n+1}}. \text{ 则速度}$$

为：

$$u = \sqrt[n]{\frac{1}{k} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{n}{n+1} (y - H_0 + \frac{k(\frac{u_2^2}{R_2})^n}{\frac{\partial p}{\partial x}})^{\frac{n+1}{n}} + u_1 - \frac{n}{n+1} \frac{k}{\frac{\partial p}{\partial x}} \frac{u_1^{2n+2}}{R_1^{n+1}}} \quad (22)$$

在流体径向无渗透和圆周方向无滑移的情况下，对于稳定流流体在任意一点 x 的体积流量为一恒定值，体积流量 Q 的表达式为：

$$Q = \int_0^H u dy = \text{const} = u_1 h_1 + u_2 h_2 \quad (23)$$

涂布液膜在出口端的分裂情况见图4。

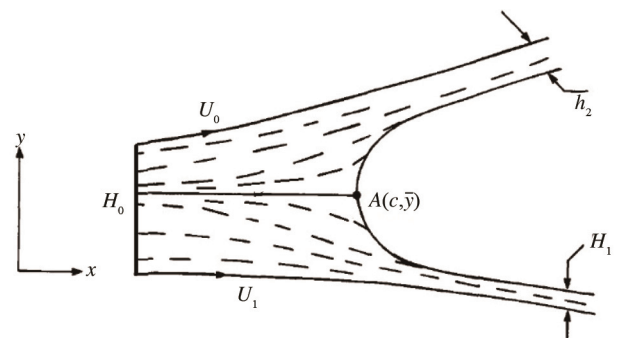


图4 涂布液膜分裂

Fig.4 The coating solution film splitting

由液体在自由表面处的边界条件得: $p = -\frac{\sigma}{r}$, r

为弯月面的半径。设 $\frac{dp}{dx} = -\sigma \frac{d(1/r)}{dx} = t$, 流体在分离点 A 处的边界条件为 $\frac{\partial u}{\partial y} = 0$, 代入到式 (22) 得:

$$\bar{y} = H_0 - \frac{k(u_2^2)^n}{t} \quad (24)$$

由图 4 可知, 当流体在 $\bar{y} < y \leq H_0 + \frac{x_c^2}{2R_2}$ 时, 流体全部被上辊带走, 则有:

$$\int_{\bar{y}}^{H_0 + \frac{x_c^2}{2R_2}} u dy = u_2 h_2 \quad (25)$$

将式 (21) 和点 A 处的边界条件代入式 (24) 化简得:

$$u_2 h_2 = \frac{n}{n+1} \frac{n}{2n+1} \sqrt{\frac{t}{k} \left(\frac{x_c^2}{2R_2} + \frac{k}{t} \left(\frac{u_2^2}{R_2} \right)^n \right)} + \left(\frac{x_c^2}{2R_2} + \frac{k}{t} \left(\frac{u_2^2}{R_2} \right)^n \right) \left(u_1 - \frac{n}{n+1} \frac{k}{t} \frac{u_1^{2n+2}}{R_1^{n+1}} \right) \quad (26)$$

同理, 当流体在 $-\frac{x_c^2}{2R_1} \leq y \leq \bar{y}$ 时, 流体全部被下

辊带走, 则 $\int_{-\frac{x_c^2}{2R_1}}^{\bar{y}} u dy = u_1 h_1$ (27)。将式 (22) 和式 (27) 代入式 (25) 化简得:

$$u_1 h_1 = \sqrt{\frac{t}{k} \frac{n}{n+1} \frac{n}{2n+1}} \times \left(H_0 + \frac{x_c^2}{2R_1} - \frac{k}{t} \left(\frac{u_2^2}{R_2} \right)^n \right)^{\frac{2n+1}{n}} + \left(u_1 - \frac{1}{n+1} \frac{k}{t} \frac{u_1^{2n+2}}{R_1^{n+1}} \right) \times \left(H_0 + \frac{x_c^2}{2R_1} - \frac{k}{t} \left(\frac{u_2^2}{R_2} \right)^n \right) \quad (28)$$

试验机的加装的视觉模块可以识别液膜分裂处弯月面的半径 r 以及 x_c , 并可以通过建立如图 4 坐标系

解出弯月面的方程式以及导数 $\frac{d(1/r)}{dx}$, 带入 $\frac{dp}{dx} =$

$-\sigma \frac{d(1/r)}{dx} = t$ 得到 t , 联立式 (26) 和式 (22) 可求得

h_2 , 联立式 (28) 和式 (22) 可求得 h_1 。

求得 h_2 和 h_1 后, 有多种方法验证该模型的正确性, 当涂布流场处于非饱和型涂布流场时, 最终涂覆在基材上的涂布厚度和留在浸辊上的涂布液厚度与入口处浸辊上的涂布厚度有着密切的关系。由体积流量恒定可知: $u_2 h_2 = u_1 h_1 + u_2 h_2$ 。当涂布流场处于饱和型涂布流场时, 最终涂覆在基材上的涂布厚度和留在浸

辊上的涂布液厚度与入口处浸辊上的涂布液厚度没有太大的关系。此时涂布流场可以简化成:

$$\frac{u_1 + u_2}{2} H = u_1 h_1 + u_2 h_2。$$

由以上推到过程可知, 涂层的厚度与辊面带起的涂布液弯月面是有一定数学关系的, 只要得到了弯月面的半径, 就可以推导出根据这个数学关系涂层的厚度。如果设计一种可以识别涂层厚度或者弯月面半径的在线识别机器, 就可以解决涂层厚度在线监测的难题, 涂布液弯月面的半径通过一定手段可实时监测。以上推导结果可结合在线监测平台实时监测涂层的厚度。

2 在线监测平台的可行性分析

平台的难度主要在于摄像头能否捕捉拍摄到辊面带起的涂布液弯月面、厚度以及图像识别的精度, 下面只要从试验和分析两方面来说明平台的可行性。

2.1 平台图像识别参数分析

平台使用的工业摄像机为德国灰点公司的 FL2G-50S5M/C 灰点面阵相机, 像素为 500 万, 分辨率为 2448×2048, 像素尺寸为 3.45 μm×3.45 μm; 镜头选用的是奥普特公司的 OPT-C1216-5M, 焦距为 12 mm, 像素 5M, 工作距离为 ∞~150。平台中, 镜头到拍摄物体的距离为 65, 放大倍率约为 0.18, 由相机的参数可知, 相机在此工况下拍摄面积为 4.69 cm×3.93 cm, 放大后, 每个像素点尺寸为 19.17 μm×19.17 μm, 最大拍摄速度为 500 帧/s, 完全可以满足涂布在线监测拍摄速度, 有实验和模拟计算结果可知, 涂层厚度范围为 300 μm~3 mm, 弯月面的尺寸从 1~4 cm 不等, 因此相机的精度完全可以满足试验要求。

2.2 实验证明

在设计该平台前, 为了验证平台的可行性, 已经运用无溶剂涂布头 WZT650 实验平台 (见图 5) 做过一项相关试验, 涂布液用甘油和水溶液, 使用的摄像头和光源与该平台为同款, 实验证明相机可以清晰地拍摄到弯月面的轮廓甚至涂层的轮廓, 拍摄不同辊速下弯

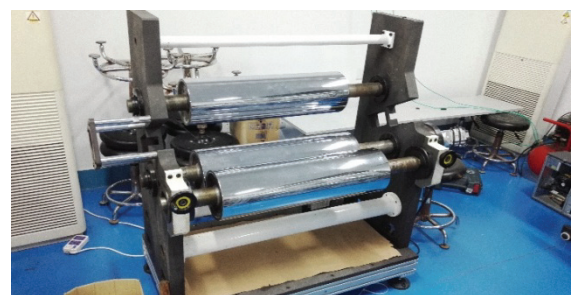


图 5 WZT650 实验平台实物

Fig.5 Real products for WZT650 experimental platform

月面的轮廓见图6，拍摄到的涂层轮廓和涂布液附着前后浸辊的图像见图7。实验证明，涂层厚度范围为 $300\ \mu\text{m} \sim 3\ \text{mm}$ ，像素尺寸为 $3.45\ \mu\text{m} \times 3.45\ \mu\text{m}$ ，因此样机可以清晰拍摄出涂布液弯月面的轮廓，甚至可以拍到涂布液附着在浸辊上的厚度。

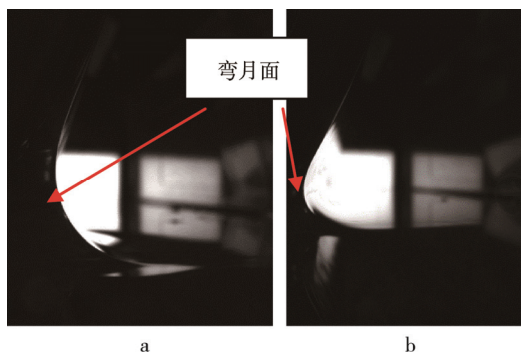


图6 不同辊速下弯月面轮廓
Fig.6 Meniscus outline at different roller speeds

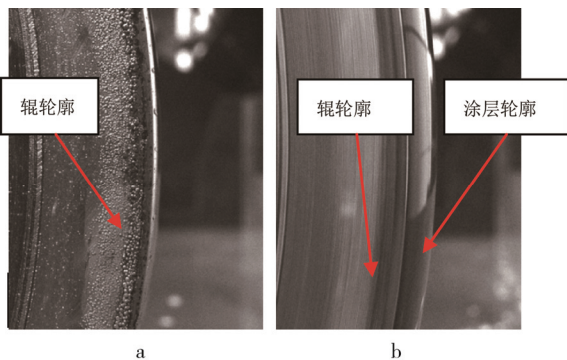


图7 浸辊静止与转动时的照片对比
Fig.7 Picture contrast between static and rotating immersion rollers

3 平台主要技术指标及方案的设计

3.1 实验平台设计的要求

实验平台设计的要求为：辊速比可调，两辊间隙可调，机器视觉拍摄角度可调，涂布浸深可调，两辊方便安装、更换具有统一的安装接口。经过上述对影响涂布量的关键工艺参数进行分析，现针对分析结果给出整个检测实验系统一个总体的方案设计。检测系统按功能可分为机械平台、测厚控制系统及数据采集系统3部分，其系统结构见图8。

3.2 试验机平台工作过程

实验时，手动调节浸辊与背辊之间的间隙。辊的转速比由 PLC 对其进行控制设定。数据采集采用德国灰点公司的 FL2G-50S5M/C 面阵相机。相机与光源精确安装在浸辊与背辊之间的一侧，位置可以沿着辊的转动，以便拍摄辊的不同位置。胶黏剂反射从光源发出的光并被相机捕捉拍摄，相机将光强度转换成电信号，通过转换获得数字信号，然后保存在图像存储

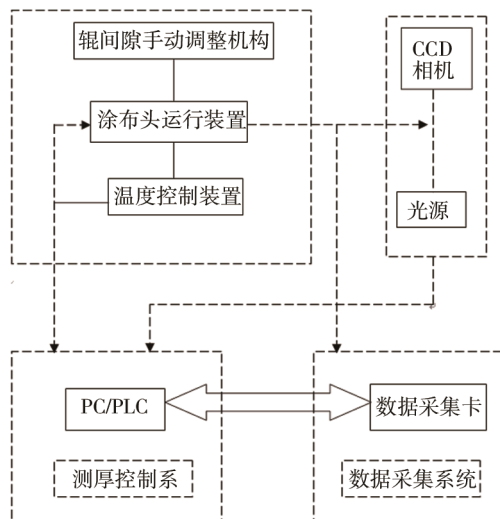


图8 在线检测实验平台方案
Fig.8 Scheme for on-line detection experimental platform

器件中，还可以经数据接口读入计算机进行保存和显示。最终通过软件分析提取出所拍摄出图像的特征，得出在某一工况下粘附在转移钢辊上面胶黏剂的弯月面轮廓、厚度值。由于浸辊的宽幅是固定的，由此可折换成胶黏剂流出来的流量，制定出实验装置整体的技术指标和总体的技术参数规划，以满足实验的要求：浸辊/背辊直径为 184 mm，宽幅为 300 mm，浸辊速度范围为 5 ~ 45 m/min，背速度范围为 10 ~ 150 m/min，辊间间隙调整范围为 0.2 ~ 2.2 mm，浸深为 10 ~ 60 mm。

4 机械系统设计

平台整体设计的三维模型见图9。间隙调节模块与机器视觉模块是整个实验平台的核心部分。辊筒是整个实验平台的核心部件，辊系由2台伺服电机驱动。

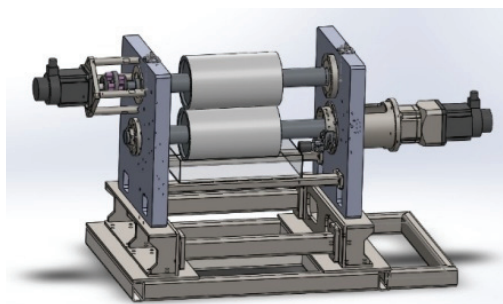


图9 实验平台
Fig.9 Experimental platform

4.1 浸辊结构设计

目前多数浸辊涂布都在常温下进行，一般温度控制在 35~45 ℃，当外界温度变化很大时，可采用连接外部温控机加热的方式，后期可以根据需要更换其他加热方式的辊。2根钢辊材质、加工方法和内部结构

完全相同。由于涂布量非常小，涂层厚度只有零点几十微米到 2 mm，辊的加工质量会严重影响涂布质量，尤其是浸辊，其加工精度直接影响涂层的厚度和均匀度。辊面镀铬后精磨，镀铬层深 0.15 ~ 0.20 mm，精磨后表面粗糙度要达到 $Ra0.1 \mu\text{m}$ 。与轴承配合处的轴颈要研磨，表面粗糙度同样要达到 $Ra0.2 \mu\text{m}$ ，同轴度和圆度公差都要在 0.01 mm 以内，辊加工完成后要检验动平衡。

4.2 联轴器的选择

浸辊的位置与驱动电机的位置相对固定，采用膜片联轴器就可满足传动要求。背辊的位置相对于浸辊是变化的，而驱动电机的安装位置固定不动，因此需要选择特殊的连接方式来满足传动需求。由于同步带传动和可伸缩的万向节联轴器需要较大的安装空间，所以背辊与电机之间只能选择施密特联轴器，见图 10。施密特联轴器建议使用在偏心量在 0 到最大允许偏心量之间^[31]。



图 10 施密特平行轴联轴器
Fig.10 Schmidt parallel shaft coupling

4.3 间隙调整机构的设计

设计偏心蜗轮来实现间隙的调整。蜗轮的分度圆和安装轴承的孔的中心偏置 1 mm，蜗轮的外圈和镶嵌在壁板内的铜套紧密配合并能转动，计量辊的支撑轴承安装在蜗轮的偏心孔内。蜗杆驱动蜗轮转动，转移辊和背辊之间的距离在 0.2 ~ -2.2 mm 内无级可调，机构的结构原理图以及蜗轮的二维图见图 11。偏心蜗轮嵌入在壁板中，蜗杆安装在嵌在壁板中的两滚珠轴承里并与偏心蜗轮形成配合关系。蜗轮蜗杆的传动比为 52 : 1。折算成计量辊的水平偏移，则蜗杆每转

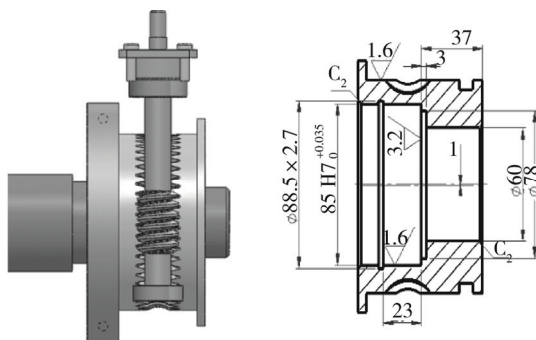


图 11 间隙调节机构
Fig.11 Clearance adjustment mechanism

动一圈背辊在水平方向移动 76.66 μm 。通过手动转动蜗杆带动蜗轮转动，以此来实现计量辊与转移钢辊在 2 mm 的间隙内无级可调。

4.4 视觉模块的设计

试验机中，由于涂布深度的变化，要求机器视觉模块能拍摄浸辊的多个角度，所以要求相机要求可以移动。平台设计中将相机的安装架通过一个扇形零件与装盘连接在一起，使相机可以随扇形零件沿着转盘做圆周运动，保证可以拍到浸辊的任何一个角度。视觉模块见图 12，与视觉模块配合的需要一个透明的有机玻璃的涂布液槽。

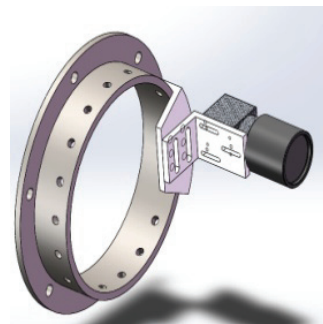


图 12 视觉模块机构
Fig.12 Visual module mechanism

5 伺服电机的选择

实验平台采用工程常用的公式来选择电机：

$$P = \frac{nT}{9550\eta}$$

式中： T 为扭矩； P 为电机功率； n 为输出转速，试验机在正常工作过程中，以较小的转速转动。在将胶黏剂转移到浸辊的过程中，受到胶黏剂对钢辊的静压力、剪切力以及传动过程中其他的动摩擦力。受力分析见图 13。

实验平台采用工程常用的公式来选择电机：

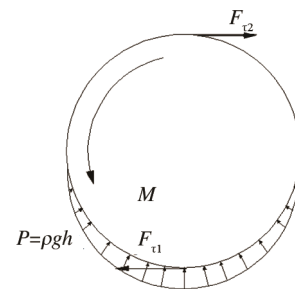


图 13 浸辊受力分析
Fig.13 Immersion roller stress analysis

5.1 剪切力 F_{t1} 的计算

浸辊和涂布液接触时，液体和浸辊固体分子之间相互吸引，形成液体对固体壁面的附着力即剪切力。由于涂布液是属于非牛顿流体中的粘弹性流体，属于粘弹性流体的涂布液本构方程类似于假塑性流体^[32]，由牛顿内

摩擦定律导出,其切应力与速度梯度的关系式为:

$$\tau = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (n < 1) \quad (29)$$

式中: τ 为切应力 (Pa); du/dx 为流体的剪切变形速率; μ 为比例系数, 又称为流体的动力粘度 (Pa·s), 涂布液适涂粘度范围为 0.1 ~ 1.2 Pa·s, 选用上限 1.2 Pa·s 进行计算; n 为流变指数, 一般为 0.15 ~ 0.9, 取最大值 0.9, 流变指数 n 和动力粘度 μ 之值由实验确定。

剪切力求解公式: $F_{\tau 1} = \tau S$ 。式中: $F_{\tau 1}$ 为剪切力 (N); S 为剪切面积 (m^2)。工作机在正常工作过程中, 浸辊设计最大工作速度为 45 m/min, 涂布液体的流变指数 $n=0.9$, 涂布液剪切变形速度为 45 m/min, 背辊与浸辊之间的可调间隙范围 0.2 ~ 2.2 mm, 设层流深度为 5 mm, 计量转移辊直径为 184 mm, 胶黏剂施涂宽度为 0.3 m。则由式 (29) 得涂布液体的剪切力

$$F_{\tau 1} = \tau S = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)^n S = 7.31 \text{ N}。$$

5.2 剪切力 $F_{\tau 2}$ 的计算

剪切力求解公式: $F_{\tau 2} = \tau S$ 。式中: 工作机在正常工作过程中, 浸辊设计最大工作速度为 45 m/min, 取速度 10 m/min, 背辊的最大工作速度为 150 m/min, 那么两辊相对速度为 140 m/min, 取最大速度背辊与浸辊之间的可调间隙范围为 0.2 ~ 2.2 mm, 取最小间隙 0.2, 背辊和浸辊直径 184 mm, 胶黏剂施涂宽度为 0.3 m, 则由式 (29) 得涂布液体的剪切力 $F_{\tau 2} = \tau S =$

$$\mu \left(\frac{du}{dy} \right)^n S = 26.39 \text{ N}。浸辊受到的最大阻力为 $F_{f 2} = F_{\tau 1} +$$$

$F_{\tau 2} = 33.7 \text{ N}$, 最大阻力矩为 $T_{f 1} = 0.092 F_{\tau 1} = 3.1 \text{ N} \cdot \text{m}$, 背辊受到的最大阻力为 $F_{f 2} = F_{\tau 2} = 26.39 \text{ N}$, 最大阻力矩为

$$T_{f 2} = 0.092 F_{f 2} = 2.43 \text{ N} \cdot \text{m}。通过公式 $J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i r_i^2$, 计算$$

得到浸辊和背辊的转动惯量分别为 0.1727, 0.1716 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。根据试验样机的两辊的阻力以及转动惯量, 最终浸辊选择的电机型号为台达公司的 ECMA-E21305CS, 额定功率为 0.5 kW, 额定扭矩为 2.39 N/m, 瞬时最大扭矩为 7.16 N/m, 额定转速为 2000 r/min, 最高转速为 3000 r/min, 另外需要配一个 1 : 3 的行星减速器, 型号为 AB115-005-S1-P2。背辊选择的电机型号为台达公司的 ECMA-E21310CS, 额定功率为 1 kW, 额定扭矩为 4.77 N/m, 瞬时最大扭矩为 14.32 N/m, 额定转速为 2000 r/min, 最高转速为 3000 r/min。

6 结语

对浸辊涂布涂层厚度实施在线实时检测, 能有效

提高企业的市场竞争力。在分析影响涂层厚度及质量的关键工艺参数基础上, 给出了涂层厚度在线检测的方案设计, 并构建出科学合理的实验平台。同时, 针对平台的关键零部件及参数进行了具体详细的设计。无论对于科研实验还是企业的实际的应用须求, 文中研究的内容都具有现实可行的意义。

参考文献:

- [1] 沈峰, 陈小锋. 环保型粘合剂在食品包装复合膜中的应用[J]. 塑料包装, 2006, 16(6): 21—24.
SHEN Feng, CHEN Xiao-feng. Application of Environmentally Friendly Adhesive in Food Packaging Compound Film[J]. Plastic Packaging, 2006, 16(6): 21—24.
- [2] CARVALHO M S, SCRIVEN L E. Flows in Forward Deformable Roller Coating Gaps: Comparison between Spring and Plane-Strain Models of Roller Cover[J]. Journal of Computational Physics, 1997, 138: 449—479.
- [3] COYLE D J, MACOSKO C W, SCRIVEN L E. Film-Splitting Flows in Forward Roller Coating[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1986, 171: 183—207.
- [4] YU S H, LEE K S, YOON S J. Film Flow around a Fast Rotating Roller[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009, 30: 796—803.
- [5] HAO Y, HABER S. Reverse Roller Coating Flow[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1999, 30: 635—652.
- [6] GASKELL P H, REES S R, SAVAGE M D, et al. A Mathematical Model of Roller to Web Kiss Coating[J]. Journal of the Society of Chemical Industry, 1998, 76: 29—37.
- [7] OWENS M S, VINJAMUR M, SCRIVEN L E, et al. Misting of Newtonian Liquids in Forward Roller Coating[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2011, 50: 3212—3219.
- [8] ASCANIO G, TABOADA B, TANGUY P A. Misting Droplet Size Analysis in a Metered Film Coater[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2008, 86: 215—218.
- [9] YAMADA H, JAMES D F. Misting and the Effect of Rheological Properties of the Coating Fluid[J]. Nordic Pulp and Paper Research Journal, 2011, 26(1): 128—132.
- [10] ASCANIO G, CARREAU P J, REGLAT O P, et al. Extensional Rheology of Coating Suspensions in Relation with Misting in Film Coaters[J]. Nordic Pulp and Paper Research Journal, 2005, 20(1): 48—53.
- [11] LEE K J H, NOH I J, MAN S. Dynamics and Instability

- of a Polymeric Paint in Roller Coating Process for Automotive Pre-coating Application[J]. *Polymer-Korea*, 2011, 35(6): 574—579.
- [12] CHONG Y H, GASKELL P H, KAPUR N. Coating with Deformable Rollers: An Experimental Investigation of the Ribbing Instability[J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62: 4138—4145.
- [13] SASAKI M, SUSZYNSKI W J, CARVALHO M S, et al. Process Limits in Two-layer Reverse Roller Transfer[J]. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2013, 10(4): 485—492.
- [14] HOON L J, KWON H S, SUNG L J. Ribbing Instability in Rigid and Deformable Forward Roller Coating Flows[J]. *Korea-Australia Rheology Journal*, 2010, 22(1): 75—80.
- [15] JANG J Y, CHEN P Y. Experimental and Numerical Analysis of Non-Newtonian Effect on Film Thickness and Ribbing Instability in Forward Roller Coating Process[J]. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, 2010, 31(3): 221—228.
- [16] 陈克复, 颜进华. 在高剪切涂布过程中涂料流变性的研究[J]. *中国造纸*, 1998(1): 14—18.
CHEN Ke-fu, YAN Jin-hua. Study on Rheology of Coating in High Shear Coating Process[J]. *China Pappermaking*, 1998(1): 44—18.
- [17] 梁云, 陈克复. 涂布加工过程中胶黏剂的迁移及其机理研究[J]. *中国造纸学报*, 2003, 18(1): 102—105.
LIANG Yun, CHEN Ke-fu. Study on the Migration and Mechanism of Adhesive in Coating Process[J]. *Chinese Journal of Paper Technology*, 2003, 18(1): 102—105.
- [18] WEINSTEIN S J, RUSCHAK K J. Coating Flows[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2004, 36: 29—53.
- [19] NERÍN C, SALAFRANCA J, AZNAR M, et al. Critical Review on Recent Developments in Solventless Techniques for Extraction of Analytes[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2009, 393: 809—833.
- [20] HAO Y, HABER S. Reverse Roller Coating Flow[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 1999, 30: 635—652.
- [21] JOHNSON M A. Viscoelastic Roller Coating Flows[D]. University of Maine, 2003.
- [22] BOEHM M W, SARKER S, KOELLING K. An Experimental Investigation of Two-phase Coating Flow within Microchannels: the Effect of Coating Fluid Rheology[J]. *Microfluid Nanofluid*, 2011, 10: 1175—1183.
- [23] MIX A W, CHEN Z B, JOHNSON L M, et al. Blotching in Roller Coating[J]. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2011, 8(1): 67—74.
- [24] LÓPEZ F V, PAUCHARD L, ROSEN M, et al. Non-Newtonian Effects on Ribbing Instability Threshold[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2002, 103: 123—139.
- [25] MMBAGA J P, HAYES R E, BERTRAND F H, et al. Flow Simulation in the Nip of a Rigid Forward Roller Coater[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2005, 48: 1041—1066.
- [26] ZEVALLOS G A, CARVALHO M S, PASQUALI M. Forward Roller Coating Flows of Viscoelastic Liquids[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2005, 130: 96—109.
- [27] LIE K N, CHIU Y M, JANG J Y. Ribbing Instability Analysis of Forward Roller Coating[J]. *Journal of Mechanics*, 2009, 25: 167—175.
- [28] ASCANIO G, CARREAU P J, LA FUENTE E B, et al. Forward Deformable Roller Coating at High Speed with Newtonian Fluids[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2004, 82: 390—397.
- [29] OWENS M S, VINJAMUR M, SCRIVEN L E, et al. Misting of Non-newtonian Liquids in Forward Roller Coating[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2011, 166: 1123—1128.
- [30] SAVAGE M D. Mathematical Models for Coating Processes[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1982, 117: 443—455.
- [31] 袁恩熙. 工程流体力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
YUAN En-xi. *Engineering Fluid Mechanics*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [32] 袁汝旺. 逆转辊涂布系统的研究[D]. 天津: 天津工业大学.
YUAN Ru-wang. Study on Coating System of Reverse Roller[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University.