

提拉法涂胶的力学分析与模拟

付永启 任延同

(中科院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

摘要 用流体力学理论分析了提拉式涂胶过程中胶液的受力流动状态,推导出涂胶厚度与提升速度、胶液粘度等参数的理论关系式。经实际涂胶测定,该关系式反映的变化规律与实际是相符的。

关键词 提拉式涂胶 流体力学 胶膜厚度 胶液粘度

1 引言

提拉法是光刻中常用的另一种涂胶方法,此方法主要基于一些特殊形状光刻基板涂胶需要而提出的。如光栅尺、大尺寸码盘、圆柱面等。该方法有别于离心式涂胶靠高转速产生的离心力实现胶液的均匀涂布,而是靠极慢的提升速度(通常小于 $1\text{mm}/\text{min}$)将被涂件从胶液中缓慢提起,利用低粘度光刻胶中稀释剂挥发快的特点形成均匀分布的胶层。

提拉涂胶法设备简单、操作容易常被使用。但涂胶厚度靠经验来控制,使工艺过程带有很大的盲目性,如能有一理论依据作为实践中的指导,则能减少这种盲目性。基于这种考虑,笔者从流体力学的角度详细分析了提拉法涂胶的力学机理,从中找出涂胶厚度、提拉速度与胶液粘度之间的内在关系,以此作为实际操作时正确选择工艺参数的参考依据。

2 涂胶过程的力学及数学模型

提拉法涂胶过程中的胶液受力简图如图1所示。

2.1 胶液的静压力分布

任取一单位质量胶液,作用在质点上的力除重力外,还有胶液的粘滞力。于是,作用在单位质量胶体上的质量力为:

$$\begin{cases} f_x = 0 \\ f_y = 0 \\ f_z = -g \end{cases} \quad (1)$$

将单位质量力代入压力差方程有

$$dp = \rho(-g dz) \quad (2)$$

积分得

$$p = -\rho gz + C \quad (3)$$

根据边界条件, 当 $z = 0$ 时, $p = p_0$, 可求出积分常数 $C = p_0$, 于是式

(3) 变为

$$p = p_0 - \rho gz \quad (4)$$

胶液的静压力分布 p 即为所求。

2.2 胶液流速 u

胶液在重力作用下形成静压力 p , 它克服附面层阻力 τ (单位面积上的阻力) 使胶液向下流动。形成的附面层速度分布如图2所示。由牛顿第二定律可得

$$p - \tau = mu \frac{du}{dz} \quad (5)$$

其中 τ 可由式(6) 决定(层流附面层),

$$\tau = 0.343\rho u^2 Re_x^{-1/2} \quad (6)$$

分别将式(4)、式(6)代入式(5)得

$$p_0 - \rho gz - 0.343\rho u^2 Re_x^{-1/2} = mu \frac{du}{dz} \quad (7)$$

式中

p_0 ——大气压强;

Re ——胶液流动的雷诺数。

当提拉装置以速度 v 匀速提起被涂毛坯件时, 其上的胶液以速度 u 流动, 然后慢慢减速, 直至停止流动。胶液流动的速度由微分方程(7) 决定, 它与胶液粘度 ρ 有关。

式(7) 可化为贝努利方程得其通解为

$$u = \left[\left(\frac{p_0}{m} z + C \right) e^{-Az} - \frac{z}{A} + \frac{1}{A^2} \right]^{1/2} \quad (8)$$

其中

$$A = 0.343 \frac{\rho Re^{-1/2}}{m} \quad (9)$$

以边界条件 $u = 0, z = 0$ 代入上式得特解为

$$u = \left[\left(\frac{p_0}{m} z + \frac{1}{A^2} \right) e^{-Az} - \frac{z}{A} + \frac{1}{A^2} \right]^{1/2} \quad (10)$$

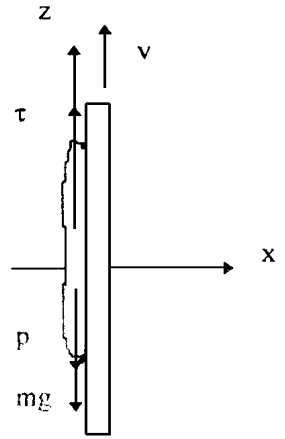


Fig. 1 Dynamic model of pulling coating

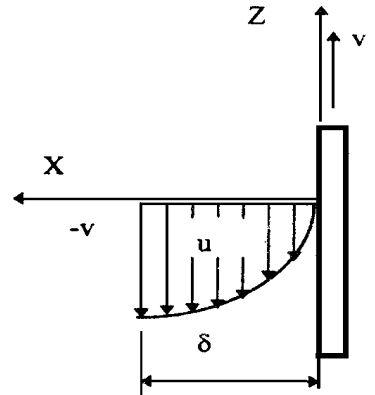


Fig. 2 Speed distribution on coating surface of substrate

此即为附面层内胶液流速分布规律。

实际涂胶时,当胶液流速小于 $1\text{mm}/\text{min}$ 时,被涂毛坯件离开光刻胶液面时其上的胶层即已挥发变干,这种情况下,涂胶过程中的胶液流速即为提拉速度 v (相对于被涂胶槽中静止胶液的速度)。

2.3 涂胶厚度 δ

厚度均匀的胶层是靠极慢的提拉速度(通常小于 $1\text{mm}/\text{min}$)、较低的粘度(稀释比 $1:3\sim 4$,稀释剂AZ303)、低湿度条件下得到的,即被涂毛坯件边吊出液面边挥发变干成膜。所以,胶液的初始速度为提拉速度 v ,待离开液面时,被涂毛坯件表面胶液流速即已为零。故膜层厚度完全由表面附面层的厚度决定,与初始速度 v 、胶液粘度 ν (运动粘度)有关。由于胶液粘度较低(小于 3 厘泊),其雷诺数 $Re < 2000$,被涂毛坯件表面形成的是层流附面层,可按层流附面层厚度计算如下^[11]

$$\delta = 5.84 \sqrt{\frac{V_x}{v}} \quad (11)$$

其中的提拉速度 v 即为层流附面层的外边界速度(被涂毛坯件以速度 v 从静止的胶液槽中提出,等效于槽中胶液相对于被涂毛坯件以 $-v$ 的速度流动)。此即为提拉法涂胶参数 δ 、 ν 、 v 之间的数学模型。

3 实验测试及讨论

根据上述的理论模型,对涂胶厚度随粘度的变化 $\delta(\nu)$ 及涂胶厚度随提升速度的变化关系 $\delta(v)$ 分别作了模拟计算,结果如下图3、4所示。从图中可看出如下变化规律:

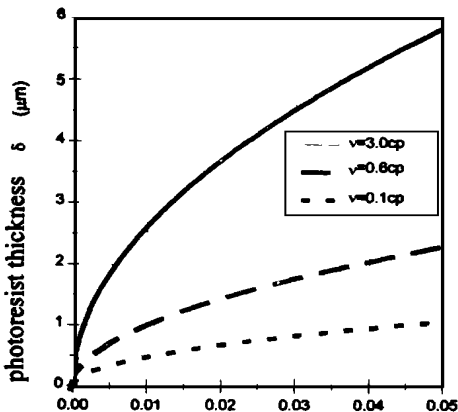


Fig. 3 $\delta(\nu)$ under different viscosity

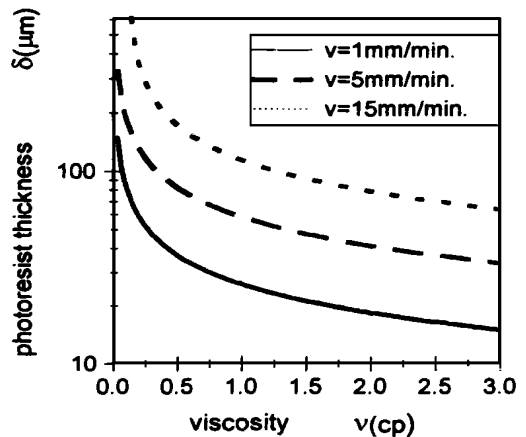


Fig. 4 $\delta(\nu)$ under different pulling speed

1. 涂胶厚度随胶液粘度的增大而增加;

2. 当提升速度增大时, 涂胶厚度增加的加速度亦增加;

3. 涂胶厚度随提升速度的增大而增大;

4. 当胶液粘度逐步增大时, 涂胶厚度增大的速度就越快。

为了验证理论分析的正确性, 用 Bp-201 光刻胶进行涂胶实验。

图5是根据实际测试数据拟合的涂胶厚度与速度关系曲线 $\delta(v)$, 从图中可看出, 涂胶厚度随提拉速度增加的变化规律与模拟计算结果所反映的变化规律是一致的。说明上述的理论分析是正确的。

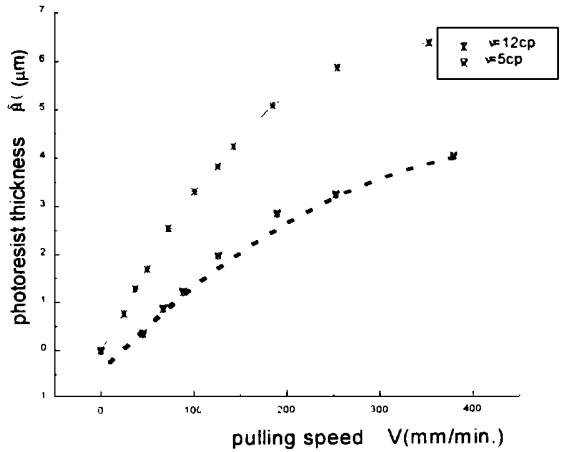


Fig. 5 Pulling speed versus resist thickness

参 考 文 献

- 1 山东工学院, 东北电力学院合编. 工程流体力学. 北京: 水利电力出版社, 1987: 120
- 2 王焕德主编. 流体力学和流体机械. 北京: 中国农业机械出版社, 1981: 185

Dynamic Analysis of Dip Coating

FU ong-Qi, REN an-Tong

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

Flowing form of resist forced by gravity during process of dip coating is analyzed in this paper. Relationship among parameters of pulling speed, viscosity & coated resist thickness have been deduced in the view of liquid dynamics. Measured by practical dip coating and experiment, the changing rule reflected by the theoretical results is coincide well with the measuring data.

Key words: Dip coating, Liquid dynamics, Resist thickness, Viscosity

付永启 男, 1967年5月生。1988年毕业于吉林工业大学农业机械专业, 获工学学士学位, 1994年2月于长春光学精密机械学院精密机械系获工学硕士学位; 1996年5月于中国科学院长春光学精密机械研究所获工学博士学位。感兴趣的研究方向为精密测试、光学刻划。目前在长春光机所物理学博士后流动站衍射光学元件的制作研究。已发表论文16篇。