

空间太阳能电池自动封装机器人的涂胶过程

赵 辉, 付 庄, 李培波, 赵言正

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030 E-mail yzh-zhao@sjtu.edu.cn)

摘 要: 为了提高空间太阳能电池的封装质量, 对自动封装机器人的注射器涂胶过程进行了建模与分析. 基于非牛顿流体理论, 建立了盖片胶的圆管流动模型, 并使用有限元软件 Adina 进行了数值计算. 根据理论模型求解出了针头段的速度场, 同时得到了模型的数值解, 二者进行了对比验证. 从而获得了圆管流动出口流量的精确解, 用于下节过程——平面扩散中盖片胶初始形状的计算. 涂胶过程中的参数, 包括: 盖片胶粘度、注射器入口压强、针头直径, 影响着涂胶量, 进而影响着最终的封装质量.

关键词: 空间太阳能电池; 自动封装机器人; 涂胶; 非牛顿流体; 圆管流动; Adina

中图分类号: O373 O357

文献标识码: A

文章编号: 0367-6234(2008)05-0779-04

Coating process of automatic bonding robot for space solar cells

ZHAO Hui, FU Zhuang, LI Peibo, ZHAO Yan-zheng

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

E-mail yzh-zhao@sjtu.edu.cn

Abstract The syringe-coating process of an automatic bonding robot is studied in order to improve the bonding quality of space solar cells. Based on non-Newtonian fluid theory, a mathematical model of pipe flow of the adhesive was founded, and the finite element program 'Adina' was employed to calculate the flow field. The velocity field of the needle section was worked out according to the theoretical model. Meanwhile, the numerical solution of the model was also calculated, and compared with the theoretical solution. Thus an analytical solution of the outlet flow rate of the needle was obtained to calculate the initial state of the adhesive in next planar spreading process. Three parameters in coating process, including the adhesive's viscosity, the syringe's inlet pressure and the needle's diameter, affect the coating volume flow and the final bonding quality.

Key words space solar cell; automatic bonding robot; coating; non-Newtonian fluid; pipe flow; Adina

目前, 航天器电源系统大多采用太阳能电池方阵、蓄电池组电源系统供电. 在地球的外层空间 (150 km 以外), 太阳辐照度大约为 1360 W/m^2 , 是地面的 13~17 倍^[1]. 空间环境非常恶劣, 温度起伏大, 高能粒子多, 使得工作在其中的太阳能电池必须具备性能稳定和抗辐射特性. 为了保证太阳能电池在恶劣的太空环境下能可靠运行, 必须在太阳能电池的表面进行抗辐照玻璃盖片的封装操作, 以达到保护太阳能电池的目的.

空间太阳能电池的封装工艺过程如下: 带互连片的空间太阳能电池表面涂胶 $\rightarrow$ 抗辐照玻璃盖片与电池片封装 $\rightarrow$ 加热固化 $\rightarrow$ 检测测试^[1]. 封装后太阳能电池表面胶层厚度是否均匀将影响电池的抗辐照能力和光电转化效率; 气泡的大小和数量将影响太阳能电池的寿命; 封装不恰当将造成太阳能电池内部或边缘有裂缝^[2]; 盖片胶的外溢将影响封装的成品率和航天器的外观质量, 进而影响航天器的制造成本和可靠性; 封装胶层超出一定的厚度范围, 将不能满足太阳光的透射率要求, 从而影响太阳能电池的光电转化效率.

本文在机器人技术的平台上, 借鉴国内外的一些相关技术^[3], 找到了一种适合太阳能电池表面的自动涂胶方法及太阳能电池与玻璃盖片的自动封装方

收稿日期: 2005-12-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60675040).

作者简介: 赵 辉 (1981-), 男, 博士研究生;

赵言正 (1965-), 男, 教授, 博士生导师.

法,在满足最新一代航天器电源系统质量可靠性的同时,还能保证涂胶和封装的产品合格率和劳动生产率尽可能的高,较好的达到了预期要求.

本文研究的是自动涂胶方法.基于非牛顿流体理论,通过实验测出了盖片胶的粘度,并通过深入的分析,建立了盖片胶的圆管流动模型,求解出了针头段的速度场,并使用有限元软件 Adina 进行了数值计算,将二者结果进行了对比验证,从而获得了圆管流动出口流量的精确解,用于下一过程——平面扩散中盖片胶初始形状的计算.

1 自动涂胶过程

1.1 机器人简介:

整个机器人系统主要包括 5 部分:三自由度直角坐标机器人平台,涂胶系统,封装系统,调平平台以及控制子系统^[4].如图 1 所示.

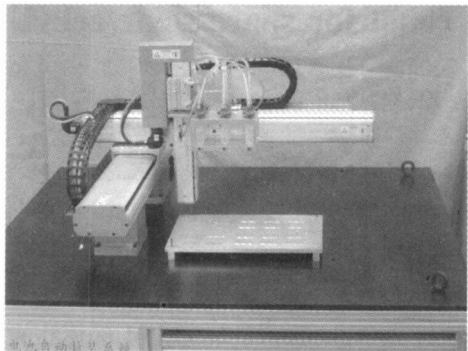


图 1 自动封装机器人

1.2 自动涂胶:

涂胶过程如下:机器启动,初始化工作完成后,选择涂胶程序,机器人涂胶机构开始移动,迅速将注射器靠近空间太阳电池片表面,以较慢速度移动针头,在电池片上方走出了一系列的“之”字路径,并将盖片胶均匀的涂在了电池片上^[4].注射器中的盖片胶在进出口压强差作用下,作圆管流动,从针头流出,落在电池片上.

2 盖片胶粘度特性

对于本文要讨论的问题来说,只需关注盖片胶的粘度特性.盖片胶是复杂的非牛顿流体,可选取相应的本构模型来近似^[5].根据需要,本文将盖片胶取为幂率流体^[6,7].实验所用的仪器为高级流变扩展系统 (ARES),采用同心圆桶法,对盖片胶做应变率扫描,考虑了实验时盖片胶的实际流动速度范围,即对应着应变率范围,得到表观粘度与应变率之间相关联的实验数据,并通过曲线拟合,得到表观粘度 η 随应变率 $\dot{\gamma}$ 变化的曲线,如图 2 所示.

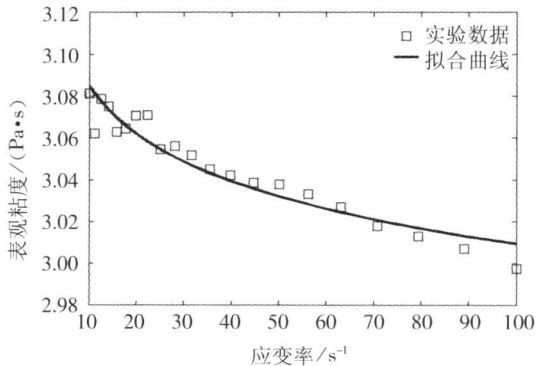


图 2 表观粘度与应变率的关系图

通过曲线拟合,得到

$$\mu = 3.162\ 2 \quad n = 0.989\ 3$$

于是

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} = \mu \cdot (\dot{\gamma})^{n-1} \cdot \dot{\gamma} = \mu \cdot (\dot{\gamma})^n = 3.162\ 2 \cdot (\dot{\gamma})^{0.989\ 3}.$$

3 圆管流动建模求解:

在圆管流动中,注射器中的盖片胶在入口处压力的作用下,从下端出口处快速流出,落在下面的玻璃片上,其示意图如图 3 所示.

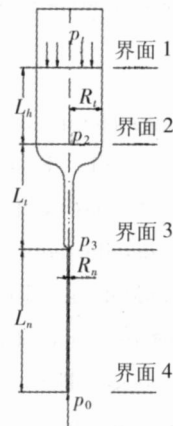


图 3 圆管流动示意图

针筒内盖片胶的流动分为三段:针筒段,过渡段和针头段.从实验情况来看,涂胶时盖片胶流动平稳,无紊流现象,故假定整个圆管流动处于层流状态.

选取圆柱坐标系 $O r \theta z$ 原点 O 位于针头出口处的中心,平行于任一针筒半径方向取为 r 方向,垂直于纸面为 θ 方向,沿针筒轴线向上取为 z 方向. $r z$ 平面位于纸面内.

假定各段的流动均为轴对称的,则 θ 方向的流速为零^[5].设盖片胶的流场为

$$u_r = u_r(r, z, t), u_z = u_z(r, z, t), u_\theta = 0$$

相应地,柱坐标系下的连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\rho u_r r)}{\partial r} + \frac{\partial (\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

沿 r, z 两个方向上的动量方程为

$$\rho \left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta}}{r}. \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z. \quad (3)$$

式中: ρ 为盖片胶密度, p 为热力学压强, τ 为偏应力张量的各分量, F_z 为重力项.

盖片胶本构关系用幂率流体来表示, 偏应力张量与应变率张量的幂率关系^[5]如下

$$\tau_{ij} = \eta \cdot \dot{\gamma}_{ij} = \mu \cdot (\dot{\gamma}_{ij})^n, \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (4)$$

流场边界条件定义如下

$$\begin{aligned} u_r|_{\Omega} &= 0, & u_z|_{\Omega} &= 0 \\ p|_{in} &= p_L, & p|_{out} &= p_0. \end{aligned} \quad (5)$$

式中: Ω 代表整个三部分流场的边界墙壁, $p|_{in}$ 为入口处压强, $p|_{out}$ 为出口处压强.

以上即为圆管流动的数学模型. 由于问题的特殊性, 模型还可以进一步简化.

考虑图 3 中上面较粗的针筒段, 因为针筒的直径远远大于针头的直径, 所以入口处液面下降缓慢, 流场在每个短时间内可视为静态的, 故图 3 中界面 2 处压强为 $p_L + \rho g L_h$; 又 $p_L \gg \rho g L_h$, 所以可忽略后者, 即 $p_2 \approx p_L$.

中间过渡段, 由粗口到细口, 流体速度加快, 同时流体压强减小, 所以界面 3 处的压强小于界面 2 处的压强, 即 $p_3 < p_2$.

再考虑下面的针头段的流动. 显然, 该段内流体沿 r 方向的速度为零, 所以只用考虑 z 方向上的流动. 假设流体不可压缩, 则密度恒定不变. 相比较上下端口的大压强差, 流体的重力可忽略. 在注射器上下压差不变的情况下, 可基本假设该段的流体为定常流动.

这样, 速度场可简化为^[4]

$$u_z = u_z(r), \quad u_r = u_{\theta} = 0$$

相应的, 连续性方程 (1) 自动满足. 而动量方程 (2)、(3) 则简化为只沿 z 方向, 形式如下

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}). \quad (6)$$

幂率流体的本构关系具体形式如下^[5]

$$\tau_{rz} = \mu \cdot (\dot{\gamma}_{rz})^n = \mu \cdot \left| \frac{\partial u_z}{\partial r} \right|^{n-1} \frac{\partial u_z}{\partial r}. \quad (7)$$

式中: μ 为流体的稠度系数, n 代表幂率指数.

式 (6)、(7) 联立, 积分, 再根据边界条件

$$u_z|_{r=R_n} = 0 \quad (8)$$

可得到针头段的速度场分布

$$u_z = \frac{n}{n+1} \left[\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right]^{\frac{1}{n}} \left(R_n^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}} \right). \quad (9)$$

此即针头段的速度场分布.

根据公式

$$Q = \iint_S dS = \int_0^R u_z \cdot 2\pi r \cdot dr. \quad (10)$$

可求出针头流量

$$Q = \pi \left[\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right]^{\frac{1}{n}} \frac{n}{1+3n} R_n^{\frac{1+3n}{n}}. \quad (11)$$

由于 $\frac{\partial p}{\partial z} \approx \frac{\Delta p}{L_n} = \frac{p_3 - p_0}{L_n}$, p_3 是未知的, 但在过

渡段, p_3 与 p_2 有关系, 而且 $p_2 \approx p_L$, 所以, 可将过渡段与针头段放在一起考虑, 针头段的速度、流量公式仍分别采用式 (9)、(11), 但是其中的压强

梯度变化为 $\frac{dp}{dz} \approx \frac{p_3 - p_0}{L_n} \approx \frac{p_2 - p_0}{L_n + L_t} \approx \frac{p_L - p_0}{L_n + L_t}$. 于是式 (9)、(11) 分别变为

$$u_z = \frac{n}{n+1} \left[\frac{1}{2\mu} \cdot \frac{p_L - p_0}{L_n + L_t} \right]^{\frac{1}{n}} \left(R_n^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}} \right). \quad (12)$$

$$Q = \pi \left[\frac{1}{2\mu} \cdot \frac{p_L - p_0}{L_n + L_t} \right]^{\frac{1}{n}} \frac{n}{1+3n} R_n^{\frac{1+3n}{n}}. \quad (13)$$

4 仿真实验验证:

为了对理论结果进行验证, 本文对模型也进行了数值求解^[8]. 采用有限元软件 Adina 使用其流体模块 Adina-F, 几何模型只画了过渡段和针头段这两部分, 针筒和针头关于中心轴对称, 所以只取了轴截面来计算. 划分网格后, 如图 4 所示.

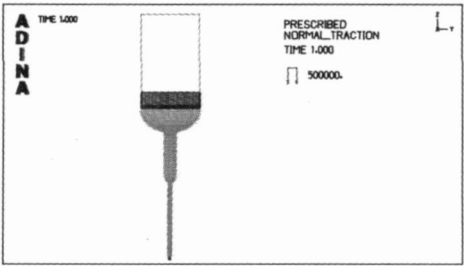


图 4 圆管流动有限元模型

在施加了相应的荷载和边界条件后, 即可调用求解器进行计算. 用矢量图来表示流场速度的空间分布, 如图 5 所示.

利用式 (12) 计算出的针头速度 $u_z(r)$, 沿半径 r 方向呈抛物线分布. 而仿真模型里, 针头段沿着半径 r 方向共划分了 7 个单元, 每个单元的速度用小方框表示. 这样, 可得到针头段速度的理论解与数值解, 放在同一图中作比较, 如图 6 所示.



图 5 流场速度矢量图

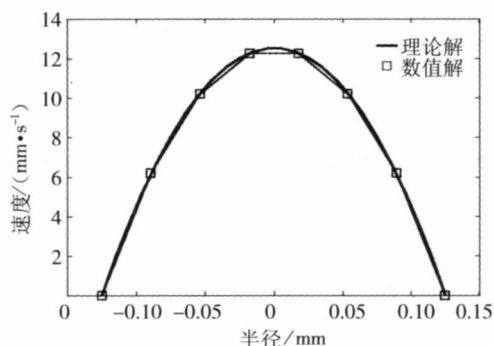


图 6 针头段速度的理论解与数值解比较

从上图可看出,理论解与数值解吻合的非常好,从而证明了二者的正确性.基于该速度解求出的针头流量式(13),可以作为下一扩散过程分析的依据.用 Adina 软件对胶的圆管流动进行模拟仿真,也是可信的.

5 结 论

本文从理论建模和数值计算上研究了空间太阳能电池自动封装机器人的涂胶过程.

1) 圆管流动速度场的理论解和数值解通过对比验证,证明结果正确;

2) 针头出口流量的精确理论解可用于计算下一过程——平面扩散中盖片胶的初始形状;

3) 建立了圆管流动的仿真平台,当涂胶参数如盖片胶粘度、注射器入口压强和针头直径改变时,可以对涂胶量和最终的封装质量进行评估预测.

参考文献:

- [1] 杨庆华. 空间太阳能电池自动封装机器人的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2004.
- [2] FU Z, ZHAO Y, CAO Q, *et al*. Solar cell crack inspection by image processing [C] // Proceedings of 2004 International Conference on the Business of Electronic Product Reliability and Liability. Shanghai: ICBEPR, 2004: 77–80.
- [3] BUSH R. Matching fluid dispensers to materials for electronics applications [J]. Electronic Packaging & Production, 1997, 37(9): 6–62.
- [4] ZHAO Y, FU Z, YANG Q, *et al*. Study on quality control in the bonding processing of space solar cell [C] // Proceedings of 2004 International Conference on the Business of Electronic Product Reliability and Liability. Shanghai: ICBEPR, 2004: 9–12.
- [5] 韩式方. 非牛顿流体本构方程和计算解析理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [6] OSTWALD W, DE WAELE A. Oil and color [J]. Chem Assoc J, 1923: 6–23.
- [7] 陈宏, 周伊云, 罗锡荣, 等. 反式-1,4-聚异戊二烯及其混炼胶的流变特性 [J]. 轮胎工业, 2002, 22(11): 643–647.
- [8] 吕振华, 伍卓安, 李世民. 减振器节流阀非线性特性的有限元模拟分析 [J]. 机械强度, 2003, 6: 614–620.

(编辑 赵丽莹)