

食品装备管路自动涂胶装置及其挤出流道结构优化

Automatic gluing device for food equipment pipeline and the optimization of its extrusion flow channel structure

杨金山¹ 汤晓华¹ 杨泗萍² 刘鑫¹

YANG Jin-shan¹ TANG Xiao-hua¹ YANG Si-ping² LIU Xin¹

(1. 北京工商大学人工智能学院, 北京 100048; 2. 中国航空工业标准件制造有限责任公司, 贵州 贵阳 550014)

(1. School of Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;

2. China Aviation Industry Standard Parts Manufacturing Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550014, China)

摘要:目的: 获得食品加工输送管路缠绕加热带表面粘接剂均匀、可控涂抹的胶层。方法: 通过流变学试验获取硅橡胶本构模型, 利用 Polyflow 仿真硅橡胶挤出流动过程, 以加热带长度、宽度方向涂胶均匀性为目标, 开发挤出试验机系统, 分析不同流道出口收缩段长度、出口厚度下的流速和体积流量分布特征, 优化流道出口结构参数, 经涂胶试验验证胶层均匀性, 并迭代流道出口结构。结果: 硅橡胶具有剪切变稀的特性; 当收缩段长为 5 mm, 口厚为 0.8 mm 并在出口中心处距离边缘 3.5 mm 的位置线性扩展至 1.05 mm 时, 涂胶均匀性最佳。结论: 对硅橡胶流道出口两端边缘厚度加以线性扩展, 能够改善涂胶均匀性; 出口与加热带的间距及硅橡胶流速与缠绕速度匹配性是影响涂胶均匀性的另一关键因素。

关键词: 管路; 硅橡胶; 涂胶; 挤出流道; 均匀性

Abstract: **Objective:** The adhesive layer of food processing and conveying pipeline winding and tropical surface adhesive was obtained. **Methods:** The silicone rubber constitutive model was obtained through rheological test, and POLYFLOW was used to simulate the silicone rubber extrusion flow process. Aiming at the gluing uniformity in the length and width direction of the heating belt, the extrusion test electromechanical system was developed to analyze the flow velocity and volume flow distribution characteristics under different channel outlet shrinkage section length and outlet thickness. The channel outlet structural parameters were optimized. The uniformity of adhesive layer was verified by gluing test, and the outlet structure of runner was iterated. **Results:** Silicone rubber has the characteristics of shear thinning.

作者简介: 杨金山, 男, 北京工商大学在读硕士研究生。

通信作者: 汤晓华 (1963—), 男, 北京工商大学教授, 博士。

E-mail: tangxiaohua@th.btbu.edu.cn

收稿日期: 2021-09-03

Within the set parameters of the extrusion runner structure; the length of the shrinkage section of 5 mm, the mouth thickness of 0.8 mm, and the center of the runner outlet of 3.5 mm away from both sides. The runner structure with linear expansion was the best structural parameter for the uniformity of glue application. **Conclusion:** Silicone rubber is a pseudoplastic non-Newtonian fluid. The coating uniformity can be improved by linearly expanding the edge thickness at both ends of the runner outlet. The distance between the outlet and the heating belt and the matching of silicone rubber flow rate and winding speed are another key factor affecting the uniformity of gluing.

Keywords: pipeline; silicone rubber; gluing; extrusion flow structure; uniformity

管路输送因其具备密闭、高效、损耗少等优点可以输送各种物料、蒸汽和水等物质, 在食品加工设备中得到广泛应用。由于许多食品物料流动性及品质受温度影响很大, 因此管路加热保温成为必然, 如在采用管路运输蒸汽间接加热的连续式海参蒸煮设备上^[1], 较大的温度波动量、滞后量和超调量都会造成蒸煮后的海参品质偏差; 在浓缩南瓜汁的流化床蒸发器设备上^[2], 其主体结构部分是不锈钢管路, 然而在蒸发浓缩时, 南瓜汁的有效营养成分会因受热温度的变化导致不同程度的损失; 在采用管路输送蒸汽加热的加料机设备上^[3], 料液的温度也是影响胶料均匀性的关键因素。

传统食品加工设备上的管路本身输送功能单一, 管路多采用包裹保温材料的被动保温方式, 以实现管路在运输物质时的保温等温度控制功能, 还可能有防腐和阻燃等附加特性^[4-5], 如以涂胶缠绕实现加热、保温功能则能够更好地满足使用需求。其中, 管路非黏性功能带涂胶缠绕食品加工管路工艺中的粘接剂涂胶均匀性, 是决

定后续管路温度控制功能优劣的核心与基础。

关于涂胶工艺过程研究,李联成等^[6]探讨了卫星上管路加热带缠绕工艺,利用人工刮涂的方式完成加热带上粘接剂的涂覆,提出实现涂胶的均匀性是技术难点。由数值模拟计算提供精确结果已经被广泛用于流体的挤出流动及成型^[7-10],而有限元流体分析软件的引入,提供了一种相对简便有效的数值模拟方案,流体的流变模型的建立和边界条件的设定是模拟准确性关键之一。赵言正等^[11]运用有限元软件 Adina 分析空间太阳能电池与防辐射盖板之间涂层的粘附机理及影响粘接质量的相关因素,建立了盖片胶的流动模型。Akter 等^[12]建立了线材涂层运动速度和压力分布的柱坐标数学模型,分析流体压力对涂覆过程的影响。李东等^[13]对 PVC 木塑复合材料异型材使用 Polyflow 模拟其在挤出模中的流动,并结合产品实际测试结果,以实现异型材截面的平衡流动进行优化设计。

课题组拟选取硅橡胶作为聚酰亚胺加热带管路缠绕的粘接剂^[14-18];通过对加热带内附的电阻丝两端通电实现对管路的升温加热及保温。采用旋转流变仪试验建立硅橡胶的本构模型;运用仿真软件对硅橡胶的流道出口结构进行仿真优化,比对其对加热带表面硅橡胶涂胶厚度及均匀化效果的影响,筛选最佳挤压流道结构,并通过试验验证,以获得缠绕加热带表面粘接均匀、可控涂抹的胶层,为后续缠绕食品加工管路装备开发提供有效设计规范和工程实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料及分析软件

脱醇型单组份室温硫化硅橡胶:GD414 型,中昊晨光化工研究有限公司;

聚酰亚胺加热带:内含两根电阻丝,厚 0.1 mm,宽 10 mm,市售;

流体分析专业软件 Polyflow,集成于 ANSYS WORKBENCH 中,使用过程中调用 Polyflow 模块。

1.2 试验仪器

流变仪:TA-DHR2 型,美国 TA 公司;

激光位移传感器:LK-G150 型,基恩士(中国)有限公司;

嵌入式控制系统:STM32F103 型,意法半导体公司;

电子称重系统:LP7510 型,北京朗科称重设备有限公司;

注射器:10 mL,山东通迈医疗器械有限公司。

1.3 硅橡胶黏度特性测定

试验采用 TA-DHR2 型旋转流变仪对硅橡胶的流变特性进行了测试,试验类型为应变率扫描,采用平行板测量转子系统。该测量主要用于获取流体的稳态流动曲线,根据曲线拟合剪切黏度和剪切速率的方程。非牛顿流体在平行圆板间隙中的剪切速率会因径向距离 r 而变

化,剪切应力需要校正^[19]。

2 涂胶挤出系统机构设计及流动过程数值模拟

2.1 流道挤出系统结构设计

涂胶系统由注射器和前端挤出流道系统复合构成,采用涂层法^[20],可以利用注射器实现精确地控制硅橡胶的沉积量。根据加热带长度方向为矩形的特征,初步将挤出流道系统设计成矩形出口如图 1 所示。注射器筒壁内径 Φ_1 为 15 mm,长径比为 5 : 1,扁口宽度 W_2 为 10 mm,与加热带宽保持一致。运用控制变量法通过只改变扁口的收缩段长度 h 和扁口厚度 w_1 两个参数中的一个,保持另一个参数不变的方法研究其对出口流速变化的影响,具体方案:

(1) 收缩段长 h 设置为 5 mm,选取 3 组扁口厚度 w_1 ,分别为 0.4、0.6、0.8 mm。

(2) 扁口厚度 w_1 设置为 0.8 mm 时,选取 3 组收缩段长 h ,分别为 5、10、15 mm。

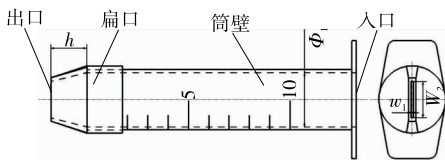


图 1 结构模型示意图

Figure 1 Schematic diagram of structural model

2.2 硅橡胶挤出流动过程的数值模拟

2.2.1 挤压流动过程的控制方程 流体满足于三大定律,即质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。基于质点或空间的研究方法为微分法,主要解决复杂的二维、三维流动问题。以微分形式的三大基本定律作为硅橡胶挤压流动的控制方程^[21]。

2.2.2 基本假设 为了使计算结果更容易收敛,对硅橡胶流体的稳态流动作出如下基本假设:

(1) 硅橡胶在流道中的流动是不可压缩的。

(2) 硅橡胶在流道中的流动是恒温的完全发展的稳态层流。

(3) 硅橡胶的黏性力远大于惯性力和重力,故忽略惯性力和重力。

2.2.3 本构方程 硅橡胶粘接剂是非牛顿流体,可选取近似的本构模型,根据需要,文中将硅橡胶取为幂律流体,其公式:

$$\eta = K(\lambda \dot{\gamma})^{n-1}, \quad (1)$$

式中:

η ——剪切黏度,Pa·s;

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率, s^{-1} ;

K ——黏度系数,Pa·s;

λ ——松弛时间,s;

n ——非牛顿指数。

2.2.4 边界条件 入口处施加恒定的法向速度 $V_n = 0.22 \text{ mm/s}$, 切向速度 $V_s = 0$, 出口处设为法向力 F_n 和切向力 F_s 均为 0, 壁面法向速度和切向速度均为 0, 松弛时间为 0.02 s , 流体密度为 1.2 g/cm^3 。

3 自动涂胶试验机电系统设计

3.1 机电系统

机电系统如图 2 所示, 由 3 部分构成: 自动涂胶机械系统, 由笛卡尔三自由度步进电机滚珠丝杠运动平台和涂胶系统构成; 检测系统及数据采集, 由激光位移传感器、压力传感器系统构成, PC 端采集数据; 驱动、控制及人机界面系统, 由 STM32F103RCT6 芯片为 MCU 的嵌入式系统构成^[22-23]。试验台机械系统如图 3 所示。

3.2 自动涂胶及其检测过程

涂胶流程主要由两部分构成, ① 涂胶: 经人机界面启动后, 自动涂胶试验台图 3 中 X 轴、Z 轴按照设定流量、涂胶厚度参数协同运动, 直至涂胶结束; ② 胶层厚度检测: 在加热带涂胶方向依据试验方案要求沿 Y 轴方向扫描截取胶层厚度数据, 数据由激光位移传感器采集、计算机存储处理。

3.3 自动涂胶试验方案

加热带胶层目标厚度设定为 0.4 mm , 宽度为 10 mm , 既要保证加热带同一截面宽度方向胶层厚度均匀性, 又要保证加热带长度方向不同截面上胶层厚度的一致性。试验取加热带涂胶试样长度为 50 mm , 在 4 等分段、5 个不同截面上使用激光位移传感器沿 Y 轴方向检测胶层厚度及宽度分布。参数设定: 激光采样频率设定为 250 Hz ;

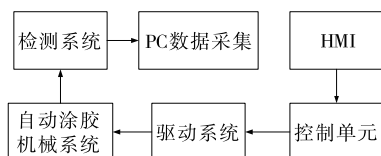


图 2 自动涂胶机电系统框图

Figure 2 Block diagram of automatic gluing electromechanical system

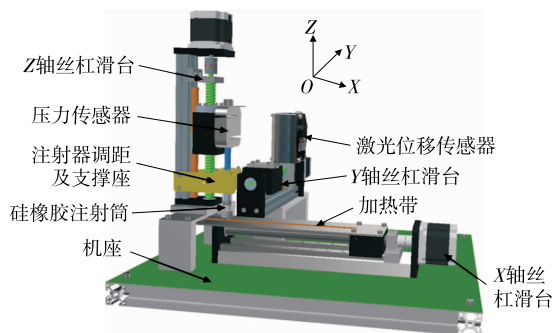


图 3 自动涂胶试验台

Figure 3 Automatic gluing test bench

设置 Z 轴注射器丝杠滑台的位移速度依次为 $0.22, 0.32, 0.43 \text{ mm/s}$ 3 种速度, 均为匀速运动, 分析 3 种速度对涂胶均匀性的影响, 为下一步的加热带管路缠绕提供工程工艺参数。

4 结果与分析

4.1 硅橡胶流动曲线

在 25°C 下用旋转流变仪测定了硅橡胶的流动曲线如图 4 所示。由图 4 可知, 硅橡胶具有“剪切稀化”的特性, 属于非牛顿流体范畴的假塑性流体。选取幂律模型拟合曲线。

通过曲线拟合, 得到 $K = 197.24 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $n = 0.74$, 本构方程:

$$\eta = 197.24 \times \dot{\gamma}^{-0.26} \quad (2)$$

4.2 Polyflow 仿真结果

4.2.1 初步仿真 通过 Polyflow 仿真模拟得到出口的流速曲线, 出口处流速沿 W_2 方向分布的一致性决定涂胶厚度的均匀性, 因此以流道出口厚度中心线流速为基准, 绘制沿该线流速曲线, 对比不同结构出口流速的均匀性。

由图 5 可知, 当收缩段长度不变时, 口厚越大, 出口处流速均匀性越好, 故选择扁口厚度 $w_1 = 0.8 \text{ mm}$; 当扁口厚度为 0.8 mm 时, 收缩段长越小, 出口处流速均匀性越好, 故选择收缩段长 $h = 5 \text{ mm}$ 。初步选择扁口厚度 w_1 为 0.8 mm , 收缩段长 h 为 5 mm 的出口结构。图 6 中 $w'_1 = 0.8 \text{ mm}$ 时为未修正出口流量曲线, 说明边缘流量下降明显, 需修正。

4.2.2 修正仿真 将出口处沿 Y_1 轴方向 10 等分如图 6 所示, 分析其出口流量分布。由于出口结构的对称性, 以出口对称中心 O_1 为原点, 绘制出口正向体积流量分布曲线。

由图 6 可知, 当 $w'_1 = w_1 = 0.8 \text{ mm}$ 不变时, 以 K 点为分界线, 曲线将出口按流量变化被分为两个区域: K 点左上方体积流量 (对应出口处中间 8 段的体积流量) 相邻差值变化不大, 最大体积流量差约为 $0.36 \text{ mm}^3/\text{s}$, 但总体体积流量随修正量增加而减小; K 点右下方出口两端处

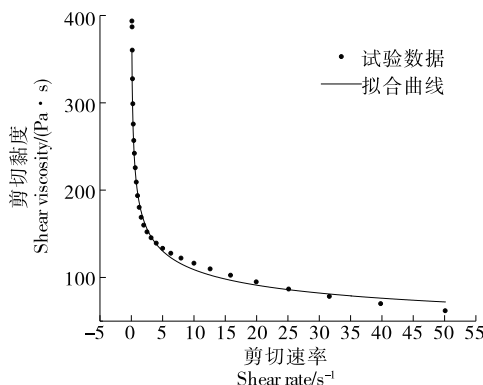


图 4 25°C 时硅橡胶的流动曲线

Figure 4 Flow curve of silicone rubber at 25°C

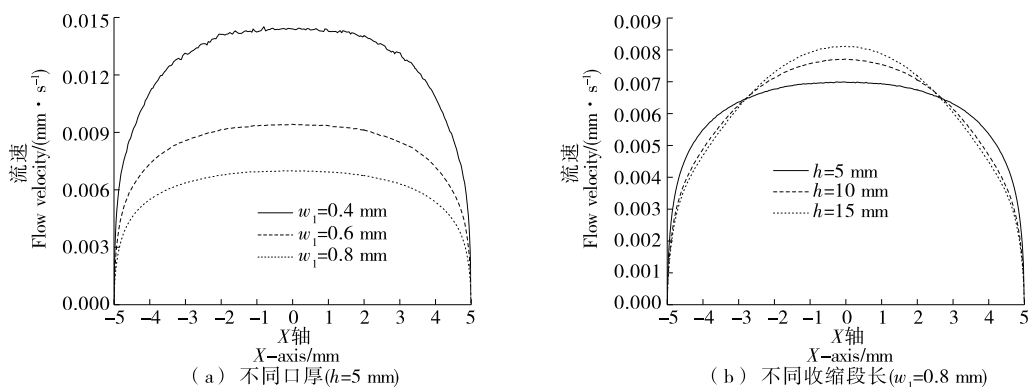
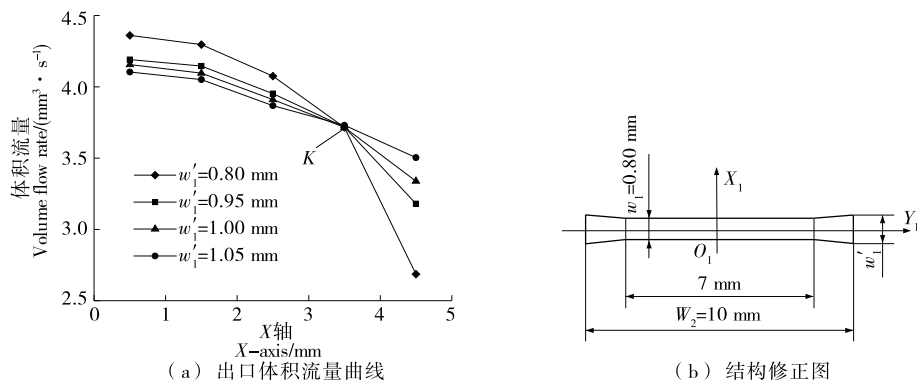


图 5 不同出口结构的流速曲线

Figure 5 Flow velocity curves of different exit structures

图 6 修正厚度 w'_1 对出口体积流量的影响Figure 6 Correcting the influence of thickness w'_1 on outlet volume flow

的体积流量相对变化较大,约为 $1.03 \text{ mm}^3/\text{s}$,且随修正量增加体积流量增大。造成上述变化原因分析如下:在总体积流量为常数不变约束下, K 点右下方由于出口修正增大因素影响导致该区域体积流量增加,必定导致 K 点体积流量相应减小。则考虑在距 O_1 点距离 3.5 mm 处,即变化交点 K 处的对称两个位置为起始点向各自出口末端线性扩展。修正方案依次设置 w'_1 厚度为 0.95, 1.00, 1.05 mm,经 Polyflow 模拟仿真,得到修正前与修正后的体积流量对比图。修正后的体积流量分布改善明显,当 $w'_1=1.05$ mm 时,修正效果最好,出口速度云图见图 7。综上所述,最终确定收缩段长度 h 为 5 mm,口厚 0.8 mm,在距离边缘 1.5 mm 处开始至两端口厚进行线性修正至 1.05 mm。

4.3 自动涂胶试验验证

为验证仿真结果,并考虑到扁口结构机械加工工艺性,采用 3D 金属激光打印加工注射器出口结构,尺寸误差控制在 0.1~0.2 mm。试验选取两款流道出口结构:收缩段长 h 为 5 mm,一种为修正后口厚 w_1 为 0.8 mm 结构;另一种为口厚 0.6 mm 未修正的结构。

对口厚 0.6 mm 的未修正结构进行涂胶测试,设置参数为:向下挤压速度为 0.22 mm/s,流道出口所在的表面与加热带之间的间距调整为 0.4 mm,硅橡胶挤压速度经

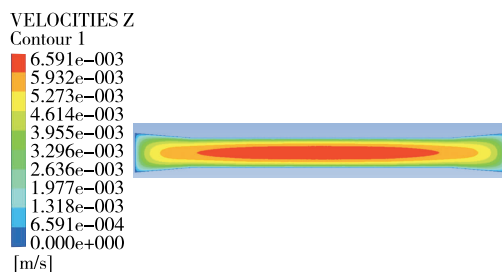


图 7 修正后流道出口速度云图

Figure 7 The corrected cloud diagram of the exit velocity of the runner

换算为每秒体积流量 $3.8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$,求得加热带丝杠滑台位移速度为 9.42 mm/s。Polyflow 数值模拟计算得到的出口流量为 $3.798 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$,通过称重显示仪数据,测得挤压过程中流体实际内部平均压力为 19 476.23 Pa, Polyflow 数值模拟流道内平均压力为 19 717.61 Pa,误差为 241.38 Pa,相对误差 1.22%,表明仿真计算出口流量与压力可信。然后进行 3 次涂胶测试,对比涂胶 5 个截面厚度的平均值。结果表明:未修正结构涂胶厚度曲线各截面均呈现中凸,涂胶厚度均匀性有待改善,但其在 5 个不同截面厚度误差较小,最大误差为 0.03 mm,实际涂胶结果与模拟仿真结果趋势基本保持一致。

对修正后结构进行涂胶测试,设置参数依次为:向下挤压速度 0.22,0.32,0.43 mm/s,计算求得其加热带丝杠滑台的位移速度 V_x 为 9.42,14.13,18.84 mm/s,分别对 3 种挤压速度各做 3 组试验,得到 9 组数据,对比每种速度设置下 5 个截面涂胶厚度的平均值。由图 8 可知,在 $V_x=9.42$ mm/s 与未修正结构相同的涂胶速度下,修正后结构的涂胶厚度在各截面上均匀性较好,其在 5 个不同截面的厚度的一致性误差较小,最大误差为 0.02 mm,其实际涂胶结果与模拟仿真结果趋势也基本保持一致。涂胶厚度曲线呈现微小内凹外凸,有两种可能性:① 由于中间胶层流体挥发较快和较大的两边缘表面张力推动流体向两侧移动^[24];② 由于胶层两侧边缘受到约束,胶层固化后两侧边缘部分厚度大于中间部分厚度^[25]。两种出口结构的涂胶宽度都略大于 10 mm,最大为 10.35 mm,

可能是由于硅橡胶在挤出后的扩散造成的^[26-27]。

由表 1 可知, $V_x=9.42$ mm/s 时,平均涂胶厚度为 0.42 mm,相对误差为 14.45%,同理通过计算得到 $V_x=14.13$ mm/s 时,平均涂胶厚度为 0.41 mm,相对误差为 15.05%, $V_x=18.84$ mm/s 时,平均涂胶厚度为 0.41 mm,相对误差为 13.77%。据此推测在一定范围内涂胶速度对涂胶厚度和均匀性影响有限。在涂胶测试试验中发现,调整流道出口所在的表面与加热带之间的间距 h_3 , $h_3>0.4$ mm 时,会明显出现涂胶宽度 <10 mm 且涂胶厚度 >0.4 mm,与试验预期不符。硅橡胶的挤出体积流量与加热带上缠绕所带走硅橡胶量保持一致为原则,当加热带缠绕速度相对过快时,会因硅橡胶流体与加热带附着力不足导致硅橡胶在出口处堆积。

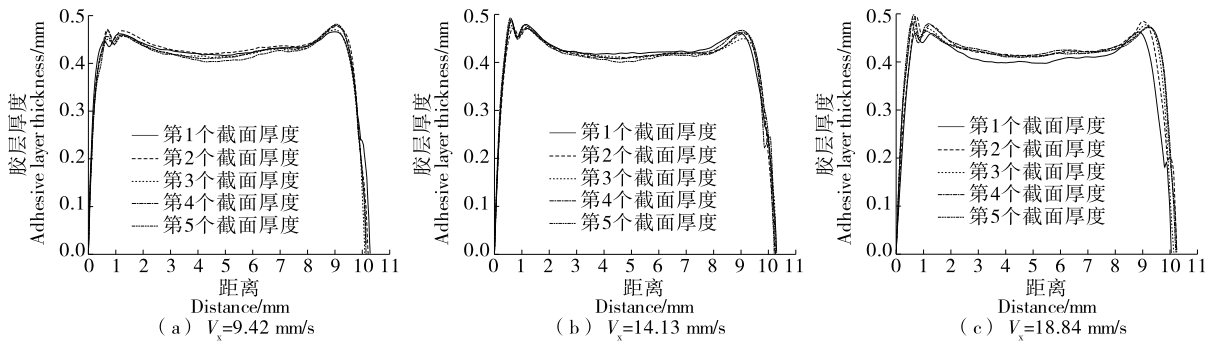


图 8 不同加热带位移速度下涂胶厚度的平均值曲线

Figure 8 Average value curve of gluing thickness under different displacement velocity of heating belt

表 1 $V_x=9.42$ mm/s 的不同截面涂胶平均厚度对比

Table 1 Comparison of average thickness of adhesive coating on different sections with $V_x=9.42$ mm/s

截面编号	最大厚度/mm	最小厚度/mm	最大偏差/mm	平均厚度/mm	相对误差/%
1	0.46	0.42	0.04	0.42	9.52
2	0.47	0.42	0.05	0.42	11.90
3	0.47	0.41	0.06	0.41	14.63
4	0.48	0.41	0.07	0.42	16.66
5	0.48	0.40	0.08	0.41	19.51
平均值	0.47	0.41	0.06	0.42	14.45

5 结论

(1) 旋转流变仪测定结果表明,硅橡胶的挤压流动具有剪切稀化特性,属非牛顿流体中的假塑性流体。

(2) Polyflow 数值模拟的硅橡胶出口体积流量分布曲线与试验所得涂胶厚度曲线相符,表明幂律模型的准确性和数值模拟的可靠性。仿真优化基础上,确定了影响涂胶厚度均匀性的关键结构参数:扁口收缩段长,扁口

厚度和边缘线性修正位置及厚度修正数据。

(3) 开发了自动涂胶试验平台,通过涂胶测试表明出口与加热带之间的间距及硅橡胶的挤压速度与加热带的缠绕速度的匹配问题是影响厚度均匀性的关键因素之一,并且在一定范围内涂胶厚度的均匀性不受匹配后加热带移动速度的影响,可以实现对涂胶量的评估预测。

(4) 试验根据流道出口的体积流量曲线,在出口边缘处只进行了线性修正,不同速度下的涂胶均匀性平均误差约在 15%,后续将采用对流道出口边缘处进行更为精确的非线性修正方案进一步改善均匀性。

参考文献

[1] 倪锦,徐文其,沈建.旁路调节控制在连续式海参蒸煮设备上的应用研究[J].食品与机械,2015,31(6):105-108.
NI Jin, XU Wen-qi, SHEN Jian. Application on sea cucumber cooking equipment's control based on bypass adjustment[J]. Food & Machinery, 2015, 31(6): 105-108.
[2] 付振岭,刘振义,李丁,等.惰性粒子流化床蒸发器浓缩南瓜汁的传热研究[J].食品与机械,2005,21(2):41-43.
FU Zhen-ling, LIU Zhen-yi, LI Ding, et al. Investigation of heat transfer on the three-phase circulating fluidized bed evaporator during condensing pumpkin juice[J]. Food & Machinery, 2005, 21

- (2): 41-43.
- [3] 宋伟民, 徐晓光, 李春光, 等. 加料机料液温度控制系统的改进与工程应用[J]. 食品与机械, 2016, 32(2): 79-80, 83.
SONG Wei-min, XU Xiao-guang, LI Chun-guang, et al. Improved design and engineering application of feeding material liquid temperature control system[J]. Food & Machinery, 2016, 32(2): 79-80, 83.
- [4] 张思博. 基于机器人的 T 型管缠绕线型设计及轨迹规划[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018: 3-6.
ZHANG Si-bo. Winding pattern design and trajectory planning of tee tube based on robot[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2018: 3-6.
- [5] 周利成. 基于 ADAMS 的石油管道防腐胶带缠绕机的动力学分析[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2016: 1-3.
ZHOU Li-cheng. Dynamics analysis of the oil pipeline anticorrosion taps winding machine based on ADAMS[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2016: 1-3.
- [6] 李联成, 张萍. 卫星管路加热带安装工艺方法探讨[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(4): 384-386.
LI Lian-cheng, ZHANG Ping. Installation of pipeline with electric heater in spacecraft[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(4): 384-386.
- [7] ATLAS M, HUSSAIN S, SAGHEER M. Entropy generation and unsteady casson fluid flow squeezing between two parallel plates subject to cattaneo-christov heat and mass flux[J]. European Physical Journal Plus, 2019, 134(1): 1-16.
- [8] ROUT B C, MISHRA S R, THUMMA T. Effect of viscous dissipation on Cu-water and Cu-kerosene nanofluids of axisymmetric radiative squeezing flow[J]. Heat Transfer-Asian Research, 2019, 48(7): 3 039-3 051.
- [9] AI-SAIF A S J A, JASIM A M. A novel algorithm for studying the effects of squeezing flow of a casson fluid between parallel plates on magnetic field[J]. Journal of Applied Mathematics, 2019, 2 019: 1-19.
- [10] BHASKAR K, SHARMA K. Unsteady MHD squeezing viscous Casson fluid flow in upright channel with cross-diffusion and thermalradiative effects[J]. Indian Journal of Physics, 2021, 95(7): 1 453-1 467.
- [11] ZHAO H, FU Z, LI P B, et al. Anadhesion process for space solar cells[J]. Journal of Adhesion, 2007, 83(12): 1 003-1 029.
- [12] AKTER S, HASHMI M S J. Analysis of polymer flow in a conical coating unit: A power law approach[J]. Progress in Organic Coatings, 1999, 37(1): 15-22.
- [13] 李东, 马鹏涛, 廖洋威. 基于 Polyflow 仿真的 PVC 木塑复合材料异型材挤出模优化[J]. 模具工业, 2021, 47(7): 1-6.
LI Dong, MA Peng-tao, LIAO Yang-wei. Optimization of extrusion die for PVC wood plastic composite profile based on Polyflow simulation[J]. Die & Mould Industry, 2021, 47(7): 1-6.
- [14] BAI L, ZHAI L, HE M H, et al. Preparation of heat-resistant poly (amide-imide) films with ultralow coefficients of thermal expansion for optoelectronic application[J]. Reactive & Functional Polymers, 2019, 141: 155-164.
- [15] ZHAI L, YANG S Y, FAN L. Preparation and characterization of highly transparent and colorless semi-aromatic polyimide films derived from alicyclic dianhydride and aromatic diamines [J]. Polymer, 2012, 53(16): 3 529-3 539.
- [16] YIN Q, HU Y Y, QIN Y T, et al. Construction of polyimide films with excellent dimensional stability and toughness via incorporating point-to-face multi-coordination structure[J]. Composites Part B Engineering, 2020, 208(44): 108566.
- [17] SEYEDMEHDI S A, ZHANG H, ZHU J. Superhydrophobic RTV silicone rubber insulator coatings[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(7): 2 972-2 976.
- [18] CHEN D Z, LIU Y, HUANG C. Synergistic effect between POSS and fumed silica on thermal stabilities and mechanical properties of room temperature vulcanized (RTV) silicone rubbers [J]. Polymer Degradation & Stability, 2012, 97(3): 308-315.
- [19] ABBAS Z, JAFAR M A, HASNAIN J. Analysis of asymptotic solutions for non-Newtonian fluid flow between two parallel discs with dissimilar in-plane motion[J]. European Journal of Mechanics/ B Fluids, 2020, 84: 129-138.
- [20] 夏雨. 基于网版印刷法的空间太阳能电池阵自动装配机器人[D]. 上海: 上海交通大学, 2013: 19.
XIA Yu. Theauto-assembly robot of spacesolar cell arrays based on screen printing [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013: 19.
- [21] RAMPURE M R, KULKARNI A A, RANADE V V. Hydrodynamics of bubble column reactors at high gas velocity: Experiments and computational fluid dynamics (CFD) simulations[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(25): 8 431-8 447.
- [22] 杨泗苹, 汤晓华, 李天骄, 等. 糙米轮廓截面激光连续扫描机电系统开发[J]. 食品与机械, 2021, 37(4): 108-112, 138.
YANG Si-ping, TANG Xiao-hua, LI Tian-jiao, et al. Development of a continuous laser scanning electromechanical system for brown rice profile cross section[J]. Food & Machinery, 2021, 37(4): 108-112, 138.
- [23] 安嘉强, 汤晓华, 吴婧, 等. 奶油蛋糕远程 3D 打印机器人数控协同机电系统设计[J]. 食品与机械, 2019, 35(5): 123-126, 143.
AN Jia-qiang, TANG Xiao-hua, WU Jing, et al. Design of robot NC cooperative electromechanical system for remote 3D cake printer[J]. Food & Machinery, 2019, 35(5): 123-126, 143.

(下转第 151 页)

本栏目主持

中国食品科学技术学会
食品装备与智能制造分会