

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2016.03.006

纸浆模塑吸滤成型模具的吸浆孔结构优化

廖泽顺¹, 滑广军¹, 莫灿梁², 赵德坚¹, 谢勇¹

(1. 湖南工业大学 包装新材料与技术重点实验室, 湖南 株洲 412007; 2. 东莞市汇林包装有限公司, 广东 东莞 523520)

摘要: 对纸浆模塑吸滤成型模具的吸浆孔结构进行了优化, 以提高产品吸滤成型效率及均匀性。建立了纸浆模塑吸滤成型模具吸浆过程阻力的数学模型, 通过分析该模型得出吸浆孔的孔径大小及入出口截面突变是影响吸浆过程压力损失的主要因素。利用 ANSYS/FLOTRAN 仿真分析软件, 分别对不同孔径、不同锥度、不同倒角半径的模具吸浆孔模型进行了模拟分析, 并通过对比分析得到了最优吸浆孔结构参数; 最后进行了对比验证实验, 确定了纸浆模塑模具吸浆孔结构的优化参数: 孔径为 3 mm, 锥形吸浆孔的入口口径为 3 mm, 出口口径为 5 mm, 吸浆孔倒角半径为 1.5 mm。

关键词: 纸浆模塑; 模具吸浆孔; 结构优化; ANSYS/FLOTRAN

中图分类号: TB486+.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2016)03-0032-06

Optimization of Suction Filtration Mold's Midge Pore Structure of the Pulp Model

LIAO Zeshun¹, HUA Guangjun¹, MO Canliang², ZHAO Dejian¹, XIE Yong¹

(1. The Key Laboratory of New Packaging Materials and Technology, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China; 2. Huilin Packaging Co., Ltd., Dongguan Guangdong 523520, China)

Abstract: The optimization research of suction filtration mold's midge pore structure of the pulp model was made to improve product suction filtration efficiency and uniformity. The resistance mathematical model of the process of suction filtration mold of pulp molding was established. Through the analysis of the model, it was concluded that the pore size of the slurry and the mutation of the inlet and outlet section were the main factors influencing the pressure loss in the slurry process. Then the simulation software ANSYS/FLOTRAN were applied to simulate and analyze grout hole models with different diameters, tapers and chamfer radius. At last, the experiment was carried out. The optimization parameters of pulp mold suction hole structure were determined as the pore size being 3 mm, tapered bore grout inlet diameter being 3 mm, outlet diameter being 5 mm, grout hole chamfer radius being 1.5 mm respectively.

Key words: pulp model; mold's midge pore; structure optimization; ANSYS/FLOTRAN

0 引言

随着社会对包装环保要求的不断提高, 我国纸

浆模塑产业发展十分迅速。真空吸滤成型是纸浆模塑制品最主要的成型方式^[1]。目前, 业内专家对真空

收稿日期: 2015-10-12

基金项目: 湖南省重点研发计划基金资助项目(2015JC3114), 湖南工业大学自然科学基金资助项目(3510005)

作者简介: 廖泽顺(1989-), 男, 湖南永州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为产品包装设计及制造,

E-mail: 778496958@qq.com

通信作者: 滑广军(1975-), 男, 河南长垣人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要从事运输包装技术, CAD/CAE, 振动测试与故障诊断, 结构动力学方面的教学与研究, E-mail: 846620681@qq.com

吸滤成型理论及模具结构设计方面的研究取得了较大进展,但针对吸滤模具吸浆孔结构参数对产品成型过程影响方面的研究还不够充分,生产厂家对模具吸浆孔结构的设计基本上依据经验进行。

目前,我国对纸浆模塑真空吸滤成型理论研究较深的有张以忱等^[2],他们提出了基于造纸理论的吸滤成型模型,但是无法预测成型模具的结构参数对纸浆模塑制品成型过程和质量的影响;王惠书^[3]、刘志忱^[4]均对真空吸滤成型模具进行了研究,前者主要研究了成型模具结构与浆液的关系,后者主要研究了模具设计与纸浆模塑制品结构的关系。但是这些研究均未对模具吸浆孔结构参数对吸滤成型过程的影响进行分析。

本研究拟通过建立吸滤成型过程中成型模具吸浆孔阻力的数学模型,并通过分析建立的模型探讨吸滤成型过程中模具吸浆孔阻力的成因及影响因素;然后应用有限元分析软件 ANSYS/FLOTRAN 模拟吸滤成型模具不同吸浆孔结构参数对制品成型过程的影响,通过对比分析得出最优的模具吸浆孔设计方案,并在此基础上对模具吸浆孔结构进行改进;最后,通过实验验证所得参数的有效性,以期对纸浆模塑吸浆模具结构的优化设计提供理论参考依据。

1 吸滤成型过程压力损失分析及吸滤模型的建立

1.1 压力损失分析

吸滤成型过程中,浆液产生的压力损失主要包括沿程压力损失和局部压力损失^[5]。吸滤成型模具吸浆孔内的浆液流动可视为直孔管道流动,浆液沿吸浆孔产生的损失可视为沿程压力损失,即

$$\Delta p_1 = \lambda \frac{l v^2}{2 dg} \quad (1)$$

式中: Δp_1 为沿程压力损失, Pa;

λ 为沿程阻力系数;

l 为管道长度, m;

d 为管径, m;

v 为断面平均流速, m/s;

g 为重力加速度, m/s²。

在吸滤成型过程中,当浆液流进、流出吸浆孔时,其流速大小和方向会发生急剧变化,局部区域会出现旋涡、冲击等现象,流体质点间的互相碰撞和摩擦等会造成能量损失,这种能量损失表现为局部压力损失,即

$$\Delta p_2 = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

式中: Δp_2 为局部压力损失;

ζ 为局部阻力系数。

模具吸浆孔总压力损失 Δp_r 为总沿程压力损失与总局部压力损失之和,即

$$\Delta p_r = \sum \zeta \frac{v^2}{2g} + \sum \lambda \frac{l v^2}{2 dg} \quad (3)$$

1.2 吸滤成型阻力模型的建立

将成型模具各吸浆孔看成并联后与成型模具背腔形成串联关系,由公式(1)以及速度与流量的关系式(4)^[6]可以得到直管道流量与压差的关系式,如式(5)所示。

$$v = Q \cdot \left(\frac{\pi d^2}{4} \right)^{-1} \quad (4)$$

$$\Delta p = \lambda \frac{l v^2}{d 2g} = \frac{8\lambda}{g \pi^2 d^5} l Q^2 \quad (5)$$

式中: Q 为流量, m³/s;

Δp 为管道两端口的压力差, Pa。

由上式可知,单个抽气孔中滤液流量与压强的关系式如下:

$$Q_0^2 = \frac{1}{\lambda} \frac{\pi^2 d_0^5 g \Delta p_0}{8l_0} \quad (6)$$

式中: Q_0 为单个抽气孔中的滤液流量, m³/s;

d_0 为吸浆孔直径, m;

l_0 为抽气孔长度, m;

Δp_0 为吸浆孔两侧压力差, Pa。

成型模具所有抽气孔总的流量为

$$Q_{\text{总}} = n Q_0 \quad (7)$$

式中: n 为模具吸浆孔总数。

由于浆液在流入模具吸浆孔及从吸浆孔流出到模具背腔时,浆液流经口径突然收缩或扩张,会导致浆液产生较大的速度变化,实际阻力大于直接相加,需加一个系数 k 来平衡,即:

$$Q_0^2 = n^2 \frac{1}{k} \frac{1}{\lambda} \frac{\pi^2 d_0^5 g \Delta p_0}{8l_0} = \frac{\Delta p_0}{\frac{8l_0 k \lambda}{n^2 \pi^2 d_0^5 g}} \quad (8)$$

取上式右侧分母为阻力影响系数 J , 即

$$J = \frac{8l_0 k \lambda}{n^2 \pi^2 d_0^5 g} \quad (9)$$

由式(3)及(9)可以看出,纸浆模塑吸滤成型过程中的压力损失及成型阻力主要来自于模具吸浆孔的孔径长度、孔径大小及吸浆孔突变结构系数等。因此,确定本文的研究重点为改变模具吸浆孔直径大小,以减小吸浆孔截面突变对吸浆过程浆液的压力损失及其流动速度的影响。并拟通过改变吸浆孔进出口处的倒角大小以及将直孔变为锥形孔等设计方式来减小吸浆孔截面的突变。

2 吸浆孔有限元分析及实验验证

本研究选择有限元分析软件 ANSYS/FLOTRAN 对吸滤成型模具进行仿真分析, 选择的分析单元类 LUID141^[7-8]。根据浆液实际流动情况, 取分析类型为层流分析。根据实际生产要求, 设置浆液进出口压力差为 5 N, 所有壁面无位移边界条件, 粗糙度取 6.4^[9]。根据参考文献[10], 取浆液的平均密度为 1 005 kg/m³, 浆液的动力黏度为 0.002 Pa·s, 且浆液为不可压缩液体。

2.1 几何模型的建立

本文主要研究模具吸浆孔结构参数对成型过程中浆液的速度以及压力损失的影响, 为方便对比分析, 取模具局部两孔模型进行分析。分别建立直孔模型(如图 1 所示)、锥形孔模型(如图 2 所示)和入出口倒角模型(如图 3 所示), 并且分别对直孔模型吸浆孔的孔径大小、锥形孔模型吸浆孔的锥度大小、倒角孔模型吸浆孔的倒角半径进行梯度设置, 以便得到最合适的吸浆孔结构参数。

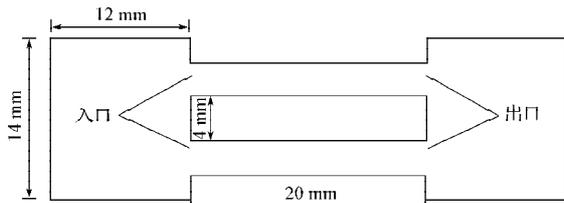


图 1 直孔模型

Fig. 1 Straight hole model

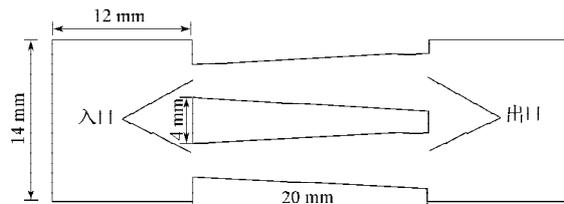


图 2 锥形孔模型

Fig. 2 Tapered hole model

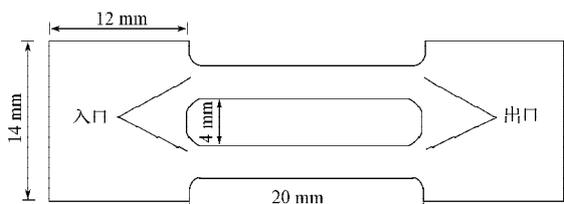


图 3 入出口倒角模型

Fig. 3 Inlet and outlet chamfer model

2.1.1 孔径大小对比分析

根据生产经验, 纸浆模塑模具的吸浆孔大小一般为 2~4 mm^[3]。因此本研究选取孔径分别为 2.0, 2.2,

2.4, 2.6, 2.8, 3.0, 3.2, 3.4, 3.6, 3.8, 4.0 mm 的吸浆孔模型进行仿真分析。对所得分析结果分别提取出距吸浆孔入口 1 mm、出口 1 mm 处的径向最大压力值及吸浆孔入口处最大速度值, 整理得表 1, 根据表 1 的数据绘制如图 4 和图 5 所示孔径大小对压力损失和入口截面速度的影响曲线。

表 1 不同孔径下的相关数据汇总表

Table 1 The relevant data summary of different apertures

孔径 / mm	入口压力 / Pa		出口压力 / Pa		入出口压差 / Pa	入口截面最大速度 / (mm·s ⁻¹)
	上孔	下孔	上孔	下孔		
2.0	3.945	3.945	0.363	0.369	4.311	1.950
2.2	3.847	3.847	-0.365	-0.322	4.191	2.041
2.4	3.759	3.759	-0.318	-0.309	4.072	2.075
2.6	3.568	3.568	-0.191	-0.210	3.768	2.102
2.8	3.294	3.294	-0.277	-0.199	3.532	2.188
3.0	3.116	3.116	-0.329	-0.301	3.431	2.185
3.2	3.153	3.153	-0.177	-0.147	3.315	2.229
3.4	3.127	3.127	-0.163	-0.157	3.287	2.213
3.6	2.907	2.907	-0.248	-0.221	3.141	2.207
3.8	2.785	2.785	-0.134	-0.153	2.928	2.202
4.0	2.322	2.322	-0.193	-0.219	2.528	2.224

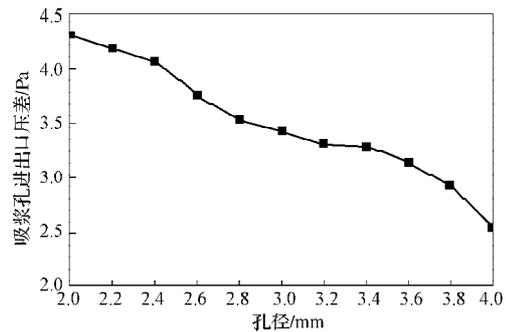


图 4 孔径大小对压力损失的影响曲线

Fig. 4 Pore size and the pressure loss curve

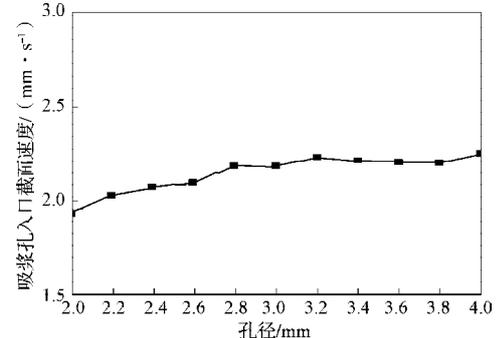


图 5 孔径大小对入口截面速度的影响曲线

Fig. 5 Curve of pore size and speed of inlet cross-section

观察图 4 和图 5 中的曲线可以得知, 随着吸浆孔模型中孔径的不断增大, 吸浆孔进出口压差不断降低, 即压力损失减小, 吸浆孔阻力越小; 当孔径在 2~3 mm 范围内, 入口截面速度随孔径的增大而增大, 当孔径达到 3 mm 后, 速度变化趋于平缓。这是因为,

随着孔径的不断增大,当其动能不足以克服正压力梯度时,流体容易产生回流现象,因此速度不会持续增加。综合考虑压力损失以及速度变化规律,确定当孔径为3 mm时,吸滤成型模具的吸浆成型效果相对较好。

2.1.2 锥形孔大小对比分析

设置吸滤成型模具锥形孔的入口孔径大小为3 mm,而出口口径分别为3, 4, 5, 6, 7 mm,对模具的吸浆孔模型进行仿真分析。对所得分析结果分别提取出距吸浆孔入口1 mm、出口1 mm处的径向最大压力值及吸浆孔入口处最大速度值,整理得表2。并且根据表2中的数据绘制图6和图7所示出口末端口径对压力损失的影响曲线及出口末端口径对入口截面速度的影响曲线。

表2 锥度变化下的相关数据汇总表

Table 2 The relevant data summary of taper changes

出口口径/mm	入口压力/Pa		出口压力/Pa		入出口压差均值/Pa	入口截面最大速度/(mm·s ⁻¹)
	上孔	下孔	上孔	下孔		
3	3.153	3.153	-0.147	-0.177	3.315	2.229
4	2.266	2.266	0.224	0.214	2.485	2.485
5	2.482	2.482	0.377	0.359	2.114	2.614
6	2.498	2.498	0.277	0.290	2.215	2.558
7	2.531	2.531	0.520	0.540	2.001	2.520

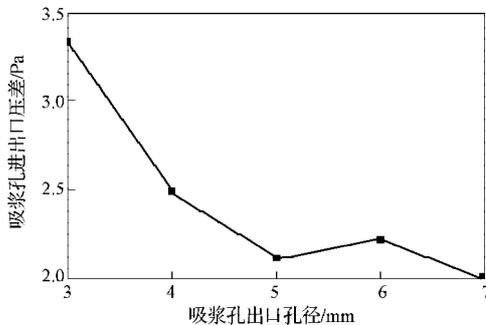


图6 出口末端口径对压力损失的影响曲线

Fig. 6 Curve of exit end aperture and pressure loss

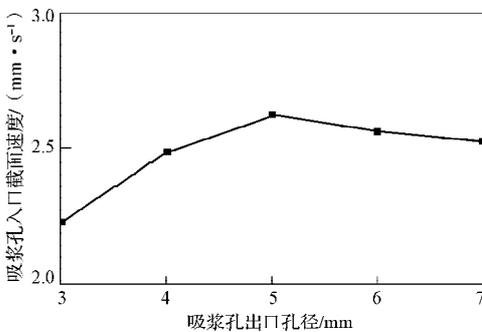


图7 出口末端口径对入口截面速度的影响曲线

Fig. 7 Curve of exit end aperture and speed of inlet cross-section

从图6所示口径对压力损失的影响曲线可以看

出,随着出口末端孔径的不断增大,吸浆孔进出口压差先降低后上升然后又降低,可见设置锥形孔可以减少压力损失,但是随着锥形孔出口孔径的不断增大,过流截面逐渐增加,靠近孔壁面的流速会减小,动能不足以克服正压力梯度,流体在贴近壁面处容易发生倒流现象,因此锥形孔出口口径不是越大越好。从图7所示口径对入口截面速度的影响曲线可以看出,在出口末端口径从3 mm到5 mm的变化过程中,入口截面速度增大且增大速率较大;而当孔径从5 mm增大到7 mm的变化过程中,入口截面速度降低且趋于平缓。综合考虑压力损失及速度变化规律,可确定当锥形孔末端口径为5 mm时,吸滤成型模具的吸浆成型效果相对较好。

2.1.3 倒角大小对比分析

设置吸滤成型模具的锥形孔为入口孔径大小为3 mm,孔间距为4 mm的吸浆孔,入出口的倒圆角半径分别为0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mm,对成型模具的吸浆孔模型进行仿真实验分析。并对所得到的仿真分析结果,分别提取出距吸浆孔入口1 mm、出口1 mm处的径向最大压力值及吸浆孔截面最大速度值,整理得表3。并且根据表3中的数据,绘制如图8和图9所示倒角半径对压力损失的影响曲线及倒角半径对吸浆孔中心截面速度关系曲线。

表3 不同倒角半径下的相关数据汇总表

Table 3 The relevant data summary of chamfer radius

倒角半径/mm	入口压力/Pa		出口压力/Pa		入出口压差均值/Pa	入口截面最大速度/(mm·s ⁻¹)
	上孔	下孔	上孔	下孔		
0	3.153	3.153	-0.147	-0.177	3.315	2.448
0.5	3.220	3.170	-0.198	-0.260	3.449	2.448
1.0	3.123	3.223	-0.330	-0.300	3.438	2.456
1.5	3.168	3.268	-0.233	-0.261	3.415	2.468
2.0	3.309	3.322	0.019	-0.020	3.328	2.461

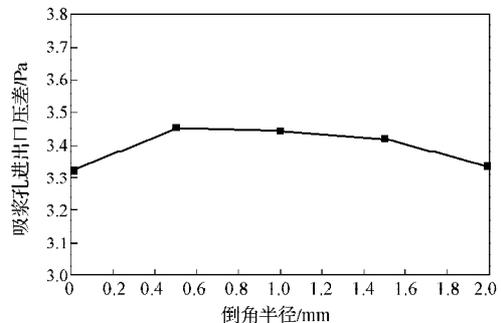


图8 倒角半径对压力损失的影响曲线

Fig. 8 Curve of chamfer radius and pressure loss

从图8所示曲线可看出,倒角半径从0 mm到2 mm变化过程中,吸浆孔进出口压力损失先增大后减小,但整体变化幅度不大,不到0.2 Pa。

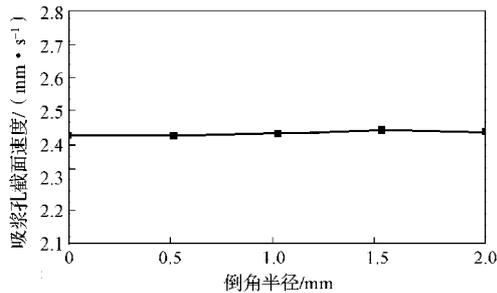


图9 倒角半径对吸浆孔中心截面速度的影响曲线
Fig. 9 Curve of chamfer radius and speed of central cross-section of grout hole

图9所示曲线表明,随着倒角半径的变化,吸浆孔入口截面速度变化不大,考虑孔径大小、孔间距及加工复杂程度,确认倒角半径取1.5 mm时较合理。

图10所示为实验所得吸浆孔倒角半径为1.5 mm的倒角与未倒角的入口截面速度矢量图。

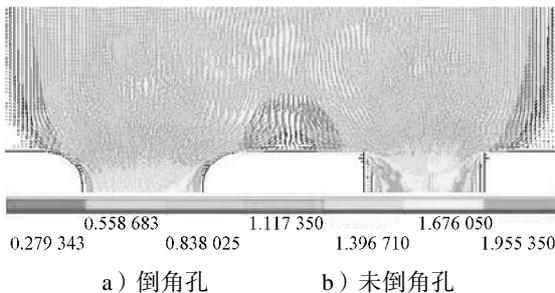


图10 倒角孔与未倒角孔速度矢量图

Fig. 10 Vector of chamfered hole and unchamfered hole velocity

由于惯性作用,流体流经突然收缩截面时流线不能突然改变方向,要有一个连续的变化过程,从图8所示矢量图可知,对比未倒角孔,倒角孔减少了吸浆孔截面突然收缩产生的影响,其矢量图中流线光滑,无漩涡产生。

2.2 最优参数设计仿真实验

由前面的分析可知,当吸滤成型模具锥形孔径大小为3 mm,锥形孔入口孔径为3 mm,出口口径为5 mm,倒角半径为1.5 mm时,吸滤成型效果最佳,以这些数据进行建模分析,并提取吸浆孔最优参数模型速度矢量图,如图11所示。

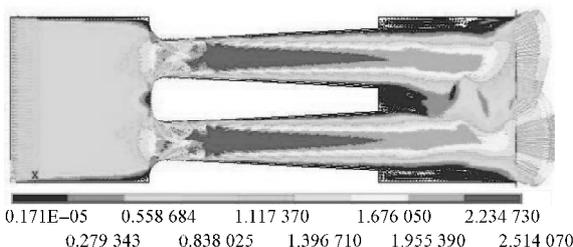


图11 吸浆孔最优参数模型速度矢量图

Fig. 11 Optimal parameters of the model grout hole velocity vector

由图11可看出,浆液在吸孔入口及出口处的速度变化平缓,无漩涡产生,浆液流动速度分布均匀。

2.3 实验验证

借鉴文献[10]的实验方法,对仿真得到的模具吸浆孔最优结构参数进行验证。对生产某产品的纸浆模塑吸浆模具吸浆孔结构进行改进(如图12所示)并进行实验。分别测试模具改进前后产品的均匀性以及吸滤成型时间。某产品吸浆成型模具结构简图如图13所示。

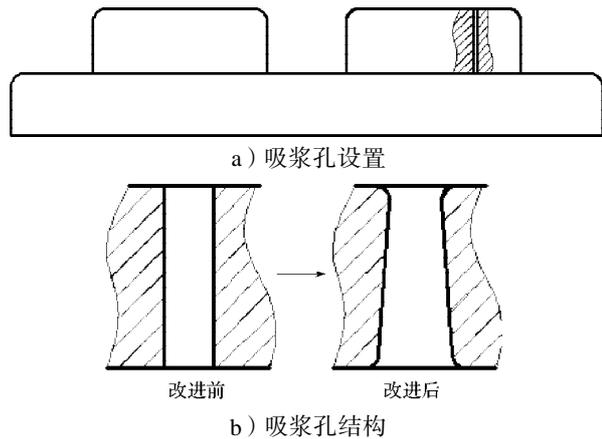


图12 模具吸浆孔设置及其结构改进前后示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the die suction hole setting and the structure before and after the change

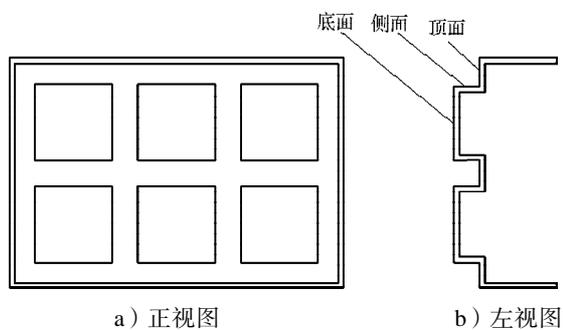


图13 模具结构简图

Fig. 13 Mold structure diagram

分别对模具吸浆孔结构改进前后的底面、侧面、顶面进行取样,测试其厚度,每个面取样5次,并求出平均方差值;与此同时,测试改进前后产品的吸浆成型时间,所得测试结果见表4。设 $M_1, M_2, M_3, m_1, m_2, m_3$ 分别为底面、侧面、顶面改进前与改进后的平均方差值。

根据表4中的数据,可以计算出各测试面的平均方差值: $M_1=0.282, M_2=0.232, M_3=0.230; m_1=0.053, m_2=0.052, m_3=0.022$;从平均方差的计算结果可知,改进后的均方差值均变小,表明产品的均匀性得到了改善。从表4中的数据可以得知,通过对吸浆孔的改

进,吸滤成型效率明显提高,改进后比改进前的成型效率约提高了8%。

表4 产品厚度及吸浆时间测试值

Table 4 Product thickness and midge time test values

测试方案	底面	侧面	顶面	吸浆时间/s
吸浆孔改进前	2.40	2.30	2.65	3.8
	2.22	2.80	2.32	
	3.30	2.90	2.32	
	2.55	2.30	2.40	
	2.50	2.50	2.40	
吸浆孔改进后	2.51	2.45	2.60	3.5
	2.52	2.40	2.60	
	2.40	2.50	2.53	
	2.64	2.50	2.62	
	2.50	2.60	2.60	

3 结论

本文对吸滤成型模具吸浆孔结构参数进行了分析,通过建立吸滤成型过程中成型模具吸浆孔的阻力数学模型,分析并得出了吸滤成型过程中模具吸浆孔阻力的形成原因及影响因素,且应用有限元分析软件 ANSYS/FLOTTRAN 模拟了不同吸浆孔结构对制品成型过程的影响,并与实验结果进行了对比验证,可得出以下结论:

1)适当增大吸浆孔的直径,并通过对吸浆孔进出口处进行倒角处理、将直孔变为锥形孔等可减小吸浆孔截面突变,改善纸浆模塑吸滤的成型效率及吸浆均匀性。

2)模具吸浆孔孔径为3 mm,倒角半径为1.5 mm,锥形孔的入口口径为3 mm,出口口径为5 mm时,吸滤成型模具的吸滤成型效果最好,对比改进前后的实验结果,可知制品均匀性得到了改善,成型效率约提高了8%。

本研究通过对比分析得出的最优模具吸浆孔设计方案可为纸浆模塑吸浆模具结构优化设计提供参考依据。

参考文献:

[1] 金国斌,徐兰萍.纸浆模塑件生产工艺方法综合研究[J].包装工程,2004,25(3):1-3,23.
JIN Guobin, XU Lanping. Research on Production Techniques of Molded Pulp Products[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(3): 1-3, 23.

[2] 张以忱,黄英,姜翠宁.纸浆模塑真空吸滤成形机理研究[J].真空,2003,36(3):52-58.
ZHANG Yichen, HUANG Ying, JIANG Cuining. Shaping Principle of Vacuum Filtering of Pulp-Molding[J]. Vacuum, 2003, 36(3): 52-58.

[3] 王惠书.谈纸模餐具湿部成型工艺条件[N].中国包装报,2000-09-22(03).
WANG Huishu. Tableware Wet Pulp Molding Processing Conditions[N]. China Packaging News, 2000-09-22(03).

[4] 刘志忱.纸浆模塑机理及其模具设计研究[J].包装世界,2002(6):31-35.
LIU Zhichen. Research on Mechanism and Pulp Molding Die Design[J]. Packaging World, 2002(6): 31-35.

[5] 蔡增基,龙天渝.流体力学泵与风机[M].北京:中国建筑工业出版社,2009:91.
CAI Zengji, LONG Tianyu. Fluid Mechanics Pump and Fan[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2009: 91.

[6] 江宏俊.流体力学[M].北京:高等教育出版社,1985:20-40.
JIANG Hongjun. Hydrodynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1985: 20-40.

[7] 张洪才,孙长青.ANSYS14.0/FLUENT理论解析与工程应用实例[M].北京:机械工业出版社,2013:168-176.
ZHANG Hongcai, SUN Changqing. ANSYS14.0 FLUENT Theoretical Analysis and Engineering Application[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2013: 168-176.

[8] 韩占中,王敬,兰小平.FLUENT流体工程仿真计算实例与应用[M].北京:北京理工大学出版社,2004:20-21.
HAN Zhanzhong, WANG Jing, LAN Xiaoping. FLUENT Fluid Engineering Simulation and Application Examples[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004: 20-21.

[9] 于永建,张新昌.纸浆模塑真空吸滤成型阻力因素分析[J].包装工程,2005,26(1):12-13.
YU Yongjian, ZHANG Xinchang. Analysis on Resistance of Vacuum Filtering Molding Process[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(1): 12-13.

[10] 祁德庆.工程流体力学[M].上海:同济大学出版社,1995:45-50.
QI Deqing. Engineering Fluid Mechanics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1995: 45-50.

[11] 于永建.纸浆模塑真空吸滤成型机理及其模具参数研究[D].无锡:江南大学,2005.
YU Yongjian. Pulp Molding Vacuum Filter Forming Mechanism and Mold Parameter Research[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2005.

(责任编辑:廖友媛)