

先进材料

基于厚度变化的纸浆模塑模内干燥特性研究

赵甜甜¹, 王军^{1,2*}

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;

2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要: **目的** 探究模内干燥纸浆模塑制品厚度变化规律及干燥特性。**方法** 使用纸浆模塑成型机在不同干燥温度下, 对 3 种不同初始厚度的纸浆模塑制品进行热压干燥实验, 对实验所得产品的厚度变化和质量变化数据进行分析, 并绘制干燥特性曲线。**结果** 纸浆模塑制品热压干燥过程可分为预压阶段、恒速干燥阶段和降速干燥阶段 3 个过程。在预压阶段, 蓬松的纸浆模塑湿坯被模具挤压致密, 厚度值出现瞬时减薄的趋势, 减厚率高达 40% 以上, 在恒速及降速阶段厚度则会逐步递减至一个平衡值。**结论** 根据实验结果获得了基于厚度变化的纸浆模塑制品的干燥特性。

关键词: 纸浆模塑; 热压干燥; 厚度变化; 干燥特性曲线

中图分类号: TB484.1; TS755 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)19-0092-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.19.012

In-mold Drying Characteristics of Molded Pulp Products Based on Thickness Change

ZHAO Tian-tian¹, WANG Jun^{1,2*}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Jiangsu Wuxi 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangsu Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the thickness variation and drying characteristics of in-mold dried pulp molded products. The hot pressing drying experiments were carried out on three kinds of pulp molded products with different initial thickness by a pulp molding machine at different drying temperature. The thickness and quality change data of the products were analyzed, and the drying characteristic curve was drawn. The hot pressing drying process of molded pulp products could be divided into three processes: the pre-pressing stage, the constant speed drying stage, and deceleration drying stage. In the pre-pressing stage, the fluffy pulp molded wet blank was extruded and compacted by the mold, and the thickness value tended to be instantly thinned, with a thickness reduction rate of more than 40%. In the constant speed and deceleration phases, the thickness decreased gradually to an equilibrium value. According to the experimental results, the drying characteristics of molded pulp products based on thickness change are obtained.

KEY WORDS: pulp molding; hot pressing drying; thickness change; drying characteristic curve

纸浆模塑制品是一种以植物纤维为原料, 在纸浆模塑成型机上通过特定模具吸滤成型, 干燥整型等工序后, 获得的一种具有特定几何空腔结构的纸质包装制品, 常用的干燥方式分为烘箱热风干燥和模具热压干燥 2 种^[1]。随着人们对绿色包装及可持续包装的倡

导, 其凭借 100% 可回收, 可自然降解, 同时具有良好缓冲保护性的特性逐渐引起了人们的关注^[2]。目前, 纸浆模塑制品除了用于蛋托等食品托盘外, 热压成型的制品更广泛应用于手机、电脑等高档电子产品的缓冲包装领域^[3-4]。

收稿日期: 2023-03-30

基金项目: 国家一流学科建设轻工技术与工程 (LITE 2018-29); 江苏省自然科学基金 (BK20151128)

近年来, 国内外对纸浆模塑制品的研究多集中在工艺与设备、缓冲机理、结构设计等方面, 并取得了一定的成果^[5-7]。其中比较突出的是 Saxena 等^[8]开发出了一种可用于生产纸瓶的模具与工艺。基于干燥研究方向, 姚培培等^[9]研究了不同干燥方式对纸浆模塑材料性能的影响。闵诗源等^[10]研究了热风干燥条件下, 纸浆模塑干燥模型的建立及烘箱结构的优化。邱仁辉等^[11]对纸浆模塑餐具热压干燥工艺过程进行了分析, 采用分离变量法推导出模具热传导方程的解析解, 以优化模具的结构设计及加热管布置。但却鲜有针对热压成型类纸浆模塑制品干燥特性的研究, 甚至忽略了纸浆模塑作为一种电子产品包装, 其在热压干燥过程中厚度结构的变化过程。

本文选择应用于手机内托的一种纸浆模塑制品模具, 利用纸浆模塑热成型机, 研究在热压干燥条件下, 不同的热压温度和初始湿坯厚度对纸浆模塑干燥特性曲线的影响, 以及厚度结构变化规律。

1 实验

1.1 纸浆模塑热压干燥实验

本实验的主要目的是研究纸浆模塑制品的模内干燥过程的干燥特性曲线, 并探究模具温度和物料特性对干燥特性及厚度变化的影响。

1.1.1 材料与设备

主要材料: 竹蔗混合浆(竹浆的质量分数为 40%、甘蔗浆的质量分数为 60%)。为控制实验变量, 每次实验前将浆料浓度调节至 $(0.24 \pm 0.01)\%$, 游离度为 (550 ± 10) mL。

主要设备: FLUKE TiS75 红外热成像仪, 美国福禄克电子仪器仪表公司; XH-H1 电子天平, 永康市香山衡器有限公司; IMT-HD02 纸张厚度测定仪, 东莞市英特耐森精密仪器有限公司; HK-128 恒温恒湿箱, 东莞市恒科仪器设备有限公司; 实验所用纸浆模塑全自动热压成型机, 上海永发模塑科技发展有限公司。如图 1a 所示, 成型设备主要由吸浆系统、热压系统和传送系统组成。图 1b 为该设备控制面板, 通过控制面板可以调控吸浆时间、热压温度和热压时间等工艺参数。

1.1.2 实验步骤

1) 模具预热: 为保证实验的准确性和稳定性, 每次实验开始前需先通过控制面板设置实验所需温度进行预热 2 h, 实验时用红外模具测温枪进行测温来确定是否预热完成。

2) 校准电子天平(精度 0.01 g): 考虑风压及样品托盘的质量, 称量过程需去皮校准。

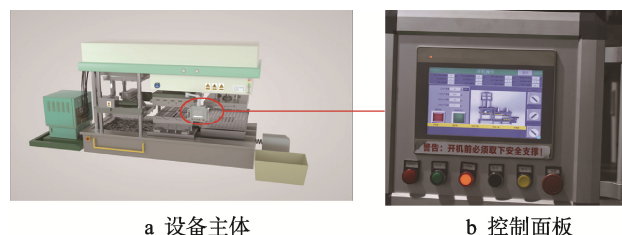


图 1 纸浆模塑全自动热成型设备
Fig.1 Automatic hot pressing equipment for pulp molding

3) 制备纸浆模塑湿坯: 选用型腔规整、深度较浅的手机托盘为实验介质, 通过操控吸浆时间来控制湿坯厚度。

4) 模内干燥: 通过控制面板设置模内干燥时间, 将吸制好的纸浆模塑湿坯经设备运送系统从吸浆模转移至热压下模, 热压下模将湿坯运送到热压工位与上模进行合模干燥, 干燥完成后的样品被转移模转移至收样区。

5) 样品质量及厚度数据记录: 将经特定时间干燥完成的样品迅速取出, 并用电子天平称量记录样品质量; 从样品中截取 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 的矩形样片, 从样片中选取 9 个测量点(图 2), 用纸张厚度测定仪进行测量并记录。

6) 烘干: 为获得样品绝干质量, 将所有模内干燥后的样品按次序标号, 并置于恒温恒湿箱内, 在标准温湿度条件下 $(110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、25%) 烘烤 24 h, 参考标准 EN ISO 638-1:2022^[12], 烘干后的样品用电子天平测其质量。

7) 按照上述步骤完成各个工况的实验, 每个工况重复 3 次以上。本实验设置 3 种热压下模热板温度, 分别为 (75 ± 5) 、 (95 ± 5) 、 (115 ± 5) $^{\circ}\text{C}$; 3 种纸浆模塑湿坯初始厚度分别为 $d_1(1.5\text{ mm} \pm 0.2\text{ mm})$ 、 $d_2(2.0\text{ mm} \pm 0.2\text{ mm})$ 、 $d_3(2.5\text{ mm} \pm 0.2\text{ mm})$, 进行交叉实验。初始阶段分别在 0、2、5、10 s 的干燥时间下测取湿坯质量和厚度, 接着干燥时间每增加 10 s 测量一次, 直至样品质量和厚度不再发生明显变化时结束实验。

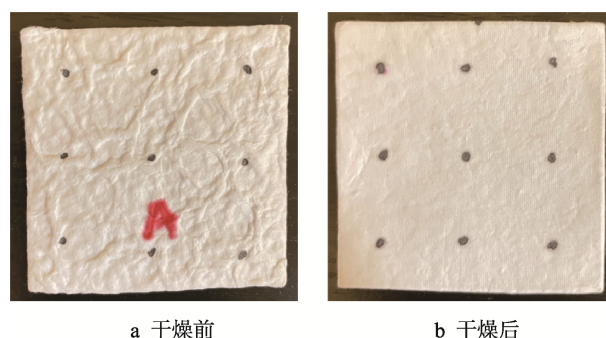


图 2 样片厚度测量位置及干燥前后示意图
Fig.2 Measuring position of sample thickness and schematic diagram before and after drying

1.2 数据处理方法

1.2.1 干燥数据处理

对实验过程中记录的样品质量数据进行处理,将质量数据转换成干基含水率 (DBMC) [13], 计算方法如式 (1) 所示。

$$\eta_{\text{DBMC}t} = \frac{m_t - m_f}{m_f} \quad (1)$$

式中: m_t 为 t 时刻的样品质量, g; m_f 为样品的干基质量, g; $\eta_{\text{DBMC}t}$ 为 t 时刻的干基含水率。

为了量化成型过程中的脱水量, 以干燥效率 D_e (Dry Efficiency) 作为性能指标 [14], 计算见式 (2)。

$$D_e = \frac{m_{\text{in}} - m_t}{m_{\text{in}} - m_f} \times 100\% \quad (2)$$

式中: m_{in} 为样本的初始质量, g。

1.2.2 厚度数据处理

为了评价纸浆模塑制品干燥过程的相对减厚度, 将减厚度率 (Thickness Reduction, η_{THKred}) 作为评价指标, 定义如下:

$$\eta_{\text{THKred}} = \frac{d_{\text{in}} - d_{\text{out}}}{d_{\text{in}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: d_{in} 为初始试样厚度, 即预成型试样的厚度, mm; d_{out} 为输出样品厚度, 即样品经过热成型工艺干燥后的厚度, mm。

将 1.1.2 节实验步骤 5 中所得厚度数据按照上述减厚度率的定义进行处理。

2 结果与分析

2.1 温度对干燥过程的影响

在模内干燥纸浆模塑成型工艺中, 纸浆模塑湿坯首先从吸滤成型模具上转移至热压下模, 热压下模接着将纸浆模塑湿坯转移至热压成型工位, 并与上模进行合模; 然后将纸浆模塑湿坯压制干燥完成, 干燥过程中产生的水汽由真空持续抽出; 最后输出干燥完成的纸浆模塑制品。通常情况下, 纸浆模塑模内干燥工艺分为 2 种情况, 一种为热压上下模具均被赋予温度; 另一种为热压上下模具一面进行加热, 一面为常温。为了简化研究难度, 便于揭示纸浆模塑在模具内部的热质传递过程, 本文选择对热压下模进行加热, 热压上模在干燥过程中始终保持常温。在热成型实验中, 用红外测温枪 (FLUKE TiS75) 测量了模具表面和纸浆的初始温度。用数字温湿度计 (LE500-WH) 测量环境空气的相对湿度和温度。所有实验数据均在成型机稳定运行时至少进行 3 次测量, 所有数据均具有良好的重现性。图 3 为测温枪测得样品及模具表面的温度。

在一定干燥条件下, 物料含水量与干燥时间之间

的关系曲线叫作干燥特性曲线 [15]。其中, 温度是干燥工艺中的重要参数, 不同模具温度对纸浆纤维多孔介质干燥过程的干燥特性曲线如图 4 所示, 热压模具的温度越高, 干燥曲线的斜率更大。从图 4 中可以看出, 材料厚度为 d_3 时, 模具在温度 115 °C 下的干燥曲线在干燥时间为 60 s 时开始出现降速阶段, 而在 75 °C 条件下, 材料在 300 s 内依然处于干燥初期, 即恒速干燥阶段。从图 4 中进一步分析可知, 完整的干燥过程基本分为 3 个阶段: 第 1 阶段为预压阶段, 样品中的大量水分被模具挤压排出; 第 2 阶段为恒速干燥阶段; 第 3 阶段为降速干燥阶段。在预压阶段, 纸浆模塑中的干基含水率随时间增加瞬时下降; 在恒速干燥阶段中, 含水率随时间呈线性均匀下降; 当含水率下降到某一特定值后曲线呈平缓变化, 物料中的水分最终趋于平衡, 水分不再变化。在干燥过程中, 样品从第 2 阶段转变为第 3 阶段时的含水量为临界含

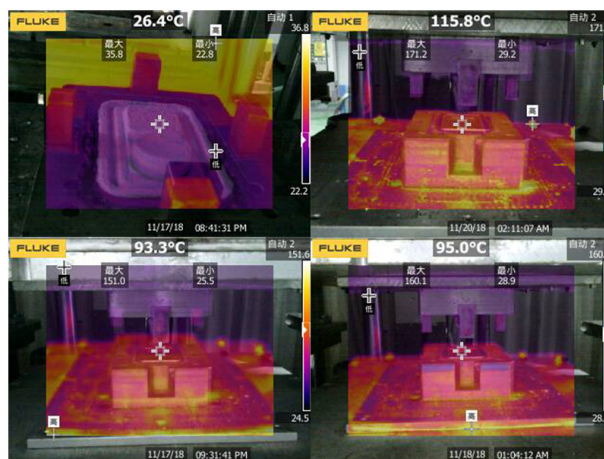


图 3 红外测温图

Fig.3 Infrared thermometry diagram

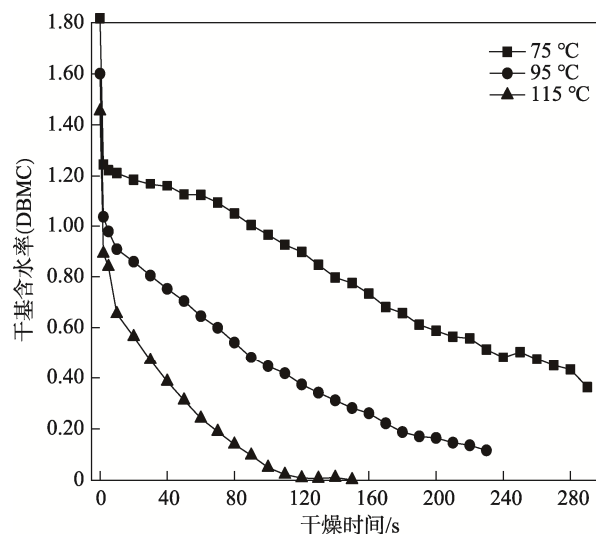


图 4 不同温度条件下, 初始厚度 d_3 的纸浆模塑干燥特性曲线

Fig.4 Drying characteristic curve of TH3 with initial thickness d_3 at different temperature

水量。尽管在预压阶段, 纸浆模塑的含水量骤降, 但是实验在大型热压机上进行, 设备干燥时间设定条件有限, 无法在预压阶段得到更精细的实验数据。在表 1 中显示了预压阶段的干燥数据, 在热压模具合模的 2 s 内, 热板温度为 75 °C 时的干燥效率为 31.46%; 5 s 时的干燥效率为 32.60%, 差别只有 1.14%, 这表示预压阶段含水率骤降过程基本结束。

表 1 纸浆模塑预压阶段干燥效率
Tab.1 Drying efficiency of pulp molding in pre-pressing stage

试样编号	热板温度/°C	热压时间/s	干燥效率/%
T-1	75	2	31.46
T-2	95	2	37.50
T-3	115	2	38.62
T-1	75	5	32.60
T-2	95	5	38.89
T-3	115	5	42.14

2.2 初始厚度对干燥过程的影响

由于纸浆模塑制品吸浆制湿坯的特殊性, 增加吸浆时间从而增大湿坯厚度。图 5 反映了在相同温度条件下 (75 °C), 纸浆模塑湿坯在 3 种不同初始厚度下物料干基含水率随时间的变化, 曲线的斜率反映了干燥速率。如图 5 所示, 随着物料初始厚度的增加, 即物料单位固体物含量的增加, 干燥到相同含水率所需时间逐渐增加。图 5 中反映了恒速干燥阶曲线斜率随厚度的增大而减小, 所需干燥时间也随厚度增大而增加。同理, 表 2 显示了在预压阶段物料的干燥效率在极短的时间内就增加到 25%~33%。因此, 在提升纸浆模塑干燥效率时, 可以从提升预压阶段的干燥效率开始。

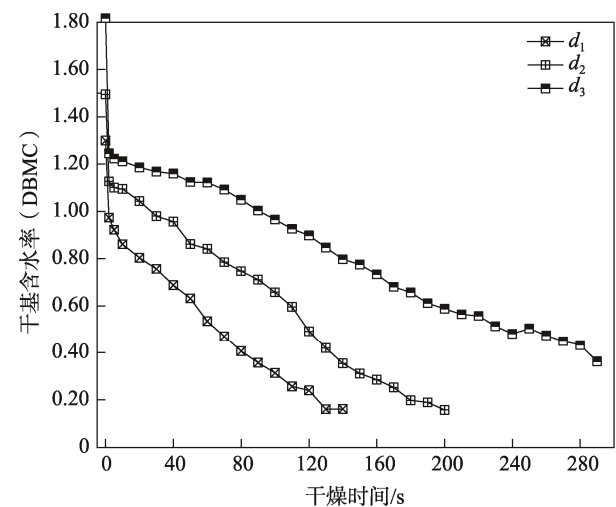


图 5 相同温度下, 初始厚度不同的纸浆的模塑干燥特性曲线

Fig.5 Drying characteristic curve of pulp molding with different initial thickness at the same temperature

表 2 相同温度下, 初始厚度不同的纸浆模塑预压阶段的干燥效率

Tab.2 Drying efficiency of pulp molding with different initial thickness at the same temperature

试样编号	初始厚度	热压时间/s	干燥效率/%
T-1	d_1	2	25.38
T-2	d_2	2	24.93
T-3	d_3	2	31.46
T-1	d_1	5	29.07
T-2	d_2	5	26.67
T-3	d_3	5	32.60

2.3 纸浆模塑厚度随干燥时间的变化规律分析

因为纸浆模塑湿坯中含有大量孔隙, 所以材料在受压和受热的加工过程中其形状易发生变化, 随着干燥时间的增加, 含水量和厚度的降低, 纸浆模塑制品表面也发生明显变化, 见图 6。纸浆模塑湿坯在热压初期由于受到压力的作用, 蓬松的孔隙得到挤压, 大量水分脱出, 厚度骤降。如图 7 所示, 随着干燥时间的增加, 制品被逐渐压制紧密, 样品厚度呈现均匀减薄的趋势。如表 3 所示, 初期 2~5 s 内, 样品减厚度最高达到 43.88%。在热压 100 s 时, 试样减厚度为 56.50%, 比预压阶段只增加了 12.62%, 这表明预压阶段在整个干燥的减厚过程中占主要部分。

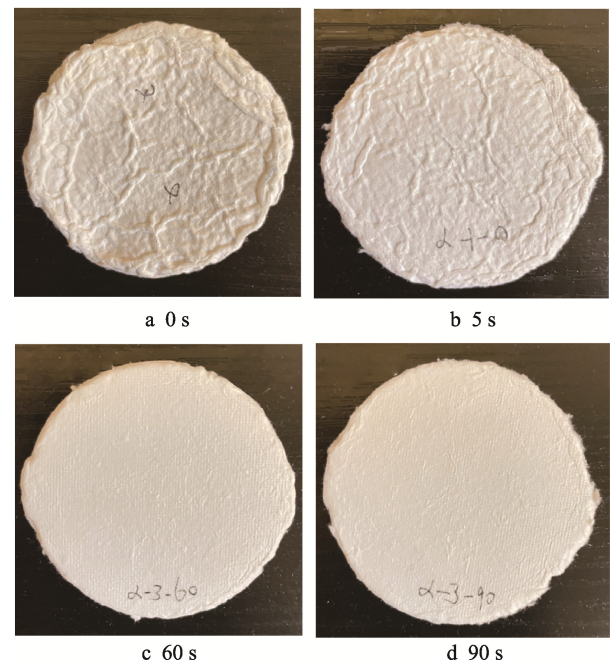


图 6 样品随干燥时间的表面变化
Fig.6 Surface change of sample with drying time

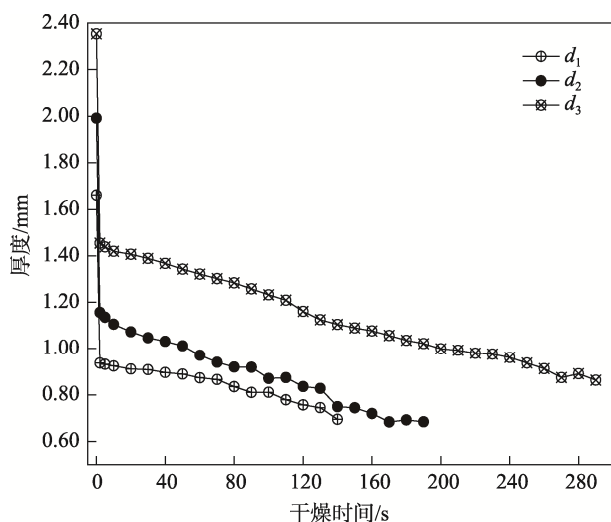


图7 干燥过程中纸浆模塑厚度变化曲线

Fig.7 Variation curve of pulp molding thickness during drying process

表3 纸浆模塑在不同干燥时间的减厚率

Tab.3 Thickness reduction rate of pulp molding for different drying time

试样 编号	初始 厚度/mm	热压 2 s 后		热压 5 s 后		热压 100 s 后	
		厚度/ mm	减厚 率/%	厚度/ mm	减厚 率/%	厚度/ mm	减厚 率/%
T-1	1.66	0.937	43.55	0.932	43.86	0.811	51.14
T-2	2.00	1.156	42.20	1.136	43.20	0.870	56.50
T-3	2.35	1.455	38.09	1.439	38.77	1.232	47.57

3 结语

1) 本文通过全自动纸浆模塑热压成型机对纸浆模塑制品进行热压干燥实验,研究了干燥温度和物料初始厚度对饱和纸浆纤维多孔介质干燥特性的影响,并分析了不同干燥时间下物料主要结构特征,即厚度变化趋势。

2) 实验研究表明,纸浆模塑模内干燥过程分为3个阶段。在干燥的预压阶段,多孔介质中的干基含水率随时间瞬时下降,接着含水率随时间增加呈线性均匀下降,并进入恒速干燥阶段;当含水率下降到临界含水率后曲线呈平缓变化,即降速干燥阶段;最后多孔介质中的水分趋于平衡,水分不再变化。同理,纸浆模塑厚度在预压阶段的减厚率最高达到43.88%,接着厚度随时间呈现均匀减薄的趋势。在热压100 s时的减厚率只比预压阶段增加了12.62%,故预压阶段在热压干燥的减厚过程中占主要部分。本文研究为提升纸浆模塑干燥效率及结构变化趋势的预测提供一定依据。

在纸浆模塑热压干燥实验过程中发现,尽管预压阶段经历的时长较短,通常只有数秒的时间,但是纸

浆模塑含水率和厚度值变化比例却接近整体变化水平的一半,因此反映出预压阶段对制品干燥和减厚都发挥了重要作用。因为纸浆模塑是由水、纤维、填料等组分组成的复杂多相结构,所以在未来的研究中可进一步探究浆料种类、设备真空度等参数对纸浆模塑热压干燥规律的影响及作用。

参考文献:

- [1] DIDONE M, SAXENA P, BRILHUIS-MEIJER E, et al. Moulded Pulp Manufacturing: Overview and Prospects for the Process Technology[J]. Packaging Technology and Science, 2017, 30(6): 231-249.
- [2] BRADLEY C G, CORSINI L. A Literature Review and Analytical Framework of the Sustainability of Reusable Packaging[J]. Sustainable Production and Consumption, 2023, 37: 126-141.
- [3] ZHANG Yan-ling, DUAN Chao, BOKKA S K, et al. Molded Fiber and Pulp Products as Green and Sustainable Alternatives to Plastics: A Mini Review[J]. Journal of Bioresources and Bioproducts, 2022, 7(1): 14-25.
- [4] 黄俊彦. 纸浆模塑生产实用技术[M]. 北京: 文化发展出版社, 2021: 3-6.
- [5] HUANG Jun-yan. Practical Technology for Pulp Molding Production[M]. Beijing: Cultural Development Press, 2021: 3-6.
- [6] 张贺家, 王赞, 张新昌. 双层纸浆模塑制品成型工艺影响因素的研究[J]. 包装工程, 2015, 36(1): 80-84.
- [7] ZHANG He-jia, WANG Zan, ZHANG Xin-chang. Factors Influencing the Forming Process of Two-Ply Molded Pulp Products[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(1): 80-84.
- [8] 唐杰. 吊灯灯罩模塑缓冲包装制品动态仿真及性能的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018: 7-8.
- [9] TANG Jie. Study on Dynamic Simulation and Performance of Molded Cushioning Packaging Products for Chandelier Lampshade[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018: 7-8.
- [10] 季善阁. 纸浆包装壳结构有限元分析及优化[D]. 天津: 河北工业大学, 2016: 1-5.
- [11] JI Shan-ge. Finite Element Analysis and Optimization of Pulp Packaging Shell Structure[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2016: 1-5.
- [12] SAXENA P, BISSACCO G, MEINERT K A, et al. Soft

- Tooling Process Chain for the Manufacturing of Micro-Functional Features on Molds Used for Molding of Paper Bottles[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 54: 129-137.
- [9] 姚培培,肖生苓,岳金权.不同干燥方式对纸浆模塑材料性能的影响[J].*包装工程*, 2014, 35(7): 22-28.
YAO Pei-pei, XIAO Sheng-ling, YUE Jin-quan. Effects of Different Drying Methods on the Properties of Molded Pulp Material[J]. *Packaging Engineering*, 2014, 35(7): 22-28.
- [10] 闵诗源.纸浆模塑干燥模型的建立及烘箱结构优化设计[D].武汉:华中科技大学, 2019: 3-5.
MIN Shi-yuan. Establishment of Pulp Molding Drying Model and Optimization Design of Oven Structure[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019: 3-5.
- [11] 邱仁辉,黄祖泰,王克奇.纸浆模塑餐具热压干燥过程的研究[J].*农业工程学报*, 2005, 21(12): 34-38
QIU Ren-hui, HUANG Zu-tai, WANG Ke-qi. Hot-Pressing and Drying Process of Pulp Molding Tablewares[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(12): 34-38
- [12] EN ISO 638-1:2022, 纸、纸板、纸浆和纤维素纳米材料 用烘箱法测定干物质含量 第一部分: 固体材料[S].
EN ISO 638-1:2022, Paper, Board, Pulps and Cellulosic Nanomaterials-Determination of Dry Matter Content by Oven-Drying Method-Part 1: Materials in Solid Form[S].
- [13] DIDONE M, MOHANTY S, HATTEL J H, et al. On the Drying Process of Molded Pulp Products: Experiments and Numerical Modelling[J]. *Drying Technology*, 2020, 38(12): 1644-1662.
- [14] LI Qi-mou, RODRIGUES S A, MORGENSTERN M, et al. Characteristic Drying Curve Behavior of Whey and Casein Micelle Proteins via Thin-Film Drying[J]. *Drying Technology*, 2023, 41(2): 308-321.
- [15] 陈晓彬,王宇航,何耀辉,等.纸张干燥特性曲线影响因素实验研究[J].*中国造纸学报*, 2019, 34(3): 50-53
CHEN Xiao-bin, WANG Yu-hang, HE Yao-hui, et al. Experimental Study on Influence Factors of Paper Drying Characteristic Curve[J]. *Transactions of China Pulp and Paper*, 2019, 34(3): 50-53

责任编辑:曾钰婵