

考虑几何特征的纸浆模塑收缩率实验研究

马俊青¹, 毛宽民², 李之行², 邱悦²

(1. 咸阳师范学院, 咸阳 712000; 2. 华中科技大学, 武汉 430074)

摘要: **目的** 为高精度设计纸浆模塑产品探索基础数据。**方法** 考虑纸浆模塑的几何特征, 通过现代测试仪器对实际生产纸浆模塑不同截面的几何形状进行测试, 得到其截面形状的几何数据, 再通过数据拟合方法得到其几何特征的几何尺寸, 最后按照收缩率的定义, 得到其不同几何特征的收缩率。**结果** 脱模斜度收缩率均值为 5.71%; 中间长度方向上凸型腔的收缩率为负, 其长度越大, 伸长率越小; 下凹型腔的收缩率为正数, 其长度越大, 收缩率越小; 型腔高度的变化率均值为 4.7%; 倒角圆弧半径尺寸变化较大, 其收缩率均值为 70.61%。**结论** 克服了以往研究者只通过正规纸浆模塑试样(正方形)研究纸浆模塑收缩率的缺点, 为纸浆模塑的精确设计提供了基础数据。

关键词: 纸浆模塑; 收缩率; 数据拟合; 几何特征

中图分类号: TS767 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)03-0061-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.03.009

Experimental Study on Molded Pulp Shrinkage Considering Geometric Features

MA Jun-qing¹, MAO Kuan-min², LI Zhi-hang², QIU Yue²

(1. Xianyang Normal University, Xianyang 712000, China;

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

ABSTRACT: The work aims to explore basic data for high-precision design of molded pulp products. Considering the geometrical characteristics of pulp molding, the geometry of different cross sections of the actually produced molded pulp was tested by modern test instruments to get the geometrical data of cross section, and the geometrical dimensions of the geometrical features were obtained by data fitting method. According to the definition of shrinkage, the shrinkage of different geometric features was obtained. The mean rate of film shrinkage was 5.71%. The shrinkage rate of the convex cavity in the middle along the length direction was negative, and the larger the length was, the smaller the elongation was. The shrinkage of the concave cavity was a positive, and the larger the length was, the smaller the shrinkage was. The mean rate of change in cavity height was 4.7%. The radius of the chamfered arc changed greatly, and the average shrinkage rate was 70.61%. The work has overcome the shortcomings of previous researchers to study the shrinkage of molded pulp only by regular molded pulp samples (squares), thus providing basic data for the precise design of molded pulp.

KEY WORDS: molded pulp; shrinkage characteristics; data fitting; geometric features

纸浆模塑制品的干燥技术目前大致分为脱模干燥与模内干燥等 2 种^[1-3]。脱模干燥又分为热风干燥、

远红外线辐射干燥、微波加热干燥等。在结构上, 纸浆模塑制品是属于毛细多孔物料一类的产品, 因此在

收稿日期: 2018-10-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2015AA043302)

作者简介: 马俊青(1963—), 男, 咸阳师范学院副教授, 主要研究方向为应用数学。

通信作者: 毛宽民(1964—), 男, 华中科技大学教授, 主要研究方向为结合部动力学建模、结构设计。

干燥的过程中会出现很多复杂现象,主要是由其自身多孔的结构特点和干燥的复杂性所致^[4-7]。纸浆模塑制品在干燥过程中会发生比较明显的收缩现象,其影响因素主要有温度和水分含量等。在实验过程中,如果纸浆浓度、吸附时间等工艺参数设置不合理或者温度达不到要求,纸浆模塑制品可能会产生很严重的变形,此时的收缩率也将对水分在产品内部的扩散造成影响。在研究收缩变形的过程中,其理论模型不容易建立,一般通过试验研究其变形过程^[4,8]。

目前国内外对纸浆模塑制品的收缩率研究较少,基本都是先制作一个正规形状(正方形)的试样,然后对该试样进行干燥,之后度量其长度尺寸,计算其收缩率^[9]。然而,这种获取收缩率的方法忽略了纸浆模塑的几何特征,使用根据这种收缩率设计的模具制造出来的纸浆模塑误差较大,对纸浆模塑的力学性能、缓冲性能、包装性能、模具精度和美观性有非常大的影响^[10-12]。通过实验发现,纸浆模塑的收缩率与其几何特征有极大的关系^[13]。

文中选用的纸浆模塑拟以回收瓦楞纸板为原料,加入适量的水,随后用打浆机打散配成纸浆质量分数为 2% 的浆液,再经真空吸收 6 s 后烘烤成型。拟通过大量实验测试得到不同尺寸大小的纸浆模塑产品的几何特征(型腔高度、上凸型腔宽度、下凹型腔宽度、脱模斜度、过度圆弧半径)数据,随后与吸附模具相同位置的数据进行比较,通过统计学原理得到纸浆模塑的收缩率数据,为高精度成型模具的设计提供理论依据。

1 纸浆模塑测试

1.1 实验仪器及方法

实验所用仪器为海克斯康公司的桥式三坐标测量机,型号为 Global Classic SR 07.10.07,采用红宝石测头,允许测量误差小于 $1.7\ \mu\text{m}$,可以满足高精度自动化的测量需求。纸浆模塑干燥后具有一定的变形,为了精确测量和定位,设计了一种夹具(见图 1),可将变形的纸浆模塑挤压平整并在工作台上准确定位。

实验对象是厂家提供的 3 种纸浆模塑以及与之对应的吸附成型模具,图 1 所示即为其中一个。实验前预先将纸浆模塑放置于温度为 $(26\pm 1)^\circ\text{C}$ 的环境下 24 h,进行预处理。测试时使用所设计的夹具依次将 3 个纸浆模塑夹紧并放置于三坐标测量机上进行测量,分别记录相应的实验数据。不同纸浆模塑的尺寸和几何特征不同。测量完毕后,使用数据拟合数学处理方法对得到的数据进行处理,得到不同几何特征的几何尺寸,并与吸附成型模具中相应几何特征的尺寸数据进行比较,再结合收缩率的计算方法,就可以得

到相应纸浆模塑的收缩率^[14-16]。

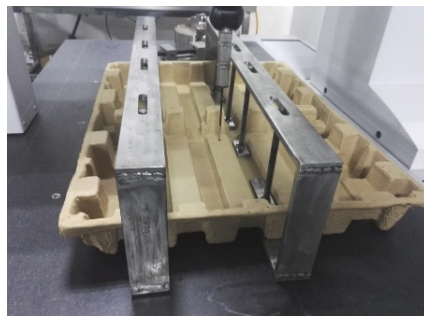


图 1 纸浆模塑定位与测量
Fig.1 Molded pulp positioning and measurement

1.2 纸模测量

实验用的 3 种不同型号的纸浆模塑及配套的成型模具(见图 2—4,编号分别为 ME1, ME2, ME6),其长、宽、高、圆角以及脱模斜度均有差别。

为了对不同几何特征的几何尺寸进行测量并得到其具体数据,认真观察并分析了厂家提供的纸浆模塑,选择变形较小、较为平整且包含几何特征较多的部分作为测量部位。测量路径如图 2—4 中的黑线所示。

将纸浆模塑利用设计的模具加紧,使测试部分平整,然后将他们放置于三坐标测量机的工作台上。对纸浆模塑进行调整,使待测平面位于测试机的 yz 平面,测点间隔设置为 1 mm,三坐标测量机即可自动测量并记录测量结果。

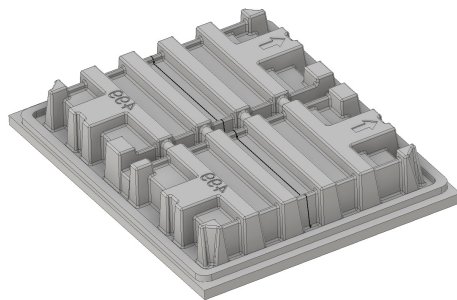


图 2 ME1 成型模具及测量路径
Fig.2 ME1 molding die and measurement path

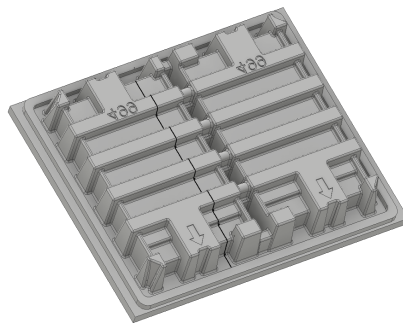


图 3 ME2 成型模具及测量路径
Fig.3 ME2 molding die and measurement path

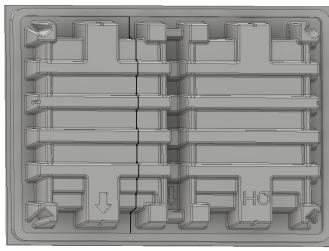


图 4 ME6 成型模具及测量路径
Fig.4 ME6 molding die and measurement path

1.3 测量结果散点图

将上述测量数据导入 Matlab, 得到了三件纸浆模塑的截面散点位置, 见图 5—7。

将图 5—7 与厂家提供的模具对比可以看出, 干燥收缩后的纸模在几何特征上有部分发生了变化, 大部分基本保持了原来的特征, 可以作为样本与模具对比得出收缩率。下面将建立数学模型将这些散点拟合成规则的相交曲线以计算收缩率。

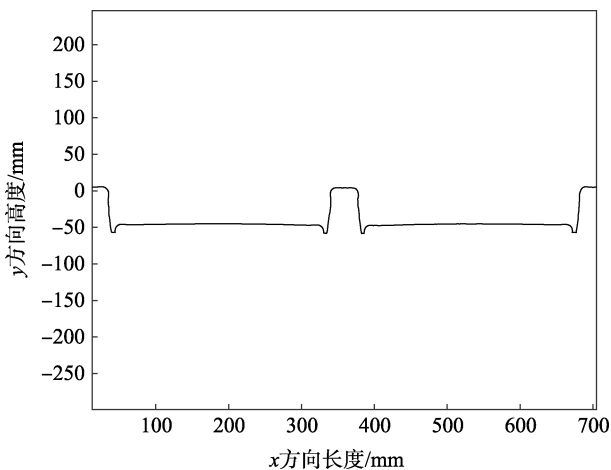


图 5 ME1 截面散点位置
Fig.5 ME1 cross-section measurement result plot

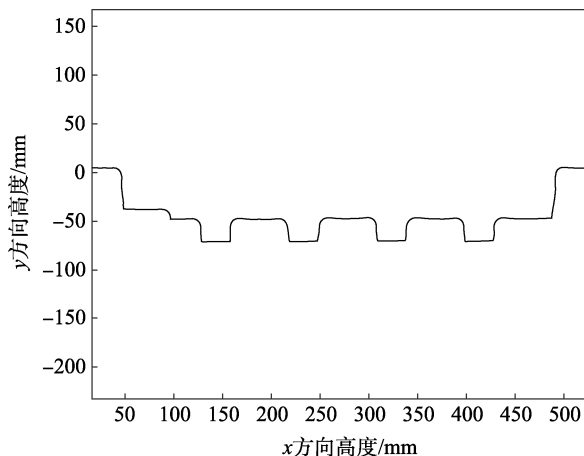


图 6 ME2 截面散点位置
Fig.6 ME2 cross-section measurement result plot

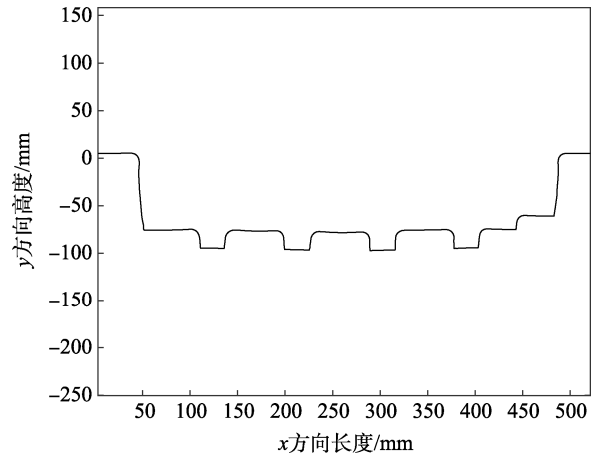


图 7 ME6 截面散点位置
Fig.7 ME6 cross-section measurement result plot

2 测量结果处理方法

2.1 曲线的拟合

由于纸浆模塑本身的变形及多种几何特征相互连接的问题, 因此不能直接从测量数据中得到其几何尺寸。纸浆模塑的测量截面主要由相切的直线段、圆弧、斜线段连接而成, 采用最小二乘法对测量结果进行数据拟合, 可从中得到每一个几何特征的几何尺寸。

1) 最小二乘法^[17]。已知直线段方程令为 $Y=KX+B$, 散点坐标记为 (x_i, y_i) , 则总偏差设为:

$$I = \sum_{i=1}^n (Y(x_i) - y_i)^2 \quad (1)$$

式中: I 为偏差, 其值越小则偏差越小; X, Y 为线段横、纵坐标变量; K 为直线段斜率; B 为直线段偏移量; i 为散点编号 ($i=1, 2, 3 \dots n$); n 为散点最大数。

将 $Y=KX+B$ 带入 I 中即可得: $I = \sum_{i=1}^n (K \times x_i + B - y_i)^2$, 其对 B 的偏导等于 0 时可以求出 I 的最小值, 即:

$$\frac{\partial I}{\partial B} = \sum_{i=1}^n 2(Kx_i + B - y_i) = 0 \quad (2)$$

同时其对 K 的偏导也应等于 0, 即:

$$\frac{\partial I}{\partial K} = \sum_{i=1}^n 2(Kx_i + B - y_i)x_i = 0 \quad (3)$$

将式 (2)、(3) 带入式 (1) 中可得:

$$K = \frac{\sum xy - \frac{1}{n} \sum x \sum y}{\sum x^2 - \frac{1}{n} (\sum x)^2} \quad (4)$$

$$B = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum xy}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (5)$$

2) 圆弧段的拟合方法。在拟合散点图中的圆弧

时,并不能简单地取圆弧上的点直接进行拟合,还要考虑与之相邻的线段是否与圆弧相切。首先,给出利用最小二乘法进行圆弧拟合需要满足的方程,将处于圆弧处的散点记为 (x_i, y_i) ,令圆心为 (x_c, y_c) 、半径为 r ,则拟合偏差 W 为:

$$W = \sum_{i=1}^n (x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2 - r^2 \quad (6)$$

式中: i 为散点编号($i=1,2,3\dots n$); n 为散点最大数。

当 W 取最小值时得出的 x_c, y_c, r 为圆的拟合方程参数。此外,需要加入2个限制条件,即圆弧相邻两线段要与之相切,给出其相邻两线段的参数方程为: $A_1X+B_1X+C_1=0$ 和 $A_2X+B_2X+C_2=0$,其中 A_1, B_1, C_1 及 A_2, B_2, C_2 为相邻线段的方程参数。

以ME2中一段线段-圆弧-线段特征为例叙述具体的拟合步骤。利用最小二乘法,可以得到该部分的直线方程为 $0X+Y+47.64017=0$ 。将处于斜线上的散点带入公式中,可以得到该部分的斜线方程为 $-8.05172X-Y+1687.801=0$ 。

圆弧段的拟合过程相对于前者更为烦琐,利用两切线交点结合中的方向向量可以得出平分线的方程。平分线方程为: $-0.99238X+0.87675Y+255.662=0$,记为圆的第1个限制条件。圆心到水平线的 y 方向距离为圆弧半径 r ,即 $-47.64017-y_c=r$,这是圆的第2个限制条件。随后将处于圆弧上的4个散点带入式(6)。同时由图5—7的几何关系可以知道 y 的取值范围为 $-65\sim-55$,然后借助Matlab中的fminbnd函数可以求出 W 取极小值时 y 的取值大小。由此可以得到圆的拟合方程为: $(X-210.2475)^2+(Y+53.627)^2=5.98683^2$ 。

整个纸模截面的结构特征均可以按照上面的方式对整个截面进行拟合,ME2初步的拟合结果见图8。

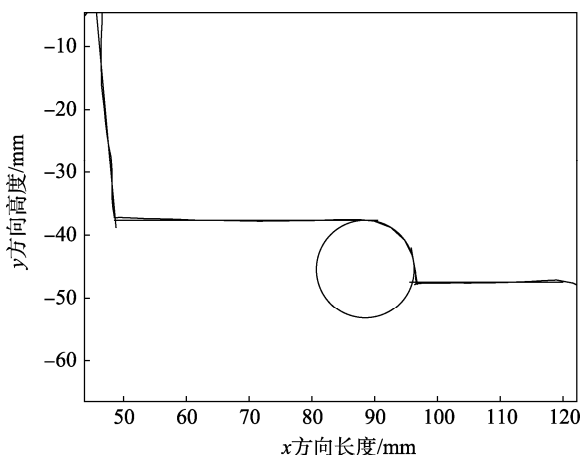


图8 ME2局部拟合
Fig.8 ME2 local fitting

将前面选取的ME1, ME2, ME6等3个截面作为样本,按照同样的方法取拟合,初步拟合的结果见图9—10。

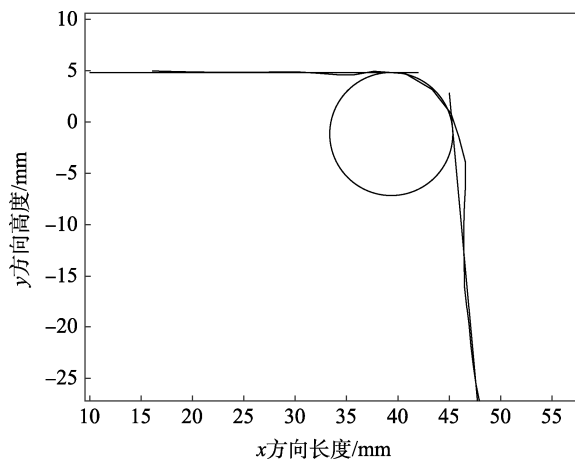


图9 ME1局部拟合
Fig.9 ME1 local fitting

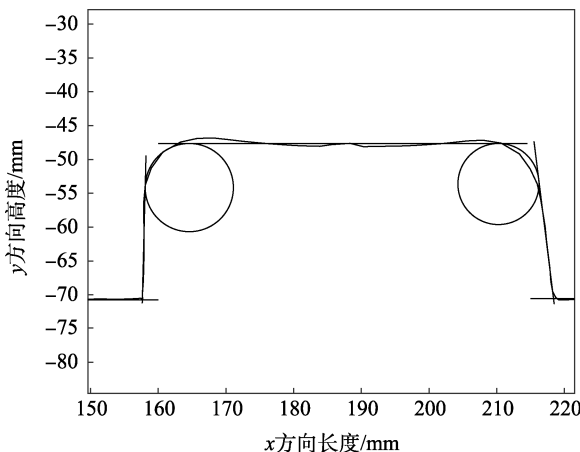


图10 ME6局部拟合
Fig.10 ME6 local fitting

2.2 收缩率计算

收缩率采用线收缩率,线收缩率是纸浆模塑制品实验前后的长度差与之前长度的比值,一般用百分率来表示,其计算公式如下:

$$S_1 = \frac{I_1 - I_0}{I_0} \times 100\% \quad (7)$$

式中: S_1 为成型制品的线性收缩率; I_1 为常温下与纸浆模塑制品尺寸 I_0 对应的模具(下模)尺寸; I_0 为成型制品的尺寸。

模具对应纸模的各部分结构均可直接由CAD软件测出。根据纸模干燥后散点图的初步拟合图和模具加网后的测量结果,在进行下一步对比时,不仅要针对整体尺寸进行一一对比,而且应当将纸模截面处的结构特征单独列出进行归类对比,以得出不同类型特征收缩率的变化规律和这些特征组合后收缩率变化的规律,使得对比后得到的收缩率更具科学性和实践指导意义。对于纸浆模塑样本截面的直线段、圆角、斜线段这3类特征,可将他们分组对比。

3 数据处理及分析

对整个截面特征进行对比时，考虑到纸模模具结构中的圆角特征均是经过倒角后形成的，因此可以将圆角去除后的散点拟合图和对应的模具截面图进行对比。这样既能避免内圆角测量效果不好带来的误差，还能更直观地比较线段长度的收缩变化。对比的结果如下所述（其中对齐方式选取各自中心线对齐，

已在图中标出）。

3.1 脱模斜度变化率

ME2 斜度对比见图 11。图 11 中 K2—K211 为各个位置的编号，其各自的测量数据见表 1。可以看出斜度变化率范围较大，其平均值为 11%。

ME6 斜率对比见图 12。图 12 中 K61—K611 为各个位置的编号，其各自的测量数据见表 2。可以看出斜度变化率范围较大，其平均值为-2%。

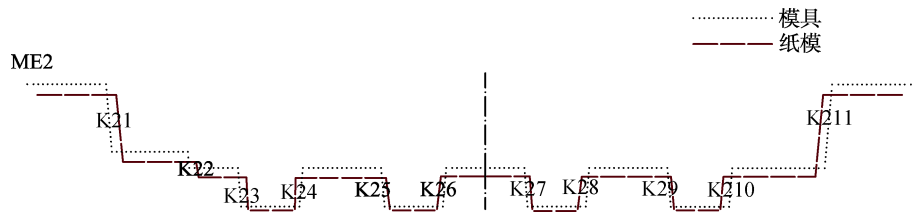


图 11 ME2 斜度对比
Fig.11 ME2 slope comparison

表 1 ME2 斜度的计算数据
Tab.1 Calculation data of ME2 slope

ME2	脱模斜度测量值/(°)	脱模斜度设计值/(°)	变化率/%
K21	5.20	5	4
K22	9.67	5	93
K23	3.10	5	-38
K24	1.44	5	-71
K25	7.08	5	42
K26	6.90	5	38
K27	4.38	5	-12
K28	7.15	5	43
K29	5.37	5	7
K210	5.35	5	7
K211	5.43	5	9

表 2 ME6 斜率计算数据
Tab.2 Calculation data of ME6 slope

ME6	脱模斜度测量值/(°)	脱模斜度设计值/(°)	变化率/%
K61	3.54	5	-29
K62	4.77	5	-4
K63	6.83	5	36
K64	5.32	5	6
K65	8.46	5	69
K66	2.51	5	-50
K67	2.56	5	-49
K68	3.66	5	-27
K69	6.09	5	22
K610	5.96	5	19
K611	4.19	5	-16

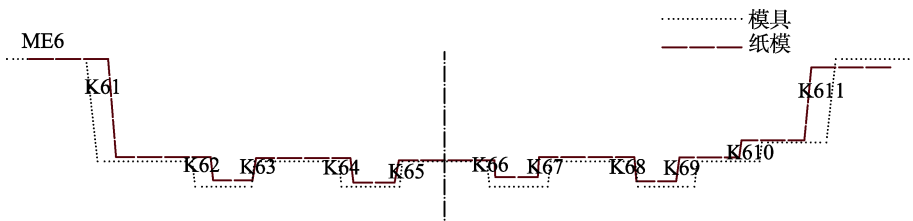


图 12 ME6 斜率对比
Fig.12 ME6 slope comparison

ME1 斜率对比见图 13。图 13 中 K11—K18 为各个位置的编号，其各自的测量数据见表 3。可以看出斜度变化率范围不大，K16 处斜度因坍塌而出现变化率过大，其平均值为 10%。

由表 1、表 2、表 3 可以看出，脱模斜度变化率变化较大。其主要原因是在湿模通过转移模转移到烘

干设备时，由于重力的作用以及放置状态的变化，导致纸浆模塑的局部发生较为严重的变形。在数据统计分析时，将个别变化大的数据剔除不用。脱模斜度变化率的直方图与概率密度函数曲线见图 14，脱模斜度变化率均值为 5.71%，标准差为 0.2237，符合正态分布。

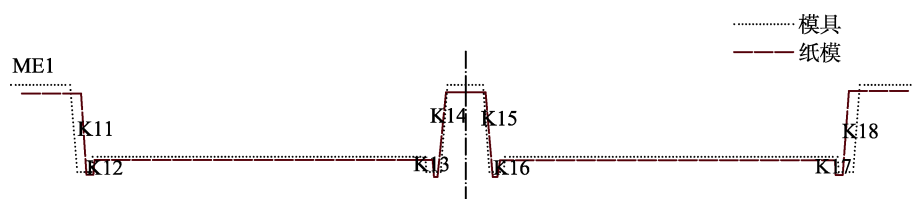


图 13 ME1 斜率对比
Fig.13 ME1 slope comparison

表 3 ME1 斜率计算数据
Tab.3 Calculation data of ME1 slope

ME1	脱模斜度测量值/(°)	脱模斜度设计值/(°)	变化率/%
K11	4.35	5	-13
K12	4.66	5	-7
K13	5.23	5	5
K14	6.57	5	31
K15	5.59	5	12
K16	10.54	5	111
K17	2.25	5	-55
K18	4.85	5	-3

表 4 ME2 外圆角半径变化
Tab.4 Fillet radius change of ME2

ME2	纸模圆角半径/mm	模具圆角半径/mm	收缩率/%
R21	5.99	3.83	-56
R22	7.78	3.83	-103
R23	7.52	3.83	-96
R24	6.51	3.83	-70
R25	8.02	3.83	-109
R26	6.70	3.83	-75
R27	6.52	3.83	-70
R28	7.48	3.83	-95
R29	6.83	3.83	-78
R210	6.14	3.83	-60
R211	5.18	3.83	-35

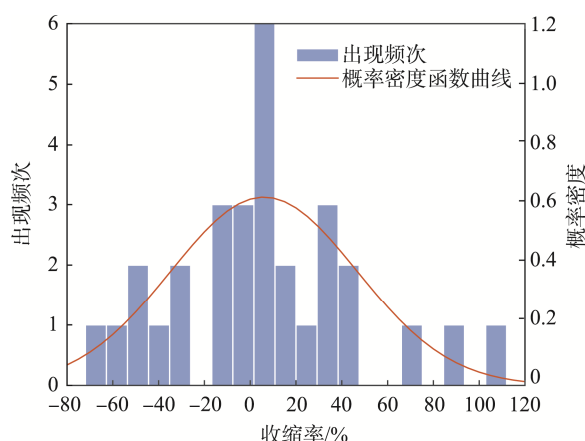


图 14 脱模斜度变化率直方图与概率密度曲线
Fig.14 Histogram and probability density curve of the stripping slope change rate

3.2 倒角圆弧半径收缩率

ME2 圆角部分对比见图 15。图 15 中 R21—R211 为各个圆角的编号，其各自的测量数据见表 4。可以

看出收缩率变化范围较大，其平均值为-77%。

ME6 圆角部分对比见图 16。图 16 中 R61—R610 为各个圆角的编号，其各自的测量数据见表 5。可以看出收缩率变化范围较大，其平均值为-83%。

由表 4、表 5 的数据可以看出，纸浆模塑的倒角圆弧半径都不同程度地变大。倒角圆弧半径变化率的直方图与概率密度函数曲线见图 15，倒角圆弧半径变化率均值为 70.61%，标准差为 0.1368，符合正态分布。

3.3 中间部分凸凹型腔线长收缩率

ME2 中间部分对比、ME6 中间部分对比及 ME1 中间部分对比见图 16—20。图 18—20 中 LS1—LS9 为各个上凸型腔线长编号，LX1—LX12 为下凹型腔线长编号，其各自的测量数据分别见表 6—7。

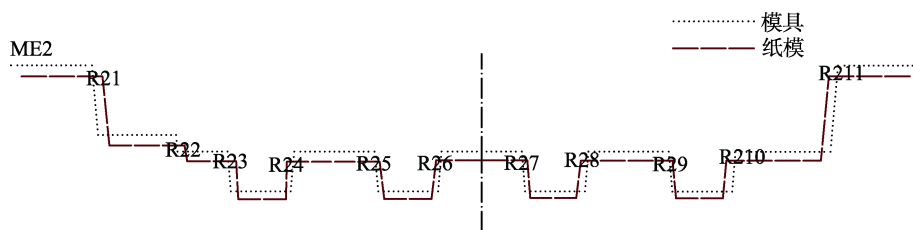


图 15 ME2 圆角部分对比
Fig.15 ME2 rounded parts comparison

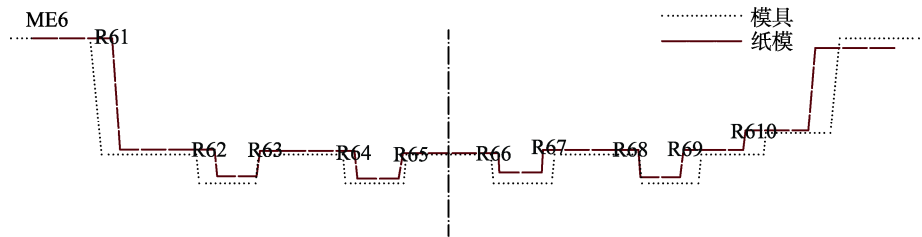


图 16 ME6 圆角部分对比
Fig.16 ME6 rounded parts comparison

表 5 ME6 外圆角半径变化 Tab.5 Fillet radius change of ME2			
ME6	纸模圆角 半径/mm	模具圆角 半径/mm	收缩率/%
R61	6.43	3.91	-65
R62	7.95	3.91	-103
R63	7.38	3.91	-89
R64	7.15	3.91	-83
R65	6.56	3.91	-68
R66	6.98	3.91	-79
R67	9.32	3.91	-138
R68	6.43	3.91	-65
R69	6.44	3.91	-65
R610	6.89	3.91	-76

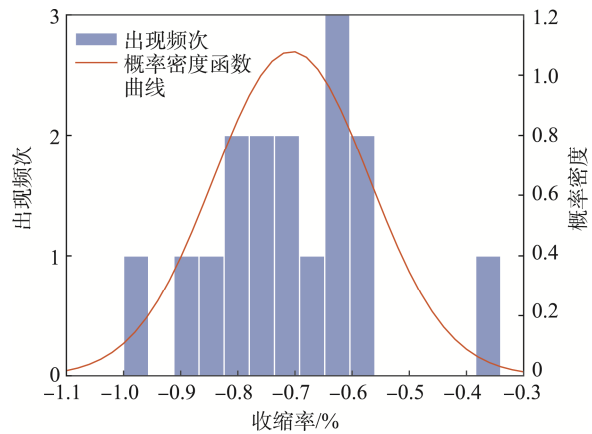


图 17 倒角圆弧半径变化率直方图与概率密度曲线
Fig.17 Histogram and probability density curve of the chamfered arc radius change rate

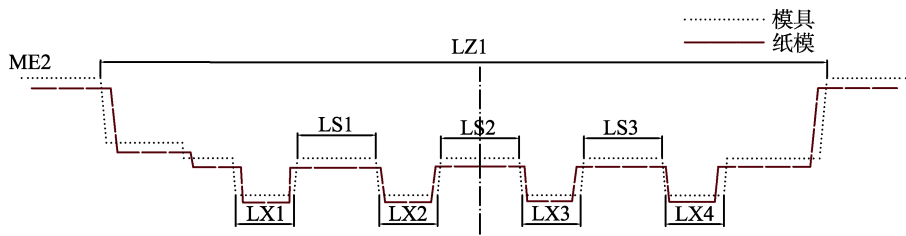


图 18 ME2 中间部分对比
Fig.18 ME2 middle parts comparison

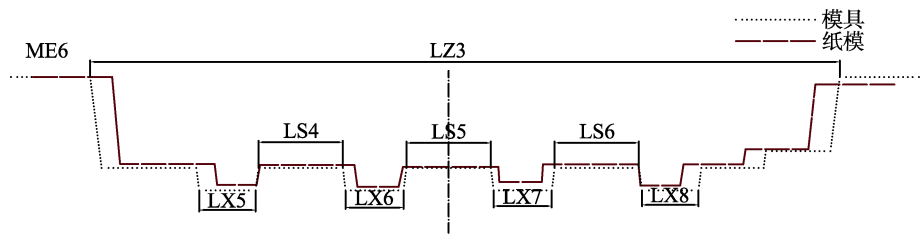


图 19 ME6 中间部分对比
Fig.19 ME6 middle parts comparison

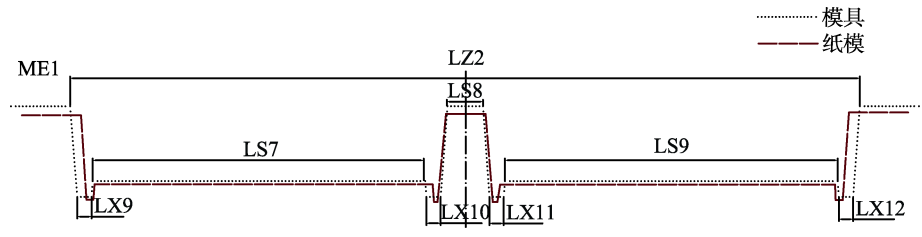


图 20 ME1 中间部分对比
Fig.20 ME1 middle parts comparison

表 6 中间部分上凸型腔线长收缩率
Tab.6 Longitudinal shrinkage of upper convex cavity line in the middle part

上凸型腔	纸模线长/ mm	模具线长/ mm	收缩率/%
LS1	57.29	50.08	-14
LS2	56.35	50.08	-13
LS3	56.59	50.08	-13
LS4	59.64	53.79	-11
LS5	60.30	53.79	-12
LS6	60.28	53.79	-12
LS7	285.92	281.86	-1
LS8	33.45	30.56	-9
LS9	283.29	281.86	-1

表 7 中间部分下凹型腔线长收缩率
Tab.7 Longitudinal shrinkage of concave cavity in the middle part

下凹型腔	纸模线长/ mm	模具线长/ mm	收缩率/%
LX1	29.44	37.44	21
LX2	29.14	37.44	22
LX3	28.38	37.44	24
LX4	28.89	37.44	23
LX5	24.88	35.12	29
LX6	26.03	36.17	28
LX7	26.82	36.17	26
LX8	25.13	35.12	28
LX9	5.85	11.59	50
LX10	2.98	11.59	74
LX11	3.89	11.59	66
LX12	6.02	11.59	48

由表 6 可以看出,上凸型腔的长度伸长率(负的收缩率)随型腔长度的变化而变化,长度越大,伸长率越小。其变化情况见图 21。

由表 7 可以看出,对于下凹型腔,其长度收缩率随型腔长度的变化而变化,长度越大,收缩率越小。其变化情况见图 22。

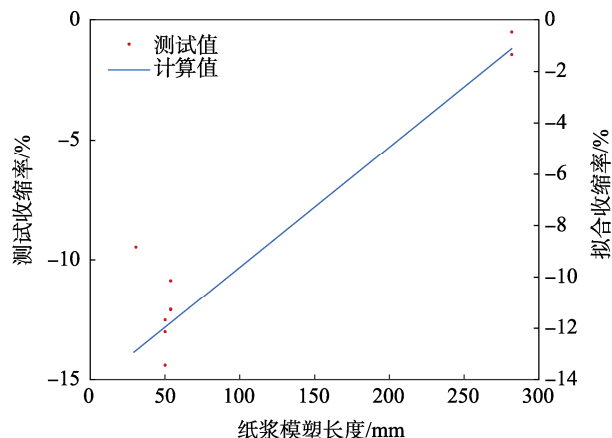


图 21 上凸型腔长度伸长率(负收缩率)随型腔长度的变化曲线

Fig.21 Change curve of elongation (negative shrinkage) of the upper convex cavity length along with the cavity length

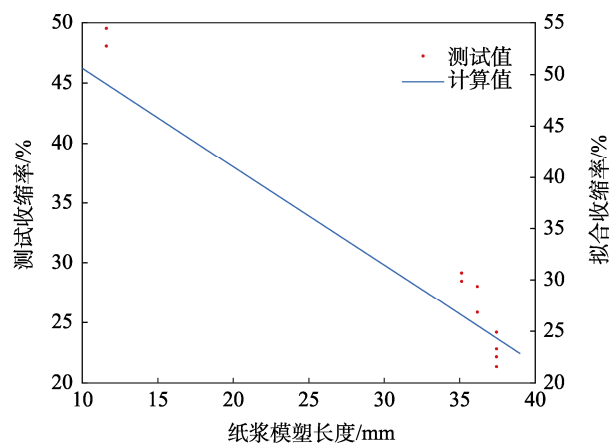


图 22 下凹型腔长度收缩率随型腔长度的变化曲线

Fig.22 Change curve of shrinkage curve of the convex cavity length along with the cavity length

3.4 高度方向收缩率

ME2, ME6 高度方向对比分别见图 23—24。图 23 中 H1—H12 为各个部分高度编号, ME2 及 ME6 高度变化见表 8—9, 可知其在高度方向均为收缩, 且收缩率较小, 平均值为 11%。

ME1 高度方向对比见图 25。图 25 中 H1—H8 为各个部分高度编号。ME1 高度变化见表 10, 可知其高度收缩率相对较小, 变化也相对较小, 平均值为 4%。

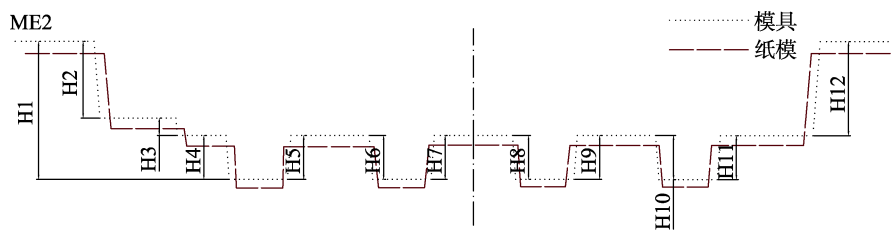


图 23 ME2 高度方向对比

Fig.23 Comparison of ME2 in height direction

表 8 ME2 高度变化 Tab.8 ME2 height change			
高度	纸模高度/ mm	模具高度/ mm	收缩率/%
总高 H1	75.21	77.52	3
H2	42.47	42.84	1
H3	9.82	10.20	4
H4	23.25	24.48	5
H5	23.07	24.48	6
H6	22.90	24.48	6
H7	23.77	24.48	3
H8	23.12	24.48	6
H9	22.88	24.48	7
H10	23.17	24.48	5
H11	23.15	24.48	5
H12	51.95	53.04	2

表 9 ME6 高度变化 Tab.9 ME6 height change			
高度	纸模高度/ mm	模具高度/ mm	收缩率/%
总高 H1	100.73	105.04	4
H2	80.67	84.24	4
H3	19.20	20.80	8
H4	18.33	20.80	12
H5	19.93	20.80	4
H6	18.32	20.80	12
H7	13.89	20.80	33
H8	16.40	20.80	21
H9	18.99	20.80	9
H10	19.65	20.80	6
H11	14.06	15.60	10
H12	65.89	68.64	4

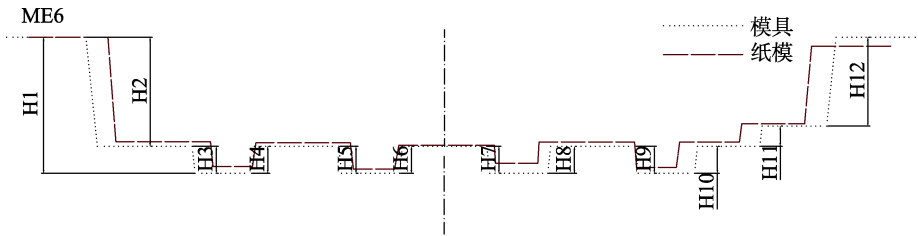


图 24 ME6 高度方向对比
Fig.24 Comparison of ME6 in height direction

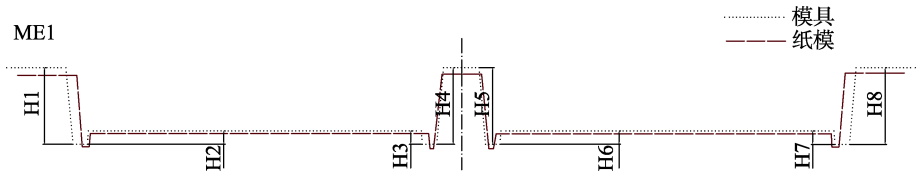


图 25 ME1 高度方向对比
Fig.25 Comparison of ME1 in height direction

表 10 ME1 高度变化 Tab.10 ME1 height change			
高度	纸模高度/ mm	模具高度/ mm	收缩率/%
H1	62.03	64.22	3
H2	10.95	11.23	3
H3	10.57	11.23	6
H4	62.41	64.25	3
H5	62.41	64.25	3
H6	10.39	11.21	7
H7	11.00	11.25	2
H8	62.04	64.26	3

符合正态分布。

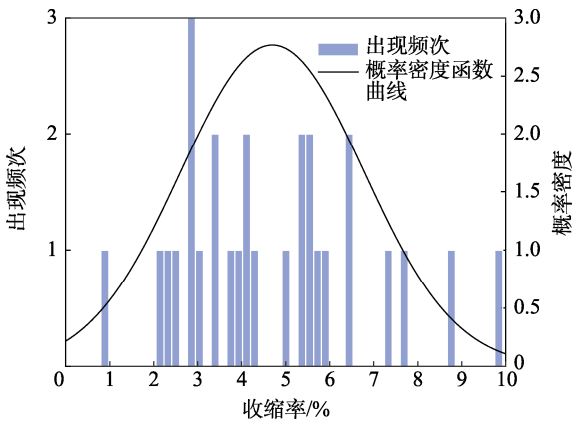


图 26 凸腔高度收缩率的直方图与概率密度函数曲线
Fig.26 Histogram and probability density curve of convex cavity height shrinkage

由表 8—10 可以看出，纸浆模塑的凸腔高度不同程度都缩小。凸腔高度收缩率的直方图与概率密度函数曲线见图 26。其均值为 4.7%，标准差为 0.0208，

4 结语

对实验数据进行筛选和数字特征的计算获得了凹凸腔长度收缩率的数学模型以及其他几何特征的收缩率数据,为纸浆模塑精确设计提供了理论依据。

1) 脱模斜度由于受到转移模转移过程的影响,其变形较为复杂。通过数据分析可以看出,其变化率符合正态分布,其均值为 5.71%,标准差为 0.2237。

2) 中间上凸型腔长度的收缩率与下凹型腔长度的收缩率呈现不同的变化规律。对于上凸型腔,其长度伸长率(负的收缩率)随型腔长度的尺寸变化,长度越大,伸长率越小。对于下凹型腔,其长度收缩率随型腔长度的长度变化,长度越大,收缩率越小。

3) 型腔高度的变化率均值为 4.7%,标准差为 0.0208,符合正态分布。

4) 倒角圆弧半径尺寸变化较大,这是由于整体的收缩导致外凸圆角坍塌,从而使得其半径变大。倒角圆弧半径变化率均值为 70.61%,标准差为 0.1368,符合正态分布。

未来在进行模具设计时可参照上述收缩率统计数据将相应的模具尺寸进行调整,上凸腔型可根据目标尺寸按照图 24 对应长度的收缩率适当调整,下凹腔型可根据图 25 的收缩率数据确定模具尺寸,高度方向尺寸可综合考虑斜率以及高度收缩率调整模具尺寸,使纸浆模塑产品尺寸更加精确。

参考文献:

- [1] 王博. 纸浆模塑制品干燥机理研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
WANG Bo. The Research on Drying Theory of Pulp Molded Packaging Products[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.
- [2] DIDONE M, TOSELLO G. Potential of Impulse Drying Technology for Molded Pulp Products Manufacture[C]// Progress in Paper Physics Seminar, Darmstadt, 2016: 9—15.
- [3] 刘全祖, 沈祖广, 黄良, 等. 纸浆模塑制品的研究现状与发展趋势[J]. 包装工程, 2018, 39(7): 97—103.
LIU Quan-zu, SHEN Zu-guang, HUANG Liang, et al. Research Status and Development Trend of Pulp Molded Products[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(7): 97—103.
- [4] 刘卫涛. 纸浆模塑干燥工艺优化与过程节能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
LIU Wei-tao. The Parameter Optimization and Energy Conservation Study of Molded Pulp Drying Process[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [5] 刘卫涛, 邓先和, 黄阔. 纸浆模塑薄层干燥实验及动力学模型分析[J]. 造纸科学与技术, 2014, 33(6): 107—111.
LIU Wei-tao, DENG Xian-he, HUANG Kuo. Thin Layer Drying Experiment and Kinetic Model Analysis of Molded Pulp[J]. Paper Science & Technology, 2014, 33(6): 107—111.
- [6] 张一忱, 蒋代君, 黄英, 等. 纸浆真空模塑成型技术及应用[J]. 真空, 2002(4): 7—13.
ZHANG Yi-chen, JIANG Dai-jun, HUANG Ying, et al. Technology and Application of Vacuum Pulp-molding[J]. Vacuum, 2002(4): 7—13.
- [7] 张琳. 纸浆模塑包装制品干燥机理及其工艺参数研究[D]. 无锡: 江南大学, 2006.
ZHANG Lin. The Research on Drying Theory and Process Parameters of Molded Pulp Packaging Products[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2006.
- [8] 欧建志, 王文生, 黄占虎. 纸浆模塑制品干燥的有关问题[J]. 纸和造纸, 1999(1): 38—39.
OU Jian-zhi, WANG Wen-sheng, HUANG Zhan-hu. Problems Related to the Drying of Molded Pulp Products[J]. Paper and Paper Making, 1999(1): 38—39.
- [9] 黄俊彦, 朱婷婷. 纸浆模塑生产实用技术[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2008.
HUANG Jun-yan, ZHU Ting-ting. Molded Pulp Production Technology[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2008.
- [10] 刘雪莹, 张丽, 陈金周. 纸浆模塑制品的生产技术及其发展状况[J]. 中国包装, 2004(4): 43—45.
LIU Xue-ying, ZHANG Li, CHEN Jin-zhou. Production Technology and Development Status of Molded Pulp Products[J]. China Packaging, 2004(4): 43—45.
- [11] 张新昌, 王永光. 国产纸浆模塑工业包装生产设备及其发展[J]. 机电信息, 2003(16): 23—25.
ZHANG Xin-chang, WANG Yong-guang. Domestic Molded Pulp Industrial Packaging Production Equipment and Its Development[J]. Mechanical and Electrical Information, 2003(16): 23—25.
- [12] 黄帅. 纸浆模塑生产过程节能降耗关键技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2014.
HUANG Shuai. Research on Key Energy-saving Technologies of Pulp Molding Batch Process[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2014.
- [13] 邱仁辉. 纸浆模塑制品成型机理及过程控制的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2002.
QIU Ren-hui. Study on the Mechanism of Pulp Molding and Process Control[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2002.
- [14] 杨智能, 张龙, 李志刚. 塑料薄膜热收缩率测试方法[J]. 机械, 2012, 39(8): 70—73.
YANG Zhi-neng, ZHANG Long, LI Zhi-gang. The Testing Method of Heat Shrinkage of Plastic Film[J]. Machinery, 2012, 39(8): 70—73.

- [15] 黄俊彦. 纸浆模塑制品的模具及其设计[J]. 湖南包装, 2002(3): 20—23.
HUANG Jun-yan. Molded Pulp Products and Their Design[J]. Hunan Packaging, 2002(3): 20—23.
- [16] 刘斌, 崔志杰, 陈昌乾. 模具检测技术现状及发展趋势[J]. 模具工业, 2017, 43(5): 1—6.
LIU Bin, CUI Zhi-jie, CHEN Chang-gan. Status and Development Trend of Die & Mould Inspection Technology[J]. Die & Mould Industry, 2017, 43(5): 1—6.
- [17] 张永涛, 贾延明. 最小二乘法中代数多项式曲线拟合的分析及实现[J]. 计算机与数字工程报, 2017, 45(4): 637—639.
ZHANG Yong-tao, JIA Yan-ming. Analysis and Program Implementation of Least Squares Polynomial Curve Fitting[J]. Computer & Digital Engineering, 2017, 45(4): 637—639.