

竹勺连续化自动成型装置的设计与试验

雷军^{1,2}, 张文福², 张建^{2*}, 袁少飞², 吴安琪², 王进²

(1.浙江农林大学 化学与材料工程学院, 杭州 311300; 2.浙江省林业科学研究院 浙江省竹类研究重点实验室, 杭州 310023)

摘要: 针对传统竹勺热压成型工序中存在的连续性差、效率低、人工强度大等问题, 在已有的成型技术基础上, 对竹勺热压工艺、上下料方式、单次成型个数等关键结构和运动参数进行改进设计, 提出了一种多吸盘连续上料整体热压成型的工艺方法, 并设计了竹勺热压成型样机。通过对竹勺压板热传递条件的理论分析, 在压板尺寸为(713×537×56) mm的条件下, 确定竹勺模具排列方式为16×3, 即单次可成型竹勺48个, 对比传统竹勺热压机将加工效率提高了128%。运用ANSYS Workbench有限元方法模拟吸盘吸附时的变形状态并对吸附底面的受力情况进行分析, 确定吸盘吸附直径为5mm、吸盘吸力为4.75N, 验证了在该吸力下对竹勺无变形。通过对传统头部热压和整体热压两种工艺加工出来的竹勺进行弯曲性能分析试验, 结果表明整体热压加工后的竹勺含水率为4.8%、弯曲强度99.46MPa、弯曲模量为5809.2MPa, 对比传统头部热压加工后的竹勺含水率降低了1.2%、弯曲强度增加了17.0%、弯曲模量增加了14.5%, 并对断裂特征使用电子显微镜观察分析, 表明本文提出的整体热压装置成型后的竹勺具备更好的使用硬度和弯曲强度。

关键词: 竹材加工; 整体热压; 连续成型; 吸盘; 竹勺模具; 弯曲性能

Design and testing of a continuous automatic forming device for bamboo spoons

Abstract: To address the problems of poor continuity, low efficiency and high manual effort in the traditional bamboo spoon forming process, based on the existing forming technology, the key structure and movement parameters such as the bamboo spoon hot press process, loading and unloading method and the number of single forming were improved and designed, and a multi-suction cup continuous loading whole hot press forming process was proposed, and a prototype bamboo spoon hot press forming machine was designed. Through the theoretical analysis of the heat transfer conditions of the bamboo spoon press, the arrangement of the bamboo spoon moulds was determined to be 16 x 3 under the condition that the press size is (713 × 537 × 56) mm, which means that 48 bamboo spoons can be formed in a single pass, increasing the processing efficiency by 128% compared to the traditional bamboo spoon heat press. The deformation of the suction cups was simulated using the ANSYS Workbench finite element method and the force on the bottom surface of the suction cups was analysed to determine a suction cup diameter of 5 mm and a suction cup force of 4.75N. It was verified that there was no deformation of the bamboo spoon under this suction force. The results showed that the moisture content of the bamboo spoon was 4.8%, the bending strength was 99.46MPa and the bending modulus was 5809.2MPa, which was 1.2% lower, 17.0% higher and the bending modulus was 14.5% higher than that of the bamboo spoon processed by traditional head hot pressing. The fracture characteristics were also analysed by electron microscopy, indicating that the bamboo spoon formed by the proposed integral hot pressing device has better service hardness and bending strength.

Key words: bamboo processing; overall hot pressing; continuous forming; suction cups; bamboo spoon moulds; bending performance

0 引言

基金项目: 浙江省省院合作林业科技项目(2021SY07)

作者简介: 雷军(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事竹木加工和林业机械的研究, E-mail: 1449146422@qq.com.

※通讯作者: 张建(1978—), 男, 研究员, 博士, 主要从事竹木加工和林业机械的研究, E-mail: 1041701452@qq.com.

竹子作为一种绿色、环保的可再生材料，具有种类繁多、生长迅速、性能良好等特点^[1]。随着国际上限塑政策的盛行和国内“以竹代塑”的推动，竹材被广泛应用于建筑、家具、日用品、工艺品等领域，特别是在具有使用频率高、消费速度快等特征的快消品产业，竹材以其更好的力学性能和环保特性，成为塑料等传统快消品原料的完美替代品^[2-8]。随着近几年竹纤维餐具、竹质刀叉勺、竹质吸管以及竹键盘和鼠标等原竹快消品的销量增长迅速，出口量也逐年增长。原竹快消品加工产业的发展面临着前所未有的机遇与挑战。而竹勺作为竹餐具中加工最为复杂的竹质快消品种类，其加工工艺和设备的落后成为制约竹勺加工发展的最大阻力^[9]。传统的竹勺热压成型机主要针对竹勺头部，利用平模加热进行热压成型；而且机械设备存在自动化程度低、加工连续性差、人工强度大的问题^[10-14]。

本文在传统热压成型工艺和机器的技术基础上进行改进，提出了一种多吸盘连续上料整体热压成型的工艺方法，并设计了竹勺热压成型样机。并在相同的工况下，对两种不同工艺和设备的工作效率、工作稳定性、竹勺性能提升开展样机试制和试验论证比较，为新型的竹勺连续化自动成型装置的研制与开发提供了思路和参考依据。

1 工作原理与整机结构

1.1 工作原理

竹勺热压成型原理对比如图 1 所示。图 1a 为传统头部热压成型原理，操作员在每次合模前后，需要在加热平模上完成竹勺坯料的上料和竹勺成品的拿取工作。由于需要人工上料，为保证操作员在上料过程中安全性，所以竹勺模具只能做到竹勺头部 90cm 处，因此传统竹勺热压机不仅会使竹勺受热不均导致产品差异，而且人工上料、卸料增加了操作危险性，降低了加工效率。

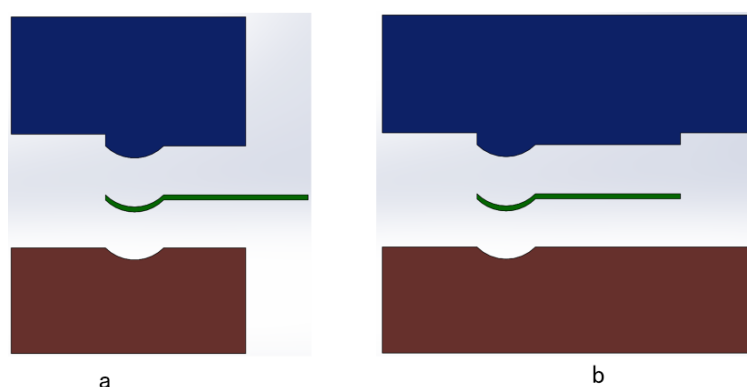
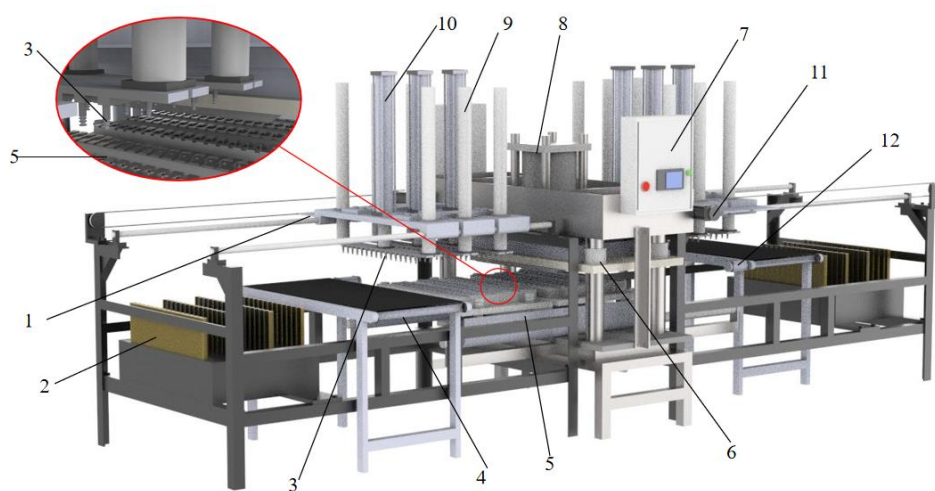


图 1 竹勺热压成型原理对比

Fig.1 Principles comparison of bamboo spoon molding

针对头部热压竹勺的缺陷，将热压工艺改进为整体热压（如图 1b 所示），并由此提出了一种多吸盘连续上料，竹勺整体热压的成型装置，如图 2。竹勺连续化自动成型装置的工作原理为：只需操作员在加工

前，在数控中心对热压温度进行设置，并只需对料仓进行上料，料仓最大容量可装填 2400 个竹勺坯料，可供热压机完成 50 次热压动作，这一设计保证操作员无需直接接触热压模具，降低了操作危险性。除中间为热压成型装置外，竹勺的自动上下料装置对称布置两套，气动导轨带动可移动平模在压模下方左右往复移动，可移动平模设置有两套竹勺模具，在其中一套模具和压模合模热压的同时，一侧的自动上下料装置在另一套模具上完成竹勺上料，一次热压完成后，可移动平模移动至另一侧对未加工竹勺进行热压，同样另一侧的自动上下料装置将已加工的竹勺吸附移动至传送带上送至竹勺储存箱，完成自动卸料工作，随后从料仓进行自动上料，以此循环完成竹勺的连续加工成型。热压模具设计为竹勺整体热压，保证受热均匀（如图 2 中圆圈放大图所示），且可一次完成 48 个竹勺的热压成型工作，提高了加工效率。



1.齿条传动 2.料仓 3.吸盘 4.传送带 5.可移动平模 6.压模 7.数控中心 8.压模气缸 9.吸盘组件 10.吸盘气缸 11.吸盘组件移动电机 12.传送带电机

1.Gearing of the rack and pinion 2.Silos 3.Suction cups 4.Conveyor belts 5.Removable flat die 6.Press-die 7.CNC center 8.Press-die cylinder 9.Suction-cup assembly 10.Suction cup cylinder 11.Suction-cup assembly removable motor 12.Conveyor motor

注：圆圈内为压模和可移动平模之间放大图，表示对竹勺进行整体热压。

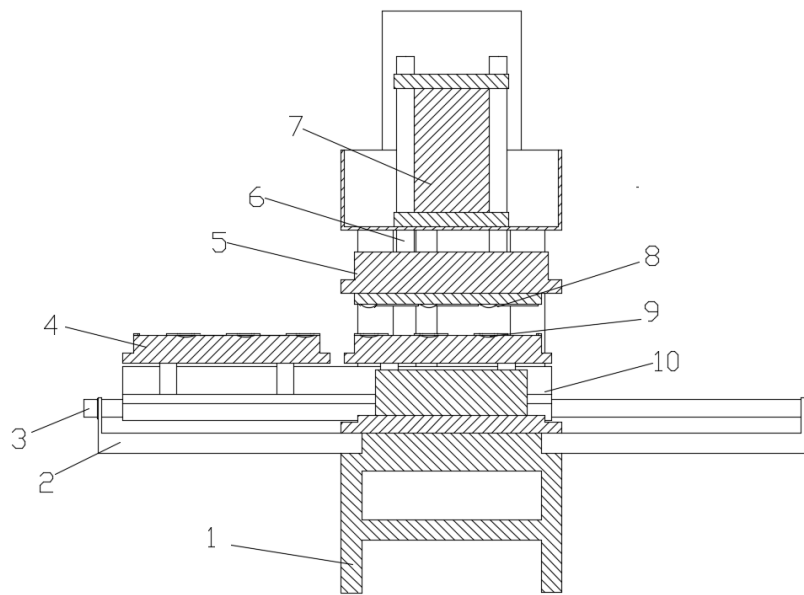
Note: The circle shows an enlarged view between the pressing die and the removable flat die, indicating the overall hot pressing of the bamboo spoon.

图 2 竹勺连续化自动热压成型原理

Fig.2 Principle of bamboo spoon continuous automatic molding

1.2 整机机构

竹勺连续化自动成型机主体结构可分为热压成型装置和自动上下料装置两个部分，热压成型装置样机整机结构如图 3 所示，竹勺坯料在上下模具之间完成热压成型，平模在电动推杆的带动下在导杆上移动，完成不间断的成型热压工作，SC 复动型压模气缸给合模动作提供动力。



1.机架 2.平模导轨 3.导杆 4.可移动平模 5.压模 6.压模柱 7.压模气缸 8.竹勺上模具 9.竹勺下模具 10.平模撑板
 1.Racks 2.Flat die guide 3.Guide rod 4.Removable flat die 5.Press-die 6.Press-die column 7.Press-die-cylinder 8.Bamboo spoon top die
 9.Bamboo spoon lower die 10.Flat mold spacer

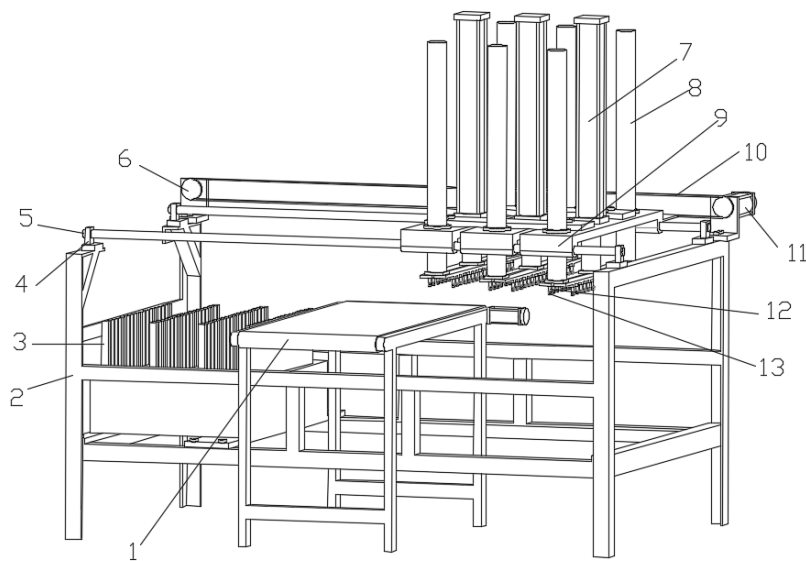
注：该结构图为对称剖视图。

Note: The structure drawing is a symmetrical sectional view

图3 热压成型装置内部结构图

Fig.3 The internal structure diagram of molding device

自动上下料装置样机整体机构如图4所示，该装置设计两个独立动力源，另外包含机架、传动装置、送料装置、卸料装置、执行装置几个部分组成。120W的80ST-M02430Z1型号的伺服电机给传送带提供动力，并配置24V的电磁失电制动器来控制传送带完成卸料。齿轮齿条带动吸盘支架在料仓、传送带、平模之间移动完成自动上料和下料的工作。吸盘共设置三排，保证每个竹勺由两个吸盘吸附，确保吸附移动过程中不掉落，由于竹勺热压后呈弯曲状，为保证竹勺均匀，所以在吸盘底部使用橡胶材料安装一个橡胶底座。



1.传送带 2.机架 3.料仓 4.导轨支架 5.吸盘导轨 6.齿轮 7.吸盘气缸 8.吸盘滑杆 9.吸盘支架 10.齿条 11.伺服电机 12.吸管 13.橡胶底盘
 1.Conveyor belts 2.Racks 3.Silos 4.Guide rail holder 5.Suction cup guide rail 6.Gears 7.Suction-cup-cylinders 8.Suction cup slide bar 9.Suction cup holder 10.Rack 11.Servo Motor 12.Straws 13.Rubber chassis

图 4 自动上下料装置结构图

Fig.4 The structure diagram of Automatic loading and unloading device

2 总体参数与关键部件设计

2.1 样机总体参数

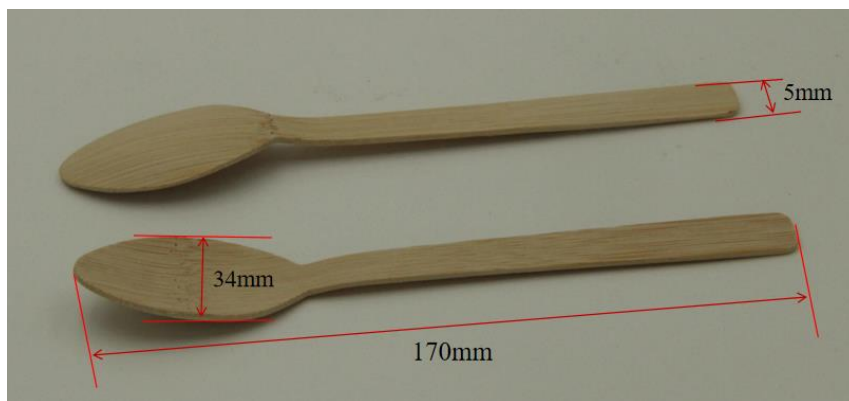


图 5 竹勺尺寸图

Fig.5 Diagram of the size of a bamboo spoon

竹勺尺寸如图 5 所示，以及热传递最合理的压板尺寸要求，确定压板尺寸为 $(713 \times 537 \times 56)$ mm，由此针对本样机的模具个数进行优化设计，共设置竹勺模具 16×3 ，共 48 个，即一次热压可成型 48 个竹勺产品。样机每分钟的产量 Q_1 为：

$$Q_1 = \frac{N}{t} \tag{1}$$

式中：N 为一次工作成型竹勺个数；t 为一次热压工作所需时间，取其值为 1.75min。对比传统热压机一次热压 15 个竹勺产品，所需时间为 1.25min，样机的产量提升率 W 为：

$$W = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_2} \tag{2}$$

式中：Q₁ 为本样机产量；Q₂ 为传统热压机产量，计算同公式（1），得出样机的产量提升率为 128%。样机主要参数如表 1。

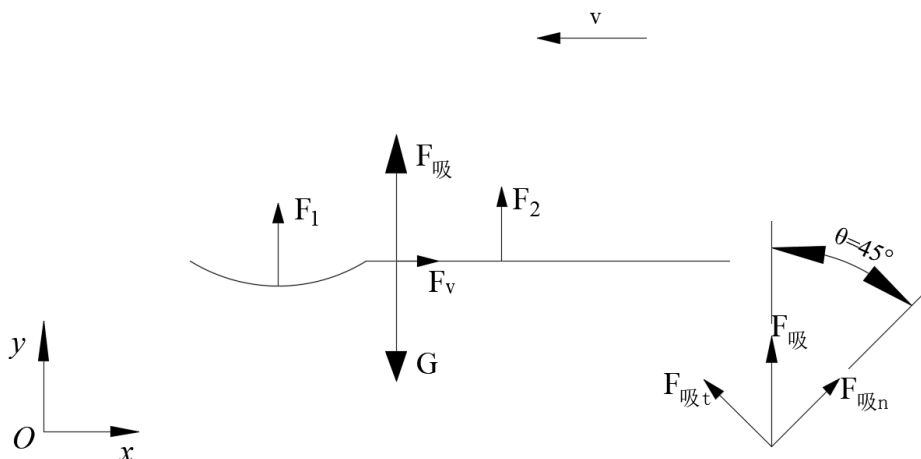
表 1 连续化竹勺自动热压成型机主要技术参数

Table.1 Main parameters of continuous bamboo spoon hot pressing machine

参数 Parameters	产量 Productivity/ (Number · min ⁻¹)	热压温度 Molding temperature/ (°C)	热压时间 Molding time/ (min)	上下料时间 Loading and unloading time/ (min)
设计值 Values	27	140	1	0.75

2.2 吸盘组件设计

吸盘组件是本文提出的热压成型机实现成型自动化和上下料连续化的关键工作部件。吸盘组件的主要功能是实现竹勺在热压成型装置和自动上下料装置之间的转移，为了对吸盘进行具体设计，需对吸附运动过程中竹勺的受力情况进行分析，如图 6 所示。由于竹勺质量并非均匀分布，为了使吸盘组件在吸附竹勺时更加稳定，在竹勺重心两侧对称设计有两个吸盘，F₁ 和 F₂ 为两个吸盘的吸力，F_吸 为一个竹勺所受的总吸力；以向左运动为例，F_v 为水平移动时竹勺所受惯性力；为了保证竹勺运动过程中的稳定，对竹勺所受的力进行正交分解，例如 F_{吸t} 和 F_{吸n} 为 F_吸 径向和法向所受的力；G 为竹勺所受重力；竹勺水平移动速度为 v。



注: F_1 、 F_2 为一个竹勺分别受到的两个吸盘吸力, N; $F_{吸}$ 为一个竹勺承受的向上总吸力, N; G 为竹勺所受重力, 其中 g 取 $9.8(m \cdot s^{-2})$, N; F_v 为竹勺水平方向上由静止到运动所受的惯性力, 与运动方向相反, N; $F_{吸t}$ 、 $F_{吸n}$ 为 $F_{吸}$ 的正交分量, N。

Note: F_1 and F_2 represents the two suction cups forces of a bamboo spoon respectively, N; $F_{吸}$ represents the total upward suction force on a bamboo spoon, N; G represents the gravitational force on a bamboo spoon, which g is taken as $9.8(m \cdot s^{-2})$, N; F_v represents the inertial force on a bamboo spoon from rest to motion in the horizontal direction, opposite to the direction of motion, N; $F_{吸t}$ and $F_{吸n}$ represents the orthogonal components of $F_{吸}$, N.

图 6 竹勺移动受力示意图

Fig.6 Force analysis of bamboo spoon moving

吸盘组件受力分析如下:

$$\begin{cases} \sum F_t \geq 0, F_{吸t} - F_{vt} - G_t \geq 0 \\ \sum F_n \geq 0, F_{吸n} + F_{vn} - G_n \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 F_t 为竹勺所受总径向力、 F_n 为竹勺所受总法向力, 吸盘吸力需克服重力和惯性力的影响, 保证竹勺在移动过程中稳定不掉落。为了更好的对力进行分析, 故将所受力都以正交分量来计算。

未成型前竹勺质量平均为 340g, 成型后质量变轻, 所以计算时 m 取大值 350g; 竹勺水平方向为匀速运动, V_t 为 0.15m/s, 由静止到加速的时间为 1s, 所以加速度 a 为 $0.15m/s^2$ 。计算力的正交分量时 θ 取 45° 。

$$G_t = G_n = mg\sin\theta = mg\cos\theta \quad (4)$$

$$F_{vt} = F_{vn} = masin\theta = macos\theta \quad (5)$$

结合公式 (3)、(4)、(5) 可得:

$$F_{吸} = \frac{F_{吸t}}{\sin\theta} = \frac{F_{吸n}}{\cos\theta} \geq 3.43N \quad (6)$$

根据竹勺受力分析进行真空吸盘的设计, 其中真空吸盘吸力计算公式为:

$$F = 0.1 \times A \times P \quad (7)$$

式中 F 为真空吸盘理论起吊力, N; A 为吸盘的吸附面积, cm^2 ; P 为吸盘真空压力, kPa。以标准吸盘为标准对本吸盘进行设计^[15], 取吸盘真空度为 60%, 即吸盘真空压力为 60%的大气压力, P 取 60.795kPa。结合公式 (6)、(7)、实际运行中对于吸盘吸力的要求, 初选吸盘吸附直径为 5mm, 计算得出理论起吊力 F 为 4.74N, 符合公式 (6), 所以取吸盘吸附直径为 5mm 对吸盘进行设计, 如图 7 所示。

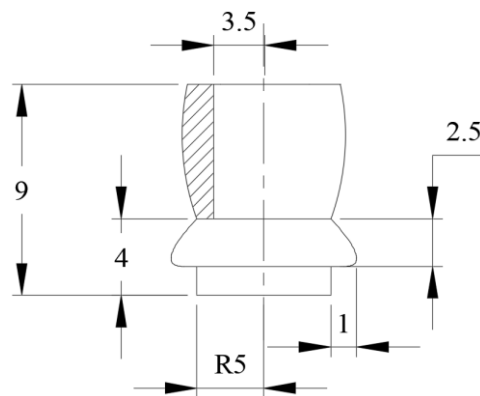


图 7 吸盘剖面图及相关尺寸 (单位: mm)

Fig.7 The Cross-sectional view of suction cups and related dimensions (Unit: mm)

图为吸盘底部的剖面图，在直径为 3.5mm 的吸管底部套一个高度为 9mm 的橡胶底座，设计高度为 4mm 的伸缩区，在吸盘在吸附过程中预防由于吸附力过大对于竹勺表面的破坏，橡胶底座的底面为吸附底面，直径为 5mm。

3 仿真模拟

为了确定在吸附过程中吸盘吸力是否会对吸附底面产生变形，以及对其吸附底面受力进行仿真模拟，本文采取有限元的方法对吸盘底部吸附过程中的受力状态进行模拟分析，通过有限元分析方法中化整为零，再积零为整的思想，先将吸盘和吸附底面拆分为一个个小单元进行分析，再将每个小单元组合在一起形成一个吸附整体进行分析。本文采用 ANSYS Workbench 分析软件，从前处理、分析计算、后处理三个分析模块出发，完成一次完整的有限元分析^[15]。

3.1 吸盘的模型设计

对吸盘进行有限元分析首先需要进行三维模型建模设计，依据图 6 中相关尺寸，在 SolidWorks 三维软件中建立三维模型，并在吸盘底部建立一个吸附底面配合模拟，吸盘吸附直径为 5mm，吸附底面直径应大于吸附直径，参考竹勺尺寸，吸附底面直径设计为 12mm，厚度为 2mm。设置吸附底面和吸盘同轴配合，吸盘吸附面和吸附底面重合配合，将设计好的装配体导入 ANSYS Workbench 中，装配体如图 8 所示。

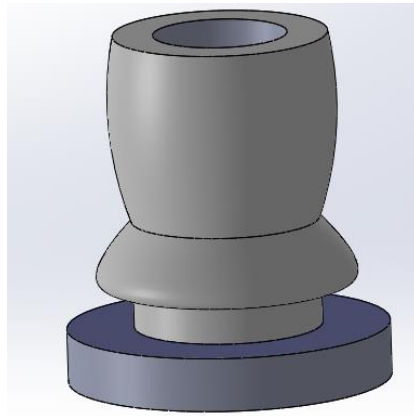


图 8 吸盘与吸附底面装配体

Fig.8 Suction cup and adsorption bottom assembly

3.2 吸盘的有限元分析

在三维装配体模型建立完成之后，选择 Analysis systems 中静态结构分析，将模型导入 DesignModeler 几何建模平台中并选择生成模型，在平台主界面显示有限元项目模型导入成功后，进行吸盘装配体各部件的材料属性定义。其中吸附底面材质设置为竹木材料，其密度为 1.5g/cm^3 ，泊松比为 0.3。与吸附底面接触的吸盘设置为橡胶材质，属于超弹性材料，因此需要在材料库选择 Hyperelastic Materials 中的 Mooney-Rivlin 2 Parameter 模型，对其参数进行设置，其中 Material Constant C10 为 1.38MPa ；Material Constant C01 为 0.345MPa ；Incompressibility Parameter D1 设置为 0.01MPa^{-1} 。根据设计以及橡胶材料的普遍硬度可以计算出，橡胶吸盘的弹性模量为 3.4MPa ，泊松比为 0.49，密度为 1g/cm^3 。在对吸盘与吸附底面的材料定义之后，即可进行分析的前处理模块对其进行网格划分，在网格划分中选择 Mechanical，设置吸盘的网格大小为 1mm ，结构为四面体网格结构^[16-19]。吸附底面的网格划分结构如图 9 所示。

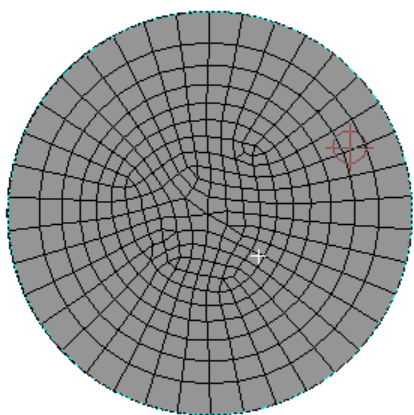


图 9 吸附底面网格划分结果

Fig.9 The meshing results of adsorbent base

网格划分完成后，需要对吸盘模型进行约束和边界条件的设置，如图 10 所示，由于吸盘和吸附底面之间属于接触问题，为了更好的分析吸附底面的受力情况，由此选择接触类型为摩擦接触，摩擦系数为 0.8。在接触对象的选择中，选择吸附底面为目标面（图 10 中显示为蓝色面），选择吸盘为接触面（图 10 中显示为红色面）。另外，由于本分析属于超弹性材料中的大变形问题，需要在接触选项中选择增强拉格朗日公式增加额外的控制，保证两个接触面不会互相穿透^[15]。

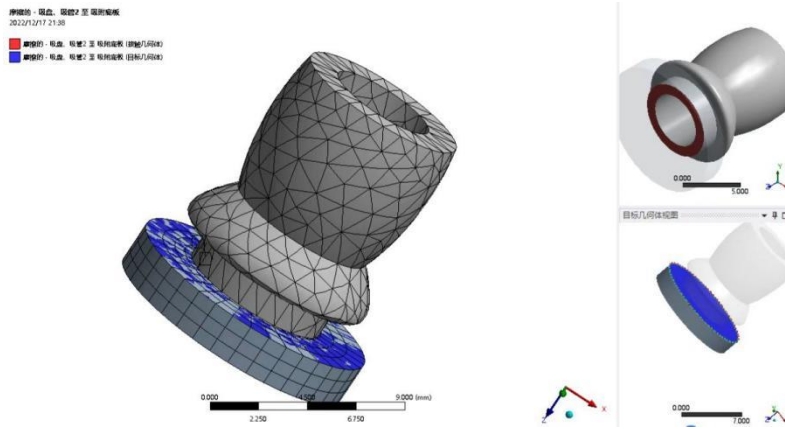


图 10 模型的接触面设置

Fig.10 Contact surface settings for the model

最后根据本文设计的真空吸盘真空度为 60%进行力的加载，即在吸盘吸附表面施加一个垂直向下的 60% 的大气压强，为 60.795KPa。所有参数设置完成后，即进行有限元计算求解。

3.3 有限元结果分析

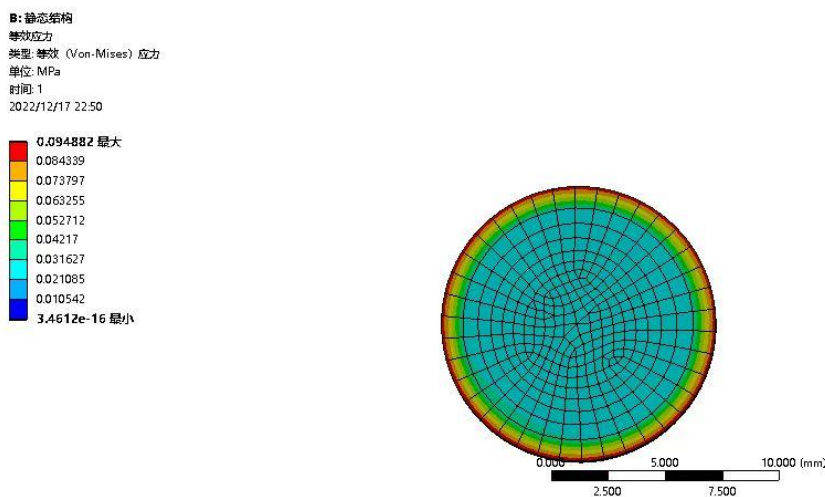


图 11 吸附时吸附底面的 Mises 等效应力图 (MPa)

Fig.11 Force map of the Mises equivalence effect of the adsorption bottom during adsorption (MPa)

由图 11 中所示的吸附时吸附底面的 Mises 等效应力图可知，最大应力值（Max）0.09MPa 出现在吸盘的非接触区，即吸附底面的边缘，从非接触区域向接触区域出现应力逐渐减小的趋势，分别为 0.084MPa、0.074MPa、0.063MPa、0.053MPa、0.042MPa，一直到接触区域内部，即吸附区域应力不再变化，稳定在 0.032MPa。整体压力呈现出由外向内逐渐递减，非接触区压力高且有变化趋势，吸附区域压力较低且稳定无变化的趋势。

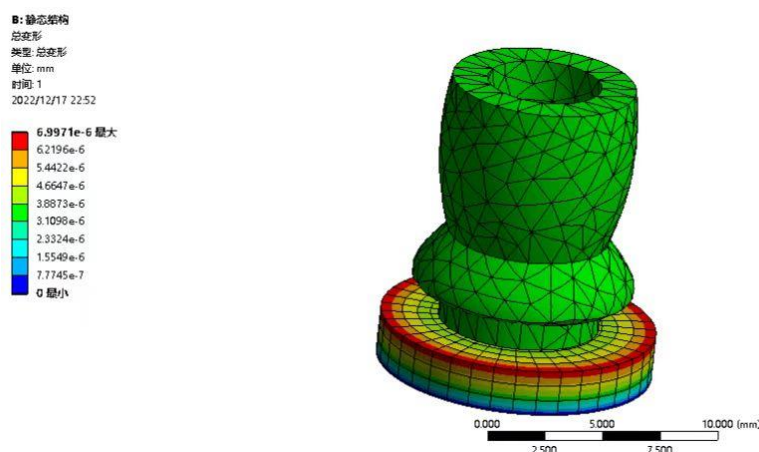


图 12 吸附时吸盘的总变形图（mm）

Fig.12 Total deformation diagram of the suction cup during adsorption (mm)

图 12 为吸附时吸盘的总变形图，由图可知在吸附过程中，橡胶底座的变形稳定在 0.31×10^{-5} mm，而吸附底面的上表面变形呈现出由外向内、由上至下逐渐变小的趋势，最边缘的非接触区变形最大值为 0.70×10^{-5} mm，吸附底面的这一变形趋势和图 11 中应力的变化趋势呈现出较好的一致性，表明该有限元变形分析符合实际受力情况。

根据有限元分析结果得出，本文设计的吸盘组件在吸附过程中，吸附直径为 5mm，吸附力为 4.74N，受力符合理论计算中的受力情况，且吸附过程对于竹勺的变形破坏极小，可忽略不计，最大的 0.70×10^{-5} mm 形变值也符合生产对于竹勺的误差要求，验证了本文提出的竹勺连续化自动成型装置吸盘组件在吸附过程中的可行性，以及吸附过程对竹勺无变形破坏发生。

4 试验与分析

4.1 试验方法与仪器设备

为验证本文提出的连续性竹勺自动成型机加工出的竹勺性能，对比传统成型机开展了竹勺弯曲性能、含水率、微观形貌的试验观察^[20-22]。试验所用的仪器和设备主要包括：万能力学试验机、S-3400N 扫描电子显微镜、电子秤（精度：0.01g）、扫描仪、竹勺连续化自动成型装置（图 13）、传统竹勺热压成型机（图 14）、真空干燥箱等。

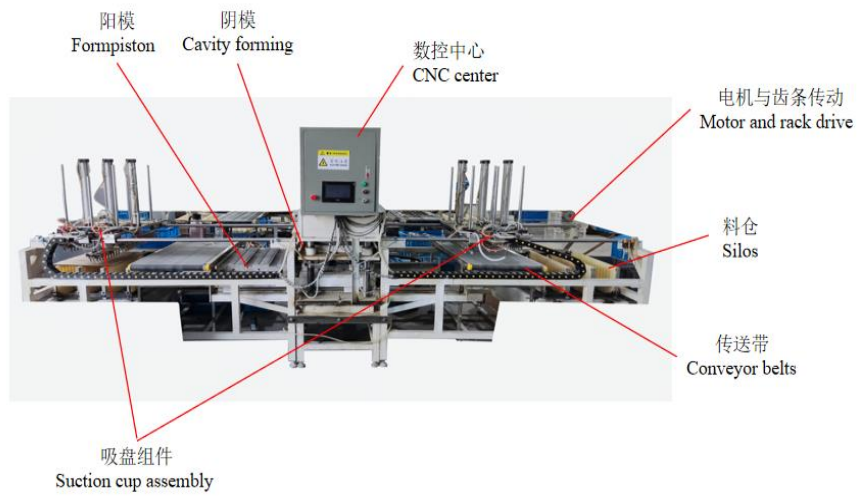


图 13 竹勺连续化自动成型装置样机

Fig.13 Bamboo spoon continuous automatic molding device prototype



图 14 传统竹勺热压成型机

Fig.14 Traditional bamboo spoon molding machine

4.2 试验材料

试验所采竹材产自安徽，选用三年生毛竹（*Phyllostachys edulis*）作为竹勺原料。经过定长截断、去青

去黄、软化处理、等初加工工艺处理后^[23-24]，得到加工所需的竹片坯料。对同一批竹片坯料进行热压成型加工，其中头部热压成型加工在浙江省安吉峰晖竹木制品有限公司的传统竹勺热压成型机上进行；整体热压成型加工在浙江省林业科学研究院竹类重点实验室的竹勺连续化自动成型装置样机上进行。对加工完成后的两种竹勺样品，各随机抽取 20 组进行称重、放入真空干燥箱内，干燥温度为 120℃、干燥 12h 后进行二次称重。对比两种不同工艺和设备生产出的竹勺样品的含水率，为后续试验提供参考，结果如表 2 所示：

表 2 不同热压工艺竹勺的含水率

Table.2 The moisture content of the Bamboo spoons with different platen-craft

工艺	热压前质量	热压后质量	含水率
Craft	Quality before autoclaved/g	Quality after autoclaved/g	Moisture content/%
整体热压	313g	299g	4.8%
Overall platen			
头部热压	392g	363g	8.0%
Cephalic platen			

对所得不同工艺生产出的竹勺样品含水率进行分析，结果得出整体热压后的竹勺含水率低于头部热压后的竹勺。为进一步论证两种工艺对于竹勺使用性能——弯曲强度的影响，对两种竹勺进行弯曲性能试验。

4.3 竹勺弯曲性能试验

依据 GB/T 15780-1995，对竹勺的弯曲性能进行测试。竹勺试样尺寸为 17mm×(a+b)mm×2mm，a 为勺头宽度、b 为勺柄宽度。

试样采用三点弯曲，压辊施力部位为勺柄部位，两支撑辊的跨距为 80mm，试验装置如图 15。加载速度按 10mm/min 加荷，预加载为 5mm/min，对两种不同竹勺分别进行抗弯试验，直至试样破坏断裂，不考虑竹节影响。试验结果见表 3，载荷—位移关系曲线如图 16。

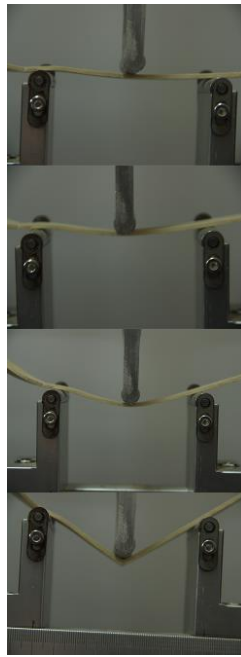


图 15 三点弯曲试验装置

Fig.15 Test equipment for three-point bending

表 3 不同竹勺弯曲性能试验结果

Table.3 Test result of different bamboo spoon flexural performance

工艺	破坏载荷	弯曲强度	弯曲模量
Craft	Destruction load/N	Flexural strength/MPa	Flexural modulus/MPa
整体热压	39.78	99.46	5809.2
Overall platen			
头部热压	33.99	84.99	5073.9
Cephalic platen			

对比 Guowei Chen^[25]等对于含水率对竹片断裂性能的研究，本试验在整体热压竹勺含水率略低于头部热压竹勺的情况下，其弯曲强度反而比头部热压竹勺更大，考虑这是因为弯曲过程中主要由纤维束起支撑作用，而整体热压工艺致使其内部有更多的纤维拉出，使其抗弯曲能力更好、强度更大。

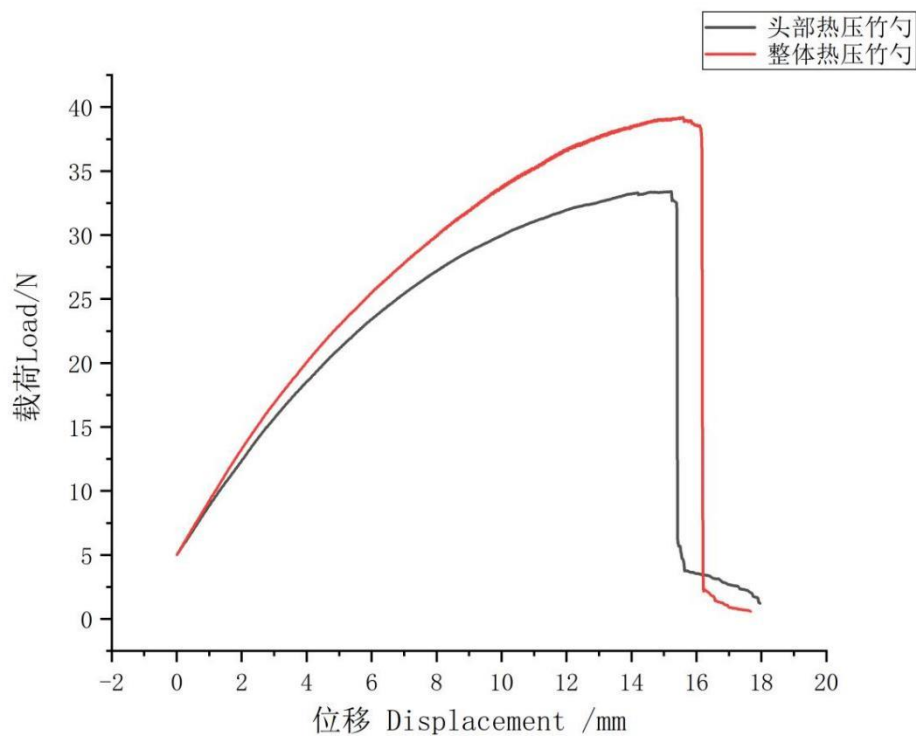


图 16 三点弯曲载荷-位移关系曲线

Fig.16 The load-displacement of three-point bending test

另一方面，从载荷-位移曲线中可以看出，头部热压竹勺曲线一直处于整体热压竹勺曲线的下方，从表 2 中可知其弯曲模量低于整体热压竹勺，所以头部热压竹勺在使用性能上，主要表现为抗弯韧性；而热压竹勺抗弯能力更好、韧性更差，使用性能上表现为抗弯硬度。考虑到竹勺使用过程中，较好的强度和硬度更加便于使用，抗弯硬度优于抗弯韧性，所以相较之下整体热压竹勺具有更好的使用性能。

4.4 竹勺破坏特征观察

借助扫描仪和 S-3400N 扫描电子显微镜对两种不同竹勺三点弯曲破坏后形貌特征进行观察，如图 17、18 所示。从图中可知，断裂过程中，竹勺外侧被拉伸，内侧被压缩。断裂从竹勺最外侧薄壁组织开始延伸至内部维管束。最先发生断裂的部位是薄壁组织和纤维束之间的界面，然后断裂由外侧向内部延伸，伴随着外侧纤维被拉出。

使用 3000dpi 分辨率扫描仪观察竹勺宏观断裂形貌，如图 17a，可以看到整体热压竹勺在断裂破坏时断面平整，破坏层面呈一字型，从侧面观察到，裂纹深度大、延伸快、径直向内破坏、路径单一，呈现出较为典型的脆性破坏模式。头部热压竹勺破坏时断面凹凸不平，破坏层面呈“Z”字型，从侧面观察到，裂纹向内扩展时，破坏路径向左右方向延伸，呈“十”字型，并且伴随着大量的外侧纤维束被拉出，呈现出典型的韧性破坏模式。



图 17a 整体热压竹勺扫描断裂形貌图（分辨率为 3000dpi）

Fig.17a Scan fracture topography of bamboo spoon with overall platen (The resolution is 3000dpi)



图 17b 头部热压竹勺扫描断裂形貌图（分辨率为 3000dpi）

Fig.17b Scan fracture topography of bamboo spoon with cephalic platen (The resolution is 3000dpi)

借助扫描电镜对两种不同竹勺破坏断面微观形貌进一步观察，如图 18 所示，图 18a 为头部热压竹勺断面形貌，对比图 18b 整体热压竹勺断面，观察到头部热压竹勺断面参差不齐，并伴随着大量的纤维束拉出，破坏特征与扫描仪表达基本一致。

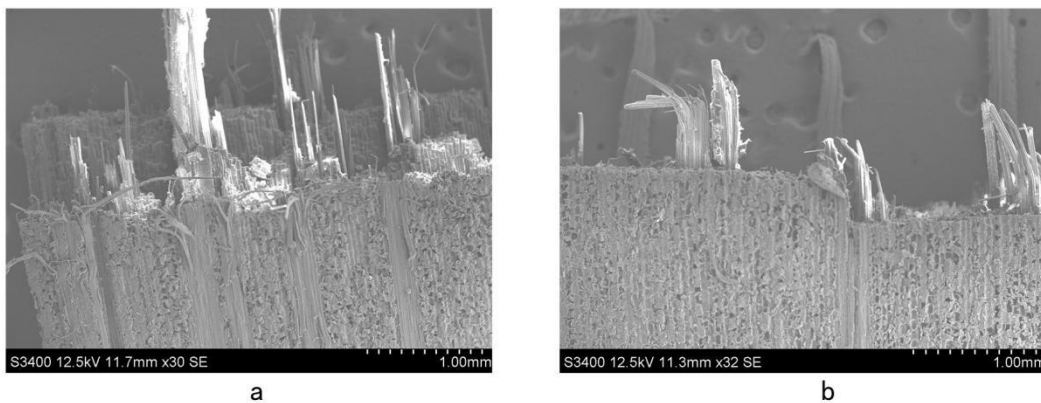


图 18 不同竹勺断面微观形貌图

Fig.18 Microtopography of different bamboo spoon cross-sections

1) 由表 3 和图 16 可知: 试验结果表明整体热压加工后的竹勺含水率为 4.8%、弯曲强度 99.46MPa、弯曲模量为 5809.2MPa, 对比传统头部热压加工后的竹勺含水率降低了 1.2%、弯曲强度增加了 17.0%、弯曲模量增加了 14.5%

2) 对比图 17a 和图 17b 不同竹勺的断裂形貌可知, 通过整体热压工艺加工后的竹勺产品断面较为平整, 破坏层面呈“一”字型, 裂纹延伸为单一方向, 且裂纹深度大, 延伸速度快。对比图 18a、b 不同竹勺的微观断面形貌可得, 整体热压竹勺的断面主要少量的纤维束被拉出, 且断裂截面干脆、整齐。

3) 由此得出热压竹勺在破坏过程中主要破坏模式为脆性破坏, 这和弯曲试验所得结论相符, 结合弯曲试验所得整体热压后的竹勺弯曲强度更大的特性, 所以整体热压竹勺在使用性能上为断裂脆性和更大的弯曲强度, 得出整体热压竹勺在使用上相较于头部热压竹勺硬度更好, 更好使用。

5 结果与讨论

(1) 本文提出了一种多吸盘连续上料, 整体热压成型的工艺方法, 并设计了竹勺连续化自动成型装置样机, 并验证了该方法的可行性和优异性。

(2) 样机的仿真模拟表明此竹勺成型机在吸附直径为 5mm、吸盘吸附力为 4.74N, 能够保证在竹勺自动上下料过程的稳定、不掉落, 并且吸附力造成的竹勺变形量为 $0.70 \times 10^{-5} \text{mm}$ 符合竹勺生产误差要求。

(3) 该样机设计的多吸盘自动上下料装置, 以及 48 个竹勺模具和可移动平模, 不仅对工人的操作危险性进行规避, 而且将工作效率提升至 27 个/min, 效率提高了 128%。

(4) 本文提出的整体热压成型工艺生产出的竹勺, 对比传统头部热压成型工艺, 以相同的热压温度 140°C 进行加工, 该工艺在弯曲强度上增加了 17.0%、弯曲模量上增加了 14.5%, 并且在宏观和微观层面上观察整体热压表现出典型的脆性断裂特征, 具有更好的使用硬度和抗弯强度, 即整体热压后竹勺使用性能更加优异。

本文提出的竹勺连续化自动成型装置, 对传统竹勺热压成型机在提高生产效率、降低操作危险性、优化竹勺使用性能以及提高竹勺加工自动化程度上有较大的现实意义, 后期可将竹勺前段工序、后端工序以及成型工序结合起来形成一道完整的连续化自动生产线, 而且可将该成型方法应用于其他竹质快消品加工中进行研究。

参 考 文 献

[1]董姿妤. 原竹家具结构设计研究[D]. 河北科技大学,2020.

[2]刘鹏程, 周期石, 田杰夫, 张海, 李威, 付飞扬. 原竹材料抗弯性能试验研究[J]. 建筑科学与工程学报,2021,38(04):101-109.

- [3]宋莎莎, 费本华, 刘学莘. 竹质家具加工技术及其未来发展[J]. 木材加工机械, 2012, 23(3): 43-46, 42.
- [4]费本华. 践行新理念 提速竹产业[J]. 世界竹藤通讯, 2019, 17(02): 1-6.
- [5]李玉敏, 冯鹏飞. 基于第九次全国森林资源清查的中国竹资源分析[J]. 世界竹藤通讯, 2019, 17(06): 45-48.
- [6]Ian R. Hunter. Bamboo resources, uses and trade: the future?[J]. Journal of Bamboo and Rattan, 2003, 2(4).
- [7]Buckingham Kathleen Carmel, Wu Liangru, Lou Yiping. Can't see the (bamboo) forest for the trees: examining bamboo's fit with in international forestry institutions.[J]. Ambio, 2014, 43(6).
- [8]Ian R. Hunter. Bamboo—solution to problems[J]. Journal of Bamboo and Rattan, 2002, 1(2).
- [9]LI Z, XU Y. Strengthen Machine Building to Make the Best Use of Bamboo Resources [J]. China Wood-Based Panels, 2006, 3: 014.
- [10]张建, 张文福, 王洪艳, 袁少飞, 袁超哲. 一种竹片均质化竹餐具的制备方法 [P]. 浙江省: CN114407160B, 2022-07-15.
- [11]李滨, 郭明辉. 我国数控木工机械研发方向的探讨[J]. 林业机械与木工设备, 2013, 41(10): 6-9.
- [12]黄冲. 重组竹竹方冷压成型自动生产线的构建技术[D]. 浙江农林大学, 2014.
- [13]于慧洋. “以竹代木”的低碳理念在空间设计中的运用[D]. 云南艺术学院, 2017.
- [14]张英. 以竹代木 开发“第二森林”[J]. 中国林业, 2006(19): 4-9.
- [15]熙鹏. 鲍鱼腹足吸附性研究及仿生吸盘设计与试验[D]. 吉林大学, 2020.
- [16]黄建龙, 解广娟, 刘正伟. 基于 Mooney-Rivlin 和 Yeoh 模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J]. 橡塑技术与装备, 2008, 34(12): 22-26.
- [17] Dai H H. Model equations for nonlinear dispersive waves in a compressible Mooney-Rivlin rod[J]. Acta Mechanica, 1998, 127(1-4): 193-207.
- [18] Wang W, Deng T, ZHAO S. Determination for Material Constants of Rubber Mooney-Rivlin Model [J]. Special Purpose Rubber Products, 2004, 4: 003.
- [19] Fukahori Y, Seki W. Molecular behaviour of elastomeric materials under large deformation: 1. Re-evaluation of the Mooney-Rivlin plot[J]. Polymer, 1992, 33(3): 502-508.
- [20] Bam-boo-Determination of physical and mechanical properties—Part 1: Requirements[S]. ISO22157—1—2004.
- [21] Bam-boo-Determination of physical and mechanical properties—Part 2: Requirements[S]. ISO22157—2—2004.
- [22] JG/T199—2007 建筑用竹材物理力学性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版, 2007.
- [23]陈和光. 一种竹餐具用品加工工艺[P]. 海南省: CN113858354A, 2021-12-31.
- [24]李正文. 一种组装式竹餐具加工设备[P]. 湖南省: CN214163362U, 2021-09-10.
- [25] Guowei Chen, Hongyun Luo, Haoyu Yang, Tao Zhang, Sijie Li. Water effects on the deformation and fracture behaviors of the multi-scaled cellular fibrous bamboo,[J]. Acta Biomaterialia, 2018, 65(203-215).