

基于浮选法的鼠笼式鲜枸杞分级机的设计与试验

瞿前进¹ 张 军¹ 康宁波¹ 邓改革² 周良欢¹ 张宏博¹

(1. 宁夏大学食品科学与工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: [目的] 提高鲜枸杞分级效率。[方法] 设计基于浮选法的鼠笼式鲜枸杞分级机, 以鲜枸杞横径为分级指标。利用鲜枸杞密度小于水的物理特性, 运用浮选原理研制鲜枸杞分级机。通过力学分析及试验测量, 计算和规定了分级机的理论结构参数。基于 ANSYS Fluent 模拟分级过程, 分析模拟结果, 并验证和精确该分级机的理论结构参数。[结果] 分级机具体参数为: 鼠笼直径 0.34 m, 长度 2.1 m, 辊杠直径 10 mm, 鼠笼倾斜角度 17°, 水流量 $1.7 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$, 水流速 3.5 m/s, 鼠笼转速 12 r/min。平行试验结果表明, 鲜枸杞平均分级准确率约为 93.79%, 鲜枸杞无损率为 98.21%; 批量试验表明, 鲜枸杞平均生产能力为 1 020.6 kg/h, 平均分级准确率为 92.85%。[结论] 试验研制的基于浮选法的鼠笼式鲜枸杞分级机能够实现鲜枸杞低损、快速、高效分级。

关键词: 浮选法; 鼠笼; 鲜枸杞; 横径

Design and test of mouse cage fresh wolfberry classifier based on flotation method

QU Qianjin¹ ZHANG Jun¹ KANG Ningbo¹ DENG Gaige² ZHOU Lianghuan¹ ZHANG Hongbo¹

(1. School of Food and Wine, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: [Objective] Improve the rapid grading technology of fresh goji berries. [Methods] Utilizing the physical properties of fresh goji berries with a density lower than water, a fresh goji berry classifier was developed using flotation principles. The theoretical structural parameters of the classifier were calculated and specified through mechanical analysis and experimental measurements. Based on ANSYS Fluent simulation of the grading process, analyzed the simulation results, and verified and accurately determined the theoretical structural parameters of the classifier. [Results] The specific parameters of the classifier were: cage diameter 0.34 m, length 2.1 m, roller bar diameter 10mm, cage tilt angle 17°, water flow rate $1.7 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$, water flow rate 3.5 m/s, cage speed 12 r/min. Using parallel and batch testing methods, the production efficiency and capacity of the prototype were verified. The parallel test results showed that the average classification accuracy of fresh goji berries was about 93.79%, and the non-destructive rate of fresh goji berries was 98.21%. Batch experiments have shown that the average production capacity of fresh goji berries was 1 020.6 kg/h, and the average classification accuracy was 92.85%. [Conclusion] The squirrel cage fresh goji berry classifier developed in this article based on flotation method can achieve low loss, fast, and efficient classification of fresh goji berries.

Keywords: flotation method; mouse cage; fresh wolfberry; transverse diameter

鲜枸杞快速分级是枸杞干制和原浆生产加工环节中急需解决的问题, 当前的分级技术无法高效预处理鲜枸杞。目前, 市场上主要的枸杞产品为枸杞干果和原浆^[1], 分级技术对枸杞干果尤为重要, 枸杞干果以体积和质量大的鲜枸杞为原材料, 枸杞原浆则反之。

马建华^[2]利用机器视觉技术, 对枸杞进行全图像采集, 图像处理后用非接触喷气式分离系统对枸杞进行分

级, 达到了无损伤、无污染的分级效果, 但分级准确率较低。曾泽宇^[3]通过计算机视觉对枸杞的外观品质(大小、色泽等)进行分析、检测, 并依据结果建立分级模型, 实现了枸杞的在线检测分级, 但分级效率低且几何特征分析不全, 使得分级精度受限, 无法满足企业生产。张魄珊等^[4]采用 MATLAB 数字图像处理工具对枸杞图像进行处理, 获取枸杞的面积尺寸、颜色特征, 通过提取破损、油粒

基金项目: 宁夏回族自治区自然科学基金联合基金(编号: 2022AAC03022); 国家自然科学基金(编号: 32260617)

通信作者: 康宁波(1984—), 男, 宁夏大学正高级实验师, 硕士生导师, 博士。E-mail: knb@nxu.edu.cn

收稿日期: 2024-03-18 **改回日期:** 2024-05-26

(即黑斑部分)部位的轮廓对其面积进行填充,根据其面积占整个枸杞面积的比例进行判断和分级处理,但该方法效率低,达不到企业的生产要求。于洋等^[5]设计了变距式鲜枸杞分级机,利用 EDEM 软件对部件参数进行单因素仿真分析,确定样机最佳参数组合,可以满足鲜枸杞分级的作业要求,但机械损伤较大,且容易出现鲜枸杞在筛面卡住现象,不适合连续高强度的作业。卢伟等^[6]提出基于高光谱和集成学习的黑枸杞快速分级方法,以 LDA、RE、LIBSV 3 个最优分类器为元模型,通过 Stacking 集成学习建立黑枸杞快速无损分级模型,使用果肉-FD-SPA-Stacking 组合,验证了该技术进行黑枸杞快速无损分级可行,但该技术只是处于研发阶段,且速度缓慢,对枸杞有一定的损伤,需要继续完善。

朱雯莎等^[7]对赤霞珠浆果在不同蔗糖溶液中的浮选密度进行了分类,结果表明,葡萄异质性对赤霞珠浆果实直径大小、成熟特性和葡萄酒酒精度有重要影响。鲜枸杞的物理特性与葡萄、蓝莓等浆果类似^[8],成熟后皮薄易损,在采摘及分级过程中极易因外力而导致果皮细胞破损,进而诱发霉变失去鲜食价值^[9]。研究拟针对鲜枸杞特性设计鼠笼式鲜枸杞分级机,按鲜枸杞横径的不同进行分级筛选,并通过试验验证鼠笼式分级装置的性能,以期为解决鲜枸杞分级分选难题提供依据。

1 总体设计方案

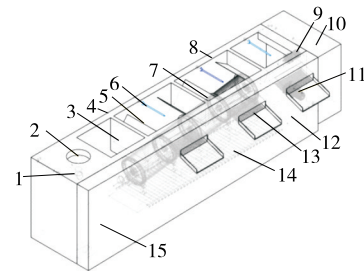
1.1 技术要求

研究主要以宁夏中宁宁杞 5 号鲜枸杞为研究对象,长径 8~20 mm,横径 5~12 mm,个体质量范围为 0.5~1.2 g;根据企业分级要求,按照横径尺寸将鲜枸杞分为 3 个等级(一级横径 ≤ 8.50 mm,二级横径 8.51~10.49 mm,三级横径 ≥ 10.50 mm)。设计的鲜枸杞分级机实现的技术目标为:分级精度 92%、无损率 96%、生产能力 1 t/h。

1.2 整体结构及工作原理

鲜枸杞分级机的工作原理为:新鲜枸杞密度小于水^[10],水中浮力抵消了全部重力,其在静止水中会缓慢向上漂浮,同时鲜枸杞在水中的运动还会受到水的黏滞阻力的影响,在各因素的共同作用下,鲜枸杞在水中所受外力将远小于其在空气中所承受外力,故浮选法将是解决鲜枸杞分级过程中因外力而导致损伤的最佳方法。

根据鲜枸杞分级机工作原理,将整机划分为进料装置、分级系统及水循环出料系统 3 部分^[11](图 1)。进料系统采用循环水流不断冲刷进料漏斗,使枸杞与水的混合物能够不断进入分级机底部分选鼠笼;分级机核心部分为倾斜放置的旋转分级鼠笼,鼠笼周围由不同间距的不锈钢辊杠组成^[12],其中前半部分辊杠间距小,后半部分辊杠间距大,鼠笼中心为旋转轴,工作时旋转轴带动分级鼠笼旋转,枸杞在鼠笼中向上浮动,上浮过程中根据自身尺寸通过不同间距的辊杠,最后进入不同等级通道^[13],进而实现了分级;设计了溢流式枸杞出料装置,并配合喷头,从而实现鲜枸杞连续无损出料。



1. 进料管道 2. 进料口 3. 挡板 4. 主槽 5. 物料挡板 6. 喷头 7. 鼠笼 8. 循环管道 9. 电动机 10. 机槽 11. 水泵 12. 抽水口 13. 出料口 14. 底座 15. 补水槽

图 1 鼠笼式鲜枸杞分级机结构图

Figure 1 Structure diagram of mouse cage fresh wolfberry classifier

2 关键部件设计与参数确定

2.1 鼠笼分级系统的设计和参数确定

2.1.1 浮选运动 与目前主流的鲜枸杞分级技术相比,浮选技术操作简单,损耗低,分级精度高,且能进行大容量分级,满足企业需求。

鲜果由主槽底部通过水浮作用力 F_V 克服重力 F_G 和阻力 F_D ,上浮到水面。

$$F_V - F_G - F_D = ma, \quad (1)$$

中:

m ——枸杞质量, g;

a ——枸杞上浮的加速度, N/kg。

设鲜枸杞横径为 r , 密度为 ρ_m , 体积为 V_g , 液体密度为 ρ_w , 鲜枸杞上升时间为 t_s , 速度为 V_s , 重力加速度为 g , 鲜枸杞在上升方向的投影面积为 S , 液体介质黏度为 μ , 代入式(1), 可化为

$$\rho_w g V_g - \rho_m g V_g - \frac{1}{2} \rho_w C_D V_s^2 f = m \frac{dV_s}{dt}. \quad (2)$$

若阻力系数取 0.45, 则 $Re \geq 1\,000$ ^[14]。故在该设备中代入阻力系数 C_D , 对式(2)进行微分方程求解, 简化得到鲜枸杞上升运动的速度方程为

$$V_s = \sqrt{\frac{8rg(\rho_w - \rho_m)}{3\rho_w C_D}} \left[1 - \frac{2}{e^{2t\sqrt{3g\rho_w C_D(\rho_w - \rho_m)/(8\rho_w^2 r)}} + 1} \right]. \quad (3)$$

鲜枸杞上浮初速度为 0, 且在合外力的作用下做加速上升运动, 故速度的确定需依据枸杞上浮到水面的时间, 后续将结合分级系统设计确定枸杞上浮时间。

2.1.2 鼠笼尺寸设计 鲜枸杞大小不一, 如按照小枸杞或枸杞平均特性来规定分级机尺寸会产生生产能力不足、生产效率低等问题(大枸杞分级区域在分级机的末端, 分级时间比一、二级鲜枸杞略长)。故以枸杞最大鲜果(体积约为 1.34 cm^3 , 质量约为 1.23 g , 得到 $G=1.2 \times 10^{-2} \text{ N}$)进行计算和说明。

根据预设计的生产能力, 确定鼠笼的尺寸(见图 2):

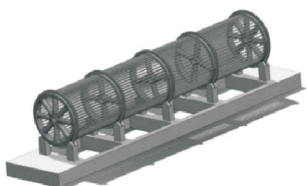


图2 鼠笼设计图

Figure 2 Design drawing of mouse cage

$$V_F = \frac{W_m V_g}{Y_v M}, \quad (4)$$

式中:

W_m ——每分钟完成分级的鲜枸杞质量, kg/s;

M ——鲜枸杞的质量, g;

V_g ——鲜枸杞的体积, m^3 ;

Y_v ——填充系数, 一般取 0.25~0.33^[13]。

填充系数选择 0.25, 则鼠笼体积 $V_F = 0.732 m^3$ 。典型的滚筒长度一般为其直径的 2~6 倍^[16], 考虑水浮选过程会消耗一定的时间, 取鼠笼直径:鼠笼长度 $\approx 1:5$, 则鼠笼长度为 2.1 m, 鼠笼半径 R 为 0.17 m。

按照表 1 的鲜枸杞等级标准, 确定辊杠间隙。一级分级鼠笼辊杠间隙 L_1 为 8.407 mm, 对应辊杠数 n_1 为 58 根, 二级分级鼠笼辊杠间隙 L_2 为 10.529 mm, 对应辊杠数 n_2 为 52 根。

$$L = 2 \sin\left(\frac{180}{n}\right) R - D. \quad (5)$$

根据整机的工作原理、完成动作及生产效率要求, 鼠笼中辊杠直径必须设定合适, 使得进入鼠笼的鲜枸杞能够按照要求完成分级, 同时合适的辊杠规格也可以降低鲜枸杞的机械损伤, 保证鲜枸杞分级后的质量。

辊杠尺寸主要依据鲜枸杞外形椭球体形状设计, 正常鲜枸杞长径 8~20 mm, 横径 5~12 mm, 按照分级动作要求, 鲜枸杞应轻松穿过两个辊杠间隙(图 3), 故辊杠的直径周长 l 与枸杞的横径周长 l' 之比应等于辊杠粗径 R_b 与细径 R_s 之比^[17], 即

$$\frac{l}{l'} = \frac{R_s}{R_b} = 1. \quad (6)$$

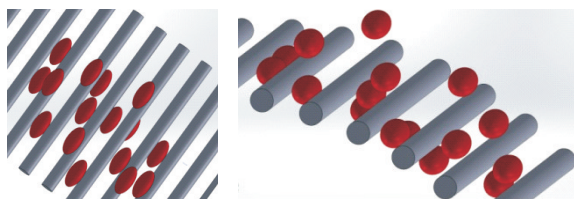


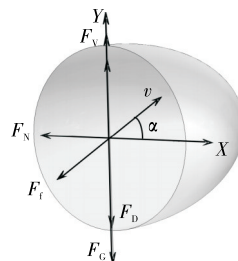
图3 鲜枸杞穿过辊杠模拟图

Figure 3 Simulation of fresh wolfberry passing through the roller bar

根据鲜枸杞横径长度, 得到辊杠直径 D 的范围为 $8 mm \leq D \leq 12 mm$ 。在节约材料和生产要求的条件下, 将辊杠直径设为 10 mm。

2.1.3 鼠笼倾斜角度计算与鲜枸杞受力分析 鼠笼倾斜

需按照生产能力、上浮速度和分级效率规定角度。鼠笼倾斜角度设计应使势能较低、稳定性较差的鲜枸杞在合适的分级区域完成分级, 为此, 对鼠笼中的鲜枸杞进行受力分析。图 4 为鲜枸杞在鼠笼中的受力分析, 设计鼠笼倾斜角度应与鲜枸杞在鼠笼中的运动方向角度有关, 使鲜枸杞顺畅到达合适的分级区域。



v 为枸杞在鼠笼中因浮力和水流裹挟共同作用下的运动速度和方向; F_t 为枸杞所受阻力合力; F_N 为枸杞在水平方向所受阻力

图4 鲜枸杞在鼠笼中受力分析(纵切面)

Figure 4 Stress analysis of fresh wolfberry in mouse cage (Longitudinal section)

通过试验, 得到鲜枸杞从主槽底部上浮到水表面时间为 5 s。结合式(3)可知, 上浮的最后速度为 0.32 m/s, 同时鲜枸杞在鼠笼中前行的时间至多为 5 s。故规定 2 s 通过鼠笼完成分级, 同时进行试验测量, 得到鲜枸杞 2 s 内上浮了 0.61 m。结合反三角函数, 求知鼠笼倾斜角度:

$$\tan^{-1} \frac{S_p}{S_h} = a, \quad (7)$$

式中:

S_h ——鼠笼长度, m;

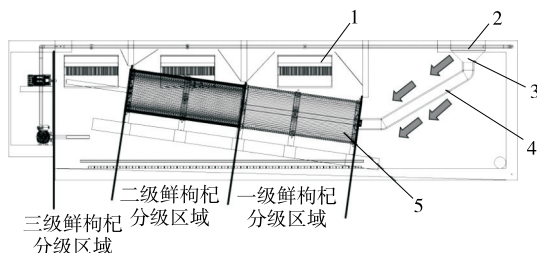
S_p ——鲜枸杞在分级装置中垂直方向运动位移, m。

通过计算求得鼠笼倾斜角度 a 近似为 17° 。

2.2 进料装置

进料装置由进料漏斗、环状喷流和进料管道组成(图 5), 进料漏斗通过进料管道与鼠笼连接。环状喷流围绕在进料口上方, 喷出的水流持续冲刷进料口, 将鲜枸杞送入进料管道达到鼠笼。

鲜枸杞自身的重力势能和水流速的动力势能共同决定鲜枸杞的进料快慢, 而鲜枸杞自身的重力势能不变, 水流速的动力势能可控。水的流动裹挟鲜枸杞运动, 故对



1. 出料口 2. 环状喷流 3. 进料漏斗 4. 进料管道 5. 鼠笼

图5 进料装置示意图

Figure 5 Schematic diagram of feeding device

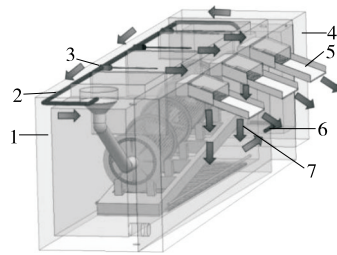
水的流速进行规范。

鲜枸杞在鼠笼中的运动时间为2 s,在考虑阻力的条件下,水流速 $V_w > 1.05$ m/s。由于速度越大,阻力越大,水流裹挟的鲜枸杞在水中做减速运动,直到到达鼠笼末端,阻力为0,前行速度也为0。按照技术要求,设计的分级装置和进料管道的总长度 D 为3.17 m,设水流速 $V_w > 1.5$ m/s,并通过ANSYS Fluent进行验证和精确。

2.3 水循环出料系统

分级过程结束的鲜枸杞,在喷头的作用下进入出料口。出料口有一定的斜度,利于鲜枸杞滚入收集装置。出料口穿过补水槽的部分,底部有密集的小孔,将溢出的水漏入补水槽。

循环泵从补水槽抽水,通过循环管道将水送达喷头和环状喷流,出料口溢流漏入补水槽,如此往复,完成水循环(见图6)。水循环出料系统在具备出料功能的同时,兼具节水功能。



1. 主槽 2. 循环水管 3. 喷头 4. 补水槽 5. 出料口 6. 抽水口 7. 水泵

图6 水循环出料系统示意图

Figure 6 Schematic diagram of water circulation discharge system

3 ANSYS Fluent模拟分级过程及精确参数

3.1 分析计算模型

参照试验设计要求、计算数值和规定参数,建立三维模型,基于ANSYS Fluent对分级过程进行模拟,从而验证参数合理性和精确计算部分参数。

设置颗粒瞬态和颗粒稳态两个子项目进行分析模拟(图7),按照计算尺寸1:1进行建模,然后对模型进行网格化处理,网格节点共1 976 800,网格数量为11 143 384。

计算湍流模型选择Standard $k-\epsilon$ 两方程模型,该模型应用多,计算适中,有较多数据积累和相当精度。双方程湍流模型允许通过求解两个独立的输运方程来确定湍流长度和时间尺度,比较适合进行分级模拟。按照分级标准,注入颗粒模型的横径分别为8.0、9.5、10.5 mm。选取进料口为inlet,3个出料口为outlet,主槽内壁和外表面设置为wall(见图8)。

3.2 分级过程模拟及精确参数

通过多次模拟(表1)确定水流速 V_w 为3.5 m/s为较适宜水流速,可将鲜枸杞送达鼠笼末端。

$$Q = SV_w, \quad (8)$$

Smoothing	Medium
Mesh Metric	Element Quality
Min	0.15173
Max	1.
Average	0.8443
Standard Deviation	9.6649e-002
Inflation	
Assembly Meshing	
Advanced	
Statistics	
Nodes	1976800
Elements	11143384

图7 颗粒设置

Figure 7 Particle settings

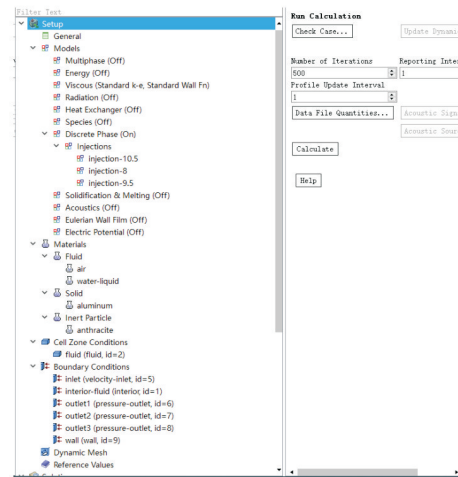


图8 Fluent设置处理及CFD-Post后处理

Figure 8 Fluent setting processing and CFD-Post post-processing

表1 分级机模拟不同水流速裹挟鲜枸杞在主槽内运动数据比较

Table 1 Comparison of movement data of fresh wolfberries in the main trough under different water flow speeds simulated by a classifier

水流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	运动时 间/s	傅汝德数	摩擦阻 力/N	运动路 程/m
1.5	1.4	0.237	0.021	1.48
2.0	1.6	0.382	0.027	1.64
2.5	1.7	0.546	0.043	1.79
3.0	1.8	0.669	0.061	1.93
3.5	2.1	0.833	0.083	2.06
4.0	2.4	0.974	0.109	2.18

式中:

S ——管道截面面积,约为 $5.024 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 。

根据式(8)计算出水流量 Q 为 $1.7 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ 。

由图9可知,在水流速 V_w 为3.5 m/s的前提下,鲜枸杞可被输送到鼠笼末端。水流由管道进入鼠笼,由于横截

面的突然变大,水流四散开来,但在惯性的作用下,主要的运动轨迹还是沿鼠笼中心轴附近运动。

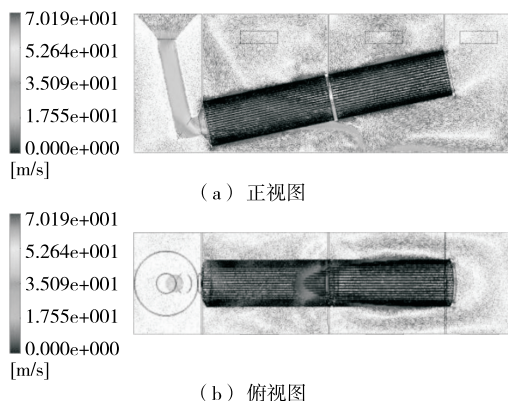


图 9 速度矢量图

Figure 9 Velocity vector graph

由图 10 可知,颗粒在分级机中的停留时间为 8~10 s,其中在分级区域停留的时间累计为 3.29~5.00 s,进一步验证了上浮时间试验。

由于鲜枸杞极易受到损伤,故运用浮选原理最大程度减小鲜枸杞在分级过程中受到的机械损伤和碰撞损伤等^[18]。试验研发的分级设备不同于现今滚筒分级设备,现今的滚筒设备是利用离心原理或振动原理^[19],且都是

在空气中进行的,所分级的对象一般为谷物、茶叶、核桃等^[20]外表皮不易受到损伤的农产品。鼠笼转速并不是鲜枸杞分级机主要考虑的因素,在模拟过程中,验证了物料 5 s 之内完成一次上浮,因此可以将鼠笼转速调整为 12 r/min。在该转速下,保证出料效率的同时尽可能减小由于转动产生的紊流。

4 样机试验及结果分析

4.1 试验方法

通过上述确定的参数建造样机,并进行平行试验,根据宁夏鲜枸杞等级标准,先由人工使用卡尺确定大小等级,再按照质量标准进行称重挑选,挑选 9 组 900 颗无损伤宁夏鲜枸杞,其中一级鲜枸杞 300 颗,二级鲜枸杞 300 颗,三级鲜枸杞 300 颗。从鼠笼式鲜枸杞分级机的入料口倒入选择好的宁夏鲜枸杞,通过设备进行分级,确定分级准确率、无损率和生产能力,重复 9 组取平均值。根据式(9)、式(10)定义自动分级机的分级准确率和无损率。

$$K = \frac{R}{B_R} \times 100\%, \quad (9)$$

$$W = \frac{G_Q}{B_R} \times 100\%, \quad (10)$$

式中:

K ——分级准确率,%;

R ——人工分级等级一致数;

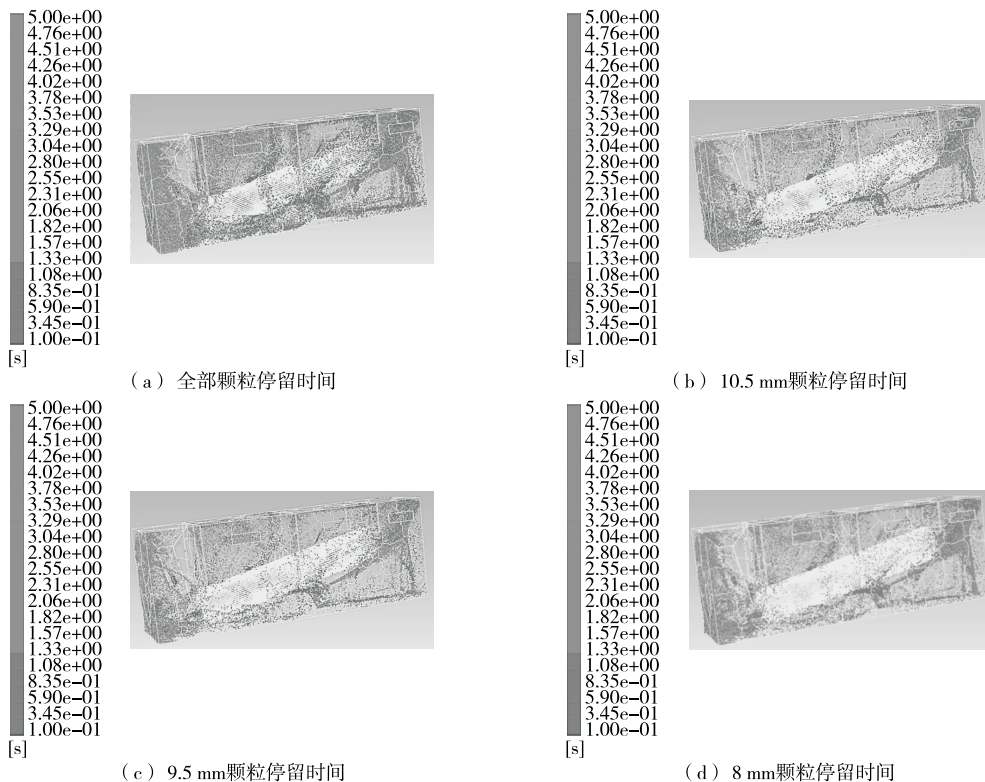


图 10 颗粒云图

Figure 10 Particle cloud map

B_R ——分级总数;

W ——无损率,%;

G_Q ——分级机分级无损伤数。

挑选3组36 kg无损宁夏鲜枸杞,其中一级鲜枸杞12 kg,二级鲜枸杞12 kg,三级鲜枸杞12 kg。从一个组的某一等级鲜枸杞投入进料口开始,到该等级的鲜枸杞全部分级结束为止,记录所用时间和分级后该等级鲜枸杞的质量,进行3组测试,求得样机的生产能力和批量试验下的分级准确率。由于上文是按照最大果计算和确定参数,且其他等级的鲜枸杞质量较小,故在同质量下三级鲜枸杞可更快完成分级,不能代表分级机的生产能力,所以生产能力计算需依照三级鲜枸杞批量试验分级时间进行计算[式(11)]。

$$W_Q = \frac{G_R}{T_Q} \times 3600S, \quad (11)$$

式中:

W_Q ——生产能力,kg/h;

G_R ——三级鲜枸杞分级总质量,kg;

T_Q ——单级分级最长时间,s。

4.2 试验结果与分析

对鼠笼式鲜枸杞分级机进行9次平行试验,试验结果见表3,分级机平均准确率为93.79%,其中,最少有836颗鲜枸杞横径等级和人工等级一致,准确率为92.89%,无损率为98.21%,达到设计要求。但试验过程中影响分级准确率和无损率的因素主要包括:

(1) 进料过程中,对进料装置的控制不稳定或一次性投入鲜枸杞过多,使得管道中鲜枸杞密度高,小果在大果的携带下,快速通过一级分级区域,使得小果在二、三级分级区域中分级出料。

(2) 对冲水速度控制不稳定,冲水速度过高,导致鲜

枸杞还未在对应的分级区域完成分级,就因为过高的速度而冲入下一级鼠笼,使其在等级不对应的分级区域完成分级。

(3) 鲜枸杞在进料和出料装置中因为与金属部件碰撞出现损失。尤其是在出料过程中,分级后的鲜枸杞在出料口滚落到收集箱中,此过程鲜枸杞会因溢流和自身的重力作用,产生一定的速度到达收集箱而产生碰撞。

由表2~表3可知,分级机平均生产能力为1 020.6 kg/h,平均准确率为92.85%,达到设计要求。因平均产能是按照三级鲜枸杞分级时间进行计算,故在实际生产中生产能力会高于批量试验结果。批量试验的平均准确率比平行试验低,主要原因是水流速控制不稳定,导致个别小鲜枸杞被冲入下一级鼠笼;鲜枸杞从出料口滚落至收集装置,会有个别鲜枸杞未能进入收集装置。

表2 鼠笼式鲜枸杞分级样机平行试验数据

Table 2 Parallel experimental data of mouse cage fresh goji berry grading prototype

组别	一级鲜枸杞	二级鲜枸杞	三级鲜枸杞	无损伤鲜枸杞	总计	准确率/%
1	268	280	294	888	842	93.56
2	270	275	295	883	840	93.33
3	271	279	294	878	844	93.78
4	262	280	297	880	839	93.22
5	275	294	296	888	865	96.11
6	273	273	295	882	841	93.44
7	265	286	295	891	846	94.00
8	272	274	298	883	844	93.76
9	266	278	292	882	836	92.89

表3 鼠笼式鲜枸杞分级样机批量试验数据

Table 3 Batch test data of squirrel cage fresh goji berry grading prototype

组别	一级鲜枸杞		二级鲜枸杞		三级鲜枸杞		生产能力/(kg·h ⁻¹)	准确率/%
	分级时间/s	分级质量/kg	分级时间/s	分级质量/kg	分级时间/s	分级质量/kg		
1	73	11.16	97	11.05	126	10.99	1 028.57	92.22
2	69	11.04	102	11.07	129	11.30	1 004.65	92.81
3	71	11.02	89	11.16	126	11.49	1 028.57	93.52

综上,试验样机的整体性能稳定,分级准确率高,生产能力强,达到预期设计的高速、无损、准确分级的目的,能够满足企业的生产需求。

5 结论

研究利用浮选原理完成了鼠笼式鲜枸杞分级机的试验与设计。结果表明,试验设计的鼠笼直径为0.34 m,长度为2.1 m,辊杠直径为10 mm,鼠笼倾斜角度为17°。基于ANSYS Fluent对分级过程进行模拟,验证了参数合理性并精确计算部分参数(水流量为 $1.7 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$,水流速

为3.5 m/s,鼠笼转速为12 r/min)。通过样机试验得出试验装置的准确率高达93%,无损率为98.21%,平均产能约为1 020.6 kg/h,达到试验设计的预期目标。该机机构设计合理,运输方便,体积小,有较低的能耗,可实现分级需求。后续应优化进料装置,更准确地控制水流速以提高分级精度。在节约资源的前提下,优化现有系统,基于现有的水循环出料系统,设计水循环出料收集一体化装置。设备使用时,用水量过大,未来尽可能减小主槽体积,节约水源。在出料装置上设计烘干装置,使工艺流程化、系统化、实用化和商用化。

参考文献

- [1] 年新, 高艺玮, 连敏, 等. 宁夏枸杞产业发展现状及建议[J]. 农业科技通讯, 2024(2): 4-6.
NIAN X, GAO Y W, LIAN M, et al. The current situation and suggestions for the development of Ningxia Goji berry industry[J]. Agricultural Science and Technology Communication, 2024(2): 4-6.
- [2] 马建华. 枸杞机器视觉分级分选机的研制[D]. 银川: 宁夏大学, 2017: 1-12.
MA J H. The development of wolfberry classifier based on machine vision[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2017: 1-12.
- [3] 曾泽宇. 基于计算机视觉的枸杞分级方法研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019: 40-57.
ZENG Z Y. Chinese wolfberry classification method based on computer vision[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019: 40-57.
- [4] 张魄珊, 靳伍银. 基于 MATLAB 图像处理的枸杞分级方法[J]. 甘肃农业大学学报, 2017, 52(3): 131-135.
ZHANG L S, JIN W Y. A grading method for goji berries based on MATLAB image processing[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2017, 52(3): 131-135.
- [5] 于洋, 任思敏, 魏雅鑫, 等. 基于 EDEM 的变间距式鲜枸杞分级机设计[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(3): 266-273.
YU Y, REN S M, WEI Y X, et al. A classification method on Chinese wolfberry based on MATLAB image processing[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2023, 41(3): 266-273.
- [6] 卢伟, 蔡苗苗, 张强, 等. 高光谱和集成学习的黑枸杞快速分级方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(7): 2 196-2 204.
LU W, CAI M M, ZHANG Q, et al. Fast classification method of black goji berry (*Lycium Ruthenicum* murr.) based on hyperspectral and ensemble learning[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(7): 2 196-2 204.
- [7] 朱雯莎, 刘国安, 李茹一等. 浮选法在赤霞珠葡萄果粒成熟度分级中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(12): 100-105.
ZHU W S, LIU G A, LI R Y, et al. Assessment of maturity of cabernet sauvignon grapes sorted by flotation[J]. Food and Fermentation Industry, 2023, 49(12): 100-105.
- [8] 赵娟红, 米娟娟, 李治刚, 等. 宁夏枸杞果实性状和预处理对果实制干的影响[J]. 林业科学, 2024, 60(3): 35-44.
ZHAO J H, MI J J, LI Z G, et al. Effects of *Lycium barbarum* fruit characteristics and pretreatment on the fruit drying[J]. Forestry Science, 2024, 60(3): 35-44.
- [9] 耿燕, 许正宏, 史劲松, 等. 枸杞多糖体外调节人体肠道菌群的功能研究[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(9): 74-81.
GENG Y, XU Z H, SHI J S, et al. Study on the function of *Lycium barbarum* polysaccharides in regulating human gut microbiota in vitro[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(9): 74-81.
- [10] 于洋, 蔚明强, 王尔杰, 等. 枸杞烘干箱温度场优化及仿真[J]. 食品与机械, 2024, 40(1): 101-107, 114.
YU Y, WEI M Q, WANG E J, et al. Optimization and simulation analysis of temperature field of wolfberry drying box[J]. Food & Machinery, 2024, 40(1): 101-107, 114.
- [11] 康宁波, 何建国, 瞿前进, 等. 鲜枸杞清洗分级机: CN117694560A[P]. 2024-03-15.
KANG N B, HE J G, QU Q J, et al. Fresh goji berry cleaning and grading machine: CN117694560A[P]. 2024-03-15.
- [12] 刘明政, 李长河, 曹成茂, 等. 核桃分级破壳取仁及壳仁分离关键技术及装置研究进展[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 294-310.
LIU M Z, LI C H, CAO C M, et al. Research progress on key technology and device for size-grading shell-breaking and shell-kernel separation of walnut[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2020, 36(20): 294-310.
- [13] 马建华, 张冬, 何建国, 等. 枸杞自动化输送和分级装置机械设计[J]. 农机化研究, 2017, 39(2): 108-111, 116.
MA J H, ZHANG D, HE J G, et al. Mechanical design of wolfberry automatic conveyor and grading equipment[J]. Research on Agricultural Mechanization, 2017, 39(2): 108-111, 116.
- [14] 史洛宇, 齐梅, 易成高, 等. 静水中气泡上升运动及阻力系数研究[J]. 计算力学学报, 2019, 36(3): 422-428.
SHI M Y, QI M, YI C G, et al. Study on kinetic properties and drag coefficient of rising bubble behavior in still water[J]. Journal of Computational Mechanics, 2019, 36(3): 422-428.
- [15] 史增录, 唐学鹏, 赵守瑞, 等. 栅条滚筒式干果分级机设计[J]. 农业工程, 2018, 8(7): 105-109.
SHI Z L, TANG X P, ZHAO S R, et al. Design of grid cylinder type dried fruit sorting machine[J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(7): 105-109.
- [16] 吕金庆, 于佳钰, 冯雪, 等. 辊式马铃薯分级机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 323-332.
LU J Q, YU J Y, FENG X, et al. Design and experiment of roller potato grading machine[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 323-332.
- [17] 康宁波, 强锋, 吴龙国, 等. 基于电磁式同步执行机构的鲜枣分级机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 254-260.
KANG N B, QIANG F, WU L G, et al. Design and experiment of synchnronization actuator system based on electromagnetism for fresh jujube classifier[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2017, 33(7): 254-260.
- [18] 胡博, 唐晓妹, 陈雪梅, 等. 红枣枸杞浸泡酒营养成分及体外抗氧化活性分析[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(1): 44-50.
HU B, TANG X H, CHEN X M, et al. Analysis of nutrients and antioxidant activity of red jujube wolfberry-soaked wine[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(1): 44-50.
- [19] 刘佳浩, 高军伟, 张炳星, 等. 基于机器视觉的水果分级系统[J]. 食品与机械, 2023, 39(6): 112-118.
LIU J H, GAO J W, ZHANG B X, et al. Design of fruit grading system based on machine vision[J]. Food & Machinery, 2023, 39(6): 112-118.
- [20] 符灵梅, 王玉健, 徐莉, 等. 超高效液相色谱—串联质谱法快速分析氰霜唑及其代谢物 CCIM 在水果中的残留[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(9): 93-103.
FU L M, WANG Y J, XU L, et al. Rapid analysis of cyazofamid and CCIM residues in fruits by ultra-high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(9): 93-103.