doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.009

同轴差速式酿酒葡萄离心破碎机设计与试验

苏　媛[1]　刘文政[1]　房玉林[1]　孙翔宇[1,2]　李泽福[1,3]　何　珂[4]

(1. 西北农林科技大学葡萄酒学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业农村部酿酒葡萄加工重点实验室, 怀来 075400;
3. 中粮长城酒业有限公司, 银川 750100; 4. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 针对传统离心式酿酒葡萄破碎机作业时破碎度不均匀且破碎率重复性较低,导致葡萄果皮破碎率和出汁率不稳定影响后续浸渍发酵质量,设计一种同轴差速式葡萄离心破碎机,通过导流叶轮分流并导流葡萄粒群、冲击叶轮撞击破碎葡萄。构建了导流、冲击破碎过程中的葡萄受力模型,分析确定了影响破碎性能的关键结构参数。采用 EDEM 离散元仿真建立了破碎机和葡萄互作仿真模型,并进行三因素三水平正交试验,分析了导流叶轮转速 n_d、冲击叶轮转速 n_c和喂入量 w_r 对分流不均匀性系数和冲击稳定指数的影响,确定了最优工作参数组合:导流叶轮转速 n_d为 80 r/min、冲击叶轮转速 n_c为 600 r/min、喂入量 w_r 为 6 kg/s。酿酒工厂内机械性能破碎试验结果表明,葡萄平均破碎率和出汁率分别为 96.37% 和 7.05%,相应变异系数分别为 1.23% 和 19.76%,相较于传统破碎机,破碎率变异系数降低 58.3%,出汁率变异系数降低 23.4%,整机作业效果满足葡萄酒酿造工艺要求。

关键词: 酿酒葡萄; 离心破碎机; 导流叶轮; 冲击叶轮; EDEM

中图分类号: S229　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)07-0105-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Coaxial Differential Speed Centrifugal Crushing Device for Grape

SU Yuan[1]　LIU Wenzheng[1]　FANG Yulin[1]　SUN Xiangyu[1,2]　LI Zefu[1,3]　HE Ke[4]

(1. *College of Enology, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
2. *Key Laboratory of Wine Grape Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Huailai* 075400, *China*
3. *COFCO Great Wall Winery Co., Ltd., Yinchuan* 750100, *China*
4. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: The first critical quality point in the wine making process is grape breakage. The grape crushing rate, juice yield rate, and the repeatability will affect the taste and flavor of wine production. The traditional centrifugal crushing machines used in winemaking often result in uneven crushing and low repeatability of crushing rates, leading to instability in the skin rupture rate and juice yield, affecting the quality of subsequent maceration and fermentation processes. To address these issues, a coaxial differential-speed centrifugal crushing method for winemaking grapes was designed, utilizing a guiding impeller to divert and direct the flow and a striking impeller to impact and crush the grapes. A mechanical model was constructed for the feeding process, flow guiding, and impact crushing to analyze and identify the key structural parameters affecting crushing performance. A model was established by using EDEM discrete element simulation to simulate the interaction between the crusher and the grapes. A three-factor, three-level response surface experiment was conducted to analyze the effects of guiding impeller speed, striking impeller speed, and feed rate on the flow uniformity and crushing stability coefficient. The optimal operating parameter combination was determined as follows: guiding impeller speed (n_d) was 80 r/min, striking impeller speed (n_c) was 600 r/min, and feed rate (w_r) was 6 kg/s. Performance crushing tests conducted at the factory revealed that the average crushing

收稿日期: 2025-02-18　修回日期: 2025-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(52305281)、陕西省重点研发计划项目(2025NC-YBXM-194)、陕西省自然科学基金青年项目(2025JC-YBQN-238)和陕西省科协青年人才托举计划项目(20250604)

作者简介: 苏媛(1994—),女,讲师,博士,主要从事现代葡萄酒酿造机械装备研究,E-mail: suyuan@nwafu.edu.cn

通信作者: 何珂(1993—),男,讲师,博士,主要从事现代农业机械装备研究,E-mail: kehe@nwafu.edu.cn

rate and juice yield were 96.37% and 7.05%, respectively. The variation coefficients of the crushing rate and juice yield were 1.23% and 19.76%, respectively. Compared with traditional crushers, the variation coefficient of the crushing rate was reduced by 58.3%, and that of the juice yield was reduced by 23.4%. Overall, the operational performance of the coaxial differential-speed centrifugal grape crusher met the requirements of winemaking processes. This research could improve the mechanical crushing performance of wine grapes, furthermore enhancing the quality of wine production. The research result can provide reference and guidance for the improvement of fruit crushing machinery in the relevant fruit wine brewing process.

Key words: wine grapes; centrifugal crusher; guide impeller; impact impeller; EDEM

0 引言

葡萄酒产业是涵盖农业种植、加工制造、农业旅游等产业的绿色产业。推动葡萄酒产业健康发展对促进土地资源合理利用、改善农村生态环境和推动乡村振兴具有重要作用[1-2]。提高葡萄酒感官品质和生产效率是推动我国葡萄酒产业健康发展的重要途径之一[3-4]。

破碎是葡萄酒酿造过程中的关键质量控制点，机械化破碎是保证产品质量稳定性、提高生产效率的有效措施[5]。葡萄果皮富有颜色、优质单宁和风味物质，果籽却含有劣质单宁，因此葡萄破碎通常要求果皮破碎而果籽完整[6]。不同的葡萄破碎程度将对后续酿造葡萄酒的品质风味产生重要影响[7-8]。SPARROW 等[9]研究认为采用高破碎度葡萄醪进行发酵可加快果皮细胞中酚类化合物的释放量和速率。胡云峰等[10]探讨了不同破碎程度对玫瑰香葡萄酿酒香气成分的影响，结果表明酿酒中芳香物质随破碎度变化。王新等[11]探究了不同破碎程度对蛇龙珠葡萄发酵原酒色度与口感的影响，结果表明较高破碎度葡萄酿造的原酒口感风味最佳。上述研究中葡萄破碎方法均采用人工破碎。

现有机械式葡萄破碎方式主要有对辊挤压与离心冲击两类，其中对辊挤压式采用一对挤压辊碾碎葡萄，如乌克兰葡萄栽培与葡萄酒酿造研究所研制的小型葡萄破碎机即采用该原理[12]，但此类方式针对不同粒径葡萄难于调整挤压辊间隙，易造成葡萄籽粒的碎裂[13]；离心冲击式采用旋转叶片撞击抛撒葡萄使其破碎，如 PELLENC 公司生产的葡萄破碎机即采用此原理[14]，根据葡萄品种可通过调节离心盘转速获得不同葡萄破碎度，然而由于葡萄在进入离心盘瞬间产生碰撞反弹导致葡萄破碎度不均匀，影响葡萄破碎出汁率[15]。针对此问题，目前国内外未见有对葡萄破碎机械进行优化研究的报道。

为此，本文提出一种同轴差速式葡萄离心破碎方法，通过导流叶轮分流引流葡萄、冲击叶轮撞击葡萄的破碎方式提高酿酒葡萄破碎均匀性与重复性。采用理论分析方法对关键部件进行设计分析，应用离散元数值模拟方法分析内叶轮对葡萄破碎影响，并以赤霞珠葡萄为试验对象进行试验验证，旨在提升酿酒葡萄机械破碎性能，提高葡萄酒酿造品质。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

同轴差速式葡萄离心破碎机整体结构如图 1 所示，主要包括机架、入料斗、导流叶轮、冲击叶轮、驱动电机、驱动心轴和空心轴等。冲击叶轮驱动电机以带传动方式连接驱动空心轴使冲击叶轮高速旋转，导流叶轮驱动电机经减速器降速换向后以带传动方式连接驱动心轴使导流叶轮低速旋转，形成两叶轮同轴差速旋转的运动形式。

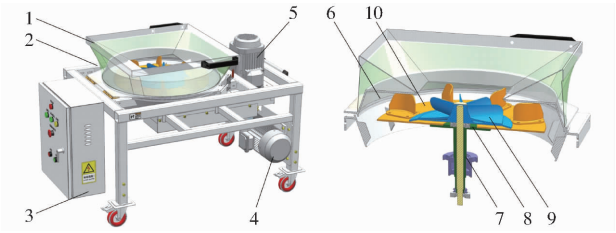


图 1 同轴差速式葡萄离心破碎机结构图

Fig. 1 Structure diagram of coaxial differential speed centrifugal crushing device for grape

1. 入料斗 2. 机架 3. 控制柜 4. 导流叶轮驱动电机 5. 冲击叶轮驱动电机 6. 壳体 7. 驱动心轴 8. 驱动空心轴 9. 导流叶轮 10. 冲击叶轮

1.2 工作原理

离心破碎机工作时，入料斗承接除梗后的单粒葡萄，葡萄在重力作用下进入叶轮旋转区域。葡萄的破碎过程可分为 3 个阶段，如图 2 所示，在阶段Ⅰ，为避免葡萄喂入后堆积，葡萄被低速旋转的导流叶轮快速分流至冲击叶轮叶片位置；在阶段Ⅱ，经分流后的葡萄被高速旋转的冲击叶轮叶片冲击，部分葡萄受到叶片的冲击作用后破碎并被抛送至壳体内壁；在阶段Ⅲ，未被冲击破碎的葡萄经叶轮抛撒后撞击壳体内壁后破碎，所有破碎后的葡萄在自身重力作用下经由壳体与冲击叶轮间隙排出。

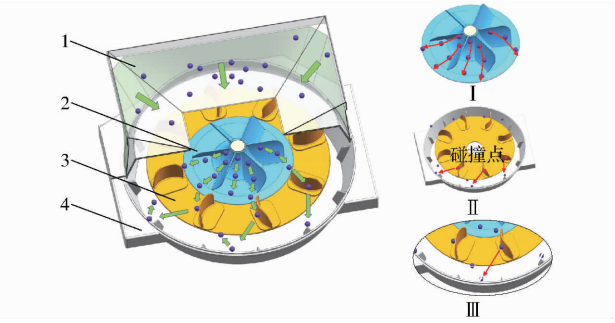


图 2　同轴差速式葡萄离心破碎原理图

Fig. 2　Schematic of coaxial differential speed centrifugal crushing device for grape

1. 入料斗　2. 导流叶轮　3. 冲击叶轮　4. 壳体

2　关键部件参数设计

2.1　导流叶轮

除梗后葡萄经入料口进入导流叶轮区间，为防止葡萄弹跳或堆积影响其流动性，需合理设计导流叶轮以快速引导分流葡萄。葡萄自入料口进入导流叶轮后，一是葡萄自叶轮中心锥盘流动下滑，二是葡萄从导流叶片弧面上流动下滑，因而影响导流叶轮引导分流葡萄的关键因素是导流叶轮中心锥盘回转母线与叶片设计曲线形状，如图 3 所示。结合工程实际经验，设计导流叶轮顶端直径 d_1 为 55 mm，底部直径 d_2 为 290 mm，叶片最大处直径 d_3 为 260 mm。

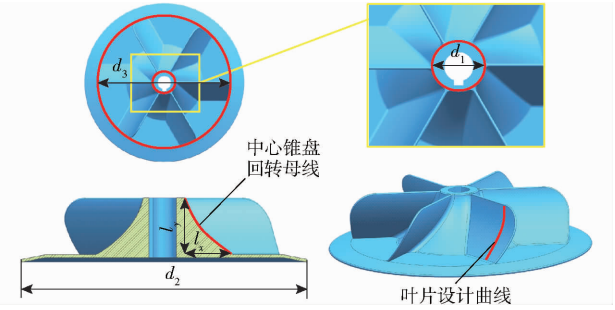


图 3　导流叶轮参数示意图

Fig. 3　Schematic of guide impeller parameters

为使葡萄颗粒快速从导流叶轮顶端滑落，避免葡萄颗粒的堆积和无序碰撞，应减少葡萄的滑落运动时间。根据斯涅尔定律可知最速降曲线可满足葡萄滑落存在最快时间[16-17]，因此导流叶轮中心锥盘回转母线与叶片设计曲线设计为最速降线。在理想情况下，最速降线即摆线，如图 4a 所示，假设存在半径为 R_0 的圆沿直线 AB 滚动，圆上任意一点滚动形成的轨迹即 A、B 两点间最速降曲线，最速降曲线的解析方程为

$$\begin{cases} x = R_0(\theta - \sin\theta) \\ y = R_0(\theta - \cos\theta) \end{cases} \tag{1}$$

式中　(x,y)——质点坐标，m

θ——质点滚动转角，rad

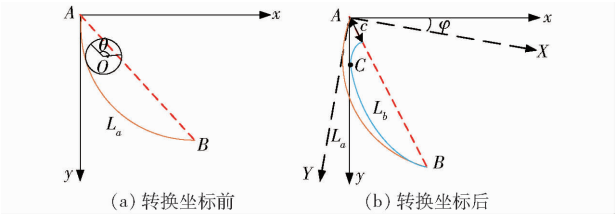


图 4　最速降曲线几何意义

Fig. 4　Geometric meaning of brachistochrone

在数学上最速降线解析方程实质为求函数 $y(x)$ 满足边界条件

$$\begin{cases} y(x_B) = y_B \\ y(0) = 0 \\ \min T = \int_0^{x_B} \dfrac{\sqrt{1 + y'^2}}{\sqrt{2gy}}\mathrm{d}x \end{cases} \tag{2}$$

式中　x_B——点 B 横坐标，m

y_B——点 B 纵坐标，m

T——质点从点 A 运动到点 B 的时间，s

g——重力加速度，m/s^2

应用最速降曲线进行工程设计时，需考虑摩擦阻力的影响，故需对解析方程进行优化。假设葡萄与锥盘的动摩擦因数为 μ，则考虑摩擦情况下质点滚动过程动能变化量为[18]

$$\mathrm{d}\left(\frac{mv^2}{2}\right) = mg\mathrm{d}y - \mu mg\cos\psi\mathrm{d}s = mg\mathrm{d}(y - \mu x) \tag{3}$$

其中

$$\begin{cases} v = \sqrt{2g(y - \mu x)} \\ \mu = \tan\psi \end{cases} \tag{4}$$

式中　v——质点运动速度，m/s

m——质点质量，kg

ψ——摩擦角，(°)

s——质点运动距离，m

因此，考虑摩擦力作用下最速降线求解边界条件更新公式为

$$\begin{cases} y(x_B) = y_B \\ y(0) = 0 \\ \min T = \int_0^{x_B} \dfrac{\sqrt{1 + y'^2}}{\sqrt{2g(y - \mu x)}}\mathrm{d}x \end{cases} \tag{5}$$

将 Axy 坐标系顺时针旋转 φ 得到新坐标系 AXY，如图 4b 所示，其中坐标转换关系为 $y - \mu x = Y/\cos\varphi$，此时边界条件关系转换为

$$\min T = \int_0^{X_B} \frac{\sqrt{1 + Y'^2}}{\sqrt{\dfrac{2gY}{\cos\varphi}}}\mathrm{d}X \tag{6}$$

式中　X_B——AXY 坐标系下点 B 横坐标，m

(X,Y)——转换后坐标，m

经旋转坐标系后，原圆滚线轨迹 L_a 初始阶段进入 $x<0$ 区间，在该区域内速度公式 $v=\sqrt{2g(y-\mu x)}$ 不能成立，因此 L_a 不是考虑摩擦作用下 A、B 间最佳路径。在 AXY 坐标系下必然存在路径使葡萄沿边界 y 轴下滑并进入平移变换后圆滚线到达点 B，此时解析方程为

$$\begin{cases} x=R_1(\theta-\sin\theta)+c \\ y=R_1(\theta-\cos\theta) \end{cases} \tag{7}$$

式中 R_1——变换后参数半径，m

c——最速降线横向平移距离，m

此时，点 A、B 间最速降线为线段 AC 与线段 CB 的组合，运动时间为 T，由于点 C 为可动边界，当点 C 发生变化时，运动时间修正为 δT，有

$$\begin{cases} T=\sqrt{\dfrac{2y_c}{g}}+\displaystyle\int_{X_c}^{X_B}\frac{\sqrt{1+y'^2}}{\sqrt{2g(y-\mu x)}}\mathrm{d}x \\ \delta T=\dfrac{1}{\sqrt{2gy_c}}\left(1-\dfrac{y'}{\sqrt{1+y'^2}}\right)\delta y_c \end{cases} \tag{8}$$

其中点 C 位置为极值点，满足条件 $\delta T=0$，$y'=\infty$，此时最速降线与 y 轴相切且满足

$$\begin{cases} \left.\dfrac{\mathrm{d}X}{\mathrm{d}Y}\right|_c=\dfrac{1-\cos\theta_c}{\sin\theta_c}=\mu \\ X_c=R_1(\theta_c-\sin\theta_c)+c \\ Y_c=R_1(1-\cos\theta_c)+c \\ X_c=\mu Y_c \end{cases} \tag{9}$$

式中 (X_c,Y_c)——转换坐标后点 C 坐标，m

θ_c——质点滚动至点 C 转角，rad

从点 A 至点 B 的最速降曲线 ACB 的参数 R_1 和 c，仅取决于点 A、B 相对位置和葡萄与导流叶轮间摩擦因数[19]。其中点 A、B 横向距离 l_x 参照除梗机参数设计为 50 mm，点 A、B 纵向距离 l_y 应大于葡萄自除梗机下落后自然弹跳高度，根据前期研究，取为 60 mm。葡萄与导流叶轮间摩擦因数为 0.64，根据上述参数可得出导流叶轮中心锥盘回转母线和叶片设计曲线。

为保证导流叶轮可连续稳定地快速分流葡萄，应使葡萄在进入导流叶轮顶端时填充流畅。导流叶片增加可使葡萄进行多向分流，提高冲击叶轮破碎效率和破碎均匀性。但随着导流叶片的增加，分流区间减小，葡萄流动性降低易造成拥堵，影响导流效果。基于物料特性可知[20]，叶片低端内侧间隔应大于葡萄颗粒等效直径 6 倍，即

$$\frac{(d_1+2l_x)\pi}{N}>6d_f \tag{10}$$

式中 d_f——葡萄等效直径，取 13.5 mm[20]

N——导流叶片数量

因此满足上述条件的叶片数量 $N\leqslant 6$，为使葡萄尽可能的多向分流，初步设计导流叶轮叶片为 6 片。

2.2 冲击叶轮

葡萄经导流叶轮分流后进入冲击叶轮区间，在冲击叶轮的作用下葡萄破碎并被冲击至壳体内壁。冲击叶轮的叶片曲线设计应使葡萄受到冲击力方向指向接触点曲面法向且产生远离叶轮轴线的合力。参考犁体曲面的设计方法[21-22]，采用对数螺旋线型进行冲击叶轮叶片设计。对数螺旋线型曲线模型为

$$\rho=a\mathrm{e}^{b\beta} \tag{11}$$

式中 a——常数

b——指数系数

β——极角，rad

ρ——极径，m

其中参数 a 控制对数螺线开始的位置，同时也影响叶片的强度和刚度，一般 a 越大，叶片的强度和刚度也越大。参数 b 影响对数螺线的紧密程度，它决定对数螺线在极坐标系中的扩展速度。结合工程经验采用三维设计方法调整曲线模型，确定冲击叶轮叶片曲面的曲线模型为

$$\rho=50\mathrm{e}^{1.3\beta} \tag{12}$$

综合考虑离心破碎机的整体空间位置尺寸，确定冲击叶轮直径为 500 mm，叶片高度为 60 mm，叶片厚度为 4 mm。为提高冲击叶轮的破碎效率，设计冲击叶轮叶片为 8 片，设计的冲击叶轮如图 5。

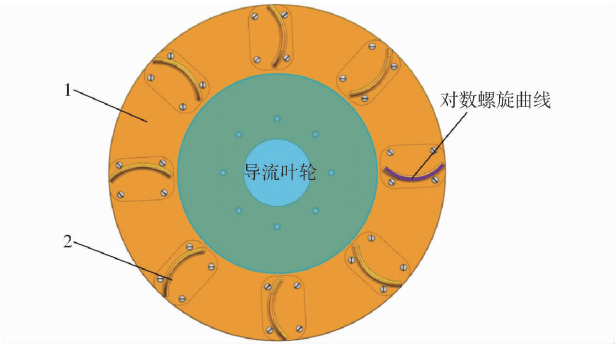


图 5 冲击叶轮结构图

Fig. 5 Schematic of impact impeller

1. 冲击叶轮底盘 2. 冲击叶轮叶片

3 葡萄颗粒运动分析

3.1 葡萄颗粒在导流叶轮上运动分析

葡萄在进入转动状态下导流叶轮区间后，部分葡萄在旋转的中心锥盘作用下均匀分散进入导流叶片间隔内，并在导流叶轮的离心作用下送入冲击叶轮区间。葡萄在中心锥盘曲面向下滑动过程受力较为复杂，主要受到锥盘的支持力和摩擦力、离心力以及相邻葡萄间的相互作用力等。由于葡萄自除梗机进入破碎机时处于自由落体状态，葡萄群处于离散

相状态，因此可忽略相邻葡萄间的相互作用力进行力学分析[23-24]。选取位于锥盘母线某点的葡萄颗粒为研究对象，以该点处母线切向为 x 轴，以葡萄颗粒受到锥盘支持力方向为 z 轴，以垂直于 xz 平面方向为 y 轴，该点葡萄受力分析如图 6。

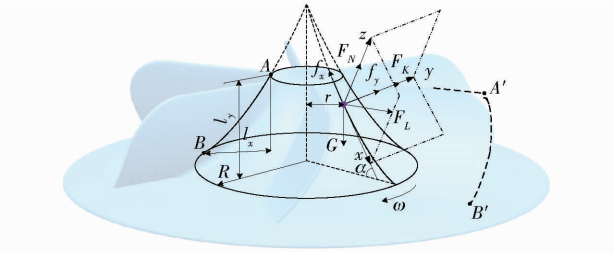


图 6　葡萄在导流叶轮中心锥盘的受力分析

Fig. 6　Force analysis of grape on guide impeller conical-disc

为确保葡萄自锥盘顶端沿锥盘分散下滑，需保证葡萄颗粒不脱离锥盘表面且合力在 x 轴方分力大于等于零，据此建立葡萄下滑过程受力方程

$$\begin{cases} F_N - G\cos\alpha + F_L\sin\alpha = 0 \\ G\sin\alpha + F_L\cos\alpha - f_x \geqslant 0 \\ F_N = G\cos\alpha - F_L\sin\alpha \geqslant 0 \\ F_L = m\omega^2 r \\ G = mg \\ F_f = \mu F_N \\ F_K = 2m\omega\dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\cos\alpha \\ f_x = \sqrt{F_f^2 - f_y^2} \end{cases} \tag{13}$$

式中　F_N——中心锥盘对葡萄颗粒的支持力，N

G——葡萄颗粒重力，N

F_L——葡萄颗粒离心力，N

F_f——葡萄颗粒与中心锥盘间摩擦力，N

f_x——摩擦力在 x 轴方向分力，N

f_y——摩擦力在 y 轴方向分力，N

F_K——葡萄颗粒科氏力，N

ω——中心锥盘转动角速度，rad/s

r——葡萄颗粒与中心锥盘轴线距离，m

α——葡萄颗粒在该点处切线与水平面夹角，(°)

化简式(13)可得

$$\sqrt{\frac{f_x - G\sin\alpha}{mr\cos\alpha}} \leqslant \omega \sqrt{\frac{g}{r\tan\alpha}} \tag{14}$$

根据式(14)可知，满足葡萄下滑的导流叶轮最低转速与葡萄和锥盘动摩擦因数 μ、切角 α 以及葡萄与锥盘轴线距离相关。假设 α 为定值，葡萄颗粒与锥盘轴线距离较小时则需要较高的转速，当葡萄颗粒与锥盘轴线距离较大时，锥盘转速较小时即可满足要求；满足葡萄不脱离锥盘表面时，锥盘最大转速仅与最速降曲线点 A、B 纵向距离 l_y 相关，将设计值 60 mm 代入式(14)得 $\omega \leqslant 12.7$ rad/s，即 120 r/min。

部分葡萄在入料后则直接经由导流叶片曲面滑落至导流叶片间隔，并在导流叶轮的作用下进入冲击叶轮区间。葡萄在导流叶片曲面向下滑动过程中主要受到导流叶片支持力和摩擦力、离心力以及相邻葡萄间的相互作用力等[25]，选取位于导流叶片曲线某点处葡萄颗粒为研究对象，以该点处相切于曲线方向为 x 轴，以葡萄颗粒受导流叶片支持力方向为 y 轴，受力分析如图 7 所示。

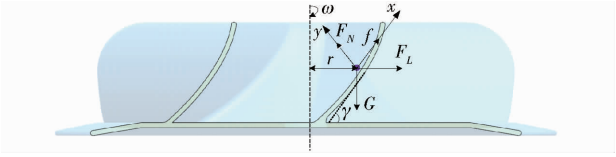


图 7　葡萄在导流叶片的受力分析

Fig. 7　Force analysis of grape on guide vane

为使葡萄能沿导流叶片曲面下滑，葡萄受力应满足

$$\begin{cases} G\sin\gamma - F_L\cos\gamma > \mu F_N \\ F_N = F_L\sin\gamma + G\cos\gamma \\ \omega = \dfrac{\pi n}{30} \end{cases} \tag{15}$$

式中　γ——葡萄颗粒在导流叶片某点处切线与水平面夹角，(°)

n——导流叶轮转速，r/min

化简式(15)得

$$n < \frac{30}{\pi}\sqrt{\frac{g\tan(\gamma - \arctan\mu)}{r}} \tag{16}$$

由式(16)可知，导流叶片的转速与导流叶片切线与水平面夹角、葡萄颗粒与叶片摩擦因数以及葡萄颗粒与中心锥盘轴线距离相关。γ 随叶片曲面曲线斜率时时变化，最大不超过 90°，为确保落入导流叶片任意位置的葡萄颗粒均能进入叶片间隔内，r 应为导流叶片最大半径 125 mm，μ 为 0.64，代入式(16)可知 $n < 108$ r/min。综合上述分析，应取导流叶轮的转速小于 108 r/min。

3.2　葡萄颗粒在冲击叶轮上运动分析

经由导流叶轮的葡萄颗粒进入冲击叶轮后，部分葡萄颗粒直接被冲击叶片碎裂，部分未能直接破碎的葡萄则在冲击叶片的作用下碰撞至壳体内壁，发生二次碎裂行为。对在冲击叶轮上的单个葡萄进行受力分析，在参考系中以冲击叶片对葡萄颗粒的支持力方向为 x 轴，以葡萄所受离心力方向为 y 轴，受力分析如图 8 所示。

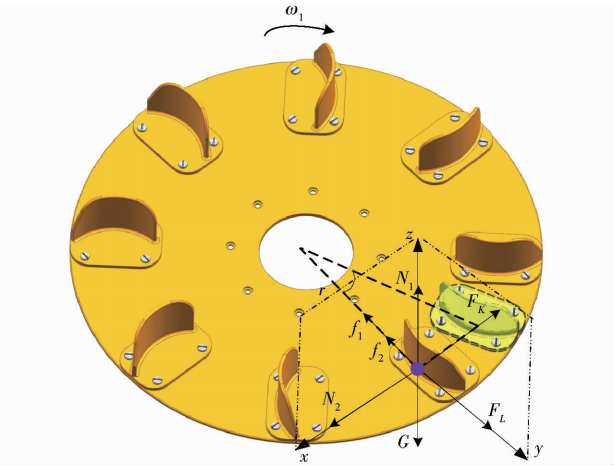


图 8 葡萄在冲击叶轮的受力分析

Fig. 8 Force analysis of grape on impact impeller

根据葡萄颗粒在冲击叶盘上的受力分析,建立葡萄颗粒受力方程

$$\begin{cases} F = F_x + F_y \\ N_2 - F_K = F_x \\ F_L - f_1 - f_2 = F_y \\ F_L = m\omega_1^2 r \\ F_K = 2m\omega_1 \dfrac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} \\ f_1 = \mu N_1 = \mu mg \\ f_2 = \mu N_2 \\ N_2 = m\dfrac{\mathrm{d}(\omega_1 r)}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{17}$$

式中 F_x——葡萄在 x 方向所受合力,N

F_y——葡萄在 y 方向所受合力,N

N_1——葡萄受冲击叶轮底盘的支持力,N

N_2——葡萄受冲击叶片的冲击力,N

f_1——葡萄与冲击叶轮底盘间摩擦力,N

f_2——葡萄与冲击叶轮叶片间摩擦力,N

ω_1——冲击叶轮转动角速度,rad/s

化简式(17)可得

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2} - \omega_1^2 r + \mu\left(g + \dfrac{\mathrm{d}(\omega_1 r)}{\mathrm{d}t} - 2\omega_1 \dfrac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}\right) = 0 \\ \dfrac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2} - \dfrac{\mathrm{d}(\omega_1 r)}{\mathrm{d}t} - 2\omega_1 \dfrac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} = 0 \end{cases} \tag{18}$$

根据上述分析可知,葡萄颗粒受到冲击叶片撞击后的运动与冲击叶轮角速度 ω_1、葡萄与冲击叶片碰撞时与中心锥盘轴线距离 r 相关。近似葡萄颗粒为球形体,则当葡萄颗粒与冲击叶片相撞时最大截面处产生的应力大于等于葡萄颗粒的抗压强度极限时,葡萄则产生破碎;反之葡萄将被冲击至壳体内壁发生碰撞进行二次破碎。

4 离散元仿真分析

采用 EDEM 仿真分析葡萄颗粒分散运移和碰撞过程,模拟破碎装置对葡萄颗粒群的作用效果并分析颗粒群运动规律,探究不同工况参数组合下导流叶轮对葡萄颗粒群的分流效果、冲击叶轮对颗粒冲击力的变化情况,以及喂入量对冲击稳定性的影响。

4.1 仿真试验因素与评价指标

针对酿酒葡萄破碎,破碎机应能满足葡萄酿造工艺要求的破碎率和出汁率。根据微皮发酵理论[9],生产中葡萄破碎率与出汁率及其重复性应尽可能高,反映在破碎机与葡萄互作离散元仿真模型中要求导流叶轮对颗粒群进行快速且均匀分流,冲击叶轮对葡萄颗粒的破碎冲击力趋于相等。在此背景下,将分流不均匀性系数 Y_1 和冲击稳定指数 Y_2 作为离散元仿真试验评价指标,间接表征破碎机破碎重复性。

分流不均匀性系数 Y_1 反映了破碎机内部导流叶轮对颗粒群分配的均匀性。在理想情况下,导流叶轮应能够将葡萄颗粒群体均匀分配到破碎区域,以保证各颗粒在破碎过程中所受的冲击力均衡。因此,Y_1 越小,说明导流叶轮分流越均匀,破碎机的工作性能越稳定,能够在不同生产环境下保持稳定的破碎率。

冲击稳定指数 Y_2 则衡量了冲击叶轮对葡萄颗粒的冲击力是否趋于一致。在实际过程中,冲击叶轮的作用是通过高速旋转将葡萄颗粒进行破碎,Y_2 越小,意味着叶轮对颗粒的冲击力更加均匀,有助于减少因冲击力不均导致的破碎不均匀现象,提高破碎率与出汁率重复性[13,15]。

结合离心式葡萄破碎机结构参数与工作过程分析可知,影响破碎机工作性能的参数为导流叶轮转速 n_d、冲击叶轮转速 n_c 和葡萄喂入量 w_r。根据酿酒工艺要求,确定喂入量为 3 ~ 7 kg/s,参考 PELLENC 机型,确定冲击叶轮转速为 600 ~ 800 r/min,根据前期导流叶轮预试验,确定导流叶轮转速为 40 ~ 80 r/min。试验因素编码如表 1 所示。

表 1 试验因素编码

Tab. 1 Test factors and codes

编码	因素		
	导流叶轮转速 n_d/(r·min^{-1})	冲击叶轮转速 n_c/(r·min^{-1})	喂入量 w_r/(kg·s^{-1})
-1	40	600	3
0	60	700	5
1	80	800	7

分流不均匀性系数 Y_1 计算方法：利用 EDEM 在每两个导轮叶片间布置直径为 50 mm 的数量统计器 sensor，统计仿真时间内各导轮叶轮通过的葡萄颗粒数量，如图 9 所示，根据测得的数据，计算分流不均匀性系数 Y_1 为

$$Y_1 = \frac{S_f}{\overline{X}} \times 100\% \tag{19}$$

其中

$$S_f = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{6} (X_i - \overline{X})}{N_i - 1}} \tag{20}$$

式中　$\overline{X}$——叶片间隔平均颗粒数量

X_i——两叶片间隔颗粒数量

S_f——平均颗粒数量标准差

N_i——导轮叶片间隔数量，取 6

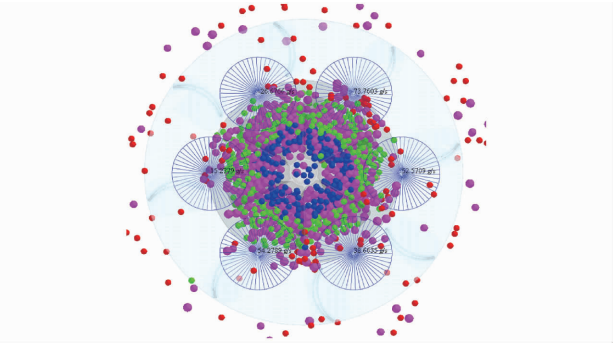


图 9　分流不均匀性系数统计方法示意图

Fig. 9　Statistical method for uniformity coefficient of diversion

冲击稳定指数 Y_2 测定方法：选取仿真时间段内 75 组独立区域内的颗粒群，以颗粒群为单位，统计颗粒在仿真时间段内受到的最大冲击力 F_{max}，根据测得的数据计算冲击稳定指数

$$Y_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_i} (F_{max} - \sigma)^2}{N_i - 1}} \tag{21}$$

式中　σ——颗粒平均冲击力，N

4.2　葡萄离心破碎机离散元仿真

4.2.1　仿真参数设置

运用 UG 绘制离心破碎机关键结构的三维模型，包括导流叶轮、冲击叶轮、料斗和外壳，并将其 .STP 文件导入 EDEM 2020 进行仿真。仿真设定葡萄颗粒参照赤霞珠品种，其直径范围为 10 ~ 14 mm，仿真试验设置 3 种粒径葡萄颗粒：10、12、14 mm。仿真使用 Hertz - Mindlin(no slip)接触模型。葡萄颗粒相关仿真参数参照课题组前期研究结果[20]进行设置，如表 2 所示。

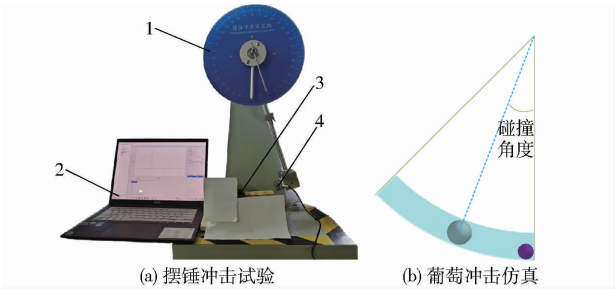
4.2.2　仿真参数准确性验证

为验证葡萄颗粒仿真过程中受力与真实情况一致，搭建葡萄冲击碰撞力测量平台，如图 10a 所示，以赤霞珠葡萄为测试对象，摆锤角度分别为 10°、15°、20°主动碰撞葡萄，测量葡萄受到初次碰撞力值。在 EDEM 中构建同原理仿真模型，如图 10b 所示，测量葡萄颗粒受到初次碰撞力值。

表 2　离散元仿真参数

Tab. 2　Simulation parameters of EDEM

项目	参数	数值
酿酒葡萄	密度/(kg·m^{-3})	1 094
	剪切模量/Pa	1.30×10^7
	泊松比	0.33
不锈钢板	密度/(kg·m^{-3})	7 930
	剪切模量/Pa	8.08×10^{10}
	泊松比	0.30
葡萄-葡萄	碰撞恢复系数	0.178
	静摩擦因数	0.459
	动摩擦因数	0.40
葡萄-不锈钢板	碰撞恢复系数	0.411
	静摩擦因数	0.643
	动摩擦因数	0.027



(a) 摆锤冲击试验　　(b) 葡萄冲击仿真

图 10　葡萄冲击试验

Fig. 10　Test of grape impact

1. 摆锤机　2. 控制系统　3. 葡萄颗粒　4. 压力传感器

葡萄试验受力与仿真结果如图 11 所示，可知在摆锤角度分别为 10°、15°、20°情况下，葡萄受到初次碰撞力均值分别为 5.13、7.52、11.90 N，均值拟合曲线斜率为 3.39，截距为 1.41，且此时葡萄均未发生

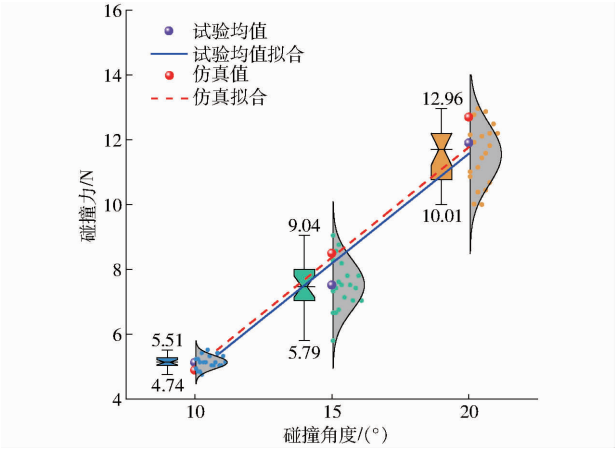


图 11　葡萄碰撞试验结果

Fig. 11　Results of grape collision test

破裂现象。仿真葡萄冲击时葡萄受初次碰撞力分别为 4.89、8.50、11.70 N，拟合曲线斜率为 3.41，截距为 1.55，斜率误差不超过 10%，可认为仿真过程中葡萄颗粒受力与真实情况相近[26]。因此，在离心破碎机仿真过程中可认为葡萄颗粒受力值与实际一致。同时，采用摆锤冲击试验台测量赤霞珠葡萄临界破碎力为 12.24 N。

4.2.3 仿真过程与结果分析

运用 EDEM 研究葡萄颗粒运动过程，在入料斗上方设置颗粒工厂，使颗粒自由落体跌落在导流叶轮上，设置颗粒生成速率为 5 000 颗/s，仿真总时长为 2 s，仿真模型如图 12 所示。

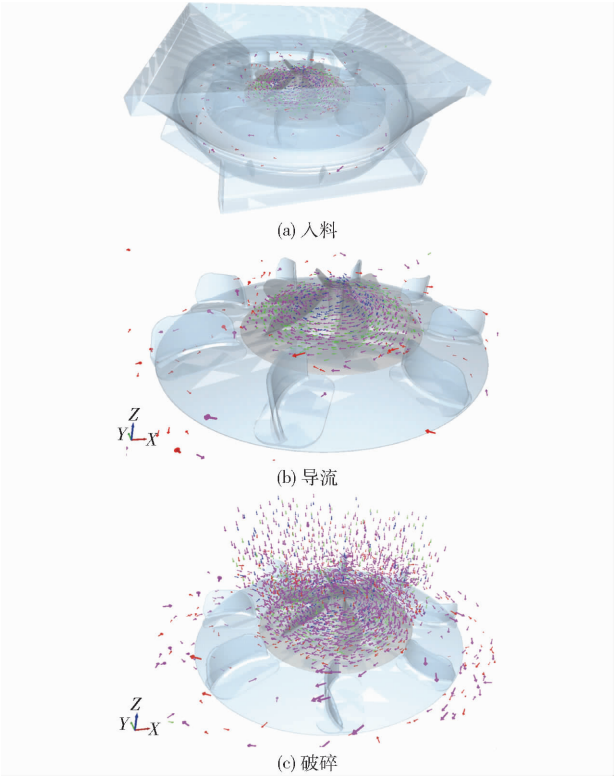


图 12 EDEM 仿真模型

Fig. 12 EDEM simulation model diagrams

试验方案与结果如表 3 所示。使用 Design-Expert 软件对试验结果进行回归拟合分析，得到分流不均匀性系数 Y_1 和冲击稳定指数 Y_2 的二项回归模型

$$Y_1 = 8.07 + 0.523\,7X_1 + 0.256\,4X_2 - 0.010\,3X_3 + 0.205\,2X_1X_2 + 0.009\,2X_1X_3 + 0.009\,47X_2X_3 + 0.238\,2X_1^2 - 0.432\,6X_2^2 - 0.106\,8X_3^2 \quad (22)$$

$$Y_2 = 21.76 - 1.96X_1 + 4.95X_2 - 1.20X_3 + 1.06X_1X_2 - 0.436\,6X_1X_3 + 1.60X_2X_3 + 0.103\,8X_1^2 + 2.66X_2^2 + 2.50X_3^2 \quad (23)$$

式中 X_1、X_2、X_3——因素编码值

对回归模型中各项回归系数以及影响试验指标 Y_1 的 3 个因素进行显著性检验和方差分析，结果如表 4 所示。由表 4 可知，目标函数 Y_1 回归方程极显著，且失拟项 P 为 0.172 9，大于 0.05，无失拟因素存在。模型 R^2 为 0.976 7，表明二次回归方程预测值与实际值高度匹配，故可以用 Y_1 的二次回归方程进行分析。

表 3 试验方案与结果

Tab. 3 Experiment scheme and results

序号	因素			Y_1/%	Y_2/N
	导流叶轮转速 n_d/(r·min^{-1})	冲击叶轮转速 n_c/(r·min^{-1})	喂入量 w_r/(kg·s^{-1})		
1	40	800	5	8.35	31.16
2	80	700	7	7.61	21.38
3	80	600	5	7.00	15.79
4	60	700	5	8.10	22.91
5	60	600	7	7.13	19.35
6	40	700	3	8.81	26.49
7	60	800	7	8.00	31.25
8	60	600	3	7.26	25.81
9	80	700	3	7.69	23.80
10	40	600	5	8.40	22.18
11	60	700	5	7.92	22.91
12	60	700	5	8.09	20.05
13	80	800	5	7.76	28.99
14	60	700	5	8.14	22.91
15	60	700	5	8.10	20.05
16	60	800	3	7.74	31.29
17	40	700	7	8.69	25.81

表 4 分流不均匀性系数 Y_1 方差分析

Tab. 4 ANOVA of uniformity coefficient of diversion Y_1

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	3.97	9	0.440 9	32.565 5	0.000 1 **
X_1	2.19	1	2.194 3	162.068 2	<0.000 1 **
X_2	0.53	1	0.525 9	38.842 7	0.000 4 **
X_3	0	1	0.000 8	0.062 7	0.809 4
X_1X_2	0.17	1	0.168 4	12.436 4	0.009 6 **
X_1X_3	0	1	0.000 3	0.025 2	0.878 3
X_2X_3	0.04	1	0.035 9	2.650 3	0.147 6
X_1^2	0.24	1	0.238 8	17.639 0	0.004 0 **
X_2^2	0.79	1	0.788 1	58.209 1	0.000 1 **
X_3^2	0.05	1	0.048 0	3.548 3	0.101 6
残差	0.09	7	0.013 5		
失拟项	0.06	3	0.021 4	2.797 4	0.172 9
误差	0.03	4	0.007 6		
总和	4.06	16			

注：** 表示影响极显著($P \leqslant 0.01$)。下同。

由 P 值可知，导流叶轮转速、冲击叶轮转速及其交互项、冲击叶轮转速和导流叶轮转速的平方项对 Y_1 有极显著影响。由 F 值可知，影响 Y_1 的因素由大到小为导流叶轮转速、冲击叶轮转速、喂入量。

对回归模型中各项回归系数以及影响指标 Y_2 的 3 个因素进行显著性检验和方差分析，结果如表 5 所示。

表 5　冲击稳定指数 Y_2 方差分析

Tab. 5　ANOVA of breaking stability coefficient Y_2

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	313.32	9	34.81	16.97	0.000 6 **
X_1	30.68	1	30.68	14.95	0.006 2 **
X_2	195.67	1	195.67	95.36	<0.000 1 **
X_3	11.52	1	11.52	5.61	0.049 7 *
X_1X_2	4.46	1	4.46	2.17	0.183 9
X_1X_3	0.76	1	0.76	0.37	0.561 4
X_2X_3	10.30	1	10.30	5.02	0.060 1
X_1^2	0.05	1	0.05	0.02	0.886 0
X_2^2	29.84	1	29.84	14.54	0.006 6 **
X_3^2	26.34	1	26.34	12.84	0.008 9 **
残差	14.36	7	2.05		
失拟项	4.58	3	1.53	0.62	0.636 0
误差	9.78	4	2.45		
总和	327.68	16			

注：* 表示影响显著（$0.01 < P < 0.05$）。

由表 5 可知，冲击稳定指数 Y_2 回归方程极显著，且失拟项 P 为 0.636 0，大于 0.05，无失拟因素存在。冲击稳定指数 Y_2 的 R^2 为 0.956，表明二次回归方程预测值与实际值高度匹配，故可以用冲击稳定指数 Y_2 的二次回归方程进行分析。

由 P 值可知，导流叶轮转速、冲击叶轮转速以及冲击叶轮转速和喂入量的平方项对冲击稳定指数 Y_2 有极显著影响，喂入量对冲击稳定指数 Y_2 有显著影响。由 F 值可知，影响冲击稳定指数 Y_2 的因素由大到小为冲击叶轮转速、导流叶轮转速、喂入量。

4.3　最优参数组合确定

通过三因素三水平正交试验，确定影响分流不均匀性系数和冲击稳定指数的最优参数组合。根据酿造工艺要求，二者数据越小越优。因此确定目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1(n_d, n_c, w_r) \\ \min Y_2(n_d, n_c, w_r) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 40\ \text{r/min} \leqslant n_d \leqslant 80\ \text{r/min} \\ 600\ \text{r/min} \leqslant n_c \leqslant 800\ \text{r/min} \\ 3\ \text{kg/s} \leqslant w_r \leqslant 7\ \text{kg/s} \end{cases} \end{cases} \tag{24}$$

根据目标函数和约束条件，由 Design-Expert 软件可得最优参数组合：导流叶轮转速为 78.71 r/min、冲击叶轮转速为 603.45 r/min、喂入量为 6.15 kg/s，此时分流不均匀性系数和冲击稳定指数分别为 6.86% 和 15.79 N。以上作业参数最优解均接近上边界水平值，说明满足基本作业要求的情况下使葡萄颗粒均匀分流于各冲击叶轮间，且能提供相对一致的、稳定的冲击环境。因此，确定破碎机最优参数组合为：导流叶轮转速 80 r/min、冲击叶轮转速 600 r/min、喂入量 6 kg/s。取优化后参数进行仿真验证试验，得分流不均匀性系数和冲击稳定指数分别为 7.08% 和 16.21 N，与优化结果基本一致。

4.4　最优参数组合破碎效果分析

取优化后参数进行 5 次仿真试验验证，采用仿真破碎率进行评价。仿真破碎率的测定方法为：统计 75 组独立区域颗粒群内颗粒受力大于葡萄临界破碎力（12.24 N）的数量，根据所测数据计算仿真破碎率 Y_3 及其变异系数 Y_4

$$Y_3 = \frac{N_B}{N_T} \times 100\% \tag{25}$$

式中　N_B——颗粒群内颗粒受力大于葡萄临界破碎力数量

N_T——颗粒群内颗粒总数量

$$Y_4 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{5} (Y_{3,i} - \overline{Y}_3)}{4}} \tag{26}$$

式中　$Y_{3,i}$——每次试验仿真破碎率

$\overline{Y}_3$——5 次仿真试验平均仿真破碎率

根据葡萄临界破碎力统计可得 5 次仿真试验中平均仿真破碎率为 94.27%，变异系数为 1.58%，满足赤霞珠葡萄酿酒工艺要求。

5　性能试验

为验证仿真试验得到的最优参数组合对于酒庄实际酿酒葡萄破碎作业的准确性，进行葡萄离心破碎机台架试验。

5.1　试验条件

葡萄离心破碎机性能试验于 2024 年 10 月在宁夏银川中粮长城天赋酒庄完成。试验以成熟期酿酒葡萄赤霞珠为测试样本，以 PELLENC 除梗振动粒选机为前置酿酒葡萄除梗机，出料口下方放置自制的离心破碎机与传统离心破碎机。试验前通过调节使喂入量为 6 kg/s，调节破碎机导流叶轮和冲击叶轮转速分别为 80 r/min 和 600 r/min。

5.2　试验材料与方法

取样装置为直径为 1 000 mm 的圆形食品级不锈钢直底圆盘，内部沿圆周方向均匀摆放 5 个 100 mm × 200 mm × 120 mm 的集料盒。酿酒葡萄除梗破碎作业稳定后，将取样装置推入破碎机底部，静置 5 s 后取出，试验重复 5 次作业，以 5 个集料盒的葡萄破碎率和出汁率及其变异系数为评价指标，葡萄破碎率 R_B 和出汁率 R_J 计算公式为

$$R_B = \frac{m_b}{M} \times 100\% \tag{27}$$

$$R_J = \frac{m_J}{M} \times 100\% \tag{28}$$

式中 m_b——破碎葡萄质量,g

m_J——葡萄自流汁质量,g

M——样本总质量,g

为反映同轴差速式酿酒葡萄离心破碎机作业质量,在喂入量相同、冲击叶轮线速度相等试验条件下,测试传统离心破碎机葡萄破碎效果,进行对比试验,葡萄酒庄葡萄破碎的试验场景如图 13 所示。



(a) 试验现场 (b) 结果统计

图 13 酒庄葡萄破碎试验场景

Fig. 13 Winery grape crushing tests

5.3 试验结果

同轴差速式酿酒葡萄离心破碎机和传统离心破碎机的葡萄破碎率和出汁率及其变异系数如表 6 所示。

试验结果表明,同轴差速式酿酒葡萄离心破碎机在上述参数组合下作业的出汁率和破碎率分别为(7.05 ± 1.39)% 和(96.37 ± 1.18)%,满足葡萄酒酿造工艺要求。对比试验结果表明,与传统破碎机相比,相同冲击叶轮线速度和喂入量条件下,葡萄出汁率的变异系数减小 23.4%,破碎率变异系数减小 58.3%,表明新型酿酒葡萄破碎机可以减小葡萄冲击不稳定性,可降低葡萄破碎度不均匀率,提升破碎率重复性,保证破碎质量。

表 6 台架试验结果

Tab. 6 Result of winery grape crushing test %

参数	新型破碎机	传统破碎机
出汁率	7.05 ± 1.39	4.88 ± 1.26
破碎率	96.37 ± 1.18	91.23 ± 2.69
出汁率变异系数	19.76	25.78
破碎率变异系数	1.23	2.95

6 结论

(1)设计了一种同轴差速式酿酒葡萄离心破碎机,阐述了该机导流叶轮分流引流、冲击叶轮撞击葡萄的破碎原理,确定了导流叶轮和冲击叶轮的结构参数,并建立了葡萄破碎过程受力模型。

(2)建立了同轴差速式酿酒葡萄离心破碎机 EDEM 离散元仿真模型,并进行了三因素三水平正交试验,得出破碎机最优工作参数组合:导流叶轮转速 n_d 为 80 r/min、冲击叶轮转速 n_c 为 600 r/min、葡萄喂入量为 6 kg/s。

(3)以优化所得最优参数进行机器性能试验验证,结果表明针对赤霞珠葡萄,同轴差速式酿酒葡萄离心破碎机平均出汁率为 7.05%,破碎率为 96.37%;与传统破碎机相比,葡萄出汁率的变异系数减小 23.4%,破碎率变异系数减小 58.3%,满足赤霞珠酿酒葡萄高质量破碎要求。

参 考 文 献

[1] 许靖,代晓霞,王旭,等. 我国葡萄酒产业发展的掣肘因素分析及对策建议[J]. 中外葡萄与葡萄酒,2022(6):111 - 114.
XU Jing, DAI Xiaoxia, WANG Xu, et al. Analysis and countermeasures on restrictive factors of China's wine industry[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2022(6): 111 - 114. (in Chinese)

[2] 倪定清,陈海盛,姜海燕. 葡萄酒产业新质生产力的内涵解读、理论框架与实施路径[J]. 中国果树,2024(12):122 - 129,146.
NI Dingqing, CHEN Haisheng, JIANG Haiyan. Connotation interpretation, theoretical framework and implementation path of new quality productive forces of grape wine industry[J]. China Fruits, 2024(12): 122 - 129, 146. (in Chinese)

[3] 陈彤国. 葡萄皮和籽对红葡萄酒理化特性和感官品质的影响[D]. 西安:陕西师范大学,2019.
CHEN Tongguo. The influence of grape skins and seeds on the physicochemical properties and sensory quality of red wine[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2019. (in Chinese)

[4] 周艳萍,赵晓宁,段金婷,等. 葡萄酒发酵过程中常见风味物质含量变化的研究[J]. 中外葡萄与葡萄酒,2016(3):26 - 29.
ZHOU Yanping, ZHAO Xiaoning, DUAN Jinting, et al. Changes of the common flavor of grape wine in fermentation process[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2016(3): 26 - 29. (in Chinese)

[5] 桂长莉. 发酵前处理工艺对干红葡萄酒品质影响的研究[D]. 银川:北方民族大学,2017.
GUI Changli. Study on the quality of dry red wine based on pre-fermentation technology[D]. Yinchuan: North Minzu University, 2017. (in Chinese)

[6] 成池芳,陈新军,张如意,等. 破碎程度对'丹菲特'葡萄酒香气物质的影响[J]. 中外葡萄与葡萄酒,2023(3):46 - 51.
CHENG Chifang, CHEN Xinjun, ZHANG Ruyi, et al. Effects of crushing degrees on aroma substances in 'Dornfelder' wines[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2023(3): 46 - 51. (in Chinese)

[7] 陈彤国,袁缓缓,雷小青,等. 不同皮籽比例对葡萄酒酚类物质和感官特性的影响[J]. 食品与发酵工业,2019,45(4):117 - 122,128.
CHEN Tongguo, YUAN Huanhuan, LEI Xiaoqing, et al. Effects of different skin and seed ratios on phenolic compounds and sensory properties of wine[J]. Food and Fermentation Industries,2019,45(4): 117 - 122,128. (in Chinese)

[8] WANG X, CAPONE D L, ROLAND A, et al. Impact of accentuated cut edges, yeast strain, and malolactic fermentation on chemical and sensory profiles of Sauvignon blanc wine[J]. Food Chemistry,2023,400: 134051.

[9] SPARROW A M, HOLT H E, PEARSON W, et al. Accentuated cut edges (ACE): effects of skin fragmentation on the composition and sensory attributes of pinot noir wines[J]. American Journal of Enology and Viticulture,2016,67(2): 169 - 178.

[10] 胡云峰,刘维维,张轲,等. 不同前处理对玫瑰香葡萄酒香气成分的影响[J]. 食品科技,2010,35(9):97 - 100, 104.
HU Yunfeng, LIU Weiwei, ZHANG Ke, et al. The influence on the aroma components of wine made by Muscat hamburg grape in different processes[J]. Food Science and Technology,2010,35(9): 97 - 100, 104. (in Chinese)

[11] 王新,赵炳成,王开真,等. 不同破碎率对发酵原酒的影响[J]. 酿酒科技,2006(10): 60 - 61.
WANG Xin, ZHAO Bingcheng, WANG Kaizhen, et al. Effects of different crashing ratio on fermenting brut wine[J]. Liquor-Making Science & Technology,2006(10): 60 - 61. (in Chinese)

[12] 王秀道. 葡萄酒酿造用的小型破碎机[J]. 食品机械,1985(4): 12 - 13.

[13] 李华,王华,袁春龙,等. 葡萄酒工艺学[M]. 北京:科学出版社,2007.

[14] ARNAUD C, NIERO R, SAMSON A, et al. Assessing a new crusher aimed at delivering wines with improved polyphenols and flavours[J]. Wine & Viticulture Journal,2013,28(3): 25 - 32.

[15] 高畅,来疆文,杨继红,等. 葡萄酒工程学[M]. 北京:中国农业出版社,2018.

[16] 史乃煜,陈海涛,魏志鹏,等. 基于最速降线原理的免耕播种机强制回土装置研究[J]. 农业机械学报,2020,51(2): 37 - 44.
SHI Naiyu, CHEN Haitao, WEI Zhipeng, et al. Design and test of forced-return device based on principle of brachistochrone [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(2): 37 - 44. (in Chinese)

[17] 刘晓东,胡瑞,王登辉,等. 基于颗粒肥料运动模型的排肥器优化与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(12): 85 - 95.
LIU Xiaodong, HU Rui, WANG Denghui, et al. Optimization and test of fertilizer apparatus based on granular fertilizer movement model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(12): 85 - 95. (in Chinese)

[18] 丁力,豆宇飞,王万章,等. 组合孔内充式油莎豆排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(12):100 - 115.
DING Li, DOU Yufei, WANG Wanzhang, et al. Design and experiment of seed metering device with combination hole and inner filling for *Cyperus esculentus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(12):100 - 115. (in Chinese)

[19] 尤明庆. 最速降线求解和摩擦力影响的研究[J]. 河南理工大学学报,2005,24(1):83 - 88.
YOU Mingqing. Study on the solution of brachist ochrone and the effect of friction[J]. Journal of Henan Polytechnic University,2005,24(1):83 - 88. (in Chinese)

[20] ZU Haolei, HE Ke, LIU Wenzheng, et al., Interaction properties of wine grapes: DEM analysis and experimental investigation [J]. Journal of Food Engineering,2025,387: 112347.

[21] 高宗飞,朱云明,沈春根,等. 基于复合型线的一种加速叶道离心轮设计[J]. 排灌机械工程学报,2023,41(7):701 - 708.
GAO Zongfei, ZHU Yunming, SHEN Chungen, et al. Design of accelerated blade passage centrifugal impeller based on compound line[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2023,41(7):701 - 708. (in Chinese)

[22] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2018.

[23] 王金峰,付佐栋,翁武雄,等. 圆锥盘推板式水田侧深施肥双行排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(2): 53 - 62, 106.
WANG Jinfeng, FU Zuodong, WENG Wuxiong, et al. Design and experiment of conical-disc push plate double-row fertilizer apparatus for side-deep fertilization in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023, 54(2): 53 - 62, 106. (in Chinese)

[24] 杨然兵,张翔,李建东,等. 锥体帆布带式排种器参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(3): 6 - 13.
YANG Ranbing, ZHANG Xiang, LI Jiandong, et al. Parameter optimization and experiment on cone canvas belt type seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(3): 6 - 13. (in Chinese)

[25] 刘彩玲,张福印,都欣,等. 水平涡轮叶片式精量排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊 1): 165 - 174.
LIU Cailing, ZHANG Fuyin, DU Xin, et al. Design and experiment of precision fertilizer distribution mechanism with horizontal turbine blades[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (Supp. 1): 165 - 174. (in Chinese)

[26] SU Yuan, XU Yang, CUI Tao, et al. Determination and interpretation of bonded-partical model parameters for simulation of maize kernels[J]. Biosystems Engineering,2021,210: 193 - 205.