



陈帅康, 孙步功, 郑小宝, 等. 红豆草种子物理-化学法协同破眠机设计与试验[J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(4): 1052-1065.

CHEN S K, SUN B G, ZHENG X B, et al. Design and experiment of physical-chemical synergy sleep breaking machine for sainfoin seeds[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(4): 1052-1065.

红豆草种子物理-化学法协同破眠机设计与试验

陈帅康, 孙步功*, 郑小宝, 祁 渊

(甘肃农业大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:【目的】种子因硬实而产生的休眠现象会导致种子晚发芽或不发芽, 影响种子区域化专业化生产。红豆草作为典型的硬实豆科牧草种子, 有很高的休眠率。为解除种子休眠、提高种子发芽率, 使种子苗齐苗壮。研究采用物理-化学协同破眠的方法, 设计双辊挤压摩擦与化学液浸泡相结合的破眠机, 实现物理-化学破眠方法协同作业。【方法】以种子发芽率为试验指标, 开展物理-化学法结合试验, 确定种子发芽影响因素, 验证物理-化学法协同破眠的可行性。【结果】利用 EDEM、ANSYS 和 Design-Expert 等分析软件分析得到发芽率影响显著性的因素依次为研磨辊粗糙度、浸泡时长、研磨缝隙、研磨辊转速和浸泡液浓度; 最优工作参数为: 研磨缝隙 2.5 mm、研磨辊转速 1.4 m/s、研磨辊粗糙度 200 目、浸泡液浓度 15%、浸泡时长 90 min。【结论】通过标准发芽试验对比发现物理-化学法协同破眠机处理后的红豆草发芽率均值为 93.18%, 与拟合函数优化结果一致, 证明物理-化学法协同破眠的设计可靠性与高效性。

关键词: 红豆草; 种子休眠; 物理-化学协同; 双辊摩擦; 参数优化; 种子萌发

中图分类号: S223.1*1 文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2286(2024)04-1052-14



Design and experiment of physical-chemical synergy sleep breaking machine for sainfoin seeds

CHEN Shuaikang, SUN Bugong*, ZHENG Xiaobao, QI Yuan

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: [Objective] The dormancy phenomenon caused by seed hardness will lead to late germination or no germination of seeds, which will affect the regionalized and specialized production of seeds. As a typical solid leguminous forage grass seed, sainfoin seed has a high dormancy rate. This study aims to to relieve seed dormancy, improve its germination rate, and make the seeds grow strong. [Method] In this study, the method of physical-chemical synergy sleep breaking was adopted, and a sleep breaker combining double-roller extrusion

收稿日期: 2024-01-27 修回日期: 2024-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51965002)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51965002)

作者简介: 陈帅康, 硕士生, orcid.org/0009-0003-3053-2235, chenshuaikang6@163.com; *通信作者: 孙步功, 教授, 博士, 主要从事旱作农业全程机械化研究, orcid.org/0000-0002-3507-4312, sunbg@gsau.edu.cn。

©《江西农业大学学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

friction and chemical liquid immersion was designed to realize the collaborative operation of physical-chemical sleep breaking methods. Taking the seed germination rate as the experimental index, the physical-chemical combination test was conducted to determine the influencing factors of seed germination, and the feasibility of the physical-chemical method to break sleep was verified. EDEM, ANSYS and Design-Expert analysis software were used to analyze the factors affecting the germination rate in the order of grinding roll roughness, soaking time, grinding gap, grinding roll speed and soaking solution concentration. [Result] The optimal working parameters were as follows: grinding gap 2.5 mm, grinding roller speed 1.4 m/s, grinding roller roughness 200 mesh, immersion liquid concentration 15%, and immersion time 90 min. [Conclusion] The average germination rate of *A. chinensis* treated with physical-chemical synergy sleep breaker is 93.18%, which is consistent with the optimization results of the fitting function and proves the reliability and efficiency of physical-chemical synergy sleep breaking.

Keywords: sainfoin; seed dormancy; physico-chemical synergy; double-roller friction; parameter optimization; seed germination

【研究意义】种子休眠是植物长期进化过程中形成的一种抵抗外界不良环境的特性^[1],休眠的实质是通过改变植物生长环境和分布区域来更好地保证物种族类的延续^[2]。但种子休眠导致种子晚发芽或不发芽的现象会影响农业生产和种子区域化和专业化生产的生长周期^[3],进而给前期育种、中期播种和后期检验等一系列工作带来不便。在近自然恢复寒旱区草地生态环境的过程中^[4-5],由硬实效应引起的种子休眠已成为生态环境建设进程^[6]、国民经济发展和畜牧业可持续发展进程中的巨大障碍^[7]。因此,为加快推进生态系统近自然恢复^[8-9],探究种子休眠机理,研发解除种子休眠装置的任务迫在眉睫。【前人研究进展】目前种子破眠方法有物理方法^[10]、化学方法^[11]、生物方法^[12]和综合方法^[13],最常用的是物理或化学方法,但单一物理方法存在对种胚和胚乳造成不可逆的损伤且伤种率高的问题,机械破眠装置存在利用率低、成本投入高和不宜批量生产等问题^[14]。单一化学方法存在易产生污染且危险系数高、操作难度大的问题^[15]。结合单一破眠方法优点设计协同破眠机,弥补单一破眠方法存在的问题。国内外学者围绕种子破眠做出了大量研究,如刘洋礼等^[16]研究小冠花种子破眠,先使用硫酸对种子进行前期的浸泡然后再用物理研磨的方法破除种皮,使种子发芽率达82.4%;Harada等^[17]研究龙眼细胞种子萌发,使用Co- γ 射线照射种子,处理后种子发芽率明显改善;崔雪艳等^[18]采用浓度0.15%的乙烯利浸泡花生种子,发现处理过的种子比处理前萌发率高25%左右;Otani等^[19]在研究种皮硬实物质时,发现硬实物质可被动物胃液中的稀酸软化而达到破除效果。

【本研究切入点】红豆草(Red bean grass)营养丰富全面,蛋白质、矿物质、维生素含量高^[20],且耐干旱、寒冷、早霜、深秋降水、缺肥贫瘠土壤等不利因素^[21],但红豆草种子会因自身硬实效应而出现发芽率低、休眠率高的现象^[22],为解除种子休眠,提高发芽率,使苗齐苗壮。【拟解决的关键问题】采用物理-化学协同破眠的方法,设计双辊挤压摩擦与化学液浸泡相结合的破眠破眠机,基于回归正交旋转组合试验,研究研磨缝隙、研磨辊转速、研磨盘粗糙度、浸泡液浓度和浸泡时长等因素对发芽率的影响规律,根据高发芽率的辩证目标,寻求影响因素的最优组合。物理-化学法协同破眠使种子发芽率升高、伤种率降低并具有通用性,满足批量生产和大规模人工种植的需要。研发有利于机械破眠技术的深入研究,并对破眠技术的进一步开发产生长远的效应;同时也可作为各种机械破眠技术的开发提供有效的试验研究支持,并为种子破眠装置的研发设计及后续优化提供理论依据。

1 双辊摩擦式物理-化学法协同破眠机的研究与设计

1.1 红豆草种子特性参数

设计红豆草种子破眠机,需要测定种子的基础物理特性。试验材料为定西市通渭县农户家中购买,红豆草种子整体外形呈扁半球状,腹部呈近直线形,背部呈弧形且两侧有凸形网状脉。

测定三轴尺寸。定义种子长度方向为X轴(L),宽度方向为Y轴(B),厚度方向为Z轴(H),如图1所

示。随机挑选待试验的籽粒充实、大小相近、无损伤带荚和脱荚种子 40 粒,用数显游标卡尺(精度为 0.01 mm)进行尺寸,将测定数据记录到表 1。

采用百粒法测定千粒质量^[23]。用四分法随机取 100 粒为 1 组,10 粒为 1 个小堆,取 10 个小堆合成 100 粒。共取 8 组,即为 8 个重复组。然后电子天平对重复组分别称量,测量精度为小数点后 4 位。计算标准差(S)及变异系数(C),将数据记录到表 1。计算公式如下:

$$S = \sqrt{\frac{n(\sum X^2) - (\sum X)^2}{n(n-1)}} \quad (1)$$

$$C = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 \quad (2)$$

式(1)、(2)中: $\bar{X}$ 为 100 粒种子平均质量(g),X 为重复组质量(g),n 为重复次数,Σ 为总和。

表 1 红豆草种子特性参数

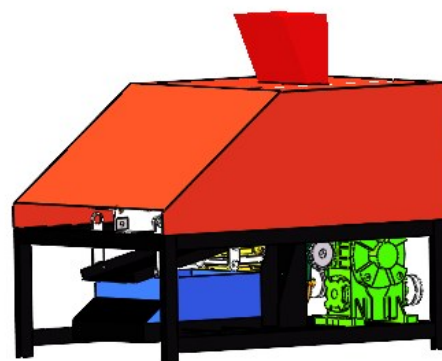
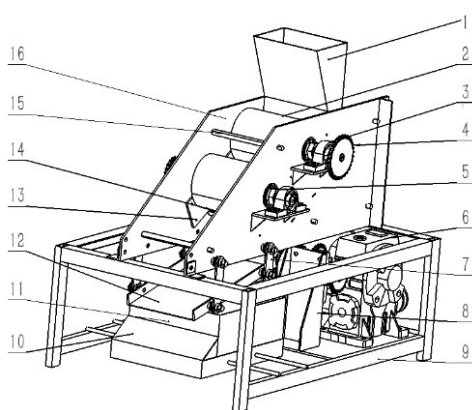
Tab.1 Characteristics of red bean grass seeds

类型 Type	长×宽×厚/(mm×mm×mm) Length×Width×Thickness	$\sum X^2$	$(\sum X)^2$	变异系数 Coefficient	标准差 Standard deviation	千粒质量/g Thousand grain weight
带荚 Pods	6.46×4.65×3.07	31.72	253.76	0.007	0.014 6	20.0
脱荚 Seeds	3.99×2.94×2.08	16.03	128.24	≈0.000 01	0.000 1	14.2

1.2 整机设计原理及工作参数

研究结合物理和化学方法,设计了一种双辊摩擦式物化协同破眠试验机。装置运行结合物理研磨和化学浸泡 2 种方法,方案一:先对待试验种子进行化学浸泡处理,再研磨已浸泡处理过的种子,最终完成种子破眠;方案二:先对待试验种子进行物理研磨处理,再浸泡已研磨处理过的种子,最终完成种子破眠。方案一中先浸泡种子后研磨处理,因浸泡溶液为酸性溶液,容易对研磨装置产生腐蚀效果,需要将浸泡处理后的种子清洗干净后才能进行研磨处理,步骤较为复杂,方案二研磨后再浸泡,最后清洗种子,步骤简单易操作。故选择方案二作为设计思路。

破眠机整机主要由进料机构、破眠装置、出料除杂装置、浸泡收集装置等构成。



1:入料口;2:碾磨辊;3:轴承座;4:传动齿轮;5:传动轴;6:减速器;7:筛网推动轴;8:齿轮固定板;9:机架;10:收集装置;11:浸泡装置;12:筛网;13:碾磨辊紧固板;14:碾磨底板;15:侧板连轴;16:侧板。

1: Inlet; 2: Grinding rollers; 3: Bearing housing; 4: Transmission gears; 5: Transmission shaft; 6: Reducer; 7: Screen pushing shaft; 8: Gear fixing plate; 9: Rack; 10: Collection device; 11: Immersion device; 12: Screens; 13: Grinding roller fastening plate; 14: Grinding the base plate; 15: Side plate coupling; 16: Side plates.

图 2 物化协同破眠装置结构

Fig.2 Structure diagram of physico-chemical coupling sleep-breaking device

装置工作原理为:双辊摩擦式物理-化学法协同破眠机的动力由电机提供,皮带轮驱动磨辊运动,再通过齿轮齿条带动筛网工作,两个磨辊由齿轮齿条连接实现同向同转速。将准备好的种子从进料口喂入,种子受到自身重力作用向下滑落进入摩擦破眠装置,碾磨辊在齿轮带动下开始转动,共设置有两个碾磨辊,根据种子外形尺寸调至下方磨盘以达到碾磨的合适间隙。碾磨辊在碾磨过程中将种子推向下一流程,种子及种皮进入抖动筛网除杂装置,筛网在连接杆的带动下持续抖动,将种子与种皮分离。种子经筛网分离后进入下方种子收集装置,收集装置上方为化学浸泡装置,浸泡一段时间后用打捞工具捞出种子,完成最终破眠。物理-化学法协同破眠机技术参数如表 2 所示。

表 2 物理-化学法协同破眠机主要技术参数

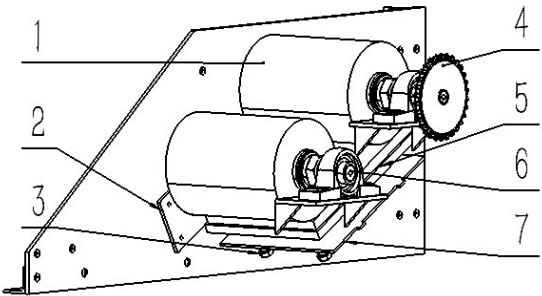
Tab.2 The main technical parameters of the double-roller friction sleep breaking device

参数 Parameters	值 Values
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm) Size of whole machine	950×640×700
整机质量/kg Overall quality of the machine	245
配套动力/kW Mating power	2.25
研磨转速/(m·s ⁻¹) Output speed	1.4
作业速度/(kg·h ⁻¹) Working speed	50~60
研磨辊尺寸(外圆直径×高)/(mm×mm) Grinding roller size	150×32
筛网孔尺寸/mm Mesh hole size	3.5
筛分速度/(m·s) Sieving speed	1.5
最大浸泡量/kg Maximum soaking volume	30
伤种率/% Injury rate	<10
碾磨盘粗糙度/目 Grinding disc roughness	200
研磨缝隙/mm Grind the gaps	2.5~3.0
研磨盘尺寸(长×宽×厚)/(mm×mm×mm) Grinding disk size	200×150×25
单个研磨辊尺寸(外圆直径×内圆直径×厚)/(mm×mm×mm) Individual grinding roll size	150×25×32

2 关键部件设计

2.1 双辊摩擦式结构

双辊摩擦式结构主要由研磨辊、研磨盘、磨盘调节板及磨辊链轮等构成,其结构如图 3 所示。研磨辊与研磨盘之间的距离可由磨盘调节板与调节螺母配合实现调节。装置开始运行后,研磨辊在链轮齿轮的带动下做定轴转动,种子进到研磨装置,研磨盘斜面角度设置为 45°,避免种子在研磨过程中停滞导致种子无法被研磨等问题;研磨过程中的研磨缝隙可由调节螺栓调节,即研磨辊对种子的正压力可调节,单个种子受力分析如图 4 所示。



1: 研磨辊;2: 磨辊挡板;3: 调节螺母;4: 磨辊链轮;5: 研磨盘;6: 传动轴;7: 调节底板。
1: Grinding rollers;2: Grinding roller baffle;3: Adjusting nut;4: Grinding roller sprocket;5: Grinding disc;
6: Transmission shaft;7: Adjusting the base plate.

图 3 研磨装置结构

Fig.3 Structure diagram of grinding device

图 4 中: f 为总摩擦力, N; G 为种子所受总重力, kg; g 为重力加速度 (m/s^2); F_f 为种子受磨盘摩擦力, N; $F_{\text{压}}$ 为研磨辊对种子垂直方向的压力, N; $F_{\text{支}}$ 为研磨盘对种子垂直方向的支撑力, N。

相比于碾磨辊对种子产生的摩擦力, 种间摩擦作用可以忽略, 红豆草尺寸较小, 碾磨时碾磨辊对种子产生的作用力与竖直方向之间的夹角很小, 可以忽略。分析种子受力图可知, 种子所受摩擦力主要是由压力和重力组成。

从研磨角度分析种子所受摩擦为滚动摩擦, 由摩擦力学理论模型可得:

$$f = \mu N \quad (3)$$

$$F_f = \mu \rho \quad (4)$$

$$\rho = \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 \quad (5)$$

$$\rho_1 = xmg \quad (6)$$

式(3)(4)(5)(6)中: μ 为总摩擦系数; ρ 为种子所受法向载荷, N; ρ_1 为种子自身重力, N; ρ_2 为种子所受正压力, N; ρ_3 为辊架自身重力, N; x 为群体种子的数量, 粒; m 为单体种子的质量, kg。

联立上式可得: $F_f = \mu(xmg + \rho_1 + \rho_2)$, 即种子所受摩擦力主要取决于自身重力、正压力和摩擦粗糙度。

2.2 筛网分离结构

荚皮分离装置前端设置为斜面状, 为方便下一步破眠处理和防止将刚分离好的胚与荚皮掺杂。将筛网孔设计为直径 ϕ 为 3.5 mm 的圆孔, 在电机的带动下, 连杆推动筛网做往复运动, 掉落至筛网的荚皮与胚在抖动中被分离, 胚从网孔掉入浸泡装置, 荚皮抖落至装置外。筛网运动示意简图如图 5 所示。

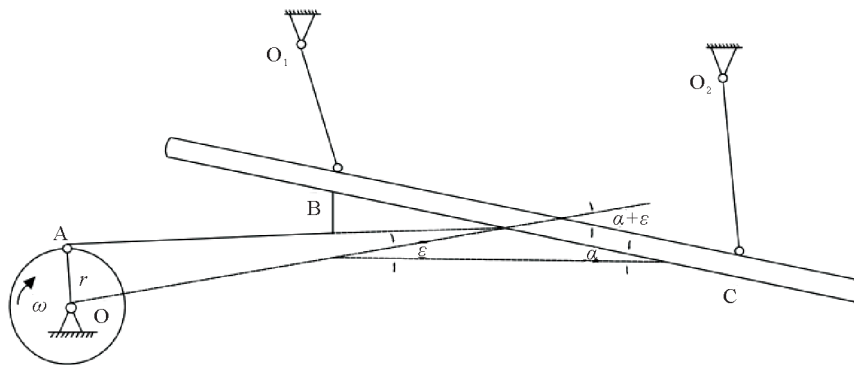


图 5 筛分筛网装置运动示意

Fig.5 Schematic diagram of the movement of the screening screen device

根据筛网的运动轨迹与机构传动建立运动数学模型, 具体由下面公式计算:

$$\omega^2 r \geq g \frac{\sin(\alpha + \phi)}{\cos(\varepsilon + \alpha + \phi)} = K_s \quad (7)$$

$$\omega^2 r \geq g \frac{\sin(\phi - \alpha)}{\cos(\varepsilon + \alpha - \phi)} = K_x \quad (8)$$

$$\omega^2 r \geq g \frac{\cos \alpha}{\sin(\varepsilon + \alpha)} = K_p \quad (9)$$

式(7)(8)(9)中: ω 为曲柄的角速度 (r/s); r 为曲柄的半径 (m); g 为重力加速度 (m/s^2)。

振动筛网与水平面方向的夹角选取对荚皮与胚的筛分有着关键影响。筛面角度过小, 会使物料在筛网面停留时间过长; 筛面角度过大, 会使物料下落速度过大, 降低物料筛分效率^[24]。选取角度 α 为 20° , 方向为物料筛分掉落的方向。筛网面和筛网摆动方向之间夹角为 $\varepsilon + \alpha$ (筛板向上倾角时夹角为 $\varepsilon - \alpha$)。

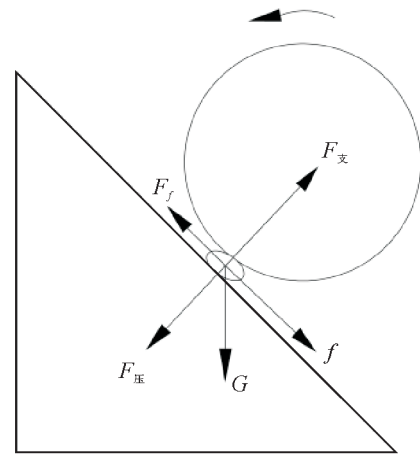


图 4 红豆草单粒种子受力分析

Fig.4 Stress analysis diagram of a single seed of red bean grass

筛分速度设置为 1.5 m/s。筛网宽度尺寸 B 根据碾磨辊的长度确定,筛网长度尺寸 L 与筛网功率 N 可由下列公式计算:

$$L = Q_s/Bq_s = Q(1 - \delta k)Bq_s$$

(10)

$$N = Q_e Np/\eta \sqrt{a^2 + b^2}$$

(11)

式(10)(11)中: Q_s 为喂入量(kg/s); δ 为杂质总重比; K 为筛网特性系数,取 0.6; q_s 为单位筛板面积的喂入量 kg/(s·m²); Q_e 为待筛分物料(kg/s); Np 为单位功率 kW/(kg·s); η 工况系数,选取 0.9。

3 样机模型仿真试验

3.1 基于 EDEM 的破眠装置种子颗粒仿真

参照表 1 所测红豆草种子特性参数及红豆草种子形状(图 6a)进行颗粒仿真模型的建立,根据种胚图(图 6b)建立种胚仿真颗粒模型(图 6c),根据荚皮图(图 6d)建立种皮颗粒图(图 6e),最后建立破眠装置仿真模型图(图 6f)。模型主要包括主机架、入料口、研磨盘、研磨辊、浸泡箱和收集装置等。

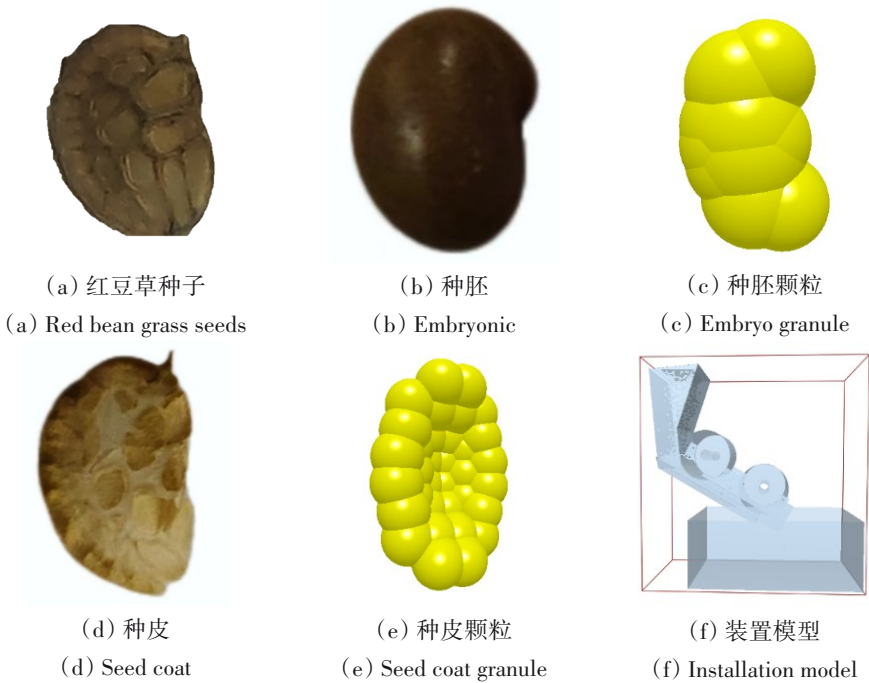


图6 种子颗粒及破眠试验机几何模型

Fig.6 Models of seed pellets and dormancy-breaking device

红豆草种子自身表面不光滑,但可认为是均质的,种子接触时的接触面远远小于种子表面,接触时的表面上仅发生弹性变形,且接触力垂直于该接触面,故此接触模型选择软件默认的无滑动模型(Hertz-Mindlin)^[25]。设置重力系数为-9.8 N/kg,正方向为软件内部坐标系 Z 轴方向。仿真开始前,依据参数参照表 3、表 4 设定材料本征参数及接触属性。仿真时,采用具有随机性的动态颗粒工厂进行仿真,设置颗粒总数 50 000 颗,产生的颗粒初始速度为 0,颗粒方向固定为 -Z 方向,仿真计算采用固定时间步长,并由 20% 的 Rayleigh 时间步长确定,数据保存的时间间隔为 0.02 s。

表 3 仿真模型材料本征参数

Tab.3 Intrinsic parameters of the material for the simulation model

材料 Material	泊松比 Poisson's ratio	剪切模量/Mpa Shear modulus	密度/(kg·m ⁻³) Density
种子 Seed	0.43	12	1 174
钢材 Steel	0.25	102	7 850
塑料 Plastics	0.40	100	7 800

表 4 仿真模型材料接触属性参数
Tab.4 Parameters for material contact properties of the simulation model

接触类型 Contact type	恢复系数 Recovery factor	静摩擦系数 Coefficient of static friction	滚动摩擦系数 Rolling friction coefficient
种子-种子 Seeds-Seeds	0.37	0.24	0.08
种子-塑料 Seeds-Plastics	0.43	0.70	0.53
种子-钢材 Seeds-Steel	0.46	0.73	0.48

3.2 仿真结果分析及参数验证

仿真种子在装置内的运行过程,两个关键点在于:一是种子在研磨部分的运动状况;二是经处理后的种子与种皮经筛网筛分时的分离效果。同时,对这两个工作过程进行仿真分析:为探究破眠时研磨辊转速在 1.2~1.6 m/s 的理想转速,现选取不同速度下摩擦装置中种子运动及受力情况作为参照标准,同时选取 1.2 m/s、1.4 m/s、1.6 m/s 3 种不同工况进行分析,研磨时的种子颗粒分离情况图(原色为种皮,紫色为胚)如图 7(a)、图(b)、图(c)所示;种子在研磨时所受力分析图如图 7(d)、图(e)、图(f)所示。

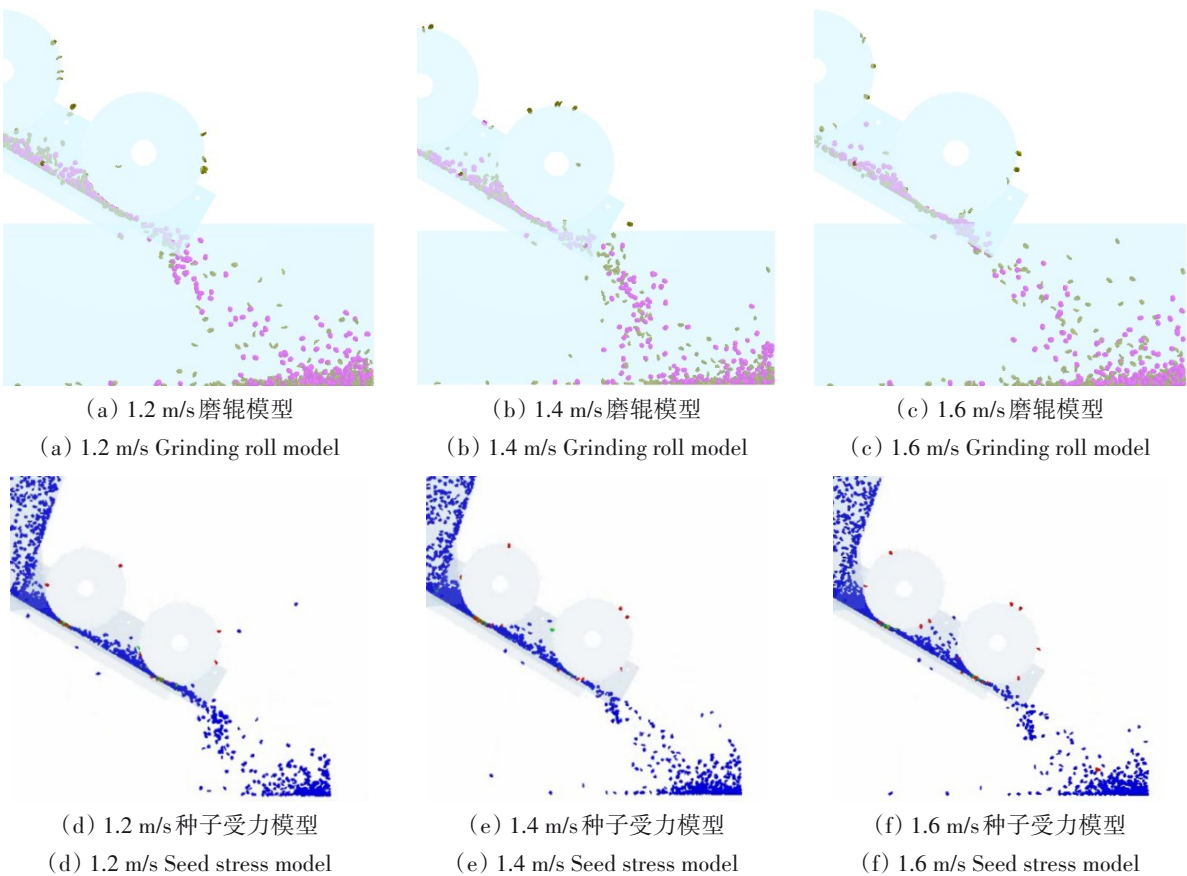


图 7 不同速度下研磨盘上种子颗粒情况

Fig.7 Seed particles on the grinding disc at different speeds

分析不同工况下研磨盘上种子颗粒受力情况,种子受力随转速的增加呈先增大后减小趋势,当研磨速度较低时,种皮与研磨辊出现的粘连现象比较明显;研磨速度较高时飞溅现象比较明显。磨辊转速取到 1.4 m/s 时红豆草种子的最大受力为 26.7 N,种子颗粒的速度矢量与分布状况均满足种子研磨要求,与磨辊转速取 1.2 m/s、1.6 m/s 时的工况对比可知,本装置运行时磨辊转速取 1.4 m/s 时为理想转速。该仿真条件下,设置颗粒数量为 10 000 个,10 000 粒红豆草种子约为 200 g,即为该协同破眠试验机最佳喂入量。为进一步探究筛网分别在筛分速度 1.3~1.7 m/s 下对分离荚皮的影响,现将该部分进行仿真分析,经

研磨后的种子已经分为种皮(原色)与胚(紫色)两个部分,两部分经由筛网分离。不同速度下筛网筛分仿真效果图如图 8 所示。

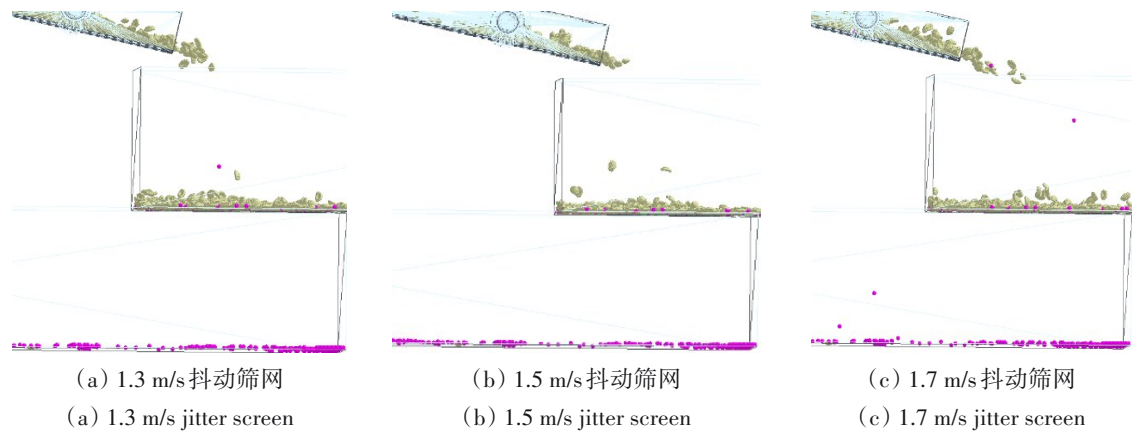


图 8 不同速度下筛网筛分情况
Fig.8 Screening of screens at different speeds

分析不同工况下筛网分离仿真效果图,筛网转速取 1.3 m/s 时部分胚会滞留到筛网上;筛网转速取 1.7 m/s 时种皮与胚出现飞溅现象。由荚皮—胚筛分掉落情况对比筛网转速取 1.3 m/s、1.7 m/s 时的工况效果图,当筛分速度在 1.5 m/s 时对荚皮的分离效果更好,装置运行时磨辊转速取 1.4 m/s 时为理想转速。

4 样机试验与分析

4.1 试验设计方案

按照 GB/T 2930.4—2017 要求开展种子破眠试验。将研究中研磨辊仿真结果进行试验验证与分析,根据双辊摩擦式破眠装置工作过程,结合预试验结果,选取研磨缝隙、研磨辊转速、研磨盘粗糙度、浸泡液浓度和浸泡时长为试验因素,以发芽率为响应指标,采用五因素三水平进行二次回归正交旋转组合试验,每组工况重复试验 3 次。各试验因素水平如表 5 所示,试验样机如图 9 所示。

表 5 协同试验因素水平编码表
Tab.5 Coding table of factor level for coupling test

水平 Level	因素 Factor				
	C_1 研磨缝隙/mm Grind the gaps	C_2 研磨辊转速/($r \cdot s^{-1}$) Grinding roller speed	C_3 研磨盘粗糙度/ra Grinding disc roughness	C_4 浸泡液浓度/% Immersion concentration	C_5 浸泡时长/min Soaking time
-1	2	1.2	163	10	30
0	2.5	1.4	183	15	60
+1	3	1.6	203	20	90
水平间隔Δ Horizontal spacing	0.5	0.2	20	5	30

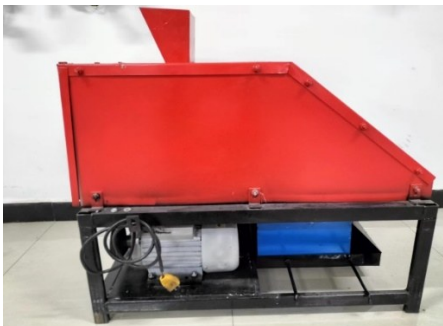


图 9 样机
Fig.9 Mockup drawing

4.2 试验结果及分析

种子发芽率二次回归模型的建立及检验结果见表6。

表6 标准发芽试验结果

Tab.6 Experimental results of standard germination tests

试验号 Test number	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	D 发芽率/% Germination rate
1	-1	0	0	1	0	89.2
2	0	1	0	-1	0	88.2
3	0	0	1	0	-1	89
4	-1	0	0	-1	0	88.5
5	0	0	1	-1	0	88.8
6	1	0	-1	0	0	88.4
7	0	0	0	-1	1	89.3
8	0	0	0	1	1	89.8
9	1	0	0	0	1	89.3
10	0	0	-1	0	-1	90.4
11	1	0	1	0	0	89
12	0	0	0	0	0	88.4
13	0	0	0	0	1	89.6
14	0	0	-1	-1	0	89.4
15	-1	0	0	0	-1	89.7
16	1	-1	0	0	0	88.6
17	0	-1	1	0	0	89.1
18	0	-1	0	0	-1	89.6
19	-1	0	1	0	0	88.2
20	0	0	1	1	0	89.5
21	-1	1	0	0	0	88.3
22	0	1	0	0	-1	89.5
23	0	1	-1	0	0	89.8
24	0	1	0	0	1	94.3
25	1	1	0	0	0	88.7
26	0	0	-1	0	1	89.4
27	-1	0	0	0	1	88.3
28	-1	0	-1	0	0	88.6
29	-1	-1	0	0	0	88.6
30	0	0	0	0	0	88.2
31	0	0	0	-1	-1	90.6
32	-1	0	0	1	0	88.1
33	1	0	0	0	-1	89
34	0	-1	0	0	1	89.4
35	0	-1	-1	0	0	88.9
36	0	0	0	1	-1	89.2
37	1	0	0	-1	0	88.9
38	0	1	0	1	0	89.7
39	0	0	0	0	0	88.2
40	0	-1	0	1	0	88.6
41	0	0	0	0	0	88.2
42	0	0	0	0	0	88.5
43	0	0	-1	1	0	89.7
44	0	0	0	0	0	88.2
45	0	-1	0	-1	0	89.6
46	0	1	1	0	0	88.2

在DE中,对种子发芽率(D)进行方差分析,如表7所示。得(D)的二次回归模型为:

$$D=88.28+0.175\ 0C_1-0.062\ 5C_2-0.2C_3+0.031\ 2C_4-0.181\ 3C_5+0.1C_1C_2+0.25C_1C_3+0.175C_1C_4+0.425C_1C_5-0.45C_2C_3+0.625C_2C_4-0.075C_2C_5+0.1C_3C_4+0.4C_3C_5+0.475C_4C_5-0.102\ 1C_1^2+0.264\ 6C_2^2+0.447\ 9C_3^2+0.539\ 6C_4^2+0.872\ 9C_5^2$$

表 7 种子发芽率的回归方程方差分析

Tab.7 Regression equation analysis of variance for seed germination rate

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
Source	Sum of squares	df	Mean square	Value	Prob>F
模型 Model	16.45	20	0.822 6	14.47	< 0.000 1
C_1	0.490 0	1	0.490 0	8.62	0.007 0
C_2	0.062 5	1	0.062 5	1.10	0.304 4
C_3	0.640 0	1	0.640 0	11.26	0.002 5
C_4	0.015 6	1	0.015 6	0.274 9	0.604 7
C_5	0.525 6	1	0.525 6	9.25	0.005 5
C_1C_2	0.040 0	1	0.040 0	0.703 8	0.409 5
C_1C_3	0.250 0	1	0.250 0	4.40	0.046 2
C_1C_4	0.122 5	1	0.122 5	2.16	0.154 5
C_1C_5	0.722 5	1	0.722 5	12.71	0.001 5
C_2C_3	0.810 0	1	0.810 0	14.25	0.000 9
C_2C_4	1.56	1	1.56	27.49	< 0.000 1
C_2C_5	0.022 5	1	0.022 5	0.395 9	0.534 9
C_3C_4	0.040 0	1	0.040 0	0.703 8	0.409 5
C_3C_5	0.640 0	1	0.640 0	11.26	0.002 5
C_4C_5	0.902 5	1	0.902 5	15.88	0.000 5
C_{12}	0.090 9	1	0.090 9	1.60	0.217 5
C_{22}	0.610 9	1	0.610 9	10.75	0.003 1
C_{32}	1.75	1	1.75	30.81	< 0.000 1
C_{42}	2.54	1	2.54	44.71	< 0.000 1
C_{52}	6.65	1	6.65	117.01	< 0.000 1
残差 Residual	1.42	25	0.056 8		
失拟 Lack of fit	1.33	20	0.666	3.77	0.073 2
误差 Pure error	0.088 3	5	0.017 7		
总和 Cor total	17.87	45			

表7中模型的 P 值小于0.001,表明回归模型极显著;失拟项 P 值(0.073 2)大于0.05,表明失拟不显著,模型能正确反映发芽率 D 与因素 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 之间的关系。其中一次项 C_1 、 C_3 、 C_5 和交互项 C_1C_5 、 C_3C_5 对种子发芽有显著影响,交互项 C_2C_3 、 C_2C_4 、 C_4C_5 平方项 C_3^2 、 C_4^2 、 C_5^2 对种子发芽有极显著影响,其余各项均不显著。五因素对发芽率的影响主次顺序为 C_3 研磨盘粗糙度、 C_5 浸泡时长、 C_1 研磨缝隙、 C_2 研磨辊转速、 C_4 浸泡液浓度。根据回归模型方程式做出各因素之间关系的响应曲面图(图10),响应面图的形状可以反映出变量(自变量)对响应变量的影响程度和交互效果。

研磨盘粗糙度、浸泡液浓度和浸泡时长的交互作用对发芽率的影响:图10(b)、图10(c)、图10(d)、图10(e)、图10(f)中可以看出研磨盘粗糙度、浸泡液浓度和浸泡时长对研磨后的发芽率交互作用的响应曲面图。从图中得,研磨盘粗糙度200目、浸泡液浓度15%、研磨辊转速1.4 m/s、浸泡时间90 min时,发芽率较高。研磨辊转速、浸泡液浓度和浸泡时长的交互作用对发芽率的影响:图10(a)中可以看出在上述试验条件下,研磨缝隙为2.5 mm研磨出的种子发芽率较高。

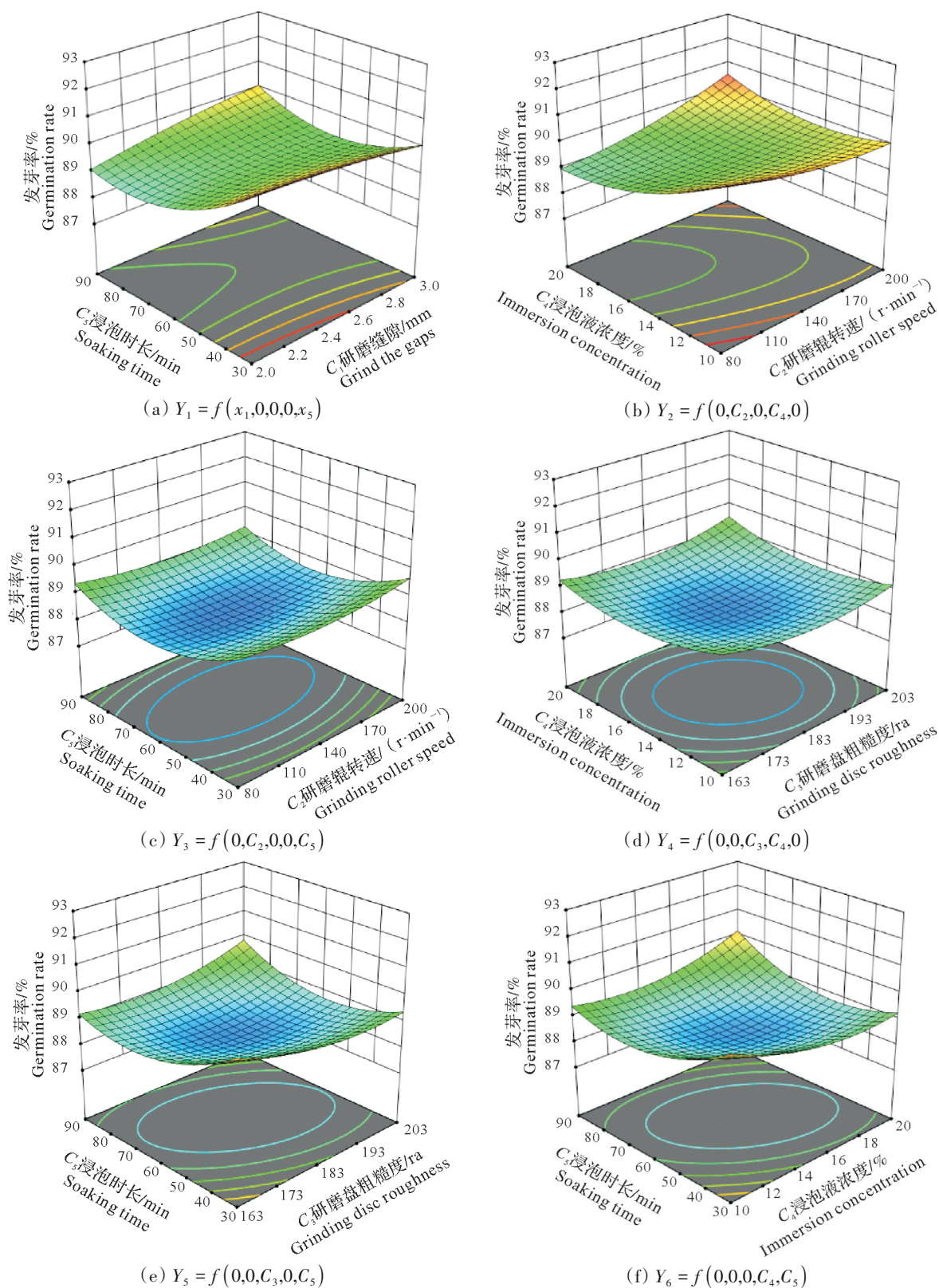


图10 部分参数影响分析

Fig.10 Some parameters affect the analysis chart

4.3 物理-化学法协同破眠机试验

4.3.1 试验材料

红豆草种子是从定西市通渭县农户家中购买,随机挑选出种子300粒。将种子分成6组,每组50粒。试验器材:LED冷光源人工气候箱、玻璃培养皿(直径9 cm)、滤纸等。

4.3.2 试验指标

种子发芽率。发芽率指测试种子发芽数占测试种子总数的百分比。即：

发芽率 = $\frac{\text{发芽种子数}}{\text{总种子数}} \times 100\%$ (12)

种子发芽势。发芽势是指在发芽过程中日发芽种子数达到最高峰时,发芽的种子数占供测样品种子数的百分率,一般以发芽试验规定期限的最初 1/3 期间内的种子发芽数占供验种子数的百分比为标准。即：

发芽势 = $\frac{\text{第7天发芽种子数}}{\text{供试种子总数}} \times 100\%$ (13)

活力指数。活力指数是种子发芽速率和生长量的综合反映,是种子活力的更好指标。即：

$G_i = \sum \frac{G_t}{D_t}$ (14)

式(14)中: D_t 为第 t 日发芽势; G_t 为第 t 日的发芽数。

4.3.3 试验设计及结果分析

将试验设计的最优的 9 组结果设定为装置的运行参数并根据实际情况做出相应调节,将待试验种子放入破眠机试验,把处理后的种子以 50 粒分为 1 组,每个最优组设置 5 个重复组进行发芽试验,发芽试验结果如图 11、表 8 所示。

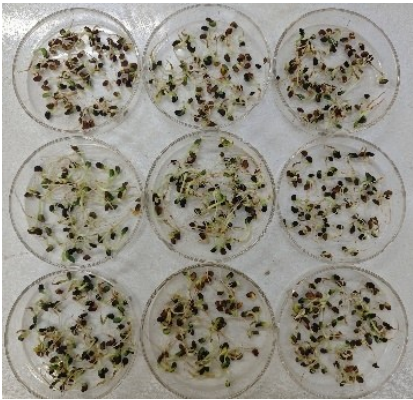


图 11 处理后的试验种子发芽情况

Fig.11 Germination of test seeds after treatment

表 8 种子试验发芽结果统计

Tab.8 Statistics of germination results in seed experiments

试验序号	发芽率/%	试验序号	发芽率/%
Test serial number	Germination rate	Test serial number	Germination rate
1	92.6	6	95.8
2	91.8	7	93.4
3	94.2	8	89.8
4	90.3	9	96.1
5	94.6		

破眠机处理后的红豆草种子发芽率均值为 93.18%,破眠机最优处理参数为研磨缝隙为 2.5 mm、研磨辊转速为 1.4 m/s、研磨辊粗糙度 200 目、浸泡液浓度为 15%、浸泡时长 90 min。表明协同破眠机的最终加工设计满足前期预设的试验要求,证实了物化协同破眠方法的可行性与高效性。

5 结 论

测得带荚红豆草种子千粒质量为 20.0 g,脱荚红豆草种子千粒质量为 14.2 g,带荚红豆草种子平均尺寸为:长 6.46 mm、宽 4.65 mm、厚 3.07 mm,脱荚红豆草种子平均尺寸为:长 3.99 mm、宽 2.94 mm、厚 2.08 mm。该数据为破眠装置的建立与架构分析提供理论支持。

使用EDEM软件模拟分析红豆草种子在协同破眠过程中的受力大小以及速度分布情况,确定了种子单次最佳喂入量约为200 g,研磨结构中研磨辊最佳转速约为1.4 m/s,筛网最佳抖动速度为1.5 m/s,该数据表明整机设计满足破眠工艺要求。

用响应曲面法对所得实验数据进行分析优化与试验验证,得出物理-化学法协同破眠试验装置最优工作参数为:研磨缝隙2.5 mm、碾磨辊转速1.4 m/s、研磨盘粗糙度设200目、浸泡液浓度15%、浸泡时长90 min,在该工作参数下对红豆草进行破眠处理可将种子发芽率可提升至93.18%。该数据证明采用物理-化学法协同的综合破眠方法能够更好的实现破眠效果,证明该装置满足前期预设要求。

针对单一破眠方法中出现的效率低、时间周期长、成本高、损伤率高和操作难度大等问题,采用物理-化学法协同破眠方法能够有效实现红豆草的种子破眠,提高种子发芽率,加快牧草种子机械化破眠进程,使种子苗齐苗壮。

参考文献 References:

- [1] 宋松泉,唐翠芳,雷华平,等.种子休眠与萌发调控的研究进展[J].作物学报,2024,50(1):1-15.
SONG S Q, TANG C F, LEI H P. Research progress on seed dormancy and germination regulation[J]. Acta agronomica Sinica, 2024, 50(1): 1-15.
- [2] 张慧敏,李希来,李兰平,等.草种配置对高寒人工草地群落多样性和生产力的影响[J].草地学报,2020,28(5):1436-1443.
ZHANG H M, LI X L, LI L P, et al. Effects of grass seed allocation on community diversity and productivity of alpine artificial grassland[J]. Acta grassland Sinica, 2020, 28(5): 1436-1443.
- [3] 张慧,朱文泉,史培军,等.青藏高原各主要植被类型的特征及环境差异研究[J].生态学报,2024,44(7):2955-2970.
ZHANG H, ZHU W Q, SHI P J, et al. Study on the characteristics and environmental differences of major vegetation types in the Tibetan Plateau[J]. Acta ecologica Sinica, 2024, 44(7): 2955-2970.
- [4] 贺金生,卜海燕,胡小文,等.退化高寒草地的近自然恢复:理论基础与技术途径[J].科学通报,2020,65(34):3898-3908.
HE J S, BU H Y, HU X W, et al. Near-natural restoration of degraded alpine grasslands: theoretical basis and technical approach[J]. Chinese science bulletin, 2020, 65(34): 3898-3908.
- [5] 王立景,肖焱,孔令桥,等.青藏高原草地承载力空间演变特征及其预警[J].生态学报,2022,42(16):6684-6694.
WANG L J, XIAO Y, KONG L Q, et al. Spatial evolution characteristics and early warning of grassland carrying capacity in the Tibetan Plateau[J]. Acta ecologica Sinica, 2022, 42(16): 6684-6694.
- [6] 刘明,张莉,王军邦,等.草地退化及恢复治理的文献计量学分析[J].中国草地学报,2020,42(6):91-100.
LIU M, ZHANG L, WANG J B, et al. Bibliometric analysis of grassland degradation and restoration management[J]. Chinese journal of grassland, 2020, 42(6): 91-100.
- [7] 王彦.天祝高寒草甸退化草地土壤种子库研究初报[J].甘肃畜牧兽医,2020,50(6):54-55.
WANG Y. Report on Soil Seed Bank of degradation of alpine meadow in Tianzhu[J]. Gansu animal husbandry and veterinary medicine, 2020, 50(6): 54-55.
- [8] 胡芳.立草为业 生态富民.记2017年度国家科技进步奖二等奖项目“青藏高原特色牧草种质资源挖掘与育种应用”[J].中国科技奖励,2018(1):59-61.
HU F. Standing grass for the industry, ecological enrichment. The second prize of the 2017 national science and technology progress award “mining and breeding application of characteristic forage germplasm resources on the Qinghai-Tibet Plateau”[J]. China science and technology awards, 2018(1): 59-61.
- [9] 贺金生,刘志鹏,姚拓,等.青藏高原退化草地恢复的制约因子及修复技术[J].科技导报,2020,38(17):66-80.
HE J S, LIU Z P, YAO T, et al. Constraints and restoration technologies of degraded grassland restoration on the Tibetan Plateau[J]. Science & technology review, 2020, 38(17): 66-80.
- [10] 贾金蓉.野黍休眠性及对除草剂烟嘧磺隆抗药性的研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2017.
JIA J R. Study on dormancy and resistance to herbicide nicosulfuron[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017.
- [11] 付楠,宋慧,王淑君,等.种子的休眠与破除研究进展[J].安徽农业科学,2018,46(24):10-12.
FUI N, SONG H, WANG S J, et al. Research progress on seed dormancy and breakage[J]. Journal of Anhui agricultural sciences, 2018, 46(24): 10-12.
- [12] 王艳梅,张小雪,朱秀征,等.林木种子休眠与萌发机制研究进展[J].林业科学,2021,57(10):128-144.

- WANG Y M, ZHANG X X, ZHU X Z, et al. Research progress on seed dormancy and germination mechanism of forest trees [J]. *Scientia silvae Sinicae*, 2021, 57(10): 128-144.
- [13] 郭丽萍. 种子休眠原因及休眠解除方法研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2016.
- GUO L P. Research on the causes of seed dormancy and the method of relieving dormancy [D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2016.
- [14] 宋松泉, 唐翠芳, 雷华平, 等. 种子休眠与萌发调控的研究进展[J]. *作物学报*, 2024, 50(1): 1-15.
- SONG S Q, TANG C F, LEI H P, et al. Research progress on seed dormancy and germination regulation [J]. *Acta agronomica Sinica*, 2024, 50(1): 1-15.
- [15] 陈帅康, 郑小宝, 祁渊, 等. 牧草种子硬实破眠研究与智能化破眠展望[J]. *林业机械与木工设备*, 2023, 51(3): 4-10.
- CHEN S K, ZHENG X B, QI Y, et al. Research on hard seed sleep breaking of herbage and prospect of intelligent sleep breaking [J]. *Forestry machinery and woodworking equipment*, 2023, 51(3): 4-10.
- [16] 刘洋礼, 孙步功, 张鹏, 等. 小冠花硬实种子物化一体破眠机设计与试验[J]. *东北农业大学学报*, 2021, 52(5): 69-78.
- LIU Y L, SUN B G, ZHANG P, et al. Design and experiment of the integrated physicochemical sleep breaker of hard and solid seeds [J]. *Journal of northeast agricultural university*, 2021, 52(5): 69-78.
- [17] HARADA N, OKAJIMA K, NARIMATSU N, et al. Effect of topical application of raspberry ketone on dermal production of insulin-like growth factor-I in mice and on hair growth and skin elasticity in humans [J]. *Growth hormone & IGF research*, 2008, 18(4): 335-344.
- [18] 崔雪艳, 李永军. 乙烯利对花生种子萌发及胚芽长势的影响[J]. *农业科技通讯*, 2021(12): 106-109.
- CUI X Y, LI Y J. Effect of ethephon on seed germination and germ growth of peanut [J]. *Bulletin of agricultural science and technology*, 2021(12): 106-109.
- [19] OTANI T, SHIBATA E. Seed dispersal and predation by Yakushima macaques, *Macaca fuscata yakui*, in a warm temperate forest of Yakushima Island, southern Japan [J]. *Ecological research*, 2000, 15: 133-144.
- [20] 刘乾, 张榕, 付萍, 等. 红豆草植物学特性研究报告[J]. *甘肃畜牧兽医*, 2019, 49(8): 67-70.
- LIU Q, ZHANG R, FU P, et al. Report on botanical characteristics of red bean grass [J]. *Gansu animal husbandry and veterinary medicine*, 2019, 49(8): 67-70.
- [21] 付萍, 杨浩, 孟祥君, 等. 红豆草在甘肃省不同生态区的生产性能及品质研究[J]. *中国饲料*, 2023(11): 135-139.
- FU P, YANG H, MENG X J, et al. Research on production performance and quality of red bean grass in different ecological regions of Gansu Province [J]. *China feed*, 2023(11): 135-139.
- [22] 魏少萍, 李景峰, 梁鹏飞, 等. 红豆草种子形态和营养成分遗传变异分析[J]. *草地学报*, 2021, 29(11): 2530-2537.
- WEI S P, LI J F, LIANG P F, et al. Genetic variation analysis of seed morphology and nutrient composition of red bean grass [J]. *Acta grassland Sinica*, 2021, 29(11): 2530-2537.
- [23] 李强, 孙步功, 张鹏, 等. 紫花苜蓿种子破眠方法的设计与试验研究[J]. *农机化研究*, 2021, 43(6): 161-165.
- LI Q, SUN B G, ZHANG P, et al. Design and experimental study on a method of breaking seed dormancy of alfalfa [J]. *Agricultural mechanization research*, 2021, 43(6): 161-165.
- [24] 徐天昊. 基于EDEM的振动筛分参数对效率的对比研究[J]. *南方农机*, 2024, 55(1): 166-168.
- XU T H. Comparative study on the efficiency of vibrating sieving parameters based on EDEM [J]. *South China agricultural machinery*, 2024, 55(1): 166-168.
- [25] 陈永, 高晓勋, 金鑫, 等. 油莎豆排种离散元仿真参数标定与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(12): 58-69.
- CHEN Y, GAO X X, JIN X, et al. Calibration and analysis of seeding parameters of *Cyperus esilentus* seeds based on discrete element simulation [J]. *Transactions of the Chinese society for agricultural machinery*, 2023, 54(12): 58-69.