doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.S1.019

紫云英联合收获物料分离清选机设计与试验

游兆延[1]　吴惠昌[1]　颜建春[1]　魏　海[1]　高学梅[1]　高嵩涓[2]
(1.农业农村部南京农业机械化研究所,南京 210014;2.南京农业大学资源与环境科学学院,南京 210095)

摘要:针对紫云英联合收获物料组分构成复杂及其小差异混杂特性,使其在分离清选作业过程中存在高含杂、多损失等问题,提出"先筛分、再气流清"的作业模式,设计了紫云英联合收获物料分离清选机,并对喂料斗出口处料层厚度调节机构、筛分装置、集杂除尘装置等关键部件进行了设计选型与参数计算。基于 DEM-CFD 耦合数值模拟方法,确定了物料层调节厚度、筛分装置驱振振幅和吸杂管道风量调节手柄挡位等主要影响因素合理的取值范围,运用 Minitab 进行正交试验设计,以籽粒清洁率和夹带总损失率为响应值,得到影响紫云英联合收获物料分离清选机作业质量的最优因素参数组合:物料层调节厚度为 16.8 mm、筛分装置驱振振幅为 35 mm、吸杂管道风量调节手柄在挡位 5,此时,籽粒清洁率均值为 98.07%,夹带总损失率均值为 2.96%,试验结果满足设计要求。

关键词:紫云英;分离清选机;联合收获物料;仿真;试验
中图分类号:S226.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)S1-0181-10

Design and Experiment of Separating and Cleaning Machine for Chinese Milk Vetch Combine Harvest Material

YOU Zhaoyan[1]　WU Huichang[1]　YAN Jianchun[1]　WEI Hai[1]　GAO Xuemei[1]　GAO Songjuan[2]
(1. *Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing* 210014, *China*
2. *College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing* 210095, *China*)

Abstract: China is the original country of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.), and also the country with the earliest utilization and cultivation of Chinese milk vetch and the largest planting area in the world. Chinese milk vetch, also known as grass seed, Ziyunying and so on, is one of the main winter green manure crops in paddy fields of central and southern China. To enhance the machanization level of separating and cleaning of Chinese milk vetch combine harvest material, according to the complex component compositions and small difference confounding characteristics of Chinese milk vetch combine harvest materials, the operation mode of "screening first, and then air flow cleaning" was put forward, and a separating and cleaning machine for Chinese milk vetch combined harvest material was designed. Through design selection and parameter calculation of key components of the prototype, the important working parameters of the feeding hopper outlet material layer thickness adjustment mechanism, the screening device and impurity-collection and dust-removal device were determined. Based on the DEM-CFD coupled numerical simulation method, the reasonable value ranges of the main influential factors, such as the material layer adjustment thickness, the vibration amplitude of the screening device, and the air volume adjustment handle gear of the impurity-absorbing duct were confirmed, an orthogonal experimental design was conducted by using Minitab, with the grain cleaning rate and the total entrained loss rate as the response values, the optimal parameter combination that affected the operation quality of separating and cleaning machine for Chinese milk vetch combined harvest material was obtained. The prototype field validation test showed that, when the material layer adjustment thickness was 16.8 mm, the screening device vibration amplitude was 35 mm, and the air volume adjustment handle gear of the impurity-absorbing duct was 5, after the operation of separating and cleaning machine for Chinese milk

收稿日期:2023-07-10　修回日期:2023-08-28
基金项目:中国农业科学院所级基本科研业务费专项(S202310)、国家绿肥产业技术体系建设专项资金项目(CARS-22)和中国农业科学院主要粮经作物初加工装备创新团队专项(31-NIAM-09)
作者简介:游兆延(1988—),男,助理研究员,主要从事绿肥生产机械装备研究,E-mail:17366350354@163.com

vetch combine harvest material, the average grain cleaning rate was 98.07%, and the total entrained loss rate was 2.96%, the experimental results met the design requirements of operation machine.

Key words: Chinese milk vetch; separating and cleaning machine; combine harvest material; simulation; experiment

0 引言

紫云英是我国南方稻田主要的冬季绿肥作物,也是一种优质的豆科牧草和蜜源作物[1-2],种植紫云英对于增加生物有机肥源,减少温室气体排放,提高化肥利用率和促进农业绿色发展都有着重要作用[3-5]。紫云英收获期抗倒伏性、成熟度一致性等性状特征一般较差[6-7],目前收获方式主要借用稻麦联合收获机,配合喷施化学药剂方法进行收获[8-9],由于缺乏针对紫云英联合收获物料专用的分离清选结构和运动参数研究,联合收获机种箱内收获的紫云英物料具有组分构成复杂及其小差异混杂特性,收获的紫云英籽粒根据后续用途还需进行初清或精选等操作。

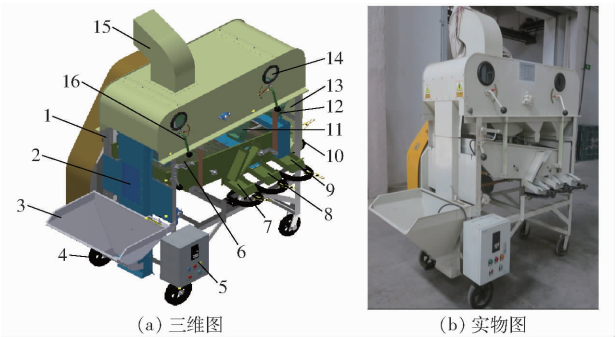
目前我国紫云英联合收获物料采用谷物分离清选机进行分离清选作业时,由于物料各组分质量差异性小,谷物分离清选机对紫云英联合收获物料的适应性较差,极易造成紫云英籽粒的夹带损失,因此紫云英联合收获物料分离清选环节仍然较多采用人工扬场与手动筛分的组合作业形式,但是人工扬场与手动筛分组合方式劳动强度大、作业效率低,严重制约了我国紫云英产业的持续发展。因此,有必要对紫云英联合收获物料分离清选机理及配套装备做进一步研究,以实现紫云英联合收获物料机械化高效分离清选。

目前,常见的谷物分离清选方式有风筛式清选和气流式清选两种类型[10-12]。近年来,国内相关学者针对油菜、玉米、胡麻、花生等作物研制了多种分离清选装备,进行了作业性能试验研究[13-16],但尚无紫云英联合收获物料分离清选装备的研究报道。相关研究表明,在紫云英联合收获物料气流分离清选过程中,能够将物料各组分中差异性较大的果荚、茎秆、碎土块与紫云英籽粒实现有效分离,但与籽粒悬浮速度差异较小的果荚壳、轻质杂物易与籽粒混杂,仅通过控制清选气流速度来调节分离清选效果容易造成紫云英籽粒夹带损失率较大。因此,为进一步提高紫云英联合收获物料分离清选效果与机械化作业水平,本文提出“先筛分、再气流清”的作业模式,设计紫云英联合收获物料分离清选机,以期达到对紫云英联合收获物料不同组分的分级式分离清选。

1 工作过程与关键参数

1.1 整机结构与工作过程

紫云英联合收获物料分离清选机主要由机架、喂料斗、振动变频控制箱、前吸风道、风机、筛分装置、偏心驱振装置、风量调节机构、中间沉积室、后杂余收集装置、吸杂管道、落种管道、出风管道和行走轮等组成,其结构如图 1 所示,整机主要技术参数如表 1 所示。工作时喂料斗中紫云英联合收获物料混合物,在吸杂风机气流作用下由吸风道被提升,由于重杂的临界速度大于气流速度,故不能被提升,通过吸风道进风口后落至地面上,其余的物料继续往上提升后落入清选装置上,筛选装置在偏心机构带动下做往复运动,筛分过程时落到筛选装置上筛筛面的种子其厚度或者宽度小于上筛筛孔尺寸的通过上筛落入到筛选装置下筛上,大于清筛装置上筛筛孔尺寸的大杂质从筛面滑下,经大杂排杂槽排出。落到下筛上的种子和杂质,其尺寸小于下筛筛孔尺寸的,通过下筛面落到筛分装置底部从小杂排杂槽排出,其余的种子则从下筛筛面上滑出,从种子出口排出,同时从后吸风道进入的气流再次对种子进行清选,把虫蛀或不成熟种子吸入后沉积室,其中较重的经铰链活门打开后由虫蛀和不成熟种子排杂槽排出,轻杂质进入中间沉积室,从大杂排杂槽排出,最轻杂质随气流经风口由出风口排出至除尘布袋。



(a) 三维图 (b) 实物图

图 1 紫云英联合收获物料分离清选机结构图

Fig. 1 Structure diagrams of separating and cleaning machine for Chinese milk vetch combined harvest material

1. 机架 2. 前吸风道 3. 喂料斗 4. 行走轮 5. 振动变频控制箱 6. 筛分装置 7. 大杂排杂槽 8. 小杂排杂槽 9. 虫蛀和不成熟种子排杂槽 10. 落种管道 11. 中间沉积室 12. 后杂余集料装置 13. 吸杂管道 14. 观察镜 15 出风管道 16. 风量调节机构

表 1　紫云英联合收获物料分离清选机主要技术参数

Tab.1　Key technical parameters of separating and cleaning machine for Chinese milk vetch combined harvest material

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 665×1 226×2 395
整机质量/kg	408
配套动力/kW	3
筛体振幅/mm	0～35
筛箱驱振频率/Hz	5～7
吸杂风机转速/(r·min^{-1})	0～1 200
生产效率/(kg·h^{-1})	650

1.2　工作参数

紫云英联合收获物料分离清选作业机工作时可以根据紫云英联合收获物料净度情况，对喂料斗喂入量、筛选装置驱振振幅、吸杂风机转速进行不同工况调节。

喂料斗喂入量的控制主要依靠喂料斗出口处料层厚度调节机构(图 2)，调节板通过限位滑槽的作用，实现 0～28 mm 不同厚度层物料的喂入；筛选装置驱振振幅通过更换不同的偏心驱振套来进行调节，振幅调节范围为 0～35 mm；紫云英联合收获物料分离清选作业机的吸杂风机采用吸入型通用离心式风机，通过正反转风量调节手柄能够实现对吸杂风道风门开度的增大与减少，依照风量调节装置设定，风量调节手柄转动 90°经历 0～6 挡位，实现对吸杂风道风量的完全开启、闭合或部分开启。

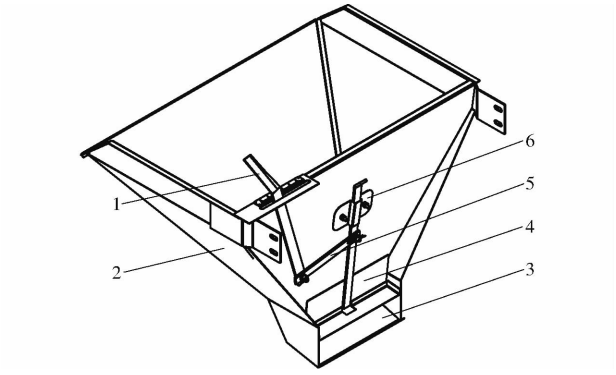


图 2　喂料斗出口处料层厚度调节机构示意图

Fig.2　Schematic of feeding hopper outlet material layer thickness adjustment mechanism

1. 手柄　2. 喂料斗侧板　3. 落料板　4. 调节板　5. 连杆　6. 限位滑槽

当紫云英联合收获物料喂料斗出口处喂入量较小、风量调节手柄挡位较高时，籽粒含杂率理论上较低，但清选损失率升高，影响了样机生产效率；当紫云英联合收获物料喂料斗出口处喂入量不断增大、风量调节手柄挡位较低时，一定程度上减少了籽粒的清选损失，但籽粒含杂率有所上升。因此，对紫云英联合收获物料进行分离清选时物料喂入量、物料在筛面的流动性、吸杂风机风量调节手柄挡位等皆是影响紫云英联合收获物料分离清选作业机工作性能的关键因素。

2　关键部件设计与仿真

2.1　筛分装置

筛分装置是紫云英联合收获物料分离清选机的重要组成部分。筛分装置主要包括敲击锤清筛机构、排刷清筛机构、传动皮带轮、偏心驱振套、飞轮、橡胶球清筛装置、托轮、轻杂集料装置、下筛、弹性吊板、大杂集料装置等，如图 3 所示。筛分装置在传动皮带轮、偏心驱振机构、连杆、弹性板等联合作用下，近似往复直线运动进行种子筛分作业。敲击锤清筛机构安装于橡胶球清筛装置上方，两个敲击锤通过四杆机构和机架相连，当筛面堵塞较严重时，敲击锤落下不断敲击橡胶球清筛装置筛片，敲击力度控制在使种子既不跳离筛面又不堵塞筛面即可；橡胶球清筛装置内的橡胶球在球格内随机弹性碰撞并不断撞击筛片，筛孔内滞留物料在橡胶球撞击力、筛片受迫振动等效冲击力、重力、惯性力、摩擦力、种子间作用力等作用下被弹出筛孔实现清筛；下筛下面是排刷清筛机构，由其曲轴机构带动做往复运动，使用时毛刷高筛面 1 mm 为宜。橡胶球清筛装置筛面倾角 3°～6°无级调节，下筛倾角 7.25°，振动频率 5～7 Hz。

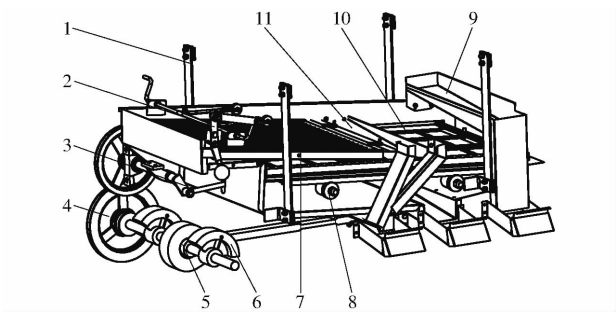


图 3　筛分装置结构示意图

Fig.3　Structural diagram of screening device

1. 弹性吊板　2. 敲击锤清筛机构　3. 排刷清筛机构　4. 传动皮带轮　5. 偏心驱振机构　6. 飞轮　7. 橡胶球清筛装置　8. 托轮　9. 轻杂集料装置　10. 下筛　11. 大杂集料装置

2.1.1　橡胶球清筛装置结构与作用机制

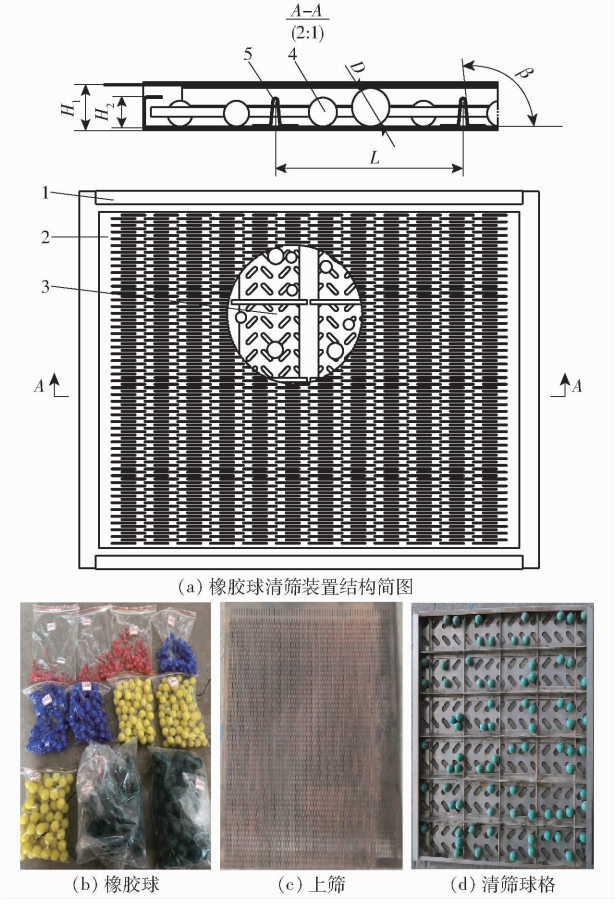
橡胶球清筛装置主要由筛框、上筛、落料板、橡胶球、橡胶球挡板组成，上筛可抽嵌安装在筛框内，透料板和橡胶球挡板组成的球架内分成若干个 U 形凹槽，U 形凹槽和上筛片形成多个近乎封闭的球格，直径不一的橡胶球随机放置在每个球格内，橡胶球数量为 2～4，如图 4 所示。上筛为长条孔筛，尺寸 36 mm×1.5 mm，橡胶球材质为丁晴橡胶，直径 D

为 8 ~24 mm,球格高度 H_1 为 29 mm,橡胶球挡板间距 L 为 120 mm,挡板高度 18 mm,挡板锥面倾角为 95°,落料板透料孔为长条孔,尺寸 21 mm ×6 mm,为了使橡胶球在筛面振动时不脱离筛框,橡胶球清筛装置筛框横挡高度 H_2 需满足

$$H_2 \geqslant H_1 - 0.7D_{min} \tag{1}$$

式中 D_{min}——选用的最小橡胶球直径,mm

经计算取整,H_2 为 24 mm。



(a) 橡胶球清筛装置结构简图

(b) 橡胶球 (c) 上筛 (d) 清筛球格

图 4 橡胶球清筛装置

Fig. 4 Rubber ball sieve-cleaning device

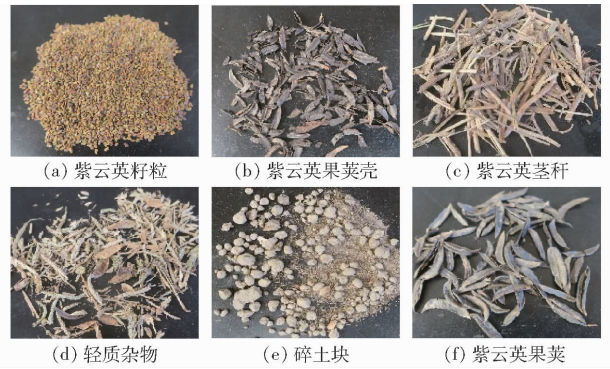
1. 筛框 2. 上筛 3. 落料板 4. 橡胶球 5. 橡胶球挡板

橡胶球激振力的作用表现为:橡胶球对筛孔内种子的直接撞击作用力和筛片受迫振动等效冲击力对种子的间接作用力。前期试验表明,橡胶球撞击频率为 10 ~20 Hz、撞击点位置在一定范围内随机变化,橡胶球激振力在筛面的作用范围为 1 ~2 倍橡胶球直径,高频跳跃的橡胶球撞击点大概率靠近筛面卡种位置,橡胶球直接撞击作用力及筛片受迫振动等效冲击力均可有效作用于筛孔滞留的种子,为种子提供一定能量从而克服筛孔对种子的束缚产生清筛效果[17]。

2.1.2 筛分过程仿真模拟

为合理确定筛分装置作业过程中驱振振幅、物料层厚度参数取值范围,结合离散元仿真分析与实际试验方法,对筛分装置驱振振幅、物料层厚度参数选取后所对应的作业效果进行探讨分析。应用 EDEM 2020 数值模拟不同振幅下紫云英联合收获物料在筛分装置装置作用下的运移状态与迁移规律,观察物料层在给料盘上的形态分布。

紫云英联合收获物料(图 5)主要包括 6 种组分:紫云英籽粒、紫云英果荚壳、不同长度紫云英茎秆、轻质杂物和少量碎土块,同时,当脱料效果不充分时其物料中也会混杂有少量未脱粒的紫云英果荚。



(a) 紫云英籽粒 (b) 紫云英果荚壳 (c) 紫云英茎秆

(d) 轻质杂物 (e) 碎土块 (f) 紫云英果荚

图 5 紫云英联合收获物料不同组分

Fig. 5 Different components of Chinese milk vetch combine harvest material

EDEM 中紫云英联合收获物料属性参数如表 2 所示。各组分之间的恢复系数设定:紫云英籽粒与籽粒之间为 0.2,籽粒与茎秆之间为 0.2,籽粒与果荚壳之间为 0.2,籽粒与果荚之间为 0.2,籽粒与轻质杂物之间为 0.2,籽粒与碎土块之间为 0.3,籽粒与筛分装置筛面之间为 0.5;各脱粒物料之间静摩擦因数设定:紫云英籽粒与籽粒之间为 1,籽粒与茎秆之间为 0.8,籽粒与果荚壳之间为 0.8,籽粒与果荚之间为 0.8,籽粒与轻质杂物之间为 0.2,籽粒与碎土块之间为 0.58,籽粒与筛分装置筛面之间为 0.58;各物料之间动摩擦因数均设为 0.01。

表 2 EDEM 中紫云英联合收获物料属性参数

Tab. 2 Chinese milk vetch combine harvest material property parameters in EDEM

材料	泊松比	剪切模量/MPa	密度/(kg·m^{-3})
籽粒	0.25	10	728
茎秆	0.20	100	150
果荚壳	0.20	15	100
果荚	0.20	15	828
轻质杂物	0.25	100	50
碎土块	0.20	33	2 300
筛面	0.30	700	7 800

将紫云英联合收获物料分离清选机的喂入量设为 0.18 kg/s,根据紫云英混合物料草谷比和各物料

占比情况，经换算物料工厂在喂料口处产生籽粒 15 000 个/s，茎秆 40 个/s，果荚 15 个/s，果荚壳 30 个/s，轻质杂物 40 个/s，碎土块 20 个/s，仿真时间步长 1×10^{-5} s，时间间隔 0.01 s，共仿真 2.5 s。图 6 为仿真结束时筛分装置不同振幅所对应的紫云英联合收获物料在筛面上的分布形态。由图 6 可知，当筛分装置振幅为 5 mm 时，驱振装置对筛面上紫云英联合收获物料作用的输送速度较小，分层效果不明显，大部分物料全部滞留在筛面一端，影响机具作业效率。当筛分装置振幅在 15 ~ 35 mm 时，紫云英联合收获物料单位时间内输送的物料量稳定均匀，且随着驱振振幅的增加紫云英联合收获物料分层效果与离散程度不断提升。

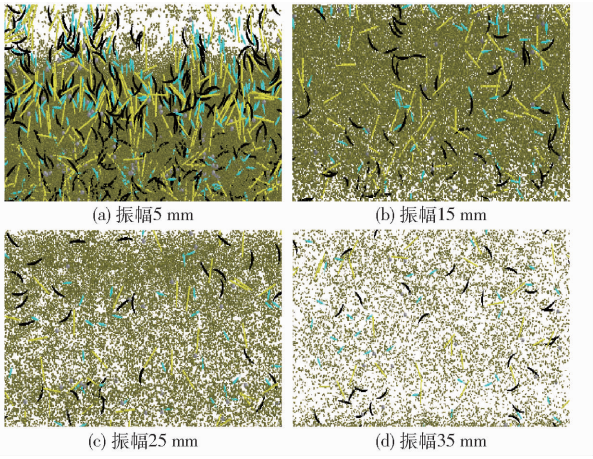


图 6　筛分装置不同振幅作用下物料分布形态

Fig. 6　Material distribution patterns with different amplitudes of screening device

仿真试验中，筛分装置驱振振幅设为 5 ~ 35 mm 时，喂料斗出口处测定的料层厚度基本保持在 11.2 ~ 27.6 mm 之间，筛分装置在不同振幅时筛面上紫云英联合收获物料运移状态如图 7 所示。仿真结果表明，出口处料层厚度设为 11.2 mm 时，紫云英联合收获物料在筛面呈现出从左至右由多到少的整体变化趋势，只有近似圆球状的碎土块顺利地从筛面滑下，其余的物料在筛面的离散度较差；料层厚度稳定在 16.8 ~ 22.2 mm 时，不断提高筛分装置振幅时，物料层离散度逐步增加且分散均匀；由图 7d 可知，筛分装置振幅过高时会引起物料颗粒与壁面接触碰撞作用过大产生飞溅与反弹，引起籽粒损失。因此，为确保紫云英联合收获物料作为散体颗粒流均能顺畅均匀分布在筛分装置上且不造成籽粒损失，物料层厚度调节板应调至 16.8 ~ 22.2 mm 范围内。

2.2　集杂除尘装置

2.2.1　结构组成

集杂除尘装置组成图如图 8 所示，主要由吸杂风机、吸风管道、观察镜、落种管道、风量调节板、出

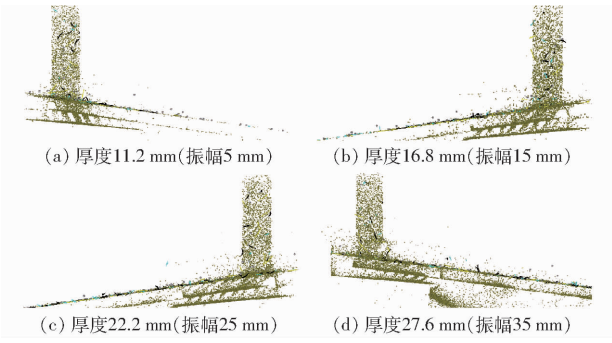


图 7　不同料层厚度时物料运移状态

Fig. 7　Material migration states with different material layer thickness

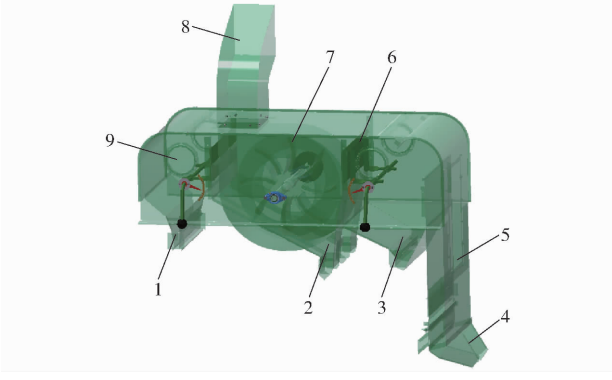


图 8　集杂除尘装置组成图

Fig. 8　Composition diagram of impurity-collection and dust-removal device

1. 前杂余集料装置　2. 中间沉积室　3. 后杂余集料装置　4. 落种管道　5. 吸杂管道　6. 风量调节板　7. 吸杂风机　8. 出风管道　9. 观察镜

风管道、前杂余集料装置、中间沉积室、后杂余集料装置等部件组成。其中吸风管道风量由风量调节板调节，风量调节板的提升和下降依靠调节手柄通过连杆机构来实现，当吸风管道调节手柄顺时针转动时，风道横截面(600 mm × 165 mm)开口被风量调节板逐步遮挡而减小。集杂除尘装置作业时，从筛分装置下筛面流动的物料首先进入吸风管道，物料中筛选后的优良种子受重力作用从落种管道中排出，物料中最轻的杂物大部分随气流经出风管道排出至除尘布袋，临界速度小于气流速度的病弱、虫蛀种子或者短茎秆被吸杂风机产生的气流吸走，带入后杂余集料装置，较重的杂质落入后杂余集料装置底部，而一部分轻杂质又随着气流进入中间沉积室或前杂余集料装置，落入前杂余集料装置、中间沉积室、后杂余集料装置的杂质，经一段时间后，用手搬动铰链活门，便可把杂质排入相应的排杂槽中。

2.2.2　吸杂风机转速确定

紫云英联合收获物料分离清选机的吸杂风机选用吸入型通用离心式风机，参照粮油、牧草等种子悬浮速度测试方法和标准，分离清选系统内气流工作

速度应不高于作物籽粒最大悬浮速度 v_{fmax}[18-20]。应用农业农村部南方种子加工工程技术中心自主研发的种子悬浮速度试验装置对紫云英籽粒悬浮速度进行测量，悬浮速度测量现场如图 9 所示，选用 YZ-2000A 型智能风速风量仪对紫云英籽粒悬浮速度进行测量，测量结果表明，紫云英籽粒悬浮速度为 4.94 ~ 8.91 m/s。

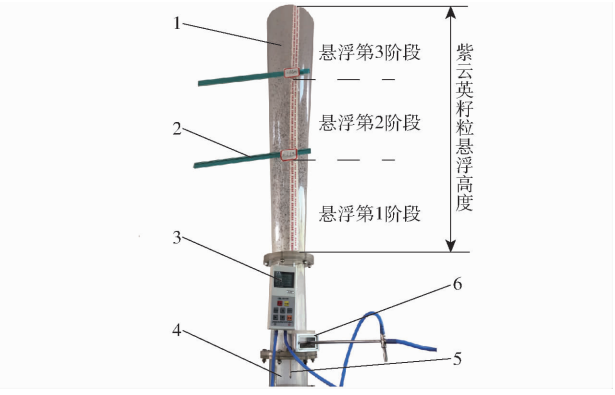


图 9 悬浮速度测量现场

Fig. 9 Suspension velocity measuring site

1. 锥型观察管 2. 悬浮标尺 3. 风速风量仪 4. 稳压管 5. L 形皮托管 6. 皮托管固定插块

吸杂风机风压全压计算公式为

$$h_q = h_j + h_d \tag{2}$$

其中

$$h_j = \frac{\xi l_0 \rho v_{fmax}^2}{2rg} + \frac{\psi \rho v_{fmax}^2}{2g} + \frac{\lambda \rho v_{fmax}^2}{2g} \tag{3}$$

$$h_d = \frac{\rho v_{fmax}^2}{2g} \tag{4}$$

式中 h_q——吸杂风机风压全压，Pa

h_j——静压，克服空气在流动中的阻力，Pa

h_d——动压，Pa

ξ——气流摩擦因数，取 0.35[20]

l_0——风管长度，取 0.55 m

v_{fmax}——紫云英籽粒最大悬浮速度，取 8.91 m/s

ψ——管道对气流的阻力系数，取 0.35[21]

λ——风机进出口对气流的阻力系数，取 0.60[21]

ρ——空气密度，取 1.2 kg/m^3

r——风管水力半径，取 0.038 m[21]

g——重力加速度，取 9.80 m/s^2

由式(2) ~ (4)计算得吸杂风机风压全压 h_q 为 28.24 Pa。

吸杂风机叶轮外径一般设计在 250 ~ 400 mm 之间，设计中风机叶轮外径 D_y 取 310 mm，吸杂风机转速计算式为

$$n = \frac{60}{\pi D_y}\sqrt{\frac{h_q g}{\varepsilon \rho}} \tag{5}$$

式中 ε——计算系数，取 0.40

由式(5)计算得 n 为 1 480 r/min，则设计吸杂风机最大转速为 1 500 r/min。

2.2.3 吸杂管道风量调节挡位范围确定

结合 DEM-CFD 气固耦合理论方法确定吸杂管道风量调节挡位范围[22-23]。集杂除尘装置仿真模拟作业过程中，EDEM 软件实时获取颗粒物料的位置与接触信息，并将获取的信息传递到 Fluent 15.0 软件中，软件根据获取的信息模拟计算物料对流场的影响情况，再将所获得的流场信息反馈到 EDEM 软件中，模拟流场对物料体的影响，依次循环从而达到双向气固耦合效果。仿真过程中，设置 Fluent 时间步长为 5×10^{-4} s，吸杂风机叶轮旋转过程采用动网格模型，利用 SIMPLE 耦合算法对集杂除尘装置内部速度场和压力场进行耦合求解，动量项采用二阶迎风格式，湍流动能和湍流耗散率采用一阶迎风格式，残差收敛精度为 1×10^{-4}。耦合计算中，因为固相体积分数小于 8%，属于稀相气力输送系统，因此选择欧拉-拉格朗日耦合模型，集杂除尘装置气固耦合清选仿真模型如图 10 所示。

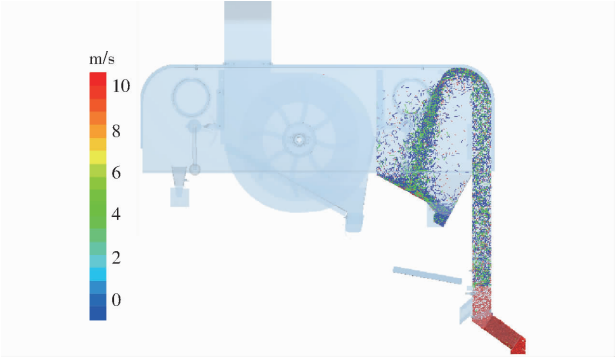


图 10 集杂除尘装置气固耦合清选仿真模型

Fig. 10 Gas-solid coupling cleaning simulation model of impurity-collection and dust-removal device

根据吸杂管道风量调节挡位范围(0 ~ 6)，对集杂除尘装置气固耦合清选仿真进行模拟，观察紫云英联合收获物料筛分后混合物在气流清选过程中的运移规律，筛选出适宜的吸杂管道风量调节挡位区间。数值模拟试验过程中发现，当风量调节挡位区间低于 2 挡位时，集杂除尘装置内部气流过小，大部分紫云英茎秆、果荚壳等不能被吸出，籽粒含杂率过高；当风量调节挡位区间高于 5 挡位时，集杂除尘装置内部气流过大，一部分籽粒也被吸入到杂余集料装置，籽粒损失率增大，致使作业效果不理想，因此，后续紫云英联合收获物料分离清选工作参数优化中，吸杂管道风量调节挡位应在 2 ~ 5 挡范围内。

在气流流场收敛稳定的情况下进行 DEM－CFD 耦合，根据前期筛分装置 EDEM 仿真后处理分析可知，在 2.08 s 时，下筛流出的籽粒和杂余混合物流量基本稳定，接近集杂除尘装置作业工况，此时，筛分后的物料混合物在吸杂风机旋转产生的气流抽吸负压作用下开始分离，饱满的紫云籽粒受自身重力作用落入紫云英籽粒接料盒内，与此同时短茎秆及轻质杂物由吸杂管道开始进入后杂余集料装置，在 2.21 ~ 2.60 s 之间时，临界速度小于气流速度的大量短茎秆或轻质杂物受吸杂风机旋转产生气流场的扰动在后杂余集料装置内开始做翻转运动，在此过程中杂余物料主要受到重力、压强梯度力、曳力、自旋升力以及与料斗壁面的碰撞力，并在后杂余集料装置下端沉积短茎秆、轻质杂物及极少部分紫云英籽粒，在 2.60 s 以后，进入后杂余集料装置的物料流量基本维持稳定，在高速流动气流的带动下能够实现筛分后物料中不同物料组分在各区域内的分离清选作业。

3　分离清选机性能试验

3.1　试验材料

2023 年 5 月，在芜湖市南陵县青弋江种业有限公司种子包装车间内进行了紫云英联合收获物料分离清选机现场作业性能试验（图 11）。试验材料选用“皖紫早花”紫云英联合收获物料（主要成分为紫云英籽粒、果荚、轻质杂物、短茎秆等），紫云英收获机械选用久保田 CX100Q－S 型履带收获机，收获期紫云英黑荚率达 76%，每株有伸长分枝 4 ~ 5 个，果荚数 18 ~ 31 个，每荚含种子 4 ~ 6 粒，紫云英联合收获物料含水率为 10.3%。试验前对清选分离机进行空转运行检查，并对物料层厚度调节板（0 ~ 28 mm）、筛分装置驱振振幅（0 ~ 35 mm）和吸杂管道风量调节挡位（0 ~ 6）进行调试。



图 11　分离清选机试验现场

Fig. 11　Performance test of separating and cleaning machine

3.2　试验方法

按照紫云英联合收获物料分离清选机预期实现的设计功能，结合 GB/T 5262—2008《农业机械试验条件测定方法的一般规定》中的试验方法进行作业性能试验，作业机功率为 3 kW，待空机调试正常后在喂料斗内加入紫云英联合收获物料。根据前期仿真试验和实际操作经验，当物料层调节厚度为 16.8 ~ 22.2 mm、筛分装置驱振振幅为 15 ~ 35 mm、吸杂管道风量调节手柄挡位为 3 ~ 5 时，作业机具有较强的物料分离清选适应性，因此，在此工作参数下测定籽粒清洁率和夹带总损失率。

在紫云英联合收获物料分离清选机作业过程中，存在很多影响作业质量的非线性因素，采用 $L_9(3^4)$ 正交试验法[24-25]，对影响籽粒清洁率、夹带总损失率的主要参数组合完成优化，试验因素水平见表 3。分别计算籽粒清洁率、夹带总损失率评价分离清选机作业性能，每组试验重复 3 次取平均值。其中，籽粒清洁率、夹带总损失率计算公式为[26-27]

$$Y_1 = \frac{m_1}{M_{B1}} \times 100\% \tag{6}$$

$$Y_2 = \frac{m_2 + m_3 + m_4 + m_5}{M_{B2} + M_{B3} + M_{B4} + M_{B5}} \times 100\% \tag{7}$$

式中　Y_1——籽粒清洁率，%

Y_2——夹带总损失率，%

m_1——紫云英籽粒出种口接料袋内籽粒质量，g

M_{B1}——紫云英籽粒出种口接料袋内物料质量，g

m_2——大杂排杂槽出料口接料袋内籽粒质量，g

M_{B2}——大杂排杂槽出料口接料袋内物料质量，g

m_3——小杂排杂槽出料口接料袋内籽粒质量，g

M_{B3}——小杂排杂槽出料口接料袋内物料质量，g

m_4——虫蛀和不成熟种子排杂槽出料口接料袋内籽粒质量，g

M_{B4}——虫蛀和不成熟种子排杂槽出料口接料袋内物料质量，g

m_5——集杂除尘装置除尘布袋内籽粒质量，g

M_{B5}——集杂除尘装置除尘布袋内物料质量，g

表 3　试验因素水平

Tab. 3　Experimental factors and levels

水平	因素		
	物料层调节厚度 x_1/mm	筛分装置驱振振幅 x_2/mm	风量调节手柄挡位 x_3
1	16.8	15	3
2	19.5	25	4
3	22.2	35	5

3.3 试验结果与分析

运用 Minitab 17 对上述正交试验进行方案设计，结果如表 4 所示，A、B、C 分别为 x_1、x_2、x_3 水平值。由表 4 可知，对于不同的评价指标，影响因素的显著性不同，当评价指标以籽粒清洁率 Y_1 优先时，影响 Y_1 的主次顺序为 B、A、C，选择较优的水平组合为 $A_1B_3C_3$；评价指标以夹带总损失率 Y_2 优先时，影响 Y_2 的主次顺序为 C、A、B，选择较优的水平组合为 $A_1B_2C_1$。

表 4 正交试验设计与结果

Tab. 4 Orthogonal test design and results

试验号		因素			籽粒清洁率 Y_1/%	夹带总损失率 Y_2/%
		A	B	C		
1		1	1	1	90.44	1.32
2		1	2	3	95.86	5.16
3		1	3	2	98.47	4.09
4		2	1	2	89.07	4.65
5		2	2	1	93.28	1.59
6		2	3	3	98.12	5.38
7		3	1	3	88.33	6.96
8		3	2	2	94.68	5.01
9		3	3	1	97.30	3.74
籽粒清洁率 Y_1	k_1	94.92	89.28	93.67	$B>A>C$	
	k_2	93.49	94.61	94.07		
	k_3	93.44	97.96	94.10		
	R	1.48	8.68	0.43		
夹带总损失率 Y_2	k_1	3.52	4.31	2.22	$C>A>B$	
	k_2	3.87	3.92	4.58		
	k_3	5.24	4.40	5.83		
	R	1.72	0.48	3.61		

方差分析结果见表 5。由 Y_1 的方差分析可以看出，筛分装置驱振振幅对籽粒清洁率 Y_1 影响最显著，物料层调节厚度影响次之，吸杂风机风量调节手柄挡位对籽粒清洁率 Y_1 影响最小；由 Y_2 的方差分析可以看出，吸杂风机风量调节手柄挡位对夹带总损失率 Y_2 影响最显著，物料层调节厚度影响次之，筛分装置驱振振幅对夹带总损失率 Y_2 影响最小，与极差分析结果一致。综合极差分析和方差分析结果，根据不同的评价指标，选择最优因素水平组合不同。Y_1 优先时，选取 $A_1B_3C_3$ 组合最优（未出现在正交试验方案中），增加试验方案 $A_1B_3C_3$，Y_1 为 98.16%，Y_2 为 3.03%；Y_2 优先时，选取 $A_1B_2C_1$ 组合最优（未出现在正交试验方案中），另外增加试验 $A_1B_2C_1$，Y_1 为 92.94%，Y_2 为 1.87%。比较不同评价指标优先时最佳组合方案，根据紫云英种业公司实际选种最佳需求，选取籽粒清洁率相对较优的因素水平组合 $A_1B_3C_3$，即物料层调节厚度 x_1 为 16.8 mm，筛分装置驱振振幅 x_2 为 35 mm，吸杂管道风量调节手柄在挡位 5。

表 5 方差分析

Tab. 5 Analysis of variance

评价指标	变异来源	平方和	自由度	均方和	F	P
籽粒清洁率 Y_1	校正模型	119.66	6	19.94	22.15	
	A	4.27	2	2.13	2.46	*
	B	115.04	2	57.52	66.25	**
	C	0.35	2	0.17	0.20	*
夹带总损失率 Y_2	校正模型	25.54	6	4.26	15.10	
	A	4.91	2	2.46	8.71	*
	B	0.39	2	0.20	0.70	*
	C	20.24	2	10.12	35.88	**

注：** 为极显著（$P<0.01$），* 为显著（$P<0.05$）。

3.4 试验验证

为了验证上述正交性能试验最佳因素水平组合的准确性，于 2023 年 6 月在芜湖市南陵县青弋江种业有限公司种子贮藏厂房内进行试验，试验方法与 3.2 节一致，试验过程中，紫云英联合收获物料分离清选机工作参数设置如下：物料层调节厚度 x_1 为 16.8 mm、筛分装置驱振振幅 x_2 为 35 mm、吸杂管道风量调节手柄挡位 x_3 在挡位 5，进行 3 次重复性试验，场地试验结果分析计算可得，籽粒清洁率均值为 98.07%，夹带总损失率均值为 2.96%。图 12 为紫云英联合收获物料分离清选后在紫云英籽粒接料袋、各排杂槽出料口接料袋以及集杂除尘装置布袋内取样的物料，试验过程中发现，喂料装置、筛分装置和集杂除尘装置工作参数相对适宜时，样机运行状态稳定，能够实现对紫云英联合收获不同组分物料的高效分离清选作业，符合预设的作业工艺流程。

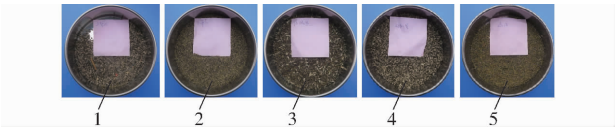


图 12 紫云英联合收获物料分离清选作业效果

Fig. 12 Separation and cleaning operation effect of Chinese milk vetch combine harvest material

1. 上筛分离出的大杂、果荚与较长茎秆 2. 下筛分离出的碎土、碎小果荚壳 3. 由集杂除尘装置清选出的虫蛀和不成熟种子以及短茎秆 4. 除尘布袋内的轻质杂物 5. 由落种管道排出的紫云英籽粒

4 结论

（1）针对紫云英联合收获物料各组分质量差异性小且易混杂特点，提出“先筛分、再气流选”的作业模式，对喂料口出口处料层厚度调节机构、筛分装置、集杂除尘装置等关键部件进行了设计选型与参数计算，基于 DEM - CFD 耦合数值模拟方法，确定了喂料斗出口处物料层调节厚度、筛分装置驱振振

幅和吸杂管道风量调节手柄挡位等主要影响因素合理的取值范围，设计了紫云英联合收获物料专用分离清选作业机。

（2）分离清选性能试验结果表明，物料层调节厚度 A、筛分装置驱振振幅 B、吸杂管道风量调节手柄挡位 C 对于不同评价指标的影响显著性不同。以籽粒清洁率 Y_1 为评价指标，影响主次因素为 B、A、C，最佳因素水平组合是 $A_1B_3C_3$；以夹带总损失率 Y_2 为评价指标，影响主次因素为 C、A、B，最佳因素水平组合是 $A_1B_2C_1$；比较不同最佳组合方案，按照种子生产企业实际选种最佳需求，选取籽粒清洁率相对更优的因素水平组合 $A_1B_3C_3$，即物料层调节厚度 x_1 为 16.8 mm、筛分装置驱振振幅 x_2 为 35 mm、吸杂管道风量调节手柄在挡位 5 时，验证试验表明，籽粒清洁率均值为 98.07%，夹带总损失率均值为 2.96%。

（3）本文设计的紫云英联合收获物料分离清选机试验结果满足设计要求，能够实现对紫云英联合收获不同组分物料的分离清选作业。

参 考 文 献

[1] 游兆延，张冲，高学梅，等. 紫云英绿肥盛花期埋切翻压组合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(3)：78－86.
YOU Zhaoyan, ZHANG Chong, GAO Xuemei, et al. Design and experiment of incisal-burying and ploughing combined machine for *Astragalus smicus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 78－86. (in Chinese)

[2] TOMA Y, SARI N N, AKAMATSU K, et al. Effects of green manure application and prolonging mid-season drainage on greenhouse gas emission from paddy fields in Ehime, southwestern Japan[J]. Agriculture, 2019, 9: 29.

[3] 李忠义，韦彩会，何铁光，等. 基于学科知识图谱的紫云英研究态势分析[J]. 中国农机化学报，2020，41(7)：207－214.
LI Zhongyi, WEI Caihui, HE Tieguang, et al. Research status on Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus*) based on the discipline knowledge map[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(7): 207－214. (in Chinese)

[4] 游兆延，高雅，吴惠昌，等. 2BFLA－200 型多品种绿肥智能混播机研制与试验[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2021，2(2)：26－34.
YOU Zhaoyan, GAO Ya, WU Huichang, et al. Development and test of 2BFLA－200 type multi-variety manure intelligent mixer[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization (in Chinese and English), 2021, 2(2): 26－34. (in Chinese)

[5] 游兆延，吴惠昌，高学梅，等. GFY－200 型经济绿肥粉碎翻压复式机设计与试验[J]. 中国农机化学报，2021，42(1)：116－121.
YOU Zhaoyan, WU Huichang, GAO Xuemei, et al. Design and experiment of GFY－200 type crushing and overturning combined machine for economic green manure[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(1): 116－121. (in Chinese)

[6] 游兆延，颜建春，吴惠昌，等. 稻田绿肥紫云英种子联合收获机设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(增刊 2)：1－10.
YOU Zhaoyan, YAN Jianchun, WU Huichang, et al. Design and experiment of seed combine harvester for Chinese milk vetch green manure in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2): 1－10. (in Chinese)

[7] YOU Z Y, GAO X M, YAN J C, et al. Design and multi-parameter optimization of a combined Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) seed harvester[J]. Agriculture, 2022, 12: 2074.

[8] 廖育林，鲁艳红，聂军，等. 水稻联合收割机收获紫云英种子的应用效果研究[J]. 湖南农业科学，2014(18)：12－14.
LIAO Yulin, LU Yanhong, NIE Jun, et al. Effects of rice combine harvester application to harvesting Chinese milk vetch seed [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2014(18): 12－14. (in Chinese)

[9] 游兆延，高学梅，吴惠昌，等. 紫云英种子收获期机收损失率测算[J]. 种子，2019，38(7)：140－143.
YOU Zhaoyan, GAO Xuemei, WU Huichang, et al. Calculation of the loss rate of machine-harvested during Chinese milk vetch seed harvesting[J]. Seed, 2019, 38(7): 140－143. (in Chinese)

[10] 徐立章，李洋，李耀明，等. 谷物联合收获机清选技术与装置研究进展[J]. 农业机械学报，2019，50(10)：1－16.
XU Lizhang, LI Yang, LI Yaoming, et al. Research process on cleaning technology and device of grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 1－16. (in Chinese)

[11] 蒋庆，王儒敬. 稻麦联合收获机清选智能调控模型仿真与试验[J]. 系统仿真学报，2022，34(11)：2485－2496.
JIANG Qing, WANG Rujing. Simulation and experiment of an intelligent control model for the cleaning of a rice-wheat combine harvester[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(11): 2485－2496. (in Chinese)

[12] 郭红星，金诚谦，印祥，等. 谷物联合收获机清选系统研究现状[J]. 中国农机化学报，2020，41(6)：26－36.
GUO Hongxing, JIN Chengqian, YIN Xiang, et al. Research status of the cleaning system of the corn combine harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(6): 26－36. (in Chinese)

[13] 王立军，马杨，冯鑫，等. 玉米籽粒收获机分段式振动筛清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(9)：89－99.
WANG Lijun, MA Yang, FENG Xin, et al. Design and experiment of segmented vibrating screen in cleaning device of maize grain harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 89－99. (in Chinese)

[14] 张敏，金诚谦，梁苏宁，等. 风筛选式油菜联合收割机清选机构参数优化与试验[J]. 农业工程学报，2015，31(24)：8－15.
ZHANG Min, JIN Chengqian, LIANG Suning, et al. Parameter optimization and experiment on air-screen cleaning device of

rapeseed combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(24):8 - 15. (in Chinese)

[15] 戴飞,赵武云,宋学锋,等. 胡麻脱粒物料分离清选作业机参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(7):100 - 108.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, SONG Xuefeng, et al. Parameters optimization and experiment on separating and cleaning machine for flax threshing material[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(7):100 - 108. (in Chinese)

[16] 李豪杰,王青华,李军浩,等. 半喂入花生联合收获机去石清选装置设计与试验[J]. 中国农机化学报,2021,42(10):29 - 33, 58.
LI Haojie, WANG Qinghua, LI Junhao, et al. Design and experiment of stone cleaning devices of half-feeding peanut combined harvesters[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021,42(10):29 - 33, 58. (in Chinese)

[17] 李永磊,徐泽昕,万里鹏程,等. 批次式种子清选机橡胶球清筛装置激振力模拟分析[J]. 农业工程学报,2021,37(20):23 - 33.
LI Yonglei, XU Zexin, WAN Lipengcheng, et al. Impulsive force simulation of the rubber ball sieve-cleaning device for batch seed cleaners[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(20):23 - 33. (in Chinese)

[18] 侯华铭,崔清亮,郭玉明,等. 气吹式粮油作物脱出物清选悬浮速度测量装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(16):43 - 49.
HOU Huaming, CUI Qingliang, GUO Yuming, et al. Design and test of air-sweeping suspension velocity testing device for cleaning threshed materials of grain and oil crops[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(16):43 - 49. (in Chinese)

[19] 王维,王亚妮,田智辉,等. 物料悬浮速度测试台的设计与试验研究[J]. 中国农机化学报,2016,37(6):44 - 46, 78.
WANG Wei, WANG Yani, TIAN Zhihui, et al. Research on design and experimental of material suspension velocity test bench[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(6):44 - 46, 78. (in Chinese)

[20] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 牧草种子悬浮速度测定方法:JB/T 7290—2007[S]. 北京:中国机械工业出版社,2008.

[21] 刘正怀,郑一平,王志明,等. 微型稻麦联合收获机气流式清选装置研究[J]. 农业机械学报,2015,46(7):102 - 108.
LIU Zhenghuai, ZHENG Yiping, WANG Zhiming, et al. Design on air-flowing cleaning unit of micro rice-wheat combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7):102 - 108. (in Chinese)

[22] 郭柄江,马学东,赵磊,等. 基于 DEM - CFD 耦合的谷物多级风选模拟研究[J]. 中国农机化学报,2019,40(10):96 - 102.
GUO Bingjiang, MA Xuedong, ZHAO Lei, et al. Simulation research of grain multi-stage wind selection based on DEM - CFD coupling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(10):96 - 102. (in Chinese)

[23] 黄震宇,李腾,喻志成,等.蔬菜种子风力筛选机分离室气固两相流模拟与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(5):70 - 76.
HUANG Zhenyu, LI Teng, YU Zhicheng, et al. Simulation and experiment of gas-solid two-phase flows in separation chamber of air-screening machine for vegetable seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5):70 - 76. (in Chinese)

[24] 游兆延,高学梅,徐弘博,等. 基于 MAV 智能无人机绿肥撒播装置设计与试验[J]. 智能化农业装备学报(中英文),2020,1(1):60 - 67.
YOU Zhaoyan, GAO Xuemei, XU Hongbo, et al. Design and experiment of intelligent green manure spreading device based on MAV[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization (in Chinese and English), 2020, 1(1): 60 - 67. (in Chinese)

[25] 施印炎,陈满,汪小旦,等. 离心匀肥罩式水稻地表变量撒肥机设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(3):86 - 93,113.
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Design and experiment of variable-rate fertilizer spreader with centrifugal distribution cover for rice paddy surface fertilization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3):86 - 93, 113. (in Chinese)

[26] MIU P I, KUTZBACH H D. Modeling and simulation of grain threshing and separation in threshing units—Part Ⅰ[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(1): 96 - 104.

[27] GB/T 5262—2008 农业机械试验条件测定方法的一般规定[S]. 2008.