doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.011

辊搓圆筒筛式谷子清选装置设计与试验

李心平　孟亚娟　张家亮　耿令新　姬江涛
(河南科技大学农业装备工程学院,洛阳 471003)

摘要:为解决谷子初脱后因物料中残留谷码多、含水率高而导致清选含杂率和损失率较高的问题,设计了辊搓圆筒筛式谷子清选装置。该装置主要由谷码辊搓装置、圆筒筛装置、横流风机和离心风机等组成,实现了先脱谷码后清选的功能。选取离心风机转速及角度、横流风机转速、圆筒筛转速和谷码辊搓装置主动辊转速作为试验因素,籽粒含杂率和损失率作为试验指标进行了正交试验,试验表明:谷码辊搓装置主动辊转速 250 r/min、离心风机角度 3°、小圆筒筛转速 60 r/min、离心风机转速 700 r/min、中圆筒筛转速 60 r/min、大圆筒筛转速 70 r/min,横流风机转速 600 r/min 为该清选装置的最优组合。对该参数组合进行验证试验,并对该装置清选性能进行对比试验,结果表明,在最优组合条件下籽粒含杂率为 1.64%、总损失率为 0.86%,该装置籽粒含杂率与总损失率均低于传统型风机圆筒筛式和风机振动筛式清选装置。

关键词:谷子;清选装置;辊搓圆筒筛式
中图分类号:S226.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2018)10-0092-11

Design and Test of Cleaning Device for Roller Rubbing Cylinder Sieve of Millet

LI Xinping　MENG Yajuan　ZHANG Jialiang　GENG Lingxin　JI Jiangtao
(*College of Agricultural Equipment Engineering*, *Henan University of Science and Technology*, *Luoyang* 471003, *China*)

Abstract: In order to solve the problem of high impurity rate and loss rate caused by the residual grain codes and the high moisture content in the raw material of millet after the first stripping, a roll-twist cylinder screen type of millet cleaning device was designed. The device was mainly composed of spikelet roller rubbing device, cylinder screen device, cross flow fan and centrifugal fan, which realized the function of clearing millet code first and then cleaning it. The rotating speed and angle of centrifugal fan, speed of cross flow fan, rotational speed of cylinder screen as well as the rotational speed of spikelet roller rubbing device were selected as the test factors, the impurity rate and the loss rate were taken as the test indexes for the orthogonal test. Results of orthogonal test showed that the optimal combination of the cleaning device was the rotation speed of spikelet roller rubbing device as 250 r/min, the angle of centrifugal fan as 3°, the speed of small cylinder screen as 60 r/min, the speed of centrifugal fan as 700 r/min, the speed of medium cylinder screen as 60 r/min, the speed of large cylinder screen as 70 r/min, and the speed of cross flow fan as 600 r/min. The combination of the parameters was tested and the cleaning performance of the device was compared, under such conditions, the impurity content was 1.64%, the loss rate was 0.86%, the impurity rate and loss rate of this device were lower than those of traditional fan cylinder screen and fan vibrating screen cleaning device.

Key words: millet; cleaning device; roller rubbing cylinder device

0　引言

清选装置作为谷子联合收获机的重要组成部分,直接影响整机的工作性能[1-3]。清选是谷子收获的关键环节,清选系统的结构参数、运动参数及谷子初脱后物料特性均对清选损失、含杂产生重要影响,已有文献对谷子机械物理性能和空气动力学特性进行了研究[4-8]。

收稿日期:2018-04-16　修回日期:2018-06-15
基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0701800、2016YFD0701802)
作者简介:李心平(1973—),男,教授,博士,主要从事农产品收获与加工机械研究,E-mail:aaalxp@126.com
通信作者:姬江涛(1965—),男,教授,博士,主要从事智能化农业装备研究,E-mail:jjt0907@163.com

常用的清选方式有风筛式清选和气流式清选，目前多使用风机振动筛式清选装置[9-10]。关于振动筛筛分性能的研究方面，王成军等[11]利用离散元仿真软件 EDEM 进行模拟试验，研究了三自由度振动筛形式，大幅提高了筛分效率；李菊等[12]利用颗粒离散单元法（DEM）研究并优选出四维振动形式（3T－1R），提高了透筛性。此装置应用于谷子清选工作效率高，但具有结构较为复杂、振动大、可靠性差、湿分性能低等缺点。风机圆筒筛清选系统[13]主要工作部件为风机和圆筒筛，运用气流清选原理，依据漂浮特性及空气动力学理论，结合物料特性，利用筛面的运动和风力的作用将物料清选分离，此装置应用于谷子清选作业可简化谷物清选系统结构，提高喂入量且有效提高湿分性能。为优化装置结构和参数，BELLOCQ 等[14]研究表明，旋转筛对粒状且具有湿软团聚现象的物料筛分效率较高；LAWINSKA 等[15]在筛孔堵塞的机理层面，使用振动装置和具有锥形筛的旋转筛鼓筛进行筛孔间歇性筛查、连续筛查的堵塞识别；IVANOV 等[16]研究籽粒在筛面上的分离过程，获得圆筒筛孔中颗粒的运动微分方程，并且得到籽粒透过筛孔的条件；周学建等[17]采用圆筒筛机构配以横流风机，通过优化技术，探讨了圆筒筛清选机构参数与性能的关系；师清翔等[18]在试验基础上建立圆筒筛清选机构数学模型，通过调整离心风机、横流风机运动参数来适应离心风机位置参数变化，得到离心风机最佳位置参数。

由以上研究可知，适用于谷物清选的风机圆筒筛清选装置已对整体结构优化方面进行了深入研究，风机圆筒筛清选系统应用于谷子清选可有效将谷子与杂余分离，且湿分性能较好。由于谷子与谷码的连接力强，分离较为困难，谷子初脱后物料中残留较多谷码，导致谷子清选装置清洁率明显下降。如何在清选前分离脱去残留谷码是清选装置亟待解决的问题[19]。

针对谷子清选装置谷码残留、结构复杂、湿分性能低的问题，本文结合谷子初脱后物料特性，基于先脱谷码后清选的原理，设计一种适用于谷子清选的辊搓圆筒筛式谷子清选装置，以期在清选装置内消除残留谷码影响，增强湿分性能，降低籽粒含杂率和清选装置总损失率。

1　结构与工作原理

1.1　结构和工作流程

因谷子收获季节性强，且作业环境复杂，为此设计了辊搓圆筒筛式谷子清选装置，其结构如图 1 所示，由谷码辊搓装置、圆筒筛装置、横流风机、离心风机、螺旋输送装置、机架和电动机等部件组成。

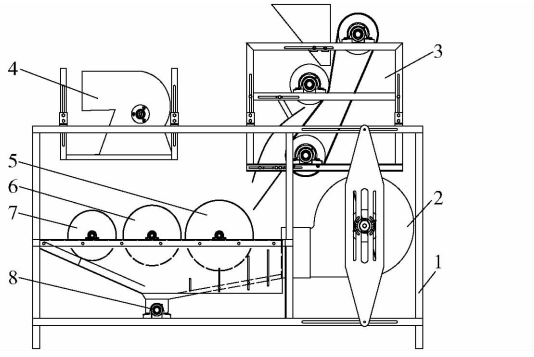

图 1　辊搓圆筒筛式谷子清选装置原理图

Fig. 1　Principle diagram of cleaning device for roller rubbing cylinder sieve of millet

1. 机架　2. 离心风机　3. 谷码辊搓装置　4. 横流风机　5. 大圆筒筛　6. 中圆筒筛　7. 小圆筒筛　8. 螺旋输送器

待清选谷子初脱后物料由喂料口喂入，首先进入谷码辊搓装置，谷子初脱后物料中残留谷码被搓擦分离成籽粒和颖壳，随后谷子辊搓后物料被分层抛扬至清选室的圆筒筛筛面上，3 个圆筒筛同向旋转将谷子辊搓后物料连续抛扬，同时受到横流风机和离心风机气流清选分离作用，颖糠和短茎秆等轻杂物被横流风机气流作用吸出，长茎秆和部分轻杂物被离心风机气流吹至后方糠槽，籽粒透过圆筒筛漏下落至螺旋输送装置，在螺旋辊输出端排出，完成清选作业。由于本装置清选时先搓擦分离了谷码，并且延长了谷子辊搓后物料在清选室与气流接触的时间，因此降低了籽粒含杂率并且提高了湿分性能。

1.2　工作原理

谷子初脱后物料经输送带匀速均匀喂入喂料口，在自身重力和喂料口摩擦力下沿喂料口斜面均匀有序滑落至谷码辊搓装置，首先进入压紧辊与橡胶带组成的分离空间，利用压紧辊和橡胶带的差速运动和挤压作用搓擦谷码，谷码受到压紧辊和橡胶带相反的搓擦力、挤压力和自身重力，使残留谷码分离成籽粒和颖壳；分离后的籽粒和颖壳随同原谷子初脱后物料中籽粒、短茎秆及颖糠等分层抛扬至清选室的圆筒筛筛面上，通过 3 个圆筒筛连续旋转抛扬作用使谷子辊搓后物料悬浮在清选室内，利用籽粒和其它杂物重量不同、漂浮速度不同的空气动力学特性，在离心风机和横流风机形成的气流场中，借助气体介质清选分离籽粒和杂物，在圆筒筛和双风机的共同作用下完成低损失、低含杂的清选作业。

2　部件设计

2.1　谷码辊搓装置

每个谷穗有 60 ~ 150 个谷码，谷码多以螺旋形轮生在谷穗上，谷码由分枝、小穗、小花和刚毛组成，

有球形、三角形以及长圆锥形等多种形态,经测定:谷码平均长度为 20.6 mm,平均宽度 10.66 mm,平均厚度 9.8 mm,生物形态见图 2。

图 2 谷穗和谷码生物形态图

Fig. 2 Graincode biomorphology map

1. 谷穗 2. 谷码

谷穗与谷码之间的连接力相对较小,而谷子与谷码的连接力强,因此,谷穗易与谷码分离,但谷子与谷码的分离较为困难,受谷子脱净率所限,往往谷子初脱后物料中残留很多谷码,进入清选装置后严重影响籽粒含杂率,因此需要设计一种在清选前清除残留谷码的装置。

谷码辊搓装置结构见图 3,由喂料斗、主动辊、压紧辊、从动辊、防溅板、橡胶传送带、托板和机架等组成。工作时,电动机带动主动辊转动,主动辊通过传送带带动从动辊旋转,谷子初脱后物料从喂料斗进入,在物料自身重力和喂料斗对物料的摩擦力作用下落至橡胶带与压紧辊组成的分离空间内,谷码在压紧辊和橡胶带的搓擦与挤压下分离,谷子辊搓后物料被抛射出去并在托板和防溅板导流下落至清选室内,进行下步清选。

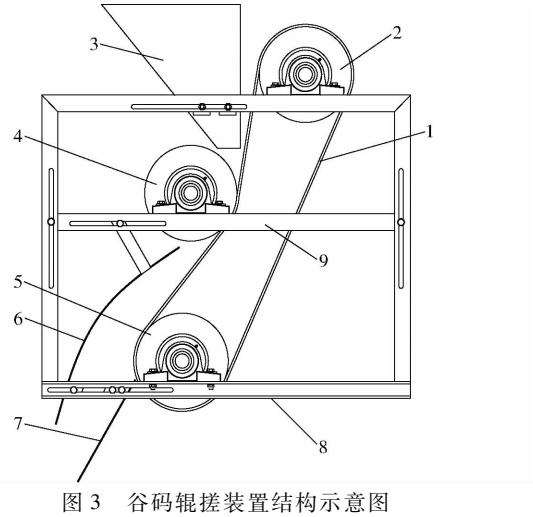

图 3 谷码辊搓装置结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of grain roller rubbing device

1. 橡胶传送带 2. 主动辊 3. 喂料斗 4. 压紧辊 5. 从动辊 6. 防溅板 7. 托板 8. 机架 9. 分离空间

为适应最大喂入量作业需求同时适配清选室尺寸,结合谷物分层抛扬原理,传送带线速度应在 2 ~ 5 m/s,且压紧辊直径对搓擦效果影响较小,主动辊、从动辊和压紧辊的宽度均选取为 570 mm,直径均选取为 200 mm。为保证谷子初脱后物料准确落入分离空间,喂料斗宽度应略小于压紧辊的宽度,选取为 540 mm。主动辊和被动辊的轴心水平距离为 600 mm,主动辊和被动辊轴心连线与水平面的角度为 66°。压紧辊设计成可移动结构,根据谷子初脱后物料含水率变化范围改变抛射角,调整清除谷码的效果。谷子初脱后物料含水率在 39.7% ~ 46.5% 之间时,谷码的静滑动摩擦角变化区间为 27.4° ~ 30.5°,故谷码辊搓装置物料抛射角 γ 取 30° ~ 35°。

为确保谷码辊搓装置达到理想的清谷码效果,结合谷码的生物特性,对谷码进行力学特性分析。谷码受力分析如图 4 所示,图中 γ 为谷码辊搓装置物料抛射角,G 为谷码自身重力,N_1 为橡胶带对谷码的挤压力,N_2 为压紧辊对谷码的挤压力,f_1 为压紧辊与橡胶带差速产生的搓擦力,f_2 为橡胶带对谷码的搓擦力,谷码在分离空间内受到来自橡胶带与压紧辊两个大小相等方向相反的挤压力 N_1 和 N_2,挤压力使谷粒与穗柄之间产生横向相对位移,产生剪切破坏其连接实现分离,根据谷码蓬松结构被破坏的极限载荷 68.6 N,为使谷码被正常分离,设计挤压力 N_1 和 N_2 满足条件:$N_1 < N_2 + G\cos\gamma$,且 $N_1 = N_2 > 68.6$ N 时,产生剪切破坏;同时谷码受到橡胶带搓擦力 f_2 和压紧辊与橡胶带差速产生的搓擦力 f_1 及自身重力 G,搓擦力使谷粒与穗柄产生切向相对位移,造成连接断裂实现谷码分离,分离的程度与摩擦力大小有关,增强对谷物的搓擦力 f_1 及 f_2,可提高分离率;搓擦力 f_1 和 f_2 满足条件:$f_2 + G\sin\gamma > f_1$,此时物料沿橡胶带运动方向下滑。

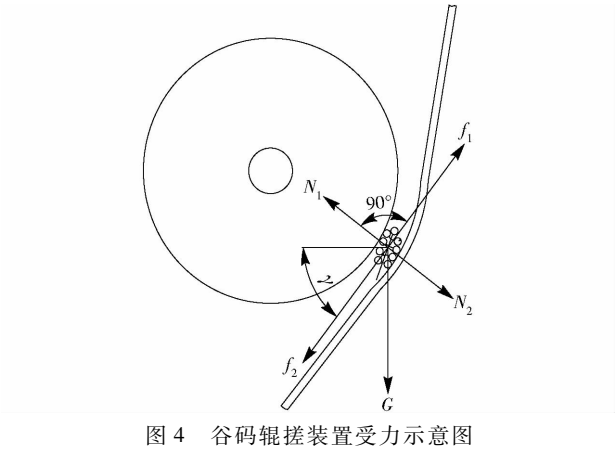

图 4 谷码辊搓装置受力示意图

Fig. 4 Schematic diagram of force on roller rubbing device

2.2 圆筒筛装置

2.2.1 圆筒筛结构及工作原理

谷子辊搓后物料成分主要有颖壳、短茎秆、长茎

秆、籽粒等，其各成分漂浮速度：颖壳为 0.6 ~ 5 m/s、短茎秆为 5.0 ~ 6.0 m/s、长茎秆为 6.0 ~ 8.0 m/s、谷子籽粒为 9.8 ~ 11.8 m/s；经测量谷子平均三轴尺寸为 1.36 mm × 1.48 mm × 1.66 mm，短茎秆平均尺寸为 4.28 mm × 7.12 mm，长茎秆平均尺寸为 4.86 mm × 11.34 mm。

本装置选用圆筒型编织筛。圆筒筛由辐板、编织筛网等围合成圆筒型组成，编织筛用铁丝编织而成，具有结构简单，重量轻、筛孔有效面积大、筛漏能力强和生产率高等特点。圆筒筛利用离心力将谷子辊搓后物料抛离筛面，使辊搓后物料分散在清选室内，增加了气流的作用面积，减少了潮湿的杂物粘在筛面上的不利情况，有利于谷子籽粒透过筛孔，分离效果显著。同时，根据谷子辊搓后物料生物特性中各成分的尺寸参数，选取筛孔为 5 mm × 5 mm 的编织筛网，圆筒筛结构见图 5。

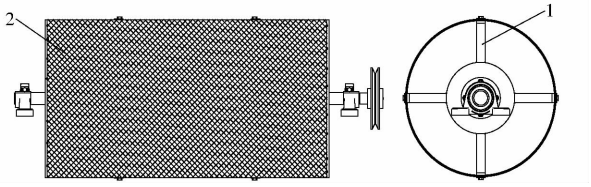

图 5　圆筒筛结构示意图

Fig. 5　Schematic diagram of cylinder screen

1. 辐板　2. 编织筛网

由于谷子辊搓后物料含水率较高，辊搓后物料结块且与筛面黏结较多，清选过程中难以分离，为了提高清选装置籽粒含杂率，降低辊搓后物料含水率对清选装置总损失率的影响，优化清选工作方式，选用大、中、小 3 个不同直径的圆筒筛等间距平行排列的设计方式[20]，且为适应喂入量 0.56 kg/s 的清选作业需求，圆筒筛宽度同时与清选室宽度 700 mm 以及谷码辊搓装置宽度匹配。本装置 3 个圆筒筛选取同样宽度，大圆筒筛喂入量由生产率 Q[21] 表征，生产率为筛子的透筛能力，其中

$$Q = \frac{Z\delta m_1}{1\,000} \tag{1}$$

式中　Z——筛孔总数，取 16 112 个

δ——1 s 从筛孔掉下的谷子初脱后物料系数（一般为 0.01 ~ 0.025），取 0.015

m_1——谷子初脱后物料质量，kg

故取 3 个圆筒筛宽度 B = 660 mm。

圆筒筛装置结构及工作示意图如图 6 所示。

谷子辊搓后物料首先被谷码辊搓装置抛扬落至大圆筒筛落料区域 S_1 内的右侧筛面上，在大圆筒筛旋转对谷子辊搓后物料产生的摩擦力作用下被传送到筛面落料区域 S_1 左侧，随后在离心力作用下被抛扬至中圆筒筛落料区域 S_2 内的右侧筛面上，并同样在摩擦力和离心力作用下沿旋转方向依次抛送至小圆筒筛落料区域 S_3 内，工作过程中，圆筒筛装置上方形成一层蓬松的物料流，使质量较大的籽粒向下运动透过筛面而质量较小的短茎秆和颖糠等向上运动实现分离，通过使谷子辊搓后物料在 3 个圆筒筛筛面上的连续传送，延长了谷子辊搓后物料在清选室内悬浮时间，多次抛扬，增加了气流场对辊搓后物料作用机会，降低了含水率，提高了筛分和湿分性能，优化了清选效果。

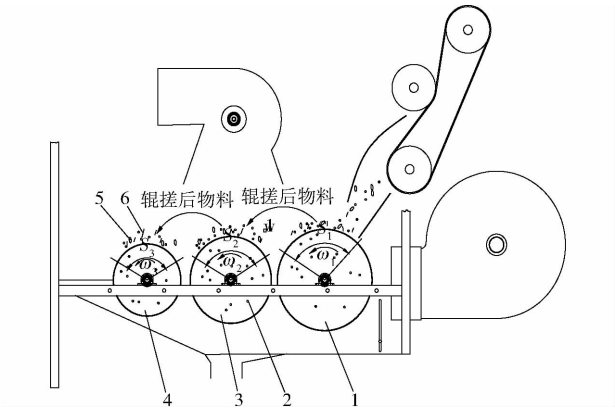

图 6　圆筒筛装置结构及工作示意图

Fig. 6　Cylinder screen device structure and working diagram

1. 大圆筒筛　2. 籽粒　3. 中圆筒筛　4. 小圆筒筛　5. 颖壳　6. 短茎秆

2.2.2　谷子辊搓后物料受力分析

图 7 所示为圆筒筛装置物料受力分析图，在进行受力分析过程中，假设物料为一质量为 m 的质点，不考虑籽粒间的摩擦。

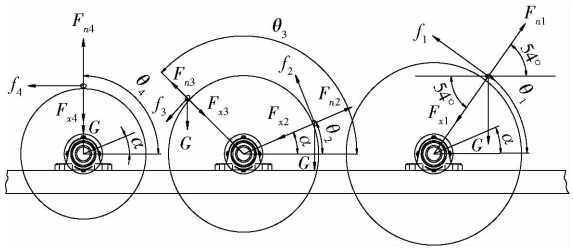

图 7　圆筒筛装置谷子辊搓后物料受力分析图

Fig. 7　Analysis diagram of force of material after drum roll of drum screen device

（1）大圆筒筛

工作时，谷子辊搓后物料在圆筒筛装置上会有前滑、后滑和抛扬 3 种运动状态。当谷子辊搓后物料从谷码辊搓装置中抛落至大圆筒筛的过程中，受到托板和防溅板的约束作用，不会出现前滑和后滑现象，因此设计大圆筒筛时，只需要求谷子辊搓后物料能被抛扬到中圆筒筛上即可，其满足的函数关系为

$$\begin{cases} f_{y1} > mg\sin\theta_1 \\ F_{n1} > mg\cos\theta_1 + F_{x1} \\ f_{y1} = \mu F_{n1} \\ F_{x1} = \dfrac{mv_1^2}{R_1} \end{cases} \tag{2}$$

式中 f_{y1}——物料在大圆筒筛上的摩擦力,N

θ_1——物料在大圆筒筛上的位置角,(°)

F_{n1}——物料在大圆筒筛上受到的支撑力,N

F_{x1}——物料在大圆筒筛上受到的向心力,N

μ——物料在圆筒筛上的摩擦因数

v_1——物料在大圆筒筛筛面上的线速度,m/s

R_1——大圆筒筛半径,mm

m——落至圆筒筛筛面的谷子辊搓后物料质量

化简可得

$$\frac{v_1^2}{R_1 g} > \sin\theta_1 \tag{3}$$

可以看出,当谷子辊搓后物料在大圆筒筛上运动时,一旦满足 $v_1 > \sqrt{R_1 g\sin\theta_1}$,辊搓后物料将会被抛起(其中 $\theta_1 = 90°$时,辊搓后物料的最大临界抛起速度为:$v_{1\max} > \sqrt{R_1 g}$)。为了保持辊搓后物料在大圆筒筛上被连续抛起,能够形成蓬松的物料流,"分层效应"显著,谷子辊搓后物料中长茎秆受到大圆筒筛切线方向提供的速度 v_1 与其在风机气流场作用下沿大圆筒筛切线方向获得的速度 v_1' 之和应大于辊搓后物料中长茎秆的漂浮速度,其漂浮速度为 6.0 ~ 8.0 m/s,否则,辊搓后物料难以抛离筛面,而是在筛面形成致密的物料层,阻碍籽粒与轻杂物分离;同时该速度之和还须小于物料中籽粒漂浮速度,其漂浮速度为 9.8 ~ 11.8 m/s,否则,该速度和过大会使辊搓后物料的抛扔距离加大,减少籽粒的透筛机会,影响辊搓后物料在筛面上的分离效果。经 QDF - 2A 型热球式风速仪测定,传统的双风机双圆筒筛清选装置清选室内混合气流场的风速 v_1' 为 6.5 ~ 7.1 m/s,且 8 m/s$\leqslant v_1 + v_1' \leqslant$9.8 m/s,因此,取大圆筒筛线速度为 1.715 m/s,大圆筒筛直径 $D_1 = 350$ mm;且当 $\theta_1 = 90°$时,辊搓后物料的最大临界抛起速度为 $v_{1\max} = 1.31$ m/s,故满足大圆筒筛抛起设计需求。

(2)中圆筒筛

工作时,谷子辊搓后物料在中圆筒筛上可能会出现前滑和后滑,运动条件如下:

物料前滑时

$$\begin{cases} f_3 > mg\sin\theta_3 \\ F_{n3} = mg\cos\theta_3 + F_{x3} \\ f_3 = \mu F_{n3} \\ F_{x2} = \dfrac{mv_2^2}{R_2} \end{cases} \tag{4}$$

物料后滑时

$$\begin{cases} f_{y2} < mg\sin\theta_2 \\ F_{n2} = mg\cos\theta_2 \\ f_{y2} = \mu F_{n2} \end{cases} \tag{5}$$

式中 f_{y2}、f_3——物料在中圆筒筛上的摩擦力,N

θ_2、θ_3——物料在中圆筒筛上的位置角,(°)

F_{n2}、F_{n3}——物料在中圆筒筛上受到的支撑力,N

F_{x2}——物料在中圆筒筛上受到的向心力,N

v_2——物料在中圆筒筛筛面上的线速度,m/s

R_2——中圆筒筛半径,mm

化简可得:

物料前滑时

$$\frac{v_2^2}{R_2 g} > \frac{\cos(180° - (\theta_3 + \alpha))}{\sin\alpha} \tag{6}$$

物料后滑时

$$\frac{v_2^2}{R_2 g} > \frac{\cos(\theta_2 - \alpha)}{\sin\alpha} \tag{7}$$

式中 α——谷子辊搓后物料的摩擦角

可以看出:谷子辊搓后物料在圆筒筛上的滑动与筛筒的线速度有关,线速度越大,物料就越容易产生滑动;物料的滑动与物料在圆筒筛面上的位置及其与筛面摩擦角有关。当 $90° - \alpha \leqslant \phi \leqslant 90° + \alpha$($\phi$ 为谷子辊搓后物料在中圆筒筛上抛扬时的位置角,其值介于 θ_2 和 θ_3 之间),物料在圆筒筛上既不前滑也不后滑。同时,为保证谷子辊搓后物料中轻杂物能够从中圆筒筛上成功地抛送至小圆筒筛,工作时还需满足 $v_2 > \sqrt{R_2 g\sin\phi}$;且中圆筒筛又需顺利承接大圆筒筛抛扬的物料,相同直径尺寸并不能顺利完成抛扬工作,故其直径须略小于大圆筒筛直径。因此取 $v_2 = 1.335$ m/s,取其直径 $D_2 = 300$ mm。

(3)小圆筒筛

作为圆筒筛装置的最后一道环节,谷子辊搓后物料中长茎秆等较大轻杂物需要经过小圆筒筛的作用抛向机器的末端接糠口处,这个过程中物料在小圆筒筛上运动时需要满足的条件是:物料不能出现后滑情况,即 $\varepsilon \leqslant 90° + \alpha$($\varepsilon$ 为谷子辊搓后物料在小圆筒筛上抛扬时的位置角,其值小于 θ_4);物料需满足抛扬条件,即 $v_3 > \sqrt{R_3 g\sin\varepsilon}$,其中 R_3 为小圆筒筛半径;谷子辊搓后物料受到小圆筒筛切线方向提供的速度 v_3 与其在风机气流场作用下沿小圆筒筛切线方向获得的速度 v_3' 之和应略小于其物料中轻杂物最大临界漂浮速度,否则物料中轻杂物夹带少量籽粒可能会被直接抛出机外,减弱筛子清选效果,增大清选损失;该速度和还须大于辊搓后物料中短茎秆

漂浮速度 5.0 ~ 6.0 m/s，否则，物料中轻杂物会在清选室尾部形成致密层，难以被抛出。经 QDF－2A 型热球式风速仪测定，传统的双风机双圆筒筛清选装置清选室内尾部气流场风速 v_3' 为 4.1 ~ 5.4 m/s，且 6.0 m/s≤$v_3 + v_3'$≤8.0 m/s，因此，取小圆筒筛线速度为 1.244 m/s，其直径 D_3 = 250 mm。

2.3　横流风机

在收割后期清选负荷加大，造成谷子辊搓后物料在圆筒筛面上堆积，使物料来不及分离而落入籽粒输送器，籽粒含杂率明显上升，为减轻圆筒筛清选负荷，增强物料在圆筒筛装置上方形成的分层效果，更有效地清除物料中短茎秆及颖糠等轻杂物，降低物料含水率，在圆筒筛装置上部设计了一个横流风机。

横流风机结构及工作示意图如图 8 所示。该横流风机主要由叶轮、壳体和涡舌等组成。壳体是两端封闭、径向开口式的结构，叶轮叶片前倾。横流风机主要清除谷子辊搓后物料中的短茎秆及颖糠，工作时，颖糠和短茎秆被吸入进气叶栅，随后从出气口排出。

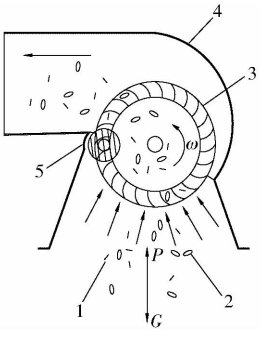

图 8　横流风机结构及工作示意图

Fig. 8　Working diagram of cross flow fan

1. 短茎秆　2. 颖壳　3. 叶轮　4. 壳体　5. 涡舌

2.4　离心风机

离心风机的主要作用是将圆筒筛筛面上的长茎秆、筛体中部分短茎秆和颖糠清选出机外；并且谷子辊搓后物料在被谷码辊搓装置分层抛扬过程中，由于防溅板和托板的存在，影响分层效果，离心风机的工作气流利用物料中各成分空气动力学特性的差异，可进一步增加物料的分层效果，从而达到清除长茎秆等几何尺寸较大的轻杂物，降低籽粒含杂率的目的。

离心风机主要由叶轮、壳体和风量调节阀等组成，其结构如图 9 所示。风机工作时，动力传至风机轴上，使叶轮高速旋转，空气经风机两侧的进气口吸入，进入叶轮的空气和叶轮一起旋转，在离心力的作用下，被排出机壳。

由于圆筒筛对气流有一定阻碍作用，为了保证圆筒筛上筛面及部分落至圆筒筛筛筒内部的长茎秆和颖糠能被及时有效地吹出机外，必须保证离心风机能够产生足够的动压。设计离心风机时，主要通过确定谷子辊搓后物料长茎秆的漂浮速度来得到离心风机气流工作速度为 v = 18 m/s，从而取得离心风机全压力为 p_1 = 432.6 Pa，参照模型离心风机无因次曲线性能参数，结合实际工作条件，选取离心风机结构尺寸：叶轮内径 180 mm，叶轮外径 420 mm。

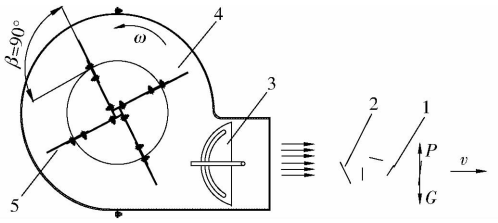

图 9　离心风机工作示意图

Fig. 9　Working diagram of centrifugal fan

1. 短茎秆　2. 长茎秆　3. 风量调节阀　4. 壳体　5. 叶轮

3　试验及结果分析

3.1　试验条件

试验材料：物料选用河南省洛阳市孟津县文公村自然成熟谷子机收之后的初脱后物料，品种为豫谷 18，籽粒含杂率约为 41.2%，将籽粒、茎秆、颖糠按照质量比 6∶3∶1 混合而成，总质量 4.48 kg；其各成分的含水率分别为 33.23%、39.46% 和 41.42%。清选喂入量为 0.56 kg/s，取样时间为 8 s。

辊搓圆筒筛式谷子清选装置如图 10 所示。

其他设备：变频电动机（YTSP100L－4－2.2 kW 型）、干燥箱（DZG－6050SBD 型）、电子秤等。

图 10　辊搓圆筒筛式谷子清选装置实物图

Fig. 10　Physical drawing of millet cleaning device with roller rubbing cylinder sieve

3.2　试验参数和评价指标

根据谷子辊搓后物料在清选室清选过程中受力分析及空气动力学特性分析结果，确定离心风机转速、离心风机角度、横流风机转速、谷码辊搓装置主动辊转速以及 3 个圆筒筛转速为试验研究的 7 个主要参数。

综合试验台工作的实际情况，各清选部件的转

速可调,进行单因素预试验,确定各因素变化范围,以谷子清选过程中的籽粒含杂率 y_1、清选装置总损失率 y_2 作为试验评价指标。

籽粒含杂率

$$y_1 = \frac{n_1}{N_0} \times 100\% \tag{8}$$

清选装置总损失率

$$y_2 = \frac{n_2 - (N_0 - n_1)}{n_2} \times 100\% \tag{9}$$

式中 n_1——台架作业处理完成后籽粒输出装置内所含杂余质量

N_0——台架作业处理完成后籽粒螺旋输送器内所接样品质量

n_2——台架作业开始时喂料斗喂入籽粒质量

3.3 试验方案

综合试验台工作的实际情况,对选取的 7 个因素进行七因素三水平的正交试验,即选用正交表 $L_{18}(3^7)$ 进行试验设计与分析,其因素水平如表 1 所示。

表 1 试验因素水平

Tab. 1 Experimental factors and levels

水平	因素						
	离心风机转速/(r·min⁻¹)	横流风机转速/(r·min⁻¹)	中圆筒筛转速/(r·min⁻¹)	大圆筒筛转速/(r·min⁻¹)	小圆筒筛转速/(r·min⁻¹)	谷码辊搓装置主动辊转速/(r·min⁻¹)	离心风机角度/(°)
1	600	500	60	70	60	250	-3
2	700	600	70	80	70	300	0
3	800	700	80	90	80	350	3

3.4 试验结果与分析

根据极差确定籽粒含杂率、清选装置总损失率影响因素的主次关系,极差分析结果如表 2 所示。A、B、C、D、E、F、G 为因素水平值。对试验结果进行方差分析,进而确定试验指标在不同试验因素水平组合下的变化规律,试验结果方差分析如表 3 所示。

综合极差分析与方差分析结果可知,谷码辊搓装置主动辊转速、离心风机角度、离心风机转速、3 个圆筒筛转速及横流风机转速对试验台清选性能的影响是不同的。并且,根据方差分析的结果可知,除横流风机转速外,所选试验指标对性能指标具有显著影响,因此所选因素范围是合理的,且所选因素是影响该试验台性能指标的关键因素。

3.4.1 大圆筒筛、中圆筒筛转速对清选性能的影响

在所选的 7 个参数中,大圆筒筛转速、中圆筒筛转速对籽粒含杂率、清选装置总损失率均有显著影响。并且,大、中圆筒筛转速越快,谷子辊搓后物料和筛面接触面积与频率越大,圆筒筛面与辊搓后物料接触次数增多,进而导致辊搓后物料被清选次数增加,清选面积增加,因此,导致籽粒含杂率降低;且大、中圆筒筛转速越快,谷子辊搓后物料被抛扬次数随之增多,同时,经过风力清选次数增加,进而导致清选装置总损失率升高。反之,籽粒含杂率增加,清选装置总损失率降低。

3.4.2 离心风机转速、离心风机角度对清选性能的影响

离心风机转速、离心风机角度对清选装置总损失率影响不显著,但对籽粒含杂率均具有显著影响,且风机转速越大,角度越大,籽粒含杂率越低,清选装置总损失率越高。原因在于,风机转速越大,谷子辊搓后物料所受风力增大,辊搓后物料在清选室呈悬浮状态,风力大于部分轻杂物漂浮速度,进而导致物料中被吹走轻杂物增多,导致籽粒含杂率降低;清选室内风力增加,部分不饱满籽粒所受风力大于其漂浮速度,即随风力被吹送至后方糠槽,进而导致清选装置总损失率增加。

3.4.3 小圆筒筛转速、谷码辊搓装置主动辊转速对清选性能的影响

小圆筒筛转速、谷码辊搓装置主动辊转速对清选装置总损失率具有非常显著的影响,但对籽粒含杂率影响不显著,且谷码辊搓装置主动辊转速增加,谷码受到谷码辊搓装置分离空间挤压搓擦力增加,进而谷码分离率增加,且谷码辊搓装置主动辊转速增加,对谷子辊搓后物料抛扬分层能力增加,结合风力影响,对辊搓后物料中轻杂物清选效果越好,进而导致籽粒含杂率降低,但由于谷码辊搓装置主动辊转速增加,对物料抛扬作用增加,部分籽粒与圆筒筛筛面产生强烈冲击力,籽粒未能有效及时通过筛面落至籽粒输送器,进而导致清选装置总损失率升高;小圆筒筛转速增加,对试验台尾部作业性能影响显著,小圆筒筛筛面上辊搓后物料被抛扬次数增加,且与筛面相对滑动增多,进而辊搓后物料与小圆筒筛筛面相对接触面积减少及接触频率增加,进而被筛选次数增加,因此,籽粒含杂率降低;且抛扬初速度增加,辊搓后物料中所夹带籽粒受空气阻力减小,速度大于其漂浮速度,因此,所夹带籽粒随轻杂物一起被抛扬到试验台尾部糠槽增多,进而导致清选装置总损失率升高。

进而通过极差和方差分析，综合考虑各试验因素对清选性能指标的影响，确定影响籽粒含杂率的主次因素顺序为：中圆筒筛转速、离心风机转速、大圆筒筛转速、离心风机角度、小圆筒筛转速、谷码辊搓装置主动辊转速、横流风机转速；影响清选装置总损失率的主次因素顺序为：中圆筒筛转速、谷码辊搓装置主动辊转速、大圆筒筛转速、小圆筒筛转速、离心风机角度、离心风机转速、横流风机转速。

表 2　试验方案与结果

Tab. 2　Test schemes and results

序号		A	B	C	D	E	F	G	籽粒含杂率 y_1/%	清选装置总损失率 y_2/%
1		1	1	1	1	1	1	1	3.74	0.42
2		1	2	2	2	2	2	2	3.19	1.00
3		1	3	3	3	3	3	3	1.68	3.30
4		2	1	1	2	2	3	3	2.25	1.40
5		2	2	2	3	3	1	1	2.10	2.16
6		2	3	3	1	1	2	2	2.50	1.24
7		3	1	2	1	3	2	3	2.25	1.70
8		3	2	3	2	1	3	1	2.00	2.30
9		3	3	1	3	2	1	2	2.60	1.14
10		1	1	3	3	2	2	1	2.35	2.02
11		1	2	1	1	3	3	2	3.41	0.96
12		1	3	2	2	1	1	3	2.55	0.68
13		2	1	2	3	1	3	2	2.51	1.96
14		2	2	3	1	2	1	3	2.28	0.88
15		2	3	1	2	3	2	1	2.85	1.28
16		3	1	3	2	3	1	2	1.91	2.00
17		3	2	1	3	1	2	3	2.16	0.98
18		3	3	2	1	2	3	1	2.30	1.96
籽粒含杂率	K_1	16.913	15.013	17.013	16.475	15.463	15.175	15.338		
	K_2	14.488	15.138	14.900	14.750	14.963	15.300	16.125		
	K_3	13.225	14.475	12.713	13.400	14.200	14.150	13.163		
	R	3.688	0.663	4.300	3.075	1.263	1.150	2.963		
	较优水平	A_3、B_3、C_3、D_3、E_3、F_3、G_3								
	因素主次	C、A、D、G、E、F、B								
	较优组合	$C_3A_3D_3G_3E_3F_3B_3$								
清选装置总损失率	K_1	8.377	9.497	6.177	7.157	7.577	7.277	10.137		
	K_2	8.920	8.280	9.460	8.660	8.400	8.220	8.300		
	K_3	10.080	9.600	11.740	11.560	11.400	11.880	8.940		
	R	1.703	1.320	5.563	4.403	3.823	4.603	1.837		
	较优水平	A_1、B_2、C_1、D_1、E_1、F_1、G_2								
	因素主次	C、F、D、E、G、A、B								
	较优组合	$C_1F_1D_1E_1G_2A_1B_2$								

由以上分析可知，两试验指标的最佳组合不同，且正交试验籽粒含杂率最优组合均为试验因素水平的上限组合，正交试验清选装置总损失率最优水平绝大多数为试验因素水平的下限，因此籽粒含杂率与清选装置总损失率变化规律呈相反趋势，故利用多指标正交试验设计中的综合平衡法对因素进行综合比较和分析，根据试验结果，作出两种指标的趋势图（图 11、12）。

对于籽粒含杂率，因素 A 取 A_3最好，对于清选装置总损失率，因素 A 取 A_1最好，从图 11 中可以看出，A 取 A_2和 A_3时，清选装置总损失率相差较大，且上升趋势明显，从图 12 中可以看出，A 取 A_2和 A_3时，籽粒含杂率相差不大，且下降趋势不明显，综合以上分析，因素 A 取 A_2。

对于清选装置总损失率，因素 B 取 B_2最好，对于籽粒含杂率，因素 B 取 B_3最好，从图 11 中可以看出，B 取 B_2和 B_3时，清选装置总损失率相差较大，且上升趋势明显，从图 12 中可以看出，B 取 B_2和 B_3时，籽粒含杂率相差不大，且下降趋势不明显，综合以上分析，因素 B 取 B_2。

对于清选装置总损失率，因素 C 取 C_1最好，对于籽粒含杂率，因素 C 取 C_3最好，从图 11 中可以看

表 3 清选性能指标方差分析

Tab. 3 Analysis of variance of cleaning performance indicators

试验指标	差异源	离差平方和	自由度	均方	F	显著性
籽粒含杂率	A	1.171	2	0.585	11.366	**
	B	0.041	2	0.020	0.401	
	C	1.541	2	0.770	14.961	**
	D	0.792	2	0.396	7.688	*
	E	0.135	2	0.067	1.308	
	F	0.133	2	0.066	1.288	
	G	0.785	2	0.392	7.620	*
	误差列	0.463	9	0.051		
清选装置总损失率	A	0.252	2	0.126	1.258	
	B	0.180	2	0.090	0.896	
	C	2.607	2	1.304	13.003	**
	D	1.670	2	0.835	8.328	*
	E	1.350	2	0.675	6.732	*
	F	1.971	2	0.985	9.829	**
	G	0.290	2	0.145	1.445	
	误差列	0.702	7	0.100		

注：* 表示影响显著，** 表示影响非常显著。

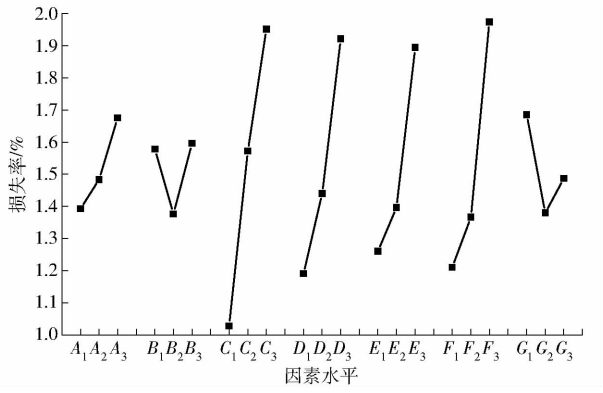

图 11 清选装置总损失率随 7 个因素的变化曲线

Fig. 11 Changing curves of total loss rate of cleaning device with seven factors

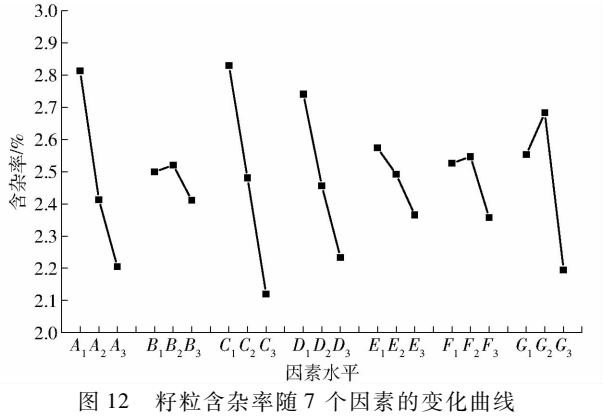

图 12 籽粒含杂率随 7 个因素的变化曲线

Fig. 12 Variation curves of grain impurity ratio with seven factors

出，C 取 C_1 和 C_3 时，清选装置总损失率相差较大，且上升趋势明显，从图 12 中可以看出，C 取 C_1 和 C_3 时，籽粒含杂率相差不大，且下降趋势不明显，综合以上分析，因素 C 取 C_1。因素 D、E、F 和因素 C 具有类似趋势，因此分别取 D_1、E_1、F_1。

对于清选装置总损失率，因素 G 取 G_2 最好，对于籽粒含杂率，因素 G 取 G_3 最好，从图 11 中可以看出，G 取 G_2 和 G_3 时，清选装置总损失率相差不大，且上升趋势不明显，从图 12 中可以看出，G 取 G_2 和 G_3 时，籽粒含杂率相差较大，且下降趋势明显，综合以上分析，因素 G 取 G_3。

从而确定了 $F_1G_3E_1A_2C_1D_1B_2$ 为较优参数组合，即谷码辊搓装置主动辊转速为 250 r/min，离心风机角度为 3°，小圆筒筛转速为 60 r/min，离心风机转速为 700 r/min，中圆筒筛转速为 60 r/min，大圆筒筛转速为 70 r/min，横流风机转速为 600 r/min。

3.5 试验验证

为了验证参数匹配的可靠性，且由于较优组合大部分发生在所选参数取值的边缘处，故采用已优选出的最佳参数组合，进行重复性验证试验，试验结果如表 4 所示。

表 4 验证试验结果

Tab. 4 Verification test results

试验	试验次序	籽粒含杂率/%	清选装置总损失率/%
$F_1G_3E_1A_2C_1D_1B_2$ 3 次重复试验	1	1.65	0.88
	2	1.63	0.84
	3	1.64	0.86
	平均值	1.64	0.86
1 号验证试验（谷码辊搓装置主动辊转速为 200 r/min）	1	1.87	1.05
	2	1.89	1.07
	3	1.88	1.03
	平均值	1.88	1.05
2 号验证试验（中圆筒筛转速 50 r/min）	1	1.79	0.79
	2	1.77	0.78
	3	1.78	0.77
	平均值	1.78	0.78
3 号验证试验（大圆筒筛转速 60 r/min）	1	1.82	0.85
	2	1.87	0.82
	3	1.86	0.85
	平均值	1.85	0.84

根据试验结果，在参数组合 $F_1G_3E_1A_2C_1D_1B_2$ 下，谷子在清选过程中的籽粒含杂率为 1.64%，清选装置总损失率为 0.86%。由 1 号验证试验，保持 $G_3E_1A_2C_1D_1B_2$ 不变，谷码辊搓装置主动辊转速取 200 r/min（最小转速），试验结果籽粒含杂率为 1.88%，清选装置总损失率为 1.05%，可见籽粒含杂率和清选装置总损失率均有所提高，因此根据清选性能指标的评价原则，判定谷码辊搓装置主动辊转速 250 r/min 优于 200 r/min；由 2 号验证试验，保持 $F_1G_3E_1A_2D_1B_2$ 不变，中圆筒筛转速降低至

50 r/min(最小转速),试验结果籽粒含杂率为1.78%,清选装置总损失率为0.78%,可见清选装置总损失率有所降低,但籽粒含杂率提高了0.14个百分点,因此判定谷码辊搓装置主动辊转速60 r/min优于50 r/min;由3号验证试验,保持$F_1G_3E_1A_2C_1B_2$不变,大圆筒筛转速取60 r/min(最小转速),试验结果籽粒含杂率为1.85%,清选装置总损失率为0.84%,可见清选装置总损失率略微下降,但籽粒含杂率却有所上升,原因是,大圆筒筛转速降低时,其上谷子辊搓后物料不能有效地抛送至清选空间,进而影响籽粒与轻杂物的分离效果。因此综合考虑之后,判定大圆筒筛转速70 r/min,优于60 r/min。

综上,验证试验表明,在$F_1G_3E_1A_2C_1D_1B_2$参数组合下,籽粒含杂率和清选装置总损失率最低,为谷子清选装置的最优作业性能参数组合。

为进一步验证辊搓圆筒筛式谷子清选装置清选性能,将本清选装置与传统型风机圆筒筛式清选装置以及国内市场常用的风机振动筛式清选装置进行对比试验。其中传统型风机圆筒筛式清选装置采用双风机双圆筒筛物料外流式;风机振动筛式清选装置采用风机振动筛及凹板筛结构,初脱后物料透过凹板筛均匀掉落至振动筛前部,离心风机工作气流将轻杂物吹出机外。两种清选装置实物如图13所示。

(a) 传统型风机圆筒筛式　　(b) 风机振动筛式

图13　谷子清选装置实物图

Fig. 13　Physical drawings of millet cleaning device

试验物料仍然选用河南省洛阳市孟津县文公村自然成熟谷子机收之后的初脱后物料,品种为豫谷18,脱出物籽粒含杂率41.2%,喂入量0.56 kg/s,取样时间为8 s的相同条件下进行。并选取各清选装置最优参数组合,传统型风机圆筒筛式清选装置最佳离心风机转速为1 158 r/min,横流风机转速为893 r/min,前、后圆筒筛转速分别为93、63.5 r/min,以及离心风机最佳倾角为5°;风机振动筛式清选装置最佳性能参数:离心风机转速及倾角分别为1 787 r/min、17°,振动筛曲柄转速及振幅分别为404 r/min、30 mm;同时,在辊搓圆筒筛式谷子清选装置最优作业性能参数组合下,以籽粒含杂率和清选装置总损失率作为试验评价指标,进行三者对比试验。试验结果表明,传统型风机圆筒筛式清选装置籽粒含杂率为1.94%,清选装置总损失率为0.98%,风机振动筛式清选装置籽粒含杂率为1.85%,清选装置总损失率为0.96%,辊搓圆筒筛式谷子清选装置相对于传统型风机圆筒筛式清选装置籽粒含杂率降低了0.3个百分点,清选装置总损失率降低了0.12个百分点;且辊搓圆筒筛式谷子清选装置籽粒含杂率相对于风机振动筛式清选装置降低了0.21个百分点,清选装置总损失率降低了0.1个百分点。对于谷子清选收获,籽粒含杂率和清选装置总损失率均越低越好,该清选装置具有低损失和低含杂的优势。因此相对于其它清选装置,该清选装置性能更好、更具有实用价值。

4　结论

(1)通过对谷子初脱后物料在清选过程中的力学特性分析,设计了辊搓圆筒筛式谷子清选装置,该装置在消除残留谷码影响的同时,增强了湿分性能,降低了籽粒含杂率和清选装置总损失率。其中,谷码辊搓装置运用搓擦原理实现了清选前清除残留谷码的效果,降低了籽粒含杂率;三圆筒筛装置延长了谷子辊搓后物料清选路径,风机气流清选较为充分,物料粘结减少,从而在提高筛分效率的同时,降低了清选装置总损失率和籽粒含杂率。

(2)通过正交试验确定了影响清选装置清选性能指标的7个因素主次顺序。影响籽粒含杂率的主次因素顺序为:中圆筒筛转速、离心风机转速、大圆筒筛转速、离心风机角度、小圆筒筛转速、谷码辊搓装置主动辊转速、横流风机转速;影响清选装置总损失率的主次因素顺序为:中圆筒筛转速、谷码辊搓装置主动辊转速、大圆筒筛转速、小圆筒筛转速、离心风机角度、离心风机转速、横流风机转速。经极差和方差分析确定了最优组合:谷码辊搓装置主动辊转速为250 r/min,离心风机角度为3°,小圆筒筛转速为60 r/min,离心风机转速为700 r/min,中圆筒筛转速为60 r/min,大圆筒筛转速为70 r/min,横流风机转速为600 r/min。

(3)验证试验结果表明,这一组合确为最优组合,在该条件下,谷子清选装置的籽粒含杂率为1.64%,清选装置总损失率为0.86%,满足小型农户谷子收获脱粒之后的清选需求,为谷子清选装置设计提供了参考,但在联合收获机上的清选作业效果仍需田间试验进一步验证。相对于传统型风机圆筒筛式以及风机振动筛式清选装置,辊搓圆筒筛式谷子清选装置的籽粒含杂率降低了0.21~0.3个百分点,总损失率降低了0.1~0.12个百分点,具有籽粒含杂率低、清选装置总损失率低、实用价值高等特点。

参 考 文 献

1 廖庆喜,陈立,李海同,等. 油菜联合收获机脱出物清选试验台[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(10):80 - 85,79. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20131014&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.014.
LIAO Qingxi,CHEN Li, LI Haitong, et al. Cleaning unit test-bed of extraction components for rape combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(10):80 - 85,79. (in Chinese)

2 卢文涛,王荣先,邓志刚,等. 杂粮联合收获脱粒技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报,2017,38(11):11 - 16.
LU Wentao,WANG Rongxian, DENG Zhigang, et al. Development status and prospect of threshing technologies for coarse cereal [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2017,38(11):11 - 16. (in Chinese)

3 李洋,徐立章,周莹,等. 脱出物喂入量对多风道清选装置内部气流场的影响[J]. 农业工程学报,2017,33(12):48 - 55.
LI Yang, XU Lizhang, ZHOU Ying,et al. Effect of extractions feed-quantity on airflow field in multi-ducts cleaning device[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(12):48 - 55. (in Chinese)

4 梁苏宁,金诚谦,张奋飞,等.4LZG - 3.0 型谷子联合收获机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(12):31 - 38.
LIANG Suning, JIN Chengqian, ZHANG Fenfei, et al. Design and experiment of 4LZG - 3.0 millet combine harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(12):31 - 38. (in Chinese)

5 马秋成,卢安舸,高连兴,等. 莲子物料空气动力学特性与壳仁分离装置试验[J]. 农业工程学报,2015,31(6):297 - 303.
MA Qiucheng, LU Ange, GAO Lianxing, et al. Aerodynamic characteristics of lotus seed mixtures and test on pneumatic separating device for lotus seed kernel and contaminants [J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(6):297 - 303. (in Chinese)

6 王升升,师清翔,耿令新,等. 谷子半喂入脱粒装置试验台设计[J]. 中国农机化学报,2016,37(12):27 - 30,62.
WANG Shengsheng, SHI Qingxiang, GENG Lingxin, et al. Development of test-bed of semi-feeding millet threshing mechanism. [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2016,37(12):27 - 30,62. (in Chinese)

7 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/OL]. 农业机械学报,2015,46(7):102 - 108. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150716&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.016.
LIU Zhenghuai, ZHENG Yiping, WANG Zhiming, et al. Design on air-flowing cleaning unit of micro rice-wheat combine harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(7):102 - 108. (in Chinese)

8 郭文松,简建明,散鎏龙,等. 4CML - 1000 型链耙式地膜回收机设计与试验优化[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(2):66 - 73. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180209&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.009.
GUO Wensong, JIAN Jianming, SAN Yunlong, et al. Design and experimental optimization of 4CML - 1000 type chain rake film recycling machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(2):66 - 73. (in Chinese)

9 徐立章,于丽娟,李耀明,等. 双出风口多风道离心风机内部流场数值模拟[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(10):78 - 86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20141013&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.013.
XU Lizhang,YU Lijuan,LI Yaoming,et al. Numerical simulation of internal flow field in centrifugal fan with double outlet and multi-duct[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(10):78 - 86. (in Chinese)

10 师清翔,许泽宇,耿令新,等. 新型谷物输送-分离-清选复合装置[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),2017(1):61 - 66.
SHI Qingxiang,XU Zeyu,GENG Lingxin,et al. Composite device for new grain transportation separation and cleaning[J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science),2017(1):61 - 66. (in Chinese)

11 王成军,刘琼,马履中,等. 棉籽颗粒在三自由度混联振动筛面上的运动规律[J]. 农业工程学报,2015,31(6):49 - 56.
WANG Chengjun, LIU Qiong, MA Lüzhong,et al. Cottonseed particle motion Law in 3 - DOF hybrid vibration screen surface [J]. Transactions of the CSAE,2015,31(6):49 - 56. (in Chinese)

12 李菊,曾氢菲,邓嘉鸣,等. 多维并联振动筛筛分过程解析与筛面运动形式优选[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(11):399 - 407. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20161154&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.054.
LI Ju, ZENG Qingfei, DENG Jiaming, et al. Screening process analysis for multi-dimensional parallel vibrating screen and optimization of screen surface movement[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(11):399 - 407. (in Chinese)

13 沈宇峰,吴明亮,官春云,等. 小型联合收获机清选装置研究现状及发展对策[J]. 农机化研究,2016,38(10):263 - 268.
SHEN Yufeng, WU Mingliang, GUAN Chunyun,et al. Study status and developmental strategies of cleaning device of small combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2016,38(10):263 - 268. (in Chinese)

14 BELLOCQ B, RUIZ T, DELAPLACE G,et al. Screening efficiency and rolling effects of a rotating screen drum used to process wet soft agglomerates[J]. Journal of Food Engineering,2017,195:235 - 246.

(下转第 136 页)

method[J]. Powder Technology,2018,328:167 - 183.
25 方会敏,姬长英,CHANDIO F A,等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(3):22 - 28. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160304&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.004.
FANG Huimin,JI Changying,CHANDIO F A,et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(3):22 - 28. (in Chinese)
26 郑侃,何进,李洪文,等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):62 - 72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160910&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.010.
ZHENG Kan,HE Jin,LI Hongwen,et al. Research on polyline poil-breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(9):62 - 72. (in Chinese)
27 UCGUL M,SAUNDERS C,MILTON F J. Discrete element modelling of top soil burial usinga full scale mouldboard plough under field conditions[J]. Biosystems Engineering,2017,160:140 - 153.
28 丁启朔,任骏,ADAM B E,等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(3):38 - 48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170305&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.005.
DING Qishuo,REN Jun,ADAM B E,et al. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(3):38 - 48. (in Chinese)
29 曹秀振. 基于离散元法的免耕播种开沟器的设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2016.
30 ASAF Z,RUBINSTEIN D,SHMULEVICH I. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage[J]. Soil & Tillage Research,2007,92(2):227 - 242.
31 张永良. 基于离散元的逆转旋耕施肥播种机抛土性能仿真及试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2012.
32 ZENG Z,CHEN Y,ZHANG X. Modelling the interaction of a deep tillage tool with heterogeneous soil [J]. Computers and Electronics in Agriculture,2017,143:130 - 138.
33 GURSOY S,CHEN Y,LI B. Measurement and modelling of soil displacement from sweeps with different cutting widths[J]. Biosystems Engineering,2017,161:1 - 13.
34 SOLHJOU A,FIELKE J M,JMA D. Soil translocation by narrow openers with various rake angles [J]. Biosystems Engineering,2012,112(1):65 - 73.
35 杨有刚,张宏,冯涛,等. 土壤浅深松联合松耕机设计和浅松土试验[J]. 机械工程学报,2012,48(19):163 - 168.
YANG Yougang,ZHANG Hong,FENG Tao,et al. Topsoil and subsoil combined cultivator and top-soiling experiment[J]. Journal of Mechanical Engineering,2012,48(19):163 - 168. (in Chinese)

(上接第 102 页)

15 LAWINSKA K, REMIGIUSZ M. Analysis of sieve holes blocking in a vibrating screen and a rotary and drum screen[J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing,2017, 53(2):812 - 828.
16 IVANOV N M, FEDORENKO I Y,ZAKHAROV S E,et al. Holesevaluating grain feed at separation by planetary cylindrical sieve with round holes[J]. Siberian Bulletin of Agricultural Science,2017,47(5):72 - 79.
17 周学建,袁华杰,闫卫红,等. 联合收获机吸杂口偏置型旋风分离清选装置试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(8):80 - 85,159. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20140813&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.013.
ZHOU Xuejian,YUAN Huajie,YAN Weihong, et al. Performance experiment on cyclone separating device based on off-centered inlet scoop[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(8):80 - 85,159. (in Chinese)
18 师清翔,马萌,闫卫红,等. 双扬谷器旋风分离清选系统试验与参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(11):124 - 128. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20141119&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.019.
SHI Qingxiang,MA Meng,YAN Weihong,et al. Two-stage winnower cyclone separating cleaning system performance testing and optimization[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(11):124 - 128. (in Chinese)
19 杨作梅,孙静鑫,郭玉明. 不同含水率对谷子籽粒压缩力学性质与摩擦特性的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(23):253 - 260.
YANG Zuomei, SUN Jingxin, GUO Yuming. Effect of moisture content on compression mechanical properties and frictional characteristics of millet grain [J] . Transactions of the CSAE,2015,31(23):253 - 260. (in Chinese)
20 薛然. 花生荚果圆筒筛筛分特性研究与参数优化[D]. 北京:中国农业科学院,2015.
21 尹健,黄年月,吴兵,等. 微型水稻联合收割机新型圆筒筛设计研究[J]. 现代机械,2011(3):62 - 64,72.