

基于 CFD 的牧草种子收获机沉降箱体改进设计与试验

兰凌霄 李凤鸣 王 强 刘贵林 李 伟 刘 伟
(中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院有限公司, 呼和浩特 010010)

摘要: 现有牧草种子收获机在收获牧草种子时,其收获总损失率与破碎率较高,杂质清选效果差,沉降不充分。为了解决上述问题,在现有沉降箱的基础上进行理论及结构分析,结合具体需求及整机结构外形来改进沉降箱清选结构,设计了一种圆弧减速挡板,减小了种子受到的冲击力,调整了挡板的大小以及位置,使得更多的种子经过沉降进行清选,提升牧草种子收获的质量合格率。通过计算流体动力学仿真对沉降分离装置的内部流场进行了仿真模拟,选择雷诺应力模型和 DPM 模型分别对气相和固相进行模拟得到气流场分布图和颗粒场的运动轨迹图。结果表明设计的圆弧减速挡板对比折线降速挡板的结构提升了种子沉降率,并减小了种子破碎率,并且在入口风速提高时,提高了箱底种子捕获率。通过牧草种子收获机收割苜蓿实地试验,分别对比了无挡板以及折线减速挡板的收获合格率。结果表明,采用圆弧减速挡板的沉降箱收获种子时沉降损失率为 0.19%,破碎率为 0.9%,均达到相关行业标准,证明了该装置的有效性。

关键词: 牧草种子收获机; 沉降箱; 圆弧减速挡板; 计算流体力学

中图分类号: S225.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S2-0150-06

Improvement Design and Experiment of Settlement Box of Forage Grass Seed Harvester Based on CFD

LAN Lingxiao LI Fengming WANG Qiang LIU Guilin LI Wei LIU Wei

(Hohhot Branch of Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Co., Ltd., Huhhot 010010, China)

Abstract: When harvesting forage seeds, the current harvester has high total loss rate and crushing rate, poor cleaning effect of impurities and insufficient settlement. In order to solve the above problems, theoretical and structural analysis on the basis of the existing settling box were carried out, the cleaning structure of the settling box in combination with specific requirements and the overall structure shape was improved, a circular arc decelerating baffle was designed, the impact force on the seeds was reduced, the size and position of the baffle were adjusted, and more seeds were made clean by settling. The qualified rate of forage seed harvest quality was improved. By means of computational fluid dynamics simulation, the internal flow field of the settlement separation unit was simulated. Reynolds stress model and DPM model were selected to simulate the gas phase and solid phase respectively to obtain the airflow field distribution diagram and the particle field motion trajectory diagram. The results showed that the circular arc deceleration baffle designed compared with the structure of the broken line deceleration baffle increased the seed settlement rate, reduced the seed crushing rate, and increased the bottom capture rate when the inlet wind speed was increased. Field experiments were carried out to harvest alfalfa by forage seed harvester, and the harvest qualification rates of baffle free and broken line reducer were compared. The results showed that the sedimentation loss rate was 0.19% and the crushing rate was 0.9%, both of which met the national standard and proved the effectiveness of the device.

Key words: forage seed harvester; settlement box; arc cancellation baffle; computational fluid dynamics

收稿日期: 2023-06-03 修回日期: 2023-08-24
基金项目: 内蒙古自治区科技重大专项(2020ZD0001)
作者简介: 兰凌霄(1995—),男,工程师,主要从事农牧业机械设计研究,E-mail: 121905657@qq.com
通信作者: 李凤鸣(1986—),男,正高级工程师,主要从事农牧业机械设计研究,E-mail: lifeman_ok@126.com

0 引言

在一些发达国家中,土地集中过度使用后,土壤质量下降,需要种植一些牧草来恢复土壤活力,这样也就促使牧草种子的需求大幅提升,间接地促进这些国家的牧草收获机械的发展^[1]。

我国近些年产业结构调整、退耕还林还草等政策的实施促使牧草草籽需求量大幅提升,据资料统计,我国每年草籽需求量约 2.0×10^5 t,实际供应量不足 5×10^4 t,每年进口的牧草种子超过 6×10^4 t,其中苜蓿种子的进口量约占总进口量的 $1/3$ ^[2]。草籽的需求,致使我国大部分农场用谷物收获机来对牧草种子进行收获,这样的收割方式,收获的损失率高达 50%,造成了严重的浪费。

在牧草成熟适宜收获期,进行全喂入收获会因为其茎秆内部含水率较高,导致收获质量较低。20 世纪 30 年代,根据苜蓿特性,JAMES E W 等研制出一种专用的苜蓿种子联合收获机,该机器通过捶打作物的方式,使种子脱离作物本身,被脱离下来的牧草种子经多孔的种子盘进入输送通道,输送通道内通过内外压差将种子装入收集袋^[3]。1959 年,FRANCISM J 等研制了牧草种子捡拾联合收获机,该机器通过梳刷方式使牧草种子剥离,而且捡拾部分可以随着作业根据地面高低变化进行仿形^[4]。20 世纪 80 年代,机械工业部内蒙古畜牧机械研究所研制出 92ZS-1.5 型牧草种子收获机。该机采用先进割前脱粒技术,在收割时通过机器的转刷与牧草接触,对牧草梳刷进行脱粒,使种子与茎秆提前分离,同时在高速转刷带动下会产生一定的负压,种子会被吸附到采集区^[5]。21 世纪初,中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院研制出 9ZQ-2.7 型苜蓿种子收获机,该机器沉降箱内加入折线挡板,降低了沉降损失率^[6]。

收获的种子中夹杂着干草等一些杂质,而且存在着种子收获损失,所以将收获的种子沉降并与杂质清选分离,是亟需解决的问题。

本文通过 ANSYS 等仿真软件对已设计的沉降箱样机内部气流气场进行仿真模拟,分析牧草种子与杂质的运动轨迹,设计一种新型的沉降分离装置。

1 沉降箱结构与挡板设计

1.1 沉降箱结构

沉降箱结构主要依照整体结构随形设计,考虑底盘配合以及物料存放等因素,借鉴了旋风分离器的工作原理以及先前的沉降箱模型,对沉降箱体重新进行了设计。根据具体情况利用 SolidWorks 软件

进行三维建模,如图 1 所示,物料从进风口进入,在箱内进行沉降分离,部分杂质从出风口飘出,可从观察窗实时观看种子沉降。

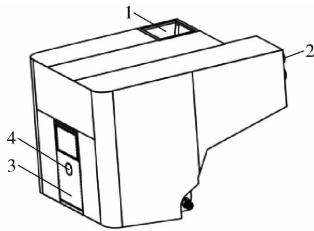


图 1 沉降箱模型

Fig.1 Settlement box model

1. 出风口 2. 进风口 3. 检修门 4. 观察窗

箱体容积计算公式为

$$V = \frac{BLQ}{44.44v\eta} \quad (1)$$

式中 V ——容积, m^3
 B ——收获机工作幅宽, m
 L ——从空载到满载的行走距离, m
 Q ——单位面积物料质量, kg/hm^2
 v ——物料单位体积质量, kg/m^3
 η ——箱体充满系数,取 80% ~ 85%

结合经验与实际需求,得出箱体容积为 9.5 m^3 。

1.2 圆弧减速挡板设计

减速挡板的设计目的是,当种子随风吹入到沉降箱内,撞到减速挡板上,挡板的反作用力使得种子反弹,反弹之后的种子则会受到入口风速的作用,进行降速下沉抛物线运动,这样不仅可以对进入沉降箱的种子起到降速作用,更方便沉降,其次还能在入口处对种子上的灰尘进行脱离,如图 2 左侧是折线形减速挡板,安装位置距入风口 600 mm 左右。

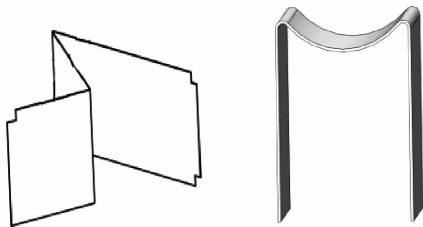


图 2 减速挡板

Fig.2 Deceleration damper

但是在试验中折线形挡板位置以及形状对种子的降速沉降效果较差,很多种子不经过挡板便从挡板下部空隙漏出,而且折线挡板加入后种子的破碎率有些许增高,考虑到平板以及棱角对种子的冲击力会对种子造成损伤,为了减小冲击力,降低种子破碎率,本文设计一种圆弧形挡板,如图 2 右侧所示,圆弧形减小了挡板对种子的压力,也能起到降速的作用,同时将棱角进行圆角化,使种子受力更小一些,并调整了挡板的大小以及位置,使得挡板可以更

好地对种子进行沉降。图 3 为挡板在沉降箱流体域内的具体位置。

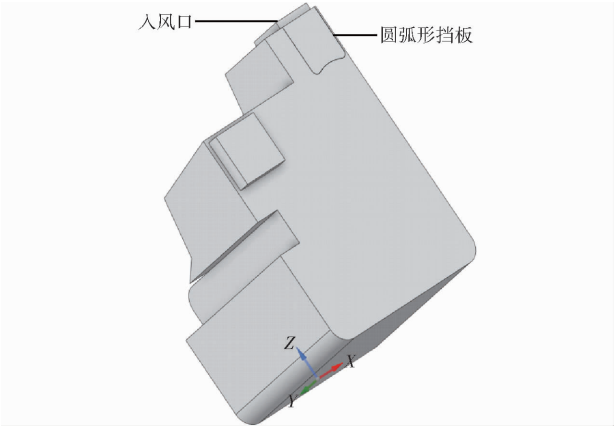


图 3 圆弧减速挡板在流体域位置
Fig.3 Circular arc deceleration baffle in fluid domain position

2 收获机沉降箱 CFD 模拟

2.1 流场数学模型

针对流场中常用的 $k-\omega$ 与 $k-\varepsilon$ 模型,本文需要在沉降箱内进行旋转沉降,在考虑到流场曲线、涡流以及旋转等因素下,选择雷诺应力模型(RSM),它会更高精度地计算流场内部的复杂情况,也可以更准确地反映沉降箱内种子及杂质的曲线运动。虽然 RSM 需要求解额外方程,会显著增加计算时间,而且收敛性较低,消耗较多的计算机资源,但是现有的计算机计算能力可以满足它的需求。

在雷诺方程中 k, ε 两个参数计算方法为^[7-15]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2}(P_{ii} + G_{ii}) - \rho \varepsilon (1 + 2Mt^2) + S_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{1}{2}(P_{ii} + C_{\varepsilon 3} G_{ii}) \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (3)$$

- 式中 k ——湍流动能, m^2/s^2
 ρ ——气体密度, kg/m^3
 ε ——湍流动能耗散率, m^2/s^3
 t ——时间, s
 μ ——层流粘度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
 μ_t ——湍流粘度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
 u —— x 方向上速度, m/s
 P_{ii} ——剪切应力产生相, Pa/s
 G_{ii} ——浮力产生相, Pa
 Mt ——湍流马赫数
 $C_{\varepsilon 3}$ ——点相对于重力的流动系数

S_k, S_ε ——用户软件定义参数
 $\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.0, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92$ 。

2.2 流场模型

对于流体仿真,流场网格划分质量十分重要,将 SolidWorks 建立的沉降箱模型导入 ANSYS 软件中的 Fluent 模块,用其自带的 meshing 进行网格划分,由于沉降箱模型较为复杂,选择了四面体与六面体网格共节点相连,采用这样的方式即使在边角处,网格也会有相邻的网格,使其更细腻更平滑,计算采用了 128 472 个元素和 373 527 个节点的多面体网络。重力加速度 g 设定为 $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$,大气压力为 101 325 Pa。进风口作为入口,边界条件为速度入口,入口风速为 10 m/s 。出风口作为出口,出口条件为压力出口类型。入口出口的水力直径经过计算分别为 0.16、0.28 m 。

2.3 离散相模型

选择 DPM 模型来模拟颗粒运动轨迹。在模型中粒子与管道壁面可发生壁面反射、逃逸以及被捕获等一些壁面条件,沉降箱底部 wall-trap 选择捕获边界条件,其他箱体壁面选择反射边界条件。喷射源的选择根据具体试验的种子,选择苜蓿颗粒,最大直径 4 mm ,最小直径 1 mm ,平均直径 2.5 mm 。同时也建立另一个喷射源用来模拟灰尘、杂质在沉降箱内的运动轨迹。喷射源的速度需要入风口的速度来决定,由于入风经过管道,需要求出入风口的风速。

根据颗粒在管道中的输送理论,入口风速计算公式为

$$v_a = K_L \sqrt{\frac{\rho_f}{1\,000}} + K_d L' \quad (4)$$

- 式中 K_L ——牧草种子粒度系数
 ρ_f ——种子密度, kg/m^3
 K_d ——种子物料特性系数
 L' ——管道长度, m

当选取的种子颗粒直径在 10 mm 以下时, K_L 取值范围为 16 ~ 20,由于选取的是苜蓿种子,粒径平均 4 mm 左右, K_L 取 16。由于种子风送管道长度低于 1.5 m ,所以 K_d 对于入风口速度影响可以忽略。由式(4)可得入口风速 v_a 为 10.14 m/s ,取整为 10 m/s ^[16-18]。

2.4 整体流程及模拟程序

根据 ANSYS 官方的求解过程(图 4),选择 SIMPLE-Consistent 压力基求解器,特点是求解速度快。离散格式则选择压力插值法的 PRESTO,用于高度旋流,包括压力梯度突变(多孔介质、风扇模型等)或者计算域存在大曲率的面。

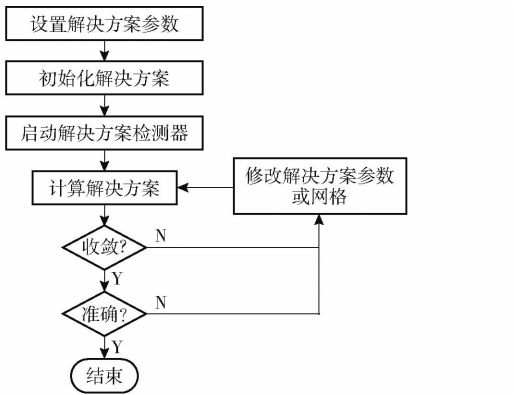


图 4 求解流程图
Fig. 4 Solution flowchart

为测试减速挡板的清选、沉降效果,设置多组试验,在其他条件一致下,一组设置折线减速挡板,一组设置圆弧减速挡板,一组没有设置挡板。同时也设定不同入口风速,来进行验证。

3 仿真结果与分析

3.1 沉降箱的清选作用

清选作用是沉降箱的一大特性,从图 5 可看出,当风速达到 7.5 m/s 时,苜蓿种子上附着的灰尘以及杂质会因重力的缘故先下沉到箱内,旋转一段时间细小的灰尘颗粒全部都会被清选出沉降箱。风速 7.5 m/s 也是低于提供的入口风速,效果十分明显。

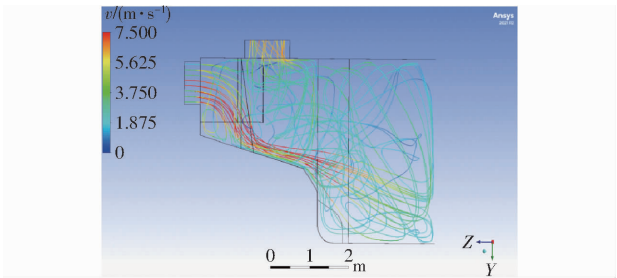


图 5 杂质颗粒速度
Fig. 5 Change in velocity of impurity particles

3.2 沉降箱内速度与压力变化

3.2.1 减速挡板对速度的影响

入口气流速度相同时,图 6 为无挡板的沉降箱种子颗粒速度,气流进入箱体内部速度一直未减,直到触碰到箱体壁面才进行减速,在箱体内旋转不充分便沉底,而且极少数种子从出口风筒逃逸出去,造成了损耗。对比而言,图 7 中气流进入箱体内部便与挡板碰撞,进行往返运动,达到了降速与初步清选种子的效果,而且进入箱体内部,相对比而言旋转得充分一些,利于清选。但是存在部分颗粒从挡板下通过,总体而言没有种子从出口逃逸,没有造成损耗^[19-22]。

图 8 为设置圆弧形减速挡板的沉降箱种子颗粒速度,如图 8 所示,颗粒在遇到挡板时降速,而且只

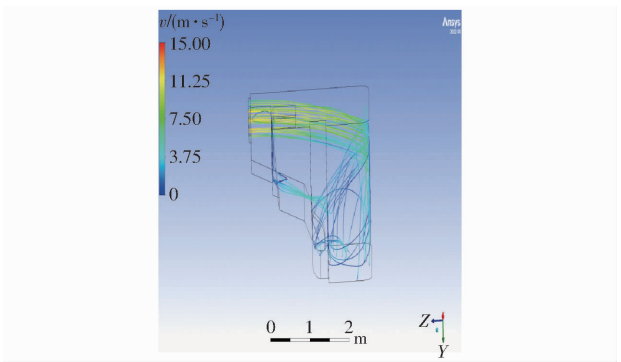


图 6 无挡板种子颗粒速度
Fig. 6 Particle velocity diagram of seeds without baffles

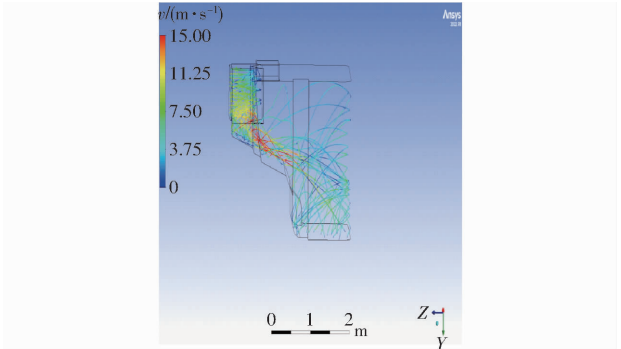


图 7 折线挡板种子颗粒速度
Fig. 7 Particle velocity diagram of seeds with fold line baffles

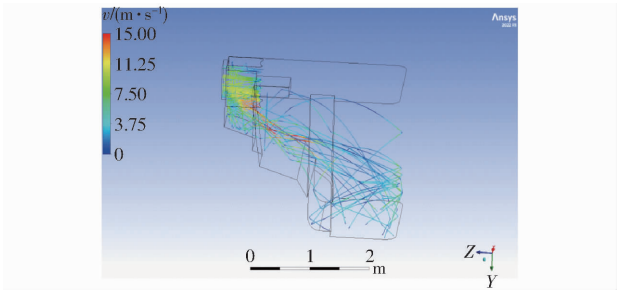


图 8 圆弧挡板种子颗粒速度
Fig. 8 Particle velocity diagram of seeds with arc baffles

有极少颗粒绕过减速挡板直接进入箱体内部,降速十分充分。

3.2.2 减速挡板对颗粒压力的影响

根据图 9 看出,在进入沉降箱内,颗粒在碰撞圆弧挡板时,压力提升至 240 Pa,图 10 则是在折线减速挡板的作用下,入口处压力增加至 420 Pa,对比来看,两者都在入口处进行了反弹运动,但是折线挡板在入口处压力提升较为明显,比圆弧的压力高近 1 倍,这种情况,容易使种子结构受到破坏^[22-24]。

3.3 减速挡板对颗粒停留时间的影响

用圆弧挡板时,如图 11 所示,牧草种子在入口处进行反弹运动,在进入箱体后进行旋转沉降,绝大部分颗粒在 1.5 s 左右就进行沉降。由图 12 可以看到,气流在折线挡板处消耗了部分时间,颗粒在箱体内部也进行了旋转运动,颗粒停留时间约

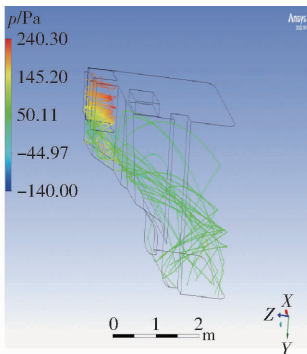


图 9 圆弧挡板种子颗粒压力

Fig.9 Particle pressure diagram of seeds with arc baffles

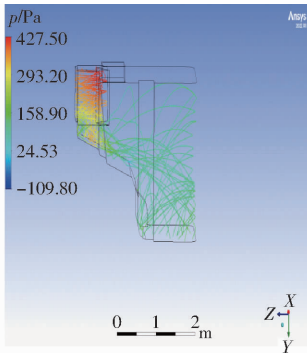


图 10 折线挡板种子颗粒压力

Fig.10 Particle pressure diagram of seeds with fold line baffles

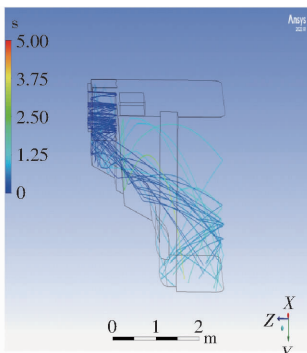


图 11 圆弧挡板颗粒停留时间

Fig.11 Residence time of seed particles with arc baffles

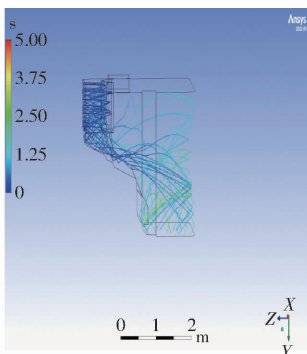


图 12 折线挡板颗粒停留时间

Fig.12 Retention time of particles with fold line baffles

为 2.8 s,对比圆弧挡板情况,颗粒停留时间慢了 1 s 左右。

3.4 入口速度对沉降效果的影响

对入口气流不同速度进行了仿真,针对的颗粒都是粒径 4 mm 左右的颗粒相(苜蓿),针对箱底的捕获率进行了数据记录,如图 13 所示,无减速挡板时,当速度达 9 m/s 时,就存在 0.4% 的种子没有被箱底捕获,随着风速增加,这个数量也在逐步增加。加了折线形挡板的沉降箱,当风速达 13 m/s 时,开始存在 0.2% 的种子没有被箱底捕获,随着风速增加,种子数量在缓慢增加。圆弧挡板则是从风速达到 16 m/s 时,捕获率才开始下降,而且比折线形挡板的下降斜率小,所以圆弧形的捕获率稳定性更好一些。从图 13 可知,加了减速挡板的收获机在入口气流速度 10 m/s 左右时,基本不会有沉降损失。

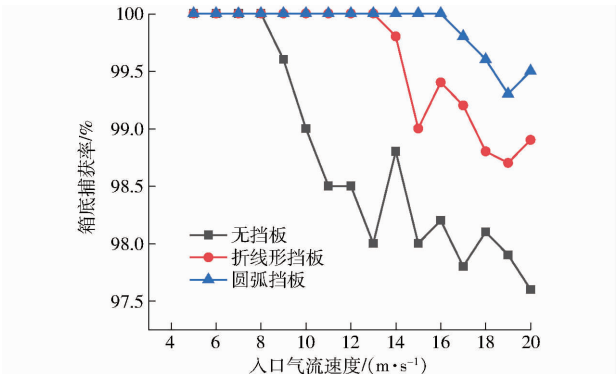


图 13 速度与捕获率对应关系

Fig.13 Line chart corresponding to speed and capture rate

4 试验

4.1 试验装置

沉降箱完成设计改进后随着牧草种子收获机一起进行试制,试制时严格按照图纸,试制结束后,整机如图 14 所示。在四川省阿坝藏族羌族自治州红原县川草国家级牧草种子生产基地进行收获试验,收获的作物是苜蓿。

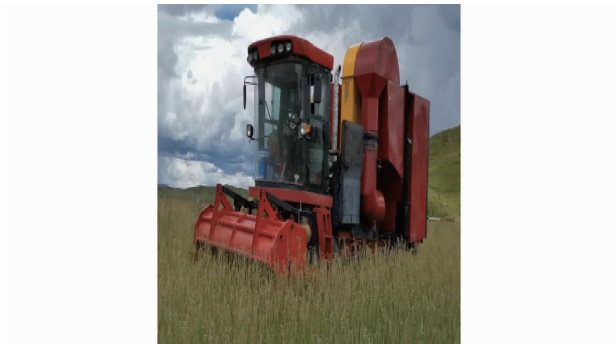


图 14 试验样机

Fig.14 Test prototype

4.2 试验设计与方法

为了对比沉降箱的沉降与清选效果,按照 GB/T 5262—2008《农业机械试验条件测定方法的一般

规定》的要求,现场对一些关键指标进行测定。其中沉降损失率可以判断设计的沉降箱以及减速挡板的性能,沉降损失率越低说明沉降效果越好。种子破碎率是指种子在采集沉降过程中破碎种子数量的占比,种子破碎率越低说明采集的种子质量越好。

针对除杂清选种子效果,加入种子净度这一概念,在指标中加入了种子质量以及清选后质量,这样可以有效地对比,收获种子时候清选杂质的效果。因为需要对比未加挡板牧草种子收获机以及加了两种减速挡板的实际效果,因此设计了 3 组试验,每一组都做了 3 次,取平均值作为参考。

4.3 试验结果及分析

由表 1 可看出,在取样面积相同的情况下,未加挡板牧草种子收获机以及牧草种子收获机加两种不同减速挡板的收获效果对比。可以看出使用牧草种子收获机时沉降损失率为 1.4%,加了折线挡板之后沉降损失率为0.26%,加了圆弧挡板之后,沉降

表 1 3 组牧草种子收割试验结果

Tab.1 Three groups test values of forage seed harvesting

参数	牧草种子 收获机未 加挡板	牧草种子 收获机加 折线挡板	牧草种子 收获机加 圆弧挡板
	5	5	5
取样面积/m ²			
取样面积内损失量/g	1.67	0.30	0.23
每平方米损失量/(g·m ⁻²)	0.33	0.06	0.05
取样面积内总质量/g	119	117	124
每平方米总质量/(g·m ⁻²)	23.8	24.4	24.8
沉降损失率/%	1.4	0.26	0.19
收获种子质量/g	104	110	117
种子清选后质量/g	100	108	115
种子破碎率/%	1.9	2.1	0.9

损失率达到了 0.19%。可见加了圆弧减速挡板后,沉降损失率有了一定幅度的下降。

对于种子净度,牧草种子收获机含杂 4 g,加了两种挡板的收获机含杂 2 g,明显看出牧草种子收获机加了挡板之后清选效果更佳。从收获种子质量可以看出,圆弧挡板比折线挡板收获的质量更多一些。破碎率来看,折线挡板由于种子收到的压力增加,导致破碎率提升,而圆弧挡板则有效地解决了这个问题,破碎率仅为 0.9%。

试验结果表明圆弧形挡板牧草种子收获机的清选、沉降效果以及破碎率,优于折线挡板以及无挡板情况,挡板减速与沉降的效果均与仿真一致,满足收获需求。

5 结论

(1)通过仿真分析得到,灰尘等杂质在入口风速大于 7.5 m/s 时可以实现有效清选。

(2)圆弧减速挡板的仿真效果对比折线挡板以及无挡板两种情况,不仅使进入沉降箱内部的种子速度降低,也使种子在箱体内部旋转得更加充分,沉降时间也更短。而且圆弧挡板会减少种子冲击挡板时的压力,降低种子破碎概率,同时还增加了箱体底部的捕获率。

(3)加工试制牧草种子收获机样机,进行收获试验,满足 GB/T 5262—2008《农业机械试验条件测定方法的一般规定》,圆弧形挡板的种子沉降损失率以及种子破碎率相比较折线挡板都有所下降,沉降损失率为 0.19%,种子破碎率为 0.9%,均达到相关标准(JB/T 10908—2008《割前脱牧草种子收获机》)。

参 考 文 献

[1] 刘伟,李凤鸣,李伟,等. 牧草种子收获机研究现状与展望[J]. 农业工程, 2021, 11(7):17-20.
LIU Wei, LI Fengming, LI Wei, et al. Research status and prospect of forage grass seed harvester[J]. Agricultural Engineering, 2021, 11(7): 17-20. (in Chinese)

[2] 刘永杰,孙东升,毛晓辉. 处于产业化发展中的牧草种子收获与加工行业急需先进的成套技术设备[J]. 农机市场, 2005 (12):14-16.

[3] SMITH R L. Grass seed harvester for small plots1[J]. Crop Science, 1973, 13(6):762-763.

[4] 李衍军,刘贵林. 苜蓿种子收获机械发展探讨[J]. 农业机械, 2016(9):91-94.

[5] 王全喜,马卫民,王振华,等. 禾本科牧草种子收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 2):96-101.
WANG Quanxi, MA Weimin, WANG Zhenhua, et al. Design and experiment on gramineous herbage seed harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2):96-101. (in Chinese)

[6] 李凤鸣,高晓宏,王强,等. 牧草种子收获机分离装置结构设计[J]. 农业机械, 2022(5):84-87, 93.

[7] WALLIN S, JOHANSSON A V. An explicit algebraic Reynolds stress model for incompressible and compressible turbulent flows [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2000, 403: 89-132.

[8] FENG Y Q, YU A B. Assessment of model formulations in the discrete particle simulation of gas-solid flow[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2004, 43(26):8378-8390.

[9] WANG B, XU D L, CHU K W, et al. Numerical study of gas-solid flow in a cyclone separator[J]. Applied Mathematical Modelling, 2006, 30(11):1326-1342.

- HAN Hui, CHENG Dequan, XU He. Fault diagnosis of feed pump bearing based on SDAE[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(4): 254–258. (in Chinese)
- [18] 王春阳, 汤子梦, 吴喜芳, 等. 土地利用分类粒子群优化概率神经网络半监督算法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 167–176.
- WANG Chunyang, TANG Zimeng, WU Xifang, et al. Semi-supervised land use classification based on particle swarm optimization probabilistic neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 167–176. (in Chinese)
- [19] 王华, 陈梦奇, 蔡恩香, 等. 基于多目标粒子群优化算法的永久基本农田划定模型[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 138–146.
- WANG Hua, CHEN Mengqi, CAI Enxiang, et al. Permanent basic farmland delineation model based on multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 138–146. (in Chinese)
- [20] 杜先君, 贾亮亮. 基于优化堆叠降噪自编码器的滚动轴承故障诊断[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(12): 2827–2838.
- DU Xianjun, JIA Liangliang. Fault diagnosis of rolling bearing based on optimized stacked denoising auto encoders[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(12): 2827–2838. (in Chinese)
- [21] 郑茂辉, 刘少非. GA 优化 ELM 神经网络的排水管道缺陷诊断[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(5): 59–64.
- ZHENG Maohui, LIU Shaofei. Defect diagnosis of urban drainage pipelines based on GA optimized ELM neural network[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(5): 59–64. (in Chinese)
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 21397—2008 棉花收获机[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

(上接第 155 页)

- [10] LI J, WEBB C, PANDIELLA S S, et al. Solids deposition in low-velocity slug flow pneumatic conveying[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2005, 44(2): 167–173.
- [11] KUMAR V J F, DURAIRAJ C D. Influence of head geometry on the distributive performance of air-assisted seed drills[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 75(1): 81–95.
- [12] WANG Ying, WILLIAMS K, JONES M, et al. CFD simulation methodology for gas – solid flow in bypass pneumatic conveying—a review[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 125: 185–208.
- [13] 孙舒畅. 基于 DEM – CFD 耦合的气吸式玉米精密排种器工作过程仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [14] 张展. 风机和压缩机的设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [15] 韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT: 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
- [16] TRIPATHIN M, SANTO N, KALMAN H, et al. Experimental analysis of particle velocity and acceleration in vertical dilute phase pneumatic conveying[J]. Powder Technology, 2018, 330: 239–251.
- [17] 杨庆璐, 李子涵, 李洪文, 等. 基于 CFD – DEM 的集排式分肥装置颗粒运动数值分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 81–89.
- YANG Qinglu, LI Zihan, LI Hongwen, et al. Numerical analysis of particle motion in pneumatic centralized fertilizer distribution device based on CFD – DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 81–89. (in Chinese)
- [18] 李中华, 王德成, 刘贵林, 等. 气流分配式排种器 CFD 模拟与改进[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 64–68.
- LI Zhonghua, WANG Decheng, LIU Guilin, et al. CFD simulation and improvement of air-stream distributive metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 64–68. (in Chinese)
- [19] 邢金龙. 基于 CFD – DEM 耦合的气流一阶集排式排种系统仿真与试验[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [20] 王磊, 席日晶, 廖宜涛, 等. 油麦兼用型气送式集排器匀种涡轮设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 62–72, 97.
- WANG Lei, XI Rijing, LIAO Yitao, et al. Design and test on even seeding turbine of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 62–72, 97. (in Chinese)
- [21] QIAN J, FERRO A R, FOWLER K R. Estimating the resuspension rate of indoor particles[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2008, 58(4): 502–516.
- [22] SHIMA N. A Reynolds-stress model for near-wall regions[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B, 1985, 51(465): 1631–1636.
- [23] XU H, ZHANG P, HU Z, et al. Analysis of dust diffusion from a self-propelled peanut combine using computational fluid dynamics[J]. Biosystems Engineering, 2022, 215: 104–114.
- [24] CORTES C, GIL A. Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2007, 33(5): 409–452.