doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.007

对辊差速式块状有机肥破碎施肥装置设计与试验

陈桂斌[1,2]　王庆杰[1,2]　李问盈[1,2]　何　进[1,2]　李洪文[1,2]　于畅畅[1,2]
(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对现有施肥装置对有机肥肥块的破碎效果不佳,农田条施排肥难度大等问题,提出对辊差速式肥块破碎施肥方式,通过施肥辊相对转动咬合喂入,将肥块破碎的同时实现强制排肥,增大排肥率。对施肥辊齿辊尺寸、齿形及辊齿布置方式等关键部件及参数进行设计,建立肥块破碎受力模型和施肥量的理论模型,得到影响破碎力和施肥量的主要因素。利用离散元分析软件建立肥块破碎模型,通过仿真试验明确施肥装置的上置施肥辊转速、下置施肥辊转速、施肥辊中心高度差、施肥量对破碎率的影响规律;设计四因素正交旋转试验,对破碎施肥装置的作业参数进行优化,当上置施肥辊转速为 238 r/min、下置施肥辊转速为 374 r/min、两施肥辊中心高度差为 71 mm、施肥量为 797g/s 时,优化所得破碎率为 80.3%,排肥率为 99.2%;搭建对辊差速式破碎施肥装置试验台,对机施有机肥含水率 8% ~40% 的 4 种肥块进行验证试验,试验所得的肥块破碎率分别为 90.7%、80.8%、79.6%、76.9%,排肥率分别为 95.6%、97.8%、98.2%、98.6%,与优化所得结果的平均误差分别为 4.66%、1.66%,误差较小,表明对辊差速式块状有机肥破碎施肥装置满足施肥要求。

关键词: 有机肥; 破碎; 对辊差速; 试验
中图分类号: S224.22　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)12-0065-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Double Roller Differential Speed Crushing Fertilizer Device for Block Organic Fertilizer

CHEN Guibin[1,2]　WANG Qingjie[1,2]　LI Wenying[1,2]　HE Jin[1,2]　LI Hongwen[1,2]　YU Changchang[1,2]
(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Aiming at the problems that organic fertilizer is easy to agglomerate in long-term piling up and the existing fertilizer apparatus has poor crushing effect on block organic fertilizer, which is not conducive to mechanized deep construction and difficult to apply fertilizer by strip in farmland. The fertilization method of crushing organic fertilizer by roller differential extrusion was put forward to improve the crushing rate of farm manure, ensure the quality rate of fertilizer and improve the utilization rate of fertilizer. The fertilizer block can be broken and forced to discharge which can be realized at the same time by the relative rotation of the fertilizing roller. By building a test of roll differential extrusion fertilizer apparatus, the key parts of fertilization roller were designed, including tooth roller, tooth profile and roller tooth arrangement, force analysis model of fertilizer fragmentation and the theoretical model of fertilizer amount were set up and the main factors affecting crushing force and key parameters affecting fertilizer amount were got, and then the influence law was produced. A discrete element model of fertilizer fragmentation was built to clarify the rotation speed of upper and lower fertilizing roller of fertilization device and the height difference of the center of fertilization roller and effect of fertilizer amount on crushing rate. The orthogonal rotation experiment of multiple factors was designed to optimize the operation performance parameters of the fertilizer device. The results showed that the rotation speed of the top fertilization roller was 238 r/min, the rotation speed of the lower fertilization roller was 374 r/min, the height difference between the two fertilization rollers was 71 mm, the crushing rate was 80.3%, and the fertilizer dropping rate was 99.2%. In the validation test, four kinds of organic fertilizer with water

收稿日期: 2020-11-20　修回日期: 2021-01-31
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700301)
作者简介: 陈桂斌(1997—),男,博士生,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail: 1510202878@qq.com
通信作者: 王庆杰(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备研究,E-mail: wangqingjie@cau.edu.cn

content ranging from 8% to 40% were selected to verify the optimized parameters. The results showed that the crushing rate was 90.7%, 80.8%, 79.6% and 76.9% and the fertilizer discharge rate was 95.6%, 97.8%, 98.2% and 98.6%, respectively. The average error between the results and the optimized results was 4.66% and 1.66%, respectively. The experimental results showed that the roller differential block type fertilizer applicator had high quality of broken fertilizer.

Key words: organic fertilizer; crushing; roller differential speed; experiment

0 引言

在农业生产中,化学肥料具有肥效释放快、养分含量高、用量少等优势,但长期施用化肥导致土壤耕作层肥力结构被破坏,有机质下降;有机肥具有营养全面、有机质丰富、肥效缓和持久等优势,施用有机肥能有效改善土壤理化性质[1-4]。近年来随着国家对绿色农业的不断重视,在“减药”、“减肥”的政策指引下,有机肥代替部分化肥已成为提升耕地质量的重要途径[5-8]。

有机肥为含湿物料,在长期堆放处理过程中易结块,影响肥效释放,不利于机械化施肥作业,当前机施有机肥的含水率为8% ~40%[9-10]。为保障有机肥施肥质量,在施肥前一般先使用药剂杀灭害虫、去除病菌,后进行发酵腐熟处理。现有有机肥施肥方式主要有撒施和深施两种,其中大田以撒施作业为主,利用不同种类的撒肥车将肥料抛撒到地表,常见撒肥装置有离心圆盘、螺旋桨叶、锤片等[11-12],其撒肥原理为利用高速旋转部件将肥块撞击破碎,但此类方式碎肥不均匀,排肥量不稳定,易架空拥堵,能耗高;目前有机肥深施主要应用于果园施肥作业中,大田作物的深施肥装置鲜有研究报道。有机肥深施能够减少氮元素挥发,提高肥料利用率,但受制于肥料易结块、深施过程易堵塞等问题,有机肥深施多为两段式处理,先经过碎肥装置将肥块粉碎,后利用高速旋转的立式或卧式开沟部件[13-14],在开沟的同时实现肥料与土壤混合。两段式作业虽能有效将肥块破碎,减少施肥堵塞,但粉碎后的肥料在堆放过程中可能会再次结块,进而影响施肥质量。目前国内外学者主要针对施肥机送肥、抛撒、开沟装置进行研究,对碎肥装置的研究较少。李娟等[15]为提高有机肥施肥均匀性,设计了一种双体独立螺旋的分段配送机构。张涵等[16]依据有机肥呈块状、易板结等特点设计了双螺旋机构,以期在输肥的同时实现肥块切割破碎。上述研究并未较好地解决有机肥施肥中肥块破碎率低、易堵塞、肥块再次结块,致使施肥质量下降等问题。

针对上述问题,结合有机肥特性和深施肥要求,本文提出一种对辊差速式肥块破碎施肥方式,在开沟作业的同时对肥块进行破碎施肥,避免施肥堵塞。对施肥辊的齿辊尺寸、齿形、排布方式进行设计,建立离散元仿真模型,通过单因素试验,明确各因素对破碎率的影响,通过正交旋转试验确定施肥装置的最佳作业参数,并进行试验验证。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

对辊差速式块状有机肥破碎施肥装置结构如图1所示,主要包括喂入料斗、直流电机、施肥对辊、可调节出肥口等。两直流电机固定在机架上,上置与下置施肥对辊通过菱形轴承座安装在输肥管侧板上,施肥对辊通过联轴器与直流电机相连。施肥对辊的相对位置可调,排肥口开度通过螺栓与螺帽的相对位置变化进行调节。输肥腔体前后安装透明亚克力板,便于观察肥块的破碎状态。

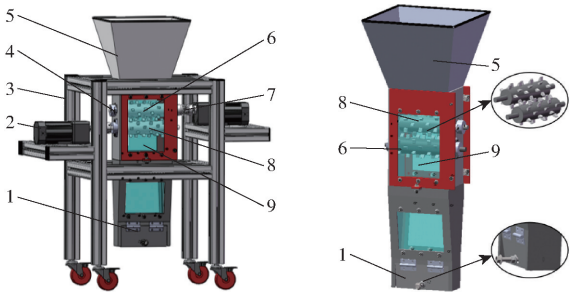


图1 对辊差速式施肥装置结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of counter roller differential speed crushing fertilizer device

1. 排肥口 2. 直流电机 3. 机架 4. 轴承座 5. 喂入料斗 6. 上置施肥辊 7. 联轴器 8. 下置施肥辊 9. 侧板

为通过台架试验获得施肥装置的上、下施肥辊的最优转速,施肥对辊的转速可通过直流电机的调速器进行定量调节;为获取施肥对辊的最佳安装位置,两施肥辊的相对安装高度可调;施肥装置排肥口开度可调,保证施肥过程不发生堵塞;考虑到施肥装置后期在整机上的可安装性,施肥腔体的宽度不宜过大。

1.2 工作原理

如图1所示,施肥装置作业时,在喂入料斗中装满肥块,肥块依靠自身重力落入施肥对辊所在的碎肥区,通过施肥对辊辊齿剪切、挤压作用将肥块破碎,最后通过排肥口将肥料排出。肥块的破碎过程主要分为3个阶段,如图2所示,在区域 A 内肥块在

两施肥辊的作用下被预粉碎，辊齿做回转运动时产生扰动，使肥块加速运动到下一区域。在区域 *B* 内肥块受到辊齿的剪切、挤压和冲击作用使肥块破碎，破碎后的肥块从齿侧预留的间隙中流出。区域 *C* 为释放区，破碎阶段完成后，辊齿脱离啮合状态，不再对肥块进行破碎处理，破碎后的颗粒在自身重力的作用下，向输肥腔体下方运动经排肥口排出。

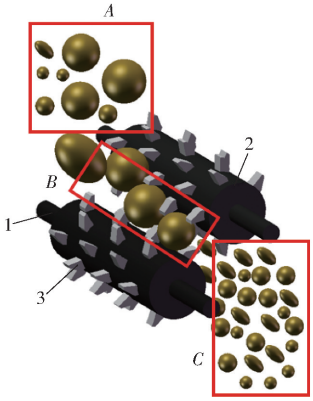


图 2　对辊差速碎肥排肥原理图

Fig. 2　Schematic of fertilizer crushing with differential speed roller

1. 下置施肥齿辊　2. 上置施肥齿辊　3. 辊齿

2　关键部件设计

2.1　施肥对辊设计

施肥对辊是对辊破碎施肥装置的核心工作部件，作业时施肥辊主动旋转依靠辊齿与肥块间的剪切、挤压作用将肥块破碎。因此辊齿的结构形式和排布方式等因素对碎肥质量将产生直接影响。

2.1.1　齿辊设计

试验所用材料为养殖场经堆放处理的牛粪肥，肥块含水率为 28.56%，硬度小，粒径分布多集中在 30 ~ 80 mm。为满足施肥辊的破碎施肥要求，以碎肥后肥块粒径目标值 30 mm 对施肥辊进行设计，齿辊的壁厚 R_i 为定值，施肥辊质量 m_r、施肥辊直径 d 和长度 l 表达式[17]为

$$\begin{cases} m_r = \dfrac{\pi d^2 - \pi (d - 2R_i)^2}{4}\rho l \\ d = \dfrac{q_n \phi}{\chi \sin^2 \beta_0} \end{cases} \tag{1}$$

式中　ρ——施肥辊材料密度，g/mm^3

β_0——肥块与辊齿间摩擦角，为 20° ~40°，取 30°

q_n——破碎比，为 0.38

χ——最小直径修正系数，取 0.91

ϕ——肥块粒径，取目标值 30 mm

通过公式(1)确定施肥辊直径为 50 mm，结合齿辊的质量要求尽量小，加工时选用的标准件壁厚为 3.2 mm，并确定齿辊长度为 175 mm，满足设计要求。

2.1.2　齿形设计

对辊辊齿的形式直接影响肥块的破碎质量，为保证肥块破碎后粒度均匀，根据辊式破碎机设计经验，辊齿的外形尺寸应小于肥块的粒度，为增强施肥辊齿的施肥能力，本文参照矿用棱锥齿形对施肥对辊齿形进行设计[18]。

如图 3 所示，为保证辊齿的强度，增强施肥辊齿对肥块的咬合能力，设置齿顶倾角 θ 为 80°[19]，在保证辊齿强度的同时增强辊齿的破碎能力。

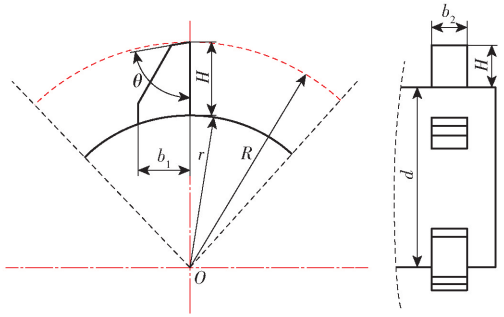


图 3　齿形参数示意图

Fig. 3　Schematic of tooth profile parameter

考虑辊齿直径 d 和两辊布置的中心距 A 约束，并为达到更好的破碎效果，充分实现对辊剪切挤压破碎物料的特点，辊齿的高度应满足不得大于破碎物料的粒度要求，设计辊齿高度 H 应满足[20]

$$\frac{A-d}{2} \leqslant H \leqslant A - d$$

取

$$H = 0.6(A - d) \tag{2}$$

此外齿宽 b_1、齿厚 b_2 按照破碎物料的强度进行设计，肥块硬度较小，依据经验公式取[20]

$$\begin{cases} b_1 = 0.7H \\ b_2 = 0.8H \end{cases} \tag{3}$$

中心距为 70 mm 时，两辊的辊齿在轴向方向上有重叠量，理论上肥块的破碎效果较优，则确定辊齿高度 H、齿宽 b_1、齿厚 b_2 分别为 12、8.4、9.6 mm。

2.1.3　辊齿布置

辊齿的排列方式主要有均匀布齿、螺旋布齿、相间布齿等形式。其中螺旋布齿相较于其他布齿方式对块状物料的喂入能力强，碎肥时对肥块的侧推和剪切作用强，此外螺旋布齿能提高施肥辊齿的利用率，降低辊齿空转，增强施肥能力。

合理的辊齿间节距 P 会对破碎后肥块的粒径 R_2 有较大影响，依据文献[19]确定节距 P 为

$$P = \frac{5}{6}R_2 \tag{4}$$

齿辊截面内辊齿的数量过多，齿环内相邻辊齿的空间会减小，从而咬合颗粒直径大的肥块效果差，

依据经验公式[21]计算截面内辊齿数量

$$N=\frac{2\pi(R-H)}{D_2} \tag{5}$$

式中 R——齿辊半径

D_2——齿辊截面内相邻两齿的距离,mm

假定破碎后的肥块目标粒径为 30 mm,则 D_2 取 30 mm 可满足要求,故确定相邻两辊齿的节距 P 为 25 mm,齿辊横截面内有 5 个辊齿。

为提高施肥辊齿的利用率,确定辊齿排列为 5 条螺旋线,辊齿的排列方式如图 4 所示。

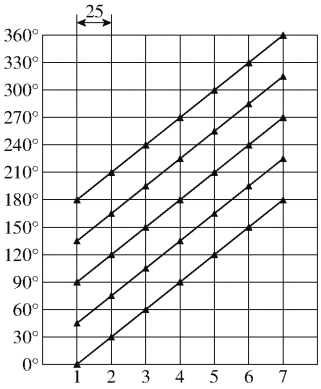


图 4 施肥辊齿排列示意图

Fig. 4 Arrangement schematic of fertilizing roller teeth

2.2 肥块破碎受力分析

施肥对辊在做相对回转运动时,辊面上的辊齿将肥块咬合喂入并破碎。整个破碎过程非常复杂,明确破碎过程中肥块所受破碎力与各因素之间的关系十分重要,肥块受力模型简化如图 5 所示。

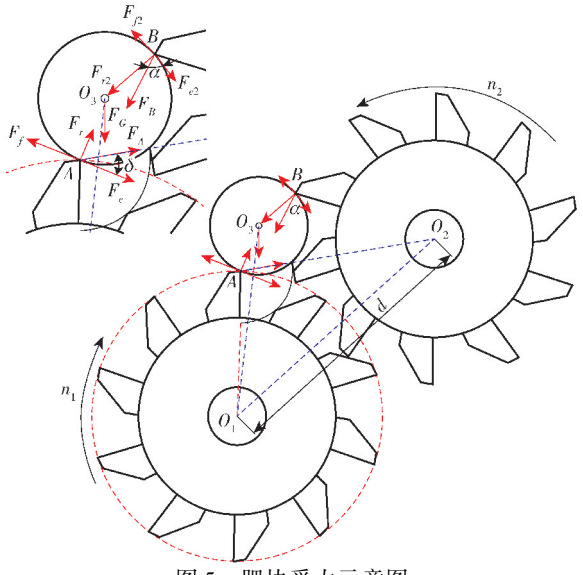


图 5 肥块受力示意图

Fig. 5 Stress diagram of fertilizer block

破碎过程中当 A、B 两齿咬入物料的瞬间,由静力学平衡可知,辊齿 A、B 的破碎力为

$$\begin{cases}F_r=F_A\sin\delta\\F_{r2}=F_B\sin\alpha\end{cases} \tag{6}$$

式中 F_A——辊齿 A 对物料的破碎力,N

F_B——辊齿 B 对物料的破碎力,N

F_r——F_A 指向颗粒中心 O_1 的分力,N

F_{r2}——F_B 指向颗粒中心 O_2 的劈裂力,N

δ、α——破碎力 F_A、F_B 与其咬入力 F_e、F_{e2} 的夹角,(°)

辊齿 A、B 的咬入力为

$$\begin{cases}F_e=F_A\cos\delta\\F_{e2}=F_B\cos\alpha\end{cases} \tag{7}$$

由公式(6)、(7)得

$$\begin{cases}F_r=F_e\tan\delta\\F_{r2}=F_{e1}\tan\alpha\end{cases} \tag{8}$$

其中 $F_f=\mu F_B \qquad F_{f2}=\mu F_A$

式中 μ——物料与辊齿间的摩擦因数

若使肥料颗粒实现无滚动的静止状态,且确保顺利喂入需满足

$$F_f\sin\alpha\leqslant F_{f2}\sin\delta \tag{9}$$

式中 F_f——辊齿 A 对物料的摩擦力,N

F_{f2}——辊齿 B 对物料的摩擦力,N

在碎肥的过程中局部先受到冲击和挤压出现破碎状态,当颗粒半径减小 Δr 时,则颗粒 i 承受外载荷所做的功 W_i 为

$$W_i=F_r\Delta r+F_{r2}\Delta r=\Delta r(F_r+F_{r2}) \tag{10}$$

破碎物料的能耗与物料的体积及强度极限成正比,即

$$W\geqslant\frac{\sigma_{\max}^2}{2E}V \tag{11}$$

式中 $\sigma_{\max}$——物料的强度极限,Pa

V——物料体积,m^3

W——破碎物料所需能耗,kW

E——物料材料弹性模量,MPa

故颗粒半径从 r 减小到 $r-\Delta r$ 时,所需要的能量[22]为

$$W_n=\frac{\sigma_{\max}^2}{2E}\left[\frac{4}{3}\pi r^3-\frac{4}{3}\pi(r-\Delta r)^3\right]=\frac{2\pi\sigma_{\max}^2}{3E}[r^3-(r-\Delta r)^3] \tag{12}$$

施肥辊所做的功 W_n 即为破碎时所需能量,有

$$\begin{cases}W_i=W_n\\(F_r+F_{r2})\Delta r=\dfrac{2\pi\sigma_{\max}^2}{3E}[r^3-(r-\Delta r)^3]\end{cases} \tag{13}$$

肥料颗粒越细碎所需要的能量越高,即[22]

$$\max(F_r+F_{r2})=\lim_{\Delta r\to0}\left[\frac{2\pi\sigma_{\max}^2}{3E}\frac{r^3-(r-\Delta r)^3}{\Delta r}\right]=\frac{2\pi\sigma_{\max}^2r^2}{E} \tag{14}$$

由公式(6)、(9)、(14)得

$$\min(F_A+F_B)=\frac{\pi\sigma_{\max}^2 r^2}{E\sin\alpha}+\frac{\pi\sigma_{\max}^2 r^2}{E\sin\delta} \tag{15}$$

经分析可知肥块破碎时所需的最小破碎力主要与肥块的粒径分布和咬合位置有关，破碎力与肥块粒径成正相关，咬合位置由辊齿的结构参数和咬入夹角 α、δ 决定，当辊齿的结构参数确定时，在相同粒径下，咬入夹角 δ、α 变大，则最小破碎力会减小。

2.3　施肥量分析

施肥量受施肥辊辊齿布置形式、齿形结构、相对安装位置、物料强度等因素影响。可视肥块均可顺利被破碎齿咬入，输肥管内 100% 充满有机肥，并均匀连续通过，引入物料填充系数 K 对其进行修正。

假设辊齿作为物料进入施肥腔体，单位时间内通过施肥腔的物料总体积与转过辊齿体积的差值，可近似视为施肥量，即

$$Q=1\times10^{-3}\rho_2 K(V_1-V_2) \tag{16}$$

式中　Q——施肥对辊的排肥量，g/s

ρ_2——有机肥密度，kg/m^3

K——有机肥填充系数，取 0.4

V_1——有机肥通过施肥腔总体积，m^3

V_2——单位时间辊齿转过的总体积，m^3

基于强制排肥的特性，肥块被挤压进入施肥腔后，辊齿接触的线速度运动如图 6 所示，上置施肥辊转速为 n_2，下置施肥辊转速为 n_1，两辊中心距为 A，齿辊半径为 R，施肥辊回转直径为 D，辊齿齿高为 H，因此有

$$V_1=\int_R^{R+H}L(\omega_1+\omega_2)x\mathrm{d}x-\int_{A-(R+H)}^{R+H}L\omega_2 x\mathrm{d}x \tag{17}$$

式中　ω_2——上置施肥辊角速度，rad/s

ω_1——下置施肥辊角速度，rad/s

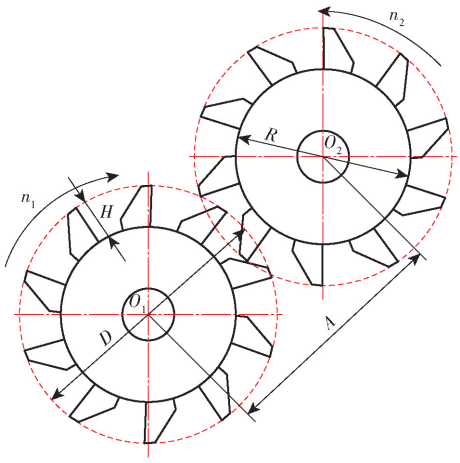


图 6　施肥量分析图

Fig. 6　Analysis of amount of manure

对 V_1 进行积分化简后得

$$V_1=\frac{1}{2}L(\omega_1+\omega_2)(D^2-R^2)+\frac{1}{2}L\omega_2 A(A-2D) \tag{18}$$

由施肥辊角速度公式得

$$\begin{cases}\omega_1=\dfrac{n_1\pi}{30}\\ \omega_2=\dfrac{n_2\pi}{30}\end{cases} \tag{19}$$

$$D=2(R+H) \tag{20}$$

由公式(18)～(20)得

$$V_1=\frac{\pi L}{60}[(n_1+n_2)(D^2-R^2)+n_2(A^2-2AD)] \tag{21}$$

假设 V_0 为单个辊齿的体积，两个施肥辊共有 m 个辊齿，则单位时间内通过两辊辊齿的肥料体积为

$$V_2=\frac{n_2 m V_0}{60} \tag{22}$$

将公式(21)、(22)代入公式(16)中得

$$Q=1\times10^{-3}\rho_2 K\frac{\pi L}{60}\left\{n_1(D^2-R^2)+n_2\left[(D-A)^2-R^2-\frac{mV_0}{\pi L}\right]\right\} \tag{23}$$

由上述分析可知，在肥块自身性质、施肥辊安装位置、辊齿结构和布置形式一定时，施肥对辊的转速对施肥量有较大影响。随着上置施肥辊和下置施肥辊转速增加，施肥量会增大，但施肥量与施肥辊转速不呈线性关系，只呈现正相关关系。

3　离散元仿真分析

应用离散元仿真软件对施肥对辊的碎肥能力进行仿真分析，通过研究各作业参数对破碎率的影响规律，明确各影响因素参数选择范围。

采用球形颗粒对部分有机肥肥块进行建模，利用 API 函数对肥块进行颗粒替换。在 EDEM 软件中的 Bonding 模型下建立肥块模型，通过设置 Bonding 键的单位法向刚度、单位切向刚度、临界法向应力、临界切向应力和粘结半径 5 个参数来表征肥块的粘结特性。

在破碎过程中，颗粒肥块中的粘结键受到辊齿的作用力而受力断裂，以此来模拟肥块的破碎过程，替换后肥块的最小单元为 2.4 mm，根据肥块的粒径分布情况，确定替换后颗粒直径的尺寸为 35、55、75 mm，颗粒团的替换情况如图 7 所示。颗粒团分别生成如图 8 所示的颗粒工厂 1、2、3。在 EDEM 前处理面板中设置肥块颗粒的泊松比为 0.25，剪切模量为 1.0×10^6 Pa，密度 380 kg/m^3。钢板的泊松比为 0.30，剪切模量为 7.94×10^{10} Pa，密度为 7 800 kg/m^3，

Bonding 键粘结参数参照文献[22 -25]进行标定设置,具体参数为单位法向刚度 5.0 × 10^9 N/m^3,单位切向刚度 1.0 × 10^9 N/m^3,临界法向应力 25 MPa,临界切向应力 12 MPa,粘结半径 3.0 mm。

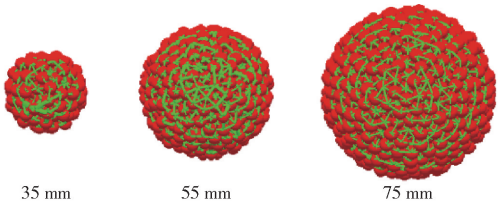


图 7 颗粒替换示意图

Fig. 7 Schematic of granule replacement

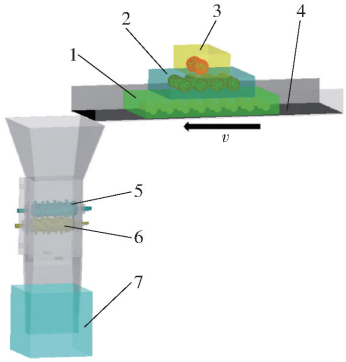


图 8 肥块破碎仿真示意图

Fig. 8 Simulation diagram of fertilizer block crushing

1. 35 mm 肥块颗粒工厂 2. 55 mm 肥块颗粒工厂 3. 75 mm 肥块颗粒工厂 4. 输送带模型 5. 上置施肥辊 6. 下置施肥辊 7. 肥块收纳盒

各材料间接触参数设置[23-26]如表 1 所示。

表 1 接触参数

Tab. 1 Contact parameters

材料	恢复系数	静摩擦因数	动摩擦因数
肥块–钢板	0.6	0.7	0.11
肥块–肥块	0.6	0.6	0.10

将建好的对辊差速破碎模型导入仿真软件中,通过前期理论分析确定影响破碎质量的主要因素,结合装置本身结构,设置对辊安装的相对高度差为 60 ~ 100 mm,参照现有破碎机作业时对辊的转速范围,设置上置施肥辊转速为 150 ~ 300 r/min,下置施肥辊转速为 200 ~ 400 r/min,施肥量范围为 700 ~ 1 000 g/s,通过前期预试验确定当施肥装置底部开度为 50 mm 时,肥块不会发生堵塞且底部开度与肥块破碎率无相关性,故排肥口开度设置为 50 mm,仿真模型如图 8 所示。

肥块破碎仿真过程如图 9(仿真参数为上置施肥辊转速 250 r/min、下置施肥辊转速 300 r/min、施肥辊中心高度差 80 mm、施肥量 800 g/s),采用肥块颗粒间粘结键断裂数为破碎效果指标,采用后处理对仿真结果进行数据处理,得到不同作业参数下,肥块破碎率随时间的变化图像。

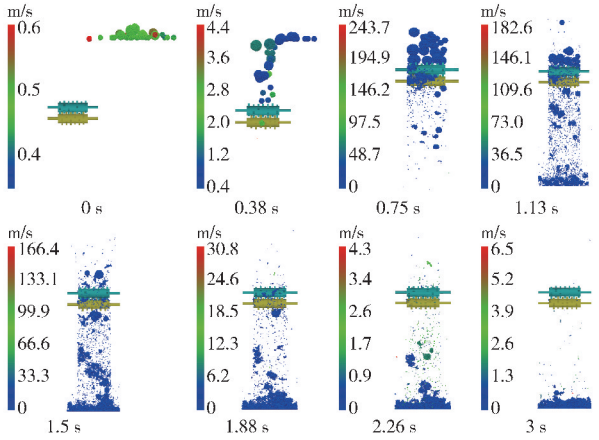


图 9 碎肥仿真过程

Fig. 9 Simulation process of fertilizer crushing

3.1 上置施肥辊转速对破碎率的影响

确定下置施肥辊转速为 300 r/min,施肥量为 800 g/s,对辊安装的相对高度差为 80 mm,上置施肥辊转速分别选取 150、200、250、300 r/min,共进行 4 组仿真试验,试验结果如图 10 所示。

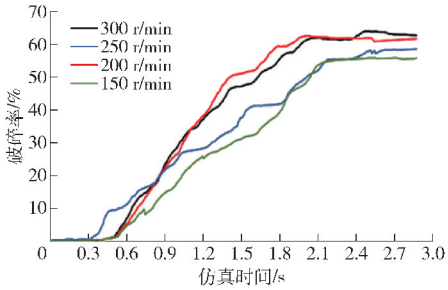


图 10 不同上置施肥辊转速的破碎率变化曲线

Fig. 10 Breaking rate curves of different rotation speeds of upper fertilization roller

试验结果表明,上置施肥辊在 250、300 r/min 时肥块的破碎率较高,且破碎率随仿真时间变化趋势基本相同,当转速为 150 r/min 时,肥块破碎率最低,碎肥效果较差,在 1.8 ~ 2.4 s 内破碎率变化基本与 200 r/min 时相同,但在 0.3 ~ 1.8 s 和 2.4 ~ 3.0 s 范围内破碎率明显低于其他转速水平。随上置施肥辊转速增加肥块破碎率有增加趋势,但增加效果不明显。

3.2 下置施肥辊转速对破碎率的影响

确定上置施肥辊转速为 225 r/min,施肥量为 800 g/s,对辊安装的相对高度差为 80 mm,下置施肥辊转速为 200、250、300、350、400 r/min,共进行 5 组仿真试验,试验结果如图 11 所示。

试验结果表明下置施肥辊转速在 300、350、400 r/min 时,肥块破碎率基本相同,且高于其他转速情况,400 r/min 时破碎率最高,达到 65.9%,转速在 200 r/min 时,破碎率最低,为 55.4%,碎肥效果

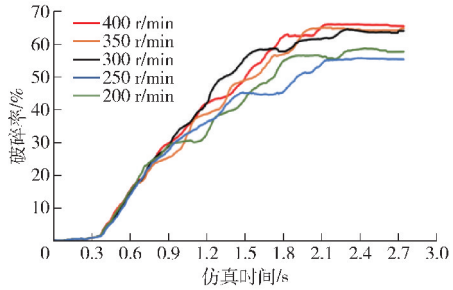


图 11　不同下置施肥辊转速的破碎率变化曲线

Fig. 11　Breaking rate curves of different rotation speeds of lower fertilization roller

差。下置施肥辊转速对破碎率影响较大，在 1.2 ~ 1.8 s 内随下置施肥辊转速增加，破碎率增加趋势较为明显。

3.3　施肥辊中心高度差对破碎率的影响

确定上置施肥辊转速为 225 r/min，下置施肥辊转速为 300 r/min，施肥量为 800 g/s，施肥辊中心高度差为 60、70、80、90、100 mm，共进行 5 组仿真试验，试验结果如图 12 所示。

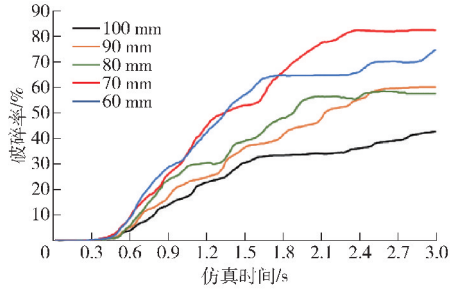


图 12　不同施肥辊中心高度差的破碎率变化曲线

Fig. 12　Variation curves of crushing rate for different height differences of fertilizing roller center

试验结果表明，两施肥辊中心高度差为 70 mm 时，肥块破碎率最高达到 83.0%，高度差为 80、90 mm 时，肥块破碎率变化趋势基本相同，肥块破碎率分别为 60.2%、57.3%。中心高度差为 60 mm 时相较于 70 mm 破碎率明显降低，在 100 mm 时破碎率最低，仅为 45.6%。中心高度差为 60、70、80、90、100 mm 破碎率均有先增加后减小的趋势，在 70 ~ 90 mm 时碎肥效果最佳，中心高度差对破碎率影响最为显著。

3.4　施肥量对破碎率的影响

确定上置施肥辊转速为 225 r/min，下置施肥辊转速为 300 r/min，对辊安装的相对高度差为80 mm，施肥量为 700、800、900、1 000 g/s，共进行 4 组仿真试验，施肥量变化仿真时间增加至 3.3 s，试验结果如图 13 所示。试验结果表明，上、下施肥辊转速以及施肥辊中心高度差固定时，肥块的破碎率并不随施肥量的增加而呈现明显的下降趋势，施肥量为 1 000 g/s 时，其破碎率在 1.2 ~ 2.7 s 时略低于其他范围的施肥量，但随着仿真时间增加至 3.0 ~ 3.3 s 时，不同施肥量的破碎率趋于 71.0%。施肥量在 700 ~ 1 000 g/s 的范围内对肥块破碎率影响不大。但在仿真结束时，如图 9，3 s 时有少量的肥块颗粒仍滞留在施肥腔中，其施肥量与排肥量不一致。

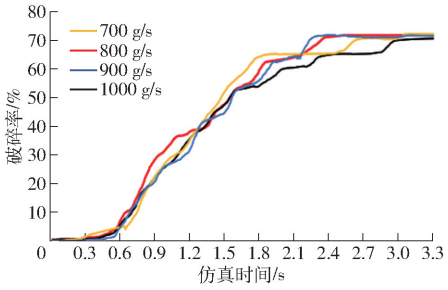


图 13　不同施肥量的破碎率变化曲线

Fig. 13　Change curves of crushing rate affected by different fertilization rates

4　台架试验

2020 年 8 月于中国农业大学保护性耕作研究中心进行对辊差速式块状有机肥破碎施肥装置的性能试验。试验材料选取养殖场经堆放处理的牛粪肥，测量含水率为 28.56%，密度为 380 kg/m^3，对养殖场内牛粪肥进行随机取样，对所得的样品进行粒径测量分析，其中 0 ~ 20 mm、20 ~ 40 mm、40 ~ 60 mm、60 ~ 80 mm、80 ~ 120 mm 分别占比为 11.3%、13.7%、38.7%、24.6%、11.7%。

4.1　试验因素

为选取对辊差速式施肥装置最优作业参数，通过对肥块的仿真分析得到各试验因素影响破碎率的规律。为确定上下施肥辊的最优转速、施肥辊的最佳安装位置、较优施肥量，选取上置施肥辊转速、下置施肥辊转速、施肥量、施肥辊中心高度差为试验因素，进行二次旋转正交组合试验。

4.2　试验评价指标

在前期预试验和离散元仿真试验中发现，肥块本身物料特性导致其流动性不佳，碎肥过程中会有少量肥料滞留于施肥腔内，施肥量与排肥量关系不确定，因此将排肥率作为本试验评价指标之一。

参照 GB/T 25246—2010《畜禽粪便还田技术要求》和碎土率相关测量标准，分别对试验前后块状有机肥的粒径分布和质量进行测量，得到破碎率 Y_1 和排肥率 Y_2 计算式分别为

$$Y_1 = \frac{S - S_1}{S} \times 100\% \tag{24}$$

式中　S——试验所用肥样总质量，g

S_1——试验所用肥样中等效直径大于 30 mm 的肥样质量，g

$$Y_2 = \frac{M_1}{M} \times 100\% \tag{25}$$

式中 M——试验前称量肥样总质量,g

M_1——试验后肥样总质量,g

4.3 试验方案与结果分析

通过前期肥块单因素仿真试验与国内外对辊装置的相关研究,结合对辊差速碎肥的实际需求,确定上下两施肥辊的转速分别为 200 ~ 300 r/min、250 ~ 375 r/min,根据施肥需求选取施肥量为 700 ~ 1 000 g/s,通过前期肥块施肥农艺要求确定两施肥辊中心高度差为 70 ~ 90 mm,进行 Box - Behnken试验,对指标的显著性进行分析,确定各因素及其交互作用对试验指标的影响,得到对辊差速施肥装置的最优参数组合。试验因素编码如表 2 所示,试验结果如表 3 所示,x_1、x_2、x_3、x_4为因素编码值。

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Test factors code

编码	因素			
	上置施肥辊转速 A/(r·min^{-1})	下置施肥辊转速 B/(r·min^{-1})	施肥量 C/(g·s^{-1})	施肥辊中心高度差 D/mm
1	300	375.0	1 000	90
0	250	312.5	850	80
-1	200	250.0	700	70

对试验结果进行二次回归分析,并进行多元参数拟合,得到块状有机肥破碎率 Y_1和排肥率 Y_2两个评价指标的回归方程,对其显著性进行检验。

通过表 4 可知,试验模型极显著($P < 0.01$)。主因素中施肥辊中心高度差对于指标影响最为显著,下置施肥辊的转速为极显著,施肥量影响为显著,上置施肥辊转速影响为较显著,且各主因素对破碎率影响的主次顺序为 x_4、x_2、x_3、x_1,交互项中上置施肥辊和施肥辊中心高度差对破碎率影响较为显著。二次主效应项中上置施肥辊转速为极显著,将不显著的交互项和二次主效应项的平方和、自由度并入残差项,剔除不显著因素,进行方差分析,得到各因素与破碎率回归方程为

$$\begin{aligned} Y_1 = {} & -202.798\,2 + 1.950\,0A + 0.078\,9B - \\ & 0.023\,6C + 1.566\,7D - \\ & 9.750\,0 \times 10^{-3}AD - 2.488\,6 \times 10^{-3}A^2 \end{aligned} \tag{26}$$

对上述回归方程进行失拟性检验,如表 4 所示,失拟项 $P = 0.140\,2$,不显著($P > 0.1$),证明试验指标和试验因素存在显著的二次关系。

由表 5 可知,试验模型极显著($P < 0.01$)。主因素中下置施肥辊转速对于指标影响最为显著,下置施肥辊的转速影响为极显著,上置施肥辊转速、施肥辊中心高度差影响为显著,施肥量对排肥率的影响不显著,但其交互项对排肥率影响为显著,各主因素对排肥率影响的主次顺序为 x_2、x_4、x_1、x_3,交互项

表 3 试验方案与结果

Tab. 3 Test scheme and results

试验编号	因素				破碎率	排肥率
	x_1	x_2	x_3	x_4	Y_1/%	Y_2/%
1	-1	-1	0	0	59.6	98.27
2	1	-1	0	0	48.6	96.29
3	-1	1	0	0	62.6	98.78
4	1	1	0	0	54.5	97.67
5	0	0	-1	-1	82.9	98.44
6	0	0	1	-1	75.9	96.96
7	0	0	-1	1	67.6	98.04
8	0	0	1	1	52.2	96.23
9	-1	0	0	-1	59.6	98.39
10	1	0	0	-1	73.2	96.96
11	-1	0	0	1	56.3	95.80
12	1	0	0	1	50.4	97.14
13	0	-1	-1	0	56.5	96.07
14	0	1	-1	0	71.9	98.94
15	0	-1	1	0	54.6	96.14
16	0	1	1	0	68.3	98.59
17	-1	0	-1	0	74.5	97.61
18	1	0	-1	0	63.2	96.54
19	-1	0	1	0	66.5	98.25
20	1	0	1	0	56.6	97.06
21	0	-1	0	-1	72.6	97.16
22	0	1	0	-1	82.4	99.44
23	0	-1	0	-1	52.1	96.42
24	0	1	0	-1	63.5	97.56
25	0	0	0	0	68.3	99.25
26	0	0	0	0	64.8	98.88
27	0	0	0	0	65.9	99.15
28	0	0	0	0	70.2	99.60
29	0	0	0	0	62.3	98.31

表 4 破碎率方差分析

Tab. 4 Variance analysis of crushing rate

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	1 799.83	6	299.97	11.70	<0.000 1 ***
x_1	88.56	1	88.56	3.45	0.076 5 *
x_2	292.05	1	292.05	11.39	0.002 7 ***
x_3	150.52	1	150.52	5.87	0.024 1 **
x_4	910.02	1	910.02	35.50	<0.000 1 ***
x_1x_4	95.06	1	95.06	3.71	0.067 2 *
x_1^2	263.61	1	263.61	10.28	0.004 1 ***
失拟	526.32	18	29.24	3.11	0.140 2
残差	37.62	4	9.41		
总和	2 363.77	28			

注:*** 表示影响极显著($P < 0.01$);** 表示影响显著($0.01 < P < 0.05$);* 表示影响较显著($0.05 < P < 0.1$)。下同。

表 5　排肥率方差分析

Tab. 5　Variance analysis of fertilizer rate

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	28. 55	9	3. 17	7. 96	<0. 000 1 ***
x_1	2. 47	1	2. 47	6. 19	0. 022 3 **
x_2	9. 42	1	9. 42	23. 62	0. 000 1 ***
x_3	0. 48	1	0. 48	1. 21	0. 284 3
x_4	3. 16	1	3. 16	7. 93	0. 011 0 **
x_1x_4	1. 92	1	1. 92	4. 81	0. 040 9 **
x_1^2	4. 93	1	4. 93	12. 37	0. 002 3 ***
x_2^2	1. 97	1	1. 97	4. 93	0. 038 7 **
x_3^2	4. 78	1	4. 78	11. 98	0. 002 6 ***
x_4^2	5. 25	1	5. 25	13. 16	0. 001 8 ***
失拟	6. 65	15	0. 44	1. 91	0. 280 1
残差	0. 93	4	0. 23		
总和	36. 13	28			

中上置施肥辊转速与施肥辊中心高度差影响为显著，二次主效应项中上置施肥辊转速、施肥量、施肥辊中心高度差影响均为极显著。将不显著的交互项和二次主效应项的平方和、自由度并入残差项，剔除不显著因素，进行方差分析，得到各因素与排肥率回归方程为

$$Y_2 = 9.136\,3 + 0.054\,5A + 0.102\,3B + 0.063\,5C + 1.041\,5D + 1.385\,0\times10^{-3}AD - 3.487\,7\times10^{-4}A^2 - 1.409\,7\times10^{-4}B^2 - 3.814\,1\times10^{-5}C^2 - 8.994\,2\times10^{-3}D^2 \quad (27)$$

对上述回归方程进行失拟性检验，如表 5 所示，失拟项 $P=0.280\,1$，不显著（$P>0.1$），证明试验指标和试验因素存在显著的二次关系。

4.4　响应曲面分析

为分析各因素与试验指标之间的关系，利用 Design-Expert 软件对试验数据进行分析处理，得到上置施肥辊转速与施肥辊中心高度差交互因素对破碎率和排肥率的影响效应响应曲面，如图 14、15 所示。

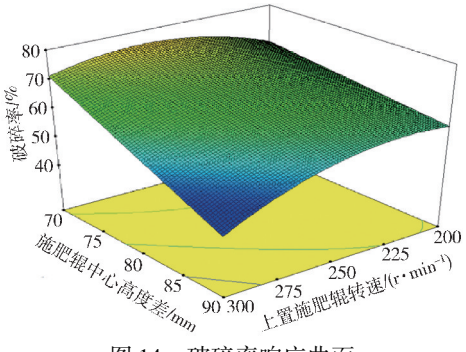


图 14　破碎率响应曲面

Fig. 14　Response surface of crushing rate

对于破碎率 Y_1，下置施肥辊转速、施肥量一定时，研究施肥辊中心高度差和上置施肥辊转速的交互作用对破碎率的影响，响应曲面如图 14 所示。当施肥辊中心高度差一定时，破碎率随上置施肥辊转速增加而增大，以块状有机肥破碎率最大值为目标，上置施肥辊较优的转速为 238. 3 ~ 252. 9 r/min，当上置施肥辊转速一定时，破碎率随施肥辊高度差的增加而减小，以块状有机肥破碎率最大值为目标，施肥辊中心较优高度差为 70 mm。

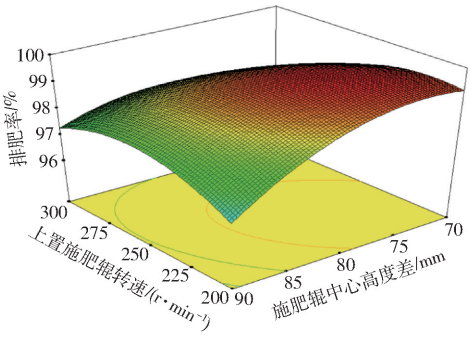


图 15　排肥率响应曲面

Fig. 15　Response surface of fertilizer rate

对于排肥率 Y_2，下置施肥辊转速、施肥量一定时，研究施肥辊中心高度差和上置施肥辊转速的交互作用对排肥率的影响，响应曲面如图 15 所示。当施肥辊中心高度差一定时，破碎率随上置施肥辊转速增加而增大，以破碎后有机肥排肥率最大值为目标，上置施肥辊的最优转速为 235. 4 ~ 245. 4 r/min，当上置施肥辊转速一定时，破碎率随施肥辊高度差的增加而减小，以块状有机肥破碎率最大值为目标，施肥辊中心最优高度差为 75. 8 ~ 80. 4 mm。

4.5　参数优化

为获得对辊差速式块状有机肥破碎施肥装置的最优工作参数，利用 Design-Expert 软件的优化模块，对试验因素参数进行优选，遵循保证破碎率、提高排肥率的原则，根据对辊差速施肥装置的试验条件和工作要求，确定目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(A,B,C,D) \\ \max Y_2(A,B,C,D) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 235\ \text{r/min} \leqslant A \leqslant 253\ \text{r/min} \\ 250\ \text{r/min} \leqslant B \leqslant 375\ \text{r/min} \\ 700\ \text{g/s} \leqslant C \leqslant 1\,000\ \text{g/s} \\ 70\ \text{mm} \leqslant D \leqslant 81\ \text{mm} \end{cases} \end{cases} \quad (28)$$

考虑到对辊差速施肥装置实际的作业要求，得到试验装置的最优参数组合为上置施肥辊转速 238 r/min、下置施肥辊转速为 374 r/min、施肥量 797 g/s、两施肥辊中心高度差为 71 mm，此参数组合下破碎率为 80. 3%，排肥率为 99. 2%。

5　试验

为验证上述离散元仿真试验和二次正交旋转试

验所得试验结果的准确性,试验材料选用含水率为38.65%、28.56%、16.31%、8.36%的肥块。试验装置如图16所示,为自主设计的对辊差速式块状有机肥施肥装置试验台,其主要由直流调速器(XD125030A型)、开关电源(QZ-720-24型)、直流减速电机(5D120GN-C型)、施肥辊等组成。

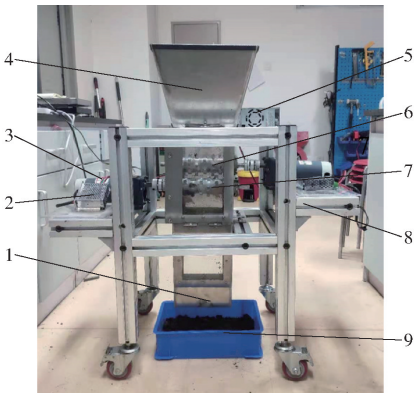
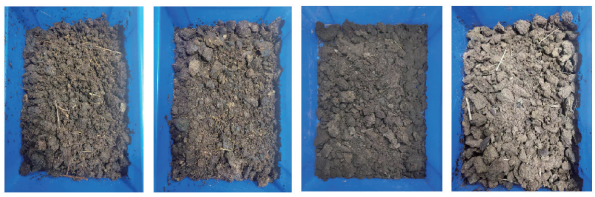


图16 对辊差速施肥装置试验台

Fig. 16 Differential speed roller fertilizing device

1. 排肥口 2. 直流调速器 3. 减速电机 4. 喂入料斗 5. 开关电源 6. 上置施肥辊 7. 下置施肥辊 8. 高度调节架 9. 肥块收纳盒

试验时通过调速器调节上置施肥辊与下置施肥辊的转速分别为238、374 r/min,施肥辊的相对高度差为71 mm,底部施肥口开度为50 mm。使用4种含水率的肥块各进行3次重复试验,碎肥效果如图17所示。试验完成后使用GS-86型电动振筛机配合30、20、10、5 mm 4种孔径的筛网,对破碎后的肥块进行筛分,使用电子秤(精度0.01 g)对不同粒径肥样颗粒进行称量。



(a) 38.65% (b) 28.56% (c) 16.31% (d) 8.36%

图17 4种含水率肥块碎肥效果

Fig. 17 Effect charts of four kinds of fertilizer

散粒状有机肥颗粒粒径一般小于10 mm,目前农艺环节并未对肥块的粒径提出要求,但在实际施肥过程中,普遍认为肥块粒径越小越好,肥块在破碎后有利于肥效释放,提高肥料利用率,同时能提升施肥均匀性,有利于机械化作业。

对辊差速式块状有机肥施肥装置作业后肥块破碎后的粒径分布如表6所示,其中含水率为38.65%、28.56%、16.31%、8.36%的肥块破碎率分别为90.7%、80.8%、79.6%、76.9%。通过测量肥腔内肥料颗粒的滞留量,测得其排肥率分别为95.6%、97.8%、98.2%、98.6%。

表6 粒径分布

Tab. 6 Particle size distribution %

含水率/%	粒径范围/mm			
	0~10	10~20	20~30	≥30
38.65	21.6	45.5	23.6	9.3
28.56	15.6	24.6	40.6	19.2
16.31	16.0	21.2	42.4	20.4
8.36	9.3	20.5	47.1	23.1

试验结果表明,在该试验条件下,随肥块含水率的升高,肥腔内肥料的滞留量有所增加,导致排肥率下降;随肥块含水率的降低,肥块韧性增加,导致破碎率有所下降;破碎率与排肥率与参数优化所得结果平均误差较小,分别为4.66%、1.66%。施肥装置对不同含水率的肥块适应性较好,且碎肥质量好,排肥率高,满足装置设计要求。

6 结论

(1)设计了对辊差速式块状有机肥破碎施肥装置。阐述了该装置的工作原理,确定了辊齿、齿形及辊齿布置等结构参数,建立肥块破碎过程的受力模型,并对施肥对辊的施肥能力进行分析,得出施肥辊转速对施肥量的影响规律。

(2)通过离散元仿真模型,进行单因素仿真试验,得出各试验因素对试验指标的影响规律,缩小试验因素范围。经正交旋转试验进行试验因素的参数优化,得到该装置的最优参数组合为:上置施肥辊转速238 r/min、下置施肥辊转速374 r/min、施肥辊中心高度差71 mm、施肥量797 g/s,得到优化后的破碎率为80.3%,排肥率为99.2%。

(3)以优化所得的最优参数进行试验验证,结果表明,施肥装置对含水率8%~40%的4种肥块进行验证试验,所得的破碎率分别为90.7%、80.8%、79.6%、76.9%,排肥率分别为95.6%、97.8%、98.2%、98.6%,与优化所得结果的平均误差分别为4.66%、1.66%,误差较小,满足装置设计要求。

参 考 文 献

[1] WANG Hanxi, XU Jianling, LIU Xuejun, et al. Effects of long-term application of organic fertilizer on improving organic matter content and retarding acidity in red soil from China[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 195: 104382.

[2] 孙凯,刘振,胡恒宇,等.有机培肥与轮耕方式对夏玉米田土壤碳氮和产量的影响[J].作物学报,2019,45(3):401 - 410.
SUN Kai, LIU Zhen, HU Hengyu, et al. Effects of organic fertilizer and wheel tillage on soil carbon nitrogen and yield in summer maize fields[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(3): 401 - 410. (in Chinese)

[3] 高焕文,李洪文,李问盈.保护性耕作的发展[J].农业机械学报,2008,39(9):43 - 48.
GAO Huanwen, LI Hongwen, LI Wenying. Development of conservation tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 43 - 48. (in Chinese)

[4] GUO Liyue, WU Guanglei, LI Yong, et al. Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat-maize rotation system in Eastern China[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 156: 140 - 147.

[5] 何进,李洪文,陈海涛,等.保护性耕作技术与机具研究进展[J/OL].农业机械学报,2018,49(4):1 - 19.
HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1 - 19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180401&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001. (in Chinese)

[6] 宫亮,安景文,邢月华,等.连年深松和施用有机肥对土壤肥力及玉米产量的影响[J].土壤,2016,48(6):1092 - 1099.
GONG Liang, AN Jingwen, XING Yuehua, et al. Effects of perennial deep pine and organic fertilizer application on soil fertility and maize yield[J]. Soil, 2016, 48(6): 1092 - 1099. (in Chinese)

[7] 谢军,赵亚南,陈轩敬,等.有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率[J].中国农业科学,2016,49(20):3934 - 3943.
XIE Jun, ZHAO Ya'nan, CHEN Xuanjing, et al. Organic nitrogen replaces chemical fertilizer nitrogen to improve maize yield and nitrogen absorption and utilization efficiency[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(20): 3934 - 3943. (in Chinese)

[8] GONG Wei, YAN Xiaoyuan, YAN Jing, et al. Long-term manure and fertilizer effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat-maize cropping system in northern China[J]. Geoderma, 2008, 149(3): 318 - 324.

[9] 吴宁. 2F50 有机肥撒施机开发研究[D].北京:中国农业机械化科学研究院,2016.
WU Ning. Research and designt of 2F50 manure spreader[D]. Beijing: China Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2016. (in Chinese)

[10] 张周. 不同有机肥排肥性能分析及排肥机构设计[D].贵州:贵州大学,2018.
ZHANG Zhou. Performance analysis and mechanism design of different organic fertilizers[D]. Guizhou: Guizhou University, 2018. (in Chinese)

[11] 胡永光,杨叶成,肖宏儒,等.茶园施肥机离心撒肥过程仿真与参数优化[J/OL].农业机械学报,2016,47(5):77 - 82.
HU Yongguang, YANG Yecheng, XIAO Hongru, et al. Simulation and parameter optimization of centrifugal fertilizer spreader for tea plants[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 77 - 82. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160511&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.011. (in Chinese)

[12] 孙冬霞,李明军,吴爱兵,等.有机肥及其配套机械化技术的研究进展[J].中国农机化学报,2019,40(2):72 - 80.
SUN Dongxia, LI Mingjun, WU Aibing, et al. Research progress of organic fertilizer and its supporting mechanization technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(2): 72 - 80. (in Chinese)

[13] 肖宏儒,赵映,丁文芹,等.1KS60 - 35X 型果园双螺旋开沟施肥机刀轴设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(10):32 - 39.
XIAO Hongru, ZHAO Ying, DING Wenqin, et al. Design and test of knife shaft for 1KS60 - 35X orchard double helix furrow fertilizer applicator[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10): 32 - 39. (in Chinese)

[14] 康建明,李树君,杨学军,等.密植果园开沟施肥机开沟刀片设计与试验[J/OL].农业机械学报,2017,48(2):68 - 74.
KANG Jianming, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Design and experiment of ditching blade installed in close planting orchard ditching machinery planting orchard ditching machinery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 68 - 74. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170209&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.009. (in Chinese)

[15] 李娟,何晓宁,王东伟,等.新型农家肥果园自动施肥机的设计与试验[J].农机化研究,2020,42(6):46 - 51.
LI Juan, HE Xiaoning, WANG Dongwei, et al. Design and test of a new automatic fertilizer applicator for farmyard orchards[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(6): 46 - 51. (in Chinese)

[16] 张涵,周岭,丁羽,等.果园固态有机肥施肥机的绞龙设计[J].中国农机化学报,2016,37(1):69 - 72.
ZHANG Han, ZHOU Ling, DING Yu, et al. Design of winch dragon for orchard solid organic fertilizer applicator[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(1): 69 - 72. (in Chinese)

[17] 甘声豹,李粤,张喜瑞,等.喂入式立轴甩刀香蕉秸秆粉碎还田机设计与试验[J].农业工程学报,2014,30(13):10 - 19.
GAN Shengbao, LI Yue, ZHANG Xirui, et al. Design and experiment on banana stalk chopper with feeding type spindle flail[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(13): 10 - 19. (in Chinese)

[18] SUN Kangkang, MA Ruoding, LI Guang, et al. The influence of the structure of double toothed roller crusher on the crushing

effect based on EDEM[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,2018,423(1):1115 - 1120.
[19] 毛瑞,崔达,李光,等. 辊齿结构及布置形式对双齿辊破碎机性能的影响[J]. 矿山机械,2018,46(2):44 - 49.
MAO Rui,CUI Da,LI Guang, et al. Influence of style and layout of roller tooth on performance of double toothed-roller crusher [J]. Mining & Processing Equipment,2018,46(2):44 - 49. (in Chinese)
[20] 鲁艳鹏. 基于 DEM - FEM 耦合的双齿辊破碎机及其传动系统的数字化平台研究[D]. 长春:吉林大学,2019.
LU Yanpeng. Research on digital platform of double toothed roll crusher and its transmission system based on DEM - FEM coupling[D]. Changchun: Jilin University,2019. (in Chinese)
[21] 曹鑫鹏,王庆杰,李洪文,等. 玉米免耕播种机侧置切刀与拨茬齿盘组合清茬装置研究[J/OL]. 农业机械学报,2021,52(3):36 - 44.
CAO Xinpeng, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Combined row cleaners research with side cutter and stubble clean disk of corn no-till seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(3):36 - 44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20210304&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.004. (in Chinese)
[22] 王保强. 大型分级破碎机破碎机理及冲击动力学特性研究[D]. 北京:煤炭科学研究总院,2019.
WANG Baoqiang. Study on crushing mechanism and impact dynamic characteristics of large-scale sieving crusher[D]. Beijing: China Coal Research Institute,2019. (in Chinese)
[23] 袁全春,徐丽明,马帅,等. 有机肥深施机肥块破碎刀设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(9):44 - 51.
YUAN Quanchun,XU Liming,MA Shuai,et al. Design and test of fertilizer block crushing knife for deep fertilizer applicator [J]. Transactions of the CSAE,2020,36(9):44 - 51. (in Chinese)
[24] 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.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen,et al. Research on polyline soil 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. 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. (in Chinese)
[25] 赵淑红,刘汉朋,杨超,等. 玉米秸秆还田交互式分层深松铲设计与离散元仿真[J/OL]. 农业机械学报,2021,52(3):75 - 87.
ZHAO Shuhong, LIU Hanpeng,YANG Chao,et al. Design and discrete element simulation of interactive layered deep loose shovel for corn straw mulching[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(3):75 - 87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20210308&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.008. (in Chinese)
[26] 丁启朔,任骏,BELAL E A,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.
DING Qishuo, REN Jun,BELAL E A, 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. 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. (in Chinese)

(上接第 53 页)

[19] 田阳,林静,李宝筏. 气力式秸秆深埋还田机输送装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(12):36 - 44.
TIAN Yang,LIN Jing,LI Baofa. Design and test of conveying device of pneumatic straw deep burying and returning machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(12):36 - 44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20181205&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.005. (in Chinese)
[20] 顾峰玮,胡志超,陈有庆,等. “洁区播种”思路下麦茬全秸秆覆盖地花生免耕播种机研制[J]. 农业工程学报,2016,32(20):15 - 23.
GU Fengwei, HU Zhichao, CHEN Youqing, et al. Development and experiment of peanut no-till planter under full wheat straw mulching based on “clean area planting”[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 15 - 23. (in Chinese)
[21] 刘洋. 玉米青贮机滚筒式切碎装置的设计与有限元分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2008.
LIU Yang. Design and finite element analysis of roller shredding mechanism for silage maize harvester[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008. (in Chinese)
[22] 江英帅. 智能青贮机监测系统及青贮作业装置研发[D]. 济南:济南大学,2020.
JIANG Yingshuai. Development of intelligent silage monitoring system and silage operation device[D]. Ji'nan: University of Ji'nan, 2020. (in Chinese)