

有机肥侧抛装置螺旋叶片辅助辊轮设计与试验

刘宏新^{1,2} 赵一健¹ 解勇涛¹ 张一鸣¹ 尚家杰¹

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 宿迁学院机电工程学院, 宿迁 223800)

摘要:为解决现有对置斜盘有机肥侧抛装置在抛撒时存在的近处肥料堆积与局部起垄问题,结合侧抛装置各部件作用及工作原理,在理论分析的基础上设计一种对称螺旋叶片辅助辊轮,并优化其关键结构参数和作业参数,明确了其与主抛撒部件圆盘的空间位置关系。利用 EDEM 软件先后开展了单因素与响应面仿真试验,研究了辊轮转速、螺旋角和叶片数对均匀度变异系数和 1 m 内肥料占比的影响,优化后得到了最优参数组合。仿真结果表明,辅助辊轮工作时的最优参数组合为辊轮转速 2 238 r/min、螺旋角 42.70°、叶片数 4,均匀度变异系数 24.45%、1 m 内肥料占比 24.96%,且以该参数组合进行仿真的结果优于原辊轮最优参数仿真结果;设计的辅助辊轮样机试验结果为均匀度变异系数 25.46%、1 m 内肥料占比 25.65%,相较于原辅助辊轮的 46.77% 与 65.94% 有了很大改善,配合主盘共同作用时抛撒均匀性好,无堆积和起垄现象。研究表明:对称螺旋叶片可有效修正肥料颗粒运动方向,使主盘集中的非受控肥料向两侧分散,与主盘及其他辅助部件联合作用下大幅提高了抛撒性能。

关键词: 有机肥侧抛; 辅助辊轮; 对称螺旋叶片

中图分类号: S22 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)04-0107-13 OSID: 

Design and Experiment of Spiral Blades Auxiliary Roller of Organic Fertilizer Side Throwing Device

LIU Hongxin^{1,2} ZHAO Yijian¹ XIE Yongtao¹ ZHANG Yiming¹ SHANG Jiajie¹

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Suqian College, Suqian 223800, China)

Abstract: In order to solve the problems of near fertilizer accumulation and local ridging in the existing side throw device for organic fertilizer with inclined opposite discs, combined with the function and working principle of each component of side throw device, an auxiliary roller with symmetrical spiral blade was innovated on the basis of theoretical analysis, the key structural parameters and operating parameters were optimized, and the spatial position relationship between the side throw device and the discs of the main throwing component was clarified. Single factor and response surface experiments were carried out by EDEM software, the effects of roller speed, helix angle and blade number on uniformity coefficient of variation and fertilizer proportion within 1 m were studied, the optimal parameter combination was obtained after optimization. The simulation results showed that the optimal parameter combination of auxiliary roller was roller speed of 2 238 r/min, helix angle of 42.70°, number of blades of 4, coefficient of variation of uniformity of 24.45%, fertilizer proportion within 1 m of 24.96%, and the simulation results with this parameter combination were better than those with the optimal parameters of the original roller. Test results of new auxiliary roller after innovative design were 25.46% and 25.65%, which were greatly improved compared with 46.77% and 65.94% of the original auxiliary roller, when combined with the main discs throwing uniformity was good, no accumulation and ridging phenomenon occurred. The results showed that symmetric spiral blades can effectively correct the movement direction of fertilizer particles, so that the non-controlled fertilizers concentrated in the main discs were dispersed on both sides. Combined with the main disc and other auxiliary components, the throwing performance was greatly improved.

Key words: organic fertilizer side throwing; auxiliary roller; symmetrical spiral blades

收稿日期: 2022-07-14 修回日期: 2022-10-02
基金项目: 黑龙江省第一层次领军人才梯队后备带头人基金项目([2017]487)
作者简介: 刘宏新(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械化技术与装备研究,E-mail: lcc98@163.com

0 引言

近年来,有机肥代替部分化肥已成为提升耕地质量的重要途径^[1-3],而有机肥施用的关键点在于有机肥抛撒机。当前,有机肥抛撒机按抛撒方向可以分为侧向抛撒式撒肥机和后向抛撒式撒肥机两类^[4-5]。与后抛式相比,侧抛式撒肥机在行驶过程中,肥料沿机具前进方向的侧向抛出,可完成后抛式撒肥机能实现的所有工作,而且抛撒作业时可控性强、一次作业覆盖面大,适合多种环境,优势明显^[6]。但由于侧抛式撒肥机设计与制造难度大,对供料有特殊要求,故机型有限,实际应用极少。

笔者团队设计的对置斜盘有机肥侧抛装置,在主要抛撒部件(安装有刮肥板的对置斜盘)作用下肥料撒布于田间,有效抛距为 11.6 m。但由于对置斜盘结构的特殊性,其倾角导致装置近处沿抛撒方向的路径上存在肥料堆积现象,且越近堆积越明显,故设置辅助辊轮来解决该问题。此外,辅助辊轮与主抛撒部件的空间位置关系并不明确,不恰当的位置会影响部分肥料的抛撒。

近年来,国内外学者对后抛式撒肥机的主要抛撒部件研究较多,而对侧抛式撒肥机的研究与应用极为有限。后抛式撒肥机主抛部件的相关研究有两类。一是辊轮类:马标等^[7]基于增加幅宽同时提高肥料破碎率的研究目标,将抛撒辊轮上的叶片沿辊轮径向布置,按齿数将叶片主体等分成两部分,每部分再沿辊轮轴线方向对称弯折 30°;吴昊等^[8]为解决撒肥机辊轮抛撒效率低的问题,将抛撒辊轮上的叶片按照螺旋线从中间向两侧沿辊轮轴向依次对称排布,使肥料可以向两侧扩散,提高了抛撒稳定性和均匀度;李文哲等^[9]针对农家肥抛撒机当前抛撒幅宽无法满足要求的问题,将抛撒辊轮上的叶片按照左旋 8 片和右旋 8 片对称布置,使肥料可以向两侧扩散;吕金庆等^[10]设计了一种装于立式有机肥抛撒机抛撒辊轮上并带有碎肥刀片和撒肥刀片的螺旋叶片,可以有效解决有机肥因黏度大而导致的抛撒困难问题;二是圆盘类:YILDRIM^[11]探究了不同入料量下的圆盘式撒肥机在叶片数从 2 增至 12 时对抛撒均匀性的影响,发现叶片数为 2 时所有入料量下的均匀性都最优;FULTON 等^[12]探究了叶片不同折弯角对圆盘式撒肥机抛撒均匀性的影响,得到叶片远离圆心一侧边缘向后倾斜 15°时可以有效减小肥料颗粒弹跳,抛撒均匀性最好;YILDRIM 等^[13]在探究圆盘式撒肥机叶片对抛撒均匀性的影响时,将普通直叶片分别与不同折弯角叶片组合使用,发现直叶片与前弯 5°叶片为最优组合,肥料抛撒均匀性最

优。总的来说,叶片结构(如叶片数、折弯角)对抛撒均匀性有较大的影响,同时叶片排布方式也决定着肥料运动。

为充分发挥辅助抛撒部件辊轮的作用,解决近处肥料堆积和局部起垄问题,本文将采用理论分析与虚拟仿真结合的方式对其进行结构设计与参数优化,并通过样机试验验证其可行性与作业效果。

1 侧抛装置结构与工作原理

对置斜盘有机肥侧抛装置如图 1 所示,主要由撒肥圆盘、辅助辊轮、上导流板、挡料板等组成。其中,安装有刮肥板的对置斜盘为主要抛撒部件^[6],圆盘直径为 500 mm,其当前位置与水平方向夹角(即圆盘倾角)为 75°,两圆盘中心距为 320 mm,侧抛装置工作时圆盘转速一般取 700 r/min,该转速下肥料的有效抛距接近峰值,当转速大于 700 r/min 时有效抛距增长趋于平缓。撒肥圆盘高速旋转时其上的刮肥板将肥料抛出。辅助辊轮、上导流板和挡料板为辅助部件,辅助辊轮如图 2 所示,可以降低近处肥料堆积;上导流板能控制抛离角过大的肥料,保证肥料良好的射流形态和有效抛距;挡料板可以控制抛离角过小的肥料,并将抛离角小的部分封堵在装置内。

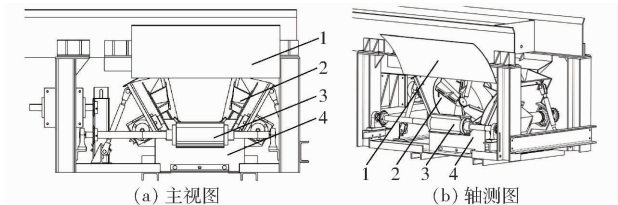


图 1 侧抛装置结构图

Fig. 1 Structural diagrams of side throw device

1. 上导流板 2. 撒肥圆盘 3. 辅助辊轮 4. 挡料板

侧抛装置在进行抛撒作业时,由于肥料落在刮肥板上的区域不同,肥料颗粒速度和运动规律会有差别,其中跟随刮肥板以相应速度做规律性运动的肥料为受控肥料,在刮肥板作用下这部分肥料被抛出,如图 3a 所示,并保持在此图中抛离角范围内;而还有一小部分肥料被堆积在刮肥板末端且在刮肥板旋转过程中会脱离刮肥板控制,这部分聚集在末端且随时会掉落的肥料为非受控肥料。在挡料板作用下,非受控肥料出口被阻且被封堵在侧抛装置底部,此时底部肥料在刮肥板的旋转运动下会逐渐形成密闭、具有一定强度且不干扰刮肥板旋转和肥料抛撒的柔性筒腔,如图 3b 所示。当柔性筒腔彻底形成后,此时位于刮肥板末端的非受控肥料在抛撒过程中被分成 3 部分,如图 3c 所示,由于肥料间黏性较

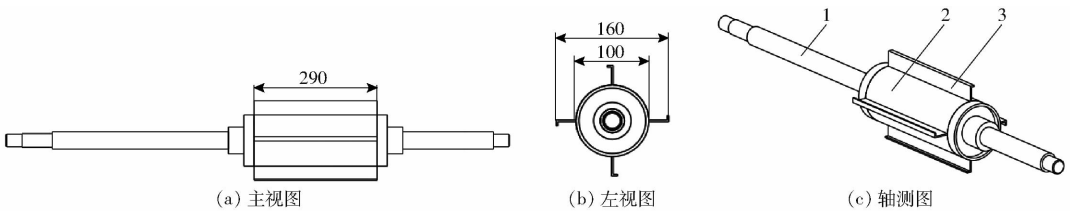


图 2 辅助辊轮结构图

Fig.2 Structure diagrams of auxiliary roller

1. 辊轴 2. 辊筒 3. 叶片

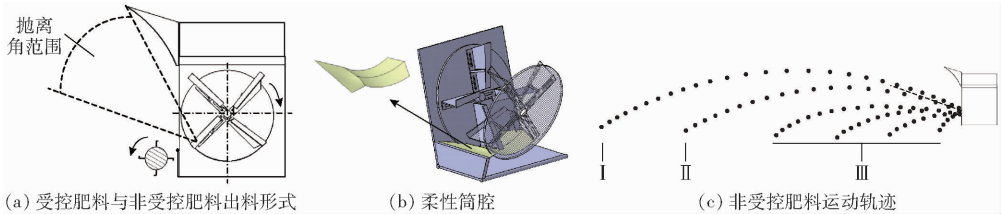


图 3 非受控肥料形成原因及出料原理

Fig.3 Formation cause and discharge principle of uncontrolled fertilizer

大,肥料 I 同受控肥料一起以较大速度从最小抛离角(图中虚线)上方抛出,肥料 II 沿最小抛离角下方抛出,速度逐渐衰减,但仍被抛至远处,而非受控肥料中占比较大的肥料 III 则被圆盘上的刮肥板携带出并在某一时刻脱离控制,一小部分落回至筒腔,另一部分由于惯性掉落在近处,若安装辅助辊轮后,该部分肥料则掉落至辅助辊轮上,辅助辊轮的叶片承接这部分肥料并向外抛撒,从而降低肥料在近处的堆积。

辅助辊轮为达到辅助抛撒目的,理论上其线速度应至少与圆盘保持一致,可以更好承接后者抛撒出的肥料颗粒,保证颗粒速度的接替与衔接。但由于辅助辊轮抛撒的肥料为非受控肥料,该部分肥料的速度差距较大,大部分脱离柔性筒腔的非受控肥料速度较小,且逐渐衰减,故辅助辊轮的转速在理论值的基础上可适当降低。

2 辅助辊轮结构设计

2.1 肥料颗粒力学与运动学分析

2.1.1 肥料颗粒脱离辊轮前

如图 4 所示,以辊轮辊筒中心 O 为原点建立坐标系 XOZ ,其中 X 轴指向肥料抛撒方向, Z 轴方向垂直于地面向上。在侧抛装置工作过程中,肥料不断被刮肥板携带出,自由下落距离较短,落在辊轮叶片上的初速度 v_0 较小,且肥料较为松软具有黏性,故假设肥料落到辊轮上不会弹起。

如图 4a 所示,对刚落至辊轮叶片上的肥料颗粒进行受力分析。颗粒受重力 G 、离心力 F_{ce} 、科里奥利力 F_{co} 、惯性力 F_i 、摩擦力 F_f 和叶片的支持力 F_N 。则肥料颗粒受到合力为

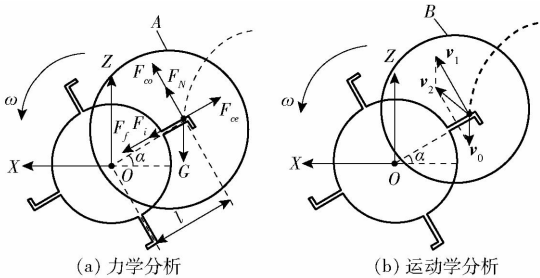


图 4 肥料颗粒脱离辊轮前的力学与运动学分析

Fig.4 Mechanical and kinematic analysis of fertilizer particles before leaving roller

$$F = mg(1 + \cos\alpha + \mu\sin\alpha) + m\omega^2 l + 2m\omega \frac{dl}{dt} + m \frac{d^2 l}{dt^2} \tag{1}$$

式中 m ——肥料颗粒质量,kg
 g ——重力加速度, m/s^2
 ω ——辊轮角速度, rad/s
 l ——肥料颗粒与辊轮中心的距离,mm
 μ ——摩擦因数
 t ——颗粒运动到距轴中心线 l 所用时间,s
 α ——叶片当前旋转位置与水平方向的夹角, $(^\circ)$

在合力作用下肥料颗粒所获得的速度为

$$v_1 = \int \frac{F}{m} dt \tag{2}$$

故肥料颗粒脱离辊轮前(即跟随叶片运动)的合速度为

$$v_2 = v_0 + v_1 \tag{3}$$

2.1.2 肥料颗粒脱离辊轮后

肥料颗粒在旋转辊轮叶片的带动作用下被抛至空中,在对其进行力学与运动学分析时需考虑空气阻力影响,空气阻力计算式为

$$f = \frac{1}{2} C \rho s v^2 \tag{4}$$

式中 f ——颗粒受到的空气阻力,N
 C ——空气阻力系数
 ρ ——空气密度,kg/m³
 s ——颗粒迎风面积,m²
 v ——颗粒与空气的相对运动速度,m/s

由于肥料颗粒在空气中运动时的迎风面极小,故其与空气的相对运动速度为 v_2 。在空气中肥料颗粒各方向的加速度为

$$\begin{cases} a_{fx} = \frac{C \rho s v_{2x}^2}{2m} \\ a_{fy} = \frac{C \rho s v_{2y}^2}{2m} \\ a_{fz} = \frac{C \rho s v_{2z}^2}{2m} \end{cases} \tag{5}$$

式中 a_{fx} ——颗粒 X 方向空气阻力加速度,m/s²
 a_{fy} ——颗粒 Y 方向空气阻力加速度,m/s²
 a_{fz} ——颗粒 Z 方向空气阻力加速度,m/s²
 v_{2x} —— v_2 在 X 方向的分速度,m/s
 v_{2y} —— v_2 在 Y 方向的分速度,m/s
 v_{2z} —— v_2 在 Z 方向的分速度,m/s

以颗粒抛出点在地面上的投影为原点 O 建立直角坐标系 XOZ , X 轴指向肥料抛撒的方向, Z 轴垂直于地面向上。肥料颗粒脱离辊轮后的力学与运动学分析在 XOZ 平面的运动轨迹投影如图 5 所示。在空中运动的方程为

$$\begin{cases} d = v_{2x} t_3 - \int_0^{t_3} \int_0^{t_3} a_{fx} dt dt \\ H = \int_0^{t_1} \int_0^{t_1} (a_{fz} + g) dt dt + \int_0^{t_2} \int_0^{t_2} (g - a_{fz}) dt dt - v_{2z} t_1 \\ v_{2z} = \int_0^{t_1} (a_{fz} + g) dt \\ t_3 = t_1 + t_2 \end{cases} \tag{6}$$

式中 d ——抛撒距离,m
 H ——颗粒上升过程中到达的最大高度,m
 h ——辅助辊轮离地高度,m
 t_1 ——颗粒上升至最高点的时间,s
 t_2 ——颗粒从最高点落至地面的时间,s
 t_3 ——颗粒在空中运动的总时间,s

由式(6)可知, v_{2x} 是决定抛撒距离的关键因素,由式(1)~(3)可知, v_2 由 v_0 和 v_1 共同决定。其中, v_0 取决于非受控肥料出料速度, v_1 主要取决于辊轮转速和叶片高度,故辊轮转速也是后续仿真试验中需要考虑的关键因素,而最大程度上保证叶片高度也

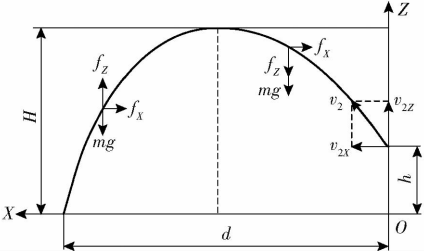


图 5 肥料颗粒脱离辊轮后在 XOZ 面力学与运动学分析
Fig. 5 Mechanics and kinematics analysis of fertilizer particles detached from roller on XOZ surface

是防止近处肥料堆积的关键。此外,侧抛装置行走速度也会对抛撒有一定的影响,但由于当前需解决的是辊轮在抛撒时存在的近处肥料堆积和局部起垄问题,采用定点形式抛撒可以使观察效果明显且便于测量和对比,而装置行走会对观察产生影响,故侧抛装置行走速度在本文中不做进一步探究。

2.2 可修正肥料颗粒方向机构分析与设计

从上述理论分析结果可得影响辅助辊轮抛撒的工作参数与结构参数,优化相应参数可以减少近处部分肥料的堆积。图 6 为非受控肥料被传递至辅助辊轮的俯视图,当叶片承接肥料区域容量达到峰值时,叶片对于剩余部分肥料则失去作用,故肥料掉落在近处,从而产生堆积或局部起垄现象。因此需要改变叶片结构形式,使肥料颗粒向两侧分散,加强其对肥料颗粒的控制作用,并使非受控肥料在叶片的作用下拥有良好的撒布面。

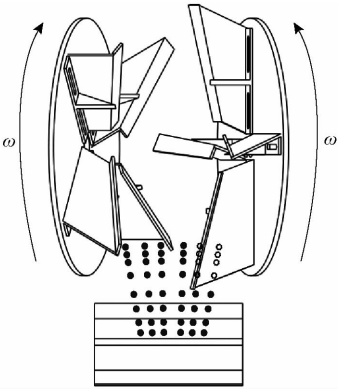


图 6 中间区域非受控肥料射流
Fig. 6 Uncontrolled fertilizer jet in the middle area

基于上述问题,将辅助辊轮叶片结构设计为螺旋结构,由左旋右旋两半叶片对称布置组合而成,如图 7 所示。侧抛装置在作业过程中,非受控肥料被刮肥板末端从柔性筒腔中携带出并落至对称螺旋叶片上,辊轮旋转过程中叶片会不断修正肥料颗粒的运动方向,使颗粒从叶片中间滑至两侧,排料量大大增加,扩大两侧撒布范围且抛撒均匀,故可以很好地解决原辅助辊轮在抛撒中存在

的问题。

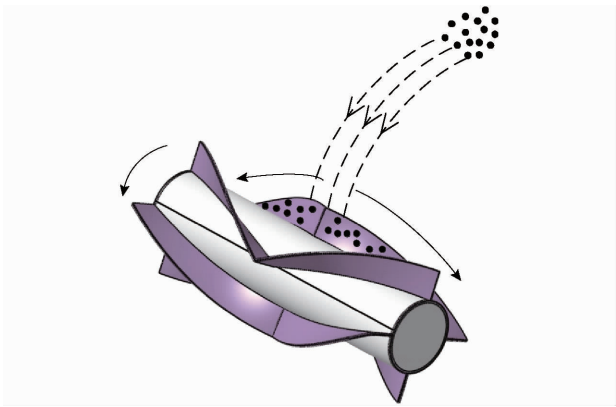


图 7 对称螺旋叶片工作原理

Fig. 7 Working principle diagram of symmetric spiral blade

根据前文理论分析结果可知,增加叶片高度可

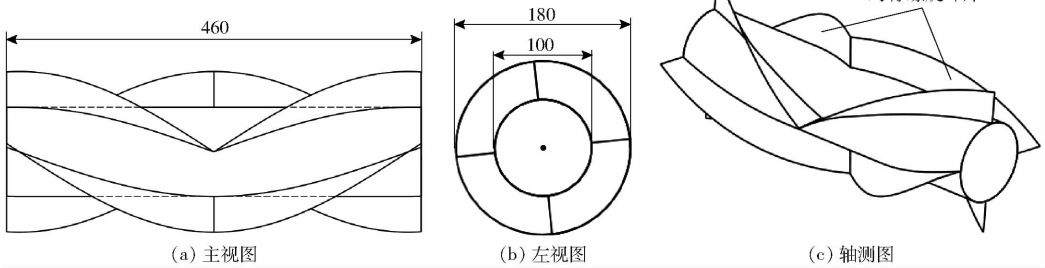


图 8 带有对称螺旋叶片的辅助辊轮结构图

Fig. 8 Structure diagrams of auxiliary roller with symmetrical spiral blade

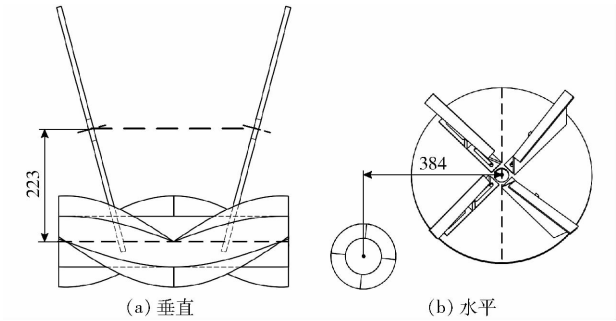


图 9 辅助辊轮与对置斜盘空间位置关系

Fig. 9 Spatial position relationship between auxiliary roller and opposite inclined disc

2.3 对称螺旋叶片上颗粒受力分析与运动分布

肥料颗粒作用于对称螺旋叶片时的受力分析如图 10 所示。以 O 为原点建立空间直角坐标系 $OXYZ$, X 轴指向肥料抛撒方向, Y 轴方向与机具运动方向相反, Z 轴方向垂直于地面向上。当颗粒落至螺旋叶片时会受到多种力的共同作用,包括重力 G 、离心力 F_{ce} 、科里奥力 F_{co} 、惯性力 F_i 、叶片的支持力 F_N 和摩擦力 F_f 。当前叶片的螺旋结构既有原辅助辊轮直板叶片的抛撒功能,还具有修正颗粒运动方向的功能,使颗粒在受到 X 轴方向力的同时,还受到沿 Y 轴方向的力,颗粒沿 Y 轴的正向或负向分散。肥料颗粒在 Y 轴方向受到的力为

以增大肥料颗粒承载面积,使螺旋叶片修正肥料颗粒的工作区域增大,修正效果更好。但由于安装空间的限制,且辊轮与机具间要留有一定空间容纳肥料,防止干涉,辊筒半径仍为 50 mm,叶片高度增至 40 mm。为了尽可能扩大撒布面,并增加叶片的有效修正工作区间,在安装空间允许的前提下将辊筒长度增至 460 mm。带有对称螺旋叶片的辅助辊轮结构图如图 8 所示。根据前文对非受控肥料运动轨迹的分析,辅助辊轮既不能阻挡非受控肥料中速度较大的部分,还要承接速度较小的部分,故辅助辊轮与对置斜盘的空间位置关系如图 9 所示。当前叶片的螺旋角在设计过程中应考虑肥料与叶片相对滑动时的滑动摩擦角,并结合工程实践经验,螺旋角初步取值为 35° ,叶片数为 4。

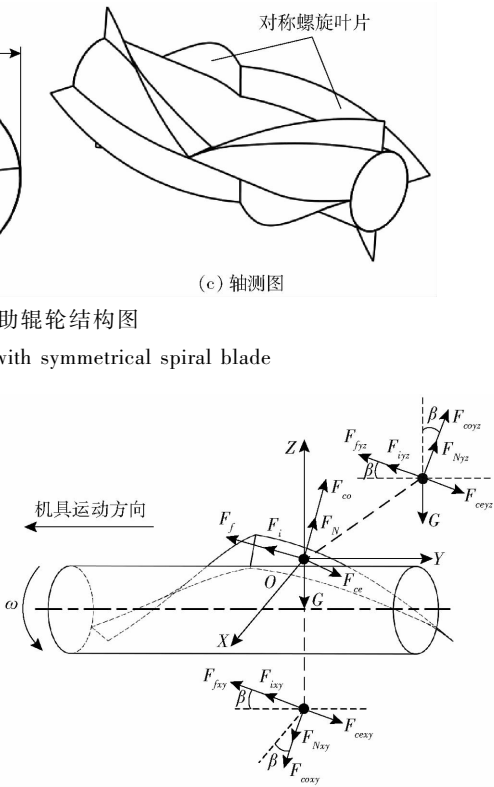


图 10 落至对称螺旋叶片上的颗粒受力分析

Fig. 10 Force analysis of particles falling on symmetrical spiral blade

$$F_y = (F_{coxy} + F_{Nxy} + F_{coyz} + F_{Nyz}) \sin\beta + (F_{cexy} - F_{fxy} - F_{ixy} + F_{ceyz} - F_{fyz} - F_{iyz}) \cos\beta \quad (7)$$

$$a_y = \frac{F_y}{m} \quad (8)$$

式中 F_y ——颗粒沿 Y 轴方向的合力, N
 β ——螺旋角, $(^\circ)$

a_y ——颗粒沿 Y 轴方向的加速度, m/s^2

由式(7)、(8)可知,肥料颗粒在沿 X 轴正向运动的同时,还有沿 Y 轴的正向或负向运动的趋势,此时肥料颗粒可以向外分散。如图 11 所示,为直板

叶片与对称螺旋叶片上的肥料颗粒撒布范围对比,图中线条为肥料颗粒的运动轨迹。其中,直板叶片上的肥料颗粒撒布范围呈矩形,叶片排料量小,极易使颗粒堆积,从而产生起垄现象;而对称螺旋叶片由于其螺旋角可修正肥料颗粒运动方向,扩大了叶片有效区域,从而使原本的矩形面变为向外发散的扇面。

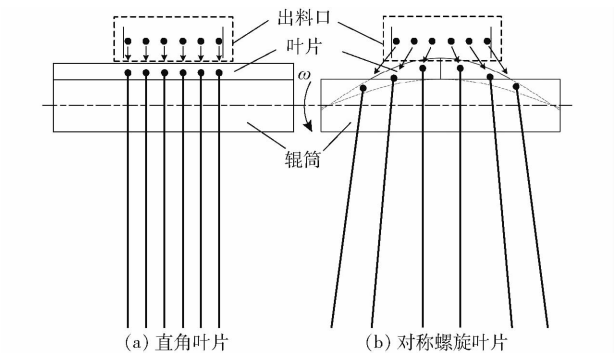


图 11 两种叶片上肥料颗粒撒布范围对比

Fig. 11 Comparison of distribution range of fertilizer particles on two leaves

2.4 功耗分析

辅助辊轮总功率消耗 N 包括两部分,一部分为克服辊轮转动时轴承的摩擦阻力和空气阻力等空转功率 N_k ,另一部分为辅助辊轮在抛撒肥料过程中的功率消耗 N_p 。总功率消耗 N 可表示为^[14]

$$N = N_k + N_p = A\omega + B\omega^3 + \frac{q(\omega r)^2}{1\,000(1-\mu)} \quad (9)$$

式中 r ——辊轮半径,m

A ——系数,与轴承种类、传动方式有关,取 $(2 \sim 3) \times 10^{-4}$

B ——系数,与辊轮转动时迎风面积有关,取 $(4.8 \sim 6.8) \times 10^{-7}$

q ——辅助辊轮喂料量,取 1.4 kg/s

式(9)中的功率消耗,以辊轮叶片对肥料颗粒的冲击为非弹性碰撞算,即肥料颗粒撞击辊轮叶片后即以辊轮速度进行运动。当圆盘转速为 700 r/min 时,侧抛装置整体喂入量为 15 kg/s ^[6],经多次仿真试验测定,经由辅助辊轮控制的非受控肥料为 1.4 kg/s ,故喂料量取 1.4 kg/s 。根据式(9)并换算单位得到不同辊轮转速下的功耗曲线,如图 12 所

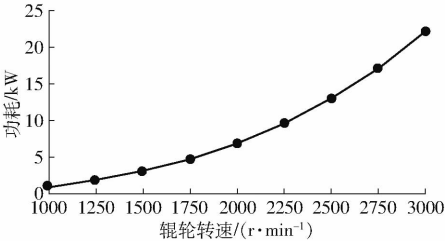


图 12 不同辊轮转速下功耗变化曲线

Fig. 12 Power consumption curves at different roller speeds

示。从图 12 可以看出,在不同辊轮转速下功耗呈指数式增长,初时随着辊轮转速提升功耗增长较平稳,当转速超过 $2\,500 \text{ r/min}$ 后,功耗急剧上升,因此应在满足工作要求条件下使辊轮转速尽可能低,以保证功耗最低。

3 仿真

3.1 仿真模型建立及参数设置

3.1.1 侧抛装置模型建立

对侧抛装置的模型进行创建,在不影响仿真结果的情况下,对虚拟仿真无实际意义的结构进行简化,简化后的侧抛装置如图 13a 所示。为便于观测肥料颗粒的抛撒情况,需建立地面模型。根据实际抛撒经验,3 m 以外为主抛撒部件圆盘抛撒肥料的区域,近处(3 m 内)为辅助辊轮抛撒肥料的主要区域,故地面模型的长度也将以此为依据设置成 3 m。地面模型宽度根据抛撒幅宽设定,辅助辊轮 3 m 处的抛撒幅宽不应超过主抛撒部件。综上,地面模型尺寸为 $3\,800 \text{ mm} \times 2\,000 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,如图 13b 所示。

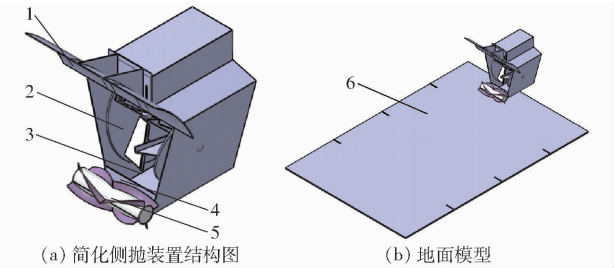


图 13 侧抛装置仿真模型

Fig. 13 Simulation model of side throw device

1. 上导流板 2. 撒肥圆盘 3. 柔性筒腔 4. 挡料板 5. 辅助辊轮 6. 地面

3.1.2 仿真参数设置

仿真过程中被辅助辊轮抛撒出的肥料颗粒不只沿水平方向飞行,还有竖直方向,将计算域在 Z 方向的最大值设置为 $4\,000 \text{ mm}$ 。仿真中,将肥料颗粒简化为圆球模型,创建球形肥料颗粒体,并参照其实际平均粒径将模型半径设置为 2 mm ,粒径随机分布。由于在实际抛撒作业中,肥料被抛至地面后会与土壤接触,因此为还原肥料与土壤的实际接触状态,需要设置带有土壤颗粒的地面或将地面赋予土壤属性,综合对比发现两者误差很小、仿真趋势一致,且后者计算速度显著提高,故采用为地面赋予土壤属性的方法进行仿真。并定义肥料与土壤间的接触参数,以便更真实反映抛撒后作业效果。肥料、钢、土壤及其彼此间接触参数等^[15-17]如表 1 所示。由于肥料、土壤含湿的原因会发生明显粘结和聚集,

故肥料与肥料间、肥料与土壤间接触模型均采用 Hertz – Mindlin with JKR^[18-19], 肥料颗粒与侧抛装置间采用无滑移 Hertz – Mindlin (no slip) 模型。

表 1 EDEM 仿真基本参数

Tab. 1 Basic parameters of EDEM simulation		
项目	参数	数值
肥料	泊松比	0.4
	剪切模量/Pa	2×10^6
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	800
	表面能/($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)	0.045
钢	泊松比	0.31
	剪切模量/Pa	7×10^{10}
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 900
	表面能/($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)	0.022 5
土壤	泊松比	0.3
	剪切模量/Pa	5×10^7
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 600
	表面能/($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)	0
肥料-肥料	恢复系数	0.6
	静摩擦因数	0.65
	动摩擦因数	0.1
肥料-钢	恢复系数	0.6
	静摩擦因数	0.7
	动摩擦因数	0.11
肥料-土壤	恢复系数	0.4
	静摩擦因数	0.66
	动摩擦因数	0.18

仿真试验旨在探究柔性筒腔形成后辅助辊轮抛撒非受控肥料的情况,而对置斜盘高速旋转时抛撒出的肥料会与辅助辊轮抛撒出的肥料掺杂在一起,对后者抛撒肥料的数据测定造成干扰,故在侧抛装置内预先添加柔性筒腔模型,并将颗粒工厂设置在柔性筒腔上方,即刮肥板旋转一周时末端所能到达的最低处,此时圆盘只起到将肥料颗粒携带至辅助辊轮上的作用,根据已有试验数据,圆盘转速设为 30 r/min。喂料量取 1.4 kg/s,全过程仿真时间为 14 s,共喂料 10 s^[20],剩余 4 s 让肥料颗粒自由下落,直至全部落回地面。

3.2 仿真过程与评价指标测定方法

3.2.1 仿真过程

为便于观察辅助辊轮抛撒作业后近处肥料的分布状况,采用定点形式抛撒。设置全程计算时间为 14 s,固定时间步长为 Reyleigh 时间步长的 20%,每隔 0.02 s 记录一次^[21-22],仿真过程侧抛装置静态图如图 14a 所示。

图 14b 为带有对称螺旋叶片的辅助辊轮在仿真过程中旋转至某一时刻的静态图,可以看到辅助辊轮旋转过程中,肥料颗粒沿着叶片向两侧滑动,对称

螺旋叶片有效修正了肥料颗粒的运动方向,排料量显著增加。

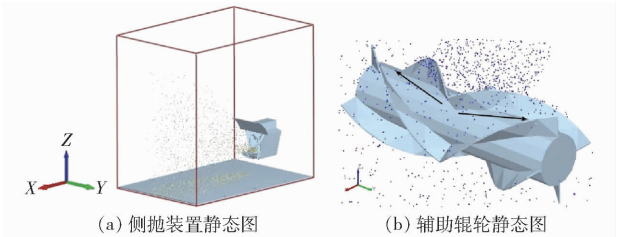


图 14 EDEM 仿真过程
Fig. 14 EDEM simulation process

3.2.2 评价指标测定方法

近处肥料堆积和局部起垄会对侧抛装置整体抛撒效果造成影响,使有效抛距内的均匀度变异系数增大。根据原有抛撒经验,当无辊轮辅助作业的侧抛装置在抛撒肥料时,非受控肥料大多落在 1 m 内,其次是 3 m 处,3 m 外较为均匀。因此辅助辊轮在单独作业时应使 1 m 的肥料尽可能少,确保非受控肥料更多落在 2 ~ 3 m 范围内,以充分发挥其辅助作业的功能,进而提升整体抛撒性能。为评价辅助辊轮的作业性能,设定两个评价指标,分别为均匀度变异系数与 1 m 内肥料占比。其中,均匀度变异系数的长度测定边界设置为 3 m。

(1) 均匀度变异系数测定方法

按照撒肥机环保要求和试验方法^[23]相关规定,测定均匀度变异系数需设置肥料收集箱,如图 15a 所示,每个收集箱尺寸为 500 mm × 500 mm × 100 mm,共设置 18 个。按照上述环保要求和测定方法,有机肥后抛属于横向施肥,均匀度变异系数应小于 30%,而侧向抛撒属于纵向施肥,变异系数在一般情况下小于 40% 即可。

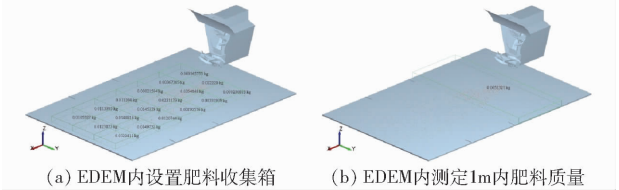


图 15 EDEM 内评价指标测定办法

Fig. 15 Determination method of evaluation index in EDEM

(2) 1 m 内肥料占比测定方法

1 m 内肥料是指辅助辊轮抛撒的全部非受控肥料中 1 m 以内的部分,待所有肥料颗粒均落至地面后,在 EDEM 内调整收集箱尺寸和数量,测定 1 m 内所有肥料的质量,如图 15b 所示,测得的质量与非受控肥料总质量相除,即可计算出 1 m 内肥料占比。

3.3 单因素试验

3.3.1 试验方案

选取辅助辊轮转速、螺旋角和叶片数 3 个参数

为试验因素,以均匀度变异系数和1 m内肥料占比为试验评价指标,进行对置斜盘侧抛装置辅助辊轮抛撒作业单因素试验。试验中设定工况:肥料喂入量1.4 kg/s、喂料时间10 s、总时间14 s。

利用 EDEM 后处理中 Manual Selection 命令手动选择非受控肥料颗粒,测得被带出的肥料颗粒最大速度为23 m/s,最小速度为10.25 m/s,换算成对应辅助辊轮转速分别为2 442 r/min 和1 090 r/min,根据前文工作机理分析与功耗分析结果,单因素试验选定辅助辊轮转速为1 090~2 500 r/min;为利于辊轮工作时肥料颗粒在叶片上的运动能够克服滑动摩擦阻力而向两侧分散,叶片螺旋角应大于35°,而又因辊轮抛撒肥料需满足射流要求,其幅宽不能超过主抛撒部件,通过仿真得到辅助辊轮螺旋角与圆盘抛撒幅宽关系曲线,当辅助辊轮螺旋角小于53°时,3 m处辅助辊轮抛撒幅宽小于圆盘的抛撒幅宽,综合考虑选定螺旋角为35°~53°;当叶片数超过8时,均匀度变异系数急剧升高,且肥料颗粒难以进入辊轮,辊轮相当于封闭圆筒,当叶片数小于3时,部分肥料辅助辊轮无法承接,直接落至近处地面,结合工程实践经验与原有仿真数据,选定叶片数为3~8。

选用上述3个因素的中间水平进行单因素仿真试验:辊轮转速1 936 r/min、螺旋角44°、叶片数6,每组试验固定其中2个试验因素水平,探究随着单因素水平线性变化时辅助辊轮抛撒作业均匀度变异系数和1 m内肥料占比的变化规律,仿真试验结束后按评价指标测定办法进行测定。

3.3.2 试验结果分析

辅助辊轮从径向看,其叶片可分为顶部、中部和根部3部分区域。叶片的主体部分(即中部)是抛撒肥料和修正肥料颗粒运动方向的良好工作区域,经此区域抛撒的肥料抛距大(1 m内肥料占比小)且均匀(均匀度变异系数小);叶片顶部虽可以正常抛料,但其无法有效修正肥料颗粒运动方向;而叶片根部则既无法抛撒肥料,也无法修正运动方向。

为保证仿真试验结果的准确性,每组试验重复5次,结果取平均值,单因素仿真试验结果如图16

所示。由图16a可知,随着辊轮转速提高,肥料均匀度变异系数先急剧下降再缓慢上升,1 m内肥料占比整体呈下降趋势,造成上述变化的原因是:当转速为1 090 r/min时,辊轮转速低于肥料颗粒运动速度,辊轮(叶片)会阻碍肥料颗粒运动,大部分肥料颗粒被堆积在叶片根部贴近辊筒处,既无法被抛至远处,也不能有效修正运动方向,导致两评价指标均很高。当转速升至1 936~2 500 r/min时,辊轮转速相对于肥料颗粒运动速度稍高,此时肥料颗粒进入辊轮并落至叶片虽不困难,大部分肥料仍能落至叶片中部区域,但也有相当一部分肥料落至顶部,该部分肥料直接被抛出,来不及修正运动方向,故1 m内肥料占比持续走低,而均匀度变异系数则略有回升。综合上述分析,辊轮转速1 936~2 500 r/min为辊轮进行抛撒作业时的较优水平区间,在此区间内均匀度变异系数满足要求,且能最大程度保证1 m内肥料占比。

由图16b可知,随着辊轮叶片螺旋角增大,肥料均匀度变异系数整体呈上升趋势,1 m内肥料占比先快速下降后又平稳。当螺旋角为35°时,可以有效修正肥料颗粒运动方向,此时由螺旋角导致的叶片向外分散肥料颗粒的力较好,抛撒均匀,变异系数低至18.3%。螺旋角为38°~53°时,螺旋角逐渐增大,修正效果愈发明显,肥料颗粒向两侧分散显著,均匀性变差,故变异系数上升显著。但当螺旋角较小时,肥料颗粒克服滑动摩擦阻力的能力较小,且向外分散的肥料颗粒少,肥料易滞留,抛出困难,故1 m内肥料占比较大。综上所述,螺旋角38°~50°为辊轮进行抛撒作业时较优的水平区间。

由图16c可知,随着叶片数量增加,辅助辊轮抛撒作业时均匀度变异系数整体呈上升趋势,而1 m内肥料占比整体先下降后又逐渐上升。产生上述变化趋势的原因为:当叶片数较少时,叶片与叶片间空隙大,肥料颗粒可以顺利到达叶片中部区域,故均匀度变异系数小;随着叶片数增多,叶片与叶片间空隙逐渐减小,肥料进入叶片逐渐困难,部分肥料无法顺利到达中部区域,在顶部即被抛撒出去,故无法修正运动方向,因此均匀度变异系数逐渐升高。此外,当

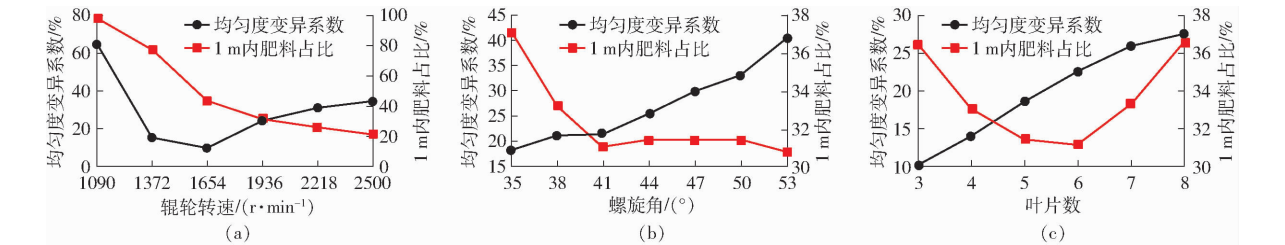


图 16 单因素试验结果

Fig. 16 Single factor test results

叶片数过少时,每个叶片抛撒肥料量较多,且肥料具有粘滞性,导致无法被抛远,部分被堆积在近处。而当叶片数过多时,一定转速下的辊轮对肥料颗粒来说则近乎于封闭状态,肥料颗粒难以进入其中,大部分颗粒被弹至空中后散布在近处,故 1 m 内肥料占比偏高。综合上述分析,叶片数 4~8 为辊轮进行抛撒作业较优的水平区间,此区间能最大程度兼顾均匀度变异系数和 1 m 内肥料占比。

3.4 响应面试验

3.4.1 试验方案与结果

为进一步寻求辅助辊轮抛撒作业最优参数组合,探究作业参数对试验指标的交互作用和影响规律,选取辊轮转速、螺旋角和叶片数为试验因素,均匀度变异系数 Y_1 和 1 m 内肥料占比 Y_2 为试验指标,利用 Design-Expert 软件中的 Box-Behnken 响应曲面法开展试验方案设计与数据分析。各试验因素编码如表 2 所示,试验方案与结果如表 3 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为编码值。

表 2 试验因素编码
Tab.2 Coding of test factors

编码	因素		
	辊轮转速 $x_1/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	螺旋角 $x_2/(^{\circ})$	叶片数 x_3
-1	1 936	38	4
0	2 218	44	6
1	2 500	50	8

表 3 试验方案与结果
Tab.3 Test scheme and results

序号	因素			均匀度变异 系数 $Y_1/\%$	1 m 内肥料 占比 $Y_2/\%$
	X_1	X_2	X_3		
1	-1	-1	0	20.80	33.74
2	1	-1	0	34.84	22.77
3	-1	1	0	29.02	31.67
4	1	1	0	37.56	19.68
5	-1	0	-1	14.00	33.02
6	1	0	-1	32.34	19.42
7	-1	0	1	27.46	33.75
8	1	0	1	35.54	23.97
9	0	-1	-1	23.01	26.34
10	0	1	-1	30.49	22.01
11	0	-1	1	33.38	27.08
12	0	1	1	36.69	26.68
13	0	0	0	31.67	25.53
14	0	0	0	29.88	25.33
15	0	0	0	31.17	25.79
16	0	0	0	29.71	25.32
17	0	0	0	30.80	25.35

3.4.2 试验结果分析

对试验数据进行方差分析与多元回归拟合,得到均匀度变异系数 Y_1 和 1 m 内肥料占比 Y_2 两个试

验指标的回归方程,并对二者进行显著性检验。

(1) 均匀度变异系数

由表 4 可知,在置信度为 95% 的条件下,模型拟合度为极显著 ($P < 0.01$),回归模型失拟项 $P = 0.5241$,表现为不显著,说明不存在其他影响评价指标的主要因素。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_1 = 30.65 + 6.13X_1 + 2.72X_2 + 4.15X_3 - 1.38X_1X_2 - 2.57X_1X_3 - 1.04X_2X_3 - 1.82X_1^2 + 1.73X_2^2 - 1.49X_3^2 \tag{10}$$

由式(10)回归系数可得,影响均匀度变异系数的因素主次顺序为辊轮转速、叶片数和螺旋角。

表 4 均匀度变异系数方差分析
Tab.4 Variance analysis of coefficient of variation

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	570.16	9	63.35	95.23	0.0001**
X_1	300.13	1	300.13	451.15	0.0001**
X_2	59.02	1	59.02	88.72	0.0001**
X_3	138.03	1	138.03	207.48	0.0001**
X_1X_2	7.56	1	7.56	11.37	0.0119*
X_1X_3	26.32	1	26.32	39.96	0.0004**
X_2X_3	4.35	1	4.35	6.53	0.0378*
X_1^2	14.01	1	14.01	21.06	0.0025**
X_2^2	12.65	1	12.65	19.01	0.0033**
X_3^2	9.31	1	9.31	13.99	0.0073**
残差	4.66	7	0.67		
失拟项	1.85	3	0.62	1.06	0.5241
总和	574.82	16			

注:**表示差异极显著 ($P < 0.01$), *表示显著 ($0.01 < P < 0.05$),下同。

(2) 1 m 内肥料占比

由表 5 可知,在置信度为 95% 的条件下,模型拟合度为极显著 ($P < 0.01$),回归模型失拟项 $P = 0.7684$,表现为不显著,说明不存在其他影响评价指标的主要因素。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_2 = 25.46 - 5.79X_1 - 1.24X_2 + 1.34X_3 - 0.25X_1X_2 + 0.96X_1X_3 + 0.98X_2X_3 + 1.76X_1^2 - 0.26X_2^2 + 0.32X_3^2 \tag{11}$$

由式(11)回归系数可得,影响 1 m 内肥料占比的因素主次顺序为辊轮转速、叶片数和螺旋角。

3.4.3 响应曲面分析

通过 Design-Expert 软件对数据进行处理,得到辊轮转速、螺旋角和叶片数对均匀度变异系数和 1 m 内肥料占比影响程度的响应曲面,如图 17、18 所示。不同因素对评价指标的影响程度与单因素试验趋势基本吻合。

如图 17a 所示,当叶片数 X_3 位于中心水平时,随着辊轮转速提升均匀度变异系数逐渐增大,随着

表 5 1 m 内肥料占比方差分析

Tab.5 Variance analysis of near fertilizer proportion					
变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	316.50	9	35.17	1 174.48	0.000 1 **
X_1	268.42	1	268.42	8 964.77	0.000 1 **
X_2	12.23	1	12.23	408.34	0.000 1 **
X_3	14.28	1	14.28	477.07	0.000 1 **
X_1X_2	0.26	1	0.26	8.69	0.021 5 *
X_1X_3	3.65	1	3.65	121.84	0.000 1 **
X_2X_3	3.86	1	3.86	128.96	0.000 1 **
X_1^2	12.99	1	12.99	433.98	0.000 1 **
X_2^2	0.28	1	0.28	9.20	0.019 0 *
X_3^2	0.43	1	0.43	14.33	0.006 8 **
残差	0.21	7	0.030		
失拟项	0.047	3	0.016	0.39	0.768 4
总和	316.71	16			

螺旋角增大均匀度变异系数整体先略下降后上升；如图 17b 所示,当螺旋角 X_2 位于中心水平时,随着

辊轮转速提升均匀度变异系数逐渐增大,随着叶片数增多均匀度变异系数也保持一定趋势逐渐增大；如图 17c 所示,当辊轮转速 X_1 位于中心水平时,随着螺旋角增大均匀度变异系数逐渐增大,随着叶片数增多,均匀度变异系数也呈现逐渐增大的趋势。

如图 18a 所示,当叶片数 X_3 位于中心水平时,随着辊轮转速提升 1 m 内肥料占比逐渐降低,当转速低时,随着螺旋角增大 1 m 内肥料占比略有降低,而转速高时趋于不变；如图 18b 所示,当螺旋角 X_2 位于中心水平时,随着辊轮转速提升 1 m 内肥料占比逐渐降低,转速低时随着叶片数增大 1 m 内肥料占比趋于不变,转速高时略有增大；如图 18c 所示,当辊轮转速位于中心水平时,叶片数较少时,随着螺旋角增大 1 m 内肥料占比缓慢下降,叶片数较多时则略有增加,随着叶片数增加,1 m 内肥料占比先降低后又逐渐增大。

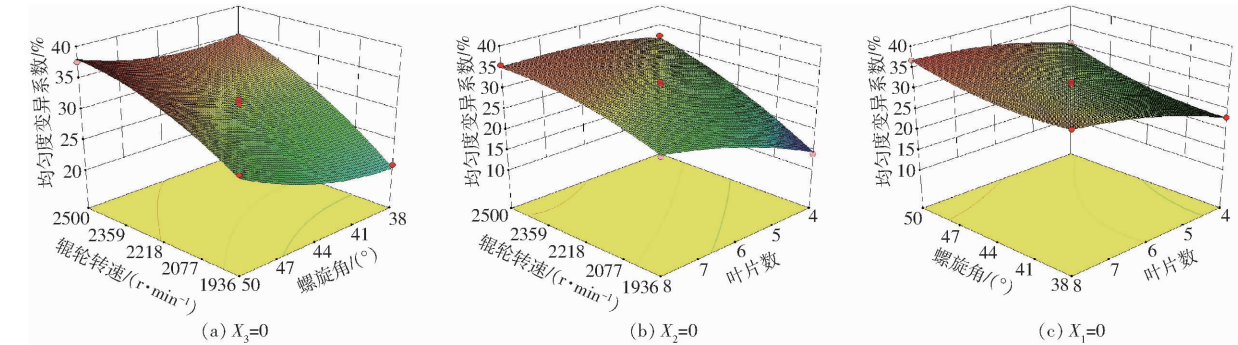


图 17 各因素交互作用对均匀度变异系数的影响

Fig. 17 Influence of interaction of various factors on coefficient of variation of uniformity

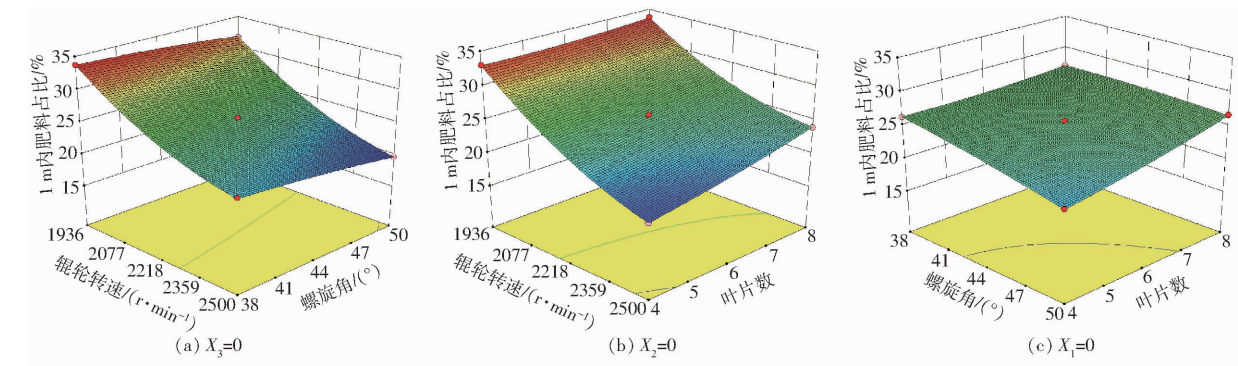


图 18 各因素交互作用对 1 m 内肥料占比的影响

Fig. 18 Effect of interaction of factors on fertilizer proportion within 1 m

辅助辊轮进行抛撒作业时,辊轮转速作为影响评价指标最显著因素应尽量保证其与肥料颗粒运动速度相近,这样肥料颗粒可以顺利落至中部区域,保证抛距和均匀性;螺旋角既不能过小,需确保修正肥料颗粒运动方向的有效性,又不能过大,向两侧的分力过大会导致均匀性下降;叶片数在能克服肥料间黏性的基础上应尽量少,使肥料颗粒更多落至叶片中部区域,从而拥有良好抛撒效果,亦能避免因叶片

数量过多形成封闭系统而阻碍肥料颗粒正常进入叶片。

3.4.4 参数优化与验证试验

以均匀度变异系数低、1 m 内肥料占比低为原则,在辊轮转速为 1 936 ~ 2 500 r/min、螺旋角为 38° ~ 50°、叶片数为 4 ~ 8 的约束条件下进行优化求解,得到辊轮转速 2 238 r/min、螺旋角 42.70°、叶片数 4 的最优参数组合。在该参数组合条件下,获得均匀度

变异系数 24.91% ,1 m 内肥料占比 24.44%。

为了验证优化分析结果的正确性,在上述最优参数组合条件下进行仿真试验,试验重复 5 次并取平均值。得到均匀度变异系数为 24.45% ,1 m 内肥料占比为 24.96%。验证试验结果表明,优化结果可信。

3.5 改进前后辅助辊轮抛撒情况对比

由改进前辅助辊轮仿真试验可知,辅助辊轮最优参数为:辊轮转速 2 223 r/min、叶片数 4,在该参数组合下仿真试验结果为均匀度变异系数 48.12% ,1 m 内肥料占比 63.47% ,对比可知改进后辅助辊轮在评价指标方面有了很大改善。此外,从肥料抛撒情况来看(图 19),原辅助辊轮进行抛撒作业时肥料大多集中在中部,此时近处肥料更容易堆积和起垄;而改进后辅助辊轮可以有效修正肥料颗粒的运动方向,使肥料向外侧抛撒,大大增加排料量并扩大抛撒幅宽,有效避免近处肥料堆积和起垄。

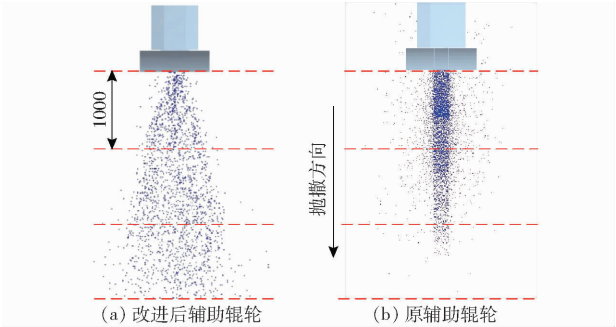


图 19 改进前后辅助辊轮抛撒情况对比
Fig. 19 Comparison of auxiliary roller dispersion before and after improvement

4 样机试验

4.1 试验方法与材料

试验于 2022 年 7 月 9 日进行,地点为东北农业大学,当日天气晴朗,温度 18 ~ 29℃ ,西南风 3 ~ 4 级。根据国内行业有机肥料现行标准^[24],选择哈尔滨易利融农业科技有限公司的商品生态有机肥作为试验材料^[6]。设计带有对称螺旋叶片的辅助辊轮,如图 20 所示。

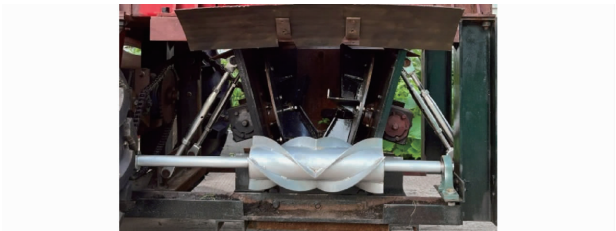


图 20 带有对称螺旋叶片的辅助辊轮
Fig. 20 Auxiliary roller with symmetrical spiral blade

试验时,当圆盘为主要抛撒部件、辊轮为辅助抛

撒部件时,圆盘转速设为 700 r/min,改进后辅助辊轮转速设为 2 238 r/min,原辅助辊轮转速设为 2 223 r/min,喂入量为 15 kg/s,抛撒时间 10 s。当辅助辊轮为主要抛撒部件,圆盘只起供料作用时,圆盘转速设为 30 r/min,喂入量为 1.4 kg/s,其余参数不变。

4.2 试验结果分析

为检验改进后辅助辊轮设计效果,在侧抛装置上分别安装改进后辅助辊轮和原辅助辊轮,采用定点形式抛撒,以辊轮为主要抛撒部件,圆盘起供料作用。图 21a、21b 分别为不放置收集盒时的抛撒效果。改进后辅助辊轮与仿真分析中的结果一致,在抛撒过程中可以有效修正肥料颗粒的运动方向,使肥料向两侧分散,有效避免近处肥料堆积和起垄;而原辅助辊轮在抛撒过程中肥料大多集中在中部,近处肥料更容易堆积和起垄。图 21c 为肥料收集盒,试验结束后,用电子秤分别称量改进前后辅助辊轮抛撒后每个收集箱内的肥料质量,并计算出二者均匀度变异系数与 1 m 内肥料占比,如表 6 所示,安装改进后辅助辊轮的侧抛装置在均匀度变异系数和 1 m 内肥料占比两方面下降显著。上述结果与仿真试验测得的结果相一致。



图 21 辅助辊轮创新设计效果检验
Fig. 21 Test on innovative design effect of auxiliary roller

表 6 辅助辊轮抛撒试验结果

Tab. 6 Dispersing test results of new and old auxiliary roller		%
辊轮种类	均匀度变异系数	1 m 内肥料占比
改进后	25.46	25.65
改进前	46.77	65.94

为检验改进后辅助辊轮与主抛撒部件圆盘的配合效果,在侧抛装置上分别安装改进前后辅助辊轮,先后采用定点形式抛撒和移动作业查看抛撒效果,试验过程以圆盘为主要抛撒部件,辊轮为辅助抛撒部件。图 22a、22b 分别为安装有改进前后辅助辊轮的侧抛装置在定点形式下的抛撒效果,图 22c 为安装有改进后辅助辊轮的侧抛装置移动作业抛撒效果。改进后辅助辊轮作为辅助抛撒部件可以很好配

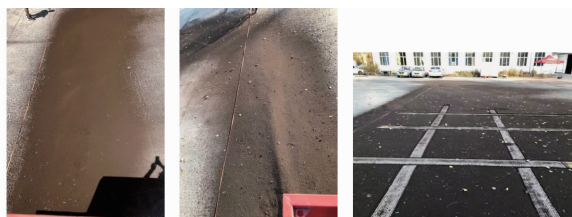


图 22 装有改进前后辅助辊轮侧抛装置抛撒效果对比

Fig. 22 Comparison of dispersing effect of new and old auxiliary roller side throwing device

合主抛撒部件圆盘,解决侧抛装置在抛撒过程中近处肥料堆积和起垄问题。

5 结论

(1)带有对称螺旋叶片的辅助辊轮,可以利用

其叶片形状与布置形式对肥料颗粒运动方向进行有效修正,使主盘集中的非受控肥料向两侧分散,有效解决了近处肥料堆积和局部起垄的问题。

(2)对于主盘直径 500 mm、倾角 75° 、对置盘中心距 320 mm 的主抛机构,改进后辅助辊轮优化后的参数为:辊轮轴线与两圆盘形心连线在垂直方向与水平方向的距离分别为 223 mm 和 384 mm,辊筒长度 460 mm、叶片高度 40 mm、转速 2 238 r/min、螺旋角 42.70° 、叶片数 4。

(3)样机试验结果表明,改进后辅助辊轮进行抛撒作业的均匀度变异系数 25.46%、1 m 内肥料占比 25.65%,相较于原辅助辊轮 46.77% 与 65.94% 有了很大改善。其与主抛撒部件圆盘共同作业时肥料抛撒均匀性好,无堆积和起垄现象,大幅提高了侧抛装置抛撒性能。

参 考 文 献

- [1] 徐大兵,赵书军,袁家富,等. 有机肥替代氮肥对叶菜产量品质和土壤氮淋失的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(增刊): 13-18.
XU Dabing, ZHAO Shujun, YUAN Jiafu, et al. Chemical N fertilizer replaced with organic fertilizer affecting yield and quality of leaf vegetable and N leaching in soils[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(Supp.): 13-18. (in Chinese)
- [2] 闫佳会,侯璐,姚强,等. 有机肥替代化肥对大葱产量、品质和土壤氮淋失的影响[J]. 西北农业学报, 2020, 29(8): 1243-1249.
YAN Jiahui, HOU Lu, YAO Qiang, et al. Effect of chemical fertilizer substitution with organic fertilizer on *Allium fistulosum* L. yield, quality and soil nitrogen leaching[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2020, 29(8): 1243-1249. (in Chinese)
- [3] 张娟,徐宁彤,孟庆峰,等. 有机肥施用年限对土壤有机碳组分及其来源与玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 107-113.
ZHANG Juan, XU Ningtong, MENG Qingfeng, et al. Effect of years of manure fertilizer application on soil organic carbon component, its source and corn yield[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(2): 107-113. (in Chinese)
- [4] 刘宏新,王佳兴,苏航,等. 倾斜对置圆盘侧抛式有机肥撒播机设计及关键部件研究[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(8): 83-90, 98.
LIU Hongxin, WANG Jiaxing, SU Hang, et al. Design on side type discharge organic fertilizer spreader with inclined opposite discs and research on its key components[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(8): 83-90, 98. (in Chinese)
- [5] 付宇超,袁文胜,张文毅,等. 我国施肥机械化技术现状及问题分析[J]. 农机化研究, 2017, 39(1): 251-255, 263.
FU Yuchao, YUAN Wensheng, ZHANG Wenyi, et al. Present situation and problem analysis of the technology of fertilizer mechanization in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(1): 251-255, 263. (in Chinese)
- [6] 刘宏新,杜春利,尹林伟,等. 倾斜对置圆盘有机肥侧抛射流形态与控制研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 168-177.
LIU Hongxin, DU Chunli, YIN Linwei, et al. Shooting flow shape and control of organic fertilizer side throwing on inclined opposite discs[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 168-177. (in Chinese)
- [7] 马标,吴爱兵,许斌星,等. 多功能固体有机肥撒施机拨料辊的设计及试验研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(4): 112-116.
MA Biao, WU Aibing, XU Binxing, et al. Design and experimental study on multifunctional solid manure spreader poking roller[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(4): 112-116. (in Chinese)
- [8] 吴昊,刘希锋,张海滨,等. 有机肥撒施机抛撒装置设计与试验[J]. 农机化研究, 2022, 44(11): 113-118.
WU Hao, LIU Xifeng, ZHANG Haibin, et al. Design and test of the spreading device of organic fertilizer spreader[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(11): 113-118. (in Chinese)
- [9] 李文哲,王庆庆,崔亮,等. 农家肥抛撒机抛撒性能分析与试验[J]. 东北农业大学学报, 2017, 48(12): 57-67.
LI Wenzhe, WANG Qingqing, CUI Liang, et al. Performance analysis and experiment of farm manure spreader[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2017, 48(12): 57-67. (in Chinese)
- [10] 吕金庆,孙玉凯,李季成,等. 立式有机肥螺旋撒肥装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 19-28.
LÜ Jinqing, SUN Yukai, LI Jicheng, et al. Design and test of vertical spiral organic fertilizer spreading device[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(24): 19-28. (in Chinese)
- [11] YILDRIM Y. Effect of vane shape on fertilizer distribution uniformity in single-disc rotary fertilizer spreaders[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008, 24(2): 159-163.
- [12] FULTON J, THAPER R, VIRK S, et al. Effect of vane shape on fertilizer distribution for a dual-disc spinner spreader[J].

Applied Engineering in Agriculture, 2020, 36(5): 743–751.

[13] YILDRIM Y, KARA M. Effect of different vane combinations on fertilizer distribution uniformity with various flow rates in spinning disc broadcasters[J]. Journal of Agricultural Science, 2012, 18(1): 54–62.

[14] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册. 下册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.

[15] 刘宏新, 王晨, 王佳兴, 等. 车载便携式农家肥捡拾装置设计与试验研究[J]. 东北农业大学学报, 2017, 48(9): 59–71, 96. LIU Hongxin, WANG Chen, WANG Jiaxing, et al. Design and experiment study on portable in-vehicle device of farmyard manure collecting[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2017, 48(9): 59–71, 96. (in Chinese)

[16] 王宪良, 胡红, 王庆杰, 等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 78–85. WANG Xianliang, HU Hong, WANG Qingjie, et al. Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 78–85. (in Chinese)

[17] 温翔宇, 袁洪方, 王刚, 等. 颗粒肥料离散元仿真摩擦因数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 115–122, 142. WEN Xiangyu, YUAN Hongfang, WANG Gang, et al. Calibration method of friction coefficient of granular fertilizer by discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 115–122, 142. (in Chinese)

[18] 袁全春, 徐丽明, 邢洁洁, 等. 机施有机肥散体颗粒离散元模型参数标定[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 21–27. YUAN Quanchun, XU Liming, XING Jiejie, et al. Parameter calibration of discrete element model of organic fertilizer particles for mechanical fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 21–27. (in Chinese)

[19] 武涛, 黄伟凤, 陈学深, 等. 考虑颗粒间黏结力的黏性土壤离散元模型参数标定[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(3): 93–98. WU Tao, HUANG Weifeng, CHEN Xueshen, et al. Calibration of discrete element model parameters for cohesive soil considering the cohesion between particles[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(3): 93–98. (in Chinese)

[20] 顿国强, 于春玲, 郭艳玲, 等. 双齿轮式排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 87–96. DUN Guoqiang, YU Chunling, GUO Yanling, et al. Design and experiment of double-gear type fertilizer apparatus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 87–96. (in Chinese)

[21] HOU Q, DONG K, YU A. DEM study of the flow of cohesive particles in a screw feeder[J]. Powder Technology, 2014, 256: 529–539.

[22] KRETZ D, CALLAU-MONJE S, HITSCHLER M, et al. Discrete element method (DEM) simulation and validation of a screw feeder system[J]. Powder Technology, 2016, 287: 131–138.

[23] 全国农业机械标准化技术委员会. 农业机械施肥撒施机环保要求和试验方法: GB/T 25401—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

[24] 全国农业技术推广服务中心. 肥料合理使用准则通则: NY/T 496—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

(上接第 82 页)

[17] OELZE M L, SABATIER J M, RASPET R. Roughness measurements of soil surfaces by acoustic backscatter[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(1): 241–250.

[18] 江冲亚, 方红亮, 魏珊珊. 地表粗糙度参数化研究综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(3): 292–303. JIANG Chongya, FANG Hongliang, WEI Shanshan. A review of research on parameterization of surface roughness[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(3): 292–303. (in Chinese)

[19] 刘立超, 魏国梁, 张青松, 等. 基于激光雷达的农业耕作微地貌测量装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 84–92. LIU Lichao, WEI Guoliang, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of microtopography measuring device for agricultural cultivation based on LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 84–92. (in Chinese)

[20] 刘立超, 张青松, 肖文立, 等. 油菜机械直播作业厢面地表粗糙度测量与分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 38–47. LIU Lichao, ZHANG Qingsong, XIAO Wenli, et al. Measurement and analysis of surface roughness of rapeseed mechanized direct seeding operation[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(12): 38–47. (in Chinese)

[21] 刘洁, 杨晓菊, 廖宜涛, 等. 基于线结构激光传感器的土壤表面粗糙度测量方法研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 134–140. LIU Jie, YANG Xiaojie, LIAO Yitao, et al. Study on soil surface roughness measuring method based on line structured light sensor[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(3): 134–140. (in Chinese)

[22] 王伟伟, 李俊, 王晴晴, 等. 耕作土壤沟形测量系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 93–99. WANG Weiwei, LI Jun, WANG Qingqing, et al. Design and experiment for tillage soil groove measurement system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 93–99. (in Chinese)

[23] RAJAMANI R. Vehicle dynamics and control[M]. Berlin: Springer Verlag, 2005.

[24] SHRINI K U. Advances in soil dynamics[M]. Michigan: the American Society of Agricultural Engineers, 2009.