

腔盘式穴施肥装置柔性护肥机构设计与试验

刘正道 王庆杰 李洪文 何进 卢彩云 谢立娟

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对腔盘式穴施肥装置存在的输肥过程中肥盘与护肥腔刚性接触、造成卡肥现象,严重影响输肥稳定性等问题,提出了一种柔性护肥方法,并设计了基于梅花状尼龙纤维的柔性护肥机构。通过理论计算和有限元模拟仿真,对单根尼龙纤维的力学性能进行分析,得出了尼龙纤维结构参数对其受力和形变的影响规律,确定所选用纤维直径为 0.1 mm;通过对纤维束结构的分析,为保证植毛孔安全距离和刷丝束合理间隙,设计刷丝长度为 13 mm,植毛孔直径为 4 mm;运用 EDEM 软件模拟肥腔内肥料受压过程各壁面受力变化,确定肥盘与底护肥刷的安装负间隙为 1.6 mm,与侧护肥刷的安装负间隙为 0.5 mm。加工了柔性护肥机构并进行验证试验,试验结果表明,该机构无卡肥现象,肥盘转动扭矩为 4.71 N·m,肥盘转动阻力比原机构减小 58.54%。该柔性护肥机构可有效避免输肥过程中的卡肥现象,降低输肥阻力,保证了输肥稳定性。

关键词: 施肥装置;腔盘式;穴施肥;柔性护肥;输肥稳定性

中图分类号: S224.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)11-0097-07

Design of Flexible Fertilizer Protection Mechanism for Hole-fertilizing Apparatus with Notched Plate

LIU Zhengdao WANG Qingjie LI Hongwen HE Jin LU Caiyun XIE Lijuan
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Hole-fertilizing technology can be used for fixed-point, quantitative and accurate fertilization while seeding is in operation, which is an effective method to improve the fertilizer use efficiency of corn, soybean and other crops. During the fertilizer transfer process of the hole-fertilizing apparatus, the rigid contact of fertilizer plate with fertilizer protection cavity caused the phenomenon of fertilizer blocking, which seriously affected the stability of fertilizer delivery. Thus a flexible fertilizer protection method was put forward and a flexible fertilizer protection mechanism was designed by using the nylon fiber which was in the shape of plum flowers. The theoretical calculation and finite element analysis of the mechanical property of single nylon fiber was carried out, the effect of the structural parameters of nylon fiber on the stress was obtained and the diameter of the selected fiber was determined as 0.1 mm. The analysis of fiber bundle structure showed that the fiber length should be 13 mm and the mounting hole diameter should be 4 mm, to ensure the safe distance of mounting hole and reasonable clearance of brush bundle. EDEM software was used to simulate the stress changes of each wall during the process of fertilizer group compressed in fertilizer cavity, the negative clearance between fertilizer plate and bottom fertilizer protection brush was designed as 1.6 mm and 0.5 mm with side fertilizer protection brush. Flexible fertilizer protection mechanism was designed and the test results showed that there was no fertilizer blocking problem, the rotary torque of the fertilizer plate was 4.71 N·m which was reduced by 58.54% compared with the original mechanism without flexible fertilizer protection mechanism. This mechanism could effectively avoid the fertilizer blocking problem, reduce the resistance of fertilizer delivery and insure the stability of the fertilizer delivery. The research result might provide a new approach for precise fertilizer delivery.

Key words: fertilizing apparatus; notched plate; hole-fertilization; flexible fertilizer protection; stability of fertilizer delivery

收稿日期: 2018-07-01 修回日期: 2018-08-20
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600)和教育部创新团队发展计划项目(IRT13039)
作者简介: 刘正道(1992—),男,博士生,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail: liuzd@cau.edu.cn
通信作者: 王庆杰(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail: wangqingjie@cau.edu.cn

0 引言

肥料穴施技术可以定点定量精确施肥,单穴肥料供应单穴作物,是提高玉米、大豆等作物肥料利用效率的有效手段^[1-3]。课题组前期设计了腔盘式精量穴施肥装置,装置工作过程分取肥、输肥和投肥3个阶段,前期已经对腔盘(肥盘)的取肥性能进行了研究^[4]。输肥过程是指肥盘将肥料从肥箱中取出运送至装置底部的过程,整个输肥过程肥盘始终在护肥腔内,由于肥料属于离散体,肥盘和护肥腔刚性接触,造成肥盘转动阻力过大且极易出现卡肥现象,严重影响输肥稳定性。

柔性材料是指在外力作用下可以挤压变形、当外力除去后能恢复到原来状态的材料,经常作为刚性机构间缓冲件、密封件使用^[5-6]。在工程领域,柔性材料是解决运动部件刚性接触,造成摩擦过大、物料损伤等问题的主要途径^[7-8]。田立权等^[9-11]设计的弹射式耳勺型水稻芽种播种装置中,采用同步柔性随动护种装置减少水稻芽种与护种辊之间的摩擦损伤;王希英等^[12-13]设计的列交错匀带式马铃薯精量排种器,通过柔性双列交错排种带增加取种凹勺舀取充种时间,充分利用排种带空间结构;何腾飞^[14]设计的毛刷顶针联合清种式排种器采用主动式圆柱毛刷,保证油菜籽播种过程既不伤种,又能起到良好的清种效果。上述研究均表明,在与种子接触的部件表面采用柔性材料,使种子与运动部件柔性接触,达到保护种子、减少摩擦的目的。但肥料穴施过程中,肥料在肥盘的肥腔内随肥盘运动,肥料颗粒较小且以肥团为单位输送,设计过程对接触部件的密封性和防卡性要求较高。

针对所设计的腔盘式穴施肥装置肥盘和护肥腔刚性接触易出现卡肥现象的问题,本文提出一种柔性护肥方法,拟在护肥腔内壁设计柔性护肥刷,实现肥盘和护肥腔柔性接触,以期为穴施肥肥团的稳定输送提供新方法。

1 结构和工作原理

腔盘式穴施肥装置柔性护肥机构主要由肥箱、肥盘、护肥腔壳体、侧护肥刷、底护肥刷组成,结构如图1所示,为便于观察内部结构,结构图中去掉一侧护肥刷。

其工作原理是:工作过程中,肥盘顶部位于肥箱内并绕中心轴在肥箱和护肥腔内转动,肥盘外围有8个均布的肥腔,当肥腔转过肥箱时充满肥料。护肥腔内部装有护肥刷,护肥刷采用柔性纤维材料,随着肥盘的转动,肥腔带动肥料经过护肥腔,与护肥腔

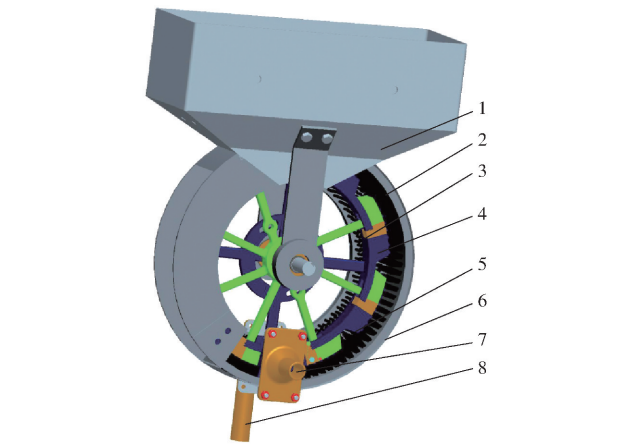


图1 腔盘式穴施肥装置柔性护肥机构
Fig.1 Flexible fertilizer protection mechanism for hole-fertilizing apparatus with notched plate
1. 肥箱 2. 底护肥刷 3. 侧护肥刷 4. 肥盘 5. 肥腔 6. 护肥腔 7. 进气口 8. 出肥口

内壁的护肥刷接触,护肥刷分左右侧护肥刷和底护肥刷,三面护肥刷和肥腔围成密闭空间,使肥料保持在肥腔内并随肥腔转动被运送至装置底部,完成输肥过程。当肥料运送至底部进气口和出肥口中间时,肥腔内肥料在气流作用下被快速送至肥沟,完成投肥过程。由于护肥刷采用柔性材料,整个输肥过程肥盘与护肥腔柔性接触,避免肥盘和护肥腔之间出现卡肥现象。

2 关键部件设计

腔盘式穴施肥装置输肥过程主要依靠护肥腔内壁的柔性护肥刷,保证肥盘与护肥腔、肥料与护肥腔之间柔性接触,避免卡肥现象。因此,本文主要针对柔性护肥刷进行设计,并研究护肥刷与肥盘、护肥刷与肥料间相互作用。

2.1 护肥刷选材和布局

柔性材料多指以高分子化合物为基础的有机高分子材料,如纤维、塑料、树脂和高分子基复合材料等^[15]。本文在选择柔性材料时主要考虑材料的柔弹性和耐磨性,根据柔性材料受力时应力应变曲线不同,常见材料的力学性能可分为硬而脆、硬而强、硬而韧、软而韧和软而弱^[16]。护肥腔内壁柔性材料应具有一定的硬度,保证肥盘经过护肥腔时肥腔内肥料不会因材料过软进入柔性材料内部;此外,材料应具有一定的韧性,使材料与肥盘间具有一定的正压力,将肥料密封在肥腔内。尼龙6(简称PA6)是常见的工业材料,力学性能硬而韧,具有良好的疲劳强度、刚性、耐热性和吸湿性,是尼龙纤维的主要材料^[17-19],因此本文选用PA6纤维制成护肥刷,安装在护肥腔内壁。

护肥刷结构包括植毛基和刷丝(尼龙纤维),刷丝成束安装在植毛基的圆孔内,常见的植毛孔排列方式分为对齐式和梅花式两种^[14],如图 2 所示。当植毛基大小相同时,梅花式排列尼龙纤维密度更大,纤维束间间隙更小,可有效避免肥料进入纤维束间隙,因此本文植毛孔采用梅花式排列。植毛基结构则根据肥盘和肥箱结构确定,如图 3 所示,分为底植毛基(图 3a)和侧植毛基(图 3b),侧植毛基分两部分,一部分位于肥箱内(图 3b 左),另一部分位于护肥腔内(图 3b 右)。

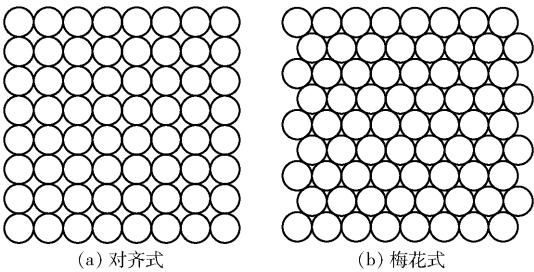


图 2 植毛孔排列方式

Fig. 2 Arrangement modes of nylon fiber mounting hole

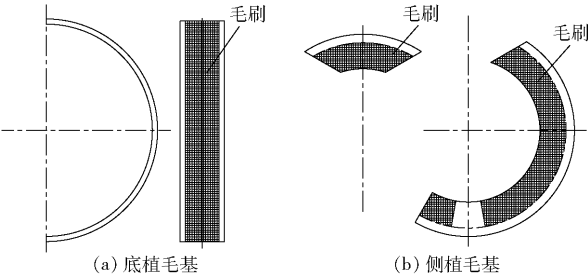


图 3 植毛基结构图

Fig. 3 Structure diagrams of fiber fixed base

2.2 单根尼龙纤维力学性能分析

2.2.1 受力分析

护肥刷由梅花式排列的纤维束组成,而纤维束又由单根尼龙纤维组成,单根尼龙纤维的力学性能直接影响护肥刷与肥料、肥盘间相互作用。安装时,护肥刷与肥盘间存在负间隙,尼龙纤维受肥盘外壁的作用力,单根纤维的结构和受力如图 4 所示。在对单根尼龙纤维进行力学分析时,可以将尼龙纤维看作一根圆柱形悬臂梁,受来自肥盘侧壁垂直于接触面的预紧力 F_N 。此外,当肥盘转动时,单根尼龙纤维还受到肥盘侧壁的摩擦力 f 。

当肥盘静止时,单根纤维在受到盘的预紧力作用下,发生弯曲并处于平衡状态,单根纤维的约束状态为一端固定,另一端自由,根据集中载荷作用下悬臂梁的挠曲线方程^[20-21]可得尼龙纤维所受预紧力和尼龙纤维末端挠度的关系为

$$y_B = \frac{F_N l^3}{3EI}$$

(1)

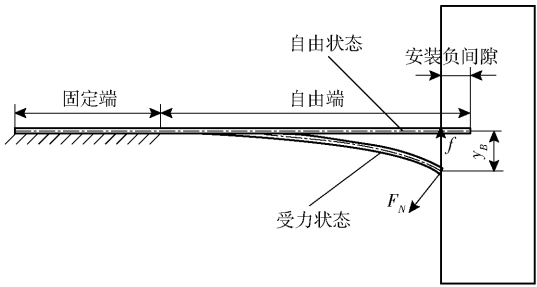


图 4 单根尼龙纤维结构和受力图

Fig. 4 Structure and force diagram of single nylon fiber

其中

$$I = \frac{\pi d_s^4}{64}$$

(2)

式中 y_B ——尼龙纤维末端挠度,mm
 E ——尼龙纤维的弹性模量,PA6 弹性模量为 2.32 GPa
 l ——尼龙纤维自由端长度,mm
 I ——惯性矩, m^4
 d_s ——单根尼龙纤维直径,mm

由式(1)、(2)得,当单根尼龙纤维变形量已知
的情况下,其对肥盘的压力为

$$F_N = \frac{3\pi E y_B d_s^4}{64 l^3}$$

(3)

由式(3)可知,当单根尼龙纤维在肥盘作用下处于稳定状态时,其对肥盘的压力与尼龙纤维直径、挠度、自由端长度有关。

2.2.2 有限元仿真分析

当肥盘在护肥腔内转动时,单根尼龙纤维除受肥盘壁给予的压力外,还受到来自肥盘外壁的摩擦力,单根尼龙纤维发生进一步的变形,所受肥盘侧壁压力也随之变化。为更好地分析单根尼龙纤维在肥盘转动时的受力和形变,本文采用 ANSYS 对不同结构参数下单根尼龙纤维受力进行分析。

尼龙纤维的直径是影响其力学性能的主要因素之一,工业生产中作为刷丝的尼龙纤维的直径在 0.08~2.5 mm^[22-23],刷丝直径越大,对肥盘外壁的压力越大,肥盘转动阻力越大,反之刷丝越细,对肥盘外壁的压力越小,但压力过小肥料容易进入刷丝间隙。因此本文选取 3 种直径的刷丝(0.1、0.2、0.3 mm)进行力学分析,刷丝长度为 10 mm,刷丝和肥盘间摩擦因数为 0.2,仿真得到刷丝应力云图如图 5 所示。

由图 5 可知,随着刷丝直径的增大,刷丝最大应力点与刷丝根部的距离减小,刷丝末端挠度较大,当刷丝直径为 0.2、0.3 mm 时,刷丝变形基本集中在刷丝根部,末端变形量较小,实际工作中与肥盘和肥料接点接触,肥料易进入刷丝内,因此最终选用工业生产常用毛刷直径为 0.1 mm。

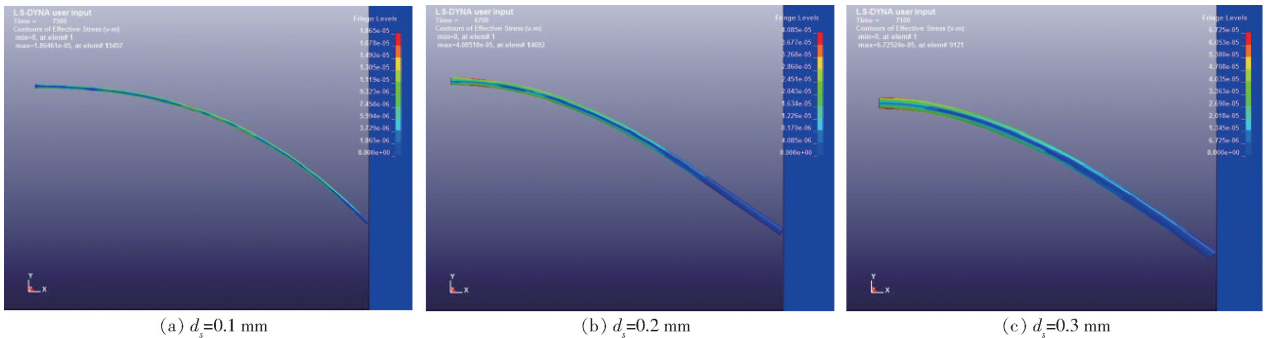


图5 不同直径的单根尼龙纤维应力云图

Fig.5 Stress nephograms of single nylon fiber under different diameters

2.3 纤维束结构参数设计

实际工作过程中,护肥刷由尼龙纤维束通过梅花状排列组成,护肥刷对肥盘的作用力为所有单根纤维对肥盘作用力的总和。因此,刷丝密度将直接影响护肥刷与肥盘间相互作用,刷丝密度越大,护肥刷对肥盘的阻力越大,但刷丝密度过小,纤维束间间隙过大,肥料易进入刷丝间隙。在加工毛刷时,刷丝密度由植毛孔安全距离和植毛孔直径决定,植毛孔的安全距离指的是相邻两个植毛孔的圆心连线距离减去两根毛孔半径之和后的距离。护肥刷纤维束结构如图6所示,当相邻两个纤维束植毛孔直径相同时,植毛孔安全距离为

$$\delta = L - D_0 \tag{4}$$

式中 δ ——植毛孔安全距离,mm
 L ——相邻两植毛孔中心距,mm
 D_0 ——植毛孔直径,mm

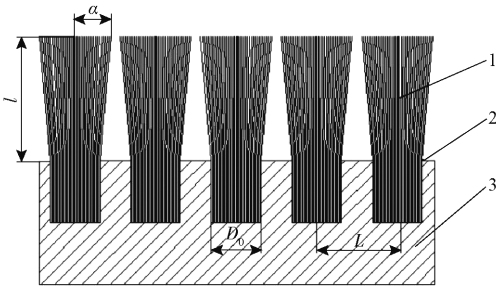


图6 护肥刷纤维束结构图

Fig.6 Fiber bundle structure diagram of fertilizer protection brush

1. 纤维束 2. 植毛孔 3. 植毛基

植毛孔的安全距离与植毛基的材料有关,为保证安装打孔时植毛基的力学性能,本文所用植毛基材料为聚丙烯(PP)^[24],植毛孔安全距离 $\delta = 2\text{ mm}$ 。刷丝安装时,刷丝固定端位于植毛孔内,自由端由于刷丝间相互排斥形成一定的分散角,刷丝束末端的直径为分散直径。为避免刷丝束间间隙过大,肥料进入刷丝束间隙,相邻2刷丝束末端应至少相切,即

$$L \leq D_0 + 2l \tan \alpha \tag{5}$$

式中 α ——分散角, ($^{\circ}$)
经测量得,当刷丝直径为0.1 mm时, $\alpha = 4.6^{\circ}$ 。
由式(4)、(5)得 $l \geq 12.71\text{ mm}$ 。由于所选用刷丝直径较小,刷丝长度过长刷丝耐磨性能降低,易发生折断、脱落现象,因此取整得刷丝长度 $l = 13\text{ mm}$ 。
相邻刷丝束末端的间隙是引起肥料进入护肥刷的主要原因,因相邻刷丝末端相切且梅花状布置,肥料颗粒不进入刷丝束间隙的条件为刷丝束末端间隙内切圆直径不大于肥料颗粒直径,即

$$\frac{1}{6}(2\sqrt{3}-3)(D_0+2l\tan\alpha)\leq R \tag{6}$$

式中 R ——肥料颗粒半径,mm
所测肥料半径基本分布在大于0.5 mm范围,当 $R = 0.5\text{ mm}$ 时,植毛孔直径 $D_0 \leq 4.37\text{ mm}$ 。植毛孔直径越大,单位面积植毛基上纤维束数量越小,纤维束间形成的间隙越少,取整后取最大值得植毛孔直径为4 mm。

2.4 护肥刷与肥料间相互作用

护肥刷分为底护肥刷和侧护肥刷,侧护肥刷为平面刷,底护肥刷为圆弧刷,肥盘转动过程,受肥腔内壁作用,肥腔内肥料更偏向于圆弧刷方向运动,在设计过程中应首先满足底护肥刷受力,再对侧护肥刷进行设计。

肥腔内肥料除受到重力和肥腔侧壁的作用力外,还受到3面护肥刷的挤压作用。肥料在底护肥刷的推挤作用下肥料间间隙变小,当底护肥刷的推挤作用过大,肥料向两侧运动,挤压侧护肥刷,为保证充分密封效果的同时减小护肥刷对肥盘的阻力,侧护肥刷受力应尽可能小,即底护肥刷对肥腔内肥料的力不传递给侧护肥刷。

离散元法是研究离散颗粒运动和受力的一种主要方法,近年来逐渐被应用到施肥领域,对肥料运动和受力进行分析^[25-27]。为研究肥腔内肥料随底护肥刷推挤作用的增大,侧护肥刷受力变化情况,本文运用EDEM软件进行模拟仿真,如图7所示。仿真过程用底板代替底护肥刷,侧板代替侧护肥刷,分别

计算在底板推挤肥料过程中,底板和侧板所受压力随时间的变化。为使计算过程肥腔内肥料均处于平衡状态,底板运动速度不应过大,设为 0.01 m/s,材料参数和接触参数参照作者前期研究,试验结果如图 8 所示。

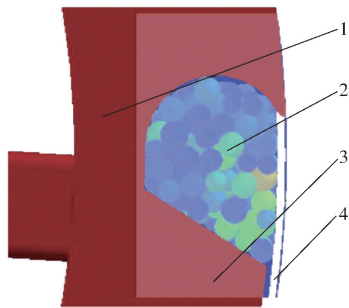
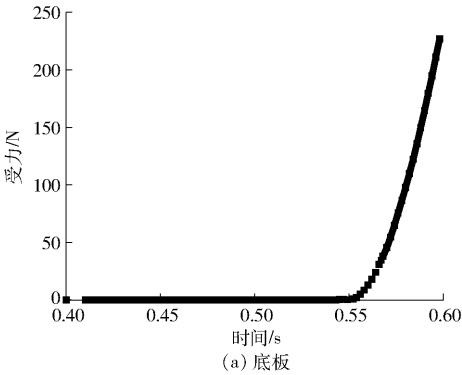


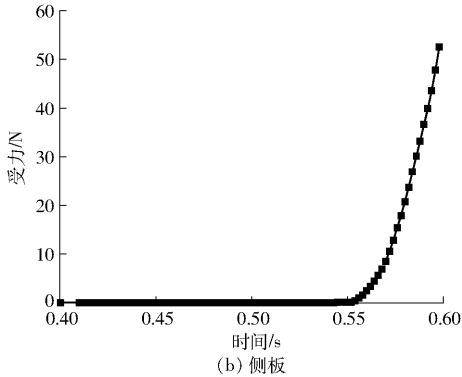
图 7 肥团受压运动仿真试验

Fig. 7 Fertilizer group motion simulation test under pressure

1. 肥盘 2. 肥料颗粒 3. 侧板 4. 底板



(a) 底板



(b) 侧板

图 8 肥团受压过程受力变化曲线

Fig. 8 Force changing curve of fertilizer group under pressure

由图 8 可知,底板在 0.41 s 开始向肥团侧运动,在 0.41 ~0.55 s 内,随底板运动,底板和侧板受力很小且基本恒定,主要由于肥腔内肥料颗粒间存在自由间隙,此过程为消除自由间隙阶段,整段过程底板运动距离为 1.4 mm。从 0.55 s 开始,底板和侧板受到的压力急剧增大,由于肥料颗粒间自由间隙消除,肥料因底板的压缩内部应力增大,产生对底板和侧板的反作用力。为保证良好的密封性,护肥刷对肥料应具有一定的预紧力,且预紧力不应过大,因此,肥盘和底护肥刷间安装负间隙取 1.6 mm。侧护肥

刷受力较小,设计时只要求具有一定的负间隙即可,取侧护肥刷与肥盘间安装负间隙为 0.5 mm。

3 试验验证

加工试制了所设计的柔性护肥机构,如图 9 所示。加工完成后与原装置(无柔性护肥机构)进行对比试验,试验用肥料为颗粒状复合肥(中农集团, N - P₂O₅ - K₂O, 15% - 15% - 15%),质量含水率为 4.37%,排肥盘转速为 60 r/min。在装置运行平稳后,测量排肥盘中心轴扭矩,分别测量 10 次求平均值。此外,在穴施颗粒状肥料过程中,肥料碾压破碎是造成机构间摩擦过大、排肥稳定性差的重要因素。在试验前后,分别随机取 200 粒肥料,数出不完整(破损)颗粒数,计算肥料颗粒破损率并进行对比。



图 9 柔性护肥机构

Fig. 9 Flexible fertilizer protection mechanism

试验结果表明:

(1)在无柔性护肥机构条件下,极易出现卡肥现象,肥盘平均每转动 1 ~2 周,出现一次卡肥现象,需停止试验对肥盘和护肥腔间隙进行清理;在无卡肥现象时测得肥盘中心轴平均扭矩为 11.36 N·m。

(2)在有柔性护肥机构情况下,整个试验过程未出现卡肥现象;肥盘中心轴扭矩为 4.71 N·m,与原装置相比减小 58.54%。柔性护肥机构可极大程度上减小输肥阻力,保证输肥稳定性。

(3)试验前测得所用肥料颗粒破损率为 1.5%,无柔性护肥机构装置作业后肥料破损率为 7%,原因为肥盘转动过程中,肥料颗粒与箱体、护肥腔间刚性接触,加工、安装间隙的存在,使肥料传输过程缝隙附近肥料颗粒被不断碾压破损;有柔性护肥机构装置作业后肥料颗粒破损率为 2%,作业前后无显著差异。

4 结论

(1)设计了一种柔性护肥机构。该机构由梅花状布置的尼龙纤维束组成,安装在护肥腔内壁,保证

肥盘和护肥腔间柔性接触。

(2)通过对单根尼龙纤维进行受力分析得出,尼龙纤维对肥盘外壁的压力与纤维长度、直径、安装间隙有关;利用 ANSYS 软件对不同直径(0.1、0.2、0.3 mm)和单根尼龙纤维受压变形情况进行仿真分析,最终确定所选用毛刷直径为 0.1 mm;通过对纤维束和植毛基结构分析,设计刷丝长度为13 mm,植毛孔直径为 4 mm;用 EDEM 软件模拟肥腔内肥料受

压过程各壁面受力情况,确定肥盘与底护肥刷间安装负间隙为 1.6 mm,与侧护肥刷间安装负间隙为 0.5 mm。

(3)加工所设计柔性护肥机构并进行验证试验,结果表明:该机构无卡肥现象,肥盘转动扭矩为 4.71 N·m,与原机构相比,肥盘转动阻力减小 58.54%;工作前后肥料颗粒破损率仅增加 0.5 个百分点,无碾压破碎现象。

参 考 文 献

- 1 汤海涛,马国辉,罗锡文,等. 水稻机械精量穴直播定位深施肥节氮栽培效果研究[J]. 农业现代化研究, 2011, 32(1): 111-114.
TANG Haitao, MA Guohui, LUO Xiwen, et al. Effects of mechanical precise hill-drop drilling and located depth-fertilization on rice nitrogen-saving [J]. Research of Agriculture Modernization, 2011, 32(1): 111-114. (in Chinese)
- 2 袁文胜,李坤,金诚谦,等. 穴施肥排肥器设计与试验[J]. 农机化研究, 2018, 40(1): 145-149, 165.
YUAN Wensheng, LI Kun, JIN Chengqian, et al. Design and experiment of hill placement fertilizer applicator [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(1): 145-149, 165. (in Chinese)
- 3 李沐桐,温翔宇,周福君. 中耕作物精准穴施肥控制机构工作参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 37-43. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160906&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.006.
LI Mutong, WEN Xiangyu, ZHOU Fujun. Working parameters optimization and experiment of precision hole fertilization control mechanism for intertilled crop [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 37-43. (in Chinese)
- 4 刘正道,王庆杰,刘春鸽,等. 腔盘式精量穴施肥装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 137-144. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181015&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.015.
LIU Zhengdao, WANG Qingjie, LIU Chungu, et al. Design and experiment of precision hole-fertilizing apparatus with notched plate[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 137-144. (in Chinese)
- 5 王乐勤,杨晖,励行根,等. 柔性石墨密封垫片的研究现状及发展趋势[J]. 流体机械, 2013, 41(6): 37-41, 78.
WANG Leqin, YANG Hui, LI Xinggen, et al. Present research and development trend of flexible graphite sealing gasket [J]. Fluid Machinery, 2013, 41(6): 37-41, 78. (in Chinese)
- 6 李玉龙,何忠波,白鸿柏,等. 特大尺寸金属橡胶柔性密封环设计与仿真分析[J]. 润滑与密封, 2011, 36(3): 105-108.
LI Yulong, HE Zhongbo, BAI Hongbai, et al. The design and simulation analysis of big size soft metal-rubber seal ring[J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(3): 105-108. (in Chinese)
- 7 姚立宁. 柔性复合材料本构理论及工程应用[J]. 武汉水利电力大学学报, 1993, 26(4): 378-388.
YAO Lining. Constitutive theory of flexible composites and their application in engineering[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1993, 26(4): 378-388. (in Chinese)
- 8 胡力. 柔性复合材料在结构伸缩缝堵漏中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2015(3): 155-157.
- 9 田立权,唐汉,王金武,等. 弹射式耳勺型水稻精量穴直播排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 65-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170408&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.008.
- 10 TIAN Liquan, TANG Han, WANG Jinwu, et al. Design and experiment of rebound dipper hill-drop precision direct seed-metering device for rice[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 65-72. (in Chinese)
- 10 田立权. 弹射式耳勺型水稻芽种播种装置机理分析与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2017.
TIAN Liquan. Mechanism analysis and experimental study on the rice seed sowing device with ejection ear spoon type [D]. Harbin:Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- 11 田立权,王金武,唐汉,等. 螺旋槽式水稻穴直播排种器设计与性能试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 46-52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160507&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.007.
TIAN Liquan, WANG Jinwu, TANG Han, et al. Design and performance experiment of helix grooved rice seeding device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 46-52. (in Chinese)
- 12 王希英. 双列交错勺带式马铃薯精量排种器的设计与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2016.
WANG Xiying. Design and experimental research on double-row criss-cross spoon-belt potato precision seed metering device [D]. Harbin:Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)

- 13 王希英,唐汉,王金武,等. 双列交错匀带式马铃薯精量排种器优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 82–90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161111&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.011.
WANG Xiyong, TANG Han, WANG Jinwu, et al. Optimized design and experiment on double-row cross spoon-belt potato precision seed metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 82–90. (in Chinese)
- 14 何腾飞. 毛刷顶针联合清种式排种器的设计与试验研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2015.
HE Tengfei. Design and experiment research on clean seeds seedmeter combining brush and spring[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 15 高凤仙. 柔性功能高分子材料及器件的设计与应用[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2017.
GAO Fengxian. Design and application of flexible functional polymer materials and devices[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017. (in Chinese)
- 16 顾晓宇. 柔性叶片螺旋输送机理及仿真研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨商业大学, 2014.
GU Xiaoyu. Flexible blade screw conveying mechanism and simulation research[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2014. (in Chinese)
- 17 左琴平,林红,陈宇岳. 聚酰亚胺纤维的开发及应用进展[J]. 纺织导报, 2018, 43(5): 60–63.
ZUO Qinqing, LIN Hong, CHEN Yuyue. Progress in the development and application of polyimide fiber[J]. China Textile Leader, 2018, 43(5): 60–63. (in Chinese)
- 18 曾伟,牟伟旭,王培,等. 毛刷式机械抛光毛刷磨损及加工效率的研究[J]. 工具技术, 2013, 47(7): 13–17.
ZENG Wei, MOU Weixu, WANG Pei, et al. Study on brush wear and polishing efficiency by mechanical polishing with brush[J]. Tool Engineering, 2013, 47(7): 13–17. (in Chinese)
- 19 谢荣珠. 尼龙刷去毛刺及抛光工艺[J]. 航空工艺技术, 1986(3): 45–46.
- 20 赵则昂,邓宗白,宋安平. 悬臂梁大挠度变形的近似估计法[J]. 力学与实践, 2014, 36(3): 341–344, 366.
ZHAO Zeang, DENG Zongbai, SONG Anping. An approximation method for the large deflection of cantilever beams[J]. Mechanics in Engineering, 2014, 36(3): 341–344, 366. (in Chinese)
- 21 葛如海,储志俊. 悬臂梁集中载荷大挠度弯曲变形的一种解[J]. 应用力学学报, 1997, 14(4): 73–79, 154.
GE Ruhai, CHU Zhijun. A way to calculate the deformation of great flexibility of slender long overhanging beam under concentrated load[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1997, 14(4): 73–79, 154. (in Chinese)
- 22 李雪梅,司徒建崧,郭铭信,等. 我国刷用单丝生产及应用现状[J]. 化纤与纺织技术, 2016, 45(2): 23–27.
LI Xuemei, SITU Jiansong, GUO Mingxin, et al. Development and application status of brush monofilament[J]. Chemical Fiber & Textile Technology, 2016, 45(2): 23–27. (in Chinese)
- 23 陈远木. 制刷聚丙烯单丝的生产工艺探讨[J]. 中国塑料, 1993(3): 40–42.
CHEN Yuanmu. The studies on technology of PP monofilament used for brush making[J]. China Plastics, 1993(3): 40–42. (in Chinese)
- 24 崔小明. 我国聚丙烯行业发展特点简介[J]. 橡塑技术与装备, 2014, 40(6): 61.
- 25 LANDRY H, THIRION F, LAGUË C, et al. Numerical modeling of the flow of organic fertilizers in land application equipment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 51(1–2): 35–53.
- 26 刘彩玲,黎艳妮,宋建农,等. 基于 EDEM 的离心甩盘撒肥器性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 32–39.
LIU Cailing, LI Yanni, SONG Jiannong, et al. Performance analysis and experiment on fertilizer spreader with centrifugal swing disk based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14): 32–39. (in Chinese)
- 27 顿国强,陈海涛,冯夷宁,等. 基于 EDEM 软件的肥料调配装置关键部件参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 36–42.
DUN Guoqiang, CHEN Haitao, FENG Yining, et al. Parameter optimization and test of key parts of fertilizer allocation device based on EDEM software[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(7): 36–42. (in Chinese)