

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.10.007

刘信鹏, 黄伟华, 李尊香, 等. 小型沼液沼渣施肥机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(10): 48-53

Liu Xinpeng, Huang Weihua, Li Zunxiang, et al. Design and experiment of small scale biogas slurry fertilizer applicator [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(10): 48-53

## 小型沼液沼渣施肥机设计与试验\*

刘信鹏<sup>1, 2</sup>, 黄伟华<sup>3</sup>, 李尊香<sup>1, 2</sup>, 焦静<sup>1, 2</sup>, 牛钊君<sup>3</sup>, 李明<sup>3</sup>

(1. 中国热带农业科学院南亚热带作物研究所, 广东湛江, 524091; 2. 湛江市热带作物秸秆高效循环利用工程技术研究中心, 广东湛江, 524091; 3. 中国热带农业科学院农业机械研究所, 广东湛江, 524088)

**摘要:** 由于沼液沼渣地表撒施会造成大量物质挥发, 导致有机成分很难被植物深入吸收利用, 造成环境污染和资源浪费。为充分利用生物质资源, 在参考国内外分开式、一体式、自走式、管道输送式等地下施灌的基础上, 设计小型半挂式沼液沼渣施肥机, 对沼液罐、机架、深松型施肥犁等关键部件进行分析, 运用SolidWorks对该机进行三维建模, 利用仿真分析模块对关键机构部件进行应力分析, 确定样机结构, 并进行样机制作。田间试验表明: 当调节阀调到最大, 机具以1.5 m/s的速度前进作业时, 罐内原料在5~6 min内排完, 渗湿土壤厚度在7.3~15.6 cm之间, 实现连续施肥。

**关键词:** 沼液沼渣; 施肥机; 半挂式; 仿真分析

**中图分类号:** S224.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-5553 (2024) 10-0048-06

### Design and experiment of small scale biogas slurry fertilizer applicator

Liu Xinpeng<sup>1, 2</sup>, Huang Weihua<sup>3</sup>, Li Zunxiang<sup>1, 2</sup>, Jiao Jing<sup>1, 2</sup>, Niu Zhaojun<sup>3</sup>, Li Ming<sup>3</sup>

(1. Institute of South Subtropical Crops, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang, 524091, China;  
2. Zhanjiang Tropical Crop Straw Efficient Recycling Engineering Technology Research Center, Zhanjiang, 524091, China;  
3. Institute of Agricultural Machinery, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang, 524088, China)

**Abstract:** Because the biogas slurry on the surface would have caused a lot of volatilization of substances, it is difficult for organic components to be deeply absorbed and utilized by plants, resulting in environmental pollution and resource waste. In order to make full use of biomass resources, this paper designed a small semi-hanging biogas slurry fertilizer application machine based on reference to domestic and foreign underground irrigation of separate, integrated, self-propelled and pipe-conveyed types, and analyzed the key components such as methane tank, frame and deep-loose type fertilizer plow, used SolidWorks to conduct three-dimensional modeling for the machine, and used simulation analysis module to analyze the stress of key mechanism components, to determine the structure of the prototype machine, and carry out the prototype production. Field experiments showed that when the regulating valve was adjusted to the maximum and the machine was operated at the speed of 1.5 m/s, the raw materials in the tank were emptied within 5-6 min, and the thickness of the wet soil was 7.3-15.6 cm, which achieved the purpose of continuous fertilization by the machine.

**Keywords:** biogas slurry; fertilizer applicator; semi-hanging; simulated analysis

## 0 引言

随着我国沼气产业快速发展, 随之产生大量的沼液沼渣, 其中这些固液交融的流态沼液沼渣含有作物

生长需要的氮、磷、钾及有机物质, 并能改善土壤酸碱度, 是速效、无污染、无残毒的“生物肥料”; 其利用方式主要有地表洒施和地下施灌, 但由于地表撒施存在肥料使用量大、用量难以控制、易挥发物、有机成分吸

收稿日期: 2023年4月26日 修回日期: 2023年8月31日

\* 基金项目: 海南省自然科学基金青年基金项目(520QN330)

第一作者: 刘信鹏, 男, 1990年生, 山东临沂人, 硕士, 助理研究员; 研究方向为农业机械工程。E-mail: 1525848365@qq.com

通讯作者: 李尊香, 男, 1989年生, 广东湛江人, 助理研究员; 研究方向为农业机械工程。E-mail: 1192187600@qq.com

收利用率不高,造成资源浪费、环境污染等问题;目前针对以上问题,德国、加拿大、以色列等国家多采用分开式机械化暗灌运施的方法,实现了沼液沼渣还田利用的目的;而国内对流态田间运施一体机械施肥机研究较少,还处于表面施肥、人工施肥、地下施灌等多种方式施肥的持续完善阶段,导致大量流态沼液沼渣无法完全还田利用,造成环境二次污染及生物质资源的浪费<sup>[1]</sup>。综上所述,暗灌运施的施肥技术装备,能有效增加流态沼液沼渣在土壤中的渗透性,减少氨氮挥发、合理控制施肥量等,这一施肥方法主要是通过沼肥施罐机进行还田利用,该施肥方法主要有分开式、一体式、自走式、管道输送式四种<sup>[2-4]</sup>,其中管道输送式施肥机需铺设管道,施工量大,且对地面的平整性要求较高,不适合垄作农田作业;自走式施罐机通过管道连接,结构复杂;拖拉机牵引分开式施罐机,结构简单,通用性强;一体式施罐机,自备动力,结构紧凑,专用性强、成本高昂。

因此,本文根据开沟、松土、施肥、覆土等农艺要求,结合暗灌运施的存储、运输、施肥等功能要求,设计小型半挂式沼液沼渣施肥机,并为其配套施用的开沟深松机具。

## 1 整机结构与工作原理

### 1.1 整机结构

半挂式沼液沼渣施肥机主要由沼液沼渣罐、液压缸、丝杠连接杆、沼液沼渣主流管、沼液沼渣透明塑料分流管、罐体机架、机具机架、牵引机架、深松犁、离心泵、皮带轮、皮带、液压马达、球形直通阀、车轮、活动杆等机构组成,如图 1 所示。

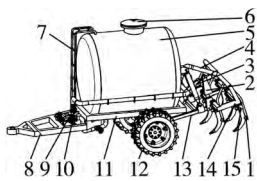


图 1 半挂式沼液沼渣施肥机整体结构

Fig. 1 Overall structure of semi-hanging biogas slurry fertilizer applicator

1. 沼液沼渣透明塑料分流管
2. 丝杠连接杆
3. 沼液沼渣总流管
4. 液压缸
5. 沼液沼渣罐
6. 罐体进口
7. 安全梯
8. 离心泵
9. 牵引机架
10. 球形直通阀
11. 罐体机架
12. 车轮
13. H型活动杆
14. 机具机架
15. 深松犁

### 1.2 工作原理

半挂式沼液沼渣施肥机底盘通过单点悬挂牵引与拖拉机悬挂点连接,并将罐体固定安装在底盘上,在罐体后端,采用三点悬挂的方式,通过 H 型活动杆将深松犁及沼液沼渣透明塑料分流管固定连接在机架上,并由丝杠连接杆和液压缸及拖拉机液压系统对其倾斜角度及升降高度进行前、后、上、下调节;当进行沼液沼

渣运输时,拖拉机液压系统会通过液压马达进行泵油,驱动悬挂在罐体后面的液压缸工作,缩短液压缸工作行程,将深松犁机具提升至运输状态;在装肥料时,拖拉机通过输出轴将动力输送到离心泵,将沼液沼渣通过吸料管泵入罐体内;卸料前将排料控制阀打开,离心泵反转,将罐体内沼液沼渣通过主流管排向深松犁上的分流管上,使肥料随深松犁深松开沟作业进行连续施肥作业。

### 1.3 关键机构设计分析

#### 1.3.1 罐体设计分析

为防止机具载重大压实土壤,方便田间作业,将罐体载重量设计为 6 t,长、宽、高分别设计为 2 420 mm × 1 920 mm × 1 920 mm 的圆柱形空心三维空间结构,如图 2 所示,其中罐体体积由中间筒体和两边椭圆形封体组成,罐体选用材料为 Q235-B,其疲劳极限强度为 375 MPa,屈服极限强度为 235 MPa,常温状态下,  $[\sigma] = 113 \text{ MPa}$ ,焊缝系数  $\phi$  为 1.0,根据标准 NB/T 47002.1-2019,可知钢材厚度偏差  $\Delta$  为 0.5 mm。

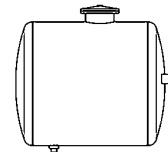


图 2 沼液沼渣施肥机罐体

Fig. 2 Tank body of biogas slurry fertilizer applicator

为保证罐体的使用寿命,结合沼液沼渣的腐蚀性流体特性,取腐蚀裕量  $C$  为 2 mm,并将整个罐体内表面进行镀锌防腐处理;为保证罐体内部压力安全,参考刘宏新等<sup>[5]</sup>对半挂式流态有机肥施肥机设计时,罐体最高工作压力为 0.205 MPa,并结合纯猪粪液发酵有机肥的密度  $882 \text{ kg/m}^3$ ,对罐体壁厚进行计算。

$$P = 1.1 \times P_1 \quad (1)$$

$$N = \frac{\pi}{4} D^2 I + 2\nu_1 \quad (2)$$

$$I_1 = \frac{PD}{2\phi[\sigma] - P} \quad (3)$$

$$I_{\min} = \frac{2I_1}{1000} \quad (4)$$

$$I_2 = I_{\min} + \Delta + C \quad (5)$$

式中:  $P_1$ ——初始工作压力,MPa;

$P$ ——设计工作压力,MPa;

$D$ ——筒体截面直径,mm;

$I$ ——筒体长度,mm;

$\nu_1$ ——封头体积, $\text{m}^3$ ;

$N$ ——罐体体积, $\text{m}^3$ ;

$\phi$ ——焊缝系数;

- $[\sigma]$ ——极限强度,MPa;  
 $\Delta$ ——钢材厚度偏差,mm;  
 $I_1$ ——罐体理论计算厚度,mm;  
 $I_{\min}$ ——罐体最小理论厚度,mm;  
 $I_2$ ——罐体设计厚度,mm。

经过计算得到罐体钢材厚度  $I_2 = 6.1 \text{ mm}$ , 为了达到制造工艺和刚度要求, 取罐体厚度为  $7 \text{ mm}$ 。

### 1.3.2 吸排系统分析

罐体进行吸入作业时, 驾驶员将球形直通阀打开, 离心泵通过抽排动力, 将罐内空气气体抽出, 降低罐体内气压, 在气压的推动下通过吸料管将液态沼液沼渣压入罐体内, 透过液位计量器查看罐体内肥料的喂入量情况, 当罐体被装满后, 关闭吸料管上的直通阀; 施肥作业时, 驾驶员将沼液沼渣主流管上的球形直通阀打开, 拖拉机带动离心泵工作, 将空气进行压缩, 压入到罐体内部, 随着罐内压缩空气的不断进入, 罐内形成正压, 将罐内液态沼液沼渣肥料由主流管经分流管进行施肥作业。

### 1.3.3 机架与牵引架分析

机架主要由主架、支撑架、悬挂等组成; 机架是固定支撑罐体, 连接机具、承受传递机具产生的力、力矩、动载荷的重要桥梁。机架前端通过牵引架与拖拉机进行单点悬挂连接, 后端通过三点悬挂与施肥机具连接, 因此机架要具有足够的强度和刚度, 满足机具运输和田间作业要求。由于沼液沼渣施肥机要完成深松、开沟、施肥工作, 为保证连接支撑的可靠性, 机架选择矩形架, 并采用  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的方钢, 进行加工制造安装, 满足灌体和机具的工作使用要求。

牵引架在连接机具与拖拉机的同时, 还在其支撑表面固定安装离心泵、安全梯、液压马达等部件, 如图3所示, 因此将机架与牵引架进行刚性连接; 为保证灌体机架与拖拉机链接的可靠性, 方便机具拆解及弯道行驶, 采用单点悬挂方式, 通过固定插销与限位销扣将拖拉机与牵引架连接; 当牵引架越长时, 传力角度越小, 传递力越大, 影响行驶稳定性, 增加倒车难度; 鉴于罐体装载量产生的垂直静态载荷与轴载荷均会经牵引架转移到拖拉机上; 结合 GB/T 21160—2007 标准, 并引用东北农业大学滕伟健在有机肥采运施肥机设计中对牵引架连接点的水平垂直高度  $550 \text{ mm}$ <sup>[6]</sup>, 以减小牵引架与拖拉机挂接处的垂直分力, 起到最佳牵引效果。

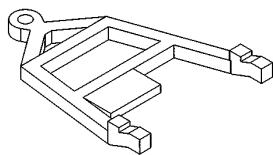


图3 沼液沼渣施肥机牵引架结构

Fig. 3 Traction frame structure of biogas slurry fertilizer applicator

### 1.3.4 深松型施肥犁设计分析

沼液沼渣施肥犁是施肥机具的关键阻力部件, 其结构对施肥深度、施肥质量、开沟阻力有着重要影响, 直接影响肥料与土壤的渗透结合情况<sup>[7,8]</sup>。结构如图4所示, 上端采用的是直立固定孔柄, 孔柄下端是椭圆弧形犁臂, 犁头采用楔形尖, 并在犁臂后端上固定可拆卸沼液沼渣透明塑料分流管固定夹; 在拖拉机动力牵引施肥过程中, 拖动犁头楔形尖进入土层中对土壤进行剪切、挤压、撕裂等作用, 使土壤发生剪切失效, 达到深松施肥的效果。作业过程中主要受到土壤的压力和摩擦力, 如图5所示。犁头楔形尖切入土壤, 椭圆弧形犁臂靠弧形犁臂挤压出一条施肥沟槽, 将沼液沼渣通过分流管施入土壤中。



图4 深松型施肥犁

Fig. 4 Deep loose fertilizer plow

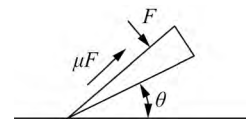


图5 深松型施肥犁楔形尖受力分析

Fig. 5 Force analysis of wedge tip of deep-loose fertilization plow

楔形尖头所受的水平和竖直阻力分别为

$$F_1 = F \sin \theta + \mu F \cos \theta \quad (6)$$

$$F_2 = F \cos \theta - \mu F \sin \theta \quad (7)$$

式中:  $F_1$ ——土壤对楔形尖水平阻力, N;

$F_2$ ——土壤对楔形尖竖直阻力, N;

$\mu$ ——土壤摩擦系数;

$\theta$ ——犁头作业楔形角, ( $^\circ$ )。

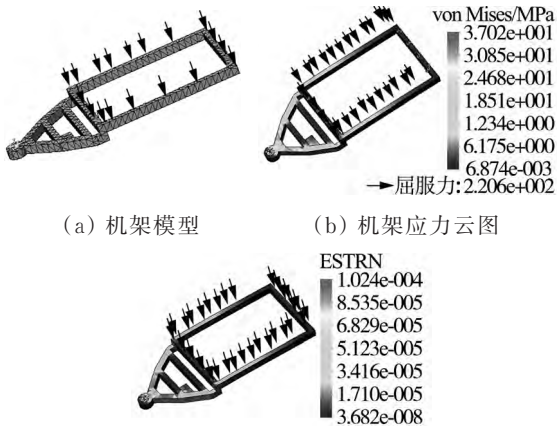
## 2 机架与深松犁仿真分析

### 2.1 机架仿真分析

车架是罐体、吸排系统、液压悬挂系统等零部件的安装基体, 在进行后端施肥机具提升和罐体肥料施运过程中, 承担工作机具的负载和罐体肥料的垂直重力载荷以及牵引架与拖拉机挂接牵引力和力矩。因此需要对车架进行仿真分析, 调整应力过于集中结构, 达到车架使用要求。对机架进行三维建模, 材料选用 Q235, 由于牵引架的牵引座通过牵引销挂接拖拉机, 行驶过程中该处受冲击载荷与磨损突出, 因此需要选用屈服强度较高的合金钢 20Cr Mn Mo。对三维建模机架进行网格划分, 以罐体满载和机具自身重量之和作为机架表面施加载荷, 在机架纵梁上施加垂直载荷, 横



梁上施加扭矩与弯矩;将机架、悬架、车桥通过夹紧约束固定在一起,仿真时作柔性虚件代替;牵引架的牵引座通过牵引销与拖拉机挂接,仿真时施加约束<sup>[9, 10]</sup>。经过仿真分析后得到机架应力云图和变形云图,如图 6 所示。机架模型的应力主要集中在机架与车桥连接处和牵引架的牵引座处,最大应力为 104 MPa,小于屈服应力 885 MPa,说明机架满足静载荷条件下的强度要求。



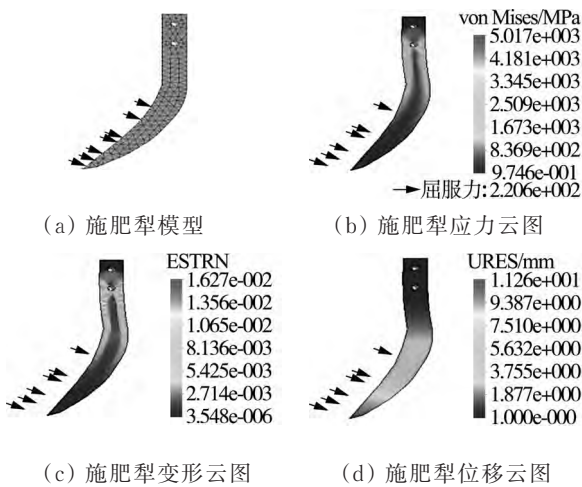
(a) 机架模型 (b) 机架应力云图 (c) 机架变形云图

图 6 机架应力应变云图

Fig. 6 Stress-strain nephogram of the frame

### 2.2 深松型施肥犁仿真分析

为了提高深松型施肥犁的强度和硬度,选用合金钢 Q235,其弹性模量为  $1.2 \times 10^{11}$  Pa,泊松比为 0.291,密度为  $7\ 870\ \text{kg/m}^3$ ,屈服强度为  $3.1 \times 10^8$  Pa。运用 SolidWorks 对深松型施肥犁进行三维建模,进行定义模型单元类型,网格划分,对每个深松型施肥犁受力部位施加相同的载荷,并进行仿真分析,得到深松型施肥犁的应力与位移云图<sup>[11, 12]</sup>,如图 7 所示。



(a) 施肥犁模型 (b) 施肥犁应力云图 (c) 施肥犁变形云图 (d) 施肥犁位移云图

图 7 深松型施肥犁应力应变云图

Fig. 7 Stress-strain nephogram of deep-loose fertilizer plow

$$\tau_T = \frac{T}{W_T} \approx \frac{9\ 550\ 000}{0.2d^3} \frac{P}{n} \leq [\tau_T] \quad (8)$$

式中:  $\tau_T$ ——切应力,MPa;

$T$ ——受到的扭矩,N·mm;

$W_T$ ——抗扭截面系数;

$n$ ——转速,r/min;

$P$ ——传递功率,kW;

$d$ ——计算刀具端面直径,mm;

$[\tau_T]$ ——许用扭转切应力,MPa。

在深松型施肥犁的应力应变云图中,最大应力发生在深松型施肥犁柄挂接处;在位移云图中深松型施肥犁主要变形发生在犁头的最下部;经过强度计算得到深松型施肥犁最大需用应力为 156 MPa,远小于许用屈服应力 235 MPa,满足深松型施肥犁的工作性能要求。

### 3 试验与分析

通过雷沃 1204 拖拉机牵引沼液沼渣施肥机在湛江雷州龙门镇甘蔗种植地进行性能试验。试验原料采用猪场发酵的沼液沼渣,其固体质量分数已达到到 5%~10% 左右,试验前通过单点悬挂将沼液沼渣施肥机固定在拖拉机上,并将施肥机液压悬挂装置与拖拉机液压系统连接,调节液压升降装置使深松型施肥犁离地高度符合试验要求<sup>[13-15]</sup>,并将沼液沼渣填充到罐体内,其主要技术参数如表 1 所示,其分流管内径尺寸是参考李文哲等<sup>[16]</sup>对沼液沼渣暗灌施肥机设计与试验。

表 1 主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters

参数	数值
配套动力/kW	≥66.19
外形尺寸(长×宽×高) (/cm×cm×cm)	250×200×200
工作幅/cm	225
分流管内径/mm	36
施肥深度/cm	≤40
罐体装载量/m <sup>3</sup>	7.8
生产率/(hm <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	≤1.2
深松犁/个	可拆可调

为了避免施肥机在加、减速前进与准备停车阶段出现速度波动,而引起施肥流量断续与不均匀的问题,所以在机具前进 10 m 后与停车前的 10 m 之间,进行试验样本采集与取样,为了减小试验误差,对施肥流量均匀连续性能的影响,分别在 100 m×20 m 的区域内,划定 5 条 100 m×4 m 试验采样区,进行 5 组重复试验。田间试验作业时,将沼液沼渣调节阀调到最大,并保持拖拉机以 1.5 m/s 的速度匀速前进;在完成施肥作业后,等待 30 min 使土壤与肥料充分吸渗,采用钢直尺在采样区内以 5 m 间隔,在机具前进方向进行

垂直渗湿土壤厚度的测量取样,并将测量的试验样本数据记录,如表2所示。

表2 单因素试验影响因素水平范围

Tab. 2 Level range of influencing factors in single factor test

水平	渗湿土壤厚度/cm				
	1号试验地	2号试验地	3号试验地	4号试验地	5号试验地
1	11.5	12.5	12.8	10.9	10.5
2	10.3	15.3	15.6	10.3	9.3
3	9.6	13.6	12.3	12.3	10.6
4	10.1	11.6	13.8	11.6	11.1
5	9.1	10.1	12.5	10.2	9.9
6	9.6	11.3	11.6	13.3	12.5
7	10.2	9.9	12.7	10.6	13.2
8	8.8	9.3	10.3	8.3	10.2
9	9.6	11.8	11.6	9.9	10.6
10	9.3	9.1	10.7	10.3	11.8
11	10.3	10.9	8.6	11.3	13.3
12	9.7	8.8	10.3	10.7	11.7
13	8.9	9.5	8.9	11.5	9.8
14	10.3	11.3	10.3	9.6	12.3
15	7.3	12.5	11.3	8.8	10.1
16	10.6	9.3	9.7	11.3	11.5

田间试验结果表明:罐内原料在5~6 min内排完,沼液沼渣顺利排入到紧固在深松犁上的透明塑料分流管出口,在分流管道中没有堵塞现象;并通过试验数据分析得到5块试验地的沼液沼渣渗湿土壤厚度在7.3~15.6 cm之间,如图8所示,达到沼液沼渣肥料在土壤表层以下连续浅施的目的,有助于肥料与土壤的充分渗湿,防止肥料露置土壤表层,造成沼液蒸发、肥料养分流失的资源浪费现象。

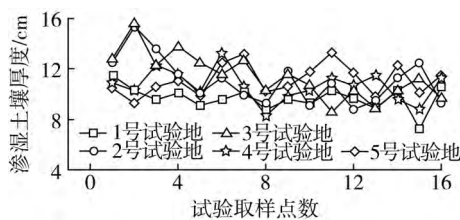


图8 沼液沼渣渗湿土壤厚度数据分析

Fig. 8 Analysis of soil thickness data of biogas slurry infiltration

## 4 结论

1) 根据沼液沼渣地表撒施会造成大量物质挥发性,在参考国内外分开式、一体式、自走式、管道输送式等地下施灌的基础上,设计小型半挂式沼液沼渣施肥机。

2) 对小型沼液沼渣施肥机的沼液罐、机架、深松型施肥犁等关键部件进行设计分析,运用SolidWorks对该机进行三维建模,利用仿真分析模块对机架与深松型施肥犁进行应力分析,确定样机结构。

3) 在沼液沼渣施肥机械通过拖拉机配套牵引进行施肥工作时,将沼液沼渣调节阀调到最大,拖拉机以1.5 m/s的速度前进作业,罐内原料在5~6 min内排完,排入到各个深松型施肥犁沼液沼渣分流管道中,没有堵塞现象。

4) 经过田间试验后,测量分析5块试验地渗湿土壤厚度在7.3~15.6 cm之间,达到沼液沼渣肥料在土壤表层以下连续浅施的目的,有助于肥料与土壤的充分渗湿,防止肥料露置土壤表层,造成沼液蒸发、肥料养分流失的资源浪费现象。

## 参 考 文 献

- [1] 张鲁云,何义川,杨怀君,等. 国内外液体肥料施肥机械发展概况及需求分析[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(15): 12-15, 19.  
Zhang Luyun, He Yichuan, Yang Huaijun, et al. Development and demand analysis of liquid fertilizer machines athome and abroad [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(15): 12-15, 19.
- [2] Pullen D W M, Godwin R J, Grundon P, et al. Injecting bio solids into grass and arable crops, Part I: Design and evaluation of a shallow injector [J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(3): 285-297.
- [3] Chen Y, Tessier S. Criterion for design and selection of injection tools to minimize liquid manure on the soil surface [J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(6): 1421.
- [4] Chen Y. A liquid manure injection tool adapted to different soil conditions [J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(6): 1729.
- [5] 刘宏新,徐高伟,贾儒,等. 脉冲式沼肥防堵分配装置工作机理与结构优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 32-39.  
Liu Hongxin, Xu Gaowei, Jia Ru, et al. Operating principle and structural optimization of impulse type anti-blocking distribution device for biogas manure [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(22): 32-39.
- [6] 滕伟健. 半挂式流态有机肥采运施肥机组设计[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- [7] 钱孟波,李希斌,王望龙,等. 固态肥深施肥工作机理及核心部件优化设计[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2021, 42(4): 421-427.  
Qian Mengbo, Li Xibin, Wang Wanglong, et al. Working mechanism of solid fertilizer deep fertilizing machine and optimization design of core components [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2021, 42(4): 421-427.
- [8] 苏丽达,常睿智,杨永海. 有机粉肥施肥机结构设计及优

- 化[J]. 试验技术与管理, 2022, 39(4): 77—83.
- Su Lida, Chang Ruizhi, Yang Yonghai. Structural design and optimization of powdery organic fertilizer applicator [J]. *Experimental Technology and Management*, 2022, 39(4): 77—83.
- [9] 袁虎. 沼液沼渣暗灌施肥机械的研制及关键部件的仿真研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
- [10] 董剑豪, 毕新胜, 于爱婧, 等. 基于AMESim有机肥—化肥开沟施肥机仿真分析[J]. *液压与气动*, 2021, 45(6): 128—134.
- Dong Jianhao, Bi Xinsheng, Yu Aijing, et al. Simulation analysis of ditching fertilizer applicator based on AMESim organic fertilizer-chemical fertilizer [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2021, 45(6): 128—134.
- [11] 刘宏新, 孟永超, 李彦龙, 等. 沼肥采运车储罐动力学数值模拟与相似模型试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(17): 42—49.
- Liu Hongxin, Meng Yongchao, Li Yanlong, et al. Numerical simulation of dynamic and similarity model test of tank in biogas fertilizer transport truck [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(17): 42—49.
- [12] 孙冬霞, 樊平, 王鹏军, 等. 有机肥施肥机关键部件的有限元分析及试验[J]. *中国农机化学报*, 2020, 41(7): 9—15.
- Sun Dongxia, Fan Ping, Wang Pengjun, et al. Finite element analysis and test of key parts of organic fertilizer applicator [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(7): 9—15.
- [13] 白海超, 衣淑娟, 冯召华, 等. 深施型液态施肥机施肥能量损失试验研究[J]. *南方农机*, 2021, 52(10): 80—82.
- [14] 褚斌, 吴爱兵, 韩梦龙, 等. 畜禽粪便堆沤有机肥撒肥机设计与试验[J]. *中国农机化学报*, 2021, 42(2): 58—65.
- Chu Bin, Wu Aibing, Han Menglong, et al. Design and experiment of the organic fertilizer spreader for livestock and poultry manure composting [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(2): 58—65.
- [15] 周文琪, 肖红, 刘子铭, 等. SYJ—3深施型斜置式液肥穴施肥机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(4): 78—86.
- Zhou Wenqi, Xiao Hong, Liu Ziming, et al. Design and test of SYJ—3 deep application-type inclined liquid fertilizer hole applicator [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(4): 78—86.
- [16] 李文哲, 袁虎, 刘宏新, 等. 沼液沼渣暗灌施肥机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(11): 75—80.
- Li Wenzhe, Yuan Hu, Liu Hongxin, et al. Biogas slurry fertilizer applicator for dark irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(11): 75—80.
- (上接第 16 页)
- Xu Gaowei, Liu Hongxin, Jian Shichun, et al. Design and test of transplanting mechanism on mulch-film of *salvia miltiorrhiza* based on five-bar mechanism [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(9): 55—65.
- [17] 袁挺, 张宇, 尹金亮, 等. 蔬菜移栽机曲柄摇杆—导轨组合式取投苗装置研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(12): 116—125.
- Yuan Ting, Zhang Yu, Yin Jinliang, et al. Study on seedling taking and throwing device based on combined structure of crank rocker and guide rail for vegetable transplanter [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(12): 116—125.
- [18] 谢守勇, 阳尚宏, 刘军, 等. 蔬菜移栽机斜插夹钵式取投苗装置研制[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(6): 1—10.
- Xie Shouyong, Yang Shanghong, Liu Jun, et al. Development of the seedling taking and throwing device with oblique insertion and plug clipping for vegetable transplanters [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(6): 1—10.
- [19] 崔永杰, 卫咏哲, 丁辛亭, 等. 基于圆柱凸轮的株距可调式取苗末端执行器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(1): 104—114, 122.
- Cui Yongjie, Wei Yongzhe, Ding Xinting, et al. Design and experiment of adjustable spacing end-effector based on cylindrical cam [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(1): 104—114, 122.
- [20] 王秀, 刘蒙滋, 翟长远, 等. 蔬菜移栽夹茎式取苗装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(9): 122—132.
- Wang Xiu, Liu Mengzi, Zhai Changyuan, et al. Design and experiment of vegetable transplanting clip stem seedling device [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(9): 122—132.
- [21] 周海丽, 刘珂, 童俊华, 等. 温室穴盘钵苗成排取苗移植手部件设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(5): 82—90.
- Zhou Haili, Liu Ke, Tong Junhua, et al. Design and test of row picking end-effectors for potted seedlings in greenhouses [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(5): 82—90.