

全膜面覆土式马铃薯播种联合作业机设计与试验

戴 飞¹ 辛尚龙¹ 赵武云¹ 刘凤军² 辛兵帮² 马明生³

(1. 甘肃农业大学工学院, 兰州 730070; 2. 酒泉市铸陇机械制造有限公司, 酒泉 735000;

3. 甘肃省农业科学院旱地农业研究所, 兰州 730070)

摘要:为实现马铃薯大垄双行膜上覆土自然破膜出苗机械化栽培,设计了一种可实现施肥、播种、起垄、覆膜和全膜面覆土一体化作业的全膜面覆土式马铃薯播种联合作业机。对样机关键部件进行了设计,确定其排肥系统、链勺式排种系统工作参数,同时分析了提土-膜面覆土装置作业过程,得到满足膜顶覆土厚度的必要作业条件。田间试验结果表明,当作业速度为1.8~2.0 km/h时,重种指数为4.9%,漏种指数为6.6%,种植深度合格率为95.2%,种薯间距合格指数为90.1%,膜顶覆土厚度合格率为98.8%,各行排肥量一致性变异系数为6.5%,总排肥量稳定性变异系数为5.1%,试验指标均符合国家和行业标准要求,试验结果满足设计和实际作业要求。

关键词:马铃薯;播种;全膜面覆土;联合作业机;设计;试验

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)03-0076-08

Design and Experiment of Combined Potato Planting Machine for Covering Soil on Top of Full Film Surface

DAI Fei¹ XIN Shanglong¹ ZHAO Wuyun¹ LIU Fengjun² XIN Bingbang² MA Mingsheng³

(1. School of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2. Jiuquan Zhulong Machinery Manufacturing Co., Ltd., Jiuquan 735000, China

3. Institute of Dryland Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Aiming at enhancing the mechanization level of potato cultivation, promoting the development of potato industry, and further integration agronomic requirement of seedlings emerge cultivation pattern of potato self-puncture with covering soil on the film, a combined potato planting machine was designed, which synchronously realized institutional operation, such as fertilization, seeding, ridging, film mulching and covering soil on the top of full film surface. Based on the prototype, key parts were designed and selected, and the structure and operation parameters of fertilizing system and chain-spoon potato metering device were determined. The operation process of covering soil on the top of full film surface was analyzed, and the necessary work conditions to make sure that the covering soil thickness on the top of full film surface were obtained by analysis and calculation. For the relevant work performance test of prototype, the field experimental results showed that under the condition of operation speed of 1.8~2.0 km/h, the multiple index was 4.9%, the missing index was 6.6%, the qualification rate of planting depth was 95.2%, the potato distance qualified index was 90.1%, the qualification rate of covering soil on the top of full film surface was 98.8%, the variation coefficient of fertilizer consumption consistency for each row was 6.5%, and the variation coefficient of fertilizer consumption stability for the total row was 5.1%, which were up to the relevant work quality evaluation specification requirements, and also the experimental results met the design requirements of combined operation machine. The research results provided an important reference for the plastic film mulching cultivation pattern of root-tuber crop combined machine development.

Key words: potato; planting; covering soil on top of full film surface; combined machine; design; experiment

收稿日期: 2016-07-28 修回日期: 2016-08-22

基金项目: 农业部公益性行业科研专项(201503105)和甘肃省科技重大专项计划项目(143NKDF016)

作者简介: 戴飞(1987—),男,讲师,主要从事北方旱区作物生产装备工程研究,E-mail: daifei@gsau.edu.cn

通信作者: 赵武云(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事旱区农业工程技术与装备研究,E-mail: zhaowuy@gsau.edu.cn

引言

目前,传统大田马铃薯栽培有平作和垄作模式,垄作分为垄体覆膜与无膜 2 种,其中垄作覆膜种植为我国西北旱区马铃薯的主导栽培模式,主要包括先播种后覆膜、待出苗后人工放苗以及先覆膜后破膜播种 2 种类型^[1]。前者需人工放苗,作业强度大、地膜损伤严重,且放苗不及时易出现高温烧苗现象;后者需有配套的膜上播种机具,现有的手持式掘穴器播种速率低,且种床保墒效果不理想。为此,针对甘肃省马铃薯大垄双行覆膜种植模式要求,相关学者提出了“马铃薯垄作膜上覆土自然破膜出苗栽培技术”,即马铃薯垄作施肥播种覆膜后,在垄体顶部地膜膜面上覆盖一层厚度为 35~45 mm 的土壤,意在使马铃薯植株幼苗依靠覆土重力的作用自行穿破地膜完成出苗^[2-3]。该农艺技术能够避免人工二次放苗、节省劳力,可有效保证种植马铃薯出苗整齐和青薯率低且增产效果显著,在甘肃省得到了大面积的推广应用。

近年来,国内外马铃薯种植机械化水平在逐步提升。国外以德国 Grimme 和美国 Double L 等农机制造公司为代表,主要生产大中型马铃薯播种施肥联合作业装备,在自动化行(株)距控制、液压系统供种、播种电子监测等方面技术先进,无论采用半悬挂或牵引式,均可一次完成开沟、施肥、施药、播种和起垄覆土等作业,联合机智能化、精量化程度高^[4-5]。但受不同地域农田降水条件与作业气候限制,国外马铃薯机械化种植基本无覆膜作业工序,且其体积大、价格昂贵,不适宜在我国西北旱地马铃薯产区应用。国内研制了一系列中小型马铃薯垄作种植一体机,机械化联合工作程度较高、作业质量可靠,但由于没有专门的膜顶覆土装置而不符合马铃薯大垄双行膜上覆土自然破膜出苗栽培种植模式要求^[6-8]。目前,相关覆膜种植机、铺膜机膜上覆土机构主要有内螺旋滚筒式和前旋耕输土式^[9-11]。其中,内螺旋滚筒式覆土机构针对膜面穴状覆土要求,实现交叉排土与孔穴覆盖功能;前旋耕输土式覆土机构可满足平铺膜、全膜面覆土与垄体两侧膜边覆土需求,广泛应用于小麦全膜覆土穴播技术、玉米全膜双垄沟播技术配套机具中,但两者均达不到垄作模式下垄体全膜面覆土的农艺技术条件。孙伟等^[12]研制出全膜覆盖铺膜机膜上覆土装置,作业性能良好,但该装置主要以马铃薯全膜双垄沟播技术为依托。为此,在融合马铃薯大垄双行膜上覆土自然破膜出苗栽培技术的基础上,本文设计全膜面覆土式马铃薯播种联合作业机。

1 整机结构与工作原理

1.1 结构组成

全膜面覆土式马铃薯播种联合作业机主要由悬挂装置、排肥系统、链勺式排种系统、垄体整形装置、提土-膜顶覆土装置、垄体覆膜装置、旋耕刀组、地轮和镇压轮等部件组成,结构如图 1 所示。

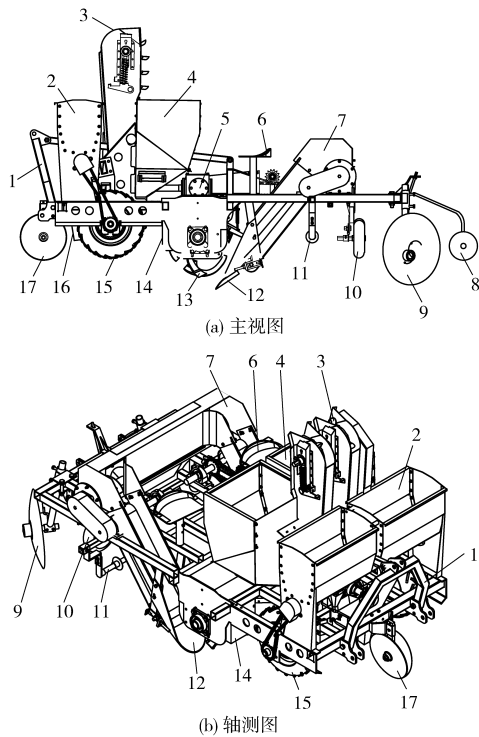


图 1 全膜面覆土式马铃薯播种联合作业机结构简图
Fig. 1 Structure diagrams of combined potato planting machine for covering soil on top of full film surface

1. 悬挂架 2. 肥箱 3. 排种装置 4. 种箱 5. 变速箱 6. 补种座 7. 提土-膜顶覆土装置 8. 镇压轮 9. 膜侧覆土圆盘 10. 展膜轮 11. 覆膜挂接装置 12. 起土铲 13. 旋耕刀组 14. 垄体整形装置 15. 地轮 16. 靴式开沟器 17. 施肥开沟器

其中,排肥系统由肥箱、倾斜圆盘式施肥开沟器及外槽轮式排肥器等组成;链勺式排种系统由种箱、靴式开沟器及采用交叉配置的链勺式排种器等构成;旋耕起垄装置主要包括旋耕刀组及垄体整形装置;垄体覆膜装置由覆膜挂接装置、展膜轮及膜侧覆土圆盘等组成;提土-膜面覆土装置包括起土铲、左右均布对称的刮板升运带式提土器和横跨垄体膜顶的水平双向螺旋覆土装置。

1.2 传动系统与工作原理

联合作业机传动系统如图 2 所示,机具以三点后悬挂方式与拖拉机联接,当拖拉机牵引机具作业时,前行地轮转动,地轮外侧链带动肥箱中外槽轮式排肥器转动进行施肥作业,其内侧链传动带动种箱中两列链勺式排种器运行实现取种,并结合靴式开

沟器完成播种。与此同时,联轴器Ⅰ通过变速箱将动力分别传递至其两侧旋耕刀组与后置提土-膜顶覆土装置,提土-膜顶覆土装置动力左、右半轴通过联轴器Ⅱ联接转动,且分别带动其两侧刮板升运带式提土器顺时针运转,并在其右侧链传动的作用下进一步带动水平双向螺旋覆土装置转动作业。

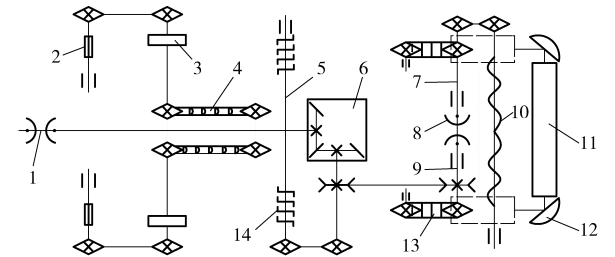


图2 联合作业机传动系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of transmission system

1. 联轴器Ⅰ 2. 外槽轮式排肥器 3. 地轮 4. 链勺式排种器
5. 旋耕刀轴 6. 变速箱 7. 动力左半轴 8. 联轴器Ⅱ 9. 动力右半轴
10. 水平双向螺旋覆土装置 11. 镇压辊 12. 膜侧覆土圆盘
13. 刮板升运带式提土器 14. 旋耕刀组

机具田间工作时(补种人员就位),地轮前行带动两侧肥箱内外槽轮式排肥器转动,并在输肥管、中置排肥盒及倾斜圆盘式施肥开沟器滚动前行的作用下将肥料施入大垄垄体中间部位。随着肥料的不断施入,种箱内链勺式排种器同时也在自下而上持续运行,充种区一侧的链勺向上运动并依次舀取切块种薯,当种勺到达最高点翻越主动轮后,种薯下落至前一种勺的勺背上,并经种勺携带种薯运动至投种点,薯块下落至种沟底部,并结合靴式开沟器完成排种。与此同时,联合作业机旋耕刀组高速旋转,左、右旋耕刀组呈螺旋形,为减小机具重心转矩,改善刀组旋转时的动平衡,保持起垄垄体的直线度,刀组转动时交替入土,旋耕刀组将土壤旋切并向后抛输,确保有充足的疏松土壤能够填充刮板升运带式提土器;且左、右两旋耕刀组之间的土壤经垄体整形装置修复后完成起垄作业。此时,地膜在覆膜挂接装置、展膜轮的不断转动作业过程中紧密附着在大垄垄体表面,并由膜侧覆土圆盘将两侧膜边转动覆土压实,完成垄体覆膜作业。当起土铲掘起已旋耕土壤后,由刮板升运带式提土器将土壤倾斜提升至横跨垄体膜顶的水平双向螺旋覆土装置两侧,随着水平双向螺旋输送器的不断转动及两侧土壤螺旋推送,通过中置溜土槽瞬时将升运土壤均匀覆撒在垄体膜面顶部,并在后置镇压辊的配合下完成全膜面覆土作业。

1.3 主要技术指标

全膜面覆土式马铃薯播种联合作业机对应的农艺栽培模式如图3所示。其中,大垄垄高为180~200 mm,相邻垄体中心距为1 200 mm,垄体顶部宽

度为800~850 mm(后续关键部件设计中统一按照800 mm计算),其膜顶覆土厚度规定为35~45 mm(后续关键部件设计中统一取40 mm计算),双行播种深度为100~120 mm,种薯株距为400 mm,垄体中置单行施肥,施肥深度为80~100 mm。大垄垄体覆膜选用宽度为1 200 mm、厚度为0.01 mm的地膜(白/黑色)。

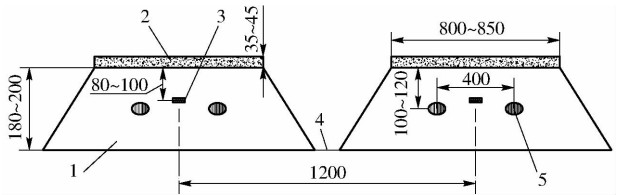


图3 马铃薯大垄双行膜上覆土自然破膜出苗栽培模式

Fig.3 Seedlings emerge cultivation pattern of potato self-puncture with covering soil on film

1. 大垄垄体 2. 膜顶覆土 3. 中置施肥带 4. 垄沟 5. 双行播种带

结合甘肃省马铃薯种植特点和动力计算结果,作业机主要技术参数如表1所示。

表1 作业机主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of operation machine

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	2.75×1.55×1.42
配套动力/kW	23.2~29.4
挂接方式	后三点悬挂
施肥行数	1
播种行数	2
整机质量/kg	560
作业速度/(km·h ⁻¹)	1.8~2.0
生产率/(hm ² ·h ⁻¹)	0.13~0.20
施肥深度/mm	80~100
播种深度/mm	100~120
起垄高度/mm	180~200
垄顶宽度/mm	800~850
膜面覆土厚度/mm	35~45

2 关键部件设计

2.1 排肥系统

联合作业机排肥系统(图4)由两组肥料箱和与其对应的外槽轮式排肥器、输肥盒、排肥管、中置排肥盒、肥量调节手轮、倾斜圆盘式施肥开沟器等部件组成。

其中,根据马铃薯种植特点,选择排肥系统肥箱作业幅宽 B_1 为1 200 mm,则左、右侧肥箱的总容积为^[13]

$$C = \frac{1.1L_1B_1Q_{\max}}{10\,000\gamma_1}$$

(1)

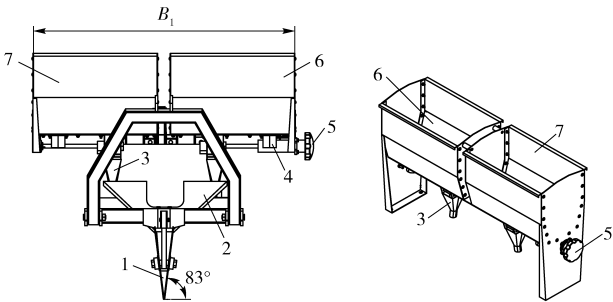


图4 排肥系统结构简图

Fig.4 Structure diagram of fertilizing system composition
1. 倾斜圆盘式施肥开沟器 2. 中置排肥盒 3. 输肥盒 4. 外槽轮式排肥器 5. 肥量调节手轮 6. 左侧肥箱 7. 右侧肥箱

其中 $C = C_Z + C_Y$ $C_Z = C_Y$
式中 C ——肥箱的总容积, L
 L_1 ——肥箱所装肥料满足的施肥距离, 设定为 1 000 m
 B_1 ——排肥系统工作幅宽, 取 1. 20 m
 $Q_{\max}$ ——最大施肥率, 取 370 kg/hm²^[14]
 γ_1 ——磷酸二铵密度, 取 0. 80 kg/L^[15]
 C_Z, C_Y ——左、右侧肥箱的容积

由式(1)计算得出, 肥箱的总容积 $C = 61. 05$ L, 则 $C_Z = C_Y = 30. 5$ L。

2.2 链勺式排种系统

链勺式排种器是目前马铃薯播种装置普遍应用的重要工作部件, 近年来通过相关试验研究与实际应用其作业性能已日趋完善^[16-18]。联合作业机设计选取的链勺式排种系统结构(图5)由种箱、主(从)动链轮、滚子链条、链条张紧装置、护种板、链勺式排种器和导种管等部件组成。

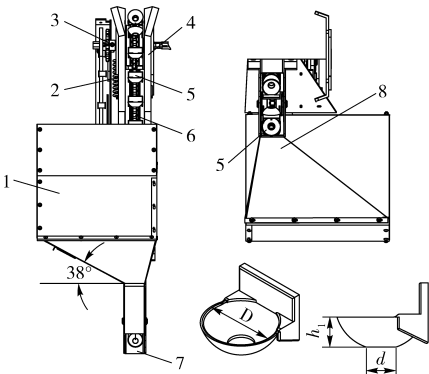


图5 链勺式排种系统结构简图

Fig.5 Structure diagram of chain-spoon potato metering device system
1. 种箱外部 2. 链条张紧装置 3. 主动链轮 4. 护种板 5. 链勺式排种器 6. 滚子链条 7. 导种管 8. 种箱内部

为使马铃薯植株田间通风透光, 达到增产的目的, 播种行-行间采用交叉种植, 且为进一步提高链勺式排种器充种性能, 种箱两排滚子链上的链勺采

取交叉配置设计^[19]。依据图5分析, 理想状态下, 单粒播种在相同时间内落入种沟的种薯数量等于排种器排出的种薯数量, 则建立方程^[16]

$$\frac{V\Delta t}{L_2} = \frac{v\Delta t}{l_1} \quad (2)$$

即
$$\frac{V}{L_2} = \frac{v}{l_1} \quad (3)$$

式中 V ——联合作业机前进速度, m/s, 依据表1取 0. 50 ~ 0. 56 m/s

v ——链勺式排种器线速度, 为保证排种质量, 取最大值 0. 55 m/s^[17]

L_2 ——理论株距, 依据大垄双行种植农艺要求取 130 mm

l_1 ——链勺间距离, mm

Δt ——时间, s

由式(2)、(3)计算得出, 链勺间的距离 l_1 为 128 ~ 143 mm 之间, 则取平均值圆整可得 $l_1 = 136$ mm。

相关试验研究表明切块马铃薯种薯的休止角基本保持在 30° ~ 32° 之间^[16, 20]。为提高排种系统充种性能, 避免链勺式排种器取种时种箱薯块出现休止自锁, 将导种管旁种箱底部倾角设计为 38°。依照切块种薯三轴尺寸相关研究, 取链勺式排种器顶部直径 $D = 50$ mm, 底部直径 $d = 20$ mm, 链勺高度 $h_1 = 18$ mm^[16]。

2.3 靴式开沟器

马铃薯大垄双行膜上覆土自然破膜出苗栽培模式对播种的均匀、稳定性要求较高, 联合作业机除排种系统作业性能可靠外, 其播种深度(100 ~ 120 mm)控制也是一个重要因素^[7, 21]。如图1所示, 联合作业机播种深度主要由三点悬挂架挂接位置、种箱前置地轮与靴式开沟器入土深度共同控制。其中, 靴式开沟器对播种深度一致性的影响至关重要^[22]。联合作业机选用的靴式开沟器结构如图6所示, 主

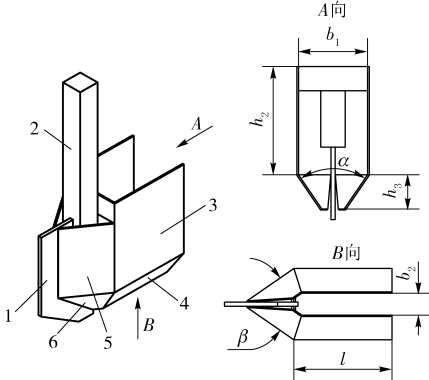


图6 靴式开沟器结构示意图

Fig.6 Structure diagram of shoe-type furrow opener
1. 前刀刃 2. 立柱 3. 沟侧翼板 4. 沟底翼板 5. 沟侧土壤分流板 6. 沟底土壤分流板

要由前刀刃、立柱、翼板(包括沟侧翼板和沟底翼板)和土壤分流板(包括沟侧土壤分流板和沟底土壤分流板)等组成。

其中,靴式开沟器沟侧翼板高度 $h_2 = 245\text{ mm}$, 长度 $l = 200\text{ mm}$, 两沟侧翼板间的距离 $b_1 = 175\text{ mm}$, 两沟底翼板的距离 $b_2 = 70\text{ mm}$; 两沟侧土壤分流板的夹角 $\alpha = 66^\circ$, 两沟底土壤分流板的夹角 $\beta = 70^\circ$; 沟底翼板与沟底土壤分流板高度相同 ($h_3 = 75\text{ mm}$)。靴式开沟器作业时,入土深度控制在 $100 \sim 120\text{ mm}$ 之间,在前刀刃的作用下其入土性能较好、开沟深度一致,且沟底平整、沟宽适度,能够使排出种薯稳定地附着于沟底种床。

2.4 提土-膜面覆土装置

2.4.1 结构

如图 7 所示,提土-膜面覆土装置主要由起土铲、刮板升运带式提土器、水平双向螺旋覆土装置、输土罩壳和溜土槽等部件组成。当联合作业机作业时,该装置动力左、右半轴在联轴器的联接作用下促使刮板升运带式提土器运转,实现将起土铲掘起土壤倾斜提升与输送。当土壤升运输送至水平双向螺旋覆土装置两侧后,在其变向推送作用下,使得土壤顺着中置溜土槽滑落,并均匀铺撒覆盖至大垄垄体

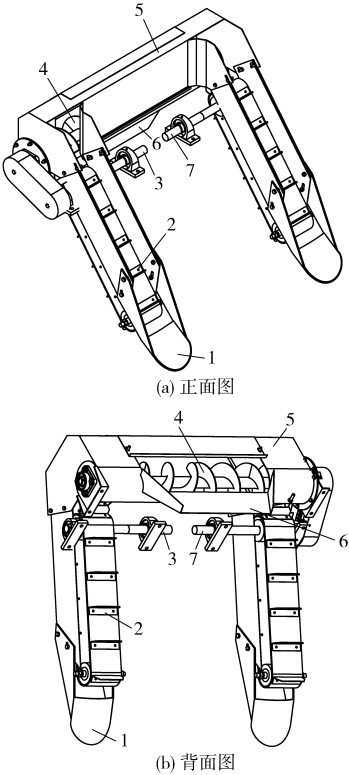


图 7 提土-膜面覆土装置结构简图

Fig. 7 Structure diagram of soil elevating-covering mechanism

1. 起土铲 2. 刮板升运带式提土器 3. 动力左半轴 4. 水平双向螺旋覆土装置 5. 输土罩壳 6. 溜土槽 7. 动力右半轴

膜顶部位。

垄体膜顶覆土厚度是影响马铃薯垄作膜上覆土自然破膜出苗栽培技术效应的关键因素之一。适宜的土壤压力有助于马铃薯秧苗易破膜出土,提高其出苗率、增加作物产量^[3]。当覆土厚度过大时,幼芽顶破地膜的时间较长,会造成商品薯产量下降;而覆土厚度较低时,又无足够的土壤压力^[3,23]。因此,为保证提土-膜面覆土装置作业过程中对膜顶覆土厚度的一致性与稳定性,需对影响其作业性能的关键参数(水平双向螺旋覆土装置转速、刮板升运带式提土器线速度及其结构参数)进行理论分析与计算。

2.4.2 垄体膜顶覆土量

如图 8a 所示,当联合作业机在单位时间段内由 A 点至 B 点前行向大垄垄体膜顶覆土作业时,其垄体膜顶覆土量为

$$Q = \gamma_2 l_2 b h_4 \tag{4}$$

其中

$$l_2 = Vt$$

式中 Q ——垄体膜顶覆土量, kg/h

t ——覆膜单位时间,取 1 h

γ_2 ——土壤(黄绵土)容重,取 $1\,300\text{ kg/m}^3$ ^[12]

l_2 ——单位时间内膜顶覆土长度, m

b ——膜顶覆土宽度,取 0.80 m

h_4 ——膜顶覆土厚度,取 0.04 m

由式(4)计算得出: $Q = 74\,880\text{ kg/h}$ 。

如图 8b 所示,水平双向螺旋覆土装置由输土罩

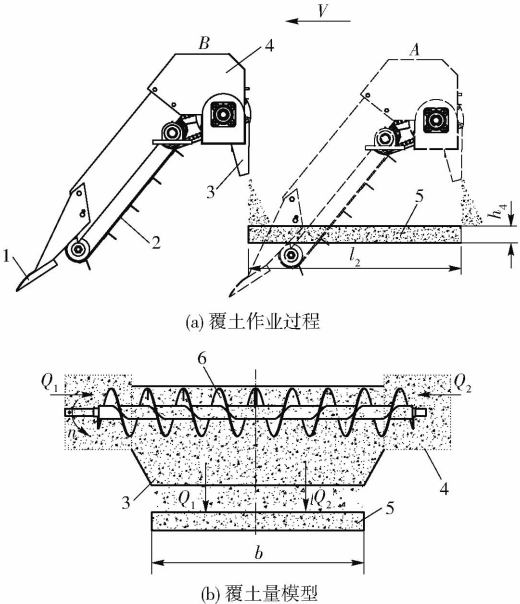


图 8 膜顶覆土作业过程

Fig. 8 Schematic diagrams of operation process of covering soil on top of full film surface

1. 起土铲 2. 刮板升运带式提土器 3. 溜土槽 4. 输土罩壳 5. 垄体膜顶覆土层 6. 水平双向螺旋覆土装置

壳、中置溜土槽及左右两段等长反向的螺旋叶片组成。因此,当两侧提升土壤经输土罩壳进入水平双向螺旋覆土装置后,升运土壤均向中置溜土槽螺旋推送,并向大垄垄体膜顶均匀覆盖铺撒。其中,左侧螺旋输(覆)土量为 Q_1 ,右侧螺旋输(覆)土量为 Q_2 ,可得

$$\begin{cases} Q = Q_1 + Q_2 \\ Q_1 = Q_2 \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)计算得出: $Q_1 = Q_2 = 37\,440\text{ kg/h}$ 。

2.4.3 水平双向螺旋覆土装置转速

当水平双向螺旋覆土装置转速为一定值,且其两侧输(覆)土量均满足 $37\,440\text{ kg/h}$ 时,大垄垄体膜面对应的覆土厚度才会满足相关农艺技术要求,通常在不考虑土壤轴向阻滞影响的情况下,水平双向螺旋覆土装置转速为^[24]

$$n = \frac{Q_1}{47D_1^2S\varphi_1\gamma_2\varepsilon} \quad (6)$$

式中 D_1 ——水平双向螺旋叶片外径,为 0.16 m
 S ——水平双向螺旋覆土装置螺距,为 0.10 m
 φ_1 ——水平双向螺旋覆土装置填充系数,查表取 0.5 ^[13]

ε ——倾斜输送系数(倾斜角度 0°),为 1 ^[13]

由式(6)计算得出水平双向螺旋覆土装置转速 $n = 479\text{ r/min}$ 。

2.4.4 刮板升运带式提土器倾斜提升线速度

为保障提土-膜面覆土装置有充足土壤进行膜顶覆土作业,除水平双向螺旋覆土装置转速外,刮板升运带式提土器倾斜提升线速度也是影响其作业性能的又一关键因素。设计的刮板升运带式提土器倾斜角 α_1 为 45° ,工作时的绝对运动由两种运动合成,即联合作业机前进速度 V 、刮板升运带式提土器倾斜提升线速度 v_1 ,如图 9 所示。

则刮板升运带式提土器倾斜提升线速度为^[13]

$$v_1 = \frac{Q_1}{3\,600B_2H\gamma_2\varphi_2k} \quad (7)$$

式中 B_2 ——刮板升运带宽度,为 0.21 m
 H ——刮板高度,为 0.06 m
 φ_2 ——刮板升运带式提土器填充系数(在 $0.75 \sim 0.97$ 之间),取均值为 0.86 ^[13]
 k ——倾斜系数,刮板升运带式提土器倾斜角度为 45° ,查表取 0.40 ^[13]

由式(7)计算得出刮板升运带式提土器倾斜提升线速度 $v_1 = 1.85\text{ m/s}$ 。

2.4.5 刮板升运带结构参数

如图 9b 所示,当土壤填充至刮板升运带式提土器且稳定倾斜输送时,两刮板之间及其填充土壤形

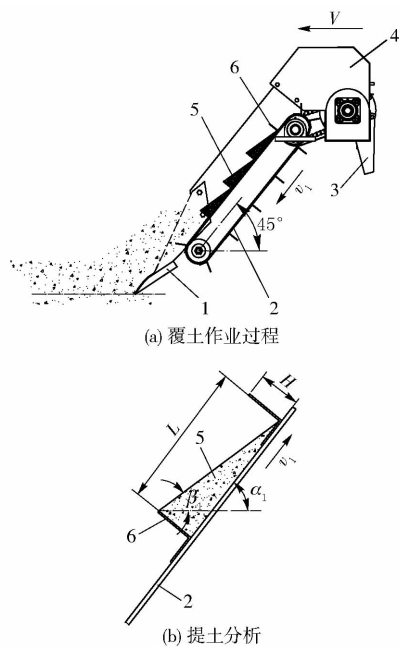


图 9 刮板升运带式提土器作业过程
Fig.9 Schematic diagrams of operation process of scraper lifting belt soil elevating mechanism

1. 起土铲 2. 升运带 3. 溜土槽 4. 输土罩壳 5. 升运土壤
6. 刮板

成了一个闭合的直角三角形,依据几何关系,可得刮板间距为

$$L_3 = \frac{H}{\tan(\alpha_1 - \beta_1)} \quad (8)$$

式中 β_1 ——土壤(黄绵土)的内摩擦角,取 28° ^[25]

由式(8)计算得出刮板升运带式提土器刮板间距 $L_3 = 0.194\text{ m}$,在每组刮板升运带式提土器上设置 18 个刮板,即升运带长度设计值为 3.30 m 。

3 田间试验与结果分析

3.1 试验条件与材料

2016 年 4 月,在甘肃省定西市安定区香泉镇进行了全膜面覆土式马铃薯播种联合作业机现场操作演示与田间作业性能试验。试验地土壤为黄绵土,含水率为 16.86% ,土壤容重为 $1\,300\text{ kg/m}^3$,坚实度小于 0.20 MPa ,田面较平整、疏松且杂草较少。试验前对联合作业机进行调试,在肥箱中加入磷酸二铵固体颗粒化肥,在种箱中添加平均三轴尺寸为 $44.8\text{ mm} \times 36.6\text{ mm} \times 23.9\text{ mm}$ 的切块种薯,通过挂接板将提土-膜面覆土装置起土铲倾角调整为 15° ,在覆膜挂接装置上安装(白/黑色)地膜(0.01 mm),并将膜侧覆土圆盘倾角调整至 35° 。

3.2 试验方法

按照联合作业机预期实现的设计功能,结合 GB/T 25417—2010《马铃薯种植机 技术条件》和 NY/T 1415—2007《马铃薯种植机质量评价技术规

范》规定的试验方法进行田间作业性能试验(图 10),联合动力选取常林沭河 SH404 型轮式拖拉机,标定功率为 29.4 kW,作业机前进速度为 1.8 ~ 2.0 km/h。试验选取种植深度合格率、重种指数、漏种指数、种薯间距合格指数、膜顶覆土厚度合格率、总排肥量稳定性变异系数、各行排肥量一致性变异系数作为能够体现联合作业机工作性能的测试指标;同时考察联合作业机排肥系统、链勺式排种系统、旋耕起垄装置、垄体覆膜装置及提土-膜面覆土装置的工作运转情况。其中,膜顶覆土厚度合格率测定用钢卷尺以人工测量的作业方式,获取各测区内膜顶覆土厚度达到 35 ~ 45 mm 合格样本占总抽取样本数量的平均百分比;其余指标全部依照文献[26]规定的具体计算方法,测定各项作业性能指标。



图 10 联合机田间作业性能试验

试验结果统计与计算中规定试验小区以单一垄体宽度(800 mm)为基准,试验准备区长度为 5 m,测定区长度为 20 m,试验小区在试验地中随机选取,马铃薯施肥播种起垄覆膜全膜面覆土试验重复 10 次,试验结果取试验测定指标的平均值。

3.3 试验结果与分析

全膜面覆土式马铃薯播种联合作业机田间试验结果如表 2 所示。

由试验结果可得,全膜面覆土式马铃薯播种联合作业机试验指标均达到国家标准要求。

试验过程中发现,当联合作业机前进速度保持在 1.8 ~ 2.0 km/h 时,其各组成系统的作业性能较高且相对稳定。当前进速度进一步提高时,链勺式

表 2 田间试验结果
Tab.2 Results of field experiment %

试验指标	标准值	试验结果
重种指数	≤20.0	4.9
漏种指数	≤10.0	6.6
种植深度合格率	≥80.0	95.2
种薯间距合格指数	≥85.0	90.1
膜顶覆土厚度合格率		98.8
各行排肥量一致性变异系数	≤13.0	6.5
总排肥量稳定性变异系数	≤7.0	5.1

排种器线速度增大,种薯在排种系统主动链轮处所受的转动惯性力过大,会出现被甩出种勺无法进入导种管的现象,最终造成漏播;同时,靴式开沟器翼板和土壤分流板与种床土壤互作时间缩短,播种开沟深度一致性受到扰动,致使种植深度合格率降低。若田间土地不平整、土壤坚实度较高时,则会影响旋耕土壤进入提土-膜面覆土装置的及时性与准确性,导致垄体膜顶覆土厚度不一致,土壤结块覆盖,因此,需要适当调整作业机前进速度,确保旋耕刀组与田间土壤的充分作用时间,以获取高质量的切削土壤。

4 结论

(1)通过融合马铃薯大垄双行膜上覆土自然破膜出苗栽培技术,确定了样机传动系统,并对其排肥系统、链勺式排种系统及提土-膜面覆土装置重要作业部件进行选型与设计,完成其关键参数分析计算,设计了全膜面覆土式马铃薯播种联合作业机。

(2)联合作业机采用的排肥系统能够将两侧肥箱内的肥料准确施入垄体中间部位,链勺式排种系统将切块薯投送至垄体施肥带两侧并确保种薯的合理间距,二者相互配合作业,可有效避免施肥烧种现象;通过满足垄体膜顶覆土厚度要求条件的分析,确保了提土-膜面覆土装置能够准确、可靠实现“提土-覆土”动态工作过程,最大限度保证了膜顶覆土作业。

(3)田间试验表明,全膜面覆土式马铃薯播种联合作业机工作后其重种指数为 4.9%,漏种指数为 6.6%,种植深度合格率为 95.2%,种薯间距合格指数为 90.1%,膜顶覆土厚度合格率为 98.8%,各行排肥量一致性变异系数为 6.5%,总排肥量稳定性变异系数为 5.1%,田间性能试验指标均达到国家和行业标准要求,试验结果满足设计要求,能够实现马铃薯施肥、播种、起垄、覆膜、全膜面覆土的一体化作业。

参 考 文 献

- 1 贾晶霞,杨德秋,李建东,等. 马铃薯栽培农艺与机械化生产技术调研综述[J]. 农机化研究,2010,32(11):1-6.
JIA Jingxia, YANG Deqiu, LI Jiandong, et al. Investigation summary about potato planting agriculture and mechanical production technique [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(11): 1-6. (in Chinese)
- 2 杨来胜,席正英,李玲,等. 马铃薯高垄膜上覆土自然破膜出苗栽培技术[J]. 中国蔬菜,2010(11):47-48.
- 3 杨忠娜,唐继军,张立峰. 土下覆膜播种方式作物自动破膜出苗效应[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(5):61-65.
YANG Zhongna, TANG Jijun, ZHANG Lifeng. A study on self-puncture effect of different crops in sub-soil planting with film mulching [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(5): 61-65. (in Chinese)
- 4 吕金庆,田忠恩,杨颖,等. 马铃薯机械发展现状、存在问题及发展趋势[J]. 农机化研究,2015,37(12):258-263.
LÜ Jinqing, TIAN Zhongen, YANG Ying, et al. The development situation, existing problems and development trend of potato machinery [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(12): 258-263. (in Chinese)
- 5 刘全威,吴建民,王蒂,等. 马铃薯播种机的研究现状及进展[J]. 农机化研究,2013,35(6):238-241.
LIU Quanwei, WU Jianmin, WANG Di, et al. Current status and progress of the potato seeder [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(6): 238-241. (in Chinese)
- 6 杨德秋,郝新明,李建东,等. 四行悬挂式马铃薯种植机虚拟设计与试验[J]. 农机化研究,2009,31(10):75-78.
YANG Deqiu, HAO Xinming, LI Jiandong, et al. Virtual design and experiments of four-row mounted potato planter [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(10): 75-78. (in Chinese)
- 7 李明金,许春林,李连豪,等. 2CM-4型马铃薯播种施肥联合作业机的研制[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2012,24(1):14-16.
LI Mingjin, XU Chunlin, LI Lianhao, et al. Research and development of 2CM-4 sowing and fertilization combined machine for potato [J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2012, 24(1): 14-16. (in Chinese)
- 8 高明全,张旭东,刘维佳,等. 2CM-2型马铃薯播种机关键部件的设计[J]. 沈阳农业大学学报,2012,43(2):237-240.
GAO Mingquan, ZHANG Xudong, LIU Weijia, et al. Design on the critical parts of 2CM-2 type potato planter [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2012, 43(2): 237-240. (in Chinese)
- 9 赵立军,何堤,周福君. 2BF-1400型水稻覆膜播种机覆土机构参数优化与试验[J/OL]. 农业工程学报,2015,31(8):21-26. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150804&flag=1. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.08.004.
ZHAO Lijun, HE Di, ZHOU Fujun. Parameter optimization and test on soil-covering mechanism of 2BF-1400 rice mulching film seeder machine [J/OL]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8): 21-26. (in Chinese)
- 10 唐学鹏,赵武云,戴飞,等. 旱地小麦全膜覆土播种一体机的研制[J]. 干旱地区农业研究,2013,31(6):248-251.
TANG Xuepeng, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Design and manufacture of an integrated machine to spread membrane covering soil and seeding for dry land wheat [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(6): 248-251. (in Chinese)
- 11 戴飞,赵武云,马明义,等. 双垄耕作施肥喷药覆膜机工作参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):83-90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160112&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.012.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, MA Mingyi, et al. Parameters optimization of operation machine for tillage-fertilization and spraying-filming on double ridges [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 83-90. (in Chinese)
- 12 孙伟,刘小龙,石林榕,等. 刮板升运带式膜上覆土装置覆土特性[J]. 机械工程学报,2016,52(7):38-45.
SUN Wei, LIU Xiaolong, SHI Linrong, et al. Covering soil on plastic-film characteristics of scraper lifting belt mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(7): 38-45. (in Chinese)
- 13 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.
- 14 石小红,田丰,张永成,等. 不同施肥量和密度对马铃薯叶片叶绿素含量的影响[J]. 青海大学学报:自然科学版,2009,27(6):56-60.
SHI Xiaohong, TIAN Feng, ZHANG Yongcheng, et al. Effects of different fertilizing dosage and density on chlorophyll content of potato leaves [J]. Journal of Qinghai University: Nature Science, 2009, 27(6): 56-60. (in Chinese)
- 15 高雄,郝磊. 2CMG-4型马铃薯播种机排肥试验研究[J]. 农机化研究,2016,38(4):205-208.
GAO Xiong, HAO Lei. Study on fertilizer experiment of 2CMG-4 type potato planter [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(4): 205-208. (in Chinese)
- 16 吕金庆,杨颖,李紫辉,等. 舀勺式马铃薯播种机排种器的设计与试验[J/OL]. 农业工程学报,2016,32(16):17-25. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161603&flag=1. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.16.003.
LÜ Jinqing, YANG Ying, LI Zihui, et al. Design and experiment of cup-belt type potato seed-metering device [J/OL]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 17-25. (in Chinese)
- 17 孙伟,王关平,吴建民. 勺链式马铃薯排种器漏播检测与补种系统的设计与试验[J/OL]. 农业工程学报,2016,32(11):8-15. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161102&flag=1. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.11.002.
SUN Wei, WANG Guanping, WU Jianmin. Design and experiment on loss sowing testing and compensation system of spoon-chain potato metering device [J/OL]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 8-15. (in Chinese)

- Mechanics, 1953, 20: 327 – 344.
- 18 ASAF Z, RUBINSTEIN D, SHMULEVICH I. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 92(1–2): 227 – 242.
- 19 石林榕, 吴建民, 赵武云, 等. 基于离散单元法农田土壤单轴压缩模型的建立及参数校核[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(4): 174 – 182.
- SHI Linrong, WU Jianmin, ZHAO Wuyun, et al. Establishment and parameter verification of farmland soil model in uniaxial compression based on discrete element method[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(4): 174 – 182. (in Chinese)
- 20 BUDYNAS R G, NISBETT J K. Shigley's mechanical engineering design[M]. Columbus, OH: McGraw-Hill, 2012.
- 21 BHARADWAJ R, KETTERHAGEN W R, HANCOCK B C. Discrete element simulation study of a freeman powder rheometer[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(21): 5747 – 5756.
- 22 南京水利科学研究所土工研究所. 土工试验技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- 23 DAS B M. Advanced soil mechanics[M]. 2nd ed. Washington D C: Taylor & Francis, 1997.
- 24 UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modeling of tillage: determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil[J]. Biosystems Engineering, 2014, 121: 105 – 117.
- 25 BOAC J M, CASADA M E, MAGHIRANG R G, et al. Material and interaction properties of selected grains and oil seeds for modeling discrete particles[J]. Transactions of the ASABE, 2010, 53(4): 1201 – 1216.
- 26 贾富国, 韩燕龙, 刘扬, 等. 稻谷颗粒物料堆积角模拟预测方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 254 – 260.
- JIA Fuguo, HAN Yanlong, LIU Yang, et al. Simulation prediction method of repose angle for rice particle materials[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(11): 254 – 260. (in Chinese)
- 27 王金武, 王奇, 唐汉, 等. 水稻秸秆深埋整秆还田装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 112 – 117. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150916&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.016.
- WANG Jinwu, WANG Qi, TANG Han, et al. Design and experiment of rice straw deep buried and whole straw returning device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 112 – 117. (in Chinese)
- 28 BARRIOS G K P, CARVALHO R M D, KWADE A, et al. Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling[J]. Powder Technology, 2013, 248(2): 84 – 93.
- ~~~~~

(上接第 83 页)

- 18 KHALID A, AL-GAADI K A. Performance evaluation of a cup-belt potato planter at different operation conditions and tuber shapes[J]. American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences, 2011, 10(5): 821 – 828.
- 19 政东红, 陈伟, 杜文亮, 等. 勺式排种技术及其排种均匀性的研究分析[J]. 农机化研究, 2016, 38(7): 106 – 109.
- ZHENG Donghong, CHEN Wei, DU Wenliang, et al. The study and analysis of cup seed sowing technology and uniformity[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(7): 106 – 109. (in Chinese)
- 20 王泽明. 勺式马铃薯播种机排种器的设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
- 21 王徐建, 宋建农, 刘彩玲, 等. 甘草倾斜移栽开沟器的设计与试验[J/OL]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 16 – 23. http://www.tcsae.org/nygcxb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161303&flag=1. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.13.003.
- WANG Xujian, SONG Jiannong, LIU Cailing, et al. Design and experiment on licorice tilt transplanting furrow opener[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13): 16 – 23. (in Chinese)
- 22 岳群, 蒋金琳, 战长龄, 等. 小型多功能马铃薯种植机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2015, 37(10): 128 – 131.
- YUE Qun, JIANG Jinlin, ZHAN Changling, et al. Design and test of multifunctional small potato planting machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(10): 128 – 131. (in Chinese)
- 23 陈强, 韩文贺, 王国红, 等. 春马铃薯膜上覆土技术的应用研究[J]. 农学学报, 2015, 5(1): 1 – 4.
- CHEN Qiang, HAN Wenhe, WANG Guohong, et al. Application research of covering soil over membrane technology of spring potato cultivation[J]. Journal of Agriculture, 2015, 5(1): 1 – 4. (in Chinese)
- 24 徐余伟. 橡胶工业螺旋输送机设计参数的选择和确定[J]. 橡塑技术与装备, 2008, 34(10): 52 – 58.
- XU Yuwei. The choice and decision of design parameters for screw conveyor for rubber industry[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2008, 34(10): 52 – 58. (in Chinese)
- 25 李强, 刘国彬, 许明祥, 等. 黄土丘陵地撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质[J/OL]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 153 – 159. http://www.tcsae.org/nygcxb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131021&flag=1. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.10.021.
- LI Qiang, LIU Guobin, XU Mingxiang, et al. Soil anti-scourability and its related physical properties on abandoned land in the Hilly Loess Plateau[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 153 – 159. (in Chinese)
- 26 GB/T 6242—2006 种植机械 马铃薯种植机 试验方法[S]. 2006.