doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.011

全膜双垄沟双幅覆膜覆土联合作业机设计与试验

戴　飞[1]　张仕林[1]　宋学锋[1]　赵武云[1]　马海军[2]　张锋伟[1]

(1. 甘肃农业大学机电工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃洮河拖拉机制造有限公司, 定西 730500)

摘要: 为进一步提升全膜双垄沟覆膜种床机械化耕整作业效果与作业效率,基于全膜双垄沟种床双幅覆膜覆土农艺技术栽培模式,设计全膜双垄沟双幅覆膜覆土联合作业机,实现了全膜双垄沟种床构建过程中的旋耕、起垄、施肥、双幅覆膜覆土及镇压的一体化作业。在设定联合作业机传动系统的前提下,对样机关键部件进行设计与选型,确定其旋耕刀组、排肥装置、提土-种床覆土装置的工作参数与功耗,同时解析了刮板式提土装置、水平双向螺旋输土装置作业过程,得到满足双幅覆膜种床各部位覆土的必要条件。应用离散单元法对提土-种床覆土装置"提土-输土-覆土"动态作业过程进行数值模拟,分析了各工作环节输土、覆土特性,对影响覆土作业效果的相关因素进行了探讨。田间试验结果表明,当全膜双垄沟双幅覆膜覆土联合作业机前进速度为 1.10 m/s 时,采光面地膜机械破损程度为 39.8 mm/m^2、种床膜边覆土宽度合格率为 94.5%、大垄垄体中心覆土宽度合格率为 91.6%、种床覆土厚度合格率为 97.5%、种床起垄高度合格率为 93.2%,试验指标均符合国家与行业标准要求,试验结果满足设计和实际作业要求,田间试验工况与仿真结果基本一致。

关键词: 全膜双垄沟; 双幅覆膜覆土; 联合作业机

中图分类号: S223.2$^+$4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)05-0108-10　　**OSID**:

Design and Test of Combined Operation Machine for Double Width Filming and Covering Soil on Double Ridges

DAI Fei[1]　ZHANG Shilin[1]　SONG Xuefeng[1]　ZHAO Wuyun[1]　MA Haijun[2]　ZHANG Fengwei[1]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *China*
2. *Gansu Tao River Tractor Manufacturing Co., Ltd., Dingxi* 730500, *China*)

Abstract: Whole plastic mulching and furrow planting has been widely adopted as a drought resistant cultivation model in the northwest arid area of China in recent years. For further integration agronomic requirement of cultivation pattern of double width filming and covering soil on double ridges and improving the level of mechanization construction performance and efficiency of seedbed, a combined operation machine for double width filming and covering soil on double ridges was designed, which synchronously realized institutional operation once such as rotary tillage, ridging, fertilization, double width filming and covering soil and suppressing on double ridges. Based on the transmission route of combined operation machine, the key parts were designed and selected, and the operation parameters and power dissipation of rotary blades, fertilizing device and soil elevating-seedbed covering mechanism were determined. The operation process of scraper type soil lifting device and horizontal two-way spiral soil conveyer were analyzed, and the necessary work conditions to make sure that the covering soil on the all parts of double width filming seedbed were analyzed and calculated. The discrete element method was applied to simulate the device with soil elevating-seedbed covering mechanism dynamic operation process of soil elevating, transporting and covering. The characteristics of soil transporting and covering in each working link were analyzed, the related factors that affected the effect of covering soil were discussed. The field experimental results showed that under the condition of operation speed of 1.10 m/s, the

收稿日期: 2019-09-26　修回日期: 2019-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775115、51405086)、甘肃农业大学伏羲青年英才培养计划项目(GAUFX-03Y12)和现代农业产业技术体系专项(CARS-14-1-28)

作者简介: 戴飞(1987—),男,副教授,主要从事西北旱区膜土-机器-植物互作系统研究,E-mail: daifei@gsau.edu.cn

通信作者: 赵武云(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事北方旱区作物生产装备工程研究,E-mail: zhaowy@gsau.edu.cn

mechanical damage degree of day lighting surface of plastic film was 39.8 mm/m^2, the qualified rates of soil width covered on seedbed film edge was 94.5%, the qualified rates of soil width covered on center of large ridge was 91.6%, the qualified rates of soil depth covered on seedbed was 97.5% and the qualified rates of ridging height was 93.2%, which were up to the relevant work quality evaluation specification requirements, and the experimental results met the design requirements of combined operation machine. The field test conditions was consistent with the simulation result. The research results would provide an important reference for researching and developing the supporting agricultural machinery equipment which constructed seedbed of whole plastic-film mulching on double ridges in northwest arid area of China.

Key words: whole plastic-film mulching on double ridges; double width filming and covering soil; combined operation machine

0　引言

旱地全膜双垄沟播技术是近年来我国西北地区旱作农业的一项创新技术，具有“蓄水保墒、覆盖抑蒸、膜面集雨”的功能与特点。近 10 年来，该技术每年平均推广面积保持在 8.87×10^5 hm^2 以上，从 2014 年起每年应用面积均超过 1.0×10^6 hm^2[1]。该技术主要针对玉米生产种植而提出，要求先完成种床相关大小垄体与垄沟的耕整、覆膜和覆土准备，然后在小垄垄沟内开展膜上播种作业[2]。在黄土高原雨养农业区，多年的高强度耕作和降水时空分布不均衡导致耕地土壤肥力衰退、土地承载力下降，而全膜双垄沟播技术在一定程度上改善了旱作农田土壤水分环境，在旱地农业生产中发挥了至关重要的作用[3-4]。

目前，全膜双垄沟覆膜种床机械化构建中普遍以小垄垄体为中心基准，用宽度为 1 200 mm 的白色地膜（厚度为 0.01 mm）进行铺设，即整幅地膜覆盖小垄整体与其两侧垄沟，并分别均等向两侧各 1/2 大垄垄体延伸，进行覆膜作业，同时在覆膜机覆土侧流槽、直流槽及镇压轮的共同配合下完成两侧膜边、垄沟内的覆土镇压[2,5]。当二次覆膜作业时，其左侧 1/2 大垄垄体覆土膜边正好与上一组右侧大垄垄体覆土膜边对接，并在覆膜土带的连接下完成了大垄垄体的全膜覆盖。采用现有覆膜种床机械化构建模式，对其作业地况规整度、配套装备性能及农机手操作水平要求相对较高，尤其是大垄垄体膜边的对接覆土。当大垄垄体接缝处、小垄垄沟覆盖土壤不足时，双垄覆膜种床基准定位不稳，在外界风力、地表形貌的干涉作用下容易出现种床沟垄覆盖地膜滑移、翻接与撕裂现象，这将对后续机械化膜上播种质量产生影响；当覆盖土壤过量时，全膜双垄沟生产系统覆盖地膜有效采光面积减小，导致种床对于太阳辐射的吸收能力减弱，使其膜面集雨功能丧失[6-8]。因此，为缓解现有覆膜种床机械化构建模式存在的问题，提高全膜双垄沟机械化作业效率，笔者提出了全膜双垄沟种床双幅覆膜覆土机械化作业模式。

国内设计的 1MLQS-40/70 型起垄全铺膜联合作业机、双垄耕作施肥喷药覆膜机和横腰带覆土式全膜双垄沟覆膜联合作业机等多款机具，对其关键部件与作业性能的优化改进均以小垄垄体为中心基准，进行种床的单覆膜作业[5,9-10]。为进一步提升全膜双垄沟全程机械化作业水平，在结合种床双覆膜覆土作业模式，应用课题组针对全膜双垄沟覆膜种床提出的覆土量理论分析计算方法的基础上[5]，设计全膜双垄沟双幅覆膜覆土联合作业机，以期一次性完成旋耕、施肥、喷药、种床大小垄体双幅覆膜覆土、镇压等，为西北旱区铺膜覆土耕作装备的研发提供参考。

1　整机结构与工作原理

1.1　整机结构

全膜双垄沟双幅覆膜覆土联合作业机主要由旋耕开沟起垄装置、施肥系统、刮板式提土装置、螺旋输土装置、覆土装置、覆膜装置、仿形镇压装置及动力传动系统等组成，其结构如图 1 所示。其中，旋耕开沟起垄装置主要由双螺旋旋耕刀组、中置开沟铲和侧置开沟铲组成；覆膜装置由挂膜架和展膜辊组成；仿形镇压装置则由膜边覆土带镇压轮、大垄垄体中心覆土带镇压轮、垄沟镇压打孔轮和平行四杆仿形机构组成。

1.2　传动系统与工作原理

全膜双垄沟双幅覆膜覆土联合作业机传动系统原理如图 2 所示。联合作业机动力通过联轴器将拖拉机动力后输出轴与变速箱相连接，动力通过变速箱左右一对锥齿轮分别传递至旋耕刀组与右侧传动链上，使得旋耕刀组高速切削土壤抛送至刮板式提土装置，并在链传动作用下左右两组刮板式提土装置顺时针转动。后置螺旋输土装置与刮板式提土装置也依靠链传动转动，将提升土壤进行横轴向输送，

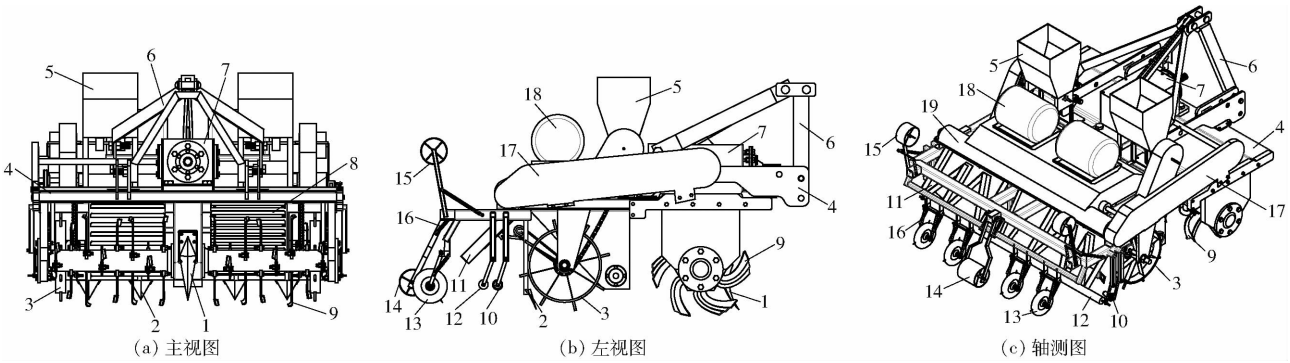


图 1 全膜双垄沟双幅覆膜覆土联合作业机结构简图

Fig. 1 Structure diagrams of combined operation machine for double width filming and covering soil on double ridges

1. 中置开沟铲 2. 侧置开沟铲 3. 地轮 4. 机架 5. 肥箱 6. 悬挂架 7. 变速箱 8. 刮板式提土装置 9. 旋耕刀组 10. 挂膜架 11. V 型槽覆土装置 12. 展膜辊 13. 垄沟镇压打孔轮 14. 大垄垄体中心覆土带镇压轮 15. 膜边覆土带镇压轮 16. 平行四杆仿形机构 17. 传动系统 18. 药液箱 19. 双向螺旋输土装置

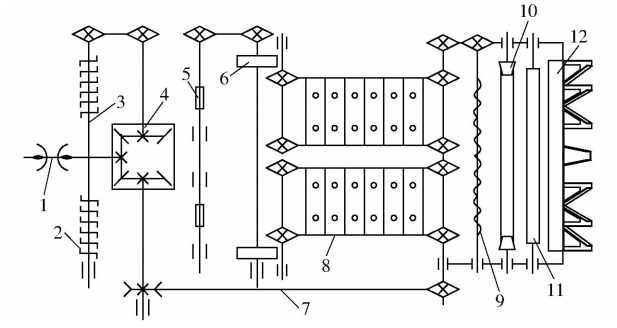


图 2 联合作业机传动系统原理图

Fig. 2 Schematic of transmission system

1. 联轴器 2. 旋耕刀组 3. 刀轴 4. 变速箱 5. 排肥装置 6. 地轮 7. 链传动 8. 刮板式提土装置 9. 螺旋输土装置 10. 挂膜架 11. 展膜辊 12. 覆土装置

并在覆土装置配置的 V 型溜土槽的辅助作用下完成覆土作业。与此同时,随着联合作业机前进,地轮转动带动排肥装置作业,挂膜架上挂接地膜在展膜辊的转动作用下完成协同覆膜作业。

联合作业机在田间作业时采用四轮拖拉机后置三点悬挂方式,将拖拉机动力输入至变速箱并传动旋耕刀轴带动旋耕刀组将种床土壤旋切疏松并在中置开沟铲与侧置开沟铲的共同作用下完成对旋耕种床的开沟起垄;两侧肥料箱内的排肥器在地轮转动带动下完成小垄两侧垄沟内施肥,且在喷药装置的作用下向种床大小垄面进行药剂喷施;而地膜随覆膜挂接装置同步转动,在展膜辊的辅助下均匀覆膜。此时,旋耕刀组高速旋切将土壤抛送至刮板式提土装置并后输至双向螺旋输土装置,在正、反转旋向输土装置的作用下将土壤推送至 5 个出土口,通过 V 型槽覆土装置对输送土壤进行适量分流,完成在大垄垄体中心、小垄两侧垄沟内覆土作业,且在平行四杆仿形机构、大垄垄体中心覆土带镇压轮和膜边覆土带镇压轮的共同配合下完成对覆膜种床的镇压作业。

1.3 主要技术指标

全膜双垄沟种床双幅覆膜覆土农艺技术栽培模式及其技术参数如图 3 所示。联合作业机在种床机械化铺设时以中间大垄为基准,一次性可实现中间大垄、两侧小垄及其左右各 1/2 大垄的构建,用两幅幅宽为 1 200 mm、厚度为 0.01 mm 的白色地膜进行铺设,在 7 条覆土带的共同作用下完成全膜双垄沟双幅覆膜种床的构建。其中,种床大垄与小垄的总宽度为 2 200 mm,大垄宽度为 700 mm,高度为 100 ~ 150 mm,小垄宽度为 400 mm,高度为 150 ~ 200 mm,要求地膜全域覆盖并在垄沟内播种,播种深度为 30 ~ 50 mm,株距根据不同地区年降水量来衡量,一般为 330 ~ 400 mm。

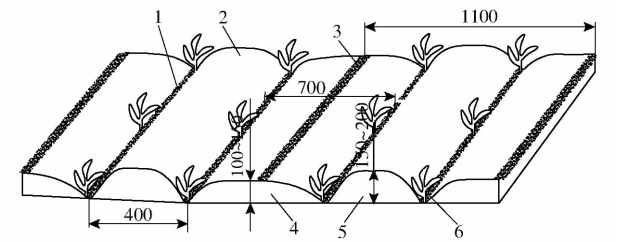


图 3 全膜双垄沟种床双幅覆膜覆土农艺技术栽培模式

Fig. 3 Cultivation pattern of double width filming and covering soil on double ridges

1. 垄沟覆土带 2. 覆盖地膜 3. 大垄垄体中心覆土带 4. 大垄垄体 5. 小垄垄体 6. 沟播作物

结合全膜双垄沟种床双幅覆膜覆土农艺技术栽培模式及联合作业机结构、动力设计,样机技术参数如表 1 所示。

2 关键部件设计与参数确定

2.1 旋耕刀组

全膜双垄沟双幅覆膜覆土联合作业机旋耕刀组结构如图 4 所示,主要由左刀轴、右刀轴、40 把旋耕刀及配套刀座组成。旋耕刀组除了能够高速切削种

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)/(mm×mm×mm)	2 310×2 830×1 130
配套动力/kW	44.1
整机质量/kg	536
工作幅宽/mm	2 200
施肥行数	2
作业速度/(km·h^{-1})	2.80～5.00
施肥深度/mm	70～90
旋耕深度/mm	80～120
起垄高度/mm	150～200/100～150
起垄宽度/mm	400/700
挂接地膜幅宽/mm	1 200
挂接地膜厚度/mm	0.01
挂接地膜幅数	2
膜边覆土宽度/mm	90～110
垄沟覆土宽度/mm	35～45
大垄垄体中心覆土宽度/mm	180～200
覆土厚度/mm	20～30
生产率/(hm^2·h^{-1})	0.56～0.80

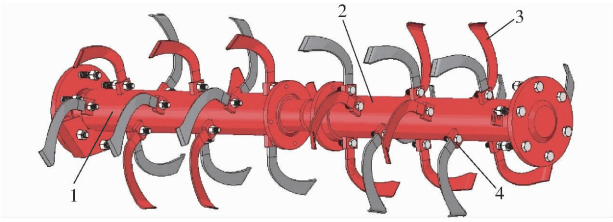


图 4　旋耕刀组结构图

Fig. 4　Structure diagram of rotary blades

1. 左刀轴　2. 右刀轴　3. 旋耕刀片　4. 刀座

床土壤外，还需要分别以左、右刀轴各自为单元体，将土壤由刀轴两侧往中间推送以形成大小垄体。

旋耕刀在左、右刀轴上呈双螺旋线排列，为保证刀轴旋转时的平衡与起垄特性，左刀轴上左边的 10 把旋耕刀排列成右旋，右边的 10 把旋耕刀排列成左旋，右刀轴上旋耕刀排列与左刀轴相同，确保耕作时旋耕刀组同时起到抛切土壤与推送土壤起垄的双重作用。

旋耕刀组在作业过程中主要实现入土、翻土、推送、抛掷等作业工序，因此，联合作业机大部分功率主要消耗在该装置中。为保证在耕整、覆膜、覆土各个工段运行平稳，确保作业机配套动力合理，需要对旋耕刀组功耗进行近似估算[11]

$$P_1 = \frac{K_\lambda v_1 b d}{1\,000} \tag{1}$$

其中　　$b = 2b_1 + 2b_2$

式中　P_1——旋耕刀组功耗，kW

K_λ——旋耕比阻，取 0.063 N/mm^2[12]

v_1——联合作业机前进速度，取 1.10 m/s

b——旋耕刀组耕作宽度，mm

d——旋耕深度，取 100 mm

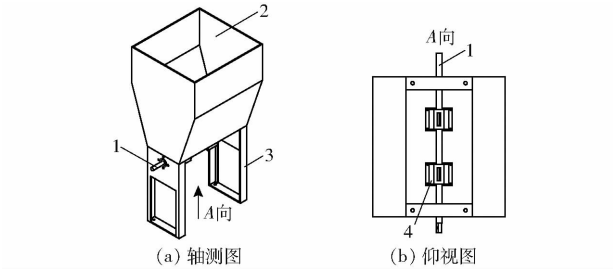
b_1——大垄垄体宽度，依照全膜双垄沟播农艺栽培模式(图 3)取 700 mm

b_2——小垄垄体宽度，依照全膜双垄沟播农艺栽培模式(图 3)取 400 mm

由式(1)计算分别得出：b = 2 200 mm；P_1 = 15.25 kW。

2.2　排肥装置

联合作业机排肥装置结构如图 5 所示，由两组肥料箱和与其对应的外槽轮式排肥器等部件组成，固定安装于机架上，肥料箱下置外槽轮式排肥器，依靠地轮转动带动，完成小垄两侧垄沟内施肥。



(a) 轴测图　(b) 仰视图

图 5　排肥装置结构图

Fig. 5　Structure diagrams of fertilizing device

1. 排肥轴　2. 肥料箱　3. 机架　4. 外槽轮式排肥器

根据全膜双垄沟种床双幅覆膜覆土农艺技术栽培模式，排肥装置单个肥料箱作业幅宽 B_1 为 400 mm，则单个肥料箱的容积为[11]

$$C = \frac{1.1 L_1 B_1 Q_{\max}}{10\,000 \gamma_1} \tag{2}$$

式中　C——单个肥料箱总容积，L

L_1——肥料箱所装肥料满足的施肥距离，设定为 1 000 m

γ_1——颗粒肥料密度，约为 1.33 kg/L[13]

$Q_{\max}$——单位面积最大施肥量，本文取 378 kg/hm^2[14]

由式(2)计算可得 C = 12.50 L，结合该容积参数进行肥料箱设计。

2.3　提土-种床覆土装置

2.3.1　结构组成

提土-种床覆土装置是全膜双垄沟双幅覆膜覆土联合作业机关键工作部件，主要由刮板式提土装置、双向螺旋输土装置、V 型槽覆土装置、罩壳及传统系统组成，具体结构组成如图 6 所示。

提土-种床覆土装置输送土壤多少对于覆膜种床机械化构建至关重要，同时刮板式提土装置线速度及其结构参数、双向螺旋输土装置转速及其结构参数均是影响输送土壤质量的关键工作参数，为进

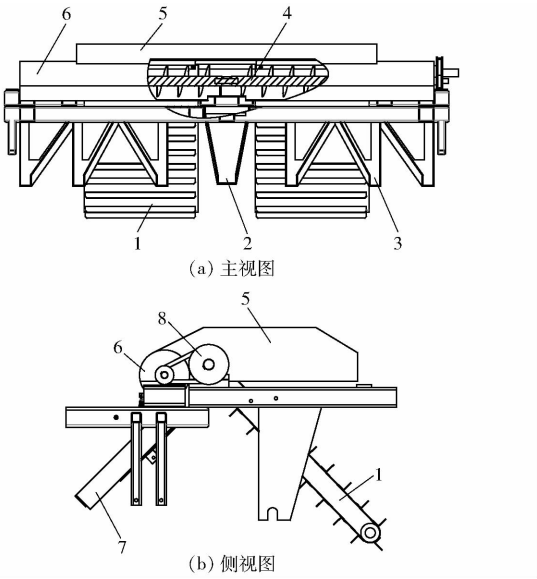


图 6 提土-种床覆土装置结构图

Fig. 6 Structure diagrams of soil elevating - seedbed covering mechanism

1. 刮板式提土装置 2. 中置溜土槽 3. 侧置溜土槽 4. 双向螺旋输土装置 5. 提土罩壳 6. 输土罩壳 7. V 型槽覆土装置 8. 传动链

一步提升提土-种床覆土装置作业性能,需要进行理论分析与计算确定。

2.3.2 覆膜种床覆土量

依据全膜双垄沟种床双幅覆膜覆土农艺技术栽培模式,提土-种床覆土装置作业过程如图 7 所示。

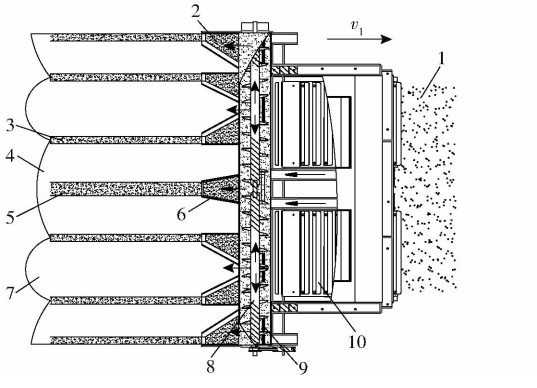


图 7 提土-种床覆土装置作业过程示意图

Fig. 7 Schematic of soil elevating - seedbed covering mechanism operation process

1. 大田土壤 2. 侧置溜土槽 3. 垄沟覆土带 4. 大垄垄体 5. 大垄垄体中心覆土带 6. 中置溜土槽 7. 小垄垄体 8. 水平双向螺旋输土装置 9. 溜土口 10. 刮板式提土装置

种床覆膜土壤在两组刮板式提土装置的升运下进入水平双向螺旋输土装置,在正、反旋向螺旋叶片的推送作用下覆膜土壤从 5 个溜土口排出,并在设有 7 组溜土槽覆土装置的导流作用下在覆膜种床上形成 7 条覆土带,其中包括 1 条大垄垄体中心覆土带、4 条垄沟覆土带和 2 条膜边覆土带,对长度为 1 000 mm 的全膜双垄沟覆膜种床各位置覆土量进行计算。

覆膜种床 4 条垄沟覆土带各自的覆土量为[5]

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = \gamma l_1 B_2 H \tag{3}$$

式中 γ——土壤(黄绵土)容重,参照文献[15-16]取1 300 kg/m^3

l_1——全膜双垄沟覆膜种床长度,取 1 000 mm

B_2——垄沟覆土宽度,取 40 mm

H——覆土厚度,取 25 mm

由式(3)计算可得 $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = 1.30$ kg。

覆膜种床 2 条膜边覆土带各自的覆土量

$$Q_5 = Q_6 = \gamma l_1 B_3 H \tag{4}$$

式中 B_3——膜边覆土宽度,取 100 mm

由式(4)计算可得 $Q_5 = Q_6 = 3.25$ kg。

覆膜种床 1 条大垄垄体中心覆土带的覆土量

$$Q_7 = \gamma l_1 B_4 H \tag{5}$$

式中 B_4——大垄垄体中心覆土宽度,取 190 mm

由式(5)计算可得 $Q_7 = 6.18$ kg。

则长度为 1 000 mm 的全膜双垄沟覆膜种床各位置总体覆土量为

$$Q = 4Q_1 + 2Q_5 + Q_7 \tag{6}$$

由式(6)计算可得 $Q = 17.88$ kg。

2.3.3 刮板式提土装置

如图 8 所示,刮板式提土装置主要由传动轴、升运链板和土壤升运刮板等组成。其中,升运链板长度为 3 200 mm,宽度为 600 mm,刮板式提土装置下端部离地面高度为 260 mm,其与地面的倾斜夹角 β 为 40°(图 8b)。

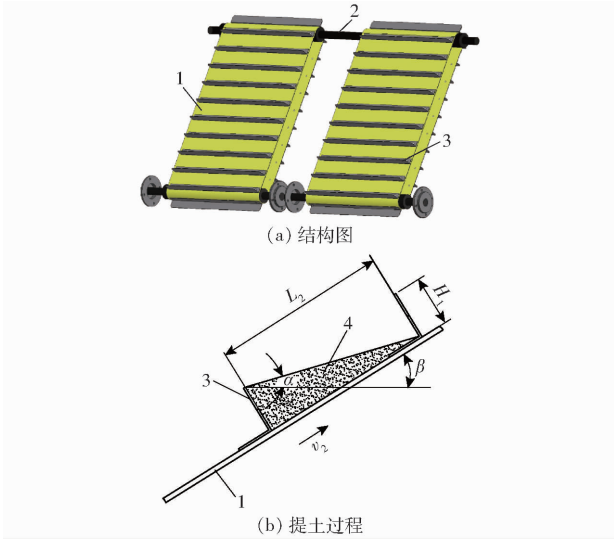


图 8 刮板式提土装置

Fig. 8 Scraper type of soil lifting device

1. 升运链板 2. 传动轴 3. 土壤升运刮板 4. 升运土壤

由图 8a 可以看出，作业机左右两组刮板式提土装置确保了双覆膜种床的所有覆土量，则刮板式提土装置的倾斜提升线速度为[5,11]

$$v_2 = \frac{Q_8}{tB_5H_1\gamma\varphi k} \tag{7}$$

其中　$Q_8 = \frac{Q}{2}$　　$t = \frac{l_1}{v_1}$

式中　Q_8——左侧刮板式提土装置覆土量，kg

B_5——升运链板宽度，为 0.60 m

H_1——升运链板高度，为 0.03 m

φ——刮板式输送器填充系数，为倾斜升运，取 0.92[11]

k——倾斜系数，刮板式输送器倾斜角为 40°，查表取 0.43[11]

t——覆膜机铺设长度为 l_1 所需时间，s

由式(7)计算可得 $Q_8 = 8.94$ kg，$t = 0.91$ s，$v_2 = 1.06$ m/s。

则左侧刮板式提土装置所需功率为[11]

$$P_2 = Q_9(LW + H_2)/102 \tag{8}$$

其中　$Q_9 = \frac{Q_8}{t}$

式中　P_2——左侧刮板式提土装置所需功率，kW

Q_9——左侧刮板式提土装置升运量，kg/s

L——左侧刮板式提土装置水平投影长度，为 1.15 m

H_2——左侧刮板式提土装置垂直高度，为 0.96 m

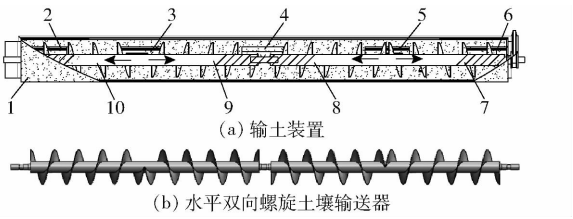
W——左侧刮板式提土装置运动阻力系数，取 1.04[11]

由式(8)计算可得 $Q_9 = 9.82$ kg，$P_2 = 0.21$ kW；因此作业机刮板式提土装置所需总功率为 0.42 kW。

2.3.4　水平双向螺旋输土装置

如图 9 所示，水平双向螺旋输土装置主要由覆土罩壳、各位置排土口和水平双向螺旋土壤输送器等组成。其中，水平双向螺旋土壤输送器由左、右两部分构成，左、右两部分均由两段旋向相反的转动轴组成(图 9b)，每段长度相等(均为 0.55 m)。当水平双向螺旋输土装置转动作业时，在水平双向螺旋土壤输送器左右两侧 4 段顺、逆时针旋向转动轴作用下将刮板式提土装置升运的土壤进行轴向输送，并在土壤自身重力的作用下沿各位置排土口落下[17]。

当水平双向螺旋输土装置转速一定，刮板式提土装置提土量达到 $Q_z = 70\,704$ kg/h 时，全膜双垄沟双幅覆膜覆土种床才会满足相关农艺技术要求，通



(a) 输土装置

(b) 水平双向螺旋土壤输送器

图 9　水平双向螺旋输土装置结构图

Fig. 9　Structure diagrams of horizontal two-way spiral soil conveyer

1. 输土罩壳　2. 左侧排土口 1　3. 左侧排土口 2　4. 中置排土口　5. 右侧排土口 1　6. 右侧排土口 2　7. 右段逆时针转轴　8. 右段顺时针转轴　9. 左段逆时针转轴　10. 左段顺时针转轴

常在不考虑土壤轴向阻滞影响的情况下，水平双向螺旋输土装置转速为[18]

$$n = \frac{Q_{10}}{47D_1^2S\varphi_1\lambda\varepsilon} \tag{9}$$

其中　$Q_{10} = \frac{Q_z}{N}$

式中　Q_{10}——水平双向螺旋土壤四分之一长度输送器输土量，kg/h

D_1——水平双向螺旋叶片外径，为 0.20 m

S——水平双向螺旋覆土装置螺距，为 0.13 m

φ_1——水平双向螺旋覆土装置填充系数，查表取 0.5[11]

ε——倾斜输送系数(倾斜角 0°)，为 1[11]

N——水平双向螺旋土壤输送器旋向段数，为 4

由式(9)计算可得 $Q_{10} = 17\,676$ kg/h，$n = 111$ r/min。

则水平双向螺旋输土装置所需功率为[11]

$$P_3 = 4P_4 \tag{10}$$

其中　$P_4 = \frac{Q_9}{204(L_2W_2 + H_3)\eta}$

式中　P_3——水平双向螺旋输土装置所需功率，kW

P_4——四分之一长度水平双向螺旋输土装置所需功率，kW

L_2——水平双向螺旋输土装置水平投影四分之一长度，为 0.55 m

H_3——输送土壤提升高度，为 0 m

W_2——土壤沿外壳移动阻力系数，取 1.20

η——修正系数，倾斜角小于 20°，取 1[11]

由式(10)计算可得 $P_3 = 0.28$ kW，$P_4 = 0.07$ kW。

3　种床覆土作业过程仿真

3.1　仿真参数设定

提土-种床覆土装置作业过程是其刮板式提土装置倾斜升运覆膜土壤与水平双向螺旋输土装置横向推送土壤的过程协同与互作耦合。为进一步动态

观察和验证对提土-种床覆土装置的结构设计及其覆土机理研究的正确性,探明其“提土、输土、覆土”动态工作特性,采用离散单元法对装置种床覆土作业过程进行数值仿真,覆土土壤颗粒选取球体颗粒建模,其直径设定为 3 mm,土壤颗粒-土壤颗粒、土壤颗粒-升运链板、土壤颗粒-水平双向螺旋土壤输送器、罩壳壁面接触模型选择 Hertz - Mindlin(no-slip),相关仿真试验参数设置如表 2 所示[19-21]。

表 2 物性及接触参数

Tab. 2 Parameters of materials and contact

项目	参数	数值
土壤颗粒	泊松比	0.4
	剪切模量/Pa	1.0×10^{6}
	密度/(kg·m^{-3})	1 364
刮板、壁面	泊松比	0.28
	剪切模量/Pa	3.5×10^{10}
	密度/(kg·m^{-3})	7 850
土壤颗粒-土壤颗粒	恢复系数	0.21
	静摩擦因数	0.68
	动摩擦因数	0.27
土壤颗粒-链板、螺旋输送器、壁面	恢复系数	0.54
	静摩擦因数	0.68
	动摩擦因数	0.13

仿真时间步长 1.405×10^{-5} s,是瑞利时间步的 40%,仿真共进行 2.5 s。根据全膜双垄沟双幅覆膜种床提土-种床覆土装置结构设计与组成,刮板式提土装置单侧刮板为 22 个,两刮板间距离设置为 152 mm,链板运动通过 EDEM 软件中 coupling server 面板,由动力学耦合来控制,依据相关装置作业参数计算,刮板式提土装置线速度设置为 1.10 m/s。在 Geometry 面板给水平双向螺旋输土装置添加线性旋转运动,将其转速设置为 110 r/min。设置的颗粒工厂是 400 mm × 600 mm 的长方形平面,单侧颗粒工厂每秒生成土壤颗粒数为 2.90×10^{7} 个。

3.2 双幅覆膜种床覆土过程数值模拟

如图 10 所示,在双幅覆膜模式下对提土-种床覆土装置在仿真时间 2.5 s 内的种床覆土作业过程进行数值模拟,解析土壤进入装置后的运动路径与迁移规律,以进一步优化装置结构设计。

在双幅覆膜种床覆土数值模拟过程中,当 t = 0.45 s 时(图 10a)覆膜土壤颗粒基本将刮板式提土装置足量填充,并倾斜升运即将进入水平双向螺旋输土装置;t = 0.60 s 时(图 10b)水平双向螺旋土壤输送器左右两侧 4 段顺、逆时针旋向转动轴作用下将刮板式提土装置升运土壤进行横向输送,靠近刮板式提土装置的螺旋土壤输送器部分能够快速将土壤分配至 4 组垄沟覆土溜土槽,使其在 t = 0.75 s 时(图 10c)已经开始出现少量、不连续的土壤颗粒流;当 0.90 ~ 1.05 s 时(图 10d、10e)上述溜土槽覆土土壤逐步形成连贯的颗粒流,且土壤颗粒流量逐渐增大,而离刮板式提土装置相对较远的大垄垄体中心覆土溜土槽和 2 组膜边覆土溜土槽也有少量土壤颗粒流形成;从 t = 1.35 s 开始(图 10f)水平双向螺旋输土装置趋于稳定的覆土横向输送状态,膜面形成了 7 条覆土带;由 1.95 ~ 2.30 s(图 10g、10h)结果可以看出,4 组垄沟覆土带由于土壤颗粒轴向传输路

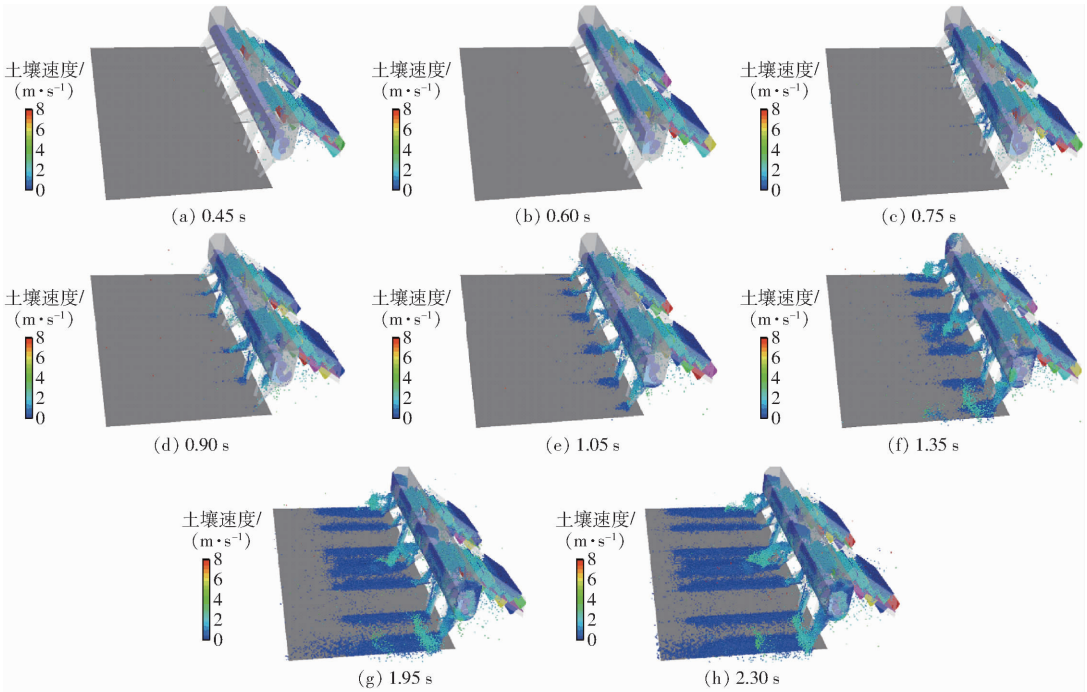


图 10 双幅覆膜种床覆土过程数值模拟结果

Fig. 10 Numerical simulation results of covering soil operation process on double width filming seedbed

径较短呈“幕帘状”均匀下落，而大垄垄体中心覆土带和 2 组膜边覆土带土壤颗粒由于较长路径的轴向旋转推送，使得其转动惯量较大而在覆土作业过程中出现了泼撒和跳跃现象（如图 11 红色方框标记所示），使得种床覆土效果受到一定的影响，导致大垄垄体中心及 2 组膜边覆土带的覆土厚度、宽度变异不稳定，给后续覆膜土带的有效镇压带来难度。同时，泼撒跳跃的覆土作业方式降低了覆膜种床的有效采光面积，且不利于对覆盖地膜的附着固定，最终引起全膜双垄沟覆膜种床机械化构建失效。

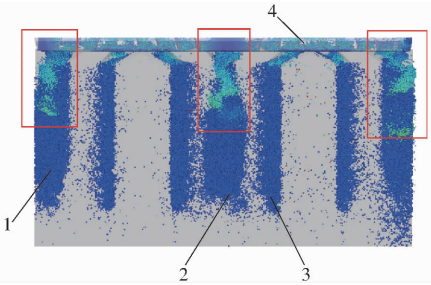


图 11　种床覆土作业效果模拟

Fig. 11　Simulation operation effect of covering soil on seedbed

1. 膜边覆土带　2. 大垄垄体中心覆土带　3. 垄沟覆土带　4. 水平双向螺旋输土装置

4　田间试验与结果分析

4.1　试验条件与方法

2018 年 10 月，在甘肃省洮河拖拉机制造有限公司-甘肃农业大学临洮旱作农机装备专家大院试验田进行了全膜双垄沟双幅覆膜覆土联合作业机田间工作性能试验，如图 12 所示。试验地面积为 0.60 hm^2，土壤为黄绵土，土壤含水率为 14.9% ~ 16.1%，土壤容重为 1 300 kg/m^3，土壤坚实度小于 0.16 MPa，田面平整。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，在覆膜挂接装置上安装白色卷状地膜（厚度为 0.01 mm），并牵拉至展膜辊下贴地铺平，作业机配套动力为 44.1 kW洮河-604 型轮式拖拉机，试验前进速度为 1.10 m/s[5]。



图 12　联合机作业田间性能试验

Fig. 12　Field performance test of combined machine

试验按照 NY/T 986—2006《铺膜机作业质量》、DB62/T 1935—2010《全膜双垄沟铺膜机操作规程及作业质量验收》、DB62/T 1934—2010《全膜双垄沟玉米机械化作业技术规范》要求，计算测定全膜双垄沟双幅覆膜覆土联合作业机田间工作后采光面地膜机械破损程度、种床膜边覆土宽度合格率、大垄垄体中心覆土宽度合格率、种床覆土厚度合格率和种床起垄高度合格率。同时考察联合作业机旋耕起垄装置、排肥系统、种床覆膜装置、刮板式提土装置及水平双向螺旋输土装置的工作运转情况[22-25]。

其中，大垄垄体中心覆土宽度合格率的测定方法为：随机选取测定点 30 个，在每个测定点上测定大垄垄体中心覆土带宽度，其中宽度 180 ~ 200 mm 为合格点。大垄垄体中心覆土宽度合格率计算式为

$$Y_1 = \frac{m_1}{m_0} \times 100\% \tag{11}$$

式中　m_0——总测定点数

m_1——大垄垄体中心覆土宽度合格点数

其余试验指标：采光面地膜机械破损程度、种床膜边覆土宽度合格率、种床覆土厚度合格率和种床起垄高度合格率，测定方法均与文献[5]相同。

4.2　试验结果与分析

在测定全膜双垄沟双幅覆膜覆土联合作业机作业性能指标的同时，与课题组研制的横腰带覆土式全膜双垄沟覆膜联合作业机进行了对比试验。后者覆膜模式为单幅覆膜（覆膜宽度 1 200 mm），田间试验结果见表 3 所示，全膜双垄沟双幅覆膜覆土种床构建效果如图 13 所示。由试验结果可得，全膜双垄沟双幅覆膜覆土联合作业机工作后相关采光面地膜机械破损程度为 39.8 mm/m^2、种床膜边覆土宽度合格率为 94.5%、大垄垄体中心覆土宽度合格率为 91.6%、种床覆土厚度合格率为 97.5%、种床起垄高度合格率为 93.2%，试验指标均符合国家与行业相关标准要求，试验结果满足设计和实际作业要求。

表 3　田间试验结果

Tab. 3　Result of field experiment

试验指标	全膜双垄沟双幅覆膜覆土联合作业机	横腰带覆土式全膜双垄沟覆膜联合作业机	标准值
采光面地膜机械破损程度/($mm \cdot m^{-2}$)	39.8	38.6	≤50
种床膜边覆土宽度合格率/%	94.5	95.8	≥90
大垄垄体中心覆土宽度合格率/%	91.6		≥90
种床覆土厚度合格率/%	97.5	95.2	≥90
种床起垄高度合格率/%	93.2	89.8	≥75



图 13 全膜双垄沟双幅覆膜覆土种床构建效果

Fig. 13 Seedbed construction effect of double width filming and covering soil on double ridges

由图 13 可以看出,全膜双垄沟种床各位置覆土带分布形态与仿真分析结果基本一致,表明双幅覆膜种床覆土过程数值模拟的相关参数设置准确、建立模型合理,可在后续研究中探讨不同提土-种床覆土装置工作参数组合对种床机械化覆土作业效果的影响,以期进一步提升其工作性能。

试验过程中发现,联合作业机种床机械化构建作业效率明显,当前进速度适中且耕地较平整时,样机各关键工作部件性能相对稳定,刮板式提土装置与水平双向螺旋输土装置配合,确保在溜土槽覆土装置的导流作用下在覆膜种床上形成 7 条均匀覆土带。与横腰带覆土式全膜双垄沟覆膜联合作业机作业性能相比,除种床膜边覆土宽度合格率略低外,全膜双垄沟双幅覆膜覆土联合作业机其余试验指标均优于对比样机。但由于联合作业机工作幅宽大,当田间地表崎岖不平时,其后置仿形镇压装置容易失效,造成覆盖地膜与种床地表贴合不紧实、垄沟地膜架空等现象。同时,联合作业机前进速度不宜过高,由相关分析计算可以看出联合作业机大部分功率消耗在旋耕刀组部分,需要确保旋耕刀组与田间土壤的充分作用时间,以获取较高质量的种床覆膜土壤,这是两类作业机共有的问题。

5 结论

(1)基于全膜双垄沟种床双幅覆膜覆土农艺技术栽培模式,设计了全膜双垄沟双幅覆膜覆土联合作业机,该机能够一次性完成旋耕、起垄施肥、双幅覆膜覆土、镇压等作业功能。确定了样机传动系统,并对其旋耕刀组、排肥装置、提土-种床覆土装置等重要作业部件进行选型与设计,结合相关作业性能与农艺技术要求,完成了关键工作参数与功耗的分析计算。

(2)应用离散单元法对提土-种床覆土装置“提土-输土-覆土”动态作业过程进行模拟,分析了各作业环节输土、覆土特性,对影响覆土作业效果的因素进行了分析,发现覆膜土壤较长的轴向旋转推送路径和较大的转动惯量是导致水平双向螺旋输土装置在覆土作业过程中出现土壤颗粒流泼撒和跳跃现象的主要原因。

(3)田间试验表明,全膜双垄沟双幅覆膜覆土联合作业机作业后,相关采光面地膜机械破损程度为 39.8 mm/m^2、种床膜边覆土宽度合格率为 94.5%、大垄垄体中心覆土宽度合格率为 91.6%、种床覆土厚度合格率为 97.5%、种床起垄高度合格率为 93.2%。试验指标均符合国家与行业相关标准要求,试验结果满足设计要求,田间试验验证工况与仿真结果基本一致。

参 考 文 献

[1] 戴飞,赵武云,张锋伟,等. 西北雨养区全膜双垄沟播技术与配套机具研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(5):1-16.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, ZHANG Fengwei, et al. Research progress analysis of furrow sowing with whole plastic-film mulching on double ridges technology and machine in northwest rainfed area [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5):1-16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20190501&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.001. (in Chinese)

[2] 戴飞,赵武云,张锋伟,等. 玉米全膜双垄沟残膜回收机作业性能优化与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(18):50-60.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, ZHANG Fengwei, et al. Optimization and experiment of operating performance of collector for corn whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(18): 50-60. (in Chinese)

[3] GAN Y T, KADAMBOT H M S, NEIL C T, et al. Chapter seven-ridge-furrow mulching systems-an innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain-fed environments[J]. Advances in Agronomy, 2013, 118(1): 429-476.

[4] 莫非,周宏,王建永,等. 田间微集雨技术研究及应用[J]. 农业工程学报,2013,29(8):1-17.
MO Fei, ZHOU Hong, WANG Jianyong, et al. Development and application of micro-field rain-harvesting technologies[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8): 1-17. (in Chinese)

[5] 戴飞,赵武云,史瑞杰,等. 横腰带覆土式全膜双垄沟覆膜联合作业机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(6):130-139.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, SHI Ruijie, et al. Design and experiment of operation machine for filming and girdle covering on double ridges[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 130-139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20190614&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.014. (in Chinese)

[6] DONG B D, LIU M Y, JIANG J W, et al. Growth, grain yield, and water use efficiency of rain-fed spring hybridmillet (*Setaria italica*) in plastic-mulched and unmulched fields[J]. Agricultural Water Management, 2014,143: 93-101.

[7] 马忠明,白玉龙,薛亮,等. 不同覆膜栽培方式对旱地土壤水热效应及西瓜产量的影响[J]. 中国农业科学,2015,48(3):514 - 522.
MA Zhongming, BAI Yulong, XUE Liang, et al. Effects of different plastic film mulching methods on soil water and temperature as well as watermelon yield in loess dryland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(3): 514 - 522. (in Chinese)

[8] 王红丽,张绪成,宋尚有,等. 旱地全膜双垄沟播玉米的土壤水热效应及其对产量的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(10):2609 - 2614.
WANG Hongli, ZHANG Xucheng, SONG Shangyou, et al. Effects of whole field-surface plastic mulching and planting in furrow on soil temperature, soil moisture, and corn yield in arid area of Gansu Province, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(10): 2609 - 2614. (in Chinese)

[9] 张勇,安世才,王赟,等. 1MLQS - 40/70 起垄全铺膜联合作业机的改进设计[J]. 中国农机化,2011,32(4):89 - 92.
ZHANG Yong, AN Shicai, WANG Yun, et al. Improved design on the 1MLQS - 40/70 whole film mulching and ridge forming combined machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2011, 32(4): 89 - 92. (in Chinese)

[10] 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.
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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160112&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.012. (in Chinese)

[11] 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.

[12] 姬江涛,贾世通,杜新武,等. 1GZN - 130V1 型旋耕起垄机的设计与研究[J]. 中国农机化学报,2016,37(1):1 - 4,21.
JI Jiangtao, JIA Shitong, DU Xinwu, et al. Design and research of 1GZN - 130V1 rotary cultivation ridger[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(1): 1 - 4, 21. (in Chinese)

[13] 刘彩玲,魏丹,宋建农,等. 颗粒肥料离散元仿真边界参数系统化研究[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(9):82 - 89.
LIU Cailing, WEI Dan, SONG Jiannong, et al. Systematic study on boundary parameters of discrete element simulation of granular fertilizer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9):82 - 89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180909&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.009. (in Chinese)

[14] 徐振峰,刘宏胜,高玉红,等. 密肥互作对全膜双垄沟播玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究,2014,32(2):85 - 90.
XU Zhenfeng, LIU Hongsheng, GAO Yuhong, et al. Effect of density and fertilizer interaction on yield and water use efficiency of maize cultivated by system of full plastic-film mulching on double ridges and planting in catchment furrows[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(2): 85 - 90. (in Chinese)

[15] 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)

[16] 李强,刘国彬,许明祥,等. 黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质[J]. 农业工程学报,2013,29(10):153 - 159.
LI Qiang, LIU Guobin, XU Mingxiang, et al. Soilanti-scouribility and its related physical properties on abandoned land in the Hilly Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10):153 - 159. (in Chinese)

[17] 杨文武,罗锡文,王在满,等. 轮式拖拉机水田轮辙覆土装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(16):26 - 31.
YANG Wenwu, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of track filling assembly mounted on wheeled-tractor for paddy fields[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 26 - 31. (in Chinese)

[18] 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)

[19] 戴飞,宋学锋,赵武云,等. 全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(2):49 - 56,77.
DAI Fei, SONG Xuefeng, ZHAO Wuyun, et al. Simulative calibration on contact parameters of discrete elements for covering soil on whole plastic film mulching on double ridges[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2):49 - 56, 77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20190206&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.006. (in Chinese)

[20] DAI F, GUO W J, SONG X F, et al. Design and test of crosswise belt type whole plastic-film ridging-mulching corn seeder on double ridges[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2019, 12(4): 88 - 96.

[21] UCGUL M, SAUNDERSA C, LI P L, et al. Analyzing the mixing performance of a rotary spader using digital image processing and discrete element modelling (DEM)[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 151: 1 - 10.

[22] DB62/T 1934—2010 全膜双垄沟玉米机械化作业技术规范[S]. 2010.

[23] NY/T 986—2006 铺膜机作业质量[S]. 2006.

[24] DB62/T 1935—2010 全膜双垄沟铺膜机操作规程及作业质量验收[S]. 2010.

[25] 孙伟,刘小龙,张华,等. 马铃薯施肥播种起垄全膜覆盖种行覆土一体机设计[J]. 农业工程学报,2017,33(20):14 - 22.
SUN Wei, LIU Xiaolong, ZHANG Hua, et al. Design of potato casingsoil planter in all-in-one machine combined with fertilizing, sowing, ridging, complete film mulching and planting line covering[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 14 - 22. (in Chinese)