doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.10.023

自解捆式果园秸秆覆盖机设计与试验

朱新华[1]　赵　伟[1]　伏胜康[1]　高向瑜[2]　魏玉强[1]

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 潍柴动力股份有限公司应用工程中心, 潍坊 261061)

摘要: 针对果园秸秆覆盖机不适应捆状秸秆、装载量小以及覆土装置易被碎石卡死问题,设计了一种自解捆式果园秸秆覆盖机。该机型由履带底盘、料箱、解捆铺料装置和覆土装置等组成。解捆铺料装置为齿带式结构,安装于料箱后部。为适应多种秸秆捆尺寸,提高抓料解捆能力和铺料均匀性,通过对解捆铺料过程分析确定了解捆铺料装置高度、倾角和齿带转速等关键参数范围;为了实现切绳和破捆过程滑切减阻,设计了三角形拨料刀齿,并基于刀齿对秸秆的扰动区域分析,对刀齿排布进行了设计;设计了一种双向对抛式覆土装置,同步对秸秆层进行薄土盖压。试验结果表明:覆盖机的秸秆装载量提高到原来的 3.1 倍;当覆盖机车速在 0.8 ~ 1.4 km/h,解捆铺料装置齿带转速在 180 ~ 240 r/min 时,秸秆覆盖层厚度为 5.1 ~ 18.1 cm(标准差小于等于 3.4 cm),薄土盖压层厚度为 2.3 ~ 4.0 cm,无卡死现象,满足作业要求;建立的秸秆覆盖厚度模型决定系数为 0.967 2。该机实现了秸秆解捆、行间覆盖与薄土盖压一体化作业。

关键词: 果园; 秸秆覆盖; 秸秆捆; 解捆装置

中图分类号: S224.9　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)10-0223-10　　**OSID**:

Design and Test of Self-unbaling Orchard Straw Mulching Machine

ZHU Xinhua[1]　ZHAO Wei[1]　FU Shengkang[1]　GAO Xiangyu[2]　WEI Yuqiang[1]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Application Engineering Center*, *Weichai Power Co.*, *Ltd.*, *Weifang* 261061, *China*)

Abstract: Aiming at solving the problems, such as inadaptation to baled straw, insufficient loading capacity, and easily blocked soil covering device, that happened in the first generation orchard straw mulching machine, a self-unbaling orchard straw mulching machine was developed. The machine consisted of tracked chassis, unbaling-spreading device, bin and soil covering device, etc. The unbaling-spreading device was a toothed belt structure and installed at the rear of the bin. To adapt to a variety of straw bales and improve bale breaking ability and mulch uniformity, after analyzing the process of unbaling and spreading, the key parameters such as inclination angle, height and rotating speed of the device were determined. To reduce drag during rope cutting and bale breaking, a triangular knife-tooth was designed, and the distribution of the knife-teeth was planned based on the analysis of straw compression and disturbance area. A double-sided opposite-throwing soil covering device was designed to cover soil on the surface of straw layer synchronously. The test results showed that the straw loading capacity was increased to 3.1 times of the original machine. When the speed of the straw mulching machine was 0.8 ~ 1.4 km/h and the rotating speed of the unbaling-spreading device was 180 ~ 240 r/min, the thickness of the straw mulching layer was 5.1 ~ 18.1 cm with standard deviation not more than 3.4 cm, and the thickness of the soil covering layer was 2.3 ~ 4.0 cm with no interruption happened during soil-covering, meeting the requirements for straw mulching in orchard. The established straw mulch thickness model, with a determination coefficient of 0.967 2, can be used to guide the parameters adjustment in actual production. The machine realized the operation integration of straw unbaling, inter-row mulching and thin soil covering, which laid foundation for improvement of orchard straw mulching mechanization technology and equipment performance.

Key words: orchard; straw mulching; straw bale; unbaling-spreading device

收稿日期: 2020-11-06　修回日期: 2021-01-10

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201503137)、陕西省重点研发计划项目(2019ZDLNY01-05-02、2019 NY-165)和陕西省农业协同创新与推广联盟重大科技项目(LMZD201703)

作者简介: 朱新华(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备与技术研究,E-mail: zxh920@nwsuaf.edu.cn

0 引言

果园秸秆覆盖具有保墒[1-3]、土壤增碳[4-5]、抑制杂草[6-7]、防止水土流失[8-9]和土壤次生盐渍化[10]等效果,特别适于旱区果园土壤管理[11-13]。该技术集地力提升与农业废弃物生态化利用于一体,自20世纪50年代开始被广泛研究,但鲜见规模化应用。主要原因是人工作业成本高[14],且存在火灾隐患[15]。该技术实现机械化的难点在于:农作物秸秆松散质轻、体量大与果园狭小空间限制之间的矛盾导致作业机械装载量过小,以及难以避免秸秆覆盖带来的火灾隐患。针对这些难点,笔者提出了一种果园秸秆机械化分层覆盖技术并设计了果园秸秆覆盖机[16-17]。第一代覆盖机实现了果园秸秆覆盖机械化,但只能适应松散秸秆,且覆土装置容易被碎石卡死。尽管其料箱容积达7 m^3,但松散小麦秸秆的装载量仅0.4 t左右,相对于1.5~3.0 kg/m^2的秸秆覆盖量要求[16],该装载量过小,成为制约覆盖机作业效率的瓶颈。

近年来,农作物秸秆普遍以秸秆打捆的形式进行储运。果园秸秆覆盖时,若按照先解捆破碎再装车铺料覆盖两段式进行,则既增加了工艺过程也无助于提升作业效率。理想的方式是覆盖机一体化完成果园内秸秆解捆铺料和薄土盖压。因此,研究与覆盖机配套的车载式解捆铺料装置和覆土装置是完善果园秸秆机械化覆盖技术,提升覆盖机作业效率的关键。当前,关于秸秆解捆技术和装置的文献报道较少,主要集中于饲养场牧草破捆解包装置[18]。这类装置一般采用齿辊组结构,其外形尺寸大,解捆排料不连续[19-20],且轴辊上容易缠草。果园秸秆覆盖机要求解捆铺料装置出料量必须均匀稳定且灵活可调[21]。因此,现有的破捆装置均不满足要求。现有的覆土装置主要应用于播种、施肥、覆膜和葡萄埋藤等作业过程中对小范围区域进行覆土[22],其覆土幅宽较小且覆土厚度不均匀,不适于秸秆覆盖层的薄土盖压。

针对上述问题,本文设计一种自解捆式果园秸秆覆盖机,通过理论分析确定关键部件的主要参数,并通过性能试验对自解捆式果园秸秆覆盖机的作业效果加以验证。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

自解捆式果园秸秆覆盖机总体结构如图1所示。主要由履带底盘、料箱、解捆铺料装置、覆土装置等组成。其中,料箱底部设置有刮板送料机构。解捆铺料装置为齿带式结构,安装于料箱的后部,其底部与刮板送料机构的末端构成出料口。解捆铺料装置的齿带上通过刀座固定有多排拨料刀齿,相邻刀座上的拨料刀齿在装置宽度方向上交错分布。覆土装置通过平行四杆机构和钢绳挂接于料箱的后下方,由液压缸拉动钢绳控制升降。覆土装置两侧安装有两个相向旋转、前后交错的抛土轮,其固定于伸缩机构的伸缩架上,伸缩架与液压缸的伸出端铰接。

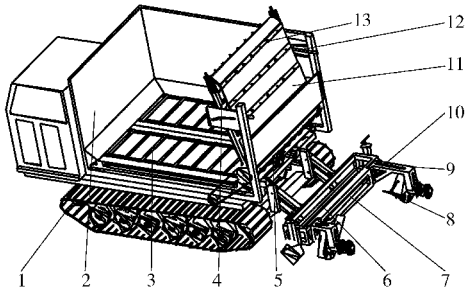


图1 自解捆式果园秸秆覆盖机总体结构图

Fig. 1 Structure diagram of self-unbaling orchard straw mulching machine

1. 履带底盘 2. 料箱 3. 刮板送料机构 4. 解捆铺料装置 5. 匀料梳齿 6. 覆土装置 7. 伸缩机构 8. 抛土轮 9. 伸缩架 10. 液压缸 11. 齿带 12. 角度调节机构 13. 拨料刀齿

1.2 工作原理

如图2所示,作业时覆盖机以一定速度行驶,位于覆盖机料箱底部的刮板送料机构将秸秆捆向解捆铺料装置推送。解捆铺料装置接触秸秆捆后,齿带上的拨料刀齿割断捆绳,对秸秆梳刷、破碎,形成松散秸秆。刀齿拨带秸秆经匀料梳齿进一步破碎、匀料后沿其末端抛出,铺撒于覆土装置秸秆落料区的地表,形成秸秆覆盖层。同时,前后交错布置的两个抛土轮就地切土、取土,将碎土颗粒相向抛撒,在秸秆覆盖层上方盖压一层薄土。解捆铺料装置齿带、覆土装置抛土轮由液压马达驱动。秸秆覆盖层的厚度可通过控制覆盖机车速 v_c、解捆铺料装置齿带转速 n_1 等参数来调整。抛土轮间距由液压缸调整,薄

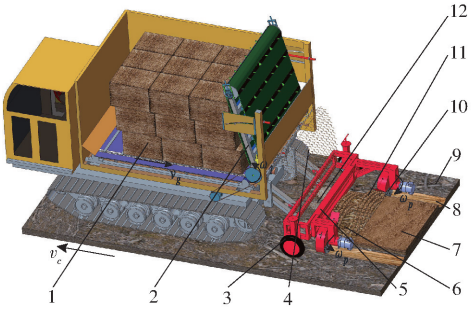


图2 秸秆覆盖机工作原理图

Fig. 2 Working principle of straw mulching machine

1. 秸秆捆 2. 解捆铺料装置 3. 限深轮 4. 松散秸秆抛撒轨迹 5. 覆土装置 6. 秸秆覆盖层 7. 薄土盖压层 8. 取土沟槽 9. 地面 10. 抛土轮 11. 碎土颗粒抛撒轨迹 12. 秸秆落料区

土盖压层厚度由限深轮调整。秸秆覆盖最大宽度与覆土装置的秸秆落料区等宽。覆土宽度由抛土轮间距决定。作业时，薄土盖压宽度略大于秸秆覆盖层宽度。

1.3　主要技术参数

自解捆式果园秸秆覆盖机的主要技术参数如表 1 所示。

表 1　自解捆式果园秸秆覆盖机主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters of self-unbaling orchard straw mulching machine

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	5.3×2.2×2.4
料箱尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	3.0×1.7×1.8
解捆铺料装置尺寸(高×宽×厚)/(m×m×m)	1.8×1.4×0.3
覆土装置尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	2.2×1.3×0.7
配套动力/kW	50
作业幅宽/m	1.5～1.7
秸秆覆盖层厚度/cm	5.1～18.1
薄土盖压层厚度/cm	2.3～4.0
作业效率/($hm^2 \cdot h^{-1}$)	0.3～0.7

2　关键部件设计

2.1　解捆铺料装置设计

解捆铺料装置安装在覆盖机料箱后部，主要由齿带、主从动轴辊、支撑架、张紧装置等组成(图 3)。解捆铺料装置由液压马达驱动，其主要作用为对秸秆捆进行解捆并将破捆后的松散秸秆抛撒覆盖于果树行间。

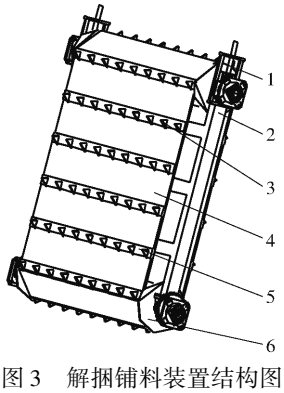


图 3　解捆铺料装置结构图

Fig. 3　Structure diagram of unbaling-spreading device

1. 张紧机构　2. 支撑架　3. 拨料刀齿　4. 齿带　5. 刀座　6. 轴辊

2.1.1　解捆铺料装置高度

解捆铺料装置应适应不同捆型和尺寸的秸秆捆。当装置的高度过小时，会影响尺寸较大的秸秆捆抓料解捆。由图 4 可知，当解捆铺料装置的高度 H 小于单个秸秆捆的高度时，装置上部整排拨料刀齿和齿带会对秸秆捆产生作用力 F_D、f_C，其包含与前进方向相反的分力 F_{Dx}、f_{Cx}，不利于秸秆捆的喂入，导致下料不均匀、不连续。因此，解捆铺料装置的高度 H 由

$$L'\cos\delta + \frac{D}{2} + \varepsilon \geqslant h_k \tag{1}$$

及 $L' = H - D$ 得

$$H \geqslant \frac{h_k - \dfrac{D}{2} - \varepsilon}{\cos\delta} + D \tag{2}$$

式中　L'——解捆铺料装置主、从动轴辊中心距，m

δ——解捆铺料装置倾角，(°)

ε——出料口间隙，m

h_k——单个秸秆捆高度，m

D——轴辊直径，m

单个秸秆捆高度 h_k 取值范围为 0.3～1.4 m，出料口间隙 ε 取 0.1～0.2 m，解捆铺料装置倾角 δ 取 20°，代入式(2)可得：$H \geqslant 1.5$ m。考虑到 H 过大时增大覆盖机的整体尺寸，H 取 1.8 m。

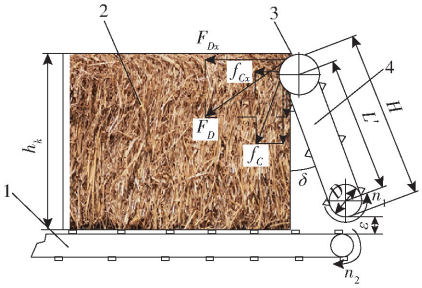


图 4　装置高度与秸秆捆受力分析图

Fig. 4　Mechanical analysis of height of unbaling-spreading device and straw bale

1. 刮板送料机构　2. 秸秆捆　3. 反向力产生区域　4. 解捆铺料装置

2.1.2　拨料刀齿设计

拨料刀齿是解捆铺料装置的关键部件，除应具备捆绳切割和破捆功能，还应具备良好的拨料能力。因此，选用三角形拨料刀齿。茎秆物料与金属刀具刃口的摩擦角一般为 18°～24°[23]，而刀具产生滑切的条件是刃口滑切角大于等于刃口与秸秆的摩擦角。因此设置刀齿的滑切角为 30°以减阻降耗。拨料刀齿刃口采用锯齿形结构，以增强切割和拨料性能。

刀齿高度是刀尖与刀座平面间的距离，对拨料量和拨料阻力影响较大。为了确定拨料刀齿高度，通过拉压力试验机(HSV 型，量程 0～1 000 N，精度 0.5%)分析了恒速下拨料刀齿高度 h_D 取 2、3、4、5、6 cm 时，拨料量 m_b 和拨料阻力 F_f 的变化(图 5)，拨料刀齿速度 v_D 为 300 mm/min，结果见图 6，ΔF_f 为一定高度拨料刀齿与 2 cm 拨料刀齿拨料阻力的差值，Δm_b 为一定高度拨料刀齿与 2 cm 拨料刀齿拨料量的差值。

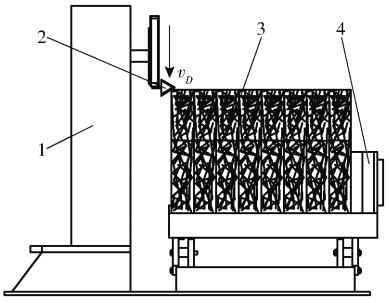


图 5 拨料阻力和拨料量测量示意图

Fig. 5 Schematic of resistance and straw-carrying mass measuring

1. 拉压力试验机 2. 拨料刀齿 3. 秸秆捆 4. 秸秆捆定位装置

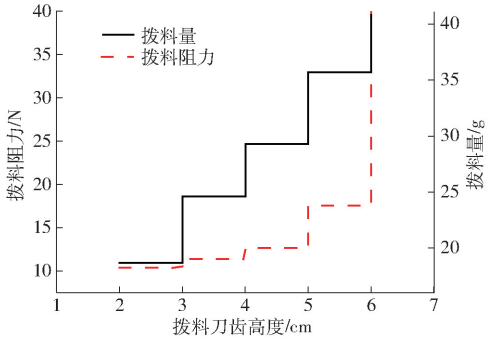


图 6 不同拨料刀齿高度时拨料刀齿拨料阻力和拨料量的变化曲线

Fig. 6 Influence of knife-tooth height on resistance and straw-carrying mass

h_D取 2、3、4、5、6 cm 时，ΔF_f为 1.0、2.3、7.3、29.6 N，Δm_b为 5.9、10.6、17.0、22.1 g，二者比值为 5.9、4.6、2.3、0.7 g/N。随着刀齿高度的增加，比值逐渐减小，3 cm 时的比值最大。即 3 cm 时阻力小，拨料量相对较大。同时，综合考虑刀齿高度较小时，不易堵刀、拨料均匀性好以及刀片刚度好，将三角形拨料刀齿的高设为 3 cm。

基于 ANSYS 对拨料刀齿进行有限元分析。设置拨料刀齿的厚度为 2 mm，材料为 45 锰钢，刀齿固定端面应变为零，平行于固定端面和刀齿平面施加 1.8 N/mm（拨料刀齿刮拨试验测得的最大拨料阻力为 54 N，为了保证高度为 30 mm 拨料刀齿的强度，将其等价成均布载荷后作为拨料刀齿有限元分析的边界条件）的均布载荷，结果如图 7 所示。应力最大处为 36.761 MPa，在拨料刀齿的边缘，小于材料的屈服极限；在拨料过程中拨料刀齿的变形量由固定端向刀齿顶端逐渐变大，其最大变形量为 0.003 766 8 mm，变形量较小，满足强度要求。

2.1.3 拨料刀齿排布

齿带上刀座间距和刀座上拨料刀齿的数量影响秸秆覆盖层的厚度和均匀性。拨料刀齿越多，对秸秆捆的破碎效果越好，秸秆覆盖越均匀。但是，刀齿数量过多将大大增加功耗。因此，刀座上拨料刀齿

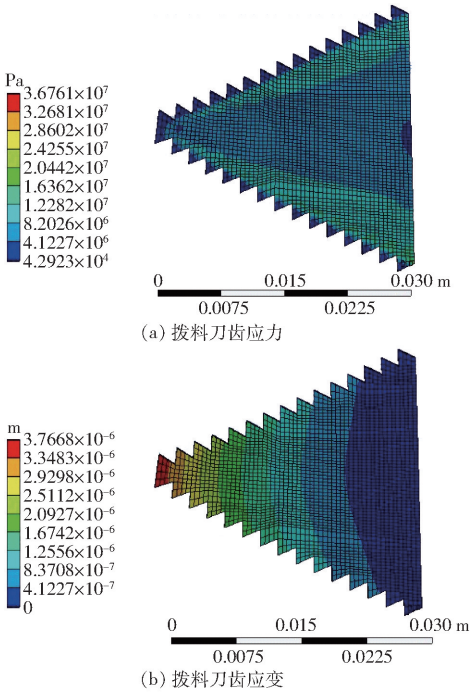


图 7 拨料刀齿应力和应变分析

Fig. 7 Stress and strain analysis of triangular knife-tooth

的布置要考虑单个拨料刀齿作业时对秸秆的压缩扰动区域，如图 8 所示。

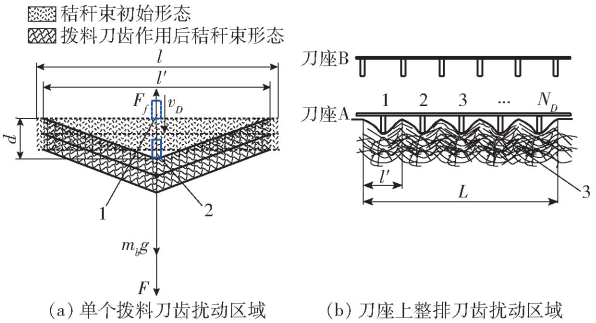


图 8 拨料刀齿扰动区域示意图

Fig. 8 Disturbing area of knife-teeth

1. 拨料刀齿初始位置 2. 拨料刀齿工作位置 3. 秸秆捆横截面

扰动区域宽度 l'越大，秸秆捆破捆所需拨料刀齿的个数 N_D越少。扰动区域深度 d 为秸秆从静止加速到拨料刀齿速度 v_D 时刀齿运动的距离，计算式为

$$d=\frac{v_D^2}{2a}=\frac{v_D^2}{2\dfrac{F+m_bg-F_f}{m_b}}=\frac{m_bv_D^2}{2\left(\dfrac{F_D}{N_D}+m_bg-F_f\right)} \tag{3}$$

式中 a——压缩扰动过程中秸秆加速度，m/s²

F——单个拨料刀齿的拨料力，N

g——重力加速度，取 9.8 m/s²

F_D 可根据选用的液压马达的额定转矩算出，本文取 $F_D=900$ N。F_f、m_b 参考图 6 选取，由图 8 可知

$$l'=2\sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2-d^2} \tag{4}$$

$$L=N_Dl' \tag{5}$$

式中　l——单根秸秆长度，cm

L——秸秆与解捆铺料装置接触长度，cm

求得

$$N_D = \frac{\sqrt{4F_fL(1-2F_Dl^2)+F_D^4l^2-8F_Dl^2(m_bg+F_f)-32F_DLm_bv_D^2}}{2l^2(F_f-m_bg)+4m_bv_D^2} + \frac{F_Dl^2-4m_bgL}{2l^2(F_f-m_bg)+4m_bv_D^2} \tag{6}$$

l 的取值范围为 10 ~ 30 cm，L 取 140 cm。将相关参数代入式(3)、(6)求解取整后得 N_D 的取值范围为 8 ~ 12，本文取 N_D = 10，即拨料刀齿的横向间距为 14 cm。

刀座之间的距离越大，转速一定时，单位时间内拨料刀齿与秸秆捆接触的次数越少，秸秆覆盖厚度越小。覆盖机车速 v_c 取 0.25 m/s。根据农艺要求[21]，1 s 内应覆盖的秸秆质量 M_1 = 240 g，设 1 s 内刀座经过出料口的次数为 N_Z，则有 $n_1N_ZN_Dm_b = 60M_1$，求得 N_Z = 6。齿带总长度取 210 cm，故刀座间的间距为 35 cm。相邻刀座上的刀齿交错排布(图 8b)，以达到更好的破捆效果和覆盖均匀性。

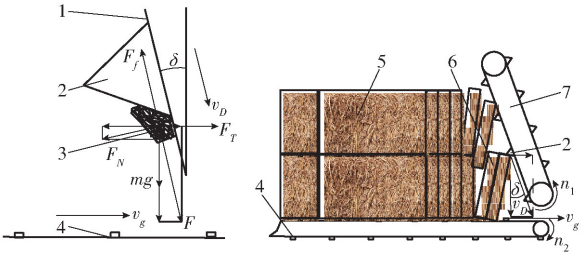
2.1.4　解捆铺料装置倾角

解捆铺料装置倾角对抓料能力和堵塞有重要影响。为了提高拨料刀齿的抓料能力，上下两个轴辊中心线平面与竖直方向设置倾角 δ。由图 9a 可知，拨料刀齿在作业过程中拨带的秸秆束在水平方向上受到的合力

$$F_x = F_T + (F - F_f)\sin\delta - F_N\cos\delta = F_T\sin^2\delta + (F - F_f)\sin\delta \tag{7}$$

式中　F_T——刮板对秸秆的推挤力，N

F_N——齿带对秸秆束的正压力，N



(a) 解捆时秸秆束受力分析　　(b) 破捆后秸秆饼与拨料刀齿接触状况

图 9　秸秆解捆时受力分析图

Fig. 9　Mechanical analysis of straw unbaling process

1. 齿带　2. 拨料刀齿　3. 秸秆束　4. 刮板　5. 秸秆捆　6. 解捆后秸秆饼　7. 解捆铺料装置

由式(7)可知，随着 δ 的增加，F_x 也随之增加，即拨料刀齿的抓料能力增强。但是 δ 不宜过大。秸秆捆在打捆成型时，内部形成层状结构。每层秸秆紧实，呈饼块状，饼块之间粘结力较小。由图 9b 可知，当 δ 过大，拨料刀齿速度 v_D 的水平分量将大于刮板的速度 v_g，此时，解捆后的秸秆饼向前倾倒导致秸秆瞬时喂入量过大而可能发生堵料现象。因此，为了防止堵料，应满足

$$v_D\sin\delta \leqslant v_g \tag{8}$$

根据本课题组前期研制的果园秸秆覆盖机下料试验结果[16]，取 v_D = 1.0 m/s，刮板的速度 v_g 取 0.4 m/s，则 δ 小于等于 25°。同时，为了避免解捆铺料装置对秸秆捆产生与其前进方向相反的推力，影响下料连续性，δ 应大于等于零。则 δ 取值范围为：$0° \leqslant \delta \leqslant 25°$。

2.1.5　解捆铺料装置齿带转速

解捆铺料装置齿带转速影响秸秆覆盖层的连续性和切绳解捆的可靠性。对秸秆抛撒覆盖过程进行动力学分析可知，解捆后的散状秸秆束经拨料刀齿拨送沿匀料梳齿末端的切线方向抛出作斜抛运动，其运动分析如图 10 所示。

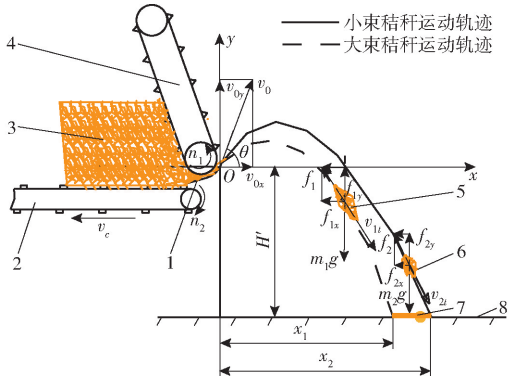


图 10　秸秆束抛撒覆盖过程分析

Fig. 10　Analysis of straw spreading process

1. 匀料梳齿　2. 刮板送料机构　3. 秸秆捆　4. 解捆铺料装置　5. 大束秸秆　6. 小束秸秆　7. 秸秆覆盖区域　8. 地面

秸秆束为轻质物，需考虑气流阻力 f 影响。低速状态下秸秆束所受阻力 f 与其速度 v 成正比，即

$$f = -kv = -CSv \tag{9}$$

式中　k——空气阻力系数

C——气流阻力常数

S——物体迎风面积，m²

取 $C \approx 2.98$[24]，由于秸秆束大小不同，在气流阻力的作用下秸秆束运动轨迹会产生分离，形成秸秆覆盖区域，如图 10 所示。

(1)秸秆束上升过程中，某时刻 t 处秸秆束距离坐标原点 O 的水平和竖直位移分别为 x、y。动力学方程为

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2x}{dt^2} = -k\dfrac{dx}{dt} \\ m\dfrac{d^2y}{dt^2} = -mg - k\dfrac{dy}{dt} \\ v_{0x} = v_0\cos\theta - v_c \\ v_{0y} = v_0\sin\theta \end{cases} \tag{10}$$

式中　v_0——秸秆束被抛出时的初始速度，m/s

v_{0x}——速度 v_0 在水平方向分速度,m/s

v_{0y}——速度 v_0 在竖直方向分速度,m/s

θ——速度 v_0 与水平方向的夹角,(°)

m——秸秆束的质量,g

求解得

$$\begin{cases} v_x = (v_0\cos\theta - v_c)\,\mathrm{e}^{-\frac{k}{m}t} \\ v_y = \left(v_0\sin\theta + \dfrac{mg}{k}\right)\mathrm{e}^{-\frac{k}{m}t} - \dfrac{mg}{k} \\ x = \dfrac{m(v_0\cos\theta - v_c)}{k}(1 - \mathrm{e}^{-\frac{k}{m}t}) \\ y = \dfrac{k}{m}\left(v_0\sin\theta + \dfrac{mg}{k}\right)(1 - \mathrm{e}^{-\frac{mg}{k}}) - \dfrac{mg}{k}t \end{cases} \tag{11}$$

式中 v_x——秸秆束上升过程水平分速度,m/s

v_y——秸秆束上升过程竖直分速度,m/s

当上升到最高点时,秸秆束运动的时间为 $t_{v_{y0}}$,水平和竖直方向上的位移分别为 $x_{v_{y0}}$、$y_{v_{y0}}$,即

$$\begin{cases} t_{v_{y0}} = -\dfrac{m}{k}\ln\dfrac{mg}{mg + kv_0\sin\theta} \\ x_{v_{y0}} = \dfrac{(v_0\cos\theta - v_c)\,mv_0\sin\theta}{mg + kv_0\sin\theta} \\ y_{v_{y0}} = \dfrac{mv_0\sin\theta}{k} + \dfrac{m^2g}{k^2}\ln\dfrac{mg}{mg + kv_0\sin\theta} \end{cases} \tag{12}$$

(2)秸秆束下降过程中,某时刻 t' 处秸秆束距离最高点的水平和竖直位移分别为 x'、y'。动力学方程为

$$\begin{cases} m\dfrac{\mathrm{d}^2x'}{\mathrm{d}t'^2} = -k\dfrac{\mathrm{d}x'}{\mathrm{d}t'} \\ m\dfrac{\mathrm{d}^2y'}{\mathrm{d}t'^2} = -mg + k\dfrac{\mathrm{d}y'}{\mathrm{d}t'} \end{cases} \tag{13}$$

求解得

$$\begin{cases} v_{x'} = (v_0\cos\theta - v_c)\,\mathrm{e}^{-\frac{k}{m}t'} \\ v_{y'} = \left(v_0\sin\theta - \dfrac{mg}{k}\right)\mathrm{e}^{\frac{k}{m}t'} + \dfrac{mg}{k} \\ x' = \dfrac{m(v_0\cos\theta - v_c)}{k}(1 - \mathrm{e}^{-\frac{k}{m}t'}) \\ y' = \dfrac{k}{m}\left(v_0\sin\theta - \dfrac{mg}{k}\right)(1 + \mathrm{e}^{\frac{mg}{k}}) + \dfrac{mg}{k}t' \end{cases} \tag{14}$$

式中 $v_{x'}$——秸秆束下降过程水平分速度,m/s

$v_{y'}$——秸秆束下降过程竖直分速度,m/s

当秸秆束到达地面时

$$y' = y_{v_{y0}} + H' \tag{15}$$

式中 H'——秸秆束抛出点距离地面的高度,m

求得

$$t' = \frac{v_0\sin\theta}{g} + \frac{mg}{k}\ln\frac{mg}{mg + kv_0\sin\theta} + \frac{kH'}{mg} - \frac{k^2}{m^2g}\left(v_0\sin\theta - \frac{mg}{k}\right)(1 + \mathrm{e}^{\frac{mg}{k}}) \tag{16}$$

将 t' 代入式(14)中可求得 x',则秸秆覆盖区域的长度为

$$\Delta x = x_2 - x_1 = (x_{v_{y0}} + x')\,|_{S=S_2}^{S=S_1} \tag{17}$$

式中 x_1——大束秸秆在水平方向上的位移,m

x_2——小束秸秆在水平方向上的位移,m

S_1——大束秸秆的迎风面积,m^2

S_2——小束秸秆的迎风面积,m^2

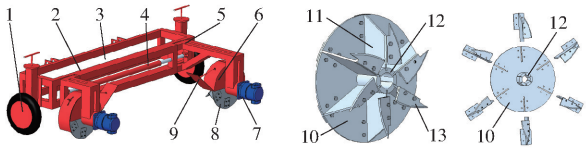
覆盖机在前进方向上不发生秸秆漏盖现象的条件是

$$v_c(t_{v_{y0}} + t') \leqslant \Delta x \tag{18}$$

根据本课题组前期研制的果园秸秆覆盖机下料试验结果[16],取大束秸秆迎风面积 $S_1 \approx 0.012\ m^2$,小束秸秆迎风面积 $S_2 \approx 0.005\ m^2$。此外,匀料梳齿末端切线方向与水平方向的夹角 $\theta = 60°$。代入式(14)、(17)、(18)中可得 $v_0 \leqslant 3.2$ m/s。为了切断捆绳,拨料刀齿的速度应大于柔性纤维物料进行有支撑切割时割刀的最低速度,即 $v_0 \geqslant 0.8$ m/s[25]。换算成解捆铺料装置齿带的转速,即:80 r/min $\leqslant n_1 \leqslant$ 320 r/min。因此,解捆铺料装置的驱动液压马达选用 BMR-125 型摆线液压马达,其排量为 126.3 mL/r,最大扭矩为 338 N·m。

2.2 覆土装置设计

覆土装置由机架、抛土轮、伸缩机构、限深轮等组成(如图 11)。采用两个前后方向交错布置的抛土轮进行取土并双向对抛,避免了提土刮板和匀土螺旋易被碎石卡死的问题[17]。同时,双向对抛可提高覆土的均匀性。利用双向液压控制的伸缩机构可调节两个抛土轮的横向间距,对应调整抛土轮的转速,可实现覆土宽度在 1.4 ~ 2.2 m 内自由调节,以适应不同行距果园作业。通过限深轮来控制薄土盖压层的厚度。伸缩液压缸选用 HSG40 型双作用液压缸,覆土装置长 × 宽 × 高为 2.2 m × 1.3 m × 0.7 m。



(a) 覆土装置总体结构 (b) 抛土轮结构

图 11 覆土装置结构图

Fig. 11 Structure diagram of soil-covering device

1. 限深轮 2. 机架 3. 秸秆落料区 4. 液压缸 5 伸缩架 6. 挡土罩壳 7. 液压马达 8. 抛土轮 9. 挡土板角度调节机构 10. 轮盘 11. 抛土叶片 12. 轮毂 13. 切土刀片

如图 11b 所示,抛土轮由抛土叶片、轮盘、轮毂和切土刀片等组成。抛土轮轮盘的直径 R_q 影响抛土轮的取土量和入土深度 h_q(如图 12),根据等体积原理,双侧对抛覆土时,抛土轮取土区域的面积 S_q 与薄土盖压层的截面积 S_t 之间应满足:$2S_q = S_t$,即

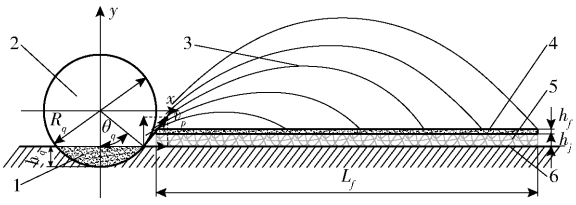


图 12　抛土过程运动分析图

Fig. 12　Kinematic analysis of soil throwing process

1. 取土区域　2. 抛土轮　3. 土壤颗粒的运动轨迹　4. 薄土盖压层　5. 秸秆覆盖层　6. 地面

$$2\left(\frac{2\theta_q}{360}\pi R_q^2 - R_q^2\sin\theta_q\cos\theta_q\right) = L_f h_f \tag{19}$$

由图 12 可知

$$h_q = R_q(1-\cos\theta_q) \tag{20}$$

式中　θ_q——抛土轮取土区域对应圆心角半角，(°)

L_f——薄土盖压层宽度，cm

h_f——薄土盖压层厚度，cm

根据农艺要求[21]，取 $L_f = 180$ cm、$h_f = 3$ cm、$h_q = 0.5R_q$，代入式(19)、(20)，求得 $R_q = 0.2$ m，即抛土轮轮盘直径 $D = 0.4$ m。

抛土轮转速 n_p 影响抛土轮抛出土壤颗粒的运动轨迹，抛土轮转速 n_p 越大，薄土盖压层宽度 L_f 越大。忽略空气阻力的影响，将土壤颗粒视为质点，对抛土过程进行运动分析，可得

$$\begin{cases} v_p\cos\theta_q t = R_q(1-\sin\theta_q) + L_f \\ v_p\sin\theta_q t - \dfrac{1}{2}gt^2 = h_j \end{cases} \tag{21}$$

其中　$$v_p = \frac{2\pi n_p R_p}{60}$$

式中　h_j——秸秆覆盖层厚度，cm

v_p——土壤颗粒抛出时初速度，m/s

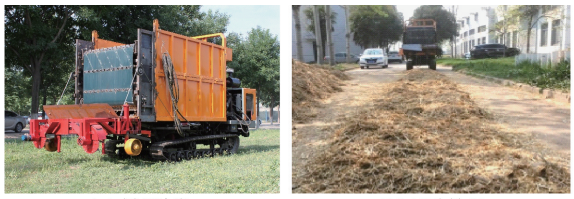
根据农艺要求[21]，秸秆覆盖层厚度 h_j 取 10 cm，代入式(21)，求得与薄土盖压层宽度相对应的抛土轮转速 n_p 为 225 ~ 275 r/min。

3　性能试验

3.1　秸秆覆盖试验

为检验齿带式解捆铺料装置的作业效果，在西北农林科技大学试验站进行了秸秆覆盖试验(图 13)。试验材料为长方形捆状小麦秸秆(陕西省扶风县大明秸秆回收专业合作社)，长 × 宽 × 高为 120 cm × 40 cm × 35 cm，密度为 179.5 kg/m^3，含水率为 10.4%。覆盖机对捆状小麦秸秆的装载量为 1.25 t，是松散小麦秸秆装载量的 3.1 倍。覆盖机车速为 0.5 ~ 12.5 km/h。

根据前期预试验，在覆盖机车速为 0.8 ~ 1.4 km/h、解捆铺料装置齿带转速 180 ~ 240 r/min 时，覆盖机作业稳定，且秸秆覆盖厚度可满足作业要求[21]。因此，以覆盖机车速 0.8、1.0、1.2、1.4 km/h 和解捆铺料装置齿带转速 180、200、220、240 r/min 进行两因素四水平试验，刮板送料机构转速固定为 4 r/min。采用 5 点取样法测量秸秆层的厚度，取平均值并计算其标准差，通过标准差表征其均匀性。试验重复 3 次，结果取平均值。试验结果用 Origin 2017 绘图，并用 Design-Expert 8.0 软件建立秸秆覆盖层厚度模型。



(a) 样机实物　　(b) 试验效果

图 13　秸秆覆盖试验

Fig. 13　Straw mulching test

3.1.1　试验结果与分析

试验结果如表 2 和图 14 所示。当覆盖机车速 0.8 ~ 1.4 km/h，解捆铺料装置齿带转速 180 ~ 240 r/min 时，秸秆覆盖层厚度 5.1 ~ 18.1 cm，厚度标准小于等于 3.4 cm。覆盖厚度满足要求，均匀性良好。由图 14a 可知，秸秆覆盖层厚度随覆盖机车速增大而减小，随解捆铺料装置齿带转速增大而增大；由图 14b 可知，覆盖机车速较高时，厚度标准差相对较小，而解捆铺料装置齿带转速增大时，覆盖厚度标准差随之增大，此时覆盖厚度也较大。建立秸秆覆盖层厚度对覆盖机车速和解捆铺料装置齿带转

表 2　秸秆覆盖试验结果

Tab. 2　Result of straw mulching test

试验序号	因素		秸秆覆盖层厚度/cm	标准差/cm
	覆盖机车速/(km·h^{-1})	解捆铺料装置齿带转速/(r·min^{-1})		
1	0.8	180	10.4	1.8
2	0.8	200	11.8	2.3
3	0.8	220	14.6	3.3
4	0.8	240	18.1	3.4
5	1.0	180	8.5	1.8
6	1.0	200	10.8	2.4
7	1.0	220	12.1	2.6
8	1.0	240	16.4	2.6
9	1.2	180	7.4	1.7
10	1.2	200	9.9	2.4
11	1.2	220	11.0	2.9
12	1.2	240	14.4	2.3
13	1.4	180	5.1	1.0
14	1.4	200	7.0	1.5
15	1.4	220	10.4	3.0
16	1.4	240	13.2	3.0

速响应的二元线性模型

$$h_j = -6.503 + 0.125\,7n_1 - 7.79v_c \quad (22)$$

模型决定系数 $R^2 = 0.967\,2$。由表 3 可知，$P < 0.000\,1$，表明该模型极显著。解捆铺料装置齿带转速 n_1、覆盖机车速 v_c 对秸秆覆盖厚度的影响均在 $P < 0.01$ 的水平上显著，说明覆盖机车速、解捆铺料装置齿带转速与秸秆覆盖层厚度之间存在良好的相关性，秸秆覆盖层厚度在 5.1 ~ 18.1 cm 可调。

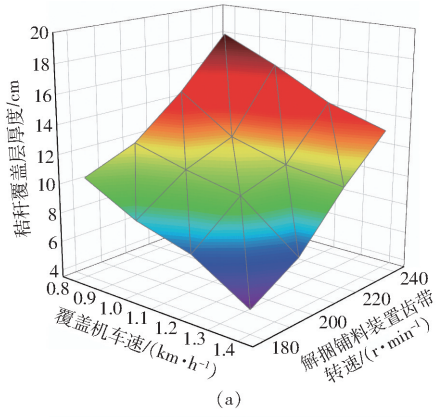


图 14 作业参数对秸秆覆盖层厚度及其标准差的影响

Fig. 14 Effect of operation parameters on straw layer thickness and standard deviation

表 3 秸秆覆盖层厚度模型方差分析

Tab. 3 Variance analysis of covering thickness model

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	174.95	2	87.48	221.95	<0.000 1 **
n_1	48.55	1	48.55	123.18	<0.000 1 **
v_c	126.40	1	126.40	320.72	<0.000 1 **
残差	5.12	13	0.39		
总计	180.07	15			

注：** 表示影响极显著（$P < 0.01$）。

3.1.2 秸秆覆盖层厚度模型验证

为了在实际作业中对秸秆覆盖层厚度精准调控，对秸秆覆盖层厚度模型的准确性进行验证。果园秸秆覆盖中，适宜的厚度范围一般在 9 ~ 15 cm[21]。在覆盖机的秸秆覆盖厚度 5.1 ~ 18.1 cm 内等距选取 5 个厚度（8、10、12、14、16 cm），代入模型中得到对应的作业参数，以此作业参数进行秸秆覆盖试验，每组试验重复 5 次。将实测厚度与计算厚度进行比较，结果见图 15。均方根误差（RMSE）为 0.815 7 cm，决定系数为 0.905，表明计算厚度与实测厚度偏差较小，且趋向于 1∶1，秸秆覆盖层厚度模型可用于指导覆盖作业中的厚度调整。

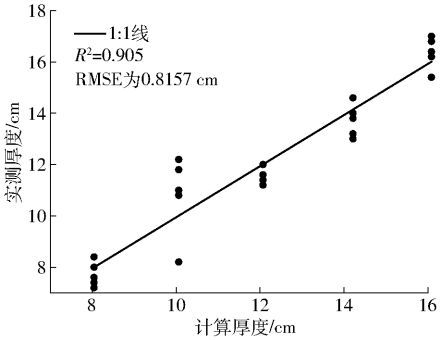


图 15 秸秆覆盖层厚度实测值与计算值的关系曲线

Fig. 15 Relationship between actual value and calculated value of thicknesses of straw mulch

3.2 果园作业试验

在陕西杨凌扶特斯公司苹果园进行秸秆覆盖初步试验（图 16）。果园行距 3.5 m，株距 1.2 m。为了检验自解捆式果园秸秆覆盖机秸秆覆盖的厚度范围和覆盖的准确性，根据秸秆覆盖试验的结果，选取秸秆覆盖厚度最大值、最小值和中间值时的作业参数，分别设置覆盖机车速、齿带转速组合分别为：（0.8 km/h，240 r/min）、（1.4 km/h，180 r/min）和（1.0 km/h，220 r/min）。为了保证覆土层的厚度满足薄土盖压要求，设置覆土装置抛土轮转速范围为 225 ~ 275 r/min。

秸秆层和薄土层厚度测量均采用 5 点取样法。试验重复 3 次，结果取平均值。作业前，在果树行间



(a) 秸秆覆盖机械化作业

(b) 覆盖效果

图 16 果园秸秆覆盖试验

Fig. 16 Straw-soil mulching test in apple orchard

地面的中线上间隔 1 m 分别放置 5 个正方形平板(0.8 m×0.8 m),作业时使秸秆覆盖在平板表面以便测量其厚度。在覆土装置秸秆落料区与抛土轮之间的机架上临时加装覆膜装置,使抛土轮抛撒的土壤颗粒落于地膜上方,将薄土盖压层与秸秆覆盖层分隔开,测量薄土盖压层厚度。测量时,先测量薄土盖压层厚度,薄土分离后再测量秸秆覆盖层的厚度。

果园作业试验秸秆覆盖层厚度测量结果(表 4)表明,秸秆覆盖层厚度范围为 5.2 ~ 18.0 cm,厚度标准差小于等于 3.3 cm,平均值与模型计算值相对误差小于等于 14%;覆土装置无卡死现象,薄土盖压层厚度 2.3 ~ 4.0 cm。结果表明,自解捆式果园秸秆覆盖机能直接处理捆状秸秆,作业效率可达 0.3 ~ 0.7 hm^2/h,相比于第一代果园秸秆覆盖机提高了 1.5 倍,性能满足果园作业要求。

表 4　果园作业试验秸秆覆盖层厚度测量结果

Tab.4　Measuring results of straw-layer thickness in orchard test

参数组合	秸秆覆盖层厚度平均值/cm	秸秆覆盖层厚度标准差/cm	厚度平均值与计算值相对误差/%
(0.8 km/h,240 r/min)	18.0	3.3	3
(1.4 km/h,180 r/min)	5.2	1.0	5
(1.0 km/h,220 r/min)	11.7	2.2	14

4　结论

(1)针对果园秸秆覆盖机不适应捆状秸秆、装载量小以及覆土装置易被碎石卡死等问题,研制了自解捆式果园秸秆覆盖机,由履带底盘、料箱、解捆铺料装置、覆土装置等组成。该机实现了秸秆解捆、铺料和薄土盖压一体化作业。秸秆装载量提升到原来的 3.1 倍,提高了覆盖机有效作业时间,作业效率可达 0.3 ~ 0.7 hm^2/h,相比于第一代果园秸秆覆盖机提高了 1.5 倍。

(2)设计了齿带式解捆铺料装置,由上下轴辊、齿带和拨料刀齿等组成。通过分析作业过程和要求,确定了装置高度、倾角和齿带转速等关键参数的范围,以适应多种秸秆捆尺寸并提高覆盖均匀性。设计了一种对抛式覆土装置,避免了碎石卡死问题。

(3)试验结果表明,当覆盖机车速 0.8 ~ 1.4 km/h,解捆铺料装置齿带转速 180 ~ 240 r/min 时,秸秆覆盖层厚度 5.1 ~ 18.1 cm,厚度标准差小于等于 3.4 cm,薄土盖压层厚度 2.3 ~ 4.0 cm,无卡死现象。建立了秸秆覆盖层厚度模型,经验证可用于指导实际生产中作业参数调整。试验结果在果园作业中得到验证,表明自解捆式果园秸秆覆盖机能直接对捆状秸秆解捆铺料,性能满足果园作业要求。

参　考　文　献

[1] CHANG L, HAN F, CHAI S, et al. Straw strip mulching affects soil moisture and temperature for potato yield in semiarid regions[J]. Agronomy Journal, 2020, 112(2): 1126 - 1139.

[2] PAULO S, LOURENCO E, GAVA R, et al. Soil evaporation under different straw mulch fractions[J]. African Journal of Agricultural Research, 2014, 9(23): 1793 - 1800.

[3] 刘继龙, 李佳文, 周延, 等. 秸秆覆盖与耕作方式对土壤水分特性的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 333 - 339.
LIU Jilong, LI Jiawen, ZHOU Yan, et al. Effects of straw mulching and tillage on soil water characteristics[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 333 - 339. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190736&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.036. (in Chinese)

[4] CHEN Y, WEN X, SUN Y, et al. Mulching practices altered soil bacterial community structure and improved orchard productivity and apple quality after five growing seasons[J]. Scientia Horticulturae, 2014, 172(3): 248 - 257.

[5] SI P, LIU E, HE W, et al. Effect of no-tillage with straw mulch and conventional tillage on soil organic carbon pools in Northern China[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2018, 64(3): 398 - 408.

[6] GENGER R K, ROUSE D I, CHARKOWSKI A O. Straw mulch increases potato yield and suppresses weeds in an organic production system[J]. Biological Agriculture & Horticulture, 2018, 34(1): 53 - 69.

[7] ABOUZIENA H F, HAFEZ O M, El-METWALLY I M, et al. Comparison of weed suppression and mandarin fruit yield and quality obtained with organic mulches, synthetic mulches, cultivation, and glyphosate[J]. HortScience, 2008, 43(3): 795 - 799.

[8] JOURGHOLAMI M, ABARI M E. Effectiveness of sawdust and straw mulching on postharvest runoff and soil erosion of a skid trail in a mixed forest[J]. Ecological Engineering, 2017, 109: 15 - 24.

[9] PROSDOCIMI M, JORDáN A, TAROLLI P, et al. The immediate effectiveness of barley straw mulch in reducing soil erodibility and surface runoff generation in Mediterranean vineyards[J]. Science of the Total Environment, 2016, 547: 323 - 330.

[10] BALWINDER-SING H, EBERBACH P L, HUMPHREYS E, et al. The effect of rice straw mulch on evapotranspiration, transpiration and soil evaporation of irrigated wheat in Punjab, India[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(12): 1847 - 1855.

[11] 石艳. 陕西渭北旱区苹果园不同覆盖方式的保水效果及效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
SHI Yan. The soil water content of different mulching methods and its effect on growth and bearing in Shanxi Weibei semiarid region apple orchard[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)

[12] JAIME C, AITOR A, PERE R, et al. Innovative soil conditioners and mulches for forest restoration in semiarid conditions in

Northeast Spain[J]. Ecological Engineering, 2018, 118: 52 - 65.
[13] CULUMBER C M, REEVE J R, BLACK B L, et al. Organic orchard floor management impact on soil quality indicators: nutrient fluxes, microbial biomass and activity[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2019, 115(3): 101 - 115.
[14] WANG J, HUANG J, ZHAO X, et al. Simulated study on effects of ground managements on soil water and available nutrients in jujube orchards[J]. Land Degradation & Development, 2016, 27(1): 35 - 42.
[15] KEESSTRA S D, RODRIGO-COMINO J, NOVARA A, et al. Straw mulch as a sustainable solution to decrease runoff and erosion in glyphosate-treated clementine plantations in Eastern Spain. An assessment using rainfall simulation experiments[J]. Catena, 2019, 174: 95 - 103.
[16] 徐少杰, 朱新华, 王东阳. 果园秸秆覆盖机设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(7): 122 - 130.
XU Shaojie, ZHU Xinhua, WANG Dongyang. Design and experiment on straw mulching machine in arid orchards[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(7): 122 - 130. (in Chinese)
[17] 房效东. 果园秸秆覆盖机覆土装置改进与试验[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.
FANG Xiaodong. Improvement and experiment of soil covering device for straw covering machine in orchard[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)
[18] 田富洋, 陈玉华, 宋占华, 等. 自走式全混合日粮制备机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 106 - 114.
TIAN Fuyang, CHEN Yuhua, SONG Zhanhua, et al. Design and experiment of self-propelled TMR preparation mixer for silage straw feed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 106 - 114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200312&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.012. (in Chinese)
[19] 王刚. 草捆自动输送破捆机构: CN209609269U[P]. 2019 - 01 - 28.
[20] 王福贵. 一种自走式七轴饲草破捆粉碎搅拌饲喂机: CN210352615U[P]. 2019 - 07 - 16.
[21] 王清江. 矮砧苹果园秸秆覆盖模式及秸秆机械化覆盖作业技术研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
WANG Qingjiang. Study on straw mulching model and straw mechanized mulching technology in apple orchard[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)
[22] 张志君, 孙旭伟, 金柱男, 等. 大豆播种机破碎式仿生覆土装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 34 - 40, 73.
ZHANG Zhijun, SUN Xuwei, JIN Zhunan, et al. Design and test of crushing bionic soil covering device of soybean seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 34 - 40, 73. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180205&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.005. (in Chinese)
[23] 沈再春. 农产品加工机械与设备[M]. 北京: 中国农业出版社,1993: 94.
[24] 王春元, 殷雨萌. 基于空气动力学对标枪投掷问题的研究[J]. 科技创新导报, 2020, 17(10): 71, 73.
WANG Chunyuan, YIN Yumeng. Research on javelin throwing problem based on aerodynamics[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2020, 17(10): 71, 73. (in Chinese)
[25] 张燕青, 崔清亮, 郭玉明, 等. 谷子茎秆切割力学特性试验与分析[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 146 - 155, 162.
ZHANG Yanqing, CUI Qingliang, GUO Yuming, et al. Experiment and analysis of cutting mechanical properties of millet stem [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 146 - 155, 162. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190416&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.016. (in Chinese)

(上接第 185 页)

[23] 廖庆喜,张宁,张朋玲,等. 一器多行离心式油菜排种器[J]. 农业机械学报,2012,43(2):48 - 51,95.
LIAO Qingxi, ZHANG Ning, ZHANG Pengling, et al. Centrifugal metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2):48 - 51, 95. (in Chinese)
[24] 李耀明,马征,徐立章. 油菜联合收获机筛面粘附物摩擦特性[J]. 农业机械学报,2010,41(12):54 - 57,47.
LI Yaoming, MA Zheng, XU Lizhang. Tribological characteristics of adhesive materials on cleaning sieve of rape combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12):54 - 57, 47. (in Chinese)
[25] 马征,李耀明,徐立章. 油菜脱出物漂浮速度及摩擦与浸润特性的测定与分析[J]. 农业工程学报,2011,27(9):13 - 17.
MA Zheng, LI Yaoming, XU Lizhang. Testing and analysis on rape excursion components characteristics in floating, friction and wettability[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9):13 - 17. (in Chinese)
[26] 张凯,王瑞金,王刚. Fluent 技术基础与应用实例[M]. 北京:清华大学出版社,2010.
[27] 刘德军,赵秀荣,高连兴,等. 不同收获方式含水率对油菜收获物流损失的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(10):339 - 342.
LIU Dejun, ZHAO Xiurong, GAO Lianxing, et al. Effect of moisture content on rape harvest logistics losses under different harvest methods[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10):339 - 342. (in Chinese)