

对辊挤压式砂姜黑土整地机设计与试验

陈桂斌^{1,2} 董超^{1,2} 张立^{1,2} 王庆杰^{1,2} 何进^{1,2} 李洪文^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对砂姜黑土区土壤易形成坚硬土块,传统翻耕、旋耕作业后地表大土块过多,严重影响小麦播种质量的问题,设计了一种对辊挤压式砂姜黑土整地机,可一次性完成土块捡拾、筛分输送、破碎还田和平地镇压等作业。对整机关键部件进行了设计与分析,确定了入土铲刀、筛分输送装置和破碎装置等部件结构与工作参数,同时分析了土壤在筛分输送装置上的受力和运动过程。采用高速摄影对砂姜黑土土块破碎机理进行研究,得到土块破碎过程中位移-载荷变化规律,结果表明土块最大破碎载荷不超过 900 N;利用 EDEM 软件对 3 种辊齿的碎土能力进行仿真分析,确定破碎装置的结构和工作参数。田间试验采用 3 种作业方式:犁耕 + 旋耕 + 捡拾破碎(地块 a);犁耕 + 捡拾破碎(地块 b);犁耕 + 旋耕两次(地块 c)。其中,地块 a 农田土块破碎率为 89.5%,较地块 c 高 44.4 个百分点;地块 b 较地块 c 土块数量少 55.3%。a、b、c 3 个地块地表平整度标准差均值分别为 6.92、11.58、17.23 mm,结果表明地块 a 作业后地表平整度最佳,地块 b 作业效果优于地块 c,在一定条件下,对辊挤压式砂姜黑土整地机作业效果优于旋耕机。

关键词: 砂姜黑土; 整地机; 对辊

中图分类号: S222.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)03-0050-10

OSID:



Design and Experiment of Shajiang Black Soil Preparation Machine with Double Pressing Roller

CHEN Guibin^{1,2} DONG Chao^{1,2} ZHANG Li^{1,2} WANG Qingjie^{1,2} HE Jin^{1,2} LI Hongwen^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the Shajiang black soil tend to become hard soil blocks and there are too many large soil blocks remain on land surface after traditional tillage and rotary tillage, which seriously affects the quality of wheat sowing. A pair of roller extrusion Shajiang black soil preparation machine was designed for solving the mentioned problems. The machine can finish the series work of soil pick-up, screening and transportation, crushing and returning to the field, and flat pressing. The multifunctional material testing machine and high-speed photography were used to study the crushing mode of Shajiang black soil, and the displacement load variation law in the crushing process was obtained. The maximum crushing load was determined to be no more than 900 N. Straight blade, as the key parts of the whole machine structure, its parameters such as the blade inclination angle, blade length, blade rear end height were studied. Through the force analysis of the soil block in the screening conveying device, the angle between the screen plate and the retaining plate was finally believed to be 110 degrees. By researching on the installation parameters of the crushing roller and the rotation speed of the crushing roller in the crushing device, the structure and working parameters of the crushing device were finally identified. There were three comparison through the field experiment: plow + rotary tillage + picking up and breaking (a), plow + picking up and breaking (b), plow + rotary tillage + rotary tillage (c). Comparing the results of a and c, the soil fragmentation rate of a was 89.5%, which was 44.4 percentage points higher than that of mode c. Besides, the number of soil blocks in mode b was 55.3% less than that in mode c. The mean values of standard deviation of surface roughness of mode a, b and c were 6.92, 11.58 and 17.23 mm, respectively, The results showed that the surface evenness of mode a was the best, and the effect of mode

收稿日期: 2021-03-26 修回日期: 2021-06-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700301)

作者简介: 陈桂斌(1997—),男,博士生,主要从事现代农业装备设计研究,E-mail: 1510202878@qq.com

通信作者: 王庆杰(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计研究,E-mail: wangqingjie@cau.edu.cn

b was better than that of mode c. Under certain conditions, the effect of double roller extrusion type soil preparation machine for Shajiang black soils was better than that of rotary tiller.

Key words: Shajiang black soil; ground preparation machine; double pressing roller

0 引言

砂姜黑土是国内主要中低产土壤类型之一,全国总面积约为 $4 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 主要分布在黄淮海平原南部。砂姜黑土钙质结核粒径大,容重大,土壤特性变化大,“早、涝、僵、瘦”问题较为严重^[1-3], 现有耕整地机具难以适应砂姜黑土土质要求,导致耕整地质量差、地表土块多,严重降低播种质量。

砂姜黑土区在秋播小麦前,整地方式多为先利用铧式犁翻耕,后用旋耕机旋耕^[4-5],翻耕能使表层紧实土壤疏松细碎,增加土壤孔隙度;旋耕能平整地表、降低地表容重^[6],但由于砂姜黑土特殊的物理性质,旋耕对土块的破碎效果差,耕后地表存在大量坚硬土块,严重影响小麦播种质量。同时连年旋耕会使土地耕层变浅、犁底层变紧实、透水通气性差、农作物产量降低^[7-8]。此外,免耕加深松也为砂姜黑土区小麦种植常见整地方式,免耕条件下秸秆覆盖可提高砂姜黑土的蓄水保墒能力,增加土壤有机质积累,改善砂姜黑土的理化性质^[9-10],深松可打破犁底层,降低土壤容重^[11-12],但免耕加深松的作业模式不能对砂姜黑土土块进行有效破碎处理,导致耕地平整度差,小麦播种质量不佳。目前国内缺少砂姜黑土碎土整地机具,相关学者对于碎土部件的研究主要集中在旋耕刀、圆盘耙、驱动耙、镇压器等方面^[13-16],秦宽等^[17]设计了一款集翻耕、旋耕、秸秆粉碎还田于一体的犁翻旋耕复式作业机;赵淑红等^[18]研制了一种与深松铲互作效应的破茬碎土刀,以求破碎深松作业时的残存土块,降低机具作业功耗;张春玲等^[19]提出了一种六头螺旋秸秆还田耕整机刀辊,以期减小功耗,提高碎土率。上述传统的碎土部件对砂姜黑土土块破碎效果差,种床质量难以达到小麦播种时的农艺要求。

针对现有耕整地机具在砂姜黑土区作业后地表土块体积大、数量多,影响播种质量等问题,本文拟设计一种对辊挤压式砂姜黑土整地机,机具可一次性完成土块捡拾、筛分输送、破碎还田、平地镇压等作业。通过对辊挤压的方式对土块进行破碎处理,以提高砂姜黑土区耕整地质量。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

对辊挤压式砂姜黑土整地机主要针对传统耕作

方式难以有效破碎砂姜黑土区土块,致使耕整地质量差等问题而设计。其整机结构如图 1 所示,主要由土块捡拾装置、筛分输送装置、破碎装置、传动系统、过载保护装置等组成。

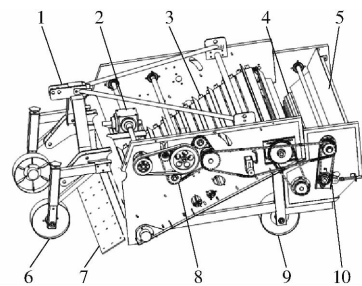


图 1 对辊挤压式砂姜黑土整地机结构简图
Fig.1 Structure diagram of Shajiang black soil preparation machine with double pressing roller

1. 挂接架 2. 变速箱 3. 筛分输送装置 4. 破碎装置 5. 挡土板 6. 限深轮 7. 铲刀 8. 传动系统 9. 行走轮 10. 过载保护装置

1.2 工作原理

机具通过三点悬挂挂接在拖拉机后方,拖拉机提供牵引力使机具在农田沿着既定路线前进,机具前端的入土铲刀随着机具前进,将地表 8 cm 以上浅层土铲起,土块在机具前进速度的作用下将被铲起并向后方运移,落入后方筛分输送装置上。

拖拉机动力输出轴将动力传递给传动系统,变速箱利用带传动和链传动将动力传递给筛分输送装置、破碎装置。筛分输送装置以高于机具前进速度运转,承接铲起的土块并向后方运移,输送装置平铺结构呈栅栏状,使细土与土块分离;当土块直径大于筛分输送装置间隙时,会被筛分出来运送到后方破碎装置中,通过破碎装置中相对旋转的对辊实现土块破碎还田。

2 砂姜黑土土块特性分析

砂姜黑土质地坚硬、易结块,与传统的土壤结构有较大的区别,对砂姜黑土土块的破碎过程和所需破碎载荷进行研究,为机具设计提供理论参考。

试验所用土块平均含水率为 4.3%,利用电子万能材料试验机,对土块进行挤压破碎试验,记录破碎所需的载荷,得到土块破碎所需载荷力;使用高速摄影设备^[20-21]对土块挤压破碎过程进行分析;得到土块破碎变形过程和位移-载荷变化规律,土块变形过程如图 2 所示。

在加载过程中,土块破碎时每个单元的应力状

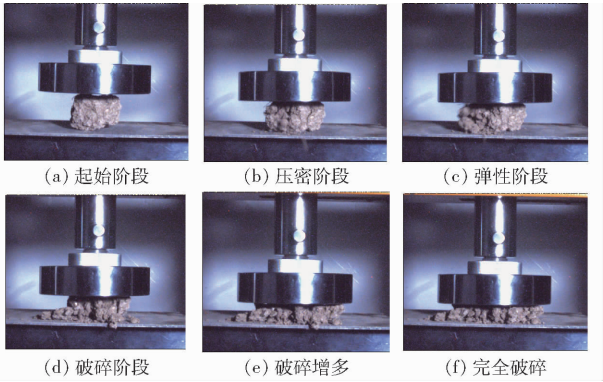


图2 土块破碎不同阶段高速摄影图像

Fig.2 High speed photographs of different stages of soil fragmentation

态如图3所示,根据平衡原理,单位法向力、切向力和主应力之间的关系为

$$\begin{cases} \sigma_N = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2\gamma) \\ \sigma_T = (\sigma_1 - \sigma_3) \sin\gamma \cos\gamma \\ \gamma = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中 σ_N ——土块单元所受法向力
 σ_T ——土块单元所受切向力
 σ_1 ——计算所得的大主应力
 σ_3 ——计算所得的小主应力
 γ ——土块单元破碎面外法线与垂直轴的夹角
 ϕ ——土块单元的内摩擦角

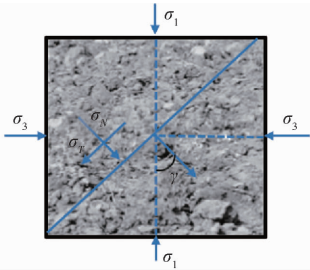


图3 单位土块破碎受力分析

Fig.3 Analysis of crushing force of unit soil mass

随机选取5组土块,并将其稳定放置在万能试验台下端夹具平台上,上端夹具选择圆盘平面,通过系统设定的速度,圆盘平面匀速垂直向下运动,通过上下两端夹具的共同挤压,实现土块破碎。连接在上端夹具上的力学传感器到达一定的受力上限后自动停机,并实时记录土块破碎过程受力的变化情况。

将各个位移阶段所受载荷用平滑曲线连接起来,得到5组土块受力破碎的位移-载荷曲线,如图4所示。对5组土块破碎位移-载荷变化曲线进行分析可知,在阶段Ⅰ(压密阶段),加载过程中土块试样开始产生微裂纹,先由土块两边端部向内无规律的延伸,土块内会出现无规律分布的短小微裂

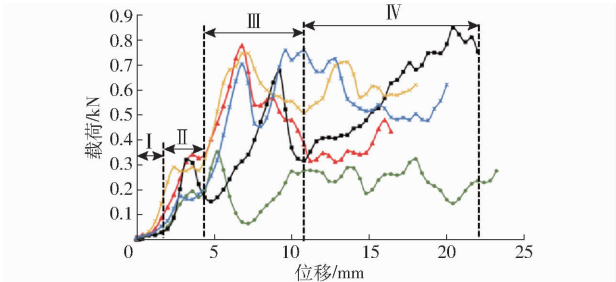


图4 土块破碎位移-载荷变化曲线

Fig.4 Variation curves of soil fragmentation displacement-load

纹,载荷呈指数增长;在阶段Ⅱ(弹性阶段),微小裂纹扩展较快,同时产生分叉新裂纹,土块发生弹性形变开始呈现崩碎趋势,此时载荷呈现一定程度的波动,曲线转折点处载荷基本都不超过400N;在阶段Ⅲ(破碎阶段),土块强度达到破碎载荷峰值,土块产生崩裂,且伴随微小爆裂声,破碎阶段的载荷基本都不超过800N;在阶段Ⅳ(完全破碎阶段),试验土块从挤压破碎至最终完全破碎,完全破碎阶段的载荷处在不断波动状态,且最大载荷均未超过900N。

研究砂姜黑土土块的破碎过程,将土块挤压破碎试验所得载荷的数据作为土块破碎所需载荷初步估值,为后续机具破碎装置等结构设计提供参考。

3 关键部件设计

3.1 入土铲刀选型与参数设计

入土铲刀为直接接触土部件,其主要功能为捡拾铲起地表土块,并将土块向后输送,根据砂姜黑土区地表状况及小麦播种时的农艺要求,铲刀入土作业时要对播种深度内的大土块进行捡拾,同时尽可能的降低入土深度。

3.1.1 入土铲刀选型

砂姜黑土整地机为播前耕整地机具,田间作业时,地表及土壤浅层经旋耕机作业后,土壤疏松,对入土铲刀的作用力相对较小。普通旋耕机作业深度为12~16cm^[22],小麦播种深度一般为3~5cm^[23],故将铲刀的作业深度控制在5~8cm较为合适。

土块捡拾机械与农用铲运机械及薯类收获机械等作业原理类似,目前捡拾铲刀主要分为一字型铲刀和凸字形铲刀。其中,凸字形铲刀入土过程有先后,因此其入土能力强,但所需能耗高;一字型铲刀铲后农田地表较平整,铲刀入土行程较长,所需铲土力小、能耗少,更适合砂姜黑土等坚实的土壤条件。

3.1.2 铲刀倾角

铲刀倾角 α 是入土铲刀的重要参数, α 关系着铲刀与土块之间的力学关系,同时要保证土块从铲面上顺利离开,提高铲起土块过程中的流畅性,参照

农用铲运机标准, 铲刀铲土角在 $25^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 范围内较为合适。

图 5 为铲刀作业时被铲起土块受力分析图。假设铲刀 AB 以速度 v 在农田土壤浅层中水平匀速前进, 将土壤简化为块状单体, 力的作用中心简化为点 O , 铲刀入土深度用 h' 表示。

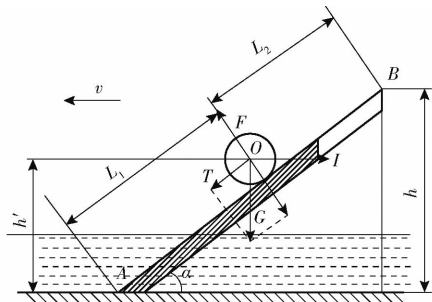


图 5 土块受力分析图
Fig. 5 Force analysis of soil block

由图 5 建立方程式

$$\begin{cases} I \cos \alpha - T - G \sin \alpha = 0 \\ F - G \cos \alpha - I \sin \alpha = 0 \\ T = F \tan \varphi_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中 I ——铲起土块沿铲刀上升的力
 F ——铲刀对土壤的反作用力
 G ——铲起土块的重力
 T ——土块沿铲面向上运动所受摩擦力
 α ——铲刀倾角
 φ_2 ——土壤对钢的摩擦角

由公式(2)可推出铲刀倾角公式为

$$\alpha = \arctan \frac{I - G \tan \varphi_2}{I \tan \varphi_2 + G} \quad (3)$$

由公式(3)可知, 铲刀倾角 α 的选择与铲刀作业土壤摩擦因数、铲土量等因素有关。机具前端铲刀的材料为 65Mn 钢板, 土壤对钢的摩擦角 φ_2 一般取值范围为 $30^{\circ} \sim 36^{\circ}$ 。则机具作业时, 土壤对铲的摩擦因数为 $\tan \varphi_2$, 结合砂姜黑土区农田土壤较黏重的特性, 最终选择铲刀倾角 α 为 30° 。

3.1.3 铲刀长度

如图 5 所示, 铲刀的长度 L 由两部分组成, 分别为铲刀入土部分长度 L_1 和铲刀露出土面部分长度 L_2 , 即: $L = L_1 + L_2$, 入土部分长度 L_1 可以根据确定的铲刀倾角 α 和铲刀入土深度 h' 进行近似计算, 计算式为

$$L_1 = \frac{h'}{\sin \alpha} \quad (4)$$

铲刀露出土面部分长度 L_2 可以近似由能量定理计算。土壤从被铲起到移动到最高位置, 经历长度为 L_2 , 能量由动能 E 转换为重力势能 w_1 和摩擦消耗的能量 w_2 , 可得到能量守恒公式

$$\begin{cases} \frac{mv^2}{2} = w_1 + w_2 \\ w_1 = mgL_2 \sin \alpha \\ w_2 = mgL_2 \tan \phi \cos \alpha \end{cases} \quad (5)$$

由公式(5), 得到铲刀长度 L 的计算公式为

$$L = L_1 + L_2 = \frac{h'}{\sin \alpha} + \frac{v^2 \cos \varphi_2}{2g \sin(\alpha + \varphi_2)} \quad (6)$$

根据上述公式, 当铲刀倾角 α 取 30° , 入土深度 h' 取作业最大深度 80 mm, 机具作业速度 v 取值为 1.2 m/s, φ_2 取值为 30° , 重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 则通过公式(6)计算, 得到铲刀长度 L 约为 235 mm。

3.1.4 铲刀后端高度

铲刀后端高度 h 主要与铲刀后端所连接的筛分输送装置的安装位置有关, 需要保证 h 介于从动轮轴心 D 所在的水平位置与挡土板运转轨迹最低点 C 所在水平位置之间, 具体位置布置如图 6 所示。

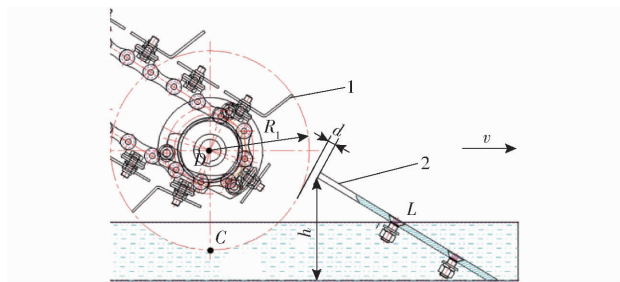


图 6 铲刀与筛分装置位置示意图
Fig. 6 Schematic of blade and screening device position
1. 挡土板 2. 入土铲刀

机具作业时, 被铲起土壤和土块会被挡土板承接并向上运送, 挡土板运动至从动轮轴处的轨迹半径用 R_1 表示, 考虑到铲刀入土深度范围在 5 ~ 8 cm, 挡土板轨迹最低点 C 应尽量靠近农田地表, 筛分输送装置从动链轮轴心所处的水平面与地表高度差设计为 100 mm, 安装间隙 d 为 10 mm, 挡土板运动轨迹是半径 R_1 为 274 mm 的圆弧, 则点 C 与土壤的最大干涉深度为 37 mm。

以铲刀设计的最大入土深度 80 mm 来计算, 最大干涉深度对机具的正常运行没有影响, 将铲土板后端最高点设计为距离地面 45 mm, h 为 125 mm。而根据前文所选择和计算得出的铲刀倾角 α 和铲刀长度 L 取值, 计算得出铲刀高度 $h = L \sin \alpha = 117.5 \text{ mm}$ 。

3.2 筛分输送装置

3.2.1 土块受力运动分析

筛分输送装置主要由筛分输送链、链杆、筛土板、挡土板、传动链条等部件组成。机具作业时, 被铲起的土块由筛分输送装置中的挡土板承接并向后方运送, 相邻挡土板间设计安装间隙, 在运送土块过

程中筛分输送链产生抖动,土块在挡土板上的运动多为顺流和回流两种形式,筛分输送链在进行回转运动时,大小土块间产生挤压、碰撞、翻滚、跳跃等随机运动,小粒径土壤颗粒通过挡土板撒落地表,大粒径土块在筛分输送链的运携下进入后续破碎装置中,具体过程如图 7 所示。

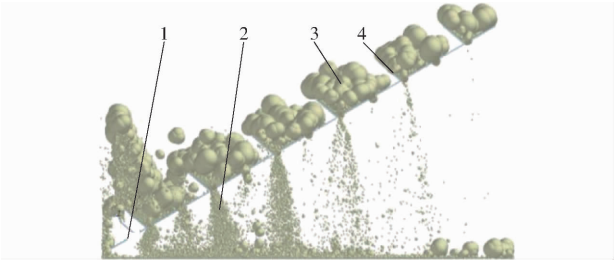


图 7 土块筛分过程图
Fig. 7 Soil block screening process diagram
1. 筛土板 2. 小粒径土壤 3. 大粒径土块 4. 挡土板

两挡土板间距离约 140 mm,考虑到农田中土块粒径区间分布以及筛分输送装置需要承接大量农田土块和土壤,在承接输送过程中可能发生堆积,故将挡土板的高度设计为 60 mm,将土块简化为球体,则挡土板可承接的最大球体直径约为 143 mm,超出农田中分布的绝大多数土块直径,可满足承接土块并使其在输送过程中不向下滚落的要求,土块在向上输送过程中的受力分析如图 8 所示。

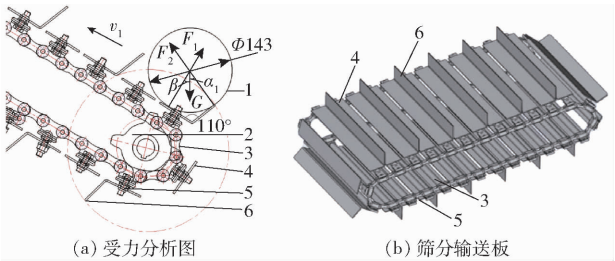


图 8 最大土块受力分析示意图
Fig. 8 Schematic of maximum soil block stress analysis
1. 最大直径土块简化模型 2. 从动链轮 3. 传动链条 4. 筛土板 5. 链杆 6. 挡土板

如图 8a 所示,当土块在筛分输送装置中以速度 v_1 匀速向后上方运动时,可得出土块匀速运动时受力平衡方程为

$$\begin{cases} G\cos\beta - F_1 - F_2\cos(\alpha_1 + \beta) = 0 \\ F_2\sin(\alpha_1 + \beta) - G\sin\beta = 0 \end{cases} \quad (7)$$

综合上述受力平衡方程式,可以得出 F_1 、 F_2 的关系式为

$$\begin{cases} F_1 = G\left(\cos\beta - \frac{\sin\beta}{\tan(\alpha_1 + \beta)}\right) \\ F_2 = G\frac{\sin\beta}{\sin(\alpha_1 + \beta)} \end{cases} \quad (8)$$

式中 G ——土块模型的重力

α_1 ——重力与其作用在筛土板压力间的夹角
 β ——筛分输送装置与作用平面的倾角
 F_1 ——筛土板对土块模型支持力
 F_2 ——挡土板对土块模型支持力

两块板焊接形成的夹角应在 $90^\circ \sim 135^\circ$ 之间,如果夹角小于 90° ,会产生壅土现象,如果夹角大于 135° ,则较大粒径土块会直接从挡板处滚下。本文选择筛土板与挡土板间夹角为 110° 。

3.2.2 承载能力分析

筛分输送装置需先承接被铲刀铲起的土壤和土块,后将筛分过的土块输送至破碎装置,其输送过程的承载能力对于输送链板强度设计较为重要。

根据特征线法的通解达朗贝尔公式,求得筛分输送链板运送土块的承载能力为

$$u(x,t) = \frac{1}{2}(\varphi_1(x+ct) + \varphi_3(x-ct)) \quad (9)$$

其中 $c = \sqrt{\frac{EB}{m(x,t)}}$

式中 φ_1 、 φ_3 ——任意形式函数
 c ——筛分链弹性波传播速度,函数形式由初始条件和边界条件决定
 E ——筛分链弹性模量
 B ——链板宽度

筛分链板张力为

$$T(x,t) = EB \frac{\delta u(x,t)}{\delta x} = EA(\varphi_1'(x+ct) - \varphi_3'(x-ct)) \quad (10)$$

在筛分输送链板张力下插入筛分链板速度为

$$V(x,t) = \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} + v(x,t) = c\varphi_1'(x+ct) - c\varphi_3'(x-ct) + v(x,t)$$

上述方程解由两部分叠加,解得

$$\begin{cases} V(x,t) = v_x + v_y + v_1 \\ T(x,t) = \tau_1 + \tau_2 \\ \tau_1 = EB\varphi_1'(x+ct) \\ v_x = c\varphi_1'(x+ct) \end{cases} \quad (11)$$

式中 V ——筛分链板运动速度
 v_1 ——筛分输送链板速度
 v_x ——筛分链板水平方向速度分量
 v_y ——筛分链板竖直方向速度分量
 τ_1 ——驱动链轮在侧上方链板张力
 τ_2 ——驱动链轮在侧下方链板张力

因筛分输送链板驱动链轮在侧上方,因此运动时张力为

$$\tau_1 = EB \frac{v_x}{c} = c_1 m_1(x,t) v_x \quad (12)$$

其中 $m_1 = h'\rho Bv(x,t)$

式中 m_1 ——单位负载段质量

结合筛分输送链弹性波传播速度 9.64 m/s, 铲刀铲土深度 80 mm, 土壤密度 2 350 kg/m³, 链板运动速度 0.87 m/s, 链板宽度 1 560 mm 等计算, 得筛分输送链板承载能力为 2 460 N。

3.2.3 运动过程分析

如图 9 所示, 为确定每个筛土板与挡土板运动的起始时间与结束时间, 以达到模拟链传动工作过程, 对筛土板与挡土板的运动过程进行分析, 建立两板运动分析模型。当 n 为奇数时, 挡土板运动的起始时间与结束时间分别为

$$\begin{cases} T_{n0} = \frac{1}{v_1} \left[(n-1)l + \frac{n-1}{2}(l_1 + l_2) \right] \\ T_{n1} = \frac{1}{v_1} \left[(n-1)l + \left(\frac{n}{2} - 1 \right)l_1 + \frac{n}{2}l_2 \right] \end{cases} \quad (n=1, 3, 5, \dots) \quad (13)$$

当 n 为偶数时, 挡土板运动的起始时间与结束时间分别为

$$\begin{cases} T_{n2} = \frac{1}{v_1} \left[(n-1)l + \frac{n-1}{2}(l_1 + l_2) \right] + \frac{h_0}{v_1 \sin \theta} \\ T_{n3} = \frac{1}{v_1} \left[(n-1)l + \left(\frac{n}{2} - 1 \right)l_1 + \frac{n}{2}l_2 \right] + \frac{h_0}{v_1 \sin \theta} \end{cases} \quad (n=2, 4, 6, \dots) \quad (14)$$

式中 l ——筛分间距

l_1 ——筛土板宽度

l_2 ——挡土板宽度

h_0 ——筛分输送链板高度

θ ——筛分输送链板与水平面安装夹角

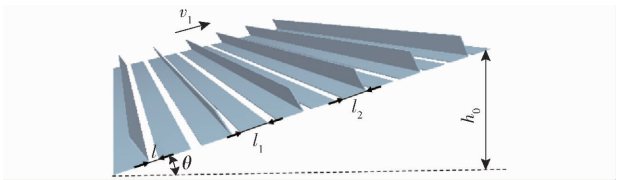


图 9 筛分输送链板运动模型

Fig. 9 Motion model of chain plate in screening and conveying

3.3 破碎装置

破碎装置主要包括前后两个破碎辊、传动轴、活动摇臂板、挡土板、过载保护装置、加强杆、侧板等, 如图 10 所示。

破碎装置的碎土方式以挤压、剪切为主, 碰撞为辅。破碎原理为筛分输送装置将未被筛分还田的大粒径土块从后方抛出, 土块以一定的初速度撞击在破碎装置挡土板上, 前后两个破碎辊通过相向差速旋转, 将大粒径土块破碎成小粒径土块并实现还田。

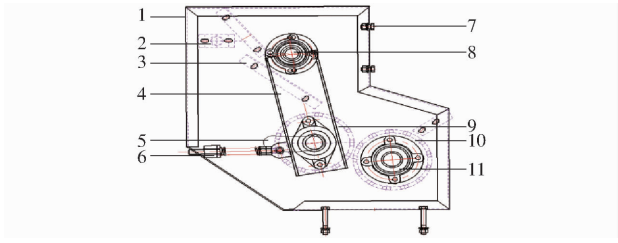


图 10 破碎装置侧视图

Fig. 10 Side view of crushing device

1. 侧板 2. 加强杆 3. 挡土板 4. 活动摇臂板 5. 前破碎辊移动滑道 6. 弹簧调节杆 7. 紧固螺栓 8. 传动轴 9. 后破碎辊 10. 过载保护装置 11. 滚动轴承

砂姜黑土最大碎土载荷为 900 N, 其硬度较大且地表环境复杂, 可能存在石块等坚硬杂物, 因此加装过载保护装置, 可自行向后移动以扩大对辊间距, 起到过载保护的作用。

3.3.1 破碎辊齿选择

在破碎辊表面设置规律分布的辊齿结构能够更适合农田土块破碎需求, 辊齿不仅能增大土块的接触面积, 同时也能增加破碎辊与土块接触时的载荷, 提高土块破碎率。

如图 11 所示, 目前并未有针对土块破碎的辊齿齿形, 结合砂姜黑土的碎土要求, 本文设计了 3 种形式的辊齿, 相关研究表明连续条形齿对土块的剪切、挤压破碎效果较好, 但当土块含水率大时, 土块破碎后易被压入辊齿凹槽内, 出现“堵齿”, 间断条形齿能够减轻堵齿发生, 但辊齿与土块的接触面积减小, 为保证土块挤压破碎效果, 减轻辊齿根部的堵齿现象, 基于连续条形齿上安装间断条形齿, 从而设计组合形齿, 应用离散元仿真软件对破碎辊齿的碎土过程进行分析, 以求获得最佳的辊齿形式和差速条件。

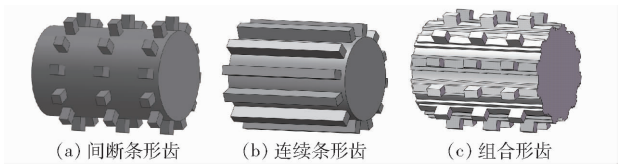


图 11 破碎辊结构示意图

Fig. 11 Structure diagrams of crushing roller

砂姜黑土土块物理特性各向一致性较高, 结合对现有的砂姜黑土的尺寸及形状分布统计, 仿真时建立球体(直径 60 mm)与长方体(60 mm × 60 mm × 40 mm)各 5 个土块模型, 考虑到土壤颗粒间的粘结力, 应用 Hertz Mindlin with bonding 粘结模型进行土块建模, 采用颗粒替换的方式生成由多个小颗粒粘结而成的土块, 并使用 API 函数完成颗粒替换, 其小颗粒半径为 3 mm, 粘结半径为 3.5 mm。在破碎过程中颗粒团的颗粒间粘结键受力断裂, 以此模拟土块破碎过程, 其土块粘结参数如表 1 所示, 接触参数

如表 2 所示。

表 1 砂姜黑土土块粘结参数
Tab.1 Bond of Shajiang black soil block

参数	数值
法向刚度/(N·m ⁻³)	2.0×10 ⁸
切向刚度/(N·m ⁻³)	2.5×10 ⁷
法向临界应力/Pa	8.37×10 ⁵
切向临界应力/Pa	4.12×10 ⁵
粘结半径/mm	3.5

表 2 接触参数
Tab.2 Contact parameters

参数	数值
泊松比	0.26
土壤密度/(kg·m ⁻³)	2 350
土壤剪切模量/Pa	1×10 ⁶
土壤间恢复系数	0.23
土壤间静摩擦因数	0.70
土壤间动摩擦因数	0.18
土壤-部件恢复系数	0.15
土壤-部件静摩擦因数	0.35
土壤-部件动摩擦因数	0.13

在仿真模拟过程中将建立好的破碎辊模型导入仿真软件,为简化计算过程,模型中分别截取长度均为 300 mm 的 3 种破碎辊进行仿真分析。仿真时分别生成球体与长方体各 5 个粘结土块模型,如图 12 所示。

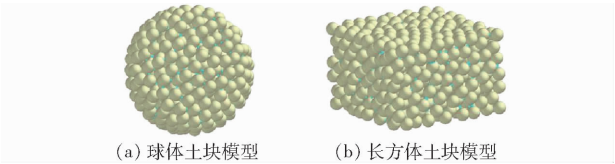


图 12 土块离散元模型
Fig.12 Discrete element models of soil block

在 EDEM 前处理面板中设置前辊齿转速为 200 r/min,后破碎辊转速分别为 300、350、400 r/min,进行对比试验。探究不同辊齿和不同速差条件下土块破碎情况,以破碎后的粘结键破碎个数与最大土块粘结颗粒个数为试验指标衡量破碎效果,仿真如图 13 所示,仿真结果如表 3 所示。

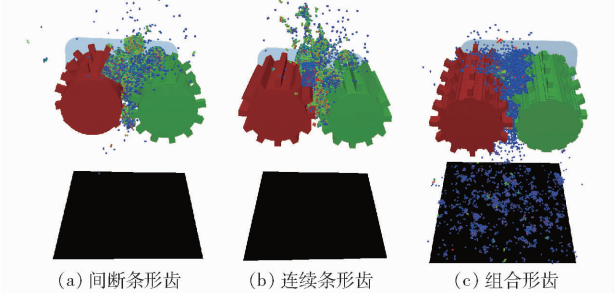


图 13 辊齿作业仿真
Fig.13 Simulation process of roller teeth

表 3 不同辊齿、速差下土块的破碎效果对比
Tab.3 Comparison of crushing effect of different roller teeth and speed difference on soil lumps

破碎对辊齿形	破碎对辊速差/ (r·min ⁻¹)	粘结键断裂 个数/个	剩余最大土块粘 结颗粒个数/个
间断条形齿	100	8 174	94
	150	8 180	91
	200	8 295	108
连续条形齿	100	9 202	82
	150	9 628	78
	200	9 628	80
组合形齿	100	9 404	82
	150	10 075	74
	200	10 281	86

仿真试验结果表明:在相同速差下,组合形齿粘结键断裂数量最多,且每种齿形的破碎对辊随着速差的增大,粘结键断裂数量都有增加趋势。对比不同速差,速差为 150 r/min 时,破碎后剩余最大土块颗粒粘结个数最小,因此组合形齿的碎土效果最好。

3.3.2 破碎辊安装参数

破碎对辊相对位置直接影响土块破碎效果,农田中土块直径大于 30 mm 可对作物生长产生较大影响^[21]。因此,破碎对辊安装时要求将土块的粒径范围控制在 30 mm 以下,图 14 为对辊安装位置示意图。

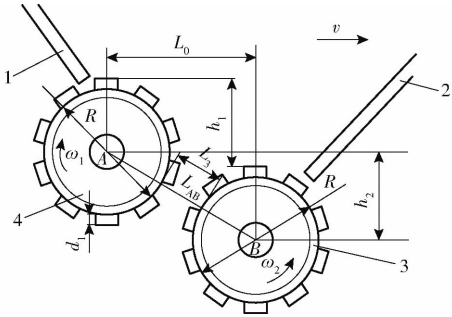


图 14 前后破碎辊相对位置示意图
Fig.14 Relative position of front and rear crushing rolls
1.后挡土板 2.前挡土板 3.前破碎辊 4.后破碎辊

3.3.2.1 破碎辊中心垂直距离

根据图 14 所示,假设机具以速度 v_2 在田间作业,两破碎辊中心 A 和 B 之间垂直距离高度 h_2 为

$$h_2 = h_1 = H_A - H_B \tag{15}$$

式中 h_1 ——两破碎辊运转时可达到的最上端点之间距离

H_A ——后破碎辊中心点 A 与地面垂直距离

H_B ——前破碎辊中心点 B 与地面垂直距离

秋播前,砂姜黑土区农田经过旋耕机作业后,直径 30 mm 以上的土块基本分布范围在 30 ~ 140 mm。两辊中心高度差在 70 ~ 80 mm 间较为合理,最终两

捡拾破碎;地块 c 为犁耕 + 旋耕两次。3 种不同方式作业后,对地块 a、b、c 的土块破碎率、地表平整度、出苗率进行测量计算。3 种不同方式作业前后对比如图 17 所示。

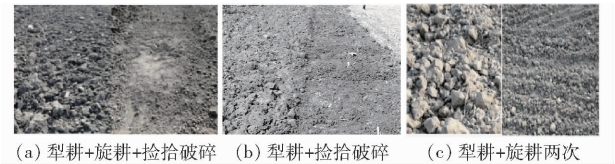


图 17 3 种不同作业方式作业前后对比

Fig. 17 Comparison of three different operation modes

4.2 土块破碎率

在进行对比试验前,将试验地土块分布情况进行统计。采用 5 点取样法分别在试验地块 a、b、c 选取 5 个 1 m² (1 m × 1 m) 地块统计其中直径大于 30 mm 的土块个数,并取平均值来表示地块 a、c 试验前 1 m² 内大于 30 mm 的土块个数。在地块 a、b、c 上分别在机器作业后,以同样方法统计剩余的直径大于 30 mm 的土块数量,并取平均值。土块破碎率 N'计算公式为

N' = (S1 - S2) / S1 × 100% (22)

式中 S₁——试验前 1 m² 地块内直径大于 30 mm 土块数量

S₂——试验后 1 m² 地块内直径大于 30 mm 土块数量

经过对试验前后 3 种不同作业方式下土块的统计测量,测得土块数量及破碎率如表 5 所示。

表 5 土块数量及破碎率

Tab. 5 Quantity and crushing rate of soil blocks

地块	S ₂					平均值	S ₁	破碎率/ %
a	62	28	33	46	41	42	400	89.5
b	98	103	120	143	66	106		
c	276	185	293	200	231	237	432	45.1

根据表 5 可知:①对比地块 a、c,砂姜黑土整地机破碎土块性能优于旋耕机,砂姜黑土整地机作业后土块破碎率为 89.5%,比旋耕两次作业的土块破碎率高 44.4 个百分点。②对比地块 b、c,试验后地块 b 下 30 mm 土块数量较地块 c 少 131 个,地块 b 较地块 c 土块数量少 55.3%,砂姜黑土整地机土块破碎效果较旋耕机作业两次好。

4.3 地表平整度

进行 3 种不同作业方式的地表平整度测量,分别选取等间距的 3 个横向位置,在每个位置 1.6 m 的宽度上,等间距取 8 个点,完成试验数据测定,并取每组数据的标准差均值表示地表平整程度,相关

测量数据如表 6 所示。

表 6 3 种不同作业方式地表平整度

Tab. 6 Surface roughness of three different operation modes

地块	位置	测量值/mm								标准差 均值/mm
a	1	68	76	54	70	63	80	72	68	6.92
	2	78	82	65	60	73	67	72	75	
	3	75	64	53	74	69	70	63	67	
b	1	58	75	83	64	70	62	71	77	11.58
	2	83	90	62	57	59	91	72	75	
	3	53	75	78	88	94	100	66	83	
c	1	80	91	120	73	122	75	67	103	17.23
	2	93	125	73	82	97	117	109	78	
	3	82	80	92	114	76	85	114	86	

由试验测得数据及实际作业效果可知:砂姜黑土整地机平地镇压效果较旋耕机好,在经过犁耕 + 旋耕 + 捡拾破碎作业后农田地表平整度标准差均值为 6.92 mm,远小于犁耕 + 旋耕两次作业后标准差均值 17.23 mm,且捡拾破碎后地块高度较旋耕机低,说明土壤地表更加平整。犁耕 + 捡拾破碎后地表平整度标准差均值为 11.58 mm,优于旋耕作业后标准差均值 17.23 mm,与犁耕 + 旋耕 + 捡拾破碎作业地表平整度差距不大。因此,可在优化砂姜黑土整地机平地镇压效果的基础上,去除旋耕作业,以减少机具进地作业次数,节约农业生产成本。

5 结论

(1)利用万能材料试验机和高速摄影对砂姜黑土土块破碎过程进行研究,得到土块破碎形变过程图像和位移-载荷变化规律,明确土块发生破碎时最大破碎载荷不超过 900 N。

(2)进行砂姜黑土整地机整机结构设计,对关键部件入土铲刀进行选型与参数设计;对筛分输送装置中的土块进行受力分析,确定筛分输送链板的最大输送承载能力和运动过程;利用 EDEM 软件对辊齿碎石过程进行仿真分析,得到最佳辊齿形式和速差;对破碎辊安装参数、破碎辊转速进行设计,确定破碎装置的结构和工作参数。

(3)通过田间试验表明,犁耕 + 旋耕 + 捡拾破碎方式农田土块破碎率为 89.5%,较犁耕 + 旋耕两次破碎率高 44.4 个百分点;犁耕 + 捡拾破碎较犁耕 + 旋耕两次土块数量少 55.3%。地块 a、b、c 地表平整度标准差均值分别为 6.92、11.58、17.23 mm,结果表明地块 a 作业后地表平整度最佳,地块 b 作业效果优于地块 c,对辊挤压式砂姜黑土整地机可在一定程度上代替旋耕机作业。

参 考 文 献

- [1] 张娟娟,席磊,杨向阳,等.砂姜黑土有机质含量高光谱估测模型构建[J].农业工程学报,2020,36(17):135-141.
ZHANG Juanjuan, XI Lei, YANG Xiangyang, et al. Construction of hyperspectral estimation model for organic matter content in sandy ginger black soil[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(17): 135-141. (in Chinese)
- [2] 谷丰. 典型砂姜黑土区农田土壤水分养分动态变化特征及模拟[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
GU Feng. Characteristics and modeling of soil water and nutrition dynamics in a typical calcic vertisol[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [3] 詹其厚. 砂姜黑土壤性土特点与农业综合利用技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
ZHAN Qihou. Effects of tillage and sowing and straw returning methods on soil physical and chemical properties and yield formation of winter wheat in lime concretion black soil[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [4] GUAN Chunsong, FU Jingjing, CUI Zhichao, et al. Evaluation of the tribological and anti-adhesive properties of different materials coated rotary tillage blades[J]. Soil & Tillage Research, 2021, 209: 104933.
- [5] MATIN M A, HOSSAIN M I, GATHALA M K, et al. Optimal design and setting of rotary strip-tiller blades to intensify dry season cropping in Asian wet clay soil conditions[J]. Soil & Tillage Research, 2021, 207: 104854.
- [6] 魏国梁,张青松,刘立超,等.犁旋组合式油菜直播机扣垡装置设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(6):38-46.
WEI Guoliang, ZHANG Qingsong, LIU Lichao, et al. Design and experiment of plowing and rotary tillage buckle device for rapeseed direct seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 38-46. (in Chinese)
- [7] 杨庆璐,陈桂斌,谢立娟,等.伸缩指杆式玉米秸秆旋耕掩埋机设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(12):35-43.
YANG Qinglu, CHEN Guibin, XIE Lijuan, et al. Design and test of telescopic rod type corn stalk rotary tillage and burying machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 35-43. (in Chinese)
- [8] 郑侃,何进,李洪文,等.反旋深松联合作业耕整机设计与试验[J].农业机械学报,2017,48(8):61-71.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of combined tillage implement of reverse-rotary and subsoiling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 61-71. (in Chinese)
- [9] 何进,李洪文,陈海涛,等.保护性耕作技术与机具研究进展[J].农业机械学报,2018,49(4):1-19.
HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1-19. (in Chinese)
- [10] 王庆杰,王宪良,李洪文,等.华北一年两熟区玉米秸秆覆盖对冬小麦生长的影响[J].农业机械学报,2017,48(8):192-198.
WANG Qingjie, WANG Xianliang, LI Hongwen, et al. Effect of maize straw mulching on winter wheat growth in double cropping area of northern China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 192-198. (in Chinese)
- [11] 何明,高焕文,董培岩,等.一年两熟地区保护性耕作深松试验[J].农业机械学报,2018,49(7):58-63.
HE Ming, GAO Huanwen, DONG Peiyan, et al. Sub-soiling experiment on double cropping and conservation tillage adopted area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 58-63. (in Chinese)
- [12] 林静,张桐嘉,陈彬,等.深松灭茬旋耕起垄联合作业机设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(2):28-39.
LIN Jing, ZHANG Tongjia, CHEN Bin, et al. Design and test of subsoiling rotary rilling and rilling combined operating machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 28-39. (in Chinese)
- [13] 贾洪雷,王万鹏,陈志,等.农业机械触土部件优化研究现状与展望[J].农业机械学报,2017,48(7):1-13.
JIA Honglei, WANG Wanpeng, CHEN Zhi, et al. Research status and prospect of soil-engaging components optimization for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 1-13. (in Chinese)
- [14] 曾荣,李东东,祝英豪,等.旋转耕作部件性能测试试验台设计与应用[J].农业机械学报,2020,51(5):88-97.
ZENG Rong, LI Dongdong, ZHU Yinghao, et al. Design and application of performance test bench for rotary tiller components[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 88-97. (in Chinese)
- [15] 王文明,王天元,郭兵,等.基于振动减阻原理的旋转中耕机关键部件设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(3):35-45,135.
WANG Wenming, WANG Tianyuan, GUO Bing, et al. Design and experiment of key components of rotary cultivator based on vibration reducing resistance principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 35-45, 135. (in Chinese)
- [16] 王金武,张成亮,许春林,等.联合整地机平整部件参数优化[J].农业机械学报,2013,44(2):34-37,11.
WANG Jinwu, ZHANG Chengliang, XU Chunlin, et al. Parameters optimization on flattening component of combined cultivating implement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 34-37, 11. (in Chinese)
- [17] 秦宽,丁为民,方志超,等.犁翻旋耕复式作业耕整机的设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(16):7-16.
QIN Kuan, DING Weimin, FANG Zhichao, et al. Design and experiment of plowing and rotary tillage combined machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 7-16. (in Chinese)
- [18] 赵淑红,王加一,杨超,等.保护性耕作破茬碎土刀设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(9):57-68.
ZHAO Shuhong, WANG Jiayi, YANG Chao, et al. Design and experiment of stubble chopper under conservation tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 57-68. (in Chinese)
- [19] 张春岭,夏俊芳,张居敏,等.六头螺旋秸秆还田耕整机刀辊设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(3):25-34.
ZHANG Chunling, XIA Junfang, ZHANG Jumin, et al. Design and experiment of knife roller for six-head spiral straw returning cultivator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 25-34. (in Chinese)
- [20] 王新坤,徐胜荣,樊二东,等.全圆旋转射流喷头设计与水力性能试验[J].农业机械学报,2019,50(2):132-137,146.
WANG Xinkun, XU Shengrong, FAN Erdong, et al. Structure design and hydraulic performance test of round rotary jet sprinkler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 132-137, 146. (in Chinese)
- [21] YANG Xin, WU Bo, ZHANG Zhenya. A study of fracture toughness of granite under impact load using three-dimensional reconstruction and high-speed photography techniques[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(22): 1227.
- [22] 杜新武,杨绪龙,庞靖,等.悬挂式旋耕机耕深监测系统设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(8):43-51.
DU Xinwu, YANG Xulong, PANG Jing, et al. Design and test of tillage depth monitoring system for suspended rotary tiller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 43-51. (in Chinese)
- [23] 姜萌,刘彩玲,魏丹,等.小麦宽苗带精量播种施肥机设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(11):53-62.
JIANG Meng, LIU Cailing, WEI Dan, et al. Design and test of wide seedling strip wheat precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 53-62. (in Chinese)