

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.003

4MB-6型密植棉秆对行铲拔铺放机改进设计

贺小伟^{1,2} 刘金秀^{2,3} 徐杨¹ 王龙^{1,2} 高筱钧¹ 王旭峰^{2,3}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 塔里木大学机械电气化工程学院, 阿拉尔 843300;

3. 新疆维吾尔自治区普通高等学校现代农业工程重点实验室, 阿拉尔 843300)

摘要: 针对原4MB-6型密植棉秆对行铲拔铺放机田间性能试验中存在的减阻装置壅土严重、对行铲切装置处棉秆堆积、拔秆铺放辊拔秆不连续及有效性差等问题,对该机具进行了改进设计;为进一步提高该机具的作业性能,对其核心工作部件的作业机理进行了分析;对行铲切装置采用原地放垡间隔作业技术,当铲切深度约为115 mm时,在1幅宽膜内(2050 mm),其底部虚实作业比例为1:2.42,地表虚实作业比例为1:0.59,该比例从地面到底部呈连续递减趋势,有利于降低作业功耗;在铲切作业过程中,在梯形框架带刃口的侧板部分和铲切板的挤压、剪切作用下,棉茬周围土壤被剪切和弯曲破坏,土壤-棉根系复合体产生失效被原位抬升于土壤上层,对其余土壤的扰动较小;齿型推拔辊采用反向推拔作业原理,有利于棉秆导入V形刀齿并进行有效夹持,由于其所起拔的棉秆已被铲切抬升,且入土深度(0~10 mm)小,因此进一步减小了整机作业功耗。田间试验表明,改进后的机具整机作业性能稳定,对行铲切装置工作流畅,实现了棉秆对行铲切及原位抬升作业目标,齿型推拔辊能有效抓取棉秆,并进行切向甩抛使得整株棉秆根茬土壤分离、铺放于田间,拔净率为90.87%~91.42%,达到了整秆铲拔的设计要求(拔净率90%以上),是新疆棉区棉秆资源机械化收获的适用设备。

关键词: 密植棉秆; 低耗; 原位抬升; 反向推拔

中图分类号: S225.91⁺2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S2-0021-10

Improvement Design of 4MB-6 Row-controlled Shoveling and Drawing Placement Machine for Cotton-stalks in Close Planting

HE Xiaowei^{1,2} LIU Jinxiu^{2,3} XU Yang¹ WANG Long^{1,2} GAO Xiaojun¹ WANG Xufeng^{2,3}

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

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Tarim University, Alar 843300, China

3. The Key Laboratory of Colleges and Universities under the Department of Education of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Alar 843300, China)

Abstract: Aiming at the existing problems in the field test of the primary 4MB-6 row-controlled shoveling and drawing placement machine for cotton-stalks in close planting, such as severe soil hilling in the drag reduction device, cotton-stalks accumulation in the row-controlled shoveling device, discontinuous operation and poor effectiveness of drawing-placing roller and so on, the primary machine were improved. In order to further improve the performance of machine, the working mechanism of main working parts should be analyzed. Adopting the technique of discharging furrow slice in-situ and interval operation and when shoveling depth of the row-controlled shoveling device was about 11.5 cm, the virtual and actual operation ratio of shoveling at bottom and surface was 1:2.42 and 1:0.59 respectively that was a continuous decreasing trend from the ground to the bottom, which was helpful to reduce operating power consumption of the machine. Under extrusion and shearing of shoveling plate and side panel with blade of trapezoid frame, the soil around soil-root composite were damaged by shearing and bending and soil-root composite were also damaged and uplifted in-situ in upper soil during the process of shoveling, and the

收稿日期: 2020-08-10 修回日期: 2020-09-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300302)、兵团重大科技项目(2018AA001/03)和塔里木大学现代农业工程重点实验室开放课题项目(TDNG2020201)

作者简介: 贺小伟(1987—),男,博士生,塔里木大学讲师,主要从事现代农业装备设计与智能测控研究,E-mail: xiaoweimeixin@163.com

通信作者: 徐杨(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事农业机械及其自动化研究,E-mail: xuyang@cau.edu.cn

row-controlled shoveling device had little disturbance to the rest of the soil. The principle of reverse pushing and drawing was adopted when designing the pushing-drawing roller with tooth type. As the diameter of the main part of the cotton-stalks was gradually increased from top to bottom, it was helpful to introduce the cotton-stalks into V-shaped cutter and clamp the cotton-stalks effectively. In addition, because the cotton-stalks that would be pulled up was shoveled and lifted, and working depth of the pushing-drawing roller (0 ~ 10 mm) was small, which both were helpful to further reduce the power consumption of whole machine. The results of field test showed that the improved machine had stable operation performance compared with the primary one. The row-controlled shoveling device could work smoothly and achieve the goal of row-controlled shoveling and uplifting in-situ cotton-stalks. The pushing-drawing roller with tooth type could clamp the cotton-stalks effectively and separate the soil from soil-root composite when throwing cotton-stalks tangentially, and it could also spread cotton-stalks in the field. The pulling rate of the improved machine was 90.87% ~ 91.42%, which could meet the design requirements of shoveling and drawing cotton-stalks (the pulling rate should be greater than or equal to 90%). It was a suitable equipment for mechanized harvesting of the cotton-stalks in Xinjiang cotton area.

Key words: cotton-stalks in close planting; low consumption; uplifting in-situ; pushing and drawing in opposite direction

0 引言

棉花是在我国国民经济发展中占重要地位的经济作物^[1];中国作为世界上最大的棉花生产国和消费国,三大棉花主产区分别分布于西北内陆地区、黄河流域和长江流域^[2]。2019年,全国棉花播种面积为 $3.3392 \times 10^6 \text{ hm}^2$,全国棉花总产量 $5.889 \times 10^6 \text{ t}$,其中新疆棉花播种面积为 $2.5405 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占全国76.081%,新疆棉花总产量为 $5.002 \times 10^6 \text{ t}$,占全国84.938%^[3];密植棉秆作为新疆机采棉生产中的主要副产物,其产量巨大且分布相对集中。

棉秆富含纤维素、半纤维素、木质素、粗蛋白、钙和磷,是一种适宜的生物质可再生资源,在农畜业、工业、能源等领域开发利用潜力可观^[4-10]。进入21世纪以来,新疆棉区对棉秆的主要利用方式为粉碎还田,但由于新疆棉田多为连作种植,带病菌的棉秆就地粉碎还田会将多种病原菌带入土壤,加之棉秆木质化程度高、留在土壤中不易腐烂,会产生土壤病虫害加重、棉茬挂膜率高、播种合格率下降等问题,不利于棉花产业的持续、健康发展^[11-12]。鉴于以上问题,在新疆棉区开展棉秆机械化整秆收获是其资源化规模利用的合理途径,收获的整株棉秆不仅可作为商品出售、增加棉农收入,更为棉秆资源的工业化加工利用提供了条件,将会获得环境、能源和经济等多重效益^[13]。

目前,国内外学者对棉秆收获方式进行了多方面研究:对行作业方式包括铲切式、齿盘式、链夹式、对辊式、圆盘式,该类收获方式目前主要适应于等行距标准化的种植模式^[14-19];不对行作业方式包括剪切式、横辊齿刀式,其中剪切式收获方式存在根茬留

地的问题,不利于后续土壤耕作及作物生长^[20-21],横辊齿刀式收获方式需入土作业,且由于不对行作业致使功耗较高^[22-23]。新疆地区属荒漠绿洲灌溉农业区^[24],机采棉种植过程中最后一次灌水时间为棉花采收前一个多月前,导致棉花采收后棉田土壤板结严重,单纯采用起拔方式,很容易引起棉秆断裂,且现有起拔方式不适于机采棉密植种植模式;单纯采用铲切方式,无法分离根茬泥土,且现有铲切方式作业功耗较高。

课题组针对新疆棉区土壤条件,结合目前广泛推行的密植种植农艺要求,借鉴虚实并存作业原理^[25],提出对行铲切、反向推拔协同作业方法,设计了4MB-6型密植棉秆对行铲拔铺放机,实现针对板结土壤的铲、拔秆作业;但原样机存在减阻装置壅土严重、对行铲切装置棉秆堆积、拔秆铺放辊拔秆不连续及拔秆有效性差等问题,因此对机具的部分机构进行改进设计。另外,为进一步提高该机具的作业性能,本文通过分析对行铲切装置和齿型推拔辊作业过程,研究其工作机理,以期为密植棉秆对行铲拔铺放机作业性能的提升提供理论参考。

1 整机结构及特点

为配套机械化采收作业并实现棉花高产,新疆棉区棉花种植模式采取“小个体、大群体”的栽培策略,形成并广泛推行(66+10)cm宽窄行密植种植模式^[26];兼顾农机和农艺融合要求,设计了4MB-6型密植棉秆对行铲拔铺放机,该机工作幅宽确定为2.28m,其值大于1膜6行的地膜整体宽度(2.05m),并可确保机组无重无漏进行作业,如图1所示。

原4MB-6型密植棉秆对行铲拔铺放机整机结

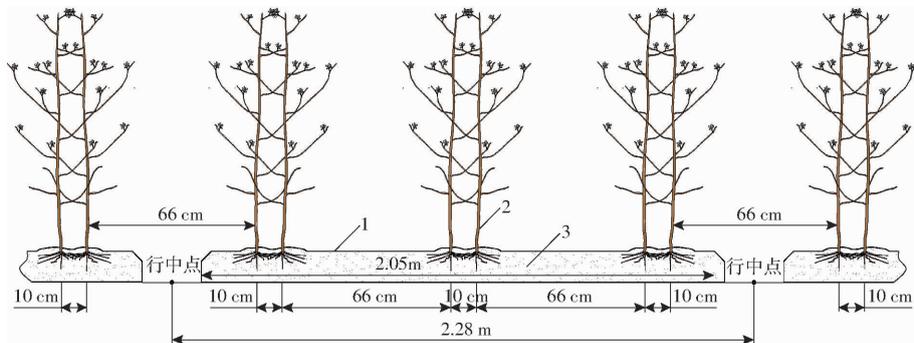


图 1 1 膜 6 行 (66 + 10) cm 密植模式和工作幅宽示意图

Fig. 1 Diagram of (66 + 10) cm close planting mode for six rows with one film and working width

1. 地膜 2. 密植棉秆 3. 土壤

构如图 2 所示, 主要由机架、三点悬挂架、传动系统、压秆装置、限深轮、减阻装置、对行铲切装置、铲切调节装置、拔秆铺放辊、脱秆装置等部件组成。机具采用对称配置的方式悬挂在拖拉机上, 其中减阻装置、对行铲切装置和铲切调节装置为对行作业单体, 横向配置 3 组对行作业单体; 如图 3 所示, 单组对行铲切装置工作幅宽 410 mm, 每组间隔 350 mm, 针对 2 行窄行距棉秆进行对行铲切作业。

化单元设计, 并融合了铲切和起拔 2 种方法; 压秆装置、减阻装置、限深轮、对行铲切装置、拔秆铺放辊、脱秆装置按作业顺序依次布置在机架上, 每个单元的作业高度或深度均可调。机具作业时, 压秆装置首先对棉秆进行推压, 紧接着减阻装置在窄行距棉秆根茬两侧切土以减小后续对行铲切阻力, 随后铲切装置入土铲切棉茬并将其提升、导流至土壤表层, 最后由拔秆铺放辊反向拔秆、抛拨棉秆并铺放于田间, 为防止棉秆、残枝及残膜缠绕在拔秆铺放辊上, 在机架后梁上设置了脱秆装置进行分离作业。

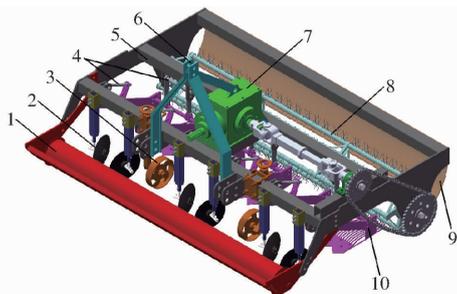


图 2 原样机整机结构图

Fig. 2 Structure of primary prototype

- 1. 压秆装置 2. 减阻装置 3. 限深轮 4. 铲切调节装置 5. 机架
- 6. 三点悬挂架 7. 传动系统 8. 拔秆铺放辊 9. 脱秆装置
- 10. 对行铲切装置

2 原样机田间试验情况

2.1 试验条件与试验区概况

2019 年 11 月在阿拉尔市十二团国家农业科技园区选取了机采棉棉田进行了原样机试验, 如图 4 所示。采棉机作业后棉秆全部站立于田间, 试验田为 1 膜 6 行机采棉密植模式, 窄行侧边土壤坚实度平均值为 2 402. 983 kPa, 窄行中间土壤坚实度平均值为 2 972. 492 kPa, 秸秆平均高度为 785. 578 mm, 平均秸秆数为 20. 39 根/m²。

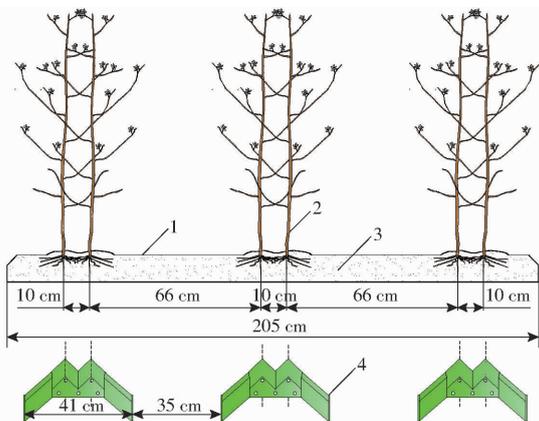


图 3 对行铲切装置间隔分布示意图

Fig. 3 Interval distribution of row-controlled shoveling device

1. 地膜 2. 密植棉秆 3. 土壤 4. 对行铲切装置



图 4 密植棉秆试验田

Fig. 4 Experimental plot of cotton-stalks in close planting

阿拉尔市大部分处于塔里木河冲积平原, 在河阶地以及一些老河道两旁发育着本区面积最大、最

4MB-6 型密植棉秆对行铲拔铺放机采用模块

重要的林灌草甸土^[27],该试验区属暖温带极端大陆性干旱荒漠气候,雨量稀少,冬季少雪,地表蒸发强烈,年均降水量为40.1~82.5 mm,年均蒸发量高达1 876.6~2 558.9 mm^[28]。

2.2 试验情况

通过田间试验,验证原4MB-6型机采棉密植棉秆对行铲拔铺放机的棉秆推压、对行铲切效果良好(铲切深度10~12 cm),如图5所示,机组对行作业、一次作业6行,机组作业后棉秆被推倒并被铲切抬升;但拔秆铺放辊拔秆效果较差,如图6所示,棉秆只有一部分被起拔并铺放在地面,未形成连续作业,拔秆不连续时,易引起棉秆铲切装置拥堵;另外,减阻装置未起到预期效果,其转动轴容易卡死,致使壅土严重,且会影响后续对行铲切装置作业,如图7所示。



图5 棉秆倒伏及铲切情况

Fig.5 Lodging and shoveling condition of cotton-stalks



图6 棉秆被起拔情况

Fig.6 Drawing condition of cotton-stalks



图7 对行铲切装置处棉秆拥堵情况

Fig.7 Jam condition of cotton-stalks in position of row-controlled shoveling device

2.3 试验问题分析

2.3.1 棉秆拥堵原因分析

拥堵原因如下:

(1)减阻装置切土、翻土效果差;减阻装置壅土严重,而且翻出的土壤易于堆积至对行铲切装置前

端,致使棉秆拥挤在对行铲切装置处。

(2)拔秆铺放辊拔秆效果不明显,未连续有效将棉秆拔起、抛甩到田间铺放,致使对行铲切装置处棉秆堆积而拥堵。

(3)地轮与减阻装置横向间隔距离较小,机组前行时,会将棉田散落的棉枝条带起,越积越多,致使棉秆在该处拥堵,进而影响地轮及对行铲切装置作业。

2.3.2 减阻装置作业效果分析

原样机减阻装置采用圆盘式,由连接柱、调节螺栓、连接杆、圆盘转动轴和切土圆盘组成,如图8所示;2个间隔一定距离的圆盘式减阻装置组成1个减阻装置组,对应2个切土圆盘相对偏转设置,每个切土圆盘与平行于机具前进方向的竖直平面具有一偏转角 α ,使得2个切土圆盘形成前部敞口小、后部敞口大的结构,在分别距离2行窄行距棉秆主干约50 mm处将两侧土壤切开并向外侧翻动,形成2条作业沟,有利于后续铲切装置的铲切作业。

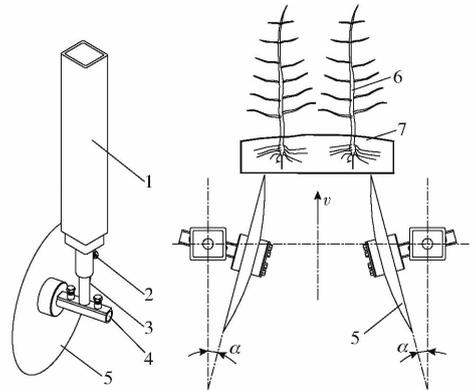


图8 减阻装置及其工作示意图

Fig.8 Resistance reduction device and its schematic

1. 连接柱 2. 调节螺栓 3. 连接杆 4. 圆盘转动轴 5. 切土圆盘 6. 棉秆 7. 土壤

由于减阻装置作业深度较浅(30~50 mm),从棉茬侧面(距离棉秆主干约50 mm)切土时,30~50 mm作业深度范围内棉茬根系发达,直径较大的棉支根在该处较集中,致使切土圆盘切土阻力大,切土、翻土效果差;若在距离棉茬较远处切土,则起不到减阻效果。试验发现,若作业深度过浅(0~30 mm),切土圆盘不连续转动,而且会将采棉机作业时碰触落掉的残枝、棉桃壳等集堆;若将切土装置的作业深度加大,则切土阻力显著增大,且翻土效果差,易出现切土圆盘不转动、卡死现象,致使减阻装置壅土严重,影响后续对行铲切装置作业。

2.3.3 拔秆铺放辊作业效果分析

拔秆铺放辊是完成棉秆起拔的关键部件,对经铲切抬升后的整株棉秆进行逆向拔秆作业,使得棉秆完全从土壤中拔出并铺放。如图9所示,拔秆铺放辊置于对行铲切装置的后方,由辊轴、支撑盘、弹

齿轴和拔秆弹齿等组成; 辊轴的两端通过花键轴头、轴承和轴承座连接在机架左右 2 个侧板上, 辊轴上共焊接 4 个支撑盘, 支撑盘将辊轴分为 3 个工作段, 分别对 1 膜 6 行中 3 对窄行距棉秆进行起拔作业, 每个工作段内沿支撑盘外圆周向均布 5 个拔秆轴, 拔秆轴连接在支撑盘上, 拔秆弹齿等间距安装在拔秆轴上。

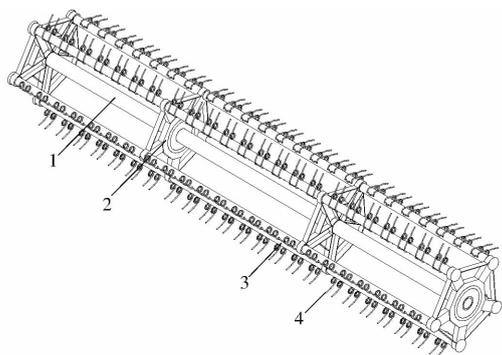


图 9 拔秆铺放辊结构图

Fig. 9 Structure diagram of drawing and windrowing roller

1. 辊轴 2. 支撑盘 3. 弹齿轴 4. 拔秆弹齿

田间试验发现, 若拔秆铺放辊上的拔秆弹齿伸入土壤中进行拔秆作业, 则很容易在拔秆弹齿与弹齿轴连接处产生应力集中, 使得连接处螺栓断裂, 而且拔秆弹齿变形量也会很大; 若拔秆弹齿距离地面一定高度进行拔秆作业, 发现其拔秆效果差; 拔秆弹齿的截面直径为 6 mm, 根据田间测量得出密植棉秆底部主干直径范围为 4.14 ~ 12.32 mm, 大部分弹齿与棉秆主干部分接触时容易滑脱 (图 10), 未形成有效起拔力, 从而致使拔秆铺放辊拔秆作业不连续、效果差。

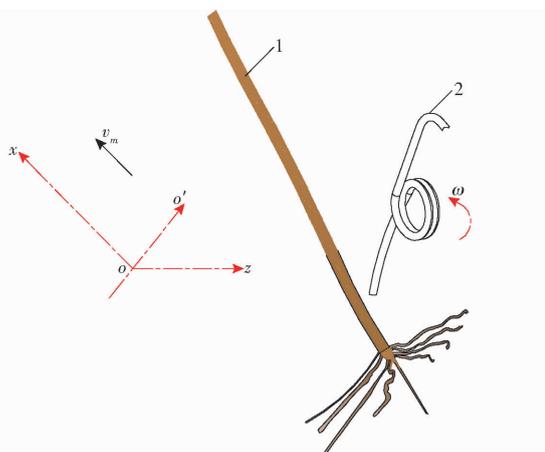


图 10 弹齿在棉秆主干部分作业位置示意图

Fig. 10 Schematic of spring tooth operating at bottom position of cotton-stalk

1. 棉秆 2. 弹齿

3 样机改进设计

3.1 减阻装置

用深松犁钩子替代减阻切土圆盘, 卡装在原样

机前横梁安装减阻装置的位置, 该深松犁钩子主要由菱形尖头、两侧翼板、犁柱、安装卡板和 U 型螺栓组成, 如图 11 所示。田间试验表明, 该深松犁钩子开土、翻土效果较好, 但由于菱形尖头与压秆装置纵向间距过小, 经深松犁松动抬升的土壤和棉田地表的棉枝容易在该间距内堆积, 一方面致使压秆装置的压辊不转动, 另一方面随着作业时间的增加导致深松犁钩子也无法正常作业。

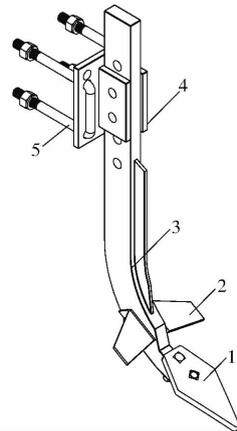


图 11 深松犁钩子

Fig. 11 Subsoiling plough hook

1. 菱形尖头 2. 两侧翼板 3. 犁柱 4. 安装卡板 5. U 型螺栓

基于以上问题, 再次改进后的样机将深松犁钩子去掉, 在压秆装置和对行铲切装置之间不设置减阻装置; 田间试验表明, 未设置减阻装置时, 对行铲切装置作业单体可以实现入土、切土、铲秆、棉茬原位抬升作业, 且达到了预期作业效果。

3.2 齿型推拔辊

将拔秆铺放辊上的拔秆弹齿替换为拔秆效果显著的齿型板, 优化后的拔秆装置 (齿型推拔辊) 如图 12 所示; 齿型推拔辊关键作业部件是推拔棉秆的齿型板, 其通过螺栓固定在拔秆轴上。

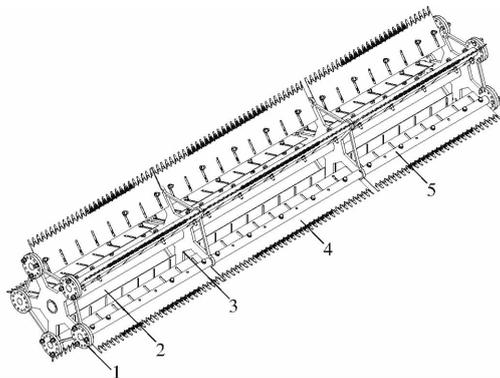


图 12 齿型推拔辊

Fig. 12 Pushing-pulling roller with tooth type

1. 转动盘 2. 辊轴 3. 支撑盘 4. 齿型板 5. 拔秆轴

如图 13 所示, 齿型板由板体、锯片、V 形刀齿和 U 型槽组成。考虑到齿型板的安装及强度要求, 初步设计时齿型板厚度取为 3 mm, 材质选用合金结构

钢 35SiMn。V 形刀齿位于齿型板前端,顶部呈圆弧状($R=2\text{ mm}$),有利于将棉秆导入 V 形刀齿中;V 形刀齿可以适应不同粗细的棉秆,且与普通直板相比,V 形刀齿推拔棉秆时有 2 个工作点,容易抓取棉秆,而且能通过调整 V 形刀齿的齿形角来改变刀齿与棉秆产生的摩擦力;另外,在每个 V 形刀齿两侧安装 2 个锯片,以进一步增大推拔力。根据田间密植棉秆底部主干直径范围($4.14\sim 12.32\text{ mm}$),V 形刀齿开口宽度取 18 mm ;由于 V 形刀齿齿形角应小于或等于钢材与棉秆之间的摩擦角(29.1°)^[23],所以齿形角取 28° 。

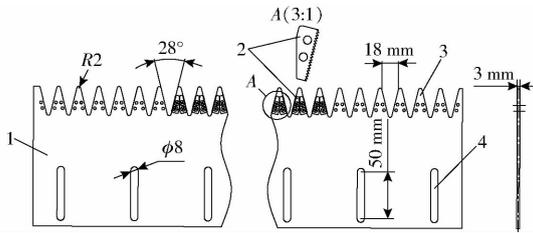


图 13 齿型板结构图

Fig. 13 Structure diagram of tooth-shaped plate

1. 板体 2. 锯片 3. V 形刀齿 4. U 型槽

为确保齿型板在棉秆主干底部较合适的作业位置进行棉秆推拔作业,设定齿型推拔辊回转半径 R_1 为 $230\sim 300\text{ mm}$,该回转半径指辊轴中心到 V 形刀齿推拔点的距离,可根据具体作业环境、不同棉花品种进行调节,调节途径为改变板体上的 U 型槽与拔秆轴的连接位置、改变拔秆轴两端的转动盘与支撑盘的连接位置;如图 14 所示,转动盘上均布 12 个孔,调整转动盘上的孔与支撑盘上的不同孔连接,齿型推拔辊回转半径 R_1 随之改变,同时齿型板旋转到最低点时与水平面的夹角也会变化。

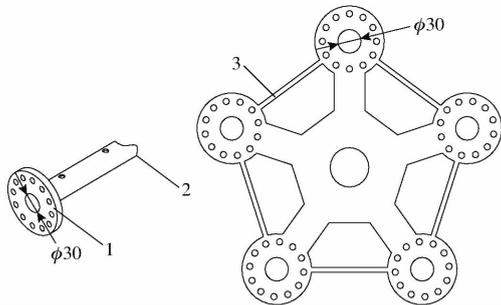


图 14 齿型板倾斜度调节

Fig. 14 Declivity regulation of tooth-shaped plate

1. 转动盘 2. 拔秆轴 3. 侧端支撑盘

3.3 优化后整机

改进后的整机结构如图 15 所示,将限深轮安装在机架前横梁两侧,将压秆装置和对行铲切装置之间的减阻装置去除,将拔秆装置的拔秆弹齿替换为拔秆效果显著的齿型板,相应地,对后置脱秆装置也进行结构调整,确保与齿型推拔辊协调作业,及时将

棉秆、棉枝及残膜从齿型板上脱离掉。表 1 为改进后机具的主要技术参数。

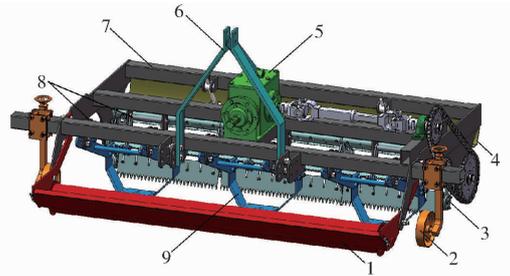


图 15 对行铲拔铺放机整机结构图

Fig. 15 Structure of row-controlled shoveling and drawing placement machine for cotton-stalks

1. 压秆装置 2. 限深轮 3. 齿型推拔辊 4. 脱秆装置 5. 传动系统 6. 三点悬挂架 7. 机架 8. 铲切调节装置 9. 对行铲切装置

表 1 整机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of operation machine

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	1.63×2.58×1.31
工作幅宽/m	2.28
作业深度/mm	80~135
作业行数	6
配套动力/kW	≥23.69 ^[29]
传动系统总传动比	2.78
整机质量/kg	607

4 作业机理分析

4.1 对行铲切机理分析

对行铲切装置主要由铲切挂接架、梯形框架和铲切板组成,如图 16 所示;该装置是 4MB-6 型密植棉秆对行铲拔铺放机的核心工作部件,3 组对行铲切装置间隔布置,对 1 膜 6 行密植种植农艺的棉秆实施对行铲切任务。铲切框架设计成前倾梯形形式结构,其两侧带刃口的侧板部分均向内折弯并向前倾,以减小被切土层通过梯形框架时与侧板的接触面积,从而提高被切土层及棉茬在铲切板上的通过性。

新疆棉区机采棉种植过程中最后一次灌水时间为棉花采收前一个多月前,棉花采收后,由于地表蒸发强烈,土壤板结严重;该机具采用原地放垡间隔作业技术,利用对行铲切装置对棉茬进行铲切,切削土壤和抬升棉根系-土壤复合体两个阶段连续进行,在梯形框架带刃口的侧板部分和铲切板的挤压、剪切作用下,棉茬周围土壤被剪切和弯曲破坏、土壤-棉根系复合体产生失效被原位抬升于土壤上层,如图 17 所示。在铲切框架外侧的土壤层未被松动和破坏,且土壤层相互位置未发生变化,土壤-棉根系

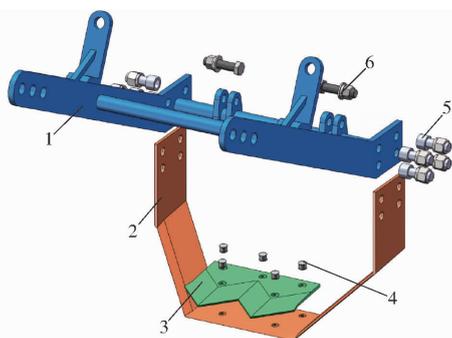


图 16 单组对行铲切装置

Fig. 16 Single row-controlled shoveling device

1. 铲切挂接架 2. 梯形框架 3. 铲切板 4. 铆钉 5. 螺纹连接 I
6. 螺纹连接 II

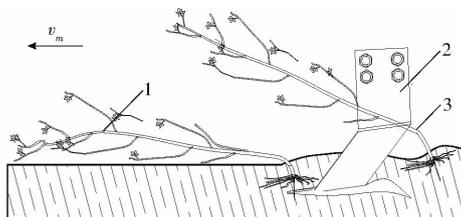


图 17 对行铲切作业过程

Fig. 17 Working sketch of row-controlled shoveling device

1. 俯卧棉秆 2. 对行铲切装置 3. 抬升后的棉秆

复合体仍然处于土壤中,只是被整体抬升接近于地表。对行铲切装置采用间隔配置,实现间隔作业,符合虚实并存的作业理论^[30-31],在达到棉秆铲切目的的同时,有利于减少棉田风蚀沙化危害。

根据棉田测量得出地面以下棉秆主根长度范围值为 10.3 ~ 21.7 cm;由于在 0 ~ 80 mm 土层中棉秆主根直径较大、支根分布较多,若作业深度小于 80 mm,则铲切板作业阻力大,所以原地放垡间隔作业技术的作业深度 d 控制在 80 ~ 135 mm,在该作业深度范围内,铲切板作业时只要将棉秆主根切断即可,降低了作业阻力;若作业深度过大,则作业功耗会大幅提升。如图 18 所示,当铲切深度约为 115 mm 时,底部虚实作业比例为 1:2.42,地表虚实作业比例为 1:0.59,虚实作业比例从地面到底部呈连续递减趋势,有利于降低对行铲切装置的作业功耗;另一方面,采用原地放垡间隔作业技术,会使得虚部和实部的孔隙度差值增加,改变土壤中水热、养分常规的垂直运动规律,出现侧向水平运移过程,从而提高棉田土壤蓄水保墒能力和透气性,有利于培肥土壤^[32-34]。

4.2 拔秆机理分析

棉秆经铲切装置铲切作业后,整株棉秆及棉茬上附带的土壤被抬升至接近土壤表层位置,后置的齿型推拔辊在棉秆主干底端夹持棉秆,由于棉秆主干部分直径从上往下逐渐略有增加,采用反向推拔

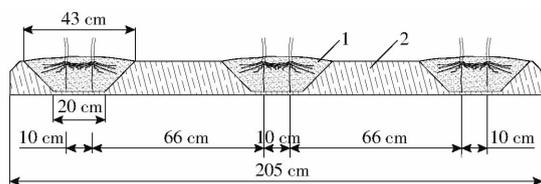


图 18 对行铲切虚实作业比例示意图

Fig. 18 Sketch of asthenia and sthenia operation ratio

1. 铲切部分(虚部) 2. 未铲切部分(实部)

作业原理,更有利于棉秆导入 V 形刀齿并进行有效夹持,且使得 V 形刀齿及锯片对棉秆产生较大的静摩擦力;另外,推拔辊上的齿型板作业时入土深度(0 ~ 10 mm)小,进一步减小了整机的作业功耗。

齿型推拔辊作业时,辊轴带动齿型板作回转运动,当 V 形刀齿接触到棉秆时,棉秆产生弹性变形,同时由于在反作用力的作用下弹性变形恢复。将棉秆近似为弹性体,在夹持碰撞过程中忽略重力、弹力等常规力及棉秆发生的位移,仅考虑碰撞力在碰撞延续时间内的积累效果^[13,35]。根据碰撞的冲量定理有

$$m_1 v_1 - m_1 v_0 = S = \int_0^t F' dt \quad (1)$$

式中 m_1 ——棉秆质量,kg
 v_1 ——推拔时棉秆质心运动速度,m/s
 v_0 ——棉秆初速度,取值为 0,m/s
 F' ——推拔时 V 形刀齿对棉秆的碰撞力,N
 t ——碰撞延续时间

碰撞前后速度发生变化,两物体动能的损失为

$$\Delta T = (1 - k^2) \frac{m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)} (v_1 - v_0)^2 \quad (2)$$

式中 ΔT ——动能的损失量,J
 k ——棉秆弹性体的恢复系数
 m_2 ——V 形刀齿质量,kg

分析式(2),由于 k 为 0 ~ 1^[13],可知 $\Delta T > 0$ 。这表明 V 形刀齿及锯片在推拔碰撞时,部分动能将转化成其他形式的能量,其中变形能占主导地位^[36]。在变形阶段,棉秆主要将动能转化成变形能,在恢复阶段棉秆将变形能转化为动能,棉秆将对 V 形刀齿及两侧锯片产生作用力,在该作用下使得棉秆与 V 形刀齿及锯片两侧产生摩擦力 f ,该摩擦力 f 是形成棉秆拔取力 F 的主要分力^[13]。

由于棉秆自重远小于土壤对棉秆根部的复合力,在分析棉秆瞬时受力时,将棉秆的重力忽略,棉秆在反向推拔瞬间受力分析如图 19 所示,棉秆的拔取力 F 由齿型板对棉秆的推力 F_1 、V 形刀齿及锯片对棉秆的静摩擦力 f 、棉秆被 V 形刀齿及锯片向后方推拔变形产生的弹力 F_2 的合力形成。齿型推拔辊反向回转作业时,棉秆所受拔取力 F 克服棉秆

与土壤的复合力、棉秆与棉茬上附带土壤的重力,棉秆被拔起并在离心力作用下切向甩出、铺放在田间。

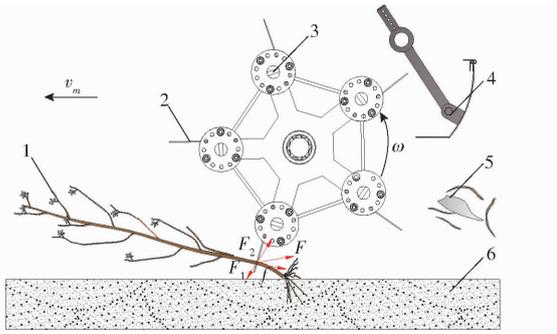


图 19 棉秆瞬时受力分析平面图

Fig. 19 Planar graph of instantaneous stress analysis for pulling cotton-stalks

1. 棉秆 2. V形刀齿 3. 齿型推拔辊 4. 脱秆装置 5. 残膜、棉枝 6. 土壤

5 田间试验与分析

2020年3月对改进后的4MB-6型密植棉秆对行铲拔铺放机作业效果进行了检测,试验地设在新疆维吾尔自治区阿拉尔市十二团5连机采棉棉田,该试验地处于塔里木河冲积平原南岸,土壤类型属于灌耕林灌草甸土(表层以轻壤、沙壤为主)^[27]。

图20为试验现场,田间试验结果表明:改进后的4MB-6型密植棉秆对行铲拔铺放机作业稳定可靠,能一次性完成棉秆的压、铲、拔、铺放等多项作业,当对行铲切装置铲切深度约为11.5 cm,棉秆拔净率达到90.87%~91.42%^[37],达到了技术指标要求(拔净率90%以上)^[23];试验中对行铲切装置作业流畅,实现了棉秆对行铲切及原位抬升作业目标,未出现棉秆拥堵现象,齿型推拔辊能有效抓取棉秆,并进行切向甩抛使得整株棉秆根茬土壤分离、铺放于田间,样机改进前后作业性能对比如表2所示。



图 20 改进样机田间试验

Fig. 20 Field experiment of improved prototype

4MB-6型密植棉秆对行铲拔铺放机作业幅宽为2.28 m,适用于目前正广泛推行的1膜6行(幅宽2050 mm)机采棉(660+100) mm宽窄行种植模式,1次作业6行、作业效率高。该试验田的土壤条

表 2 机具改进前后作业性能对比

Tab. 2 Comparison of operation performance before and after improvement

样机	作业效果				
	压秆装置	减阻装置	对行铲切装置	拔秆装置	拔净率/%
原样机	良好	壅土严重	易拥堵	拔秆铺放辊-拔秆不连续	
改进后样机	良好	去除	作业流畅	齿型推拔辊-拔秆铺放效果良好	90.87~91.42 ^[37]

件与新疆大部分机采棉种植区的土壤条件类似(沙壤土质),可知该机在新疆棉区适应性较好,是棉秆资源机械化收获的适用设备。

6 结论

(1)针对机采棉棉田土壤条件,4MB-6型密植棉秆对行铲拔铺放机采用模块化单元设计,并融合了铲切和起拔2种方法。结合第1次田间试验中发现问题,对样机进行了改进设计,将限深轮安装在机具前横梁两侧,去除了对行铲切装置作业前的减阻装置,并将拔秆装置的拔秆弹齿替换为拔秆效果显著的齿型板,相应地,对后置脱秆装置也进行结构调整,确保与齿型推拔辊协调作业,及时将棉秆、棉枝及残膜从齿型板上脱离掉。第2次田间性能试验表明,改进后的4MB-6型密植棉秆对行铲拔铺放机整机性能稳定,对行铲切装置工作流畅,实现了棉秆对行铲切及原位抬升作业目标,齿型推拔辊能有效抓取棉秆,并进行切向甩抛使得整株棉秆根茬土壤分离、铺放于田间,拔净率为90.87%~91.42%,达到了技术指标要求(拔净率90%以上),是棉秆资源机械化收获的适用设备。

(2)该机具采用原地放垡间隔作业技术,利用间隔配置的铲切装置进行对行铲切作业,切削土壤和抬升棉根系-土壤复合体两个阶段连续进行,在梯形框架带刃口的侧板部分和铲切板的挤压、剪切作用下,棉茬周围土壤被剪切和弯曲破坏、土壤-棉根系复合体产生失效被原位抬升于土壤上层。在梯形框架外侧的土壤层未被松动和破坏,且土壤层相互位置未发生变化,虚部和实部的孔隙度差值增加,出现侧向水平运移过程,有利于提高棉田土壤蓄水保墒能力和透气性,培肥棉田土壤、减少棉田风蚀沙化危害。

(3)对行铲切装置作业深度 d 控制在80~135 mm;对行铲切作业时,在1幅宽膜内(2050 mm),当铲切深度约为115 mm时,底部虚实作业比例为1:2.42,地表虚实作业比例为1:0.59,虚实作业比

例从地面到底部呈连续递减趋势,有利于降低对行铲切装置的作业功耗。

(4)齿型推拔辊采用反向推拔作业原理,在棉秆主干底端夹持棉秆,由于棉秆主干部分直径从上往下逐渐略有增加,更有利于棉秆导入 V 形刀齿并进行有效夹持,且使得 V 形刀齿及锯片对棉秆产生较大的静摩擦力。起拔作业时,推拔辊上的 V 形刀齿在已被抬升的棉秆主干部分夹持起拔棉秆,所以

推拔阻力低,另外,由于其入土深度(0~10 mm)小,进一步减小了整机作业功耗。

(5)V 形刀齿与棉秆的碰撞过程分为变形阶段和恢复阶段,在变形阶段,棉秆主要将动能转化成变形能,在恢复阶段棉秆将变形能转化为动能,棉秆将对 V 形刀齿及两侧锯片产生作用力,在该作用力下使得棉秆与 V 形刀齿及锯片两侧产生摩擦力 f ,该摩擦力 f 是形成棉秆拔取力 F 的主要分力。

参 考 文 献

- [1] 张蓓蓓,耿维,崔建宇,等. 中国棉花副产品作为生物质能源利用的潜力评估[J]. 棉花学报,2016,28(4):384-391. ZHANG Beibei, GENG Wei, CUI Jianyu, et al. Assessment of the biomass energy use potential of cotton byproducts in China [J]. Cotton Science,2016,28(4):384-391. (in Chinese)
- [2] 宋占华,宋华鲁,耿爱军,等. 棉花秸秆双支撑切割性能试验[J]. 农业工程学报,2015,31(16):37-45. SONG Zhanhua, SONG Hualu, GENG Aijun, et al. Experiment on cutting characteristics of cotton stalk with double supports [J]. Transactions of the CSAE,2015,31(16):37-45. (in Chinese)
- [3] 国家统计局. 国家统计局关于 2019 年棉花产量的公告[EB/OL]. [2019-12-17]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201912/t20191217_1718007.html.
- [4] 班婷,郭兆峰,马艳,等. 新疆棉秸秆综合利用现状及基质化利用发展前景[J]. 农业工程,2019,9(10):59-65. BAN Ting, GUO Zhaofeng, MA Yan, et al. Comprehensive utilization present situation and culture medium utilization prospects of cotton straw in Xinjiang[J]. Agricultural Engineering,2019,9(10):59-65. (in Chinese)
- [5] 高瑞芳,张吉树. 新疆棉花秸秆饲料化开发利用研究[J]. 中国畜牧杂志,2016,52(8):76-80. GAO Ruifang, ZHANG Jishu. Study on exploiting and utilizing cotton stalks of Xinjiang as feed[J]. Chinese Journal of Animal Science,2016,52(8):76-80. (in Chinese)
- [6] 李艳梅,张兴昌,廖上强,等. 生物炭基肥增效技术与制备工艺研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(10):1-14. LI Yanmei, ZHANG Xingchang, LIAO Shangqiang, et al. Research progress on synergy technologies of carbon-based fertilizer and its application[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(10):1-14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171001&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.001. (in Chinese)
- [7] HAYKIR NI, BAKIR U. Ionic liquid pretreatment allows utilization of high substrate loadings in enzymatic hydrolysis of biomass to produce ethanol from cotton stalks [J]. Industrial Crops and Products, 2013,51(6):408-414.
- [8] GEMTOS T A, TSIRICOGLU T. Harvesting of cotton residue for energy production[J]. Biomass & Bioenergy, 1999, 16(1):51-59.
- [9] 宋孝周,雷亚芳,傅峰. 棉秆重组方材制备工艺与试验[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(5):164-168. SONG Xiaozhou, LEI Yafang, FU Feng. Preparation technology and experiment of reconsolidated square materials of cotton stalk [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(5):164-168. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130529&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.029. (in Chinese)
- [10] 贺清尧,冉毅,刘璐,等. 生物质灰致沼液氮磷脱除研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(1):237-244,251. HE Qingyao, RAN Yi, LIU Lu, et al. Ammonia nitrogen and phosphorous removal from biogas slurry induced by biomass ash addition[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(1):237-244,251. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170131&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.031. (in Chinese)
- [11] 马云艳,顾美英,徐万里,等. 棉秆生物炭对大丽轮枝菌生长及毒素作用的影响[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(5):217-224. MA Yunyan, GU Meiyang, XU Wanli, et al. Influences of cotton biochar on growth and toxin effect of *Verticillium dahliae*[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015,33(5):217-224. (in Chinese)
- [12] 贺小伟,刘金秀,李传峰,等. 我国棉秆机械收获技术现状分析及对策研究[J]. 中国农机化学报,2019,40(3):19-25. HE Xiaowei, LIU Jinxiu, LI Chuanfeng, et al. Current status and countermeasure research for cotton-stalk mechanical harvesting in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2019,40(3):19-25. (in Chinese)
- [13] 何学迎. 拉拔式棉秆拔秆装置的设计与试验研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2016. HE Xueying. Design and experimental research of cotton stalk pulling-out mechanism[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [14] 郭振华,史建新,康秀生,等. 铲刀式拔棉秆机阻力分析[J]. 新疆农机化,2008,24(4):9-10,31.
- [15] 陈明江,赵维松,王振伟,等. 齿盘式多行拔棉秆装置拔秆过程分析与参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(3):109-120. CHEN Mingjiang, ZHAO Weisong, WANG Zhenwei, et al. Operation process analysis and parameter optimization of dentate disc cotton stalk uprooting mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(3):109-120. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190311&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.011. (in Chinese)
- [16] 沈茂. 链条滑轨式棉柴夹持起拔机构设计与试验研究[D]. 武汉:华中农业大学,2011. SHEN Mao. Design and experimental study on chain-slide rail type clamping-pulling mechanism of cotton stalks [D]. Wuhan:

- Huazhong Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- [17] SARKARI M R M, MINAEE S. Evaluation of a cotton stalk puller performance[J]. American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture, 2008, 2(1): 19-24.
- [18] RAMADAN R Y Y. Development and evaluation of a cotton stalks puller[J]. Journal of Soil Science and Agricultural Engineering, 2010, 1(10): 1061-1073.
- [19] 贾健. 拔棉柴机的设计研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2005, 25(3): 268-269, 274.
JIA Jian. Design on machines of dialing cotton stem[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2005, 25(3): 268-269, 274. (in Chinese)
- [20] 宋占华, 肖静, 张世福, 等. 曲柄连杆式棉秆切割试验台设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊): 162-167.
SONG Zhanhua, XIAO Jing, ZHANG Shifu, et al. Design and experiment on crank-connecting rod cotton stalk cutting test bench[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 162-167. (in Chinese)
- [21] 王锋德, 陈志, 董世平, 等. 自走式棉秆联合收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 67-70.
WANG Fengde, CHEN Zhi, DONG Shiping, et al. Experiment of self-walking cotton-stalk combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 67-70. (in Chinese)
- [22] 张爱民, 廖培旺, 陈明江, 等. 自走式不对行棉秆联合收获打捆机的设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(9): 127-138.
ZHANG Aimin, LIAO Peiwang, CHEN Mingjiang, et al. Design and experiment of self-propelled non-aligned cotton stalk combined harvest baler[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(9): 127-138. (in Chinese)
- [23] 唐遵峰, 韩增德, 甘帮兴, 等. 不对行棉秆拔取收获台设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 80-85.
TANG Zunfeng, HAN Zengde, GAN Bangxing, et al. Design and experiment on cotton stalk pulling head with regardless of row[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 80-85. (in Chinese)
- [24] 黄琴. 作物秸秆还田对土壤养分含量的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2006, 24(3): 277-279.
HUANG Qin. The effect on soil fertilization of crop stalk returning to fields[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2006, 24(3): 277-279. (in Chinese)
- [25] 王亚东. 虚实并存(间隔)耕作产生发展及其启示[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
WANG Yadong. Origin and development of zone tillage and its enlightenment[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- [26] 余渝, 孔宪辉, 刘丽, 等. 新疆兵团机采棉发展现状与建议[J]. 塔里木大学学报, 2018, 30(3): 57-61.
YU Yu, KONG Xianhui, LIU Li, et al. Development status and suggestions of mechanical harvest upland cotton in Xinjiang production and construction corps[J]. Journal of Tarim University, 2018, 30(3): 57-61. (in Chinese)
- [27] 新疆生产建设兵团农一师土壤普查办公室. 农一师土壤[M]. 新疆生产建设兵团: 阿克苏农一师印刷厂, 1985.
- [28] 第一师阿拉尔市人民政府. 气候条件[EB/OL]. [2019-09-23]. <http://www.ale.gov.cn/ssgk/qhtj>.
- [29] 贺小伟, 刘金秀, 李传峰, 等. 机采棉密植棉秆对行铲拔铺放机的设计与有限元分析[J]. 塔里木大学学报, 2019, 31(2): 71-77.
HE Xiaowei, LIU Jinxiu, LI Chuanfeng, et al. Design and finite element analysis of row-controlled shoveling and drawing placement machine for cotton-stalks with close planting and machine-harvested cotton[J]. Journal of Tarim University, 2019, 31(2): 71-77. (in Chinese)
- [30] 丁元书. 虚实并存耕作技术推广研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
DING Yuanshu. Study on the extension of spacing tillage technique[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- [31] 董向前, 宋建农, 王继承, 等. 9ST-460型草地振动式间隔松土机改进设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 62-65.
DONG Xiangqian, SONG Jiannong, WANG Jicheng, et al. Improved design and experiment of 9ST-460 vibration spacing scarifier for grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 62-65. (in Chinese)
- [32] 董向前, 宋建农, 王继承, 等. 天然草场改良用振动式间隔松土机作业机理[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 119-123.
DONG Xiangqian, SONG Jiannong, WANG Jicheng, et al. Working mechanism of vibration spacing scarifier for grassland[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 119-123. (in Chinese)
- [33] 冯雨峰, 刘洪来, 吕进英, 等. 原地放袋振动间隔松土对羊草草地质量的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 43-47.
FENG Yufeng, LIU Honglai, LÜ Jinying, et al. Effect of situ-vibration spacing scarifying technique to *Leymus chinensis* grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 43-47. (in Chinese)
- [34] 武广伟, 宋建农, 李永磊, 等. 草地振动式间隔松土机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 42-46, 41.
WU Guangwei, SONG Jiannong, LI Yonglei, et al. Design and experiment on vibration spacing scarifier for meadow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 42-46, 41. (in Chinese)
- [35] 代振维. 棉花拔秆机拔取机构的设计与试验研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015.
DAI Zhenwei. Design and research on cotton stalk drawing institutions of pull-out cotton stalk mechanism[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [36] 王振伟. 不对行棉秆收获台的研究与设计[D]. 淄博: 山东理工大学, 2014.
WANG Zhenwei. The design and research on cotton stalk pulling head with regardless of row[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [37] 贺小伟, 刘金秀, 王旭峰, 等. 密植棉秆对行铲拔铺放机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 142-151.
HE Xiaowei, LIU Jinxiu, WANG Xufeng, et al. Design and experiment of row-controlled shoveling and drawing placement machine for cotton-stalks based on agronomy of close planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 142-151. (in Chinese)