

紫云英绿肥盛花期埋切翻压组合作业机设计与试验

游兆延 张 冲 高学梅 高 雅 彭宝良 吴惠昌

(农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要:为实现紫云英绿肥规模化种植区域的绿肥高效、低耗机械化翻压,基于前端埋切、后端翻压的结构配置思路,设计了一种无动力输入的紫云英绿肥盛花期埋切翻压组合作业机。对盛花期紫云英生物学特征及压切特性开展研究,进而设计了辊筒组件、前悬挂连接组件、栅条式翻转犁等主要工作部件;通过理论计算和力学分析,得到实现紫云英茎秆顺畅埋切的压切辊半径为305 mm、压切刀滑切角范围为34.3°~55.7°;采用水平直线法设计了栅条式犁体曲面,推导得到导曲线抛物线方程,并绘制了犁体直线角变化规律图。紫云英绿肥盛花期间翻压试验结果表明:在机具作业速度为5.8~6.0 km/h条件下,茎秆切断长度合格率92%,耕宽稳定性变异系数3.7%,耕深稳定性变异系数5.6%,土垡破碎率85.6%,植被翻压覆盖率98.3%,试验指标均符合国家和行业标准要求。设计的埋切翻压组合作业机工作效率可达0.67~1.20 hm²/h,在翻压质量和组配方式上明显优于目前我国常用的畜力犁、铧式犁、旋耕机等翻压方式,具有很好的推广应用价值。

关键词:紫云英;绿肥;盛花期;埋切翻压机;试验

中图分类号:S223.2⁺4 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2020)03-0078-09

OSID:



Design and Experiment of Incisal-burying and Ploughing Combined Machine for Astragalus smicus Green Manure in Full-bloom Stage

YOU Zhaoyan ZHANG Chong GAO Xuemei GAO Ya PENG Baoliang WU Huichang

(Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: In order to realize high-efficiency and low energy-consumption mechanized ploughing operation in the large-scale planting area of *Astragalus smicus* green manure, based on the structure placement idea of front-end buried-cutting and back-end overturning, an incisal-burying and ploughing combined machine with no power input for *Astragalus smicus* green manure in its flourishing period was designed. The biological characteristics and pressure-shear strength test of *Astragalus smicus* in full-bloom stage were studied, and then the key components such as roller components, front suspension connection components and grid-type plough were designed. Through theoretical calculation and mechanical analysis, the radius of press-cutting roller for smooth incisal-burying of *Astragalus smicus* stalks was 305 mm, and the sliding cutting angle was ranged from 34.3° to 55.7°, the grid-type plough surface was designed by using the horizontal straight element method, the parabolic equation of the guide curve was derived and the influence regularity of plough element-line angle was drawn as well. The results of field overturning test of *Astragalus smicus* green manure in full-bloom stage showed that with the operation speed of 5.8~6.0 km/h, the qualified rate of stem-cutting length was 92%, the stability variation coefficient of tillage width was 3.7%, the stability variation coefficient of tillage depth was 5.6%, the rate of soil fragmentation was 85.6%, and the rate of vegetation overturning coverage was 98.3%, the test indexes met the requirements of national and industrial standards. The designed incisal-burying and ploughing combined machine can work efficiently up to 0.67~1.20 hm²/h, which was obviously superior to the conventional overturning modes such as animal plough, mouldboard plough and rotary tiller in terms of overturning quality and the combination pattern, and had good popularization and application value.

Key words: *Astragalus smicus*; green manure; blossom stage; incisal-burying and ploughing machine; experiment

收稿日期:2019-07-15 修回日期:2019-11-15

基金项目:国家绿肥产业技术体系建设专项资金项目(CARS-22)和中国农业科学院所级基本科研业务费专项(S202012-02)

作者简介:游兆延(1988—),男,助理研究员,主要从事农业机械装备研究,E-mail:17366350354@163.com

通信作者:吴惠昌(1973—),男,研究员,主要从事农产品加工与农机装备智能化研究,E-mail:huichangwu@126.com

0 引言

随着农村土地流转和农业合作社的大量出现,以及轮作休耕、果菜茶有机肥替代化肥等重大项目的不断推进,规模化种植绿肥成为化学肥料、农药等农资的重要支撑措施^[1-2]。

紫云英是我国主要的绿肥作物,也是一种优质的豆科牧草和蜜源作物,对于增加生物有机肥源、改善生态、提高化肥利用率和促进农业绿色发展都具有重要的作用^[3-6]。翻压是紫云英生产的重要环节,紫云英翻压具有改变土壤理化性质、增加土壤有机质、提高作物产量和品质等优点^[7-8]。国外种植绿肥的主要目的是封闭杂草,种植方式采用单熟制或者休耕制,绿肥成熟后一般不翻压到土壤里,常在切断后覆盖在地表,或由镇压辊筒压青后使其在自然状态下腐殖^[9-11]。荷兰 Van Wamel BV、德国 FENDT 等公司也研发了前置绿肥粉碎、后置五铧或八铧犁翻压的联合作业机,但其配套的拖拉机动力均在 220 kW 以上,且需有前动力输出。在我国复种指数高、小田块条件下,国外绿肥翻压模式不能简单效仿和复制。当前,我国紫云英翻压主要采用传统的畜力犁、旋耕机或铧式犁等方式^[12-14]。畜力犁费时,费力;旋耕机多为小动力配置,作业效率低,且翻压后肥土效果不高;铧式犁翻压紫云英时多为整株翻压,翻压时紫云英茎秆分解速度较慢,在空茬期较短时肥效利用率不高,且整翻还田后对后茬作物的生长也会产生一定的影响^[15-16]。另外,为了将紫云英完全翻压入土,需加大耕深,导致动力消耗巨大。

针对上述生产需求和现有绿肥翻压方式的弊端,本文设计一种紫云英绿肥盛花期埋切翻压组合作业机,以期在有效提高紫云英翻压率和肥田效果的同时,降低作业功耗。

1 盛花期紫云英生物学特征及压切特性

1.1 盛花期紫云英生物学特征

盛花期田间紫云英如图 1 所示,花序为总状花序,通常每个花序有 7~11 朵小花,茎秆呈圆柱形或扁圆柱形,茎粗 2~10 mm,中空,茎色以绿色为主,叶为奇数羽状复叶,长 10~20 cm,叶色一般为深绿色和黄绿色^[3]。

1.2 压切特性试验

根据绿肥植株特点和翻压后腐解特性需求,为达到最佳的埋切翻压效果,需对紫云英茎秆的压切特性进行研究^[17],试验品种选用芜湖青弋江种业有限公司紫云英留种地的青弋江 1 号,株样共 5 株,带回实验室作保鲜处理,分别测量并记录每株紫云英的摊开



图 1 盛花期紫云英
Fig.1 *Astragalus smicus* in blossom stage
1. 花 2. 茎秆 3. 叶

株高、生长高度、茎秆含水率等物理特性,并借助 JXSA304B 型万能试验机对株样茎秆根部、中部、顶部等部位进行压切强度测试(如图 2 所示),将万能试验机记录的茎秆压切断时力值与空载时力值之差的 最大值作为该组试验的茎秆最大压切力^[18],试验中 选定加载速度 50 mm/min、上限载荷 500 N、上限下 降载荷 5 N,在测试界面中依次点击载荷调零、重设 标距、开始、完成键,试验重复 5 次,最后取平均值。

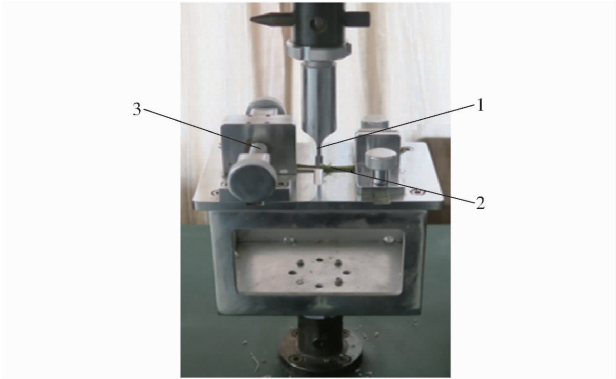


图 2 紫云英茎秆压切强度试验
Fig.2 Pressure-shear strength test of *Astragalus smicus* stalk
1. 压切刀 2. 茎秆 3. 固定夹具

各采样株样物理特性及压切试验结果如表 1, 试验数据为后续埋切组件的研制提供了设计依据。

表 1 试验结果
Tab.1 Experimental results

样品 序号	摊开株 高/cm	生长 高度/cm	茎秆含 水率/%	最大压切力/N		
				根部	中部	顶部
1	70	48	76.65	25.25	19.03	12.28
2	58	47	77.13	26.92	19.65	18.47
3	63	49	81.75	21.03	20.40	8.72
4	65	47	79.45	39.69	15.75	10.23
5	81	51	80.22	33.28	29.04	10.96
平均值	67.4	48.4	79.04	28.63	20.77	12.13

2 整机结构与工作原理

2.1 总体结构

紫云英绿肥埋切翻压组合作业机总体结构与各 部件结构示意图如图 3 所示,主要由埋切部件、拖拉

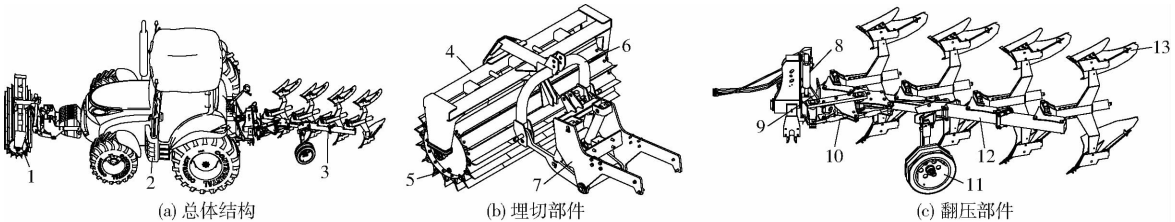


图 3 紫云英埋切翻压组合作业机总体结构与各部件结构示意图

Fig. 3 Overall structure and each part's diagram of incisal-burying and ploughing combined machine for *Astragalus smicus*

1. 埋切部件 2. 拖拉机 3. 翻压部件 4. 支撑组件 5. 辊筒组件 6. 悬挂组件 7. 前悬挂连接组件 8. 翻转油缸 9. 悬挂架
10. 调幅螺杆 11. 限深轮 12. 犁架 13. 犁体

机和翻压部件组成。埋切部件主要由支撑组件、辊筒组件、悬挂组件、前悬挂连接组件等组成，翻压部件主要由翻转油缸、悬挂架、调幅螺杆、限深轮、犁架、犁体等构成。工作时，埋切部件通过其前悬挂连接组件固定在行走动力机构前端，拖拉机后端三点悬挂与翻压部件固定连接。

2.2 工作原理

工作时，埋切部件无需动力输入，由拖拉机拖拽或推行而向前移动，辊筒组件前移过程中，先将紫云英绿肥推倒在地，紫云英茎秆由均布于辊筒组件上的压切刀切成一段段短小茎秆，并被进一步压埋入土壤，后置翻压部件仅需较小耕深，即可将压切后的紫云英茎秆翻压到土中，埋切部件所有作业消耗的动力只是辊筒移动的牵引力，翻压部件动力消耗较现有铧式犁动力消耗也大幅减少。翻压部件两组犁体呈 180° 相对犁架垂直配置，犁架通过一转动轴安装在悬挂架上，拖拉机液压输出动力使翻转油缸的活塞杆伸缩，推动犁架完成 180° 翻转，作业过程中实现犁体单向翻垡。调幅螺杆可使组合作业机工作幅宽在一定范围内进行调节，提高了对作业条件（土壤条件、耕深等）变化的适应能力，从而提高机具作业效率、降低油耗。

3 主要工作部件设计与分析

3.1 辊筒组件

3.1.1 结构及组成

辊筒组件(图 4)是实现紫云英茎秆埋切的重要部件，主要由弹性卸土板、压切刀、端部支撑装置、辊筒壁、注水口堵头、旋转轴等组成，辊筒组件上均布排列若干排刀组，每排刀组由 4 只压切刀构成。

当辊筒组件在地表滚动并推倒紫云英茎秆时，气槽式压切刀切断紫云英茎秆的同时，也会将一部分茎秆埋切入土壤中，压切刀上间隔分布形成内嵌气槽的穿孔，减少土垡与刀壁的贴合面积，降低相互间的粘合力，在压切刀移出土壤时使土垡能在其自重作用下脱离压切刀^[19]，同时，设计由弹簧钢热轧

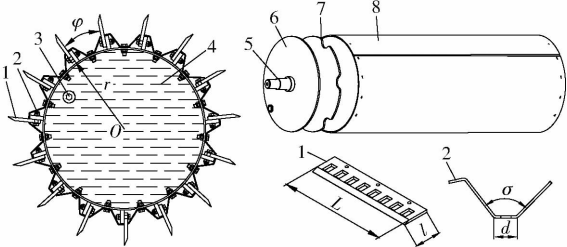


图 4 辊筒组件示意图

Fig. 4 Roller components

1. 气槽式压切刀 2. F 型弹性卸土板 3. 注水口堵头 4. 水
5. 旋转轴 6. 外支撑板 7. 齿形盘式内支撑板 8. 辊筒壁

成型的 F 型弹性卸土板，确保当作业土壤处于高粘性时，弹性卸土板能推动土垡沿辊筒径向移出，达到理想的卸土效果。齿型盘式内支撑板的齿型可保证辊筒内腔相通，压切力可通过拧下注水口添加不同质量的水来调节，以适应不同品种、不同成熟度紫云英绿肥茎秆的埋切需求。

依据图 4 分析，理想状态下紫云英茎秆切断长度为辊筒壁半径与相邻两压切刀之间弧度的乘积，考虑依靠辊筒组件装满水后将紫云英茎秆埋压切断，需满足条件

$$A_l = \theta \pi r / 180 = \varphi r \tag{1}$$

$$\rho g V = 4 \rho g L \pi r^2 \geq 4 K F'_{\max} L A_l \tag{2}$$

式中 A_l ——紫云英茎秆切断长度，参考玉米、高粱、小麦、水稻等作物秸秆粉碎还田合格长度取值在 100 ~ 150 mm 之间^[20]，则取平均值 125 mm

θ ——相邻两压切刀之间夹角，(°)

φ ——相邻两压切刀对应弧度，rad

V ——辊筒组件内部体积，m³

L ——单个压切刀长度，依据作业幅宽要求，取 500 mm

ρ ——水的密度，kg/m³

g ——重力加速度，9.8 m/s²

r ——压切辊半径，mm

K ——单位面积内紫云英植株数量，根据理想条件下紫云英开沟、播种等环节种

植技术要求^[6],取 580 株/m²

$F'_{\max}$ ——单株紫云英茎秆受到的最大压切力,依据表 1,取值 40 N

图 4 中 l 为压切刀宽度(140 ~ 180 mm^[21]),取 180 mm, σ 为 F 型弹性卸土板的夹角,取 82.1°, d 为弹性卸土板底部宽度,取 30 mm^[19]。

由式(1)、(2)计算可得,压切辊半径应满足 $r > 303$ mm,故设计将压切辊半径圆整为 305 mm,相邻两压切刀对应弧度 φ 为 0.409 rad,则两相邻压切刀之间对应的夹角 θ 为 23.45°,取整为 24°,即设计辊筒壁上沿圆周均布配置压切刀数量为 15。

3.1.2 压切刀排布方式

从辊筒组件中的压切刀安装排布可知,每排刀组由 4 只压切刀组成,通过间隔移除压切刀,可实现压切刀单弧度 φ 、双弧度 2φ 和三弧度 3φ 等 3 种间距排布方式(图 5),这样组配方式下,可减少同时与地面作用的刀片数量,使单位压切刀对茎秆的压切力成倍增加,可适应不同品种、不同压切长度的紫云英绿肥茎秆的埋切作业需求。

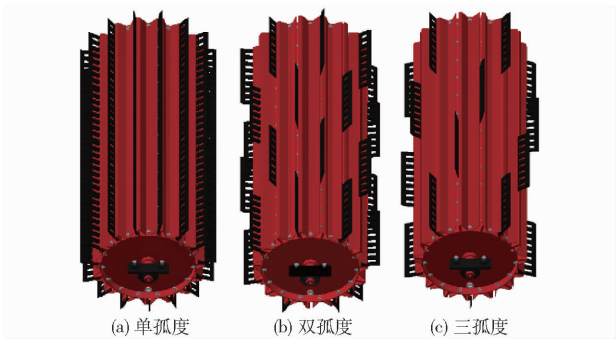


图 5 压切刀 3 种间距排布方式

Fig.5 Three spacing arrangements of incisal-pressing knives

3.1.3 紫云英茎秆受力分析

如图 6 所示,对紫云英茎秆进行受力分析,将紫云英茎秆标记为质点 n ,其受力有地面支撑力 G_N 、压切刀沿开刃面刃口切线 $b-b'$ 方向的摩擦力 F 和切刀刃口沿 $a-a'$ 方向的法向反作用力 N , N' 为土壤的法向反力,将 N 沿开刃面刃口切线方向分解成 T 和 T' ,则刀刃滑切作用取决于力 T 的大小,当 $T > F$ 时,压切刀对紫云英茎秆产生滑切,则茎秆受力方程为

$$\begin{cases} T = N \tan \tau \\ F = N \mu \\ \mu = \tan \psi \end{cases} \quad (3)$$

式中 T ——切向力, N

τ ——作用点动态滑切角,(°)

ψ ——钢板与紫云英茎秆滑动摩擦角,(°)

μ ——钢板与紫云英茎秆滑切系数

根据刀刃切割农作物茎秆的滑切理论可知^[22],

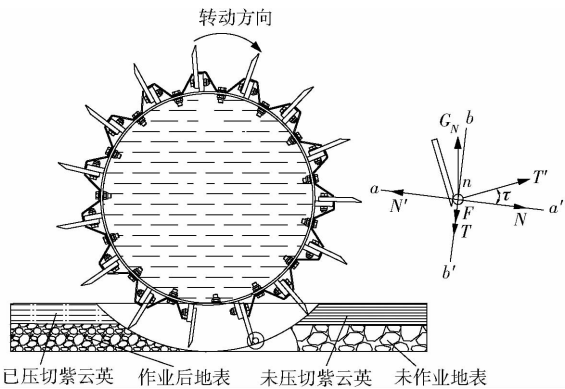


图 6 紫云英茎秆受力分析

Fig.6 Mechanical analysis of Astragalus smicus straw

在切割作业时实现滑移切是不可取的,实现无滑移的滑切是可行的。若 $T > F$,则 $\tau > \psi$,即接触点动态滑切角大于茎秆和刀片的摩擦角时,压切刀对茎秆产生滑切作用。参考不同含水率下其它农作物茎秆与钢板摩擦角的测定方法^[23],测得盛花期采样紫云英茎秆含水率 76.65% ~ 81.75% 时,紫云英茎秆与钢板滑动摩擦角为 32.7° ~ 34.3°,因此动态滑切角 $\tau > 34.3^\circ$;为避免茎秆堵塞,又有 $\tau < 90^\circ - \psi$,即当压切刀滑切角满足 $34.3^\circ < \tau < 55.7^\circ$ 时,可保证压切刀刃线上的每一点在地表接触位置时与茎秆有效切割,实现紫云英茎秆顺畅埋切。

3.2 前悬挂连接组件

前悬挂连接组件是连接辊筒埋切组件与拖拉机的重要装置,主要由油管、前连接侧板、提升臂、支撑梁和液压油缸等组成。辊筒埋切组件田间工作时油缸处于伸出状态,提升臂位于田间作业位置 A,而辊筒埋切组件在运输状态时,油缸则处于收缩状态,提升臂位于运输位置 B(图 7)。根据辊筒组件约 900 kg、式(2)计算灌满辊筒组件所需水量约 585 kg 以及考

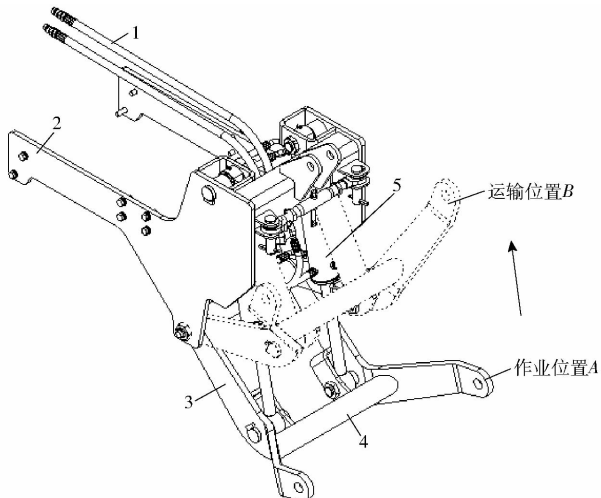


图 7 前悬挂连接组件提升臂位置变换示意图

Fig.7 Position change diagram of lifting arm of

front suspension connection components

1. 油管 2. 前连接侧板 3. 提升臂 4. 支撑梁 5. 液压油缸

考虑运输时辊筒埋切组件最低离地高度 200 mm 等情况综合分析计算,选择满足负载及行程要求液压缸型号 HSGL01-80/dE,设计液压缸行程 440 mm,工作压力 16 MPa,缸径 80 mm,活塞杆径 40 mm。

3.3 栅条式犁体

3.3.1 结构设计

翻压部件犁体工作面的结构直接影响翻压效率及牵引力大小,在犁体曲面的设计方法中目前得到广泛应用的是水平直线法^[24-25],研究表明栅条式犁体碎土、脱土性能较好,不仅可以保持土壤表层的形成顺序,而且还可降低能量消耗,且耕作后土壤的总腐殖质含量、全氮含量、活性磷含量等农化特性均优于整片式铧式犁体耕作后作业效果^[26],故采用水平直线法设计栅条式犁体(图 8),主要由犁铧、犁壁、犁柱、栅条、调节螺杆、导向板等组成,工作时犁铧与犁壁先将土壤和茎秆混合物翻转,再由栅条将翻转的土壤进行碎土,导向板则使栅条犁工作行程尽量保持在一条直线上。

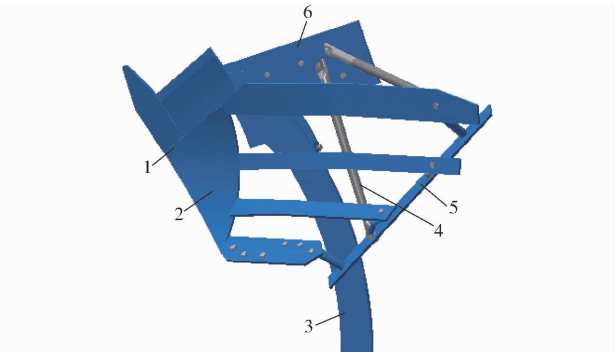


图 8 栅条式犁体三维设计图

Fig.8 3D design drawing of grid-type plough

1.犁铧 2.犁壁 3.犁柱 4.调节螺杆 5.栅条 6.导向板

3.3.2 导曲线分析

犁体曲面的形状和工作性能主要由导曲线和元线角变化规律所决定^[27-28],图 9 为栅条式犁体导曲线及拟合曲线,其中 s 为导曲线的直线长度, ε 为铧刃起土角, w 为两端点切线夹角,根据紫云英绿肥翻压要求并结合农业机械设计手册铧式犁相关设计参数的推荐范围^[21,28],设计犁体导曲线各参数如下:铧刃起土角 18.7° ,导曲线长度 37.7 mm,两端点切线夹角 124.5° ,导曲线高度 237.35 mm,导曲线开度 232 mm。

从拟合曲线分析可知,栅条式犁体铧刃起土角数值与一般铧式犁体相比较小,而导曲线开度较大,在作业过程中有利于土壤沿着犁体曲面向后脱离犁壁,减小犁体翻压阻力。根据导曲线各参数,推导可得抛物线型导曲线方程式^[29]

$$x^2 + 7.279xy + 13.247y^2 + 2559.387x - 7561.383y = 0$$

(4)

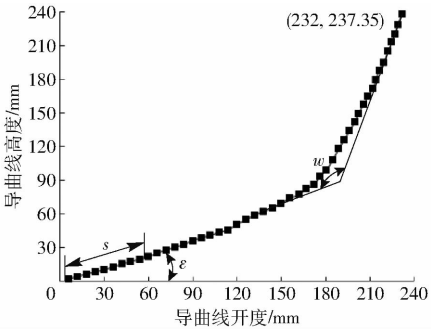


图 9 犁体导曲线及拟合曲线

Fig.9 Plough guiding curve and fitting curve

3.3.3 元线角变化规律分析

元线角随元线高度变化过程中,一般都有初始元线角→最小元线角→最大元线角的变化规律,根据紫云英翻压部件作业原理及与辊筒组件的配套要求,设计翻土型犁体曲面^[30],单个犁体耕宽 400 mm,耕深 220 mm,初始元线角为 35° ,元线间隔 25 mm,对于翻土型犁体,在最小元线角向最大元线角变化时,元线角按抛物线规律变化,公式为

$$y = \frac{y_{\max}(Z_i - Z_{\min})^2}{(Z_{\max} - Z_{\min})^2}$$

(5)

其中

$$y_{\max} = \frac{1}{m}(Q_{\max} - Q_{\min})$$

(6)

式中 y ——角度对应的纵坐标数值,mm
 Z_i ——自铧刃起第 i 条元线高度,mm
 $Z_{\max}$ ——最大元线角处对应元线高度,取 425 mm
 $Z_{\min}$ ——最小元线角处对应元线高度,取 75 mm
 m ——比例尺,取 $0.2(^\circ)/\text{mm}$
 $Q_{\max}$ ——最大元线角,取 50° ^[29]
 $Q_{\min}$ ——最小元线角,取 31° ^[29]
 $y_{\max}$ —— y 的最大值,由式(6)计算取 95 mm
故在 $Q_{\min} \rightarrow Q_{\max}$ 段,犁体元线角抛物线解析式为

$$y = \frac{(Z_i - 75)^2}{1289.47}$$

(7)

设置元线间隔 25 mm,将各元线高度代入式(7),可得图 10 所示犁体元线角变化规律。

4 田间试验与结果分析

4.1 试验条件

紫云英绿肥埋切翻压田间试验于 2018 年 4 月 23 日在芜湖南陵紫云英试验地进行,试验田长 70 m,宽 20 m,盛花期紫云英鲜草产量为 $17\,093\text{ kg}/\text{hm}^2$,土壤类型为沙壤土,TZS 型水分测定仪测得土壤含水率为 28.73% (0 ~ 10 cm) 和 32.1% (20 ~ 30 cm),容重 $1.23 \sim 1.42\text{ g}/\text{cm}^3$,TYD-2 型土壤硬度计测得深度

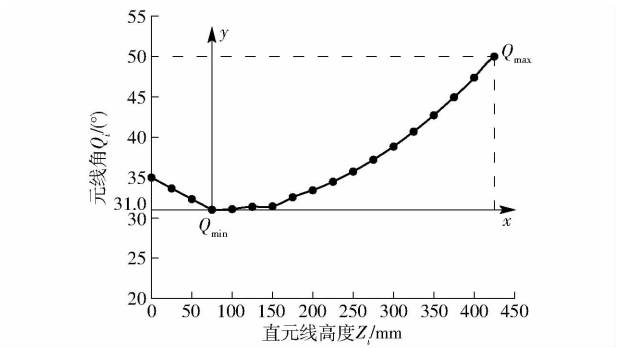


图 10 犁体元线角变化规律图

Fig. 10 Influence regularity chart of plough element-line angle
5、10、15、20 cm 处土壤坚实度峰值分别为 141、200、401、612 N/cm²，配套动力为 John Deere - 1054 型拖拉机。

4.2 试验方法

为考察紫云英绿肥埋切翻压组合作业机作业质量，参考 GB/T 14225—2008《铧式犁》和 JB/T

6678—2001《秸秆粉碎还田机》等标准中规定的试验方法进行田间作业性能试验(图 11)，选取茎秆切断长度合格率、土堡破碎率、耕深及耕宽稳定性变异系数和地表以下植被翻压覆盖率作为组合作业机工作性能的测试指标。

试验地块紫云英鲜草产量为 17 093 kg/hm²，且大部分紫云英植株株高为 40 ~ 60 cm，满足理想的紫云英 15 000 ~ 22 500 kg/hm² 翻压量要求^[5]，无需增大辊筒组件压切力，故选择压切刀排布方式为单弧度排列。每次行程机具按照图 11a 中箭头方向对紫云英绿肥进行埋切翻压作业，图中 A、B、C、D 为测定区各点的标杆位置，E、F、G、H、I 为选定的土壤含水率、容重、坚实度等参数的测定区域，A→B 段和 C→D 段为土堡破碎率、地表以下植被翻压覆盖率、翻压耕深、耕宽等试验指标的测定区，每个行程上测量 15 个点，等距离插上标杆。

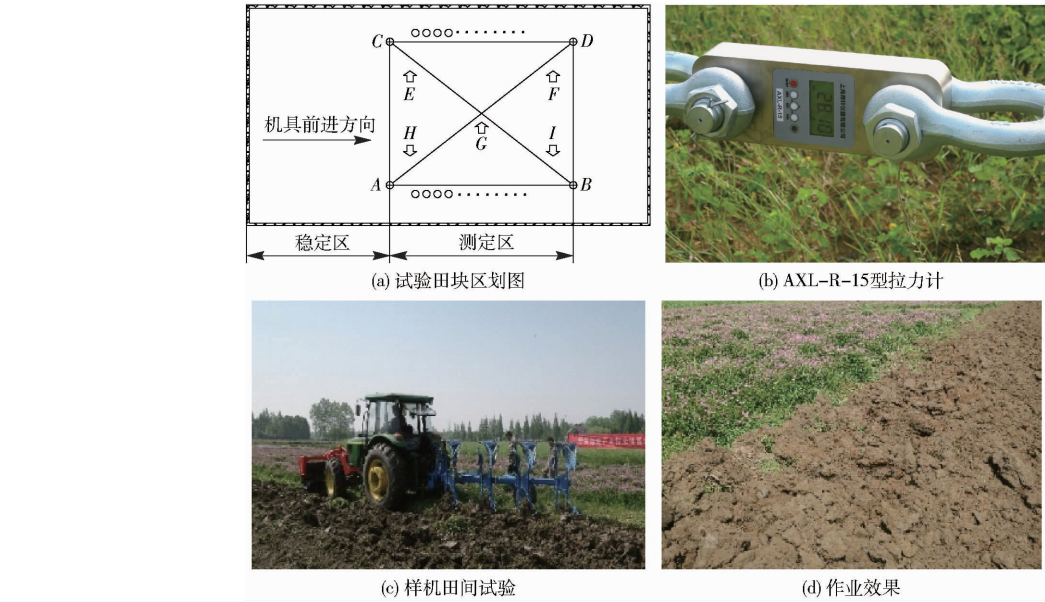


图 11 试验方法设计与田间性能试验

Fig. 11 Design of experimental method and field performance test

试验时，准备 2 台常发 1504 型拖拉机，利用一台拖拉机挂倒挡牵引另外一台拖拉机，分别将紫云英埋切翻压组合作业机辊筒组件、栅条式翻转犁和传统铧式犁悬挂于被牵引拖拉机上，利用 AXL - R - 15 型拉力计(图 11b)测得埋切翻压机各部件、拖拉机、传统铧式犁正常作业时牵引力，从而计算出绿肥埋切翻压机和传统铧式犁工作时总牵引力，分别记为 F_j 和 F_h ， F_j 包含了辊筒组件的牵引力 F_g 和栅条犁的牵引力 F_s ，每次牵引试验前，将数显拉力机切换至 PEAK 键，随着牵引力测量值的变动，液晶显示区始终实时锁定测得的最大测量值，记为该次试验测得的牵引力，再按 PEAK 键，解除锁定状态，此时屏上 PEAK 指示消失，重新回到测力状态。测得栅条

犁的牵引力 F_s 为 28.1 kN，辊筒组件的牵引力 F_g 为 0.8 kN，拖拉机工作阻力为 1.7 kN，传统铧式犁牵引力 F_h 为 42.3 kN。埋切翻压机总功率 P_m 应包含牵引力总功率 P_q 和辊筒组件的转动功率 P_r ，机具前进速度 v 按 6 km/h 计算，可得

$$P_m = P_r + P_q \tag{8}$$

其中

$$P_r = \frac{T_1 N_1}{9\,550} = \frac{F_g r N_1}{9\,550} \tag{9}$$

$$P_q = F_j v \tag{10}$$

$$F_j = F_g + F_s \tag{11}$$

$$P_h = F_h v \tag{12}$$

式中 N_1 ——辊筒正常作业条件下的转速，约 50 r/min

T_1 ——辊筒转矩, N·m

经计算辊筒组件转动部分功耗为1.28 kW, 紫云英埋切翻压组合作业机牵引力消耗48.17 kW, 紫云英埋切翻压组合作业机总功率消耗49.45 kW, 传统铧式犁作业功率为70.5 kW, 紫云英埋切翻压组合作业机作业功耗较传统铧式犁作业功耗降低约29.86%。

茎秆切断长度合格率测定方法是采用钢板尺人工测量方式, 获取各测区内翻垡土块下方0~25 cm切断茎秆质量占总抽取茎秆质量的平均百分比^[20]。

土垡破碎率计算方法是在每个行程内选取不少于3个测定点, 在不小于200 cm×200 cm面积耕层内, 分别测定最大尺寸在大于、小于和等于5 cm时的土块质量, 计算土垡破碎率为

$$C = \frac{G_s}{G} \times 100\% \tag{13}$$

式中 G_s ——全耕层内最大尺寸小于、等于5 cm的土块质量, kg

G ——全耕层土块总质量, kg

耕深稳定性变异系数是通过耕深尺测量最后犁体耕深来计算, 计算式为

$$V_1 = \frac{S}{a} \times 100\% \tag{14}$$

其中 $\bar{a} = \frac{\sum a_i}{n}$ (15)

$$S = \sqrt{\frac{\sum (a_i - \bar{a})^2}{n - 1}} \tag{16}$$

式中 a_i ——各测定点耕深, cm

n ——每行程测定点数

$\bar{a}$ ——每行程平均耕深, cm

S ——每行程标准差, cm

V_1 ——每行程耕深稳定性变异系数, %

耕宽是指沿垂直机具运动方向测定的两个相邻行程犁沟沟墙之间的水平距离, 在测定耕深的相应处进行耕宽测量, 耕宽稳定性变异系数计算方法同耕深稳定性变异系数^[31]。

植被翻压覆盖率测定方法如下: 每个行程不少于3个测点, 在已耕地上取宽度为400 cm、长度为30 cm的区域, 分别测定地表以上的紫云英植被质量、地表以下8 cm深度内的紫云英植被质量以及8 cm以下耕层内的紫云英植被质量, 植被翻压覆盖率为

$$F_1 = \frac{z_2 + z_3}{z_1 + z_2 + z_3} \times 100\% \tag{17}$$

式中 z_1 ——露在地表以上的紫云英植被质量, g

z_2 ——8 cm深度内的紫云英植被质量, g

z_3 ——8 cm以下紫云英植被质量, g

4.3 试验结果与分析

紫云英埋切翻压组合作业机田间试验结果如表2所示, 由试验结果可得, 埋切翻压组合作业机工作效率可达0.67~1.20 hm²/h, 紫云英茎秆切断长度合格率为92%, 翻压部件作业幅宽1 920 mm, 耕深220 mm, 耕宽稳定性变异系数3.7%, 耕深稳定性变异系数5.6%, 土垡破碎率85.6%, 植被翻压覆盖率98.3%, 紫云英埋切翻压组合作业机试验指标均达到国家和行业标准要求。

表2 田间试验结果

Tab.2 Results of field experiment

参数	技术要求 ^[20,31]	测定结果	判定结果
作业速度/(km·h ⁻¹)	>5.0	5.8~6.0	合格
入土行程/m	≤6.0	4.7	合格
茎秆切断长度合格率/%	≥85	92	合格
耕宽稳定性变异系数/%	≤10.0	3.7	合格
耕深稳定性变异系数/%	≤10.0	5.6	合格
土垡破碎率/%	≥65	85.6	合格
植被翻压覆盖率/%	≥85	98.3	合格

试验过程中发现, 当组合作业机前进速度保持在5.8~6.0 km/h时, 其各组成部件作业性能较高且相对稳定。当前进速度进一步提高时, 辊筒组件、栅条式犁体与紫云英茎秆、土壤互作时间缩短, 辊筒组件来不及将紫云英茎秆完全埋压切断就从茎秆上面转动过去, 同时, 耕深和耕宽稳定性受到扰动, 造成茎秆切断长度合格率和耕深、耕宽稳定性变异系数降低。若田间土地不平整、土壤坚实度不高时, 则会影响辊筒组件压切紫云英茎秆可靠性, 需要适当调整压切深度和翻压深度, 确保压切刀、栅条犁等部件与茎秆、田间土壤的有效作用时间, 以获取高质量的埋切和翻压效果。

5 结论

(1)设计了一种紫云英绿肥埋切翻压组合作业机, 阐述了其结构组成和工作原理, 并对辊筒埋切组件、前悬挂连接组件、栅条式翻转犁等主要工作部件进行了分析和参数设计, 在有效提高紫云英绿肥翻压肥田效果的同时, 使作业功耗降低了29.86%。

(2)根据盛花期紫云英压切特性试验和理论计算, 设计满足埋切要求的压切辊半径为305 mm; 基于农作物茎秆滑切理论, 结合紫云英茎秆受力分析, 得到辊筒组件压切刀滑切角范围为34.3°~55.7°; 采用水平直元线法设计栅条式犁体曲面, 推导得到导曲线抛物线方程, 并绘制了犁体直元线角变化规律图。

(3)田间试验结果表明,在作业速度为 5.8 ~ 6.0 hm²/h 的条件下,埋切翻压组合作业机工作效率可达 0.67 ~ 1.20 hm²/h,紫云英茎秆切断长度合格率为 92%,耕宽稳定性变异系数 3.7%,耕深稳定性变异系数 5.6%,土垡破碎率 85.6%,植被翻压覆盖率 98.3%,各项性能指标均达到国家和行业标准要求。

参 考 文 献

[1] 曹卫东,包兴国,徐昌旭,等. 中国绿肥科研 60 年回顾与未来展望[J]. 植物营养与肥科学报, 2017, 23(6): 1450 – 1461.
CAO Weidong, BAO Xingguo, XU Changxu, et al. Reviews and prospects on science and technology of green manure in China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(6):1450 – 1461. (in Chinese)

[2] 李萍萍,林永锋,胡永光. 有机肥与化肥配施对茶叶生长和土壤养分的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 64 – 69.
LI Pingping, LIN Yongfeng, HU Yongguang. Effects of compound applicaion of organic and chemical fertilizers on growth, quality of tea plants and soil nutrient [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(2): 64 – 69. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/readerview_abstract.aspx?file_no=20150211&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.011. (in Chinese)

[3] 林多胡,顾荣申. 中国紫云英[M]. 福州:福建科学技术出版社,2000.

[4] 谢志坚,周春火,贺亚琴,等. 21 世纪我国稻区种植紫云英的研究现状及展望[J]. 草业学报, 2018, 27(8): 185 – 196.
XIE Zhijian, ZHOU Chunhuo, HE Yaqin, et al. A review of *Astragalus sinicus* in paddy fields in south China since 2000s [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(8): 185 – 196. (in Chinese)

[5] 曹卫东,徐昌旭. 中国主要农区绿肥作物生产与利用技术规程[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2010.

[6] 游兆延,吴惠昌,彭宝良,等. 机收水稻茬地紫云英双圆盘开沟撒播组合作业机设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 18 – 28.
YOU Zhaoyan, WU Huichang, PENG Baoliang, et al. Design of double disc ditching and sowing combined working machinee experiment on of *Astragalus smicus* for machine-harvested rice stubble field [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6):18 – 28. (in Chinese)

[7] 周国朋,谢志坚,曹卫东,等. 稻草高茬-紫云英联合还田改善土壤肥力提高作物产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23):157 – 163.
ZHOU Guopeng, XIE Zhijian, CAO Weidong, et al. Co-incorporation of high rice stubble and Chinese milk vetch improving soil fertility and yield of rice [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 157 – 163. (in Chinese)

[8] 白金顺,曹卫东,包兴国,等. 长期绿肥翻压对西北旱地小麦籽粒矿质元素含量的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(6): 1847 – 1851.
BAI Jinshun, CAO Weidong, BAO Xingguo, et al. Effects of long-term green manure application on the concentrations of mineral elements in grain of dryland wheat in northwest of China [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(6): 1847 – 1851. (in Chinese)

[9] 石飞,杨庆媛,王成,等. 世界耕地休耕时空配置的实践及研究进展 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 1 – 9.
SHI Fei, YANG Qingyuan, WANG Cheng, et al. Practice and research progress on spatio-temporal collocation of fallow of cultivated land in world[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 1 – 9. (in Chinese)

[10] ASTIER M, MAASS J M, ETCHEVERS-BARRA J D, et al. Short-term green manure and tillage management effects on maize yield and soil quality in an Andisol [J]. Soil and Tillage Research, 2006, 88(1 – 2): 153 – 159.

[11] SAMARAJEEWA K B D P, TAKATSUGU H, SHINYA O. Effect of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) as a cover crop on weed control, growth and yield of wheat under different tillage systems [J]. Plant Production Science, 2005, 8(1): 79 – 85.

[12] GIRMA G, ERCOLE Z, ABIYE A. Optimization of animal drawn tillage implement systems: part 2, development of a reversible plough and a ridger [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 67(4): 299 – 310.

[13] 熊元芳. 水田埋草旋耕机的试验研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(5): 177 – 178.
XIONG Yuanfang. Experimental study of paddy straw-burying tiller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(5): 177 – 178. (in Chinese)

[14] 贺江川,陈学庚,郑炫,等. 1LFT-550 型调幅式液压翻转栅条犁设计[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(5): 27 – 30.
HE Jiangchuan, CHEN Xuegeng, ZHENG Xuan, et al. Design of 1LFT-550 modulated hydraulic turnover strip plough [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(5): 27 – 30. (in Chinese)

[15] 郑丹. 不同条件下作物秸秆养分释放规律的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2012.
ZHENG Dan. The nutrient releasing regularity of crop stalks [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012. (in Chinese)

[16] 师宏魁. 玉米秸秆整株还田秸秆分解速率及还田效应[D]. 北京:中国农业大学,2003.
SHI Hongkui. The decomposition rate and field effects after the returning of whole maize stalk into farmland [D]. Beijing:

- China Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- [17] 刘庆庭, 区颖刚, 卿上乐, 等. 农作物茎秆的力学特性研究进展[J]. 农业机械学报, 2007, 38(7): 172–176.
LIU Qingting, OU Yinggang, QING Shangle, et al. Study progress on mechanics properties of crop stalks [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(7): 172–176. (in Chinese)
- [18] 沈成, 陈巧敏, 周杨, 等. 苧麻单茎秆切割试验与分析[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(6): 40–43.
SHEN Cheng, CHEN Qiaomin, ZHOU Yang, et al. Experiment and analysis on single stalk cutting of ramie [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(6): 40–43. (in Chinese)
- [19] 吴惠昌, 高学梅, 游兆延, 等. 一种压切辊筒组件: CN208638907U [P]. 2018–07–12.
- [20] JB/T 6678—2001 秸秆粉碎还田机[S]. 2001.
- [21] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [22] 赵宏波, 何进, 李洪文, 等. 条带式旋切后抛防堵装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 65–75.
ZHAO Hongbo, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of strip rotary-cut-throw anti-blocking implement[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 65–75. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180508&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.008. (in Chinese)
- [23] 房欣, 陈海涛, 黄振华, 等. 不同含水率大豆秸秆与不同材料间滑动摩擦特性的研究[J]. 大豆科学, 2012, 31(5): 838–841.
FANG Xin, CHEN Haitao, HUANG Zhenhua, et al. Sliding friction characteristic of different moisture content of soybean stalk with different materials [J]. Soybean Science, 2012, 31(5): 838–841. (in Chinese)
- [24] 何志民, 杨芳, 孙红霞, 等. 水平直线犁体曲面参数化设计[J]. 机械科学与技术, 2002, 21(4): 562–568.
HE Zhimin, YANG Fang, SUN Hongxia, et al. On parametric design of horizontal straight generatrix plough body surface [J]. Mechanical Science and Technology, 2002, 21(4): 562–568. (in Chinese)
- [25] 宫含洋, 王立权, 邢晓冬, 等. 海底犁式挖沟机犁体建模及土壤裂解研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(19): 134–140.
GONG Hanyang, WANG Liqun, XING Xiaodong, et al. Modeling of the plow body of submarine plowing trencher and analysis of the soil cutting process [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(19): 134–140. (in Chinese)
- [26] KOCAP B Φ, 王梦熊. 栅条犁[J]. 粮油加工与食品机械, 1985(6): 41–44.
KOCAP B Φ, WANG Mengxiong. Grid-type plough [J]. Machinery for Cereals, Oil and Food Processing, 1985(6): 41–44. (in Chinese)
- [27] 何永强, 贺俊林, 杨作梅. 犁体曲面离散元仿真试验与参数优化[J]. 农机化研究, 2019, 41(12): 89–93.
HE Yongqiang, HE Junlin, YANG Zuomei. Discrete element simulation and parameter optimization of plow surface [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(12): 89–93. (in Chinese)
- [28] 张青松, 汲文峰, 廖宜涛, 等. 油菜直播机铧式开畦沟前犁曲面分析与阻力特性试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 130–135.
ZHANG Qingsong, JI Wenfeng, LIAO Yitao, et al. Surface analysis and resistance characteristics experiment on ditch plow ahead of direct rapeseed seeder [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 130–135. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140222&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.022. (in Chinese)
- [29] 任文涛, 李宝筏. 元线角变化规律公式的应用技巧及其公式的改进[J]. 沈阳农业大学学报, 1994, 25(3): 336–342.
REN Wentao, LI Baofa. Application and modification of the angel formula of plow bottom horizontal construction line [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1994, 25(3): 336–342. (in Chinese)
- [30] 胡中. 水平直线犁体曲面导曲线的一般方程式及其参数[J]. 农业机械学报, 1979, 10(4): 66–74.
HU Zhong. The general equation and parameters of the guiding curve of plow bottom surface formed by horizontal straight-line elements [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1979, 10(4): 66–74. (in Chinese)
- [31] GB/T 14225—2008 铧式犁[S]. 2008.