

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.007

基于逆向工程的搅浆刀作业性能界定与关键设计参数研究

丁启朔^{1,2} 吕绪敏^{1,2} 孙克润³ 李毅念^{1,2} 何瑞银^{1,2} 汪小昆^{1,2}

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 江苏省智能化农业装备重点实验室, 南京 210031;

3. 银华春翔有限公司, 连云港 222000)

摘要: 水田搅浆是基于稻作制度的独立机械化作业环节,搅浆刀是进行搅浆农艺处理的专用刀具,但目前缺乏针对搅浆的农艺界定及搅浆刀专用设计参数研究。本文利用逆向工程技术获取搅浆刀的关键几何参数,并对搅浆作业和搅浆刀的设计方法进行定义。通过与常规旋耕刀(R245)进行分析对比提出搅浆刀的专用设计参数,进而通过田间试验进一步探讨搅浆刀的设计方法。结果表明,搅浆刀的楔面入土效应是保障其水田搅浆性能的关键,该效应所对应的搅浆刀设计参数被定义为侧切刃楔角,侧切刃楔角与侧切刃刀面宽度2个关键设计参数决定了搅浆刀入土过程的侧向搅浆作业强度。与R245旋耕刀相比,侧切刃楔角是搅浆刀设计的显著特点,搅浆刀的侧切刃静态楔角高于动态楔角,而R245的侧切刃面是一平直刀面(楔角为 0°),在正切刃区域,搅浆刀与旋耕刀的楔角变化基本一致。基于田间土壤条件的原位台架试验进一步证明了搅浆刀专用设计参数对保障起浆、水田埋草等性能的优越性。

关键词: 搅浆刀; 逆向工程; 刀具楔角; 搅浆性能

中图分类号: S222

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)03-0068-07

OSID:



Performance and Design Parameter Definition on Puddling Knife Using Reverse Engineering

DING Qishuo^{1,2} LÜ Xumin^{1,2} SUN Kerun³ LI Yinian^{1,2} HE Ruiyin^{1,2} WANG Xiaochan^{1,2}

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment of Jiangsu Province, Nanjing 210031, China

3. Yinhuachunxiang Co., Ltd., Lianyungang 222000, China)

Abstract: Evolution of agronomic practices has led to the classification of paddy production machines. Specialized machineries also imply differences of functional performance among different types of soil engaging tools. Each class of rotatory tiller knives thus needs to be developed with its specific optimized designs. Puddling is an independent mechanized field operation. Puddling knife has been well evolved from long history of paddy production and industry development. However, proper definition on mechanized puddling and the design theory for puddling knife is lacking. An inverse engineering approach was adopted to quantify the geometric parameters of a market available puddling knife. Puddling operation and the design principle for puddling knife was defined. A rotary tiller knife (modeled R245) was used for comparison purpose and a field experiment was conducted to illustrate functional performances of the puddling knife. Results showed that rank intrusion effect was a key factor guaranteeing the functionality of puddling. Therefore, the key parameter of puddling knife design was defined as side blade rank angle. It was the integrated effect of the side blade rank angle and the side blade width that determined the puddling performance of the knife. Compared with R245, the puddling knife was featured with its side blade rank angle, which static value was higher than the dynamic value. While the R245 had a flattened side blade (i. e. 0° of rank angle). In the front blade section, both the puddling knife and the rotary tiller knife had a similar geometry. Field experiment further proved an improved performance of the puddling knife as compared with R245, either in puddling quality and straw burial. The result also implied the need to apply inverse engineering tools for the design of all other types of soil engaging tools.

Key words: paddy puddling knife; reverse engineering; knife wedge angle; puddling performance

收稿日期: 2020-05-02 修回日期: 2020-06-10

基金项目: 江苏省农业科技自主创新项目(CX(17)1002)、江苏省苏北科技专项(ZL-LYG2017008)和国家重点研发计划项目(2016YFD0300900)

作者简介: 丁启朔(1968—),男,教授,主要从事土壤-植物-机器系统研究,E-mail: qsding@njau.edu.cn

0 引言

稻作农艺的演变推动了耕作机械设计理论的发展,南方稻作保护性耕作体现在以旋代耕、以旋代耙等技术模式的普遍应用。农机-农艺融合也促成了旋耕触土部件种类多样、形态各异的市场状况。但触土部件设计理论并未受到足够关注,各类触土部件(如旋耕灭茬刀、搅浆刀、深耕刀、起垄刀、开垦刀等)的专用设计理论尚不完善。

经典的旋耕机械设计理论演变复杂,从初期强调触土部件(旋耕刀)的入土和脱草性^[1]发展到刀辊排列^[2]等整机优化理论,直到目前对农机-农艺融合的重视,开始强调旱/水田埋草或水旱兼顾的旋耕机设计^[3]和兼顾深松(犁旋一体、旋耕深松机)^[4]、强调复式作业(旋耕耕整播种一体机、旋耕开沟播种机、免耕播种盖籽机、苗带清秸旋耕播种机、空间立体匀播机)^[5-7]以及条带保护性耕作的旋耕及播种机具^[8],涉及到生产领域的诸多方面。

农艺对秸秆还田的要求进一步强化了灭茬和埋草性能的机械设计理论,旱地灭茬^[9]、水田灭茬、留茬碎草、免耕碎草^[10]、深旋埋草^[11]、灭茬起浆等研究成果充分体现了近年来我国耕作研究的理论发展及农机农艺融合深度。尽管如此,在刀具的设计理论层面依然缺乏对不同类别刀具的功能特征描述和关键设计参数的定义。

现有的旋耕刀设计理论严格界定了其功能属性和结构特征,功能属性体现为出入土性和脱草性,结构特征涉及侧切刃和正切刃的专用设计和组合^[12]。相比旋耕刀,搅浆刀、灭茬刀等触土部件是近年来农艺创新及产业市场行为的产物,尚未见其严谨的设计理论研究。鉴于目前涉及许多的水田耕作研究方向,如水田搅浆平地、深旋埋草、条带浅旋播种等^[13],因此有必要对各类型专用旋耕类触土部件进行功能界定和优化设计。

目前,市场上的旋耕刀具种类多样,如旋耕刀、灭茬刀、搅浆刀、开垦刀、起垄刀等,型号繁杂,因此可以按照生产中的典型机械化农艺(农事)环节对触土部件进行分类。本文对搅浆和搅浆刀的基本界定如下:水田搅浆(又称打浆、起浆、刮浆)是机插秧之前的带水耕耙关键作业环节,为水稻机插秧提供表面平整、埋茬完全、土壤软烂的苗床,这一农艺环节强调触土部件的搅浆性能,搅浆刀的设计参数应能体现出对应的搅浆功能和专有特征。

逆向工程技术是快速实现从产品获取关键设计参数的现代方法^[14-15],逆向工程已用来显著提高旱地耕作机械触土部件作业性能^[16-17]。充分发展的

搅浆机产业为利用逆向工程技术研究搅浆刀设计理论提供了良好的条件。同时,针对搅浆刀的逆向工程设计理论研究也能够推动其他各类触土部件的深入研究,有助于厘清目前旱地/水田旋耕机产品门类繁杂、机具应用方式混乱的现象。本文基于逆向工程技术,在界定搅浆刀专用作业性能的基础上,研究搅浆刀的关键技术参数,同时结合田间试验对比搅浆刀和旋耕刀在带水环境中的作业性能。

1 理论分析

1.1 基于逆向工程的搅浆刀结构重建

试验用搅浆刀选择连云港苏连机械有限公司的产品,该型搅浆刀专为水田搅浆机研发配套,起浆性能优良。

逆向工程方法参见文献^[16-18],所用关键仪器和软件分别为三坐标扫描仪和 SolidWorks 软件(2017 版),通过实体扫描并导入软件进行造型,获得虚拟重构的水田搅浆刀,保障模型与实体几何尺寸的一致性,其刀辊回转半径 R 为 195 mm,侧切刃起始半径 R_0 为 102 mm,工作幅宽 b 为 35 ~ 40 mm,正切面端面刀高 h 为 36 mm,侧切刃包角 θ_{\max} 为 28.38°。

1.2 刃口轮廓线滑切角分析

图 1 所示搅浆刀的外形结构、尺寸与旋耕刀差异显著,搅浆刀侧切刃所在刀面(简称侧切刃刀面)是一个空间弯折面,而旋耕刀侧切刃段是平直刀面。因此搅浆刀的侧切刃是一条空间弯曲的 3D 曲线,这些特征体现出搅浆刀的特殊结构特征。

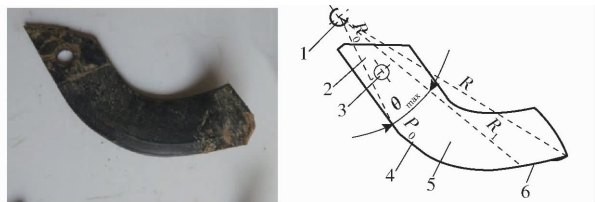


图 1 搅浆刀平面图

Fig. 1 Dimensions of puddling knife

1. 刀辊中心 2. 刀柄 3. 安装孔 4. 侧切刃 5. 侧切面 6. 正切刃

为简化分析和对比,首先借用旋耕刀的侧切刃滑切角分析法^[12,19-20],采用 ANSYS - DYNALIA 联合仿真结合 AUTOCAD(2017)软件计算出搅浆刀在不同旋耕速比 λ 下水平投影的侧切刃静态滑切角 τ_0 和动态滑切角 τ_k ,将搅浆刀与旋耕刀(R245 旋耕刀 NJ103-75)做对比(图 2)显示,搅浆刀的静、动态滑切角变化特征与旋耕刀差异显著,搅浆刀的静态滑切角变化范围是 36° ~ 50°,R245 旋耕刀的静态滑切角在 34° ~ 49°之间^[21],但二者静态滑切角变化范围较为接近(图 2a)。搅浆刀与旋耕刀的动态滑

切角差异显著。作业环境的特殊性决定了搅浆刀侧切刃总极径小于旋耕刀,而且在泥浆作业条件下缠草裹泥矛盾比早旋更加突出,因此搅浆刀不仅需要小极径而且还要更大的动态滑切角(图2b)。另外,搅浆刀的动态滑切角的变化程度也相对平稳。所有这些特征都表明搅浆刀在带草起浆条件下具备理论上更优的防缠草性能。

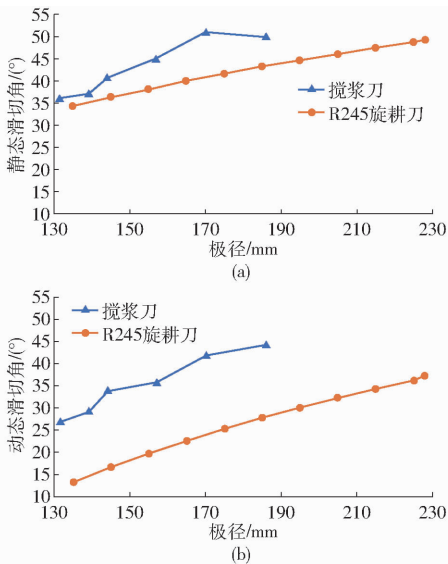


图2 刀具滑切角变化曲线($\lambda = 5$)

Fig. 2 Changing curves of sliding cutting angle ($\lambda = 5$)

上述利用旋耕刀设计理论进行的搅浆刀作业性能分析仅局限于滑切、防缠草等方面,尚不能利用旋耕刀的滑切角设计理论解释搅浆刀的搅浆性能,因此,必须为搅浆刀设计提出专用的设计参数。

1.3 刃口楔面触土效应与参数化

搅浆刀模型的典型结构特点是其侧切刃刀面是一个空间曲面。鉴于旋耕刀侧切刃刀面功能仅为侧切刃切入土壤,旋耕刀的设计理论并不讨论侧切刃刀面的设计参数。但搅浆刀的侧切刃刀面的翘曲状结构必然导致一个楔面入土的效应,即在搅浆刀的侧切刃入土过程中,侧切刃刀面沿刃口入土的方向形成楔面推挤土壤的效果,因此侧切刃刀面的楔面参数必然影响到搅浆刀的搅浆性能。

1.3.1 侧切刃刃口静态楔角

搅浆刀侧切刃刃口静态楔角定义为搅浆刀侧切刃刀面倾斜入土的角度,即刀具刃口上各点的回转圆平面与该点处局部侧切面的切平面间的夹角。逆向工程技术的方法是沿搅浆刀刃口不同位置将刀身分割成一组微小刀具,每一微小刀具都呈现出直立或倾斜的角度入土,故可以采用微分法,分别计算出每一微小刀具倾斜入土的角度。

利用 SolidWorks 软件分析过程如图3所示,在简化处理并略去刃口微观结构复杂性后,选刃口根

部(即侧切刃刀面前缘)一点作为起点 P_0 。按照刀具安装位置明确回转中心点 O ,将刀柄安装孔回转中心轴 L_z 与上下两面中心轴平移至点 O 得到 L_c 与 L_p 。以直线 L_p 与起点 P_0 作一基准面 S_0 ,该基准面 S_0 即为侧切刃起点处的回转圆所在平面。在侧切刃起点 P_0 处作一条空间直线 D_0 ,使其垂直于侧切面。然后通过空间直线 D_0 与点 P_0 作一基准面 S_{p0} ,基准面 S_{p0} 为点 P_0 相对于侧切面外表面的切面。然后以 S_{p0} 、 S_0 为基准建立基准轴 L_{z0} ,分别于基准面 S_{p0} 、 S_0 上新建视图,分别画直线 l_{p1} 、 l_1 ,使其与轴 L_{z0} 垂直。直线 l_{p1} 、 l_1 的夹角即为刀具刃口静态楔角(图3)。

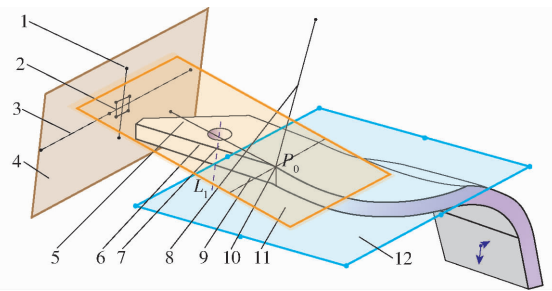


图3 静态楔角参考线示意图(点 P_0)

Fig. 3 Diagram of static wedge angle reference line (point P_0)

1. 轴 L_c
2. 点 O
3. 轴 L_p
4. 总回转面 S
5. 直线 l_{p1}
6. 直线 l_1
7. 轴 L_z
8. 空间直线 D_0
9. 轴 L_{z0}
10. 点 P_0
11. 回转基准面 S_{p0}
12. 基准面 S_0

侧切刃起点 P_0 可于刀柄与弯曲段寻找,但其余各点的寻找主要是通过构建横切面获取,以回转中心线 L_c 与侧切刃起点 P_0 做一基准面 S_{c0} ,称其为横切面。然后以基准面 S_{c0} 为基准绘制一新基准面 S_{c1} ,且经过线中心线 L_c ,向右侧偏转 2.5° 。然后同时选中基准面 S_{c1} 与刃口所在曲面,依次进行工具-草图曲线-交叉曲线操作,可得到两个面的一条相交空间曲线 D_1 。则 D_1 与侧切刃外侧面相交的点为第2个点 P_1 ,于点 P_1 处作空间直线 D'_1 垂直于侧切面。然后按照点 P_0 所示方法求得静态楔角(图4)。

$$\alpha_{cn} = 2.5n \quad (1)$$

式中 α_{cn} ——偏移角, P_n 处的横切面 S_{cn} 与初始横切面 S_{c0} 的夹角, ($^\circ$)

n ——系数,取 0、1、2...

1.3.2 侧切刃刃口动态楔角

静态楔角是在刀具的静止状态计算得到。但是在实际工作中,前进速度是一个重要的影响参数。因此需要考虑搅浆刀在前进状态下的刃口楔角,称其为动态楔角。动态楔角可更好地反映在实际作业中搅浆刀侧切刃不同位置相对入土角度的变化及其对搅浆扰动质量的实际影响。

利用 SolidWorks 软件分析其动态楔角,具体为:

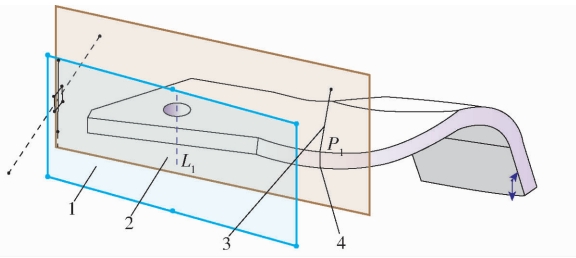


图4 静态楔角参考线示意图(点 P_1)

Fig.4 Diagram of static wedge angle reference line (point P_1)

1. 横切面 S_{C0}
2. 横切面 S_{C1}
3. 空间直线 D'_1
4. 空间曲线 D_1

在基准面 S_0 上以点 O 为圆心,以 OP_0 为直径作回转圆 R_0 ,后将回转圆进行上下两侧拉伸,薄壁厚度设置为 10 mm,薄壁方向指定为朝向回转中心的方向。然后选中薄壁外圆柱面 S_{R0} 与面 S_{P0} ,依次选择工具—草图—交叉曲线操作,可得到空间曲线 $3D-1$,此线即为面 S_{R0} 与面 S_{P0} 的交线。然后在点 P_0 处作空间直线 $3D-2$,使其与空间曲线 $3D-1$ 在点 P_0 处相切。然后求得空间直线 $3D-2$ 与回转圆在点 P_0 处切线的夹角,即为点 P_0 处的动态楔角(图 5)。

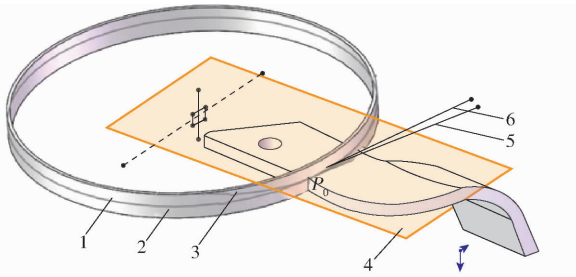


图5 动态楔角参考线示意图

Fig.5 Dynamic wedge angle reference line

1. 回转圆 R_1
2. 回转圆外曲面 S_{R0}
3. 空间曲线 $3D-1$
4. 基准面 S_0
5. 空间直线 $3D-2$
6. 回转圆切线 L_{P0}

1.4 静/动态楔角分析

上述搅浆刀楔角分析和刀具几何的参数化充分反映出搅浆刀与旋耕刀的本质区别。旋耕刀侧切刀面是平直刀面,因此,采用楔角理论分析,其静/动态楔角都为 0° 。相反,搅浆刀的侧切刀刀面在不同位置表现出不同的静态楔角和动态楔角(图 6a)。

1.4.1 侧切刃与过渡刃参数分析

图 6b 显示随着偏移角的增加,搅浆刀静态楔角与动态楔角均呈现出先增、后减再增加的趋势。在偏移角为 10° 时,搅浆刀侧切刃刃口的回转圆与其切平面基本重合,在该处侧切刃刀面曲面近似于一平面,侧切刃楔角均在 20° 以下。对比搅浆刀侧切刃静/动态楔角可知,动态楔角总体上小于静态楔角,二者差值在 $3^\circ \sim 10^\circ$ 之间。

旋耕刀侧切刃各点的楔角为零,仅在过渡刃处开始显现并逐步增大。搅浆刀与旋耕刀在侧切刃与

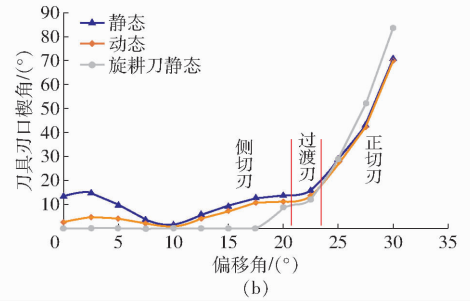
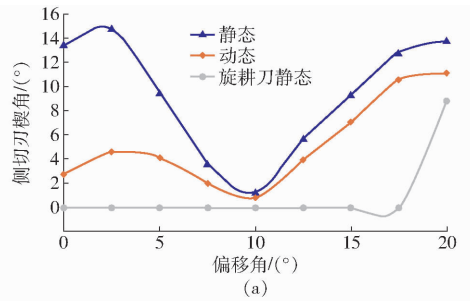


图6 楔角变化曲线

Fig.6 Changing curves of wedge angle of blade into soil

正切刃过渡段(图 6a)逐步接近。说明搅浆刀设计关键体现在其侧切刃刀面强化的搅浆功能,因此应强化搅浆刀侧切刃刀面的合理楔角设计,以加强侧切刃刀面的楔面入土横向搅浆效果。

1.4.2 正切刃设计参数分析

按照相同变化的偏移角分析正切刃段,所得数据较少,获得的正切刃各点静/动态楔角迅速增加,接近线性变化。但静态楔角仅高于动态楔角 $2^\circ \sim 3^\circ$,在偏移角 30° 时,楔角达到 70° 。搅浆刀与 R245 旋耕刀在正切刃部分(图 6b)的静态楔角基本吻合。正切刃的作用主要是切开沟底,搅拌成浆,进一步埋覆秸秆,与旋耕刀农艺要求^[22]一致,因此二者的楔角变化也基本一致。

基于逆向工程两种刀具间的显著性差异进一步表明,搅浆机作为水田专用的作业机具,必须通过强化的侧切刃刀面楔角优化设计才能够满足搅浆农艺的专门要求。目前的搅浆机产业虽已长足发展,但搅浆刀的优化设计尚不完善,如何基于其独有的参数化设计方法实现搅浆作业效果的最优尚需进一步深入研究。

2 搅浆刀作业性能田间试验

为整体上检验上述理论分析的正确性,本文在田间原位和原茬条件下开展台架对比试验,检验搅浆刀与旋耕刀在水田条件下的作业特性。

2.1 搅浆刀与旋耕刀作业性能对比

田间试验在泗洪县石集乡稻米文化小镇的试验田($118.22^\circ\text{E}, 33.47^\circ\text{N}$)进行,于 2018 年 5 月 31 日至 6 月 11 日进行。试验地常年稻麦轮作,土壤类型

为砂姜黑土^[23], 试验地土壤物理参数如表1所示, 土壤紧实度如图7所示。使用久保田PR688Q型全喂入收获机对小麦进行横向收获, 控制留茬高度为40 cm, 采用样框法进行秸秆五点取样^[24-25], 测得秸秆密度为5 882.10 kg/hm²。

表1 试验地土壤物理参数

Tab.1 Soil physical parameters of test site

土层深度 D/cm	含水率/%	容重/($g \cdot cm^{-3}$)	总孔隙度/%
0 ~ 5	23.00 ^a	1.43 ^a	46.00 ^a
5 ~ 10	19.40 ^{bc}	1.59 ^{bc}	40.10 ^{cd}
10 ~ 15	19.40 ^{bc}	1.64 ^{ab}	38.00 ^{de}
15 ~ 20	18.10 ^c	1.68 ^a	36.70 ^e
20 ~ 25	19.60 ^{bc}	1.52 ^{cd}	42.80 ^{bc}
25 ~ 30	20.10 ^{bc}	1.47 ^{de}	44.70 ^{ab}

注: 同列数字后的不同字母表示在0.05水平下差异显著。

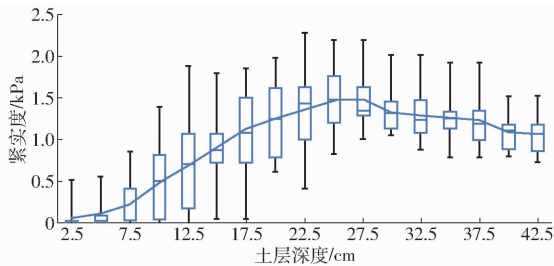


图7 土壤紧实度随土层深度的变化

Fig.7 Changes of soil compactness with soil depth

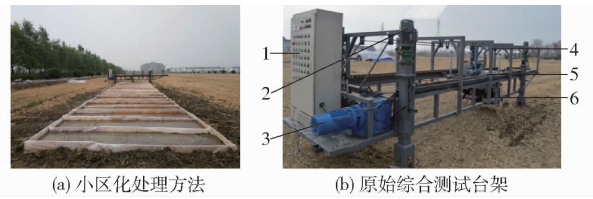
2.2 测试方法与指标

旋耕作业刀辊转速控制在150~350 r/min^[26], 但水田搅浆作业的刀辊转速尚未有明确的规范。因此主要进行两型刀具在不同转速下的搅浆作业质量对比, 将转速设置为280、348、510 r/min。IT225旋耕刀旋耕参数具体为: 刀辊回转半径 R 为225 mm, 侧切刃起始半径 R_0 为125 mm, 正切面端面刀高 h 为36 mm, 侧切刃包角 θ_{max} 为37°, 正切面弯折角 β 为120°, 工作幅宽 b 为45~55 mm, 与搅浆刀在回转半径、工作幅宽等参数存在显著差异。

使用土壤耕作原位综合测试平台^[27]进行试验(图8), 通过控制柜调节牵引电动机转速和转向, 进而调节旋耕部件前进速度和转向, 以螺旋柱为基准, 升降台车整体结构可精准调节耕深, 由牵引电动机(4 kW)提供动力, 可牵引测试台车整体前后移动进行作业, 同时进行田间小区化处理。小区尺寸3.6 m × 1.5 m, 小区之间采用隔水膜包裹的木板分隔。然后上水泡田并结合当地生产实际控制田面水层高度为5~7 cm。台车以0.2 m/s的速度稳定前行, 以减小前进速度对功耗的影响^[28]。

2.2.1 搅浆作业深度与稳定性测试

在每一搅浆作业区内测取5个点, 每个点重复3次取样测试。测量刀辊两端部搅浆刀最低点与泥



(a) 小区化处理方法

(b) 原始综合测试台架

图8 小区试验检验方法

Fig.8 Plot experiment setting

1. 控制柜 2. 升降电动机 3. 牵引电动机 4. 螺旋柱 5. 台车机构 6. 旋耕部件

浆表面的垂直距离, 此垂直距离即为该测点的搅浆深度^[29]。搅浆深度平均值 \bar{X} 为

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{n} \quad (2)$$

式中 X ——测点搅浆深度, cm

n ——测点数

搅浆深度稳定性系数 U 为

$$U = \left[1 - \frac{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 / (n - 1)}}{\bar{X}} \right] \times 100\% \quad (3)$$

2.2.2 工作能耗测试

测试平台输出刀辊转速、扭矩和功耗参数, 结合转速与所测扭矩计算搅浆功耗。

2.2.3 搅浆作业后秸秆垂直空间分布测试

试验前将不同长度的秸秆混匀并手工均匀铺撒在搅浆测试小区地表, 搅浆处理后在每个处理小区内测3个点, 每个测点用0.3 m × 0.3 m的样桶隔开, 将压入泥浆中的秸秆空间分布划分为0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm 3个土层小心取出, 将秸秆洗净并铺开, 采用Digimizer软件测取3个垂直空间内秸秆每层的长度分布。

2.3 试验结果及分析

2.3.1 搅浆耕深稳定性

表2显示, IT225旋耕刀在各转速下的耕深稳定性均优于搅浆刀。由于两种刀具的正切刃宽幅不同, 体现出二者设计参数不同的效果。

表2 搅浆耕深稳定性系数试验结果

Tab.2 Experimental results of stability coefficient of mixing tillage depth

刀型	转速/ ($r \cdot min^{-1}$)	平均耕深/ cm	耕深稳定性 系数/%
旋耕刀	280	13.42	95.07
	348	13.02	97.26
	510	13.94	93.65
搅浆刀	280	11.42	90.11
	348	10.16	95.68
	510	9.91	90.29

2.3.2 搅浆扭矩对比分析

表3显示,相同转速下IT225旋耕刀的扭矩略高于搅浆刀,但差异不显著。理论上旋耕刀耕耘阻力随静态滑切角的增大而增大^[12],但本文所得结果反映出两型刀具的滑切角接近,表明滑切角对搅浆功耗的影响较小,这是导致搅浆能耗不同于旋耕能耗的一个因素。搅浆刀的回转半径小于IT225旋耕刀,采取“短刀密排”的方式,搅浆刀安装数量远高于旋耕刀的安装数量。刀具数量增多,扭矩功耗也随之增大^[30]。搅浆刀楔角不断变化,侧切刃刀面的楔面入土强化搅浆效应也增大搅浆能耗。但各种效应叠加后的总搅浆能耗尚难于准确界定,这也是本试验测取刀轴扭矩研究方法的不足之处,尚待进一步探究。

表3 不同处理下的扭矩试验结果

Tab.3 Torque test results under different treatments

刀型	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	平均扭矩/ ($N \cdot m$)	最小扭矩/ ($N \cdot m$)	最大扭矩/ ($N \cdot m$)
旋耕刀	280	71.91	42.64	96.87
	348	91.37	67.66	129.92
	510	131.80	105.24	174.30
搅浆刀	280	71.63	113.96	41.68
	348	89.82	121.20	55.19
	510	130.35	172.99	84.05

2.3.3 秸秆垂直空间分布情况

机插秧的合理栽插深度为2~5 cm^[31],要求0~5 cm浆层内秸秆量少。经过搅浆或旋耕作业之后,秸秆及碎茬被掩埋在泥浆中。图9显示在280 r/min刀辊转速条件下,搅浆刀在不同浆层深度的秸秆长度以及数量均小于旋耕刀。搅浆刀处理后秸秆主要集中于5~10 cm深度处。IT225旋耕刀处理的秸秆则主要集中于0~5 cm泥浆层,5 cm以上秸秆较多,且在秸秆分离、清洗过程中,发现大部分长秸秆倾斜分布于0~10 cm泥浆层中。IT225旋耕刀压茬、脱草性能差,容易缠草,压入泥浆层中的秸

秆会随着刀具回转再次被带入到表层。搅浆刀得益于侧切刃的独特设计和楔角变化,加强了对秸秆的剪切与滑切作用,被压入泥浆层中的秸秆不会随着刀具的回转再次回到表层。已有研究也佐证了水田整地条件下搅浆刀较IT225旋耕刀具有更好的灭茬、埋茬性能,可满足秸秆还田与水稻插秧的农艺要求^[32]。

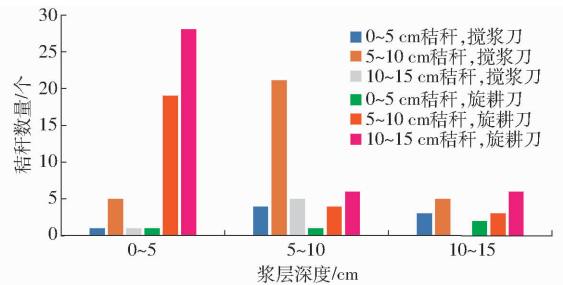


图9 不同处理下埋茬秸秆长度分布

Fig.9 Length distribution of stubble under different treatments

3 结论

(1)搅浆刀的功能特征体现在其侧切刃刀面的楔角和刀面宽度两方面,具备侧切刃刀面楔面结构特征的搅浆刀显著强化了入土过程的侧面搅浆性能。

(2)利用逆向工程方法获得了搅浆刀的侧切刃和侧切刃刀面的设计参数,侧切刃刀面的静态、动态楔角及楔面宽度决定侧向搅浆的强度,因此是评价搅浆刀性能的关键参数。

(3)搅浆作业的关键体现在刀具的侧切刃刀面搅浆性能,因此,搅浆刀设计理论需要重点探讨侧切刃刀面的静态与动态楔角、刀面宽度等参数的优化设计。

(4)原位台架试验对比结果表明,相比IT225旋耕刀,搅浆刀功耗较低,0~5 cm浆层内秸秆数量远低于旋耕刀,埋草质量高,进一步证明了静态与动态楔角间的差异性及其对搅浆和埋茬效果的显著影响。

参 考 文 献

- [1] 丁为民,王耀华,彭高植.正、反转旋耕刀性能分析及切土扭矩比较试验[J].南京农业大学学报,2001,24(1):113-117. DING Weimin, WANG Yaohua, PENG Songzhi. Comparison experiment and property analysis of up-cut and down-cut rotary blades[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2001, 24(1):113-117. (in Chinese)
- [2] 郑侃,赵宏波,刘文正,等.卧式旋耕机刀辊防缠技术研究现状与展望[J].农机化研究,2017,39(9):254-258. ZHENG Kan, ZHAO Hongbo, LIU Wenzheng, et al. Research status and prospect of anti-tangling technique of blade axis on horizontal rotary cultivator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(9):254-258. (in Chinese)
- [3] 张秀梅,张居敏,夏俊芳,等.水旱两用秸秆还田整地机关键部件设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(11):10-16. ZHANG Xiumei, ZHANG Jumin, XIA Junfang, et al. Design and experiment on critical component of cultivator for straw returning in paddy field and dry[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11):10-16. (in Chinese)
- [4] 陈书法,解法旺,孟宪清.新型秸秆还田犁翻旋耕复式作业机结构设计[J].农机化研究,2019,41(7):154-158. CHEN Shufa, XIE Fawang, MENG Xianqing. Structural design of a new type of straw returning plowing and rotary tilting duplex working machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(7):154-158. (in Chinese)
- [5] 杨娜.玉米深松全程施肥种籽旋耕播种机的研究[D].保定:河北农业大学,2015.

- YANG Na. Study on the corn planter with subsoiling whole layer fertilizer and rotary tillage row [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [6] 王伟康. 小麦旋耕开沟播种机的设计与试验研究[D]. 南京:南京农业大学, 2016.
WANG Weikang. Design and experimental research on rice and wheat seeding machine [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [7] 常旭虹, 王艳杰, 陶志强, 等. 小麦立体匀播栽培技术体系[J]. 作物杂志, 2019, 23(2): 168-172.
CHANG Xuhong, WANG Yanjie, TAO Zhiqiang, et al. Tridimensional uniform sowing cultivation system of wheat [J]. Crops, 2019, 23(2): 168-172. (in Chinese)
- [8] 汪志祥. 双轴式旋耕灭茬播种机的灭茬刀辊优化设计与试验研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2019.
WANG Zhixiang. Optimum design and experimental study of stubble cutter roller for two-axis rotary tillage and stubble seeder [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [9] 汲文峰. 旋耕—碎茬仿生刀片[D]. 长春:吉林大学, 2010.
JI Wenfeng. Biomimetic blades for soil-rototilling and stubble-breaking [D]. Changchun: Jilin University, 2010. (in Chinese)
- [10] 于建军. 小麦玉米机械化生产配套种植模式与播种技术试验研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2016.
YU Jianjun. The matching planting pattern of mechanized production of wheat and maize and the experiment research in seeding technique [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [11] 夏俊芳, 张国忠, 许绮川, 等. 多熟制稻作区水田旋耕埋草机的结构与性能[J]. 华中农业大学学报, 2008, 27(2): 331-334.
XIA Junfang, ZHANG Guozhong, XU Qichuan, et al. Research on the mechanized technology of rotary tillage and stubble-mulch for paddy field under multiple rice cropping system [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2008, 27(2): 331-334. (in Chinese)
- [12] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007.
- [13] 李明金. 水田搅浆机平地装置的设计与试验研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2014.
LI Mingjin. The design and experiment of flattening device of stir-slurry machine in paddy field [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [14] 赵少君, 罗聪, 梁方波. 逆向工程与快速成型在产品中的应用[J]. 佳木斯教育学院学报, 2009, 95(3): 61.
ZHAO Shaojun, LUO Cong, LIANG Fangbo. Application of reverse engineering and rapid prototyping in product design [J]. Journal of Juamjusi Education Institute, 2009, 95(3): 61. (in Chinese)
- [15] TAMÁS V, MARTIN R R, COX J. Reverse engineering of geometric models—an introduction [J]. Computer Aided Design, 1997, 29(4): 255-268.
- [16] 汲文峰, 佟金, 贾洪雷, 等. 鼯鼠爪趾几何结构量化特征分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 193-198.
JI Wenfeng, TONG Jin, JIA Honglei, et al. Quantitative characteristic features of geometric structures of claws of mole rat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 193-198. (in Chinese)
- [17] 贾洪雷, 郑健, 赵佳乐, 等. 2BDB-6(110)型大豆仿生智能耕播机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 93-107.
JIA Honglei, ZHENG Jian, ZHAO Jiale, et al. Design and experiment of 2BDB-6(110) soybean bionic intelligent tillage-sowing machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 93-107. (in Chinese)
- [18] 王霄. 逆向工程技术及其应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.
- [19] 彭高植, 吴德光. 旋耕机工作部件设计方法的研究(一)[J]. 镇江农业机械学院学报, 1982(3): 5-26.
- [20] 曲国良, 丁为民, 彭高植. 旋耕弯刀侧切刃曲线分析及新型曲线的推导[J]. 农业机械学报, 1991, 22(2): 22-27.
QU Guoliang, DING Weimin, PENG Songzhi. Analysis on edge-curves of rotary blades and derivation of edge-curves [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1991, 22(2): 22-27. (in Chinese)
- [21] 丁为民, 彭高植. 旋耕刀滑切角及滑切角方程的研究[J]. 农业工程学报, 1995, 11(4): 67-72.
DING Weimin, PENG Songzhi. Study on the equation of sliding angle and sliding angle of rotary tillage cutter [J]. Transactions of the CSAE, 1995, 11(4): 67-72. (in Chinese)
- [22] 彭高植, 吴德光. 旋耕机工作部件设计方法的研究(二)[J]. 江苏工学院学报, 1983(1): 41-56.
- [23] 蔡立, 刘元昌, 林静慧. 泗洪砂姜黑土的肥力演变与合理施肥[J]. 土壤, 1991(6): 311-313, 306.
- [24] 石勇. 旋耕秸秆混埋还田质量试验研究[D]. 南京:南京农业大学, 2015.
SHI Yong. Experimental research on the effect of straw incorporation with rotary tillage [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [25] 陈青春, 石勇, 丁启朔, 等. 正反转旋耕作业的秸秆混埋效果比较[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 13-18.
CHEN Qingchun, SHI Yong, DING Qishuo, et al. Comparison of straw incorporation effect with down-cut and up-cut rotary tillage [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 13-18. (in Chinese)
- [26] GB/T 5668—2017 旋耕机械 刀和刀座[S]. 2017.
- [27] 葛双洋. 水稻土深松对土壤物理性质及小麦生长影响的研究[D]. 南京:南京农业大学, 2017.
GE Shuangyang. Effects of subsoiling on paddy soil physical properties and growth of wheat [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [28] 陈翠英. 旋耕机速度参数的合理选择[J]. 农业机械学报, 1985, 16(2): 30-37.
CHEN Cuiying. Reasonable choice of speed parameters of tractor and rotary tiller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1985, 16(2): 30-37. (in Chinese)
- [29] GB/T 24685—2009 水田平地搅浆机[S]. 2009.
- [30] 张红霞, 刘师多, 师清翔, 等. 玉米秸秆粉碎刀具和刀速对粉碎功耗和质量的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2003, 24(2): 1-4.
- [31] 葛茜, 马晓丽, 史莉娜, 等. 汉中水稻机械插秧插植深度试验初报[J]. 陕西农业科学, 2016, 62(9): 16-17.
- [32] 夏萍, 江家伍. 机械化秸秆还田技术及配套机具(综述)[J]. 安徽农业大学学报, 2001, 28(1): 106-108.