

钢辊式圆捆机旋转草芯形成影响因素分析与优化*

雷军乐^{1,2} 王德福¹ 李东红¹ 张全超¹ 杨 星¹ 那明君¹

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江职业学院机械工程学院, 哈尔滨 150080)

摘要: 针对国产的中小型钢辊式圆捆机收获完整稻秆易产生堵塞的问题,利用自行设计的钢辊式圆捆机(草捆直径约 500 mm)试验装置对其打捆过程进行了研究。通过高速摄像分析可知:旋转草芯形成过程实质上是稻秆在卷压室内连续卷绕累积的过程,形成的旋转草芯可对后续喂入的稻秆产生较大的牵带作用,进而消除打捆堵塞。通过试验分析可知,旋转草芯形成过程主要依靠钢辊对稻秆的摩擦牵引及后续喂入稻秆的持续推动完成的,据此,针对影响钢辊式圆捆机形成旋转草芯的主要因素——钢辊对稻秆的摩擦作用、捡拾器弹齿端点线速度以及稻秆喂入量为试验因素,以旋转草芯形成时的干物质质量为评价指标,进行了试验研究。结果表明:各因素对旋转草芯形成时的干物质质量贡献率从大到小依次为:钢辊对稻秆的摩擦作用、捡拾器弹齿端点线速度、稻秆喂入量。当因素参数组合为钢辊与稻秆间的滑动摩擦因数约 0.65、捡拾器弹齿端点线速度 2.23 m/s、稻秆喂入量 1.5 kg/s 时,旋转草芯形成时的干物质质量为 1.58 kg。研究结果可为钢辊式圆捆机的设计及其作业参数优化提供理论及技术依据。

关键词: 钢辊式圆捆机 完整稻秆 旋转草芯 因素优化

中图分类号: S225.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)12-0018-08

Influence Factors Analysis and Optimization of Forming
Rotary Straw Core by Steel-roll Round Baler

Lei Junle^{1,2} Wang Defu¹ Li Donghong¹ Zhang Quanchao¹ Yang Xing¹ Na Mingjun¹

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. College of Mechanical Engineering, Heilongjiang Vocational College, Harbin 150080, China)

Abstract: Aimed at plugging problem of baling intact rice straw by the domestic small and midsize steel-roll round baler, baling process was studied by the self-made steel-roll round baler (diameter of bale was 500 mm). The forming process of rotary straw core was essentially the process of inwinding and continuous accumulation of rice straw in baling chamber by analysis using high-speed camera. Large traction, which was produced by the rotary straw core on the subsequent feeding rice straw, was beneficial to eliminate baling plugging. Test results showed that the formation of rotary straw core mainly depended on the friction of the steel rolls on rice straw and the sustained driving force of the subsequent feeding rice straw, and the main influencing factors were analyzed. The main influencing factors were as follows: friction effect of the steel roll on rice straw, linear velocity of spring-finger and feeding quantity of rice straw. The dry mass of rotary straw core was decided as the evaluation index, and the Design-Expert software was used to optimize the level of each factor. The contributing rate of each factor on the dry mass of rotary straw core was as follows: friction effect of the steel roll on rice straw, linear velocity of spring-finger, feeding quantity of rice straw. When the parameters of sliding friction coefficient between steel and rice straw was 0.65, the linear velocity of spring-finger was 2.23 m/s and the feeding quantity of rice straw was 1.5 kg/s, the dry mass of rotary straw core was 1.58 kg. The research results can be used to support innovative design and parameters optimization of steel-roll round baler.

Key words: Steel-roll round baler Intact rice straw Rotary straw core Factors optimization

收稿日期: 2015-08-21 修回日期: 2015-10-15

* 国家自然科学基金资助项目(51405076)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20124105110004)和黑龙江科技攻关资助项目(GC13B604)

作者简介: 雷军乐, 博士生, 黑龙江职业学院讲师, 主要从事畜牧机械研究, E-mail: xiaole_616@163.com

通讯作者: 王德福, 教授, 博士生导师, 主要从事畜牧机械研究, E-mail: dfwang640203@sohu.com

引言

目前我国稻秆年产量已超过 2.1 亿 t,但稻秆疏松的结构使其贮运成本较高,所以多数稻秆常被随意抛弃或就地焚烧,对环境造成了严重污染。稻秆作为一种可再生资源正在得到广泛深入利用^[1-5],而对稻秆进行打捆压缩回收是使其得到充分利用的前提条件。

钢辊式圆捆机是我国进行秸秆收获的关键技术装备,由于其具有结构简单、配套动力较小、价格较低等特点而受到广大农户的欢迎^[6]。但我国生产的钢辊式圆捆机大多是以牧草打捆机为基础研发的^[7],随着半喂入式水稻收获机的快速发展,由其获得的完整稻秆资源越来越丰富,利用中小型钢辊式圆捆机对这种完整稻秆打捆时易产生堵塞现象,从而限制了钢辊式圆捆机的应用与发展。

目前,国外对圆捆机的相关研究报道主要集中于圆捆机的应用领域^[8-13],我国学者针对圆捆机打捆也做了一些研究,但多数报道还是主要集中于钢辊式圆捆机的研发性设计、改进及应用等方面^[14-20],缺少针对钢辊式圆捆机卷捆过程的详细研究。

针对我国研制的中小型钢辊式圆捆机进行完整稻秆(尤其是含水率大于 65% 的完整鲜稻秆)打捆时易产生堵塞的现象^[14],本文在自制的新型钢辊式圆捆机基础上,对该机旋转草芯形成过程进行详细研究分析,并对影响旋转草芯形成的主要因素进行试验研究,为研制适合中国应用的秸秆类中小型钢辊式圆捆机提供必要的理论与技术支持。

1 试验设备与材料

1.1 试验装置和仪器设备

采用的试验装置如图 1 所示。该试验装置主要由钢辊式圆捆机(钢辊直径 150 mm、卷压室净尺寸 $\Phi 500\text{ mm} \times 750\text{ mm}$)和带式输送机(长度 4 000 mm)组成,各配 1 台电动机和 1 台变频器分别用来驱动和调速。其中圆捆机在卷压室喂入口处配置了一对喂入辊(其中上辊为圆环齿刀式,每个圆环周向均匀布置 3 个齿刀,相邻两圆环上的齿刀旋转相位差为 60°),并在卷压室底部设置了 3 个水平钢辊(其上均匀焊接 12 根尺寸为 $100\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的钢板条),该圆捆机不仅增强了对大喂入量情况下完整稻秆的攫取喂入能力(正常工作时喂入对辊主要起导送作用),同时增强了卷压室底部钢辊对刚进入卷压室稻秆的拨送及卷绕能力。经试验证实,该圆捆机对完整稻秆(其长度与圆捆机宽度相近)打捆时,稻秆能够在卷压室内快速形成连续卷绕累

积过程,从而消除打捆堵塞现象。为便于观测,在卷压后室侧壁开设了一个半圆形的高速摄像观测口(配置透明玻璃板)。

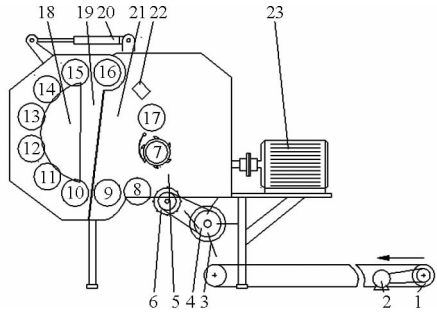


图 1 钢辊式圆捆机试验装置示意图

Fig. 1 Sketch map of experimental equipment of steel-roll round baler

1. 带式输送机 2. 输送机电动机 3. 捡拾器弹齿 4. 捡拾器
5. 卷压室喂入口 6. 喂入下辊 7. 喂入上辊 8~17. 卷草钢辊
18. 高速摄像观测口 19. 卷压后室 20. 液压放捆机构 21. 卷压前室 22. 捆绳机构 23. 圆捆机电动机

另外,采用的仪器设备还有美国 Vision Research 公司生产的 V5.1 型数字式高速摄像机(1 200 帧/s,4 GB);上海一恒科学仪器有限公司生产的 DHG-9420A 型电热恒温鼓风干燥箱。

1.2 试验材料与方法

采用哈尔滨市香坊区城高子镇经割前摘脱水稻收获机获得的完整稻秆为试验原料,经测定其含水率为 10%(试验中采用复水法调整稻秆含水率),平均长度为 750 mm(不包括穗头部稻秆)。

为保证稻秆匀速喂入圆捆机,卷捆试验前,先确定输送机运动速度为 1 m/s,然后根据稻秆喂入量确定稻秆在输送机上每米铺放的质量并称取;卷捆试验时,将称量好的稻秆按要求均匀铺放于输送机上由其匀速喂入圆捆机,喂入过程中及时在输送机上按要求铺放稻秆(已称量)直至形成旋转草芯,旋转草芯形成后立即放出、称量并记录其质量。每组试验重复 5 次,试验结果取其平均值。

1.3 试验因素与评价指标

根据预试验及高速摄像分析可知,影响旋转草芯形成的主要因素是后续稻秆的推动力以及钢辊对稻秆的摩擦作用力。

根据动能定理,后续稻秆的推动力与连续进入的稻秆运动速度及其质量成正比,而后续稻秆运动速度与捡拾器弹齿端点线速度和钢辊边缘线速度有关(本试验中捡拾器弹齿端点线速度与钢辊边缘线速度之比为 0.92);后续稻秆质量与稻秆单位时间喂入量(即稻秆喂入量)有关。因此,本文将捡拾器弹齿端点线速度、稻秆喂入量作为试验因素。

根据文献[21-23]可知,物料的摩擦特性与其

含水率、接触材料的表面粗糙度有关。经预试验可知,不同含水率的复水稻秆与钢板间具有不同的摩擦特性(稻秆与钢板间的滑动摩擦因数随稻秆含水率的增大总体呈增大的趋势)。因此结合生产实际情况,本文在圆捆机结构不变的条件下,通过改变稻秆含水率来反映钢辊对稻秆的摩擦作用情况,以便于研究分析钢辊摩擦作用对旋转草芯形成的影响。

经以上综合分析,本文选取稻秆含水率(代表钢辊对稻秆的摩擦作用)、捡拾器弹齿端点线速度以及稻秆喂入量作为试验因素,将旋转草芯干质量 Y (旋转草芯形成时的干物质质量)作为评价指标。

1.4 试验因素水平

采用三因素五水平正交旋转试验设计方法,各试验因素水平如表 1 所示。

表 1 试验因素编码
Tab.1 Experimental factors and levels

编码	稻秆含水率/%	捡拾器弹齿端点 线速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	稻秆喂入量/ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)
-1.68	12	1.58	0.7
-1	23	1.72	0.9
0	40	1.92	1.3
1	57	2.12	1.7
1.68	68	2.26	1.9

2 旋转草芯形成过程分析

在稻秆含水率 12%、捡拾器弹齿端点线速度 1.94 m/s、钢辊边缘线速度 2.11 m/s、稻秆喂入量 1.0 kg/s(稻秆在输送带上的每米铺放质量为 1 kg)的卷捆条件下,利用高速摄像进行了旋转草芯形成过程研究分析。

为便于追踪稻秆在旋转草芯形成过程中的运动轨迹和速度变化情况,试验前将部分稻秆沿根部向上 200 mm 长范围分别染成红色(下文称红色标记稻秆)和绿色(下文称绿色标记稻秆),试验时抽取这 2 种颜色稻秆各 7 根分别铺放于输送带的首尾两端(红色标记稻秆在前)。

2.1 旋转草芯形成过程受力分析

稻秆在卷压室内卷绕累积过程受力分析如图 2 所示。

由图 2 可看出,圆捆机工作时,横向铺放的稻秆在捡拾器弹齿捡拾、推送下,能够克服自身重力、捡拾器上托板及稻秆间的摩擦阻力而向前上方(喂入口方向)移动,考虑实际情况下捡拾器上托板及稻秆间的摩擦阻力较小,故将其忽略不计,因此,稻秆在捡拾器上沿运动方向受到的合力 T 可表示为

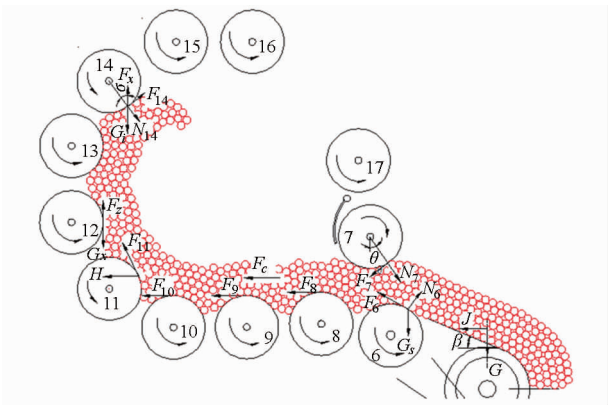


图 2 稻秆在卷压室内卷绕累积过程受力示意图
Fig.2 Force analysis of rice straw in baling chamber

$$T = J\cos\beta - G\sin\beta \tag{1}$$

式中 T ——稻秆在捡拾器上沿运动方向的合力, N
 J ——捡拾器弹齿对稻秆的推力, N
 G ——捡拾器上稻秆的重力, N
 β ——捡拾器上托板与水平方向的夹角, ($^{\circ}$)

由式(1)可知,合力 T 取决于捡拾器弹齿对稻秆的推力,且由图 2 可知,此合力可认为是喂入口处稻秆受到的推力。

当稻秆到达卷压室喂入口处时,稻秆受到的水平合力 F_{hx} 为

$$F_{hx} = F_6\cos\beta + F_7\cos\theta = f(N_6\cos\beta + N_7\cos\theta) \tag{2}$$

式中 F_6 ——喂入下辊对稻秆的摩擦力, N
 F_7 ——喂入上辊对稻秆的摩擦力, N
 N_6 ——喂入下辊对稻秆的支持力, N
 N_7 ——喂入上辊对稻秆的支持力, N
 f ——稻秆与钢辊间摩擦因数
 θ ——稻秆与喂入上辊的接触角, ($^{\circ}$)

式(2)中, N_7 、 N_6 与后续稻秆推力 T 呈正相关,因此稻秆在喂入口处受到的水平合力 F_{hx} 主要与后续稻秆推力 T (捡拾器弹齿对稻秆的推力)呈正相关。一般钢辊式圆捆机工作时,喂入口处稻秆量较少($\theta = 0^{\circ}$),喂入上辊主要起导送作用;当喂入口处稻秆较多($0^{\circ} < \theta \leq 90^{\circ}$)时,稻秆在喂入对辊摩擦作用下被初步挤压,使稻秆与喂入对辊间的摩擦力增大(有利于喂入稻秆),由此可知,在稻秆喂入量增加($0^{\circ} < \theta \leq 90^{\circ}$)的情况下,喂入对辊也可以将其有效攫取并喂入卷压室。

由图 2 可看出,在稻秆刚进入卷压室沿 8 ~ 10 号钢辊运动时,稻秆受到的水平合力 H 表示为

$$H = F_{hx} + F_c + F_8 + F_9 + F_{10} \tag{3}$$

式中 $F_8 \sim F_{10}$ ——8 ~ 10 号钢辊对稻秆的摩擦力, N
 F_c ——稻秆间相互拉扯产生的作用力, N

当稻秆运动到 11 号钢辊处时,在水平推送力 H 以及该钢辊摩擦导送(与水平推送力 H 正相关)作

用下,其运动方向开始由水平变为向上,使稻秆克服自身重力沿 12、13 号钢辊表面竖直上升。

当稻秆到达 14 号钢辊处时,在后续稻秆推力及该钢辊的摩擦作用下,稻秆的运动方向由竖直向上变为向斜右上方,设 14 号钢辊处稻秆的重力为 G_i 、受到的后续稻秆推力为 F_x ,则稻秆在运动方向上受到的合力 F_σ 为

$$F_\sigma = f(F_x - G_i) \cos \sigma + (F_x - G_i) \sin \sigma \quad (4)$$

式中 σ ——后续稻秆在 14 号钢辊处的推动角, ($^\circ$)

由式(4)可知,当 F_σ 在竖直方向上的分力 $F_{\sigma y} = F_\sigma \sin \sigma > G_i$ 时,稻秆将克服自身重力继续沿 15、16 号钢辊表面周向卷绕然后降落,当 $F_{\sigma y} < G_i$ 时,稻秆离开 14 号钢辊后便在其重力作用下开始回落,从而完成稻秆的第 1 次卷绕累积过程。后续喂入稻秆在卷压室内的受力及运动方式基本如前所述,随后续稻秆的不断喂入,稻秆在卷压室内实现了连续卷绕累积进程并最终形成旋转草芯。

综合以上分析可知,稻秆在卷压室内卷绕累积过程主要依靠后续稻秆的推动力及旋转钢辊的摩擦力。

2.2 旋转草芯形成过程高速摄像分析

稻秆在捡拾器弹齿捡拾、推送作用下,经喂入对辊的导送进入卷压室,随后续稻秆的不断喂入,稻秆在卷压室内连续卷绕累积并逐渐形成旋转草芯。图 3 所示为稻秆在卷压室内形成旋转草芯的高速摄像(从高速摄像观测口进行拍摄),其中 k_2 表示无染色标记稻秆, k_3 表示绿色标记稻秆,图 3a 中的(1)~(7)、(7)~(9)及(9)~(12)照片时间间隔分别为 0.3 s、1.0 s 和 0.4 s,图 3b 中的坐标原点为高速摄像观测口的右下角。

由图 3 可知,稻秆在卷压室内的运动过程可细分为以下 2 步:

(1)稻秆在卷压后室卷绕累积。稻秆在卷压后室卷绕累积过程如图 3a 中的(1)~(7)所示,利用高速摄像分析软件的慢速回放功能可知,红色标记稻秆 k_1 的运动轨迹及在各时间段(两照片时间间隔)的平均运动速度分别如图 3b、图 3c 所示。结合上述各图可看出,在第 1 时间段,先喂入卷压室内的红色标记稻秆在后续喂入稻秆推动及钢辊摩擦力综合作用下开始沿卷压后室钢辊表面周向上升,此过程平均运动速度为 0.52 m/s;在第 2 时间段, k_1 上升至 14 号钢辊处,在该钢辊作用下, k_1 的运动方向由垂直向上变为向斜右上方,稻秆受到的重力变为其主要作用力,导致 k_1 平均运动速度下降;在第 3 时间段,红色标记稻秆在其自重作用下开始回落,而此时与后续上升的稻秆发生摩擦,导致其平均运动速度继续下降;在第 4 时间段,红色标记稻秆开始沿

后续喂入稻秆的上层表面继续向下自由滚动,初步实现草芯的累积,此过程稻秆的重力势能转化为动能, k_1 的平均运动速度上升;在第 5 时间段,已滚落至卷压室下部的红色标记稻秆在后续不断喂入稻秆的推动下,随后续稻秆一起加速上升至 14 号钢辊;在第 6 时间段,红色标记稻秆又在 14 号钢辊处受该钢辊作用而改变方向,并在自重作用下再次回落,进而实现稻秆整体在卷压室内的连续卷绕累积进程。由以上分析可看出,此阶段草芯卷绕累积过程实质上是稻秆在卷压后室左下部不断上升与下降的过程(形成连续卷绕累积过程),其上升的高度主要取决于后续稻秆的推动力及旋转钢辊的摩擦力。

(2)稻秆卷绕累积进程逐渐扩张至整个卷压室,草芯开始旋转。由图 3a 中的(8)~(9)可看出,随后续稻秆不断喂入,红色标记稻秆在摄像范围内消失,无染色标记稻秆沿周向卷绕,绿色标记稻秆开始到达卷压室左下部,此时稻秆几乎充满整个卷压室,高速摄像显示草芯随后开始以一定的速度旋转起来,其旋转过程如图 3a 中的(10)~(12)所示,这说明卷压室内已有稻秆在后续稻秆不断推动及钢辊导送综合作用下逐渐向卷压室中前部移动,卷绕累积进程也逐渐扩张至整个卷压室,钢辊对稻秆总的周向牵引力不断增大,加上后续喂入稻秆不断对草芯施加的推动力,促使草芯开始旋转。经大量预试验观测,此阶段如草芯不能尽快旋转,则无法使卷压室内已有稻秆实现进一步的卷绕累积进程,此时即使稻秆充满整个卷压室也无法形成旋转草芯,从而易造成稻秆堆积在喂入口处。由此可知,要让旋转草芯顺利形成必须实现稻秆在卷压室内的连续卷绕累积,否则易于造成打捆堵塞。且经进一步研究分析可知,此阶段稻秆的卷绕累积进程主要依靠稻秆与卷压室内钢辊间不断增大的摩擦力来实现。

经试验可知,旋转草芯形成时的干质量为 3.87 kg,由高速摄像测试软件可测出旋转草芯形成后的边缘线速度为 1.72 m/s(约为钢辊边缘线速度的 81%),说明旋转草芯形成后内部较松弛,此时钢辊对旋转草芯的总摩擦力还较小,旋转草芯与钢辊间存在明显的打滑现象。

经大量试验证实,在有利的卷捆条件下,旋转草芯在第 1 步即可形成。

2.3 旋转草芯对后续稻秆的牵带作用

为进一步说明旋转草芯形成对后续稻秆喂入的影响,对稻秆在旋转草芯形成前、形成后进入卷压室过程进行了高速摄像分析(从圆捆机左前方进行拍摄)。为方便分析,以稻秆离开捡拾器弹齿时的位置作为初始位置,并通过高速摄像测试软件追踪稻秆每

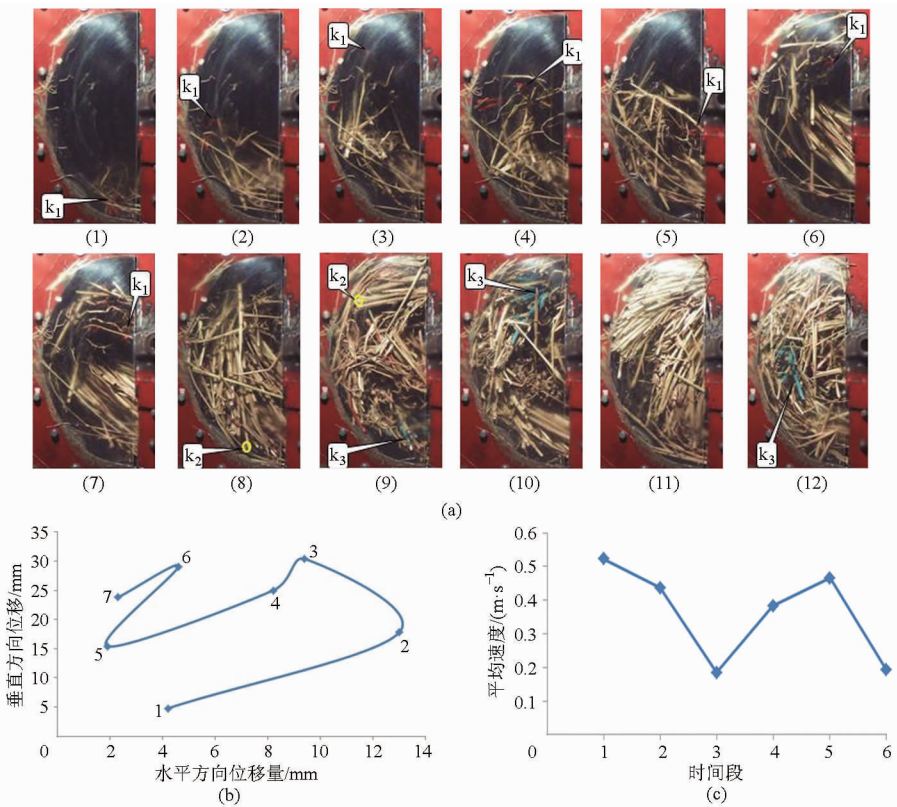


图3 稻秆在卷压室内形成旋转草芯的过程

Fig. 3 Movement of rice straw in baling chamber

(a) 旋转草芯形成过程高速摄像 (b) 图3a中的(1)~(7)照片红色标记稻秆 k_1 的运动轨迹
(c) 图3a中的(1)~(7)照片红色标记稻秆 k_1 在各时间段的平均速度

间隔 0.025 s 时的运动情况,图 4 所示为稻秆连续在 5 个位置的运动轨迹及在各时间段的平均运动速度。

由图 4a 可看出,稻秆在旋转草芯形成后进入卷压室过程的运动轨迹总体较平稳,说明旋转草芯形成有利于后续稻秆向卷压室喂入口方向移动;由图 4b 可看出,稻秆在旋转草芯形成前、后进入卷压室过程中,在自身重力及所受摩擦阻力作用下,稻秆离开弹齿后的平均运动速度均出现下降的趋势,后又因在喂入对辊的输送作用而逐渐增大,但稻秆在旋转草芯形成后的平均运动速度总体比旋转草芯形成前高,尤其是稻秆逐渐移向喂入口处时,其平均运动速度增加幅度较明显(由 1.37 m/s 快速增加至

1.66 m/s),说明旋转草芯形成对喂入口处的稻秆有较大的牵引作用,这是因为旋转草芯形成后,捡拾器喂入的稻秆一旦到达 8 号钢辊处,便会在旋转草芯与旋转钢辊大的牵引力作用下被迅速卷入卷压室并跟随旋转草芯旋转,而由于稻秆间存在相互交织与牵连,已被卷入卷压室的稻秆会对喂入口处的稻秆有较大的拖拽牵引作用,从而使到达喂入口处的稻秆运动速度迅速增加。

由此可知,旋转草芯尽快形成是保证卷捆过程顺利进行的重要前提条件。旋转草芯如不能尽快形成,不仅会使新喂入的稻秆易于堵塞在卷压室喂入口处,导致整个卷捆作业无法进行,且已进入卷压室

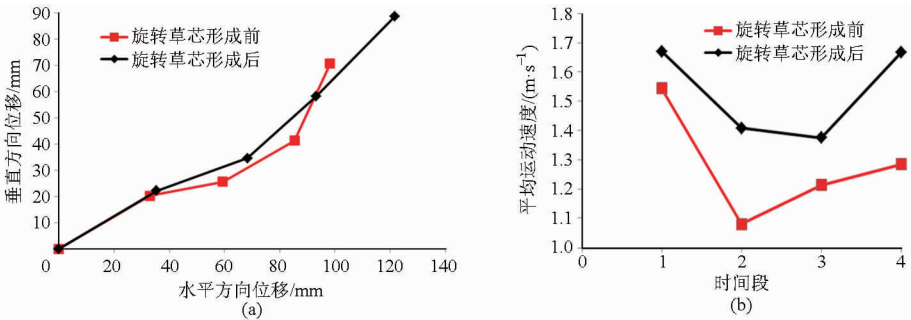


图4 旋转草芯对稻秆进入卷压室过程的影响

Fig. 4 Effects of rotary straw core on rice straw moving into baling chamber

的稻秆易受钢辊的旋转带动而产生稻秆缠绕钢辊现象,造成打捆机故障。因此,钢辊式圆捆机打捆时产生堵塞现象的根本原因是旋转草芯不能尽快形成,这在试验中已得到验证。

经上述试验分析可知,要促使旋转草芯尽快的形成主要应增加后续稻秆的推动力以及增加钢辊对稻秆的摩擦力。

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

本试验结果如表 2 所示, A 、 B 、 C 分别为因素稻秆含水率、捡拾器弹齿端点线速度、稻秆喂入量的编码值。

表 2 试验方案与结果

Tab. 2 Experimental scheme and results

试验序号	A	B	C	旋转草芯干质量 Y/kg
1	-1	-1	-1	3.7
2	-1	-1	1	3.0
3	-1	1	-1	2.8
4	-1	1	1	2.1
5	1	-1	-1	2.0
6	1	-1	1	1.8
7	1	1	-1	1.7
8	1	1	1	1.6
9	-1.68	0	0	3.9
10	1.68	0	0	1.5
11	0	-1.68	0	2.3
12	0	1.68	0	1.7
13	0	0	-1.68	2.9
14	0	0	1.68	2.3
15	0	0	0	2.1
16	0	0	0	1.9
17	0	0	0	1.9
18	0	0	0	2.2
19	0	0	0	1.9
20	0	0	0	2.0

3.2 试验分析

3.2.1 回归模型与方差分析

根据表 2 的试验结果,利用 Design-Expert 软件获取各因素编码值与旋转草芯形成时的干物质质量(简称旋转草芯干质量) Y 的回归模型为

$$Y = 2 - 0.63A - 0.24B - 0.20C + 0.16AB + 0.14AC + 0.013BC + 0.22A^2 - 0.026B^2 + 0.19C^2 \quad (5)$$

回归模型的方差分析如表 3 所示。由表 3 可知,模型的 P 值极显著,失拟项不显著,说明在本试验研究范围内,各试验指标的影响极显著且模型是合适的。由 Design-Expert 软件还可获得模型的决定系数 $R^2 = 0.97$,说明回归模型与试验结果拟合程度较好,可用于预测旋转草芯形成时干物质质量的

变化情况。

表 3 旋转草芯干质量回归模型的方差分析

Tab. 3 Variance analysis of regression equation for dry mass of rotary straw core

项目	自由度	均方	F 值	P 值
模型	9	0.91	36.60	<0.000 1 **
A	1	5.34	214.39	<0.000 1 **
B	1	0.80	32.23	0.000 2 **
C	1	0.54	21.60	0.000 9 **
AB	1	0.21	8.49	0.015 5 **
AC	1	0.15	6.08	0.033 4 **
BC	1	1.250×10^{-3}	0.050	0.827 2
A^2	1	0.71	28.44	0.000 3 **
B^2	1	9.761×10^{-3}	0.39	0.545 1
C^2	1	0.50	20.08	0.001 2 **
失拟项	5	0.034	2.11	0.215 9

注: ** 表示 $P < 0.01$ 水平极显著。

3.2.2 各因素对旋转草芯干质量的贡献率

由表 3 的一次项 F 值可判断各因素对评价指标贡献率从大到小依次为:钢辊对稻秆的摩擦作用、捡拾器弹齿端点线速度、稻秆喂入量。

3.2.3 各因素对旋转草芯干质量的影响

将稻秆喂入量固定在零水平上,得到稻秆含水率与捡拾器弹齿端点线速度对旋转草芯干质量的影响,如图 5a 所示。从图 5a 可看出,随稻秆含水率的升高,旋转草芯干质量逐渐减小,这是因为随稻秆含水率的增加,稻秆与钢辊间的摩擦因数总体呈增大趋势,因此钢辊对草芯可以形成足够大的周向牵引力使其旋转起来。当稻秆含水率一定时,旋转草芯干质量随捡拾器弹齿端点线速度的增大总体呈下降趋势,这是因为提高捡拾器弹齿端点线速度,弹齿对稻秆的向前推送作用变强,稻秆获得的动能越大越有利于其进入卷压室或推动卷压内稻秆向前移动,同时捡拾器弹齿端点线速度的增加也意味着钢辊边缘线速度的增大,钢辊对卷压室内的稻秆作用频率越高,越有利于旋转草芯的快速形成。

将捡拾器弹齿端点线速度固定在零水平上,得到稻秆含水率与稻秆喂入量对旋转草芯干质量的影响,如图 5b 所示。从图 5b 可看出,在稻秆含水率一定的情况下,旋转草芯干质量随稻秆喂入量增加呈先快速下降后缓慢上升的趋势,这是因为稻秆喂入量较低时,随稻秆喂入量的增加,稻秆获得的动能也随之增大,增加了后续喂入稻秆对卷压室内稻秆的推动作用,同时单位时间内卷压室内稻秆质量增加较快,钢辊对稻秆的摩擦作用快速增大,从而促进了旋转草芯快速形成,降低旋转草芯干质量;当稻秆喂入量过高时,稻秆在喂入口处快速堆积,不利于喂入

对辊的攫取喂入,因此过厚稻秆层不利于旋转草芯的快速形成,不仅会削弱稻秆向前运动的总动力,而且还易造成后续喂入稻秆在卷压室喂入口处的累积堵塞,这在试验中得到了证实。由此可知,适当增大稻秆喂入量,有助于减小旋转草芯干质量,但稻秆喂入量不宜过大。

将稻秆含水率固定在零水平上,得到捡拾器弹

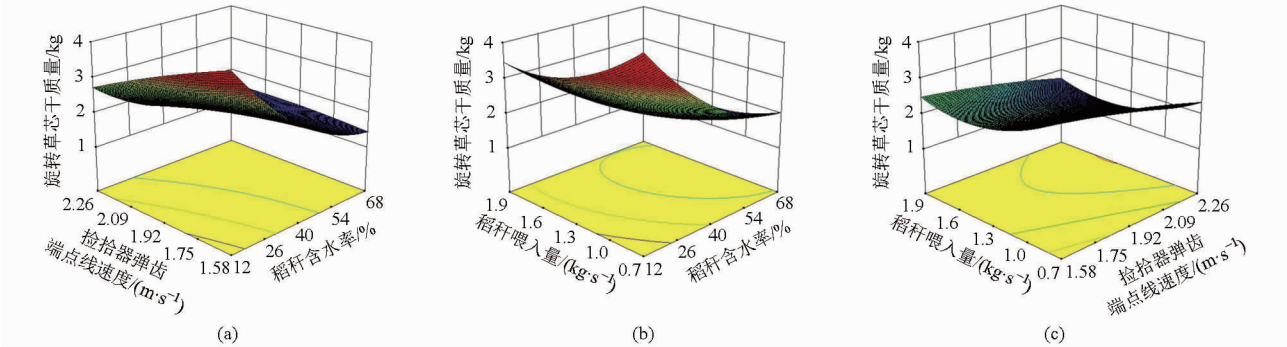


图5 旋转草芯干质量的响应曲面

Fig.5 Response surface for dry mass of rotary straw core

4 试验参数优化及验证

根据旋转草芯形成过程分析可知,旋转草芯形成越快,越有利于成捆,因此在稻秆含水率 12% ~ 68%、捡拾器弹齿端点线速度 1.58 ~ 2.26 m/s、稻秆喂入量 0.7 ~ 1.9 kg/s 试验因素范围内,利用 Design-Expert 软件将目标函数(旋转草芯形成时的干物质质量)设为最小值,寻找满足以上目标函数的最优参数组合,结合圆捆机生产率,最终确定本试验范围内最优参数组合为稻秆含水率 58% (此含水率稻秆与钢辊间的滑动摩擦因数约为 0.65),捡拾器弹齿端点线速度 2.23 m/s,稻秆喂入量 1.5 kg/s,旋转草芯干质量预测值 1.45 kg。

为验证优化结果的可靠性,按照上述优化参数组合进行了 5 次重复试验验证,结果取其平均值,验证结果为 1.58 kg,与预测值的相对误差为 8.2%,说

明模型是可靠的。

明模型是可靠的。

5 结论

(1)钢辊式圆捆机旋转草芯形成过程实质上是稻秆在卷压室内连续卷绕累积的过程,此过程主要依靠后续喂入稻秆的推动力以及钢辊对稻秆的摩擦力综合作用完成;旋转草芯对后续喂入稻秆有较大的牵带作用,其尽快形成是保证钢辊式圆捆机卷捆过程顺利进行的关键。

(2)在本试验因素范围内,各因素对钢辊式圆捆机旋转草芯形成时干物质质量的贡献率从大到小依次为:钢辊对稻秆的摩擦作用、捡拾器弹齿端点线速度、稻秆喂入量,优化后的参数组合为:钢辊与稻秆间的滑动摩擦因数约为 0.65、捡拾器弹齿端点线速度 2.23 m/s、稻秆喂入量 1.5 kg/s,此时旋转草芯形成时的干物质质量为 1.58 kg。

参 考 文 献

1 Menardo S, Cacciatorea V, Balsari P. Batch and continuous biogas production arising from feed varying in rice straw volumes following pre-treatment with extrusion[J]. Bioresource Technology, 2015, 180: 154 – 161.

2 Wendy Mussoline, Giovanni Esposito, Piet Lens, et al. Enhanced methane production from rice straw co-digested with anaerobic sludge from pulp and paper mill treatment process[J]. Bioresource Technology, 2013, 148: 135 – 143.

3 刘军军,何春霞. 水稻秸秆和淀粉基全降解装饰板的制备[J]. 农业工程学报,2012,28(6):283 – 288.

Liu Junjun, He Chunxia. Preparation of rice straw and starch-based biodegradable decorative materials[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 283 – 288. (in Chinese)

4 杨涛. 水稻秸秆纤维素发酵转化燃料乙醇的研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2008.

Yang Tao. Studies on the production of the fuel ethanol by the fermentation of rice straw cellulose[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2008. (in Chinese)

5 韩永俊,陈海涛,刘丽雪. 水稻秸秆纤维地膜制造工艺参数优化[J]. 农业工程学报,2011,27(3):242 – 247.

Han Yongjun, Chen Haitao, Liu Lixue. Optimization of technical parameters for making mulch from rice straw fiber[J]. Transactions of the CSAE,2011, 27(3): 242 – 247. (in Chinese)

6 杜韧,张哈,李丹. 圆捆机成型室的试验与研究[J]. 北华航天工业学院学报,2010,20(5):1-3.
Du Ren, Zhang Han, Li Dan. Experiment and research on forming box of wound bundler[J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering,2010,20(5):1-3. (in Chinese)

7 陈清. 农作物秸秆收获机械现状及发展趋势[C]//中国农学会秸秆资源综合利用分会论文集,2006:47-48.

8 Han K J, Collins M, Vanzant E S. Bale density and moisture effects on alfalfa bale silage[J]. Crop Science, 2004, 44(3):914-919.

9 Borreani G, Tabacco E. The effect of a baler chopping system on fermentation and losses of wrapped big bales of alfalfa[J]. Agronomy Journal, 2006, 98(1):1-7.

10 Timo Lötjönen, Teuvo Paappanen. Bale density of reed canary grass spring harvest[J]. Biomass and Bioenergy, 2013, 51:53-59.

11 Khanchi A, Jones C L, Sharma B, et al. Characteristics and compositional change in round and square switchgrass bales stored in South Central Oklahoma[J].Biomass and Bioenergy, 2013, 58:117-127.

12 Prewitt R M, Montross M D, Shearer S A, et al. Corn stover availability and collection efficiency using typical hay equipment [J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3):705-711.

13 Shinnars K J, Huenink B M, Muck R E, et al. Storage characteristics of large round and square alfalfa bales: low-moisture silage bales[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(2):401-407.

14 王德福,蒋亦元,王吉权. 钢辊式圆捆打捆机结构改进与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(12):84-88.
Wang Defu, Jiang Yiyuan, Wang Jiquan. Structure-improving and experiment of steel-roll round baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(12):84-88. (in Chinese)

15 王德福,张全国. 青贮稻秆圆捆打捆机的改进研究[J]. 农业工程学报,2007,23(11):168-171.
Wang Defu, Zhang Quanguo. Improvement of round baler for rice straw ensiling[J]. Transactions of the CSAE,2007,23(11):168-171. (in Chinese)

16 王春光. 钢辊外卷式圆捆机结构与原理[J]. 农业机械,2008(12A):43-45.

17 王春光. 9YD-1.2 型短胶带式圆捆机结构与原理[J]. 农业机械,2009(5A):78-79.

18 王琛,黄东明,周益君,等. 9YY-550 型小型秸秆捡拾圆捆机的设计[J]. 中国农机化,2008(4):67-68.
Wang Chen, Huang Dongming, Zhou Yijun, et al. Design on the model 9YY-550 minitype rotary baler for straw[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2008(4):67-68. (in Chinese)

19 杜韧,张立志. 圆捆机成型室原理与发展趋势[J]. 农业机械,2007(18):78-79.

20 王春光,敖恩查,邢冀辉,等. 钢辊外卷式圆捆打捆机设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(增刊):103-106.
Wang Chunguang, Ao Encha, Xing Jihui, et al. Design and experiment on round baler with revolute steel roller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.):103-106. (in Chinese)

21 霍丽丽,孟海波,田宜水,等. 粉碎秸秆类生物质原料物理特性试验[J]. 农业工程学报,2012,28(11):189-195.
Huo Lili, Men Haibo, Tian Yishui, et al. Experimental study on physical property of smashed crop straw[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(11):189-195. (in Chinese)

22 黄振华,陈海涛,房欣,等. 含水率对大豆秸秆流动力学性能的影响[J]. 大豆科学,2011,30(5):847-850.
Huang Zhenhua, Chen Haitao, Fang Xin, et al. Flowability parameters for chopped soybean stalk[J]. Soybean Science, 2011, 30(5):847-850. (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)