

秸秆圆捆机捆绳机构的参数优化与试验

王德福, 张全超, 杨 星, 李 超, 李东红, 王 沫, 平忠源

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘 要: 针对我国中小型圆捆机收获的秸秆捆易于膨胀松散、甚至散捆的问题, 设计了一种与钢辊式圆捆机相配套的捆绳机构。在秸秆捆力学特性测定及其膨胀变形影响因素分析的基础上, 利用钢辊式圆捆机试验台, 选取影响捆绳机构性能的导绳轮半径、链轮中心距圆捆机侧壁的安装距离、以及捆绳在秸秆捆端部缠绕的圈数作为试验因素, 以秸秆捆膨胀率和捆绳消耗量为评价指标进行试验研究。结果表明: 对秸秆捆膨胀率贡献率依次为安装距离、导绳轮半径、圈数; 对捆绳消耗量贡献率依次为导绳轮半径、安装距离、圈数。当试验因素参数组合为圈数 2 圈、导绳轮半径 70 mm、安装距离 62 mm 时, 秸秆捆膨胀率为 4.42%, 捆绳消耗量为 2.93 kg/t。研究结果可为圆捆机捆绳机构的研究和设计提供理论及技术依据。

关键词: 捆绳机构; 绕绳轨迹; 参数; 优化; 圆捆机

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.14.008

中图分类号: S233.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-14-0055-07

王德福, 张全超, 杨 星, 李 超, 李东红, 王 沫, 平忠源. 秸秆圆捆机捆绳机构的参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 55—61. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.14.008 http://www.tcsae.org

Wang Defu, Zhang Quanchao, Yang Xing, Li Chao, Li Donghong, Wang Mo, Ping Zhongyuan. Parameter optimization and experiment of rope-winding mechanism of straw round balers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(14): 55—61. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.14.008 http://www.tcsae.org

0 引 言

中国农作物秸秆年产量已超 7 亿 $t^{[1-4]}$ 。由于秸秆蓬松、分布分散, 因此秸秆打捆收获非常必要。圆捆机由于结构简单、价格较低、配套动力较小, 因而在中国农村使用较多(主要是中小型钢辊式圆捆机^[5-7])。

中国自主研发的中小型钢辊式圆捆机所收获的秸秆捆, 存在易于膨胀松散、形状尺寸不规范、在搬运贮存过程中容易出现散捆等问题^[8-9]。这主要是由于秸秆是粘弹性物料, 秸秆捆在成捆室中经应力松弛后在其内部残留部分平衡应力, 秸秆捆离开成捆室后, 平衡应力转化为使其产生膨胀变形的变形恢复力, 并直接作用在捆绳上^[10-11], 而秸秆捆成型后主要依靠捆绳维持其卷压形态, 若捆绳在秸秆捆表面缠绕分布不合理, 易造成秸秆捆形态不稳定, 发生不规则膨胀变形甚至散捆现象。

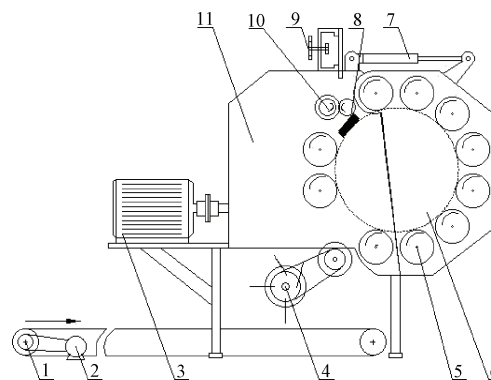
目前, 国内外学者已对秸秆挤压过程的流变特性进行了大量研究^[12-14], 但对圆捆机卷压过程的流变特性及其捆绳机构的相关研究报道较少^[15-16]。因此, 利用自制的压力测试装置测定秸秆捆的力学特性, 在此基础上分析设计的圆捆机捆绳机构不同绕绳轨迹对秸秆捆形态变化的影响情况, 通过试验对其结构进行参数优化, 为圆

捆机捆绳机构的设计提供理论及技术支持。

1 试验准备

1.1 捆绳机构结构及工作原理

利用已建立的钢辊式圆捆机试验台进行捆绳机构的试验研究。该试验台主要由钢辊式圆捆机(成捆室尺寸为 $\Phi 500\text{ mm} \times 750\text{ mm}$)和带式输送机组成, 分别配备 Y132M2-6 型电机(江苏省溧阳电机厂)、FR-F740-45K-CHT1 型变频器(日本三菱公司)。试验台结构如图 1 所示, 图中黑实框 8 为秸秆捆的压力测试装置的安装位置, 首先利用压力测试装置测定秸秆捆力学特性, 然后装配设计的捆绳机构进行捆绳试验。



1. 输送机电机 2. 带式输送机 3. 主电机 4. 捡拾器 5. 钢辊 6. 成捆室 7. 液压装置 8. 压力测试装置安装位置 9. 捆绳机构 10. 夹绳对辊 11. 圆捆机
1. Conveyor motor 2. Belt conveyor 3. Main motor 4. Pickup mechanism 5. Steel roll 6. Baling room 7. Hydraulic mechanism 8. Location of stress test device 9. Rope-winding mechanism 10. Rope rolls 11. Round baler

图 1 钢辊式圆捆机试验台示意图

Fig.1 Experimental equipment of steel-roll round baler

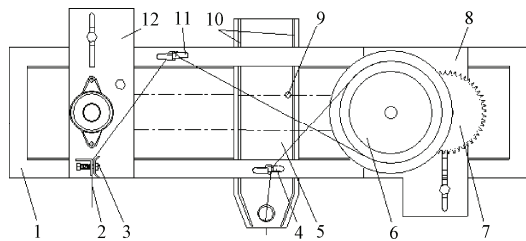
收稿日期: 2015-10-29 修订日期: 2016-05-21

基金项目: 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); 黑龙江省科技攻关项目(GC13B604)

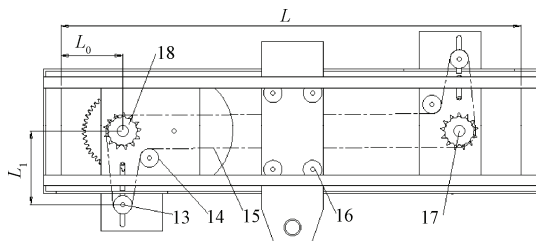
作者简介: 王德福, 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士生导师, 2009 年赴美国普渡大学访学一年, 主要从事畜牧机械方面的教学和研究工作。哈尔滨东北农业大学工程学院, 150030。Email: dfwang640203@sohu.com

其它仪器设备主要包括 BSA3202S 型电子天平(奥多利斯科学仪器有限公司)、TGT-100 型机械磅秤(衡力达电子衡器有限公司)、米尺等。

捆绳机构是圆捆机的关键部件之一,适用于秸秆捆达到预定密度时的放绳捆绕。设计的捆绳机构主要是由传动组合、导轮组合及座板等组成,如图 2 所示;传动组合由导绳轮、小齿轮(图 2 中未画出)、大齿轮、链轮、传动链条及移动导绳板构成,小齿轮与导绳轮同轴,同时与大齿轮啮合,大齿轮与右侧链轮同轴,传动链条上固定一个挡销,挡销的另一端深入到移动导绳板的两挡板之间,在运动过程中挡销通过挡板推动导绳板水平运动。导轮组合由可动导轮和定位导轮组成,可动导轮、定位导轮皆安装在座板上,其中可动导轮的位置在座板的竖直方向上可调。座板包括左座板、右座板,分别安装在捆绳机构框架的左侧、右侧,在捆绳机构框架的水平方向上可调。



a. 捆绳机构主视图
a. Front view of rope-winding mechanism



b. 捆绳机构后视图
b. Back view of rope-winding mechanism

1.捆绳机构框架 2.捆绳 3.夹绳板 4.下过绳环 5.移动导绳板 6.导绳轮
7.大齿轮 8.右座板 9.挡销 10.挡板 11.上过绳环 12.左座板 13.可动
导轮 14.定位导轮 15.传动链条 16.移动导轮 17.左链轮 18.右链轮
1.Frame 2.Rope 3.Rope-clip plate 4.Lower rope ring 5.Mobile rope-guiding
plate 6.Rope-guiding wheel 7.Big gear 8.Right plate 9.Driving pin 10.Driving
rod 11.Upper rope ring 12.Left plate 13.Mobile wheel 14.Positioning wheel
15.Driving chain 16.Moving wheel 17.Left sprocket 18.Right sprocket

注: L 为成捆室长度, mm; L_0 为链轮中心与成捆室侧壁之间的安装距离, mm; L_1 为可动导轮与链轮之间的距离, mm。

Note: L is the length of baling room, mm; L_0 is the distance between sprocket center and side wall of baling room, mm; L_1 is the distance between mobile wheel and sprocket center, mm.

图 2 圆捆机捆绳机构结构示意图

Fig.2 Structural diagram of rope-winding mechanism

1.2 工作原理与关键结构参数

工作时,捆绳经过夹绳板与上过绳环,绕导绳轮一圈,然后依次通过下过绳环、移动导绳板后,由夹绳对辊将捆绳送入成捆室,通过捆绳带动导绳轮、小齿轮、大齿轮、右链轮、左链轮、可动导轮、定位导轮、传动链条,继而由传动链条固定的挡销带动移动导绳板沿水平方向运动,使得捆绳按照一定的螺距在秸秆捆表面进

行螺旋缠绕^[19-20]。当导绳板移动到左右两端时,传动链条上挡销的运动可分解为在可动导轮与链轮之间的距离 L_1 (以下简称停留距离,通过可动导论调节)范围内的竖直运动以及在移动导绳板两挡板间的水平运动,在此过程中,挡销的水平方向分速度极小,且移动导绳板上两挡板的间距为 70 mm,因此,导绳板在秸秆捆两端短暂停留,增加捆绳在秸秆捆端部缠绕的圈数。传动链条运动一周,移动导绳板完成一个往返动作,割刀切断捆绳,完成捆绳的缠绕作业。

钢辊式圆捆机是通过钢辊(摩擦)带动秸秆捆匀速转动实现卷捆的。钢辊线速度 v_1 与秸秆捆线速度 v_2 近似相等,设钢辊转速为 n_1 ,则秸秆捆匀速转动的角速度为

$$\omega_2 = \frac{2\pi \cdot n_1 \cdot r_1}{60r_2} \quad (1)$$

式中 ω_2 为秸秆捆角速度, rad/s; n_1 为钢辊转速, r/min; r_1 为钢辊半径, 75 mm, r_2 为秸秆捆半径, 250 mm。

秸秆捆转动一周所用时间 t_0 为

$$t_0 = 2\pi / \omega_2 = 60r_2 / (n_1 \cdot r_1) \quad (2)$$

传动链条的移动速度 v_6 为

$$v_6 = \frac{2\pi \cdot n_1 \cdot r_1 \cdot z_4 \cdot r_6}{60r_3 \cdot z_5} \quad (3)$$

式中 v_6 为捆绳缠绕的螺距, mm; r_6 为链轮半径, 26.53 mm; z_4 为小齿轮齿数, 15; z_5 为大齿轮齿数, 50; r_3 为导绳轮半径, mm。

由上式可知,秸秆捆以角速度 ω_2 做匀速圆周运动,移动导绳板以速度 v_6 做往复直线运动,在两种组合运动作用下,捆绳螺旋缠绕在秸秆捆表面。

1.3 试验材料及试验条件

试验材料选用哈尔滨市香坊农场经割前摘脱水稻收获机获得的完整稻秆,平均长度为 750 mm,含水率为 20%。捆绳采用由三股黄麻纤维右旋捻制而成的麻绳,直径为 3 mm,经万能试验机拉伸试验测得其最大拉伸力为 140 N 左右。

参照相关文献^[19-20],本试验选择圆捆机钢辊转速为 200 r/min、喂入量为 0.8 kg/s,每捆稻秆质量为 17 kg(圆草捆打捆机标准中密度要求 $\geq 115 \text{ kg/m}^3$)。

1.4 试验评价指标

试验分别测定秸秆捆膨胀率 P_k 和捆绳消耗量 G_S 为试验的评价指标。

秸秆捆膨胀率 P_k 参照 JB/T 5166-1991《方草捆压捆机试验方法》^[21]中关于草捆抗摔率的测定方法,将试验收获的秸秆捆,自 5 m 高度自由下落,每捆连续摔 3 次,然后从其右端面起沿轴向每隔 125 mm 测量捆周长,至秸秆捆左端面结束,共计 7 组周长,每组周长重复 3 次测量取均值,计算秸秆捆摔落膨胀后的平均直径。按式(4)计算其膨胀率。

$$P_k = \frac{d_{ks} - d_k}{d_k} \times 100\% \quad (4)$$

式中 P_k 为秸秆捆膨胀率, %; d_{ks} 为秸秆捆摔落膨胀后的平均直径, mm; d_k 为成捆室直径, 500 mm。

捆绳消耗量 G_s 测定依照 GB/T 14290-2008《圆草捆打捆机》^[22]，分别测量秸秆捆的实际质量及捆绳质量。按式（5）计算其捆绳消耗量。

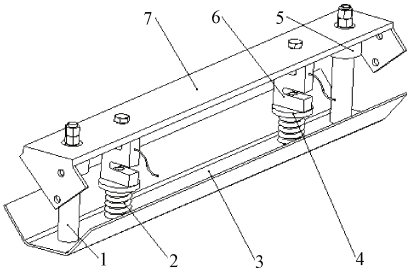
$$G_s = \frac{10^3 G_{ks}}{G_k - G_{ks}} \quad (5)$$

式中 G_s 为捆绳消耗量，kg/t； G_{ks} 为捆绳质量，kg； G_k 为被测秸秆捆质量，kg。

2 秸秆捆力学特性及其膨胀影响因素分析

2.1 秸秆捆力学特性

秸秆捆成型过程中的力学特性对其形态变化有重要影响，因此，利用配置有压力测试装置的钢辊式圆捆机试验台，测定秸秆捆挤压力在试验条件下的变化情况。该压力测试装置结构如图 3 所示，主要由 2 个 S 型传感器（型号均为 YZC-516，量程为 300 kg，广州电测仪器厂）并联而成，活动板可以沿导向柱轴向自由移动，活动板底板与秸秆捆相切，底板面积为 730 mm×40 mm。



1.导向柱 2.传力弹簧 3.活动板 4.传力触头 5.导向套 6.S 型压力传感器 7.固定板
1.Guide pillar 2.Force transfer spring 3.Movable plate 4.Force transfer contact 5.Guide sleeve 6.S type pressure sensor 7.Fixed plate

图 3 压力测试装置

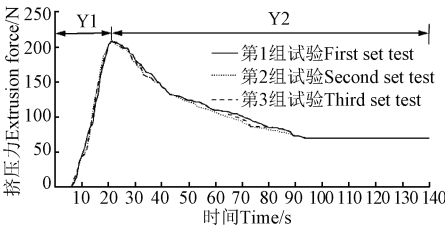
Fig.3 Test device of rotary compressing force

试验时，利用带式输送机将稻秆喂入圆捆机，喂料完成后，秸秆捆继续在成捆室内运转，直至应力趋于稳定。利用东北农业大学工程学院研制的 FTNS-8 型智能 8 通道应力/扭矩/转速/功率测量仪采集整个打捆过程的挤压力数据，并由计算机实时记录，测定试验重复 3 次，结果如图 4 所示。

稻秆卷捆过程对活动板底板挤压力计算公式如下

$$F(t) = F_1(t) + F_2(t) \quad (6)$$

式中 $F(t)$ 为任意时刻活动板底板受到的总挤压力，N； $F_1(t)$ 和 $F_2(t)$ 为两个传感器任意时刻分别测得的挤压力，N。



注：Y1 为卷压阶段；Y2 为应力松弛阶段。
Note: Y1 means stage of rotary compression; Y2 means stage of stress relaxation.

图 4 挤压力随时间的变化曲线

Fig.4 Change curve of stress with time

由挤压力变化曲线可知，随着稻秆的不断喂入，在第 8 s 时开始出现挤压力，第 22 s 时喂料完成，此时挤压力达到最大，最大挤压力平均为 208.46 N。秸秆捆继续在成捆室内旋转，挤压力随时间不断下降，喂料完成约 60 s 后趋于相对稳定，平衡挤压力平均为 69.50 N。由应力松弛阶段可以看出，挤压力在喂料完成后的 20 s 内释放较快，因此，当喂料完成 20 s 后适合捆绳机构的放绳捆绕。

由秸秆捆力学特性测定结果可知，喂料刚完成时秸秆捆挤压力达到最大值，随后由于秸秆捆的应力松弛特性，挤压力随时间不断下降最后趋于稳定（平衡挤压力）。

2.2 秸秆捆膨胀变形的影响因素分析

秸秆捆的平衡挤压力是造成其在运输贮存过程中出现膨胀变形的重要原因。经挤压力测定结果可知，喂料完成一段时间后，秸秆捆内部仍残留部分平衡挤压力，秸秆捆放出成捆室后，该力直接作用在捆绳上，秸秆捆主要依靠捆绳限制其平衡挤压力的向外膨胀，不同的绕绳轨迹直接影响秸秆捆的形态变化。影响秸秆捆膨胀变形的主要因素包括捆绳螺旋缠绕的螺距 s （简称螺距）、捆绳在秸秆捆端部缠绕的圈数 Q （简称圈数）以及秸秆捆端部捆绳距相应端面的距离 l_0 （简称端面距离）。现通过单因素试验分析不同的绕绳轨迹对秸秆捆膨胀变形的影响，试验结果分别如表 1、表 2、表 3 所示。

表 1 螺距试验

Table 1 Experiments of screw pitch

螺距 Screw pitch s /mm	膨胀率 Expansion rate P_k /%
100	5.44
140	6.09
180	7.65
220	8.82
260	9.09

注：圈数为 1.5 圈，端面距离为 100 mm。
Note: Circle number are 1.5 circles, distance is 100 mm.

表 2 圈数试验

Table 2 Experiments of circle number

圈数 Circle number Q	膨胀率 Expansion rate P_k /%
0.5	7.65
1.0	6.96
1.5	6.34
2.0	5.82
2.5	5.68

注：螺距为 180 mm，端面距离为 100 mm。
Note: Screw pitch is 180 mm, distance is 100 mm.

表 3 端面距离试验

Table 3 Experiments of distance

端面距离 Distance l_0 /mm	膨胀率 Expansion rate P_k /%
50	3.92
75	5.18
100	6.57
125	7.42
150	7.68

注：螺距为 180 mm，圈数为 1.5 圈。
Note: Screw pitch is 180 mm, circle number are 1.5 circles.

通过试验观察发现, 螺距、圈数以及端面距离对秸秆捆膨胀率均有显著影响。当螺距达到 260 mm 时, 秸秆捆膨胀率过大, 易出现散捆现象; 当圈数达到 2.5 圈时, 秸秆捆端部较为紧实, 再增加圈数对秸秆捆膨胀率变化不显著; 当端面距离达到 150 mm 时, 秸秆捆两端膨胀明显, 秸秆捆明显出现不规则现象, 影响秸秆捆形态。

3 捆绳机构试验与参数优化

3.1 试验方法

由捆绳机构的工作原理可知, 捆绳缠绕的螺距 s 为

$$s = v_6 \cdot t_0 = \frac{2\pi \cdot r_2 \cdot z_4 \cdot r_6}{r_3 \cdot z_3} \quad (7)$$

由式 (7) 可知, 捆绳缠绕的螺距 s 与导绳轮半径 r_3 成反比。

捆绳在秸秆捆端部缠绕的圈数 Q 为

$$Q = \frac{n_2 \cdot (2L_1 + 70)}{60v_6} \quad (8)$$

秸秆捆转速 n_2 为定值, 导绳轮半径 r_3 选定后, 链条移动速度 v_6 即为定值, 因此, 圈数 Q 与停留距离 L_1 成正比相关。

端面距离 l_0 直接取决于链轮中心 (即导绳板移动到端部的中心) 距圆捆机侧壁的安装距离 L_0 (简称安装距离)。

由以上分析可知, 圈数 Q 、螺距 s 以及端面距离 l_0 主要与捆绳机构的导绳轮半径 r_3 、停留距离 L_1 以及安装距离 L_0 有关。因此, 依据 Central Composite 试验设计, 选择导绳轮半径 r_3 、安装距离 L_0 以及圈数 Q 为试验因素 (其中圈数的调节是在导绳轮半径选定后通过控制停留距离实现), 进行 3 因素 5 水平正交旋转组合试验。在单因素试验研究基础上, 结合 Design-Expert 软件, 设定圈数范围为 0.66~2.34 圈, 导绳轮半径的取值范围 50~100 mm (螺距约为 125~250 mm), 安装距离的取值范围 50~150 mm, 各因素水平编码表见表 4。

表 4 试验因素编码表

Table 4 Experimental factors and levels

水平 Levels	试验因素 Experimental factors		
	圈数 Circles number	导绳轮半径 Wheel radius	安装距离 Mounting distance
	A/圈	B/mm	C/mm
-1.682	0.66	50	50
-1	1	60	70
0	1.5	75	100
1	2	90	130
1.682	2.34	100	150

3.2 试验结果与分析

响应面试验方案及结果见表 5。

在试验过程中, 捆绳机构能够顺利地进行捆绳缠绕工作。从试验效果来看, 圈数、导绳轮半径和安装距离对试验结果存在一定的交互作用。利用 Design Expert 软件分别对秸秆捆膨胀率 P_k 、捆绳消耗量 G_s 的回归模型进行方差分析, 分析结果如表 6、表 7 所示。

表 5 试验方案和结果

Table 5 Experimental plan and results

序号 No	圈数 Circles	导绳轮半径 Wheel radius	安装距离 Mounting Distance	膨胀率 Expansion rate $P_k/\%$	捆绳消耗量 Consumption of rope $G_s/(\text{kg}\cdot\text{t}^{-1})$
1	-1	-1	-1	6.81	2.10
2	1	-1	-1	5.74	2.48
3	-1	1	-1	5.41	3.37
4	1	1	-1	4.93	3.78
5	-1	-1	1	9.63	1.36
6	1	-1	1	8.68	2.27
7	-1	1	1	6.92	2.12
8	1	1	1	6.68	3.00
9	-1.682	0	0	7.4	1.53
10	1.682	0	0	5.9	2.57
11	0	-1.682	0	9.78	1.81
12	0	1.682	0	5.99	3.61
13	0	0	-1.682	3.91	3.50
14	0	0	1.682	7.65	2.31
15	0	0	0	6.19	2.67
16	0	0	0	7.04	2.64
17	0	0	0	6.42	2.46
18	0	0	0	6.76	2.39
19	0	0	0	7.19	2.30
20	0	0	0	6.21	2.69
21	0	0	0	6.44	2.42
22	0	0	0	6.05	2.66
23	0	0	0	6.83	2.44

表 6 秸秆捆膨胀率回归模型的方差分析

Table 6 Variance analysis of regression equation for expansion rate of straw bales

项目 Source	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F Value	P 值 P Value	显著程度 Significant
模型	9	4.22	34.88	< 0.0001	**
A	1	2.03	16.77	0.0013	**
B	1	12.94	107.02	< 0.0001	**
C	1	17.16	141.94	< 0.0001	**
AB	1	0.21	1.75	0.2090	
AC	1	0.016	0.13	0.7202	
BC	1	0.78	6.46	0.0246	*
A ²	1	0.028	0.23	0.6383	
B ²	1	3.64	30.10	0.0001	**
C ²	1	1.12	9.27	0.0094	**
失拟项	5	0.056	0.35	0.8716	

注: * $P<0.05$ 为显著, ** $P<0.01$ 为极显著, 下同。
Note: * $P<0.05$ means significant, ** $P<0.01$ means highly significant, the same as follow.

表 7 捆绳消耗量回归模型的方差分析

Table 7 Variance analysis of regression equation for consumption of ropes

项目 Source	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F Value	P 值 P Value	显著程度 Significant
模型	9	0.88	64.82	<0.0001	**
A	1	1.37	100.73	<0.0001	**
B	1	3.68	269.99	<0.0001	**
C	1	1.81	132.77	<0.0001	**
AB	1	1.472×10^{-6}	1.081×10^{-4}	0.9919	
AC	1	0.12	9.09	0.0094	**
BC	1	0.15	10.87	0.0059	**
A ²	1	0.43	31.88	<0.0001	**
B ²	1	0.076	5.58	0.0360	*
C ²	1	0.30	22.08	0.0360	**
失拟项	5	1.104×10^{-3}	0.051	0.9984	

由表 6、表 7 的试验方差分析可知，2 个响应面模型的 P 值均小于 0.0001，失拟项均不显著，说明各因素的影响极显著且模型是合适的。由 Design Expert 软件还可以获得试验模型决定系数分别为 $R_{P_k}^2 = 0.96$ ， $R_{G_s}^2 = 0.98$ ，说明回归模型与试验结果拟合程度较好，可分别用于预测秸秆捆膨胀率 P_k 和捆绳消耗量 G_s 的变化情况。

对各指标回归方程进行显著性分析，剔除其不显著项，分别获取各因素编码值与秸秆捆膨胀率 P_k 、捆绳消耗量 G_s 的回归模型，如式（9）、（10）所示。

$$P_k = 6.57 - 0.39A - 0.97B + 1.12C - 0.31BC + 0.48B^2 - 0.27C^2, \quad (9)$$

$$G_s = 2.52 + 0.32A + 0.52B - 0.36C + 0.13AC - 0.13BC - 0.17A^2 + 0.068B^2 + 0.14C^2. \quad (10)$$

由各表中一次项的 F 值可进一步判断各因素对各试验评价指标的贡献率，如表 8 所示。

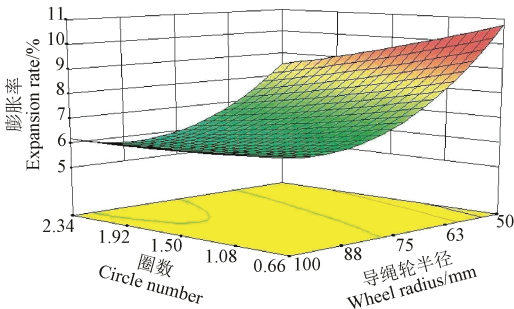
表 8 各因素对指标的贡献率

Table 8 Contributing rate of each factor on evaluation index				
评价指标 Index	圈数 Circle number A	导绳轮半径 Wheel radius B	安装距离 Mounting distance C	贡献率 排序 Sequence
P_k	16.77	107.02	141.94	$C > B > A$
G_s	100.73	269.99	132.77	$B > C > A$

交互因素对评价指标响应曲面如图 5 所示。图 5a 为安装距离位于中心水平（100 mm）时，圈数与导绳轮半

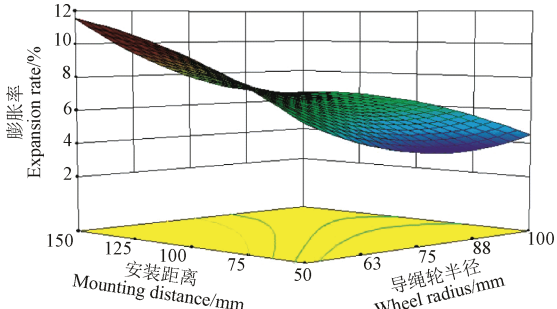
径交互作用对秸秆捆膨胀率的响应曲面图，从图 5a 可以看出，增加圈数和增大导绳轮半径有助于降低秸秆捆膨胀率；图 5b 为圈数位于中心水平（1.5 圈）时，导绳轮半径与安装距离交互作用对秸秆捆膨胀率的响应曲面图，从图 5b 可以看出，增大导绳轮半径和减小安装距离有助于降低秸秆捆膨胀率。由图 5a 和图 5b 可知，响应曲面变化规律与表 6 计算结果及预试验分析一致，总体影响趋势为圈数越多、导绳轮半径越大、安装距离越小，则秸秆捆膨胀率越低，反之则秸秆捆膨胀率高。其主要原因：当圈数增加时，秸秆捆两端缠绕的紧实度增加，限制了秸秆捆的膨胀程度；当导绳轮半径 r_3 增大时，由式（6）可知，捆绳缠绕螺距随之减小，捆绳缠绕越紧密，导致秸秆捆膨胀率降低；当安装距离减小时，秸秆捆端部捆绳距相应端面的距离随之减小，降低了秸秆膨胀率。

图 5c 为导绳轮半径位于中心水平（75 mm）时，圈数与安装距离交互作用对捆绳消耗量的响应曲面图，从图 5c 可以看出，减少圈数和增大安装距离有助于降低捆绳消耗量；图 5d 为圈数位于中心水平（1.5 圈）时，导绳轮半径与安装距离交互作用对捆绳消耗量的响应曲面图，从图 5d 可以看出，减小导绳轮半径和增大安装距离有助于降低捆绳消耗量。由图 5c 和图 5d 可知，响应曲面变化规律与表 7 计算结果及回归模型（10）吻合，总体影响趋势为圈数越少、导绳轮半径越小、安装距离越大，则捆绳消耗量越低，反之则捆绳消耗量高。



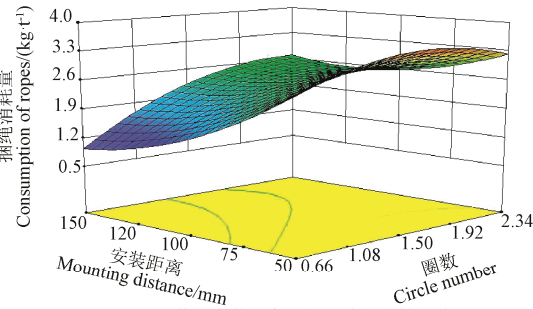
a. 圈数和导绳轮半径对秸秆捆膨胀率的影响

a. Effect of circle number and wheel radius on expansion rate of straw bales



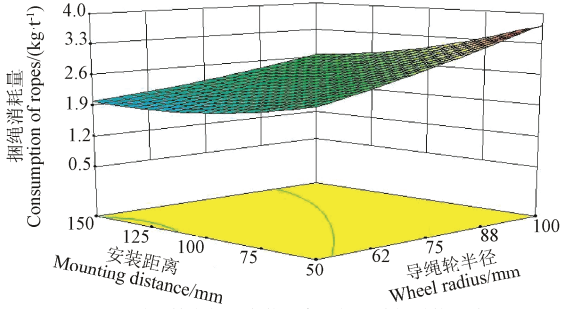
b. 导绳轮半径和安装距离对秸秆捆膨胀率的影响

b. Effect of wheel radius and mounting distance on expansion rate of straw bales



c. 圈数和安装距离对捆绳消耗量的影响

c. Effect of circle number and mounting distance on consumption of ropes



d. 导绳轮半径和安装距离对捆绳消耗量的影响

d. Effect of wheel radius and mounting distance on consumption of ropes

图 5 双因素交互作用对评价指标的影响

Fig.5 Effects of two factors on evaluation indexes

3.3 参数优化及试验验证

为达到较好的绕绳效果及经济利益，就要求秸秆捆膨胀率小，捆绳消耗量低。通过响应面分析目标参数可知，秸秆捆要达到较小的膨胀率，需要增加圈数和导绳

轮半径，减小安装距离；要达到较低的捆绳消耗量，需要增加圈数和导绳轮半径，减小安装距离。由于各因素对目标参数影响不一致，因此需要综合考虑。

针对秸秆捆膨胀率小、捆绳消耗量低的捆绳作业要

求, 在试验范围内进行捆绳机构参数优化, 其目标函数如式 (11) 所示。

$$F = [\min(P_k), \min(G_s)] \quad (11)$$

约束条件为: $0.66 < A < 2.34$; $50 < B < 100$; $50 < C < 150$ 。采用 Design-Expert 软件对参数进行优化求解, 得到各因素优化参数组合: 圈数为 2.11 圈、导绳轮半径为 70 mm、安装距离为 62 mm, 此时秸秆捆膨胀率 4.42%、捆绳消耗量为 2.93 kg/t。经参数圆整后确定参数值: 圈数为 2 圈、导绳轮半径为 70 mm、安装距离为 62 mm。根据选定的参数组合以及公式 (3)、(7) 可得, 可动导论与链轮之间的停留距离为 143.5 mm。

在试验田进行捆绳机构优化参数组合的验证试验, 试验过程中主钢辊转速为 200 r/min, 拖拉机前进速度为 3.6 km/h, 秸秆条铺平均为 0.8 kg/m, 试验指标如 1.4 所述。通过最优参数组合的 3 次重复试验, 得到秸秆捆膨胀率平均为 4.61%, 捆绳消耗量平均为 2.86 kg/t。试验结果与响应面优化结果间的误差均在 10% 以内, 说明试验获得的参数模型可靠, 优化结果可信度高。田间验证试验及成捆效果如图 6 所示。

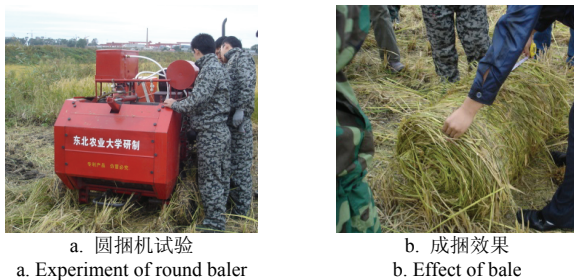


图 6 圆捆机田间试验
Fig.6 Field experiment of round baler

4 结 论

1) 由秸秆捆力学特性测定及其膨胀变形因素分析可知, 卷捆刚完成时秸秆捆挤压力达到最大值, 随后挤压力随时间不断下降最后趋于平衡挤压力; 影响秸秆捆膨胀变形的主要因素为平衡挤压力和绕绳轨迹。

2) 通过试验研究可得, 影响捆绳机构绕绳性能的试验因素对秸秆捆膨胀率影响顺序依次为: 链轮中心距圆捆机侧壁的安装距离、导绳轮半径、捆绳在秸秆捆端部缠绕的圈数; 对捆绳消耗量影响顺序依次为: 导绳轮半径、链轮中心距圆捆机侧壁的安装距离、捆绳在秸秆捆端部缠绕的圈数。

3) 通过响应曲面分析法, 建立了各试验因素与评价指标的响应曲面模型, 确定了本文设计的圆捆机捆绳机构的优化参数: 圈数为 2 圈、导绳轮半径为 70 mm、安装距离为 62 mm。在优化参数组合下, 秸秆捆膨胀率为 4.42%、捆绳消耗量为 2.93 kg/t。

【参 考 文 献】

[1] 雷军乐, 王德福, 张全超, 等. 完整稻秆卷压过程应力松弛试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 76—83.
Lei Junle, Wang Defu, Zhang Quanchao, et al. Experiment on stress relaxation characteristics of intact rice straw during

rotary compression[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(8): 76—83. (in Chinese with English abstract)

[2] 王德福, 蒋亦元, 张永根, 等. 鲜稻秆青贮收获工艺试验研究[J]. 东北农业大学学报, 2009, 40(11): 113—115.
Wang Defu, Jiang Yiyuan, Zhang Yonggen, et al. Experimental study on harvesting process of flesh rice straw[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2009, 40(11): 113—115. (in Chinese with English abstract)

[3] 毕于运, 高春雨, 王亚静, 等. 中国秸秆资源数量估算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 211—217.
Bi Yuyun, Gao Chunyu, Wang Yajing, et al. Estimation of straw resources in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(12): 211—217. (in Chinese with English abstract)

[4] 韩鲁佳, 闫巧娟, 刘向阳, 等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 87—91.
Han Lujia, Yan Qiaojuan, Liu Xiangyang, et al. Straw Resources and Their Utilization in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2002, 18(3): 87—91. (in Chinese with English abstract)

[5] 高海, 李国东, 刘伟, 等. 农作物秸秆综合利用现状及技术[J]. 现代农业科技, 2011(18): 290—291.
Gao Hai, Li Guodong, Liu Wei, et al. Status and technology of comprehensive utilization of crops straw[J]. Anhui Agriculture, 2011(18): 290—291. (in Chinese with English abstract)

[6] 华荣江, 唐遵峰, 叶红艳, 等. 国内外圆捆机械研究与发展趋势[J]. 中国农机化, 2012(3): 23—26.
Hua Rongjiang, Tang Zunfeng, Ye Hongyan, et al. Research and development tendency about baler in domestic and overseas[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2012(3): 23—26. (in Chinese with English abstract)

[7] 王春光, 马卫民, 马赛, 等. 钢辊预压式圆捆机设计[J]. 农业工程, 2011, 1(2): 17—20.
Wang Chunguang, Ma Weimin, Ma Sai, et al. Design on round baler with prepressing device[J]. Agricultural Engineering, 2011, 1(2): 17—20. (in Chinese with English abstract)

[8] 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 with English abstract)

[9] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(11): 168—171. (in Chinese with English abstract)

[10] 杨延文. 玉米茎秆及其打捆力学特性研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2014.
Yang Yanwen. Study on The Mechanical Characteristics of Maize Stalk and Its Round Bundle[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)

[11] 杜健民, 李旭英, 白雪卫, 等. 压缩过程影响秸秆捆形态稳定性的流变学试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 103—106.
Du Jianmin, Li Xuying, Bai Xuewei, et al. Experimental study on rheology for bale durability under compression[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural

- Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(2): 103—106. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李汝莘, 耿爱军, 赵何, 等. 碎玉米秸秆卷压过程的流变行为试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 30—35.
Li Ruxin, Geng Aijun, Zhao He, et al. Rheologic behavior of chopped corn stalks during rotary compression[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(18): 30—35. (in Chinese with English abstract)
- [13] 杨明韶, 张永, 李旭英. 粗纤维物料压缩过程的一般流变规律的探讨[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 135—137.
Yang Mingshao, Zhang Yong, Li Xuying. Rheological law of the crop stem fibrous material during compression process[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2002, 18(1): 135—137. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李大鹏. 饲草压捆时应力松弛特性的试验研究[J]. 粮食与饲料工业, 2003(9): 26—27.
Li Dapeng. Study on the stress relaxation in forage baling[J]. Cereal & Feed Industry, 2003(9): 26—27. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王春光, 杨明韶, 高焕文, 等. 牧草在高密度压捆时的应力松弛研究[J]. 农业工程学报, 1997, 13(3): 48—52.
Wang Chunguang, Yang Mingshao, Gao Huanwen, et al. Study on stress—relaxation of hay during baling under high density[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1997, 13(3): 48—52. (in Chinese with English abstract)
- [16] 赵何, 杨若玲, 李汝莘, 等. 碎玉米秸秆青贮打捆试验研究[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2011, 42(2): 301—305.
Zhao He, Yang Ruoling, Li Ruxin, et al. Test and research on silage bundling for chopped corn stalks[J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science, 2011, 42(2): 301—305. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李明利. 玉米摘穗秸秆青贮打捆联合作业机的设计[D]. 泰安: 山东农业大学, 2009.
Li Mingli. Design of Core Snapping and Stalk Silage Baling Combine Harvester[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张智龙. 玉米青贮打捆收获机割台及打捆控制系统的设计[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
Zhang Zhilong. Design on the Header and Bundling Control System of Self-Propelled Corn Stalk Silage Bundling Harvester[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [19] 丛宏斌, 李明利, 李汝莘, 等. 4YQK-2 型茎秆青贮打捆玉米收获机的设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 96—100.
Cong Hongbin, Li Mingli, Li Ruxin, et al. Design of 4YQK-2 combine harvester for corn and straw ensilage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(10): 96—100. (in Chinese with English abstract)
- [20] 丛宏斌, 李汝莘, 韩新月, 等. 青贮玉米收获机打捆装置自动控制系统设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 42—54.
Cong Hongbin, Li Ruxin, Han Xinyue, et al. Design of automatic control system on baling apparatus for ensilage maize combine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 42—54. (in Chinese with English abstract)
- [21] JB/T 5166—1991 方草捆压捆机试验方法[S].
- [22] GB/T 14290—2008 圆草捆打捆机试验方法[S].

Parameter optimization and experiment of rope-winding mechanism of straw round balers

Wang Defu, Zhang Quanchao, Yang Xing, Li Chao, Li Donghong, Wang Mo, Ping Zhongyuan

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: China is rich in crop straw resources, and annual straw output has reached about 700 million t. Due to fluffy and dispersed properties, baling of straw is very necessary for its further utilization. Because round balers don't have the knotter of square balers, the structure of round balers is relatively simple, and it is widely used both at home and abroad. Small and medium-sized round balers are widely used in the rural areas in China. At present, there are some problems when the straw bales are harvested by small and medium-sized round balers developed in China, and the unreasonable working way of the rope-winding mechanism is one of main reasons. In view of the straw bales harvested by small and medium round balers, easy to expand and loosen, a rope-winding mechanism was designed for the steel-roller round baler. On the basis of the measurement of mechanical property of straw bale and the analysis of influencing factors of straw bale expansion deformation, main structural parameters of the rope-winding mechanism, including wheel radius, installation distance between sprocket center and wall side of baling room and circle number of rope at the end of straw bale, were decided as experimental factors, and expansion rate of straw bales and consumption of ropes were selected as evaluation indices. Experiments were done by the round baler equipped with the rope-winding mechanism. The rope-winding mechanism was able to work smoothly in the experiment. According to experimental results, there were certain interactions among circle number, wheel radius and installation distance. Variance analysis was carried out respectively on the regression models of 2 evaluation indices by the Design Expert software. Known from the analysis of variance, the P values of 2 response surface models were all less than 0.0001, and the lack-of-fits were all non-significant, which demonstrated the effect of factors was outstanding and the model was appropriate. The coefficient of determination (R^2) for the models were 0.96 and 0.98 respectively, which indicated that the proposed model was agreeable with the practical condition, and thus the proposed model could be used to predict the change of expansion rate of straw bales and consumption of ropes. The results showed that the contributing rate of each factor on expansion rate of straw bales was mounting distance, radius of guiding wheel, and circle number respectively; the order of contributing rate for each factor on the consumption of ropes from high to low was radius of guiding wheel, mounting distance, and circle number. When the circle number was 2 circles, wheel radius was 70 mm, and mounting distance was 62 mm, the optimal evaluation indices were achieved as follows: expansion rate of straw bale was 4.42%, and consumption of rope was 2.93 kg/t. The experimental results can provide a reference for the design and development of rope-winding mechanism of round balers.

Keywords: winding machines; trajectories; parameter; optimization; round baler