

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.018

青饲圆捆机对数螺旋式成形装置设计与试验*

高东明¹ 王德成² 李杰¹ 刘玉德¹ 乔晓东³

(1. 北京工商大学材料与机械工程学院, 北京 100048; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083;

3. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 为提高青贮饲料的打捆作业效率和作业质量,在现有青贮饲料打捆技术的基础上,设计了一种用于青贮作业,由喂料预压机构、对数螺旋式二次压捆机构组成的对数螺旋式圆草捆成捆装置。对不同含水率的玉米秸秆进行了不同压力角的试验,试验结果表明:取压力角小于 20° 的对数螺旋式喂料压捆过程,解决了圆形内腔的成捆室在喂入粗大、湿润、坚硬物料时的堵塞问题;对含水率为 $50\% \sim 70\%$ 的玉米秸秆,装置压力角 α 值取 15° 时,喂入速度和压捆速度匹配较好;装置对高含水率的玉米秸秆具有较好的适应性。

关键词: 青贮饲料 圆捆机 成形装置 对数螺旋

中图分类号: S817.11*5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)07-0118-05

Design and Test of Logarithmic Spiral Round Baler Chamber

Gao Dongming¹ Wang Decheng² Li Jie¹ Liu Yude¹ Qiao Xiaodong³

(1. College of Material and Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Operational efficiency and working quality of silage round baler were mainly determined by the compression chamber. For the feeding difficulties of traditional compression chamber, a new type of round bale device with logarithmic spiral geometric features was designed for the silage job. This device consists of a preload feeding mechanism and the logarithmic spiral type secondary extrusion mechanism. The pressure angles of this machine were experimented with different moisture contents of corn stalks. Results of field test indicate that, plugging problems were solved by using logarithmic spiral geometry chamber baler compared with the circular cavity compression chamber balers. The pressure angle of logarithmic spiral baler feeder must be less than 20° under the feeding process of thick, hard and moist materials. Under the conditions that the pressure angle of 15° and the moisture content of $50\% \sim 70\%$, the feeding speed could match the baling speed in higher efficiency. To form bales of equivalent mass, the device had good adaptability for high moisture corn stalks. The design principles and experimental results of logarithmic spiral compression chamber provided an optimization direction for improving the working efficiency of silage round baler.

Key words: Silage Round baler Compression chamber Logarithmic spiral

引言

圆草捆打捆机的工作过程是把物料旋转压缩成

圆捆,并采用网或绳包卷圆捆。圆草捆打捆机的核心部件是成捆室,其功能是使物料在成形舱的内腔中不断旋转,逐渐形成圆捆^[1]。用于青贮饲料的圆

收稿日期: 2015-03-25 修回日期: 2015-04-15

* 国家牧草产业技术体系课题资助项目(CARS-35)和公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(201203024)

作者简介: 高东明,讲师,博士,主要从事草业机械研究,E-mail: gaodongming@btbu.edu.cn

通讯作者: 王德成,教授,博士生导师,主要从事草业机械研究,E-mail: wdc@cau.edu.cn

捆机由于物料需要切碎且含水率高,草捆密度大,因此主要采用固定成捆室。其结构形式有辊筒式、短皮带式、链杆式等^[2]。国内外文献对圆捆机打捆过程中的功率消耗^[3-5]和收获损失^[6]进行了广泛研究。研究表明:物料进入成捆室时产生拥堵和压捆部件之间的间隙是影响圆捆机作业损失和作业效率的主要原因^[7-8]。为解决堵塞问题,文献^[9-10]对成捆室的喂入口进行了改进研究。由于圆捆打捆机的喂入均匀性和压捆阻力变化对打捆机圆捆成形具有重大影响,因此,要求喂入量和压捆阻力变化均匀。现有的成捆室不论采取何种形式的压捆部件,其围成的内腔均为圆柱形,物料从喂入到成形过程中,内腔横截面积急剧变小,从而易发生喂入困难、拥堵、喂入口零部件损坏等现象。此外,这种腔体结构导致圆捆在压制过程中物料因被压缩而产生的蠕变能不断积聚,而不能得到释放,导致成捆所需要的动力急剧增大,又易损坏传动部件。

针对上述问题,本文设计一种用于青贮作业,物料喂入均匀、顺畅,圆捆成形过程中动力输入波动小的对数螺线式圆草捆成捆装置,对其关键部件的参数进行分析设计,并用不同含水率的玉米秸秆对样机进行作业试验。

1 对数螺线式圆草捆成形原理与装置技术参数

1.1 对数螺线式圆草捆成形原理

对数螺线式圆草捆成捆装置的结构如图 1 所示。它所围成的空腔由圆弧段和 2 个对数螺线段组成。分析固定成捆室圆草捆打捆机的打捆过程可知,草捆总是需要经历草料的成核与长大 2 个过程。选取进入成捆室的一个微小物料单元为研究对象,分析其在成捆室中受到的作用力可知,该微单元主要受力有:被动转动的草捆在草捆外表面切线方向上的摩擦力 F'_i ,草捆对其向外的正压力 F_n ,主动运动的压捆部件对其的摩擦力 F_i ,压捆部件对其向草捆方向的正压力 F'_n 。

在成核阶段,物料通过短皮带的上表面喂入由喂料预压机构和对数螺线式二次压捆机构共同围成的成捆室。当成捆室中的物料较少时,物料在压捆机构链杆的摩擦力 F_i 作用下不断翻滚卷成松散的草核。

当松散的草核逐渐填满成捆室时,此时进入草捆的长大阶段。由对数螺线的几何构造可知,当曲线方程的参数确定时,曲线的切线方向与极径的垂线所夹的角度是一定值。根据这一性质,在物料喂入及预压过程中,由于压力角 α 为定值,工作表面

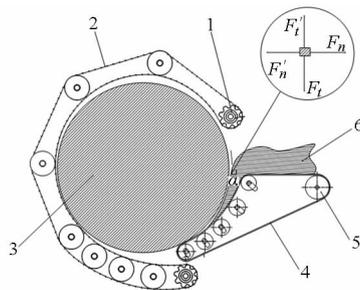


图 1 装置结构示意图

Fig. 1 Structure of device

1. 主动链轮 2. 链杆 3. 草捆 4. 短皮带 5. 驱动轮 6. 待喂入伺草

上某点与坐标原点 O 的距离 ρ 不断渐变,这样使得短皮带对草捆的压力增幅比较缓慢而且稳定,物料在 F_n 和 F'_n 的作用下体积逐步受到压缩。物料在静摩擦力 F_i 作用下随草捆一起转动进入二次压缩段压缩。随着链杆的不断运行,物料向上运动进入圆捆保持段。物料不断喂入、压实,最后形成圆捆。当传感器检测草捆达到预定规格后,成形后的圆捆被设置在成捆室外部的缠网机构包裹丝网^[11]。最终,对数螺线式二次压捆机构向上开启;此时成捆室由闭合状态转为开放状态,圆草捆离开成捆室,一个作业循环完成。

当压力角 $\alpha = 0^\circ$ 时,曲率半径为 $r = \frac{\rho}{\sin 90^\circ} = \rho$

为定值,即内腔为圆柱形的传统成捆室,易造成喂入困难。因此增大压力角 α 值可以提高喂入效率,但是当 α 增大接近于物料与工作表面的静摩擦角 φ 时,摩擦力 F'_i 为动摩擦,出现物料在工作表面上打滑的情况。即要求

$$\alpha < \min \{ \varphi_i \} \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

式中 φ_i ——不同物料的摩擦角

1.2 主要的技术参数

由于成捆装置是圆捆机最重要的工作部件,因此需要对其作业对象的参数进行预先设定。根据圆草捆在运输过程中依赖的车辆和公路宽度对草捆的外形尺寸约束,设定装置的规格参数如表 1 所示。

表 1 装置的主要规格参数

Tab. 1 Main specification parameters of device

参数	数值
配套丝网幅宽/mm	1 200 或 1 000
草捆规格/mm	$\phi 850 \times 850$
草捆质量/kg	240 (含水率 70%)

2 主要部件设计

装置由喂料预压机构、对数螺线式二次压捆机构及相应的辅助机构组成。

2.1 喂料预压机构

喂料预压机构由动力设备驱动的驱动轮、若干导轮和围绕各轮设置的短皮带组成。驱动轮和各导轮分别平行设置在机架上。其中,各导轮呈对数螺线轨迹排列,直至排列到对数螺线式二次压捆机构的前端。短皮带通过各导轮支撑形成一段对数螺线形工作表面^[12]。

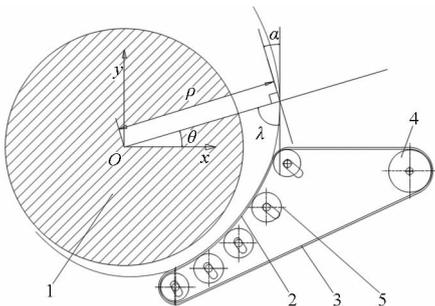


图2 喂料预压机构的结构及参数示意图

Fig. 2 Structure and parameters of feeding preload mechanism

1. 草捆 2. 工作表面 3. 短皮带 4. 驱动轮 5. 导轮

如图2所示,喂料预压机构中的短皮带沿各导轮到对数螺线式二次压捆机构输入端的方向形成的对数螺线形工作表面满足以下特征:假设 xOy 是以对数螺线式二次压捆机构内预形成的圆草捆中心为坐标原点 O 的坐标系,则对数螺线形工作表面和其延长线在 xOy 面内形成的无形变对数螺线工作表面的极坐标形式^[13]为

$$\rho = ke^{\theta \cot \lambda} \quad (2)$$

式中, ρ 为极半径,表示对数螺线形工作表面和其延长线上的任意点与圆草捆在 xOy 面中心的距离; k 为表征该对数螺线曲率特性的参数,其值为最下边的导轮与草捆中心的距离,当草捆直径确定后,其参数以不与对数螺线式二次压捆机构发生干涉为原则,其取值范围为 $425 \text{ mm} \leq k \leq 450 \text{ mm}$; θ 是极半径 ρ 与坐标轴 Ox 的夹角。 λ 为该对数螺线上的任意切线与极半径 ρ 的夹角。

式(2)中,令 $m = \cot \lambda$,则

$$\lambda = \arctan \frac{1}{m} \quad (3)$$

曲线上任意点的曲率半径为 $r_i = \frac{\rho_i}{\sin \lambda}$ ($i = 1, 2, 3, \dots$),构造其直角坐标系下的参数方程可得

$$x = ke^{m\theta} \cos \theta \quad (4)$$

$$y = ke^{m\theta} \sin \theta \quad (5)$$

根据上述参数方程,并代入一定的 θ 角,对式(4)、(5)用泰勒展开式、复数或以正方形各自边长为半径的圆弧近似地连接逼近对数螺线^[14],即得到构成对数螺线形工作表面的主导轮和各从导轮

的导轮轴的 (x, y) 坐标位置。

参照文献[15,16]对不同物料在不同表面的摩擦因数的研究结论,采用不同含水量苜蓿和玉米物料测定物料与胶带的摩擦角,可得: $\alpha < 20^\circ$ 。对于牧草、麦秸等其他农业纤维物料,为了能够根据不同物料调节压力角 α 的值,各导轮的轴孔设计为条形孔,通过改变 m 值即可得到所需要的导轮轴的 (x, y) 坐标位置,进而对喂料预压机构的压力角进行调整。

2.2 对数螺线式二次压捆机构

对数螺线式二次压捆机构主要由两舱壁、若干外导轮、链式压捆单元、从动链轮和主动链轮组成(如图3所示)。两舱壁对称设置,每一舱壁分别由一扇形体和一对数螺线形体合成于一体,舱壁的外缘弧度为一扇形线 and 一对数螺线形成的曲线,其中对数螺线形段为物料压缩段,扇形体段为圆捆保持段。

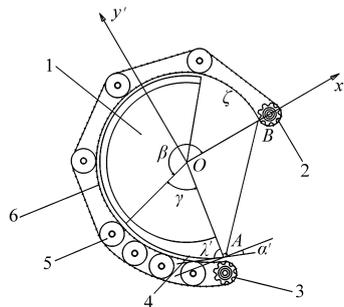


图3 对数螺线式二次压捆机构

Fig. 3 Secondary baling institutions with logarithmic spiral

1. 舱壁 2. 主动链轮 3. 从动链轮 4. 导轨 5. 外导轮 6. 链杆压捆单元

如图3所示,对数螺线式二次压捆机构中,导轨与舱壁的外缘弧度一致,为一扇形线 and 一对数螺线形成的曲线,其中,对数螺线形轨迹具有以下特征:假设 $x'O'y'$ 是以圆捆中心为坐标原点 O 的坐标系,限于各外导轮与相应导轨之间的链杆形成的曲线 ζ 在 $x'O'y'$ 面投影形成的曲线方程可以由分段函数表示为

$$\rho' = \begin{cases} 425 & (0 \leq \theta' \leq \beta) \\ 425e^{(\theta' - \beta) \cot \lambda'} & (\beta < \theta' \leq \beta + \gamma) \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\lambda' = 90^\circ - \alpha'$$

式中 ρ' ——对数螺线式二次压捆机构的极半径,

表示导轨的对数螺线形段上的任意点与圆捆在 $x'O'y'$ 面中心的距离

λ' ——该对数螺线上任意切线与极半径 ρ' 的夹角

α' ——各压捆单元组成的对数螺线形工作面与物料的摩擦角

为了保证机构能够正常工作,式(6)须满足以

下约束：

(1) 为了保证圆捆保持段的链杆既能夹持圆草捆又能保证卸捆时草捆能顺利卸出,要求

$$180^\circ < \beta \leq 195^\circ \quad (7)$$

(2) 参考图 1, 当 $\theta' = \beta + \gamma$ 时, 成捆室须满足与喂料预压机构既能形成一个密闭的空腔又不能干涉, 即

$$\beta + \gamma \approx 260^\circ \quad (8)$$

结合约束(1)要求, 取 $\beta = 190^\circ$, 可得 $\gamma = 70^\circ$ 。

(3) 为了保证草捆能够顺利离开成捆室, 须满足 AB 间的距离大于 850 mm。依据余弦定理

$$l_{AB} = \sqrt{l_{OA}^2 + l_{OB}^2 - 2l_{OA}l_{OB}\cos(360^\circ - \beta - \gamma)} > 850 \text{ mm} \quad (9)$$

其中 $l_{OA} = 425e^{\gamma \cot \lambda'} \quad (10)$

$$l_{OB} = 425 \text{ mm} \quad (11)$$

联立式(9)~(11)并化简后可得

$$\sqrt{(e^{\gamma \cot \lambda'})^2 + 1 - 2\cos(\beta + \gamma)e^{\gamma \cot \lambda'}} > 2 \quad (12)$$

将 $\beta = 190^\circ, \gamma = 70^\circ$ 代入不等式(12)并求解得到不等式的有效解为: $\cot \lambda' \geq 0.28$ 。由于 $\lambda' = 90^\circ - \alpha'$, 可得

$$\alpha' \geq 15.65^\circ \quad (13)$$

(4) 文献[17] 给出不同湿度、切碎长度的饲草与光滑金属面的最小摩擦因数为 0.3。为了保证湿重的草捆不发生打滑现象, α' 须小于物料与压捆链杆的自锁摩擦角 ψ , 即

$$\alpha' < \tan \psi = 0.3 \quad (14)$$

联立不等式(13)、(14)可得

$$15.65^\circ \leq \alpha' < 16.69^\circ \quad (15)$$

优先保证摩擦力的前提下, 取对数螺旋式二次压捆机构的压力角 α' 为 15.65° 。

3 样机试验

为了避免装置作业时发生物料拥堵, 由装置工作原理以及摩擦力计算公式可知, 是否发生拥堵与喂料预压机构的压力角有关, 同时还受物料含水率的影响。而装置的防拥堵特性可以用每次打捆所消耗的时间来表示。因此, 对不同含水率玉米秸秆在不同压力角 α 值下所消耗的时间进行试验。试验方案及各因素的水平如表 2 所示。

表 2 试验因素水平表

Tab.2 Experimental factors and levels

因素	水平			
	1	2	3	4
预压喂料机构的压力角 $A/(\circ)$	5	10	15	20
含水率 $B/\%$	50	60	70	

依据青贮饲料工艺要求, 选用平均切碎长度 25~50 mm, 平均含水率为 50%~70% (湿基) 的玉米秸秆进行压捆试验。样机及试验现场如图 4 所示。试验过程为, 首先测定不同含水率玉米秸秆在成捆室中形成符合青贮饲料要求的圆捆时, 草捆在直径方向上向对数螺旋式二次压捆机构产生的推力, 试验结果表明, 当力传感器测定值为 3 900 N 时草捆即可满足要求。进而, 以力传感器达到 3 900 N 为每次压捆作业完成的触发条件进行试验。



图 4 样机及试验现场图

Fig.4 Prototype and test figure

试验结果如图 5 所示。试验结果表明, 对比传统的压力角为零的圆捆机, 采用具有一定压力角的对数螺旋式圆草捆成形装置可以解决拥堵问题并减少打捆时间。压力角对 3 种不同含水率玉米秸秆的作业时间影响显著, 完成一次作业所需要的时间在不同压力角下随玉米秸秆含水率的增大而减小。对比不同含水率物料的变化趋势可以看出: 装置对高含水率的玉米秸秆具有很好的适应性, 不同含水率的物料的作业耗时随压力角的增大而减小。这是由于含水率高的物料摩擦因数较大, 在喂入环节不易打滑, 喂入效果也较好。

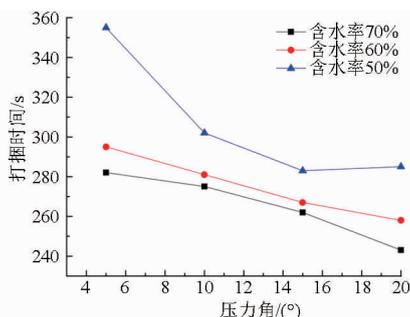


图 5 打捆作业所需时间

Fig.5 Working efficiency of baling

4 结论

(1) 喂料预压机构由于设置了对数螺旋形工作表面, 根据物料几何特征及含水率的不同, 压力角 α 的取值范围为 $\alpha < 20^\circ$ 。这种渐进式的喂料压捆过程, 解决了圆形内腔的成捆室在喂入粗大、湿润、坚

硬物料时发生的堵塞问题,而且有效减少了机具的振动。

(2) 对数螺线式二次压捆机构由 70° 的对数螺线形的物料压缩段和 190° 的扇形的圆捆保持段组成。为了保证草捆能够顺利离开成捆室且在成捆室内不发生打滑现象,取对数螺线式二次压捆机构的

压力角 α' 为 15.65° 。

(3) 对数螺线式圆草捆成捆装置对高含水率的玉米秸秆具有很好的适应性。针对牧草、麦秸等其他农业纤维物料,为获得较好的喂入、压捆效果,需调整喂料预压机构的压力角。

参 考 文 献

- 1 Cavalchini A G. CIGR handbook of agricultural engineering [M]. St Joseph, MI: ASAE, 1999.
- 2 Srivastave Ajit K, Carroll E Goering, et al. Hay and forage harvesting[M]. St Joseph, MI: ASAE, 2006.
- 3 Coates W, Lorenzen B. Harvesting guayule shrub by baling [J]. Applied Engineering in Agriculture, 1990, 6(4): 390 - 395.
- 4 Freeland R S, Bledsoe B L. Energy required to form large round hay bales effect of operational procedure and baler chamber type [J]. Transactions of the ASAE, 1988, 31(1): 63 - 67.
- 5 Wu Zhengping, William L Kjelgaard, Sverker P E Persson. Machine width for time and fuel efficiency[J]. Transactions of the ASAE, 1986, 29(6): 1508 - 1513.
- 6 Anderson P M, Kjelgaard W L. Harvesting practices and round bale losses[J]. Transactions of the ASAE, 1981, 24(4): 841 - 842.
- 7 Shinnors K J, Huenink B M, Muck R E. Storage characteristics of large round alfalfa bales: dry hay[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(2): 409 - 418.
- 8 Taylor R K, Blasi D A, Shroyer J P. Storage losses in net-wrapped large round bales of alfalfa[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1994, 10(3): 317 - 320.
- 9 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)
- 10 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)
- 11 高东明, 王德成, 王光辉, 等. 圆草捆自动缠网装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(8): 99 - 104.
Gao Dongming, Wang Decheng, Wang Guanghui, et al. Self-wrapping net mechanism for round baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 99 - 104. (in Chinese)
- 12 中国农业大学. 一种对数螺线式圆捆成形装置及方法: 中国, ZL201110000408. 5 [P]. 2012 - 07 - 25.
- 13 Rocha R, Dias R. Finite strain analysis using ammonoids: an interactive approach[J]. Journal of Structural Geology, 2005, 27(3): 475 - 479.
- 14 Christoph Baumgarten, Gerald Farin. Approximation of logarithmic spirals[J]. Computer Aided Geometric Design, 1997, 14(6): 515 - 532.
- 15 ASAE D251. 2—2008, Friction coefficients of chopped forages[S]. 2008.
- 16 Shinnors K J, Koegel R G, Lehman L L. Friction coefficient of alfalfa [J]. Transactions of the ASAE, 1991, 34(1): 33 - 37.
- 17 Richter D. Friction coefficients of some agricultural materials [J]. Agricultural Engineering, 1954, 35(6): 411 - 413.