

大豆秸秆纤维制取机配套原料捞取装置设计与参数优化

李 卓,陈海涛,顿国强,韩 霞,苗乃彪,吴广伟

(东北农业大学 工程学院,黑龙江 哈尔滨 150030)

摘 要:为了提高大豆秸秆资源利用率,利用 CATIA 软件设计了秸秆纤维制取机配套原料捞取装置,采用二次通用旋转组合试验方法,以捞取量为响应函数,以捞取装置的耙头角度和耙齿角度为影响因素,对大豆秸秆原料捞取装置参数进行了优化试验研究。结果表明:在转速为 $55 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的条件下,当耙齿角度 21.54° 、耙头角度 88.58° 时,每次最大捞取量为 0.39 kg ,作业效果最佳。

关键词:大豆秸秆;捞取装置;秸秆纤维制取机;参数优化

中图分类号:TH237.1

文献标识码:A

DOI:10.11861/j.issn.1000-9841.2014.05.0748

Design and Parameters Optimization of Raw Material Dredging Device for Soybean Straw Fiber Extrusion Machine

LI Zhuo, CHEN Hai-tao, DUN Guo-qiang, HAN Xia, MIAO Nai-biao, WU Guang-wei

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

Abstract: In order to improve soybean straw resource utilization, the raw material dredging device for soybean straw was designed with CATIA software. The quadratic general rotary unitized design was carried out with rake teeth angle and rake head angle as influence factors, and dredging amount as experimental index. The results showed that the spindle speed $55 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, rake teeth angle of 21.54° and rake head angle of 88.58° were the best combination factors, which led to the most dredge amount of 0.39 kg in each time. It can provide the basis for the design of rake.

Key words: Soybean; Dredging device; Straw fiber extrusion machine; Parameters optimization

我国是世界上秸秆资源较为丰富的国家之一^[1]。据统计,我国年产各类秸秆约为 8.4 亿 t ,其中大豆秸秆约为 0.28 亿 t ^[2]。“十二五”伊始,国家提出了秸秆综合利用的方针,主要围绕的技术核心是秸秆还田、能源化、饲料化和工业应用等,并预计到 2015 年将秸秆利用率提高到 80% ^[3-4]。但从国内看,秸秆利用情况仍不乐观,每年还有相当一部分秸秆被废弃焚烧,焚烧后产生的粉尘以及有害气体是秋冬季节雾霾天气的主要成因^[5-6]。秸秆高值化综合利用技术已经成为当今国内外研究热点和生产实际亟待解决的难题。

东北农业大学研制的高得率 D200 型大豆秸秆纤维制取机可加工经过常温水浸泡清洗后的作物秸秆来制造植物纤维基膜原料,实现秸秆纤维的清洁制取,同时也为秸秆低成本无污染利用奠定了基础^[7-8]。大豆秸秆纤维制取机加工原料为经适度细碎化处理、含水率达饱和的大豆秸秆,其与普通粉粒状物料的物理特性差异性很大,目前市场上成型喂料设备如带式输送机、斗式提升机和螺旋输送机等均无法满足秸秆纤维制取机供料技术要

求^[9-10]。为了实现该机器系统秸秆浸泡软化、除尘后可自动、定量、稳定供料的目的,现对其配套的秸秆原料捞取装置进行了系统研究,以期优化装置结构参数,为实现大豆秸秆纤维制取机自动化生产提供装备支持。

1 秸秆纤维制取机完整工作系统介绍

研究采用 D200 型大豆秸秆纤维制取机,配套设备包括输送装置、捞取装置及浸泡清洗装置,如图 1 所示。

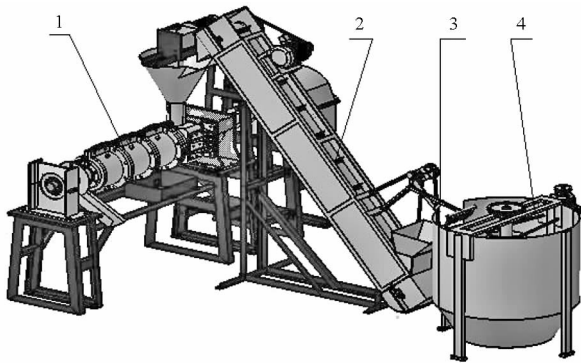
该系统要实现的功能是将浸泡 $12 \sim 24 \text{ h}$ 的大豆秸秆,均匀、连续、稳定地自动喂入到纤维制取机中,并根据纤维制取机工况适时地改变喂入量,生产率 $\geq 1 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ 。浸泡清洗装置中配有上段为螺旋式、下段为平浆式搅拌机构,使适度细碎化处理后的的大豆秸秆水平、竖直两个方向受力,实现秸秆的浸泡软化、除尘。在 $12 \sim 24 \text{ h}$ 后,启动电机,捞取装置与输送装置同时工作。使耙子在曲柄驱动下按照预定轨迹做往复运动,利用秸秆摩擦特性,将秸秆连续、稳定的喂入输送装置中,再由带耙式输送

收稿日期:2014-03-13

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划(2012BAD32B02-5)。

第一作者简介:李卓(1989-),女,硕士,主要从事农业机械装备及生物质材料研究。E-mail:zsrz89@126.com。

通讯作者:陈海涛(1963-),男,教授,博导,主要从事农业机械装备及生物质材料研究。E-mail:htchen@neau.edu.cn。



1: D200 型大豆秸秆纤维制取机; 2: 输送装置; 3: 捞取装置; 4: 浸泡清洗装置。

1: D200 soybean straw fiber extrusion machine; 2: Feeder; 3: Dredging device; 4: Immersion cleaning device.

图 1 秸秆纤维制取机完整工作系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the complete straw fiber extrusion machine

装置匀速喂入到秸秆纤维制取机中, 经过挤压膨化完成秸秆纤维原料加工。每次捞取后, 秸秆在水的浮力作用下上升到耙子的作业高度, 以便实现下一次捞取作业。工作过程中, 可根据主机实际需求, 调整电机转速, 改变捞取装置的转速, 实现喂入量的改变。

该系统的加工对象为适度细碎化处理的大豆秸秆, 生产率 $\geq 1 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$, D200 型大豆秸秆纤维制取机主轴转速为 $80 \sim 140 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 浸泡清洗装置的转速为 $1.2 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$, 输送装置的线速度为 $0.059 \sim 0.065 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 捞取装置的转速为 $47 \sim 60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

2 秸秆原料捞取装置设计

2.1 秸秆物料物理特性

大豆秸秆纤维制取机加工的原料为细碎化处理后的、含水率饱和(通常在 80% 以上)的大豆秸秆, 其物理特性与普通物料差异性很大, 为了设计的需要, 测定揉切机粉碎后、浸泡 24 h 大豆秸秆物理特性, 其平均长度为 76.96 mm, 平均直径为 2.21 mm, 滑动摩擦角为 $35.6^\circ \sim 39.93^\circ$, 堆积密度为 $74 \sim 102 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

2.2 捞取装置结构设计

捞取装置是一个曲柄摇杆机构, 如图 2 所示。当曲柄转动时, 摇杆和耙子分别做摆动和往复运动。图中 D 为耙子端点, $D_1 \sim D_6$ 为 D 点理想运动轨迹上的 6 个特定点, D_1 为入水点, D_2 为最深点, D_3 为出水点, D_4 为过浸泡清洗装置外壁点, D_5 为落料终点, D_6 为最高点。其中, $D_1 D_3$ 间的距离为有效捞取长度, 设定为 220 mm, D_2 到水面的高度为 142 mm, 保证捞取效果。

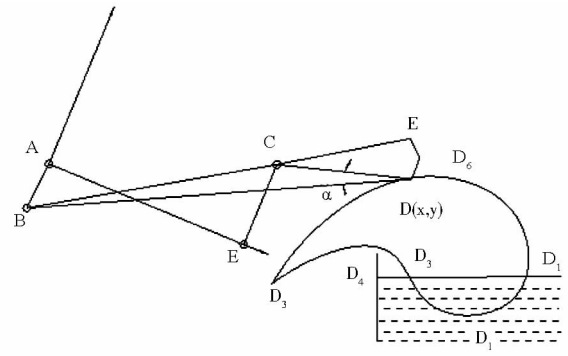


图 2 捞取装置工作过程示意图

Fig. 2 Sketch of dredging device working process

应用解析法求取曲柄摇杆机构的杆件尺寸, 以 AE 为坐标轴, D 点坐标为 (x, y) , 分析 D 点的位置方程如式(1)所示。

$$U^2 + V^2 = W^2 \quad (1)$$

式中,

$$U = l_{CD}[(x - l_{AE})\cos\alpha - y\sin\alpha] \times$$

$$(x^2 + y^2 + l_{BD}^2 - l_{AD}^2) -$$

$$l_{BD}x[(x - l_{AE})^2 + y^2 + l_{CD}^2 - l_{CE}^2]$$

$$V = l_{CD}[(x - l_{AE})\sin\alpha - y\cos\alpha] \times$$

$$(x^2 + y^2 + l_{BD}^2 - l_{AD}^2) +$$

$$l_{BD}y[(x - l_{AE})^2 + y^2 - l_{CD}^2 - l_{CE}^2]$$

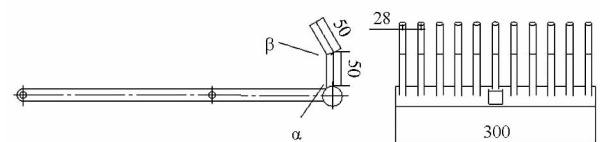
$$W = 2l_{BD}l_{CD}\sin\alpha[x(x - l_{AE}) + y^2] -$$

$$2l_{BD}l_{CD}l_{AE}y\cos\alpha$$

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{l_{BD}^2 + l_{CD}^2 - l_{AD}^2}{2l_{BD}l_{CD}}\right)$$

求得各杆件尺寸参数值分别为: $l_{AE} = 300 \text{ mm}$, $l_{AB} = 80 \text{ mm}$, $l_{BC} = 285 \text{ mm}$, $l_{CE} = 100 \text{ mm}$ 。

耙子每次的理论捞取量为 0.33 kg , 秸秆堆积密度为 $74 \sim 102 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 结合输送装置喂料技术要求, 设计耙子机构, 如图 3 所示。耙杆与耙齿分别采用不锈钢和直径 10 mm 防水锈蚀处理钢筋加工而成。



α : 耙头角度; β : 耙头角度。

α : Rake head angle; β : Rake teeth angle.

图 3 耙子结构示意图

Fig. 3 Sketch of rake

根据浸泡预处理后秸秆物料的摩擦特性, 在捞取阶段, 耙子与水平面间的夹角必须满足式(2)所示条件。

$$a + b - c - 180^\circ < \varphi \quad (2)$$

式中, c 为耙杆与水平方向的夹角, $^\circ$; φ 为秸秆

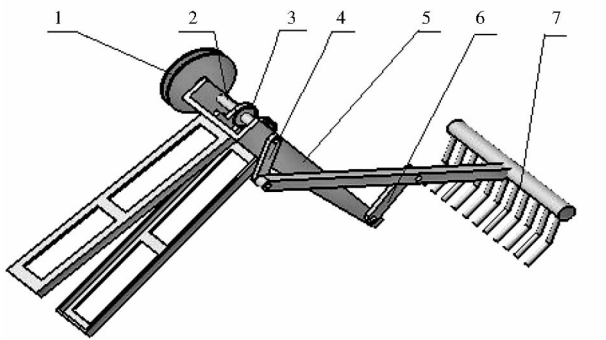
的滑动摩擦角,°。

当耙子运动轨迹一定时,耙杆与水平方向的夹角变化规律恒定。

为了使浸泡后的物料在落料阶段能够从耙子上滑落,不产生回带现象,则耙子与水平面间的夹角需满足式(3)所示条件。

$$a + b - c - 180^\circ \geq \varphi \tag{3}$$

捞取装置结构简图如图(4)所示,利用 CATIA 对其进行仿真分析。为避免捞取秸秆过程中与输送装置喂料斗干涉,将捞取装置固定在输送装置正上方 400 mm 处。



1. 带轮;2. 轴;3. 轴承座;4. 曲柄;5. 机架;6. 摇杆;7. 耙子。
1. Pulley;2. Axle;3. Axle-bearing;4. Crank;5. Frame;6. Rock-
er;7. Rake.

图 4 捞取装置结构简图

Fig.4 Structural sketch of dredging device

3 参数优化试验

3.1 试验设计

将取自东北农业大学香坊试验农场 2012 年收获的绥豆 26 大豆秸秆,用去掉动刀片和锤片的揉切机对大豆秸秆加工预处理,并将加工预处理后秸秆浸泡 24 h 作为试验试样。

试验仪器及设备为 YB502 型电子天平(上海海康电子仪器厂),秒表,自制捞取试验装置(图 5)。

试验采用二次通用旋转组合试验方法,依据理论



图 5 自制捞取机构试验装置

Fig.5 Self-made test dredging device

分析选取耙头角度 a 和耙齿角度 b 影响因素,以捞取量为目标函数。试验因素与水平编码见表 1。

表 1 试验因素与水平编码

Table 1 Experimental factors and levels

编码 Code	因素 Factor	
	耙齿角度 Rake teeth angle/°	耙头角度 Rake head angle/°
1.414	50.00	110.00
1	44.18	104.18
0	30.00	90.00
-1	15.82	75.82
-1.414	10.00	70.00

试验中,取 5 kg 试验试样置于容器中,将耙子安装在容器一侧,驱动耙子曲柄以 $55 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速转动,待耙子运动平稳(连续运动 10 s)后,用电子天平测定 1 次捞取质量,每组试验重复 3 次,取平均值。

3.2 结果与分析

试验中的耙齿角度,耙头角度及捞取量值,见表 2。

表 2 试验方案和试验结果

Table 2 Experimental scheme and results

序号 Serial number	耙齿角度 Rake teeth angle/°	耙头角度 Rake head angle/°	捞取量 Dredge amount/kg
1	15.82	75.82	0.345
2	44.18	75.82	0.136
3	15.82	104.18	0.288
4	44.18	104.18	0.152
5	10	90	0.315
6	50	90	0.110
7	30	70	0.192
8	30	110	0.194
9	30	90	0.354
10	30	90	0.342
11	30	90	0.358
12	30	90	0.376
13	30	90	0.364
14	30	90	0.366
15	30	90	0.346
16	30	90	0.395

应用 Design-expert 8.0 对试验结果进行分析处理,获得耙齿角度、耙头角度与目标函数捞取量的回归模型如式(4)所示。

$$Y = -2.62 + 6.56 \times 10^{-2}a - 3.38 \times 10^{-4}a^2 + 0.06b - 3.87 \times 10^{-4}b^2 + 9.05 \times 10^{-5}ab \tag{4}$$

该模型的方差分析结果见表 4,其中 $F_{\text{模型}} = 66.04$,对应 $P_{\text{模型}} < 0.0001$,模型极显著,失拟项 $F_{\text{失拟}} = 2.44$,对应的 $P_{\text{失拟}} = 0.1492 > 0.1$,具有良好的拟合关系^[11]。

表 3 回归模型方差分析
Table 3 Variances analysis of regression model

来源 Source	平方和 Square	自由度 df	均方和 Mean square	F 值 F value	临界值 Critical
回归 Regression	0.14	5	0.03	66.04	5.64
剩余 Residual	4.17×10^{-3}	10	4.17×10^{-4}		
拟 Fitting	2.13×10^{-3}	3	7.11×10^{-4}	2.44	3.07
误差 Error	2.04×10^{-3}	7	2.91×10^{-4}		
总和 Sum	0.14	15			

如图 6 所示,当耙头角度较小时,随着耙齿角度的增大,捞取量逐渐增大,这是由于耙子进入到秸秆中的深度逐渐增加,所捞取的秸秆量增加;而当耙头角度较大时,耙齿角度的增大将使耙子尖端与水平方向的夹角变大,捞取量减少。耙头角度对捞取量的影响也是先增大后减小,主要原因是随着耙头角度的增加,耙子尖端与水平方向的夹角 α 先减小后增大,当耙头角度在 90° 左右时, α 值最小,捞取效果也最好。

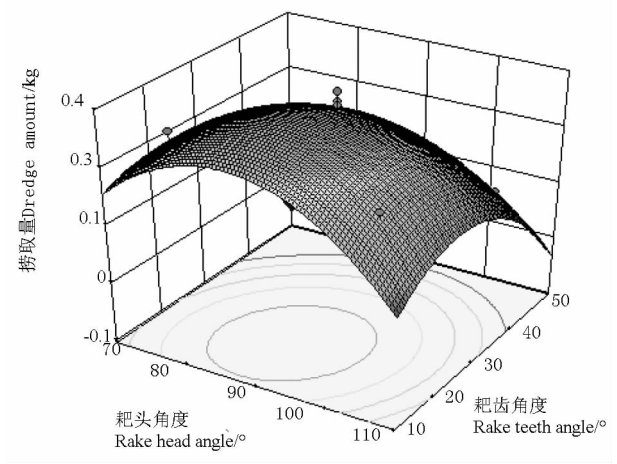


图 6 耙齿角度和耙头角度对耙取量的影响
Fig.6 Influence of rake teeth and rake head angel on dredge amount

3.3 参数优化与验证

以捞取量最大为目标,得到最优组合为耙齿角度 21.54° ,耙头角度 88.58° ,此时捞取量的理论值为 0.39 kg 。

根据确定的最优方案,对该方案进行了验证试验,5 次捞取量的平均值为 0.388 kg ,与优化结果基本一致。

4 结 论

对于经揉切粉碎平均长度为 76.96 mm 、含水量饱和的大豆秸秆,所设计的曲柄摇杆式捞取装置式切实可行的。

在曲柄转速为 $55\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下,当捞取装置的参

数组合为曲柄长度为 80 mm 、连杆长度 285 mm 、摇杆长度为 100 mm 、耙齿角度 21.54° 、耙头角度 88.58° 时,每次捞取量为 0.39 kg ,满足系统技术要求。

参考文献

[1] 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 L J,Yan Q J, Liu X Y,et al. Straw resources and their utilization in China[J]. Transactions of the CSAE,2002,18(3):87-91.)

[2] 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 X,Chen H T,Huang Z H,et al. Sliding friction characteristic of different moisture content of soybean stalk with different materials[J]. Soybean Science,2012,31(5):838-841.)

[3] 全国农作物秸秆资源调查与评价报告[J]. 农业工程技术·新能源产业,2011(2):2-5. (National crop straw resources survey and evaluation report [J]. Agricultural Engineering Technology (New Energy Industry),2011(2):2-5.)

[4] 王亚静,毕于运,高春雨,等. 中国秸秆资源可收集利用量及其适宜性评价[J]. 中国农业科学,2010,43(9):1852-1859. (Wang Y J,Bi Y Y,Gao C Y. Collectable amounts and suitability evaluation of straw resource in China[J]. Scientia Agricultura Sinica,2010,43(9):1852-1859.)

[5] 李飞跃,汪建飞. 中国粮食作物秸秆焚烧碳排放量及转化生物炭固碳量的估算[J]. 农业工程学报,2013(14):1-7. (Li F Y, Wang J F. Estimation of carbon emission from burning and carbon sequestration from biochar producing using crop straw in China [J]. Transactions of the CSAE,2013(14):1-7.)

[6] Cao G. Investigation on emission factors of particulate matter and gaseous pollutants from crop residue burning[J]. Journal of Environmental Sciences,2008(1):50-55.

[7] 韩永俊,陈海涛,刘丽雪,等. 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 Y J, Chen H T,Liu L X,et al. Optimization of technical parameters for making mulch from rice straw fiber[J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(3):242-247.)

[8] 陈海涛,李皓. 高得率秸秆纤维制取机的设计[J]. 黑龙江造纸,2012,40(3):13-18. (Chen H T,Li H. The design of straw fibers extruder devices [J]. Heilongjiang Pulp & Paper,2012,40(3):13-18.)

[9] 应美旻,王庚煌. 机械化运输工艺设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,1998. (Ying M H,Wang G H. Mechanized transport process design manual [M]. Beijing: Chemical Industry Press,1998.)

[10] 顾玲,管荣根,张瑞宏,等. 链板式连续运输机械的现代设计方法研究[J]. 工程设计学报,2003,10(3):149-153. (Gu L,Guan R G,Zhang R H,et al. Research of modern design method on chain slat type continuous conveying machine[J]. Journal of Engineering Design,2003,10(3):149-153.)

[11] 刘振学,黄仁和,田爱民. 实验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社,2005:100-103. (Liu Z X,Huang R H,Tian A M. The design of experiments and data processing [M]. Beijing: Chemical Industry Press,2005:100-103.)