

棉花秸秆无筛粉碎机的设计与试验

曹玮钊¹, 沈卫强², 郭兆峰², 马艳², 智恒¹, 班婷^{1,2}

(1.新疆农业大学机电工程学院,新疆乌鲁木齐830052;2.新疆农业科学院农业机械化研究所,新疆乌鲁木齐830091)

摘要:针对棉花秸秆因木质化程度较高、韧性强,还掺有棉絮,在有筛粉碎机粉碎过程中排料困难、筛片易堵塞等问题,设计了一种棉花秸秆无筛粉碎机,通过调整出料口面积来实现粉碎室内气体流量的改变,获得不同粉碎粒度的棉花秸秆成品;对粒度分级装置、粉碎刀辊等主要部件的结构进行了确定;阐述了粉碎过程中棉花秸秆的受力过程,确定了L改进型锤片的关键参数,对机具的L改进型锤片和抛送叶片进行了结构和排列设计。Fluent仿真分析结果表明:L改进型锤片相比直刀型锤片更有利于提高棉花秸秆在粉碎室内的流动性并在粉碎室内形成更大的负压。以L改进型锤片数量、粉碎刀辊转速、出料口面积为试验因素,以棉花秸秆粉碎粒径合格率为试验指标,进行三因素三水平正交试验,确定影响棉花秸秆粉碎粒径合格率显著性的因素由大到小分别为:粉碎刀辊转速、出料口面积和L改进型锤片数量。确定较优参数组合为L改进型锤片数量140把,粉碎刀辊转速 $2\,660\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,出料口面积 $136\,500\text{ mm}^2$ 。采用较优参数组合进行样机田间试验,测得棉花秸秆粉碎粒径合格率为93.7%,能够满足棉花秸秆粉碎机实际生产需要。

关键词:棉花秸秆;无筛粉碎机;L改进型锤片;设计;试验

中图分类号:S562;S226.3 **文献标志码:**A

Design and experiment of no-sieve cotton straw crusher

CAO Weizhao¹, SHEN Weiqiang², GUO Zhaofeng², MA Yan², ZHI Heng¹, BAN Ting^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;

2. Institute of Agricultural Mechanization, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi, Xinjiang 830091, China)

Abstract: The current crushing process of the sieve crusher had difficulties in discharging and easy to block problems due to the high degree of cotton straw lignification, strong toughness, and mixing with cotton wool. In this study, a new type of no-sieve cotton straw crusher was designed. By adjusting the area of the discharge outlet, the change of the gas flow in the crushing chamber was achieved to obtain different crushing particle size of the finished product of the cotton straw. The structure of particle size classification device, crushing knife roller and other major components were determined. The force process of cotton straw in the crushing process was described, and the key parameters of L improved hammer blade were determined. The structure and arrangement design of the L improved hammer blade and throwing blade was carried out. The results of Fluent simulation analysis showed that the L improved hammer blades were more conducive to improving the mobility of cotton straw in the crushing chamber and forming a larger negative pressure inside the crushing chamber than the straight blade hammer blades. Taking the number of L improved hammer blades, crushing knife roller speed, and outlet area as the test factors, and the qualified rate of cotton straw crushing particle size as the test indexes, a three-factor three-level orthogonal test was conducted, the significance of the impact on the qualified rate of cotton straw crushing particle size from the largest to the smallest were the crushing knife roller speed, outlet area, the number of L improved hammers. The more optimal parameter combination were determined to be 140 L improved hammers, $2\,660\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ the speed of crushing

收稿日期:2023-11-07

修回日期:2023-12-22

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金(2020D01B37)

作者简介:曹玮钊(1998-),男,山东菏泽人,硕士研究生,研究方向为农业机械装备。E-mail: 1970260398@qq.com

通信作者:班婷(1986-),女,新疆新疆人,高级工程师,主要从事农业机械装备研究。E-mail: 39448221@qq.com

spindle, and 136 500 mm² the area of outlet. Using the optimal parameter combination for field test, the qualified rate of cotton straw crushing particle size was 93.7%, which met the actual production needs of cotton straw crusher.

Keywords: cotton straw; no-sieve crush; L improved hammer blade; design; experiment

近些年来,新疆棉花种植面积、总产量和单产一直居于世界首位^[1-3]。棉花秸秆是棉花生产中的副产物,作为一种可再生能源,在肥料、饲料和工业原料等应用方面具有巨大潜力^[4]。目前新疆区域内大量的棉花秸秆主要处理方式是粉碎还田,然而这种方式处理的棉花秸秆存在常年不易腐烂和土传病害等问题,严重影响下茬棉花播种效果;焚烧棉花秸秆造成严重的环境污染,因此有效地将棉花秸秆进行粉碎开发利用,对促进新疆地区经济发展具有重要意义^[5-6]。

秸秆粉碎机在我国应用广泛,种类也非常多。主要分为有筛粉碎机和无筛粉碎机,对有筛秸秆粉碎机研究较多,例如付敏等^[7]为解决筛网堵塞、过粉碎等问题设计了一种振幅方向平行于转子回转轴线的振动筛;田海清等^[8]设计了一种分段圆弧筛片代替环形平筛,使锤片和筛片间隙不断发生变化,破坏环流层,改善锤片式粉碎机性能;王迪等^[9]运用 Fluent 软件对设计的 3 种不同类型新型筛片进行数值分析并进行验证试验,试验结果表明新型筛片的使用破坏了环流层,改善了粉碎机性能。但有筛粉碎机在粉碎过程中存在筛孔堵塞、筛片磨碎变形严重等问题不能得到根本解决,主要是因为粉碎室内饲料层重量较大的物料由于离心力较大的原因分布在外层,紧贴着筛面运动,导致粉碎粒度达到要求的物料无法及时排出机外,被迫继续做环形运动,从而导致被粉碎的物料不能及时排出,发生重复粉碎和过度粉碎所消耗的功率约占总粉碎功率的 80%^[10-11]。无筛粉碎技术取消了筛片,利用风量来控制物料的粉碎粒度,使达到粉碎要求的物料能够及时排出机外,极大地提高了粉碎效率,降低了能耗。

本文针对有筛粉碎机在粉碎棉花秸秆时存在筛孔堵塞等问题,设计了一款新的棉花秸秆粉碎机具,采用无筛粉碎,利用调整出料口面积的方式来实现棉花秸秆粉碎粒径的改变。基于此设计思路,对棉花秸秆无筛粉碎机的关键零部件进行理论分析,确定机具主要结构参数,设计三因素三水平正交试验,选取较优组合,并进行样机试验,以期棉花秸秆粉碎的研究和发展提供参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构与技术改进

棉花秸秆无筛粉碎机整机,主要由喂料输送装置、粉碎装置、传动系统等部件组成,结构如图 1a 所示。粉碎装置由粒度调节装置和粉碎刀辊(粉碎主轴、L 改进型锤片和抛送装置)组成,如图 1b 所示。该机的传动系统分为两部分,即采用链传动的喂料输送装置和采用 V 型皮带传动的棉花秸秆粉碎装置。链传动的传动比准确,传动效率高;带传动能吸振缓冲,有过载保护作用。整机结构参数见表 1。

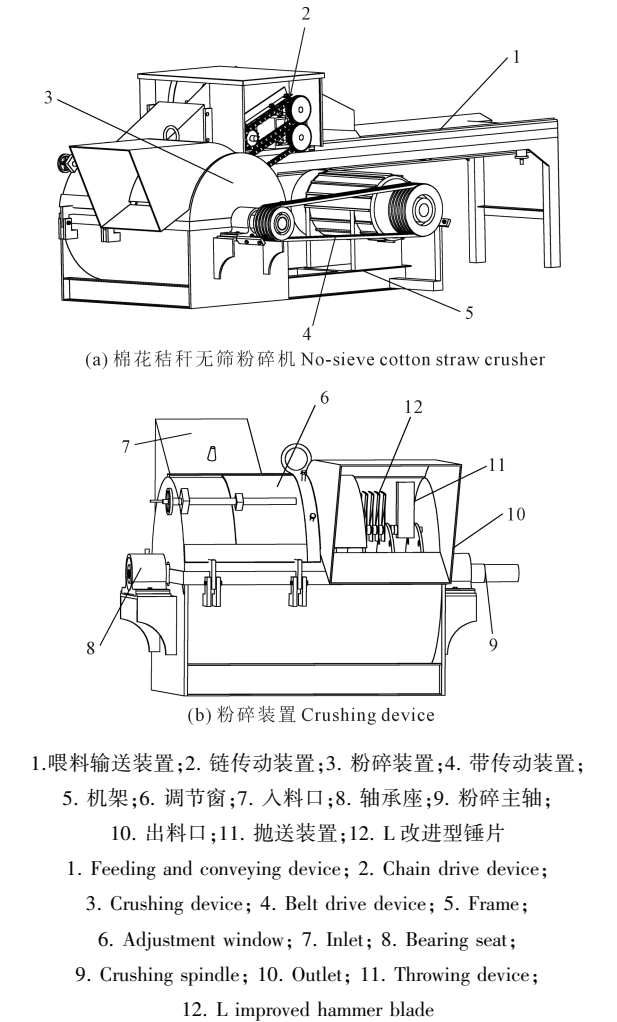


图 1 棉花秸秆无筛粉碎机结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of no-sieve cotton straw crusher

已有棉花秸秆粉碎机大多采用有筛粉碎,存在筛孔易堵塞、排料困难和棉花秸秆中残留的棉絮在粉碎过程中高温易燃等问题。同时,普遍采用的直刀型锤片存在对粉碎室底部棉花秸秆捡拾性差、粉碎效率低等问题。因此,本文设计了棉花秸秆无筛粉碎机,从以下几个方面进行改进:

(1)采用无筛粉碎,降低功耗。采用无筛粉碎技术,利用改变出料口的面积来代替有筛粉碎机筛片的作用,利用风量控制棉花秸秆的粉碎力度,一定程度上克服了有筛粉碎机排料困难、物料过度粉碎、筛片易堵塞等问题。

(2)改进锤片,提高粉碎效果。结合棉花秸秆纤维特点,设计了一种新的 L 改进型锤片,其特殊的结构使刀刃线的长度得到延长,提高捡拾棉花秸秆的能力,相邻销轴上 L 改进型锤片的折弯部对称排列,又组成 Y 型锤片,粉碎效果得到进一步提升。

1.2 工作原理

棉花秸秆无筛粉碎机作业时,粉碎电机的动力输出经过带轮二次增速,带动粉碎主轴高速旋转,棉花秸秆经喂料输送装置输送至入料口。同时 L 改进型锤片和抛送叶片的高速旋转使粉碎室内气体流速增加、气压减小,形成负压区,入料口处的秸秆在负压区的作用下进入粉碎室,棉花秸秆与 L 改进型锤片之间接触产生剧烈的冲击力并被推到齿条上,粉碎刀辊上的 L 改进型锤片与齿条形成有支撑切割,使棉花秸秆被粉碎成小段或纤维状,粉碎后的棉花秸秆在高速旋转的粉碎主轴和抛送叶片产生的气流和离心力作用下从出料口抛出。通过对出料口的调节实现不同粒径棉花秸秆的粉碎。

2 关键部件设计

2.1 粒度分级机构设计

2.1.1 可调节出料口设计 传统有筛粉碎机的物料粉碎粒度是通过控制筛片孔径的大小来实现的,

调整物料的粉碎粒度就必须更换筛片,而且在粉碎过程中,筛片的堵塞和磨损变形非常普遍,降低了粉碎效率,增加能耗。因此本机采取调整棉花秸秆无筛粉碎机出料口面积的方式来改变粉碎室的气体流量,从而实现控制粉碎粒度的目的。棉花秸秆无筛粉碎机的分级依据流体动力学悬浮理论,利用气流量将粉碎机内的粉碎物料分级风选出来,棉花秸秆单元在无筛秸秆粉碎机粉碎室内的运动分析如图 2 所示。

棉花秸秆单元在空气中的浮重 W_s 为^[12-13]:

$$W_s = \frac{\pi}{6} d_s^3 (\rho_s - \rho) g$$
 (1)

棉花秸秆单元所受的空气阻力 R 为:

$$R = C \frac{\pi}{4} d_s^2 \rho \frac{V_0^2}{2}$$
 (2)

当棉花秸秆单元达到悬浮条件时,浮重与空气阻力相等,由此可得悬浮速度的计算公式 V_0 为:

$$V_0 = \sqrt{\frac{4g}{3}} \times \sqrt{\frac{d_s(\rho_s - \rho)}{C\rho}}$$
 (3)

式中, d_s 为棉花秸秆单元的直径(m); ρ 为空气密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); ρ_s 为棉花秸秆密实密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); C 为阻力系数,与物体形状、流体运动状态有关。

由上式可知,当粉碎棉花秸秆物料较大较重时,即直径 d_s 和密实密度 ρ_s 越大,由式(3)可知棉花秸秆所需的自由悬浮速度 V_0 也越大。对于棉花秸秆而言,当自由悬浮速度一定时,能够悬浮物料的球形直径确定,大于该直径的颗粒不能悬浮,小于该直径的颗粒被 L 改进型锤片和抛送叶片所形成的气流带走。粒度分级机构如图 3 所示,通过转动调节杆来实现粉碎室上壳体调节窗的横向移动,设计出料口的最大面积为 $227\,500\text{ mm}^2$,增大出料口,出料速度加快,粉碎效率提高;减小出料口,棉花秸秆粉碎得更加充分。为了使粉碎后棉秆的粒度达到要求,本文分别选取 $91\,000$ 、 $136\,500$ 、 $182\,000\text{ mm}^2$ 出料口面积进行正交试验。

表 1 棉花秸秆无筛粉碎机的主要性能参数

Table 1 Main performance parameters of no-sieve cotton straw crusher	
参数 Parameter	数值 Value
外形尺寸(长×宽×高) Overall dimension (length×width×height)	2900 mm×1200 mm ×1300 mm
粉碎刀辊转速 Crushing spindle speed	2660 r · min ⁻¹
产量 Throughput	3 t · h ⁻¹
L 改进型锤片数量 Number of L improved hammer blades	140
工作电压 Operating voltage	380 V

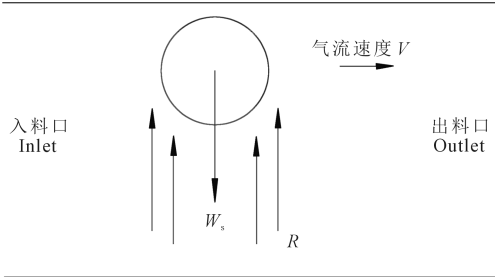


图 2 棉花秸秆单元悬浮状态及运动分析
Fig.2 Analysis of the suspension state and motion of cotton straw unit

2.1.2 齿条的设计 棉花秸秆的粉碎过程主要是靠锤片和齿条的揉搓作用来完成的,单一的锤片很难完成有支撑切割,安装齿条来辅助切割是相当重要的,其粉碎效果对纤维多和韧性大的棉花秸秆极为明显。对粉碎过程中齿条作用下棉花秸秆的状态进行分析,由动量守恒定理可知,棉花秸秆与 L 改进型锤片发生碰撞后的动能改变量为

$$\Delta E = \frac{mm_1(v-v_1)^2}{2(m+m_1)} \tag{4}$$

式中, m 为 L 改进型锤片的质量(g); m_1 为棉花秸秆的质量(g); v 为 L 改进型锤片的运动速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); v_1 为棉花秸秆的运动速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

动能改变量 ΔE 为碰撞后棉花秸秆发生破碎和变形的动量,在没有齿条作用时,棉花秸秆受到锤片打击时的相对速度约为锤片末端线速度的 80%~90%左右,取值 85%,即棉花秸秆的速度 $v_1 = 0.85v$,由此可得:

$$\Delta E_1 = \frac{mm_1(0.15v)^2}{2(m+m_1)} \tag{5}$$

当有齿条作用时,棉花秸秆和齿条接触的瞬间棉花秸秆速度 v_1 近似为 0,则有齿条作用的动能改变量 ΔE_2 为:

$$\Delta E_2 = \frac{mm_1v^2}{2(m+m_1)} \tag{6}$$

因此,联立(5)、(6)式可知:

$$\frac{\Delta E_2}{\Delta E_1} = \frac{1}{0.0225} = 44.4 \tag{7}$$

由上式可知,转速相同时,有齿条的作用下获得动能改变量是无齿条时的 44.4 倍。由图 4(见 277 页)可知,由于开尔文-亥姆霍兹不稳性的作用,齿条的增加使气体流动时在前一个齿条边缘产生剪切层振荡,其传播方向与气流场方向一致,且在传

播过程中不断放大,即为正向扰动^[14-15]。当正向扰动与后一个齿条产生碰撞时,会产生逆气流场方向传播的逆向扰动,当逆向扰动传播至前一个齿条时,又会对该位置产生的正向扰动起增益的反馈作用,如此往复循环,形成了流场自激振荡现象,从而造成速度和压力的强烈波动,并在锤片末端和两个齿条的间隙位置形成涡流颠簸区,有效地减弱了粉碎室内的环流效应,增加单位时间内棉花秸秆与锤片的碰撞次数,使锤片对秸秆的打击由无支撑状态转变为有支撑状态,提高棉花秸秆粉碎效果。

确定齿条采用 L 型普通钢板,齿条长度 L 分别为 160 mm 和 770 mm,高度 h 和宽度 b 均为 40 mm,齿条的厚度 t 为 3 mm,齿条结构示意图如图 5 所示。770 mm 的齿条分为 4 片,沿棉花秸秆无筛粉碎机粉碎室对称分布;160 mm 齿条分为 3 片,安装在入料口和出料口之间,沿入料口周向排列,间隔距离为 120 mm,如图 6(见 277 页)所示。棉花秸秆含水率低时,锤片和齿条间的间隙对秸秆粉碎效果影响较小,含水率高时,秸秆的粉碎质量会显著降低,研究表明锤齿间隙控制在 18~23 mm 之内^[16],揉碎加工质量可以得到保证,本机设计的锤齿间隙为 20 mm。

2.2 粉碎刀辊设计

粉碎刀辊是棉花秸秆无筛粉碎机的关键零部件,主要由粉碎主轴、架板、间隔套筒及 L 改进型锤片等组成,如图 7(见 277 页)所示。粉碎刀辊的回转对棉花秸秆进行打击、揉切,使其粉碎成为粒度合格的物料。

棉花秸秆无筛粉碎机粉碎刀辊的旋转方式为逆时针旋转(作业过程中,L 改进型锤片从粉碎仓下壳体切入上壳体切出),如图 8 所示。粉碎过程中,秸秆在 L 改进型锤片的捡拾和正面撞击作用下,在惯性的作用下抛向棉花秸秆无筛粉碎机上壳体,与

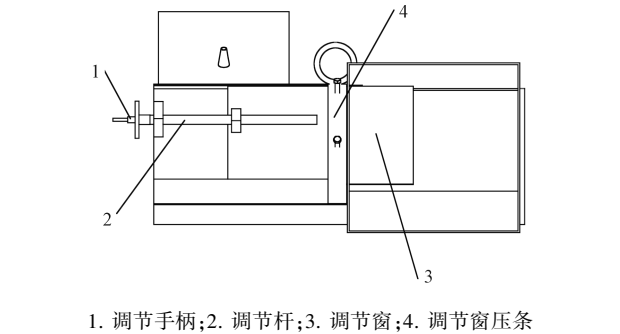
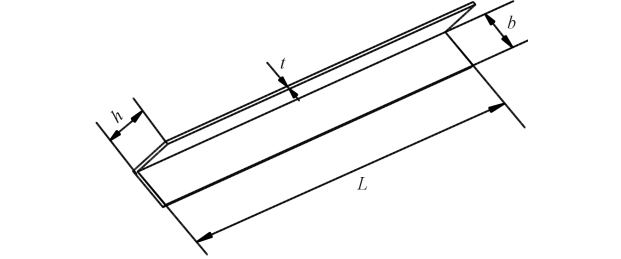


图 3 可调节出料口结构示意图



注: L : 齿条长度(mm); b : 齿条宽度(mm); h : 齿条高度(mm); t : 齿条厚度(mm)。
Note: L : Rack length (mm); b : Rack width (mm); h : Rack height (mm); t : Rack thickness (mm).

上壳体齿条发生碰撞并下落,下落过程中又遇到 L 改进型锤片的打击、揉搓,该过程反复进行,可完成多次切割,提高粉碎效果。

2.2.1 锤片设计及参数确定 粉碎机锤片的形式对粉碎室内风速影响较大,常见用于秸秆粉碎机锤片大多数为直刀型^[17-20],存在捡拾性能差、粉碎不彻底等问题。因此设计了一种 L 改进型锤片代替传统的直刀型锤片,L 改进型锤片的特殊设计能够使锤片刃线的长度得到延长,锤片质量小,提高粉碎效果。

入料口处的棉花秸秆进入粉碎室,随着粉碎刀辊的转动,当 L 改进型锤片与粉碎壳体上的齿条同时与棉花秸秆发生接触时,棉花秸秆在二者作用下首先受到塑性变形,随着 L 改进型锤片的进一步转动,棉花秸秆发生变形、剪切,直至秸秆被揉碎。由于棉花秸秆直径相对于 L 改进型锤片和齿条的回转半径较小,因此在接触棉花秸秆表皮时 L 改进型锤片和齿条可视为处于平行位置^[21-22]。

对粉碎过程中的秸秆进行受力分析,如图 9 所示,主要受到的作用力为 L 改进型锤片对棉花秸秆的支撑力 F_{nd} ,L 改进型锤片与棉花秸秆之间的摩擦

力 f_{nd} ,齿条对棉花秸秆的支撑力 F_{nv} ,齿条与棉花秸秆之间的摩擦力 f_{nv} ,离心力 F_{qe} ,秸秆本身的重力 $m_n g$ 。秸秆在与齿条接触的瞬间被切断,切断时间持续极短,此时秸秆在 L 改进型锤片上的运动状态为发生改变,处于力矩平衡阶段。

棉花秸秆切断过程受力方程为:

$$\begin{cases} F_{nd} + f_{nv} \sin(\pi - \beta) - F_{nv} - m_n g \cos\psi = 0 \\ F_{qe} + f_{nd} - f_{nv} \cos(\pi - \beta) - m_n g \sin\psi = 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} f_{nd} &= \mu_d F_{nd} \\ f_{nv} &= \mu_v F_{nv} \\ F_{qe} &= m_n \omega_n^2 R_n \end{aligned}$$

式中, β 为 L 改进型锤片折弯角($^\circ$); ψ 为秸秆自身重力与支撑力的夹角($^\circ$); μ_d 为秸秆与 L 改进型锤片之间的摩擦系数; μ_v 为秸秆与齿条之间的摩擦系数; R_n 为秸秆的回转半径(mm); ω_n 为 L 改进型锤片角速度($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$); m_n 为棉花秸秆质量(g)。

对上式求解可得:

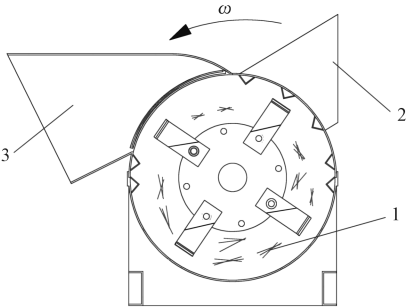
$$\begin{cases} F_{nv} = \frac{\mu_d m_n g \cos\psi + m_n \omega_n^2 R_n - m_n g \sin\psi}{\mu_d \mu_v \sin(\pi - \beta) + \mu_v \cos(\pi - \beta) - \mu_d} \\ F_{nd} = \frac{(\mu_d m_n g \cos\psi + m_n \omega_n^2 R_n - m_n g \sin\psi) [1 - \mu_v \sin(\pi - \beta)]}{\mu_d \mu_v \sin(\pi - \beta) + \mu_v \cos(\pi - \beta) - \mu_d} + m_n g \cos\psi \end{cases} \quad (9)$$

棉花秸秆的受力情况对棉花秸秆的粉碎效果具有显著影响。由式 9 可知,L 改进型锤片的角速度 ω_n 与粉碎刀辊的转速有关。当锤片和齿条的材料确定后,摩擦系数 μ_d 和 μ_v 为定值。棉花秸秆粉碎过程中,折弯角 β 对 L 改进型锤片起到关键的作用。

综上所述,设计 L 改进型锤片的厚度 a 为 2 mm,刀柄的长度 b 为 126 mm, Q 处的折弯角 β 为 120° , O 处的折弯角 δ 为 175° ,折弯角的设计对粉碎室底部的棉花秸秆有较高的捡拾性能,L 改进型锤片结构如图 10 所示。L 改进型锤片采用的材料为 65Mn 并进行淬火处理,具有较强的硬度和耐磨性。

2.2.2 锤片类型对粉碎室内流场仿真分析 为了选出适合增大粉碎室内气流速度的锤片类型,对 L 改进型锤片和直刀型锤片进行数值仿真分析,研究上述两种锤片对粉碎室内气流速度的影响。三维模型中可调节出料口面积为 $136\,500\text{ mm}^2$,在尽可能保证精确的前提下,对粉碎室三维结构模型进行简化,忽略齿条和粉碎刀辊上的轴承座、间隔套筒等,简化后的粉碎室如图 11 所示。

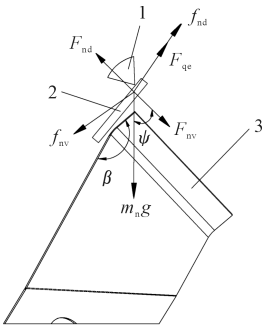
在分析粉碎室内气流场时,将流场视为不可压缩,定义粉碎刀辊区域为旋转区域^[23-25],设置粉碎



1. 粉碎的棉花秸秆;2. 入料口;3. 出料口
1. Crushed cotton straw; 2. Inlet; 3. Outlet

图 8 粉碎刀辊运动方向示意图

Fig.8 Schematic diagram of the direction of motion of the crushing knife roller



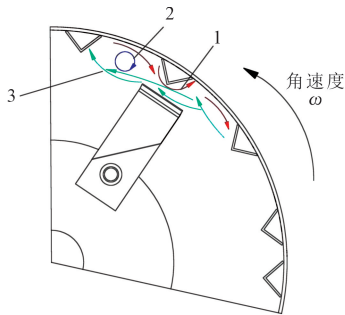
1. 齿条;2. 棉花秸秆;3. L 改进型锤片

1. Rack; 2 Cotton stalks; 3. L improved hammer blades

图 9 棉花秸秆受力粉碎过程分析

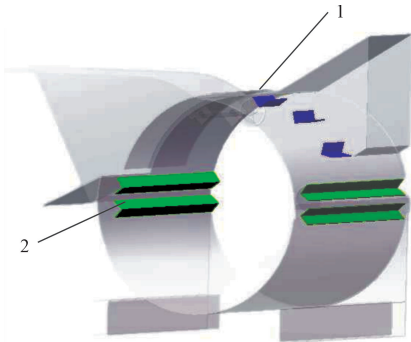
Fig.9 Analysis of cotton straw crushing process under force

刀辊转速为 $2\,660\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,其余区域为静止区域,采用静止坐标系,入口和出口边界采用压力入口和压力出口,大小均为一个标准大气压。运用多重参考系模型(MRF)解决粉碎刀辊旋转问题,利用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型来计算粉碎室内湍流,并利用 CFD-Post 软件进行后处理。



1. 逆向扰动;2. 涡流颠簸区;3. 正向扰动
1. Reverse perturbation; 2. Eddy current upset zone;
3. Forward perturbation

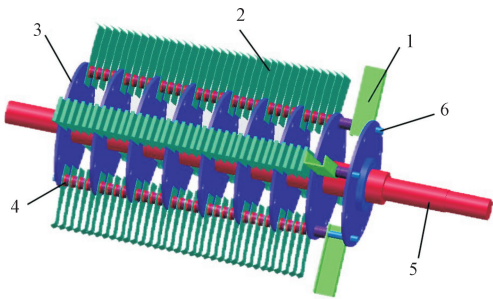
图 4 齿条对粉碎室内气流场抗扰作用示意图
Fig.4 Schematic diagram of the effect of the rack on the disturbance of the airflow field inside the crushing chamber



1. 160 mm 齿条;2. 770 mm 齿条
1. 160 mm rack; 2. 770 mm rack

图 6 齿条排列示意图

Fig.6 Schematic diagram of rack arrangement



1. 抛送叶片;2. L 改进型锤片;3. 架板;
4. 间隔套筒;5. 粉碎主轴;6. 销轴
1. Throwing blade; 2. L improved hammer blade;
3. Frame plate; 4. Spacing sleeve; 5. Crushing spindle; 6. Pin

图 7 粉碎刀辊装配示意图

Fig.7 Schematic diagram of crushing knife roller assembly

两种粉碎锤片形式在出料口截面上的气流速度图和压力云图分布如图 12、13(见 281 页)所示。观察图 12 中两种锤片类型在机壳处的气流情况,L 改进型锤片刀尖切向速度分布不均匀,尤其是 L 改进型锤片刀尖外侧切向速度更大,棉花秸秆更容易被切割,符合粉碎粒径的棉花秸秆更容易被甩出且转速分布更加均匀,更利于棉花秸秆粉碎;直刀型锤片刀尖气流转速切向速度变化小且切向速度分布均匀,棉花秸秆容易进入相邻锤片的间隔位置,物料不容易被粉碎。由图 13 可知,同直刀型锤片相比,L 改进型锤片的结构更有利于在粉碎刀辊架板间隔内部形成更大的负压值及更广的负压区域,有利于入料口的棉花秸秆在负压的作用下更快进入粉碎室进行粉碎。因此选择 L 改进型锤片作为棉花秸秆无筛粉碎机粉碎锤片的形式。

2.2.3 粉碎刀辊锤片数目的确定及排列设计 棉花秸秆无筛粉碎机的粉碎刀辊直径影响整机的粉碎效果及主轴平衡,考虑粉碎装置的稳定性等因素,选取粉碎主轴直径为 100 mm,粉碎刀辊回转直径 D 为 630 mm。粉碎室宽度决定物料在粉碎主轴上的分布及锤片的有效冲击,粉碎室宽度的选择应结合生产率、粉碎刀辊回转直径等全面考虑,粉碎室

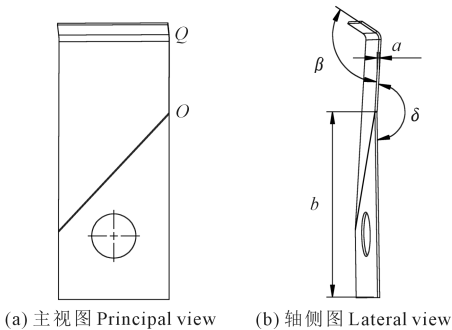
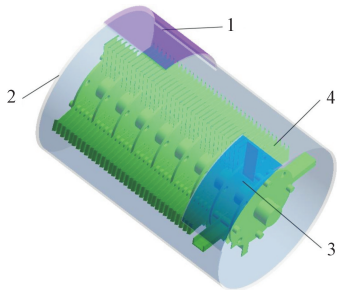


图 10 L 改进型锤片结构示意图
Fig.10 Schematic diagram of L improved hammer blade structure



1. 压力入口;2. 外壳腔体流道;3. 压力出口;4. 粉碎刀辊流道
1. Pressure inlet; 2. Housing chamber runner;
3. Pressure outlet; 4. Crushing knife roller runner

图 11 简化的三维模型

Fig.11 Simplified three-dimensional model

宽度与粉碎刀辊回转直径之比介于 0.8~2.0 之间^[26],设计粉碎室宽度 B 为 1 000 mm。合理的锤片数目对粉碎效率和粉碎物料的粗细度具有重要意义。确定锤片数目理论计算公式为^[27-29]:

$$Z = \frac{k_1 B}{a}$$

(10)

式中, k_1 为锤片配置密度系数,取 0.28; Z 为 L 改进型锤片数目(把)。

经计算求得 L 改进型锤片数量为 140 把。机具粉碎刀辊上锤片排列应满足在同一回转平面上对称布置,合理的锤片排列不仅能提高粉碎质量,同时机具平衡性也会得到提升,本机采用对称排列方式,这种排列方式会使粉碎刀辊在工作过程中整体合理平衡,机具运行平稳,秸秆粉碎较为均匀,140 把 L 改进型锤片分 4 组分别安装在架板的 4 根销轴上,第一行 L 改进型锤片与架板之间的间距 D_1 为 10 mm,各个相邻锤片的间距 D_2 为 20 mm,锤片之间使用间隔套筒进行分隔。沿粉碎主轴轴向分布架板的数目为 8 个,粉碎刀辊相邻两组架板的安装间距直接影响无筛粉碎机的作业效果,间距过小,容易引起锤片布置不合理、棉花秸秆缠绕和机器故障率增加,设计架板的厚度为 10 mm,相邻架板之间安装的间距 D_3 为 110 mm。粉碎刀辊相邻锤片组的 L 改进型锤片采取反向排列的方式,又组成 Y 型锤片,这种排列方式既有 L 改进型锤片耐磨好、对于硬质秸秆粉碎效果好的特点,又兼具 Y 型锤片功耗小、对不同农作物秸秆适应性强的特点^[30-31]。L 改进型锤片排列展开图如图 14(见 281 页)所示。

考虑到锤片数量对粉碎效果影响较大,因此本文分别选取 L 改进型锤片数量 120、140、160 把进行正交试验,研究 L 改进型锤片数量对棉花秸秆粉碎效果的影响。

2.2.4 粉碎刀辊转速的确定 粉碎刀辊转速是棉花秸秆无筛粉碎机的重要工作参数,是影响棉花秸秆粒径合格率的主要因素之一,粉碎刀辊转速与锤片末端线速度和粉碎刀辊回转直径有关。粉碎刀辊转速的计算公式为:

$$V_s = \frac{\pi \times D \times n}{60 \times 1000}$$

(11)

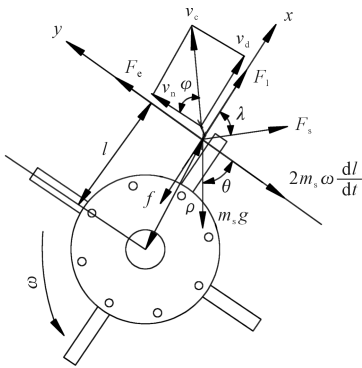
式中, V_s 为锤片末端线速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); n 为粉碎刀辊转速($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$); D 为粉碎刀辊回转直径(mm)。

锤片末端线速度过高时,物料受到锤片的打击,揉碎作用加强,增加物料的粉碎粒度,但无筛粉碎机的空转功率、噪音也随之增加,国内的粉碎机锤片末端线速度 V_s 一般为 $65 \sim 90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[32]。将上

述设计参数代入式(11)求解可得粉碎刀辊转速 $n = 1\,970 \sim 2\,728 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

本文分别选取粉碎刀辊转速 2 060、2 360、2 660 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 进行正交试验。

2.2.5 抛送装置的设计 抛送叶片的增加能提高粉碎室内的气流速度,工作时在粉碎室内形成较大的负压,促使粉碎室棉花秸秆均匀快速地从出料口排出,减少过粉碎,提高产量。为保证粉碎后的棉花秸秆顺利进入出料口完成抛送,需要保证棉花秸秆实现沿着抛送叶片向外运动,受力分析如图 15 所示。



注: v_n 和 v_d 分别为抛送叶片垂直和水平方向抛出物料最小速度分量($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

Note: v_n and v_d are the minimum velocity components ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) of the material thrown out in the vertical and horizontal directions of the throwing blade, respectively.

图 15 抛送叶片棉花秸秆抛送分析

Fig.15 Throwing analysis of cotton straw thrown by throwing blades

棉花秸秆物料在抛送过程中沿抛送叶片运动时,在 y 轴方向上受力处于平衡状态,有:

$$F_s \sin \lambda + 2m_s \omega \frac{dl}{dt} + m_s g \cos \theta = F_e$$

(12)

棉花秸秆沿抛送叶片运动的动力学方程为:

$$F_l + F_s \cos \lambda - f - m_s g \sin \theta = m_s \frac{d^2 l}{dt^2}$$

(13)

其中:

$$F_l = m_s \rho \omega^2$$

$$f = \mu F_e$$

$$F_s = C_0 A \frac{K_a (v_k - v_s)^2}{2g}$$

式中, F_s 为气流推力(N); f 为抛送叶片对秸秆的摩擦力(N); F_e 为抛送叶片对秸秆的推力(N); F_l 为离心力(N); θ 为棉花秸秆自身重力与 y 轴的夹角($^\circ$); λ 为气流推力与 x 轴的夹角($^\circ$); ρ 为秸秆质心到粉碎主轴中心距离(mm); μ 为秸秆与抛送叶片之间的摩擦系数; v_k 为受抛送叶片打击作用所产生的

打击速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); v_s 为受抛送叶片打击作用所产生的径向气流速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); l 为棉花秸秆物料动坐标(mm); m_s 为抛送棉花秸秆质量(g)。

联立式(12)和(13)可得棉花秸秆沿抛送叶片运动的微分方程为:

$$m_s[\rho\omega^2 - g(\mu\cos\theta + \sin\theta)] + C_0A \frac{K_a(v_k - v_s)^2}{2g}(\cos\lambda - \mu\sin\lambda) = m_s \frac{d^2l}{dt^2} + 2\mu m_s \omega \frac{dl}{dt} \tag{14}$$

由式(14)可知,粉碎后的棉花秸秆抛送距离与抛送叶片转速,抛送叶片回转半径以及架板间距有关。抛送叶片转速是影响棉花秸秆无筛粉碎机排料的关键因素^[33]。抛送叶片在排料过程中,棉花秸秆的排出需要获得一定的抛送速度,即为抛送叶片最小抛送速度 v_c ,计算公式为

$$v_c = \frac{(1 + \mu_2) \sqrt{v_p^2 + 2gH(1 + \mu_1)}}{\sin\varphi} \tag{15}$$

式中, H 为输送高度,即刀辊中心到出料筒顶端的距离,取值 0.5 m; μ_1 为管壁摩擦及空气阻力损失,取值 0.22; μ_2 为抛送叶片打击物料损失,取值 0.55; v_p 为末速度,取值 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; φ 为抛出角度,取值 60° 。

由上式可计算得最小抛送速度 v_c 为 $27.54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在本文设计中,抛送装置和粉碎刀辊同轴,所以粉碎主轴的转速就是抛送叶片转速,设计粉碎主轴的转速 n 为 $2\,660 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。抛送叶片远心端线速度取最小值时,抛送叶片需要的最小回转直径 D_c 为:

$$D_c = \frac{60v_c}{\pi \times n} \tag{16}$$

代入数据求得抛送叶片最小回转直径 D_c 为 0.20 m,该机具的抛送叶片分别位于销轴上,考虑棉花秸秆无筛粉碎机不具有筛片,只能通过改变粉碎室内气流来实现物料的筛选,因此取抛送叶片回转直径 D_c 为 690 mm。抛送装置选用 4 叶片形式的抛送形式^[34],并确定 4 个抛送叶片分别位于 4 个销轴的末端,采取对称排列的方式,抛送叶片选用长 210 mm、宽 135 mm、厚度为 4 mm 的钢板弯折而成。棉花秸秆在粉碎之后到达抛送区,被抛送叶片撞击后与壳体内的气流混合后抛出。

3 样机试验

3.1 试验条件及指标确定

棉花秸秆经过微生物发酵作为饲料时,反刍动物对棉花秸秆揉碎段的长度需求在 5~40 mm 之间,

切割过长或过短均不利于吸收。试验在新疆巴音郭楞蒙古自治州博湖县本部图镇进行,如图 16 所示。试验所选的棉花秸秆直径为 4~13 mm,棉花秸秆平均含水率为 9.36%。为说明棉花秸秆粉碎效果,采用测定粒径合格率作为棉花秸秆粉碎效果的评价指标。

参照农业行业标准 NY/T509-2015《秸秆揉丝机质量评价技术规范》^[35],粒径合格率是指机具作业后,粉碎成品为长度 5~40 mm 且几何宽度不大于 3 mm 的丝状物秸秆质量与总秸秆质量的比值。

棉花秸秆无筛粉碎机负载试验开始 5 min 后,每隔 5 min 在成品出口横断接取成品样品一次,共接取 3 次,每次接取粉碎棉花秸秆不少于 200 g,并将 3 次样品混合称其质量,挑出其中不符合粉碎要求的棉花秸秆粉碎并称量其质量,按照下式计算粒径合格率 Y_1 ,结果保留一位小数。

$$Y_1 = \frac{(m_3 - m_2)}{m_3} \times 100\% \tag{17}$$

式中, m_2 为不符合粉碎要求的棉花秸秆(g); m_3 为 3 次接取的棉花秸秆样品质量(g)。

3.2 试验方案

基于前文参数分析和秸秆粉碎理论分析,该机具的 L 改进型锤片数量、粉碎刀辊转速、出料口面积对粒径合格率影响较大,为确定较优参数组合,因此本试验选取影响棉花秸秆粉碎合格率的主要因素 L 改进型锤片数量、粉碎刀辊转速、出料口面积进行三因素三水平试验。通过改变粉碎刀辊上间隔套筒的数量来改变 L 改进型锤片的数量,分别选取试验值为 120、140、160 把。主动带轮转速为 $1\,470 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,带轮的传动比分别为 0.71、0.62、0.55,带轮与粉碎刀辊之间采用过盈配合加键配合的方式,从而实现粉碎刀辊不同转速的调节,所对应的粉碎刀辊转速分别为 $2\,060$ 、 $2\,360$ 、 $2\,660 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。如前文 2.1.1 节可调节出料口设计所述,通过可调节出料口的调节杆来改变出料口面积,分别选取试验值为 91 000、136 500、182 000 mm^2 。试验因素及水平编码表如表 2 所示。选择 9 组因素组合进行正交试验,试验方案如表 3 所示。

3.3 试验结果与分析

(1)极差分析。对上述三因素三水平正交试验的粒径合格率 Y_1 进行极差分析,结果见表 4。

某种因素的极差大,则反映该因素水平变动时,试验指标的波动幅度大,该因素对指标的影响大,因此显得更重要。从表 4 可以看出极差 $R_B > R_C > R_A$,因此影响试验指标粒径合格率的因素主次排列

顺序为:粉碎刀辊转速 B 、出料口面积 C 、锤片数量 A 。

(2)方差因素分析。应用 SPSS25.0 软件对试验数据进行方差分析,粒径合格率 Y_1 的方差分析结果如表 5 所示。根据表 5 可知,因素粉碎刀辊转速 B 对指标粒径合格率 Y_1 影响为极显著,因素出料口面积 C 与 L 改进型锤片数量 A 对指标粒径合格率 Y_1 的影响为显著。这些结论与极差分析法结论基本相同。

粉碎刀辊转速 B 在 $2\,660\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,指标粒径合格率 Y_1 最高。粉碎刀辊转速过低,棉花秸秆粉碎不彻底,抛送叶片输送能力极差,出料口出料不畅,并导致转子缠绕棉花秸秆,机器正常作业受到影响。但转速过快,功耗增加,机器工作的平衡性得到破坏,尤其是棉花秸秆的高频率撞击,噪声增加明显^[36]。

表 2 试验因素和水平
Table 2 Experimental factors and levels

水平 Level	锤片数量 Number of hammer blades A	粉碎刀辊转速 Crushing knife roller speed B $/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	出料口面积 Outlet area C/mm^2
-1	120	2060	91000
0	140	2360	136500
1	160	2660	182000

表 3 试验方案和结果
Table 3 Experimental scheme and results

试验号 Test No.	A	B	C	粒径合格率/% Qualified rate of particle size Y_1
1	-1	-1	-1	85.5
2	-1	0	0	89.6
3	-1	1	1	88.3
4	0	-1	1	85.7
5	0	0	-1	90.4
6	0	1	0	93.7
7	1	-1	0	89.2
8	1	0	1	87.6
9	1	1	-1	92.8

表 4 粒径合格率极差分析
Table 4 Extreme differences analysis of
particle size qualification rate

序号 No.	A	B	C
k_{j-1}	87.800	86.800	89.567
k_{j0}	89.933	89.200	90.833
k_{j1}	89.867	91.600	87.200
R	2.133	4.800	3.633

出料口面积 C 在 $136\,500\text{ mm}^2$ 时棉花秸秆粉碎效果最好。出料口面积的改变调整了粉碎室内部风量,实现了对物料粒径进行筛选的作用。如果出料口面积过小,则棉花秸秆就会发生过粉碎现象,使达到粉碎粒度要求的棉花秸秆无法排出,功耗增大,粉碎室内棉花秸秆温度明显上升;出料口面积过大,棉花秸秆粉碎不彻底,不符合粒径要求的物料明显增多。因此选择合适的出料口面积极其重要。

L 改进型锤片数目 A 为 140 把时,棉花秸秆粉碎指标粒径合格率 Y_1 达到理想值。随着锤片数目的增多,对棉花秸秆的打击次数增加,粉碎效果好,但会导致主轴的负荷增加,给粉碎刀辊平衡和安装带来困难;锤片数目减小时,起不到应有的打击效果,加工质量降低。

通过上述试验结果综合考虑,选取较优组合为: $B_3C_2A_2$,即粉碎刀辊转速 B 为 $2\,660\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,出料口面积 C 为 $136\,500\text{ mm}^2$,L 改进型锤片数目 A 为 140 把。

在较优组合 $B_3C_2A_2$ 的情况下进行场地粉碎试验,棉花秸秆粉碎合格率为 93.7%,作业效果如图 17 所示。

4 结 论

1)针对棉花秸秆纤维多、韧性强的特点,本文设计了一种棉花秸秆无筛粉碎机,取消传统有筛粉碎机的筛片,采用改变出料口大小的方式来实现粉碎室内部气流的变化,筛选出粒度符合要求的物料。L 改进型锤片与齿条配合,使物料由无支撑粉碎变为有支撑粉碎,提高了粉碎效率,解决了有筛粉碎机在粉碎棉花秸秆过程中排料困难、筛片易堵塞等问题。

2)通过对各关键部件结构参数的研究,确定了出料口大小调节方式。对棉花秸秆粉碎过程进行受力分析,确定了 L 改进型锤片和抛送叶片的结构

表 5 粒径合格率方差分析
Table 5 Analysis of variance of particle size qualification rate

方差来源 Source of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	均方 Mean square	F	P
A	8.827	2	4.413	27.020	0.036
B	34.560	2	17.280	105.796	0.009
C	20.407	2	10.203	62.469	0.016
误差 Error	0.327	2	0.163		

注: $P<0.05$ 为差异显著, $P<0.01$ 为差异极显著。
Note: $P<0.05$ means significant difference, $P<0.01$ means a highly significant difference.

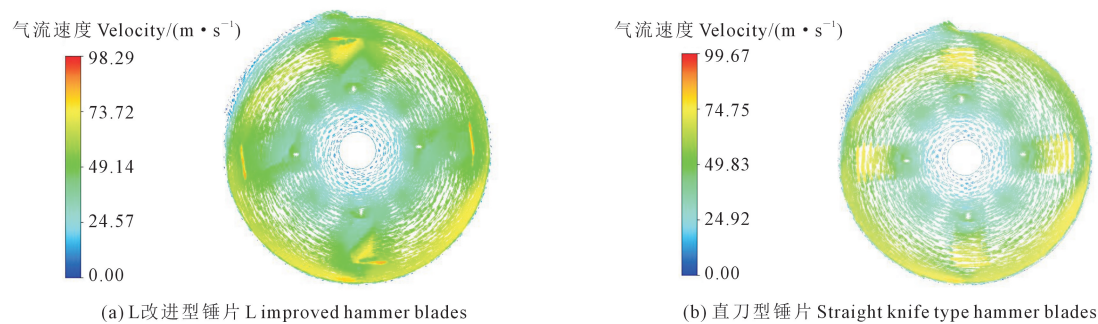


图 12 粉碎室轴截面出料口气流速度矢量图

Fig.12 Vector diagram of air velocity at the outlet of the axial section of the crushing chamber

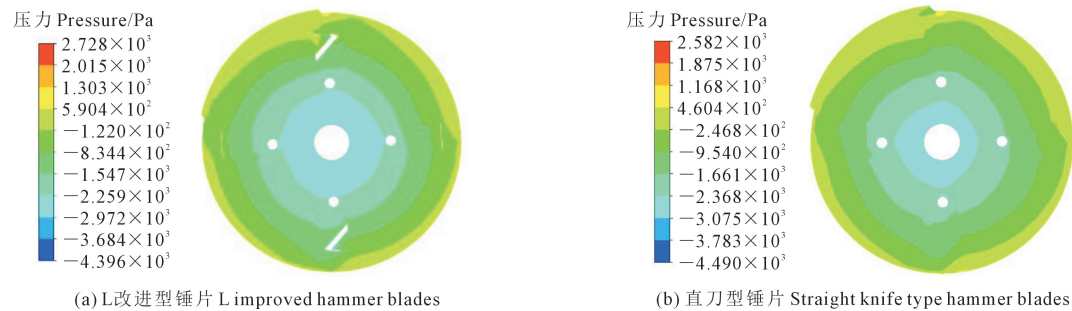


图 13 粉碎室轴截面出料口压力图

Fig.13 Pressure diagram of the outlet of the axial section of the crushing chamber

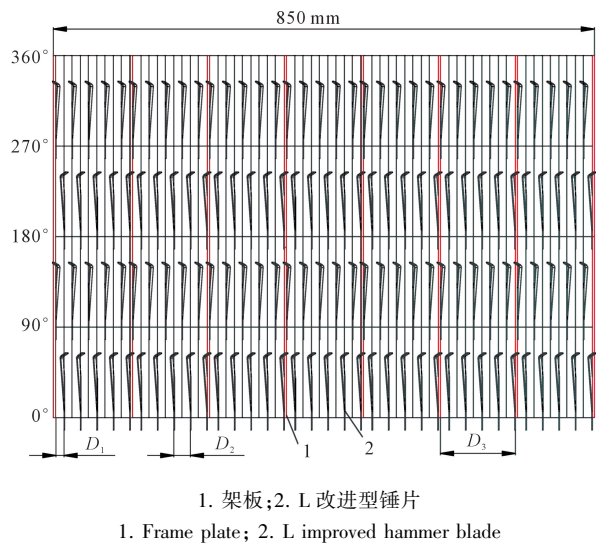


图 14 L 改进型锤片排列展开图

Fig.14 Arrangement diagram of L improved hammer blades

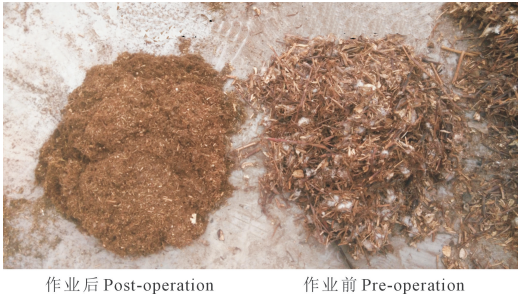


图 17 作业效果图

Fig.17 Operation effect

参数及其组合参数。通过 Fluent 仿真分析发现 L 改进型锤片相比直刀型锤片增大风速效果更好,有利于提高棉花秸秆在粉碎室内的流动性并在粉碎室内形成更大的负压。

3) 根据实际工作条件,进行了三因素三水平正交试验,确定棉花秸秆无筛粉碎机的较优参数组合:粉碎主轴转速为 $2\,660\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,出料口面积为 $136\,500\text{ mm}^2$,L 改进型锤片数量为 140 把;此时棉花秸秆无筛粉碎机的粒径合格率为 93.7%,可以满足棉花秸秆粉碎的实际要求。

参 考 文 献:

[1] 张若薇, 陈玉兰, 赵达君. 新疆棉花产业发展现状与建议[J]. 智慧农业导刊, 2023, 3(6): 1-5.
ZHANG R W, CHEN Y L, ZHAO D J. Development status of cotton



图 16 棉花秸秆无筛粉碎机场地试验

Fig.16 Sited test of no-sieve cotton straw crusher

industry in Xinjiang and the suggestions[J]. Journal of Smart Agriculture, 2023, 3(6): 1-5.

[2] 刘磊, 陈元翰, 雷紫翔. 新疆棉花产业高质量发展研究[J]. 宏观经济管理, 2021,(10): 77-83, 90.

LIU L, CHEN Y H, LEI Z X.A study on high-quality development of the cotton industry of Xinjiang [J]. Macroeconomic Management, 2021,(10): 77-83, 90.

[3] 曹吉强, 徐红. 新疆棉花的发展现状与质量提升对策[J]. 棉纺织技术, 2022, 50(6): 71-74.

CAO J Q, XU H. Development status and quality improvement countermeasure of Xinjiang cotton[J]. Cotton Textile Technology, 2022, 50(6): 71-74.

[4] 谢建华, 吴仕花, 曹肆林, 等. 夹持辊式棉秆拔取装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 101-111.

XIE J H, WU S H, CAO S L, et al. Design and test of clamping-roller cotton stalk pulling device[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 101-111.

[5] 王颖洁, 张朋, 鞠春华, 等. 新疆棉花秸秆循环利用现状与策略[J]. 棉花科学, 2022, 44(6): 44-49.

WANG Y J, ZHANG P, JU C H, et al. Current situation and strategy of cotton straw recycling in Xinjiang[J]. Cotton Sciences, 2022, 44(6): 44-49.

[6] 喻晨, 张丽, 赵志艳, 等. 新型棉秸秆揉丝粉碎机的结构设计及优化[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(7): 93-96.

YU C, ZHANG L, ZHAO Z Y, et al. Structural design and optimization of cotton straw rubbing filament crusher[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(7): 93-96.

[7] 付敏, 李锐, 马雷. 轴向振筛式秸秆粉碎机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 16-22, 293.

FU M, LI R, MA L. Development and test of straw grinder with axial vibration screen type[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(22): 16-22,293.

[8] 田海清, 屈丰富, 刘伟峰, 等. 锤片式粉碎机分段圆弧筛片设计与粉碎性能试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 92-95.

TIAN H Q, QU F F, LIU W F, et al. Design and experiment of piece-wise arc-shaped screen on hammer mill to grinding performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 92-95.

[9] 王迪, 田海清, 李大鹏, 等. 锤片式粉碎机不同筛片作用下流场特征分析与试验[J]. 农机化研究, 2023, 45(7): 8-13.

WANG D, TIAN H Q, LI D P, et al. Analysis and experimental study on flow field characteristics of hammer mill under the action of different sieves[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(7): 8-13.

[10] 吴春江. 无筛式粉碎机[J]. 饲料工业, 1983, 9(4): 11-15, 32.

WU C J.Screenless crusher[J]. Feed Industry, 1983, 9(4): 11-15, 32.

[11] 曹丽英, 汪阳, 李帅波, 等. 锤片式饲料粉碎机科技进展[J]. 包装与食品机械, 2021, 39(6): 83-88.

CAO L Y, WANG Y, LI S B, et al. The scientific and technological progress of feed hammer mill[J]. Packaging and Food Machinery, 2021, 39(6): 83-88.

[12] 买买提明·艾尼, 加合甫·阿汗, 吾尔科木·冉合木, 等. 籽棉团悬浮速度的理论算法与试验验证[J]. 农业工程学报, 2022, 38(24): 52-62.

MAMITMIN G, JAHEP A, ORKIN R, et al. Theoretical algorithm and experimental verification of seed cotton ball suspension velocity [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(24): 52-62.

[13] 郭辉, 邢少康, 郭伟宏, 等. 红花悬浮与收集试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(6): 166-170.

GUO H, XING S K, GUO W H, et al. Safflower suspension and collection test [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(6): 166-170.

[14] 张永昌, 徐宇工. 基于 TR-PIV 方法的格栅-空腔流动场自激振荡空间特征研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(23): 234-240.

ZHANG Y C, XU Y G. Spatial distribution characteristics of self-excited oscillations in a grille-cavity flow field based on TR-PIV method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(23): 234-240.

[15] 王显圣, 杨党国, 刘俊, 等. 空腔可压缩流致噪声问题研究进展[J]. 实验流体力学, 2018, 32(3): 1-16.

WANG X S, YANG D G, LIU J, et al. Progress of research on noise induced by compressible flow over cavities [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2018, 32(3): 1-16.

[16] 李林, 杨明韶, 王春光, 等. 9R-40 型揉碎机的研制与试验[J]. 内蒙古农牧学院学报, 1997, 18(3): 69-74.

LI L, YANG M S, WANG C G, et al. The manufacture & testing of 9R-40 rubber[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 1997, 18(3): 69-74.

[17] 王忠宇. 旋筒供料锤式饲草粉碎机的设计与试验[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.

WANG Z Y. Design and experiment of rotary feed tube hammer grinder[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.

[18] 贾洪雷, 姜鑫铭, 郭明卓, 等. V-L 型秸秆粉碎还田刀片设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 28-33.

JIA H L, JIANG X M, GUO M Z, et al. Design and experiment of V-L shaped smashed straw blade [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(1): 28-33.

[19] 林静, 马铁, 李宝筏. 1JHL-2 型秸秆深埋还田机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 32-40.

LIN J, MA T, LI B F. Design and test of 1JHL-2 type straw deep burying and returning machine [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(20): 32-40.

[20] 郭茜, 张西良, 徐云峰, 等. 藤茎类秸秆专用切割刀片的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 47-53.

GUO Q, ZHANG X L, XU Y F, et al. Design and experiment of cutting blade for cane straw[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(24): 47-53.

[21] 张喜瑞, 甘声豹, 郑侃, 等. 滚割喂入式卧轴甩刀香蕉假茎粉碎还田机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 33-41.

ZHANG X R, GAN S B, ZHENG K, et al. Design and experiment on cut roll feeding type horizontal shaft flail machine for banana pseudostem crushing and returning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(4): 33-41.

[22] 李明, 王金丽, 邓怡国, 等. 1GYF-120 型甘蔗叶粉碎还田机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 121-126.

- LI M, WANG J L, DENG Y G, et al. Structural design and experiments on sugarcane leaf shattering and returning machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(2): 121-126.
- [23] 武文璇, 于贤龙, 张宗超, 等. 立式机械冲击式超微粉碎机分级结构的改进设计[J]. 农业工程学报, 2023, 39(12): 245-253.
- WU W X, YU X L, ZHANG Z C, et al. Improved design of the classification structure of vertical mechanical impact superfine grinder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(12): 245-253.
- [24] 宋学锋, 戴飞, 张雪坤, 等. 基于 CFD-DEM 耦合的揉丝机排料装置内物料运动模拟与试验[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(5): 99-107.
- SONG X F, DAI F, ZHANG X K, et al. Numerical simulation and experiment of materials movement based on CFD-DEM coupling method in the discharging device of kneading machine[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(5): 99-107.
- [25] 贺殿民, 曹丽英. 锤片式饲料粉碎机物料流道内的流场仿真分析[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(7): 68-72.
- HE D M, CAO L Y. Simulation analysis of the flow field in the material flow passage of hammer type feed grinder[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(7): 68-72.
- [26] 赵远征. 木煤原料粉碎机的结构设计与研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.
- ZHAO Y Z. Research and design of wood-pellet raw material crusher[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012.
- [27] 褚斌, 齐自成, 孙立刚, 等. 用于藤茎类秸秆的大型立式粉碎机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(1): 93-100.
- CHU B, QI Z C, SUN L G, et al. Design and test of large vertical crusher for cane stalk[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(1): 93-100.
- [28] 章明浩. 番茄秸秆粉碎装置设计与试验[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2022.
- ZHANG M H. Design and experiment of tomato straw crushing device[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022.
- [29] 窦谈. 稻草秸秆粉碎机的设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.
- DOU T. Design and experimental study of rice straw crusher[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2022.
- [30] 章志强, 何进, 李洪文, 等. 可调节式秸秆粉碎抛撒还田机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 76-87.
- ZHANG Z Q, HE J, LI H W, et al. Design and experiment on straw chopper cum spreader with adjustable spreading device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 76-87.
- [31] 吴紫晗, 李粤, 郭超凡, 等. 自走式香蕉秸秆粉碎还田机设计与仿真分析[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(9): 40-46.
- WU Z H, LI Y, GUO C F, et al. Design and simulation analysis of self-propelled banana straw crushing and returning machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(9): 40-46.
- [32] 赵国兴, 孙广泰. 锤片式粉碎机参数确定及对性能的影响[J]. 农业机械化与电气化, 2007, (3): 36-37.
- ZHAO G X, SUN G T. Parameter determination of hammer crusher and its impact on performance[J]. Agricultural Mechanization and Electrification, 2007, (3): 36-37.
- [33] 陈桂斌, 卢彩云, 何进, 等. 秸秆条带捡拾粉碎深埋装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 16-27.
- CHEN G B, LU C Y, HE J, et al. Design and experiment of straw-pickup-crushed and deep buried device under strip-tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 16-27.
- [34] 穆桂脂, 辛青青, 玄冠涛, 等. 甘薯秧蔓回收机仿垄切割粉碎抛送装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 53-62.
- MU G Z, XIN Q Q, XUAN G T, et al. Design and experiment of knife roller and throwing device for sweet potato vine recycling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 53-62.
- [35] 中华人民共和国农业部. NY/T509-2015 秸秆揉丝机质量评价规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. NY/T509-2015 Technical specifications of quality evaluation for crop straw rubbing filament machines[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [36] 孙妮娜, 王晓燕, 李洪文, 等. 差速锯切式水稻秸秆粉碎还田机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 267-276.
- SUN N N, WANG X Y, LI H W, et al. Design and experiment of differential sawing rice straw chopper for turning to field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(22): 267-276.