doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.005

旋筒供料锤式饲草粉碎机设计与试验

范国强[1,2]　王忠宇[1,2]　王保兴[1,2]　王金星[1,2]　董和银[3,4]　韩　见[3,4]

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省农业装备智能化工程实验室, 泰安 271018;
3. 泰安意美特机械有限公司, 新泰 271215; 4. 泰安市畜牧智能装备产业技术研究院, 新泰 271215)

摘要: 针对我国养殖业缺乏高效饲草粉碎机的问题,设计了一种旋筒供料锤式饲草粉碎机,建立了粉碎和旋转作业的理论模型,对锤片尺寸形状、回转半径、粉碎转速、抛送距离、输送能力、供料转速和粉碎长度等关键参数进行了设计与计算,采用 EDEM 对粉碎羊草的转速、锤片数量、动定刀间隙和出料口仰角等关键因素进行了仿真分析。分析表明随着粉碎转速增高、锤片数量增加和动定刀间隙减小,颗粒尺寸均减小,粉碎扭矩先减小后增大,羊草抛送距离先增大后减小。随着出料口仰角的增大,羊草抛送距离先增大后减小。仿真得到的羊草最佳粉碎条件为粉碎转速 1 500 r/min、锤片数量 24 把、动定刀间隙 22 mm 和出料口仰角 20°。取羊草进行粉碎试验,试验结果与仿真分析基本一致。当旋筒转速为 8 r/min 时,成捆压实羊草的粉碎效率为 25 m^3/h,单人作业效率是铡草机的 12 倍,单机作业效率是铡草机的 3 倍。粉碎羊草破壁率大于 90%,搓揉效果良好。粉碎羊草直径为 0.1 ~ 1.2 mm,平均直径为 0.65 mm。粉碎羊草长度为 16 ~ 157 mm,平均长度为 47 mm,抛送距离为 11 m。粉碎后的羊草饲喂效果较好,达到了设计目标。

关键词: 羊草粉碎机; 锤片; 旋筒供料; 破壁; 搓揉

中图分类号: S817.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)12-0043-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Rotary Feed Tube Hammer Grinder

FAN Guoqiang[1,2]　WANG Zhongyu[1,2]　WANG Baoxing[1,2]　WANG Jinxing[1,2]　DONG Heyin[3,4]　HAN Jian[3,4]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Taian* 271018, *China*
2. *Shandong Provincial Intelligent Engineering Laboratory of Agricultural Equipment*, *Taian* 271018, *China*
3. *Taian Yimeite Machinery Co., Ltd.*, *Xintai* 271215, *China*
4. *Taian Animal Husbandry Intelligent Equipment Industry Technology Research Institute*, *Xintai* 271215, *China*)

Abstract: Due to the lack of efficient forage grinders in China's animal husbandry industry, a rotary feed tube hammer grinder was designed, and the theoretical model of grinding and rotating feed was established. The key parameters, such as hammer size and shape of, rotation radius, grinding speed, throwing distance, conveying capacity, feeding speed and the length of particles were designed and calculated. EDEM was used to simulate the key factors such as the grinding speed, hammer numbers, tool clearance and discharging angle to grind *Leymus chinensis*. Analysis result showed that with the increase of the grinding speed, the increase of the hammer number, and the decreases of the tool clearance, the particle size was decreased, the grinding torque was firstly decreased and then increased, and the particle throwing distance was increased first and then decreased. With the increase of the discharging angle, the particle throwing distance was increased first and then decreased. The optimal grinding parameters of *Leymus chinensis* obtained by simulation were the grinding speed of 1 500 r/min, the hammers number of 24, the tool clearance of 22 mm, and the discharging angle of 20°. *Leymus chinensis* was taken for grinding test, and the test results were basically consistent with the simulation analysis. When the rotating speed of tube was 8 r/min, the grinding efficiency of compacted *Leymus*

收稿日期: 2021-06-30　修回日期: 2021-07-25

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2018MEE026)、财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-27)和山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ008)

作者简介: 范国强(1975—),男,副教授,博士,主要从事畜牧机械和智能农机装备研究,E-mail: fgq1217@163.com

通信作者: 王金星(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备研究,E-mail: jinxingw@163.com

chinensis was 25 m^3/h. The single-person working efficiency was more than 12 times of that of the chaff cutter, and the single-machine working efficiency was more than three times of that of the chaff cutter. The wall-breaking rate of *Leymus chinensis* particles was greater than 90%, and the rubbing effect was good. The diameter of particles was ranged from 0.1 mm to 1.2 mm, with an average diameter of 0.65 mm. The particle length was distributed in the range of 16 mm to 157 mm, the average length was 47 mm, and the throwing distance was 11 m. The feeding effect of the grinded *Leymus chinensis* was better, and the design goal was completed.

Key words: *Leymus chinensis* grinder; hammer; rotary feed tube; wall-disruption; kneading

0 引言

在牛、羊等反刍动物的饲养过程中,粉碎作为牧草和秸秆加工的重要环节之一,其效果直接影响牧草和秸秆的加工成本及加工质量[1]。牧草和秸秆粉碎是切断,同时增加揉搓功能,使牧草和秸秆破壁,使内在营养外露,既提高适口性,又提高与牲畜消化液的接触面积,减少反刍时间和咀嚼时间[2-3],促进营养成分的吸收,减少牲畜的咀嚼消耗能量[4-5]。

铡草机作为牧草和秸秆加工的机械之一,具有结构简单、便于调整与维修和成本低等优点,在中小养殖场得到广泛使用。铡草机需要人工供料,一台鲜秸秆粉碎效率为 15 t/h 的铡草机需要 4 个人同时不停作业,劳动强度大,作业效率低。随着牧草打包机械的推广,采用人工破捆,并将草料排直供料,尤其是羊草等柔软的牧草,劳动强度大,作业效率低,4 个人单机作业效率约为 8 m^3/h。而且铡草机主要是切断作业,破壁和搓揉效果较差。随着养殖规模增大,其生产效率和作业性能难以满足现代化大规模养殖的需求。锤片式饲料粉碎机因具有质量好、空载启动迅速、物料适应度高、维修便捷等优势,得到广泛使用[1,6]。近年来国内大牧场引进美国 Burrows 公司的 Tub Grinder 锤片式粉碎机,该机采用叉车等机械将成捆的牧草或秸秆从旋转料仓的上部投入,由旋转料仓进行破捆和供料,解决了人工破捆和排直供料的困难,极大地节省了人工成本,提高了作业效率。同时该机采用锤片式粉碎机构,作业效率高,适应性强,破壁和揉搓效果显著,提高了养殖效益。然而国内引进的饲草锤式粉碎机规格较大,价格昂贵,难以满足中小型养殖场的需求。同时有关该锤式饲草粉碎机设计理论的研究报道较少,使得设计中小机型存在困难。目前秸秆锤片式粉碎机得到的颗粒太小[7],而反刍动物对饲草料的长度需求在 30 ~ 50 mm 之间,切割过长或过短均不利于吸收。在搅拌混合前,粉碎得到的饲草料长度需要在 40 ~ 60 mm,防止搅拌切割后过短。

本文以羊草为研究对象,设计一种旋筒供料锤式饲草粉碎机。对供料和粉碎进行机构设计和理论计算,确定关键参数。采用 EDEM 软件建立羊草粉碎的仿真模型,对粉碎转速、锤片数量和动定刀间隙等关键因素进行仿真分析,得到优化的作业参数。通过试验来验证设计和仿真分析的正确性。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

旋筒供料锤式粉碎机主要由电动机、带传动机构、粉碎机构、液压系统、旋转机构、锥形圆筒料仓、抛料筒、机架和轮胎组成,如图 1 所示。

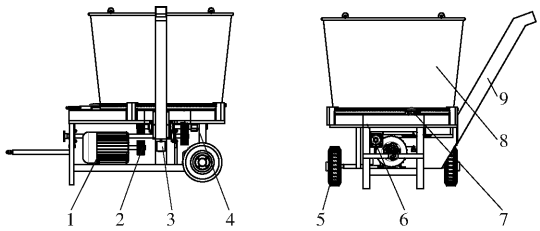


图 1 旋筒供料锤式粉碎机结构图

Fig. 1 Structure diagram of rotary feed tube hammer grinder

1. 电动机 2. 带传动机构 3. 粉碎机构 4. 液压系统 5. 轮胎 6. 机架 7. 旋转机构 8. 锥形圆筒料仓 9. 抛料筒

采用拖拉机牵引转场,由电动机驱动带传动机构和液压系统为整机提供动力。牧草由锥形圆筒料仓上部装填,液压系统驱动旋转机构带动锥形圆筒料仓进行旋转,在重力和旋推力的作用下,牧草进入粉碎机构。带传动机构带动粉碎机构进行粉碎作业,粉碎后的牧草经侧面的抛料筒抛出,在抛送过程中,在风力的作用下,土和灰尘等杂物与饲料分开,达到清洁的作用。设计参数:锥形圆筒容积 6.5 m^3;粉碎效率大于等于 24 t/h;粉碎平均长度 40 ~ 60 mm;抛料距离大于等于 10 m。

1.2 工作原理

1.2.1 锥形筒料仓

锥形筒料仓主要由锥形圆筒、链条和内挡板组成,链条固定在锥形筒的外部下端,内挡板焊接在锥形圆筒的内壁上,如图 2 所示。链条在旋转机构链轮的推动下,带动整个锥形圆筒料仓不断旋转。牧草从料仓的上方投入,在重力作用下进入料仓下部

的粉碎室。在内挡板的推动下，不断向粉碎装置供料，实现连续供料。

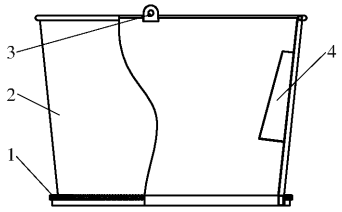


图 2　锥形筒料仓结构简图

Fig. 2　Structure diagram of conical tube

1. 链条　2. 筒壁　3. 吊耳　4. 挡板

1.2.2　旋转机构

旋转机构主要由链轮张紧机构、链轮、托轮、底板、小凸台、靠轮和大凸台组成，如图 3 所示。从顶部观察，3 个托轮呈圆形分布安装在底板上方，托起圆筒料仓。4 个靠轮呈圆形分布贴紧在圆形料仓底部的外壁，防止料仓水平移动。在张紧机构的预紧下，由液压马达驱动的链轮带动锥形圆筒料仓外部的链条，使料仓逆时针转动。料仓里的牧草在圆筒侧壁挡板的推动下，滑过小凸台，被大凸台阻挡，落入小凸台与大凸台之间的粉碎刀旋转区，实现连续旋推供料。

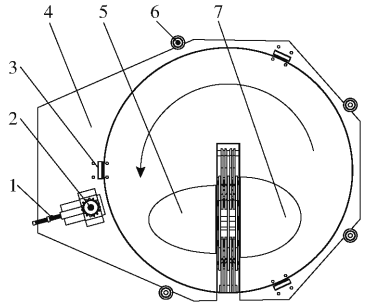


图 3　旋转机构结构示意图

Fig. 3　Schematic of rotary mechanism

1. 链轮张紧机构　2. 链轮　3. 托轮　4. 底板　5. 小凸台　6. 靠轮　7. 大凸台

1.2.3　液压系统

液压系统原理如图 4 所示，通过调整分流阀，可以调节马达和圆筒料仓的转速。

1.2.4　粉碎机构

粉碎机构安装在旋转机构底板下方，由锤片、垫片、销轴、安装盘、粉碎旋转轴、粉碎仓、定刀Ⅰ和定刀Ⅱ组成，如图 5 所示。24 片锤片以 4 片为 1 组，共分成 6 组，通过销轴均匀安装在六边形安装盘的 6 个顶点上。锤片之间安装有垫片，用于锤片的轴向定位。2 把定刀安装在粉碎仓壁板上，通过调节定刀位置，可以调节物料破碎和破壁程度。电动机或拖拉机输出轴通过皮带传动将动力传递到粉碎旋转轴，粉碎旋转轴带动安装盘和锤片作旋转运动。

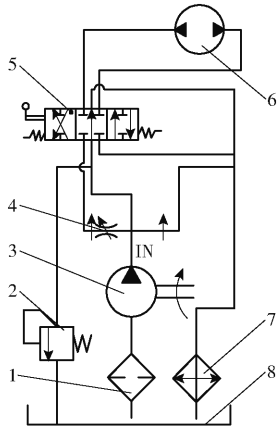


图 4　液压系统原理图

Fig. 4　Schematic of hydraulic system

1. 过滤器　2. 溢流阀　3. 齿轮泵　4. 分流阀　5. 换向阀　6. 液压马达　7. 散热器　8. 油箱

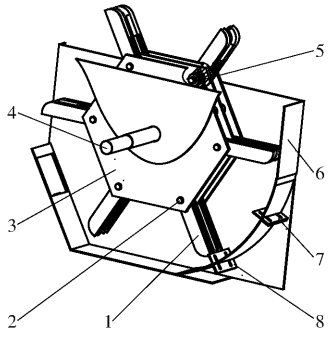


图 5　粉碎机构结构简图

Fig. 5　Structure diagram of grinding mechanism

1. 锤片　2. 销轴　3. 安装盘　4. 粉碎旋转轴　5. 垫片　6. 粉碎仓　7. 定刀Ⅰ　8. 定刀Ⅱ

草料在粉碎仓内被高速旋转的锤片锤击破碎，在定刀阻碍下，物料会被进一步破碎、揉搓和破壁。

1.2.5　带传动机构

带传动机构由电动机、联轴器、传动轴、带轮和 V 带组成，如图 6 所示。圆筒式粉碎机的动力来源于三相异步电动机和拖拉机输出轴，通过联轴器的结合和分离，实现动力切换，驱动粉碎旋转轴旋转，并带动齿轮泵，为液压系统提供动力。

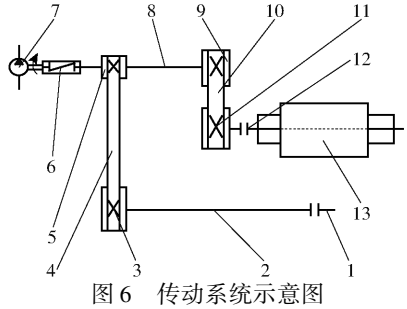


图 6　传动系统示意图

Fig. 6　Schematic of transmission system

1. 拖拉机输出轴　2. 传动轴　3. 大带轮Ⅰ　4. V 带Ⅰ　5. 小带轮Ⅰ　6. 联轴器Ⅰ　7. 齿轮泵　8. 粉碎旋转轴　9. 小带轮Ⅱ　10. V 带Ⅱ　11. 大带轮Ⅱ　12. 联轴器Ⅱ　13. 电动机

2 关键部件设计

2.1 粉碎机构

2.1.1 锤片形状

目前秸秆粉碎刀片按照形状可分为锤爪型、直刀型、弯刀型、T 型:锤爪型刀片的体积和质量大,转动惯量大,粉碎效果较好,但是消耗的功率大;直刀型刀片结构简单,质量小,消耗功率小,适合软质秸秆,通常与定刀配合使用,粉碎质量好;弯刀适合硬质秸秆,但刀片强度低;T 型刀片结构复杂,切割刃多,转动惯量大,功率消耗大,适合秸秆灭茬[8]。

本粉碎机粉碎设计长度为 40 ~ 60 mm,不要求太短,因此选用直刀型锤片,配合使用定刀,调整粉碎长度和破壁程度。

2.1.2 锤片回转半径

锤片的回转半径对粉碎效果有重要影响,回转半径越大,锤片端点的线速度越大,粉碎效果越好。但是锤片的回转半径越大也会使锤片的动不平衡程度增大,使机器振动加剧,影响使用寿命。目前,国内玉米秸秆粉碎还田机的动刀回转半径在 240 ~ 300 mm 范围内[9-10],锤片式秸秆粉碎机的回转半径为 360 mm[7],本设计选取锤片最小回转半径为 350 mm。

2.1.3 粉碎转速

粉碎锤片对牧草和秸秆的粉碎方式属于无支撑切割,切割端线速度要求较高,根据已有研究结果,动刀刀端线速度应大于 34 m/s[11],因此粉碎旋转轴最低转速为 928 r/min。

2.1.4 锤片尺寸参数设计

羊草平均直径 3.12 mm,剪切强度 τ 为 9.3 MPa。如图 7 所示,锤片总长 L_0 为 240 mm,茎秆平均直径 3.12 mm 的羊草在锤片上的最大排列数量为 77 根,锤片最大剪切面积 A_1 为 588 mm^2。

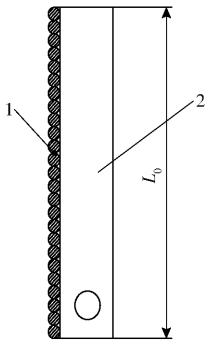


图 7 最大剪切面积示意图

Fig. 7 Schematic of maximum shear area

1. 牧草 2. 锤片

锤片受到的剪切阻力 F_1 为

$$F_1 = \tau A_1 = 5\,451\ \text{N} \tag{1}$$

粉碎机在工作时,锤片由销轴连接在刀架上,跟随刀架高速旋转,如图 8 所示:F_2 为锤片受到的离心力;mg 为锤片重力;R_0 为刀架回转中心到锤片顶部的距离;R_1 为刀架回转中心到锤片销轴孔的距离,350 mm;R_2 为刀架回转中心到锤片重心的距离;L_1 为剪切阻力对于销轴孔心的力臂;L_2 为销轴孔心到锤片重心的距离,130 mm;L_3 为剪切阻力作用点到销轴孔心的距离,150 mm;L_4 为离心力对销轴孔心的力臂;ω 为刀架回转角速度;α 为锤片偏转角。

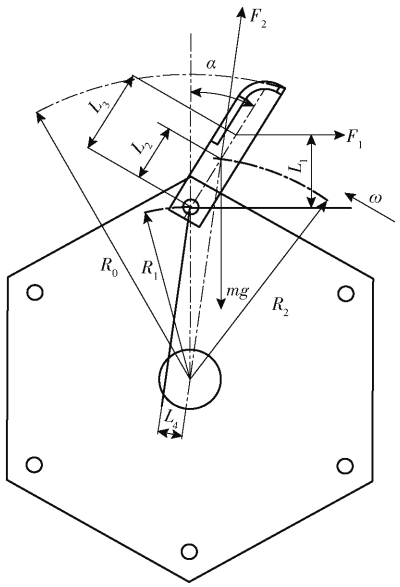


图 8 锤片受力分析图

Fig. 8 Force analysis diagram of hammer

忽略销轴对锤片的摩擦力,可以看作锤片只受 3 个力,在销轴处作力矩平衡方程,F_1 的力臂为 L_1,F_2 的力臂为 L_4,重力的力臂是 $L_2\sin\alpha$。由几何关系可知,L_1、L_2、L_3、L_4、R_1、R_2、α 之间存在关系[12]

$$L_1 = L_3\cos\alpha \tag{2}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{L_2\sin\alpha}{L_4} \tag{3}$$

锤片上相对于销轴中心 O_1 的力矩平衡方程为

$$F_1 L_3\cos\alpha + mgL_2\sin\alpha = m\omega^2 R_1 L_2\sin\alpha \tag{4}$$

式中 m——锤片质量,kg

g——重力加速度,9.8 m/s^2

整理得

$$\tan\alpha = \frac{F_1}{m\dfrac{L_2}{L_3}(\omega^2 R_1 - g)} \tag{5}$$

锤片偏转角 α 越小粉碎效果越好,由式(5)可以得到影响锤片偏转角的因素:锤片质量越大,倾角 α 越小;回转半径越大,倾角 α 越小;角速度越大,倾角 α 越小;L_2/L_3 越大,倾角 α 越小。

选取厚度为 5、10、15 mm 的锤片,在锤片转速为 928 r/min 时分别对锤片偏转角、粉碎机构偏心距和粉碎机构离心力进行计算,结果如表 1 所示。

表 1　不同厚度锤片的偏转角、机构偏心距和离心力

Tab. 1　Deflection angle, mechanism eccentricity and centrifugal force of hammers of different thicknesses

厚度/mm	质量/kg	偏转角 α/(°)	偏心距/mm	离心力/N
5	224.7	38.6	2.86	13 887
10	245.8	22.0	1.55	8 233
15	264.5	15.2	1.10	6 287

当锤片厚度为 15 mm 时，锤片偏转角度较小，能有效的实现粉碎，离心力也显著降低。研究表明，抛送叶片角度后倾约 10°时，有较好的抛送效果，对应的比功耗较小[13-14]。因此，选取锤片厚度为 15 mm。

2.1.5　抛送计算

由于锤片之间排列紧密，可以将同一根销轴上的 4 把锤片简化为宽度 b_t 为 100 mm 的风机叶片，叶片外径 D_1 为 1 200 mm，如图 9 所示。

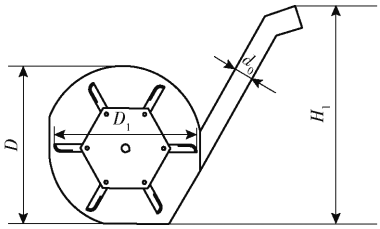


图 9　抛送计算简图

Fig. 9　Throwing calculation diagram

(1)抛送距离

只考虑锤片惯性力对碎牧草的抛撒作用时，假设锤片在水平位置时将秸秆抛起，考虑抛送瞬间饲料初速度与锤片线速度 v_0 之间的差异，则[15]

$$v_p = v_0/(1+\eta_0) \tag{6}$$

式中　η_0——锤片速度转化为碎草料速度时的速度损失系数，取 0.55[13,16]

v_p——碎草料抛送的初始速度，m/s

根据能量守恒定律[15,17]可得

$$\frac{1}{2}m_1 v_p^2 = mgH_1(1+\eta_1) + \frac{1}{2}m_1 v_1^2 \tag{7}$$

式中　H_1——抛送高度，即刀辊中心到出料筒顶端的距离，为 2.8 m

m_1——碎草料质量，kg

η_1——摩擦力和空气阻力造成抛送距离降低的系数，取 0.3[18]

v_1——抛出机外时的速度，m/s

当锤片转速为 928 r/min 时，经计算得，抛出机外时的速度 v_1 = 20.3 m/s。

碎草料抛出机外后，以类似水平抛出的运动状态远离机器，直至落地，则

$$t = \sqrt{\frac{2H_2}{g}} \tag{8}$$

式中　t——碎草料抛出机外后的运动时间，s

H_2——出料口到地面的垂直距离，为 3.2 m

碎草料抛出后运动的水平距离 S 为

$$S = v_1 t \eta_2 \tag{9}$$

式中　η_2——碎草料抛出机外后空气阻力导致抛料水平距离降低的系数，取 0.4

由式(8)、(9)计算得抛送距离 S 为 6.6 m。

(2)输送能力

为保证碎草料在出料筒内通过时不发生堵塞，输料率与空气流量之间应该有[19]

$$m_c = \frac{Q_i}{Q_j} \tag{10}$$

式中　m_c——碎牧草与空气的浓度比

Q_i——单位时间内通过出料筒的空气质量，kg/s

Q_j——出料筒的输料率，kg/s

粉碎后的牧草错乱混合排列，为防止在出料筒内堵塞，选择混合浓度比 m_c 为 1.4。粉碎机粉碎效率为 15 ~ 20 t/h，则出料筒的最大输料率 Q_j 为 5.6 kg/s，由式(10)可得，Q_i = 7.84 kg/s。粉碎机出料筒所需的最大输送能力 Q_t 为 13.44 kg/s，输送能力计算公式为[20]

$$Q_t = n_i D_1^2 b_t z \gamma \eta_3 \frac{\tan\beta}{480} \tag{11}$$

式中　n_i——风机所需的最小转速，r/min

Q_t——输料筒输送率，kg/s

z——叶片数，为 6

γ——实测碎牧草的容积密度，为 230 kg/m^3

η_3——效率系数，为 0.3

β——实测碎牧草自然休止角，为 28°

计算得风机最小转速 n_i 为 204 r/min，而粉碎旋转轴设计最低转速为 928 r/min，满足输送要求。

2.2　旋转机构

2.2.1　旋转转速

旋转供料时，羊草滑过小凸台，被大凸台阻挡落入小凸台与大凸台之间的锤片粉碎区，如图 10 所示，沿旋转方向粉碎区域面积 A_2 为 0.15 m^2。

单位时间粉碎体积 V 为粉碎区域面积与送料速度之积，为方便计算，送料速度取旋筒底面圆周半径 r_2(r_2 = 1 m)中点处线速度，则

$$V = 3\,600\frac{2\pi A_2 n_2}{60}\frac{r_2}{2} \tag{12}$$

式中　n_2——旋转供料转速，r/min

计算得 $n_2 \geqslant 0.9$ r/min。实际加工中草料是蓬松的，沿圆周方向产生飞溅，进入粉碎区域的填充率较小。加快供料转速能提高生产率，取 $n_2 \leqslant 10$ r/min。

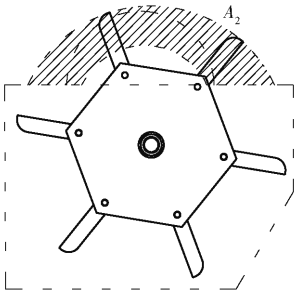


图 10 沿供料方向锤片粉碎面积示意图

Fig. 10 Schematic of hammer grinding area along feeding direction

理论粉碎长度是相邻锤片两次粉碎动作之间喂入装置的进给量,则旋筒底面圆周半径 r_2 处的理论粉碎长度 l 为[21]

$$l = t_1 \frac{2\pi n_2 r_2}{60} \tag{13}$$

式中 t_1——相邻刀片两次切碎动作间隔的时间,甩刀转速为 928 r/min 时,t_1 为 0.01 s

计算得理论粉碎长度 $l \leqslant 10$ mm。实际加工中羊草并不是笔直地喂入粉碎机构,而且存在撕扯现象,并不是纯粹的剪切,粉碎长度要比理论值大,因此应以试验得到的数值为准。

2.2.2 旋推力矩及液压系统设计

供料旋筒有效容积为 6 m^3,饲料最大密度为 700 kg/m^3,物料总质量 m' 为 4 200 kg。取饲料与钢板的最大滑动摩擦因数 μ 为 0.45 进行计算[22],旋推力矩 T_1 为

$$T_1 = m' g \mu \frac{r_2}{2} \tag{14}$$

计算得旋推力矩 T_1 为 10 000 N·m。已知链轮和链条传动比 i_1 为 16,则旋推液压马达的力矩 T_2 为 625 N·m,旋推液压马达的排量 V_1 最小值为

$$V_1 = \frac{2\pi T_2}{\Delta p \eta_m} \tag{15}$$

式中 Δp——液压马达的工作压力,为 16 MPa

η_m——液压马达的容积效率,为 0.9

计算得排量 V_1 最小值为 273 mL/r,选取液压马达的排量 V_1 为 315 mL/r。旋推转速 n_2 最大值为 10 r/min,则系统流量 Q_L 最大值为 50.4 L/min。电机转速 n_3 为 1 470 r/min,电机经带轮增速,带动液压泵,带轮增速比 i_2 为 1.2,则齿轮泵的排量 V_2 最小值为

$$V_2 = \frac{1\,000 Q_L}{i_2 n_3 \eta_{m1}} \tag{16}$$

式中 η_{m1}——齿轮泵的容积效率,为 0.9

计算得排量 V_2 最小值为 31.7 mL/r,选取液压泵排量 V_2 为 32 mL/r。

3 仿真分析

3.1 仿真模型

3.1.1 物料仿真模型

根据羊草的力学特性设置球形颗粒之间的 Bonding V2 接触模型,具体参数设置如表 2 所示。

表 2 接触模型参数

Tab. 2 Parameters of contact model

因素	数值
单位面积法向刚度/(N·m^{-3})	7.6×10^8
单位面积剪切刚度/(N·m^{-3})	6.3×10^7
抗拉强度/MPa	30
抗剪强度/MPa	9.3
粘合半径/mm	2

使用 EDEM 的 Bonding V2 接触模型来建立羊草模型。首先添加半径为 4 mm 的球形颗粒,然后将球形颗粒组成长度为 600 mm 的长条状元颗粒来模拟羊草,元颗粒产生时球形颗粒之间发生粘结,如图 11 所示。球形颗粒之间通过粘结键连接,元颗粒在受到锤片的切削、揉搓作用时会发生弯曲变形和断裂。



图 11 球形颗粒粘结后的元颗粒

Fig. 11 Meta-particles after bonding between spherical particles

3.1.2 粉碎机仿真模型

在 SolidWorks 中建立圆筒式粉碎机锤片、粉碎仓和圆筒等关键部件的装配体,保存为 IGS 格式后导入 EDEM 中,物料和机体的物理特性及接触力学特性参数设置如表 3 所示。

表 3 物料特性参数

Tab. 3 Material properties of particles

参数	物料	钢板
泊松比	0.25	0.30
剪切模量/MPa	627	80 000
密度/(kg·m^{-3})	388	7 850
物料与物料恢复系数	0.35	
物料与钢板恢复系数	0.36	
物料与物料静摩擦因数	0.33	
物料与钢板静摩擦因数	0.53	
物料与物料滑动摩擦因数	0.39	
物料与钢板滑动摩擦因数	0.64	

3.2　仿真试验设计

使用 EDEM 仿真软件进行仿真试验，设置颗粒工厂产生元颗粒的总数为 50 kg，产生速度为 5.6 kg/s，初始速度为 5 m/s。影响粉碎机工作效果的主要因素是锤片转速、锤片数量、动定刀间隙和出料口仰角。以粉碎长度、锤片扭矩和抛料距离为粉碎机的性能指标，设计单因素试验。根据预试验，单因素试验各因素所取水平如表 4 所示。

表 4　单因素试验因素水平

Tab. 4　Factors and levels in single factor experiment

水平	因素			
	锤片转速/(r·min^{-1})	锤片数量/把	动定刀间隙/mm	出料口仰角/(°)
1	1 000	12	32	10
2	1 500	24	22	20
3	2 000	36	12	30

3.3　仿真结果与分析

3.3.1　粉碎转速

仿真条件：锤片数量 24 把、动定刀间隙 22 mm、出料口仰角 20°。不同转速时粉碎仓内部的物料粉碎状态如图 12 所示。当锤片转速为 1 000 r/min 时，粉碎草料长度较长，部分草料没有被及时排出，会重新进入圆筒内，导致粉碎扭矩加大；当锤片转速为 1 500 r/min 时，粉碎草料效果较好，且能及时排出；锤片转速为 2 000 r/min 时，粉碎羊草尺寸太小，粉碎扭矩较大。

以 0.05 s 为时间间隔，选取 70 个时刻的扭矩，不同转速条件下粉碎轴受到的扭矩如图 13 所示，粉碎转速为 1 000、1 500、2 000 r/min 时粉碎轴所受的最大扭矩分别为 981、927、994 N·m。因此，随着粉碎转速的增加，粉碎扭矩先降低后增加。

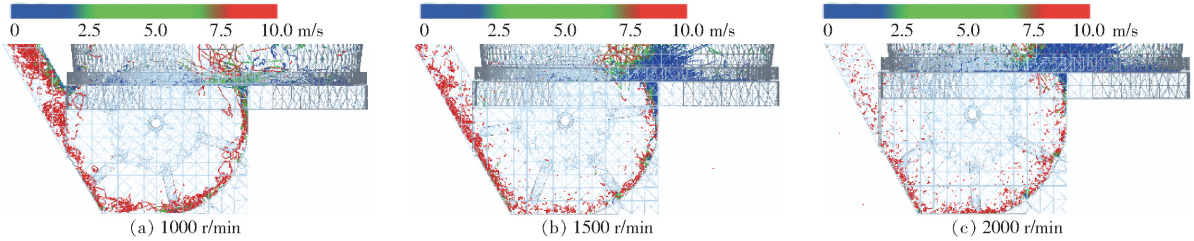


图 12　不同锤片转速时羊草粉碎状态

Fig. 12　Grinding state diagrams of *Leymus chinensis* at different hammer speeds

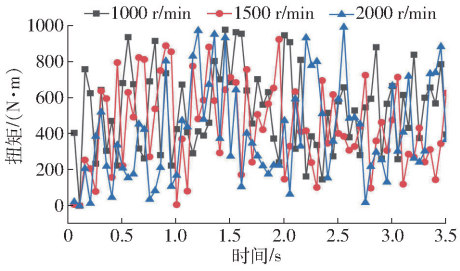


图 13　不同粉碎转速粉碎轴扭矩的变化曲线

Fig. 13　Torque change curve of the grinding shaft at different grinding speeds

粉碎转速对羊草长度的影响如表 5 所示，随着粉碎转速的增加，粉碎羊草长度减小。当转速大于 1 500 r/min，绝大部分的羊草长度分布在 0 ~ 8 cm 范围内。

表 5　不同粉碎转速时羊草长度的分布比例

Tab. 5　Particle length distribution at different grinding speeds　%

粉碎转速/(r·min^{-1})	粉碎羊草长度/cm			
	0 ~ 4	4 ~ 8	8 ~ 12	>12
1 000	15	9	15	61
1 500	41	50	5	4
2 000	78	22	0	0

粉碎转速对抛送效果的影响如图 14 所示，随着粉碎转速增高，羊草抛送距离先增大后减小。当粉碎转速为 1 000 r/min 时，颗粒尺寸较大，初速度较低，在出料口处出现堵塞现象，抛料距离为 6 m；当粉碎转速为 1 500 r/min 时，离开出料口后羊草较为集中，抛料距离为 10 m；粉碎转速为 2 000 r/min 时，颗粒较小，初速度较高，离开出料口后羊草比较分散，抛料距离减小为 8 m。

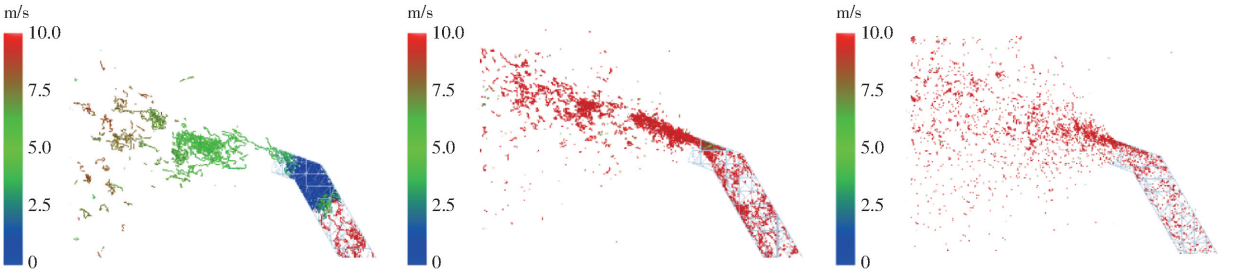
因此转速选择 1 500 r/min，能降低粉碎扭矩、获得合适的粉碎长度和较远的抛料距离。

3.3.2　锤片数量

仿真条件：锤片转速 1 500 r/min、动定刀间隙 22 mm、出料口仰角 20°。不同锤片数时，粉碎仓内部的羊草粉碎状态如图 15 所示。锤片为 12 把时，羊草进入粉碎仓后不能充分粉碎，且不能及时排出，锤片运转时的阻力增加；锤片为 24 把时，粉碎草料效果较好，且能及时排出；锤片为 36 把时，羊草粉碎更加充分。

不同数量锤片时粉碎轴承受扭矩如图 16 所示，锤片数为 12、24、36 把时粉碎轴所承受的最大扭矩分别为 985、927、1 037 N·m。因此，随着锤片数量的增加，粉碎轴承受的扭矩呈先减小后增加的变化趋势。

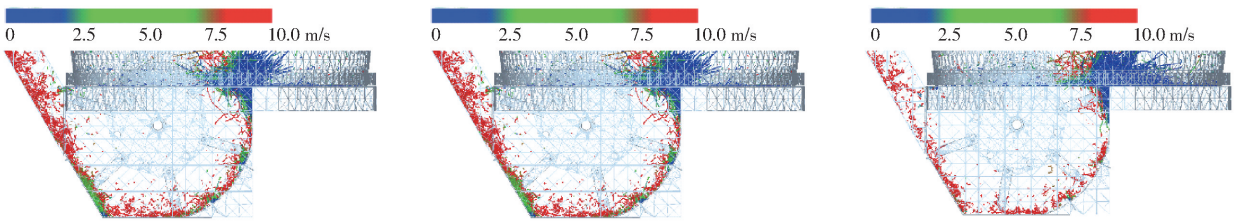
锤片数量对羊草粉碎长度分布的影响如表 6 所



(a) 1000 r/min (b) 1500 r/min (c) 2000 r/min

图 14 不同粉碎转速时羊草抛送的效果

Fig. 14 Throwing effect diagrams of *Leymus chinensis* at different grinding speeds



(a) 12把 (b) 24把 (c) 36把

图 15 不同锤片数量时羊草粉碎状态

Fig. 15 Grinding state diagrams of *Leymus chinensis* with different hammer numbers

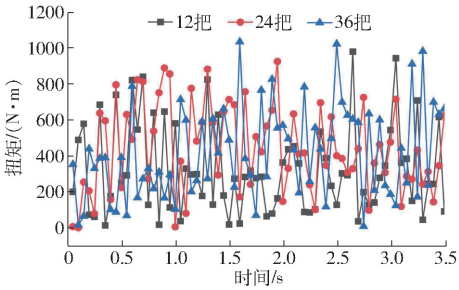


图 16 不同锤片数量时粉碎轴扭矩的变化曲线

Fig. 16 Variation curves of grinding shaft torque with different numbers of hammers

表 6 不同锤片数量时粉碎羊草颗粒长度分布比例

Tab. 6 Particle length distribution with different numbers of hammer %

锤片数量/把	颗粒长度/cm			
	0~4	4~8	8~12	>12
12	34	18	37	11
24	41	50	5	4
36	74	23	3	0

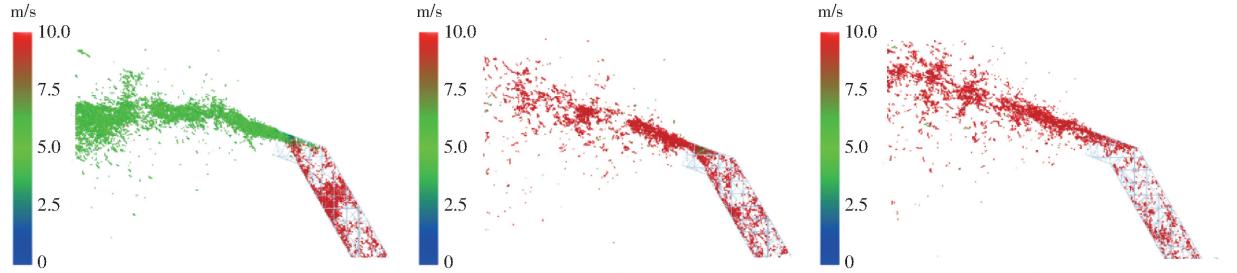
示,随着锤片数量增加,粉碎得到的羊草长度明显减小。采用 24 把锤片时,绝大部分羊草的长度分布在 0~8 cm 范围内。

锤片数量对抛送效果的影响如图 17 所示,随着锤片数量增加,羊草抛送距离先增大后减小。采用 12 把锤片时羊草粉碎效果差,颗粒过长,在出料筒内产生堆积,在出料口转弯处与出料筒壁产生摩擦,排出时速度快速降低,抛送距离为 9 m;锤片数量为 24 把时,羊草粉碎效果较好,抛送距离为 10 m;锤片数量为 36 把时,粉碎得到的羊草尺寸较小,获得的初始速度较大,排出时颗粒比较分散,粉碎后的羊草抛出距离为 7 m。

因此,使用 24 把锤片,能降低粉碎扭矩,获得合适的粉碎长度和较远的抛料距离。

3.3.3 动定刀间隙

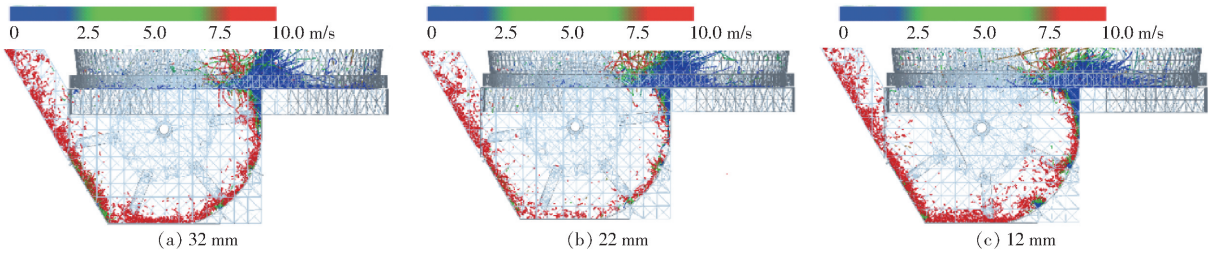
仿真条件:锤片转速 1 500 r/min、锤片数量 24 把和出料口仰角 20°。动定刀间隙对羊草粉碎效果的影响如图 18 所示。当动定刀间隙为 32 mm 时,锤片与定刀之间的间隔过大,羊草粉碎效果较差,滞留在粉碎仓内的羊草较多;当动定刀间隙为 22 mm 时,粉碎效果较好;动定刀间隙为 12 mm 时,得到的



(a) 12把 (b) 24把 (c) 36把

图 17 不同锤片数量时羊草抛送效果

Fig. 17 Throwing effect diagrams of *Leymus chinensis* with different numbers of hammers



(a) 32 mm　(b) 22 mm　(c) 12 mm

图 18　不同动定刀间隙时羊草粉碎状态

Fig. 18　Grinding state diagrams of *Leymus chinensis* with different tool clearances

羊草饲料较小,在粉碎仓内滞留的羊草较多。

动定刀间隙对粉碎轴承受扭矩的影响如图 19 所示,间隙分别为 32、22、12 mm 时粉碎轴所承受的最大扭矩分别为 971、927、1 099 N·m。因此,随着动定刀间隙的减小,粉碎轴承受的扭矩呈先减小后增加的变化趋势。

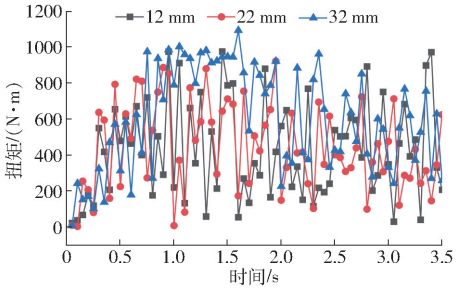


图 19　不同动定刀间隙时粉碎轴扭矩的变化曲线

Fig. 19　Variation curves of grinding shaft torque with different tool clearances

动定刀间隙对羊草粉碎长度分布影响如表 7 所示,随着动定刀间隙的减小,粉碎得到的羊草长度明显减小。采用动定刀间隙小于 22 mm 时,绝大部分羊草的长度分布在 0 ~ 8 cm 范围内。

动定刀间隙对抛送效果的影响如图 20 所示,随着动定刀间隙的减小,羊草抛送距离先增大后减小。采用 32 mm 的间隙时,粉碎得到的羊草尺寸较大,获得的动能较小,抛送距离为 9 m;采用 22 mm 的间隙时,粉碎得到的羊草尺寸适中,获得的动能较大,抛送距离增为 10 m;采用 12 mm 的间隙时,粉碎得到的羊草尺寸较小,获得的动能较大,羊草与出料口上方挡板发生碰撞后分散,抛送距离降为 8 m。

表 7　不同动定刀间隙时粉碎羊草长度分布比例

Tab. 7　Particle length distribution with different tool clearances　%

动定刀间隙/mm	粉碎羊草长度/cm			
	0 ~ 4	4 ~ 8	8 ~ 12	>12
32	38	28	21	13
22	41	50	5	4
12	74	25	1	0

因此,动定刀间隙为 22 mm 时,能降低粉碎扭矩,获得合适的粉碎长度和较远的抛料距离。

3.3.4　出料口仰角

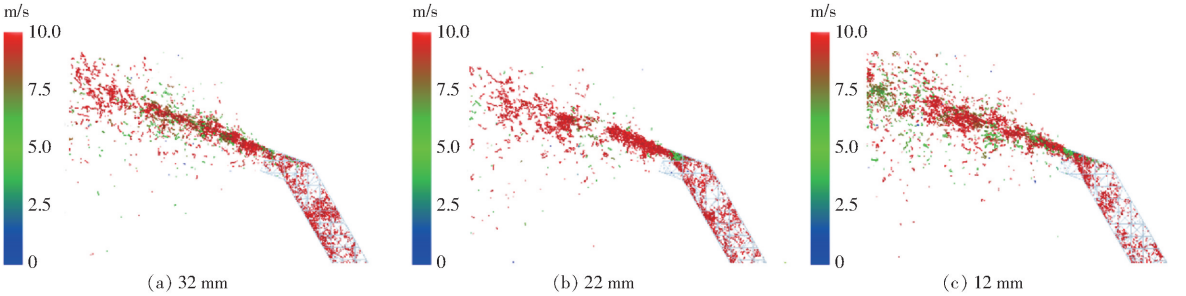
仿真条件:锤片转速为 1 500 r/min、锤片数量 24 把和动定刀间隙 22 mm。出料口仰角对抛送效果的影响如图 21 所示。随着出料口仰角的增大,羊草抛送距离先增大后减小。当出料口仰角为 10°时,羊草与出料口上部挡板的碰撞比较激烈,羊草降速显著,抛送距离为 6 m;当出料口仰角为 20°时,羊草与出料口上部挡板的碰撞减轻,抛送距离为 10 m;当出料口仰角为 30°时,物料抛出后产生较大的扩散,由于抛出角度太大,抛送距离降为 7.5 m。因此,出料口仰角选择 20°时可以获得更远的抛料距离。

4　试验

4.1　试验条件与测试指标

试验在黑龙江省大庆市润国牧场进行,试验羊草含水率 12%,长度在 30 ~ 65 cm 之间,试验样机如图 22 所示。

由仿真分析可知,最佳粉碎条件为:粉碎转速 1 500 r/min、锤片数量 24 把、动定刀间隙 22 mm、出



(a) 32 mm　(b) 22 mm　(c) 12 mm

图 20　不同动定刀间隙时羊草抛送效果

Fig. 20　Throwing effect diagrams of *Leymus chinensis* with different tool clearances

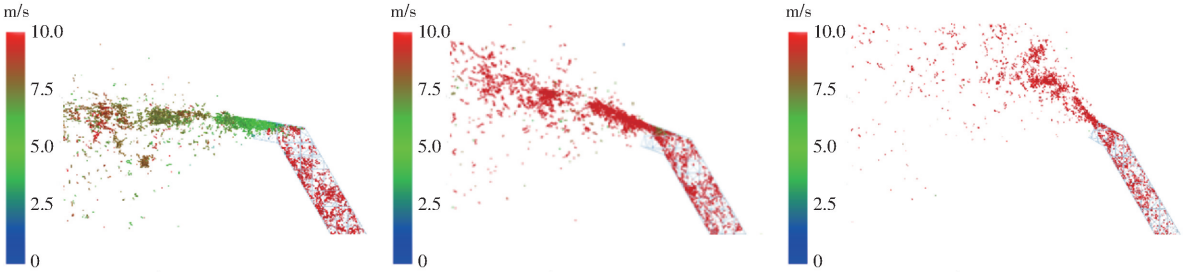


图 21 不同出料口仰角时抛送效果

Fig. 21 Throwing effect diagrams of *Leymus chinensis* at different discharging angles



图 22 试验样机

Fig. 22 Prototype

料口仰角 20°。选取最佳粉碎参数启动样机,采用叉车将直径为 1 m 左右成捆羊草投入粉碎机,在 0 ~ 10 r/min 范围内调节旋筒转速,寻找合适的供料速度和粉碎长度,然后试验重复进行 3 次,每次试验粉碎的成捆羊草体积为 6 m^3。试验的主要测试指标为粉碎效率、粉碎长度、抛料距离,取 3 次试验的平均值作为统计值。

4.2 试验结果与分析

当旋筒转速过低时,粉碎效率较低,电机负载太小。逐渐增加转速,当旋筒转速为 8 r/min 时,成捆压实羊草的粉碎效率为 25 m^3/h,单人作业效率是铡草机的 12 倍以上,单机作业效率是铡草机的 3 倍以上。粉碎得到的羊草饲料如图 23 所示。



图 23 粉碎的羊草饲料

Fig. 23 *Leymus chinensis* particles after grinding

粉碎得到的羊草饲料 90% 以上均破壁,搓揉效果良好。粉碎饲料直径分布在 0.1 ~ 1.2 mm 范围内,平均直径为 0.65 mm。绝大部分饲料长度分布在 16 ~ 157 mm 范围内,平均长度为 47 mm,饲喂效果较好,达到了设计要求。试验粉碎饲料长度分布为:0 ~ 4 cm 为 44%,4 ~ 8 cm 为 48%,8 ~ 12 cm 为 5%,12 cm 以上为 3%;仿真粉碎饲料长度分布 0 ~ 4 cm 为 41%,4 ~ 8 cm 为 50%,8 ~ 12 cm 为 5%,12 cm 以上为 4%。两者基本吻合。试验抛料距离为 11 m,仿真抛料距离为 10 m,试验距离稍大,是因为在实际粉碎中存在气流,抛送距离较远。

综上所述,试验指标均达到设计目标,满足养殖场的使用要求。

5 结论

(1)设计了由带传动机构、粉碎机构、液压系统、旋转机构、锥形圆筒料仓和抛料筒组成的旋筒供料锤式粉碎机,建立了粉碎和旋转作业的理论模型,并对锤片尺寸形状、回转半径、粉碎转速、抛送距离、输送能力、供料转速和粉碎长度等关键参数进行了设计与计算。

(2)采用 EDEM 软件对粉碎羊草的转速、锤片数量、动定刀间隙和出料口仰角进行了仿真分析,仿真得到的羊草最佳粉碎条件为粉碎转速 1 500 r/min,锤片数量 24 把、动定刀间隙 22 mm 和出料口仰角 20°。

(3)取羊草进行粉碎试验,试验结果与仿真分析基本一致。当旋筒转速为 8 r/min 时,成捆压实羊草的粉碎效率为 25 m^3/h,单人作业效率是铡草机的 12 倍以上,单机作业效率是铡草机的 3 倍以上。羊草破壁率大于 90%,搓揉效果良好。饲料直径分布在 0.1 ~ 1.2 mm 范围内,平均直径为 0.65 mm。绝大部分饲料长度分布在 16 ~ 157 mm 范围内,平均长度为 47 mm。由于在实际粉碎中存在气流,抛送距离为 11 m,比仿真抛料距离稍大。粉碎后的羊草饲喂效果较好,达到了设计目标。

参 考 文 献

[1] 曹丽英,李帅波,李春东,等. 锤片式饲料粉碎机的研究发展现状[J]. 饲料工业, 2021(3): 31 - 36.
CAO Liying, LI Shuaibo, LI Chundong, et al. The research and development status of hammer feed mill[J]. Feed Industry,

2021(3)：31－36. (in Chinese)
[2] SOITA H W, CHRISTENSEN D A, MCKINNON J J. Influence of particle size on the effectiveness of the fiber in barley silage [J]. Journal of Dairy Science,2000,83(10):2295－2300.
[3] KONONOFF P J, HEINRICHS A J. The effect of reducing alfalfa haylage particle size on cows in early lactation[J]. Journal of Dairy Science,2003,86(4):1445－1457.
[4] 丛宏斌,王克恒,李汝莘,等. 锥辊式玉米秸秆揉搓装置的设计[J]. 农业机械学报,2007,38(12):81－84,92.
CONG Hongbin, WANG Keheng, LI Rushen, et al. Design of acorn stalk rubbing cone[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(12):81－84,92. (in Chinese)
[5] 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 Xuefeng, DAI Fei, ZHANG Xuekun, 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. (in Chinese)
[6] 田海清,王海庆,黄涛, 等. 锤片饲料粉碎机组合形筛片设计改善粉碎性能[J]. 农业工程学报,2018,34(22):45－52.
TIAN Haiqing, WANG Haiqing, HUANG Tao, et al. Design of combination sieve for hammer feed mill to improve crushing performance[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 45－52. (in Chinese)
[7] 王德福,王沫,李利桥. 锤片式粉碎机粉碎玉米秸秆机理分析与参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(11):165－171.
WANG Defu, WANG Mo, LI Liqiao. Mechanism analysis and parameter optimization of hammer mill for corn stalk[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(11):165－171. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20171120&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.020. (in Chinese)
[8] 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 Honglei, JIANG Xinming, GUO Mingzhuo, et al. Design and experiment of V－L shaped smashed straw blade[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 28－33. (in Chinese)
[9] 郑智旗,何进,李洪文,等. 动定刀支撑滑切式秸秆粉碎装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊):108－116.
ZHENG Zhiqi, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of straw-chopping device with chopping and fixed knife supported slide cutting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(Supp.):108－116. (in Chinese)
[10] 刘晓亮. 秸秆粉碎还田机新型刀片的设计与试验[D]. 长春:吉林大学,2012.
LIU Xiaoliang. Design and experiment of the new smashed straw machine blade[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
[11] 陈松涛, 周学建, 师清翔, 等. 小麦秸秆还田机粉碎装置性能影响因素试验与优化[J]. 农业机械学报,2007,38(9):67－70,62.
CHEN Songtao, ZHOU Xuejian, SHI Qingxiang, et al. Experiment and optimization on factors affecting the performance of wheat stalk macerator smashing devices[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(9):67－70,62. (in Chinese)
[12] 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 Ming, WANG Jinli, DENG Yiguo, et al. Structural design and experiments on sugarcane leaf shattering and returning machine[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(2):121－126. (in Chinese)
[13] 严伟,吴努,顾峰玮,等. 叶片式抛送装置功耗试验研究与参数优化[J]. 中国农业大学学报,2017,22(7):99－106.
YAN Wei,WU Nu,GU Fengwei, et al. Parameter optimization and experiment for the power consumption of impeller-blower [J]. Journal of China Agricultural University, 2017,22(7):99－106. (in Chinese)
[14] 翟之平,王春光. 叶片式抛送装置气流流场数值模拟与优化[J]. 农业机械学报,2008,39(6):84－87.
ZHAI Zhiping, WANG Chunguang. Numerical simulation and optimization for air flow in an impeller blower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(6):84－87. (in Chinese)
[15] 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/OL]. 农业机械学报,2019,50(12):53－62.
MU Guizhi,XIN Qingqing,XUAN Guantao, et al. Design and experiment of knife roller and throwing device for sweet potato vine recycling machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(12):53－62. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20191206&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.006. (in Chinese)
[16] 史建新,陈发,郭俊先,等. 抛送式棉秆粉碎还田机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2006,22(3):68－72.
SHI Jianxin, CHEN Fa, GUO Junxian, et al. Design and experimental research of the field straw chopper with throwing cotton-stalk[J]. Transactions of the CSAE,2006,22(3):68－72. (in Chinese)
[17] 郑文秀,吕钊钦,张万枝,等. 单行甘薯秧蔓回收机设计与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(6):1－9.
ZHENG Wenxiu, LÜ Zhaoqin, ZHANG Wanzhi, et al. Design and test of single row sweet potato vine recycling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6): 1－9. (in Chinese)
[18] 梁冰,甘皓元. 在实验室中利用自由落体测定空气阻力系数[J]. 百色学院学报,2009,22(6):58－60.

(下转第 76 页)