

自走式全混合日粮制备机设计与试验

田富洋^{1,2} 陈玉华^{1,3} 宋占华^{1,2} 闫银发^{1,2} 李法德^{1,2} 王中华⁴

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东农业大学山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018; 3. 山东农业大学山东省农业装备智能化工程实验室, 泰安 271018; 4. 山东农业大学动物科技学院, 泰安 271018)

摘要: 针对目前国内奶牛饲喂过程中青贮池饲料运输成本高、操作工序多以及营养损失大等问题,在现有立式饲料搅拌机的基础上,确定了牛场青贮秸秆饲料高效饲喂的自走式全混合日粮制备机总体方案,设计了青贮池青贮秸秆饲料取料装置、环形输送装置、带有切碎刀片的立式搅拌装置以及可调节撒料范围的侧门撒料装置。针对人工手动或多功能单一机械移除青贮圆捆或方捆塑料拉伸膜效率低的问题,模拟人类牙齿咬切方法设计了一种切捆除膜装置,利用下割刀的咬合动作实现对青贮捆的抓捆、切捆、除膜等一体化作业。设计了一种高效挂接机构,可对青贮池取料装置和切捆除膜装置进行快速换装,实现了牛场青贮秸秆饲料高效饲喂的一体化作业。经试验检测,样机取料高度为5 000 mm,取料宽度为2 000 mm,全混合日粮总制备时间为23.7 min,得到全混合日粮混合均匀度为91.1%,全混合日粮生产率为29.6 m³/h,卸料自然残留率为0.7%,青贮秸秆捆破膜清除率达98.4%,验证了该机的实用性。

关键词: 全混合日粮; 青贮秸秆饲料; 切捆除膜; 搅拌; 自走式; 畜牧机械

中图分类号: S817.12+4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)03-0106-09

OSID:



Design and Experiment of Self-propelled TMR Preparation Mixer for Silage Straw Feed

TIAN Fuyang^{1,2} CHEN Yuhua^{1,3} SONG Zhanhua^{1,2} YAN Yinfu^{1,2} LI Fade^{1,2} WANG Zhonghua⁴

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machineries and Equipment, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

3. Shandong Provincial Engineering Laboratory of Agricultural Equipment Intelligence, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

4. College of Animal Science and Technology, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: The formula for a total mixed rations (TMR) was designed by animal nutrition experts and included roughage chopped to an appropriate length, concentrates, and various additives that were fully mixed in certain proportions. There were two main methods currently utilized for silage storage: in a silage pit and in silage bales. On the basis of the existing vertical feed mixer, the self-propelled TMR mixer with the loader and conveyor was developed, the scheme of this designed self-propelled TMR mixer was put forward, and the practicability of the prototype was verified. Silage bales wrapped with a stretchable film was widely used in the animal husbandry industry to remove the bottleneck when preparing silage straw feed. The current methods to manually remove the stretchable films or the use of machines with a plurality of single functions were time-consuming. Therefore, a bale splitter matched with a self-propelled TMR mixer that provided the functions of bale gripping and cutting, material loading, and film removal was designed to realize integrated feeding in the pasture with high efficiency. The self-propelled hydrostatic driving system was adopted, and the self-propelled TMR mixer realized the combined functions of reclaiming and conveying of material in the silage pit, mixing of roughage and concentrate, transporting and discharging of rations, self-propelled TMR mixers like that considered here

收稿日期: 2019-07-17 修回日期: 2019-08-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701701、2016YFD0700205)、山东省科技攻关项目(2017GNC10123)和山东省重点产业关键技术项目(2016CYJS05A02)

作者简介: 田富洋(1979—),男,副教授,博士,主要从事现代农业机械装备以及机器人动力学与控制研究,E-mail: sdaufy@163.com

通信作者: 李法德(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究,E-mail: lifade@sdau.edu.cn

played an important role in speeding up the utilization of crop straw as feed. This constituted one component of the implementation of a policy of ‘grain to feed’ with the aim of alleviating the problems arising when people and livestock compete for grain. The test results showed that the maximum height and width of reclaiming reached 5 000 mm and 2 000 mm, respectively, the average preparation time was 23.7 min. The mixing uniformity was 91.1%, the production efficiency of TMR was 29.6 m³/h, the residual rate of unloading was 0.7%, and the removal rate of the waste film was 98.4%, which met the stipulated requirements and provided a reference for further design of the equipment.

Key words: total mixed ration; silage straw feed; bale cutting and film removal; mixer; self-propelled; animal husbandry machinery

0 引言

全混合日粮 (Total mixed rations, TMR) 是按照反刍动物 (牛、羊和鹿等) 不同生长阶段的生理需要, 根据动物营养专家设计的配方, 把切碎 (揉搓) 至适当长度的粗料、精料以及各种添加剂按照一定的配比进行充分混合而得到的一种营养相对均衡的饲料^[1-3]。TMR 搅拌机能够将多种物料进行搅拌混合, 用来生产全混合日粮, 同时结合相关 TMR 饲喂技术, 可以确保奶牛所采食的全混合日粮的营养浓度一致^[4]。

目前, 世界上畜牧业发达的美国、加拿大、以色列、德国、挪威、法国、荷兰、意大利等国家已经普遍采用全混合日粮 (TMR) 饲喂技术^[5-12]。我国推广具有取料、搅拌和撒料等多功能的一体化 TMR 正处于关键时期, 还存在着诸多制约因素, 如饲养理念、日粮技术、精准养殖技术等。虽然国内有多家企业生产 TMR 机械, 但一体化 TMR 饲喂机械设备主要依赖国外进口, 而且针对 TMR 饲喂机械的相关研究也较少。郭英洲等^[13]针对移动式青贮取料机进行了研究; 万霖等^[14]设计了小型牵引式立式全混合日粮饲料搅拌车, 确定了主要工作部件的结构参数, 并对螺旋搅拌器主轴的受力和运动特性进行了数值模拟研究; 王德福团队^[15-19]对单轴卧式 TMR 机、叶板式 TMR 机、轮转式 TMR 机等进行了试验研究, 分析了混合机部分机构以及相关工艺参数的优化组合方案, 对全混合日粮混合质量评价指标的试验方法也进行了相关探究; 针对青贮包饲料取料人工劳动强度大的问题, 陈玉华等^[20]研究了一种上颚式青贮捆的切捆除膜装置, 可以配合 TMR 机实现青贮饲料制备作业。

目前, 国内青贮饲料储存方法主要有两种: 在青贮池内贮藏和以青贮捆包形式贮藏。国内奶牛养殖企业从青贮池取料再到牛场饲喂多为单机操作, 机械设备只能完成其中的一项作业任务。针对青贮池饲料运输成本高、操作工序多以及营养损失大等问题, 本文设计通过快速挂接可实现青贮池取料和青

贮捆包取料的自走式全混合日粮制备机整体结构, 模拟人类牙齿咬合动作设计青贮捆包的抓捆、切捆、除膜装置, 设计青贮池取料和输送机构, 根据奶牛饲喂饲料特性设计青贮饲料的混合搅拌及撒料装置。

1 主要结构与工作原理

1.1 主要结构

自走式全混合日粮制备机结构示意图如图 1 所示。

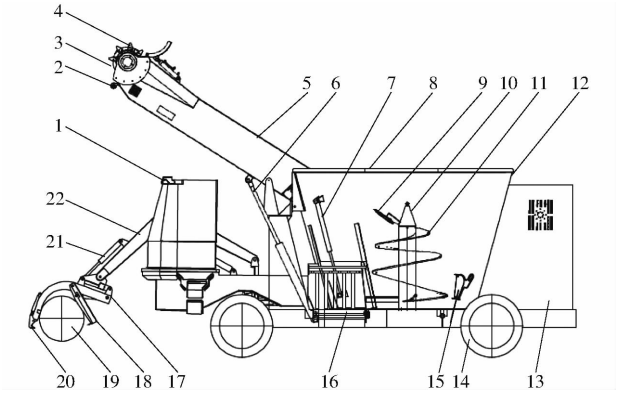


图1 自走式全混合日粮制备机结构示意图
Fig.1 Sketch of self-propelled TMR preparation mixer for silage straw feed

1. 驾驶室 2. 地轮 3. 取料装置 4. 切刀 5. 输送装置 6. 举升液压缸 7. 撒料液压缸 8. 搅拌装置 9. 动刀片 10. 锥筒 11. 螺旋搅拌器 12. 料箱 13. 液压动力装置 14. 行走轮胎 15. 定刀 16. 撒料装置 17. 切捆除膜装置 18. 割刀 19. 青贮捆 20. 夹膜机构 21. 液压缸 22. 机械臂

自走式全混合日粮制备机主要由取料装置、切捆除膜装置、输送装置、全混合日粮搅拌装置、自动撒料装置、自走式静液压驱动和智能控制系统等组成。实现了青贮饲料的自动取料、边行走边混合等功能, 同时可将全混合日粮通过自动撒料装置直接抛撒到牛场内进行饲喂, 一台设备完成牧场中取料—搅拌—输送—撒料的全程工作。自走式全混合日粮制备机的主要技术参数如表 1 所示。

1.2 工作原理

自走式全混合日粮制备机采用自走式静液压驱动系统, 将智能计量取料、切捆除膜、自动计量精料、

表 1 自走式全混合日粮制备机性能参数
Tab.1 Performance parameters of self-propelled

TMR mixer	
参数	数值/形式
发动机额定功率/kW	120
发动机额定转速/(r·min ⁻¹)	2 000
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	8 410×2 730×3 160
结构质量/kg	8 500
生产率/(m ³ ·h ⁻¹)	29.6
取料切割形式	滚筒切割
取料装置切刀数量	48
取料高度×宽度/(mm×mm)	5 000×2 000
搅拌容积/m ³	16
螺旋搅拌器布置形式	立式
螺旋搅拌器数量	1
螺旋搅拌器动刀片数量	11
料箱定刀片数量	3

混合搅拌、牛舍自动撒料等多项功能优化组合于一体,如图 2 所示,具有两个功能:实现打捆包膜青贮秸秆的自动抓捆、碎捆、除膜、取料、搅拌、撒料等作业;通过快速卸除切捆除膜装置实现青贮池饲料的取料、搅拌、撒料等作业。工作时,根据全混合日粮配方按照先粗后精、先长后短、先干后湿的原则装取各种饲料,通过智能计量器精确控制每种饲料的加载量;根据以下两种情况快速设置自走式全混合日粮制备机取料装置:针对打捆包膜青贮秸秆饲料取料,调整切捆除膜装置的工作位置,启动自走式全混合日粮制备机搅拌装置使螺旋搅拌器旋转后,开启切捆除膜装置,液压操控叉齿穿透裹包膜插入青贮捆包内,同时割刀夹持住青贮捆包底端并向上提升,类比人的牙齿咬合动作,割刀在油缸驱动下将青贮捆包切成 2 块,裹包膜解除与饲草捆的附着力,当松开割刀时,饲草物料在自重作用下落入搅拌装置的料箱内,启动搅拌装置使螺旋搅拌器旋转,旋转的螺旋搅拌器将饲草捆破碎,此时废膜仍阻滞在夹膜机构上,在进入下一个青贮捆抓取工序前,转动切捆除膜装置从料箱上方位置移开,随后通过辅助夹持油缸缩回活塞杆,裹包废膜随之被释放,最后可集中回收地上废膜。

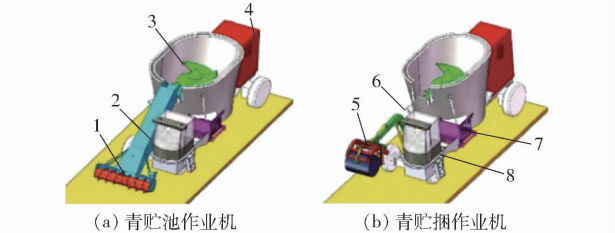


图 2 自走式全混合日粮制备机作业效果图
Fig. 2 3D work models of self-propelled TMR mixer
1. 青贮池取料装置 2. 输送装置 3. 饲料搅拌装置 4. 发动机
5. 青贮捆抓取装置 6. 抓捆机械臂 7. 撒料装置 8. 驾驶室

收地上废膜。

针对青贮池饲料取料,通过模块化快速挂接机构将切捆除膜装置快速卸除,利用取料装置完成青贮池饲料的破料、取料。然后,将自走式全混合日粮制备机转移至精料仓下添加精饲料,借助智能计量系统自动计量,避免产生装料误差,搅拌装置料箱内的饲料通过螺旋搅拌器充分搅拌混合后,最后进入牛舍经自动撒料装置按奶牛所需饲料量抛撒喂食。

2 关键部件设计

2.1 取料装置

取料装置主要由切刀、滚筒、螺旋叶片、取料头轴和驱动液压马达组成,如图 3 所示。在取料头滚筒旋转的过程中,安装在螺旋叶片上的 48 片切刀将切下的青贮饲料向中间位置拨料,同时将切下的青贮饲料向后下方的转套内区域输送,从而可使切切的青贮饲料进一步传送至输送装置,滚筒还焊接有 4 个导向刀片,以使沿着螺旋叶片径向方向移动的青贮饲料加速运动至输送带,同时加快青贮饲料从滚筒两端向中部快速推进,该结构能有效防止青贮饲料在滚筒中间产生堵塞现象。

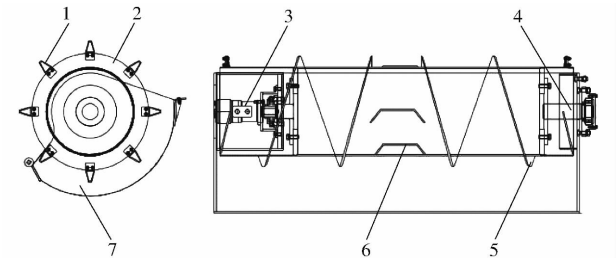


图 3 取料装置结构示意图
Fig. 3 Schematic of silage loader

1. 切刀 2. 滚筒 3. 驱动液压马达 4. 取料头轴 5. 螺旋叶片
6. 导向刀片 7. 转套

滚筒直径为 530 mm,轴向长度为 2 000 mm,确保足够的物料接触面积,同时可使青贮物料不抛撒到转套外面,进而提高切料效率。BM4-390 型马达可提供 697 N·m 的连续扭矩,确保滚筒切刀能顺利切下青贮物料,当物料阻力较大时,可低转速大扭矩旋转切料。BM4-390 型马达额定转速为 200 r/min,最大转速为 240 r/min,本文设计的切刀尖端与滚筒中心距离为 320 mm,可计算出切刀的刀尖线速度为

$$v_q = \frac{2\pi r_q n}{60\,000} = \frac{2\pi \times 320 \times 200}{60\,000} = 6.7\text{ m/s} \quad (1)$$

同理,可得切刀最大瞬时线速度为

$$v_{q\max} = \frac{2\pi r_q n}{60\,000} = \frac{2\pi \times 320 \times 240}{60\,000} = 8\text{ m/s} \quad (2)$$

式中 v_q ——切刀线速度, m/s
 v_{qmax} ——切刀最大瞬时线速度, m/s
 r_q ——切刀尖端与滚筒中心距离, mm
 n ——液压马达转速, r/min
故取料装置切刀线速度的作业范围为 6.7 ~ 8.0 m/s。

取料装置螺旋输送机物料生产率为

$$Q_l = \frac{\pi}{24} [(D_l - 2\lambda)^2 - d^2] \varphi_l P n \rho C \times 10^{-10} \quad (3)$$

式中 Q_l ——螺旋输送机物料生产率, kg/s
 D_l ——螺旋输送机叶片外径, 取 500 mm
 λ ——螺旋输送机叶片与转套外壳的间隙, 取 8 mm
 d ——螺旋输送机轴内径, 取 402 mm
 φ_l ——螺旋输送机充满系数, 取 0.4
 P ——叶片螺距, 取 285 mm
 ρ ——青贮物料密度, 取 420 kg/m³
 C ——螺旋输送机倾斜输送系数, 取 0.75

代入数值, 最终计算可得取料装置螺旋输送机物料生产率为 13.7 kg/s。

2.2 切捆除膜装置

根据人类牙齿咬合动作设计青贮捆包的抓取、切捆、除膜装置, 如图 4 所示, 装置主要由支撑叉齿、割刀、夹膜机构以及液压油缸驱动装置等部分组成。

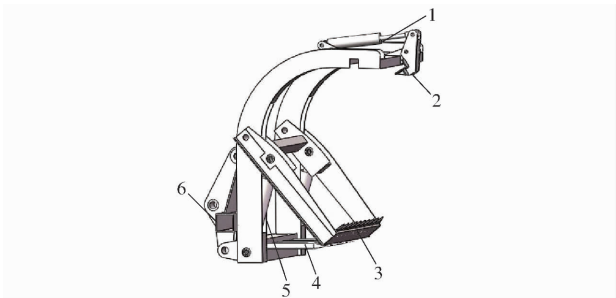


图 4 切捆除膜装置结构示意图

Fig. 4 Bale splitter model

1. 夹膜液压缸 2. 夹膜机构 3. 割刀 4. 支撑叉齿 5. 切捆液压缸 6. 挂接机构

切捆作业时, 首先调整下颚式切捆除膜装置的工作位置, 操控主液压缸使割刀绕枢轴向上转动与青贮秸秆捆相接触, 当割刀紧紧咬合住青贮捆时, 主液压缸中急剧上升的液压力使割刀切入青贮捆; 此时可操作辅助液压缸使活塞杆伸出, 从而向下转动的夹膜机构抓钩挤压住青贮捆裹包膜, 类似人的牙齿咬合动作, 当割刀向上运动到几乎完全切过青贮捆时, 将圆捆(或方捆)青贮捆包切成 2 块, 包裹在裹包膜内的秸秆草料在自重作用下落入搅拌装置料箱内; 随后再由辅助液压缸驱动夹持抓钩使其缩回, 同时裹包膜被释放至地面上, 以便于废膜的集中回

收与利用, 随即完成青贮捆的切捆除膜作业过程。

2.3 输送装置

输送装置主要由下辊轮组合件、液压马达、输送筒、环形输送带以及上辊轮组合件等组成。输送装置结构示意图如图 5 所示。

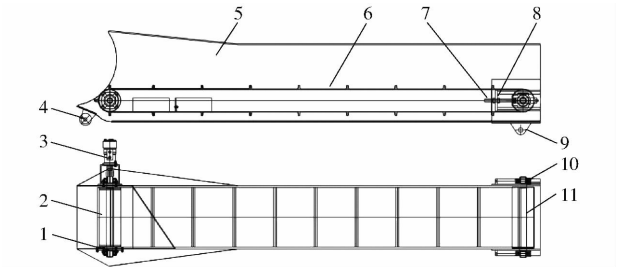


图 5 输送装置结构示意图

Fig. 5 Structure sketch of conveying device

1. 带方形座外球面轴承 2. 下辊轮组合件 3. 液压马达 4. 地轮 5. 输送筒 6. 环形输送带 7. 六角头螺栓 8. 六角螺母 9. 枢转轴 10. 带滑块座外球面轴承 11. 上辊轮组合件

输送装置的物料输送量公式为

$$Q_c = 3.6 B h v_s \rho \varphi k_q \times 10^{-6} \quad (4)$$

式中 Q_c ——物料输送量, t/h
 B ——输送带导料槽宽度, 取 500 mm
 h ——输送带导料槽高度, 取 30 mm
 v_s ——输送带升运速度, 取 3.5 m/s
 φ ——输送效率, 取 0.88
 k_q ——倾斜输送系数, 取 0.6

经过计算得到输送装置物料输送量为 53 t/h (14.7 kg/s), 大于前述取料装置螺旋输送机物料生产率 13.7 kg/s, 因此在青贮物料输送过程中能够有效防止物料堵塞问题, 表明该结构参数设计合理。

输送装置传动辊筒轴的功率计算公式为

$$N_c = (K_k L v + K_z L Q_c + 0.00273 Q_c H) K_f \times 10^{-3} \quad (5)$$

式中 N_c ——传动辊筒轴功率, kW
 K_k ——空载运行功率系数, 取 0.01
 L ——输送带水平投影长度, 取 2500 mm
 K_z ——水平满载运行功率系数, 取 8.17×10^{-5}
 H ——输送带垂直输送高度, 取 2320 mm
 K_f ——附加功率系数, 取 8.5

代入数据经过计算可得输送装置传动辊筒轴的功率消耗为 3.69 kW。

为了精确控制搅拌装置料箱的青贮进料量, 支撑料箱的机架上安装有 3 个称量传感器, 当智能称量系统产生与所需特定饲料质量对应的数值信号时, 取料装置刀辊的旋切速度随着输送带减速也逐渐降低, 当智能称量系统针对某一种饲料产生已经全部装载完毕时的指示信号时, 取料刀辊停止转动

不再继续切割取料。

2.4 青贮包切捆除膜机械臂

青贮包切捆除膜机械臂由液压缸、动臂、回转支承等组成。机械臂结构示意图如图6所示。

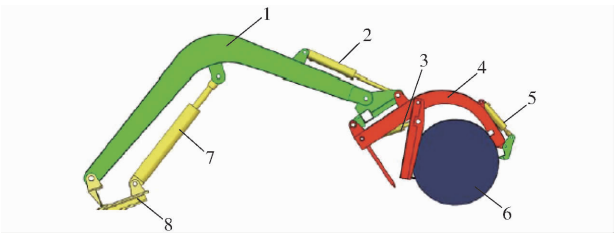
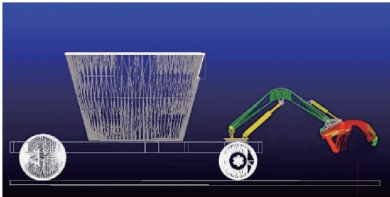
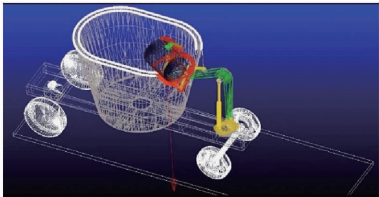


图6 切捆除膜装置装配体
Fig.6 Assembly of splitter mechanism

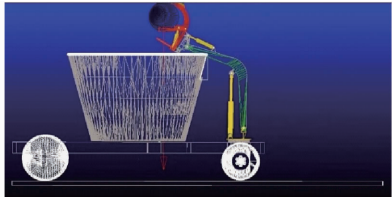
1. 动臂 2. 举升油缸 3. 切捆油缸 4. 下颚式切捆除膜装置
5. 夹持油缸 6. 青贮捆 7. 动臂油缸 8. 回转支承



(a) 自动抓捆



(b) 将青贮捆转移至料箱



(c) 开始切捆和装料

图7 切捆机构作业过程仿真

Fig.7 Simulation of operation process of splitter mechanism

门、驱动马达等组成。搅拌装置结构示意图如图8所示。

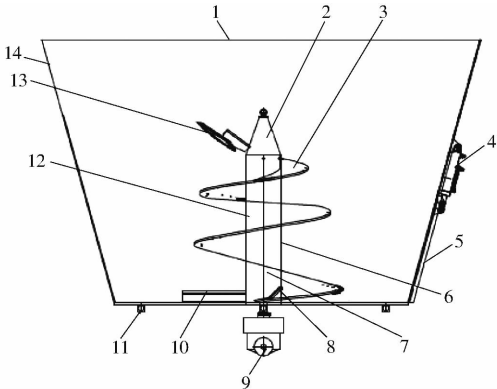


图8 搅拌装置结构示意图
Fig.8 Structure diagram of mixing device

1. 搅拌装置 2. 锥筒 3. 螺旋叶片 4. 液压缸 5. 卸料闸门
6. 套筒 7. 传动轴 8. 拨料板 9. 液压马达 10. 踢脚板
11. 称量传感器 12. 螺旋搅拌器 13. 锯齿形驱动刀片 14. 料箱

螺旋搅拌器作为搅拌装置的核心部件,其设计外观呈锥形,如图9所示。螺旋搅拌器在搅拌作业时需要多种物料进行剪切、揉搓以及混合,实际受力情况较为复杂,其受力不但与螺旋搅拌器设计结构相关,而且还与所混合的各种物料本身的物理特性有关。螺旋搅拌器叶片的平均压力计算公式为

$$F=100P_k^2(0.215M_c^2-10.62M_c+10.8D_j^2+130) \tag{6}$$

将自走式全混合日粮制备机三维模型导入ADAMS软件中,进行青贮包抓捆、举捆、切捆、装料等过程的仿真。假定青贮捆模型为圆柱体,整体尺寸设为 $\Phi 1\,200\text{ mm}\times 1\,100\text{ mm}$,青贮捆密度取 420 kg/m^3 ,泊松比为0.3^[21],仿真如图7所示,仿真模拟抓捆—切捆—装料等作业步骤,可知切捆除膜装置设计方案满足作业要求,不存在机体干涉问题。

2.5 搅拌装置

根据育成牛和泌乳阶段奶牛的营养需要和饲养方案,按照营养专家提供的全混合日粮配方,用特制的全混合日粮搅拌机对日粮各组分进行充分混合,为奶牛24 h自由采食创造反刍胃的消化环境,使日粮能达到营养均衡的要求^[8]。自走式全混合日粮制备机搅拌装置主要由料箱、螺旋搅拌器、卸料闸

式中 P_k ——螺距长度改变系数,取1
 M_c ——混合物料的含水率
 D_j ——螺旋搅拌器螺旋叶片末端直径,mm
螺旋搅拌器3个螺旋叶片直径设计值分别为2 470、1 730、1 220 mm,代入式(6)最终计算得到3个螺旋叶片的平均压力分别为19 325、15 968、14 343 Pa。

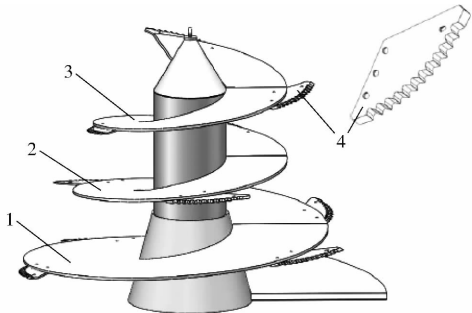


图9 螺旋搅拌器结构示意图

Fig.9 Structure sketch of screw auger

1. 第一螺旋叶片 2. 第二螺旋叶片 3. 第三螺旋叶片 4. 动刀片

2.6 自动撒料装置

自动撒料装置由强磁除铁器、液压马达以及传动链轮等组成。采用宽大卸料闸门,加装额外的强磁除铁器,可实现全混合日粮均匀撒料和安全饲喂的功能;利用卸料螺旋搅拌器配备双侧门撒料装置和抛撒宽度自动调整装置,以调节撒料范围和提高了撒料均匀度,可实现自走式全混合日粮制备机左右

两侧同时撒料。此外,可以利用双向液压控制装置自动调整撒料宽度的放料斗,以适应不同规模牛舍的饲喂要求,自动撒料装置具有节约时间、操作简单以及降低饲喂成本等优点,通过该装置可实现牛场喂食奶牛的目的。撒料装置结构示意图如图 10 所示。

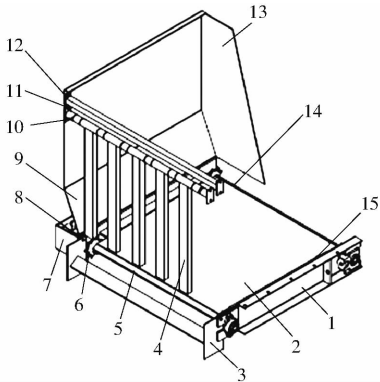


图 10 撒料装置结构示意图

Fig. 10 Structure sketch of spreading device

1. 侧板 2. 底板 3. 前磁铁 4. 立磁铁 5. 主动轴 6. 链轮
7. 马达座 8. 马达 9. 上侧板 10. 间隔套 11. 磁铁固定轴
12. 连接架 13. 后封板 14. 从动轴 15. 链条

本文采用的链轮半径为 46.5 mm, 配备 BMP-160 型摆线马达, 额定转速为 310 r/min, 得出全混合日粮撒料传送速度为

$$v = \frac{2\pi r_l n}{60\,000} = \frac{2\pi \times 46.5 \times 310}{60\,000} = 1.5 \text{ m/s} \quad (7)$$

式中 r_l ——链轮半径, mm

为确保每头奶牛获得最佳的采食量, 从卸料闸门撒出的全混合日粮要均匀一致。牧场饲养员可根据实际需要来调节卸料闸门开启的大小, 当不需要继续撒料时, 可随时关闭卸料闸门, 确保料箱里的物料不再被抛撒, 避免造成 TMR 物料的浪费。

3 试验

3.1 试验材料

本样机试验地点选在山东省肥城市忠利奶牛养殖专业合作社, 合作社奶牛存栏量 2 000 头, 日消耗青贮饲料 40 t, 能满足自走式全混合日粮制备机性能试验的条件。

试验用仪器、仪表和量具包括干燥箱、磅秤、秒表、宾州筛、点温计、电子秤、米尺、标准砝码、天平(感量 0.5 级)、转速表、成套测功仪表(精度 1 级)、取样袋和样品铝盒等。试验用物料采用统一全混合日粮配方, 精饲料和粗饲料的混合比为 3:7, 且粗、精饲料不能含有与示踪剂相同的物料, 其中, 粗饲料中的苜蓿草比例为 15%~20%, 碱草(羊草)比例为 15%~20%, 含水率应小于或等于 15%; 青贮饲料比例为 60%~70%, 含水率为 60%~70%; 精饲料

的配比可根据牧场现有情况选取, 而且每次试验物料量应不少于本样机料箱设计容量的 70%^[22]。

测定试验物料相对含水率时, 可从每一种待测物料不同位置处取样 3 次, 每点取样约 50 g, 将样品分别放入铝盒内立即称量, 然后在 105℃ 恒温下把物料干燥至质量不变, 再称量干燥后的质量。物料相对含水率为

$$M_{CH} = \frac{m_s - m_g}{m_s} \times 100\% \quad (8)$$

式中 M_{CH} ——物料相对含水率, %

m_s ——干燥前样品质量, kg

m_g ——干燥后样品质量, kg

3.2 评价指标

应用自走式全混合日粮制备机加工青贮料, 要因地制宜地合理选择饲料搅拌加工设备^[5,9]。本机器柴油发动机推荐工作转速为 1 300~1 500 r/min, 从取料、搅拌再到撒料作业连续作业时长为 15~25 min。牛嘴的宽度为 12~15 cm, 可消化的秸秆纤维长度在 3~10 cm, 如果纤维太长, 奶牛拒绝采食; 如果纤维太短, 则很快就会通过消化道而不能被充分吸收^[10]。参考文献[3,5,6,8,10,15,18], 选定全混合日粮混合均匀度、全混合日粮撒料均匀度、全混合日粮物料自然残留率、全混合日粮生产率、青贮秸秆捆破膜清除率作为自走式全混合日粮制备机试验评价指标。

3.2.1 全混合日粮混合均匀度

测定全混合日粮混合均匀度的示踪物为水稻颗粒, 水稻示踪物在添加精饲料期间与物料同时加入, 添加量为物料总量的 5%^[23]。待各试验物料充分混合后, 随着卸料闸门口物料不断排出, 等间隔抽取不少于 50 个样品, 并且每个样品的质量不少于 2 000 g, 作为混合均匀度测试样本, 然后分别挑拣出每个样品中的全部示踪物并称量, 计算每份样品的示踪物质量与样品质量的百分比。计算样本标准差和混合均匀度

$$S_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}} \quad (9)$$

$$M_h = \left(1 - \frac{S_h}{\bar{X}}\right) \times 100\% \quad (10)$$

式中 S_h ——混合样本标准差

N ——样本数量

X_i ——样本中示踪物质量与样品质量百分比, %

$\bar{X}$ ——样本中示踪物质量与样品质量百分比的平均值, %

M_h ——全混合日粮混合均匀度, %

对于全混合日粮混合效果评价,当混合均匀度大于 90% 时表示混合质量优,混合均匀度大于 80% 且小于 90% 时表示混合质量可以接受,但仍需进一步改善。全混合日粮混合均匀度越高表示搅拌越均匀,营养成分也更均衡,实际生产中要求不同车次的全混合日粮制备机所制备的全混合日粮混合均匀度大于 90%。

3.2.2 全混合日粮撒料均匀度

选取一个长度不小于 200 m 且宽度不小于 5 m 的平直而宽阔的撒料场地,每间隔 10 m 做一个标记,即:0、1、2、…、20 共 21 个标记;然后模拟自走式全混合日粮制备机在牛舍实际喂料的作业情况,从标记 0 处开始撒料,直到超过标记的第 20 点为止;在标记 2~19 处,取不少于 15 个样品,在每点挑取相同长度的物料,称量并编号。计算样本标准差和撒料均匀度

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (m_i - \overline{m})^2}{N - 1}}$$
 (11)

$$M_x = \left(1 - \frac{S_x}{\overline{m}}\right) \times 100\%$$
 (12)

式中 S_x ——撒料样本标准差
 m_i ——第 i 个样品质量, kg
 $\overline{m}$ ——样品质量平均值, kg
 M_x ——撒料均匀度, %

3.2.3 全混合日粮物料自然残留率

在每批次全混合日粮充分混合结束并自然卸料后,对自走式全混合日粮制备机料箱内部进行彻底清理,同时对收集的残留物料称量,该质量与每批次全混合日粮的质量之比就是全混合日粮物料自然残留率。物料自然残留率计算式为

$$R = \frac{\Delta m}{m_c} \times 100\%$$
 (13)

式中 R ——全混合日粮物料自然残留率, %
 Δm ——料箱内残留物料质量, kg
 m_c ——料箱额定批次物料质量, kg

3.2.4 全混合日粮生产率

全混合日粮生产率计算公式为

$$E_t = \frac{\sum V_i}{\sum t_i}$$
 (14)

式中 $\sum V_i$ ——日粮生产试验期间车次取料和装料体积, m^3
 $\sum t_i$ ——日粮生产试验期间车次纯工作时间, h

3.2.5 青贮秸秆捆破膜清除率

首先安装切捆除膜装置,利用青贮包切捆除膜机械臂调整切捆除膜装置的工作位置,启动切捆液压缸将青贮秸秆捆包切成 2 块,草捆在自重作用下落入搅拌装置料箱内,夹膜机构夹住裹包膜防止掉入搅拌装置;当裹包膜内秸秆物料排净之后,转动切捆除膜机构从料箱上方位置移开,随后通过辅助夹持油缸控制夹膜机构,裹包废膜则被释放。收集地上废膜,记录收集的废膜质量,同时挑拣出掺杂进搅拌装置料箱内的全部裹包膜并称量。相同工况下切割 5 个秸秆捆包,计算每个捆包的破膜清除率并最终取其算术平均值。

$$S = \frac{\Delta m_s}{m_i + \Delta m_s} \times 100\%$$
 (15)

式中 S ——破膜清除率, %
 Δm_s ——地上收集的废膜质量, g
 m_i ——掺杂进料箱内的裹包膜质量, g

3.3 样机试验

2018 年 12 月 29 日,山东省农业机械科学研究院产品质量检测中心对 9JZL-16 型自走式全混合日粮制备机进行了检验鉴定。检测地点在山东省肥城市忠利奶牛养殖专业合作社,该奶牛场的青贮池属于半地下结构,宽度为 3 000 mm,饲料深度为 4 500 mm;青贮饲料为全株玉米切碎 2~3 cm 制成,含水率 64.8%,发酵 60 d 后开始取料;制作的全混合日粮青贮饲料占 70%,精饲料占 30%,精饲料含水率 13.7%。试验选用 5 个圆柱青贮捆为试验对象,其整体尺寸为 $\Phi(1\,200 \pm 6) \times (1\,100 \pm 6)$ mm,青贮捆密度 (420 ± 10) kg/m^3 ,青贮专用拉伸膜裹包 4 层。经试验检测,样机取料高度为 5 000 mm,取料宽度为 2 000 mm,全混合日粮总制备时间为 23.7 min,得到全混合日粮混合均匀度为 91.1%,全混合日粮生产率为 29.6 m^3/h ,卸料自然残留率为 0.7%,青贮秸秆捆破膜清除率达 98.4%。检验结果均符合 JB/T 11438—2013《全混日粮搅拌机》国家标准和 Q/XFNM 001—2018《自走式全混合日粮制备机》企业标准。

取料试验包括青贮捆的切捆取料和青贮池内取料。切捆取料试验如图 11,青贮池内取料如图 12,搅拌试验如图 13,撒料试验如图 14 所示。该样机可完成青贮捆抓捆机、青贮饲料取料机、皮带输送机、TMR 饲料搅拌机及撒料车等多种单一畜牧机械设备的全部作业功能。

4 结论

(1)设计了自走式全混合日粮制备机,该机采



图 11 切捆试验
Fig. 11 Bale-cutting test



图 12 青贮池取料
Fig. 12 Silage tank feeding test



图 13 搅拌试验
Fig. 13 Mixing test



图 14 撒料试验
Fig. 14 Distribution test

用轮式行走底盘,整机采用全液压驱动,集青贮池饲料的取料与输送、粗精饲料搅拌、物料运输和自动撒料饲喂等作业于一体。针对目前国内通过人工手动或借助多功能单一机械移除青贮圆捆(方捆)裹包膜而造成费时、费力、高成本的问题,研制出一种集抓捆、切捆、除膜和装料等功能于一体的切捆除膜装置,通过快速挂接装置,更换青贮池饲料取料装置和切捆除膜装置,实现了牛场不同类型青贮物料的高效饲喂一体化作业。

(2)自走式全混合日粮制备机的取料装置为滚筒切割形式,设计切刀线速度为 $6.7\sim8.0\text{ m/s}$,可满足青贮池青贮料的切取要求和 16 m^3 料箱容量饲料的制备进度,撒料装置传送速度控制在 1.5 m/s ,可使卸料更均匀。经试验检测,样机取料高度为 $5\,000\text{ mm}$,取料宽度为 $2\,000\text{ mm}$,全混合日粮总制备时间为 23.7 min ,得到全混合日粮混合均匀度为 91.1% ,全混合日粮生产率为 $29.6\text{ m}^3/\text{h}$,卸料自然残留率为 0.7% ,青贮秸秆捆破膜清除率达 98.4% 。该机满足全混合日粮制备机相关的国家标准。

参 考 文 献

[1] 陈玉华,田富洋,闫银发,等. 国内外 TMR 饲喂技术及其制备机的研究进展[J]. 中国农机化学报,2017,38(12):19-29.
CHEN Yuhua, TIAN Fuyang, YAN Yinfa, et al. Research progress of domestic and foreign TMR feeding technologies and mixers [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(12):19-29. (in Chinese)

[2] KAMMEL D W. Design, selection and use of TMR mixers[C]//Tri-state Dairy Nutrition Conference, Florida, 1998.

[3] SCHÄREN M, JOSTMEIER S, RUESINK S, et al. The effects of a ration change from a total mixed ration to pasture on health and production of dairy cows[J]. Journal of Dairy Science, 2015, 99(2):1183-1200.

[4] SOVA A D, LEBLANC S J, MCBRIDE B W, et al. Accuracy and precision of total mixed rations fed on commercial dairy farms [J]. Journal of Dairy Science, 2014, 97(1):562-571.

[5] ARZOLA-ÁLVAREZ C, BOCANEGRA-VIEZCA J A, MURPHY M R, et al. Particle size distribution and chemical composition of total mixed rations for dairy cattle: water addition and feed sampling effects[J]. Journal of Dairy Science, 2010, 93(9):4180-4188.

[6] BEAUCHEMIN K A, YANG W Z, RODE L M. Effects of particle size of alfalfa-based dairy cow diets on chewing activity, ruminal fermentation, and milk production[J]. Journal of Dairy Science, 2003, 86(2):630-643.

[7] MCCORMICK M E, HAN K J, MOREIRA V R, et al. Evaluation of alfalfa inter-seeding effect on bahiagrass baleage fermentation and lactating Holstein performance[J]. Journal of Animal Science and Biotechnology, 2014, 5(1):1-9.

[8] KMICIKIEWYCZ A D, HARVATINE K J, HEINRICHS A J. Effects of corn silage particle size, supplemental hay, and forage-to-concentrate ratio on rumen pH, feed preference, and milk fat profile of dairy cattle1[J]. Journal of Dairy Science, 2015, 98(7):4850-4868.

[9] OELBERG T J, STONE W. Monitoring total mixed rations and feed delivery systems[J]. Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice, 2014, 30(3):721-744.

[10] EASTRIDGE M L, STARKEY R A, GOTT P N, et al. Dairy cows fed equivalent concentrations of forage neutral detergent

- fiber from corn silage, alfalfa hay, wheat straw, and corn stover had similar milk yield and total tract digestibility[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2017, 225: 81 – 86.
- [11] CATTERTON T L, ERDMAN R A. The effect of cation source and dietary cation-anion difference on rumen ion concentrations in lactating dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2016, 99(8): 1 – 11.
- [12] GROEN M J, STEELE M A, DEVRIES T J. Short communication: effect of straw inclusion rate in a dry total mixed ration on the behavior of weaned dairy calves[J]. *Journal of Dairy Science*, 2015, 98(4): 2693 – 2700.
- [13] 郭英洲, 李志奎, 李存斌, 等. 9QZ-2.0 型自走式青贮取料机的研制[J]. *农机化研究*, 2010, 32(8): 104 – 106.
GUO Yingzhou, LI Zhikui, LI Cunbin, et al. Research of the 9QZ-2.0 self-propelled silage loader[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2010, 32(8): 104 – 106. (in Chinese)
- [14] 万霖, 汪春, 马永才, 等. 小型立式 TMR 饲料搅拌车的设计与仿真研究[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2009, 21(6): 15 – 17, 28.
WAN Lin, WANG Chun, MA Yongcai, et al. Design of a small vertical TMR mixer and simulation[J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2009, 21(6): 15 – 17, 28. (in Chinese)
- [15] 王德福, 张全国. 全混合日粮混合质量评价指标试验方法的研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(5): 126 – 129.
WANG Defu, ZHANG Quanguo. Experimental methods for evaluating indexes of processing quality of total mixed ration [J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(5): 126 – 129. (in Chinese)
- [16] 王德福, 王吉权. 单卧轴全混合日粮混合机的试验[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(6): 205 – 207.
WANG Defu, WANG Jiquan. Test of a single horizontal mixer of total mixed ration[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(6): 205 – 207. (in Chinese)
- [17] 王德福, 李超, 李利桥, 等. 叶板式饲料混合机混合机理分析与参数优化[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(12): 98 – 104.
WANG Defu, LI Chao, LI Liqiao, et al. Mechanism analysis and parameter optimization of blade-type feed mixer [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(12): 98 – 104. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171211&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.011. (in Chinese)
- [18] 李利桥, 王德福, 李超, 等. 转筒与桨叶组合式日粮混合机设计与试验优化[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(10): 67 – 75.
LI Liqiao, WANG Defu, LI Chao, et al. Design and experimental optimization of combined-type ration mixer of drum and blade [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(10): 67 – 75. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171008&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.008. (in Chinese)
- [19] 于克强, 李利桥, 何勋, 等. 转轮式全混合日粮混合机试验设计与机理分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 109 – 117, 170.
YU Keqiang, LI Liqiao, HE Xun, et al. Experimental design and principle analysis on paddle-wheel total mixed ration mixer [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 109 – 117, 170. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150717&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.017. (in Chinese)
- [20] 陈玉华, 田富洋, 闫银发, 等. 切捆除膜机的设计与模态分析[J]. *农机化研究*, 2019, 41(4): 101 – 106.
CHEN Yuhua, TIAN Fuyang, YAN Yinfa, et al. Design and modal analysis of machine for splitting a wrapped bale and removing the packaging material from the bale [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2019, 41(4): 101 – 106. (in Chinese)
- [21] 刘超. 圆捆机草捆密度实时监测系统设计与试验[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
LIU Chao. Design and experiment of real-time bale density monitoring system of round baler [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. (in Chinese)
- [22] 陈波. 模型化奶牛营养需要及全混合日粮配方软件系统的开发[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
CHEN Bo. Development of software system for modeling dairy cow nutrition requirements and total mixed diet formula [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008. (in Chinese)
- [23] VERTOMRNNEN J, KINGET R. The influence of five selected processing and formulation variables on the particle size, particle size distribution, and friability of pellets produced in a rotary processor[J]. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 2008, 23(1): 39 – 46.