

一种多物理场作用下玉米秸秆粉碎装备设计

钟声标

(江西科技学院, 南昌 330098)

摘要: **目的** 对玉米秸秆的物理属性进行分析研究, 结合理论分析和工艺设计, 提出可实现工业化制造的玉米秸秆粉碎装备。**方法** 在对玉米秸秆超微粉碎进行有效性分析的基础上, 科学地确定剪切、挤压、撞击的路径, 综合设计出一种高效、高通量、低耗能、高粉碎目数, 并且满足玉米秸秆饲料化要求的超微粉碎装备。**结果** 最终成功完成了玉米秸秆超微粉碎机整体方案的设计。**结论** 粉碎后的玉米秸秆可用作牲畜饲料和制作包装衬垫, 对提高秸秆利用率具有重要意义。

关键词: 玉米秸秆; 粉碎原理; 超微粉碎机设计

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)23-0140-06

Design of Corn Stalk Crushing Equipment in multi-physics fields

ZHONG Sheng-biao

(Jiangxi University of Technology, Nanchang 330098, China)

ABSTRACT: The work aims to study the physical properties of corn stalk and combine theory analysis with process design to create a process route which can achieve industrialized manufacturing of corn stalk crushing process. Based on effectiveness analysis of the ultra-fine pulverization of corn stalk, routes of shearing, extrusion and impaction were determined scientifically. An effective ultrafine grinder featured by high throughput, low consumption and many crushing meshes and meeting fodder requirement of corn stalk was designed comprehensively. The overall scheme of ultrafine grinder for corn stalk superfine was designed. Crushed corn stalk can be used as fodders of livestock and pads of packing. It is significant for improving the use ratio of corn stalk.

KEY WORDS: corn stalks; crushing principle; design of ultrafine grinder

长期以来, 玉米秸秆一直是生物质包装材料的原料之一。对玉米秸秆进行精细加工处理, 可制成包装衬垫材料和高营养牲畜饲料, 不仅有利于节省资源, 而且还可以避免秸秆焚烧, 具有良好的生态效益和经济效益^[1]。玉米秸秆制作包装衬垫, 是解决其采后资源化处理的重要途径。其核心在于粉碎技术与粉碎装备的研制, 已有的玉米秸秆粉碎装备要么能耗大, 要么处理效率低, 要么粉碎目数达不到工业要求^[2-3]。

目前市场上常用的微粉碎设备有气流式、高频振动式、旋转球磨式和冲击式超微粉碎设备^[4]。在

国内, 尽管在超微粉碎设备研制上已经达到了较高的水平, 但是和发达国家的超微粉碎设备相比, 依然有着巨大的差距。

目前, 我国在超微粉碎装备的研制上, 已经慢慢从仿制阶段过渡到开始研制开发适合自己的超微粉碎新型装备。用户评价粉体加工装备, 大都是直接通过产品之间的差价和可观性。这也是推动超微粉碎机研究发展的动力, 但是由于短期研发的行为较多, 并且关于同一技术研究的现象也比较普遍, 这就造成设备的设计与工艺研究脱节的现象十分严重。在超微粉碎装备研制方面的基

收稿日期: 2016-10-08

作者简介: 钟声标 (1978—), 男, 江西南昌人, 硕士, 江西科技学院讲师, 主要研究方向工业设计。

础理论依然较为薄弱，这对超微粉碎设备生产企业的工艺设计产生了一定的影响，并且相关的配套设备以及辅助设备的一条龙生产研制方面的工作还是一片空白。在具体物料的特性和产品的指标方面，超微粉碎设备和分级设备的规格型号比较多样，目前为止还没有对于任何物料都适应的高效万能的粉碎设备和分级设备，一些设备生产厂商的市场意识较为淡薄^[5-6]。

文中从玉米秸秆的物理属性入手，结合实验测试、理论分析、工艺设计等，综合设计满足玉米秸秆资源化利用要求的，高通量、高效率、低能耗、高粉碎目数的玉米秸秆粉碎装备。

1 粉碎方案的设计

1.1 工艺路线

评价一种粉碎装备的粉碎效果的指标，通常情况下包括产品物料的颗粒直径、生产速度和能量消耗。一般情况下，粉碎后物料颗粒的粒度越小则过筛能力越弱。当物料颗粒的粉碎粒度达到 20 目以下时，筛网就会特别容易发生堵塞，这样会导致粒度直径合格的物料不能及时通过筛网，还会造成过粉碎。另一方面，由于物料颗粒的过筛能力下降，会导致物料生产率的降低，能量的消耗也会大幅度增加，有时还容易出现电机卡死、超负荷等现象，也会增加安全隐患，因此，如何提高筛分能力成为了物料超微粉碎领域的技术难题。该方案在粗粉碎的环节采取筛分检查，从而保证在细粉碎环节实现进料的均匀粉碎，保证粉碎效率。在该方案设计中通过计算验证，可以达到目标要求的粒度，主要考虑效率问题，所以不再对细粉碎后的物料进行筛分。具体工艺路线为：原料—粗粉碎—烘干—细粉碎—旋风分离器（—除尘器）—收集，见图 1。

1.2 粉碎方法的选择

目前，国内关于玉米秸秆的细粉碎没有详细的技术和参数选用。通过比较不同粉碎方法的特点、适用范围、能耗和粉碎的效果，结合玉米秸秆的物理性能，选定挤压、撞击和剪切为方案设计的粉碎方法。该结构利用高速撞击、挤压和剪切原理，粉碎的主体结构主要包括定刀和动刀两部分，轴作高速旋转，使动刀与定刀间产生较大的相对速度，在

切齿处对纤维进行挤压剪切，在间隙较大的地方实行撞击粉碎，从而实现多物理场的粉碎目的^[7-8]。

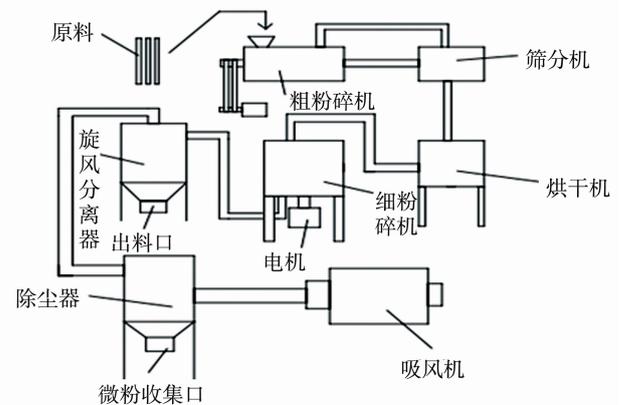


图 1 粉碎工艺路线

Fig.1 Crushing process route map

2 粉碎装备设计

2.1 电动机的选择

电动机的选择要根据超微粉碎机正常工作时所需的功率 P 和转速 n ，并综合生产成本和生产率等方面的因素确定。该方案选用额定功率为 45 kW 的三相异步电动机，同步转速为 3000 r/min，型号为 Y225M-2，采用带轮传动与粉碎机的主轴相连。

2.2 风机的选择^[9-10]

2.2.1 风量的确定

一般情况下，风扇流量要比输送装置的气流量大 10%~20%，出风机的风量 $Q=G_s/mP_a$ ，式中： G_s 是输送装置的生产率，取 5 t/h； m 为固气比，该设计采用吸送式、低真空的输送方式， m 取 1； $P_a=1.2$ kW/m³。由此，所需风扇流量 $Q'=(110\%~120\%)Q\approx 4790$ m³/h。

2.2.2 确定输料管的内直径

根据文献可知物料玉米秸秆的输送风速为 18~30 m/s，该方案取 20 m/s。由式 (1) 可得输料管内的直径：

$$D_s = \sqrt{\frac{4Q_a}{3600\pi v_a}} = 0.0188 \sqrt{\frac{Q_a}{n v_a}} \quad (1)$$

式中： n 为一台装置同时工作的输料管数目； Q_a 为风机所需风量 (m³/h)。计算可得 $D_s=168$ mm。

2.2.3 输送机构的压力损失

压力损失由式(2)计算:

$$\Delta P_t = \Delta P_a + \Delta P_p + \Delta P_j + \Delta P_{sh} + \Delta P_w + \Delta P_q + \Delta P_g \quad (2)$$

式中: ΔP_a 为纯空气中不含物料运动产生的压力损失; ΔP_p 为沿直管中输送气流与管壁、颗粒摩擦, 颗粒与管壁及颗粒之间摩擦所产生的压力损失; ΔP_j 为将颗粒加速到稳定输送速度所产生的压力损失, 主要产生在供料器和弯管之后, 在垂直的输料管中提升物料时要克服重力所产生的压力损失; ΔP_{sh} 为弯管的压力损失; ΔP_q 为各主要部件产生的压力损失; ΔP_g 为压送式中物料直接向大气排出时产生的压力损失, 该方案为吸送式, 不予考虑。

经过计算可得, 整个机构的压力损失总和为 1088 Pa, 所需风量为 4790 m³/h, 再考虑到计算所存在的误差, 且所需风机也应有一定的余量, 该设计选用了型号为 BCF-5000DT2C 的风机。

2.3 粉碎结构的设计

在该方案中物料进行细粉碎时, 要求进料粒径小于 10 目(直径约 2.05 mm)。颗粒每剪切 1 次后, 体积减少一半, 则经过 21 次的剪切, 粒径细度可以达到 400 目。考虑到粉碎机最后的粒度要求, 在此取 $v=120$ m/s。动子转动半径可以根据刀片末端线速度公式计算:

$$v = \frac{2\pi Rn}{60 \times 1000} \quad (3)$$

式中: n 为轴的转速; R 为半径; v 为末端线速度, v 取 120 m/s。可求得 $R=0.4$ m。

假设只有一把刀进行剪切, 转速为 3000 r/min, 动子半径 400 mm 时, 假定物料的颗粒以最大的加速度下落时, 忽略所有阻力, 即颗粒作自由落体运动, 经理论计算可得知一个颗粒被剪切前所下降的高度为 2 mm, 被剪切 21 次将走过 42 mm 的高度, 在此取一定的安全系数, 初步设剪切转子的有效剪切高度为 500 mm, 转刀个数为 8 个, 可以充分保障物料被剪切到的次数。

分析表明, 通过增加粉碎的路程, 可以保证物料被剪切到足够的次数, 最终达到 400 目的细度要求。除却剪切的作用外, 物料在被加速后与定子冲击, 粉碎过程中物料和转子刀片冲击, 物料在间隙处还可以研磨、撞击, 进一步加强了粉碎效果, 可使成品粒径小于预期值。除此之外, 细粉碎机不仅具有研磨、剪切粉碎作用, 而且还具有挤压、气流

粉碎作用。这些共同力的作用下, 在理论上基本可以达到 400 目粉碎细度的要求。结合效率和耗能因素, 该方案设计中在粉碎机内没有设置筛选结构, 不对粉碎后的产物实行进一步筛选。这样可以进一步提高粉碎的效率, 减少能耗。

为了满足规模化制粉的需要, 该设计中主要采用气力输送, 可以提高生产率。把输送过程和干燥、除尘、粉碎等工艺操作结合起来, 可以实现生产、输送流水式的自动化作业。动力装置的作用则是提供具有一定速度和压力的空气流来完成秸秆物料的输送。输送管道多采用薄壁的管材以减轻其质量, 节省费用, 管道系统的布置则应尽量简单, 少用弯头, 采用最短的行程, 尽量布置成直线形式, 以减少气力输送的阻力和耗能。

2.4 结构参数的计算

2.4.1 带传动设计^[11]

设计传动比 $i=1$ 。查表得工作情况系数 $K_A=1.0$, 故计算功率 $P_{ca}=K_A P=49.5$ kW。根据转速及计算功率查表, 选择 C 型窄 V 带。取小带轮的基准直径 $d_{d1}=200$, 验算得带速 $v=30.09$ m/s, 因为 30 m/s $< v < 40$ m/s, 故带速合适。计算大带轮的基准直径 $d_{d2}=i d_{d1}=200$ mm。根据公式 $0.7(d_{d1}+d_{d2}) \leq a_0 \leq 2(d_{d1}+d_{d2})$ 初定 V 带的中心距 $a_0=800$ mm, 计算带所需的基准长度 $L_{d0} \approx 2a_0 + \frac{\pi}{2}(d_{d1}+d_{d2}) + \frac{(d_{d2}-d_{d1})^2}{4a_0} = 2228$ mm, 查表后, 选择带的基准长

度为 1200 mm。计算实际中心距 $a \approx a_0 + \frac{L_d - L_{d0}}{2} = 806$ mm。验算小带轮上的包角 $\alpha_1 = 180^\circ - (d_{d2} - d_{d1}) \frac{57.3^\circ}{a} = 180^\circ \geq 90^\circ$ 。由 $d_{d1}=200$ mm 和 $n=3000$ r/min, 查表得单根带的额定功率 $P_0=13.41$ kW; 查表得单根带的基本额定功率为 5.01 kW, 额定功率的增量为 0, 则 $Z=P_{ca}/P_0=3.7$, 即带的根数为 4。

查表得 C 型带的单位长度质量 $q=0.3$ kg/m, 所以 V 带的初拉力最小值 $F_{0min} = 500 \times (2.5 - k_\alpha) / k_\alpha + qv^2 = 1123$ N, 应使用的实际初拉力 $F_0 > 1123$ N。

设带的紧边拉力和松边拉力分别为 F_1, F_2 , 则 $F_1 + F_2 = 2F_0$, 带的有效拉力 F_e 和带传递的功率有如下关系:

$$P = F_e v / 1000 \quad (4)$$

由 $F_e = F_1 - F_2$ ，所以 $F_1 = F_0 + \frac{F_e}{2}$ ， $F_2 = F_0 - \frac{F_e}{2}$ ，
即 $F_1 = 1945.53 \text{ N}$ ， $F_2 = 300.47 \text{ N}$ 。

2.4.2 轴的选择与校核

1) 初步选取最小的轴径。轴的材料选用 45 钢， $\sigma_b = 650 \text{ MPa}$ ，查得 $A = 110$ ，轴所传递的功率 $P = 45 \text{ kW}$ ，轴转速 $n = 2970 \text{ r/min}$ ，则得到轴的最小直径为 $d_{\min} = A \sqrt[3]{P/n} = 29.5 \text{ mm}$ ，根据结构需要选取 $d_{\min} = 55 \text{ mm}$ 。

2) 轴的受力分析。轴的材料为 45 钢，轴上安装有带轮和轴承，其受力主要有带通过带轮传递给轴的力以及轴承的支持力。根据轴的安装方式，对轴进行受力分析。计算可知，最大弯矩 $M = 968 - 302.14 \text{ N}\cdot\text{mm}$ ，转矩 $T = 157\ 575 \text{ N}\cdot\text{mm}$ ，根据第三强度理论校核，则 $\sigma_{ca} = \sqrt{M^2 + (\alpha T)^2} / W = [\sigma_{-1}] = 70 \text{ MPa}$ ，故轴的设计安全合格^[12]。

2.4.3 轴承校核

该设计采用 7218B 型号的轴承，基本额定动载荷 $C_r = 107 \text{ kN}$ ，基本额定静载荷 $C_{or} = 90.8 \text{ kN}$ ，极限转速 $N_0 = 3700 \text{ r/min}$ 。由带轮、轴及转子模型分析得到带轮的质量 $m_1 = 13.370 \text{ kg}$ ，轴的质量 $m_2 = 43.872 \text{ kg}$ ，动刀盘的质量 $m_3 = 182.723 \text{ kg}$ 。由此，每个轴承受到的轴向力为：

$$F_a = \frac{1}{2}(m_1 + m_2 + m_3)g = 1200 \text{ N} \quad (5)$$

当量动载荷：

$$P = f_p(Xf_r + YF_a) \quad (6)$$

其中，载荷性质系数： $f_p = 1.0 \sim 1.2$ ，取 1.0。径向载荷： $F_r = 1466.68 \text{ N}$ ，轴向载荷 $F_a = 1200 \text{ N}$ ，由 $F_a / C_{or} = 0.013$ ，查表得 $e = 0.19$ 。因为 $F_a / F_r = 0.82 > e$ ，查表得到 $X = 0.56$ ， $Y = 2.3$ ，所以：

$$P = f_p(Xf_r + YF_a) = 3581.34 \quad (7)$$

轴承寿命：

$$Lh = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{f_i C}{f_p P} \right)^2 = 85\ 736.49 \text{ h} \quad (8)$$

其中， $f_i = 1$ ， $f_p = 1.2$ ， $\varepsilon = 3$ 。查手册得轴承的使用寿命满足要求。

2.4.4 电机输出轴与带轮联接键的校核

根据 GB 1096—1979 可得到选用圆头普通平键 (B 型)， $b = 16 \text{ mm}$ ， $h = 10 \text{ mm}$ ， $L = 45 \text{ mm}$ ，转

矩 $T = 9550P/n$ ，代入得 $T = 157\ 575 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，键联接工作面的挤压应力为 $\sigma_p = \frac{4T}{d_{nl}}$ ，代入得 $\sigma_p = 39.39 \text{ MPa} < [\sigma_{-1p}] = 90 \text{ MPa}$ ，故键可用。

2.5 具体的实施方式

上盖与定子通过螺纹连接，定子与下机壳也是用螺纹连接，并且通过螺纹固定在底座上，见图 2。底座可以通过地脚螺钉固定在地面上。转子通过键连接与转轴，从而带动转子转动。转子与定子内衬间的刀具间隙大约为 1~3 mm。它们之间的间隙即为物料的粉碎轨道，转子从侧面看为圆台形，上面间隙为 3 mm，下面间隙为 1 mm。进料口在上端，出料口在侧面下端。定子与定子内衬之间的空隙通冷却水，作为系统的冷却装置。物料从上面入口进入粉碎机，在粉碎机离心力的作用下，在定子内衬与转子之间相互的剪切、挤压、撞击及研磨作用下，不断被粉碎，最后从底端的出料口排出。

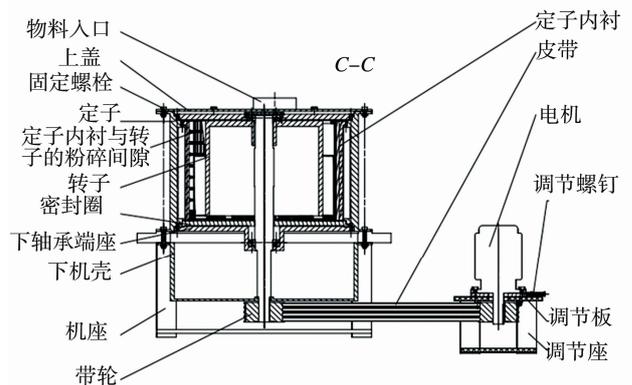


图 2 粉碎结构的剖视图

Fig.2 Sectional view of crushing structure

物料由上盖的入口处，通过上轴承座，进入定子内衬与转子的间隙中进行粉碎。在定子内衬与转子间隙粉碎过后的物料，再通过密封圈，进入下机壳里，最后从下机壳侧面的出料口排出，见图 3。

转子结构为一体加工模式，外圆柱轮廓的刀具直接在圆柱上车削加工出来。转子的动刀为主要破碎的实现部件，高度 500 mm，材料为 HT200，螺旋刀具的螺旋角为 10°，轮毂通过键与轴过盈配合，结构见图 4。定子主要包括定子和定子内衬两部分，其中定子内衬的内侧安装有锤片式刀具、剪切式的切齿，剪切式的切齿和定子内衬一体加工^[13-14]。锤片式刀具则通过螺钉固定在内衬的内侧，定子内衬通过螺钉固定在定子上，结构见图 5。

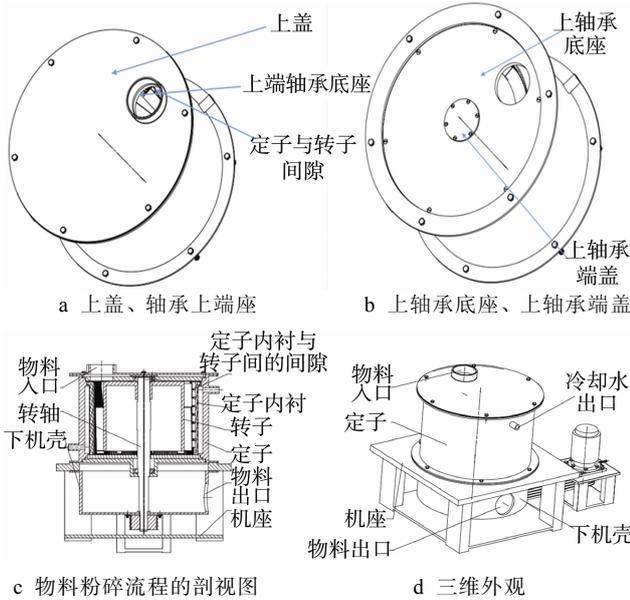


图3 物料粉碎装置效果
Fig.3 Effect diagram of material crushing device

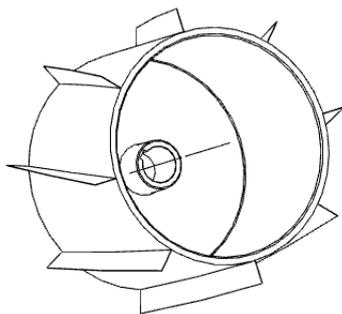


图4 转子的三维图例
Fig.4 The 3D illustrations of rotors

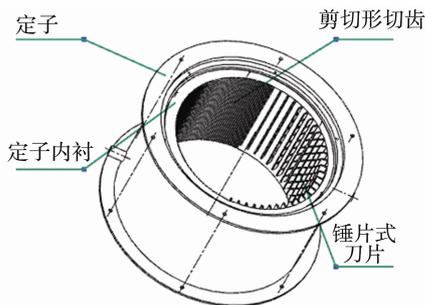


图5 定子与定子内衬三维装配
Fig.5 3D assembly of stator and stator lining

转子在转动过程中,物料在转子与定子内衬的间隙间被粉碎,会产生大量的热,这就需要冷却系统。水冷系统通过定子与定子内衬之间的间隙通冷却水,从而可带走定子内衬的热量,延长机身的寿命,见图6。

电机组件主要由电机、调节板、调节座及调节螺钉组成。可以通过调节螺钉调节电机在调节座上

的位置,实现皮带的张紧。具体结构见图7。

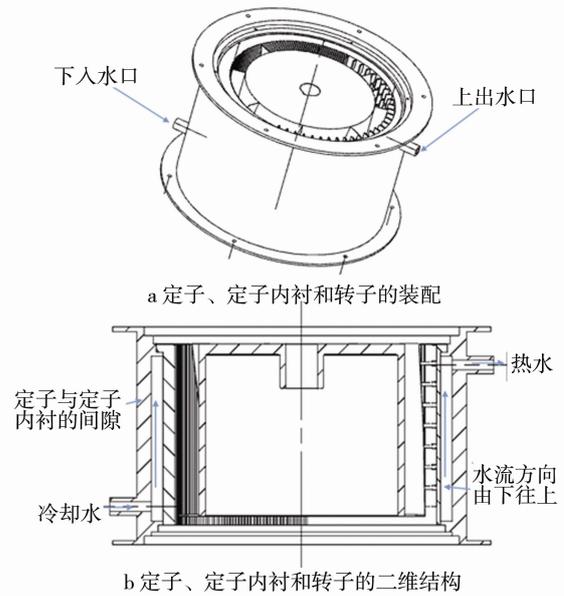


图6 冷却系统
Fig.6 Cooling system

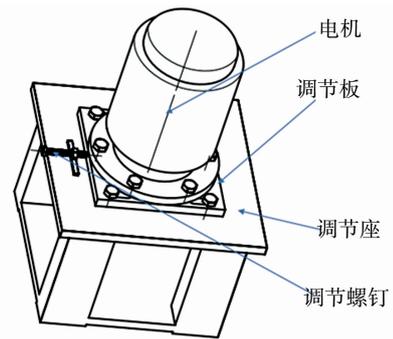


图7 电机组件
Fig.7 Motor assembly

3 结语

该方案采用挤压、剪切及撞击的原理,可以实现对纤维状物料的有效粉碎,要求进料粒径大小小于10目。在控制转子动刀与定子之间距离的同时,主要通过提高物料在间隙处被剪切的次数达到粉碎目的,可以使物料粉碎达到细度要求。粉碎机的转子被设计成螺旋齿刀,一方面不仅可加长物料在粉碎机中的粉碎路程,还可以增大物料被剪切到的概率,另一方面还可以对物料起到推送作用,防止物料在粉碎轨道中滞留,以方便出料。该设计创新性地提出了螺旋齿刀剪切、偏心挤压及撞击的粉碎方法,这可大大提高机器粉碎的效率,为“玉米秸秆饲料化生物可及性屏障破解机理研究”提供了技术支撑。

参考文献:

- [1] 程宗佳. 精细粉碎的饲料可改善动物的生产性能[J]. 饲料研究, 2009(2): 70—71.
CHENG Zong-jia. Fine Crushing Feed Can Improve the Performance of Animal Production[J]. Feed Research, 2009(2): 70—71.
- [2] 曹稳根, 高贵珍, 方雪梅, 等. 我国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. 宿州学院报, 2007, 22(6): 111—126.
CAO Wen-gen, GAO Gui-zhen, FANG Xue-mei. Crop Straw Resources and Their Utilization in China[J]. Journal of Suzhou University, 2007, 22(6): 111—126.
- [3] 陈琳. 农作物秸秆资源综合利用的战略研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2007.
CHEN Lin. Strategic Research on the Comprehensive Utilization of Crop Straw Resources[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2007.
- [4] 谢瑞红, 王顺喜, 谢建新, 等. 超微粉碎技术的应用现状与发展趋势[J]. 中国粉体技术, 2009, 15(3): 64—67.
XIE Rui-hong, WANG Shun-xi, XIE Jian-xin, et al. Application Status and Development Trend of Ultra-fine Grinding Technology[J]. China powder technology, 2009, 15(3): 64—67.
- [5] 陈争光, 王德福. 玉米秸秆皮糠分离机构的试验研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2014, 45(5): 573—578.
CHEN Zheng-guang, WANG De-fu. Experimental Study on Corn Straw Separate Mechanism[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2014, 45(5): 573—578.
- [6] 王晓峰. 超微粉碎过程粉碎腔流场的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
WANG Xiao-feng. Study on the Flow Field in the Grinding Chamber of Ultra Micro Grinding[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [7] 徐健. SWFP66X60A 型锤式粉碎机锤片尺寸及排列方式优化研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
XU Jian. Optimization of Size and Arrangement of Hammer Pieces of SWFP66X60A Hammer Mill[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009.
- [8] 刘丽玲. 玉米秸秆皮糠叶分离试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2011.
LIU Li-ling. Experimental Study of Corn Straw Leaf Separation[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2011.
- [9] ALPINESKTIENGESELL S. Handbook Mechanical Processing Technology[M]. New York: Routledge, 1996, 36—70.
- [10] LAURENCE G, ALAIN C, HON D. Talc Grinding in an Opposed Air Jet Mill: Startup, Product Quality and Production Rate Optimization[J]. Powder Technology, 2002, 128(2/3): 306—313.
- [11] 杨可桢, 程光蕴, 李仲生, 等. 机械设计基础[M]. 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 15—88.
YANG Ke-zhen, CHENG Guang-yun, LI Zhong-sheng, et al. The Basic Mechanical Design[M]. 5th Edition. Beijing: Higher Education Press, 2006: 15—88.
- [12] 吴宗泽, 罗胜国. 机械设计课程设计指手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999, 20—90.
WU Zong-ze, LUO Sheng-guo. The Course Design of the Mechanical Design Manual[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 20—90.
- [13] 姜秀凤, 娄勇健, 王锐, 等. 玻璃钢包装筒结构设计及成形工艺[J]. 精密成形工程, 2014, 6(2): 60—62.
JIANG Xiu-feng, LOU Yong-jian, WANG Rui, et al. Structure Design and Molding Packaging Process of Glass Reinforced Plastic Packaging Tube[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(2): 60—62.
- [14] 王宏松, 汪程, 修辉平. 模具数字化设计与快速制造[J]. 精密成形工程, 2014, 6(2): 55—59.
WANG Hong-song, WANG Cheng, XIU Hui-ping. Digital Design and Rapid Manufacturing Technology of Mold[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(2): 55—59.