

太阳能草捆干燥设备设计与试验^{*}

杨世昆 杜建强

(中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院, 呼和浩特 010020)

【摘要】 针对饲草在田间干燥物质损失大和营养成分保持率低的问题,提出了牧草湿法收获工艺的技术原理、工艺路线,为太阳能饲草干燥实现规模机械化提供技术支撑,设计了可直接进行整捆饲草干燥的太阳能草捆干燥设备。该设备能实现太阳能的自动采集并对含水率在40%左右的整捆饲草进行干燥处理,成品草捆可直接进行贮藏。设备的性能试验和牧草干法收获与湿法收获对比试验结果表明:太阳能干燥饲草损失率小于等于2%,成品草捆含水率小于等于17%,太阳能空气集热器白天平均热效率大于等于0.5,处理能力大于等于1 t/h。

关键词: 太阳能 草捆 干燥 设计 试验

中图分类号: S226.6; S54; S214 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)04-0081-06

Design and Experiment of Bale Drying Machinery Using Solar Energy

Yang Shikun Du Jianqiang

(Huhhot Branch, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Huhhot 010020, China)

Abstract

Aiming at exiting problems of flowers and leaves as well as the nutrition loss by using the dry harvesting technology process in field for forage grass, the introduction for the wet harvesting technology process innovation and its advantages of forage grass in different views was gave, such as technological theory and technological process. And in order to provide technical support for forage grass dimension mechanization desiccation by using solar energy, one type of solar energy bale drying machinery was developed. It could work in solar automatism collection manner and dry the bale of moisture content in around 40%. Products could be directly baled and stored. The performance test of the equipment and the dry grass and wet harvest were experimented. The tested results were listed as follows: solar drying forage loss was less than or equal to 2%, finished bale moisture content was less than or equal to 17%. The collector efficiency of solar energy air was more than or equal to 50% and handling ability was more than 1 t/h.

Key words Solare energy, Bale, Drying, Design, Experiment

引言

长期以来,在收获和制备干草过程中,饲草田间干燥工艺一直是我国干草制备的主体工艺。在饲草收获季节,连续晴数天的机会很少,因此许多地区因饲草收割季节湿潮多雨,苜蓿等优质饲草不能适时制备成干草,导致饲草在田间干燥期间干物质损失严重和营养成分保持率低。根据农业部有关部门统计,我国每年损失贮草大约在3亿t,饲草干燥已成

为制备优质干草的制约瓶颈,先进的饲草干燥设备的研究与开发已迫在眉睫。目前,国内人工干燥牧草设备主要有转筒式饲草干燥机、93QH系列燃煤牧草干燥机组、93QH系列干燥机组、93QH-1000型燃油(气)牧草干燥机组,均采用燃油、燃煤和燃气作为主要能源,因此干燥后牧草的成本偏高,产业化比较困难,经济效益不明显。针对上述问题,本文从牧草湿法收获工艺的技术原理、工艺路线以及牧草干法收获与湿法收获对比试验效果等方面系统分

收稿日期: 2010-10-17 修回日期: 2010-11-15

^{*} “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2007BAD35B00)

作者简介: 杨世昆,研究员,博士生导师,主要从事太阳能利用技术及装备研究, E-mail: yskun001@sohu.com

析牧草湿法收获工艺,并根据近年来太阳能饲草干燥技术的快速发展,进一步研制太阳能草捆干燥设备^[1]。

1 牧草湿法收获工艺技术原理与工艺路线

1.1 技术原理

牧草湿法收获工艺的基本技术原理是针对牧草在干燥过程中营养物质的变化规律与损失特征,将牧草干燥的第一阶段仍然放在田间进行,第二阶段采用太阳能草捆干燥成套设备进行干燥。太阳能草捆干燥技术具有环保、快速和低温干燥的显著技术优势,将方草捆含水率从 40% 降至 17%,干燥时间大约在 4 h,使牧草中的营养成分获得了有效保持;由于太阳能草捆干燥技术采用低温干燥技术,克服了高温干燥所产生的芳香性氨基酸挥发严重,一些蛋白质发生变性的不足,使草产品具有芳香青草味、蛋白质消化率高、适口性好和家畜消化摄入量高等优点。另外,太阳能草捆干燥技术避免了牧草第二阶段因田间干燥光化学作用与雨淋霉变所带来的损失。从“量”的角度来讲,采用先进的牧草收获工艺,将刈割后牧草干物质的损失程度降至最低,是牧草湿法收获工艺最直接的追求目标。试验证明,将刈割后豆科(苜蓿)牧草含水率降至 40% 左右时进行打捆作业,苜蓿的花和叶基本保持完好,在整个收获加工作业中干物质的损失不超过 2%。

1.2 工艺路线

牧草湿法收获工艺,即割(压扁)、搂、捡拾运输(捡拾压捆)、干燥与贮存的收贮工艺,这种收获工艺采用的作业机具主要有往复式割草机(切割压扁机)、旋转式搂草机、翻晒机、草捆捡拾压捆机、运输车和太阳能草捆干燥成套设备,机械化程度可达到 95% 以上。牧草湿法收获工艺过程是:割草(对豆科类牧草进行压扁处理)、晾晒后搂草条、翻晒、在牧草含水率降至 40% 左右时,捡拾压捆机捡拾草条压制草捆并运输到指定地点进行干燥作业。

2 整体结构与工作原理

2.1 整体结构

依据牧草湿法收获工艺的技术原理与工艺路线,设计出太阳能草捆干燥设备,主要由太阳能集热干燥系统、干燥草仓及其液压起落系统、太阳能草捆干燥自动控制系统等组成^[2]。太阳能草捆干燥设备整体结构如图 1 所示。

草捆干燥是在干燥草仓内进行,太阳能空气集热器加热的空气通过风机从干燥草仓底部吹入,整个干燥过程由计算机自动控制。太阳能空气集热器与房顶设计为一体,在太阳能空气集热器下面为储

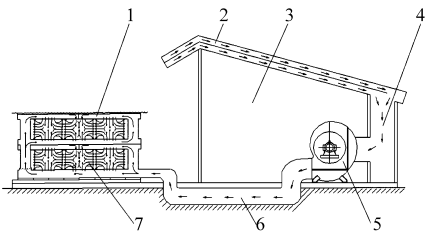


图 1 太阳能草捆干燥设备整体结构示意图

Fig. 1 Overall structural configuration of solar energy bale drying machinery

1. 干燥草仓 2. 太阳能空气集热器 3. 储草仓 4. 风道 5. 风机 6. 地下风道 7. 草捆

草仓,设计时不仅考虑了太阳能的采集,而且也考虑了干燥草仓干燥完草捆的暂存空间和草捆进一步深加工(压块、包装、装卸等)设备的位置。

2.2 工作原理

将收割后的牧草晾晒到含水率 40% 左右时打成草捆,由运输设备运到干燥草仓,液压起落系统工作,完成草捆装卸。太阳能集热干燥系统完成太阳能的收集,在自动控制系统控制下,将热风吹送到干燥草仓。自动控制系统控制液压起落系统,保证在干燥过程中,干燥草仓中上、下出风口始终紧紧压在草捆的两个端面上,保证热风完全地通过草捆,带走水分,干燥草捆。当牧草含水率降到 17% 以下,停止风机运转,草捆出仓,并存放在储存仓内。该设备工作原理如图 2 所示。通过更换出风口处工作部件,设备还可干燥玉米、高粱等农作物,真正实现一机多用,为用户创造更好的经济效益。

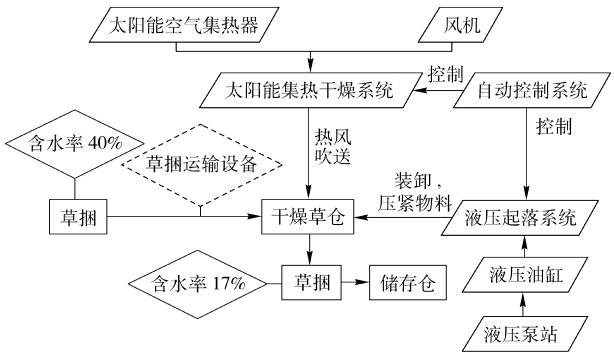


图 2 太阳能草捆干燥设备工作原理图

Fig. 2 Working principle of solar energy bale drying machinery

3 主要部件设计

3.1 干燥草仓

根据牧草湿法收获工艺要求和草捆干燥特性,目前我国普遍使用的捡拾压捆机打出的草捆,牧草含水率在 40% 时,草捆密度大约在 200 kg/m³,一般的干燥处理达不到草捆的内部,造成草捆外表非常干燥,内部含水率高而霉变。因此干燥草仓的设计

应先对草捆内部进行干燥,在最短的时间内保证草捆的整捆干燥。通过对干燥热空气穿过草捆的气流分析,采用干燥热空气同时强行进入草捆的上、下两个端面,在草捆的中间部位相遇,再从草捆的侧面排出,将草捆内部的水分带走。由于草捆的外部比内部容易干燥,而干燥气流先把草捆内部的水分带到外部,从而达到整捆快速干燥的效果。

据此,干燥草仓设计为上、下两层草捆干燥结构,主要由上、中、下风道和组成液压起落系统的上、下支撑液压油缸等组成。该油缸可将中风道、上风道升起和降下,便于草捆的装卸和干燥。在下风道和中风道的上面安装草捆定位栏,装卸时可方便地将草捆固定整齐,同时保证草捆间留有一定空间,便于湿空气从草捆侧面排出。

目前我国主要饲草打捆设备有方草捆打捆机和圆草捆卷捆机,方草捆的外形尺寸为 360 mm × 460 mm × 800 mm(高 × 宽 × 长),圆草捆的外形尺寸为 1 200 mm × 1 200 mm(直径 × 高)。所以设计两种风道出风口盖板,其中方草捆风道盖板上每个出风口尺寸为 350 mm × 500 mm(宽 × 长),草捆定位栏 480 mm × 450 mm(宽 × 高)。出风口尺寸小于方草捆长宽尺寸是为了干燥草捆时保证出风口与草捆端面的密封性。干燥方草捆时上、下每个出风口之间放置上、下叠在一起的 2 个方草捆,所以草捆定位栏高于单个方草捆高度尺寸,便于方草捆在设备中整齐摆放并且装卸方便;圆草捆风道盖板上每个出风口尺寸为直径 1 000 mm,出风口尺寸小于圆草捆直径尺寸,同样考虑到干燥草捆时出风口与草捆端面的密封性。由于干燥圆草捆时每个上下出风口之间放置一个圆草捆而且草捆质量一般在 300 kg 左右,所以不再设计草捆定位栏。两种风道盖板可以互换使用,依据干燥草捆形状的不同,只需更换风道上的盖板即可。干燥草仓的功能真正实现了牧草的整捆干燥处理,大大减少了散草干燥时所产生的花叶损失。

草捆干燥过程气流运动如图 3 所示,热空气通过下风道入风口进入下风道,一部分从下风道出风口吹入草捆底部,穿过草捆进行干燥,水分从草捆侧壁排出进入大气;一部分流经联风管,进入中风道中,从中风道下出风口吹入草捆顶部,穿过草捆进行干燥,水分从草捆侧壁排出进入大气。在中风道隔风引流板的作用下,另一部分热风从中风道上出风口吹入草捆底部,穿过草捆进行干燥,水分从草捆侧壁排出进入大气。同时通过联风管将风送入上风道,然后从上风道出风口吹入草捆顶部,穿过草捆进行干燥,水分从草捆侧壁排出进入大气。

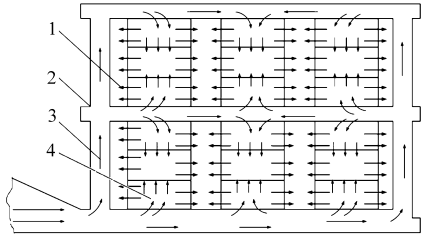


图 3 草捆干燥过程气流运动图
Fig. 3 Air stream movement during bale desiccation
1. 冷湿空气 2. 干燥草仓 3. 热干空气 4. 待干草捆

3.2 太阳能集热干燥系统

太阳能集热干燥系统主要有太阳能空气集热器、风道、风机等组成。空气集热器是最重要的部件,太阳能空气集热器主要由透光板、集热板、吸热涂层、保温层等组成。通过对各种不同材料、不同涂层及不同外形结构的集热板进行对比试验,梯形板瞬时热效率的平均值为 51.57%,比其他外形结构的集热板都高;使用吸热涂料的集热板表面平均温度是 43.5℃,比不使用吸热涂料的温度提升了 67.3%,比普通油漆涂料提升了 11.3%;铝板材质集热器出口平均温度为 44.2℃,比一般材质的温度提升了 29.23%,仅略低于紫铜板集热器出口平均温度 45.1℃。经过对金属材料市场的调查,如果集热板采用金属板规格的厚度都为 1 mm,紫铜板的价格为 400 元/m²,铝板价格为 62.5 元/m²,仅集热板一项,铝板就比铜板的造价节省 84.4%,所以铝板集热器性价比最高。通过试验本着经济实用易于推广的原则,确定空气集热器选材为:透光板选用聚碳酸酯阳光板,集热板选用 0.5 mm 铝板,集热板结构采用梯形槽 V 形槽波纹,涂层为吸热涂料,保温层为聚胺酯泡沫熟料。

选用以上材料制作的集热器热效率为 0.52。

3.3 太阳能草捆干燥自动控制系统

太阳能草捆干燥自动控制系统中由可编程序控制器(PLC)CP1H 承担工艺流程的控制和数据采集的任务,生产过程中的各种运行模式定时、风机自动启停、油缸升降、故障检测等操作逻辑关系均由 PLC 根据嵌入式计算机设定的命令来执行,具体结构如图 4 所示。同时在线检测温度、湿度、风机转速等参数,这些参数有些直接参与干燥过程的控制,有些以历史数据记录,作为分析处理的信息。PLC 所有的控制参数和在线检测的数据,通过 RS232 接口,送到嵌入式计算机,同时接收来自嵌入式计算机的信息,执行设定好的运行模式。

3.4 干燥草仓液压起落系统

装卸草捆时液压起落系统将干燥草仓的中层和上层风道自动升起,方便快速装卸;干燥草捆时,液

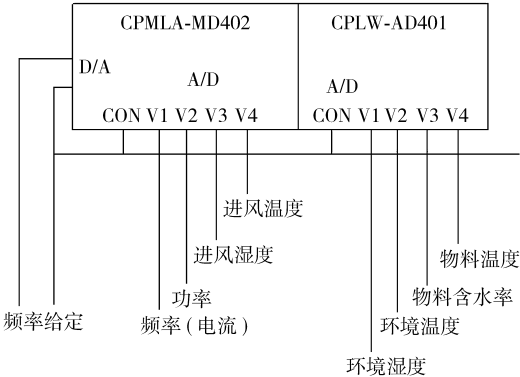


图 4 PLC 模拟量输入、输出接线图

Fig. 4 Wiring diagram of PLC analogue inputs and outputs

压起落系统将干燥仓的中层和上层风速自动落下,在上、下出风口的边缘以一定的压力紧紧地压在了草捆的上、下两个端面上,确保密闭的气流完全吹入草捆,以保证饲草干燥品质和生产率。设计时对上层干燥仓和中层干燥仓风道支撑进行了质量计算,上层干燥仓加上顶部的遮雨板,质量在 2 000 kg 左右,中层干燥质量在 1 500 kg 左右,每层上下出风口之间入仓时草捆的总质量在 2 500 kg 左右。故下支撑液压油缸的理论推力为 60 000 N,选用型号为 DG-J80C-E1 的液压油缸,最大推力 80 430 N,最大拉力 54 980 N 可满足要求,上支撑液压油缸的理论推力为 20 000 N 左右,选用 DG-J63C-E1 型液压油缸,最大推力 49 870 N,最大拉力 338 70 N 可达到设计要求。

液压油缸由液压泵站提供动力,该液压泵站由交流电动机驱动的液压泵及各种控制阀组成。液压泵站输出液压油送到各液压缸,通过电磁换向阀控制液压缸的运行方向,通过同步阀控制相应两个液压缸同步运行,通过双向节流阀控制油缸运动的速度,泄压阀保证交流电动机安全运行。

4 试验

4.1 试验内容

试验应选择在具有典型地理条件和牧草生长的地点,故选择在鄂尔多斯市乌审旗大力神肉牛养殖场。该作业地段日照充足,苜蓿种植面积广,牲畜饲养饲喂具有一定规模,然而在苜蓿收获期降雨比较频繁,且收获期比较短,故急需大型的规模化饲草干燥设备。

试验依据行业标准 JB/T 10906—2008《太阳能饲草干燥设备》规定进行。对集热效率、干燥时间、草捆含水率、牧草的营养成分及损失率进行检测。

4.1.1 集热效率

太阳能空气集热器热效率按瞬时热效率 η_c 计

算^[3]

$$\eta_c = \frac{Q_u}{A_c I_c} = \frac{3\,600 \times 2.8 \times 10^{-4} m c_p (T_{f,o} - T_{f,i})}{I_c} \quad (1)$$

其中 $m = \frac{\rho s v}{A_c}$

式中 Q_u ——有用效益, J
 A_c ——集热器采光面积, m^2
 I_c ——太阳能辐射强度, W/m^2
 m ——单位采光面上空气质量流率, $kg/(m^2 \cdot s)$
 v ——空气流速, m/s
 ρ ——空气密度, kg/m^3
 s ——集热器空气流道的横截面积, m^2
 $T_{f,o}$ ——出口温度, $^{\circ}C$
 $T_{f,i}$ ——进口温度, $^{\circ}C$
 c_p ——空气的定压比热容, $J/(kg \cdot K)$

4.1.2 草捆相对含水率

随机取 5 个草捆样本,做切碎处理,其长度为 15 mm。每个样本质量不少于 50 g,干燥到质量不再减少为止,称其质量,计算后取平均值

$$H_c = \frac{G_{sc} - G_{gc}}{G_{sc}} \times 100\% \quad (2)$$

式中 H_c ——草捆湿基含水率, %
 G_{sc} ——干燥前样本质量, g
 G_{gc} ——干燥后样本质量, g

4.1.3 草捆干燥均匀性

草捆干燥均匀性是太阳能草捆干燥设备又一重要的性能指标,主要衡量设备中每个草捆的干燥速率是否一致,一批次干燥作业完成后,是否所有的草捆都达到了出仓的标准,也就是说每个草捆的含水率应在 17% 左右,且相差不大。导致草捆干燥不均匀的因素主要有两方面:一方面是设备本身的原因,一是各个出风口的风压不一致,二是出风口处与草捆端面之间有漏风现象;另一方面是由于每个草捆密度有所差异,当相差比较大时,也会导致草捆干燥不均匀。

4.2 结果及分析

2009 年 10 月 6 日在鄂尔多斯市乌审旗进行了试验,将一批次完整的干燥过程进行 5 次采样,间隔为 1 h,对设备进行全面的性能检测^[4]。

4.2.1 空气集热器热效率

对太阳能草捆干燥设备中太阳能空气集热器部分进行了性能试验,经测定,空气集热器集热效率为 0.51,太阳能采集效果显著,并起到良好的热空气的传导和保温作用,在试验期间,同一时间对大气温度和太阳能空气集热器出风口处空气温度进行了检

测。温度对比测定如表 1 所示。

表 1 温度对比测定

Tab.1 Comparison of temperature

项目	时刻				
	12:15	13:15	14:15	15:15	16:15
大气温度/℃	21.2	22.8	22.9	21.3	20.2
出风口处 空气温度/℃	29.4	32.8	32.7	26.9	23.1

试验结果表明,13:00 到 14:00 时阳光辐射强度最大,通过太阳能空气集热器的空气温度可提高 10℃,太阳能空气集热器的透光板、集热板、吸热涂层、保温层达到设计要求,集热板和吸热涂层的材质具有很好的热传导性和吸热性,保温层保温性能良好。

4.2.2 草捆相对含水率

随机取 5 个草捆样本,按式(2)进行初始含水率的测定,如表 2 所示。

表 3 实测数据

Tab.3 Experiment results

时间 t/h	质量/kg					总质量/kg	平均含水率/%
	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5		
0	26.2	26.0	25.6	26.0	25.8	129.6	45.0
1	21.1	20.8	20.5	20.7	20.8	103.9	31.4
2	18.9	18.7	18.5	18.6	18.5	93.2	23.5
3	17.7	17.7	17.5	17.6	17.6	88.1	19.1
4	17.2	17.2	17.0	17.1	17.1	85.6	16.7

从表 3 可以看出草捆的质量和含水率随时间的变化趋势。草捆质量和含水率逐渐减小,干燥 1 h 后,草捆的含水率降到 30% 以下,干燥速度逐渐缓慢下来,干燥速率趋于平缓,直到含水率降到 17% 以下。

4.2.3 草捆干燥均匀性

由表 3 和式(3),可以算出草捆样本 1~5 最终的含水率分别为:16.2%、16.8%、17.1%、16.3%、17.0%。

可以看出 5 个草捆样本干燥 4 h 后,每个草捆

表 2 原样含水率测定

Tab.2 Measurement of parent material moisture content

测定项	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5
干燥前质量 G_{sc}/g	50	50	50	50	50
干燥后质量 G_{gc}/g	27.5	26.5	28.0	27.5	28.0
含水率 $H_c/\%$	45	47	44	45	44
平均含水率/%	45				

实时含水率计算公式为

$$H_t = 100 + \frac{W_0}{W_t} (H_0 - 100)$$

(3)

式中 H_t —— t 时刻的含水率
 H_0 ——最初含水率
 W_t —— t 时刻的物料质量
 W_0 ——起始物料质量

每次采样分别称量这 5 个草捆样本,记录实测数据如表 3 所示。

的含水率基本都在 17% 以下,且相差不大,草捆内外部含水率趋于一致,说明太阳能草捆干燥设备对草捆干燥的均匀性良好。

4.2.4 太阳能草捆干燥工艺与田间饲草干燥工艺对比试验

不同干燥工艺紫花苜蓿营养成分变化平均数据如表 4 所示。

另外,通过试验测得该设备每小时产量不小于 1 t。田间干燥饲草由机械作业所导致的干物质总损失禾本科牧草一般在 3%~15%;豆科牧草如苜蓿

表 4 紫花苜蓿营养成分

Tab.4 Average variations data of Alfalfa's nutrition composition

草捆状态	粗蛋白	粗脂肪	粗纤维	粗灰分	无氮浸出物	钙	磷	胡萝卜素
鲜牧草原始样本	20.50	3.10	25.80	9.30	41.30	0.78	0.13	0.016 3
田间干燥(雨淋)	10.25	1.55	37.60	10.20	40.40	0.48	0.09	0.002 5
田间干燥(非雨淋)	15.38	2.32	33.70	10.30	38.30	0.60	0.10	0.003 8
太阳能干燥(长散草)	18.45	2.79	29.16	9.20	40.40	0.72	0.12	0.013 0
太阳能干燥(草捆)	18.86	2.85	27.69	9.00	41.60	0.76	0.12	0.013 5

损失率高达 25% ~30% (主要是花和叶的损失); 太阳能草捆干燥饲草损失小于等于 2%。从太阳能草捆干燥工艺与田间饲草干燥工艺对比试验可以看出, 太阳能草捆干燥工艺与传统的田间干燥工艺相比, 可减少干物质损失近 30%, 饲草的有效营养成分如粗蛋白、粗脂肪等保存率由 50% 提高到 90% 以上, 充分体现了太阳能草捆干燥工艺及设备的性能。

5 结 论

(1) 通过性能试验和牧草干法收获与湿法收获

对比试验, 太阳能草捆干燥设备能实现太阳能的自动采集并对含水率在 40% 左右的整捆饲草进行干燥处理, 成品草捆可直接进行贮藏, 太阳能干燥饲草损失率小于等于 2%, 成品草捆含水率小于等于 17%, 太阳能空气集热器白天平均热效率大于等于 0.5, 处理能力大于等于 1 t/h。

(2) 太阳能草捆干燥设备实地试验表明, 该设备性能稳定, 作业顺畅, 无故障发生, 具有干燥效率高、劳动强度低、操作及维修方便等优点。该设备能完全满足豆科、禾本科等饲草的贮藏干燥要求, 干燥贮藏后营养损失少, 达到良好的饲喂效果。

参 考 文 献

1 董宽虎, 沈益新. 饲草生产学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.

2 杨世昆, 苏正范. 饲草生产机械与设备[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009.

3 杨世昆, 刘贵林, 杜建强, 等. 太阳能草捆干燥设备: 中国, ZL200710300870. 0 [P]. 2007 - 12 - 29.
Yang Shikun, Liu Guilin, Du Jianqiang, et al. Solar energy bale drying machinery: China, ZL200710300870. 0 [P]. 2007 - 12 - 29. (in Chinese)

4 何月娥, 杨孝文, 张梧邨. 农机试验设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.

5 杨国峰, 杨进, 万忠民. 谷物通风干燥的数学模拟及试验[J]. 粮食储藏技术, 1999, 28 (5) : 23 ~ 30.
Yang Guofeng, Yang Jin, Wan Zhongmin. Mathematical simulation of grain drying through ventilation and the test findings[J]. Grain Storage Technology, 1999, 28 (5) : 23 ~ 30. (in Chinese)

6 高彩霞, 王培. 收获期和干燥方法对苜蓿干草质量的影响[J]. 草地学报, 1997, 5 (2) : 113 ~ 116.
Gao Caixia, Wang Pei. Effect of various harvest time and drying methods on nutritive value of alfalfa hay[J]. Acta Agrestia Sinica, 1997, 5 (2) : 113 ~ 116. (in Chinese)

7 刘兴元. 优质苜蓿草捆加工生产技术的研究[J]. 草业科学, 2001, 18 (2) : 23 ~ 26.
Liu Xingyuan. Study of the production technique of high quality alfalfa bale processing[J]. Pratacultural Science, 2001, 18 (2) : 23 ~ 26. (in Chinese)

8 Bruce D M, Mcfarlane N J B. Control of mixed-flow grain of the driers; testing of feedback-plus-feed forward algorithm[J]. J. Agric. Engng. Res. , 1992, 52 : 11 ~ 23.

9 Mullet A, Berea A, Rosella C. Drying model of carrots[J]. Drying Technology, 1989, 7 (3) : 537 ~ 557.

10 James A, Stewart R. Moisture migration during storage of preserved high moisture grams[J]. Transactions of ASAE, 1975, 18 (2) : 378 ~ 393.

11 Arum S, Mujumdar. Drying technology in agriculture and food sciences[M]. New York: Science Publishers, Inc. , 2000: 191 ~ 211.

12 Shahab Sokhansank, Patil F T. Kinetics of dehydration of green alfalfa[J]. Drying Technology, 1996, 14 (5) : 1 197 ~ 1 234.

13 杜建强, 杨世昆, 刘贵林, 等. 牧草太阳能低温干燥试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41 (增刊) : 186 ~ 190.
Du Jianqiang, Yang Shikun, Liu Guilin, et al. Test on forage dryness using low temperature[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41 (Supp.) : 186 ~ 190. (in Chinese)