

太阳能牧草干燥成套设备干燥工艺参数优化

钱旺 杨世昆 刘贵林 贺刚 王振华 杜建强

(中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院有限公司, 呼和浩特 010010)

摘要: 太阳能光热技术在苜蓿草干燥领域的应用前景广阔, 太阳能低温干燥技术能够最大限度地减少苜蓿草营养成分的损失。为了提高苜蓿草太阳能低温干燥的效率, 优化9TGK-1.5型太阳能牧草干燥成套设备干燥工艺参数, 通过苜蓿草干燥试验台对苜蓿草低温干燥过程进行试验研究, 得出苜蓿草干燥过程中进口温度、进口风速对干燥时间的影响, 并对苜蓿草干燥模型进行拟合。利用苜蓿草干燥试验数据和干燥模型方程确定苜蓿草太阳能分段式干燥工艺及参数, 相比目前干燥设备常用的进口温度45℃和进口风速1.5 m/s的工艺参数, 采用优化后的干燥工艺及工艺参数, 苜蓿草干燥效率提高了34.4%, 提高了苜蓿草粗蛋白和胡萝卜素等营养成分保有量。

关键词: 苜蓿草; 太阳能干燥; 干燥工艺; 参数优化

中图分类号: S226.6; S214.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)08-0110-09

Optimization of Drying Process Parameters of Solar Herbage Dry Equipment

QIAN Wang YANG Shikun LIU Guilin HE Gang WANG Zhenhua DU Jianqiang

(Hohhot Branch of Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Co., Ltd., Huhhot 010010, China)

Abstract: Solar-thermal technology was widely applied in the field of alfalfa drying already, Solar low temperature drying technology can minimize the loss of alfalfa nutrient compositions. The aim was to improve solar drying efficiency and optimize the drying process parameters of 9TGK-1.5 solar grass drying unit equipment. Firstly, the factors influencing the drying of alfalfa was studied. The experiment and analysis of the low temperature drying process of alfalfa were studied through drying test bed. The changing rules of drying temperatures, wind speeds, drying rates, drying base moistures and drying times were found out. The conclusion was obtained that in the first stage of drying process, the temperature can be chosen as 50℃, wind speed can be 1.5 m/s in order to save energy. When drying process in the second and third stages, in order to achieve the effect of rapid drying, the temperature can be chosen as 50℃, wind speed can be 2.5 m/s. Experiment results showed that the Page equation was consistent with the drying process of alfalfa. The fitting regression of drying model of alfalfa was completed. The optimized parameters were adopted to improve the efficiency of alfalfa by 34.4%. It can improve the effective control of aromatic amino acid volatilization and protein denaturation, and increase the content of crude protein and carotene in alfalfa hay. The research result provided an optimized basis for the design of the related parameters of solar drying technology and drying equipment.

Key words: alfalfa; solar energy; drying process; parameter optimization

0 引言

苜蓿草是高产优质的蛋白质饲料之一, 面对国内蛋白质饲料短缺的情况, 如何高效获得优质苜蓿

草是行业内亟待解决的重要问题^[1-2]。太阳能低温干燥能够最大限度地减少苜蓿草营养成分的损失^[3]。

利用太阳能干燥牧草最早起源于欧洲, 但目前

收稿日期: 2018-03-12 修回日期: 2018-04-07

基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目

作者简介: 钱旺(1982—), 男, 博士生, 主要从事畜牧机械研究, E-mail: qianwang0319@163.com

通信作者: 杨世昆(1954—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事畜牧机械研究, E-mail: yskun001@sohu.com

在欧洲仍主要采用燃油高温快速干燥设备干燥牧草。国内、外学者主要开展高温快速干燥、强制对流干燥和热风干燥的研究,在苜蓿草太阳能低温干燥方面的研究很少。FARHANG 等^[4]研究了利用微波原理对苜蓿草进行干燥,通过微波炉试验找到不同功率对干燥速率的影响规律;HRISTOV^[5]研究了不同干燥方式对紫花苜蓿青贮料干物质和蛋白质降解性能的影响,发现苜蓿草干燥速度对蛋白质溶解度有影响;SILES 等^[6]研究了苜蓿草的干燥动力学,并进行了湿度和温度对干燥速度影响的模拟;车刚等^[7]研究了紫花苜蓿热风干燥特性,发现在热风温度为 190 ~ 200℃ 时,其干燥速率较高;吕黄珍等^[8]以轻柴油为燃料,导热油为载体,研究了对几种牧草种子干燥的效果;王全喜等^[9]研究了牧草种子热泵辅助型太阳能储热干燥设备设计与试验,发现 4 种供热干燥模式的耗电量之比为 0.9 : 1.0 : 1.2 : 1.5;杜建强等^[10]利用太阳能低温干燥试验台进行了苜蓿草含水率和表面温度对干燥时间影响的研究;而太阳能低温干燥参数(进口温度、风速)对干燥工艺和干燥后苜蓿草营养品质的影响因素方面的研究很少。

本文根据自行设计的 9TGK-1.5 型太阳能牧草干燥成套设备的运行情况及生产能力,提出影响牧草干燥的基本因素,利用干燥试验台对苜蓿草干燥特性进行理论研究和分析,找出苜蓿草干燥过程中不同进口温度、进口风速组合下,干燥速率和干基含水率随干燥时间的变化规律,并对苜蓿草干燥模型进行拟合回归,对干燥后的苜蓿草营养成分变化情况进行初步研究,最终提出太阳能干燥成套设备的最优干燥工艺及参数方案,以期对太阳能干燥设备相关工艺参数的设计和编制提供优化的依据。

1 材料与方法

1.1 设备总体结构

9TGK-1.5 型太阳能牧草干燥成套设备总体结构包括太阳能空气集热器、调频风机、风送系统、牧草干燥仓、计算机自动控制柜和自动抓草斗具等^[11],如图 1、2 所示。

该设备的工作原理:抓草斗具实现苜蓿草的自动进料和出料,厂房顶部太阳能空气集热器对热空气进行收集,调频电动机将热空气通过风送系统送入干燥仓,调频电动机和温控系统通过计算机对进口风速、进口温度进行控制。

1.2 苜蓿草的干燥工艺流程及工艺参数

9TGK-1.5 型太阳能牧草干燥成套设备可对苜蓿草、黑麦草、苏丹草、披碱草、羊草等牧草进行干



图 1 太阳能干燥设备图

Fig. 1 Drawing of solar drying equipment

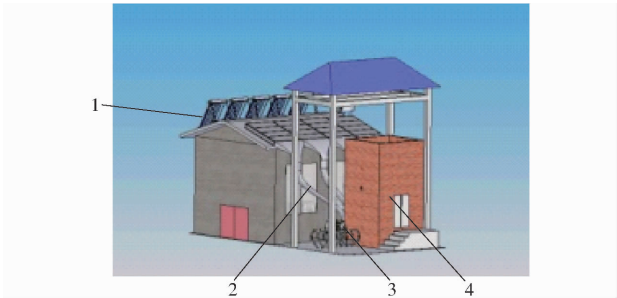


图 2 太阳能干燥设备原理图

Fig. 2 Diagram of solar drying equipment

1. 太阳能集热系统 2. 风送系统 3. 自动抓草斗具 4. 牧草干燥仓

燥生产。由于早期太阳能集热器集热效率所限,9TGK-1.5 型太阳能牧草干燥成套设备设定了统一的干燥工艺流程和参数,干燥工艺参数设定为进口风速 1.5 m/s、进口温度 45℃ (图 3)。课题组发现在苜蓿草干燥生产中干燥工艺不合理,参数不理想。设定不同的进口温度和进口风速,最终干燥苜蓿草的用时不同,营养品质也不同。为了细化 9TGK-1.5 型太阳能牧草干燥成套设备的干燥工艺,优化干燥工艺参数,通过试验台进行干燥机理研究,对苜蓿草干燥模型进行拟合回归,优化苜蓿草的干燥工艺。

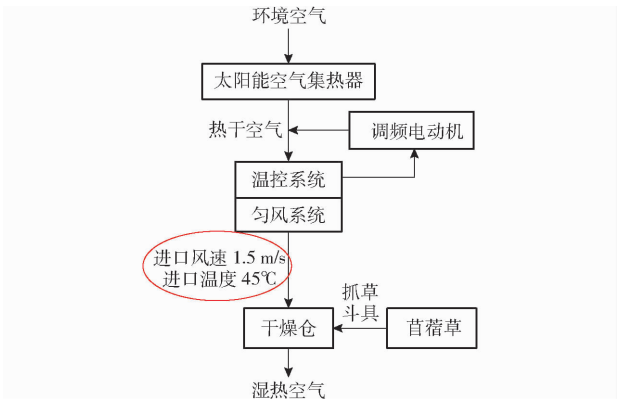


图 3 太阳能干燥设备工艺流程图

Fig. 3 Process flow chart of solar drying equipment

1.3 试验装置

如图 4、5 所示,由中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院自行设计的太阳能牧草干燥试验台,主要由透射聚光型太阳能空气集热器和牧草干燥试

验台两部分组成,透射聚光型太阳能空气集热器安装于实验室屋顶之上,收集的太阳能是热风的主要能源。牧草干燥试验台放置于实验室屋内地面上,两者之间通过风管连接。干燥试验台具体包括电子称量仪、入风室、温度探头、湿度探头、干燥箱、温控柜、数据记录仪、计算机等部分。

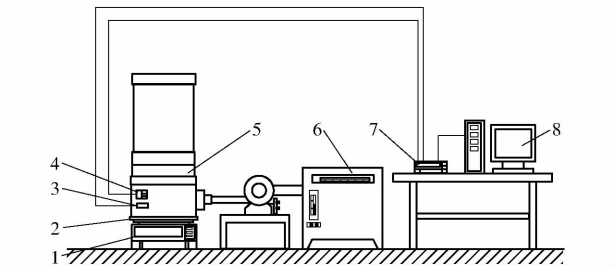


图 4 干燥试验台结构示意图

Fig. 4 Schematic drawing of solar drying test-bed

1. 电子称量仪 2. 入风室 3. 温度探头 4. 湿度探头 5. 干燥箱 6. 温控柜 7. 数据记录仪 8. 计算机

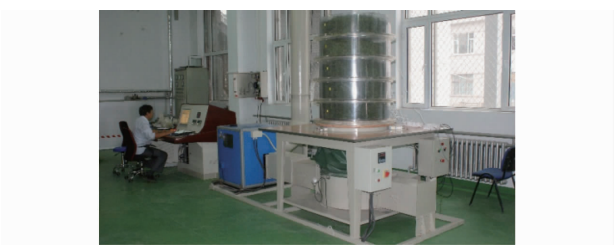


图 5 干燥试验台实物图

Fig. 5 Drawing of solar drying test-bed

1.3.1 参数的测量方案

试验仪器如图 6 所示,干燥箱下端均匀布置 3 个 0.05 级精度的 BK-5 型电子称量传感器,量程为 300 kg,可测量试验台上苜蓿草质量。进风口布置有精度为 0.2 m/s 的 FTS64-2011-10M 型风速传感器和准确度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 2\%$ 的 JWSK-6W1WDB 型温、湿度传感器,量程分别为 0~30 m/s 和 -40~120 $^{\circ}\text{C}$ 、0~100%,控制单元通过传感器精准控制进口温度和进口风速。温、湿度传感器可对干燥箱内不同高度的温、湿度进行实时监测。计算机控制系统可以在线显示时间、温度、风速、苜蓿草质量等参数并进行存储。另外,本试验还用到 DGQ 型电热干燥箱、N962E 型风速仪、电子天平、DH516-A 型红外在线水分测定仪等仪器。

1.3.2 测量的控制方案

在测试系统实施中,通过变频器、可编程控制器 PLC 和上位计算机对风机转速进行控制,将透射聚光型太阳能空气集热器内产生的热空气由风管引入到实验室内牧草干燥特性试验台中。温度控制器 PID 可实现计算机对辅助热源电加热空气的控制,进行干燥空气的温度调节。风道内和干燥箱入口处布置了匀风装置,实现了干燥空气的均匀分布。物

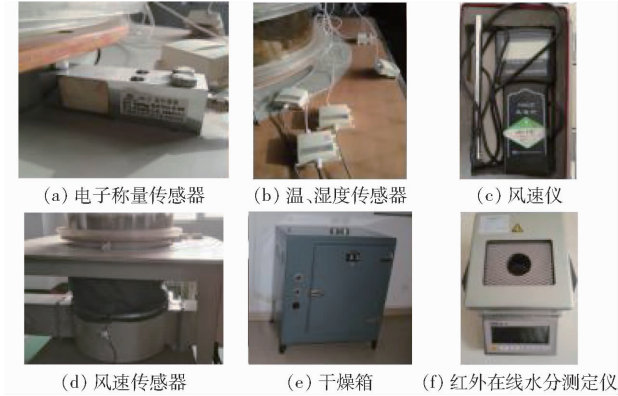


图 6 干燥试验仪器

Fig. 6 Instruments of drying test

料相关的参数测量数据全部由上位计算机进行存储与分析,见图 7。

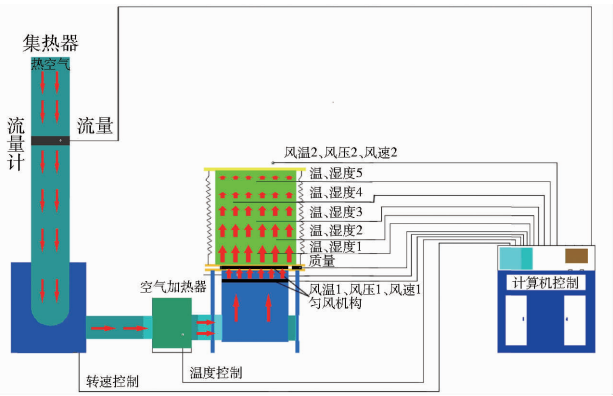


图 7 干燥试验台测控系统

Fig. 7 Measurement and control system of solar drying test-bed

1.4 试验材料

苜蓿草原料采自内蒙古呼和浩特市托克托县种植场的金皇后初花期紫花苜蓿。

1.5 试验方案

根据生产实践和已有的苜蓿草干燥试验基础数据提出了 6 组参数组合方案,见表 1。经试验研究得出 6 组干燥时间和苜蓿草质量的数据。计算得出干基含水率、水分比和干燥速率,绘制干基含水率、干燥速率随时间变化的曲线,并对其进行定量分析。每次测试的鲜苜蓿草质量均为 5 000 g。

表 1 不同风速、温度试验

Tab.1 Different wind speeds and temperatures test

试验组号	进口温度/ $^{\circ}\text{C}$	进口风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1	45	1.5
2	50	1.5
3	55	1.5
4	50	0.8
5	50	2.5
6	55	2.5

苜蓿草干燥试验在温度为 $(27 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿

度为 $(30 \pm 5)\%$ 、风速为 0 m/s 的实验室环境中进行。

试验干燥流程:鲜苜蓿草→自然堆放→热风干燥→冷却→品质指标测定。干燥后的苜蓿草湿基含水率控制在 $15\% \sim 17\%$ (安全含水率)。

1.6 测量指标

1.6.1 苜蓿草原始湿基含水率

苜蓿草刈割后,随机取 5 个样本,做切碎处理,使其长度为 15 mm 。每个样品质量为 50 g ,装入铝盒内,立即称量。按照草样制作要求迅速进行干燥处理。该试验采集草样的含水率采用 DGQ 型电热干燥箱进行干燥。在 105°C 下恒温干燥 24 h ,然后取出干燥后的苜蓿草放入干燥皿中冷却至常温 (23°C 左右),再称其质量^[12]。苜蓿草的原始湿基含水率计算公式为

$$H_c = \frac{m_0 - m_e}{m_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中 m_0 ——样品干燥前质量, g
 m_e ——样品干燥后质量, g

测定数据如表 2 所示。经计算,物料原始湿基含水率为 77.4% 。

表 2 苜蓿草原始湿基含水率测定结果
Tab.2 Measurement of raw materials moisture content

干燥前质量/g	干燥后质量/g	湿基含水率/%
50.0	11.5	77.0
50.0	11.1	77.9
50.0	11.4	77.2
50.0	11.4	77.3
50.0	11.2	77.6
50.0	11.3	77.4

1.6.2 干基含水率

试验过程中苜蓿草质量的测定由试验台架上的电子称量传感器完成。干基含水率 M_t 、水分比 M_R ^[13] 计算公式为

$$M_t = \frac{m_t - m_d}{m_d} \tag{2}$$

$$M_R = \frac{M_t}{M_0} \tag{3}$$

式中 M_t —— t 时刻物料干基含水率, g/g
 M_R ——水分比
 m_t —— t 时刻物料质量, g
 m_d ——物料中干物质质量, g
 M_0 ——物料初始干基含水率, g/g

1.6.3 干燥速率

干燥速率定义为湿物料在单位时间内单位面积(物料和干燥介质的接触面积)汽化的水分质量^[14]。

若物料与干燥介质的接触面积不易确定,可用干燥强度来表示干燥速率。干燥强度定义为物料干基含水率随时间的变化率,通常用 V_d 表示^[15]。计算公式为

$$V_d = \frac{\text{d}M_d}{\text{d}t} = \frac{M_{d,j+1} - M_{d,j}}{t_{j+1} - t_j} \tag{4}$$

式中 V_d ——干燥速率, $\text{g}/(\text{g} \cdot \text{min})$
 $M_{d,j+1}$ 、 $M_{d,j}$ —— t_{j+1} 、 t_j 时刻干基含水率, g/g
 t ——干燥时间, min

在试验过程中湿物料的质量因失去水分而逐渐减少,用牧草湿基含水率不能直接描述干燥所除去的水分。而绝对干料的质量在干燥过程中是不变的,故用干基含水率来衡量干燥速度更合理,试验操作起来更方便^[16-17]。

1.7 数据的采集

试验开始前先称取准备好的鲜苜蓿草,试验中每隔 20 min 读取干燥试验台电子称量传感器读数,将每一次测量数据填入记录表内,如表 3 所示。由式(2)~(4)分别计算可得干基含水率、水分比和干燥速率。

表 3 物料质量 m_t 试验数据
Tab.3 Material quality m_t of test data g

t/min	试验组号					
	1	2	3	4	5	6
0	5 000.01	5 000.08	5 000.10	5 000.04	5 000.00	5 000.03
20	4 758.23	4 643.78	4 646.67	4 938.08	4 852.61	4 128.90
40	4 414.38	4 239.51	4 175.67	4 715.65	4 108.78	3 031.50
60	3 753.43	3 418.81	3 139.12	4 275.45	3 165.45	2 719.56
80	3 326.55	3 100.02	2 790.12	3 588.38	2 693.11	2 458.11
100	3 136.61	2 825.07	2 570.22	3 115.67	2 456.53	2 263.10
120	3 010.15	2 656.29	2 366.67	2 683.62	2 267.70	2 154.51
140	2 897.68	2 518.78	2 301.17	2 520.61	2 156.54	2 058.30
160	2 738.70	2 393.81	2 185.83	2 333.12	2 063.70	1 984.50
180	2 595.92	2 306.31	2 121.48	2 173.73	2 031.27	1 924.91
200	2 491.21	2 212.48	2 083.46	2 087.89	1 982.72	1 924.90
220	2 382.78	2 143.82	2 071.20	2 069.73	1 946.33	1 924.91
240	2 324.59	2 093.79	1 984.54	2 061.22	1 937.21	1 924.89
260	2 297.68	2 050.00	1 924.89	2 054.19	1 937.03	1 924.78
280	2 253.34	2 018.77	1 924.93	2 054.10	1 937.04	1 924.92
300	2 230.10	1 975.03	1 924.91	205.40	1 925.67	1 924.93
320	2 225.02	1 937.51	1 924.82	205.34	1 926.11	1 924.78

1.8 数学模型和计算

为了寻找合适的苜蓿草干燥模型,根据国内、外学者在干燥模型方面的研究成果,结合课题研究的物料物理特性,选择了目前干燥研究领域比较常见的 3 种物料干燥动力学的半经验和经验模型,如表 4 所示。3 种模型中,Newton 方程就是 Page 方程中 $n = 1$ 的修正方程^[18],因此,只要研究 Page 方程

和 Logarithmic 方程是否与苜蓿草干燥特性试验曲线吻合即可。

表 4 物料干燥模型
Tab.4 Drying model of alfalfa

序号	名称	公式
1	Page 方程 ^[19]	$M_R = \exp(-kt^n)$
2	Newton 方程 ^[20]	$M_R = \exp(-kt)$
3	Logarithmic 方程 ^[21]	$M_R = a \exp(-kt) + b$

注： a 、 b 为干燥模型中的经验系数； k 为干燥常数； n 为待定系数^[22-23]。

对两种物料干燥模型进行非线性拟合处理，并对其进行线性回归分析。

Logarithmic 方程线性化后表示为

$$-\ln M_R = kt - \ln a \tag{5}$$

Page 方程线性化后表示为

$$\ln(-\ln M_R) = \ln k + n \ln t \tag{6}$$

由线性化后的函数可得 $-\ln M_R - t$ 和 $\ln(-\ln M_R) - \ln t$ 的关系图。

1.9 苜蓿草品质检验

对各组干燥后的苜蓿草草样进行营养成分品质化验^[24]。课题组委托相关实验室对苜蓿干草重要指标进行了营养成分品质化验，品质化验参考方法如下：按 GB/T 6432—1994 测定粗蛋白含量；按 GB/T 6433—2006 测定粗脂肪含量；按 GB/T 6434—2006 测定粗纤维含量；胡萝卜素的测定参照《粮油籽粒品质及其分析技术》^[3-4]。通过化验结果对比苜蓿草干燥后营养成分的保有量情况。

2 试验结果与讨论

2.1 不同试验参数下苜蓿草干基含水率

图 8 为干基含水率随干燥时间变化曲线，图 9 为水分比 M_R 随干燥时间变化曲线。水分比 M_R 的变化趋势与干基含水率变化趋势一致。由图 8、9 分析可知，有 4 组试验达到苜蓿草的安全含水率所用的时间较少，即第 2、3、5、6 组；第 1 组所需干燥时间较长；从试验条件可以看出第 2 组与第 5 组进口温度相同，进口风速不同，在干燥第 1 阶段（65 min 内）2 条曲线干基含水率基本接近，在第 2、3 阶段（65 min 后）第 5 组干基含水率明显低于第 2 组，因此，在干燥第 2、3 阶段进口风速对干燥特性影响大于进口温度对其的影响；由第 4 组试验数据分析可得，进口风速过低将会使湿空气无法完全散出，不能达到预期干燥的效果。比较第 2 组、第 4 组和第 5 组干燥速率曲线，在第 2、3 阶段表现为进口温度相同时，进口风速越大干燥速率越快。由此可知在干燥过程的 3 个阶段合理选择进口温度和进口风速很

重要。

由苜蓿草干燥特性曲线及数据分析可知，苜蓿草干燥工艺应采用多参数分段式干燥。苜蓿草干燥处于第 1 阶段时，结合节能角度考虑选择进口温度为 50℃，进口风速为 1.5 m/s。苜蓿草干燥处于第 2、3 阶段时，为了达到快速干燥的效果，选择进口温度为 50℃，进口风速为 2.5 m/s。通过试验数据分析，采用分段式干燥工艺及干燥参数，3 个阶段干燥速率会明显增大。

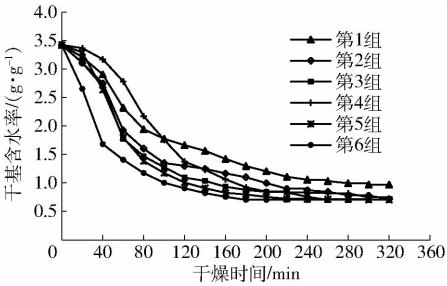


图 8 干基含水率曲线
Fig.8 Curves of moisture content of drying base

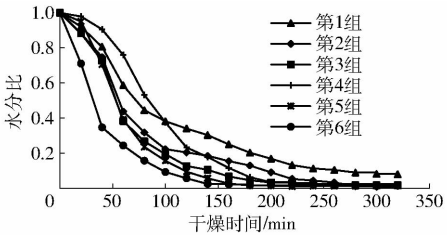


图 9 水分比曲线
Fig.9 Curves of moisture ratio

2.2 不同试验参数下苜蓿草干燥速率

由试验数据绘制苜蓿草干燥速率曲线如图 10 所示，不同进口温度和进口风速条件下的干燥速率变化曲线的总体趋势相同。通过苜蓿草干燥试验，发现干燥特性曲线的干燥速率分为 3 个阶段。第 1 阶段干燥速率快，苜蓿草的水分散失主要以游离水分蒸发为主，此类水分与物料的结合力较弱，在干燥过程中易于除去。第 2 阶段干燥速率由最大值开始降低，此时苜蓿草的水分散失主要以物化结合水分为主，此类水分与物料的结合比较稳定，在干燥过程中较难除去。第 3 阶段干燥速率趋于一个恒定值，主要是苜蓿草化学结合水分的蒸发，此类水分是按照一定的数量和比例与化合物结合而生成带结晶水的化合物中的水分，不易干燥。第 1 阶段与第 2、3 阶段干燥速率由快转慢存在一个转折点，由图 10 可得干燥速率最大值点，根据试验数据计算该点苜蓿草湿基含水率为 48%。为了实际生产中便于操作，确定湿基含水率 $(48 \pm 2)\%$ 为苜蓿草干燥特性 3 阶段的分段点。从图 10 可知，最先达到干燥分段点的是第 6 组，干燥速率达到峰值所用的时间是 52 min。

苜蓿草干燥速率由进口温度、进口风速决定,进口温度越高,进口风速越大,苜蓿草干燥速度越快;之后达到干燥分段点的是第 2、3、5 组,分别用时 66、63、65 min,比较第 6 组和第 5 组试验数据可知第 1 阶段进口温度对干燥速率有很大影响。第 2 组和第 5 组的干燥速率几乎在相同时间达到峰值,干燥第 1 阶段进口温度对干燥特性影响大于进口风速的影响。

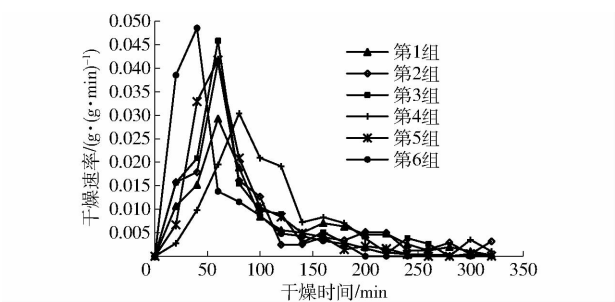


图 10 苜蓿草干燥速率曲线
Fig. 10 Drying rate curves of alfalfa

2.3 数学模型分析

2 种模型效果可由 $-\ln M_R - t$ 和 $\ln(-\ln M_R) - \ln t$ 关系得出。拟合曲线如图 11、12 所示。

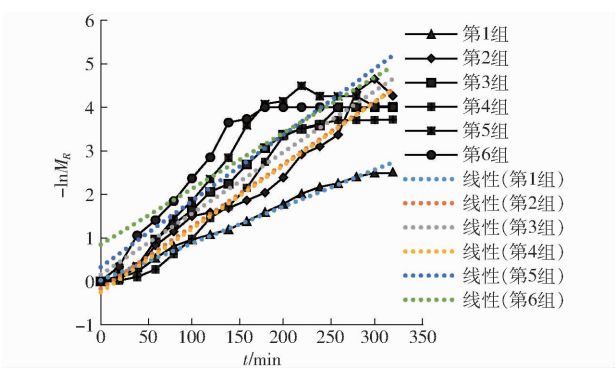


图 11 Logarithmic 方程拟合曲线
Fig. 11 Fitting curves of Logarithmic equation

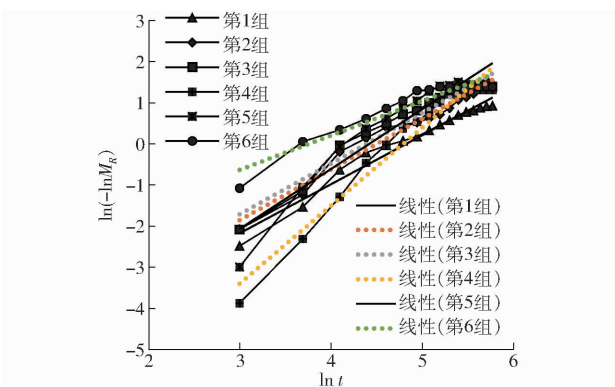


图 12 Page 方程拟合曲线
Fig. 12 Fitting curves of Page equation

根据图 11、12,比较 2 组线性回归曲线可以看出两种模型拟合效果各不相同,干燥温度不同,适合的干燥模型也不同。

为证明 Logarithmic 方程和 Page 方程在苜蓿草干燥方面的适用性,对试验数据进行回归分析,得到干燥模型的各决定系数 R^2 。拟合结果如表 5、6 所示。

表 5 Logarithmic 方程拟合结果
Tab. 5 Fitting results of Logarithmic equation

组号	k	a	R^2
1	0.008 5	0.869 2	0.978 1
2	0.014 3	0.817 8	0.899 4
3	0.014 1	0.740 5	0.891 3
4	0.014 5	0.912 7	0.887 6
5	0.152 0	0.710 8	0.825 5
6	0.012 8	0.565 4	0.811 7

表 6 Page 方程拟合结果
Tab. 6 Fitting results of Page equation

组号	k	n	R^2
1	0.003 2	1.191 2	0.969 3
2	0.003 9	1.232 3	0.969 8
3	0.004 5	1.233 4	0.950 4
4	0.000 1	1.894 8	0.948 5
5	0.001 6	1.454 9	0.907 4
6	0.043 3	0.836 6	0.908 8

干燥模型拟合程度由 R^2 决定,一般情况下 R^2 在 0.9 ~ 1 之间,模型拟合效果比较理想,Page 方程拟合的 R^2 均大于 0.9,故可以认为其可靠性较好,Logarithmic 方程拟合效果 R^2 不理想。所以认为 Page 方程作为苜蓿草干燥模型比较理想,利用该模型能够准确预测苜蓿草干燥特性。

由 Page 模型可确定水分比 M_R 和时间 t 的关系,分段点 M_R 值由式(2)、(3)计算可得。分段干燥时间由第 2 组的 Page 方程(6)确定,即进口温度 50℃、进口风速 1.5 m/s 时,将分段点 M_R 值、 $k = 0.003\ 9$ 、 $n = 1.232\ 3$ 代入 Page 方程可得分段干燥工艺的第 1 阶段干燥时间 T_1 。 T_1 作为分段式干燥工艺流程理论分界点,可编入程序由计算机控制。

3 干燥工艺参数优化与干燥生产验证

3.1 试验方案

通过 6 组试验数据的对比分析,给出最优参数方案:干燥第 1 阶段,出于节能考虑选择进口温度为 50℃,进口风速为 1.5 m/s。干燥第 2、3 阶段,为了达到快速干燥的效果,选择进口温度为 50℃,进口风速为 2.5 m/s。为了验证参数优化方案的效果,将参数优化方案 and 上文的 6 组参数方案,共计 7 组参数方案分别在 9TGK-1.5 型太阳能牧草干燥成套

设备上进行了试验验证。

3.2 试验条件

苜蓿草原料为内蒙古呼和浩特市托克托县种植场的金皇后紫花苜蓿,原始湿基含水率为 76.2%。试验环境为空气温度 26℃,空气湿度 18%,风速 2 m/s。试验时间为 2017 年 8 月 28 日 11:00。试验地点为内蒙古呼和浩特市托克托县种植场。

3.3 试验设备

9TGK-1.5 型太阳能牧草干燥成套设备,中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院有限公司研制。

对 9TGK-1.5 型太阳能牧草干燥成套设备进行了干燥生产验证。生产验证使用的仪器设备有 DH516-A 型红外在线水分测定仪、DGQ 型电热干燥箱、N962E 型风速仪、电子天平等。

3.4 验证方案

3.4.1 干燥模型验证

通过在线水分测定仪对苜蓿草试验生产过程的监测记录,验证 Page 干燥模型的合理性,为不同含水率苜蓿草干燥工艺流程提供依据(Page 方程代入表 6 的参数和最终水分比,可得干燥时间)。

3.4.2 干草营养品质化验

对 7 组参数方案干燥后的苜蓿草进行营养成分品质化验^[25]。化验结果见表 7。

3.5 验证结果

(1)根据表 7 可以看出,苜蓿草实际干燥时间与 Page 方程理论推导苜蓿草干燥时间相对误差在 5% 以内,吻合程度很高,说明 Page 方程可以作为该设备干燥不同含水率苜蓿草干燥工艺流程的模型。从 7 组数据可以看出优化后的参数(第 7 组)相比设备原参数(第 1 组)在干燥苜蓿草效率上提高了 34.4%。

(2)通过 7 组数据的营养成分化验结果可以看出,第 5 组和第 7 组的苜蓿草各项营养成分保有量最高,尤其是粗蛋白和胡萝卜素,而粗蛋白和粗纤维指标决定苜蓿干草的品质分级。通过品质检测结果分析和相关研究成果总结,发现牧草在干燥温度升高时会伴随着芳香性氨基酸挥发和蛋白质变性^[24]。故选择温度参数为 50℃ 作为干燥苜蓿草的温度是合理的(第 3、6 组不适合低温干燥)。苜蓿市场普遍采用干草检测报告和干草外观物理描述两种方法对干草进行分级标识。根据美国农业部对进口苜蓿草等级划分依据,粗蛋白质量分数为 18%~20% 和 20%~22% 的苜蓿草分别为三级和二级苜蓿草,而第 5 组和第 7 组相比第 1 组蛋白质质量分数高出近 2 个百分点。因此,采用优化后的工艺参数(第 7 组)相比设备原参数(第 1 组),粗蛋白和胡萝卜素等营养成分保有量提高,苜蓿草销售价格也会提高。

表 7 苜蓿草干燥时间与营养成分
Tab.7 Dry time and nutrient compositions of drying alfalfa

组号	干燥 第 1 阶段 时间/ min	干燥 第 2、3 阶 段时间/ min	实际 干燥时间/ min	Page 方程 推导干燥 时间/min	干燥时间 相对 误差/%	干燥后 湿基 含水率/ %	粗蛋白 质量分数/ %	粗脂肪 质量分数/ %	粗纤维 质量分数/ %	灰分 质量分数/ %	胡萝卜素 质量比/ (mg·g ⁻¹)
1	77	243	320	315	1.59	21.9	18.89	3.16	23.08	8.73	147.07
2	66	214	280	274	2.19	17.2	20.17	3.02	24.60	8.71	108.93
3	63	177	240	231	3.90	17.0	18.74	2.89	24.41	7.93	84.93
4	87	213	300	296	1.35	16.7	19.98	3.24	23.08	8.73	147.07
5	65	135	200	191	4.71	17.0	20.68	3.31	22.47	7.25	140.73
6	51	109	160	153	4.58	17.0	19.01	2.94	24.38	6.97	85.78
7	67	143	210	—	—	17.0	20.67	3.37	22.32	7.36	140.21

(3)考虑到第 5 组和第 7 组都是比较理想的参数方案,第 7 组在干燥第 1 阶段进口风速为 1.5 m/s,干燥第 2、3 阶段为 2.5 m/s,第 5 组进口风速为 2.5 m/s,从能耗方面考虑,通过理论计算干燥第 1 阶段(67 min 内)第 7 组和第 5 组的能耗差异,节省能耗约为 15%。因此,在干燥效果相近的情况下,选择第 7 组的参数方案为最优工艺参数方案。新工艺流程图相比设备原工艺图,将干燥过程划分为 2 个阶段分别进行干燥,由计算机控制工艺流程程序、

传感器监测干燥生产过程,可实现自动干燥生产。图 13 是设备干燥苜蓿草的工艺流程图和工艺参数,图 14 是第 7 组试验后苜蓿干燥的外观质量。

4 结论

(1)通过试验数据分析可得苜蓿草干燥特性分为 3 个阶段。第 1 阶段干燥速率快,苜蓿草的水分散失主要以游离水分蒸发为主。第 2 阶段干燥速率由最大值开始降低,此时苜蓿草的水分散失主要以

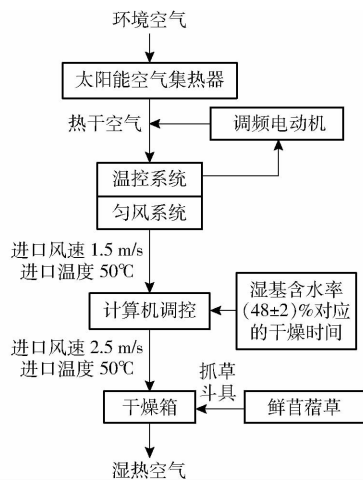


图 13 太阳能干燥设备新工艺流程图

Fig. 13 New process flow chart of solar drying equipment



图 14 苜蓿草干燥效果

Fig. 14 Drying effect of alfalfa

物化结合水分为主。第 3 阶段干燥速率趋于一个恒定值,主要是苜蓿草化学结合水分的蒸发。

(2) 针对苜蓿草干燥特性,制定分段式干燥工艺及工艺参数。干燥第 1 阶段,进口温度对干燥特性影响大于进口风速的影响,同时考虑节能,选择进口温度为 50℃,进口风速为 1.5 m/s。干燥第 2、3 阶段,进口风速对干燥特性影响大于进口温度的影响,为了提高干燥速率,选择进口温度为 50℃,进口风速为 2.5 m/s。分段式干燥工艺分界点的湿基含水率为 48%,为了实际生产中便于操作,确定湿基含水率范围为 $(48 \pm 2)\%$,作为干燥工艺分段点参考范围。

(3) 通过干燥模型线性回归分析得出, Page 模型最适合描述苜蓿草太阳能干燥曲线的变化规律。Page 模型为苜蓿草太阳能干燥工艺的制定和干燥设备生产实践提供优化依据。

(4) 通过 9TGK-1.5 型太阳能牧草干燥成套设备对分段式干燥工艺及工艺参数的试验验证,结合干草品质化验结果,采用优化后的工艺参数方案,干燥苜蓿草效率提高了 34.4%,进口温度为 50℃ 时有效控制了芳香性氨基酸挥发和蛋白质变性,苜蓿干草的粗蛋白和胡萝卜素等营养成分保有量高。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 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. Forage dryness using low temperature[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 186-190. (in Chinese)
- 3 董宽虎,王常慧,牧原. 干燥方法对苜蓿草粉营养价值的影响[J]. 草地学报,2003,11(4):334-337.
DONG Kuanhu, WANG Changhui, MU Yuan. Effects of different drying methods on the nutritive value of alfalfa meal[J]. Acta Agrestia Sinica, 2003, 11(4): 334-337. (in Chinese)
- 4 FARHANG A, HOSINPOUR A, DARVISHI H, et al. Accelerated drying of alfalfa (*Medicago sativa* L.) by microwave dryer[J]. Drying Technology, 2011, 29(9):1066-1075.
- 5 HRISTOV A. Effect of sample pretreatment on alfalfa silage dry matter and protein degradability in sacco [J]. Animal Feed Science and Technology, 1992, 38(1):67-74.
- 6 SILES J A, DAS S K, BAL S. Kinetics of alfalfa dryin simultaneous modelling of moisture content and temperature[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 64(1):129-133.
- 7 车刚,汪春,李成华,等. 紫花苜蓿热风干燥特性与工艺的试验研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2004,16(4):36-39.
CHE Gang, WANG Chun, LI Chenghua, et al. Study on airflow drying characteristic and technology of alfalfa [J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2004, 16(4): 36-39. (in Chinese)
- 8 吕黄珍,刘德旺,王德成. 采用 5HCCX-1.6 型冲击穿流循环式干燥设备干燥几种牧草种子的效果试验[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10):178-180.
LÜ Huangzhen, LIU Dewang, WANG Decheng. Experimental study on drying forage seeds by 5HCCX-1.6 recalculating impinging crossflow dryer[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(10):178-180. (in Chinese)
- 9 王全喜,王德成,杜建强,等. 牧草种子热泵辅助型太阳能储热干燥设备设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 222-226, 265.
WANG Quanxi, WANG Decheng, DU Jianqiang, et al. Design and experiment of heat pump assisted solar energy heat-storage drying equipment for herbage seed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 222-226, 265. (in Chinese)
- 10 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. Forage dryness using low temperature[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 186-190. (in Chinese)
- 11 杨世昆,杨文大,刘贵林,等. 交替供热式太阳能饲草干燥设备:200320124589.3[P]. 2003-11-14.

- 12 BRUCE D M, MCFARLANE N J B. Control of mixed-flow grain of the driers; testing of feedback-plus-feedforward algorithm[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1992, 52: 11 – 23.
- 13 雷广平, 王宝和. 薄层干燥技术的研究进展[J]. 干燥技术与装备, 2011(2): 45 – 53.
LEI Guangping, WANG Baohe. Research progress of thin-layer drying technology[J]. Drying Technology & Equipment, 2011(2): 45 – 53. (in Chinese)
- 14 郑先哲, 夏吉庆. 苜蓿干燥特性与品质的试验研究[J]. 干燥技术与设备, 2004, 3(1): 65 – 68.
ZHENG Xianzhe, XIA Jiqing. Study on the character and quality of the alfalfa in drying process[J]. Drying Technology & Equipment, 2004, 3(1): 65 – 68. (in Chinese)
- 15 裴彩霞, 董宽虎, 范华. 不同干燥方法对牧草 WSC 及降解率的影响[C] // 洪绂曾. 21 世纪草业科学展望—国际草业(草地)学术大会论文集. 北京, 2001: 467 – 470.
- 16 MUJUMDAR A S. Drying technology in agriculture and food sciences[M]. New York: Science Publishers, 2000: 191 – 211.
- 17 HARKEMA H, MENSINK M G J, SOMHORST D P M, et al. Reduction of *Botrytis cinerea* incidence in cut roses (*Rosa hybrida* L.) during long term transport in dry conditions[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 76: 135 – 138.
- 18 NESLIHAN C, ARIF H. A review of heat pump drying: part 1—systems, models and studies[J]. Energy Conversion and Management, 2009(9): 116 – 123.
- 19 PAGEG E. Factors influencing the maximum rates of air-drying shelled corn in thin layers[D]. West Lafayette: Purdue University, 1949: 107 – 119.
- 20 MULLET A, BEREA A, ROSELLA C. Drying model of carrots[J]. Drying Technology, 1989, 7(3): 537 – 557.
- 21 SAEID M, ALI M, BARAT G, et al. An investigation of energy consumption, solar fraction and hybrid photovoltaic-thermal solar dryer parameters in drying of chamomile flower[J]. International Journal of Food Engineering, 2014(4): 132 – 143.
- 22 PAUL R T, SOKHANSANJ S. Thin layer of components of fresh alfalfa[J]. Canadian Agriculture Engineering, 1992, 13(4): 343 – 346.
- 23 PAUL R T, SOKHANSANJ S. Physical and nutrition changes in green alfalfa during high temperature drying [C] // ASAE 1995 Annual Meeting, 1995: 204 – 211.
- 24 钱旺, 杨世昆, 刘贵林, 等. 苜蓿草干燥试验与收获工艺优化[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 231 – 234, 288. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2012S47&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.047.
QIAN Wang, YANG Shikun, LIU Guilin, et al. Optimization on harvesting technology and drying experiment of alfalfa[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Sup.): 231 – 234, 288. (in Chinese)
- 25 何照范. 籽粒粮油品质及其分析技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1985: 144 – 150.

(上接第 41 页)

- 15 韩绿化, 毛罕平, 严蕾, 等. 穴盘育苗移栽机两指四针钳夹式取苗末端执行器[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 23 – 30. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150704&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.004.
HAN Lühua, MAO Hanping, YAN Lei, et al. Pincette-type end-effector using two fingers and four pins for picking up seedlings [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 23 – 30. (in Chinese)
- 16 李加念, 洪添胜, 冯瑞钰, 等. 基于真有效值检测的高频电容式土壤水分传感器[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 216 – 221.
LI Jianian, HONG Tiansheng, FENG Ruiyu, et al. High-frequency capacitive soil water content sensor based on detecting of true root mean square[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 216 – 221. (in Chinese)
- 17 王侨, 曹卫彬, 张振国, 等. 穴盘苗自动取苗机构的自适应模糊 PID 定位控制[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 32 – 39.
WANG Qiao, CAO Weibin, ZHANG Zhenguo, et al. Location control of automatic pick-up plug seedlings mechanism based on adaptive fuzzy-PID[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 32 – 39. (in Chinese)
- 18 黄震宇, 李腾, 喻志成, 等. 蔬菜种子风力筛选机分离室气固两相流模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 70 – 76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160510&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.010.
HUANG Zhenyu, LI Teng, YU Zhicheng, et al. Simulation and experiment of gas-solid two-phase flows in separation chamber of air screening machine for vegetable seeds[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 70 – 76. (in Chinese)
- 19 李慧, 刘星桥, 李景, 等. 基于物联网 Android 平台的水产养殖远程监控系统[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13): 175 – 181.
LI Hui, LIU Xingqiao, LI Jing, et al. Aquiculture remote monitoring system based on IOT Android platform[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(13): 175 – 181. (in Chinese)
- 20 戴建国, 赖军臣. 基于图像规则与 Android 手机的棉花病虫害诊断系统[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 35 – 44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150106&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.006.
DAI Jianguo, LAI Junchen. Image-rule-based diagnostic expert system for cotton diseases and pests based on mobile terminal with Android system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 35 – 44. (in Chinese)