

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.049

# 基于温湿度控制的牛粪再生垫料生产工艺干燥特性研究

郭钰<sup>1,2</sup> 周洪宇<sup>1,2</sup> 段娜<sup>1,2</sup> 吴敏<sup>3</sup> 王盼柳<sup>1,2</sup> 施正香<sup>1,2</sup>(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 农业农村部设施农业工程重点实验室, 北京 100083;  
3. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘要:** 为解决奶牛场粪污处理的难题,同时为散栏饲养牛舍提供安全舒适的牛床垫料,以固液分离后的固体牛粪为研究对象,研究在不同干燥温度、相对湿度和物料厚度条件下,牛粪再生垫料的干燥特性和杀菌率,通过响应面分析得出最优干燥工艺参数,并进行装置设计与现场试验。结果表明:高温高湿干燥能有效杀灭牛粪中的无乳链球菌和大肠杆菌。响应面分析优化确定的最佳工艺参数为高温高湿(温度 60℃、相对湿度 60%)杀菌处理 2 h + 热风降湿(78℃)干燥处理 4 h,物料厚度为 4 cm,在此条件下得到的垫料产品含水率为(50.3 ± 0.6)%,大肠杆菌和无乳链球菌的杀菌率分别为 98.3% 和 99.5%。现场验证试验结果表明该方法生产牛粪再生垫料可行,其垫料成品的含水率为(50.2 ± 1.0)%,大肠杆菌和无乳链球菌的杀菌率分别为 95.3% 和 98.3%。

**关键词:** 牛粪再生垫料; 温湿度控制; 含水率; 杀菌率; 干燥

中图分类号: S811.5; X713 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S1-0413-08

## Temperature-humidity Controlled Drying Technology and Device Design for Producing Recycled Manure Solids

GUO Yu<sup>1,2</sup> ZHOU Hongyu<sup>1,2</sup> DUAN Na<sup>1,2</sup> WU Min<sup>3</sup> WANG Panliu<sup>1,2</sup> SHI Zhengxiang<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Engineering in Structure and Environment,  
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China

3. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** With the increase of people's demand for dairy products, the rapid development of dairy farming has made manure management attracting much attention. In order to solve the problem of manure treatment in large-scale dairy farms, and simultaneously provide safe and comfortable dairy bedding materials, the solid portion of dairy manure after solid-liquid separation was used as research object, and the sterilization rate during high-temperature and high-humidity drying process and the drying characteristics during the dehumidifying drying process under different temperature, relative humidity (RH) and material thickness conditions were investigated. The feasibility of producing recycled manure solids (RMS) by temperature-humidity controlled drying technology was analyzed. The optimal drying parameters were obtained through response surface analysis with drying temperature, drying time and material thickness as variables and final moisture content of RMS as response index. On this basis, temperature-humidity controlled drying device for producing RMS was designed and the on-site verification test was carried out under the optimized process conditions. The results indicated that high-temperature and high-humidity drying process can effectively kill *Streptococcus agalactiae* and *Escherichia coli* in dairy manure. Except for some conditions, the sterilization rate after 2 hours of drying can reach more than 99%. The higher the relative humidity of the environment during the high-temperature and high-humidity drying stage was, the less serious encrustation of dairy manure was, which was conducive to the moisture evaporation in the subsequent drying process and improving the drying efficiency. In the dehumidifying drying stage, under the same material thickness and drying time, the higher the drying

收稿日期: 2020-08-10 修回日期: 2020-08-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0501402)

作者简介: 郭钰(1997—),女,硕士生,主要从事牛粪再生垫料技术研究,E-mail: S20193091664@cau.edu.cn

通信作者: 段娜(1983—),女,高级工程师,博士,主要从事农业废弃物资源化利用技术研究,E-mail: duanna@cau.edu.cn

temperature was, the more the moisture content drops were, and the faster the internal moisture migration speed was, however, it was not the higher drying temperature can make better. The results of response surface analysis showed that the intensity sequence of the parameters affecting the final moisture content was material thickness, drying time, and drying temperature. The optimal parameters were 2 h high-temperature and high-humidity (60°C, 60% RH) sterilization treatment + 4 h dehumidifying drying (78°C), as well as the material thickness of 4 cm. Under this condition, the water content of the final product obtained was (50.3 ± 0.6)%. The sterilization rate of *Escherichia coli* and *Streptococcus agalactiae* was 98.3% and 99.5%, respectively. The temperature-humidity controlled drying device was mainly composed of the feeding and discharging system, the heating and air supply system, the humidification and dehumidification system, etc. For the field verification test, the moisture content of the final product was (50.2 ± 1.0)%, and the sterilization rates of *Escherichia coli* and *Streptococcus agalactiae* were 95.3% and 98.3%, respectively, meeting the safety requirements for RMS. The results showed that the temperature-humidity controlled drying technology was feasible to produce RMS quickly and safely. And the results can provide new method for producing RMS.

**Key words:** recycled manure solids; temperature and humidity control; water content; sterilization rate; drying

## 0 引言

我国奶牛养殖业快速发展,2018年奶牛存栏量约为1038万头<sup>[1]</sup>,牛奶产量为3075万t<sup>[2]</sup>,奶牛粪污产生量约为1.82亿t<sup>[3]</sup>。大量粪污带来的环境问题备受关注,牛粪再生垫料技术是近年来兴起的一种粪污清洁回用技术,一方面可解决粪污环境污染问题,另一方面粪污处理后回用作为卧床垫料,减少了牛场的垫料投入。因此,其在奶牛场受到了广泛的应用。

20世纪70年代,美国将牛粪再生垫料(Recycled manure solids, RMS)用作奶牛的卧床垫料<sup>[4]</sup>,之后新西兰、英国、加拿大等多个国家也开始应用牛粪再生垫料<sup>[5]</sup>。奶牛的乳头和四肢会与牛床垫料紧密接触,因此,牛床垫料的舒适性和安全性关系到牛奶的质量和奶牛健康。文献[6]研究发现,与秸秆、沙子和锯末相比,RMS具有更好的舒适性。文献[7]研究发现使用RMS的奶牛跛足率低于使用沙子垫料的奶牛。但文献[8]研究发现使用未灭菌RMS的奶牛肢蹄病患发病率(69%)高于使用秸秆垫料的奶牛(37%)( $P < 0.001$ )。文献[9]研究表明管理良好的沙子垫料与牛粪堆肥垫料之间的乳房炎指标无明显差异。以上研究表明,RMS有利于提高奶牛的舒适性,但不同生产方式生产的RMS其安全性差异较大,杀菌消毒是RMS生产过程中的重要环节。目前,RMS的生产方式主要包括固液分离后直接利用、厌氧发酵后沼渣生产垫料、好氧发酵生产垫料等<sup>[10]</sup>。厌氧发酵和好氧发酵方式均可获得较好的处理效果,但处理时间较长。而干燥技术具有升温时间快、杀菌效果好等特点,常见的干燥方法有:热风干燥、真空干燥、太阳能干燥、高温高湿干

燥等,高温高湿干燥技术可以避免一般热风干燥过程中的壳化现象<sup>[11]</sup>,同时,在高温高湿环境下可以达到灭菌的效果<sup>[12]</sup>。现今,关于粪便干燥的研究较少,文献[13]利用鸡舍排出废气余热干燥鸡粪,可在适宜条件下将鸡粪的含水率降低至28%。一般情况下固液分离后的牛粪含水率约为75%<sup>[14-15]</sup>,而理想的RMS含水率应该保持在40%~50%<sup>[15]</sup>,因此,快速、高效生产牛粪再生垫料的干燥工艺及其设备的研发将为牛粪再生垫料技术的应用提供一个新思路。

本文以固液分离后的固体牛粪为研究对象,在不同温度、湿度和物料厚度条件下进行干燥和杀菌,探究变温变湿干燥工艺生产牛粪再生垫料的可行性,并通过响应面优化试验确定最佳工艺参数。在此基础上进行装置设计和现场验证试验,以期能为牛粪再生垫料生产提供新的方法,促进产业发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用牛粪来自北京市通州区渠头牛场,牛场采用干清粪工艺,牛粪通过管道集中于集粪池中,固液分离之后固体部分用于试验,固体牛粪的含水率为75%。

### 1.2 试验设计

变温变湿工艺干燥牛粪试验分为两个阶段,包括高温高湿杀菌阶段和降湿干燥阶段,分析不同干燥条件下牛粪的干燥特性和杀菌效果,然后根据响应面优化设计试验确定最适宜的工艺参数用于装置现场试验。

#### 1.2.1 高温高湿杀菌阶段

采用CTHI-100B型恒温恒湿箱(施都凯仪器



少,这与文献[17]研究结论一致,细菌的耐热性会随着含水率的降低而增强。考虑能耗因素,将高温高湿阶段的工艺参数设定为温度 $60^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $60\%$ 。

## 2.2 降温干燥阶段牛粪含水率变化分析

图1为降温干燥阶段不同工艺参数下牛粪的干燥特性曲线,前2 h是 $60^{\circ}\text{C}$ 、 $60\%$ 相对湿度的高温高湿干燥杀菌阶段,后6 h是分别在 $60$ 、 $70$ 、 $80^{\circ}\text{C}$ 条件下的热风干燥降温阶段。结果表明,在相同的物料

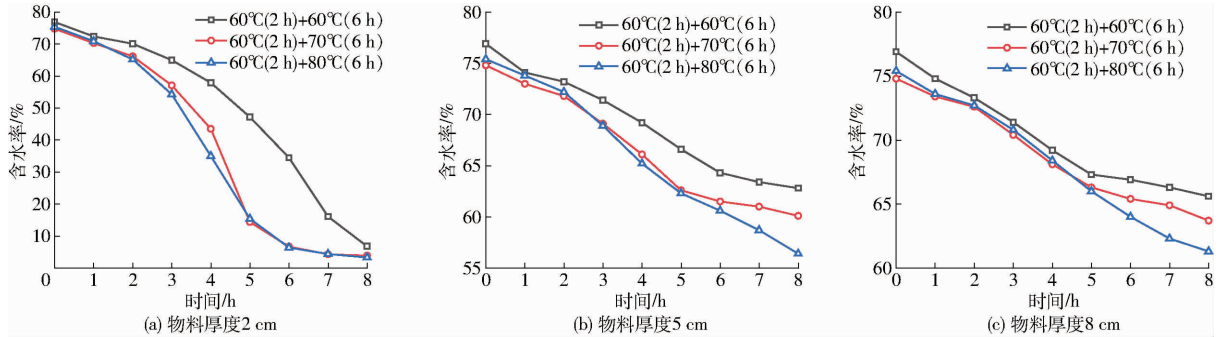


图1 不同变温变湿干燥工艺参数下牛粪的干燥特性曲线

Fig. 1 Drying curves of cow manure under different temperature-humidity changed drying conditions

图2为不同厚度的牛粪在不同干燥工艺参数下的干燥速率变化曲线。牛粪的干燥过程总体可以分为3个阶段:预热阶段( $AB$ 段)、恒速阶段( $BC$ 段)和降速阶段( $CD$ 段)。干燥过程由 $A$ 点开始,此时物料内外存在温度差,内部水分迁移蒸发较为缓慢,随着内外温差的减小,干燥速率增加并达到最大值,之后进入恒速阶段,这期间干燥速率基本维持在较高水

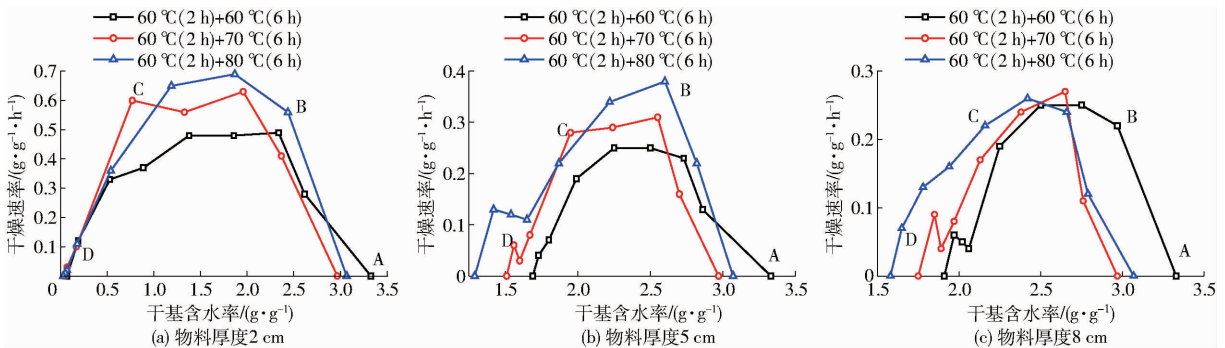


图2 不同变温变湿干燥工艺参数下牛粪的干燥速率变化曲线

Fig. 2 Drying rate curves of cow manure under different temperature-humidity changed drying conditions

临界含水率是恒速干燥阶段与降速干燥阶段的临界点,也就是 $C$ 点,随着物料厚度的增加,干燥过程的临界含水率越高,干燥的效果越差,文献[21]使用真空微波的方式来干燥不同厚度的胡萝卜切片,发现随着胡萝卜切片厚度的增加,其临界含水率没有发生变化。这是由于微波具有的穿透力可降低厚度对其产生的影响,不影响水分通道,因此临界含水率不发生变化,而采取热风干燥手段对牛粪进行干燥,牛粪表面的结壳现象对其内部水分迁移的影

厚度和干燥时间下,牛粪的干燥温度越高,含水率下降越多,物料内部水分迁移速度越快。其他相同条件的情况下,随着物料厚度的增加,牛粪的最终含水率也在增加。当干燥结束时,物料厚度为 $5\text{ cm}$ 和 $8\text{ cm}$ 的牛粪最终含水率依然停留在 $55\%$ 以上,而物料厚度为 $2\text{ cm}$ 的牛粪在干燥 $8\text{ h}$ 后含水率均降至 $10\%$ 以下。而牛粪再生垫料最适宜的含水率为 $50\%$ 以下,干燥最适宜的物料厚度需要进一步确定。

平,此时牛粪中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,在干燥过程中容易被去除<sup>[18]</sup>;后期物料表面壳化严重,阻止了牛粪内外热量的传递,同时牛粪内部水分的迁移受阻,物料内部水分扩散速率小于物料表面水分蒸发速率,导致干燥速率下降<sup>[19]</sup>,后期干燥速率下降的另一个因素是牛粪中游离水的比例下降,干燥难度增加<sup>[20]</sup>。

响较大,随着物料厚度的增加,临界含水率增加,干燥效率降低<sup>[22]</sup>。当物料厚度为 $2\text{ cm}$ 和 $5\text{ cm}$ 时,干燥温度越高,牛粪的最大干燥速率越大,而当物料厚度为 $8\text{ cm}$ 时,降温干燥温度为 $70^{\circ}\text{C}$ 时,其最大干燥速率最大。当物料厚度一定时,最大干燥速率的增加会使恒速阶段( $BC$ )缩短,临界含水率会随之增加,干燥效率随之受到影响,因此干燥温度并不一定越高越好,需要进一步通过响应面优化设计试验,最终确定最适的干燥条件。

### 2.3 响应面优化结果分析

#### 2.3.1 回归模型方程的建立及显著性检验

根据表 1 进行的变温变湿干燥试验的结果见表 3。通过试验结果拟合分析,得到含水率  $Y$  对干燥温度编码值  $A$ 、物料厚度编码值  $B$  和干燥时间编码值  $C$  的回归模型方程

$$Y = 61.46 - 2.6A + 21.1B - 11C + 6.3AB - 0.6AC + 8.8BC + 0.045A^2 - 18.56B^2 + 1.89C^2 + 1.4A^2B + 7.2A^2C - 5.15AB^2$$

决定系数  $R^2 = 0.9996$ ,说明该回归模型方程拟合度较好,实测值和预测值差距较小;模型  $P < 0.0001$ ,表明该模型显著;失拟项  $P = 0.0591 > 0.05$  不显著,意味着该模型不失拟,能够对含水率进行准确地预测和分析。一次项中,干燥温度、物料厚度和干燥时间对牛粪最终含水率的影响显著 ( $P < 0.01$ )。在交互项方差分析中,物料厚度与干燥温度的交互作用、物料厚度与干燥时间的交互作用对牛粪最终含水率的影响显著 ( $P < 0.01$ ),而干燥温度与干燥时间的交互作用效果不显著 ( $P > 0.05$ )。

表 3 变温变湿干燥的 Box - Behnken 试验结果

Tab.3 Results of Box - Behnken test for changed temperature-humidity drying process

试验序号	A	B	C	含水率/%
1	-1	-1	0	34.5
2	1	-1	0	6.4
3	-1	1	0	66.9
4	1	1	0	64.0
5	-1	0	-1	69.2
6	1	0	-1	65.2
7	-1	0	1	62.8
8	1	0	1	56.4
9	0	-1	-1	43.5
10	0	1	-1	68.1
11	0	-1	1	3.9
12	0	1	1	63.7
13	0	0	0	61.4
14	0	0	0	62.4
15	0	0	0	61.7
16	0	0	0	60.3
17	0	0	0	61.5

#### 2.3.2 响应面曲线分析

图 3 ~ 5 为变温变湿干燥工艺中干燥温度、物料

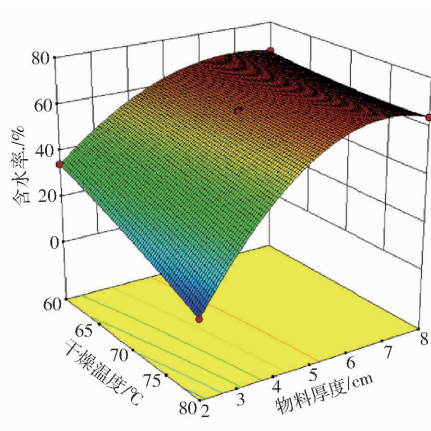
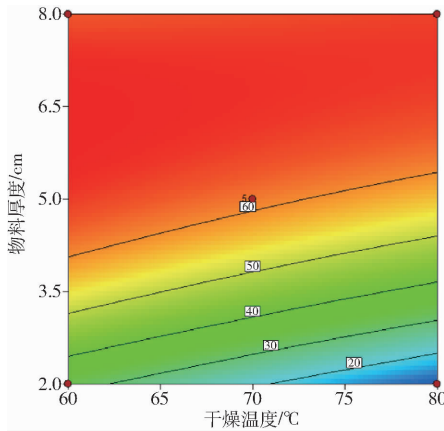


图 3 干燥温度与物料厚度的交互作用对牛粪再生垫料含水率影响的响应面和等高线图

Fig.3 Response surface and contour plots showing drying temperature and material thickness on water content

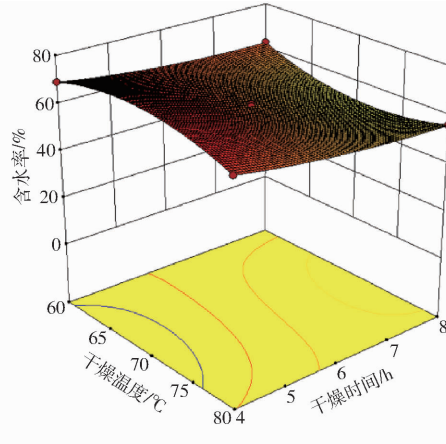
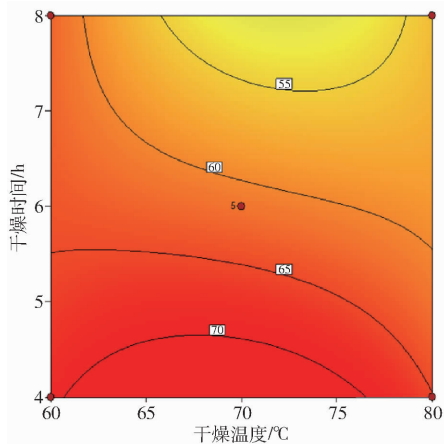


图 4 干燥温度与干燥时间的交互作用对牛粪再生垫料含水率影响的响应面和等高线图

Fig.4 Response surface and contour plots showing drying temperature and drying time on water content



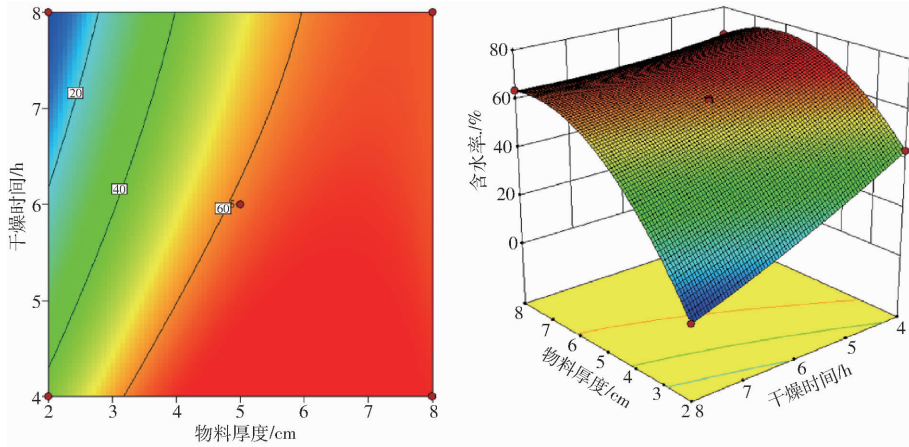


图5 物料厚度与干燥时间的交互作用对牛床再生垫料含水率影响的响应面和等高线图

Fig.5 Response surface and contour plots showing material thickness and drying time on water content

厚度和干燥时间之间的交互作用对最终物料含水率的影响。响应面曲线的平缓与陡峭反映的是两种因素交互作用的显著情况,坡度越陡表明交互作用越显著,坡度越平缓则表明交互作用越不显著。从等高线和参数可知,对牛粪干燥最终含水率的影响程度由大到小依次为:物料厚度、干燥时间、干燥温度。

将牛粪再生垫料最终含水率 50% 作为指标,通过响应面软件进行优化,得到牛粪再生垫料变温变湿干燥的最佳工艺参数为:干燥温度 77.995℃、物料厚度 4.074 cm 和干燥时间 5.788 h。考虑到实际操作条件,将该最佳工艺参数调整为:干燥温度 78℃、物料厚度 4 cm 和干燥时间 6 h。在此工艺条件下进行 3 次重复验证试验,实际测得最终物料的含水率分别为 50.8%、49.6% 和 50.6%,平均值为 50.3%,相对误差为 0.6%,误差较小,说明该工艺参数可靠。

### 2.3.3 微生物变化情况

根据响应面优化设计确定的最佳工艺参数,分别检测牛粪在变温变湿干燥过程中的大肠杆菌和无乳链球菌的变化情况,结果见表 4。

表 4 牛粪再生垫料干燥处理前后大肠杆菌和无乳链球菌菌体浓度的变化情况

Tab.4 Changes of *E. coli* and *S. agalactiae* of RMS after drying lg cfu/g

微生物类别	固液分离后	干燥 2 h	干燥 6 h
大肠杆菌	(5.33 ± 0.18) <sup>a</sup>	(3.06 ± 0.26) <sup>b</sup>	(3.54 ± 0.31) <sup>b</sup>
无乳链球菌	(3.86 ± 0.30) <sup>a</sup>	(1.69 ± 0.36) <sup>b</sup>	(1.55 ± 1.48) <sup>b</sup>

注:数据均为 3 次重复的平均值,同行不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

牛粪在高温高湿干燥 2 h 后,大肠杆菌和无乳链球菌的杀菌率分别达到 99.5% 和 99.3%,杀菌效果明显;继续进行 4 h 的热风干燥后,大肠杆菌的数量略微有所上升,这可能是由于热风干燥导致的牛

粪表面结壳,阻止了热空气与牛粪内部的热量交换,这时牛粪内部的温度低于大肠杆菌的最低杀菌温度,甚至是适宜其生长的。变温变湿干燥 6 h 后,牛粪中大肠杆菌和无乳链球菌的最终杀菌率为 98.3% 和 99.5%,满足牛粪再生垫料的安全性要求。

## 3 牛粪再生垫料生产装置及现场验证试验

以上文试验结果为基础,设计一套能够实现变温变湿干燥工艺生产牛粪再生垫料的装置。

### 3.1 总体设计

基于变温变湿干燥工艺的牛粪再生垫料生产装置的总体结构设计如图 6 所示。该装置主要由进出料单元、固体粪便传送单元、控温加热送风单元、加湿排湿单元、控制单元等部分组成。进料口在装置上方,进料口前方挡板的主要目的是控制物料铺设的厚度并且使物料的铺设更加均匀分散,受热更充分。物料通过传送带单元进行输送,3 层传送带运动方向相反,使物料自上而下到达出料口。进风口位于装置长度方向一侧,与传送带长度一致,进风口与控温加热送风单元相连接,加湿单元位于装置左侧,排湿单元位于装置右上位置,需要排湿时关闭加湿器,开启排湿风扇。装置底部设有刮料板,干燥过程中若有牛粪掉落在装置底部,刮料板会将其刮至出料口。同时装置还安装了自动控制系统、温湿度传感器等实现对温湿度的显示与自动调控。

干燥箱体容积约为 3.5 m<sup>3</sup>,传送带长 1 500 mm,宽 900 mm,由孔径为 1 mm 的 304 型不锈钢钢板构成。加热送风系统的送风风机型号为 HAG-EP50A3-L1.5-31(潍坊汇众机电设备有限公司),热风风量最高可达 800 m<sup>3</sup>/h,最高温度可达 150℃。加湿系统的加湿器选用 MHS-6zst 型(苏州美合森电子有限公司)工业超声波加湿器,加湿量可达

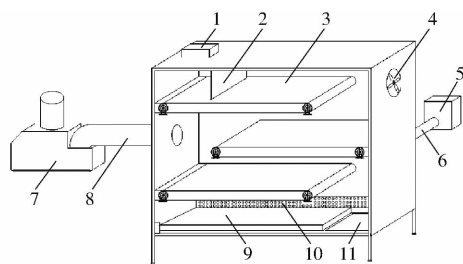


图 6 基于变温变湿干燥工艺的牛粪再生垫料生产装置总体结构示意图

Fig. 6 Structure diagram of temperature-humidity drying controlled equipment for recycled manure solids

1. 进料口 2. 挡板 3. 传送带 4. 排湿风扇 5. 热风机 6. 进风管 7. 工业加湿器 8. 加湿管道 9. 刮料板 10. 进风口 11. 出料口

6 kg/h,排湿风扇选用 VIG6A 型(艾美特电器(深圳)有限公司)。

### 3.2 工作过程

牛粪从进料口进入装置,通过传送带输送至出料口。先进行高温高湿干燥处理,而后进行升温降湿干燥处理。将空气作为介质,预先通过设置热风机的温度进行加热,然后送入装置内,将热量传递给物料,进行湿热交换。当物料蒸发出来的水分无法达到所要求的相对湿度时,启动加湿系统,加湿器通过超声波将水雾化,再由管道输送至干燥箱体实现加湿。高温高湿处理 2 h 后,再进行升温降湿,加湿系统关闭,通过改变热风机的温度实现升温,箱体内的湿空气通过装置右侧的排湿风扇排出从而实现降湿。

### 3.3 现场试验验证

采用该装置,对牛粪变温变湿干燥工艺生产 RMS 进行现场验证,试验地点为中国农业大学上庄实验站,试验时间为 4 月,重复进行 3 次,期间未出现极端天气情况。结合响应面优化设计的结果,通过装置调节,先在高温高湿(温度 60℃,相对湿度 60%)条件下对牛粪进行 2 h 杀菌处理,然后关闭加湿系统,开启排湿风扇,在加热降湿条件下(78℃)对牛粪进行 4 h 干燥处理,并对经过 6 h 处理后的牛粪进行含水率、大肠杆菌和无乳链球菌数量的测定,

测试仪器和操作步骤与实验室试验一致,现场验证试验结果如表 5 所示。

表 5 现场验证的试验结果

Tab. 5 Results of on-site verification test

样品	含水率/%	大肠杆菌菌体	无乳链球菌
		浓度/ (lg cfu·g <sup>-1</sup> )	菌体浓度/ (lg cfu·g <sup>-1</sup> )
变温变湿干燥前	74.4 ± 0.6	4.1 ± 0.1	4.6 ± 0.4
变温变湿干燥后	50.2 ± 1.0	2.8 ± 0.1	2.9 ± 0.2

现场验证试验最终垫料产品的平均含水率为(50.2 ± 1.0)%,牛粪的大肠杆菌和无乳链球菌杀菌率分别为 95.3% 和 98.3%,且最终产品中细菌菌体浓度不超过 10<sup>6</sup> cfu/g,与响应面优化试验中同样处理条件下实验室试验的结果基本相符。由此表明,基于变温变湿干燥工艺设计的牛粪再生垫料生产装置,具有可行性,但其杀菌率仍有待于进一步提高,后续研究需进一步优化其工艺。

## 4 结论

(1) 高温高湿干燥能够有效杀灭牛粪中的无乳链球菌和大肠杆菌,除个别条件外,干燥 2 h 后的杀菌率能达到 98% 以上。高温高湿干燥阶段环境的相对湿度越大,牛粪的结壳现象越不明显,有利于后续干燥过程中水分的蒸发,提升干燥效率。

(2) 选取干燥温度、干燥时间和物料厚度为变量,以牛粪最终含水率为响应指标,响应面分析结果表明,对牛粪干燥最终含水率的影响程度由大到小依次为:物料厚度、干燥时间、干燥温度。优化后的工艺参数为:2 h 高温高湿干燥(温度 60℃,相对湿度 60%) + 4 h 热风干燥(78℃)、物料厚度 4 cm,在此条件下得到的最终产品含水率为(50.3 ± 0.6)%,大肠杆菌和无乳链球菌的杀菌率为 98.3% 和 99.5%。

(3) 基于变温变湿干燥工艺设计的牛粪再生垫料生产装置,具有可行性,现场试验表明最终获得的成品含水率为(50.2 ± 1.0)%,大肠杆菌和无乳链球菌的杀菌率分别为 95.3% 和 98.3%。

## 参 考 文 献

- [1] 农业农村部奶业管理办公室,中国奶业协会. 2018 中国奶业统计摘要[J]. 北京:中国奶业协会,2019.
- [2] 黄靖鑫. 规模化奶牛养殖场成本核算研究[D]. 保定:河北农业大学,2019.
- [3] 施正香,孙飞舟,刘志丹,等. 我国奶牛养殖粪污综合治理和资源有效利用的现状与对策[J]. 中国畜牧杂志,2013,49(20): 35-40.
- SHI Zhengxiang, SUN Feizhou, LIU Zhidan, et al. The current status and countermeasures of comprehensive treatment of dairy cow breeding manure and effective utilization of resources[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2013, 49(20): 35-40. (in Chinese)
- [4] KATHARINE A L, SIMON C A, JAMES E B, et al. Recycling manure as cow bedding: potential benefits and risks for UK

- dairy farms[J]. *The Veterinary Journal*, 2015, 206(2): 123–130.
- [5] KEYS J E, SMITH L W, WEINLAND B T. Response of dairy cattle given a free choice of free stall location and three bedding materials[J]. *Journal of Dairy Science*, 1976, 59(6): 1157–1162.
- [6] ADAMSKI M, GLOWACKA K, KUPCZYNSKI R, et al. Analysis of the possibility of various litter beddings application with special consideration of cattle manure separate[J/OL]. *Acta Scientiarum Polonorum*, 2011. <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.agro-a67b8b30-9758-4c7c-9c8d-5758558a35b2>.
- [7] SCHWARZ M, BONHOTAL J. Health impacts and economics of using dried manure solids in the northeast[C]//Ninth Annual Fall Dairy Conference, New York, 2008.
- [8] PAVOL M. Effects of manure bedding on the rate of claw diseases in dairy cows[J]. *Folia Veterinaria*, 2016, 60(4): 14–19.
- [9] ECKELKAMP E A, TARABA J L, AKERS K A, et al. Sand bedded freestall and compost bedded pack effects on cow hygiene, locomotion, and mastitis indicators[J]. *Livestock Science*, 2016, 190: 48–57.
- [10] 王盼柳, 施正香, 曾雅琼, 等. 牛床再生垫料生产技术模式和产业需求分析[J]. *中国畜牧杂志*, 2017, 53(3): 147–153.  
WANG Panliu, SHI Zhengxiang, ZENG Yaqiong, et al. Analysis of production technology models and industry demand of recycled manure solids as bedding[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2017, 53(3): 147–153. (in Chinese)
- [11] 惠滢, 张影全, 张波, 等. 高温、高湿干燥工艺对挂面产品特性的影响[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(10): 117–125.  
HUI Ying, ZHANG Yingquan, ZHANG Bo, et al. Effects of high temperature and relative humidity drying technology on the product properties of chinese dried noodles[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(10): 117–125. (in Chinese)
- [12] 陈琦. 湿热灭菌及验证综述性探讨[J]. *机电信息*, 2016(11): 1–9.  
CHEN Qi. A summary discussion on humid heat sterilization and verification[J]. *Mechanical and Electrical Information*, 2016(11): 1–9. (in Chinese)
- [13] 李绚阳, 李保明, 郑炜超, 等. 鸡舍换气余热干燥鸡粪设备夏季干燥性能研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(7): 188–194.  
LI Xuanyang, LI Baoming, ZHENG Weichao, et al. Drying performance of manure drying system with waste heat of poultry house in summer[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(7): 188–194. (in Chinese)
- [14] HUSFELDT A W, EEDRES M I, SALFER J A, et al. Management and characteristics of recycled manure solids used for bedding in Midwest freestall dairy herds[J]. *Journal of Dairy Science*, 2012, 95(4): 2195–2203.
- [15] 彭英霞, 李俊卫, 王浚峰, 等. 奶牛场固体牛粪用作卧床垫料的工艺分析[J]. *中国奶牛*, 2015(2): 47–51.  
PENG Yingxia, LI Junwei, WANG Junfeng, et al. Analysis of dried solid manure used as bedding for dairy farm[J]. *China Dairy Cattle*, 2015(2): 47–51. (in Chinese)
- [16] BRAMLEY A J, NEAVE F K. Studies on the control of coliform mastitis in dairy cow[J]. *British Veterinary Journal*, 1975, 131(2): 160–169.
- [17] 周旺. 粉状食品的微波干燥及杀菌特性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2009.
- [18] 钱旺, 杨世昆, 刘贵林, 等. 太阳能牧草干燥成套设备干燥工艺参数优化[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(8): 110–118.  
QIAN Wang, YANG Shikun, LIU Guilin, et al. Optimization of drying process parameters of solar herbage dry equipment[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(8): 110–118. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180813&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180813&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.013. (in Chinese)
- [19] 娄正, 刘清, 师建芳, 等. 红枣气体射流冲击干燥收缩特性研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(增刊): 241–246.  
LOU Zheng, LIU Qing, SHI Jianfang, et al. Air impingement drying shrinkage characteristics of Chinese jujube[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(Supp.): 241–246. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=2014s139&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2014s139&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.039. (in Chinese)
- [20] 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.  
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(Supp.): 231–234, 288. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=2012s47&flag=1](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. (in Chinese)
- [21] 黄发琳, 马海乐, 刘伟民. 真空微波干燥胡萝卜的恒速干燥速度及临界含水量的实验和回归模型[J]. *食品工业科技*, 2009, 30(12): 139–141.  
HUANG Falin, MA Haile, LIU Weimin. Test and regression model on critical moisture content of carrot and drying rate during the stage of constant rate by vacuum microwave drying[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2009, 30(12): 139–141. (in Chinese)
- [22] 常剑, 尤长静, 杨德勇, 等. 多层带式干燥机干燥过程优化[J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(8): 148–154.  
CHANG Jian, YOU Changjing, YANG Deyong, et al. Optimization of drying process for multilayer belt dryer[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(8): 148–154. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20120827&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120827&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.027. (in Chinese)