

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.S2.033

# 玉米果穗深床层热风干燥特性试验

孙庆运<sup>1</sup> 张宗超<sup>1</sup> 贾振超<sup>1</sup> 韩梦龙<sup>1</sup> 慈文亮<sup>1</sup> 赵峰<sup>1,2</sup>

(1. 山东省农业机械科学研究所, 济南 250100;

2. 农业农村部黄淮海现代农业装备重点实验室, 济南 250100)

**摘要:** 为了提高玉米果穗干燥均匀性和干燥效率,降低干燥品质损失,通过研制玉米果穗深床层干燥试验台,并进行不同风速(0.5、1 m/s)、热风温度(常温(即室温)、50、60、70℃)以及料层厚度(180、360、540、720 mm)下玉米果穗干燥特性以及品质试验研究,确定最佳的玉米果穗深床层干燥工艺与参数。试验结果表明,提高热风温度和风速均会提高干燥速率,风速0.5 m/s时,热风温度50、60、70℃条件下第1层的干燥时间分别为28、20、14 h,而常温通风干燥下192 h后含水率仅下降到20%,随着热风温度的降低,干燥时间显著延长;提高热风风速有利于提高干燥速率,第3、4层玉米果穗干燥速率受风速的影响大于第1、2层;随着料层的增加,各干燥条件下干燥速率显著降低,干燥时间延长;常温条件下果穗各料层长时间处于高湿环境,从而在玉米果穗高含水率阶段采用常温通风干燥方式容易造成内部高湿和发热现象;干燥过程中玉米籽粒含水率先下降,果穗芯轴的含水率高于籽粒。与对照组相比,各组干燥物料的亮度均下降,提高热风风速和温度会降低亮度;常温通风干燥玉米籽粒电导率最低,随着温度和风速的提高,电导率升高,表明籽粒内部结构破坏较大;干燥后玉米籽粒淀粉含量和可溶性糖含量均有所减小,其中70℃、0.5 m/s条件下玉米淀粉含量最低,60℃和70℃、0.5 m/s条件下玉米可溶性糖含量较低。根据研究结果,确定玉米果穗深床层干燥工艺为先热风干燥后常温通风干燥的方式,热风温度50℃或60℃、风速0.5 m/s、通风管路单侧料层厚度为360 mm为较优的果穗热风干燥工艺参数。

**关键词:** 玉米果穗; 热风干燥; 深床层试验台; 干燥特性

**中图分类号:** S375; TS205.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S2-0285-08

## Hot Air Drying Characteristics in Deep Bed of Corn Ear

SUN Qingyun<sup>1</sup> ZHANG Zongchao<sup>1</sup> JIA Zhenchao<sup>1</sup> HAN Menglong<sup>1</sup> CI Wenliang<sup>1</sup> ZHAO Feng<sup>1,2</sup>

(1. Shandong Academy of Agricultural Machinery Science, Ji'nan 250100, China

2. Huang Huai Hai Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment,  
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Ji'nan 250100, China)

**Abstract:** Aiming to improve the drying uniformity of corn ear and drying efficiency, reduce the quality loss, and optimize the design of drying and storage equipment for corn ear, a deep bed drying test equipment of corn ear was designed according to the drying technical requirements. The drying test equipment included hot air device, drying section, control system, temperature and humidity monitoring components. The corn ear drying characteristics and quality experiment were conducted at different wind speeds (0.5 m/s and 1 m/s), hot air temperature (room temperature, 50℃, 60℃ and 70℃) and material layer thickness (180 mm, 360 mm, 540 mm and 720 mm). The result showed that with the increasing of hot air temperature and wind speed, the drying rate was improved. When the wind speed was 0.5 m/s, the drying time of the first material layer under the hot air temperature of 50℃, 60℃ and 70℃ was 28 h, 20 h and 14 h, respectively. However, the moisture content (wet basis) of corn ear at room temperature drying only dropped to 20% after 192 h. With the decrease of the hot air temperature, the drying time was significantly prolonged. Increasing hot air speed was beneficial for improving the drying rate. The change of the drying rate of corn ears in the third and fourth material layers influenced by

收稿日期: 2022-06-08 修回日期: 2022-08-14

**基金项目:** 山东省重点研发计划项目(2021CXGC010807)、山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2022E16)和山东省自然科学基金项目(ZR2019PEE047)

**作者简介:** 孙庆运(1992—),男,工程师,博士,主要从事粮油作物干燥技术与装备研究,E-mail: 1049256355@qq.com

**通信作者:** 赵峰(1972—),男,研究员,主要从事农产品加工技术与装备研究,E-mail: zf@sjlaser.com

hot air speed was greater than that of the first or second layers. When the hot air temperature was 50℃, the drying time at the first material layer under the wind speed of 1 m/s was 14.3% lower than the wind speed of 0.5 m/s. With the increase of material layers, the drying rate under each drying condition was significantly reduced, and the drying time was prolonged. The material layer of corn ear at room temperature drying conditions was in a high-humidity environment for a long time. Drying corn ear in the stage of high water content by the natural ventilation method was easy to cause internal high humidity and high temperature. The moisture content of the corn kernel was decreased firstly during the drying process, and the moisture content of the corn cob was much higher than that of the corn kernel. Compared with the control group, the brightness value of the dried materials was decreased. Besides, the increasing of the hot air speed and temperature would decrease the brightness value of corn kernel. The electrical conductivity of corn kernels dried at room temperature was the lowest, which was 104 μS/cm. With the increase of hot air temperature and wind speed, the electrical conductivity was increased, indicating that the internal structure of maize kernels was damaged greatly. The starch content and soluble sugar content of corn kernel were decreased after drying, among which the starch content was the lowest at 70℃, 0.5 m/s and the soluble sugar content was the lowest at 60℃ and 70℃, 0.5 m/s. On the basis of the drying characteristics and quality changes of corn ear, it was determined that the deep bed drying process of the corn ear was the method of hot air drying first and then drying at room temperature. The optimal hot air drying process parameters of corn ear was hot air temperature of 50℃ or 60℃, wind speed of 0.5 m/s and air channel's unilateral material layer thickness of 360 mm.

**Key words:** corn ear; hot air drying; deep bed test equipment; drying characteristics

## 0 引言

黄淮海地区为一年两熟的种植模式,玉米收获时含水率高不适合籽粒直收,多采用玉米穗收的收获方式,玉米果穗干燥后进行脱粒<sup>[1-2]</sup>。随着收获期日趋集中,晾晒场地不足,且传统晾晒过程中霉变、发芽等损失较为严重<sup>[3-4]</sup>。为了减少晾晒和贮藏过程中的损失,降低玉米果穗含水率,实现节能保质干燥,需要对玉米果穗干燥特性进行研究。

针对玉米果穗干燥贮藏过程存在的问题,国内外相关学者关于其干燥模式<sup>[5]</sup>和干燥设备<sup>[6]</sup>开展研究,文献[7]设计了机械通风玉米果穗储粮仓,采用多种通风模式,提高了干燥效率,品质损失较小;为了提升果穗干燥效果,文献[8]搭建了玉米果穗干燥监测系统,实现了温度、压力等数据的采集;文献[9]建立了果穗干燥床层收缩与干燥时间、含水率的函数方程,将床层收缩加入到控制模型中,最大限度地提高玉米干燥机的干燥能力,以及降低了干燥成本。目前玉米籽粒干燥特性和设备的研究较多<sup>[10-12]</sup>,而玉米果穗干燥主要以设备研究为主,果穗干燥特性研究较少,干燥设备仍存在干燥均匀性较差、能耗高、易霉变的问题,无法满足农户和合作社对大批量果穗低成本、低品质损失干燥和短时间贮藏的需求。需要通过玉米果穗深床层干燥特性研究,优化设备物料层深度,提高干燥均匀性,快速降低果穗含水率,从而降低干燥贮藏过程中的霉变率,提高干燥效率。

为解决玉米果穗高湿环境易霉变、均匀性较差

等问题,本文设计玉米果穗深床层干燥试验台,实现热风温度、风速、料层厚度的调节,以及干燥过程温湿度数据的采集;并开展不同风速、风温、料层厚度下玉米果穗干燥特性和品质变化的研究,从而确定合适的玉米果穗干燥工艺与设备设计参数,以期玉米果穗保质节能干燥与贮藏提供理论基础。

## 1 果穗深床层热风干燥试验台设计

### 1.1 整体结构设计

为了满足玉米果穗深床层干燥试验的需求,对试验台热风温度、风量、料层厚度、取料方式等参数进行确定,风速0.5~2 m/s可调,最大风速时热风温度范围为常温至80℃,干燥段分为4层,最大料层厚度720 mm,采用将料盒整体拉出取料的方式。该试验台主要包括热风装置、进风段、干燥段、控制装置、温湿度监测部件。设备整体结构图如图1所示。

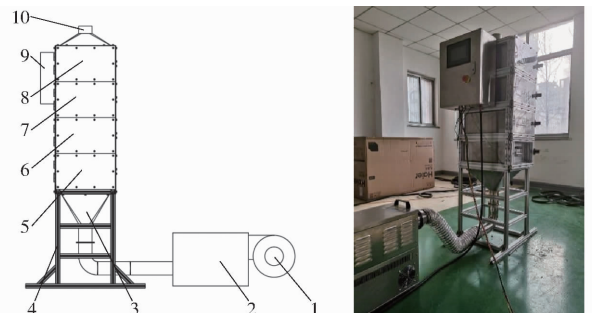


图1 整体结构与实物图

Fig. 1 Overall structure and physical drawings

1. 离心风机 2. 加热箱 3. 进风段 4. 设备底架 5. 干燥段第1层 6. 干燥段第2层 7. 干燥段第3层 8. 干燥段第4层 9. 总控制箱 10. 出风段

果穗深床层干燥试验台的工作流程: 首先打开控制装置设置热风温度、风速等参数, 离心风机和加热装置开始工作, 热风从下方穿过各物料层, 从上部出风段排出; 干燥参数稳定后依次放入各层料盒, 物料高度与料盒上沿高度一致, 物料开始干燥, 温湿度传感器实时记录各层物料温湿度的变化, 按试验方案要求每隔一定时间取出各层物料进行称量。

## 1.2 关键结构设计

### 1.2.1 料盒设计

为了满足玉米果穗干燥过程中分层取料的需求, 将干燥段分成 4 层, 每层高度 180 mm, 采用推拉的方式实现料盒的开闭, 料盒整体尺寸为 340 mm × 460 mm × 180 mm。为了便于气流的通过, 以及提高气流的均匀性, 将底部设计为均匀排布的多孔网, 网孔的尺寸为  $\Phi 10$  mm, 厚度为 2 mm, 如图 2 所示。

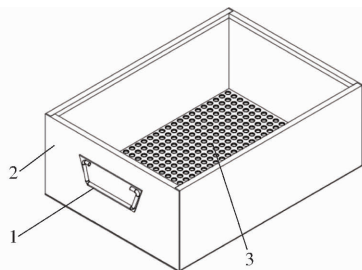


图 2 料盒结构图

Fig. 2 Structure drawing of material box

1. 把手 2. 侧板 3. 底部网孔板

### 1.2.2 热风加热装置设计

根据试验装置的技术要求, 风速设置为 0.5 ~ 2 m/s, 根据装置的结构尺寸, 考虑到气流损失, 风机风量确定为 1 200 m<sup>3</sup>/h; 基于多孔介质理论对玉米果穗料层气流分布进行仿真分析, 在风速为 2 m/s 时, 干燥装置内部的风压仿真如图 3 所示, 风机选择普通离心风机, 风压选择不低于 1 300 Pa。

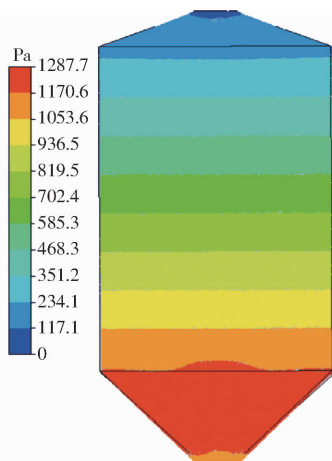


图 3 装置内气流风压仿真图

Fig. 3 Simulation diagram of airflow and air pressure in device

为了提高气流的加热速率以及热能利用率, 加热元件选择 W 型翅片加热管 (如图 4 所示), 增加气流与加热管的接触面积, 最终确定总功率为 10 kW。热风装置采用 PID 控制, 通过固态继电器调节加热管的工作状态, 实现热风温度的调节; 利用变频调速器实现离心风机的控制, 实现风速的调节。



图 4 W 型翅片加热管

Fig. 4 W-type fin heating tube

### 1.2.3 控制系统设计

干燥装置控制系统功能主要包括温度与风速调节、温湿度监测与记录、能耗测量、多阶段干燥参数控制; 控制器选用三菱 FX3U-32MR, 选用昆仑通泰触摸屏为人机交互设备, 实现参数设定与监测。系统硬件构成如图 5 所示。温湿度传感器通过 RS485 串口依据 Modbus 传输协议进行数据采集, 共 5 路分布于入料口到出料口料层间, 实时测量温湿度值的变化。

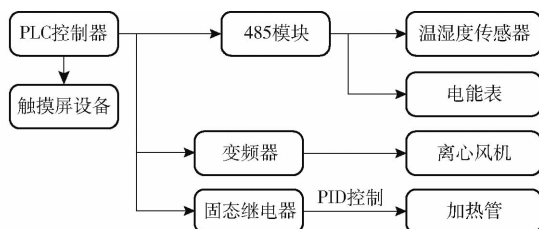


图 5 控制系统硬件构成

Fig. 5 Hardware structure of control system

干燥装置通过触摸屏工作界面进行模式选择和参数设置, 并实时显示各层温湿度值, 并对数据每隔 5 min 记录一次, 形成数据报表。模式选择和数据监测界面如图 6 所示, 可以进行连续干燥、分段干燥与常温通风干燥的选择、温度与风速设定、温湿度与能耗的实时显示等。

## 2 玉米果穗热风干燥试验

### 2.1 试验原料与设备

玉米果穗取自山东省农业科学院试验田, 采摘

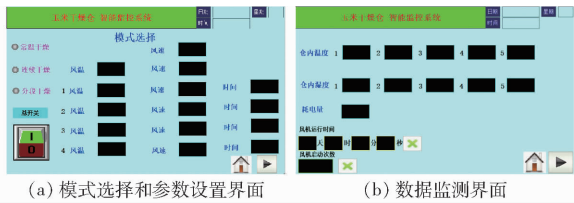


图6 触摸屏控制界面

Fig.6 Touch screen control interface

时间为2021年10月下旬,品种为登海605,果穗的初始湿基含水率为 $(40.12 \pm 1.71)\%$ ,测量方法参照国家标准 GB/T 5009.3—2016<sup>[13]</sup>。

主要仪器设备包括:深床层热风干燥试验台,山东省农业机械科学研究院(自制);HS919型电子天平,上海花潮实业有限公司;101-3B型电热鼓风干燥箱,长葛市明途机械设备有限公司;NR200型色差计,深圳市三恩驰科技有限公司;LC-10N型真空冷冻干燥机,上海力辰邦西仪器科技有限公司;HN-4型水浴锅,上海力辰邦西仪器科技有限公司;DDS-307型电导率仪,上海仪电科学仪器股份有限公司;T2602S型紫外分光光度计,上海佑科仪器仪表有限公司;PK-20M型高速冷冻离心机,湖南平科科学仪器有限公司;GR150A型磨粉机,合肥荣事达小家电有限公司等。

## 2.2 试验方法

### 2.2.1 风速

热风温度设置为 $50^{\circ}\text{C}$ ,料层总厚度为720 mm,进行不同热风风速(0.5、1 m/s)下玉米果穗干燥特性试验。果穗料层分为4层,每层物料厚度为180 mm,试验前从每层料盒上部选取3个果穗进行标记,试验过程中每隔1 h称量各层标记玉米果穗质量的变化,直到第1层玉米含水率下降到14%以下。并每小时记录各物料层温湿度的变化。干燥结束后测量果穗籽粒、芯轴、果穗的含水率以及第1层果穗籽粒的品质变化。

### 2.2.2 料层厚度和热风温度

热风温度设置为 $50^{\circ}\text{C}$ 、 $60^{\circ}\text{C}$ 、 $70^{\circ}\text{C}$ 以及常温,热风风速为0.5 m/s,进行深床层玉米果穗干燥试验,记录各料层处温湿度的变化,研究各温度下不同料层处玉米果穗干燥特性。每层物料厚度为180 mm,从每层料盒的上部选取3个果穗进行标记,每隔1 h称量各层标记玉米果穗质量的变化,直到第1层玉米含水率下降到14%以下。干燥结束后测量果穗籽粒、芯轴、果穗的含水率以及第1层果穗籽粒的品质变化。

干燥试验结束后,将干燥后的玉米籽粒与新鲜物料一起进行真空冷冻干燥,将物料含水率降至5%以下,将冷冻干燥后的新鲜物料作为对照组;取

干燥后部分物料进行粉碎,用于淀粉含量和色泽等测量。

## 2.3 主要参数

### 2.3.1 干基含水率

干基含水率的计算公式为

$$M_t = \frac{m_t - m_d}{m_d} \quad (1)$$

式中  $M_t$ —— $t$ 时刻的干基含水率, g/g

$m_t$ —— $t$ 时刻果穗的质量, g

$m_d$ ——果穗干物质的质量, g

### 2.3.2 干燥速率 $D_R$

干燥速率(g/(g·min))计算公式<sup>[14]</sup>为

$$D_R = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

### 2.3.3 水分比 $M_R$

由于果穗的平衡含水率 $M_e$ 远小于 $M_t$ 和初始干基含水率 $M_0$ ,水分比的计算公式<sup>[15]</sup>可以简化为

$$M_R = \frac{M_t}{M_0} \quad (3)$$

## 2.4 品质测定方法

### 2.4.1 色泽

利用NR200型色差计对各组玉米色泽进行检测,每个样品测量3次,取平均值(色差公式)。

### 2.4.2 电导率

称取冷冻干燥后的玉米籽粒30 g于烧杯内,添加200 mL蒸馏水,置于 $25^{\circ}\text{C}$ 水浴锅中浸泡24 h后测定电导率。每个样品测量3次,取平均值<sup>[16]</sup>。

### 2.4.3 可溶性总糖含量

可溶性总糖含量测量采用蒽酮比色法,参照文献<sup>[17]</sup>的方法。

玉米籽粒可溶性糖的提取:于干燥箱中干燥至质量恒定,磨碎后称取100 mg样品倒入10 mL离心管内,加入8 mL蒸馏水,于 $100^{\circ}\text{C}$ 水浴中20 min,取出冷却,4 500 r/min离心10 min,收集上清液,其残渣加8 mL蒸馏水重复提2次,合并上清液,定容至50 mL,作为待测样品。

配制标样,在 $45^{\circ}\text{C}$ 水浴中显色10~15 min,625 nm处测吸光度。准确吸取待测液1.0 mL,加蒽酮4.0 mL,在 $45^{\circ}\text{C}$ 水浴中显色10~15 min。取出后避光冷却,在625 nm处测吸光度,从标准曲线上得到提取液中可溶性总糖含量。

### 2.4.4 淀粉含量

淀粉含量测量也采用蒽酮比色法<sup>[17]</sup>。

淀粉相关溶液的提取:往测量可溶性糖后所剩残渣中加入7 mL 3 mol/L的盐酸,在沸水浴中煮沸45 min,取出冷却,4 000 r/min离心15 min,取上清液

到 50 mL 容量瓶中,加入 7 mL 3 mol/L NaOH,用蒸馏水定容到 50 mL,作为待测样品。

其余步骤同 2.4.3 节,从标准曲线上得到提取液中可溶性总糖含量,粗淀粉含量为可溶性糖含量乘以系数 0.9。

## 2.5 数据处理方法

利用 SPSS 21.0 对试验数据进行处理,并分析数据差异的显著性,用 Origin 9.1 绘制干燥特性曲线,并进行干燥模型的拟合分析。结果中数据以平均值  $\pm$  标准差的形式表示,并对品质指标数据进行显著性分析,以不同字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ )。

## 3 结果与讨论

### 3.1 玉米果穗深床层干燥特性研究

#### 3.1.1 风速

图 7 为热风温度 50℃、不同风速下玉米果穗不

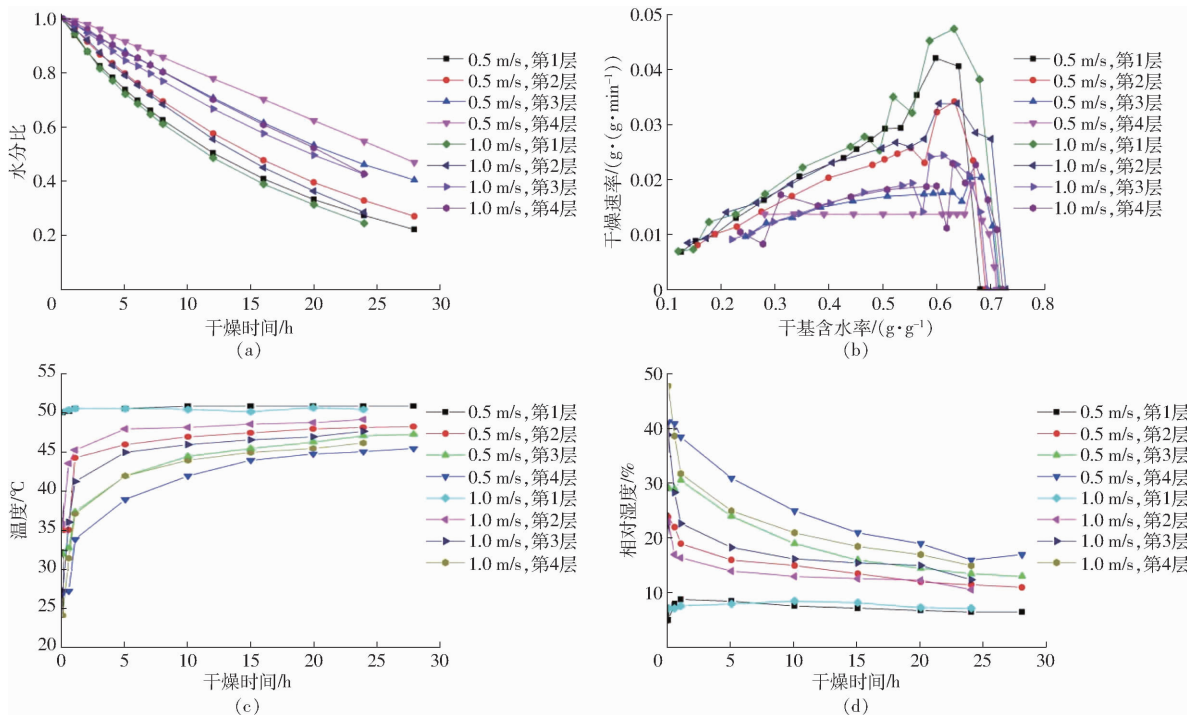


图 7 不同风速与料层厚度下玉米果穗干燥特性曲线

Fig. 7 Drying characteristic curves of corn ear at different wind speed and material layer thickness

#### 3.1.2 料层厚度

图 8 为不同热风温度下各料层玉米果穗水分比和温湿度变化曲线,从图中可以看出,在热风温度 50、60、70℃ 下随着料层厚度增加,料层温度降低,湿度升高,水分比下降速率快速减小;而果穗常温通风干燥条件下第 1 层的水分比下降最快,其他料层差异较小。这主要由于热风干燥过程中随着料层的增加,热风温度下降,湿度升高,导致干燥速率降低,且各层间水分比差值增大;在常温通风干燥下,由于第

同料层厚度处干燥特性曲线,明确了热风风速 (0.5、1 m/s) 对不同料层厚度玉米果穗含水率、干燥速率的影响。从图中可以看出,在相同料层厚度下提高热风风速会提高干燥速率,使干燥时间下降,第 1 层处风速 1 m/s 条件干燥时间比风速 0.5 m/s 下降 14.3%。从图 7a、7b 看出,风速对料层第 3、4 层果穗水分比的影响大于第 1、2 层,第 4 层受风速的影响最大,这主要是由于气流量增大,加快了内部环境中水分的排出,内部达到平衡所需时间越短,从而高风速下第 3、4 层处热风温度上升更快,湿度更低,各层间的温湿度差异更小<sup>[18]</sup>。因此提高热风速度有利于提高玉米果穗料层间气流的均匀性和干燥效率,这与核桃深床层干燥的研究结果相同<sup>[19]</sup>;从水分比变化曲线可以看出,提高热风风速使各料层水分比和干燥时间降低幅度较小,但电耗增加近一倍,因此对于果穗深床层通风干燥,热风风速 0.5 m/s 更适合干燥的需求,且应适当降低料层厚度。

2~4 料层入口处均温度较低且湿度高,从而限制了果穗内部水分的迁移,从而干燥速率低,且各料层水分比曲线较为接近。热风温度 50、60℃ 下,第 1、2 层与第 3、4 层相比水分下降速度较快,第 3、4 层水分比较接近;热风温度 70℃ 下,与第 1~3 层相比,第 4 层入口处的温度更低、湿度更高,水分比的下降速度更慢。从图 8g、8f 中可以看出,常温通风干燥介质温湿度受环境的影响较大,夜间环境温度低湿度高限制了果穗内部水分的迁移,从而果穗常温通

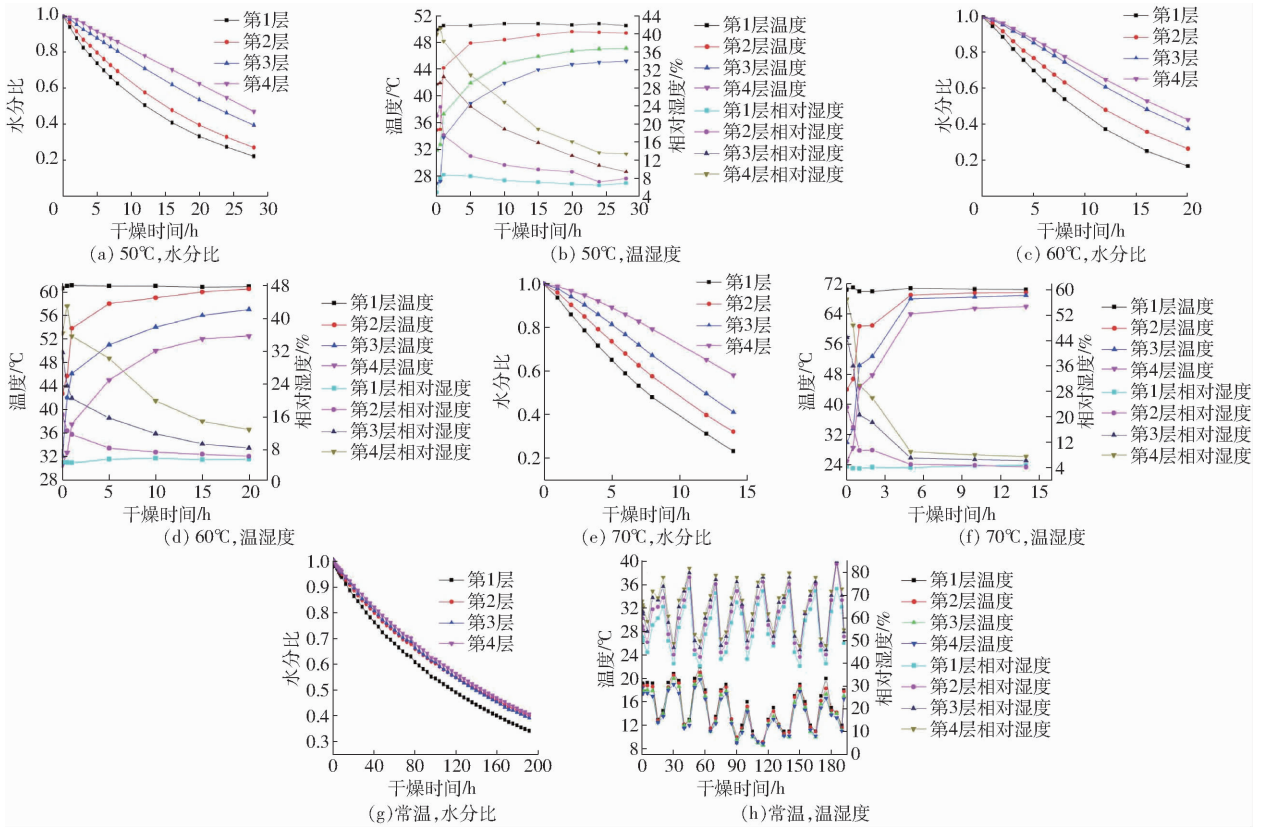


图8 不同温度下各料层玉米果穗干燥特性曲线

Fig. 8 Drying characteristic curves of corn ear of each material layer at different temperatures

风干燥速率较低,干燥时间在192 h后湿基含水率仍在20%左右,因此常温条件下在高含水率阶段环境湿度大,不及时将高湿空气排出容易导致霉变的产生,从而高含水率果穗常温通风干燥不适合大料层厚度。

研究结果表明果穗干燥仓体设计应保证合适的料层厚度,可以加快水分的散失,提高干燥均匀性,即通风管路间的距离不宜过大;在热风温度50、60℃下,通风管路单侧料层厚度为360 mm,两个通风管路之间720 mm较为合适;70℃下通风管路单侧料层厚度540 mm,两个通风管路之间1080 mm较为合适;果穗常温通风干燥时间长,随着料层增加干燥速率进一步降低,从而果穗长期处于高含水率阶段,因此果穗常温通风干燥需要与热风干燥相结合。

### 3.1.3 热风温度

图9为不同热风温度下第1层玉米果穗的干燥特性曲线,从水分比曲线看出,常温下果穗的干燥时间显著延长,随着温度的上升干燥时长下降,热风温度50、60、70℃下干燥时间分别为28、20、14 h,而常温通风干燥192 h后,果穗含水率仅下降到20%。这是由于热风温度越高,果穗中水分子能量越高,水分往外迁移的动力越大,从而水分比下降越快,这与许多物料的特性相似<sup>[20-21]</sup>。果穗

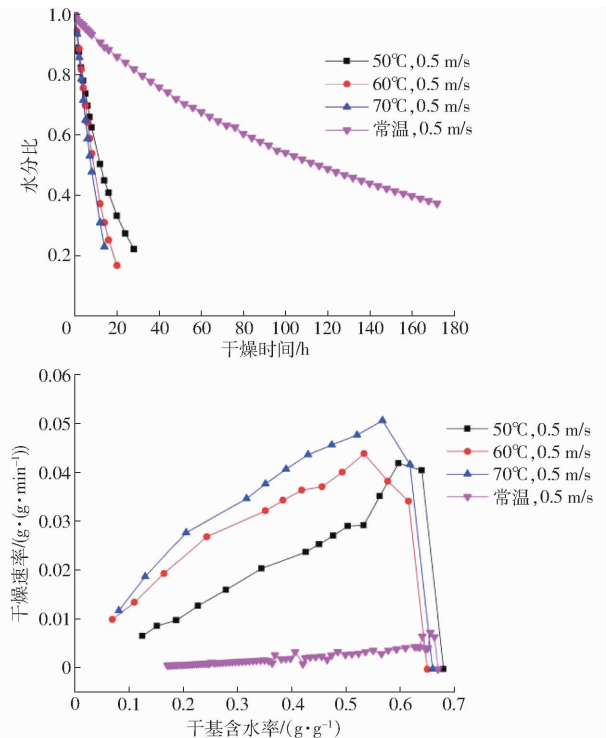


图9 不同温度下第1层玉米果穗干燥特性曲线

Fig. 9 Drying characteristic curves of corn ear of the first material layer at different temperatures

常温通风干燥速率较低,干燥速率变化较小,近似恒速干燥,而热风干燥无明显恒速阶段,均为降速干燥。由于热风干燥速率显著高于常温通风干

燥,在果穗干燥前期通过热风干燥可快速降低含水率,缩短高含水率阶段的时间,防止粮层间出现高温高湿的现象。

大型仓储式果穗干燥机的研制,可采用热风干燥与常温通风干燥相结合的方式,高含水率阶段采用热风干燥使含水率快速下降,在低含水率阶段采用常温通风干燥,可降低玉米果穗干燥霉变等损失,有利于延长贮藏时间,节约能耗。

### 3.2 不同料层处籽粒与芯轴最终含水率的差异

图 10 为热风温度 60℃、风速 0.5 m/s 下不同料层玉米果穗各部分最终含水率曲线,从图中看出,随着料层增加,果穗、籽粒、芯轴的最终含水率上升,芯轴与籽粒之间的含水率差值增大,表明了玉米果穗干燥过程中籽粒含水率先下降,随着籽粒含水率降低,玉米芯轴内水分开始快速向外迁移,这与鲜穗玉米贮藏过程中水分迁移的研究结果一致<sup>[22]</sup>。这主要是由于果穗干燥初期含水率高,籽粒致密且含水率高,造成果穗内部芯轴水分迁移较慢,从而籽粒的含水率下降速度大于芯轴;随着籽粒含水率下降,且籽粒之间产生缝隙,从而芯轴含水率开始快速下降。

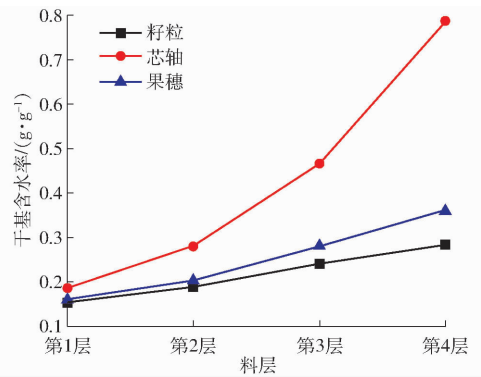


图 10 不同料层玉米果穗各部分最终含水率曲线

Fig. 10 Final moisture content curves of each part of corn ear with different material layers

### 3.3 玉米干燥品质

#### 3.3.1 色泽

从表 1 中看出,与对照组相比,干燥后玉米籽粒的亮度下降,且随着热风温度的上升亮度有下降的趋势,这是由于干燥过程玉米籽粒发生酶促褐变<sup>[23]</sup>,且随温度升高褐变的程度越大,亮度越低。从色差  $\Delta E$  来看,热风温度 70℃ 色差最大,热风温度的提高会造成表现品质的下降,热风温度 50、60℃ 下玉米籽粒色差与常温通风干燥相比无显著性差异。

表 1 不同干燥条件下玉米色泽与电导率

Tab. 1 Corn color and conductivity values under different drying conditions

处理方式	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	$\Delta E$	电导率/( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )
对照	(72.66 ± 1.88) <sup>a</sup>	(4.88 ± 0.36) <sup>a</sup>	(27.26 ± 1.19) <sup>a</sup>	0	(182.22 ± 1.41) <sup>c</sup>
常温通风干燥	(65.80 ± 1.19) <sup>b</sup>	(5.05 ± 0.85) <sup>a</sup>	(23.53 ± 1.98) <sup>b</sup>	(7.81 ± 1.51) <sup>c</sup>	(104.00 ± 1.41) <sup>f</sup>
50℃, 1 m/s	(65.58 ± 0.58) <sup>b</sup>	(5.04 ± 0.42) <sup>a</sup>	(22.33 ± 0.68) <sup>bc</sup>	(8.63 ± 0.80) <sup>bc</sup>	(187.25 ± 2.19) <sup>b</sup>
50℃, 0.5 m/s	(65.86 ± 1.14) <sup>b</sup>	(4.21 ± 0.44) <sup>a</sup>	(20.22 ± 1.25) <sup>d</sup>	(9.81 ± 1.42) <sup>b</sup>	(161.75 ± 3.18) <sup>e</sup>
60℃, 0.5 m/s	(64.88 ± 0.29) <sup>b</sup>	(4.64 ± 0.34) <sup>a</sup>	(21.33 ± 0.79) <sup>cd</sup>	(9.79 ± 0.63) <sup>bc</sup>	(169.10 ± 1.98) <sup>d</sup>
70℃, 0.5 m/s	(62.89 ± 1.35) <sup>c</sup>	(4.40 ± 0.27) <sup>a</sup>	(19.72 ± 0.75) <sup>d</sup>	(12.35 ± 1.37) <sup>a</sup>	(215.00 ± 2.83) <sup>a</sup>

注:同列数据不同字母表示差异显著,下同。

#### 3.3.2 电导率

电导率作为细胞膜透性变化指标,反映了干燥条件对玉米籽粒细胞膜的破坏程度,电导率数值越大,玉米籽粒细胞膜完整性越差,表明玉米种子活力就越低<sup>[24]</sup>。从表 1 中的电导率可以看出,常温通风干燥后的电导率最低,提高热风温度和风速会显著增加电导率,这与成军虎等<sup>[25]</sup>关于玉米热风与真空干燥的研究结果一致,表明提高热风温度,使干燥速率增大,从而造成籽粒细胞膜的破坏程度变大。对照组电导率显著大于常温通风干燥,这可能是由于新鲜玉米籽粒直接进行冷冻干燥,虽然保持了较好的结构形态、色泽,但是破坏细胞膜的完整性,有利于细胞内的物质向浸泡液迁移,造成电导率提高,这与低温冷害对玉米电导率的影响结果相同<sup>[26-27]</sup>。

#### 3.3.3 淀粉含量与可溶性糖含量

表 2 为不同干燥条件下干燥后玉米籽粒的淀粉含量(质量分数)与可溶性糖含量(质量比),从表中看出淀粉含量与可溶性糖含量有相似的变化规律,热风温度的提高会使淀粉含量和可溶性糖含量下降,这与文献[28-29]的研究结果一致。这可能由于热风温度上升,造成淀粉糊化,从而淀粉含量下降<sup>[25]</sup>,因此玉米果穗干燥过程中热风温度不宜过高。与对照组相比,常温通风干燥下淀粉含量无显著性变化,可溶性糖含量显著下降;而与热风干燥相比,常温通风干燥下淀粉含量和可溶性糖含量均相对较高,营养成分损失相对较小,表明常温干燥能更好地保留玉米的营养成分。热风温度 50、60℃ 下淀粉含量和可溶性含量均高于热风温度 70℃,结合玉米果穗干燥特性,高含水率阶段采用热风温度 50、

60℃较为合适。

表2 不同干燥条件下玉米淀粉含量和可溶性糖含量  
Tab.2 Corn starch content and soluble sugar content under different drying conditions

处理方式	淀粉含量/%	可溶性糖含量/(mg·g <sup>-1</sup> )
对照	(51.29 ± 1.01) <sup>a</sup>	(40.93 ± 4.45) <sup>a</sup>
常温通风干燥	(50.58 ± 2.23) <sup>a</sup>	(30.07 ± 1.58) <sup>bc</sup>
50℃, 1 m/s	(47.73 ± 1.03) <sup>ab</sup>	(27.50 ± 3.31) <sup>bc</sup>
50℃, 0.5 m/s	(46.95 ± 1.35) <sup>b</sup>	(37.50 ± 4.12) <sup>ab</sup>
60℃, 0.5 m/s	(45.06 ± 1.01) <sup>b</sup>	(23.27 ± 2.40) <sup>c</sup>
70℃, 0.5 m/s	(39.29 ± 1.01) <sup>c</sup>	(22.59 ± 7.41) <sup>c</sup>

## 4 结论

(1) 研制了深床层干燥试验台,通过分层取料的方式,满足了不同料层玉米果穗干燥特性试验的要

求;采用人机交互界面,可对热风温度、风速、干燥模式等进行设定,并可实时采集显示各料层温湿度值。

(2) 玉米果穗深床层通风干燥,热风风速应为0.5 m/s;在热风温度50、60℃下,通风管路单侧料层厚度最高应为360 mm,两个通风管路之间为720 mm;热风温度70℃下通风管路单侧料层厚最高为540 mm,两个通风管路之间为1 080 mm;随着热风干燥温度的上升,干燥时间显著下降;在果穗高含水率阶段采用自然通风干燥方式容易造成内部高湿和发热现象。

(3) 结合玉米果穗干燥特性和品质变化,果穗深床层干燥应采用先热风干燥后常温通风干燥的工艺,可以降低干燥时间、品质损失以及能耗;果穗热风干燥工艺参数确定为热风温度50℃或60℃、风速0.5 m/s、通风管路单侧料层厚度360 mm。

## 参 考 文 献

- [1] 王永刚,张国海,张恒,等. 黄淮海地区夏玉米收获现状分析[J]. 中国农机化学报,2018,39(11):112-115. WANG Yonggang, ZHANG Guohai, ZHANG Heng, et al. Analysis on current status of summer maize harvest in Huang-Huai-Hai Area[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(11):112-115. (in Chinese)
- [2] 尹国彬. 近年我国粮食产后损失评估及减损对策[J]. 粮食与饲料工业,2017(3):1-3. YIN Guobin. Evaluation and countermeasures of grain loss after production in recent years in China[J]. Cereal & Feed Industry, 2017(3):1-3. (in Chinese)
- [3] 王克如,李璐璐,鲁镇胜,等. 黄淮海夏玉米机械化粒收质量及其主要影响因素[J]. 农业工程学报,2021,37(7):1-7. WANG Keru, LI Lulu, LU Zhensheng, et al. Mechanized grain harvesting quality of summer maize and its major influencing factors in Huanghuaihai region of China[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(7):1-7. (in Chinese)
- [4] 武文璇,李寒松,张宗超,等. 基于合作社模式下的黄淮海玉米收获方式的思考[J]. 农业装备与车辆工程,2019,57(增刊1):83-86. WU Wenxuan, LI Hansong, ZHANG Zongchao, et al. Thinking of corn harvest methods based on cooperative mode in Huang-Huai-Hai area[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2019, 57(Supp. 1):83-86. (in Chinese)
- [5] 董殿文,周云. 玉米果穗就仓干燥的试验与探讨[J]. 粮油食品科技,2010,18(6):47-48. DONG Dianwen, ZHOU Yun. Experiment and discussion on the drying of corn fruit ears in the warehouse[J]. Grain, Oil and Food Science and Technology, 2010, 18(6):47-48. (in Chinese)
- [6] 费强,赵赵云,戴飞,等. 5HZL-1200型玉米果穗立式烘干系统的设计[J]. 浙江农业学报,2014,26(4):1095-1099. FEI Qiang, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Design of 5HZL-1200 type maize ear vertical drying system[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2014, 26(4):1095-1099. (in Chinese)
- [7] 崔相全,张宗超,韩梦龙,等. 机械通风玉米穗储粮仓在黄淮海地区的试验[J]. 农业工程学报,2021,37(4):80-86. CUI Xiangquan, ZHANG Zongchao, HAN Menglong, et al. Test of the mechanical ventilation maize storage warehouses in Huang-Huai Region[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(4):80-86. (in Chinese)
- [8] 张大龙. 基于组态技术的玉米果穗烘干监控系统的设计[D]. 兰州:甘肃农业大学,2013. ZHANG Dalong. Design of monitoring system for corn ear drying based on configuration technology[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [9] ISLAM M T. Modeling of in-bin reverse-airflow ear-maize drying: optimizing capacity and cost[D]. East Lansing City: Michigan State Univ., 2004.
- [10] 盛韶阳,吴敏,胡纯秋,等. 热风-真空复合工艺干燥玉米力学特性研究[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):476-482. SHENG Shaoyang, WU Min, HU Chunqiu, et al. Mechanical properties of maize kernel dried by hot-air vacuum compound process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1):476-482. (in Chinese)
- [11] SHIVHARE U S, RAGHAVAN G, BOSISIO R G. Modelling the drying kinetics of maize in a microwave environment[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1994, 57(3):199-205.
- [12] 赵祥涛. 高水分玉米真空低温干燥工艺生产性试验研究[J]. 粮食储藏,2007(4):51-53,56. ZHAO Xiangtao. Test on low temperature vacuum drying technology to dry corn of high moisture content[J]. Grain Storage, 2007(4):51-53,56. (in Chinese)
- [13] 中国国家标准委员会. GB/T 5009.3—2016 食品中水分的测定[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
- [14] MOHAN V C, TALUKDAR P. Experimental studies for convective drying of potato[J]. Heat Transfer Engineering, 2014, 35(14):1288-1297.
- [15] BASLAR M, KILICLI M, TOKER O S, et al. Ultrasonic vacuum drying technique as a novel process for shortening the drying period for beef and chicken meats[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 26:182-190.