

# 马铃薯通风储藏库加湿系统设计与试验

王相友<sup>1</sup> 王荣铭<sup>1</sup> 李学强<sup>2,3</sup> 王法明<sup>2,3</sup> 李少川<sup>2,3</sup>

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255000; 2. 山东思代尔农业装备有限公司, 德州 253600;

3. 山东省马铃薯生产装备智能化工程技术研究中心, 德州 253600)

**摘要:**为解决现有马铃薯通风储藏库加湿系统选型参数标准模糊和加湿方式无法随库内环境参数变化进行自动调节等问题,设计了一套马铃薯通风储藏库自动加湿系统。在现有马铃薯储藏库基础上,考虑马铃薯生理特性,该加湿系统选择 PLC S7-200 为主控制器,并运用控制变量法进行试验设计,采用 Origin 数据分析软件对各影响因素与入口风速和相对湿度之间的关系进行单因素试验分析,研究加湿帘厚度、加湿泵功率和风机风速对储藏库加湿效果的影响。硬件选型试验表明,该储藏库的最佳参数组合为湿帘厚度 45 cm、加湿泵功率 70 W、风机风速 16 m/s,当风速达到 16 m/s 时能够达到完全穿透效果。加湿系统应用试验证明,系统能够正常工作,并且将库内相对湿度维持在 95% 左右,储藏后马铃薯平均失重率为 3.70%,满足马铃薯储藏的加湿需求,且系统可根据库内环境参数的变化进行相应调整,使马铃薯保持较充足的水分和较低的失重率,从而保证储藏库内环境适合马铃薯储藏。

**关键词:** 马铃薯; 通风储藏库; 加湿系统; 相对湿度

中图分类号: S532; S229<sup>+</sup>.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)07-0358-09

OSID:



## Design and Test of Humidification System for Potato Ventilated Storage

WANG Xiangyou<sup>1</sup> WANG Rongming<sup>1</sup> LI Xueqiang<sup>2,3</sup> WANG Faming<sup>2,3</sup> LI Shaochuan<sup>2,3</sup>

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China

2. Shandong Star Agricultural Equipment Co., Ltd., Dezhou 253600, China

3. Shandong Provincial Intelligent Engineering and Technology Research Center for Potato Production Equipments, Dezhou 253600, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of fuzzy selection parameter standards of the humidification system of the existing potato ventilated storage and the inability of the humidification method to automatically adjust with the changes of the environmental parameters in the storage, a set of automatic humidification system for the potato storage was designed and developed. The humidification system was based on the existing potato storage, combined with the physiological characteristics of the potato, selected PLC S7-200 as the main controller for development, and the control variable method was used for experimental design. Through the data analysis software Origin, a single factor test analysis was carried out on the relationship between the various influencing factors and the inlet wind speed and relative humidity, and the influence of the thickness of the humidification curtain, the power of the humidification pump and the wind speed of the fan on the humidification effect of the storage was obtained. Through experimental research, it was concluded that the best collocation plan for the storage warehouse was that the thickness of the wet curtain was 45 cm, the power of the humidification pump was 70 W, the wind speed of the fan was 16 m/s, and the full penetration effect can be achieved when the wind speed reached 16 m/s. The application test of the humidification system proves that the system can work normally and can meet the humidification requirements of potato storage. It can be adjusted according to the changes of environmental parameters in the warehouse, so that the potato can maintain sufficient moisture and low weight loss rate, and guaranteed the storage in the warehouse. The environment was suitable for the storage of potatoes.

**Key words:** potato; ventilated storage; humidification system; relative humidity

收稿日期: 2021-01-30 修回日期: 2021-04-02

基金项目: 山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ010)

作者简介: 王相友(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事农产品加工技术与装备研究,E-mail: wxy@sdu.edu.cn

## 0 引言

马铃薯作为第四大粮食作物,其种植面积日益扩大。一些种植户通过合作社、民企合作等形式将零散的马铃薯种植区域连接起来,从而使马铃薯种植日趋大面积化。这种方式能有效降低马铃薯种植成本、提高管理的统一性,但是大面积种植下马铃薯的储藏问题也日益突出<sup>[1-6]</sup>。

现有马铃薯的储藏方式主要包括地窖式储藏、冷库储藏以及大型通风库储藏。地窖式储藏过于落后,其加湿方式依赖于人工洒水,且不均匀;冷库式储藏虽然较地窖式储藏效果好,但能耗大,不适于大批量马铃薯的储藏,经济效益低;大型通风储藏库利用自然冷能满足马铃薯大批量储藏的需求,但其降温加湿手段不够先进,尤其是加湿需依靠人工向地面泼洒水,不但耗费大量的人力和物力,并且造成水分分布不均,使局部湿度过大,从而导致马铃薯局部腐烂、滋生细菌,影响了储藏品质,并造成经济损失<sup>[7]</sup>。因此,亟需探索一种适宜的加湿手段,从而保证加湿效果,提高马铃薯的储藏品质。

目前,关于加湿系统设计方面的研究较少。文献<sup>[8-9]</sup>分别阐述了现有风机的基础形式、机器适应性和在高大平房仓中轴流风机的选型问题,给出一种风机选型方法;文献<sup>[10]</sup>提出,在马铃薯储藏库的温湿度调控方案中,马铃薯储藏的适宜相对湿度范围为85%~90%;文献<sup>[11-12]</sup>也分别给出了基于智能控制马铃薯储藏库内湿度调控方法和基于PLC(可编程逻辑控制器)的温湿度调控方法;还有一些学者对马铃薯储藏库内的通风加湿设备进行研究,主要通过对温、湿度进行控制和调节来提高马铃薯的储藏品质<sup>[13-17]</sup>。国外学者对马铃薯储藏的湿度条件进行了研究探索,对不同用途马铃薯的储藏给出了湿度范围<sup>[18-21]</sup>。目前,针对储藏库的加湿系统进行设计,研究加湿帘、风力和加湿泵功率之间的关系及对加湿效果的影响鲜见报道。

本文研究马铃薯通风储藏库加湿系统中加湿帘、风机对加湿效果的影响,对现有马铃薯通风储藏库的加湿系统进行设计和试验,以为马铃薯通风储藏库的设计和改进行提供技术参考。

## 1 加湿系统及其硬件设计

### 1.1 通风储藏库结构

马铃薯通风储藏库平面结构如图1a所示。此库由山东思代尔农业装备有限公司设计,加湿系统包含于马铃薯通风储藏库内,库体主要由进气窗、混气室、制冷设备、通风风机、加湿系统以及通风管道

和出气窗等组成。

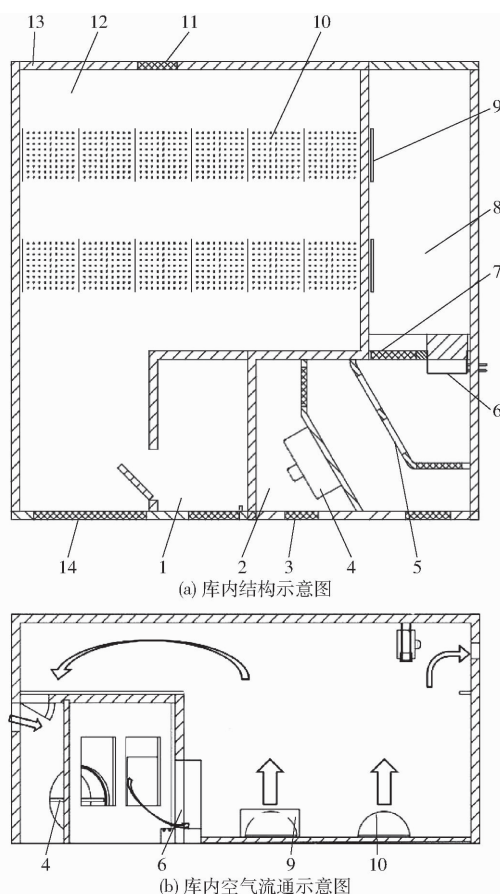


图1 储藏库示意图

Fig.1 Schematics of storage

1. 控制室 2. 混气室 3. 进气窗 4. 通风风机 5. 制冷设备
6. 加湿系统 7. 抑芽剂通道 8. 风道 9. 通风管道挡板 10. 通风管道 11. 出气窗 12. 储藏区 13. 库体 14. 库门

贮藏库整体分为下方长方体墙体和拱形顶两部分,下方长方体库体尺寸(长×宽×高)为50 m×22.5 m×3.5 m,上方拱形顶拱高约6.9 m。贮藏时,考虑马铃薯保鲜效果和库内通风效果,马铃薯垛堆高度不超过3.5 m。拱形顶整个劣弧所对应的弦长为库宽22.5 m,拱形顶所在圆的半径为12.62 m,即上方拱形顶空间体积为5 532.5 m<sup>3</sup>,库内总空间约为9 470 m<sup>3</sup>。马铃薯垛堆密度约为0.65 t/m<sup>3</sup>,故堆高为3.5 m的马铃薯垛堆质量约为2 559.3 t。

该储藏库的工作特点在于充分利用储藏地区的寒冷空气作为降温冷源,当库内通风降温时,进气窗开启,通风风机采用正压吸入的方式,引入外部空气并透过加湿帘将帘中水分吹散,随之进入库内穿过马铃薯垛堆,达到加湿的目的,加湿过程如图1b所示。

### 1.2 加湿系统硬件构成

根据该马铃薯储藏库对加湿系统的需求设计该自动加湿系统,主要包括主控制器、信号收集模块、执行模块、数模转换模块、人机交互模块。该加湿系

统硬件结构如图2所示。主控制器为PLC S7-200,信号收集部分主要包括湿度传感器、水位传感器,信号输入和输出部分由A/D、D/A转换模块组成,执行元件由多组继电器开关组成。

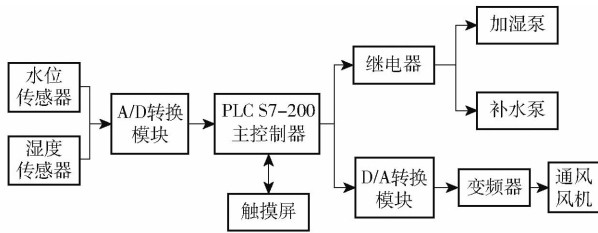


图2 加湿系统硬件结构图

Fig.2 Hardware structure diagram of humidification system

### 1.2.1 主控制器

选用西门子PLC S7-200作为加湿系统的数据处理和信号收发中心,该控制器具有运行速度快、工作稳定性强、信息处理能力强和能耗低等特点。CPU型号选用222CN(8DI/6DO),其具有多功能、易操作的优点。该系统要完成信号的收集和处理功能,需要信号转换模块和CPU处理器的配合,信号转换模块选用EM235模拟量处理模块,若有多种模拟信号输入,则需设置多个模拟量处理模块,以满足信号转换的要求。

### 1.2.2 传感器与执行部件

该系统所用传感器主要为湿度传感器和水位传感器,湿度传感器放置在风道和库内,主要检测风道内和库内不同位置的湿度信息,通过内部传感元件的函数关系得出所测位置的相对湿度,反馈至控制中心;水位传感器主要收集传输蓄水池的水位信息,保证加湿帘时刻有水补给,避免发生加湿帘无水补给的情况。

湿度传感器选用型号为西门子QFM2101,内含湿敏电阻,输出电流范围4~20 mA,当湿度传感器通电之后,内部湿敏电阻遇到空气中的水分时电阻值发生变化,使输出的电流发生改变,此时的电流输出值所对应的湿度即为空气相对湿度,输出的电流信号经转换成数字信号后,输入至主控制器进行运算并参与后续控制动作。假设输入的模拟量标准电信号范围是 $A_0 \sim A_m$ ,A/D转换后数值范围为 $D_0 \sim D_m$ ,若模拟量的标准电信号是 $A$ ,A/D转换之后的相对应数值为 $A_{A/W}$ ,所得相对湿度计算公式为

$$R = \frac{(A_{A/W} - 6400)(R_{\max} - R_{\min})}{25600} + R_{\min} \quad (1)$$

式中  $R$ ——相对湿度, %

$R_{\max}$ ——湿度传感器测量范围的最大值, %

$R_{\min}$ ——湿度传感器测量范围的最小值, %

与湿度传感器不同的是,水位传感器的水位并不能通过传感器直接得出,而是通过压力信息,由高度与水压力公式将压力转换为高度。水位传感器中所得模拟量与数字量之间的转换公式为

$$p = \frac{(D_{A/W} - 6400)(p_{\max} - p_{\min})}{25600} + p_{\min} \quad (2)$$

式中  $p$ ——压力, Pa

$p_{\max}$ ——传感器测量范围的最大值, Pa

$p_{\min}$ ——传感器测量范围的最小值, Pa

$D_{A/W}$ ——数字量的测量值

高度与水压关系式为

$$h = \frac{p - p_0}{\rho g} \quad (3)$$

式中  $h$ ——水位高度, m

$p_0$ ——测量地大气压, Pa

$\rho$ ——水密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$g$ ——重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$

该加湿系统执行部件主要由加湿泵、补水泵以及继电器、变频器和风机构成,继电器根据控制中心发出的信号控制加湿泵和补水泵的运行和停止,变频器控制通风风机的转速。

## 2 软件设计

### 2.1 控制原理

马铃薯储藏库内相对湿度需控制在85%~95%范围内<sup>[22-23]</sup>,当储藏库进行通风时,进气窗开启,风机正压吸入库内空气和外部作为冷源的空气进行混合,将低温混合气体送入库内的马铃薯储藏区,但外部冷源空气较库内空气相对湿度低且差距明显,当混合气体进入库内时,风力会将加湿帘中附着的水分吹散雾化,通过加湿帘的加湿作用,提高进入库内混合气体的相对湿度。此系统通过风道和储藏区的湿度传感器进行相对湿度的信息收集并输送至信号转换模块,完成数模转换后输入主控制器中,由主控制器进行处理判断并发出相应的控制信号,控制继电器的运行与停止,进而达到控制通风风机和加湿泵的目的<sup>[24]</sup>。此外,该系统还增加了自动注水功能,当水位下降至警戒高度不能满足加湿需求时水位传感器识别水位信息,主控制器控制补水泵,将加湿槽内的水位加至设定高度。

传感器的布局及其检测位置如图3所示。其中风道内排布相同的湿度传感器,用以测量风道内的平均空气相对湿度;风速传感器位于每个通风管道的前中后等距排布的位置,图中只示意其检测位置的入口。

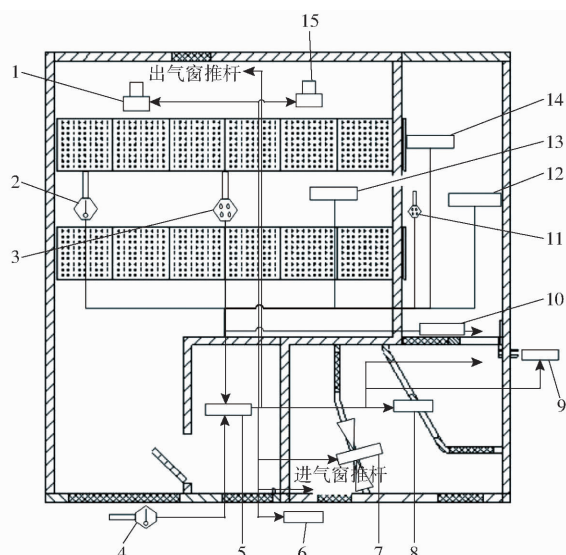


图 3 传感器分布示意图

Fig. 3 Schematic of sensor distribution

1、15. 热循环风机 2. 温度传感器 3、11. 湿度传感器 4. 室外温度传感器 5. 主控制器 6. 报警器 7. 通风风机 8. 制冷设备 9. 补水泵 10. 水位传感器 12. 风速传感器 13. CO<sub>2</sub> 传感器 14. 通风管道挡板

## 2.2 加湿控制流程

加湿系统工作时,加湿泵从水槽里吸水至加湿帘的顶部,然后使水从加湿帘的顶部均匀向下流至底部,使加湿帘充分湿润,当风通过浸过水的加湿帘时,使水分充分雾化,达到加湿的目的。主要控制流程如图 4 所示。

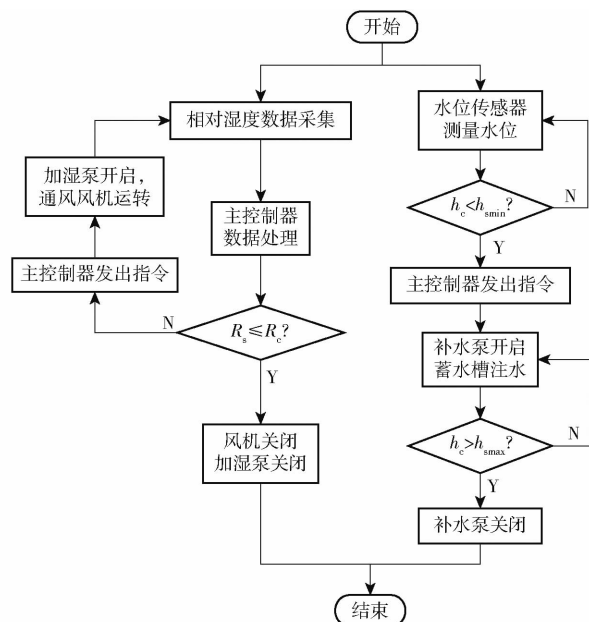


图 4 湿度控制流程图

Fig. 4 Humidity control flowchart

马铃薯贮藏库内的湿度传感器实时监测库内空气湿度信息,并将湿度信息采集值  $R_c$  传至 PLC 主控制器,PLC 主控制器将其与湿度参数设定值  $R_s$  进行湿度的参数对比,若检测到库内相对湿度小于等于

设定值  $R_s$  时,主控制器向通风风机和湿帘加湿泵发出控制指令,风机按一定的转速运转,湿帘进行加湿,直至库内达到指定的相对湿度,关闭通风风机与湿帘加湿泵;在进行相对湿度监测的同时,水位传感器实时检测水槽水位信息  $h_c$  并将检测到水位信息传送至主控制器,主控制器对其进行判断,若检测水位低于设定水位  $h_{smin}$  时,主控制器将其控制指令发送至补水泵,对水槽进行补水;注水同时,水位传感器对蓄水槽内水位进行实时监测,当检测水位  $h_c$  高于设定的警戒水位  $h_{smax}$  时,主控制器即控制补水泵停止注水。

此控制系统可根据不同贮藏时期马铃薯对湿度的需求通过人机交互模块进行相应的调整,满足不同品种不同时期马铃薯的储藏要求,降低马铃薯在储藏期的失水率和库损。

## 3 硬件选型试验

### 3.1 试验原理

风力在穿过加湿帘的过程中会被加湿帘以及水分阻挡,使风速降低,风压下降,而穿过加湿帘的湿空气还需要足够的风速风压将其通过通风管道带入库内,过低的风压会影响后期对马铃薯堆的穿透力,进而影响储藏库内部的加湿过程。加湿过程中使用循环水泵,而不同厚度的加湿帘所需循环水泵的功率也不同,水泵功率决定着加湿帘中水分以及风力的穿透效果。

本试验通过研究储藏库混气室内部的风力透过加湿帘以及加湿帘加湿补水的过程,探究风速与加湿帘厚度、加湿泵功率以及风力穿透之后水分的雾化加湿效果之间的关系,收集相对应的数据进行分析处理,得到变化曲线及规律,目的是选出最佳的方案组合,以便于根据储藏库的结构和储藏量对风机、加湿帘和加湿泵进行合理选择,以达到最佳的加湿效果。

### 3.2 试验设备

#### 3.2.1 风机

试验选用风机类型为轴流风机,型号 YTFZ40-11-14,额定功率 22 kW,风量为 110 016 m<sup>3</sup>,最大风压 593 Pa,最大转速 960 r/min,机外静风压 301 Pa,风机安装于密闭混气室内,具体安装图如图 5 所示<sup>[9]</sup>。

#### 3.2.2 加湿装置

加湿装置包括加湿帘、加湿泵和蓄水槽、补水槽,其中加湿帘尺寸(长×宽)为 549 cm×396 cm,厚度分别为 30、40、45、50 cm。

加湿泵选用 CN-8300 型变频水泵,额定电压

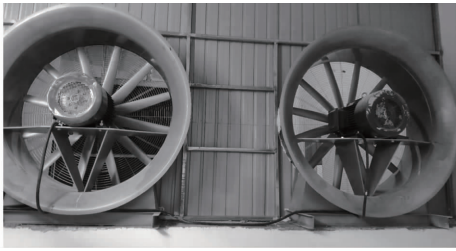
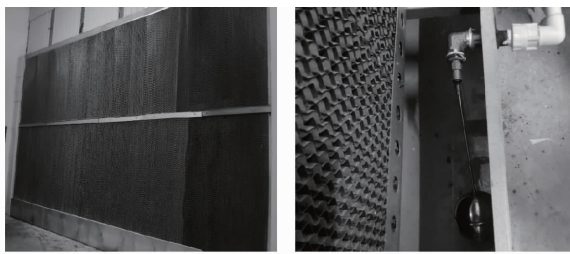


图5 轴流风机安装图

Fig. 5 Installation diagram of axial fan

220 ~ 240 V, 功率为 60 ~ 80 W, 扬程 5.2 ~ 5.8 m, 工作流量为 9 000 ~ 12 000 L/h, 尺寸(长 × 宽 × 高)为 21 cm × 9 cm × 10 cm; 蓄水槽尺寸为 5 490 cm × 50 cm × 30 cm, 壁厚 2 cm, 放置于加湿帘正下方; 加湿帘及蓄水槽补水装置安装位置如图 6 所示。



(a) 加湿帘实物安装 (b) 蓄水槽补水装置安装

图6 加湿系统安装位置图

Fig. 6 Installation location diagrams of humidification system

### 3.2.3 检测设备

风速传感器型号为 JY-WF2, 工作电压 DC 24V, 量程 0 ~ 20 m/s, 测量精度为 0.01 m/s。湿度传感器型号为 QFM2101, 工作电压 DC 13.5 ~ 35 V, 输出信号 4 ~ 20 mA, 精度为 ±3%。

水位传感器型号为 DLK-201, 工作电压 DC 15 ~ 30 V, 量程为 0 ~ 1 m, 输出信号 0 ~ 10 V, 精度为 ±0.002 5 m。风压测量选用数字式压差表, 型号为 AS510, 测量范围 0 ~ 100 hPa, 精度分别为 ±0.03 hPa (0 ~ 0.30 hPa)、±0.05 hPa (0.31 ~ 1.00 hPa)、-0.115 15 ~ 1.6 hPa (其余量程), 使用环境为 0 ~ 50℃。

库外温度传感器型号为 QAC3171, 其中工作电压为 13.5 ~ 35 V (直流), 测量范围为 -50 ~ 50℃, 输出信号为 4 ~ 20 mA, 安装高度大于 2.5 m, 且阳光不能直射; 库内温度传感器采用 JK-PT100 型温度传感器, 测量范围为 -20 ~ 50℃, 其中工作电压为 24 V (直流), 输出信号为 4 ~ 20 mA, 精度为 ±0.14℃。

### 3.3 试验方法与步骤

加湿系统的硬件选型试验于 2020 年 10 月 1 日在内蒙古自治区乌兰察布市商都县的马铃薯种业基地进行。室外温度为 3.8℃, 室外相对湿度为 48%,

库内平均温度 8.6℃, 库内平均相对湿度 61.1%, 风道内相对湿度 56%。

试验采用正压吸入的方式, 由轴流风机开启后将外部空气吸入混气仓内并形成风压, 通过风力和风压使混合后的空气穿透加湿帘。试验开始前先检查风机与加湿帘以及湿帘与墙壁之间的连接是否密封好, 避免漏气透风等情况影响数据检测。

首先开启加湿泵提前为加湿帘注水, 使加湿帘中充满水分, 将湿度传感器分别放置于风道和库内, 同时, 将风量计放置于通风管道入风口, 标记位置后固定, 仪器如图 7 ~ 9 所示。



图7 风速传感器

Fig. 7 Wind speed sensor

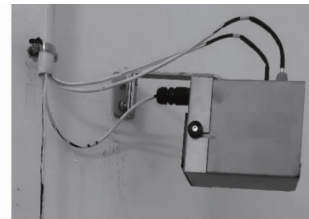


图8 湿度传感器

Fig. 8 Humidity sensor



图9 风速及湿度传感器安装位置图

Fig. 9 Installation location diagram of wind speed and humidity sensor

试验时, 运用控制变量法进行设计, 分别调节风机转速、改变加湿帘厚度、更换不同功率的加湿泵改变加湿泵功率, 测量风道内相对湿度的变化以及穿过加湿帘后通风管道入口风速的变化, 具体步骤如下:

(1) 试验开始时, 待水分充满加湿帘后, 控制变频器将风机转速调至正常工作状态, 控制风机得到相对稳定的风速并保持 15 ~ 20 min, 期间每隔 5 ~

10 min 在通风管道的风力入口处相同位置记录风速  $v_b$ , 同时记录所用加湿帘厚度  $h_1$  和此时风机侧风速  $v_{a1}$  以及加湿泵功率  $W_1$ ; 增加加湿泵功率至  $W_2$ , 改变加湿泵的水供给量, 测量透过加湿帘吹入库内的通风管道入口风速  $v_{b2}$  和空气相对湿度平均值  $R$ , 改变加湿泵的功率  $W_1 \sim W_3$  并采用相同的方式记录固定加湿帘厚度下不同功率加湿泵的水供给量所对应的入口风速  $v_b$  以及对应的相对湿度  $R$ 。

(2) 将加湿泵功率调整至初始功率  $W_1$ , 保持加湿帘厚度不变, 提高风机转速并记录风速  $v_{a2}$ , 保持 15 ~ 20 min, 测量通风管道入口风速和风道内的相对湿度, 改变风机转速记录风机侧风速为  $v_{a1} \sim v_{a5}$  时分别对应的入口风速平均值  $v_{b1} \sim v_{b5}$  以及相对湿度; 改变加湿泵功率并重复上述步骤, 记录在不同加湿泵功率下, 风机风速  $v_{a1} \sim v_{a5}$  分别对应通风管道入口风速和风道内相对湿度。

(3) 关闭风机和加湿系统, 更换另一厚度为  $h_2$  的加湿帘, 待加湿帘充满水之后, 重复上述两步试验, 记录厚度为  $h_2$  时对应的透过加湿帘的风速  $v_{b1} \sim v_{b5}$  和相对湿度的平均值  $R_1 \sim R_5$ 。

(4) 多次更换加湿帘, 改变湿帘厚度和加湿泵功率并重复上述操作, 将记录的数据取平均值, 分析风机风速、加湿帘厚度和加湿泵功率之间的关系。

### 3.4 数据处理与分析

根据伯努利方程得出风压计算公式为

$$w_p = \frac{r_0 v^2}{2} \quad (4)$$

其中

$$r_0 = \frac{r}{g}$$

式中  $r$ ——空气重度, 取  $0.012\ 25\ \text{kN/m}^3$

$w_p$ ——风压, kPa

$r_0$ ——空气密度,  $\text{kg/m}^3$

$v$ ——风速,  $\text{m/s}$

本试验测得马铃薯堆高约 2 m, 穿透马铃薯垛堆所需通风管道内的最小风速为 6 m/s, 计算得风压为 22.5 Pa。

储藏时, 需保证混气室的空气穿过加湿帘进入风道后的相对湿度达到储藏需求, 即相对湿度达到 95% 左右, 由于库内马铃薯在储藏过程中会持续进行呼吸作用产生大量水分, 使库内的温度和湿度都有增加, 而当风道内的低温混合气体通过通风管道进入库内后, 会使库内温度降低, 从而使空气湿度进一步增加, 故当风道内空气相对湿度达到 95% 左右时, 穿过马铃薯堆进入库内的空气相对湿度将大于 95%。

此外, 试验时持续通风的目的是为储藏库内部通风换气, 降低库内温度, 同时将混合气体提高湿度

后通入库内, 故在温度下降湿度提高的过程中, 可忽略由温差影响带来的试验误差。

#### 3.4.1 加湿帘厚度对加湿效果的影响

初步确定加湿帘厚度为 30、40、45、50 cm, 测量穿过不同厚度加湿帘的空气中的加湿效果以及加湿后的空气在通风管道入口附近的风速, 如表 1 所示, 并推算出对应的风压, 再结合加湿后的空气相对湿度与所需相对湿度的差距, 确定该厚度下的加湿帘是否能够满足加湿需求。

表 1 加湿帘厚度对加湿效果及风力的影响

Tab.1 Influence of thickness of humidification curtain on humidification effect and wind power

加湿帘厚度/cm	入口平均风速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	平均相对湿度/%
30	7.1	78.4
40	6.8	82.3
45	6.3	95.1
50	5.7	93.5

由表 1 可以看出, 选用 45 cm 厚度的加湿帘时, 入口风速与相对湿度可同时满足马铃薯储藏需求, 故将加湿帘厚度确定为 45 cm。

#### 3.4.2 混气室风机风速对加湿效果的影响

在前期试验确定的加湿帘厚度的基础上, 进行混气室内的风机风速对加湿效果和入口风力的影响试验。试验选择加湿帘厚度为 45 cm, 风机的转速通过变频器进行调节, 使用 Origin 软件分析测得的风速和相对湿度变化趋势如图 10 所示。

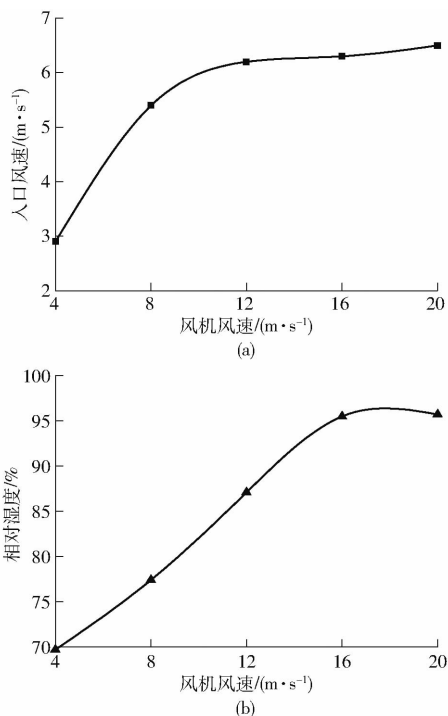


图 10 混气室风机风速对加湿效果及风力的影响  
Fig. 10 Effect of wind speed of air mixing chamber fan on humidification effect and wind power

由图 10a 可看出,随着风机风速的增加,通风管道的入口风速也在升高,并且由图 10b 可知风道内相对湿度也有增加,但是在 4 ~ 12 m/s 的风速区间内,入口平均风速的增加量明显大于 12 ~ 20 m/s 区间内的增加量,且在 12 m/s 之前,相对湿度随着风速的提升也有明显变化。同时也可看出,当风速达到 12 m/s 以上时,入口风速变化不明显,而当风机风速达到 16 m/s 时,风道内相对湿度维持不变甚至略有下降,此时通风系统所处的状态即为加湿帘的最佳穿透状态。

由图 10b 可得出,当风机风速达到最佳穿透状态时,继续提高风速对加湿效果影响不明显,故在实际选型中,使风机风速满足最佳穿透状态即可,避免造成资源浪费,所以库内加湿过程中风机的风速可选择在 16 m/s 左右。

另外,由图 10a 可知,在加湿系统调节过程中,需保证调节风机时的最小风速不得低于 12 m/s,否则会造成穿透马铃薯堆的风力不足,影响马铃薯储藏库的加湿和换气效率。

### 3.4.3 加湿泵功率对加湿效果的影响

加湿泵安装于加湿帘的底部,通过将加湿帘底部蓄水池中的水分引至加湿帘上部,冲击加湿帘顶部挡板,使水分布满加湿帘顶端,然后沿加湿帘内部空隙自然流下,达到为加湿帘实时补充水分的目的,由此可知,加湿泵功率决定着加湿帘内部水分的充盈程度,间接影响着加湿帘的加湿效果及对风力的阻挡作用。为研究马铃薯储藏库中加湿帘底端的加湿泵功率对两者的影响,结合前期试验确定的加湿帘厚度方案,选择功率分别为 60、70、80 W 的加湿泵进行试验。试验数据如表 2 所示。

表 2 不同加湿泵功率对加湿效果的影响

Tab. 2 Influence of different humidification pump power on humidification effect

加湿泵功率/W	入口平均风速/(m·s <sup>-1</sup> )	平均相对湿度/%
60	6.6	93.8
70	6.3	95.1
80	6.1	95.4

由表 2 可以得出,加湿泵功率对加湿帘的加湿效果和入口风速都有一定程度的影响,并且随着加湿泵功率的增加,通风管道入口风速有所减小,证明加湿泵功率越大,加湿帘对穿透风力的阻碍作用越强;从相对湿度的数值可以看出,当加湿泵功率为 70 W 时符合加湿需求,但当增加至 80 W 时,相对湿度值略有增加但不明显,相反通风管道入口风速有下降趋势,说明加湿帘对风力穿透的阻力会随之增

加。故可将加湿泵功率确定为 70 W。

## 4 应用试验

### 4.1 加湿系统应用试验

试验于 2020 年 10 月 15 日在内蒙古自治区乌兰察布市商都县的马铃薯种植基地的新型通风式马铃薯储藏库内进行。试验开始前,将马铃薯入库保存,使用的马铃薯为“川引 2 号”鲜食加工薯,储藏所需环境温度为 8℃,相对湿度为 95%,同时设定蓄水槽最低水位 0.05 m,警戒水位 0.25 m,初始水位高度为 0.15 m,库内马铃薯储量为储藏区总容量的 1/3,质量约 280 t,测得库外温度 2.3℃,相对湿度 49%。试验时,马铃薯储藏库处于封库状态。

试验中每 3 h 记录一组采集的数据,同时使用手持温湿度计(中国台湾群特股份有限公司,型号 CENTER 310,相对湿度测量范围:0 ~ 100%,精度为 ±2.5%)进行风道和库内马铃薯堆表面的湿度测量,所得数据作为系统测量数据的误差评定参考标准,并与系统测得数据进行比对。测得试验数据如表 3 所示。

表 3 加湿系统测量结果

Tab. 3 Application data measurement of humidification system

试验序号	系统相对湿度 R <sub>s</sub> /%		实测相对湿度 R <sub>e</sub> /%		加湿系统工作状态			水位高度/m	补水泵状态
	风道	库内	风道	库内	加湿泵	风机	湿度		
1	91.2	82.1	89.1	81.9	工作	工作	增加	0.10	关
2	93.5	85.3	92.4	84.7	工作	工作	增加	0.06	关
3	94.2	88.2	92.8	86.4	工作	工作	增加	0.07	开
4	96.3	90.1	94.7	88.5	工作	工作	增加	0.23	关
5	97.2	92.4	95.2	90.6	工作	工作	增加	0.21	关
6	96.5	94.6	95.6	92.8	工作	工作	增加	0.20	关
7	96.7	95.2	95.2	94.5	工作	工作	保持	0.19	关
8	95.3	96.4	94.3	95.3	工作	工作	保持	0.17	关
9	94.2	95.3	91.7	94.8	工作	工作	保持	0.14	关
10	91.2	94.8	89.1	93.5	工作	工作	保持	0.12	关
11	93.5	95.4	91.4	94.6	工作	工作	保持	0.11	关
12	95.7	96.2	94.5	95.2	工作	工作	保持	0.07	关
13	97.4	98.7	95.7	96.8	工作	工作	保持	0.23	关
14	96.3	98.2	95.8	96.7	工作	工作	保持	0.21	关
15	95.4	96.3	94.7	95.6	工作	工作	保持	0.18	关
16	94.5	96.1	93.5	95.2	工作	工作	保持	0.17	关

由表 3 可得,该马铃薯储藏库加湿系统可正常运行并能够完成从马铃薯入库开始至封库期间库内储藏环境的增湿与维持,并能够及时监测并补给蓄水槽水量。该系统能够自动完成库内湿度的检测并能够自动调整。当相对湿度降至 95% 以下时,加湿系统会自动调整,使库内湿度维持稳定,

当蓄水槽水位下降至设定最低水位 0.05 m 时,可自动注水至 0.25 m。

## 4.2 色泽对比与失重率测量

### 4.2.1 色泽

马铃薯收获入库之前,随机选取多个健康马铃薯作为试验对象,将马铃薯表面清理干净并将其标为序号 A,然后用洁净的刀具将马铃薯切为两半,采集入库前马铃薯内部的水分数据并使用 SP60 型色差仪(美国爱色丽公司)测量 A 组马铃薯剖面的亮度并取平均值,每次色差测量前都使用标准白板和黑板进行矫正。

随后每隔 30 d 从马铃薯堆中随机选取体积和质量相近的马铃薯分为数量相等的 3 组作为试验对象(分别标号为 B、C、D),观察储藏期间马铃薯内部水分变化情况,并在同一试验条件下分别测量 B、C、D 组剖面的亮度并取平均值。水分变化情况如图 11 所示。

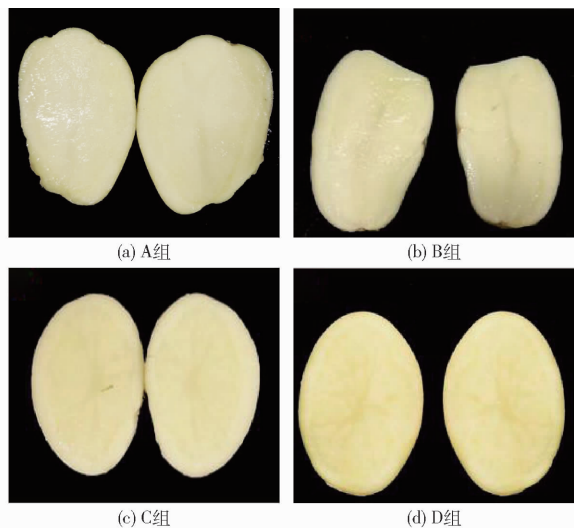


图 11 鲜切薯内部情况对比

Fig. 11 Comparison of internal conditions of fresh-cut potatoes

试验测得 A、B、C、D 组马铃薯剖面亮度的平均值分别为 76、71、65、62,由图 11 可知,通过对 4 个不同时期的马铃薯内部水分观察以及色泽的亮度比较,可以看出马铃薯在储藏过程中虽有部分水分散失,但储藏期结束后仍然保持着充足的水分和鲜亮的色泽,并且内部无明显的腐烂、黑心病和环腐病等可见病症,可得该加湿系统能够减少马铃薯自身的水分散失,达到较好的储藏品质。

### 4.2.2 失重率

马铃薯的失重率是指储藏后与储藏前的马铃薯质量变化占储藏前质量的百分比,在储藏过程中,营养物质会随着自身蒸腾作用和呼吸作用不断消耗,若马铃薯水分过度消耗,失重率增加,则

无法保证马铃薯的储藏品质。加湿系统设计目的在于调节控制库内环境的相对湿度,使马铃薯在储藏过程中减少自身营养物质损耗,保持较饱满的水分。

马铃薯失重率采用的测量方法为称重法,试验仪器选用电子秤,测量精度为 0.1 g。加湿系统稳定后,选取大小和健康状况相近的马铃薯,清洁表面泥土杂质并分成数量相同的 5 份,分别称量后记录质量,然后放置于储藏库的 5 个不同位置并标序号 1~5,放置时间为 120 d,储藏期结束后再分别取出并称量记录。同时,作为对照组,另选取 5 组大小和健康状况相近的马铃薯称量并取平均值后,放入储藏环境相同(但不加湿)的储藏库中,待储藏期结束后称量,计算未加湿条件下马铃薯的失重率。记录数据如表 4 所示。

表 4 马铃薯失重率

Tab. 4 Potato weight loss

组别	储前质量/g	储后质量/g	失重率/%
对照组	5 035. 61	4 788. 86	4. 90
1	5 039. 46	5 020. 81	3. 70
2	5 030. 13	5 011. 62	3. 68
3	5 016. 27	4 997. 61	3. 72
4	5 032. 52	5 013. 95	3. 69
5	5 021. 45	5 002. 72	3. 73
平均值	5 027. 97	5 009. 34	3. 70

根据表 4 的数据显示,加湿条件下 5 组马铃薯的平均失重率为 3.70%,与同条件下未加湿的储藏库的 4.90% 失重率相比明显降低。与现有普通控温通风储藏库的 5.2% 和传统土窖贮藏的马铃薯 9.95% 的失重率相比降低幅度较大<sup>[25]</sup>,可见能够获得较好的储藏效果。

## 5 结论

(1)在本文试验条件下,选择加湿帘厚度为 45 cm 可使加湿效果最佳。通风管道入口风速大于 6 m/s 时,风力能够穿透堆高 2 m 的马铃薯堆,有利于湿空气的库内循环。

(2)试验表明,该加湿系统可实现库内湿度的检测及自动调整,将库内相对湿度维持在 95% 左右,并且可实现蓄水槽水位的控制,将水位始终控制在 0.05 m 以上,使加湿帘保持足够的水量供应。

(3)该加湿系统对马铃薯的呼吸和蒸腾都具有一定的抑制作用,将储藏期马铃薯的平均失重率降低至 3.70%,明显降低了储藏过程中自身营养物质的消耗,对提高马铃薯储藏品质起到了积极作用。



## 参 考 文 献

- [1] 向贤伟. 马铃薯的生理生化特性及其保鲜包装技术[J]. 株洲工学院学报, 1994, 8(4): 35-41.  
XIANG Xianwei. Analysis of the physiological and biochemical characteristics of potatoes and their influence on freshening-keeping packaging[J]. Journal of Zhuzhou Engineering Institute, 1994, 8(4): 35-41. (in Chinese)
- [2] 李杰, 朱雪静, 马晓勇. 气调库技术发展及存在问题[J]. 冷藏技术, 2018, 41(1): 55-58.  
LI Jie, ZHU Xuejing, MA Xiaoyong. Technical development and existing problems of CA storage[J]. Cold Storage Technology, 2018, 41(1): 55-58. (in Chinese)
- [3] 高树成, 赵旭. 我国马铃薯储藏技术的研究与应用现状[J]. 粮食加工, 2018, 43(1): 78-80.
- [4] 杨雅伦, 郭燕枝, 孙君茂. 我国马铃薯产业发展现状及未来展望[J]. 中国农业科技导报, 2017(1): 35-42.  
YANG Yalun, GUO Yanzhi, SUN Junmao. Present status and future prospect for potato industry in China[J]. China Agricultural Science and Technology Review, 2017(1): 35-42. (in Chinese)
- [5] 霍权恭, 范璐. 储藏条件对马铃薯品质的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2005, 26(6): 47-49.  
HUO Quangong, FAN Lu. Effects of storage condition on the potato quality[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2005, 26(6): 47-49. (in Chinese)
- [6] 单志杰. 马铃薯种薯收获与贮藏技术[J]. 种子科技, 2015, 33(1): 46-47.
- [7] 任洪忱, 孙大明, 金德海, 等. 新型自然冷能马铃薯贮藏库的研究[J]. 农机使用与维修, 2019(6): 11-13.
- [8] 宋景才, 尹洪斌, 张志愿. 高大平房仓轴流风机通风降温试验[J]. 粮食储藏, 2004, 33(6): 31-33.  
SONG Jingcai, YIN Hongbin, ZHANG Zhiyuan. Test of axial-flow machine for ventilation and lowering temperature in large warehouse[J]. Food Storage, 2004, 33(6): 31-33. (in Chinese)
- [9] 樊泽继. 风机基础选型及施工要点研究[J]. 华东公路, 2017(5): 116-119.
- [10] 熊新荣, 胡兵, 王小娟, 等. 马铃薯储藏库的温湿度控制方案研究[J]. 陕西农业科学, 2015(10): 43-46.
- [11] 王相友, 李少川, 王法明, 等. 马铃薯贮藏库调控系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 363-370.  
WANG Xiangyou, LI Shaochuan, WANG Faming, et al. Design and experiment of potato storage equipment control system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 363-370. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20200342&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200342&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.042. (in Chinese)
- [12] 李锦杰, 费旭云, 毕松. 基于PLC的温湿度智能控制系统设计[J]. 自动化应用, 2017(4): 57-58, 110.
- [13] 张文林. 基于PLC马铃薯仓库自动控制系统的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.  
ZHANG Wenlin. Study on automatic control system based on PLC for potato storage warehouse [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [14] 王进, 王笑. 基于51单片机的大棚温湿度监测系统设计与应用[J]. 农业工程, 2019, 9(8): 38-40.  
WANG Jin, WANG Xiao. Design of greenhouse temperature and humidity monitoring system based on 51 single chip microcomputer[J]. Agricultural Engineering, 2019, 9(8): 38-40. (in Chinese)
- [15] 赵正军, 王福平, 潘杰, 等. 基于Wi-Fi的马铃薯贮藏环境测控系统设计与应用[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(2): 233-237.
- [16] 吴琼. 马铃薯贮藏环境监控系统的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.  
WU Qiong. Research on potato storage environment monitoring system[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [17] 贾倩民, 陈彦云, 陈科元. 马铃薯贮藏的环境影响因子及监控系统[J]. 农机化研究, 2014, 36(3): 58-61.  
JIA Qianmin, CHEN Yanyun, CHEN Keyuan. The research of optimal allocation of greenhouses composite energy[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(3): 58-61. (in Chinese)
- [18] GACHANGO E, KIRK W W, SCHAFER R. Effects of in-season crop-protection combined with postharvest applied fungicide on suppression of potato storage diseases caused by oomycete pathogens[J]. Crop Protection, 2012, 41: 42-48.
- [19] PAUL V, EZEKIEL R, PANDEY R. Sprout suppression on potato; need to look beyond CIPC for more effective and safer alternatives[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(1): 1-18.
- [20] ELMORE J S, BRIDDON A, DODSON A T, et al. Acrylamide in potato crisps prepared from 20 UK-grown varieties; effects of variety and tuber storage time[J]. Food Chemistry, 2015, 182(2-3): 1-8.
- [21] FOUKARAKI S G, COOLS K, CHOPE G A, et al. Impact of ethylene and 1-MCP on sprouting and sugar accumulation in stored potatoes[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 114: 95-103.
- [22] 李守强, 田世龙, 程建新, 等. 不同温湿度差和通风方式对马铃薯贮藏环境的调控效果试验[J]. 粮食加工, 2018, 43(4): 77-81.
- [23] 尹飞凰, 高舸. 适宜马铃薯储藏的环境参数智能调节系统[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(9): 374-376.
- [24] 王昌. 基于PLC的节能型果蔬气调保鲜库的控制系统设计[D]. 青岛: 青岛大学, 2016.
- [25] 王洁, 李喜宏, 赵亚婷, 等. 不同贮藏方式对马铃薯品质的影响[J]. 食品科技, 2017(11): 36-40.  
WANG Jie, LI Hongxi, ZHAO Yating, et al. Effects of different storage methods on quality of potato[J]. Food Science and Technology, 2017(11): 36-40. (in Chinese)