

水稻干燥变温混配装置设计与试验

车刚^{1,2} 王洪超^{1,2} 万霖^{1,2} 王鑫^{1,2} 唐浩³ 张成旭¹
(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319; 2. 黑龙江省农机智能装备重点实验室, 大庆 163319;
3. 北大荒农垦集团有限公司, 哈尔滨 150030)

摘要:为解决水稻干燥过程中热源波动大、变温工艺要求快速调整温度的需求,设计了一种配合负压干燥机变温控制的同轴侧入式壳形变温干燥混配装置。以气流旋转驱动壳体内叶片导向配风为径向混合方式,采用机电联动式齿盘精量调节阀开度,实现高效气流均匀混合。为提高变温控制精度以及混配温度的稳定性,应用神经网络预测与回归试验设计方法分析混配阀门开度与热风温度、风机频率及系统温度差值的关系,建立了变温混配装置的混合控制模型。利用大涡模拟的原理,借助 Fluent 软件对变温干燥混配装置进行混合温度场模拟,得到了最佳混配效果的距离为 26.85 cm,模拟结果与红外线热像验证图吻合良好。试验研究表明:变温控制满程时间为 0.75 s,最大变温温差的均值为 0.96℃,控制合格率达 84% 以上。出机水稻含水率在合理范围内,干燥后水稻品质较优,满足生产要求。

关键词: 水稻; 变温干燥; 混配装置; 设计; 性能试验

中图分类号: S226.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)02-0386-07 **OSID:** 

Design and Test of Varying Temperature Mixing Device on Paddy Rice Drying

CHE Gang^{1,2} WANG Hongchao^{1,2} WAN Lin^{1,2} WANG Xin^{1,2} TANG Hao³ ZHANG Chengxu¹
(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China
2. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery Equipment, Daqing 163319, China
3. The Great Northern Wilderness State Farms Group Co., Ltd., Harbin 150030, China)

Abstract: Drying is a necessary post-harvest handling aspect of the grain and directly determines the final economic benefit of the grain. In order to solve the need for rapid temperature adjustment in the process of grain drying and the great fluctuate of heat source, a coaxial side-entry shell-shaped temperature-variable drying and mixing device was designed to cooperate with the variable-temperature control of the negative pressure dryer. In order to achieve high-efficiency and uniform air mixing, the guide vanes distribute cold air in the air rotating housing was radial mixing mode, and the valve opening was precisely adjusted by electro-mechanical linkage gear plate. In order to improve the accuracy of variable temperature control and the stability of mixed temperature, the relationship between valve opening and hot air temperature, fan frequency and system temperature difference was analyzed by neural network prediction and design method of regression experiment, and the air volume mixed control model of variable temperature mixing device was established. Based on the principle of large eddy simulation, the mixing temperature field of variable temperature drying mixing device was simulated by Fluent software. The distance of the best mixing effect was 26.85 cm. The simulation results were in good agreement with the infrared thermal image verification diagram. The test results showed that the full range time of variable temperature control was 0.75 s, the maximum value of variable temperature difference was 0.96℃, and the qualified rate of control was more than 84%. The output rice moisture content was in a reasonable range, and the quality of rice after drying was better, which can meet the production requirements. The results of the research provide a reference for achieving high quality, high-efficiency, energy-saving drying process and equipment design.

Key words: paddy rice; variable temperature drying; mixing device; design; performance test

收稿日期: 2020-12-23 修回日期: 2021-01-15
基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2100901)、黑龙江省应用技术与开发计划重大项目(GA15B402)、大学生创新创业训练计划项目(201910223002)和全国基层农技推广项目(JCTG1904)
作者简介: 车刚(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备与农产品节能干燥工程研究,E-mail: chegang180@126.com

0 引言

水稻是热敏性物料,其特殊的生理性组织结构,导致其存在干燥特性差异。若干燥速率不均匀,或受热温度、干燥风速较高,易产生内部温度梯度,出现爆腰的现象,在后续脱壳、碾米过程中会出现碎粒,造成出米率下降。若干燥温度过高,则会导致内部出现脂肪酸等物质变性,加速水稻籽粒陈化,在蒸煮品尝过程中,口感也会下降,即水稻食味值下降^[1-6]。因此,水稻干燥品质受热风风速和温度的影响大。近年来,以水分活度为统一特征,以自由能传递和转换为统一尺度,完整地理论上揭示实际干燥过程,得到了干燥物系的数学解^[7-8],相关研究分析了影响干燥品质的因素并提出了有益的干燥工艺^[9-11],但是由于水稻干燥是大滞后、非线性变量物系,实现优质、高效节能干燥控制目标存在难度^[12-16]。目前,在水稻干燥生产中,普遍以低温作业为主,但是存在生产效率与品质控制的矛盾问题。基于品质控制的变温保质干燥过程,对温度精度要求较高,特别是当粮食干燥温度高于目标温度,则会严重影响干燥后的水稻品质。实际生产中依靠调节热风机进风口风量与PID控制器配合进行温度调节,具有大时滞性的特点,重新达到新温度平衡用时较长,不能实现短时间内的变温调节。粮食变温干燥机普遍采用2台或3台风机为各干燥段提供不同温度的热风,该方法易于单独温度调控,但是供热机构庞大、成本高,且使用大功率正压风机,增加电能消耗,不利于节能^[17-18]。

为此,本文结合水稻变温干燥工艺,基于壳形管路混配气流的变温调节方法,设计同轴侧入式壳形变温混配装置。该装置利用相对穿透混合原理,以气流旋转驱动壳体内叶片导向配风为径向混合方式,降低混合气流在管道中的能量损失,缩小混合空间尺寸和混配时间,以实现高效气流均匀混合。依据水稻含水率的变化,自动调节机电联动式齿盘精量调节阀开度,快速调整主风道的热风温度,以满足变温干燥的需求。

1 水稻变温干燥工艺模型

水稻干燥是一个复杂的非线性系统,影响因素复杂且存在系统时滞问题。由于粮流的初始状态各异,在干燥段内不同粮层深度的水稻状态存在差别,易形成水分和温度梯度^[19-21]。依据在线水分传感器获得的水稻含水率数据,对热风温度进行变温调控以获得高品质水稻。水稻变温干燥工艺模型如图1(T_0 为水稻的初始温度; M_0 为水稻的初始含水

率; d_{F0} 为热风的初始湿含量; $T_1 \sim T_4$ 为不同干燥段水稻的温度; T_{F0} 为冷空气的初始温度; T_{F1} 、 T_{F2} 为混配前后的热风温度; T_{F3} 、 T_{F4} 为排出废气的温度; d_{F1} 、 d_{F2} 为混配前后热风的湿含量; V_{F0} 为冷空气的初始风速; V_{F1} 、 V_{F2} 为混配前后热风的风速; V_{F3} 、 V_{F4} 为排气风机的风速; $M_1 \sim M_4$ 为不同干燥段水稻的含水率; d_{F3} 、 d_{F4} 为排出废气的湿含量)所示,热气流进入干燥机后,在上、下出风口风机作用下使上粮层呈逆流干燥状态,下粮层呈顺流干燥状态。在循环干燥过程中,结合不同含水率的水稻对干燥温度的需求,自主调控混配装置的工作参数,改变进气段的热风温度,从而获得干燥段内水稻的质热调节效应。

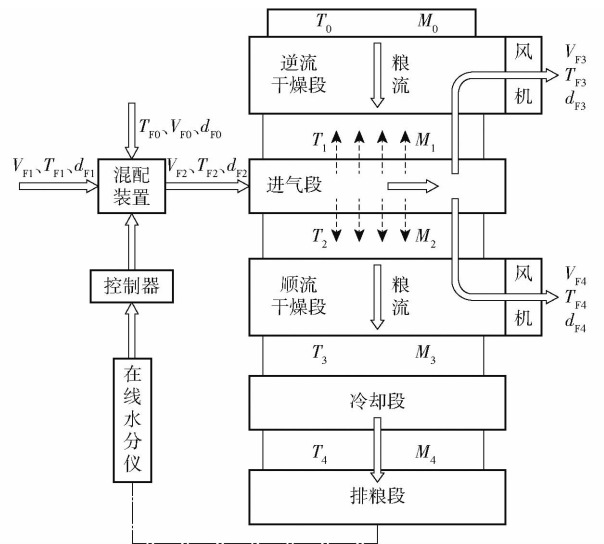


图1 水稻变温干燥工艺模型

Fig.1 Rice variable temperature drying model

2 干燥机变温混配装置设计

2.1 干燥机基本结构

水稻保质干燥过程是对热风温度与风速精确控制的融合过程。因此在干燥机进风通道处设计变温混配装置,实现干燥温度的实时调节。干燥机主体部分由预热段、过渡段、干燥段、变温混配装置等构成,如图2所示。通过调节排风口处安装的变频风机,可实现对干燥段内上部、下部风速的控制,进而改变干燥区域内水稻的降水幅度。在整个干燥过程中,自主调节后的温差变化范围小,避免影响水稻的干燥品质。

2.2 变温干燥混配装置设计

2.2.1 冷热气流混合原理

在气流混合过程中,采用多股气流汇入主气流的方式,能够强化混合过程。当气流流入与主气流呈一定角度时,流体混合边界发生弯曲并且气流不再呈轴对称。流体横截面由圆形变为马蹄形。主气流与流体相交时被减速,形成滞止压力区,绕过相交

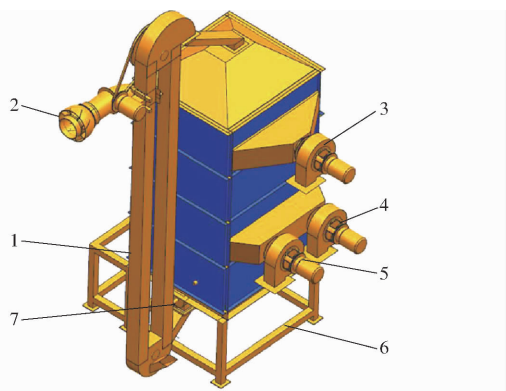


图2 负压循环式干燥试验机

Fig.2 Negative pressure circulation batch dryer

1. 提升机 2. 变温混配装置 3. 上层吸风机 4. 下层左吸风机
5. 下层右吸风机 6. 底座 7. 排粮机构

流体后形成低压区,此时在该区域形成相反方向的漩涡。产生的侧应力使主气流与流入气流混合更快速,缩短混合均匀距离^[22-23]。基于气流混合理论,设计一种配合负压干燥机变温控制的同轴侧入式壳形变温干燥混配装置。单股冷气流与主气流的混合流动如图3所示。

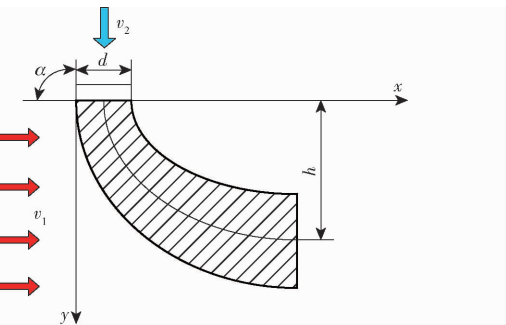


图3 单股冷气流与主热气流混合流动示意图

Fig.3 Schematic of mixed flow of single cold air flow and main hot air flow

当冷气流轴线与热气流方向一致时,轴线与 x 轴的法向距离为绝对穿透深度 h 。绝对穿透深度 h 与入口直径 d 的比值为相对穿透深度 H 。在冷热气流混合中相对穿透深度计算公式为

$$H = \frac{0.132v_2}{\alpha v_1} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} \quad (1)$$

式中 ρ_1, ρ_2 ——热气流和冷气流的密度, kg/m^3
 v_1, v_2 ——热气流和冷气流的速度, m/s
 α ——气流相交角, ($^\circ$)

由式(1)分析,冷热气流的密度、速度和气流相交角将影响相对穿透深度,间接影响气流混合效果。相对穿透深度越大,气流混合速度更快且混合距离更短。当冷热气流都无相变且流体交角一定时,逆流的平均温差最大而顺流温差最小。根据变温混配干燥装置控制范围,采用顺流混合方式适合对热风温度的调控。

2.2.2 混配装置结构设计

变温干燥混配装置是水稻变温干燥系统的核心部件^[24-25],能够将冷热气体按比例进行混合,使热交换后的气流达到新稳态,结构如图4所示。气流旋转驱动壳体与进气调节齿轮盘联接,嵌套于主管道外壁上且可以相对转动。气流旋转驱动壳体内部安装有导向叶片,主管道壁面设有周向对称开口,与旋转驱动壳体套管壁面开口组成可调阀门。冷空气在螺旋导向叶片导流作用下径向对称进入主管道内,在较短距离内实现冷热气流的均匀混合。试验研究表明,气流旋转导向角度为 $40^\circ \sim 50^\circ$ 时,主管道径向进气流畅且流量大。因此设计导向叶片角度为 45° 。支架及限位组件与主体管道固定联接,其作用是安装步进电机和转动限位。通过控制步进电机的转速调节旋转驱动壳体相对于主管道的转动量,从而改变周向阀门开度,准确调节进气量和气流温度。进气调节齿轮盘的转角与步进电机的供电时间相关。当管道中的温度与目标温度不符时,根据温度差值对变温混配装置进行调节,快速达到目标温度。

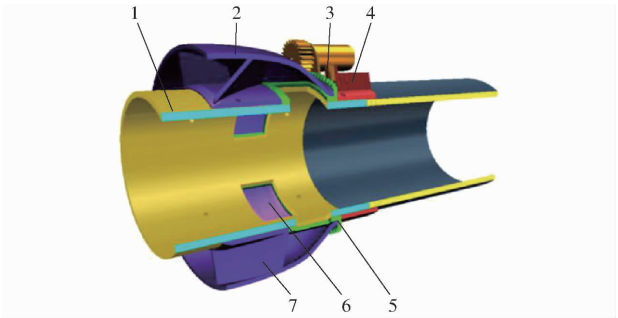


图4 变温干燥混配装置

Fig.4 Variable temperature mixed flow drying device

1. 主管道 2. 气流旋转驱动壳体 3. 步进电机 4. 支架及限位组件 5. 进气调节齿轮盘 6. 阀门开口 7. 螺旋导向叶片

2.2.3 阀门开口设计

阀门开口的形状与尺寸直接决定装置的进气量和混合气流的均匀度。考虑在主管道外壁开设长方形开口便于调节进风量,开口对称布置易于实现穿透深度的均匀性,在主管道上开设对称式长方形开口,旋转驱动壳体套管壁面设计相同开口。由于采用侧入式进风方式,在螺旋叶片导向作用下使冷气流呈旋转状态进入主管道。假设混合过程为理想状态,单位时间内通过变温干燥混配装置冷空气和热气流的截面风量等于混合后的截面风量,计算公式为

$$v_2 \pi r^2 + v_1 S = v_m \pi r^2 \quad (2)$$

式中 S ——开口面积, m^2
 v_m ——混合后风速, m/s
 r ——热源管道内径,取 0.2 m

为了满足干燥风量调节的要求,以获取最小风温和可调风速为约束条件,假设温度波动为 $\pm 5^{\circ}\text{C}$,热风温度为 $35\sim 75^{\circ}\text{C}$,环境温度为 20°C 。通过风速试验确定结构参数,结合式(2)计算,得到主管道开口面积不大于 0.026 m^2 ,结合主管道表面尺寸,确定长方形开口数量为4个,宽度为 15 cm ,长度 18 cm 。

2.2.4 传动机构设计

为了实现精细调节进风量并准确控制热介质温度,结合进气管道的尺寸特征,阀门开口调节机构采用小减速比的齿轮传动方式,如图5所示。设计进气调节齿轮盘与气流旋转驱动壳体联成一体,步进电机联接的齿轮与进气调节齿轮盘相啮合。根据齿轮齿根弯曲强度设计和齿面疲劳接触强度校核^[26],设计一级直齿传动齿轮。为了增强齿轮传动的平稳性和承载能力,确定重合度为1.63,传动比为5,进气调节齿轮盘齿数为110齿,步进电机齿轮为22齿。为防止齿轮轴向转动影响传动效率,设计电机齿轮齿面宽度为进气调节齿轮盘宽度的2.5倍。

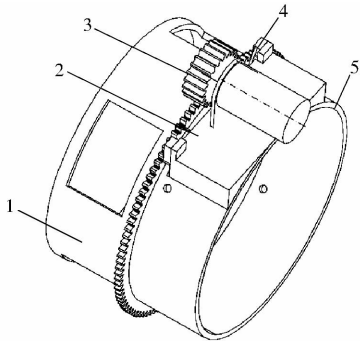


图5 混配传动装置
Fig.5 Transmission of mixed flow

1. 齿盘联接件 2. 电机支架 3. 电机齿轮 4. 齿盘 5. 固定套

2.3 变温干燥混配控制模型

在实际干燥工作中,应考虑在不同热风温度条件下,变温干燥混配装置阀门开度的变化对热风温度稳定性的影响。为提高变温控制过程的精度以及混配气流温度的稳定性,进行 $L_{25}(3^5)$ 全面试验,根据干燥过程的控制需求,确定热风温度 a_1 因素水平选取为 $35、45、55、65、75^{\circ}\text{C}$,风机频率 a_2 因素水平选取为 $10、20、30、40、50\text{ Hz}$,目标温度与实际温度差值 a_3 为 $1、2、3、4、5^{\circ}\text{C}$ 。基于神经网络具有典型分布式计算的特点,采用以热风温度、风机频率和系统温度差值为输入,阀门开度为输出,通过神经网络预测训练与回归分析获得控制模型。

以试验数据为样本,应用 Neuroshell 进行学习训练,80%为训练样本,20%为学习样本。激活函数选择 logistic,学习速率为0.1,梯度选择0.1,权

重选择0.3,以最小温度偏差为目标。训练结果:训练次数为 3.9×10^4 次,最大温度偏差为 0.029°C ,最小温度偏差为 0.017°C 。将试验值输入训练模型中,得出阀门开度预测值,利用 SPSS 回归分析建立变温干燥混配装置驱动齿轮盘的阀门开度 F 控制模型

$$F=54.091-0.115a_1-0.72a_2+3.1a_3-0.011a_1a_2+0.086a_1a_3+0.241a_2a_3 \quad (3)$$

通过阀门控制 P-P 图对预测模型进行检验。如图6a所示,阀门控制值与直线近似重合,即实测数据与理论数据相近,服从正态分布。如图6b所示,剔除趋势的阀门开度分布点与中线的差值波动偏差变化范围在 ± 0.2 之间,说明变化范围小,服从近似正态分布且模型能够满足对阀门的控制要求。回归方程的预测与真实值的相关系数 $R=0.945$,决定系数 $R^2=0.892$,拟合程度良好,显著性 $P<0.001$,各因素对阀门开度 F 影响极显著,因此,该模型能够间接表述各参数与电机供电时间的关系。为精确计算电机驱动时间,结合混配装置的传动比,设定电机转速为 50 r/min ,阀门开口面积为 33.75 cm^2 ,得到变温干燥混配装置电机驱动时间 t 的控制模型为

$$t=0.41-0.0008a_1-0.005a_2+0.23a_3-0.00008a_1a_2+0.0006a_1a_3+0.002a_2a_3 \quad (4)$$

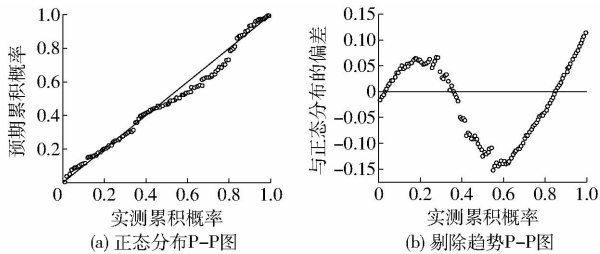


图6 阀门控制 P-P 图
Fig.6 P-P diagram of valve control

结合神经网络预测建立的电机驱动时间控制模型,能够根据实际热风温度与目标温度差值来调节变温干燥混配装置的阀门开度,从而实现变温干燥的精确控制。

3 气流混配性能试验仿真与验证

3.1 试验设备与仪器

试验设备采用本文设计的变温干燥混配装置,通过透明亚克力管道与干燥机主风道相连,应用美国 FLIR 型红外相机进行试验观测。采用法国 KIMO 公司生产 AMI300 型多功能测量仪进行风速检测,使用变频器对风机进行调速,范围为 $0.1\sim 10\text{ m/s}$,使用电加热系统提供热源,电加热功率 50 kW 。

3.2 试验方案

运用 Fluent 软件进行 $L_9(3^4)$ 试验,对变温混合过程进行仿真模拟,对温度混合均匀后的边界距离进行统计分析与评价。模拟试验中开口度分别设置为 80%、60%、40%、20%,主管道温度设置为 45、50、55、65℃,入口处管道风速分别设置为 2.5、5、7.5、10 m/s。对导入模型的温度场进行分析,并查看混合效果。对混合边缘进行测量,混合距离作为冷热混配评价指标。验证试验采用近红外热像仪分析,使用分界痕迹标记线对混合后距离进行标记。为方便观测混合距离,在亚克力管道上打孔并用金属点标记,标记点间距为 200 mm。通过调节开口度、主管道温度和入口处管道风速,得到冷热气流的混合情况。

3.3 仿真控制方法

假设空气混合过程为理想混合状态,且入风口压力一致,冷热气体的混合看作是单位时间内经过变温混配装置的冷空气与热空气的截面风量之和。采用大涡模拟 (LES) 的方法,在 Fluent 进行模拟仿真,获得混合过程中流动情况。大尺度涡对于平均流动有较大影响,而小尺度的涡主要发挥耗散的作用。大涡湍流模型是对瞬时流体过滤,过滤出去则为小尺度的涡。大尺度涡流采用 N-S 方程进行求解,小尺度涡通过亚格子尺度模型求解。

3.4 试验结果与分析

运用 Fluent 软件对装置内冷热气流混合仿真模拟分析,试验结果如表 1 所示。

开口度对混合均匀距离的影响最大,入口处管道风速对混合均匀距离的影响次之。最优参数组合为 $A_1B_4C_2$,混合均匀距离最长边缘距离为 85.46 cm,最短为 26.85 cm,仿真极值如图 7 所示。在气流旋转驱动外壳导向叶片的作用下,冷热气流混合流向与管道轴向出现夹角偏移,能够在较短距离内实现均匀混合,且混合过程边缘线明显,但气流旋转现象不显著。

为验证混合实际情况与数值分析结果的准确性,选取表 1 各试验序号中的最优与最差组合进行近红外热成像验证。近红外热成像法能够根据表面的辐射温度体现气流流向,并且可直接反映温度混合情况,气流混合距离效果如图 8 所示。由近红外热像试验结果可知,在变温干燥混配装置的混合作用下,在装置的后方出现气流的旋转痕迹边界。同时为较为清晰体现气体混配效果,如图 8b 混合距离与 Fluent 仿真距离相比长 1.15 cm,如图 8a 混合距离与 Fluent 仿真距离相比短 3.46 cm。近红外热像检测的距离与仿真试验结果相比误差小于 4.2%。

表 1 试验结果
Tab.1 Test results

试验 序号	因素			混合均匀 距离/cm
	开口度 A/%	主管道温度 B/℃	入口处管道风速 C/(m·s ⁻¹)	
1	80	45	2.5	37.41
2	80	50	5	37.26
3	80	55	7.5	40.06
4	80	65	10	35.64
5	60	45	5	32.90
6	60	50	7.5	32.93
7	60	55	10	32.16
8	60	65	2.5	54.24
9	40	45	7.5	72.76
10	40	50	10	76.70
11	40	55	2.5	85.46
12	40	65	5	26.85
13	20	45	10	44.18
14	20	50	2.5	55.78
15	20	55	5	35.64
16	20	65	7.5	36.13
K_1	150.38	187.25	232.89	
K_2	152.23	202.66	132.65	
K_3	261.78	193.32	181.87	
K_4	171.71	152.85	188.67	
R	111.40	49.81	100.24	
最优值	A_1	B_4	C_2	

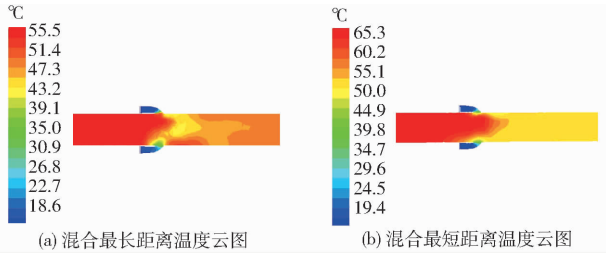


图 7 混合气流仿真图

Fig.7 Simulation diagrams of mixed air flow

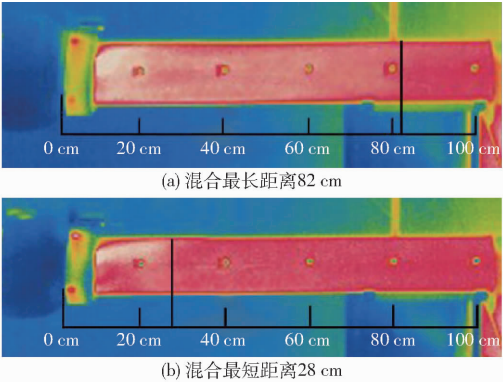


图 8 气流混合距离验证

Fig.8 Mixed distance verification

试验验证表明:冷热气流能在较短距离内实现混合完全,无分层流动现象且混合效果好,满足实际需求。

4 变温混配性能试验

4.1 温度控制稳定性分析

通过干燥机控制系统 MCGS 触摸屏设置干燥热风温度和目标温度,进行温度模拟输入动态实测。设置温度与目标温度差值小于 0.5℃,温度变化设置波动区间为 5℃,满足电机运动控制方程。根据电机性能可知,在调节变温干燥装置过程中,电机满程运动时间为 0.75 s,本机采用电加热装置提供热量,经换热器换热后热风温度较稳定。试验用温度传感器反应时间 5 s,远大于电机满程运动时间,因此可以通过设置热风温度、动态输入模拟温度与风速调节变频器,观测热风温度的波动。通过测量 5 s 后的温度变化差值,进行温控稳定性评价。

4.1.1 热风温度对温度偏差的影响

如图 9 所示,随着热风温度的增加,整体上温度偏差呈上升趋势,在较高温度时出现偏差较大,偏差过大与风机的控制频率及目标温度的差值相关。温度控制过程以温度偏差评判控制系统稳定性^[27]。温度控制过程以温度偏差小于 1℃为界判断控制系统的稳定性。通过试验测试表明,温度合格率为 84.6%,其中温度偏差最大值为 1.56℃,温度偏差最小值为 0.4℃,平均值为 0.96℃,标准误差 0.082℃。

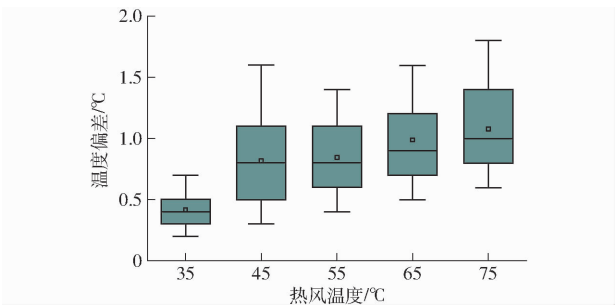


图 9 热风温度对温度偏差影响

Fig.9 Influence of heat wind temperature on temperature deviation

4.1.2 风机频率对温度偏差的影响

随着风机频率的增加,整体上温度偏差呈上升趋势,在高频率区间段温度偏差较大,如图 10 所示。由于风机频率过高,控制精度下降导致温度偏差上升。温度控制过程以温度偏差小于 1℃为界判断控制系统的稳定性,以风机频率为变量因子进行评判,其中温度偏差最大值为 1.8℃,温度偏差最小值为 0.2℃,平均值为 0.829℃,标准误差为 0.035℃。

综上分析热风温度、风机频率对温度偏差的影响可知,温度波动范围在 0.20 ~ 1.56℃。试验可知变温干燥混配装置的控制满程时间为 0.75 s,最大

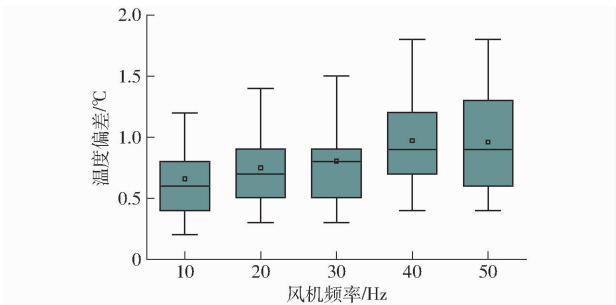


图 10 风机频率对温度偏差的影响

Fig.10 Influence of fan frequency on temperature deviation

变温温差的均值为 0.96℃,控制合格率达 84% 以上,满足设计要求。

4.2 变温干燥效果验证

为验证变温干燥混配装置的干燥效果,采用绥粳 12 为试验材料,对干燥机的运行情况进行分析。工作环境温度 16℃,热风变温幅度设定为 40 ~ 60℃,变频调节热风风速为 0.5 ~ 2 m/s,干燥机满载水稻 1 360 kg。重点测试变温控制过程对出机水稻含水率和干燥后品质的评价,采用的负压循环式干燥机及变温混配控制系统如图 11 所示。

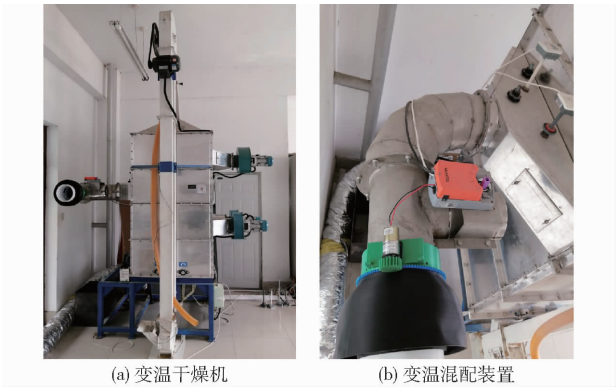


图 11 负压循环式干燥试验样机

Fig.11 Test prototype of negative pressure batch dryer

设置水稻出机含水率小于 14.5%,进行连续干燥运行试验,通过在线水分仪记录可得水稻入机和出机含水率变化,如图 12 所示。入机水稻含水率变化区间为 17.1% ~ 19.6%,水分不均匀性大。在变

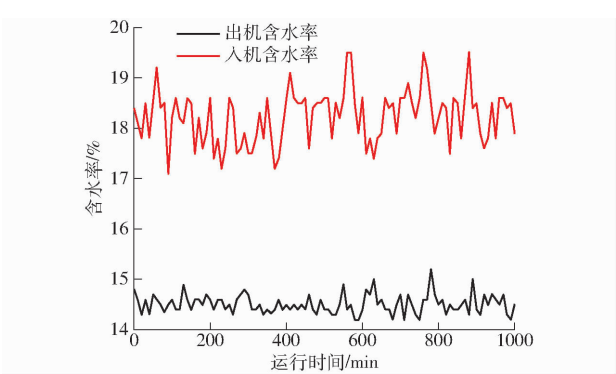


图 12 水稻入机和出机含水率变化曲线

Fig.12 Entering and exiting rice moisture chart

温调控的作用下,水稻籽粒均匀受热,出机水稻含水率的变化幅度较平缓,含水率标准误差均值为 0.035%,方差为 0.113%²,总体在合理控制区间内。应用佐竹大米食味计和外观品质检测仪测试,水稻食味值大于 82,糙碎率小于 3.4%,干燥不均匀性指数小于 0.5%。整机运行平稳可靠,满足生产要求。

5 结论

(1)结合水稻变温干燥工艺模型,基于冷热气流的相对穿透混合原理,设计了一种同轴侧入式壳形变温干燥混配装置,采用气流旋转驱动壳体内布置的导向叶片为径向配风通道,机电联动式齿盘精量调节阀门开度,实现高效气流均匀混合。

(2)基于神经网络预测与回归试验设计方法分析并建立了变温控制驱动齿轮盘的阀门控制模型和电机供电时间控制模型。应用 Fluent 软件进行仿真优化,确定了最优参数组合。采用红外热像仪进行验证,冷热气流能在较短距离内实现完全混合,无分层流动现象且混合效果好。获得最佳混配效果的距离为 26.85 cm。

(3)变温混配装置控制分析表明,变温控制系统在干燥控制过程中时滞较小,控制满程时间为 0.75 s,最大变温温差的均值为 0.96℃,控制合格率达 84% 以上。水稻出机含水率在合理范围内,干燥后水稻食味值大于 82,糙碎率小于 3.4%,综合评价满足生产要求。

参 考 文 献

- [1] 黄小丽,肖波,王振华,等. 过热蒸汽干燥稻米力学特性试验[J]. 农业机械学报,2014,45(2):199-203.
HUANG Xiaoli, XIAO Bo, WANG Zhenhua, et al. Mechanical characteristics of rice dried with superheated steam[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(2):199-203. (in Chinese)
- [2] 徐斌,董英,吴艳博,等. 麦胚多层多室流化床在线稳定化试验[J]. 农业机械学报,2010,41(1):127-131.
XU Bin, DONG Ying, WU Yanbo, et al. Technology and equipment of stabilized storage of wheat germ by on-line multistage fluidization drying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(1):127-131. (in Chinese)
- [3] 车刚,吴春升. 典型农产品干燥技术与智能化装备[M]. 北京:化学工业出版社,2017.
- [4] WU J, ZHANG H, LI F. A study on drying models and internal stresses of the rice kernel during infrared drying[J]. Drying Technology, 2017,35(6):680-688.
- [5] 吴中华,刘兵,王丹丹,等. 稻谷干燥缓苏特性与裂纹产生规律研究[J]. 农业机械学报,2018,49(5):368-374.
WU Zhonghua, LIU Bing, WANG Dandan, et al. Drying-tempering characteristics and fissuring law of paddy rice kernel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(5):368-374. (in Chinese)
- [6] 胡万里,李长友,徐凤英. 稻谷薄层快速干燥工艺的试验[J]. 农业机械学报,2007,38(4):103-106.
HU Wanli, LI Changyou, XU Fengying. Experiment on the rapid drying process of paddy thin layer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(4):103-106. (in Chinese)
- [7] LI Changyou. Analytical theory study on latent heat coefficient of grain water vaporization[J]. Drying Technology, 2021,39(6):803-819.
- [8] 徐凤英,黄木水,陈震,等. 稻谷烘干过程中的水分扩散特性与品质特性[J]. 农业工程学报,2016,32(15):261-267.
XU Fengying, HUANG Mushui, CHEN Zhen, et al. Moisture diffusion characteristics and quality characteristics of rice during drying[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(15):261-267. (in Chinese)
- [9] 王士军,毛志怀. 连续流粮食干燥控制系统变量分析与结构设计[J]. 农业机械学报,2009,40(5):115-118.
WANG Shijun, MAO Zhihui. Variable analysis and structural design on automatic control system of continuous flow grain drying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(5):115-118. (in Chinese)
- [10] 刘雪强,陈晓光,吴文福. 基于相似理论的谷物干燥过程经验模型[J]. 农业机械学报,2007,38(9):75-81.
LIU Xueqiang, CHEN Xiaoguang, WU Wenfu. Empirical model for grain drying process based on similarity theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(9):75-81. (in Chinese)
- [11] 吕豪,吕黄珍,王雷,等. 微波-热风振动流化床干燥机设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(6):344-351.
LÜ Hao, LÜ Huangzhen, WANG Lei, et al. Design and experiment of microwave-hot-airflow vibrating dryer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(6):344-351. (in Chinese)
- [12] ONDIER G O, SIEBENMORGEN T, MAUROMOUSTAKOS A. Drying characteristics and milling quality of rough rice dried in a single pass incorporating glass transition principles[J]. Drying Technology, 2012,30(16):1821-1830.
- [13] 李长友,麦智炜,方壮东,等. 种子循环干燥系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(6):242-248.
LI Changyou, MAI Zhiwei, FANG Zhuangdong, et al. Development of seed circulation drying system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(6):242-248. (in Chinese)
- [14] 郑先哲,刘辉,沈柳杨,等. 基于玻璃化转变的稻谷变温热风干燥工艺研究[J]. 农业机械学报,2020,51(1):331-340.
ZHENG Xianzhe, LIU Hui, SHEN Liuyang, et al. Hot-airdrying technology of changing temperature for paddy rice based on glass transition theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(1):331-340. (in Chinese)
- [15] 李长友,张烨,麦智炜. 高湿粮食贮藏干燥机设计与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(4):231-235.
LI Changyou, ZHANG Ye, MAI Zhiwei. Design and experiment of dryer for high moisture grain storage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(4):231-235. (in Chinese)