

多层盘式秧盘热风辅助微波干燥机优化设计与性能试验

于海明^{1,2} 祁联星¹ 胡玉辉¹ 郑芳^{2,3} 张子涵¹ 张欣悦⁴

(1. 东北农业大学电气与信息学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业农村部智慧养殖技术重点实验室, 武汉 430070;
3. 华中农业大学信息学院, 武汉 430070; 4. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319)

摘要: 针对现有水稻秸秆营养穴盘(简称秧盘)热风辅助微波干燥机静态干燥时存在气流场和电磁场分布不均匀、干燥效率低和干燥品质差等问题,设计了多层盘式热风辅助微波干燥机,并主要针对干燥机的微波谐振腔和气流均布室进行了优化设计。利用 ANSYS Electronics 软件对微波谐振腔馈口不同排列方式进行仿真,根据电磁场强度均匀性及 S 参数的影响,确定馈口的排列方式及高度;利用 ANSYS Fluent 软件对气流均布室的导流腔高度、气流均布腔高度及导流体底边直径进行优化;以秧盘为试验材料对该机性能和加热均匀性进行试验验证。结果表明,优化后气流均布室出口处气体流速的均匀性指数与优化前相比提高 21.26%;微波谐振腔三馈口 V-L-L 排列方式下电磁场强度均匀性最好且 S 参数最小;馈口高度为 160 mm 时反射功率最低,比馈口高度为 70 mm 时降低 78.13%;相较于热风干燥和微波干燥,秧盘在热风辅助微波干燥方式下干燥速率分别提高 291.31% 和 86.48%,且干燥均匀性更好。该研究可为热风辅助微波干燥机的结构优化提供参考。

关键词: 水稻秸秆营养穴盘; 热风辅助微波干燥机; 料盘; 结构优化

中图分类号: S226.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)11-0397-15 OSID: 

Optimization Design and Performance Test of Multi-layer Tray
Straw Tray Hot Air Assisted Microwave Drying Device

YU Haiming^{1,2} QI Lianxing¹ HU Yuhui¹ ZHENG Fang^{2,3} ZHANG Zihan¹ ZHANG Xinyue⁴

(1. College of Electrical and Information, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Key Laboratory of Smart Farming Technology for Agricultural Animals,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China
3. College of Informatics, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China
4. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: A multi-layer tray-type hot air-assisted microwave drying machine was designed to address the issues of non-uniform airflow and electromagnetic field distribution, low drying efficiency, and poor drying quality during static drying of existing straw-based nutrient seedling-growing bowl tray (referred to as seedling trays). The microwave resonant cavity and airflow distribution chamber of the drying machine were optimized. ANSYS Electronics software was used to simulate different arrangements of the microwave resonant cavity feed ports, based on the uniformity of electromagnetic field intensity and the influence of S-parameters, to determine the arrangement and height of the feed ports. ANSYS Fluent software was used to optimize the height of deflector chamber and height of airflow distribution chamber, as well as diameter of the bottom edge of deflector. The performance and heating uniformity of the machine were experimentally verified by using the seedling tray as the test material. The results showed that the uniformity index of gas velocity at the outlet of the optimized airflow distribution chamber was increased by 21.26% compared with that before optimization. The V-L-L arrangement of the three feed ports in the microwave resonant cavity had the best electromagnetic field intensity uniformity and the smallest S-parameters. The reflectivity was the lowest when the feed port height was 160 mm, decreasing by 78.13% compared with height of 70 mm. Compared with hot air drying and microwave drying, the drying rate of the seedling tray under hot air-assisted microwave drying was increased by 291.31% and 86.48%, respectively, and the drying uniformity was better. The research result can provide a reference for the structural optimization of hot air-assisted microwave drying machines.

Key words: straw-based nutrient seedling-growing bowl tray; microwave hot air-assisted dryer; reels; structural optimization

收稿日期: 2023-04-20 修回日期: 2023-05-15

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD06B01)、黑龙江省自然科学基金项目(C2015037)、人才留学归国科研启动计划项目(ZRCLG201902)和农业农村部智慧养殖技术重点实验室项目(KLSFTAA-KF002)

作者简介: 于海明(1973—),男,教授,博士,主要从事智能干燥装备与现代循环农业智能装备技术研究,E-mail: hmyu09@yeah.net

0 引言

水稻秸秆营养穴盘(简称水稻秧盘)^[1]是水稻秸秆营养穴盘育秧及全程机械化栽植技术体系(简称水稻机械化种植体系)的核心,其品质是决定该机械化种植体系能否推广与应用的决定性因素。经生产实践证明,水稻机械化种植体系不仅能解决水稻秸秆增值还田等关键问题,还能显著改善土壤环境、增加土壤中有机质含量,增强土壤肥力,提高水稻品质和产量^[2],解决过剩秸秆利用、水稻产量及品质提高的难题。在水稻秧盘生产中,干燥定型是水稻秧盘生产工艺的重要环节,是决定水稻秧盘品质的关键因素之一^[3],采用何种干燥技术及装备来确保水稻秧盘干燥定型品质是亟待解决的问题。目前水稻秧盘干燥方式主要包括自然干燥、热风干燥、蒸汽干燥^[4-5]和热风微波联合干燥^[6]等 4 种干燥方式。经试验研究,在综合考虑 4 种干燥方式对水稻秧盘品质影响及热风辅助微波干燥技术优点的基础上,确定热风辅助微波干燥技术为水稻秧盘干燥的主要技术。而研究合适的干燥设备是实现热风辅助微波干燥技术的关键。

近年来,热风辅助微波干燥技术广泛应用于水果^[7-8]和蔬菜^[9-12]等多种物料的干燥加工,但热风辅助微波干燥也存在着因温度过高导致物料内部出现焦糊的缺陷,需要对干燥工艺、干燥方法及干燥设备进一步改进优化。因此,国内外许多学者对热风辅助微波干燥装置进行了研究。文献[13]设计了一种热风微波耦合干燥系统,该系统具有物料滚筒,滚筒内安装有螺旋状导轨,工作时,物料在滚筒中呈螺旋状运动,使物料受热更加均匀。但该系统只能控制热风温度,无法控制微波加热温度,如果物料在同一微波功率下长时间连续干燥,其内部温度将急剧升高,从产生焦糊现象,影响干燥品质。另外,由于物料在滚筒内随着滚筒滚动,很容易造成物料损伤。文献[14]研究了热风微波混合干燥对酸樱桃干燥动力学、总酚、抗氧化能力、维生素 C、颜色及复水能力的影响,并与热风干燥进行了对比研究。但该研究所用的干燥设备是具有热风功能的家用微波炉,仅能控制热风温度(40~280℃)和设置微波干燥功率(最大微波功率 900 W),不能控制微波加热温度和风速,且风速(0.5 m/s)不能调节。因此,该干燥设备无法保证物料干燥品质,也不具有通用性。文献[15]开发了一个具有微波和热风干燥功能的集成干燥系统,用于实现对蘑菇快速干燥。但该干燥系统也是在家用微波炉的基础上通过加装热风干燥系统改装而成,虽然能实现热风温度控制及设置

不同的微波功率和热风速度,但仍然不能实现对微波加热温度控制。因此,也无法保证物料连续干燥的品质,同时也严重影响干燥效率。上述文献仅是利用热风 and 微波联合干燥技术及装备对水果和蔬菜干燥进行了研究,文献[16]虽然设计了一个微波热风联合干燥装置,实现了对水稻秧盘干燥,并且该装置除了能够实现微波热风耦合干燥外,还能单独实现微波干燥和热风干燥,但该装置仅能实现热风温度控制,不能对微波加热温度实现控制,且一次仅能干燥一块水稻秧盘,这不仅难以确保水稻秧盘的干燥品质,也影响干燥效率。

针对目前热风辅助微波干燥机存在的微波加热温度难以控制、连续干燥品质无法保证及生产率低等问题,特别是针对水稻秧盘干燥问题,本文设计一种基于干燥物料温度变化而控制加热温度的多层盘式热风辅助微波干燥机,并利用 ANSYS Electronics 软件和 ANSYS Fluent 软件对干燥机的微波谐振腔和气流均布室进行优化设计;同时以水稻秧盘为试验材料对该机的性能和加热均匀性进行试验验证。

1 材料与方法

1.1 整机结构

多层盘式水稻秧盘热风辅助微波干燥机结构简图如图 1 所示,主要由磁控管、电加热器、热循环风机、排湿风机、红外温度传感器、气流均布器、谐振腔、多层料盘支架和控制系统等组成,可以实现热风干燥、微波干燥和热风辅助微波干燥。干燥机工作时,空气在热循环风机作用下,经电加热器加热后通过上循环风管进入干燥室顶部的气流均布器,再通过谐振腔上壁的进风孔进入谐振腔内对物料进行干燥,热空气最终在热循环风机作用下由谐振腔下壁的出风口经下循环风管进入电加热器内重新加热后,再次通过气流均布器进入谐振腔,实现热风系统循环干燥;磁控管通过波导安装在谐振腔左、右两侧和后侧,其发出的微波能经波导通过谐振腔上的馈口进入谐振腔内对物料进行干燥;同时,控制系统根据设定参数与红外温度传感器反馈实时调节电加热器的温度和磁控管发出的功率,以达到确保干燥物料品质的目的。另外,为确保干燥品质及提高干燥速率,当干燥机进行微波干燥时,需同时打开排湿风机,及时排出谐振腔内的湿空气;当干燥机进行热风辅助微波干燥时,可根据需要通过控制系统自动打开排湿风机,去除谐振腔内的湿空气;排湿风机的启停时间可通过控制系统中的触摸屏来设置。干燥机主要结构参数如表 1 所示。

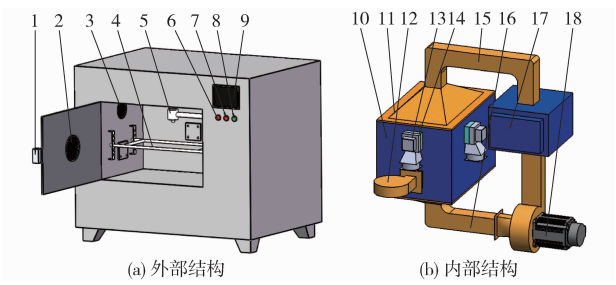


图 1 热风辅助微波干燥机结构示意图

Fig. 1 Schematics of hot air-assisted microwave dryer

1. 门把手 2. 观察视镜 3. 排湿孔 4. 多层料盘支架 5. 红外温度传感器 6. 急停按钮 7. 电源指示灯 8. 电源开关 9. 触摸屏 10. 谐振腔 11. 气流均布器 12. 排湿风机 13. 磁控管 14. 波导 15. 上循环风管 16. 下循环风管 17. 电加热器 18. 热循环风机

表 1 整机结构尺寸和主要性能参数

Tab. 1 Structure size and main performance parameters of whole machine

参数	数值
外形尺寸/(mm × mm × mm)	1 410 × 1 200 × 1 140
风速调节范围/(m · s ⁻¹)	10 ~ 30
温度调节范围/℃	0 ~ 100
微波功率调节范围/kW	0 ~ 3
料盘调节间距/mm	24

1.2 微波谐振腔仿真分析及优化

微波谐振腔是微波加热系统中常用的热转换器件和热存储器件,微波源通过馈口传输到谐振腔内的微波能,以最佳方式反射耦合后,在谐振腔内形成特定的电磁场分布,根据电磁场理论分析,谐振腔腔体的电磁场分布决定了微波加热的均匀性^[17]。引起谐振腔内电磁场均匀的因素很多,包括物料本身物理化学属性和谐振腔结构等^[18]。其中谐振腔结构(包括腔体结构型式、几何尺寸和馈口位置)对电磁场强度均匀性影响较大。因此需要对其结构进行优化设计,以进一步提高微波加热均匀性。

1.2.1 微波谐振腔结构设计

微波谐振腔分为多模谐振腔和单模谐振腔,根据多模谐振腔和单模谐振腔的特点^[19],同时考虑水稻秧盘(图 2)结构型式为矩形和干燥机整体结构,采用多模矩形谐振腔作为仿真研究对象,其结构如图 3 所示。确定微波谐振腔结构尺寸时,首先确定波长和期望的振荡模式,然后确定出谐振腔的尺寸,再由谐振腔尺寸去判定谐振腔中可能激励出的振荡模式,并修正,最后通过仿真来分析所确定的谐振腔结构尺寸是否合理。

按经典的微波理论,矩形谐振腔谐振波长和谐振频率分别为^[20]

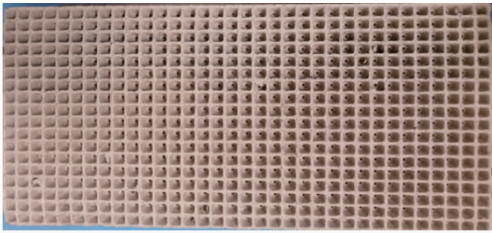


图 2 水稻秸秆营养穴盘

Fig. 2 Photograph of straw-based nutrient seedling-growing bowl tray

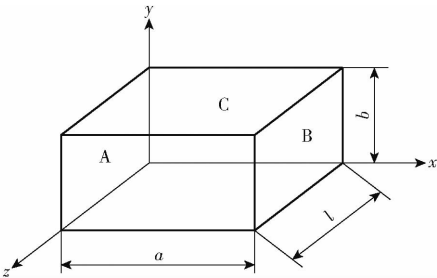


图 3 谐振腔示意图

Fig. 3 Schematic of resonant cavity

$$\lambda_{mnp} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{l}\right)^2}} \tag{1}$$

$$f_{mnp} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{l}\right)^2} \tag{2}$$

式中 c ——光速, m/s
 $a、b、l$ ——矩形谐振腔几何尺寸, mm
 $m、n、p$ ——沿 $a、b、l$ 边分布的驻波半波数目
矩形谐振腔仿真模型几何尺寸应同时满足^[21]

$$f_0 - \Delta f < \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{l}\right)^2} < f_0 + \Delta f \tag{3}$$

$$V > V_{\min} \tag{4}$$

式中 f_0 ——中心工作频率, 取 2 450 MHz
 Δf ——工作频率附近的频宽, 取 30 MHz
 V ——微波谐振腔体积, m³
 $V_{\min}$ ——微波谐振腔最小体积, m³

微波谐振腔最小体积 $V_{\min}$ 计算公式为^[5, 22]

$$V_{\min} = \frac{m_1 [4.183 M_1 (T_2 - T_1) + h (M_1 - M_2) + C_s (1 - M_1) (T_2 - T_1)]}{t \eta_1 \eta_2 k' \omega \varepsilon_0 \varepsilon_{eff}'' E_c^2} \tag{5}$$

式中 t ——蒸发干燥物料中水分所需要时间, s
 m_1 ——干燥物料初始总质量, kg
 M_1 ——物料初始含水率(湿基), %
 M_2 ——物料最终含水率(湿基), %
 T_1 ——干燥物料初始温度, ℃
 T_2 ——干燥物料最终温度, ℃

h ——水蒸气在温度 T_2 时的汽化潜热, kJ/kg
 C_s ——干燥物料中干物质比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
 η_1 ——磁控管加热效率, 取 80 %
 η_2 ——微波能量转换效率, 取 70 %
 k' ——安全系数
 ω ——微波场中的角频率, s^{-1}
 ε_0 ——真空介电系数, 取 $8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
 $\varepsilon''_{\text{eff}}$ ——介电损耗因子
 E_c ——击穿电场强度, 取 $3 \times 10^6 \text{ V/m}$

假设干燥机每小时干燥 3 盘总质量为 3 kg 的水稻秧盘, 水在 65°C 时比热容为 $4.183 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, $M_1 = 70\%$, $M_2 = 10\%$, $T_1 = 15^\circ\text{C}$, $T_2 = 65^\circ\text{C}$, $h = 2\,345.5 \text{ kJ/kg}$, $\eta_1 = 80\%$, $\eta_2 = 70\%$, $k' = 1$, $\varepsilon''_{\text{eff}}$ 取 0.5, $\omega = 2\pi f_0$, 查文献[4]可知, $C_s = 0.84 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。经计算, $V_{\min} = 3.81 \times 10^{-9} \text{ m}^3$ 。

在实际应用中, 谐振腔体过小会导致加热腔内的场强分布不均匀, 从而导致干燥物料出现受热不均匀现象, 所以一般取矩形加热腔三边尺寸都大于 3λ ($\lambda = 122.2 \text{ mm}$) [23]。综合以上因素, 同时考虑到秧盘尺寸 ($581 \text{ mm} \times 273 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$), 确定微波谐振腔仿真尺寸为 $700 \text{ mm} \times 450 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ 。对多模谐振腔, 在中心频率为 $2\,450 \text{ MHz}$ 时具有 5 个以上、间隔大致为 10 MHz 的模式频谱密度, 最终通过计算及比较可得矩形谐振腔谐振频率在 $2\,420 \sim 2\,480 \text{ MHz}$ 之间 [20]; 另外, 由谐振腔尺寸可得谐振腔体积 V_x 为 $0.141\,75 \text{ m}^3$, $V_x > V_{\min}$, 因此, 谐振腔尺寸满足设计要求。

1.2.2 馈口布置方案设计

由于单个磁控管加热能力有限, 对于几何尺寸较大的微波谐振腔, 一般需要多个磁控管协同工作, 才能满足干燥要求 [19]。但对于多磁控管加热情况, 若馈口数目和馈口位置设计不合理, 将使谐振腔内电磁场分布不均匀, 导致干燥机干燥效率低, 干燥质量差, 影响干燥机在水稻秧盘生产上的应用。对于标准矩形波导, 其横截面是 1:2 的矩形, 则馈口在谐振腔体侧壁面上布置时, 有两种基本型式, 如图 4 所示。将长边与谐振腔壁面长边平行的布置型式定义为 L 型, 长边与谐振腔壁面短边平行的布置型式定义为 V 型。仿真设计 2 种激励方式, 即双馈口激励方式和三馈口激励方式。为研究方便, 将谐振腔的左、右和后侧壁面分别定义为 A 面、B 面和 C 面, 如图 3 所示, 则馈口在谐振腔 A 面、B 面和 C 面上的布置方案如表 2 所示。根据谐振腔的尺寸, 确定微波馈口端使用 BJ-26 型波导, 内壁尺寸为 $86.36 \text{ mm} \times 43.18 \text{ mm}$, 则馈口的尺寸与波导内壁的尺寸相等。

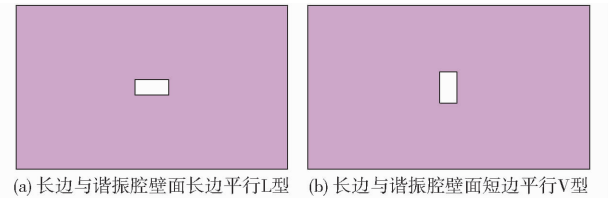


图 4 馈口的两种布置型式

Fig. 4 Two distribution modes of feed port

表 2 矩形谐振腔馈口布置方案
Tab. 2 Layout scheme of rectangular resonant cavity feed port

方案	双馈口激励方式			方案	三馈口激励方式		
	A 面	B 面	C 面		A 面	B 面	C 面
1	L	L		5	L	L	L
2	L	V		6	L	L	V
3	V	V		7	L	V	L
4	V	L		8	L	V	V
				9	V	V	L
				10	V	V	V
				11	V	L	V
				12	V	L	L

1.2.3 馈口高度优化

馈口高度是决定馈口与馈口间反射功率的重要因素, 合理的馈口高度是有效利用磁控管发出功率的重要保障。因此, 在确定馈口布置方案基础上, 以与秧盘尺寸相等的水负载为干燥介质, 以馈口高度为变量, 设置范围为 $70 \sim 160 \text{ mm}$, 仿真分析馈口与馈口间的反射功率和馈口高度之间的关系来优化馈口高度。

1.2.4 控制方程

(1) 根据电磁理论, 分析谐振腔内电磁变化的实质是求解给定条件下的 Maxwell 方程组, Maxwell 方程组为 [21]

$$\begin{cases} \nabla \boldsymbol{H}(\boldsymbol{r}, t) = \frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{D}(\boldsymbol{r}, t) + \boldsymbol{J}(\boldsymbol{r}, t) \\ \nabla \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}, t) = -\frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{B}(\boldsymbol{r}, t) \\ \nabla \boldsymbol{D}(\boldsymbol{r}, t) = \rho'(\boldsymbol{r}, t) \\ \nabla \boldsymbol{B}(\boldsymbol{r}, t) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\boldsymbol{H}$ ——磁场强度 $\boldsymbol{E}$ ——电场强度
 $\boldsymbol{J}$ ——电流密度 ρ' ——电荷密度
 $\boldsymbol{D}$ ——电位移矢量
 $\boldsymbol{B}$ ——磁感应强度

因电磁场存在于媒质中, 因此有满足媒质的宏观本构关系

$$\begin{cases} \boldsymbol{D} = \varepsilon' \boldsymbol{E} \\ \boldsymbol{B} = \mu' \boldsymbol{H} \\ \boldsymbol{J} = \sigma \boldsymbol{E} \end{cases} \quad (7)$$

式中 ε' ——介电常数

μ' ——磁导率 σ ——电导率

对式(6)中旋度方程 $\nabla \mathbf{H}(r,t) = \frac{\partial}{\partial t} D(r,t) +$

$J(r,t)$ 和 $\nabla \mathbf{E}(r,t) = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}(r,t)$ 再次取旋度,同时考

虑到矢量恒等式和方程中场与场的关系,以及场与源之间的关系,可以确定 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 的波动方程

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{E} + k_0^2 \mathbf{E} = 0 \\ \nabla^2 \mathbf{H} + k_0^2 \mathbf{H} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中 $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$

式中 k_0 ——自由空间波数

μ_0 ——自由空间磁导率, S/m

(2)对矩形谐振腔,如图 3 所示,在建立数学模型时,应假设谐振腔横截面积和媒质具有轴向均匀性;谐振腔材料为理想导体;研究谐振腔内电磁场分布时,仅研究激励源以外空间的电磁场分布,不考虑激励源,则矩形谐振腔在 TE 模式下的数学模型为^[21]

$$\begin{cases} E_x = \frac{2\omega\mu n\pi}{k_c^2 b} H_0 \cos \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{b} y \sin \frac{p\pi}{l} z \\ E_y = -\frac{2\omega\mu n\pi}{k_c^2 a} H_0 \sin \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{b} y \sin \frac{p\pi}{l} z \\ E_z = 0 \\ H_x = j \frac{2n\pi p\pi}{k_c^2 a l} H_0 \sin \frac{m\pi}{a} x \cos \frac{n\pi}{b} y \cos \frac{p\pi}{l} z \\ H_y = j \frac{2n\pi p\pi}{k_c^2 b l} H_0 \cos \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{b} y \cos \frac{p\pi}{l} z \\ H_z = -j2H_0 \cos \frac{m\pi}{a} x \cos \frac{n\pi}{b} y \cos \frac{p\pi}{l} z \end{cases} \quad (9)$$

式中 k_c ——TE 模式下的电导率

H_0 ——TE 模式下的磁场强度

j ——TE 模式下的电流密度

矩形谐振腔在 TM 模式下的数学模型与 TE 模式下的数学模型仅相差 90° 的相位差。

矩形谐振腔边界条件为: $\frac{\partial H_s}{\partial n} = 0, nE_s = 0, H_s, E_s$

分别为谐振腔磁场、电场强度。

(3)谐振腔内电磁场仿真计算主要用 ANSYS Electronics 软件中 HFSS 仿真模块,采用的算法是全波算法,其中,有限元算法(FEM)是全波算法中的一种,也是 HFSS 的核心算法,是电磁领域最成熟稳定的三维电磁场求解器,具有极好的结构适应性和材料适应性,尤其针对内部求解问题能够快速进行网格划分及矩阵求解^[24]。由 Maxwell 方程组中两个旋度方程 $\nabla \mathbf{H}(r,t) = \frac{\partial}{\partial t} D(r,t) + J(r,t)$ 和 $\nabla \mathbf{E}(r,$

$t) = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}(r,t)$ 及其本构关系可推导出矢量

Helmholtz 方程作为 FEM 的支配方程,公式为^[21,24-25]

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \cdot \mathbf{E} \right) - k_0^2 \varepsilon_r \mathbf{E} = 0 \quad (10)$$

式中 μ_r ——复相对导磁率

ε_r ——复相对介电常数

再根据变分原理,可得到无源区谐振腔域内支配方程所对应的电磁场有限元计算泛函数,即

$$F(\mathbf{E}) = \iiint_V \left\{ \frac{1}{\mu_r} \nabla \times \mathbf{E} \nabla \cdot \mathbf{E} - k_0^2 \varepsilon_r \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} \right\} dV \quad (11)$$

式中 V ——谐振腔体体积

1.2.5 边界条件

谐振腔采用软件默认的真空腔,介电常数为 1,电导率为 0,内部待加热介质的介电常数为 17。干燥机所选用的磁控管型号为 2M244,磁控管功率为 1 kW,设置微波频率为 2 450 MHz。谐振腔材质设置为不锈钢,相对介电常数为 1,电导率为 1.1×10^6 S/m^[18-19]。通过仿真计算谐振腔品质因数来分析验证所建的模型是否合理时,采用 HFSS 的本征模求解,谐振腔壁的边界条件设置为有限边界导体^[26];优化馈口布置方式及馈口高度时,采用 HFSS 的 Modal Driven 求解类型,设置整个谐振腔为边界条件^[19]。

1.2.6 评价指标

(1)品质因数

品质因数越高,谐振腔内电磁能输出效率越高,谐振腔加热效率也越高。因此,品质因数是衡量谐振腔质量的重要指标,计算公式为^[17,20]

$$Q_0 = \frac{2}{\delta} \frac{\int_V |\mathbf{H}|^2 dV}{\int_V |\mathbf{H}_t|^2 dV} \quad (12)$$

式中 δ ——内壁集肤效应系数, m

$\mathbf{H}_t$ ——不考虑损耗时内壁表面磁场强度

(2)S 参数

对于具有多馈口的谐振腔,S 参数用 S_{ef} ($e=1,2,\dots,f=1,2,\dots$) 来表示。当 e 和 f 相等时,表示反射系数,即回波损耗,表示有多少能量被反射回馈口;当 e 和 f 不相等时,表示馈口 e 和 f 的耦合系数,即插入损耗,表示有多少能量从馈口 e 传到馈口 f 。

(3)反射功率

在微波技术等领域中,反射功率是一个重要的参数,用于描述电磁波在传输线或天线中的损耗和反射情况,反射功率越低,表示越少的能量被反射回来,而越多的能量被传播或穿透到新的介质中。本

文主要用反射功率来优化馈口高度。

1.3 气流均布器结构设计及优化

1.3.1 气流均布器结构设计及网格划分

气流均布室结构示意图如图 5 所示。气流均布室设计为 3 种型式,由进风口、气流均布腔、一级气流分配板、二级气流分配板、导流腔和导流体组成。其中,图 5a 仅有气流均布腔;图 5b 具有气流均布腔、二级气流分配板、导流腔,没有一级气流分配板和导流体;图 5c 具有气流均布腔、一级气流分配板、二级气流分配板、导流腔和导流体。一级气流均布室进风口为 90 mm×90 mm,一级和二级气流分配板为 600 mm×350 mm。二级气流分配板上出风口孔径为 5 mm,采用矩阵(34 mm×20 mm)方式排列,上下中心距及左右中心距分别为 18 mm 和 17.4 mm;

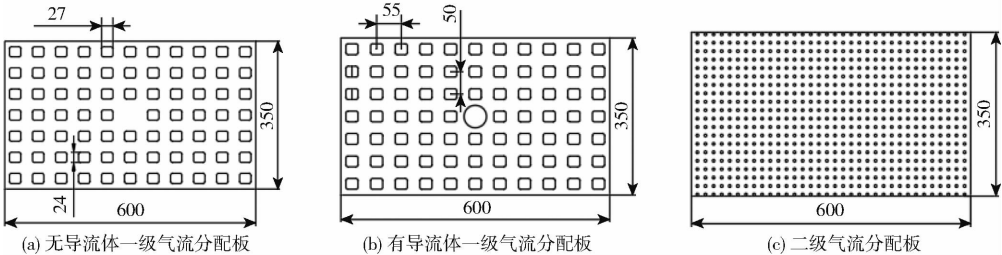


图 6 一级气流分配板和二级气流分配板

Fig. 6 The first and second air distribution plate

几何模型建立和网格划分在分析过程中起着关键性作用,气流均布器利用 Creo 6.0 建立三维模型,使用 ANSYS Meshing 进行网格划分,网格类型为四面体单元格式,采用非结构化网格划分方法,并对进出口等面进行局部加密以提高计算精度,网格进行光顺化处理后,Equivolume Skewness 小于 0.9,经独立性验证^[27],网格为 5×10⁶~6×10⁶ 个。

1.3.2 气流控制方程

考虑到模拟效率与精度平衡,假设气流均布室内的热气流为稳态粘性流体,气流均布室腔体密封性良好,腔体内气体流动为不可压缩流动,且湍流发展充分,不考虑用户自定义源项,近壁面区采用壁面函数法获取与壁面相邻的节点变量值,则利用 ANSYS Fluent 对多层盘式水稻秧盘热风辅助微波干燥机内部进行数值模拟时,控制方程选用具有较好鲁棒性、能适应较复杂流动特征的标准 $k-\varepsilon$ 模型,相应的物理方程如下^[27-30]:

连续性方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (i = 1, 2, 3) \tag{13}$$

动量守恒方程

$$\rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] - \frac{\partial p'}{\partial x_i} \quad (i, j = 1, 2, 3) \tag{14}$$

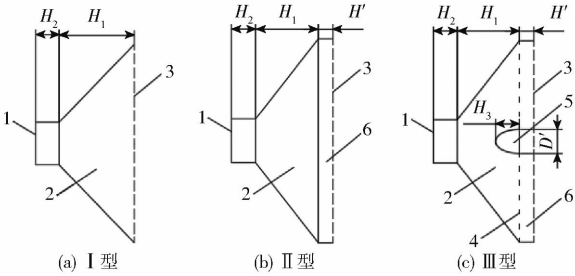


图 5 气流均布室模型简图

Fig. 5 Model sketches of airflow distribution chamber

1. 进风口 2. 气流均布腔 3. 二级气流分配板 4. 一级气流分配板 5. 导流体 6. 导流腔

一级气流分配板有两种形式,一种没有导流体,如图 6a 所示,一种有导流体,如图 6b 所示;二级气流分配板的形式如图 6c 所示。

式中 ρ ——流体密度, kg/m³
 u_i, u_j, u_k ——均速度分量, m/s
 p' ——流体时间均压, Pa
 μ ——流体动力黏度, Pa·s
 x_i, x_j ——各坐标分量

δ_{ij} 为函数, 当 $i = j$ 时, $\delta_{ij} = 1$, $i \neq j$ 时, $\delta_{ij} = 0$ 。

因为气流均布室具有弯曲壁面,气流在弯曲壁面内的流动,应用重整化群 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型仿真性能优于标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型^[27,29,31],因此本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对气流均布腔体进行模拟,湍流动能 k 方程和耗散率 ε 方程为

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \frac{u_{eff}}{\rho} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \frac{G_k}{\rho} - \varepsilon \tag{15}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\varepsilon \frac{u_{eff}}{\rho} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{16}$$

其中

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta}{1 + \beta \eta^3} \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right)$$
$$\eta = (2E_{ij}E_{ij})^{\frac{1}{2}} \frac{k}{\varepsilon} \quad E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$
$$u_{eff} = u_i + \mu \quad u_i = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

式中 E_{ij} ——时均应变率
 u_{eff} ——等效黏性系数

u_t ——湍动黏度

η ——无量纲常数

湍动能 k 与耗散率 ε 的湍流普朗特数分别为 $\alpha_k = 1.0, \alpha_\varepsilon = 1.3$; 模型常数 $C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.0845, \eta_0 = 4.377, \beta = 0.012$ 。 G_k 是由平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项, 公式为

$$G_k = u_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (17)$$

1.3.3 数值方法及边界条件

以空气作为模拟流体, 采用有限容积法对控制方程进行离散, 对流项采用二阶迎风格式, 扩散项采用二阶中心差分格式, 利用 SIMPLE 算法实现压力和速度之间耦合求解^[29], 残差精度设为 10^{-5} 。

选取边界条件时, 设进风端外端面为 inlet 边界, 出口外端为 outlet 边界, 其余壁面为 wall 边界条件, 根据设计工况设定进口速度为 20 m/s, 进、出口流体温度为 343 K (70℃), 空气密度为 1.029 kg/m³, 空气黏度为 2.06×10^{-5} Pa·s。根据公式

$$I = 0.16 (Re)^{1/8} \times 100\% \quad (18)$$

其中

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu}$$

式中 Re ——雷诺数

L ——特征长度, 对气流均布室入口, 取

0.09 m; 对气流均布室出口, 取 0.005 m

并结合进、出口水力直径^[27,31] (进口水力学直径为 90 mm, 出口水力学直径为 5 mm), 估算进口湍流强度 I 为 3.84%, 出口湍流强度 I 为 5.52%。

进口条件: 选取速度进口边界条件, 速度方向垂直 inlet 表面, 且分布均匀、无旋转^[28], 入口速度为 20 m/s, 湍流强度为 3.84%。

出口条件: 选取压力出口边界条件, 出口湍流强度为 5.52%。

壁面边界条件: 壁面 wall 采用无滑移边界条件, 壁面为刚性壁面, 不考虑壁面弹性的影响, 壁面函数类型为增强壁面函数^[29]。

1.3.4 仿真评价指标

为定量比较气流均布室出口风 outlet 面速度分布的均匀性, 选取速度偏差比 E' 、速度不均匀系数 M 作为不同类型气流均布室及验证气流均布室结构优化后出风口速度均匀性评价指标, 选取均匀性指数 γ_v 作为气流均布室结构优化试验评价指标。计算式为

$$E' = \frac{|\bar{V}_L - \bar{V}_a|}{\bar{V}_a} \times 100\% \quad (19)$$

$$M = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V}_a)^2}}{\bar{V}_a} \times 100\% \quad (20)$$

$$\gamma_v = \left(1 - \frac{|V_a - V_m|}{V_m} \right) \times 100\% \quad (21)$$

其中

$$V_a = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^N V_i |A_i| \quad (22)$$

$$V_m = \frac{\sum_{i=1}^N V_i \rho_i |V_i A_i|}{\sum_{i=1}^N \rho_i |V_i A_i|} \quad (23)$$

式中 $\bar{V}_L$ ——速度分布总体平均值, m/s

V_i ——各点空气流速, m/s

N ——outlet 面个数

V_a ——面积加权平均速度, m/s

V_m ——质量加权平均速度, m/s

A ——总表面积, m²

A_i ——第 i 个单元面上的面积, m²

ρ_i ——第 i 个单元面上的流体密度, kg/m³

E' 越小, 表示不同位置出风口间速度相差越小; M 越低, 说明各出风口间空气流速偏差越小, 气流场分布越均匀; γ_v 介于 0 ~ 1 之间, γ_v 越大, 表示气流流动更均匀^[27,31-32]。

1.3.5 气流均布室型式确定及响应面设计

根据干燥机的实际结构尺寸及仿真模型可对比性, 设图 5 中气流均布室尺寸分别为 $H' = 30$ mm, $H_1 = 130$ mm, $H_2 = 50$ mm, $H_3 = 50$ mm, $H_4 = 160$ mm, $D' = 50$ mm, 3 种型式气流均布室数值仿真结果如图 7 所示。由图 7 可以看出, 图 7c 出口处气流速度较图 7a、7b 出口处气流速度均匀, 主要是导流腔在导流体的配合下, 进一步将气流向均布器两端分配, 使二级气流分配板出口处气流更加均匀。另外, 3 种型式气流均布室的速度不均匀系数 M 仿真计算值如表 3 所示。由表 3 可知, III 型气流均布室结构下的速度不均匀系数最小, 说明出口处的气流更加均匀。因此确定图 7c 所示的气流均布器为干燥机的气流分配器。根据文献^[28]及进一步研究表明, 导流腔高度 H' 、气流均布腔高度 H_1 及导流体底边直径 D' 对二级气流分配板各出风口速度均匀性分布有很大影响, 因此选取导流腔高度 H' 、气流均布腔高度 H_1 及导流体底边直径 D' 为响应面试验的主要因素, 均匀性指数 γ_v 为响应值; 由于进风口尺寸为 90 mm × 90 mm, 为不影响正对导流体二级气流分配板出口速度均匀性, 导流体直径 D' 应不大于 90 mm, 因此选取导流体直径 D' 为 30 ~ 70 mm; 根据干燥机结构尺寸, H' 与 H_1 的尺寸之和不能超过 180 mm, 为保证一级气流分配板具有较充分的分流作用, 确定导流腔高度 H' 为 10 ~ 50 mm, 气流均布腔

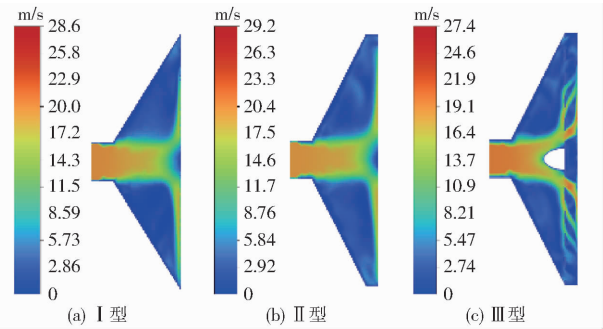


图 7 气流均布器仿真云图

Fig.7 Simulation cloud maps of three types of airflow distribution chamber

表 3 气流均布器流场均匀性评价指标比较

Tab.3 Comparison of flow field uniformity evaluation index of three types of airflow distribution chamber		
谐振腔型式	速度不均匀系数 M	均匀性指数 γ_V
I 型	87.34	70.41
II 型	89.89	71.47
III 型	62.49	85.13

H_1 为 90 ~ 130 mm。响应面试验编码如表 4 所示,响应面设计试验和试验结果如表 5 所示,表中 X_1 、 X_2 、 X_3 分别为导流腔高度、气流均布腔高度、导流体底边直径编码值。

表 4 试验因素编码

Tab.4 Coding of experimental factors			
编码	因素		
	导流腔高度	气流均布腔高度	导流体底边直径
-2	10	90	30
-1	20	100	40
0	30	110	50
1	40	120	60
2	50	130	70

1.4 性能试验

1.4.1 试验材料

本文选择水稻秧盘为试验原料对热风辅助微波干燥机进行性能验证试验,水稻秧盘由黑龙江省水稻生态育秧装置及全程机械化工程技术研究中心生产,水稻秧盘的尺寸为 581 mm × 273 mm × 16 mm,如图 2 所示。

1.4.2 试验设备及仪器

本试验所用的设备包括秧盘热风辅助微波干燥机,TL- YPCX-01 型气力式水稻秸秆营养秧盘成型机(湖南双环纤维成型设备有限公司),ZG-TP203 型电子天平(上海电子然浩有限公司),高精度电子数显游标卡尺(无锡凯保鼎工具有限公司),三相四线有功电能表(上海华廉仪器仪表有限公

表 5 仿真试验设计及响应值

Tab.5 Experimental design and response value of simulation test				
序号	因素			$\gamma_V/\%$
	X_1	X_2	X_3	
1	-1	-1	-1	82.5379
2	1	-1	-1	85.8654
3	-1	1	-1	82.5428
4	1	1	-1	86.7295
5	-1	-1	1	82.5460
6	1	-1	1	85.2301
7	-1	1	1	82.7649
8	1	1	1	86.4024
9	-2	0	0	79.5686
10	2	0	0	86.4928
11	0	-2	0	84.2745
12	0	2	0	85.3750
13	0	0	-2	85.3733
14	0	0	2	84.6630
15	0	0	0	85.1598
16	0	0	0	85.0069
17	0	0	0	85.0205
18	0	0	0	85.0205
19	0	0	0	84.9811
20	0	0	0	85.0205
21	0	0	0	85.0205
22	0	0	0	85.0205
23	0	0	0	85.0205

司),Fotric 287 型红外热像仪(科努德科技有限公司)。

1.4.3 研究方法

(1)水稻秧盘干燥方法

水稻秧盘干燥方法主要有热风干燥、微波干燥和热风辅助微波干燥。根据前期预试验,设计以下干燥条件:热风干燥条件为热风温度 65℃、风速 20 m/s;微波干燥条件为微波功率 1 400 W、加热温度为 65℃;热风辅助微波干燥条件为热风温度 65℃、风速 20 m/s、微波功率 1 400 W。水稻秧盘干燥前,先将热风干燥系统运行 10 ~ 20 min 进行预热,然后将处理好的秧盘置于塑料托盘上,放入谐振腔内,进行 3 种不同方式的干燥,在干燥初始阶段,每隔 600 s 对秧盘称量一次质量;在干燥后期阶段,根据不同情况,每隔 60 s 对秧盘称量一次并观察秧盘表面颜色,当秧盘含水率达到 10% 左右(湿基)时,干燥结束。每个试验做 3 次,由于称量过程在几秒钟内完成,因此对干燥过程没有大的影响^[33]。

(2)干燥均匀性检测

干燥均匀性是评价干燥机性能重要指标之一,为评价干燥机优化后的谐振腔和气流均布室对秧盘

干燥品质均匀性的影响,采用热风干燥、微波干燥和热风辅助微波干燥 3 种方法对其进行干燥,利用红外热像仪获得 3 种干燥方式下秧盘的热像图并对其均匀性进行分析。

(3) 生产力检验

干燥机生产力计算公式为

$$P_c = \frac{60(m_1 - m_2)}{t_1} \quad (24)$$

式中 t_1 ——干燥时间, min

P_c ——干燥机生产力, kg/h

m_1 ——干燥前物料质量, kg

m_2 ——干燥后物料质量, kg

(4) 单位能耗测定方法

干燥机单位能耗计算公式为

$$Q_1 = \frac{Q_2 - Q_3}{m_1 - m_2} \quad (25)$$

式中 Q_1 ——单位能耗, kW·h/kg

Q_2 ——干燥后电能表显示值, kW·h

Q_3 ——干燥前电能表显示值, kW·h

(5) 翘曲度测量方法

将水稻秧盘放置于水平基准面上,用足够的力压住其 3 个角,使其与水平基准面接触。由于扭翘,水稻秧盘第 4 个角悬空,用高精度电子数显游标卡尺测出翘起角到水平基准面的垂直距离。与上述测法类似,更换与水平基准面接触的 3 个角,依次测出其它翘起角到水平基准面的垂直距离,取 4 个距离中最大值为水稻秧盘的翘曲度^[34]。

(6) 干燥速率

干燥速率是指干燥过程中,单位时间减少的干基含水率,其计算公式为^[35-37]

$$D_R = \frac{D_{t1} - D_{t2}}{t_2 - t_1} \quad (26)$$

$$D_t = \frac{m_t - m_d}{m_d} \times 100\% \quad (27)$$

式中 D_t —— t 时刻物料干基含水率, %

D_R ——干燥速率, %/min

m_t —— t 时刻物料质量, g

m_d ——物料干物质质量, g

D_{t2} —— t_2 时刻干基含水率, %

D_{t1} —— t_1 时刻干基含水率, %

2 结果与分析

2.1 谐振腔仿真分析

对结构尺寸为 700 mm × 450 mm × 450 mm 的微波谐振腔,采用 HFSS 的本征模进行仿真求解,可得微波谐振腔的品质因数为 988,根据文献[20,38],

可进一步验证微波谐振腔的结构尺寸满足设计的要求。但利用 HFSS 的本征模对微波谐振腔进行仿真求解时,没有考虑激励及馈口对谐振腔内电场分布的影响,而实际工作时,激励及馈口对谐振腔内电场强度均匀性分布影响很大^[18]。由图 8 也可以看出,此时谐振腔内的电场强度中间较强,上下部分强度低,与实际应用时谐振腔内电场分布有很大差别。因此,需要考虑激励及馈口高度和安装形式来进一步仿真分析谐振腔内电场分布的均匀性,并确定馈口的安装形式及高度。

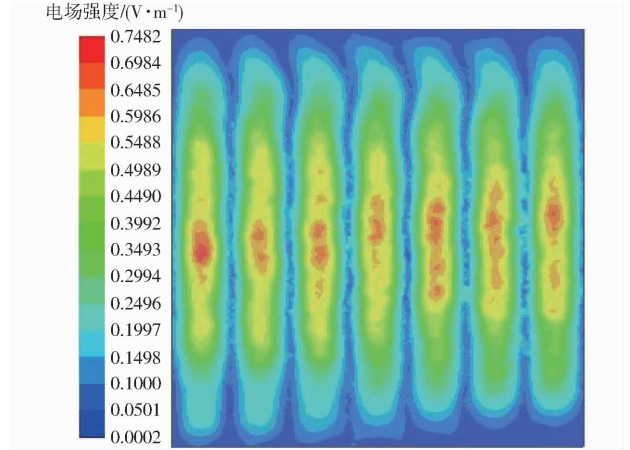


图 8 电场分布图

Fig. 8 Electric field distribution diagram

2.2 谐振腔仿真优化

2.2.1 谐振腔馈口安装方式确定

对表 2 中谐振腔馈口布置方案进行仿真分析,12 种方案下的电场分布如图 9 所示。由图 9 可知,方案 1 ~ 12 中腔体中间面的电场强度中间值为 1.667×10^3 、 6.003×10^3 、 6.828×10^3 、 6.408×10^3 、 2.85×10^3 、 1.05×10^4 、 1.115×10^4 、 8.886×10^3 、 1.136×10^4 、 7.203×10^3 、 9.058×10^3 、 8.515×10^3 V/m;方案 1、方案 5、方案 6、方案 7 和方案 10 中电场分布不均匀,电场强度差异比较大;方案 2、方案 3、方案 4、方案 8、方案 9、方案 11 和方案 12 分布较均匀,具有一定的参考价值。与双馈口激励相比,三馈口激励方式下电场强度更大,所以,在综合考虑电场强度及电场均匀性基础上,选择方案 8、方案 9、方案 11 和方案 12 作为研究对象,在 2.35 ~ 2.55 GHz 范围内进行扫频,得到这 4 个方案的 S 曲线,如图 10 所示。由图 10a 可知, S_{11} 、 S_{21} 、 S_{31} 、 S_{32} 、 S_{33} 的最小值分别为 0、-84、-87、-42、-16 dB;由图 10b 可知, S_{11} 、 S_{21} 、 S_{31} 、 S_{32} 、 S_{33} 的最小值分别为 -26、-43、-76、-70、0 dB;由图 10c 可知, S_{11} 、 S_{21} 、 S_{31} 、 S_{32} 、 S_{33} 的最小值分别为 -11、-89、-52、-75、-11 dB;由图 10d 可知, S_{11} 、 S_{21} 、 S_{31} 、 S_{32} 、 S_{33} 的最小值分别为 -2、-95、

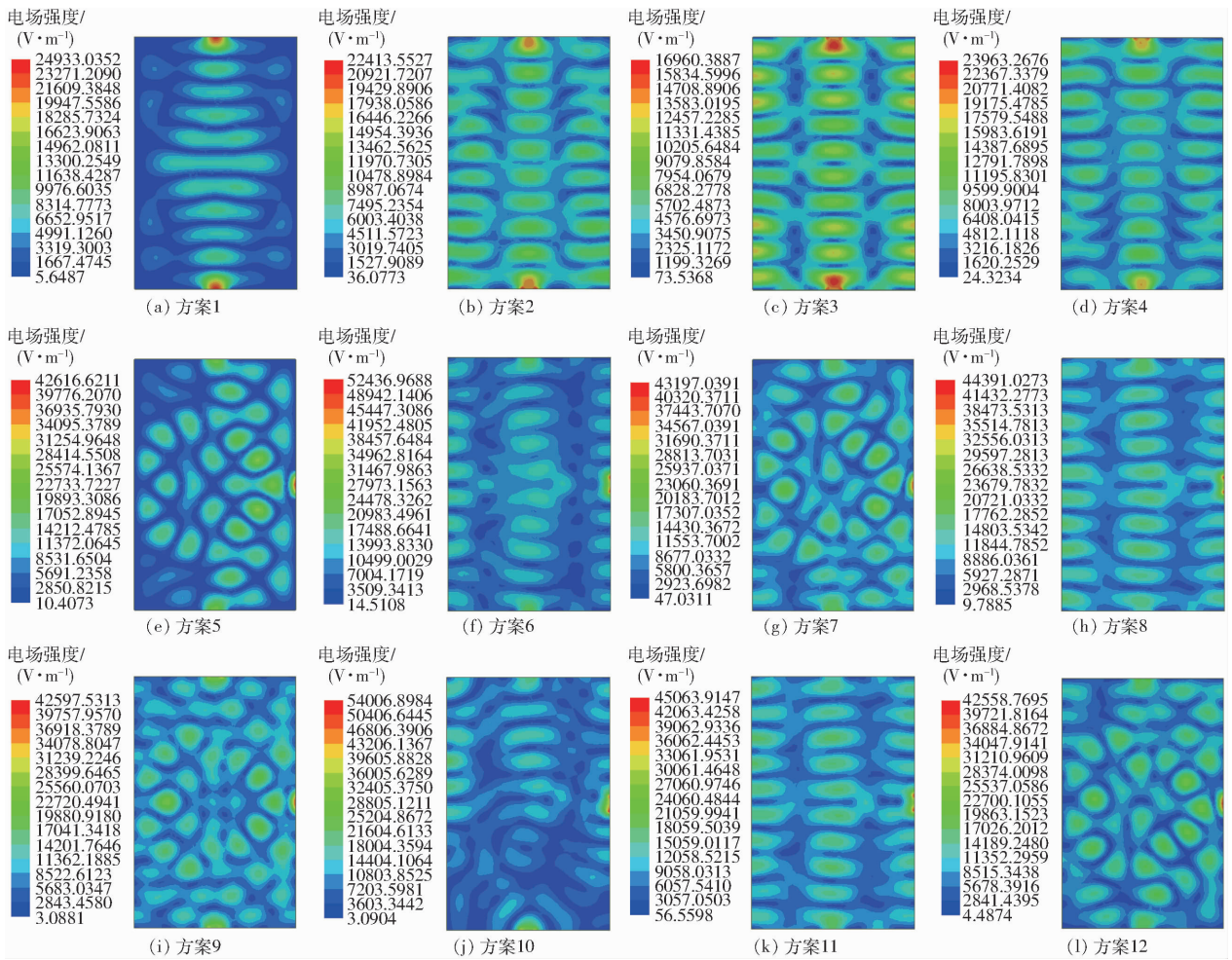


图 9 不同激励方式下的电场分布

Fig. 9 Electric field distribution under different excitation modes

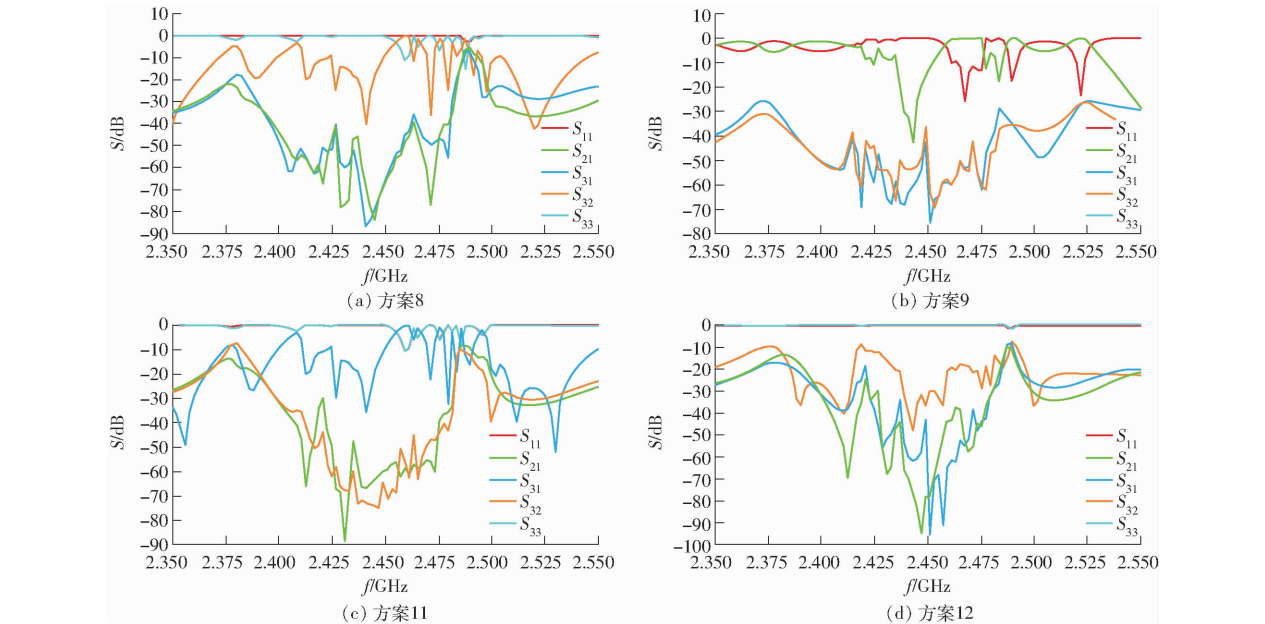


图 10 不同方案下的 S 参数

Fig. 10 S-parameters in four schemes

-96、-48、-2 dB。由图 10 可知,方案 12 中 S_{21} 、 S_{31} 、 S_{32} 的值比方案 8、方案 9 和方案 11 中的值相对较小,表明当 3 个馈口的排列方式为 V-L-L 型时,从一个馈口发出的电磁波比从另外两个馈口流出的较少,即方案 12 中的耦合功率与其他 3 种方案相比较小;方案 12 中 S_{11} 和 S_{33} 的变化幅度非

常小,几乎趋于 0 dB,但依旧小于 0 dB,这是由于空腔仿真时,馈口发射的电磁波经腔体反射大部分能量又被自身所吸收,表明当 3 个馈口的排列方式为 V-L-L 型时,电磁波损耗少且馈口间的耦合相对较小。综上分析,采用方案 12 可以使馈口间的耦合(S_{21} 、 S_{31} 、 S_{32})大大减小^[19]。因此,通过分析电场分布图与 S 参数可知,方案 12 具有一定的合理性,谐振腔馈口安装方式采用方案 12。

2.2.2 谐振腔馈口高度优化

反射功率随馈口高度的变化曲线如图 11 所示, P_{21} 、 P_{31} 和 P_{32} 的值几乎等于 0 W,说明馈口间的耦合功率很小,随着馈口高度的变化,馈口及馈口间的反射功率会有一定的波动,在 160 mm 附近反射功率较低,比馈口高度为 70 mm 时降低了 78.13%,所以馈口高度最优值为 160 mm。

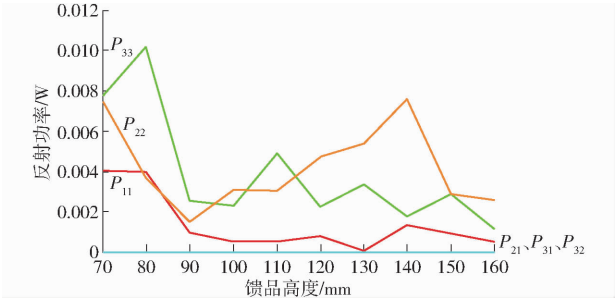


图 11 反射功率随馈口高度变化曲线

Fig. 11 Reflected power varied with height of feeder

2.3 气流均布室关键参数响应面优化结果

对试验数据进行回归分析,选择最优模型,然后进行逐步回归分析,得到最终模型。多元决定系数 R^2 越大,说明相关性好;由表 6 可知,调整 R^2 及预测 R^2 的值较大,且二者的差值均在 0.2 以内,即回归模型能充分说明工艺过程;精密度大于 4 视为合理;变异系数小于 10%,表明试验的可信度和精确度高,回归方程的适应性较好。

表 6 响应变量方差分析

Tab. 6 Analysis of variance of response variables

响应变量	R^2	R^2_{adj}	R^2_{pre}	精密度	变异系数/%
均匀性指数	0.997 4	0.995 6	0.981 7	104.469	0.13

对试验数据进行多元回归拟合,得到均匀性指数 γ_v 的二次多项式回归模型

$$\begin{aligned} \gamma_v = & 85.01 + 1.73X_1 + 0.28X_2 - 0.13X_3 + \\ & 0.23X_1X_2 - 0.15X_1X_3 + 0.065X_2X_3 - 0.52X_1^2 - \\ & 0.067X_2^2 - 0.019X_3^2 \end{aligned} \tag{28}$$

并对试验结果进行方差分析,结果如表 7 所示。

由表 7 可知,均匀性指数的回归方程模型显著 ($P < 0.01$);回归模型的一次项 X_1 、 X_2 、 X_3 和二次项

表 7 响应面试验方差分析

Tab. 7 Response surface test ANOVA

类型	平方和	自由度	均方	F	P
模型	57.59	9	6.4	558.17	<0.000 1
X_1	47.9	1	47.9	4178.11	<0.000 1
X_2	1.24	1	1.24	108.5	<0.000 1
X_3	0.29	1	0.29	25.27	0.000 2
X_1X_2	0.41	1	0.41	35.82	<0.000 1
X_1X_3	0.18	1	0.18	15.51	0.001 7
X_2X_3	0.034	1	0.034	2.97	0.108 3
X_1^2	7.48	1	7.48	652.39	<0.000 1
X_2^2	0.13	1	0.13	11.12	0.005 4
X_3^2	0.01	1	0.01	0.88	0.364 1
残差	0.15	13	0.011		
失拟项	0.13	5	0.026	10.14	0.002 6
纯误差	0.02	8	2.539×10^{-3}		

X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 影响显著 ($P < 0.01$),二次项 X_2X_3 和 X_3^2 影响不显著 ($P > 0.05$);各因素对均匀性指数的影响顺序通过 F 值可知, X_1 对均匀性指数影响最大,这是因为随着 H' 的增大,气流均布室导流腔高度 H' 的纵截面面积增大,气流在一级气流分配板和二级气流分配板之间形成了面积相同的多个涡流组,使得该区域的涡流能够及时与周围气流发生交换,这在一定程度上对出风口速度的均匀性产生积极的影响^[28];该模型决定系数 R^2 为 0.997 4、调整决定系数 R^2_{adj} 为 0.995 6,表明各模型可以揭示 99% 以上响应值变化,模型具有较高的可靠性。

通过响应面图坡度的陡缓可以判断该因素对响应值的影响,响应面如图 12 所示。由图 12 可以看出, H' 与 H_1 的交互作用显著; H' 与 D 的交互作用显著,由图 12a 可知,当 H_1 位于较高水平,且 H' 处于低水平时,随着 H' 的增加均匀性指数增长较快;当 H' 位于较高水平时,均匀性指数随着 H_1 的增大而减小。由图 12b 可知,当 H' 位于低水平时, D' 对均匀性指数的影响较小;当 H' 位于高水平时,均匀性指数随着 D' 的增大反而减小;当 D' 位于低水平时,随着 H' 的增大均匀性指数增长较快。

通过软件对各参数优化求解,得到矩形排列的各因素最优参数为 $H' = 39.9$ mm, $H_1 = 119.9$ mm, $D' = 41.1$ mm,均匀性指数预测值为 86.829 8%。调整后结构参数和调整前结构参数如表 8 所示。

利用优化方案中的参数重新进行仿真试验,得到优化方案条件下均匀性指数为 86.659 5%,和预测值 86.829 8% 相差 0.2%,说明仿真试验结果可信度高,原试验方案下的均匀性指数为 71.466 2%,优化方案条件下的均匀性指数和原方案条件下的均匀

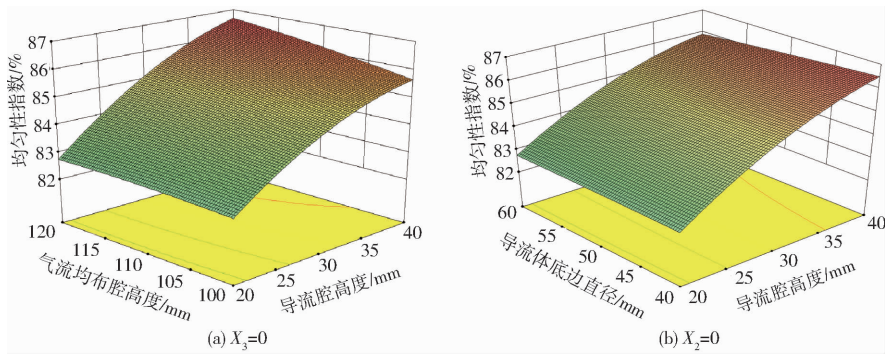


图 12 响应面图

Fig. 12 Response polygons

表 8 结构优化参数前后对比

Tab. 8 Comparison of structural parameters before and after optimization				mm
设计方案	导流腔高度 H'	气流均布腔高度 H_1	导流体底面直径 D'	
原方案	30	110	50	
优化方案	40	120	41	

性指数相比提高 21.26%，说明优化后的结构参数更好。

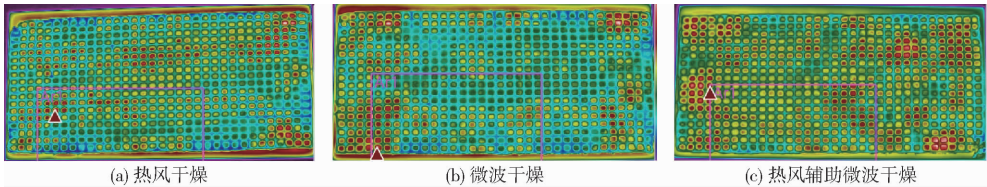


图 13 秧盘在不同干燥方式下的热像图

Fig. 13 Thermal images of straw-based nutrient seedling-growing bowl tray by three different drying methods

辅助微波干燥的均匀性更好，原因可能是秧盘对电磁波的吸收均匀性与秧盘在电磁场中的位置相关^[39]，加入热风干燥可以带动秧盘吸收不同位置的微波能，从而改善干燥的均匀性。

2.4.2 不同干燥方式下的生产力、平均能耗、翘曲度和干燥速率

不同干燥方式下秧盘湿基含水率达到 10% 左右时生产力、单位能耗、翘曲度和干燥速率如表 9 所示。热风干燥、微波干燥、热风辅助微波干燥的生产力分别为 0.105、0.678、0.679 kg/h，与热风干燥相比，热风辅助微波干燥的生产力提高 545.71%，生产力远高于热风干燥，但是与微波干燥的生产力相近，提高了 0.15%，这是因为微波干燥是从物料内部进行加热，干燥速率更快，生产力更高；热风干燥、微波干燥、热风辅助微波干燥的单位能耗分别为 8.23、1.992、2.694 kW·h/kg，相比于热风干燥，微波干燥和热风辅助微波干燥分别降低 75.71% 和 67.27%，这是由于热风干燥时间长，所以平均能耗最高，热风辅助微波干燥比微波干燥的平均能耗高是因为在微波干燥的基础上，增加了热

2.4 秧盘干燥性能

2.4.1 不同干燥方式下干燥均匀性

图 13 是秧盘在不同干燥方式下的热像图，由图 13a 可知，热风干燥的均匀性较好，但秧盘的平均温度偏低，这是因为热风干燥是从秧盘外部加热，带走秧盘表面的水蒸气，所以温度偏低；由图 13b 和图 13c 可知，微波干燥和热风辅助微波干燥的平均温度较高，这是因为微波干燥是从秧盘内部加热，所以平均温度更高；与微波干燥和热风干燥相比，热风

表 9 不同干燥方式下性能对比

Tab. 9 Performance comparison by three drying methods			
参数	热风干燥	微波干燥	热风辅助微波干燥
生产力/(kg·h ⁻¹)	0.105	0.678	0.679
单位能耗/(kW·h·kg ⁻¹)	8.230	1.992	2.694
翘曲度/cm	3.000	2.092	1.875
干燥速率/(%·min ⁻¹)	96.821	203.172	378.870

风干燥系统，所以平均能耗更高；热风干燥、微波干燥、热风辅助微波干燥的翘曲度分别为 3、2.092、1.875 cm，相比于热风干燥和微波干燥，热风辅助微波干燥分别降低 37.5% 和 10.37%，主要是因为热风辅助微波干燥时，秧盘表面温度比热风干燥和微波干燥秧盘表面温度分布更均匀（见图 13），使秧盘各个部分水分蒸发的速率趋于一致，所以翘曲度更小，干燥品质更高；热风干燥、微波干燥、热风辅助微波干燥干燥速率分别为 96.821、203.172、378.87%/min，相比于热风干燥和微波干燥，热风辅助微波干燥的干燥速率分别提高 291.31% 和 86.48%，说明热风辅助微波干燥方式下干燥速率更

快,干燥效率更高。

3 结论

(1)设计了适合秧盘干燥的多层盘式热风辅助微波干燥机,并运用 ANSYS Electronics 软件和 ANSYS Fluent 软件对微波谐振腔和气流均布室结构进行仿真分析,结果表明,微波谐振腔中三馈口 V-V-L 型排列方式下耦合系数和反馈系数最小,电场分布均匀性更好,馈口高度为 160 mm 时反射功率最低,比馈口高度为 70 mm 时降低 78.13%,说明有更多微波能被干燥介质吸收,提高了微波能的利用率;通过对气流均布室结构仿真分析,确定气流

均布室导流腔高度为 40 mm、气流均布腔高度为 120 mm、导流体底边直径为 41 mm 时,在此结构条件下气流均布室出口处均匀性指数为 86.659 5%,原方案条件下的均匀性指数提高 21.26%,说明优化结构后的气流均布室出口处的速度分布更均匀。

(2)与微波干燥和热风干燥相比,热风辅助微波干燥的均匀性更好;相比于热风干燥,微波干燥和热风辅助微波干燥的单位能耗分别降低 75.71% 和 67.27%;相比于热风干燥和微波干燥,热风辅助微波干燥的生产力分别提高 546.67% 和 0.15%、翘曲度分别降低 37.5% 和 10.37%、干燥速率分别提高 291.31% 和 86.48%。

参 考 文 献

- [1] 于海明,李海源,张欣悦,等. 水稻秸秆营养穴盘微波热风耦合干燥动力学模型研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 339-348.
YU Haiming, LI Haiyuan, ZHANG Xinyue, et al. Drying kinetic model of microwave coupled with hot air drying of straw-based nutrient seedling-growing bowl tray[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 339-348. (in Chinese)
- [2] 于海明,李海源,汪春,等. 秧盘干燥机气流分配室流场均匀性仿真分析[J]. 农机化研究, 2020, 42(2): 15-21.
YU Haiming, LI Haiyuan, WANG Chun, et al. Simulation analysis of flow field uniformity in air distribution room of rice seedbed microwave hot air coupling dryer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(2): 15-21. (in Chinese)
- [3] 张欣悦,汪春,李连豪,等. 水稻植质钵育秧盘制备工艺及参数优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 153-162.
ZHANG Xinyue, WANG Chun, LI Lianhao, et al. Preparation technology and parameters optimization for seedling-growing bowl tray made of paddy straw[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(5): 153-162. (in Chinese)
- [4] 于海明,汪春,韩智学,等. 水稻植质钵育秧盘蒸汽干燥工艺优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 40-49.
YU Haiming, WANG Chun, HAN Zhixue, et al. Optimization of steam drying conditions for seedling-growing tray made of paddy-straw[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(21): 40-49. (in Chinese)
- [5] 于海明,汪春,谢秋菊,等. 水稻植质钵育秧盘蒸汽干燥装置研制及性能试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 25-33.
YU Haiming, WANG Chun, XIE Qiuju, et al. Development and performance experiment of steam drying device of seedling-growing tray made of paddy-straw[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(1): 25-33. (in Chinese)
- [6] 李海源. 水稻秸秆营养穴盘微波热风联合干燥工艺研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2019.
LI Haiyuan. Study on microwave hot air combined drying process of rice straw nutrient acupuncture tray[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [7] HASSAN M A S, BARBARA S, ABOZAR N. Effects of hot-air and hybrid hot air-microwave drying on drying kinetics and textural quality of nectarine slices[J]. Heat and Mass Transfer, 2018, 54(4): 915-927.
- [8] TALENS C, CASTRO-GIRALDEZ M, FITO P J. A thermodynamic model for hot air microwave drying of orange peel[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 175: 33-42.
- [9] 周韵,宋春芳,崔政伟. 热风微波耦合干燥胡萝卜片工艺[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 382-386.
ZHOU Yun, SONG Chunfang, CUI Zhengwei. Coupled hot air and microwave drying technology for carrot slices dehydration[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 382-386. (in Chinese)
- [10] DAS I, ARORA A. Alternate microwave and convective hot air application for rapid mushroom drying[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 223: 208-219.
- [11] 戈永慧,张慧,彭菁,等. 热蒸汽烫漂联合热风微波耦合干燥香菇的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2020, 41(13): 59-64, 71.
GE Yonghui, ZHANG Hui, PENG Jing, et al. Optimization of the technology of hot steam blanching coupled with hot air-microwave combined drying process of shiitakes[J]. Food Industry Technology, 2020, 41(13): 59-64, 71. (in Chinese)
- [12] 吕豪,吕黄珍,杨炳南,等. 苦瓜微波-热风振动床干燥湿热特性与表现形态研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 373-381.
LÜ Hao, LÜ Huangzhen, YANG Bingnan, et al. Moisture and heat characteristics and apparent form of balsampears in microwave-hot-airflow vibrating bed drying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 373-381. (in Chinese)
- [13] 宋瑞凯,张付杰,杨薇,等. 热风微波耦合干燥系统的设计与试验[J]. 包装与食品机械, 2019, 37(1): 50-56.
SONG Ruikai, ZHANG Fujie, YANG Wei, et al. Design and test of microwave coupled drying system for hot air[J].

- Packaging & Food Machinery, 2019, 37(1): 50–56. (in Chinese)
- [14] HORUZ E, BOZKURT H, KARATAŞ H, et al. Effects of hybrid (microwave-convectional) and convectional drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries[J]. Food Chemistry, 2017, 230:295–305.
- [15] WANG Y, LI X, CHEN X, et al. Effects of hot air and microwave-assisted drying on drying kinetics, physicochemical properties, and energy consumption of chrysanthemum[J]. Chemical Engineering and Processing—Process Intensification, 2018, 129:84–94.
- [16] LI Haiyuan, HU Yuhui, QI Lianxing, et al. Simulation optimization and experimental study of the air distribution chamber structure of straw-based nutrient seeding-growing bowl tray microwave – hot-air coupling dryers[J]. Engenharia Agrícola, 2022,42; e20210226.
- [17] 丁旭. 基于 HFSS 新型微波谐振腔设计与优化[J]. 真空电子技术, 2020(1): 75–78,91.
DING Xu. Design and optimization of a new microwave cavity based on HFSS[J]. Vacuum Electronics, 2020(1):75–78, 91. (in Chinese)
- [18] 邢文龙, 曹有福, 张小燕, 等. 用于微波干燥的矩形和圆柱形谐振腔仿真分析[J]. 包装与食品机械, 2022, 40(4): 50–54.
XING Wenlong, CAO Youfu, ZHANG Xiaoyan, et al. Simulation analysis of rectangular and cylindrical resonators for microwave drying[J]. Packaging & Food Machinery, 2022,40(4):50–54. (in Chinese)
- [19] 徐浩, 祝守新, 王学俊, 等. 微波热解炭化炉谐振腔的设计与仿真[J]. 大连工业大学学报, 2018, 37(3): 229–234.
XU Hao, ZHU Shouxin, WANG Xuejun, et al. Simulation and design of resonator cavity for microwave pyrolysis carbonization furnace[J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2018,37(3):229–234. (in Chinese)
- [20] 代建武, 杨升霖, XIE Yuceng, 等. 旋转托盘式微波真空干燥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 370–376.
DAI Jianwu, YANG Shenglin, XIE Yuceng, et al. Design and experiments of rotating tray microwave vacuum dryer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(5):370–376. (in Chinese)
- [21] 陈家权, 廖子凤, 穆星宇. 箱形多模式微波加热器谐振腔的设计及电磁场分布研究[J]. 机械设计与制造, 2009(10): 21–23.
CHEN Jiaquan, LIAO Zisu, MU Xingyu. Box shape multi-pattern microwave heater resonant cavity design and distribution of electromagnetic fields[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2009(10):21–23. (in Chinese)
- [22] 于海明. 山楂微波热风耦合干燥数学模型研究及干燥设备设计[D]. 长春:吉林大学, 2015.
YU Haiming. Study on drying mathematical model of hawthorn using microwave coupled with hot air and drying machine design [D]. Changchun:Jilin University, 2015. (in Chinese)
- [23] 王东东. 大功率真空微波杀青设备结构设计及电磁仿真分析[D]. 贵阳:贵州大学, 2016.
WANG Dongdong. Structural design and electromagnetic simulation analysis of high-power vacuum microwave finishing equipment[D]. Guiyang:Guizhou University, 2016. (in Chinese)
- [24] 王晓雪. 单端口通风微波谐振腔设计与实验研究[D]. 新乡:河南师范大学, 2021.
WANG Xiaoxue. Design and experimental study of single port ventilated microwave resonant cavity [D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2021. (in Chinese)
- [25] 许杰田, 张猛, 李杰, 等. 基于矢量有限元法的微波谐振腔高频特性研究[J]. 电子科技, 2010, 23(10): 59–61.
XU Jietian, ZHANG Meng, LI Jie, et al. High-frequency characteristics of resonance cavity based on the vector finite element method[J]. Electronic Technology, 2010,23(10):59–61. (in Chinese)
- [26] 邓智仁. 微波谐振腔的数值分析及其品质因数的研究[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2015, 25(1): 43–46.
DENG Zhiren. Numerical analysis of microwave resonator and its quality factor[J]. Journal of Luoyang Institute of Technology (Natural Science Edition), 2015, 25(1): 43–46. (in Chinese)
- [27] 胡坤. ANSYS CFD 入门指南:计算流体力学基础及应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2018.
- [28] 吴敏, 段豪, 王振文, 等. 基于温湿度控制的红外热风联合干燥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 483–492.
WU Min, DUAN Hao, WANG Zhenwen, et al. Design and experiment of infrared-hot air combined dryer based on temperature and humidity control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(Supp. 1):483–492. (in Chinese)
- [29] 黎耀军, 王福军. 双方程湍流模型在高雷诺数水翼绕流模拟中应用[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 45–48,52.
LI Yaojun, WANG Fujun. Assessment of two-equation turbulence modeling for hydrofoil flows at high reynolds number[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(12):45–48,52. (in Chinese)
- [30] 姜大龙, 吴敏, 王善钰, 等. 红外联合热风干燥装置设计与性能验证[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 411–420.
JIANG Dalong, WU Min, WANG Shanyu, et al. Design and performance verification of infrared combined hot air drying device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 411–420. (in Chinese)
- [31] 代建武, 肖红伟, 白峻文, 等. 气体射流冲击干燥机气流分配室流场模拟与结构优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 69–76,295.
DAI Jianwu, XIAO Hongwei, BAI Junwen, et al. Numerical simulation and optimum design on airflow distribution chamber of air-impingement jet dryer[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 69–76,295. (in Chinese)
- [32] 陶红歌, 陈焕新, 谢军龙, 等. 基于面积加权平均速度和质量加权平均速度的流体流动均匀性指标探讨[J]. 化工学报, 2010, 61(增刊2): 116–120.

TAO Hongge, CHEN Huanxin, XIE Junlong, et al. Flow uniformity index based on area-weighted and mass-weighted average velocity[J]. CIESC Journal, 2010, 61 (Supp. 2) :116 – 120. (in Chinese)

[33] KANG Y X, FU W W, QIU Z Y, et al. Thin-layer drying characteristics and modeling of Chinese jujubes[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2012, 2012:386214 .

[34] 陈林涛, 马旭, 李泽华, 等. 水稻秧盘形变测度方法与等级评价研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6) : 159 – 166. CHEN Lintao, MA Xu, LI Zehua, et al. Deformation measurement technology and grade evaluation of rice seedling trays[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6) :159 – 166. (in Chinese)

[35] 吴孟秋, 雷登文, 朱广飞, 等. 基于动网格的白萝卜热风干燥热质传递研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 2) : 293 – 302. WU Mengqiu, LEI Dengwen, ZHU Guangfei, et al. Hot-air drying heat and mass transfer of white radish based on moving mesh[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2) : 293 – 302. (in Chinese)

[36] 孙庆运, 张宗超, 贾振超, 等. 玉米果穗深床层热风干燥特性试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 2) : 285 – 292, 337. SUN Qingyun, ZHANG Zongchao, JIA Zhenchao, et al. Hot air drying characteristics in deep bed of corn ear [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2) : 285 – 292, 337. (in Chinese)

[37] 王瑞芳, 王竞成, 赵东海, 等. 香蕉低压过热蒸汽-真空组合干燥研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3) : 392 – 399. WANG Ruifang, WANG Jingcheng, ZHAO Donghai, et al. Drying of banana using combined low-pressure superheated steam and vacuum drying [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53 (3) : 392 – 399. (in Chinese)

[38] 宿佃斌, 曾诗雨, 吕为乔, 等. 微波红外振动床协同干燥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8) : 423 – 434. SU Dianbin, ZENG Shiyu, LÜ Weiqiao, et al. Design and experiment of microwave infrared vibrating-bed dryer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8) : 423 – 434. (in Chinese)

[39] 郎旭敏, 徐亚元, 肖亚冬, 等. 不同组合干燥方式对胡萝卜脆片品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(2) : 493 – 502. LANG Xumin, XU Yayuan, XIAO Yadong, et al. Effects of different combined drying methods on the quality of carrot chips [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2021, 37(2) : 493 – 502. (in Chinese)

(上接第 396 页)

[30] 李佳利, 陈宇, 钱建平, 等. 融合 HACCP 体系的农产品区块链追溯系统精准上链机制改进[J]. 农业工程学报, 2022, 38(20) :276 – 285. LI Jiali, CHEN Yu, QIAN Jianping, et al. Improvement of the precise up-chain mechanism of the agricultural products blockchain traceability system integrating the HACCP system[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(20) : 276 – 285. (in Chinese)

[31] 袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. 自动化学报, 2016, 42(4) : 481 – 494. YUAN Yong, WANG Feiyue. Blockchain: the state of the art and future trends[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(4) : 481 – 494. (in Chinese)

[32] 邵奇峰, 金澈清, 张召, 等. 区块链技术: 架构及进展[J]. 计算机学报, 2018, 41(5) : 969 – 988. SHAO Qifeng, JIN Cheqing, ZHANG Zhao, et al. Blockchain: architecture and research progress[J]. Chinese Journal of Computers, 2018, 41(5) : 969 – 988. (in Chinese)

[33] 祝烈煌, 高峰, 沈蒙, 等. 区块链隐私保护研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(10) : 2170 – 2186. ZHU Liehuang, GAO Feng, SHEN Meng, et al. Survey on privacy preserving techniques for blockchain technology [J]. Journal of Computer Research and Development, 2017, 54(10) : 2170 – 2186. (in Chinese)

[34] 孙传恒, 于华竟, 罗娜, 等. 基于智能合约的果蔬区块链溯源数据存储方法研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8) : 361 – 370. SUN Chuanheng, YU Huajing, LUO Na, et al. Blockchain traceability data storage method of fruit and vegetable foods supply chain based on smart contract [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8) : 361 – 370. (in Chinese)

[35] 邢斌, 于华竟, 徐大明, 等. 基于区块链的红茶质量安全追溯系统开发及应用[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(11) :133 – 138. XING Bin, YU Huajing, XU Daming, et al. Development and application of traceability system for black tea based on blockchain[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(11) : 133 – 138. (in Chinese)

[36] 孟悦, 周耿, 李煜甫. 一种基于 ECC 算法的安全认证方法[J]. 电脑知识与技术(学术版), 2021, 17(3) : 75 – 76. MENG Yue, ZHOU Geng, LI Yufu. Security authentication method based on ECC algorithm[J]. Computer Knowledge and Technology, 2021, 17(3) : 75 – 76. (in Chinese)

[37] YANG L. The blockchain: state-of-the-art and research challenges[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2019, 15: 80 – 90.

[38] JI S X, PAN S R, CAMBRIA E, et al. A survey on knowledge graphs: representation, acquisition, and applications[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021, 32(2) :494 – 514.