

# 微波干燥浆果过程中料层电场分布影响能量利用分析

王 磊, 沈柳杨, 刘成海, 刘 钊, 郑先哲\*

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘 要:** 浆果微波干燥时, 果浆料层内部的电场随着温度升高和水分下降产生复杂、多变分布, 直接影响微波能量的利用和干燥均匀性。为了解析树莓果浆微波干燥过程中的料层内电场分布影响微波能量利用的规律, 通过对连续式微波干燥机设置 4 种输入功率 (12、15、18、21 kW), 从而控制干燥腔顶部磁控管开启模式, 根据开启磁控管的数量和位置的变化进而解析果浆料层上的电场分布及变化规律; 建立料层上电磁、质热传递的耦合模型确定果浆料层内的微波能吸收分布, 结合料层内温度和水分的变化特性, 探明微波干燥腔内的微波传递和能量利用效率规律。结果表明, 不同功率下模拟和实测温度的均方根误差值分别为 5.8、4.1、6.7、6.9 °C, 证明用所建立模型表征果浆物料层内的电场强度和微波能吸收分布具有较高的可信度。微波腔内开启磁控管的位置和数量决定横电场或横磁场的平面波, 而平面波的入射角决定微波能转化热能能力。矩形磁控管波导开启模式为平行排列, 且在长边方向上中心点间距为 1/4 微波波长的奇数倍时, 高低电场的交错分布提高了整个料层的电场均匀性。高均匀分布的电场强度提高了微波能的吸收和转化效率, 并改善干燥后物料的温度均匀性。研究结果可为提高连续式微波干燥机的能量利用效率和干燥均匀性提供理论依据。

**关键词:** 微波; 干燥; 浆果; 电场分布; 均匀性; 能量利用; 模拟

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.04.001

中图分类号: TS210.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-04-0001-10

王磊, 沈柳杨, 刘成海, 等. 微波干燥浆果过程中料层电场分布影响能量利用分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4): 1-10. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.04.001 http://www.tcsae.org

Wang Lei, Shen Liuyang, Liu Chenghai, et al. Effect of electric field distribution on energy use efficiency for berry puree under microwave drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(4): 1-10. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.04.001 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

浆果富含花青素、维生素等多种生物活性成分, 具有高的营养价值和保健功效<sup>[1-2]</sup>。但采后新鲜浆果含水率高、保鲜期短, 干燥是其收获后的主要处理方式之一, 将其含水率降至 15% 以下, 既能避免微生物引起霉变<sup>[3]</sup>, 又可干制加工出果干、脆片等风味食品<sup>[4-5]</sup>。微波干燥具有加热效率高、过程易控等优点, 广泛应用于食品、农产品的干燥加工<sup>[6-7]</sup>。对于黏度高 (持水性强)、富含热敏性成分的浆果果浆, 采用微波泡沫方法进行干燥, 可提高干燥速率和保护活性成分<sup>[8]</sup>。此外, 引入微波通风组合干燥工艺, 具有改善浆果微波干燥均匀性等优点。然而, 在连续式微波干燥时, 微波腔内的能量传递和干燥过程复杂多变, 导致能量利用率低、物料干燥均匀性差等问题, 制约了微波加热技术的工业化推广和应用<sup>[9-10]</sup>。

对于多馈口输入的连续式微波干燥机, 微波腔内空载时, 电场分布可视为单馈口输入的微波按 Maxwell 方程传播规律的叠加; 而在有载时, 因物料吸收、反射微波能改变其传递途径和强度, 且物料介电特性和热特性等指标随着干燥

过程而变化, 这些情况使微波腔内电场分布变化复杂。微波干燥机波导口平行的馈口间存在损耗和反射, 降低微波能利用率<sup>[11]</sup>。微波干燥机内多磁控管的开启方式影响物料加热温度, 决定加热效率<sup>[12-13]</sup>。磁控管激发产生的微波在干燥腔内传播和反射, 只有部分微波能量被物料耗散转化成内能, 引起物料温度升高、水分蒸发<sup>[14]</sup>。微波干燥时, 输入功率和物料厚度对能量利用效率有显著影响<sup>[15-16]</sup>。而通过改善微波干燥均匀性的方式可以提高能量的利用效率<sup>[17]</sup>。在连续式微波干燥机内, 料层上电场强度和分布的变化规律是决定微波干燥机能量效率的本质因素<sup>[18]</sup>。从微波与物料作用机理的角度, 阐明电场强度特性对微波能量的吸收和转化效率的影响规律, 可为优化微波干燥机功率输入模式提供理论依据, 从而提高能量利用效率和干燥均匀性。

本文以典型的特色浆果树莓为研究对象, 采用计算机模拟和台架试验相结合的方法, 应用多物理场模拟软件 COMSOL, 建立微波干燥过程中电磁波传递与吸收、物料传热与传质的数学模型, 表征浆果料层内的电场强度和微波能吸收的分布, 解析浆果连续式微波干燥特性; 通过比较微波干燥机不同磁控管开启模式下料层内电场强度的分布特征, 结合浆果物料的温度和水分变化特性, 阐明微波干燥过程中电场强度分布对能量的吸收和转化效率的影响规律, 以期浆果的连续式工业化生产提供参考。

## 1 材料与方法

本文中各公式的符号及其含义如表 1 所示。

收稿日期: 2021-01-08 修订日期: 2021-02-01

基金项目: 国家自然科学基金 (32072352)

作者简介: 王磊, 博士生, 研究方向为农产品加工。

Email: 531965265@qq.com

\*通信作者: 郑先哲, 教授, 博士生导师, 研究方向为农产品加工与贮藏。

Email: zhengxz@neau.edu.cn

表 1 公式符号表  
Table 1 List of symbols

| 符号<br>Symbol | 符号意义及单位<br>Symbolic meaning and unit   | 符号<br>Symbol       | 符号意义及单位<br>Symbolic meaning and unit                           |
|--------------|--|--------------------|--|
| $E$          | 电场强度, $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$   | $H$                | 磁场强度, $\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$                             |
| $\mu_r$      | 相对磁导率, $\text{N}\cdot\text{A}^{-2}$  | $J$                | 电流密度, $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$                             |
| $\epsilon'$  | $\epsilon'=47.29+5.1M-1.45T+0.57MT+0.56M^2-2.64T^2$ ( $T$ 、 $M$ 分别为果浆温度和湿基含水率) | $\epsilon''$       | $\epsilon''=9.13+1.11M-0.49$                                   |
| $\nabla$     | 旋度算符   | $j$                | 虚部单位, $j=(-1)^{0.5}$   |
| $\epsilon_r$ | 相对介电常数, $\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$   | $E_x, E_y, E_z$    | 电场强度在 $x, y, z$ 方向上的分量, $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$           |
| $m, n$       | 电波在 $x, y$ 方向上的半个波长数目  | $\beta x, \beta y$ | 相位角 $\beta$ 在 $x, y$ 方向上的分量, $\text{rad}$                      |
| $B_{mn}$     | 与 $m, n$ 相关的振幅常数   | $\beta$            | 相位角, $\text{rad}$  |
| $\theta_i$   | 微波在料层上的入射角, $\text{rad}$   | $\lambda_0$        | 真空中微波波长, $0.1224\text{ m}$                                     |
| $a, b$       | 料层沿 $x, y$ 方向的实际几何尺寸, $\text{m}$   | $Q_e$              | 单位体积的微波能吸收, $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$                       |
| $f$          | 微波频率, $2.45\text{ GHz}$  | $\epsilon_0$       | 真空介电常数, $8.854\times 10^{-12}\text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$      |
| $\rho$       | 果浆的密度, $1\ 100\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$                                    | $C_p$              | 果浆的比热容, $3\ 800\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ |
| $K$          | 果浆的导热系数, $0.6\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$                    | $m_{ev}$           | 水的蒸发质量, $\text{kg}$  |
| $\gamma$     | 摩尔蒸发潜热, $39\ 000\text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}$                                 | $h_t$              | 对流传热系数, $20\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$      |
| $A$          | 表面积, $\text{m}^2$  | $c$                | 水分浓度, $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$                           |
| $D$          | 果浆内的水分扩散速率, $10^{-9}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$                             | $R$                | 摩尔产量, $\text{mol}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$         |
| $T$          | 果浆温度, $^{\circ}\text{C}$   | $T_0$              | 环境温度, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$                             |
| $\mu_0$      | 真空中磁导率, $4\pi\times 10^{-7}\text{ N}\cdot\text{A}^{-2}$                        | $E_s$              | 指定边界上源表面电流的源电场, $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$                   |
| $k_c$        | 蒸发速率, $0.001\cdot\exp(3\ 600/T)\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$                    | $c_b$              | 空气中水分浓度, $1\ 831.3\text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$               |
| $MC_{w.b.}$  | 果浆含水率, 湿基, %   | $m_p$              | 果浆质量, $\text{kg}$  |
| $M$          | 同 $MC_{w.b.}$  | $RMSE_T$           | 温度均方根误差, $^{\circ}\text{C}$                                    |
| $m_d$        | 果浆内干物质质量, $\text{kg}$  | $T_{sim}$          | 模拟温度, $^{\circ}\text{C}$                                       |
| $n$          | 取样点个数, 5   | $RMSE_M$           | 含水率均方根误差, %  |
| $T_{exp}$    | 试验温度, $^{\circ}\text{C}$   | $M_{exp}$          | 试验含水率, 湿基, %   |
| $M_{sim}$    | 模拟含水率, 湿基, %   | $\bar{E}$          | 平均电场强度, $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$                           |
| $O$          | 电场强度功率比, $\text{V}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$                       | $P_a$              | 体微波能吸收, $\text{W}$   |
| $P$          | 微波功率, $\text{kW}$  | $P_e$              | 果浆物料吸收的有效能, $\text{W}$   |
| $G$          | 微波能吸收功率比, %  | $t$                | 干燥时间, $\text{min}$   |
| $\eta_1$     | 微波能吸收效率, %   | $\eta$             | 总的能量效率, %  |
| $\eta_2$     | 微波能转化效率, %   | $N_E$              | 电场强度取点个数   |
| $COV_E$      | 电场均匀性  | $COV_T$            | 温度均匀性  |
| $E_i$        | 不同点的电场强度, $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$   | $T_i$              | 不同点的电场强度, $^{\circ}\text{C}$                                   |
| $N_T$        | 温度取点个数   | $\lambda_g$        | 矩形波导内微波波长, $\text{m}$  |
| $\omega$     | 角频率, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$  | $x, y, z$          | 电磁波在 $x, y, z$ 方向上的空间位置, $\text{m}$                            |
| $L_a$        | 矩形波导长边边长, $\text{m}$   |                    |  |

注: 表中列出了公式 (1) - (28) 的符号及其意义, 并确定了部分参数数值<sup>[19-20]</sup>。  
Note: This table contains the symbols and their meaning in Equations (1) - (28), and some parameters are determined<sup>[19-20]</sup>.

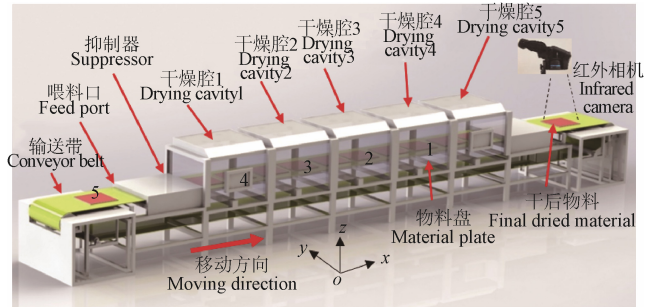
### 1.1 试验样品

新鲜浆果树莓采自东北农业大学园艺实验站。将气流冲刷干净的新鲜树莓放入搅拌机, 以  $360\text{ r/min}$  的转速搅拌  $2\text{ min}$ , 得到质地均匀的树莓果浆; 为提高干燥后品质, 向其中添加起泡剂<sup>[9]</sup>制成起泡果浆 (以下简称为果

浆), 果浆初始湿基含水率为  $90.18\%$ 。

### 1.2 连续式微波干燥机

如图 1a 所示, 试验用连续式微波干燥机由南京三乐微波有限公司生产, 型号为 WXD21S。干燥机顶部安装有 21 个磁控管, 每个磁控管的额定功率为  $1\text{ kW}$ , 可通过电源开关独立控制开启, 微波频率  $2.45\text{ GHz}$ 。简化后的模型几何尺寸和磁控管排布, 如图 1b 所示。

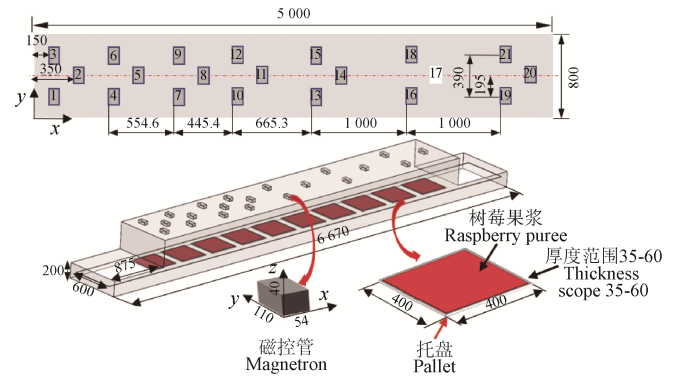


注: 图中 1-5 对应标记物料盘 1 至物料盘 5 以及取样位置, 用于取样测定干燥过程的温度和含水率变化。

Note: Number 1-5 refer to the marked Material 1 to material plate 5 and sampling positions, which are used for sampling to measure the changes of temperatures and moisture content in the drying process.

a. 连续式微波干燥机结构示意图

a. Schematic diagram of continuous microwave dryer



注: 最上图中数字 1-21 对应微波干燥机 21 个磁控管的编号。

Note: 1-21 is the serial number of 21 magnetrons mounted in microwave dryer in top sub-figure.

b. 模型几何尺寸和磁控管排布 (单位: mm)

b. Geometric dimension and magnetrons arrangement of model (Unit: mm)

图 1 连续式微波干燥机结构示意图和模型尺寸

Fig.1 Schematic diagram and model dimension of continuous microwave dryer

### 1.3 模型提出

#### 1.3.1 模型假设

1) 果浆的初始温度和含水率均匀分布; 2) 忽略果浆与托盘和输送带间热量传递; 3) 为保证模拟过程收敛性, 干燥过程中果浆的比热容、密度、导热系数和摩尔汽化潜热视为常量; 4) 由不锈钢材料制成的干燥腔体和波导外壁厚不计, 不考虑其热损失; 5) 由于果浆料层厚度较薄, 忽略沿料层厚度方向电场强度衰减对料层微波能吸收的影响。

#### 1.3.2 控制方程

经典的麦克斯韦场方程表征了微波干燥时浆果料层时变电场  $E$  转变为时变磁场  $H$  的规律, 其瞬态控制方程如式 (1) - (2)<sup>[21]</sup>

$$\nabla \cdot E = \mu_r \frac{\partial H}{\partial y} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot H = \varepsilon_r \frac{\partial E}{\partial t} + J \quad (2)$$

相对介电常数  $\varepsilon_r$  由实部和虚部组成如式 (3) [22]

$$\varepsilon_r = \varepsilon' + j\varepsilon'' \quad (3)$$

由磁控管激发的电磁波经波导轴向传递进入微波腔, 在微波腔内以  $TE_{mn}$  波模式传播 (定义为  $z$  轴方向), 如式 (4) - (6) [23]

$$E_x = \frac{\beta_y}{\varepsilon_r} B_{mn} \sin(\beta_y y) \cos(\beta_x x) e^{-j\beta z} \quad (4)$$

$$E_y = -\frac{\beta_x}{\varepsilon_r} B_{mn} \sin(\beta_x x) \cos(\beta_y y) e^{-j\beta z} \quad (5)$$

$$E_z = 0 \quad (6)$$

式中  $E_x$ ,  $E_y$  分别为电场强度  $E$  在  $x$ ,  $y$  方向的分量, 用于分析微波在波导内的传递模式, 以解释果浆料层上形成不同的电场强度分布和不同均匀性的原因。

在连续式微波干燥机的干燥腔内, 从波导口传出的微波经腔金属壁反射, 以一定角度入射到料层上, 其上出现谐振的电场模式符合方程 (7) 所示的关系 [24]

$$\sin^2 \theta_i = \left( \frac{1}{2} \lambda_0 \right)^2 \cdot \left[ (m/a)^2 + (n/b)^2 \right] \quad (7)$$

介电物料中极性分子受到电场极化作用, 电磁能转化成微波体积热  $Q_e$  [25]

$$Q_e = \pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' |E|^2 \quad (8)$$

连续式微波干燥过程中, 料层内的微波能吸收量消耗于温度升高、因料层内温差引起的热量传导、水分蒸发的汽化潜热和表面热对流损失, 依据能量守恒定律表征微波干燥时料层内热传递过程, 如式 (9) [26]

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla T) + m_{ev} \gamma + Q_e + h_i A (T - T_0) \quad (9)$$

微波干燥时, 果浆料层内水分的变化和传递过程如式 (10) 所示 [27]

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla c) = R \quad (10)$$

### 1.3.3 边界条件

干燥腔体和波导内壁由光滑不锈钢材料制成, 其阻抗条件为

$$\sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\varepsilon_0 \varepsilon_r - j\sigma / \omega}} \cdot H + E - (n \cdot E) = (n \cdot E_s) - E_s \quad (11)$$

传热传质的边界条件定义为 [28]

$$n \cdot (K \nabla T) = \gamma n \cdot (D \nabla c) \quad (12)$$

$$n \cdot (-D \nabla c) = k_c (c_b - c) \quad (13)$$

### 1.3.4 几何模型和数值模拟

在连续式微波干燥机建立的几何模型 (图 1b), 干燥腔和波导外壁设置为铜材料, 干燥腔体内设置为空气。多物理场有限元模拟软件 COMSOL 5.3 (COMSOL, Inc., 瑞典), 利用其电磁波频域求解麦克斯韦方程组、固体

传热和稀物质传递。为了确保模型精准度, 最大网格设置小于波长的  $1/5$  [29], 其中果浆料层采用用户定义网格, 其余网格预定义为超细化。所建立模型共含 884 126 个网格, 平均网格质量为 0.631。采用 COMSOL 与 MATLAB 软件联合仿真策略, 模拟连续式微波干燥机内移动果浆料层上电场强度、微波能吸收、温度和含水率变化和分布, 仿真路线如图 2 所示。不同功率下整个料层的电场强度分布由 COMSOL 软件计算如图 3 所示, 平均电场强度也可通过 COMSOL 软件获取, 步骤如下: 电场→切面→表达式 (enw.normE)→ $xy$  平面→ $z$  坐标 (选定料层  $z$  轴方向所在位置)→电场平均值 (enw.normE)。需要说明的是, 这里  $z$  坐标选定为一具体数值后结合  $xy$  平面所选定的区域为果浆料层的上表面, 且由于果浆料层为薄层, 不考虑其在料层厚度方向衰减对整体电场强度的影响, 也即将料层上表面的平均电场强度作为整个料层的电场强度。模拟温度和含水率的获取: 由于 COMSOL 软件只能完成以整体料层为对象的不同干燥时间运算, 而实际需要的是, 提取果浆物料随着时间的增加、沿输送带运动方向上不同位置、每盘物料的温度和含水率, 所以模拟利用了 MATLAB 的调运存储功能, 可获得干燥过程不同位置的果浆温度和含水率, 具体流程如图 2 所示。以含水率获取为例, 每个位置 (即试验含水率测定的对应位置) 模拟含水率获取步骤: 水分→切面→表达式 (moisture)→ $xy$  平面→ $z$  坐标 (选定料层  $z$  轴方向所在位置)→水分平均值 (moisture)。

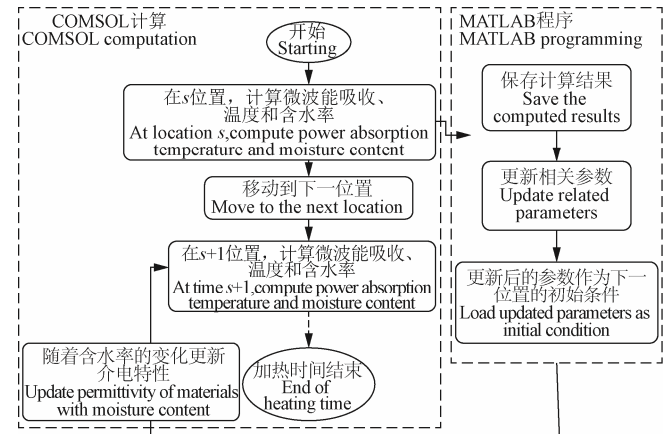


图2 物料移动过程仿真流程图

Fig.2 Flowchart of moving process simulation of material

### 1.4 试验过程

在连续式微波干燥机 (图 1) 进行台架试验, 功率设定为 12、15、18、21 kW。为对比不同磁控管开启模式 (包括数量和位置) 下功率输入对料层上电场强度分布的影响规律, 确定不同功率下磁控管开启模式如表 2 所示 (每个磁控管额定输出功率 1 kW)。根据预试验结果, 即微波干燥机上全功率 (21 kW) 不同微波强度 (2~5 W/g) 的含水率变化, 结果在微波强度 3 W/g、带速 0.5 m/min 条件下循环干燥结束后含水率为 15.0% 左右; 所以本研究确定了微波强度 3 W/g、带速 0.5 m/min、变化微波功率的研究条件, 主要研究不同微波功率下变化磁控管开启

模式对电场强度分布、能量效率的影响；且在此试验条件下果浆最终含水率均已不高于 15.0%（除 12 kW），所以研究并未对输送带速度进行调整。微波强度为 3 W/g 条件下，不同功率（12~21 kW）对应的物料质量分别为 4、5、6、7 kg，分别装于物料盘铺满整个干燥腔体（相同面积下对应料层厚度范围为 0.01~0.03 m）。

表 2 微波干燥机不同输入功率下对应磁控管开启模式  
Table 2 Working modes of active magnetrons of microwave dryer under different input powers

| 微波功率<br>Microwave<br>power/kW | 磁控管数量<br>Amount of<br>magnetron | 磁控管开启序号<br>Sequence of activated magnetrons |
|-------------------------------|---------------------------------|---|
| 12                            | 12                              | 1-6, 13-18                                  |
| 15                            | 15                              | 1-4, 6-7, 9-10, 12-13, 15-16, 18-19, 21     |
| 18                            | 18                              | 1-7, 9-13, 15-19, 21                        |
| 21                            | 21                              | 1-21  |

每次干燥时，在干燥腔的输送带上铺满果浆，然后同时开启磁控管和输送带（带速 0.5 m/min），并在进料口处继续添加对应质量的果浆，以接近实际生产过程。以输送带开启后第一个物料盘作为温度和含水率的测量对象，以单个腔体长度 1.00 m 为间距标记 5 个物料盘（腔体总长 5.00 m，不包括两端抑制器），直至第一个物料盘离开干燥腔后结束干燥，关闭磁控管（动态过程如图 1a 所示）。快速取出物料盘，用红外热像仪测量每个物料盘的温度分布，每盘物料采用直接干燥法（GB 5009.3—2010）测定含水率，因物料表面为 0.40 m×0.40 m，考虑微波干燥的不均匀性，在物料盘上的 13 个不同点进行取样<sup>[17]</sup>，分别测定不同点处的含水率后取平均值。根据试验测得的物料平均温度和含水率验证模拟结果，利用验证后的耦合模型表征果浆内部的电场强度和微波能吸收分布。

### 1.5 数据分析

干燥后果浆的含水率由式（14）计算

$$MC_{w.b.} = \frac{m_p - m_d}{m_p} \times 100\% \quad (14)$$

为了评估模型的可靠性，用均方根误差（RMSE）值定义测量和模拟温度、含水率值之间的误差

$$RMSE_T = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{sim} - T_{exp})^2} \quad (15)$$

$$RMSE_M = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_{sim} - M_{exp})^2} \quad (16)$$

为比较不同功率下磁控管开启模式产生平均电场强度的效率值定义了电场强度功率比

$$O = \frac{\bar{E}}{P} \quad (17)$$

对干燥区域内果浆的微波能吸收  $Q_e$  (W/m<sup>3</sup>) 进行体积分，计算体微波能吸收

$$P_a = \iiint Q_e \quad (18)$$

为了比较不同功率（对应不同质量）的微波能吸收效率，定义了微波能吸收质量比

$$G = \frac{P_a}{m_p} \quad (19)$$

微波能吸收效率定义为微波能吸收比总的能量输入

$$\eta_1 = \frac{P_a t}{P t} \times 100\% = \frac{\iiint Q_e}{P} \times 100\% \quad (20)$$

微波能转化效率定义为有效能比微波能吸收

$$\eta_2 = \frac{P_e t}{P_a t} = \frac{m_{ev} \cdot \gamma + C_p \cdot m \cdot \Delta T}{P} \times 100\% \quad (21)$$

总的能量效率由电能到有效能为

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \quad (22)$$

为了定量评价干燥的电场和温度的均匀性，引入均匀性系数  $COV_E$  和  $COV_T$  评价均匀性程度，系数值越低，表明分布的均匀性越高。 $COV_E$  和  $COV_T$  的计算如式（23）-（24）所示<sup>[30]</sup>

$$COV_E = \frac{1}{\bar{E}} \sqrt{\frac{1}{N_E} \sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2} \quad (23)$$

$$COV_T = \frac{1}{\bar{T}} \sqrt{\frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2} \quad (24)$$

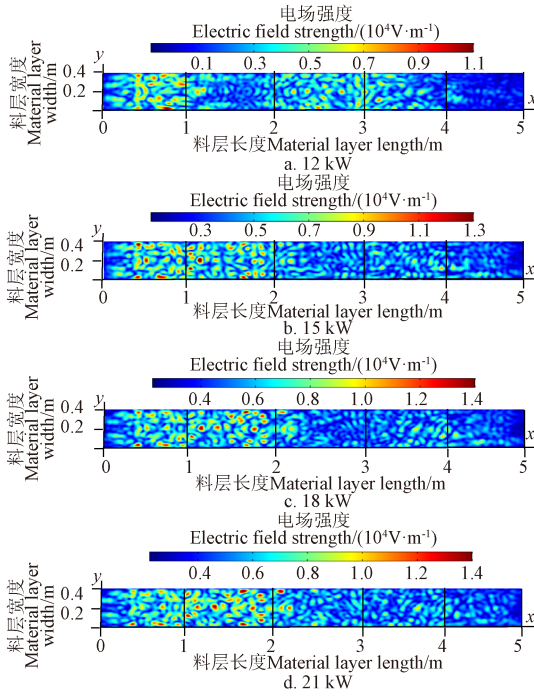
## 2 结果与分析

### 2.1 微波输入模式对果浆料层上电场强度的影响

利用 COMSOL 软件计算整个果浆料层的电场强度，为不同微波输入模式（开启磁控管位置和数量）下果浆料层上的电场强度分布如图 3 所示，表征果浆移动干燥过程中料层上电场强度值的变化。微波干燥机内由多个波导口输出的平面波经微波腔金属壁的反射形成驻波，同相的驻波在料层表面叠加形成强弱不同的电场强度分布。根据式（7）的计算，本研究的连续式微波干燥机内料层上，理论上存在 464 组  $(m, n)$  电场模式  $((m, n) \in (81, 6))$ 。为解析磁控管波导口在微波腔顶部安装位置对料层上电场分布的影响规律，对梯度开启磁控管图 3a~3c（依次对应输入功率 12、15、18 kW）与全开启磁控管的图 3d（对应功率 21 kW）进行对比，结果表明：1）沿着物料运动方向（x-轴），电场在纵向上（y-轴）有强、弱交替较为一致的电场分布（纵向强点个数 6），在连续式微波干燥机的料层上，由于料层运动方向（横向）波导口的位置及数量变化形式多，电场强度在纵向上分布均匀性高于横向的。2）根据料层电场强度计算程序<sup>[31]</sup>，图 3a 和 3c（依次对应微波功率 12 kW 和 18 kW）所示料层电场强度的均匀度分别为 0.899 4 和 0.896 6，略低于图 3b 和 3d（依次对应微波功率为 15 kW 和 21 kW）所示的电场均匀度 0.902 6 和 0.903 8，考虑公式（7）所表征的关系，可以推断微波腔内壁尺寸和料层与微波源的相对位置对料层上整体电场分布的影响强于磁控管开启模式。3）在结构形状和尺寸固定的连续式微波干燥机内，磁控管开启模式（数量和排列方式）决定料层上的电场强度的水平和分布<sup>[32]</sup>，对于某一位置的波导口，在料层上辐射位置（沿 x 轴向）越远， $\theta_i$  角值越大，依据  $E_i = E_0 \cos \theta_i$ ，在料层上的电场  $E_i$  值



越小, 电场强度减弱; 因此, 相比于输入功率 21 kW 的磁控管全部开启的情况, 部分开启磁控管 (输入功率 12、15、18 kW) 的微波在料层上的入射角增加, 电场强度下降; 依据微波腔中 TM 平面波的波阻抗  $\eta_{\text{TM}} = \eta_0 \cos \theta_i$  (其中,  $\eta_0$  为初始波阻抗),  $\theta_i$  增加引起  $\eta_{\text{TM}}$  下降, 表明更多 TM 波的微波能消耗, 转化成热能; 而对 TE 平面波的波阻抗  $\eta_{\text{TE}} = \eta_0 / \cos \theta_i$ ,  $\theta_i$  增加引起  $\eta_{\text{TE}}$  升高, 表明 TE 平面波的热能转化下降。因此, 在连续式微波干燥机微波腔内, 开启磁控管数量及位置通过入射角对微波能转化成热能的影响, 取决于 TE 或者 TM 平面波。



注: 坐标原点  $O$  点在料层左端 ( $x = 0$ ), 与腔体 1 左端面重合, 料层中心线 ( $y = 0.2$ ) 与输送带中心线在  $x$  方向重合,  $x$  方向为料层运动方向。  
Note: Coordinate origin point  $O$  is at the left end of the material layer ( $x = 0$ ) with the left end face of cavity 1, and the center line of the material layer ( $y = 0.2$ ) coincides with the moving direction conveyor belt in the  $x$  direction,  $x$  direction is the moving direction of the material layer.

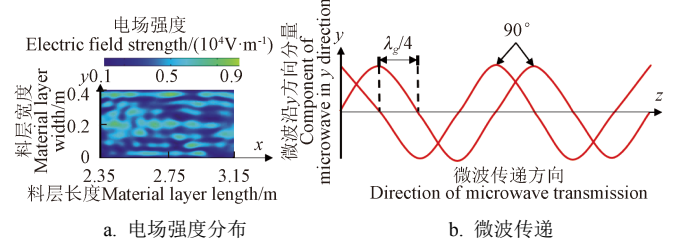
图3 不同功率输入模式果浆料层上的电场强度分布

Fig.3 Distribution of electric field strength of puree laryer under different power input modes

在微波腔内, 多波导微波输入时料层上的电场强度分布可视为单个波导输入时的电场强度的叠加, 模拟单一波导 (图 1b 中 14#波导口) 输出微波在料层上的电场分布和传递如图 4 所示。矩形波导传递的微波以为  $\text{TE}_{10}$  模式为主<sup>[33]</sup>, 由波导口发出的微波以正弦波形式传递, 果浆料层的电磁波产生表面反射和内部折射, 形成电场强度如图 4a 所示: 长约 0.80 m (料层上位置为 2.35~3.15 m)、宽约 0.40 m。

由图 4a 还可以观察到, 在  $y$  (矩形波导长边) 方向上, 电场呈现高低交错的分布状态, 高低电场间距离约为 0.026 m。因为在  $\text{TE}_{10}$  传播模式下, 将  $m=1, n=0$  代入式 (4) — (6), 得到  $\text{TE}_{10}$  波的场分量如式 (25) — (27) 所示, 可知  $\text{TE}_{10}$  波只在  $y$  方向上存在电场分量; 并由式

(26) 可知, 微波在料层上的电场高低分布存在  $90^\circ$  相位差, 如图 4b 所示,  $90^\circ$  相位差对应  $1/4$  的微波波长。在 2.45 GHz 频率下, 由式 (28) 计算得微波在传递过程中的波长<sup>[34]</sup>  $\lambda_g$  为 0.102 m,  $\lambda_g/4$  为 0.025 m, 与模拟所得电场强度相邻极值间距 0.026 m 接近。



a. 电场强度分布  
a. Distribution of electric field strength

b. 微波传递  
b. Transmission of microwave

注:  $\lambda_g$  为波导内微波波长。

图4 单个磁控管波导料层上的电场强度分布和微波传递

Fig.4 Distribution of electric field strength at material layer and microwave transmission at single waveguide

$$E_x = 0 \quad (25)$$

$$E_y = -\frac{j\omega\mu_r a}{\pi} B_{10} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) e^{-j\beta z} \quad (26)$$

$$E_z = 0 \quad (27)$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - (\lambda_0 / 2L_a)^2}} \quad (28)$$

为进一步探究不同位置波导对料层位置上电场分布的影响, 比较了两种不同方式的波导组合 13、15 和 13、14 的电场强度分布如图 5 所示。图 5a 的电场分布更为均匀, 因为该组合方式下磁控管波导长边方向上中心点位置距离 0.39 m 为  $1/4$  微波波长的奇数倍, 使得不同波导产生的高低电场交错分布。

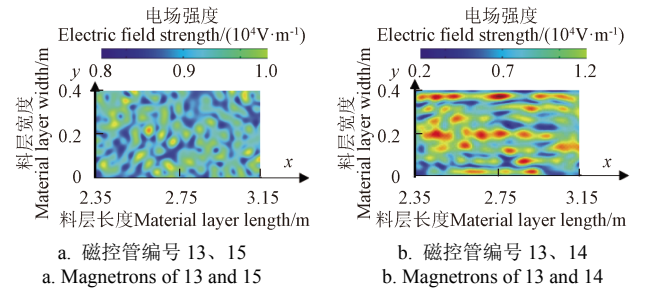


图5 两种不同波导组合方式的电场强度分布

Fig.5 Distribution of electric field strength of two different combination modes of waveguides

而图 5b 波导中心位置的距离 0.20 m 更接近  $1/4$  微波波长的偶数倍, 不同位置波导产生的高低电场重合叠加, 加剧电场分布的不均匀性, 并在相同输入功率下产生不同的电场强度分布。图 5a 所示电场强度分布均匀, 最大电场强度为  $1.0 \times 10^4 \text{ V/m}$ , 图 5b 所示电场强度高低分布明显, 最大电场强度为  $1.2 \times 10^4 \text{ V/m}$ , 这表明不同相位差电磁波在料层上叠加, 增大电场强度分布的不均匀性; 所形成的驻波并没有产生更高的电场强度, 这是由于相位差  $180^\circ$  微波间的相互碰撞抵消, 造成能量损失。

不同微波功率输入模式下整个料层的平均电场强度、电场均匀性和电场强度功率比,如图 6 所示。料层上平均电场强度与微波功率呈正相关,但电场强度并不随着微波功率的增大线性增大,因为不同的磁控管开启模式使得料层电场产生不同程度的叠加,有不同水平的电场强度均值。电场强度功率比随电场均匀性系数的减小而增大,且在微波功率输入为 15 kW 条件下的磁控管开启模式电场均匀性最高、电场强度功率比最大。原因是微波功率 15 kW 时,干燥机顶部开启的磁控管为沿着腔体壁两侧,关闭 5、8、11、14、17、20 号磁控管(如图 1b 所示)。且矩形磁控管在横边方向上(y)中心点间距为 0.39 m,为 1/4 微波波长(0.026 m)的奇数倍,使得电场在 y 方向上交错分布,降低因同相反向电场叠加而造成的能量损失,尽管在 x 方向仍存在因磁控管间排布间距产生叠加,整体来讲,这种的磁控管开启模式电场分布均匀性更高、电场强度功率比更大。相比 15 kW,其他功率条件下磁控管开启模式,磁控管开启位置的间距同时存在 1/4 微波波长的奇数倍和偶数倍,使得电场分布在 y 方向上产生不同相位叠加,加剧电场分布的不均匀性,降低电场强度功率比。由以上分析可知,提高电场分布均匀性可以减少电场叠加造成的能量损失,产生更大的电场强度功率比。

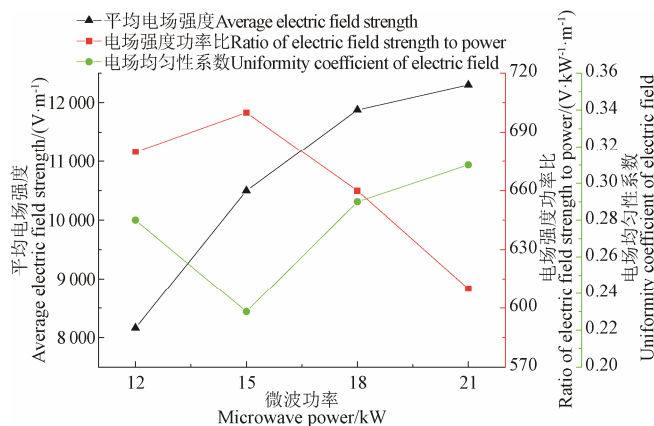


图 6 不同功率的电场强度平均值、电场强度功率比、电场均匀性系数

Fig.6 Average value of electric field strength, ratio of electric field strength to power and the uniformity coefficient of electric field under different microwave powers

## 2.2 果浆料层上微波能吸收

不同功率条件下料层上微波能吸收分布如图 7 所示,对比图 3 可以发现,每个功率下的微波能吸收分布不同于其电场强度分布。根据 Poynting 定理,微波能吸收由电场强度和物料的介电特性共同决定<sup>[35]</sup>。物料的介电特性随着温度和含水率而变化,但本研究中不同微波功率下的温度和含水率变化趋势相近(见 2.3 节),忽略较小的介电特性变化影响,只考虑不同功率条件下的电场强度变化对微波能吸收的影响。根据式(18)、(19)得到不同功率下整个料层的体微波能吸收和体微波能吸收质量比如图 8 所示,体微波能吸收随着微波功率的增大而增大,因为微波输入功率与料层上电场强度正相关;

而体微波能吸收质量比与体微波能吸收有着不同的变化趋势,并在 15 kW 条件下取得最大值。因为体微波能吸收与质量的比值可代表单位功率条件下产生电场强度的大小,与电场强度功率比有一致的变化趋势。由此可知,连续式微波干燥机内开启磁控管的模式决定了料层上的电场强度分布,并影响微波能的能量吸收效率。

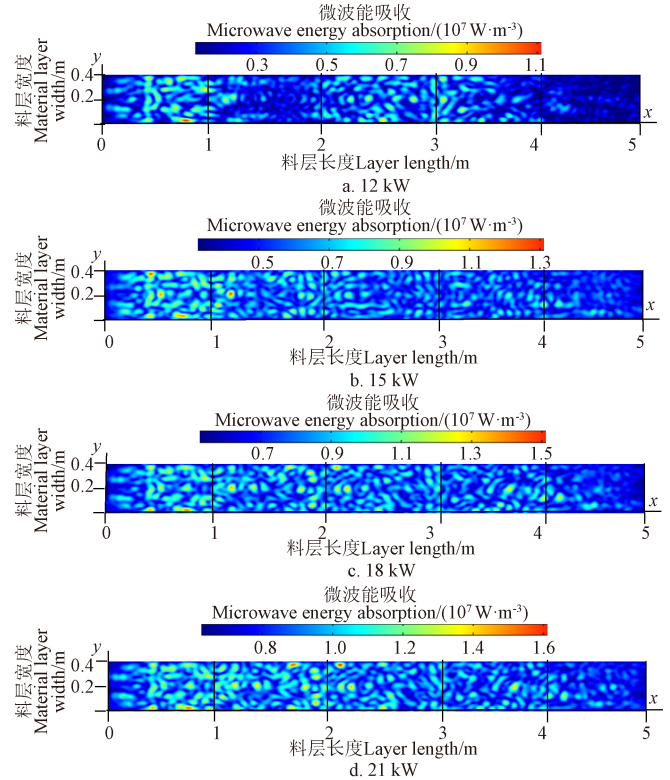


图 7 果浆料层上不同功率的微波能吸收分布

Fig.7 Distribution of microwave energy absorption at material layer of different microwave powers

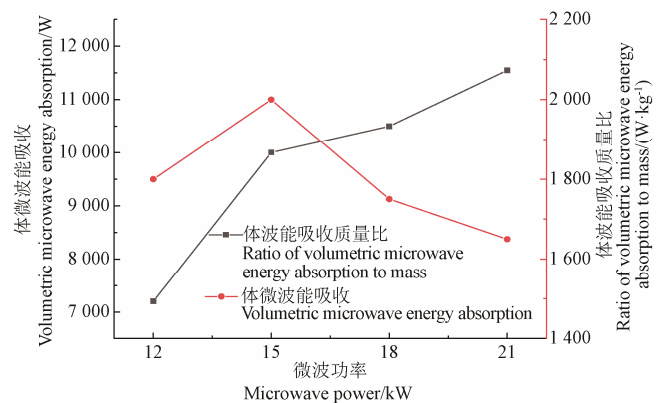


图 8 不同功率的体微波能吸收和体微波能吸收质量比

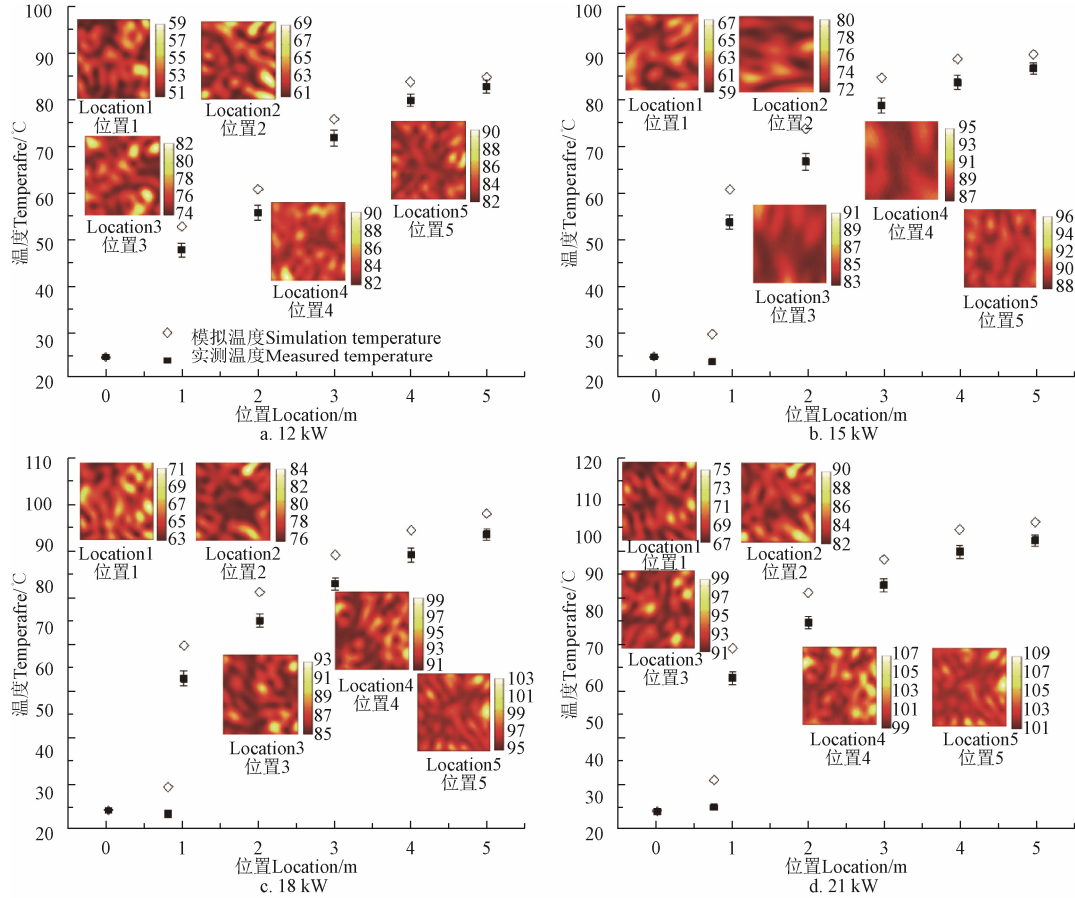
Fig.8 Volumetric microwave energy absorption and the ratio of volumetric microwave energy absorption to mass under different microwave powers

## 2.3 微波干燥过程中果浆料层上温度和水分布

在不同微波输入功率下,5 个取样点位置的模拟温度分布及提取的温度值与红外热成像处理的试验温度值如图 9 所示。每个功率条件下,在干燥前段(对应位置 0 至位置 1 阶段),较多的微波能(图 7)吸收使料层温度快速升高;在中后期阶段(对应位置 1 至位置 5 阶段),

微波能吸收随着功率输入模式和介电特性的变化而变化,整体上有逐渐减小的趋势,且微波能量在果浆内部转化成热量并进行积累,使温度达到较高水平,连续式

微波干燥机的微波腔的空间体积大(料层仅为薄层),有利于果浆在微波腔内进行充分热量交换,使得温度升高趋向平缓。



注: 0 代表进行干燥处理的果浆起始位置, 1-5 m 分别为果浆物料在腔体 1 至腔体 5 完成干燥时所处位置, 对应时间分别为 2、4、6、8、10 min, 下同。  
Note: 0 represents initial location where the pulp is dried, 1-5 are respectively the locations of pulp materials when they are dried at cavity 1 to cavity 5, the corresponding time is 2, 4, 6, 8 and 10 min. The same below.

图 9 不同功率下 5 个取样点位置的模拟温度分布及提取的温度值与红外热成像处理的试验温度值

Fig.9 The simulated temperature distribution and extracted simulation temperature value and measured temperature from infrared thermal images at five sampling points.

由图 9 还可知,连续式微波干燥过程中每个功率同一测量位置的模拟和实测温度的变化一致性较高,并根据式(15)计算了不同功率模拟和实测温度间的均方根误差值(RMSE<sub>T</sub>)分别为 5.8、4.1、6.7、6.9 °C,这是由于取样红外测温操作和模拟的密度、比热容设定为常量使得实测温度略低。如图 10 所示,不同微波输入功率下 5 个取样点位置的模拟与实测含水率的变化趋势一致,同样计算了不同功率下模拟和实测含水率间的均方根误差值(RMSE<sub>M</sub>)分别为 6.3%、5.3%、5.6%、4.2%,由于干燥过程的含水率变化较为复杂,而模拟与实测含水率间的最大均方根误差仅为 6.3%,表明了用所建立模型模拟干燥过程含水率变化的可行性。但因模拟温度高于实测温度,模拟的含水率降速略快。总体比较,模拟与实验测得的温度和水分布具有较高的一致性,应用微波场与传热、传质耦合的理论能够深入解析连续式微波干燥过程中运动的果浆物料层内的电场强度和微波能吸收的分布。

## 2.4 不同微波功率下的能量利用效率

根据式(20)-(22)计算的不同功率下的能量吸收

效率  $\eta_1$ 、有效能转化效率  $\eta_2$  和总能量效率  $\eta$ , 如图 11 所示。

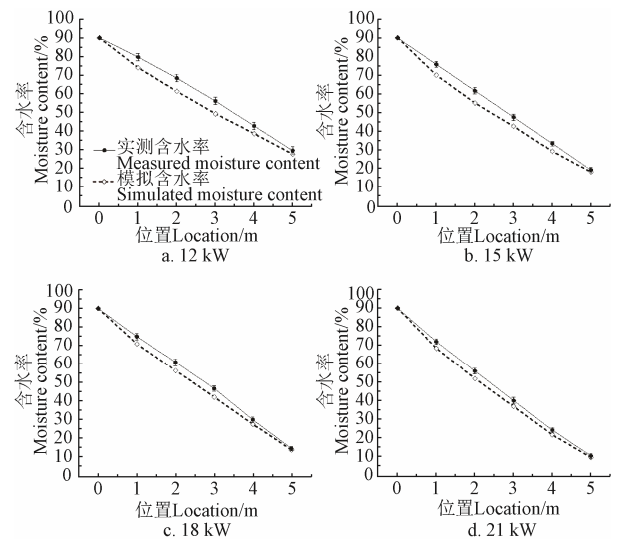


图 10 不同功率下模拟与实测的含水率对比

Fig.10 Comparison of the measured and simulated moisture content under different microwave powers



能量吸收效率随着微波功率的变化而变化, 最大吸收效率值出现在 15 kW, 因为不同功率条件下的磁控管开启模式形成变化的电场强度和电场强度功率比。在微波输入功率 15 kW 条件下, 所对应的矩形磁控管波导口的开启模式为平行排列, 且长边方向上中心点间距为 1/4 微波波长的奇数倍, 提高了整个料层的电场均匀性, 更高电场均匀性降低电场叠加造成的能量损失, 有更大的电场强度功率比, 提高微波能的吸收效率<sup>[36]</sup>。

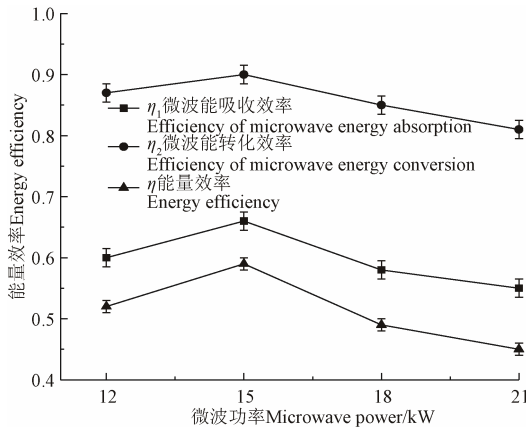


图 11 不同微波功率下的能量效率

Fig.11 Energy efficiency under different microwave powers

微波输入功率影响干燥机的能量转化效率, 最大能量转化效率同样出现在输入功率 15 kW, 因为相比于所研究的其他功率, 此功率条件下的开启磁控管排列模式使料层上微波能量有最高的均匀性, 进而温度的分布更为均匀, 减少了温度过高的热点向外热传递、造成热损失, 吸收的微波能量更多的被用于料层温度升高和水分蒸发。由  $\eta_1$  和  $\eta_2$  计算了总的能量效率  $\eta$ ,  $\eta$  最大值出现在微波输入功率 15 kW 下对应的磁控管开启模式。以上研究表明, 均匀的电场分布减少了电场的叠加和料层横向温度分布差, 降低由于外部电场叠加和料层内部热量传递造成的能量损失, 提高了微波的能量利用效率。

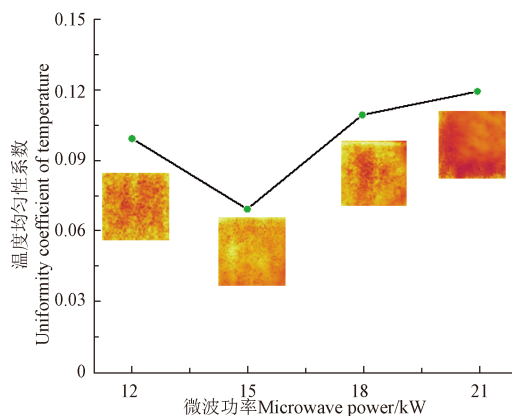


图 12 不同微波功率干后物料的温度均匀性

Fig.12 Temperature uniformity of material after drying under different microwave powers

不同功率下树莓果浆的干后温度均匀性及红外热成像图如图 12 所示。干后的温度均匀性与电场强度均匀性(图 6)变化趋势一致, 因为连续式微波干燥机内果浆随

着输送带运动, 降低了其在横向的、运动方向上(x 向)的电场不均匀性; 前已分析在磁控管不同开启模式下, 料层在横向(y 向)上均有较高电场均匀性, 从而提高干后物料的加热均匀性。

### 3 结 论

1) 在连续式微波干燥机内, 开启磁控管数量及位置确定 TE 或者 TM 形式的平面波, 进而平面波在料层上的入射角决定微波能到热能转化率; 微波腔内壁尺寸和料层与波导口相对位置对料层上整体电场分布的影响强于磁控管开启数量; 料层在纵向(运动方向)比横向有更高的电场强度分布均匀性。

2) 连续式微波干燥机内, 磁控管开启模式产生不同的电场叠加, 当矩形磁控管波导开启方式为平行排列, 且长边方向上中心点间距为 1/4 微波波长的奇数倍时, 可提高整个料层的电场均匀性。

3) 连续式微波干燥机多磁控管的功率输入模式, 可通过控制磁控管呈开启模式提高料层上的电场均匀性, 均匀的电场分布减小了电场叠加造成的能量损失和料层横向的温度分布差, 提高整体能量效率和果浆干燥后温度均匀性。

4) 在不同微波功率输入的干燥条件下, 采用多物理场耦合模拟方法计算所得的果浆料层上的温度和含水率, 与实测值对比, 有一致的变化趋势和较低的偏差, 温度的均方根误差值分别为 5.8、4.1、6.7、6.9 °C, 含水率的均方根误差值分别为 6.3%、5.3%、5.6%、4.2 %, 表明应用微波场与传热、传质耦合的理论能够准确表征、解析树莓果浆的连续式微波干燥过程。

### [参 考 文 献]

- [1] Giuffrè A M, Louadj L, Rizzo P, et al. Packaging and storage condition affect the physicochemical properties of red raspberries (*Rubus idaeus* L., cv. Erika)[J]. Food Control, 2019, 97(3): 105-113.
- [2] Rao A V, Snyder D M. Raspberries and human health: A review[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(7): 3871-3883.
- [3] 司旭, 陈芹芹, 毕金峰, 等. 干燥方式对树莓干燥特性、品质和微观结构的影响[J]. 中国食品学报, 2016, 16(10): 130-138.  
Si Xu, Chen Qinqin, Bi Jinfeng, et al. Effects of drying methods on the drying characteristics, quality and microstructure of raspberry[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(10): 130-138. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘伟东, 顾欣, 郭君钰, 等. 微波热风联合干燥工艺对枸杞品质和表面微生物的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 296-302.  
Liu Weidong, Gu Xin, Guo Junyu, et al. Effects of microwave-hot air drying process on quality and surface microorganism quantity of Lycium barbarum[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(20): 296-302. (in Chinese with English abstract)
- [5] 马永强, 杨秋慧, 王鑫, 等. 超声波-乙醇法提取树莓酮及



- 抗脂质过氧化研究[J]. 包装工程, 2020, 41(5): 32-39.
- Ma Yongqiang, Yang Qiuhui, Wang Xin, et al. Extraction of raspberry ketone by ultrasound-ethanol method and its anti-lipid peroxidation[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(5): 32-39. (in Chinese with English abstract)
- [6] 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观形态研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 373-381.
- Lv Hao, Lv Huangzhen, Yang Bingnan, et al. Moisture and heat characteristics and apparent form of balsam pears in microwave-hot-air flow vibrating bed drying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 373-381. (in Chinese with English abstract)
- [7] 张鹏, 颜碧, 李江阔, 等. 果蔬微波联合干燥技术研究进展[J]. 包装工程, 2019, 40(19): 16-23.
- Zhang Peng, Yan Bi, Li Jiangkuo, et al. Research progress on microwave combined drying technology of fruits and vegetables[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(19): 16-23. (in Chinese with English abstract)
- [8] Dehghannya J, Pourahmad M, Ghanbarzadeh B, et al. Heat and mass transfer modeling during foam-mat drying of lime juice as affected by different ovalbumin concentrations[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 238: 167-177.
- [9] 秦庆雨, 郑先哲, 王磊, 等. 树莓果浆微波泡沫干燥过程能量吸收与利用[J]. 食品科学, 2020, 41(15): 124-133.
- Qin Qingyu, Zheng Xianzhe, Wang Lei, et al. Energy absorption and utilization of raspberry pulp microwave foam drying process[J]. Food Science, 2020, 41(15): 124-133. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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 with English abstract)
- [11] 郑先哲, 朱广浩, 卢淑雯, 等. 通风改善发芽糙米微波连续干燥均匀性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 280-286.
- Zheng Xianzhe, Zhu Guanghao, Lu Shuwen, et al. Ventilation improving drying uniformity of germinated brown rice under continuous microwave conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(13): 280-286. (in Chinese with English abstract)
- [12] Rakesh V, Datta A K, Walton J H. Microwave combination heating: Coupled electromagnetics-multiphase porous media modeling and MRI experimentation[J]. AIChE Journal, 2012, 58(4): 1262-1278.
- [13] Mokhta Z, Ong M, Salman B, et al. Simulation studies on microwave-assisted pyrolysis of biomass for bioenergy production with special attention on waveguide number and location[J]. Energy, 2020, 190: 116474.
- [14] Prommas R, Rattanadecho P, Jindarat W. Energy and exergy analyses in drying process of non-hygroscopic porous packed bed using a combined multi-feed microwave-convective air and continuous belt system (CMCB)[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2012, 39(2): 242-250.
- [15] Ambros S, Foerst P, Kulozik U. Temperature-controlled microwave-vacuum drying of lactic acid bacteria: Impact of drying conditions on process and product characteristics[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 224: 80-87.
- [16] Jafari H, Kalantari D, Azadbakht M. Semi-industrial continuous band microwave dryer for energy and exergy analyses, mathematical modeling of paddy drying and its qualitative study[J]. Energy, 2017, 138: 1016-1029.
- [17] Jafari H, Kalantari D, Azadbakht M. Energy consumption and qualitative evaluation of a continuous band microwave dryer for rice paddy drying[J]. Energy, 2018, 142: 647-654.
- [18] 郑先哲, 秦庆雨, 王磊, 等. 气流改善泡沫树莓果浆微波干燥均匀性提高能量利用率[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 280-290.
- Zheng Xianzhe, Qin Qingyu, Wang Lei, et al. Airflow improving foam berry pulp microwave drying uniformity and energy efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(14): 280-290. (in Chinese with English abstract)
- [19] Dinčov D D, Parrott K A, Pericleous K A. Heat and mass transfer in two-phase porous materials under intensive microwave heating[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 65(3): 403-412.
- [20] Mercali G D, Sarkis J R, Jaeschke D P, et al. Physical properties of acerola and blueberry pulps[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 106(4): 283-289.
- [21] Shen L, Zhu Y, Liu C, et al. Modelling of moving drying process and analysis of drying characteristics for germinated brown rice under continuous microwave drying[J]. Biosystems Engineering, 2020, 195: 64-88.
- [22] Lin B, Li H, Chen Z, et al. Sensitivity analysis on the microwave heating of coal: A coupled electromagnetic and heat transfer model[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 126: 949-962.
- [23] 李秀萍. 微波技术基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [24] Erle U, Pesheck S, Lorence M. Development of Packaging and Products for Use in Microwave Ovens[M]. Duxford, United Kingdom, Elsevier Ltd, 2020.
- [25] Ye J, Lan J, Xia Y, et al. An approach for simulating the microwave heating process with a slow- rotating sample and a fast-rotating mode stirrer[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 140: 440-452.
- [26] Buttress A, Jones A, Kingman S. Microwave processing of cement and concrete materials—towards an industrial reality[J]. Cement and Concrete Research, 2015, 68: 112-123.
- [27] 程裕东, 易正凯, 金银哲. 微波干燥过程中南极磷虾肉糜的传热传质及形变参数模型[J]. 农业工程学报, 2020, 36(3): 302-312.
- Cheng Yudong, Yi Zhengkai, Jin Yinzhe. Heat and mass transfer and deformation parameter model of minced Antarctic krill during microwave drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(3): 302-312. (in Chinese with English abstract)
- [28] Yuan B, Danao M G C, Stratton J E, et al. High pressure processing (HPP) of aronia berry purée: Effects on physicochemical properties, microbial counts, bioactive compounds, and antioxidant capacities[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2018, 47: 249-255.
- [29] Zhu H, He J, Hong T, et al. A rotary radiation structure for microwave heating uniformity improvement[J]. Applied

- Thermal Engineering, 2018, 141: 648-658.
- [30] Huang Z, Datta A K, Wang S. Modeling radio frequency heating of granular foods: Individual particle vs. effective property approach[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 234: 24-40.
- [31] 孙井坤. 活性米微波干燥机机理分析及设备设计[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- Sun Jingkun. Study on the Drying Mechanism and Dryer Design of Germinated Brown Rice under Microwave Drying Conditions[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [32] Liu S, Fukuoka M, Sakai, N. A finite element model for simulating temperature distributions in rotating food during microwave heating[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 115(1): 49-62.
- [33] Venkatesh M S, Raghavan G S V. An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials[J]. *Biosystems Engineering*, 2004, 88(1): 1-18.
- [34] Luan D, Tang J, Pedrow P D, et al. Analysis of electric field distribution within a microwave assisted thermal sterilization (MATS) system by computer simulation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 188: 87-97.
- [35] Sadiku O. *Elements of Electromagnetics*[M]. New York: Oxford fourth ed, 2007.
- [36] Zhang R, Wang Y, Wang X, et al. Study of heating characteristics for a continuous 915 MHz pilot scale microwave thawing system[J]. *Food Control*, 2019, 104: 105-114.

## Effect of electric field distribution on energy use efficiency for berry puree under microwave drying

Wang Lei, Shen Liuyang, Liu Chenghai, Liu Chai, Zheng Xianzhe<sup>\*</sup>

(College of Engineering, Northeast Agriculture University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** Berry fruit rich in bioactive compounds (anthocyanins and vitamins) has fairly high health and nutritional benefits in terms of anti-aging, antioxidant ability, and anti-carcinogenic activity. However, fresh berry fruit is difficult to be stored, due to its high moisture content and temperature in the harvesting season. Consequently, microwave drying has been widely applied in the dehydration process for berry fruit, with the advantages of high efficiency, great processing capacity, and easy control of dryer. In microwave heating, the energy absorption depends on the intensity of electric fields and dielectric properties inside the processed material. Maxwell's equation was followed by the transmission of an electric field in the microwave cavity, where a time-varying electric field was accompanied by a corresponding time-varying magnetic field. The behavior of electromagnetic fields can be completely defined inside a microwave applicator and coupled with the appropriate boundary conditions. The electric field is primarily determined by magnetron arrangement, the shape, and size of the cavity. However, the complex and variable distribution of electric field inside the material has posed severe effects on the utilization of microwave energy and drying uniformity of the final product. Taking the raspberry puree as a representative processed material, an adjustable regulation of active magnetrons was introduced to mount on the ceiling of the microwave cavity in a continuous dryer, in order to elucidate the effect of electric field distribution in the material layer on the energy utilization, particularly with the rising temperature and declining moisture. The input powers of the microwave were set as 12, 15, 18, and 21 kW. Four modes of active magnetrons in amount and positions were used to reveal the change of electric field. A coupling model with the electromagnetic, heat, and mass transfer was established to characterize the distribution of electric field and energy absorption inside the puree layer. The microwave propagation inside berry puree layers and utilization efficiency of energy were clarified in the microwave dryer, considering the coupling model and drying properties of berry puree at different moisture and temperature. Results show that the Root Mean Square Errors (RMSE) of simulated and measured temperatures were 5.8, 4.1, 6.7, and 6.9 °C at the microwave powers of 12, 15, 18, and 21 kW, respectively, indicating that the simulation model was reliable for the distribution of electric field in the pulp material layer. The amount and positions of active magnetrons determined the Transverse Electric (TE) or Transverse Magnetic (TM) plane wave in the microwave cavity, where the incident angle of the plane wave dominated the conversion capacity of microwave energy to thermal energy. There were higher impacts on the dimensional size of the inner wall in the microwave cavity, and the relative position between the raspberry puree and guidance ports, compared with the mounts of active magnetrons. There was a greater uniform distribution of electric field along the longitudinal direction than along the crossing direction. The active mode of magnetrons was parallel arrangement, and the distance between the central points of magnetrons was odd times of quarter microwave wavelength in the direction of the long side of the magnetron. As such, the uniformity of the electric field improved in the whole material layer, due to the cross distribution with high and low spots in the electric field. High uniformity of electric field strength can be used to enhance the absorption and conversion efficiency of microwave energy, thereby achieving a more uniform distribution of temperature in the final dried material. The research findings can gain significant insight to promote energy efficiency and drying uniformity in the large-scale continuous microwave dryer.

**Keywords:** microwave; drying; berry pulp; electric field distribution; uniformity; energy utilization; simulation