



类黄磷物料微波干燥动力学特性

何嘉玉 许磊 孙永芬 李航

Microwave drying kinetic characteristics of yellow phosphorus-like materials

HE jiayu, XU lei, SUN yongfen, LI hang

引用本文:

何嘉玉, 许磊, 孙永芬, 李航. 类黄磷物料微波干燥动力学特性[J]. 北科大: 工程科学学报, 2025, 47(5): 1067–1080. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.07.22.004

HE jiayu, XU lei, SUN yongfen, LI hang. Microwave drying kinetic characteristics of yellow phosphorus-like materials[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, 47(5): 1067–1080. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.07.22.004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.07.22.004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微波场下的钒渣氯化动力学

Kinetics of chlorination of vanadium slag by microwave heating

工程科学学报. 2020, 42(9): 1157 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.09.20.003>

卷渣类夹杂物在结晶器钢液中成分转变的动力学模型

Kinetic model of the composition transformation of slag inclusions in molten steel in continuous casting mold

工程科学学报. 2021, 43(6): 786 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.04.13.003>

基于温度效应的半水磷石膏水化反应热动力学模型

Thermodynamic model of the hydration reaction of hemihydrate phosphogypsum based on the temperature effect

工程科学学报. 2022, 44(11): 1811 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.03.30.003>

铁酸锌碳热还原动力学及反应机理

Kinetics and reduction mechanism of non-isothermal analysis carbothermal reduction of zinc ferrite

工程科学学报. 2023, 45(1): 82 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.08.05.003>

炼钢过程反应热力学与动力学及其在数值模拟仿真的应用研究进展

Advances in the thermodynamics and kinetics of the steelmaking process and their application in numerical simulation

工程科学学报. 2024, 46(11): 1960 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2023.10.26.003>

废旧三元锂离子电池正极材料的微波吸收特性

Microwave absorption characteristics of cathode materials of waste ternary lithium-ion batteries

工程科学学报. 2022, 44(7): 1222 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.11.27.003>

类黄磷物料微波干燥动力学特性

何嘉玉^{1,2)}, 许磊^{1,2,3)}✉, 孙永芬^{1,3)}, 李航^{1,2)}

1) 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 昆明 650093 2) 昆明理工大学省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 昆明 650093

3) 昆明理工大学微波能工程应用及装备技术国家地方联合工程实验室, 昆明 650093

✉通信作者, E-mail: xu_lei@kust.edu.cn

摘 要 类黄磷物料的干燥是大多数工业应用中必不可少的步骤, 目前, 传统干燥方法存在能耗高、效率低等问题, 而微波干燥因其加热效率高、节能降耗明显、过程易控等优点, 成为一种有前景的干燥方法. 本文研究了初始质量、初始含水率和微波功率对类黄磷物料微波干燥过程的影响, 并计算了干燥效率 (η) 和单位能耗 (Q_s). 结果表明, 在质量为 50 g, 含水率为 40%, 微波功率为 360 W 的条件下微波干燥效率最大为 21.51%, 单位能耗最低为 10.99 MJ·kg⁻¹. 采用四种薄层干燥动力学模型 (Page、Modified page、Simplified Fick's diffusion 和 Wang and Singh) 对类黄磷物料的干燥实验数据进行拟合和分析, Modified Page 模型最适合描述类黄磷物料微波干燥过程. 通过菲克第二定律计算水分子在类黄磷物料中的有效湿份扩散系数. 当微波功率为 360 ~ 900 W 时, 有效湿份扩散系数为 $1.00 \times 10^{-10} \sim 1.64 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. 根据微波功率与活化能的关系, 计算得到微波干燥类黄磷物料的活化能为 5.95 W·g⁻¹. 利用 COMSOL Multiphysics 软件建立多物理场耦合有限元模型, 模拟电磁场和温度场的分布情况, 研究不同微波功率和加热时间对类黄磷物料干燥特性的影响, 发现随着微波功率的增加, 电场强度随之增加. 本文将实验研究与理论计算相结合, 为微波高效干燥类黄磷物料提供一定的理论基础和参考价值.

关键词 类黄磷物料; 微波干燥; 动力学模型; 有效湿份扩散系数; 活化能; COMSOL 模型

分类号 TQ586.4

Microwave drying kinetic characteristics of yellow phosphorus-like materials

HE jiaayu^{1,2)}, XU lei^{1,2,3)}✉, SUN yongfen^{1,3)}, LI hang^{1,2)}

1) School of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

2) State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

3) National Local Joint Laboratory of Engineering Application of Microwave Energy and Equipment Technology, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

✉Corresponding author, E-mail: xu_lei@kust.edu.cn

ABSTRACT Yellow phosphorus is an important industrial raw material used in pharmaceuticals, food, pesticides, the military, and the chemical industry, significantly impacting the economy. The drying effect is the most important aspect that affects the material properties. Traditional drying methods are often inefficient and energy-intensive, while microwave drying offers unique heating advantages, making it a promising alternative. This paper explores how initial mass, moisture content, and microwave power influence the drying process using microwave technology. The study examined how varying initial mass, moisture content, and microwave power affect the drying characteristics of materials. It calculated the microwave drying efficiency (η) and unit energy consumption (Q_s) under

收稿日期: 2024-07-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52374305, 51864030); 国家重点研发计划资助项目 (2018YFC1901904); 云南省重大科技专项计划资助项目 (202202AB080018); 云南省基础研究资助项目 (202101AS070023, 202301AV070009); 云南省科技人才计划资助项目 (2019HB003); 云南省青年拔尖人才资助项目

different conditions. Results indicated that increasing the initial mass and moisture content enhances the microwave's drying efficiency and reduces the unit energy consumption. However, as microwave power increased, the microwave drying efficiency gradually decreased, while the unit energy consumption gradually increased. When the initial mass increased from 20 g to 50 g, drying efficiency rose from 6.58% to 13.12%, while unit energy consumption decreased from 34.33 to 17.20 MJ·kg⁻¹. Similarly, increasing initial moisture content increased from 20% to 40% improved efficiency from 12.36% to 19.15%, unit energy consumption decreased from 14.28 to 11.70 MJ·kg⁻¹. The results showed that the maximum microwave drying efficiency (η) reached 21.51% and the minimum unit energy consumption (Q_s) was 10.99 MJ·kg⁻¹ at a mass of 50 g, a moisture content of 40%, and a microwave power of 360 W. Furthermore, this efficiency and energy consumption were consistent when the initial moisture content ranged from 20% to 40%. Four thin-layer drying kinetic models were used to fit the relevant experimental data, revealing that the Modified Page model was the most suitable for describing the microwave drying process of the material. Surface diffusion coefficients of water molecules were calculated under different conditions, and activation energy was derived from these coefficients. The maximum diffusion coefficient was $1.29 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ for an initial mass of 40 g, $1.53 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ for an initial moisture content of 30%, and $1.64 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ for a microwave power of 900 W. The activation energy was calculated to be 5.95 W·g⁻¹. Using COMSOL, simulations of the electromagnetic and temperature fields under varying microwave power conditions were conducted. The electric field intensity increased with higher microwave power, rising from $8.13 \times 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ at 360 W to $1.15 \times 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ at 720 W. In the experimental phase, increased microwave power reduces the time required for drying, and the temperature field distribution aligns with experimental results, effectively describing the drying process under microwave influence. This provides a theoretical basis and technical support for the efficient drying of yellow phosphorus-like materials.

KEY WORDS yellow phosphorus-like materials; microwave drying; kinetic modelling; effective moisture diffusion coefficient; activation energy; COMSOL model

黄磷作为一种重要的磷化工基础工业原料,是推动中国国民经济发展重要资源,广泛应用于医药、食品、电子、军工、化工、农药等领域^[1-2].经济增长对黄磷的需求量很大,中国作为世界上最大的黄磷生产国和出口国,年产黄磷超过 304 万吨,约占全世界产量的 75%,年出口量高达 60 万吨^[3-4].由于物料的生产以及储存方式较为特殊,需要对物料进行干燥过程^[5].目前,传统干燥方法主要有喷雾干燥、冷冻干燥、热风干燥等.喷雾干燥过程中物料在一定压力下被喷成雾状,并与高温热源接触,小液滴中的水被迅速加热并蒸发,物料完成干燥.但喷雾干燥过程需要专用设备,对操作条件和过程控制要求非常高^[6].冷冻干燥是将凝胶冷冻成冰,然后在低温下升华,除去水分.但工业冷冻干燥设备价格昂贵,效率低,能耗高,并未实现工业化^[6-7].热风干燥过程中的传热方向由外向内,导致干燥时间增加,干燥效率降低^[8-9].因此,需要一种工艺简单、干燥性能好的方法来解决传统干燥方法所存在的问题^[10].微波干燥具有过程控制简单、工业投资成本低、操作简便和适应性广等优点,且微波干燥环境友好,污染小,可以有效利用微波能量^[11].

微波是频率在 0.3 GHz 到 300 GHz 之间的电磁波,相应的波长在 1 mm 到 1 m 之间^[11].微波加

热是一种辐射型加热方法,避免了传统加热过程中的“冷点”现象,具有加热速度快、选择性加热、效率高、节能等优点.微波加热是通过电磁场和物料耦合作用导致内部分子之间的振动和相互摩擦从而产生热效应^[12-13].与传统方法相比,微波可以直接穿透物料,消除由温度梯度引起的缓慢蒸发问题,能够快速传递能量,提升干燥速率,降低能耗^[6].目前,国内外学者对微波干燥及动力学特性进行了广泛研究. Alfiya 等^[14]研究了太阳能干燥和微波干燥对虾干品质的影响.微波干燥与太阳能干燥相比,干燥时间缩短了 58.3%,有效湿份扩散系数更高. Huang 等^[15]研究了不同质量、微波功率和含水率对 TiO₂ 微波干燥特性的影响.结果表明, Modified Page 模型最适合描述 TiO₂ 的微波干燥过程.当微波功率为 160 ~ 800 W,有效湿份扩散系数为 $0.30 \times 10^{-14} \sim 1.21 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, TiO₂ 的微波干燥活化能为 8.22 W·g⁻¹. Cao 等^[16]对 Y₂O₃-ZrO₂ 进行微波干燥.研究表明,微波功率为 320 ~ 640 W 时,有效湿份扩散系数为 $0.94 \times 10^{-11} \sim 1.54 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Zhou 等^[17]研究了微波干燥对 Sc₂O₃-ZrO₂ 陶瓷粉体的影响.结果表明,当初始质量为 25 g,初始含水率为 6%,微波功率为 180 W 时,微波干燥效率(η)最大为 19.05%,单位能耗(Q_s)最低为 11.84 MJ·kg⁻¹.因此,采用微波干燥工艺能够大幅度提高干燥效

率、降低能耗,有助于取得良好的干燥效果^[18-19]。

近年来,微波加热技术在干燥领域中的应用逐渐增加,而微波干燥类黄磷物料相关研究尚未见报道,本文将微波加热技术应用在类黄磷物料的干燥领域。系统研究初始质量、初始含水率和微波功率等关键因素对类黄磷物料微波干燥特性的影响。采用 Page、Modified page、Simplified Fick's diffusion 和 Wang and Singh 四种模型对干燥实验数据进行拟合和分析。通过菲克第二定律和 Arrhenius 方程分别计算干燥过程中的有效湿份扩散系数和活化能,阐明微波干燥类黄磷物料的干燥过程。通过 COMSOL 模拟不同功率条件下的电磁场分布及温度场分布情况,描述微波场作用下的干燥过程。通过该方法实现微波干燥节能高效,为微波干燥类黄磷物料的发展提供基础研究数据。

1 实验部分

1.1 实验过程

为了研究初始质量、含水率及微波功率对类黄磷物料微波干燥特性的影响,将初始质量分别为 20、30、40 和 50 g 的物料在微波功率为 540 W,含水率为 30% 的条件下进行微波干燥实验,每 30 s 记录质量的变化,物料质量连续三次无变化则干燥结束。采用控制变量法将初始含水率分别为 20%、30% 和 40% 的物料在质量为 50 g,微波功率为 540 W 的条件下进行微波干燥,每 30 s 记录质量以及记录含水率的变化。将微波功率为 360、540、720 和 900 W 的物料在质量为 50 g,含水率为 40% 的条件下进行四组实验,每组实验重复三次,每 30 s 进行记录,质量三次无变化则干燥实验结束。

1.2 干燥参数的计算方法

干燥时间为 t 时,物料含水率公式如式 (1) 所示:

$$M_t = \frac{W_t - W_g}{W_g} \times 100\% \quad (1)$$

式中: M_t 为物料干燥至 t 时刻的干基含水率,%; W_t 为物料干燥至 t 时刻的质量, g; W_g 为样品干燥至恒重时的质量, g。

水分比公式如式 (2) 所示:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \times 100\% \quad (2)$$

式中: M_0 为物料初始含水量,%; M_e 为平衡含水率, %。在微波干燥条件下, M_t 与 M_0 相比, M_e 的值可忽略不计。从而公式简化为:

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \times 100\% \quad (3)$$

1.3 干燥动力学模型

薄层干燥动力学模型主要是通过对干燥剖面的数学模拟,研究物料的干燥过程^[20]。它主要包含理论方程、半理论方程、半经验方程和经验方程^[21]。本研究选取 Page、Modified page、Simplified Fick's diffusion 和 Wang and Singh 四种常用的干燥动力学模型,如表 1 所示,表中 k 为干燥常数, n 与干燥条件有关, a 、 b 、 c 是干燥模型中的经验系数, L 是物料厚度。通过拟合系数 R^2 、残差平方和 RSS 及 F 值来选择最佳动力学模型,其数学方程式如表 2 所示。 R^2 值越接近 1 表示拟合越好。RSS 越小,自变量和因变量的相关性越好。F 值是方差分析的统计量,可以检验回归方差是否显著, F 值越大说明线性关系越显著。

表 1 模型和模型方程

Table 1 Model and model equation	
Model	Model equation
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Modified page	$MR = \exp(-(kt)^n)$
Simplified Fick's diffusion	$MR = a \exp(-ct/L^2)$
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$

表 2 数学模型的统计指标

Table 2 Statistical indicators of the mathematical model	
Statistical indicators	Equation
Leaner coefficient	$R^2 = \frac{\sum(MR_{\text{exp}} - \overline{MR}_{\text{exp}})(MR_{\text{pre}} - \overline{MR}_{\text{pre}})}{\sqrt{(\sum(MR_{\text{exp}} - \overline{MR}_{\text{exp}})^2)(\sum(MR_{\text{pre}} - \overline{MR}_{\text{pre}})^2)}}$
Residual sum of squares	$RSS = \sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp}} - MR_{\text{pre}})^2$
F-Value	$F\text{-Value} = \frac{MS_{\text{treatment}}}{MS_{\text{error}}}$

表 2 中: MR_{exp} 是第 i 次实验后物料的含水率, %; MR_{pre} 是第 i 次实验后物料理论含水率的计算公式, %; $\overline{MR}_{\text{exp}}$ 是实验数据的平均含水率, %; $\overline{MR}_{\text{pre}}$ 是根据公式计算出的理论平均含水率, %; N 为观测值个数; $MS_{\text{treatment}}$ 是处理均方, MS_{error} 是误差均方,它们通过平方和除以相关自由度得到的。

1.4 COMSOL Multiphysics 仿真分析

本研究通过 COMSOL Multiphysics 仿真模拟分析了微波干燥类黄磷物料过程中的电磁场及温度场分布情况,微波反应器模型示意图如图 1 所

示. 物理场设置为“传热-电磁热-微波加热”, 添加的物理场界面设置为“电磁场, 频域 (emw)”、“固态传热 (ht)”和“电磁热 (emh1)”, 预设研究设置为“频域瞬态单向耦合电磁热”. 微波频率为 2.45 GHz, 微波源为 BJ26, 波导管的横截面, 其尺寸为 78 mm×18 mm^[22]. 该模型的微波炉炉壁和波导采用铜材质. 在 2.45 GHz 的激发频率下, TE₁₀ 模式是通过矩形波导的唯一传播模式^[23-24]. 因此, 选用 TE₁₀ 模式的矩形波导进行模拟仿真.

微波炉在工作时温度场与电磁场之间相互作用, 其内部是一个复杂的多物理场环境. 利用 COMSOL Multiphysics 6.0 软件对物料微波加热的电磁传热耦合方程进行数值计算, 能较好地模拟电磁场与温度场之间的能量转变情况. 该软件采用有限元法对数值模型进行求解, 仿真中采用麦克斯韦方程求解电磁传播问题. 频域法是求解时域谐波电磁场问题的典型方法. 利用 Maxwell 方程计算微波腔内的电磁场分布^[25-29].

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times E) - k_0^2 \left(\epsilon_r' - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) E = 0 \quad (4)$$

式中: E 为电场强度, $V \cdot m^{-1}$; ω 为角频率, $rad \cdot s^{-1}$; j 为电流密度, $A \cdot m^{-1}$; ϵ_0 为真空介电常数 (8.85×10^{-12}), $F \cdot m^{-1}$; μ_r 为相对磁导率, ϵ_r' 为介电常数; k_0 为自由空间波数, $rad \cdot m^{-1}$; σ 为电导率, $S \cdot m^{-1}$. k_0 由

表达式给出:

$$k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = \frac{\omega}{c_0} \quad (5)$$

其中: μ_0 为真空磁导率 ($4\pi \times 10^{-7}$), $N \cdot A^{-2}$; c_0 为光在真空中的速度, $m \cdot s^{-1}$.

微波腔体模型的网格尺寸如图 2 所示. 对模型进行网格划分设置, 完整网格共有 31306 个域单元、4388 个边界单元和 356 个边单元, 网格顶点有 5776 个, 最小单元质量为 0.09201, 单元体积比为 0.003932, 网格体积为 $0.01927 m^3$. 利用 COMSOL Multiphysics 软件的有限元求解方法, 将电磁场方程和传热方程耦合, 建立微波加热过程中电磁场和温度场演化的可视化模型^[24]. 模拟中输入的参数如表 3 所示.

2 结果与讨论

2.1 微波吸收特性

介电参数会影响介质对微波的吸收能力. 采用高温复合电导率分析仪 (VNA-Vector Network analyzer) 对不同含水率的物料在不同温度条件下的介电性能变化进行测试. 物料的介电响应随温度的变化而变化. 复介电常数反映微波在物料中的吸收、存储、损耗以及产生热量的能力, 通常用 ϵ 表示,

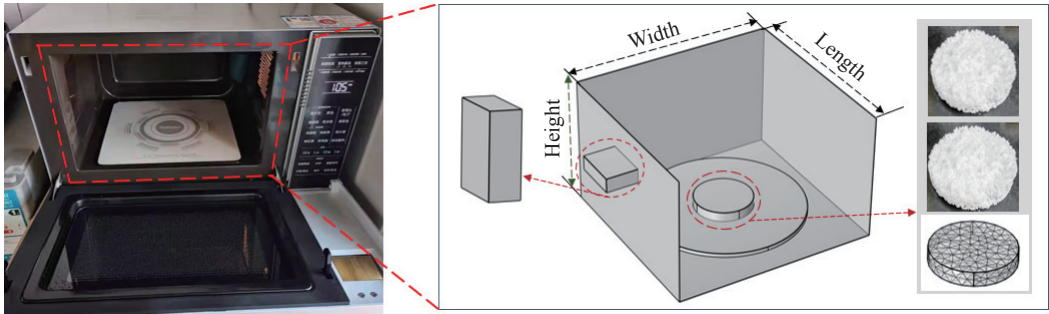


图 1 微波反应器模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of the microwave reactor mode

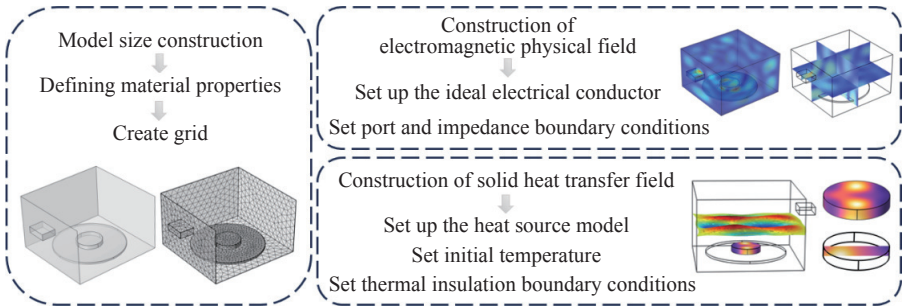


图 2 模型的有限网格划分及耦合多物理场模型的数值计算过程

Fig.2 Finite meshing of the model and numerical calculation process of the coupled multiphysics field model

表3 模拟中输入的参数

Table 3 Initial simulation parameters

Parameter	Value or expression
Microwave width/m	0.32
Microwave depth/m	0.3
Microwave height/m	0.2
Waveguide width/m	0.05
Waveguide depth/m	0.068
Waveguide height/m	0.022
Glass disc radius/m	0.125
Glass tray height/m	0.006
Distance between the glass disc and the bottom/m	0.015
Material radius/m	0.045
Material height/m	0.015
Initial temperature/℃	25
Microwave frequency/GHz	2.45
Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	k_solid_1(T)
Constant pressure heat capacity/(J·g ⁻¹ ·K ⁻¹)	C_solid_1(T)
Densities/(kg·m ⁻³)	rho_solid_1(T)
Relative permittivity	3.2
Relative permeability	1
Conductivity/(S·m ⁻¹)	0.002

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = \varepsilon_0 (\varepsilon_r' - i \varepsilon_r'') \quad (6)$$

其中: ε_0 为真空介电常数 (8.85×10^{-12}), $\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$; ε_r 为相对复介电常数, $i^2 = -1$; ε_r' 是复介电常数的实部, 称为介电常数, 主要反映材料的极化能力; ε_r'' 是复介电常数的虚部, 称为损耗因子. 它表示材料耗散微波能量的能力. 这两个参数均会影响物料对微波的吸收, 从而影响微波效率.

介质损耗正切是介电损耗因子和介电常数之比, 表达式如下,

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad (7)$$

其中, $\tan \delta$ 为介质损耗的正切值. 一般来说, 正切损耗越大, 衰减/微波吸收就越大, 当微波在物料中传播时, 衰减/微波吸收就会转化为热量.

此外, 微波穿透深度表示材料对微波能的衰减能力, 定义为微波功率密度衰减至表面值得 $1/e$ (即 36.8%) 时对应的材料厚度, e 为欧拉数 (2.7182818...).

而且, 穿透深度与微波频率和介质参数息息相关. 一般来说, 物料吸波能力越弱穿透深度越高. 微波穿透深度计算公式如下,

$$D_p = \frac{c_0}{2 \sqrt{2} f \pi \sqrt{\varepsilon_r' \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \right)^2} - 1 \right]}} \quad (8)$$

其中: D_p 为微波穿透深度, m; c_0 为光在真空中的传播速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; f 为微波频率, Hz.

图 3 显示不同含水率物料在微波频率为 2.45 GHz 下的介电常数、损耗因子、损耗正切和穿透深度随温度的变化曲线. 物料的介电性能主要受自由水存在的影响. 在微波作用下, 自由水中偶极子的主要极化方式为取向极化, 而毛细结合水对极化的影响要比自由水对极化的影响小得多. 物料的介电常数和损耗因子随温度的变化呈先升高后降低的趋势. 因为物料中水吸收微波能力较强, 物料可以吸收更多的微波能, 介电常数会有所增加. 物料中的水分随着温度的升高会蒸发, 且物料的介电常数和损耗因子低于水的介电常数和损耗因子, 故介电常数和损耗因子有下降趋势. 由图 3(a) 可知, 类黄磷物料的介电常数 ε_r' 为 3.2 (与黄磷的介电常数 $\varepsilon_r' = 3.17$ 相接近). 穿透深度在一定温度之后升高, 主要原因是物料中的水分被蒸发后物料吸收微波能量的能力变弱.

2.2 不同条件对物料微波干燥的影响

为了研究初始质量、初始含水率及微波功率对类黄磷物料的影响, 通过实验数据计算干燥过程中的干燥速率、微波干燥效率以及单位能耗. 在微波干燥过程中, 150 s 之前实现自由水的快速脱离, 含水率急剧下降, 150 s 之后干燥物料内部存在难以去除的毛细水和结合水, 此时含水率变化较小. 此外, 在含水率为 30%、微波功率为 540 W、初始质量不同的条件下, 物料干燥速率随着质量的增大而逐渐减小, 质量为 20 g 的干燥速率为 $27.51\% \cdot \text{min}^{-1}$ (图 4(a)). 在初始质量为 20 g、微波功率为 540 W、初始含水率不同的条件下, 干燥速率随含水率的增大而增大, 含水率为 40% 的干燥速率为 $26.34\% \cdot \text{min}^{-1}$ (图 4(b)). 主要原因是相同质量物料的单位体积含水率最高, 水分子可以吸收更多的电磁能量, 从而实现高效干燥类黄磷物料^[30]. 当微波功率为 900 W 时, 干燥速率达到最大, 为 $27.34\% \cdot \text{min}^{-1}$ (图 4(c)). 微波加热可以实现物料的快速干燥, 且随着微波功率的增加, 所需干燥时间减少^[31]. 当微波功率为 360 W 时所需干燥时间为 330 s, 而微波功率为 900 W 时所需干燥时间为 240 s, 说明释放的微波能量随着微波功率的增加而变多. 其主要原因是微波功率越大, 物料可以吸收更多

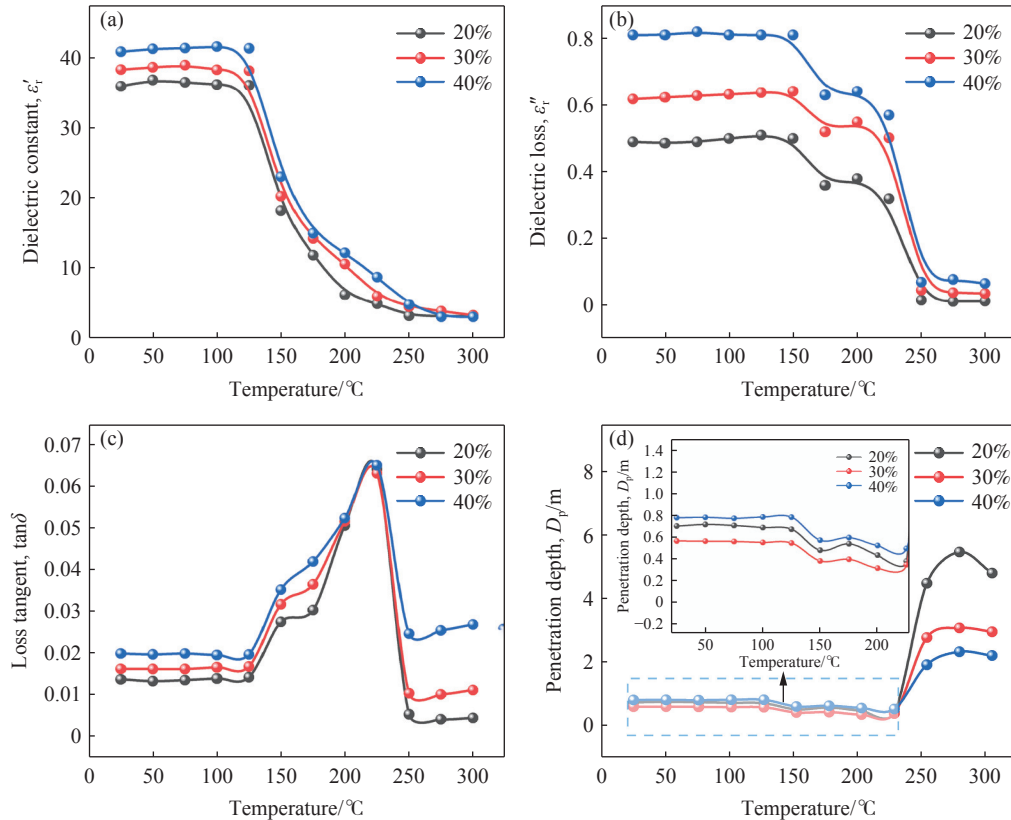


图3 不同含水率物料(微波频率为2.45 GHz)参数随温度的变化曲线。(a) 介电常数 ϵ' ; (b) 损耗因子 ϵ'' ; (c) 损耗角正切 $\tan\delta$; (d) 微波穿透深度 D_p

Fig.3 Variation curves of parameters with temperature for materials with different water content (microwave frequency of 2.45 GHz): (a) dielectric constant ϵ' ; (b) dielectric loss ϵ'' ; (c) loss tangent $\tan\delta$; (d) penetration depth D_p

的电磁能, 吸收的电磁能可以转化为热能, 加速水分挥发^[13]。

通过微波干燥效率和单位能耗来评价初始质量、初始含水率和微波功率对物料微波干燥能量效率的影响^[7,32]。微波干燥效率(η)是材料中水分转化为水蒸气的能量和微波提供的能量之比, 计算公式如下^[33]:

$$\eta = \frac{m_w \lambda_w}{Pt} \times 100\% \quad (9)$$

式中: m_w 为蒸发水分的质量, kg; λ_w 为水分气化潜热 (2257 kJ·kg⁻¹); P 为微波功率, W; t 为微波干燥时间, s。

单位能耗(Q_s)是单位质量物料蒸发水分的能耗, 单位为 MJ·kg⁻¹。计算公式如下^[33]:

$$Q_s = \frac{Pt}{m_w} \times 10^{-6} \quad (10)$$

根据式(9)和式(10)计算微波干燥效率和单位能耗, 结果如图4(d), (e)和(f)所示。图4(d)和(e)表明, 随着初始质量和初始含水率的增加, 微波干燥效率随之增大, 相应的单位能耗显著降低。由图4(f)可知, 随着微波功率的增加, 干燥时间变短, 微波干燥效率显著降低, 而相应的单位能耗随

着微波功率的增大而增大。主要原因是微波功率的增大导致水分蒸发量增大。如图4(d), (e)和(f)可知, 当初始质量为50 g, 初始含水率为40%, 微波功率为360 W时, 微波干燥效率最大为21.51%, 单位能耗最低为10.99 MJ·kg⁻¹。

将类黄磷物料在温度为60℃、电压为220 V、频率为50 Hz、功率为2050 W的鼓风干燥箱以及温度为100℃、电压为220 V、频率为50/60 Hz, 功率为2500 W的马弗炉中做三组重复常规干燥实验, 实验数据取平均值。两种常规干燥所用时间分别为45 min和36.5 min, 而微波干燥在360 W时所用时间为5.5 min, 在900 W时所用时间为4 min。由表4可知, 常规干燥的干燥效率远不及微波干燥, 单位能耗远大于微波干燥。验证微波干燥技术节能高效, 在工业上的应用可以缩短操作时间。

2.3 动力学模型的数据拟合与分析

通过Page、Modified page、Simplified Fick's diffusion和Wang and Singh四种薄层干燥动力学模型探究物料的微波干燥过程动力学特性。采用物料初始质量为50 g, 初始含水率为30%, 微波功率为900 W的相关实验数据进行拟合与分析, 确定最佳动力学模型。由表5、表6、表7中的拟合数据

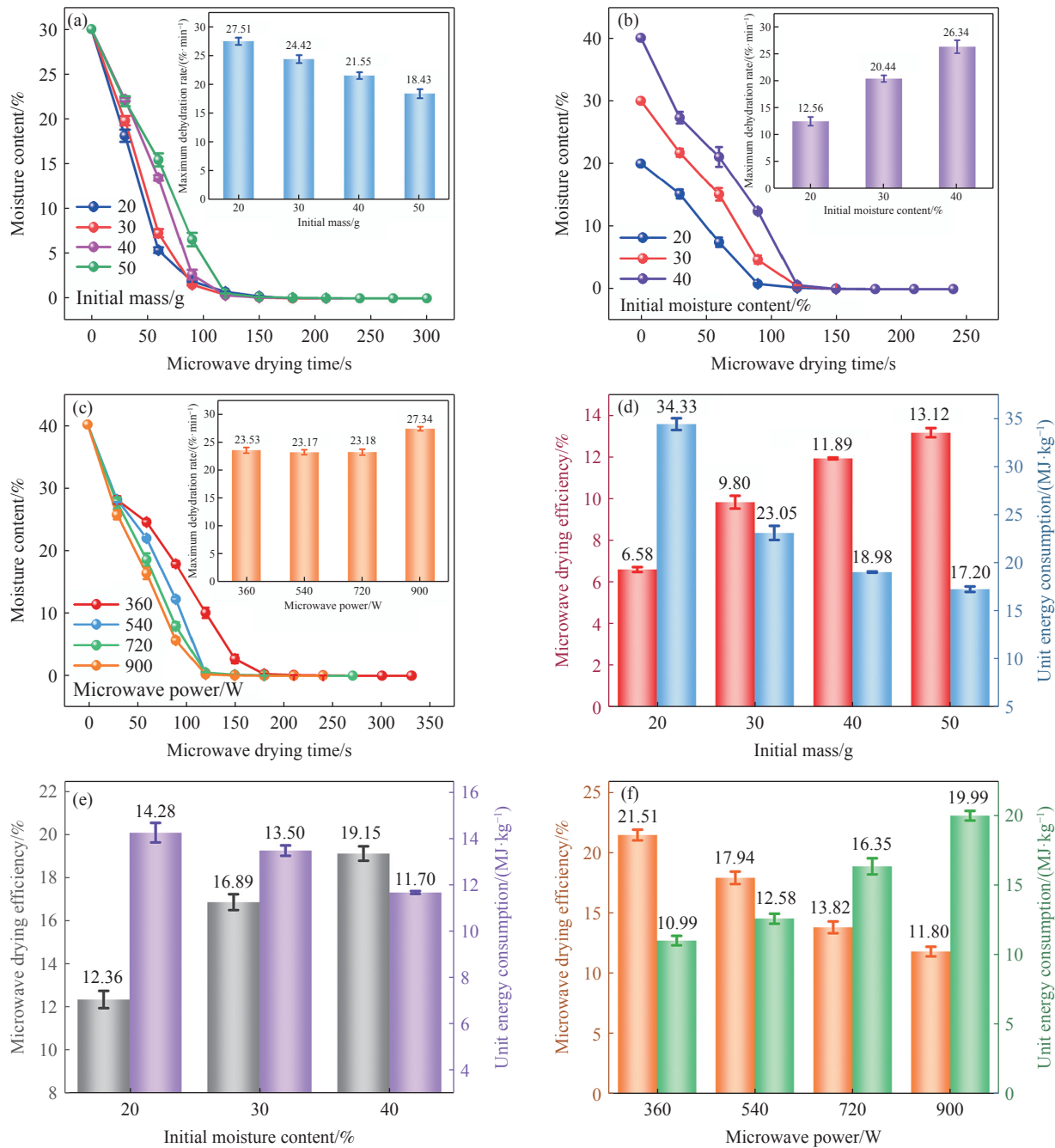


图4 不同初始质量(a)、初始含水率(b)及微波功率(c)条件下的含水率-时间曲线;不同初始质量(d)、初始含水率(e)及微波功率(f)条件微波干燥效率-单位能耗图

Fig.4 Moisture content-time curves for different initial mass (a), initial moisture content (b) and microwave power (c); microwave drying efficiency-unit energy consumption graphs for different initial mass (d), initial moisture content (e) and microwave power (f) conditions

可知, Modified Page 模型的 R^2 范围在 0.99165 ~ 0.99837 之间, RSS 的范围在 0.00167 ~ 0.00915 之间, F 值的范围在 627.47262 ~ 2990.27238 之间. 图 5(a), (b) 和 (c) 是不同模型与实验数据的拟合曲线图, 从图上直观可以看出 Modified Page 模型的拟合效果最佳. 图 5 (d), (e) 和 (f) 是干燥动力学的正态分布图, 其中 Modified page 模型的分布最为正态化. 结果表明, 与另外三种模型相比, Modified page 模型的 R^2 值更接近 1, RSS 值更小, F 值更大, 能够有效

描述物料的微波干燥过程.

为了验证 Modified Page 模型的拟合效果, 将 Modified page 模型与不同条件下的所有实验数据进行拟合, 拟合数据如表 8 所示, 从图 6(a), (b) 和 (c) 可以看出拟合效果良好. 不同初始质量、初始含水率和微波功率下的水分比数据符合正态分布, 如图 6(d), (e) 和 (f) 所示. 从残差分布图看出模型与实验数据的残差分布是随机的, 进一步证明模型拟合正确. 进一步验证 Modified page 模型对

表 4 微波干燥与常规干燥参数对比

Table 4 Comparison of microwave drying and conventional drying parameters

Drying methods	Power/W	Time/s	Drying efficiency/%	Unit energy consumption/(MJ·kg ⁻¹)
Microwave drying	360	330	21.51	10.99
	540	270	17.94	12.58
	720	270	13.82	16.35
	900	240	11.80	19.99
Hot air drying	2050	2700	9.30 × 10 ⁻⁷	2401.32
High-temperature furnace	2500	2190	9.24 × 10 ⁻⁷	2370.13

表 5 不同模型在初始质量为 50 g, 含水率为 30%, 功率为 540 W 条件下的拟合结果

Table 5 Fitting results of different models at 50 g material weight, 30% initial moisture content, 540 W microwave power

Model	R ²	RSS	F-value
Page	0.99837	0.00167	2990.10032
Modified Page	0.99837	0.00167	2990.27238
Simplified Fick's diffusion	0.97532	0.02536	110.93019
Wang and Singh	0.93578	0.06599	772.45486

表 6 不同模型在初始含水率为 30%, 质量为 20 g, 功率为 540 W 条件下的拟合结果

Table 6 Fitting results of different models at 30% initial moisture content, 20 g material weight, 540 W microwave power

Model	R ²	RSS	F-value
Page	0.99197	0.00917	666.52219
Modified Page	0.992	0.00915	668.25558
Simplified Fick's diffusion	0.955671	0.044947	68.98683
Wang and Singh	0.98353	0.011882	3322.96016

表 7 不同模型在微波功率为 900 W, 含水率为 40%, 质量为 50 g 条件下的拟合结果

Table 7 Fitting results of different models at a 900 W microwave power, 40% initial moisture content, 50 g material weight

Model	R ²	RSS	F-value
Page	0.99163	0.00911	625.83417
Modified Page	0.99165	0.00909	627.47262
Simplified Fick's diffusion	0.96754	0.03535	990.7175
Wang and Singh	0.9836	0.01787	3317.52598

类黄磷物料干燥过程描述的准确性, 将干燥过程中水分比 MR 的实验计算值与 Modified page 模型的拟合值进行对比, 如图 7 所示. 可以看出 MR 的实验值与 Modified page 模型的拟合值基本在一条斜率为 1 的直线上. 因此, 在不同初始质量、初始含水率和微波功率条件下, Modified Page 模型可

以很好的解释微波干燥类黄磷物料的特性.

2.4 扩散系数和活化能的计算

各种物质的干燥过程通过菲克第二扩散定律来描述. 将实验所得数据对 ln(MR) 与 t 进行线性拟合, 得到计算有效湿份扩散系数的梯度和截距, 表明 Ln(MR) 与 t 具有良好的线性关系, 如图 8 所示. 水在物料中的扩散用菲克第二定律描述^[34-36]:

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{u=1}^{u=\infty} \frac{1}{u^2} \exp \left[-\frac{4u^2\pi^2 O_e}{d^2} t \right] \quad (11)$$

当 u 等于 1 时, 可得式 (12):

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp \left[-\frac{4\pi^2 O_e}{d^2} t \right] \quad (12)$$

式 (12) 两边同时取对数, 可得式 (13):

$$\ln(MR) = \ln \frac{6}{\pi^2} - \frac{4\pi^2 O_e}{d^2} t \quad (13)$$

式中: O_e 为有效湿份扩散系数, $m^2 \cdot s^{-1}$; t 为干燥时间, s; d 为物料颗粒的直径, m.

将式 (13) 和相关实验数据拟合得到拟合直线的梯度. 由梯度可求得平均有效湿份扩散系数:

$$O_e = -a \frac{d^2}{\pi^2} \quad (14)$$

式中, a 为 ln(MR) 与 t 拟合曲线的斜率.

研究了 O_e 在不同初始质量、初始含水率和微波功率条件下的变化规律. 随着物料质量和初始含水率的增大, O_e 先增大后减小, 如图 8 所示. 主要原因是初始质量和初始含水率越高, 物料可以吸收更多的微波能量, 物料传质速率增加. 但初始质量和初始含水率过高会导致物料内部的结构更复杂, 从而降低干燥的传质速率. 当初始质量为 40 g、初始含水率为 30% 时, O_e 分别达到最大值. 初始质量小于 40 g 时, 微波吸收效率随质量的增大而提高. 但是当质量大于 40 g 时, 内部可以吸收的电磁能量减少甚至不吸收能量, 导致 O_e 逐渐减小. 当含水率小于 30% 时, O_e 随着含水率的增大而增

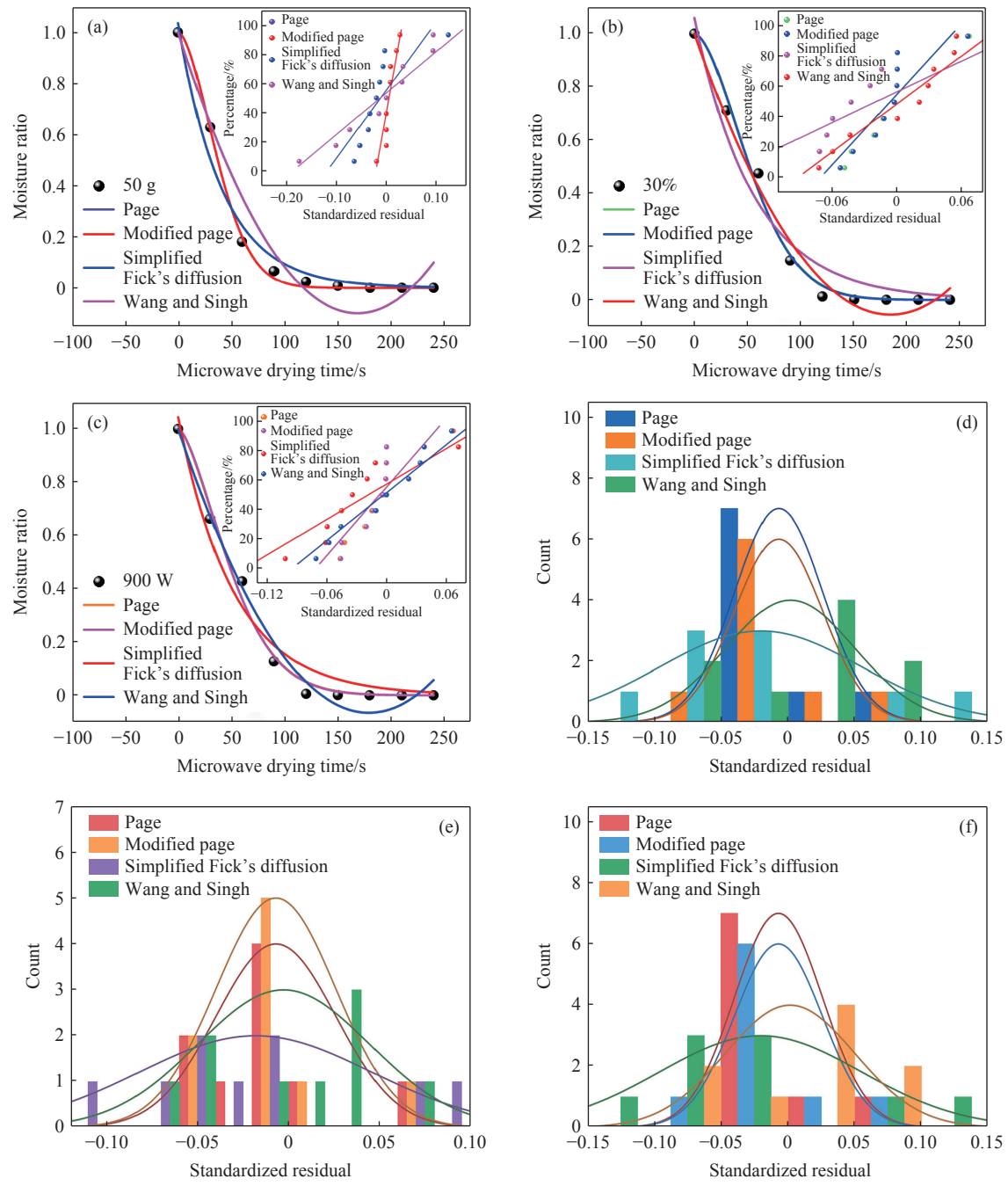


图5 不同干燥动力学模型 Page、Modified page、Simplified Fick's diffusion 和 Wang and Singh 与实验数据的拟合曲线和正态分布图。(a, d) 初始质量 50 g, 初始含水率 30%, 微波功率 540 W 的拟合曲线与正态分布; (b, e) 初始含水率 30%, 初始质量 20 g, 微波功率 540 W 的拟合曲线与正态分布; (c, f) 微波功率 900 W, 初始含水率 40%, 初始质量 50 g 的拟合曲线与正态分布

Fig.5 Fitted curves and normal distribution plots of different drying kinetic models: Page, Modified Page, Simplified Fick's diffusion, and Wang and Singh against experimental data: (a, d) fitted curves with normal distribution for initial mass 50 g, initial moisture content 30%, microwave power 540 W; (b, e) fitted curves with normal distribution for initial moisture content 30%, initial mass 20 g, microwave power 540 W; (c, f) fitted curves with normal distribution for microwave power 900 W, initial moisture content 40%, initial mass 50 g

大, 到达 30% 的临界值之后, 水含量的增加使物料内部水分子的扩散能力减弱, 导致 O_e 变小. 水分子在物料中的 O_e 随微波功率的增大而增大, 当微波功率从 360 W 增加到 900 W 时, O_e 从 $1.00 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $1.64 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. 微波加热主要是由于偶极子旋转和离子传导, 导致能量转化为

热能而不是传热. 微波对物料的热效应与其吸波性能密切相关, 介电常数和介电损耗因子决定其吸波性能. 物料吸收微波能量的过程不是储存的过程, 会转化为热能, 物料吸收微波能量并将其转化为热能的能力受加热温度和介电性能的影响. 因此, O_e 增大的原因是物料吸收的微波能量随微

表 8 Modified Page 模型与实验数据拟合结果

Table 8 Results of fitting the Modified Page model to the experimental data

Condition factors	Condition	R^2	RSS	F-value
Initial mass	20 g	0.99837	0.00167	2990.2724
	30 g	0.99989	0.00013	45794.306
	40 g	0.99467	0.00658	1060.9327
	50 g	0.99252	0.00963	856.37235
Initial moisture content	20%	0.99793	0.00236	2408.98045
	30%	0.99200	0.009915	668.25558
	40%	0.98506	0.01616	368.86228
Microwave power	360 W	0.98577	0.03294	322.94741
	540 W	0.98095	0.02354	317.31312
	720 W	0.99176	0.00986	716.94608
	900 W	0.99165	0.00909	627.47262

波功率的增大而增大, 温度随之升高, 从而增强水分的扩散^[20].

活化能是干燥材料中每单位质量的水分所需要的能量. 本研究中, 可以采用 Arrhenius 方程来估算活化能:

$$O_e = O_0 \exp\left(-\frac{E_a m}{P}\right) \quad (15)$$

式中: O_e 为有效湿份扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; O_0 为频率因子, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; m 为物料初始质量, 50 g; P 为微波加热功率, W; E_a 为活化能, $\text{W} \cdot \text{g}^{-1}$.

将式 (15) 两边取对数可得:

$$\ln O_e = \ln O_0 - \frac{50 E_a}{P} \quad (16)$$

根据 $\ln O_e$ 与 $50/P$ 的相关性, E_a 可以由 Arrhenius 方程计算得出, E_a 越大则物料中的水分越难去除. 根据式 (16) 可计算活化能为 $5.95 \text{ W} \cdot \text{g}^{-1}$ ($R^2=0.999$).

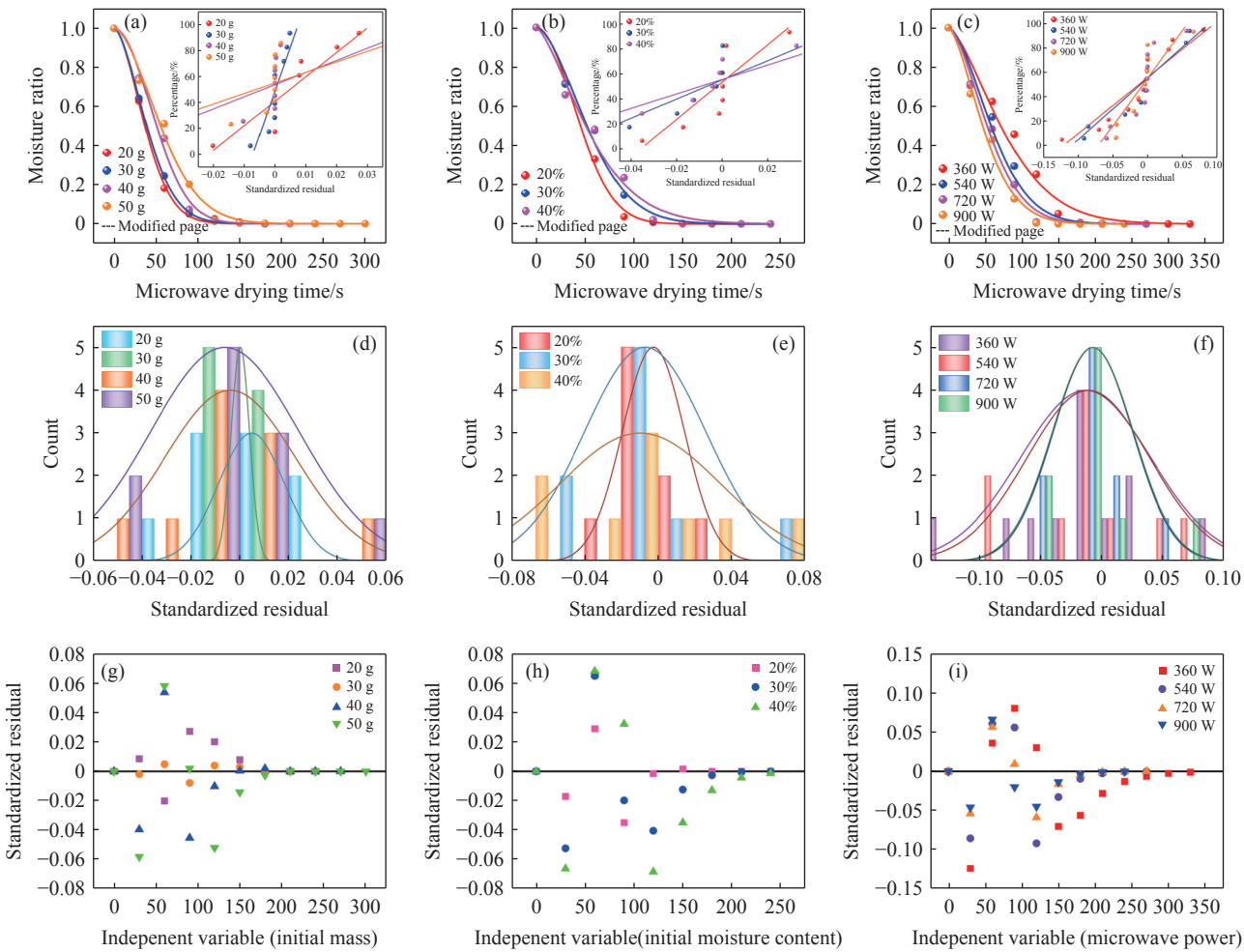


图 6 Modified Page 模型与实验数据的关系. (a, d, g) 不同初始质量条件下的拟合曲线、正态分布与残差分布图; (b, e, h) 不同初始含水率条件下的拟合曲线、正态分布与残差分布图; (c, f, i) 不同微波功率条件下的拟合曲线、正态分布与残差分布图

Fig.6 Relationship between Modified page model and experimental data: (a, d, g) fitted curves, normal and residual distribution plots for different initial mass conditions; (b, e, h) fitted curves, normal and residual distribution plots for different initial moisture content conditions; (c, f, i) fitted curves, normal and residual distribution plots for different microwave power conditions

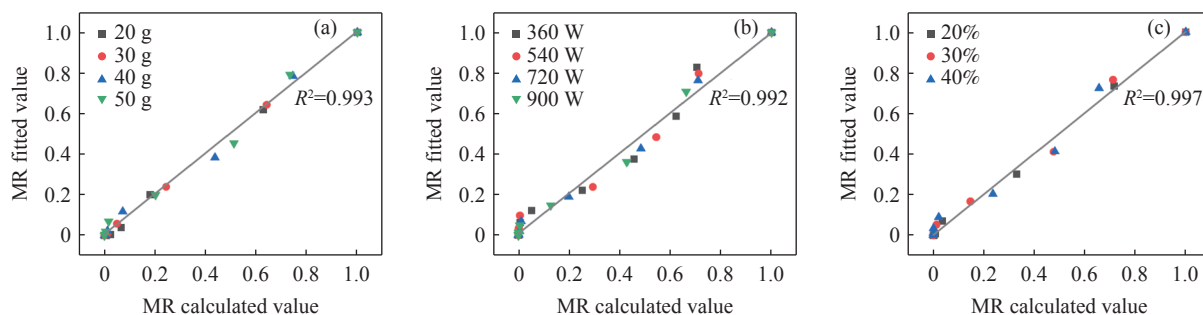


图7 MR 实验计算值与 Modified page 模型拟合值的关系。(a) 不同初始质量; (b) 不同微波功率; (c) 不同初始含水率

Fig.7 MR experimentally calculated values versus Modified page model fit: (a) different mass; (b) different microwave powers; (c) different moisture contents

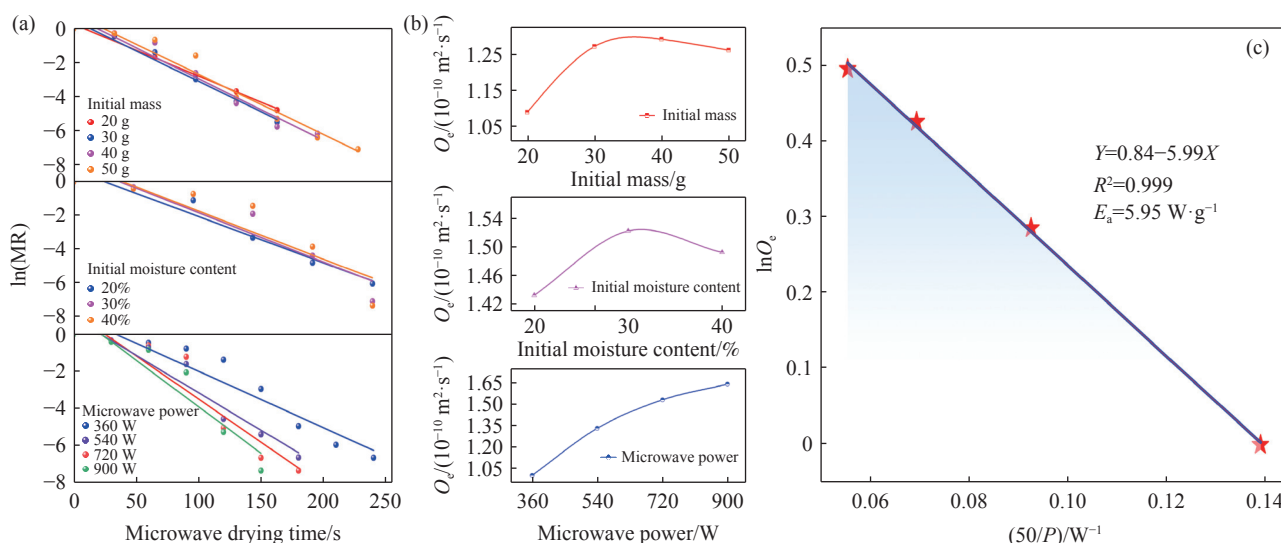


图8 不同初始质量、初始含水量和微波功率条件下的 (a) $\ln(MR)$ 与 t 的拟合曲线, (b) 水分子扩散系数, 以及 (c) $\ln O_e$ 与 $50/P$ 的线性关系图

Fig.8 Fitted curves of (a) $\ln(MR)$ versus t , (b) water molecule diffusion coefficient, and (c) $\ln O_e$ versus $50/P$ linearly for different initial mass, initial water content, and microwave power conditions

因此可验证微波加热可以有效节能, 微波干燥可以显著提高反应速率, 从而缩短反应时间。

2.5 微波干燥电磁场仿真模拟

微波功率对于电磁场仿真来说至关重要。根据实验发现, 干燥效率随着初始质量的增大而增大, 单位能耗随之降低。因此, 选用料层厚度为 15 mm 的物料来进行模拟, 研究微波功率对电磁场和温度场的影响。图 9 显示 2.45 GHz 频率下不同功率微波腔体、 X - Y 平面、腔体多切面的微波电场强度以及切面电阻损耗模拟结果图。电场强度随微波功率的增大而增大, 当功率从 360 W 增大到 720 W 时, 最大电场强度从 $8.13 \times 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 上升到 $1.15 \times 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ [37]。与实验部分的微波功率越大, 所需干燥时间越短这一现象吻合。不同功率的电场分布显示微波馈口处及 X - Y 平面的电场强度的值较大, 腔内整体的电场分布较为均匀, X - Y 平面的电场分布不均匀。在同一功率下, 微波加热时间增

加, 炉壁与物料整体的场强分布及大小无明显变化。结果表明, 在微波加热过程中, 微波功率对电场强度有较大影响。因此, 合理控制微波功率有助于实现高效干燥物料。图 10 显示料层厚度为 15 mm 的物料在不同功率条件下的模拟与实验部分的温度场分布情况, 可以看出不同加热时间物料温度分布的最大温度及最小温度差。温度通过红外热成像仪, 每组实验重复三次, 取平均值。随着功率及时间的增加, 物料温度随之增加。图 10 (b) 显示实测温度与模拟温度的对比, 可以看出模拟部分和实验部分热点与冷点的温度场分布一致, 升温趋势一致。

3 结论

本文采用微波干燥法处理类黄磷物料, 并对其干燥特性进行了研究。结果表明, 干燥时间随微波功率的增大而减小, 微波干燥效率随物料初始

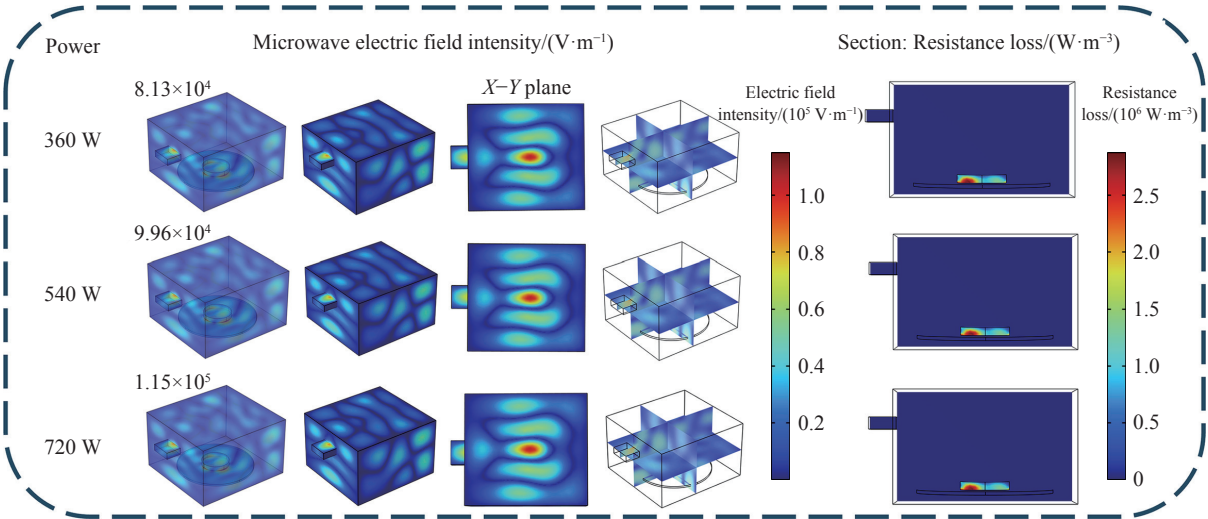


图 9 不同微波功率下的电磁场分布图

Fig.9 Electromagnetic field distribution at different microwave powers

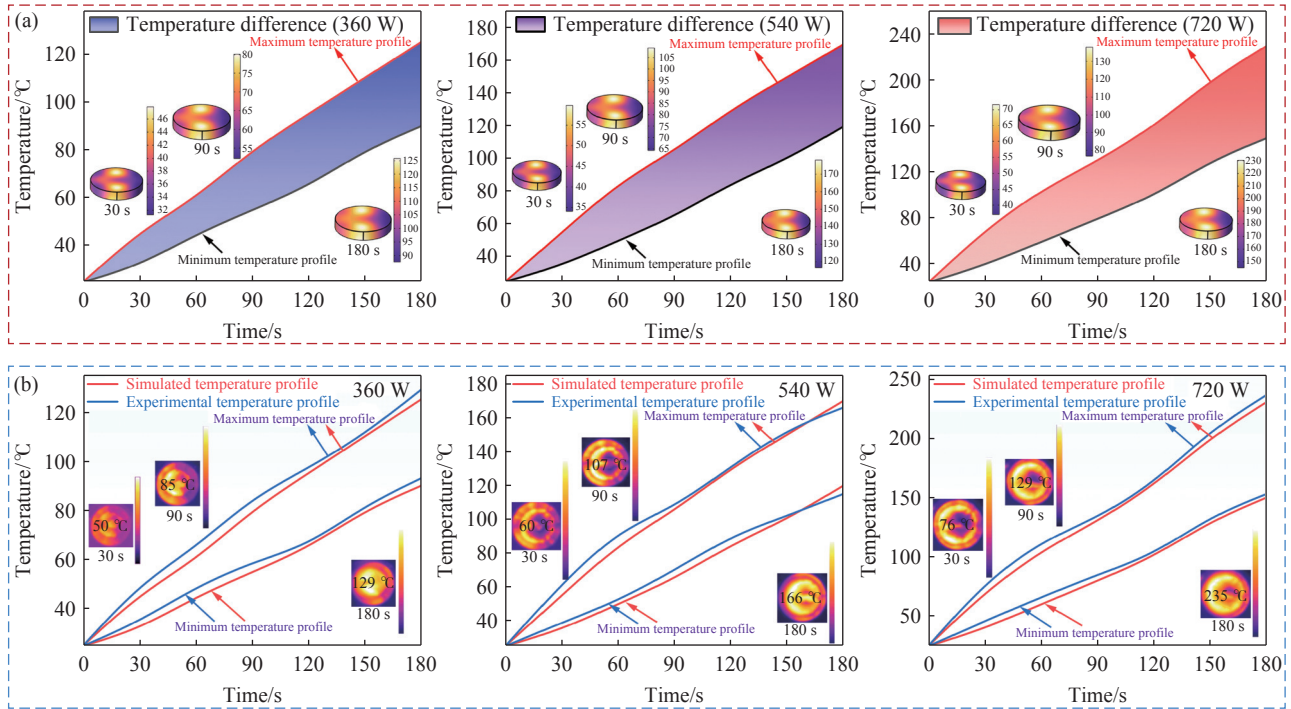


图 10 温度场分布图. (a) 物料厚度为 15 mm 的模拟图; (b) 实验与模拟验证图

Fig.10 Temperature field distribution plots: (a) simulation plot for material thickness of 15 mm; (b) experimental and simulation verification plot

质量和含水率的增大而增大, 单位能耗随之减小. 当微波功率为 360 W 时, 干燥效率可达 21.51%, 单位能耗为 $10.99 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. 此外, 采用四种薄层干燥动力学模型对水分比数据进行拟合, Modified page 模型的 R^2 和 F 值最大, RSS 值最小, 标准残差更符合正态分布, 拟合结果接近直线, 满足模型匹配度的判断条件, 可描述类黄磷物料的微波干燥过程. 此外, 对有效湿份扩散系数和活化能进行计算. 结果表明, 有效湿份扩散系数随着微波功率的增大而增大, 干燥活化能为 $5.95 \text{ W} \cdot \text{g}^{-1}$. 通过 COMSOL

模拟微波功率条件下电磁场与温度场的分布情况. 电场强度随微波功率的增大而增大, 与实验部分微波功率越大微波干燥所需时间减少这一现象相吻合, 温度场分布与实验相吻合, 可描述微波场作用下的干燥过程. 本研究可为高效干燥类黄磷物料提供一定的理论基础和技术支持.

参 考 文 献

[1] Liu Z Y, Yu Q B, Ma W D, et al. Experimental investigation on centrifugal granulation of molten yellow phosphorus slag. *Chem*

- Eng Res Des*, 2023, 197: 548
- [2] Wu F H, Zhao C Y, Qu G F, et al. A critical review of the typical by-product clean ecology links in the Chinese phosphorus chemical industry in China: Production technologies, fates and future directions. *J Environ Chem Eng*, 2022, 10(2): 106685
- [3] Li Y, Chen Z J, Jin Y, et al. Study of the Silica or K-feldspar as fluxing agent for the yellow phosphorus production. *Phosphorus Sulfur Silicon Relat Elem*, 2018, 193(8): 520
- [4] Liu X Y, Liu X M, Zhang Z Q. Recycling and comprehensive utilization of yellow phosphorus slag in building materials: A review. *Constr Build Mater*, 2023, 396: 132384
- [5] Yao Y. Study on pellet pre-treatment process to improve quality of phosphate rock powder for yellow phosphorus production. *Sulphur Phosphorus Bulk Mater Handl Relat Eng*, 2018(1): 1
(姚语. 黄磷生产磷矿粉提质增效的球团预处理工艺研究. *硫磷设计与粉体工程*, 2018(1): 1)
- [6] Hao X D, Yang M X, Huang W W, et al. Study on drying kinetics of calcium oxide doped zirconia by microwave-assisted drying. *Ceram Int*, 2022, 48(20): 30430
- [7] Qiu Y, Bi J F, Jin X, et al. Investigation on the rehydration mechanism of freeze-dried and hot-air dried shiitake mushrooms from pores and cell wall fibrous material. *Food Chem*, 2022, 383: 132360
- [8] Zheng H W, Hao X D, Zhang S R, et al. Modeling of process and analysis of drying characteristics for natural TiO_2 under microwave heating. *Chem Eng Process Process Intensif*, 2022, 174: 108900
- [9] Bakalis S, Fryer P J, Lopez-Quiroga E. Heat Treatment of Milk: Microwave Technology and Ohmic Heating // McSweeney P L H, McNamara J P. *Encyclopedia of Dairy Sciences*. 3rd Ed. New York: Elsevier, 2022
- [10] Lan W H, Wang X, Xiao P. Agglomeration on drying of yttria-stabilised-zirconia slurry on a metal substrate. *J Eur Ceram Soc*, 2006, 26(16): 3599
- [11] Hameed A, Maan A A, Nazir A, et al. Microwave-vacuum extraction technique as a green and clean label technology: Kinetics, efficiency analysis, and effect on bioactive compounds. *Food Anal Meth*, 2023, 16(3): 525
- [12] Zheng H W, Li Q N, Ling Y Q, et al. Optimisation on the microwave drying of ammonium polyvanadate (APV)- based on a kinetic study. *J Mater Res Technol*, 2021, 13: 1056
- [13] Huang J H, Chen C Y, Song Z H, et al. Effect of microwave pretreatment of perilla seeds on minor bioactive components content and oxidative stability of oil. *Food Chem*, 2022, 388: 133010
- [14] Alfiya P V, Rajesh G K, Murali S, et al. Quality evaluation of solar and microwave dried shrimps—A comparative study on renewable and dielectric heating methods. *Sol Energy*, 2022, 246: 234
- [15] Huang W W, Zhang Y Q, Lu J J, et al. Microwave drying method investigation for the process and kinetics of drying characteristics of high-grade rutile TiO_2 . *Ceram Int*, 2023, 49(10): 15618
- [16] Cao W, Zhou J, Ren C X, et al. Research on the drying kinetics for the microwave drying of $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ ceramic powder. *J Mater Res Technol*, 2023, 26: 4563
- [17] Zhou J, Tian C L, Ren C X, et al. Dynamics characteristics and microstructure evolution of $\text{Sc}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ ceramic powders during microwave drying. *Ceram Int*, 2024, 50(8): 12934
- [18] Al-Ali M, Parthasarathy R. Influence of microwave drying and conventional drying methods on the mechanical properties of naproxen sodium drug tablets. *Particuology*, 2020, 53: 30
- [19] Skansi D, Tomas S. Microwave drying kinetics of a clay-plate. *Ceram Int*, 1995, 21(3): 207
- [20] Zhou J, Cao W, Zhang Y Q, et al. Effect of microwave drying technology on drying kinetics of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ composite ceramic powder. *J Mater Res Technol*, 2023, 24: 6762
- [21] Zamanhuri N A, Abd Rahman N, Bakar N F A. Extraction of palm fatty acids from sterilized oil palm mesocarp by microwave technique: Optimization and kinetics. *Mater Today Proc*, 2022, 63: S166
- [22] Salvi D, Boldor D, Aita G M, et al. COMSOL Multiphysics model for continuous flow microwave heating of liquids. *J Food Eng*, 2011, 104(3): 422
- [23] Geedipalli S S R, Rakesh V, Datta A K. Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens. *J Food Eng*, 2007, 82(3): 359
- [24] Ren L, Zhang K, Wang F, et al. Microwave heating of coal slime based on multi-physics field simulations: Regulating waveguide port size and sample radius to improve microwave utilization efficiency. *Chem Eng J*, 2023, 470: 143975
- [25] Zhu W X, Nie Z H, Wang H D, et al. Simulation on temperature field of microwave reheating of cold-chain quick-frozen food with different packaging materials. *Packag Eng*, 2022, 43(11): 198
(朱文娴, 聂子恒, 王浩东, 等. 基于包装材料冷链速冻食品微波复热温度场仿真研究. *包装工程*, 2022, 43(11): 198)
- [26] Zhang K, Lu L X, Wang J. Simulation of microwave heating of packaged food by software COMSOL. *Packag Eng*, 2014, 35(5): 1
(张柯, 卢立新, 王军. 基于 COMSOL 的包装食品微波炉加热模拟. *包装工程*, 2014, 35(5): 1)
- [27] Zhu J Y, Yi L P, Yang Z Z, et al. Three-dimensional numerical simulation on the thermal response of oil shale subjected to microwave heating. *Chem Eng J*, 2021, 407: 127197
- [28] Lu J X, Shi S L, Li H, et al. Thermodynamic analysis of moist coal during microwave heating using coupled electromagnetic, multi-phase heat and mass transfer model. *Chem Eng Sci*, 2022, 255: 117690
- [29] Lin J H, Sun S C, Xu D H, et al. Microwave directional pyrolysis and heat transfer mechanisms based on multiphysics field stimulation: Design porous biochar structure via controlling hotspots formation. *Chem Eng J*, 2022, 429: 132195

- [30] Ahmed M, Faisal M, Laskar A, et al. Experimental studies for thin layer model validation and microwave drying characteristics of beetroot considering energy optimization. *Fuel*, 2023, 346: 128345
- [31] Chen H L, Li T, Wang Z, et al. Effect of dielectric properties on heat transfer characteristics of rubber materials *via* microwave heating. *Int J Therm Sci*, 2020, 148: 106162
- [32] Jafari H, Kalantari D, Azadbakht M. Energy consumption and qualitative evaluation of a continuous band microwave dryer for rice paddy drying. *Energy*, 2018, 142: 647
- [33] Soysal Y, Öztekin S, Eren Ö. Microwave drying of parsley: Modelling, kinetics, and energy aspects. *Biosyst Eng*, 2006, 93(4): 403
- [34] Song Z L, Jing C M, Yao L S, et al. Microwave drying performance of single-particle coal slime and energy consumption analyses. *Fuel Process Technol*, 2016, 143: 69
- [35] Diao J, Hess D W. Use of angle-resolved XPS to determine depth profiles based on Fick's second law of diffusion: Description of method and simulation study. *J Electron Spectrosc Relat Phenom*, 2004, 135(2-3): 87
- [36] Darvishi H, Azadbakht M, Rezaeiasl A, et al. Drying characteristics of sardine fish dried with microwave heating. *J Saudi Soc Agric Sci*, 2013, 12(2): 121
- [37] Fu B A, Chen M Q, Song J J. Investigation on the microwave drying kinetics and pumping phenomenon of lignite spheres. *Appl Therm Eng*, 2017, 124: 371