

基于电场分布的单波导矩形微波喷动床结构设计

Design of rectangular microwave spouted bed with single waveguide based on electric field distribution

帅炜奎¹ 王瑞芳^{1,2} 高亚平¹

SHUAI Wei-kui¹ WANG Rui-fang^{1,2} GAO Ya-ping¹

吴龙^{1,2} 徐庆^{1,2} 李占勇^{1,2}

WU Long^{1,2} XU Qing^{1,2} LI Zhan-yong^{1,2}

(1. 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222;

2. 天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室, 天津 300222)

(1. Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-line Monitoring for Light Industry & Food Machinery and Equipment, Tianjin 300222, China)

摘要:针对矩形微波喷动床,基于喷动腔内电场强度及电场分布均匀性进行结构分析与优化。采用的评价指标为反映电场分布均匀性的变异系数 COV 、平均电场强度 E_{mean} 和反映电场局部集聚参数 E_{max}/E_{mean} 。利用多物理场耦合软件 COMSOL Multiphysics 对喷动腔内电场强度进行数值模拟,通过单因素和正交试验法分别分析喷动床结构参数 a (喷动床宽)、 H (波导位置) 和 L (喷动床高) 对评价指标的影响。结果发现, a 对 COV 和 E_{max}/E_{mean} 的影响最显著, H 对 E_{mean} 的影响最显著; a 与 L 的交互作用对 COV , E_{mean} 和 E_{max}/E_{mean} 的影响均显著。单波导矩形微波喷动床的优化结构为: $a=427\text{ mm}$, $H=200\text{ mm}$, $L=1\ 000\text{ mm}$ 。

关键词:微波干燥; 喷动床; 电场; 均匀性; 数值模拟

Abstract: The structure of rectangular microwave spouted bed was optimized based on the good electric field intensity and distribution. The evaluation index was the coefficient of variation COV which reflected the uniformity of the electric field distribution, and the average electric field intensity E_{mean} and the local gathering parameter E_{max}/E_{mean} . The numerical simulation of the electric field intensity in the spouted bed was carried out by using the COMSOL Multiphysics to analyze the effects of the parameters a (spouted bed width), H (waveguide position) and L (spouted bed height). The results showed that the effect of a value on COV and E_{max}/E_{mean} was the most significant, but H value on E_{mean} was the most significant. The interaction between a and L was significant for COV , E_{mean} and

E_{max}/E_{mean} . The optimized structure of rectangular microwave spouted bed with single waveguide was: $a=427\text{ mm}$, $H=200\text{ mm}$, and $L=1\ 000\text{ mm}$.

Keywords: microwave drying; spouted bed; electric field; uniformity; numerical simulation

微波喷动床是集微波加热与喷动床优势于一体的微波联合干燥装置。其既具有微波加热速度快的优点,又能利用喷动床中物料的随机运动改善微波加热不均匀的缺点。微波喷动床干燥于1998年由美国的Feng等^[1-3]提出并进行了相关的研究,研究结果表明,微波辅助喷动床联合干燥可以有效缩短干燥时间,提高物料干燥均匀性和干制品的品质。Nindo等^[4]通过研究芦笋的品质变化,得出微波喷动床干燥有利于提高干燥速度,改善产品的复水性及色泽,同时更好地保留了总抗氧化活性物。张懋等^[5-6]以颗粒状切割蔬菜为原料,研究物料在微波喷动床中的温度变化规律及其传质模型,得出微波喷动床联合干燥土豆块的膨化特性和复水率都很理想。Chen等^[7]研究了微波喷动床干燥数学模型,对微波干燥过程中的过热问题进行了预测。王建中^[8]对茭白颗粒微波喷动床干燥进行研究,表明微波喷动床干燥后的产品品质接近真空冷冻干燥的,而且能耗远远低于冷冻干燥的。Kahyaoglu等^[9]对比了微波喷动床与喷动床干燥速煮小麦的干燥速率以及有效扩散系数,发现功率密度为3.5, 7.5 W/g时,微波喷动床的干燥时间相比喷动床分别减小60%, 85%,有效扩散系数从 $1.44 \times 10^{-10} \sim 3.32 \times 10^{-10}$ 提高到 $5.06 \times 10^{-10} \sim 11.3 \times 10^{-10}$ 。

目前,对微波喷动床的研究主要集中在物料干燥动力

作者简介:帅炜奎,男,学士。

通信作者:王瑞芳(1974—),女,天津科技大学教授,博士。

E-mail: wangruifang@tust.edu.cn

收稿日期:2017-11-25

学、干燥均匀性及干制品品质方面,对于微波喷动床装置的结构设计未见文献提及。微波加热的不均匀性是制约微波应用的主要瓶颈。而微波腔内电磁场分布的不均匀是造成微波加热不均匀的主要因素。因此,在微波喷动床设计时首先应保证腔内电磁场分布的均匀性。传统喷动床为柱锥形结构,但最适合于微波加热的腔体结构为矩形腔,因此,本研究针对矩形微波喷动床,采用多物理场耦合软件 COMSOL Multiphysics^[10],通过求解一定边界条件的麦克斯韦方程组对喷动床内的电场进行数值模拟。主要研究了在单波导矩形微波喷动床结构设计时,各结构尺寸对喷动腔内电场强度及电场分布均匀性的影响,并对结构进行优化。模拟边界条件采用反映实际情况的阻抗边界条件。

阻抗边界条件的计算公式为:

$$\sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0}} \times n \times H + E - (n \times E)n = (n \times E_s) \times n - E_s, \quad (1)$$

式中:

μ_0 ——真空磁导率, $4\pi \times 10^{-7}$ H/m;

μ_r ——材料的相对磁导率;

ϵ_0 ——真空介电常数, 8.85×10^{-12} F/m;

H ——磁场强度, A/m;

E ——电场强度, V/m;

E_s ——源电场,用于指定边界上的一个面电流源, V/m。

1 矩形微波喷动床结构

图 1(a) 为矩形微波喷动床装置结构图,喷动床为柱锥体结构。在本研究中,将其结构简化见图 1(b)。喷动床采用对称结构,其尺寸表示为 $a \times a \times L$ 。周云龙等^[11]在对变倾角柱锥体喷动床颗粒流速与浓度分布特性研究中得出锥体倾角为 60° 时,颗粒在喷动床内的分布状态最佳。因此,本研究将喷动床的锥底角设计为 60° 。波导数量对微波腔内电磁场的分布有很大的影响,本研究中使用一个波导口,位于一侧壁面上,波导型号为标准 BJ-26 型波导。考虑到腔内电场强度不能太小和分布的均匀性,在一个波导口的情况下,喷动床边长 a 不能取太大。为了研究喷动床结构尺寸与波长的关系,以与波长 ($\lambda = 122$ mm) 的倍数关系取值,最大值为 3.5 倍的波长,最小值取 1 倍波长;喷动床高度 L 由具体处理物料的最大喷动高度决定, L 取值范围为 800~1 100 mm;波导口位置 H 的取值范围为 100~400 mm。微波入射功率设

置为 100 W。数值模拟中,在微波腔内取超过 1.0×10^5 个数据点进行分析。

2 评价指标

2.1 COV

COV 用于衡量喷动床内电场分布的均匀程度, COV 越小则电场分布越均匀,是评价结构合理性的重要指标。COV 由式(2)计算:

$$COV = \frac{1}{E} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}{n}}, \quad (2)$$

式中:

COV——变异系数;

n ——取样点数;

E_i ——取样点的电场强度, V/m;

$\bar{E}$ ——喷动床内的平均电场强度, V/m。

2.2 E_{mean}

E_{mean} 是微波腔内电场强度的平均值。根据微波加热原理,微波加热功率与电场强度呈正比关系,故 E_{mean} 表征微波能量的利用程度, E_{mean} 越大,微波能利用越高。 E_{mean} 按式(3)计算:

$$E_{\text{mean}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i. \quad (3)$$

2.3 $E_{\text{max}}/E_{\text{mean}}$

$E_{\text{max}}/E_{\text{mean}}$ 是微波腔内电场强度的最大值与平均值的比值。在多模微波腔内,由于电磁场反射叠加,容易造成局部电磁场集聚而出现物料过热现象。 $E_{\text{max}}/E_{\text{mean}}$ 越小,表明微波局部过热现象越不显著。

3 数据分析及处理方法

3.1 单因素试验法

针对喷动床结构的 3 个尺寸 (a , H 和 L), 主要分析了当 L 为固定参数 ($L = 800$ mm) 时, a 和 H 对 COV、 E_{mean} 及 $E_{\text{max}}/E_{\text{mean}}$ 的影响, 其中 a 为 $122(\lambda)$, $183(1.5\lambda)$, $244(2.0\lambda)$, $305(2.5\lambda)$, $366(3.0\lambda)$, $427(3.5\lambda)$ mm, H 为 100, 200, 300, 400 mm; 当 a 为固定参数 ($a = 427$ mm) 时, H 和 L 对 COV、 E_{mean} 及 $E_{\text{max}}/E_{\text{mean}}$ 的影响, 其中 H 为 100, 200, 300, 400 mm, L 为 800, 900, 1 000, 1 100 mm。

3.2 正交试验设计法

建立三因素四水平正交试验。设计表采用标准型 $L_{32}(4^3)$ 。

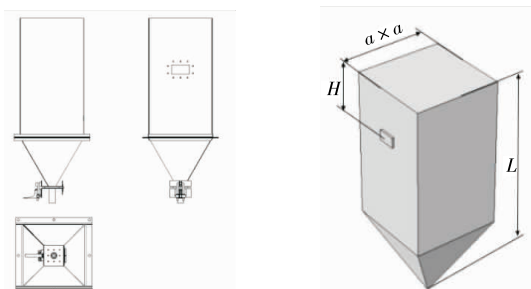
3.3 数据处理方法

本研究利用 Minitab 统计软件对试验数据进行方差分析, 获得各因素的显著性水平, 同时判断各因素间是否存在交互作用, 从而获得最优数据组合。

4 结果与讨论

4.1 单因素试验法数据分析

4.1.1 a 和 H 对 COV、 E_{mean} 及 $E_{\text{max}}/E_{\text{mean}}$ 的影响 图 2 研究了当 L 为 800 mm 时, a 与 H 对矩形喷动床内电场及电场分布的影响。由图 2(a) 可见, 当 $a > 122$ mm 时, H 和 a 对



(a) 矩形微波喷动床装置结构 (b) 矩形微波喷动床模拟结构

图 1 单波导矩形微波喷动床结构图

Figure 1 The structure diagram of rectangular microwave spouted bed with single waveguide

COV 的影响不大,数据基本集中在 0.45~0.55。一般腔体尺寸越大,腔内模式数越多,电场分布越均匀。本研究中 a 的取值应在 2 倍波长及以上。这与文献[12]中提到的多模腔的腔体尺寸一般为几倍波长及以上相一致。

由图 2 (b)可知,平均电场强度与喷动腔的大小没有明显的规律可寻,在同样的入射功率下,电场强度并未随着腔体体积增大而呈减小趋势。最大平均电场强度出现在 a 为 305 mm, H 为 400 mm 结构中。当 a 为 366 mm 时,不论 H 值多大,平均电场强度值均较小。微波腔内,原则上 E_{mean} 值越大,代表微波能越大,越有利于微波加热。但平均电场强度值增大有 2 种可能,一种是腔内总体场强值增大,没有局部电场集聚现象;另一种是由于腔内个别位置出现电场集聚而导致的平均电场值增大。对于后者,会导致微波加热中物料出现局部严重过热现象,在微波腔设计中应该避免。因

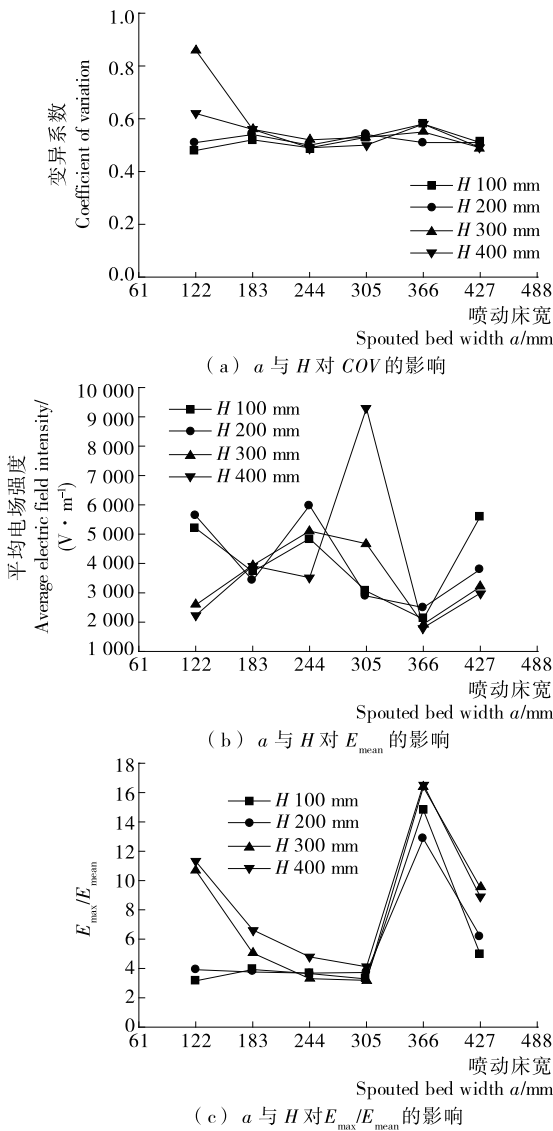


图 2 a 与 H 对 COV、 E_{mean} 及 $E_{\text{max}}/E_{\text{mean}}$ 的影响
($L=800$ mm)

Figure 2 The effect of a and H value on COV, E_{mean} and $E_{\text{max}}/E_{\text{mean}}$ ($L=800$ mm)

此,单纯依据 E_{mean} 值判断电场优劣具有一定的片面性。本研究通过 $E_{\text{max}}/E_{\text{mean}}$ 值反映电场集聚现象,值越大,代表电场集聚越严重。由图 2 (c)可知,当 a 为 366 mm 时,不论 H 值多大, $E_{\text{max}}/E_{\text{mean}}$ 值均较大,说明此结构电场集聚严重。由图 3 可知,电场集聚主要出现在波导口处。

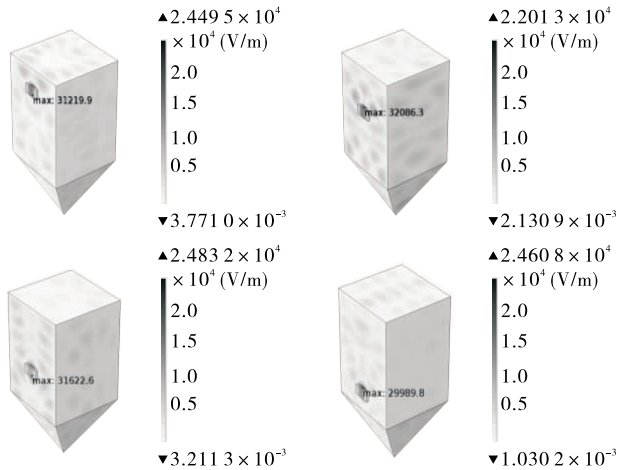


图 3 $a=366$ mm, $H=100, 200, 300, 400$ mm 时
电场分布云图

Figure 3 The cloud diagram of electric field distribution
($a=366$ mm, $H=100, 200, 300, 400$ mm)

4.1.2 H 和 L 对 COV、 E_{mean} 及 $E_{\text{max}}/E_{\text{mean}}$ 的影响 图 4 研究了当 a 为 427 mm 时, H 与 L 对矩形喷动床内电场强度及电场分布均匀性的影响。从图 4 中可以看出, L 与 H 对 COV 的影响较小, COV 值稳定在 0.45~0.55, 但对 E_{mean} 和 $E_{\text{max}}/E_{\text{mean}}$ 的影响较大。当 L 为 900 mm 时, E_{mean} 值较小而 $E_{\text{max}}/E_{\text{mean}}$ 值较大, 说明局部集聚严重, 应该在设计中避免。而当 L 为 1 000 mm 时, 不论 H 取多大, $E_{\text{max}}/E_{\text{mean}}$ 值相对较小, 即电场集聚较小, 对于结构设计比较理想。

通过单因素分析, a 、 H 和 L 对 E_{mean} 及 $E_{\text{max}}/E_{\text{mean}}$ 的影响基本没有规律可循。由此可见, 微波腔内电场值和电场分布比较复杂, 其受多因素的交互影响。因此, 本研究采用正交试验, 通过方差分析法进一步分析各个因素对微波腔内电场分布的影响。

4.2 正交试验法数据分析

正交试验因素水平见表 1, 采用残差图、主效应图和交互作用图分析试验结果。残差图选取了正态概率图, 当数值点紧紧分布在线的两侧则说明该结果可信。主效应图中的点是每个因子各水平的响应变量的平均值, 虚线为响应数据的总平均值。交互作用图中是平行线则表示各因子不存在

表 1 正交试验因素水平

Table 1 Orthogonal test factors and levels mm			
水平	a	H	L
1	244	100	800
2	305	200	900
3	366	300	1 000
4	427	400	1 100

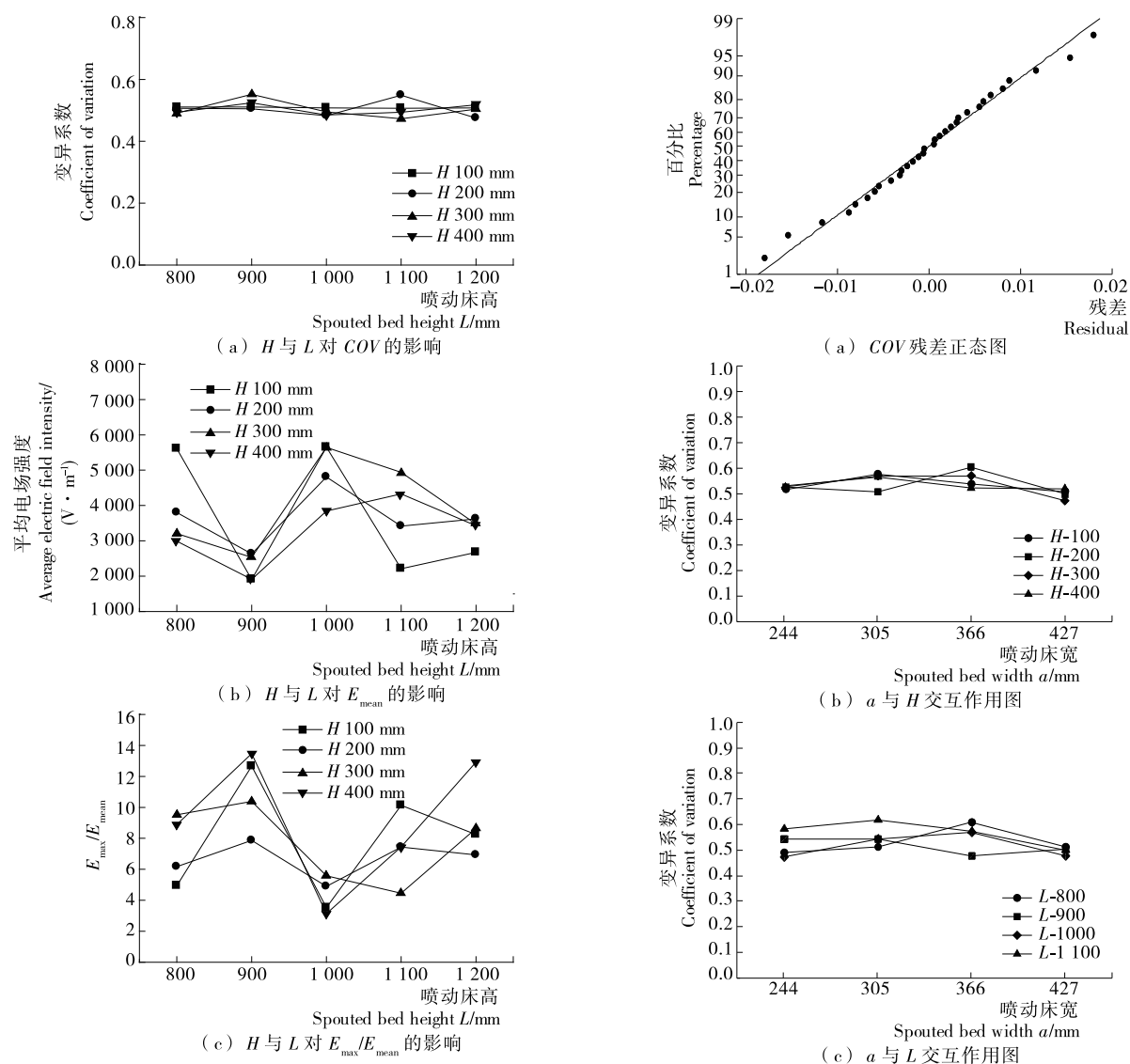


图4 H 与 L 对 COV 、 E_{mean} 及 E_{max}/E_{mean} 的影响
($a=427$ mm)

Figure 4 The effect of H and L on COV , E_{mean} and E_{max}/E_{mean} ($a=427$ mm)

交互,若偏离平行状态则说明因子之间存在交互作用,偏离平行状态程度越大,交互作用越明显^[13]。

4.2.1 各因素及交互作用对 COV 的影响 图5(a)中,各数据点几乎在一条直线上,数据符合正态分布,说明结果可用。由图5(b)、(c)可知,对于 COV 指标, a 与 L 和 H 均有交互作用,其中 a 与 L 的交互作用更加显著。由图5(d)可知, a 对 COV 的影响较大。因此,在设计矩形微波喷动床结构时,影响腔内电场分布均匀性的主要因素有 a 、 a 与 L 及 a 与 H 的交互作用。

4.2.2 各因素及交互作用对 E_{mean} 的影响 图6(a)中各数值点基本在一条直线上,数据符合正态分布,结果可用。由图6(b)可知, a 与 L 的交互作用对 E_{mean} 的影响有显著。由图6(c)可知, H 对 E_{mean} 的影响最显著。因此,在设计矩形微波喷动床结构时,影响腔内电场强度大小的主要参数为 H 和 a 与 L 的交互作用。

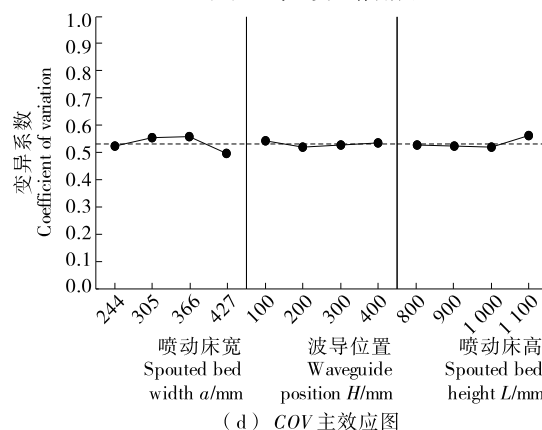


图5 各因素对 COV 的影响及交互作用

Figure 5 The impact of various factors on COV and interaction

4.2.3 各因素及交互作用对 E_{max}/E_{mean} 的影响 由图7(a)可知,数据基本符合正态分布,分析结果可用。图7(b)表示 a 与 L 交互作用对 E_{max}/E_{mean} 具有影响。图7(c)中显示 a 和 H 的影响较大,其中 a 的影响更显著。因此,影响矩形微波喷动床内电场局部积聚现象的主要因素为 a 和 a 与 L 的交互作用。

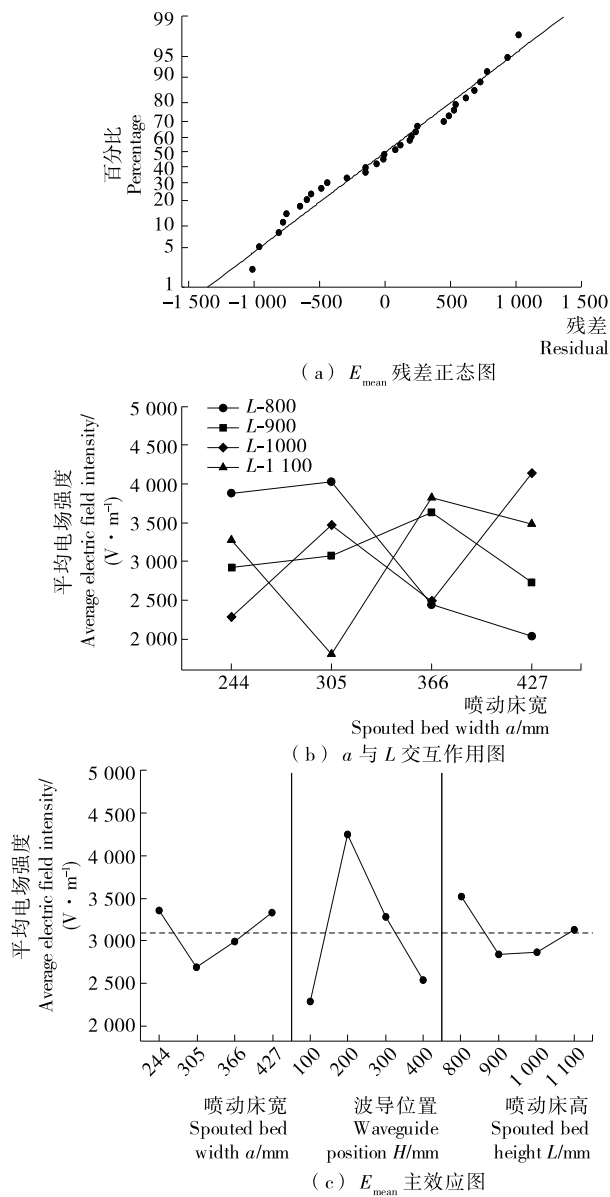


图 6 各因素对 E_{mean} 的影响及交互作用
Figure 6 The impact of various factors on E_{mean} and interaction

综上,除了 a 与 L 的交互作用既影响电场强度又影响电场分布均匀性外, a 值(反映喷动床结构大小)主要影响电场分布均匀性,而 H 值(反映波导位置)主要影响电场强度。

4.3 基于电场强度与电场分布均匀性的矩形微波喷动床结构优化

由图 8 可知,3 个响应的复合合意性为 0.944 4,说明是一个最优化的解。为了使微波腔内具有较高的平均电场强度,较好的电场分布均匀性和较小的局部电场积聚现象,本研究条件中的最优结构为 $a = 427\text{ mm}$ 、 $H = 200\text{ mm}$ 、 $L = 1\,000\text{ mm}$ 。

5 结论

本研究基于电场强度和电场分布均匀性对矩形微波喷动床的结构进行优化。结果发现: a 对 COV 和 E_{max}/E_{mean} 影响最显著, H 对 E_{mean} 值影响最显著;对于 COV , a 分别与 H

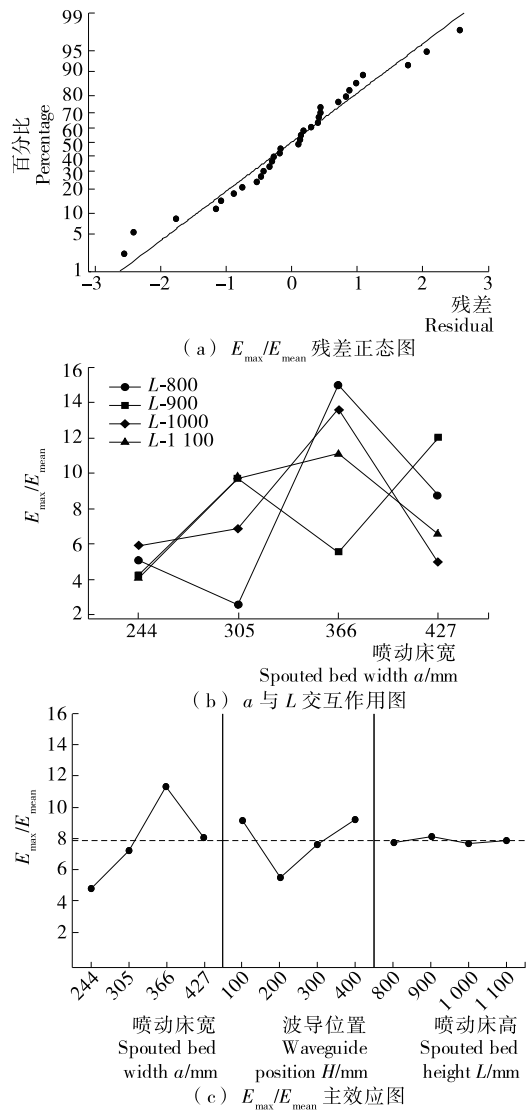
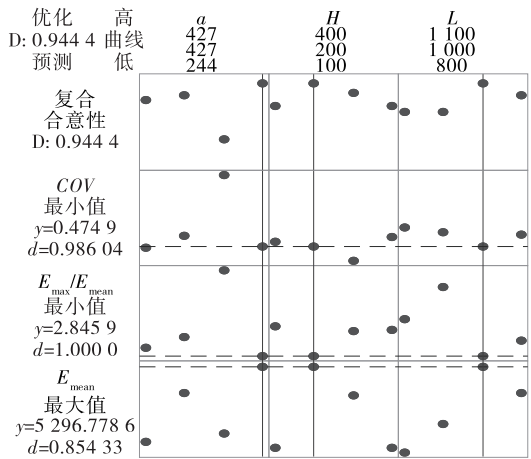


图 7 各因素对 E_{max}/E_{mean} 的影响及交互作用
Figure 7 The impact of various factors on E_{max}/E_{mean} and interaction



图中竖线表示当前因素设置值;顶部数字表示竖线所代表的值;水平虚线和数字代表当前因素水平的响应

图 8 基于 COV 、 E_{mean} 和 E_{max}/E_{mean} 结构优化
Figure 8 The optimization structure based on COV , E_{mean} and E_{max}/E_{mean}

(下转第 157 页)

的测定分析,探索黄花菜干燥预处理方法。研究结论:

(1) 相同条件下,采用茅岩莓复合催熟剂浸泡黄花菜 30 min,再用 PVC 塑料袋密封,50 ℃ 贮藏 5 h,黄花菜的褪绿黄化效果与营养品质比乙烯利复合催熟剂和焦亚硫酸钠复合催熟剂处理好。

(2) 茅岩莓是一种具有保健功能的植物材料,其食品安全性远高于焦亚硫酸钠和乙烯利,并且茅岩莓的褪绿黄化效果与处理品质也比焦亚硫酸钠和乙烯利好,因此,茅岩莓复合催熟剂褪绿黄化的方法对机械规模化干制黄花菜具有一定指导价值。

参考文献

- [1] 杨大伟,夏延斌.不同品种黄花菜的干制特性研究[J].食品工业科技,2003,24(10):77-78.
- [2] 匡滢.湖南祁东打造“黄花菜之乡”首届黄花菜节吸引数万游客[EB/OL].(2016-07-04)[2017-05-29].<http://hn.people.com.cn/n2/2016/0704/c337651-28607371.html>.
- [3] 徐爱东.蔬菜中乙烯利使用现状、残留量测定及安全性评价[J].北方园艺,2011(2):36-39.
- [4] 王岩,周莉玲,李锐,等.显齿蛇葡萄化学成分的研究[J].中药材,2002,25(4):154-156.
- [5] 熊皓平,何国庆,杨伟丽,等.显齿蛇葡萄生化成分分析[J].中国食品学报,2004,4(3):68-71.
- [6] 万忠民.植酸对草莓保鲜的研究[J].食品科学,2008,29(10):619-621.
- [7] 崔霖芸.野木瓜果汁非酶褐变复配抑制剂的优化[J].食品与机械,2017,33(4):194-197.
- [8] 毕家钰,代曜伊,郑炯.褐变抑制剂对干制香蕉片护色效果的影响[J].食品与机械,2016,32(11):184-188.
- [9] 崔霖芸.野木瓜果汁非酶褐变复配抑制剂的优化[J].食品与机械,2017,33(4):184-189.
- [10] 李红涛.木糖醇低糖柿子果酱生产工艺研究[J].农产品加工:学刊,2014(12):26-29.
- [11] 覃海元.钙和褐变抑制剂对鲜切菠萝影响的初步研究[J].广西轻工业,2005(6):23-25.
- [12] 余翔,苗修港,张贝贝,等.热烫处理对南瓜叶化学成分及色泽的影响[J].食品科学,2016,37(7):44-49.
- [13] 林亲录,邓放明.园艺产品加工学[M].北京:中国农业出版社,2003:13-14.
- [14] 武奕宏,蔡菁华,黄漫青,等.板栗非酶促褐变的基础物质及产物分析[J].中国农学通报,2012,28(30):267-271.
- [15] 林依偲,郝艳玲.植物衰老的生理特征[J].畜牧与饲料科学,2009,30(5):8-10.
- [16] 吴光南,刘宝仁,张金渝.水稻叶片蛋白水解酶的某些理化特性及其与衰老的天系[J].江苏农业学报,1985,1(1):128-129.
- [17] 袁沛元,潘建平,曾杨.妃子笑荔枝现蕾开花期叶片碳水化合物和蛋白质含量变化研究[J].福建果树,2009(1):25-28.
- [18] 朱向秋,刘长江,魏建梅.冬枣采后果实呼吸强度和 V_C 、糖含量变化的研究[J].特产研究,2006(4):39-43.
- [19] 张群,刘伟,吴跃辉,等.特早熟柑橘贮藏期间物性与理化品质变化及相关性分析[J].湖南农业科学,2016(1):71-76.
- [20] 朱文慧,车凤斌,郑素慧,等.无核白葡萄干在不同温度贮藏中品质和生理的变化[J].新疆农业科学,2015,52(6):1 050-1 055.
- [1] 杨大伟,夏延斌.不同品种黄花菜的干制特性研究[J].食品工业科技,2003,24(10):77-78.
- [2] 匡滢.湖南祁东打造“黄花菜之乡”首届黄花菜节吸引数万游客[EB/OL].(2016-07-04)[2017-05-29].<http://hn.people.com.cn/n2/2016/0704/c337651-28607371.html>.
- [3] 徐爱东.蔬菜中乙烯利使用现状、残留量测定及安全性评价[J].北方园艺,2011(2):36-39.
- [4] 王岩,周莉玲,李锐,等.显齿蛇葡萄化学成分的研究[J].中药材,2002,25(4):154-156.
- [5] 熊皓平,何国庆,杨伟丽,等.显齿蛇葡萄生化成分分析[J].中国食品学报,2004,4(3):68-71.
- [6] 万忠民.植酸对草莓保鲜的研究[J].食品科学,2008,29(10):619-621.
- [7] 崔霖芸.野木瓜果汁非酶褐变复配抑制剂的优化[J].食品与机械,2017,33(4):194-197.
- [8] 毕家钰,代曜伊,郑炯.褐变抑制剂对干制香蕉片护色效果的影响[J].食品与机械,2016,32(11):184-188.
- [9] 崔霖芸.野木瓜果汁非酶褐变复配抑制剂的优化[J].食品与机械,2017,33(4):184-189.
- [10] 李红涛.木糖醇低糖柿子果酱生产工艺研究[J].农产品加工:学刊,2014(12):26-29.
- [11] 覃海元.钙和褐变抑制剂对鲜切菠萝影响的初步研究[J].广西轻工业,2005(6):23-25.
- [12] 余翔,苗修港,张贝贝,等.热烫处理对南瓜叶化学成分及色泽的影响[J].食品科学,2016,37(7):44-49.
- [13] 林亲录,邓放明.园艺产品加工学[M].北京:中国农业出版社,2003:13-14.
- [14] 武奕宏,蔡菁华,黄漫青,等.板栗非酶促褐变的基础物质及产物分析[J].中国农学通报,2012,28(30):267-271.
- [15] 林依偲,郝艳玲.植物衰老的生理特征[J].畜牧与饲料科学,2009,30(5):8-10.
- [16] 吴光南,刘宝仁,张金渝.水稻叶片蛋白水解酶的某些理化特性及其与衰老的天系[J].江苏农业学报,1985,1(1):128-129.
- [17] 袁沛元,潘建平,曾杨.妃子笑荔枝现蕾开花期叶片碳水化合物和蛋白质含量变化研究[J].福建果树,2009(1):25-28.
- [18] 朱向秋,刘长江,魏建梅.冬枣采后果实呼吸强度和 V_C 、糖含量变化的研究[J].特产研究,2006(4):39-43.
- [19] 张群,刘伟,吴跃辉,等.特早熟柑橘贮藏期间物性与理化品质变化及相关性分析[J].湖南农业科学,2016(1):71-76.
- [20] 朱文慧,车凤斌,郑素慧,等.无核白葡萄干在不同温度贮藏中品质和生理的变化[J].新疆农业科学,2015,52(6):1 050-1 055.

(上接第 93 页)

和 L 之间有交互作用,且 a 与 L 的交互作用影响更显著;对于 E_{mean} 和 $E_{\text{max}}/E_{\text{mean}}$, a 与 L 之间存在交互作用。通过最优响应器获得了单波导矩形微波喷动床结构的最优化组合 a 为 427 mm, H 为 200 mm, L 为 1 000 mm。该结构可以使微波腔内具有较高的平均电场强度,较好的电场分布均匀性和较小的局部电场集聚现象。

参考文献

- [1] FENG Hao, TANG Jun-ming. Microwave finish drying of diced apples in spouted bed[J]. Journal of Food Science, 1998, 63(4): 679-683.
- [2] FENG Hao, TANG Jun-ming, CAVALIERI R P. Combined microwave and spouted bed drying of diced apples: effect of drying conditions on drying kinetics and product temperature[J]. Drying Technology, 1999, 17(10): 1 981-1 998.
- [3] FENG Hao, TANG Jun-ming. Analysis of microwave assisted fluidized bed drying of particulate product with a simplified heat and mass transfer model[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2002(29): 1 021-1 028.
- [4] NINDO C I, SUN T, WANG S W, et al. Evaluation of drying technologies for retention of physical quality and antioxidants in asparagus (*Asparagus officinalis*, L.)[J]. Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie, 2003, 36(5): 507-516.
- [5] YAN Wei-qiang, ZHANG Min, HUANG Lue-lue, et al. Study of the optimisation of puffing characteristics of potato cubes by spouted bed drying enhanced with microwave[J]. J Sci Food Agric, 2010, 90(8): 1 300-1 307.
- [6] 颜伟强.颗粒状切割块茎类蔬菜微波喷动均匀干燥特性及模型的研究[D].无锡:江南大学,2011:29-45.
- [7] ZHAO Si-ming, QIU Cheng-guang, XIONG Shan-bai, et al. A thermal lethal model of riceweevils subjected to microwave irradiation[J]. Journal of Stored Products Research, 2007, 43(4): 430-434.
- [8] 王建中.茭白颗粒微波喷动床干燥特性及工艺研究[D].上海:上海海洋大学,2013:10-21.
- [9] LEYLA N K, SERPIL S, GULUM S. Spouted bed and microwave-assisted spouted bed drying of parboiled wheat[J]. Food and Bioproducts Processing, 2012, 90: 301-308.
- [10] 姚文龙,平雪良,胡大华,等.高压脉冲电场同轴处理室的仿真优化[J].食品与机械,2015,31(3):82-86.
- [11] 周云龙,杨宁,李洪伟,等.变倾角柱锥体喷动床颗粒流速与浓度分布特性[J].工程热物理学报,2014,35(8):1 554-1 558.
- [12] MEHRDAD Mehdizadeh. Microwave/RF applicators and probes for material heating, sensing, and plasma generation[M]. 2nd ed. Oxford: Mehrdad Mehdizadeh, 2015: 154-180.
- [13] 梁伟玲,张钦德,吴君.正交试验优化麒麟血竭中血竭素的超声提取工艺[J].中国生化药物杂志,2015,35(4):158-160.