

引用格式:

潘兴家, 王居飞, 李旭辉, 李骅, 田莉. 端口开启方式对麦秆微波加热的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(2): 227–234.

PAN X J, WANG J F, LI X H, LI H, TIAN L. Effect of port opening method on the microwave heating of wheat straw[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2022, 48(2): 227–234.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 端口开启方式对麦秆微波加热的影响

潘兴家, 王居飞, 李旭辉, 李骅\*, 田莉

(南京农业大学工学院, 江苏 南京 210031)

**摘要:** 运用 Comsol Multiphysics 软件对 3 端口微波设备加热麦秆粉末进行建模和仿真, 研究微波设备开启单个端口和多个端口组合对麦秆粉末升温的影响。对微波设备右侧端口、右侧和左侧端口开启、3 端口共同开启的仿真加热情况进行验证, 发现测温点的升温曲线与仿真一致。3 个端口对麦秆粉末分别单独加热时, 热点会出现在不同的位置, 并且对物料的加热效果具有较大的差异; 当 3 个端口共同开启时, 麦秆粉末的热点形状以及位置发生改变, 并且热点中心区域的温度均出现下降。在相同功率下, 单端口开启的平均升温速率均快于端口组合开启时的速率, 左侧端口单独开启的平均升温速率最快, 是后侧端口和左侧端口组合开启时的 2 倍以上。端口组合对于微波加热带来升温不均匀具有优化作用, 平均温度梯度的波峰处降低约 22.7%。从升温速率上考虑, 应考虑采用单个大功率磁控管加热; 从物料的受热均匀性上来说, 可以考虑增加多个微波端口, 以保证麦秆的受热均匀性。虽然能源损耗会加大, 但在能源投入充足的情况下, 可以使用这种方法来提升麦秆受热的均匀性。

**关键词:** 麦秆; 微波加热; 仿真

中图分类号: TS255.36

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2022)02-0227-08

## Effect of port opening method on the microwave heating of wheat straw

PAN Xingjia, WANG Jufei, LI Xuhui, LI Hua\*, TIAN Li

(College of Engineering, Nanjing Agriculture University, Nanjing, Jiangsu 210031, China)

**Abstract:** Virtual modeling and numerical simulation of microwave equipment and straw powder were carried out by Comsol Multiphysics software to study the effects of wave ports at different positions and multiple wave ports combined on straw powder heating. The experimental results were verified by simulation of the heating conditions of the right port, the right port and the left port open, and the three ports open together. It was found that the heating curve of the experimental temperature measuring point was consistent with that of the simulation, indicating that the model was verifiable. When the wave ports at different positions heated the straw powder separately, the hot spots would appear at different positions, and the heating effect on the material was greatly different. When multiple ports are opened together, the hot spot shape and position of straw powder was changed and the temperature in the central area of the hot spot decreases to some extent. Under the same power, the average heating rate of single port opening is faster than that of multi-port combination. The average heating rate under single port opening on the left side is the fastest, which is more than twice that of single port opening on the right and back side. In the case of multi-port heating, it has an optimization effect on the hot and cold points caused by microwave heating, and the peak of the average temperature gradient is reduced by about 22.7%. In terms of the material heating uniformity, multiple wave ports can be considered to ensure the material heating uniformity, although the energy loss will increase. However, it can be used to improve the heating uniformity of wheat straw in the case of sufficient energy input.

收稿日期: 2020-09-28

修回日期: 2021-12-03

基金项目: 南京农业大学-新疆农业大学联合基金项目(KYYJ201804)

作者简介: 潘兴家(1996—), 男, 浙江温岭人, 硕士研究生, 主要从事农业机械智能化装备研究, 2018112018@njau.edu.cn; \*通信作者, 李骅, 博士, 教授, 主要从事种收装备及生物质微波裂解研究, lihua@njau.edu.cn

**Keywords:** wheat straw; microwave heating; simulation

微波加热具有选择性加热的特性,能够实现目标物料的靶向加热,微波辅助热解技术具有较为广阔的商业化前景<sup>[1-3]</sup>。已有大量的有关原料和微波反应过程参数对试验产物的影响、寻求目标产物最优参数的研究<sup>[4-5]</sup>,但是由于温度测量的不确定性,红外测温传感器只能记录外表面温度,而内部光纤探头只能测量单个点的温度,使得微波加热过程中的温度测量成为难点<sup>[6]</sup>,影响最优化参数的确定,继而影响其后续工业化进程。

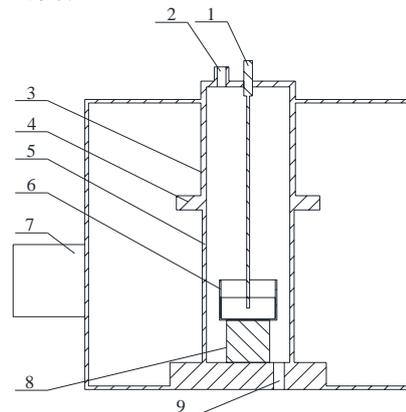
得益于计算机性能的增长和相关仿真软件的升级迭代,可建立起更多高效并且准确的数学模型来模拟电磁场和物料的相互作用,从而了解电磁场在腔体中的分布以及物料的受热情况,从模拟仿真软件中求得更全面详实的数据,为微波炉腔体的设计、磁控管的安装位置、物料的摆放方案等设计提供建议<sup>[7-9]</sup>。FARAG等<sup>[10]</sup>基于COMSOL-Multiphysics建立的三维模型发现,控制木块大小在2倍穿透深度下可以有效减小温度梯度,在木块中添加微波吸收材料可以显著提升温度。HONG等<sup>[11]</sup>研究发现,微波频率的细微波动容易带来微波场的大变化,煤炭本身摆放位置离波导位置越近,煤炭的最高温度呈现出先下降后上升的趋势。SHEN等<sup>[12]</sup>建立了包含电磁场、热传递和水分传递的三维多物理场耦合模型,实现了糙米在传送带上运动的干燥模型,证明通过物料的运动、水分的蒸发和通风对流的协同作用,能使物料的温度和水分的分布更加均匀。MOHD等<sup>[13]</sup>对微波端口的数量及位置的研究发现,底部反应器具有较好的加热效果,多个微波端口对微波加热没有积极的影响。YU等<sup>[14]</sup>用微波加热碳化硅床,使雾化的蓖麻油酸酯达到50 000 °C/s的升温速率,通过控制总功率,在微波炉底部分别加入1~3个端口工作,发现端口虽然对电场分布有很大影响,但是对温度的分布影响不大。

笔者从现有的3端口微波设备着手,探究不同位置的端口以及多个端口组合工作对麦秆粉末加热效果的影响。通过构建微波设备及麦秆粉末三维仿真模型,引入随温度变化的介电常数属性,实现电磁场和传热过程的双向耦合;通过试验验证了仿真结果的正确性,研究3个不同位置的端口以及3个端口分别组合开启时对麦秆粉末升温的影响。

## 1 微波加热设备的结构和虚拟建模

### 1.1 设备结构

微波加热设备的结构如图1所示,3个波导分别位于腔体的左右两侧和后侧。左侧磁控管竖向放置,右侧磁控管横向放置,并且互相错开,位于内腔两侧。每个磁控管的运行频率为2.45 GHz,运行功率为1 kW,通过矩形波导进入腔体。腔体内嵌1个中空的圆柱形腔体作为反应腔,反应内腔的上半部分由不锈钢组成,保证和外壳的连接紧密;下半部分是一个石英玻璃管,具有较好的微波穿透性。从反应内腔的底部注入氮气,从上方不锈钢盖的出气孔排出。K型热电偶的插入口位于腔体上方的中心位置,可以通过调节K型热电偶上的滑动螺丝来调节测温点的位置。装载麦秆粉末的反应皿采用石英玻璃制成,既保证对微波的透射率,又能承受1200 °C的高温。



1 K型热电偶; 2 带出气孔的不锈钢盖; 3 不锈钢管; 4 不锈钢连接套; 5 石英玻璃管; 6 石英杯; 7 磁控管; 8 石英柱; 9 不锈钢底座。

图1 三端口微波加热设备的结构

Fig.1 Schematic diagram of microwave equipment with 3 ports

### 1.2 几何建模与材料属性

根据微波设备的实际尺寸,按照1:1的比例进行三维建模,整体模型及腔体内的麦秆粉末放置细节如图2所示。模型的几何参数和部分材料参数分别如表1、表2所示。除麦秆外,其余材料的物理参数均来自Comsol Mutiphysics的材料库。

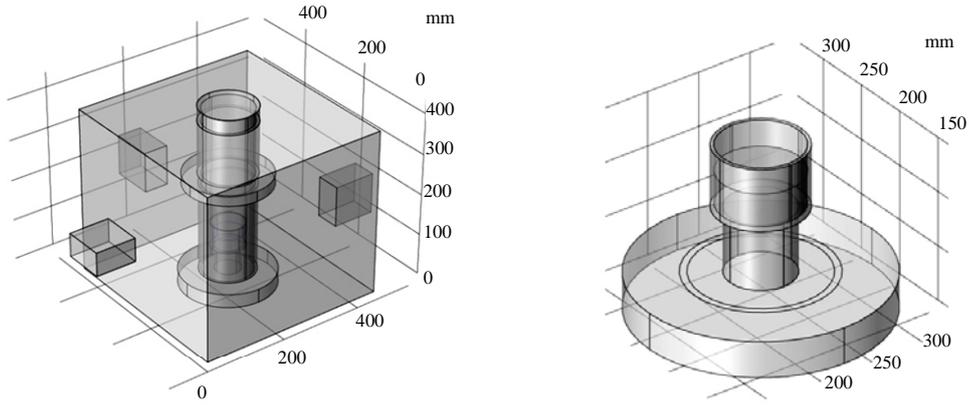


图 2 微波设备三维建模的整体和局部视图

Fig.2 Overall and partial views of 3D modeling of microwave equipment

表 1 模型的几何参数

Table 1 Geometric parameters of the model							mm
模型零部件	长度	宽度	高度	半径	内径壁厚度	盖厚度	
微波腔	450	450	400				
波导	98	58	98				
不锈钢底座			33	109			
石英管			216	64	6		
不锈钢连接件			25	100	42		
不锈钢管			141	66	8		
不锈钢盖			21	66	8		
石英柱			60	30			
石英烧杯			57	40	3	3	
麦秆粉末			30	37			

表 2 仿真中涉及的材料参数

Table 2 Material parameters used in the simulation						
材料	相对磁导率	电导率/(S·m <sup>-1</sup> )	相对介电常数	热导率/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
麦秆 <sup>[15]</sup>	1	0	$f(T)$	0.16	665	3540
石英玻璃	1	0	4.2	1.4	2210	730
氮气	1	0	1	0.0		
不锈钢	1	$5.998 \times 10^7$	1	400	8960	385

### 1.3 模型的假设

为了提高运算效率，减少仿真时间，对部分影响较小的参数和模型结构进行简化，作 5 项假设。

- 1) 假设麦秆粉末为圆柱形，且不考虑其生物物质的多向异性，不具备磁性，不受磁场干扰。
- 2) 空气和石英玻璃的介电常数不随温度改变而改变。
- 3) 磁控管始终在 2.45 GHz 频率工作。
- 4) 不考虑水分蒸发和裂解反应。
- 5) 仅考虑麦秆粉末内部的传热，即麦秆粉末边界与外界热绝缘。

### 1.4 控制方程

使用 Comsol Multiphysics 软件对麦秆粉末进行

仿真时，需要涉及电磁场和热传递场之间的耦合。它们之间通过亥姆霍兹方程和傅立叶传热方程的双向耦合模拟。通过求解亥姆霍兹方程获得微波腔内的电场和耗散功率密度分布，并通过将耗散功率损耗密度与传热方程耦合来获得温度分布<sup>[16]</sup>。

### 1.5 网格划分

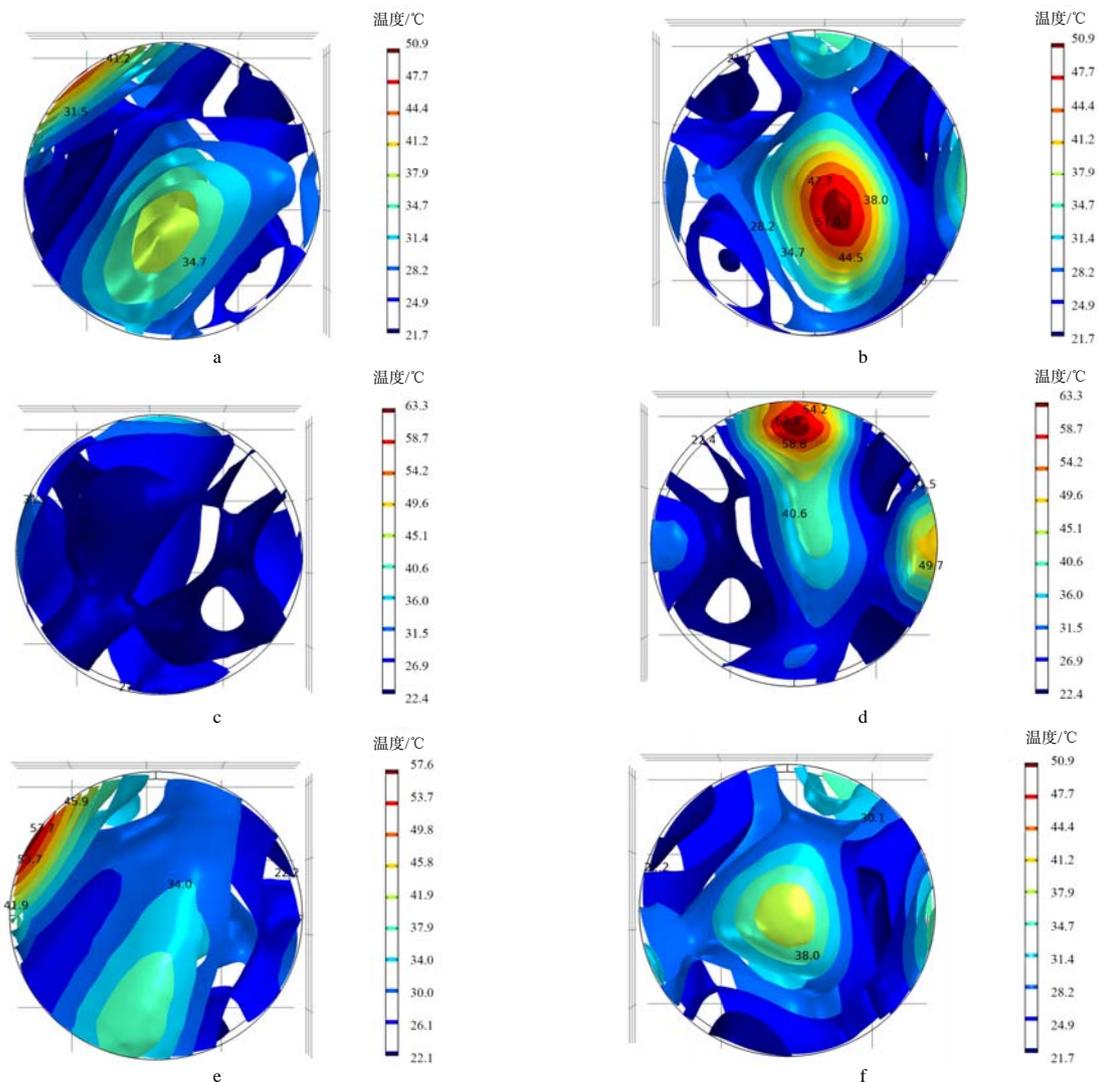
对于整个模型，选择了自由四面体作为划分单元进行网格划分。依据文献[17]，电磁波的准确模拟需要在某一波长中至少存在 5 个网格，所以最大单元网格不能超过 5.990 mm。为了取得良好的试验精度，所划分的最大网格单元为 2.449 mm。

## 2 微波加热麦秆粉末的仿真

### 2.1 3个端口单独开启对麦秆粉末热点分布的影响

由于实际设备中,每个磁控管的最大功率为1 kW,因此仿真时将每个端口的功率设为1 kW,研究左侧、右侧和后侧磁控管分别开启时麦秆粉末的温度分布,使用等值面图来反映麦秆粉末的受热情况。图3展示的是加热进行到10 s时的等温面,麦秆粉末部分被划分为10个温度区间,温度较高的5个区间定义为热点区域。右侧端口单独开启时,共出现3个热点,其中2个出现在麦秆粉末中心的上、下表面,另外1个出现在麦秆粉末俯视图的左上角(图3-a、图3-b);当后侧端口单独运行时,出现2个热点,分布在仰视图中的上侧和右侧(图3-c、图

3-d),最明显的热点出现在与后侧端口位置相近的一侧,最大等值面温度为63.3℃;当左侧端口单独运行时,麦秆粉末的热点有2个,分别位于俯视图的左上角以及仰视图的中心(图3-e、图3-f)。从图3-d可以看出,当端口对准部分麦秆粉末时,传播过程中遇到麦秆粉末,电磁波的能量被较好地吸收,其热点等温线随着电磁波的渗透逐渐衰减。左侧端口工作时,最明显的热点也出现在与端口相应的左上角处,但等温线的表现形式和图3-d不同,这可能是端口方向旋转导致的;而右侧端口由于偏离麦秆粉末,其传播方向也和左侧端口不同,因此并未在右下角出现热点,而且热点温度相对较低,说明这个热点和其余的热点相似,是经过腔体反射后再被麦秆粉末吸收的。



a、b 分别为右侧端口开启的麦秆粉末俯视图和仰视图; c、d 分别为后侧端口开启的麦秆粉末俯视图和仰视图; e、f 分别为左侧端口启动的麦秆粉末俯视图和仰视图。

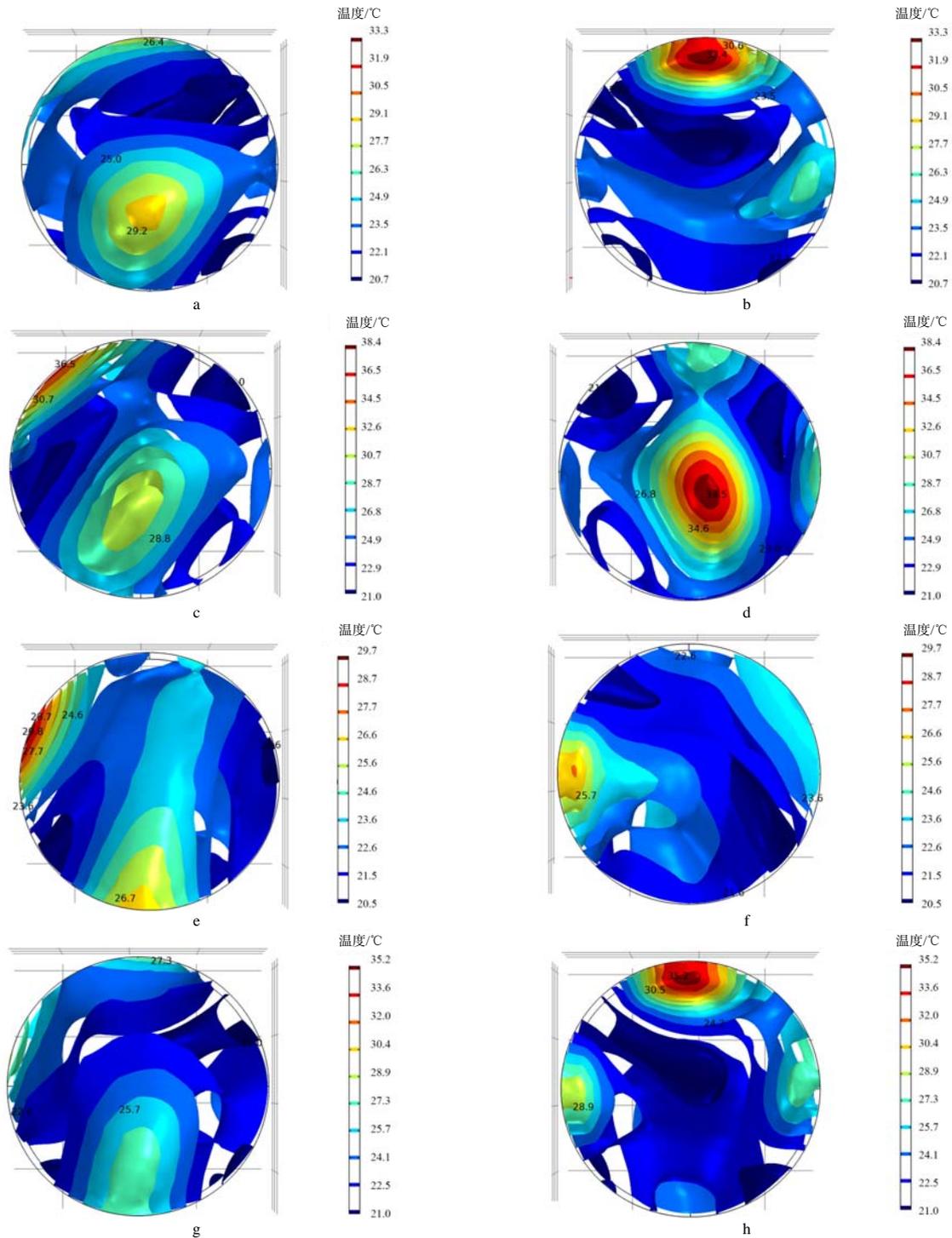
图3 3个微波端口单独开启的麦秆粉末热点分布

Fig.3 Hot spot distribution of wheat straw powder under single wave port opening

### 2.2 端口组合开启对麦秆粉末加热的影响

在控制总功率为 1 kW 的情况下，3 个端口两

两组合开启和 3 个端口共同开启的情况下麦秆粉末的吸热表现如图 4 所示。右端口和后端口组合开启



a、b 分别为右侧端口和后侧端口组合开启的麦秆粉末俯视图和仰视图；c、d 分别为右侧端口和左侧端口组合开启的麦秆粉末俯视图和仰视图；e、f 分别为后侧端口和左侧端口组合开启的麦秆粉末俯视图和仰视图；g、h 分别为 3 个端口共同开启的麦秆粉末俯视图和仰视图。

图 4 微波端口组合开启的麦秆粉末热点分布

Fig.4 Hot spot distribution of wheat straw powder with multi wave ports opening

时, 出现了 2 个热点: 一个位于麦秆粉末仰视图的上方, 靠近后侧端口的的位置; 另一个位于麦秆粉末俯视图的靠近中心偏下的位置(图 4-a、图 4-b)。热点位置类似右侧端口和后侧端口单独开启的叠加, 但是在图 3-b 里的热点以及图 3-a 中左上角的热点消失了。在图 4-c、图 4-d 中, 右侧端口和左侧端口组合开启时, 出现 3 个热点, 2 个较为明显的热点分别出现在麦秆粉末俯视图的左上侧, 以及麦秆粉末仰视图的中心偏下的位置并靠近底部, 类似右侧端口和左侧端口分别单独工作的叠加。如图 4-e、图 4-f 所示, 后侧端口和左侧端口组合开启时的热点总共有 3 个: 一个出现在麦秆粉末俯视图的左上侧, 与左侧端口单独工作时的其中一个热点位置一致; 一个出现在俯视图的下侧, 与后侧端口单独开启时的热点刚好相反; 还有一个在麦秆粉末仰视图的左侧。如图 4-g、图 4-h 所示, 3 个端口共同开启时热点有 2 个, 分别出现在麦秆粉末底部的上侧和左侧, 能够看出后侧端口对麦秆粉末的影响较大, 因为靠近后侧端口的热点依旧较为明显。综上, 多端口组合开启时, 出现的热点区域和单个端口开启时的热点位置有差别。这是因为不同端口发出的电磁波会存在互相抑制的现象, 在同一个位置的电磁波强度不一致, 互相之间抑制的程度也会不一样, 因而出现热点位置的改变以及热点温度的降低。

### 2.3 试验验证

分别对单独运行右侧端口、右侧端口和左侧端口组合、3 端口共同开启进行试验验证, K 型热电偶的测温点都是麦秆粉末的中心位置, 每组试验重复 3 次, 结果取其平均值。试验测温点和仿真时该点位置的升温曲线如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 虽然仿真的升温曲线在最后都超越实际升温曲线并有增大的趋势, 但试验和仿真得出的结果拟合度依旧较好。说明模型参数可靠, 具有可验证性。误差的主要来源是在模型建立时, 为提高仿真效率, 假定麦秆粉末边界与外界热绝缘, 而实际情况是, 随着麦秆粉末温度的升高, 与空气的温度梯度变大, 麦秆粉末向腔体内散热越

来越快, 导致了实际升温曲线在高温段会出现升温速率变缓的现象。

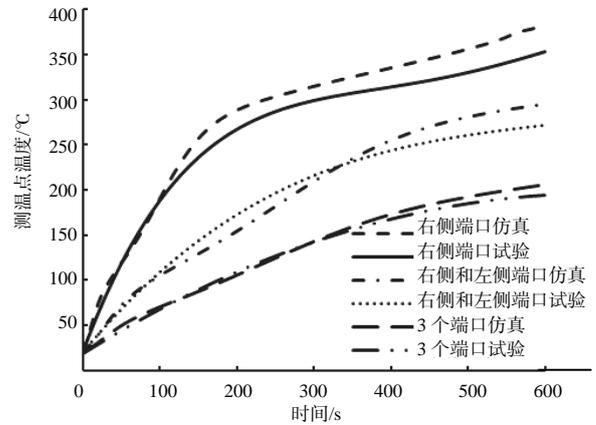


图 5 麦秆粉末加热试验和仿真的升温曲线

Fig.5 Heating curves of experiment and simulation

### 2.4 微波设备对麦秆的加热效果

从图 6 可以看出, 在相同功率下, 不同端口或者端口组合工作的情况下, 麦秆粉末的平均升温速率不同, 左侧端口单独开启时升温最快, 后侧端口和左侧端口开启时升温最慢, 说明后侧磁控管和左侧磁控管工作时存在较大干扰, 影响了对麦秆粉末的加热效果。提示在设计微波设备时, 需谨慎安排磁控管的位置。当多个端口组合工作时, 端口发出的电磁波整体呈现互相抑制的情况, 与之前热点图得出的结论一致。虽然在设计的时候通过改变波导位置, 减少干扰, 然而经过反应腔的反射, 端口之间发出的电磁波还是会存在不同程度的干扰。

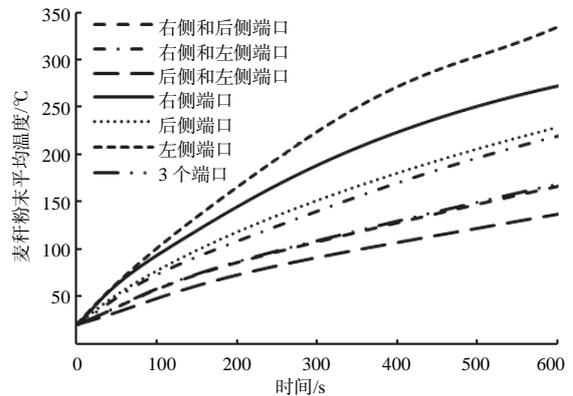


图 6 不同端口组合开启下的麦秆粉末的平均温度

Fig.6 Heating curves inside the wheat straw under different port combinations

从图 7 可以看出, 麦秆粉末功率吸收可以分成 3 个阶段: 随着温度的上升, 麦秆粉末中的水分损

失加大,对微波能的转换能力提升;当升温到较高温度后,水分流失加剧,降低了整体的微波能转换能力;当温度继续上升,麦秆粉末发生裂解,微波能转化成热能的能力又开始上升。无论哪种工作模式,麦秆粉末的吸收功率相对于磁控管的运行功率来说能量利用率较低,这是因为秸秆本身相对介电常数就是较低的,不易将微波能吸收转换成热能。综上所述,在微波加热生物质的时候,添加微波吸收剂来促进生物质升温是有必要的。

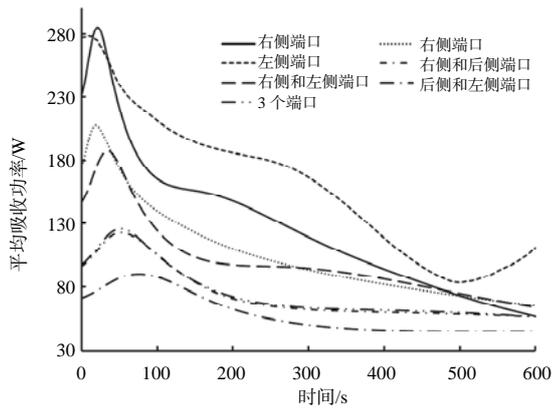


图 7 微波端口组合的麦秆粉末内部的吸收功率

Fig.7 The absorption power change curves inside the raw material under different port combinations

从不同端口在相同平均温度下的温度梯度(图 8)来看,后侧端口单独工作时,麦秆粉末的受热是最不均匀的,结合图 3-c、图 3-d 可以发现,后侧端口单独工作时,最为明显的热点位于麦秆粉末的边缘处,热量不能较好地扩散。右侧端口单独工作时的麦秆粉末的温度梯度曲线和左侧端口单独工作时的相近,因此左侧端口单独工作时加热效果是最好的。从图 8 可以看出,在相同的温度下,2 个端口或者 3 个端口组合运行对麦秆粉末的平均温度梯度具有较好的改善作用。单个端口或者组合端口加热的第 1 次麦秆粉末的温度梯度的波峰出现在 200 °C 附近。后侧和左侧端口组合工作时的温度梯度峰值是 58.2 °C/cm,右侧端口工作时的峰值是 74.4 °C/cm,麦秆粉末的平均温度梯度下降约 22%。这表明多个端口组合加热对温度梯度有优化作用,能够更好地保证麦秆粉末在相近的温度下进行裂解,受热更加均匀。在能源投入充足的情况下,这种优化方式是可取的。

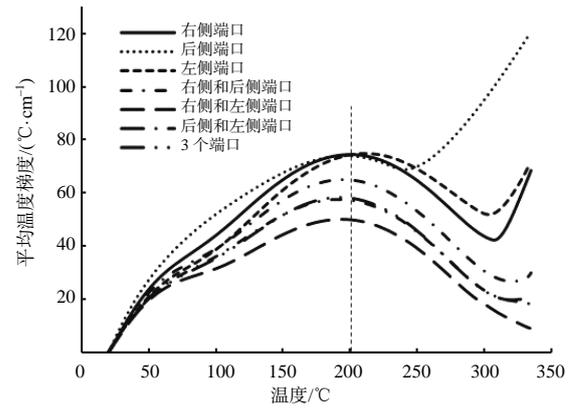


图 8 平均温度相同的情况下麦秆粉末的平均温度梯度

Fig.8 Comparison of temperature gradient of wheat straw powder at the same temperature

### 参考文献:

- [1] MULEY P D, NANDAKUMAR K, BOLDOR D. Numerical modelling of microwave heating of a porous catalyst bed[J]. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 2019, 53(1): 24-47.
- [2] HUANG J, XU G, CHEN Y, et al. Simulation of microwave's heating effect on coal seam permeability enhancement[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019, 29(5): 785-789.
- [3] SI C, WU J, ZHANG Y, et al. Experimental and numerical simulation of drying of lignite in a microwave-assisted fluidized bed[J]. *Fuel*, 2019, 242: 149-159.
- [4] ZHANG Y N, CUI Y L, LIU S Y, et al. Fast microwave-assisted pyrolysis of wastes for biofuels production: a review[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 297: 122480.
- [5] MUTSENGERERE S, CHIHOBHO C H, MUSADEMBA D, et al. A review of operating parameters affecting bio-oil yield in microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 104: 328-336.
- [6] KAPPE C O. How to measure reaction temperature in microwave-heated transformations[J]. *Chemical Society Reviews*, 2013, 42(12): 4977-4990.
- [7] YANG Z X, QIAN K Z, ZHANG X S, et al. Process design and economics for the conversion of lignocellulosic biomass into jet fuel range cycloalkanes[J]. *Energy*, 2018, 154: 289-297.
- [8] ARPIA A A, CHEN W H, LAM S S, et al. Sustainable biofuel and bioenergy production from biomass waste residues using microwave-assisted heating: a comprehensive review[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 403: 126233.

- [9] ROBINSON J P, KINGMAN S W, SNAPE C E, et al. Pyrolysis of biodegradable wastes using microwaves[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Waste and Resource Management*, 2007, 160(3): 97–103.
- [10] FARAG S, SOBHAY A, AKYEL C, et al. Temperature profile prediction within selected materials heated by microwaves at 2.45 GHz[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 36: 360–369.
- [11] HONG Y D, LIN B Q, LI H, et al. Three-dimensional simulation of microwave heating coal sample with varying parameters[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 93: 1145–1154.
- [12] SHEN L Y, ZHU Y, LIU C H, 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.
- [13] MOHD MOKHTA Z, ONG M Y, 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] YU S Z, DUAN Y, ZHOU X, et al. Three-dimensional simulation of a novel microwave-assisted heating device for methyl ricinoleate pyrolysis[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 153: 341–351.
- [15] TOPCAM H, KARATAS O, EROL B, et al. Effect of rotation on temperature uniformity of microwave processed low-high viscosity liquids: a computational study with experimental validation[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 60: 102306.
- [16] TAMANG S, ARAVINDAN S. 3D numerical modelling of microwave heating of SiC susceptor[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 162: 114250.
- [17] 宋瑞凯, 张付杰, 杨薇, 等. 矩形微波腔体双馈口位置与加热效率仿真及验证[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 42(6): 51–57.

责任编辑: 罗慧敏  
英文编辑: 吴志立