

Comsol Conference 2018 (Shanghai)

宋春芳

江南大学

November 1-2, 2018



黑莓微波真空干燥传热特性分析



Dr. and Associate Prof. Chunfang Song

*Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology
(Mechanical engineering), Jiangnan University, 1800 Lihu Road, Wuxi,
Jiangsu,214122, P. R. China*

Tel:+86 510 85910390

E-mail: songcf@jiangnan.edu.cn

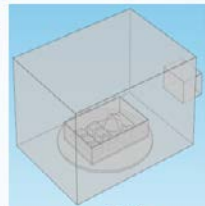


Chunfang-Song

Analysis of a Heat Transfer Model for Microwave Heating based on dielectric properties

II Simulation of microwave process

Comsol simulation process



The choice of physical fields

- Physical field module - microwave heating-
- frequency domain electromagnetic wave interface and solid coupling heat transfer interface

Establishing Geometric model

- The microwave cavity, waveguide, food units, etc

Parameter setting & attribute definition

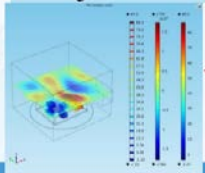
- the initial value, boundary conditions and material properties, and so on

meshing

- Air domain: standard subdivision
- Sample: More detailed subdivision

Model solution

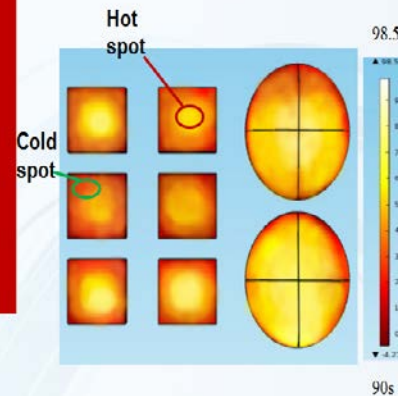
- The transient temperature distribution of surface temperature



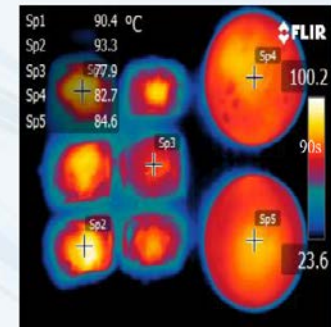
Microwave heating simulation

Comparison of space temperature simulation and the experimental results

Simulation results of space temperature distribution



Experimental results using infrared thermal imager



研究背景

1. 我国已是亚洲最大的黑莓种植基地和世界知名产地。
2. 黑莓年产量较大, 江苏省有全国较大的黑莓种植基地和系列产品研发基地。

➤黑莓产量大, 资源丰富, 取材便利

1. 黑莓果实中多酚类物质居多, 抗氧化性能好, 对人的身体大有裨益。
2. 黑莓鲜果中亦含有大量种类丰富的矿物质成分, 花青素的含量更是明显优于其他水果。

➤黑莓营养价值高, 保健作用好

1. 黑莓收获季为6月-8月
2. 采摘后常温保存不能超过24小时

➤黑莓为易腐果品, 深受季节影响

1. 黑莓鲜果口感味酸, 传统的加工方式容易破坏黑莓果实中的营养物质。
2. 花青素的保留是评价黑莓营养及其加工方式的重要指标, 对黑莓加工工艺的探究非常必要。

➤黑莓加工工艺的优化显得尤为重要

研究背景



原果风味浓, 味酸, 不耐贮运



冻果易损失果实原有的风味, 也不耐运输



果汁往往含糖量较高, 对人体健康不利



传统加工方法易损害果实内的营养物质



Advantages of simulation

With the rapid development of computer and computer aided engineering and efficient numerical simulation, computer simulations have become effective tools to understand the complex microwave vacuum heating process. The establishment of a simulation model means that multiple experiments are no longer required, avoiding the limitations of experimental conditions and speeding up the research cycle.

However, reports of the numerical simulation study of microwave heating involving a vacuum are relatively scant, where the principles involved are relatively complex, and the relevant simulation model has not yet been found. Thus, we modeled the microwave vacuum drying process to observe the transient heat transfer characteristics of blackberries and collected comprehensive experimental results to investigate the effects of microwave power and vacuum degree on the temperature of the blackberries during the drying process.

This provides a theoretical basis for the improvement of plant fruit and vegetable drying technology and equipment, providing technical support for industry.



Mathematical physics model of microwave vacuum heating material

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

$$P_v = \pi f \epsilon_0 \epsilon'' |\vec{E}|^2$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + P_v$$

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \epsilon_r' (1 - j \tan \delta)$$

$$\tan \delta = \epsilon_r'' / \epsilon_r'$$

$$\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H}$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_a)$$

$$p = p_{atm} + p'$$

\vec{E} ——物料内部的场强, V/m

μ_r ——相对磁导率

ϵ_r ——物料的相对介电常数

σ ——电导率, S/m

ϵ_0 ——真空介电常数, F/m

ω ——电磁波的激励角频率, rad/s

k_0 ——自由空间波矢量, rad/m

P_v ——耗散功率, W/m³

f ——电磁波频率, Hz

ϵ_0 ——真空介电常数, F/m

ϵ'' ——介电损耗因子

ρ ——加热材料的密度, kg/m³

C_p ——恒压比热容, J/(kg·°C)

T ——加热 t 时刻物料温度, °C

K ——热传导系数, W/(m·°C)

\vec{D} ——加热物料电位移矢量, C/m

\vec{B} ——加热物料磁感应强度, T

\vec{j} ——加热物料电流密度, A/m²

\vec{H} ——加热物料磁场强度, A/m

h ——表面对流热传递系数, W/(m²·°C)

T_a ——初始温度, °C

p ——微波真空装置的压强, Pa

p' ——相对真空度, Pa

P_{atm} ——标准大气压, Pa



Microwave vacuum drying device

Vacuum pump

Microwave device



Drying chamber





Simulation process

Parameter setting

Geometric modeling

Defined probe

Material definition

定义

- 黑莓
- 塑料盘
- 金属边界
- 无传热
- 空气
- 端口边界
- 边界坐标系 1 (sys1)
- 视图 1

材料

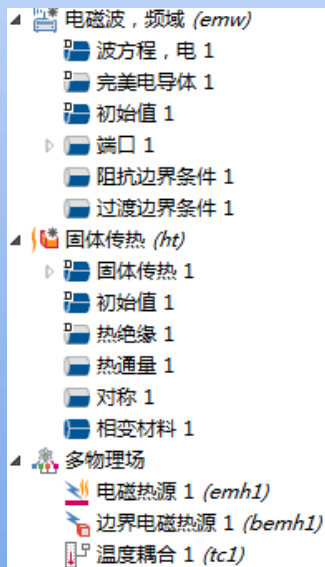
- Air (mat1)
- Copper (mat2)
- Acrylic plastic (mat3)
- 黑莓 (mat4)
- Acrylic plastic 1 (mat5)

材料	选择
Air (mat1)	域 1, 3-4
Copper (mat2)	边界 1-5, 10-12, 155, 181, 299
Acrylic plastic (mat3)	域 2
黑莓 (mat4)	域 5-54
Acrylic plastic 1 (mat5)	边界 14-15, 18, 298

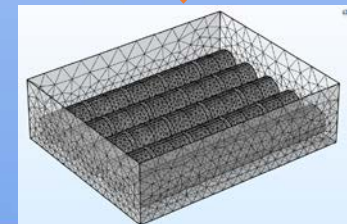
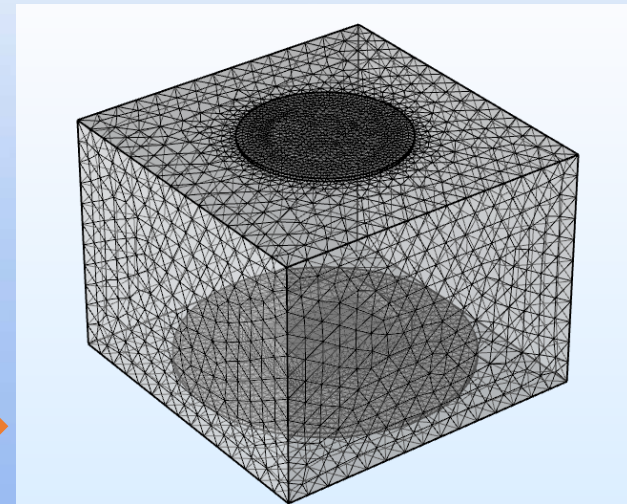


Simulation process

Add physical field



Mesh





瞬态
= 计算 更新解

标签: 瞬态

研究设置

时间单位: s

时间: range(0,1,120) s

相对容差: 0.01

求解过程中的结果

物理场和变量选择

修改研究步骤的物理树和变量

物理场接口	求解	离散化
电磁波, 频域 (emw)	<input type="checkbox"/>	物理场设置
固体传热 (ht)	<input checked="" type="checkbox"/>	物理场设置

多物理场	求解
电磁热源 1 (emh1)	<input checked="" type="checkbox"/>
边界电磁热源 1 (bemh1)	<input checked="" type="checkbox"/>
温度耦合 1 (tc1)	<input checked="" type="checkbox"/>

Result

结果

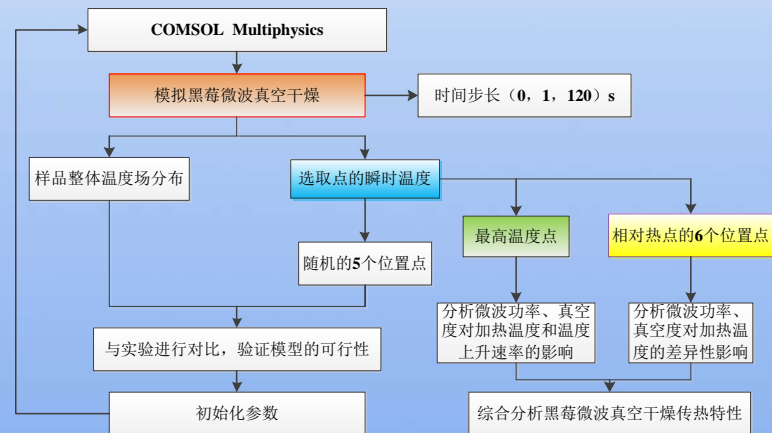
- 数据集
 - 研究 1/解 1 (1) (sol1)
 - 研究 1/解 1 (2) (sol1)
- 派生值
 - S-parameter, S11dB (emw)
 - 点计算 2
 - 点计算 3
 - 点计算 4
 - 点计算 5
 - 点计算 6
- 表格
 - Evaluation 3D
 - 表格 1
 - 表格 2
 - 表格 3
 - 表格 4
 - 表格 5
 - 表格 6
 - 表格 7
- 电场 (emw)
 - 表面 1
- 温度 (ht)
 - 表面
- 导出
 - 绘图 1
 - 报告



Simulation conditions / Simulation process

Experimental conditions

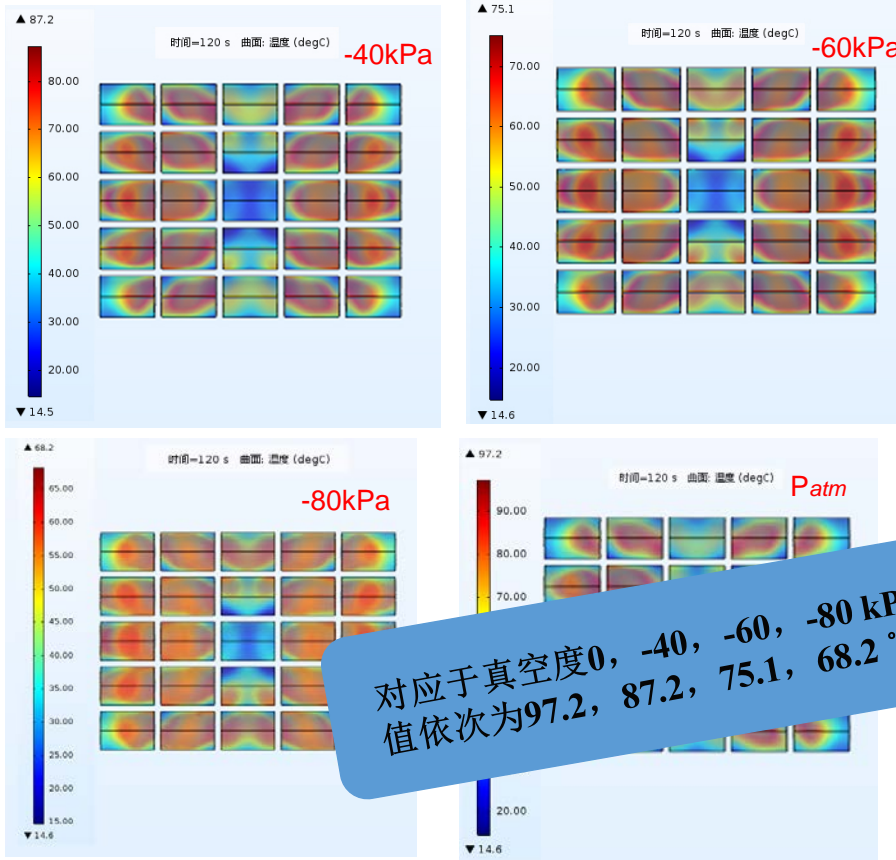
Serial number	Microwave power /W	Vacuum degree / kPa
1	400	-40
2	400	-80
3	400	-60
4	300	-60
5	450	-60
6	400	0



黑莓微波真空传热特性

Results

相同功率不同真空度条件下黑莓样品干燥2 min后的温度分布图（400W）

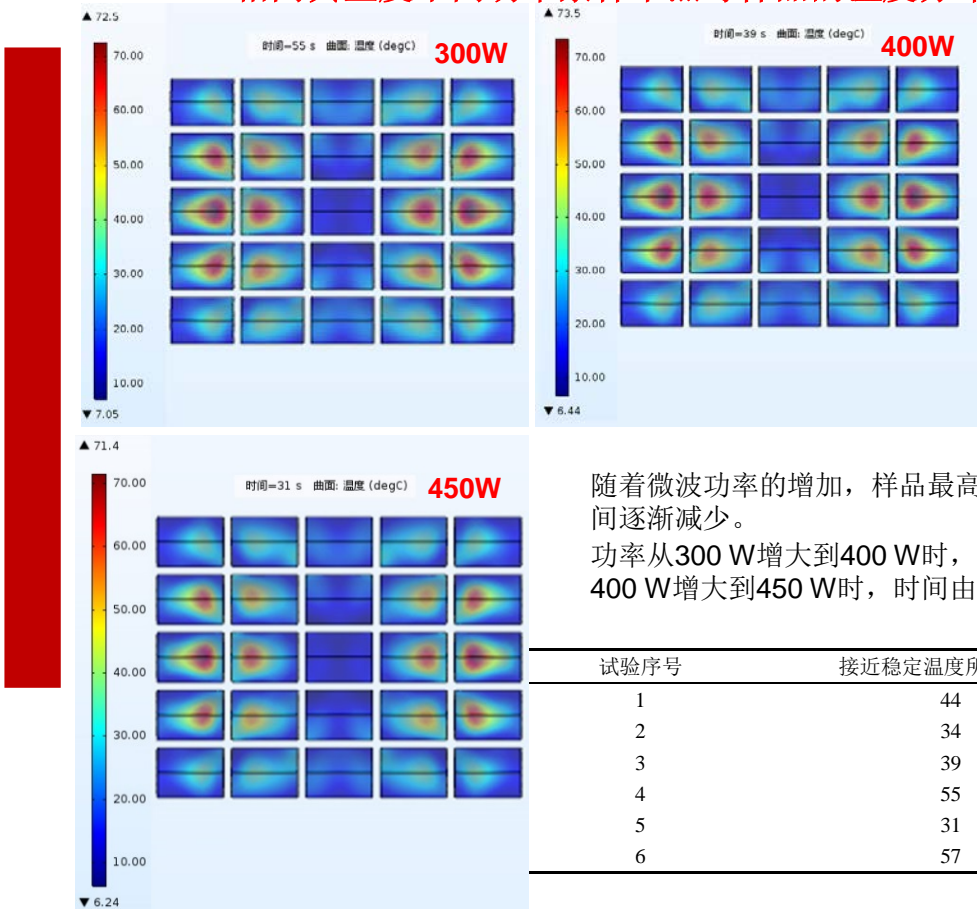


对应于真空度0, -40, -60, -80 kPa下最高温度值依次为97.2, 87.2, 75.1, 68.2 °C(2min)

随着真空度绝对值的增加，水分蒸发加快，物料在低温条件下干燥。

黑莓微波真空传热特性

Results 相同真空度不同功率条件下黑莓样品的温度分布图 (-60kPa)



微波功率影响黑莓的温度上升速率，真空度影响黑莓加热2 min后的最终稳定温度。

随着微波功率的增加，样品最高温度点趋于稳定温度时所耗时间逐渐减少。
 功率从300 W增大到400 W时，时间由55 s降到39 s；功率由400 W增大到450 W时，时间由39 s降到31 s。

试验序号	接近稳定温度所需时间/s	最终的稳定温度(/°C)
1	44	87.2
2	34	68.2
3	39	75.1
4	55	74.1
5	31	75.4
6	57	97.2

黑莓微波真空传热特性

样品温度分布的差异性研究

选取黑莓样品区域上温度相对较高的位置点c1、c2、c3、c4、c5、c6。在COMSOL软件中计算出这6个位置点微波真空加热2 min后温度，求出每种仿真条件下这6个位置点的温度标准差，用来反映不同位置点的温度差异性。其中标准差的计算公式为：

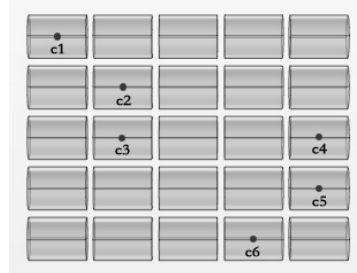
式中：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}$$

σ ——表示6个位置点的温度标准差；

x_i ——第*i*个位置点的温度，℃；

μ ——6个位置点的平均温度，℃。



不同仿真条件下所选位置的温度标准差

试验序号	C1	C2	C3	C4	C5	C6	标准差 σ
1	79.94	82.90	82.91	83.81	83.30	82.70	1.24
2	59.01	59.39	59.43	59.78	59.76	59.23	0.27
3	72.26	73.52	73.52	73.87	73.83	73.87	0.57
4	61.18	73.25	73.22	73.39	73.48	71.19	4.36
5	72.82	73.61	73.41	74.42	73.78	73.32	0.48
6	79.68	92.73	92.80	93.98	93.16	92.66	5.01

功率为400W，真空度为-80kPa时，相对热点的温度差异性最小。

相同真空度的条件下，随着微波功率增加，热点的温度差异性越来越小

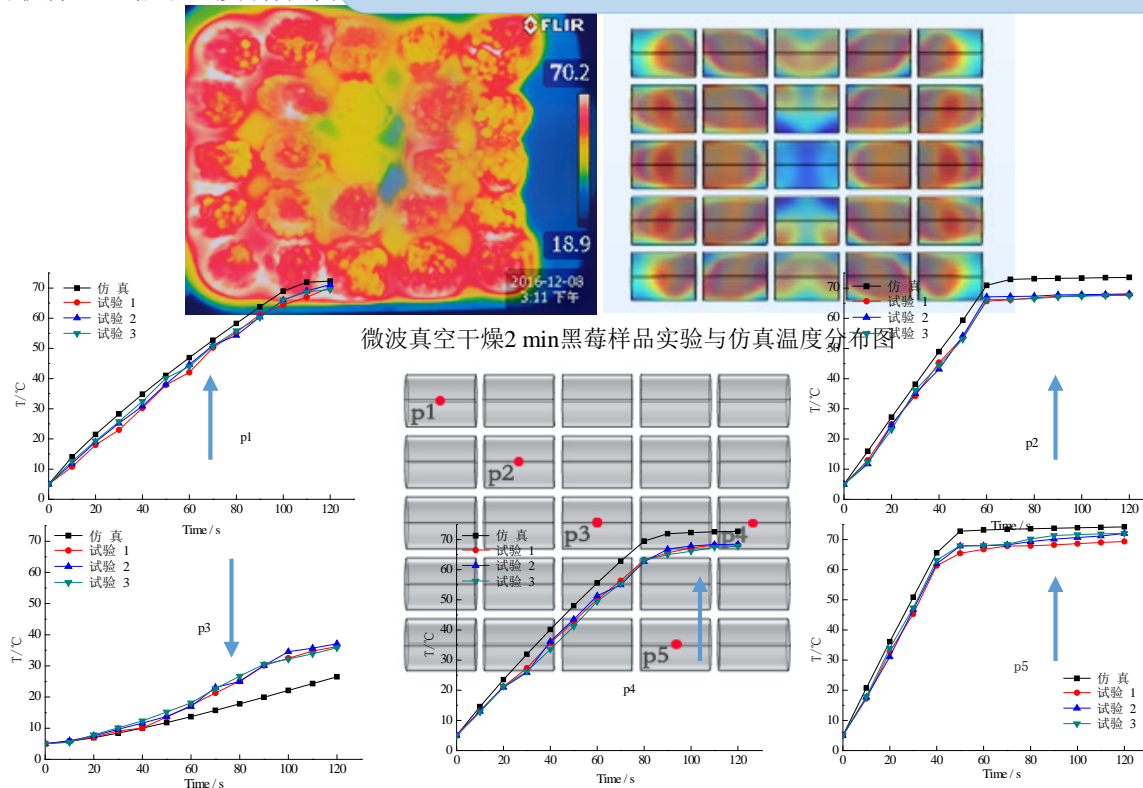
相同微波功率的条件下，随着真空度绝对值增大，热点的温度差异性越来越小

黑莓微波真空传热特性

模型验证

选取微波功率为400W，真空验证时，在样品上取出五个点，分析软件FILR拾取温度场分布图

黑莓在微波真空加热的过程中，温度先是呈线性趋势上升，随后缓慢上升逐渐趋于稳定。在p1、p2、p4、p5等相对热点位置，仿真的温度略高于试验温度，p3冷点位置实际温度略高于仿真温度，这主要是因为仿真模型较为理想，总体上试验和仿真结果较为吻合。



结果与讨论

- 仿真空间温度场分布与瞬态温度曲线与实验结果保持一致，模型是可行的。
- 该模型可用于分析微波真空干燥过程中样品的温度变化，避免了实验过程中测温破坏加热过程中的真空环境，导致加热的不连续性。
- 同时模型可以很好地预测微波真空加热的冷点位置，选择相对热点位置以保证加热的高效性。



Microwave vacuum equipment for industrial use



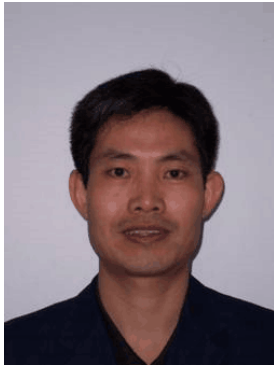
Comsol 会议

团队简介

团队的主要研究领域与特色

进行食品无损检测和控制的研究：基于声与振动的食品无损检测系统研究；基于近红外光谱的水蜜桃品质研究；基于太赫兹成像技术的叶片检测研究；基于气味检测的白酒自动勾兑系统研究；基于气味散发机理的果蔬微波干燥研究。

团队的人员构成及成果概况：团队现有成员4人，3个博士学位老师。教授1名，副教授2名，获得江苏省科技进步三等奖一项，轻工联合会科技进步三等奖2项，授权发明专利4项，其中国际专利2项，团队承担国家自然科学基金3项，省产学研5项。



李臻峰，教授，博导
lzf800000@hotmail.com
江南大学机械工程学院



宋春芳，副教授，硕导
songcf@jiangnan.edu.cn
电话：15951582145
江南大学机械工程学院



Thanks!

Welcome to discuss!

Chunfang-Song