

文章编号: 2095-4980(2023)11-1342-09

提升微波加热均匀性的新型电介质基底

江炳萱, 肖 玮*, 张正平

(贵州大学 大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 介绍并分析了一种新型的电介质基底, 旨在提升微波加热的温度分布均匀性。该基底为非轴对称结构, 由FR-4环氧玻璃纤维板与氧化铝制成, 其几何参数的选定是以降低球形介质样品的平均温升变异系数为目的。为探究电介质基底对微波加热均匀性的影响, 采用球形马铃薯为研究对象, 利用COMSOL Multiphysics多物理场仿真软件模拟微波加热过程, 并计算马铃薯的平均温升变异系数。仿真结果表明: 相比于不加载基底直接加热, 加载电介质基底加热的马铃薯样品的平均温升变异系数降低了40%以上。最后, 进行实验测试验证计算的有效性, 实验结果表明: 实验测试与仿真计算结果一致, 温度上升曲线吻合较好, 使用该电介质基底可以有效改善微波加热的均匀性。

关键词: 微波加热; 球形介质; 非对称结构; 多物理场仿真; 加热均匀性

中图分类号: TM924.76

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023126

Designing a novel dielectric base for improvement of uniformity of microwave heating

JIANG Bingxuan, XIAO Wei*, ZHANG Zhengping

(College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou 550025, China)

Abstract: This paper introduces and analyses a novel dielectric base plate with an asymmetric shape and dielectric property aiming to achieve a uniform temperature distribution over the heating sample. Firstly, the proposed dielectric base contains FR-4(FR-4 Epoxy Glass Cloth) and alumine and is located within a commercial microwave oven to heat a potato sample. The permittivity and geometric values of the base are the selected parameters to be optimized for the sake of lowering the Coefficient Of Variation(COV) of temperature on the spherical medium heating sample and improving heating uniformity. Secondly, calculation of the multiphysical field simulation is applied to simulate the heating process. The simulation results based on COMSOL Multiphysics show that the COV decreases from 0.9134 to 0.5446 with the dielectric base. In other words, the COV declines by over 40%. Finally, an experimental system is built to measure the temperature of the heating sample to validate the simulations and calculations. Good agreements have achieved between the simulation and experiment, showing good consistence in temperature rise curves. It illustrates that the novel dielectric base can make the temperature uniformity of the heating sample improved.

Keywords: microwave heating; spherical medium; asymmetric structure; multi-physics field simulation; heating uniformity

自1945年Percy Spencer意外发现微波的热效应以来, 微波加热技术不断得到关注和发展, 逐渐用于各类新兴学科和产业中^[1]。近年来, 由于微波加热具有即时性、高效性、绿色性等优势受到青睐, 因此科研工作者对微波加热技术在食品加热领域的应用越发关注^[2]。食物的加热均匀性是微波加热效果的主要参考指标之一, 目前家用微波炉的加热均匀性仍较低, 因此需要进一步研究微波加热技术如何改善食物加热后温度分布的均匀性^[3]。

收稿日期: 2023-05-11; 修回日期: 2023-07-11

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(62101146); 贵州省科技计划资助项目(ZK2021—般298)

*通信作者: 肖 玮 email:wxiao@gzu.edu.cn

国外科研工作者对于微波加热均匀性的研究包括：K A Lurie 等^[4]与 E F Kent 等^[5]证明了微波加热的均匀性与微波加热腔的大小与几何形状有关，也与腔内材料的介电常数、排列与分布有关。目前常用的家用微波炉提升微波加热均匀性的方法主要是旋转托盘与模式搅拌器，但这些方法仅对于低损耗材料加热时效果较好^[6]。E Dominguez-Tortajada^[7]等提出了一种包裹黏土样品电介质多层结构模型，可以改善样品内部电场的均匀性。

国内科研工作者，重点研究了加热介质本身的特性对微波加热均匀性的影响：H Chen 等^[8]通过对微波加热的温度分布进行研究，得出微波加热球形介质时，最高温度总是出现在样品的中心区域的结论；Y Liao 等^[9]提出一种环绕电介质的模型，可以使加热最高温度的位置偏离样品的中心位置。它们都可以改善微波加热的均匀性，但存在加工难度大、质量大、尺寸大等问题，难以投入实际生产应用。

基于此，本文提出一种容易加工且成本低廉的电介质基底，可以加载在家用微波炉中的旋转托盘上方。本文以球形马铃薯为研究对象，利用 COMSOL 多物理场仿真软件建立微波加热模型，模拟加热过程，分析马铃薯样品的温度分布变化以及微波加热的均匀性。通过实验测量加热样品的温度分布，并与仿真结果进行对比，验证了该电介质基底对微波加热均匀性的改善效果。

1 微波加热模型

本文模拟球形马铃薯样品放入家用微波炉中进行加热的过程，加热样品吸收微波功率，从内部开始产生热量，从而使样品温度上升。微波加热模型满足以下条件：

- 1) 电介质基底是均匀的、各向同性的、非磁性的材料；
- 2) 加热过程中基底与样品的体积变化忽略不计；
- 3) 样品通过边界处的对流与外界进行热交换；
- 4) 忽略加热样品的介电常数随温度的变化。

1.1 利用平面波理论与统计电磁学分析微波炉中的电场

根据以上假设，考虑到微波谐振腔中的场模式对几何参数敏感，会随时间推移而变化，如图 1 所示，因此电场对微波加热腔的几何形状的灵敏度如式(1)所示：

$$\frac{\Delta V}{V} \approx \frac{3\lambda^3}{8\pi V} \tag{1}$$

式中： V 为空腔体积； λ 为自由空间波长。

式(1)表示本文实验所用微波炉的加热腔可被视作一个电大空腔，因此平面波理论可用来近似分析加热样品和微波之间的相互作用^[9]。

当平面波从具有相对介电常数 ϵ_{rem} 的电介质入射到相对介电常数 ϵ_{sam} 电介质球上时，如图 2 所示，电场、磁场和波数的方向分别是 x 、 y 和 z ，入射平面波如式(2)所示：

$$\mathbf{E}_i = \mathbf{a}_x \mathbf{E}_0 e^{-j2\pi f(\epsilon_{rem}\epsilon_0\mu_0)^{\frac{1}{2}}z} \tag{2}$$

式中： \mathbf{a}_x 为沿 x 方向的单位矢量； \mathbf{E}_0 为电场强度； f 为工作频率； ϵ_0 为自由空间的介电常数； μ_0 为自由空间的磁导率。

式(2)表明，此时可根据统计电磁学分析平面波和加热样品间的相互作用，加热样品内部的电场可以通过将入射的平面波扩展为一系列球面波来计算^[10-11]。

1.2 利用功率损耗密度与平均温升的变异系数衡量微波加热的效果

整个加热腔体中的电场可用亥姆霍兹方程描述^[12]：

$$\nabla^2 \times \mathbf{E} - k_0^2 \epsilon_{sam} \mathbf{E} = 0 \tag{3}$$

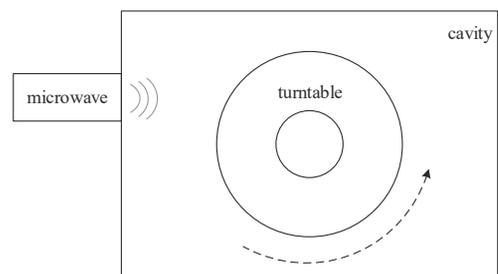


Fig.1 Schematic diagram of heating samples in microwave resonant cavity
图 1 微波谐振腔内加热物品示意图

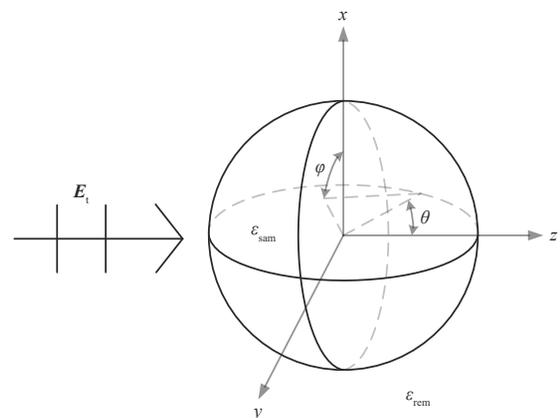


Fig.2 Plane wave incident from a dielectric with relative permittivity ϵ_{rem} to a dielectric sphere with relative permittivity ϵ_{sam}
图 2 从相对介电常数 ϵ_{rem} 电介质入射到相对介电常数 ϵ_{sam} 电介质球体上的平面波

式中： ϵ_{sam} 为加热样品的相对介电常数； k_0 为波数。在微波加热时，温度场 T 通常由传热方程约束^[13]：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\kappa \nabla T) = Q \quad (4)$$

式中： ρ 为电荷体密度； C_p 为比热容； κ 为热导率； Q 为电磁热。加热样品表面发生热量交换，表面的热量边界条件^[14]如式(5)所示：

$$q_0 = h(T_0 - T) \quad (5)$$

式中： h 为传热系数； T_0 为初始温度。微波的功率损耗密度(Power Loss Density, PLD)^[15]，可以表征电磁热，如式(6)所示：

$$P_{\text{loss}} = \frac{1}{2} \omega \epsilon_{\text{rem}} \epsilon_{\text{sam}} \langle |\mathbf{E}|^2 \rangle \quad (6)$$

式中 ω 为角速度。在不失一般性的情况下，忽略空气中的热传导，则温度上升与微波的功率损耗密度成正比：

$$T - T_0 \propto P_{\text{loss}} \quad (7)$$

式(7)表示加热效率可以通过微波的功率损耗密度来表征，即微波的功率损耗密度越高，微波加热的效率也越高。通常，平均温升的变异系数(COV)可用于评估加热均匀性^[16]，如式(8)所示：

$$C_{\text{OV}} = \frac{T_{\text{STD}}}{T_{\text{AVG}}} \quad (8)$$

式中： T_{STD} 为平均温升的标准差； T_{AVG} 为平均温升的平均值。平均温升的变异系数数值越小，微波加热的均匀性越好。

2 电介质基底的结构设计与优化

本文基于此前科研工作者的研究基础，即某些电介质在包围加热样品时，可以改善样品内部电场分布的均匀性^[7]，进而提升微波加热的均匀性，对所设计的电介质基底的材料与几何参数进行研究与设计。

2.1 微波加热电磁仿真分析

实物实验测试所用的家用微波炉型号为格兰仕(Glanz P70D20TL-D4)，首先在多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 中建立一个尺寸相同的微波炉三维模型，如图 3 所示，图中蓝色部分为所设计的介质基底，绿色部分为待加热样品，尺寸如表 1 所示。其中马铃薯相对介电常数为 $50-j15$ ，导热系数为 $0.4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，密度为 $1\,000 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，比热容为 $3\,900 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ^[9]，直径为 4 cm 。

表 1 微波炉的几何参数(cm)

Table 1 Geometric parameters of the microwave oven(cm)

symbol	geometric meaning	value
a_{oven}	wide side length of the Glanz P70D20TL-D4	29.0
b_{oven}	narrow side length of the Glanz P70D20TL-D4	28.0
h_{oven}	vertical height of the Glanz P70D20TL-D4	18.0
h_{plate}	height of the round glass turntable	1.0
d_{plate}	diameter of the round glass turntable	24.4

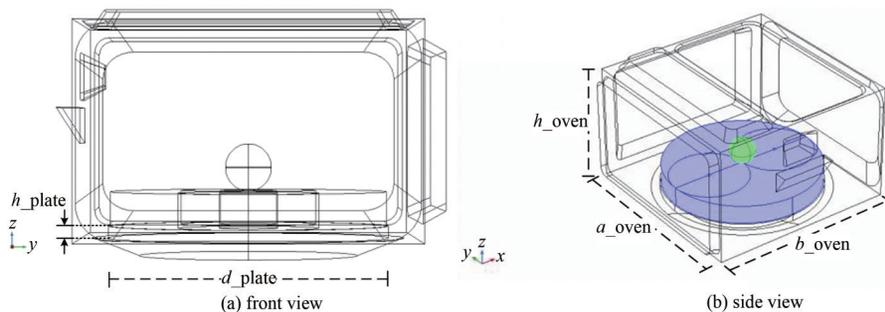


Fig.3 Front and side views of the microwave oven device in COMSOL Multiphysics

图 3 COMSOL Multiphysics 中的微波炉装置的正反面

首先对球形马铃薯样品进行微波加热的数值计算。分析在工作频率为 2.45 GHz ，输入功率为 300 W 时的加热效果。选取输入功率大小时，通过查看 Glanz P70D20TL-D4 产品说明书，考虑到“中档火力”是此型号微波炉微波加热时最节能的档位，也是日常家庭使用中最常用的档位，其平均输入功率为 300 W ，因此在仿真计算时，

将端口微波输入功率也定为 300 W。考虑到计算精确度，本文划分的网格数为 71 137，自由度为 504 877。数值计算结果表明：经过 10 s 加热，球形马铃薯样品从设定的初始温度 293.15 K(即通常室温 20 °C)上升至 318.817 K，平均温升为 25.667 K，PLD 为 $2.945 2 \times 10^6$ W/m³，整体平均温升的 COV 为 0.913 4，可见此时微波加热的均匀性较差。

2.2 电介质基底结构的设计

本文设计了一款能加载在家用微波炉的加热腔内，并通过提升内部电场均匀性来改善微波加热均匀性的电介质基底。该电介质依据平面波理论所设计，目的是降低被加热物体的平均温升 COV，改善加热均匀性。

2.2.1 电介质基底的材料选取

电介质基底材料和结构的设计对微波加热的效率与均匀性影响较大^[5-6]。该基底加载在圆形托盘上方，球形马铃薯样品下方的中间位置，如图 4 所示，尺寸如表 2 所示。当微波到达样品时，样品中心位置附近将出现热点，根据 Y Liao 的理论，结合加热腔的整体尺寸，将基底的高度设计为 2.9 cm，以使电场聚焦位置远离样品的中心^[9]。考虑到玻璃旋转托盘的直径为 24.4 cm，但并不是一个规则的圆柱体，在边缘有突起，因此基底的直径设计为 24 cm。

表 2 电介质基底与加热样品的几何参数(cm)

Table 2 Geometric parameters of the dielectric base and heated sample(cm)

symbol	geometric meaning	value
$h_{\text{dielectric}}$	height of the dielectric base	2.9
$d_{\text{dielectric}}$	diameter of the dielectric base	24.0
d_{potato}	diameter of the spherical potato sample	4.0
h_{glass}	height of the round glass turntable	1.0

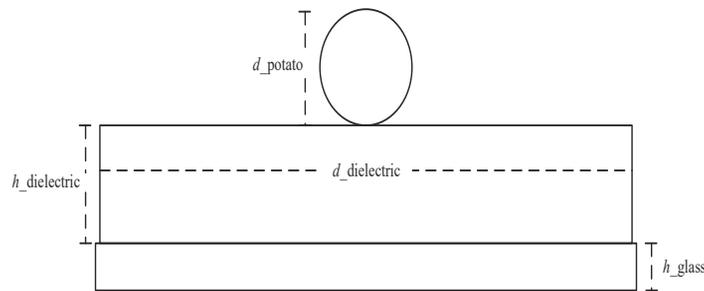


Fig.4 Schematic diagram of the substrate placed on the tray and heated sample

图 4 放置在托盘上的基底和加热样品示意图

随后，选取了几种常用的单一电介质材料构成的电介质基底，测试相同条件下加热 10 s 后样品的加热效果，结果如表 3 所示。通过对比，将氧化铝和 FR-4 环氧玻璃纤维板作为电介质基底时，加热效果有一定改善：氧化铝可提高平均温升值，但平均温升的 COV 也增大；FR-4 可减小平均温升的 COV，同时也降低了平均温升值。考虑电介质材料成本不宜过高，最终选取 FR-4 和氧化铝这 2 种材料设计电介质基底。

表 3 几种单一电介质作为基底时的微波加热效果

Table 3 Microwave heating effects with several kinds of single dielectric as substrates

type of materials	average temperature rise/K	PLD/(W/m ³)	COV
without dielectric base	25.667	$2.945 2 \times 10^6$	0.913 4
aluminum oxide	29.079	$3.819 6 \times 10^6$	0.945 3
aluminum	28.554	$3.991 9 \times 10^6$	0.968 9
FR-4	24.981	$2.843 3 \times 10^6$	0.901 3
silicon	15.781	$1.703 4 \times 10^6$	0.909 6
silicon dioxide	14.667	$1.439 6 \times 10^6$	0.896 9
Ferrium C61	26.922	$3.165 5 \times 10^6$	0.974 6
copper	29.736	$3.454 5 \times 10^6$	1.035 2
polypropylene	19.724	$2.131 2 \times 10^6$	0.962 5
graphite	23.597	$2.710 4 \times 10^6$	0.905 4

2.2.2 电介质基底的结构设计

确定使用 FR-4 和氧化铝作为电介质基底后，选取几种电介质基底常见设计图案进行仿真实验，如图 5 所示，其中不同的颜色分别代表 FR-4 和氧化铝所占的部分(深色代表 FR-4，浅色代表氧化铝)。图 5(a)为对半分的设计图案，在相同条件下微波加热后，平均温升为 25.224 K，COV 为 0.778 9，相比不使用基底直接加热下降了 14.8%，因此微波加热的均匀性有少量提升。在图 5(a)基础上再进行 2 个半圆切割，得到图 5(b)所示图案，在相同条件下微波加热后，平均温升为 20.403 K，COV 为 0.614 1。此时 COV 降低了更多，为 23.8%，微波加热的均匀

性提升效果比图 5(a)图案更加优异, 但平均温升也有所降低, 即微波加热的效率变差。图 5(c)是将电介质基底平均切割成 4 份, 在对角位置使用同种电介质材料。在相同条件下微波加热后, 平均温升为 19.445 K, COV 为 0.791 4, 此图案对微波加热的均匀性有一定改善, 但微波加热的效率下降更为严重。图 5(d)是将电介质基底设计切割成环形, 然后填充 FR-4 和氧化铝。扫描不同小圆半径与不同材料情况下的微波加热效果, 当内侧为 FR-4 材料, 外侧为氧化铝材料且内侧 FR-4 半径为 2 cm 时, 微波加热的均匀性提升最多。在相同条件下微波加热后, 平均温升为 21.970 K, COV 为 0.777 9。以上 4 种图案的微波加热效果, 如表 4 所示。

表 4 四种简单图案的微波加热效果

Table4 Microwave heating effects of four simple patterns

type of materials	average temperature rise/K	PLD/(W/m ³)	COV
without dielectric base	25.667	2.945 2×10 ⁶	0.913 4
(a)	25.224	2.876 9×10 ⁶	0.778 9
(b)	20.403	2.188 1×10 ⁶	0.614 1
(c)	19.445	2.094 4×10 ⁶	0.791 4
(d)	21.970	2.379 8×10 ⁶	0.777 9

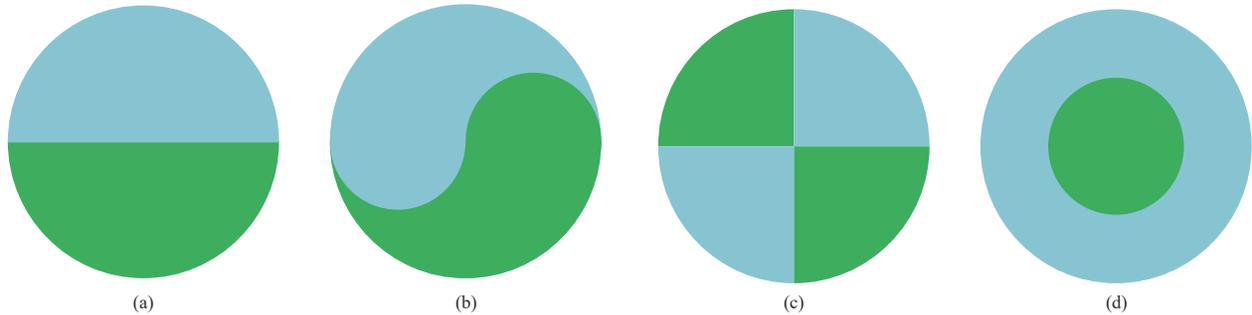


Fig.5 Patterns of several different dielectric substrates
图 5 几种不同的电介质基底图案设计

经过对比, 图 5(b)图案对微波加热均匀性的提升幅度最大, 但降低了微波加热的效率, 样品平均温升值下降超过了 1/5, 造成一定的微波能量浪费。因此选择以该图案为基础, 对电介质基底的结构做进一步设计与优化。图 5(b)图案大致几何结构与我国传统文化中的“太极”图类似, 因此将其进一步进行切割, 在 FR-4 和氧化铝部分分别切一个小圆, 并分别填充圆形氧化铝和 FR-4 材料, 如图 6 所示, 其尺寸如表 5 所示。

在相同条件下微波加热后, 平均温升为 20.630 K, COV 为 0.544 6, 比不加载电介质直接加热下降超过 40%, 对微波加热均匀性的改善提升明显。电介质基底与玻璃旋转托盘对微波加热效果的改善对比如表 6 所示。由 COV 值的变化可见, 家用微波炉常见用以提升微波加热均匀性的旋转托盘, 仍不如电介质基底的改善效果。

球形马铃薯样品内部电场分布如图 7 所示, 根据式 (6), 电场强度的分布均匀性与微波加热的均匀性是一致的。经过对比, 样品内部电场的聚焦位置(暗红色处)偏离了正中心位置一些。图 7(a)中深蓝色的加热冷区几乎占到了整个切面的 3/4, 而图 7(b)中深蓝色的加热冷区仅有 1/4, 红、黄色的加热暖区相对明显扩大, 因此电场分布的均匀性提升了, 与微波加热均匀性的提升一致。

表 6 是否加载托盘与电介质基底微波加热效果的对比

Table6 Comparison of microwave heating effects whether loading trays and dielectric substrates

loaded device	average temperature rise/K	PLD/(W/m ³)	COV
without dielectric base and turntable	26.342	3.160 7×10 ⁶	0.956 3
turntable only	25.667	2.945 2×10 ⁶	0.913 4
dielectric base only	20.984	2.351 1×10 ⁶	0.697 7
dielectric base and turntable	20.630	2.232 7×10 ⁶	0.544 6

表 5 电介质基底的几何参数(cm)

Table5 Geometric parameters of the dielectric base(cm)

symbol	geometric meaning	value
$d_{\text{dielectric}}$	diameter of the dielectric base	24
r_1	radius of the semicircle	3
r_2	radius of the small circle	2

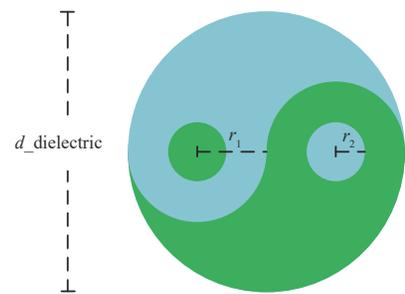


Fig.6 Pattern of the dielectric substrate
图 6 电介质基底的图案设计

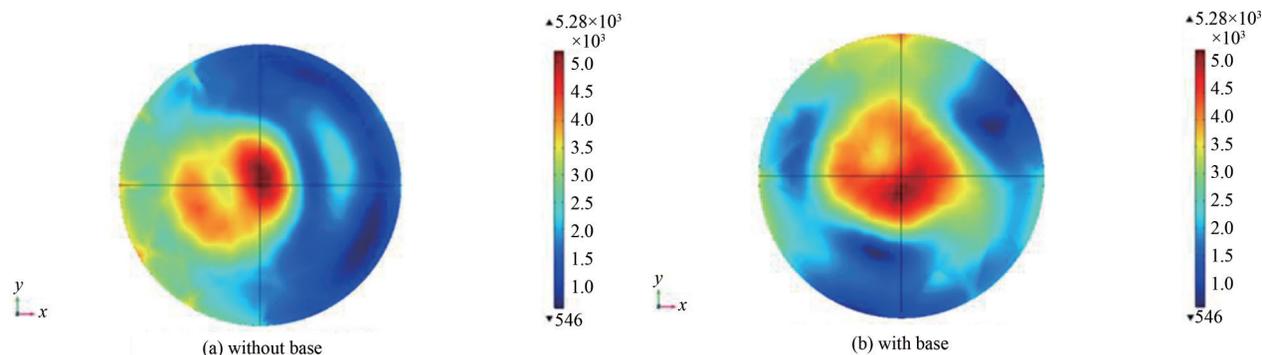


Fig.7 Electric field distribution on the cross section of heated sample
图 7 加热样品切面的电场分布

2.2.3 对比仿真实验

改变加热样品的体积，测试加载电介质时不同直径的马铃薯样品的加热效果。如图 8 所示，直径为 3 cm 的马铃薯样品平均温升最高，COV 值最低。当体积发生变化时，COV 值在 0.55~0.60 之间变化，平均温升在 18~21 K 范围内变化，体现了加载电介质基底时，对不同体积加热样品的微波加热均匀性改善具有泛用性。改变加热样品的介电常数，测试加载电介质时不同介电常数的马铃薯样品的加热效果。如图 9 所示，其中图 9(a)为保持实部不变，改变样品介电常数虚部；图 9(b)为保持虚部不变，改变样品介电常数实部。可见介电常数为 50-j15 的马铃薯样品 COV 值最低，平均温升较高。当介电常数发生变化时，COV 值在 0.55~0.65 之间变化，平均温升在 19~22 K 范围内变化，体现了加载电介质基底时，对不同介电常数加热样品的微波加热均匀性改善具有泛用性。

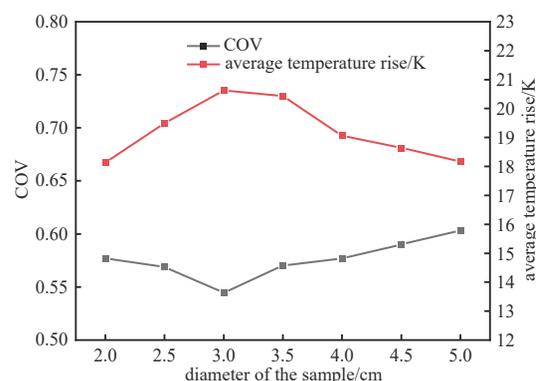


Fig.8 Heating effect of spherical potatoes with different volumes
图 8 不同体积球形马铃薯的加热效果

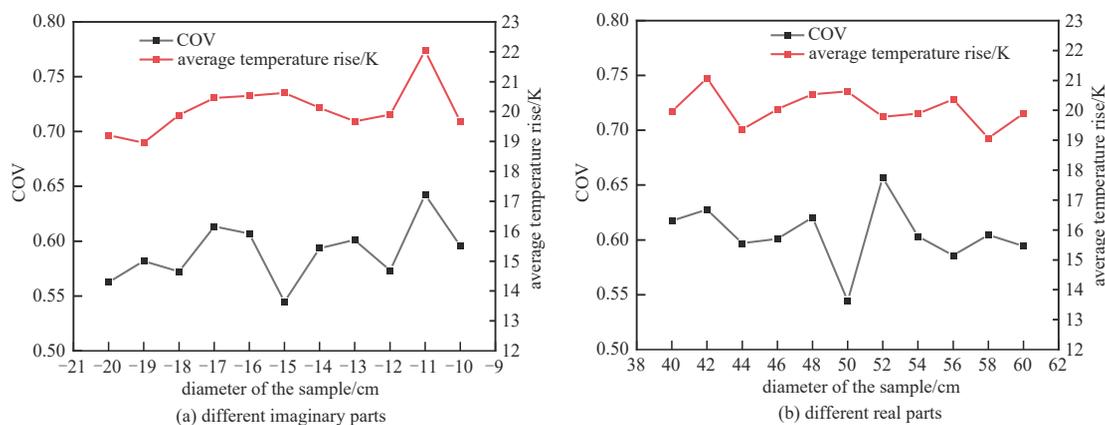


Fig.9 Heating effect of spherical potatoes with different dielectric constants
图 9 不同介电常数球形马铃薯的加热效果

3 电介质基底提升微波加热均匀性的实验研究

本文设计的电介质基底尺寸的最小精确度为 0.1 cm，满足工业加工的精确度要求。将各处尺寸调整 1%，最终计算结果与原本计算结果误差均在 0.07% 内。此外，氧化铝与 FR-4 材料的成本不高，且加工难度不大，因此对该电介质基底进行实物加工并测试，验证仿真模拟的结果。

3.1 实验装置与仪器

使用的微波加热测试系统包括：格兰仕微波炉 Glanz P70D20TL-D4、电介质基底、热成像仪 Fluke-Tis75+(精

确度为 ± 0.1 K)、数字温度计 Lihuada DM6801A(精确度为 ± 0.1 K)以及球形加热马铃薯样品, 如图 10 所示。

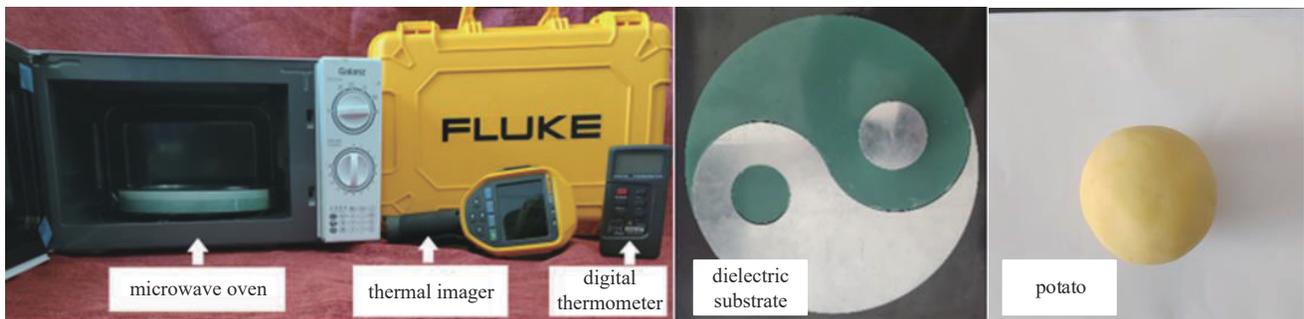


Fig.10 Photos of experimental equipment, testing instruments, the dielectric substrate and the potato
图 10 实验装置、测试仪器、电介质基底与马铃薯的照片

3.2 电介质基底对微波加热均匀性的提升

将马铃薯剥皮并切割成直径为 4 cm 的球形, 放入微波炉中玻璃旋转托盘的中心, 并将数字温度计的探针插入至马铃薯中心。加热旋钮调节至中档(300 W), 然后通电并旋动微波炉开关, 对马铃薯样品加热 10 s 后立即取出, 从中间切开, 利用热成像仪对切面进行拍摄, 得到热图像。另取一相同马铃薯样品, 在玻璃旋转托盘上放置电介质基底, 然后重复进行加热操作与热图像记录, 结果如图 11 所示, 其中红色数字表示加热样品内部最高温度, 白色数字表示加热样品中心温度, 淡绿色数字表示环境温度。经过对比, 实验中加载电介质基底后, 温度热点从中心位置有所发散, 结合加热冷区的缩小、加热暖区的增大以及两者分布的变化可以得出, 微波加热的均匀性有所提升。同时实验测量结果与软件仿真结果基本一致, 验证了仿真模拟的有效性。但样品最高温度存在误差, 其主要来源于加热结束后, 取出马铃薯并拍摄热图像需要 3~5 s, 有一些热量扩散, 导致热成像图中温度比仿真结果低 5 K 左右。

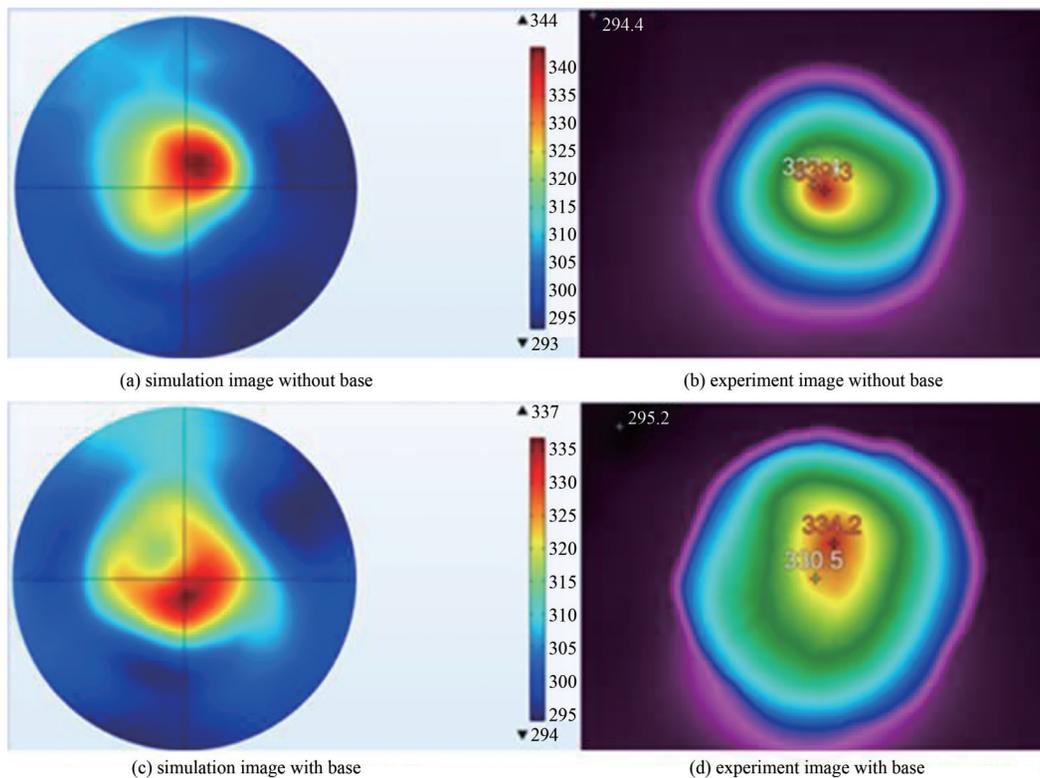


Fig.11 Temperature distribution on sample potato slice of simulation and thermal imaging
图 11 样品马铃薯切面的仿真与实物热成像温度分布

进一步对马铃薯中心处温度进行测量, 每隔 2 s 记录一次结果, 绘制随时间变化的温度曲线, 如图 12 所示。结果表明, 实验测量的温度与仿真模拟的温度吻合良好, 不加载电介质时温度误差为 1.6% 以内, 加载电介质时

温度误差为 2.3% 以内。误差主要来源于玻璃旋转托盘不是标准的圆柱体，实验所用马铃薯也不是标准的球体，与仿真模型存在差异，同时马铃薯的介电常数在仿真模拟中被假设为均匀分布，且忽略了其随温度的变化。

3.3 对比实验

将微波加热时间从 10 s 改为 15 s，对马铃薯重复微波加热实验，切面热成像图如图 13(a)~(b) 所示。通过对比，加载电介质基底后，红色的加热暖区面积有一定增加，蓝色的加热冷区面积有一定减小，而中心位置的温度峰值减小了 6.8 K。结果表明，马铃薯加热更长时间后，加载电介质基底后对微波加热均匀性的改善较为明显，但温升的损失也相对增加，即微波加热的效率下降了。

将微波炉火力档位调整至低档(200 W)时，对加热马铃薯样品重复微波加热实验，加热时间为 15 s，切面热成像图如图 13(c)~(d) 所示。通过对比，加载电介质基底后，红色的加热暖区面积大幅增加，蓝色的加热冷区面积大幅减小，而中心位置的温度峰值减小了 9.2 K。结果表明，使用更低功率的档位加热马铃薯时，加载电介质基底后对微波加热均匀性的改善也较为明显，但对温升下降也更加明显，即微波加热的效率会降低。

综上，当延长加热时间或使用低档位功率进行加热时，电介质基底也可以明显提升微波加热的均匀性。

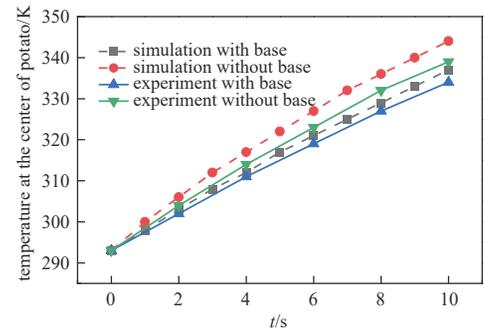


Fig.12 Temperature at the center of the sample potato
图 12 样品马铃薯中心温度随时间变化图

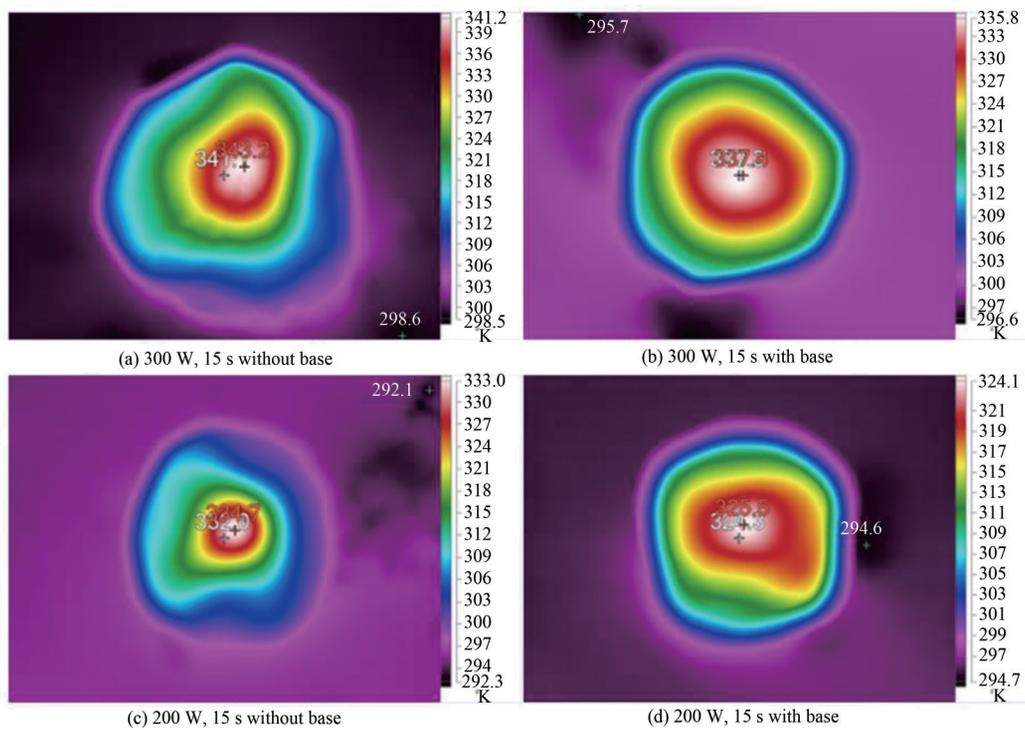


Fig.13 Temperature distribution on sample potato slice under different conditions
图 13 不同条件下样品马铃薯切面的热成像温度分布

4 结论

本文利用多物理场模型对微波炉的加热过程进行数值仿真模拟，设计了一款新型的电介质基底，可用于加载在加热腔内以提升加热均匀性。通过实验测量，验证了模型的有效性，并得出以下结论：

- 1) 实验测量结果与仿真模拟结果吻合良好，表明该多物理场模型能比较准确地模拟微波加热过程。
- 2) 本文设计的新型电介质基底在对球形介质进行微波加热时，能够改善加热样品的加热均匀性，相比不加载基底的直接加热，样品平均温升的变异系数降低 40% 以上，受热更加均匀。
- 3) 将我国传统文化中的“太极”图案引入微波加热领域，该非轴对称的排布结构能改善微波加热球形介质的均匀性，且加热效果优于轴对称结构，证明非轴对称结构设计在微波加热领域有潜在的研究价值。

该电介质基底加工难度与成本较低，在微波加热食品的应用中具有很大潜力，展望微波加热领域的未来，

可为多模腔体设计提供参考。

参考文献:

- [1] OSEPCHUK J M. A history of microwave heating applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1984,32(9):1200–1224. doi:10.1109/TMTT.1984.1132831.
- [2] 郑亚琪,陈星. 微波加热效应的多物理场仿真与实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(2):302–306. (ZHENG Yaqi, CHEN Xing. Multi-physics simulation and experiment research of microwave heating[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(2):302–306.) doi:10.11805/TKYDA201802.0302.
- [3] DATTA A K, RAKESH V. Principles of microwave combination heating[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2013,12(1):24–39. doi:10.1111/j.1541-4337.2012.00211.x.
- [4] LURIE K A, YAKOVLEV V V. Method of control and optimization of microwave heating in waveguide systems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999,35(3):1777–1780. doi:10.1109/20.767375.
- [5] KENT E F, KENT S. Numerical modeling of microwave heating of dielectric materials[C]// International Conference on Advanced Computational Methods in the Heat Transfer. 2004.
- [6] MONZÓ-CABRERA J, CATALÁ-CIVERA J M, PLAZA-GONZÁLEZ P, et al. A model for microwave-assisted drying of leather: development and validation[J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 2004, 39(1): 53–64. doi: 10.1080/08327823.2004.11688508.
- [7] DOMINGUEZ-TORTAJADA E, MONZO-CABRERA J, DIAZ-MORCILLO A. Uniform electric field distribution in microwave heating applicators by means of genetic algorithms optimization of dielectric multilayer structures[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007,55(1):85–91. doi:10.1109/TMTT.2006.886913.
- [8] CHEN Hailong, LI Tao, LIANG Yun, et al. Experimental study of temperature distribution in rubber material during microwave heating and vulcanization process[J]. Heat and Mass Transfer, 2017,53(3):1051–1060. doi:10.1007/s00231-016-1877-3.
- [9] LIAO Yinhong, HONG Tao, CHEN Junjie, et al. Surrounding dielectrics for reducing heating concentrations of spheres in microwave applicators with moving elements[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021,69(11):4589–4598. doi:10.1109/TMTT.2021.3101205.
- [10] KRITIKOS H N, SCHWAN H P. The distribution of heating potential inside lossy spheres[J]. IEEE Transactions on Bio-medical Engineering, 1975,22(6):457–463. doi:10.1109/TBME.1975.324465.
- [11] WAIT J R. Electromagnetic wave theory[M]. New York:Harper & Row, 1985.
- [12] MENG Qian, LAN Junqing, HONG Tao, et al. Effect of the rotating metal patch on microwave heating uniformity[J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 2018,52(2):94–108. doi:10.1080/08327823.2018.1440341.
- [13] LI He, SHI Shiliang, LIN Baiquan, et al. A fully coupled electromagnetic, heat transfer and multiphase porous media model for microwave heating of coal[J]. Fuel Processing Technology, 2019(189):49–61. doi:10.1016/j.fuproc.2019.03.002.
- [14] CHEN Jiajia, PITCHAI K, BIRLA S, et al. Simulation of microwave heating of porous media coupled with heat, mass and momentum transfer[C]// Proceedings of the 2012 COMSOL Conference in Boston. Boston:COMSOL, 2012.
- [15] HUANG Kama, LIAO Yinhong. Transient power loss density of electromagnetic pulse in Debye media[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015,63(1):135–140. doi:10.1109/TMTT.2014.2374158.
- [16] DATTA A K, ANANTHESWARAN R C. Handbook of microwave technology for food application[M]. Boca Raton: CRC Press, 2001.

作者简介:

江炳萱(1997-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波加热 .email:gs.bxjian20@gzu.edu.cn.

肖 玮(1994-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为微波能的工业应用.

张正平(1964-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电磁场与微波技术.