

果蔬物料变化对微波加热温度特性的影响

张乐道¹ 虞启辉² 丁小航²

(1. 内蒙古科技大学生命科学与技术学院, 内蒙古 包头 014010;

2. 内蒙古科技大学机械工程学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: [目的] 解决微波加热时, 果蔬物料内会出现因局部温度过高而引起的焦化现象。[方法] 建立介电特性随温度变化的电磁—热传导耦合模型, 通过试验验证了模型的正确性。[结果] 当形状为正方体、球体时, 介电特性值较大的物料更容易在偏离物料中心处、中心处形成高温聚集区, 高温聚集区的温度可比周围温度高 10℃ 以上; 若尺寸相同, 介电特性越小的物料温度均匀性越高, 介电常数减少 24.8% 可使温度均匀性提高 43.8%。[结论] 通过调节物料的介电特性和尺寸可有效控制物料温度分布的均匀性。

关键词: 介电特性; 物料尺寸; 温度分布; 温度均匀性; 微波

The effect of fruits and vegetables changes on the temperature characteristic during microwave heating

ZHANG Ledao¹ YU Qihui² DING Xiaohang²

(1. School of Life Science and Technology, Inner Mongolia University of Science and Technology,

Baotou, Inner Mongolia 014010, China; 2. School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia

University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to solve coking scorch caused by excessive local temperature often occurs when microwave heating of fruit and vegetable materials. [Methods] A coupling model of electromagnetic-heat conduction with dielectric properties varying with temperature was established, and the correctness of the model was verified by experiments. [Results] When the shape is cube, materials with larger dielectric properties are more likely to form a high temperature accumulation zone far from the center, and when the shape is sphere, materials with larger dielectric properties are more likely to form a high temperature accumulation zone in the center. If the size is the same, the temperature uniformity of the material with smaller dielectric properties is higher, and the temperature uniformity is increased by 43.8% when the dielectric constant is reduced by 24.8%. [Conclusion] The temperature distribution uniformity of the material can be effectively controlled by adjusting the dielectric characteristics and size of the material.

Keywords: dielectric characters; material size; temperature distribution; temperature uniformity; microwave

微波干燥具有加热效率高、干燥时间短等优点, 已被应用于果蔬采后处理中。冀德富等^[1]采用阴干法、晒干法、50℃烘箱干燥法和微波干燥法 4 种方法干燥玉米须, 发现微波干燥时间最短且黄酮提取率最高。沈伟等^[2]探究了热风干燥、远红外干燥和微波干燥 3 种方式对芒果果皮理化特性的影响, 对比研究了干燥速率和果皮营养物质含量, 发现微波干燥效率最高且总多酚含量较多。

然而在微波干燥过程中, 普遍存在局部温度过高、局

部焦化的现象。针对这一现象, 目前主要以试验研究居多, 在此基础上, 进行综合分析得出最优操作条件。沈素晴等^[3]采用微波干燥青香蕉, 研究了加载不同强度微波和不同间歇比微波时青香蕉的加热特性, 发现调节微波功率和微波的间歇比可避免青香蕉的焦糊现象; Wang 等^[4]采用红外测温方式测量物料温度, 研究了微波干燥过程中胡萝卜的温度分布; 罗归一等^[5]采用微波干燥土豆片, 通过控制微波加载功率的方式, 控制干燥曲线, 发现可变

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (编号: 52006109)

通信作者: 张乐道 (1984—), 女, 内蒙古科技大学副教授, 博士。E-mail: ldzhang@imust.edu.cn

收稿日期: 2023-06-14 **改回日期:** 2024-07-14

功率的控温方式更节能且温度均匀性更好。但这些研究并未找到微波加热不均匀问题的本质,不能从根本上解决微波加热不均匀的问题。因焦化现象至今未被有效解决^[6],极大地限制了微波技术在果蔬干燥行业的应用。

为了能从理论上认识并控制微波加热过程,越来越多的学者依据微波加热时的物理过程,采用多物理场耦合的方式对微波加热过程进行研究^[7-8]。张柯等^[9]利用 COMSOL 软件建立了电磁-热传导耦合模型,模拟微波加热马铃薯的过程,通过监测特征点的温度变化,与试验温度值对照,发现了能提高试验效率的仿真模型。Zhang 等^[10-11]建立非线性的电磁-热传导耦合模型模拟微波加热物料的过程,发现物料吸收的微波能会随着体积的增大而增加,但是当物料的体积过于小时,这种趋势会发生局部中断现象。Knoerzer 等^[12]在研究微波干燥过程中建立了不考虑水分损失的传热方程,由该方程可知,介电特性、热性质(热导率和比热容)、谐振腔的参数(腔体大小和微波功率等)和物料的物理特性(形状、大小、密度和位置等)均能影响微波干燥的均匀性。至今还未见关于果蔬物料品种、形状和尺寸变化对微波加热温度特性影响的系统研究。

研究拟建立介电特性随温度变化的电磁-热传导耦合模型,模拟微波加热果蔬的过程,考虑果蔬物料种类会随着季节变化,果蔬大小会随着生产需求变化,因此研究果蔬介电特性改变和尺寸改变对物料内温度分布和温度

均匀性的影响,以期为解决微波加热果蔬的温度不均匀问题提供新思路。

1 物理模型

微波炉是一个金属箱,通过在 TE10 模式下工作的矩形端口连接到 2.45 GHz 的微波源。微波炉底部有一个圆柱形玻璃板,玻璃板中心上面放着一个球形果蔬物料。采用 COMSOL 软件对微波炉、波导、果蔬物料和玻璃板进行建模,其模型如图 1 所示,外框即为微波炉壁。

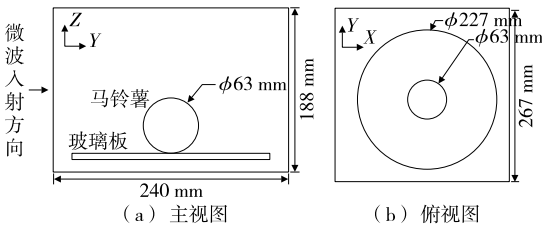


图 1 微波加热果蔬物料模型

Figure 1 Models of fruit and vegetable materials heated by microwave

样品的初始温度和环境温度为 25 ℃,加热时间为 5 s,微波功率为 1 kW,波端口微波频率为 2 450 MHz,端口使用 TE10 模,微波炉壁的材料选用铜,铜和空气的参数直接从 COMSOL 材料库中导出,果蔬物料表面热对流为 2 W/(m²·K)。果蔬物料以马铃薯为例,参数见表 1。

表 1 马铃薯参数对照表[†]

Table 1 Comparison table of potato parameters

热导率/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	相对介电常数	相对介电损耗
0.55	1 050	3.64×10 ³	-6.4×10 ⁻⁴ T ² -0.05T+55.54	-6.4×10 ⁻⁴ T ² -0.108T+15.62

[†] T 表示样品温度,K。

为进一步探究微波入射时物料温度的均匀性,在物料中选取 7 个特征点(见图 2),计算时获得这 7 个特征点的温度值。

采用温度变异系数(coefficient of variation, COV)来表征微波加热的均匀性^[13],计算公式如式(1)所示。COV 是温度标准差与平均温度升高值的比值,能够排除可能由于整体温升不明显而造成的均匀性高的假象,更客观地反映出数据的离散程度^[14]。COV 值越小,其温度均匀性越高。

$$Cov = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - \Delta T)^2}}{\Delta T - T_0}, \quad (1)$$

式中:

Cov——温度变异系数;

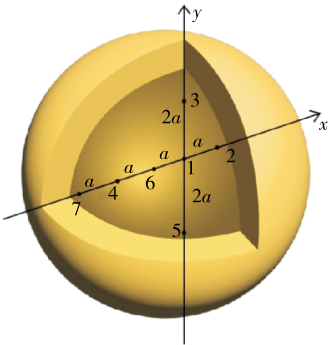


图 2 特征点位置

Figure 2 Location of feature points

T_i——加热结束后任一点的温度,℃;

ΔT——加热结束后的平均温度,℃;

T_0 ——初始温度,℃。

2 模型验证

为了验证以上模型的正确性,依据文献[9]中的试验条件:微波炉腔尺寸为350 mm×235 mm×338 mm,马铃薯中心坐标为(0 mm, 0 mm, 24 mm),马铃薯尺寸为100 mm×42 mm×50 mm,使用厚度为3 mm的PP塑料装马铃薯,马铃薯的初始温度和环境温度均为24℃,加热时间为30 s,微波炉功率为780 W。依据上述条件设置所建模型中的参数进行计算,将计算所得7个特征点的温度与试验结果进行对比,如图3所示。从图3可以看出,模型计算所得温度与试验温度基本吻合,说明所建模型能够较准确描述微波加热果蔬的过程。

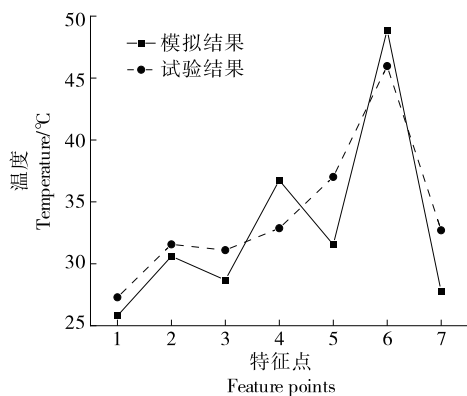


图3 试验结果与仿真结果的比较

Figure 3 Comparison between experimental results and simulation results

除了采用图3判断模型计算值与试验值的接近程度,继续使用式(2)计算均方根误差,计算得到均方根误差为1.72℃(<1.75℃),在可接受范围内^[15],所以该模型可用于分析微波加热果蔬物料的过程。

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_s - \theta_E)^2}, \quad (2)$$

式中:

s ——均方根误差,mm;

θ_s ——模拟温度,℃;

θ_E ——试验温度,℃。

3 仿真分析

3.1 介电特性对物料温度特性的影响

3.1.1 果蔬物料的介电特性 介电特性是分子中束缚电荷对外加电场的响应特性,对于微波加热影响十分关键^[16],果蔬物料介电特性的表达式如式(3)所示^[17]。

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'', \quad (3)$$

式中:

ϵ^* ——介电特性,F/m;

j ——复数的虚部, $j = \sqrt{-1}$;

ϵ', ϵ'' ——介电常数和介电损耗因子。

由式(3)可知,介电特性可由介电常数 ϵ' 和介电损耗因子 ϵ'' 两部分表示。介电特性影响着物料的微波吸收能力以及加热效率。微波的频率、温度、水分含量以及无机盐离子等因素均会影响果蔬物料的介电特性^[18],进而影响微波加热的效率与均匀性^[19]。

试验所用微波设备的频率为2 450 MHz,依据文献[20—24]中的数据,列举了12种果蔬物料在2 450 MHz频率下的介电常数和介电损耗,如表2所示。

表2 2 450 MHz频率下一些果蔬的介电特性

Table 2 Dielectric properties of some fruits and vegetables under the frequency of 2 450 MHz

物料	温度/℃	介电常数	介电损耗	参考文献
马铃薯	25	55.54	15.62	[23]
胡萝卜	25	73.80	20.07	[22]
苹果	25	57.00	12.00	[20]
玉米	25	57.90	15.91	[21]
萝卜	25	72.98	17.32	[24]
香菜	25	63.87	14.65	[24]
竹笋	25	71.00	16.00	[24]
西兰花	25	71.56	20.88	[24]
大蒜	25	46.50	18.20	[24]
香蕉	25	66.86	18.79	[24]
黄瓜	25	73.55	14.16	[24]
梨	25	70.68	16.53	[24]

介电特性改变,对应着物料的改变。选取介电常数和介电损耗因子差距较大的胡萝卜和马铃薯作为代表性果蔬进行研究,其物料介电常数和介电损耗因子随温度的变化规律如表3所示。

表3 胡萝卜和马铃薯的介电特性[†]

Table 3 Dielectric properties of carrots and potatoes

物料	相对介电常数	相对介电损耗
胡萝卜	$-6.4 \times 10^{-4} T^2 - 0.057 T + 73.8$	$-6.4 \times 10^{-4} T^2 - 0.108 T + 20.07$
马铃薯	$-6.4 \times 10^{-4} T^2 - 0.057 T + 55.54$	$-1.0 \times 10^{-4} T^2 - 0.108 T + 15.62$

[†] T 为温度,K。

3.1.2 介电特性对物料温度分布的影响 为研究介电特性对尺寸不同的物料温度分布的影响,使用从 X 轴入射1 kW微波的模型,模拟计算中所采用参数(密度、导热系数等)见表1,分别对半径不同的球形物料(胡萝卜和马铃薯)进行模拟分析。不同半径的球形胡萝卜和马铃薯加热5 s后的温度分布云图如图4所示。

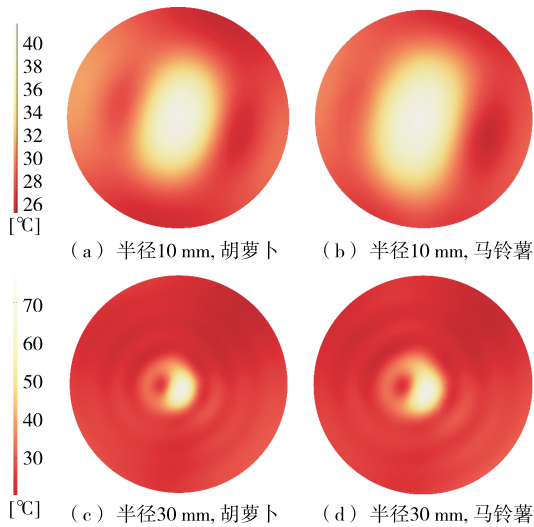


图 4 介电特性改变时不同尺寸下的温度分布云图

Figure 4 The effect of dielectric property on temperature distribution at different material sizes

果蔬物料水分含量大,长时间微波加热,必然在物料内部形成水分和热量的传递。而在微波加热的 5 s 内,物料内部水分来不及扩散,物料外部的温升不足以形成大量的水分蒸发,此时,可忽略其内部的水分传递,主要考察因物料介电特性和形状不同而引起的温度分布的变化。由图 4 可以看出,介电常数和介电损耗因子均不同的胡萝卜(ϵ_1)和马铃薯(ϵ_2),尺寸相同时温度分布总体上很接近;介电常数和介电损耗因子相同,尺寸不同时,温度分布有明显差别。由此可知,当微波加热时间较短,如 5 s,则介电常数的改变对球形物料的温度分布基本无影响。

为进一步研究介电特性对物料温度分布的影响,依据工业生产实际,设置不同形状,使用从 X 轴入射 1 kW 微波的模型,模拟计算中所采用参数(密度、导热系数等)见表 1,物料介电特性参数如表 3 所示。分别对圆柱形、正方体形、球形物料进行模拟分析,得到不同形状的胡萝卜和马铃薯加热 5 s 后的中心截面温度分布云图,如图 5 所示。由图 5 可以看出,当形状为圆柱时,介电常数和介电损耗因子均较大的胡萝卜与介电常数和介电损耗因子均较小的马铃薯温度分布较接近;当形状为正方体时,介电常数和介电损耗因子均较大的胡萝卜高温区面积更小、更偏向物料周边,也就是更容易在偏离物料中心处形成高温聚集区;当形状为球形时,介电常数和介电损耗因子均较大的胡萝卜高温区面积更小,更容易形成高温聚集区。

3.1.3 介电特性对物料温度均匀性的影响 为探究物料介电特性对温度分布均匀性的影响,以介电常数和介电损耗因子相差较大的胡萝卜和马铃薯为例,模拟计算中所采用参数(密度、导热系数等)见表 1,物料介电特性参数如表 3 所示。在球形物料中选取 7 个特征点,7 个特征

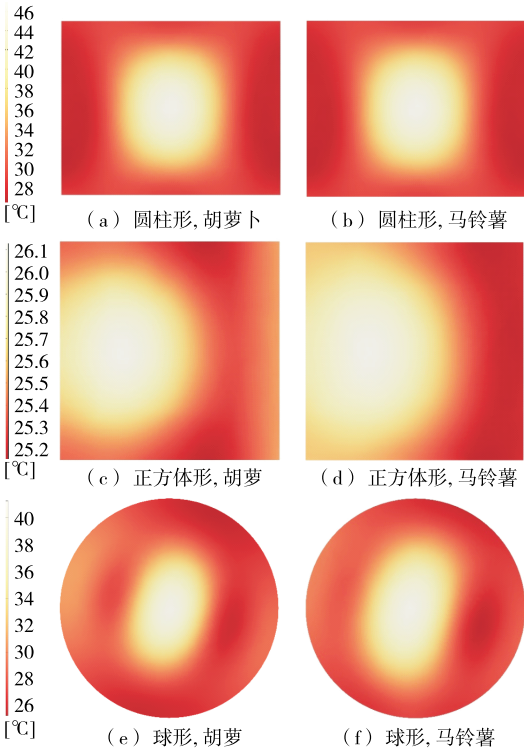


图 5 介电特性不同时不同形状下的温度分布云图

Figure 5 The effect of dielectric property on temperature distribution at different material shapes

点的位置如图 2 所示。介电特性对物料温度均匀性的影响如图 6 所示。

由图 6 可得,特征点 1 温度明显偏高,其为物料的中心点,反映了微波加热易使物料中心焦化的问题。图 6 中显示了加热 5 s 后,7 个特征点的温度值。由这 7 个特征点的温度值计算得到半径 30 mm 的胡萝卜、半径 30 mm 的马铃薯、半径 10 mm 的胡萝卜、半径 10 mm 的马铃薯的平均温度值分别为 36.69、35.68、32.01、29.64 °C。可以看出,在物料尺寸相同时,介电常数和介电损耗因子较大的物料,平均温度更高。

进一步,将这 7 个特征点温度代入式(1),计算得到表征温度均匀性的 COV 值,绘制 COV 随介电特性的变化图如图 7 所示。从图 7 可以看出,不管介电特性是大还是小,直径较小的物料,COV 值越小,温度均匀性越高。若尺寸相同,则介电特性越小的物料,COV 值越小,温度均匀性越高。对于小尺寸的物料,如 10 mm,介电常数从 73.80 降低至 55.54 时,COV 由 0.16 降低至 0.09,温度均匀性升高了 43.8%;对于大尺寸的物料,如 30 mm,介电常数从 73.80 降低至 55.54 时,COV 由 0.54 降低至 0.45,温度均匀性升高了 16.7%。

3.2 尺寸对物料温度特性的影响

3.2.1 尺寸对物料温度分布的影响 以球形马铃薯为

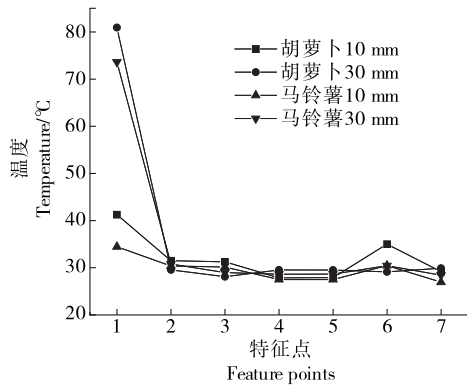


图6 7个特征点温度

Figure 6 The temperature of seven feature points

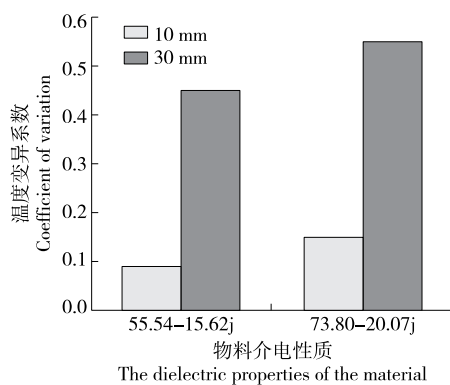


图7 COV随介电特性的变化

Figure 7 The varies of COV with the changes of dielectric properties

例,在其他条件均相同时,仅改变物料尺寸,将不同尺寸的物料放入6个微波入射方向的模型中,模拟参数(密度、导热系数等)见表1,考虑实际工业化生产的需求,选取半径在10~60 mm的球形物料进行模拟分析,不同半径的球形物料加热5 s后的温度分布云图如图8所示。

由图8可以看出,温度最高值不一定在中心点,物料半径为10 mm时,温度最高值以点状分布,未偏离中心点;物料半径为20 mm时,温度最高值以点状分布,部分偏离中心点,偏中心点右方一些;物料半径为30 mm时,温度最高值以点状分布,偏中心点右下方一些;物料半径为40 mm时,温度最高值完全偏离中心点,且温度最高值出现在物料外表面;物料半径为50,60 mm时,物料内部温度无明显变化。这些结果表明物料尺寸对物料温度分布的影响显著。

将物料温度分布图中的温度最大值由大到小进行排序:20 mm>30 mm>10 mm>40 mm>50 mm>60 mm,这与物料中心点温度大小排序一致。马铃薯半径为10,20 mm时,马铃薯出现明显的中心焦化现象;随着马铃薯半径的不断增加,当马铃薯半径 ≥ 40 mm时,马铃薯的温度分布表现出四周温度较高的态势。王中明^[25]通过试验

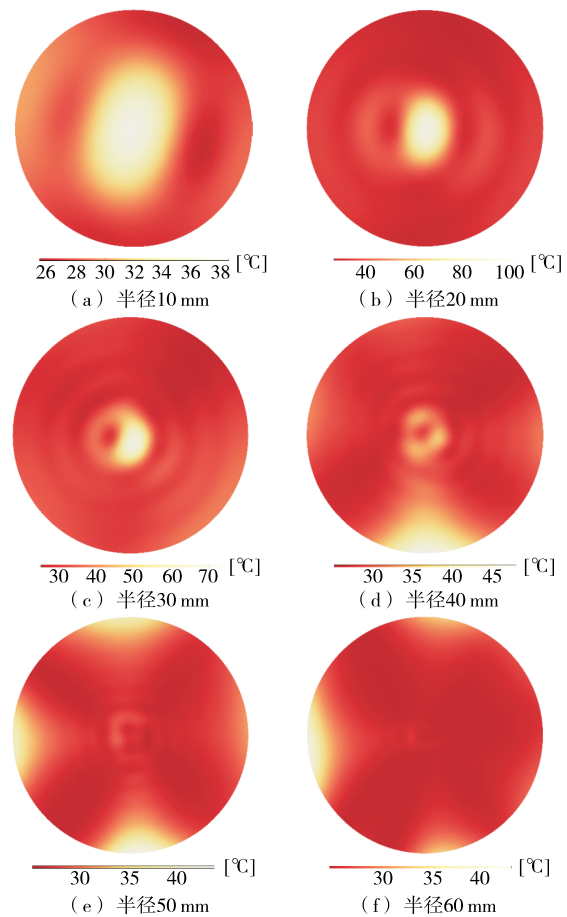


图8 球形半径对温度分布云图的影响

Figure 8 The effect of spherical radius on temperature distribution

发现了被干燥物料的形状是影响微波加热的一个重要因素,证明了球形物料是最有利于微波聚焦的形状。但球形物料的直径过大易使微波很难穿透物料。柱状物料的半径较小时,物料的外表面和内部均会受热升温;而半径 >40 mm时,只有外表面受热。参照该理论,试验物料的形状和大小的参数设置均合理,且仿真结果是可靠的。

3.2.2 尺寸对物料温度均匀性的影响 为探究物料尺寸对温度分布均匀性的影响,以球形马铃薯为例,使用从X轴入射1 kW微波的模型,模拟计算所需参数(密度、导热系数等)见表1,在球形马铃薯物料中选取7个特征点,7个特征点的位置如图2所示。加热5 s后,得到6个尺寸物料的7个特征点的温度,如图9所示。

由图9可得,物料尺寸为20 mm时,物料各位置温度均偏高;特征点1温度均明显偏高,验证了微波加热易使物料中心焦化的现象。经计算得到不同尺寸的物料平均温度从大到小的排序为:20 mm>30 mm>10 mm>40 mm>50 mm>60 mm。将特征点温度通过式(1)计算,得到COV随物料尺寸的变化,如图10所示。

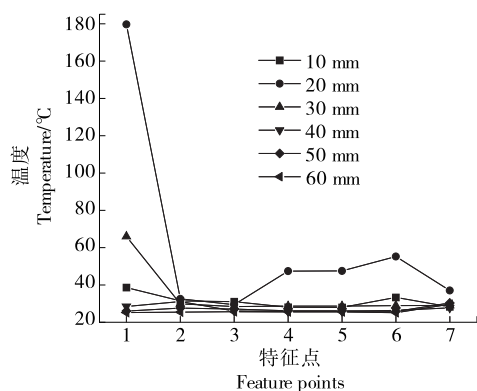


图 9 7 个特征点的温度

Figure 9 The temperature of seven feature points

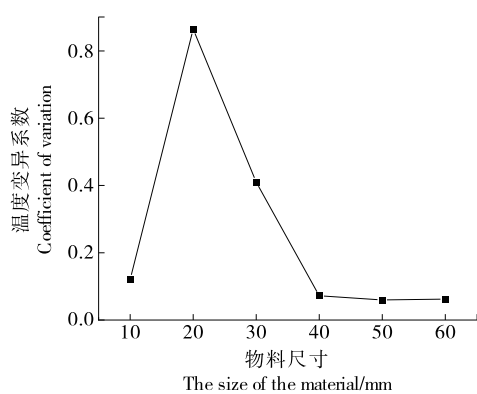


图 10 COV 随物料尺寸的变化

Figure 10 The varies of COV with the changes of material size

由图 10 可知,各尺寸物料的 COV 值由大到小的顺序为 20 mm>30 mm>10 mm>40 mm>60 mm>50 mm。COV 值越低,温度均匀性越高,所以得到均匀性排序为 50 mm>60 mm>40 mm>10 mm>30 mm>20 mm。考虑到物料的升温速率及电磁场的分布,物料半径为 20 mm 时,物料温度分布最不均匀,中心点焦化最严重;当物料半径 ≥ 40 mm 时,会导致微波无法穿透物料;物料半径为 10, 30 mm 时,加热效果最好,温度均匀性比半径为 20 mm 的球形物料提高了 52.63% 以上;在微波可以穿透物料时,物料中心点温度大小排序、物料温度的最高值大小排序、电场最大值大小排序和磁场最大值大小排序一致,均为 20 mm>30 mm>10 mm>40 mm,且与均匀性由大到小排列顺序相反。这可能与微波穿过物料后,在物料内的衰减有关。

4 结论

研究建立了微波和传热的耦合模型,描述了微波加热果蔬物料的过程。利用微波加热马铃薯的测温试验验证了模型的正确性。依据微波加热果蔬时经常改变物料

的场景,研究了物料介电特性改变和物料尺寸改变时,物料的温度特性变化规律。结果表明,当形状为正方体时,介电常数和介电损耗因子均较大的胡萝卜高温区面积更小,更偏向物料周边,也就是更容易在偏离物料中心处形成高温聚集区;当形状为球形时,介电常数和介电损耗因子均较大的胡萝卜高温区面积更小,更容易在中心处形成高温聚集区;在物料尺寸相同时,介电常数和介电损耗因子较大的物料,平均温度更高;不管介电特性是大还是小,直径较小的物料,温度变异系数数值越小,温度均匀性越高;若尺寸相同,则介电特性越小的物料,温度变异系数数值越小,温度均匀性越高;当物料半径 >40 mm 时,物料半径越大,温度最高值越偏离中心点;当物料半径 >40 mm 时,物料内部温度无明显变化,温度最高值点靠近物料外表面;对于球形马铃薯来说,半径为 20 mm 时,温度均匀性最差。

为解决微波真空冷冻干燥过程中局部温度过高的问题,后续可结合微 CT(X-ray micro-computed tomography)技术构建果蔬物料的微孔道变化,开展考虑水分含量变化的瞬态传热传质研究,发展基于微尺度效应的微波真空冷冻干燥的传热传质理论。

参考文献

- [1] 冀德富, 李欢欢, 刘建国. 玉米须的干燥方法及提取方法研究[J]. 中国中医药现代远程教育, 2022, 20(19): 163-166.
JI D F, LI H H, LIU J G. Study on drying and extraction methods of corn stigma[J]. Chinese Medicine Modern Distance Education of China, 2022, 20(19): 163-166.
- [2] 沈伟, 张培兰, 牛俊乐, 等. 不同干燥方式对芒果果皮理化特性的影响[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(9): 87-92.
SHEN W, ZHANG P L, NIU J L, et al. Effects of different drying methods on physicochemical properties of mango pericarp[J]. Storage and Process, 2021, 21(9): 87-92.
- [3] 沈素晴, 徐亚元, 李大婧, 等. 青香蕉微波干燥特性及动力学模型研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(14): 110-117.
SHEN S Q, XU Y Y, LI D J, et al. Research on microwave drying characteristics and kinetic model of green bananas[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(14): 110-117.
- [4] WANG S M, YANG R Q, HAN Y B, et al. Effects of magnetron arrangement and power combination on temperature field uniformity of microwave drying of carrot[J]. Drying Technology, 2016, 34(8): 912-922.
- [5] 罗归一, 宋春芳, 李臻峰, 等. 基于温度和功率控制的微波干燥研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(6): 58-63.
LUO G Y, SONG C F, LI Z F, et al. Study on microwave drying based on temperature and power control[J]. Food & Machinery, 2018, 34(6): 58-63.
- [6] ARAL S, BEŞE A V. Convective drying of hawthorn fruit

- (*Crataegus* spp.): effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity[J]. Food Chemistry, 2016, 210: 577-584.
- [7] CHANDRASEKARAN S, RAMANATHAN S, BASAK T. Microwave material processing: a view[J]. American Institute of Chemical Engineers Journal, 2011, 58(2): 330-363.
- [8] PITCHAI K, BIRLA S L, SUBBIAH J, et al. Coupled electromagnetic and heat transfer model for microwave heating in domestic ovens[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 112 (1/2): 100-111.
- [9] 张柯, 卢立新, 王军. 基于COMSOL的包装食品微波炉加热模拟[J]. 包装工程, 2014, 35(5): 1-4, 12.
ZHANG K, LU L X, WANG J. Simulation of Microwave heating of packaged food by software COMSOL[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(5): 1-4, 12.
- [10] ZHANG H, DATTA A K. Coupled electromagnetic and thermal modeling of microwave oven heating of foods[J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 2000, 35(2): 71-85.
- [11] ZHANG H, DATTA A K. Microwave power absorption in single-and multiple-item foods[J]. Institution of Chemical Engineers, 2003, 81(3): 257-265.
- [12] KNOERZER K, REGIER M, HARDY E H, et al. Simultaneous microwave heating and three-dimensional MRI temperature mapping[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2009, 10: 537-544.
- [13] GEEDIPALLI S S R, RAKESH V, DATTA A K. Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 82 (3): 359-368.
- [14] 刘心爽. 腔体式微波降膜蒸发器的结构设计及优化[D]. 天津: 天津大学, 2019: 28-35.
LIU X S. The design and optimization of falling film evaporator inside microwave cavity[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019: 28-35.
- [15] 张柯. 金属化包装改善食品微波加热效果的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 32-38.
ZHANG K. Metallized microwave package research to improve the effect of microwave heating of food[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014: 32-38.
- [16] 罗归一. 基于介电特性检测的微波干燥控制与品质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018: 41-50.
LUO G Y. Study on microwave drying control and quality based on dielectric property detection[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018: 41-50.
- [17] ZHU X H, GUO W C, WU X L. Frequency-and temperature-dependent dielectric properties of fruit juices associated with pasteurization by dielectric heating[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109(2): 258-266.
- [18] LING B, GUO W C, HOU L X, et al. Dielectric properties of pistachio kernels as influenced by frequency, temperature, moisture and salt content[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(2): 420-430.
- [19] 吴斯侃, 宋永一, 王鑫, 等. 物质介电特性对微波加热影响研究进展[J]. 当代化工, 2020, 49(9): 1 987-1 991.
WU S K, SONG Y Y, WANG X, et al. Research progress in influence of dielectric properties of materials on microwave heating[J]. Contemporary Chemical Industry, 2020, 49(9): 1 987-1 991.
- [20] GUO W, NELSON S O, TRABELSI S, et al. 10~1 800 MHz dielectric properties of fresh apples during storage[J]. Journal of Food engineering, 2007, 83(4): 562-569.
- [21] 徐保江, 李宝林. 根据物料的介电特性快速测定含水率的试验研究[J]. 沈阳农业大学学报, 1998, 29(1): 65-68.
XU B J, LI B L. Quick determination on water content of agricultural products based on dielectric properties of materials [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1998, 29(1): 65-68.
- [22] 秦文, 羽仓义雄, 铃木宽一, 等. 胡萝卜贮藏过程中电容与新鲜度的关系研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 160-162.
QIN W, Yoshio Hugura, Kanichi Suzuki, et al. Evaluation of the relationship between capacitance and freshness of carrot during storage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(9): 160-162.
- [23] NELSON S O. Dielectric properties of some fresh fruits and vegetables at frequencies of 2.45 to 22 GHz[J]. Transactions of the ASAE, 1983, 26(2): 613-616.
- [24] SIPAHIOGLU O, BARRINGER S A. Dielectric properties of vegetables and fruits as a function of temperature, ash, and moisture content[J]. Journal of Food Science, 2003, 68(1): 234-239.
- [25] 王中明. 基于微波干燥生物材料的传热传质机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011: 27-34.
WANG Z M. Study of heat and mass transfer mechanism based on microwave drying biological materials[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011: 27-34.