

基于三维扫描和射频加热的食品升温过程模拟

Application of 3D scanning method in radio frequency heating simulation

张汝怡^{1,2,3} 李 锋^{1,2,3} 焦 阳^{1,2,3,4,5}

ZHANG Ru-yi^{1,2,3} LI Feng^{1,2,3} JIAO Yang^{1,2,3,4,5}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学食品热加工工程技术研究中心, 上海 201306; 3. 国家淡水水产品加工技术研发分中心, 上海 201306; 4. 南京工业大学食品与轻工学院, 江苏 南京 210000; 5. 天顺农副产品有限公司, 江苏 徐州 221000)

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Engineering Research Center of Food Thermal-processing Technology, Shanghai 201306, China; 3. National R&D Branch Center for Freshwater Aquatic Products Processing Technology, Shanghai 201306, China; 4. College of Food Science and Light Industry, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 210000, China; 5. Tianshun Agricultural Product Company, Xuzhou, Jiangsu 221000, China)

摘要:为提升模拟精度,以马铃薯为例,选取两种不规则形状的样品,运用三维扫描仪获取精确的几何模型,导入多物理场耦合有限元软件中,求解其在不同功率/电压下射频加热过程中的温度分布,并进行试验验证。结果表明,射频加热 40 min 后,模拟计算结果的温度分布、最高与最低温度值以及内部点升温曲线均与试验结果较一致,两种样品的模拟精度均达 90% 以上。三维扫描方法适用于射频加热不规则样品的模拟,且样品形状的差异以及极板电压的变化均未影响射频加热模拟的精确性。

关键词:射频加热;三维扫描;食品热加工;有限元模拟

Abstract: In order to improve the simulation accuracy, this paper took potatoes as examples, selected two irregular-shape potatoes, used a three-dimensional scanner to obtain the accurate geometries, imported the geometries into a multiphysics finite element software COMSOL Multiphysics®, solved its temperature distribution field under different powers/voltages, and carried experiment verifications. Results show that after 40 minutes of RF heating, the temperature distribution, maximum and minimum temperature values and internal time-temperature curves of the simulated results are in good agreement with the experimental results with a simulation accuracy over 90%. This method is suitable for simulating RF heating processes of irregular-shape sam-

ples. Variations of sample shape and plate voltages do not have significant influence to the accuracy of RF heating simulation.

Keywords: radio frequency; three-dimensional scanning; thermal processing; computer simulation

射频加热是运用频率在 300 kHz~300 MHz 范围内的电磁波^[1],通过产生高速交变电场使得被加热介质中的带电离子之间产生剧烈的碰撞和摩擦,从而使电介质样品生热^[2]。射频加热具有速度快、穿透能力强、加热均匀性好等优势,在食品热加工领域具有较大应用潜力^[3]。为了避免干扰通信,美国联邦通信委员会(FCC)规定工业、科学与医疗领域(ISM)可用的 3 个射频频段为:13.56,27.12,40.68 MHz^[4]。

近年来计算机性能的提高以及有限元算法的优化,使得射频加热的有限元仿真成为研究射频加热的重要辅助手段。有限元数值模拟能够实时显示射频加热试验中无法精确获取的电场和温度分布,其结果可指导试验,优化工艺,节省研发成本,缩短研发周期^[5]。射频加热的均匀性受样品形状、大小,以及样品放置方式的影响^[6]。对于形状规则的物体,形体可直接在仿真软件中进行绘制,射频加热模拟的结果精确度较高,如玉米粉^[7]、冷冻虾块^[3]、冷冻牛肉块^[8]等。然而对形状不规则的物体,复杂的形体难以精确绘制,导致模拟精度较差,甚至无法准确预测冷热点位置,为辅助工艺开发增加了难度。

三维扫描是集光、机、电和计算机技术于一体的高新技术,能够通过扫描物体空间外形和结构,获取物体表面的空间坐标。三维扫描能够将物体的形状转化成数字信号,便于计算机进行处理,优化和计算,近年来已被应用

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(编号:31801613);中国博士后科学基金面上资助项目(编号:2018M632299)

作者简介:张汝怡,男,上海海洋大学在读硕士研究生。

通信作者:焦阳(1985—),女,上海海洋大学副教授,硕导,博士。

E-mail: yjiao@shou.edu.cn

收稿日期:2019-03-01

于食品工业,如:Cepeda 等^[9]利用 CT 扫描获取肉制品的形状参数进行不规则的即食肉制品换热冷却研究,试验结果显示,内部核心区域温度的标准误差为 $(1.19 \pm 0.54)^\circ\text{C}$,核心区域至表面部分的温度标准误差为 $(1.73 \pm 0.48)^\circ\text{C}$,表面温度标准误差为 $(2.01 \pm 1.01)^\circ\text{C}$,模型与试验符合程度较高;Kuffi 等^[10]采用数字扫描仪获取肉牛胴体的三维形状参数,导入计算流体力学(CFD)模型预测肉牛胴体冷藏过程中温度分布的变化,结果显示,相比于表层牛肉的温度分布,内部温度点的测温结果符合程度更高;Sture 等^[11]开发了一种具有 360° 扫描截面的彩色外部 3D 成像机器视觉系统,基于三维几何特征和颜色信息识别大西洋鲑鱼的畸形和伤口,识别效率分别为 86% 和 89%。已有研究大多运用三维扫描方法获取几何形状,并对单一加热或冷却过程进行模拟。而射频加热过程是一个电磁场耦合传热过程,且平行极板式射频加热器对样品形状敏感度较高,因此有必要探索三维扫描方法运用于射频加热过程的适用性,并对模拟结果精度进行分析。本研究采用三维扫描获取样品的形状数据,导入商业有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics® 中进行射频加热过程模拟,并进行试验验证。分析所开发方法对射频加热过程模拟不规则形状样品的模拟精度,旨在为不规则形状样品的射频加热模拟提供更为精确的新方法。

1 材料与方法

1.1 材料

马铃薯:购于上海临港农工商超市,确保样品个体完整、无机械损伤,新鲜度高。按其形状特征取两种具有代表性形状的马铃薯样品,编号如图 1 所示。

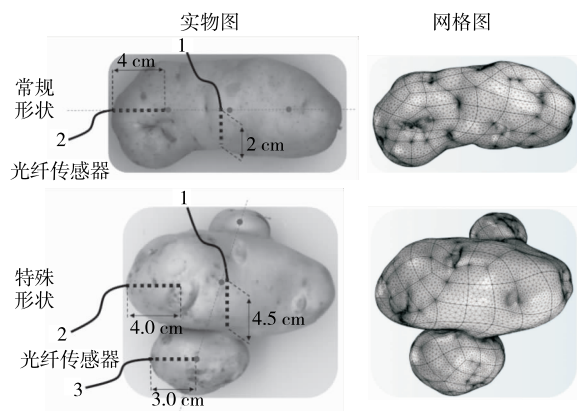


图 1 马铃薯样品图及三维扫描导入有限元模拟软件中的几何形体图

Figure 1 Potato samples and their 3D scanned geometries in FEM package

1.2 仪器及设备

热特性分析仪:KD2pro 型,美国 Decagon 公司;
差示扫描量热仪:DSC Q2000 型,美国 TA 公司;
介电特性测试仪:E5071C 型网络分析仪及 N4691B 型探头,美国 Keysight 公司;
红外热像仪:FLIR A-600 Series 型,美国 FLIR 公司;
隧道式射频加热试验仪:Labotron12 型,法国 Sairem 公司;
三维扫描仪:HL-3DS+型,广州华朗三维公司。

1.3 方法

1.3.1 三维扫描创建形体 将样品洗净,擦干,放入恒温室内静止 24 h。样品表面均匀涂抹白色的显像剂,待显像剂干燥后,将用于图像定位的标定点无序地贴满样品表面。待扫描的样品放置于黑色旋转盘上,通过控制旋转盘的旋转以及手动翻转样品改变三维扫描样品的角度,获得样品不同面的点云图,并基于标定点进行拼接,形成样品完整形状的点云图。采用三维扫描仪自带的 Geomagic Studio 软件处理点云图,依次进行点云着色、封装、填补空洞、建立曲面片、建立栅格和拟合曲面等步骤,最后转存为 * IGS 文件(图 2)。对选取样品逐一进行扫描、存档。

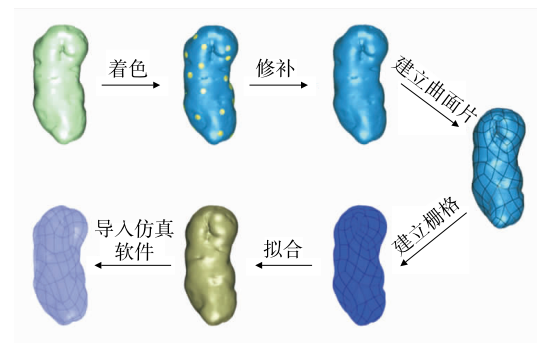


图 2 三维扫描处理过程
Figure 2 Scheme of 3D scanning procedure

1.3.2 样品热物理参数 马铃薯的导热系数采用热特性分析仪和 SH-1 线热源探头进行测量。测量过程中,样品放置在烧杯中,用保鲜膜封闭烧杯杯口,将烧杯放置于恒温水浴加热,通过调节水浴温度获得不同温度下样品的热特性参数^[12]。比热容采用差示扫描量热仪测量,先将样品温度降至 10°C ,逐步升温至 70°C ,每隔 10°C 采样,具体试验步骤见文献^[13]。介电特性采用高温同轴光缆探头与网络分析仪进行测量,样品温度通过恒温油浴锅与换热容器进行调节。将样品切削成加热容器内腔大小,使换热容器与样品直接且紧密接触,热量由恒温油浴锅经保温热管传递到圆柱状样品容器,调节油浴温度测量不同温度下样品的介电特性。测量温度范围 $10 \sim 70^\circ\text{C}$,间隔 10°C 。试验均重复 3 次,并取平均值,具体步

骤见文献[14]¹²⁻¹³。

1.3.3 计算机模拟 采用 COMSOL Multiphysics® 软件基于有限元方法建立射频加热模型,模型主要包含热传递和电磁场两个物理场^[15]。电磁场的控制方程为拉普拉斯公式,即准静态假设下,简化后的麦克斯韦方程^[16]:

$$-\nabla \cdot [(\sigma + 2\pi f \epsilon_0 \epsilon''j) \nabla V] = 0, \quad (1)$$

式中:

∇ ——拉普拉斯算子;

σ ——样品的电导率, S/m;

j ——虚数单位, $j = \sqrt{-1}$;

f ——频率, Hz;

ϵ_0 ——真空介电率, 8.86×10^{-12} F/m;

ϵ'' ——样品相对介电损耗因子;

V ——上下极板间电压, V。

电磁能通过式(2)转换为热能^[17]:

$$P = 2\pi \epsilon_0 \epsilon''j |\vec{E}|^2, \quad (2)$$

式中:

P ——单位体积样品吸收的电磁能功率, W/m³;

$\vec{E}$ ——样品内部电场强度, W/m。

热传递的控制方程:

$$\rho c_P \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + P, \quad (3)$$

式中:

T ——样品温度, °C;

t ——射频加热时间, s;

ρ ——样品密度, kg/m³;

c_P ——样品比热容, J/(kg · K);

k ——热导率, W/(m · K)。

样品表面自然对流损失的热量为:

$$Q = hA(T - T_0)。 \quad (4)$$

射频加热模型的几何模块中导入三维扫描后处理得到的 * IGS 格式的文件,进行射频加热不规则样品的模拟,流程如图 3 所示。射频加热器的内腔尺寸与实物保持一致尺寸,其中上极板 900 mm × 500 mm,下极板 1 300 mm × 860 mm,三维扫描样品放置于下极板上表面正中间与实际加热位置保持一致(图 4)。上极板电压值采用射频加热设备导出的阳极电压,样品 1、2 的电压值范围分别为 3.9~4.7 kV 和 4.1~4.8 kV。下极板接地,电势为 0。射频加热模型中,腔体与样品的网格尺寸分别采用“细化”与“极端细化”,射频加热时间设为 2 400 s,步

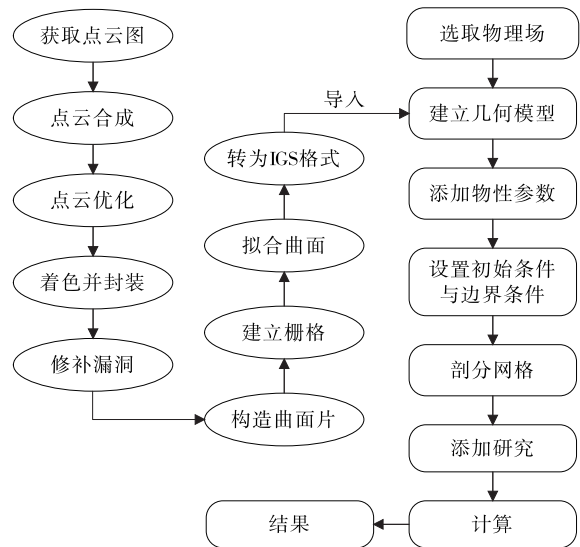
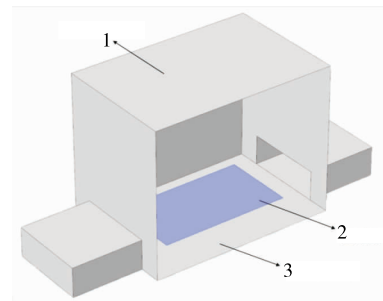


图 3 三维扫描不规则形状样品的射频加热模拟流程图
Figure 3 Flow chart of 3D scanning and radio frequency heating simulation in COMSOL Multiphysics®



1. 射频加热内腔 2. 上极板 3. 下极板

图 4 射频加热器几何结构示意图

Figure 4 Configuration of the radio frequency heater

长 10 s。模拟过程中所涉及的初始及边界条件如表 1 所示。

1.3.4 试验验证 马铃薯样品经扫描后放置于恒温室内静止 24 h^[18]。将样品逐一放置于射频加热器下极板上正中间,根据样品形状复杂程度,分别在样品 1 中选取两个不同位置插入光纤传感器,在 2 号样品中选取 3 个不同位置点插入光纤传感器(如图 1 所示)。射频加热器极板间距调整为 8 cm。加热时间设为 40 min,每隔 10 min 取出样品,移除光纤传感器,通过红外热像仪获取样品表面温度分布,随后插入光纤传感器继续试验。加热结束后,

表 1 射频加热模拟的初始和边界条件

Table 1 Initial and boundary conditions of radio frequency heating simulation with COMSOL Multiphysics®

初始温度/ °C	环境温度/ °C	射频频率/ MHz	极板间距/ cm	表面对流换热系数/ (W · m ⁻² · K ⁻¹)
17.4	17.4	27.12	8	10

将马铃薯样品用薄刃迅速切开,获取内部切面的温度分布图。两个样品依次进行射频加热试验,其中,分别采用不同功率对马铃薯样品进行加热,样品 1 采用 1.5 kW,极板电压值 4 kV;样品 2 采用 2 kW,极板电压值 4.6 kV,以

$$T_{\text{error}} = \frac{|T_{s-1} - T_{e-1}| \cdot |T_{s-1} - T_0| + \cdots + |T_{s-n} - T_{e-n}| \cdot |T_{s-n} - T_0|}{|T_{s-1} - T_0| + \cdots + |T_{s-n} - T_0|}, \quad (5)$$

$$\sigma = (1 - \frac{T_{\text{error}}}{T_{\text{mean}} - T_0}) \times 100\%, \quad (6)$$

式中:

σ ——模拟精确度,%;

T_{mean} ——模拟结果中样品表面平均温度,℃;

T_{error} ——模拟与试验温度差,℃;

T_{s-n} ——模拟结果在选定点的温度,℃;

T_{e-n} ——试验结果在选定点的温度,℃;

T_0 ——初始温度,℃。

本文样品计算模拟精确度分析选取表面 7 个位置

验证不同功率加热对模拟精度的影响。加热结束后,将样品切开,通过红外热像仪获取样品截面的温度分布。

1.3.5 模拟精度分析 为了衡量射频加热模拟结果的精确性,建立模拟结果的温差公式以及精确度公式:

点,分别为表面的最高与最低温度点,中心截面的最高与最低温度点,以及表面随机选取的 3 个选定点,位置如图 1 中红色圆点所示。

2 结果与分析

2.1 热物理特性

马铃薯样品的物性参数受温度影响较大。在 10~70℃ 温度范围内,介电常数随着样品温度的升高先增大后减小,在 50℃ 左右达到最大值。介电损耗与热导率随着温度的升高而增大,比热容反之。具体数值见表 2。

表 2 马铃薯的物性参数

Table 2 Thermal and dielectric properties of potato samples

样品温度/℃	介电常数	介电损耗因子	比热容/(kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
10	119.83±1.59	500.68±14.97	3.68	0.61±0.03
20	125.68±2.37	567.20±18.41	3.67	0.62±0.04
30	132.12±2.79	640.02±14.77	3.66	0.62±0.04
40	140.46±2.97	716.42±18.84	3.62	0.63±0.03
50	145.70±3.81	792.76±28.54	3.62	0.67±0.05
60	125.40±4.44	853.15±34.99	3.62	0.77±0.04
70	99.46±4.78	942.80±35.46	3.63	0.91±0.05

2.2 模拟与试验验证

2.2.1 温度及冷热点分布 图 5、6 分别展示了试验与模拟获得两个样品的温度分布。可见试验与模拟结果在加热过程不同时刻的热型均保持较高的符合程度,其中试验与模拟所获的样品热点与冷点的位置一致。样品 1 右侧厚度高于左侧,导致在射频加热过程中因能量聚集成热点区域。同时,在靠近样品左侧的中间位置,因表面低洼形成冷点^[19]。中心截面的红外热像图与模拟结果的中心切面印证了两者在内部温度分布的一致性。

样品 2 的形状相对复杂,中间主体部分呈椭球型,上下两侧各有一个球状凸起,且下侧凸起体积大于上侧。样品的形状决定了射频加热的热型分布^{[14]35-36[20]}。从试验结果可看出,凸起与主体连接部位的温度高于周围,形成热点区域,并且上侧连接部位的温度高于下侧。这是由于狭缝中的空气与样品之间的介电特性差异较大,引起了局部电场强度过高,导致了过热。此外,中间主体上表面最高点附近也存在热点区域。模拟结果与试验结果一致,上侧凸起的表面温度高于下侧凸起,主要因为上侧凸起较高,距离上极板更近,吸收了更多的射频能量,

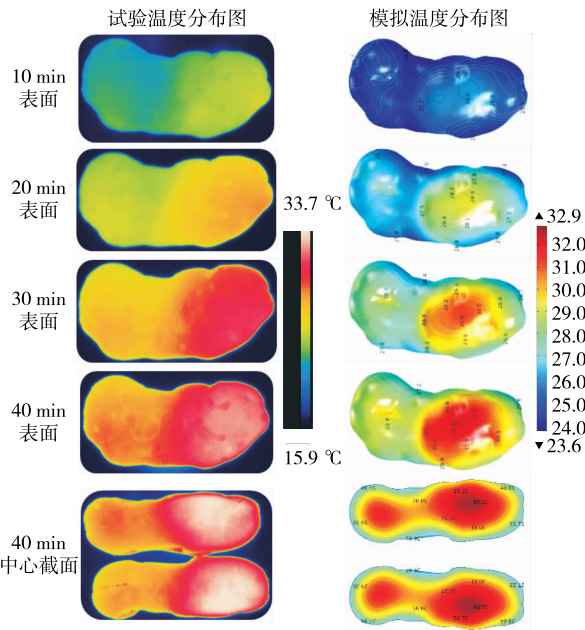


图 5 样品 1 的试验与模拟结果的温度分布对比
Figure 5 Comparison of experimental and simulation results of sample 1

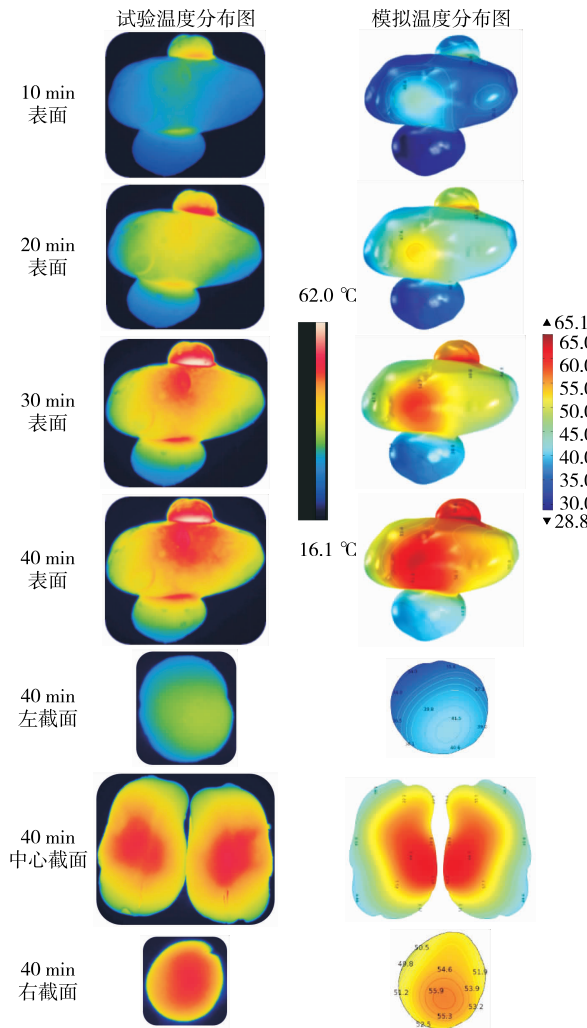


图6 样品2的红外热像图与模拟结果的温度分布对比

Figure 6 Comparison of experimental and simulation temperature distribution of sample 2

造成该区域温度高于周围。样品顶部热点区域位置存在误差的原因是样品2的形状复杂,在加热腔内放置中存在摆放位置误差。试验与模拟结果的垂直截面温度分布均显示,上下两侧的凸起中心截面的中心温度高于表面,这是射频整体加热的特性所致。

2.2.2 表面最高与最低温度模拟精度 在样品的热型高度符合的基础上,模拟与试验结果在最高与最低温度相符的情况可作为判断模拟结果精确性的重要指标。如图7所示,样品1的试验与模拟的最高温度相符性较好,温差低于 $1.12\text{ }^{\circ}\text{C}$;最低温度的误差略高于最高温度,为 $\pm 2.42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。样品2试验与模拟的最低温度符合程度较高,误差为 $1.1\sim 1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。然而,模拟值的最高温度高于试验值,在 $10\sim 30\text{ min}$ 时试验值与模拟值的误差 $<1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,在 40 min 的偏差达到 $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据样品试验与模拟的最高与最低温度值、初始温度、模拟结果的平均温度,运用

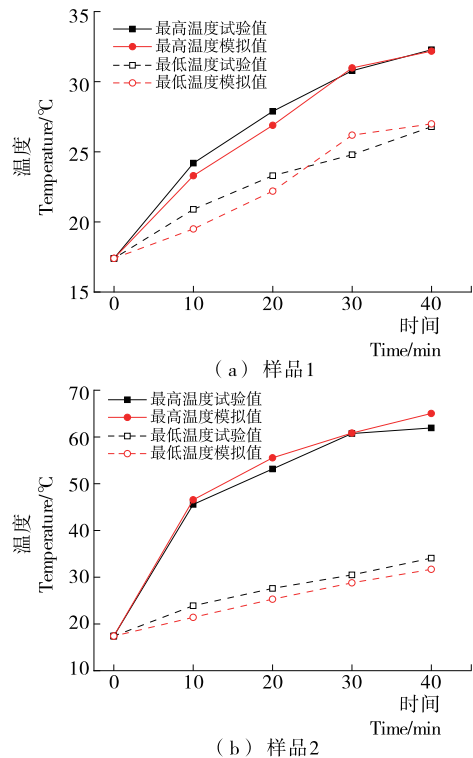


图7 样品表面最高与最低温度随时间的变化

Figure 7 The maximum and minimum temperature variation with time on the surface of potato 1 and 2 during experiment and simulation

式(6)计算模拟精确度,可得加热 40 min 后的样品1、2的模拟精度分别为 99.73% 、 97.62% ,说明三维扫描几何在射频加热不规则样品的模拟精度较高。在不同加热时间,模拟结果存在一定的浮动范围,以样品2为例,在加热时间为 $10, 20, 30\text{ min}$ 时,模拟结果的精度分别为 97.61% 、 96.17% 、 99.08% 。

2.2.3 内部点升温过程模拟精度 图8为光纤传感器获得的样品内部点升温曲线与射频加热模型中同一位置的升温曲线模拟结果对比。其中,试验值温度曲线存在分段现象是由每隔 10 min 取样拍摄红外热像图导致的温度下降引起的。由结果可见,样品1中两个测温点的试验与模拟曲线趋势均一致,数值无显著差异;两者初始温度均为 $17.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,位置1、2在加热 40 min 时试验测定温度分别达到 $32.4, 28.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,模拟温度分别为 $32.1, 29.3\text{ }^{\circ}\text{C}$;在同一时刻的温度误差在 20 min 左右达到最大值 $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。样品2各测温点的试验与模拟温度的误差均 $<3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。加热过程中,样品1、2内部点的模拟结果精确度采用式(5)和(6)计算,结果分别为 98.2% 、 96.3% ,模拟结果精确度较高。样品1、2的升温速率及终温差异主要是由样品体积不同导致的电磁能转化为热能的比率不同所致。由结果可见,计算机模拟能够较为精确地预测样品内部选定点升温过程。

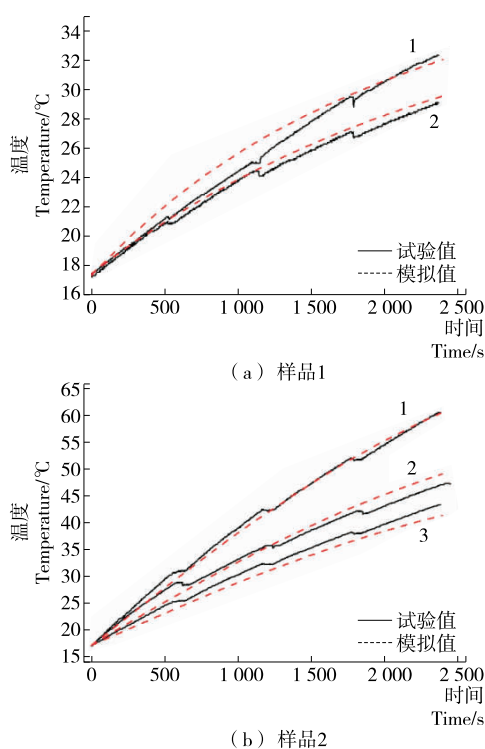


图 8 样品内部温度随时间的变化

Figure 8 Temperature-time histories of selected center location in potato samples 1 and 2

3 结论

本研究采用三维扫描方法精确获取样品的三维形状参数,模拟其在射频加热过程中的温度分布并进行试验验证。结果表明:精确的样品三维形状在射频加热过程数值模拟中的温度分布与试验结果热型符合程度较高,选定点温度及最高与最低温度预测均与试验结果无显著差异,表面及内部测温点温度的模拟精度均达 90% 以上。此外,极板电压变化以及样品形状复杂程度均不影响模拟结果精确程度,证明了三维扫描几何适用于射频加热模拟。本研究将三维扫描方法运用在射频加热模拟过程中,模拟结果精度高,然而,将三维扫描所获得的几何形体导入有限元软件后,存在一定的摆放位置误差,无法保证与试验过程完全一致,会影响模拟精度,期待未来通过进一步优化模拟过程中样品的放置方式得到改进。

参考文献

[1] RYYNANEN S. The electromagnetic properties of food materials: A review of the basic principles[J]. *Journal of Food Engineering*, 1995, 26(4): 409-429.

[2] MARRA F, ZHANG Li-leng, LYNG J G. Radio frequency treatment of foods: Review of recent advances[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 91(4): 497-508.

[3] PALAZOGLU T K, MIRAN W. Experimental comparison of microwave and radio frequency tempering of frozen block

of shrimp[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 41: 292-300.

- [4] MARRA F, LYNG J, ROMANO V, et al. Radio-frequency heating of foodstuff: Solution and validation of a mathematical model[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 79(3): 998-1 006.
- [5] ROMANO V, MARRA F. A numerical analysis of radio frequency heating of regular shaped foodstuff[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 84(3): 449-457.
- [6] FERRARI-JOHN R S, KATRIB J, PALADE P. A tool for predicting heating uniformity in industrial radio frequency processing[J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2016, 9(11): 1-9.
- [7] OZTURK S, KONG F, SINGH R K, et al. Radio frequency heating of corn flour: Heating rate and uniformity[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 44: 191-201.
- [8] BEDANE T F, LONG C, MARRA F, et al. Experimental study of radio frequency (RF) thawing of foods with movement on conveyor belt[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 201: 17-25.
- [9] CEPEDA J F, WELLER C L, THIPPAREDDI H, et al. Modeling cooling of ready-to-eat meats by 3D finite element analysis: Validation in meat processing facilities[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 116(2): 450-461.
- [10] KUFFI K D, DEFRAEYE T, NICOLAI B M, et al. CFD modeling of industrial cooling of large beef carcasses[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2016, 69: 324-339.
- [11] STURE Ø, ØYE E R, SKAVHAUG A, et al. A 3D machine vision system for quality grading of Atlantic salmon[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 123: 142-148.
- [12] WANG Ning, BRENNAN J. Thermal conductivity of potato as a function of moisture content[J]. *Journal of Food Engineering*, 1992, 17(2): 153-160.
- [13] 杨瑞丽. 土豆冻结过程中相变界面的模拟及实验研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2014: 17-18.
- [14] 张振娜. 马铃薯射频烫漂护色及其作用机理研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2018.
- [15] 张林青. 基于射频加热的食品解冻技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2015: 23-25.
- [16] BIRLA S L, WANG Shao-jin, TANG Ju-ming. Computer simulation of radio frequency heating of model fruit immersed in water[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 84(2): 270-280.
- [17] UYAR R, BEDANE T F, ERDOGDU F, et al. Radio-frequency thawing of food products: A computational study[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 146: 163-171.
- [18] 朱文学. 食品干燥原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 123-124.
- [19] LI Yu-lin, LI Feng, TANG Ju-ming, et al. Radio frequency tempering uniformity investigation of frozen beef with various shapes and sizes[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 48: 42-55.
- [20] TIWARI G, WANG Shao-jin, TANG Ju-ming, et al. Analysis of radio frequency (RF) power distribution in dry food materials[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 104(4): 548-556.