

不同形状尺寸冷冻牛肉的射频解冻均匀性探究

Study on the uniformity of frozen beef with various sizes and shapes thawed by radio frequency

何佳玲^{1,2} 陈璐^{1,2} 张汝怡^{1,2,3} 朱亚莉^{1,2} 李锋^{1,2} 焦阳^{1,2}

HE Jia-ling^{1,2} CHEN Lu^{1,2} ZHANG Ru-yi^{1,2,3} ZHU Ya-li^{1,2} LI Feng^{1,2} JIAO Yang^{1,2}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 食品热加工工程技术研究中心, 上海 201306;

3. 上海点为智能科技有限公司, 上海 201306)

(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. Shanghai Dotwil Intelligent Technology Co., Ltd., Shanghai 201306, China)

摘要:分别选取不同形状、厚度、底面积和放置方式的8种冷冻牛肉样品,采用频率为40.68 MHz的小型射频解冻炉进行解冻试验;基于试验数据,建立并求解计算机模型,预测样品的解冻升温速率和温度分布,并计算其解冻均匀性系数。结果表明,模拟计算得到的温度值与试验值契合度较高;所有牛肉样品的解冻速率整体上呈线性上升的趋势(相变温度区上升较缓慢)。厚度大的样品解冻速度快,但解冻均匀性较差;相同厚度的样品,底面积越大,解冻速度越慢,解冻均匀性较好;当样品垂直放置时,长方体样品出现严重过热现象,最高温度达到了55.2℃,解冻均匀性较差,而圆柱体样品的最高温度为36.6℃,解冻均匀性相对较好。

关键词:射频解冻;形状;计算机模拟;均匀性

Abstract: To investigate the effects of geometric parameters on uniformity of frozen beef thawed by radio frequency (RF), frozen beef samples with 8 different shapes, thickness, bottom areas and placements were thawed in a RF oven (40.68 MHz) respectively for determining the thawing uniformity. Meanwhile, a computer model was established and utilized to predict the thawing rate and temperature distribution of the samples. The predicted temperature distribution showed a good agreement with the experimental results. The general thawing rates of all beef samples are constant and then decreased gradually as reaching the

phase change temperature zone. Samples with larger thickness showed a higher thawing rate, but a worse thawing uniformity. For the samples with the same thickness, the larger the bottom area was, the slower thawing rate was. When placed vertically, the cuboid sample was more seriously overheated, and the maximum temperature reached 55.2℃, which represented a poor thawing uniformity. The maximum temperature of the cylinder sample was 36.6℃ after RF tempering with relatively better thawing uniformity.

Keywords: RF thawing; shapes; computer simulation; uniformity

为保证品质,牛肉在运输出口前通常需进行冷冻处理,到港后经解冻回温,再进行分割售卖。传统解冻单纯依靠外部热源和样品内部热传导进行,存在着解冻效率低、汁液流失严重、易引起微生物污染^[1-2]等问题,从而造成产品品质下降。因此,需要高效率高品质的解冻技术来提高解冻效率和解冻品质。

射频是一种频率范围在3~300 MHz的电磁波,常用工业频率为13.56,27.12,40.68 MHz^[3]。射频加热的原理是射频发生器产生高频交变电磁场,食品中的微观粒子在交变电场作用下不断运动、摩擦碰撞而产生热量,使食品升温加热^[4-5]。射频加热具有整体加热、加热速率快等特性^[6],已在食品工业的解冻^[7]、干燥^[8]、灭菌^[9]等方面有较多研究。射频解冻过程不仅与温度、频率、食品组分^[10]及介电特性^[11]有关,同时还与食品的形状和尺寸^[12-13]有关,这些因素综合影响射频解冻的速率和均匀性。

计算机模拟仿真技术能够通过数学模型,联立耦合求解多物理场中的参数,大大节省了试验时间和成本,能

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:何佳玲,女,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,硕士生导师,博士。E-mail: yjiao@shou.edu.cn

收稿日期:2019-11-13

辅助研究涉及多物理场的加工机理及工艺优化。目前为止,已有不少研究^[14-18]运用 COMSOL Multiphysics® 有限元分析软件模拟射频解冻过程,试验验证表明,计算机模拟能较好地展示射频加热样品的温度和电磁场分布。然而,尚未有系统地运用计算机模拟结合试验揭示样品在不同放置方式、形状和厚度下射频解冻效果的差异及变化趋势的人。

试验拟运用 COMSOL Multiphysics® V5.2 有限元分析软件建立基于频率为 40.68 MHz、功率为 400 W 的小型射频解冻炉的计算机仿真模型,模拟不同尺寸和形状下冷冻牛肉样品的射频解冻过程,以试验验证该模型的升温情况和温度分布,并分析不同几何特征下冷冻牛肉样品的射频解冻均匀性,以期作为射频解冻应用的方案优化提供参考和工艺开发方向。

1 材料与方法

1.1 材料及样品制备

牛后腿肉:上海市浦东新区古棕路农工商超市,经冷链运输至实验室;

样品处理及制备:将购买的牛后腿肉剔除肥肉和筋膜,经绞肉机绞成肉糜,填充到模具中,随后放入-20℃冷库中冷冻,冷冻至完全塑形后脱模并用电钻在牛肉几何中心打孔,孔内插入牙签,继续放入冷库冷冻,待样品中心温度达到-18℃时,取出进行射频解冻试验。试验牛肉样品的形状尺寸详见表 1。

表 1 射频解冻冷冻牛肉的尺寸形状

Table 1 Sizes and shapes of frozen beef in RF thawing

样品编号	形状	尺寸/mm ³	放置方式
A	长方体	80×50×40	水平
B	长方体	80×50×20	水平
C	长方体	100×80×40	水平
D	长方体	50×40×80	垂直
E	圆柱体	Φ 60×65	垂直
F	圆柱体	Φ 60×32.5	垂直
G	圆柱体	Φ 120×32.5	垂直
H	圆柱体	Φ 60×65	水平

1.2 仪器与设备

智能解冻炉(表 2):DOTWIL™ D20Plus 型,上海点为智能科技有限公司;

绞肉机:锦厨乐® JR-12 型,广州尚喜厨电器有限公司;

荧光光纤测温仪:HQ-FTS-D1F 型,西安和其光电科技有限公司;

红外热像仪:FLIRA655sc 型,美国 FLIR 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 牛肉介电特性和热物性 牛肉在解冻频率及温度范围内的热物性参数和介电特性参考文献[11-12]数据,详见表 3。

表 2 射频解冻炉性能及几何参数

Table 2 Properties and geometric parameters of RF thawing oven

额定解冻频率/MHz	射频输出最大功率/W	外腔尺寸(宽×深×高)/mm ³	内腔尺寸(宽×深×高)/mm ³	上下极板距/mm
40.68	400	380×390×335	320×270×122	122

表 3 牛肉热物性及介电特性[†]

Table 3 Thermal and dielectric properties of beef

牛肉特性参数	单位	表达式
热导率	W/(m·K)	$0.000\ 4T^3-0.009\ 6T^2-0.011\ 2T+1.446\ 9$
比热容	J/(g·K)	$T^4-0.000\ 2T^3-0.009\ T^2+2.076\ 9T-9.454\ 8$
相对介电常数		$-0.002\ 7T^6+0.116\ 8T^5-1.954\ 2T^4+15.257\ T^3-54.734\ T^2+85.17T-40.444$
相对介电损耗因子		$0.095\ 2T^4-3.248\ 2T^3+37.119\ T^2-127.24T+110.27$

[†] T 为牛肉样品温度,℃。

1.3.2 射频解冻 将冷冻好的牛肉糜放置在射频解冻炉腔体的中心位置,拔出牙签,将光纤温度传感器插入孔中(牛肉的几何中心),开始解冻并进行实时温度记录,待牛肉中心温度到达-4℃时停止解冻,立即使用红外热成像仪拍摄牛肉的表面温度分布。每组试验样品重复试验 3 次。

1.4 计算机模拟

1.4.1 模型构建 采用 COMSOL Multiphysics® (COMSOL Multiphysics 5.2, Burlington, MA, USA)有限元方法

软件对射频解冻过程进行模拟,建立静电场下的热传导双向耦合模型,流程如下:

(1) 物理场选择:选择静电场模块(AC/DC)和固体传热模块。

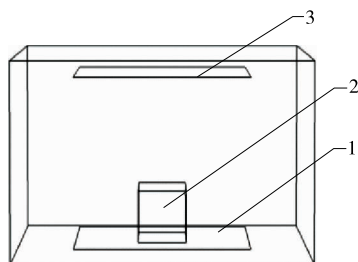
(2) 几何模型建立:绘制出射频解冻炉及样品的几何形状和相对位置,详见图 1。

(3) 参数输入:输入物料解冻过程所涉及的参数,详见表 4。

表 4 模拟射频解冻中的参数

Table 4 Parameters of RF thawing in simulation

样品解冻初始温度/℃	样品密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	环境温度/℃	射频工作频率/MHz	极板间距/mm	上极板电压/V	对流传热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
-18	960	20	40.68	122	2 800~3 900	10



1. 下极板 2. 样品 3. 上极板

图 1 射频炉腔体和样品的几何模型

Figure 1 RF cavity and geometric model of food sample

(4) 初始和边界条件设置:设置样品初始温度、环境温度及样品与空气间的对流传热。

(5) 网格划分:根据所需结果精确性选择合适的网格细度划分。

(6) 求解总时间和时间步长输入:总时间依据解冻终点设置,时间步长设定为 10 s,保证计算速度和结果的准确性。

(7) 结果输出和分析:输出样品几何中心点的升温曲线以及样品表面及截面的二维温度分布图进行结果分析。

1.4.2 初始和边界条件 牛肉样品初始温度为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$,极板间距为 122 mm;牛肉样品表面与空气进行对流传热,公式为:

$$Q = hA(T - T_0), \quad (1)$$

式中:

Q ——单位时间内材料与大气之间交换的热量, W;

h ——对流传热系数,试验中为 $10\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

A ——材料与空气的接触面积, m^2 ;

T ——样品的温度, $^{\circ}\text{C}$;

T_0 ——解冻炉腔内环境的温度,试验中为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.4.3 解冻均匀性评价 解冻均匀性可由温度均匀性(STUI)公式^[19]计算出具体数值来直观表示。将模拟获得的样品解冻温度值代入式(2)中,即可计算出 STUI。STUI 值越小,意味着样品的解冻均匀性越好。

$$\text{STUI} = \frac{\int |T - T_g| dV}{(T_g - T_i)V}, \quad (2)$$

式中:

STUI——模拟温度均匀性指数;

T ——计算机模拟中求解后获得的样品温度, $^{\circ}\text{C}$;

T_g ——解冻目标温度,试验中为 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$;

T_i ——样品的初始温度,试验中为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$;

V ——样品的体积, m^3 。

2 结果与分析

2.1 牛肉形状对射频解冻效果的影响

图 2 和图 3 分别是不同形状下(长方体和圆柱体)冷冻牛肉的射频解冻速率变化曲线和表面温度分布图。由图 2 可知,试验得到的解冻速率曲线和模拟获得的解冻速率曲线契合度较高,解冻速率呈先线性上升再趋于平缓的趋势。在解冻前期,相对于长方体牛肉样品(样品 A),圆柱体牛肉样品(样品 H)的解冻速率较快,而接近解冻终点时,解冻速率趋于平缓,使得最后所用解冻时间大于长方体样品。由图 3(a)和(b)可知,试验和模拟获得的温度分布情况基本一致。模拟得到的最高温度值比试验温度值高 $1\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,可能是射频解冻过程中牛肉表面与空气存在对流及水分蒸发逸散,带走了一部分热量,使得牛肉表面温度下降^[19]。由于长方体样品各面的交汇边缘多于圆柱体,因此长方体样品侧面的高温分布面积较大,均匀性较圆柱体样品差。

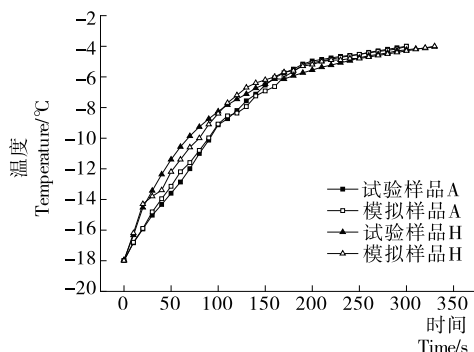


图 2 不同形状牛肉的解冻速率试验与模拟值的比较
Figure 2 Comparison of experimental and simulated thawing rate of different shaped beef

2.2 牛肉厚度对射频解冻效果的影响

由图 4(a)和(b)可知,长方体样品 B 解冻时间为 360 s,而 2 倍厚度的样品 A 解冻则需要 300 s;圆柱体样品 F 解冻所需时间为 390 s,比其 2 倍厚度的样品 E 解冻所用时间(290 s)延长了 100 s。Li 等^[20]的研究结果也表明,样品厚度大,升温速率快,所用时间越短。

由图 5(a)和(b)可知,当样品厚度减少 50%时,长方体样品的最高温度由 23.0℃降低至 22.6℃;而圆柱体样品厚度减小 50%时,最高温度由 36.6℃降至 21.6℃,由

此可看出,样品厚度对解冻后的最高温度有显著影响:样品厚度越大,解冻终点的最高温度越高,解冻均匀性较差。这是由于样品厚度越大,样品上表面与上极板间的

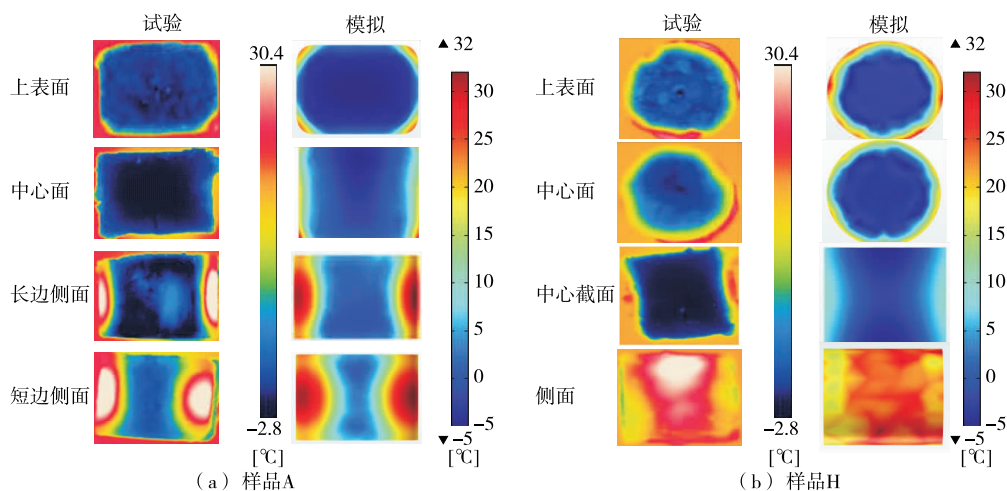


图 3 不同形状冷冻牛肉射频解冻后的表面温度分布图

Figure 3 The surface temperature distribution of frozen beef with various shapes after RF thawing

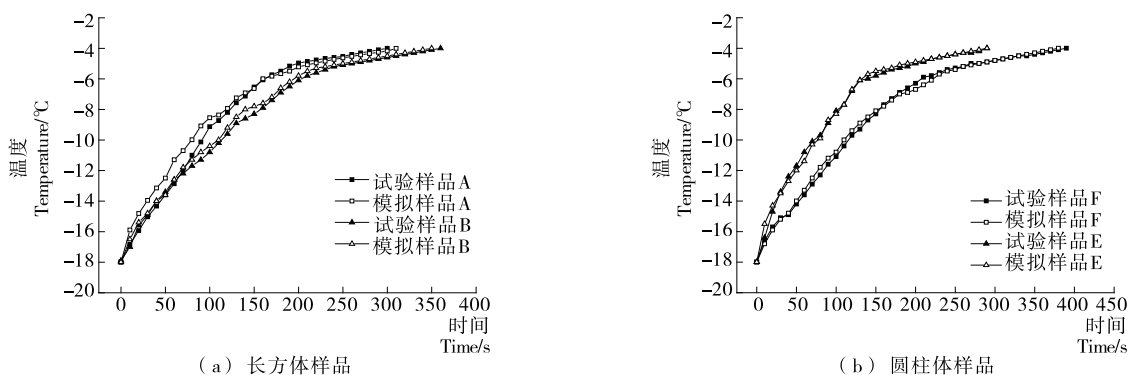


图 4 不同厚度冷冻牛肉的解冻速率曲线图

Figure 4 The thawing rates of frozen beef with different thickness during RF thawing

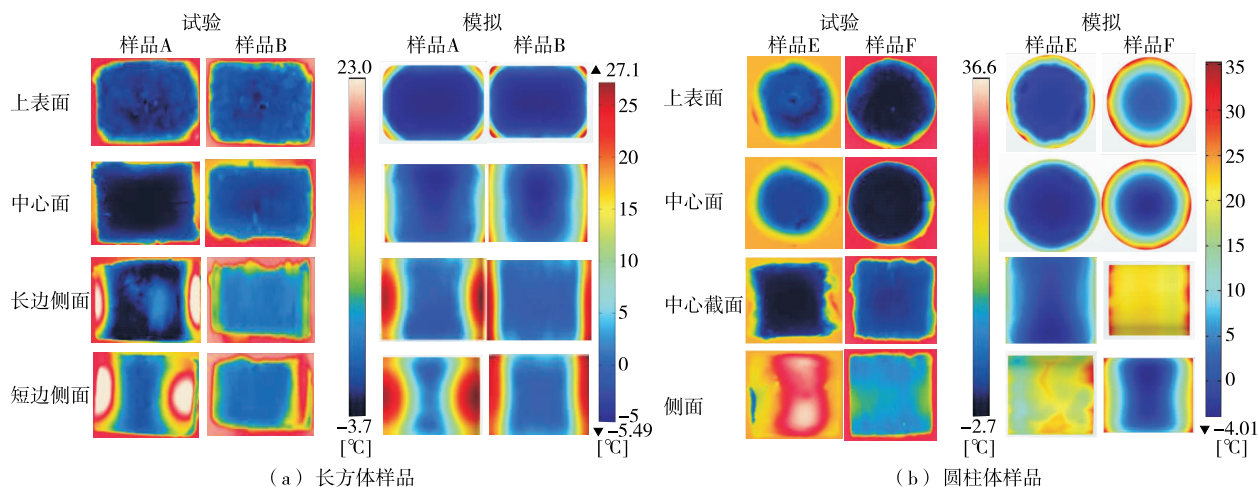


图 5 不同厚度冷冻牛肉样品射频解冻后的表面温度分布图

Figure 5 The surface temperature distribution of frozen beef with different thickness after RF thawing

空气间隙越小,样品内部的电场强度较高,导致样品吸收更多的电磁能,样品升温更快,温度更高。

2.3 牛肉底面积对射频解冻效果的影响

图 6(a)和(b)为不同底面积长方体和圆柱体冷冻牛肉样品的解冻速率曲线图。由图 6 可知,底面积大的长方体牛肉样品 C 解冻时间为 340 s,而底面积小的牛肉样品 A 解冻时间为 300 s,底面积减小后时间减少了 40 s;底面积大的圆柱体牛肉样品 G 解冻时间为 480 s,而小底面积牛肉样品 F 解冻时间为 360 s,其时间减少了 120 s。因此,无论是长方体还是圆柱体样品,底面积越大,解冻速率越小,所用时间越长。

图 7(a)和(b)为不同底面积下长方体和圆柱体牛肉样品的解冻表面温度分布图。由图 7 可知,长方体牛肉样品底面积增加至原来的 2 倍后,到达解冻终点时,样品的最高温度由 23.0 °C 降为 21.4 °C,而最低温度从 -3.7 °C 升高至 -2.8 °C;圆柱体样品底面积增大至 2 倍之后,解冻终点时的最高和最低温度分别由 21.6 °C 和 -2.8 °C 降低至 20.4 °C 和 -3.8 °C。

综上可知,样品底面积越大,解冻时间越长,但解冻后最高温度较低,样品温差小,解冻均匀性较好。Uyar 等^[21]的研究结果也表明,样品表面与上极板的间距固定时,样品底面积越小,温度上升快,终点温度高。

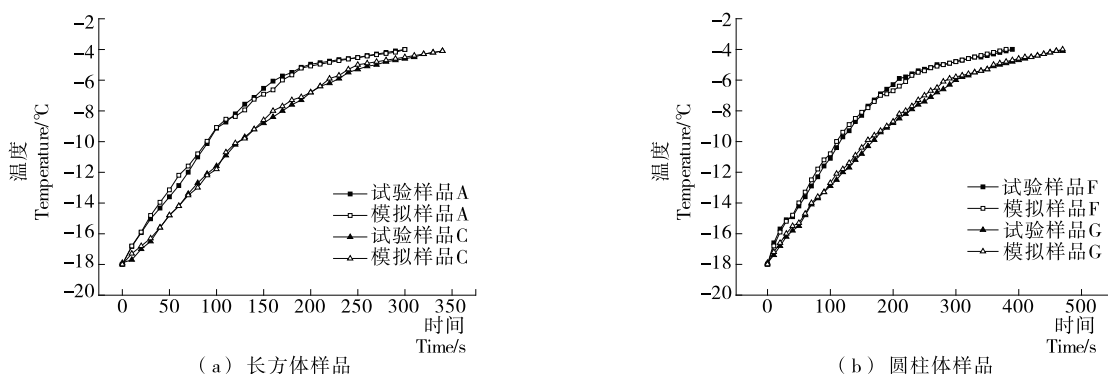


图 6 不同底面积冷冻牛肉样品的射频解冻速率曲线

Figure 6 RF thawing rate of frozen beef with different base area

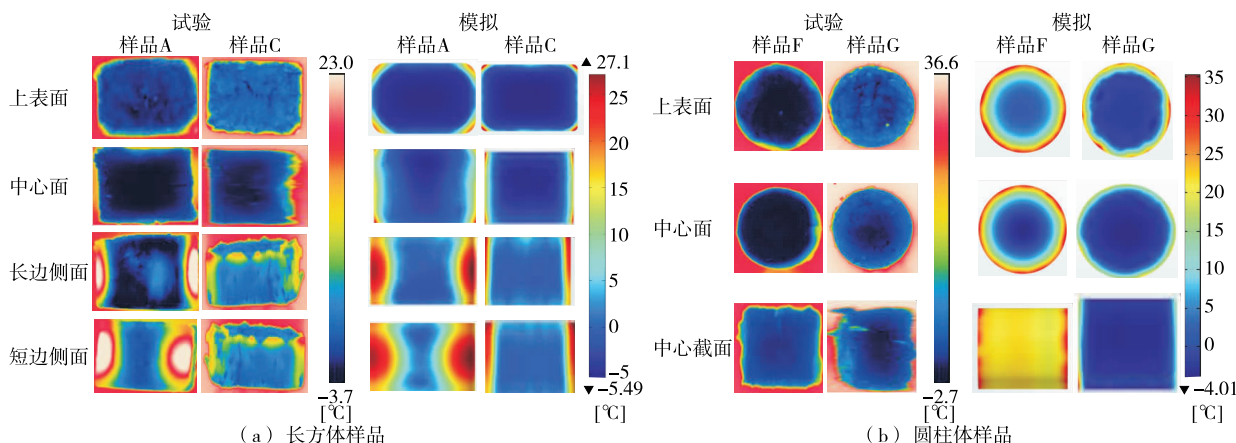


图 7 不同底面积的牛肉样品射频解冻表面温度分布图

Figure 7 The surface temperature distribution map of samples with different base areas

2.4 放置方式对射频解冻效果的影响

由图 8 可知,垂直放置的长方体样品 D 的解冻时间(280 s)与水平放置的长方体样品 A(300 s)差异较小;而垂直放置的圆柱体样品 E 的解冻时间为 290 s,比水平放置的样品 H 解冻时间(340 s)缩短了 50 s。这与厚度大的样品解冻速率快的结果一致。Romano 等^[22]的研究结果也表明,垂直放置样品的加热速率大于水平放置样品。

对于解冻后的温度分布,由图 9 可知,模拟的表面温

度分布与试验契合度较好。长方体牛肉样品由水平位置(样品 A)变为垂直放置(样品 D),其解冻后的最高温度由 23.0 °C 变为 55.2 °C,而最低温度则从 -3.7 °C 降低到 -4.1 °C,出现严重过热现象;圆柱体样品垂直放置(样品 E)后,最高和最低温度分别由 30.4 °C 和 -2.8 °C 变为 36.6 °C 和 -2.7 °C。这是由于垂直放置后样品厚度变大,样品上表面与上极板间的空气间隙变小,电磁能量更加集中,使得样品温度上升较快。

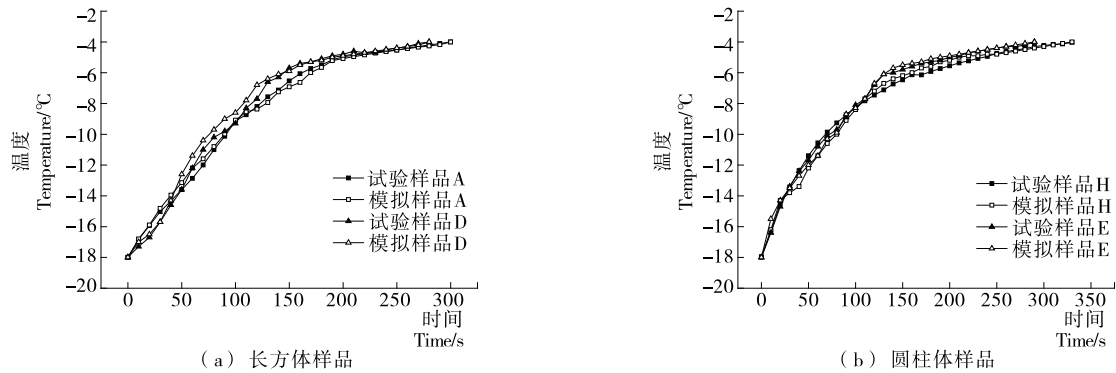


图 8 不同放置方式牛肉样品的射频解冻速率曲线
Figure 8 RF thawing rate of beef samples with different directions

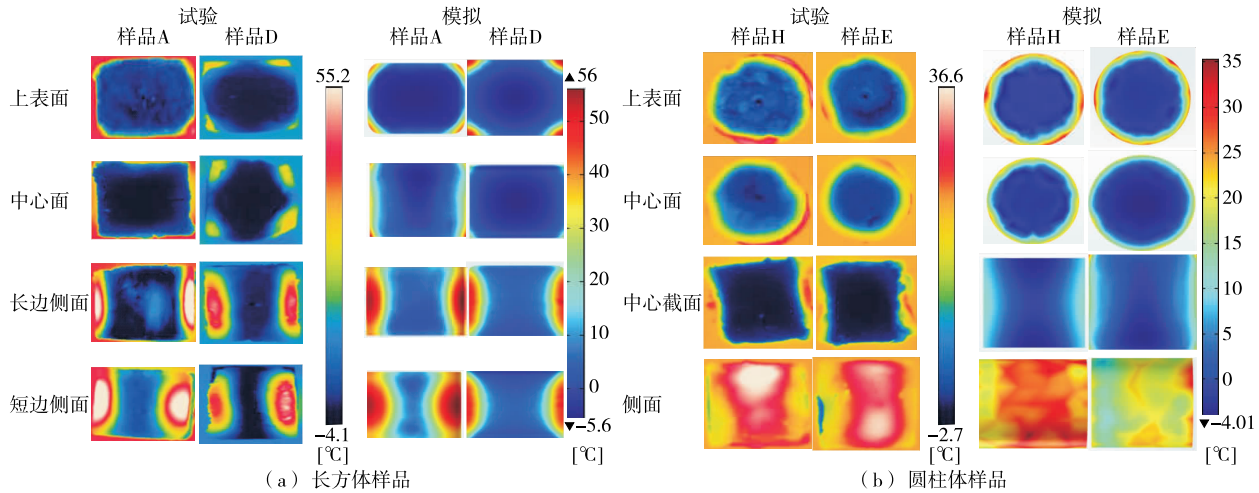


图 9 不同放置方式的牛肉样品射频解冻表面温度分布图
Figure 9 The surface temperature distribution map of samples with different placements after RF thawing

2.5 解冻均匀性

STUI 值越大,表明样品温度分布越不均匀,解冻均匀性越差。由表 5 可知,牛肉样品厚度越大,STUI 值越大,解冻均匀性越差,与 Li 等^[20]的研究结果一致;相同厚度样品,底面积大,其 STUI 值小,加热均匀性越好,Jiao 等^[14]、Zhang 等^[23]和 Zhu 等^[24]的研究结果一致;相同的样品,放置方式不同,STUI 值也不同,Miran 等^[25]的研究表明,水平放置样品的 STUI 值与垂直放置的相比,STUI

值相对较小,解冻均匀性较好,即水平放置样品解冻均匀性更好,与试验得到的结果一致。由此可见,牛肉样品厚度小,底面积大,水平放置时,STUI 值较小,射频解冻均匀性较好。

3 结论

基于不同形状及尺寸的冷冻牛肉射频解冻试验,建立了射频炉解冻牛肉的计算机模型,模拟得到的解冻速率变化曲线和表面温度图与试验结果基本一致,证明了模型的有效性。模拟及试验结果均显示,冷冻牛肉射频解冻速率呈现先线性上升再趋于平缓的变化趋势。运用验证了的数学模型计算解冻均匀性指数,结果表明,冷冻样品厚度越大,射频解冻速率越高,中心与边角位置温差越大,解冻均匀性越差;样品厚度相同时,底面积越大,解冻时间越长,温差越小,解冻均匀性越好;相比垂直放置样品,水平放置时,解冻均匀性较好。

试验分析了长方体和圆柱体两种特定形状下不同尺寸的冷冻牛肉射频解冻特性,但对其他形状样品尤其是

表 5 解冻后不同形状及放置方式样品的模拟温度均匀性指数比较

Table 5 Comparison of simulation temperature uniformity index of different samples after RF thawing

样品	STUI 值	样品	STUI 值
A	0.546	E	0.615
B	0.255	F	0.101
C	0.212	G	0.206
D	0.218	H	0.440

真实冷冻肉类及水产品样品的射频解冻尚未见研究。因此,对于特定真实形状的冷冻畜、水产品的射频解冻工艺探索以及解冻品质分析可作为后续的研究方向。此外,试验中基于该射频解冻设备所开发的计算机模型可以进一步应用于其他产品的解冻温度预测。

参考文献

- [1] 冯晚平, 胡娟. 冷冻食品解冻技术研究进展[J]. 农机化研究, 2011(10): 249-252.
- [2] BROWN T, JAMES S J. The effect of air temperature, velocity and visual lean (VL) composition on the tempering times of frozen boneless beef blocks[J]. Meat Science, 2006, 73(4): 545-552.
- [3] 李玉林, 焦阳, 王易芬. 射频加热技术在食品工业中的应用[J]. 食品与机械, 2017, 33(12): 197-202.
- [4] ȘTEFANOIU G-A, TANASE E E, MITELUȚ A C, et al. Unconventional treatments of food: Microwave vs. radiofrequency[J]. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2016, 10: 503-510.
- [5] PIYASENA P, DUSSAULT C, KOUTCHMA T, et al. Radio frequency heating of foods: Principles, applications and related properties: A review [J]. Critical Reviews Food Science Nutrition, 2003, 43(6): 587-606.
- [6] JIAO Yang, TANG Ju-ming, WANG Yi-fen, et al. Radio-frequency applications for food processing and safety[J]. Annual Reviews Food Sci Technology, 2018, 9: 105-127.
- [7] GUO Chao-fan, MUJUMDAR A S, ZHANG Min. New development in radio frequency heating for fresh food processing: A review[J]. Food Engineering Reviews, 2019, 11(1): 29-43.
- [8] MCKENNA B M, LYN G, BRUNTON N, et al. Advances in radio frequency and ohmic heating of meats[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(2): 215-229.
- [9] MARRA F, ZHANG Lu, LYN G. Radio frequency treatment of foods: Review of recent advances[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(4): 497-508.
- [10] 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.
- [11] FARAG K W, LYN G, MORGAN D J, et al. Dielectric and thermophysical properties of different beef meat blends over a temperature range of -18 to +10 °C[J]. Meat Science, 2008, 79(4): 740-747.
- [12] DAG D, SINGH R K, KONG Fan-bin. Dielectric properties, effect of geometry, and quality changes of whole, nonfat milk powder and their mixtures associated with radio frequency heating[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 261: 40-50.
- [13] YANG Hu-yu, CHEN Qian, CAO Hong-wei, et al. Radio-frequency thawing of frozen minced fish based on the dielectric response mechanism[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 52: 80-88.
- [14] JIAO Shun-shan, DENG Yun, ZHONG Yu, et al. Investigation of radio frequency heating uniformity of wheat kernels by using the developed computer simulation model[J]. Food Research International, 2015, 71: 41-49.
- [15] HUANG Zhi, MARRA F, WANG Shao-jin. A novel strategy for improving radio frequency heating uniformity of dry food products using computational modeling[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 34: 100-111.
- [16] ERDOGDU F, ALTIN O, MARRA F, et al. A computational study to design process conditions in industrial radio-frequency tempering/thawing process[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 213: 99-112.
- [17] HOU Li-xia, HUANG Zhi, KOU Xiao-xi, et al. Computer simulation model development and validation of radio frequency heating for bulk chestnuts based on single particle approach[J]. Food and Bioprocess Processing, 2016, 100: 372-381.
- [18] UYAR R, ERDOGDU F, SARGHINI F, et al. Computer simulation of radio-frequency heating applied to block-shaped foods: Analysis on the role of geometrical parameters[J]. Food and Bioprocess Processing, 2016, 98: 310-319.
- [19] 郭洁玉. 冻肉射频解冻过程中温度变化的模拟与测定[J]. 食品与生物技术学报, 2016, 35(1): 66-71.
- [20] 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.
- [21] UYAR R, ERDOGDU F, MARRA F. Effect of load volume on power absorption and temperature evolution during radio-frequency heating of meat cubes: A computational study[J]. Food and Bioprocess Processing, 2014, 92(3): 243-251.
- [22] 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.
- [23] ZHANG Shuang, HUANG Zhi, WANG Shao-jin. Improvement of radio frequency (RF) heating uniformity for peanuts with a new strategy using computational modeling[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 41: 79-89.
- [24] ZHU Han-kun, LI Dong, MA Ji-wei, et al. Radio frequency heating uniformity evaluation for mid-high moisture food treated with cylindrical electromagnetic wave conductors[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 47: 56-70.
- [25] MARRA F, LYN G, ROMANO V, et al. Radio-frequency heating of foodstuff: Solution and validation of a mathematical model[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(3): 998-1006.