



罗氏沼虾虾仁介电特性变化规律研究

成晓宁¹,张焯¹,赵亚¹,石启龙¹,高瑞昌²,居向东³

1. 山东理工大学 农业工程与食品科学学院,山东 淄博 255000;

2. 江苏大学 食品与生物工程学院,江苏 镇江 212013;

3. 江苏威伍水产发展股份有限公司,江苏 高邮 225600

摘要:在不同频率(0~3000 MHz)和加热温度(25~65 ℃)下,考查罗氏沼虾虾仁(含水率20%~80%)的介电特性变化规律,并探究不同质量分数渗透剂溶质(NaCl、蔗糖、海藻糖和麦芽糊精)对罗氏沼虾虾仁介电特性的影响。结果表明:当罗氏沼虾虾仁的含水率为20%~80%时,介电常数和介电损耗因子均随着含水率的增加而增大;当加热温度为45~65 ℃时,介电损耗因子随着加热温度的升高而增大;在0~3000 MHz频率范围内,虾仁的介电常数和介电损耗因子均随着频率的增加而减小;当上述4种渗透剂溶质的质量分数分别为5%、10%、15%和20%时,虾仁的介电常数最大;虾仁的穿透深度随着加热温度、含水率和频率的增加而减小。因此,加热温度、含水率、频率和渗透剂溶质均会显著影响罗氏沼虾虾仁的介电特性。

关键词:罗氏沼虾虾仁;介电特性;含水率;加热温度;频率;渗透剂溶质

中图分类号:TS254.4 **文献标识码:**A

0 引言

罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)是世界上最大的淡水虾类,其蛋白质含量丰富,生长快,易于养殖^[1]。据统计,2022年全国罗氏沼虾养殖总产量达 1.8×10^5 t^[2]。新鲜虾仁含水率高,在储藏运输过程中极易发生腐败变质,而冷链运输可确保产品在流通过程中处于低温环境,在减少损耗的同时,又保证了产品的新鲜度,但成本较高。干燥处理是常用的延长水产品保质期的方法,不仅能有效抑制微生物生长,而且成本较低^[3]。然而,蛋白质具有温

度敏感性,因此选择一种合适的干燥方法是获得高品质罗氏沼虾虾仁的关键。

微波是一种频率为0.3~300 GHz,波长为1 mm~1 m,且具有穿透性的高频电磁波,利用其能量进行介电加热是其重要应用之一^[4]。微波干燥(Microwave Drying, MD)是指将电磁波传送到物料中,并与物料内部的水分子发生同频高速旋转,二者因摩擦产生的瞬间热量可使水分变成水蒸气被除去,从而达到干燥目的的方法^[5]。目前,微波干燥已被应用于水产品(如虾^[6-7]、鲍鱼^[8]等)的干燥中,不仅能缩短干燥时间,且所得干制品具有更好

收稿日期:2024-07-02;修回日期:2024-08-20

基金项目:江苏省重点研发计划(现代农业)项目(BE2023341);扬州市科技计划(现代农业)项目(YZ2023039)

作者简介:成晓宁(2000—),女,山东省聊城市人,山东理工大学硕士研究生,主要研究方向为食品干燥理论与技术。

E-mail:1376044832@qq.com

通信作者:石启龙(1974—),男,河北省唐山市人,山东理工大学教授,博士,主要研究方向为生鲜食品加工与贮藏。

E-mail:qilongshi@sdut.edu.cn

的色泽和风味,但仍存在加热不均匀的问题,而物料的介电特性、热性能、尺寸、几何形状等都会影响其加热均匀性^[9]。

介电特性是指在电场作用下,物料所表现出的对静电能的存储和耗散的性质,通常包括介电常数和介电损耗因子这两个参数^[10]。其中,介电常数可反映物料的电容性,体现物料储存电能的能力;介电损耗因子反映的是物料的电阻性,表征物料将电能作为热量耗散的能力^[11]。X. T. Ma 等^[12]基于介电损耗因子反馈设计了一种微波控制方案,该方案不仅能有效防止物料在干燥中后期温度的飙升,还可确保产品的品质。这证实了基于介电特性反馈优化微波干燥的可行性。此外,有研究^[13]表明,经渗透剂处理后,物料化学成分的变化及细胞结构的破坏在一定程度上可影响其介电特性。而目前尚缺乏有关罗氏沼虾虾仁在微波干燥过程中介电特性变化规律的研究。

基于此,本研究拟以罗氏沼虾虾仁为研究对象,探究加热温度、含水率、频率和渗透剂溶质对罗氏沼虾虾仁介电特性的影响,并建立固定频率下罗氏沼虾虾仁介电常数和介电损耗因子随加热温度和含水率变化的数学模型,以期为罗氏沼虾虾仁微波干燥工艺设计及优化提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

罗氏沼虾虾仁,江苏威伍水产发展股份有限公司;NaCl,江苏苏盐井神股份有限公司;蔗糖,山东金怡神糖业有限公司;海藻糖,上海权旺生物科技有限公司;麦芽糊精,山东西王集团有限公司。以上试剂均为食品级。

1.2 主要仪器与设备

E5063A 型矢量网络分析仪、85070E 型介电探头,美国安捷伦公司;DW-HL100 型超低温冰箱,中科美菱低温科技有限公司;FD-80 型真空冷冻干燥机,北京博医康实验仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 不同含水率罗氏沼虾虾仁制备 将罗氏沼虾虾仁在-40℃超低温冰箱中预冻至少24 h后,于

真空冷冻干燥机中进行冷冻干燥,设置冷凝温度为-80℃,真空度为20 Pa,并定期取样,控制虾仁含水率分别为80%、65%、50%、35%和20%。

1.3.2 罗氏沼虾虾仁渗透脱水预处理 为探究不同渗透剂溶质及其质量分数对罗氏沼虾虾仁介电特性的影响,根据笔者团队前期研究^[14],对罗氏沼虾虾仁进行超声波辅助渗透脱水处理,并略作修改。设置渗透脱水温度为35℃,料液比为1:4(g/mL),时间为30 min,以NaCl质量分数(*A*)、蔗糖质量分数(*B*)、海藻糖质量分数(*C*)和麦芽糊精质量分数(*D*)为主要因素,设计四因素三水平 $L_9(3^4)$ 正交试验,正交试验因素与水平见表1。超声波辅助渗透脱水处理后再对罗氏沼虾虾仁进行冻干处理,控制虾仁含水率为 $(55\pm 1)\%$ 。

1.3.3 含水率测定 参照《食品安全国家标准 食品中水分的测定》(GB 5009.3—2016)^[15]中的直接干燥法测定罗氏沼虾虾仁含水率。

1.3.4 介电特性测定 介电特性测定系统由开放式同轴探头、矢量网络分析仪、介电探头套件软件、计算机和恒温油浴器组成。矢量网络分析仪开机预热1 h后,将开放式同轴探头连接到矢量网络分析仪上,通过分别测定空气、短路、25℃去离子水的介电特性对仪器进行校准。测定时,需将开放式同轴探头与罗氏沼虾虾仁充分接触,无气泡,无缝隙。设定频率范围为0~3000 MHz,线性扫描点数为101个,环境测试温度为25℃,通过计算机读取介电常数和介质损耗因子的数值,每次实验均需重复3次。

分别测定不同含水率的罗氏沼虾虾仁在加热温度为25℃、35℃、45℃、55℃和65℃时的介电特性。其中,虾仁的加热温度由恒温油浴器控制,加热过程中将热电偶感温端插入虾仁的几何中心处,达到所需温度后迅速测定其介电特性。渗透剂脱水处理后的虾仁则在环境温度(25℃)下测定介电特性。

表1 正交试验因素与水平				
Table 1 Orthogonal test factors and levels				
水平	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
1	5	10	5	10
2	10	20	10	20
3	15	30	15	30

1.3.5 数学模型建立 以罗氏沼虾虾仁的含水率(W)和加热温度(T)为自变量,介电常数(ε')和介电损耗因子(ε'')为因变量,建立虾仁的介电常数、介电损耗因子随其含水率和加热温度变化的数学模型;此外,以介电常数和介电损耗因子为自变量,以虾仁的含水率为因变量,建立虾仁的含水率随其介电常数和介电损耗因子变化的数学模型。

1.3.6 穿透深度计算 穿透深度(D_p/cm)是指微波在穿透物料过程中,能量减少为原来的 $1/e$ ($e=2.718$) 时距离物料表面的垂直距离,计算公式如下^[16]:

$$D_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\varepsilon' \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} - 1 \right)}}$$

式中, c 为真空中的光速($2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$), f 为微波频率/Hz。

1.4 数据处理

采用 SPSS 21.0 软件进行统计分析和方差分析,并确定模型的显著性水平。通过 Duncan 多重检验评估样品组间差异(在 95%置信区间)。

2 结果与分析

2.1 罗氏沼虾虾仁加热温度与介电特性关系分析

加热温度对罗氏沼虾虾仁介电常数的影响如图 1 所示,其中不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$),下同。由图 1 可知,在 915 MHz 和 2450 MHz 频率下,当虾仁含水率较低时,加热温度对介电常数的影响不显著($P>0.05$)。但当虾仁含水率较高时,介电常数随着温度的升高变化显著($P<0.05$)。如在 2450 MHz 频率下,含水率 35% 的虾仁,温度由 25 ℃ 上升至 65 ℃,介电常数由 9.84 降低至 9.21($P>0.05$);而含水率 80% 的虾仁,介电常数则由 57.47 显著降低至 56.27($P<0.05$)。通常,物料的介电常数会随着温度的升高而降低,这可能同结合水与自由水含量比值、离子电导率和离子迁移率的变化有关^[17]。温度升高会加速水分子的布朗运动并抑制分子极化效应,从而降低物料的介电常数;而物料含水率较低时,布朗运动

和分子极化效应会达到平衡,因此介电常数基本保持不变^[11]。S. Li 等^[18]在对 4 种淡水鱼和咸水鱼介电特性随温度的变化研究中也得到了类似的结果。

加热温度对罗氏沼虾虾仁介电损耗因子的影响如图 2 所示。由图 2 可知,随着加热温度的升高,虾仁的介电损耗因子显著增大($P<0.05$)。这可能是因为介电损耗因子反映了外加电场在物料中耗散的能量,随着物料温度的升高,其吸收的能量增加,导致介电损耗因子也随之增大^[19]。当含水率较高时,物料的介电损耗因子对温度变化的响应明显高于含水率较低的情况。如在 2450 MHz 频率下,当加热温度由 25 ℃ 升高至 65 ℃ 时,含水率 80% 和 20% 的虾仁,介电损耗因子分别增加了 3.52 和 0.57。有报道^[20]称,水分状态变化、弛豫时间和分子极化是影响介电损耗因子的关键因素,且随着含水率的降低,结合水对物料介电损耗因子的影响逐渐占据主导地位,从而使介电损耗因子保持相对稳定。

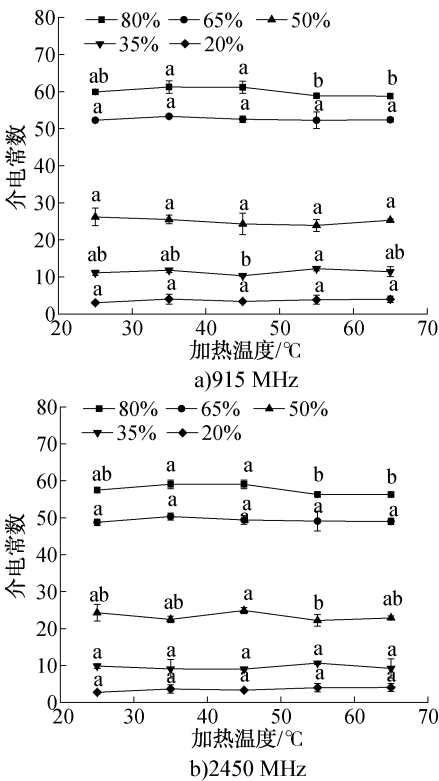


图 1 加热温度对罗氏沼虾虾仁介电常数的影响
Fig. 1 Effects of heating temperature on the dielectric constant of *M. rosenbergii* meat

2.2 罗氏沼虾虾仁含水率与介电特性关系分析

含水率对罗氏沼虾虾仁介电特性的影响如图 3 所示。由图 3 可知,在 915 MHz 和 2450 MHz 频率下,虾仁的介电常数和介电损耗因子均随着含水率的降低而逐渐减小。如当频率为 2450 MHz 时,随着含水率从 80%降低至 20%,虾仁的介电常数和介电损耗因子分别减小了 50.45 和 15.09。此外,与高含水率的虾仁相比,低含水率虾仁的介电常数变化幅度较小。如在 2450 MHz 频率下,含水率由 65%降低至 50%时,虾仁的介电常数降低了 20.18;而当含水率从 35%降低至 20%时,虾仁的介电常数仅降低了 5.56。这一现象归因于水作为极性分子,在物料中呈多层结构排列,相较于其他组分能结合更多电磁能。在相同温度下,含水率高的物料中自由水含量高,这就导致水分子的偶极子转向更剧烈,介电常数的变化更显著^[21]。相反地,当物料处于低含水率时,其内部水分主要以结合水的形式存在,水分状态只有轻微变化,导致相对较少的分子极化,因而介电特性变化不明显^[22]。

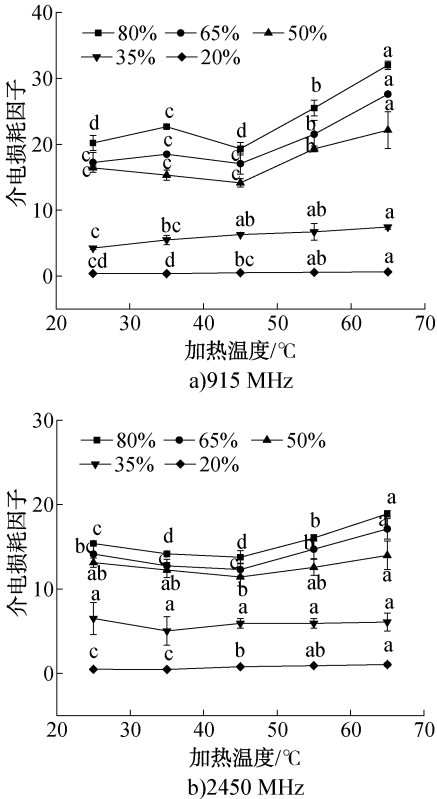


图 2 加热温度对罗氏沼虾虾仁介电损耗因子的影响

Fig. 2 Effects of heating temperature on the dielectric loss factor of *M. rosenbergii* meat

2.3 频率与罗氏沼虾虾仁介电特性关系分析

频率对罗氏沼虾虾仁介电特性的影响如图 4 所示。由图 4 可知,在任意含水率下,虾仁介电常数和介电损耗因子均随着频率的增加而降低,且低频段的变化趋势较高频段更明显。该结果与频率对三文鱼^[23]、鲢鱼鱼糜^[24]等其他水产品介电特性的影响结果较一致。由图 4a) 可知,随着频率的不断升高,虾仁介电常数呈先迅速减小后趋于稳定的变化

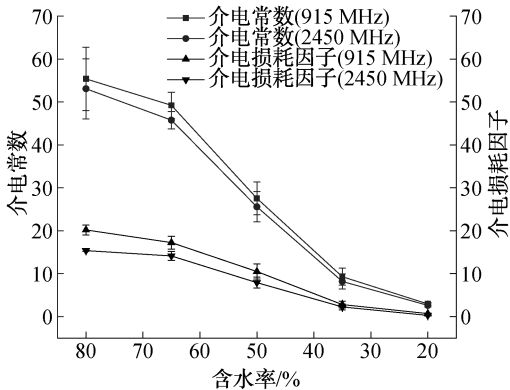


图 3 含水率对罗氏沼虾虾仁介电特性的影响
Fig. 3 Effect of moisture content on the dielectric properties of *M. rosenbergii* meat

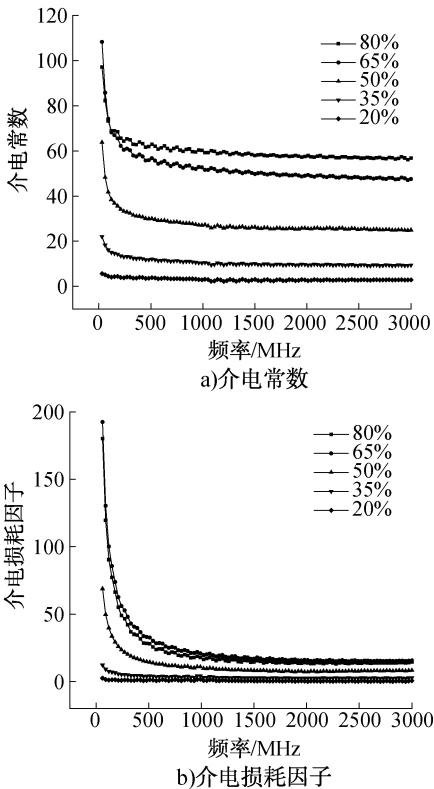


图 4 频率对罗氏沼虾虾仁介电特性的影响
Fig. 4 Effect of frequency on the dielectric properties of *M. rosenbergii* meat

趋势。以含水率 50% 的虾仁为例,当频率由 30 MHz 增加至 300 MHz 时,虾仁的介电常数降低了 49.21%; 而由 300 MHz 增加至 3000 MHz 时,虾仁的介电常数降低了 23.01%。这可能是因为低频段离子传导占主导地位,而在高频段偶极子的旋转效应则更显著。随着频率的不断增加,产生的较高电场振动导致水分子的极化减少,故介电常数不断减小^[25]。由图 4b) 可知,随着频率的不断升高,虾仁的介电损耗因子也呈先迅速减小后趋于稳定的变化趋势,尤其在含水率较高的虾仁中,这一变化趋势更明显。如当频率由 30 MHz 增加至 300 MHz 时,含水率 80% 和 20% 的虾仁的介电损耗因子分别下降了 138.10 和 1.40。与介电常数相比,介电损耗因子初始值较高,稳定后的值较低,降低速度慢,且在高频阶段受含水率的影响相对较小。基于虾仁介电特性随频率变化的特点,微波干燥过程中可采用改变微波功率的干燥法以优化干燥效果。

2.4 渗透剂溶质对介电特性的影响分析

正交试验结果见表 2。由表 2 可知,经不同渗透剂溶质处理后的虾仁,其介电常数和介电损耗因子均有所变化。当各渗透剂溶质的质量分数处于最低水平(序号 1)时,虾仁的介电常数达到最大值,之后随着质量分数的增加,介电常数逐渐减小。这可能是因为渗透剂溶质的加入不仅会引起物料脱水,还会与物料中的极性分子结合,导致介电特性减弱^[26]。Y. X. Chen 等^[27]研究发现,当 NaCl 的质量分数超过 1.0% 时,鱼肉的介电常数会

随着 NaCl 质量分数的增加而降低,本研究结果与其较一致。这可能是因为盐的加入提高了蛋白质的溶解度和持水能力,但当盐的质量分数增加到某种程度后,结合离子的静电斥力增加,导致肌丝晶格膨胀,使鱼肉的持水能力下降,介电常数降低。研究^[25]表明,渗透剂溶质处理过程中,渗透脱水效果对介电特性的影响大于固形物质量的增加。本研究中,经渗透脱水预处理后的虾仁均控制着相同的含水率,因此,虾仁介电特性的差异主要取决于固形物质量的变化。

正交试验方差分析结果见表 3。由表 3 可知,综合考虑 2 个频率下的介电特性,渗透处理后虾仁介电常数最大的组合为 $A_1B_1C_3D_2$,此时 NaCl、蔗糖、海藻糖和麦芽糊精的质量分数分别为 5%、10%、15% 和 20%。这表明介电常数随海藻糖质量分数增加而增大的程度较其他 3 种渗透剂溶质更为明显。介电损耗因子最大的组合为 $A_{2,3}B_1C_{1,2,3}D_1$,此时海藻糖质量分数对介电损耗因子的影响不显著,NaCl、蔗糖和麦芽糊精的质量分数分别为 10% (或 15%)、10% 和 20%。L. X. Yang 等^[28]研究发现,盐的添加对介电特性变化有显著影响,添加盐或盐-糖混合物可加快虾的微波加热速率。因此,为优化微波干燥过程,在设计渗透预处理实验时,必须充分考虑渗透剂溶质的种类及其质量分数的影响。

2.5 数学模型的构建及分析

2.5.1 介电常数与加热温度、含水率的数学模型
以加热温度(T)和含水率(W)为自变量,介电常数(ε')为因变量,分别在 915 MHz 和 2450 MHz 频率

表 2 正交试验结果
Table 2 Results of orthogonal test

序号	A	B	C	D	915 MHz		2450 MHz	
					介电常数	介电损耗因子	介电常数	介电损耗因子
1	1	1	1	1	50.53±0.09	50.96±0.84	44.94±0.27	27.56±0.31
2	1	1	2	2	47.28±0.35	38.46±0.97	41.61±0.36	22.83±0.36
3	1	1	3	3	44.35±1.01	30.75±0.48	38.41±0.79	20.05±0.51
4	2	1	2	3	42.95±1.13	62.11±1.99	36.47±0.97	31.74±0.83
5	2	2	3	1	44.27±1.08	56.88±0.36	38.81±0.96	29.97±0.24
6	2	3	1	2	38.76±1.19	48.88±2.49	33.96±0.55	25.36±1.02
7	3	1	3	2	48.27±1.10	58.47±0.63	41.82±1.25	30.23±1.22
8	3	2	1	3	39.22±2.67	57.49±5.87	32.93±2.07	28.90±2.79
9	3	3	2	1	35.88±0.89	54.98±6.88	29.45±2.37	27.38±3.16

下,对与虾仁加热温度和含水率有关的介电常数进行线性回归方程拟合,并建立数学模型,结果见表4。由表4可知,介电常数数学模型的 R^2 均大于0.950,表明模型均能预测虾仁的介电常数,且拟合效果良好。显著性水平 P 值均小于0.001,表明虾仁介电常数随加热温度和含水率变化的数学模型均具有显著性。

2.5.2 介电损耗因子与加热温度、含水率的数学模型

以加热温度(T)和含水率(W)为自变量,介电损耗因子(ε'')为因变量,分别在915 MHz和2450 MHz

表3 正交试验方差分析结果

Table 3 Results of variance analysis of orthogonal test

方差来源		F 值	P 值	最优水平
915 MHz	介电常数	A 65.905	0.000	$A_1B_1C_3D_{1,2}$
		B 82.442	0.000	
		C 20.347	0.000	
		D 9.699	0.001	
	介电损耗因子	A 77.186	0.000	$A_{2,3}B_1C_{1,2,3}D_1$
		B 32.49	0.000	
		C 3.472	0.053	
		D 7.402	0.005	
2450 MHz	介电常数	A 72.82	0.000	$A_1B_1C_3D_2$
		B 71.342	0.000	
		C 20.985	0.000	
		D 14.327	0.000	
	介电损耗因子	A 37.247	0.000	$A_{2,3}B_1C_{1,2,3}D_{1,3}$
		B 29.225	0.000	
		C 0.376	0.692	
		D 4.524	0.026	

表4 介电常数与加热温度、含水率的数学模型

Table 4 Mathematical model of dielectric constant and heating temperature, moisture content

序号	响应值	数学表达式	F 值	P 值	R^2
1	ε' ($f=915$ MHz)	$\varepsilon'_{915} = -20.216 - 0.012T + 1.026W$	754.115	0.000	0.954
2	ε' ($f=2450$ MHz)	$\varepsilon'_{2450} = -20.094 - 0.012T + 0.986W$	711.837	0.000	0.952

表5 介电耗损因子与加热温度、含水率的数学模型

Table 5 Mathematical model of dielectric loss factor and heating temperature, moisture content

序号	响应值	数学表达式	R^2
3	ε'' ($f=915$ MHz)	$\varepsilon''_{915} = 0.626 - 0.670T + 0.602W + 0.007T^2 - 0.004W^2 + 0.005TW$	0.949
4	ε'' ($f=2450$ MHz)	$\varepsilon''_{2450} = -1.666 - 0.424T + 0.588W + 0.004T^2 - 0.004W^2 + 0.002TW$	0.959

表6 含水率与介电常数、介电损耗因子的数学模型

Table 6 Mathematical model of moisture content and dielectric constant, dielectric loss factor

序号	响应值	数学表达式	F 值	P 值	R^2
5	$W(f=915$ MHz)	$W_{915} = 21.523 + 1.171\varepsilon' - 0.640\varepsilon''$	218.820	0.000	0.973
6	$W(f=2450$ MHz)	$W_{2450} = 22.223 + 1.186\varepsilon' - 0.545\varepsilon''$	208.957	0.000	0.972

频率下,对与虾仁加热温度和含水率有关的介电损耗因子进行非线性回归方程拟合,并建立数学模型,结果见表5。由表5可知,在2种频率下,介电损耗因子与加热温度、含水率的数学模型以二元二次方程表示,其中 R^2 均大于0.940,表明模型均能预测虾仁的介电损耗因子,且拟合效果良好。

2.5.3 含水率与介电常数、介电损耗因子的数学模型

以介电常数(ε')、介电损耗因子(ε'')为自变量,虾仁含水率(W)为因变量,分别在915 MHz和2450 MHz频率下,对与虾仁介电常数和介电损耗因子有关的含水率进行线性回归方程拟合,并建立数学模型,结果见表6。由表6可知,各模型的 R^2 值均大于0.970, P 值均小于0.001,表明模型具有显著性且拟合效果良好。

2.5.4 基于含水率、加热温度的罗氏沼虾虾仁介电特性预测

为了验证模型的准确性和精确性,按照相同实验步骤再次测定不同加热温度、含水率条件下虾仁的介电特性,并将所得数据代入回归方程中得出计算值,对比实测值与计算值,结果如图5所示。由图5a)和b)可知,虾仁的实际介电常数与计算所得介电常数的 R^2 均大于0.910,预测误差较小,表明加热温度、含水率与介电常数的数学模型可较好地预测虾仁的介电常数。由图5c)和d)可知,虾仁的实际介电损耗因子与计算所得介电损耗因子的 R^2 均大于0.900,预测误差较小,表明加热温

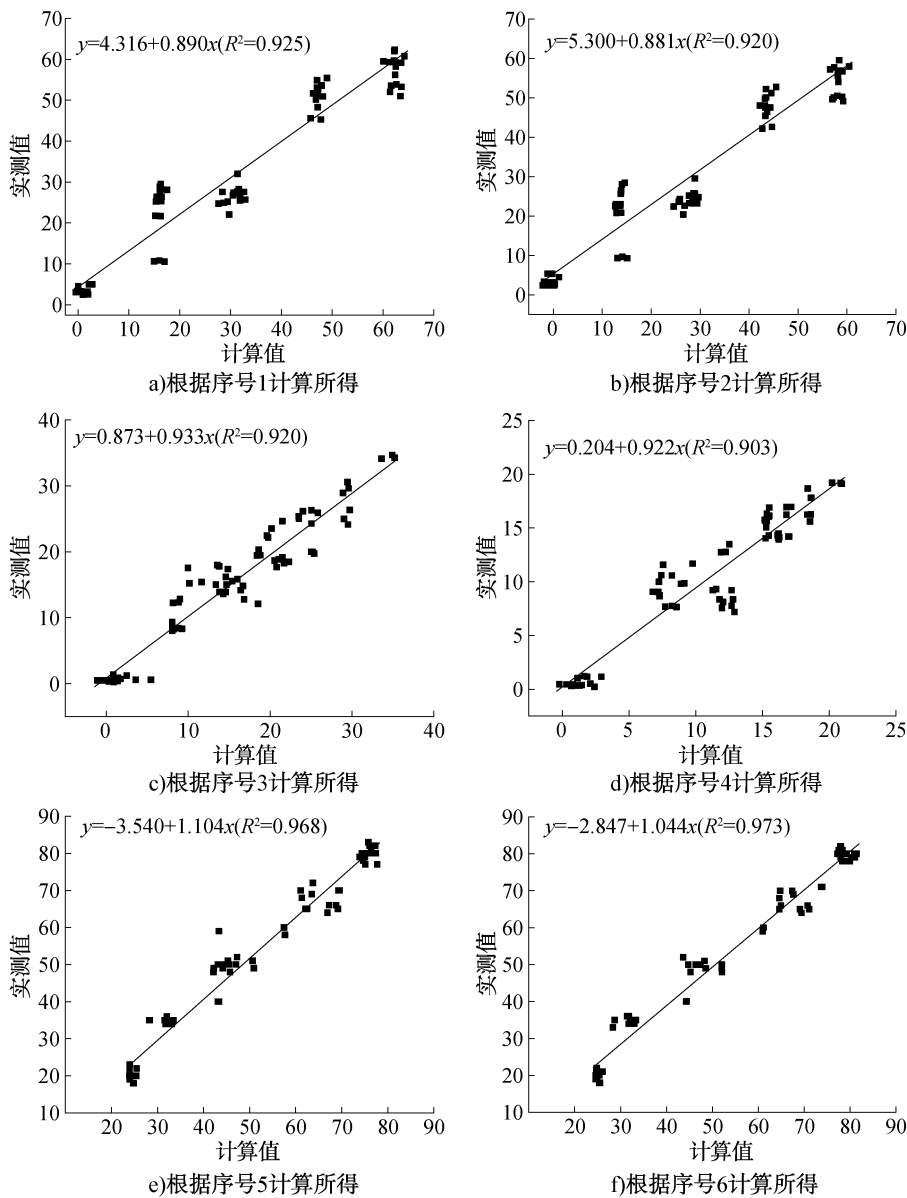


图 5 计算值与实测值的关系图

Fig. 5 Relationship between calculated value and measured value

度、含水率与介电损耗因子的数学模型可较好地预测虾仁的介电损耗因子。由图 5e) 和 f) 可知, 虾仁的实际含水率与计算所得含水率的 R^2 均大于 0. 960, 预测误差较小, 表明介电常数、介电损耗因子与含水率的数学模型可较好地预测虾仁的含水率。

2. 6 穿透深度分析

当微波作用于食品内部时, 电磁能衰减, 而穿透深度是衡量电场能否均匀加热样品的重要指标^[29]。罗氏沼虾虾仁的微波穿透深度见表 7。由表 7 可知, 加热温度、含水率和频率均能显著影响微波的穿透深度。微波的穿透深度均随上述三者的增加而减小; 低含水率虾仁的穿透深度受加热温度

的影响大于高含水率虾仁。例如, 在 2450 MHz 频率下, 当加热温度从 25 ℃ 升高至 65 ℃ 时, 含水率 20% 的虾仁的穿透深度从 7. 13 cm 降低至 3. 76 cm, 而含水率 80% 的虾仁的穿透深度从 0. 97 cm 降低至 0. 78 cm。本研究结果与宣晓婷等^[30] 在南美白对虾穿透深度随频率、加热温度和含水率变化的研究所得结果较一致。这可能是由于不同介质物料内部原子与电磁波的相互作用力不同, 样品的成分、大小和形状均会影响其介电特性, 进而影响其穿透深度^[31]。有报道^[32] 称, 食品的厚度不应超过其穿透深度的 2~3 倍。因此, 要保证虾仁内部加热均匀, 应注意虾仁的厚度适中。

表 7 罗氏沼虾虾仁的微波穿透深度
Table 7 Microwave penetration depth of *M. rosenbergii* meat m

频率/MHz	含水率/%	加热温度/℃				
		25	35	45	55	65
915	20	26. 14±9. 93 ^{ab}	29. 12±5. 45 ^a	19. 28±0. 70 ^{ab}	18. 00± 2. 18 ^b	16. 10 ±1. 53 ^b
	35	4. 17±0. 20 ^a	3. 39±0. 47 ^b	2. 78± 0. 01 ^{bc}	2. 90±0. 63 ^{bc}	2. 48±0. 14 ^c
	50	1. 70±0. 07 ^b	1. 79±0. 11 ^{ab}	1. 89±0. 11 ^a	1. 41±0. 03 ^c	1. 29±0. 13 ^c
	65	2. 23±0. 18 ^a	2. 29±0. 01 ^a	2. 26±0. 19 ^a	1. 80±0. 18 ^b	1. 41±0. 02 ^b
	80	2. 03±0. 11 ^a	1. 83±0. 01 ^b	2. 14±0. 08 ^a	1. 61±0. 08 ^b	1. 29±0. 02 ^b
2450	20	7. 13±2. 50 ^a	7. 84±1. 21 ^a	4. 61±0. 72 ^b	4. 26±0. 60 ^b	3. 76±0. 23 ^b
	35	1. 17±0. 33 ^a	1. 26±0. 33 ^a	1. 04±0. 09 ^a	1. 12±0. 09 ^a	1. 05±0. 27 ^a
	50	0. 79±0. 03 ^b	0. 78±0. 07 ^{ab}	0. 88±0. 07 ^a	0. 76±0. 04 ^b	0. 70±0. 07 ^b
	65	0. 98±0. 08 ^a	1. 10±0. 06 ^a	1. 12±0. 06 ^a	0. 94±0. 04 ^a	0. 81±0. 06 ^a
	80	0. 97±0. 01 ^b	1. 06±0. 02 ^a	1. 10±0. 05 ^a	0. 92±0. 02 ^b	0. 78±0. 02 ^c

注:同行不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

3 结论

本文研究了在频率 0 ~ 3000 MHz、加热温度 25 ~ 65 ℃ 下,含水率 20% ~ 80% 的罗氏沼虾虾仁的介电特性变化规律,得到如下结论:罗氏沼虾虾仁的介电常数和介电损耗因子均随着含水率的增加而增大,随着频率的增加而减小;在 45 ~ 65 ℃ 加热温度下,介电损耗因子随着加热温度的升高而增大;当 NaCl、蔗糖、海藻糖和麦芽糊精的质量分数分别为 5%、10%、15% 和 20% 时,介电常数最大,之后随着渗透剂溶质质量分数的增加而减小;穿透深度随着加热温度、含水率和频率的增加而减小。因此,在设计罗氏沼虾虾仁微波干燥实验时,可考虑控温或改变微波功率的干燥方法优化干燥过程。本研究结果可为调控罗氏沼虾虾仁微波干燥的均匀性及优化工业生产中微波干燥的方案提供参考。

参考文献:

[1] 应宇斌. 鲤鱼鳞水解物对罗氏沼虾抗冻保护作用及其活性成分分析研究[D]. 杭州:浙江大学,2022.

[2] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会编制. 中国渔业统计年鉴—2022[M]. 北京:中国农业出版社,2022.

[3] SHAHRIAR M F,JOARDDER M U H,KARIM A. Recent trends and future potential of microwave-assisted fish drying[J]. Drying Technology,2022,40(16) :3389-3401.

[4] KIPCAK A S, İSMAIL O. Microwave drying of fish, chicken and beef samples[J]. Journal of Food Science and Technology,2021,58(1) :281-291.

[5] ÖZTÜRK S,ŞAKIYAN Ö,ÖZLEM ALIFAKI Y. Dielectric properties and microwave and infrared-microwave combination drying characteristics of banana and kiwifruit [J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40 (3) :e12502.

[6] SUN W Z,JI H W,ZHANG D,et al. Evaluation of aroma characteristics of dried shrimp (*Litopenaeus vannamei*) prepared by five different procedures[J]. Foods,2022,11 (21) :3532.

[7] 董志俭,孙丽平,李冬梅,等. 不同干燥方法对南美白对虾品质的影响[J]. 食品工业科技,2017,38(5) :219-222,227.

[8] 张孙现. 鲍鱼微波真空干燥的品质特性及机理研究[D]. 福州:福建农林大学,2014.

[9] 王楠,侯旭杰. 新型加热技术在食品加工中的应用及其研究进展[J]. 食品研究与开发,2019,40(4) :209-215.

[10] JIANG N,LIU C Q,LI D J,et al. Dielectric properties of *Agaricus bisporus* slices relevant to drying with microwave energy [J]. International Journal of Food Properties, 2020,23(1) :354-367.

[11] AKANKSHA V, MANOJ T. Interaction of mustard husk with microwave radiation; A study on dielectric properties and its variation with frequency[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,2023,173:106090.

[12] MA X T,LUO G Y,LI Z F,et al. Microwave power control scheme for potatoes based on dielectric loss factor feedback [J]. Journal of Food Engineering,2021,288:110134.

[13] ZHOU X,LI R,LYNG J G,et al. Dielectric properties of kiwifruit associated with a combined radio frequency vacuum and osmotic drying [J]. Journal of Food Engineering,2018,239:72-82.

[14] 刘静,赵亚,石启龙. 渗透剂预处理对扇贝柱热泵干燥动力学及品质特性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2022,40(3) :145-156.

[15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安

国家标准 食品中水分的测定:GB 5009.3—2016 [S]. 北京:中国标准出版社,2017.

[16] FRABETTI A C C, GARNAULT T, CURTO H, et al. Dielectric properties of low moisture foods measured by open-ended coaxial probe and cavity perturbation technique[J]. *European Food Research and Technology*, 2023, 249(11):2861–2873.

[17] MAO Y X, HAO Y J, GUAN X Y, et al. Temperature and moisture dependent dielectric and thermal properties of walnut components associated with radio frequency and microwave pasteurization[J]. *Foods*, 2022, 11(7):919.

[18] LI S, LI F, TANG J M, et al. Influence of composition, temperature, and frequency on dielectric properties of selected saltwater and freshwater fish[J]. *International Journal of Food Properties*, 2019, 22(1):1920–1934.

[19] JIANG N, LAGNIKA C, LIU C Q, et al. Dielectric properties of thermosonically treated *Agaricus bisporus* slices during microwave vacuum drying and correlation with the water state[J]. *Drying Technology*, 2020, 38(4):448–459.

[20] LI L L, ZHANG M, YANG P Q. Suitability of LF-NMR to analysis water state and predict dielectric properties of Chinese yam during microwave vacuum drying[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 105:257–264.

[21] BAI S Q, LIU L, YU H B, et al. Thermal and dielectric properties of wolfberries as affected by moisture content and temperature associated with radio frequency and microwave dehydrations[J]. *Foods*, 2022, 11(23):3796.

[22] 顾国华, 宋春芳, 崔政伟. 基于温度和水分的紫薯热物理特性与介电特性的分析[J]. *浙江农业学报*, 2015, 27(1):97–103.

[23] HE J L, LI F, JIAO Y. Prediction of salmon(*Salmo salar*) quality during refrigeration storage based on dielectric properties[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2021, 14(3):262–269.

[24] 李双, 李锋, 焦阳. 不同添加物对鲢鱼鱼糜及鱼糜制品介电特性及水分迁移率的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(15):54–63.

[25] 高亚平, 安峰, 赵东海, 等. 基于介电特性的青萝卜干燥品质预测模型[J]. *天津科技大学学报*, 2019, 34(4):63–71.

[26] JIANG J H, ZHANG M, DEVAHASTIN S, et al. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatments on drying and quality characteristics of pulsed fluidized bed microwave freeze-dried strawberries[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 145:111300.

[27] CHEN Y X, HE J L, LI F, et al. Model food development for tuna (*Thunnus Obesus*) in radio frequency and microwave tempering using grass carp mince[J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 292:110267.

[28] YANG L X, QIU W Q, YIN Y L, et al. Dielectric properties of Antarctic krill(*Euphausia superba*) and white shrimp(*Penaeus vannamei*) during microwave thawing and heating[J]. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 2017, 51(1):3–30.

[29] XU Y Y, XIANG P, QIU W Q, et al. Dielectric properties of the Maillard reaction solution formed between enzymatic hydrolysate of Antarctic krill and glucose under microwave heating[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 161:113355.

[30] 宣晓婷, 曹月阳, 朱麟, 等. 南美白对虾射频联合热风干燥工艺优化及对其品质影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(22):150–157.

[31] OKE A B, BAIK O D. Role of moisture content, temperature, and frequency on dielectric behaviour of red lentil and Kabuli chickpea in relation to radio frequency heating[J]. *Applied Food Research*, 2022, 2(1):100046.

[32] ABEA A, GOU P, GUARDIA M D, et al. Combined effect of temperature and oil and salt contents on the variation of dielectric properties of a tomato-based homogenate[J]. *Foods*, 2021, 10(12):3124.

Study on the variation of dielectric properties of *Macrobrachium rosenbergii* meat

CHENG Xiaoning¹, ZHANG Zhuo¹, ZHAO Ya¹, SHI Qilong¹, GAO Ruichang², JU Xiangdong³

1. College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. College of Food and Biotechnology Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

3. Jiangsu Qiwu aquatic products development Co., Ltd., Gaoyou 225600, China

Abstract: The variation of dielectric properties of *Macrobrachium rosenbergii* meat (moisture content 20%~80%) were investigated at different frequencies (0~3000 MHz) and heating temperatures (25~65℃), and the effects of the mass fraction of different osmotic agent solutes (NaCl, sucrose, trehalose and maltodextrin) on the dielectric properties of *M. rosenbergii* meat were also investigated. The results indicated that within the moisture content range of 20%~80%, both the dielectric constant and dielectric loss factor of *M. rosenbergii* meat increased with the

increasing moisture content. The dielectric loss factor of *M. rosenbergii* meat increased with rising temperature under a range from 45 °C to 65 °C. In a frequency range of 0~3000 MHz, both the dielectric constant and dielectric loss factor of *M. rosenbergii* meat decreased as the frequency increased. When the mass fraction of sodium chloride, sucrose, trehalose and maltodextrin was 5%, 10%, 15% and 20%, respectively, the dielectric constant of *M. rosenbergii* meat reached its maximum value. Additionally, the penetration depth of *M. rosenbergii* meat decreased with increasing temperature, moisture content and frequency. Therefore, the heating temperature, moisture content, frequency, and osmotic agent significantly affected the dielectric properties of the *M. rosenbergii* meat.

Key words: *Macrobrachium rosenbergii* meat; dielectric property; moisture content; heating temperature; frequency

[责任编辑:杨晓娟]