

微波频率、含水率与无机盐对小麦胚芽介电特性的影响

吴其飞 王力坤 陈中伟 徐 斌
(江苏大学食品与生物工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为探明微波稳定麦胚的机制,以小麦胚芽为研究对象,研究了不同测量频率、含水率、脂肪含量及添加不同无机盐条件下麦胚粉体的介电特性(介电常数 ϵ' 和介电损耗因数 ϵ'')。实验结果表明,在 2 个常用微波频率下,小麦胚芽 ϵ' 在频率为 915 MHz 时略大于 2 450 MHz 时,但 ϵ'' 在 2 450 MHz 时明显大于 915 MHz 时;小麦胚芽介电特性随含水率的增加而增大,当其含水率从 4% 增至 16% 时,其 ϵ' 和 ϵ'' 分别从 2.61 和 0.02 升高至 4.32 和 0.8;不同脂肪含量的小麦胚芽的介电特性相差较小,尤其是 ϵ'' ;对比添加 5 种无机盐后小麦胚芽介电特性发现,NaCl 对其 ϵ' 和 ϵ'' 有明显增加作用,尤其是当 NaCl 的质量分数为 1% 时,效果最明显。

关键词: 小麦胚芽; 介电特性; 无机盐; 微波频率; 含水率

中图分类号: TS210.9; S125 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)05-0225-06

Effect of Microwave Frequency , Water and Inorganic Salts on Dielectric Properties of Wheat Germ

Wu Qifei Wang Likun Chen Zhongwei Xu Bin
(School of Food and Biological Engineering , Jiangsu University , Zhenjiang 212013 , China)

Abstract: Microwave can stabilize the quality of wheat germ rapidly and uniformly with the advantages of losing nutrition minimally. To investigate the mechanism of microwave on the stability of wheat germ , the dielectric properties (ϵ' and ϵ'') of wheat germ were studied under different frequencies , water contents , fat contents and salts , including sodium , potassium , magnesium , calcium and iron ion. The results showed that , when the frequency was 915 MHz , ϵ' is slightly higher than that at 2 450 MHz , while ϵ'' was less than that at 2 450 MHz significantly. When water content is 16% , with frequency changes from 915 MHz to 2 450 MHz , ϵ' was decreased from 4.91 to 4.32 , and ϵ'' was increased from 0.33 to 0.80. As water content of wheat germ increasing , the dielectric properties of wheat germ were increased significantly. When the water content was increased from 4% to 16% , the ϵ' was increased from 2.61 to 4.32 , and ϵ'' increased from 0.02 and 0.8 , respectively. Fat content had little effect on the dielectric properties of wheat germ , particularly has no effect on ϵ'' . Among the five salts , adding NaCl can increase ϵ' and ϵ'' of wheat germ. Especially when NaCl concentration was 1% , ϵ' was increased slightly while ϵ'' was increased apparently from 0.8 to 1.3 , which can enhance enzyme inactivation effect of microwave.

Key words: wheat germ; dielectric properties; inorganic salts; microwave frequency; water content

引言

小麦胚芽富含不饱和脂肪酸和蛋白质,被誉为

“天赐营养源”,但由于其富含脂肪酶,在加工储藏过程中极易酸败变质,因此需要稳定化处理。常用的稳定化处理方法包括干法加热和湿法加热,其中,

收稿日期: 2015-11-13 修回日期: 2015-12-30
基金项目: 国家自然科学基金项目(31371877)、中国博士后基金特别资助项目(2013T60510)、江苏省博士后基金项目(1202070C)和江苏大学高级人才基金项目(12JDG055)
作者简介: 吴其飞(1972—),男,副研究员,主要从事农产品加工及贮藏研究,E-mail: 272877123@qq.com
通信作者: 徐斌(1969—),男,教授,主要从事粮油精深加工技术与装备研究,E-mail: food_oil@126.com

微波处理小麦胚芽具有快速、均匀、营养成分破坏少等优点,是一种极具应用前景的麦胚稳定化方法^[1],但其对小麦胚芽的稳定化作用机制仍需要深入研究。

微波对麦胚的稳定化效果主要基于能量转化产热效率,由物料的介电特性决定^[2]。介电特性是农产品物料的一个重要物理特性^[3],包括介电常数 ϵ' 和介电损耗因子 ϵ'' ,分别表示物料储存和转化能量的能力。物料的介电特性受频率、温度以及食品组成等因素的影响,其中,物料的含水率、无机盐等对其介电特性有较大影响。研究表明,无机盐可增加食品中离子浓度,提高物料的 ϵ'' ^[4]。UAN等^[5]、ZHANG等^[6]和AHMED等^[7]分别研究了钠盐对土豆泥、猪肉制品和黄油介电特性的影响,结果表明,钠盐可显著增加以上物料的 ϵ'' ,而对 ϵ' 影响不大。然而,上述研究对象的含水率较高,关于无机盐对低含水率物料介电特性影响的研究鲜见报道。

本文以麦胚为研究对象,研究不同微波频率、物料含水率和脂肪含量条件下麦胚的介电特性,并着重研究添加不同种类和含量的无机盐对麦胚介电特性的增效作用,从而指导麦胚的微波稳定化工艺。

1 材料与设备

1.1 材料与试剂

小麦胚芽,新疆天山面粉集团生产。
NaCl、KCl、MgCl₂、无水CaCl₂均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司;EDTA-FeNa(分析纯),Adamas试剂有限公司;无水乙醇(分析纯),国药化学试剂有限公司。

1.2 实验设备

E5062A型网络分析仪和85070E型同轴探头,美国安捷伦公司;HB43-S型卤素水分快速测定仪,瑞士梅特勒-托利多公司;高速多功能粉碎机,浙江湖北拜杰公司;HH-S型数显恒温水浴锅,江苏省金坛市医疗仪器厂。

2 实验方法

2.1 样品制备

本研究采用同轴探头法测定麦胚的介电特性。测定前,使用粉碎机将麦胚粉碎,全部过60目筛,制成颗粒大小均匀的固体粉末,以准确获取麦胚粉体的介电特性^[8]。

2.1.1 不同含水率样品的制备

麦胚的含水率一般为12%;安全含水率为小于4%^[9]。因此,选择4%作为含水率下限,以高于一般含水率的16%作为含水率上限。调整麦胚粉体

的含水率分别至4%、7%、10%、13%、16%。具体步骤为,将原料麦胚置于60℃的鼓风干燥箱中干燥至所需含水率后,于室温下密封保存^[10];向原料麦胚中均匀喷洒适量去离子水,以制备含水率高于原料麦胚的样品,然后置于密封袋中,在4℃冰箱中保存72 h。同时,每天搅动3~4次,以使水分分布均匀,并达到平衡^[11]。在介电特性测试前24 h,将样品取出,使其恢复室温^[10]。

2.1.2 脱脂样品的制备

参考GB/T 14772—2008《食品中粗脂肪的测定》对麦胚脱脂得到脱脂麦胚。

2.1.3 不同无机盐含量样品的制备

无机盐添加方式参考含水率调节方法,将不同种类及含量的无机盐溶液分别均匀喷洒于含水率为11.74%的50 g粉状麦胚上,以保证无机盐离子均匀分布于麦胚内部。5种不同浓度的无机盐离子(Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、Fe²⁺)溶液的具体添加量参照表1^[12]。

表 1 麦胚中不同无机盐离子含量
Tab. 1 Different salt contents in wheat germ

无机盐 种类	麦胚 干质 量/g	理想无机盐 质量比(正常 湿重)/(g·g ⁻¹)	盐添 加量/ g	盐溶液 添加量/ mL	最终 含水 率/%
NaCl	44.13	0.005 0	0.250		
		0.007 5	0.375		
		0.001 0	0.500	2.35	16.59
		0.012 5	0.625		
		0.015 0	0.750		
KCl	44.13	0.002 6	0.230		
		0.004 5	0.225	2.35	16.59
		0.006 4	0.320		
CaCl ₂	44.13	0.002 5	0.125		
		0.005 3	0.265	2.35	16.59
		0.008 0	0.400		
MgCl ₂	44.13	0.003 6	0.180		
		0.007 5	0.375	2.35	16.59
		0.011 5	0.553		
EDTA-FeNa	44.13	0.000 093	0.005		
		0.000 130	0.007	2.35	16.59
		0.000 170	0.009		

(1)NaCl添加量:AACC方法10-10.02和10-13.03(2012)中表明面粉中NaCl的最佳添加量是1.5%(质量分数)。由于麦胚的含水率一般低于面粉,向其添加1.5%的NaCl符合安全要求。HEIDOLPH等^[12]研究表明焙烤食品中NaCl的添加量一般在0.5%~2%。由于目前提倡少盐膳食的理念^[14],因此本实验中选择NaCl的添加量梯度为0.5%、0.75%、1%、1.25%、1.5%,其中Na⁺质量分

数分别为 0.19%、0.29%、0.39%、0.49%、0.59%。

(2) KCl 添加量: GB 2760—2014《食品添加剂使用标准》中对 KCl 添加量无明确要求,可按生产需要适量使用;如果将其作为盐及代盐制品最大限量是 35%。BRASCH 等^[15]研究结果表明,若用 KCl 替代部分 NaCl,当 KCl 添加量达到 30%时,面包品质未发生明显改变(参考 AACC 方法 10-10.02)。因此,本实验中 KCl 的添加量为 0.26%、0.45%、0.64%,其中 K⁺质量分数分别为 0.14%、0.24%、0.34%。

(3) CaCl₂添加量: GB 2760—2014《食品添加剂使用标准》中规定 CaCl₂在豆类制品中可按生产需要适量使用;CaSO₄在面包、蛋糕、饼干等中的最大添加量是 10 g/kg(以 Ca²⁺计为 0.29%)。因此本实验中 CaCl₂的添加量为 0.25%、0.53%、0.80%,其中 Ca²⁺质量分数分别为 0.09%、0.19%、0.29%。

(4) MgCl₂添加量: GB 2760—2014《食品添加剂使用标准》中规定 MgCl₂在豆类制品中可按生产需要适量使用。本实验中为方便 Ca²⁺和 Mg²⁺作用效果的比较,将其设置为相同含量。因此本实验中 MgCl₂的添加量为 0.36%、0.75%、1.15%。其中 Mg²⁺质量分数分别为 0.09%、0.19%、0.29%。

(5) EDTA-FeNa 添加量: GB 14880—2012《食品营养强化剂使用标准》中规定小麦粉及其制品中 Fe³⁺的添加量为 14~26 mg/kg;美国联邦标准(21 CFR 137.165)中建议 Fe³⁺添加量为 44 mg/kg;世界卫生组织(WHO)建议 Fe³⁺的添加量为 15~

40 mg/kg;美国食品药品监督管理局(FDA)规定 EDTA-FeNa 的最大添加量为 0.03%,鉴于第 1 个标准中 EDTA-FeNa 的添加量在上述标准中最低,因此参照第 1 个标准,设定 EDTA-FeNa 的添加量分别为 0.009 3%、0.013%和 0.017%,其中 Fe³⁺的添加量为 14、20、26 mg/kg。

2.2 样品含水率的测定

采用 HB43-S 型卤素水分快速测定仪测定样品含水率。升温程序和温度参照方法 Flour and Wholemeal, Power, 1560.03(全麦粉,120℃)。

2.3 样品介电特性的测定

利用 E5062A 型矢量网络分析仪,采用同轴探测试法(85070E 型末端开路同轴探头)测定,具体操作方法如下:开机预热 1 h 后,将同轴探头依次置于空气中、短路件和去离子水中进行校准。以 5 MHz 为间隔,研究 600~2 700 MHz 频率范围内麦胚的介电特性,特别是 915 MHz 和 2 450 MHz 频率下麦胚的 ϵ' 和 ϵ'' ^[16],并分析介电参数随频率的变化规律。

3 结果与讨论

3.1 不同频率下麦胚的介电特性

图 1 显示了不同含水率麦胚的介电特性随频率变化的趋势。如图所示,在 600~2 700 MHz 范围内随着频率的增加, ϵ' 没有明显的上升或下降趋势;而 ϵ'' 增加趋势明显,这一规律可以从图 2 中更加直观地观察出来。

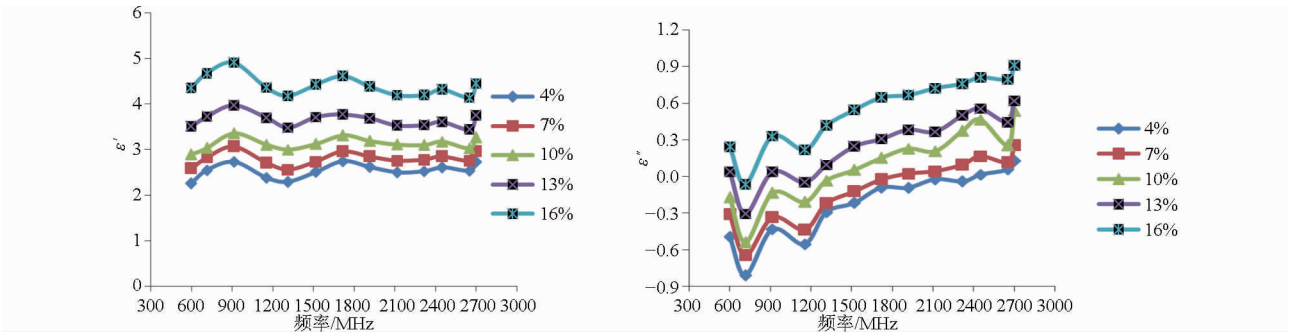


图 1 不同含水率下麦胚介电特性随频率的变化
Fig.1 Dielectric properties of wheat germ with different frequencies under different water contents

如图 2 所示,不同含水率下, ϵ' 在 915 MHz 时略大于 2 450 MHz 时,且这一现象随麦胚含水率的增加而越发明显,例如,含水率为 4%时, ϵ' 在 2 个频率下分别为 2.73 和 2.61;含水率为 16%时, ϵ' 分别为 4.91 和 4.32。相反,频率为 915 MHz 时的 ϵ'' 明显小于 2 450 MHz 时,例如,在含水率为 4%时, ϵ'' 分别为 -0.43 和 0.02;在含水率为 16%时, ϵ'' 分别为 0.33 和 0.80。GUO 等^[8]曾研究过不同含水率鹰嘴豆粉的介电特性。其结果表明,在 10~1 800 MHz 频率范围内,含水率为 7.9%的鹰嘴豆粉的介电特性随

频率增加而增加,与本文实验结果相似。这可能是因为物料介电特性主要受到离子传导和偶极子旋转的影响,对于某一物料而言,在频率为 915 MHz 时的离子传导损失比 2 450 MHz 时要高得多,而偶极子旋转损失则低得多,麦胚介电特性是两者的共同作用的结果。同时, ϵ'' 还受到含水率变化范围的影响,在低含水率范围内, ϵ'' 随频率的提高而增加。因此,随着频率的增加,在实验测定含水率范围内,麦胚 ϵ' 可以保持增加或不变, ϵ'' 呈增加趋势^[17]。

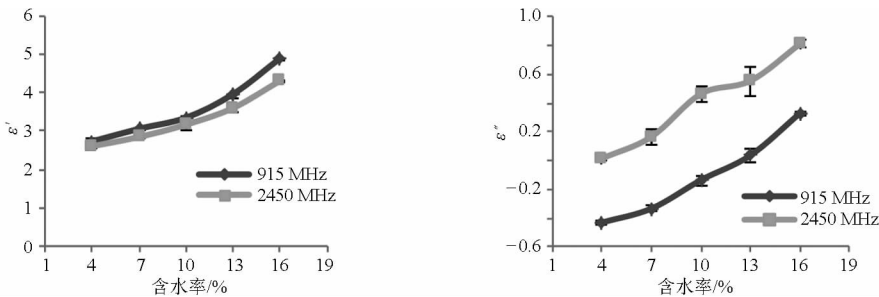


图 2 不同频率下麦胚介电特性随含水率的变化

Fig. 2 Dielectric properties of wheat germ with different water contents under different frequencies

3.2 不同含水率下麦胚的介电特性

含水率对麦胚介电特性的影响如图 1 所示,麦胚介电特性随含水率的增加而增大,但不同含水率的麦胚的介电特性随频率变化趋势相同。这表明含水率的增加并不影响麦胚介电特性随频率的变化趋势,而是通过增强麦胚中偶极子旋转作用来增加麦胚介电特性。

靳志强等^[10]曾研究过玉米粉的介电特性,其结果表明,束缚水对极化的响应比自由水小得多。因此,当物料含水率大于某一值时,自由水对介电特性的影响起主要作用。尽管麦胚是低含水率的样品,自由水含量相对较少,但介电特性随含水率增加而显著增加。从图 2 中可以具体看出,在 2 450 MHz 下,当含水率从 4% 增加到 16% 时, ϵ' 和 ϵ'' 分别从 2.61 和 0.02 增加到 4.32 和 0.8。

虽然含水率的增加可以增强麦胚的介电特性,进而增强微波的作用效果,但是,在微波作用过程

中,物料的含水率呈逐渐减少的趋势,介电特性随之变小。因此,有必要进一步研究脂肪、无机盐含量等对麦胚介电特性的影响规律。

3.3 不同脂肪含量下麦胚的介电特性

图 3 显示了含水率为 12% 的脱脂麦胚和未脱脂麦胚的介电特性。如图 3 所示,脱脂后麦胚 ϵ' 呈略微增加趋势,而 ϵ'' 基本没有变化。由于脂肪本身属于非极性分子,其与极性的电磁场相互作用能力弱。因此,脂肪的增加会降低介电特性。

在本研究中,麦胚油属于长链脂肪酸酯类,在振荡电磁场中流动性差^[18],因此,脂肪含量的增加会导致麦胚介电特性减小,进而影响微波的作用效果。但从脂肪比热容低的角度考虑,脂肪的存在仍然会对麦胚微波热效应产生积极影响。总体而言,脂肪对麦胚的微波作用存在双重因素的影响,而可能在含水率的显著效果的掩盖下,整体作用效果不明显。

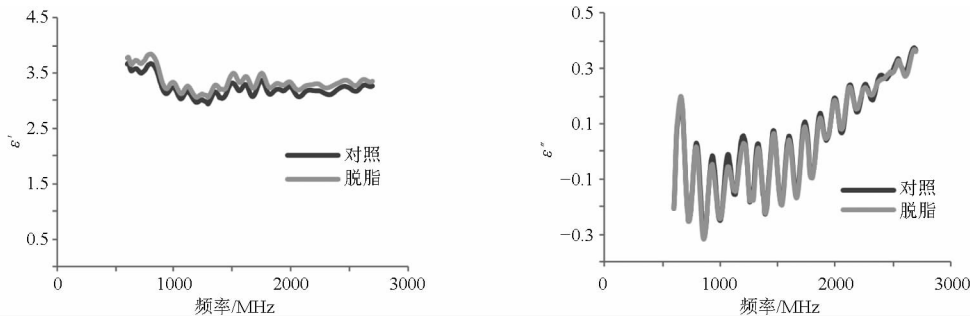


图 3 不同脂肪含量下麦胚介电特性随频率的变化

Fig. 3 Dielectric properties of wheat germ with different frequencies under different fat contents

3.4 添加不同种类及含量无机盐对麦胚的介电特性的影响

图 4、5、6 分别显示了在 915 MHz 和 2 450 MHz 频率下,添加 NaCl、KCl、MgCl₂ 和 CaCl₂ 后麦胚介电特性的变化趋势。从图 4a 中不难看出,在 NaCl 的影响下,麦胚的 ϵ' 虽有小幅波动,但大体呈上升趋势;图 5a、6a 显示了 KCl、MgCl₂ 和 CaCl₂ 对介电特性的影响。如图所示,在 3 种离子添加量较低时, ϵ' 随着盐添加量的增加而增加,但随着离子添加量进一步增加, ϵ' 开始减小,最终等于或小于空白对照组。

由于 EDTA - FeNa 的允许添加量少,本实验中麦胚介电特性几乎没有变化,因此关于铁离子添加对麦胚介电特性的影响不做具体分析。

ZHANG 等^[6]研究了添加量为 0.4% ~ 2.4% 的食盐对猪肉介电特性的影响,表明在 915、2 450 MHz 时,食盐的添加可以降低猪肉的 ϵ' 。GUAN 等^[5]以含水率为 85.9% 的土豆泥为研究对象,研究了 1 ~ 1 800 MHz 频率范围内,无机盐添加量对研究对象介电特性的影响。结果表明,无机盐的添加对 ϵ' 没有明显影响。本实验结果显示无机盐离子的添加对

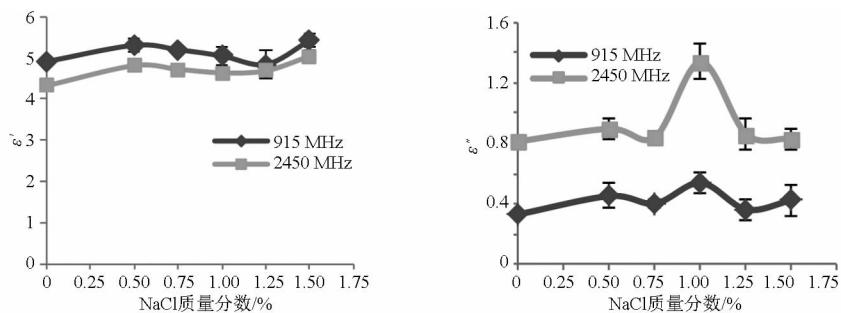


图 4 不同频率下含水率为 16% 的麦胚介电特性随 NaCl 含量的变化

Fig. 4 Dielectric properties of wheat germ of 16% water content with NaCl content under different frequencies

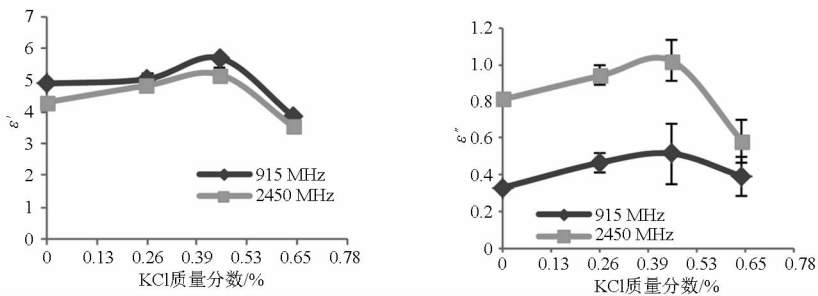


图 5 不同频率下含水率为 16% 的麦胚介电特性随 KCl 含量的变化

Fig. 5 Dielectric properties of wheat germ of 16% water content with KCl content under different frequencies

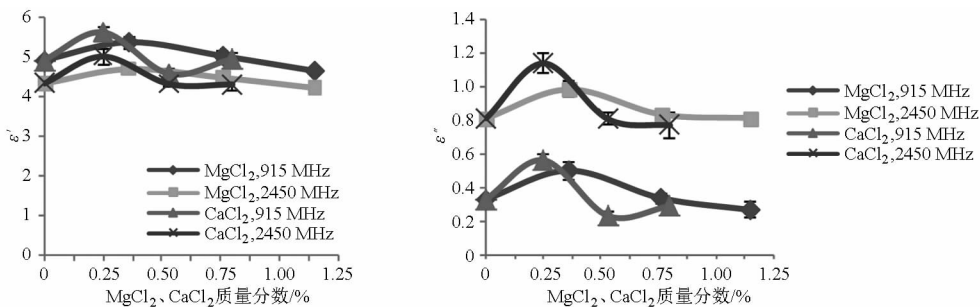


图 6 不同 MgCl_2 和 CaCl_2 含量下含水率为 16% 的麦胚介电特性随频率的变化

Fig. 6 Dielectric properties of wheat germ of 16% water content with MgCl_2 and CaCl_2 content under different frequencies

麦胚 ϵ' 的影响较小,且变化趋势不一,可能是由于麦胚含水率低,离子传导作用增强效果不明显导致的。

对于 ϵ'' ,在含水率一致的情况下,无机盐的离子传导作用同样是引起其变化的主要因素。如图 4b 所示,当 NaCl 添加量为 0.5%、0.75%、1.25% 和 1.5% 时, ϵ'' 较空白对照组略有增加,但并不明显。当 NaCl 添加量为 1% 时, ϵ'' 从 0.8 增加到 1.3,呈显著增加;由图 5b 和 6b 可以看出,在 KCl、 MgCl_2 和 CaCl_2 的影响下, ϵ'' 在离子添加量较低时,会有一定程度的增加,但随添加量的增加, ϵ'' 开始减小,最终接近空白对照组。

水、盐或其他组分对物料介电特性的影响主要取决于它们的结合方式或对各自运动的限制,例如,无机盐离子可以通过与自由水结合而降低介电常数;而通过增加带电离子的传导作用而增强介电损耗。因此,本实验中在较高浓度时,KCl、 MgCl_2 和 CaCl_2 可能会因与水分子或其他组分结合而限制自由水分子或离子的传导作用,使无机盐的增强效果

不明显。为了探究离子的添加是否会对麦胚中自由水造成影响,研究了无机盐对麦胚水分活度的影响,结果表明添加无机盐对麦胚自由水的影响不明显,这说明无机盐离子可能是与麦胚中束缚水或其他组分结合,进而影响了离子传导作用。由于食品中有机组分相对于水溶性离子溶液或水是惰性电介质,能量可以完全透过^[19]。如果离子与食品中蛋白质等有机组分结合而限制其流动性,则会与在较低离子浓度时, ϵ' 和 ϵ'' 的增加的实际情况相悖,并且对于低含水率的食物,束缚水在 20 ~ 30 000 MHz 范围内介电加热中起主要作用^[20]。因此,当离子浓度增加到一定范围后,可自由移动的离子很可能与食品中束缚水结合而影响物料的介电特性。

鉴于 NaCl 对介电特性影响的特殊性,进一步研究了含水率为 4% 的麦胚的介电特性。如图 7 所示,在 4% 和 16% 含水率下,麦胚 ϵ' 的变化规律有一定的相似性; ϵ'' 的变化有一定的差异,但在 1.0% NaCl 含量下, ϵ'' 仍具有较高值。这说明相对于其他

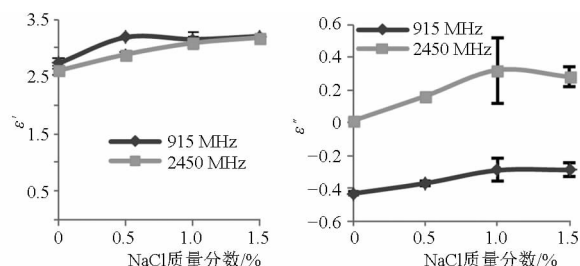


图7 不同频率下含水率为4%的麦胚介电特性随NaCl含量的变化

Fig.7 Dielectric properties of wheat germ of 4% water content with NaCl content under different frequency

无机盐离子而言,NaCl对麦胚介电特性的影响有一定的特殊性,且在其质量分数为1.0%时,对微波作用效果的增强作用比较明显。如在2450 MHz下, ε' 和 ε'' 分别由2.61和0.02增加到3.09和0.32,理论上表明微波能的贮存和转化能力均得到提高。虽然麦胚 ε' 在1%质量分数时与相邻质量分数相比差

异不大,但综合考虑介电特性和少盐膳食的理念,1%质量分数的NaCl添加量是比较理想的添加量。

4 结束语

综上所述,在2个常用频率下,麦胚的 ε' 区别较小,但 ε'' 区别明显,麦胚在微波频率为2450 MHz条件下的热转化能力优于915 MHz时;在4%~16%范围内,增加麦胚含水率可以明显增大麦胚的介电特性,进而一定程度上提高微波对麦胚的稳定化效果;脂肪含量对麦胚介电特性的影响小;添加无机盐后麦胚的介电特性结果表明,添加质量分数为1%的NaCl可以明显增加麦胚的 ε' 和 ε'' ,理论上可以增强微波作用效果,有助于酶的钝化,实际效果有待进行进一步研究。本研究的结果可在理论上指导麦胚等低水分物料的微波稳定化过程,为全麦粉及麦胚的深加工提供技术支撑。

参 考 文 献

- DE VASCONCELOS M, BENNETT R, CASTRO C, et al. Study of composition, stabilization and processing of wheat germ and maize industrial by-products[J]. *Industrial Crops and Products*, 2013, 42:292-298.
- PIYASENA P, DUSSAULT C, KOUTCHMA T, et al. Radio frequency heating of foods: principles, applications and related properties—a review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2003, 43(6): 587-606.
- SACILIK K, COLAK A. Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz [J]. *Powder Technology*, 2010, 203(2): 365-370.
- SOSA-MORALES M E, VALERIO-JUNCO L, LÓPEZ-MALO A, et al. Dielectric properties of foods: reported data in the 21st century and their potential applications [J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2010, 43(8): 1169-1179.
- UAN D G, CHENG M, WANG Y, et al. Dielectric properties of mashed potatoes relevant to microwave and radio-frequency pasteurization and sterilization processes [J]. *Journal of Food Science*, 2004, 69(1): 30-37.
- ZHANG L, LYNG J G, BRUNTON N P. The effect of fat, water and salt on the thermal and dielectric properties of meat batter and its temperature following microwave or radio frequency heating [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 80(1): 142-151.
- AHMED J, RAMASWAMY H S, RAGHAVAN V G. Dielectric properties of butter in the MW frequency range as affected by salt and temperature [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 82(3): 351-358.
- GUO W, TIWARI G, TANG J, et al. Frequency, moisture and temperature-dependent dielectric properties of chickpea flour [J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 101(2): 217-224.
- 王俊国, 杨玉民. 粮油副产品加工技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 63.
- 靳志强, 王顺喜, 韩培. 频率、温度和含水率对玉米介电性能的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2011, 16(4): 141-147.
- 郭文川, 王婧, 刘驰. 基于介电特性的薏米含水率检测方法[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(3): 113-117.
Guo Wenchuan, Wang Jing, Liu Chi. Predicating moisture content of pearl barley based on dielectric properties[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(3): 113-117. (in Chinese)
- DOBLADO-MALDONADO A F, ARNDT E A, ROSE D J. Effect of salt solutions applied during wheat conditioning on lipase activity and lipid stability of whole wheat flour [J]. *Food Chemistry*, 2013, 140(1): 204-209.
- HEIDOLPH B B, RAY D K, ROLLER S, et al. Looking for my lost shaker of saltreplacer: flavor, function, future [J]. *Cereal Foods World*, 2011, 56(1): 1-5.
- SERVICES U D o H H, U D O. Agriculture, Dietary guidelines for Americans [S]. 2010.
- BRASCHI A, GILL L, NAISMITH D J. Partial substitution of sodium with potassium in white bread: feasibility and bioavailability [J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 2009, 60(6): 507-521.
- TANAKA F, MALLIKARJUNAN P, HUNG Y C. Dielectric properties of shrimp related to microwave frequencies: from frozen to cooked stages [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 1999, 22(6): 455-468.
- 应火冬. 谷物介电性质及其在含水率测量中的应用[J]. *农业工程学报*, 1992, 8(3): 113-119.
- CHA-UM W, RATTANADECHO P, PAKDEE W. Experimental and numerical analysis of microwave heating of water and oil using a rectangular wave guide: influence of sample sizes, positions, and microwave power [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2011, 4(4): 544-558.
- MUDGETT R E. Electrical properties of foods [M]//RAO M A, RIZVI S S H. Engineering properties of foods. New York: Marcel Dekker Inc., 1986: 329-390.
- WANG Y, WIG T D, TANG J, et al. Dielectric properties of foods relevant to RF and microwave pasteurization and sterilization [J]. *Journal of Food Engineering*, 2003, 57(3): 257-268.