

# 2450MHz 频率下含盐凝胶琼脂的介电特性

程裕东

酒井升 半泽保

(上海水产大学食品学院, 200090)

(东京水产大学食品工学研究室, 东京 108-8477)

**摘要** 本文通过对水分含量99%的含盐琼脂(盐浓度:0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,1,1.5,2)的介电特性值测定,研究了在10~75℃范围中盐浓度对高水分凝胶琼脂介电特性所产生的影响,并进一步讨论了食品微波加热中,采用含盐琼脂在介电性质上对真实食品进行模拟的可能性,扩大了液晶感温法进行食品内温度分布研究的适用范围。

**关键词** 微波加热,琼脂,介电常数,介电损失率,穿透深度

**中图分类号** TS205.9

食品微波加热时,由于食品的介电特性,食品或容器的形状大小以及加热腔内电场强度分布等造成食品内的不均匀加热。介电特性加热形态即温度分布起着极为显著的作用。温度分布研究中,可视化法[酒井升等 1996]直观方便,其中液晶感温法[酒井升等 1996]即运用高水分含量的琼脂作为样品,将液晶感温片置于测温部,感温片颜色随温度的不同而发生变化。从各部位的颜色来定性地判断温度分布情况,若进一步将颜色图像通过定性化处理即可得定量温度分布曲线。Roebuck 和 Goldblith [1975]在1GHz 以及3GHz 频率下对介电特性值与水分含量及离子强度的关系进行了研究,得出高水分含量的凝胶琼脂的介电特性和水非常接近,离子浓度对介电特性会产生影响,琼脂中盐浓度的不同可改变琼脂的介电特性。指出含盐琼脂可在介电特性上模拟其他真实食品的设想。高水分凝胶琼脂具有良好的透明度,使用简单,是理想的液晶显色样品材料,可以三维地确认样品内部过热点(Hot-Spot)和过热线(Hot-Line)的分布特征[Decareau 1985]。但是,目前为止,对于高水分含盐琼脂的介电特性方面的进一步研究尚无报导。本研究以不同盐浓度凝固琼脂(水分含量99%)为实验样品,在不同盐浓度和温度下,测定琼脂的介电常数和介电损失率,对它们间的相互关系进行考察。

## 1 材料与方方法

本研究采用 Hewlett-Packard 介电常数测定仪(HP 85070B)和 HP 8510B Network Analyzer 进行介电常数和介电损失率的测定。该装置可在 200MHz~13.5GHz 的频率范围内连续测定。此外,该装置为探针测定法,对凝固形样品可将直径19mm 的圆柱型探针的先端部与样品表面保持良好的接触进行测定。将测试样品含盐浓度分别为0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,1,1.5,2%的琼脂溶液(含水量99%,琼脂粉末由日本国产化学工业株式会社制)放入 200ml 烧杯中,

在室温下待其凝固。为了防止样品中水分蒸发,将烧杯上口用塑料膜密封,在设定温度的小型环境实验器(タバイエスベック制 SH-240)中恒温。测定之前用蒸馏水对介电测定探针进行校正。整个测定过程,采用铜-镍热电偶测温仪对样品的温度进行监测,其精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

## 2 结果

10~75 $^\circ\text{C}$ 范围内所测介电常数和介电损失率如图1和图2所示。图1可见介电常数值随温度的上升而减小,且随盐浓度的增加而减小。由于在含盐凝胶琼脂中存在着离子和极性水分子,它们在微波电场下会产生相互作用,妨碍极性水分子的运动,从而导致介电损失率随盐浓度的增加,呈增大趋势,这可以认为离子在电场作用下,产生巨大的电流损失所致(见图2)。

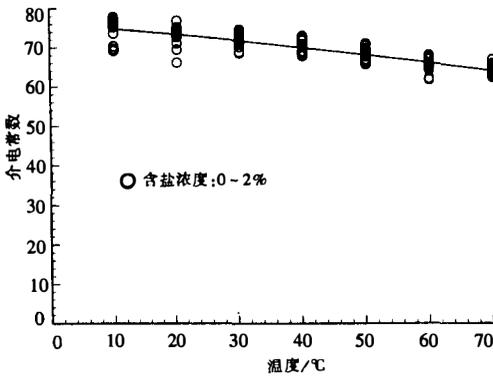


图1 不同温度下各含盐琼脂的介电常数

Fig. 1 Dielectric constant of agar gel with various NaCl content at different temperature

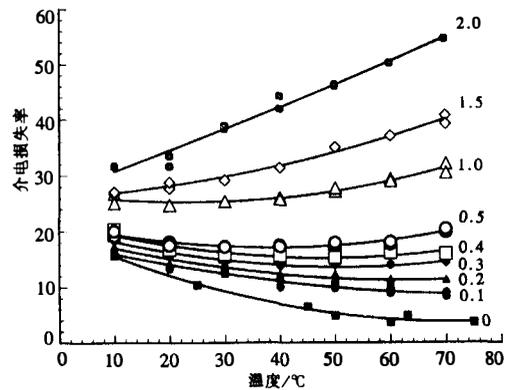


图2 不同温度下各含盐琼脂的介电损失率

Fig. 2 Loss factor of agar gel with various NaCl content at different temperature

由于含盐凝胶琼脂的含水率为99%,可将其视为水化离子溶液来考虑其介电行为。高水分食品中,一般盐浓度对介电常数下降的影响不大。介电损失是由电导损耗和偶极分子的旋转损耗两部分组成。这两种行为皆与温度有关,但它们的温度相关性有所差别[Mudgett 1986]。即随着温度的升高,离子电导损耗增大,相反偶极分子的旋转损耗呈现了减小趋势。它们的综合作用形成了如图2所示的介电损失率随温度的升高呈现减小后增大的变化趋势。在本研究使用的盐浓度范围内,介电损失率由低变高的转换点(Intermediate Transition Point)随着含盐浓度的增加,向着温度下降方向转移,即在转化温度以下,极性水分子损失占优势;转化温度以上,离子损失占优势。特定盐浓度的转换温度随浓度的增加而降低,因为温度和盐浓度对极性水分子和离子的介电行为有影响。图1和图2所示结果与Mudgett[1986]在2450MHz频率和不同温度条件下氯化钠水溶液浓度对介电常数和介电损失的影响之结果有着相同的变化趋势。

穿透深度反映食品微波加热特性的重要指标之一,对温度分布的形成起着重要影响。各含盐浓度下样品的穿透深度 $d_p$ 由下式计算[电气学会通信教育会 1984],示于图3。

$$d_p = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{2}{\epsilon'(\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)}}$$

$$\tan\delta = \epsilon''/\epsilon'$$

频率为 2450MHz 时,波长  $\lambda=12.2\text{cm}$ 。  
 式中  $\epsilon'$  为介电常数, $\epsilon''$  为介电损失率。

由图3可见,随着温度的上升,穿透深度逐渐减小,微波在样品内部之穿透能力减弱,表面加热性增强;含盐浓度较低时,其穿透深度增大,而在含盐浓度较高时,穿透能力减弱。将凝胶琼脂的介电特性以盐浓度和温度的函数来表示,进行了如下的考察。从图1可知盐浓度对介电常数的影响甚微,所以本研究将其简单地考虑成介电常数只是随温度改变的一次函数。这样,在盐浓度0~2范围内样品之介电常数可用一次回归方程表示,即  $\epsilon' = -0.16T + 75.5$ 。而介电损失率(图2)由于随温度的变化很大,在不同盐浓度下用对温度的2次回归方程表示,并列于表1。为了使表1中的各式统一采用  $aT^2 + bT + c$  形式进行表示,

$a, b, c$  各参数与盐浓度的关系(图4),求出它们对盐浓度的关系函数如下:

$$a = (-1.11N^2 + 1.51N + 2.54) \times 10^{-3}$$

$$b = 0.329N + 0.397$$

$$c = 4.37N + 19.65$$

此处  $N$  为盐浓度,不同盐浓度下凝胶琼脂的介电损失率随温度的函数可由下式统一表示。

$$\epsilon''(T, N) = (-1.11N^2 + 1.51N + 2.54) \times 10^{-3}T^2 + (0.329N + 0.397)T + (4.37N + 19.65)$$

由上式推算而得的穿透深度(图3中虚线表示),可见它们同实测值基本一致。

### 3 讨论

通常,食品的介电特性皆随温度而发生改变,其介电常数、介电损失率以及穿透深度的范围为:温度10~80℃时, $\epsilon'$  为50~75[-], $\epsilon''$  为5~35[-], $d_p$  为0.5~2.5cm[Ryynanen 1995]。本研究采用的含盐琼脂的介电特性值范围与多数食品的值相一致。在此,本研究着眼于微波加热产生最显著影响的穿透深度,将市售的鸡蛋豆腐(纪文食品株式会社制),土豆泥、豌豆泥以及常作为模拟食品使用的膨润土糊和合成糊与不同含盐浓度的凝胶琼脂的穿透深度进行比较,对含盐琼脂样品在介电特性上模拟实际食品的合理性加以考察,结果如图5所示。这里,鸡蛋豆腐的介电特性值采用与琼脂相同方法实测而得。豌豆泥[Tong 等 1994]、土豆泥、膨润土

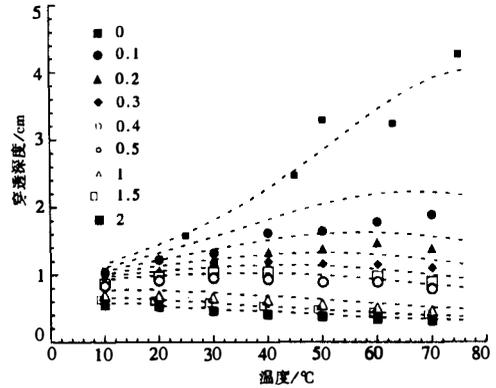


图3 不同温度下各含盐琼脂的穿透深度  
 Fig. 3 Penetration depth of agar gel with various NaCl content at different temperature

表1 2450MHz 频率下含盐琼脂的介电损失率  
 Tab. 1 Dielectric loss factor in various NaCl content at 2450 MHz

含盐浓度	介电损失率
0.0	$3.01 \times E - 0.436T + 19.96$
0.1	$2.01 \times E - 0.292T + 19.04$
0.2	$2.47 \times E - 0.305T + 20.50$
0.3	$2.95 \times E - 0.302T + 21.10$
0.4	$3.54 \times E - 0.311T + 22.09$
0.5	$2.97 \times E - 0.241T + 22.03$
1.0	$3.02 \times E - 0.065T + 24.56$
1.5	$2.04 \times E - 0.058T + 26.20$
2.0	$1.24 \times E - 0.293T + 28.15$

注: 本表中的  $E=10^{-3}T^2$ 。

糊和合成糊(聚乙烯醇 13.7%~14%的水溶液,日本积水树脂株式会社制)[Cheng 等 1997]的介电特性值均使用了它们的文献值。由图可见,穿透深度是以鸡蛋豆腐、豌豆泥、土豆泥、合成糊和膨润土糊的顺序逐渐增大。鸡蛋豆腐与琼脂(NaCl 1%),豌豆泥及土豆泥与琼脂(NaCl 0.4%),合成糊与琼脂(NaCl 0.3%)以及膨润土糊与(NaCl 0.1%)具有极其接近的穿透深度值。由此预示含盐琼脂在介电性质上可对实际食品进行模拟。

一般来说,对于常温包装调理食品的微波加热,加热时间约为60~180sec 左右[速水宏 1998]。与热传导相比食品的介电性质对温度分布起着更为突出的影响。在这种情况下,本研究采用适当的含盐浓度凝胶琼脂对真实食品在介电特性上进行模拟,并采用液晶感温法研究它们的加热特性,即进行食品内温度分布的定性与定量分析是可行的。

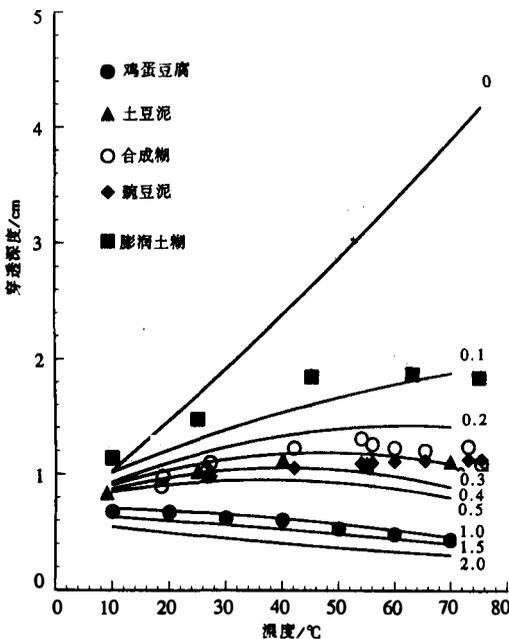


图5 作为模拟食品的含盐琼脂的穿透深度比较  
Fig. 5 Comparison of penetration depth of agar gel with various NaCl content as phantom food

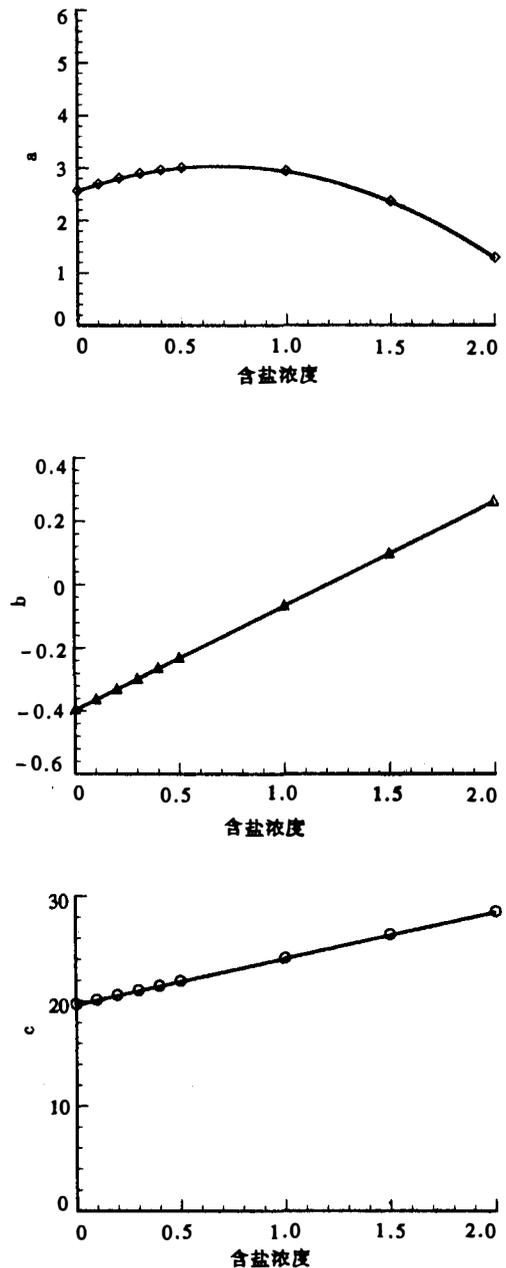


图4 a,b,c系数分别与含盐浓度的关系  
Fig. 4 Relationship between coefficients (a,b,c) and NaCl content

## 参 考 文 献

- 程裕东, 酒井升, 半泽保. 1996. マイクロ波加熱過程における扁平圓筒型食品モデルの熱移動解析. 日本食品科学工学会志, 43(11), 1183~1189
- 酒井升, 松尾完, 程裕东ら. 1996. マイクロ波加熱時模擬食品内温度分布可視化定量化. 日本食品科学工学会志, 43(2), 136~140
- 酒井升, 程裕东, 半泽保. 1996. 2450MHzおよび915MHzにおける合成糊の誘電特性. 日本食品科学工学会志, 43(2), 181~184
- 电气学会通信教育会編. 1984. 电热工学. 东京: オーム社. 87
- 速水宏. 1998. レトルト食品の近況と今後の課題. ジャパンフードサイエンス, 12, 28~33
- Cheng Y D, Sakai N, Hanzawa T. 1997. Effects of dielectric properties on temperature distributions in food model during microwave heating. Food Sci Technol, 3(4). 324~328
- Decareau R V. 1985. Microwaves in the food processing industry. Food science and technology a series of monographs. 45, Academic Press Inc. (Harcourt Brace Jovanovich, Publishers)
- Mudgett R E. 1986. Electrical properties of foods. Engineering properties of food. By Bao M A and Rizvi S S H. 349~353. N Y Marcel, Inc
- Ryynanen S. 1995. The electromegnetic properties of food materials - A review of the basic principle. J Food Eng, 26, 409~429
- Roebuck B D, Goldblith S A. 1975. Dielectric properties at microwave frequencies of agar gels. J Food Sci, 40: 899~902
- Tong C H, Lentz R R, Rossen J L. 1994. Dielectric properties of pea-puree at 915MHz and 2450MHz as a functions of temperature. J Food Sci, 59(1), 121~122, 134

## DIELECTRIC PROPERTIES OF AGAR GEL WITH SODIUM CHLORIDE AT 2450MHZ

CHENG Yu-Dong

(College of Food Science, SFU, 200090)

Noboru SAKAI, Tamotsu HANZAWA

(Department of Food Science and Technology, Tokyo University of Fisheries, Tokyo 108-8477)

**ABSTRACT** By measuring the dielectric constant and loss factor of agar gel (99wt% moisture content) containing sodium chloride (concentration; 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1, 1.5, 2%) to investigate the effect of salt concentration on dielectric properties of agar gel with high water content was studied. Meanwhile, the possibility to use the dielectric properties of agar gel simulated as real food under microwave heating was discussed in this study as well, which broadens the applicability in studying the temperature distributing of food by thermometry of liquid crystal.

**KEYWORDS** microwave heating, agar gel, dielectric constant, loss factor, penetration depth