

冷冻鲑鱼的介电常数与射频解冻效果研究

王亚盛 (威海职业学院信息工程系, 山东威海264210)

摘要 基于27.12 MHz 射频自跟踪平板电容式解冻系统的电气系统设计特点, 对冷冻鲑鱼的介电常数模型、实部和虚部进行了分析研究。在分析研究冷冻鲑鱼的解冻时间、射频穿透深度的基础上, 通过实验验证了射频解冻的质量优于微波解冻和一般常用的解冻方法。

关键词 射频; 冷冻鲑鱼; 介电常数; 解冻效果

中图分类号 Q957 文献标识码 A 文章编号 0517 - 6611(2006) 19 - 5130 - 02

Research on the Dielectric Constant of Frozen Spanish Mackerel and RF Defrosting

WANG Ya-sheng (Weihai Vocational College, Department of Information Engineering, Weihai, Shandong 264210)

Abstract According to the 27.12 MHz RF Auto-follow the electricity system design characteristics, the panel capacitor type of defrosting system and the analytical research was carried out in the Frozen Spanish mackerel of Dielectric constant model mutually, real number and imaginary number. Based on the analytical research of defrosting time and RF deeply depth in the Frozen Spanish mackerel, the experiment proved that the RF defrosting quantity was better than microwave defrosting and other methods.

Key words RF; Frozen Spanish mackerel; Dielectric constant; Defrost result

近几年来, 基于27.12 和10 MHz 的射频解冻系统已经引起了人们的高度重视。射频解冻方法不仅具有微波解冻的速度快、效率高等优点, 还克服了微波解冻易导致局部水溶的问题。为此, 笔者基于射频27.12 MHz 的谐振频率自跟踪平板电容式解冻系统产品的电气系统设计特点, 对冷冻鲑鱼的复合相介电常数、冷冻鲑鱼的解冻时间与解冻效果进行了分析研究。

1 射频解冻系统设计

1.1 系统主要参数设计

(1) 隧道式平板负载电容主要参数。平板宽度33 cm, 长度100 cm, 平板间距11 cm。平板间距在8 ~15 cm 可以根据需要调整。

(2) 采用LC 振荡模式, 中心谐振频率27.12 MHz, 自动调整范围为±15%, 空载时自动停振。

(3) 射频输出功率60 kW, 阳极振荡电压峰值10 000 V, 射频电场强度大于100 kV/m。

(4) 适用于相对介电常数2.0 ~5.0 的外形结构规范的各种冷冻水产品、生肉的解冻。

(5) 将35 kg 重的冷冻水产品从-18℃ 解冻至-4℃ 需要的时间不超过30 min。

1.2 产品电气系统结构设计 产品电气系统由电子管射频丁类放大电路、LC 平板电容负载电路、谐振频率取样整形电路、锁相控制与分频电路、射频激励电路、分频与延迟电路以及温度设定与控制电路等部分组成, 如图1 所示。

2 冷冻水产品的复合相介电常数分析

2.1 冷冻水产品介电常数的物理意义 控制冷冻水产品解冻质量过程中, 冷冻水产品的介电常数是重要的参数。单一介质的介电常数是一个复数, 通常可以用 ϵ 表示, 则^[1]:

$$\epsilon = \epsilon' + \frac{-j\epsilon''}{1 + j2\pi f\tau} \quad (1)$$

在射频情况下, 由于 $2\pi f\tau \gg 1$, 则对(1) 式进行变换后, 可得:

$$\epsilon = \left\{ \epsilon' + \frac{(\epsilon'' - \epsilon')}{1 + (2\pi f\tau)^2} \right\} - j\epsilon'' \quad (2)$$

$$+ j\left[\frac{(\epsilon'' - \epsilon')}{2\pi f\tau} \right] \quad (2)$$

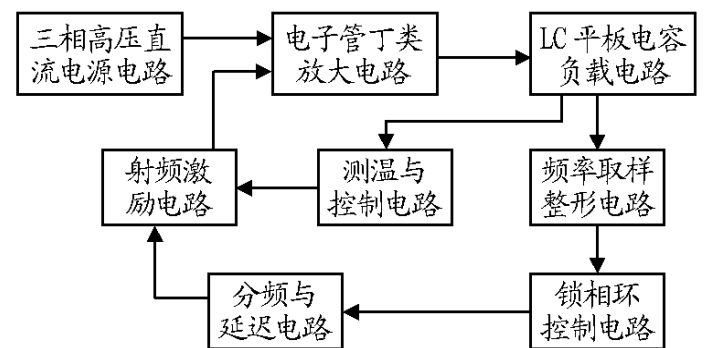


图1 电气系统结构

式中, ϵ' 是介质在高频极限时仅有位移极化情况下的介电常数, 与解冻过程中的射频电磁波的频率关系密切; ϵ'' 是介质在低频极限时仅有取向极化情况下的介电常数, τ 是介质在低频极限时取向极化的松弛时间。从(2) 式可以看出, 介电常数 ϵ 的实部和虚部都是电磁波频率 f 的函数, 且 ϵ 与 f 呈非线性关系。

介电常数 ϵ 代表了在解冻过程中, 冷冻水产品吸收和储存射频电磁波能量的能力, ϵ 的大小不仅与介质有关, 还与温度、频率关系密切。介电常数的实部是相对介电常数, 其值大小决定了平板负载电容器的电容量。虚部是介电损耗, 它反映了冷冻水产品将射频电磁波的能量转换为热能的能力, 虚部的值越大, 说明介质对热能量的吸收能力越大, 加热解冻速度越快。

2.2 复合相的相对介电常数 不同物质的介电常数是不同的。由多种物质混合而成的物质, 其综合介电常数是由组成该混合物质的各种单一物质的介电常数按照一定的规律确定的, 通常用复合相介电常数的概念来描述。根据复合相的结构组成不同, 有对数混合模式、串联混合模式、并联混合模式和多元混合相模式等多种描述复合相介电常数的模型, 而采用多元混合相物质的相对介电常数模型, 相对来说更符合冷冻水产品的情况。多元混合相模式的相对介电常数为^[2]:

$$\epsilon_r = \epsilon_a + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n V_i (\epsilon_i - \epsilon_a) \frac{[1 + A_{ui} (\epsilon_i / \epsilon_a - 1)]^{-1}}{\epsilon_i} \quad (3)$$

其中, ϵ_a 为混合物中基质的相对介电常数, V_i 、 ϵ_i 、 A_{ui} 分别为混合物中第 i 种物质的体积比、相对介电常数和 u_i 轴上的去极化因子。在27.12 MHz 射频电磁波环境下, 由于射频波长 $\lambda = 1.106$ cm, 远大于被解冻水产品的几何尺寸, 则

可近似有:

$$A_{ai} = A_{bi} = A_{ci} = 1/3$$

2.3 冷冻鲑鱼的介电常数及特征

2.3.1 水产品的成分分析。在分析冷冻水产品的介电常数时,依据冷藏厂大批量冷冻的水产品品种为基准进行研究分析。以鲑鱼为例,其主要成分的重量比分别为:水分含量72.5%,蛋白质含量21.2%,脂肪含量3.1%,碳水化合物含量2.1%,灰分含量1.1%。在冷冻过程中,需要外加6%左右的自来水。这样,对于一个重量35 kg的冷冻鲑鱼块来说,其主要成分中,冰、蛋白质、脂肪、碳水化合物及其他物质的体积含量约为:79.92%、14.39%、3.15%和2.55%。

2.3.2 冷冻鲑鱼的相对介电常数分析。冷冻鲑鱼块中的各种成分可以近似为均匀分布,根据公式(3)可得相对介电常数 ϵ_r 为:

$$\begin{aligned} \epsilon_r = & \epsilon_{冰r} / [1 + 0.1439(\epsilon_{蛋r} - \epsilon_{冰r}) / (2\epsilon_{冰r} + \epsilon_{蛋r}) \\ & + 0.0315(\epsilon_{脂r} - \epsilon_{冰r}) / (2\epsilon_{冰r} + \epsilon_{脂r}) \\ & + 0.0255(\epsilon_{炭r} - \epsilon_{冰r}) / (2\epsilon_{冰r} + \epsilon_{炭r})] \end{aligned} \quad (4)$$

介电常数是外加电磁场频率 f 、温度 T 的函数,在一定的温度、频率范围内,介电常数与频率 f 成反比,与温度 T 成正比。通常,在电磁场频率0~2450 MHz,温度-20~0℃情况下,根据公式(2)和实验数据可以得到冰、蛋白质、脂肪和碳水化合物的相对介电常数为: $\epsilon_{冰r} = 2 \sim 4$, $\epsilon_{蛋r} = 4 \sim 6$, $\epsilon_{脂r} = 2 \sim 5$, $\epsilon_{炭r} = 3 \sim 5$ 。

根据理论分析和实验,冰的介电常数可用下列公式计算:

$$\epsilon_{冰} = 3.15 + j \cdot 57.34 / [f^{-1} + 2.48 \times 10^{-14} f^{1/2}] \cdot \exp(3.62 \times 10^{-2} T) \quad (5)$$

在射频27.12 MHz, -18℃条件下,理论计算数据和实验数据有一些差异。取 $\epsilon_{蛋} = 4.7$, $\epsilon_{脂} = 2.5$, $\epsilon_{炭} = 3.4$ 。而冰的 $\epsilon_{冰}$ 为:

$$\epsilon_{冰} = 3.15 + 0.02341j$$

冰的相对介电常数为3.15,根据(4)式可得冷冻鲑鱼的相对介电常数 ϵ_r 为3.4424。

2.3.3 冷冻鲑鱼的介电常数虚部分析。水中的导电离子浓度远远大于冰中的导电粒子浓度,冰和水的导电机理有所不同。但是,实验证明纯冰的电导率与其液态水的电导率差不多。通常采用普通自来水对水产品进行冷冻,而鲑鱼体内水分的电导率和普通自来水的电导率在同一个数量级,冷冻鲑鱼中冰的电导率通常在40~90 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

介电常数的虚部与频率、温度有密切的关系,可以通过(2)式进行计算和实验验证。在射频27.12 MHz, -18℃条件下,由于频率比较高,冷冻鲑鱼的介电常数的虚部可以用 $\epsilon_r/2f_0$ 近似计算,根据计算和实验数据表明,其虚部为0.00265~0.00597,损耗角正切 $\tan \delta$ 为0.00077~0.00173。

北方交通大学的关明慧等研究报道了纯冰在3000 MHz微波, -12℃条件下的介质损耗角正切 $\tan \delta$ 为0.0009,这与笔者的实验结果基本吻合。由此,可以得到冷冻鲑鱼的介电常数公式:

$$\epsilon_r = 3.4424 + (0.00265 \sim 0.00597)j \quad (6)$$

3 解冻时间与解冻效果

3.1 电容量设计 采用隧道式平板电容器结构,平板宽度

33 cm,长度100 cm,平板间距11 cm。则极板面积 S 为0.33 m^2 , $d = 0.11 \text{ m}$,如图2所示。

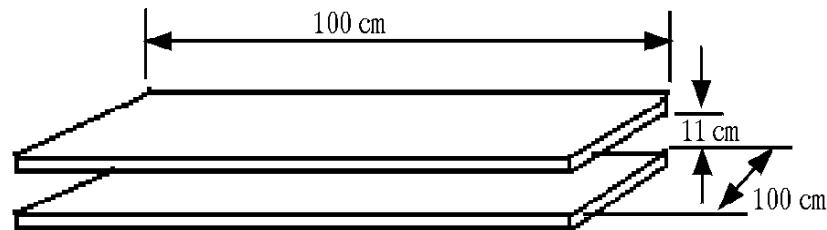


图2 平板电容结构示意图

空载时,电介质为空气,空气的相对介电常数近似为1,电容量 $C_{空}$ 为:

$$C_{空} = \epsilon_0 S / d = 26.55(\text{pF})$$

满负载时,电介质为10 cm厚的冷冻鲑鱼和1 cm厚的空气构成的2个电容的串联。在射频27.12 MHz条件下解冻,冷冻鲑鱼的相对介电常数为4.4424,则电容量 $C_{载}$ 为:

$$C_{载} = \epsilon_0 S / (d_{鱼} \epsilon_r + d_{空}) = 67.99(\text{pF})$$

3.2 电容器的有功功率分析 在对冷冻鲑鱼解冻过程中,消耗的功率为有功功率,其值主要由冷冻鲑鱼介电常数的虚部所确定,虚部值越大,吸收的功率就越多,解冻速度就越快。在解冻过程中,如果忽略1 cm厚的空气的影响,冷冻鲑鱼块的厚度按照11 cm考虑,则冷冻鲑鱼块吸收的功率为:

$$P_{吸} = 2 f U^2 \epsilon_r \tan \delta \epsilon_0 S / d \quad (7)$$

将解冻条件及相关参数代入(7)式后,可得:

$$P_{吸} = 533.912 \sim 1199.567(\text{J/s})$$

3.3 解冻时间分析

3.3.1 解冻需要的热能分析。在冷冻鲑鱼中,由于采用一般自来水冷冻,其比热容低于纯水冰的比热容,约为1.8 kJ/(kg·K),也低于纯蛋白质[2.09 kJ/(kg·K)]、纯脂肪[209 kJ/(kg·K)]和纯水[2.114 kJ/(kg·K)]的比热容,因此,在解冻过程中,冰升温最快。通常,畜肉类、鱼肉类以半解冻(-3~-4℃)状态加工比较好,即通过解冻,使冷冻鲑鱼的温度从-18℃升至-4℃左右。为此,解冻时需要的热能量 $W_{解}$ 为:

$$\begin{aligned} W_{解} &= C_{比热容} \times V \times G \times T \\ &= 1.8 \times 3 \times 10^4 \times 1.0 \times 14 = 7.56 \times 10^5(\text{J}) \end{aligned}$$

式中, $C_{比热容}$ 为冷冻鲑鱼块的比热容, V 为冷冻鲑鱼块体积, G 为冷冻鲑鱼块的平均密度, T 为温度差。

3.3.2 解冻时间。解冻时间为 t ,则:

$$t = W_{解} / P_{吸} = 1415 \sim 630(\text{s})$$

解冻时间一般在10~25 min,比真空解冻及其他常规解冻方法的解冻时间(1~24 h)缩短了很多,比微波解冻时间(2~8 min)虽然略长,但是克服了微波解冻存在的穿透深度较浅、表面吸收能量集聚、解冻不均匀、局部水溶等问题。

3.4 解冻加热深度问题 在实际对冷冻鲑鱼解冻过程中,电磁波从冷冻鲑鱼块的表面进入并在其内部传播时,由于能量不断被冷冻鲑鱼块吸收并转化为热能,导致电磁波携带的能量随着其深入的深度以指数形式不断衰减。因此,在冷冻鲑鱼块的厚度方向上吸收的热能是不均匀的,这是由于电磁波的穿透能力不同所致。

穿透能力就是电磁波穿透到介质内部的本领,电磁波

(上接第5131页)

穿透深度被定义为:电磁波功率从介质表面减至表面值的 $1/e(36.8\%)$ 时的距离,用 D_e 表示, e 为自然对数底值。即:

$$D_e = \lambda_0 / (\epsilon_r^{1/2} \text{tg} \delta) \quad (8)$$

式中, λ_0 是电磁波的波长, ϵ_r 是介质的相对介电常数, $\text{tg} \delta$ 是损耗角正切。在对冷冻鲑鱼解冻过程中,穿透深度 $D_{e\text{鱼}}$ 在1 097 ~2 465 m,远大于2 450 MHz 微波的穿透深度。

由于射频解冻的穿透深度远大于冷冻鲑鱼块的厚度10 cm,在电磁波穿透冷冻鲑鱼块过程中的能量衰减可以近似为零。所以,能够很好地保证解冻的均匀性、一致性,不存在表面能量集聚现象,这也是射频解冻的质量明显优于微波解冻的主要原因之一。

4 实验数据

对冷冻后1个月、2个月的共10块35 kg 重量的冷冻鲑鱼进行解冻实验,有关数据如表1所示。

产品解冻过程中,设定终止温度为 -4°C ,由2个红外温度传感器始终对冷冻鲑鱼块的表面温度进行检测,达到设定温度 -4°C 时自动停止解冻。

5 结语

应用基于射频27.12 MHz 自跟踪平板电容式解冻系统产品,与合作企业对不同日期、不同批次冷冻的相同规格冷

冻鲑鱼的解冻实验,解冻升温14 所需要的平均解冻时间为17.7 min,解冻均匀,效果好,实际谐振频率在27.12 MHz $\pm 10\%$ 之内变化,谐振时的解冻速度最快。通过理论与实验证明,射频解冻优于微波解冻和一般常用的解冻方法,具有很好的推广应用价值。

表1 解冻时间与质量

序号	解冻时间 s	谐振频率 MHz	质量状态
1	925	26.11 ~30.87	解冻均匀,无水溶
2	930	26.23 ~30.89	解冻均匀,无水溶
3	1 012	25.21 ~29.12	解冻均匀,无水溶
4	1 068	25.12 ~28.98	解冻均匀,无水溶
5	1 126	25.55 ~29.21	解冻均匀,微水溶
6	1 030	26.03 ~30.43	解冻均匀,微水溶
7	899	26.65 ~30.77	解冻均匀,无水溶
8	1 268	25.57 ~30.32	解冻均匀,无水溶
9	1 202	25.45 ~29.42	解冻均匀,无水溶
10	1 134	25.35 ~29.67	解冻均匀,无水溶
平均	1 059	25.12 ~30.89	解冻均匀,效果好

参考文献

- [1] 陈敏,杨欣荣.测量油品含水量的电容式传感器机理[J].传感器技术,2002(7):16-17.
- [2] 黄兴忠,杨坤.烟气排放物对微波频段信号影响的定量计算[J].自然科学进展,2005(10):1 277-1 278.