

内部多孔性食品的热导率模型与预测

赵学伟

(郑州轻工业学院食品与生物工程学院, 河南郑州 450002)

摘要:了解食品的热导率是进行加工过程模拟和产品质量控制的基础;综述了食品的组分构成、温度、水分含量、结构对内部多孔性食品热导率的影响及其模型表示,其中对结构模型作了重点论述;介绍了非冻结和冻结多孔性食品的热导率预测方法;最后对今后的研究方向作了展望。

关键词:内部多孔性食品,热导率,模型,预测

Thermal conductivity model and prediction for internal porous foods

ZHAO Xue-wei

(School of Food and Biological Engineering, Zhengzhou Institute of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Thermal conductivity of foods is the base of processes modeling and product quality controlling. The effects of food compositions, temperature, moisture content, and structure on the thermal conductivity of internal porous foods and how to model their contributing were reviewed, with especially focusing on structure models. Thermal conductivity predicting methods for non-frozen and frozen porous foods were presented. Finally, future research needs were outlined.

Key words: internal porous food; thermal conductivity; model; prediction

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2008)08-0292-06

食品加工和保藏的很多单元操作都涉及到热量传递。热量传递的速率用热导率(k)来表示。只有知道食品的热导率才能预测热加工的速度,了解食品内部的温度分布,从而选择合理的加工工艺,有效预测和控制产品的质量。食品热处理单元操作的设计早期主要靠经验,近些年来数值模拟技术在这方面得到更多应用^[1],物料的热物性数据的精确度直接影响所建立的数学模型的精确度,热导率是其中的一个重要物理量,因此,了解食品的热导率也是进行加工过程模拟和设备设计的需要。根据 Carson 等对多孔性材料的分类^[2],可以将多孔性食品分为内部多孔性食品和外部多孔性食品,前者包括烘烤食品、干燥果蔬、冰激淋等,后者包括粉体食品和颗粒食品。多数多孔性食品属外部多孔性食品。相同孔隙度的内部多孔性食品和外部多孔性食品,其热导率明显不同。影响多孔性食品热导率的主要因素有组分构成、水分含量、温度和自身结构。本文主要综述面制品、干燥果蔬以及冰激淋等内部多孔性食品的热导率影响因素及其模型表示,最后论述热导率预测的方法。

1 组分模型

食品中不同物质组分的热导率是不同的,根据各组分的热导率及其质量分数可按式(1)计算食品

的热导率。该模型是 Sweat 等根据 430 种液态和固态食品的热导率测定结果得出的^[3],但仅适用于非多孔性食品,或用来计算多孔性食品中固相部分的热导率。对于多孔性食品,该方程不再适用^[3],即使方程中加入空气项也不能得到令人满意的结果^[4]。另外,该模型没有考虑温度的影响,仅适用于 -25°C 条件下的热导率计算。

$$k = 0.58X_w + 0.155X_p + 0.25X_c + 0.16X_f + 0.135X_{ash} \quad \text{式(1)}$$

其中, X_w 、 X_p 、 X_c 、 X_f 、 X_{ash} 分别代表水分、蛋白质、碳水化合物、脂肪、灰分的质量分数。

2 经验模型

通常多孔性食品是由水分(或冰)、碳水化合物、蛋白质、脂肪、纤维素、矿物质及空气构成的。温度(T)对食品热导率的影响首先通过对各组分热导率的影响表现出来,见式(2)~式(9)^[3]。有研究者为简化计算,以碳水化合物的热导率代替固体的热导率^[5]。

$$k_w = 0.57 + 1.78 \times 10^{-3}T - 6.94 \times 10^{-6}T^2 + 2.20 \times 10^{-9}T^3 \quad \text{(2)}$$

$$k_{carbo} = 0.201 + 1.39 \times 10^{-3}T - 4.33 \times 10^{-6}T^2 \quad \text{式(3)}$$

$$k_{pro} = 0.179 + 1.20 \times 10^{-3}T - 2.72 \times 10^{-6}T^2 \quad \text{式(4)}$$

$$k_{fat} = 0.181 - 2.76 \times 10^{-3}T - 1.77 \times 10^{-7}T^2 \quad \text{式(5)}$$

$$k_{fiber} = 0.183 + 1.25 \times 10^{-3}T - 3.17 \times 10^{-6}T^2 \quad \text{式(6)}$$

$$k_{ash} = 0.330 + 1.40 \times 10^{-3}T - 2.91 \times 10^{-6}T^2 \quad \text{式(7)}$$

$$k_{ice} = 0.222 + 6.25 \times 10^{-3}T + 1.02 \times 10^{-4}T^2 \quad \text{式(8)}$$

收稿日期:2008-01-04

作者简介:赵学伟(1969-),男,博士,副教授,研究方向:谷物食品加工。

$$k_a = 2.382 \times 10^{-2} + 6.75 \times 10^{-5} T \quad \text{式(9)}$$

只要温度的变化不引起物质相态发生变化(如冷冻、解冻、熟化),对于多数食品来说温度对热导率的影响较小。高水分食品在冷冻或解冻时,水与冰的相对比例发生变化,由于水和冰的热导率存在差异,导致食品热导率变化较大。在温度低于起始冻结点 T_f 时,热导率与温度的关系见式(10),在高于 T_f 时,高水分食品的热导率与温度之间接近线性关系见式(11)^[6],式中 k_f 是 T_f 时的热导率, b 、 c 、 d 为常数。

$$k = k_f + b(T - T_f) + c\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_f}\right) \quad \text{式(10)}$$

$$k = k_f + d(T - T_f) \quad \text{式(11)}$$

Maroulis 等认为温度对中等水分食品热导率的影响符合 Arrhenius 方程^[7]。Jefferson 等在模拟不同因素对面包皮厚度、比重的影响时,采用 $k = k_f e^{kT}$ 描述温度对面团热导率的影响^[8]。

由于水的热导率明显高于食品中干物质的热导率^[3],水分含量对食品的热导率有很大影响,热导率随水分含量降低而降低。对于水分含量较高的食品^[4],或在很窄的水分范围内,热导率和水分含量间呈线性关系^[9],在水分含量范围较宽时,应当建立非线性关系^[10]。

对于含水较高的多孔性食品,如果食品内部出现温度梯度,水分在高温的一侧蒸发,然后在温度低的一侧凝结,水蒸汽的转移伴随有潜热转移,使气相部分的表观热导率增大,称为蒸发-冷凝效应^[11]。Goedeken 等实验证实了水分蒸发-冷凝对面包热导率的影响^[12]。这种现象一般在冻藏温度以上更为常见,但 Hamdami 等甚至在冻结温度以下观察到这种现象^[13]。为此,引入了有效热导率的概念。有效热导率考虑了传导传热以及蒸发-冷凝、辐射传热等多种热量传递。考虑潜热转移的影响,有效热导率可由式(12)表示^[14]。

$$k_g = k_a + k_{\text{eva-con}} f_{\text{eva-con}} \quad \text{式(12)}$$

其中, k_{air} : 空气的热导率; $f_{\text{eva-con}}$: 蒸发-冷凝传热的热阻因子, $k_{\text{eva-con}}$: 蒸发-冷凝传热的当量热导率,用式(13)表示。

$$k_{\text{eva-con}} = \frac{D}{RT} - \frac{P}{P - a_w P_{\text{sat}}} L_0 a_w \frac{dP_{\text{sat}}}{dT} \quad \text{式(13)}$$

其中, D : 水蒸汽的扩散系数; R : 气体常数; P : 总压力; P_{sat} : 水蒸汽的饱和分压; a_w : 水分活度; L_0 : 水的汽化热。

Hamdami 等在建立半生面包冷冻过程中的热质传递模型时,采用上述方法考虑蒸发-冷凝效应对有效热导率的影响,面包表面温度和中心温度以及失水量的预测值与实验值吻合很好^[15]。

温度降到冰点以下时,部分液态水转变成冰,由于冰的热导率是水的近 4 倍,食品体系的热导率发生剧烈变化^[3]。Kumcuoglu 等关于面团^[16]以及 Hamdami 等^[6]、Jury 等^[17]关于半生面包热导率的研究结果也证明了这一点。随温度降低,冰与水分的相对比例不断增大,冰的质量份数与起始冻结点有关系,可由 Clausius - Clapeyron 方程(式(14))求

出^[18]。可根据体系的组分构成预测起始冻结点 T_f ^[19],或实际测定得出^[5],总水分(X_{tw})、结合水分(X_{bw})也可由测定得出^[5]。

$$X_{\text{ice}} = (X_{\text{tw}} - X_{\text{bw}}) \left(1 - \frac{T_f}{T}\right) \quad \text{式(14)}$$

空气的热导率较小^[3],因此食品内的孔隙越多热导率越低。Sumnu 在研究不同方式烘烤过程中面包热导率的变化时,以水分含量和孔隙度为自变量,以式(15)为模型进行回归分析^[20]。Baik 等在杯糕烘烤不同时间后取出样品,测定热导率,回归分析得出方程,即式(16)^[21]。

$$k = a + b\varepsilon + cX_w + d\varepsilon X_w \quad \text{式(15)}$$

$$k = 0.00263T - 0.831X_w - 0.000910\rho + 0.00422X_w\rho \quad \text{式(16)}$$

Šeruga 等根据面团的水分、蛋白质、碳水化合物、脂肪、纤维素、灰分的含量,以及各组分热导率与温度的关系(式(2)~式(7)),采用质量加权平均求出热导率,发现计算值与测量值之间相差较大^[22]。其它研究者关于面团及其烘烤制品的研究也有类似发现^[23],说明除组分构成、温度和水分因素外,还存在影响多孔性食品热导率的其它因素。

3 结构模型

对于多孔性食品,由于其中空气的热导率比固相基质的热导率低得多^[3],多孔性食品的结构特性对热导率有很大影响。结构特性包括孔隙度、气孔的大小、形状及分布、不同相(如空气、水分、冰、固体物质)的空间分布等。Carson 将热导率结构模型分为两类:模型中只含有各组分的热导率及其体积分数的刚性模型;模型中还包含另外的结构参数的柔性模型^[24]。

3.1 刚性模型

较为常见的刚性模型有:平行模型、垂直模型、EMT 模型,分别见式(17)~式(19),其中 k_i 、 ε_i 表示 i 相的热导率、体积分数。空气体积分数 ε_a 就是前面提到的孔隙度 ε ,由式(22)计算 ε_a ,由式(23)计算各相的体积分数 ε_i , ρ_{app} 、 ρ_i 、 ρ_i 分别表示食品的表观密度、真实密度、 i 相的密度。Maxwell 模型也是较为常见的刚性模型,分两种情况, k_1 是连续相时称为 ME2 模型, k_2 是连续相时称为 ME2 模型,分别见式(20)、(21)。这 5 种模型的结构模式示意图见图 1^[24-26]。

$$k = \sum_i \varepsilon_i k_i \quad \text{式(17)}$$

$$k = \frac{1}{\sum_i \left(\frac{\varepsilon_i}{k_i}\right)} \quad \text{式(18)}$$

$$\sum_i \varepsilon_i \frac{k_i - k}{k_i + 2k} = 0 \quad \text{式(19)}$$

$$k = k_1 \frac{2k_1 + k_2 - 2\varepsilon_2(k_1 - k_2)}{2k_1 + k_2 + \varepsilon_2(k_1 - k_2)} \quad \text{式(20)}$$

$$k = k_2 \frac{2k_2 + k_1 - 2\varepsilon_1(k_2 - k_1)}{2k_2 + k_1 + \varepsilon_1(k_2 - k_1)} \quad \text{式(21)}$$

$$\varepsilon_a = 1 - \frac{\rho_{\text{app}}}{\rho_i} \quad \text{式(22)}$$

$$\varepsilon_i = \frac{m_i \rho_{\text{app}}}{\rho_i} \quad \text{式(23)}$$



图1 5种两相体系的基本结构模式示意图^[27]

(从左至右依次表示:平行模型、ME1模型、EMT模型、ME2模型、垂直模型)

平行模型假设各相交替层状排列,热传导方向与各层平行,而垂直模型假设热流方向与层垂直;EMT模型假设所有的相彼此分散;Maxwell假设其中1相为连续相,而分散相以小球体的形式分散在连续基质中,各小球体周围的温度分布不相互影响^[26]。平行模型、垂直模型以及EMT模型适用于多相体系,而Maxwell模型仅适用于两相体系。垂直模型和平行模型分别表示总热导率可能的最低值和最高值,称为Wiener边界。其它模型的值位于Wiener边界内。其它如随机模型、Kopelman模型等刚性模型在烘烤食品热导率的研究中也有应用^[27]。

由于Maxwell模型仅适用于两相体系,对于冻结的多孔性食品体系,Hamdami提出改进的Maxwell模型,如图2所示,每步均采用Maxwell模型。第一步:水作连续相、冰作分散相;第二步:固体作连续相,(冰/水)作分散相;第三步:(冰/水)/固体作连续相,气体作分散相^[13]。其中固体包括干物质和结合水。

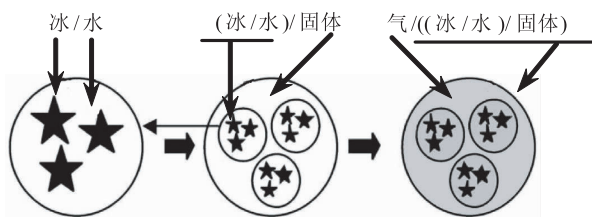


图2 Hamdami等提出的Maxwell改进模型^[13]

Wang等以图1中所示的5种结构模式为基础,假设每种结构模式所占的体积分数都是1/2,采用任何两种不同结构模式简单加和,产生出不同的结构模式^[26]。Wang等假设存在一种结构模式,其中具有多个连续相,推导出1个十分复杂的热导率结构模型^[28]。

3.2 柔性模型

仅考虑各组分的热导率和体积分数并不能准确描述多孔性食品的热导率,模型中需要加入另外的参数^[24]。

3.2.1 Krischer模型 Krischer认为,既然任何两相体系的热导率一定位于Wiener边界范围内,可以采用垂直结构和平行结构的组合来表示它的结构^[13,29]。组合结构的热导率是垂直热导率 k_{sc} 和平行热导率 k_{pa} 的加权调和平均值,见式(24), k_{pa} 、 k_{sc} 分别为根据平行模型、垂直模型计算的热导率, f_k 称为权重因子,其值可通过热导率测定来确定^[24]。

$$k = 1 / \left(\frac{1 - f_k}{k_{pa}} + \frac{f_k}{k_{sc}} \right) \quad \text{式(24)}$$

Maroulis等将果蔬看作是由空气、水、固体物质3相构成,采用Krischer模型模拟干燥过程中的热导率变化^[30]。在按式(22)、(23)计算孔隙度时,根据式

(25)计算表观密度^[31],该式中引入体积收缩系数 β , β 的值需要通过实验确定。Hussain等对多种果蔬在不同干燥条件下的286个孔隙度数据分析后得出,以干燥温度、水分含量、初试孔隙度、产品类型为输入量,采用多项式回归模型与非线性神经网络组合而成的神经网络能够有效预测果蔬干燥过程中的孔隙度^[32]。

$$\rho_{app} = \frac{1 + X}{1 + \frac{X_0}{\rho_{app-0}} + \beta \frac{X - X_0}{\rho_w}} \quad \text{式(25)}$$

其中, X_0 :初始水分, ρ_{app-0} :初始表观密度, ρ_w :水的密度。

3.2.2 改进的Maxwell模型 基于垂直模型和平行模型的Krischer模型,其物理结构具有高度的各向异性。Carson等对Maxwell模型进行改进,见式(26),并建议对于各向同性材料采用该模型^[24,25]。

$$k = k_c \frac{\left(\frac{j^2}{1-j^2} \right) k_c + k_a - \left(\frac{j^2}{1-j^2} \right) (k_c - k_a) \varepsilon}{\left(\frac{j^2}{1-j^2} \right) k_c + k_a + (k_c - k_a) \varepsilon} \quad \text{式(26)}$$

式中 k_c 为连续相的热导率,该模型中引入了参数 j 。内部多孔性材料的上边界为EMT方程(见式(19)),将多孔性食品看作是气相和固相的两相混合物,下边界为Maxwell方程(空气为分散相),取 $j = \sqrt{2/3} \approx 0.82$ 时,方程(26)与EMT方程相同, $j = 0.68 - 0.7$ 时,方程(26)的值与下边界Maxwell方程的值很接近。分析结果显示,取 $j = 0.75$ (0.68与0.82的中间值),在 $k_c/k_a \leq 12$ 、 $\varepsilon \leq 0.5$ 时热导率预测值的最大不确定性小于 $0.02 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。多孔性食品的热导率一般在 $0.05 - 0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 之间,所以,如果预测值大于0.1,就可以取 $j = 0.75$,采用式(26)预测热导率^[24],因为,用于工程设计时,热导率数据的精确度在 $\pm 10\%$ 通常就足够了^[33]。如果预测值小于0.1时,就应当先通过实验确定 j 的值^[24]。

Hamdami等把非冻结的面包瓤和面包皮看成是干物质、水、气体(包括空气和水蒸汽)3相构成的体系,在起始冻结点以下,看作是包含冰晶在内的4相体系。考虑蒸发-冷凝作用对气相热导率的影响,采用平行模型、垂直模型、Krischer模型和Hamdami等提出的Maxwell改进模型(图2)模拟半生面包冷冻过程中的热导率变化,发现Krischer模型的预测结果与实验结果吻合很好^[5]。但是Hamdami等在研究半生面包在冷冻过程中的热质传递时,采用Maxwell改进模型(图2)模拟面包瓤的热导率,采用平行模型模拟面包皮的热导率^[15]。Jury等同样考虑蒸发-冷凝效应,采用这4种模型模拟半生面包在冷冻和烘烤过程中的热导率变化,发现温度在冻结点以上时平行模型更能有效地预测热导率的变化,在冻结点以下时平行模型的估计值偏大而Krischer模型的估计值偏小^[17]。

Maxwell模型假设分散相以球体的形式存在。如果不是球体,而是椭圆柱体,3个轴的取向是随机的,DeVries等提出模型(27)。该模型是对Maxwell模型的扩展,其中 N 表示分散相的种类数,每个分散相

(j)的权重因子 f_j 由式(28)表示,其中 g_i :形状因子,满足 $\sum_{i=a,b,c} g_i = 1$ 。N=1, $f_c = 1$ 、 $g_i = 1/3$ 时 DeVries 模型即为 Maxwell 模型^[34]。

$$k = \frac{f_c \varepsilon_c k_c + \sum_{j=1}^N f_j \varepsilon_j k_j}{f_c \varepsilon_c + \sum_{j=1}^N f_j \varepsilon_j} \quad \text{式(27)}$$

$$f_j = \frac{1}{3} \sum_{i=a,c} \left[1 + \left(\frac{k_i}{k_c} - 1 \right) g_i \right] \quad \text{式(28)}$$

Cogne 等根据对冰激淋的显微观察发现冰晶不是圆球形,采用 DeVries 模型模拟无气泡冰激淋的热导率,模拟值与测定值较为一致,而垂直模型、Maxwell 模型的预测值偏低,平行模型的偏高^[18]。

3.2.3 改进的平行模型 Rahman 等在研究果蔬干燥过程中的热导率变化时,提出模型(29),其中 f_r 称为 Rahman-Chen 结构因子, k_s 为固体部分的热导率,可以认为该模型是对平行模型的扩展^[10]。根据前人的热导率测定结果,回归分析得出 f_r 与水分、温度、孔隙度之间存在关系式(30)。其中 $T_{ref} = 273K$, 水分 14%~88%, 孔隙度 0~0.56, 温度 278~373K^[10]。

$$k_c = \varepsilon_a k_a + f_r \left[(1 - \varepsilon_a - \varepsilon_w) k_s + \varepsilon_w k_w \right] \quad \text{式(29)}$$

$$f_r = 0.996 \left[1 - \varepsilon_a + \frac{k_a}{(k_w)_{ref}} \right] \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{0.713} (X_w)^{0.285} \quad \text{式(30)}$$

Maroulis 等将中等水分食品看作是干物质和含无限多水分的湿物质的混合物,采用平行模型表示该混合物的热导率,见式(31),用 Arrhenius 模型表示温度对干物质的热导率和湿物质的热导率的影响^[7]。

$$k = \frac{1}{1+X} k_w + \frac{X}{1+X} k_s \quad \text{式(31)}$$

Reyes 等在采用 12 种模型模拟小麦面包、黑麦面包等 12 种多孔性烘烤食品的热导率,其中有两种模型分别为式(32)、(33)^[28]。

$$k = k_s \frac{w}{w+d} + k_a \frac{d}{w+d} \quad \text{式(32)}$$

$$k = k_s \frac{w}{s(w+d)} + k_a \frac{d}{w+d} \quad \text{式(33)}$$

其中, w : 壁的厚度, d : 气孔的平均直径, s : 最短路径比。

式(32)是一个改进的平行模型,但是不是采用体积分数而是采用线性长度分数来考虑热导率的影响。式(33)是对式(32)的又进一步改进,考虑到热量通过固体部分传递时由于需要绕过气泡,传递距离增大,引入最短路径比来修正导热路径的长度,最短路径比为热量传导的最短路径与样品厚度的比^[27]。

以上是多孔性食品热导率研究中用到的一些柔性模型,其中 Krischer 模型应用较多^[25]。

Reyes 等的研究显示,固体部分的热导率和最短路径比对多孔性烘烤食品的热导率影响显著,而气孔壁厚、空气的热导率、气孔直径、气孔大小的分布和孔隙度对热导率的影响不显著,说明多孔性食品的热导率模型中应当考虑导热路径的“曲折度”^[27]。Carson 等的研究表明除组分的热导率和体积分数

外,对于内部多孔性材料来说,相邻气泡间的互连程度也对热导率有很大影响^[35]。对于多孔性材料,孔隙度以及气孔的结构和分布都对热导率有显著影响^[30]。可以看出,影响热导率的结构因素有多种,有的还难以定量表示,要引入模型就更加困难。

4 热导率预测方法

热导率预测就是不需要做热导率测定实验,通过其它特性的测定,根据热导率模型求出热导率的方法。如果没有热导率测定仪器,或测定仪器不适合要测的样品,这时采用热导率模型预测热导率就是一个有效的解决办法。

4.1 非冻结多孔性食品的热导率预测

图3为预测非冻结多孔性食品热导率的步骤^[24]。孔隙度由式(22)、(23)求出。根据式(3)、(4)、(5)、(7)计算干物质组分在不同温度时的热导率,由平行模型求出固体部分的热导率 k_s 。根据 k_s 和式(2)求得的水分热导率,由 EMT 模型求出连续相的热导率 k_c (也可以根据 k_p 、 k_f 、 k_{car} 、 k_{ash} 、 k_w , 由 EMT 一步求出 k_c , 但是计算复杂)。如果根据前人的研究结果 f_k 为已知,根据 k_c 和由式(9)求得的空气热导率,由 Krischer 模型求出非冻结多孔性食品的有效热导率 k_e 。否则,如果体系为各相异性,通过实验求出 f_k 的值,由 Krischer 模型求出 k_e ; 如果体系为各相同性,取 $j = 0.75$, 由方程(26)求出 k_e 。包括烘烤食品、干燥果蔬在内的多数内部多孔性食品的热导率大于 $0.1W/mK$ ^[3], 所以可以直接取 $j = 0.75$ ^[24], 如果热导率预测值小于 $0.1W/mK$, 就要先通过实验确定 j 的值, 不过,这样就没有达到预测的目的。

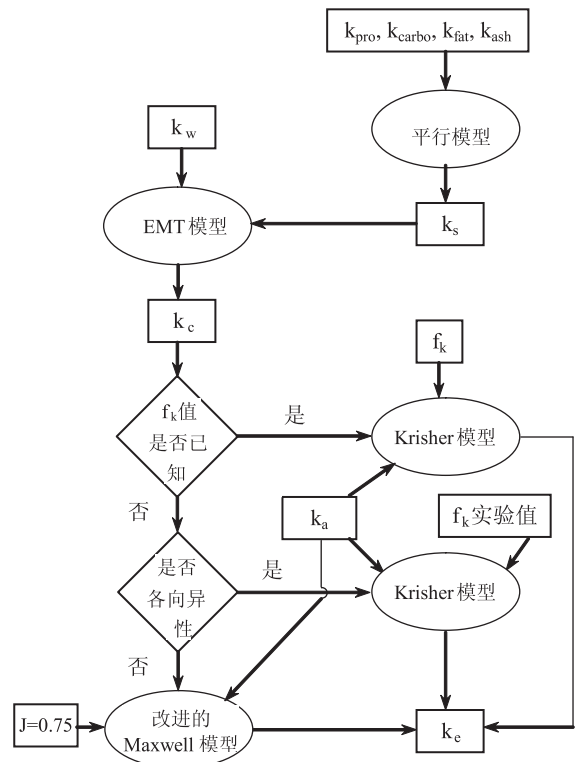


图3 预测非冻结多孔性食品热导的步骤^[25]

虽然蒸发-冷却效应对气相部分的热导率有显著影响^[11,13],但是该方法中对此并未考虑。

4.2 冻结多孔性食品的热导率预测

对于冻结多孔性食品,由于要同时考虑水结冰以及孔隙结构带来的影响,使得热导率预测更加困难。

Cogne 等将膨松冰激淋看作是固态物质(包括碳水化合物、蛋白质、脂肪和未冻结水)为连续相、冰和空气为分散相构成的混合物。首先根据组分构成求出 T_i ,而后由式(14)算出冰的质量分数,再由式(23)算出体积分数,而后求出水的体积分数。根据各固态物质的热导率和体积分数由平行模型求出连续相热导率 k_c ; 根据 k_c 和冰的体积分数、热导率,由 DeVries 模型求出无气泡冰激淋的热导率;最后由 Maxwell 模型求出膨松冰激淋的热导率^[18]。该方法中,考虑冰晶不是球形,采用 De Vries 模型求冰 + 连续相体系的热导率是更为科学的做法,但由此引入 3 个形状因子参数。该研究者通过对实验数据的模型拟和,求得形状因子 $g_1 = g_2 = 1/11$ 、 $g_3 = 9/11$ 。进一步研究显示,将冰激淋配方中蔗糖的含量增大到 25%、50%,采用该形状因子数据时 DeVries 模型仍能有效预测热导率,说明 $g_1 = g_2 = 1/11$ 、 $g_3 = 9/11$ 具有一定的普遍性。

Carson 建议采用上述方法预测冻结多孔性食品的热导率^[25],但上述形状因子的值未必适用于所有冻结多孔性食品。

5 展望

对食品体系中各相之间空间结构关系的了解是建立结构模型的基础^[19]。近来对冷冻面团中冰晶的形成部位^[36]及其变化^[37]有了新的了解,这些认识会对建立冷冻面团的热导率结构模型提供有益帮助。Reyes 等采用图像处理技术定量表达烘烤食品的结构特性,并试图建立其与热导率之间的联系,为研究多孔性食品的热导率提供了有益的启示^[27]。因此,应加强对多孔性食品结构特性的研究并给予定量表示,为建立有效的热导率预测模型提供更多的理论依据。

研究食品加工过程中的适时热导率更有实际意义。在面制品加工过程中,气孔中的气体除空气外,还存在水蒸气、 CO_2 ,而且量也在不断发生变化,这些必然对气相的热导率产生影响。另外,在加工过程中,气体对流传热所占的比例可能较大。这些因素使加工过程中的热导率变化更为复杂,现有热导率模型中对这些因素还没有给予充分考虑。

食品加工过程中,温度达到一定值时热导率出现拐点,这是由淀粉糊化、蛋白变性等造成的,Gupta 采用分段拟合的办法建立经验模型^[23],而结构模型中还对对此没有考虑。如何在结构模型中考虑熟化对热导率的影响是需要进一步研究的内容。

对多孔性食品尤其是冻结多孔性食品热导率的预测还比较困难,在考虑蒸发-冷凝效应以及采用柔性模型时,由于引入了附加参数,使热导率预测变得更加困难。如何建立具有普遍意义的热导率模型及其预测方法是需要进一步解决的问题。

参考文献:

- [1] Thorne S. Mathematical Modeling of Food Processing Operations[M]. London: Elsevier Applied Science, 1992.
- [2] Carson J K, Lovatt S J, Tanner D J, et al. Thermal conductivity bounds for isotropic, porous materials[J]. Int J Heat and Mass Transfer, 2005, 48:2150~2158.
- [3] Saravacos G D, Maroulis Z B. Transport Properties of Foods [M]. New York: Marcel Dekker, Inc, 2001.
- [4] Rao M A, Rizvi S S H. Engineering Properties of foods [M]. New York: Marcel Dekker, Inc, 1995.
- [5] Hamdami N, Monteau J-Y, Le Bail A. Thermophysical properties evolution of French partly baked bread during freezing [J]. Food Res Int, 2004, 137:703~713.
- [6] Pham Q T, Willix J. Thermal conductivity of fresh lamb meat, offals and fat in the range $-40^{\circ}C$ to $+30^{\circ}C$ [J]. J Food Sci, 1989, 54: 508~515.
- [7] Jefferson D R, Lacey A A, Sadd P A. Understanding crust formation during baking[J]. J Food Eng, 2006, 75:515~521.
- [8] Maroulis Z B, Saravacos G D, Krokida M K, et al. Thermal conductivity prediction for foodstuffs: effect of moisture content and temperature[J]. Int J Food Properties, 2002(5):231~245.
- [9] Rahman M S. Food Properties Handbook[M]. New York: CRC Press, 1995.
- [10] Rahman M S, Chen X D, Perera C O. An improved thermal conductivity prediction model of fruits and vegetables as a function of temperature, water content and porosity[J]. J Food Eng, 1997, 31: 163~170.
- [11] de Vries U, Sluimer P, Bloksma A H. A quantitative model for heat transport in dough and crumb during baking[P]. In Proceedings of the Cereal Science and Technology in Sweden, 13-16 June, Lund University, Ystad, Sweden, 1989. 174~188.
- [12] Goedeken D L, Shah K K, Tong C H. True thermal conductivity determination of moist porous food materials at elevated temperatures[J]. J Food Sci, 1998, 63:1062~1066.
- [13] Hamdamia N, Monteau J-Y, Bail A L. Effective thermal conductivity of a high porosity model food at above and sub-freezing temperatures [J]. Int J Refrigeration, 2003, 26: 809~816.
- [14] Sakiyama T, Akutsu M, Miyawaki O, et al. Effective thermal diffusivity of food gels impregnated with air bubbles[J]. J Food Eng, 1999, 39:323~328.
- [15] Hamdami N, Monteau J-Y, Bail AL. Heat and mass transfer in par-baked bread during freezing[J]. Food Res Int, 2004, 37:477~488.
- [16] Kumcuoglu S, Tavman S, Nesvadba P, et al. Thermal conductivity measurements of a traditional fermented dough in the frozen state[J]. J Food Eng, 2007, 78:1079~1082.
- [17] Jury V, Monteau J-Y, Comiti J, et al. Determination and prediction of thermal conductivity of frozen part baked bread during thawing and baking[J]. Food Res Int, 2007, 40:874~882.
- [18] Cogne C, Andrieu J, Laurent P, et al. Experimental data

- and modelling of thermal properties of ice creams[J]. J Food Eng, 2003, 58:331~341.
- [19] Miles C A, Mayer Z, Morley M J, et al. Estimating the initial freezing point of foods from composition data[J]. Int J Food Sci Technol, 1997,32: 389~400.
- [20] Sumnu G, Datta AK, Sahin S, et al. Transport and related properties of breads baked using various heating modes[J]. J Food Eng, 2007, 78: 1382~1387.
- [21] Baik O D, Sablani S S, Marcotte M, et al. Modeling the thermal properties of a cup cake during baking[J]. J Food Sci, 1999, 64: 295~299.
- [22] Šeruga B, Budzaki S, Ugarcic-Hardi Ž, et al. Effect of temperature and composition on thermal conductivity of “Mlinci” dough[J]. Czech J Food Sci, 2005, 23:152~158.
- [23] Gupta T R. Thermal conductivity of Indian unleavened flat bread (chapati) at various stages of baking[J]. J Food Proc Eng, 1993, 16:227~235.
- [24] Carson J K, Lovatt S J, Tanner D J, et al. Predicting the effective thermal conductivity of unfrozen, porous foods[J]. J Food Eng, 2006, 75: 297~307.
- [25] Carson J K. Review of effective thermal conductivity models for foods[J]. Int J of Refrigeration, 2006, 29:958~967.
- [26] Wang J, Carson J K, North M F, et al. A new approach to modeling the effective thermal conductivity of heterogeneous materials[J]. Int J Heat and Mass Transfer, 2006, 49:3075~3083.
- [27] Reyes C, Barringer S A, Uchummal-Chemminian R. et al. Thermal conductivity models for porous baked foods[J]. J Food Proc Preser, 2006, 30:381~392.
- [28] Wang J, Carson J K, North M F, et al. A new structural model of effective thermal conductivity for heterogeneous materials with co-continuous phases[J]. Int J Heat and Mass Transfer, 2007 (in press).
- [29] Carson J K. Comment on the schematic representation of Krischer's effective thermal conductivity model[J]. J Food Eng, 2006, 74:430.
- [30] Maroulis Z B, Krokida M K, Rahman M S. A structural generic model to predict the effective thermal conductivity of fruits and vegetables during drying[J]. J Food Eng, 2002, 52: 47~52.
- [31] Krokida M K, Zogzas N P, Maroulis Z B. Shrinkage and porosity during drying modelling the effect of vacuum[J]. Int J Food Sci Technol, 1997,32: 445~458.
- [32] Hussain M A, Rahman M S, Ng C W. Prediction of pores formation (porosity) in foods during drying: generic models by the use of hybrid neural network[J]. J Food Eng, 2002,51:239~248.
- [33] Nesvadba P. Methods for the measurement of thermal conductivity and diffusivity of foodstuffs[J]. J Food Eng, 1982, 1:93~113.
- [34] Tarnawski V R, Cleland D J, Corasaniti S, et al. Extension of soil thermal conductivity models to frozen meats with low and high fat content[J]. Int J Refrigeration, 2005, 28:840~850.
- [35] Carson J K, Lovatt S J, Tanner D J, et al. An analysis of the influence of material structure on the effective thermal conductivity of porous materials using finite element simulations[J]. Int J Refrigeration, 2003, 26:873~880.
- [36] Baier-Schenk A, Handschin S, von Schonau M, et al. In situ observation of the freezing process in wheat dough by confocal laser scanning microscopy (CLSM): Formation of ice and changes in the gluten network[J]. J Cereal Sci, 2005,42:255~260.
- [37] Baier-Schenk A, Handschin S, Conde-Petit B. Ice in prefermented frozen bread dough - an investigation based on calorimetry and microscopy[J]. Cereal Chem, 2005, 82:251~255.
- (上接第 291 页)
- [24] 李核, 李攻科, 张霞. 密闭式微波系统的微波辅助萃取动力学模型[J]. 中山大学学报, 2004, 43(3): 40~44.
- [25] 曹庸, 于华忠, 杜来填, 等. 虎杖白藜芦醇超临界 CO₂ 萃取研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2003, 29(4): 353~355.
- [26] 曹庸. 超临界 CO₂ 提取虎杖白藜芦醇工艺[P]. 中国专利, CN 1513823A, 2004-7-21.
- [27] 周锦珂, 李金华, 葛发欢. 超临界 CO₂ 萃取虎杖中白藜芦醇的工艺研究[J]. 中药材, 2004, 27(9): 675~676.
- [28] 李华, 沈洁. 超声波法从葡萄籽中提取多酚的研究[J]. 酿酒科技, 2005(5): 89~91.
- [29] 刘树兴, 程丽英, 陈志亮, 等. 白藜芦醇提取工艺的研究[J]. 食品与发酵工业, 2004(12): 145~147.
- [30] 江曙, 朱蓉蓉, 张芳, 等. 虎杖中白藜芦醇的提取及工艺的优化[J]. 江南中医药大学学报, 2006, 22(3): 197~199.
- [31] 康彦芳, 李梦青, 侯建功, 等. 超声波法从葡萄穗轴废渣中提取白藜芦醇[J]. 化工进展, 2006, 25(11): 1362~1365.
- [32] 苏文强, 杨磊, 李艳杰, 等. 碱提取法从虎杖中分离白藜芦醇的研究[J]. 林产化工通讯, 2004, 38(1): 17~20.
- [33] 苏文强, 杨磊, 朱明华, 等. 中压柱层析法分离白藜芦醇的研究[J]. 林产化学与工业, 2004, 24(1): 39~42.
- [34] 向海燕. 虎杖中白藜芦醇的分离纯化研究[D]. 中南大学博士学位论文, 2005.
- [35] 曹勇. 虎杖中白藜芦醇的提取、纯化技术研究[D]. 湖南农业大学硕士学位论文, 2001.
- [36] 向海燕, 周春山, 钟世安, 等. 白藜芦醇分子印记聚合物合成及其中药虎杖提取液活性成分的分离[J]. 应用化学, 2005, 22(7): 740~744.
- [37] 瞿卫林, 陈晓祥, 赵伯涛. 大孔吸附树脂分离虎杖中白藜芦醇的研究[J]. 中国野生植物资源, 2005, 24(6): 60~64.
- [38] 陈雷, 杨福全, 张天佑, 等. 虎杖中白藜芦醇和白藜芦醇苷高速逆流色谱分离提纯及分析[J]. 分析测试学报, 2000, 19(4): 60~62.
- [39] 孟昭仁, 奚洪民, 刘进帮. 白藜芦醇的提取和纯化及分析方法研究进展[J]. 化学世界, 2002, 16(10): 511~513.
- [40] 丁永胜, 何丽一. 薄层荧光扫描法测定小叶买麻藤等植物中芪类化合物含量[J]. 药学报, 2000, 35(6): 454~456.