

水产食品罐头热杀菌模拟与优化的研究进展

黄蓓蓓

(三门峡职业技术学院, 三门峡 472000)

摘要: **目的** 为了动态掌握水产食品罐头内食品热杀菌过程中的全场温度、速度、杀菌值的分布及变化规律,有效指导工业生产,对热杀菌过程模拟与优化的进展进行研究。**方法** 介绍目前对热杀菌模拟及优化的研究方法,并对其适用范围作分析,梳理水产食品罐头热杀菌模拟及优化的研究历程和进展。**结论** 目前很多研究所建立的模型只有理论上的分析,缺乏实验上的证实。运用计算机进行热杀菌的模拟与优化并应用到实际生产中是水产食品罐头的发展方向。

关键词: 水产食品罐头; 热杀菌; 模拟; 优化

中图分类号: TS295⁺.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)13-0099-07

Research Progress in Simulation and Optimization of Thermal Sterilization of Canned Aquatic Products

HUANG Bei-bei

(Sanmenxia Polytechnic, Sanmenxia 472000, China)

ABSTRACT: In order to comprehensively and dynamically understand the distribution and variation laws of temperature, speed and sterilizing value of the food inside the aquatic product cans during thermal sterilization and thus to effectively guide industrial production, the research progress in simulation and optimization of the thermal sterilization process is required. This review briefly introduced the current research methods for the simulation and optimization of thermal sterilization, analyzed their applicable ranges, and combed the research history and progress of thermal sterilization simulation and optimization of canned aquatic products. At the moment, the models established in most studies are limited to theoretical analysis, lacking experimental verification. Employment of computers in simulation and optimization of thermal sterilization and its application in actual production would be the development direction of canned aquatic products.

KEY WORDS: canned aquatic products; thermal sterilization; simulation; optimization

水产食品是海洋和淡水渔业生产的动植物及其加工产品的统称,主要有鱼、虾、蟹、贝等4类。我国是水产品的生产和消费大国,水产品市场和消费群体不断扩大,需求量逐年增加。水产食品作为一种易腐败的食品原料,加工成水产罐制品,可以有效杀灭原料中的腐败菌和致病菌,保证产品的货架寿命。水产食品罐头的热杀菌是其重要的加工方法之一。为了在保证水产食品安全的前提下,提高

水产食品的品质,同时缩短杀菌时间,需要对热杀菌过程进行优化。

一个多世纪以来,热杀菌是生产罐头食品的一种重要的食品加工方法。热杀菌过程必须进行精心计算,使该过程中产品达到指定杀菌温度,以杀灭微生物,确保灭菌食品的安全^[1-6]。过度的热杀菌处理也必须避免,因为热杀菌过程也会对食品产生不利影响质量(如营养物质的损耗及感官品质的下

收稿日期: 2016-04-11

作者简介: 黄蓓蓓(1981—),女,辽宁鞍山人,工学硕士,三门峡职业技术学院讲师,主要研究方向为食品分析和发酵工程。

降)^[7]。为了寻找最佳的热加工工艺参数,通过大量实验验证的方法不仅耗时耗力,而且投入巨大。近年来发展起来的计算机仿真模拟是非常有效且高效的解决途径。通过对罐头食品热加工过程中传热传质的计算机模拟,不仅可以完全动态掌握容器内食品热杀菌过程中的全场温度、速度、杀菌值的分布及变化规律,而且还可进一步研究加热工艺参数的优化,有效指导工业生产,特别是对断电等突发事件的发生后续处理具有指导性作用。

1 传热基础

传热是由于温度差而引起的能量转移,热量总是自动地由高温区传递到低温区。根据传热机理不同,可以分热传导、热对流和热辐射等3种基本方式。传热过程与温度分布有着密切的关系,温度场是物体或系统内各点温度分布的综合。一般情况下,任意点的温度是空间位置和时间的函数,温度场的数学表达式为:

$$T = f(x, y, z, t) \quad (1)$$

式中: x, y, z 为空间中某一点的坐标; t 为所处时间。如果温度场随时间而变化,则称为不稳定温度场,反之,则称为稳定温度场。

1.1 热传导

傅里叶定律是热传导的基本定律,是一个实验定律,其表达式为:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2)$$

式中: λ 为导热率,表征物质导热能力的大小。

1.2 热对流

对流传热传热速率由牛顿冷却定律给出:

$$Q = hS \cdot \Delta T \quad (3)$$

式中: h 为对流传热系数 ($W/(m^2 \cdot K)$); S 为总传热面积 (m^2); ΔT 为流体与壁面间存在的温度差平均值。

2 模拟热杀菌过程的数值计算方法

在罐头行业刚刚诞生时,对食品内部温度要依靠经验公式来预测。经验公式的优点是简单、应用范围广,以至于该法在今天仍被用于预测或评估一

些热加工,缺点是其无法应用于变温的边界条件下^[3]。

出于对食品安全的考虑,对于低酸性食品的灭菌,必须确保有效灭菌时间达到 12 d (以肉毒梭状芽孢杆菌为目标微生物)^[8],因此,模型的准确性至关重要。现代食品工业中,在对热杀菌过程进行模拟时,需要描述食品复杂的几何图形中流体的流动过程。其中,计算流体动力学 (CFD) 作为一种强大的仿真和分析工具而被广泛应用^[9-10]。该方法使用物理模型,并结合运动学和动力学的优势,可以对热杀菌的每一个具体过程进行预测^[11]。在食品工程中,CFD 法可以有效解决经验公式和理论分析无法解决的复杂问题^[7]。目前模拟热加工过程的数值计算方法很多,其中,有限差分法 (FDM)、有限体积法 (FVM) 和有限元法 (FEM) 是 3 种最常用的解决流体力学及传热传质问题的方法^[7]。每种 CFD 方法有各自的特点和各自的适用范围。

2.1 有限差分法^[12]

有限差分法是计算机数值模拟最早采用的方法,至今仍被广泛运用。其基本思想是把连续的求解区域用有限个节点构成的网格来代替;把连续求解区域上的连续变量的函数用在网格上定义的离散变量函数来近似;把原方程和求解条件中的微商用差商来近似,积分用积分和来近似,于是原微分方程和求解条件就近似地代之以代数方程组,即有限差分方程组。解此方程组就可以得到原问题在离散点上的近似解。然后再利用插值方法便可从离散解得到求解问题在整个区域上的近似解。该法数学概念直观,表达简单,对任意复杂的偏微分方程都可写出其对应的差分方程,是发展较早且比较成熟的数值方法。该方法已得到了充分的研究。有限差分法的缺点是只适用于简单几何形状容器,如有限厚板容器^[13]、圆柱形^[14-18]、矩形^[19]、蒸煮袋^[20-21]等,而对于复杂形状容器的精确度不高^[22]。

2.2 有限元法^[23]

有限元法是一种高效能、常用的计算方法。其基本思想是将连续的求解区域离散为一组由有限个单元组成的并按一定方式相互联结在一起的单元组合体来加以分析,即假想将物体划分为小的单元,然后对各个单元进行分析,最后再把单元分析结果组合得到整个对象的分析结果。有限元法可以统一处理多种边界条件,可以适用于复杂的几何构

型,可对不同物理现象耦合的问题进行有效分析^[24]。此外,有限元法采用规范化的矩阵形式表达,便于计算机的编程和执行。目前采用有限元法的商业计算流体力学(CFD)软件有 FIDAP, CFX 等。

2.3 有限体积法^[25]

有限体积法的基本思路是将计算区域划分为一系列不重复的控制体积,并使每个网格点周围有一个控制体积;将待解的微分方程对于每一个控制体积积分,便得出一组离散方程。其中的未知数是网格点上因变量的数值。为了求出控制体积的积分,必须假定值在网格点之间的变化规律,即假设值分段的分布剖面。有限体积法的基本思路易于理解,并能得出直接的物理解释。有限体积法得出的离散方程,要求因变量的积分守恒对任意一组控制体积都得到满足,对整个计算区域,自然也得到满足。这是有限体积法吸引人的优点。此外,对于有限差分法等一些离散方法,仅当网格极其细密时,离散方程才满足积分守恒;有限体积法即使在粗网格情况下,也显示出准确的积分守恒。有限体积法可以在任何离散水平下,对单个体积、一组体积或整个求解域都可达到保守平衡^[26-27]。此外,经过可靠的数值检验,有限体积法对于扩散-对流复合问题的准确度更高^[28-29]。

非共轭对流/传导数学模型是在固体或液体食品中,拥有恒定或可变的热物理性质,被用来描述食品表面第 1 类、第 2 类或第 3 类边界条件下的传热传质过程^[30-31]。共轭对流/传导问题是要研究一个更普遍的物理现象,即液体或固体食物与其周围流体相互耦合。

2.4 非共轭模型

非共轭模型的适用对象是固体或液体食品,且食品表面存在第 1 类、第 2 类或第 3 类边界条件。热传导的边界条件是指导热物体边界处的温度或表面传热情况。边界条件通常分为以下 3 类。

边界条件(Dirichlet)。给定物体边界上任何时刻的温度分布。

$$T = T_{\text{ref}} \quad (4)$$

式中: T_{ref} 为参考温度。

边界条件(Neumann)。给定物体边界上的热流密度分布。

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = q^n \quad (5)$$

式中: k 为热导率 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$); n 为食品表面法线方向; q^n 为热流量 (W/m^2)。

边界条件(Robin)。给定物体边界与周围流体间的表面传热系数 h 及流体的温度 T_{fluid} 。

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_{\text{wall}} - T_{\text{fluid}}) + h_m h_{\text{lv}} \times (C_{\text{wall}} - C_{\text{fluid}}) \quad (6)$$

式中: T_{wall} 为食品壁面温度; h_m 为传质系数 (m/s); h_{lv} 为蒸发潜热 ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$); C_{wall} 为壁边缘液体的物质浓度; C_{fluid} 为流体的物质浓度 (kg/m^3)。其中,食品表面蒸发(已包括在式(6)最后一项中)结合了传质非稳态扩散方程和传热非稳态扩散方程。要应用非共轭模型,需要知道的参数有:食品的几何形状及尺寸、初始条件(如压力、温度、食品浓度等)、热物理性质(对于固体食品:密度、比热、热导率等;对于液体食品:密度、比热、热导率、粘度等)、边界条件(热导率、温度等)。这些参数的准确值并不一定都能从文献中获得,因为在非线性瞬态模型中,这些参数有可能随时间或空间而变化。

2.5 共轭模型

共轭传热模型既考虑了食品本身的传热,也将食品周围的气体或液体的流体力学纳入考虑范围^[32]。此外,共轭模型还考虑了食品内部的传热与食品到周围液态的传热的相互关系^[33]。共轭模型的特点是其不需要获得固体或液体食品表面的对流传热系数,这些系数可以作为数值模拟的一部分而被计算出来。由此可见,热杀菌中任何容器中的食品与其周围液体的传热相互作用都可通过共轭模型而被准确描述出来。同样,共轭模型在进行模拟时也不需要表明传热系数,这些系数可以由杀菌结束后食品与其周围液体的温度分布来得到。

要应用共轭传热模型,需要知道的参数有:食品的几何形状及尺寸、初始条件(如压力、温度、食品浓度等(包括食品与其周围液体))、热物理性质(对于固体食品:密度、比热、热导率等;对于液体食品:密度、比热、热导率、粘度等)、外部热物理性质(周围液体的密度、比热、热导率、粘度等)。

食品和流体沿法线方向到容器壁进行传热的共轭边界条件可由式(7)描述:

$$(T_{\text{food}})_{\text{wall}} = (T_{\text{fluid}})_{\text{wall}} \quad (7)$$

$$k_{\text{food}} \left(\frac{\partial T_{\text{food}}}{\partial n} \right)_{\text{wall}} = k_{\text{fluid}} \left(\frac{\partial T_{\text{fluid}}}{\partial n} \right)_{\text{wall}}$$

式中： T_{food} 为食品的温度(K)； T_{wall} 为容器壁的温度(K)； k_{food} 为食品的热导率(W/(m·K))； k_{fluid} 为周围液体的热导率(W/(m·K))； n 为到食品表面的发现方向。

局部对流传热系数可由食品及周围液体的温度场计算得到：

$$q'' = \frac{k_{\text{fluid}}(T_{\text{fluid}} - T_{\text{wall}})}{\Delta n}; \quad h = \frac{q''}{T_{\text{wall}} - T_{\text{fluid}}} \quad (8)$$

式中： q'' 为热通量(W/m²)。

共轭模型在固液混合罐中的研究也有较多报道。Ghani 和 Farid^[32]模拟固液混合罐内的热杀菌过程，将菠萝作为不可渗透固体和多孔介质来模拟菠萝罐头热杀菌过程。Rabiey 等^[34]将固体假想为均匀的圆球颗粒来模拟固液混合罐头的热杀菌过程，并通过实验来证明模型的精确性与可靠性。Padmavati 等^[35]将菠萝假想成均匀的块状几何体随机分布在罐中，通过实验发现模型的预测温度与实验结果十分吻合。

由于大部分水产品都呈固态，且浸泡于卤水中，在罐头内呈固液混合状态，因此共轭传热模型是分析水产品热传递的主要模型。

3 热杀菌的优化理论

传热模型可以对在任何变化的外界温度下的食品冷点温度变化作出准确的预测，这是对热杀菌过程进行优化的基础^[36-38]。一般来说，微生物比食品的其他质量参数（如营养、质构、颜色等）对热的抵抗力更低，这是热杀菌过程能够进行优化的理论依据^[8]。已有研究表明，变温杀菌技术（VRT）能够提升食品质量，同时减少杀菌时间及消耗的能量^[39-46]。早期的研究主要集中于变温杀菌对营养物质的保留。与恒温杀菌相比，变温杀菌在这方面仅提高了2%~3%，效果并不明显^[44-46]。20世纪90年代以来，学者们逐步将研究集中于其他质量因素，如表面质量、杀菌时间、能量消耗等。这些因素对于消费者和食品企业来说都是意义重大的^[39-43]。大部分对于变温杀菌的研究都表明，使用变温杀菌技术，相对于恒温杀菌技术，在达到相同的表面质量时，杀菌时间显著缩短，一般为20%~45%；或在相

同的杀菌时间下，表面质量有显著提升，一般为5%~25%^[39-43,47]。通常一种产品都有其特定的变温曲线，因而需要对不同的产品分别进行建模与优化^[40]。

目前，已有一系列热杀菌优化方法，如复形法^[43]、拟牛顿多元优化法^[42]、多重迭代法^[45]、二分法^[48]、综合控制随机搜索法^[17]、随机质心优化法^[47]、共轭梯度法^[39]、神经网络模型与遗传算法^[40-41]等。

3.1 共轭梯度法^[39]

共轭梯度法是解决大型非线性优化的有效算法之一，具有所需存储量小、步收敛性好、稳定性高，且不需要任何外来参数的特点。Simpson 等人^[39]用共轭梯度法进行了温度曲线的优化，取得了较好的结果。此外，共轭梯度法实现简单，用 Microsoft Excel 即可完成。

3.2 神经网络模型与遗传算法^[40]

近年来，神经网络模型与遗传算法的组合用于热杀菌的模拟与优化逐渐受到关注。神经网络是一种通过模仿动物神经网络特质的计算单元的结合体。通过神经网络，可以在输入与输出之间直接建立联系，而不需要考虑其内在的关系。遗传算法是一种模拟自然进化过程搜索最优解的方法。将这两者组合使用，即使用神经网络模型进行建模，用遗传算法进行检索、优化，具有计算速度快、鲁棒性和灵活性的特点。

4 水产食品罐头热杀菌模拟及优化研究历程

4.1 半经验模型

半经验模型是指对复杂的过程作必要合理的简化，并经实验检验与修正其模型参数的数学模型。Pérez-Martín 等^[49]运用半经验模型对长鳍金枪鱼的预煮时间进行了计算机模拟，建立了预煮时间、初始鱼重、初始温度的回归方程，并且建立了3个简便的应用方程。利用这3个简便方程，可以不使用计算机，即可方便地进行热杀菌模拟。半经验模型的缺点是无法对变温条件进行模拟，且每种新食品的半经验模型均需较复杂的计算与实验才能确定。

4.2 CFD 模拟与优化

Durance 等^[47]使用有限差分法，以有限圆柱体

作为容器,建立太平洋鲑鱼的热传导模型,并使用随机质心优化(RCO)来寻找最佳的VRT条件。该研究显示,采用RCO优化的VRT加热方式在保持相同的 F_0 值和表面质量的情况下,杀菌时间从64 min减少至54 min,硫胺素损失从19.6%减少至16.8%。Simpson等^[39]对软包装鲑鱼的热杀菌过程进行了优化,该研究使用有限差分法进行模拟,并采用共轭梯度法对其VRT函数(三次样条曲线)进行优化。模拟值与实际值的误差小于5%,并且无显著差别($P < 0.05$)。VRT优化后,在相同杀菌值下的杀菌时间可减少多达20%~30%,营养素剩余率略高于恒温杀菌,且管内各点的营养素分布更为均匀。Simpson等^[50]对各类海鲜(贻贝、鲑鱼、螃蟹、蛤蚌、竹蛭)的热杀菌最优化标准进行了分析。

4.3 基于COMSOL Multiphysics的模拟与优化

COMSOL Multiphysics是一款多物理场仿真软件,比CFD软件的功能更全,面向对象更广。Ansorena等^[51]应用COMSOL Multiphysics软件对金枪鱼罐头的热传递函数进行了研究,得到了准确的金枪鱼传热模型,并在正弦函数和指数函数的VRT曲线下进行了热杀菌模拟。Ansorena等^[52]利用热传递模型找到贻贝罐头的最慢加热点,并进行优化,获得了最佳质量VRT函数。结果表明,VRT杀菌的表面质量显著高于恒温杀菌。

4.4 品质动力学模型

Banga^[53]等人运用非稳态实验法,建立了金枪鱼的硫胺素和表面颜色的热降解动力学模型。他们认为其动力学模型是一阶的,并且动力学参数D依赖于热致死时间TDT,并使用加权非线性回归计算其动力学参数,使用考虑了非均匀和非稳态的温度分布的数学模型来计算硫胺素的平均质量剩余。该模型的预测值与实际值的相关度高,统计可靠性好,并得出了一阶动力学模型可被用于热杀菌的模拟与质量优化的结论。Girard等^[54]研究了VRT与CRT对红鲑鱼及粉鲑鱼罐头香味成分的影响,该研究采用的VRT函数为三重斜坡函数,运用主成分分析法,对罐头的的主要香味成分(醛、酮及硫化物)进行了分析,认为不同杀菌条件下香味物质含量的差异显著,但在感官评价上无显著差异。

5 结语

1) 模型的验证方面。目前,很多研究所建立的模型只有理论上的分析,而缺乏实验上的证实。比如,共轭模型的建立使用了很多近似值和一些假设,这些近似与假设并没有得到实验的验证,因此如何在现有条件下设计实验,验证模型在不同实验条件下的可靠性,是今后研究所要面临的问题。

2) VRT函数研究方面。Chen等将指数函数与正弦函数作为热杀菌的VRT函数,取得了一定的优化结果。选用这2种函数的原因是,它们都只包括了2个可变参数,而其他函数,如阶梯型函数、多重斜坡函数等,则包括了更多的参数,分析起来也更加困难。后者的优化潜力大大高于前面2种函数。如Simpson等将三次样条曲线作为VRT函数进行优化,取得了不错的结果。由此可见,对更为复杂的函数进行优化,是今后热杀菌优化的发展趋势之一。

3) 实际应用方面。目前为止,文中所述的热杀菌模拟与优化技术还没有被正式应用于水产食品工业。因为每一种水产食品均有其独特的传热特性,要对某一种特定食品建立传热函数较为复杂。进行热杀菌的模拟与优化有着显著的优势,如降低成本,节约时间,扩大生产规模,允许生产者实时掌握杀菌的程度,并能有效应对突发情况(如断电、蒸汽泄露等),可进行在线纠偏等。随着时代的发展,运用计算机进行热杀菌的模拟与优化并应用到实际生产中是可以预见的。

参考文献:

- [1] BALL O C. Mathematical Solution of Problems on Thermal Processing of Canned Food[M]. Auckland: University of California Press, 1928.
- [2] BIGELOW D W, BOHART S G, RICHARDSON C A. Heat Penetration in Processing Canned Foods[M]. New York: Research Laboratory, National Cannery Association, 1920.
- [3] HOLDSWORTH D S. Thermal Processing of Packaged Foods[J]. Book Reviews, 1998,9(38):41.
- [4] PHAM T Q. Calculation of Thermal Process Lethality for Conduction-heated Canned Foods[J]. Journal of Food Science, 1987,52(4):967—974.
- [5] STUMBO R C. Thermobacteriology in Food Processing [M]. New York: Academic Press, 1965.
- [6] TEIXEIRA A A. Thermal Process Calculations. Handbook of Food Engineering[M]. Taylor and Francis

- Group, 1992:563—619.
- [7] LEMUS-MONDACA R A, VEGA-GÁLVEZ A, MORAGA N O. Computational Simulation and Developments Applied to Food Thermal Processing[J]. Food Engineering Reviews, 2011,3(3/4):121—135.
- [8] MÁRQUEZ C A, SALVADORI V O, MASCHERONI R H, et al. Application of Transfer Functions to the Thermal Processing of Sweet and Sour Cherries Preserves:Influence of Particle and Container Sizes[J]. Food Science and Technology international, 2003,9(2):69—76.
- [9] LIU S X, PENG M. Verification of Mass Transfer Simulation with CFD Using Highly Accurate Solutions[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005,49(2):309—314.
- [10] IVESTER R W. Productivity Improvement through Modeling: an Overview of Manufacturing Experience for the Food industry[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2008,7(1):182—191.
- [11] BRUIN S, JONGEN T R G. Food Process Engineering: The Last 25 Years and Challenges Ahead[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2003,2(2):42—81.
- [12] 克罗夫特 D R, 利利 D G. 传热的有限差分方程计算[M]. 北京:冶金工业出版社, 1982.
- CROFT D R, LILI D G. Finite Difference Heat Transfer Equation Calculation[M]. Beijing:Metallurgical industry Press, 1982.
- [13] SILVA C, HENDRICKX M, OLIVEIRA F, et al. Optimal Sterilization Temperatures for Conduction Heating Foods Considering Finite Surface Heat Transfer Coefficients[J]. Journal of Food Science, 1992, 57(3): 743—748.
- [14] SHIN S, BHOWMIK S R. Computer Simulation to Evaluate Thermal Processing of Food in Cylindrical Plastic Cans[J]. Journal of Food Engineering, 1990,12(2):117—131.
- [15] TUCKER G S, CLARK P. Modelling the Cooling Phase of Heat Sterilization Processes, Using Heat Transfer Coefficients[J]. International Journal of Food Science & Technology, 1990,25(6):668—681.
- [16] BHOWMIK S R, SHIN S. Thermal Sterilization of Conduction-Heated Foods in Plastic Cylindrical Cans Using Convective Boundary Condition[J]. Journal of Food Science, 1991,56(3):827.
- [17] BANGA J R, PEREZ-MARTIN R I, GALLARDO J M, et al. Optimization of the Thermal Processing of Conduction-heated Canned Foods: Study of Several Objective Functions[J]. Journal of Food Engineering, 1991,14(1):25—51.
- [18] AKTERIAN S G, FIKIIN K A. Numerical Simulation of Unsteady Heat Conduction in Arbitrary Shaped Canned Foods during Sterilization Processes[J]. Journal of Food Engineering, 1994,21(3):343—354.
- [19] NEWTONIAN H T T, PLATE N F F I, EXCHANGERS H, et al. Mathematical Modelling of Sterilisation and Cooking Processes for Heat Preserved Foods Applications of a New Heat Transfer Model[J]. Food and Bioproducts Processing, 1991,69c:5—12.
- [20] TANDON S, BHOWMIK S R. Evaluation of Thermal Processing of Retortable Pouches Filled with Conduction Heated Foods Considering their Actual Shapes[J]. Journal of Food Science, 1986,51(3):709—714.
- [21] BHOWMIK S R, TANDON S. A Method for Thermal Process Evaluation of Conduction Heated Foods in Retortable Pouches[J]. Journal of Food Science, 1987, 52(1):202—209.
- [22] NAVEH D, KOPELMAN I J, PFLUG I J. The Finite Element Method in Thermal Processing of Foods[J]. Journal of Food Science, 1983,48(4):1086—1093.
- [23] 杜平安, 于亚婷, 刘建涛. 有限元法:原理、建模及应用[M]. 第2版. 北京:国防工业出版社, 2011.
- DU Ping-an, YU Ya-ting, LIU Jian-tao. Finite Element Method:Principle, Modelling, and Application[M]. 2nd Edition. Beijing:National Defence industry Press, 2011.
- [24] 鲁建霞, 苟惠芳. 有限元法的基本思想与发展过程[J]. 机械管理开发, 2009,24(2):74—75.
- LU Jian-xia, GOU Hui-fang. Basic Idea and Development History of Finite Element Method [J]. Mechanical Management and Development, 2009,24(2):74—75.
- [25] 李人宪. 有限体积分法基础[M]. 第2版. 北京:国防工业出版社, 2008.
- LI Ren-xian. Basics of Finite Volume Method[M]. 2nd Edition. Beijing:National Defence industry Press, 2008.
- [26] VERSTEEG H K. An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method, 2/E[M]. Pearson Education India, 1995.
- [27] TURNER I, MUJUMDAR A S, KUDRA T. Mathematical Modeling and Numerical Techniques in Drying Technology[J]. Drying Technology an International Journal, 1997, 15(3):1259—1260.
- [28] PATANKAR S V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow (Hemisphere Series on Computational Methods in Mechanics and Thermal Science)[M]. CRC Press, 1980.
- [29] BOTTE G G, RITTER J A, WHITE R E. Comparison of Finite Difference and Control Volume Methods for solving differential equations[J]. Computers & Chemical Engineering, 2000, 24(12):2633—2654.
- [30] HUSSAIN M M, DINCER I. Two-dimensional Heat and Moisture Transfer Analysis of a Cylindrical Moist Object Subjected to Drying:a Finite-difference Approach[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(21):4033—4039.
- [31] JANJAI S, LAMLERT N, INTAWEE P, et al. Finite Element Simulation of Drying of Mango[J]. Biosystems engineering, 2008, 99(4):523—531.
- [32] GHANI A G A, FARID M M. Using the Computational

- Fluid Dynamics to Analyze the thermal Sterilization of Solid-Liquid Food Mixture in Cans[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2006,7(1/2): 55—61.
- [33] LAMNATOU C, PAPANICOLAOU E, BELESSIOTIS V, et al. Finite-volume Modelling of Heat and Mass Transfer during Convective Drying of Porous Bodies—non-conjugate and Conjugate Formulations Involving the Aerodynamic Effects[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(7):1391—1402.
- [34] RABIEY L, FLICK D, DUQUENOY A. 3D Simulations of Heat Transfer and Liquid Flow During Sterilisation of Large Particles in a Cylindrical Vertical Can[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007,82(4): 409—417.
- [35] PADMAVATI R, ANANDHARAMAKRISHNAN C. Computational Fluid Dynamics Modeling of the Thermal Processing of Canned Pineapple Slices and Titrates[J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2013, 6(6): 882—895.
- [36] BALSACANTO E, ALONSO A A, BANGA J R. A Novel, Efficient and Reliable Method for Thermal Process Design and Optimization. Part I: Theory[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 52(3):227—234.
- [37] BALSACANTO E, BANGA J R, ALONSO A A. A Novel, Efficient and Reliable Method for Thermal Process Design and Optimization. Part II: Applications [J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 52(3):235—247.
- [38] Mohamed I O. Computer Simulation of Food Sterilization Using an Alternating Direction Implicit Finite Difference Method[J]. *Journal of Food Engineering*, 2003, 60(3):301—306.
- [39] SIMPSON R, ALMONACID S, MITCHELL M. Mathematical Model Development, Experimental Validation and Process Optimization: Retortable Pouches Packed with Seafood in Cone Frustum Shape[J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 63(2):153—162.
- [40] CHEN C R, RAMASWAMY H S. Multiple Ramp- variable Retort Temperature Control for Optimal Thermal Processing[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2004, 82(1):78—88.
- [41] CHEN C R, RAMASWAMY H S. Modeling and Optimization of Variable Retort Temperature (Vrt) Thermal Processing Using Coupled Neural Networks and Genetic Algorithms[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 53(3):209—220.
- [42] NORONHA J, HENDRICKX M, SUYS J, et al. Optimization of Surface Quality Retention during the Thermal Processing of Conduction Heated Foods Using Variable Temperature Retort Profiles[J]. *Journal of food processing and preservation*, 1993, 17(2):75—91.
- [43] ALMONACID MERINO S F, SIMPSON R, TORRES J A. Time-Variable Retort Temperature Profiles for Cylindrical Cans: Batch Process Time, Energy Consumption, and Quality Retention Model[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 1993, 16(4):271—287.
- [44] NADKARNI M M, Hatton T. Optimal Nutrient Retention during the Thermal Processing of Conduction - Heated Canned Foods: Application of the Distributed Minimum Principle[J]. *Journal of Food Science*, 1985, 50(5):1312—1321.
- [45] SAGUY I, KAREL M. Optimal Retort Temperature Profile in Optimizing Thiamin Retention in Conduction-Type Heating of Canned Foods[J]. *Journal of Food Science*, 1979, 44(5):1485—1490.
- [46] TEIXEIRA A A, Zinsmeister G E, ZAHRADNIK J W. Computer Simulation of Variable Retort Control and Container Geometry As A Possible Means of Improving Thiamine Retention in Thermally Processed Foods [J]. *Journal of Food Science*, 1975, 40(4):656—659.
- [47] DURANCE T D, DOU J, Mazza J. Selection of Variable Retort Temperature Processes for Canned Salmon[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 1997, 20(1):65—76.
- [48] HILDENBRAND P. An Approach to Solving the Optimal Temperature Control Problem for Sterilization of Conduction-heating Foods[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 1980,3(3):123—142.
- [49] PÉREZ-MARTÍN R I, BANGA J R, SOTELO M G, et al. Prediction of Precooking Times for Albacore (Thunnus Alalunga) by Computer Simulation[J]. *Journal of Food Engineering*, 1989, 10(2):83—95.
- [50] SIMPSON R, ALMONACID S, TEIXEIRA A. Optimization Criteria for Batch Retort Battery Design and Operation in Food Canning-Plants[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2003, 25(6):515—538.
- [51] ANSORENA M R, DEL VALLE C, SALVADORI V O. Application of Transfer Functions to Canned Tuna Fish Thermal Processing[J]. *Food Science and Technology international*, 2010, 16(1):43—51.
- [52] ANSORENA M R, SALVADORI V O. Optimization of Thermal Processing of Canned Mussels[J]. *Food Science and Technology international*, 2011, 17(5):449—458.
- [53] BANGA J R, ALONSO A A, GALLARDO J M, et al. Kinetics of Thermal Degradation of Thiamine and Surface Colour in Canned Tuna[J]. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung*, 1993, 197(2): 127—131.
- [54] GIRARD B, DURANCE T. Headspace Volatiles of Sockeye and Pink Salmon as Affected by Retort process[J]. *Journal of Food Science*, 2000, 65(1):34—39.