

液体- 颗粒食品无菌工艺的研究进展

邓 力, 金征宇

(江南大学食品学院, 无锡 214036)

摘 要: 液体- 颗粒食品无菌工艺试图将超高温杀菌工艺应用于固体食品, 其主要特征是使用刮板表面换热器和保温管, 目前远未发展到技术成熟的水平。该工艺具有处理传统中式餐桌食品的潜力, 可能在未来发展为我国食品科学研究的热点。液体- 颗粒传热学的实验和预测方法——颗粒温度时间关系的实验测量, 无因次关系理论预测颗粒流体传热膜系数, 作为建立致死率和品质保持的数学模型的基础, 是液体- 颗粒食品的无菌工艺的关键技术之一。由于Ball法作为传统的杀菌工艺评价方法不适用于液体- 颗粒食品无菌工艺, 一些新的杀菌工艺效果评价模型和实验验证方法发展起来。该论文概述了液体- 颗粒食品无菌工艺的基本原理、传热学、主要效果评价模型、评价实验方法以及工艺优化所采用的目标函数和限制函数。

关键词: 液体- 颗粒食品; 无菌工艺; 致死率; 传热; 传热膜系数 h_{fp} ; 效果评价; 优化

中图分类号: TS205.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)05-0012-10

0 引言

食品加工中采用超高温短时杀菌结合无菌包装称为无菌工艺, 具有显著的优点^[1]: 1) 食品感官及营养品质明显优于常规杀菌; 2) 避免杀菌后食品再污染; 3) 快速换热提高了能量利用率; 4) 自动化程度高。在液体食品加工领域无菌工艺已成为主流杀菌技术, 仅美国就有420条商业生产线^[1]。但是无菌工艺应用于固体食品时却产生了技术困难。Silva等^[2]指出固体食品内部的热传导会增加灭菌时间, 使其难以应用于固体食品。现有的解决方法是固体颗粒食品与液体混合, 通过高效换热器实现无菌工艺。近十多年来, 含有分散颗粒的高粘度食品的无菌工艺已经取得较大进展, 工艺原理和研究方法已经达到很高的水平, 但远未发展到技术成熟的水平。

液体- 颗粒无菌工艺中F值(致死率)和C值(蒸煮值, Cook Value)分别代表加热过程中的微生物致死率和食用品质破坏, 而食品温度的时间和空间分布是计算F值和C值必要条件, 因此液体- 颗粒传热学是液体- 颗粒食品无菌工艺的核心内容。

通过实验测量结合数学模型来获得液体- 颗粒温度的时间和空间分布, 而数学模型也必须经过实验测量来验证。对于连续运动的流体和悬浮颗粒, 颗粒温度的测量很困难, 虽然已发展出多种测量方法, 但目前尚无准确可靠的颗粒测温技术, 导致致死率预测的数学模型的应用领先于工艺评价验证的实验研究, 缺少一种公认的、普适的评价模型和方法。近年来, 实验方法和数学手段进一步丰富和发展了, 这一情况并未得到根本改变^[3-6], 成为液体- 颗粒食品无菌工艺研究的主要障碍。

传统阿氏杀菌工艺采用Ball法评价杀菌工艺的效果。Messon等^[7]指出Ball法的应用条件: 1) 表面对流

换热系数 h_{fp} 无穷大; 2) 加热时间必须长至满足传热方程无限级数求解的一阶近似; 3) 介质温度恒定。而这些条件在液体- 颗粒食品的无菌工艺中通常都不能满足。Sastry^[3]认为, 由于保温管内颗粒连续加热时流体温度会下降, 从罐头食品中得到的时间温度半对数直线, 在连续流动系统中不一定存在。因此必须建立一套新的杀菌工艺效果评价和实验验证方法。

与传统方法相比, 液体- 颗粒无菌工艺优化的基本条件是相同的: 即在保证达到商业灭菌要求F值的条件下使食品品质的损害最小。但是由于无菌工艺与传统方法的传热学过程明显不同, 导致优化计算更为复杂和困难。

中国食品工业的一个主要任务是传统中式食品的工业化, 其核心就是中式传统餐桌食品的工业化^[4]。中国饮食文化有“食不厌精, 脍不厌细”的传统, 大多数中式菜肴, 尤其是家常菜肴, 通常为体积尺寸较小的固体颗粒(丁、丝、片)。同时, 传统中式菜肴有相对较高的加热强度, 有利于高温条件下的热交换, 从而使很多中式食品具有通过HTST(高温短时)及UHT(超高温)技术杀菌处理成为工业化的方便食品的潜力。笔者认为, 液体颗粒混合物无菌工艺可能在未来发展为我国食品科学研究的热点, 成为传统中式食品工业化技术的主要技术核心之一。但在本文投稿前国内尚没有该领域的中文文献报道和相关实验研究。

本论文对液体- 颗粒食品的刮板式换热器- 保温管无菌工艺基本原理、传热学、效果评价及优化作了原理性综述, 并介绍了主要研究方法。

1 液体- 颗粒混合物无菌工艺概述

在液体- 颗粒食品无菌工艺中, 食品颗粒复杂多样的组织和外形、液体部分复杂的流变特性、加工中食品热物理性质的变化(如加热过程中食品的边界层移动^[5]、热物性的温度依赖性等)、运动颗粒的温度测量等难点影响到无菌工艺的理论计算和实验验证, 使得这一技术的复杂性远远超过液体食品无菌工艺和传统杀菌

收稿日期: 2003-10-08 修订日期: 2004-06-24

作者简介: 邓 力(1966-), 男, 江苏南京人, 副教授, 博士生, 主要研究方向为食品超高温杀菌。无锡 江南大学食品学院, 214036

技术, 并依赖于数学模型。

目前已有多种估算含颗粒低酸性食品的致死率的数学模型/计算机仿真方法^[3, 6, 8- 10]。还有一些确定关键指标的预测模型和仿真方法^[3, 9, 11]。

液体- 颗粒无菌工艺研究是由具有各自规律相互独立又在总体上密切相关多个部分组成的系统, 笔者总结主要部分的关系如图 1 液体- 颗粒无菌工艺研究体系。

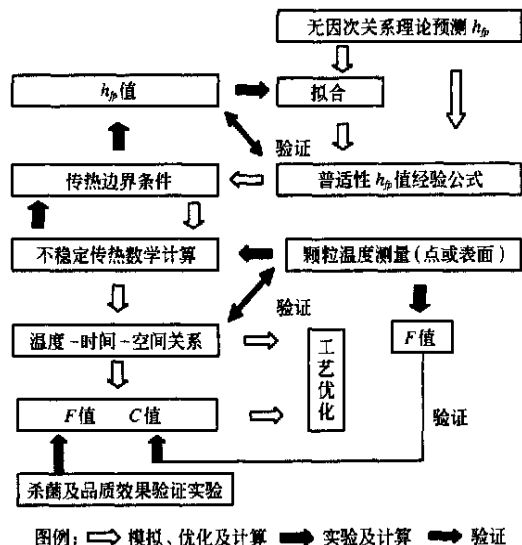


图 1 液体- 颗粒无菌工艺研究体系

Fig 1 System of Liquid /particle food aseptic processing research

1.1 工艺流程

图 2 为液体- 颗粒无菌工艺的不同线路的工艺流程。图 3 为悬浮颗粒工艺系统示意图。

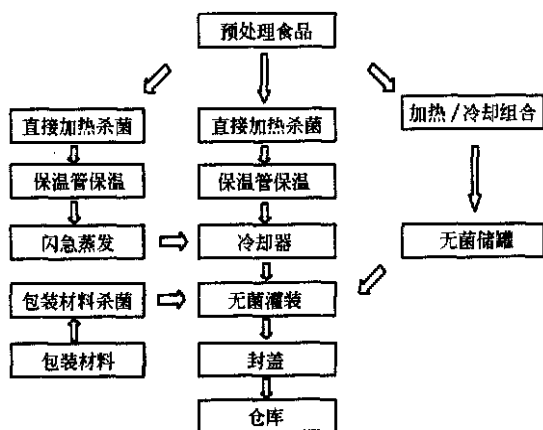


图 2 无菌工艺系统流程图^[11]

Fig 2 Flow chart of aseptic processing system

液体- 颗粒无菌工艺系统中作为杀菌对象的液体- 颗粒混合物在刮板表面换热器(SSHE, the scraped surface heat exchanger)中被加热, 然后在保温管(the holding tube)中保温, 产品冷却后无菌包装得到成品。液体- 颗粒混合物的组成及特性(如固液比、液体流变学特性、固液比重差等)应能保证混合物的流动。液体- 颗粒换热工艺的主要特征是使用刮板表面换热器和保

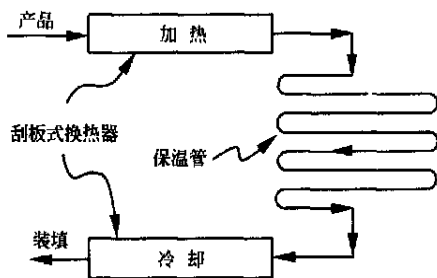


图 3 悬浮颗粒工艺系统示意图^[8]

Fig 3 Schematic diagram of system for processing particulate

温管。SSHE 与其它快速加热方法, 如蒸汽注入、片式换热器、套管换热器等相比, 相对较低的传热效率配合了颗粒内部的传热滞后。Warwick^[12]认为, SSHE 处理低酸性食品的颗粒直径应小于 15 mm。Buchner^[13]的实验中的一种专门设计的并优化过的 SSHE 能够处理直径达到 37 mm 的颗粒。高粘度液体与颗粒混合物采用 SSHE 后, 混合更好, 分布更均匀, 有利于降低加热程度减少产品的热破坏。

1.2 微生物原理

液体- 颗粒无菌工艺中食品颗粒的致死率可以用两种方法表达: 1) 无菌工艺的关键是在指定温度下将食品内部指标微生物的原始值降低到允许的数值。可以用杀菌值或工艺致死率 F_0 来表示, 该值是加热杀菌的计算基础; 2) 总体致死率 F_s , 为体积平均微生物致死率, 在颗粒食品的杀菌计算中具有总体意义。表达式分别为:

$$F_0 = \int_0^t 10^{(T-T_0)/Z} dt \quad (1)$$

$$F_s = D_0 \log(TM V) \quad (2)$$

$$TM V = \frac{1}{V} \int_0^V 10^{[-\frac{1}{D_0} \int_0^T 10^{(T-T_0)/Z} dt]} dV \quad (3)$$

式中 $TM V$ (the target mass average survival of micro-organism) —— 颗粒的目标微生物总数平均残留率; D_0 —— 参考温度下的 D 值, 即微生物数量下降一个对数周期所需要的时间, min; V —— 颗粒体积, m^3 ; T —— 工艺温度, $^{\circ}C$; T_0 —— 参考温度, $^{\circ}C$; Z —— 微生物的温度敏感性, $^{\circ}C$; t —— 加热时间, min。

1.3 无菌工艺产品品质优势的理论基础

微生物的致死活化能较高, 为 209~ 418 kJ/mol; 质量因子(色、味、组织及营养成分)降解的活化能居中, 为 63~ 126 kJ/mol; 而酶促反应、扩散控制和氧化反应活化能较低, 为 8~ 63 kJ/mol^[14]。因而微生物致死比营养及风味成分破坏对升温更为敏感。因此对于给定的微生物致死率, 提高温度有利于产品的质量保持。

Toledo 和 Chang^[15]概括了在指定温度 T 下营养破坏程度与微生物失活之间的关系的数学式, 当加热介质温度恒定并忽略升温过程时:

$$\log(C/C_0) = \pm [(D_m/D_c) \log(N_0/N)]$$

$$\times [10^{(T_0 - T)(\frac{1}{Z_m} - \frac{1}{Z_c})}] \times C/C_0 \quad (4)$$

式中 C, C_0 ——分别为加工前后的营养成分浓度, mol/m^3 ; N, N_0 ——加工前后的微生物数量, $\text{个}/\text{m}^3$; D_c, D_m ——分别为营养成分和微生物在参考温度 T_0 () 下的对数递减时间, min ; Z_c, Z_m ——分别为营养成分和微生物的 D 值变化一个对数周期的温度值 ()。

该式虽然受到应用条件限制, 但揭示了无菌工艺具有质量优势的原理。

2 液体- 颗粒食品无菌工艺中的传热

在液体- 颗粒无菌系统中, 传热包括从刮板表面换热器外壳由热源向食品体系的传热、从液体向颗粒的传热及颗粒内部的传热^[1]。颗粒内部的传导传热慢于液体的对流传热, 形成传热滞后, 整个食品体系的最冷点在颗粒食品中心, 颗粒的数量和尺寸成为控制因素。保温管中, 颗粒温度逐渐接近载流温度, 载流温度随之降低。

颗粒内最冷点的升温速度取决于产品表面和内部的热阻。对流换热系数 h_{fp} 代表了食品表面热阻, 是温度预测的核心参数, 其主要影响因素包括^[3]: 1) 颗粒大小和形状; 2) 颗粒和流体的热物理性质; 3) 颗粒位置; 4) 流体和颗粒相对速度; 5) 颗粒与管道直径之比; 6) 流体粘度和温度。而内部热阻是食品热物理性质(密度、比热和热传导系数)、几何形状和尺寸的函数。

2.1 刮板表面换热器中的蒸气与食品体系的换热

A dam s 等^[16]用下式表达 SSHE 中食品体系的温度, 即液体- 颗粒混合物的平均温度:

$$T = T_s + (T_i - T_s) \exp \left[\frac{-UA t_h}{V \rho C_p} \right] \quad (5)$$

式中 T_s ——蒸汽温度, ; T_i ——混合物初始温度, ; ρ ——混合物密度, kg/m^3 ; C_p ——混合物比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; U ——总体传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; A ——SSHE 换热面积, m^2 ; t_h ——加热时间, s ; V ——混合物总体积, m^3 。

2.2 保温管中液体与颗粒的传热

在液体- 颗粒悬浮液中, 忽略粘度形成的能量损失及假设径向理想均匀混合, 保温管内热交换可以通过颗粒表面能量平衡计算, 数学关系式如下^[4]:

$$U_{ht} A_{ht} (T_f - T_a) = m_f C_{pf} (T_f^{t+1} - T_f) - h_{fp} A_{ps} (T_f - T_{ps}) \quad (6)$$

式中 U_{ht} ——SSHE 传热效率, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; A_{ht} ——保温管内表面积, m^2 ; T_f —— t 时的载流体温度, ; T_a ——加热介质温度, ; m_f ——流体质量, kg ; C_{pf} ——流体比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_f^{t+1} —— $t+1$ 时的载流温度, ; T_{ps} ——颗粒表面温度, ; N ——颗粒数目, 个; A_p ——颗粒表面积, m^2 。

2.3 最小保温管安全长度

最小保温管安全长度必须保证合理的停留时间 RT (the Resident Time), 以使全部产品达到商业灭菌条件, 可以由下式计算^[17]

$$L = t V_{max} \quad (7)$$

式中 L ——最小保温管安全长度, m ; t_r ——颗粒停留时间, s ; V_{max} ——最大流速, m/s 。

由 Navier Stokes 方程可以求得最大流速和平均流速间的关系。

2.4 颗粒移动对传热的影响

在液体- 颗粒运动中, 剪切应力形成了速度分布, 因而导致食品颗粒在系统中的停留时间 (RT) 的不同, 形成停留时间分布 (RTD , Resident Time Distribution) 因素。 RT 的影响因素包括: 颗粒体积及其分布、流体介质的热性质和流动性质、保温管内颗粒速度分布、产品的热性质以及保温管的排布^[18]。颗粒的 RT 值可以换算为不同径向位置的颗粒速度, 以计算需要的保温管长度。

Sigh 和 Lee^[19]列举了测算 RTD 的方法: 1) 给颗粒输入浓度一个阶跃变化, 输出浓度产生阶跃函数变化; 2) 给出一个频率按照正弦变化的颗粒浓度输入, 形成相应的频率响应图; 3) 将小量的示踪颗粒以最短时间注入流体中, 形成一个脉冲输出。正弦法需要特殊装置, 较复杂, 通常采用脉冲输入法^[20]。

Ram asw am y^[18]等详细综述了表达 RTD 值的一系列参数和公式及各种用于测算和模拟 RTD 的方法。

2.5 颗粒的不稳定传热与温度分布计算

在液体- 颗粒无菌工艺中, 颗粒的温度及温度分布是加热温度、液体- 颗粒运动状态、加热时间和颗粒在系统中位置的函数, 其变化是一个不稳定过程。瞬时不稳定传热方程为式(8)^[21] (假设热物理性质恒定; 颗粒均质且各向同性; 颗粒内仅热传导; 无内热源; 流体及颗粒无相变; 颗粒和液体起始温度相同):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

式中 T ——颗粒温度, ; t ——加热时间, s ; a ——导温系数, m^2/s ; x, y, z ——笛卡尔坐标系三维空间位置, m 。

边界条件(对流换热条件) 由牛顿方程和傅立叶方程确定:

$$k_p \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) \eta = - h_{fp} (T_p - T_f) \quad (9)$$

式中 k_p ——导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; h_{fp} ——对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; η ——该点等温线上的法向单位矢量; T_p ——颗粒表面温度, ; T_f ——载流温度, 。

(8) (9) 式决定了颗粒表面和内部的温度- 时间- 空间关系, 是致死率和蒸煮值计算的基础。因此, 不稳定传热方程的求解是液体- 颗粒无菌工艺的核心计算, 通常有以下几种方法求解: 1) 在规定几何形状物体和均匀边界条件下, 通过傅立叶变换无限级数解析求解^[21, 22]; 2) 在 Bi (比奥数, Biot number) < 0.1 时, 由集总热容法进行简化计算^[21]; 3) 在不规则形状及不均匀边界条件下, 通过有限差分、有限元等数值方法计算^[23]; 4) 通

过计算机软件, 如MATLAB 中的PDE (偏微分) 工具包以及一些专用传热学软件由有限元法求解, 如CFD (Computational fluid dynamics) 软件中的FLUENT、CFX 等计算^[24]。在液体- 颗粒无菌工艺的研究中主要采用方法3)和4)。

2.6 对流传热系数 h_{fp} 的计算

对流传热系数 h_{fp} , 又称传热膜系数, 决定了悬浮颗粒的温度分布, 是计算致死率以及工艺及设备设计和工艺优化必须的参数。在液体- 颗粒无菌工艺中, 颗粒处于运动状态, h_{fp} 测算难度很大。

常见 h_{fp} 计算方法有: 1) Chang 和 Toledo^[25] 简化食品形状为无限平板、无限圆柱和球体, 得到瞬时传热方程的解析解, 利用边界条件求得 h_{fp} , 他们还据此建立了计算模型, 用于 h_{fp} 的预测。2) 颗粒内部的热阻与表面对流热阻相比可以忽略时 ($Bi < 0.1$), 可采用集总热容法 (the lump capacity approach) 由颗粒的平均温度计算 h_{fp} ^[21]:

$$\ln(T_p - T_f) = \ln(T_{ip} - T_f) - \left(\frac{h_{fp} A_p}{m_p C_p} \right) t \quad (10)$$

式中 T_p —— t 时刻颗粒温度, °C; T_{ip} ——颗粒初始温度, °C; T_f ——载流温度, °C; h_{fp} ——对流传热系数, W/(m²·K); A_p ——颗粒传热面积, m²; m_p ——颗粒质量, kg; C_p ——颗粒比热, J/(kg·K); t ——加热时间, s。

通过 $(T_p - T_f)$ 与时间作半对数曲线, 由斜率可计算出 h_{fp} ^[26]。但其前提 ($Bi < 0.1$) 在液体- 颗粒传热中与事实不符, Sastry 等人^[27] 测量了在蘑菇形状铝制颗粒在牛顿和非牛顿流体中的平均和不同时刻的 h_{fp} , 比较由集总热容法与瞬时传热方程计算的 h_{fp} 值, 当 h_{fp} 值由 1000 到 10000 W/(m²·K), 集总热容法产生误差达到 5% 到 25%。

3 液体- 颗粒传热中颗粒的温度时间关系实验测量方法

3.1 静态颗粒法 (Stationary Particle Method)

该法中颗粒在载流中保持静止, 同时测定颗粒和载流的温度, 由不稳定传热方程式求得 h_{fp} 。因为颗粒的移动和转动受到限制, 静态颗粒法不可能反映出真实的条件, 从而导致偏差^[28]。而对于非牛顿流体, 由于流体颗粒相对速度较低, 通常处于层流状态, 这时静态颗粒法适用于对 h_{fp} 做出保守计算。

一些研究者^[29, 30] 采用该法研究了各种工艺参数对 h_{fp} 的影响。该法的优点是实验装置相对简单。

3.2 移动热电偶法 (Moving Thermocouple Method)

Sastry 等^[31] 通过电机使钩状热电偶以设定的速度移动, h_{fp} 以获得的时间温度数据通过集总热容法计算。优点为: 1) 记录了移动颗粒的准确温度; 2) 可以使用不透明载流。虽然可测量颗粒移动对 h_{fp} 的影响, 并证实与静态法相比, 传热效率明显提高, 但颗粒的运动仍然受到限制, 并对载流产生干扰。Sastry 等^[32] 的实验表

明, 运动可以明显提高传热效率, 并指出移动热电偶法的预测数据仍然保守。由于设备设计难度大, 该法难以应用于高温高压条件, 并且因为在无菌系统内无法限制颗粒的运动轨迹, 实验数据重现性差。

3.3 熔点法 (Melting Point Method)

该法利用聚合物色泽随温度变化的特性, 通过色彩解析计算 h_{fp} 。Mwangi 等^[33] 放置温度指示范围为 51~80 °C 熔点指示剂于一个直径 8~12.7 mm 的聚甲基丙烯酸酯球。通过一个文丘里管将颗粒引入一个载流为甘油/水混合物的模拟无菌工艺保温管中。温度上升后, 指示剂表面熔化变色, 纪录颜色变化与时间的关系以及载流的温度时间关系。通过与颜色- 温度基准比较, 得到颗粒表面的温度- 时间关系。同时以该值通过瞬时传热方程的有限差分算法算出 h_{fp} 值, 预测指标物的表面温度。以预测温度与观测温度差值最小时的 h_{fp} 值为目标值。该法要求保温管透明, 并且由于变色不可逆, 颗粒不能重复使用。

3.4 微生物指示法 (Microbiological Indicator Method)

Hunter^[34] 在 1972 年首次通过加热置入芽孢的海藻胶小球以数学模型推算 h_{fp} 。此法推动并启发了化学指示物的应用。Weng 等^[35] 采用过氧化物酶代替微生物在巴氏杀菌条件下测定 h_{fp} , 将热电偶插入载有该指示物的聚缩醛小球, 记录加热和冷却曲线, 指示物回收, 酶活测定后估算实际的累积致死率。Weng 等^[35] 发展了绝对致死率差值法 (LALD, the least absolute lethality difference), 通过数学模型计算的致死率与实验数据获得的致死率的差值来计算 h_{fp} 。推算的 h_{fp} 值与已知热物理性质被带入显式有限差分方程, 以计算颗粒中心的时间温度关系及相关的总体致死率。采用数值逼近方法, 调整 h_{fp} 数值的大小, 当计算和实测致死率之差小于允许范围时, 所采用的 h_{fp} 数值为目标值。作者比较了其结果与 Lenz 和 Lund^[36] 的最小温度目标总体平方差法 (LSTD, the least sum of squared temperature differences approach) 的不同, 认为前者更为准确。

微生物法更适于总体而不是单个颗粒的 h_{fp} 测算。尽管微生物法不影响颗粒轨迹并适用于高温, 但样品间差异、载体对指示剂的活性的影响会形成测量误差。

3.5 液晶法 (Liquid Crystal Method)

Stoforos 等^[37] 首次使用该法测定连续系统中的 h_{fp} 。Moffat^[29] 采用该法, 在颗粒表面覆盖一层热敏性变色液晶以录像记录变化, 通过计算机比较标准色确定表面温度。该法是非破坏性的 (颗粒可重复使用), 并且快速, 提供了与 h_{fp} 相关的表面温度测定方法。但该法的温度测量准确性受下列条件限制: 1) 颜色变化对应的温度变化范围; 2) 录像的解析度; 3) 颗粒表面色泽可见。因而该法不适用于在高温高压系统及不透明液体条件下使用。

3.6 流体温度量热法 (Liquid Temperature/Calorimetry Method)

该法^[38]通过添加低温颗粒进入热流体中,记录流体温度变化,通过能量平衡测算 h_{fp} 。该法可以测算颗粒总体 h_{fp} ,并可以用于不透明载流,但在高温高压下,使用该法比较困难。该法原理简明,却不适用于单独颗粒的 h_{fp} 测算,使该法的应用受到限制。

3.7 相对速度法(Relative Velocity Method)

相对速度法利用已建立的液流中一定形状的颗粒的相关经验公式,例如已由 Kramers^[39], Ranz 和 Marshall^[40, 41] 及 Whitake^[42] 提出的有关流体特性、流动特性,与 Nu (努塞尔特准数, $Nu = h_{fp} \times L / k_p$, L —特征几何尺寸, m; k_p —导热系数, W/(m·K)) 相关的颗粒几何形状的公式。该法以摄像机测定流体和颗粒的速度,载流速度通过将示踪颗粒引入液流来测定,而相对速度则通过测定给定的示踪颗粒超过被测定颗粒的时间来获得。该法所得数据的准确性取决于采用的相关公式的准确性。Sastry^[43] 认为,该法可以用于研究 h_{fp} 的径向变化。

3.8 发射法(Transmitter Method)

该法的原理是将一个微型传感器置于颗粒的最冷点,传感器发射温度数据,并由调谐记录仪记录。Balasubramaniam 和 Sastry^[44] 使用石英晶体发射电子信号到外部接收器,并将其转化为温度信号记录。石英晶体置于一个由氮化硼做成的柱状中空胶囊中。 h_{fp} 通过获得的时间温度关系由有限差分方法计算。发射法被认为很实用并对 h_{fp} 测定无干扰,但现有结构紧凑的传感器,密度远远大于真实食品^[43],导致误差。

3.9 瞬时核磁共振成像法(Flash MRI(Magnetic Resonance Imaging)Method)

Ruan^[45]等在研究欧姆杀菌时,在测量温度场时使用瞬时核磁共振成像法获得温度分布的断面图。为避免干扰,使用 Flash MRI 时必须关掉电场。该法从理论上更适用于颗粒-液体的温度场测量及 h_{fp} 计算,但要对各种 SSHE 以及很长的保温管应用 Flash MRI 是不现实的。

4 无因次关系理论预测流体颗粒 h_{fp} 及影响 h_{fp} 的因素

4.1 液体-颗粒对流换热的 h_{fp} 计算的无因次数群关系

无因次传热系数 Nu 与流体-颗粒的惯性力、粘性力、浮力、运动粘度、热扩散系数相关。通过无因次关系理论得到:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr) \quad (11)$$

式中 Re ——雷诺数; Gr ——格拉肖夫准数; Pr ——普兰德准数。

当颗粒和流体相对速度等于 0, $Re = 0$, 这时 $Nu = 2.0$ 。Hunter^[34]认为以 $Nu = 2.0$ 为基础设计的杀菌工艺显然会导致过热。

相对速度不等于 0 时, Johnson 等^[46]得出当

$$Re > 500: Nu = 0.714 Re^{0.5} Pr^{0.5} \quad (12)$$

$$Re > 200: Nu = 0.37 Re^{0.6} Pr^{0.33} \quad (13)$$

文献[1]中, Nu 看作 Pe 的函数:

$$Nu = 2.0 + 0.5 Pe + 0.25 Pe^2 \ln(Pe) + 0.334 Pe^2 + (1/16) Pe^3 \ln(Pe) \quad (14)$$

式中 Pe ——彼克列数(传热)。

Zuritz 等^[47]认为 Nu 与颗粒和保温管尺寸有关,以蘑菇状的铝质颗粒悬浮在 70 非牛顿流体中,流速 0.06 ~ 0.287 m/s 时,得到:

$$Nu = 2.0 + 28.37 Re^{0.233} Pr^{0.143} (D_p/D_{ube})^{1.787} \quad (15)$$

式中 D_p ——颗粒直径, m; D_{ube} ——保温管管径, m。

Zitoun 和 Sastry^[48, 49]采用液晶法以 45 的最大操作的温度在保温管模拟器内研究了立方体颗粒传热受颗粒尺寸、流体粘度、流速和径向位置的影响。所采用特征尺寸为与立方体体积相同的球体尺寸,作者推算出 Nu 与管内 Re_g , 管内的 Pr_g , 长度与直径比和颗粒径向位置($R - r/R$)的关系。该式采用了纯粹传导传热占优势条件下的球体,在 41.2 < Re < 477.5 和 185.3 < Pr < 1075.2 下有效:

$$Nu = 2.0 + 8.4703 Re^{0.553} Pr^{0.2176} (L_p/D_s)^{0.6272} \times [(R - r)/R]^{-0.11472} \quad (16)$$

式中 R ——保温管直径, m; r ——颗粒径向位置, m; L_p ——颗粒特征尺寸, m; D_s ——保温管半径, m。

并采用相对速度法验证上式。

Chandarana 等^[9]认为,颗粒尺寸的减小可以增加颗粒的表面积与体积之比(SA/V , the surface area to volume ratio)从而使 h_{fp} 增加。作者得到 h_{fp} 与 SA/V 和 Re 的关系如下:

$$h_{fp} = 1.14 \times 10^4 (SA/V)^{1.94} Re^{0.07} \quad (17)$$

已有的经验关系式远多于本文所列举。

通过无因次理论得到的经验关系式的准确性和应用范围有限,但提供了具有一定普适性的公式,在一些必要参数难以测算的复杂情况下,可得到有价值的 h_{fp} 平均值,同时可以用于了解流体热物理性质和相对粘度对 h_{fp} 的影响。

4.2 影响液体-颗粒混合物传热的因素

1) 颗粒的大小: 根据传热学原理,食品颗粒越大杀菌越困难,但最大的颗粒未必运动最快,导致加热时间的延长,产生较为复杂的情况。Lenz 和 Lund^[36]在传统罐藏工艺中,将直径 0.95, 2.065 和 3.015 cm 的铅粒浸没在水中,发现随着颗粒尺寸的增加 h_{fp} 增加了。但是在 60% 蔗糖溶液中却没有发现明显的关系。Deniston 等^[50]以马铃薯颗粒在相同条件下实验,发现颗粒大小对 h_{fp} 有明显的影响。Hassan^[51]报告了与 Deniston 等^[50]相反的情况,在水中,颗粒越小而 h_{fp} 越大。2) 颗粒的形状: Zuritz 等^[47]报告说随着球体颗粒尺寸的增加 h_{fp} 增加,并发现随立方体颗粒尺寸减小 h_{fp} 增加。颗粒形状影响到流动状态以及 h_{fp} ,但在相同条件下不同形状对 h_{fp} 的影响程度非常有限。3) 固液比和流速: Mwangi 等^[52]认为,由于其颗粒的出现扰乱了流场,随着固体比例和流速的增加, h_{fp} 将提高 80% ~ 200%。4)

颗粒- 流体相对速度: Measman^[28] 提出颗粒- 流体相对速度的增加会使 h_{fp} 随颗粒尺寸增加。管壁附近颗粒移动较慢, 从而导致相对流速增加, h_{fp} 会受到这一现象的影响, 趋于减小。5) 颗粒位置: Balasubramaniam 和 Sastry^[44] 观察到流体颗粒相对速度随颗粒位置变化。在

管壁附近的 h_{fp} 值可能较高。Zitoun 和 Sastry^[53] 报告当位置从中心向管壁变化时, h_{fp} 值增加。作者将颗粒位置的这种影响归因于管道中部的颗粒缺少旋转。对流换热系数测量实验部分数据总结如表 1。

表 1 测量对流换热系数相关数据
Table 1 Published data on fluid-to-particle heat transfer coefficients

颗粒材料	颗粒形状	颗粒尺寸或型号	流体性质	流动条件	$h_{fp}/W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$	参考文献
硅 胶	立方体	2.54 cm	淀粉悬浮液	静态	8~ 36	[9]
马铃薯海藻胶混合物	立方体	1 cm	NaCl 水溶液	0.48~ 2.88 m ³ /s	300~ 2000	[54]
马铃薯	立方体	1~ 2 cm	水	0.36~ 0.86 m ³ /s	239~ 303	[25]
铝	球体	直径 2.39 cm	水	0.98~ 2.50 m ³ /s	2039~ 2507	[31]
铝	蘑菇状	3 型	羧甲基纤维素溶液	0.08~ 0.29 kg/s	548~ 1175	[47]
铝	蘑菇状		羧甲基纤维素溶液	5~ 51 × 10 ⁻⁴ m/s	22~ 153	[30]
铝	球体	直径 1.33~ 2.39 cm	水	0.48~ 2.88 m ³ /s	688~ 3005	[32]
聚甲基丙烯酸甲酯	球体	直径 8~ 12.7 mm	甘油/水	$Re = 73.1 - 369$	58~ 1301	[33]
铝	球体		羧甲基纤维素溶液	$Re = 14.8 - 798$	134~ 669	[44]

5 液体- 颗粒食品无菌工艺的效果评价

5.1 工艺模拟评价的总体方法

工艺模拟评价的基本方案^[8]有: 1) “ F_0 值保温管法”: 假设 SSHE 中致死率为零, 在计算时将 SSHE 产生的热致死率加入保温管的热致死率中, 得到总体致死率; 2) “唯一保温管法”: 排除 SSHE 形成的致死率, 仅考虑在保温管中的致死率积累; 3) “系统总体法”: 总体考虑 SSHE 和保温管中的致死率积累。Chandarana 等^[9]比较了以上方法: 计算机模拟表明在计算颗粒中心要求达到 F_0 为 6 min 的热处理强度时, 不考虑 SSHE 的作用, 可能导致加热时间高达 78 min。Lee 等^[54]对 Chandarana 等^[9]提出的 3 种方法进行了敏感性分析。他们将肉毒杆菌 PA 3679 达到 6D 破坏和过氧化物酶达到 12D 的保温管长度用作评价参考值, 发现“总体系统法”和“ F_0 值保温管法”之间没有显著差异。“唯一保温管法”导致产品过度热处理。

对于液体食品的连续杀菌工艺评价, Teixeira 和 Manson^[58]认为, 可以只考虑产品在保温管内的致死率效果。这一设想通过假设保温管绝热简化了传热学模型, 采用一个计算机模型计算了保温管内从假塑性流体到胀塑性流体的单点 F 值(F_0) 总体 F 值(F_s) 的差异, 并研究了保温管温度、 Z 值和 D 值, 保温管直径和流速的作用, 认为除了流动特性指数和 D 值影响显著, 其余因素对 F_0 和 F_s 的差异影响不大。

5.2 已建立的一些数学模型

Dail^[7]建议采用 Ball 法估算保温时间。Larkin^[10]在有限的 h_{fp} 条件下, 从半对数图的线性部分估算出热穿透系数 f_h 和 j_h , 采用计算机模拟, 作者得出以 Ball 法计算的致死率会比实际值高估 241%, 因此引入一个双曲函数来修正 Ball 的算法。

Sastry^[4]首先提出了无菌工艺装置中流动颗粒产品的普遍模型。这一模型通过能量平衡计算载流温度曲线, 计算出的载流温度曲线和以 $Nu = 2.0$ 计算出的保

守的 h_{fp} 值作为输入数据, 采用 Galerkin-Crank-Nicolson 有限差分方法求解各种产品在不同参数条件下的平板、有限圆柱和球体的能量平衡方程。它们的模拟结果说明在 SSHE 和保温管内颗粒的不同大小、形状、热性质会影响达到肉毒杆菌芽孢 6D 和过氧化物酶 12D 所需要的最小时间以及相应的工艺处理时间。

Chandarana 等^[9]在研究含有颗粒的无菌系统时, 基于能量平衡方程, 发展了一种显式有限差分模型, 并认为产品的热性质、物理性质、流变学性质、 RTD 及 h_{fp} 是工艺评价的关键。Chang 和 Toledo^[25]采用显式有限差分法对立方型颗粒在各种加热和冷却条件下进行模拟, 表明 h_{fp} 对杀菌时间有显著的影响。

瑞典食品工业研究所(SIK, the Swedish Institute for Food Research) 建立的一个模型^[56]以平均蒸煮值为产品品质因素, 并将该因素作为工艺变量引入模拟过程。物理变量包括产品流速、颗粒体积和几何形状、设备技术条件、颗粒数量及热性质。该模型正确计算的关键是 RT 值和 h_{fp} 的准确性。

值得注意的是, 工艺评价的数学模型建立在整个过程模拟的基础之上, 而液体颗粒的无菌工艺的模拟过程的核心由二阶偏微分方程决定, 是一个非线性系统, 高度依赖计算机, 例如早期采用的 Pascal 程序^[2], 以后采用 A Syst 软件^[56], 到近期研究直接采用 CFD 大型软件。

5.3 数学模型的实验验证

1) 微生物指示物法

一些研究者^[57, 58]在无菌工艺条件下以嗜热脂肪芽孢杆菌 (*Bacillus sterothemophilus*) 验证各种模拟颗粒食品的杀菌工艺。Hilton 等^[57]将嗜热脂肪芽孢杆菌置入牛肉颗粒的中心, 发现 131 /52.2 s 后无存活, 中心致死率达 25D, 超过了传统上需要的最小值 12D。

海藻胶颗粒技术模拟食品颗粒真实条件, 为颗粒食品无菌工艺的杀菌效果评价开辟了一条重要途径。该法

将微生物与食品混合置入海藻酸钠中,并可做成类似真实食品的形状和尺寸。其优点之一就是可以模拟真实产品的环境,如 pH 值、Aw (水分活度) 以及食品成分如蛋白质、脂肪对微生物的保护作用。

Pflug^[59]指出因为芽孢的 Z 值曲线向下弯曲,并且在 116 减小 10,在 127 减小 6,因此采用的芽孢指示物即使有相同的 F 值,在大于 116 应该进行某种形式的修正。并且认为可以通过由 Pflug 和 Christensen^[59]推出的综合方法和方程由时间温度关系计算出必要的修正。Pflug^[62]等认为肉毒梭状芽孢杆菌是低酸性食品的最佳指标菌。

微生物指示物法实验工作繁重而耗时,但却是颗粒杀菌合理评价最可靠的方法。

2) 化学和酶标记物法

尽管微生物验证很可靠,但是其应用受到工作量和实验条件的限制。在食品中,化学和酶标记物法成为获得杀菌条件下颗粒的总体时间温度关系的新方法,用于判定致死率和品质损失。颗粒无菌工艺的化学和酶指示物要求: 1) 检测方法简单; 2) 对实验条件敏感; 3) 有适于无菌工艺的明确的热稳定性。为预测杀菌效果 Mulley 等^[61]在罐藏工艺中采用盐酸硫胺素, Adams^[62]在蔬菜高温短时工艺中用过氧化物酶作指示物。 Rao^[63]等用维生素 C 作为罐藏豌豆中有关营养保留的评测指标。

Weng 等^[64]发现有机溶剂(12 烷)中置入的过氧化物酶与肉毒梭状芽孢杆菌的 Z 值变化很相似。Berry 等^[65]推荐使用甲基甲硫氨酸磺(MMS, methymethionine sulfonium)在高温低 PH 条件下作为细菌致死率的指示剂。 Ramaswamy^[66]等将胰蛋白酶稀释液封入一个不锈钢胶囊,置入有限圆柱颗粒中心,通过酶失活动力学数据结合有限差分算法估算圆柱状马铃薯的 h_{fp} 值。Kim 和 Taub^[67]研究了无菌工艺中以 2, 3-二氢-3, 5-二羟基-6 甲基(四氢)-吡喃-4 和 5-羟甲基糠醛为 D-果糖指示剂,指示花椰菜、鸡肉、火腿、马铃薯、绿豆、豌豆和胡萝卜中的食品化学变化。

6 液体- 颗粒无菌工艺的优化

杀菌工艺条件优化是指在达到必须的目标致死率条件下,具有最大的实际操作温度、最小的营养和感官因子的损失。工艺优化的限制基本条件是食品体系的最冷点 F_0 值必须大于 3 min。

6.1 目标函数

一些研究者^[68, 69]已经计算了最大表面平均质量保持和体积平均质量保持的优化杀菌条件。通常使用的目标函数分为两类: 1) 最大的品质保持; 2) 最小的蒸煮值。已知模型食品中一点的时间温度关系、参考 D 值及 Z 值,食品质量指标的保持可按式计算:

$$\frac{Q}{Q_0} = 10^{\left[-\frac{1}{D_{ref} q_0} \int_{t_0}^t \frac{(T - T_{ref})}{Z_q} dt \right]} \quad (18)$$

式中 Q, Q_0 ——时间 t 及 t_0 的食品质量水平;
 D_{ref} ——参考温度下的对数递减时间, min; T ——工

艺温度, °C; T_{ref} ——参考温度, °C; Z_q ——质量因子平均 Z 值, 通常取 33 °C; T_{ref} ——参考温度, 通常取 100 °C。

与产品杀菌的温度响应最重要相反,从应用角度看,对质量因子的优化,最需要的是整体的温度时间关系。产品总体积 V 给定平均质量保持率方程为:

$$\left(\frac{Q}{Q_0} \right)_{avg} = \frac{1}{V} \int_0^V 10^{\left[-\frac{1}{D_{ref} q_0} \int_{t_0}^t \frac{(T - T_{ref})}{Z_q} dt \right]} dV \quad (19)$$

符号意义同(18)式。

蒸煮值(C 值, Cook Value)是常用的评估品质损失的指标,是 Mansfield^[70]1962 年针对低酸性食品无菌工艺提出的:

$$C = \int_0^t 10^{\left(\frac{T - T_{ref}}{Z_q} \right)} dt \quad (20)$$

符号意义同(18)式。

对于不同温度,存在下列转换关系:

$$C_{100} = C_T 10^{\frac{T - 100}{Z_q}} \quad (21)$$

式中 C_T ——温度 T 下的蒸煮值, min; C_{100} ——100 °C 下的蒸煮值, min; 其余符号意义同(18)式。

可以通过蒸煮值对质量损失做出估算。Tucker 和 Holdsworth^[74]提出平均蒸煮值 C_{avg} , 用于计算有关最小蒸煮值的工艺条件的平均影响,关系式为

$$C_{avg} = \frac{1}{V} \int_0^V 10^{\left(\frac{T - T_{ref}}{Z_q} \right)} dt dV \quad (22)$$

符号意义同(18)(19)式。

(18)式及(19)式表达的质量保持模型与 D 值相关。而蒸煮值模型则独立于 D 值。通过有关传热学及质量优化的硫胺素降解过程模拟, Teixeira^[72]指出, D 值对优化工艺温度没有明显影响。Silva^[72]指出两个目标函数(即最大质量因子保持和最小平均蒸煮值)对于高于 150 min 的参考 D 值产生了相同的值。当 D 值小于 150 min,以最小平均蒸煮值计算的优化工艺温度明显增加,并导致过热。作者认为体积平均质量保持率法比平均蒸煮值的法好。

6.2 限制函数

液体- 颗粒无菌工艺的优化的限制条件,即限制函数为: $F < F_0$

在工艺评价中,通常希望有一个确保微生物安全的致死率 F_P , 一个品质到达可接受的最低限度的最大蒸煮值 C_{max} , 并通过他们得到一个可以接受的产品。杀菌率 $\Phi_F = F/F_P$ 和品质率 $\Psi_c = C/C_{max}$ 可以用于评价工艺的合理性: 当 $\Phi_F < 1$, 说明杀菌不足, 如果 $\Psi_c > 1$, 说明出现过度加热。带有颗粒食品无菌工艺的优化应保证在食品体系的任意一点满足无菌条件,同时使质量损害最小。

7 小 结

1) 液体- 颗粒食品无菌工艺具有处理传统中式餐

桌食品的潜力;

2) 有关 F 值和 C 值的计算公式表明, 计算杀菌和品质保持效果必须知道温度的时间和空间分布, 因此液体-颗粒传热学是液体-颗粒食品无菌工艺的核心内容;

3) 尽管已经有多种测量运动颗粒冷点温度的技术, 但没有一种方法是精确可靠的, 因此目前尚缺乏公认的、可以广泛应用的液体-颗粒食品无菌工艺评价模型和方法;

4) h_{fp} 是无菌工艺传热学、杀菌学计算的关键因子。影响 h_{fp} 的因素多而复杂, 有多种无因次关系式预测对流换热系数 h_{fp} , 但没有完全普适性的关系式;

5) Ball 法作为传统的杀菌工艺评价方法不适用于液体-颗粒食品无菌工艺, 已经建立了一些新的工艺效果评价的数学模型;

6) 可通过微生物指示法及化学和酶标记物法对无菌工艺效果评价模型和品质损失进行实验验证;

7) 通常以最大品质保持和最小蒸煮值为目标函数以 $F < F_0$ 为限制函数优化液体颗粒无菌工艺。

[参 考 文 献]

- [1] Ramaswamy H S, Awuah GB, Simpson B K. Heat transfer and lethality considerations in aseptic processing of liquid/particle mixtures: a review [J]. *Cri Rev Food Sci & Nutri*, 1997, 37: 253- 286
- [2] Silva C, Hendrickx M, Oliveira F, et al. Critical evaluation of commonly used objective functions to optimize overall quality and nutrient retention of heat-preserved foods[J]. *J Food Eng*, 1992, 17: 241.
- [3] Sastry S K. Mathematical evaluation of processing of schedules for aseptic processing of low-acid food containing particulates utilizing the Ball method[J]. *Food Technol*, 1989, 43(3): 122
- [4] 李里特. 农产品加工应重视餐桌主食品[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(3): 13- 16
- [5] Singh R P. Moving boundaries in food engineering [J]. *Food Technol*, 2000, 54: 2
- [6] Dail R. Calculation of required hold time of aseptically processed low-acid food containing particulates utilizing the Ball method[J]. *J Food Sci*, 1985, 50: 1703
- [7] Merson R L, Singh R P, Carroad P A. An evaluation of Ball's formula method of thermal process calculations[J]. *Food Technol*, 1978, 32(3): 66
- [8] Chandarana D I, Gavin A III. Establishing thermal processes for heterogeneous foods to be processed aseptically: a theoretical comparison of process development methods [J]. *J Food Sci*, 1989, 54: 198
- [9] Chandarana D I, Gavin A, Wheaton F W. Simulation of parameters for modeling aseptic processing of food containing[J]. *Food Technol*, 1989, 43(3): 137.
- [10] Larkin J N. Use of a modified Ball's formula method to evaluate aseptic processing of foods containing particulates[J]. *Food Technol*, 1989, 43(3): 124
- [11] Lee J H, Singh R D, Larkin J W. Determination of lethality and process time in continuous sterilization system containing particulates[J]. *J Food Eng*, 1990, 11: 67.
- [12] Warwick D. A septic: the problems revealed [J]. *Food Manufac*, 1990, 65: 49.
- [13] Buchner N. A septic processing and packaging of particulates[A]. In: Willhoft W M A, edit. *A septic Processing and Packaging of Particulate Foods*[C]. London: Blackie Academic and professionals, 1993, 1.
- [14] Sadler G D. A septic chemistry [A]. In: Nelson P E, Chambers J W, Rodriguez J H, edit. *Principles of A septic Processing and Packaging*[C]. Washington, DC: The Food Processors Institute, 1987, 45
- [15] Toledo R T, Chang S Y. Advantages of aseptic processing of fruits and vegetables[J]. *Food Technol*, 1990, 44(2): 72
- [16] Adams J P, Simunovic J, Smith K L. Temperature histories in a UHT indirect heat exchanger[J]. *J Food Sci*, 1984, 49: 273
- [17] Dickerson J R, Scalzo R W, Reed A M, et al. Residence time of milk products in holding tubes of high-temperature short time pasteurizes[J]. *J Dairy Sci*, 1968, 51: 1731.
- [18] Ramaswamy H S A, Simpson B D, Smith J P. Residence time distribution (RTD) in aseptic processing of particulate foods: a review [J]. *Food Res Int*, 1995, 28: 291
- [19] Singh R K, Lee J H. Residence time distributions of foods with/without particulates in aseptic processing systems. In: Singh R K, Nelson P E, edit. *Advances in A septic Processing Technologies*, London and New York: Elsevier Applied Science, 1992
- [20] Yang B B, Swartzel K R. Photo-sensor methodology for determining residence time distributions of particles in continuous flow thermal processing systems[J]. *J Food Sci*, 1991, 56, 1076
- [21] 杰姆斯·苏赛克, 传热学上册[M]. 北京: 人民教育出版社, 1980, 232
- [22] 无锡轻工业学院等. 食品工程原理[M]. 北京: 北京轻工业出版社, 1985, 235
- [23] 戴嘉尊. 数学物理方程[M]. 南京: 东南大学出版社, 2002, 32- 82
- [24] 陶文铨. 计算传热学的近代进展[M]. 北京: 科学出版社, 2000, 363- 392
- [25] Chang S K, Toledo R T. Heat transfer and simulated sterilization of particulate solids in a continuously flowing system [J]. *J Food Sci*, 1989, 54: 1017.
- [26] Ramaswamy H S, Tung M A. Simplified equations for transient temperatures in conductive foods with convective heat transfer at the surface[J]. *J Food Sci*, 1982, 47: 2042
- [27] Sastry S K, Heskitt B F, Blaisdell J L. Experimental and modeling studies on convective heat transfer at particle-liquid interface in aseptic processing systems [J]. *Food Technol*, 1989, 43(3): 132

- [28] Maesmans G, Hendrick M, Decordt S, et al Fluid-to-particle heat transfer coefficient determination of heterogeneous foods: a review [J]. J Food Proc Preserv, 1992, 16: 29
- [29] Chang S K, Toledo R T. Heat transfer and simulated sterilization of particulate solids in a continuously flowing system [J]. J Food Sci, 1989, 54: 1017.
- [30] Alhamdan A, Sastry S K. Natural convection heat transfer coefficient between non-Newtonian fluid and an irregular shaped particle [J]. J Food Proc Eng, 1990, 13: 113
- [31] Sastry S K, Heskitt B F, Blaisdell J L. Experimental and modeling studies on convective heat transfer at particle-liquid interface in aseptic processing systems [J]. Food Technol, 1989, 43(3): 132
- [32] Sastry S K, Lima M, Brim J, et al Liquid-to-particle heat transfer during continuous tube flow: influence of flow rate and particle to tube diameter ratio [J]. J Food Process Eng, 1990, 13: 239
- [33] Mwangi J M, Rizvi S S H, Datta A K. Heat transfer to particles in shear flow: application in aseptic processing [J]. J Food Eng, 1993, 19: 55
- [34] Hunter G M. Continuous sterilization of liquid media containing suspended particles [J]. Food technol, 1972, 24: 158
- [35] Weng Z M, Hendrickx M, Maesmans G, et al The use of a time-temperature-integrator in conjunction with mathematical modeling for determining liquid /particle heat transfer coefficients [J]. J Food Eng, 1992, 16: 197, 1
- [36] Lenz M K, Lund D B. The lethality-Fourier number method, heating rate variations and lethality confidence intervals for forced-convection heated foods in containers [J]. J Food Proc Eng, 1978, 2: 227.
- [37] Stoforos N G, Park K L, Merson R L. Heat transfer in particulate foods during aseptic processing [R]. The 1989 IFT Annual Meeting, Chicago, II, 1989 June 25- 29
- [38] Stoforos N G, Merson R L. Estimating heat transfer coefficient in liquid/particulate canned foods using only liquid temperature data [J]. J Food Sci, 1990, 55: 478
- [39] Kramers H. Heat transfer from spheres to flowing media [A]. In: Zenz F A, Othmer D F, edit Fluidization and Fluid Particle Systems [C]. New York: Reinhold, 1960: 1946
- [40] Ranz W E, Marshall W R, JR. Evaporation from drop [J]. Chem Eng Prog, 1981, 48: 141.
- [41] 化学工程手册编委. 化学工程手册·第20篇 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1987, 20(2): 34- 46
- [42] Whitaker S. Forced convection heat transfer calculations for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres, and for flow in packed beds and tube bundles [J]. J A ChE, 1972, 18: 361.
- [43] Sastry S K. Liquid-to-particle heat transfer coefficient in aseptic processing [A]. In: Nelson P E, Singh R K, edit Advances in Aseptic Processing Technologies [C]. London and New York: Elsevier Applied Science, 1992
- 63
- [44] Balasudramaniam V M, Sastry S K. Liquid-to-fluid convective heat transfer in non-Newtonian carrier medium during continuous tube flow [J]. J Food Eng, 1994, 23: 169
- [45] Ruan R, Chen P, Chang K, et al Rapid food particle temperature mapping during ohmic heating using FLASHEMRI [J]. J Food Sci, 1996, 64(6): 1024- 1026
- [46] Johnson H F, Pigford R L, Chapin J H. Heat transfer to clouds of falling particles [J]. Trans Am Inst Chem Eng, 1944, 37: 95
- [47] Zuritz C A, McCoy S C, Sastry S K. Convection heat transfer coefficients for irregular particles immersed in non-Newtonian fluids during tube flow [J]. J Food Eng, 1990, 11: 159
- [48] Zitoun K B, Sastry S K. Determination of convective heat transfer coefficient between fluid and cubic particles in continuous tube flow using noninvasive experimental techniques [J]. J Food Pro Eng, 1994, 17: 209
- [49] Zitoun K B, Sastry S K. Convective heat transfer coefficient for cubic particles in continuous tube flow using the moving thermocouples method [J]. J Food Proc Eng, 1994, 17: 229
- [50] Deniston M F, Hassan B H, Merson R. Heat transfer coefficients to liquids with food particles in axially rotating cans [J]. J Food Sci, 1987, 52: 962
- [51] Hassan B H. Heat Transfer Coefficients for Particles in Axially Rotating Cans [D]. Ph. D. thesis, Department of Agricultural Engineering, University of California, Davis, CA, 1984
- [52] Mwangi J M, Rizvi S S H, Datta A K. Heat transfer to particles in shear flow: application in aseptic processing [J]. J Food Eng, 1993, 19: 55
- [53] Zitoun K B, Sastry S K. Determination of convective heat transfer coefficient between fluid and cubic particles in continuous tube flow using noninvasive experimental techniques [J]. J Food Pro Eng, 1994, 17: 209
- [54] Lee J H, Singh R K, Chandarana D I. Sensitivity analysis of aseptic process simulations for foods containing particulates [J]. J Food Proc Eng, 1990, 12: 295
- [55] Teixeira A A, Manson S E. Thermal process control for aseptic processing systems [J]. Food Technol, 1983, 37(4): 128
- [56] Skjoldbrand C, Ohlsson T. A computer simulation program for evaluation of the continuous heat treatment of particulate food products Part 2: design [J]. J Food Eng, 1993, 20: 149
- [57] Hilton J R, Driver A, Silvestre M G, et al Validation of the thermal sterilization of particulates processed at elevated temperatures [J]. Activities Report R&D Assoc, 1989, 41(1): 39
- [58] Ronner U. A new biological indicator for aseptic sterilization [J]. Food Technol Int, Europe, 1990, 90: 43
- [59] Pflug I J, Berry M R, Dignan D M. Establishing the heat preservation process for aseptically packed low-acid

- food containing large particulates, sterilized in a continuous heat-hold-cool system [J]. *J Food proc.*, 1990, 53: 312
- [60] Pflug I J, Christensen R. Converting an F-value determined on the basis of one Z-value to the F-value determined on the basis of a second Z-value[J]. *J Food Sci.*, 1980, 45: 35
- [61] Mulley E A, Stumbo C R, Hunting W A. Thiamine: a chemical index of the sterilization efficacy of thermal processing[J]. *J Food Sci.*, 1993, 40: 993
- [62] Adams J B. The inactivation and regeneration of peroxidase in relation to the high temperature-short time processing of vegetables[J]. *J Food Technol.*, 1978, 13(4): 281.
- [63] Rao M A, Lee C Y, Katz J, et al. A kinetic study of loss of vitamin C, color, and firmness during thermal processing of canned peas[J]. *J Food Sci.*, 1981, 46: 636
- [64] Weng W M, Hendrickx M, Maesmans G, et al. Immobilized peroxidase: a potential bioindicator for evaluation of thermal processes[J]. *J Food Sci.*, 1991, 56: 56
- [65] Berry M F, Singh R K, Nelson P E. Kinetics of methionine sulfonium in buffer solutions for estimating thermal treatment of liquid foods[J]. *J Food Proc Preserv.*, 1989, 13: 475.
- [66] Ramaswamy H S, Ghazala S. Center point nutrient degradation in heat processed conduction heating food model[J]. *J Food Proc Eng.*, 1990, 12: 159, 7.
- [67] Kim H J, Taud I A. Intrinsic chemical markers for aseptic processing of particulate foods[J]. *Food Technol.*, 1993, 47(1): 91.
- [68] Banga J R, Perez Martin R I, Gallardo J M, et al. Optimization of thermal processing of conduction-heated canned foods: study of several objective functions[J]. *J Food Eng.*, 1991, 14: 25
- [69] Tucker G S, Holdsworth S D. Mathematical modeling of sterilization and cooking processes for heat preserved foods: applications of a new heat transfer model[J]. *Trans Ind Chem Eng.*, 1991, 69: 5
- [70] Mansfield T. High temperature short time sterilization [A]. In: *proc 1st Int Cong Food Science and Technology*, vol 4[C]. London: Gordon and Breach, 1962, 311.
- [71] Tucker G, Holdsworth S D. Optimization of quality factors for foods thermally processed in rectangular containers[A]. In: *Field R W, Howell J A, edit Process Engineering for the Food Industry*, 2nd ed[C]. London: Elsevier Applied Science, 1990, 59.
- [72] Teixeira A A, Dixon J R, Zarnadid J W, et al. Computer simulation of nutrient retention in thermal processing of conduction heating foods[J]. *Food Technol.*, 1969, 23(6): 137.

Research advances in aseptic processing of liquid/particle foods

Deng Li, Jin Zhengyu

(School of Food Science and Technology, Southern Yangtze University, Wuxi 214036, China)

Abstract: Liquid/particle food aseptic processing, as an attempt to apply ultra high temperature sterilization to solid food, consists of the scraped surface heat exchangers and the holding tube characteristically, and have not been developed to be applicable to industry. It have potential to process Chinese traditional table foods, would become a focal point in Chinese food science research. As the foundation for establishing mathematical models of the lethality and the retention of quality, the experimental and predicting methods of Liquid/particle heat transfer, including the measuring of relationship of temperature/time of food particles and predicting fluid-to-heat transfer coefficient from dimensionless correlations, is the key to research on aseptic processing of liquid/particle foods. Ball's formula method, as a normal validation method, is not applicable to aseptic processing of liquid/particle food, so a few new models and experimental methods for aseptic process evaluation was developed. The principle and heat transfer for aseptic processing of liquid/particle foods, models and methods for aseptic process evaluation and the objective/limited functions in optimization of processing were reviewed.

Key words: Liquid/particle food; aseptic processing; lethality; heat transfer; fluid-to-heat transfer coefficient (h_{fp}); process evaluation; optimization