

真空包装小龙虾虾仁热杀菌数值模拟研究

侯皓然, 马淑凤, 王利强*

(江南大学机械工程学院 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室 江苏无锡 214122)

摘要 以小龙虾虾仁为研究对象,利用 COMSOL Multiphysics 软件建立了考虑外包装材料(PET/AL/NY)的三维仿真模型,模拟工业高温蒸汽灭菌过程。无线温度传感器对虾仁冷点温度的验证结果发现,三维仿真模型对于高温灭菌过程的表征结果可靠。在此基础上,通过仿真模型可表征真空包装虾仁内的最慢加热区(SHZ)位置变化、温度变化及 F 值变化的实时数据。结合工业生产需要,优化针对于真空包装小龙虾虾仁产品的灭菌方案。结果发现:产品最慢加热区位于厚度较大的截面中心处而不是几何中心,产品表面存在过度加热现象。参考模型温度分布结果及相关质构数据,认为在 F 值 = 8 min 条件下 115 °C-10 min 杀菌方案可在确保产品安全的前提下提升产品品质。本文所建立的模型可为真空包装软罐头产品的热杀菌优化提供参考。

关键词 高温灭菌; COMSOL; 模拟; 真空包装

文章编号 1009-7848(2022)11-0279-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.11.029

小龙虾作为夏日食品近年来越来越受到消费者喜爱,各类以小龙虾为元素的产品层出不穷,人们想在空间和时间上拓宽产品的销售范围及货架期。在运输、仓储再到销售的整个过程中,常温储藏产品受环境因素的影响较小,通过包装、热杀菌等手段制成罐头食品,虽可以杀灭腐败微生物,但同时也破坏了食品中的部分营养物质,导致产品品质下降。由于不同包装材料及形式、不同杀菌过程所对应的包装内环境变化十分复杂,采用数值模拟结合计算机仿真技术可获得包装内温度场分布、食品水分含量、致死率值等相应指标的实时数据。

食品材料热杀菌领域相关的数值模拟,主要涉及到不同杀菌工艺(微波、射频)模拟、食品介质温度-时间分布、最慢加热区(SHZ)及冷点位置、食品中水分含量和营养物质与温度的相关性研究等。然而,从包装角度出发,杀菌过程中材料对食品杀菌程度的相关性研究较少^[1],所涉及的食品材料对象大多使用食品模拟物代替^[2-3]。Hong 等^[4]建立胡萝卜条 3D 热交换模型,分析不同温度、时间

杀菌方案、不同尺寸包装与食品硬度、颜色、 F 值、 C 值的相关性研究。Park 等^[5]采用模糊算法分类不同大小的玉米构建几何模型,探究热环境对玉米质构的影响,优化热杀菌过程。目前,针对于水产品品类从包装的角度出发,关于其热杀菌模拟及优化的研究还较少。研究杀菌最优条件,可以保证达到食品安全致死率值(F 值)的同时,降低热强度对产品表面和整体的破坏。

由于食品热物性参数会受到温度、食品内部成分含量、不同品种(批次)等多方面影响,而热物性参数与杀菌程度的表征高度相关,因此,确定食品材料热物性参数变化对于模型构建准确性也尤为重要。本文以小龙虾为研究对象,构建小龙虾虾仁与包装材料系统几何模型,验证数值模型的适用性,建立不同杀菌工艺与虾仁品质质构之间的相关性研究。

1 材料与方法

1.1 试验材料

小龙虾虾仁(每只约 30~35 g),洪泽湖品知鲜小龙虾。

1.2 仪器材料

DZ-260PD 真空包装机,大江机械制造有限公司;LDZM 高温灭菌锅,上海申安医疗器械厂;KSON 恒温恒湿箱,庆声电子科技有限公司;TA-XT plus 物性测试仪,TA Instruments;DK-S22 数

收稿日期: 2021-11-20

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(JUSRP21115);
江苏省食品先进制造装备技术重点实验室自主研究课题资助项目(FMZ201902)

第一作者: 侯皓然,女,硕士生

通信作者: 王利强 E-mail: wlqcom@163.com

显恒温水浴锅,精宏电热仪器有限公司;HT9815热电偶温度计,鑫泰仪器仪表有限公司;KD2 Pro热特性分析仪,美国Decagon公司;Q2000DSC差示扫描量热仪,美国TA Instruments。

1.3 原材料预处理

参考徐言等^[6]和陈东清等^[7]的方法对小龙虾进行前期预处理,向3倍小龙虾质量的清水中分别添加质量分数为0.80%的食盐、0.16%的柠檬酸,浸泡吐脏15 min后清水漂洗小龙虾1~2次;加入2%的盐水中煮沸3 min;迅速冷却至常温;去除虾头,虾尾剥壳去肠线,取虾仁部分;预处理完成的虾仁采用高温蒸煮袋(PET/AL/NY)进行真空包装,厚度为0.22 mm,120 mm×170 mm。

1.4 真空包装小龙虾虾仁热杀菌模型的建立

真空包装的虾仁在进行高温蒸汽灭菌的过程中具有不同的传热机制,灭菌锅内的热蒸汽与产品之间通过对流进行热量交换,灭菌锅壁会产生热辐射效应,承装小龙虾虾仁的金属栅格网与

真空包虾仁下表面接触,通过热传导导致使虾仁表面升温。

1.4.1 几何模型及网格划分 根据虾仁在热杀菌过程的实际情况进行如下假设:1)虾仁认为是连续、均匀、具有各向同性;2)高温蒸煮袋外侧与杀菌锅温度相等;3)虾仁表面传热系数均一;4)不考虑虾仁表面水冷凝现象,基于上述假设建立真空包装虾仁几何模型见图1。

使用3D扫描技术对真空包即食小龙虾产品建模(约64 g,8只),获得真空包装即食小龙虾仁的三维点云数据,通过逆向曲面生成三维几何实体,导入COMSOL Multiphysics中,如图1所示。

由于包装薄膜在一个方向上尺寸极小^[8],若画出几何实体会产生大量微小网格结构,因此对包装材料设置薄层接口,在保证精确度的同时减少模型计算量。使用COMSOL Multiphysics进行网格划分,几何域划分情况如图2所示。

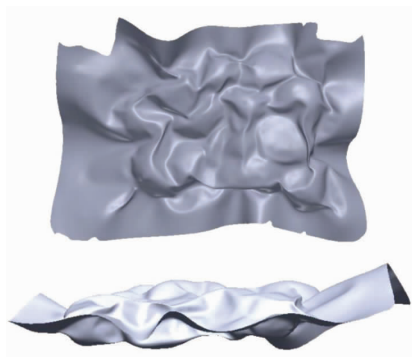


图1 几何模型

Fig.1 Geometric model

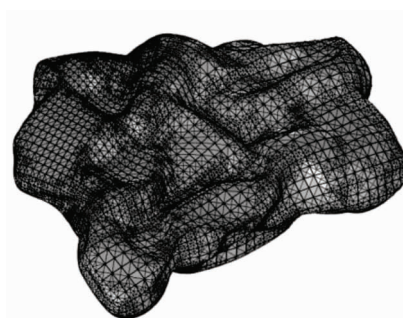


图2 真空包即食虾仁网格划分

Fig.2 Grid division of vacuum-packed crayfish

1.4.2 相关材料热物性参数 Obuz等^[9]模拟强制热对流环境下的牛排温度变化,发现模拟温度值出现过度加热问题,原因是由于模型中使用了恒定的热物性质假设。本文认为虾仁热物性质中比

热容是随温度和时间变化的,具体包装材料、小龙虾虾仁的热物性参数值及相关参数数学模型见表1。

表1 小龙虾虾仁的热物性参数

Table 1 Thermodynamic parameters of crayfish

热物性参数	虾仁	PET/AL/NY
$C_p/J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$7.97 \times 10^{-4} T^2 - 0.039 T + 0.87$	4 040
$\rho/kg \cdot m^{-3}$	$1\ 105 \pm 117$	1 016
$k/W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0.53 ± 0.02	0.56

注:数据参考文献[10-11]。

1.4.2.1 测定导热系数 使用 KD2 Pro 热物性分析仪对食品热物性参数进行测试,SH-1 双头探针(长 30 mm,直径 1.28 mm,两针间距 6 mm)测量虾仁导热系数,测试前虾仁水浴加热至目标温度,每组重复 5 次取平均值。

1.4.2.2 测定比热容 根据 ASTM E1269-05 标准使用 DSC 测试熟制虾仁比热容,建立小龙虾虾仁比热容与温度变化的相关性方程。采用 DSC 三线法测量,称取 10 mg 样品置于固体坩埚中,升温程序为 10 °C 恒温 5 min,10~150 °C 以 15 °C/min 速率升温,150 °C 恒温 10 min,每个样品测试 3 次取平均值,多项式拟合得到虾仁 C_p 随 T 的变化关系为式(1),其中 $R^2 = 0.99$ 。

$$C_p (\text{J/kg}\cdot\text{K}) = 7.97 \times 10^{-4} T^2 - 0.039T + 0.87 \quad (1)$$

1.4.2.3 测定密度 考虑到虾仁属于食品介质,在热杀菌过程中会涉及水分交换,因此对于多孔介质材料,使用真密度测试仪可获得去除内部空隙或颗粒间空隙的密度,测试得到的结果为 1 201 kg/m³。使用传统排水法测定虾仁的体积,并计算得到虾仁的密度为 1 183 kg/m³。

1.4.3 数值模拟及仿真环境 真空包装内容物为纯固体,传热方式为热传导,由于固体材料为食品,涉及到环境温度变化引起的水分交换,故模拟使用固体传热与稀物质传递物理场耦合。针对固体结构,在传热过程中模型会进行持续的热交换,具有各向同性的固体热交换傅里叶模型如下,式(2)中 r 为直径(mm), z 表示速率方向, α 为热渗透系数(m²/s),可描述虾仁热杀菌过程中的非稳态传热现象。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_T}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \quad (2)$$

在高温热空气环境中,虾仁内部湿热传递表示为式(3)。

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{k_m}{\rho C_m} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \quad (3)$$

假设虾仁模型初始条件认为是连续且均一的,具有各项同性,虾仁内部由于水分蒸发出现潜热损失,虾仁表面与外界热空气进行对流换热和物质交换。

$$T(r, Z) \Big|_{t=0} = T_0, m(r, Z) \Big|_{t=0} = m_0 \quad (4)$$

初始边界条件设置热对流,物体表面热平衡见式(5)。

$$r=0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (5)$$

样品表面边界条件见式(6)。

$$k_T \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = h_T (T_s - T_w) + D_m \rho \lambda \frac{\partial m}{\partial n} \quad (6)$$

$$-k_m \left(\frac{\partial m}{\partial n} \right) = h_m (m_e - m) \quad (7)$$

包装材料温度计算如式(8)所示。

$$T_i = \frac{T_w + T_s}{2} \quad (8)$$

式中, k_T ——导热系数,W/(m·°C); k_m ——导湿系数,m·s; T_i ——导热系数薄膜温度,单位°C; T_s ——包装外表面温度,单位°C; T_w ——灭菌锅腔内热空气温度(T_w 值根据灭菌锅升温程序变化,将 105,115,121,126 °C 杀菌 15 min 过程中温度曲线导入软件,虾仁初始温度为 40 °C 略高于室温),单位°C。

采用有限元方法,根据每个单元内各点的温度和湿度分布见式(9)。

$$T^{(e)} = \sum_{i=1}^n N_i T_i, m^{(e)} = \sum_{i=1}^n N_i m_i \quad (9)$$

由于高温灭菌锅内热空气的速度难以测量,灭菌锅内环境强制对流传热系数(h)预测数值为 200~2 000 W/(m²·K)^[12],通过比较温度场的模拟数据与试验数据标准差(RMSE)确定最适传热系数^[10]。总传热系数为对流传热系数与辐射传热系数之和,如式(10)所示。

$$h_k = h_c + h_r \quad (10)$$

根据 Isleroglu 等^[13]研究发现,对于不同环境温度下该模型中的热辐射效应对产品温度分布的影响远小于热对流。也就是说,除去热空气的加热作用以外,灭菌锅内循环的热空气对流作用是主要传热机理。底面金属栅格网的热传导对于虾仁的温度分布影响较小,这是由于金属栅格网导热系数较高。综上,整体传热系数与对流传热系数数值非常接近。

1.5 试验过程

1.5.1 模型验证 使用 Data Trace 温度探测仪对真空包装小龙虾仁实体的 SHZ 位置温度进行实时数据采集,传感器的具体位置如下图 3 所示,1

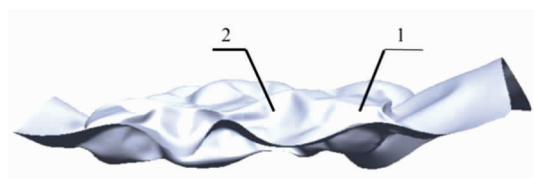


图3 真空包装中传感器位置示意图
Fig.3 Schematic diagram of sensor position
in vacuum package

位点为样品厚度最厚区域中心,2位点为样品几何中心。采集灭菌锅 120 ℃-15 min 灭菌升温相关数据,拟合后导入模型温度预设,模拟高温灭菌的实际杀菌过程。最后,通过传感器采集的温度数据与三维模型对应点位比较验证并计算误差。

1.5.2 小龙虾仁致死率值与品质破坏 F 值表示高温灭菌在时间-温度上的积累效应,即致死率值。 F 值增大会造成虾仁品质破坏,Ali 等^[14]研究不同 F 值对沙丁鱼罐头质构的影响发现,沙丁鱼硬度随 F 值增加而降低,整体制品质构也呈现下降趋势;对于相同 F 值,不同杀菌温度和时间方案对产品品质也会产生不同的影响。Sreenath 等^[15]研究相同 F 值不同杀菌方案对鲭鱼品质影响,发现杀菌温度越高,热强度越低。

虾仁杀菌程度用 F_0 值表示,如式(11)所示。

$$F_0 = \int_{t_0}^{t_f} L(t) \cdot dt = \int_{t_0}^{t_f} 10^{\frac{T_c - T_{ref}}{z}} \cdot dt = \int_{t_0}^{t_f} \frac{1}{F} \cdot dt \quad (11)$$

式中, t_f ——杀菌完成时间,min; T_c ——冷点温度,℃; T_{ref} ——标准杀菌温度,取 121.1 ℃;根据肉毒杆菌计算致死率值对应的 Z 值(取 10 ℃)。

根据资料显示,1994 年 Frott 等^[16]研究认为水

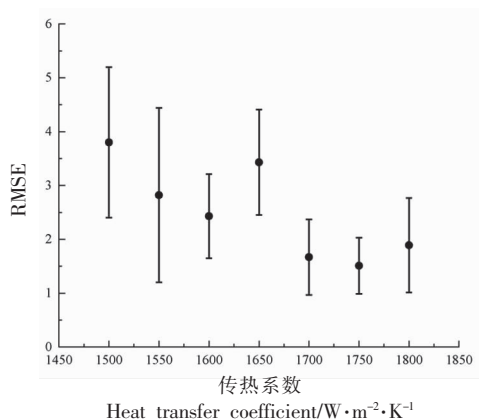


图4 不同传热系数 h 对应的平均 RMSE 变化

Fig.4 Changes in the average RMSE values according to h value

产品杀菌 F 值应控制在 5~20 min 范围内,对于即食虾类产品,相关研究文献显示 F 值应小于 10 min^[10,17-18]。本课题以即食小龙虾虾仁为对象,研究 F 值为 8 min 时对应的最佳杀菌温度-时间组合,并研究安全杀菌值下真空包装虾仁相关品质指标变化。

采用 TA-XT plus 物性测试仪测定不同杀菌方案下小龙虾虾仁的品质指标,参数设定为:测试速率 1 mm/s、返回速率 1 mm/s、形变量 30%、两次压缩时间间隔为 5 s。压缩探头为 P50 mm 柱型探头。试样取虾尾中部,大小约为 8 mm×8 mm×6 mm 方块,进行 5 次平行试验。

1.5.3 数据分析 使用 SPSS V19.0 进行显著性差异评估,将模拟数据与试验数据进行比较,其中 RMSE 计算公式见式(12)。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_e - T_{sim})^2}{n}} \quad (12)$$

式中, T_e ——试验数据的温度,℃; T_{sim} ——模拟数据的温度,℃; n ——数据点数。

2 结果与讨论

2.1 模拟与验证

为确定真空包装虾仁模型的最适传热系数 h ,模型对 h 值(1 500~1 800 $W/m^2 \cdot K$)进行模拟,并考虑不同试验环境计算平均标准差结果,得到最适传热系数为 1 750 $W/m^2 \cdot K$,如图 4 所示。

比较小龙虾仁 SHZ 处 121 ℃灭菌 15 min 温度模拟结果与试验结果曲线如图 5,所得结果标准

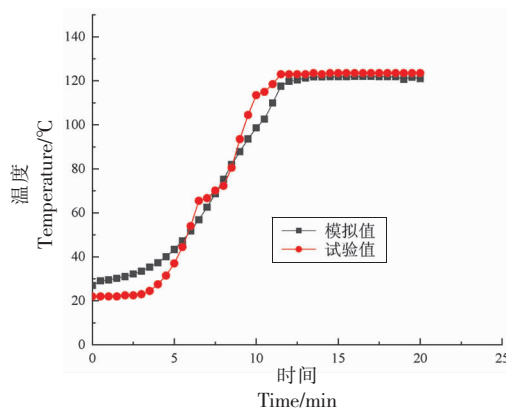


图5 121 ℃-15 min 最慢加热区模拟与试验温度分布值

Fig.5 Comparison of simulation results with experiment data for SHZ at 121 ℃

差 $RMSE < 0.6458\text{ }^{\circ}\text{C}$, 认为该模型可表征实际灭菌锅内的杀菌过程。在起始和结束部分模拟值与试验值之间的误差较大, 原因可能是传感器探针插入和取出时周围环境介质变化所引起的。

2.2 温度分布

采用 PET/AL/NY 高温蒸煮袋包装的小龙虾仁在设定 $121\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下灭菌 15 min 升温曲线下的三维模型温度分布如下图 6, 抽真空导致包装袋表面有不均匀褶皱分布, 从温度分布来看褶皱凸起处、四周及包装袋边缘区温度较高, 表面平滑区域温度分布较均匀, 表面最大值与最小值相差 $6.543\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

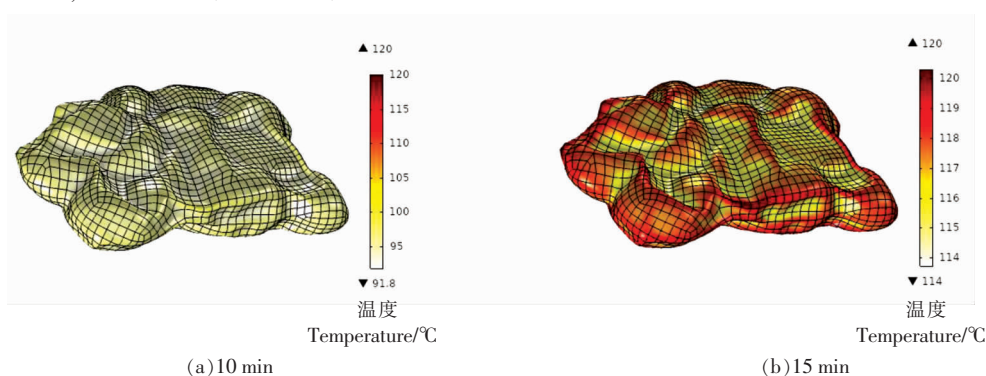


图 6 灭菌 10 min 和 15 min 时小龙虾仁表面温度分布云图

Fig.6 Surface temperature distribution of crayfish at 10 min and 15 min

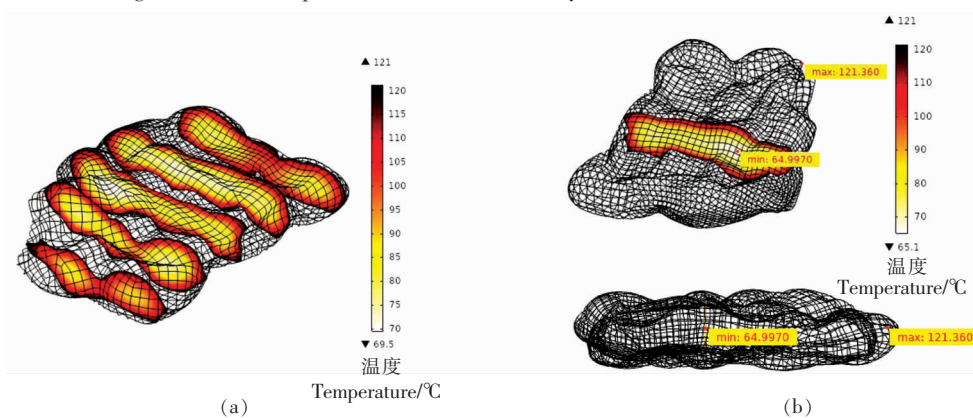


图 7 $121\text{ }^{\circ}\text{C}$ -15 min 灭菌后虾仁温度分布截面图

Fig.7 Sectional view of temperature distribution of crayfish at $121\text{ }^{\circ}\text{C}$ -15 min

2.3 致死率值分布

不同杀菌方案会对产品致死率分布产生影响, 从而影响杀菌效果, 通过计算机模拟可以得到 $121\text{ }^{\circ}\text{C}$ -15 min 杀菌程序下小龙虾仁致死率分布云图(图 8)及致死率截面图(图 9)。图中显示 $F_{\min} = 8.94\text{ min}$, 满足产品灭菌需求。然而, $F_{\max} = 14.92\text{ min}$ 与最小值相差达 5.98 min , 差距较大, 说明传统经

$^{\circ}\text{C}$ 。从图中可以看出, 灭菌 10 min 和 15 min 时的温度变化随灭菌锅温度的升高, 虾仁的传热速率逐渐增加。

图 7 为 15 min 灭菌结束时的温度分布截面图, 虾仁整体温度分布呈现出较大的温度梯度, 最大值温度为 $121.36\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最小值为 $64.99\text{ }^{\circ}\text{C}$, 主要温度梯度变化位于靠近包装袋外层区域。冷点位置不是一成不变的, 冷点变化区域即最慢加热区位于真空包装虾仁厚度较大区域, 并不位于三维几何实体中心。

验灭菌方法在满足杀菌要求的情况下, 产品外表面存在过度杀菌问题, 严重影响产品品质。

从位置来看, F 值最小值与几何中心处相关数据如下表 2, 由表可得, F 值最小值同样不位于几何中心, 原因可能是 F 值受温度影响, 产品厚度越大传热速率越慢, 因此 F 值最小点位于厚度较大区域而不是几何中心。

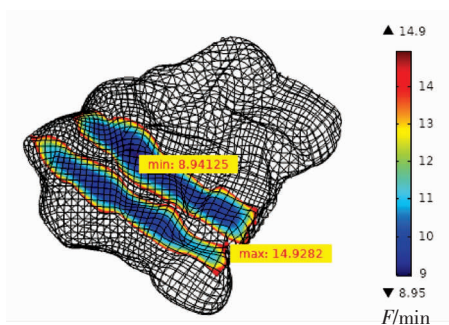


图8 121 °C-15 min 小龙虾仁致死率分布云图

Fig.8 Distribution of lethality of crayfish at 121 °C-15 min

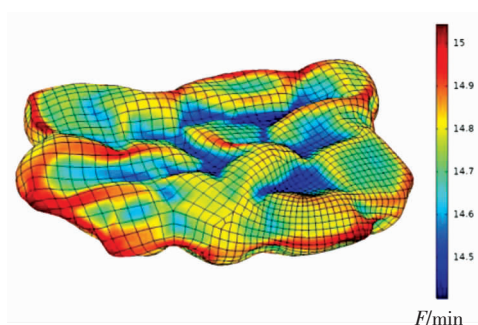


图9 121 °C-15 min 小龙虾仁致死率截面图

Fig.9 Sectional view of the lethality rate of crayfish at 121 °C-15 min

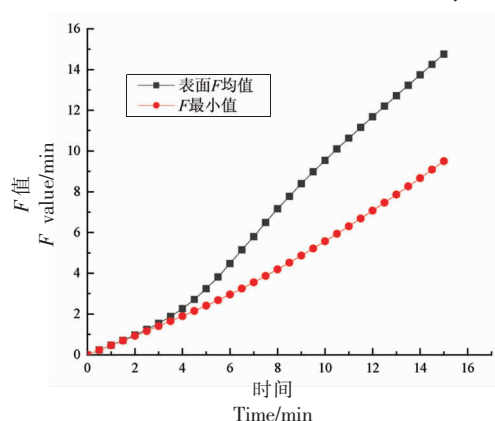


图10 121 °C-15 min 真空袋内小龙虾仁致死率值变化

Fig.10 Change of lethality of vacuum-packed crayfish at 121 °C-15 min

表2 F 值最小值点和几何中心点Table 2 F -value minimum point and geometric center point

	F 值/min	所在坐标/mm
几何中心	9.23	$x = -0.002y = -0.006z = -0.001$
F_{\min}	8.94	$x = -0.014y = -0.016z = 0.0008$

2.4 不同杀菌方案对产品品质的影响

为优化真空包装小龙虾仁产品杀菌方案,减少由于过度灭菌而导致的品质损失,根据上述模型模拟不同加热温度(105,115,121,126 °C)程序,得到不同杀菌温度环境下真空包装小龙虾仁温度分布及致死率变化情况,如下图11所示。升温过程所用时间随温度上升而延长,相同致死率条件下恒温杀菌时间和总杀菌时间随温度升高而降低。

表3呈现了不同杀菌方案作用下虾仁的相关质构数据。硬度反应食品材料内部聚合度,硬度越大表示食品内部结构越紧密。在加热前期,虾尾由

于虾肉蛋白热变性和交联导致硬度增大,后随着温度的上升外表面过度受热引起虾肉凝胶劣化致使硬度降低,同时在整个加热过程中硬度随虾肉逐步脱水导致肌肉组织收缩而增加。综合虾尾内部各种成分的变化机制,随着杀菌温度-时间的上升,肉质硬度、弹性呈现出先增加后降低的趋势。虾肉胶黏性和咀嚼性在温度、时间的变化中同样呈先增加后降低的趋势,最值出现在115 °C-10 min时,胶黏性为7.57 N,咀嚼性为23.66 mJ。

从结果看出115 °C-10 min的相关质构参数优于其它温度-时间组合方案。在相同致死率值情况下^[6],产品质量品质会受到灭菌温度的影响,最

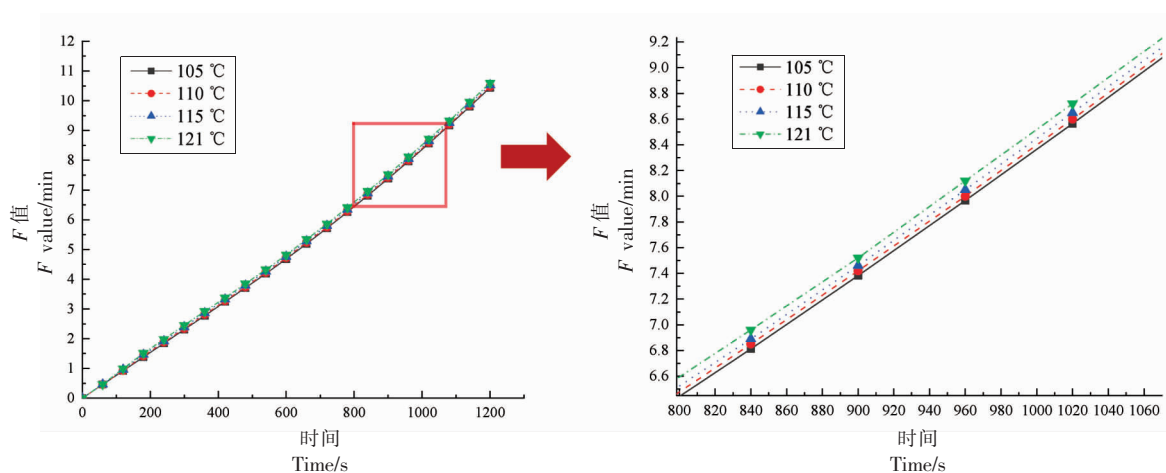
图 11 不同杀菌温度下 F 值变化曲线Fig.11 Change of F value under different sterilization temperatures

表 3 不同杀菌方案下虾仁的质构变化

Table 3 Changes of texture parameters under different sterilization program

杀菌方案	质构参数			
	硬度/N	弹性/mm	胶黏性/N	咀嚼性/mJ
115 °C-5 min	6.73	3.06	5.63	17.22
115 °C-10 min	9.20	3.13	7.57	23.66
115 °C-15 min	6.13	2.73	4.97	13.53
121 °C-5 min	5.90	2.83	5.11	14.48
121 °C-10 min	6.21	2.30	4.91	11.29
121 °C-15 min	5.46	2.59	4.26	11.01
126 °C-5 min	5.31	2.76	4.25	11.71

适灭菌温度-时间方案对产品灭菌方案优化有着重要作用。

3 结论

1) 利用 COMSOL Multiphysics 建立真空包装即食小龙虾仁产品的热杀菌过程仿真模型,使用 3D 扫描技术并进行逆向转曲面处理,建立固体传热和稀物质传递耦合模型,并进行试验检验模型的可靠性。

2) 仿真模型将不规则三维几何、包装材料的传热影响以及灭菌锅升温过程等因素考虑在内,减少模拟过程误差。

3) 通过仿真模型可以得到热杀菌过程中的温度场分布,进而观察产品热杀菌过程中的内外温差及受热均匀性,模拟得到的致死率数据反应灭菌程度。从模拟结果中发现,产品中心和表面温度、 F 值差距较大,褶皱凸起处、四周及包装袋边

缘区域存在过度杀菌现象,同时研究不同温度-时间灭菌方案对产品品质的影响,得到对于该真空包装即食小龙虾仁产品的最适灭菌程序为 115 °C-10 min。

参 考 文 献

- [1] DUARTE AUGUSTO P E, PINHEIRO T F, CRIS-TIANINI M. Using computational fluid -dynamics (CFD) for the evaluation of beer pasteurization: Effect of orientation of cans[J]. Ciencia E Tecnologia De Alimentos, 2010, 30(4): 980-986.
- [2] KORIBILLI N, ARAVAMUDAN K, VARADHAN M U S V A. Quantifying enhancement in heat transfer due to natural convection during canned food thermal sterilization in a still retort[J]. Food Bioprocess Tech, 2011, 4(3): 429-450.
- [3] LESPINARD A R, MASCHERONI R H. Influence

- of the geometry aspect of jars on the heat transfer and flow pattern during sterilization of liquid foods [J]. *J Food Process Eng*, 2012, 35(5): 751–762.
- [4] HONG Y K, UHM J T, YOON W B. Using numerical analysis to develop and evaluate the method of high temperature sous-vide to soften carrot texture in different-sized packages [J]. *J Food Sci*, 2014, 79(4): E546–E561.
- [5] PARK H W, YOO J S, JUNG H, et al. Developing a sterilization processing and a grading system to produce a uniform quality of sterilized whole corn (*Zea mays* L. var. *ceratina*) [J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 249(6): 55–65.
- [6] 徐言, 陈季旺, 楚天奇, 等. 盐煮工艺对即食小龙虾品质的影响 [J]. *武汉轻工大学学报*, 2020, 39(5): 1–8.
- XU Y, CHEN J W, CHU T Q, et al. Effect of salt-boiling process on quality attributes of ready-to-eat crayfish [J]. *Journal of Wuhan Polytechnic University*, 2020, 39(5): 1–8.
- [7] 陈东清, 李新, 汪兰, 等. 即食小龙虾加工与杀菌工艺研究 [J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2020, 38(5): 46–53.
- CHEN D Q, LI X, WANG L, et al. Study on technology used in processing and sterilization of ready-to-eat crayfish [J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2020, 38(5): 46–53.
- [8] MONDAL A, DATTA A K. Two-dimensional CFD modeling and simulation of crustless bread baking process [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 99(2): 166–174.
- [9] OBUZ E, DIKEMAN M E, ERICKSON L E, et al. Predicting temperature profiles to determine degree of doneness for beef biceps femoris and longissimus lumborum steaks [J]. *Meat Sci*, 2004, 67(1): 101–105.
- [10] FAN H L, HUANG J L, ZHAO J X, et al. Electromagnetic properties of crayfish and its responses of temperature and moisture under microwave field [J]. *J Food Sci*, 2021, 86(4): 1306–1321.
- [11] 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.
- [12] GEANKOPLIS C J, HERSEL A A, LEPEK D H. Transport processes and separation process principles [M]. Upper Saddle River: Prentice hall PTR, 2018: 98–105.
- [13] ISLEROGLU H, KAYMAK-ERTEKIN F. Modelling of heat and mass transfer during cooking in steam-assisted hybrid oven [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 181(5): 50–58.
- [14] ALI A, SUDHIR B, GOPAL T K S. Effect of heat processing on the texture profile of canned and retort pouch packed oil sardine (*Sardinella longiceps*) in oil medium [J]. *J Food Sci*, 2005, 70(5): S350–S354.
- [15] SREENATH P G, ABHILASH S, RAVISHANKAR C N, et al. Heat penetration characteristics and quality changes of indian mackerel (*Rastrelliger kanagurta*) canned in brine at different retort temperatures [J]. *J Food Process Eng*, 2009, 32(6): 893–915.
- [16] FROTT R, LEWIS A S. The Canning of fish and meat [M]. London: Springer, 1994: 202.
- [17] GOPINATH S P, ANTHONY M X K, NAGARAJARAO R C, et al. Standardisation of process parameters for ready-to-eat squid masala in indigenous polymer-coated tin-free steel cans [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2007, 42(10): 1148–1155.
- [18] MOHAN C O, RAVISHANKAR C N, BINDU J, et al. Effect of thermal process time on quality of ‘Shrimp kuruma’ in retortable pouches and aluminum cans [J]. *J Food Sci*, 2006, 71(6): S496–S500.

Numerical Simulation Study on Heat Sterilization of Vacuum-packed Crayfish

Hou Haoran, Ma Shufeng, Wang Liqiang*

(Academy of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, Wuxi 214122, Jiangsu)

Abstract A three-dimensional heat transfer model was established to simulate thermal pasteurization process of model food (crayfish) considering the packaging materials (PET/AL/NY) based on COMSOL Multiphysics in this paper. Through the verification result of the cold spot temperature of the shrimp by the wireless temperature sensor, it was found that the three-dimensional simulation model was reliable for the characterization of the high temperature sterilization process. The simulation model could be used to characterize the real-time data of the slowest heating zone (SHZ) in the vacuum packaged shrimp position change, temperature change and F value change. Combining with the needs of industrial production, optimize the sterilization plan for vacuum-packed crayfish and shrimp products. It was found that the slowest heating zone of the product was located at the center of the thicker section instead of the geometric center, and the product surface was overheated. With reference to the model temperature distribution results and related texture data, it was believed that the 115 °C-10 min sterilization program under the condition of F value=8 min could improve product quality while ensuring product safety. This study is expected to be a significant contribution for further optimization studies.

Keywords thermal sterilization; COMSOL; simulation; vacuum packaging