

自热米饭的传热分析与包装优化设计

孙浩文 李 欢 吴晓蒙 毛立科

(中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

摘要: [目的] 为了进一步了解传热过程对自热食品品质的影响, 提高现有自热米饭的加热速率。[方法] 采用虚拟仿真与试验相结合的方法, 分析了自热米饭加热过程中实际温度变化以及传热对米饭质构的影响, 利用 COMSOL 软件构建了自热米饭的三维传热模型以研究自热米饭的传热过程, 并以加热速度最大化为目的进行自热米饭包装的优化设计。[结果] 复热后自热米饭经 20 °C 冷却 90 min 后, 不同层次间质构特性存在差异, 其中中层米饭咀嚼性较高、整体质构较好, 而底层米饭弹性、内聚性和咀嚼性显著降低。该三维传热模型可以准确描述自热米饭加热过程中的温度变化, 此外, 对于相同体积的自热米饭, 优化包装的尺寸和长宽的参数组合 (长为 133.49 mm, 宽为 120 mm 时, 加热时间缩短 387 s)、利用碗装包装形状 (顶部直径为 273 mm, 底部直径为 200 mm 时, 加热时间缩短 194 s), 以及采用新型铝箔底包装材料 (加热时间缩短 251 s), 相较于市场原有包装均显著提升自热米饭加热效果。[结论] 采用的虚拟仿真与试验结合的方法可以直观描述自热米饭传热效果, 优化自热米饭包装可以有效提高传热速率。

关键词: 自热米饭; 包装; 质构; 优化设计; 模拟仿真

Heat transfer analysis and packaging optimization design of self-heating rice

Sun Haowen Li Huan Wu Xiaomeng Mao Like

(College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] To further understand the influence of the heat transfer process on the quality of self-heating foods and improve the heating rate of existing self-heating rice products. [Methods] A combination of virtual simulation and experimental methods was used to analyze the actual temperature variations during the heating process of self-heating rice and the effects of heat transfer on rice texture. A three-dimensional heat transfer model of self-heating rice was established using COMSOL software to investigate the heat transfer process, and the packaging design of self-heating rice was optimized with the objective of maximizing the heating rate. [Results] After reheating and cooling at 20 °C for 90 min, differences in textural properties were observed among different layers of self-heating rice. The rice in the middle layer showed higher chewiness and better overall texture, whereas the springiness, cohesiveness, and chewiness of the bottom layer rice were significantly reduced. The established three-dimensional heat transfer model accurately described the temperature changes during the heating process of self-heating rice. In addition, for self-heating rice with the same volume, optimization of packaging dimensions and length-to-width parameter combinations (with a length of 133.49 mm and a width of 120 mm) shortened the heating time by 387 s; The use of a bowl-shaped package (with a top diameter of 273 mm and a bottom diameter of 200 mm) shortened the heating time by 194 s; And the application of a novel aluminum foil-bottom packaging material shortened the heating time by 251 s. Compared with the original commercial packaging, all these optimization strategies significantly improved the heating performance of self-heating rice. [Conclusion] The combination of virtual simulation and experimental methods used in this study can intuitively describe the heat transfer performance of self-heating rice, and optimization of self-heating rice packaging can effectively improve the heat transfer rate.

Keywords: self-heating rice; packaging; texture; optimization design; simulation

基金项目: “十四五”国家重点研发计划重点专项 (编号: 2023YFF1105205)

通信作者: 吴晓蒙 (1986—), 男, 中国农业大学副教授, 博士。E-mail: wuxmeng@cau.edu.cn

收稿日期: 2025-06-15 改回日期: 2026-05-30

引用格式: 孙浩文, 李欢, 吴晓蒙, 等. 自热米饭的传热分析与包装优化设计[J]. 食品与机械, 2026, 42(7): 235-242.

Citation: Sun Haowen, Li Huan, Wu Xiaomeng, et al. Heat transfer analysis and packaging optimization design of self-heating rice[J]. Food & Machinery, 2026, 42(7): 235-242.

随着现代社会生活节奏的加快和消费需求的多样化,自热食品成为快速消费市场中的重要组成部分。自热食品通常由热源、激活剂、被加热食品和包装系统构成,是一种具备自我加热能力的方便食品,在军用、民用及应急场景中得到广泛应用^[1]。其加热机制依赖氧化钙、镁粉或铁粉类热源与水发生放热反应,通过蒸汽对流或热传导将热量传递至食品,实现复热。自热米饭作为一种便捷的即食食品,因其无需外部加热设备、操作简单等特点,受到广大消费者的青睐。尽管自热米饭在便利性方面表现出色,但其加热过程中的热传递效率和均匀性问题仍然显著影响产品的加热效果和消费者的体验。因此,如何提高自热米饭的加热速率和均匀性,成为当前亟需解决的关键问题。

自热食品的加热过程高度复杂,涉及热传导、自然对流和相变传热等多种耦合机制,这一过程通常始于化学放热反应产生高温水蒸气,其后热量在密闭或半密闭空间中通过包装壁面向食品内部传递。热传导主要发生于热源与包装接触部位以及食品内部固体区域;水蒸气则在有限空间内形成对流,对食品表面和空隙区域进行高效热交换;同时,水蒸气在遇冷表面凝结为液态水时释放潜热,构成相变传热过程。三者相互叠加,构成了非稳态、不均匀且多相协同的典型非线性传热系统^[2]。已有研究主要集中在自热米饭的加热过程、传热机制以及包装材料的选择等方面,但这些研究往往局限于单一因素的考察,缺乏对传热过程、包装尺寸、形状和材料等多因素的系统性分析与优化自热米饭的传热分析与包装优化设计研究。

在结构复杂或层级明显的自热食品系统中,其包装内部热量传递不仅受材料热物性的影响,还受到食品孔隙率、层间导热路径、蒸汽空间分布等因素的协同作用。系统性的数值模拟可帮助揭示米饭中心与边缘、顶部与底部之间的温升差异,从而指导结构改进与热源布置优化。近期研究进一步从热源、包装结构与材料等方面对自热食品进行优化。郝淑贤等^[3]表明:当热源质量 ≥ 90 g、激活剂用量为 3.0~3.5 倍时,自热效率最优,铝材料虽对传热无显著优势,但更耐高温变形。马天娇等^[4]则发现复合铝箔包装可显著抑制贮存过程中水氧渗透,热效率维持率比 PE 材质高出 20%~30%。在包装几何结构方面,王心梅等^[5]开发了内置式圆柱包装设计,在体积不变前提下实现快速均匀升温,并延长保温时间;Liu 等^[6]则在即食米饭研究中通过金属化膜解决加热角落效应,提升了热均匀性。

已有研究尝试通过建立热分析模型揭示其加热规律。如二维或三维有限元模型被用于模拟温度在食品结构内的扩散过程,以评估热源分布、容器结构、材料导热性等因素对热量传输路径和速度的影响。部分模型进一步引入了相变单元,模拟蒸汽生成与凝结过程,提升对热量集中区域和温度死角的预测能力^[7]。此外,多物理场仿真平台已被广泛用于耦合分析热传导、流体对流与相变

潜热等现象,实现对复杂热环境中温度场分布的高精度建模与动态追踪^[8]。梁怡良等^[9]通过对土豆泥包装模型建立高精度热场模拟,预测误差 $< 3^{\circ}\text{C}$;宋晓燕等^[10]建立了用于熟制鱿鱼块在微波杀菌过程中的温度变化和微生物灭活情况的热模型,可精确评估食品热安全。这些研究不仅验证了数值模拟在非稳态热处理过程中的高精度和高适用性,也为结构优化和加热均匀性提升提供了有力的理论依据。尽管如此,当前关于分体式自热米饭的传热建模与结构优化研究仍显薄弱,特别是在包装尺寸组合、材料导热性能、形态结构对温度分布与中心点升温的具体影响机制方面,缺乏系统验证。此外,传统试验方法在多因素条件筛选方面存在周期长、资源耗费大等限制,难以满足快速开发与工程优化的需要。

自热过程中的温度分布还会显著影响食品的质构特性,尤其是在主食类产品如米饭中更为明显。研究表明,不同部位因受热程度差异,在硬度、弹性、咀嚼性等方面可能存在显著不均,这会直接影响食用品质与消费者满意度^[11-12]。当前相关研究主要集中在蒸煮或微波加热食品的质构变化规律^[13-16],而针对自热食品在非均匀加热条件下的层间质构差异研究仍较为缺乏,特别是缺少将温度场仿真结果与质构试验数据相结合的研究模式。

因此,研究采用试验和三维数值仿真模拟相结合的方法,利用数值模拟仿真软件 Comsol 构建分体式自热米饭的三维传热模型,对传热过程进行仿真模拟,并与实际自热米饭自加热结果进行相互验证,以此来分析分体式自热米饭包装尺寸、形状和材料对加热效果的影响。同时,根据分析结果对分体式自热米饭包装进行优化设计,以期提高自热产品的自加热能效并推动其市场发展。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

自热米饭:三全食品股份有限公司;

多路温度测试仪:USB-TEMP 型,德国耶纳测量技术有限公司;

电阻温度探测器:RTD 型,深圳市敏创电子有限公司;

物性分析仪:CT3 型,美国博勒飞工程实验室有限公司。

1.2 方法

1.2.1 自热米饭模型建立与加热过程模拟 自热米饭的传热过程是一个高度复杂的三维传热过程,模拟的计算区域包括包装、加热部件和被加热部件三部分。包装部分包含托盒、托盒盖、米饭包装盒和盖膜等;加热部件包含热源、水;被加热部分为水蒸气。此外,一些因素对传热过程影响相对较小,对此进行了基本假设:假设能量全部被水蒸气吸收,无对流、传导引起的热损失,忽略散失到环境中的热量,边界条件采用第一类边界条件;不考虑传热过程中的辐射传热;不考虑热源发生化学反应的过程,只把产生的热量作为热源施加在模型中。利用自热米饭轴对称的特点,用 Comsol 软件构建与实际自热米饭

结构 1/4 相符合的三维传热模型,构建的模型如图 1 所示。通过 Comsol 自带的数据库和相关文献设置各个部位的热物性参数^[17-18],具体物性参数如表 1 所示。所有包装材料定为 100% 聚丙烯,对传热过程进行模拟。对米饭加热 900 s,得到简单布局下自热米饭模型的升温曲线。

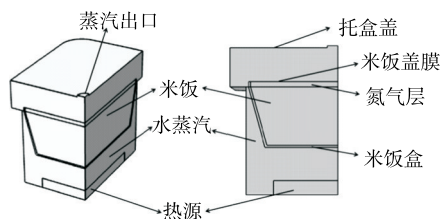


图 1 自热米饭三维模型

Figure 1 Three-dimensional model of self-heating rice

表 1 自热米饭物性参数

Table 1 Physical property parameters of self-heating rice

材料	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	恒压热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
米饭	0.694	1 036	2 930
米饭盒	0.138	900	1 926
米饭盖膜	0.650	120	1.92
托盒	0.043	900	2 000
铝箔	235	2 700	902
水	0.600	998.2	4 182
水蒸气	0.026 1	0.554 2	2 014

1.2.2 自热米饭加热过程中实际温度变化的测定 使用 USB-TEMP 多路温度测试仪和 DAQami 测温软件,将热电偶一端连接到 USB-TEMP 多路温度测试仪上,另一端插入米饭温度测量点,以采集自热米饭加热过程中的温度变化。温度测量点一共 6 个,P1、P2、P3 分别在米饭 1/2 处的顶部、中心和底部,P4、P5、P6 分别在米饭 1/4 处的顶部、中心和底部,如图 2 所示。首先打开 DAQami 测温软件,将装有自热米饭的包装袋撕开,在温度测量点处固定热电偶,将注水袋中的适量水倒入装有加热片的包装盒中,将整盒自热米饭用绝热胶条封好,整体平放,等待其自加热过程,加热器和米饭无直接接触,实时收集 6 个测温点加热过程中温度变化数据,记录时间为 900 s,以时间为横

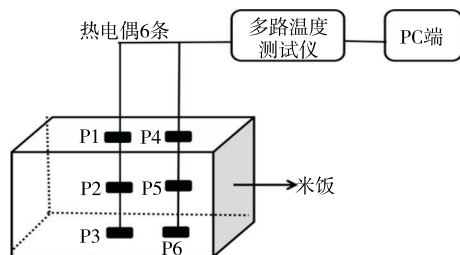


图 2 试验布置图

Figure 2 Experimental layout

坐标,测量点温度为纵坐标绘制米饭各个测量点温度曲线,并结合三维数值模拟仿真结果进行对比。

1.2.3 自热米饭复热后的质构分析 参照陈嘉馨等^[19]的试验方法并修改。将复热后的自热米饭在 20℃ 环境中冷却 90 min,将米饭划分为表层、中层和底层,表层为距米饭表面 0~1 cm,中层为 1~2 cm,底层为接触加热包的底部 2~3 cm。采用物性分析仪(CT3)及 TA5 探头,并配合 TA-RT-KIT 夹具进行质构测试。测试模式选择 TPA (texture profile analysis),测试速度 60 mm/min,压缩程度 50%,触发力 0.05 N,且两次压缩间隔及保持时间均设为 5 s,以模拟实际咀嚼过程中的暂停与停留。试验在 (20.0±0.5)℃ 的恒温实验室中进行,湿度控制在 50%~60% 范围内,每个样品层取 3 粒完整米饭,均匀平行排列于测试平台上,且每个层次重复 15 次测试,剔除数据中的最大值和最小值,取 13 次的平均值作为最终测定结果。

1.2.4 自热米饭的加热优化设计 使用 COMSOL 软件,对建好的自热米饭模型进行三维仿真模拟后,分析包装的尺寸、形状和材料对自热米饭加热效果的影响,根据分析结果在软件中进行产品优化设计。保持自热米饭体积不变,即长、宽、高乘积不变,分别改变包装中长、宽、高 3 个参数,然后将模型加热 900 s,分析不同尺寸自热米饭的加热效果,然后进行自热米饭包装尺寸的优化;基于包装尺寸的优化结果,对现有自热米饭包装的形状做出优化,将市场现有的方形包装设计为碗装包装,并与原有形状的自热米饭包装进行加热速率方面的比较;基于原有自热米饭的包装材料,在包装底部设计 PP 材质龙骨架以增加包装的机械性能,在底部和内侧设计复合铝箔膜以保证包装阻隔性并增加导热性能,然后对此新型自热米饭包装加热过程进行试验和仿真模拟,以中心点温度的变化曲线作图。

1.2.5 数据处理 使用 Microsoft Excel 2019、Origin Pro 2022 和 SPSS 29 进行统计分析。单因素方差分析 (ANOVA) 检验不同层次之间是否存在显著性差异,并使用 Tukey HSD 法进行检验。

2 结果与讨论

2.1 自热米饭加热和模拟过程中温度变化

三维仿真模拟自热米饭加热过程中不同测量点的升温曲线和实际自热米饭不同测量点的升温曲线如图 3 所示。水源接触加热片后,水蒸气的温度迅速上升达到 100℃,因此忽略水蒸气的温度变化,加热时间直接从水蒸气温度达到 100℃ 后开始计算。在整个仿真模拟加热过程中,米饭底部(P3 和 P6)温度始终最高,最高温度为 364.41 K (91.26℃);顶部(P1 和 P4)温度次之,最高温度为 358.41 K (85.26℃);中心(P2 和 P5)温度始终最低,最高温度为 346.02 K (72.86℃)。对比实际试验条件下加热过程中自热米饭的温度分布曲线,米饭底部(P3 和 P6)最高温度 366.50 K (93.35℃);顶部(P1 和 P4)最高温度

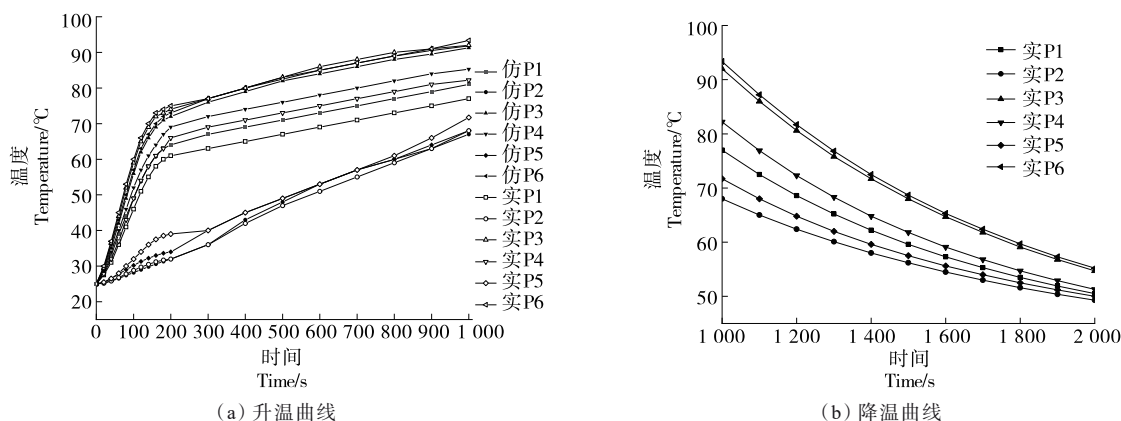


图3 仿真模拟和试验测量点的升温与降温曲线

Figure 3 Temperature rise and temperature decrease curves at simulation and experimental measurement points

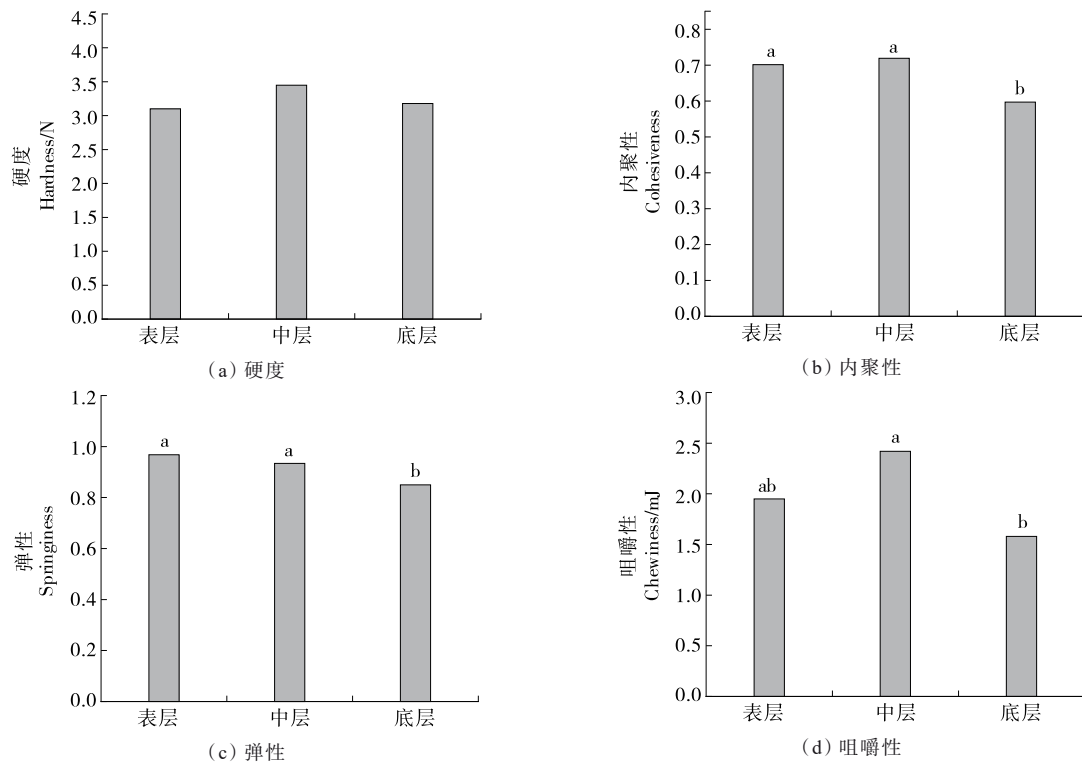
355.36 K (82.20 °C); 中心 (P2 和 P5) 最高温度 344.86 K (71.71 °C), 两者分布基本一致, 各测量点的实测值和仿真模拟值差值均小于 7 °C, 平均误差大小为 2.45%, <10%, 所以认为该自热米饭的三维数值模型较为准确, 因此得出结论: 仿真模拟的三维模型可以有效模拟自热米饭的加热过程, 能够保证后续仿真模拟结果的准确性。

无论在仿真模拟还是实际试验中, 米饭的 1/2 处和 1/4 处测量点温差较大, 但升温曲线的变化趋势基本一致。米饭的底部和顶部在加热初期升温较快, 呈急剧上升状态, 顶部测量点 (P1 和 P4) 的温差范围稳定在 4 °C 左右; 中心测量点 (P2 和 P5) 的温差前期有较大波动, 加热后期温差逐渐稳定在 4 °C 左右; 底部测量点 (P3 和 P6) 的温差持续波动, 加热初期温差范围为 3 °C, 后期温差逐渐增大至 8 °C。在自热米饭加热结束后, 对各测点继续进行降温过程监测, 结果如图 3(b) 所示。在试验范围内各测点温度均呈持续下降趋势, 但不同测点的降温幅度和温度水平存在明显差异。1 000 s 时, P3 和 P6 温度最高, 约为 92~93 °C, 说明底部区域在加热阶段吸收了较多热量, 具有较明显的热积累现象; P4 和 P1 温度次之, 分别约为 82, 77 °C; P5 和 P2 温度较低, 分别约为 72, 68 °C。随着冷却时间延长, 各测点温度逐渐下降。其中, P3 和 P6 由于初始温度较高, 降温幅度较大, 到 2 000 s 时下降至约 55 °C; P1、P2、P4 和 P5 则下降至 49~51 °C。从整体趋势来看, 降温初期温度下降较快, 随后降温速率逐渐减缓, 说明米饭在冷却过程中先快速向外界释放热量, 后期随着米饭内部与外部温差减小, 散热速率逐渐降低。此外, 各测点之间的温差在冷却过程中逐渐缩小。1 000 s 时, 最高温度测点与最低温度测点之间相差约 25 °C, 而到 2 000 s 时, 各测点温度差缩小至 5~6 °C。这表明在冷却过程中, 米饭内部热量发生重新分布, 不同区域温度逐渐趋于均衡。底部测点 P3 和 P6 虽然降温幅度较大, 但在整个冷却阶段仍保持较高温度, 说明靠近热源区域的热量积累更明显, 冷却过程也具有一定滞后性。此外, 由于热源加热时直接

加热水蒸气, 水蒸气在米饭上层凝结, 将热量传递向内部, 使外表的温度明显高于米饭中心温度, 这与李阳^[12]关于自加热食品的传热与热源的位置有关的结论相一致。

2.2 自热米饭复热后的质构分析

由图 4 可知, 复热后自热米饭在 20 °C 环境中冷却 90 min 后, 不同层次米饭的质构特性表现出一定差异。硬度方面, 表层、中层和底层米饭的硬度分别约为 3.10, 3.45, 3.18 N, 中层略高于表层和底层, 但三者差异不显著 ($P>0.05$), 说明冷却 90 min 后米饭不同层次间抗压变形能力整体较为接近。弹性方面, 表层和中层米饭的弹性分别约为 0.97 和 0.94, 二者差异不显著, 而底层弹性降至约 0.85, 显著低于表层和中层 ($P<0.05$)。这表明底层米饭在压缩后恢复原有形态的能力较弱, 组织结构完整性相对较差。内聚性结果显示, 表层和中层米饭的内聚性分别约为 0.70 和 0.72, 二者差异不显著, 而底层仅约为 0.60, 显著低于表层和中层 ($P<0.05$)。内聚性反映米饭颗粒内部结构在受力过程中的保持能力, 底层内聚性降低说明其内部凝胶网络或米粒结构更容易在压缩过程中被破坏。咀嚼性方面, 中层米饭最高, 约为 2.42 mJ, 底层最低, 约为 1.58 mJ; 中层显著高于底层 ($P<0.05$), 表层约为 1.96 mJ, 与中层和底层均无显著差异。综合来看, 复热后自热米饭经 20 °C 冷却 90 min 后, 中层米饭整体表现出较好的质构特性, 具有较高的咀嚼性、内聚性和弹性; 表层米饭质构次之; 底层米饭的弹性、内聚性和咀嚼性均较低, 说明其食用品质相对较差。这可能与自热米饭复热过程中不同层次受热和水分迁移不均有关。中层米饭受外界冷却影响较小, 同时又未直接接触底部加热区域, 水分分布和淀粉凝胶结构相对稳定, 因此保持了较好的咀嚼特性。表层米饭在冷却过程中直接暴露于环境中, 容易发生一定程度的水分散失和表面老化, 但其弹性和内聚性仍与中层接近。底层米饭靠近加热包, 复热过程中可能受到更强的局部热作用及水分重新分布影响, 导致米粒结构松散或凝胶网络稳定性下降, 从而表现为弹性、



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图4 复热后不同层的质构分析

Figure 4 Texture analysis of different layers after reheating

内聚性和咀嚼性显著降低。总体说明,自热米饭在复热及冷却过程中存在明显的层间质构差异,底层质构劣变是影响复热后整体食用品质稳定性的重要因素。

2.3 自热米饭包装的优化设计

在自热米饭加热过程中,包装的尺寸、形状和材料都会影响被加热食品的传热面积和传热速率。目前市场上自热食品包装多为长方体形的塑料材质,这种形状和材质传热速率较小,热量利用率并非最佳。因此,基于市场原有自热米饭的包装,使用三维数据模型研究尺寸、形状和材料对米饭加热效果的影响并对其进行优化。

2.3.1 包装尺寸优化 经过多次改变包装的长宽高后,

在保证传热效率最优的情况下,固定三维模型最佳宽高,然后改变模型的长度,同样,固定模型最佳长高和长宽,分别改变宽度和高度,以分析不同尺寸参数对自热米饭热吸收率的影响,如图5所示。结果发现,改变参数宽和高时,对自热米饭中心点温度的影响更大。因此,改变自热米饭包装的3个参数以优化加热速率时,包装尺寸中的宽和高可以优先进行考虑。

保证三维模型体积不变的情况下,分别改变模型的长、宽、高3个参数中的2个,分析不同尺寸组合的加热效果从而进行包装尺寸优化设计,不同长宽、长高和宽高组合的中心点加热至900 s时的温升曲线如图6所示。在长

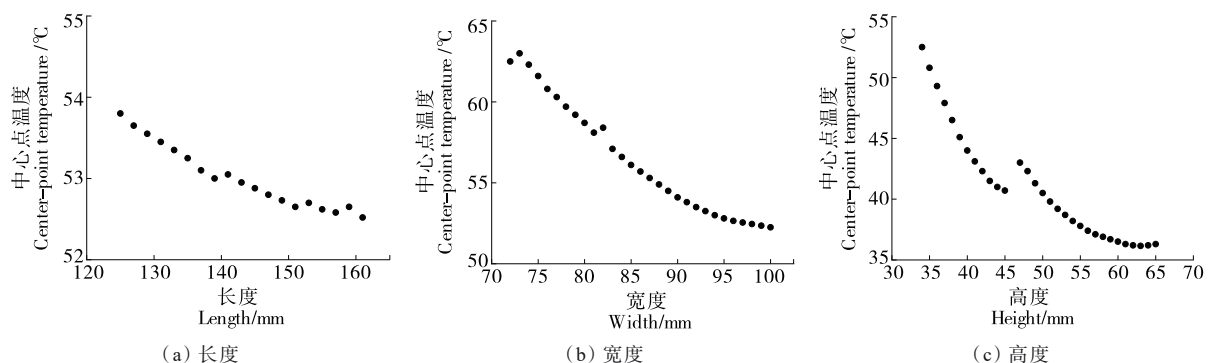
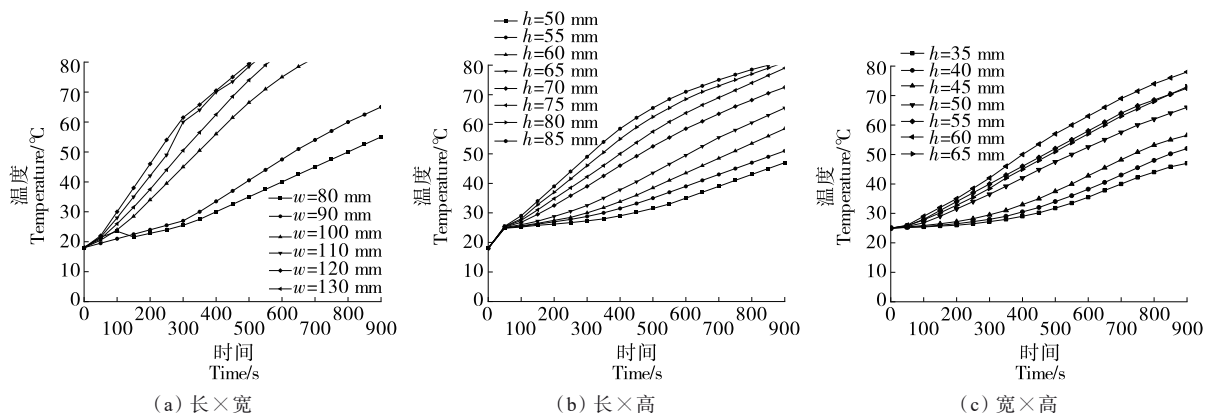


图5 $t=900$ s时中心点温度值随不同包装尺寸的变化曲线

Figure 5 Variation curves of central point temperature with different package sizes at $t=900$ s

图 6 $t=900$ s 时不同尺寸参数组合的中心点温升曲线Figure 6 Central point temperature rise curve of different size parameter combinations at $t=900$ s

宽组合中,当长为 133.49 mm,宽为 120 mm 时,中心点温度到达 65 °C 所需时间最短,为 344 s,较原有包装缩短了 387 s;在不同长高组合中,当长为 63.53 mm,高为 85 mm 时,中心点温度到达 65 °C 所需时间最短,为 686 s,较原有包装缩短了 45 s;在不同宽高组合中,当宽为 55.83 mm,高为 60 mm 时,中心点温度到达 65 °C 所需时间最短,为 633 s,较原自热米饭缩短了 98 s。结果表明,改变长宽、长高和宽高的参数组合能够有效提高加热速率,参数组合的变化更能明显缩短加热时间,其中改变长宽参数组合,使得最终加热至 65 °C 的时间最短,因此可以考虑在保持相同体积的情况下,进一步改变自热米饭包装的形状以缩短复热时间。

2.3.2 包装形状优化 相同体积不同几何形状的包装,表面积不同,进入食品的能量在内部形成不同的复杂聚焦区,导致温度分布有明显区别^[20]。在保证三维模型体积不变的情况下,基于包装尺寸的优化结果将外包装设计为圆柱体,内包装设计为碗状,顶部和底部均为圆形,顶部直径为 273 mm,底部直径为 200 mm,侧面为弧形,以增大传热面积,使之显著提高米饭的热吸收效率。在米饭的实际加热过程中,当中心点温度达到 65 °C 及以上,则

可以认为米饭的复热效果良好,仿真模拟自热米饭加热 900 s 后的温度云图如图 7(a) 所示,可以看出在加热 900 s 后,对比方盒形包装,虽然碗形包装温度由四周向中心依次降低,但中心温度明显高于 65 °C,其余各个部位的温度更是远超于 65 °C。碗装形状的包装明显吸收热量更多,传热速率更好,能够更快地将米饭中心温度升至可食用的温度,进一步节省人们食用自热米饭时等待的时间。

将碗装米饭和原有方盒米饭加热过程中的中心点温度进行对比,升温曲线如图 7(b) 所示。碗形包装和方盒形包装在加热过程中的温度均持续上升,但碗装包装的中心温度和升温速率均高于方盒形包装,加热至 900 s 时两者中心点温度分别为 362.19 K (89.04 °C) 和 344.86 K (71.71 °C),说明优化后的碗装米饭的传热速率更快。因此可以得出结论:保证相同体积的情况下,包装形状的优化能够明显减少热量散失,在相同时间内使中心加热温度更高,是可行的提升自热米饭加热效率的方法。此外,目前市面上流行的碗状自热食品通常结合纸基包装^[21],不仅能够有效提高传热速率,更有利于保护环境,实现可持续发展。

2.3.3 包装材料优化 基于原有 PP 包装和一种快速加热的铝箔纸自热饭盒,设计了一种新型自热米饭包装在保

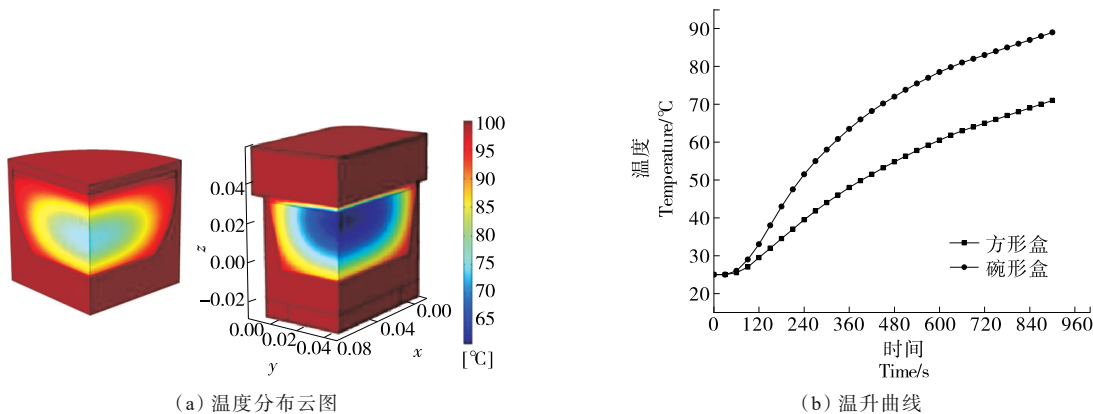


图 7 加热 900 s 时不同形状自热米饭温度分布云图和温升曲线

Figure 7 Temperature distribution cloud diagrams and temperature rise curves with different shapes after heating for 900 s

持稳定结构的同时增加传热速率,包装设计如图8所示。对设计的铝箔底包装和原有PP包装的自加热过程进行试验和仿真模拟,温度变化曲线如图9所示。两者模拟仿真计算的结果均与实际温度曲线数据高度吻合,说明模拟仿真的结果具有有效性,可以保证仿真过程的准确性。



图8 铝箔底自热米饭包装实物图

Figure 8 Physical picture of self-heating rice packaging with aluminum foil bottom

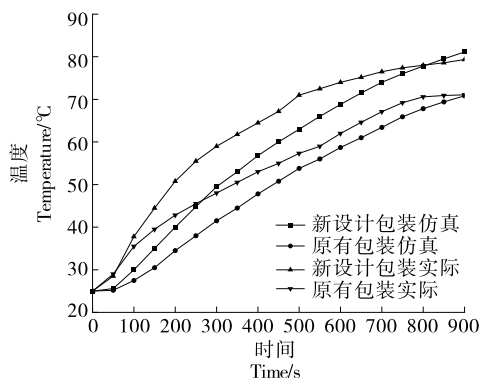


图9 不同包装材质的自热米饭加热过程中食品中心点温度变化曲线

Figure 9 Temperature change curves at the food center point during the heating of self-heating rice with different packaging materials

试验和模拟仿真结果均显示新型铝箔底包装米饭的升温速率高于PP盒包装。在试验过程中,铝箔底包装米饭和PP盒包装米饭最高温度分别为79.34,71.06℃,中心点分别在406,657s到达65℃,节约了251s的加热时间。而在模拟仿真中,加热至900s时,两者中心点温度分别为354.29K(81.14℃)和343.97K(70.82℃),说明将外壳底部替换为铝箔材料后加热效率有效提升。同时,当米饭中心温度达到65℃时,铝箔底包装和PP盒包装用时分别为537,731s,包装材料的改变使得加热时间节约了194s,说明新型铝箔底包装的设计能够有效缩短加热时间,实现了快速加热,提高了热量分布的均匀性^[22]。文献数据显示米淀粉的糊化温区主要集中在60~80℃^[23],糊化依赖于在该温区内的停留时间而非瞬时达温;更高或更久的处置可促进米粒内部糊化、减少“白心”。完全糊化的终点通常出现在糊化峰温度之后,需要额外的保温时

间^[24]。研究中,铝箔底包装因其导热性能优越,加热效率更高,不仅在相同时间内达到了更高峰值温度,而且米饭中心区域(冷点)进入糊化温区并保持较长时间,从而促进了更充分的糊化反应,有利于改善口感、减少白心现象,提升熟化程度。相比之下,PP盒包装的冷点升温较慢,虽然在延长加热时间后可部分改善熟化效果,但由于温升速率和热分布均匀性不足,其在糊化温区的有效停留时间(TIGW)相对较短,熟化程度较低。因此,加热时间的增加在一定程度上有助于熟化,但其效果受到加热效率与热分布均匀性的显著影响,铝箔底包装在相同加热条件下更易实现米饭的均匀、充分熟化。铝箔材料具有高导热性,因此在塑料自热饭盒基础上加入铝箔,明显提高热交换效率,最终使米饭中心温度快速升高,满足了消费者对于加热速度的需求。

3 结语

采用试验和三维数值仿真模拟结合的方法,分析了自热米饭加热过程中实际温度变化以及传热对米饭质构的影响,构建了与市售自热米饭实际结构相近的三维传热模型研究其自加热的过程。三维温度分布模型可以直观地描述样品在加热过程中的温度分布特性,更加全面地展现了自热米饭的传热效果,尤其是被加热米饭部位各个位置的温度分布及变化情况,且理论值和试验值呈现良好的一致性,可以为自热食品进一步优化包装设计提供合理可靠的数据。同时,在建立的三维模型中将包装尺寸、形状和包装材料对自热米饭加热效果的影响进行分析和优化,结果表明相同体积的自热米饭,其传热效果明显受到包装尺寸和形状的影响,优化形状后的碗装自热米饭包装比原始长方体形包装传热效率更高,设计的新型铝箔底包装相较于原有包装也能够明显缩短自热米饭的复热时间。

参考文献

- [1] 刘嘉喜,王越鹏,薛建宇.单兵自热野战食品的传热分析与优化设计研究[J].中国食品学报,2003(Z1):393-399.
Liu J X, Wang Y P, Xue J Y. Optimization of heat transfer for individual self-heating combat ration[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2003(Z1): 393-399.
- [2] 张文华.自热食品传热过程及热吸收率影响因素研究[D].北京:北京工商大学,2015:14.
Zhang W H. The study on heat transfer process and heat absorption rate influencing factors of self-heating food[D]. Beijing: Beijing Technology and Business University, 2015: 14.
- [3] 郝淑贤,韦丽娜,魏涯,等.发热包传热效果及其对冻干鱼肉复水品质的影响[J].广东海洋大学学报,2024,44(4):139-146.
Hao S X, Wei L N, Wei Y, et al. Heat transfer effect of heating package and its effect on rehydration quality of freeze-dried fish meat[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2024, 44(4): 139-146.

- [4] 马天娇, 崔燕, 吴刚, 等. 无火焰食品自加热器的加热性能及其影响因素[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(19): 178-184.
Ma T J, Cui Y, Wu G, et al. Research on heating performance and its influencing factors of flameless food self-heater[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(19): 178-184.
- [5] 王心梅, 蔡思杰, 姜芳芳. 内置式自热牛奶包装盒设计及性能分析[J]. 乳品与人类, 2024(4): 13-18, 25.
Wang X M, Cai S J, Jiang F F. Design and performance analysis of integrated self-heating milk packaging[J]. Dairy Products and Humans, 2024(4): 13-18, 25.
- [6] Liu C, Shen L Y, Liu H R, et al. Improvement of temperature distribution uniformity of ready-to-eat rice during microwave reheating via optimizing packaging structure[J]. Foods, 2023, 12(15): 2 938.
- [7] 马立鹏, 孟春玲, 张文华, 等. 自热米饭传热过程的仿真研究[J]. 食品工业, 2018, 39(5): 238-242.
Ma L P, Meng C L, Zhang W H, et al. Simulation study on heat transfer process of self-heating rice[J]. The Food Industry, 2018, 39(5): 238-242.
- [8] 张柯, 卢立新, 王军. 基于 COMSOL 的包装食品微波炉加热模拟[J]. 包装工程, 2014, 35(5): 1-4, 12.
Zhang K, Lu L X, Wang J. Simulation of microwave heating of packaged food by software COMSOL[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(5): 1-4, 12.
- [9] 梁怡良, 王利强, 张新昌. 基于 COMSOL 的中央厨房餐品微波加热包装仿真研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(23): 262-268.
Liang Y L, Wang L Q, Zhang X C. Simulation on microwave heating packaging for central kitchen meals based on COMSOL[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(23): 262-268.
- [10] 宋晓燕, 杨凯, 刘宝林. 熟制鱿鱼块微波杀菌过程的数值模拟研究[J]. 工业微生物, 2023, 53(3): 91-96.
Song X Y, Yang K, Liu B L. Study on numerical simulation of microwave sterilization of cooked squid block[J]. Industrial Microbiology, 2023, 53(3): 91-96.
- [11] 赵萌, 张磊, 朱洁, 等. 预制条件及干燥方式对自热米饭品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(3): 16-21.
Zhao M, Zhang L, Zhu J, et al. Effects of prefabrication conditions and drying methods on quality of self-heated rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(3): 16-21.
- [12] 李阳. 自加热食品加热过程中温度分布及传热优化研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2016: 75.
Li Y. Study on temperature distribution and heat transfer optimization in self-heating food[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2016: 75.
- [13] 刘钊. 微波复热方便米饭加热均匀性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021: 5.
Liu C. Study on temperature uniformity for instant rice under microwave reheating[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021: 5.
- [14] 朱勇. 金属化包装贴膜改善微波复热方便米饭的温度分布均匀性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021: 6.
Zhu Y. Study on improving temperature uniformity of microwave-reheated instant rice with metallized packaging film[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021: 6.
- [15] 王晓蕊. 微波复热方便米饭的温度分布研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019: 7.
Wang X R. Study on the temperature distribution of instant rice during microwave reheating[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019: 7.
- [16] 李春香. 微波复热米饭过程温度分布规律的研究以及传热模型的建立[D]. 无锡: 江南大学, 2010: 3.
Li C X. Research on the law of temperature distribution and heat transfer of microwave reheating of instant rice[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010: 3.
- [17] 艾文婷, 张敏, 黄汝国, 等. 热分析技术在食品热物性研究中的应用[J]. 食品工业科技, 2016, 37(19): 377-380, 386.
Ai W T, Zhang M, Huang R, et al. Application of thermal analysis technology in research of food's thermal properties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(19): 377-380, 386.
- [18] Son H H, Muhammad M. Rahman analysis of thermal response of a food self-heating system[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(14/15): 2 109-2 115.
- [19] 陈嘉馨, 胡丽琴, 周传名, 等. 优质稻蒸谷米品质特性研究[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(6): 50-58.
Chen J X, Hu L Q, Zhou C M, et al. Quality properties of parboiled grains of high-quality rice[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(6): 50-58.
- [20] 戴辉明, 郭雯, 程裕东, 等. 不同形状包装食品在微波加热过程中的三维温度分布[J]. 食品工业科技, 2015, 36(13): 82-86, 102.
Dai H M, Guo W, Cheng Y D, et al. Three-dimensional temperature distribution of the packaged foods with different shapes during microwave heating[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(13): 82-86, 102.
- [21] 薛亿娇, 华飞果, 张红杰, 等. 功能型纸基包装材料的应用现状和发展趋势[J]. 中国造纸, 2020, 39(11): 70-77.
Xue Y J, Hua F G, Zhang H J, et al. Development of functional paper-based packaging materials: a review[J]. China Pulp & Paper, 2020, 39(11): 70-77.
- [22] 管胜男, 陈照峰, 马昊, 等. 铝箔气泡复合材料的制备及隔热性能研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(1): 53-60.
Guan S N, Chen Z F, Ma H, et al. Preparation of aluminum foil/bubble composite and its property on thermal insulation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (Natural Science Edition), 2018, 50(1): 53-60.
- [23] Shofiyah S S, Yuliani D, Widya N, et al. Isolation, expression, and characterization of raw starch degrading α -amylase from a marine lake Bacillus megaterium NL3[J]. Heliyon, 2020, 6(12): e05796.
- [24] Wang S J, Chao C, Xiang F J, et al. New insights into gelatinization mechanisms of cereal endosperm starches[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 3 011.