连续式工业化微波复热盒装米饭的加热均匀性

郑先哲,刘慧然,刘成海,柏才宇,蒋镇泽,赵兴隆,沈柳杨,刘 钗* (东北农业大学工程学院,哈尔滨 150030)

摘 要:为提高连续式微波复热盒装米饭的加热均匀性,以微波功率、加热时间、盒装米饭排列方式(简称排列方式) 为影响因素,以含水率、平均温度、温度均匀度等为评价指标,采用单因素试验方法解析微波加热因素对米饭中温度和 水分分布及变化的影响规律,以期获得连续式微波复热盒装米饭优化工艺参数。结果表明,摆放在连续式微波加热设备 内矩形包装盒内的米饭总体上存在明显边缘温度高和边角热聚焦的现象,其中单个包装盒内也存在类似分布;当微波功 率升高后出现中心聚焦效应;随着脉冲占空比(微波功率)增大,微波向米饭内部传递深度增加、产生的体积热增多, "冷点"会向中心点处聚集、"冷点"面积逐渐缩小,微波加热均匀性提高;排列方式对加热均匀性影响小;对于盒装 米饭在连续式微波加热设备内以2、3、4 列排列,因微波在盒装米饭边缘面聚焦、内传递时衰减和餐盒间与其内部介电 特性高低变换的原因,餐盒内米饭加热均匀性由高变低。为了充分利用连续式微波设备的加热能力和腔体空间尺寸,微 波复热盒装米饭较优工艺参数为微波功率17.1 kW、脉冲占空比 0.90、加热时间 300 s、排列方式为沿连续式微波干燥机 传送带的宽度方向排布 4 盒米饭。研究结果可为预制食品工业化生产的复热工艺及品质改善提供技术参数。

关键词: 微波复热; 连续式; 盒装米饭; 均匀性; 预制食品

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407234

中图分类号: TS217.1

文献标志码: A 文章编号: 1002-6819(2024)-22-0252-12

郑先哲,刘慧然,刘成海,等.连续式工业化微波复热盒装米饭的加热均匀性[J].农业工程学报,2024,40(22):252-263. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407234 http://www.tcsae.org

ZHENG Xianzhe, LIU Huiran, LIU Chenghai, et al. Heating uniformity of ready-to-eat rice under continuous industrializationmicrowave reheating[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024,40(22): 252-263. (in Chinese with English abstract)doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407234http://www.tcsae.org

0 引 言

种类丰富、质量稳定的预制食品工业化加工可满足 市场多元化需求[1-2]。预制食品的食前复热效率和质量是 相关生产企业和消费者关注的重要问题。常规的复热方 式包括蒸煮复热、微波复热和发热包复热等^[3]。微波加 热技术操作简便、节能高效,家用微波炉用处较多的就 是复热食物^[4]。盒装米饭是预制食品中的主食^[5],多采用 矩形可加热塑料容器包装盒装米饭,可充分利用装载空 间和提高存放稳定性,适合在冷链条件下运输、贮藏、 销售[6-7],再经复热后才可食用。微波加热适用于复热盒 装米饭^[8],然而,微波复热过程中温度不均匀分布影响 食用品质^[9]。微波复热过程中物料内温度分布均匀性取 决于被加热物形状、物料特性和加热工艺参数等因素[10]。 微波加热矩形食品时,在边角处产生聚焦效应、快速升 温^[11]:加热球形食品时,易在中心处产生聚焦效应、出 现过热现象[11]; 微波加热圆柱型物料时, 不只各圆形横 切面的中心处出现热点,四边形的纵向切面上的形心处

收稿日期: 2024-07-26 修订日期: 2024-08-28

※通信作者:刘钗,博士,讲师,研究方向为农产品加工与贮藏。 Email: liuchai@neau.edu.cn 同样出现热点^[12],物料内部的"冷点"和"热点"随高 度和直径的比值发生变化,但对不同厚度/半径比圆柱型 的温度变化规律一致^[13]。微波加热时不同形状的食品因 过热降低微波能利用率^[14],结合微波穿透深度合理的设 计食品形状尺寸有助于改善微波加热效果,提高微波能 的利用率。本文选用市场上常见的矩形餐盒包装米饭作 为研究对象,探究微波复热过程中盒装米饭内温度分布 规律。

通过分析食品物料热特性和介电特性,有助于阐明 物料在微波复热过程中的传热传质机理^[15]。物料热特性 反映其吸收微波能转化成热能和内部高温区向低温区传 递热量的能力,其中比热容和导热系数在冷藏、干燥及 加热等过程中起到重要作用^[16-17]。介电特性决定物料对 微波能吸收和转化能力,物料的介电特性越大越能有效 吸收微波能,加快自身加热速率。温度对盒装米饭的介 电特性有显著影响,微波在盒装米饭中的穿透深度随温 度上升逐渐增大^[10],但温度对米饭介电损耗因子及比热 容的影响较大,而对介电常数及导热系数的影响较小^[18]。 根据微波加热过程中物料特性的变化和响应,可以解释 微波加热过程中温度分布不均匀性成因,为改善微波加 热均匀性提供依据。

微波复热盒装米饭的前期研究大多着力于微波炉内 复热米饭均匀性的研究,团队在前期的研究过程中也进 行了微波炉内复热米饭均匀性的研究^[10, 18-20]。但在连续

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32072352); 国家重点研发计划项目 (2022YFD1600500)

作者简介:郑先哲,教授,博士生导师,研究方向为农产品加工与贮藏。 Email: zhengxz@neau.edu.cn

式微波设备上进行盒装米饭微波复热的研究相对较少, 利用连续式微波设备能较好提高预制米饭的加热效率, 提高微波能的利用效率。前期研究已完成微波炉内复 热预制米饭的数值仿真模拟^[18,21],获得较好的微波炉复 热预制米饭的工艺参数与金属化包装结构,完成利用连 续式微波干燥机进行糙米和浆果等多种物料的数值仿真 模拟^[20,22-25],分析了微波加热均匀性与连续式微波干燥 机腔体结构、微波腔内磁控管排布方式和物料特性等的 相关性,前期研究的成果可为本文提供理论依据。

优化加热时间和功率等微波加热工艺参数,可以保 证复热米饭品质和技术参数作用[26-27]。在连续式微波加 热过程中,功率和处理时间与加热均匀性呈负相关,初 始温度与加热均匀性呈正相关^[28]。采用计算机仿真和台 架试验相结合方法分析连续式微波复热盒装米饭过程, 可以解析微波加热参数对连续微波复热过程米饭内温度 均匀性影响,优化出温度分布均匀性高的连续式微波复 热模式及参数^[18]。微波复热盒装米饭受矩形包装盒结构 尺寸、物料特性和工艺参数等影响。不同于微波炉的批 量式处理能力低、复热不均匀性显著和不同型号间优化 参数互换性差等问题^[28-29],本文以连续式微波复热矩形 盒装米饭为研究对象,通过含水率、平均温度和温度均 匀度等指标,研究不同微波功率、加热时间和盒装米饭 排列方式对复热米饭品质影响,为满足工业化复热盒装 米饭需要,运用连续式微波加热设备进行盒装米饭复热 试验[30-31],优化微波复热工艺参数及流程,为预制食品 的工业化生产和高品质新产品的开发提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用大米品种为农大贰号长粒香(五常,哈尔 滨),试验前需将大米放入4℃冰柜中冷藏24h,使其 水分分布均匀;矩形聚丙烯餐盒购于电商平台,餐盒 (650 mL)上表面长为17.0 cm,宽为11.5 cm,下表面 长为14.0 cm,宽为8.5 cm,上下表面的圆角半径为 1.0 cm,餐盒高度为4.0 cm。

1.2 试验设备

冷柜, SC/SD-332型, 冷冻温度<-18℃, 青岛海尔 集团; 电子精密天平, ARRW60型, 精度 0.01 g, 上海 奥豪斯公司; 电饭煲, SR-CW15型, 杭州松下有限公司; 连续式微波干燥机, WXD10S-17型, 微波频率 2.45 GHz, 南京三乐微波技术开发有限公司; 多通道测温仪, HT9815型, 温度测量范围-200~1 372℃, 北京鑫思特 公司; 手持式红外测温仪, 精度 0.1℃, 美国 FLIR Systems 公司; 苹果 15Pro 手机, 4 800 万像素主摄像头, 美国苹 果公司; 微波工作站, MWS 型, 测温范围-40~250℃, 美国 FLIR 公司。

1.3 盒装米饭的制备

将1000g大米淘洗3次后沥干,按米水比1:1.4 (g/g)比例浸泡,每间隔10min搅拌一次,浸泡 30min后焖制米饭,将熟米饭静置到室温后,装入 650 mL 矩形聚丙烯餐盒中,置于4℃冰箱冷藏24h 后做 成盒装米饭^[10]。盒装米饭单盒质量(540±20)g,1000g 大米焖制后可获得4.5 盒盒装米饭,其初始含水率为 (62.6%±0.6%)。试验重复3次进行,每次试验使用 120 盒盒装米饭。

1.4 试验方法

1.4.1 温度测量方法和测量位置设定

连续式微波干燥机包括5个微波腔(图 1a),各微 波腔内磁控管按 6、5、3、2、3 进行排布 (图 1b)。微 波加热设备制造企业,从提高通用性和能量利用率等方 面考虑,以改善加热均匀性为目标,在研制和生产环节 对微波腔的结构及尺寸进行了优化设计[22]。微波加热均 匀性与连续式微波干燥机腔体结构、微波腔内磁控管排 布方式相关性的仿真与分析^[20,23]表明在固定位置微波腔 内的电场呈不均匀分布,但物料上电场强、弱位置及演 变都有相近趋势[25];并且,连续式微波加热设备内物料 在输送带上运动,要经历电场强度强弱变换区域、有显 著互补效应,加热结束在出口处温度均匀性主要取决于 物料的热传递及介电特性指标^[24]。可通过优化微波加热 工艺参数和改善物料吸收及反射微波能力(如金属化包 装等)等提高加热均匀性[18,24,31-32]。盒装米饭的矩形聚 丙烯餐盒沿连续式微波干燥机传送带的宽度方向排成 4列。在微波复热过程中,通过设置脉冲占空比(一个 脉冲周期内磁控管开启的时间与脉冲周期的时间之比) 确定微波复热功率^[33],通过调整带速确定微波加热时间, 测量盒装米饭的温度。为了快速测定微波复热后餐盒内 米饭的温度,对摆放在微波腔内输送带上指定位置餐盒 进行处理,按照图 1c 所示进行位置及编号,在盒盖上标 记、打孔,以便穿过传感器导线,根据餐盒深度4cm确 定导线穿过孔长度(为餐盒深度一半),确保测到米饭 中层温度; 切开矩形包装盒底面, 在微波复热后将切开 的包装盒底面虚安在原包装盒底面处,测温时撤去该底 面。使用手持式红外测温仪在 10 s 内测量米饭上、下表 面的温度; 然后盖上安装 5 个通道传感器的餐盒上盖(确 保传感器测温段正好抵至米饭中层),利用多通道测温 仪测量中层①~⑤点的温度数据,并借助 SigmaPlot 软 件绘制中层温度的等高线图。选取头排4盒、中排4盒 和尾排4盒,共计12盒盒装米饭作为研究对象时,将序 号6和7盒装米饭称作中心盒,其余盒装米饭称作边角 盒。取单盒盒装米饭作为研究对象时,将其分作上层、 中层和下层,每层取①~⑤点进行温度数据测量,将① 点称作中心点, 2~5点称作边角点。

1.4.2 盒装米饭含水率变化的确定

在连续微波复热过程中,盒装米饭含水率的分布趋势通过变色硅胶的颜色分布来评价。变色硅胶内氯化钴 对水吸附作用强,会因所含氯化钴结晶水数量变化而呈 现出不同颜色^[34-35]。添加去离子水调整变色硅胶含水率, 使之与盒装米饭的相同,制备含水变色硅胶。通过设定 与复热盒装米饭相同加热条件,对含水变色硅胶进行微 波复热试验。将含水变色硅胶颜色区分度高的含水率

2024年

(MC)作为标志性水分,通过建立微波复热过程中含水 变色硅胶的颜色分布与其含水率的变化情况,可视化显 示微波复热盒装米饭过程的水分分布的变化趋势,其中 含水变色硅胶的颜色分布是由 R (Red,红色)、 G (Green,绿色)、B (Blue,蓝色)值确定的;利用 Matlab软件获取含水变色硅胶的 RGB值,建立 R、G和 B 值间的随机关系(X),并拟合出 X与变色硅胶含 水率(Y)间的关系^[21]。利用微波工作站,设置微波功 率(600~1100 W,间隔 100 W)和复热时间(300 s) 后,使用单盒米饭/变色硅胶进行 X 与 Y 间拟合关系的试 验验证,米饭和变色硅胶的初始含水率均为 62.60%。

盒装米饭置于矩形聚丙烯材质的餐盒内,封闭性强、 微波复热时水分蒸发少,可避免复热米饭发干、变硬等 口感变差的现象^[21]。对铺放在微波设备输送带上米饭餐 盒组合的中心盒和边角盒,在如图 1c 所示的米饭上层 ①~⑤点处取样,用 105 ℃ 烘箱法测定其含水率。



b. 连续式微波干燥机内磁控管排布 b. The arrangement of magnetron tube in a continuous microwave dryer



c. 盒装米饭排列方式及测量位置设定 c. The arrangement and temperature measurement points setting for ready-to-eat rice

图1 盒装米饭在连续式微波干燥机的排列方式及温度测量点 设置

Fig.1 The arrangement of ready-to-eat rice in a continuous microwave dryer and the setting of temperature measurement points

1.4.3 温度均匀度系数计算

通过温度均匀度系数对微波复热效果进行评价,该 系数值越小,表示温度分布均匀性越强。加热米饭餐盒 内温度均匀度系数由式(1)计算^[10]。

$$C_{ov} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (T_i - \bar{T})}}{\bar{T} - T_0}$$
(1)

式中 C_{ov} 为物料层温度均匀度系数; N为层内取样点数; T_0 为温度初始值, \mathbb{C} ; T_i 为取样点温度, \mathbb{C} ; \overline{T} 为取样餐盒内温度均值, \mathbb{C} 。

1.5 微波复热米饭试验设计

使用 650 mL 矩形餐盒容装 (540±20)g 盒装米饭。为 探究工艺参数对微波复热盒装米饭均匀性的影响,设定 微波功率 19 kW,分别以加热时间、脉冲占空比和排列 方式(表1)为试验因素进行单因素试验,表中带"*" 数值表示进行某一因素试验时其他因素所在水平。以含 水率、温度、温度分布均匀性为指标,对微波复热盒装 米饭效果进行分析。每次试验重复 3 次。

表1 微波复热米饭单因素试验的因素及取值

Table 1 Factors and values of single factor experiment for ready-

to-eat rice under microwave reheating							
因素 Factors	指标值 Index value						
加热时间 Heating time <i>t</i> /s	120	180	240	300*	360		
脉冲占空比(Mcb) Pulse duty cyclecle	0.70	0.75	0.80*	0.85	0.90	0.95	1.00
排列方式 (列) Arrangements	2	3	4*				

注:为了对比分析连续式微波复热过程中,脉冲占空比对盒装米饭内温度 和含水率分布及变化的影响,又选择脉冲占空比 0.90 进行微波复热试验,加 热时间(0~300 s、间隔 60 s),以复热后米饭平均温度不超过 70 ℃ 为加热 目标。

Note: To compare the influence of the pulse duty cycle on the distribution and change in temperature and moisture content of ready-to-eat rice during continuous microwave reheating. The microwave reheating experiment with the pulse duty cycle of 0.90 and the heating time 0-300 s (interval 60 s) was selected, and the heating aim with the average temperature of the ready-to-eat rice after reheating did not exceed 70 °C.

1.6 数据处理

使用手持式红外热像仪(FLIR公司,美国)获取盒 装米饭上层和下层温度分布值,使用多通道测温仪(鑫 思特公司,中国)测量盒装米饭中层各测量点的温度。 含水变色硅胶的颜色 RGB 值由 Matlab 软件(MathWorks 公司,美国)获取,红外热像图由热像仪自带的 FLIR Tools 软件(FLIR公司,美国)进行分析,盒装米饭中 层的温度由 SigmaPlot 12.5 (Systat公司,美国)软件绘制 等高线图,其他数据采用 OriginLab 9.0 (OriginLab公司, 美国)软件进行绘制,并利用 SPSS Statistics V21.0 (IBM公司,美国)软件对试验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 硅胶含水率变化与其颜色对应值的确定

为表征盒装米饭含水率变化,依据硅胶在不同含水 率状态下颜色演变特征,如图 2 所示随含水率增加由蓝 色(*MC*=0)逐渐转变到浅红色(*MC*=65%)。获取图 2 内不同含水率变色硅胶的色差数值(*R、G、B*值),其 色差的归一化值*X*由式(2)获得^[36],*X*与变色硅胶含水 率(*Y*)间的拟合关系如式(3)所示^[21]。

$$X = \frac{R - B}{G + B - R} \tag{2}$$



图 2 含水变色硅胶不同含水率下的颜色状态 Fig.2 Color state of allochroic silica gel under different moisture content

2.2 盒装米饭排列方式对微波加热均匀性的影响

在连续式微波复热条件下,微波功率19kW、微波 脉冲占空比为 0.80、加热时间 300 s, 盒装米饭包装餐盒 的不同排列方式中温度分布如图3所示。在整体排列上, 从边缘向内部温度分布呈现由高到低变化;在单独矩形 包装盒装米饭中,温度总体上呈现边缘高、中心低的状 态分布。这是由于在连续式微波干燥机上,矩形波导传 递模式下在料层上的电场强度分布仅存在于与前进方向 垂直的横向分量上^[24],在微波腔金属壁反射的谐振波 TE 与铺放在输送带上盒装米饭表面平行、传递到盒装米 饭边缘(空气与米饭颗粒接触面)的微波发生散射、渗 透,产生微波体积热,微波能向内传递时以自然指数函 数形式迅速衰减、但电场强度以正弦函数形式强弱变换, 向内升温幅度呈波动式减弱;在组合摆放的各个餐盒间 存在空气,空气介电特性指标远低于米饭的值,微波在 餐盒间消耗很低^[24],因此,组合摆放的内部餐盒边缘处 温度略有升高;在微波复热米饭过程中,腔体内存在空 气,引起餐盒边缘处自然对流、带走热量,如果自然对 流消耗热量的速度高于微波体积热产生速度,会导致盒

装米饭边缘处温度有所降低。上述情况综合效应引起 图 3 所示微波加热米饭的温度分布。



图 3 微波复热不同排列米饭的温度分布(微波功率 19 kW、 微波脉冲占空比为 0.80、加热时间 300 s)

Fig.3 Temperature distribution of different arrangements after microwave reheating (microwave power of 19 kW, pulse duty cycle of 0.80, and total heating time of 300 s)

排列方式对复热后盒装米饭平均温度和温度均匀度 系数的影响,如图4所示,对于盛装米饭的矩形餐盒在 连续式微波加热设备输送带上以2、3、4列排列,表明 按照4列方式排布盒装米饭的平均温度最高,温度均匀 度系数值最低、温度分布均匀性最好;餐盒以2列方式 排列的米饭的平均温度低,温度均匀度系数最高、加热 均匀性低;餐盒以3列排列的加热均匀性情况居中。



注: a.为垂直于连续式微波干燥机传送带运动方向的宽度上排布4列; b.为 垂直于连续式微波干燥机传送带运动方向的宽度方向上排布3列; c.为垂 直于连续式微波干燥机传送带运动方向的宽度方向上排布2列。微波功率 19 kW、微波脉冲占空比为0.80、加热时间300 s。

Note: a. Arrange four columns along the width of the continuous microwave dryer's conveyor belt. b. Arrange three columns along the width of the continuous microwave dryer's conveyor belt. c. Arrange two columns along the width of the continuous microwave dryer's conveyor belt. The microwave power of 19 kW, the pulse duty cycle of 0.80, and the total heating time of 300 s.

图 4 不同排列方式下盒装米饭的平均温度和温度均匀度系数 Fig.4 The average temperature and temperature uniformity coefficient of ready-to-eat rice under different arrangements

餐盒整体排列和单盒盒装米饭,在微波复热后均呈 现出边角热、中心低的温度分布,2列方式排布的盒装 米饭中心位置"冷点"较多,使得其温度的差异性要大 于3列和4列方式排布。为了充分利用连续式微波设备 的加热能力和腔体空间尺寸、提高微波能的吸收和利用 效率,选择沿着输送带运动方向4列排列平行摆放米饭 矩形包装盒。对于4列方式排列餐盒整体及个体的周边 向中心存在温度由高向低的明显差异、加热均匀性差的 问题,是后续研究设计金属化包装结构依据,利用微波 对铝箔反射及加热机理,改变连续式微波加热设备内的 电场分布,提高微波加热矩形盒装米饭温度分布均匀性、 提高微波能量利用效率^[10,18,37]。

2.3 微波脉冲占空比对盒装米饭复热效果的影响

盒装米饭微波加热 300 s,微波功率 19 kW 的温度分 布如图 5 所示。对比边角盒和中心盒①~⑤点的温度分 布,脉冲占空比处于 0.70~0.85 范围时边角盒的温度高 于中心盒 (序号6和7),每盒内边角区域温度高于中 心区域。脉冲占空比处于 0.90~1.00 范围时中心盒/点温 度大于边角盒/点的。随着脉冲占空比增大,微波能输入 量增加,餐盒中心聚焦明显。复热后中层温度分布与上 层的情况类似,脉冲占空比处于 0.70~0.80 时,中心盒/ 点处温度要高于边角盒/点处的值;但脉冲占空比处于 0.85~1.00 范围时,中心盒/点处温度低于边角盒/点的值。 加热后下层温度分布在边角处温度最高,中心点①处温 度最低,边角处温度差异不显著。在微波加热过程中, 米饭盒侧壁和上、下两整体表面入射的微波能量,在边 角盒处由米饭盒侧壁入射产生能量聚集。中心部分距边 缘尺寸大于盒装米饭的微波穿透深度,由于传递到中心 盒处微波能量衰减,因传导热量少、温升幅度小形成

"冷点"^[10],出现中心盒位置温度比边角盒温度低的情 况。随着脉冲占空比(微波功率)的增大,微波能向内 部传递量增加,"冷点"会向中心点处聚集且"冷点" 面积缩小。在脉冲占空比为 0.85 时出现"转换点",即 脉冲占空比在 0.70~0.80 范围时盒装米饭单体的温度分 布呈显著"边角效应",在脉冲占空比为 0.85~0.90 时 微波在边角的聚焦效应不再显著。这表明在每个脉冲占 空比的作用区间内, 微波能输入时段在米饭中产生集中 体积热会在间歇阶段传导至低温区,降低热点温度,这 种热量疏导能力取决于米饭热特性(比热容和导热系数 等)和微波加热脉冲占空比等因素^[21];在脉冲占空比 0.90~1.00 范围时单盒米饭呈现出显著的"中心聚焦效 应"。在连续式微波加热腔内总体排列形式的盒装米饭 是矩形体,其中序号6和7是中心盒米饭,在复热过程 中, 盒装米饭盒侧壁和上、下两整体表面入射的微波能 量,在边角盒处由盒装米饭侧壁入射产生能量聚集。中 心部分距边缘尺寸大于盒装米饭的微波穿透深度,由于 传递到中心盒处的微波已衰减,有温差区域依靠传导加 热,因传导热量少、温升幅度小形成"冷点"。总会出 现中心盒的位置温度比边角盒温度低的效果。随着脉冲 占空比(微波功率)的增大,微波向米饭内部传递深度 增加、产生的体积热增多,"冷点"会向中心点处聚集、 "冷点"面积逐渐缩小。但温度过高会导致米饭失水变 干、影响口感。



图 5 不同微波输出脉冲占空比下米饭上层、中层和下层的温度分布(微波功率 19 kW、加热时间 300 s) Fig.5 Temperature distribution of ready-to-eat rice's top, middle, and bottom layers under different pulse duty cycle (the microwave power of 19 kW, and the total heating time of 300 s)

为了可视化定性观察连续式微波加热设备内矩形包 装中米饭的水分分布,根据变色硅胶在不同含水率时颜 色的差异性(如图6所示),确定微波输出脉冲占空比 对变色硅胶水分分布的影响,随着脉冲占空比增加,微 波入射到物料中的能量增多、在相同加热时间内水分蒸 发量增加(如图7所示);不同于图5中温度分布不均 匀性随着脉冲占空比变化而更加显著,在脉冲占空比 (*M*_{cb})不高于 0.80 时, 硅胶中水分变化在总体上边角 盒的蒸发明显高于中心盒的, 而*M*_{cb}高于 0.80 时每个硅 胶盒中水分差异不明显, 这是因为*M*_{cb}高于 0.80 时的微 波能输入提供足够水分蒸发所需能量, 使中心区域水分 蒸发量增多。获取 600~1100 W 范围内, 微波复热含水 变色硅胶 300 s 时的颜色分布(图 8), 分别通过 RGB 值拟合法和 105 ℃ 烘箱法测定其含水率, 并与相同条件 复热后盒装米饭采用 105 ℃ 烘箱法测得的含水率进行对比 (图 9),统计分析结果表明由 RGB 值拟合法获得的变 色硅胶含水率与米饭的整体变化有显著的一致性(相关 性系数 *R*=0.79, *P*<0.05)。因此,根据相同包装内硅胶水分分布情况,可以可视化表征在相同微波加热条件下 盒装米饭内的水分变化。







- 图 7 微波输出脉冲占空比对盒装米饭和硅胶中含水率影响的 变化趋势
- Fig.7 Moisture content changes of ready-to-eat rice and allochroic silica gel under different pulse duty cycle



图 8 不同微波功率下含水变色硅胶不同含水率下的颜色状态 Fig.8 Color state of allochroic silica gel under different microwave power

在微波复热的每个盒装米饭内水分差异更小,原因 有①变色硅胶属无机物,对水分束缚力小^[34];而米饭中 淀粉等有机成分对水分束缚更强,因此米饭失水会更少; ②米饭包装盒上盖有密闭作用,阻碍失水。因此,图 7 中在不同脉冲占空比下边角盒和中心盒的水分变化,可 以反映微波加热对水分蒸发有较强作用,但在每个矩形 包装内的水分分布较均匀。变色硅胶对水分束缚力虽小 于米饭,两者含水率随脉冲占空比的变化规律相似,且 同样在脉冲占空比为 0.85 时观察到转换点。



- 图 9 不同功率对盒装米饭和硅胶中含水率影响的变化趋势
- Fig.9 The moisture content change trend of ready-to-eat rice and allochroic silica gel under different microwave power

微波复热米饭的平均温度随脉冲占空比而上升,温 度均匀度系数随脉冲占空比先减小再增大,脉冲占空比 为 0.90 时温度均匀系数最小,温度分布均匀性最高(图 10)。



图 10 微波输出脉冲占空比下盒装米饭的平均温度和 温度均匀度系数

Fig.10 The average temperature and temperature uniformity coefficient of ready-to-eat rice under different pulse duty cycle

这是因为占空比大于 0.90 时,随着脉冲占空比的增大, 微波功率增大,导致微波聚集效果更显著,中心位置出 现"热点",中心点与边角点处的温差大,温度分布均匀 性降低^[21]。对比不同微波功率下盒装米饭温度分布,在 脉冲占空比为 0.90 时,微波复热米饭温度分布均匀性高。 2.4 连续微波复热过程中盒装米饭的温度和含水率变化

参考电饭锅炊饭标准要求的保温温度在 65~80℃, 可保证新炊米饭的口感和状态等质量^[38]。考虑微波加热 能耗和米饭复热后配送环节热损失,确定复热盒装米饭 温度应不低于 70℃、且确保盒装米饭内加热均匀性尽量 高和水分损失尽量少。分析连续微波复热过程中盒装米 饭温度和含水率变化,有助于确定适宜加热时间,为后 续通过矩形餐盒金属化包装提高加热均匀性的设计提供 依据。

在连续式微波复热过程中盒装米饭的温度变化如 图 11 所示(微波功率 19 kW、脉冲占空比 0.80)。在加 热时间 120~240 s 时,盒装米饭的取样三层均在边角处 出现"热点"、中心处出现"冷点",表现出明显的"边 角效应"。这是由于入射 TE 平面波与盒装米饭料层边 界平行(沿 x-和 y-方向),引起非谐振散射造成边界层 内电场集中,形成边角效应:盒装米饭侧壁和上、下两 表面入射的微波能量,在边角处由盒装米饭侧壁入射产 生能量聚集;在加热时间 300~360 s 出现"中心聚焦" 效应,根据 2.1 节对微波在餐盒个体间及总体内传递的 分析,这是由于微波产生体积热向盒装米饭排列总体的 中心传递造成的。在微波复热过程中,盒装米饭吸收微 波能、温度升高,引起导热系数和比热增大^[21],经由热 传导达到中心处热量增多;边角处存在与周围环境的热 对流,边角温度下降^[21]。



图 11 不同总加热时间连续式微波复热盒装米饭上层、中层和下层的温度分布(微波功率 19 kW、脉冲占空比 0.80) Fig.11 Temperature distribution of ready-to-eat rice's top, middle, and bottom layers under different total heating time (the microwave power of 19 kW, and the pulse duty cycle of 0.80)

在连续式微波复热过程中,盒装米饭平均含水率呈 下降趋势,在120s时边角盒和中心盒的差异不显著 (P>0.05),在180~360s内中心盒含水率要高于边角 盒,如图12所示。



图 12 微波加热过程中盒内米饭含水率变化(微波功率 19 kW、 脉冲占空比 0.80)

Fig.12 The moisture content of ready-to-eat rice under different heating time (the microwave power of 19 kW, and the pulse duty cycle of 0.80)

随着微波复热盒装米饭的平均温度升高,温度均匀

度系数下降,温度分布的均匀性增强(图 13)。微波加 热时间取决于连续微波干燥机输送带的带速,使盒装米 饭在微波腔内所经历加热时间不同,沿盒装米饭运动方 向形成有差别微波能吸收分布^[39]。微波加热时腔体内电 场强度分布决定米饭对微波能吸收量,在本研究所用连 续式微波加热设备上(图 1a、b所示),在密集磁控管 排布的腔体 1 #和 2 #内微波能吸收量更多,而在相对稀 疏磁控管排布的腔体内(腔体 3 #、4 #和 5 #)微波能吸 收量相对较低。

对比微波功率和加热时间对盒装米饭温度分布的影响,发现沿矩形餐盒的上层和下层方向,对于相同脉冲 占空比,在加热时间 180~300 s 时,微波复热后米饭的 上层平均温度最大,温度分布的均匀性最高,下层平均 温度最小、温度分布均匀性最差;在加热时间 300~ 360 s 时,中层平均温度最大、温度分布均匀性最高,下 层平均温度最小、温度均匀性最差。相同加热时间下, 在脉冲占空比 0.70~0.85 时,复热后上层的平均温度最大, 温度分布趋向均匀;下层平均温度最小,温度分布的均 匀性最差。在脉冲占空比 0.85~1.00 时,中层平均温度 最大,温度分布均匀度最高;下层平均温度最小,温度 均匀性差。随脉冲占空比、加热时间增加,微波复热过 程积累体积热逐渐增多,盒装米饭的温度逐渐升高。



图 13 微波加热过程中不同加热时间盒装米饭平均温度和温度 均匀度系数(微波功率 19 kW、脉冲占空比 0.80) Fig.13 The average temperature and temperature uniformity coefficient of ready-to-eat rice under different microwave heating time (the microwave power of 19 kW, and the pulse duty cycle of 0.80)

2.5 连续微波复热盒装米饭加热均匀性分析

2.5.1 连续复热过程的整体温度和水分变化

为提高连续微波复热过程中盒装米饭加热均匀性和 能量利用率,在2.4节(脉冲占空比为0.80)基础上, 根据图5和图6所示的脉冲占空比0.90在餐盒单体内温 度和水分分布更均匀的规律,分析连续微波复热过程中 盒装米饭的温度和水分的分布及变化。在脉冲占空比 0.90的连续微波复热盒装米饭过程中,盒装米饭的温度 分布情况分别如图14所示。在连续式微波复热时间 60s时,头排盒装米饭(序号1、2、3和4)的升温速 率较大。加热时间120s时,单体盒装米饭内中心点 (①点)开始出现"冷点"。加热时间 180 s 时,除每 盒中心点处出现冷点外,按运动方向由头排、中排和尾 排(共计 12 盒盒装米饭)总体排列的矩形,在中心盒 (序号 6 和 7)处出现"冷点"。加热时间从 180 s~ 300 s 过程中,温度分布中的"冷点"表现出逐渐向中心 处"聚集"现象,且边角处单体盒装米饭中心①点温度 高于边角点温度。

在复热初期(60s)上层的平均温度最高,复热中 期(120~180s)中层的温度逐渐超过上层,在整个复 热过程(0~300 s)下层的平均温度始终保持最低。在 复热过程中,盒装米饭置于连续式微波干燥机内的传送 带上,上层米饭吸收微波能并转化成热能后使得温度升 高,盒装米饭在包装盒内的厚度尺寸大于微波穿透深度[21] (16.30±0.23 mm), 微波到达米饭中层前已衰减, 中层 温度升高主要依赖于热传导,导致复热初期上层的平均 温度高于中层。在微波复热后期,盒装米饭吸收微波能 在内部的热传导能力增强,使中层获得更多热量; 与上 层米饭相比,中层米饭缺少与周围环境的热对流,使得 中层温度在复热中期高于上层温度。下层米饭因吸收微 波能量少、升温缓慢,平均温度始终保持最低^[7]。如 图 15 所示的在脉冲占空比 0.90 的微波加热模式下,对 比图 11 ($M_{cb}=0.80$) 与图 14 ($M_{cb}=0.90$) 的盒装米饭内 三层温度分布,随着米饭温度升高、温度均匀度系数降 低,连续式微波复热过程中米饭内部加热均匀性提高; 在实现相近加热温度(平均温度不低于 70℃)目标下,脉 冲占空比 0.90 比其 0.80 的盒装米饭微波复热均匀性更高。 这是由于微波复热时,高脉冲占空比有更多微波能量入 射到米饭内部、生成微波体积热,热能传递能力增强, 微波传递产生热点的能量弥散、缓解"冷点"和"热点" 温度差异。



图 14 连续微波复热过程上层、中层和下层的温度分布(微波功率 19 kW、脉冲占空比 0.90)

Fig.14 Temperature distribution of ready-to-eat rice's top, middle, and bottom layers during microwave reheating (the microwave power of 19 kW, and the pulse duty cycle of 0.90)

微波复热盒装米饭过程含水率随时间的变化如图 16 所示,盒装米饭在边角盒的含水率要低于中心盒的。比 较连续微波复热过程中盒装米饭沿运动方向温度变化, 盒装米饭在1#和2#腔体内时温度快速升高,这是因 腔体内的磁控管排布密集,且介电常数随温度而升高,吸收微波能的能力增强; 盒装米饭在3#、4#和5#腔体内时温度升高速率减缓,是腔体内磁控管排布稀疏,

介电常数随温度升高而降低,导热系数和介电损耗因子 随温度升高呈上升趋势,米饭吸收的微波能主要用于热 传导^[21]。

图 15 连续微波加热过程中米饭平均温度及均匀度系数(微波功率 19 kW、脉冲占空比 0.9) Fig.15 The average temperature and temperature uniformity coefficient of ready-to-eat rice during microwave reheating (the microwave power of 19 kW, and the pulse duty cycle of 0.90)

图 16 连续微波复热过程的盒装米饭含水率(微波功率 19 kW、 脉冲占空比 0.9)

Fig.16 The moisture content of ready-to-eat rice during microwave reheating (the microwave power of 19 kW, and the pulse duty cycle of 0.90)

2.5.2 连续式微波复热过程中盒装米饭总体边缘处的温度变化

由 2.2 节分析可知,在微波加热过程中,放置在输 送带上盒装米饭的个体及排列总体从边缘向中心的温度 分布均呈现由高到低的变化趋势,排列总体棱角处首先 产生最高温度,影响到盒装米饭的微波复热均匀性和质 量。如图 1c 所示,选择序号1 盒装米饭处于运动前沿和 棱角处,可以解析微波能从低密度(空气)进入高密度 物料(米饭)引起的电场聚焦及温度变化,确定连续微 波加热过程盒装米饭内最高温度分布及演变。在微波复 热过程中,序号1盒装米饭的上、中和下三层内①~⑤ 点温度变化情况如图 17 所示 (微波功率 19 kW、脉冲占 空比 0.9)。盒装米饭复热后的平均温度随加热时间的增 加而升高,对比各层①~⑤点的温度,在加热时间为 120 s 时①点的中下层温度最低, 对应图 14 内序号 1 盒 装米饭的中心处表现出明显"冷点",加热时间在 180~300 s, 中心点(①点)与边角点(②~④点)温 度差异不显著。这是因为在复热后期,米饭吸收 微波能在内部积累、传导,使中心点(①点)的温度升

高到与边角点差异变小。通过对连续微波复热盒装米饭 过程整体温度分布情况,和序号1盒装米饭的温度变化 情况进行分析,发现沿连续式微波干燥机传送带宽度方 向排布4盒米饭,并取12盒作为研究对象时的温度分布 规律与连续微波复热盒装米饭过程的温度分布情况一致。

- 图 17 连续微波复热过程中序号 1 处盒装米饭表层、中层和底 层的温度分布(微波功率 19 kW、脉冲占空比 0.9)
- Fig.17 Temperature distribution of top, middle, and bottom layers of No.1 ready-to-eat rice during microwave reheating (the microwave power of 19 kW, and the pulse duty cycle of 0.90)

3 结 论

对连续式微波复热盒装米饭过程分析得出,盒装米 饭的排列方式、微波功率和加热时间对盒装米饭的水分、 温度分布特性有影响。优选微波复热工艺,提高生产效 率和微波能量利用率,有助于满足工业化复热米饭的需 要,可为预制食品的工业化生产和高品质新产品的开发 提供理论参考。其结论如下:

 沿连续式微波干燥机传送带的宽度方向排满盒装 米饭可获得较好的温度分布均匀性,有利于微波能的吸 收和提高利用效率。

2)微波复热盒装米饭过程中,随着微波占空比增大, 温度分布均匀性出现先增大后减小趋势,在微波脉冲占 空比 0.90 处获得最优的温度分布均匀性。在脉冲占空比 为 0.85 时温度分布出现"转换点",即脉冲占空比在 0.70~0.80 范围复热后盒装米饭的温度因"边角效应" 呈现不均匀分布,在占空比 0.90~1.00 单盒米饭温度因 "中心聚焦"呈现不均匀性分布。

3)在连续式微波复热盒装米饭过程中,沿传送带的 宽度方向排布4列盒装米饭,采用微波功率为17.1kW (总微波功率19kW与脉冲占空比0.90的乘积)、加热 时间为300s,可提高微波复热均匀性。

4)本研究解析连续式微波复热盒装米饭均匀性变化 规律,探明微波在矩形餐盒的边缘入射衰减和聚焦是加 热不均匀性产生的主要原因;提出微波脉冲式能量输入 的盒装米饭复热模式及参数,提高米饭微波复热均匀性。

[参考文献]

- 张德权,刘欢,孙祥祥,等.预制菜肴工业化加工技术现 状与趋势分析[J].中国食品学报,2022,22(10): 39-47.
 ZHANG Dequan, LIU Huan, SUN Xiangxiang, et al. Analysis of current situation and trends of industrial processing technology for prepared dishes[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(10): 39-47. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刘宇,赵煜炜,姜文杰,等.猪肉预制菜加工与质量安全 控制技术研究进展[J].食品工业科技,2024,45(23): 413-421.

LIU Yu, ZHAO Yuwei, JIANG Wenjie, et al. Research advanced on processing and quality safety control technology of pre-made pork dishes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(23): 413–421. (in Chinese with English abstract)

- [3] 罗霜霜,康建平,张星灿,等.方便米饭品质改良研究进展[J]. 粮油食品科技,2020,28(3):78-84.
 LUO Shuangshuang, KANG Jianping, ZHANG Xingcan, et al. Research progress on quality improvement of instant rice[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2020, 28(3):78-84. (in Chinese with English abstract)
- [4] 郑先哲,张雨涵,刘成海,等.微波技术在食品和农产品加 工中应用研究进展[J].农业工程学报,2024,40(6):14-28. ZHENG Xianzhe, ZHANG Yuhan, LIU Chenghai, et al. Research progress in the microwave technologies for foodstuffs and agricultural products[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of CSAE), 2024, 40(6): 14-28. (in Chinese with English abstract)
- [5] 田晓红,姜平,谭斌,等.方便米饭加工技术研究进展[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(4): 1-8.
 TIAN Xiaohong, JIANG Ping, TAN Bin, et al. Research progress on the processing technology of instant rice[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(4): 1-8. (in Chinese with English abstract)

- [6] 陈健敏. 盒装米饭热链储运及冷链微波复热品质变化和控制[D]. 广州:华南理工大学, 2014: 1-7. CHEN Jianmin. Research on Quality Control of Packed Rice During Hot Chain and Reheating of Cold Chain[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014: 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [7] ERLE U. Development of Packaging and Products for Use in Microwave Ovens[M]. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing in Materials, 2020: 125-144.
- [8] CHEN J J, PITCHAI K, BIRLAA S. Modeling heat and mass transport during microwave heating of frozen food rotating on a turntable[J]. Food and Bioproducts Processing, 2016, 99: 116-127.
- [9] LIU S W, HASSAN N A, HE J, et al. Microwave treatment affects the storage stability of rice: The influence on the structure and properties of starch[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2024, 59(5): 3187-3197.
- [10] 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): 2398.
- [11] ZHANG Z J, SU T Y, ZHANG S W. Shape effect on the temperature field during microwave heating process[J]. Journal of Food Quality, 2018, 2018: 1-25.
- [12] 范大明,陈卫,李春香,等.方便米饭微波复热过程温度分布的尺寸效应[J].农业工程学报,2012,28(S1):273-280.
 FAN Daming, CHEN Wei, LI Chunxiang, et al. Size effect on temperature distribution of instant rice during microwave reheating process[J] Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of CSAE), 2012, 28(S1):273-280. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王丽云,范大明,庞珂,等.颗粒状态对米饭微波复热过程温度分布的影响[J].食品工业科技,2012,33(21):53-56,61.
 WANG Liyun, FAN Daming, PANG Ke, et al. Particle state effect on temperature distribution of instant rice during microwave reheating process[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(21): 53-56,61. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张柔佳,王易芬,栾东磊. 微波加工过程中食品温度分布规律 及其均匀性研究[J]. 食品与发酵工业,2018,44(4):270-278. ZHANG Roujia, WANG Yifen, LUAN Donglei. A review of temperature distribution and heating uniformity of food during microwave thermal processing[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(4):270-278. (in Chinese with English abstract)
- [15] CHEN J J, PITCHAI K, BIRLA S, et al. Temperaturedependent dielectric and thermal properties of whey protein gel and mashed potato[J]. Transactions of the ASABE, 2013, 56(6): 1457-1467.
- [16] 郑先哲,鲁天麟,陈启明,等.复合助剂对低温喷雾干燥 蓝靛果粉理化性质的影响[J]. 农业工程学报,2024,40(2): 93-106.
 ZHENG Xianzhe, LU Tianlin, CHEN Qiming, et al. Effects of compound additives on the physicochemical properties of lowtemperature spray drying *Lonicera edulis* powder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of CSAE), 2024, 40(2): 93-106. (in Chinese with English abstract)
- [17] 陈大为,张勇,罗明朗.家用微波炉加工米饭对米饭营养 成分的影响[J].粮食加工,2018,43(4):46-48.

- [18] 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,2021:1-19.
 ZHU Yong. Study on Improving Temperature Uniformity of Microwave-reheated Instant Rice with Metallized Packaging Film[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021:1-19. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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: 9-51.
 WANG Xiaorui. Study on the Temperature Distribution of Instant Rice During Microwave Reheating[D]. Haerbin: Northeast Agricultural University, 2019: 9-51. (in Chinese with English abstract)
- [20] SHEN L Y, ZHU Y, LIU C H, et al. Modelling of moving drying process and analysis of drying characteristics for germinated brown rice under continuous microwave drying[J]. Biosystems Engineering, 2020, 195: 64-88.
- [21] 刘钗. 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.

LIU Chai. Study on Temperature Uniformity for Instant Rice under Microwave Reheating[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021. (in Chinese with English abstract)

[22] 朱广浩.发芽糙米连续式微波干燥过程仿真及干燥机设计[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2018.
ZHU Guanghao. Simulation of Continuous Drying Process for Germinated Brown Rice and Design of Microwave Dryer[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese with English abstract)

[23] 郑先哲,秦庆雨,王磊,等.气流改善泡沫树莓果浆微波 干燥均匀性提高能量利用率[J].农业工程学报,2019, 35(14): 280-290.

ZHENG Xianzhe, QIN Qingyu, WANG lei, et al. Airflow improving foam berry pulp microwave drying uniformity and energy efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of CSAE), 2019, 35(14): 280-290. (in Chinese with English abstract)

- [24] 王磊. 浆果连续式微波干燥过程能量利用及工艺优化研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2021.
 WANG Lei. Study on Energy Utilization and Parameters Optimization for Berry under Continuous Microwave Drying[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [25] 高峰. 树莓果浆连续式微波干燥均匀性研究及工艺优化[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2023.
 GAO Feng. Study on the Uniformity and Process Optimization under Continuous Microwave Drying of Raspberry Puree[D]. HArbin: Northeast Agricultural University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [26] ZHANG S, RAMASWAMY H, WANG S J. Computer simulation modelling, evaluation and optimisation of radio frequency (RF) heating uniformity for peanut pasteurisation process[J]. Biosystems Engineering, 2019, 184(0): 101-110.
- [27] VERMA D K, TRIPATHY S, SRIVASTAV P P. Microwave heating in rice and its influence on quality and technofunctional parameters of rice compositional components[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 128: 106030.
- [28] WANG S M, YANG R Q, HAN Y B, et al. Effects of magnetron arrangement and power combination on temperature field uniformity of microwave drying of carrot[J]. Drying Technology, 2016, 34(8): 912-922.
- [29] 郑先哲,封少轩,高瑞丽,等.浆果微波干燥品质控制系

统研究[J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(2): 63-72.

ZHENG Xianzhe, FENG Shaoxuan, GAO Ruili, et al. Study on control system of quality for microwave drying of berry[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2022, 53(2): 63-72. (in Chinese with English abstract)

- [30] 郑先哲,付科森,张雨涵,等.脉冲式连续微波干燥树莓果浆的控制系统和品质优化[J].食品工业科技,2024,45(16):259-271.
 ZHENG Xianzhe, FU Kesen, ZHANG Yuhan, et al. Control system and quality optimization of pulsed continuous microwave drying of raspberry pulp[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(16): 259-271. (in
- Chinese with English abstract) [31] 段晓毅. 方便米饭品质提升关键技术及回生控制研究[D]. 成 都:西华大学, 2023: 9-28. DUAN Xiaoyi. Research on Key Technology of Quality Improvement and Regeneration Control of Instant Rice[D]. Chengdu: Xihua University, 2023: 9-28. (in Chinese with English abstract)
- [32] YANG R, MORGAN M, FATHY A, et al. A comprehensive evaluation of microwave reheating performance using dynamic complementary-frequency shifting strategy in a solid-state system[J]. Food Bioprocess Technol, 2023, 16: 1061-1075.
- [33] 胡婷,樊明聪,车丽,等.脉冲微波处理对大米理化指标和流变特性的影响[J].华中农业大学学报,2016,35(4):100-105.
 HU Ting, FAN Mingcong, CHE Li, et al. Effects of pulsed microwave on physicochemical and rheological properties of rice[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2016, 35(4):100-105. (in Chinese with English abstract)
- [34] 孙倩,阚燕,秦晓雨,等. 醋酸纤维素/氯化钴比色湿度传感器研究[J]. 丝绸, 2021, 58(1): 34-39.
 SUN Qian, KAN Yan, QIN Xiaoyu, et al. Colorimetric humidity sensor based on cellulose acetate /CoCl₂ nanofibers[J]. Journal of Silk, 2021, 58(1): 34-39. (in Chinese with English abstract)
- [35] 阚燕,孙倩,李晓强,等.基于氯化钴改性的纤维素纸比 色湿度传感器[J]. 化工进展, 2021, 40(5): 2703-2709.
 KAN Yan, SUN Qian, LI Xiaoqiang, et al. Colorimetric humidity sensor based on CoCl₂/cellulose paper[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(5): 2703-2709. (in Chinese with English abstract)
- [36] 郑先哲,赵兴隆,刘成海,等.基于果实颜色特征的蓝靛 果忍冬花青素含量预测[J].农业工程学报,2023,39(2): 242-251.
 ZHENG Xianzhe, ZHAO Xinglong, LIU Chenghai, et al. Prediction of the anthocyanin content of *Lonicera edulis* based on fruit color characteristics[1]. Transactions of the Chinese

on fruit color characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of CSAE), 2023, 39(2): 242-251. (in Chinese with English abstract)

[37] WANG G Y, MENG J H, ZHANG K. Process intensification of non-uniform additive pattern for coal slime drying by microwave heating[J]. Energy, 2024, 302: 131859.

[38] 刘洪涛,吴畏.中日韩电饭煲产品标准差异解读[J]. 家电科技,2018,11(3):30-34.
LIU Hongtao, WU Wei. Interpretation of differences in product standards of rice cookers in China, Japan and Korea[J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2018, 11(3):30-34. (in Chinese with English abstract)

[39] 王磊, 沈柳杨, 刘成海, 等. 微波干燥浆果过程中料层电 场分布影响能量利用分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4):

1-10.

WANG Lei, SHEN Liuyang, LIU Chenghai, et al. Effect of electric field distribution on energy use efficiency for berry

puree under microwave drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of CSAE), 2021, 37(4): 1-10. (in Chinese with English abstract)

Heating uniformity of ready-to-eat rice under continuous industrialization microwave reheating

ZHENG Xianzhe, LIU Huiran, LIU Chenghai, BAI Caiyu, JIANG Zhenze,

ZHAO Xinglong , SHEN Liuyang , LIU Chai st

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: To improve the heating uniformity of ready-to-eat rice during continuous microwave reheating, the microwave power, heating time, and combination arrangement of ready-to-eat rice were selected as influencing factors, and moisture content, average temperature, and temperature uniformity served as evaluation indexes. The single-factor experimental design was employed to investigate the effects of continuous microwave reheating parameters on the temperature and moisture content distribution inside ready-to-eat rice and obtain the optimal processing parameters under continuous microwave reheating. The results demonstrated that microwave power and heating time had significant effects on the uniformity of temperature distribution inside the arrangement of packaged ready-to-eat rice. The temperature distribution inside the combination arrangement of ready-to-eat rice in the cavity of the continuous microwave dryer showed a clear "corner effect" and "rim overheating" due to the intensity decay of incident microwave contacting the arrangement of ready-to-eat rice. The ready-toeat rice arranged in four columns had the highest average temperature and uniform temperature distribution. However, the average temperature of the ready-to-eat rice in two columns was relatively low with the non-uniform distribution. The ready-toeat rice container laid along the width direction of the conveyor belt in the continuous microwave dryer had the obvious uniformity of temperature distribution which is conducive to microwave energy absorption and utilization efficiency. It was appropriate to determine the four-column arrangement of the ready-to-eat rice. The average temperature of ready-to-eat rice increased with microwave power, temperature uniformity initially deteriorated and ultimately dropped with microwave power, and the highest heating uniformity may be achieved at a microwave power of 17.1 kW (19 kW×0.90) with a pulse duty cycle of 0.90. The temperature distribution exhibited a "center focus effect" with an increase of the microwave power, where the conversion point from "corner effect" to "center focus effect" occurred at the microwave power of 16.15 kW (19 kW× 0.85) with a pulse duty cycle of 0.85. During the continuous microwave reheating process of ready-to-eat rice, the top, middle, and bottom layers of ready-to-eat rice showed "hot spots" at the corners and "cold spots" at the center, demonstrating a clear "corner effect" under the total heating time in the range of 120-240 s. The "center focus effect" occurs at a total heating duration of 300-360 s. The average temperature gradually increased with the total heating time, and so does the uniformity of temperature distribution. According to the temperature distribution of the ready-to-eat rice's overall arrangement during a continuous microwave reheating for 300 s, the average temperature of the top layer is the highest at the initial stage of reheating (60 s), the temperature of the middle layer gradually is higher than the top layer at the middle stage of reheating (120-180 s), and the average temperature of the bottom layer remained the lowest throughout the reheating process (0-300 s). According to the temperature distribution in the top, middle, and bottom layers of ready-to-eat rice during the continuous microwave reheating with a total heating period of 300 s, the temperature distribution trend was similar to the distribution of overall arrangement temperature. The color of the water-containing color-changing silica gel was introduced to determine the changing trend in the moisture content of ready-to-eat rice. It was found that the evaporation trends of the moisture in ready-toeat rice were similar to its temperature distribution under the continuous microwave reheating process. There was a significant phenomenon of high edge temperature and corner thermal focusing in the rectangular rice packaging boxes placed inside the microwave cavity, and a similar distribution also existed in single packaging box. As the increase of pulse duty cycle (microwave power), the depth of microwave transmission into the interior of the rice, and the generation of microwave volumetric heating, the "cold spot" moved towards the center area at gradually falling trend, which improved the uniformity of microwave heating. The arrangement method had little effect on heating uniformity. For boxed rice arranged in 2, 3, and 4 columns in a continuous microwave heating device, the uniformity of rice heating inside the box changed from high to low due to the focusing of microwaves on the edge surface of the boxed rice, attenuation during internal transmission, and the low to high dielectric properties between the boxes and their interior. In order to fully utilize the heating capacity and cavity space size of continuous microwave equipment, the optimal process parameters for ready-to-eat rice under continuous microwave reheating were obtained as microwave power of 17.1 kW (19 kW×0.90) with a pulse duty ratio of 0.90, a heating time of 300 s, and four ready-to-eat rice packaging containers arranged across the width of the conveyor belt of the continuous microwave dryer. The research findings can provide the feasible approaches for reheating cooked-rice food with high quality. Keywords: microwave reheating; continuous type; ready-to eat rice; uniformity; prepared food