

集负压与过热蒸汽的多功能烹饪试验平台研发

Research and development of multifunctional cooking test platform combining negative pressure and superheated steam

曾明坚¹ 赵亚栋² 徐凤英¹

ZENG Mingjian¹ ZHAO Yadong² XU Fengying¹

刘天毅³ 张佩瑶³ 蒋卓⁴

LIU Tianyi³ ZHANG Peiyao³ JIANG Zhuo⁴

(1. 华南农业大学工程学院, 广东 广州 510642; 2. 华南农业大学材料与能源学院, 广东 广州 510642;
3. 广东美的厨房电器制造有限公司, 广东 佛山 528000; 4. 华南农业大学食品学院, 广东 广州 510642)

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China; 2. College of Materials and Energy, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China; 3. Guangdong Midea Kitchen Appliances Manufacturing Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000, China; 4. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

摘要:目的:设计一种具备负压、过热蒸汽的多功能烹饪试验平台。方法:对一体机烹饪设备的研究现状进行分析,并对过热蒸汽和负压技术在食品工业中的应用现状进行汇总,确定了多功能烹饪试验平台的性能参数。根据试验平台各个功能的特性,对烹饪腔体、炉门等部件进行设计,并制定了试验平台的整体方案。结果:研发的多功能烹饪试验平台具有负压、蒸汽、微波、烘烤4个功能,可实现-28 kPa的负压抽取、向腔体直喷390℃的过热蒸汽,热风 and 微波加热效果较好。结论:研发的多功能烹饪试验平台具有较高的可行性和实用性。

关键词:多功能烹饪;负压;过热蒸汽;试验平台

Abstract: Objective: To design a multifunctional cooking experimental platform with negative pressure and superheated steam, providing consumers with greener, healthier, and more diverse cooking methods. Methods: The research status of integrated cooking equipment was analyzed, and the application status of superheated steam and negative pressure technology in the food industry was summarized and analyzed. The performance parameters of the multifunctional cooking experimental platform were determined. Based on the characteristics of each function of the experimental platform, the cooking chamber, furnace door

and other components were designed, and the overall plan of the experimental platform was developed. Results: The multifunctional cooking experimental platform developed has four functions: negative pressure, steam, microwave, and baking. It can achieve negative pressure extraction of -28 kPa and direct injection of 390℃ superheated steam into the cavity. The heating effect of hot air and microwave is good. Conclusion: The multifunctional cooking experimental platform developed has high feasibility and practicality.

Keywords: multifunctional cooking; negative pressure; superheated steam; experimental platform

一体机是将微波炉、电蒸箱、电烤箱的功能集成一体的产品,根据不同的烹饪模式,可将一体机分为微蒸烤一体机、蒸烤一体机、微烤一体机和微蒸一体机等。王黎喆等^[1]对具有蒸烤功能的烹饪一体机的排气效果进行优化,以保证一体机的烹饪效果;任富佳等^[2]对具有微波功能的烹饪一体机的微波结构进行优化,以延长微波组件的使用寿命、降低开发成本;闻继望等^[3]研发了具有双烹饪腔室的多功能烹饪装置,可同时对多种食材进行加工,提高烹饪效率。

过热蒸汽作为一种新型热处理技术已被应用于多种食品的加工,如蔬菜、水果、谷物和肉类等。采用过热蒸汽能实现在低氧加工环境下烹饪食物,从而降低食品因氧化反应导致的品质下降并减少有害物质的产生^[4];采

作者简介:曾明坚,男,华南农业大学在读硕士研究生。

通信作者:蒋卓(1986—),男,华南农业大学副教授,博士。

E-mail:jiangzhuo@scau.edu.cn

收稿日期:2023-11-16 改回日期:2024-04-28

用过热蒸汽加工物料时,过热蒸汽具有在低温区域优先凝结的特性,可使物料均匀升温^[5]。与传统炖煮加热方式相比,采用负压技术进行烹饪可最大限度减少原料营养成分、水分和重量的流失^[6-7],在一定程度上改善食品的质地、感官特性以及贮藏稳定性等^[8]。在食品工业中,过热蒸汽可应用于干燥、半熟、预处理、烹饪、灭菌、灭酶等^[9-12];负压技术可用于加工肉制品、海鲜产品、果蔬等^[13]。将负压技术、过热蒸汽与一体机的烹饪功能相结合,可为消费者提供更为健康、更加丰富的烹饪方式。试验拟在微蒸烤一体机的基础上,研发一种具有负压、过热蒸汽技术的多功能烹饪试验平台,为一体机设备的研发提供依据。

1 多功能烹饪试验平台整体方案

1.1 整机布局

多功能烹饪试验平台由微波、蒸汽、烘烤、负压 4 部分组成,采用可编程逻辑控制器(PLC)作为控制系统,其功能原理图如图 1 所示。对试验平台进行设计加工和零件选型后搭建样机,烹饪腔体、蒸汽管道、热风管道均采用 304 不锈钢制作,并采取保温措施。烹饪腔体中装有多种传感器,可对烹饪过程中的温度、压力、湿度等多种参数进行监测。热风内置对腔体密封性有一定影响,为了保证负压功能的正常工作,试验平台将热风外置。

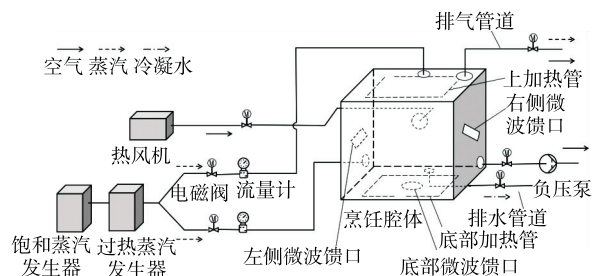


图 1 多功能烹饪试验平台原理图

Figure 1 Schematic of multifunctional cooking test platform

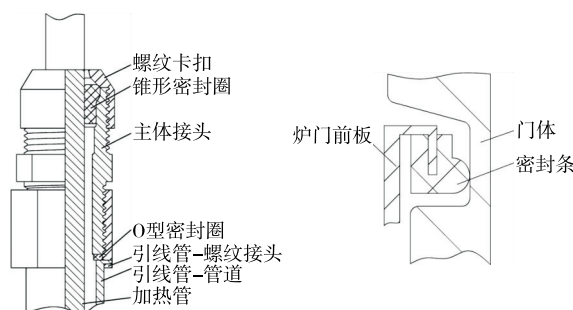
1.2 蒸汽方案设计

试验平台采用电加热法作为过热蒸汽的发生方式,并使用双蒸汽发生器。饱和蒸汽发生器产生饱和蒸汽,其最高温度可达 160 ℃;过热蒸汽发生器对饱和蒸汽进行二次加热产生过热蒸汽,其最高温度可达 450 ℃。蒸汽管道上装有 SQ10 电磁阀,电磁阀可通过调整阀门开度来调整蒸汽流量。

试验平台可提供饱和蒸汽和过热蒸汽。与相同压力下的饱和蒸汽相比,过热蒸汽具有更高的焓值和传热传热效率^[14-15],其能够使食材温度迅速上升,进而提高烹饪效率。过热蒸汽可与加热管、微波、热风三者任意组合使用,使用者可根据烹饪需要选用相应组合方式。负压方案设计为保证烹饪腔体密封性,腔体整体采用氩弧焊

焊接而成。此外,还需对上加热管与引线管的密封、炉门与腔体的密封、管道密封进行密封设计。上加热管与引线管采用卡套式接头实现密封,密封结构图如图 2(a)所示。腔体与炉门处的密封通过内嵌式密封条实现,密封示意图如图 2(b)所示。密封条需具备耐温性和一定的硬度。炉门密封条的硬度与耐温性之间存在一定的关系,密封条的硬度越高,其耐温性也相应提高。通过对不同硬度的密封条进行测试,采用硬度为 40HA、材料为硅胶的密封条,其耐温性能可达 300 ℃。试验平台的管道可分为蒸汽管道、负压管道、热风管道、排水管道和排气管道。管道上安装电磁阀作为管道密封器件,电磁阀与管道采用法兰连接。

由于负压功能工作时腔体需保持密封状态,所以负压可与微波、加热管组合使用。



(a) 加热管与引线管处的密封 (b) 炉门与腔体处的密封

图 2 密封结构图

Figure 2 Seal structure diagram

1.3 微波方案设计

微波部分由矩形波导、2M539H 型磁控管、WepeX 1600A 微波变频电源、散热风扇等部件组成。微波功能需周期性地降低输出功率以避免使用过程中食物出现过热或过烧现象。为了防止微波泄露,在炉门上采用扼流结构(包括扼流槽和扼流齿圈),扼流结构如图 3 所示。扼流结构能对从腔体与门体缝隙间泄漏出的微波进行反射从而相位抵消来实现自防泄漏^[16]。

1.4 烘烤方案设计

试验平台的烘烤功能包括热风烘烤和加热管烘烤。热风烘烤由 RY-P 型热风机、加热管和电磁阀组成。热风机可实现 30~50 Hz 的风机变频。采用单加热管烘烤时,需在 20 min 内将腔体加热至 260 ℃,经计算得加热管

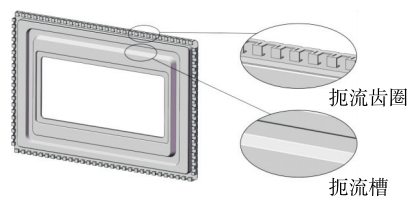


图 3 扼流结构图

Figure 3 Microwave leakage prevention structure

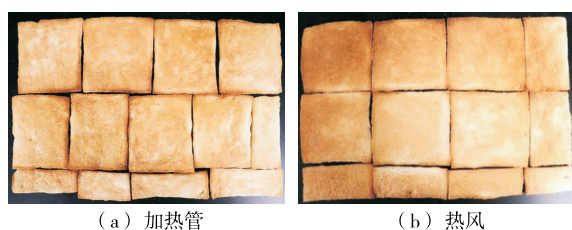
总功率需 $\geq 4\ 250\ \text{W}$ 。考虑到散热等因素,加热管总功率最终确定为 $5\ \text{kW}$,其中上管功率为 $3\ \text{kW}$,下管功率为 $2\ \text{kW}$ 。

2 样机性能测试与分析

2.1 基本功能测试与分析

2.1.1 烘烤功能均匀性试验 分别在加热管、热风工况下烤制面包片。采用嘉顿小平方包作为试验面包片,烤制前需将面包片边缘褐色部分去除并铺满烤架,对烤制后的面包片进行色度评价以验证样机烘烤功能的均匀性^[17]。

面包片烤制效果如图4所示,热风烤制的面包片部分边缘出现烤焦情况,色度达到烤制要求的面包片面积占比 89.2% ;加热管烤制的面包片存在少部分未上色区域,色度达到烤制要求的面包片面积占比 83.7% ;热风烤制的面包片整体均匀性和上色度均优于加热管烤制,这是由于二者的热量传递方式不同。加热管的热量传递方式为热传导和热辐射,热风的热量传递方式为热对流。热风的通入加强了烹饪腔体内的热对流,循环流动的热风使面包片更均匀地受热,因此烤制出来的面包片整体上色更为均匀。烹饪腔体与烤架在一定程度上影响了热风的流动性,导致部分面包片边缘出现烤焦情况。加热管通过热传导加热腔体内的空气产生了热对流,进而通过热辐射和热对流的方式烤制面包片,但加热管的形状使面包片受热较为集中,面包片表面出现颜色深浅不一的情况。整体而言,加热管和热风烤制的面包片整体上色均匀,烤制效果较好。但烘烤均匀性尚有提升空间,可对热风、加热管进行调整,进一步提升烘烤均匀性。



(a) 加热管 (b) 热风

图4 面包片烘烤均匀性

Figure 4 Bread slices baking uniformity

2.1.2 微波功能均匀性试验 将20片完整虾片均匀放置于腔体内底部玻璃上,分别打开左侧、右侧、底部微波,设定时间为 $1\ \text{min}$,以测试不同微波馈口加热虾片的爆开情况,记录虾片爆开个数,试验重复3次。若虾片爆开的总个数 $>60\%$,测试结果为合格^[18]。

由表1可知,在 $1\ \text{min}$ 的微波加热时间内,3个微波馈口的虾片爆开数均 $>60\%$,说明测试结果达到预期。根据虾片的爆开率可知,底部微波加热效果最好,右侧微波次之,左侧微波最差。微波辐射在腔体内的分布对食物的加热效果有直接影响,试验平台的左、右侧的微波源发出的微波辐射的分布均匀性主要依靠腔体内壁对微波

表1 虾片爆开数

Table 1 Number of prawn crackers popped

馈口位置	平均爆开率/%
左侧微波	75.0
右侧微波	86.7
底部微波	98.3

辐射的反射;底部的微波源发出的微波辐射在进入腔体时会被转盘进行搅动,使微波辐射更均匀地分散在腔体内,所以底部微波的加热效果最佳。微波整体加热效果较好,但左侧微波的加热均匀性需进一步优化。

2.2 负压功能测试与分析

在腔体空载情况下,开启负压功能后采集 $20\ \text{min}$ 内腔体内压力值变化,并绘制压力变化曲线如图5所示。由图5可知, $15\ \text{s}$ 时腔体压力下降到 $-28\ \text{kPa}$; $45\ \text{s}$ 时压力值上升到 $-26\ \text{kPa}$,在 $-26\ \text{kPa}$ 稳压时间 $210\ \text{s}$; $270\ \text{s}$ 时压力值上升到 $-24\ \text{kPa}$,此后腔体压力值保持不变。表明负压功能工作良好,在 $20\ \text{min}$ 内腔体的压力值可维持在 $0\sim-24\ \text{kPa}$ 。压力值由 $-28\ \text{kPa}$ 上升到 $-26\ \text{kPa}$ 是由于负压值抽取到设定值时,负压泵停止工作,但负压阀门尚未完全关闭,外界气体进入腔体;压力值由 $-26\ \text{kPa}$ 上升到 $-24\ \text{kPa}$ 可能是管道阀门处到腔体之间的管道中残留有冷凝水,冷凝水中溶解的气体在负压状态下逸出,从而使腔体内压力值上升。后续采用负压加工食材时,腔体内的负压状态会发生改变,可根据实际烹饪情形设置负压的抽取上下限。

2.3 过热蒸汽功能测试与分析

在烹饪腔体未预热的情况下,分别采用顶部蒸汽口、底部蒸汽口进蒸汽,采集蒸汽进入腔体温度和腔体炉心温度。当炉心温度达到 $250\ ^\circ\text{C}$ 时,停止采集。根据采集的温度数据绘制温度变化曲线如图6所示。由图6可知,当炉心温度达到 $200\ ^\circ\text{C}$ 时,顶部蒸汽口用时 $1\ 830\ \text{s}$,底部蒸汽口用时 $1\ 550\ \text{s}$;当炉心温度达到 $250\ ^\circ\text{C}$ 时,顶部蒸汽口用时 $2\ 870\ \text{s}$,底部蒸汽口用时 $3\ 320\ \text{s}$;相较于微蒸

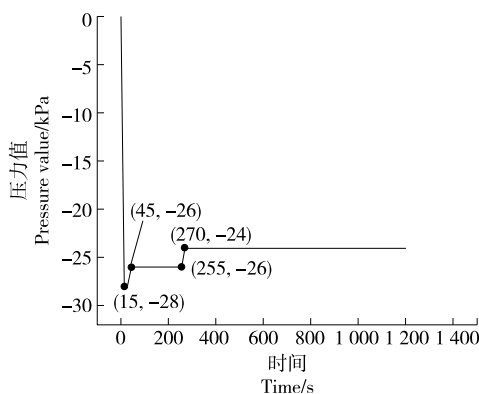


图5 负压压力曲线图

Figure 5 Pressure change curve of negative pressure

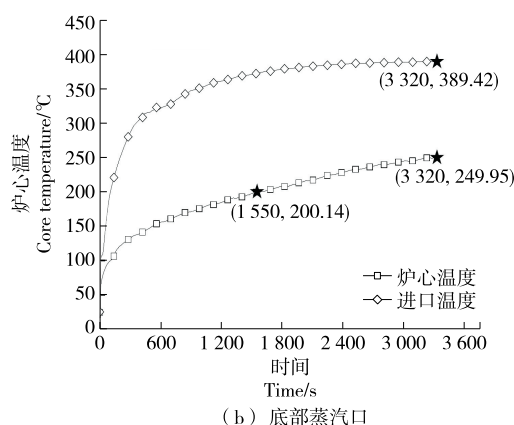
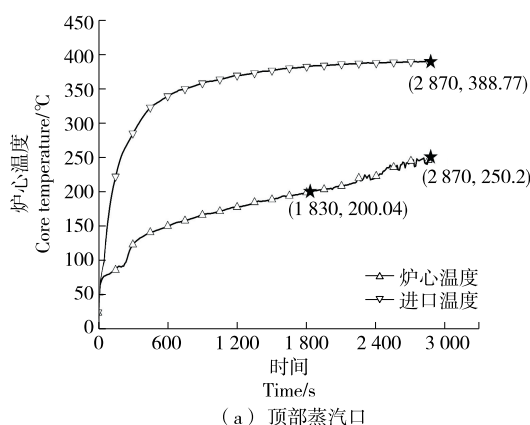


图 6 蒸汽升温曲线

Figure 6 Steam heating curve

烤一体机蒸汽功能的温度范围一般为 $100\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$, 试验平台的蒸汽部分的性能有较大提升。采用底部蒸汽口或顶部蒸汽口进蒸汽, 30 min 内均能达到 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 从 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升温到 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 需 15 min 左右。在蒸汽通入腔体的前期, 蒸汽与腔体的温差较大, 因此该阶段的腔体升温速度快; 但随着蒸汽的通入, 温差逐渐减小、部分蒸汽冷却为冷凝水吸收部分热量, 导致炉心升温速度减缓。比较不同蒸汽口通蒸汽时的炉心升温曲线: 上蒸汽口受到滤网网的阻挡, 所以该工况下的炉心升温曲线波动较大; 底部蒸汽口因入口位置受到冷凝水影响较大, 通入的蒸汽中的热量被冷凝水吸收并冷却为冷凝水, 从而导致炉心升温更为缓慢。为保证蒸汽烹饪食物的质量, 后续可根据需要采用微波或加热管进行辅助加热。

3 结论

研究开发了一种具有负压与过热蒸汽功能的多功能烹饪试验平台。该试验平台可采用负压、蒸汽、微波、烘烤 4 个功能烹饪食物, 微波、烘烤性能均能达到单一烹饪设备性能的同等级水平。与现有的烹饪一体机相比, 可以采用温度更高的过热蒸汽对食物进行烹饪, 在烹饪性能方面有较大提升, 且负压功能可以为使用者提供更为丰富的加工方式烹饪食材。但该试验平台还需对加热管、左侧微波的加热均匀性进行优化。

参考文献

- [1] 王黎喆, 杨均. 一种具有蒸烤功能的烹饪装置及烹饪一体机: 202310096320.0[P]. 2023-06-30.
WANG L J, YANG J. A cooking device and cooking integrated machine with steaming and baking function: 202310096320.0[P]. 2023-06-30.
- [2] 任富佳, 刘庆华, 阮华平, 等. 具有微波加热功能的烹饪一体机: 202011044779.9[P]. 2020-12-08.
REN F J, LIU Q H, RUAN H P, et al. Cooking all-in-one machine with microwave heating function: 202011044779.9[P]. 2020-12-08.
- [3] 闻继望, 吴江水, 余燕齐. 一种多功能烹饪装置: 202310902837.4 [P]. 2023-10-03.
WEN J W, WU J S, YU Y Q. A multifunctional cooking device: 202310902837.4[P]. 2023-10-03.
- [4] CHO W H, CHOI J S. Sensory quality evaluation of superheated steam-treated chicken leg and breast meats with a combination of marination and hot smoking[J]. Foods, 2021, 10(8): 1 924.
- [5] HUANG T C, HO C, FU H Y. Inhibition of lipid oxidation in pork bundles processing by superheated steam frying [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(10): 2 924-2 928.
- [6] 赵亚, 张越翔, 徐燕, 等. 香菇脆热泵—瞬时压差膨化干燥工艺优化[J]. 食品与机械, 2023, 39(7): 193-201.
ZHAO Y, ZHANG Y X, XU Y, et al. Optimization of the processing parameters of shiitake (Letinus edodes) crisps during heat pump coupled with instant controlled pressure drop puffing drying process[J]. Food & Machinery, 2023, 39(7): 193-201.
- [7] 王香存, 陈龙, 金征宇. 真空油炸技术及其在淀粉基食品中的应用[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(11): 1-9.
WANG X C, CHEN L, JIN Z Y. Vacuum frying technology and its applications in starchy foods [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(11): 1-9.
- [8] 崔伟, 孟祥忍, 高子武, 等. 牛肉低温蒸煮过程中挥发性风味成分及其前体物动态变化[J]. 食品与机械, 2022, 38(4): 20-28, 244.
CUI W, MENG X R, GAO Z W, et al. Dynamic changes of volatile flavor components and their precursors during low temperature cooking of beef[J]. Food & Machinery, 2022, 38(4): 20-28, 244.
- [9] FANG J J, LIU C X, LAW C, et al. Superheated steam processing: An emerging technology to improve food quality and safety [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 63(27): 1-17.
- [10] 魏思凡, 朱堃华, 皮东楷, 等. 过热蒸汽技术在食品加工中的应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(4): 335-344.
WEI S F, ZHU K H, PI D K, et al. Research progress on application of superheated steam technology in food processing[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(4): 335-344.

(下转第 193 页)

- WANG X F, ZHANG J W, SHUAI F W, et al. The effect of hydroxypropyl starch substitution degree on the performance of starch hollow capsules[J]. Chinese Journal of New Drugs, 2017, 26(24): 2 984-2 988.
- [6] 何绍凯, 刘文娟, 曹余, 等. 酶解羟丙基马铃薯淀粉的制备及其在空心胶囊中的应用[J]. 食品工业科技, 2017, 38(6): 163-167.
- HE S K, LIU W J, CAO J, et al. Preparation of enzymatic hydrolyzed hydroxypropyl potato starch and the application in hollow capsules[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(6): 163-167.
- [7] 陈启杰, 赵雅兰, 踪张扬, 等. 绿豆淀粉/纤维素纳米晶胶囊壳的制备及表征[J]. 中国食品学报, 2022, 22(8): 182-189.
- CHEN Q J, ZHAO Y L, ZONG Z Y, et al. Preparation and characterization of mung bean starch/cellulose nanocrystalline capsule shells[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(8): 182-189.
- [8] MORENO O, CÁRDENAS J, ATARÉS L, et al. Influence of starch oxidation on the functionality of starch-gelatin based active films[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 178: 147-158.
- [9] ZHANG N Z, LIU H S, YU L, et al. Developing gelatin-starch blends for use as capsule materials[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 92(1): 455-461.
- [10] 宿玲恰, 吴敬. 淀粉基未来食品及其制备方法研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(12): 5-16.
- SU L Q, WU J. Research progress on starch based future foods and their preparation methods[J]. Journal of Food and Biotechnology, 2021, 40(12): 5-16.
- [11] ZHANG Y P, ZHAO Q, WANG H S, et al. Preparation of green and gelatin-free nanocrystalline cellulose capsules[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 164: 358-363.
- [12] 黄峻榕, 唐晓东, 蒲华寅. 淀粉凝胶的微观结构、质构及稳定性研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2017, 36(7): 673-679.
- HUANG J R, TANG X D, PU H Y. Research progress on microstructure, texture and stability of starch gel[J]. Journal of Food and Biotechnology, 2017, 36(7): 673-679.
- [13] MARIIA K, ARIF M, DING Y, et al. Preparation of novel hard capsule using water-soluble polysaccharides and cellulose nanocrystals for drug delivery [J]. Journal of Pharmaceutical Innovation, 2022, 18(2): 675-686.
- [14] PUTRO J N, SOETAREDJO F E, LUNARDI V B, et al. Polysaccharides gums in drug delivery systems: A review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 127020.
- [15] SCOPEL B S, RIBEIRO M E, DETTMER A, et al. Cornstarch-gelatin films: Commercial gelatin versus chromed leather waste gelatin and evaluation of drying conditions[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2017, 26(5): 1 998-2 006.
- [16] DANG X G, SHAN Z H, CHEN H. The preparation and applications of one biodegradable liquid film mulching by oxidized corn starch-gelatin composite[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2016, 180(5): 917-929.
- [17] ZHANG Y H, YANG N, ZHANG Y Q, et al. Effects of κ -carrageenan on pullulan's rheological and texture properties as well as pullulan hard capsule performances [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 238: 116190.
- [18] GARCIA M A V T, GARCIA C F, FARACO A A G. Pharmaceutical and biomedical applications of native and modified starch: A review[J]. Starch, 2020, 72(7/8): 1900270.
-
- (上接第 80 页)
- [11] 陈龙, 王谊, 程昊, 等. 水相高温处理对淀粉结构与性质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(11): 1-11.
- CHEN L, WANG Y, CHENG H, et al. Effect of high temperature treatments of aqueous phase on structure and properties of starch[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2021, 40(11): 1-11.
- [12] 李少斌, 方婷, 苏煌杰, 等. 过热蒸汽干燥技术研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 219-226.
- LIS B, FANG T, SU H J, et al. Research progress of superheated steam drying technology[J]. Food & Machinery, 2021, 37(7): 219-226.
- [13] KATHURIA D, DHIMAN A K, ATTRI S. Sous vide, a culinary technique for improving quality of food products: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 119: 57-68.
- [14] 张楠, 葛鑫会, 石琳, 等. 小麦胚芽的过热蒸汽稳定化工艺研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 129-132, 158.
- ZHANG N, GE X H, SHI L, et al. Study on the process of superheated steam stabilization of wheat germs [J]. Food & Machinery, 2021, 37(7): 129-132, 158.
- [15] 王学成, 张绪坤, 苏志伟, 等. 过热蒸汽干燥及逆转点研究进展[J]. 食品与机械, 2014, 30(2): 234-237.
- WANG X C, ZHANG X K, SU Z W, et al. Research advances on superheated steam drying and inversion point [J]. Food & Machinery, 2014, 30(2): 234-237.
- [16] 宋展鹏, 曹卫平, 葛连富, 等. T型槽加载扼流器设计[J]. 无线电工程, 2019, 49(9): 825-828.
- SONG Z P, CAO W P, GE L F, et al. Design on T-groove loaded choke[J]. Radio Engineering, 2019, 49(5): 825-828.
- [17] 李剑, 王伯燕, 陆伟, 等. 基于酥饼和面包片的电烤箱烘焙均匀性测试研究[J]. 中国标准化, 2021(19): 241-245.
- LI J, WANG B Y, LU W, et al. Research on baking uniformity test of electric oven based on shortbread and slices of bread[J]. China Standardization, 2021(19): 241-245.
- [18] 夏然, 唐相伟, 栾春, 等. 平板微波炉食物加热均匀性提升研究[J]. 真空电子技术, 2016(4): 51-55.
- XIA R, TANG X W, LUAN C, et al. Food heating uniformity improvement of flat-panel microwave ovens [J]. Vacuum Electronics, 2016(4): 51-55.