

夹心海苔隧道式烘烤设备优化设计与试验

Optimization design and experimental research of sandwich seaweed tunnel baking equipment

于 超¹ 陈书法¹ 钮硕硕¹ 刘 阳² 祁恒阳³ 詹照雅⁴

YU Chao¹ CHEN Shufa¹ NIU Shuoshuo¹ LIU Yang² QI Hengyang³ ZHAN Zhaoya⁴

(1. 江苏海洋大学机械工程学院, 江苏 连云港 222005; 2. 连云港大阳机械有限公司,

江苏 连云港 222111; 3. 连云港市海贡机械有限公司, 江苏 连云港 222100;

4. 福建申石蓝食品有限公司, 福建 宁德 355200)

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang, Jiangsu 222005,

China; 2. Lianyungang Dayang Machinery Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu 222111, China;

3. Lianyungang Haigong Machinery Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu 222100, China;

4. Fujian Shenshilan Food Co., Ltd., Ningde, Fujian 355200, China)

摘要:目的:解决传统夹心海苔隧道式烘烤设备隧道内温度分布不均、夹心海苔易糊粘于传送带等实际问题。方法:对夹心海苔隧道式烘烤设备进行结构设计,对模糊PID温度控制系统进行软硬件设计,按照实际生产环境设置边界条件建立烘烤设备模型,对隧道内温度场进行CFD仿真优化试验。结果:仿真试验得出,加热管上下均匀排列、加热管数量30根、间距220 mm、加热长度1 000 mm的参数组合最适于夹心海苔的烘烤工作。经样机试验得出,优化后的夹心海苔烘烤设备隧道内温度分布均匀,温度误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$,糊粘次数 ≤ 2 次/h,生产效率 $\geq 1\,000$ 片/h,成品质量一致性误差 $\leq 2.1\%$ 。结论:该设备的使用可以有效解决传统夹心海苔隧道式烘烤设备隧道内温度分布不均等问题,满足夹心海苔烘烤的实际生产要求。

关键词:夹心海苔;隧道式烘烤装置;CFD仿真;模糊PID控制

Abstract: Objective: In order to solve the practical problem of uneven temperature distribution in the tunnel and easy adhesion of sandwich seaweed to the conveyor belt. **Methods:** The structure of tunnel baking equipment for sandwich seaweed and the software and hardware of fuzzy PID temperature control

system were designed in this study, the baking device model was established based on the boundary conditions set in the actual production environment, after that, the CFD simulation optimization experiments was performed on the temperature field inside the tunnel. **Results:** The simulation experiment showed that the parameter combination of evenly arranged heating tubes, 30 heating tubes, 220 mm spacing, and 1 000 mm heating length was the most suitable for the baking of sandwich seaweed. It could be concluded from the prototype test that the optimized sandwich seaweed baking equipment had a uniform temperature distribution in the tunnel, a pasting frequency of ≤ 2 times/hour, a production efficiency of $\geq 1\,000$ pieces/hour, and a product quality consistency error of $\leq 2.1\%$, which met the actual production requirements of sandwich seaweed baking. **Conclusion:** The use of this device can effectively solve the problem of uneven temperature distribution inside the tunnel of traditional sandwich seaweed tunnel baking equipment, and meet the actual production requirements of sandwich seaweed baking.

Keywords: sandwich seaweed production; tunnel baking device; CFD simulation; fuzzy PID

基金项目:江苏省政策引导类计划—苏北科技专项(编号:LYG-SZ-201918);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(编号:KYCX20_2914);江苏省大学生创新创业训练计划项目(编号:202111641038Y)

作者简介:于超,男,江苏海洋大学在读硕士研究生。

通信作者:陈书法(1970—),男,江苏海洋大学教授,硕士生导师,硕士。E-mail:845983529@qq.com

收稿日期:2023-07-18 **改回日期:**2024-03-28

目前关于紫菜的加工方式分为一次加工(初级加工)和二次加工(深加工、精加工)。一次加工流程为新鲜紫菜采收后,经水洗、晾干、切碎、烘烤、制饼、简易包装到出厂。二次加工流程为在紫菜一次加工基础上,再进行调味、烤酥、精切、包装等工艺,最后制成的即食紫菜产品^[1-4]。目前国内外对夹心海苔烘烤装置的设计研究不多,且以箱式为主。微波炉内温度易于控制、高效节能。

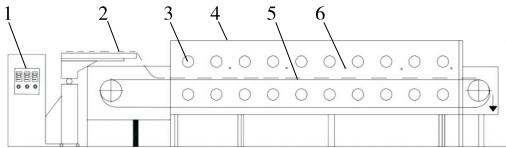
但微波烘烤炉体积有限,间歇工作模式,操作繁琐,不适于夹心海苔的连续生产,工作效率低。日本东洋物产企业株式会社海苔加工机组^[5],采用隧道式烘烤装置,能够实现流水线生产,生产效率高,但是由于机组平面尺寸较大,占地面积大,适合于大型企业生产,同时机组配套大功率传送机构与加热组件,加热迅速,海苔烘烤消耗电能较大,生产过程中隧道内温度分布不均,生产过程中易造成海苔片糊粘的问题,影响紫菜加工生产效率。

研究拟采用 CFD 仿真技术,对隧道内加热管的安装方式进行优化。利用 Solid Works 进行三维炉体建模,利用 Fluent 仿真软件对不同加热管排列方式的模型进行隧道内热流场的 CFD 数值仿真,并搭建模糊 PID 温度控制系统对现有的隧道式烘烤装置进行优化,使隧道内温度分布更加均匀,减少夹心海苔烘烤中的糊粘次数,提高夹心海苔的生产效率。

1 夹心海苔隧道式烘烤装置结构与工作原理

如图 1 所示,夹心海苔隧道式烘烤装置由箱体、烘烤组件、传送机构、传感器、控制器等组成,主要结构与性能参数如表 1 所示。

夹心海苔的制作包括撒料、扣合、烘烤、冷却、切片和检测包装 6 个过程。具体工作过程为:在传送带上平铺一张紫菜片,撒料机将各种辅料如糖粉、花生碎和芝麻等混合,均匀地撒在紫菜片上,传送带旁的工人喷洒清水后,将另一张紫菜片扣在上面,夹心海苔随传送带进入到



1. 控制器 2. 夹心海苔 3. 烘烤组件 4. 箱体 5. 传送机构
6. 温度传感器

图 1 夹心海苔隧道式烘烤装置结构简图

Figure 1 General drawing of sandwich seaweed baking structure

表 1 夹心海苔隧道式烘烤装置主要结构与性能参数

Table 1 Main parameters of structure and performance of tunnel baking device for sandwich seaweed

结构与性能参数	单位	数值	结构与性能参数	单位	数值
长	m	3.40	重量	kg	500
宽	m	1.00	温度误差	℃	≤2
高	m	1.20	生产效率	片/h	>1 000
输送带宽度	m	0.6	糊粘次数	次/h	≤3
输送带长度	m	7	质量一致性误差	%	≤5
加热功率	kW	30			

隧道中进行烘烤,夹心海苔上下受热,辅料熔化,在重力影响下完成两片紫菜的黏合,冷却后进行统一切片,检测并包装,在阴凉处贮藏。传统夹心海苔烘烤装置在长时间工作中,易出现温度分布不均的问题,使夹心海苔在烘烤过程中易出现糊粘现象,影响生产。

2 夹心海苔隧道式烘烤设备隧道内流场仿真

采用计算流体力学的方法对多种不同加热管安装方式模型进行隧道内温度场仿真^[6],根据单因素与多因素组合试验,选取加热管安装最优排列组合。

2.1 隧道式烘烤设备模型的建立

以连云港大阳机械厂夹心海苔烘烤设备尺寸为依据,用 Solidworks 构建三维模型,运用 Fluent 对加热装置内部固定热源进行热扩散分析。由于实际烘烤装置本身结构复杂,划分网格后加热管连接处网格较为密集,每一组加热管,网格数量和模型复杂程度将会急剧增加,所以对模型构建进行简化处理,以利于仿真分析^[7-8]。

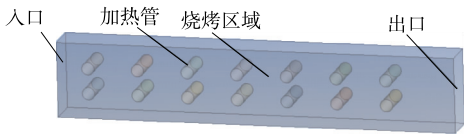


图 2 隧道式烘烤装置物理模型图

Figure 2 Physical model diagram of tunnel baking furnace

2.2 边界条件设定

设计上下两排对称式排列和上下两排交错式排列两种方案进行仿真对比试验。对于两种模型的仿真,夹心海苔经传送带进入隧道内烘烤,烘烤过程中随着传送带带动待烤制夹心海苔移动,会带动周边气体流动,热量也会随着气体流动而流动,从而加速炉内后部温度上升直至恒温状态。为了使仿真结果更加准确,打开能量方程,再打开辐射方程,定义流体域选为不可压缩的空气,初始速度为 0.1 m/s,入口空气初始温度为 20 ℃,外部框架选为不锈钢,加热管材料设定为金属钨,热源设定 420 kW/m³。初始化定义,开始迭代计算。隧道内材料基本参数如表 2 所示。

2.3 仿真结果与分析

设定仿真边界条件,迭代计算生成温度热力云图,如图 3、图 4 所示。

通过两张隧道截面热力云图看出,隧道内温度随着距离的增加而逐渐升高,并在隧道出口处温度缓慢下降。为了更加明显地对比加热管两种排列方式的温度分布情况,在夹心海苔烘烤平面位置绘制两条直线分别为 z_1 、 z_2 ,沿两条直线方向选取 1 000 处测量点绘制温度变化折线,通过 Origin 软件绘制海苔烘烤区域温度点线图,如

表 2 隧道内材料基本参数
Table 2 Basic properties of metal materials

材料	导热率/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	比热容/ (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	密度/ (g · cm ⁻¹)
铜	386	381	8.90
钨	178	142	19.35
铝	202	871	2.70

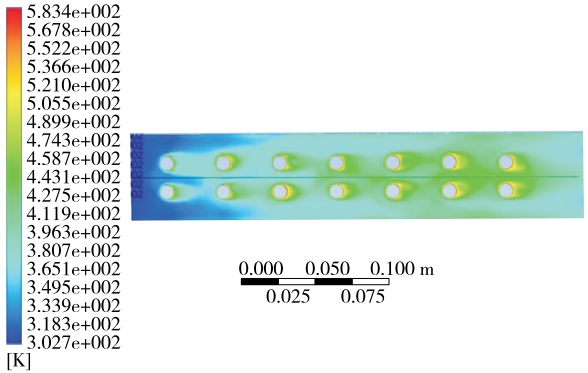


图 3 加热管上下排列 z_1 截面温度云图

Figure 3 Temperature nephogram of upper and lower arrangement z_1 section of heating pipe

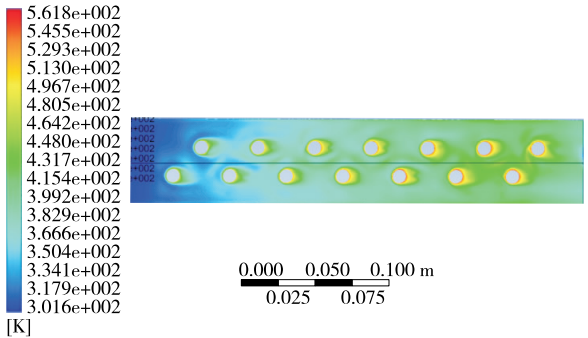


图 4 加热管上下错位排列 z_2 截面温度云图

Figure 4 Temperature nephogram of staggered z_2 section of heating tubes

图 5 所示。

对比图 5 中的 z_1 、 z_2 横截面温度点线图,可以看出加热管上下对称排列温度 A 相对于上下错位排列 B 升温要快,A 曲线温度明显高于 B 曲线。加热管上下排列方式,炉内温度在 0.1 m 处开始温度趋于平稳,相较于上下加热管交错排列,其升温快,温度高,能有效确保夹心海苔辅料的融化与烤熟,在 0.25 m 处 A 曲线温度下降较快,在实际生产中可降低夹心海苔出现糊焦的概率。A 曲线出口降温曲线相较于 B 曲线更为平滑,有利于辅料的逐渐冷却,减少孔隙的产生,有助于提升夹心海苔的口感与品质,因此综合分析选取上下对称排列 A 更适合于实际夹心海苔生产。

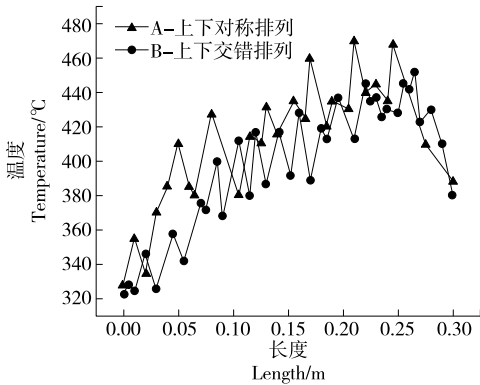


图 5 夹心海苔烘烤界面温度分布曲线图

Figure 5 Broken line diagram of temperature in seaweed baking area

2.4 隧道截面平均温度分布系数

隧道中心界面温度分布均匀性对夹心海苔烘烤过程有着重要的影响,温度分布越均匀夹心海苔烘烤质量越好,相反温度分布不均容易造成夹心海苔产品出现残次现象。为了表现隧道内温度分布均匀性,通过 Fluent 软件导出夹心海苔烘烤截面温度数据,划分 1 000 处温度测量点,采用数学公式求取截面平均温度、方差、标准差表达温度的波动状况,方差越小波动越小。在 Fluent 后处理中将选定夹心海苔烘烤界面温度数据导出,计算截面平均温度,计算公式为^[6]:

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_j, \quad (1)$$

$$r = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (t_j - \bar{t})^2}, \quad (2)$$

式中:

$\bar{t}$ ——截面平均温度,K;

n ——截面测量点数量;

t_j ——截面测量点温度,K;

r ——截面内温度分布标准差。

2.5 多因素正交仿真试验

为选择最佳的仿真参数组合,仿真试验选择加热管间距、加热管数量、加热区长度 3 个参数作为因素,设计正交试验如表 3、表 4 所示。

由表 4 可知,加热管间距对于隧道内温度分布影响最大,其次是加热管数量,最后加热区长度,最优因素组合为加热管数量 30 根,安装间距 220 mm,加热区 1 000 mm。为了验证仿真结果的可靠性,后续与企业合作制备一台试验样机进行实地试验测试,测试包括测量隧道各区域温度升温速度,温度波动状况,以及温度控制系统对加热装置的控制效果,即测量控制器输出端电压的变化,测量隧道内多处温度沿炉体分布情况,记录夹心海苔糊粘现象等。

表 3 仿真试验因素水平表

Table 3 Simulation test factor level table

水平	A 加热管间距/mm	B 加热管数量	C 加热管长度/mm
1	170	26	700
2	190	30	1 000
3	220	34	1 300

表 4 正交试验设计及结果

Table 4 Orthogonal experimental design and results

试验号	A	B	C	隧道截面温度 标准差
1	1	1	1	42.562
2	1	2	2	40.227
3	1	3	3	43.108
4	2	1	2	34.356
5	2	2	3	36.227
6	2	3	1	38.435
7	3	1	3	23.138
8	3	2	1	21.206
9	3	3	2	24.384
k_1	41.966	33.352	34.068	
k_2	36.340	32.553	32.989	
k_3	22.909	35.309	34.158	
极差	19.057	2.756	1.169	

3 模糊 PID 温度控制系统设计

3.1 硬件选择

模糊 PID 控制系统主要包括:温度控制器、加热管、调压器和温度传感器。选用 CH-902 温度控制器,调节实际参数用于控制隧道内加热管的工作。温度传感器选用 PT-100 温度传感器,误差 $-0.5\sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,调压模块选用三相全隔离智能交流调压模块。

3.2 软件设计

传统的 PID 只能根据输入误差 e ,通过设定系数 K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 进行调节^[7-8]。而模糊 PID 控制系统在 PID 控制前加入模糊控制器,可以根据输入电压误差 e 和电压偏差率 ec 进行模糊推理,通过推理出的 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 系数与 PID 初始系数 K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 进行叠加得出最终调整后的系数 K_d 、 K_i 、 K_p 。此模糊 PID 控制结构是并行结构,系统响应时间快,具有良好的时效性和系统调节能力^[9]。模糊 PID 控制参数调整结构如图 6 所示, PID 控制方程如式(3)所示、模糊 PID 调整系数如式(4)~式(6)所示。

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (3)$$

式中:

$u(t)$ ——控制器输出值;

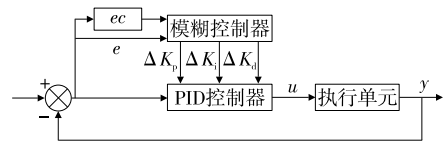


图 6 模糊 PID 控制参数结构

Figure 6 Fuzzy PID control parameter structure

$e(t)$ ——对比差值信号;

K_p ——比例常数;

T_i ——积分时间;

T_d ——微分时间。

$$K_p = \Delta K_p + K_{p0}, \quad (4)$$

$$K_i = \Delta K_i + K_{i0}, \quad (5)$$

$$K_d = \Delta K_d + K_{d0}. \quad (6)$$

温度控制流程框图如图 7 所示。

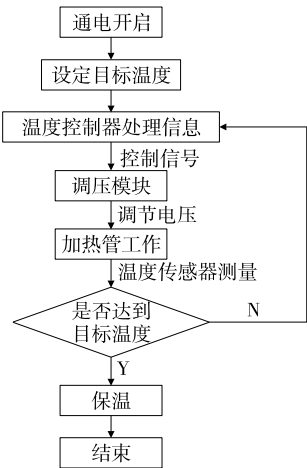


图 7 温度控制流程图

Figure 7 Temperature control flow chart

4 试验研究与结果分析

为验证该仿真结果的可靠性,在江苏连云港市大阳机械厂进行试验样机的组装与试验测试,室内温度 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度适宜,夹心海苔片张重量约 4 g,辅料重量约 20 g,辅料奶粉与糖充分混合,手动均匀播撒在紫菜片上,喷水湿润后进入烤炉,烘烤温度 $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,烘烤时间约 40 s,夹心海苔烘烤工作稳定时,记录试验数据。

4.1 隧道内温度均匀性测试

在夹心海苔稳定烘烤过程中,利用 PT100 温度传感器分别对隧道内不同区域进行测量,记录测量的温度信息,绘制隧道内温度分布曲线,如图 8 所示。

由图 8 可知,采用分段式加热控制方式的烘烤装置,其内部温度变化曲线与仿真试验结果相似,隧道口加热区升温较快,保温区域温度分布较为平缓,隧道内温度误差 $\leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于温度传感器测量的是隧道内流动气体的温度,测量位置实际温度与海苔受热温度可能存在 $2\sim$

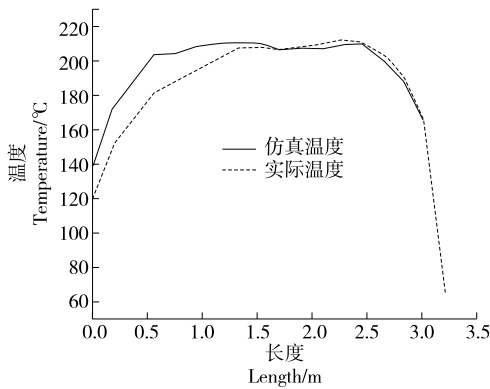


图 8 温度分布曲线

Figure 8 Temperature distribution curve

5℃的偏差。考虑到该装置加热区温度较高,此处误差属于次要影响因素,暂不单独考虑。

4.2 夹心海苔糊粘性测试

利用传统烘烤装置与优化的试验样机进行夹心海苔烘烤测试,连续烘烤 6 h,每隔 30 min 记录夹心海苔糊粘次数,如表 5 所示。

与传统夹心海苔烘烤设备对比,优化后夹心海苔成品色泽鲜绿,表面平整,优化的设备实际糊粘次数≤2次/h,

表 5 夹心海苔烘烤过程中糊粘现象次数

Table 5 Times of sticking phenomenon in the baking process of sandwich seaweed

烘烤时间/min	传统夹心海苔烘烤装置			优化的夹心海苔试验样机		
	测试 1	测试 2	测试 3	测试 1	测试 2	测试 3
30	1	2	2	0	0	0
60	3	3	4	0	0	1
90	3	4	3	0	1	0
120	4	3	4	1	1	0

在夹心海苔隧道式烘烤设备糊粘次数≤3 次/h 要求范围之内,满足企业实际生产要求。

4.3 夹心海苔实际烘烤质量检测试验

测试夹心海苔隧道式烘烤炉生产速率是否达到企业生产指标 1 000 片/h,质量一致性误差≤5%。为了保证夹心海苔烘烤产能测试的准确性,连续记录 5 h 夹心海苔的生产总量,取其平均值,计算质量一致性系数。采用每隔 20 min 称重的方式进行测量,并通过计算夹心海苔质量均匀度变异系数来验证夹心海苔隧道式烘烤装置是否符合生产标准。记录夹心海苔隧道式烘烤装置生产效率如表 6 所示。

表 6 夹心海苔智能化隧道式烘烤装置生产效率

Table 6 Production efficiency of intelligent tunnel baking device for sandwich seaweed

时间段	夹心海苔 1/3 h 产量/g			总质量/g	产量/片	平均值/g	质量变异系数/%
	前 20 min	中间 20 min	后 20 min				
第 1 h	9 363	9 661	9 743	28 767	1 027	9 589	2.1
第 2 h	9 351	9 661	9 712	28 724	1 025	9 575	2.0
第 3 h	9 466	9 686	9 723	28 875	1 031	9 625	1.4
第 4 h	9 437	9 684	9 714	28 835	1 029	9 612	1.5
第 5 h	9 454	9 717	9 751	28 922	1 032	9 640	1.6

由表 6 可以看出,夹心海苔隧道式烘烤装置在连续工况下,单位时间内夹心海苔产量均匀。相较于企业对于新型夹心海苔隧道式烘烤装置要求,机器双条作业产能 1 000 片/h,夹心海苔成品质量一致性误差≤5%。优化的夹心海苔隧道式烘烤设备实际成品质量一致性误差≤2.1%,平均产能为 1 000~1 040 片/h。

5 结论

研究采用仿真与试验相结合的方式,完成对夹心海苔烘烤装置的设计及优化,相较于以往夹心海苔隧道式烘烤设备,研究设计的夹心海苔烘烤装置具有成本低、产量稳定、标准化程度高等优势。从研究结果不难分析出,对夹心海苔进行隧道式烘烤过程中,加热管的均布程度会较大程度地影响夹心海苔成品的质量,其结果呈现出:加热管均布程度越高,烤制过程中热量越均匀,产品的成品质量越高。但研究仅验证了隧道式海苔烘烤设备的成

品质量与加热管均布程度的关系,至于其他各种烘烤形式的加热管均布程度对夹心海苔成品质量的影响,暂未进行深入研究,仍需业内同行深入拓展。

参考文献

[1] 何荣海, 马海乐, 余筱洁. 条斑紫菜 ACEI 抑制肽的超滤分离与离子交换纯化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 146-150, 204.
HE R H, MA H L, YU X J. Ultrafiltration separation and ion exchange purification of ACEI inhibitory peptides from Porphyra yezoensis[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 146-150, 204.
[2] 张金昂. 新型紫菜产品工艺研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013: 2.
ZHANG J A. Research on the process of new seaweed products[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013: 2.

(下转第 179 页)

- [J]. Heilongjiang Animal Reproduction, 2021, 29(3): 47-49, 54.
- [10] 熊磊. 长货架期低热量发酵骆驼乳产品研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016: 35-42.
- XIONG L. Research on long shelf life low calorie fermented camel milk products[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016: 35-42.
- [11] WANG L, HE Y, SWANSON O S, et al. Optimization of medium composition and culture conditions for cell multiplication of a high quality milk beer fermentation yeast (*Kluyveromyces marxianus*) [J]. Food Science and Technology Research, 2020, 26: 351-361.
- [12] WANG L, ZHONG H, LIU K, et al. The evaluation of kefir pure culture starter: Liquid-core capsule entrapping microorganisms isolated from kefir grains [J]. Food Science and Technology International, 2016, 22: 598-608.
- [13] 王伟佳, 高晓夏月, 刘爱国, 等. 不同热处理无乳糖酸奶与普通酸奶品质的比较[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(5): 99-104.
- WANG W J, GAO X X Y, LIU A G, et al. Comparison of quality between lactose free yogurt and regular yogurt with different heat treatments[J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(5): 99-104.
- [14] SON S, LEWIS B A. Free radical scavenging and antioxidative activity of caffeic acid amide and ester analogues: Structure-activity relationship [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(3): 468-472.
- [15] 杨希娟, 张杰, 党斌, 等. 西藏灵菇中产胞外多糖假肠膜明串珠菌发酵性能及流变学特性研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(4): 106-110, 115.
- YANG X J, ZHANG J, DANG B, et al. Study on fermentation performance and rheological properties of leuconostoc pseud oenterica producing exopolysaccharide in Xizang Linggu[J]. Food Industry Technology, 2017, 38(4): 106-110, 115.
- [16] 赵晓, 杜琨, 张媛. 菊粉对合生元酸奶质构、流变学特性和微观结构的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 72-77.
- ZHAO X, DU K, ZHANG Y. The effect of inulin on the texture, rheological properties, and microstructure of synbiotic yogurt[J]. Food Industry Technology, 2023, 44(1): 72-77.
- [17] 韩秋煜, 许玮宸, 李雪飞, 等. 绵羊酸奶与山羊酸奶品质和风味的对比[J]. 安徽农业大学学报, 2022, 49(4): 681-686.
- HAN Q Y, XU W C, LI X F, et al. Comparison of quality and flavor between sheep yogurt and goat yogurt[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2022, 49(4): 681-686.
- [18] DOMAGATA J. Instrumental texture syneresis and microstructure of yoghurts prepared from goat, cow and sheep milk [J]. International Journal of Food Properties, 2009, 12(3): 605-615.
- [19] 孙鹏伟, 刘娅妮, 李然, 等. 不同添加量的双孢蘑菇粉对酸奶流变学和质构特性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(9): 54-61.
- SUN P W, LIU Y N, LI R, et al. The effect of different dosages of agaricus bisporus powder on the rheological and textural properties of yogurt[J]. Food Industry Technology, 2024, 45(9): 54-61.
- [20] 张亦, 王亮, 吕自力, 等. 牛、山羊和骆驼酸奶营养与理化特性的比较研究[J]. 中国乳品工业, 2022, 50(10): 14-22.
- ZHANG Y, WANG L, LU Z L, et al. A comparative study on the nutritional and physicochemical properties of yogurt from cows, goats, and camels[J]. China Dairy Industry, 2022, 50(10): 14-22.
- [21] 罗倩, 田计均, 唐媛, 等. 山葵酸奶工艺及挥发性风味物质研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(7): 149-158.
- LUO Q, TIAN J J, TANG Y, et al. Research on the process and volatile flavor compounds of wasabi yogurt[J]. Food Research and Development, 2020, 41(7): 149-158.
- (上接第 100 页)
- [3] 王晓东. 即食型湿态调味紫菜关键技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015: 6.
- WANG X D. Research on key technologies of instant wet seasoning seaweed[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015: 6.
- [4] 杨延强, 易维明, 李志合, 等. 层流炉二维 PIV 自动控制系统[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 88-92.
- YANG Y Q, YI W M, LI Z H, et al. Two dimensional PIV automatic control system for laminar flow furnace[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 88-92.
- [5] 安载学, 王昱, 徐晓红, 等. 中日韩紫菜产业回顾与分析[J]. 农业与技术, 2011, 31(2): 7-11.
- AN Z X, WANG Y, XU X H, et al. Review and analysis of the seaweed industry in China, Japan, and South Korea[J]. Agriculture and Technology, 2011, 31(2): 7-11.
- [6] BURATTI C, PALLADINO D, MORETTI E. Prediction of indoor conditions and thermal comfort using CFD simulations: A case study based on experimental data[J]. Energy Procedia, 2017, 126(4): 115-122.
- [7] ABDELMALEK Z, KHAN I, KHAN M W A, et al. Computational analysis of nano-fluid due to a non-linear variable thicked stretching sheet subjected to Joule heating and thermal radiation[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(5): 11 035-11 044.
- [8] 丁力, 杨丽, 武德浩, 等. 基于 DEM-CFD 耦合的玉米气吸式排种器仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 48-57.
- DING L, YANG L, WU D H, et al. Simulation and experiment of corn air suction seeder based on DEM-CFD coupling[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 48-57.
- [9] 任守纲, 杨薇, 王浩云, 等. 基于 CFD 的温室气温时空变化预测模型及通风调控措施[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 207-214.
- REN S G, YANG W, WANG H Y, et al. A CFD based prediction model for spatiotemporal changes in greenhouse temperature and ventilation control measures[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2015, 31(13): 207-214.