

小颗粒(含粉料)物料射频干燥机设计与分析

Design and analysis of radio frequency dryer for small particles (containing powder)

凌铮铮¹任广跃^{1,2}段 续^{1,2}卢映洁¹陈 曦¹LING Zheng-zheng¹ REN Guang-yue^{1,2} DUAN Xu^{1,2} LU Ying-jie¹ CHEN Xi¹

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023;

2. 粮食储藏安全河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001)

(1. College of Food and Biological Engineering Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2. Collaborative Innovation Center of Grain Storage Security, Zhengzhou, Henan 450001, China)

摘要:针对小颗粒(含粉料)状物料干燥方式简单,热利用率低、获得的物料干制品质量得不到有效保障的问题,利用射频给热技术,设计了针对小颗粒(含粉料)物料中试射频干燥机。该设备由给热系统和输送系统两部分组成,给热系统主要包含射频发生器和翅片加热管,输送系统的主要传送部件为输送带。同时为保证射频干燥的均匀性,设计了物料厚度的限制装置,并以玉米颗粒为试验物料,对所设计的射频干燥机进行物料衡算及能耗分析。结果表明,干燥 1 000 kg 玉米颗粒,平均耗时 40.83 min,平均干燥能耗 4 241.438 9 kJ/kg · H₂O。该机可以较大幅度地提高热能利用率,保障物料干制品质量。

关键词:射频干燥;小颗粒物料;结构设计;能耗分析

Abstract: In view of the simple drying method of small granular (powder) materials, low heat utilization rate and ineffective guarantee of the quality of dry products, a pilot-scale radio frequency dryer for small granular (powder) materials was designed by using radio frequency heating technology. The device consisted of a heating system and a conveying system. The heating system mainly comprised an RF generator and a finned heating tube. The main conveying part of the conveying system was a conveyor belt. At the same time, in order to ensure the uniformity of RF drying, a material thickness limiting device was also designed. The corn granules were used as test materials to analyze the material balance and energy consumption of the designed RF dryer. The results show that the drying of 1 000 kg corn granules took

an average of 40.83 min and the average drying energy consumption was 4 241.438 9 kJ/kg · H₂O. The machine could greatly improve the heat energy utilization rate, and the dry product quality could be guaranteed. (Including powder) materials RF drying industrial application provides theoretical basis and technical support.

Keywords: radio frequency drying; small particle material; structural design; energy consumption analysis

射频(radio frequency, RF)是指频率在 3 kHz ~ 3 GHz 的一种高频交流变化电磁波的简称。由于射频是一种非电离形式的电磁能量,对正常的通讯有影响,故美国联邦通信委员会(The US Federal Communications Commission, FCC)规定在工业、科学和医学上应用的射频频率为 13.56, 27.12, 40.68 kHz^[1]。传统热风干燥主要通过热传导和对流将热能从热源传递到物料中,而射频干燥的特点是直接与物料中的极性分子或离子进行耦合,物料中的极性分子和离子受到高频率交变电场激发,正负离子发生离子迁移,进而产生热,对物料进行干燥^[2],因而比热风干燥效率更高。除此之外,射频干燥相对微波干燥而言,具备更好的均匀性、更稳定的温度控制和更佳的干燥质量^[3-4]。基于上述优点,射频干燥已在水果^[5]、豆类^[6]、香料^[7]和肉类^[8]中都有应用。然而射频干燥存在着“热点”和“冷点”的问题,致使干燥均匀性变差。为解决加热不均匀的问题,Uyar 等^[9]通过改变牛肉粒的尺寸、形状、射频电极的位置以及样品的介电性能,来改善射频干燥的均匀性。Zhu 等^[10]通过添加电磁波导体,来改变样品中的电场线分布,以减少中高水分马铃薯淀粉的冷点面积,改善射频加热均匀性问题。Chen 等^[11]通过模拟家用微波炉内冷冻土豆泥的旋转解冻,以期通过运动方式来改善射频加热的均匀性。Chen 等^[12]在之

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:31671907);智汇郑州·1125 聚才计划(编号:2016XT026)

作者简介:凌铮铮,男,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:任广跃(1971—),男,河南科技大学教授,博士后。

E-mail: guangyueyao@163.com

收稿日期:2019-05-31

前的研究基础上,模拟了小麦粒在传送带上的受射频加热的情况,其获得的结论是:在进行射频加热的过程中,运动可以改善射频加热过程的加热均匀性。综上所述,专家学者们通过不同手段、方法,改善了射频给热过程中的加热均匀性。

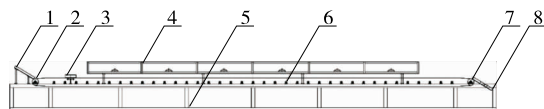
在实际的食品工业中,热风干燥小颗粒(含粉料)物料时,会造成物料堆积,颗粒飞散,并且对干燥室的环境造成严重破坏,导致物料的质量变差,能耗变高。进而导致小颗粒(含粉料)物料在食品工业上发展的滞后,不利于产业化的进行。然而,结合射频给热适合处理低水分含量物料的特点,射频干燥可以替代热风干燥在小颗粒(含粉料)工业上的应用,使干燥时物料处于相对静止状态,有效防止物料质量变差,能耗提高。近些年关于射频干燥在食品上的应用研究,较多的集中在食品材料的灭酶、灭菌和延长食品的货架期方面。Manzocco 等^[13]研究了射频对苹果中多酚氧化酶(PPO)和脂氧合酶(LOX)的影响,发现经射频处理后苹果样品的 PPO 和 LOX 含量有效降低,由此得到的苹果泥样品在感官品质上更好地被消费者所接受。Michael 等^[14]验证研究了射频对脱脂奶粉(NDM)中坂崎克罗诺杆菌和沙门氏菌的灭杀效果,得到射频灭杀 NDM 中的坂崎克罗诺杆菌和沙门氏菌的方法是一种更为快速、均匀的方法。Jiao 等^[15]研究发现热空气辅助射频技术处理烤咸花生后,大大延长了烤花生的货架期。然而在小颗粒(含粉料)物料干燥上应用射频技术鲜有报道,仅王丽萍^[16]研究了大麦苗粉在射频干燥的情况下,对其风味、营养成分的影响,表明射频干燥有利于增加大麦苗粉的风味。并未将射频干燥作为一种新型的、低能耗的、高质量的干燥方法去研究。

为将射频干燥技术在食品行业内推广应用,试验拟设计一台占地面积 $<30\text{ m}^2$ 、处理量可达到 $1\ 500\text{ kg/h}$ 、能耗 $<6\ 000\text{ kJ/kg}\cdot\text{H}_2\text{O}$ 的中试射频干燥机(干燥物料为玉米颗粒)。设计射频干燥机干燥小颗粒(含粉料)以射频源发射的射频为主要给热方式,翅片加热管辅助给热方式进行干燥,在物料充分干燥(物料的含水率 $<10\%$)的前提下,保证干燥物料干燥均匀、快速,为射频干燥小颗粒物料提供理论依据及技术支持。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

所设计的射频干燥机主要由射频源箱体、进料口、输送带、厚度限制装置、电加热装置、两边对称的辊轮、底部支架、出料口、动力装置、控制电路和显示器等部分组成,其外型尺寸为 $22\ 000\text{ mm}\times 2\ 000\text{ mm}\times 1\ 200\text{ mm}$,如图 1 所示。射频箱体为与两边支架连接起来的箱体,保证射频能量的充分利用;厚度限制装置的接口处有一缓和装置,以保证物料的均匀性;底部支架两边具有完整的



1. 进料口 2. 输送带 3. 厚度限制装置 4. 射频箱体 5. 底部支架 6. 电加热装置 7. 辊轮 8. 出料口

图 1 射频干燥机的总体结构示意图

Figure 1 Overall design drawing of radio frequency dryer

电回路,以保证整个过程都在控制之下进行;动力装置主要为输送带提供稳定的速度,以保证射频干燥的均匀性;控制电路包括温控模块和射频输出控制模块,温控模块控制电加热装置的输出功率,以适合不同水分含量的物料。

1.2 工作过程

将物料倾倒至进料口处,在重力的作用下物料向下滑动或滚动至与输送带的接口处,输送带在电动机的作用下带动物料向射频箱体方向前进,物料在进入射频箱体之前,会受到厚度限制装置的作用,使物料保持一种厚度均匀的状态进入到射频箱体。当物料进入到射频箱体内部时,物料内的水分子与射频源激发的电磁场进行耦合,水分子开始剧烈运动,由于分子间的摩擦和分子的运动产生巨大的热,并且由于深层分子先吸收能量,导致物料从内部开始产热,从内层到外层产生由高到低的梯度热,使物料内的水分子顺应热梯度,扩散到空气中^[17]。并且在两边风扇的作用下,将湿空气抽出,达到干燥的目的,物料在输送带上的整个过程,都受到电加热装置的影响,一方面来自电加热装置的热辐射,另一方面来自具有良好导热性能的输送带的直触加热,提高物料的温度,来减少射频加热的负担,整个射频加热过程中,物料都受到了温控模块的监视,当物料的温度超出给定的范围时,开始逐个停止射频发射器,防止物料受到高温作用后,导致物料的质量不佳。当物料到达出料口时,传感器检测物料的含水量是否达到要求,若物料已经达到安全贮藏的水分含量,并且在出料口被收集、贮藏,若还未达到目标含水量,则调整射频干燥机参数,重新干燥,直至物料达到含水量要求。

2 能耗核算

玉米是中国最主要的粮食作物,2017 年玉米产量 $25\ 907.07\text{ 万 t}$,占全国粮食总产量的 39.15% ,为将新鲜玉米及玉米产品(一般含水率为 $25\%\sim 30\%$)安全地贮藏,必须将其干燥至适宜仓储的含水率($13\%\sim 15\%$)。将玉米粉碎至颗粒状的玉米糝是一种较为广泛的加工贮藏方式,在玉米粉碎过程中,可充分利用粉碎机所散发的热量来降低玉米颗粒的含水率。故试验设计的射频干燥机是以玉米颗粒为物料,以期在产地生产高附加值的玉

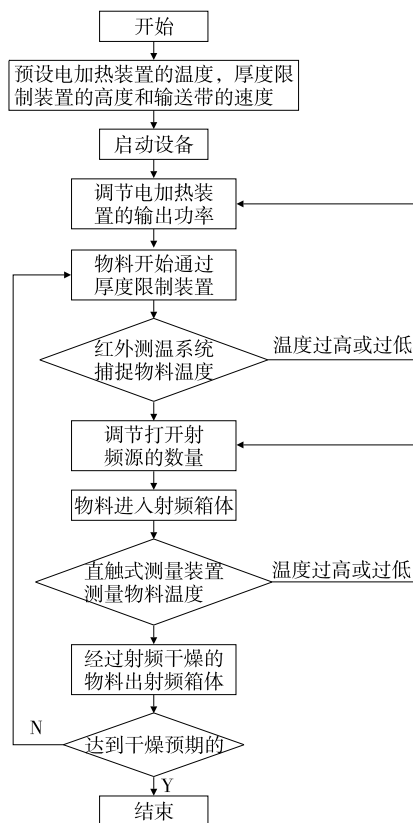


图2 射频干燥机的工作流程图

Figure 2 Flow chart of radio frequency dryer

米颗粒,获得质优、低耗的玉米颗粒干制品,为玉米颗粒的射频干燥工业化提供理论依据及技术支持。

中国的玉米热风干燥机热效率低、单位能耗大,在 $6\,700\text{ kJ/kg} \cdot \text{H}_2\text{O}$ 左右^[18]。为了验证设计射频干燥机射频干燥性能,暂时将电加热辅助模块关闭,仅考虑射频给热。设计该射频干燥机能处理 $1\,500\text{ kg/h}$ 的玉米颗粒,为保证玉米颗粒的品质(霉菌数量下降7个对数级),射频给热不得少于 35 min (料厚 100 mm 、极板间距 150 mm)^[19],玉米颗粒最高达到 $65\text{ }^\circ\text{C}$ ^[20],在此基础上进行能耗核算。玉米颗粒的比热 $C_p = 1.6\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$,水在 $65\text{ }^\circ\text{C}$ 的蒸发潜热 $L = 2\,345\text{ kJ/kg}$,玉米的热导率 $\lambda = 0.144\,4\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

(1) 将玉米颗粒加热到 $65\text{ }^\circ\text{C}$ 的理论能耗:

$$P_{ta} = M \times C_p \times \Delta T, \quad (1)$$

式中:

P_{ta} ——将玉米颗粒加热到 $65\text{ }^\circ\text{C}$ 的理论能耗, kW;

M ——单位时间的产量, kg/s ;

C_p ——玉米颗粒的比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

ΔT ——物料升高的温度, $^\circ\text{C}$ 。

(2) 蒸发玉米颗粒中水分需要的理论能耗:

$$P_{te} = M \times \frac{(m_1 - m_2)}{(100 - m_1)} \times L, \quad (2)$$

式中:

P_{te} ——蒸发玉米颗粒中水分需要的理论能耗, kW;

m_1 ——玉米颗粒的初始水含量, %;

m_2 ——玉米颗粒的终含水含量, %;

L ——水在 $65\text{ }^\circ\text{C}$ 的蒸发潜热, kJ/kg 。

(3) 理论功率:

$$W = P_{ta} + P_{te}, \quad (3)$$

式中:

W ——理论功率, kW。

代入数值经计算得 $W = 222.101\,1\text{ kW}$ 。

(4) 实际功率:由于该设计的能耗估算是基于从输电干线到射频发生器输出的能量,其转化率约为 $1:1.15$ 。则需实际功率为: $222.101\,1\text{ kW} \times 1.15 = 255.582\,4\text{ kW}$ 。

则设计该射频干燥机在仅打开射频给热模块时能耗为 $4\,089.318\,4\text{ kJ/kg} \cdot \text{H}_2\text{O}$,与热风干燥的能耗 ($6\,700\text{ kJ/kg} \cdot \text{H}_2\text{O}$)相比降低约 39% 的能耗,降低了制作干制品物料的消耗,为玉米颗粒的射频干燥工业化提供借鉴参考。

3 射频干燥机主要部件设计

3.1 射频箱体

基于以上的能量核算,为保证射频给热的连续性,以及设计的现实性,使干燥后的物料水分达到安全要求, Liu等^[21]研究了射频对小麦粉的干燥灭菌效果的验证,参考其对射频源的设计并结合工业实际,将射频箱体(图3)设计为6个射频箱连接组成,箱体总长 $18\,000\text{ mm}$,一个单独的箱体内部有2个射频源 (27.12 kHz , 22 kW , $50\text{ }\Omega$),共12个射频源组成。箱体规格为 $3\,000\text{ mm} \times 1\,200\text{ mm} \times 500\text{ mm}$,材料主要为铝。箱体之间连接致密,箱体与底部支架连接稳固,保持在输送带上进行射频干燥的密闭性,防止电磁辐射外泄。

3.2 输送机

为保证设备各部分连接紧密,依照各部分参数设计,以及设备占地面积的合理性,将设备主体框架的输送机整体规格设计为 $20\,000\text{ mm} \times 1\,000\text{ mm}$ 。依据以上核算内容,将输送带带速定为 23 m/h ,输送带的主要材料涂棉帆布,表面涂有丁苯橡胶 (Styrene Butadiene Rubber, SBR),SBR可以使输送带表面光滑,提高输送带的紧密

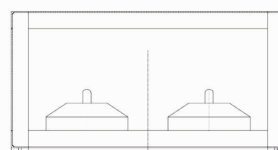


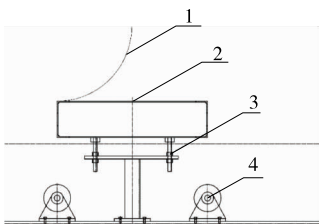
图3 射频箱体简图(左视图)

Figure 3 Schematic diagram of radio frequency cabinet (left view)

程度,不致使物料漏于设备内,减短设备的维护周期,SBR 还使输送带耐受高温,涂后可使输送带耐受 140 ℃ 高温,可达到 T2 等级的耐热等级^[22]。输送机两端与进料口、出料口有紧密连接,以保证物料不外漏以减少损失。

3.3 厚度限制装置

厚度限制装置位于进料口与射频箱体之间,为防止物料倾倒过快导致物料堆积于厚度限制装置前方,故设计距离进料口 800 mm,以保证物料在进入箱体时保持物料厚度均一,分布均匀。厚度限制装置的主材料为铝合金,为符合装置各个部分嵌合紧密,将装置的规格定为 1 000 mm×150 mm,高度可以根据物料、产量、含水率的实际情况来调整(范围为 50~180 mm),如图 4 所示。装置上方设有一个 1/4 圆的缓和设计,目的是防止从进料口输送过多物料,导致物料堆积,或物料直接越过厚度限制装置,堆积在物料的上方进入射频干燥机,导致物料的厚度不均匀,对射频干燥的质量造成影响。



1. 物料缓和设计 2. 厚度限制盖 3. 高度调节螺栓 4. 电加热装置

图 4 厚度限制装置设计图(左视图)

Figure 4 Design drawing of thickness limiting device (left view)

3.4 电加热装置

电加热装置位于输送带上下两个带面之间,共 37 个单独的翅片电加热发射器,曾炜杰等^[23]模拟了翅片电加热管的温度分布情况,为防止加热片之间距离过近,导致温度分布局部过高,电加热装置之间间隔 600 mm,组成联合的射频干燥机的电加热辅助模块,在数控模块的调控下,对射频干燥机进行辅助给热。翅片电加热管与普通元件相比散热面积扩大了 2~3 倍,即翅片元件所允许的表面功率负荷是普通元件的 3~4 倍。由于元件的长度缩短,使得本身的热损失减小,在相同的功率条件下,具有升温快、发热均匀、散热性能好、热效率高、使用寿命长、成本低等优点^[23]。其主材料为不锈钢、改性氧化镁粉、高电阻电热合金丝、不锈钢散热片等,管径 12 mm,工作电压 220 V,功率 1 000 W,如图 4 所示。

3.5 动力装置

设计射频干燥机的动力来源主要由电动机提供,电动机位于进料口的侧方。电动机及减速器、轴承座等均应安装在由地脚螺栓固定的底座上,以防止向任何方向

移动,保持结构的稳定。电动机为卧式鼠笼通用型电动机,电动机应装有冷却风扇,完全封闭,符合防尘标准(DIP),电机防护等级采用 IP54,来确保电动机工作过程中的安全。输送机的托辊直径 300 mm,输送机的托辊采用的轴承为滚珠轴承,以保证输送机轴承的使用寿命。

4 试验验证

基于上述设计,按图 5、6 组装相应的中试样机,样机机组供电输入电源为三相五线 380 V,射频输出频率 27.12 kHz,单个射频源输出功率 22 kW(功率可调),干燥量 1 500 kg/h,使用环境温度 -5~40 ℃,进料口高度 100 mm,传送带带宽 1 000 mm(食品级,16 mm 厚),输送带线速度 23 m/h,传送电机功率为单相 -0.75 kW(电子调速),机组尺寸 22 200 mm×2 050 mm×1 210 mm(长×宽×高),机组与设计总体误差 <5%,样机主体材料为铝合金和不锈钢,验证射频干燥机的干燥性能。

挑选无虫无害的新鲜玉米粒,经粉碎机粉碎为新鲜玉米颗粒。依据上述设备描述,在此基础上进行试验验证。每次试验玉米颗粒质量为 1 000 kg。

由表 1 可知,干燥 1 000 kg 玉米颗粒,平均耗时

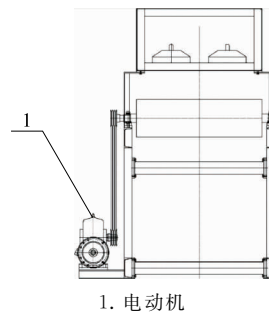


图 5 射频干燥机设计图(左视图)

Figure 5 Design drawing of radio frequency dryer (left view)

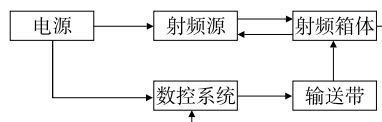


图 6 射频干燥机主要部分关系图

Figure 6 Diagram of main parts of radio frequency dryer

表 1 验证实验结果

Table 1 Verification test results

试验号	干燥结束时间/min	平均干燥能耗/(kJ·kg ⁻¹ ·H ₂ O)	物料最终含水率/%
1	41.5	4 225.367 4	9.6
2	42.0	4 324.216 8	9.5
3	39.0	4 174.732 4	9.8

40.83 min,比预测耗时多 2.07%;平均干燥能耗 4 241.438 9 kJ/kg · H₂O, 比设计能耗 (4 089.318 4 kJ/kg · H₂O)高 3.72%;玉米颗粒最终含水率都达到目标值。较现有的热风干燥能耗 (6 700 kJ/kg · H₂O)降低约 36.7%。综上,所设计的射频干燥机基本符合预期。

5 结论

针对小颗粒(含粉料)物料的干燥要求,结合热力学、动力学和电磁学原理,设计了一款针对性较强的射频干燥机。该设备将射频加热与热空气辅助加热结合起来,通过对物料内的质传热进行分析,合理利用热梯度,构建适宜温度梯度,在保证不破坏物料质量的前提下,使物料从内部加热,加快水分子从物料内部扩散至外部的速率,并且运用动力学原理,缓解了射频加热不均匀的问题。整个射频干燥机都在数控系统的控制下,对整个射频干燥过程进行多重控制,使射频干燥过程更加精准高效,不仅节省了人力物力,满足了食品工业上对产品的要求,而且保证了产品的营养成分不流失,提高了产品价值,延长了产品的货架期。然而,试验针对的小颗粒(含粉料)物料所设计的射频干燥样机在进行验证时,仅采用玉米颗粒为试验样品,为保证设计的科学性,仍需对其他小颗粒(含粉料)物料进行进一步的验证。

参考文献

- [1] GUO Chao-fan, MUJUMDAR A S, ZHANG Min. New development in radio frequency heating for fresh food processing: A review[J]. Food Engineering Reviews, 2019, 11(1): 29-43.
- [2] ZHOU Xu, WANG Shao-jin. Recent developments in radio frequency drying of food and agricultural products: A review[J]. Drying Technology, 2019, 37(3): 271-286.
- [3] 邓云,王竹怡,钟宇,等.射频技术及其在低水分活度食品中的应用[J].食品与机械,2013,29(3):250-253.
- [4] FIORE A, DI MONACO R, CAVELLA S, et al. Chemical profile and sensory properties of different foods cooked by a new radiofrequency oven[J]. Food Chemistry, 2013, 139(1/2/3/4): 515-520.
- [5] ZHOU Xu, XU Ru-zhen, ZHANG Bei-hua, et al. Radio frequency-vacuum drying of kiwifruits: Kinetics, uniformity, and product quality[J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 11(11): 2 094-2 109.
- [6] JIAO Shun-shan, JOHNSON J A, TANG Jie, et al. Dielectric properties of cowpea weevil, black-eyed peas and mung beans with respect to the development of radio frequency heat treatments[J]. Biosystems Engineering, 2011, 108(3): 280-291.
- [7] KIM S, SAGONG H, CHOI S H, et al. Radio-frequency heating to inactivate *Salmonella Typhimurium* and *Escherichia coli* O157:H7 on black and red pepper spice[J]. International Journal of Food Microbiology, 2012, 153(1/2): 171-175.
- [8] KIM J, PARK J W, PARK S, et al. Study of radio frequency thawing for cylindrical pork sirloin[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2016, 41(2): 108-115.
- [9] UYAR R, BEDANE T F, ERDOGDU F, et al. Radio-frequency thawing of food products: A computational study[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 146: 163-171.
- [10] ZHU Han-kun, LI Dong, LI Shu-jun, et al. A novel method to improve heating uniformity in mid-high moisture potato starch with radio frequency assisted treatment[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 206: 23-36.
- [11] CHEN Jia-jia, PITCHAI K, BIRLA S, et al. Modeling heat and mass transport during microwave heating of frozen food rotating on a turntable [J]. Food and Bioprocess Processing, 2016, 99: 116-127.
- [12] CHEN Jia-jia, LAU S K, CHEN Long, et al. Modeling radio frequency heating of food moving on a conveyor belt[J]. Food and Bioprocess Processing, 2017, 102: 307-319.
- [13] MANZOCCO L, ANESE M, NICOLI M C. Radiofrequency inactivation of oxidative food enzymes in model systems and apple derivatives[J]. Food Research International, 2008, 41(10): 1 044-1 049.
- [14] MICHAEL M, PHEBUS R K, THIPPAREDDI H, et al. Validation of radio-frequency dielectric heating system for destruction of *Cronobacter sakazakii* and *Salmonella species* in nonfat dry milk[J]. Journal of Dairy Science, 2014, 97(12): 7 316-7 324.
- [15] JIAO Shun-shan, ZHU Di-di, DENG Yun, et al. Effects of hot air-assisted radio frequency heating on quality and shelf-life of roasted peanuts [J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(2): 308-319.
- [16] 王丽萍. 大麦苗粉及其复合粉匣片的功能及制备工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 30-41.
- [17] 弗兰克. 传热和传质基本原理[M]. 葛新石, 叶宏, 译. 北京: 化学工业出版社, 2007: 530-558.
- [18] 翁拓, 吴家正, 范立, 等. 粮食干燥技术的能耗浅析[J]. 节能技术, 2014, 32(3): 210-213.
- [19] 郑阿娟. 玉米籽粒射频杀菌工艺研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017: 13-14.
- [20] 李里特. 食品物性学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 181-202.
- [21] LIU Shu-xiang, OZTURK S, XU Jie, et al. Microbial validation of radio frequency pasteurization of wheat flour by inoculated pack studies[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 217: 68-74.
- [22] 机械设计手册编委会. 机械设计手册: 带传动和链传动[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 3-7.
- [23] 曾伟杰, 谷波, 李强林. 圆柱型翅片管换热器变工况传热性能模拟与分析[J]. 制冷学报, 2019, 40(2): 28-35.