doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.038

不同试验条件下的大葱葱茎射频干燥特性研究

李学姣 刘光泽 阮培英 卢晓峰 程卫东 张银平 耿端阳
（山东理工大学农业工程与食品科学学院，淄博 255000）

摘要：通过分析不同试验条件下大葱葱茎在射频干燥过程中的温升、吸收功率以及失水率等，明确干燥物料及形态、容器材料及其放置高度、物料层厚、极板间距和加热目标温度等因素对于大葱葱茎射频干燥特性的影响，为后续大葱射频干燥研究提供合理高效的试验基本参数及其因素水平范围。在相同射频条件下，葱茎碎的温升速率约为葱茎片的3倍，且葱芯所需要的干燥时长约为葱白干燥时长的2倍，为避免干燥不同步导致葱白过度干燥，应将葱白与葱芯分别进行射频干燥。与聚四氟乙烯（PTFE）、聚乙烯（PE）材料的容器相比，葱茎碎在聚丙烯（PP）容器中的温升速率更高，因此PP材料更适合用作葱茎射频干燥的容器。在选定干燥物料及其形态与所用容器的基础上，通过试验发现层厚14 mm、质量650 g是葱白碎可以实现较快温升速率的最小层厚及质量；极板间距77~87 mm的范围既可以保证最大层厚28 mm的葱白在最小极板间距下不会发生过流和焦糊现象，也能保证最小层厚14 mm的葱白在最大极板间距下能较快速地到达75 ℃的目标温度。此外，将层厚14 mm和28 mm的葱白分别在容器垫高11 mm和不垫高时进行同样条件的射频干燥，发现不同层厚葱白在垫高和不垫高时吸收的射频功率存在不同程度变化，并且失水率变化趋势也有差别；层厚14 mm的葱白在不垫高时比垫高提高干燥效率约8%，而层厚28 mm的葱白在不垫高和垫高时具有相同的干燥时长。由于容器垫高11 mm对不同层厚葱白在相同射频干燥条件下干燥特性的影响不同，选择不垫高容器更利于葱白的射频干燥研究。

关键词：大葱葱茎；射频干燥；物料形态；容器材料；放置高度；物料层厚
中图分类号：TS255.36 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-1298(2024)S1-0356-08

Impacts of Experimental Factors on Radio Frequency Drying Characteristics of Scallion Stem

LI Xuejiao LIU Guangze Ruan Peiying LU Xiaofeng CHENG Weidong ZHANG Yinping GENG Duanyang
(*College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo* 255000, *China*)

Abstract: Through analyzing the temperature rise, radio frequency (RF) output power, and water loss during the RF drying of scallion stem under the different experimental conditions, the impacts of form of scallion stem to be heated and its parts, container material and its placement position, scallion layer height, electrode gap, and target temperature on the RF drying characteristics of scallion stem were clarified. The results could provide reasonable and efficient experimental parameters and factors' scopes for the subsequent research of scallion stem RF drying. It was found that the temperature rise rate of chopped scallion stem was about three times that of scallion stem slice, and the drying period required for scallion core was twice that for scallion white under the same RF parameters. Therefore, scallion white and scallion core should be RF dried separately to avoid excessive drying of scallion white. Compared with containers made of polytetrafluoroethylene (PTFE) and polyethylene (PE) material, the temperature rise rate of chopped scallion stem in polypropylene (PP) container was higher. Therefore, PP container was more suitable to be used for scallion stem RF drying. Using the selected PP container, the chopped scallion white with the minimum layer height of 14 mm and mass of 650 g could achieve a fast temperature rise rate. The range of electrode gap between 77 mm and 87 mm could ensure that the scallion white of the maximum layer height of 28 mm avoided overcurrent and burnt under the minimum electrode gap, and that the scallion white of the minimum layer height of 14 mm reached the target temperature of 75 ℃ quickly under the maximum

收稿日期：2024－07－20 修回日期：2024－09－20
基金项目：山东省现代农业产业技术体系岗位专家项目(SDAIT-02-12)和国家自然科学基金项目(32372008)
作者简介：李学姣(1996—)，女，硕士生，主要从事农产品干燥技术与装备研究，E-mail: 1505019730@qq.com
通信作者：阮培英(1979—)，女，副教授，主要从事农业物料初加工技术与装备研究，E-mail: maryruan@126.com

electrode gap. In addition, the scallion white with layer heights of 14 mm and 28 mm were subjected to the same RF drying at conditions of raising container 11 mm and no raise, respectively. It was found that RF power variations and water loss changing tendency under these two conditions for the scallion white with different layer heights were different. Moreover, the scallion white of 14 mm layer height with no container raise improved drying efficiency about 8% compared with that with container raise, while the scallion white of 28 mm layer height obtained the same RF drying periods under those two conditions. Therefore, the scallion white or its container without raise of 11 mm was more conducive to its RF drying research due to the different effects of container raise on the drying characteristics of scallion white with different layer heights under the same RF drying parameters.

Key words: scallion stem; radio frequency drying; material form; container material; placement position; layer height

0　引言

我国的大葱收获面积居世界首位且产量占世界总产量的23%[1]。大葱富含辛辣成分与有机酸等天然物质，具有抑菌和抗氧化等作用[2]，是一种重要的调味蔬菜。新鲜蔬果由于含水率高、呼吸代谢强而无法长时间存放，经过干制后则可显著延长其存贮时间，并且由于食用方便，干制蔬果在现代饮食中占据越来越大的比例[3]。葱类的干制目前主要针对小葱和香葱的葱茎与葱叶开展研究，旨在获得高效优质的干燥方法与工艺。通过研究发现香葱葱叶采用催化式红外联合热风干燥可比热风干燥提高效率14%~48%，而采用红外联合冷冻干燥则比真空冷冻干燥可缩短时长10%~34%[4]。对比热风干燥、真空冷冻干燥与真空冷冻-真空微波联合干燥对香葱品质的影响，结果显示联合干燥能耗低且香葱品质最好[5]。此外，研究也发现乙醇+维生素C的预处理可以缩短红外热风干燥时间约43%，并且可获得更好的葱茎品质[6]。

射频（Radio frequency，RF）加热属于介电加热，射频能量直接作用于物料内部的水分子等极性成分，使得物料内外同时受热，实现其快速高效干燥，因此在蔬果干制等领域广泛应用[7]，但将其应用于葱类的干燥目前还暂未有系统研究。由于射频具有选择性加热的特点，因此在研究物料的射频干燥时首先要确定合理的射频干燥试验条件，包括基本试验参数和因素及其水平范围。

物料层厚和极板间距是射频干燥研究中的重要参数，两者能够决定物料的温升速率[8]；干燥温度则会影响产品的品质：温度低会降低干燥效率，温度过高会导致物料营养过度损失。此外，物料干燥时的形态、使用的容器材料以及容器的放置位置[9-10]等均会影响物料的射频干燥特性等。基于此，本文通过分析在不同试验条件下大葱葱茎射频干燥过程中的温升、吸收射频功率以及失水率等，明确物料形态、容器材料及其放置高度以及物料层厚、极板间距和加热目标温度等因素对于大葱葱茎射频干燥特性的影响，以期为后续大葱射频干燥研究提供合理高效的试验条件。

1　材料与方法

1.1　试验原料

大葱采购自山东省淄博市淄博商厦超市（理工大学店），选取葱茎紧实、无损伤的大葱，切除根须和叶后置于（4±1）℃冰箱中保存。依据GB 5009.3—2016《食品安全国家标准　食品中水分的测定》[11]约每7 d测定一次含水率，测得其初始湿基含水率为89.98%~90.70%。

1.2　试验设备和仪器

图1为本研究采用的GJD-10B-27Ⅱ-JY型自由振荡平行电极板式射频加热系统（河北华氏纪元高频设备有限公司）的结构示意图。该系统的额定输出功率为6 kW，工作频率为27.12 MHz，主要由功率发射单元、射频加热腔、热风辅助单元以及控制显示系统组成。其中加热腔中的极板尺寸为450 mm × 650 mm，其间距在50~300 mm范围内可调。

其他主要仪器包括101-2型电热恒温干燥箱（上海东星建材试验设备有限公司），UTP-313型0.01 g精

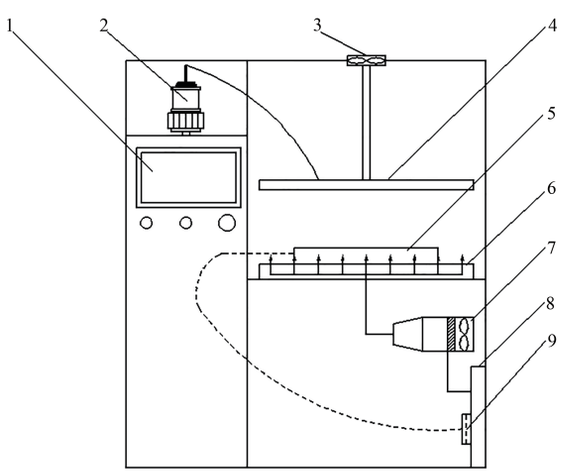


图1　射频加热系统结构示意图

Fig. 1　Structure diagram of RF drying system

1. 控制显示面板　2. 射频发射腔　3. 排风口　4. 上极板　5. 物料盘　6. 下极板　7. 热风系统　8. 控制中心　9. 光纤测温单元

度电子天平(上海花潮电器有限公司)和FB224L型0.000 1 g精度电子天平(上海舜宇恒平科学仪器有限公司)。

1.3 射频干燥方法

试验前将葱茎从冰箱中取出并在室温(20 ℃)中放置缓苏约10 h。射频干燥时,将一定形态的物料均匀平铺在托盘后放在射频加热腔的下极板中间位置,随后在设定的目标温度和极板间距下进行干燥,温度偏差设置为5 ℃,即当物料温度上升至目标温度时射频自动停止,当物料温度低于目标温度5 ℃时射频自行启动。物料的温度通过3个光纤温度传感器测得,测温点位置如图2所示。测得的物料温度和干燥过程中的射频输出功率和阳极电流(阳流)等均以每秒1次的采样频率由射频控制系统采集、显示和存储。射频干燥过程中每隔20 min将物料取出称量,质量记为m_i,对其翻搅约30 s后放回射频加热腔内继续干燥,并分别根据公式

$$W_i = \frac{m_{i-1} - m_i}{m_{i-1}} \times 100\% \tag{1}$$

$$M_i = \frac{m_i - m_0(1 - M_0)}{m_i} \times 100\% \tag{2}$$

式中 W_i——干燥20 min后物料的失水率,%

m_{i-1}——开始干燥时物料的质量,g

m_i——干燥20 min后物料的质量,g

M_i——干燥后物料的湿基含水率,%

m_0——物料的初始质量,g

M_0——物料的初始湿基含水率,%

计算该段时间内的失水率和干燥后物料的湿基含水率,当含水率低于8%时视为干燥至终点。

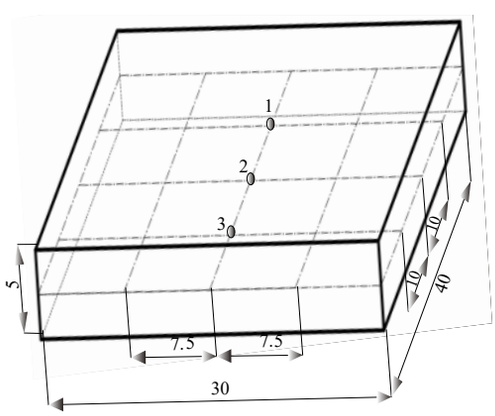


图2 测温点位置示意图

Fig. 2 Temperature measurement positions diagram

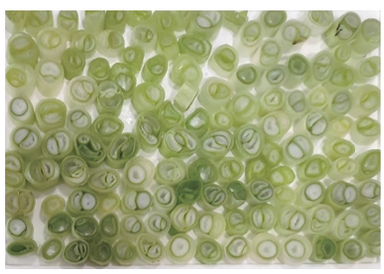
1.4 数据统计与分析方法

试验数据利用软件Microsoft Excel 2021和IBM SPSS Statistics 27.0进行整理、统计和分析,并使用Origin 2021根据射频系统导出的物料温度和射频输出功率等数据绘制物料干燥过程中的功率和温度-时间曲线图。

2 结果与讨论

2.1 物料形态

目前关于葱茎干燥的研究多是对葱茎切片后进行干燥,对于葱茎其他形态的干燥研究还未有报道。参照文献[12]的结论,将约300 g物料分别切成高5~8 mm的葱茎切片与宽5 mm、长7~10 mm的葱茎碎,在极板间距约为89 mm的条件下进行射频加热。葱茎切片和葱茎碎在容器中的放置样式如图3所示,两者在射频加热26 min后的温度-时间曲线如图4所示。



(a) 葱茎切片



(b) 葱茎碎

图3 葱茎切片和葱茎碎在容器中的放置样式

Fig. 3 Scallion stem slices and shreds in Teflon trays

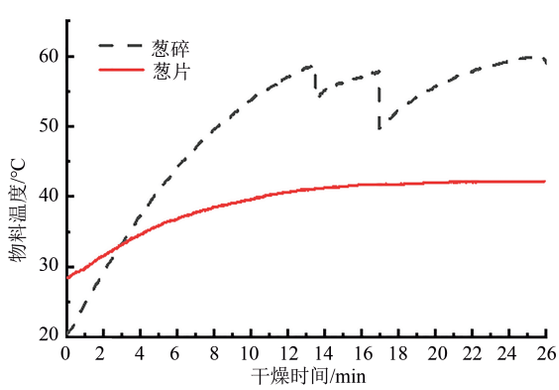


图4 葱片和葱碎的射频干燥温升曲线

Fig. 4 Temperature curves of scallion stem slices and shreds during RF drying

由图4可以看出,在相同射频条件下加热26 min后,葱碎温度升高了接近40 ℃,而葱片的温升仅为15 ℃,葱碎的温升速率明显高于葱片。这是由于葱茎切碎后物料分布得更为均匀和集中,与射频接触面积增加,能够吸收更多的射频能量,从而具有更高的温升速率[13]。文献[14]的研究也发现,胡萝卜切片的分割比例越低则射频干燥速率越高。因此,大葱葱茎在进行射频干燥时,

应选取葱茎碎的形态进行干燥。

2.2　容器材料

选取底面尺寸(长×宽)约为350 mm × 250 mm的聚四氟乙烯(PTFE)、聚乙烯(PE)和聚丙烯(PP)的3个长方形容器用以分析容器材料对于同样射频加热条件下葱茎干燥过程特性的影响。首先将约300 g葱茎碎分别放在PTFE和PE容器中,在物料层厚10 mm、极板间距85 mm的条件下射频加热140 min,物料的温度变化如图5所示。可以看出,使用PTFE和PE作为容器的葱茎碎在加热140 min后,最高温度均未超过60 ℃,且两个容器内的物料在相同射频条件下具有比较接近的温升过程,但PE材料的容器总体更具性价比。

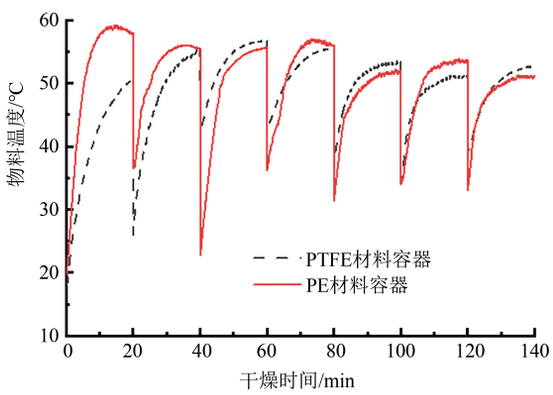


图5　PTFE和PE材料容器中葱茎碎的温度-时间曲线

Fig. 5　Temperature-time curves of chopped scallion stem in PTFE and PE containers

考虑到图5中的加热效果差是由于物料质量过低、层厚过小所致,因此将葱茎碎质量调整到450 g、层厚增至15 mm,分别装在PE和PP容器中在极板间距85 mm的条件下进行射频加热。图6和图7分别为两种容器中葱茎碎的温度-时间和射频输出功率-时间曲线。由此可知,葱茎在PP容器中吸收的射频功率更高,因此温升速率更高,且每次加热都能接近或超过60 ℃;PE容器中的葱茎相对来说加热效果要差些,但比图5中PE容器内的葱茎加热效果稍有改善。在射频加热过程中,当容器材料的介电常数与被加热物料的介电常数相近并且介电损耗远小于物料的介电损耗时,能获得最佳的加热效果[15]。由此说明,PP材料的介电特性与葱茎的介电特性更为匹配,因此相比PE材料更适用于葱茎射频干燥。

2.3　干燥物料

图8为15 mm层厚葱茎碎的初始状态和在85 mm极板间距、目标温度70 ℃条件下射频干燥260 min后的状态。如图8所示,当葱白干燥到较为干、脆时,葱芯仍保持较为柔韧鲜嫩的状态,即葱白和葱芯存在不能同步干燥的问题。原因在于葱芯部分较为厚实,细胞组织较为紧密,而葱白部分较薄、组织相对疏松。这种结构差异导致了两部分在干燥过程中的水分蒸发速率不同,从而

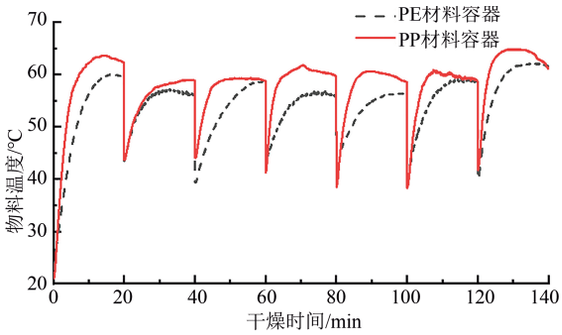


图6　PE、PP容器中葱茎碎的温度-时间曲线

Fig. 6　Temperature-time curves of chopped scallion stem in PE and PP containers

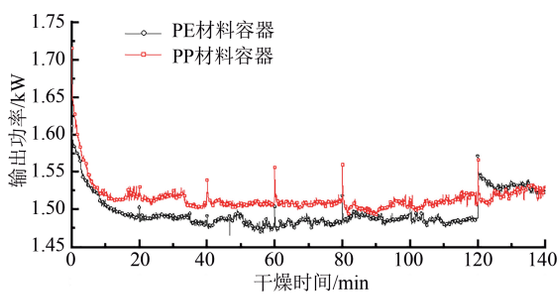


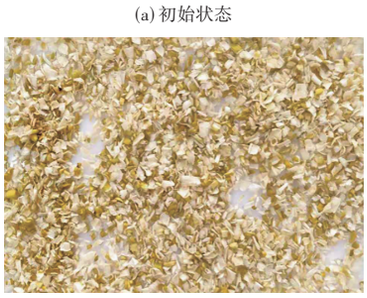
图7　使用PE和PP容器干燥时的射频输出功率

Fig. 7　RF output power of chopped scallion stem by using PE and PP containers

产生了干燥不均匀的现象。



(a) 初始状态



(b) 干燥260 min后状态

图8　葱茎碎初始状态和射频干燥260 min后状态

Fig. 8　Fresh chopped scallion stem and that after 260 minutes of RF drying

为验证两者的射频干燥不同步现象,将葱茎的葱白和葱芯切碎后分别在极板间距80 mm、目标温度75 ℃的条件下射频干燥到终点,并以520 g、层厚15 mm的葱白为参照,与520 g、层厚13 mm和600 g、层厚15 mm葱芯的干燥情况进行对比。图9为葱白和葱芯在射频干燥全程的失水率曲线。如图9所示,葱白干燥所需干燥时长

为200 min，而与其同质量和同层厚的葱芯所需的干燥时长则分别为380 min和420 min（未公开发表数据），即在相同的射频干燥条件下，葱芯所需要的干燥时长显著高于葱白（P<0.01），约为其2倍，且葱白每20 min的失水率均远高于葱芯的失水率。因此，大葱葱茎在进行射频干燥时，葱白和葱芯应分开处理，由此可避免出现葱白过度干燥的问题。

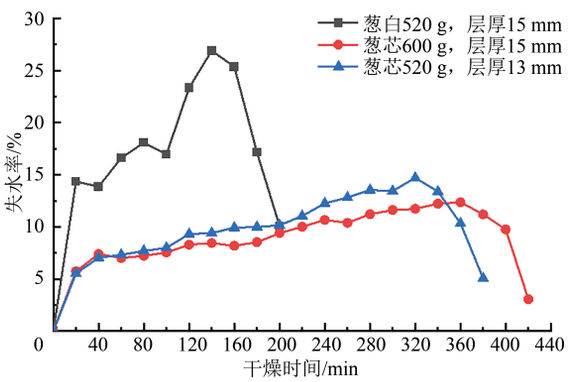


图9 葱白和葱芯的射频干燥失水率曲线

Fig. 9 Water loss curves of scallion white and scallion core during RF drying

2.4 物料层厚及质量

有研究表明在极板间距固定的情况下，物料层厚的变化会影响射频电场的分布：随着物料厚度的增加，上极板和物料表面之间的间距随之减小，导致射频电场分布更加集中、场强更大，从而使物料具有更快的加热速率[16]。为此，在明确了干燥物料及形态和使用容器的基础上，首先通过试验确定射频干燥时物料层厚与质量的最小值，使其具有较好的温升干燥特性。

由图5、6可知，层厚10 mm的物料温升速率低，层厚15 mm的物料在质量为450 g时的温升速率也未有显著提升。因此根据选定PP容器的底面积尺寸，对层厚14 mm、质量650 g的葱白进行射频干燥。图10为该物料在87 mm极板间距条件下的温度-时间曲线，可以看出该葱白在射频加热不到5 min可达到60 ℃，50 min可达到70 ℃，具有较快的温升速率。由此，650 g和层厚14 mm可作为大葱葱茎射频干燥研究的最小质量和层厚；根据选定的容器尺寸，最大层厚选定为28 mm，可避免物料层厚过厚影响失水以致降低总体干燥效率。

2.5 极板间距

在射频加热系统中，极板间距与系统的输出功率和加热速率有直接关系，极板间距的增加会导致阳流和输出功率的降低，这主要是由于极板间距的增加，会导致电场强度降低，射频能量在物料中的穿透能力减弱，从而影响加热效果[17]。为明确葱白射频干燥时，极板间距对阳流及射频输出功率的影响并能合理确定极板间距范围，分别将装有层厚14、21、28 mm葱白的容器，在极板间距70~95 mm的范围内由大到小调整，测定并记录3

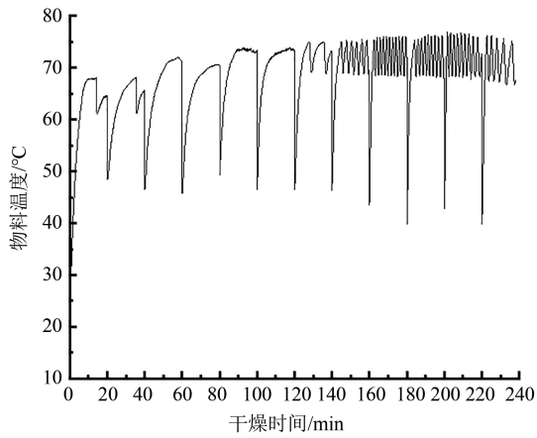


图10 层厚14 mm、质量650 g葱白的温度-时间曲线

Fig. 10 Temperature-time curve of scallion white with layer height of 14 mm and mass of 650 g

个层厚物料在不同极板间距下初始20 s的阳流和射频输出功率[18]，结果如图11所示。由图中可知，对于3个层厚的葱白来说，随着极板间距由70 mm增大至95 mm，阳流及射频功率均呈现不断减小趋势；当极板间距大于85 mm时，阳流与功率降低幅度减缓；当极板间距小于75 mm时，阳流和功率增加幅度最大。文献[19]在核桃的射频热风干燥过程中，也对负载物料在不同极板间距下的阳流变化进行了研究并依此确定了极板间距范围。极板间距过大，射频功率低会导致温升速率低[20]；而极板间距过低则会导致电流和功率过大，升温速率过快、温度过高，并会因热集中导致物料加热不均匀程度增大而出现焦糊以及过流“打火”现象[21]，从而影响物料品质。基于以上结论，极板间距范围可初步选为75~85 mm。

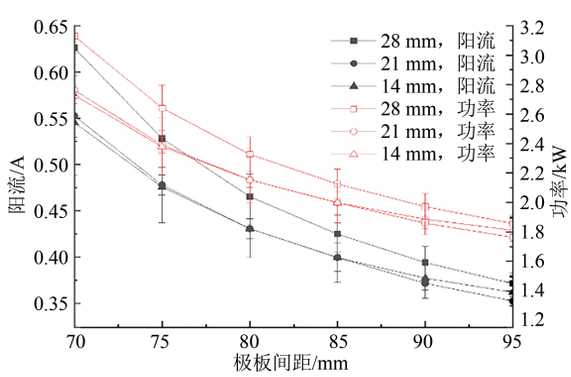


图11 不同层厚葱白的阳极电流/功率随极板间距变化的曲线

Fig. 11 Curves of anode current/ RF power of scallion white with different layer heights under different electrode gaps

在此基础上，将最大层厚28 mm的葱白在目标温度70 ℃、极板间距75 mm条件下干燥至终点，发现葱白会出现很多焦糊的现象，如图12所示；而在极板间距调高2 mm时，该现象有明显减少。因此，葱白射频干燥的合理极板间距范围可调整为77~87 mm。



图 12　极板间距 75 mm 时层厚 28 mm 葱白干燥至终点时的状态

Fig. 12　Scallion white of 28 mm layer height finishing RF drying with an electrode gap of 75 mm

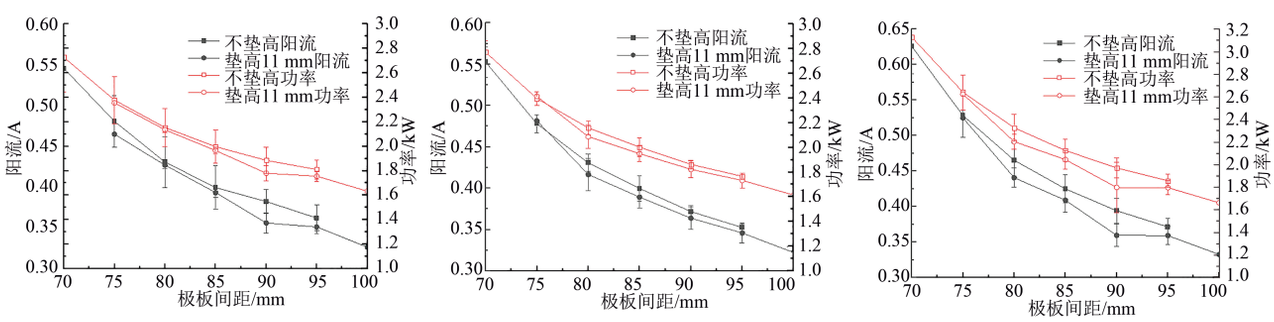
2.6　射频干燥温度

目前葱类干燥研究所用的温度范围在 50~90 ℃之间，温度过高会损失葱的品质，温度过低则会导致干燥速率变慢[22]。通过预试验发现，层厚 14 mm 的葱白在极板间距 77 mm、目标温度 50 ℃的条件下射频干燥，其失水率非常缓慢，在加热 560 min 之后葱白的含水率仍在 30% 以上。在此基础上，将最小层厚 14 mm 的葱白在最大极板间距 87 mm、目标温度 75 ℃的条件下射频干燥至终点，以验证最高温度设定为 75 ℃的可行性，其结果如图 10 所示。由图中的温度-时间曲线可知，葱白在射频加热约 7 min 后温度超过 65 ℃，在 127 min 时温度则可达到 75 ℃。因此，大葱射频干燥研究的温度范围可选为 55~75 ℃，这样既可避免太低的干燥效率，又能避免温度过高对物料颜色和维生素 C 含量等品质造成不良影响[23]。

2.7　物料放置高度的确定

射频干燥时物料的放置位置会影响物料周围与内部的射频电场的强度及其分布均匀性，从而影响物料干燥速率[24-25]。葱白射频干燥时，将其容器垫高 11 mm 可以增加容器底部与下极板之间的空隙，或可为葱白水分的蒸发提供更大的逸散空间，但同时也会影响射频电场的分布从而影响物料的干燥特性。通过对比极板间距 70~100 mm 范围内 3 个不同层厚葱白在垫高和不垫高两个不同放置高度时的初始阳流和功率，以及对比最大和最小层厚的葱白分别在垫高和不垫高条件下的射频干燥失水率，可以明确葱白射频干燥时物料放置高度对其干燥特性的影响。

图 13 为 3 个层厚的葱白在不同放置高度下于初始 20 s 内测得的阳流/功率-极板间距曲线。如图 13 所示，3 个不同层厚的葱白在不垫高和垫高时的初始阳流及功率均存在不同程度的差异：例如在极板间距 85 mm 下，层厚 14 mm 的葱白在垫高与不垫高时的差异很小，层厚 28 mm 的差异则稍大。为印证不同放置高度对不同层厚葱白的干燥特性影响不同，对层厚 28 mm 和 14 mm 的葱白分别在垫高 11 mm 和不垫高、极板间距 85 mm、温度 70 ℃条件下进行射频干燥至终点。图 14 为其失水率-时间曲线。由图 14 可知，层厚 28 mm 的葱白在垫高和不垫高时的干燥时长均为 320 min，但垫高 11 mm 时失水率稍低；而层厚 14 mm 葱白在不垫高时干燥时长为 240 min，比垫高时缩短 7.69%，不垫高时前期的失水率稍低、后期则与垫高的接近。垫高 11 mm 时失水率稍有下降，可能是因为将物料垫高后阻碍了湿热空气向上流动散失，从而影响葱白的失水率。图 15 则是层厚 28 mm 和 14 mm 的葱白在两种情况下干燥时的实际射频输出功率。如图 15 所示，层厚 14 mm 葱白在垫高 11 mm 前期的射频输出功率比不垫高稍高，后期则与不垫高的功率接近，与葱白失水率变化趋势基本一致；而层厚 28 mm 葱白在垫高 11 mm 时的射频功率整体略低于不垫高。



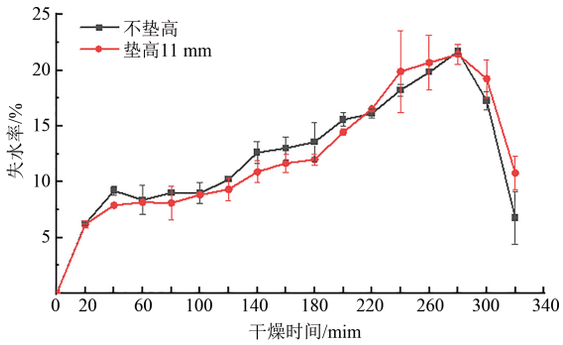
(a) 层厚 14 mm　　(b) 层厚 21 mm　　(c) 层厚 28 mm

图 13　各层厚葱白不同放置位置阳流/功率-极板间距曲线

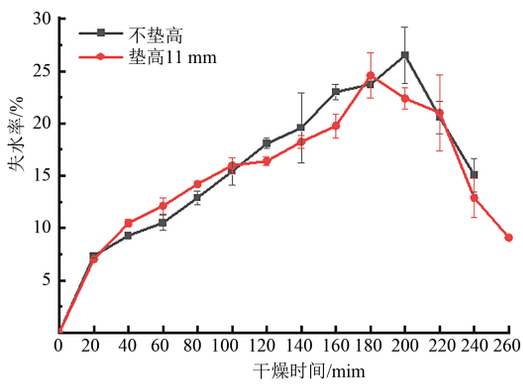
Fig. 13　Curves of anode current/power under different placement positions of scallion white with different layer heights

将层厚 14 mm 的葱白垫高与其层厚接近的高度后，对其射频电场的影响较大，因此垫高初期射频输出功率有所增加，失水率也随之改善；但随着干燥过程层厚的逐渐减小，垫高对于薄层葱白的射频输出功率虽稍有增加但可能对其射频电场的均匀性有负面影响[25]，同时也会减少热空气向上散失的空间，因此垫高后期的失水率反而低于不垫高的情况，使得层厚 14 mm 葱白在垫高时其总干燥时长反而增加、干燥效率下降。与之相比，层厚 28 mm 的葱白垫高不到其层厚 1/2 的高度后，射频电场及其输出功率没有明显变化，也就是垫高对厚层物料的射频电场影响小，因此除了失水率因散失空间被部分占据而略有减缓外并未引起干燥时长的变化。

基于层厚 14 mm 葱白在垫高 11 mm 时其干燥效率



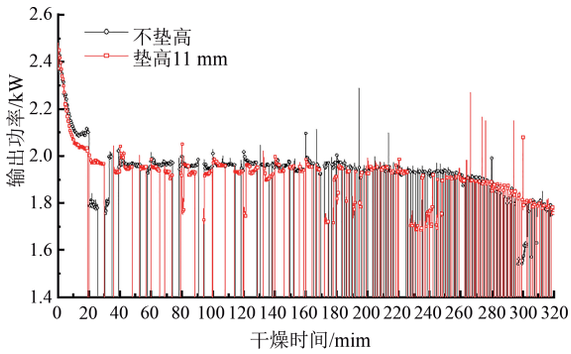
(a) 层厚28 mm



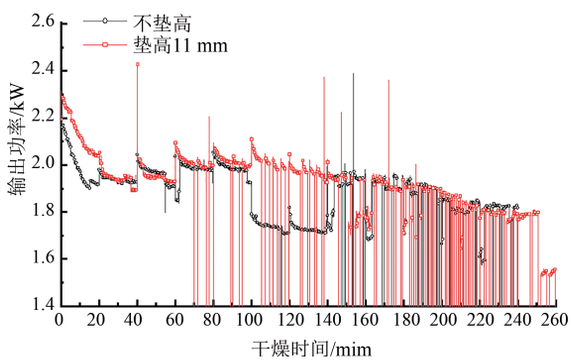
(b) 层厚14 mm

图14 层厚28 mm和14 mm的葱白在不同放置高度的失水率-时间曲线

Fig. 14 Water loss curves for scallion white under different placement positions with layer heights of 28 mm and 14 mm



(a) 层厚28 mm



(b) 层厚14 mm

图15 层厚28 mm和14 mm的葱白在不同放置高度的功率-时间曲线

Fig. 15 RF power curves for scallion white under different placement positions with layer heights of 28 mm and 14 mm

降低,而层厚28 mm葱白在垫高时的干燥时长却无明显变化,即垫高11 mm对不同层厚葱白在相同射频干燥条件下干燥特性的影响不同,为避免将容器垫高会引入新的变量、确保可以准确揭示葱白射频干燥规律,选择不垫高物料更利于葱白射频干燥研究。

3 结论

(1)在相同射频干燥条件下,葱碎的温升速率要高于葱片,且葱芯所需要的干燥时长显著高于葱白,因此将葱白碎作为射频干燥的物料及形态更为合理;与PE和PTFE容器相比,葱茎在PP材料容器中的温升速率更高,PP材料更适用于大葱葱茎射频干燥。

(2)在选定容器基础上,层厚14 mm、质量650 g的葱白是可以实现较快温升速率的最小层厚及质量;在极板间距75 mm及以下时,系统阳流明显增加,层厚28 mm的葱白在射频干燥时容易发生过流“打火”和焦糊现象;而极板间距过大时会降低薄层物料的温升速率、延长到达目标温度的时间从而影响整体干燥效率。因此,物料层厚、极板间距和目标温度应相互协调以确定合理的水平范围。

(3)不同层厚葱白在垫高11 mm和不垫高时的初始阳流及功率的差异程度不同;在同样条件下射频干燥至终点时,层厚14 mm葱白在不垫高时比垫高节约8%的射频干燥时长,而层厚28 mm葱白在不垫高和垫高时具有相同的干燥时长。基于垫高对不同层厚葱白在相同射频干燥条件下干燥特性的影响不同,选择不垫高物料或容器的形式更利于葱白射频干燥研究。

参 考 文 献

[1] 刘甲振, 耿爱军, 侯加林, 等. 国内外大葱播种技术与装备研究进展[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(4):104-108.
LIU Jiazhen, GENG Aijun, HOU Jialin, et al. Research status on sowing technology and equipment of scallion at home and abroad[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(4): 104-108. (in Chinese)

[2] 曹博雅, 蒲丹丹, 郑瑞仪, 等. SAFE-GC-MS结合GC-O法分析20种辛香型香辛料香气活性成分[J/OL]. 食品科学, http://link.cnki.net/urlid/11.2206.TS.20231206.1030.007.

[3] 朱经楠, 彭健, 辜青青, 等. 射频加热技术及其在果蔬干制中的研究应用进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(16):432-441.
ZHU Jingnan, PENG Jian, GU Qingqing, et al. Research progress in the application of radio frequency technology in fruit and vegetable drying[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(16): 432-441. (in Chinese)

[4] 顾晨. 香葱催化式红外联合干燥技术研究[D]. 镇江:江苏大学, 2023.
GU Chen. Catalytic infrared drying in combination with other drying technology of chives[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023. (in

Chinese）

[5] 金敬红，凌艺炜，姚正颖，等. 基于SPME-GC-MS技术的香葱干燥技术的优化研究[J]. 中国调味品，2023，48(9)：184－188.
JIN Jinghong，LING Yiwei，YAO Zhengying，et al. Optimization of scallion drying technology based on SPME-GC-MS technology[J]. China Condiment，2023，48(9)：184－188.（in Chinese）

[6] WANG X L，FENG Y B，ZHOU C S，et al. Effect of vacuum and ethanol pretreatment on infrared-hot air drying of scallion（*Allium fistulosum*）[J]. Food Chemistry，2019，295：432－440.

[7] ZHANG Y，PANDISELVAM R，ZHU H K，et al. Impact of radio frequency treatment on textural properties of food products：an updated review[J]. Trends in Food Science & Technology，2022，124：154－166.

[8] QU Y T，LAN R G，RAMASWAMY H，et al. Determining the top electrode voltage in free-running oscillator radio frequency heating of soybeans under different electrode configurations[J]. Food and Bioproducts Processing，2020，122：332－341.

[9] HUANG Z，ZHANG B，MARRA F，et al. Computational modelling of the impact of polystyrene containers on radio frequency heating uniformity improvement for dried soybeans[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies，2016，33：365－380.

[10] ZHENG A J，ZHANG B，ZHOU L Y，et al. Application of radio frequency pasteurization to corn（*Zea mays* L.）：heating uniformity improvement and quality stability evaluation[J]. Journal of Stored Products Research，2016，68：63－72.

[11] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. GB 5009.3-2016食品安全国家标准 食品中水分的测定[S]. 北京：中国标准出版社，2016.

[12] 李昊杰. 香葱节能干制工艺与品质控制[D]. 泰安：山东农业大学，2020.
LI Haojie. Energy saving drying technology and quality control of *Allium fistulosum* L.[D]. Taian：Shandong Agricultural University，2020.（in Chinese）

[13] 李洪岳，李青鸾，郑建军，等. 射频加热技术在粮食储藏与加工中应用研究进展[J]. 智慧农业(中英文)，2021，3(4)：1－13.
LI Hongyue，LI Qingluan，ZHENG Jianjun，et al. Recent advances on application of radio frequency heating in the research of post-harvest grain storage and processing[J]. Smart Agriculture，2021，3(4)：1－13.（in Chinese）

[14] 王晨晨. 预处理对胡萝卜切片的射频热风联合干燥工艺及其品质的影响研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2021.
WANG Chenchen. Influences of pretreatment on quality of carrot slices under radio frequency combined with hot air dehydration[D]. Yangling：Northwest A&F University，2021.（in Chinese）

[15] HUANG Z，ZHU H K，WANG S J. Computer simulation of radio frequency heating for insect control in dried soybeans[C]// Annual International Meeting of the American Society of Agricultural and Biological Engineers，2014.

[16] UYAR R，ERDOGDU F，MARRA F. Effect of load volume on power absorption and temperature evolution during radio-frequency heating of meat cubes：a computational study[J]. Food & Bioproducts Processing，2014，92(3)：243－251.

[17] 李瑞. 采后巴旦木的射频杀菌技术研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2019.
LI Rui. Pasteurization technologies of postharvest almonds using radio frequency heating[D]. Yangling：Northwest A&F University，2019.（in Chinese）

[18] 毛雨潇. 核桃的射频干燥杀虫技术研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2022.
MAO Yuxiao. Protocol development of radio frequency drying and disinfestation for walnuts[D]. Yangling：Northwest A&F University，2022.（in Chinese）

[19] ZHANG B，ZHENG A J，ZHOU L Y，et al. Developing hot air-assisted radio frequency drying for in-shell walnuts[J]. Emirates Journal of Food and Agriculture，2016，28(7)：459－467.

[20] 王昆. 射频加热系统上极板电压的模型验证和分布均匀性研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2016.
WANG Kun. Model validation and distribution uniformity on top electrode voltage of radio frequency heating systems[D]. Yangling：Northwest A&F University，2016.（in Chinese）

[21] ZHOU X，XU R Z，ZHANG B H，et al. Radio frequency-vacuum drying of kiwifruits：kinetics，uniformity，and product quality[J]. Food and Bioprocess Technology，2018，11：2094－2109.

[22] 王蓓，赵兴，马海乐，等. 香葱分段式变温催化红外干燥的特性及品质研究[J]. 现代食品科技，2019，35(11)：132－137.
WANG Bei，ZHAO Xing，MA Haile，et al. Characteristics and quality of Chinese chives dried by a temperature-segmented catalytic infrared system[J]. Modern Food Science and Technology，2019，35(11)：132－137.（in Chinese）

[23] 赵兴，吴本刚，马海乐，等. 香葱催化式红外干燥特性及品质研究[J]. 现代食品科技，2018，34(9)：182－189.
ZHAO Xing，WU Bengang，MA Haile，et al. Drying characteristics and quality attributes of Chinese chives by catalyzed infrared drying[J]. Modern Food Science and Technology，2018，34(9)：182－189.（in Chinese）

[24] CHEN L，WANG K，LI W，et al. A strategy to simulate radio frequency heating under mixing conditions[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2015，118：100－110.

[25] JIAO S S，DENG Y，ZHONG Y，et al. Investigation of radio frequency heating uniformity of wheat kernels by using the developed computer simulation model[J]. Food Research International，2015，71：41－49.