

自激热声振荡气流对白萝卜片 热风干燥过程的强化作用

张 晗¹ 张茗予¹ 赵华超¹ 李 兵¹ 吴中华^{1,2}

(1. 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222;

2. 天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室, 天津 300222)

摘要: [目的] 探究自激热声振荡对固体食品干燥过程的强化作用。[方法] 设计一种基于 Rijke 管谐振结构的脉动热风干燥装置, 以白萝卜片为研究对象, 考察热风温度 (100~140 °C)、气流流速 (1~7 m/s) 及料层厚度 (4~12 mm) 对干燥动力学与产品品质的影响。[结果] 该装置可稳定产生温度 140 °C、频率 147 Hz、声压级 94 dB 的自激脉动气流, 较传统非脉动干燥效率显著提升: 在 100 °C 工况下, 干燥时间由 165 min 缩短至 135 min (降幅 18%), 且随温度升高强化效果增强 (140 °C 时干燥速率提升 3 倍); 在优化参数组合 (温度 100 °C、风速 1 m/s、料厚 8 mm) 下, 白萝卜片收缩率 (67%)、复水比 (4.66) 及白度 (70.18) 均优于传统干燥的。[结论] 热声振荡通过周期性扰动减薄传热边界层, 显著强化热质传递效率, 同时减少高温对物料结构的破坏。

关键词: 干燥; 热声振荡; Rijke 管; 白萝卜; 产品品质

Enhancement effect of self-excited thermoacoustic oscillating airflow on hot air drying process of white radish slices

ZHANG Han¹ ZHANG Minyu¹ ZHAO Huachao¹ LI Bing¹ WU Zhonghua^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and Online Monitoring of Light Industry and
Food Engineering Machinery and Equipment, Tianjin 300222, China)

Abstract: [Objective] To investigate the enhancement effect of self-excited thermoacoustic oscillation on the drying process of solid foods. [Methods] A pulsating hot air drying device based on a Rijke tube resonator structure is designed. White radish slices are selected as the target material to study the effects of hot air temperature (100~140 °C), airflow velocity (1~7 m/s), and layer thickness (4~12 mm) on drying kinetics and product quality. [Results] The device can stably generate a self-excited pulsating airflow with a temperature of 140 °C, frequency of 147 Hz, and sound pressure level of 94 dB, which significantly improves drying efficiency compared to traditional non-pulsed drying methods. Under a 100 °C working condition, the drying time is reduced from 165 min to 135 min (an 18% decrease), and the enhancement effect increased with temperature (at 140 °C, the drying rate tripled). With optimized parameters (100 °C, 1 m/s airflow, 8 mm material thickness), the shrinkage rate (67%), rehydration ratio (4.66), and whiteness (70.18) of the white radish slices are improved compared to conventional drying. [Conclusion] Thermoacoustic oscillation enhances heat and mass transfer efficiency by periodically disturbing the thermal boundary layer, while also reducing structural damage to the material caused by high temperatures.

Keywords: drying; thermoacoustic oscillation; Rijke tube; white radish; product quality

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (编号: 31471618)

通信作者: 吴中华 (1977—), 男, 天津科技大学教授, 博士。E-mail: wuzhonghua@tust.edu.cn

收稿日期: 2025-02-17 改回日期: 2025-08-08

引用格式: 张晗, 张茗予, 赵华超, 等. 自激热声振荡气流对白萝卜片热风干燥过程的强化作用[J]. 食品与机械, 2025, 41(11): 50-57.

Citation: ZHANG Han, ZHANG Minyu, ZHAO Huachao, et al. Enhancement effect of self-excited thermoacoustic oscillating airflow on hot air drying process of white radish slices[J]. Food & Machinery, 2025, 41(11): 50-57.

食品干燥方式包括热风干燥、微波干燥、太阳能干燥、冷冻干燥等。热风干燥因其热源范围广,操作简单,干燥器投资成本低等优点,在食品干燥领域应用广泛;典型热风干燥器如电热烘箱、烘干隧道窑以及热风带式干燥机等,以及近年来发展较快的复合干燥技术,如微波—真空联合作用、红外—热风联合作用以及超声辅助干燥等^[1-3]。在传统热风干燥器中,风机将新鲜空气送入加热器,加热器(电加热器、蒸汽换热器或煤燃烧器)产生热量并传给空气,使之变成热风。热风以对流传热形式将热量传递给湿物料。因此,强化热风对流传热过程,可以提高食品干燥速率,缩短干燥时间,减少干燥能耗和品质劣变^[4-7]。增大热风与食品物料间相对速度是强化对流传热的方法之一,对应措施包括:①提高热风平均速度如流化床干燥器,但热风用量大将降低热效率,增加尾气处理负荷;②物料状态由静止变成运动,如振动床干燥器,但需要使用机械振动器;③脉动气流(也称脉冲气流),在保持热风平均风速不变下,改变热风瞬时速度,从而改变热风与物料相对速度,强化对流传热。相比提高热风平均速度,脉动气流热风用量少,干燥热效率高,近年来被广泛应用于农产品和食品领域^[8-11]。Pramudita等^[12]研究发现,利用300 Hz的脉动气流干燥乳清液滴,相比于连续热风干燥,增强了干燥传热传质过程,干燥时间降低了18.39%。

目前,脉动热风主要通过周期性调节风机转速或阀门开度实现,该方式具有主动调节、使用机械能、在干燥室外调节等特点。热声振荡是一种在声学空间结构内,使用热量激发空气脉动方法;即根据一定声学谐振结构设计干燥室,输入热量在干燥室内激发空气周期性振动,从而实现脉动热风。在该干燥方式下,输入干燥室热量的一部分用于加热空气,变成热风;另一部分用于激发热声振荡,使热风变为脉动气流,从而强化干燥对流传热过程。与传统脉动热风不同,热声振荡具有被动调节、使用热能,以及在干燥室内调节等特点。19世纪70年代,热声振荡现象在发动机燃烧领域研究较多,随后应用拓展到焚烧、干燥、气化等领域,也可应用于液体以及颗粒物料干燥领域^[13-15]。Wu等^[16]利用Helmholtz型脉动燃烧器产生的高速高温脉动热风,直接雾化并干燥高黏蛋清,与传统喷雾干燥相比,其能耗为2 900~3 500 kJ/kg,节省干燥能耗50%以上,蛋清颗粒表面光滑,蛋白质热变性小且功能保持完好。

针对固体食品物料如片、块类果蔬物料,研究拟设计一套基于Rijke管热声谐振结构的脉动热风干燥试验装置,以石英Rijke管为干燥室,采用感应加热方式输入热量,加热空气并同时激发热风振荡产生脉动热气流。以白萝卜片为原料,分析不同干燥条件下,白萝卜片脉动气流干燥特性与产品品质。并通过比较脉动/非脉动工况下

白萝卜片干燥试验数据,揭示热声振荡对干燥过程的强化效果,以促进热声振荡在固体农产品和食品干燥中的应用。

1 白萝卜片脉动热风干燥试验

1.1 原料与仪器

白萝卜:1~2 d内低温空运至天津,于4℃冷藏备用,市售;

Rijke型自激脉动热风干燥装置:自制;

电子天平:BSA124S-CW型,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;

电子天平:JS15-02型,上海浦纯春计量仪器有限公司;

电热鼓风恒温干燥箱:101-2B型,绍兴市苏珀仪器有限公司;

分光测色仪:NS800型,深圳市三恩时科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 样品预处理 选取无虫害、无霉烂、无机械损伤、形状均匀、大小基本一致,初始含水率为94%的白萝卜,用清水洗净并去皮。将去皮后的白萝卜用切片机切成30 mm×30 mm×8 mm圆片,备用。

1.2.2 白萝卜片脉动/非脉动热风干燥试验 分别在脉动/非脉动气流模式下进行白萝卜片热风干燥试验,考察干燥温度、物料厚度和进气速度等参数对干燥过程的影响。首先打开感应加热器和水泵开关,然后打开可控风速风泵,用热电偶检测石英管干燥室温度变化。同时采集系统开始工作,显示声波频率和声压级。待试验装置在设定条件下运行稳定后,将白萝卜片样品放入不锈钢丝网干燥篮中,再将干燥篮吊装在Rijke管内感应加热金属孔板层上方约100 mm处;在Rijke管内,来自Rijke管下端进口的环境空气,通过感应加热金属层时被加热,温度升高到设定干燥温度。当热空气通过提篮型干燥室时,白萝卜片与热空气换热,开始升温 and 干燥失水。每隔5 min将干燥篮取出,再迅速取出白萝卜片称重,记录白萝卜片在不同时刻的质量(精确至0.01 g),放回继续进行干燥试验,不断重复该过程直至白萝卜片干基含水率≤13%(干基含水率0.149 g/g)时,停止干燥试验。同一工况条件下重复5次,去掉误差大的数据,剩余数据取平均值,用于绘制白萝卜片干燥曲线和干燥速率曲线。

1.2.3 干基含水率 按式(1)计算任意干燥时刻物料的干基含水率。

$$X_t = \frac{M_t - M}{M}, \quad (1)$$

式中:

X_t ——干燥至 t 时刻物料干基含水量,g/g;

M_t ——干燥至 t 时刻物料质量,g;

M ——绝干后的物料质量, g。

1.2.4 干燥速率 按式(2)计算任意干燥时刻物料的干燥速率。

$$W = \frac{X_t - X_{t-\Delta t}}{\Delta t}, \quad (2)$$

式中:

$X_t + \Delta t$ ——干燥至 $t + \Delta t$ 时刻物料干基含水量, g/g;

Δt ——相邻 2 次测量的时间间隔, min。

1.2.5 收缩率 采用体积排除法^[17], 按式(3)计算物料收缩率。

$$S_R = \frac{V_0 - V_d}{V_0} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

S_R ——物料收缩率, %;

V_0 ——干燥前白萝卜片体积, mL;

V_d ——干燥后白萝卜片体积, mL。

1.2.6 复水比 将干燥后的白萝卜片称重, 40℃水浴, 每隔 5 min 取出, 用吸水纸上沥干 5 min, 再称重, 继续置于 40℃水浴, 直至白萝卜片质量趋于稳定。按式(4)计算物料复水比^[18-19]。

$$RR = \frac{M_2}{M_1}, \quad (4)$$

式中:

RR ——物料复水比;

M_1 ——复水前白萝卜片质量, g;

M_2 ——复水沥干后白萝卜片质量, g。

1.2.7 白度 将干燥后的白萝卜片用保鲜膜封住, 置于分光测色仪下, 测定不同干燥方式下白萝卜片的 L^* , a^* , b^* 值。按式(5)计算白度。

$$W_1 = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}}, \quad (5)$$

式中:

W_1 ——白度;

L^* ——样品的明暗程度(数值范围 0~100, 值越大表示样品越白);

a^* ——样品的红绿程度(正值为红, 负值为绿, 0 为中性, 值越大表示样品越红);

b^* ——样品的黄蓝程度(正值为黄, 负值为蓝, 0 为中性, 值越大表示样品越黄)。

1.3 数据处理

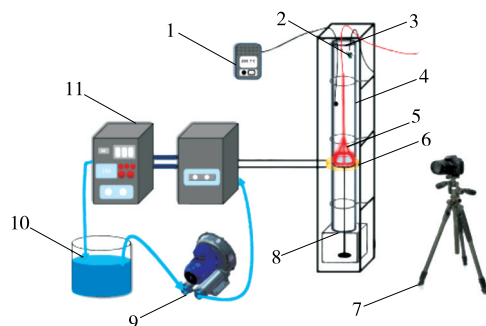
分别使用 SPSS 18.0 和 Origin 2021 软件对数据进行统计分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 Rijke 型自激脉动气流干燥装置

图 1 为自制的 Rijke 型自激脉动热风干燥装置, 该装置主要由干燥单元、测温单元、脉动声波检测单元、感应加热单元组成。感应加热单元由冷却水泵、水箱、感应加

热器和金属孔板层组成。干燥单元由长 1 240 mm, 直径 65 mm 的竖直石英管(即 Rijke 管)组成。金属孔板加热层放置在石英管内、下方 1/3 长度处, 与石英管共同组成声学共鸣腔。感应加热器隔着石英管对金属层进行加热, 金属层受热升温并释放热量; 当放热达到一定值后, 将在石英管内激发热声振荡。环境空气由下方进气口进入石英管, 经过金属层加热, 形成了持续的脉动气流。麦克风安装在石英管上端出气口, 采集石英管内自激脉动发出的声音。红外激光测温仪用于测量石英管内金属孔板和物料表面温度, 热电偶测量干燥室气体温度。



1. K 型热电偶 2. 麦克风 3. 出气口 4. 石英管 5. 干燥提篮 6. 金属孔板层 7. 高速相机 8. 进气口 9. 冷却水泵 10. 储水箱 11. 感应加热装置

图 1 基于感应加热的 Rijke 型自激脉动热风干燥装置图
Figure 1 Rijke type pulsating hot air drying device based on induction heating

首先, 在石英管出气口处无遮挡时, 开启并缓慢增加感应加热单元的输出功率, 用以加热金属孔板。当功率超过一定值后, 加热的金属孔板将激发 Rijke 管热声振荡, 则可以获得脉动气流干燥的工况。图 2(a) 为干燥室气流温度 120℃ 下 Rijke 管发出的声波信号, 其中纵坐标 Amplitude 为归一化后的声压水平, 其基准声压数值为 93.98 dB。声波信号值呈稳定的周期性变化, 振动频率约为 147 Hz; 此时为自激脉动热气流工况。将出气口的 1/4~2/4 进行遮挡, 热声振荡条件被破坏, Rijke 管内为非脉动干燥的工况。图 2(b) 为相同条件下 Rijke 管发出的声波信号, 声音波动较小, 说明 Rijke 管内为非脉动干燥工况, 用于模拟传统对流热风干燥工况。

2.2 白萝卜片脉动热风干燥特性

2.2.1 热风温度对白萝卜片脉动干燥特性的影响 由图 3(a) 可知, 当干燥温度分别为 100, 120, 140℃ 时, 白萝卜片干基含水率从 16.600 g/g 降至 0.149 g/g, 脉动气流干燥时间分别为 135, 77, 54 min, 非脉动气流干燥时间为 165, 112, 92 min, 两者相比分别缩短了 18%, 29%, 41%。同一干燥温度下, 脉动气流干燥物料时间明显少于非脉动气流; 同时, 随着干燥温度的升高, 脉动气流干燥

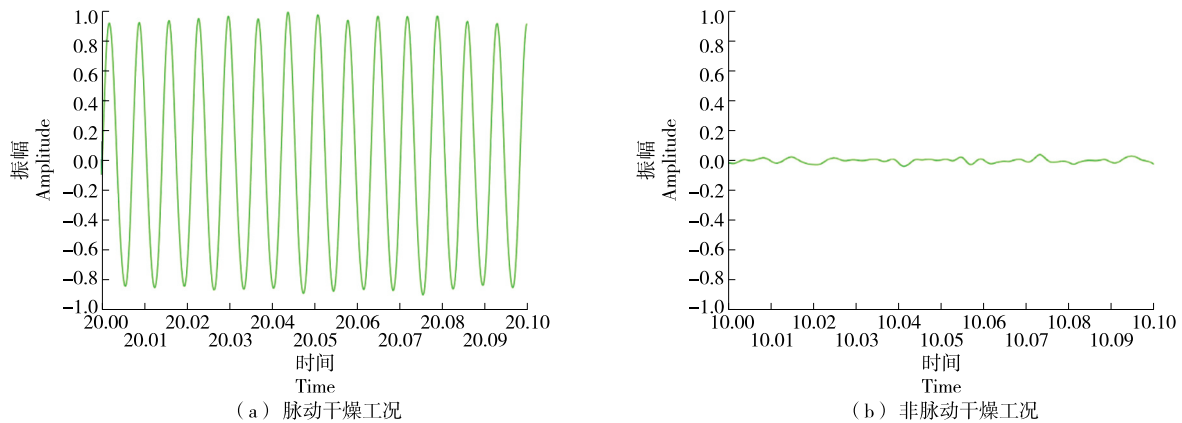


图2 不同工况下Rijke管内声音波形图

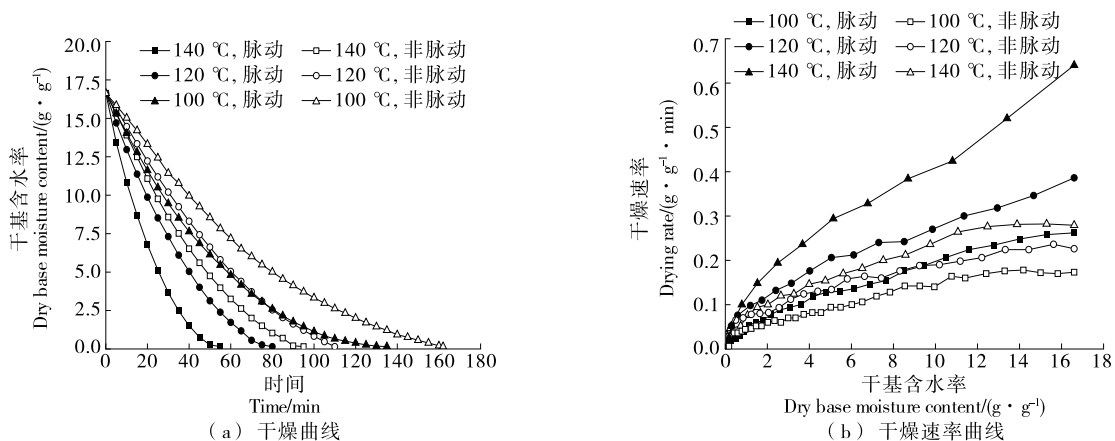
Figure 2 Waveforms of sound in Rijke tube under different operating conditions

时间缩短幅度逐渐变大,表明脉动气流对干燥过程的促进效果随着干燥温度的升高而提升。这是因为在脉动工作模式下,干燥气流压力、频率呈周期性振荡变化;气流振荡减薄了物料传热边界层,加快热量向物料传递,从而提高干燥速率。脉动气流振荡强度与干燥温度呈正相关,气流温度越大时脉动强度越大,因此对物料干燥促进效果更明显。

由图3(b)可知,相比非脉动气流,脉动气流状态下白萝卜片干燥速率更大,白萝卜片干燥速率增加幅度随着气流温度的升高而增大;初始干燥速率增幅从100℃的2倍增加到140℃的3倍。在含水率16.8 g/g降至约12.0 g/g期间,非脉动气流下白萝卜片干燥速率变化较小,为恒速干燥阶段。在恒速干燥阶段,白萝卜片内部水分迁移速率(即内部水分迁移到物料表面过程)大于外部水分迁移速率(即物料表面水分蒸发,蒸汽穿过边界层进入干燥气体,由干燥气体带走过程),物料表面维持饱和和水分状态;干燥过程为外部水分迁移控制,因而为恒速干燥

阶段。在含水率由12.0 g/g降至1.0 g/g期间,白萝卜片干燥速率缓慢降低,为降速干燥阶段;因此在非脉动气流下,干燥过程由恒速+降速阶段组成。但对于脉动气流,白萝卜片干燥速率随干燥时间不断减小,整个干燥过程为降速干燥。

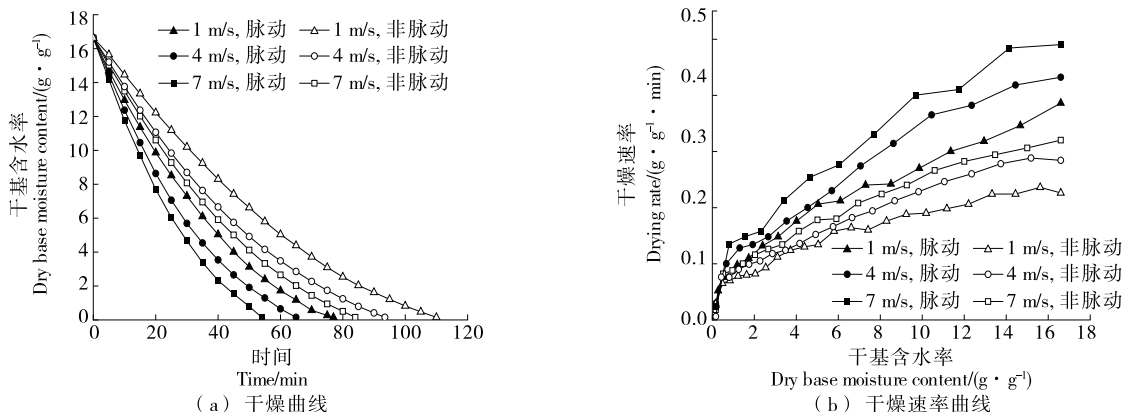
2.2.2 空气流速对白萝卜片脉动干燥特性的影响 由图4(a)可知,当气体速度分别为1,4,7 m/s时,脉动气流下干燥时间分别为77,65,54 min,非脉动气流下干燥时间分别为110,95,84 min,两者相比分别缩短了30%,32%,36%,表明不同流速下脉动气流均能加快干燥过程,但随着流速的增大,脉动气流增幅变化不明显。由图4(b)可知,在非脉动气流速度1 m/s下,白萝卜片在含水率为16.8~13.0 g/g时存在一个恒速干燥阶段。当非脉动气流速度增加至4 m/s时,恒速干燥阶段消失;这是因为气流速度增加可以减薄蒸汽传质边界层,从而增加外部水分迁移速率。脉动气流在流速1 m/s的干燥速率也明显高于非脉动气流在流速7 m/s的;即脉动气流振荡对



白萝卜片料层厚度8 mm、气流流速1 m/s

图3 不同热风温度下白萝卜片干燥和干燥速率曲线

Figure 3 Drying and drying rate curves of white radish slices at different drying temperatures



白萝卜片料层厚度 8 mm、干燥温度 120 °C

图 4 不同流速下白萝卜片干燥和干燥速率曲线

Figure 4 Drying and drying rate curves of white radish slices at different flow rates

干燥过程的强化效果大于非脉动气流速度增加(从 1 m/s 增加到 7 m/s)的,表明脉动气流振荡是强化物料干燥的一个重要方法。

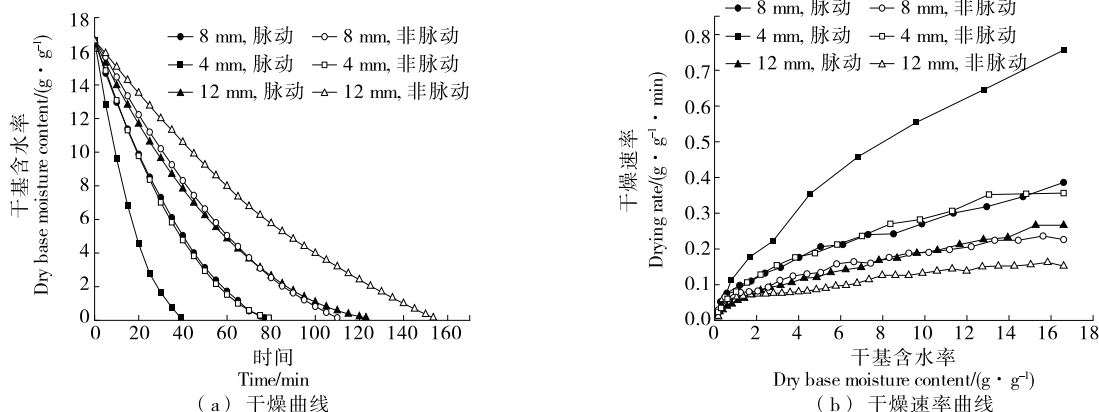
2.2.3 物料厚度对白萝卜片脉动干燥特性的影响 由图 5(a)可知,当料层厚度分别为 4, 8, 12 mm, 白萝卜片干燥至安全含水率时,脉动气流下所需时间分别为 40, 77, 124 min, 非脉动气流下时间为 80, 110, 154 min, 两者相比分别缩短了 50%, 30%, 19%。对比非脉动气流,不同厚度下脉动气流均能以更短的时间完成干燥过程;但随着料层厚度增加,脉动气流对干燥过程的促进作用越小。由图 5(b)可知,非脉动气流下,白萝卜片在 4 mm 厚度时,恒速阶段为 16.6~13.0 g/g; 8 mm 时为 16.6~14.2 g/g; 12 mm 时为 16.6~15.0 g/g;恒速干燥阶段随厚度增加干燥时间变短,整个干燥过程更倾向于降速干燥。这是由于白萝卜片料层越厚,内部水分外迁通道变长,干燥为内部水迁移控制。脉动气流振荡主要增强了外部水分迁移过程,因

而当白萝卜片厚度增加,干燥为内部水分迁移控制时,其干燥促进作用减弱。

2.3 白萝卜片脉动热风干燥品质特性

2.3.1 热风温度对白萝卜片脉动品质特性的影响 由表 1 可知,固定料层厚度 8 mm、流速 1 m/s,随着气流温度的提升,产品收缩率不断增大,复水比不断降低。脉动气流处理的干制品在 140 °C 时收缩率和白度最大,相比非脉动的分别提高了 8%、8.86;在 100 °C 时复水比最大,相比非脉动的增加了 0.72。同一温度下,脉动气流干燥的白萝卜片的收缩率、复水比、白度均大于非脉动的,表明不同温度下脉动气流处理的白萝卜片品质更好,原因是脉动气流使得产品结构更紧密,减弱了高温对白萝卜片内部结构的破坏效果,同时最大程度保持了其原本的白度。

2.3.2 热风流速对白萝卜片脉动品质特性的影响 由表 2 可知,固定料层厚度 8 mm、温度 120 °C,气流流速越大,产品的收缩率越大,复水比越小,同样收缩率与复水



气流流速 1 m/s、气流温度 120 °C

图 5 不同料厚下白萝卜片干燥和干燥速率曲线

Figure 5 Drying and drying rate curves of white radish slices under different material thicknesses

表1 不同温度下干制品的品质特性

Table 1 Quality characteristics of dry products at different hot air temperatures

状态	温度/℃	收缩率/%	复水比	白度
脉动	100	67	4.66	70.18
	120	76	4.19	72.36
	140	83	3.79	75.83
非脉动	100	60	3.94	62.64
	120	68	3.45	64.54
	140	75	2.97	66.97

表2 不同流速下干制品的品质特性

Table 2 Quality characteristics of dry products at different hot air velocities

状态	流速/(m·s ⁻¹)	收缩率/%	复水比	白度
脉动	1	76	4.19	72.36
	4	81	3.82	73.94
	7	85	3.56	75.33
非脉动	1	68	3.45	63.84
	4	72	3.03	65.21
	7	76	2.95	67.54

比成反比。脉动气流处理的干制品在7 m/s时收缩率和白度最大,相比非脉动的分别提高了9%、8.73;在1 m/s时复水比最大,相比非脉动的增加了0.74;同一流速下,脉动气流干燥的白萝卜片的收缩率、复水比、白度均大于非脉动的,表明不同流速下脉动气流处理的白萝卜片品质更优良。当流速由4 m/s提升至7 m/s时,脉动气流处理的干制品白度由73.94增加至75.33,白度变化相对较小,原因可能是流速过高的气流使得物料内的大部分水分被去除,白萝卜片中的蛋白质和总糖等物质不断积累,发生美拉德反应,白萝卜片内部结构颜色变化。

2.3.3 物料厚度对白萝卜片脉动品质特性的影响 由表3可知,固定流速1 m/s、温度120℃,料层越厚,产品的收缩率越小,复水比越大。脉动气流处理的干制品在4 mm时收缩率和白度最大,相比非脉动的分别提高了8%、9.87;在12 mm时复水比最大,相比非脉动的增加了0.74。同一料层厚度下脉动气流干燥的白萝卜片的收缩率、复水比均大于非脉动的,表明脉动气流干燥下的白萝卜片品质优于非脉动的。白萝卜片料层越厚,脉动气流干燥的白萝卜片白度越低,原因可能是当厚度较大时,脉动气流对干燥的促进效果减弱,干燥速率下降,白萝卜片热处理时间延长,进而导致干制品的白度较小。

2.4 60℃普通热风干燥

脉动气流通过周期性扰动减薄了传热边界层,增大

表3 不同料厚下干制品的品质特性

Table 3 Quality characteristics of dry products under different material layer thickness

状态	料厚/mm	收缩率/%	复水比	白度
脉动	4	85	3.76	76.79
	8	76	4.19	72.36
	12	65	4.65	69.25
非脉动	4	77	2.96	66.92
	8	68	3.45	63.84
	12	56	3.91	61.27

了传热传质效率,从而减少了高温产生的影响^[16]。选择干燥工况较优的厚度与气流流速(白萝卜片料层厚度8 mm、气流流速1 m/s)和普通干燥(干燥温度60℃)时的^[20]进行对比,结果如图6所示。由图6(a)可知,在普通热风干燥下白萝卜片干燥过程持续8.5 h。采用脉动气流、料层厚度为8 mm、气流流速为1 m/s,干燥温度为140℃时,其干燥时间比普通热风干燥的缩短了9倍以上。由图6(b)可知,普通热风干燥的干燥速率始终<0.1 g/(g·min),在干燥开始时有一段预热阶段干燥速率逐渐提升,在含水率由16.8 g/g降至11.0 g/g期间进入一段恒速干燥段,随后进入降速干燥。与普通热风干燥在高温下有相似的干燥趋势,脉动气流干燥则始终呈现为降速干燥。

干燥后白萝卜片的收缩率为61%,复水比为3.86,白度为69.05。相比于高温的热风干燥,白度有明显的提升,在温度为60℃时降低了高温对白萝卜片内部结构的破坏,使白萝卜片保留了较好的色泽,由于干燥温度较长,复水比略微降低。对比试验干燥产物,60℃普通热风干燥白萝卜片的收缩率、复水比、白度均小于脉动热风干燥的。

2.5 能耗分析

为比较脉动热风与普通热风干燥的能耗,按式(6)、式(7)计算被加热的空气的总热量作为总能耗。

$$Q = C_p m_A \Delta T, \quad (6)$$

$$m_A = Sv \Delta t \rho, \quad (7)$$

式中:

Q ——总热量,kJ;

C_p ——空气的比热容,kJ/(kg·K);

m_A ——空气质量,kg;

ΔT ——空气加热前后的温度差,K;

S ——干燥管内面积,m²;

v ——空气流速,m/s;

Δt ——干燥总时间,s;

ρ ——空气密度,kg/m³。

按式(8)计算单位能耗^[21]。

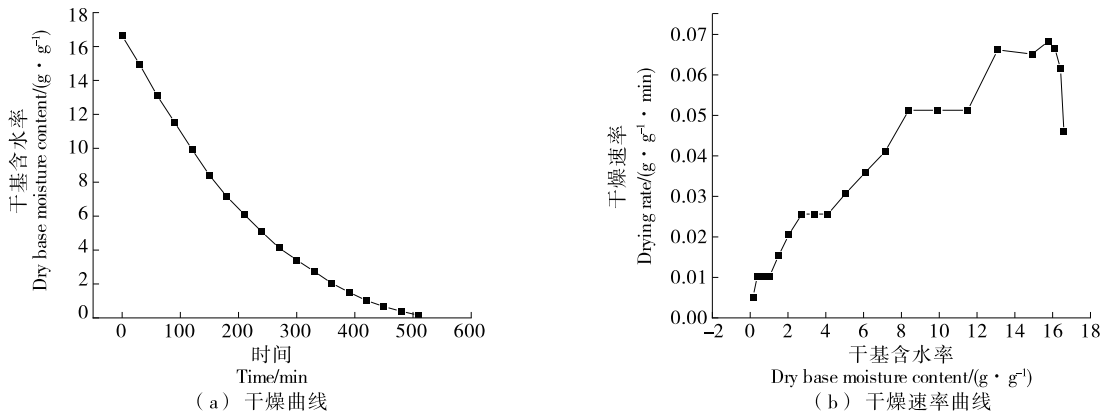


图 6 普通热风干燥下白萝卜片的干燥曲线和干燥速率曲线

Figure 6 Drying and drying rate curves of white radish slices under conventional hot air drying

$$N = \frac{Q}{m_w},$$

式中:

N ——单位能耗, kJ/kg;

Q ——总热量, kJ;

m_w ——去除水分的质量, kg。

对于单个白萝卜片,在气流流速为 1 m/s,白萝卜片厚度为 8 mm,干燥温度为 60, 100, 120, 140 °C 的脉动与非脉动工况下,对脉动气流干燥与非脉动气流的能耗进行对比分析。通过式(6)~式(8)计算每种工况下单位能耗,结果如图 7 所示。由图 7 可知,单位能耗最低的为 140 °C 下脉动热风干燥的,为 $246.397\ 8 \times 10^3$ kJ/kg,能耗最高的为 60 °C 普通热风干燥的,为 $711.928\ 9 \times 10^3$ kJ/kg。在脉动热风干燥下,随着干燥温度的降低,单位能耗逐渐升高,这是由于干燥温度的降低延长了干燥时间,使得单位能耗升高。在非脉动气流工况下,120 °C 热风干燥的能耗最低,但仍高于 3 个温度下脉动气流的,且在 140 °C 时普通热风干燥的单位能耗为同温度下脉动热风干燥的 1.9 倍。

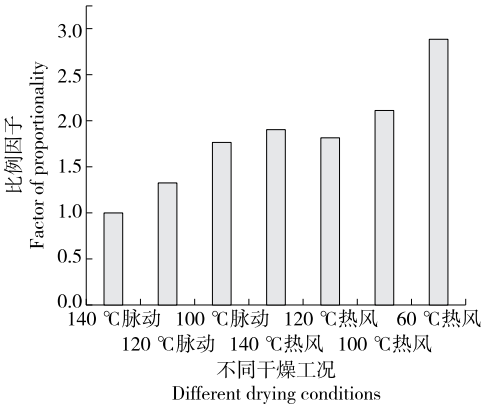


图 7 不同干燥工况下单位能耗比图

Figure 7 Energy consumption per unit under different drying conditions

3 结论

研究构建了基于 Rijke 管热声谐振结构的自激脉动热风干燥装置。结果表明,当热风温度为 120 °C,料厚为 1 mm,气流流速为 1 m/s 时,自激脉动气流 (147 Hz, 94 dB) 使白萝卜片干燥时间缩短了 50%,突破了传统脉动干燥依赖主动机械调控的局限性,验证了热能直接驱动脉动气流的可行性。通过金属孔板层热声转换效率优化,实现了热风温度 (100~140 °C) 与脉动强度 (声压级 93.98~94.00 dB) 的协同调控。在温度 100 °C、风速 1 m/s、料厚 8 mm 的工况下,脉动热风干燥白萝卜片复水比较传统热风干燥提升了 18.2%,白度提高了 11.3%,收缩率降低了 11.7%。该研究为果蔬脆片等固体食品的工业化生产提供了新工艺,可减少干燥能耗 40% 以上,同时显著改善产品质构与营养价值。后续可引入 CFD 模拟揭示脉动气流场与物料孔隙结构的相互作用;开发可调式 Rijke 管阵列以适应不同物料形态;探索热声—微波协同干燥技术,进一步缩短干燥周期并抑制美拉德反应导致的色泽劣变。

参考文献

[1] NOWACKA M, MATYS A, WITROWA-RAJCHERT D. Innovative technologies for improving the sustainability of the food drying industry[J]. Current Food Science and Technology Reports, 2024, 2(2): 231-239.

[2] 于蒙杰, 张学军, 牟国良, 等. 我国热风干燥技术的应用研究进展[J]. 农业科技与装备, 2013(8): 14-16.

YU M J, ZHANG X J, MOU G L, et al. Research progress on the application of hot air drying technology in China[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2013(8): 14-16.

[3] 张乐道, 虞启辉, 丁小航. 果蔬物料变化对微波加热温度特性的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(9): 29-35.

ZHANG L D, YU Q H, DING X H. The effect of fruits and vegetables changes on the temperature characteristic during

- microwave heating[J]. Food & Machinery, 2024, 40(9): 29-35.
- [4] DE SOUSA R C, COSTA A B S, FREITAS M D M, et al. Convective drying of black pepper: experimental measurements and mathematical modeling of the process[J]. Food and Bioprocess Processing, 2024, 143: 102-116.
- [5] JAHROMI A N, RAHMAN H U, ÖZER M A, et al. A novel textile drying technique *via* pulsed vacuum method[J]. Drying Technology, 2024, 42(2): 212-226.
- [6] XU X, ZHANG L, FENG Y B, et al. Vacuum pulsation drying of okra (*Abelmoschus esculentus* L. Moench): better retention of the quality characteristics by flat sweep frequency and pulsed ultrasound pretreatment[J]. Food Chemistry, 2020, 326: 127026.
- [7] KOWALSKI S J, SZADZIŃSKA J, PAWŁOWSKI A. Ultrasonic-assisted osmotic dehydration of carrot followed by convective drying with continuous and intermittent heating[J]. Drying Technology, 2015, 33(13): 1 570-1 580.
- [8] SETAREH M, ASSARI M R, BASIRAT TABRIZI H, et al. Experimental and drying kinetics study on millet particles by a pulsating fluidized bed dryer[J]. Heliyon, 2024, 10(13): e33680.
- [9] AHMAD TELI S, SHEIKH A Y, SHUKLA R M, et al. Numerical optimization of drying of white button mushroom (*Agaricus bisporus*) employing microwave and fluidized bed drying for preparing value added product[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2024, 18: 101360.
- [10] 吕豪, 吕黄珍, 杨炳南, 等. 苦瓜微波—热风振动床干燥湿热特性与表观形态研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 373-381.
- LU H, LU H Z, YANG B N, et al. Moisture and heat characteristics and apparent form of balsam pears in microwave-hot-airflow vibrating bed drying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 373-381.
- [11] KIRICENKO K, KLEINEBUDDE P. Drying behavior of a horizontal vibrated fluidized bed dryer for continuous manufacturing[J]. Pharmaceutical Development and Technology, 2023, 28(5): 440-451.
- [12] PRAMUDITA D, HUMJAA S, TSOTSAS E. Droplet drying and whey protein denaturation in pulsed gas flow—a modeling study[J]. Journal of Food Engineering, 2022, 321: 110959.
- [13] 程茜, 于晓晨, 于才渊. 褐煤脉冲式气流干燥传递过程研究[J]. 化工进展, 2017, 36(7): 2 368-2 374.
- CHENG Q, YU X C, YU C Y. Study on transfer process of lignite drying in an impulse pneumatic dryer[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(7): 2 368-2 374.
- [14] 刘春菊, 王海鸥, 刘春泉, 等. 循环脉冲提高气流膨化干燥黄桃效率[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(3): 680-685.
- LIU C J, WANG H O, LIU C Q, et al. Efficiency of explosion puffing drying of yellow peach improved by cyclic pulse[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2016, 32(3): 680-685.
- [15] MAJKA J, OLEK W. Application of the response surface methodology for designing oscillation drying of beech timber[J]. Forests, 2020, 11(5): 541.
- [16] WU Z H, YUE L, LI Z Y, et al. Pulse combustion spray drying of egg white: energy efficiency and product quality[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(1): 148-157.
- [17] 王娟, 肖亚冬, 徐亚元, 等. 不同预处理方式对花椰菜干制品品质影响研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(24): 36-43.
- WANG J, XIAO Y D, XU Y Y, et al. Effect of different pretreatment methods on the quality attributes of dried cauliflower[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(24): 36-43.
- [18] NANSERKEO S, MUYONGA J, BYARUHANGA Y B. Influence of drying methods on jackfruit drying behavior and dried products physical characteristics[J]. International Journal of Food Science, 2022, 2 022: 8432478.
- [19] NIU Y, CHEN H F, ZHANG Z F, et al. Effect of ethanol osmotic dehydration on CO₂ puffing and drying mechanism of potato[J]. Food Chemistry: X, 2023, 18: 100715.
- [20] 张烨, 莫豪裕, 江伟檀, 等. 基于响应面的白萝卜热风干燥品质及工艺研究[J]. 包装工程, 2024, 45(21): 147-157.
- ZHANG Y, MO H Y, JIANG W T, et al. Hot-air drying quality and process of white radish based on response surface[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(21): 147-157.
- [21] 陈健凯, 林河通, 林艺芬, 等. 基于品质和能耗的杏鲍菇微波真空干燥工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 277-284.
- CHEN J K, LIN H T, LIN Y F, et al. Optimized technology of *Pleurotus eryngii* by microwave-vacuum drying based on quality and energy consumption[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(3): 277-284.