

接触式超声强化热泵干燥苹果片的干燥特性

刘云宏 苗帅 孙悦 李晓芳 王乐颜 朱文学

(河南科技大学食品与生物工程学院, 洛阳 471003)

摘要: 为研究接触式超声对热泵干燥的强化效应,在热泵干燥机内安装了一套超声波装置,并以苹果片为研究对象,进行接触式超声强化热泵干燥试验,研究超声波功率、干燥温度以及切片厚度对苹果片干燥特性的影响。结果表明:将物料放在超声辐射盘上进行热泵干燥强化,有利于加快物料内部传质过程;随着超声功率和温度的增加以及厚度的减小,物料所需干燥时间逐渐缩短,平均干燥速率逐渐增大;超声对干燥速率的影响随着物料含水率的降低而减弱;在温度较低及物料较薄时,接触式超声的强化效果较好,但其对干燥速率的影响随着温度升高及物料变厚而有所下降;有效水分扩散系数的数值范围为 $1.333 \times 10^{-10} \sim 1.651 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$,且随着超声功率及温度的升高而增大;经过接触式超声处理的苹果片,其组织结构中的孔洞明显增多与扩张,在 60 W 超声功率作用下还形成了较多微细孔洞,从而有利于物料内部水分迁徙与扩散。将接触式超声技术用于热泵干燥过程的强化,可有效提高热泵干燥速率,缩短物料干燥时间。

关键词: 苹果片; 接触式超声; 热泵干燥; 干燥特性

中图分类号: TS255 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)02-0228-09

Drying Characteristics of Apple Slices during Contact Ultrasound Reinforced Heat Pump Drying

Liu Yunhong Miao Shuai Sun Yue Li Xiaofang Wang Leyan Zhu Wenxue

(College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: In order to investigate the enhancing effect of contact ultrasound treatment on conventional heat pump drying, an ultrasound device was installed in the heat pump dryer, and contact ultrasound reinforced heat pump drying of apple slices was carried out to study the effects of ultrasound power, drying temperature and sample thickness on drying characteristics. The results showed that the internal mass transfer process of samples could be enhanced by putting samples on the ultrasound radiation board directly during heat pump drying. Drying time was shortened and drying rate was improved with the increases of ultrasound power and drying temperature and the decrease of sample thickness. The influence of ultrasound treatment on drying rate was decreased with the reduction of moisture content. Obviously strengthened effect of contact ultrasound on drying rate could be observed at low temperature and thin thickness, while it was reduced with the increases of drying temperature and thickness. The values of effective moisture diffusivity (D_{eff}) ranged from $1.333 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ to $1.651 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, and it was increased at high ultrasound power and drying temperature. After the contact ultrasound treatment, the numbers and sizes of the tiny holes inside apple slice were improved. With ultrasound power of 60 W, many micro-tunnels were even produced in the organizational structure of apple slices, which was also beneficial to enhance internal moisture diffusion. Therefore, contact ultrasound technology is an effective method to increase the drying rate of heat pump drying and shorten drying time obviously as well.

Key words: apple slices; contact ultrasound; heat pump drying; drying characteristics

收稿日期: 2015-07-31 修回日期: 2015-09-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1404334)、公益性行业(农业)科研专项(201503239)、河南省高校青年骨干教师项目(2015GGJS-048)、河南省重大科技专项(121199110110)和河南省教育厅科技攻关项目(14B550005)

作者简介: 刘云宏(1975—),男,副教授,主要从事农产品加工与贮藏工程研究,E-mail: beckybin@haust.edu.cn

引言

热泵干燥作为一种现代干燥技术^[1],具有操作简单、减少能耗、环境友好等优点^[2-4],得到干燥领域越来越多的关注。然而,热泵干燥同时存在设备投资大、干燥时间长等不足^[5],致使热泵干燥技术在农产品干燥产业中的应用受到一定限制。物料在热泵干燥过程中的脱水过程包括内部扩散和表面蒸发2个阶段,干燥速率主要取决于内部水分迁移阻力和表面水分蒸发阻力^[6-7]。如果内部扩散阻力远大于表面扩散阻力,则该干燥过程属于内部扩散控制。对于大多数生物物质材料,由于其致密的微观结构及复杂的组织环境,整个干燥过程多体现为内部扩散控制的降速干燥阶段,内部质热传递速率是影响干燥速率的主要因素。如果能在热泵干燥过程中,采取辅助措施以降低内部扩散阻力、强化内部水分迁徙,则有助于提高热泵干燥的干燥速率、缩短干燥时间。

超声波是一种频率高于20 kHz的能量机械波,具有方向性好、穿透能力强、振动强烈等特点。当超声波作用于其他介质时,可以使介质质点发生高频振动,同时物料内部受到反复拉伸和收缩作用,从而产生空化效应、机械效应等,可降低物料内部水分附着力并减小水分迁徙阻力,从而增强物料内部的传质^[8]。目前,超声波在食品行业中主要应用于细胞破碎及成分提取强化等^[9-10],由于其显著的传质强化效果,超声辅助技术也逐渐应用于干燥工艺中^[11-17]。

热泵干燥具有干燥速率较低的不足,而超声具有强化传质的显著特点。因此,将超声强化技术用于热泵干燥过程,理论上可利用超声能量及其空化效应和机械效应去强化物料内部的传质过程,从而提高热泵干燥速率,但目前缺乏接触式超声强化热泵干燥的研究报道。本文提出将接触式超声与热泵

干燥相结合的研究思路,并以苹果为研究对象,研究接触式超声对干燥特性及物料微观结构的影响,探讨接触式超声对热泵干燥速率的强化机理,以期超声强化热泵干燥技术在食品干燥产业中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

试验所用苹果购于洛阳大张超市,选择体积、成熟度基本一致、无虫害的苹果,购买回来后于3~4℃的冰箱中冷藏。使用时,切成所需的厚度与面积进行干燥试验。采用105℃加热干燥法测得所用苹果的初始干基含水率为 $(670 \pm 8)\%$ 。

1.2 超声波装置

本文所用的超声波装置由河南科技大学与深圳科美达超声设备有限公司联合设计,其结构如图1所示。该超声波装置主要由超声换能器和超声发生器组成。超声换能器主要包括底盘、支撑杆、超声振子及辐射盘等部件。目前应用的超声波振子多为喇叭形和圆柱形,且多采用压电换能器。不同用途的换能器对性能参数的要求不同,为使换能器工作稳定、达到最佳的声匹配,本文选用前后盖设计的喇叭形超声振子,超声振子的固定与支撑由下部的底盘与支撑杆实现,超声波振子下端固定在支撑杆上,上端通过紧固螺钉和超声振子专用胶(环氧树脂AB胶水)与不锈钢辐射盘紧密相连,在稳固辐射板的同时还可降低振子与负载之间阻抗。超声换能器的尺寸参数为:换能器整体高度350 mm,其中超声振子高68 mm、底径59 mm,辐射盘直径150 mm、厚度2 mm。通过阻抗匹配和调谐匹配,并负载大小合适的辐射盘,换能器性能可达到最佳,可持续工作且基本不发热。经测试,超声换能器的谐振频率为 (28 ± 0.5) kHz,谐振阻抗 $0 \sim 20 \Omega$,最大功率为60 W。所设计的换能器谐振阻抗低、电声转换效率高、发热量

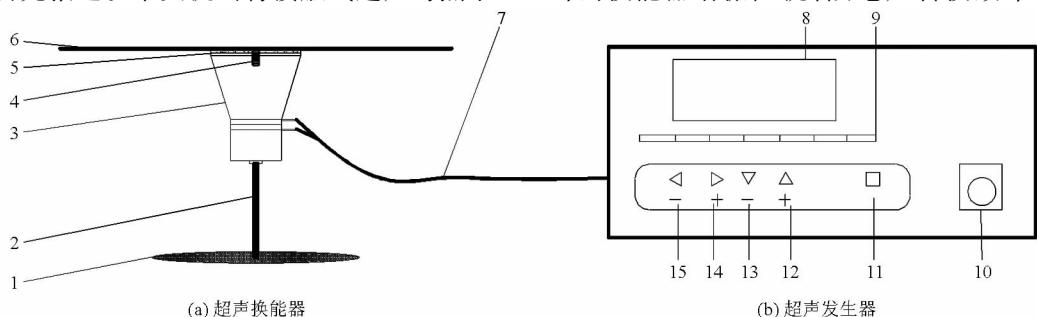


图1 超声波装置

Fig. 1 Ultrasound device

1. 底盘 2. 支撑杆 3. 超声振子 4. 紧固螺钉 5. 超声振子专用胶 6. 辐射盘 7. 电缆线 8. 显示面板 9. 功率指示灯 10. 开关
11. 启动/停止键 12. 增加时间按键 13. 减少时间按键 14. 增加功率按键 15. 减小功率按键

低、振幅大、振速高。

超声换能器通过电缆与超声发生器连接,通过超声发生器的操作面板调节并控制超声换能器。超声发生器开启后,通过功率“+”和“-”按键来改变超声辐射功率,功率可调范围为0~60 W,功率可通过显示面板读出。启动/停止键可在运行中随时暂停启动,通过时间“+”和“-”键来调节超声作用时间,时间变化由显示面板显示,到达设定时间后,超声波系统可自动停止。按着功率“+”键不放,同时开启电源开关,显示器上可显示实时频率,按着功率“-”键不放,同时开启电源开关,显示器上可显示实时电流。

1.3 超声波强化热泵干燥设备

将上述超声波装置安装到热泵干燥机中,即为本文所用的接触式超声波强化热泵干燥设备,其结构如图2所示。热泵干燥机由河南科技大学与广东

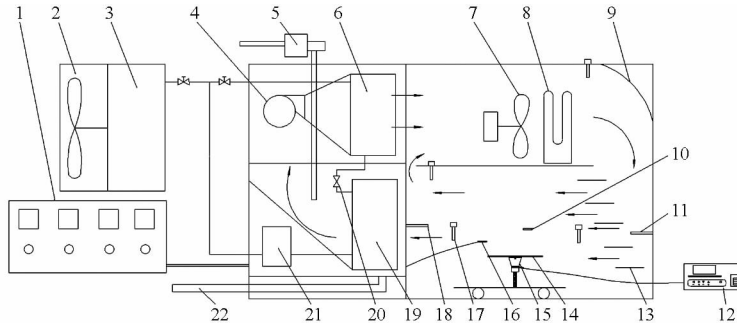


图2 接触式超声波强化热泵干燥装置示意图

Fig.2 Schematic of contact ultrasound reinforced heat pump drying device

1. 控制面板 2. 室外风扇 3. 室外冷凝器 4. 主风机 5. 排湿风机 6. 冷凝器 7. 辅助风机 8. 辅助加热器 9. 导风板 10. 风速计
11. 流速表 12. 超声波发生器 13. 匀风板 14. 超声波辐射板 15. 换能器 16、17. 温度传感器 18. 流速表 19. 蒸发器 20. 安全阀
21. 压缩机 22. 排水管

1.4 试验方法

每次干燥前,将苹果洗净去皮,用切片剂切成厚度均匀且面积一致的圆形薄片。干燥时,将称量好的苹果片均匀平铺在热泵干燥机中的超声振动圆盘上,固定超声发生器频率为28 kHz,工作方式为连续工作,分别设定风速为0.5、1.5、2.5 m/s,超声功率为0、30、60 W,温度为40、50、60℃,物料厚度为3、6、9 mm,研究各参数对干燥特性的影响。干燥过程中每隔30 min迅速取出称其质量,然后迅速放回继续干燥,直到物料干基含水率降至30%时结束干燥。每组试验重复3次。

1.5 计算

(1) 干基含水率的测定参照 GB/T 3543.6—1995,计算公式为

$$D_t = \frac{M_t - M_d}{M_d} \times 100\% \quad (1)$$

式中 D_t —— t 时刻物料的干基含水率, %

省农业机械研究所联合设计^[18],主要由热泵系统及热风循环系统组成。热泵系统包括压缩机、蒸发器、内部冷凝器、外部冷凝器及膨胀阀等,循环介质为R22制冷剂。热风循环系统包括干燥仓、主风机、辅助风机、除湿风机、辅助加热器及导风板等。干燥机控制系统可自动完成全过程干燥、升温、降温、排湿等操作,并自动记录干燥温度、湿度等参数。干燥时,超声换能器置于干燥室内,超声发生器安放在干燥室外,两者通过电缆连接,物料直接放在超声换能器的辐射盘上,超声振子产生的超声波通过辐射盘传递给物料,以实现热泵干燥过程的强化。

其他仪器与设备:切片剂(德州天马粮油机械有限公司),Scout SE型电子天平(奥豪斯仪器有限公司),101-3ES型电热鼓风干燥箱(北京市永光明医疗仪器厂),JSM-6010LA型扫描电子显微镜(日本电子株式会社)。

M_t —— t 时刻物料的质量, g

M_d ——物料的干基质量, g

(2) 干燥速率是指干燥过程中单位时间减小的干基含水率,其计算公式为

$$D_R = \frac{D_{t_1} - D_{t_2}}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

式中 D_R ——干燥速率, %/min

D_{t_1} —— t_1 时刻的干基含水率, %

D_{t_2} —— t_2 时刻的干基含水率, %

(3) 物料水分比的计算式为^[7]

$$M_R = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (3)$$

式中 M_R ——水分比

X_t ——物料在 t 时刻的干基含水率, %

X_0 ——物料的初始干基含水率, %

X_e ——物料的平衡干基含水率, %

根据文献可知,干燥过程中苹果的平衡干基含水率

约为 5%^[19]。

(4) 对于较长时间的干燥过程,生物材料降速干燥特性可用 Fick 扩散方程描述^[7],其解析解为

$$M_R = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4b^2}\right) \quad (4)$$

式中 D_{eff} ——有效水分扩散系数, m^2/s

b ——物料厚度的 1/2, m

将式(4)简化并对数线性化,可得

$$-\ln M_R = -\ln \frac{8}{\pi^2} + \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4b^2} \quad (5)$$

由式(5)可知: $-\ln M_R$ 与 t 呈线性关系,其斜率

$$k = \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4b^2} \quad (6)$$

经 Origin 8.5 软件对 $-\ln M_R$ 与 t 进行线性拟合,求出斜率 k ,再根据式(6),计算有效水分扩散系数 D_{eff} 。

试验中的数据处理与分析采用 Origin 8.5 软件。

2 结果与讨论

2.1 风速对干燥特性的影响

在超声功率 60 W、温度 50℃ 及物料厚度 6 mm 的条件下,设定风速为 0.5、1.5、2.5 m/s,不同风速下的物料干燥曲线如图 3 所示。由图可见,物料脱水速率随着风速的提高而略有上升。风速越高,物料表面的湍动越强烈,表面的质热传递边界层越薄,表面扩散阻力越小^[7],越有利于干燥的进行。然而,风速的变化只能影响物料表面的质热传递状态,对物料内部的影响甚微。如果物料干燥过程属于内部扩散控制,则提高风速不会对干燥速率产生明显影响^[20-21]。苹果属于高糖度、致密型生物材料,其内部扩散阻力要远大于表面蒸发阻力^[22],内部传质过程决定整个干燥的干燥速率,因此提高风速对苹果的干燥速率影响不显著。鉴于风速对超声强化热

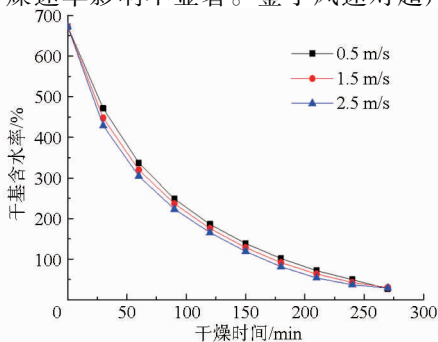


图 3 风速对超声强化热泵干燥苹果片的干燥特性的影响

Fig. 3 Effect of air velocity on drying characteristics of ultrasound reinforced heat pump drying of apple slices

泵干燥速率的影响不大,本文在后续研究中固定风速为 1.5 m/s。

2.2 超声波功率对干燥特性的影响

固定物料厚度为 6 mm 及风速为 1.5 m/s,在干燥温度 40、50、60℃ 的条件下,施加不同功率的接触式超声进行热泵干燥过程强化,干燥曲线如图 4 所示,干燥速率曲线如图 5 所示。由图可知,苹果的直接热泵干燥与超声强化热泵干燥过程均只存在降速干燥阶段,说明其干燥过程主要受内部扩散控制。在苹果热泵干燥过程中加上超声波进行强化后,物料干燥时间明显缩短,干燥速率显著上升。以温度为 50℃ 时为例,当附加超声功率分别为 30 W 和 60 W 时,所用干燥时间分别为 300 min 和 210 min,与无超声作用的干燥时间 330 min 相比,分别减少 9.09% 和 36.36%;平均干燥速率为 2.16%/min 和 3.07%/min,与无超声作用的平均干燥速率 1.97%/min 相比,分别提高了 9.64% 和 55.84%。可见,接触式超声对苹果热泵干燥过程具有显著的强化效果,且随着超声功率的增加,缩短干燥时间与提高干燥速率的比率明显增加。在热泵干燥过程中,当把物料直接放在超声辐射盘上,超声产生高频振动,并将能量直接传入物料内部,物料内组织结构受到反复、强烈的收缩和舒张作用而产生“海绵效应”^[22],当其产生的力大于物料内部微细管内水分的表面附着力时,水分更容易脱离管壁并通过微管道迁移出来^[8]。接触式超声在物料内部也可能产生空化作用,从而影响热泵干燥速率:由于超声的高频振动产生了强大的破坏应力,这种破坏应力在物料内部的液体中产生空泡,而空泡的瞬间爆破会产生强大的动能和压缩能^[23],这 2 种能量同时作用于物料内部与微管道紧密结合的水分,导致结合水变为较易流动的自由水,从而加快水分迁移。超声空化作用还会导致苹果内部孔隙结构发生变化,孔隙率增大,孔隙结构的连通性增强,减小了水分迁移阻力,水分在声压梯度驱动下形成的挤压渗流及超声热效应,从而增大了水分的迁移速率^[24]。随着超声功率的增加,物料内部振动更为强烈,超声所产生的空化效应、机械效应相应增强,在更短时间内将结合水与管壁之间的结合力破坏,并形成更多的微细管束,进一步强化了物料表面与内部传质,从而提高干燥速率。此外, Santacatalina 等^[25]认为超声波辐射板本身的机械振动能增强物料表面水分湍动并减薄苹果表面边界层,提高物料表面水分蒸发速率,也有利于干燥过程的进行。

由图 5 还可看出,在含水率较高时,不同超声功率下的干燥速率曲线有明显差别,随着干燥的进行

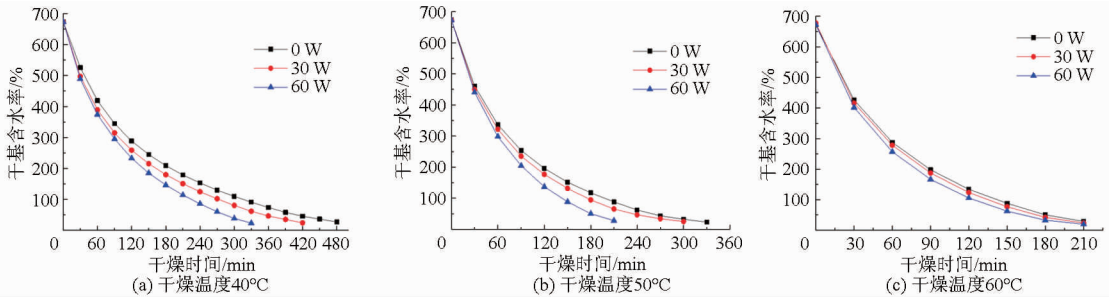


图4 不同干燥温度与超声波功率条件下苹果片热泵干燥的干燥曲线

Fig. 4 Drying curves of heat pump drying of apple slices under different ultrasonic powers and temperatures

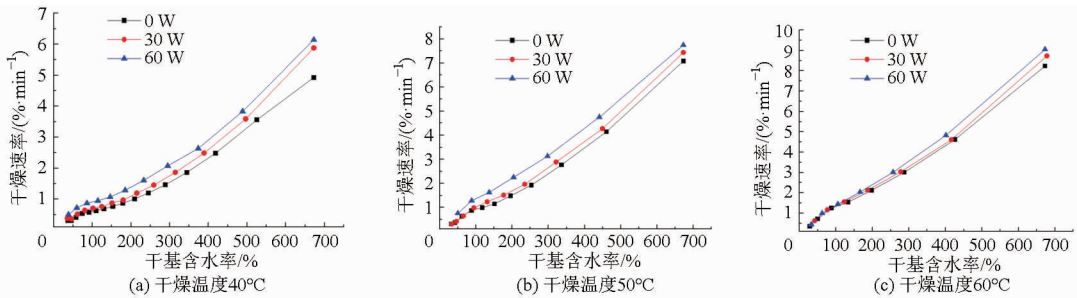


图5 不同干燥温度与超声波功率下苹果片热泵干燥的干燥速率曲线

Fig. 5 Drying rate curves of heat pump drying of apple slices under different ultrasonic powers and temperatures

及含水率的下降,干燥速率曲线之间的距离越来越小,而在图5c中,3条干燥速率曲线在干基含水率低于100%时基本重合。以上现象表明,虽然在干燥过程中提高超声功率可以提高干燥速率,但超声的强化效果随着物料含水率的下降而减弱。在高含水率阶段,由于物料中含有较多的自由水,超声在物料内部能够较好的传播,超声产生的空化效应和机械效应较为强烈,因此,30 W和60 W的超声波都能显著提高物料的干燥速率,而超声功率越大,对干燥速率的强化效果越明显。随着物料含水率的不断降低,自由水含水率显著减少^[26],内部扩散阻力越来越大,同时超声波在物料中传播的衰减系数变大,其空化效应和机械效应随之变弱,致使超声波对水分扩散及干燥速率的强化效果有所降低。

2.3 干燥温度对干燥特性的影响

图4和图5还表明了干燥温度对超声联合热泵干燥特性的影响。在60 W超声功率强化条件下,60℃时所需干燥时间比40℃时缩短36%,说明温度对干燥时间的影响十分显著。温度升高,干燥介质与物料之间的温度梯度增大,导致热流密度随之增加,提高传热速率;此外,干燥温度升高会降低干燥介质的相对湿度,增大了物料与干燥介质之间的蒸汽压差,从而提高其传质速率;提高干燥温度还使物料温度随之上升,内部水分子运动加剧,提高内部扩散速率。因此,提高干燥温度可以明显缩短干燥时间。结合图4、图5可知,不同温度条件下,超声对热泵干燥过程的强化效果有明显区别。在温度为

40℃条件下,热泵干燥苹果片的时间为480 min,附加30 W和60 W超声之后,干燥时间分别减少12.5%及31.25%;当温度升到60℃,附加30 W和60 W超声之后,干燥时间分别减少5%及12%。可见,在低温下超声的强化效果要好于高温下超声的强化效果。干燥过程中,超声对干燥速率的强化效应主要由其产生的空化效应及机械效应的强度决定。在不同温度下,相同功率的超声所提供的声强与超声能量衰减规律基本相同^[6],用于强化水分扩散的有效超声能量以及超声波产生的空化效应和机械效应并不随温度的改变而显著变化^[27];而温度升高会提高提供给物料的热流密度,用于水分扩散与蒸发的热量随之增加^[28]。因此,在超声功率不变的情况下,随着温度的升高,热效应越来越显著,超声空化效应及机械效应对物料内部水分迁徙的影响所占比逐渐降低,表现为超声对干燥的强化效果随温度升高而趋于减弱。Rodriguez等^[29]研究了气介式功率超声对苹果干燥特性的影响,在温度为30、50、70℃时,加上90 W的超声波,干燥时间分别减少53.8%、46.1%、17.4%,超声在30℃时的干燥强化效果明显优于70℃时。Garcia-Perez等^[6]利用超声在30~70℃范围内对胡萝卜块进行了干燥研究,也发现低温下功率超声强化热风干燥效果较好,高温下功率超声对热风干燥的强化效果较弱。以上文献表明温度对超声波强化效果有影响,且在较低温度时接触式超声的强化效果明显,在较高温度时接触式超声的强化效果较弱,与本文所得结论一致。

2.4 厚度对干燥特性的影响

在温度为 50℃ 的条件下,不同物料厚度下,接触式超声强化热泵干燥苹果片的干燥曲线与干燥速率曲线如图 6 和图 7 所示。由图可知,在同一超声功率下,物料厚度的增加会导致干燥时间增加及干燥速率减小。例如超声功率为 60 W,切片厚度为 3 mm 时,干燥时间为 180 min,平均干燥速率为 3.62%/min;当切片厚度增加至 9 mm 时,干燥时间延长为 390 min,平均干燥速率则降为 1.67%/min,说明增加厚度会加大物料内部质热传递阻力,提高水分扩散和热量传导的难度,从而显著降低干燥速率。此外,不同厚度下接触式超声的强化效果也有所不同。物料厚度分别为 3 mm 和 9 mm 时,附加 60 W 超声后,干燥时间分别比无超声作用缩短 33.3% 和 18.7%,平均干燥速率分别比无超声作用

提高 51% 和 24%,可知接触式超声在物料较薄时的强化效果要明显优于物料较厚时。根据声能衰减定律^[23],超声在物料内部传递过程中,其能量会不断衰减,与超声在液体中良好的传播性能相比,偏大的衰减系数会导致超声在固体物料中传播的距离有限。物料较薄时,超声波能够影响的区域所占比例较大,甚至能够穿透物料,在超声高频振动及空化作用下,物料中绝大部分区域的内部组织扩张、微孔道增多,大部分结合水与物料组织间的作用力减弱,超声强化效果较为明显。随着物料厚度的增加,超声波在传播过程中能量不断衰减、声强逐渐降低,超声未穿透物料厚度所占比例增加,导致空化效应减弱,超声波对物料内部结合水与物料组织之间作用力的影响有所降低,因而超声强化效果有所减弱。

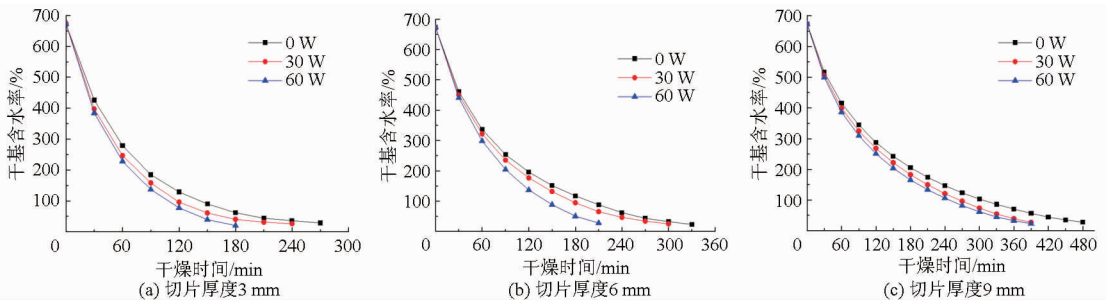


图 6 不同厚度下超声强化热泵干燥苹果片的干燥曲线

Fig. 6 Drying curves of contact ultrasound reinforced heat pump drying of apple slices with different thicknesses

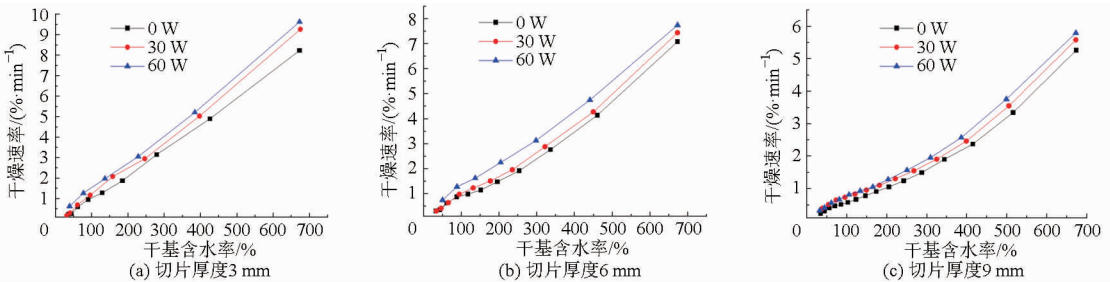


图 7 不同厚度下超声强化热泵干燥苹果片的干燥速率曲线

Fig. 7 Drying rate curves of ultrasound reinforced heat pump drying of apple slices with different thicknesses

2.5 有效水分扩散系数

不同功率、温度及厚度条件下,接触式超声强化热泵干燥苹果片的有效水分扩散系数值如表 1 所示,其范围为: $1.333 \times 10^{-10} \sim 1.651 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。以厚度为 6 mm 为例,在温度为 40、50、60℃ 条件下,附加功率为 60 W 的超声后,物料有效水分扩散系数分别比无超声作用的热泵干燥提高了 51.4%、48.9%、14.5%,可见接触式超声能够明显增加热泵干燥中苹果片内的水分扩散能力,从而提高有效水分扩散系数。一方面,由于超声空化作用使苹果内部发生挤压、形变产生了微孔道,而水分在这些微孔道中更容易扩散到物料表面,增加了扩散通道,减少

了扩散阻力;另一方面,由于超声的空化效应引发的爆破作用破坏了细胞壁,同时由于超声产生的拉伸和压缩作用减小了微管内水分的附着力,减小了细胞间水分扩散阻力,最终提高物料有效水分扩散系数^[30]。另外,附加超声后,会加大苹果片内部水分扩散的湍动^[31],从而增强苹果片内水分的对流传质,也在一定程度下提高了有效水分扩散系数。超声功率不同,对有效水分扩散系数的影响也不一样。例如温度为 50℃、厚度为 3 mm 时,附加 30 W 和 60 W 超声后,物料有效水分扩散系数分别比单一热泵干燥提高了 18.21% 和 61.91%。可见,接触式超声波功率越高,对物料内部超声的拉伸和压缩作用

表 1 不同干燥条件下的有效水分扩散系数

Tab. 1 Effective moisture diffusivity with different drying parameters

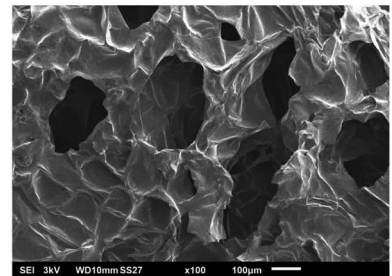
干燥条件			$D_{\text{eff}} / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
功率/W	温度/°C	厚度/mm	
0	40	3	1.333×10^{-10}
0	50	3	1.801×10^{-10}
0	60	3	3.149×10^{-10}
0	40	6	3.802×10^{-10}
0	50	6	6.020×10^{-10}
0	60	6	8.839×10^{-10}
0	40	9	4.500×10^{-10}
0	50	9	8.652×10^{-10}
0	60	9	1.496×10^{-9}
30	40	3	1.557×10^{-10}
30	50	3	2.129×10^{-10}
30	60	3	4.316×10^{-10}
30	40	6	4.459×10^{-10}
30	50	6	6.582×10^{-10}
30	60	6	9.485×10^{-10}
30	40	9	5.071×10^{-10}
30	50	9	1.056×10^{-9}
30	60	9	1.533×10^{-9}
60	40	3	2.355×10^{-10}
60	50	3	2.916×10^{-10}
60	60	3	4.413×10^{-10}
60	40	6	5.756×10^{-10}
60	50	6	8.961×10^{-10}
60	60	6	1.012×10^{-9}
60	40	9	8.168×10^{-10}
60	50	9	1.128×10^{-9}
60	60	9	1.651×10^{-9}

越显著,越有利于破坏水分与微管道的结合作用及增强水分扩散,对应的有效水分扩散系数就越高。由上可知,将接触式超声强化技术应用于热泵干燥,可明显加快干燥中物料内部传质过程,减少物料内部传质阻力,提高有效水分扩散系数。

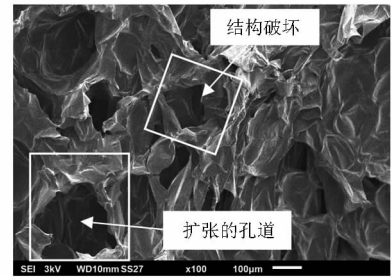
Kek 等^[32]研究了在热风干燥前对番石榴进行超声辅助渗透脱水的预处理,经处理过的物料有效水分扩散系数比未用超声处理的提高 35%; Ozuna 等^[33]利用气介式超声强化干燥苹果,在温度为 40℃、功率为 150 W 的条件下,物料有效水分扩散系数比未经超声处理的结果提高了 33.5%; Carcel 等^[20]利用气介式超声强化干燥柿子,在 50℃ 条件下,当超声功率为 75 W 时,物料有效水分扩散系数比常规热风干燥提高 29%。对比上述结果可知,本文采用的接触式超声对有效水分扩散系数的强化效果要优于超声预处理后干燥以及气介式超声强化干燥。

2.6 接触式超声对苹果片结构的影响

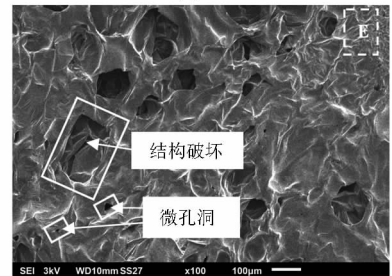
利用扫描电镜观察在不同干燥条件下苹果片的组织结构变化。无超声作用以及功率为 30 W 和 60 W 超声作用下,热泵干燥后的苹果片组织结构扫描电镜图如图 8 所示。图 8a 是未经超声处理的干燥后的苹果片组织,由图可以看出其组织结构较为致密且有一些稍微收缩的孔洞,此时细胞未充分收缩,组织间隙里的水分较难除去。图 8b 为附加 30 W 超声之后苹果片组织结构微观情况,可以看出已有细胞孔洞结构被破坏,而且出现了一些孔洞的变形与扩张。图 8c 是附加 60 W 超声之后的物料微观结构,可见结构中的孔洞明显增多,经 60 W 超声处理的组织由于超声的“海绵效应”、机械效应对组



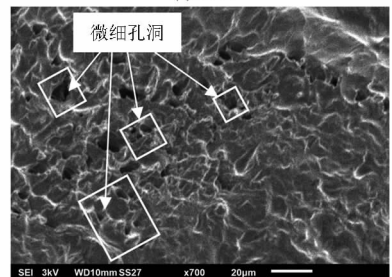
(a) 0 W



(b) 30 W



(c) 60 W



(d) 图8c中E区域放大图

图 8 不同超声功率下苹果干燥产品组织结构的扫描电镜图

Fig. 8 Scanning electron micrographs of apple tissues at different ultrasound powers

织的剪切作用,导致出现更多的微孔洞,而这些微孔洞成为水分扩散的通道,有助于水分迁徙。图 8d 为放大后的 E 区域的组织结构,放大倍数为 700 倍,从图中可以看出,上面出现了很多微细孔洞。通过以上 SEM 照片可以看出,未经超声处理的物料内部组织微孔道较少,而经过接触式超声处理的苹果片,由于其空化效应产生的爆破作用和细胞收缩,物料组织结构上的孔洞明显增多与扩张,在较大超声功率作用下,强烈的空化效应还形成了较多微细孔道,有利于物料内部水分迁徙与扩散,进而缩短干燥时间,提高干燥速率。

3 结论

(1)设计了一套超声波装置并安装在热泵干燥机内,将苹果片放在超声辐射盘上进行接触式超声强化干燥。结果表明,接触式超声可提高热泵干燥

过程中物料的水分扩散能力,降低传质阻力,从而缩短干燥时间;随着超声功率和温度的升高及物料厚度的减小,干燥时间逐渐缩短,干燥速率逐渐提高;但超声对干燥过程的强化效果随着含水率的下降而减弱;在低温及物料较薄时,接触式超声对干燥过程的强化效果较为明显,但其强化效果随着温度的升高以及物料厚度的增加而变弱。

(2)在热泵干燥过程中采用接触式超声进行干燥强化,可有效提高物料的有效水分扩散系数,其数值区间为 $1.333 \times 10^{-10} \sim 1.651 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, D_{eff} 值随着接触式超声功率及温度的升高而增大,说明接触式超声可有效降低传质阻力,提高水分扩散能力。

(3)通过扫描电镜图片可以明显看出,接触式超声会导致物料组织内部孔洞的增多与扩张,较大功率的超声还能产生微细孔洞,从而有利于物料内部水分的扩散,进而提高干燥速率。

参 考 文 献

- 1 Jeffrey D S, Signhild E A G. Thermal response testing for ground source heat pump systems—an historical review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 50: 1125 – 1137.
- 2 Vega-Mercado H, Angora-Nieto M M, Barbosa-Canovas G V. Advances in dehydration of food [J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, 49(4): 271 – 289.
- 3 Castell-Paloua, Simal S. Heat pump drying kinetics of a pressed type cheese [J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2011, 44(2): 489 – 494.
- 4 Deng Y, Zhao Y Y. Effect of pulsed vacuum and ultrasound osmopretreatments on glass transition temperature, texture, microstructure and calcium penetration of dried apples (Fuji) [J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2008, 41(9): 1575 – 1585.
- 5 陈坤杰, 李娟玲, 张瑞合. 热泵干燥技术的应用现状与展望[J]. *农业机械学报*, 2000, 31(3): 109 – 111.
Chen Kunjie, Li Juanling, Zhang Ruihe. Status and prospect of heat pump drying [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2000, 31(3): 109 – 111. (in Chinese)
- 6 Garcia-Perez J V, Rossello C, Carcel J A, et al. Effect of air temperature on convective drying assisted by high power ultrasound [J]. *Defect and Diffusion Forum*, 2006, 258:563 – 574.
- 7 吕为乔, 韩清华, 李树君, 等. 微波干燥姜片模型建立与去水机理分析[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 233 – 237.
Lü Weiqiao, Han Qinghua, Li Shujun, et al. Analysis of microwave drying model and water removing mechanism of ginger slices [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4): 233 – 237. (in Chinese)
- 8 赵芳, 陈振乾, 施明恒. 胡萝卜超声波预干燥热湿耦合迁移过程的数值模拟[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(11): 349 – 354.
Zhao Fang, Chen Zhenqian, Shi Mingheng. Numerical simulation of coupled heat and moisture transfer process in ultrasonic pre-dehydration of carrot [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(11): 349 – 354. (in Chinese)
- 9 张利芳, 张名位, 黄文, 等. 纤维素酶协同超声波辅助提取苦瓜多糖工艺优化[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(11): 142 – 147.
Zhang Lifang, Zhang Mingwei, Huang Wen, et al. Optimization on cellulase and ultrasonic wave assisted extraction technology of *Momordica charantia* polysaccharides [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(11): 142 – 147. (in Chinese)
- 10 Awad T S, Moharram H A, Shaltout O E, et al. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food; a review [J]. *Food Research International*, 2012, 48(2): 410 – 427.
- 11 Schossler K, Jager H, Knorr D. Effect of continuous and intermittent ultrasound on drying time and effective diffusivity drying convective drying of apple and red bell pepper [J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 108(1): 103 – 110.
- 12 Rodrigues S, Fernandes F A N. Use of ultrasound as pretreatment for dehydration of melons [J]. *Drying Technology*, 2007, 25(10): 1791 – 1796.
- 13 Simal S, Benedito J, Sanchez E S, et al. Use of ultrasound to increase mass transport rates during osmotic dehydration [J]. *Journal of Food Engineering*, 1998, 36(3): 323 – 336.
- 14 Romero J C A, Yopez V B D. Ultrasound as pretreatment to convective drying of Andean blackberry (*Rubus glaucus* Benth) [J].

- Ultrasonic Sonochemistry, 2015, 22: 205 – 210.
- 15 Gamboa S J, Montilla A, Carcel J A, et al. Air-borne ultrasound application in the convective drying of strawberry[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 128: 132 – 139.
- 16 Gallego-Juarez J A, Riera E, Fuente-Blanco S D L, et al. Application of high-power ultrasound for dehydration of vegetables: processes and devices [J]. Drying Technology, 2007, 25(11): 1893 – 1901.
- 17 Riera E, Gallego Juárez, Rodríguez-Corral G, et al. Application of high-power ultrasound for drying vegetables[C]//Proceedings of Forum Acusticum Sevilla 2002,2002.
- 18 Liu Y H, Miao S, Wu J Y, et al. Drying and quality characteristics of *Flos Lonicerae* in modified atmosphere with heat pump system[J]. Journal of Food Process Engineering, 2014, 37(1): 37 – 45.
- 19 Mabrouk S B, Benali E, Oueslati H. Experimental study and numerical modeling of drying characteristics apple slices[J]. Food and Bioproducts Processing, 2012, 90(4): 719 – 728.
- 20 Carcel J A, Garcia-Perez J V, Riera E, et al. Influence of high-intensity ultrasound on drying kinetics of persimmon[J]. Drying Technology, 2007, 25(1): 185 – 193.
- 21 Mulet A. Drying modelling and water diffusivity in carrots and potatoes[J]. Journal of Food Engineering, 1994, 22(1): 329 – 348.
- 22 Nowacka M, Wiktor A, Sledz M, et al. Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 113(3): 427 – 433.
- 23 Bergmann L. 超声[M].6版.曹大文,译.北京:国防工业出版社,1964.
- 24 严媛媛,冯雷雨,张超杰,等.超声能量密度对污泥脱水性能的影响[J].化工学报,2010,61(2):491–495.
Yan Yuanyuan, Feng Leiyu, Zhang Chaojie, et al. Effect of ultrasonic energy density on sludge dewatering performance [J]. CIESC Journal, 2010, 61(2): 491 – 495. (in Chinese)
- 25 Santacatalina J V, Rodriguez O, Simal S, et al. Ultrasonically enhanced low-temperature drying of apple: influence on drying kinetics and antioxidant potential [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 138: 35 – 44.
- 26 Udomkun P, Argyropoulos D, Nagle M, et al. Single layer drying kinetics of papaya amidst vertical and horizontal airflow[J]. Food Science and Technology, 2015, 64(1): 67 – 73.
- 27 Khoei M, Chekin F. The ultrasound-assisted aqueous extraction of rice bran oil[J]. Food Chemistry, 2016, 194: 503 – 507.
- 28 赵芳,程道来,陈振乾.超声波处理对污泥热风干燥过程的影响[J].农业工程学报,2015,31(4):272–275.
Zhao Fang, Cheng Daolai, Chen Zhenqian. Effect of ultrasonic treatment on hot air drying process of sludge [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4): 272 – 275. (in Chinese)
- 29 Rodriguez O, Santacatalina J V, Simal S, et al. Influence of power ultrasound application on drying kinetics of apple and its antioxidant and microstructural properties [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 129: 21 – 29.
- 30 Fernandes F A N, Gallao M I, Rodrigues S. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: melon dehydration [J]. LWT—Food Science and Technology, 2008, 41(4): 604 – 610.
- 31 Muthupandian A. Applications of ultrasound in food and bioprocessing [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 25: 17 – 23.
- 32 Kek S P, Chin N L, Yusof Y A. Direct and indirect power ultrasound assisted pre-osmotic treatments in convective drying of guava slices [J]. Food and Bioproducts Processing, 2013, 91(4): 495 – 506.
- 33 Ozuna C, Alvarez-Arenas T G, Riera E, et al. Influence of material structure on air-borne ultrasonic application in drying [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2014, 21(3): 1235 – 1243.