

不同微波环境下苹果片干燥特性分析

吕 豪¹ 吕为乔¹ 崔政伟² 吕黄珍³ 马季威³ 赵 丹³

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 江南大学江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 无锡 214122;
3. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 为了提高新鲜苹果片的干燥效率和干燥品质,通过低场核磁共振分析与成像(NMR/MRI)等研究了微波热风流化床干燥、微波真空干燥、电热鼓风干燥3种干燥工艺中苹果片的水分迁移状态和热像特征;通过色差仪等研究了不同工艺条件下脱水苹果脆片的色泽、质地和微孔结构。结果表明,随着干燥过程的持续,主信号量 A_{2i} 峰值向左偏移,水分的主要状态逐步变成不易流动水和结合水,其中热风干燥工艺前半干燥周期总信号量 A_2 下降较快,表明越到最后,物料表面结壳阻碍水分传递,水分干燥越困难;微波热风流化床干燥的温度场均匀性要高于微波真空干燥,表明热风和流化床对改善微波干燥的均匀性有积极作用。在物料特性方面,负压环境能改善苹果片的氧化褐变,但微波干燥产品在色差参数 ΔE 上的稳定性有待提高;同时微波真空干燥过程具有膨化效应,产品压缩应力最小、微孔结构明显,最适合开发苹果片产品。

关键词: 苹果片;微波干燥;核磁共振;红外热像分析

中图分类号: TS255.36 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0433-07

Analysis on Drying Characteristics of Apple Slices under Different Microwave Conditions

LÜ Hao¹ LÜ Weiqiao¹ CUI Zhengwei² LÜ Huangzhen³ MA Jiwei³ ZHAO Dan³

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Jiangsu Province Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China
3. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve the drying efficiency and drying quality of fresh apple slices, a low-field nuclear magnetic resonance and imaging analyzer (NMR/MRI) were used to measure the water-migration and thermal-image characteristics of apple slices during microwave hot-airflow drying, microwave vacuum drying and hot-airflow drying respectively. Additionally, the color, texture and microporous structure of the dehydrated apple slices were analyzed. As a result, with the drying process, the signal A_{2i} of the main peak was shifted to the left, and the main state of moisture was gradually changed into immobilized water and bound water. The total signal A_2 in the front half of the hot-airflow drying process was decreased rapidly, which indicated that drying was much more difficult in the last stage. The uniformity of temperature in microwave hot-airflow drying was better than that in microwave vacuum drying, which indicated that hot air and fluidized bed had positive effect on improving the uniformity of microwave drying. In the aspect of drying quality, negative pressure environment can avoid the serious oxidative browning of apple slices, but the stability of color difference ΔE needed to be improved during microwave drying. The apple slices had puffing effect during microwave vacuum drying, and the products had the least compressive stress and obvious micro-pore structure. Therefore, microwave vacuum drying was most suitable for developing crisp dehydrated apple slices as leisure food.

Key words: apple slices; microwave drying; nuclear magnetic resonance; infrared thermography analysis

收稿日期: 2018-07-10 修回日期: 2018-08-23

基金项目: 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室开放项目(FM-201801)和国家重点研发计划项目(2017YFD0400900、2017YFD0700304-03)

作者简介: 吕豪(1989—),男,博士生,主要从事农产品干燥技术与装备研究,E-mail: 13146035826@163.com

通信作者: 崔政伟(1963—),男,教授,主要从事农产品干燥技术与装备研究,E-mail: cuizhengwei@jiangnan.edu.cn

0 引言

苹果营养丰富,除了粗纤维,还具有大量人体必需的维生素和矿物质等营养成分^[1-2]。苹果中含有大量水分,在运输和贮藏过程中容易腐败变质。干燥可以脱出物料大部分水分,确保产品的微生物稳定性,并最大限度地减少物料储运过程中的物理化学变化^[3]。合理的干燥手段可以生产高附加值的脱水苹果脆片休闲食品,是一种重要的深加工方法^[4-5]。

微波干燥是新一代干燥技术,具有干燥速度快和干燥功率灵敏易控制等优点^[6]。由于微波干燥过程依赖于物料的介电特性和场强的分布,单纯的微波干燥往往具有干燥不均、水分散失困难的问题^[7-8]。真空环境和热风环境常用来驱除微波干燥过程散失的水汽,同时对微波干燥的水分状态和干燥品质形成影响^[9-10]。低场核磁共振分析与成像(Low-field nuclear magnetic resonance and imaging, NMR/MRI)是目前分析物料在干燥过程水分状态和分布的重要方法,通过物料内质子的横向弛豫时间 T_2 来检测样品中水分状态自由水弛豫时间 T_{21} 、不易流动水弛豫时间 T_{22} 和自由水弛豫时间 T_{23} 曲线和水分分布图,并从微观角度来解释样品中水分迁移规律^[11-12]。本文结合热风干燥、微波干燥和组合干燥,以及干燥过程的水分状态,研究苹果脆片色泽、质构、微孔径等物料特性。

1 材料与方法

1.1 主要原料

新鲜红富士苹果(*Malus pumila* Mill)8~10 kg,品种为“烟富10号”,所选原料来自同一批次,无虫害和机械损伤,大小均匀,品质稳定,无损伤,无腐烂,含水率 $(88.00 \pm 0.05)\%$ 。所选择本用保鲜袋保存,置于4℃冷藏备用。用于原料护色处理的柠檬酸($C_6H_8O_7$)、亚硫酸氢钠($NaHSO_3$)、氯化钙($CaCl_2$)、氯化钠($NaCl$)等试剂均为食品级。

1.2 设备与仪器

所用仪器包括:ORW1.0S-5Z(U)型微波真空干燥装备(奥润微波科技有限公司),WB6E型微波热风流化床干燥装备(中国农业机械化科学研究院),DFG801型电热鼓风干燥装备(湖北省黄石市医疗器械厂),MiroMR20-030V-I型低场核磁共振分析仪(纽迈电子科技有限公司),Hitachi S3400型扫描电子显微镜(日本日立公司),等。其中,微波热风流化床干燥装备如图1所示,该试验台由微波干燥室、微波馈能传输系统、振动流态化系统、热风

系统、排潮系统和控制系统等组成,其中振动流态化通过机械方式由振动电机产生激振力实现物料的流态化,该设备可以实现较大质量片状物料的均匀流态化^[13]。

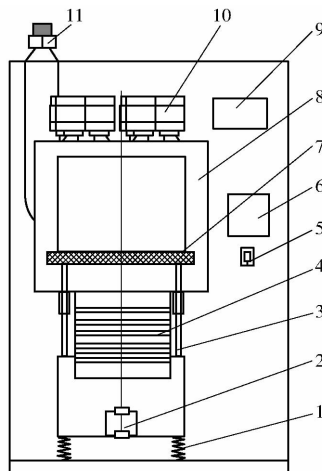


图1 微波热风流化床干燥试验台结构示意图

Fig.1 Schematic of multiple-sources microwave combining with hot-air uniform drying test device

1. 减振弹簧
2. 振动电机
3. 振动机架
4. 电加热管
5. 变频器
6. 触摸屏
7. 物料盘
8. 微波干燥室
9. 监视器
10. 磁控微波管
11. 引风机

1.3 试验方法

(1)原料切分护色处理。将苹果表面冲洗干净,去皮去核,切成5 mm厚的薄片后,放入护色液中浸泡0.5 h以防止苹果片与空气接触氧化褐变。护色液中柠檬酸、亚硫酸氢钠、氯化钙、氯化钠的质量分数分别为0.5%、0.2%、0.4%、0.5%。护色完成后,反复清洗干净,然后沥干表面溶液后进入相应的干燥工艺。

(2)干燥工艺过程分析。准备3组原料,每组预处理后的苹果片约1 000 g,分别进行微波热风流化床干燥(MAD)、微波真空干燥(MVD)和电热鼓风干燥(AD),微波功率设置为1 000 W,最高温度设定在70℃。抽样并利用NMR/MRI测量干燥过程中间阶段和干燥终点的水分状态,苹果片最终产品的干基含水率不高于8%。

低场核磁共振(NMR)是使氢质子在磁场中形成核磁能级,当电磁波能量等于原子核两相邻能级的能级差时,部分低能态的氢质子跃迁到高能态而产生共振^[14]。如果停止激发脉冲,氢质子将返回到原来的低能态。两个进动频率相同、进动取向不同的氢质子互相作用,改变运动方向的时间称为横向弛豫时间,用 T_2 表示。氢质子受束缚力越大或自由度越小, T_2 弛豫时间越短,在 T_2 谱上峰位置越靠左;反之则 T_2 弛豫时间越长,在 T_2 谱上峰位置越靠右^[15]。试验利用NMR中Carr-Purcell-Meiboom-

Gill 脉冲序列测定苹果片干燥过程中与各种水分相关的 T_2 值。采样参数: 采样点数 $T_D = 184\,920$, 采样频率 $S_W = 200\text{ kHz}$; 重复等待时间 $T_R = 6\text{ s}$; 重复采样次数 $N_S = 4$ 。使用 2D 核磁共振分析软件和重建技术 (SIRT) 算法 100 000 次迭代拟合, 将采集到的 T_2 衰减曲线代入弛豫模型, 拟合并反演可以得到样品的 T_2 弛豫信息, 包括弛豫时间及其对应的弛豫信号分量, 横坐标为 $10^{-2} \sim 10^4\text{ ms}$ 对数分布的 100 个横向弛豫时间分量 T_2 , 纵坐标为各弛豫时间对应的信号分量 A_2 , 无量纲^[16]。弛豫时间的衰减信息主要由水分提供^[17], 试验根据弛豫时间的区间来划分水分组成, 设定结合水、不易流动水与自由水分别对应 3 个弛豫时间段 T_{21} (0.01 ~ 50 ms)、 T_{22} (50 ~ 500 ms)、 T_{23} (500 ~ 10 000 ms)^[18-19]。

低场核磁共振成像 (MRI) 作为 NMR 的扩展, 可以提供自旋的空间信息, 得到质子在物料空间的分布。样品复杂结构的清晰度主要受组分中含水率的影响。图像中的亮度越高, 说明氢质子的状态越活跃, 在苹果片脱水过程中, 表现为水分的多少及其活跃程度^[20]。采样参数为: 相位编码视野 $F_P = 80\text{ mm}$, 重复等待时间 $T_R = 1\,000\text{ ms}$, 回波时间 $T_E = 7.6\text{ ms}$, 层数 $S = 1$, 选层厚度 $W = 4\text{ mm}$, 重复采样次数 $N_S = 4$ 。

准备 3 组原料, 每组预处理后苹果片约 1 000 g 分别进行 MAD、MVD 和 AD 工艺的干燥, 微波功率为 1 000 W, 各工艺下最高温度设定在 70℃。通过红外热像仪对物料干燥过程中间阶段的温度分布状态进行监测研究。

(3) 脱水产品品质分析。对不同干燥工艺下得到的苹果片物料特性进行研究, 主要涉及物料的色泽、应力特性和微孔径变化。

利用 CR-400 型色差计, 测定微波热风流化床干燥、微波真空干燥和热风干燥 3 种样品的色差。其中, L^* 为明度指数, $L^* = 0$ 表示黑色, $L^* = 100$ 表示白色; a^* 、 b^* 为彩度指数, $+a^*$ 方向颜色接近红色, $-a^*$ 方向接近绿色, $+b^*$ 方向接近红色, $-b^*$ 方向接近蓝色。 ΔE 为两点之间的变化值^[21], 计算公式为

$$\Delta E = [(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2]^{1/2} \quad (1)$$

式中 L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* ——新鲜苹果片的测定值

L^* 、 a^* 、 b^* ——不同干燥方式干燥苹果片的测定值, 为了减少试验偏差, 样品经打碎后测量均值

复水后的应力特点是评价脱水果蔬品质的重要

指标, 试验借助 TMS-PRQ 型食品物性仪对复水后的苹果片进行质地检测, 试验采用压缩法测得在压缩比为 40% 和 80% 两种条件下的应力曲线, 得出不同工艺下的干燥苹果片的最大压缩应力。

分别选取微波热风流化床干燥、微波真空干燥和热风干燥 3 种工艺下的脱水苹果片各一块, 贴到样品台上、镀膜, 通过 Hitachi S3400 型扫描电子显微镜 (SEM) 扫描观察, 在清晰的比例下拍照。

2 结果与分析

2.1 苹果片水分状态分析

信号量的大小反映了水分的活跃程度, 信号量是无量纲指标, 与采样参数的设置有关, 在同一采样参数下, T_2 谱上信号量越强, 该种水分含量越高。与此同时, 对 T_2 谱曲线积分求和, 可以得到水分的总信号量 A_2 , 对不同水分弛豫时间段 T_{21} (0.01 ~ 50 ms)、 T_{22} (50 ~ 500 ms)、 T_{23} (500 ~ 10 000 ms), 可以分别求出 A_{21} 、 A_{22} 和 A_{23} , 分别代表了结合水、不易流动水和自由水的信号量, 由此可以推断各个状态水分的量^[22]。在设定功率下微波热风流化床干燥和微波真空干燥苹果片需要 80 min, 通过热风干燥苹果片需要 8 h。同一采样参数和不同干燥工艺下苹果片 T_2 信号量分布图如图 2 所示, 并通过苏州纽迈电子科技有限公司开发了与 Matlab 2011b 集成的 Process_Peak_QY_2016 峰值分析软件, 积分计算出了 A_{21} 、 A_{22} 和 A_{23} 值。

结果表明, 新鲜苹果片中 A_{23} 信号量大, 占据了总水分信号量 A_2 的主体。微波热风流化床干燥工艺的苹果片样品, 干燥时间在 40 min 时的中间阶段, 物料水分的自由水成分显著降低, 不易流动水和结合水占据了水分的主要部分, 总信号量 A_2 由新鲜样品的 15 394 减小到 7 158。微波真空干燥工艺干燥持续 40 min 时, 苹果片自由水同样会显著降低, 不易流动水和结合水占据了水分的主体, 但从总的信号量来看, 微波真空干燥工艺的苹果片由新鲜样品的 15 394 减小到 7 351。中间阶段的 A_2 值微波真空干燥工艺大于微波热风流化床干燥工艺, 说明微波真空干燥中间状态的水分要高于微波热风干燥, 分析认为热风不仅起到驱除苹果片表面水分的作用, 还起到表层加热的作用, 能加速干燥过程。而真空环境起到加速水汽从里向外迁移的作用, 但物料升温较慢, 物料被真空环境带走的湿度小, 造成了物料在初始干燥阶段干燥速度慢于微波热风干燥。热风干燥工艺干燥持续 4 h 时的中间水分苹果片, 同样出现自由水成分显著降低, 不易流动水和结合水占据了水分的主体

的情况,但是相对于前两组微波干燥工艺,样品各部分水分的信号量较低。总信号量 A_2 由鲜样的 13 954 降到中间阶段的 6 191,小于微波热风流化床干燥和微波真空中间阶段的 A_2 值,说明热风干燥工艺前半干燥周期,水分下降较快,越到最后水分干燥愈加困难。物料的最终产品干基含水率不

高于 8%,相对于初始原料,3 种工艺下的苹果片在该阶段自由水信号完全消失,同时在弛豫时间低的左侧出现新的峰值,通过水分的划分,可以判定为少量的结合水信号 A_{21} 和极少量的不易流动水 A_{22} 。干燥最终阶段,剩余总水分信号以结合水为主,脱水物料可实现安全贮藏。

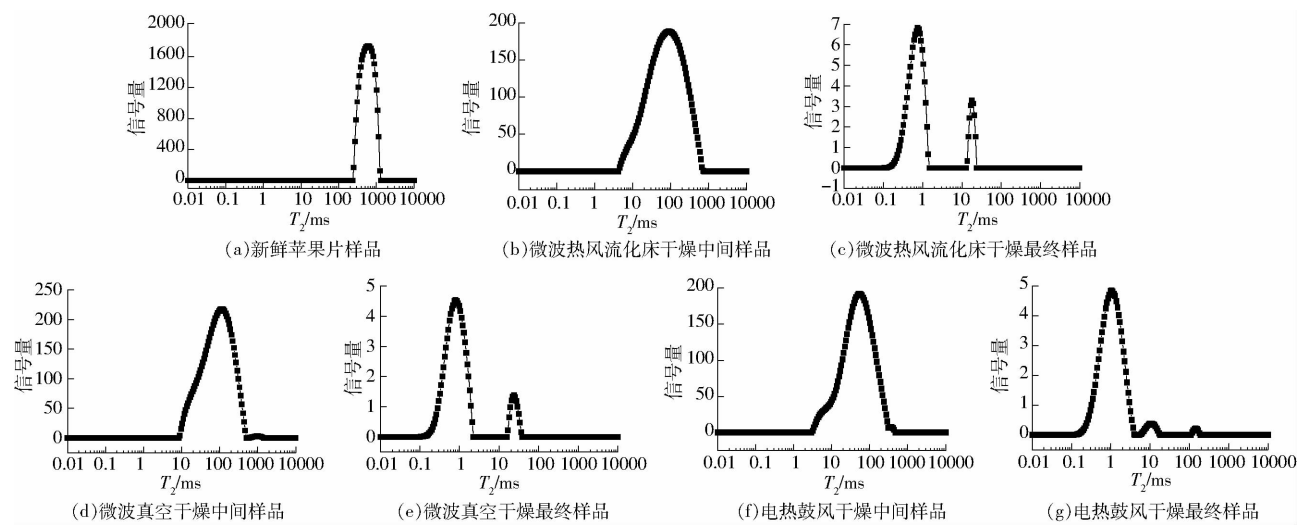


图 2 不同干燥工艺下苹果片 T_2 信号量分布图

Fig. 2 Distribution of amplitude of hydrogen protons vs relaxation time T_2 during different drying processes of apple slices

低场核磁共振与成像可以通过自旋的空间信息得到质子在物料空间的分布。样品复杂结构的清晰度主要受组分中含水率的影响。图像中的亮度越高,说明氢质子的状态越活跃,在苹果片脱水过程中,表现为水分的多少及其活跃程度。与 NMR 取

样方式相同,MRI 数据用来反映在苹果片干燥不同阶段水分空间分布。所有采样后的图像建立统一映射,以便对结果比较分析。对苹果片干燥中间阶段样品的 MRI 结果如图 3 所示。

可以发现,微波真空干燥工艺干燥 40 min 时

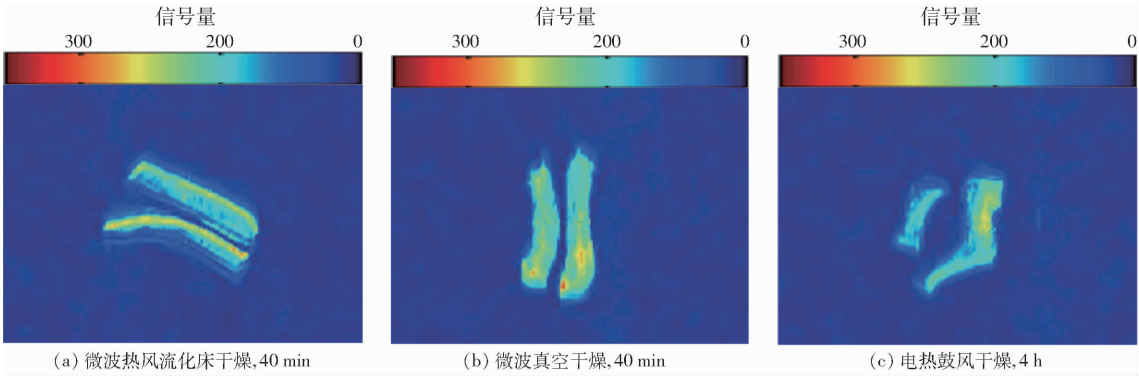


图 3 不同干燥工艺下苹果片 MRI 图

Fig. 3 MRI result of apple slices during different drying processes

苹果片的水分信号分布在各区域的强弱有显著的不同(图 3b),说明在干燥过程中各部位的含水率有一定的差别,苹果片在微波真空干燥工艺干燥中间阶段干燥不均现象明显。比较而言,微波热风流化床工艺干燥苹果片 40 min 的 MRI 图信号分布均匀性强一些(图 3a)。说明振动流化床会改善微波干燥的均匀效果。此外,热风的作用对微波干燥形成一定的补充,有效改善了苹果片在微波干燥中间阶段

的均匀性。电热鼓风干燥工艺干燥持续 4 h 的苹果片均匀性较好,但相对于微波干燥工艺,图像亮度较低(图 3c),说明在该阶段苹果片的含水率较低。这与在前半周期,电热鼓风干燥能去除更多的水分相吻合。

2.2 苹果片红外热像分析

试验利用 FLIR E40 型红外热像仪测得苹果片在微波热风流化床干燥 40 min、微波真空工艺干燥

40 min 和电热鼓风干燥 4 h 共 3 种不同干燥工艺中间阶段的热像图(图 4),热像结果反映了不同干燥工艺物料温度监控的精准程度和受热均匀程度,由于微波真空干燥需要破真空取样,温度比实际值略低,但从温度分布来看,温度分布差异明显(图 4b),这与 MRI 结果中水分分布不均、干燥不均现象相符合。在微波热风流化床干燥苹果片的中间阶段,物料的温度围绕在设定的 70℃,局部点高于设定值 1~3℃(图 4a),说

明红外测温仪的监控温度有一定的盲区,但从温度的均匀性上看,要优于微波真空干燥工艺。分析认为热风 and 流化床都提高了微波热风流化床工艺中物料温度分布的均匀性,研究结果与 MRI 的结果吻合。电热鼓风干燥苹果片持续 4 h 时的热像图(图 4c),温度在 70℃左右,温度分布的偏差浮动较小,且分布均衡,说明电热鼓风干燥工艺在物料温度分布上监测数据稳定,温度均匀性良好。

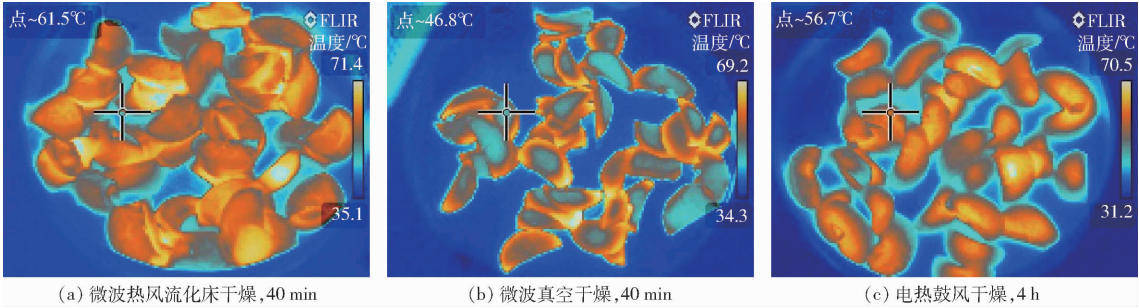


图 4 不同干燥工艺下苹果片的热像图

Fig. 4 Thermal images of apple slices during different drying processes

2.3 不同干燥工艺下脱水苹果片 L^* 、 a^* 、 b^* 和 ΔE 值分析

不同干燥工艺下的脱水苹果片的色泽有所不同,试验得到不同产品的色泽参数 L^* 、 a^* 和 b^* (图 5),图中不同字母表示差异显著, $P < 0.05$ 。相对于新鲜苹果片样品,热风干燥工艺苹果片的 L^* 值较大,说明随着水分的持续蒸发,苹果片的色泽变亮,更接近于白色,同时说明护色处理有效控制了苹果片在干燥过程中的酶促褐变反应;微波真空干燥工艺的苹果片的 L^* 值较小,但大于微波热风流化床干燥的产品,说明微波干燥过程物料的局部过热会发生颜色变化,微波对物料的强烈作用,会发生褐变反应,在热风条件下更加明显。微波热风流化床干燥工艺的产品黄度和红度都比较高,且色泽较暗,说明苹果片由原始的白色向黄褐色发展,感官品质下降。试验以新鲜苹果片为对照样,按照式(1)计算了 L^* 、 a^* 、 b^* 的色差 ΔE ,一般来说 ΔE 越小干燥产品的色泽越好。结果发现 MVD 工艺干燥产品的 ΔE 最小,微波热风流化床干燥工艺苹果片产品的 ΔE 值最大,分析表明负压环境和护色处理都能改善物料的氧化褐变,但微波热风流化床干燥工艺在产品色泽参数上的干燥品质有待提高。

2.4 苹果片压缩应力分析

试验选取微波热风流化床干燥、微波真空干燥和电热鼓风干燥 3 组不同工艺下,大小均匀、形状规则的脱水苹果片产品,在 TMS-PRO 型食品物性分析仪上进行应力压缩试验,压缩比分别设置为 40% 和 80% 两个水平。结果发现(表 1),微波热风流化

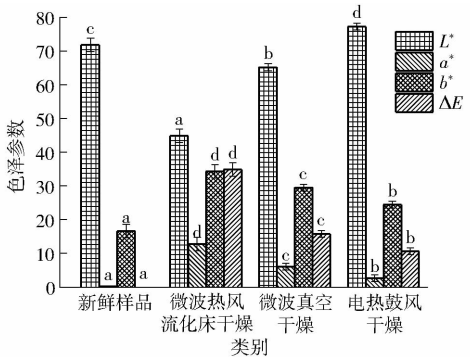


图 5 不同干燥工艺下苹果片干燥产品的 L^* 、 a^* 、 b^* 和 ΔE 值

Fig. 5 Chromatic aberration (L^* , a^* , b^* and ΔE) of dehydrated apple slices from different drying processes

表 1 不同干燥工艺下苹果片干燥产品的最大压缩应力
Tab.1 Maximum compressive stress of dried apple slices from different drying processes

干燥工艺	最大压缩应力/N	
	40% 压缩比	80% 压缩比
微波热风流化床干燥	(50.21 ± 5.12) ^b	(180.25 ± 4.13) ^c
微波真空干燥	(29.16 ± 5.35) ^a	(100.38 ± 9.01) ^a
电热鼓风干燥	(46.72 ± 2.18) ^b	(160.45 ± 2.31) ^b

注:表中同列不同字母表示差异性显著, $P < 0.05$ 。

床干燥工艺苹果片的压缩应力最大,在 40% 和 80% 两个水平的压缩比下分别为 50.21 N 和 180.25 N,说明苹果片微波热风干燥后组织结构致密,物料体积收缩严重。对于电热鼓风干燥工艺干燥苹果片最大压缩应力在 46.72 N 和 160.45 N,说明电热鼓风干燥过程苹果片韧度较低。微波真空干燥苹果片压缩应力最小,分析认为微波真空干燥工艺下的苹果

片,具有一定的膨化效果,组织结构疏松,质地酥脆。因此,试验认为微波真空干燥工艺的苹果片,在干燥过程中具有膨化效应,最适合用于开发脱水苹果片产品。

2.5 苹果片微观结构分析

试验选取微波热风流化床干燥、微波真空干燥和热风干燥 3 组不同工艺下的脱水苹果片产品,观察在 Hitachi S3400 型 SEM 下的微孔结构。分别选取150 倍和300 倍的放大倍数,发现不同工艺下产品微观结构有显著的不同(图 6)。其中微波热风流化床干燥组织结构褶皱明显,说明细胞壁受到微波较大的刺激发生形变,未有明显的孔径,也未出现果蔬干燥后经常被发现的淀粉颗粒(图 6a、6b)。微波真空

干燥工艺下的脱水苹果片出现明显的孔隙,说明在真空环境下,水分在微波的强烈刺激下,快速蒸发出来,组织结构受到水汽的压差膨化,出现疏松的孔径。微波真空干燥工艺下苹果片的这种微观结构与应力特性中最大应力小的特点相一致,解释了微波真空干燥苹果片的膨化效果(图 6c、6d)。热风干燥工艺下的苹果片,组织结构原态变化不大,并在 300 倍的 SEM 形貌图中有明显的淀粉颗粒出现。分析认为,电热鼓风干燥工艺对物料微观结构上氢键、极性基团的影响较小,对水分驱除过程比较缓慢,因此物料保持了较为原始的形态结构(图 6e、6f)。SEM 形貌中的结果与压缩应力的结果相吻合,微观结构的状态与干燥机理有关,影响着物料的质地和口感。

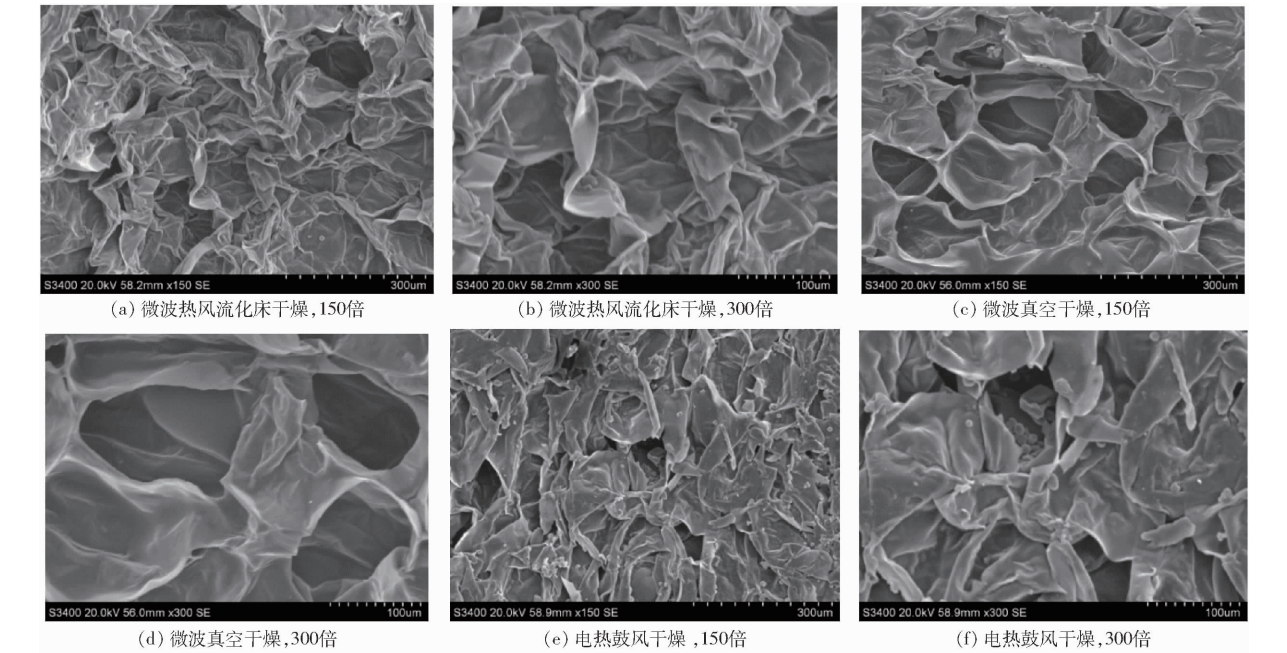


图 6 不同干燥工艺下苹果片干燥产品的 SEM 形貌图

Fig. 6 SEM images of dehydrated apple slices from different drying processes

3 结论

- (1)相比电热鼓风干燥工艺,微波热风流化床和微波真空干燥苹果片具有较高干燥效率。微波真空干燥初始干燥阶段干燥速度慢于微波热风流化床干燥。电热鼓风干燥工艺相对于微波热风流化床和微波真空干燥工艺,样品各部分水分的信号量较低,说明电热鼓风干燥工艺前半干周期水分下降较快,越到最后水分干燥愈困难。
- (2)苹果片在微波真空干燥工艺干燥中间阶段干燥不均现象明显,振动流化床能够改善微波干燥

- 苹果片均匀性,但是水分干燥不均现象没有完全消除,电热鼓风干燥工艺的均匀性要高于微波热风流化床干燥和微波真空干燥,但微波热风流化床干燥的温度场均匀性高于微波真空干燥工艺,说明苹果片微波干燥不均现象明显,但热风 and 流化床对改善微波干燥的均匀性有积极作用。
- (3)负压环境和护色处理都能改善苹果片的氧化褐变,但微波干燥产品在色泽参数上的稳定性有待提高。微波真空干燥工艺在干燥过程具有膨化效应,产品压缩应力最小、微孔径最大,最适合开发苹果片产品。

参 考 文 献

1 韩清华,李树君,马季威,等. 微波真空干燥膨化苹果脆片的研究[J]. 农业机械学报,2006, 37(8):155 - 158.
HAN Qinghua, LI Shujun, MA Jiwei, et al. Microwave vacuum drying and puffing characteristics of apple chips[J]. Transactions of

- the Chinese Society for Agricultural Machinery,2006,37(8):155 – 158. (in Chinese)
- 2 WANG Z,SUN J,CHEN F,et al. Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying[J]. Journal of Food Engineering,2007,80(2):536 – 544.
- 3 王雪媛,高琨,陈芹芹,等. 苹果片中短波红外干燥过程中水分扩散特性[J]. 农业工程学报,2015,31(12):275 – 281.
WANG Xueyuan,GAO Kun,CHEN Qinqin,et al. Water diffusion characteristics of apple slices during short and medium-wave infrared drying[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(12):275 – 281. (in Chinese)
- 4 ZHANG M,TANG J,WANG S,et al. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables[J]. Trends in Food Science & Technology,2006,17(10):524 – 534.
- 5 ZHANG M,CHEN H,MUJUMDAR A S,et al. Recent developments in high-quality drying of vegetables fruits and aquatic products [J]. Critical Reviews in Food science and Nutrition,2017,57(6):1239 – 1255.
- 6 TANG J. Unlocking potentials of microwaves for food safety and quality[J]. Journal of Food Science,2015,80(8):1776 – 1793.
- 7 ZHAO D,DING S,LIU L,et al. Two-stage intermittent microwave coupled with hot-air drying of carrot slices: drying kinetics and physical quality[J]. Food and Bioprocess Technology,2014,7(8):2308 – 2318.
- 8 FENG H,TANG J. Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed[J]. Journal of Food Science,1998,63(4):679 – 683.
- 9 WOJDYLO A,LECH K,OSZMIANSKI J,et al. Effect of convective and vacuum-microwave drying on the bioactive compounds, color, and antioxidant capacity of sour cherries[J]. Food and Bioprocess Technology,2014,7(3):829 – 841.
- 10 DAS I,ARORA A. Alternate microwave and convective hot air application for rapid mushroom drying[J]. Journal of Food Engineering,2018,223:208 – 219.
- 11 张绪坤,祝树森,黄俭花,等. 用低场核磁分析胡萝卜切片干燥过程的内部水分变化[J]. 农业工程学报,2012,28(22):282 – 287.
ZHANG Xukun,ZHU Shusen,HUANG Jianhua,et al. Analysis on internal moisture changes of carrot slices during drying process using low-field NMR[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(22):282 – 287. (in Chinese)
- 12 CASTELL-PALOU A,FEMENIA A,SIMAL S,et al. Moisture profiles in cheese drying determined by TD – NMR: mathematical modeling of mass transfer[J]. Journal of Food Engineering,2011,104(4):525 – 531.
- 13 韩清华,谢时军,李树君,等. 多馈源热风微波流态化干燥试验台设计[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(2):210 – 214.
http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140235&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.035.
HAN Qinghua,XIE Shijun,LI Shujun,et al. Design of multiple-sources microwave combining with hot-air fluidized drying test device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(2):210 – 214. (in Chinese)
- 14 FUNDO J F,AMARO A R,CARVALHO A,et al. Fresh-cut melon quality during storage: an NMR study of water transverse relaxation time[J]. Journal of Food Engineering,2015,167(Part A):71 – 76.
- 15 RUIZ-CABRERA M,GOU P,FOUCAT L,et al. Water transfer analysis in pork meat supported by NMR imaging[J]. Meat Science,2004,67(1):169 – 178.
- 16 SONG Y,ZHANG X,ZHU B,et al. Real-time detection of water dynamics in abalone (*Haliotis discus hannai* Ino) during drying and rehydration processes assessed by LF – NMR and MRI[J]. Drying Technology,2018,36(1):72 – 83.
- 17 李冰,尹青,殷丽君,等. 香菇热风微波流态化的干燥特性与机理分析[J]. 中国食品学报,2015,15(5):134 – 139.
LI Bing,YIN Qing,YIN Lijun,et al. Studies on characteristics and mechanism of hot air-microwave fluidized drying of lentinusedodes[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology,2015,15(5):134 – 139. (in Chinese)
- 18 WANG Y,ZHANG M,AZAM S R. Effect of blanching on microwave freeze drying of stem lettuce cubes in a circular conduit drying chamber[J]. Journal of Food Engineering,2012,113(2):177 – 185.
- 19 HILLS B,TAKAC S,BELTO P. A new interpretation of proton NMR relaxation time measurements of water in food[J]. Food Chemistry,1990,37(2):95 – 111.
- 20 JIN X,VAN A H,BOOM R M. Anomalies in moisture transport during broccoli drying monitored by MRI [J]. Faraday Discussions,2012,158(1):65 – 75.
- 21 VARADAN V K,GARDNER J W. Smart tongue and nose[C]//Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials 1999: Smart Electronics and MEMS,1999,3673:67 – 76.
- 22 LÜ W,ZHANG M,BHANDARI B,et al. Smart NMR method of measurement of moisture content of vegetables during microwave vacuum drying[J]. Food & Bioprocess Technology,2017,10(12):2251 – 2260.