

香蕉低压过热蒸汽-真空组合干燥研究

王瑞芳^{1,2} 王竟成¹ 赵东海¹ 徐庆^{1,2} 肖波³ 吕黄珍⁴

(1. 天津科技大学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;

2. 天津科技大学天津市低碳绿色过程装备国际联合研究中心, 天津 300222;

3. 广东省现代农业装备研究所, 广州 510630; 4. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083)

摘要: 针对低压过热蒸汽干燥香蕉时高干燥速率与高品质难以同时保证的问题, 提出了低压过热蒸汽-真空组合干燥方法, 以提高干燥速率、降低物料温度, 实现提高产品品质的目的。通过第一降速阶段和全阶段计算的香蕉逆转点温度分别为 88.75℃ 和 89.06℃。在高于逆转点的 90℃ 进行低压过热蒸汽-真空组合干燥研究, 结果表明: 低压过热蒸汽-真空组合干燥香蕉最高温度比低压过热蒸汽干燥降低 8.5℃, 干燥时间比真空干燥降低 30 min。相比低压过热蒸汽干燥和真空干燥, 第 1 次断裂衰减量分别下降了 7.37% 和 36.03%, 峰个数分别增加了 38.27% 和 41.77%, 香蕉干制品的脆性及脆性层次感增强, 干制品的孔隙结构丰富。组合干燥的维生素 C 保留率达到 67.9%, 比低压过热蒸汽干燥和真空干燥分别提高了 255% 和 191%。

关键词: 香蕉; 低压过热蒸汽干燥; 真空干燥; 逆转点温度

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)03-0392-08

OSID:



Drying of Banana Using Combined Low-pressure Superheated Steam and Vacuum Drying

WANG Ruifang^{1,2} WANG Jingcheng¹ ZHAO Donghai¹ XU Qing^{1,2} XIAO Bo³ LÜ Huangzhen⁴

(1. Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-line Monitoring for Light Industry, Food Machinery and Equipment, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China

2. Tianjin International Joint Research and Development Center of Low-carbon Green Process Equipment, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China

3. Guangdong Institute of Modern Agricultural Equipment, Guangzhou 510630, China

4. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to guarantee higher drying rate and the quality of banana dried by low-pressure superheated steam. A method of combined low-pressure superheated steam and vacuum drying was proposed to increase the drying rate and reduce the temperature of banana to improve the product quality. The inversion temperatures of banana investigated by the falling rate period and the whole drying period were 88.75℃ and 89.06℃, respectively. The drying kinetics and product quality were studied at 90℃ for combined low-pressure superheated steam and vacuum drying. The results showed that the maximum temperature of samples of combined low-pressure superheated steam and vacuum drying was 8.5℃ lower than that of low-pressure superheated steam drying and the drying time was 30 min lower than that of vacuum drying. Compared with low-pressure superheated steam drying and vacuum drying, the number of peaks was increased by 38.27% and 41.77%, and the first fracture attenuation was reduced by 7.37% and 36.03%, respectively. Therefore, the crispness of dried banana slices of combined low-pressure superheated steam and vacuum drying was enhanced. In addition, the pore structure of dried banana slices was rich. The color quality of combined low-pressure superheated steam and vacuum drying was better than that of low-pressure superheated steam drying and vacuum drying. The VC retention was 67.9%, which was increased by 255% and 191% respectively than that of low-pressure superheated steam drying and vacuum drying.

Key words: banana; low-pressure superheated steam drying; vacuum drying; inversion temperature

收稿日期: 2021-02-06 修回日期: 2021-03-03

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2018B020241003)

作者简介: 王瑞芳(1974—),女,教授,主要从事干燥技术研究, E-mail: wangruifang@tust.edu.cn

通信作者: 吕黄珍(1979—),男,研究员,主要从事农副产品加工综合利用技术与装备研究, E-mail: lvhz@caams.org.cn

0 引言

低压过热蒸汽干燥 (Low-pressure superheated steam drying, LPSSD) 是在低于大气压力的条件下采用过热蒸汽对物料进行干燥的一种方法。具有传质阻力小、无氧化反应、产品孔隙结构丰富、复水性好、表面不易结壳、营养保留率高等特点^[1]。目前 LPSSD 主要应用于果蔬^[2-4]、茶叶^[5]、奶豆腐^[6]、稻谷^[7]、山竹壳^[8]、蔬菜种子^[9-10] 等热敏性物料的干燥。

过热蒸汽干燥逆转点温度是降低干燥时间、提高干燥效率的重要参数,其针对水分在物料表面的蒸发阶段,即物料的恒速干燥阶段。对于热敏性物料(如果蔬类),在 LPSSD 过程中一般无恒速干燥阶段,逆转点温度的求解可以采用第一降速阶段(Falling rate period, FRP)和全阶段(Whole drying period, WDP)间接表示^[11-12],也可以通过对比相同操作条件不同干燥方式的干燥时间表示逆转点温度^[13-14]。LPSSD 时,为了提高干燥速率,介质温度需高于逆转点温度。香蕉为一种热敏性物料,文献^[15-16]对不同压力下 LPSSD 和真空干燥(Vacuum drying, VD)进行研究,发现香蕉的逆转点温度介于 80~90℃ 之间。为了提高香蕉 LPSSD 的干燥速率,介质温度应高于香蕉逆转点温度,但过高的介质温度会影响产品的品质。因此,对于高逆转点温度的香蕉 LPSSD 时,需要探索提高干燥速率的同时又能降低物料温度、保证产品品质的方法。

本文提出低压过热蒸汽-真空组合干燥(LPSSD-VD)方法,利用 LPSSD 在高于逆转点时的干燥速率优势以及形成的丰富孔隙结构,通过组合 VD,降低物料温度、提高产品品质。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验材料选用广东香蕉一号,成熟度为 70%~80%,物料切成直径(15±3)mm、厚度(3±0.5)mm 的薄片,实验前用 0.3% 柠檬酸进行护色预处理^[17],物料的初始干基含水率为(350±30)%。

1.2 实验装置

低压过热蒸汽干燥实验装置为实验室自行设计,如图 1 所示,由蒸汽发生装置、蒸汽加热装置、真空干燥腔及低温蒸汽冷凝收集装置组成,可以实现蒸汽发生、蒸汽过热、蒸汽干燥及蒸汽收集的连续操作。其中干燥腔内尺寸为 300 mm×300 mm×275 mm,在腔体夹层中分布有电加热板。蒸汽分布器上开有直径 3 mm 的孔,开孔率为

2.5%。距离蒸汽分布器以上 80 mm 放置物料托盘,物料托盘的材料为聚四氟乙烯,多孔状结构。将物料托盘吊置于质量检测装置(JJ600 型电子天平,精度 0.01 g,常熟市双杰测试仪器厂)进行在线质量检测。为了减小干燥过程中蒸汽和温度对质量传感器精确度的影响,传感器放置在干燥腔外部密封箱体中,仅通过金属杆与干燥腔内部的物料托盘连接,质量显示器置于干燥腔外部。物料温度由 TES-1310 型热电偶(精度 0.1℃,泰仕电子工业股份有限公司)在线测量。干燥腔内的真空环境由 V-700 型隔膜真空泵(BUCHI,瑞士)实现。为防止实验过程中管路内蒸汽冷凝,所有管路及干燥腔均由保温材料包装。

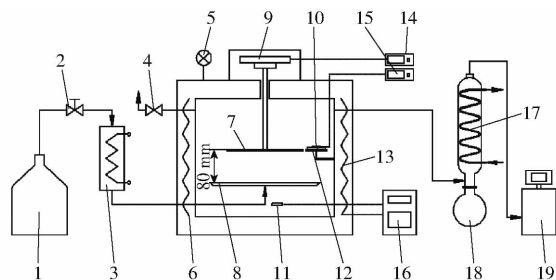


图 1 低压过热蒸汽干燥装置示意图

Fig. 1 Schematic of low-pressure superheated steam drying system

1. 蒸汽发生装置 2. 调节阀 3. 蒸汽加热装置 4. 蒸汽压调节阀 5. 真空表 6. 加热板 7. 物料托盘 8. 蒸汽分布器 9. 质量检测装置 10. 物料温度检测装置 11. 蒸汽温度检测装置 12. 对照料托盘 13. 干燥腔 14. 质量采集装置 15. 温度采集装置 16. 控制面板 17. 冷凝装置 18. 低温蒸汽冷凝收集装置 19. 隔膜真空泵

1.3 参数及其测量方法

1.3.1 干基含水率

物料干基含水率按照 AOAC 925.10—2002^[18]测定。将物料静置在 105℃ 的热风干燥箱内,干燥至物料质量不再减小时认为物料达到绝干。实验前测定香蕉片的平均干基含水率为(350±30)%。物料干基含水率的计算公式为

$$X = (m_t - m_g) / m_g \times 100\% \quad (1)$$

式中 m_t ——干燥到 t 时刻的物料质量, g

m_g ——物料绝干后的质量, g

1.3.2 干燥速率

干燥速率定义为 1 g 干基物料单位时间内去除水分的质量。计算公式为

$$U = \frac{\Delta m}{m_g \Delta t} \quad (2)$$

式中 U ——干燥速率, g/(min·g)

Δt ——干燥时间, min

Δm —— Δt 时间内去除的水分质量, g

1.3.3 色泽

采用 NS 800 型色差仪(深圳市三恩驰科技有限公司)测试物料及干制品的色泽。测色过程中每片物料取两面不同位置测试 6 次,选取 5 片干制品一共测量 30 次取算术平均值。采用亮度 L 、红色值 a 和黄色值 b 表示物料色泽。物料色泽变化的容差 ΔE 计算公式为

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (3)$$

其中

$$\Delta L = L - L_0$$

$$\Delta a = a - a_0 \quad \Delta b = b - b_0$$

式中 L_0 、 a_0 、 b_0 ——鲜物料的亮度、红色值、黄色值

1.3.4 力学特性

采用 CT3-10K 型质构仪(负载量程 0~10 000 g, 负载精度 5 g, 美国博勒飞公司)对力学特性进行测量。香蕉干制品的力学特性主要考虑脆性及脆性层次性。测试中以峰个数表示脆性,峰个数越多代表酥脆性越大;利用第 1 次断裂衰减量代表干制品的脆性层次性,衰减量越小说明脆性层次感越强。

1.3.5 维生素 C 含量

利用高效液相色谱法进行维生素 C (Vitamin C) 含量的测定。实验选取的色谱柱型号为 Eclipse XDB C-18 (4.60 × 150 mm, 5 μm), 检测波长为 254 nm, 色谱柱温度为室温 (20℃), 每次进样量为 10 μL。

流动相选取 80% 的 0.05 mol/L 磷酸二氢钾溶液和 20% 甲醇的混合溶液。每次实验开始前需要利用准备好的甲醇以 1.0 mL/min 的流速冲洗色谱柱 30 min, 然后用纯水以 1.0 mL/min 的流速清洗色谱柱 30 min, 最后用流动相以 1.0 mL/min 的流速洗至基线稳定后方可进样。实验所用的甲醇与纯水都经过 0.45 μm 的滤膜过滤并用超声振荡器振荡 30 min 除去空气。测得新鲜香蕉的维生素 C 含量(质量比)为 28 mg/(100g)。

1.3.6 微观结构分析

物料干制品的微观结构采用 Sigma 300 型扫描式电子显微镜(卡尔·蔡司股份公司)进行观测。其表征过程为:用专用导电胶粘附适量待测样品,将其固定在样品台表面,一次可固定 1~12 个待测样品,随后对待测样品进行喷金预处理,处理对待测样品截面进行微观结构分析。

2 结果与讨论

2.1 低压过热蒸汽干燥与真空干燥对比

介质温度作为影响干燥过程的主要因素,对物料的色泽、营养物质的保留以及物料内部的组织结构都有较大的影响。研究介质温度对干燥动力学、

产品组织结构和营养物质的影响,有助于寻找 LPSSD 的逆转点温度,并为 LPSSD-VD 探寻提高干燥速率、降低物料温度的方法。因此,首先分别研究 LPSSD 与 VD 在不同介质温度下的干燥动力学及干制品品质。

具体实验方法为:LPSSD 与 VD 前首先对干燥系统预热至设定温度并稳定 30 min,然后将物料放入干燥腔内的物料托盘后,关闭腔门,关闭泄气阀,打开真空泵,抽至指定压力,开始干燥。干燥过程利用蒸汽发生装置产生低温饱和蒸汽(VD 不通入蒸汽,其他操作相同),流经蒸汽加热装置加热后进入真空干燥腔内与物料直接接触进行干燥。由于干燥箱排出的低温蒸汽经冷凝装置冷凝后收集。干燥过程中,操作压力为 (9 000 ± 500) Pa, 介质温度为 80、85、90℃, 蒸汽流量为 2.2 g/min, 当物料干基含水率达到 8.7% 时干燥结束。

2.1.1 干燥动力学分析

(1) 香蕉内部温度

LPSSD 和 VD 在不同介质温度下香蕉的内部温度如图 2 所示。以 90℃ 低压过热蒸汽干燥为例,整个干燥过程温度变化可以分为 4 个阶段。第 I 阶段:物料温度迅速升高并稳定于水分蒸发温度。在真空状态下,水分的蒸发温度仅与真空度有关,在操作压力 9 000 Pa 下水的饱和温度为 45℃。在 LPSSD 时水的蒸发温度约为 53℃, 高于操作压力下的饱和温度。这是因为在 LPSSD 中,为了避免冷凝现象,实验装置中设置了电加热板,当存在其他传热方式时,物料温度高于操作压力下的沸点温度。第 II 阶段:物料温度恒定于水的沸点温度。该阶段外界提供的能量主要用于水分的迁移,物料内部水分向表面迁移的速度基本和水分从物料表面向周围环境的扩散速度一致,水分蒸发速度极快。第 III 阶段:物料内部水分逐渐减少,水分从物料内部迁移至表面所

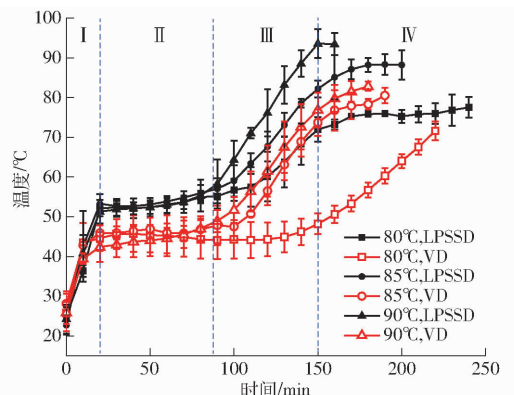


图 2 LPSSD 和 VD 在不同介质温度时香蕉内部温度变化曲线

Fig. 2 Temperature of banana at different medium temperatures for LPSSD and VD

需的驱动力逐渐增大,且由于内部水分向表面的迁移速度逐渐小于表面液体汽化的速度,干燥速度逐渐减小,物料吸收的部分热量进一步升高物料温度。第IV阶段:物料温度接近或略高于干燥介质温度并保持稳定。

由图2可知,LPSSD与VD相比,相同的介质温度,LPSSD物料的最终温度均高于VD,如:当介质温度为90℃时,LPSSD物料的最终温度达到93.6℃,而VD物料的最终温度为85.3℃。较高的物料温度不利于保证干制品的品质。

(2) 香蕉含水率

LPSSD和VD在不同介质温度下香蕉的干基含水率曲线如图3(图3b为图3a的局部放大图)所示。由图3可见,80℃和85℃LPSSD的干燥速率低于VD,90℃时相反。该结论与文献[16]对低压过热蒸汽-远红外组合干燥和真空-远红外组合干燥香蕉片的研究结果相同。从图3b可以看到,在同一时刻,LPSSD在80~90℃之间的干基含水率变化范围大于VD,说明LPSSD受温度的影响大于VD。根据文献[11]可知,这是因为在干燥过程中,去除水分因素主要取决于两部分,一方面是物料温度与环境温度之间的温度差异,另外一方面取决于干燥介质与干燥物料之间的传热系数。LPSSD的温差来自在

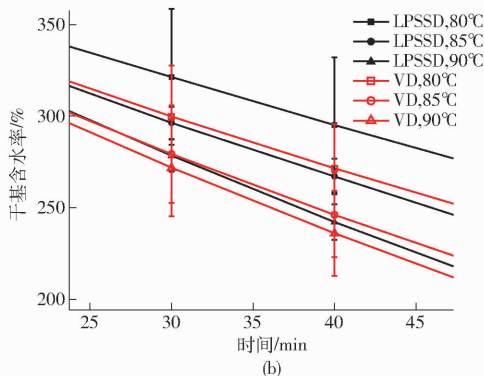
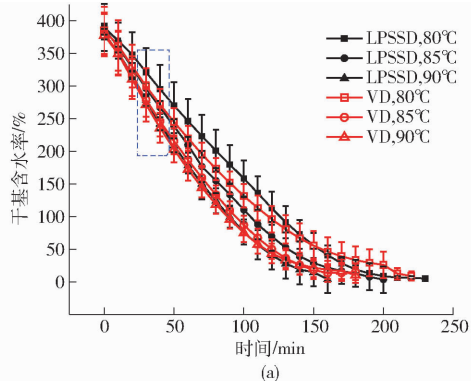


图3 LPSSD和VD在不同介质温度时香蕉干基含水率的变化

Fig. 3 Moisture contents of banana at different medium temperatures for LPSSD and VD

相应操作压力下过热蒸汽温度和饱和温度的差异,而VD的温差来自湿球温度和饱和温度之间的差异。在较低的温度下,VD的温差大于LPSSD的温差。相对于VD,LPSSD的传热系数更高。因此,VD虽然温差大,但是传热系数低,LPSSD的温差虽然小,但是传热系数大,温差和传热系数的共同作用造成了LPSSD受温度影响较大,同时,传热系数和温差的抵消作用形成了LPSSD的逆转点温度。

2.1.2 干制品品质分析

(1) 香蕉色泽

水果在干燥过程中,颜色的变化主要是由于美拉德反应以及酶促褐变,其主要影响因素包括温度、所处环境以及干燥时间等。香蕉在LPSSD和VD的色泽如图4所示。在介质温度小于90℃时,LPSSD的亮度和黄色值高于VD,红色值低于VD,在90℃时,则相反。这种现象说明在80~90℃之间存在一个温度,使得LPSSD和VD对颜色的影响发生了逆转。LPSSD的容差均大于VD,说明LPSSD对香蕉干制品的色泽破坏大于VD,其主要原因为LPSSD香蕉的最终温度均高于VD。

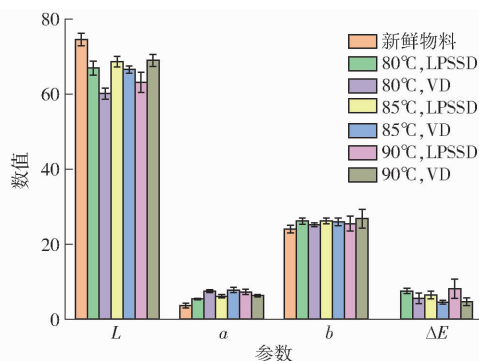


图4 LPSSD和VD在不同介质温度时香蕉色泽的变化

Fig. 4 Color of banana at different medium temperatures for LPSSD and VD

(2) 香蕉力学特性

由图5可见,在80℃和85℃时,LPSSD的干制品峰个数小于VD,说明VD的干制品脆性较好;当温度为90℃时,LPSSD的峰个数大于VD,说明温度越高,LPSSD得到的干制品脆性越好。这与文献[19]研究的微波真空干燥香蕉片温度对脆性的影响不同,该研究指出随着温度的升高,香蕉片的脆性先增大后减小。在相同介质温度下,LPSSD的第1次断裂衰减量均低于VD,说明LPSSD干制品的脆性层次感强于VD。随着介质温度的升高,LPSSD与VD均呈现先降低再升高的变化趋势,但LPSSD升高的幅度小于VD,说明在高温时LPSSD依然能保持较好的脆性层次感。这是因为LPSSD形成丰富的孔隙结构促进了断裂的层次性。LPSSD

与 VD 的孔隙结构如图 6 所示。文献[20]在白萝卜 LPSSD 和 VD 的研究中发现:LPSSD 的干制品比 VD 具有更好的空隙结构。文献[2]在胡萝卜 LPSSD 和 VD 研究中也得出相同结论。

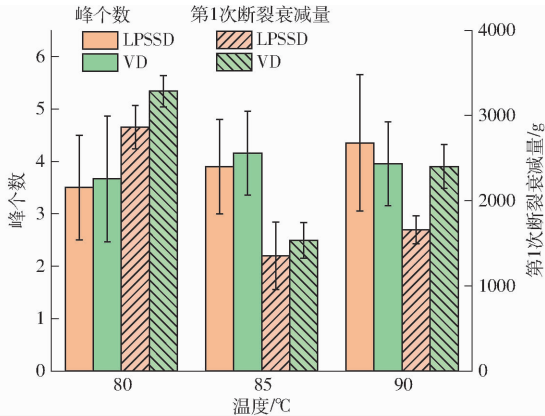


图5 LPSSD 和 VD 在不同介质温度时干制品峰个数和第一次断裂衰减量的变化

Fig.5 Number of peaks and fracture attenuation of dried banana at different medium temperatures for LPSSD and VD

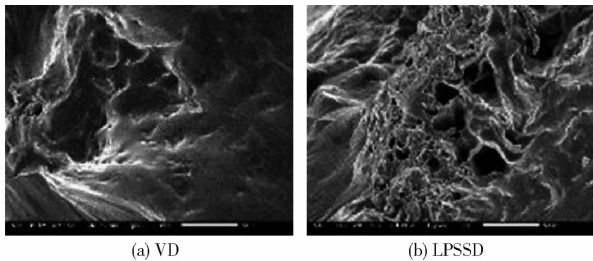


图6 90°C时 LPSSD 和 VD 香蕉干制品的微观结构

Fig.6 Micro-structure of dried product for LPSSD and VD at 90°C

(3) 香蕉维生素 C 含量

新鲜香蕉的维生素 C 含量为 28 mg/(100g)。由图 7 可见,两种干燥方式对维生素 C 的破坏均比较高,而且随着介质温度的升高,破坏程度增强。VD 和 LPSSD 的最大维生素 C 保留率仅为新鲜物料的 19.5% 和 23.9%。LPSSD 对香蕉中维生素 C 的破坏程度略小于 VD,这是因为在过热蒸汽环境中没有氧气存在,而真空环境依然有少量氧气,因此在过热蒸汽的干燥环境中,更好地抑制了氧化现象的发生。文献[21]对比研究了低压过热蒸汽、真空、热风及真空冷冻干燥对芋头品质的影响,发现低压过热蒸汽干燥在维生素 C 保留率方面虽不及真空冷冻干燥,但均优于真空干燥和热风干燥。文献[22]对低压过热蒸汽干燥、真空干燥和热风干燥芒果块研究发现:低压过热蒸汽干燥比真空干燥和热风干燥能保留更高的抗坏血酸、β-胡萝卜素、总酚含量及抗氧化活性。文献[23]对印度醋栗进行低压过热蒸汽干燥,研究证明,尽管低压过热蒸汽干

燥需要更长的干燥时间,但由于低压过热蒸汽干燥过程不涉及氧化反应,醋栗干中维生素 C 的含量比真空干燥的含量高。

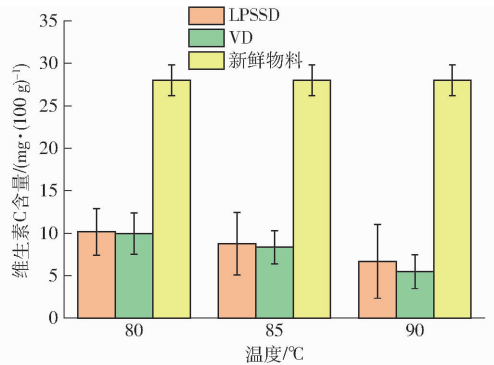


图7 LPSSD 和 VD 在不同介质温度时干制品维生素 C 含量的变化

Fig.7 Vitamin C retention of dried banana at different medium temperatures for LPSSD and VD

2.1.3 香蕉逆转点分析

在介质温度对含水率的影响中,当介质温度为 80°C 和 85°C 时,LPSSD 的干燥速率低于 VD,而在 90°C 时 LPSSD 的干燥速率高于 VD,证明了在 LPSSD 和 VD 之间存在逆转点温度。由于果蔬类物料在 LPSSD 过程中无恒速干燥阶段,因此选取第一降速阶段(FRP)和全阶段(WDP)间接表示逆转点温度。WDP 是指物料从初始干基含水率降至约 8.7% 的过程;FRP 对应恒温段。图 8 为香蕉在操作压力 9 000 Pa 的条件下分别基于 FRP 和 WDP 干燥速率求解的逆转点温度,分别为 88.75°C 和 89.06°C。基于 WDP 计算的逆转点温度高于 FRP 计算的逆转点温度,说明低压过热蒸汽在干燥前期更具有动力学优势。文献[24-25]研究表明:影响 FRP 计算的逆转点温度的主要因素为物料表面温度和干燥介质之间的温差,基于 WDP 计算得出的逆转点温度,会受到干燥温度和物料本身变化的综合影响。

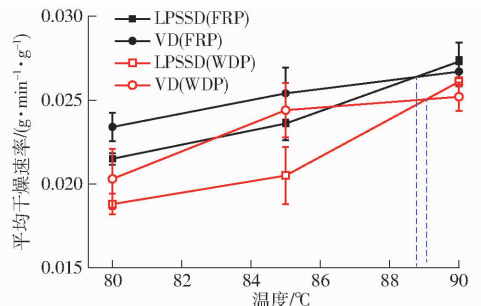


图8 基于 FRP 和 WDP 计算的逆转点温度

Fig.8 Inversion temperature based on FRP and WDP

对于 LPSSD,只有当介质温度高于逆转点温度时,干燥速率才会高于 VD。而香蕉逆转点接近于

90℃,高逆转点温度会导致介质温度过高影响产品品质。因此,对于高逆转点的热敏性物料,探索介质温度高于逆转点温度时,如何降低物料温度,提高产品品质是需要解决的问题。

2.2 低压过热蒸汽-真空组合干燥

2.2.1 干燥方法

LPSSD-VD的目的是在高于逆转点温度的介质温度下提高干燥速率,同时降低物料温度并提高产品品质。根据香蕉逆转点温度,LPSSD-VD以介质温度为90℃进行研究。由图2可知,在第I阶段,VD的升温速度高于LPSSD的升温速度,因此,在LPSSD-VD第I阶段,选取VD,提高物料的升温速度,同时减少冷凝。第II阶段LPSSD速率高于VD,而且水分散失主要集中在该阶段,因此,LPSSD-VD的第II阶段采用LPSSD。在第III阶段,LPSSD温升速度明显高于VD,为了控制温度,在LPSSD-VD的第III阶段,即当LPSSD开始进入第III阶段时采用VD,降低物料温度。

具体LPSSD-VD工艺为:第I阶段(0~10 min)采用VD;第II阶段(10~90 min)采用LPSSD;第II阶段结束时,切断过热蒸汽,采用VD,进入第III阶段。操作条件为:介质温度90℃,操作压力9 000 Pa,蒸汽流量2.2 g/min。

2.2.2 干燥动力学分析

如图9a所示,在LPSSD-VD的第I和第II阶段,物料温度分别与该阶段的VD和LPSSD的温度相同。当LPSSD-VD进入第III阶段时,相比单纯的LPSSD,物料温度继续在恒温段保持20 min,升温段向后推迟。当物料达到安全含水率时物料内部温度相比LPSSD降低了8.5℃。由图9b可知,在LPSSD-VD的第III阶段,干燥速率相比LPSSD和VD明显提高,这是由于在第II阶段LPSSD使物料形成了丰富的孔隙结构,并减轻了表面硬化现象,有利于下一阶段的水分散失。LPSSD-VD相比VD降低了30 min。由此可见,LPSSD-VD一方面缩短了干燥时间,另一方面降低了物料温度,为保证良好的干制品品质提供了条件。

2.2.3 干制品品质分析

2.2.3.1 色泽

由图10可知,LPSSD-VD的亮度 L 、黄色值 a 、红色值 b 以及容差 ΔE 明显优于相同操作条件下LPSSD和VD,香蕉的色泽得到了有效的保护。这是因为LPSSD-VD降低了物料温度,减轻了温度对色泽的破坏,提高了产品的色泽。同时由于LPSSD-VD干燥速率的提高,物料在高温下存在时间缩短,减少了物料因长时间处于高温状态而造成的热损伤

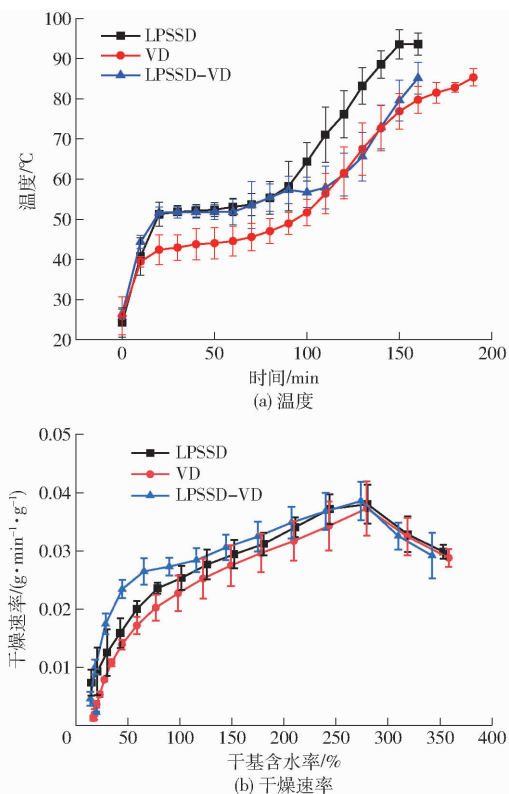


图9 不同干燥方法干燥动力学对比

Fig. 9 Comparison of drying kinetics for different drying methods

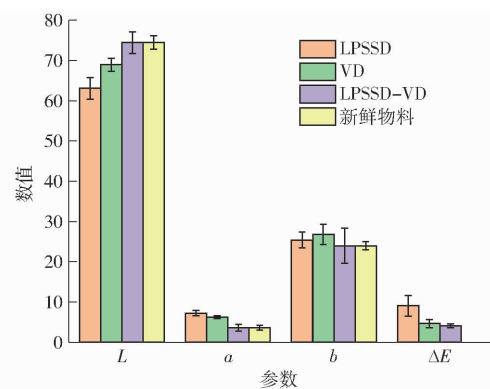


图10 不同干燥方法干制品色泽对比

Fig. 10 Comparison of color of dried banana for different drying methods

现象。

2.2.3.2 力学特性

由图11可知,相比LPSSD和VD,LPSSD-VD的峰个数分别增大38.27%和41.77%,提高了香蕉干制品的脆度。同时,香蕉干制品的第1次断裂减量相对于LPSSD和VD分别下降7.37%和36.03%,说明LPSSD-VD增强了干制品的脆性层次感。产品的脆性及脆性层次感的增强说明产品的组织结构更疏松,即产品的孔隙结构更丰富。图12为香蕉干制品在VD、LPSSD和LPSSD-VD条件下的电镜分析图,LPSSD-VD的香蕉干制品孔隙优于LPSSD和VD。这也说明在整个干燥过程中,即使只

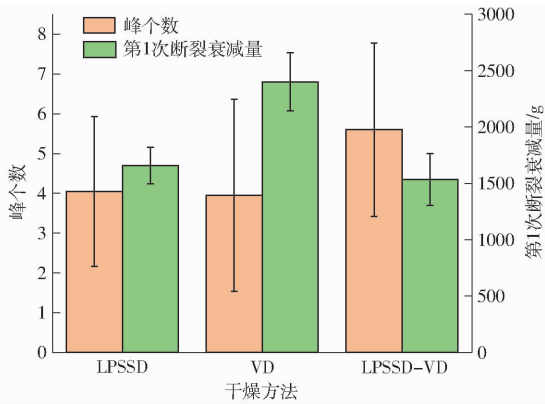


图 11 不同干燥方法干制品脆度和第 1 次断裂衰减量对比

Fig. 11 Comparison of crispiness and the first fracture attenuation of dried banana for different drying methods

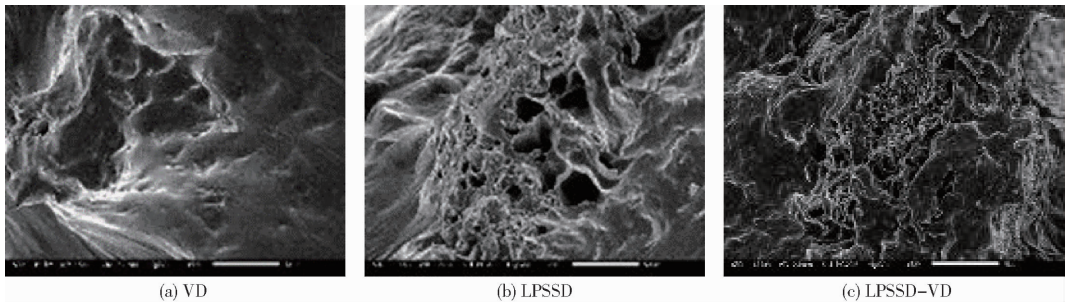


图 12 不同干燥方法香蕉干制品孔隙结构对比

Fig. 12 Comparison of micro-structure of dried banana for different drying methods

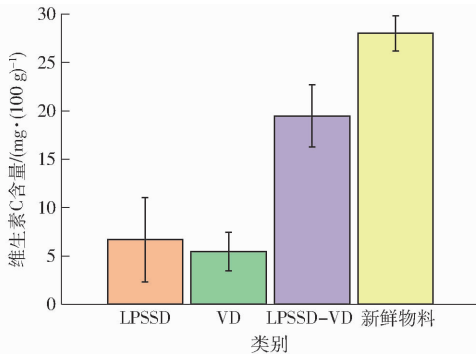


图 13 不同干燥方法干制品维生素 C 含量对比

Fig. 13 Comparison of vitamin C retention of dried banana for different drying methods

蕉干燥时,既提高干燥速率又降低物料温度,从而保留更好的色泽及营养,同时获得更好的力学特性,达到提高产品品质的目的。

3 结论

(1) 提出 LPSSD-VD 方法,实现在高介质温度干燥条件下,提高香蕉干燥速率的同时又能降低物料温度保证产品的品质。LPSSD-VD 为三段式,

是部分干燥段加入 LPSSD,物料就可以获得较好的孔隙结构。

2.2.3.3 维生素 C 含量

由图 13 可知,LPSSD-VD 大幅提高了维生素 C 的保留率,达到 67.9%,相比单纯的 LPSSD 和 VD,分别提高了 255% 和 191%。这是因为蒸汽介质破坏了维生素 C 分解的氧化反应环境,通过 LPSSD-VD 的控温效应,也降低了维生素 C 分解所需要的温度环境,因此 LPSSD-VD 可以对维生素 C 含量的保留率有较大的提升。

通过以上对 LPSSD-VD 干燥动力学和产品品质的分析,发现 LPSSD-VD 可以实现对高逆转点香

第 II 阶段采用 VD,提高物料的升温速度,同时减少冷凝;第 III 阶段采用 LPSSD,提高干燥速率;第 III 阶段在低压过热蒸汽开始升温时采用 VD,降低物料温度。

(2) 在介质温度为 80、85、90℃ 时对 LPSSD 和 VD 香蕉的干燥动力学和产品品质进行对比研究,发现:在介质温度为 80℃ 和 85℃ 时,VD 的干燥速率大于 LPSSD,当 90℃ 时,LPSSD 干燥速率才明显提高,相比 VD 干燥时间缩短 30 min。在 80、85、90℃ 下,LPSSD 的最终温度均高于 VD,其干制品的色泽破坏大于 VD,但 LPSSD 的维生素 C 保留率高于 VD。当介质温度为 90℃ 时,LPSSD 得到干制品的脆性及脆性层次感优于 VD。

(3) 通过 FRP 和 WDP 计算的香蕉逆转点温度分别为 88.75℃ 和 89.06℃。在高于逆转点的 90℃ 介质温度进行 LPSSD-VD 研究,结果表明:LPSSD-VD 相比单纯的 LPSSD 和 VD,干燥时间缩短 30 min,干燥过程中物料温度降低 8.5℃,产品色泽提高,脆性和脆性的层次感增强。维生素 C 保留率达到 67.9%,比 LPSSD 和 VD 分别提高 255% 和 191%。

参 考 文 献

- [1] SEHRAWAT R, NEMA P K, KAUR B P. Effect of superheated steam drying on properties of foodstuffs and kinetic modeling [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2016,34(5):285-301.

- [2] DEVAHASTIN S, SUVAMAKUTA P, SOPONRONNARIT S, et al. A comparative study of low-pressure superheated steam and vacuum drying of a heat-sensitive material[J]. *Drying Technology*, 2004, 22(8):1845–1867.
- [3] LEKCHAROENKUL P, TANONGKANKIT Y, CHIEWCHAN N, et al. Enhancement of sulforaphane content in cabbage outer leaves using hybrid drying technique and stepwise change of drying temperature[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 122(2):56–61.
- [4] LÉONARDV A, BLACHER S, NIMMOL C, et al. Effect of far-infrared radiation assisted drying on microstructure of banana slices: an illustrative use of X-ray microtomography in microstructural evaluation of a food product [J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 85(1):154–162.
- [5] KONGSOONTORNKIJKUL P, EKWONGSUPASARN P, CHIEWCHAN N, et al. Effects of drying methods and tea preparation temperature on the amount of vitamin C in Indian gooseberry tea[J]. *Drying Technology*, 2006, 24(11):1509–1513.
- [6] SHRIVASTAV S, KUMBHAR B K. Drying kinetics and ANN modeling of paneer at low pressure superheated steam[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2011, 48(5):577–583.
- [7] KOZANOGLU B, MAZARIEGOS D, GUERRERO-BELTRAN J A, et al. Drying kinetics of paddy in a reduced pressure superheated steam fluidized bed[J]. *Drying Technology*, 2013, 31(4):452–461.
- [8] SUVARNAKUTA P, CHAWEERUNGRAT C, DEVAHASTIN S. Effects of drying methods on assay and antioxidant activity of xanthenes in mangosteen rind[J]. *Food Chemistry*, 2011, 125(1):240–247.
- [9] KOZANOGLU B, FLORES A, GUERRERO-BELTRAN J A, et al. Drying of pepper seed particles in a superheated steam fluidized bed operating at reduced pressure[J]. *Drying Technology*, 2012, 30(8):884–890.
- [10] KOZANOGLU B, VAZQUEZ A C, CHANES J W, et al. Drying of seeds in a superheated steam vacuum fluidized bed [J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 75(3):383–387.
- [11] SUVARNAKUTA P, DEVAHASTIN S, SOPONRONNARIT S, et al. Drying kinetics and inversion temperature in a low-pressure superheated steam-drying system[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2005, 44(6):1934–1941.
- [12] 李占勇, 刘建波, 徐庆, 等. 低压过热蒸汽干燥青萝卜片的逆转点温度研究[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(1):279–286.
LI Zhanyong, LIU Jianbo, XU Qing, et al. Study on inversion temperature in low pressure superheated steam drying of green turnip slice[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(1):279–286. (in Chinese)
- [13] LEERATANARAK N, DEVAHASTIN S, CHIEWCHAN N. Drying kinetics and quality of potato chips undergoing different drying techniques[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 77(3):635–643.
- [14] PANYAWONG S, DEVAHASTIN S. Determination of deformation of a food product undergoing different drying methods and conditions via evolution of a shape factor[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78(1):151–161.
- [15] THOMKAPANICH O, SUVARNAKUTA P, DEVAHASTIN S. Study of intermittent low-pressure superheated steam and vacuum drying of a heat-sensitive material[J]. *Drying Technology*, 2007, 25(1):205–223.
- [16] NIMMOL C, DEVAHASTIN S, SWASDISEVI T, et al. Drying of banana slices using combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 81(3):624–633.
- [17] 安凤平, 宋洪波, 宋江良. 过热蒸汽膨化干燥香蕉脆片品质研究[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(12):138–142.
AN Fengping, SONG Hongbo, SONG Jiangliang. Quality for super heated steam puffing and drying banana[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(12):138–142. (in Chinese)
- [18] AOAC 925. 10—2002. Official methods of analysis (3rd ed.) [S]. Washington DC: Association of Official Agricultural Chemists, Inc., 2002.
- [19] 代建武, 杨升霖, 王杰, 等. 微波真空干燥对香蕉片干燥特性及品质的影响[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(增刊1):493–500.
DAI Jianwu, YANG Shenglin, WANG Jie, et al. Effect of microwave vacuum drying conditions on drying characteristics and texture structure of banana chips[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(Suppl. 1):493–500. (in Chinese)
- [20] LIU J B, XUE J, XU Q, et al. Drying kinetics and quality attributes of white radish in low pressure superheated steam[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2017, 13(7):20160365.
- [21] 贺星成. 低压过热蒸汽干燥芋头片加工过程的研究[D]. 福州:福建农林大学, 2011.
HE Xingcheng. Studies on the process of taro slices undergoing low-pressure superheated steam drying[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2011. (in Chinese)
- [22] SEHRAWAT R, NEMA P K, KAUR B P. Quality evaluation and drying characteristics of mango cubes dried using low-pressure superheated steam, vacuum and hot air drying methods[J]. *Food Science and Technology*, 2018, 92(1):548–555.
- [23] METHAKHUP S, CHIEWCHAN N, DEVAHASTIN S. Effects of drying methods and conditions on drying kinetics and quality of Indian gooseberry flake[J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2005, 38(6):579–587.
- [24] MESSAI S, SCHAIER J, CHRUSCIEL L, et al. Low-pressure superheated steam drying-vacuum drying of a porous media and the inversion temperature[J]. *Drying Technology*, 2015, 33(1):111–119.
- [25] 刘建波. 青萝卜低压过热蒸汽干燥特性与品质变化研究[D]. 天津:天津科技大学, 2017.
LIU Jianbo. Drying characteristics and quality attributes of green turnip in low pressure superheated steam[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2017. (in Chinese)