

芒果热泵干燥生命周期成本建模与效益分析

郭小璇¹, 朱贤文², 孙乐平¹, 李秋硕², 韩帅¹

(1.广西电网有限责任公司电力科学研究院, 南宁 530000;

2.南方电网数字电网集团有限公司, 广州 510000)

摘要: **目的** 对比研究芒果果脯热泵干燥过程与传统化石能源热风干燥的成本效益, 为企业生产提供科学指导。**方法** 在芒果果脯干燥动力学模型基础上, 为芒果果脯的干燥生产过程建立生命周期成本与效益分析模型, 辅以芒果热泵干燥实验数据, 验证模型的正确性, 并用该模型对芒果果脯热泵干燥企业的生产成本进行预测分析, 比较采用热泵干燥和传统热风干燥方法的能耗、成本效益。**结果** 在热泵干燥条件下, 不同高度层的芒果受热均匀, 可以精准调控果干温度。相较于燃煤锅炉加热干燥, 采用热泵干燥可以降低 17.1% 的生产成本, 有利于减轻企业的经济负担。与传统锅炉加热干燥方法相比, 采用热泵干燥方法可使生产能耗下降 30.17%, 二氧化碳排放量减少了 32%, 符合我国节能减排发展战略。**结论** 证明了热泵技术在芒果果脯干燥生产上的优越性。该模型方法还可用于龙眼、荔枝等同类农副产品生产中, 为果脯果干生产企业的生产成本控制提供测算方法。

关键词: 芒果果脯; 生命周期; 热泵干燥; 效益分析

中图分类号: TS255

文献标识码: A

文章编号: 1001-3563(2023)11-0108-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.11.012

Cost Modeling and Benefit Analysis of Mango Heat Pump Drying Life Cycle

GUO Xiao-xuan¹, ZHU Xian-wen², SUN Le-ping¹, LI Qiu-shuo², HAN Shuai¹

(1. Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530000, China;

2. Digital Grid Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510000, China)

ABSTRACT: The work aims to compare the cost benefits of heat pump drying process and traditional fossil energy hot air drying process of mango preserves, so as to provide scientific guidance for the production of enterprises. Based on the drying dynamics model of mango preserves, a life cycle cost and benefit analysis model was established for the drying process of mango preserves. The correctness of the model was verified by the experimental data of mango heat pump drying. The model was used to predict and analyze the heat pump drying plant of mango preserves, and the energy consumption and cost benefits of heat pump drying and traditional hot air drying were compared. The results indicated that under the condition of heat pump drying, mangoes with different heights were heated evenly, and the drying temperature could be precisely controlled. At the same time, compared with coal-fired boiler heating and drying, the heat pump drying could reduce the production cost by 17.1%, which was conducive to reducing the economic burden of enterprises. Compared with those of traditional boiler heating and drying method, the energy consumption of heat pump drying was reduced by 30.17%, and the carbon dioxide emission was reduced by 32%, which was in line with the development strategy of energy saving and emission reduction in China. This proves the superiority of heat pump technology in drying of man-

收稿日期: 2022-09-08

基金项目: 广西重点研发计划 (2021AB38037); 广西电网公司科技项目 (GXKJXM20200428)

作者简介: 郭小璇 (1986—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电能替代技术、综合能源及智能控制。

go preserves. The model method can also be applied to the production of longan, litchi and other similar agricultural and sideline products, and provide guidance for the production cost control of preserved and dried fruit production enterprises.

KEY WORDS: mango preserves; life cycle; heat pump drying; benefit analysis

芒果是世界五大水果之一^[1], 具有口感好、营养丰富等优点, 被誉为热带果王^[2]。中国的芒果产量仅次于印度, 位居世界第二^[3]。据新华社报道, 2020 年中国芒果产量达到 330.6 万 t, 总产值为 205.2 亿元。由于芒果为呼吸跃变型水果^[4], 其储存时间较短, 大量的芒果被干燥后制成芒果果脯。芒果果脯的干燥方式较多, 不同的干燥方式决定了企业的生产效益和市场竞争能力。热泵干燥技术作为一种效率高、无污染的新型干燥技术^[5], 很好地解决了果脯干燥行业与生态环境之间的矛盾, 是未来的发展方向。

虽然热泵干燥方式是果脯加工未来的发展趋势, 但目前针对热泵干燥效益的研究较少, 众多厂家还不能清晰地了解热泵干燥技术, 这会减缓中国节能减排发展战略的推进。由此可见, 很有必要对芒果热泵干燥生命周期成本效益进行建模分析, 将热泵干燥技术与传统的燃煤锅炉热风干燥技术进行对比。

目前也有一些文献对热泵的干燥效益进行了分析。李博等^[6]研发了玉米热泵干燥系统, 相较于传统干燥方式, 热泵干燥的成本降低了 40%, 节能 60% 以上。王保法等^[7]研究了挂面热泵干燥效益, 结果表明, 采用热泵干燥技术后, 节能效率提高了 40% 以上。王中伟等^[8]通过实验研究发现, 采用热泵干燥花生, 节能效果提高了 40% 左右。以往对热泵干燥的效益分析主要集中在农产品干燥上, 缺乏对芒果等水果的干燥研究。目前, 对热泵干燥效益的研究主要以实验为主, 结论不具备普遍性, 不能针对不同工厂的不同工况进行研究, 亟须对芒果热泵干燥生命周期的能耗和成本进行建模, 为果脯生产厂家提供科学指导。

基于上述思路, 文中以芒果果脯热泵干燥生命周

期为研究对象, 建立芒果果脯热泵干燥系统。在此基础上, 根据芒果干燥特性的相关公式建立芒果果脯热泵干燥生命周期动力学模型, 对芒果果脯在热泵干燥时不同时刻的果脯含水率和温度进行准确预测, 对芒果果脯热泵干燥生命周期中的经济效益和环境效益进行分析。为了验证模型的准确性, 辅以芒果果脯热泵干燥实验数据进行验证。在正确的模型基础上, 将该模型运用于芒果热泵干燥实际生产中, 通过预测芒果果脯热泵干燥的经济效益和环境效益, 并与实际调研采样得到的数据进行比较分析, 确定采用热泵干燥取代传统锅炉加热热风干燥的合理性和环保性。也可通过改变该模型的相关参数, 并运用于其他种类果脯的干燥生产中, 该模型有着良好的示范推广作用。

1 芒果果脯热泵干燥生命周期成本与能耗测算模型

1.1 芒果果脯热泵干燥系统

文中主要考察了芒果果脯热泵干燥在整个生命周期内的成本分析和能耗情况, 确定的生命周期系统边界包括从芒果到达工厂再到包装后的出售成品。系统边界不包括农业阶段和成品阶段。由于果脯厂家比较关注果脯生产的能耗和成本, 故不考虑废水、有机废物等成本。系统主要将热泵干燥所需成本、能耗与实际调查的锅炉热风干燥所需成本、能耗进行对比。如图 1 所示, 将该过程的流程可视化, 在系统分析中用虚线表示边界。为了使分析更加准确, 对芒果果脯生命周期各个环节的能耗、材料进一步细分。

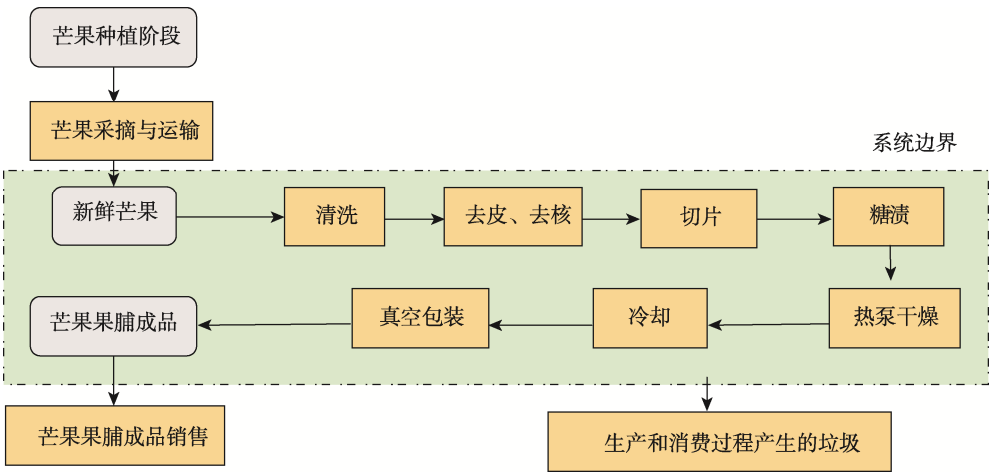


图 1 芒果果脯热泵干燥系统边界

Fig.1 Boundary of heat pump drying system for mango preserves

在芒果果脯热泵干燥生命周期过程中,需要耗能的过程包括设施能源供应、果脯清洗环节、去皮去核切片环节、糖渍环节、热泵干燥环节和包装环节等。其中,果脯加工的成本和能耗主要集中于从采购新鲜芒果到制备芒果果脯成品的阶段。为了更好地指导果脯在干燥过程中的能耗成本测算,采用 Matlab 软件搭建了生命周期模型,对典型果脯干燥加工行业电能替代设备的生产成本和能耗进行测算。该测算分为 2 个部分:建立芒果果脯干燥模型;通过芒果干燥模型对果脯生产进行成本、能耗分析。

1.2 芒果果脯热泵干燥生命周期动力学模型的建立

目前,已有众多学者对各种粮食干燥过程建立了干燥模型。Celik 等^[9]建立了玉米粒干燥模型,取得了较好的实用效果。Meas 等^[10]建立了描述水稻太阳能干燥系统内热量和水分传递的数学模型,准确地预测了干燥过程中的干燥时间和温度,以及干燥床层内的水分含量。Fernando 等^[11]对马铃薯片建立了脱水速率模型,准确预测了马铃薯片在干燥时的最佳切片厚度。也有学者对芒果热泵干燥动力学模型进行了研究,大多通过实验数据拟合得到芒果干燥模型^[12-14]。芒果的干燥动力学模型较成熟,但鲜有人对芒果热泵干燥生命周期成本效益进行研究。

在芒果果脯水分蒸发模型中,主体框架基于粮食干燥理论中的液相扩散理论方程^[15]。该方程的假设前提为在干燥达到平衡状态时,果脯与干燥介质达到平衡,此时干燥的水分平衡方程可以用式(1)表示。

$$M_R = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

式中: M_R 为水分比; M 为芒果水分含水率; M_0 为芒果初始水分含水率; M_e 为平衡水分含水率。

在干燥模型的建立过程中,干燥水分平衡公式显得至关重要,不同的水果拥有不同的水分平衡公式。对于芒果果脯, Yannick 等^[16]在 midilli 方程的基础上提出了芒果干燥水分平衡方程,见式(2)~(6)。

$$M_R = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = ae^{-kt^n} + bt \quad (2)$$

$$a = 0.000\ 003T^2 - 0.000\ 77T + 1.025\ 6 \quad (3)$$

$$b = 0.000\ 000\ 2T^2 - 0.000\ 02T + 0.000\ 4 \quad (4)$$

$$k = 0.015\ 8 + 0.000\ 007T^2 - 0.000\ 6T \quad (5)$$

$$n = 0.459\ 6 - 0.000\ 27T^2 + 0.000\ 002\ 07T \quad (6)$$

式中: k 、 a 、 n 、 b 为干燥常数; t 为干燥时间; T 为热风温度。

在水分平衡方程式中,芒果水分平衡常数的测定至关重要。根据 Ferreira^[17]测定的芒果干燥平衡水分 M_e 可以表示为式(7)。

$$M_e = \frac{X_m \times C \times a_w}{(1 - a_w) \times (1 + (C - 1) \times a_w)} \quad (7)$$

式中: X_m 为平均平衡含水量; C 为经验常数; a_w 为水分活度。这些数据都可根据实际数据选取。

计算得到芒果干燥模型的水分含量变化曲线后,可通过质能平衡方程转换对芒果干燥系统干燥时的热风温度、热风湿含量和芒果本身温度进行研究,如式(8)~(10)所示。

$$\frac{\delta D_h}{\delta x} = -\frac{\rho_g}{a_f} \frac{\delta M}{\delta t_s} \quad (8)$$

$$\frac{\delta T}{\delta x} = -\frac{h \times a}{a_f \times (C_a + D_h \times C_v)} (T - T_m) \quad (9)$$

$$\frac{\delta T_m}{\delta x} = \frac{h \times a \times (T - T_m)}{a_f \times (C_a + H \times C_v)} - \frac{h_{fg} + (T - T_m)}{\rho_g (C_p + C_w \times M)} a_f \frac{\delta D_h}{\delta x} \quad (10)$$

式中: D_h 为热风(热空气)的绝对湿度; T 为热风温度; T_m 为芒果温度; M 为芒果平均含水率; ρ_g 为芒果密度; a_f 为空气流量; h 为对流传热系数; t_s 为时间步长; a 为单位果脯体积内果脯的表面积; C_a 为干空气比热容, C_v 为水蒸气比热容; C_p 为芒果果脯比热容; C_w 为水的比热容; h_{fg} 为水的汽化热。

1.3 芒果果脯热泵干燥生命周期的效益分析

通过前文建立的芒果果脯干燥模型,可以估算芒果干燥后的水分含量,得到芒果干燥后的质量,从而对芒果果脯热泵干燥生命周期进行经济效益分析。在干燥的生命周期中,干燥系统消耗的能量主要分为机械所消耗的能量和干燥过程中的散热量 2 个部分。其中,机械所消耗的能量可用式(11)计算。

$$Q_1 = \frac{p_n \times n_p \times t_m}{0.95 \times C_{OP}} \quad (11)$$

式中: p_n 为热泵能耗; n_p 为热泵数量; t_m 为机械运行时长; C_{OP} 为热泵制热性能系数,由于在实际生产中总会有损耗,故除以系数 0.95 以估算真实能耗。

在果脯干燥过程中,散热损失的能耗也是需要考虑的因素,每年的散热量可以表示为式(12)。

$$Q_2 = S \times a \times (T_d - T_a) \times t_m \quad (12)$$

式中: S 为干燥箱散热面积; a 为综合换热系数; t_m 为机械运行时长; T_d 为干燥目标温度; T_a 为环境温度。

在得到各个能耗元素组成后,将所有能耗按照工艺加热时间计算,并与单位质量的芒果果脯成品相除,得到每 kg 芒果果脯的能耗分析预测公式,见式(13)。

$$Q = \frac{Q_1 + Q_2}{m_d \frac{1 + k_s}{1.4}} \quad (13)$$

式中: m_d 为芒果干燥量; k_s 为芒果实时水分含量。通过芒果始末含水量的换算可以得到芒果果脯的质量,进而得到每 kg 的芒果果脯能耗。

在计算工业果脯干燥生命周期费用时, 需要考虑芒果果脯受到的季节性限制, 1 年中只有半年时间处于运作时期, 且每次干燥需要 20 h, 加上维修时间, 合计大约需要 1.5 d 干燥一批果脯。由于芒果在进行干燥前还需进行切片、去皮和糖渍处理, 这些费用也需进入原材料成本中。此时, 成本主要包括电费、机械成本、运营成本、芒果原材料成本、食品添加剂成本和劳动力成本等。各种费用的计算见式 (14) — (20)。

$$C_1 = P_t \times t_m \times e_p \quad (14)$$

$$C_2 = \frac{t_f \times t_{pn} + a_{il} \times i_p + c_s + a_h + e_{ls}}{d_f} \quad (15)$$

$$C_3 = o_c \times n_{of} \quad (16)$$

$$C_4 = m_{pr} \times l \times t_m \quad (17)$$

$$C_5 = f_a \times l \quad (18)$$

$$C_6 = e_s \times e_n \quad (19)$$

$$C = \frac{C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6}{f_d} p_{cc} \quad (20)$$

式中: C_1 为干燥系统运营 1 年的电费; C_2 为干燥系统前期准备机械费用; C_3 为干燥系统运营成本; C_4 为原材料成本; C_5 为食品添加剂成本; C_6 为人工成本; C 为单位产品成本; P_t 为干燥系统工作总功率; e_p 为电费; t_f 为热泵相关费用; t_{pn} 为热泵相关零件数量; a_{il} 为保温层面积; i_p 为保温层材料造价; c_s 为控制系统造价; a_h 为辅助加热系统造价; e_{ls} 为其他费用; d_f 为机械折旧系数; o_c 为机器运营成本; n_{of} 为机器匹数; m_{pr} 为芒果原料价格; l 为芒果干燥量; f_a 为食品添加剂成本; e_s 为员工工资; e_n 为员工人数; p_{cc} 为包装材料系数; f_d 为果脯生产量。将相关费用相加后得到每生产 1 kg 芒果果脯所需的费用。

2 结果与分析

2.1 材料

芒果采购自广西百色, 品种为金煌芒, 经过切片、清洗、腌制后进行铺装烘干。通过干燥测试可知, 经过腌制后, 芒果的含水量 (均用质量分数表示) 为 63.1%, 经干燥后芒果的含水量为 12.86%。在实验过程中, 每隔 3 min 记录干燥箱的相关数据。

2.2 仪器与设备

主要设备: 果脯高温热泵干燥机 (图 2), 由中国科学院广州能源研究所研制, 干燥装置内空气平均流速为 1 m/s, 将干燥目标温度设置为 65 °C; 热泵数量为 2 台, 每台的功率为 2.25 kW; 循环风机数量为 3 台, 每台的功率为 0.55 kW, 控制系统和阀门的功率为 50 W。

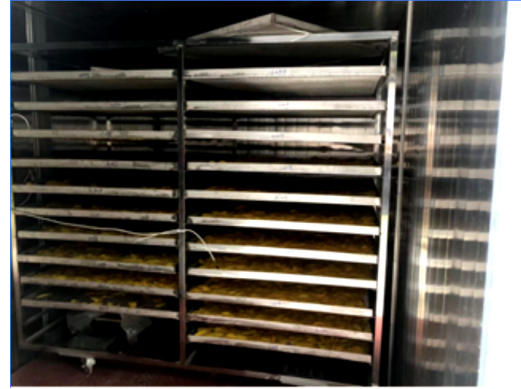


图 2 实验装置
Fig.2 Experimental device

2.3 芒果果脯热泵干燥生命周期能耗模型验证

实验条件设置: 热风空气平均流速为 1 m/s, 干燥目标温度为 65 °C, 装载量为 142.32 kg。该实验设置条件与实际工业生产条件相同。采用双向轴流风机循环送风, 定时换向, 使芒果受热均匀。同时, 在干燥箱内安装振动机, 以模拟现实生产中人工翻转果干的操作。每隔 3 min 记录芒果果脯的含水率、干燥系统生产单位果脯能耗, 并将芒果果脯热泵干燥生命周期能耗模型预测数据与实验结果进行对比。由图 3、4 可以看出, 芒果果脯热泵干燥生命周期模型预测的芒果干料含水率、每 kg 芒果干料能耗与实验数据曲线基本拟合。根据实验数据和预测数据可知, 模型预测的单位芒果干能耗与实际实验测量能耗的误差在 5% 以内, 可见该模型具有较高的准确率, 对芒果果脯的实际生产应用具有较准确的指导意义。

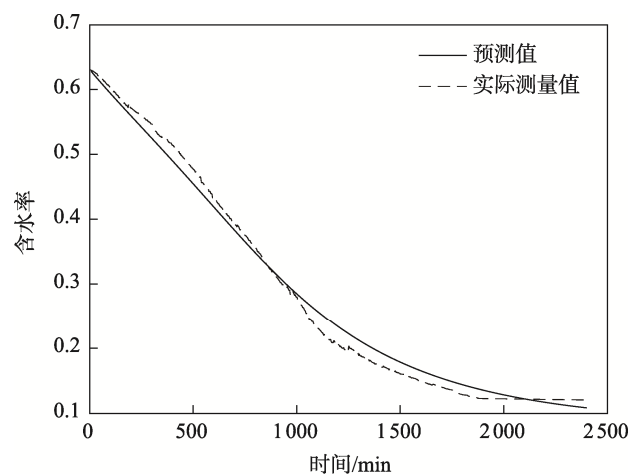


图 3 在实验条件下芒果干料含水率
理论值与实验值的对比

Fig.3 Comparison between theoretical value and experimental value of moisture content in dried mango under experimental conditions

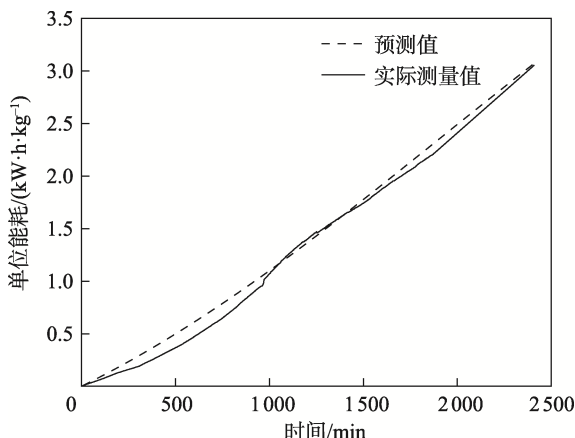


图4 在实验条件下每 kg 芒果干料能耗理论值与实验值的对比

Fig.4 Comparison of theoretical and experimental energy consumption per kilogram of dried mango under experimental conditions

2.4 芒果果脯热泵干燥生命周期效益预测

前面通过实验数据验证了模型的准确性,为了比较热泵干燥技术与传统干燥技术的环境效益和经济效益,这里运用该测算模型对某热泵干燥果脯项目设备进行建厂前的测算。该果脯干燥项目所用的热泵可以满足最大制热能力,在干燥前期无须采用电辅助加热设备,整个干燥过程中的干燥条件一致。在预测生产时,热风空气平均流速为 0.6 m/s,干燥时长为 20 h,干燥目标温度为 65 °C,每次装载量为 1 800 kg,热泵加热功率共计 55.2 kW,热泵 COP 值(制热量与总输入功率的比值)取 3.5,热泵干燥箱的尺寸为 2.2 m×6 m×2.75 m,干燥箱的壁厚为 0.04 m。干燥箱墙体的主要材料为双面不锈钢岩棉保温板,导热系数为 0.168 kJ/(m·°C·h)。由于用于工业生产的芒果干料较多,因此不同高度层的芒果受热不均。这里取空间步长为 4 cm,研究不同高度层芒果干料的参数变化情况。以芒果果脯的主要生产集中区广西为例,根据广西 2021 年的电价标准,果脯干燥行业属于工商业用电,电费为 0.556 1 元/(kW·h),热泵价格为 3 500 元/台,机器运营成本为 408 元/(kW·年),按照广西当地芒果批发价,芒果原料的成本为 3.2 元/kg,食品添加剂的成本为 5 元/kg,员工为 10 人,平均工资为 6 000 元/月。代入相关数据后,可以看到芒果果脯干燥时各参数的变化情况,测算结果如图 5—9 所示。

由图 5—7 可以看出,在热泵干燥条件下,不同高度层的芒果干料温度和含水率变化较同步,并不会出现微波干燥和红外干燥技术中常见的果干加热不均匀,导致果干烧焦的情况。从图 7 可以看出,干燥箱温度的变化与预期相符,热泵干燥技术可以精准控制干燥温度和果干含水率。精准控制果干干燥时的温度和含水率等参数可以更有效地优化果干干燥工艺,减少水果在干燥过程中营养物质的流失量。

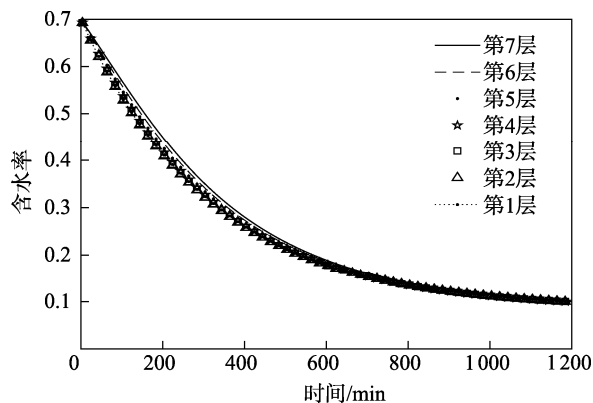


图5 工业生产条件下芒果干料的含水率理论值

Fig.5 Theoretical value of moisture content in dried mango under industrial production conditions

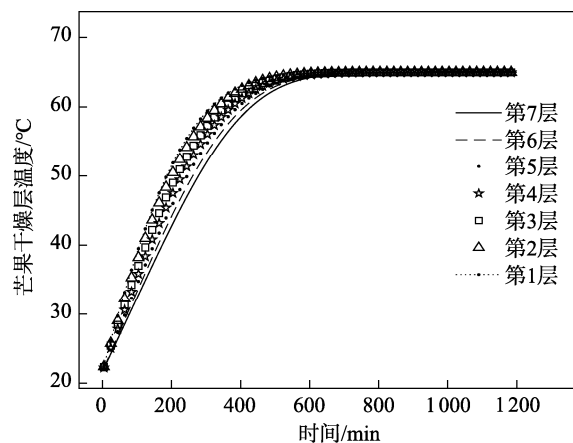


图6 工业生产条件下芒果干料温度变化理论值

Fig.6 Theoretical value of dried mango temperature change under industrial production conditions

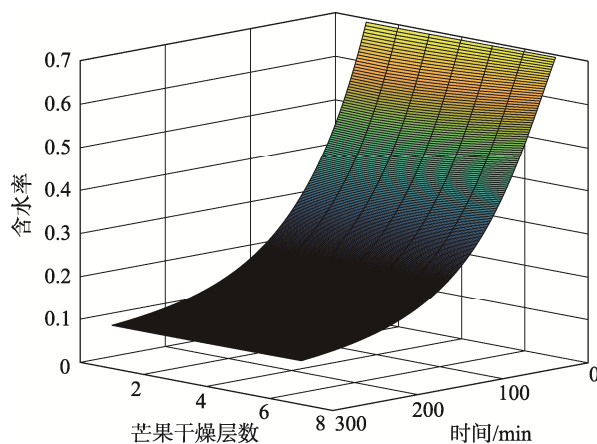


图7 工业生产条件下不同时刻芒果干料、不同床层含水率曲面图

Fig.7 Surface diagram of moisture content in different beds of dried mango at different time under industrial production conditions

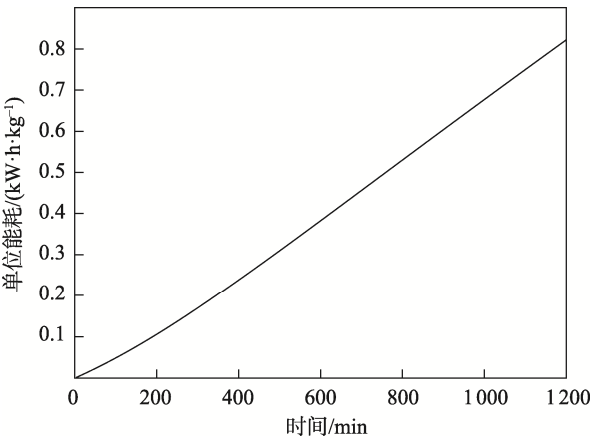


图 8 工业生产条件下每 kg 芒果干料的能耗理论值

Fig.8 Theoretical value of energy consumption per kilogram of dried mango under industrial production conditions

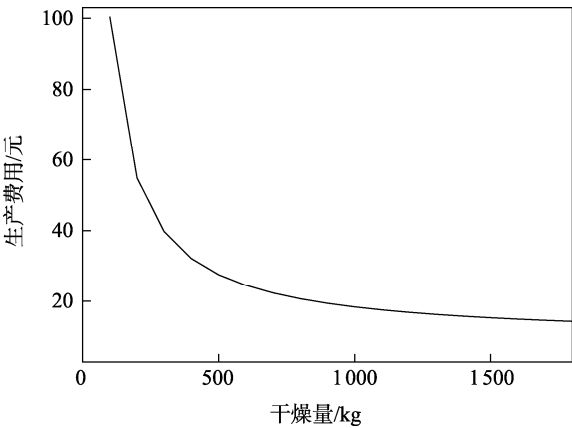


图 9 工业生产条件下每 kg 芒果干料的成本理论值

Fig.9 Theoretical value of cost per kilogram of dried mango under industrial production conditions

从图 8 可以看出,果脯干燥系统的能耗只与时间有关,与干燥物料无明显关系。从图 9 可以看出,在热泵干燥的条件下,果干生产成本先随着干燥量的增多而迅速降至 30 元/kg,当干燥量进一步增加时,生产成本缓慢下降。结合图 8 可知,对于果脯厂家,其生产规模越大,每 kg 果脯的生产成本越低,这有利于厂家扩大生产。同时,相较于锅炉加热干燥和冷冻干燥,采用热泵干燥技术具有成本低、能耗较小等优点,更适合中小企业使用,符合我国目前市场以中小企业为主的国情。

为了更好地比较芒果果脯热泵干燥与传统的锅炉热风干燥方法的优缺点及效益,实地调研了广西 3 家具有代表性的果脯生产企业。这 3 家企业主要采用燃煤锅炉产生的蒸汽进行热风干燥,将其干燥数据与热泵干燥技术数据进行对比。

由表 1 可知,热泵干燥的成本为 14.34 元,根据

实际调查,燃煤锅炉干燥生产果脯的成本平均值为 17.3 元,故每干燥 1 kg 芒果果脯,采用热泵干燥可以降低 17.1%的成本。采用热泵干燥可以有效降低干燥时产生的二氧化碳排放,根据调查数据可知,燃煤锅炉干燥生产果脯的单位能耗平均值为 1.16 kW·h/kg,而热泵干燥所需的单位能耗为 0.81 kW·h/kg,能耗下降了 30.17%,极大地提高了能源利用率。

表 1 建模测算结果与实地调研企业实际生产成本数据对比

Tab.1 Comparison between modeling calculation results and actual production cost data of surveyed enterprises

数据来源	干燥技术类型	每 kg 干料的能耗/(kW·h)	每 kg 干料的成本/元
模型分析	热泵干燥技术	0.81	14.34
宝*园(南宁)	热风干燥 (燃煤锅炉)	1.13	20.45
果*园(南宁)	热风干燥 (燃煤锅炉)	1.14	15.94
福*特(南宁)	热风干燥 (燃煤锅炉)	1.23	15.52

为了更好地比较两者的环保效益,将热泵干燥技术与锅炉干燥技术的单位 CO₂ 排放量进行了对比。目前,虽然新能源发电的占比日益增大,但中国供电大部分依赖火力发电,因此在计算二氧化碳排放量时,电能供应应按火力发电来计算,每生产 1 kW·h 的电量,二氧化碳的排放量为 0.86 kg,燃煤锅炉的二氧化碳排放量可按每 t 锅炉燃烧 1 h 排放 0.340 6 kg CO₂ 计算,进而得到不同生产方式生产果脯的二氧化碳排放量。

由表 2 可知,采用热泵代替传统锅炉加热方式后,二氧化碳排放量减少了 32%左右,环境效益显著。为了探究热泵干燥和传统锅炉加热热风干燥成本构成的差异,实际调研了企业果*园,对该公司采用锅炉加热生产芒果果脯的生产成本构成与采用热泵干燥加工果脯的生产成本构成进行了对比。

表 2 单位 CO₂排放量对比

Tab.2 Comparison of unit CO₂ emissions

数据来源	干燥技术类型	每 kg 干料的 CO ₂ 排放量/kg
模型分析	热泵干燥技术	0.69
宝*园(南宁)	热风干燥 (4 t 燃煤锅炉)	0.98
果*园(南宁)	热风干燥 (4 t 燃煤锅炉)	1.00
福*特(南宁)	热风干燥 (1 t 燃煤锅炉)	1.06

从表 3 可以明显看出,在经济性方面,目前果脯企业普遍采用锅炉等传统方式进行干燥加热,燃料成本所占比例为 5.5%。采用热泵技术设备,虽然其电能消耗有所增加,但因其节能效果明显、无燃料消耗成本,因此可以大大降低生产成本。

表 3 果*园公司采用锅炉加热生产与热泵干燥生产芒果果脯的生产成本构成
Tab.3 Production cost composition of mango preserves produced by boiler heating and heat pump drying of Fruit * Garden Company

数据来源	干燥种类	原材料	人工	燃料	电费	设备投入	其他(包装、损耗等)	%
果*园(南宁)	芒果干	65.00	19.00	5.50	4.50	4.00	2.00	
测算模型	芒果干	63.71	21.93	0.00	8.94	3.91	1.51	

3 结语

随着终端电气化的推行,热泵干燥是未来干燥行业的发展趋势。文中以芒果果脯为物料,在芒果果脯干燥动力学模型基础上建立了热泵干燥流程生命周期成本与效益分析模型。同时,辅以芒果干燥实验数据验证,并采用该模型对芒果果脯热泵干燥进行了预测分析,比较了热泵干燥与传统热风干燥的能耗、成本效益,得到如下结论。

1) 在热泵干燥条件下,不同高度层的芒果干料温度和含水率变化较同步,果干受热较均匀,可以精准调控果干温度,有利于果脯厂家进一步对果脯干燥工艺进行优化。

2) 相较于燃煤锅炉加热干燥,采用热泵干燥可以降低 17.1%的生产成本,有利于减轻企业经济成本,进一步促进我国果脯加工行业的发展。

3) 相较于燃煤锅炉的蒸汽热风干燥,采用热泵干燥后生产能耗下降了 30.17%,二氧化碳排放量减少了 32%,符合我国节能减排发展战略,是未来的发展趋势。

4) 相较于目前企业主流燃煤锅炉的蒸汽热风干燥,采用热泵干燥生产无直接燃料成本,有良好的经济效益和环境效益。随着我国小锅炉淘汰进程的逐步推进,热泵干燥的推广运用有利于我国“双碳”目标的实现,推进了终端电气化的实施,是未来干燥技术发展的主流方向。

参考文献:

- [1] 刘彩华,李曦,朱正杰,等. 芒果品质无损检测技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(22): 413-422.
LIU Cai-hua, LI Xi, ZHU Zheng-jie, et al. Progress of Non-Destructive Testing Technology in Mango Quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(22): 413-422.
- [2] LE T, NGUYEN T, MUOI N, et al. Recent Progress in Omics and Biotechnological Approaches for Improved Mango Cultivars in Pakistan[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2022, 69(6): 2047-2065.
- [3] 张明洁,张亚杰,张京红,等. 基于 GIS 的海南岛芒果气候适宜性精细化区划研究[J]. 热带作物学报, 2021, 42(12): 3678-3684.
- [4] 卫赛超,谢晶. 四种涂膜材料在芒果贮藏保鲜中的应用研究进展[J]. 包装工程, 2020, 41(11): 64-71.
WEI Sai-chao, XIE Jing. Advances in Application of Four Coating Materials in Storage and Preservation of Mango[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(11): 64-71.
- [5] 刘海波,王佳倩,李耀,等. 马铃薯片热泵干燥动力学研究及其干燥工艺优化[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(10): 106-115.
LIU Hai-bo, WANG Jia-qian, LI Yao, et al. Study on Drying Kinetics of Potato Chips by Heat Pump and Optimization of Drying Process[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(10): 106-115.
- [6] 李博,李伟钊,魏娟,等. 热泵干燥技术在粮库节能减排中的应用[J]. 粮食储藏, 2018, 47(6): 11-14.
LI Bo, LI Wei-zhao, WEI Juan, et al. Heat Pump Drying Technology Brings the Green Development in Energy Saving and Emission Reduction of Grain Depots[J]. Grain Storage, 2018, 47(6): 11-14.
- [7] 王保法,陈洁,李兴书,等. 排潮风余热回收循环利用及空气源热泵挂面干燥研究[J]. 粮食加工, 2021, 46(5): 9-14.
WANG Bao-fa, CHEN Jie, LI Xing-shu, et al. Design of Waste Heat Recovery and Utilization System of Air Compressor in Milling Process[J]. Grain Processing, 2021, 46(5): 9-14.
- [8] 王中伟,尹志宏,牛宪伟,等. 农产品热泵烘干房系统设计与经济效益分析[J]. 价值工程, 2018, 37(25): 125-127.
WANG Zhong-wei, YIN Zhi-hong, NIU Xian-wei, et al. Agricultural Product Heat Pump Drying Room System Design and Economic Benefit Analysis[J]. Value Engineering, 2018, 37(25): 125-127.
- [9] ÇELİK E, PARLAK N, ÇAY Y. Experimental and Numerical Study on Drying Behavior of CORN Grain[J]. Heat and Mass Transfer, 2020, 57: 321-332.
- [10] MEAS P, PATERSON A H J, CLELAND D J, et al. A

- Mathematical Model of Solar Drying of Rice[J]. International Journal of Food Engineering, 2012, 8(3): 1-35.
- [11] FERNANDO W J N, AHMAD A L, OTHMAN M R. Convective Drying Rates of Thermally Blanched Slices of Potato (*Solanum Tuberosum*): Parameters for the Estimation of Drying Rates[J]. Food and Bioproducts Processing, 2011, 89(4): 514-519.
- [12] VILLA-CORRALES L, FLORES-PRIETO J J, XAMÁN-VILLASEÑOR J P, et al. Numerical and Experimental Analysis of Heat and Moisture Transfer during Drying of Ataulfo Mango[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 98(2): 198-206.
- [13] DIOP A, MÉOT J M, LÉCHAUDEL M, et al. Impact of Special Drying Schemes on Color Stability of Mangoes with Different Maturity Degrees[J]. Foods, 2022, 11(5): 656.
- [14] WANG Wei, LI Ming, HASSANIEN R H E, et al. Thermal Performance of Indirect Forced Convection Solar Dryer and Kinetics Analysis of Mango[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 134: 310-321.
- [15] 宋佳. 基于 MATLAB 的谷物干燥过程数值模拟及数字化设计[D]. 长春: 吉林大学, 2014: 35-40.
- SONG Jia. Numerical Simulation and Digital Design of Grain Drying Process Based on MATLAB[D]. Changchun: Jilin University, 2014: 35-40.
- [16] ROGER YANNICK E, FOKONE ABRAHAM T, MARCEL E, et al. Experimental Study of the Drying Kinetics of Mango (*Mangifera Indica* L) during Airflow Drying Licking Countercurrent[J]. American Journal of Food Science and Technology, 2019, 7(4): 127-132.
- [17] DE SOUZA S J F, ALVES A I, VIEIRA É N R, et al. Study of Thermodynamic Water Properties and Moisture Sorption Hysteresis of Mango Skin[J]. Food Science and Technology (Campinas), 2015, 35(1): 157-166.

责任编辑: 彭颀