

单粒莲子热风干燥特性及其干燥动力学

张绪坤¹, 王高敏¹, 姚斌¹, 吴青荣¹, 徐刚², 徐建国², 李华栋²

(1. 南昌航空大学机电设备研究所, 江西南昌 330063) (2. 江西省科学院, 江西南昌 330096)

摘要: 为了提高莲子干燥品质、缩短干燥时间并降低能耗, 采用恒温 and 分段变温两种干燥方式对单粒莲子进行了 50~90 °C 恒温和 60(2~4 h)~80 °C 变温热风干燥试验, 研究莲子表观变化、复水性、干燥能耗及干燥特性, 计算不同干燥条件下的有效扩散系数和活化能。试验表明: 在恒温干燥条件下, 温度越高, 干燥时间越短, 而莲子色泽、复水性等品质则越差; 在分段变温条件下, 干燥时间较 60 °C 恒温干燥缩短了, 但品质均有所提高, 60 °C(3 h)~80 °C 变温干燥莲子的复水性优于 60 °C(2 h)~80 °C 和 60 °C(4 h)~80 °C 变温干燥, 为 169.41%, 单位能耗比 60 °C 恒温干燥减少 2033 kJ/g。根据菲克第二定律, 得到莲子 50~90 °C 恒温干燥有效扩散系数变化范围为 $1.79 \times 10^{-9} \sim 5.83 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, 60 °C(2~4 h)~80 °C 变温干燥平均有效扩散系数变化范围为 $2.97 \times 10^{-9} \sim 2.44 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。由 Arrhenius 方程建立有效扩散系数与温度的关系, 得到莲子水分活化能为 28.33 kJ/mol。试验结果为莲子干燥工艺参数优化及干燥设备设计提供参考。

关键词: 热风干燥; 变温; 品质; 扩散系数; 活化能; 莲子

文章篇号: 1673-9078(2017)4-141-148

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.4.022

Drying Characteristics and Kinetics of Individual Lotus Seeds under Hot Air drying Process

ZHANG Xu-kun¹, WANG Gao-min¹, YAO Bin¹, WU Qing-rong¹, XU Gang², XU Jian-guo², LI Hua-dong²

(1. Mechanical and Electrical Equipment Institute of Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(2. Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China)

Abstract: In order to improve the quality of dried lotus seed, shorten the drying time, and reduce energy consumption, hot air drying processes at constant temperatures (50~90 °C) and stepwise varying temperatures (60~80 °C) were adopted to dry individual lotus seeds. Changes in the appearance, rehydration characteristics, energy consumption, and drying characteristics of lotus seeds were investigated, and the effective diffusion coefficient and activation energy were calculated. The results indicated that when the lotus seeds were dried at constant temperatures, the drying time decreased with increasing air temperature, but the color, rehydration ratio, and other qualities deteriorated. When drying was conducted at stepwise varying temperatures, the drying time was shortened compared with that at a constant temperature of 60 °C, and all qualities were improved. The rehydration ratio of lotus seeds dried using a stepwise varying temperature procedure of 60(3 h)~80 °C reached 169.41%, better than those of stepwise varying temperature processes of 60(2 h)~80 °C and 60(4 h)~80 °C, and the unit energy consumption decreased from 14022 kJ/g to 11989 kJ/g compared with that of hot air drying at a constant temperature of 60 °C. According to Fick's second law, the effective diffusion coefficient of hot air drying at constant temperatures (50~90 °C) ranges from 1.79×10^{-9} to $5.83 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, and the average effective diffusion coefficient of hot air drying at stepwise varying temperatures ranged from 2.97×10^{-9} to $2.44 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. The relationship between the effective diffusion coefficient and temperature was established using Arrhenius empirical formula, and the activation energy value of lotus seeds was calculated as 28.33 kJ/mol. The experimental results provide a valuable reference for the optimization of process parameters for drying lotus seeds and the design of drying equipment.

Key words: hot air drying; varying temperature; quality; diffusion coefficient; activation energy; lotus seed

莲子是一种营养丰富, 药用价值高的药食两用的农产品。具有丰富的矿物质元素, 是农产品深加工及

收稿日期: 2016-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (31471629)

作者简介: 张绪坤 (1963-), 男, 博士, 教授, 主要从事干燥设备研究

通讯作者: 李华栋 (1960-), 男, 博士, 教授, 主要从事食品工程研究

保健食品的优良资源, 在国内外市场深受广大消费者的青睐。同时莲子中淀粉占干物质含量 50% 以上, 是一种高淀粉质农产品^[1]。炭火烘烤、太阳 (自然) 晒干是传统的莲子干燥方法。采用传统方法烘干莲子, 存在产品质量难以控制、占地面积大、生产安全性差等问题, 且在莲子采收旺季, 其加工能力远远满足不

了生产的需求。曾绍校^[2]等用热风恒温对莲子进行干燥试验,试验结果表明恒温热风干燥产品的抗性淀粉RS含量较低,体积收缩程度小,但复水率高。采用恒温干燥工艺时,低温干燥品质好,但干燥时间长,能耗高;提高干燥温度,虽然可以缩短干燥时间,但易造成热敏性营养元素损失和易氧化物质被氧化,使产品营养流失^[3],莲子干燥产品品质降低。相比于恒温干燥,分段变温干燥是根据物料处于不同干燥阶段,采取不同温度来实现物料干燥的方法,是对传统方法的改进^[4]。Kowalski^[5]用变温干燥方式来对甜菜进行干燥研究,试验表明变温干燥缩短了干燥时间,得到了更高的甜菜苷、更好的色彩保存和更少的水的活性。Chua^[6]等,分别对香蕉和番石榴采用变温干燥和恒温干燥进行对比研究,结果表明变温干燥大幅减少了干燥时间,改善了干燥品质。Jumah^[7]等对橄榄油块进行了干燥除湿工艺研究,试验表明变温干燥能让内部更多的水分扩散到材料的表面,物料干燥速率提高,并且干燥物体温度不会大幅度的增加。Ramallo^[8]和Chin^[9]等分别研究了变温干燥工艺在农产品方面的应用效果,试验结果表明,变温干燥比恒温干燥具有更大的优势,能获得更高品质的干燥产品。根据水分与物料的结合形式和所处的位置,对水分迁出物料所需能量影响很大,随着物料含水率降低,水分迁出深度增加和结合水占比率的增加,干燥过程所消耗的能量必然增大。在高含水段的水分蒸发受物料限制的作用很小,利用较低的温度干燥介质能去除绝大部分水,而在低水分段,温度是主导干燥过程的主要参数。物料在高含水段水分结合能小,而在低含水率段,水分结合能随温度升高降低^[10]。由于所处干燥阶段不同,水分与物料的结合能也不同,因而匹配的干燥能量也应不一样,这就是采用变温干燥的实质所在。本文将热风分段变温干燥工艺应用于莲子的脱水干燥中,以单个莲子为研究对象,分析分段变温干燥特性及干燥品质的影响,并对莲子干燥过程进行数学模拟和分析,为莲子分段变温干燥参数优化及实际干燥工艺设计提供参考。

1 材料与方

1.1 试验设备

试验装置如图1所示,主要包括U型加热管3根、干燥箱(自制)、WSS-411型温度表(天津市万达佛斯特仪器仪表有限公司)、YK250A40型金属管浮子流量计(大连优科仪器仪表发展中心)、SCR3-12.LA型人工智能工业功率调节器(南昌宇龙仪表电器有限公

司)、AI-808AN-24VDC型温度控制仪(控制精度:±1℃;乐清美格尔电子电器有限公司)、电能表(精度:0.5级;上海人民高科仪器仪表有限公司)及温度传感器(精度等级:0.5级;南昌宇龙仪表电器有限公司),其他试验仪器有DHG-9075A型电热鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司);ML1602型电子天平(可读性:0.01g,重复性:0.01g;梅特勒-托利多国际贸易(上海)有限公司);DT1000A型电子天平(分辨率:0.01g;常熟市意欧仪器仪表有限公司);计算机一台;玻璃培养皿若干。

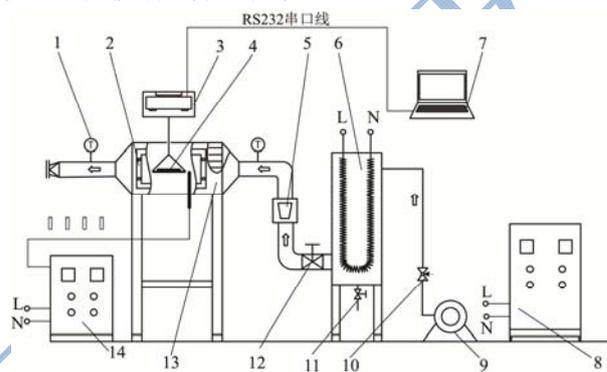


图1 热风干燥试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of hot air drying experimental setup

注:1表示温度计;2表示干燥室;3表示电子天平;4表示物料;5表示金属管浮子流量计;6表示加热器;7表示计算机;8表示总电力控制柜;9表示风机;10表示节流阀;11表示排水阀;12表示节流阀;13表示温度传感器;14表示电力控制柜。

1.2 试验材料

试验原料为新鲜莲子(白莲),取自江西广昌莲子生产基地,平均长轴直径为17.20mm,平均短轴直径为15.50mm,平均质量为2.34g/个,平均湿基含水率为60.13%±0.50%(105℃,烘7h^[11])。试验前将取回的鲜莲蓬放在纸箱中并将其放在(5±1)℃冰箱内保存。

1.3 试验方法

1.3.1 试验流程

将莲蓬从冰箱中取出,挑选出莲子(外形尺寸,成熟度与色泽基本一致)、去除莲子壳、清洗、擦去表面的水分,用千分尺测量试验莲子的直径,取得平均值。开启风机,保持干燥室内空气的流通;再开启加热器将智能温控仪设定为学习过程模式,当系统内部温度预热到试验温度后设置温控仪为人工智能模式。将开始准备好的莲子放入干燥室并人工记录电能表读数,紧闭干燥箱门。当在线称量天平显示质量为莲子湿基含水率14%的质量时,关断电力控制柜电源停止

加热,人工记录此时电能表读数。为保证干燥系统在干燥开始时干燥室内的温度与预设温度一致,每次在放入莲子干燥前,对系统加热至设定温度。热风的流量由无级变频风机控制,经多次试验,控制热风流量为 $23 \text{ m}^3/\text{h}$ (对应风速为 1 m/s),通过多次对比空白试验,可忽略热风流速对在线测量质量的影响。ML 1602 型电子天平与计算机之间通过 RS232 串口线连接,设置每 1 min 采集 1 次数据并输送至计算机,采用 Excel 文件自动保存所采集数据,每个试验重复 3 次。

1.3.2 试验干燥参数的设定

在前期探索性的试验和文献^[12]试验参数的基础上,再结合相应的热风干燥装置的特点,将试验的恒温干燥温度取值为 50 、 60 、 70 、 80 和 $90 \text{ }^\circ\text{C}$;由于在干燥过程中,当进入干燥后期时,物料的外层变得干燥,内部湿分向外传递的阻力增大,这种现象导致湿分蒸发量的大幅度降低,干燥周期加长。在后期需要提高温度,来加快干燥的进程,使得干燥周期大幅度降低。分段变温干燥时温度取值为 $60 \text{ }^\circ\text{C}(2 \text{ h})\sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ (至干燥结束)、 $60 \text{ }^\circ\text{C}(3 \text{ h})\sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ (至干燥结束)、 $60 \text{ }^\circ\text{C}(4 \text{ h})\sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ (至干燥结束)。

1.4 莲子干燥参数的计算

1.4.1 水分比及干燥速率

不同时间莲子水分比 (moisture ratio) 的计算公式为^[13]:

$$MR=(M_t-M_e)/(M_0-M_e) \quad (1)$$

式中: MR 为莲子水分比; M_0 为莲子的初始干基含水率, g/g ; M_e 为莲子的平衡干基含水率, g/g ; M_t 为干燥过程 t 时刻莲子的干基含水率, g/g 。

由于 M_e 相对于 M_0 和 M_t 很小,可以忽略,因此式 (1) 可以简化为:

$$MR=M_t/M_0 \quad (2)$$

莲子的失水效果用莲子的干燥速率 $DR[\text{g}(\text{g}\cdot\text{s})]$ 来表示,其计算公式为:

$$DR=-(M_{(t+\Delta t)}-M_t)/\Delta t \quad (3)$$

式中: $M_{(t+\Delta t)}$ 为干燥过程中 $(t+\Delta t)$ 时刻莲子干基含水率, g/g 。

1.4.2 初始含水率

莲子的初始含水率测定采用物料加热法,具体方法如下:

将 3 个培养皿编号 1、2 和 3 并称质量,将莲子放在培养皿内,称量总质量,然后放入电热恒温箱 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温干燥 1 h ,用电子天平称质量,再继续烘干,直到各培养皿前后 2 次质量变化为 0.01 g 为止,此时 3 个试样的质量保持恒定,该质量认为是莲子的绝干质量。

1.5 复水率

取不同温度下热风干燥的莲子试样各一个,分别称取各个莲子的质量,逐个置于编号不同的小烧杯中。加 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 的热水 60 mL ,放在 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温水浴中, 30 min 后取出,放在干净的滤纸上,吸去其表面水分,阴凉处晾置 30 min ,称取复水后莲子质量。重复 3 次,求取不同干燥条件下莲子复水率的平均值。复水率的计算公式如下:

$$\text{复水比} = \frac{m_2 \times (1 - w_0)}{m_1 \times (1 - w_1)} \times 100\% \quad (4)$$

式中: m_1 为莲子干燥样品的质量; m_2 为复水后莲子质量; w_0 为新鲜莲子初始湿基; w_1 为莲子干燥样品湿基含水率。

1.6 单个莲子的相对单位能耗

莲子热风干燥是一种高能耗过程,在莲子干燥过程中,低能耗是追求的目标。莲子干燥能耗高低决定加工成本大小,干燥能耗是莲子干燥的另一重要评价指标。为了保证条件基本相同,能耗采用相对单位能耗,即消耗电能与去除物料中水分质量的比值,单位为 kJ/g 。相对单位能耗的计算公式:

$$W = \frac{3600 \times (W_2 - W_1)}{M_1 - M_2} \quad (5)$$

式中: W 为相对单位能耗, kJ/g ; W_1 为干燥前电能表读数, $\text{kW}\cdot\text{h}$; W_2 为干燥后电能表读数, $\text{kW}\cdot\text{h}$; M_1 为干燥前物料总质量, g ; M_2 为干燥后物料总质量, g 。

1.7 数据处理

利用 OriginPro 8.5.1 及 MATLAB R2012b 软件对试验数据进行处理及分析。

2 结果与分析

2.1 莲子干燥表观形态及干燥品质与能耗

2.1.1 莲子干燥表观形态

莲子在恒温干燥时,随着莲子中含水率的减小,莲子的表面皱缩率变大。皱缩亦称溃陷,在干燥初期由于莲子处于高温和高含水率状态,自由水快速移动而产生的毛细管张力和干燥应力使细胞溃陷而引起的不正常、不规则的收缩。莲子水分含量较高,降低了无定形基质的粘弹性,当水分升华后,由于重力的作用,细胞结构无法保持原状,便产生了塌陷^[14]。在相同时间点处,温度越高,体积收缩越明显,莲子的表面皱缩变大,所得到干燥后的莲子外观变得粗糙。干燥

时间直接对产品的收缩变形产生作用,样品在高温条件下产生更大水分梯度,导致内应力增加,从而引起更大程度的收缩现象。图2为新鲜莲子试验样本,其表面光滑,质地饱满。从图3可以看出,在低温50℃和60℃干燥时,莲子的表面皱缩小,表面光滑度最好。在变温干燥条件下,温度为60℃(3h)~80℃和60℃(4h)~80℃时,得到的莲子表面皱缩率较小,表面粗糙度比较理想,基本上和60℃恒温干燥时的品质一样。分段变温干燥可以在缩短干燥时间的前提下,提高莲子表观质量,降低干燥能耗。



图2 新鲜莲子试验样本

Fig.2 Fresh lotus seed samples used for experiments

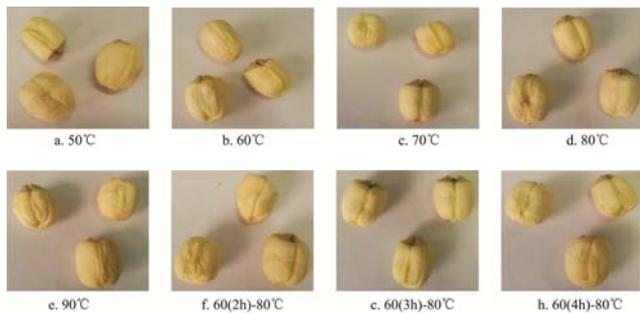


图3 莲子不同干燥温度下表现形态

Fig.3 Appearance of lotus seeds dried at different hot air temperatures

2.1.2 产品的复水率及干燥能耗

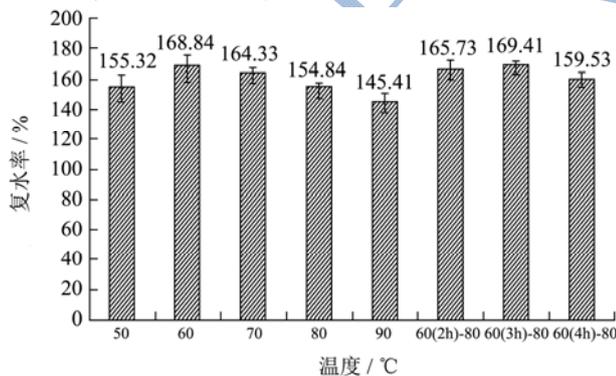


图4 不同干燥温度对复水率的影响

Fig.4 Effects of different hot air temperatures on the rehydration ratio

莲子产品质量重要评价指标之一为莲子的复水率,复水率是评价干产品复水后恢复到初始含水状态的比率,复水率越大越接近新鲜莲子的含水率,口感越好,故复水率越大越好。莲子在不同温度下复水率存在较大的差别。复水性主要取决于莲子内部细胞和

结构的破坏程度。在莲子热风干燥过程中,莲子内部发生了不可逆转的细胞错位和破坏,导致内部细胞完整性丧失,毛细管收缩,内部组织结构塌陷,从而降低整体的亲水性能^[15]。从图4复水率可以看出,热风干燥温度为60℃和70℃之间差异不大,与50℃、80℃和90℃复水率相比存在明显差异($p < 0.05$)。60℃(2h)~80℃和60℃(3h)~80℃之间复水率的差异不大,与60℃(4h)~80℃之间有着明显差异($p < 0.05$)。在热风恒温干燥时,60℃的复水性最佳,干燥品质比较高。而当温度高于60℃时,莲子的复水性开始变差,60℃为复水率减小的转折点。当温度达到90℃时,复水率明显降低,莲子的品质变差。说明莲子在90℃干燥状态下,莲子内部的组织结构被严重的破坏,从而导致其整体的复水性变差。分段变温干燥莲子整体复水性较好,采用60℃(3h)~80℃干燥工艺,复水率为169.41%,优于恒温60℃干燥的复水率。由此可看出,分段变温干燥对内部结构破坏较小,可以得到较高品质的莲子。

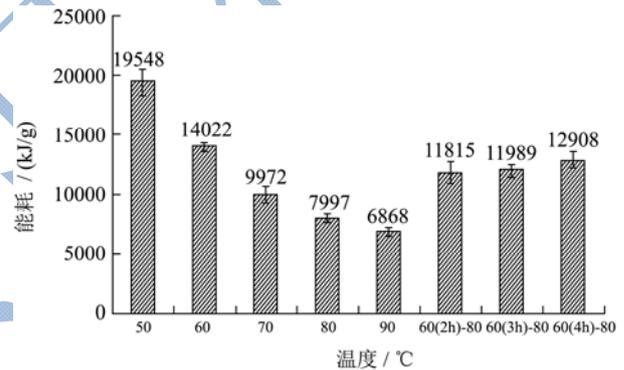


图5 不同干燥温度对单位能耗的影响

Fig.5 Effects of different hot air temperatures on the unit energy consumption

图5为单个莲子干燥的相对单位能耗,从图5可以看出,恒温干燥时不同干燥温度对单位能耗均有影响,且存在明显差别($p < 0.05$),而变温干燥条件下的单位能耗之间差异不大。恒温干燥条件下,随着温度的升高,莲子干燥过程的单位能耗逐渐降低。由于莲子干燥过程中,当温度升高时干燥时间会显著地减小。温度的升高使得物料间的水分传递动能增加,动能的增加使得在单位能耗下排出的水分迅速增大。在60℃(3h)~80℃变温干燥中,单位时间干燥能耗值接近70℃,并且比恒温干燥60℃条件下节省了2033 kJ/g。当在分段变温干燥时,由于干燥前期,莲子含水率高,只需要较低的温度便可以使得大量的水分传递出来;而在干燥后期,物料的外层变得干燥,内部湿分向外传递的阻力增大,只有高温才能让水分持续高效的排出。分段变温干燥使得能耗和时间都相对的

减少，能够很好的节省干燥的成本。

综上可以得出，莲子在热风恒温干燥条件下，60℃是最佳的温度。而在分段变温干燥条件下进行时，60℃(3h)~80℃是最佳的温度设置条件。

2.2 莲子热风干燥特性

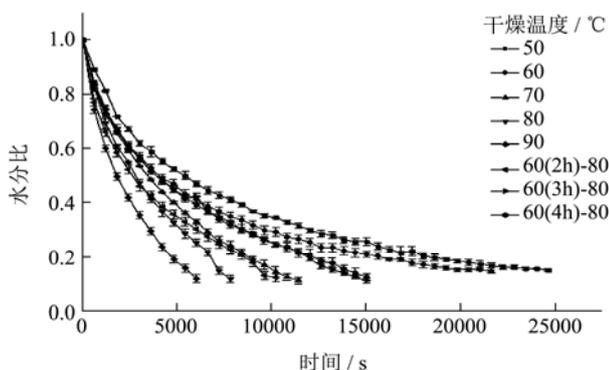


图6 莲子热风干燥曲线

Fig.6 Drying curves of lotus seed at different hot air temperatures

图6为莲子在不同温度下干燥至含水率为14%（湿基）时的干燥曲线，为使得莲子干燥的整个过程表示清晰，图中的数据点为每隔10min取值1次。从图中可以看出，在恒温干燥过程中，随着温度的升高，干燥到相同含水率的时间越短。莲子在90℃时，干燥到含水率为14%的时间为1.67h。当温度为60℃时，干燥时间则大量增加，总的干燥时间为6.73h，为90℃时的4倍，由此可见干燥温度是影响莲子干燥时间的决定因素。温度越高，产生的温差就越大，传热传质动力越大，高温可以显著减少干燥时间，提高干燥速率。在分段变温干燥温度由60℃增加到80℃时，干燥速率明显的增加，大大的提高了干燥效率。当在60℃(2h)~80℃条件下时，干燥速率明显大于60℃恒温状态下的值，将原来60℃恒温的6.73h降低到3.31h。在60℃(4h)~80℃条件下干燥时间为4.83h，明显小于60℃恒温干燥时间。分段变温干燥是温度渐进升高的过程，缩短干燥时间，降低干燥能耗，改善干燥条件。干燥温度升高，在莲子内外产生更大的温差，增大莲子内部水分迁移的驱动力，加快了内部水分迁移速度，提高了干燥效率。

图7为莲子热风干燥速率曲线，从图中可以看出，单粒莲子的整个干燥过程为降速干燥。当干基含水率到0.90g/g时，干燥过程开始从快速干燥转变为缓慢干燥阶段。其主要原因是在干燥初始阶段，莲子含水率较高，外层水分扩散阻力小，随着干燥过程的进行，干湿界面向莲子内部退缩，湿分向外迁移的阻力增大，导致内部水分蒸发速率降低。随着莲子含水率的降低，

干燥速率呈现下降的趋势。从图7还可以看出，在变温干燥条件下，干燥初始阶段虽然干燥温度较低，但水分扩散阻力小，干燥速率较大，当莲子的含水率降到一定值时，通过提高干燥温度，保持整个干燥过程干燥速率稳定在一个较高的水平。其原因是因为随着干燥温度的升高，在表面与内部之间产生较大的温差，提高了莲子内部水分迁移驱动力，加快了内部水分的扩散速率，提高了干燥效率。由图6和7可以分析得出，根据物料与水分结合能随温度、含水率变化而变化的规律，在高含水段的水分蒸发受物料限制的作用小，利用较低温度干燥介质能去除绝大部分水。而在低水分段，水分的结合能随温度的升高而降低，提高干燥温度可显著缩短干燥时间。因此物料处于不同含水率段，采用不同干燥温度，可以减弱高温对产品破坏，提高产品质量；同时在低含水段采用较高的干燥温度，可以缩短干燥时间，降低能耗，提高干燥效率。

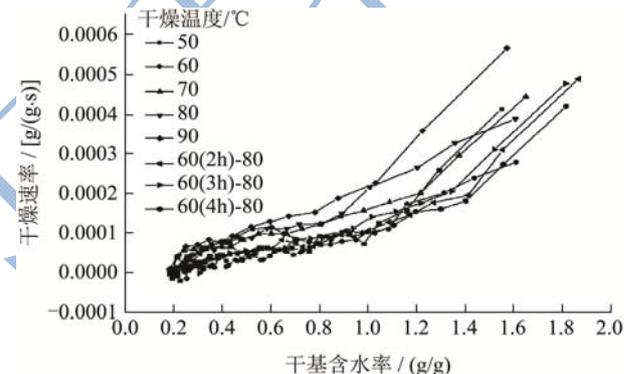


图7 莲子热风干燥速率曲线

Fig.7 Drying rates of lotus seed at different hot air temperatures

2.3 有效扩散系数

2.3.1 有效扩散系数计算公式

干燥过程中，湿分扩散是一个复杂的过程，此过程可能包括分子扩散、毛细管流、Knudsen（努森）流、吸水动力学流和表面扩散，这些现象结合起来由Fick第二定律定义为有效扩散系数，有效扩散系数是干燥参数优化和干燥机设计的一个重要的传递特性，是反应湿分传输机理的关键干燥参数。凡是涉及物料内部水分转移过程分析的问题，如干燥、脱水和贮藏等均需要知道水分扩散系数。在莲子干燥过程中，通常认为莲子内部水分流动是采用扩散方式（液体或者蒸汽）。由于莲子干燥过程是在非稳态条件下，在整个分析过程中，假设莲子为球体。即莲子的水分扩散偏微分方程可以写成：

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \left[\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (6)$$

式中, M 是含水率(小数表示); t 是时间(s); D_{eff} 是有效水分扩散系数(m^2/s); r 是沿着球半径 R 水分扩散的位点(m)。最初和边界条件假定为: 当 $r < R$, $M(r, 0) = M_0$; 且 $t > 0$, $M(R, t) = M_e$ 。

本试验过程中, 由于莲子具有上述最初和边界条件。莲子干燥是水分向外部迁移的过程, 根据斐克第二定律的解析解, 结合试验数据可以计算出莲子干燥过程水分的扩散系数, 计算公式如下^[16]:

$$\frac{M_t - M_1}{M_0 - M_1} = 1 + \frac{2R}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin \frac{n\pi r}{R} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_{eff} t}{R^2}\right) \quad (7)$$

在上式中, 当 r 无限的趋近于0时, 可以将其化简为下式:

$$\frac{M_t - M_1}{M_0 - M_1} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_{eff} t}{R^2}\right) \quad (8)$$

对球体体积进行平均化处理, 就单一莲子内平均水分获得了式(8)的分析解法, 如下为湿度随时间分布的关系式:

$$MR = \frac{6}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_{eff} t}{R^2}\right) \quad (9)$$

式中: D_{eff} 为有效扩散系数, m^2/s ; t 为试验时间, s; r 为莲子试验样本的半径, m; n 为试验采样数。

将式(9)等号两边分别取自然对数, 可得到 $\ln MR$ 与时间 t 的线性关系表达式:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (10)$$

由式(10)可知, $\ln MR$ 与时间 t 线性关系的斜率(k)表达式为:

$$k = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2} \quad (11)$$

试验数据拟合得到 $\ln MR$ 与时间 t 线性关系的斜率值, 进而由式(11)得到水分的有效扩散系数 D_{eff} 。

2.3.2 有效扩散系数计算值

表1 不同条件下莲子热风干燥有效扩散系数

Table 1 Moisture effective diffusion coefficients of lotus seed under different hot air drying conditions

干燥方式	温度/°C	斜率	有效扩散系数(m^2/s)
恒温干燥	50	-6.61×10^{-5}	1.79×10^{-9}
	60	-7.90×10^{-5}	2.14×10^{-9}
	70	-1.19×10^{-4}	3.21×10^{-9}
	80	-1.48×10^{-4}	4.00×10^{-9}
	90	-2.15×10^{-4}	5.83×10^{-9}
变温干燥	60(2 h)~80	-1.10×10^{-4}	2.97×10^{-9}
	60(3 h)~80	-9.31×10^{-5}	2.52×10^{-9}
	60(4 h)~80	-9.02×10^{-5}	2.44×10^{-9}

由于莲子整个热风干燥过程符合 Fick 第二定律, 由式(2)、(9)、(10)和(11)计算得到不同条件下

莲子热风干燥水分有效扩散系数如表1所示。从表1可以看到, 莲子在50~90 °C恒温干燥条件下水分有效扩散系数分别为 1.79×10^{-9} 、 2.14×10^{-9} 、 3.21×10^{-9} 、 4.00×10^{-9} 和 $5.83 \times 10^{-9} m^2/s$, 莲子在变温干燥60 °C(2 h)~80 °C、60 °C(3 h)~80 °C和60 °C(4 h)~80 °C条件下, 水分有效扩散系数分别为 2.97×10^{-9} 、 2.52×10^{-9} 和 $2.44 \times 10^{-9} m^2/s$ 。由此可见, 莲子热风干燥水分的有效扩散系数随着干燥温度的升高而增大。变温条件下有效扩散系数值介于恒温60 °C和70 °C条件下的数值之间。在60 °C(2 h)~80 °C干燥条件下, 莲子的水分扩散系数和70 °C时的接近, 并且大于60 °C恒温条件下系数。

2.4 活化能

食品内部水分的扩散与物料温度有关, 其关系符合阿伦钮斯方程(Arrhenius equation)。干燥活化能表示干燥过程中蒸发单位摩尔的水分所需要的启动能量, 物料的活化能越大表明其越难干燥^[17], 有效扩散系数 D_{eff} 与活化能关系可根据 Arrhenius 方程建立^[18]:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (12)$$

式中: D_0 为 Arrhenius 方程的指前因子, m^2/s ; E_a 为活化能, kJ/mol; R 为气体常数, 8.31 J/(mol K); T 为干燥温度, K。

将式(12)等号两边分别取自然对数, 可得到 $\ln D_{eff}$ 与 $1/T$ 的线性关系表达式:

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \frac{1}{T} \quad (13)$$

对试验数据线性拟合由式(13)可得到 $\ln D_{eff}$ 与 $1/T$ 线性关系的斜率值 $-E_a/R$, 从而计算出活化能 E_a 。

由上述计算所得莲子热风干燥在不同温度下的有效扩散系数, 作有效扩散系数自然底对数与温度倒数间的关系图, 再根据有效扩散系数 D_{eff} 与活化能的关系可根据 Arrhenius 方程式(12), 可以得到如图7所示的曲线结果。

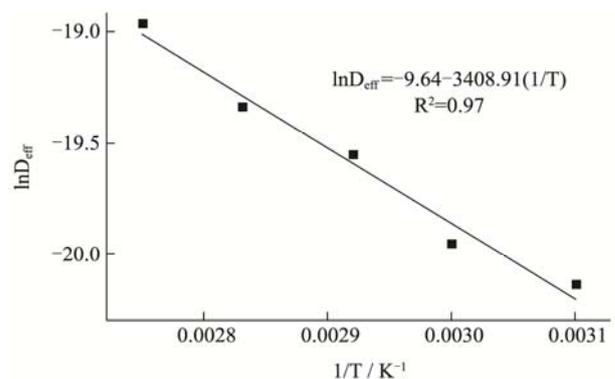


图8 $\ln D_{eff}$ 与 $1/T$ 拟合结果

Fig.8 Result of fitting between $\ln D_{eff}$ and $1/T$

注: D_{eff} 为有效扩散系数, m^2/s ; T 为干燥温度, K 。

从图8中可看到莲子干燥过程中 $\ln D_{eff}$ 与 $1/T$ 呈现线性关系, 直线方程分别为 $\ln D_{eff} = -9.64 - 3408.91(1/T)$ (决定系数 $R^2 = 0.97$)。由式(13)可得莲子干燥过程中水分活化能 E_a 为 28.33 kJ/mol 。

3 结论

3.1 莲子在热风恒温干燥条件下, 随着温度的增加, 干燥后莲子的皱缩率变大。当干燥温度达到 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 莲子的皱缩最大, 其次为 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 干燥时, 莲子皱缩较小, 并且表面光滑度最好。在变温干燥条件下, 当变温温度为 $60 \text{ }^\circ\text{C}(3 \text{ h}) \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $60 \text{ }^\circ\text{C}(4 \text{ h}) \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 得到的莲子表面皱缩率较小, 表面粗糙度比较理想, 与 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温干燥时的莲子品质接近。

3.2 干燥温度对于莲子复水性的影响较大。 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的复水性为 168.84% , 干燥后莲子的品质较好。而当干燥温度高于 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 莲子的复水率降低。当温度达到 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 复水率仅为 145.41% , 莲子的品质变差, 高温干燥对品质影响较大。分段变温干燥条件下莲子整体复水性较好, $60 \text{ }^\circ\text{C}(4 \text{ h}) \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 得到的莲子复水性最高为 169.41% , 达到恒温 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 干燥的复水率, 分段变温干燥有利于提高莲子产品品质。

3.3 热风干燥温度升高, 干燥时间减小。当温度为 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 干燥速率最大, 干燥到含水率为 14% 的时间为 1.67 h , 单粒莲子的单位能耗仅为 6868 kJ/g 。当温度为 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 干燥时间则大量增加到 8.50 h , 单位能耗达到 19548 kJ/g 。相比于恒温干燥, 分段变温干燥不仅能节省干燥时间, 并且能提高产品品质。当在 $60 \text{ }^\circ\text{C}(4 \text{ h}) \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下, 干燥时间为 4.03 h , 比 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温干燥时间 6.73 h 缩短了 2.70 h , 显著缩短了干燥时间。

3.4 莲子在 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 热风恒温干燥条件下的平均扩散系数分别为 1.79×10^{-9} 、 2.14×10^{-9} 、 3.21×10^{-9} 、 4.00×10^{-9} 和 $5.83 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, 有效扩散系数随着干燥温度的升高而增大。在变温分段干燥 $60 \text{ }^\circ\text{C}(2 \text{ h}) \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $60 \text{ }^\circ\text{C}(3 \text{ h}) \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $60 \text{ }^\circ\text{C}(4 \text{ h}) \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下, 水分有效扩散系数分别为 2.97×10^{-9} 、 2.52×10^{-9} 和 $2.44 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。有效扩散系数值介于恒温 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下的数值之间。干燥过程中水分蒸发的活化能为 28.33 kJ/mol 。

参考文献

[1] 郭泽斌, 曾绍校, 郑宝东. 超高压处理对莲子淀粉理化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2014, 14(11): 118-123
GUO Ze-bin, ZENG Shao-xiao, ZHENG Bao-dong. Effect of

ultra high pressure processing on the physicochemical properties of lotus-seed starch [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(11): 118-123

[2] 曾绍校, 梁静, 郑宝东, 等. 不同干燥工艺对莲子品质的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 227-231
ZENG Shao-xiao, LIANG Jing, ZHENG Bao-dong, et al. Effects of different drying technology on the quality of lotus-seed [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(5): 227-231

[3] 陈丰. 莲子真空微波干燥工艺研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010
CHEN Feng. Studies on the microwave vacuum drying of lotus-seed [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2010

[4] Chan dan Kumar, M A Karim, Mohammad U H Joardder, et al. Intermittent drying of food products: A critical review [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 121: 48-57

[5] S J Kowalski, J Szadzińska. Kinetics and quality aspects of beetroots dried in non-stationary conditions [J]. Drying Technology, 2014, 32(11): 1310-1318

[6] Chua K J, Mujumdar A S, Chou S K, et al. Drying of banana, guava and potato pieces: effect of cyclical variations of air temperature on convective drying kinetics and colour change [J]. Drying Technology, 2000, 18(5): 907-936

[7] R Jumah, E Al-Kteimat, A Al-Hamad, et al. Constant and intermittent drying characteristics of olive cake [J]. Drying Technology, 2007, 25(9): 1421-1426

[8] Laura A Ramallo, Nancy N Lovera, Miguel E Schmalko. Effect of the application of intermittent drying on *Ilex paraguariensis* quality and drying kinetics [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 97(2): 188-193

[9] Siew Kian Chin, Chung Lim Law. Product quality and drying characteristics of intermittent heat pump drying of ganoderma tsugae murrill [J]. Drying Technology, 2010, 28(12): 1457-1465

[10] 李长友, 麦智伟, 方壮东, 等. 粮食水分结合能与热风干燥动力学解析法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 236-242
LI Chang-you, MAI Zhi-wei, FANG Zhuang-dong, et al. Analytical study of grain moisture binding energy and air drying dynamics [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(7): 236-242

[11] GB 5009.3-2010, 食品中水分的测定[S]
GB 5009.3-2010, National food safety standard determination of moisture in foods [S]

[12] 梁静. 莲子微波干燥特性及干燥工艺的研究[D]. 福州: 福建

- 农林大学,2007
- LIANG Jing. Study on the microwave drying characteristics and drying technology optimization of lotus-seed [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2007
- [13] 张茜,肖红伟,杨旭海,等.预处理对线辣椒气体射流冲击干燥特性和色泽的影响[J].农业工程学报,2012,8(1):276-281
- ZHANG Qian, XIAO Hong-wei, YANG Xu-hai, et al. Effects of pretreatment on air impingement drying characteristics and product color for line pepper [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 8(1): 276-281
- [14] 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 Xue-yuan, GAO Kun, CHEN Qin-qin, et al. Water diffusion characteristics of apple slices during short and medium-wave infrared drying [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(12): 275-281
- [15] 宋洪波,毛志怀.干燥方法对植物产品物理特性影响的研究进展[J].农业机械学报,2005,36(6):117-121
- SONG Hong-bo, MAO Zhi-huai. Review of drying methods on the physical characteristics of plant materials [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(6): 117-121
- [16] Crank J. The mathematics of diffusion [M]. Oxford: Oxford University Press, 1975
- [17] 师建芳,吴辉煌,姜正,等.豇豆隧道式热风干燥特性和模型[J].农业工程学报,2013,29(11):232-240
- SHI Jian-fang, WU Hui-huang, LOU Zheng, et al. Drying characteristics and model of cowpea in tunnel hot air dryer [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(11): 232-240
- [18] Gabriela Clemente, Neus Sanjuán, Juan Andrés Cárcel, et al. Influence of temperature, air velocity, and ultrasound application on drying kinetics of grape seeds [J]. Drying Technology, 2014, 32(1): 68-76