

桂圆热风干燥过程动力学研究

张孝果, 张峰榛, 张玉红

(四川理工学院化学工程学院, 四川 自贡 643000)

摘要:为了研究桂圆热风干燥过程的机理,在将其视为一个球体的基础上,建立了水分在桂圆内部迁移的传质模型,并获得了内扩散系数的表达式。研究表明:桂圆热风干燥主要由表面汽化阶段和水分内部迁移阶段构成,干燥介质温度的升高或气速的增大皆可增大干燥速率,由此缩短了表面汽化阶段的时间并使水分内部迁移阶段提前;干燥介质气速的高低会影响水汽从桂圆表面迁移至气相主体区的外扩散阻力,低气速条件下外扩散阻力较大,此时测得的扩散系数实质是包括外扩散影响在内的表观扩散系数,该系数随气速增加而增大。因此测量内扩散系数时应先消除表面汽化阶段的影响,通过分析不同气速对水分内扩散系数 D_{eff} 的影响,发现消除外扩散影响的临界气速为 $1.07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,即当干燥介质气速高于该值时,可测得本征内扩散系数;在 $323.15 \text{ K} \sim 363.15 \text{ K}$ 温度范围内,水分在桂圆内部的扩散系数为 $2.52 \times 10^{-10} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1} \sim 5.27 \times 10^{-10} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$,内扩散活化能和指前因子分别为 $19.84 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 和 $4.011 \times 10^7 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 。

关键词:桂圆;热风干燥;动力学;外扩散;内扩散;活化能

中图分类号:TS255

文献标志码:A

引言

桂圆俗称龙眼,属于含水量较高的农产品,在食用和药用方面有很大的价值^[1]。为了提高桂圆存储周期,通常将其加工成桂圆干。桂圆干的制备一般采用日晒法和烘培法^[2],前者利用太阳能实现桂圆干燥,其工艺简单,适于家庭少量制作;后者则是利用焙灶进行人工烘制(干燥),适用于大批量生产。相对于日晒法,烘培法具有更快的干燥速率,可实现更高的生产效率,而干燥速率正是果蔬干产品生产中的关键参数。诸多学者围绕新鲜果蔬的热风干燥动力学展开了研究,取得的成

果包括描述薄层果蔬热风干燥过程的 Lewis 模型^[3]、Henderson & Pabis 模型^[4]、Page 模型^[5]、Two term exponential 模型^[6]、Logarithmic 模型^[7]等。这些模型主要将新鲜果蔬在一定工况下的干燥数据用来拟合动力学参数,却忽略了干燥过程机理的探究。此外,还有学者利用质量守恒及热量守恒方程建立新鲜果蔬干燥过程的传热传质微分方程,以此研究其动力学^[8-20]。这些研究虽然能较好的表达干燥过程机理,但是若要获取干燥过程中果蔬内部的温度和水分浓度分布,则需要导热系数、水分扩散系数等物性参数。张绪坤等^[21]以及邓红等^[22]利用菲克第二定律,分别实验获得了莲子和猕猴桃

收稿日期:2018-07-17

基金项目:四川省教育厅项目(14ZB0213)

作者简介:张孝果(1995-),男,四川广安人,硕士生,主要从事化工传质与分离方面的研究,(E-mail) doxiaoguo719@163.com

通信作者:张峰榛(1980-),男,四川德阳人,副教授,博士,主要从事化工传质与分离方面的研究,(E-mail) zhangfengzhen421@163.com

热风干燥过程水分的有效扩散系数。由于莲子和猕猴桃含水量相对较低,热风干燥过程几乎处于降速干燥段,即水分内部迁移阶段,因此无需考虑表面汽化阶段对有效扩散系数的影响,而对于如桂圆、荔枝这类含水量较高的果蔬来说,其水分扩散系数的测量必须首先要消除表面汽化阶段的影响。

基于此,本文探究桂圆热风干燥过程机理,并在消除表面汽化阶段以及水汽外扩散影响后,获得水分本征内扩散系数。研究结果可为高含水量果蔬类的干燥提供理论指导。

1 机理与模型

桂圆等含水量较高的果蔬的干燥过程主要由两阶段构成。干燥前期,因其表面充分湿润,除去的是表面的非结合水分,桂圆内部的水分几乎不会向表面扩散,在此阶段干燥速率基本保持恒定,这属于表面汽化阶段;随着干燥过程的进行,物料表面变干,表面水分含量约为平衡湿含量,而物料内部仍存在较高湿含量,因此物料内外形成湿含量差,在其推动下,内部水分不断扩散至表面,再汽化并扩散至气相主体,这属于水分内部迁移阶段,在此阶段干燥速率逐渐降低。

将桂圆视作直径为 d_0 的小球,并假设其内部水分扩散仅在径向进行。以桂圆球心为原点,建立球坐标系,对水分从内至外的迁移过程进行数学描述,可建立如式(1)所示的传质模型^[20-22]。

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (1)$$

式中, X 是桂圆干基湿含量; t 是时间, s; D_{eff} 是水分内扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; r 是球坐标径向位置, m。

给出初始条件: $r \leq d_0/2, X(r, 0) = X_0$, 其中, X_0 为初始湿含量。

给出边界条件: 当 $r = d_0/2, X(r, t) = X_e, X_e$ 为平衡湿含量; 当 $r = 0, \frac{dX}{dr} = 0$ 。

利用初始条件和边界条件,求解式(1),且对球体体积进行平均化处理,可得桂圆相对湿含量 MR 随时间 t 变化的关系^[21],如式(2)所示:

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \approx \frac{X}{X_0} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{4\pi^2 D_{\text{eff}} t}{d_0^2}\right) \quad (2)$$

将式(2)等式两边取对数,得到式(3):

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\frac{4\pi^2 D_{\text{eff}} t}{d_0^2}\right) \quad (3)$$

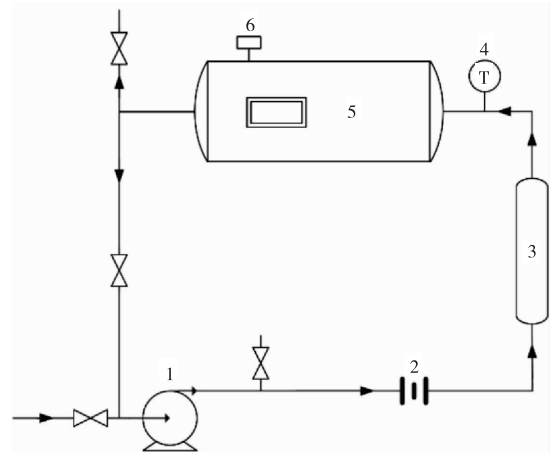
在不同实验条件下,获得桂圆热风干燥过程中水分内部迁移阶段的相对湿含量 MR 随时间 t 的变化关系,并通过式(3)拟合实验数据,可得水分内扩散系数 D_{eff} 。

2 实验部分

2.1 实验装置与流程

将一颗新鲜桂圆去除壳,称取初始质量为 m_0 ,并用游标卡尺多次测量桂圆的直径,取平均值为 d_0 。然后利用 BDGZ - B 洞道干燥器测定桂圆干燥的实验数据。BDGZ - B 洞道干燥器如图 1 所示。

实验时,先将风机前的阀门全开后,启动风机,调节干燥器后的废气循环阀门及废气排出阀的开启度,将空气流速调节到实验所需风速,再将温度设置到实验所需温度后,开启空气加热器,待设备运行稳定后,读取称量夹质量,再将测量后的桂圆放入干燥的称量夹上,紧闭干燥箱门并每隔一定的时间记录 1 次实验数据,包括物料重量、气体流量、干球温度、湿球温度,直至三次干燥物料重量之差小于 0.1 g 即可完成实验测量。



注:1 - 风机;2 - 孔板流量计;3 - 空气加热器;
4 - 温度传感器;5 - 干燥箱;6 称量传感器

图 1 BDGZ - B 洞道干燥器

2.2 实验参数确定

2.2.1 桂圆的相对湿含量 MR

桂圆相对湿含量的计算如式(4)所示。

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (4)$$

式中, X_0 为桂圆初始干基湿含量; X_e 为桂圆平衡干基湿含量。

2.2.2 干燥介质的气速

通过孔板流量计测量室温条件下干燥介质(空气)的体积流量 V_0 , 因气体为可压缩流体, 其流量随温度改变而变化, 因此, 经电加热管加热后进入干燥器的实际体积流量 V 需利用式(5)进行校正。

$$V = V_0 \times \frac{T}{T_0} \quad (5)$$

式中, T_0 为风机出口处温度, K; T 为进入干燥器的空气温度, K。

干燥介质的气速 u 为:

$$u = \frac{V}{A} \quad (6)$$

式中, A 为干燥器截面积, 本实验中为 0.0456 m^2 。

2.2.3 干燥速率

桂圆干燥速率的表达式如式(7)所示。

$$U = - \frac{m_{t+\Delta t} - m_t}{S\Delta t} \quad (7)$$

式中, U 为桂圆干燥速率, $\text{kg}(\text{水分}) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; m_t 为 t 时刻的桂圆质量, kg; t 为测量时间间隔, s; S 为桂圆外表面积, m^2 , 可利用式(8)计算。

$$S = \pi d_0^2 \quad (8)$$

式中, d_0 为桂圆的平均直径, m。

3 结果与讨论

3.1 气速和温度对干燥曲线的影响

不同气速对桂圆热风干燥曲线的影响如图2所示。

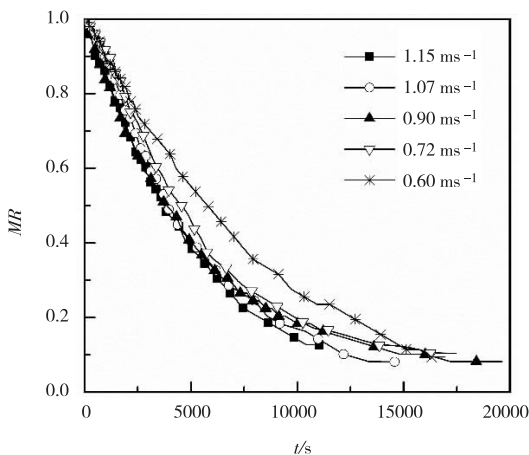


图2 气速对桂圆热风干燥曲线的影响

从图2可知, 当温度为 343.15 K , 气速为 $0.60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \sim 1.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 一方面, 桂圆含水量随时间推移而先快速降低再缓慢降低, 直至趋于稳定; 另一方面, 桂圆水分平均汽化速率随气速增大而增大, 但当气速大于等于 $1.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 它对干燥曲线无显著性影响。由传质膜理论可知, 随气速增大, 桂圆表面气膜逐渐变薄, 水分汽化后迁移至气相主体区的外扩散阻力逐渐变小, 直至其影响可被忽略不计。

温度对桂圆热风干燥曲线的影响如图3所示。

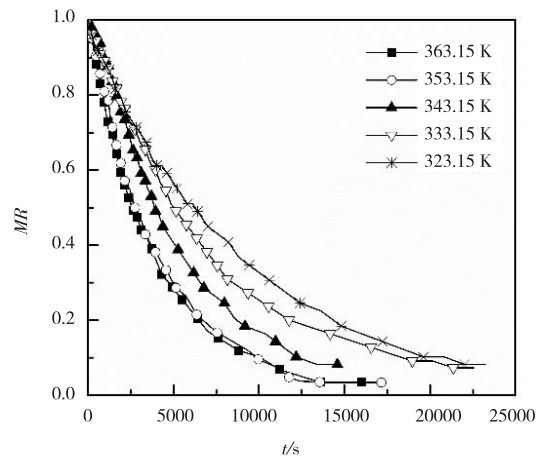


图3 温度对桂圆热风干燥曲线的影响

从图3可知, 在气速恒定为 $1.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 温度为 $323.15 \text{ K} \sim 363.15 \text{ K}$ 时, 桂圆水分平均汽化速率随温度升高而增加。这是因为升高温度使得桂圆表面温度也升高, 致使水分饱和蒸气压增大, 从而增大了桂圆热风干燥的传热传质推动力, 导致水分平均汽化速率升高。

3.2 气速和温度对干燥速率 U 的影响

气速和干燥温度对桂圆干燥速率的影响分别如图4和图5所示。

从图4和图5可知, 桂圆热风干燥过程经历了表面汽化(恒速干燥)和水分内部迁移(降速干燥)两个阶段; 在 343.15 K 温度下, 气速由 $0.60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 升至 $1.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 桂圆临界(指两阶段的临界点)湿含量由 $1.35 \text{ kg}(\text{水分}) \cdot \text{kg}(\text{干料})^{-1}$ 增至 $1.62 \text{ kg}(\text{水分}) \cdot \text{kg}(\text{干料})^{-1}$; 在 $1.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 气速下, 温度由 323.15 K 升至 363.15 K 时, 桂圆临界湿含量由 $1.50 \text{ kg}(\text{水分}) \cdot \text{kg}(\text{干料})^{-1}$ 增至 $1.65 \text{ kg}(\text{水分}) \cdot \text{kg}(\text{干料})^{-1}$ 。由此说明高气速和高干燥温度可得到较高的干燥速率, 这是由于在此条件下, 桂圆表面温度更高所致。高气速和高干燥温度使得表面

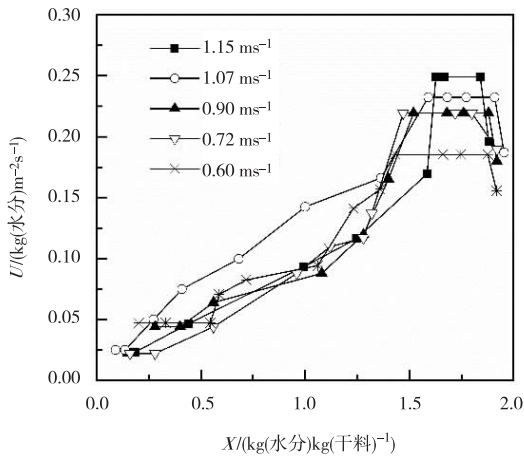


图 4 风速对桂圆热风干燥速率的影响

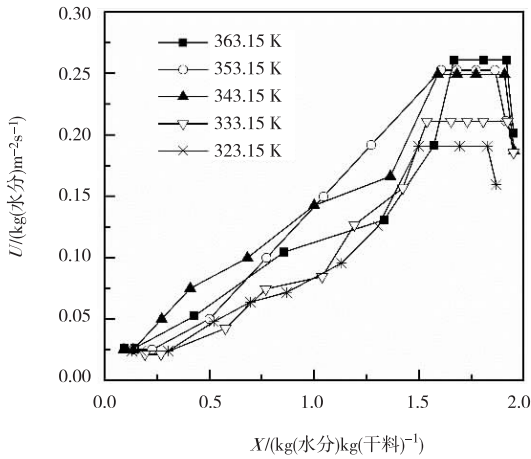


图 5 温度对桂圆热风干燥速率的影响

汽化阶段变短,这可能是因为在在此条件下,桂圆表面升温更迅速,水分相应的也蒸发更快,造成表面较早干结,从而更早进入水分内部迁移阶段。

3.3 风速对水分内扩散系数 D_{eff} 的影响

根据不同条件下的干燥速率曲线(图 2,图 3),并结合对桂圆干燥速率的分析(图 4,图 5),可区分出桂圆干燥过程的两个阶段(即表面汽化阶段和水分内部迁移阶段),再选择水分内部迁移阶段的实验数据来消除表面汽化阶段对内扩散系数测量的影响,并根据式(3)拟合获得水分内扩散系数 D_{eff} 。

在干燥气体温度恒定为 343.15 K 时,分析不同风速条件下桂圆热风干燥水分内部迁移阶段相对湿含量 MR 随时间 t 变化的实验数据,将 MR 取自然对数后进行线性回归,设置拟合直线的截距为 $\ln(6/\pi^2)$,可获得拟合直线,由此得到不同风速条件下拟合直线的斜率,并根据式(3),获得桂圆水分内扩散系数 D_{eff} ,所得结果如图

6 和表 1 所示。

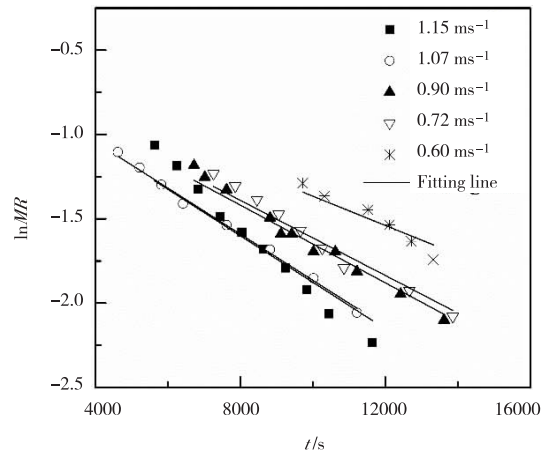


图 6 不同风速条件下 $\ln MR$ 与 t 的关系

表 1 不同风速下 $\ln MR$ 与 t 的回归方程及 D_{eff}

| $u /$ ($m \cdot s^{-1}$) | 线性回归方程 | R^2 | $D_{eff} /$ ($m^2 \cdot s^{-1}$) |
|-------------------------------|---|--------|---------------------------------------|
| 1.15 | $\ln MR = -1.379 \times 10^{-4} t - 0.4977$ | 0.9015 | 4.20×10^{-10} |
| 1.07 | $\ln MR = -1.367 \times 10^{-4} t - 0.4977$ | 0.9956 | 4.19×10^{-10} |
| 0.90 | $\ln MR = -1.152 \times 10^{-4} t - 0.4977$ | 0.9759 | 3.53×10^{-10} |
| 0.72 | $\ln MR = -1.115 \times 10^{-4} t - 0.4977$ | 0.9638 | 3.41×10^{-10} |
| 0.60 | $\ln MR = -8.682 \times 10^{-5} t - 0.4977$ | 0.9002 | 2.66×10^{-10} |

从图 6 和表 1 可知,风速在 $0.60 m \cdot s^{-1} \sim 1.15 m \cdot s^{-1}$ 内时,实验数据拟合得到的回归方程的线性度较好,其扩散系数 D_{eff} 在 $2.66 \times 10^{-10} m^2 \cdot s^{-1} \sim 4.20 \times 10^{-10} m^2 \cdot s^{-1}$ 范围, $R^2 > 0.9$, D_{eff} 随风速增加呈现出先增大的趋势,当风速大于 $1.07 m \cdot s^{-1}$ 后, D_{eff} 稳定在 $4.20 \times 10^{-10} m^2 \cdot s^{-1}$ 。这是由于在桂圆干燥水分处于内部迁移阶段时,水分从桂圆内部扩散至外表面,再在外表面汽化并扩散至气相主体,即经历内扩散、表面汽化和外扩散三个步骤。低风速下的气膜较厚,外扩散阻力较大,实验获得的扩散系数实质是包括外扩散影响在内的表观扩散系数。随风速增大,气膜减薄,外扩散阻力减小,当风速增大至某一值时,外扩散影响消除,此时获得的扩散系数为桂圆水分内部迁移阶段的本质内扩散系数。由此通过分析不同风速对 D_{eff} 的影响,获得消除外扩散影响的临界风速为 $1.07 m \cdot s^{-1}$ 。

3.4 温度对水分内扩散系数 D_{eff} 的影响

实验在大于临界风速条件(即大于 $1.07 m \cdot s^{-1}$)下研究温度对内扩散系数 D_{eff} 的影响。在桂圆热风干燥水分内部迁移阶段,分析不同温度条件下相对湿含量 MR 随

时间 t 变化的实验数据,将 MR 取自然对数后进行线性回归,获得拟合直线和拟合直线的斜率,并根据式(3),获得桂圆水分内扩散系数 D_{eff} ,结果如图7和表2所示。

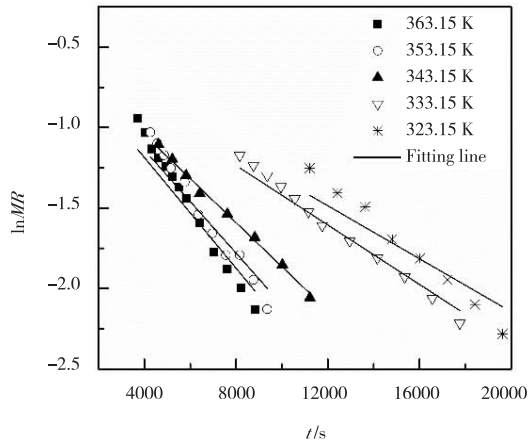


图7 不同温度条件下 $\ln MR$ 与 t 的关系

表2 不同温度下 $\ln MR$ 与 t 的回归方程及 D_{eff}

| T / K | 线性回归方程 | R^2 | $D_{\text{eff}} / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ |
|----------------|--|--------|---|
| 363.15 | $\ln MR = -1.721 \times 10^{-4}t - 0.4977$ | 0.9194 | 5.27×10^{-10} |
| 353.15 | $\ln MR = -1.602 \times 10^{-4}t - 0.4977$ | 0.9334 | 4.91×10^{-10} |
| 343.15 | $\ln MR = -1.367 \times 10^{-4}t - 0.4977$ | 0.9759 | 4.19×10^{-10} |
| 333.15 | $\ln MR = -9.230 \times 10^{-5}t - 0.4977$ | 0.9786 | 2.83×10^{-10} |
| 323.15 | $\ln MR = -8.234 \times 10^{-5}t - 0.4977$ | 0.9028 | 2.52×10^{-10} |

从图7和表2可知,拟合数据线性度较好, $R^2 > 0.9$, 温度在 323.15 K ~ 363.15 K 时, D_{eff} 在 $2.52 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \sim 5.27 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内; D_{eff} 随温度升高呈现出显著增大的趋势,说明可以通过升高干燥介质温度来强化桂圆水分内扩散过程。

3.5 水分内扩散系数 D_{eff} 的活化能

物料内扩散系数 D_{eff} 与温度符合阿伦尼乌斯方程,如式(9)所示。

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_0 T}\right) \quad (9)$$

式中, D_0 为内扩散系数的指前因子, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; E_a 为内扩散活化能, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$, 表示水分内部迁移阶段中向外表面传递 1 mol 水分所需要的启动能量,物料的内扩散活化能越大表明该过程进行得越困难; R_0 为气体常数,取 $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T 为温度, K。

将式(9)等号两边分别取自然对数,可得到 $\ln\{D_{\text{eff}}\}$

与 $1/T$ 的线性关系表达式(10)。

$$\ln\{D_{\text{eff}}\} = \ln\{D_0\} - \frac{E_a}{R_0} \frac{1}{T} \quad (10)$$

通过线性拟合实验数据,由式(10)可获得 $\ln\{D_{\text{eff}}\}$ 与 $1/T$ 线性关系的斜率值与截距,进而计算出 D_{eff} 的活化能 E_a 和指前因子 D_0 。 $\ln\{D_{\text{eff}}\}$ 与 $1/T$ 的实验数据及两者的拟合直线如图8所示。

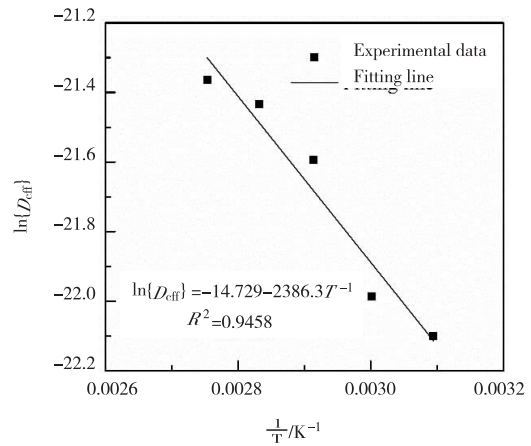


图8 $\ln\{D_{\text{eff}}\}$ 与 $1/T$ 的拟合结果

从图8可知, $\ln\{D_{\text{eff}}\}$ 与 $1/T$ 的拟合直线的线性相关度较好, $R^2 = 0.9458$, 由拟合直线斜率和截距值得到的内扩散活化能 E_a 和指前因子 D_0 分别为 $19.84 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 和 $4.011 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

4 结论

针对桂圆的热风干燥过程,将桂圆视为一个球体,建立了水分在桂圆内部迁移的传质模型,并以此研究了桂圆干燥的动力学,得到如下结论:

(1) 桂圆热风干燥过程主要由表面汽化阶段和水分内部迁移阶段构成。干燥介质温度的升高或风速的增大皆可增大干燥速率,并导致桂圆表面快速升温,加速表面干结,使得表面汽化阶段变短,相应地使水分内部迁移阶段提前。

(2) 低风速条件下,受水汽外扩散影响严重,实验测得的是表观扩散系数;当干燥介质风速高于 $1.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,可消除外扩散影响,此时测得的为本征内扩散系数。

(3) 在消除外扩散影响的条件下,水分内部迁移阶段的内扩散系数随温度的升高而增大,在 323.15 K ~ 363.15 K 范围内,内扩散系数 D_{eff} 在 $2.52 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

$\sim 5.27 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,内扩散活化能 E_a 和指前因子 D_0 分别为 $19.84 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 和 $4.011 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 蔡长河,唐小浪,张爱玉,等.龙眼肉的食疗价值及其开发利用前景[J].食品科学,2002,23(8):328-330.
- [2] 易阳,张名位.我国主要热带水果的干燥和贮藏保鲜技术研究进展[J].食品科学,2010,31(13):331-336.
- [3] BRUCE D M.Exposed-layer barley drying,three models fitted to new data up to 150°C [J].J AgrEng Res,1985,2(4):337-347.
- [4] HENDERSON S M,PABIS S.Grain drying theory II. Temperature effects on drying coefficients[J].J AgrEng Res,1961,6(4):169-174.
- [5] PAGE G E.Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers[D].Purdue USA: Purdue University,1949.
- [6] HENDERSON S M. Progress in developing the thin layer drying equation [J]. Transactions of the ASAE, 1974,17(6):1167-1172.
- [7] TOGRUL I T,PEHLIVAN D.Mathematical modeling of solar drying of apricots in thin layers[J].J Food Eng, 2002,55(3):209-216.
- [8] CHANDRA M V P,TALUKDAR P.Three dimensional numerical modeling of simultaneous heat and moisture transfer in a moist object subjected to convective drying[J]. Int J Heat Mass Tran,2010,53:4638-4650.
- [9] CHANDRAMOHAN V P.Numerical prediction and analysis of surface transfer coefficients on moist object during heat and mass transfer application[J].Heat Tran Eng,2016,37:53-63.
- [10] JANJAI S,MAHAYOTHEE B,LAMLERT N, et al. Diffusivity, shrinkage and simulated drying of litchi fruit(Litchi ChinensisSonn.)[J].J Food Eng,2010,96: 214-221.
- [11] KAYA A,AYDIN O,DINCER I.Experimental and numerical investigation of heat and mass transfer during drying of Hayward kiwi fruits(ActinidiaDeliciosa Planch)[J].J Food Eng,2008,88:323-330.
- [12] SABAREZ H T.Computational modelling of the transport phenomena occurring during convective drying of prunes[J].J Food Eng,2012,111:279-288.
- [13] WILTON P S,DENISE S A,MARIA E M D, et al. Description of the osmotic dehydration and convective drying of coconut(Cocos nucifera L.) pieces: a three-dimensional approach [J].J Food Eng,2013,115: 121-131.
- [14] TZEMPELIKOS D A,MITRAKOS D,VOUROS A P, et al.Numerical modeling of heat and mass transfer during convective drying of cylindrical quince slices [J].J Food Eng,2015,156:10-21.
- [15] GAMBOA-SANTOS J,MONTILLA A,CARCEL J A, et al.Air-borne ultrasound application in the convective drying of strawberry [J].J Food Eng,2014,128: 132-139.
- [16] DEFRAEYE T,VERBOVENP.Convective drying of fruit:Role and impact of moisture transportproperties in modelling[J].J Food Eng,2017,193:95-107.
- [17] DEFRAEYE T.Impact of size and shape of fresh-cut fruit on the drying time and fruitquality [J].J Food Eng,2017,210:35-41.
- [18] DEFRAEYE T,VERBOVEN P.Insights in convective drying of fruit by coupled modeling of fruit drying, deformation,quality evolution and convective exchange with the airflow[J].Appl Therm Eng,2018,129:1026-1038.
- [19] TAO Y,ZHANG J L,JIANG S R, et al.Contactting ultrasound enhanced hot-air convective drying of garlicslices: Mass transfer modeling and quality evaluation[J].J Food Eng,2018,235:79-88.
- [20] BEN M S,BENALI E,OUESLATI H.Experimental study and numerical modelling of drying characteris-

- tics of apple slices[J].Food Bioprod Process,2012,90: 148.
719-728.
- [21] 张绪坤,王高敏,姚斌,等.单粒莲子热风干燥特性及其干燥动力学[J].现代食品科技,2017,33(4):141-148.
- [22] 邓红,尤毅娜,李宁,等.猕猴桃片的热风干燥特性[J].食品与发酵工业,2014,40(11):165-170.

Study on Kinetics of Hot Air Drying Process of Longan

ZHANG Xiaoguo, ZHANG Fengzhen, ZHANG Yuhong

(School of Chemical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract: In order to study the mechanism of hot air drying process in longan, on the basis of treating it as a sphere, a mass transfer model of moisture in longan is established, and the expression of internal diffusion coefficient is obtained. The results show that the hot air drying of longan is mainly composed of surface vaporization stage and the internal water migration. The higher the drying air temperature or the higher the gas velocity, the higher the drying rate. As a result, the time of surface vaporization stage is shortened and the internal water migration stage is advanced. The gas velocity of drying medium will affect the external diffusion resistance of water vapor moving from the surface of longan to the main region of the the air, and the external diffusion resistance is larger under the condition of low gas velocity. The measured diffusion coefficient is essentially the apparent diffusion coefficient including the influence of external diffusion and it increases with the increase of gas velocity. Therefore, the influence of surface vaporization stage should be eliminated when measuring internal diffusion coefficient. By analyzing the influence of different gas velocities on the water internal diffusion coefficient D_{eff} , it is found that the critical gas velocity to eliminate the influence of external diffusion is $1.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. When the gas velocity of drying medium is higher than this value, the intrinsic internal diffusion coefficient can be measured. Under the temperature range of $323.15 \text{ K} \sim 363.15 \text{ K}$, the internal diffusion coefficient of the water inside the longan is in the range of $2.52 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \sim 5.27 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, and the internal diffusion activation energy and the pre-exponential factor are $19.84 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ and $4.011 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, respectively.

Key words: longan; hot air drying; kinetics; external diffusion; internal diffusion; activation energy