

茭白薄层热风干燥特性与动力学研究

诸爱士,陈震宇,成 忠

(浙江科技学院 生物与化学工程学院,杭州 310023)

摘 要: 为了解茭白干燥特性,进行了茭白薄层热风干燥实验,研究了风温、风速、茭白切片厚度及量对干燥的影响,进行了干燥曲线方程的拟合,将对流传热系数 α 与传质系数 k_H 等动力学参数与风速进行了关联。结果表明:风温、风速与厚度均对干燥影响较大,但以70℃、0.733 m/s、2 mm为宜;干燥方程符合Page模型;随风速增大, α 与 k_H 均增大,关系式为 $\alpha=91.46u^{0.7749}$, $k_H=79.24u^{0.7661}$, α 与 k_H 与风温没有关系。

关键词: 茭白;薄层热风干燥;模型;参数

中图分类号: TS255.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2011)03-0193-06

Study on characteristics and dynamics of thin-layer hot air drying of water-oat

ZHU Ai-shi, CHEN Zhen-yu, CHENG Zhong

(School of Biological and Chemical Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: The thin-layer hot-air drying experiments of water-oat were carried out to know the drying characteristics of water-oat and the effects of temperature, flow rate of hot air, thickness and quantity on the drying were investigated. The drying curve equations were fitted, the dynamics parameter, such as convective heat-transfer coefficient α and quality transmission coefficient k_H , were related with flow rate of hot air. The result shows that the wind temperature, wind speed and thickness have more influence on drying, but 70℃, 0.733 m/s and 2 mm are suitable. The drying equation accords with the Page model. As the wind speed rises, α and k_H are increased, the relation are $\alpha=91.46u^{0.7749}$ and $k_H=79.24u^{0.7661}$, α and k_H have nothing to do with the air temperature.

Key words: water-oat; thin-layer hot air drying; model; coefficient

收稿日期: 2010-10-15

基金项目: 浙江省科技计划项目(Y406053)

作者简介: 诸爱士(1966—),男,浙江省湖州人,副教授,主要从事化工单元操作的教学与应用研究。

茭白是中国特有的水生蔬菜。茭白营养丰富,据分析,100 g 茭白含蛋白质 1.4 g,脂肪 0.3 g,果糖 1.1 g,钙 40 mg,磷 43 mg,铁 0.3 mg。此外,它还含有维生素 C、核黄素、尼克酸、胡萝卜素及多种氨基酸等营养成分。茭白洁白、甘甜、鲜嫩、味美,食法多样,烧、炒、蒸、炖、焖皆可成佳肴,既可与荤料合烹,又可辅以食用菌、叶菜类合烧,还可以作水饺、包子和馄饨的馅。茭白味甘、性寒,有解热毒、除烦渴、利二便等的功效^[1]。由于茭白是水生植物,水足肉嫩,所以极易腐烂变质,在鲜货市场直销时,储藏期不超过 1 周^[2]。因此有学者研究其加工,除常规的晒茭白干外,有室温保鲜液保鲜^[3]、生产茭白罐头^[4],还有微波干燥^[5]等。本实验采用热风对片状茭白进行薄层干燥^[6],探讨了风温、风速^[7]、茭白切片厚度及装载量等对干燥的影响,对干燥动力学进行了分析计算,用 Page 模型拟合了不同风温、风速下的干燥方程,并将对流传热系数 α 及传质系数 k_H 与风速进行了关联,这些关系可为工业生产和设备设计提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

鲜茭白:市售,产自杭州附近农村。样本粗细均匀、新鲜,平均含水率为 94.2%(湿基),保湿冷藏于冰箱备用。

原料处理:鲜茭白→挑选→清洗→去壳→切片→装盘。

1.2 试验设备

DG100D 数字型洞道干燥装置(浙江中控科教仪器设备有限公司制造),DHG-9123A 型电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司制造),BS124S 型精密分析天平(北京赛多利斯仪器系统有限公司制造),T500Y 型电子天平(常熟双杰测试仪器厂制造)。

1.3 实验方法

设置好数字型洞道干燥装置需要的温度和风速,待其稳定;称取需要量的茭白片(控制同一因素考察时各实验装载量基本一样),平铺一层盖满整个干燥盘,进行干燥,记录干燥时间和质量,直至质量不变,停止实验。得到的干制品除平衡含水率不一样外,不同条件下干制品均色清白、味清香。再将干燥盘从干燥装置中取出放入恒温鼓风干燥箱,在 105 °C 下恒重,得出茭白片绝干质量,进行数据处理。

1.4 结果表达

干基含水率 X :

$$X = \frac{\text{物料中水分质量}}{\text{湿物料中干物料的质量}},$$

干燥速率 U_i :

$$U_i = \frac{G_{i-1} - G_{i+1}}{A(\tau_{i+1} - \tau_{i-1})},$$

式中: A 为干燥接触面积, m^2 ; τ 为干燥时间, s ; G_{i-1}, G_{i+1} 分别为 τ_{i-1}, τ_{i+1} 时刻物料质量, g ; U_i 为 τ_i 时刻干燥速率, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

2 结果与讨论

2.1 干燥条件

2.1.1 不同温度对干燥过程的影响

片状(厚约 2 mm)茭白,风速 0.733 m/s、平均装载量 1.180 kg/ m^2 ,考察干燥温度 55、60、65、70、75 °C (湿球温度 37.5、40.2、43.3、45.5、48.2 °C)对干燥的影响,计算得干燥曲线(图 1)和速率曲线(图 2)。

图 1、图 2 显示,干燥温度高,干燥速率快,干燥相同时间下物料的含水率就低。这是由于温度越高,传热推动力——温度差越大;空气的相对湿度也越低,空气与物料之间的传质推动力——湿度差就越大。干燥过程可分为 3 个阶段:预热、恒速及降速干燥阶段,符合传统的干燥速率曲线变化规律。预热段时茭

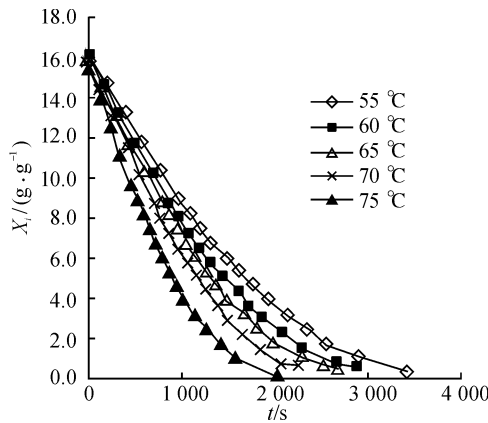


图1 不同干燥温度的干燥曲线

Fig. 1 Drying curves of different temperatures

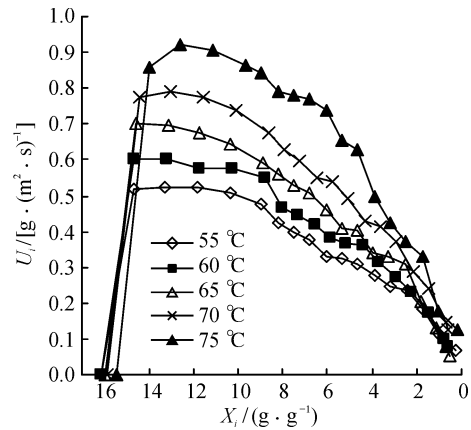


图2 不同干燥温度的速率曲线

Fig. 2 Rate curves of different temperatures

白放入干燥设备,物料预热,在升温的同时失去水分,速率加快。恒速段时去除的是茭白片表面附着的水分,表面温度为湿球温度,保持不变,使传热温差不变;物料表面是饱和湿度,故传质推动力也不变,干燥速率不变。降速阶段去除的是茭白片内部的水分和结合水分,此时水分从内部移动到表面的速率赶不上表面水分汽化速率,再加上物料表面湿度变小使传质推动力减小,导致干燥速率下降。加速阶段极短。温度越高,进入恒速干燥阶段越快,恒速阶段时间越短,临界含水率(恒速阶段转入降速阶段的转折点所对应的含水率)越高。由于茭白组织结构比较疏松,有利于水分传递,故非结合水分脱除快,使得恒速阶段速率较大、也比较短,较快进入降速段,降速段长。干燥速率受温度影响较显著,随温度升高而增高。数据表明,70 °C后随温度升高而使干燥时间减少及平均速率增高的幅度已经减小;虽提高干燥温度对过程有利,但温度升高亦增加了能耗;从干燥效率和物料热敏性来说,干燥温度不宜过高。温度过高,物料被烤熟、色泽变黄,营养成分也被破坏得越多,结合文献[3],干燥温度以70 °C为宜。

2.1.2 不同风速对干燥过程的影响

片状(厚约2 mm)茭白,干燥温度70 °C(湿球温度约45 °C)、平均装载量1.256 kg/m²,考察风速0.423、0.598、0.733、0.846、1.037 m/s对干燥的影响,得到干燥曲线(图3)和速率曲线(图4)。

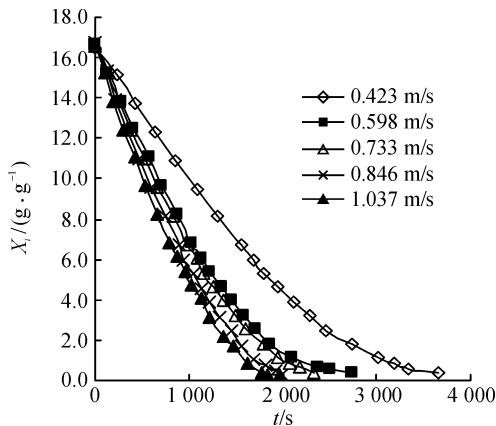


图3 不同干燥风速的干燥曲线

Fig. 3 Drying curves of different wind speeds

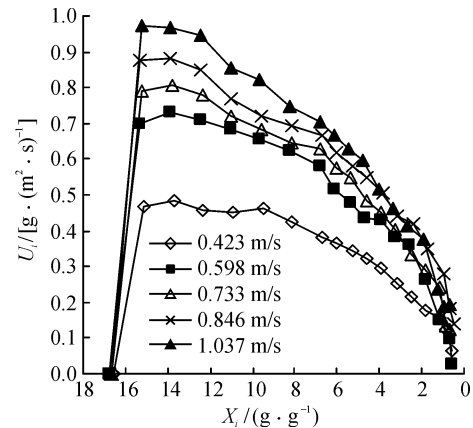


图4 不同干燥风速的速率曲线

Fig. 4 Rate curves of different wind speeds

如图3、图4所示,风速越大,干燥越快。这是因为风速越大,强制对流越好,传热与传质边界层越薄,传热系数、传质系数均增大。因此增大风速有利于干燥,但风速增大也使加热空气所需能耗增加。干燥过程与2.1.1一样出现预热、恒速及降速3个阶段;风速越大,加速阶段时间越短,恒速阶段越短,临界含水率越高。干燥速率受风速影响较大,随速度增大而增大,但其增幅逐渐减小;数据表明,0.733 m/s后随风速的增加而使干燥时间减少及平均速率增高的幅度明显减小。综合考虑,以风速0.733 m/s干燥为宜。

2.1.3 不同厚度及装载量对干燥过程的影响

风速 0.733 m/s、干燥温度 70 °C(湿球温度约 45 °C),考察茭白切片的厚度与装载量(约 1.5 mm、1.067 kg/m²,约 2.0 mm、1.256 kg/m²,约 3.0 mm、2.168 kg/m²,约 1.5 mm、装双层、1.998 kg/m²)对干燥的影响,得到干燥曲线(图 5)和速率曲线(图 6)。

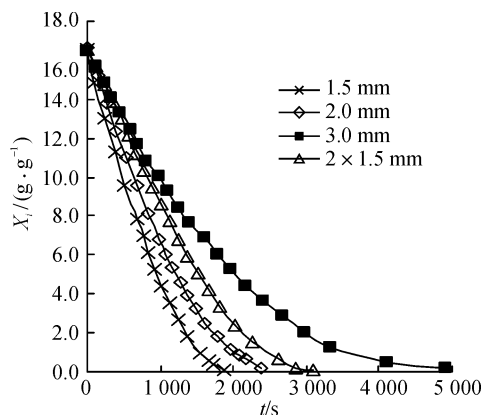


图 5 不同厚度、量的干燥曲线

Fig. 5 Drying curves of different thicknesses and quantities

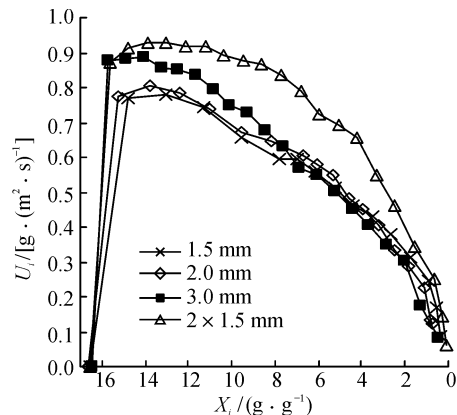


图 6 不同厚度、量的速率曲线

Fig. 6 Rate curves of different thicknesses and quantities

图 5 显示,切片薄有利于干燥,这与水分内部扩散与传递有关;薄一半但物料装二层要比厚的一层物料干燥快,起始阶段快得少些,降速阶段要快得多些。这与层间缝隙有关,刚开始两层贴得紧,等表面出现干区,层间出现缝隙,就有利于传递;但切片薄需要更多的切片工时,辅助工时增加会影响生产能力;从茭白切片厚度、量及干燥速率综合来看,厚度以 2 mm 左右为宜。而图 6 显示,单位面积挥发的水分随装载量增加而增大,这与物料和水分总量有关;相同的装载量,薄一半物料装二层要比厚的一层物料干燥速率大,这与干燥时物料与热风接触的面积有关。

2.2 干燥模型和系数

2.2.1 干燥方程

大量文献证明,蔬菜干燥适用薄层 Page 模型^[7-10],采用该模型对实验数据进行拟合。方程为:

$$MR = (X - X^*) / (X_0 - X^*) = \exp(-K\tau^n) \quad (1)$$

对式(1)线性化后得出:

$$\ln[-\ln MR] = n \ln \tau + \ln K \quad (2)$$

式中: X_0 为物料初始含水率, g/g; X^* 为干燥平衡含水率, g/g; K 、 n 为干燥方程参数。

将不同温度、不同风速实验数据分别在 $\ln[-\ln MR]$ 与 $\ln \tau$ 坐标上作图,见图 7,可得到直线的斜率即为方程的系数 n ,直线的截距即为方程中的 $\ln K$ 。

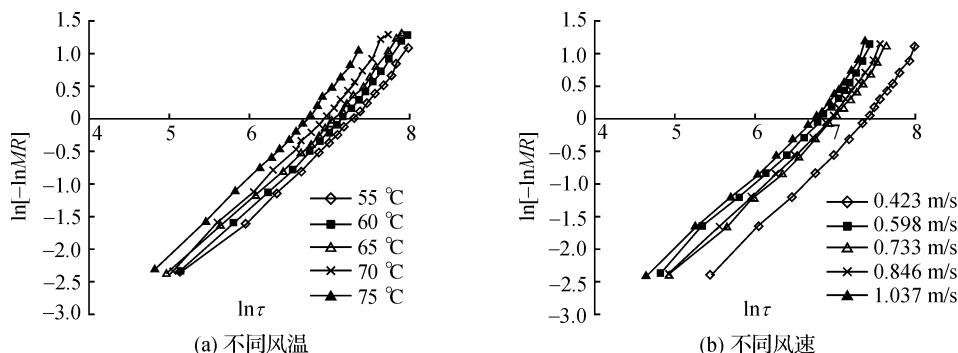


图 7 不同干燥风速、风温下的干燥曲线 $\ln[-\ln MR]$ 与 $\ln \tau$ 的关系

Fig. 7 Relationship between $\ln[-\ln MR]$ and $\ln \tau$ at different wind speeds and temperatures

由图7可见,在干燥前期,各线基本是直线,说明干燥曲线较好地符合Page模型,后期可能由于测量等误差导致线性变差,这与文献[8-9]一致。各干燥方程的系数 K 与 n 见表1和表2。

表1 风速0.733 m/s时不同温度干燥方程系数

Table 1 Drying equations coefficient of different temperatures at 0.733 m/s

温度 $t/^\circ\text{C}$	n	$K \times 10^4$
55	1.307 0	1.632
60	1.335 8	1.019
65	1.255 6	1.531
70	1.280 4	1.128
75	1.209 4	1.560

表2 70℃时不同风速干燥方程系数

Table 2 Drying equations coefficient of different wind speeds at 70℃

风速 $u/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	n	$K \times 10^4$
0.423	1.344 9	0.529
0.598	1.285 0	1.353
0.733	1.297 3	1.329
0.846	1.275 0	1.820
1.037	1.240 0	2.537

2.2.2 恒速阶段对流传热系数 α 计算与关联

根据单位面积水分汽化所需热量由单位传热面传递的热量提供的原理,即 $\alpha(t - t_w) = N_w r_w^{[11]}$,可得: $\alpha = N_w r_w / (t - t_w)$;查得 r_w ,计算不同风速 u 、不同温度 t 下的 α 值见表3和表4。

式中: N_w 为速率曲线中恒速阶段的干燥速率 U_i ; α 为对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; t 为干球温度, $^\circ\text{C}$; t_w 为湿球温度, $^\circ\text{C}$; r_w 为湿球温度对应的水汽化潜热, kJ/kg 。

表3、表4数据表明, α 随风速增大而增大,其关联式为 $\alpha = 91.46u^{0.7749}$, $R^2 = 0.9619$;而 α 与温度的关联不明显。

表3 不同风速的 α

Table 3 Convective heat-transfer coefficient α of different wind speeds

$u/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$t/^\circ\text{C}$	$t_w/^\circ\text{C}$	$N_w/[\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}]$	$r_w/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	$\alpha/[\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}]$
0.423	70.0	45.0	0.465 3	2 389.4	44.47
0.598	70.0	45.0	0.695 6	2 389.4	66.48
0.733	70.0	45.1	0.757 1	2 389.2	72.65
0.846	70.0	45.1	0.843 0	2 389.2	80.89
1.037	70.0	45.2	0.936 1	2 389.0	90.18

表4 不同温度的 α

Table 4 Convective heat-transfer coefficient α of different temperatures

$t/^\circ\text{C}$	$t_w/^\circ\text{C}$	$N_w/[\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}]$	$r_w/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	$\alpha/[\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}]$
55.0	37.5	0.523 6	2 406.8	72.01
60.0	40.2	0.589 1	2 401.0	71.44
65.0	43.3	0.662 6	2 393.3	73.08
70.0	45.5	0.751 4	2 388.3	73.25
75.0	48.2	0.829 9	2 382.5	73.78

2.2.3 恒速阶段传质系数 k_H 计算与关联

根据水分挥发速率等于传质系数与传质推动力——湿度差的乘积的原理,即 $N_w = k_H (H_w - H)^{[11]}$,可得: $k_H = N_w / (H_w - H)$;查得 H_w 与 H ,计算出不同 u 、 t 下的 k_H 值,见表5和表6。

式中: k_H 为传质系数, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \Delta H)$; H_w 、 H 为空气的饱和湿度、实际湿度, kg/kg 。

表5、表6数据表明, k_H 亦随 u 增大而增大,它们之间的关联式为 $k_H = 79.24u^{0.7661}$, $R^2 = 0.9592$;而干燥温度对 k_H 影响不大。

表 5 不同风速的 k_H Table 5 The mass transfer coefficient k_H of different wind speed

$u/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$H_w/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$H/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$N_w/[\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}]$	$k_H/[\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \Delta H)^{-1}]$
0.423	0.065	0.053	0.465 3	38.78
0.598	0.065	0.053	0.695 6	57.97
0.733	0.065	0.053	0.757 1	63.09
0.846	0.065	0.053	0.843 0	70.25
1.037	0.065	0.053	0.936 1	78.01

表 6 不同温度的 k_H Table 6 The mass transfer coefficient k_H of different temperature

$t/^\circ\text{C}$	$H_w/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$H/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$N_w/[\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}]$	$k_H/[\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \Delta H)^{-1}]$
55.0	0.042	0.034 0	0.523 6	61.60
60.0	0.049	0.039 5	0.589 1	62.01
65.0	0.059	0.048 0	0.662 6	63.10
70.0	0.066	0.054 0	0.751 4	62.62
75.0	0.078	0.064 5	0.829 9	61.47

3 结 语

1)不同条件下的干燥均可分为预热、恒速及降速干燥 3 个阶段。预热与恒速阶段短;风温愈高、风速愈大、切片厚度越薄,干燥曲线愈陡、速率曲线愈高、恒速阶段愈短。对茭白片干燥,比较适宜的条件是:干燥温度 70°C 、风速 0.733 m/s 、切片厚 2 mm 左右。

2)各条件下的干燥方程均符合 Page 模型。

3)风速对 α 与 k_H 影响明显,各自的关系均随风速增大而增大,关系为: $\alpha = 91.46u^{0.7749}$, $k_H = 79.24u^{0.7661}$;而 α 与 k_H 不受干燥温度的影响。

干燥模型及传热、传质系数的关联可为工业化生产时的干燥条件选择提供依据,也为干燥设备的设计提供了基础数据。

参考文献:

- [1] 马学仁. 名蔬良药话茭白[J]. 烹调知识, 2009(21):13-14.
- [2] 杨寿清. 茭白常温保鲜的研究[J]. 无锡轻工大学学报, 1997, 16(4):48-50.
- [3] 朱梦矣, 邵海燕. 茭白保鲜加工方法多[J]. 蔬菜, 2005(7):34-35.
- [4] 郑为东. 茭白罐头生产工艺的研究[J]. 食品工业科技, 2004, 25(6):89-90.
- [5] 余文胜, 王俊. 茭白微波干燥特性及数学模型的研究[J]. 科技通报, 2009, 25(5):654-658.
- [6] 张建军, 王海霞, 马永昌, 等. 辣椒热风干燥的工艺优化试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12):223-224.
- [7] 诸爱士. 洋葱薄层脱水动力学研究[J]. 浙江科技学院学报, 2006, 18(1):31-34.
- [8] 彭桂兰, 吴文福, 陈晓光, 等. 萝卜丝薄层干燥试验及其数学模型的建立[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3):79-81, 94.
- [9] 黄艳, 黄建立, 郑宝东. 银耳微波真空干燥特性及动力学模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4):362-367.
- [10] GUNHAN T, DEMIR V, HANCIOGLU E, et al. Mathematical modelling of drying of bay leaves[J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(11/12):1667-1679.
- [11] 何潮洪, 冯霄. 化工原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001:544-569.