DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.024

南瓜浆滚筒干燥动力学模型*

王 瑾 李树君 林亚玲 杨延辰 赵庆亮 韩清华 (中国农业机械化科学研究院,北京100083)

【摘要】 以辊式布料的单滚筒干燥机为对象进行南瓜浆滚筒干燥试验,探讨了滚筒干燥过程中物料的干燥动 力学特性及其干燥动力学模型。根据物料的状态将滚筒干燥过程分为浆状和膜状两个阶段,测定了不同蒸气压力 下物料的含水率,分析了干燥速率随蒸气压力和时间的变化规律。结果表明:物料中的水分大部分在浆状区中蒸 发,蒸气压力越高,干燥速率越快;物料在膜状区中为降速干燥阶段,蒸气压力越高膜状区起始含水率越低,起始阶 段的干燥速率越慢,干燥速率下降也越慢,干燥时间越短。膜状区物料含水率的试验数据与主要薄层干燥模型进 行拟合,Midilli-Kucuk 模型可以很好地预测南瓜浆滚筒干燥的动力学特性。

关键词: 南瓜浆 滚筒干燥 动力学 干燥速率 薄层干燥模型 中图分类号: TQ028.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)04-0126-06

Kinetics Model of Drum Drying of Pumpkin Pulp

Wang Jin Li Shujun Lin Yaling Yang Yanchen Zhao Qingliang Han Qinghua (Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract

Drum drying characteristics of pumpkin pulp were investigated by using a single drum dryer with applicator rolls. The drum drying process was divided into two phases: pulp phase and flake phase. Under these two conditions, moisture content of the samples under different steam pressures was measured in order to analyze the relationship of the drying rate with the inner pressure and drying time. It indicated from the results that, most of the moisture evaporated during the pulp phase. The higher the steam pressure was, the higher the drying rate became. It was also shown that during the flake phase, only falling rate period was taken place. As the steam pressure increased, on one hand, the initial moisture content of flake phase became less and the drying rate became decreased, on the other hand, the decreasing of the drying rate was slow down and the drying time was much shorter. The experimental moisture loss data were fitted with 10 thin-layer drying models. Consequently, of all the drying models, a semi-theoretical Midilli-Kucuk model was fitted best.

Key words Pumpkin pulp, Drum drying, Kinetics, Drying rate, Thin-layer drying model

引言

南瓜含有丰富的营养物质,具有极高的药用价 值^[1]。鲜南瓜即使在冷藏条件下也容易腐烂变质, 因此南瓜需要通过冷冻或干燥来储藏。南瓜粉是一 种深受消费者喜爱的南瓜干燥产品,具有很高的经 济价值。干燥是影响南瓜粉品质和冲调性的关键步骤。滚筒干燥的适应性广、热效率高、干燥时间短、设备成本低,是一种广泛应用于食品工业的干燥方式。滚筒干燥生产南瓜粉有利于提高产品的品质并改善产品的冲调性。目前,干燥生产过程中在线检测物料的含水率还难以实现,因此物料干燥特性及

收稿日期: 2011-06-14 修回日期: 2011-07-04

^{*}科研院所技术开发研究专项资金资助项目(2010EG119164)

作者简介:王瑾,博士生,主要从事农产品加工装备设计和理论研究, E-mail: wangjin@ caams. org. cn

通讯作者: 李树君,研究员,博士生导师,主要从事农产品加工工艺、技术与成套设备研究, E-mail: lisj@ caams. org. cn

动力学模型的研究对干燥过程优化和控制具有重要 意义。关于南瓜片的日光干燥、热风干燥、微波真空 干燥等的干燥特性及动力学模型已有所研究^[2-3], 但利用滚筒干燥方法干燥南瓜浆的相关研究尚未见 报道。本文将滚筒干燥技术应用于南瓜粉的生产, 研究南瓜浆滚筒干燥特性,分析不同蒸气压力下南 瓜浆的干燥速率,建立南瓜浆滚筒干燥动力学模型, 以期为滚筒干燥技术在南瓜粉生产中的应用提供理 论依据和技术支持。

1 理论分析

滚筒干燥过程中物料在内部加热的高温金属滚筒表面铺布成薄膜,随着滚筒旋转干燥物料达到所要求的含水率。物料下表面与筒壁直接接触,通过热传导吸收热量,上表面暴露于环境中,蒸发的水分通过对流传递到空气中。由于滚筒干燥机特殊的结构和干燥原理,物料在干燥过程中的形状和与筒壁的接触状态是不断变化的。对于采用辊式布料方式的单滚筒干燥机,可以根据物料在干燥过程中状态的变化将干燥过程分成两个阶段:浆状区(*A*~*B*)和膜状区(*B*~*C*),如图1所示。物料先后在两个区域内干燥,干燥特性各不相同。



图 1 滚筒干燥过程中浆状区和膜状区示意图 Fig. 1 Pulp phase and flake phase in drum drying 1、2、3. 布膜辊 4. 挡料辊 5. 刮刀 6. 主滚筒

浆状区指布膜辊与主滚筒形成类似"料槽"的 区域,此时物料刚落入滚筒干燥机内,尚未被碾铺成 膜,物料的体积和形状取决于槽的尺寸和进料质量 流量。由于槽的形状是不规则的且物料在布膜辊与 主滚筒相对转动作用下处于不断地运动中,槽中物 料含水率和温度分布不仅是不均匀的,也是非稳态 的。膜状区是指物料经布膜辊与主滚筒的碾压作用 在主滚筒外表面开始形成一层薄膜到料膜被刮刀刮 下的区域,此时料膜的体积和形状是确定的。当滚 筒各结构参数(布膜辊数、滚筒尺寸等)和操作参数 (滚筒转速、蒸气压力、进料质量流量)确定的情况 下,料膜的干燥条件可以认为是不变的,即达到稳定 循环状态。此时,物料的滚筒干燥动力学特性可以 用薄层干燥模型来模拟,物料随着时间转动到不同 的位置,测量不同位移处物料含水率可以表示不同时间物料含水率的变化。

对于滚筒干燥而言,当滚筒干燥机结构参数一 定时,影响其干燥速率的因素主要有:物料特性、滚 筒内蒸气压力、滚筒转速和料膜厚度。其中,蒸气压 力决定干燥温度,滚筒转速决定干燥时间,这两个因 素对滚筒干燥速率的影响最大。料膜厚度的影响因 素主要有布膜辊与主滚筒间隙、布膜辊与主滚筒相 对转速、进料质量流量以及主滚筒转速。其中,间隙 和相对转速为滚筒干燥机的固定结构参数。因此, 通过控制进料质量流量和主滚筒转速可以将料膜厚 度控制在一定的数值。本文研究不同蒸气压力下南 瓜浆含水率随时间的变化规律。试验中滚筒转速和 进料质量流量不变,以消除料膜厚度对滚筒干燥速 率的影响并确定干燥时间沿位移的分布,用位移的 变化表示时间,重点研究南瓜滚筒干燥速率的变化 规律及不同蒸气压力对干燥速率的影响,并通过与 主要薄层干燥模型的拟合来确定膜状区最佳干燥动 力学模型方程。

2 试验材料和方法

2.1 南瓜浆处理工艺

参考甘薯全粉滚筒干燥的工艺流程^[4],南瓜浆 处理工艺为:南瓜→清洗→去籽、瓤→切丁→熟化→ 打浆。

选料:南瓜品种为骆驼脖,购自北京市北沙滩农 贸市场。

清洗:原料南瓜用 50℃ 温水浸泡 3 min,清水喷 淋,清洗后沥干。

切丁:将南瓜切成 10 mm × 10 mm × 10 mm 的南 瓜丁。

熟化:南瓜丁在80℃水中漂烫2min,放入自来 水中冷却至中心温度为室温,在常压下蒸4min。

打浆:熟化后的南瓜丁直接放入打浆机中打浆, 打浆过程中不添加水。

2.2 仪器与设备

试验中使用的仪器设备主要有:单滚筒干燥试 验台(中国农业机械化科学研究院);多功能切丁机 (QDJ-60型,北京元享蔬菜食品机械厂);单道打 浆机(DJ1-0.12型,靖江食品机械制造公司);电热 恒温鼓风干燥箱(DHG-9023A型,上海精宏试验设 备有限公司)。

2.3 试验方法

2.3.1 干燥速率曲线

南瓜浆在单滚筒干燥试验台上进行干燥,布膜 辊和主滚筒间隙为1mm,相对转速为1。为保证在 试验蒸气压力下,物料的干燥时间足够长,试验中确 定滚筒转速为0.8 r/min,进料质量流量40 kg/h,当 滚筒转动达到稳定状态时,料膜厚度可控制在 0.15 mm,此时研究不同滚筒蒸气压力(0.3、0.4、 0.5 MPa)下南瓜的干燥动力学。

布膜辊1与主滚筒相切的点(点 B)为浆状区的 终点,也是膜状区的起点,刮刀处(点 C)为膜状区 的终点,经测量,B、C间弧长为110 cm(图1)。为了 研究膜状区的干燥特性,在滚筒表面沿滚筒转动方 向等距离取点,由于干燥初期物料含水率高、干燥速 率大,靠近 B 点处每5 cm 取一个点,之后每10 cm取 一个点,用刮刀在每点处取样测定其含水率,具体取 样位置如图2所示。起点 B 即膜状区位移为零的 点,此时物料的含水率认为是南瓜料膜的初始含水 率;终点 C 即位移为110 cm 的点,此时物料的含水 率为产品的最终含水率,含水率均用干基含水率表 示,每个位移处的物料含水率均测量3 次取平均值。

	11	1 1			1	1		1		
0 5 10	15 20	30 40) 50	60	70	80	90	100	110	x/cm
	ш									
0 2 4	68	12 1	6 20	24	28	32	36	40	44	<i>t</i> /s
图 2 取样点分布图										
Fig. 2 Distribution of sampling position										

平均干燥速率计算公式为^[5]

$$R_{MD} = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \tag{1}$$

式中 R_{MD} ——干燥速率,kg/(kg·s)

 M_t ——t时刻料膜的干基含水率,kg/kg

*M*_{*t*+dt} — *t* + d*t* 时刻料膜的干基含水率,kg/kg
 2.3.2 膜状区干燥过程模拟及统计分析

用于拟合南瓜滚筒干燥曲线的薄层干燥模型如 表1所示^[5-6]。

表1 主要薄层干燥模型

Tab.1 Main thin-layer drying models

模型名称	模型方程
Newton	$M_R = \exp(-kt)$
Page	$M_R = \exp\left(-kt^n \right)$
Henderson and Pabis	$M_R = a \exp(-kt)$
Modified Page	$M_R = \exp(-(kt)^n)$
Logarithmic	$M_R = a \exp(-kt) + c$
Two-term	$M_R = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
Wang and Singh	$M_R = 1 + at + bt^2$
Approximation of	$M_{-} = q \exp((-kt) + (1-q) \exp((-kbt))$
diffusion	$m_R = u \exp(-m t) + (1 - u) \exp(-m t t)$
Verma et al	$M_{R} = a \exp((-kt) + (1-a) \exp((-gt))$
Midilli-Kucuk	$M_R = a \exp(-kt^n) + bt$

注:表中 M_R 为水分比, a,b,c,n,g,k,k_0,k 都是待定系数。

水分比 M_a的计算公式为

$$M_{R} = \frac{M_{t} - M_{e}}{M_{0} - M_{e}}$$
(2)

式中 *t*——时间,s

M_e——平衡含水率,kg/kg

M₀——初始含水率,kg/kg

一般情况下,由于物料的平衡含水率 M_e 不容易测得, M_e 可以用干燥物料的最终含水率 M_f 代替,而 M_i 与 M_0 和 M_i 相比可以忽略^[7],则式(2)变为

$$M_R = \frac{M_i}{M_0} \tag{3}$$

利用 Matlab R2007a 软件中的非线性回归功能 对试验所得的干燥曲线进行 10 种不同数学模型的 回归拟合,数学模型与试验数据的匹配程度可以用 相关系数 R^2 、均方根误差 E_{RMS} 和卡方 χ^2 来衡量, R^2 越高、 E_{RMS} 和 χ^2 越小,数学模型的匹配程度越好^[8]。 R^2 、 E_{RMS} 和 χ^2 的计算公式为

$$R^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (M_{R_{\exp,i}} - M_{R_{pre,i}})^{2}}{\sum_{i=1}^{N} (M_{R_{\exp,i}} - \overline{M_{R_{\exp,i}}})^{2}}$$
(4)

$$E_{\rm RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (M_{R_{\rm pre,i}} - M_{R_{\rm exp,i}})^2}$$
(5)

$$= \frac{\sum_{i=1}^{N} (M_{R_{exp,i}} - M_{R_{pre,i}})^2}{N - z}$$
(6)

式中 $M_{R_{exp,i}}$ ——任意时刻的试验值 $\overline{M_{R_{exp,i}}}$ ——试验值的平均值 $M_{R_{pre,i}}$ ——任意时刻的预测值 N ——观测值的个数 z ——模型中待定系数的个数

3 试验结果与讨论

 χ^2

3.1 浆状区干燥特性

物料在开始落入浆状区时就有气泡产生并有水 蒸气逸出。随着新鲜物料不断输入,浆状区中物料 堆积在主滚筒与布膜辊形成的"料槽"内,槽底部的 物料贴近主滚筒表面。由于主滚筒表面温度高,物 料温度在很短的时间内达到常压下水分的沸点,物 料沸腾产生气泡,含水率降低,热量向槽上方传递。 槽上方的物料表面暴露于空气中且不断有新鲜物料 落入,因此上方的浆料温度低、含水率高,水分向槽 下方扩散。此外,浆料在主滚筒与布膜辊的对转作 用下不断进行不规则的运动,这种运动加速了料浆 内部热量和水分的传递,这一传递过程是复杂的,实 际应用中很难对其进行模拟。当滚筒转速确定时,



Fig. 3 Values of M_B under different steam pressures

从图中可以看出,随着蒸气压力的升高,物料在 浆状区蒸发的水分量增加。0.3 MPa 条件下,物料 在浆状区蒸发的水分质量占物料初始水分含量的 17.3%;0.4 MPa 条件下为38.0%;0.5 MPa 条件下 为54.8%。试验结果表明:滚筒干燥过程中物料的 大部分水分是在浆状区蒸发的,蒸气压力越高,浆状 区蒸发的水分越多。这与 Daud 以及 Trystram 和 Vasseur 的研究结果一致^[9-10]。

3.2 膜状区干燥曲线

根据对浆状区物料干燥特性的分析可知,不同 蒸气压力条件下,物料进入膜状区时的初始干基含 水率(*M_B*)不同,蒸气压力越高,初始含水率越低。 初始含水率不同将导致物料在膜状区的干燥速率不 同。图4为不同蒸气压力下,料膜含水率随时间的 变化。



由图 4 可以看出,当需将料膜含水率降到 0.04 kg/kg以下时,使用 0.3、0.4 和 0.5 MPa 蒸气压 力干燥物料所需的时间不同,分别是 44、36 和 32 s。 说明滚筒内蒸气压力越高,物料达到预定最终含水 率所需时间越短,当滚筒转速一定时物料总体干燥 时间取决于物料在膜状区干燥时间的长短。

图 5 为不同蒸气压力下料膜干燥速率随时间的 变化。整体上,料膜干燥速率随时间的延长而降低, 这是由于料膜中的含水率不断降低,自由水不断减 少,干燥驱动力越来越小。通常温度是决定干燥速 率的主导因素,温度越高干燥过程中所能达到的最 高干燥速率越大。但是与预期不同,在膜状区干燥 初期,蒸气压力越大,干燥速率越小。原因是蒸气压 力越低,料膜的初始含水率越高,干燥驱动力越大, 干燥速率越大。



图 6 为不同蒸气压力下,干燥速率随干基含水 率的变化。膜状区料膜的干燥过程中没有经历升速 和恒速干燥阶段,直接进入降速干燥阶段。随着干 基含水率的降低,料膜的干燥速率也急剧降低,但幅 度越来越小,说明料膜中的含水率已经接近物料的 平衡含水率,干燥驱动力降低。



3.3 膜状区南瓜浆滚筒干燥曲线模拟及统计分析

上述试验结果说明膜状区干燥速率决定了物料 滚筒干燥时间的长短,利用试验数据与薄层干燥模 型的拟合来建立膜状区干燥动力学模型,对滚筒干 燥过程进行预测。不同蒸气压力下试验数据的拟合 结果如表2所示。

从表 2 中可以看出,10 个模型中 Midilli-Kucuk 模型在所有试验蒸气压力下均获得了最大的 R^2 , $E_{\rm RMS}$ 最小, χ^2 也较小,说明 Midilli-Kucuk 模型可以很 好地预测南瓜浆滚筒干燥过程。

图 7 为 Midilli-Kucuk 模型所预测的干燥曲线与 试验所得的干燥曲线相符合的程度。从图中可以看 出, Midilli-Kucuk 模型与各个蒸气压力下试验点均 呈现出很好的适应性。图 8 进一步直观揭示了测量

表 2 南瓜浆滚筒干燥动力学模型统计学分析

Tab. 2 Statistical analysis of kinetic models of pumpkin pulp dried by drum dryer

	-		-				
模型名称	模型方程	蒸气压力/MPa	R^2	$E_{\rm RMS}$	χ^2		
		0.3	0. 991 04	0.02626	29. 314 25 × 10 $^{-4}$		
Newton	$M_R = \exp(-kt)$	0.4	0. 989 49	0.02871	49. 946 03 × 10 $^{-4}$		
		0.5	0. 975 92	0.04279	76. 638 33 × 10 $^{-4}$		
		0.3	0. 991 04	0.02626	31. 211 19 × 10 ⁻⁴		
Page	$M_R = \exp(-kt^n)$	0.4	0. 989 59	0.028 57	58. 904 98 $\times 10^{-4}$		
		0.5	0. 994 40	0. 020 63	7. 240 15 × 10 ⁻⁴		
		0.3	0. 991 07	0.026 21	30. 240 10 × 10 ⁻⁴		
Henderson and Pabis	$M_R = a \exp(-kt)$	0.4	0. 989 53	0.02865	51. 942 67 × 10 ⁻⁴		
		0.5	0. 977 94	0.04095	94. 064 75 \times 10 ⁻⁴		
		0.3	0. 991 04	0.026 26	31. 097 78 × 10 ⁻⁴		
Modified Page	$M_R = \exp(-(kt)^n)$	0.4	0. 989 59	0.028 57	59. 065 42 × 10 ⁻⁴		
		0.5	0. 994 40	0.02063	7. 246 19 × 10 ⁻⁴		
		0.3	0. 988 35	0. 029 95	93. 134 49 × 10 ⁻⁴		
Logarithmic	$M_R = a \exp(-kt) + c$	0.4	0. 984 23	0.03517	174. 542 75 × 10 ⁻⁴		
		0.5	0. 955 49	0.05817	552. 172 91 × 10 ⁻⁴		
		0.3	0. 991 07	0. 026 21	36. 292 80 × 10 ⁻⁴		
Two-term	$M_R = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	0.4	0. 989 53	0.028 65	62. 344 01 × 10 ⁻⁴		
		0.5	0. 977 94	0.04095	112. 892 68 $\times 10^{-4}$		
		0.3	0. 412 57	0. 212 67	801. 845 13 × 10 ⁻⁴		
Wang and Singh	$M_R = 1 + at + bt^2$	0.4	0. 504 23	0. 197 20	660. 955 86 $\times 10^{-4}$		
		0.5	0. 678 22	0. 156 41	443. 245 38 $\times 10^{-4}$		
		0.3	0. 991 04	0.02626	34. 644 11 × 10 ⁻⁴		
Approximation of diffusion	$M_R = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	0.4	0. 989 49	0.02871	59. 028 31 × 10 ⁻⁴		
		0.5	0. 975 92	0.04279	90. 743 63 × 10 ⁻⁴		
		0.3	0. 991 46	0. 025 63	39. 925 16 × 10 ⁻⁴		
Verma et al	$M_R = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	0.4	0. 989 83	0. 028 24	64. 056 59 × 10 $^{-4}$		
		0.5	0. 998 46	0.01080	0.004 17 × 10 $^{-4}$		
		0.3	0. 994 31	0. 020 92	1. 349 33 × 10 ⁻⁴		
Midilli-Kucuk	$M_R = a \exp(-kt^n) + bt$	0.4	0. 997 12	0.01504	1. 119 07 × 10 ⁻⁴		
		0.5	0. 998 53	0.01056	0. 025 11 × 10 ⁻⁴		
3.0 г		0. 5 3.0 г	0. 998 53	0. 010 56	0. 025 11 × 10 ⁻⁴		
2.5	 ● 0.3 MPa试验值 ● 0.3 MPa拟合值 	50 2.5 F					
	□ 0.4 MPa试验值 — 0.4 MPa拟合值	** **		/			
	• 0.5 MPa试验曲 — 0.5 MPa拟合值	刻 1 c		0	0.23 (D.) MA (4)		
		後 1.5			0.3 MPa试验值 - 0.3 MPa预测值		
$\mathbb{H}^{1.0}$		¥ 1.0 ≪	A B		0.4 MPa 预测值 0.5 MPa 订验值		
0.5		₩ 0.5	AND CONTRACTOR	<u> </u>	- 0.5 MPa 预测值		
0 5 10 15	20 25 30 35 40 45 ⊡j[ii]/s	0	9 0.5 1.0 干基含) 1.5 2.0 水率试验值/kg·l	2.5 3.0 kg ⁻¹		
图 7 不同蒸气压力下南	图8 不同	图 8 不同蒸气压力下南瓜浆滚筒干燥 Midilli-Kucuk					
模型的预	测值与试验值		模型的预测	自信与试验值的	的比较		
Fig. 7 Experimental and pr	edicted moisture content obtained	Fig. 8 Con	Fig. 8 Comparison of experimental and predicted moisture				
with Midilli-Kucuk model	content by Midilli-Kucuk model with drying time under						

for pumpkin pulp dried by drum dryer



试验点和预测试验点的符合程度,以试验值和预测 值分别为横、纵坐标的点组成直线,从原点起始与坐 标轴呈 45°,说明 Midilli-Kucuk 模型的预测效果很 好。

4 结论

(1)经测定,物料中的水分在浆状区中大量蒸发,浆状区中物料蒸发的水分含量随蒸气压力的升高而增大,水分含量最多可蒸发54.8%。此外,浆状区中干燥速率也随蒸气压力的升高而加快。

(2) 膜状区中,物料干燥过程为降速干燥阶段,

不同蒸气压力下料膜的初始含水率不同,蒸气压力 越高料膜初始含水率越低,初始阶段的干燥速率也 越低,但是蒸气压力越高,干燥速率降低得越慢,物 料干燥达到最终含水率所需的时间越短,因此膜状区 的干燥时间决定物料整个滚筒干燥时间的长短。

(3)物料在膜状区的干燥遵循薄层干燥特点, 不同蒸气压力下的南瓜浆滚筒干燥过程均只经历降 速干燥阶段,经过试验数据与10种经典薄层干燥模 型的拟合,得到拟合度最高的是 Midilli-Kucuk 模型, 它可以很好地预测南瓜浆滚筒干燥过程中含水率随 时间的变化。

参考文献

- 张芳,蒋作明,章恩明. 南瓜的功能特性及其在食品工业中的应用[J]. 食品工业科技, 2000, 21(6):62~64.
 Zhang Fang, Jiang Zuoming, Zhang Enming. Functional properties of pumpkin and its applications in food industry [J].
 Science and Technology of Food Industry, 2000, 21(6):62~64. (in Chinese)
- 2 Sacilik K. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo L.*) [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(1): 23 ~ 30.
- 3 Liamkaew R, Thipayarat A, Koetsinchai W. Kinetics model of vacuum microwave drying of dried pumpkin slices [C] // Proceedings of the 2nd Technology and Innovation for Sustainable Development Conference(TISD 2008), 2008: 11 ~ 16.
- 4 段欣,薛文通,张泽俊,等. 甘薯全粉滚筒干燥生产工艺[J]. 农业机械学报,2010,41(3):117~122.
- Duan Xin, Xue Wentong, Zhang Zejun, et al. Production of sweet potato flour with the method of drum dryer [J].
 Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(3):117~122. (in Chinese)
- 5 Ibrahim D. The kinetics of forced-convective air-drying of pumpkin slices [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(1): 243 ~ 248.
- 6 Ebru K A. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 73(1):75 ~84.
- 7 王宝和. 干燥动力学研究综述[J]. 干燥技术与设备, 2009, 7(1):51~56. Wang Baohe. Review of drying kinetics[J]. Drying Technology and Equipment, 2009, 7(1):51~56. (in Chinese)
- 8 Akpinar E K, Bicer Y, Cetinkaya F. Modeling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 75(3): 308 ~ 315.
- 9 Daud W R b W, Armstrong W D. Pilot plant study of the drum dryer [C] // Mujumdar A S. Drying 87', 1987: 101~108.
- 10 Trystram G, Vasseur J. The modeling and simulation of a drum dryer [J]. International Chemical Engineering, 1992, 32(4):689~705.

(上接第25页)

- 12 Vörös J. Identification of nonlinear dynamic systems using extended Hammerstein and Wiener models [J]. Control Theory and Advanced Technology, 1995, 10(4):1 203 ~1 212.
- 13 Dong R, Tan Q, Tan Y. Recursive identification algorithm for dynamic systems with output backlash and its convergence [J]. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2009, 19(4): 631 ~ 638.
- 14 刘栋,陶涛,梅雪松. 伺服系统 Hammerstein 非线性模型及参数辨识方法研究[J]. 西安交通大学学报,2010,44(3):
 42~46.

Liu Dong, Tao Tao, Mei Xuesong. Nonlinear Hammerstein model and parameter identification for servo drive system [J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2010, 44(3):42 ~ 46. (in Chinese)