

熟牛肉电流体动力学干燥特性分析及数学模型建立

丁昌江, 吕军

(内蒙古工业大学理学院物理实验中心, 内蒙古呼和浩特 010051)

摘要: 为了研究电流体动力学干燥技术中的物料厚度和横截面积对干燥特性的影响, 以及建立比较适合的数学模型。分别以不同厚度和横截面积的熟牛肉为对象在温度为 20 °C~25 °C, 相对湿度为 30±5%, 周围风速为 0 m/s 的自然环境中进行电流体动力学干燥和对比试验; 用 Newton、Page、Modified Page、Henderson and Pabis、Logarithmic、Quadratic、Demir et al、Midilli et al 等 8 种常用的薄层物料干燥的数学模型和均方根误差, 约化卡方值, 建模效率等 3 个统计参数对干燥数据进行了模拟和比较。结果表明, 熟牛肉的厚度对干燥速度和干燥时间影响较大, 熟牛肉的横截面积对干燥速度和干燥时间的影响较小; 发现 Logarithmic 模型比较适合薄层熟牛肉的电流体动力学干燥。这将为优化电流体动力学干燥的工艺和提高干燥效率提供一些线索和实践指导。

关键词: 电流体动力学; 干燥; 牛肉; 数学模型

文章编号: 1673-9078(2013)8-1805-1809

The Analysis of Electrohydrodynamic (EHD) Drying Characteristics and Construction of Mathematical Modeling of Cooked Beef

DING Chang-jiang, LV Jun

(Physical Experiment Center, College of Sciences, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: The effect of thickness and cross-sectional area of material on drying characteristics was studied and a mathematical model was developed to describe the thin layer electrohydrodynamic (EHD) drying. The drying experiment of cooked beef was investigated with the electrohydrodynamic (EHD) drying technique in ambient (ambient temperature 20~25 °C, ambient relative humidity 30±5% and wind speed 0 m/s). The cooked beef was put into high-voltage electric field with the different thickness or cross-sectional area. Eight different mathematical drying models were compared based on root mean square error, reduced chi-square and modeling efficiency to estimate drying curves. The results showed that the thickness of cooked beef had high impact on the drying rate and time and the cross-sectional area of cooked beef had smaller effect on the drying rate and time. The Logarithmic model could sufficiently describe thin electrohydrodynamic (EHD) drying of cooked beef. This work would provide some clues and practices guidance for optimizing the drying technology and improving the drying efficiency of electrohydrodynamic (EHD) drying.

Key words: Electrohydrodynamic (EHD); drying; beef; mathematical model

电流体动力学干燥[Electrohydrodynamic (EHD) drying]是通过将被干燥物料放在下极板上, 然后给上极板加一定幅度的直流或交流高电压, 在两极板间形成电晕电场, 利用高压电晕电场产生的非均匀电场力和离子风作用于物料中水分子而实现物料干燥^[1], 也称为高压电场干燥。电流体动力学干燥技术已经应用到许多领域, 成为一个研究热点^[2-3]。

Cao 等在电流体动力学干燥系统下对糙米^[4]进行干燥, 结果表明干燥速率明显高于对照组, 干燥速率随着电场强度的增加而增加, 但在低温下对裂缝率没有太大的影响。Li 等利用针盘组成的电流体动力学干

收稿日期: 2013-04-17

作者简介: 丁昌江 (1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电流体动力学干燥, 电磁生物效应方面的研究

燥系统, 在 105 °C 下进行了豆腐渣的干燥试验, 结果发现在干燥的初始阶段, 干燥速度是对比的 1.7~3.2 倍, 干燥时间缩短 15~40%, 比对照组保持更好的形状和较少的裂纹^[5]。Bai 等^[6-7]对水产品进行了电流体动力学干燥实验研究, 结果表明电流体动力学能够提高水产品的干燥速度, 很好的保持了物料色泽和平整度, 产品比对照组具有更好的复水性。Bai 等^[8]电流体动力学干燥和真空干燥结合以后对海参进行实验, 发现产品质量比单独电流体动力学干燥的更高, 这说明电流体动力学干燥还具有和其它干燥技术相结合的能力。作者曾经利用电流体动力学干燥技术对多种物料进行了实验研究, 结果发现电流体动力学干燥具有能耗低、不污染环境、干燥均匀、物料不升温的优点, 且能很好的保存物料的有效成分^[9]。但是这些研究对

干燥速度和产品质量进行了细致的研究，而物料形状对干燥速度影响的研究报道很少。

本文利用电流体动力学干燥系统，对不同厚度，横截面积的牛肉进行干燥实验研究。同时利用现有的一些常用薄层物料干燥模型和统计参数^[10-11]对电流体动力学干燥进行了研究。这将为优化干燥工艺和提高干燥效率提供一些线索和实践指导。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料及装置

熟牛肉（市场上购买）；Sh10A 型水份快速测定仪（上海）；赛多利斯 BS124S 电子天平（德国）；电流体动力学干燥实验装置见图 1，主要由 YD（JZ）-1.5/50 型高压电源（武汉）、KZX-1.5KVA 型控制柜（武汉）和电场系统组成。电场系统由两个极板组成，下极板为平板（84×44 cm），接地；上极板为多针电极（70×60 cm，针长 2 cm，针与针之间距离在横向和纵向上都为 4 cm），接高压电源；极距为 100 mm。

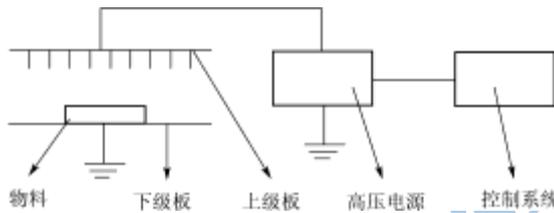


图 1 电流体动力学干燥装置示意图

Fig.1 Schematic of device of electrohydrodynamic (EHD) drying

1.2 实验方法和数学模型

1.2.1 实验方法

本试验在温度为 20℃~25℃，相对湿度为 30±5%，周围风速为 0 m/s 的自然环境中进行。在同批量牛肉中取出 10 g 切碎放入 Sh10A 型水份快速测定仪测定初始含水量。

干燥过程中的含水量为：

$$m_g = m_0 \times (1 - M_0) \tag{1}$$

$$M_i = \frac{m_i - m_g}{m_i} \times 100\% \tag{2}$$

注：M_i 为 t_i 时刻的物料含水量，m_i 为 t_i 时刻物料的质量，m_g 为物料的干物质质量，m₀ 为物料初始质量，M₀ 为物料初始含水量。

干燥过程中的干燥速度定义为：

$$v_i = \frac{m_{i-1} - m_i}{S(t_i - t_{i-1})} \tag{3}$$

注：S 表示牛肉的横截面积。

实验步骤为：

(1) 不同厚度的牛肉干燥实验：将熟牛肉除去杂质，分别切成 30 mm×21 mm×10 mm，30 mm×21 mm×5 mm 和 30 mm×21 mm×3.5 mm 的牛肉片放入电压为 24 kV 的交流电场当中进行干燥。另外再切成 20 mm×22 mm×3.5 mm 的牛肉片放到环境当中做对比实验。每隔半小时用赛多利斯 BS124S 电子天平测一次样品的质量。利用公式 (2) 和 (3) 分别计算含水量和干燥速度。每组实验重复 3 次，取其平均值，计算标准差。

(2) 不同横截面积的牛肉干燥实验：将熟牛肉除去杂质，分别切成 30 mm×21 mm×10 mm，30 mm×13 mm×5 mm 和 30 mm×6 mm×3.5 mm 的牛肉片放入电压为 24 kV 的交流电场当中进行干燥。另外再切成 20 mm×22 mm×3.5 mm 的牛肉片放到环境当中做对比实验。每隔半小时用赛多利斯 BS124S 电子天平测一次样品的质量。利用公式 (2) 和 (3) 分别计算含水量和干燥速度。每组实验重复 3 次，取其平均值，计算标准差。

1.2.2 数学模型

采用薄层物料干燥常用的 Newton、Page、Modified Page、Henderson and Pabis、Logarithmic、Quadratic、Demir et al、Midilli et al 等 8 种数学模型和均方根误差 (E_{RMS})，约化卡方值 (χ²)，建模效率 (EF) 等 3 个统计参数对不同厚度牛肉的电流体动力学干燥数据进行研究。Newton、Page、Modified Page、Henderson and Pabis、Logarithmic、Quadratic、Demir et al、Midilli et al 等 8 种数学模型见表 1。

表 1 薄层物料干燥常用的的数学模型^[10,11]

Table 1 Mathematical models widely used to describe thin layer drying

模型名称	方程
Newton	$M_i = e^{-kt}$
Page	$M_i = e^{-kt^n}$
Modified Page	$M_i = e^{-(kt)^n}$
Henderson and Pabis	$M_i = ae^{-kt}$
Logarithmic	$M_i = ae^{-kt} + b$
Quadratic	$M_i = n + at + bt^2$
Demir et al	$M_i = ae^{-(kt)^n} + b$
Midilli et al	$M_i = ae^{-kt^n} + b$

均方根误差 (E_{RMS})，约化卡方值 (χ²)，建模效率 (EF) 的定义分别^[10-11]为：

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_{R_{pre,i}} - M_{R_{exp,i}})^2} \tag{4}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{R_{exp,i}} - M_{R_{pre,i}})^2}{N - n} \quad (5)$$

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

注: $M_{R_{pre,i}}$ 为第 i 个含水量的预测值, $M_{R_{exp,i}}$ 为第 i 个含水量的实验值, $M_{R_{exp,mean}}$ 为实验上测量的含水量均值, N 为实验测量的次数, n 为干燥模型中常数的个数。

2 结果与讨论

试验测得熟牛肉的初始含水量为 62.07%。

不同厚度牛肉的干燥速度和含水量见图 1 和图 2。

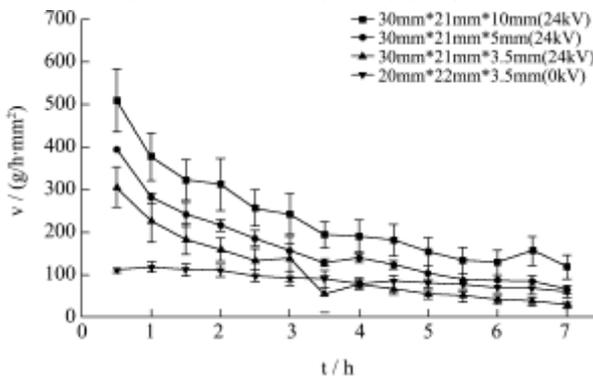


图 1 不同厚度下的干燥速度

Fig.1 Drying rate of beef with the different thickness

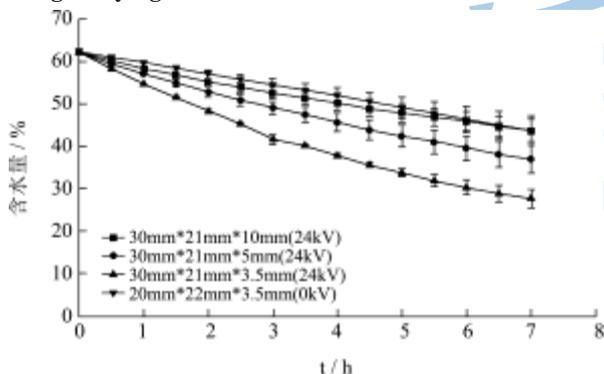


图 2 不同厚度下的牛肉含水量

Fig.2 Moisture content of beef with the different thickness

图 1 和图 2 表明: 高压电场能够提高不同厚度熟牛肉的干燥速度, 随着厚度的升高, 干燥速度的数值加大, 干燥速度与厚度成增函数关系, 但是随着厚度的升高, 达到干燥要求的时间越长; 随着时间的推移, 干燥速度越来越小, 还可以看到随着时间的推移, 牛肉的含水量逐渐降低, 即干燥速度与物料的厚度有关。

不同横截面积牛肉的干燥速度和含水量见图 3 和 4。

图 3 和图 4 表明: 高压电场能够在初期影响不同横截面积熟牛肉的干燥速度, 随着横截面积的升高, 干燥速度的数值加大; 后期影响不大。含水量曲线非

常的接近。总体来看, 横截面积对熟牛肉的电流体动力学干燥速度和干燥时间影响不大。

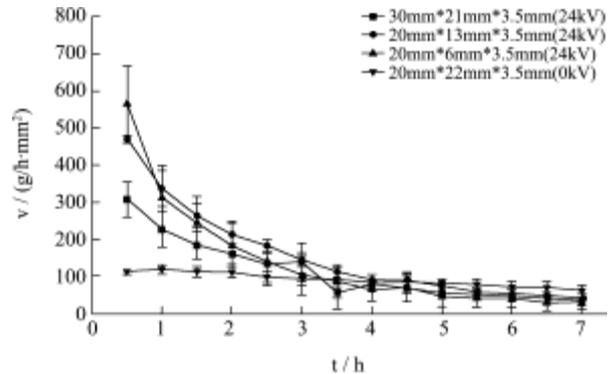


图 3 不同横截面积下的干燥速度

Fig.3 Drying rate of beef with different cross-sectional area

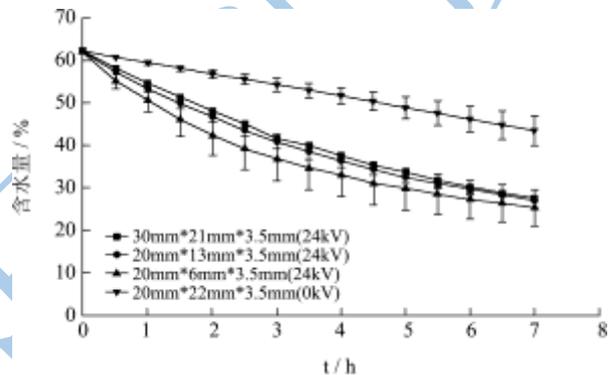


图 4 不同横截面积下的牛肉含水量

Fig.4 Moisture content of beef with different cross-sectional area

评价各个模型的统计参数见表 2, 其中每个数据代表三个厚度下统计参数的平均值。均方根误差 (E_{RMS}) 和约化卡方值 (χ^2) 的值越小, 建模效率 (EF) 的值越大, 代表模型越符合实验数据。从表 1 可以看出, Logarithmic 模型比较适合薄层牛肉的电流体动力学干燥。

表 2 不同干燥模型三个厚度下统计参数的平均值

Table 2 Average values of statistical parameters of different drying models

模型名称	E_{RMS}	χ^2	EF
Newton	0.1660083	0.0295667	0.3892080
Page	0.0990437	0.0113000	0.3166083
Modified Page	0.4627140	0.2486667	0.3059700
Henderson and Pabis	0.0035480	0.0000165	0.9979050
Logarithmic	0.0015280	0.0000036	0.9996420
Quadratic	0.0017123	0.0000041	0.9995353
Demir et al	0.0664080	0.0092357	0.9739693
Midilli et al	0.0544477	0.0000144	0.9635403

8 种模型对不同厚度牛肉的电流体动力学干燥数

据进行模拟后得到的系数见表 3。可以看出, Logarithmic 模型中的系数 k , a , b 与物料的厚度有关, k 随厚度的变化较小, a 随厚度增加而降低, b 随厚度增加而增加。

表3 8种模型的系数

Table 3 The coefficients of 8 models

模型名称	厚度/mm	k	n	a	b
Newton	3.5	0.26535			
	5	0.20470			
	10	0.17458			
Page	3.5	0.60453	0.36065		
	5	0.55772	0.26653		
	10	0.53641	0.19845		
Modified Page	3.5	3.59×10^{-67}	4.14×10^{-7}		
	5	4.61×10^{-65}	1.81×10^{-7}		
	10	2.71×10^{-66}	1.35×10^{-7}		
Henderson and Pabis	3.5	0.11956		0.61440	
	5	0.07403		0.61484	
	10	0.04980		0.61371	
Logarithmic	3.5	0.16614		0.50590	0.11667
	5	0.10263		0.48488	0.13368
	10	0.10324		0.35116	0.26776
Quadratic	3.5		0.61966	-0.07720	0.00406
	5		0.61758	-0.04777	0.00179
	10		0.61809	-0.03469	0.00129
Demir et al	3.5	0.1456	1.05×10^{-9}	-0.11205	0.44484
	5	0.09532	1.31×10^{-8}	-0.03548	0.48366
	10	0.06072	0.911×10^{-7}	-0.01986	0.52207
Midilli et al	3.5	0.14433	1.03682	0.62033	0.00954
	5	0.08504	0.93831	0.62034	0.00048
	10	0.05750	0.44320	0.62030	0.00020

电流体动力学干燥是一种新型的干燥技术, 其数学模型的研究相对来说比较少, 只是在个别的文献^[4,5,9,12]中进行了一些研究。Cao 等^[4]用类似于 Page 模型的方程对电场干燥糙米的数据进行了模拟, 得到了比较满意的结果。作者^[9]曾经也将这个模型应用到电场干燥牛肉的数据模拟当中, 发现能够达到很好的拟合度, 且模型中的系数和电压参数有一定的关系。Li 等^[5]用 Page 模型对电流体动力学干燥豆腐渣的数据进行模拟, 发现模型中的参数和电压, 极距有关。这些模型没有和其它模型对比, 找到更好地模型来拟合薄层物料的电流体动力学干燥。Bai 等^[12]对薄层鱼肉的电流体动力学干燥数据进行模拟, 发现 Quadratic 模型比较适合。物料干燥是一个非常复杂的过程, 它随着物料的质地、形状、干燥方法等不同而不同, 对此进

行数学模拟也是非常困难的。从上面的介绍可知, 对于同一种干燥技术, 不同物料的干燥数学模型可能不一样。我们用了常见的 8 种薄层物料的干燥数学模型对薄层牛肉的电流体动力学干燥数据进行了细致和深入的研究, 找到了一个比较适合薄层牛肉的电流体动力学干燥的数学模型。

牛肉干制品是我国传统肉制品的典型代表, 因其风味独特、食用方便、便于携带和贮藏而深受消费者的喜爱。传统牛肉干制品在生产中多采用风干或热风来脱水, 使产品质地较硬, 色泽发暗, 产品的质量不够稳定, 生产效率低下。现需探索新的干燥方法来解决。作者前期的研究^[9]表明电流体动力学干燥可能是一个方向, 但在工艺参数和最佳数学模型上没有进行细致的研究, 本文进行了一个补充。任何一种干燥方法都有其适用性和优缺点, 电流体动力学干燥也不例外, 这些都制约它的应用性。现在有些学者已经注意到了这些, 为了能够更好地应用这项技术和提高产品质量, 将电流体动力学干燥与其它干燥技术相结合如真空, 热风等^[8], 取得了较好的结果。如将和其它干燥技术相结合这一点应用到牛肉干制品加工领域上可能达到意想不到的效果。

总之, 上面的这些研究还是较初步, 要想以后能够在实际应用当中起到更好的作用, 还有很多工作需进一步更深入的研究。

3 结论

3.1 电流体动力学干燥技术能够提高熟牛肉的干燥速度和应用到牛肉干制品加工领域。

3.2 牛肉的厚度对电流体动力学干燥特性的影响较大, 随着厚度的升高, 干燥速度的数值加大; 而牛肉横截面积对干燥特性的影响较不大, 干燥初期还有一些影响, 后期影响较小。

3.3 通过 8 种常用的薄层物料干燥数学模型和 3 个统计参数对干燥数据的模拟发现 Logarithmic 模型的均方根误差 (E_{RMS}) 和约化卡方值 (χ^2) 的值最小, 建模效率 (EF) 的值最大, 比较适合薄层牛肉的电流体动力学干燥, 同时发现模型中的系数 k 、 a 、 b 与物料的厚度有关, 为以后研究和应用提供了初步的理论依据。

参考文献

- [1] 白亚乡, 孙冰. 工艺参数对电流体动力学干燥速度与能耗的影响[J]. 高电压技术, 2009, 35(9): 2193-2196
- Bai Y X, Sun B. Effect of technical parameters on drying rate and energy consumption of electrohydrodynamic (EHD)

- drying[J]. High Voltage Engineering, 2009,35(9):2193-2196
- [2] Singh A, Orsat V, Raghavan V. A Comprehensive Review on Electrohydrodynamic Drying and High-Voltage Electric Field in the Context of Food and Bioprocessing [J]. Drying Technology, 2012, 30(16): 1812-1820
- [3] Esehaghbeygi A. Effect of Electrohydrodynamic and Batch Drying on Rice Fissuring [J]. Drying Technology, 2012, 30(14): 1644-1648
- [4] Cao W, Nishiyama Y, Koide S, et al. Drying enhancement of rough rice by an electric field [J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(4): 445-451
- [5] Li F D, Li L T, Sun J F, et al. Electrohydrodynamic (EHD) drying characteristic of okara cake [J]. Drying Technology, 2005, 23(3): 565-580
- [6] Bai Y X, Sun B. Study of electrohydrodynamic (EHD) drying technique for shrimps [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2011, 35(6): 891-897
- [7] Bai Y X, Yang G J, Hu Y C, et al. Physical and Sensory Properties of electrohydrodynamic (EHD) dried scallop muscle [J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2012, 21(3): 238-247.
- [8] Bai Y X, Yang Y, Huang Q. Combined Electrohydrodynamic (EHD) and Vacuum Freeze Drying of Sea Cucumber [J]. Drying Technology, 2012, 30(10): 1051-1055
- [9] 丁昌江,卢静莉.牛肉在高压静电场作用下的干燥特性[J].高电压技术,2008,34(7):1405-1409
- Ding C J, Lu J L. Drying characteristic of beef in high voltage electric field [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7): 1405-1409
- [10] Demir V, Gunhan T, Yagcioglu A. Mathematical modelling of convection drying of green table olives [J]. Biosystems Engineering, 2007, 98(1): 47-53
- [11] Menges H O, Ertekin C. Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(1): 119-125
- [12] Bai Y X, Li X, Sun Y, et al. Thin layer electrohydrodynamic (EHD) drying and mathematical modeling of fish [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2011, 36(3): 217-228

欢迎订阅 EI 收录期刊、中文核心期刊 《现代食品科技》

邮发代号：46-349 刊号：ISSN 1673-9078/CN 44-1620

每期定价 15 元，全年 12 期仅 180 元。欢迎食品及相关行业的机构和科学工作者到各地邮局订阅，并踊跃投稿或建立广告宣传和产学研合作关系。

地址：广州五山华南理工大学轻工与食品学院麟鸿楼 508，邮编：510640

电话：020-87112373, 87113352, 87112532

E-mail: xdspkj9@qq.com