

燕麦马铃薯复合面条热风干燥特性 及其数学模型研究

Hot air drying characteristics and mathematical model of oat potato compound noodles

李叶贝¹ 任广跃^{1,2} 屈展平¹ 李露露¹ 段续^{1,2} 张乐道^{1,2}

LI Ye-bei¹ REN Guang-yue^{1,2} QU Zhan-ping¹ LI Lu-lu¹ DUAN Xu^{1,2} ZHANG Le-dao^{1,2}

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023;

2. 食品加工与安全国家实验教学示范中心, 河南 洛阳 471023)

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang,

Henan 471023, China; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center of Food

Processing and Security, Luoyang, Henan 471023, China)

摘要:为探讨燕麦马铃薯复合面条热风干燥特性,以燕麦马铃薯粉为原料,制作复合面条,分析在不同温度、风速和面条厚度条件下复合面条的热风干燥特性,并建立相关的数学模型。结果表明:热风温度越高,风速越大,面条厚度越小,干燥时间越短;温度及面条厚度对复合面条的干燥特性影响较大,而风速影响较小,降速阶段为其主要阶段;Midilli模型能很好地表征复合面条的干燥过程,拟合效果较好($R^2 > 0.9$),试验值和预测值能够较好地吻合,该模型可为复合面条热风干燥过程提供可靠的分析和预测;有效水分扩散系数 D_{eff} 在 $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 数量级范围内,且随干燥温度和风速的升高、面条厚度的降低而增大,复合面条干燥活化能 E_a 为43.15 kJ/mol。

关键词:燕麦;马铃薯;面条;热风干燥;干燥特性;数学模型

Abstract: The hot air drying characteristics of oat potato noodles were investigated, and the compound noodles were prepared by using oat potato flour. The hot air drying characteristics of compound noodles were studied at different temperatures, air velocity and noodle thickness, and the mathematical model was established. The resulted show that the drying time will be shorter with the higher the drying temperature. Moreover, it was found that the bigger the air velocity was the smaller the noodles thickness was. Comparing with the air velocity, the temperature and the noodles thickness had more effects

on the drying rate of the compound noodles, and the falling-rate period was a main stage of the hot air drying process. The Midilli model could represent the drying process of the compound noodles successfully and have a perfect fitting effect ($R^2 > 0.9$), the experimental results were in good agreement with the predicted values. Based on all of the factors, the model could provide a reliable analysis and prediction for the hot air drying process of the compound noodle. The effective moisture diffusion coefficient D_{eff} was in the order of $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, and it increased while the drying temperature and air velocity increase or the thickness of the noodles decreased. The activation energy E_a of the dried noodle was 43.15 kJ/mol.

Keywords: oat; potato; noodles; hot air drying; drying characteristics; mathematical model

2015年,中国启动马铃薯主粮化战略,把马铃薯加工成馒头、面条、米粉等主食是马铃薯主粮化的重要途径。将马铃薯添加到面条中,能增加面条膳食纤维和维生素含量^[1]、降低面条热量,满足消费者对低热量、高膳食纤维主食的需求。燕麦属于八大粮食作物^[2],历史悠久,营养价值高^[3-5],且具有医疗保健效果^[6],是一种兼具食药功能的谷物。将燕麦和马铃薯加工成面条,实现了燕麦和马铃薯从副食到主食类型的转变。但鲜面条不利于保存,通常进行干燥,以便于运输销售。

热风干燥是以热空气作为干燥介质的一种干燥方法,热空气通过对流循环的方式对物质进行干燥,把热量传递给物料,同时带走物料的水分,是农产品干燥的常用方法之一^[7]。与其他干燥方法比较,热风干燥的优势在于成本低、温度高、速度快。目前热风干燥普遍用于果蔬、粮食等领

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:31671907);河南省高校科技创新团队支持计划项目(编号:16IRTSTHN009);国家重点研发项目(编号:2017YFD0400901)

作者简介:李叶贝,女,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:任广跃(1971—),男,河南科技大学教授,博士。

E-mail: guangyueyao@163.com

收稿日期:2017-08-07

域^[8-10],然而热风干燥面条的研究既不系统也不深入。国外已有一些对于乌冬面、意大利面的干燥动力学研究^[11-12],提出了干燥模型,但大多停留在工艺研究方面^[13-14]。本试验拟用燕麦、马铃薯粉为原料,以温度、风速和面条厚度为因素,对燕麦马铃薯复合面条的干燥特性进行研究,采用常用的 12 种薄层干燥模型进行选择拟合验证,构建相应的数学模型,进而预测不同干燥条件下燕麦马铃薯复合面条的水分变化特性,以期为面条热风干燥的工厂化提供相关的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

马铃薯:购于河南洛阳大张超市,干燥后粉碎,备用;
燕麦粉:购于河北张家口坝上燕麦主产区;
电热鼓风干燥箱:101 型,北京科伟永兴仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 原料预处理 复合面条原料由 50%燕麦粉、50%马铃薯全粉和主料总量 8%的谷朊粉、0.3%的魔芋粉、0.15%的聚丙烯酸钠、1%食盐所组成。

1.2.2 单因素试验设计 选取热风干燥温度、风速、面条厚度为研究参数,对干燥特性的影响,建立相应的数学模型。每组试验重复 3 次。

(1) 干燥温度:设定风速为 1.5 m/s,面条厚度为 1.5 mm 为恒定条件,选取热风干燥温度为 50,60,70,80,90 ℃,对燕麦马铃薯复合面条的干燥特性进行研究。

(2) 干燥风速:设定温度为 70 ℃,面条厚度为 1.5 mm 为恒定条件,选取风速为 0.5,1.0,1.5,2.0,2.5 m/s,对燕麦马铃薯复合面条的干燥特性进行研究。

(3) 面条厚度:设定温度为 70 ℃,风速为 1.5 m/s 为恒定条件,面条厚度为 0.5,1.0,1.5,2.0,2.5 mm,对燕麦马铃薯复合面条的干燥特性进行研究。

1.2.3 指标测定

- (1) 干基含水率和干燥速率:根据文献^[15]。
(2) 水分比:根据文献^[16]。

- (3) 有效水分扩散系数:根据文献^[17]。
(4) 活化能:根据文献^[18]。

1.2.4 薄层干燥模型 薄层干燥模型一般是针对厚度在 20 mm 以下的物料完全暴露在干燥环境中的干燥模型,是用于反应干燥过程中水分随时间变化的方程,经过前人的苦心研究,总结了多个理论、半理论和经验模型^[19-20]。本试验选取其中 12 种薄层干燥模型进行分析,见表 1。

1.3 数据处理

本试验数据采用 Oringn 8.5 和 DPS 7.0 进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 温度对燕麦马铃薯复合面条热风干燥特性的影响

由图 1(a)可知,在风速为 1.5 m/s,面条厚度为 1.5 mm,温度为 50,60,70,80,90 ℃的条件下,复合面条干燥至终点所用时间分别为 210,180,150,120,90 min。温度为 90 ℃所需干燥时间比 50 ℃缩短了 57.14%。温度越高,干基含水率变化越大,达到干燥终点时所用时间越短。由图 1(b)可知,复合面条的干燥过程只有降速阶段,属于内部扩散控制。温度为 90 ℃时,干燥速率最大,两者呈正相关趋势。干燥前期,干燥速率相差较大,干燥中后期,干燥速率差异明显减小,后期基本相同。物料的干燥属于一个复杂的传质传热过程。在干燥初期,面条中液相水含量较高,且处于连续状态,水分的传输主要依赖于液态扩散、热流动和毛细管流动,复合面条表层的水分会首先蒸发,表层的水分与内部形成一定的压力梯度,随着热风温度的升高,此传质推动力也越大,干燥速度也越快。复合面条内外温差不同时,会造成水的化学势差,即热流动,这种化学势差会推动水从内部向外流动,温差越大,推动力越大。同时热风温度的升高,使面条内部温度上升,水分表面张力减小,促使毛细管流动加剧,传质速度增快,干燥速率提高。在干燥中后期,面条中水分含量明显降低,此时主要是气态扩散主导传质的进行,温度对此影响不显著,中后期的速率基本不变。因此,热风干燥温度对于燕麦马铃薯复合面条的干燥特性有着显著的影响,提高温度可以明显缩短干燥时间。

表 1 薄层干燥模型^[19]
Table 1 Thin layer drying model

序号	模型名称	模型方程
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Two-term	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-k_1t)$
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
6	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
7	Modified page	$MR = \exp[-(kt)^n]$
8	Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
9	Verma	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$
10	Two term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$
11	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
12	Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$

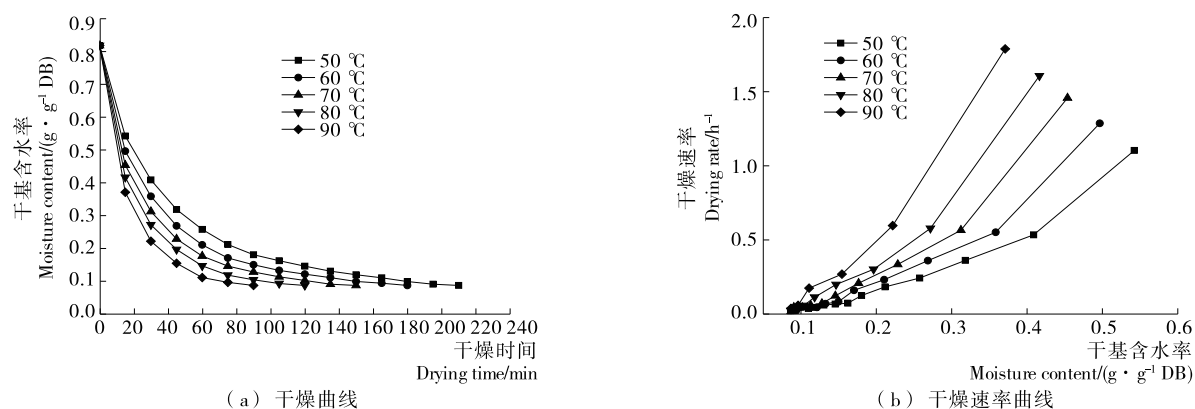


图 1 不同温度下燕麦马铃薯复合面条的干燥曲线及干燥速率曲线

Figure 1 Drying curves and drying rate curves of the oat potato compound noodles at different temperatures

2.2 风速对燕麦马铃薯复合面条热风干燥特性的影响

由图 2(a)可知,在温度为 70 °C,面条厚度为 1.5 mm,风速为 0.5,1.0,1.5,2.0,2.5 m/s 的条件下,面条干燥至终点所用时间分别为 165,150,135,120,105 min。风速为 2.5 m/s 所需干燥时间比 0.5 m/s 缩短了 36.36%。由图 2(b)可知,燕麦马铃薯复合面条的干燥速率随着风速的增大而有所提高。在热风干燥过程中,热空气既可作为载热体传输热量,又可作为载湿体带走物料的水分。面条作为固相物料,孔隙率较低,风速不能进入到面条内部,所以当其作为载热体的时候,主要通过对流的方式把热量传输给物料,只作用于物料的表面,热风风速的变化对于物料内部的气隙和固体骨架

间的传热作用并不大;当其作为载湿体时,也主要通过对流方式把物料蒸发的水分带走,热风风速并不能带走面条内部的水分,对于传质的效果也不理想。另外,随着风速的提高,造成物料表层的气流湍动变大,物料表层边界层变薄,扩散阻力变小,质热传递加快,干燥速率提高。但是风速的变化只能改变复合面条表面水分的干燥速率,对于其内部的水分影响不大。面条作为一种内部扩散控制的物料,其内部扩散阻力要远大于表面蒸发阻力,因此风速对干燥速率的影响没有温度大。

2.3 面条厚度对燕麦马铃薯复合面条热风干燥特性的影响

由图 3(a)可知,在温度为 70 °C,风速为 1.5 m/s,面条厚

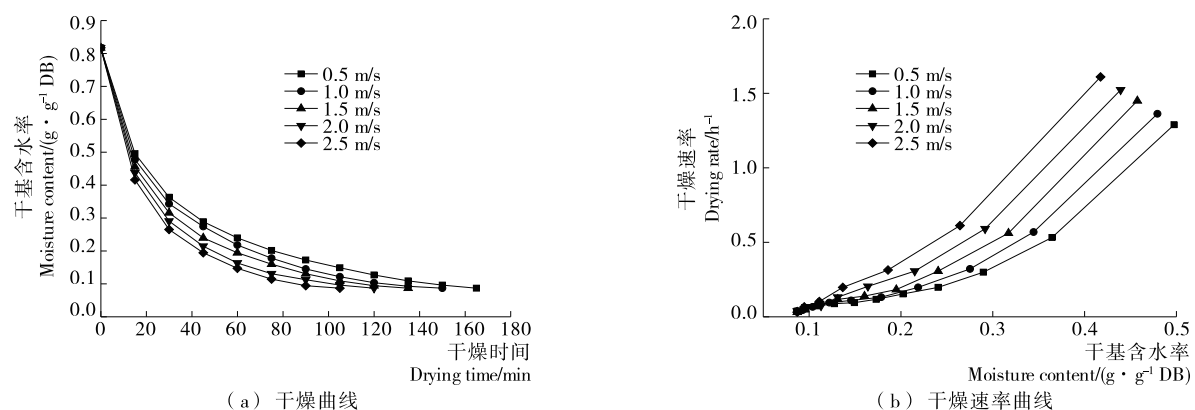


图 2 不同风速下燕麦马铃薯复合面条的干燥曲线及干燥速率曲线

Figure 2 Drying curves and drying rate curves of the oat potato compound noodles at different air velocity

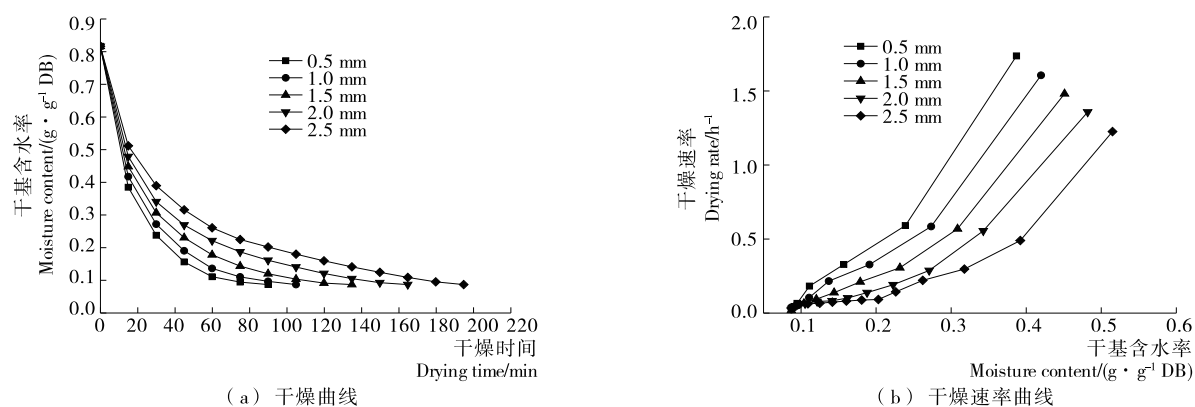


图 3 不同面条厚度下燕麦马铃薯复合面条的干燥曲线及干燥速率曲线

Figure 3 Drying curves and drying rate curves of the oat potato compound noodles at different noodle thickness

度为0.5,1.0,1.5,2.0,2.5 mm的条件下,面条干燥至终点所用时间分别为90,105,135,165,195 min。面条厚度为0.5 mm所需干燥时间比2.5 mm缩短了53.85%。面条厚度越小,干基含水率变化越大,达到干燥终点时所用时间越短。由图3(b)可知,面条厚度为0.5 mm时,干燥速率最高,复合面条厚度增加,干燥速率降低。在干燥过程中,传质传热的速率也极大地受到路径的控制,面条厚度就是改变水分传输的路径。在面条厚度较小时,热空气带来的热量进入到物料内部需要较短的路径,同样,物料内部的水分迁移出来的距离也会缩短,干燥时间就短。在面条较

厚时,热量不易进入物料内部,水分蒸发出来的路径也变长,而且内部扩散阻力也会变大,干燥时间变长。

2.4 热风干燥数学模型的建立

2.4.1 干燥模型的选择 本试验选取其中12种薄层干燥模型在温度为70℃、风速为1.5 m/s、面条厚度为1.5 mm条件下进行数据拟合,相应的参数值 R^2 、 χ^2 和RMSE,见表2。由表2可知,Midilli模型 R^2 值最大为0.999 9, χ^2 和RMSE最小,分别为 $8.498\ 4\times10^{-6}$ 和0.001 2,拟合程度最高,因此选择此模型,并对其进行验证。

表2 不同干燥模型的干燥参数及模型系数
Table 2 Drying parameters and model coefficients of different drying models

模型	R^2	χ^2	RMSE	模型参数
Newton	0.993 4	$6.115\ 9\times10^{-4}$	0.028 1	$k=0.038\ 7$
Page	0.999 5	$4.196\ 7\times10^{-5}$	0.006 8	$k=0.074\ 2,n=0.816\ 9$
Henderson and Pabis	0.993 2	$6.167\ 5\times10^{-4}$	0.028 4	$k=0.037\ 9,a=0.977\ 2$
Two-term	0.999 7	$2.610\ 4\times10^{-5}$	0.004 5	$a=0.250\ 6,k=0.158\ 4,b=0.749\ 6,k_1=0.029\ 9$
Logarithmic	0.994 6	$5.003\ 8\times10^{-4}$	0.024 7	$a=0.964\ 7,k=0.040\ 7,c=0.019\ 8$
Midilli	0.999 9	$8.498\ 4\times10^{-6}$	0.001 2	$a=1.000\ 2,k=0.082\ 8,n=0.780\ 5,b=-1.029\ 0\times10^{-4}$
Modified page	0.999 5	$4.196\ 7\times10^{-5}$	0.007 1	$k=0.041\ 4,n=817\ 1$
Approximation of diffusion	0.999 8	$2.284\ 8\times10^{-5}$	0.002 6	$a=0.250\ 4,k=0.158\ 4,b=0.189\ 1$
Verma	0.999 7	$3.003\ 9\times10^{-5}$	0.004 9	$a=0.794\ 5,k=0.031\ 1,g=189$
Two term exponential	0.999 5	$4.500\ 1\times10^{-5}$	0.006 8	$a=0.243\ 5,k=0.126\ 0$
Wang and Singh	0.845 2	0.014 2	0.093 5	$a=-0.020\ 1,b=9.502\ 6\times10^{-5}$
Modified Henderson and Pabis	0.999 6	$3.654\ 5\times10^{-5}$	0.005 2	$a=0.585\ 0,k=0.029\ 9,b=0.164\ 6,g=0.029\ 9,c=0.250\ 6,h=0.158\ 4$

2.4.2 干燥模型的验证 为了保证选择模型的准确性,选取模型以外的试验数据,进行拟合分析,结果见图4~6。从图4~6中可以看出建模以外的试验数据和模型预测值基本一致,说明此模型拟合程度较高,可以用Midilli模型对燕麦马铃薯复合面条热风干燥进行预估。通过模型可以看出干燥时间和水分比的关系,为燕麦马铃薯复合面条干燥工艺和过程控制优化提供基础数据,避免造成不必要的能耗浪费。

2.5 燕麦马铃薯复合面条热风干燥的有效水分扩散系数和活化能

根据式(8)将 $\ln MR$ 和干燥时间 T 进行线性拟合,计算出燕麦马铃薯复合面条的有效水分扩散系数 D_{eff} ,见表3~5。由表3~5可知, D_{eff} 范围为 $2.535\ 2\times10^{-10}\sim7.269\ 9\times10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$ 。温度由50℃升高到90℃, D_{eff} 增加了1.50倍;面条厚度由2.5 mm减小到0.5 mm, D_{eff} 增加了1.87倍;风

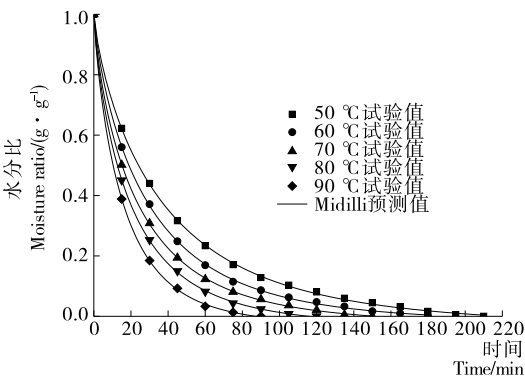


图4 不同温度条件下燕麦马铃薯复合面条热风干燥Midilli模型的验证

Figure 4 Verification of Midilli model of hot-air drying of oat potato compound noodles under different temperature conditions

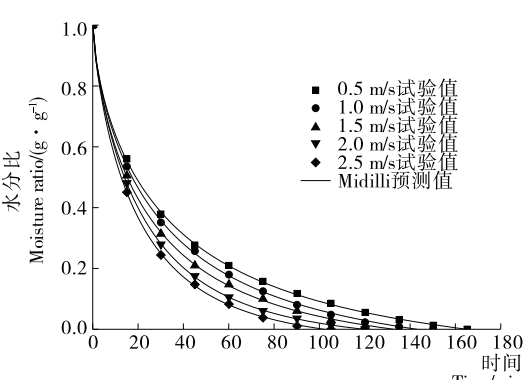


图5 不同风速条件下燕麦马铃薯复合面条热风干燥Midilli模型的验证

Figure 5 Verification of Midilli model of hot-air drying of oat potato compound noodles under different air velocity conditions

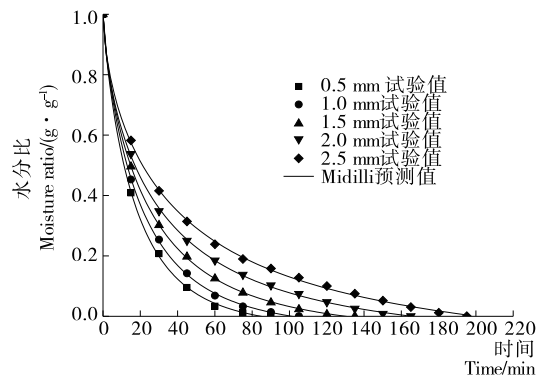


图 6 不同面条厚度条件下燕麦马铃薯复合面条热风干燥 Midilli 模型的验证

Figure 6 Verification of Midilli model of hot-air drying of oat potato compound noodles under different noodle thickness conditions

表 3 不同温度条件下燕麦马铃薯复合面条的有效水分扩散系数[†]

Table 3 Effective moisture diffusion coefficients of oat potato compound noodles under different temperature conditions

热风干燥温度/℃	有效水分扩散系数/(m ² ·s ⁻¹)
50	2.782 7×10 ⁻¹⁰
60	3.189 8×10 ⁻¹⁰
70	4.181 2×10 ⁻¹⁰
80	5.301 6×10 ⁻¹⁰
90	6.965 9×10 ⁻¹⁰

† 风速 1.5 m/s, 面条厚度 1.5 mm。

表 4 不同风速条件下燕麦马铃薯复合面条的有效水分扩散系数[†]

Table 4 Effective moisture diffusion coefficients of oat potato compound noodles under different air velocity conditions

热风干燥风速/(m·s ⁻¹)	有效水分扩散系数/(m ² ·s ⁻¹)
0.5	3.127 6×10 ⁻¹⁰
1.0	3.930 9×10 ⁻¹⁰
1.5	4.183 4×10 ⁻¹⁰
2.0	4.726 3×10 ⁻¹⁰
2.5	5.754 9×10 ⁻¹⁰

† 温度 70 ℃, 面条厚度 1.5 mm。

表 5 不同面条厚度条件下燕麦马铃薯复合面条的有效水分扩散系数[†]

Table 5 Effective moisture diffusion coefficients of oat potato compound noodles under different noodle thickness conditions

面条厚度/mm	有效水分扩散系数/(m ² ·s ⁻¹)
0.5	7.269 9×10 ⁻¹⁰
1.0	5.698 9×10 ⁻¹⁰
1.5	4.665 4×10 ⁻¹⁰
2.0	3.379 6×10 ⁻¹⁰
2.5	2.535 2×10 ⁻¹⁰

† 温度 70 ℃, 风速 1.5 m/s。

速由 0.5 m/s 增长到 2.5 m/s, D_{eff} 增加了 0.84 倍。说明增大干燥温度、风速、减小面条厚度, 可以强化燕麦马铃薯复合面条在热风干燥中的质热传递行为, 从而增大复合面条的有效水分扩散系数, 但是在热风干燥的 3 个影响因素中, 温度和面条厚度的影响较为显著, 风速的影响比较小。

根据式(10), 将 $\ln D_{eff}$ 和 $1/T$ 曲线进行线性拟合, 通过拟合直线的斜率, 计算出燕麦马铃薯复合面条干燥的活化能, E_a 为 43.15 kJ/mol ($R^2=0.976$)。

3 结论

本试验研究结果表明热风干燥的温度和面条厚度对干燥影响较为显著, 而风速影响较小。当热风温度为 90 ℃, 面条厚度为 0.5 mm 时, 干燥速率明显增大, 而温度过高可能会造成营养物质的破坏, 面条过薄易造成断条率上升, 因此可以选择干燥温度为 70 ℃, 面条厚度为 1.0 mm 作为干燥条件。风速对面条干燥影响不是太大, 考虑到能量消耗, 选取 1.0 m/s 作为风速的最佳条件。

对选取的 12 种干燥模型进行方程的拟合, 确定了 Midilli 模型为燕麦马铃薯复合面条的热风干燥模型; 燕麦马铃薯复合面条的有效水分扩散系数 D_{eff} 随着干燥温度和风速的升高、面条厚度的降低而增加; 试验计算获得的燕麦马铃薯复合面条干燥活化能 E_a 为 43.15 kJ/mol。

本试验研究了燕麦马铃薯复合面条在热风中的干燥特性, 为其工厂化的干燥控制提供了一些理论依据, 但仅对复合面条热风这一干燥形式进行了研究, 以后将对其他干燥方式进行更为深入的研究。

参考文献

[1] CARILLO P, CACACE D, DE P S, et al. Organic vs. traditional potato powder[J]. Food Chemistry, 2012, 133(4): 1 264-1 273.

[2] 张丽萍, 翟爱华. 燕麦的营养功能特性及综合加工利用[J]. 食品与机械, 2004, 20(2): 55-57.

[3] 高晶晶, 李贞. 燕麦粉添加量对馒头营养特性及活性化合物的影响[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(9): 86-91.

[4] 修娇, 马涛, 韩立宏, 等. 燕麦保健功能及其应用[J]. 食品科学, 2005(16): 109-111.

[5] 袁娟丽, 单玲克, 高金燕, 等. 品质改良剂及燕麦酸面团对燕麦面团黏弹特性的改善[J]. 食品科学, 2016, 37(15): 56-62.

[6] 石启龙, 赵亚, 林雯雯, 等. 添加剂提高燕麦片贮藏稳定性[J]. 农业工程学报, 2014(2): 278-285.

[7] 种翠娟, 朱文学, 刘云宏, 等. 胡萝卜薄片干燥动力学模型研究[J]. 食品科学, 2014, 35(9): 24-29.

[8] 李菁, 萧夏, 蒲晓璐, 等. 紫薯热风干燥特性及数学模型[J]. 食品科学, 2012, 33(15): 90-94.

[9] 李汴生, 刘伟涛, 李丹丹, 等. 糖渍加应子的热风干燥特性及其表达模型[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 330-335.

[10] 尹晓峰, 杨明金, 李光林, 等. 稻谷薄片热风干燥工艺优化及数学模型拟合[J]. 食品科学, 2017, 38(8): 198-205.

[11] VILLENEUVE S, GÉLINAS P. Drying kinetics of whole durum wheat pasta according to temperature and relative humidity[J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40(3): 465-471.

(下转第 208 页)

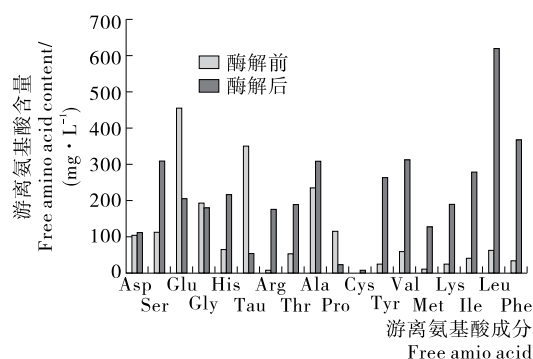


图3 酶解后游离氨基酸组成的变化

Figure 3 The changes of free amino acid before and after enzymatic hydrolysis

水解效果最佳。还通过正交试验优化了酶解工艺,结果发现在酶解温度 50 ℃、pH 值 8.5、中性蛋白酶和 Flavourzyme 的加酶量分别为 0.75% 和 1.50%、底物浓度 5%、水解时间 2.5 h 条件下酶解效率最高,水解度和氮收率分别为 37.11% 和 92.5%,酶解产物澄清无苦味及腥味。经酶解后,鸡骨泥的游离氨基酸含量显著增加,尤其是亮氨酸、苯丙氨酸、缬氨酸、异亮氨酸、酪氨酸等含量显著提高。本试验所开发的双酶水解鸡骨泥工艺对提高鸡骨利用效率有一定的应用价值。

参考文献

- [1] 赵霞, 马丽珍. 骨的综合利用[J]. 食品科技, 2003(4): 87-90.
- [2] 曹雁平. 我国禽畜骨综合加工利用的现状[J]. 粮油加工与食品机械, 2001(9): 6-8.
- [3] 李睿, 王海燕, 尚永彪. 鸡骨的综合利用研究进展[J]. 肉类工业, 2010(11): 54-57.
- [4] 丁小燕, 张雯, 陈延锋, 等. 复合风味蛋白酶水解鸡骨泥工艺条件的研究[J]. 中国食品学报, 2006, 6(1): 88-92.
- [5] 汪兰, 吴文锦, 李新, 等. 复合酶解鸡骨泥工艺[J]. 食品工业, 2015, 36(7): 4-8.
- [6] 马亚萍, 白腾辉, 康壮丽, 等. 响应面法优化鸡骨蛋白酶解工艺条件[J]. 食品工业科技, 2015, 36(19): 219-223.
- [7] 张桢, 马海霞, 杨贤庆, 等. 罗非鱼下脚料酶解液脱腥去苦的研究[J]. 食品与机械, 2012, 28(2): 27-30.
- [8] 张恒, 郭应龙. 鸡骨的酶解及酶解液的电泳分析[J]. 食品与发酵工业, 2010(9): 102-105.
- [9] ALDER-NISSEN J. Enzymic hydrolysis of food protein[M]. London, UK: Elsevier Applied Science, 1986: 110-131.
- [10] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.124—2016 食品中氨基酸的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [11] 吴贵生. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997: 76-107.
- [12] INAZU T, IWASAKI K I, FURUTA T. Effect of temperature and relative humidity on drying kinetics of fresh Japanese noodle (udon) [J]. Lebensmittel-Wissenschaft Und-Technologie, 2002, 35(8): 649-655.
- [13] 王杰, 张影全, 刘锐, 等. 挂面干燥工艺研究及其关键参数分析[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(10): 88-93.
- [14] 武亮, 刘锐, 张波, 等. 干燥条件对挂面干燥脱水过程的影响[J]. 现代食品科技, 2015(9): 191-197.
- [15] LIU Yun-hong, SUN Yue, MIAO Shuai, et al. Drying characteristics of ultrasound assisted hot air drying of Flos Lonicerae [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(8): 4 955-4 964.
- [16] SHI Qi-long, XUE Chang-hu, ZHAO Ya, et al. Drying characteristics of horse mackerel (Trachurus japonicus) dried in a heat pump dehumidifier [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84(1): 12-20.
- [17] 李叶贝, 任广跃, 屈展平, 等. 不同粒度马铃薯全粉对复合面条品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(19): 55-60.
- [18] 杨玲. 甘蓝型油菜籽热风干燥传热传质特性及模型研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014: 40-51.
- [19] 孟岳成, 王君, 房升, 等. 熟化红薯热风干燥特性及数学模型适用性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 387-392.
- [20] 孟岳成, 王雷, 陈杰, 等. 姜片热风干燥模型适用性及色泽变化[J]. 食品科学, 2014, 35(21): 100-105.
- [6] FARMAKIS L, KOLIADIMA A, KARAIKAKIS G, et al. Study of the influence of surfactants on the size distribution and mass ratio of wheat starch granules by sedimentation/steric field-flow fractionation [J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22(6): 961-972.
- [7] 蒋明虎. 旋流分离技术研究及其应用[J]. 大庆石油学院学报, 2010, 34(5): 101-109.
- [8] 曹仲文, 袁惠新. 旋流器中分散相颗粒动力学分析[J]. 食品与机械, 2006, 22(5): 74-76, 92.
- [9] ABDOLLAHZADEH L, HABIBIAN M, ETEZAZIAN R, et al. Study of particle's shape factor, inlet velocity and feed concentration on mini-hydrocyclone classification and fishhook effect[J]. Powder Technology, 2015, 283: 294-301.
- [10] 黄圣鹏. 液-液分离旋流器数值模拟及应用研究[D]. 重庆: 后勤工程学院, 2008: 1-2.
- [11] 牛伟. 溢流管直径对旋流器分离效率影响的数值模拟[J]. 化工技术与开发, 2015, 44(1): 45-48.
- [12] 王福军. 计算流体力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 132-137.
- [13] 曾兴钢, 邓松圣, 肖玉林, 等. 油-水旋流器颗粒体积分数及粒级效率数值模拟[J]. 后勤工程学院学报, 2013, 29(1): 16-20.
- [14] 俞建峰, 傅剑, 谢耀聪, 等. 淀粉分离用超重力微旋流装置分离性能研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(9): 99-103.

(上接第 83 页)