

不同干燥方法下枸杞干燥特性 及气流床厚层干燥的压降特性

张牧心¹, 尹少武^{1,2,*}, 刘传平^{1,2}, 童莉葛^{1,2}, 王立^{1,2}

(1. 北京科技大学能源与环境工程学院, 北京 100083;

2. 北京科技大学冶金工业节能减排北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要:对枸杞采用自然晾晒、烘箱薄层和气流床厚层三种不同方法进行干燥实验,考察干燥温度、是否碱水处理等因素对枸杞的干燥速率和干燥特性的影响,同时模拟气流床内的床层压降,探究不同因素对干燥过程中压降的影响。实验结果表明,将新鲜枸杞干燥至含水率13%以下,采用26℃的自然晾晒干燥时,经碱水处理和未经碱水处理的样品分别耗时103、350 h;而采用温度为50、60、70℃的烘箱薄层干燥法,经碱水处理的样品,耗时分别为14、10.5、6.5 h;温度对枸杞的干燥速率起决定性作用;枸杞喷洒碱水后干燥速度显著增加,且枸杞干品表面色泽明亮。气流床厚层干燥结果表明,气流速度和孔隙率对压降影响显著,气流温度对压降影响不显著;在雷诺数(Re)较小的情况下,Ergun方程所预测的压降值与实验值吻合较好,本模拟方法可以准确预测气流床厚层干燥的床层压降。

关键词:枸杞,干燥,干燥特性,压降

Drying characteristics of Chinese wolfberry under different drying methods and pressure drop characteristics of airflow thick-layer drying

ZHANG Mu-xin¹, YIN Shao-wu^{1,2,*}, LIU Chuan-ping^{1,2}, TONG Li-ge^{1,2}, WANG Li^{1,2}

(1. School of Energy and Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Beijing Key Laboratory of Energy Saving and Emission Reduction for Metallurgical Industry, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The drying experiments of Chinese wolfberry were performed at natural drying, oven thin-layer drying and airflow thick-layer drying conditions. The influences of drying temperature and spraying alkali water on Chinese wolfberry were studied, the drying rate curves and drying characteristics were obtained. At the same time, the pressure drop in the airflow bed was simulated to investigate the influence of different factors on the pressure drop during drying process. The results showed that, the fresh Chinese wolfberry were dried to moisture content below 13% under 26℃ natural drying conditions, it needed 103 h and 350 h for the wolfberry with spraying alkali water and without alkali water, respectively. When the fresh Chinese wolfberry were dried under oven thin-layer drying conditions, it needed 14, 10.5, 6.5 h for the wolfberry with spraying alkali water at 50, 60, 70℃, respectively. The temperature played a decisive role in drying rate of Chinese wolfberry. The drying rate increased significantly after spraying alkali water, and the surface of wolfberry was bright. The results of airflow thick-layer drying showed that the air velocity and porosity had significant influence on the pressure, air temperature on the pressure drop was not significant. In Re small, the Ergun equation predicted pressure drop values agreed well with experimental values. This simulation method could accurately predicted the pressure drop of airflow thick-layer drying conditions.

Key words: Chinese wolfberry; drying; drying characteristics; pressure drop

中图分类号: TS255.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2017)12-0103-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2017.12.019

枸杞, 中药称为枸杞子, 既是传统名贵中药材, 又是一种营养滋补品^[1]。目前, 枸杞的干燥方式主要是自然晾晒法和机械烘干法。自然晾晒是传统的干燥方法, 其优点是简单且成本低, 但是受到天气因素

的影响, 不仅干燥时间长, 而且直接与外界环境接触, 卫生条件差, 干燥品质得不到保证。随着枸杞种植规模扩大以及干燥品质要求提高, 枸杞机械化烘干需求越来越大, 因此, 有必要研究枸杞机械化烘干

收稿日期: 2016-11-01

作者简介: 张牧心(1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 湿物料干燥技术的研究, E-mail: zmxxydj@163.com。

* 通讯作者: 尹少武(1979-), 男, 博士, 副教授, 主要从事湿物料干燥技术与装备研发方面的研究, E-mail: yinsw@ustb.edu.cn。

基金项目: 北京青年英才计划项目(YETP0360); 国家重点研发计划(2016YFB0601101); 中央高校基本科研业务费(FRF-BD-15-009A)。

加工工艺^[2-3]。

近年来许多学者对枸杞的热风干燥特性和干燥工艺进行了研究。岑海堂^[4]等研究发现,常压热风干燥枸杞过程有升速、恒速和降速阶段,并推荐了干燥枸杞过程中三个阶段宜采用的干燥参数。贾清华^[5]等对枸杞热风干燥过程中温度、风速的影响进行研究,发现气流温度是影响干燥速率的主要因素,风速是次要因素。郑硕^[6]等从干燥速率和干燥品质两方面,对枸杞干燥过程中的相关因素进行实验和评价。李明滨^[7]等对枸杞恒温恒湿干燥特性进行分析,得出了干燥过程中快速、恒速和降速阶段的最佳工艺参数组合。因此,分阶段变温干燥是枸杞热风干燥的一个重要研究方向。

本文对枸杞在自然晾晒、烘箱薄层干燥和气流床厚层干燥等方法下进行了干燥实验,考察了干燥温度、是否喷碱水等因素对不同品种枸杞干燥特性的影响,得到了枸杞的干燥特性,并研究了气流干燥过程中影响压降变化的因素,以期对枸杞机械烘干技术的推广奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

枸杞鲜果 中宁1号,由宁夏中宁县某种植场提供,采摘种植基地成熟枸杞,空运至北京后在5℃保鲜存放;碱水 每50 mL水配2.5 g食用碱。

XCT-1型高温鼓风烘箱装置 上海锦屏仪器仪表有限公司,电源220 V,加热功率6 kW,风机功率100 W,温度范围:室温~500℃;气流床 自制,电源220 V,加热功率10 kW,风机功率2 kW,温度范围:室温~120℃,该气流床系统主要包括:供风系统,加热系统,管道系统和测量系统等,电压380 V/50 Hz,全压:6420~5300 Pa,转速:2800 r/min;电子天平 深圳市博途电子科技有限公司;温湿度记录仪 杭州联测自动化技术有限公司,测量范围:温度-40~100℃,湿度0~100% RH,精度:温度0.5℃,湿度0.1% RH。

1.2 实验方法

实验前,选取大小均匀、成熟饱满的枸杞颗粒,去除杂质,将碱水用喷壶均匀喷洒在需要喷碱水的枸杞上,每1000 g枸杞喷洒50 mL碱水,放置3 min后开始实验。

本文实验对比了枸杞在自然晾晒、烘箱薄层干燥和气流床厚层干燥方法下的干燥特性。

1.2.1 自然晾晒 实验在北京科技大学研究生工作室进行,时间为7月份,温度为21~32℃。将枸杞分别选取喷碱水和无碱水枸杞鲜果各50 g,早上9:00至17:00在室外晾晒,其余时间在室内通风处存放。

1.2.2 烘箱薄层干燥 采用电热鼓风干燥箱,干燥过程打开鼓风机,风速为1 m/s。干燥气流温度分别为50、60、70℃,每个温度下称取50 g枸杞并均匀喷洒碱水,进行干燥对比实验。干燥过程中分别间隔2、1.5、1 h后取出枸杞称重,直至含水量降至13%以下。实验完成后对比发现,在60℃下枸杞干品质量最佳,故在60℃下进行喷碱水和无碱水对比实验。

1.2.3 气流床厚层干燥 实验时称取一定质量的新鲜枸杞装入气流床的干燥箱内,对枸杞在气流床中进行厚层干燥实验,干燥过程中每隔6 h切换气流风向,实现枸杞交变气流厚层干燥。

枸杞厚层干燥基本实验:在风速为1 m/s、料层厚度为10 cm下探究不同温度(50、60、70℃)对枸杞干燥过程的影响;在60℃、料层厚度为10 cm下探究不同风速(0.6、0.8、1.0 m/s)对枸杞干燥过程的影响;在60℃、风速为0.8 m/s下探究不同料层厚度(5、10、15 cm)对枸杞干燥过程的影响。

枸杞厚层干燥压降实验,因素水平见表1,探究不同干燥条件下(每组枸杞600 g)压降的变化。

表1 压降实验中实验参数设置表

Table 1 Setting table of test parameters in pressure drop test

项目 编号	气流温度 (℃)	气流流速 (m/s)	物料当量直径 (m)	孔隙率
1	60	0.6	0.0091	0.4
2	70	0.6	0.0091	0.5
3	60	0.8	0.0103	0.3
4	50	0.6	0.0091	0.5
5	60	1.0	0.0091	0.4
6	60	1.0	0.0103	0.4

1.2.4 气流床压降模拟 模拟利用Gambit2.4.6建立几何模型并进行网格划分,使用Fluent软件对模型进行计算并得到不同工况下干燥室内流场和压降的具体分布情况。气流床的干燥室属于标准的长方体结构,干燥室主体长×宽×高=150 mm×140 mm×300 mm,物料厚度均为10 cm,热风气流从干燥室底部吹入、从气流床上方流出为正向,气流床几何模型如图1所示。

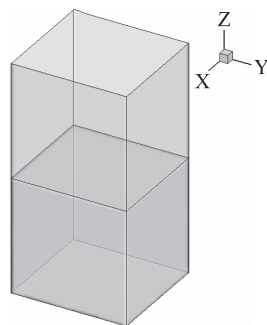


图1 填有多孔介质的气流床几何模型

Fig.1 Air beds filled with porous medium geometric model

将干燥室内空气视为不可压缩流体,不考虑温度的影响,气流为稳态流动。本文采取标准k-ε方程模型结合标准壁面模型函数的方法来解决壁面处粘性力影响区域的流动,所有的方案模拟计算过程均选用SIMPLE算法。对壁面区划分网格时进行网格加密,并在壁面位置设置边界层,进风口设置为速度进口边界(velocity-inlet),出风口设置为出口流动边界(outflow),压力速度耦合采用SIMPLE算法,控制方程的离散采用有限体积法,动量离散方程采用一阶迎风格式。由于出口与大气相连,故设置表压为0 Pa。网格类型为非结构化的三角形网格。各模

型网格均通过网格质量检查。空气物性参数及模型计算参数设置如表 2 所示：

表 2 模型计算参数
Table 2 Parameters used for simulation

参数	数值
空气密度 (kg·m ⁻³)	1.069
气流温度 (k)	330
空气粘度 (Pa·s)	19.95
物料厚度 (mm)	150
气流速度 (m·s ⁻¹)	1.91
孔隙率	0.4

1.2.5 压降的半经验公式计算 在各种文献中,床层压降模型应用比较广泛的是 Ergun 方程。Ergun 等提出了针对固定床的床层内压降公式,但该公式是一个半经验公式,对于床层内不同形状、不同颗粒粒径采用了近似处理,代入后期实验数据并计算后,提出目前接受度较高的 Ergun 方程^[8]：

$$\frac{\Delta p}{L} = A \frac{\mu u (1-\varphi)^2}{d^2 \varphi^3} + B \frac{\rho u^2 (1-\varphi)}{d \varphi^3}$$
 式(1)

式中,Δ*p* 为床层压降,Pa; *L* 为固定床长度;μ 为流体动力粘度,kg/ms; *d* 为颗粒直径, m; φ 为孔隙率;ρ 为流体密度,kg/m³; *u* 为流体流速, m/s; *A*、*B* 为经验系数,由实验确定,根据文献现列出三组有代表性的经验系数的值^[9]。

表 3 Ergun 型方程经验系数 A 和 B 的取值
Table 3 Empirical coefficient A and B values in the Ergun type equation

半经验公式	Ergun-1	Ergun-2	Ergun-3
A	150	150	180
B	1.75	0.6	1.8

但是人们逐渐发现该等式是在床层直径与颗粒直径之比较大时才成立。Eisfeld 等人^[10]指出当床层直径与颗粒直径之比较小时,Re 较低,流体流过壁面受到阻力,从而增加了压降;Re 较高,壁面与物料之间的孔隙率较大,流体在此区域产生沟流,从而降低了压降。所以 Reichelt^[11] 等人在 Ergun 方程基础上提出了适用于床层直径与颗粒直径之比较小时的半经验 Reichelt 公式：

$$\varphi = \frac{154A^2(1-\varphi)^2}{Re \varphi^3} + \frac{A_w 1-\varphi}{B_w \varphi^3}$$
 式(2)

$$A_w = 1 + \frac{2}{3(\frac{D}{d_p})(1-\varphi)}$$
 式(3)

$$B_w = \left[1.15 \left(\frac{d_p}{D} \right) + 0.87 \right]$$
 式(4)

$$\varphi = \frac{\Delta p d_p}{\rho u^2 L}$$
 式(5)

式中,Re 为雷诺数; *L* 为物料厚度; *D* 为固定床直径。

1.3 评价指标

1.3.1 含水率 非饱和多孔介质是由固相骨架和骨架孔隙内水分组成的湿物料,其含水率 (Moisture

content) 可以按干基含水率和湿基含水率两种方法来定义^[12],分别表示为：

$$M = \frac{m_w}{m_s} \times 100$$
 式(6)

$$W = \frac{m_w}{m_s + m_w} \times 100$$
 式(7)

式中, *M* 为干基 (d.b.) 含水率,%; *W* 为湿基 (w.b.) 含水率,%; *m_s* 为固相骨架质量,kg; *m_w* 为水分质量。

1.3.2 干燥速率 干燥速率即单位时间内蒸发的水分量。按照 Falade 等^[13]的方法,计算公式^[14]如下：

$$V_t = \frac{(M_t - M_{t-1})}{\Delta t}$$
 式(8)

式中, *V_t* 为 *t* 时刻物料 (d.b.) 的干燥速率, %/h; *M_t*、*M_{t-1}* 分别为 *t*、*t-1* 时刻样品干基含水率,%; Δ*t* 为时间间隔, h。

1.4 数据处理实验

数据使用 Originpro 9.0 软件处理。

2 结果分析与讨论

2.1 不同干燥方法下枸杞干燥特性

2.1.1 自然晾晒干燥特性 枸杞在自然晾晒条件下干燥曲线如图 2 所示。

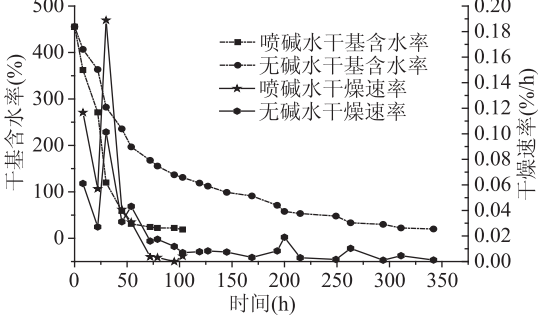


图 2 自然干燥下是否喷碱水的枸杞干燥曲线及干燥速率曲线图

Fig.2 The drying rate curves and drying characteristics curves of Chinese wolfberry with and without alkali water under natural drying

结果表明,自然条件下干燥枸杞,不仅干燥时间长,还容易受到天气因素的影响,导致枸杞品质受损;在自然干燥条件下,喷碱水的枸杞干燥速率远高于不喷碱水的枸杞干燥速率。干燥至相同含水率,喷碱水的干燥时间为 103 h,不喷碱水的干燥时间为 350 h。

2.1.2 烘箱薄层干燥特性

2.1.2.1 温度对干燥的影响 对枸杞分别在 50、60、70 ℃ 下进行喷碱水烘箱干燥,得到其干燥曲线与干燥速率曲线如图 3、图 4 所示。

通过三种温度下所得到的干燥曲线可知,干燥温度越高,干燥速率越快,干燥到安全含水率的时间越短。而采用温度为 50、60、70 ℃ 的烘箱薄层干燥法,经碱水处理的样品,耗时分别为 14、10.5、6.5 h。

2.1.2.2 是否喷碱水对干燥的影响 由图 5 可知,干燥至相同含水率,喷碱水的干燥时间为 12 h,而不喷碱水的干燥时间为 16.5 h。故喷碱水可以加快枸杞

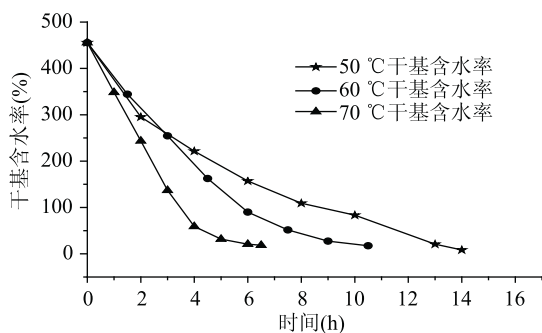


图3 不同干燥温度下枸杞干燥曲线
Fig.3 Drying curves of Chinese wolfberry under different drying temperature

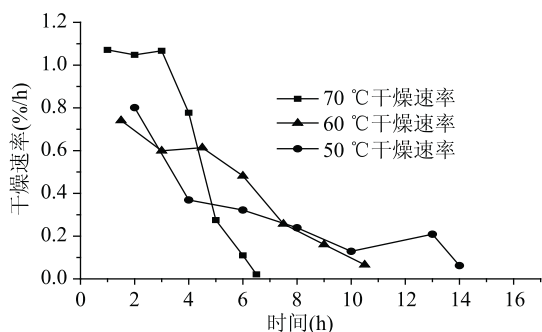


图4 不同干燥温度下枸杞干燥速率曲线
Fig.4 Drying rate curves of Chinese wolfberry under different drying temperature

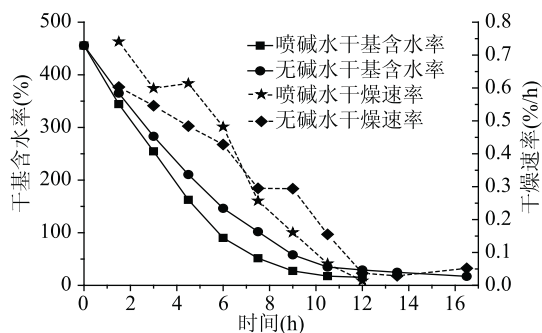


图5 60 °C下是否喷碱水干燥曲线及干燥速率曲线
Fig.5 Drying curves and drying rate curves of Chinese wolfberry with and without alkali water at 60 °C

干燥速度,并且是干燥后的枸杞更鲜亮,更加美观。且碱水是食用碱调制,可供食用,传统上允许对枸杞喷洒适量食用碱水。

烘箱薄层干燥过程中没有出现明显的恒速干燥阶段,整个干燥过程主要是降速干燥阶段。降速干燥阶段还可分为第一降速阶段和第二降速阶段。在第一降速阶段由于枸杞表面不是完全润湿,干燥过程开始后不久,物料内部水分向表面迁移,枸杞内部的水分扩散速率低于表面水分汽化的速度,所以干燥速率下降。当干燥进入第二降速阶段时,其干燥速率完全由内部水分向外部的扩散速度决定,水分排出更加困难,因而在干燥后期,干燥速率继续降低。

2.1.3 气流床厚层干燥特性 烘箱内干燥实验发现,枸杞在 50~60 °C 干燥时,颜色保持好,枸杞干品呈亮红色,干燥过程中枸杞产生的褶皱也比较美观。

在前期气流床中干燥时发现,若一直采用较高温度的热风干燥,部分枸杞会在表面产生类似水泡一样的隆起,且颜色发黄,干燥后枸杞颜色不够鲜亮,外形也不美观。因此建议气流床干燥采用分段变温干燥,先用较低温度干燥,进行保色,防止枸杞表面剧烈收缩,第二阶段采用较高的温度干燥,直至含水率为 13% 以下。本文为了探究料层厚度的变化对压降的影响,气流床干燥均采用 60 °C 进行恒温干燥。

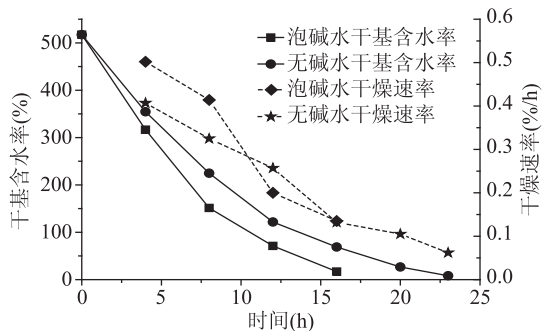


图6 气流床中枸杞层厚 5 cm 的干燥曲线及干燥速率曲线
Fig.6 Drying characteristic curves and drying rate curves of 5 cm thick layer of Chinese wolfberry in airflow bed

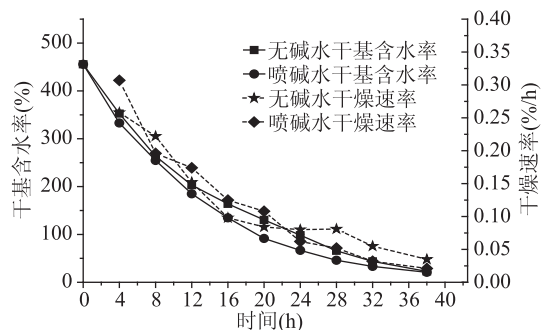


图7 气流床中枸杞层厚 15 cm 的干燥曲线及干燥速率曲线
Fig.7 Drying characteristic curves and drying rate curves of 15 cm thick layer of Chinese wolfberry in airflow bed

实验结果(图 6~图 7)表明,气流床干燥时,枸杞料层厚度太薄则干燥效率低,太厚则一方面枸杞之间产生挤压变形,挤压后破裂糖分析出发生黏连,且糖分渗出后经高温烘烤会变黑,导致枸杞干品外形不美观,另一方面料层太厚干燥不均匀,因此枸杞厚层干燥时的料层厚度适宜在 5~15 cm 范围。

2.2 气流床厚层干燥的压降特性

根据实验数据整理得到不同工况下压降随时间的变化曲线如图 8 所示,在干燥开始阶段,压降下降明显,随后趋于稳定。气流速度越大,压力变化越大,物料越厚,压力变化也越大。其中,气流速度对压降影响最大,其次是物料厚度,气流温度与风速、物料厚度相比,对压力影响不大。

压降实测值与不同计算方法得到的计算值对比如表 4 所示,对比编号 1 和 2 组实验结果发现,在气流速度相同的情况下,气流温度升高、孔隙率增大,压降减小;编号 2 组与编号 4 组实验比较,在气流速度和孔隙率一样的情况下,气流温度增大并不会影响压降,压降的变化与气流温度没有明显的关系;对比编号 1 和 5 组实验发现,在气流温度和孔隙率相同

表4 压降不同计算方法的计算值与实测值对比

Table 4 Comparison of calculated values and measured values of different calculation methods for pressure drop

项目编号	Re	实测值	Ergun-1	Ergun-2	Ergun-3	Eisfeld	模拟值
1	151.8	24.3	20.8	12.0	22.4	15.8	24.6
2	169.7	8.0	8.3	4.6	8.9	5.9	8.3
3	184.1	91.3	93.9	49.1	100	72.9	93.9
4	189.5	8.0	8.6	4.7	9.2	6.1	8.2
5	233.2	43.2	44.4	22.7	47.2	32.4	44.4
6	263.9	40.7	46.0	23.8	48.9	33.4	41.3

体速度的增加,流动阻力增加,压差增大。而多孔介质区域孔隙率越大,气流流通区域面积增大,压降自然就越来越小。

其中,Ergun-1 和 Ergun-3 经验公式计算值可以较好的与实测值吻合,可较好的预测压降;Ergun-2 和 Eisfeld 经验公式并不能很好的预测中药材厚层干燥过程中的压降。其计算值均小于实测值,且随着气流速度和孔隙率的变化而变化, $u\varphi$ 值越大,误差越大。比较实测值与 Ergun-1 经验公式计算值,这六组实验误差分别为 14.36%、3.63%、2.92%、7.25%、2.80%、13.14%。误差的产生由于在模型中,把经验系数 A 和 B 简化为一个常数,而随着速度的增加,惯性力对压降的影响越来越明显,气流速度较小时,Re 也较小,可以忽略 Re 的影响,但气流速度增大时就必须考虑 Re 增加的影响,所以偏差越来越大,但误差均属于可接受范围内。

压降不同经验公式计算值与实测值结果对比如图 9 所示,模拟值与实测值十分接近,部分值比实测值稍大,主要因为在模拟软件中,所有条件均为理想化,干燥室壁面均为绝热且完全密封,但在实际搭建过程中,虽然做了相关保温密封工作,仍存在漏风现象,实验操作与测量中也存在一定的人工误差与系统误差,导致模拟值与实测值的偏差。比较实测值与模拟值,这六组实验误差分别为 1.23%、3.75%、2.85%、2.50%、2.78%、1.47%,误差均属于可接受范围内。

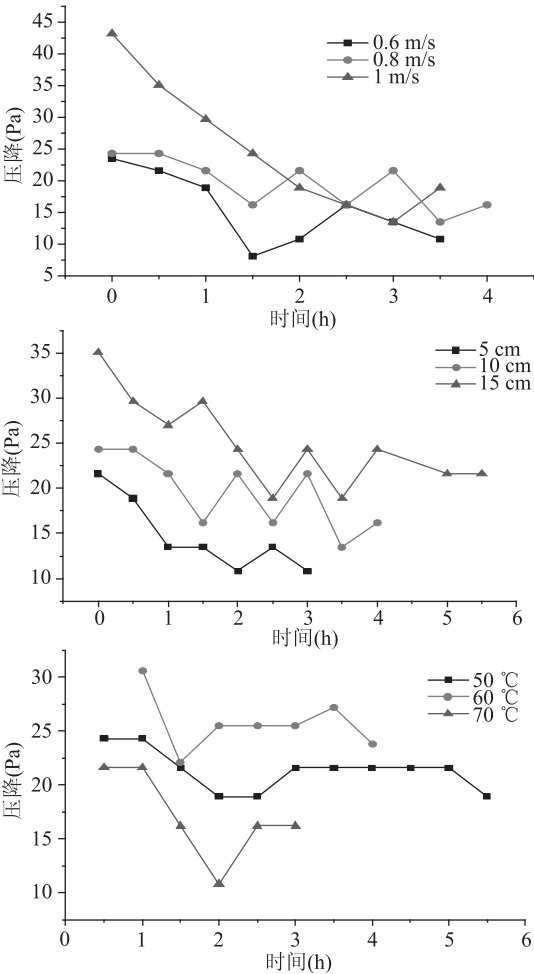


图8 实验中压降随风速、物料厚度、温度的变化曲线

Fig.8 The pressure drop curve with the change of wind speed,material thickness and temperature in the experiment

的情况下,气流速度增大,压降增大;对比编号 1、2、3 和 5 组可以发现,编号 3 组虽然气流速度增幅没有编号 5 组大,但是孔隙率减小,压降明显增加,说明与气流速度相比,孔隙率对压降的影响更大。多孔介质中单相流阻力为粘性力与惯性力之和,故孔隙率对压力变化的影响更大。

根据范宁公式:

$$\Delta P_f = \lambda \frac{L \rho u^2}{d \cdot 2}$$
式(9)

可知粘性力与流体速度有关,并且随着流体速度的增加 Re 变大,而 Re 反映了流体流动中惯性力与粘性力之比,其值越大,流体的湍动越剧烈,内摩擦力也越大,惯性力影响越来越明显。所以随着流

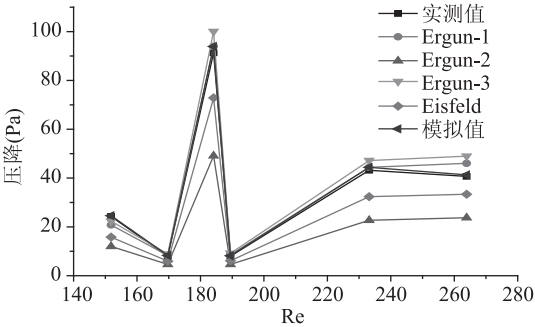


图9 压降实测值与不同计算方法的计算值对比图

Fig.9 Comparison of measured values and calculated values of different methods for pressure drop

3 讨论与结论

本文对不同品种枸杞鲜果在不同方法和干燥参数下进行了干燥实验。对比三种干燥方法发现,自然晾晒的枸杞所需干燥时间长,容易返潮吸水,枸杞干品品质较差,如果同时大量晾晒,不仅需要比较大

的晒场^[15],还需薄摊勤翻,效率低,费时费力;烘箱薄层干燥时间比自然晾晒时间大大缩短,但烘箱内温度波动较大,枸杞干品的品质得不到保证,且一次干燥枸杞的量较少,经济效益较低;气流床厚层干燥,采用全自动控制系统,分段式逐步升温,各阶段风温风向自动切换,一次干燥量大且干燥时间短,枸杞干品品质最佳。总体来说,气流床干燥效率最高,是一种值得大力推广的方法。

在上述三种方法中,喷碱水都能大大缩短干燥时间,使枸杞干品更加美观。在自然干燥、烘箱干燥和气流床干燥中,喷碱水的枸杞与无碱水的枸杞相比,不仅其颜色更加明亮,干燥时间也明显缩短。但是由于人为处理不当及其他原因,有些部门反对用碱水处理,所以可以采用其他枸杞促干剂来缩短枸杞干燥时间^[16-17]。

对比不同干燥实验参数可知,干燥温度对干燥速率影响显著,而是否喷碱水对枸杞干燥品质和干燥速率有较大影响。在气流床干燥中,料层过厚不利于干燥均匀,枸杞过多过厚,会造成底部枸杞挤压,并且中部枸杞干燥缓慢,故枸杞料层宜在5~15 cm之间。

在相同实验条件下,气流温度对压降影响不显著,气流速度、孔隙率对压降影响显著,其中,孔隙率的变化对压降的影响最大。气流速度越大,压降越大;孔隙率越小,压降越大。当流体Re较小时,Ergun半经验公式可以较好的预测压降值,Re越大,预测误差越大。模拟值与实验所测数据最大误差不超过4%,证明模拟预测压降结果可信。

参考文献

- [1]徐长青,刘赛,徐荣,等.我国枸杞主产区现状调研及建议[J].中国中药杂志,2014,39(11):1979-1984.
- [2]吴中华,李文丽,赵丽娟,等.枸杞分段式变温热风干燥特

性及干燥品质[J].农业工程学报,2015,31(11):287-293.

[3]董静洲,杨俊军,王璵.我国枸杞属物种资源及国内外研究进展[J].中国中药杂志,2008,33(18):2020-2027.

[4]岑海堂,姜芝藩.热风干燥枸杞的实验研究[J].内蒙古工业大学学报,1999,18(1):52-56.

[5]贾清华,赵士杰,柴京富,等.枸杞热风干燥特性及数学模型[J].农机化研究,2010,32(6):153-157.

[6]郑硕,李明滨,慕松.枸杞热风对流干燥动力学特性的研究与实验[J].食品工业,2012,33(9):143-146.

[7]李明滨,张增,慕松.枸杞平衡含水率的测定及其干燥工艺的优化[J].现代食品科技,2013,29(2):284-286.

[8]张立奎.固定床压降估算[J].化工装备技术,1997(2):50.

[9]马俊,孙中宁.多孔介质单相流阻力特性[J].应用科技,2012,39(2):73.

[10]Eisfeld B, Schnitzlein K. The influence of confining walls on pressure drop in packed beds[J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56: 4321-4329.

[11]Reichelt W. Zur Berechnung des Durchverlusteres einphasig durchstromter kugel- und Zylinderschuttugen [J], Chem Ing Tech, 1972, 23: 342-361.

[12]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,2014:45.

[13]Falade K O, Abbo E S. Air-drying and rehydration characteristics of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) fruits [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(2): 724-730.

[14]郭徽,杨薇,刘英.云南三七主根干燥特性及其功效指标评价[J].农业工程学报,2014,30(17):305-313.

[15]高月.枸杞干燥方法及其促干剂的研究[D].保定:河北农业大学,2015:23.

[16]杜静.枸杞表面蜡质及制干技术研究[D].兰州:兰州理工大学,2010:20-21.

[17]刘雅欣.枸杞鲜果碱水制干技术[J].植物杂志,1986(5):4-5.

(上接第102页)

工业科技,2004,25(8):73-74.

[5]张良华,张国东,孙丛丛,等.改良剂对速冻水饺冻裂率及褐变的影响研究[J].食品研究与开发,2010,31(1):24-26.

[6]李昌文,岳青,张文叶,等.影响速冻水饺品质的因素[J].粮油加工与食品机械,2005,8(8):79-81.

[7]Day L, Augustin M A, Batey I L, et al. Wheat-gluten uses and industry needs[J]. Trends in Food Science and Technology, 2006, 17(2): 82-90.

[8]黄姗,赵凯,刘宁.面粉品质对速冻饺子皮品质影响的研究[J].农产品加工,2014(10):14-18.

[9]张锦丽.改善速冻水饺品质的研究[J].食品工业科技,2005(5):35-38.

[10]李梦琴,张剑,冯志强.高档速冻饺子粉的研究[J].食品工业科技,2007(8):163-167.

[11]胡新中,张国权,张正茂,等.小麦面粉、面条色泽与蛋白质组分的关系[J].作物学报,2005,31(4):515-518.

[12]葛秀秀.中国面条颜色及其影响因素研究[D].北京:中国农业科学院,2003.

[13]廖娜,谭鹤群.不同微细化程度玉米粉的淀粉糊化度研究[J].饲料工业,2007,28(21):27-30.

[14]王春娜,龚院生.方便面糊化度测定方法的研究[J].郑州

粮食学院学报,1999,20(2):1-8.

[15]付中华,薛晓金,田素芳.糊化度的测定方法[J].粮食流通技术,2004(3):27-29.

[16]米佳.醋酸酯淀粉在速冻水饺皮中作用机理的研究[D].济南:齐鲁工业大学,2014.

[17]李雪琴,葛静静,谢沁,等.饺子皮感官品质和质构品质关系的研究[J].河南工业大学学报,2012,33(4):1-4.

[18]严勇强,李汴生,阮征,等.储藏方式与时间对鲜湿熟面条品质的影响[J].食品与发酵工业,2012,38(7):132-136.

[19]任欣,李小婷,沈群.冷冻贮藏环境对速冻水饺皮品质特性的影响[J].农业工程学报,2014,30(6):263-271.

[20]周国燕,胡琦玮,李红卫,等.水分含量对淀粉糊化和老化特性影响的差示扫描量热法研究[J].食品科学,2009,30(19):89-92.

[21]周中凯,张岩,陈晓珊.5种小麦淀粉的结构与性质的研究[J].中国食品学报,2013(4):23-26.

[22]毛灵涛,薛茹,安里千. MATLAB在微观结构SEM图像定量分析中的应用[J].电子显微学报,2004,23(5):579-583.

[23]崔勇涛,刘文白,许冰沁.疏浚土固化前后的压缩模量及微观结构变化的定量研究[J].科学技术与工程,2016,16(15):260-267.