

红外—喷动床联合干燥设备研制与分析

Development and analysis of infrared-spouted bed combined drying equipment

马立¹ 段续^{1,2} 任广跃^{1,2} 李琳琳¹ 李新林³

MA Li¹ DUAN Xu^{1,2} REN Guang-yue^{1,2} LI Lin-lin¹ LI Xin-lin³

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023; 2. 粮食储藏安全河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001; 3. 肥西老母鸡食品有限公司, 安徽 合肥 230000)

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2. Collaborative Innovation Center of Grain Storage Security, Zhengzhou, Henan 450001, China; 3. Feixi Old Hen Food Co., Ltd., Hefei, Anhui 230000, China)

摘要:为较好地解决单一红外干燥均匀性差的问题,利用红外加热高效节能的特点,结合喷动床流动性好、传热均匀的特点,设计了红外联合喷动床干燥设备。该装置包括喷动床干燥系统、红外辐射加热系统、回风式空气调节系统、动力循环系统和控制系统等。并以新鲜毛豆为物料,对该装置干燥均匀性和产品品质进行试验验证。结果表明,单一红外干燥耗时 270 min,而红外—喷动床联合干燥耗时 160 min,与单一的红外干燥相比,红外—喷动床联合干燥时间缩短了 40.7%;同时,红外—喷动床联合干燥设备减轻了毛豆仁干瘪皱缩现象,使干制品具有较好的豆香味和感官品质。

关键词:红外干燥;喷动床;均匀性;高效节能;干燥效率

Abstract: In order to better solve the problem of poor uniformity of single infrared drying, take advantage of the high-efficiency and energy-saving characteristics of infrared heating, combined with the characteristics of spouted bed and uniform heat transfer, an infrared-spouted bed combined drying equipment is designed. The device includes a spouted bed drying system, an infrared radiation heating system, a return air conditioning system, a power circulation system and a control system. In order to evaluate the performance of the drying equipment, fresh edamame was used as the material to verify the drying uniformity and product quality of the equipment. The results show that the single infrared drying takes 270 min, while the combined infrared-spouted bed drying takes 160 min. Compared with the single infrared drying, the

combined infrared-spouted bed drying time is shortened by 40.7%; at the same time, infrared-spouted drying bed combined drying equipment reduces the shrinkage and shrinkage of soybean kernels, so that the dried products have better bean aroma and sensory quality.

Keywords: infrared drying; spouted bed; uniformity; high efficiency and energy saving; drying efficiency

最大限度地减少产品退化和能源消耗是当前农产品脱水干燥加工面临的挑战^[1-4]。红外干燥技术减少了传热过程中热的损失,提高了产品品质与均匀性,但也常常受限于辐射率、面积、温度上限^[5-6];喷动床干燥过程中,气流使物料快速搅动,湍流和涡流增加了物料与加热介质之间的接触面积,提高了干燥均匀性^[7-8],但干燥速率慢,增加了操作成本。因此,为了解决目前农产品干燥领域单一干燥方式的局限性,提高干燥效率,增强产品品质,设计新的组合干燥技术,能有效改善单一干燥方法的不足与缺陷。

当前,已有众多国内外学者将不同的干燥方法进行组合,用于农产品的脱水干燥工业,取得了显著成果^[9-10]。谢小雷等^[11-12]通过连续式中红外与热风干燥联合干燥,以牛肉干活化能、收缩率和感官评价为评价指标,研究结果表明,连续式中红外与热风干燥联合干燥能较好保留干制品的风味和颜色,降低了 10.33% 的活化能和 57.14% 的干燥耗时,生产量提高了 2 倍。顾震等^[13]研究发现热泵—远红外联合干燥胡萝卜片所需时间和总耗能远低于热泵干燥。在农产品等湿物料的干燥加工领域,使用单一形式的干燥方法,很难达到最终产品要求,而将两种或多种不同干燥方法组合干燥能取长补短,达到单一干燥方法所不能达到的效果。喷动床干燥过程中

基金项目:十三五国家重点研发计划(编号:2017YFD0400901);
智汇郑州·1125 聚才计划(编号:2016XT026)

作者简介:马立,男,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:段续(1973—),男,河南科技大学教授,博士。

E-mail: duanxu_dx@163.com

收稿日期:2020-08-21

干湿物料间相互渗透,避免了局部过热,热源被充分利用,质热传递效率高^[14]。王玉川等^[15]通过将脉冲喷动床干燥与低频微波干燥组合,研究该装置对高丽菜干燥品质的影响,结果表明,联合干燥能提升干燥产品品质,缩短干燥周期。张秦权等^[16]设计的远红外联合低温真空干燥设备能较好地保留物料的总酸和总糖含量,提高干制品品质。

针对单一红外干燥过程中存在温度分布不均匀、干燥耗时长、物料受上限温度影响等问题,研究拟设计一种红外联合喷动床干燥设备,并以新鲜毛豆仁为原料,进行性能试验验证设备的干燥效果。

1 红外喷动床联合干燥设备结构

1.1 结构组成

以预计处理量 20~25 kg/h 为基础,设计的红外联合喷动床干燥设备整体占用空间 1 500 mm×1 500 mm×2 100 mm(长×宽×高),主要由喷动床主体、带温控系统的红外加热器、轴流风机、物料收集箱以及数据采集系统等组成,设备整体采用循环风设计。图 1 为设备结构图。

1.2 工作原理

该干燥设备是利用喷动床干燥过程中物料多次通过强湍流区,干湿物料在湍流和旋涡作用下,快速搅动并相互渗透,避免了局部过热的优点与红外干燥穿透性强、干燥速度快的优点有机结合。将待干燥物料通过物料入口添加到喷动床内,达到了所需的静态床层高度,此时打开动力装置,提供动力的空气体从喷动床底部气流入入口进入喷动床内部,通过改变与鼓风机相连的变频驱动装置,风量以小幅度增加,当床层处于完全喷动状态时,再利用红外辐射器产生的红外线频率与物料内部分子发生共振,使物料内部摩擦产热,结合水转化为自由水,在温度

梯度的作用下向物料表面移动蒸发,在热风对流作用下,将干燥物多余的水分通过排风口排出。物料在干燥的整个过程中,多余的热能经过回收管回收再次利用,达到了节能减排的作用。喷动床内干湿物料的规律运动、加速、减速以及物料与气体对流的运动,显著地加强了流体与颗粒之间的交换、颗粒与颗粒之间的交换、壁面与流体、颗粒之间的交换和流体、颗粒中传热传质过程,从而均匀快速去除物料中的水分,提高产品干燥均匀性。另外,干燥后的产品可以通过控制系统增大风速,在风力作用下将干制品吹出,通过物料回收箱收集,提高了干燥效率。设备整体采用工控机与 PLC 控制,以方便数据采集储存与实时查询。

2 干燥过程的基本计算

进行物料衡算、热量衡算及干燥时间的计算,其目的在于获得从物料中除去的水分、消耗多少干燥介质,需要消耗多少热量、生产率情况及干燥设备设计的一些基础数据资料。

2.1 物料中除去的水分含量

干燥过程中,物料中水分的蒸发量按式(1)计算。

$$W = G_1 \times \frac{w_1 - w_2}{1 - w_1}, \quad (1)$$

式中:

W ——水分蒸发量,kg/h;

G_1 ——物料表示的小时产量,kg/h;

W_1 ——干燥前物料中的湿基含水量,%;

W_2 ——干燥后物料中的湿基含水量,%。

2.2 空气用量

通过干燥器的湿空气中绝对干空气的量是不变的,故可以用干空气的质量作为计算基准。

蒸发水量为 W 时的干空气消耗量及实际空气用量(即湿空气用量):

$$L = \frac{W}{H_2 - H_1}, \quad (2)$$

$$L' = L(1 + H_1), \quad (3)$$

式中:

L ——绝对干空气消耗量,kg/h;

H_2 ——空气在喷动床出口处的湿度,kg/kg;

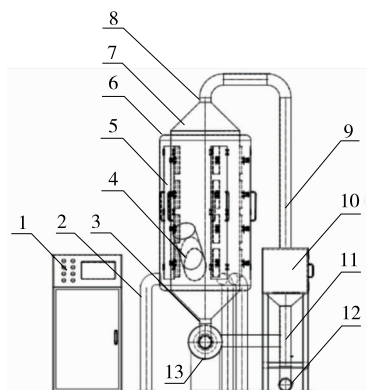
H_1 ——空气在喷动床进口处的湿度,kg/kg;

L' ——实际空气用量,kg/h。

当湿物料含水量为 2%~3%,离开喷动床时的含水量为 0.1%~0.5%,相对湿度取 0.8,为了保证水分蒸发量满足使用,通过式(1)~(3)计算可得水分蒸发量 W 为 1 kg/h,实际空气用量 L' 为 72.8 kg/h,取整为 73 kg/h。

3 设备主要部件设计

喷动床主体结构如图 2 所示。



1. 控制系统 2. 喷动床机架 3. 进气口 4. 进料口 5. 红外加热器 6. 隔热层 7. 喷动床干燥仓 8. 废气排出口 9. 回风管 10. 物料收集箱 11. 一次回风系统 12. 百叶窗 13. 轴流风机

图 1 红外联合喷动床干燥装置方案图

Figure 1 Schematic diagram of infrared combined spouted bed drying device

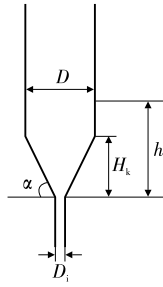


图2 喷动床干燥器的几何结构

Figure 2 Geometry of spouted bed dryer

3.1 喷动床主体结构有关参数确定

3.1.1 底部进气口直径 喷动床底部进气口直径大小主要与物料和空气体积流量有关,假设物料是直径均匀的,可由式(4)确定底部进气口直径大小。

$$D_i^2 \leqslant (0.016 \sim 0.355) L'' \sqrt{\frac{\rho_g}{d_p (\rho_s - \rho_g) g}}, \quad (4)$$

式中:

D_i ——底部进气口直径,mm;

d_p ——物料直径,mm;

L'' ——空气体积流量, m^3/h ;

ρ_g ——空气密度, $1.239 \text{ kg}/\text{m}^3$;

ρ_s ——物料密度, kg/m^3 ;

g ——重力加速度, m/s^2 。

为了适应更多物料的干燥,物料的平均直径取 15 mm ,密度取 $1600 \text{ kg}/\text{m}^3$,空气密度 $1.239 \text{ kg}/\text{m}^3$,重力加速 g 为 $-9.81 \text{ m}/\text{s}^2$,计算得进气口直径 40 mm 。

3.1.2 圆柱体直径 底部倒锥壁面与水平面夹角 α 的大小对干燥腔内物料运动的均匀性有直接影响, α 过小时,物料会在底部堆积,不易流化,形成死区,降低干燥均匀性; α 过大时,环隙区物料速度减慢,不利于操作。研究^[17-18]发现,夹角 α 为 60° 时,喷动床内物料运动分布均匀,离散状况最佳。因此,设计夹角 α 为 60° 。

圆柱直径根据通过床层的气体总量和喷动气体速度用体积流量公式计算:

$$D_c = \sqrt{\frac{4L''}{3600\pi V}}, \quad (5)$$

$$u = 1.74 \left[\frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g}{\rho_g} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

式中:

D_c ——喷动床圆柱体直径,mm;

V ——物料流化速度, m/s ;

u ——物料沉降速度, m/s ;

综合式(5)、(6),并将 $V = (0.02 \sim 0.05)u$ ^[19] 代入计算出的圆柱体直径取整为 500 mm 。

锥体高度和体积由式(7)确定。

$$H_k = \frac{D}{2 \tan \frac{\alpha}{2}}, \quad (7)$$

$$V_k = \frac{1}{3} \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 H_k, \quad (8)$$

式中:

H_k ——锥体高度,mm;

V_k ——锥体体积, m^3 。

由式(7)、(8)计算得出锥体高度 H_k 和体积 V_k 分别为 432 mm 和 0.027 m^3 。

3.1.3 静床层高度 床层高度关系到产品质量、收缩率及操作特性等工艺参数,由式(9)确定。

$$h = \left[\frac{G_2}{\rho_s (1 - \epsilon)} - V_k \right] 1/\pi \left(\frac{D_c}{2} \right)^2, \quad (9)$$

式中:

h ——静床层高度,mm;

G_2 ——湿物料的处理量, kg/h ;

ϵ ——空隙率。

当颗粒粒径为 $10 \sim 20 \text{ mm}$,圆柱体直径为 500 mm 时,颗粒孔隙率取值范围为 $0.5 \sim 0.9$,由于颗粒的平均直径为 15 mm ,因此取 ϵ 为 0.8 ,代入数值计算取整得静床层高度 h 为 200 mm 。

3.2 最小喷动速度

装置设计时,根据进气口要求设计的鼓风机运行特性是需要评估的主要因素之一,因为其与系统的可靠性以及运行成本密切相关。通过缓慢调节入口气体速度,使床层从静止状态达到松散状态,记录此时的气流速度即为最小喷动速度。在实际工况中,温度会改变流入气体的密度和黏度,根据文献^[20-21],每种床层高度的最小喷动速度为:

$$V_{\max} = (d_p/D_c) (D_i/D_c)^{1/3} \sqrt{2gH(\rho_s - \rho_g)/\rho_g}, \quad (10)$$

式中:

$V_{\max}$ ——最小喷动风速, m/s ;

d_p ——物料平均直径,mm;

D_c ——喷动床直径,mm;

D_i ——进气口直径,mm;

g ——重力加速度, m^2/s ;

H ——最大床层高度,mm。

代入参数由式(10)计算可得最小喷动风速为 $0.93 \text{ m}/\text{s}$ 。

根据上述干燥性能评估、设备结构参数估算,得到喷动床主体结构主要参数见表1。

3.3 红外辐射加热器

基于高扬等^[22]的研究,该设备选择红外辐射最佳红外线吸收波长为 $2.5 \sim 100.0 \mu\text{m}$ 。红外辐射板功率过大造成间歇性加热,导致干燥不均匀;功率过小又不能提供

表 1 喷动床几何结构主要参数

Table 1 Main parameters of spouted bed geometry

参数	符号	单位	数值
圆柱直径	D	mm	500
圆柱段高	H_1	mm	1 141
圆锥段高	H_2	mm	432
倒锥夹角	α	°	60
入口直径	D_i	mm	40

干燥所需的热能,参照魏忠彩等^[23]的计算方法,红外功率可在 0~20 kW 线性调节。红外辐射加热板尺寸 448 mm×100 mm×28 mm(长×宽×高)而红外辐射加热板的安装位置对物料干燥均匀性有直接关系,彼此之间合理的安装角度能有效提高热用率^[24]。通过文献[11]计算公式与文献[25]的理论与方法,确定红外辐射加热板 A_1 、 A_2 、 A_3 相互间夹角 α_1 、 α_2 、 α_3 为 60°时,喷动床内红外线强度分布均匀无死角,加热速度快,红外辐射利用率最高。图 3 为红外辐射加热板安装位置剖面结构示意图。

3.4 数据采集系统

温控系统由 AI108 系列温控表、智能温度变送器和 Pt100 温度传感器组成。智能温度变送器(圆卡),用于热电阻(RTD)和热电偶(TC)信号输入,二线制 4~20 mA 模拟输出,安装于传感器内部,电磁兼容性符合 GB/T 18268—2000 工业设备应用要求(IEC 61326-1)。AI108 系列温控表每秒采样 2 次,整机功耗小于 6 W,符合 IEC61010-1 过电压分类 II 和污染等级 2 安全标准。Pt100 温度传感器安装于喷动床干燥腔中,以监测干燥室的干燥温度,测量范围为-200.0~850.0 °C,温度波动均在±1 °C 范围内,整个过程记录在计算机中。入口处的空气速度由 EXTECH CFM 407113 型风速传感器测量,精度为±2%。

3.5 动力装置

由于喷动床所需气体流量要求较高而压力要求较低,因此鼓风机由轴流风机驱动。风机在启动时电流消耗会激增,影响风机的正常寿命还消耗额外的电量。电

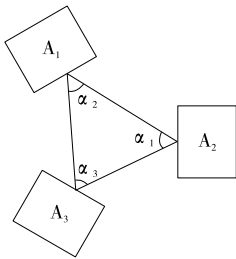


图 3 红外辐射板安装位置示意图

Figure 3 Schematic diagram of the installation position of the infrared radiation board

机的速度是固定不变,而喷动床干燥过程中需要风速小幅度增加或减小,以改变不同含水量物料的流化速度,已达到均匀快速脱水的效果的。变频器可实现电机变速启动、通过改变设备输入电压频率达到节能调速的目的,而且能给设备提供过流、过压、过载等保护功能,因此该设备安装 AD350 变频器对轴流风机进行改造。根据风能转换理论和贝茨理论^[26]确定风机功率。

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho S V^3, \tag{11}$$

式中:

P ——轴流风机实际功率,kW;

C_p ——风能利用系数(极限值 0.593);

ρ ——空气密度,kg/m³;

S ——风轴扫风面积,m²;

V ——最小喷动风速,m/s。

为保证物料回收满足使用要求,代入数值计算得轴流风机实际功率为 3 kW。

3.6 回风式空气调节系统

为了二次利用喷动床内排出的热能,降低干燥能耗,该设备采用一次回风空气调节系统,通过回风管将喷动床排风口排出的废气引回到调节机的进气口,与室外新鲜空气按一定比例混合后循环使用,可使进入喷动床内空气的湿度降低到干燥所允许的限度,减小了喷动床进、出口之间的温度变化,从而保证了产品质量。由于喷动床内外空气温差较大,利用温度较高的循环气与低温室外空气混合,可替代或部分替代加热器的作用,节约了一次加热所耗的能量,减少热损失,达到节能减排的目的。该装置将一次回风空气调节系统与物料回收箱组合安装,有效节省了实验室空间。一次回风空气调节系统如图 4 所示。

4 干燥性能评估与分析

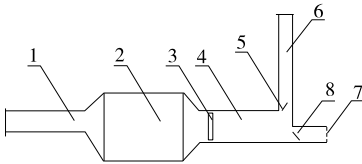
4.1 材料与仪器

4.1.1 材料

新鲜毛豆:要求大小均匀无虫害无破损,洛阳市大张超市。将毛豆去荚后称取 100 g 置于 105 °C 热风干燥箱中 24 h 后达到绝干,测得初始含水率为(69.0±0.2)%。

4.1.2 仪器

电子天平:JA2003N 型,上海佑科仪器仪表有限公司;



1. 通风管 2. 风机 3. 分风板 4. 混合室 5. 回流蝶阀 6. 回风管 7. 百叶窗 8. 进气蝶阀

图 4 一次回风空气调节系统

Figure 4 Primary return air air conditioning system

电热鼓风干燥箱:PH-010(A)型,上海一恒科学仪器有限公司;

多功能成像仪:IRI4010 型,英国北安普敦 IRISYS 公司;

色度计:CR-400 型,日本 Konica Minolta Sensing 公司。

4.2 试验方法

为了对比验证红外联合喷动床干燥对物料干燥均匀性的效果,进行红外联合喷动床干燥和红外干燥两组对比试验,测量指标均以样品含水率达到 10% 时停止干燥,称取 20 kg 新鲜去荚毛豆粒通过进料口放入喷动床中,再从喷动床内随机抽取 5 组毛豆粒进行称重,每组 20 颗,计算其初始平均重量为 11.94 g。打开动力装置,通过变频器调节进气口风速为 20 m/s,打开红外加热系统,设置加热温度为 75 °C 开始干燥,每隔 30 min 迅速取出 20 颗样品进行一次称量,每次测量抽取 5 组毛豆计算其平均值,称量之后样品放回喷动床干燥仓继续干燥。单一红外干燥中,称取 500 g 新鲜去荚后的毛豆粒均匀平铺于物料托盘上,加热温度设置为 75 °C,每隔 30 min 迅速取出物料进行一次测量,所有试验均测量 3 次,最后取平均值。

4.3 评价指标

4.3.1 干燥时间 干燥时间是评价设备性能的重要指标,以喷动床和单一红外干燥仓内的毛豆为目标,记录从开始干燥到停止作业时,其干燥所需的时间。

4.3.2 干燥温度分布 在红外联合喷动床干燥和单一红外干燥过程中,每隔 30 min 随机选择 20 粒样品计算红外喷动床干燥和单独红外干燥的含水量分布均匀性。干燥结束时,将适量样品从干燥室取出,迅速放入靠近干燥装置的玻璃盘中,利用红外热成像仪记录干燥样品表面的加热温度分布。

4.3.3 感官评价与色差分析 为了研究红外联合喷动床干燥对毛豆品质的影响,每次干燥前后,随机选择适量毛豆置于白色瓷盘中进行拍照,然后对图像进行处理和分析,为了避免图像处理中图像质量的变化,光线是恒定的和间接的。将干燥前后的样品切碎、研磨并放入容器中,颜色测量是在色度计上进行的。记录颜色 L^* (亮度)、 a^* (红色) 和 b^* (黄色) 的坐标。色差 (ΔE) 根据坐标通过式(12)计算:

$$\Delta E = \pm \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}, \quad (12)$$

式中:

ΔE ——样品色差值;

ΔL^* ——样品的亮度;

Δa^* ——红色到绿色程度;

Δb^* ——黄色到蓝色程度。

每个样品测量 5 次,并计算平均值,测量前,使用标准白板对设备进行校准。

4.3.4 能耗分析 设备安装了智能电表,用于测量红外联合喷动床干燥设备和单一红外干燥对干燥能耗的影响。以智能电表所记录干燥结束与干燥开始时的读数差作为干燥过程所消耗的电能。

4.4 结果与分析

4.4.1 干燥耗时 按 4.2 试验方法和步骤进行试验,测得在红外联合喷动床干燥与单一红外干燥条件下样品含水率随干燥时间变化的干燥曲线图如图 5 所示。单一红外干燥需要 270 min 才能达到样品所需的含水量,而红外联合喷动床干燥整个过程仅需 160 min,干燥时间缩短了 40.7%。由此可见,喷动床干燥有利于提高单一红外干燥效率,降低干燥时间,加快干燥速率。

4.4.2 干燥温度分布的影响 图 6 显示了不同干燥方法的样品的最终温度分布。与单一红外干燥相比,红外联合喷动床干燥过程中毛豆表面温度相对较低,可能是因为喷动床干燥仓内干湿物料在气流作用下相互渗透,增强了介质间的质热传递效率,并且经过一次回风系统的热空气带走了物料表面一部分热量,提高了物料的散热效果。单一红外干燥中样品表面温度比红外联合喷动床干燥样品表面温度高得多,而且单一红外干燥样品最高点和最低点之间的温度差为 51.7 °C,但在红外联合喷动床干燥中最高点和最低点之间的温度差仅为 36.1 °C,表明红外联合喷动床干燥样品的温差更小,物料表面温度

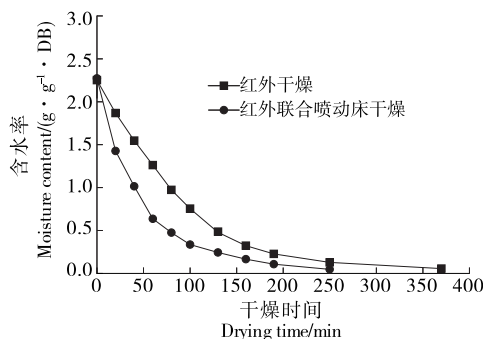


图 5 干燥方法对毛豆干燥特性的影响

Figure 5 The effect of different drying methods on the drying characteristics of edamame

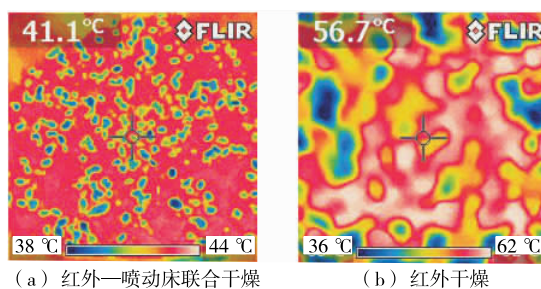


图 6 不同干燥方法干燥的青大豆的热像图

Figure 6 Thermal images of green soybean dried by different drying methods

分布更加均匀,这种现象可能是红外联合喷动床干燥中的喷动床使样品受热更快、更均匀。

4.4.3 感官与色泽 表 2 为红外联合喷动床干燥和单一红外干燥毛豆的品质比较。从形状上看,红外联合喷动床干燥后的毛豆表面较光滑,表皮光滑且呈亮绿色,颜色与新鲜样品差异不大,色泽较好。而单一红外干燥的毛豆粒由于表面温度分布不均匀,物料表面水分不能及时去除,内外温差大,导致豆仁干瘪,表皮皱缩严重,呈枯黄色。在香气方面,红外联合喷动床干燥的毛豆散发出新鲜的豆香味,而单一红外干燥的毛豆则产生“烧焦”的气味,这是因为在干燥后期随着毛豆水分的降低,内部温度分布的不均匀产生的局部过热。说明红外联合喷动床对单一红外干燥产品品质和干燥均匀性有明显改善。

表 3 为红外联合喷动床干燥和单一干燥的毛豆粒色泽的影响。结果表明,单一的红外干燥样品 a^* 值为

表 2 干燥方法对毛豆感官品质的影响

Table 2 Effects of different drying methods on the sensory quality of edamame

干燥方式	外观	色泽	滋味、气味
红外干燥	表皮干瘪,整体皱缩严重	豆皮呈褐绿色,表面暗淡	有焦糊味
红外联合喷动床干燥	表皮光滑,较为完整	颜色变化小,豆皮呈亮绿色	有豆香味

—3.36,新鲜毛豆样品的 a^* 值为—12.16,说明单一红外干燥毛豆的颜色已转为暗红色。红外联合喷动床干燥的 ΔE (13.24)最小值,说明红外联合喷动床干燥毛豆粒与新鲜毛豆粒色差不大。这是因为喷动床内物料的规律流动改善了红外干燥加热不均匀温度过高的不足,从而保证了样品原有的颜色。

表 3 干燥方法对毛豆粒色泽的影响[†]

Table 3 Effects of different drying methods on the color of edamame grains

样品	L^*	a^*	b^*	ΔE
新鲜样品	72.16 ± 0.28^a	-12.16 ± 0.41^a	35.16 ± 0.23^a	—
红外联合喷动床干燥样品	63.41 ± 0.27^a	-7.71 ± 0.15^c	26.44 ± 0.32^c	13.24 ± 0.21^b
红外干燥样品	49.37 ± 0.61^c	-3.36 ± 0.54^d	23.05 ± 0.74^d	27.11 ± 0.72^a

[†] 同一列上标字母不同表示差异显著($P \leq 0.05$)。

4.4.4 能耗 红外联合喷动床干燥设备的能耗量主要来自于动力装置和红外加热系统。对红外联合喷动床干燥设备和单一红外干燥的干燥过程进行能耗统计,结果发现,单一红外干燥消耗用电量 $13.5 \text{ kW} \cdot \text{h}$,红外联合喷动床干燥设备消耗用电量 $9.3 \text{ kW} \cdot \text{h}$,与单一红外干燥过程相比,红外联合喷动床干燥设备节约能耗 31.1%。说明红外联合喷动床干燥设备缩短了干燥时间,降低了干燥能耗。

5 结论

与单一红外干燥设备相比,红外联合喷动床干燥设备能有效缩短干燥时间,提高产品干燥的均匀性,改善毛豆干制品品质。同时,该设备还采用一次回风式空调调节系统,大量反复使用喷动床排出的废气,可以精确和灵敏地调节干燥室内的温度和湿度,节约了加热空气热源,降低了干燥能耗。

该装置结构简单,由于物料在喷动床内与气流高度混合,为了限制物料由出口带出,保证物料干燥均匀性,喷动床主体还可以采用卧式多室结构,以降低床层高度,进一步提高干燥均匀性。

参考文献

[1] BANOUT J, KUCEROVA I V A, MAREK S. Using a double-pass solar drier for jerky drying[J]. Energy Procedia,

2012, 30: 738-744.
[2] 李明娟, 张雅媛, 游向荣, 等. 不同干燥技术对核桃蛋白粉品质特性及微观结构的影响[J/OL]. 食品科学. (2020-06-01)[2020-07-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200601.1439.068>.
[3] 刘巍, 马俊贵, 余成, 等. 我国农产品干燥装备技术与发展趋势[J]. 农业工程, 2016, 6(6): 29-33.
[4] 李笑光. 我国农产品干燥加工技术现状及发展趋势[J]. 农业工程技术(农产品加工业), 2014(2): 16-20.
[5] XU Bao-guo, ZHANG Min, BHANDARI B. Temperature and quality characteristics of infrared radiation-dried kelp at different peak wavelengths[J]. Drying Technology, 2014, 32(4): 437-446.
[6] 周四晴, 段续, 任广跃, 等. 厚度控制对怀山药远红外干燥过程中水分迁移的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(12): 75-81.
[7] ALMEIDA A, FREIREA F B. Transient analysis of pasty material drying in a spouted bed of inert particles[J]. Drying Technology An International Journal, 2010, 28(3): 330-340.
[8] 王敬哲. 气流—喷动床气固两相流动与干燥特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017: 17-19.
[9] 罗磊, 康新艳, 朱文学, 等. 热泵远红外联合干燥金银花的工艺优化及品质控制[J]. 食品科学, 2016, 37(18): 6-12.

(下转第 129 页)

前的小 6~9 dB,且均在 85 dB 以下,说明五次多项式拟合后的凸轮机构设计,从动件运动产生的振动冲击更小,运行更加稳定,符合设计要求。

4 结论

设计了一款 14 头多工位回转式旋盖机,其生产能力可达 14 000 瓶/h,提高了旋盖机的生产效率;采用五次多项式拟合法对凸轮轮廓曲线进行优化,减小了旋盖机运行过程中的噪声和冲击。但设计上仍有不足之处,例如需人工更换旋盖头等零件才可适用其他瓶型的生产,快速调节、更换相应机构以适用多种瓶型是未来改进方向。

参考文献

- [1] 包轩. 我国灌装设备的发展方向[J]. 绿色包装, 2020(4): 88-89.
- [2] 陈润洁, 纪蓉, 曹小红, 等. 液体食品灌装设备技术标准的研究[J]. 包装工程, 2018, 36(2): 51-53.
- [3] 崔岩, 屠凤莲, 赵伟. 四头直线式旋盖机的设计[J]. 包装工程, 2016, 37(7): 96-98, 106.
- [4] 田林红, 田达奇. 旋转型饮品灌装机智能自校正控制[J]. 食品工业, 2019, 40(12): 225-227.
- [5] 张伟安, 王建勤. 全自动回转式旋盖机[J]. 轻工机械, 2002(2): 42-43.
- [6] 孙秀延, 赵大民, 王秀伦. XG-12 全自动回转式旋盖机的设计[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2008(1): 87-89.
- [7] 吴佳, 何雪明, 何楷, 等. 多项式拟合法在旋盖机凸轮曲线设计中的研究与应用[J]. 食品与机械, 2018, 34(6): 75-80, 151.
- [8] 李干尹, 成龙, 蒋德富, 等. 组盖机圆柱凸轮轮廓线的设计与分析[J]. 食品与机械, 2020, 36(1): 131-135.
- [9] 张聪. 自动化食品包装机[M]. 广州: 广东科技出版社, 2003: 160-165.
- [10] 严书华. 一种通用瓶盖理盖器与旋盖机构的设计[J]. 机电技术, 2007(4): 30-32.
- [11] 唐伟强, 周宇英. 旋盖机旋盖头磁耦合离合器的设计探讨[J]. 粮油加工与食品机械, 2000(1): 21-22.
- [12] 刘滨, 李颖, 陈宁. 高速旋盖机主要部件设计研究[J]. 煤炭技术, 2012, 31(10): 18, 21.
- [13] 甘俊杰. PET 瓶旋盖机主驱动系统运动特性的研究及设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2012: 43-58.
- [14] 张菁, 蔡锦达. 基于 ARM 的全自动封口旋盖机控制系统[J]. 包装工程, 2017, 38(5): 13-17.
- [15] 何长青. 圆柱凸轮 CAD/CAM 研究开发及在一次性卫生用品自动生产线中的应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016: 57-60.
- [16] 吴强, 李国富, 林军. 电池包装机凸轮送料机构的稳定性优化[J]. 机械强度, 2020, 42(5): 1 153-1 160.
- [10] JAYATUNGA G K, AMARASINGHE B M W P K. Drying kinetics, quality and moisture diffusivity of spouted bed dried Sri Lankan black pepper[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 263: 38-45.
- [11] 谢小雷, 李侠, 张春晖, 等. 牛肉干中红外—热风组合干燥工艺中水分迁移规律[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 322-330.
- [12] 谢小雷, 张春晖, 贾伟, 等. 连续式中红外—热风组合干燥设备的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 282-289.
- [13] 顾震, 徐刚, 徐建国, 等. 胡萝卜热泵与远红外辐射加热联合干燥工艺研究[J]. 食品科技, 2009, 34(4): 75-78, 84.
- [14] LIU Peng, ARUN S, MIN Zhang, et al. Comparison of three blanching treatments on the color and anthocyanin level of the microwave-assisted spouted bed drying of purple flesh sweet potato[J]. Drying Technology, 2015, 33(1): 66-71.
- [15] 王玉川, 王博, 王义祥, 等. 高丽菜脉冲喷动床—低频微波干燥品质与能耗[J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(12): 1 299-1 305.
- [16] 张秦权, 文怀兴, 袁越锦. 远红外联合低温真空干燥设备研究与设计[J]. 食品与机械, 2013, 29(1): 157-160.
- [17] 徐刚, 顾震, 徐建国, 等. 胡萝卜热泵—远红外联合干燥工艺研究[J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(6): 96-99.
- [18] 高聪. 喷动床内气固两相流的数值模拟[D]. 天津: 河北工业大学, 2008: 24-35.
- [19] 刘文武, 徐庆, 安峰, 等. 喷动床装置的设计研究[J]. 化工装备技术, 2007, 28(6): 11-14.
- [20] JAYATUNGA G K, AMARASINGHE B M. Drying kinetics, quality and moisture diffusivity of spouted bed dried sri lankan black pepper[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 263: 38-45.
- [21] PENG Zheng-biao, DOROODCHI E, LUO Cai-mao, et al. Influence of void fraction calculation on fidelity of CFD-DEM simulation of gas-solid bubbling fluidized beds[J]. Aiche Journal, 2014, 60(6): 2 000-2 018.
- [22] 高扬, 解铁民, 李哲滨, 等. 红外加热技术在食品加工中的应用及研究进展[J]. 食品与机械, 2013, 29(2): 218-222.
- [23] 魏忠彩, 孙传祝, 张丽丽, 等. 红外干燥技术在果蔬和粮食加工中的应用[J]. 食品与机械, 2016, 32(1): 217-220.
- [24] KHIR R, PAN Z, SALIM A, et al. Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(4): 1 126-1 132.
- [25] 汪喜波. 红外辐射与对流联合干燥的理论分析及试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003: 25-29.
- [26] 杨刚, 陈鸣. 一种有效计算风机发电量的新方法[J]. 华东电力, 2008(7): 12-15.

(上接第 124 页)