

DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2021.07.036

过热蒸汽干燥技术研究进展

Research progress of superheated steam drying technology

李少斌 方婷 苏煌杰 刘斌雄

LI Shao-bin FANG Ting SU Huang-jie LIU Bin-xiong

(福建农林大学食品科学学院, 福建 福州 350002)

(College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

摘要:文章从能量效率和产品质量两个方面评述了过热蒸汽干燥设备的研究进展,并论述了流化床干燥机、真空干燥机、旋转干燥机、闪蒸干燥机、冲击干燥机等不同干燥设备用于过热蒸汽干燥系统的发展现状及发展潜力。

关键词:过热蒸汽;常压过热蒸汽干燥;低压过热蒸汽干燥;干燥设备

Abstract: This paper reviews the research progress of different superheated steam drying equipment from two aspects of energy efficiency and product quality. Discussed the development status and potential of the superheated steam drying system in different drying equipment, including the fluidized bed dryer, vacuum dryer, rotary dryer, flash dryer, impact dryer, etc. .

Keywords: superheated steam; atmospheric superheated steam drying; low-pressure superheated steam drying; equipment

过热蒸汽干燥技术是指具有较高焓值的过热蒸汽可以快速地热量传递给被加工的物料,使物料水分快速蒸发。其优点:热效率高,节能效果明显^[1];传热系数高,无传质阻力^[2];有效减少有害物质的二次污染和防止爆炸发生^[3]。过热蒸汽干燥室是一个密封环境,废气排出后会在冷凝器中冷凝,整个过程不会对环境造成影响;其干燥介质为过热蒸汽,干燥时整个干燥室充满过热蒸汽,没有氧气参与,物料不会发生氧化或燃烧反应^[4]。该干燥技术已被广泛应用于电厂^[5]、污泥干燥^[6]、罐头加工^[7]、木材干燥^[8]、食品杀菌^[9]等领域。

目前有关过热蒸汽干燥技术的研究较多,但仅局限

于干燥工艺优化、数学模型建立以及品质分析等方面。文章拟分析不同处理室的过热蒸汽干燥设备的应用进展,概述其设备原理及应用的关键问题,总结其优势,旨在为过热蒸汽设备的进一步研究提供依据。

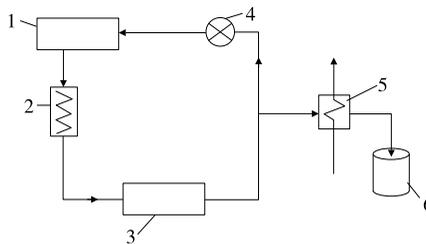
1 过热蒸汽干燥设备

20 世纪 80 年代以来,过热蒸汽技术已被美国等西方国家广泛应用至食品工业^[10]。图 1 为传统过热蒸汽干燥系统示意图,其中尾气回收循环是实现节能环保的关键步骤。根据操作压力的不同,过热蒸汽干燥设备可分为常压、低压以及高压过热蒸汽干燥设备。

1.1 常压过热蒸汽干燥设备

1.1.1 流化床过热蒸汽干燥设备 常压过热蒸汽干燥技术是指干燥环境的压力接近一个标准大气压的干燥技术。目前已在果蔬、农产品、水产品等方面被广泛应用^[11]。肖志锋等^[12]为了提高干燥效率、耗能、物料品质,结合过热蒸汽干燥和流化床干燥的各自优势,研制了卧式过热蒸汽流化床干燥设备(图 2)。

由图 2 可知,整个设备完全封闭,干燥时无需额外通入蒸汽,避免干燥初期过热蒸汽与湿物料接触而出现冷凝现象。该设备需先排空气并维持干燥腔体压力后进行湿物料干燥,干燥室上部的过热蒸汽中混有物料的细颗



1. 蒸汽发生器 2. 加热器 3. 干燥室 4. 风机 5. 热交换器
6. 蒸汽回收器

图 1 过热蒸汽干燥基本操作系统

Figure 1 Superheated steam drying system

基金项目:福建省高校产学研合作项目(编号:2017N5004);福建省科技厅星火计划项目(编号:2015S0075);福州市“十三五”海洋经济创新发展示范城市项目(编号:FZHJ17)

作者简介:李少斌,男,福建农林大学在读硕士研究生。

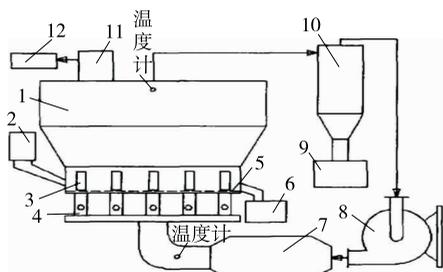
通信作者:方婷(1981—),女,福建农林大学教授,博士生导师,博士。E-mail:fangting930@163.com

收稿日期:2021-03-20

粒,这些细颗粒可以通过旋风分离器重新回收再利用。通过试验结果比较,该设备比传统热空气流化床干燥在干燥速率、耗能、物料品质等方面均有较好的效果。

Cheevitsopon 等^[13]为了最大限度地减少加热时间对谷物中 γ -氨基丁酸含量的影响,提高稻谷的糊化程度,研制了一台过蒸汽流化床设备(见图 3),该设备在闭环中运行。由一个内径为 15 cm、高为 120 cm 的不锈钢圆筒形干燥室、一个 15 kW 的电加热器、7.5 kW 电蒸锅和直径为 7.62 cm 不锈钢管道系统组成。该过热蒸汽干燥稻谷的整精米率高于热风干燥;并且可在短时间内钝化糙米的过氧化物酶,抑制淀粉糊化^[14-15],稻谷的蒸煮和干燥结合成一个单一的阶段,可以减少操作步骤,最大限度减少加热时间对谷物中 γ -氨基丁酸含量的影响。

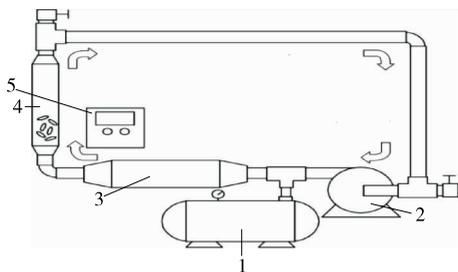
过热蒸汽流化床工作原理是将散状物料置于孔板上,由离心风机输送气体,引起物料颗粒在气体分布板上运动,在气流中呈悬浮状态,产生物料颗粒与气体的混合底层,物料颗粒在此混合底层中与气体充分接触,进行物料与气体之间的热传递与水分传递。该设备的优点为:适用于初始湿度高、加工附加值低的颗粒状物料,如大



1. 流化干燥室 2. 进料口 3. 玻璃窗 4. 蒸汽进管 5. 孔板
6. 出料口 7. 换热器 8. 循环风机 9. 细颗粒储盒 10. 旋风分离器 11. 安全阀 12. 冷凝装置

图 2 卧式过热蒸汽流化床干燥设备示意图^[12]

Figure 2 Schematic diagram of horizontal superheated steam fluidized bed drying equipment



1. 蒸汽发生器 2. 离心风机 3. 电加热器 4. 干燥室 5. 控制面板
6. 冷凝器 7. 真空风机

图 3 过热蒸汽流化床干燥器示意图^[13]

Figure 3 Schematic diagram of superheated steam fluidized bed dryer

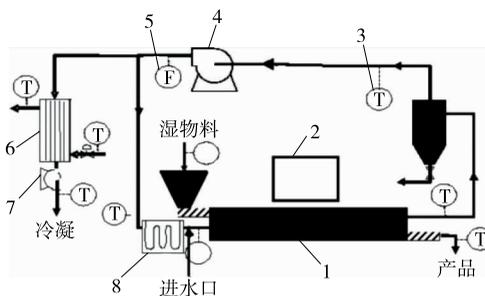
豆^[16]、油菜籽^[17]等;结构简单,检修方便,操作方便,运行平稳;传热速度快,热效率高;设备维护费用低。缺点为:鼓风机能量消耗大;部分物料在干燥过程中可能会直接从进料口飞向出料口,造成物料干燥不均匀;物料被沾污的可能性大,产品质量差。

1.1.2 旋转式过热蒸汽干燥设备 Speckhahn 等^[18]为了解决牛肉在干燥过程中引起的表面硬化,制造了一台中试规模的旋转过热蒸汽干燥器(见图 4),该设备通过插入一个旁路来进行小规模干燥试验,并确定干燥参数,如重量损失、温度和质量流量。试验表明,降低干燥温度和干燥介质(过热蒸汽)的流速,可缩短干燥时间,减少表面硬化现象,使牛肉的品质更好。

过热蒸汽滚筒干燥设备通常用于干燥糊状或浆状的饲料,如甜菜浆^[19]、啤酒糟^[20]等。该设备包括一个在轴承上旋转的干燥滚筒,干燥滚筒内含有刮刀,通过刮刀将达到干燥要求的物料刮下,该滚筒略平行于水平表面,在转动装置的驱动下,按规定的转速转动,使物料可以受热均匀。过热蒸汽滚筒干燥设备的结构比较简单,干燥速度快,热利用率较高,产品的干燥质量稳定,但是其设备投资较高,刮刀易磨损,使用周期短。

1.1.3 冲击式过热蒸汽干燥设备 Borquez 等^[21]为了获得具有高水分去除率和低 ω -3 脂肪酸化学损失的干燥产品,通过射流冲击式过热蒸汽设备(见图 5),将鱼浆置于过热蒸汽温度 135 $^{\circ}\text{C}$,蒸汽流速 0.09 m^3/s 的环境下进行干燥试验,结果表明此设备能够干燥鱼浆,且干燥效果较好,射流冲击式过热蒸汽干燥可以很好地保留鱼浆中的 ω -3 脂肪酸。Moreira 等^[22]以玉米饼和土豆片为试验原料,采用过热蒸汽冲击流干燥的方式生产的玉米饼质量更优,产品表面平整无气孔,色泽鲜亮,营养成分高。

由图 5 可知,该设备由两个不锈钢制成的圆柱腔体串联而成,可以独立运行。设备相对于水平方向成一定角度,并且倾斜角度可以从 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 根据需要进行调整,



1. 旋转干燥箱 2. 控制器 3. 温度表 4. 压力表 5. 控制面板
6. 冷凝器 7. 真空风机 8. 加热管

图 4 旋转式过热蒸汽干燥设备

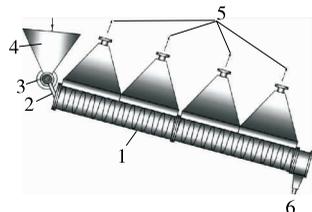
Figure 4 Schematic diagram of rotary superheated steam drying equipment

从而控制物料在干燥室中的停留时间,物料从进料口进入沿干燥室运动至出料口。过热蒸汽沿干燥室切向方向的气槽进入,与物料在干燥室内做螺旋运动(图6)并通过上部纵向气体出口排出。由于流体阻力和重力迫使物料以螺旋运动前进,以此来达到干燥的目的。冲击式(或称喷流式)过热蒸汽干燥设备适用于干燥织物、烟叶、基材的表面涂层及薄片状物料,如大豆残渣^[23]、鱼饼。

综上所述,过热蒸汽干燥虽然可以保留食品中营养成分,但是干燥后物料的质量可能会差于热风干燥的。例如银耳在过热蒸汽干燥后,虽然部分水分蒸发了,但是物料发生熟化,导致后续的水分无法蒸发,最终得不到干银耳。过热蒸汽干燥在食用菌方面的应用具有局限性,因此过热蒸汽干燥对物料的干燥具有一定的针对性。

1.2 低压过热蒸汽干燥设备

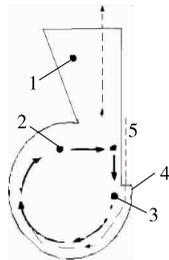
低压过热蒸汽干燥通常是指待干燥物料在比常压低的全密封容器中。一般情况下,采用过热蒸汽干燥时,过热蒸汽的温度超过 100 °C,如果热敏性物料长时间暴露在高温环境中,容易破坏物料中的营养成分,因此对于一些热敏性物料,可以降低干燥环境的压力。低压环境下,饱和蒸汽温度下降,能够防止一些热敏性物料营养成分流失,同时可以降低冷凝结露现象,避免待干燥物料外观不良的情况。低压过热蒸汽干燥的干燥压力一般为9~



1. 干燥室 2. 入口通道 3. 旋转阀 4. 进料槽 5. 气体出口
6. 出料口

图5 冲击式过热蒸汽干燥设备原理图

Figure 5 Schematic diagram of impact superheated steam drying equipment



1. 膨胀室 2. 干燥室 3. 固体颗粒 4. 狭槽 5. 气体入口

图6 单个物料在干燥室中运动的截面图

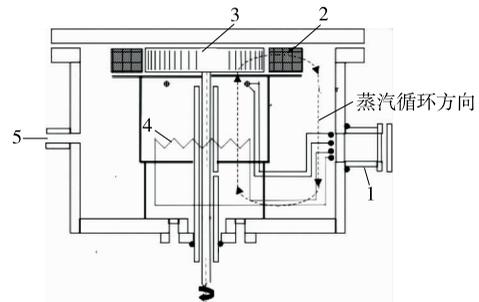
Figure 6 Cross-sectional view of a single material moving in a drying chamber

20 kPa,目前已被应用于芒果^[24]、洋葱片^[25]、芫荽^[26]和胡椒种子^[27]等农产品干燥中。

Barbieri 等^[28]以罗勒为干燥对象,利用低压过热蒸汽干燥与热风干燥进行对比,试验发现低压过热蒸汽干燥技术可以最大程度保留罗勒的香气物质,设计并制作了一台台式低压过热蒸汽干燥设备,其断面图如图7所示,其由圆柱形钢材制成,外部覆盖隔热层,内部有一个由金属丝网制成的环形样品篮用来容纳样品。

如图8所示,低压过热蒸汽干燥设备由连接到电动机的轴驱动的离心风机使过热蒸汽流过样品,设备配有压力传感器,通过数字显示器读取,温度控制在-19.9~99.9 °C,该设备内部有一根输入功率为1300 W的电阻丝用于加热蒸汽。通过真空泵的作用,将蒸汽-香气混合物抽出系统,使其通过由直径为0.08 m,高度为0.30 m的玻璃圆柱体制成的冷凝器,使大部分水蒸气分离,剩余的气体被输送到直径为0.03 m,高度为0.40 m的玻璃圆柱体制成的冷阱中,该冷阱浸没在15 °C的乙二醇-水混合物中,几乎所有化合物均能在其中冷凝。

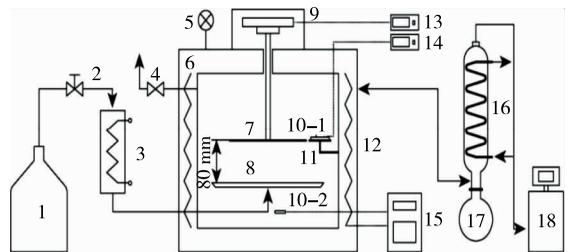
李占勇等^[29]采用低压过热蒸汽干燥设备干燥青萝卜



1. 连接管 2. 样品篮 3. 离心风机 4. 加热电阻丝 5. 真空泵

图7 干燥室横断面图

Figure 7 Cross-sectional view of drying chamber



1. 蒸汽发生器 2. 蒸汽调节阀 3. 蒸汽过热器 4. 放空阀 5. 压力表 6. 电加热器 7. 物料托盘#1 8. 蒸汽分布器 9. 称重传感器 10. K型热电偶 11. 物料托盘#2 12. 干燥箱 13. 质量采集器 14. 温度采集器 15. PID控制器 16. 冷凝器 17. 冷凝液收集瓶 18. 真空泵

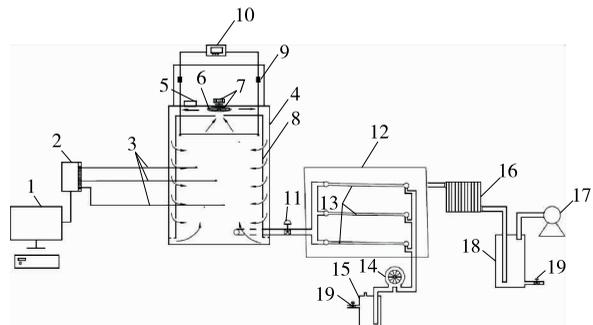
图8 低压过热蒸汽干燥系统示意图

Figure 8 Schematic diagram of the low pressure superheated steam drying system

汽,并作为干燥介质去除物料中剩余水分。能量消耗方面,干燥相同质量的海带,物源性过热蒸汽联合余热回收节能干燥系统的总能耗比热风干燥节省了44.29%。Chryat等^[40-41]研究表明,联合干燥可以降低干燥时间,提高能量效率和物料品质。

苏煌杰等^[42]将两种完全不同干燥工艺的优点融合在一起,制造了过热蒸汽与真空联合干燥一体机(见图12)。以竹笋为例进行经济性分析,如表1所示,过热蒸汽与真空联合干燥的干燥时间和每蒸发1 kg水所需能量均比热风干燥节省1/2以上,实现了干燥时间短、效率高、节能减排的目的。

综上,将过热蒸汽干燥与其他技术进行组合干燥能克服单一干燥方式所存在的弊端,提高产品质量,同时降低能耗。在性能评估和能量回收的基础上,对几种干燥技术进行对比(表2),发现过热蒸汽干燥能更有效地回收余热。值得注意的是,在技术工作中,干燥机和干燥过程的能量性能可以用各种指标来表征,包括体积蒸发率、蒸发效率、蒸汽消耗、单位热量消耗、能量效率和热效率。由于这些不一致的性能参数,基于各种类型干燥器的能耗和能效的比较分析是复杂的。通过将过热蒸汽与现有其他干燥技术的合理联合干燥可以实现大部分产品的干燥要求。



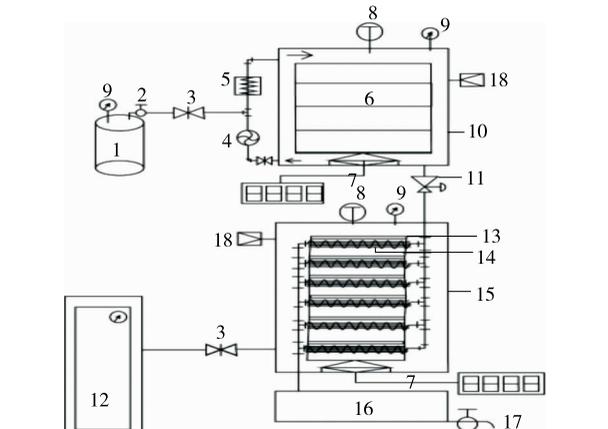
1. 计算机 2. 温度采集器 3. 热电偶 4. 过热蒸汽干燥箱体 5. 控制器 6. 加热器 7. 涡旋离心风机 8. 导流板 9. S型称重传感器 10. 称重数显表 11. 排气阀 12. 真空干燥箱体 13. 紧凑型换热器 14. 涡旋式离心风机 15. 集水器 16. 散热器 17. 真空泵 18. 集水器 19. 排水阀

图11 物源性过热蒸汽联合余热回收节能干燥示意图^[39]
Figure 11 Schematic diagram of energy saving drying by material source superheated steam combined with waste heat recovery

2 过热蒸汽干燥过程中的数学模型与传热传质

过热蒸汽干燥过程的数学模型可以分为两种:①利用数理统计方法,建立热量、质量和能量传递的回归模型;②利用相流理论和计算流体力学(CFD)方法,模拟干燥室内相流动和温度、湿度变化^[47]。干燥数学模型的研究能够为优化干燥工艺参数、设计改进干燥设备、降低干燥能耗提供理论依据。

Taechapiroj等^[48]建立了过热蒸汽流化床干燥稻谷的数学模型,用于预测稻谷的含水率和温度。Hampel等^[49]建立了描述过热蒸汽干燥过程中米粒内部传热传质的瞬态宏观模型,该模型的控制方程是基于体积平均法导出的,为了提供模型输入参数,测量糙米颗粒的某些热物理性质。Bourassa等^[50]对酒糟的干燥特性进行研究,根据Fick扩散定律,建立了酒糟有限圆柱体模型。这些酒糟用120℃的过热蒸汽在水平和垂直两个方向上干燥,用Page方程模拟的干燥特性表明不同取向的干燥特性存在显著差异($P < 0.05$)。Kumbhar等^[51-52]研究表



1. 蒸汽发生器 2. 截止阀 3. 闸阀 4. 风机 5. 加热器 6. 载物网盘 7. 承载传感器 8. 温度控制器 9. 压力表(或真空度表) 10. 过热蒸汽干燥箱 11. 压力调节阀 12. 真空泵 13. 载物盘 14. 散热器 15. 真空干燥箱 16. 冷凝水收集器 17. 放水龙头 18. 减压阀

图12 过热蒸汽联合真空干燥示意图^[42]
Figure 12 Schematic diagram of superheated steam combined with vacuum drying

表1 过热蒸汽与真空联合干燥与热风干燥能耗对比表

Table 1 Energy consumption comparison of superheated steam and vacuum combined drying and hot air drying

干燥方式	干燥时间/ h	除去水分/ g	耗电/ (kW·h)	蒸发1 kg水所 消耗能量/kJ
过热蒸汽与真空联合干燥	3.5	1 859.6	2.16	4 181.5
热风干燥	8.0	1 862.8	4.57	8 831.0

表 2 不同过热蒸汽干燥设备的比较

Table 2 Comparison of different superheated steam drying equipment

干燥设备	适用范围	适用物料	优势	缺陷
传统过热蒸汽干燥	实验室中食品的干燥	虾 ^[43] 、牛肉 ^[44] 、红烧肉 ^[45] 等	回收尾气,节能	不能连续化生产
流化床过热蒸汽干燥	湿度较高农产品颗粒	稻谷、泥、煤等	电耗较低,成本低	被沾污的可能性大,产品质量差
旋转式过热蒸汽干燥	糊状或浆状食品	饲料、啤酒糟等	干燥速度快,热利用率高,可以提高食品的质量	设备投资较高,在食品表面硬化的问题还待解决
闪蒸过热蒸汽干燥	细小颗粒状食品	鱼粉	可以快速干燥	同时收集到湿物料和干物料
冲击式过热蒸汽干燥	薄片物料、浆状食品	土豆片、鱼浆、玉米片等	适合于干燥湿基含水率低于 50% 的固体小颗粒物料	设备操作繁琐
低压过热蒸汽干燥	热敏性的食品	海参 ^[46] 、芒果等	干燥热敏性食品,可以保持食品质量	设备投资大,适合干燥附加值较高的食品
高压过热蒸汽干燥	化工类物料	糖、纸浆等	传热系数高	设备投资比常压和低压过热蒸汽多,不适用热敏性高的食品
联合干燥	高含水量的产品	海带、竹笋等	回收尾气,能量利用率高	设备投资较大

明,Page 模型比较适合于描述过热蒸汽干燥过程。

值得注意的是,对过热蒸汽为干燥介质在数学模型和试验工作中的研究较少。由于干燥所用设备、干燥条件、物料物理特性存在较大差异,在实际应用时,各模型难以推广应用。在绝大多数情况下,需要根据实际需要,对数学模型进行相应的调整。

3 前景与展望

目前,过热蒸汽干燥技术已被测试于各种类型的干燥器中,如流化床、旋转干燥器、闪蒸和冲击干燥器。过热蒸汽干燥系统的发展已有较长时间,但其产业化仅限于少数几种产品,其主要原因是由于缺乏实验室研究工作,对蒸汽干燥动力学的理解较差。流化床、旋转和冲击式干燥机已成功应用于稻谷、种子、食品等少数产品的过热蒸汽干燥测试中。这些烘干机(除旋转烘干机外)是连续运转的,可以蒸发掉大量的水,但是这些烘干机还未进行工业化,需进一步研究以证明其可行性。

中国的过热蒸汽干燥设备仍处于实验室研究阶段,主要原因有:① 设备要求高,维护成本高;② 不适宜热敏性物料干燥;③ 尾气的回收转化利用率低。由于干燥能耗占总能耗的比例逐年增加,因此,发展高效、节能的干燥设备具有经济效益。

参考文献

[1] ROMDHANA H, BONAZZI C, ESTEBAN-DECLOUX M. Superheated steam drying: An overview of pilot and industrial dryers with a focus on energy efficiency[J]. *Drying Technology*, 2015, 33(10): 1 255-1 274.

[2] SEHRAWAT R, NEMA P K, KAUR B P. Effect of superheated steam drying on properties of foodstuffs and kinetic modeling[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2016, 34: 285-301.

[3] LI Jie, LIANG Qian-Chao, BENNAMOUN L. Superheated steam drying: Design aspects, energetic performances, and mathematical modeling[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 60: 1 562-1 583.

[4] 朱建锡. 食品干燥新技术[J]. *新农村*, 2019(4): 35. ZHU Jian-xi. New technology of food drying[J]. *New Countryside*, 2019(4): 35.

[5] 李书兵, 庾保华, 乔长虎, 等. 饱和蒸汽与过热蒸汽的性质及应用[J]. *燃料与化工*, 2018, 49(1): 59-61. LI Shu-bing, TUO Bao-hua, QIAO Chang-hu, et al. Properties and applications of saturated steam and superheated steam[J]. *Fuel and Chemical Industry*, 2018, 49(1): 59-61.

[6] 张绪坤, 温祥东, 罗俊, 等. 污泥过热蒸汽干燥工艺优化[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(10): 241-248. ZHANG Xu-kun, WEN Xiang-dong, LUO Jun, et al. Optimization of superheated steam drying process for sludge[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2015, 31(10): 241-248.

[7] 郭红, 毛毛, 衣美艳. 过热蒸汽干燥在鲱鱼罐头加工中的应用研究[J]. *农产品加工*, 2018(13): 4-7. GUO Hong, MAO Mao, YI Mei-yan. Study on the application of superheated steam drying in the processing of herring can[J]. *Processing of Agricultural Products*, 2018(13): 4-7.

[8] 刘颖, 李贤军, 郝晓峰. 杉木常压过热蒸汽干燥工艺研究[J]. *林产工业*, 2020, 57(11): 4-9. LIU Ying, LI Xian-jun, HAO Xiao-feng. Study on atmospheric su-

- perheated steam drying technology of Chinese fir[J]. *Forestry Industry*, 2020, 57(11): 4-9.
- [9] BAN C, LEE D H, JO Y, et al. Use of superheated steam to inactivate *Salmonella enterica* serovars Typhimurium and Enteritidis contamination on black peppercorns, pecans, and almonds[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 222: 284-291.
- [10] 潘永康, 王喜忠, 刘相东. 现代干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 15.
- PAN Yong-kang, WANG Xi-zhong, LIU Xiang-dong. *Modern drying technology*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 15.
- [11] ALFY A, KIRAN B V, JEEVITHA G C, et al. Recent developments in superheated steam processing of foods: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2016, 56(13): 2 191-2 208.
- [12] 肖志锋, 蔡亚军, 杜克镛, 等. 过热蒸汽流化床干燥装置[J]. *干燥技术与设备*, 2005(3): 126-128.
- XIAO Zhi-feng, CAI Ya-jun, DU Ke-yong, et al. Superheated steam fluidized bed dryer[J]. *Drying Technology and Equipment*, 2005(3): 126-128.
- [13] CHEEVITSOPON E, NOOMHORM A. Effects of superheated steam fluidized bed drying on the quality of parboiled germinated brown rice[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2015, 39(4): 349-356.
- [14] WU Jian-yong, CHEN Jun, LIU Wei, et al. Selective peroxidase inactivation of lightly milled rice by superheated steam[J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 60: 623-630.
- [15] WU Jian-yong, MCCLEMENTS D J, CHEN Jun, et al. Improvement in storage stability of lightly milled rice using superheated steam processing[J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 71: 130-137.
- [16] SOMKIAT P, PAVEENA P, SOMCHART S. Heating process of soybean using hot-air and superheated-steam fluidized-bed dryers[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2005, 39(7): 770-778.
- [17] 宫英振, 牛海霞, 肖志锋, 等. 油菜籽过热蒸汽流化床常压干燥过程的数学模拟[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(4): 351-356, 387.
- GONG Ying-zhen, NIU Hai-xia, XIAO Zhi-feng, et al. Mathematical simulation of drying process of rapeseed in superheated steam fluidized bed under atmospheric pressure[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2010, 26(4): 351-356, 387.
- [18] SPECKHAHN A, SRZEDNICKI G, DESAI D K. Drying of beef in superheated steam[J]. *Drying Technology*, 2010, 28(9): 1 072-1 082.
- [19] CHRYAT Y, ESTEBAN-DECLoux M, LABARDE C, et al. A concept and industrial testing of a superheated steam rotary dryer demonstrator: Cocurrent-triple pass design[J]. *Drying Technology*, 2019, 37(4): 468-474.
- [20] STROEM L K, DESAI D K, HOADLEY A F A. Superheated steam drying of Brewer's spent grain in a rotary drum[J]. *Advanced Powder Technology*, 2009, 20(3): 240-244.
- [21] BORQUEZ R M, CANALES E R, QUEZADA H R. Drying of fish press-cake with superheated steam in a pilot plant impingement system[J]. *Drying Technology*, 2008, 26: 290-298.
- [22] MOREIRA R G. Impingement drying of foods using hot air and superheated steam [J]. *Journal of For Engineering*, 2001(49): 291-295.
- [23] CHOICARONE K, DEVAHASTIN S, SOPONRONNARIT S. Comparative evaluation of performance and energy consumption of hot air and superheated steam impinging stream dryers for high-moisture particulate materials[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(16): 3 444-3 452.
- [24] MALAIKRITSANACHALEE P, CHOOSRI W, CHOOSRI T. Study on intermittent low-pressure superheated steam drying: Effect on drying kinetics and quality changes in ripe mangoes[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(9): 1-13.
- [25] SEHRAWAT R, NEMA P K. Low pressure superheated steam drying of onion slices: kinetics and quality comparison with vacuum and hot air drying in an advanced drying unit[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 55(10): 4 311-4 320.
- [26] KOZANOGLU B, SÁNCHEZ-HUERTA Á, GUERRERO-BELTRÁN J A, et al. Drying characteristics of coriander seed particles in a reduced pressure superheated steam fluidized bed[J]. *Chemical Engineering Communications*, 2016, 203(9): 1 227-1 233.
- [27] KOZANOGLU B, VAZQUEZ A C, CHANES J W, et al. Drying of seeds in a superheated steam vacuum fluidized bed[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 75(3): 383-387.
- [28] BARBIERI S, ELUSTONDO M, URBICAIN M. Retention of aroma compounds in basil dried with low pressure superheated steam[J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 65: 109-115.
- [29] 李占勇, 刘建波, 徐庆, 等. 低压过热蒸汽干燥青萝卜片的逆转点温度研究[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(1): 279-286.
- LI Zhan-yong, LIU Jian-bo, XU Qing, et al. Study on reverse point temperature of low pressure superheated steam drying of green radish slices[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2018, 34(1): 279-286.
- [30] ROMDHANA H, BONAZZI C, ESTEBAN-DECLoux M. Superheated steam drying: An overview of pilot and industrial dryers with a focus on energy efficiency[J]. *Drying Technology*, 2015, 33(10): 1 255-1 274.
- [31] URBANIEC K, MALCZEWSKI J. Experimental investigations of beet pulp drying in superheated steam under pressure[J]. *Drying Technology*, 1997, 15(6/7/8): 2 004-2 013.
- [32] JENSEN A S. Industrial experience in pressurized steam drying of beet pulp, sewage sludge and wood chips[J]. *Drying Technology*, 1995, 13(5/6/7): 1 377-1 393.
- [33] BLASCO R, ALVAREZ P I. Flash drying of fish meals with super-

- heated steam: Isothermal process[J]. *Drying Technology*, 1999, 17: 775-790.
- [34] PAKOWSKI Z, DRUZDZEL A, DRWIEGA J. Validation of a model of an expanding superheated steam flash dryer for cut tobacco based on processing data[J]. *Drying Technology*, 2004, 22 (1/2): 45-57.
- [35] 罗章秀. 鲍鱼过热蒸汽与低温联合干燥工艺及其产品特性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013: 24-33.
LUO Zhang-xiu. Study on the combined drying process of superheated steam and low temperature for abalone and its product characteristics[D]. Fuzhou: Fujian agriculture and Forestry University, 2013: 24-33.
- [36] 黄小丽, 高明苏, 张宝善, 等. 过热蒸汽—热风联合干燥制备马铃薯颗粒全粉[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(19): 152-157, 163.
HUANG Xiao-li, GAO Ming-su, ZHANG Bao-shan, et al. Preparation of potato granules by combined drying of superheated steam and hot air[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2019, 40 (19): 152-157, 163.
- [37] NIMMOL C, DEVAHASTIN S, SWASDISEVI T, et al. Drying of banana slices using combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 81: 624-633.
- [38] 孟婷婷. 过热蒸汽联合红外光波烤制羊腿工艺参数优化研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2017: 23-39.
MENG Ting-ting. Study on the optimization of technological parameters of roasted leg of lamb by superheated steam combined with infrared light wave[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2017: 23-39.
- [39] 贾真. 物源性过热蒸汽联合余热回收节能干燥系统设计与试验[D]. 福州: 福建农林大学, 2019: 127-138.
JIA Zhen. Design and experiment of energy saving drying system with material source superheated steam combined with waste heat recovery[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019: 127-138.
- [40] CHRYAT Y, ROMDHANA H, ESTEBAN M D. Reducing energy requirement for drying of beet-pulp: Simulation of energy integration between superheated steam and air drying systems[J]. *Taylor & Francis*, 2017, 35(7): 838-848.
- [41] PARK Y, HAN Y, PARK J, et al. Evaluation of the energy efficiency of combined drying and heat treatment by superheated steam[J]. 2017, 35(12): 1 460-1 467.
- [42] 苏煌杰, 刘明鑫, 刘斌雄, 等. 响应面法优化竹笋过热蒸汽与真空联合干燥工艺[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(5): 182-187.
SU Huang-jie, LIU Ming-xin, LIU Bin-xiong, et al. Response surface method to optimize the technology of bamboo shoot superheated steam vacuum combined drying[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2020, 41(5): 182-187.
- [43] 员冬玲, 耿文广, 杜锐, 等. 南美白对虾过热蒸汽干燥特性及干燥数学模型[J]. *食品科学*, 2020, 41(3): 62-67.
YUAN Dong-ling, GENG Wen-guang, DU Rui, et al. Characteristics and mathematical model of superheated steam drying of *Penaeus vannamei*[J]. *Food Science*, 2020, 41(3): 62-67.
- [44] 刘斌雄, 李长城, 陈锦权, 等. 牛肉过热蒸汽干燥特性及薄层干燥动力学研究[J]. *食品工业*, 2018, 39(12): 36-40.
LIU Bin-xiong, LI Chang-cheng, CHEN Jin-quan, et al. Study on the drying characteristics and thin layer drying kinetics of beef superheated steam[J]. *Food Industry*, 2018, 39(12): 36-40.
- [45] 尹莉丽, 王庭欣, 张良, 等. 过热蒸汽加工红烧肉的工艺研究[J]. *食品科技*, 2017, 42(10): 122-128.
YIN Li-li, WANG Ting-xin, ZHANG Liang, et al. Study on the process of processing red braised meat by superheated steam[J]. *Food Technology*, 2017, 42 (10): 122-128.
- [46] 赵火英, 袁陆峰. 海参过热蒸汽真空干燥装置的设计与试验[J]. *食品与机械*, 2012, 28(6): 190-192.
ZHAO Huo-ying, YUAN Lu-feng. Design and test of the vacuum drying device for sea cucumber superheated steam[J]. *Food and Machinery*, 2012, 28(6): 190-192.
- [47] 文雪英, 周家华. 食品过热蒸汽干燥技术[J]. *食品工业科技*, 2009, 30(10): 370-372, 375.
WEN Xue-ying, ZHOU Jia-hua. Food superheated steam drying technology[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2009, 30 (10): 370-372, 375.
- [48] TAECHAPAIROJ C, PRACHAYAWARAKORN S, SOPONRONNARIT S. Modelling of parboiled rice in superheated-steam fluidized bed[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 76(3): 411-419.
- [49] HAMPEL N, LE K H, KHARAGHANI A, et al. Continuous modeling of superheated steam drying of single rice grains[J]. *Drying Technology*, 2018, 37(12): 1 583-1 596.
- [50] BOURASSA J, RAMACHANDRANA R, PUTHUKULANGARA P J, et al. Drying characteristics and moisture diffusivity of distillers' spent grains dried in superheated steam[J]. *Drying Technology*, 2015, 33: 2 012-2 018.
- [51] SHRIVASTAV S, KUMBHAR B K. Drying kinetics and ANN modeling of paneer at low pressure superheated steam[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2011, 48(5): 577-583.
- [52] METHAKHUP S, CHIEWCHAN N, DEVAHASTIN S. Effects of drying methods and conditions on drying kinetics and quality of Indian gooseberry flake[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2005, 38: 579-587.