

基于多热泵系统组合的冷热均衡干燥机设计与试验

曾小辉^{1,2,3}, 吴耀森^{1,2,3}, 李浩权^{1,2,3}, 龚丽^{1,2,3}, 龙成树^{1,2,3}

(1. 广东弘科农业机械研究开发有限公司, 广东 广州 510555; 2. 广东省现代农业装备研究所, 广东 广州 510630; 3. 农业农村部华南现代农业智能装备重点实验室, 广东 广州 510630)

摘要: 针对农产品干燥加工过程冷热量需求差异性大的问题, 提出了双效热泵系统、三效热泵系统定比耦合构建冷热均衡系统的思路, 定量核算并选型确定了热泵系统的主要零部件, 设计了双效与三效机组比值为3:1多热泵系统组合的冷热均衡干燥机控制逻辑, 与企业联合研制了一拖多冷热均衡干燥机, 该机批次可处理腊肠原料12 000 kg。以“三七”广式腊肠为试验物料进行了测试, 数据显示冷热均衡干燥机平均温度控制精度为-2.75%~1.65%, 平均相对湿度控制精度为-3.92%~1.85%, 干燥不均匀度为1%, 抽检试验批次产品的感官性质合格, 平均水分为15.76%, 亚硝酸盐含量和过氧化值远小于国标限定值, 整体品质达到特级腊肠要求; 本机亦适用于果蔬、肉制品及水产鱼制品的批次干燥加工。

关键词: 热泵; 冷热均衡; 一拖多; 干燥机

中图分类号: TS213.2; S226.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-2154 (2022) 04-0056-07

0 引言

我国是农业大国, 据统计2020年我国主要农产品生产总量约66 949.2万t, 水产品6 549.2万t^[1], 但我国农产品加工量和加工水平与世界发达国家相比还存在较大差距, 发达国家农产品加工程度达到80%以上, 而我国只有45%, 其中二次以上深加工只有20%^[2]。干燥是农产品加工的重要方式, 且是能源消耗的大工序^[3], 据统计, 大多数发达国家干燥能耗达到工业能耗的7%~15%^[4-5]。大批量农产品烘干按热源分主要有煤、天然气、油、柴、生物质等^[6], 近年来国家大力倡导绿色、协调发展, 水源或者空气源热泵干燥颇受人们关注。

事实上, 除热泵干燥以外, 上述燃烧式热源烘干主要采用排湿的方式, 即将大量高温高湿空气排至环境, 这不仅造成了能源的浪费, 而且也造成对环境的热污染。热泵干燥的主要热能来源于水(或者空气)中, 热能廉价, 较传统干燥可节约30%或

更多^[7]。热泵干燥的优势不仅在于节能, 而且有效地将冷、热进行了循环利用, 其冷端为蒸发器主要起除湿作用, 热端为冷凝器主要起升温作用, 因此, 热泵干燥机应用于某些农产品物料中几乎能实现全封闭干燥^[8-9]。然而, 大量农产品干燥过程所需冷热量与热泵干燥机制取的冷热量并不能完全匹配。例如一些农产品热泵干燥前期水分大量蒸发, 而冷量不足以满足除湿, 此时只能采用排湿风机排出湿热; 而干燥后期由于物料水分减少, 又会有大量冷量剩余。

因此, 无论采用天然气、矿石燃料燃烧等排湿烘干或热泵干燥, 都较难满足农产品烘干过程中冷、热的均衡需求。针对现有技术存在的问题, 本文基于冷热量均衡控制方法, 开展多热泵系统联合的制冷热系统设计, 研发冷热量通风换热关键部件, 形成冷热均衡的热泵干燥机; 选取腊肠为对象, 开展干燥工艺试验研究, 以更好地满足农产品烘干过程中的冷热量均衡需求。

收稿日期: 2022-03-18

基金项目: 国家重点研发计划课题(2019YFD0901803); 广东省重点领域研发计划项目(粤财农〔2021〕170号); 广东省乡村振兴战略专项项目(2022KJ101)

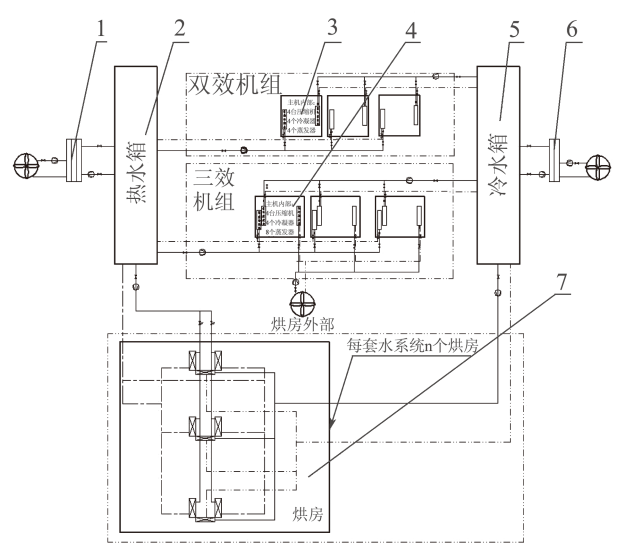
作者简介: 曾小辉(1992—), 男, 助理工程师, 主要从事农产品干燥加工技术及装备应用研究。E-mail: 306484460@qq.com

通讯作者: 龙成树(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事农产品加工技术及装备应用研究。E-mail: 814117567@qq.com

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

本文围绕农产品干燥过程冷热量均衡供给的目标，设计了多热泵系统联合的冷热均衡干燥机，主要包括图 1 所示的 7 大部分：其中双效机组由若干热泵冷热水子系统组成，各子系统制取冷热时相互独立，以水为载冷、热介质置换出能量，故双效热泵机组主要用于制取冷、热水，1 份电能可制取 3 份冷量和 4 份热量；三效热泵机组，具备双效热泵机组的功能，同时在双效热泵机组的基础上增加了散热系统，用于单独补充均衡系统所需的冷量。双效机组和三效机组制取的冷热水供给烘房组，烘房即用于农产品批次干燥的干燥室。1 个多热泵系统组合的冷热均衡干燥机可配置至少 2 个以上的干燥烘房，此种一拖多的设备应用模式特别适用于大中型肉制品加工企业，可实现冷热量的合理分配，同时减少了设备先期总投入成本。



1. 散热系统；2. 蓄热热水箱；3. 双效热泵机组；4. 三效热泵机组；5. 蓄冷冷水箱；6. 散冷系统；7. 干燥烘房组
图 1 多热泵系统组合的冷热均衡干燥机系统图

1.2 烘房的工作原理

多热泵系统组合的冷热均衡干燥机主要分为安装屋面（或者生产车间以外）的多热泵组合制冷热水系统和生产车间内多个单元干燥烘房，二者之间通过冷热水路连通。由图 2 中生产车间农产品干燥烘房即为其中 1 个单元。物料干燥前先启动制冷热水系统，储备一定量的冷水和热水（例如：设定热水温度为 63℃，冷水温度为 15℃）；待烘干物料进入

干燥烘房，用户只需一键启动烘干工艺，冷热水在水泵的驱动作用下分别进入干燥烘房的加热器和除湿器内，干燥箱内空气介质在风机驱动下穿过加热器和除湿器被升温 and 除湿，而后经过物料区与湿物料进行热质交换。此外，当干燥烘房内湿度大于设定值时将往烘房外排湿，最终达到干燥物料的目的。

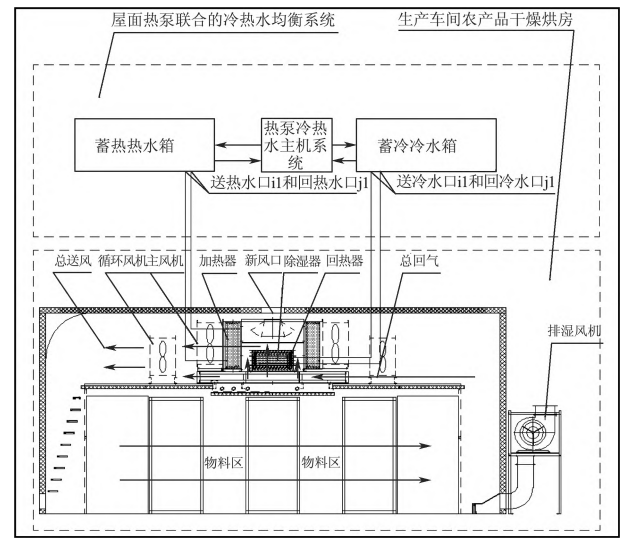


图 2 冷热均衡供应的干燥烘房结构示意图

在大中型农产品加工企业相同产能需求的前提下，购置多热泵组合的均衡干燥机（一拖多）与多台单机烘干设备比较的优势：①相较于单台单机烘干设备其供冷热量更充足，保障烘干产品的品质；②由于物料烘干过程冷热量需求不均衡，合理安排进入干燥烘房的时间可实现错峰干燥，充分利用好冷量和热量，故一拖多的干燥机总装机容量小于多台单机的总功率，总投入成本减少，干燥能耗降低。因此，研制设备对大中型企业有节本、增效和保质的作用，且可减少尾气排放，对环保亦有重要意义。

2 冷热均衡热泵系统设计

2.1 热泵系统设计

热泵系统主要由压缩机、蒸发器、冷凝器和制冷配件等组成。本文以批次烘焙 3 000 kg 原料广式腊肠为设计基准，加工周期约为 42 h，出成率约为 50%，烘烤温度为 45 ~ 58℃（广东某肉食加工厂提供数据）。因此，针对单个干燥烘房小时平均去水量为 35.72 kg/h，而广式腊肠烘干前期 12 h 去水量约为整个干燥过程去水量的 65%，故前 12 h 平均去水量约为 81.25 kg/h，为确保广式腊味的烘干品质取最大

去水量为平均去水量的 1.5 倍, 则干燥烘房的小时最大去水能力为 121.88 kg/h。去水能耗则根据某广式腊味烘焙厂家提供数据, 热泵干燥广式腊肠的去湿能耗为 4.0 MJ/(kg 水)。结合上述数据进行热泵系统主要部件选型设计如下。

2.1.1 压缩机选择

由烘烤温度及物料去湿能耗需求可知, 压缩机制热功率不小于 135.42 kW, 选择丹佛斯 SZ148 型涡旋压缩机, 通过查阅压缩机工况文献可知, 蒸发温度为 5℃, 冷凝温度为 70℃时, 其制热功率为 40.1 kW, 制冷功率为 25.09 kW, 故选择 4 台 SZ148 型压缩机。

2.1.2 蒸发器和冷凝器的选择

由于采用水为换热、载冷介质, 故两器的结构形式为干式壳管式, 壳管换热系数 k 取 1.2 kW/(m²·℃), 进出口水温 5℃。干式壳管换热器面积计算如公式 (1) 所示。

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta t_m \quad (1)$$

式中:

Q ——制热量 (或者制冷量), kW;

A ——换热面积, m²;

Δt_m ——对数传热温差, ℃。

$$\Delta t_m = \frac{t_1 - t_2}{\ln \left| \frac{t - t_1}{t - t_2} \right|} \quad (2)$$

式中:

t_1 ——换热介质进入温度, ℃;

t_2 ——换热介质换热后出来温度, ℃;

t ——蒸发温度 (或者冷凝温度), ℃。

结合以上工况参数、制热功率和制冷功率和公式 (1) 和 (2) 计算, 得到单个系统的蒸发器和冷凝器面积分别约为 2.9、4.7 m²。

综上, 压缩机、蒸发器和冷凝器型式、规格型号等技术参数确定后, 膨胀阀、干燥过滤器、电磁阀、四通阀等可依照制冷功率、管径等选择对应型号。因此, 双效热泵主机与三效热泵主机主要通过联结以上制冷元器件形成制冷系统, 其中三效热泵主机为双冷凝器系统, 其中 1 个冷凝器外接散热冷却塔, 以实现单独制冷。

2.2 冷热均衡控制系统设计

由图 3 可知, 冷热均衡控制系统主要包括冷热

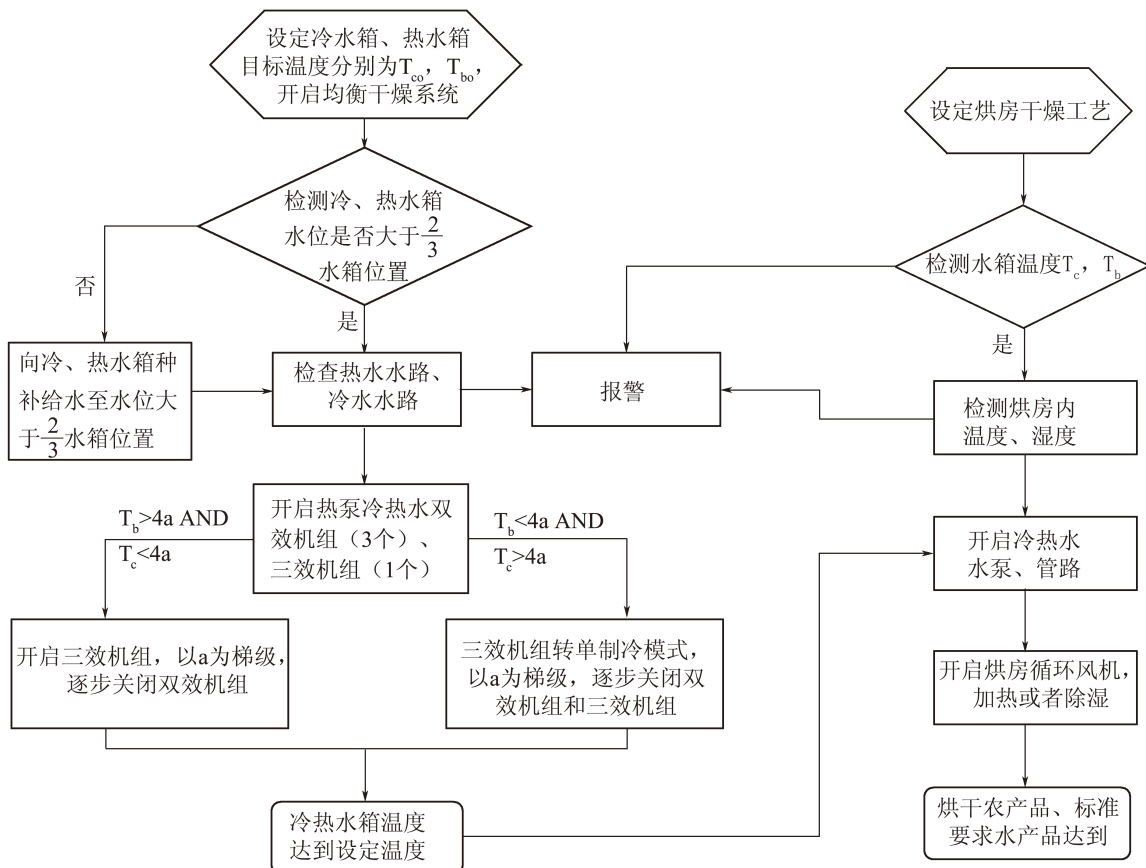


图 3 冷热均衡控制系统控制流程图

水制取控制系统和干燥烘房冷热水供应系统2大部分。冷热水制取控制主要包括控制热泵双效机组、三效机组、散热系统、散冷系统、制冷水泵、制热水泵等零部件，该系统根据用户设定热水温度、冷水温度驱动系统进行冷热水的制取，其中率先启动冷热水双效机组、运行一定时间后再启动三效机组中冷热同时制取模式，当热水达到设定值而冷水高于设定温度则启动三效系统单独制冷水模式。

冷热水供应系统主要包括供冷热水水泵、电磁阀、加热换热装置、除湿换冷装置、风机、烘房库体、风道、排湿等。当烘房干燥工艺设定完成后，一键启动烘干模式，烘房内温湿度探头实时采集数据，控制系统通过比对干燥工艺各阶段设定温、湿度值与实时温、湿度值，当达到预设指令条件，则启动热水泵、冷水泵按需向干燥烘房内输送热量和冷量。

制冷热水系统与供冷热水系统之间主要依据水箱冷热水温度而联动，若干燥过程热量需求增多，随着水箱热水温度的降低至设定值 - 偏差值，制冷热水系统将自动启动双效机组进行热量补给，同样冷水温度升高超过设定值 + 偏差值也会有相应降温动作。

2.3 均衡系统内烘干设备运行应用

实际上，1个制冷热水系统可以供应多个供冷热水系统，这样不仅可以减少水箱的数量、节省场地，甚至可以一定程度减少平均每个供冷水系统的匹数，达到高效利用冷热量的目的。采用热泵系统制取冷热水，制热系数为3~4^[10]，因此选择双效机组：三效机组=3:1。均衡系统内烘干设备运行前，系统默认检测冷热水箱水温，当冷（或热）水温度低于（或高于）设定温度时供冷热水系统将不会启动运行，如图3所示，制冷热水系统自动检测冷/热水箱水位直

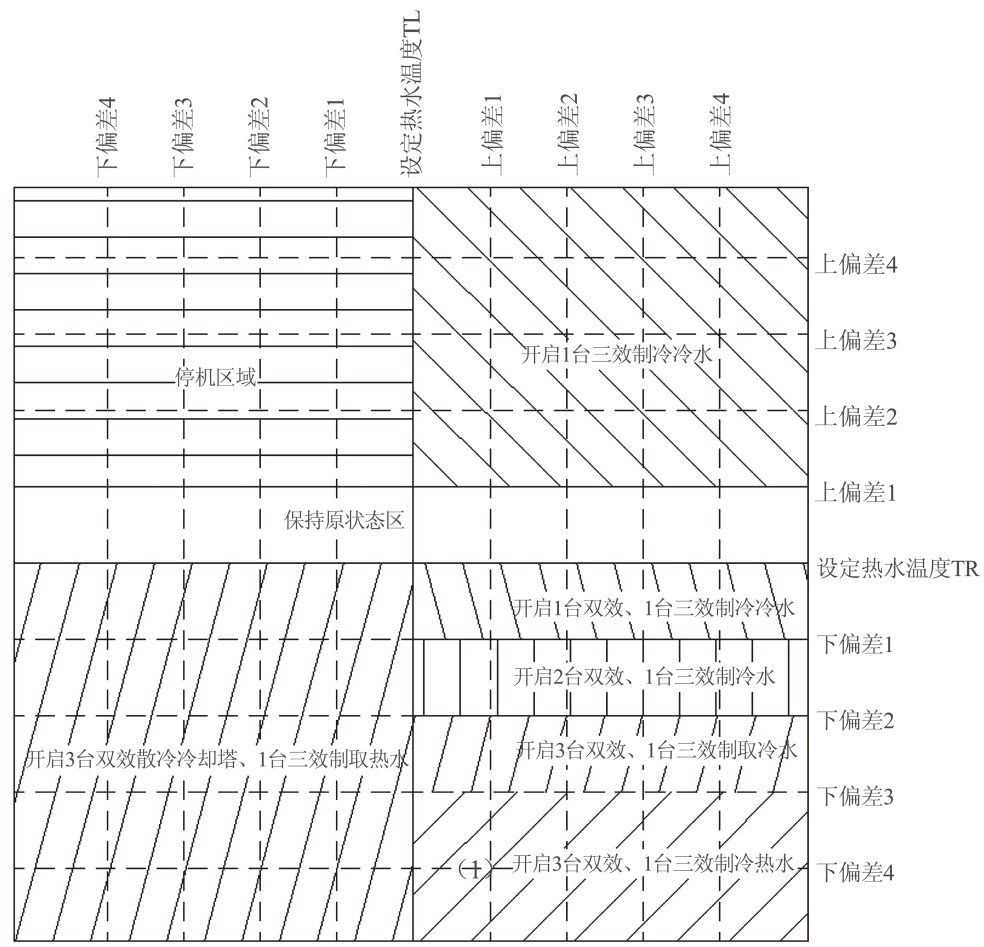


图4 均衡系统动作逻辑图

至均达到水箱容积2/3以上,制冷热水系统检测水温与设定值 T_0 的偏差等级关系而判断开机双效主机和三效主机的台数,具体动作逻辑详见图4,以图4中区域(1)为例,当热水温度低于设定温度+下偏差3,且冷水温度高于设定温度时,则开启3台双效机组制冷、热水和1台三效机组单独制冷取水,其它区域逻辑控制以此类推;中间“保持原状态区”即保持系统原有启动设备数量直至跨越上偏差1或者设定热水温度值。

综上所述,双效机组:三效机组=3:1的多热泵组合的冷热均衡干燥机,即整体由3台4个SZ148热泵双效系统和1台4个SZ148热泵三效系统组合而成,系统运行过程中冷水温度最低可达8℃(蒸发温度为4℃),热水最高温度为65℃(冷凝温度为70℃),该设备可实现为4个3000 kg/批干燥烘房供热,压缩机的总匹数为192匹(1匹=0.75 kW)。采购相同产能的(广东省现代农业装备研究所自主研发)GHRH170型热泵干燥机单机设备,该机处理量为1500 kg/批,装机容量24匹/台+12 kW辅助电加热,需要8台,按压缩机最佳工况计算1 kW等效于4 kW发热丝,则采用单机设备共需要192+24匹,比研制设备增加12.5%的装机功率,事实上电热丝产热最大取其功率的90%,即单机设备为满足干燥热量需求还需更大装机容量。

3 研制烘干设备应用试验

3.1 试验设计

试验地点:广州某腊味肉食制品厂,位于广州市黄埔区香荔路。

烘干设备:由广东省现代农业装备研究所研制,安装于肉食制品厂生产车间5楼。

试验物料:广式腊肠中“三七肠”即肥肉:瘦肉=3:7^[11],配料滚揉冷库储藏12 h,采用德国汉特曼灌肠设备扭结灌注成130 mm,直径22 mm,物料批次进入量为26车,33杆/车,分上、中、下3层,每车原料腊肠重量180~190 kg。

烘干工艺:烘干温度范围45~58℃,相对湿度为20%~70%,采用逐步升温降湿干燥模式,烘干周期为42~46 h,出成率为53%~58%。

3.2 数据曲线及分析

图5数据点为每小时设定温度、相对湿度值与

均衡系统内烘干设备实际运行温度、相对湿度值。上方温度曲线可知,广式腊味烘干采用是逐步升温的干燥方式,每小时实际运行温度的平均值与设定温度值的最大偏差:除烘干过程中3个停机排湿降温缓苏阶段外,最大偏差出现在升温烘干前期第6 h,设定温度为52℃,实测平均温度为50.57℃,控制相对最大偏差为-2.75%,其他时间段温度控制相对偏差为-2.05%~1.65%,其中第7、第14、第21 h为停机降温缓苏区,设定温度为35℃,设定相对湿度依次为60%、50%和40%,缓苏时间为1 h,其目的分别为广式腊肠的缩身定型、色泽调节和风味调节,因为短时间升温干燥有利于脂质的氧化降解^[12],形成风味物质,此外缓苏干燥有利于提升产品整体的干燥均匀性、外观色泽及形成表面均匀纹路。

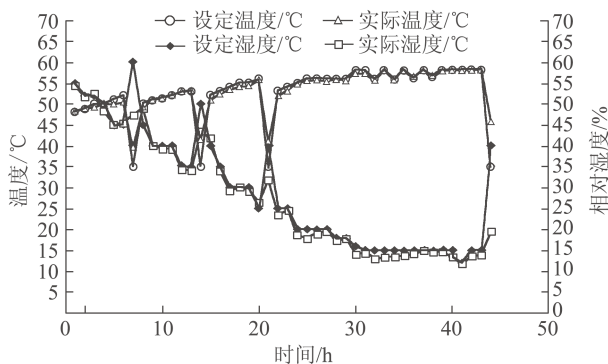


图5 广式腊味烘干均衡系统内烘干设备运行曲线

每小时设定相对湿度与实测小时平均相对湿度值的最大偏差:除3个降温缓苏阶段和最后降温出库阶段,最大偏差值出现在前期升温阶段的第8 h,设定相对湿度为45%,实测相对湿度值为48.92%,其它时段控制偏差范围为-2.08%~1.85%。相对湿度反映干燥介质的吸湿能力,实测相对湿度偏高说明此时的干燥能力略小于需求,由相对湿度曲线可知干燥前期设定相对湿度与实测值出现交错,而干燥后期实测回风湿度基本位于设定值以下,原因在于广式腊肠干燥采用逐步升温降湿干燥方式,前期腊肠水分多,温度升高腊肠吸热蒸发水分增加,而干燥温度升高和相对湿度降低均会提升设备整体除湿能力,因而精准匹配控制蒸发水分略小于除湿能力即可以获得优质产品,所以前期会出现设定湿度与回风湿度交错;后期由于腊肠水分逐渐减少,因而实测相对湿度会略低于设定湿度。

图6为3个样品的失水率曲线,每个位置样品

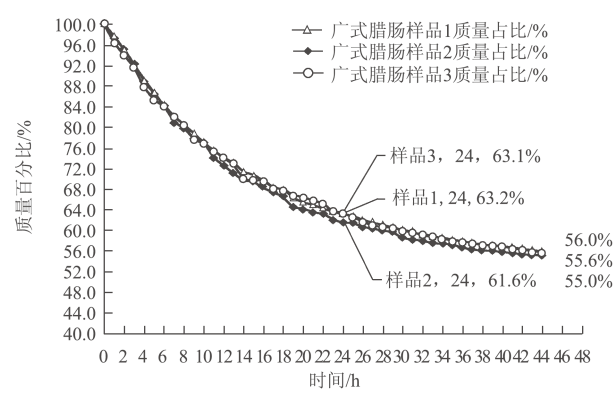


图6 广式腊味烘干失水率曲线

分为上、中、下3杆，均匀分布于干燥烘房前中后3个位置。由图中3个样品的失水率曲线可知，整个干燥过程中烘房3个位置的广式腊肠失水率相差不大，

说明设备的整体干燥均匀性较好；前24小时广式腊肠烘干去水量：样品1、样品2、样品3分别占原料腊肠的36.8%、38.4%和36.9%，占广式腊肠烘干总去水量（出成率56%）的83.86%、87.27%，83.64%；均衡系统内烘干设备运行44 h，3个位置样品均达到烘干要求，整个干燥烘房的终点干燥不均匀度为1%，可见广式腊肠的烘干去水主要集中在第1天，采用均衡系统烘干广式腊肠能够较好保障干燥品质。

3.3 研制设备加工产品品质检测

研制设备干燥加工的腊肠产品经过温度18~22℃暂存间冷却3~4 h后，进行分支剪切和定量称重包装，随机从该批次产品中，抽取5包检测样品，每包500 g，按照GB/T 23493—2009中式香肠抽检加工腊肠产品，检测数据见表1。

表1 广式腊肠生产检测数据表

序号	检测项目	标准要求	实测结果	单项判定	
1	感官性状	色泽	腊肠瘦肉呈红色枣红色，脂肪成乳白色，外表有自然光泽	符合	合格
		香气	腊香味纯正浓郁、具有腊肠固有的风味	符合	合格
		滋味	滋味鲜美，咸甜适中，无酸败或其它异味	符合	合格
		形态	外形完整、均匀，表面干爽，呈现收缩后的自然皱纹	符合	合格
2	水分 /g·100g ⁻¹	特级腊肠	≤ 25	15.76	合格
		优级腊肠	≤ 30		
		普通级腊肠	≤ 38		
3	亚硝酸盐 (以 NANO ₂ 计) /mg·kg ⁻¹	≤ 30	2.29	合格	
4	过氧化值 (以脂肪计) /g·100g ⁻¹	≤ 0.5	0.026	合格	

注：表中数据为广州某腊味肉食制品厂送检该批产品提供。

表1中数据可知，研制设备干燥加工的广式腊肠产品感官性状、水分等符合国家食品标准的各项指标要求。其中产品水分含量、亚硝酸盐、过氧化值均远低于国标，原因在于广东省为高温高湿气候环境，较低水分有利于延长保质期。

4 小结及展望

本文从烘干设备生产实践中存在的问题着手，分析了存在问题的原因，设计了多热泵组合的冷热均衡干燥机，并进行了批次物料试验，结

论如下。

1) 设计了多热泵系统组合冷热均衡干燥机，建立了干燥机的整体系统结构，并对内部主要零部件的功能及实现冷热均衡的原理进行了具体介绍。

2) 以广式腊肠为例，对热泵系统内压缩机、冷凝器和蒸发器机型进行了选型计算，确定了双效热泵系统、三效热泵系统中主要零部件的关键技术参数；设计了双效热泵系统：三效热泵系统=3:1的冷热均衡干燥机，该机型实现了1个冷热均衡系统给4台3 000 kg/批干燥烘房供应冷热量，比相同产能的

单机腊味干燥设备节省了装机总功率。

3) 与广州某肉食制品厂合作,建立了一拖多的多热泵系统组合冷热均衡干燥机,并进行了多批生产性应用试验,得到干燥机运行的温度、相对湿度控制精准度较好,干燥不均匀度小,抽检的广式腊肠产品的干燥品质均达到特级腊肠标准。

4) 开发的多热泵组合的冷热均衡干燥机,温度控制范围为 10~63 ℃,湿度控制范围为 10~95 %RH,因此该设备既适用于中高温的果蔬与肉制品干燥,也适用于略低于常温水产鱼制品等热敏性物料的烘干。^[A]

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [2] 吕金虎, 赵春芳, 李金成. 热泵干燥技术在农副产品加工中的应用与分析[J]. 农机化研究, 2010, 32(1): 212-217.
- [3] 夏源, 金磊, 刘腾, 等. 热泵技术应用于果蔬干燥的研究进展[J]. 农业科学研究, 2014, 35(1): 60-67.
- [4] 张艳来, 尹凯丹, 龙成树, 等. 热泵技术在我国农产品干燥中的应用及展望[J]. 农机化研究, 2014, 36(5): 1-7.
- [5] 曾宪国. 农产品和食品干燥技术及设备的现状与发展[J]. 现代食品, 2018(7): 172-174.
- [6] 杨开敏, 马翠亚, 程培强, 等. 农产品干燥用热源类型的研究[J]. 粮食储藏, 2019, 48(1): 11-15.
- [7] 马翠亚, 杨开敏, 王远成. 热泵技术在农产品干燥中的应用[J]. 区域供热, 2019(4): 13-20.
- [8] 李菁. 农产品干燥技术装备发展现状[J]. 农机使用与维修, 2021(7): 137-138.
- [9] 任晓芬, 陈启东, 郜玉聪, 等. 热泵干燥技术的研究进展[J]. 节能, 2021, 40(4): 74-76.
- [10] 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.
- [11] 刘清化, 胡光华, 龙成树, 等. 广式腊味批量生产现状及展望[J]. 现代农业装备, 2017(2): 53-57.
- [12] 刘巧瑜, 蔡诗鸿, 曾晓房, 等. 广式腊肠干燥过程中风味及其呈味机制的研究[J]. 食品科技, 2019, 44(8): 109-115.

Design and Test of Cold Heat Balance Dryer Based on Multi Heat Pump System

Zeng Xiaohui^{1,2,3}, Wu Yaosen^{1,2,3}, Li Haoquan^{1,2,3}, Gong Li^{1,2,3}, Long Chengshu^{1,2,3}

(1. Guangdong Hongke Agricultural Machinery R&D Co., Ltd., Guangzhou 510555, China; 2. Guangdong Institute of Modern Agricultural Equipment, Guangzhou 510630, China; 3. Key Laboratory of Modern Agricultural Intelligent Equipment in South China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P.R. China, Guangzhou 510630, China)

Abstract: In view of the large difference of cold and heat demand in the drying process of agricultural products. The idea of constant ratio coupling of double effect heat pump system and three effect heat pump system to construct cold and heat balance system is proposed. Then, the main parts of the heat pump system are determined by quantitative accounting and model selection, and then the control logic of cold and heat balance dryer combined with multi heat pump system with the ratio of double effect unit to three effect unit of 3:1 is designed. Finally, one driven multi cold and heat balance dryer, which can process 12 000 kg of sausage raw materials in batches, has been jointly developed with the enterprise. “Panax notoginseng” Cantonese sausage was used as the test material. The data show that the average temperature control accuracy of the cold and heat balance dryer is -2.75%~1.65%, the average relative humidity control accuracy is -3.92%~1.85%, and the drying unevenness is 1%. Sensory properties of the products in the test batch are qualified through sampling inspection, its average moisture content is 15.76%, the nitrite content and peroxide value of the products are far less than the limit value of the national standard, and the overall quality meets the requirements of super sausage. The cold and heat balance dryer combined with multi heat pump system is also suitable for batch drying and processing of fruits and vegetables, meat products and aquatic fish products.

Key words: heat pump; cold heat balance; one driven multi; dryer