

# 低温热泵带式烘干技术在酱油渣烘干工艺中的设计与应用

刘树模 王亮亮 齐 岩 骆志强 曹 磊

(湖南清源华建环境科技有限公司, 湖南 长沙 410000)

**摘要:** [目的] 针对传统酱油渣烘干工艺存在的能耗高、设备腐蚀性强及热敏性营养成分易损失等关键问题, 设计开发高效、节能且能保障产品品质的新型一体化干燥系统。[方法] 该系统集成了螺旋风道干燥与双级除尘等关键技术, 通过热泵的逆卡诺循环原理, 实现了 40~75 °C 的低温干燥环境, 以期在降低能耗的同时, 最大程度保留物料的原有品质。[结果] 该系统处理能力达 130 t/d (初始含水率 32%), 能稳定地将酱油渣含水率降至 15% 以下, 且单位能耗除湿量高达 3.3 kg/(kW·h), 节能效果显著。理化分析证实, 干化后酱油渣的粗蛋白等核心营养物质保留率达 95% 以上, 性质稳定, 符合食品级标准, 可直接用于后续资源化利用。[结论] 研究开发的一体式低温热泵带式烘干系统, 解决了酱油渣干燥过程中能效与产品品质难以兼顾的矛盾, 为高盐、高湿、热敏性副产物的高效、高值化资源处理提供了可靠的技术方案。

**关键词:** 低温热泵; 带式烘干; 酱油渣处理; 节能减排

## Design and application of low-temperature heat pump belt drying technology in soy sauce residue drying process

Liu Shumo Wang Liangliang Qi Yan Luo Zhiqiang Cao Lei

(Hunan Qingyuan Huajian Environmental Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410000, China)

**Abstract:** [Objective] To address key issues in conventional soy sauce residue drying processes, including high energy consumption, severe equipment corrosion, and the susceptibility of heat-sensitive nutrients to degradation, a novel integrated drying system was designed and developed to achieve high efficiency, energy savings, and reliable product quality. [Methods] The system integrates key technologies such as spiral air-duct drying and two-stage dust removal. Based on the reverse Carnot cycle principle of a heat pump, a low-temperature drying environment of 40~75 °C was established, with the aim of reducing energy consumption while maximizing the retention of the material's original quality. [Results] The system achieved a processing capacity of 130 t/d (initial moisture content of 32%) and was able to consistently reduce the moisture content of soy sauce residue to below 15%. The specific moisture extraction rate reached 3.3 kg/(kW·h), demonstrating significant energy-saving performance. Physicochemical analysis confirmed that the retention rate of key nutrients, such as crude protein, exceeded 95% after drying. The dried residue exhibited stable properties, met food-grade standards, and could be directly used for subsequent resource utilization. [Conclusion] The integrated low-temperature heat pump belt drying system developed in this study effectively resolves the conflict between energy efficiency and product quality in soy sauce residue drying. It provides a reliable technical solution for the efficient and high-value utilization of high-salt, high-moisture, and heat-sensitive by-products.

**Keywords:** low-temperature heat pump; belt drying; sauce residue treatment; energy conservation and emission reduction

通信作者: 王亮亮 (1987—), 男, 湖南清源华建环境科技有限公司高级工程师, 硕士。E-mail: wanglianglinag984@163.com

收稿日期: 2025-05-26 改回日期: 2026-03-04

引用格式: 刘树模, 王亮亮, 齐岩, 等. 低温热泵带式烘干技术在酱油渣烘干工艺中的设计与应用[J]. 食品与机械, 2026, 42(7): 186-193.

**Citation:** Liu Shumo, Wang Liangliang, Qi Yan, et al. Design and application of low-temperature heat pump belt drying technology in soy sauce residue drying process[J]. Food & Machinery, 2026, 42(7): 186-193.

酱油作为东方传统发酵食品的核心调味品,其独特风味与营养价值在现代食品工业中占据重要地位<sup>[1]</sup>。中国调味品协会统计数据显示,2023年中国酱油产量达1 000万t,人均年消费量达7.1 L<sup>[2]</sup>。然而,每生产1.00 t酱油约产生0.67 t酱油渣<sup>[3]</sup>,全国酱油渣年产生量超过500万t。酱油渣是酱油生产过程中的残渣,呈深棕色,新鲜的酱油渣水分含量最高可达80%,这类酱油渣富含蛋白质、粗纤维及多种必需氨基酸等营养成分,具有显著的资源化潜力<sup>[3-5]</sup>。酱油渣年产量较大、水分高,不易贮藏和运输,传统填埋或露天堆放处理方式不仅会释放硫化氢、氨气等恶臭气体,其渗滤液更会导致严重的土壤与

地下水污染问题<sup>[5-6]</sup>。研究表明,经适当烘干处理后的酱油渣可作为优质饲料添加剂<sup>[7-8]</sup>或有机肥原料<sup>[9-10]</sup>,其粗蛋白含量可达18%~22%,市场价值约800~1 200元/t,具有显著的经济效益和环境效益<sup>[11]</sup>。

目前,工业上普遍采用的酱油渣烘干技术主要依赖于燃煤热风或高温蒸汽等传统工艺,存在能耗高、效率低、设备腐蚀严重等问题<sup>[12]</sup>,常见的烘干系统如表1所示。另外,烘箱内较高的烘干温度(>120℃)会导致酱油渣中热敏性营养物质大量损失,严重降低产物附加值。这些技术瓶颈限制了食品工业废渣的资源化利用效率,开发新型高效烘干系统已成为行业迫切需求。

表1 常见的烘干系统对比  
Table 1 Comparison of common drying systems

| 工艺特征     | 干燥温度/℃       | 供热方式    | 安全性           | 废气处理          | 折合能耗/(kW·h·kg <sup>-1</sup> 水) | 经济性            | 系统维护及稳定性        |
|----------|--------------|---------|---------------|---------------|--------------------------------|----------------|-----------------|
| 低温热泵带式干化 | 40~75        | 电能驱动    | 低温,无爆炸风险,最安全  | 无(闭环循环,无废气外排) | 0.25~0.33                      | 初始投资高,耗电量小,成本低 | 系统维护简单,常温运行,寿命长 |
| 滚筒干化     | 200~300      | 热风/烟气   | 运行温度高,有粉尘爆炸风险 | 复杂尾气处理系统      | 1.01                           | 中              | 摩擦损耗较大,高温高湿易腐蚀  |
| 转盘干化     | ≥150         | 蒸汽/导热油  | 运行温度高,常需充氮气保护 | 复杂尾气处理系统      | 0.83                           | 高              | 摩擦损耗较大,高温高湿易腐蚀  |
| 薄层干化     | ≥150         | 蒸汽      | 运行温度高,有风险     | 复杂尾气处理系统      | 0.83                           | 高              | 系统复杂,高温高湿易腐蚀    |
| 流化床干化    | ≥150         | 烟气/导热油  | 运行温度高,有风险     | 复杂尾气处理系统      | 1.02                           | 高              | 摩擦损耗极大,高温高湿易腐蚀  |
| 太阳能干化    | 40~50        | 太阳能+辅热  | 运行温度低,安全      | 复杂尾气处理系统      | 0.07(电耗)                       | 低              | 占地大、受气候影响大,维护简单 |
| 真空干化     | 70~90        | 热水/蒸汽   | 低温缺氧,非常安全     | 废气量极少         | 0.9                            | 很高             | 系统复杂,真空度维护难,成本高 |
| 微波干化     | 80~100(物料内部) | 电能(微波能) | 有局部过热风险       | 废气量少,需处理      | 1.1                            | 高              | 系统简单但磁控管等核心部件易损 |

压缩式热泵技术基于制冷剂的相变循环原理,具有显著的节能优势和环保特性<sup>[13-15]</sup>。其低温运行特性(40~75℃)为解决传统烘干技术面临的困境提供了新的技术路径。热泵烘干系统的优势主要体现在:其能源消耗主要为可再生能源电能;低温干燥环境可有效保留酱油渣中90%以上的热敏性成分;封闭式系统设计可将挥发性有机物(VOCs)排放质量浓度控制在20 mg/m<sup>3</sup>以下,完全符合《大气污染物综合排放标准》要求。

研究拟基于热泵干燥除湿技术,针对酱油渣等食品固废的烘干需求,开展重型低温烘干设备的工艺开发与设备设计。通过理论计算,完成设备的选型和结构设计,并通过连续运行测试,验证设备在水分脱除效率、能源消耗以及保留固废营养价值等方面的综合性能。旨在为食品工业废渣的低碳资源化提供理论支撑。

## 1 工程概况

四川某酱油厂采用传统高盐稀态发酵工艺生产酱油,其生产工艺流程如图1所示,主要包括原料处理、制曲、发酵、深度压榨、过滤、灭菌与调配、包装及质量检测等工艺。该厂的原料在深度压榨后,每日产生130 t含水率约为32%的酱油渣。为实现酱油渣的资源化利用(如饲料添加剂等),需通过干燥工艺将其含水率降至15%以下,并保证酱油渣烘干前后营养物质的结构稳定性,以及控制出料温度低于45℃,以确保后续酱油渣粉碎和贮运。

## 2 低温热泵带式酱油渣烘干机设计

### 2.1 低温热泵烘干机系统总体方案

目前,工业上普遍采用蒸汽烘干技术处理酱油渣,该

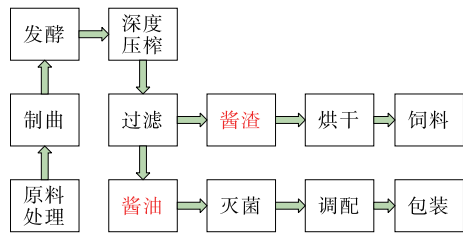


图 1 酱油厂生产工艺流程

Figure 1 Production process flow of soy sauce factory

技术属于高温干燥工艺( $>120^{\circ}\text{C}$ )。其工作原理是通过锅炉产生高温高压蒸汽作为热源,经蒸汽换热器加热空气后,将热空气通入烘干设备对酱油渣进行脱水处理。在此过程中,湿酱油渣与热空气直接接触,水分随废气排出系统。然而,蒸汽烘干技术存在以下技术瓶颈限制了其发展:① 能耗高,热效率普遍低于 40%;② 高温环境导致热敏性营养物质大量损失;③ 废气排放造成环境污染。

相比之下,采用的低温热泵烘干系统基于逆卡诺循环原理,通过制冷剂的相变循环(蒸发、压缩、冷凝、膨胀)实现热量的高效转移与利用。该系统具有以下显著优势:① 节能环保,单位能耗较传统蒸汽烘干降低 35%~50%;② 低温运行( $40\sim 65^{\circ}\text{C}$ ),可有效保护热敏性营养物质;③ 温度控制精度高( $\pm 1^{\circ}\text{C}$ );④ 封闭式系统设计,VOCs 排放质量浓度低于  $20\text{ mg/m}^3$ 。这些特性使其特别适用于对烘干温度要求严格的酱油渣处理,完全符合该项目的技术要求。

2.1.1 总体结构 研究所开发的低温热泵烘干系统主要由进料系统、烘箱、风机系统、热泵系统和出料系统 5 个功能模块组成,如图 2 所示,各模块协同工作,实现酱油渣的高效脱水干燥。

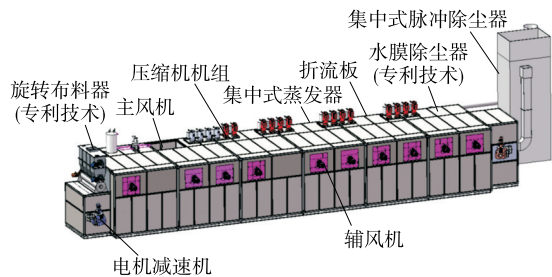


图 2 烘箱总体图

Figure 2 Overall diagram of the drying oven

进料系统由湿料仓、湿料螺旋输送机、刮板输送机和均料器等组件构成。其中,考虑到酱油渣硬度较大,含水率较低,无法切条,因此选用均料器作为切条机的替代输送设备。均料器集成了料斗、均料螺旋和破桥装置等,其主要功能是确保湿酱油渣在网带上均匀分布,为后续烘干过程的均匀性和稳定性提供保障。

干燥箱作为系统的核心干燥单元,采用对流热风干燥技术对网带上的湿酱油渣进行脱水处理。箱体内部通过钣金件分隔为干、湿两个功能区域:干区主要负责酱油渣的烘干作业,湿区则承担湿热风的降温排水和再升温功能。为提升系统能效并控制气味扩散,烘箱采用全密闭结构设计,并结合负压操作防止内部热空气外泄,进一步减少热量损失和环境污染。

热泵系统作为整个烘干系统的动力核心,由压缩机、蒸发器、冷凝器、过冷器、电子膨胀阀及连接管路等组成。考虑到烘干难度,选用了 4 台 R134 压缩机以及 14 台 R245fa 高温压缩机,18 台压缩机均为涡旋压缩机,由苏州为山之境技术有限公司提供。整个系统基于逆卡诺循环原理运行,通过制冷剂的相变实现对物料的烘干以及对湿空气的降温排水,18 台压缩机独立工作,以便于后续维修和维护。

风机系统采用主—辅风机协同工作模式。主风机作为系统回风的关键设备,主要负责实现干、湿两区之间的空气循环,形成闭合的空气循环回路。辅风机系统采用串联式设计,通过精准调控风量和风速,确保热风在干燥箱内形成均匀分布的螺旋式风道。通过调节辅风机的运行参数,可以优化热风的流动路径,使物料在烘干过程中受热均匀,从而提高烘干效率和产品质量。

出料系统由出料刮板系统、粉碎机以及自动打包机组成。出料系统主要负责对烘干后的酱油渣进行粉碎打包,实现自动化处理。

2.1.2 工作原理 湿酱油渣低温烘干系统的工作原理如图 3 所示,主要包含物料输送、空气循环和制冷剂循环 3 个主要过程。在物料输送过程中,湿料仓中初始含水率为 32% 的湿酱油渣,首先通过无轴螺旋输送机输送至刮板输送机,随后由刮板输送机送入均料器。均料螺旋将湿酱油渣均匀铺设于干燥箱的上层网带,网带以恒定速度带动物料进行水平输送。当物料到达上层网带末端时,通过重力作用落入下层网带,并反向输送至出料系统

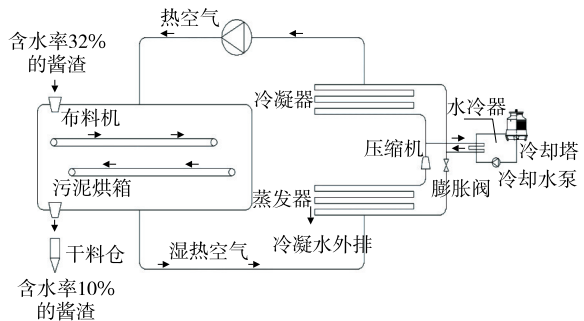


图 3 低温烘干系统工作原理示意图

Figure 3 Operating principle schematic diagram of the low-temperature drying system

完成整个干燥过程。

整个循环过程包括空气循环和制冷剂循环两个过程,其中空气循环系统采用串联式设计,如图4所示。干燥空气自下而上依次穿透下层和上层物料,实现与湿酱油渣的热湿交换。湿热空气经冷凝器加热后,温度再次升高,并由下一级辅风机重新吹扫网带上的物料,在干燥区域形成螺旋式风道,确保物料被均匀干燥。最终,湿热空气在主风机的作用下进入湿区处理系统,依次经过水膜除尘、蒸发器及除雾网进行降温排水,随后通过预热器和加热器升温后,被主风机排入干区完成循环。

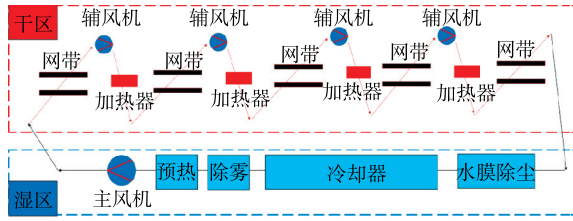


图4 烘箱空气循环示意图

Figure 4 Schematic diagram of air circulation in the drying oven

制冷循环的基本工作原理如图5所示。系统通过制冷剂的相变循环实现热量的转移与交换,具体过程:蒸发器出口的低溫低压气态制冷剂被压缩机吸入并压缩,转变为高温高压蒸气;高温高压蒸气进入冷凝器,在等压条件下向环境空气释放潜热,逐渐凝为高压液态制冷剂;高压液态制冷剂流经电子膨胀阀,发生绝节流膨胀,转变为低温低压的两相混合状态;低温制冷剂在蒸发器中吸收烘箱湿区空气的热量,完全蒸发为低压蒸气,完成制冷循环,从而实现对烘箱干区的加热和对湿区的冷却除湿,形成高效的热量梯级利用系统。

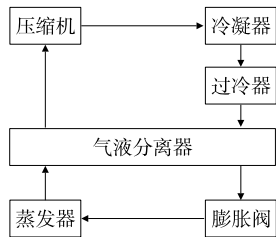


图5 制冷剂循环基本原理图

Figure 5 Schematic diagram of refrigerant cycle principles

**2.1.3 总热量设计计算** 根据项目需求,首先计算含水率为32%的湿酱油渣烘干到含水率为10%的干酱油渣所需加热量、水分蒸发量等参数,依此作为低温烘干系统的设计、设备选型等依据。低温烘干系统中,干燥所需的热量主要包含冷却加热量、主风加热量以及整体的热损。其中干燥过程中的热损在实际的工程核算中难以计算,

通常用供给总热量的5%~10%估算<sup>[16]</sup>,则系统烘干过程中所需要的总热量 $W_{h,wind}$ 可由式(1)求得。

$$W_{h,wind} = W_{h,lq} + W_{h,c+wet} - W_{h,zwind}, \quad (1)$$

式中:

$W_{h,wind}$ ——系统烘干需要总热量,kW;

$W_{h,lq}$ ——冷却加热量,kW;

$W_{h,c+wet}$ ——烘箱热损失,kW;

$W_{h,zwind}$ ——主风加热量,kW。

冷却加热量 $W_{h,lq}$ 可由式(2)求得。

$$W_{h,lq} = h_{zlk} \times Q_{m,air} \div 3600, \quad (2)$$

式中:

$h_{zlk}$ ——总冷却焓(总冷却风温度设为30℃),kJ/kg;

$Q_{m,air}$ ——干空气质量流量,kg/h。

干空气质量流量 $Q_{m,air}$ 可由式(3)求得。

$$Q_{m,air} = q_{m,water} \div (d_{hf} - d_{lq}), \quad (3)$$

式中:

$q_{m,water}$ ——蒸发水量,kg/h;

$d_{hf}$ ——回风的含湿量(回风温度设为75℃),g水/kg

干空气;

$d_{lq}$ ——总冷却风含湿量,g水/kg干空气。

烘箱内部各状态含湿量 $d$ 可由式(4)求得。

$$d = 0.622 \times p_{air} \div (101.25 - p_{air}) \times 1000, \quad (4)$$

式中:

$d$ ——对应该点的含湿量,g水/kg干空气;

$p_{air}$ ——对应点的风温压力(通过相对湿度与饱和蒸汽压计算得到),kPa。

蒸发水量 $q_{m,water}$ 可由式(5)求得。

$$q_{m,water} = q_{m,wet} - q_{m,wet} \times (1 - \omega_{wet}) \div \omega_{dry}, \quad (5)$$

式中:

$q_{m,wet}$ ——湿酱油渣质量流量,kg/h;

$\omega_{wet}$ ——进料湿酱油渣含水量,设为32%;

$\omega_{dry}$ ——出料干酱油渣含水量,设为10%。

主风加热量 $W_{h,zwind}$ 可由式(6)求得。

$$W_{h,zwind} = h_{zwind} \times Q_{m,air} \div 3600, \quad (6)$$

式中:

$h_{zwind}$ ——主风焓,kJ/kg。

主风焓 $h_{zwind}$ 可由式(7)求得。

$$h_{zwind} = h_{sf} - h_{lq}, \quad (7)$$

式中:

$h_{sf}$ ——送风焓(送风温度设为77℃),kJ/kg;

$h_{lq}$ ——冷却后风焓值,kJ/kg。

各个状态点的焓值 $h$ 可由式(8)求得。

$$h = 1.01 \times t + (2500 + 1.84 \times t) \times d \div 1000, \quad (8)$$

式中:

$h$ ——各个状态点的焓,kJ/kg;

$t$ ——各个状态点的温度,℃。

综上计算得到将含水率为 32% 的湿酱油渣加热到含水量为 10% 的干酱油渣蒸发水量为 825 kg/h,主风加热量为 112 kW,冷却热量为 712 kW,热损失为 70 kW,总加热量为 894 kW。

## 2.2 主要部件设计选型

2.2.1 风机选型 基于计算得到的整体烘箱加热量,通过式(9)计算这些加热量所需风的质量流量  $Q_m$ 。

$$Q_m = W_{h,wind} \times 3600 \div \Delta T_{wind} \div C_p, \quad (9)$$

式中:

$Q_m$ ——风的质量流量,kg/h;

$W_{h,wind}$ ——辅风加热量,kW;

$\Delta T_{wind}$ ——辅风温升,设为 21℃;

$C_p$ ——湿空气的定压比热容,设为 1.15 J/(kg·℃)。

风机数量  $n$  可由式(10)求得。

$$n = Q_m \div Q_y, \quad (10)$$

式中:

$n$ ——主风机数量,个;

$Q_y$ ——单个厂家风机的质量流量,kg/h。

计算得到烘箱升温所需辅助风机风量为 111 400 m<sup>3</sup>/h,主风机循环风量为 8 830 m<sup>3</sup>/h。考虑到设计余量与设计偏差,辅助风机选择离心风机(VR72-0630型,大通宝富风机有限公司)10台,风机额定转速 1 450 r/min,风量 13 000 m<sup>3</sup>/h。主风机选择 1 台离心风机(VR60-0710型,大通宝富风机有限公司),变频风机,风量 10 000 m<sup>3</sup>/h。

2.2.2 压缩机选型计算 针对酱油渣的烘干难度以及干料出料温度要求,烘箱内部采用温度控制策略,分别设为高温区、中温区以及低温冷却区 3 个区域,如图 6 所示。高温区设有 6 台辅助风机及 12 台 R245fa 高温热泵,加热的物料最高温度可达 75℃以上。低温冷却区设置 1 台辅助风机,通过辅风机使干料与刚进入烘箱内部的湿料进行温度交换,使得出料温度得到降低,达到 45℃左右。中温区作为温度过度区域,设置 3 台辅助风机及 4 台 R134a 热泵机组以及 2 台 R245fa 高温热泵,实现热空气温度梯度

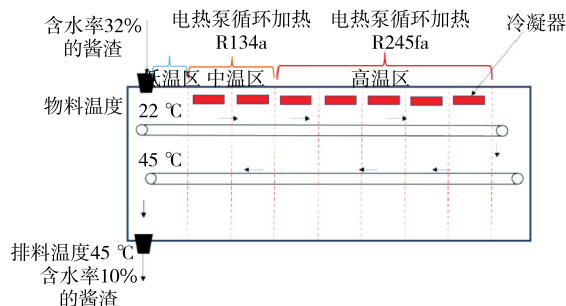


图 6 烘箱内部工作原理示意图

Figure 6 Internal operating principle schematic diagram of the drying oven

上升,确保高温区压缩机正常工作。所有压缩机设置排气温度保护、电流过载保护以及排气压力保护等程序,确保压缩机正常工作。整体物料烘干设计时间长达 90 min,具有良好的烘干效果以及烘干效率。

2.2.3 冷凝器与蒸发器设计计算 冷凝器内制冷剂与空气的平均温差  $\Delta t_c$  可由式(11)求得。

$$\Delta t_c = (t_{c2} - t_{c1}) \div \ln((t_c - t_{c1}) \div (t_c - t_{c2})), \quad (11)$$

式中:

$\Delta t_c$ ——冷凝器内制冷剂与空气的平均温差,℃;

$t_{c1}$ ——冷凝器进口处空气温度,℃;

$t_{c2}$ ——冷凝器出口处空气温度,℃;

$t_c$ ——冷凝温度,℃。

冷凝器的传热面积可由式(12)求得。

$$F_c = Q_c \div k_c \div \Delta t_c, \quad (12)$$

式中:

$F_c$ ——冷凝器的传热面积,m<sup>2</sup>;

$Q_c$ ——各个冷凝器所需换热量,W;

$k_c$ ——冷凝器的传热系数,取 22 W/(m<sup>2</sup>·K);

$\Delta t_c$ ——蒸发器制冷剂与空气的平均温差,K。

蒸发器制冷剂与空气的平均温差  $\Delta t_e$  可由式(13)

求得。

$$\Delta t_e = (t_{e2} - t_{e1}) \div \ln((t_e - t_{e1}) \div (t_e - t_{e2})), \quad (13)$$

式中:

$\Delta t_e$ ——蒸发器制冷剂与空气的平均温差,℃;

$t_{e1}$ ——蒸发器进口处空气温度,℃;

$t_{e2}$ ——蒸发器出口处空气温度,℃;

$t_e$ ——蒸发温度,℃。

蒸发器的传热面积由式(14)求得。

$$F_e = Q_e \div k_e \div \Delta t_e, \quad (14)$$

式中:

$F_e$ ——蒸发器的传热面积,m<sup>2</sup>;

$Q_e$ ——蒸发器所需换热量,W;

$k_e$ ——蒸发器的传热系数,取 18 W/(m<sup>2</sup>·K)。

各个冷凝器和蒸发器均选用波纹翅片式换热器,考虑到酱油渣干化过程中存在一定的腐蚀性,冷凝器和蒸发器采用 SUS304 不锈钢材质,根据计算结果和增加一定的裕度,单个冷凝器传热面积为 120 m<sup>2</sup>,单个蒸发器传热面积为 475 m<sup>2</sup>。

2.2.4 网带设计选型 针对酱油渣呈现硬质片状,存在一定的硬度,在堆积过程中不存在压塌现象,干燥箱采用双层网带结构设计。上、下两层网带错位布置,实现同侧进出料。考虑到酱油渣存在一点的腐蚀性,网带选用 SUS304 不锈钢整体板材,规格为 22 000 mm×200 mm×2 mm,通过激光开孔及一次冲压工艺加工成型,开孔尺寸为 20 mm×2.5 mm,确保结构的完整性和抗腐蚀性能。驱动系统采用铜线电机,配备变频控制装置,并集成张

紧、纠偏及扭矩保护机械装置,结合 PLC 检测报警系统,保证网带运行的稳定性和可靠性。湿酱油渣传输过程中,在网上带依次经过低温冷却区、中温区和高温区域,完成初步干燥;随后酱油渣掉落至下网带,实现翻抛,再次经过高温区域、中温区和低温区,最后烘干冷却后的干酱油渣进入出料系统。

**2.2.5 进料系统设计** 均料器将预干燥的湿酱油渣成型并以均匀厚度铺设在干燥箱中的网带上,增加湿酱油渣与热空气的接触面积,保证酱油渣高效率脱水。系统所用均料器主要由小料斗、均料器、破桥装置、圆弧壳体、转子、减速电机组成,其工作原理如图 7 所示。物料通过刮板输送机送入小料斗,沿轴方向,通过均料器实现轴向均匀布料,转子设有 8 个隔板,在转动过程中将每个小腔体中的物料翻转到网带上,从而使物料均匀铺落在网带上,通过调节均料器的速率及网带的运行速度,以达到设定的物料摊铺厚度。破桥装置包含一对平行主轴,两根主轴上焊接 Z 型叶片,相互错开布置,其主要作用是将湿酱油渣堆积形成的桥拱进行破除。



图 7 均料器工作原理示意图

Figure 7 Schematic diagram of the homogenizer working principle

### 2.3 除尘系统

粉尘在干化设备中的危害主要表现为以下两方面:① 粉尘在换热器表面沉积会显著降低传热效率,导致设备能效下降;② 在高温高湿工况下,粉尘是引发腐蚀问题的重要因素。针对这些问题,系统采用源头控制和过程消除相结合的综合处理方法。

**源头控制:**① 针对酱油渣初始含水率较低、易碎裂产生粉尘的特性,通过降低外循环风量,并降低循环风速,有效抑制扬尘现象。② 利用螺旋风道使细小粉尘颗粒多次穿过酱油渣层,通过酱油渣料层拦截部分粉尘。③ 网带底部配置自动清灰刮板,及时清除掉落的细小颗粒,避免二次扬尘。

**过程消除:**系统采用脉冲板式过滤除尘与水膜除尘相结合的双级除尘工艺。烘干干区的回风首先经过脉冲除尘器,经滤板过滤后,粉尘被滞留在滤板外,净化后的空气从出风口排出。滤板上表面的粉尘,由 0.5 MPa 压缩空气喷吹,通过滤板瞬间膨胀实现高效清洁。其次,经过脉冲除尘器后的回风,将进行水膜洗涤,由于粉尘是亲水

的,因此,剩余的粉尘基本被水洗去除了。最后,水膜除尘处理后的空气含湿量较高,经过蒸发器时,空气遇冷产生大量冷凝水,其“降雨量”可达 100 g/m<sup>3</sup>,相当于中等以上暴雨强度。这种冷凝水可有效冲刷换热器表面的污垢,避免腐蚀发生。

### 2.4 控制系统

低温热泵烘干系统采用基于 PLC 的智能控制系统构架,主要包括传感检测模块、控制模块以及调节模块。其中传感检测模块主要包括送分,回风温度检测,压缩机排气温度压力监控以及物料堆积高度监控等;控制模块是以可编程 PLC 为控制核心,具备数据采集、故障诊断、报警等功能;执行调节模块主要包括变频驱动装置、电子膨胀阀以及保护单元等 PLC 接收各传感器的监测数值,根据预设参数限值和算法程序进行判断计算,并输出控制信号给相应的继电器、变频器等执行元件,实现对风机、压缩机等设备的控制,从而稳定系统的最佳烘干效果。

## 3 项目运行结果

### 3.1 酱油渣烘干前后检测

湿酱油渣呈现深黄色片状,具有一定硬度以及酱香味,烘干后的酱油渣呈现浅灰色,形态与湿酱油渣基本一致,整个烘干过程酱油渣保持完整无碎裂,且未观察到焦化或热损伤现象。

采用国家标准方法对随机抽取的成品酱油渣(包装规格 36 kg/包)进行理化指标检测。水分含量:依据 GB 5009.3—2016,采用 DHG-9070A 型电热鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司)结合 ME204E 型分析天平(梅特勒—托利多国际贸易(上海)有限公司,精度 0.1 mg)测定;粗蛋白质含量:依据 GB 5009.5—2016,采用 K9840 型凯氏定氮仪(济南海能仪器股份有限公司)测定;食盐(氯化钠)含量:依据 GB 5009.44—2016,采用 T960 型自动电位滴定仪(瑞士万通中国有限公司)测定;粗脂肪含量:依据 GB 5009.6—2016,采用 SOX406 型索氏提取系统(济南海能仪器股份有限公司)测定;粗灰分含量:依据 GB 5009.4—2016,采用 SX2-12-10N 型马弗炉(上海一恒科学仪器有限公司)进行灼烧分析;粗纤维含量:依据 GB/T 5009.10—2003,采用 F800 型纤维测定仪(济南海能仪器股份有限公司)检测;维生素 B<sub>1</sub> 及 B<sub>2</sub>: 依据 GB 5009.84—2016 及 GB 5009.85—2016,采用 Agilent 1260 Infinity II 型高效液相色谱仪(安捷伦科技有限公司)检测。

由表 2 可知,鲜酱油渣中水分含量约为 30%,粗蛋白和粗纤维含量高达 16% 和 21%。酱油渣经低温烘干处理后,酱油渣水分含量降至 15% 以下,达到预定技术指标

表 2 烘干前后营养物质检测

Table 2 Nutrient content analysis before and after drying

| 检测名称   | 水分/<br>(10 <sup>-2</sup> g·g <sup>-1</sup> ) | 粗蛋白质/<br>(10 <sup>-2</sup> g·g <sup>-1</sup> ) | 食盐/<br>(10 <sup>-2</sup> g·g <sup>-1</sup> ) | 粗脂肪/<br>(10 <sup>-2</sup> g·g <sup>-1</sup> ) | 粗灰分/<br>(10 <sup>-2</sup> g·g <sup>-1</sup> ) | 粗纤维/<br>(10 <sup>-2</sup> g·g <sup>-1</sup> ) | 维生素 B <sub>1</sub> /<br>(10 <sup>-2</sup> mg·g <sup>-1</sup> ) | 维生素 B <sub>2</sub> /<br>(10 <sup>-2</sup> mg·g <sup>-1</sup> ) |
|--------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 烘干前酱油渣 | ≥29.5                                        | ≥16                                            | ≤12                                          | ≥5                                            | ≤16                                           | ≤21                                           | ≥0.03                                                          | ≥0.2                                                           |
| 烘干后酱油渣 | ≥13.8                                        | ≥20                                            | ≤15                                          | ≥6                                            | ≤20                                           | ≤25                                           | ≥0.10                                                          | ≥0.5                                                           |

(≤15%)。各营养组分(粗蛋白、粗脂肪、维生素 B<sub>1</sub> 及 B<sub>2</sub> 等)的相对含量因脱水作用呈现等比例提升,其绝对含量检验分析无显著变化,证明低温烘干工艺有效避免了传统高温干燥导致的营养损失,但烘干后食盐含量有所上升,因此后续作为饲料使用时,脱盐处理是一道必要工序,这与惠明等<sup>[11]</sup>的研究结果一致。

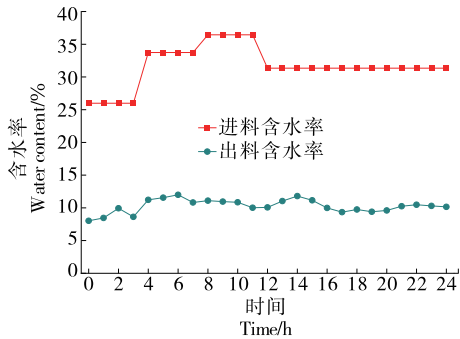
3.2 能耗分析

设备采用紧凑型模块化设计,占地面积较市场上同类低温干化设备减少约 35%,显著提高了空间利用率。整套设备主体采用 SUS304 食品级不锈钢材质,表面经抛光处理,外观简洁大气,符合食品工业卫生标准。设备运行过程中,噪声较小,车间环境整洁,无粉尘外溢现象,体

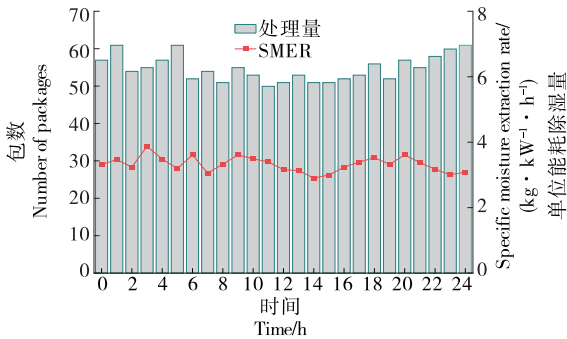
现了系统良好的密封性与环保特性。

设备 24 h 连续运行结果如图 8 所示。图 8(a)显示,在进料含水率波动范围为 28%~32%的条件下,出料含水率始终稳定控制在 12% 以下(标准差≤0.8%),完全满足项目技术指标(≤15%)要求。

图 8(b)进一步表明,设备平均处理能力为 55 包/h(单包质量 36 kg),折合日处理量达 130 t,单位能耗除湿量(SMER)为 3.3 kg/(kW·h),与崔勇等<sup>[16]</sup>设计的低温带式烘干设备以及 An 等<sup>[17]</sup>综述的热泵干燥技术典型能效水平能耗相差不大,相比李家勇等<sup>[18]</sup>提出的传统的滚筒烘干技术,能源利用率明显提高,再次表明了该系统在能效上具有一定的先进性。



(a) 进出料含水率随时间的变化



(b) 设备每小时处理量及该小时下的 SMER

图 8 干燥设备 24 h 运行能效

Figure 8 Performance of the drying equipment over 24 hours

此外,设备连续运行 1 个月过程中还表现出以下优势:基于 PLC 的智能控制系统实现“一键启停”与参数自动调节,操作人员仅需监控运行状态,无需频繁干预;维护成本低:双级除尘系统与自清洁网带设计将设备维护频率降低至每月 1 次,年维护成本较传统设备减少 42%;经济效益显著:以日处理 130 t 酱油渣计算,设备年运行成本较传统工艺节约 78 万元,资源化产物附加值提升至 1 050 元/t,投资回收期缩短至 2.1 年;社会效益突出:设备运行过程中无臭气排放,VOCs 质量浓度控制在 18.2 mg/m<sup>3</sup> 以下,显著改善了车间工作环境。

4 结语

该研究针对酱油生产过程中高盐、易腐败酱油渣的干燥需求,设计并开发了一种新型一体式低温热泵带式

烘干系统,实际运行结果表明,系统平均单位能耗除湿量为 3.3 kg/(kW·h),较传统蒸汽烘干技术节能 35%~50%,且运行过程无腐蚀性气体排放,挥发性有机物质量浓度低于 20 mg/m<sup>3</sup>。烘干前后酱油渣理化性质稳定,粗蛋白、粗脂肪等关键营养成分保留率超过 95%,出料的含水率均在 15% 以下,满足饲料添加剂与有机肥原料的食品级标准,符合项目需求。后续可通过优化热泵工质匹配、开发模块化设备等方式进一步拓展应用场景,推动行业绿色转型。

参考文献

[1] 温新红. 酱油走上餐桌的 4000 年[N]. 中国科学报, 2025-03-28(3).  
Wen X H. Soy sauce: 4000 years on the dining table[N]. China

- Science News, 2025-03-28(3).
- [2] 李含含, 张展开, 张智宏, 等. 酱油渣再利用研究进展与展望[J]. 食品与发酵工业, 2026, 52(2): 390-398.
- Li H H, Zhang Z K, Zhang Z H, et al. Research progress and prospect in reuse of soy sauce residue[J]. Food and Fermentation Industries, 2026, 52(2): 390-398.
- [3] 巩欣, 程永强, 纪凤娣, 等. 酱油渣的再利用研究进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(5): 384-387.
- Gong X, Cheng Y Q, Ji F D, et al. Research progress in the comprehensive utilization of soy sauce residue[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(5): 384-387.
- [4] 蒋爱国. 酱油渣和醋糟的营养价值及发酵技术[J]. 农村新技术, 2012(9): 69-70.
- Jiang A G. The nutritional value and fermentation technology of soy sauce residue and vinegar waste[J]. Rural New Technologies, 2012(9): 69-70.
- [5] Sadarman S, Ridla M, Nahrowi N, et al. Evaluation of ensiled soy sauce by-product combined with several additives as an animal feed[J]. Vet World, 2020, 13(5): 940-946.
- [6] Wang Z M, Liang Z S, Li G Y, et al. Odorous organic gas emission characteristics from cooked food wastes during aerobic decomposition[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 434: 139961.
- [7] Chen X R, Luo Y J, Qi B K, et al. Improving the hydrolysis efficiency of soy sauce residue using ultrasonic probe-assisted enzymolysis technology[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 35: 351-358.
- [8] 杨玉龙, 王玮翌, 宗波. 酱油渣在养殖业中再利用的方法研究与优点分析[J]. 当代畜禽养殖业, 2019(5): 36-37.
- Yang Y L, Wang W G, Zong B. Research on the methods of reusing soy sauce waste in the livestock industry and analysis of its advantages[J]. Contemporary Poultry and Livestock Industry, 2019(5): 36-37.
- [9] 吴昌正, 关梓杰, 童星. 酱油渣微生物高效转化研究进展[J]. 广东化工, 2022, 49(21): 111-113, 121.
- Wu C Z, Guan Z J, Tong X, et al. Research progress on efficient microbial transformation of soy sauce lees[J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(21): 111-113, 121.
- [10] 谢承佳, 于晓萍, 徐娴. 酱油渣加工技术研究进展[J]. 中国酿造, 2021, 40(1): 24-28.
- Xie C J, Yu X P, Xu X. Research progress on processing technology of soy sauce residue[J]. China Brewing, 2021, 40(1): 24-28.
- [11] 惠明, 郑桂朋, 田青, 等. 酿造业典型加工废弃物资源化利用研究进展[J]. 轻工学报, 2023, 38(5): 1-7.
- Hui M, Zheng G P, Tian Q, et al. Research progress on resource utilization of typical brewing industry processing wastes[J]. Journal of Light Industry, 2023, 38(5): 1-7.
- [12] Chojnacka K, Mikula K, Grzegorz I, et al. Improvements in drying technologies-efficient solutions for cleaner production with higher energy efficiency and reduced emission[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 320: 128706.
- [13] 张派伟, 张振迎, 武雨萌, 等. 热泵干燥技术的应用现状及展望[J]. 化学工程, 2024, 52(6): 40-46.
- Zhang P W, Zhang Z Y, Wu Y M, et al. Application and prospects of heat pump drying technology[J]. Chemical Engineering, 2024, 52(6): 40-46.
- [14] 王延坤, 陈鹏泉, 朱文学, 等. 大中型粮食烘干设备研究进展[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(2): 171-177.
- Wang Y K, Chen P X, Zhu W X, et al. Research progress on large and medium-sized grain drying equipment[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(2): 171-177.
- [15] 杨鲁伟, 魏娟, 陈嘉祥. 热泵干燥技术研究进展[J]. 制冷技术, 2020, 40(4): 2-8, 27.
- Yang L W, Wei J, Chen J X. Research progress of heat pump drying technology[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2020, 40(4): 2-8, 27.
- [16] 崔勇, 翟旭军, 花成巍, 等. 基于低温干化技术规模养殖场畜禽粪污脱水工艺及设备设计[J]. 中国家禽, 2022, 44(10): 62-68.
- Cui Y, Zhai X J, Hua C W, et al. Dehydration process and equipment design for livestock and poultry manure treatment in sized farm based on low-temperature drying technology[J]. China Poultry, 2022, 44(10): 62-68.
- [17] An J Y, Xie H X, Yan J C. A review of applications of energy analysis: grain, fruit and vegetable drying technology[J]. Energy Reports, 2024, 12: 5 482-5 506.
- [18] 李家勇, 杨健. 滚筒烘干机在酒糟干燥中的应用[J]. 南方农机, 2019, 50(22): 190-191.
- Li J Y, Yang J. Application of drum drying machines in drying of distiller's grains[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2019, 50(22): 190-191.