

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.03.018

膜蒸馏与溶液除湿集成型食品 低能耗干燥装置研究

Low energy consumption drying device for food based on integration of
membrane distillation and liquid desiccant dehumidification

桂大李 陈东 樊佳琪 谢继红

GUI Da-li CHEN Dong FAN Jia-qi XIE Ji-hong

(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

摘要:提出一种低能耗膜蒸馏与溶液除湿集成型干燥装置,通过除湿干燥单元将物料中的水分转移到除湿溶液中,再通过除湿溶液再生单元将除湿溶液吸收的水分分离排出;给出了装置除湿能耗比(SMER)的估算公式,在典型工况参数下装置的SMER可达 $6.36 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$;以表面经过亲水化处理的热敏性棉纤维为被干燥物料,以质量分数50%的LiBr水溶液为除湿溶液进行除湿干燥单元试验装置研究,实现了物料中水分向除湿溶液中转移,且试验装置具有自稳定和能量自平衡等特性;研制了基于中空纤维束—套管型气隙式膜蒸馏组件的除湿溶液再生试验装置,实现了对质量分数50%的LiBr水溶液的浓缩再生,且再生过程具有很高的分离效率。

关键词:膜蒸馏;溶液除湿;热敏物料;干燥;节能

Abstract: A low energy consumption drying device based on integration of membrane distillation and liquid desiccant dehumidification was proposed. The basic idea was to transfer the moisture in the material to the liquid desiccant by the dehumidifying-drying unit, and then the moisture absorbed by the liquid desiccant was separated and removed by liquid desiccant regeneration unit. Based on a brief introduction to the structure and principle of the device, an estimation formula for SMER (Specific moisture extraction rate) of the device was given and the SMER of the device can reach $6.36 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ under typical operating conditions. An experimental device for dehumidifying-drying unit was developed. The heat-sensitive cotton fiber with hydrophilic surface was used as the material to be dried and 50% LiBr aqueous solution was used as the liquid desiccant. And it showed that the moisture

in the material was successfully transferred to the liquid desiccant and the experimental device had characteristics such as self-stability and energy self-balance. A liquid desiccant regeneration experimental device based on hollow fiber bundle-sleeve tube air gap membrane distillation module was also developed, and the concentration and regeneration of 50% LiBr aqueous solution was successfully achieved, and the regeneration process had high separation efficiency.

Keywords: membrane distillation; liquid desiccant dehumidification; heat-sensitive material; drying; energy saving

干燥是食品加工的基本方式^[1-2],同时也是一种高能耗操作^[3-4]。食品中很多热敏物料需采用 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下的低温空气干燥^[5-7],由于低温空气的吸湿能力相对较弱,导致热敏物料的干燥能耗较高[低温空气从物料中带走的水分与消耗的能量之比,即除湿能耗比(SMER)^[8-9]通常 $<1.0 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$],制约了热敏性食品的干燥深加工。造成低温热风干燥能耗大的主要原因是干燥器排出废气中所蕴含热能的回收难度较大。徐俊等^[10]利用对水蒸气有强烈吸收作用的除湿溶液将干燥器排出的废气进行除湿再循环利用,提高了空气的吸湿能力并回收了废气蕴含的热能。但除湿溶液在除湿干燥过程中,溶液的浓度逐渐降低,吸湿能力减弱,需采取合理的方式对除湿溶液进行及时再生^[11-12]。

膜蒸馏是利用疏水微孔膜只允许蒸汽通过而不允许溶液通过的特性,将溶液中的水分与溶质分离的新技术^[13-14],用于再生除湿溶液时具有能耗低、分离效率高、可处理中高浓度除湿溶液等优势。因此,将膜蒸馏与溶液除湿干燥相集成,可实现热敏性食品的低能耗干燥。

1 工作原理

膜蒸馏与溶液除湿集成型干燥装置主要包括两个核

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:21576004)

作者简介:桂大李,男,天津科技大学在读硕士研究生。

通信作者:陈东(1968—),男,天津科技大学教授,博士。

E-mail: chendong@tust.edu.cn

收稿日期:2020-01-15

心单元和两个辅助单元,核心单元为除湿干燥单元和除湿溶液再生单元,辅助单元为冷却液循环单元和热泵单元,装置流程如图 1 所示。

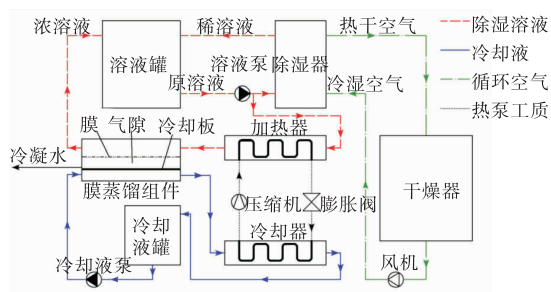


图 1 装置流程图

Figure 1 Flow chart of the device

由图 1 可知,除湿干燥单元主要由干燥器、风机和除湿器组成,用于物料干燥;除湿溶液再生单元主要由溶液罐、溶液泵、除湿器、加热器和膜蒸馏组件组成,用于再生除湿溶液;冷却液循环单元主要由冷却液罐、冷却液泵、膜蒸馏组件和冷却器组成,用于为膜蒸馏组件提供冷能;热泵单元主要由压缩机、加热器、膨胀阀和冷却器组成,用于为冷却液循环单元补充冷能,同时为除湿溶液再生单元提供热能。

该装置的工作过程为:压缩机、风机、溶液泵和冷却液泵运行,温度较高、湿度较低的热干空气进入干燥器中与热敏物料进行热质交换,并带走物料中的水分,流出干燥器时循环空气变为温度较低、湿度较高的冷湿空气进入除湿器;在除湿器中,除湿溶液与冷湿空气进行热质交换,除湿溶液吸收冷湿空气中的水分,同时也吸收水蒸气中的潜热而温度升高;冷湿空气被除湿溶液吸湿加热,流出除湿器时又变成热干空气并再次进入干燥器继续循环;除湿溶液在除湿器中吸收了来自循环空气的水分后浓度降低,成为稀溶液返回溶液罐。

当除湿溶液浓度降低时,其从循环空气中吸收水分的能力下降,因此需对其进行再生;除湿溶液再生可与除湿溶液在除湿器中吸收循环空气中的水分同时进行,使装置中除湿溶液浓度保持恒定;也可采用间歇方式对除湿溶液进行再生,即除湿溶液再生单元和除湿干燥单元不同时工作,待除湿干燥单元工作一段时间导致除湿溶液浓度降低至一定程度后,再启动除湿溶液再生单元,对除湿溶液进行浓缩再生,使除湿溶液浓度变为除湿干燥单元工作开始时的浓度;从保持装置运行参数稳定的角度而言,除湿溶液再生单元和除湿干燥单元同时工作,更便于装置的运行管理。

当除湿溶液再生单元和除湿干燥单元同时工作时,另一部分除湿溶液先进入加热器被加热器内的热泵工质加热升温,再进入膜蒸馏组件;在膜蒸馏组件中,除湿

溶液中的水分在膜表面汽化为水蒸气,水蒸气不断地穿过膜孔和气隙到达冷却板被凝结成冷凝水排出膜蒸馏组件(利用疏水微孔膜只允许水蒸气通过而不允许溶液通过的特性,除湿溶液的其他组分被截留),流出膜蒸馏组件的除湿溶液则变为浓溶液返回溶液罐;浓溶液与稀溶液在溶液罐中混合,维持溶液罐中除湿溶液浓度的稳定。

装置稳定运行时,干燥器内物料中水分的去除速率、除湿器内除湿溶液对循环空气中水蒸气的吸收速率和膜蒸馏组件内除湿溶液中水分在膜表面汽化且穿过膜孔的速率(即冷凝水排出速率)相同;循环空气在干燥器中放出的热能近似等于除湿器中吸收的热能;除湿溶液在加热器中获得的热能近似等于膜蒸馏组件中放出的热能;冷却液在冷却器中获得冷能近似等于膜蒸馏组件中提供水蒸气凝结所需的冷能。

膜蒸馏与溶液除湿集成型干燥装置的除湿能耗比(干燥器内物料除去的水分质量与压缩机耗电量之比)近似为:

$$SMER = \frac{1.5C_d C_m C_{hp} T_c}{T_c - T_e} \quad (1)$$

式中:

SMER——除湿能耗比, $\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$;

C_d ——除湿干燥单元的热效率;

C_m ——膜蒸馏组件的热效率;

C_{hp} ——热泵单元的热力学完善度;

T_c ——热泵工质在加热器中的放热温度, K ;

T_e ——热泵工质在冷却器中的吸热温度, K 。

取除湿干燥单元的热效率 0.9,膜蒸馏组件的热效率 0.9,热泵单元的热力学完善度 0.55,热泵工质在加热器中的放热温度 60°C (333 K),热泵工质在冷却器中的吸热温度 25°C (298 K)时,膜蒸馏与溶液除湿集成型干燥装置的 SMER 为 $6.36\text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

膜蒸馏与溶液除湿集成型干燥装置中最关键的两个单元是除湿干燥单元和除湿溶液再生单元(冷却液循环单元和热泵单元相对较简单、也较成熟)。因此对除湿干燥单元和除湿溶液再生单元分别建立试验装置,并对其运行特性进行验证研究。

2 除湿干燥单元的实验验证

2.1 试验材料与装置

试验材料(被干燥物料)为表面经亲水化处理的热敏性棉纤维,除湿溶液为质量分数为 50% 的 LiBr 溶液,试验装置具体结构如图 2 所示。

图 2 中,干燥器内直径 150 mm、高 1 000 mm,干燥器内布置热敏性棉纤维,除湿器内直径 107 mm、高 500 mm,除湿器内部填充聚丙烯材质的多面空心球填料,填充高度 330 mm。

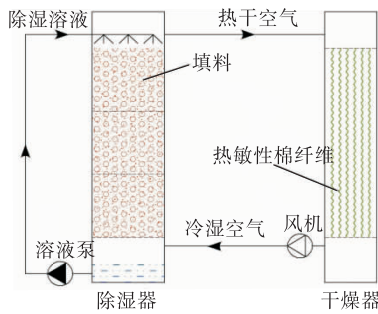


图2 除湿干燥单元试验装置

Figure 2 Experimental device of dehumidifying-drying unit

测量仪表有高精度数显温度计、DT-321S 温湿度计、ZRQF 智能风速计,用来测量除湿溶液进出除湿器温度、热干空气进干燥器温度和湿度、冷湿空气流出干燥器温度和湿度、循环空气风速等。

2.2 试验步骤

首先打开溶液泵和风机,将除湿溶液的流量和循环空气的风量调整至设定值;将除湿溶液预热至设定温度,用除湿溶液对循环空气进行加热,循环空气对干燥器内热敏性棉纤维进行预热,当循环空气温度稳定后,物料预热完毕,装置开始稳定运行。除湿干燥单元稳定运行后,记录试验装置的关键运行参数。

2.3 结果与分析

装置预热阶段,循环空气进出干燥器温度随时间变化如图3所示。

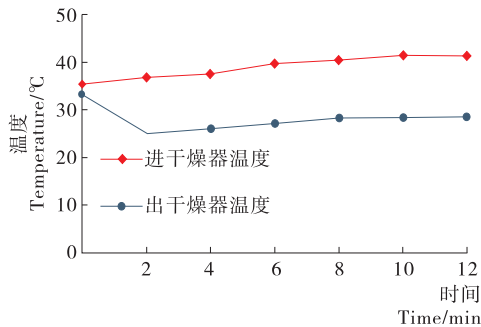


图3 循环空气进出干燥器温度随时间的变化规律

Figure 3 Temperature variation of circulating air into and out of dryer with time

由图3可知,装置预热阶段,循环空气进入干燥器温度先上升后趋于稳定;循环空气流出干燥器温度先迅速下降后上升再趋于稳定。这是由于预热阶段初期,进入除湿器的循环空气温度较低,且循环空气与除湿溶液间尚未形成充分的传热传质,所以流出除湿器(进入干燥器)温度随预热的进行逐渐升高;同时干燥器内物料的温度较低,对循环空气的吸热较多,导致2 min前循环空气流出干燥器温度迅速下降,随着物料温度的逐渐上升,物

料对循环空气的吸热逐渐减小,循环空气流出干燥器温度逐渐上升并趋于稳定,装置预热完成。

试验装置稳定运行的典型工况参数为:除湿溶液质量流量 16.8 g/s,除湿溶液进入除湿器温度 46.6 °C,除湿溶液流出除湿器温度 46.3 °C;循环空气质量流量 10.3 g/s,循环空气进入干燥器(流出除湿器)温度 42.7 °C、含湿量 23.2 g 水蒸气/kg 干空气,循环空气流出干燥器(进除湿器)温度 29.0 °C、含湿量 25.7 g 水蒸气/kg 干空气;循环空气对物料的干燥速率 0.093 kg/h。

除湿干燥试验装置的运行试验表明,除湿干燥单元具有如下特性:① 自稳定特性。即设定好除湿溶液的温度、流量和循环空气流量后除湿干燥单元会自动达到一个稳定运行状态。② 能量自平衡特性。即除湿干燥单元达到稳定运行状态后,除湿溶液进出除湿器的温度变化较小,基本不需再额外输入能量即可实现物料中水分向除湿溶液中转移。

3 除湿溶液再生单元的实验验证

3.1 试验材料与装置

试验料液为质量分数为 50% 的 LiBr 水溶液。基于膜蒸馏的除湿溶液再生单元中,膜蒸馏组件是核心部件。试验采用的膜蒸馏组件为中空纤维束—套管型气隙式膜蒸馏组件,如图4所示。

由图4可知,膜蒸馏组件的基本结构为壳体内布置多根金属套管,套管内布置多根中空纤维疏水膜管;料液从膜蒸馏组件上方进入,流入中空纤维疏水膜管内;在流经中空纤维疏水膜管过程,料液中的水分在膜管内表面汽化,水蒸气穿过膜孔到达膜管外,再穿过膜管与套管内壁间的空气间隙到达套管内壁,并在套管内壁被凝结成冷凝水,从膜蒸馏组件的左下方排出;水蒸气在套管内壁冷凝放出的热量被套管外流动的冷却液带走。膜蒸馏组件的材料和具体参数见表1。

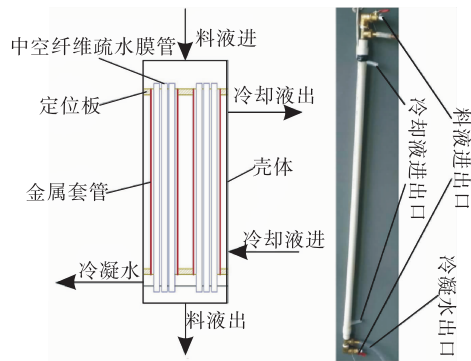


图4 试验用膜蒸馏组件

Figure 4 The experimental membrane distillation module

表 1 膜蒸馏组件参数表

Table 1 Parameters of the membrane distillation module

壳体/mm		套管/mm		中空纤维疏水膜管/mm			膜孔 径/ μm	孔隙 率	套管 根数	单根套管内 中空纤维疏 水膜管根数	中空纤维 疏水膜管 总根数	膜总 面积/ m^2
内径	外径	内径	外径	内径	外径	有效长度						
21.0	25.0	5.00	6.00	1.00	1.80	900	0.120	0.680	7	3	21	0.059 4

3.2 试验步骤

检测膜蒸馏组件有无渗漏、亲水化等缺陷,确认完好后连接加热器、膜蒸馏组件、冷却器等部件;调节加热器和冷却器使进膜蒸馏组件的溶液温度和进膜蒸馏组件的

冷却液温度达到设定值,待装置进入稳定运行状态时测量膜蒸馏组件再生除湿溶液的运行数据。

3.3 结果与分析

膜蒸馏组件再生除湿溶液的典型运行数据见表 2。

表 2 除湿溶液再生试验数据

Table 2 Experimental parameters of regeneration of liquid desiccant

除湿溶液			冷却液			膜蒸馏组	膜蒸馏组件
流量/ ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)	进膜蒸馏组 件温度/ $^{\circ}\text{C}$	出膜蒸馏 组件温度/ $^{\circ}\text{C}$	流量/ ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)	进膜蒸馏组件 温度/ $^{\circ}\text{C}$	出膜蒸馏组件 温度/ $^{\circ}\text{C}$	件产水速率/ ($\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$)	产水电导率/ ($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)
9.138	46.9	40.1	9.902	9.6	12.5	50.0	0.415

由表 2 可知,膜蒸馏组件可有效地将水分从除湿溶液中分离出来,并且膜蒸馏组件再生除湿溶液得到的冷凝水的电导率很低,表明膜蒸馏组件再生除湿溶液具有很高的分离效率。

4 结论

膜蒸馏与溶液除湿集成干燥装置可实现热敏物料的低湿、低能耗干燥;利用除湿干燥试验装置对表面经亲水化处理的热敏性棉纤维的低湿干燥试验表明,不但成功地实现了物料中水分向除湿溶液中的转移,且试验装置具有自稳定和能量自平衡等特性;通过中空纤维束一套管型气隙式膜蒸馏组件对除湿溶液的再生试验表明,膜蒸馏技术可实现除湿溶液中水分的分离,且具有很高的分离效率。给出了膜蒸馏与溶液除湿集成干燥装置的除湿能耗比 $SMER$ 的估算公式,通过典型工况参数计算表明,其 $SMER$ 可达 $6.36 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,为普通低温热风干燥装置降低能耗的 6 倍以上,具有很好的产业化应用优势。后续可建立集成装置的数学模型,掌握集成装置性能指标随关键要素的变化规律,为集成装置的设计与优化提供参考。

参考文献

- [1] 张黎骅,武莉峰,党鑫凯,等. 鲜切高山野山药片微波间歇干燥特性研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(1): 39-44, 92.
- [2] 冯爱国,李国霞,李春艳. 食品干燥技术的研究进展[J]. 农业机械, 2012, 63(18): 90-93.
- [3] 董继先,李靖,袁越锦,等. 基于能耗分析的苹果片干燥试

验研究[J]. 食品工业, 2016, 37(5): 53-57.

- [4] 翁拓,吴家正,范立,等. 粮食干燥技术的能耗浅析[J]. 节能技术, 2014, 32(3): 210-213.
- [5] 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.
- [6] 崔莉,宋双双,杜利平,等. 低温鼓风干燥过程中皱皮木瓜的褐变及其活性成分变化研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(6): 70-74, 123.
- [7] 张芳,黄玉龙,汤莹,等. 苹果片太阳能低温吸附干燥工艺优化与模型研究[J]. 现代食品科技, 2019, 35(8): 160-167.
- [8] 胡灯运,何伟,张世超,等. 太阳能—空气源热泵联合干燥系统设计及干燥枸杞的实验研究[J]. 新能源进展, 2018, 6(2): 83-89.
- [9] 李伟钊,盛伟,张振涛,等. 热管联合多级串联热泵玉米干燥系统性能试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 278-284.
- [10] 徐俊,赵纯清,周广生,等. 油菜籽低温除湿干燥特性研究[J]. 广东农业科学, 2014, 41(8): 145-148.
- [11] 程清,张小松. 一种用于除湿溶液的新型太阳能耦合再生系统[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2014, 44(1): 110-115.
- [12] 曾台焯,张小松,陈瑶. 利用冷凝热再生低浓度除湿溶液的实验研究[J]. 制冷学报, 2018, 39(1): 76-82.
- [13] 贾晓敏,陈东,谢继红,等. 典型膜蒸馏技术的性能及发展分析[J]. 化工装备技术, 2016, 37(2): 19-23.
- [14] GONZALEZ D, AMIGO J, SUAREZ F. Membrane distillation: Perspectives for sustainable and improved desalination [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 80: 238-259.