

文章编号: 0253-4339(2013)04-0010-04

doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2013.04.010

低品位热源驱动的冻干装置理论分析

牛梅梅 张绍志 洪大良 陈光明

(浙江大学制冷与低温研究所 杭州 310027)

摘 要 对一种低品位热源驱动的冷冻干燥装置进行了理论分析,该装置中冷阱采用连续可再生的氯化锂溶液,制冷系统为氨水吸收式。热力学理论分析表明,在我国华东地区夏季工况下,使用该装置冻干共晶点温度在 $-10 \sim -35^{\circ}\text{C}$ 之间的物料时,每脱除 1kg 水分可以有效利用 13573 ~ 20747kJ 的低品位热量,与传统的真空冷冻干燥机相比,节能潜力显著。

关键词 低品位热源;冷冻干燥;节能;氯化锂溶液

中图分类号: TQ028.6⁺3; TB61

文献标识码: A

Theoretical Analysis of Freeze-drying Apparatus Driven by Low-grade Heat Source

Niu Meimei Zhang Shaozhi Hong Daliang Chen Guangming

(Refrigeration and Cryogenic Engineering Institute, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China)

Abstract Theoretical analysis is made for a freeze dryer driven by low-grade heat source. Its condenser utilizes LiCl solution which is continuously regenerated, and its refrigeration system adopts ammonia-water absorption type. Through thermodynamic analysis, it is demonstrated that 13573-20747kJ heat is needed for the removal of 1kg water from the material which eutectic temperature varies between -10 and -35°C , if the freeze dryer is used in summer in east China. The energy saving potential is thus significant.

Keywords low-grade heat source; freeze drying; energy saving; LiCl solution

近年来,随着“节能减排”力度的不断加大,低品位热源在制冷技术中的应用范围越来越广泛,如太阳能热驱动的吸收式制冷;低品位热源驱动的吸附式制冷、蒸汽喷射式制冷、转轮式除湿空调;可利用低品位热源的热声驱动脉管制冷机等^[1-6]。上述应用主要集中于空调领域。

真空冷冻干燥技术是一种很好的保存生物活性物质的干燥方法,现已广泛应用于食品和制药等领域^[7]。现有真空冷冻干燥机设备复杂、成本高、能耗高,使其更大范围的推广受到了一定的限制^[8]。为了降低冷冻干燥的能耗和运行成本,这里提出一种低品位热源驱动的真空冷冻干燥装置,对其进行了理论分析。

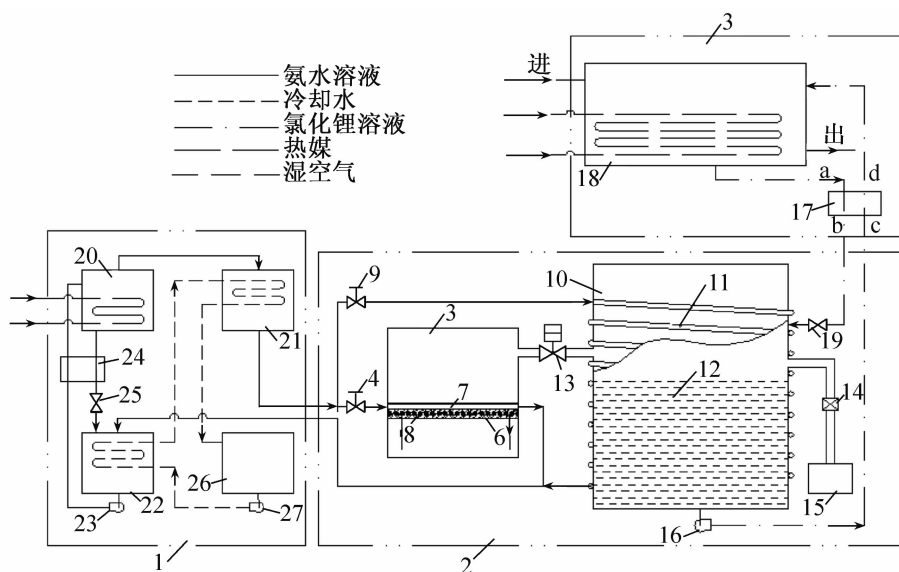
1 装置组成及工作流程

该装置由单级氨水吸收式制冷系统 1、真空干燥系统 2 和氯化锂溶液再生系统 3 组成,如图 1 所示。其工作流程为:启动氨水溶液泵 23,冷却水泵 27 和氯化锂溶液泵 16;氨水溶液从吸收器 22 进入发生器

20,由于热源的加热使沸点较低的氨蒸汽从氨水溶液中溢出,进入冷凝器 21,其余的氨水稀溶液经过溶液热交换器流向吸收器;氨蒸汽在冷凝器内冷凝为氨溶液,分别通过第一膨胀阀 4 进入隔板内蒸发换热盘管 7,第二膨胀阀 9 进入冷阱盘管 11,蒸发冷却后,制冷剂汇总回到吸收器 22,完成制冷剂的循环;吸收器内的氨水溶液与从冷却塔 27 流出的冷却水进行热交换,冷却水从吸收器流出后进入冷凝器进一步与氨蒸汽进行换热,随后回到冷却塔,完成冷却水的循环。待预冻过程结束后,开启真空泵 15,干燥箱和冷阱内真空抽至 30Pa 以下,同时热媒加热管 8 加热搁板 6,使搁板温度升至冻干物品的共晶点温度(不超过共晶点温度),待一次干燥结束后,继续加热隔板,去除冻干物质中的结合水;干燥过程中,氯化锂浓溶液吸收干燥箱内物质升华出的水蒸汽,吸收后的稀溶液由溶液泵 16 运送到溶液回热器 17,与高温浓溶液换热,进入再生器 18,在热源加热时,与湿空气进行传热传质,实现氯化锂溶液的再生,再生器出口的高温浓溶液通过节流阀 19 进入冷阱,完成氯化锂溶

基金项目:国家重大基础研究计划(2010CB227304)及国家自然科学基金(50976097)资助项目。(The project was supported by the National Basic Research of China(No. 2010CB227304) and the National Natural Science Foundation of China(No. 50976097).)

收稿日期:2012 年 7 月 2 日



1 氨水吸收式制冷系统 2 真空冷冻干燥系统 3 再生系统 4 第一膨胀阀 5 冷冻干燥箱 6 搁板
7 蒸发换热盘管 8 热媒加热管 9 第二膨胀阀 10 冷阱 11 冷却盘管 12 氯化锂溶液 13 真空隔膜阀
14 电磁放气阀 15 真空泵 16 溶液泵 17 溶液回热器 18 再生器 19 节流阀 20 发生器
21 冷凝器 22 吸收器 23 氨水溶液泵 24 溶液热交换器 25 氨水节流阀 26 冷却塔 27 冷却水泵

图 1 低品位热源驱动的冷冻干燥装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of freeze-drying apparatus driven by low-grade heat source

液的循环。

该装置利用低品位热源来驱动氨水制冷系统的发生器,发生器出口的热源,进一步为氯化锂溶液再生系统中的再生器提供热量,再生器出口的热源,继续为隔板提供加热量,以此来充分实现低品位热源的梯级利用。

2 循环热力学分析

主要分析了该装置中制冷系统、再生系统和加热系统所能利用的低品位热量。制冷系统采用的是氨-水工质对,再生系统采用的是氯化锂溶液与湿空气,加热系统采用低品位热媒,氨-水工质对的物性以及湿空气的物性参数均由 EES 软件查得,氯化锂溶液的物性则由文献[9]拟合的公式计算所得。计算条件是:以冷冻干燥 1kg 的纯水为基准,制冷系统冷凝温度和吸收温度均取 40℃;再生系统为开式系统,采用华东地区夏季平均工况下的湿空气与氯化锂溶液进行传热传质,传质压差取为 2kPa,再生器热端温差取为 5℃。为简单起见,对系统做如下假设:1)系统处于稳定工作状态;2)冷凝器人口为纯制冷剂,出口为过冷 2℃ 的过冷液体;3)蒸发器出口为饱和蒸汽;4)不考虑管道压降及管道与环境之间的换热;5)溶液换热器的冷端换热温差为 5℃;6)再生器出口热端温差为 5℃;7)高低压发生器出口的溶液以及冷阱进出口、再生器进出口的溶液均是饱和

溶液。

2.1 制冷系统发生热

由于冻干物品的共晶点基本上在 -10 ~ -35℃ 之间^[10],所以作者采取了四个蒸发温度进行能量分析,分别为 -20℃、-25℃、-30℃、-35℃,冷凝温度和吸收温度均取 40℃,四种蒸发温度对应的发生温度^[11]以及氨水制冷系统的 COP 见表 1。

干燥箱冷量 Q_1 为 1kg 的纯水从常温(这里取 30℃)降到蒸发温度所需要的冷量, kJ。

$$Q_1 = \int_{30}^0 c_p dT + 334.5 + \int_0^{t_e} c_p dT \quad (1)$$

式中: t_e 为制冷系统的蒸发温度,℃; c_p 为纯水的比热容, kJ/(kg·℃); 334.5 kJ 为 0℃ 时 1kg 的纯水由液态变为固态所需要的冷量。

冷阱冷量 Q_2 包括氯化锂溶液由常温(这里取 30℃)降至蒸发温度所需要的冷负荷,氯化锂溶液吸收 1kg 的水蒸汽所放出的热量,以及溶液经再生器带来的热量, kJ。

$$Q_2 = m \times (h_{30} - h_{t_e}) + (m \times h_{t_e} + m_s \times h_s - m_b \times h_b) + (m_c \times h_c - m_b \times h_b) \quad (2)$$

式中: m 为吸收 1kg 的水蒸汽所需要的氯化锂浓溶液循环量, kg; h_{30} , h_{t_e} 分别为氯化锂溶液在 30℃ 和蒸发温度下对应的焓值, kJ/kg; h_s 为冷阱内的水蒸汽在真空压力、蒸发温度下对应的焓值, kJ/kg; m_s 为水蒸汽的质量, kg; h_b , h_c 分别为冷阱内氯化锂溶液进、

出口状态下的焓值, kJ/kg。

总制冷量: $Q_c = Q_1 + Q_2$ (3)

发生器所需要的热量: $Q_{gen} = Q_c / COP$ (4)

表 1 四种蒸发温度下的发生热

Tab.1 Generating heat under four evaporating temperatures

$t_e/^\circ\text{C}$	$t_g/^\circ\text{C}$	COP	Q_c/kJ	Q_{gen}/kJ
-20	125	0.4663	3047	6534
-25	135	0.3854	3054	7924
-30	150	0.3136	3081	9823
-35	170	0.2273	3114	13698

2.2 再生系统再生热

冷阱内氯化锂溶液与制冷剂的温差为 2℃, 则根据氯化锂溶液的温度, 确定结冰点和结晶点对应的浓度, 氯化锂溶液吸收水蒸汽是由于氯化锂溶液的表面蒸汽压 < 水蒸汽的蒸汽压, 所以在一定温度下, 要保证足够的压差, 就需选择合适的浓度范围, 图 2 为此压差随氯化锂水溶液的温度、浓度的变化关系。

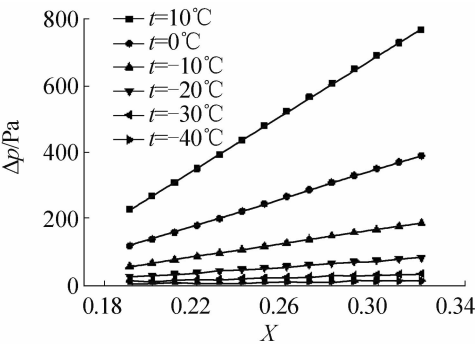


图 2 不同温度下氯化锂水溶液与纯水的
蒸汽压差随溶液浓度的变化

Fig.2 The variation of vapor pressure difference between aqueous solution of lithium chloride and pure water with the solution's concentration at different temperatures

由图 2 可以看出, 同一温度下, 随着氯化锂溶液浓度的增加, 压差增大; 同一浓度下, 随着温度的降低, 压差减小。四种蒸发温度下所选取的氯化锂溶液浓度范围见表 2。

设氯化锂浓溶液的浓度为 X_b , 吸收 1kg 的水蒸汽后的稀溶液浓度为 X_c , 则吸收 1kg 的水蒸汽所需要的浓溶液循环量

$m = X_b / (X_b - X_c)$ (5)

已知湿空气入口参数, 可以求出水蒸汽的分压力 p_v , 由于再生过程必须满足氯化锂溶液表面蒸汽压 $p_s > p_v$, 所以选取再生器出口溶液温度 80℃, 对应的空

气出口温度 $t_o = 75^\circ\text{C}$, 水蒸汽分压力 $p_{v,o} = p_s - 2\text{kPa}$ 。

对溶液回热器 17 进行能量守恒:

$m_b \times h_b + m_d \times h_d = m_a \times h_a + m_c \times h_c$ (6)

式(6)中, a, b, c, d 分别为溶液换热器热端进出口状态点和冷端进出口状态点(见图 1); 氯化锂溶液各个状态点的焓值可以根据其温度、浓度计算得到。

吸收 1kg 的水蒸汽所需干空气质量:

$m_{air} = \frac{1}{d_{out} - d_{in}}$ (7)

式中: d_{in} , d_{out} 分别为空气进、出口的含湿量, kg/(kg·干), 其值由 EES 软件输入温度、相对湿度和压力求出。

对再生器进行能量守恒得:

$Q_{reg} = m_a \times h_a - m_d \times h_d + m_{in} \times h_{in} - m_{out} \times h_{out}$ (8)

式中: m_{in} , m_{out} 分别为再生器进出口空气的质量, kg; h_{in} , h_{out} 分别为再生器进出口空气的焓值, kJ/kg; Q_{reg} 为冻干 1kg 的纯水所需要的再生热, kJ。

表 2 四种蒸发温度下的再生热

Tab.2 Regenerating heat under four evaporating temperatures

$t_e/^\circ\text{C}$	$[X_b, X_c]$	m/kg	Q_{reg}/kJ
-20	[0.17, 0.35]	0.94	4189
-25	[0.19, 0.33]	1.36	4191
-30	[0.23, 0.33]	2.3	4195
-35	[0.25, 0.32]	3.57	4199

2.3 加热量

该装置冻干箱内部采用热媒加热系统, 预冻过程结束后, 热媒加热搁板, 使冻干物质的温度升至共晶点温度, 待一次干燥结束后, 再进一步加热去除物质内的吸附水。在此, 将预冻温度设为共晶点温度以下 2~3℃, 所以加热过程中显热所需加热量甚小, 忽略不计, 而潜热量则为 1kg 冰的升华热, 即:

$Q_{heat} = 2850\text{kJ}$ (9)

2.4 总热量

$Q = Q_{gen} + Q_{reg} + Q_{heat}$ (10)

3 节能分析与比较

由表 3 可看出, 如果采用该装置从共晶点温度 -30℃ 左右的物料中脱除 1kg 水分, 可以有效使用 16868kJ 的低品位热能。而采用蒸汽加热的传统真空冷冻干燥机单位脱水量能耗标准为 1.22(kW·h)/

kg^[12], 参照该指标, 此装置每冻干脱除 1kg 水分不仅可以减少耗电量, 还能充分利用低品位热源, 因此节能效果显著。

另外, 此装置比传统的冻干机多了一个氯化锂溶液泵, 经计算, 四种蒸发温度下, 单位脱水过程中氯化锂溶液泵的耗功量仅为 175 ~ 398J, 与真空泵、加热系统耗功相比, 数值较小, 可以忽略。

表 3 四种蒸发温度下所利用的低品位热量
Tab. 3 Low-grade heat used under four evaporating temperatures

$t_e/^\circ\text{C}$	-20	-25	-30	-35
Q/kJ	13573	14966	16868	20747

4 结论

对一种采用低品位热源驱动的冷冻干燥装置进行了理论分析, 针对我国华东地区夏季工况下, 从具有不同共晶点的物料中脱除 1kg 水分所需消耗的热量进行了估算。该装置的提出不仅为低品位余热利用找到了一条新的途径, 而且为降低冷冻干燥产品生产成本、扩大冻干技术的应用范围提供了新的思路。

参考文献

[1] 郑爱平. 低品位热能在制冷技术中的应用研究[J]. 新能源, 2000, 22(3): 36-39. (Zheng Aiping. Application of low-grade thermal energy in refrigerating technology [J]. New Energy, 2000, 22(3): 36-39.)

[2] Fan Y, Luo L, Souyri B. Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and Applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11(8): 1758-1775.

[3] 王如竹, 王丽伟. 低品位热能驱动的绿色制冷技术: 吸附式制冷 [J]. 科学通报, 2005, 50(2): 101-111. (Wang Ruzhu, Wang Liwei. Green refrigeration technology driven by low-grade energy: Adsorption refrigeration [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(2): 101-111.)

[4] 李树江, 陈亮, 桂珺, 等. 蒸汽喷射制冷的现状及发展趋势[J]. 制冷与空调, 2007, 07(6): 6-10. (Li Shu-jiang, Chen Liang, Gui Jun, et al. Development trend and current situation of steam ejector refrigeration [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2007, 07(6): 6-10.)

[5] 代彦军, 腊栋. 转轮式除湿空调研究与应用最新进展

[J]. 制冷学报, 2009, 30(4): 1-8. (Dai Yanjun, La Dong. Rotary desiccant air conditioning systems: A State of the art Review [J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(4): 1-8.)

[6] 汤珂, 陈国邦, 孔博, 等. 可利用低品位热源的热声驱动脉管制冷机[J]. 太阳能学报, 2004, 25(5): 666-669. (Tang Ke, Chen Guobang, Kong Bo, et al. A thermoacoustically drive pulse tube refrigerator: capable of using low-qualified heat source [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2004, 25(5): 666-669.)

[7] 赵鹤皋, 郑效东, 黄良瑾, 等. 冷冻干燥技术与设备 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005: 1-9.

[8] 赵成刚, 刘素华. 冻干食品加工过程中的能耗分析 [J]. 食品技术, 2003(3): 8-9. (Zhao Chenggang, Liu Suhua. Analysis of energy consumption of frozen-dry foods in processing [J]. Food Science and Technology, 2003(3): 8-9.)

[9] Manuel R Conde. Properties of aqueous solutions of lithium and calcium chlorides: Formulations for use in air conditioning equipment design [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2004 (43): 367-382.

[10] 崔清亮, 郭玉明, 程正伟. 冷冻干燥物料共晶点和共熔点的电阻法测量 [J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 65-69. (Cui Qingliang, Guo Yuming, Cheng Zhengwei. Measurement of the eutectic point and melting point of the freeze-dried materials based on electric resistance method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 65-69.)

[11] 洪大良, 唐黎明, 陈光明. 一个高效的两级吸收式制冷新循环 [J]. 太阳能学报, 2010, 31(9): 1141-1145. (Hong Daliang, Tang Liming, Chen Guangming. A novel two stage absorption refrigeration cycle [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2010, 31(9): 1141-1145.)

[12] 全国冷冻设备标准化技术委员会. JB/T10285-2001 食品真空冷冻干燥设备 [S]. 北京: 机械科学研究院出版, 2001.

作者简介
牛梅梅, 女 (1989 -), 硕士研究生, 浙江大学制冷与低温研究所, 15824127987, E-mail: niumeimei@zju.edu.cn. 研究方向: 真空冷冻干燥节能技术。

About the author
Niu Meimei (1989 -), female, master, Refrigeration and Cryogenic Engineering Institute of Zhejiang University, 15824127987, E-mail: niumeimei@zju.edu.cn. Research fields: Energy saving technology of vacuum freeze-drying.