

# 中药热泵低温蒸发过程模拟与实验研究

王晓静<sup>1</sup>, 于曰铭<sup>1\*</sup>, 祝秀<sup>1</sup>, 刘洋<sup>1</sup>, 马骏<sup>2</sup>

(1. 天津大学化工学院, 天津 300072; 2. 天津津大莱博科技有限公司, 天津 300072)

**摘要:**通过对中药药液 ZY-3 的低温蒸发过程的 Aspen 模拟, 以模块化的方式先后确定了中药药液的露点温度, 使中药药液蒸发和使溶剂蒸气冷凝所需的热量和冷量, 通过其热量和冷量的计算匹配出相应的热泵系统, 最终得出蒸发操作的适宜条件, 即在 0.01 MPa (绝压) 的压力下蒸发, 溶剂冷凝到 20℃。随后组建实验设备, 以实验的方法来验证 Aspen 模拟的可能性, 通过对实验数据和模拟数据的采集、计算与分析, 结果表明, 选定的压缩机在正常工作条件下, 其冷量和热量可以很好地与中药 ZY-3 药液蒸发所需热量和蒸气冷凝所需冷量相匹配; 在操作压力为 0.01 MPa (绝压)、操作温度为 25℃ 的操作条件下, ZY-3 药液的进料量为 10.62 kg/h, 可以蒸发 9.94 kg/h 溶剂, 产品含溶剂质量分数约为 26%, 远远好于厂家对于产品指标的要求。

**关键词:**热泵; 中药提取; 低温蒸发

**中图分类号:** TQ051.8

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2016)09-0178-04

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.09.044

## Simulation and experimental study of Chinese traditional medicine heat pump for low temperature evaporation

WANG Xiao-jing<sup>1</sup>, YU Yue-ming<sup>1\*</sup>, ZHU Xiu<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, MA Jun<sup>2</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. JinDaLaiBo Science and Technology Co., Ltd., Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Through simulation of evaporation process of Chinese traditional liquid medicine ZY-3, the dew point temperature of liquid medicine ZY-3 is determined. The heat quantity and cold quantity that required for the evaporation of liquid medicine and condensation of the vapor are also calculated. The corresponding heat pump system is eventually achieved based on the heat quantity and cold quantity. The optimal conditions for evaporation operation are 0.01 MPa of working pressure and 20℃ of the condensing temperature. The simulation data and the experience data are collected, calculated and analyzed. The result shows that under normal operation condition, the cold quantity and the heat quantity of selected compressor could match the evaporation quantity very well. Under 25℃ and 0.01 MPa (absolute pressure), the feed rate of ZY-3 is 10.62 kg/h, the evaporation capacity is 9.94 kg/h and the mass fraction of solvent in the final product is about 26%, which are much better than the requirement of the product indicator from the manufacture.

**Key words:** heat pump; extraction of Chinese Traditional Medicine; low temperature evaporation

在中药制药的生产过程中,特别是在中成药品口服液类药品的生产过程中,药液的浓缩是一个非常重要的工艺过程。而在药液的浓缩过程中,蒸发是浓缩的主要手段,就中药制药浓缩生产过程而言,目前普遍采用的浓缩方法就是蒸发。因此,蒸发操作是节能工作所重点关注的问题<sup>[1]</sup>。由于制药行业利润空间大,不少企业不重视能源的合理利用,在药品生产过程中普遍存在能源使用不合理的现象,能源的浪费现象层出不穷<sup>[2-3]</sup>。

在蒸发浓缩生产过程中,热敏性物料蒸发操作应当引起绝对的重视,其原因是由于热敏性物料一旦遇到高温就会发生质变<sup>[4]</sup>,因此低温蒸发技术越来越受到人们的重视,为了减小压缩机的体积、延长压缩机的寿命、减小初投资和提高经济效益,低温热泵蒸发系统应运而生<sup>[5]</sup>。笔者针对中药浓缩蒸发过程中,热敏物料低温浓缩蒸发和低沸点溶剂回收工艺背景,结合真空浓缩技术及热泵蒸发的原理,以

国内某制药厂提供的中药药液 ZY-3 为研究对象,通过模拟和实验确定中药药液 ZY-3 的蒸发过程、蒸发操作条件、蒸发所需要的热负荷,以及冷凝溶剂所需要的冷量;确定与中药药液 ZY-3 蒸发过程相匹配的热泵系统,确定热泵设计参数。

## 1 模型建立

在系统庞大时,传统建模方法会妨碍对系统进行深入分析和研究<sup>[6]</sup>,对于中药热泵低温蒸发过程的模拟,本文中采用模块化建模的方式,将复杂多变的热力学系统看作由几个典型模块组成的系统,用能量守恒原理和质量守恒原理来分步建立模型求解。通过选择相应的各个部件的单元操作模型并规定操作条件,可以得到出口状态点参数值,在 Aspen 中通过序贯模块法进行计算,前一模块的出口参数值作为后一模块的入口参数值,通过调整模型的操作条件和初始物流的参数值使流程收敛<sup>[7]</sup>。其中

收稿日期:2016-01-29

作者简介:王晓静(1963-),男,副教授,研究方向为化工机械设备、干燥和造粒技术等;于曰铭(1991-),男,硕士生,研究方向为化工机械设备的传热与传质,通讯联系人,022-27408815,693850412@qq.com。

物性的计算采用 SRK 方程。各个部件的模型由式(1)~(7)表示。

压缩机耗功可以由式(1)和式(2)决定:

$$\omega = h_{comp,in}(t,p,x) - h_{comp,out}(t,p,x) \quad (1)$$

$$q_m \omega / \eta_i \eta_m = w \quad (2)$$

压缩机出口温度可以由式(3)确定:

$$t_{comp,out} = f(t_{comp,in}, \eta_i, x) \quad (3)$$

式中,  $\omega$  为压缩机比功;  $h_{comp,in}$  为压缩机进口焓;  $t_{comp,out}$  为压缩机出口焓;  $t, p, x$  分别为对应的温度、压力、低沸点组分摩尔分率。  $q_m$  为压缩机质量流量;  $\eta_i$  为指示效率;  $\eta_m$  为机械效率。其中  $\eta_i, q_m, x$  为未知量。

气液分离器模型由气液相平衡计算得到:

$$q_{m,main}, q_{m,sub}, x_{main}, x_{sub} = f(p, x, q_m, t_{gas-liq}) \quad (4)$$

式中,  $q_{m,main}$  为主流质量流量;  $q_{m,sub}$  为支流质量流量;  $x_{main}$  为主流低沸点组分摩尔分率;  $x_{sub}$  为支流低沸点组分摩尔分率;  $q_{m,main}, q_{m,sub}, x_{main}, x_{sub}$  都是未知数。

换热器模型由能量守恒和质量守恒方程(5)~(7)表示:

$$Q_{cond} = q_m [h_{cond,in}(t,p,x) - h_{cond,out}(t,p,x)] \quad (5)$$

$$Q_{evap} = q_{m,main} [h_{evap,in}(t,p,x) - h_{evap,out}(t,p,x)] \quad (6)$$

$$q_m = q_{m,main} + q_{m,sub} \quad (7)$$

式中,  $h_{in}, h_{out}$  分别是换热器入口和出口焓值, 下标 evap 表示冷凝蒸发器热流, 下标 cond 表示冷凝蒸发器冷流。

### 1.1 中药低温蒸发过程露点温度的确定

根据上述中药蒸发的特点, 选择压力为 0.01 MPa(绝压)的条件下, 分段模拟计算中药成分质量分数为 5%、25%、50%、75% 时的蒸发温度, 已确定不同质量分数时, 同一真空度下, 蒸发温度变化的范围。图 1 为流程模拟的温度、压力、流量等计算结果, 其他结果可从 stream table 中查看。

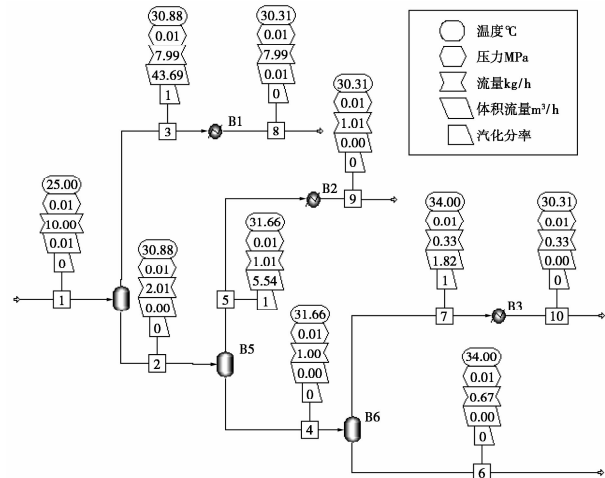


图 1 中药蒸发过程模拟

由流程模拟的结果可以得出, 随着中药成分质量分数的升高, 在真空度不变的条件下, 沸点是升高的, 温度变化幅度约为 4°C, 由于其变化幅度不大, 以及考虑实际实验中应便于操作的特点, 本文中 ZY-3 蒸发过程按照连续过程模拟计算。在压力为 0.01 MPa(绝压)时, 溶剂的露点温度为 30.31°C。

### 1.2 中药低温过程热负荷的确定

根据中药 ZY-3 蒸发过程的特点, 采用连续蒸发过程模拟, 确定在真空度为 0.01 MPa 下蒸发过程中所需要的热量, 以及蒸发的溶剂蒸气在此真空度下冷凝所需要的冷量。中药药液 ZY-3 进料组成(质量分数)为 95% 溶剂, 5% 中药成分, 进料温度为 25°C, 在蒸发压力 0.01 MPa(绝压)条件下进行蒸发, 溶剂冷凝到 20°C, 中药产品有效成分质量分数达到 75% 左右。模拟过程如图 2 所示。

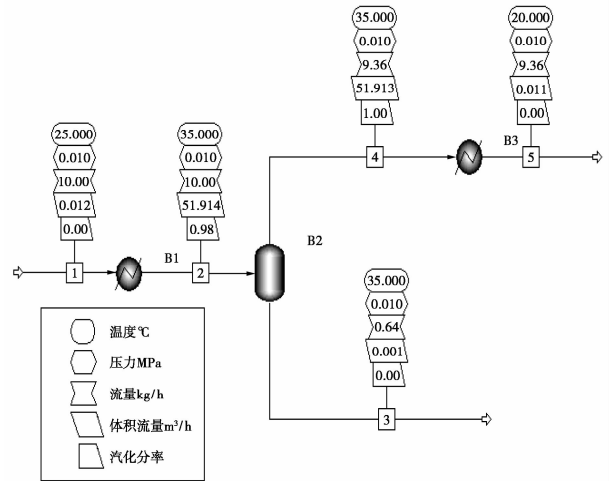


图 2 中药蒸发过程热负荷模拟

通过 Aspen 模拟计算, 得到进料量为 10 kg/h, 进料温度为 25°C, 在真空度为 0.01 MPa(绝压)的操作条件下, 使中药药液蒸发, 溶剂蒸汽冷凝到 20°C, 模拟结果所需要的热量为 2.56 kW, 冷量为 2.60 kW。

### 1.3 中药热泵低温蒸发过程匹配模拟

通过 Aspen 模拟计算, 确定了中药药液 ZY-3

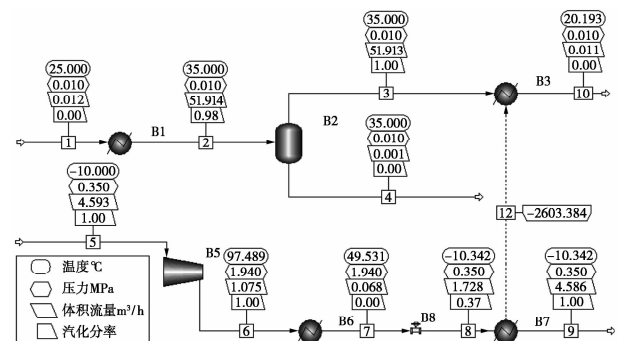


图 3 中药热泵低温蒸发过程模拟

蒸发过程中所需要的热量和冷量,根据模拟计算的结果匹配相适应的热泵系统,合并中药蒸发系统与热泵系统进行匹配模拟计算,模拟过程如图 3 所示,并根据热泵系统模拟计算结果确定压缩机的选型,为后续的实验研究做准备。

根据图 3 所示模拟结果,进行了热泵系统的匹配模拟,使用氟利昂(R22)作为热泵工质,结果如表 1 所示。

表 1 热泵系统模拟数据

名称	工质名称	工质流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	工质冷凝 温度/ $^{\circ}\text{C}$	工质蒸发 温度/ $^{\circ}\text{C}$	制冷量/ kW
参数	R22	4.59	49.53	-10.34	2.60

### 1.4 模拟计算结果

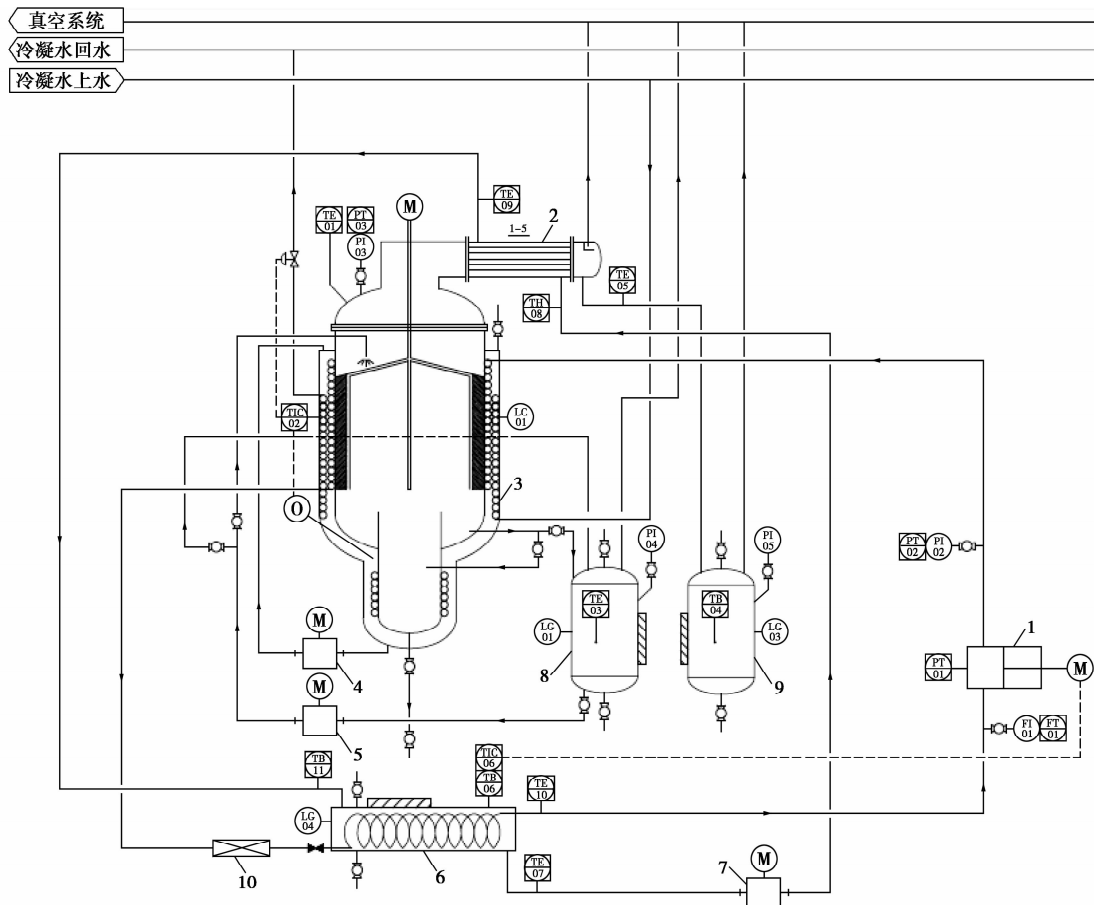
通过运用 Aspen Plus 模拟软件对 ZY-3 中药药液蒸发过程及热泵系统匹配的模拟,确定了中药药

液蒸发过程采用连续蒸发操作;压力为 0.01 MPa (绝压)的条件下操作,蒸发釜处理量为 10 kg/h 时,蒸发量为 9.33 kg/h 所需要的热量为 2.56 kW,溶剂蒸气的冷凝需要 2.60 kW 的冷量,最终产品中中药有效成分质量分数约为 78%,溶剂质量分数约为 22%,模拟结果远远好于厂家要求的产品指标(溶剂质量分数 $\leq 40\%$ )。

## 2 实验平台与实验结果

### 2.1 实验装置

本实验 PID 流程图如图 4 所示。对于压缩机的选型,选择的压缩机在 50 $^{\circ}\text{C}$  冷凝, -10 $^{\circ}\text{C}$  蒸发的工况下,制冷量为 2.9 kW,压缩机排气量为 5.9  $\text{m}^3/\text{h}$ ,与模拟值(制冷量 2.6 kW,流量 4.59  $\text{m}^3/\text{h}$ )相近但是大于模拟值,考虑实际操作中不可避免地会有能量损失的影响因素,故选定此型号的压缩机。



1—压缩机;2—溶剂冷凝器;3—蒸发釜;4—均温泵;5—出料泵;6—氟利昂蒸发器;7—冷却液循环泵;8—产品罐;9—溶剂罐;10—过滤器

图 4 热泵蒸发系统 PID 图

### 2.2 实验阶段

首先组装好实验设备,如图 5 所示。开启压缩机,观察热泵系统是否工作正常,控制氟利昂蒸发器

出口温度在 -10 $^{\circ}\text{C}$  左右,若蒸发器出口氟利昂温度大于 0 $^{\circ}\text{C}$ ,需要增大膨胀阀开度增加氟利昂气体的循环量,反之则需要减小膨胀阀开度。



图5 实验设备示意图

开启夹套蒸发釜刮膜搅拌桨。

当夹套蒸发釜水浴温度达到 50 ~ 60℃, 冷却液温度低于 20℃ 时, 开启夹套均温泵和冷却液循环泵。

打开真空系统, 调节真空缓冲罐阀门使中药蒸发系统压力表读数保持在 -0.09 MPa 左右, 然后开启加料泵, 向中药蒸发系统进料。

当实验数据稳定后, 进行数据采集。

### 2.3 实验结果

冷却液循环量为 0.19 m<sup>3</sup>/h, 溶剂冷凝器进口冷却液温度 0℃, 出口温度 14.0℃, 冷却液为质量分数 40% 乙二醇-水溶液, 在 0℃ 的密度约为 1 066.28 kg/m<sup>3</sup>, 比热容为 3.401 kJ/(kg·K), 根据热量计算公式  $Q_L = F \times C_p \times (t_1 - t_2)$  可得, 实验设备热泵系统的制冷量即热泵系统提供给溶剂冷凝器的冷量为 2.67 kW。

根据实验数据, 30 min 内热泵系统所提供的热量用于 5.31 kg 的物料升温以及 4.97 kg 的溶剂蒸发, 故热量等于溶剂在 0.01 MPa (绝压) 下的气化潜热加上原料从 25℃ 升到气化温度时的显热。通过计算可以得到, 实验设备蒸发时所需要的热量为 2.72 kW。

由实验数据可知, 实验一共进料 ZY-3 中药药液 5.31 kg, 蒸发出溶剂 4.97 kg, 计算结果可知, 产品组成含中药有效成分 (质量分数) 74%、溶剂 26%, 达到厂家对产品的要求 (溶剂质量分数 ≤ 40%)。

### 2.4 实验与模型的对比

如表 2 所示, 通过实验数据的分析与计算, 可以看出实验结果与 Aspen 模拟结果基本相符: 实验进料量折合约 10.62 kg/h, 蒸发量为 9.94 kg/h, 所需要的热量为 2.72 kW, 需要的冷量为 2.55 kW,

表2 Aspen 模拟与实验结果对比

	进料量/ (kg·h <sup>-1</sup> )	蒸发量/ (kg·h <sup>-1</sup> )	所需热 量/kW	所需冷 量/kW	产品溶剂质 量分数/%
实验数据	10.62	9.94	2.72	2.55	26
模拟数据	10.00	9.36	2.56	2.60	22

产品含溶剂 26%; Aspen 模拟的进料量为 10 kg/h, 蒸发量为 9.36 kg/h, 所需要的热量为 2.56 kW, 需要的冷量为 2.60 kW, 产品含溶剂 22%。

通过对比可以看出, 进料量、蒸发量、所需热量、所需冷量这 4 组参数模拟值与实验值相差并不大, 但是最终实验值中中药溶剂所占百分比却高出模拟值 4%。换言之, 实验值中中药有效成分比模拟值要低 4%, 这是因为在蒸发浓缩过程中, 热敏性中药对环境温度变化敏感导致的, 故在实际操作中, 热敏性物料产品的正常损失以及真实操作的条件波动还是具有很大的影响。

### 3 结论

通过应用 Aspen 软件的 heater、flash、compressor 模块建立中药热泵低温蒸发系统的模型, 运用软件的灵敏度分析对各个模型进行了分析。可以看出, 随着中药成分浓度的升高, 在真空度不变的条件下, 沸点是升高的, 温度变化幅度约为 4℃, 由于变化幅度不大, 以及考虑实际实验中应便于操作的特点, 其蒸发过程可以选用连续蒸发。并在此操作条件下, 计算了系统的热负荷。将中药低温蒸发过程温度要求与热泵系统进行了热量匹配模拟, 确定了压缩机选型参数; 同时, 采用实验的方式对模拟结果进行可信性验证, 采集了实验数据, 经过计算与分析, 基本与 Aspen 模拟结果相匹配。压缩机使用氟利昂 (R22) 作为热泵工质时, 在 0.01 MPa (绝压) 下 25℃ 进料处理量为 10.62 kg/h, 蒸发量约为 9.94 kg/h, 产品溶剂质量分数约为 26%, 远低于厂家指标要求。确定了中药 ZY-3 热泵低温蒸发工艺的流程是可行的, 在实际操作中完全可以实现。

### 参考文献

- [1] 邓小卫. 中药制药浓缩系统热经济性分析及优化 [D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [2] 周永传, 李庆喆, 蔡建国. 中药蒸发浓缩过程设备及热能利用 [J]. 机电信息, 2009, (35): 35-38.
- [3] 王晖, 王积清. 医药企业热能利用及节能措施 [J]. 应用能源技术, 2001, (3): 15-20.
- [4] 宋星星, 泽华, 黄敬, 等. 热敏性废碱液蒸发过程的强化传热 [J]. 化学工业与工程, 2003, (2): 123-125.
- [5] 俞丽华, 马国远, 徐荣保. 低温空气源热泵的现状与发展 [J]. 建筑节能, 2007, (3): 54-57.
- [6] 古雯雯. 基于 Aspen Plus 的太阳能与火电机组集成与性能分析 [D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- [7] 刘金平, 朱海明, 刘雪峰. 基于 Aspen Plus 的自复叠热泵模拟 [J]. 制冷, 2010, (1): 1-8. ■