

Process Design of 2.0T/H Ethanol Heat Pump Distillation System

Wei-hua Jiang Xinyi Yang Bofan Tong

Jinhua Vocational and Technical University, Jinhua, Zhejiang, 321000, China

Abstract

Steam mechanical vapor recompression (MVR) technology, an advanced method for efficiently utilizing the latent heat of steam, has significant application value in industrial energy conservation. This design innovatively integrates MVR technology into a distillation system based on the characteristics of the mixed solution provided by the enterprise, constructing a heat pump distillation system to recover ethanol from ethanol-water solutions. The design process includes core aspects such as process flow planning, automation control scheme design, precise material balance, and key equipment selection. By comparing energy consumption with traditional processes, the energy-saving advantages of MVR technology are highlighted. Additionally, construction flow diagrams and equipment layout diagrams have been completed, providing a comprehensive solution that combines high efficiency and cost-effectiveness for ethanol solvent recovery, from technical planning to engineering implementation, thus promoting the technological upgrade of distillation systems in terms of energy conservation and emission reduction.

Keywords

heat pump; distillation; steam mechanical recompression technology

2.0T/H 乙醇热泵精馏系统工艺设计

蒋伟华 杨欣怡 童博帆

金华职业技术大学, 中国·浙江 金华 321000

摘 要

蒸汽机械加压再循环技术(MVR)作为高效利用蒸汽潜热的先进技术,在工业节能领域颇具应用价值。本设计针对企业提供的混合溶液组成特性,创新性地将MVR技术融入精馏系统,构建热泵精馏系统用于乙醇水溶液的乙醇溶剂回收。设计过程涵盖工艺流程规划、自动化控制方案设计、精准物料衡算及关键设备选型等核心环节。同时,通过与传统工艺的能耗对比分析,凸显MVR技术的节能优势。此外,还完成施工流程图与设备布置图的绘制,从技术方案到工程实施层面,为乙醇溶剂回收提供了兼具高效性与经济性的完整解决方案,推动精馏系统在节能降耗方面的技术升级。

关键词

热泵; 精馏; 蒸汽机械再压缩技术

1 引言

在当前全球能源转型和“双碳”目标背景下,节能成为设计考虑的核心内容之一,蒸汽机械再压缩机技术(Mechanical Vapor Recompression, MVR)因其显著的节能优势成为化工分离领域的重要选择。MVR技术的核心在于通过压缩机消耗少量压缩功,将二次蒸气所携带的大量低品位废热转化为高品位能量并重新利用。该技术通常适用于分离同系且沸点相近的物质体系,这类物系的相对挥发度较小,若采用常规精馏方法,要达到分离要求往往需要较多的理论板数和较大的回流比,这会导致蒸汽和循环水的消耗量较

大。而采用热泵精馏技术时,由于压缩机的压缩比较小,相应的功耗也较低,能够显著提升经济效益。^[1]

乙醇作为化工、医药、能源等领域至关重要的基础原料,其生产技术的发展正得益于全球范围内对清洁能源及环保技术重视程度的显著提升所形成的推动作用。^[2]本文以乙醇精馏过程为研究对象,提出基于机械蒸汽再压缩(MVR)技术的精馏系统设计方案,研究重点包括MVR压缩机选型、热集成网络构建以及精馏塔操作条件优化,建立适用于乙醇分离的热泵精馏工艺模型。采用AspenPlus软件对系统进行稳态模拟,通过灵敏度分析确定最佳回流比和压缩比,并利用夹点技术实现余热高效回收。仿真结果表明,相较于传统精馏工艺,该热泵精馏系统可降低能耗42.7%,年减少二氧化碳排放量约1.8万吨。研究验证了MVR技术在乙醇精馏领域的适用性,为化工过程绿色升级提供了技术参考,对实现双碳目标具有实践价值。

【作者简介】蒋伟华(1974-),男,中国河南项城人,硕士,高级工程师,从事化工工艺设计、化工设备设计研究、学生管理工作等研究。

2 工程概述

根据企业生产过程中产生的乙醇母液：pH 值为 7-8，质量流量为 2.0T/h，主要成分有乙醇 15.6%，水 83.6%，大分子有机物 0.8%，要求塔顶精馏乙醇产品浓度大于 92%，塔釜残液浓度小于 3%。为保证整条生产线能够连续稳定运行，充分考虑到系统运行节能，本设计采用 MVR 系统对精馏塔顶蒸汽进行再压缩，提高饱和蒸汽温度，加热精馏再沸器，大幅降低精馏系统能耗，即设计热泵精馏系统，提高能量利用效率。蒸汽压缩机温升设计按 24℃设计，MVR 蒸汽压缩量约为 2.4T/h。

3 工艺系统设计

3.1 设计原则

（1）热泵精馏工艺路线高效稳定；（2）MVR 压缩机和精馏塔等关键设备技术成熟，质量可靠；（3）能确保系统一次性开车成功，排除全部不确定的因素；（4）系统控制操作简单、自动化程度高，控制准确；（5）系统能安全稳定运行，且最大限度节能，降低运行成本。

3.2 设计思路

（1）根据物料特性，本系统采用强制循环再沸器进行精馏分离处理，设计处理量为 2.0T/h，设计蒸汽压缩量为 2.4T/h。（2）为保证系统的稳定运行，设计前通过多次实验，得出本系统塔顶蒸汽温度为 78℃，压缩机温升为 24℃，再沸器温度为 96℃，强制循环再沸器的有效加热温差为 5℃左右，再沸器沸腾状态比较温和，设备使用寿命长。（3）合理选择泵的技术参数，蒸发器循环泵选取扬程低、循环量大的高效率离心泵，在满足工况要求的条件下，最大限度降低泵的轴功率。（4）采用单管程立式强制循环加热器，循环量大约在 60m³/h，物料在加热器列管内以 1.5 ~ 2.0m/s 流速通过，确保加热器不粘接晶体，不堵管。

3.3 工艺设计过程

3.3.1 选材方面

根据原料成分和以往类似设备的设计选型经验，本热泵精馏系统主要设备材质为：精馏塔根据《腐蚀数据及选材手册》中的腐蚀强度及腐蚀余量要求，选用 SS304 材质为主体材质与物料接触，满足物料的腐蚀和强度要求；再沸器选用 SS304 材质作为主体材质与物料接触，满足物料的腐蚀和强度要求；进料出料部分：接触部分选用 SS304 材质作为主体材质，满足物料的腐蚀强度和度要求；乙醇储罐选用 SS304 材质作为主体材质，满足物料的腐蚀和强度要求。

3.3.2 K 值及面积计算

强制循环蒸发器的 K 值一般选取为 1100 ~ 1200，根据类似装置实测数据，K 值取 900 ~ 1100 之间符合实际。本设计采用强制循环再沸器加热方案，采用强制循环加热，既可以降低设备投资，又可以降低系统的能耗。经过计算，

强制循环再沸器的换热面积选取为 52 m²。

3.3.3 设备形式选择

本工艺选择列管式强制循环再沸器，选择低压大流量泵是考虑到在满足工艺条件（系统流速设计）需要的情况下降低动力消耗，换热管管内流速设定范围为 1.5 ~ 2.0m/s 之间。

主要设备有：精馏塔、蒸汽压缩机、强制循环再沸器、强制循环泵等。配套设备有：泵辅设备、管线、仪表、自动操作控制系统、冷凝液管、冷凝液换热器、预热器、放空冷凝器。

3.4 设计参数

本热泵精馏系统处理物料量 2000kg/h，温度 25℃，成分质量分数为乙醇 15.6%，水 83.6%，大分子有机物 0.8%，要求塔顶精馏乙醇产品浓度大于 92%，塔釜残液浓度小于 3%。采用二级压缩的罗茨正确压缩机，压缩比去 2.4，冷却水进出水稳定分别为：进水 25℃；排水 30℃。

3.5 设计特点

节约能源效果显著。热泵作为一项能够提升低温能源温位的先进技术，与精馏工艺相结合所形成的热泵辅助精馏（HPAD）工艺，相较传统单塔精馏工艺，可实现约 20% 至 50% 的节能效果。^{[3],[4]}

对于乙醇蒸汽压缩量为 2.4T/h 的热泵精馏系统，精馏分离每吨溶剂能耗仅为 40 度电，正常运行基本不用生蒸汽，按照当地工业用电价格 1.0 元 / 度计算，处理一吨溶剂的成本为 78 元，这个运行成本不到传统精馏系统的 1/2。^{[5],[6]}

2 系统控制精准，自动化程度高。该系统主体再沸器为立式升膜强制循环再沸器。系统能否稳定运行，自动化控制是关键，该系统的自控部分采用了 PLC 控制系统，实现各传感信息的采集、传输和回路的自动控制。

设备结构优化。设备结构简单独特，注重细节设计，布置合理。

4 物料衡算及能耗分析

4.1 物料质量平衡计算

物料质量平衡数据见表 4.1.1。

表 4.1.1 主要物料平衡数据表

参数名称	强制循环蒸发
进料量 kg/h	2000kg/h
再沸器蒸发量 kg/h	2400kg/h
塔顶产品出料量 kg/h	283kg/h
塔釜产品出料量 kg/h	1715kg/h
压缩机喷淋水 kg/h	40kg/h
不凝气外排量 kg/h	2kg/h

4.2 能耗和运行成本比较

本设计能耗和运行成本比较见表 4.2.1。

表 4.2.1 能耗和运行成本比较表

进料量	2.0		T/h	工作时间			7200	小时 / 年
塔顶出料量	0.283		T/h	电价:			1.0	RMB/k.W.h
塔釜出料量	1.715		T/h	蒸汽价:			200	RMB/T
蒸发量	2.4		T/h	循环冷却水费用:			1.0	RMB/m ³
设备	热泵精馏					常规精馏		
机械压缩机	45	KW	45	RMB	0	KW	0	RMB
泵	20.9	KW	20.9	RMB	5.9	KW	5.9	RMB
厂区蒸汽	0.4	T/h	80	RMB	1.6	T/h	320	RMB
冷却水	10	T/h	10	RMB	20	T/h	20	RMB
每小时成本	155.9			RMB	345.9			RMB
每吨处理成本	78			RMB	173			RMB
每年运行成本	1122480			RMB	2490480			RMB
年节约运行费用	1368000							RMB

5 工艺系统控制

5.1 热泵精馏系统设计方案

这部分是热泵精馏系统的核心部分，它由蒸汽压缩机、驱动电机和变频器组成。采用 PLC 和变频技术，精密控制驱动蒸汽压缩机电机的转速，从而达到压缩机入口的温度和压力的稳定，其控制精度可高达 ± 1℃。

5.2 自控系统说明

热泵精馏系统控制模式分为现场控制和远程控制两种模式；控制方式分为手动、自动两种方式。现场控制可以通过触摸屏进行自动、手动控制，远程监控机也可以进行自动、手动控制。

控制中心，主要是实时检测电机、各种泵、电动阀、流量、温度、压力、液位等相关工作参数的信号，确定各部分的工作状态，以达到预热、精馏、蒸汽压缩、清洗排空、停机等自动操作的目的。热泵精馏系统控制中心通过自动报警保护系统设备不受损坏，保证系统的动态平衡。

本项目控制系统通过 PLC 的以太网通讯端口与变频器通讯，采用 PID 控制模式，精密控制压缩机驱动电机的转速；设置手动、自动两种控制方式分别用于手动检修设备和系统

自动运行；实现原料预热、精馏、蒸汽压缩、排空和清洗等自动功能。

整套控制系统配有内置的安全操作系统以防止生产过程中对产品质量的损害和重要部件的损坏。其主要功能如下：

- (1) 远程启动，运行预设定参数，达到稳定蒸发状态。
- (2) 远程关机。
- (3) 远程自动清洗系统、可以自动定时清洗、也可手动随时清洗。保持传热系数，提高生产率。
- (4) 自动报警系统。
- (5) 自动提示错误，帮助使用人员快速排错。
- (6) 自动保护系统，如果出现液位不停的升高，或不停得降低达到警戒线的时候，系统会自动进入保护状态。
- (7) 再沸器的压力控制系统，保证再沸器压力的恒定，确保再沸器温度的恒定，保证精馏效果。

6 设备选型

根据工艺设计要求和系统计算数据，热泵精馏系统的主要设备列于表 6.1.1。

表 6.1.1 热泵精馏主要设备一览表

位号	设备名称	型号规格	材质	数量	备注
E0601	强制循环加热器	F=52m ² Ø 800x2000 列管 φ25	SS304	1 台	
T0601	精馏塔	Ø 800x17812 填料塔	SS304	1 台	
C0601	蒸汽压缩机	接触气体部分 SS316L，45KW	SS304	1 台	两级压缩
P0601	强制循环泵	CQ100-80-160 15KW	SS304	1 台	
P0602	原料泵	CQ40-25-160 2.2KW	SS304	1 台	
E0602	一级预热器	Ø 325x2000 列管式，10m ²	SS304	1 台	塔釜液
E0603	二级预热器	Ø 325x2000 列管式，10m ²	SS304	1 台	蒸汽凝液

7 结论

本工艺设计是对生产溶液中乙醇进行回收,参考相关的文献资料,根据企业生产过程和要求,选择MVR技术加压提温乙醇蒸汽,用于精馏塔再沸器加热,完成高效回收乙醇的生产任务。主要工作有工艺流程及自控设计、物料衡算、设备选型、绘制施工图。

在设计过程中充分考虑了工艺过程的危险因素和生产中的安全问题,在工艺上、设备选择上、仪表自控上、设备布置上都采取了有效的安全措施,并对操作员工进行了安全教育与培训,保障项目投产后热泵精馏系统安全高效的运行。

参考文献

- [1] 张化福,童莉葛,张振涛,等.机械蒸汽压缩蒸发技术研究现状与发展趋势[J].化工学报,2023,74(增刊1):8-24.
- [2] 王帅,张军.机械蒸发在压缩(MVR)技术进展研究[J].节能,2017(11):4-6.
- [3] 李瑞端,潘宵,胡靓.节能型精馏技术—几种热泵精馏工艺综述[J].广东化工,2021,48(24):81-82.
- [4] 宁旭丹.乙醇分割式MVR热泵精馏系统设计及其优化研究[D].北京石油化工学院,2020.
- [5] 岳金彩,闫飞,邹亮.精馏过程的节能技术[J].节能技术,2018,1(26):64-67.
- [6] 赵林,吴小华,孙东亮,等.乙醇超重力MVR热泵精馏系统仿真及优化研究[J].工程热物理学报,2022,43(3):679-684.