

# 机械压缩式热泵蒸发系统在 碱液浓缩中的应用研究

赵庆霞,陶乐仁\*,黄理浩,高祥虎,高晓凯,魏义平,程建,密洁霞  
(上海理工大学能源与动力工程学院,上海200093)

**摘要:**采用双效逆流机械压缩式热泵对纺织印染厂的废碱液进行蒸发浓缩回收再利用。给出了系统流程,进行了一效、二效蒸发器热平衡计算与系统能效分析。实验结果表明,可以把质量分数6%的稀碱液浓缩到25.5%,系统能效比为12.26,基本达到了设计要求。

**关键词:**碱液浓缩;热泵蒸发;高效能;板式升膜蒸发

**中图分类号:**TK172

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2013)03-0091-03

## Application of mechanical compression heat pump evaporation system in alkali concentration

ZHAO Qing-xia, TAO Le-ren\*, HUANG Li-hao, GAO Xiang-hu, GAO Xiao-kai, WEI Yi-ping, CHENG Jian, MI Jie-xia

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 20093, China)

**Abstract:** Double-effect adverse current mechanical compression heat pump is used to concentrate the waste alkali liquor of the textile printing and dyeing mill for recycling. In this study, the system process is given. The heat balance of both effect evaporator and the system efficiency is calculated. The experimental result shows that the mass fraction of waste alkali liquor can be concentrated from 6% to 25.5% with 12.26 of energy efficiency ratio, which basically reaches the design requirement.

**Key words:** alkali concentration; heat pump evaporation; high energy efficiency; climbing-film plate evaporator

蒸发技术广泛应用于化工、食品和医药等工业领域,蒸发操作需要消耗大量的热量,在蒸发过程中,高品质的蒸汽转化为低品质的二次蒸汽,因此,低品质的二次蒸汽的利用在很大程度上决定了蒸发操作的经济性。

热泵蒸发与多效蒸发是提高蒸发操作能量利用经济性的两条最主要的途径<sup>[1]</sup>。多效蒸发是将多个蒸发器串联起来,前一个蒸发器的二次蒸汽作为下一个蒸发器的加热蒸汽,以此来利用二次蒸汽,提高经济性。但是多效蒸发装置体积庞大,系统和操作复杂,从而使得其运行的稳定性很差,并且这种多效蒸发系统蒸汽最后仍然是直接排放进入环境,没有从根本上充分利用蒸汽热量,其热效率没有得到切实的提高。热泵蒸发系统是将二次蒸汽进行压缩,提高其温度和压力后,重新作为一次蒸汽来使用,大大提高了二次蒸汽的能源利用率。西安交通大学的冯霄等<sup>[2]</sup>从节能效果和经济效益两个方面对多效蒸发和热泵蒸发进行比较,得出机械压缩式

热泵蒸发的节能效果非常显著,一次能源利用系数高于八效蒸发系统,经济效益介于三效与四效蒸发系统之间的结论。

本文采用双效逆流机械压缩式热泵,对纺织印染厂的废碱液进行蒸发浓缩回收再利用,不仅可以解决纺织印染厂的污水问题,还具有很高的经济效益,具有节能环保的双重功效。

## 1 热泵蒸发浓缩碱液回收系统

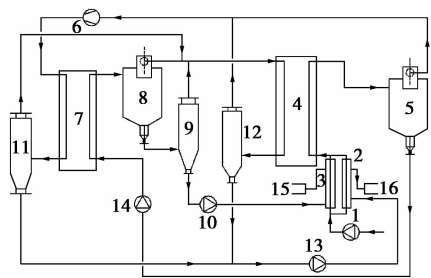
实验系统流程如图1所示,系统采用双效逆流板式升膜蒸发工艺。主要包括二次蒸汽以及碱液循环,稀碱经冷凝蒸馏水和浓碱预热后,先进入二效蒸发器蒸发,经二效气液分离后碱液再进入一效蒸发器蒸发,二效气液分离出来的二次蒸汽经罗茨鼓风机后进入到一效蒸发器中加热碱液,一效气液分离出来的二次蒸汽进二效蒸发器中加热碱液。为了提高换热性能,采用升膜蒸发工艺(图1中预热器及蒸发器皆为板式换热器),利用被蒸发溶液受热沸

收稿日期:2012-10-08

基金项目:国家高科技研究发展计划项目(2008AA05Z204)

作者简介:赵庆霞(1988-),女,硕士生;陶乐仁(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事传热传质、控制及热泵蒸发等方面的研究,通讯联系人,021-55270734, cryo307@usst.edu.cn。

腾汽化产生的蒸汽带动料液上升,在壁面形成一个稳定的液膜,从而加快蒸发,提高了换热系数<sup>[3]</sup>。实验的数据由西门子 PLC 和力控组态软件进行采集和存储,系统排出蒸馏水冷凝液的 pH 用酸度计检测。



1—稀碱泵;2,3—预热器;4—二效蒸发器;5—二效汽液分离器;  
6—压缩机;7—一效蒸发器;8—一效汽液分离器;  
9,11,12—闪蒸罐;10—浓碱泵;13—蒸馏水泵;  
14—中间泵;15—浓碱回收;16—蒸馏水回收

图 1 实验系统图

实验系统的设计要求是将废液中质量分数为  $x_0 = 6\%$  的 NaOH 稀碱液蒸发浓缩到 25%。实验采用双效热泵蒸发系统,通过改变泵和压缩机的频率来改变系统流量和蒸汽温度、压力,改变系统性能。在压缩机频率为 36 Hz,稀碱液的质量流量为  $m = 1.188 \text{ kg/s}$ ,即 4 276.8 kg/h 时,中间质量分数为

(上接第 90 页)

## 4 结论

通过实验研究表明:

(1) 曝氧工艺能够有效地除去油田采出水中含有的硫化物、亚铁离子、细菌(SRB)和 COD 等还原性物质,显著提高了污水配聚合物溶液的黏度。

(2) 聚合物溶液黏度随空气流量和曝氧时间的增大而逐渐增大,在空气流量为 5.0 L/min,曝氧时间达到 40 min 时,采油污水中的硫化物可以降低到 0.1 mg/L,亚铁离子可以完全除去,SRB 可以下降到 5 个/mL 以下。此时,处理后污水所配 1 500 mg/L 聚合物溶液的黏度可以达到 15 mPa·s 的技术要求<sup>[9]</sup>。但聚合物溶液的黏度并不是无限制增大,增大到一定程度便趋于平衡不再增加。

(3) 曝氧后污水中溶解氧质量浓度升高,配制聚合物溶液长期稳定性较差,为保证污水水质稳定和聚合物溶液黏度稳定,需要采取措施去除水中溶解氧。室内试验表明,氮气气提除氧比化学药剂除氧效果好,在氮气通量为 5.0 L/min,通气 20 min 时,

16%,最终浓碱液质量分数为 25.5%,实验中测得各效参数如表 1 所示。系统排放冷凝水 pH 经酸度计检测在 6.8~7.2,温度在 45℃ 左右。

表 1 一效、二效蒸发器参数

参数	一效蒸发器	二效蒸发器
蒸汽侧压力 $P_{ii}/\text{MPa}$	0.179	0.123
碱液侧压力 $P_{Li}/\text{MPa}$	0.123	0.096
冷凝水流量 $m_{wi}/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	0.110	0.145
碱液质量浓度 $x_i/\%$	0.160	0.255
碱液进口温度 $T_{ii}/^\circ\text{C}$	102	95
碱液出口温度 $T_{oi}/^\circ\text{C}$	118	105
蒸汽温度 $T_{vi}/^\circ\text{C}$	119	112
冷凝水温度 $T_{Li}/^\circ\text{C}$	109	97

## 2 实验数据处理

在一效、二效蒸发器中,蒸发器蒸汽侧的放热量  $Q_h$  可由蒸发器进口蒸汽焓值与出口冷凝水焓值确定,溶液侧的吸热量  $Q_c$  可由浓缩过程中水蒸发的吸热量来估算,对于 NaOH 溶液,由于存在稀释热,引入修正系数  $\eta_i = 0.98 - 0.07\Delta x_i$ <sup>[1]</sup>,其中  $\Delta x$  为进出口质量分数差,即:

$$Q_{hi} = m_{wi}(h_{ii} - h_{oi})$$

$$Q_{ci} = m_i(x_{oi} - x_{ii})\gamma_i/\eta_i$$

污水中的溶解氧能够由 0.85 mg/L 降至 0.1 mg/L,经氮气气提后的污水配制的聚合物溶液的黏度有所增加,能够达到保持聚合物黏度的效果。

## 参考文献

- [1] 王宝江,李彦兴,姚兰,等.清水配制污水稀释聚合物溶液试验研究[J].大庆石油地质与开发,2001,20(2):86-88.
- [2] 于洪江,刘祥,史俊,等.污水配制聚合物驱油体系可行性研究[J].西安石油学院学报:自然科学版,2001,15(1):27-29.
- [3] 曲虎,马梓涵,管善峰,等.油田采出水溶解性气体的腐蚀与防护[J].环境科技,2011,24(2):65-69.
- [4] 张金国.聚合物溶液粘度的主要影响因素分析[J].断块油气田,2005,12(1):57-59.
- [5] 陈跃章,张柱,陈明华,等.聚合物溶液粘度的主要影响因素分析[J].辽宁化工,2004,12(1):258-260.
- [6] Ostroff A G, Anton Gene. Introduction to oilfield water technology [M]. Englewood Cliffs N J:Prentice-Hall,1965:98-100.
- [7] 冯叔初,郭揆常.油气集输与矿场加工[M].东营:中国石油大学出版社,2006:590-592.
- [8] 管善峰,曲虎,马梓涵,等.油田污水中 CO<sub>2</sub> 气体去除的气提工艺研究[J].化学工程与装备,2011,(2):160-163.
- [9] SY 5329—1994.碎屑岩油藏注水水质推荐指标及分析方法[S].

在一效、二效蒸发器中,忽略散热损失,蒸发器的换热量可由蒸汽冷凝侧的放热量确定,即:

$$Q = m_w (h_i - h_o) = KA\Delta t_m$$

式中: $Q$ 为换热量,W; $m_w$ 为冷凝水流量,kg/s; $h_i$ 为蒸汽进口焓值,J/kg; $h_o$ 为冷凝水焓值,J/kg; $K$ 为蒸发器总的换热系数,W/(m<sup>2</sup>·°C); $A$ 为蒸发器换热面积,一效、二效均为50 m<sup>2</sup>; $\Delta t_m$ 为蒸发器两侧换热流体的对数平均温差,°C。

由于蒸发器冷凝侧水蒸汽放热量可以由实验数据直接得到,因此用水蒸汽冷凝放热量代替换热量。冷凝水流量由流量计直接测量得出,水蒸汽进出口温度压力由Pt100铂电阻和压力传感器直接测量得到。碱液预热后基本达到饱和温度,过冷过热段对蒸发器换热影响不大,因此在计算中可忽略<sup>[4-5]</sup>,对数平均温差 $\Delta t_m$ 直接取两侧饱和温度的差值,不同质量分数碱液沸点不同,取平均质量分数对应的沸点值。借助水蒸汽热力性质表及NaOH水溶液杜林曲线,得表2。

表2 一效、二效工质状态参数

参数	一效	二效
蒸汽进口 $h_i$ /(kJ·kg <sup>-1</sup> )	2706	2698
冷凝水 $h_o$ /(kJ·kg <sup>-1</sup> )	457	408
蒸汽侧饱和温度/°C	116	105
碱液沸点/°C	108	104
水汽化潜热 $\gamma$ /(kJ·kg <sup>-1</sup> )	2242	2286

## 2.1 系统能效分析

由以上参数可得一效、二效所获得的加热量分别为:

$$Q_{h1} = m_{w1}(h_{i1} - h_{o1}) = 247 \text{ kW}$$

$$Q_{h2} = m_{w2}(h_{i2} - h_{o2}) = 332 \text{ kW}$$

在运行过程中消耗的总的电功率  $W = 47$  kW,则

$$\text{一效} \quad COP_1 = Q_{h1}/W = 5.26$$

$$\text{二效} \quad COP_2 = Q_{h2}/W = 7.06$$

$$\text{系统} \quad COP = COP_1 + COP_2 = 12.26$$

一效、二效换热系数为:

$$K_1 = Q_{h1}/(A\Delta t_1) = 618 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$K_2 = Q_{h2}/(A\Delta t_2) = 6640 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

由上可以看到该系统在浓缩过程中节能效果显著,一效蒸发器换热性能小于二效蒸发器,主要是因

为一效碱液质量分数较高,由NaOH水溶液杜林曲线可得,随着碱液质量分数的增加,溶液沸点升高增大,导致一效换热温差逐渐减小,引起温差损失,因此换热效果远不如二效蒸发器。

## 2.2 一效蒸发器与二效蒸发器热平衡分析

一效 NaOH 溶液流量:

$$m_1 = m_2 - m_2(x_{o2} - x_{i2}) = 1.069 \text{ kg/s}$$

一效蒸发器和二效蒸发器 NaOH 溶液侧吸热量如下:

$$Q_{c1} = m_1(x_{o1} - x_{i1})\gamma_1/\eta_1 = 234 \text{ kW}$$

$$Q_{c2} = m_2(x_{o2} - x_{i2})\gamma_2/\eta_2 = 298 \text{ kW}$$

一效蒸发器冷凝侧与蒸发侧热损失为:

$$\Delta Q_1 = Q_{h1} - Q_{c1} = 13 \text{ kW}$$

$$\Delta Q_2 = Q_{h2} - Q_{c2} = 34 \text{ kW}$$

冷凝侧和蒸发侧的热量差主要是因为蒸发侧的吸热量在计算时只考虑了溶液中水蒸发吸收的潜热,忽略了全部溶液的显热,其次系统存在散热损失。

## 3 结论

本系统针对 NaOH 碱液的浓缩回收,经实验证明可以把质量分数 6% 的稀碱液浓缩到 25.5%。系统运行结果表明,以板式换热器作为蒸发器,采用升膜蒸发的方式实现溶液浓缩,结构紧凑,换热效果好。实验结果验证了系统的可行性,将热泵蒸发系统运用于碱液浓缩回收不仅能很好地回收利用废液,而且能较大地提高 NaOH 碱液浓缩回收系统的能效,具有节能环保双重功效。

## 参考文献

- [1] 谭天恩, 奚梅, 周明华. 化工原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [2] 冯霄, 运新华, 郁永章. 多效蒸发与热泵蒸发的分析与比较[J]. 化工机械, 1995, 22(1): 52-55.
- [3] 王迪. 升膜蒸发海水淡化装置传热特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [4] Pacheco C R F, Friani L S M. Experimental results for evaporation of sucrose solution using a climbing/falling film plate evaporator[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 64(11): 471-480.
- [5] Ribeiro C P, Cano Andrade M H. A heat transfer model for the steady-state simulation of climbing-falling-film plate evaporators[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 54(11): 309-320. ■