

机械压缩式热泵蒸发技术在碱回收系统中的研究

黄理浩¹, 陶乐仁¹, 郑志皋¹, 张庆钢¹, 王金锋², 薛维超¹, 高立博¹

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

摘要: 针对化工行业排放的碱液符合杜林法则(溶液的沸点与同压力下水的沸点呈线性关系)及沸点升高不大的特点, 设计了1套新型高效热泵蒸发碱回收系统。通过理论分析、计算以及经济性分析表明: 系统能效(COP)比较高, 能源利用率比较大; 设备的回收期很短, 符合可持续发展的要求。

关键词: 碱液排放; 高效; 热泵蒸发; 能源利用

中图分类号: TQ028.61

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2011)01-0075-04

Research on mechanical compression heat pump evaporation technology in alkali recovery system

HUANG Li-hao¹, TAO Le-ren¹, ZHENG Zhi-gao¹, ZHANG Qing-gang¹, WANG Jin-feng², XUE Wei-chao¹, GAO Li-bo¹

(1. School of Energy & Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Food Engineering College, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: As the emitted alkali lye from chemical industry is complied with the principle of Turin (the solution's boiling point is complied with the linear relationship with the water's at the same pressure) and its boiling point rising is not big, a set of new high efficiency heat pump evaporation alkali lye recovery system has been designed. Through theoretical analysis, calculation and economic analysis, it is indicated that the system's energy efficiency is high, energy utilization ratio is big, the equipment's payback period is short, it is complied with the requirement of sustainable development.

Key words: alkali lye emission; high efficiency; heat pump evaporation; energy utilization

当前有多种化工废液处理技术, 各种方法具有各自的优缺点及适合的场合。化学方法在处理废液中的有毒物质后, 又引入了新的更不易除去的离子, 称之为再污染; 生物处理法耗时又长; 大部分的物理处理法又过于简单。因此, 引入了一种新的物理方法——热泵蒸发处理技术^[1]。当前, 占据脱盐工业市场90%份额的主要是多级闪蒸淡化和反渗透技术, 余下的是多效蒸发(热力或机械压缩式)以及机械压缩式的单效蒸发系统^[2-3], 热泵蒸发技术在将来具有广阔的空间, 而且机械压缩式系统将在处理小流量保持巨大的竞争力^[4-5]。

机械压缩式热泵蒸发技术, 通过补充一定的压缩功(耗电)代替了消耗大量的加热蒸汽(耗煤), 而产生高温、高压的蒸汽以提供蒸发器中溶液的蒸发所需要的能量; 通过蒸发-冷凝可以有效去除大多数无机物, 高于沸点的有机物、热原质、细菌等; 同时, 系统以电能驱动, 对环境影响很小, 不会产生二

次污染, 而浓缩后的溶液也可以作为副产品利用, 这对解决废液污染、合理利用废液资源以及资源利用最大化是一个重要的方法。

1 高效热泵蒸发碱回收系统

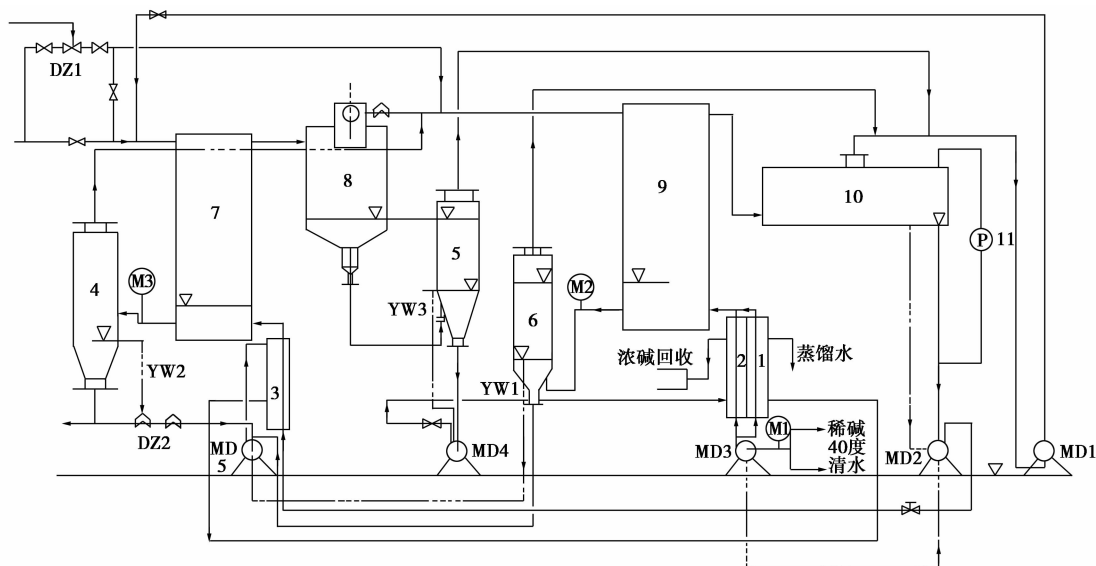
1.1 实验系统的设计

实验系统如图1所示。系统主要包括二次蒸汽以及碱液循环。二次蒸汽循环由压气机MD1、一效蒸发器、一效汽液分离、二效蒸发器、二效汽液分离、闪蒸罐1、闪蒸罐2、闪蒸罐3等组成回路; 二次蒸汽在蒸发器中冷凝后, 同时从碱液中蒸发出水蒸气, 重新进入压气机压缩。碱液循环是1个开式循环, 由预热器1、预热器2、二效蒸发器、二效汽液分离、MD2、MD1、预热器3、一效蒸发器、一效汽液分离等组成回路。预热器及蒸发器皆为板式换热器。

收稿日期: 2010-08-24; 修回日期: 2010-12-02

基金项目: 国家高科技研究发展计划(2008AA05Z204)资助

作者简介: 黄理浩(1983-), 男, 博士生, 021-55270734, huanglihao19831208@163.com; 陶乐仁(1962-), 男, 博士, 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。



1—预热器 1;2—预热器 2;3—预热器 3;4—闪蒸罐 2;5—闪蒸罐 3;6—闪蒸罐 1;7—效蒸发器;8—效气液分离器;9—二效蒸发器;10—二效气液分离器;11—压差变送器;MD1—压气机;MD2—中间碱液泵;MD3—淡碱进液泵;MD4—浓碱储液泵;MD5—蒸馏水泵;DZ1—蒸汽调节阀;DZ2—蒸馏水调节阀;YW1—液位计控制蒸馏水出水泵;YW2—液位计控制蒸馏水调节阀;YW3—液位计控制浓碱出品泵;M1—淡碱流量电磁流量计;M2—二效蒸发冷凝水流量计(涡轮流量计);M3—一效蒸发冷凝水流量计(涡轮流量计)

图 1 实验系统图

1.2 理论分析

1.2.1 机械压缩式热泵原理

热泵是一种将热量从低品位传到高品位的热力循环。热泵从实质上讲是一种热机,只是在 2 个温度之间以相反的方式运行(如图 2)^[6]。热机通过从高温 T_2 得到热量 Q_2 产生做功 W ,并且将 Q_1 的热量放入低温 T_1 中,然而热泵是通过输入功 W 从低温 T_1 中吸取热量 Q_1 ,而后将热量 Q_2 传递到高温 T_2 。冷冻设备与热泵的运行方式是一样的,所不同的是冷冻设备需要的不是在高温 T_2 下释放热量 Q_2 ,而是从低温 T_1 中吸取热量 Q_1 ;而机械压缩式热泵蒸发系统则是利用吸取的热量加热碱溶液,使溶剂蒸发,从而达到浓缩溶液的目的。

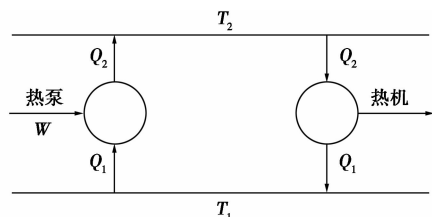


图 2 温度 T_2 与 T_1 之间热泵与热机的运行图

1.2.2 升膜蒸发原理

如图 3 所示,碱液加热时(碱液以接近蒸发温度进入通道),在不同区域[(1)、(2)、(3)]呈现出

不同流体形式(即传热形式)。

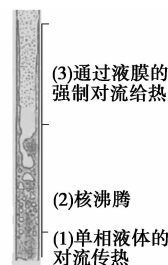


图 3 碱液在垂直通道中的蒸发示意图

区域(1),单相液体的对流传热。其传热形式为单相液体的对流传热。区域(2),核沸腾。制冷剂被加热形成气泡,增加紊流和增大传热系数。区域(3),通过液膜的强制对流给热。随着气泡的产生,流道中心全部被蒸汽占据,由于蒸汽流速很高,此时的剪切力足以形成稳定的液膜(薄膜蒸发形成),流动形式为环状流,传热系数相当高,可达液-液传热时的两三倍^[7]。

1.3 温差损失对系统的影响

由于蒸发系统采用板式换热器,不同于传统蒸发器,其管长比较长,溶液静压力较大,造成比较大的温差损失。因此,对于蒸发系统温差损失比较大的原因是:随着溶液中溶剂的蒸发,溶液浓度增大,溶液的沸点也随着升高。随着沸点的升高,这就有

可能造成加热蒸汽温度不够大,蒸发过程就会停止。由于存在温差损失,一方面,在设计计算时必须保持加热蒸汽温度一直高于溶液沸点,以免蒸发过程的中断;另一方面,沸点的升高,也使得系统的能耗增大,烟损失加大,系统的 COP 降低,不利于节能。但是 NaOH 溶液的沸点随浓度以杜林法则^[8]的线性关系变化,沸点升高不大,适合于以板式换热器作为蒸发器的环境,且能效比高。

1.4 理论设计计算

实验系统是为处理某纺织印染有限公司含 NaOH 的废水而设计的。设计的初始条件为:NaOH 稀碱液,流量为 0.5786 kg/s, NaOH 质量分数为 4%,处理后的目标 NaOH 质量分数为 30%。

图 4 是图 1 的蒸发-冷凝器部分。图 4 系统采用的是双效逆流升膜方式,有 2 个基本的流程:蒸汽的循环与溶液的循环。(实线为蒸汽循环)初始蒸汽进入一效与过渡溶液热交换产生一次蒸汽,一次蒸汽进入二效与初始溶液热交换产生低温低压的二次蒸汽,最后进入压缩机(1-2-3);(虚线-溶液循环)初始稀溶液进入二效加热,产生过渡溶液,过渡溶液进入一效,继续吸热,形成产物。其中 m_7 、 m_4 是冷凝水,可用于预热。

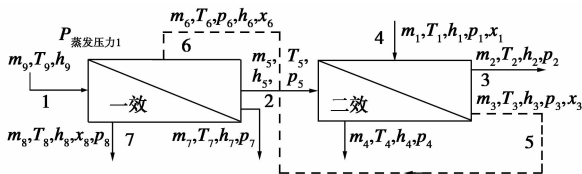


图 4 双效蒸发-冷凝器简易流程示意图

根据质量衡算与热量衡算列出以下关联式:
二效蒸发

$$m_1 = m_2 + m_3 \tag{1}$$

$$m_5 = m_4 \tag{2}$$

$$m_1 x_1 = m_3 x_3 \tag{3}$$

$$m_5 h_5 + m_1 h_1 = m_4 h_4 + m_2 h_2 + m_3 h_3 \tag{4}$$

一效蒸发

$$m_6 = m_5 + m_8 \tag{5}$$

$$m_9 = m_7 \tag{6}$$

$$m_6 x_6 = m_8 x_8 \tag{7}$$

$$m_9 h_9 + m_6 h_6 = m_7 h_7 + m_8 h_8 + m_5 h_5 \tag{8}$$

$$m_6 = m_3 \tag{9}$$

$$x_6 = x_3 \tag{10}$$

将初始值代入,分别做 2 步假定:假定 $m_5 = m_2 = m_9$,取压缩机出口或锅炉蒸汽压力 p_9 为 0.211 MPa;假定一效蒸发器的压力为 0.12 MPa,则 $p_5 =$

0.12 MPa。最后可得:

$$\begin{aligned} & -383.7 \times 2 \times 2083 + 783.7 \times 83.32/x_8 + 783.7 \times 2083 \\ & = 83.32/x_8 \times 2 \times h_8 \end{aligned} \tag{11}$$

式中 x_8 取目标浓度值 0.3,则此时 $h_8 = 452.98$ kJ/kg,根据 NaOH 溶液焓浓图查得 $h_8' = 450$ kJ/kg 相比, h_8 略大(满足 $h_8 \geq h_8'$)。假设条件满足设计要求,则将计算结果列于表 1。

表 1 系统设计结果

效数	1	2
加热蒸汽温度/°C	122	105
操作压强 P_i /kPa	211	120
溶液沸点 t_i /°C	120	101
完成液质量分数/%	30.0	7.1
蒸发水量 W_i /kg·h ⁻¹	902.64	902.64
加热蒸汽量 D /kg·h ⁻¹	958.10	902.64
压缩机耗功/kW		44.9
系统获得的潜热 Q /kW		584.66
系统 COP		13

2 高效热泵蒸发碱回收系统经济性分析

系统是为了避免某纺织印染有限公司将 NaOH 溶液作为废液排放而设计的(系统的初投资为 100 万元)。碱液的排放,不仅造成巨大的浪费,而且对环境也造成很大的破坏。高效热泵蒸发系统既回收了水以及 NaOH 溶液,同时又节能,具有巨大的经济效益。

2.1 水的回收

水是生命之源,面对日益严重的水资源污染,水资源的保护越来越受到重视。根据表 1,可知每一效分离出的水量为 $m_i = 902.64$ kg/h,则 1 天回收的水量 M_1 :

$$M_1 = 2 \times m_i \times n = 2 \times 902.64 \times 24 = 43.33 \text{ t/d} \tag{12}$$

1 年回收的水的费用 C_1 :

$$C_1 = M_1 \times N \times C_{w1} \tag{13}$$

式(13)中, N 为 1 年 365 天; C_{w1} 为上海工业生活用水价(以 2 元/t 计)。则 $C_1 = 31630.9$ 元/a。

2.2 碱液的回收

纺织印染行业一般需要使用一定浓度的 NaOH 溶液作为原料,但是 NaOH 溶液在使用之后,只是作为废液排放,既浪费也不环保。根据系统的设计,每天所能回收质量分数 30% 的 NaOH 溶液的量 M_2 :

$$M_2 = M_{\text{碱液}} \times n \tag{14}$$

式(14)中, $M_{\text{碱液}}$ 指每小时产生质量分数 30% 的

碱液,根据目标质量分数 30%, $M_{\text{碱液}}=277.72 \text{ kg/h}$ 。

所以 $M_2=277.72 \times 24=6.665 \text{ t/d}$ 。

1 年回收的碱液的费用:

$$C_2 = M_2 \times N \times C_{w2} \quad (15)$$

式(15)中, N 为 1 年 365 天; C_{w2} 为质量分数 30% NaOH 溶液的单价,以 900 元/t 计。则: $C_2=2189430$ 元/a。

2.3 碱液排污费

根据上海市水务局排水费收费标准,重点监测户为 2.6 元/t,则 1 年的碱液排污费 C_3 :初始条件为 NaOH 稀碱液,流量为 0.5786 kg/s。

$$C_3 = M_0 \times n \times N \times C_{w3} \quad (16)$$

式(16)中, M_0 为 NaOH 稀碱液 (0.5786 kg/s); C_{w3} 为排污费单价 (2.6 元/t)。则 $C_3=47374.08$ 元/a。

2.4 能源的消耗

根据表 1,压缩机的耗功 $W=44.9 \text{ kW}$,运行一年所耗的电能费用:

$$C_4 = W \times n \times N \times C_{w4} \quad (17)$$

式(17)中, C_{w4} 指工业用电单价,以 1.002 元/kWh 计。则 $C_4=394110.6$ 元/a。

根据 2.1~2.4 小节,具体各种费用见表 2。

表 2 高效热泵蒸发碱回收系统经济性分析数据 元/a

水回收费	省去的排污费	碱液回收费	主要耗用费	每年效益
31630.9	47374.08	2189430	394110.6	1874324.38

根据表 2 中每年效益分析,再对比初投资的 100 万元,可知只需 1 年即可回收成本,而且可以盈利 874324.38 元,此蒸发系统具有很高的经济效

益,而且节约能源,适合当前环保的要求,对社会的可持续发展是非常有利的。

3 结论

根据热泵以及升膜蒸发原理,设计了 1 套高效热泵蒸发碱回收系统。根据理论计算结果:与传统系统相比,能源利用率高,能效比大,更环保。通过对系统的经济性分析表明:虽然系统的初投资比较大,但是效益更好,正常运行 1 年即可回收成本,且还有较高的利润,对于企业的推广很有前景,也符合当前社会发展的要求,在当前新一轮的企业改造中将发挥更大的作用。

参考文献

- [1] 武银华. 处理技术的研究进展[J]. 广东化工,2004(增刊1): 48-50.
- [2] Hisham Ettouney. Design of single-effect mechanical vapor compression[J]. Desalination,2006,190:1-15.
- [3] Borsani R,Rebagliati R. Fundamentals and costing of MSF desalination plants and comparison with other technologies[J]. Desalination, 2005,182:29-37.
- [5] Ettouney H M,El-Dessouky H T,Faibish R S, et al. Evaluating the economics of desalination[J]. Chem Eng Prog,2002,98:32-39.
- [6] Group VIII: Advanced Materials and Technologies·Energy Technologies·Renewable Energy[M]. Springer-Verlag,2006.
- [7] 马海燕. 板式升膜蒸发器在离子膜烧碱中的应用[J]. 中国氯碱,2006(5):9-10.
- [8] Christie John Geankoplis. 齐鸣斋,译. 传递过程与分离过程原理(包括单元操作)[M]. 下册. 上海:华东理工大学出版社,2007. ■

欧洲企业青睐中国煤化工新机遇

“煤炭将逐渐成为化工行业新的基础原材料。而煤制甲醇,再制烯烃,将对未来中国具有巨大的吸引力”。日前,欧洲最知名的化工咨询公司英国泰可荣全球化学有限公司总经理 RogerLee 这样表示。

面对中国煤化工领域即将到来的新机遇,泰可荣公司选择以实际行动来把握。2010 年 11 月 15 日,中国化工信息中心与泰可荣公司在北京签署合作协议,正式结成全球战略合作伙伴关系。

“双方此次合作首先将共享营销渠道,共同寻找机会进一步开拓欧洲化工市场及中国化工市场。合作将为中国化工企业引入国外先进技术搭建新的平台。”中国化工信息中心主任付旭表示。

双方一致将第 1 个合作重点放在煤制烯烃上,这与双方对中国煤制甲醇及甲醇制烯烃(MTO)的前景判断有关。

RogerLee 表示,在目前油价每桶 80 美元的背景下,煤化工可实现经济开发。随着全球原油、煤炭及天然气价格

的波动,煤炭将逐渐成为化工行业的基础原材料。现在中国对乙烯和丙烯有需求缺口,它们可以通过煤化工产生的甲醇加工制成,因此甲醇制烯烃对中国有着巨大的吸引力。

中国化工信息中心有关专家指出,未来我国将在煤炭资源丰富的西部地区适度发展煤化工,开发煤电一体化技术、大型煤气化技术、大型煤化工联产技术等。新工艺新技术将成为我国未来煤化工发展的关键推动力。双方将在 MTO 领域展开深度合作,为在建拟建项目提供技术支持以及相关解决方案,以推动 MTO 项目在我国进一步发展。

煤炭是中国的主体能源,分别占一次能源生产总量的 77%,消费总量的 70%。煤炭清洁利用已成为我国应对气候变化的一个重要路径。作为清洁利用的一种重要方式,煤化工近两年在我国取得了一定的发展。国内有 3 个甲醇制烯烃工厂相继投入生产,第 1 家,即神华集团在内蒙古包头投资建设的年产 60 万 t MTO 项目已于 2010 年 8 月投产。(刘君)