

气体再压缩式增湿去湿高盐废水 淡化装置的建立与模拟

邵 婷, 陈文佳, 林春绵*

(浙江工业大学环境学院, 浙江 杭州 310014)

摘要:在增湿去湿法(HDH)高盐废水淡化的基础上耦合了MVR法,建立了一种新型的气体再压缩式增湿去湿高盐废水淡化装置。该系统是兼具气体循环和高盐废水循环的双循环系统,整个系统为零排放。通过Aspen Plus软件搭建该装置相关模型,分别模拟不同工艺操作参数对系统能效比和浓缩比的影响。当控制增湿塔进口空气温度为30℃、质量流量为1900 kg/h、增湿塔进口水温度为90℃、进口水质量流量为15 t/h(水气比为7.9)、循环水箱补充水质量流量为1500 kg/h(25℃)、气体压缩比为1.2时,系统能效比达到16.3,浓缩比达到1.64。

关键词:高盐废水;增湿去湿;MVR;ASPEN软件;节能

中图分类号:X701.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)10-0212-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2020.10.044

Establishment and simulation of gas recompression humidification and dehumidification high salinity wastewater desalination unit

SHAO Ting, CHEN Wen-jia, LIN Chun-mian*

(School of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract:Based on the desalination of high salinity wastewater with humidification and dehumidification method (HDH), MVR method is coupled, and a new type of gas recompression HDH high salinity wastewater desalination facility is established. This facility is a dual-cycle system involving in both gas circulation and high salinity wastewater recycling, with zero emission. Related models for this facility are built by means of Aspen Plus software, and the effects of different process parameters on the energy efficiency ratio and concentration ratio of the system are simulated respectively. The energy efficiency ratio and concentration ratio can reach 16.3 and 1.64, respectively when air temperature at the inlet of the humidification tower is at 30℃, the mass flow is 1,900 kg·h⁻¹, water temperature at the inlet of the humidification tower is at 90℃, the mass flow of the inlet water is 15 t·h⁻¹ (water/air ratio is 7.9), the mass flow of the make-up water of the circulating water tank is 1500 kg·h⁻¹ (25℃), and the gas compression ratio is 1.2.

Key words:high salinity wastewater; humidification and dehumidification; MVR; Aspen software; energy saving

利用增湿去湿法(HDH)处理高盐废水是一种新型的节能工艺,该工艺能耗低,运行投资费用少,能高效处理多种成分复杂的高盐废水,工艺条件灵活多变,适用于中小型的高盐废水淡化过程。该工艺在海水淡化^[1-3]领域研究颇多,近年来在废水处理领域正逐渐展开。陈名贤等^[4]提出一种三级串联式增湿去湿型太阳能海水淡化装置,研究了采用上中两级等温加热的方法拥有更高的产水量,并大大缩短了系统稳定的时间。戎铖等^[5]利用增湿去湿原理的新型含盐废水处理装置,对影响系统性能特征的各个因素进行实验,得到优化操作参数,填料塔顶部废水进口温度为75℃,体积流量为140 L/h,

填料塔底部空气进口体积流量为35 m³/h,上下2级冷凝室的空气进口流量比为2:1,在该操作参数下,系统的冷凝水产量和系统效率分别为3.58 kg/h和40.88%。从硕等^[6]搭建了低温常压下的新型脱盐系统,对加湿除湿过程进行热力学分析,得出当料液温度为57℃,进料体积流量为60 L/h,空气循环体积流量为180 m³/h时,系统最大产水量为1.7 kg/h,脱盐率大于99.99%。Mohamed等^[7]设计建造了一套太阳能驱动的单级和两级空气加热的脱盐系统装置,单级、两级系统生产量分别达到3.5、6.0 L/d。Hossam等^[8]采用新型波纹铝板制作的加湿器来研究加湿除湿海水淡化装置的性能,研究了

收稿日期:2019-12-13;修回日期:2020-07-28

基金项目:浙江省重点研发计划项目(2015C02058)

作者简介:邵婷(1996-),女,硕士生;林春绵(1962-),男,博士,教授,研究方向为水污染控制以及超临界流体技术研究及应用,通讯联系人, lcm@zjut.edu.cn。

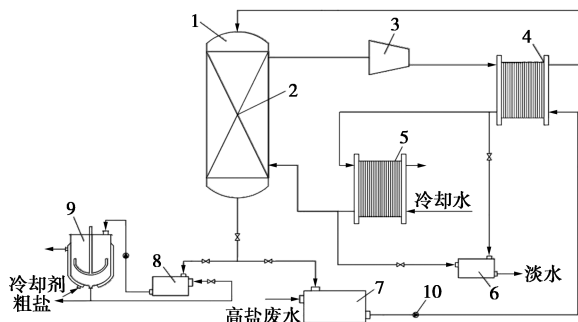
操作变量对产品回收率和性能的影响。

近年来,处理高盐废水常用的节能工艺还有MVR法^[9-11],该方法利用压缩机将蒸汽再压缩,使得蒸汽的品位得以提升,很好地解决了消耗蒸汽量大、成本高的问题,相比更为传统的多效蒸发工艺而言,MVR法节约标煤超过70%^[12]。但MVR工艺设备昂贵,蒸发过程不够稳定,容易受地理位置的影响,故需寻求综合性更优异的工艺来处理高盐废水。本文中在增湿去湿的基础上,结合了MVR法,将气体再压缩提高气体热能来预热高盐废水,该方法结合了增湿去湿法和MVR法的优点,进一步提升了能源利用效率。

1 气体再压缩式 HDH 系统工艺流程及工作原理

1.1 系统工艺流程

气体再压缩式增湿去湿系统流程如图1所示,该系统包括气体循环系统、高盐废水循环淡化系统和高盐废水浓缩系统。气体循环系统由增湿塔、压缩机、一级去湿器气体通道、二级去湿器气体通道构成。高盐废水循环淡化系统由循环水箱、增湿塔、一级去湿器液体通道、二级去湿器液体通道及淡水箱组成。浓水箱和结晶器形成高盐废水浓缩系统。



1—增湿塔;2—填料;3—压缩机;4—一级去湿器;5—二级去湿器;
6—淡水箱;7—循环水箱;8—浓水箱;9—结晶器;10—水泵

图1 气体再压缩式 HDH 系统流程示意图

1.2 工作原理

一定温度的高盐废水与气体在增湿塔内经填料进行直接接触,气体获得热量后温度升高,并带走水汽进入压缩机,气体经压缩机压缩后品位进一步提升,压缩后的气体进入到一级去湿器加热高盐废水,最后气体经二级去湿器中的冷却水冷却至初始温度进入增湿塔进行下一个循环。循环水箱内的高盐废水经水泵送至一级去湿器经气体加热后进入增湿塔,这部分高盐废水被逆流而上的气体带走热量与

水汽后,一部分进入循环水箱进行下一步循环,一部分则进入结晶器处理得到粗盐。由一级去湿器和二级去湿器得到的淡水由淡水箱收集。

增湿塔内的填料塔可采用抗污堵的环保填料,可根据废水类型选用合适的填料,适应性强,灵活多变。一级去湿器和二级去湿器为气-水式板式换热器,便于清洗更换。结晶器为锚式搅拌结晶器,所用冷却剂为冷冻水。该工艺将传统的增湿去湿脱盐工艺与MVR工艺结合起来,由最初的电加热改为气体再压缩式的方法,省去大量的热量投入,大大节省了能源消耗和运行费用。气体再压缩式增湿去湿系统是兼具气体循环和高盐废水循环的双循环系统,整个系统为零排放,提高了能源利用效率并减少了不必要的污染排放。

2 气体再压缩式 HDH 系统 Aspen 模型的建立

Aspen 软件是一款可进行化工模拟的软件,用数学模型描述多个单元操作,可模拟实际生产过程。过程模拟不仅能够节省大量费用,而且能省去大量时间投入,在化学工艺的研发过程中进行分析、优化,对工艺的实行进行可靠评估。Aspen 软件拥有强大的数据库支撑,经该软件模拟所得的数据与实际运行得到的结果吻合性极好。韩克鑫等^[13]搭建 Aspen 模型,并设计了简捷计算方法,提高了计算收敛性。于洋等^[14]采用 Aspen Plus 对某中药厂的甘草多糖水溶液浓缩过程进行仿真模拟,考察了MVR对中药浓缩过程的节能优势以及对浓缩过程稳定性的影响。故文章建立了一套气体再压缩式的增湿去湿系统模型,对该系统进行模拟优化得到最佳工艺条件。

2.1 气体再压缩式 HDH 系统模拟流程

以水和空气为介质建立系统模型,物性方法选择ELECRTL。为了方便模型的优化与收敛,将空气循环断开,得到如图2的模型。

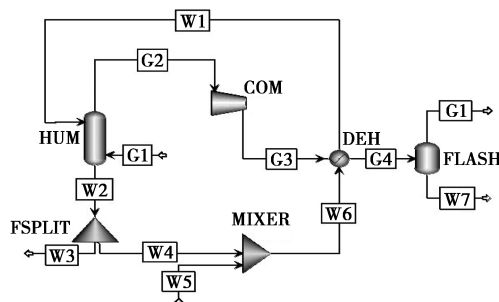


图2 气体再压缩式 HDH 系统 Aspen 模拟流程

首先选用 RADFRAC 模块模拟增湿塔 HUM, 空气从塔底部 G1 流入, 与 W1 流入的水逆流接触后经 G2 流出进入压缩机, 换热后的水从 W2 流出经 FSPLIT 模块分流, 一部分经 W3 流出, 一部分经 W4 流入循环水箱进行循环。压缩机 COM 选用 COMPR 模块, 空气经压缩机压缩后温度升高经 G3 流股运送至去湿器 DEH 部分。如图中, 用 HEATX 模块和 FLASH 模块模拟去湿器系统, 水经 W6 流股流入换热器 DEH, 与空气进行换热, 空气温度下降进入分离器 FLASH 模块, 最终空气从 G1 流出, 淡水从 W7 流出。模型中选用 MIXER 模块模拟循环水箱, 不断补充新鲜水经 W5 流股进入到 MIXER 模块中。

2.2 工艺条件影响因素

增湿塔进口水温度 T_w ($^{\circ}\text{C}$)。增湿塔进口温度不同, 能提供给空气的初始热量就不同, 增湿塔进口温度能直接影响到与空气的传热效果。

增湿塔进口水气质量比 L/G 为进入增湿塔 HUM 的高盐废水的质量流量与气体质量流量的比值。增湿塔进口水气存在最佳质量流量比, 合适的水气质量比是影响水气传热传质的关键影响因素。

气体压缩比 ε 。气体压缩比越大, 气体温升越高, 所供给初始废水的热量越大, 故气体压缩比是影响系统能效的关键影响因素。

2.3 模型评价指标

(1) 浓缩比 R 。浓缩比 R 是衡量系统性能指标之一, 用淡水产量和盐水产量的比值来评估系统的产水性能, 浓缩比 R 越高, 系统产淡水能力越好。

$$R = q_w/q_s \quad (1)$$

式中: q_w 为淡水产量, kg/h ; q_s 为盐水产量, kg/h 。

(2) 系统能效比 E 。系统能效比能反映系统能量回收效率, 是评价该系统性能的标准, 为所得淡水的潜热与压缩机输入功率的比值。 E 越高, 说明系统的能量回收效率越高, 能源利用率越好。

$$E = q_w h_w / 3600W \quad (2)$$

式中: h_w 为水气化的潜热, kJ/kg ; W 为压缩机实际输入功率, kW

3 系统模拟与性能分析

本文中建立了气体再压缩式的增湿去湿高盐废水浓缩装置, 构建系统 ASPEN 模型, 分别分析了进口水温度、进口水气比和压缩比对系统浓缩比和系统能效比的影响。为了模型更稳定运行, 做出以下设定。

(1) HUM 模块的理论塔板数为 8, 无冷凝器与

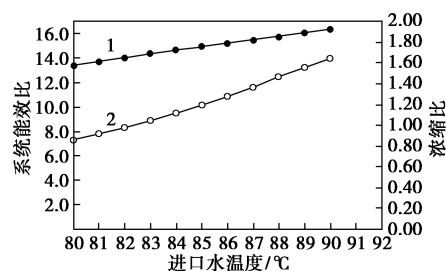
再沸器, 压力为正常大气压。

(2) 压缩机为多变压缩机, 多变效率为 0.65, 机械效率为 0.78。

(3) 各个模块的压力均为正常大气压, 热量损失忽略不计。

3.1 增湿塔进口水温度对系统的影响

在控制增湿塔进口空气温度为 30°C , 质量流量为 1900 kg/h , 增湿塔进水质量流量为 16 t/h , 循环水箱补充水为 25°C , 质量流量为 1500 kg/h , 压缩机压缩比为 1.2 的条件下, 改变增湿塔进口水温度 $80\sim 90^{\circ}\text{C}$ 。系统进口水温度对系统能效比和浓缩比的影响如图 3 所示, 浓缩比随着进口水温度上升而逐渐升高, 在 90°C 时, 浓缩比的增幅最大, 系统能效比不断上升 ($13.38\sim 16.33$)。这是由于随着进口水温度的上升, 增加了与空气的传热传质, 空气带走了更多的热量, 冷凝出更多的淡水, 故浓缩比随之升高。随着进口水温度逐渐升高, 得到更多淡水, 在压缩机压缩比变化不大的情况下, 系统能效比随之升高。故提高进口水温度有利于提高系统的能效比与浓缩比。



1—能效比; 2—浓缩比

图 3 增湿塔进口水温度对系统能效比和浓缩比的影响

3.2 增湿塔进口水气比对系统的影响

增湿塔进口水气比对系统能效比和浓缩比的影响如图 4 所示。在控制增湿塔进口空气温度为 30°C , 质量流量为 1900 kg/h , 增湿塔进口水温度为 90°C , 循环水箱补充水为 25°C , 质量流量为 1500 kg/h , 压缩机压缩比为 1.2 的条件下, 改变进口水气比 $6\sim 9$ 。如图所示, 随着进口水气比的升高, 系统能效比逐渐上升后趋于平缓, 而浓缩比上升趋势比较显著。提高水气比有利于增加高盐废水和气体的接触面积, 进行更好的传热传质, 但随着进口高盐废水质量流量增加, 空气在一定温度湿度下能带走的水是一定的, 压缩机功率变化不大, 系统能效比缓慢上升后趋于平缓, 故空气与水之间存在一个最佳的水气质量流量比, 最终发现增湿塔进口水气比在 $8\sim 9$

间,系统性能表现较好。

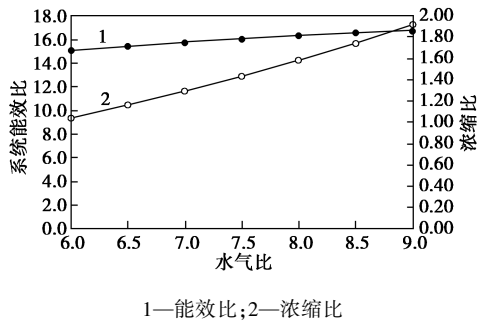


图4 增湿塔进口水气比对系统能效比和浓缩比的影响

3.3 压缩机压缩比对系统性能的影响

压缩机压缩比对系统能效比和浓缩比的影响如图5所示。在控制增湿塔进口空气为30℃,质量流量为1900 kg/h,增湿塔进口水温度为90℃,质量流量为16 t/h,循环水箱补充水为25℃,质量流量为1500 kg/h的条件下,改变压缩机压缩比1.1~1.6。如图所示,浓缩比随着压缩机压缩比的上升而逐渐减少,而系统性能比随着压缩比的上升而显著下降,最后趋于平缓。压缩机的压缩比对系统运行非常关键,压缩比越高,空气温升越大,能提供给高盐废热的热量就越多。而压缩机压缩比越高,压缩机功率越大,故系统能效比是逐渐变小的。压缩比在1.2时,既能够提供良好的温升,系统能效比也很高。

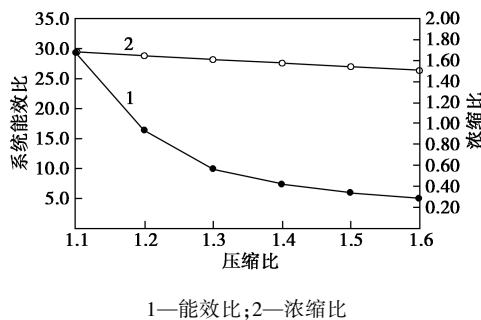


图5 压缩比对系统能效比和浓缩比的影响

4 结论

建立了一套气体再压缩式的增湿去湿高盐废水淡化装置,并利用ASPEN软件模拟相关流程,探索最优参数对系统性能的影响,最终得出以下结论。

(1) 系统能效比和浓缩比随着增湿塔进口水湿的升高而上升,适当提高进口水温度有利于提高系统能效比和浓缩比。

(2) 水气比在8~9时,系统能效比达到最优值,相应能取得较好的浓缩效果。

(3) 浓缩比随着压缩机压缩比的上升而逐渐减少,而系统性能比随着压缩比的上升而逐渐下降,最后趋于平缓。压缩比在1.2时,能提供合适的温升,系统能效比和浓缩比均较高。

(4) 气体再压缩式增湿去湿工艺兼备增湿去湿法和MVR法的优点,可根据高盐废水的类型选择不同的填料优化增湿过程,依靠气体再压缩提供热能,无需其他能量的投入,使能源利用效率有了质的提升,该方法灵活多变,适用于中小型高盐废水浓缩过程,有较好的市场前景。

参考文献

- [1] Hardik K Jani, Kalpesh V Modi. A review on numerous means of enhancing heat transfer rate in solar-thermal based desalination devices[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 93: 302-317.
- [2] 郑智颖,李凤臣,李倩,等.海水淡化技术应用研究及发展现状[J]. *科学通报*, 2016, 61(21): 2344-2370.
- [3] Cristiana B Maia, Felipe V M Silva, Vinícius L C Oliveira, et al. An overview of the use of solar chimneys for desalination[J]. *Solar Energy*, 2019, 183: 83-95.
- [4] 陈名贤,李正良,孟沪生,等.多级等温加热增湿去湿海水脱盐系统的瞬态性能[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(4): 1071-1077.
- [5] 戎铨,张锁龙,戴玮,等.空气为媒介的含盐废水处理系统实验研究[J]. *水处理技术*, 2018, 44(2): 51-55.
- [6] 从硕,陈佳明,蔡景成,等.加湿除湿脱盐系统的热力学分析及实验研究[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2019, 53(4): 684-691.
- [7] Mohamed A Antar, Mostafa H Sharqawy. Experimental investigations on the performance of an air heated humidification-dehumidification desalination system[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2012, 51(4/5/6): 837-843.
- [8] Hossam A Ahmed, Ismail I M, Wael F Saleh, et al. Experimental investigation of humidification-dehumidification desalination system with corrugated packing in the humidifier[J]. *Desalination*, 2017, 410: 19-29.
- [9] 王向斌,赵军.基于MVR技术的含盐化工废水处理系统研究[J]. *新型工业化*, 2019, 9(6): 50-54.
- [10] 苗纯正,朱小飞,唐慧波,等.MVR技术在海水淡化中的应用研究[J]. *中国资源综合利用*, 2019, 37(3): 165-168.
- [11] Zhou Yasu, Shi Chengjun, Dong Guoqiang. Analysis of a mechanical vapor recompression wastewater distillation system[J]. *Desalination*, 2014, 353: 91-97.
- [12] 庄严,王欲晓,张帆,等.两种蒸发技术处理高盐有机农药废水的比较研究[J]. *山东化工*, 2019, 48(4): 195-196.
- [13] 韩克鑫,邢玉雷,吕宏卿,等.基于Aspen Plus模拟的MVR高盐废水处理工艺设计简捷计算[J]. *盐科学与化工*, 2018, 47(12): 8-11.
- [14] 于洋,司梦兰,高雪地,等.MVR技术在中药浓缩过程中节能优化的仿真研究[J]. *中国医药工业杂志*, 2017, 48(11): 1610-1616. ■