

浅析运行工况对单效蒸发器效率的影响

吴 琼, 王振宇, 王 迪, 李龙刚, 邹兆辉

安徽浩悦环境科技股份有限公司, 安徽 合肥

收稿日期: 2023年6月17日; 录用日期: 2023年7月17日; 发布日期: 2023年7月25日

摘 要

本文研究单效蒸发器在处置高盐废水时, 加热器温度、系统真空度、冷凝器温度、分离器液面高度等运行工况参数对单效蒸发器效率的影响, 得出较为优化的运行工况参数, 为现场操作人员的实际运行工况参数控制, 提供理论依据。

关键词

单效蒸发器, 高盐废水, 蒸发效率, 工况控制

Analysis on the Influence of Operating Conditions on the Efficiency of Single-Effect Evaporator

Qiong Wu, Zhenyu Wang, Di Wang, Longgang Li, Zhaohui Zou

Anhui Hao Yue Environmental Technology Co. LTD., Hefei Anhui

Received: Jun. 17th, 2023; accepted: Jul. 17th, 2023; published: Jul. 25th, 2023

Abstract

In this paper, the influence of operating parameters such as heater temperature, system vacuum, condenser temperature and separator liquid level height on the efficiency of single-effect evaporator when it is disposing of high-salt wastewater is studied, and more optimized operating parameters are obtained, which provide a theoretical basis for the actual operating parameter control of field operators.

文章引用: 吴琼, 王振宇, 王迪, 李龙刚, 邹兆辉. 浅析运行工况对单效蒸发器效率的影响[J]. 水污染及处理, 2023, 11(3): 69-75. DOI: 10.12677/wpt.2023.113010

Keywords

Single-Effect Evaporator, High Salinity Wastewater, Evaporation Efficiency, Operating Condition Control

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

蒸发浓缩是用加热的方法,将含有不挥发性溶质的溶液加热至沸腾状况,使部分溶剂汽化并被移除,从而提高溶剂中溶质浓度的单元操作[1]。现阶段,蒸发浓缩工艺技术已经成为化工企业生产不可缺少的工艺方法,并且越来越重要[2]。因此分析影响蒸发浓缩效率的因素及采取的相应措施是我们做企业生产必备的知识和研究的方向。蒸发器作为最常见的浓缩设备,在处置高盐废水、海水淡化等领域最早被推广和使用,其原理是利用高温蒸汽与废水进行热交换后,再将水蒸气冷凝成液态水并进行收集的过程[3]。蒸发器有不同的分类,按加热方式可分为直接热源加热和间接热源加热;按操作压力可分为常压、加压和减压(真空)蒸发操作[4];按效数可分为单效蒸发器和多效蒸发器[4]。蒸发器可使废水中盐分去除率达到较高水平,一般作为高盐废水的预处理过程,操作简单、能耗较低。目前主流技术的有单、多效蒸发和机械压缩蒸发(MVR)等[5]。

机械压缩蒸发(MVR)是对蒸发过程中产生的热蒸汽经过机械再压缩,重新作为蒸汽热源加热废水,从而达到节能、环保的目的。MVR 技术同蒸发法可以实现废水零排放,且能耗是仅为传统蒸发器的四分之一到五分之一。MVR 技术更适用于废水处理量少,分离回收利用价值高的情况。若将 MVR 蒸发器直接用于大量高盐工业废水处理中,容易结垢导致蒸发器堵塞,后续维护成本也较高[6]。

本文讨论的单效外循环强制结晶蒸发器主要是凭借循环泵这一外力而促进液体产生循环,循环液体将会在流经加热器的过程中被加热,当出现分离器压力降低现象的时候产生部分蒸发,随即对液体进行冷却,直到其能够同相应的沸点温度相符合,此举能够有效降低产品出现结晶或者结构的现象出现的可能性[7],提高了设备运行的稳定性,但影响蒸发浓缩的因素较多,不能只考虑技术方面,还应该考虑人员操作、运行工况参数控制等方面的因素[8],实际生产中蒸发器往往会因为技术以外的变化因素,使得蒸发效率很难达到蒸发器的理论设计值。因此结合实际进行理论阐述,分析并指出蒸发能力达不到设计值的原因[9],就显得尤为重要。

2. 概述

2.1. 高盐废水水质情况及蒸发器概况

某化工企业在生产过程中会产生大量高盐废水,含有大量的氯化钠和硫酸钠,其采用的是单效外循环强制结晶蒸发器对高盐废水进行处理,处理后的废水经生化处理后回用,蒸发所得蒸馏残渣再交由具有资质的企业进行处理。单效蒸发器主要由加热、冷凝、真空、循环、分离五个系统组成,主要设备包括加热器、气液分离器、冷凝器、真空泵、强制循环泵、出料泵、冷凝水泵、除沫器等,设备采用蒸汽作为间接热源,加热器换热面积 100 m²、冷凝器换热面积 130 m²,分离器液面控制高度在 0~2 m 之间,设计日处置量为 45 t。高盐废水水质情况如表 1 所示。

Table 1. Water quality of high salinity wastewater
表 1. 高盐废水水质情况

名称	PH	总盐(mg/L)	硬度(mmol/L)	COD (mg/L)	氨氮(mg/L)
指标	9~10	50,000~70,000	0.5~2	30,000~80,000	100~200

由于单效蒸发器处置的物料适应范围更广，运行过程中物料加热通过强制循环，在管内流动速度快、受热均匀、传热系数高等优点，结合处置废水的总盐含量和 COD 含量较高等特点，采用单效蒸发器处置较有优势，但同时也存在跑液、内壁结盐结垢等问题，这就需要现场人员在运行过程中摸索出较为优化的运行工况参数，尽可能实现单效蒸发器效率的最大化。

2.2. 单效蒸发器处置高盐废水的工艺流程

单效蒸发器处置高盐废水的工艺流程是采用加热器和强制循环泵使得高盐废水能够进行均匀快速传热，受热的高盐废水在气液分离器里进行气液分离，分离出的气体因压差的原因会进入冷凝器，经冷凝器冷凝后，由冷凝水泵抽出。浓缩的废水经出料泵进入配套的离心机进行固液分离。工艺流程图见图 1。

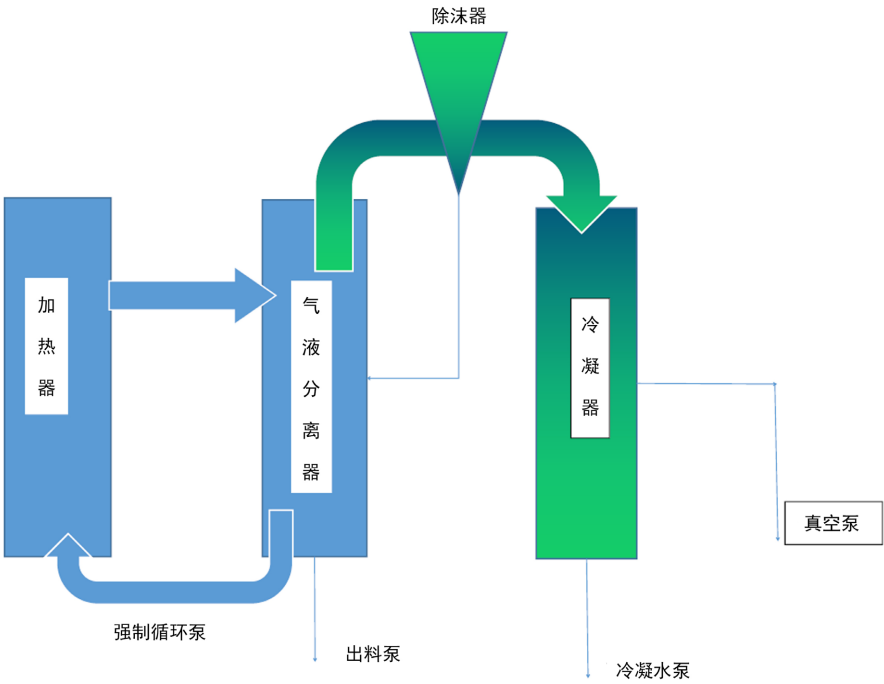


Figure 1. Process flow chart for evaporation treatment of high salinity wastewater
图 1. 高盐废水蒸发处置工艺流程图

3. 影响单效蒸发器蒸发效率的运行工况参数

化工企业处理高盐废水的单效外循环强制结晶蒸发器运行过程中，现场操作人员调控的运行工况参数主要包括：加热器温度、分离真空度、冷凝器温度、分离器液面高度等，本文也仅从这四个方面，分析只在单因素改变的情况下，单效蒸发器效率的变化情况，从而为各企业运行蒸发器提供参考依据。

3.1. 加热器温度对蒸发效率的影响

控制分离真空度为-0.08 MPa，冷凝器温度为 30℃，分离器液面高度为 1 m 的情况下，调整蒸发器

的加热器温度，记录在不同加热器温度下蒸发器蒸发效率的数据(连续记录 10 天该温度下设备正常运行时的蒸发器日处置量)，并计算出平均日处置量。统计蒸发器蒸发效率与加热器温度的关系，相关数据统计如表 2 和图 2 所示。

Table 2. Relationship between evaporator evaporation efficiency and heater temperature
表 2. 蒸发器蒸发效率与加热器温度的关系

蒸发器加热器温度(℃)	60	70	80	90	100	110
蒸发器日平均处置量(t)	38.8	42.2	44.5	44.3	42.6	42.1

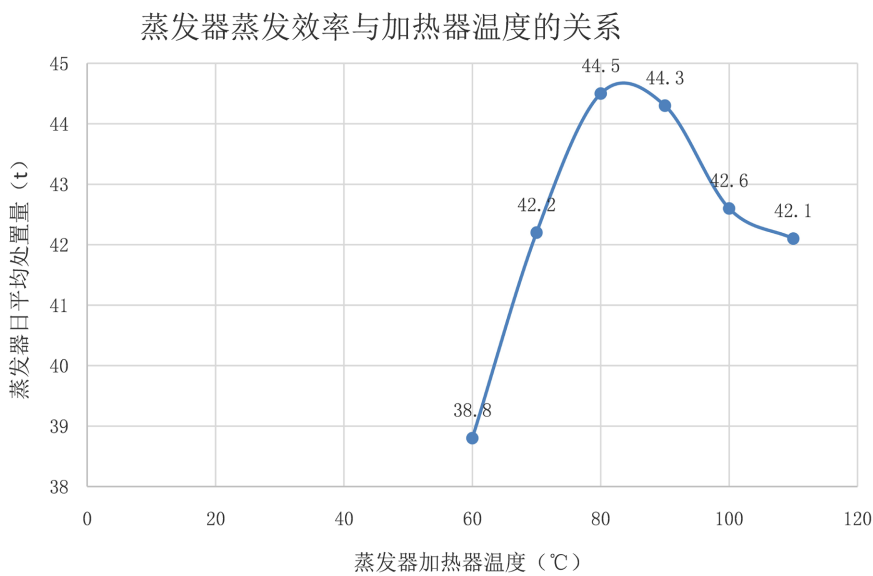


Figure 2. Relationship between evaporator evaporation efficiency and heater temperature
图 2. 蒸发器蒸发效率与加热器温度的关系

从图 2 可知，蒸发器的蒸发效率与加热器温度并不完全呈现正相关关系。在 60℃~80℃区间，随着加热器温度的持续升高，蒸发效率上升且变化明显，但在 80℃以上，蒸发器的蒸发效率没有再随着加热器温度上升而继续增加，反而在 90℃~110℃区间以上出现了一定程度的下降，这是由于高盐废水中含有大量氯化钠和硫酸钠，在蒸发浓缩过程中，随着温度的升高，浓缩速率逐渐提升，溶液中的氯化钠和硫酸钠不断以结晶析出，在 80℃左右达到蒸发 - 结晶平衡状态。

3.2. 分离真空度对蒸发效率的影响

控制保持加热器温度为 80℃，冷凝器温度为 30℃，分离器液面高度为 1 m 的情况下，调整蒸发器的分离真空度，记录在不同分离真空度下蒸发器蒸发效率的数据(连续记录 10 天该真空度下设备正常运行时的蒸发器日处置量)，并计算出平均日处置量。统计蒸发器蒸发效率与分离真空度的关系，相关数据统计如表 3 和图 3 所示。

Table 3. Relationship between evaporator evaporation efficiency and separation vacuum degree
表 3. 蒸发器蒸发效率与分离真空度的关系

分离真空度(MPa)	-0.05	-0.06	-0.07	-0.08	-0.09	-0.1
蒸发器日平均处置量(t)	39.6	40.9	42.2	43.5	44.6	44.7

蒸发器蒸发效率与分离真空度的关系

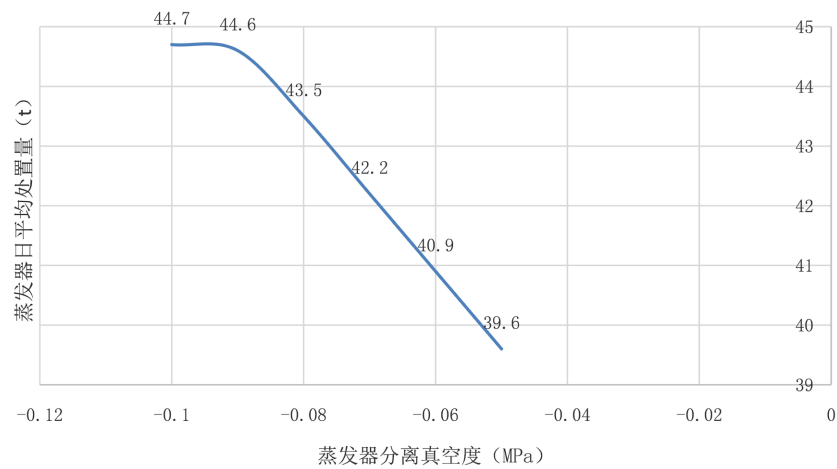


Figure 3. Relationship between evaporator evaporation efficiency and separation vacuum degree
图 3. 蒸发器蒸发效率与分离真空度的关系

从图 3 可知，蒸发器的蒸发效率与分离真空度呈现出一定程度的负相关关系。在-0.09 MPa 以上，蒸发效率随着分离真空度的持续升高，蒸发效率变化明显，但在-0.09 MPa 以下，蒸发器的蒸发效率变化不再明显，无法直接判断此时是否还继续具有负相关关系。这是由于在减压蒸发过程中，系统内真空度降低，使得高盐废水的饱和蒸汽压降低，氯化钠 - 硫酸钠体系水溶液沸点降低。

3.3. 冷凝器温度对蒸发效率的影响

Table 4. Relationship between evaporator evaporation efficiency and condenser temperature
表 4. 蒸发器蒸发效率与冷凝器温度的关系

冷凝器温度(℃)	20	25	30	35	40	45
蒸发器日平均处置量(t)	45.1	44.7	44.7	43.6	42.3	40.6

蒸发器蒸发效率与冷凝器温度的关系

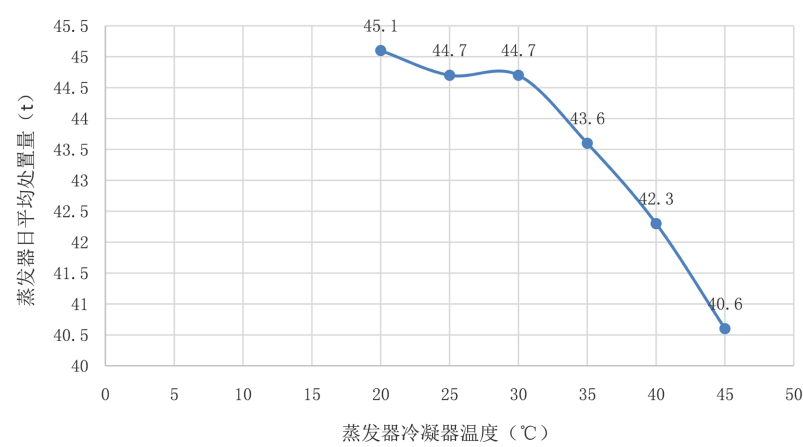


Figure 4. Relationship between evaporator evaporation efficiency and condenser temperature
图 4. 蒸发器蒸发效率与冷凝器温度的关系

控制分离真空度为-0.08 MPa，加热器温度为 80℃，分离器液面高度为 1 m 的情况下，调整蒸发器的冷凝器温度，记录在不同冷凝器温度下蒸发器蒸发效率的数据(连续记录 10 天该温度下设备正常运行时的蒸发器日处置量)，并计算出平均日处置量。统计蒸发器蒸发效率与冷凝器温度的关系，相关数据如表 4 和图 4 所示。

从图 4 可知，蒸发器蒸发效率与冷凝器温度呈现出一定程度的负相关关系。在 20℃~30℃区间以下，随着冷凝器温度的升高，蒸发器蒸发效率出现下降，但趋势不明显，而在 30℃~45℃区间，蒸发器的蒸发效率随着冷凝器温度的升高而变化较大，呈现出明显的负相关关系。这是由于分离器分离出的生蒸汽无法及时在冷凝器进行冷凝，会在分离器顶端聚集，形成蒸气压，影响分离器后续的气液分离效果。

3.4. 分离器液面高度对蒸发效率的影响

控制分离真空度为-0.08 MPa，加热器温度为 80℃，冷凝器温度为 30℃的情况下，调整蒸发器的分离器液面高度，记录在不同分离器液面高度下蒸发器蒸发效率的数据(连续记录 10 天该液面高度下设备正常运行时的蒸发器日处置量)，并计算出平均日处置量。统计蒸发器蒸发效率与分离器液面高度的关系，相关数据统计如表 5 和图 5 所示。

Table 5. Relationship between evaporator evaporation efficiency and separator liquid level height
表 5. 蒸发器蒸发效率与分离器液面高度的关系

分离器液面高度(m)	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2
蒸发器日平均处置量(t)	43.7	44.7	44.6	44.9	44.7	44.8

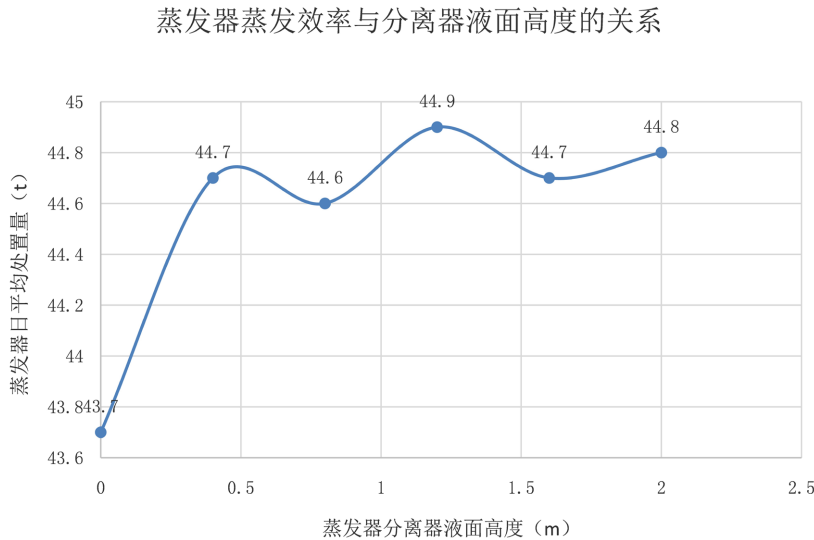


Figure 5. Relationship between evaporator evaporation efficiency and separator liquid level height
图 5. 蒸发器蒸发效率与分离器液面高度的关系

从图 5 中无法直接观察出蒸发器蒸发效率与不同分离器液面高度之间的关系，但在实际运行中，分离器液位显示高度过高时，会加大蒸汽对液体的夹带，特别是 COD 含量较高、泡沫较大时，会直接加快除沫器结盐堵塞的速度。蒸发器的连续运行时间和蒸发器运行稳定性都不如分离器液面低液位运行时。

3.5. 优化条件下蒸发器蒸发效率

控制分离真空度为-0.08 MPa，加热器温度为 80℃，冷凝器温度为 30℃，分离器液面高度为 1 m 的

条件下，记录蒸发器蒸发效率的数据(连续记录 10 天该优化条件下设备正常运行时的蒸发器日处置量)，并计算出平均日处置量。统计优化条件下蒸发器蒸发效率，相关数据统计如表 6 所示。

Table 6. Evaporation disposal capacity of evaporator under optimized conditions
表 6. 优化条件下蒸发器蒸发处置量情况

分离真空度(MPa)	-0.08				
加热器温度(℃)	80				
冷凝器温度(℃)	30				
液位显示高度(m)	1				
连续 10 日蒸发器 日处置量(t)	44.3	45.2	44.9	44.9	45.0
	45.2	44.8	44.6	44.6	45.1
连续 10 日蒸发器 日平均处置量(t)	44.86				

由表 6 可知，在优化条件下，蒸发器平均日处置量为 44.86 t，相比于 45 t 的设计处置量，实际蒸发效率已达到设计值的 99.7%。通过人员对现场工况的控制，实现了单效蒸发器效率的提升，也为现场处置提供了数据参考。

4. 结论

- (1) 单效外循环强制结晶蒸发器对高盐废水进行处置时，现场人员对参数的控制，会直接影响到蒸发器的蒸发效率。现场人员可以根据实际情况，摸索出适合该废水处置的加热器温度、冷凝器温度、分离真空度和分离器液面高度。虽然测试数据表明越低的冷凝器温度和真空度，越有利于提高蒸发效率，但在实际运行中，如果一味追求低的真空度和冷凝器温度，往往会极大的增加企业成本，所以在实际生产中，企业更多的是寻求投入产出的平衡点。
- (2) 在实际生产过程中，观察到单效蒸发器在加热器温度控制在 80℃左右、分离真空度保持在 -0.08MPa 以下、冷凝器温度控制在 30℃以下时、分离器液面高度为 1 m 的情况下处置此类高盐废水时，既能减少蒸汽使用量、延长蒸发器连续运行时间又尽可能实现蒸发器日处置量最大化的目标。

参考文献

[1] 黄亚东. 化工原理(第 1 版)[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2006 年 9 月.

[2] 李冬冬. 浅析影响浓缩蒸发的因素及采取措施[J]. 化工管理, 2013(6): 66+68.

[3] 郭翠, 宋玉亮. 低温多效海水淡化蒸发器变工况参数的研究[J]. 冶金动力, 2022(6): 67-70.
<http://dx.doi.org/10.13589/j.cnki.vjdl.2022.06.029>.

[4] 张永发. 蒸发器动态特性研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2007.

[5] 王英. MVR 单效强制循环蒸发器的设计及注意事项研究[J]. 石化技术, 2021, 28(7): 192-193.

[6] 畅炳蔚. 高盐废水处理研究进展[J]. 化工管理, 2022(19): 70-73.
https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C44YLtIOAiTRKibYlV5Vjs7iJTKGjg9uTdeTsOI_ra5_XTNuCEPJ4NEhAZSod_96530laI5AVPzoTI5WiwAcWYWg&uniplatform=NZKPT

[7] 刘晶. 煤化工高盐废水的蒸发结晶工艺技术研究[J]. 化工管理, 2023(6): 162-164.
<http://dx.doi.org/10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2023.06.048>.

[8] 刘殿宇. 污水处理蒸发器达不到生产能力的原因分析[J]. 化工与医药工程, 2018, 39(6): 65-66.

[9] 李玲密, 宋宝华, 王中原, 周欣. 高含盐工业废水蒸发结晶探讨[J]. 环境工程, 2014, 32(S1): 202-205.