

微波加热强化闪蒸的蒸发特性

田时泓^{1,2,3}, 郭磊^{1,2,3}, 巨少华^{1,2,3}, 张晖⁴

- (1. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 云南 昆明, 650093;
2. 昆明理工大学 微波能工程应用及装备技术国家地方联合工程实验室, 云南 昆明, 650093;
3. 昆明理工大学 非常规冶金教育部重点实验室, 云南 昆明, 650093;
4. 云南磷化集团有限公司 磷资源开发利用工程技术研究分公司, 云南 昆明, 650600)

摘要: 针对传统蒸发过程换热效率低下的问题, 基于传统工艺流程设计微波闪蒸系统, 在传统闪蒸罐体上设置微波馈口将微波能实时输入到闪蒸罐体内。为了验证微波闪蒸系统的蒸发处理能力, 采用水作为介质研究系统在微波加热强化方式下的闪蒸效果。控制系统的真空度为70~78 kPa, 分别研究微波功率(0.81~1.35 kW)、液体流量(10~40 L/h)和初始温度(50~90 °C)对蒸发效果及闪蒸率的影响, 并与不输入微波条件下的传统闪蒸效果进行比较。研究表明: 在实验参数范围内, 微波闪蒸产生的冷凝液体积以及随微波功率、液体流量、初始温度的增加而增加。当液体流量为40 L/h、微波功率为1.35 kW、初始温度为90 °C时, 相较于传统闪蒸, 微波加热强化条件下闪蒸蒸汽温度从36.69 °C升高至45.13 °C, 浓缩液温度从36.70 °C升高至45.33 °C, 且强化蒸发效率达到42.86%。微波加热强化条件下的系统冷凝液体积比常规工况下的多, 说明微波加热强化了闪蒸过程并有效提高了闪蒸率。

关键词: 闪蒸; 微波加热; 蒸发效率; 传热传质

中图分类号: TQ025.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2020)06-1730-08

Evaporation properties of microwave heating strengthening flash evaporation

TIAN Shihong^{1,2,3}, GUO Lei^{1,2,3}, JU Shaohua^{1,2,3}, ZHANG Hui⁴

- (1. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
2. National Local Joint Laboratory of Engineering Application of Microwave Energy and Equipment Technology, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
3. Key Laboratory of Unconventional Metallurgy, Ministry of Education, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

收稿日期: 2019-08-18; 修回日期: 2019-11-10

基金项目(Foundation item): 云南省应用基础研究重点项目(2015FA017); 云南磷化集团国家磷资源开发利用工程技术研究中心资助项目(2018181) (Project(2015FA017) supported by the Basic Research of Application Foundation of Yunnan Province; Project(2018181) supported by the National Engineering Research Center for Phosphorus Resources Development and Utilization, Yunnan Phosphate Chemical Group Co. Ltd.)

通信作者: 巨少华, 博士, 教授, 从事微波强化冶金、化工过程研究; E-mail: shj_200801@126.com

4. Phosphorus Resources Development and Utilization Engineering Technology Research Branch Office, Yunnan Phosphate Chemical Group Co. Ltd., Kunming 650600, China)

Abstract: Due to the low heat exchange efficiency of traditional evaporation process, a microwave flash system was designed based on the traditional flash evaporation process. A microwave feed port was set on the traditional flash tank to input the microwave energy into the flash tank in real time. In order to verify the evaporation processing capability of the microwave flash system, the flashing effect under microwave heating conditions was studied on the system using water as the medium. Under the condition of system vacuum of 78 kPa, the effects of microwave power (0.81–1.35 kW), liquid flowrate (10–40 L/h) and initial temperature (40–50 °C) on evaporation and flash evaporation rate was studied and compared to the traditional flash evaporation effect without microwave input. The results show that within the experimental parameters, the volume of condensate generated by microwave flash evaporation increase with the increase of microwave power, liquid flow rate and initial temperature. When the liquid flow rate is 40 L/h, the microwave power is 1.35 kW, and the initial temperature is 90 °C, the temperature of flash steam increases from 36.69 °C to 45.13 °C, the temperature of concentrate increases from 36.70 °C to 45.33 °C, and the enhanced evaporation efficiency reaches 42.86% under microwave heating strengthening conditions compared with the traditional flash evaporation. The volume of condensation water of microwave heating strengthening conditions is larger than that of the traditional flash evaporation, which indicates that microwave heating strengthens flash process and effectively improves flash evaporation rate.

Key words: flash evaporation; microwave heating; evaporation rate; heat and mass transfer

蒸发作为现代工业生产过程中的重要工序之一, 被广泛应用于化工、海水淡化、印刷、废水处理、冶金、氯碱生产等工业领域^[1-5]。蒸发以各种处理方式存在于这些工业领域中, 主要包括单效蒸发、单级闪蒸、多效蒸发(MEE)、多级闪蒸(MSF)、热力蒸汽再压缩(TVR)及机械式蒸汽再压缩(MVR)等^[6]。其中, 单效蒸发过程采用单级蒸发器、单级泵及热源系统, 所产生的蒸汽不作为热源回收利用。由于工业成本及投资控制, 工业中的蒸发过程逐渐向多级多效发展。多效蒸发通过将多个单效蒸发流程进行结合, 采用多个蒸发器及锅炉, 通过回收利用前效的蒸汽作为后效的热源使用, 蒸汽在逐效减压条件下通过蒸发器, 最终完成换热的蒸汽于末效排出系统^[7-8]。在多效蒸发的基础上, 机械式蒸汽再压缩蒸发技术被广泛利用, 通过压缩机将蒸发室内产生的二次蒸汽增压处理, 获取更高品位的蒸汽作为蒸发器内的热源使用, 这种蒸发装置与多效蒸发器相比, 节能效率提高30%~70%^[9]。由于蒸发过程常与热转化过程相配合, 针对热溶液的浓缩, 在工业应用采用闪蒸方式进行处理。闪蒸也被广泛应用于低压环境下的冷却和蒸发过程中。实际上, 闪蒸通常与降膜蒸发联用, 从而形成多级的降膜闪蒸蒸发系统, 二

次蒸汽回收后作为原液循环加热过程中的热源使用^[10]。传统蒸发工艺所采用的蒸发流程是多效蒸发或多级闪蒸, 或者多效蒸发与多级闪蒸联合使用。这些处理方式一般需要三效蒸发或者三级闪蒸从而实现溶液的浓缩。此外, 在各效之间进行物料的流转需要采用强制循环方式, 在蒸发器内部由于腐蚀及结垢, 从而导致蒸发器热效率下降^[11]。海水淡化过程中经常使用的方式为热电联产, 蒸汽机产生的高温蒸汽用于汽轮机发电后, 将具有余热的乏汽回收压缩用于蒸发器进行海水淡化。这类设备具有复杂的膜式换热系统, 资金投入较大^[12]。以上这些问题导致蒸发流程在工业生产过程中的成本很高。例如, 在氧化铝工业中蒸发流程占据的能耗为25%~30%^[13]。闪蒸被广泛应用于蒸发流程中, 闪蒸是通过将高温液体置于低于其饱和压力的环境中, 液体多余显热释放转化为蒸发潜热使部分液体快速汽化, 汽化部分带走多余热量的同时使剩余液态部分得到快速浓缩的过程^[14]。闪蒸过程的主要特点在于液体温降速度快, 传统闪蒸过程的热量来源为料液通过闪蒸减压阀前后的热焓差, 在单级闪蒸条件下, 这部分热量的转化不足以实现浓缩效果, 因此, 通过递减压力结合料液循环的多级闪蒸被广泛应用。但

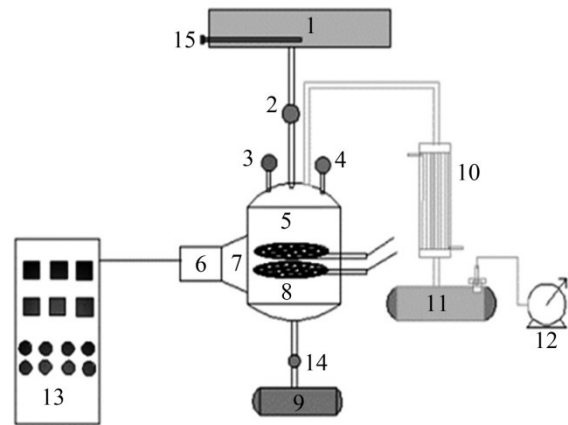
由于在闪蒸浓缩过程中料液的温降以及真空对热量补充的限制,多级闪蒸工艺通常采用闪蒸罐外进行热量补给的方式提高料液的温度,这增加了系统的复杂性与设备的投资成本。因此,需采用一种可以在真空条件下对闪蒸罐内的料液补充热量且提高单级闪蒸效率的加热方式,以改进闪蒸设备,优化蒸发工艺,减少设备投资。研究表明,液体温度、环境压力是闪蒸过程的关键控制性因素,增加初始温度或降低环境压力可使闪蒸的蒸发强度增加^[15]。采用外场强化蒸发过程的方式被人们广泛关注,被采用的外场主要包括微波场、超声场、电场、磁场。外场具有提高反应效率、缩减过程时间、提高生产效率、降低环境污染等效果^[16-17]。其中,微波是一种频率处于 0.300~3 000 GHz 的电磁波,微波加热具有加热均匀、速度快、选择性强、响应迅速等优点,且微波在真空环境中传播,其能量损失很低,因此,将微波作为外场强化蒸发过程有助于解决传热速率慢、能耗高、产品质量低等关键性问题,在加快蒸发速率的同时有助降低能耗^[18]。巨少华等^[19-20]将闪蒸罐与微波谐振腔进行协同优化设计,使微波加热与闪蒸过程在同一腔体中得到耦合,以此为基础开发了微波闪蒸新技术。其核心原理在于微波能通过馈口进入到闪蒸罐内被料液吸收,实现料液温度原位快速提升使得料液持续沸腾,从而达到强化闪蒸过程的目的。本文作者采用前期设计开发的微波闪蒸系统,进行流态水闪蒸的强化实验研究,研究微波功率、液体流量、初始温度对闪蒸蒸发效果以及体系温度的影响,以期对微波加热强化闪蒸过程的工程应用提供参考。

1 实验

1.1 实验装置

微波闪蒸装置结构如图 1 所示,主要由原液加热罐、闪蒸罐、微波源、电控柜、冷凝塔、真空泵、浓缩液收集罐、冷凝液收集罐和连接管道等构成。装置所采用的罐体等均采用 316L 不锈钢制成,罐体之间均采用不锈钢管道进行连通,罐体和管道表面均进行了保温处理。接口处采用球阀连接并控制开启。其中,闪蒸罐上方与原液加热

罐连接,中间布置有金属悬浮子流量计以及温度变送器;闪蒸罐下方与浓缩液收集罐连接,下方布置有温度变送器;金属真空泵与冷凝液收集罐连接。真空泵使冷凝液收集罐、冷凝塔、闪蒸罐、浓缩液收集罐等罐体系统环境整体成为低压环境,同时保证闪蒸罐内水蒸气的排出并维持罐体系统内的压力梯度。



1—原液加热罐; 2—温度变送器; 3—压力变送器;
4—温度变送器; 5—闪蒸罐; 6—磁控管;
7—锥形波导; 8—碳化硅多孔盘; 9—浓缩液收集罐;
10—冷凝塔; 11—冷凝液收集罐; 12—真空泵;
13—电控柜; 14—温度变送器; 15—热电阻。

图 1 微波闪蒸的实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment for microwave flash evaporation

1.2 实验设备

实验系统所用的闪蒸罐为 316L 不锈钢制成的圆柱形罐体,高为 400 mm,外径为 360 mm,内径为 300 mm,壁厚为 30 mm,在罐体外壁包覆厚约 50 mm 的保温棉以保证罐体保温效果。进液口布置在罐体穹顶中心位置。实验系统采用北京星仪传感有限公司生产的 CWDZ13 型温度变送器和 CYYZ16 型压力变送器,温度变送器测温范围为 $-50\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$,压力变送器测压范围为 $0\sim 100\text{ kPa}$,温度变送器分别安装在闪蒸罐液体进出口、闪蒸罐蒸汽出口、闪蒸罐侧面等位置,压力变送器安装在闪蒸罐顶盖位置。系统所用真空泵为 SHZ-95 型循环水真空泵,单孔抽气速率为 10 L/min ,最高可抽取的罐体真空度为当地大气压的 95% 以上。系统采用 SAMSUNG 磁控管作为微波发生装置,额定功率为 $0\sim 1.5\text{ kW}$ 。另外,在闪蒸罐中放置 1 块直径为 260 mm、厚度为 6 mm 的碳化硅陶瓷制成

的多孔盘。一方面由于碳化硅材料具有良好的吸波性能, 能够快速将微波能量转化为热量; 另一方面, 由于多孔盘布置在液体下落的路径上, 起到了减缓液体下落速度从而增加停留时间的作用。

1.3 实验流程

在实验中采用自来水作为实验工质液体, 首先在原液加热罐中预热实验工质液体到设定温度。为了减少管道和系统散热的影响, 采用加热的液体对管道和罐体预热 10 min, 然后放掉预热所消耗的液体。关闭闪蒸系统的所有阀门, 启动真空泵抽取罐体系统压力至设定值。最后开启进液阀门和微波源, 调节流量及微波功率至设定值后开始实验。

实验采用单因素控制变量法。通过控制微波功率、液体流量和初始温度进行实验, 实验时间为 20 min, 隔 5 min 记录 1 次系统温度。实验结束后关闭进液阀门及微波, 解除系统真空, 放出浓缩液收集罐和冷凝液收集罐内的液体, 测量并记录液体体积。实验参数如表 1 所示。

表 1 微波闪蒸实验参数

Table 1 Experimental parameters of microwave flash evaporation

初始温度/°C	微波功率/kW	液体流量/(L·h ⁻¹)	真空度/kPa
50~90	0.81~1.35	10~40	70~78

1.4 分析参数

以实验后系统冷凝水蒸气得到的冷凝液体积 V_c 表征系统闪蒸效果。采用闪蒸率 η 表征系统对单位液体的闪蒸能力, 其表达式为

$$\eta = \frac{V_c}{V_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中: V_i 为进入闪蒸罐体的液体总量, 其等于液体流量与实验时间的乘积。

采用强化蒸发效率 η_{EIE} 表征微波加热强化的效果, 其定义为微波加热强化方式和无微波供给的常规方式下的闪蒸率差值 $(\eta_m - \eta_c)$ 与常规方式下的闪蒸率 η_c 的百分比, 其表达式为

$$\eta_{EIE} = \frac{\eta_m - \eta_c}{\eta_c} \times 100\% \quad (2)$$

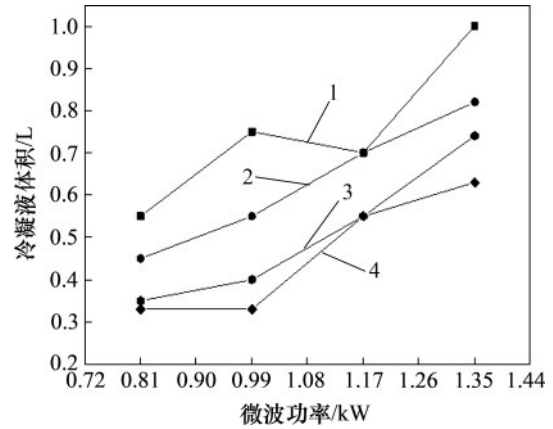
式中: η_m 为微波加热强化方式下的闪蒸率。

2 实验结果与讨论

2.1 实验参数对闪蒸效果的影响

2.1.1 微波功率的影响

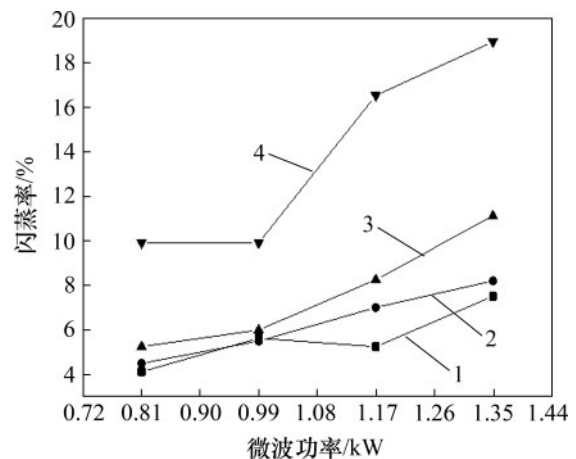
采用水作为工质, 并基于表 1 中的实验参数开展常规方式和微波加热强化方式的实验。在初始温度控制为 90 °C、冷却水温度为 18 °C、液体流量为 10~40 L/h、系统真空度为 70~78 kPa 和实验时间为 20 min 的实验条件下, 调整微波功率开展微波加热强化实验。微波功率对系统闪蒸效果(以冷凝液体积表征)的影响如图 2 所示, 对闪蒸率的影响如图 3 所示。



1—40 L/h; 2—30 L/h; 3—20 L/h; 4—10 L/h。

图 2 微波功率对冷凝液体积的影响

Fig. 2 Effect of microwave power on volume of condensation water



1—40 L/h; 2—30 L/h; 3—20 L/h; 4—10 L/h。

图 3 微波功率对闪蒸率的影响

Fig. 3 Effect of microwave power on flash evaporation rate

由图2和图3可见:随着微波功率增大,系统获得的冷凝液体积逐渐增加,说明微波功率增加对闪蒸效果起到强化作用。当液体流量为40 L/h和微波功率为0.81 kW时,冷凝液量为0.55 L;而当微波功率为1.35 kW时,冷凝液量为1.00 L。当液体流量为10 L/h和微波功率为0.81 kW时,冷凝液量为0.33 L;而微波功率为1.35 kW时,冷凝液量为0.63 L。不同工况条件下冷凝液体积呈现明显差异,这是因为不同的微波功率使得罐体内部出现不同的电磁场分布状态,因闪蒸罐的结构恒定且体积为定值,高功率工况下电磁场强度大,低功率工况下电磁场强度小,在高功率工况下闪蒸罐内液体对微波能的转化效率更高。

2.1.2 液体流量的影响

在初始温度为90 °C、微波功率为1.35 kW、冷却水温度为20 °C、系统真空度为78 kPa、实验时间为20 min的条件下,调节液体流量为10~40 L/h(调节步长为10 L/h),探究常规方式和微波加热强化方式下流量对闪蒸效果的影响,结果如表2所示。

由表2可见,随着液体流量的增加,常规闪蒸的冷凝液体积增加,当液体流量为40 L/h时,获得的最大冷凝液量为0.74 L。在实验参数范围内,因在闪蒸罐中原位馈入高功率微波,微波能被液体及水蒸气吸收转化为热能。在相同的液体流量及腔体压力条件下,微波加热强化的冷凝液体积比常规的高。这主要是由于:一方面,微波使得闪蒸罐内的热量平衡被打破,由于液体经过低压闪蒸罐体时受到压力的控制,液体更多的显热以汽化潜热的形式释放并转化;另一方面,微波直接加热闪蒸罐中的液体,液体温度升高后在罐体直接沸腾蒸发。

从表2还可见:在相同流量下,微波加热强化方式的冷凝液体积和闪蒸率相比常规方式明显增

加。随着液体流量增加,冷凝液体积明显增加,且微波加热强化方式的冷凝液体积增量和增速都比常规方式的高。闪蒸率随流量增加而降低,且微波加热强化方式的闪蒸率比常规方式的下降更明显。这主要是由于微波功率为1.35 kW,在高功率微波和低液体流量的工况下,单位体积液体中形成的电磁场强度大,但随着液体流量增加,单位体积液体中的电磁场强度降低。因此,在低液体流量工况下,微波加热液体的速度更快;在高液体流量工况下,液体转化微波能为热能的效率更高,且闪蒸效果更好。

从表2还可看出:在实验参数范围内微波强化蒸发效率为29.73%~100%。因常规方式是以高温液体突然暴露于低压环境中的过热热量作为蒸发驱动力,而微波加热强化方式是蒸发驱动力包括液体提供的过热热量以及微波所提供的热量,微波原位实时地向罐体中补充了热量,有效减弱了常规闪蒸过程中工质降温过程的影响,因此,闪蒸过程得到强化。参照微波加热固体物料的规律,微波加热提供液体能量时的转化率与液体流量呈正相关关系,液体流量增加提高了微波能的转化率,在高流量工况下的闪蒸效果更好。

2.1.3 初始温度的影响

在液体流量为40 L/h、微波功率为1.35 kW、冷却水温度为20 °C、系统真空度为78 kPa、实验时间为20 min的条件下,改变液体的初始温度,探究常规和微波加热强化2种方式下液体初始温度对闪蒸效果及闪蒸率的影响,结果分别如图4和图5所示。初始温度对闪蒸率及强化蒸发效率的影响如表3所示。从图4和图5可见:在其他实验参数一致的情况下,冷凝液体积随着初始温度的增加而增加。在相同初始温度条件下,微波加热强化方式的冷凝液体积比常规方式的高。这是因为初始温度越高,液体所能提供的过热热量越多,而

表2 微波加热强化与常规条件的闪蒸效果对比

Table 2 Comparison of flash evaporation effects at microwave heating strengthen and conventional condition

液体流量/(L·h ⁻¹)	冷凝液体积/L		闪蒸率/%		强化蒸发效率/%
	常规方式	微波加热强化	常规方式	微波加热强化	
10	0.40	0.63	12.00	18.90	57.50
20	0.37	0.74	5.55	11.10	100.00
30	0.60	0.85	6.00	8.50	41.67
40	0.74	0.96	5.55	7.20	29.73

低压环境使得蒸发所要求的潜热降低, 在微波原位快速实时加热的条件下闪蒸损失的热量及时得到了补充, 系统闪蒸量增加, 说明微波加热强化了闪蒸过程。相应地, 从表3可见, 在实验参数范围内强化蒸发效率为13.51%~45.83%。

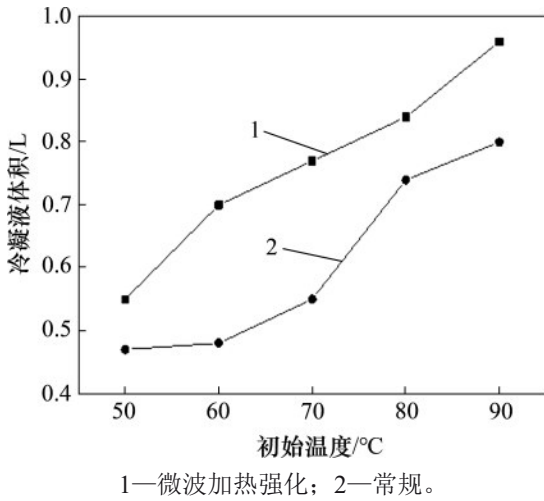


图4 初始温度对冷凝液体积的影响

Fig. 4 Effect of initial temperature on volume of condensation water

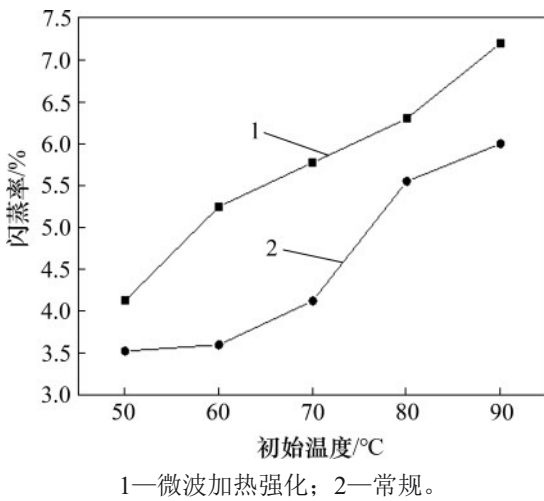


图5 初始温度对闪蒸率的影响

Fig. 5 Effect of initial temperature on flash evaporation rate

表3 初始温度对闪蒸率及强化蒸发效率的影响

参数	初始温度/°C				
	90	80	70	60	50
微波加热强化闪蒸率/%	7.20	6.30	5.78	5.25	4.13
常规闪蒸率/%	6.00	5.55	4.13	3.60	3.53
强化蒸发效率/%	20.00	13.51	40.00	45.83	17.02

2.2 微波加热强化对闪蒸体系温度的影响

从表2可以看出: 在不同液体流量下, 微波加热强化相比于常规方式时的闪蒸率最高提升了1倍多。下面通过闪蒸体系的温度变化来解释微波加热在闪蒸过程中的热强化作用。实验中采用温度变送器对闪蒸罐蒸汽出口处温度和浓缩液温度进行测量并取均值。在实验时间内和对应实验条件下, 微波功率、液体流量和初始温度对闪蒸体系温度的影响分别如表4~6所示。

表4 微波功率对闪蒸体系温度的影响

Table 4 Effect of microwave power on flash evaporation system temperature

实验条件	微波功率/kW	蒸汽出口处平均温度/°C	浓缩液平均温度/°C
微波加热强化	1.35	45.13	45.33
	1.17	43.15	42.62
	0.99	36.26	36.28
	0.81	38.85	38.17
常规	—	36.69	36.70

表5 液体流量对闪蒸体系温度的影响

Table 5 Effect of liquid flowrate on flash evaporation system temperature

实验条件	液体流量/(L·h ⁻¹)	蒸汽出口处平均温度/°C	浓缩液平均温度/°C
微波加热强化	40	42.50	39.50
	30	42.00	41.67
	20	41.50	38.50
	10	45.00	41.00
常规	40	35.96	36.02
	30	37.88	37.37
	20	35.90	35.15
	10	34.88	34.36

由表4可见: 对比微波加热强化与常规条件的闪蒸体系平均温度, 微波功率变化对闪蒸体系温度的影响较弱, 仅当微波功率为1.35和1.17 kW时, 微波加热强化条件下的蒸汽出口平均温度及浓缩液平均温度比常规工况分别高出约8 °C和6 °C。这说明高功率的微波能够更高效地对闪蒸罐内的工质及水蒸气进行加热, 且有多余的热量被浓缩液及水蒸气带出。由表5可见: 在相对应的液体流量条件下, 微波加热强化条件下的蒸汽出口

表6 初始温度对闪蒸体系温度的影响

Table 6 Effect of initial temperature on flash evaporation system temperature

实验条件	初始温度/°C	蒸汽出口处平均温度/°C	浓缩液平均温度/°C
微波加热 强化	90	42.50	38.75
	80	43.50	39.50
	70	41.75	37.75
	60	43.00	39.50
	50	41.00	35.73
常规	90	35.80	33.80
	80	39.60	33.40
	70	36.00	31.40
	60	36.40	32.40
	50	39.80	35.80

平均温度及浓缩液平均温度比常规工况下的高。对比微波加热强化与常规条件的蒸汽出口平均温度可知,微波加热使得闪蒸体系的蒸汽出口平均温度上升2~10 °C。由表6可见:当初始温度为60 °C及以上时,微波加热强化条件下的蒸汽出口平均温度及浓缩液平均温度比常规工况的高;而当初始温度为50 °C时,微波加热强化条件和常规工况的蒸汽出口平均温度及浓缩液平均温度差异不明显。闪蒸体系温度的变化说明微波能在闪蒸罐内实现了从电磁能到液体内热、内热到分子动能的转变,从而原位地快速实现了负压环境下的闪蒸过程强化。

3 结论

1) 微波能够实时原位地对闪蒸过程进行能量补充,有效减弱了闪蒸温降过程的影响。微波加热强化条件下系统冷凝液体积比常规条件下的大。微波功率越高、液体流量越大、初始温度越高,系统闪蒸蒸发效果越好。

2) 当微波功率为1.35 kW、液体流量为40 L/h、初始温度为90 °C、实验时间为20 min、系统真空度为70~78 kPa时,微波加热强化条件下的系统蒸发冷凝液体积达到1.00 L;而在液体流量为40 L/h,初始温度为90 °C,实验时间为20 min,系统真空度为78 kPa的常规方式下,系统蒸发冷凝液体积为0.74 L。

3) 初始温度及液体流量对闪蒸体系影响更显著。在初始温度高于60 °C的条件下,微波加热强化条件下的闪蒸体系温度比常规工况的高。在1.35 kW微波加热强化条件下,蒸汽出口平均温度上升2~10 °C。

参考文献:

- [1] 廖玮. MVR蒸发工艺在氧化铝生产中的应用前景分析[J]. 轻金属, 2018(2): 18-20.
LIAO Wei. Application prospect of MVR evaporation in alumina production[J]. Light Metals, 2018(2): 18-20.
- [2] 梁林. 处理高浓度含盐废水的机械蒸汽再压缩系统设计及性能研究[D]. 南京, 南京航空航天大学能源与动力学院, 2013: 17-21.
LIANG Lin. Design and performance study of mechanical vapor recompression system for treating high concentration salty wastewater[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. College of Energy and Power Engineering, 2013:17-21.
- [3] 王永青. 低温多效压汽蒸馏海水淡化系统热力分析[J]. 化学工程, 2010, 38(2): 55-58.
WANG Yongqing. Thermodynamic analysis of low-temperature multi-effect thermal vapor compression seawater desalination system[J]. Chemical Engineering (China), 2010, 38(2): 55-58.
- [4] 赵庆霞, 陶乐仁, 黄理浩, 等. 机械压缩式热泵蒸发系统在碱液浓缩中的应用研究[J]. 现代化工, 2013, 33(3): 91-93.
ZHAO Qingxia, TAO Leren, HUANG Lihao, et al. Application of mechanical compression heat pump evaporation system in alkali concentration[J]. Modern Chemical Industry, 2013, 33(3): 91-93.
- [5] 章金富, 许海涛, 冯均军, 等. 甲酸废水综合回收利用技术及产业化研究[J]. 辽宁化工, 2010, 39(9): 962-964
ZHANG Jinfu, XU Haitao, FENG Junjun, et al. Comprehensive recovery and utilization technology and industrialization of formic acid wastewater[J]. Liaoning Chemical Industry, 2010,39(9): 961-964
- [6] DRUETTA P, AGUIRRE P, MUSSATI S. Optimization of multi-effect evaporation desalination plants[J]. Desalination, 2013, 311: 1-15.
- [7] 李国强. 多效蒸发结晶在硝酸钠废水处理中的应用[J]. 化工管理, 2015(3): 201.
LI Guoqiang. Application of multi-effect evaporation crystallization in treatment of sodium nitrate wastewater[J]. Chemical Enterprise Management, 2015(3): 201.
- [8] 徐福召, 员建, 费学宁, 等. 高浓度工业含盐废水处理技术研究进展[J]. 天津城建大学学报, 2017, 23(6): 433-437.

- XU Fuzhao, YUAN Jian, FEI Xuening, et al. Research progress of high concentration industrial salt wastewater treatment technology[J]. *Journal of Tianjin Chengjian University*, 2017, 23(6): 433-437.
- [9] 顾承真, 闵兆升, 洪厚胜. 机械蒸汽再压缩蒸发系统的性能分析[J]. *化工进展*, 2014, 33(1): 30-35.
- GU Chengzhen, MIN Zhaosheng, HONG Housheng. Performance analysis of mechanical vapor recompression evaporation system[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2014, 33(1): 30-35.
- [10] ZHANG Yousen, WANG Jinshi, YAN Junjie, et al. Experimental study on non-equilibrium fraction of NaCl solution circulatory flash evaporation[J]. *Desalination*, 2014, 335(1): 9-16.
- [11] EL-DESSOUKY H T, ETTOUNEY H M. Multiple-effect evaporation desalination systems: thermal analysis[J]. *Desalination*, 1999, 125(1/2/3): 259-276.
- [12] HUANG Y C, HUNG C I, CHEN C K. Exergy analysis for a combined system of steam-injected gas turbine cogeneration and multiple-effect evaporation[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2000, 214(1): 61-73.
- [13] 侯炳毅, 冯文洁, 卫津萍. 降低氧化铝生产中蒸发汽耗的有效途径[J]. *湿法冶金*, 2004, 23(3): 163-164.
- HOU Bingyi, FENG Wenjie, WEI Jinping. Effective approach of decreasing evaporation consume during production of alumina[J]. *Hydrometallurgy of China*, 2004, 23(3): 163-164.
- [14] ZHANG Yousen, WANG Jinshi, LIU Jiping, et al. Experimental study on heat transfer characteristics of circulatory flash evaporation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 67: 836-842.
- [15] ZHANG Dan, CHONG Daotong, YAN Junjie, et al. Study on steam-carrying effect in static flash evaporation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(17/18): 4487-4497.
- [16] 金付强, 张晓东, 许海朋, 等. 物理场强化气液传质的研究进展[J]. *化工进展*, 2014, 33(4): 803-810, 823.
- JIN Fuqiang, ZHANG Xiaodong, XU Haipeng, et al. Research progress of enhancement of gas-liquid mass transfer by physical fields[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2014, 33(4): 803-810, 823.
- [17] 李洪, 崔俊杰, 李鑫钢, 等. 微波场强化化工分离过程研究进展[J]. *化工进展*, 2016, 35(12): 3735-3745.
- LI Hong, CUI Junjie, LI Xingang, et al. Recent developments in microwave-assisted chemical separation processes[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2016, 35(12): 3735-3745.
- [18] BARTHOLME M, AVRAMIDIS G, VIÖL W, et al. Microwave drying of wet processed wood fibre insulating boards[J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2009, 67(3): 357-360.
- [19] 巨少华, 郭战永, 刘超, 等. 一种微波-蒸发装置、应用及应用方法: 中国, CN 201510211058.5[P]. 2015-08-26.
- JU Shaohua, GUO Zhanyong, LIU Chao, et al. A microwave - evaporation device, application and application method: China, CN 201510211058.5[P]. 2015-08-26.
- [20] 张瑾, 陈华, 樊则宾, 等. 微波加热均匀性改善及微波闪蒸多模腔体优化研究[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 41(6): 68-75.
- ZHANG Jin, CHEN Hua, FAN Zebin, et al. Study on improvement of microwave heating uniformity and optimization of microwave flash multimode cavity[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 41(6): 68-75.

(编辑 伍锦花)