

多相流阻垢热泵蒸发系统特性研究

侯超^{1,3}, 李伟钊^{1*}, 张冲¹, 杨鲁伟^{1,2}, 张桂兰¹, 孙柳望¹, 魏娟¹

(1. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘要:为验证多相流热泵蒸发系统的在线阻垢及强化换热性能,以蒸氨废液为液相工质、氧化铝及聚甲醛粒子为阻垢颗粒进行实验研究。结果表明,氧化铝颗粒的加入可有效去除蒸发器已有垢层,换热系数由结垢后的 392.5 W/(m²·K) 提升至 1 712.2 W/(m²·K),且连续运行 130 h 换热系数未降低;蒸发器换热系数受颗粒物性参数影响较大,随着颗粒直径、密度、体积分数增加换热系数逐渐增大,但增加过量时导致流动不畅,换热系数降低;颗粒自身材质导热系数越高强化换热效果越好;循环流量、颗粒分布形式对换热系数也有较大影响,提高循环流量有助于强化换热;不同分布形式在一定程度上均可提高换热系数,双层多孔分布器可实现颗粒逐级输运,增加其进入换热管比例,强化换热效果最佳。

关键词:多相流阻垢;在线防垢;汽动强制循环;热泵蒸发;蒸氨废液

中图分类号:TQ051

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)11-0196-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.11.035

Characteristics of multi-phase flow scale inhibition in heat pump evaporation system

HOU Chao^{1,3}, LI Wei-zhao^{1*}, ZHANG Chong¹, YANG Lu-wei^{1,2}, ZHANG Gui-lan¹,
SUN Ye-wang¹, WEI Juan¹

(1. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

Abstract: The online scale inhibition and enhanced heat transfer performances of a set of multi-phase flow heat pump evaporation system is verified through employing ammonia-evaporated waste liquid as the liquid material, and using alumina and polyoxymethylene as the solid scaling particles. It is verified by results that the existing scale layer can be removed effectively after adding alumina particles, and the heat transfer coefficient of the evaporator is improved from 392.5 W/(m²·K) after scaling to 1 712.2 W/(m²·K). As descaling by alumina particles, the heat transfer coefficient remains unchanged after 130 h of continuous operation. The heat transfer coefficient of the evaporator is greatly affected by the property parameters of solid particles. With the increases of the diameter, density, type, and volume fraction of solid particles, the heat transfer coefficient increases as well. However, the fluidization state will be weakened and the heat transfer coefficient will decrease consequently when these parameters increase excessively. The higher the thermal conductivity of the particles, the better the heat transfer enhancement effect. Moreover, circulation flowrate and particle distribution form have also big impact on the heat transfer coefficient of the evaporator. Increasing the circulation flowrate contributes to enhancing the heat transfer effect. Different particle distribution forms are beneficial to improve the heat transfer coefficient, in which double-layer perforated plate distributor can also facilitate particle transportation, which is helpful to enhance the proportion of particles entering heat exchange tubes and hence presents a better heat transfer enhancement effect.

Key words: multi-phase flow scale inhibition; on-line scaling prevention; steam-driven forced circulation; heat-pump evaporation; waste liquid from ammonia evaporation

换热设备结垢在工业发达国家带来的损失约占国民生产总值的 0.3%^[1],我国因换热器结垢导致设备效率平均下降 50%^[2]。此外,考虑到污垢的存在,换热设备设计时会将面积进行放大,导致成本增加。因此,开发高效彻底的除垢、阻垢技术对于换热

过程提质增效意义重大。

污垢去除通常采用药剂或机械清洗法处理^[3-4],不但缩短了连续运行周期、增加了维护费用,还可能对换热壁面造成一定程度损害。抑垢方面,目前主要通过软化预处理^[5]、抑垢工艺设计^[6]

收稿日期:2024-02-16;修回日期:2024-09-13

基金项目:科工局乏燃料后处理专项;周远院士工作站专项(SZ20211166)

作者简介:侯超(1991-),男,博士,助理研究员,研究方向为工业节能,ucas_hc@163.com;李伟钊(1990-),男,博士,助理研究员,研究方向为热力过程优化与节能,通讯联系人,wzli2022@mail.ipc.ac.cn。

以及超声波^[7]、电磁^[8]等技术手段。这些技术只能在一定程度上延长结垢周期,难以达到根本去除。

汽、液、固多相流阻垢基于循环流化床技术与蒸发技术发展而来,其基本原理是将一定量固体惰性颗粒加入换热器内,随着流体的运动,颗粒进入换热管并与管内沸腾的汽、液两相形成汽、液、固三相体系;固体颗粒不断穿过流动边界层与换热壁面频繁摩擦碰撞,减少壁面上污垢沉积,又增强了管内流体流动的湍动程度,增加了汽化核心,在阻垢的同时到达了强化换热的效果;同时对于已有垢层也能起到冲刷及破碎的作用^[9-10]。

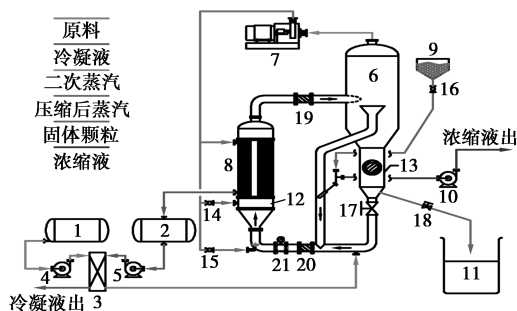
近年来,国内外学者围绕换热器多相流阻垢及强化传热特性开展了一些研究,JOCHEN St.Kollbach等^[11]以饱和的硫酸钙溶液为实验工质,分析了颗粒种类、颗粒直径、体积分率等因素对列管换热器阻垢效果及管路压降的影响。R. Rautenbach等^[12]在相同条件下对多相流换热器和普通壳管式换热器性能进行比较,当表观流速较低或流体黏度较大时,采用多相流换热器依然可以达到较高的传热系数。李修伦等^[13]开展了铜质单管中三相流沸腾传热实验研究,结果表明固体颗粒的加入可延长连续运行时间10倍以上。马红钦等^[10]针对烧碱蒸发过程换热器结垢问题开展了单管多相流蒸发实验研究,结果显示聚四氟乙烯颗粒阻垢性能较好但除垢性能一般,对壁面已有垢层难以进行完全清除;淬火处理后的聚四氟乙烯颗粒耐磨性显著提高,磨损率由22%降低到3%。贾原媛等^[14]比较了聚四氟乙烯和聚甲醛颗粒在麦草浆黑液蒸发过程的阻垢及强化换热性能,结果表明2种颗粒阻垢性能相当,均可延长结垢周期1倍以上,但聚四氟乙烯强化换热性能更佳,加入后蒸发器传热系数较加入聚甲醛颗粒时提高1.3倍。王江涛^[15]分析了静态混合器对粒子流动状态的影响,以解决水平管内颗粒沉积问题;对于单管而言,当扭率为3.5、流速处于1.1~1.3 m/s时,颗粒混合均匀度最好,对于多管换热器,管内流速为0.6 m/s时,不同截面上颗粒分布最为均匀。林广周^[16]针对换热管内颗粒分布不均问题,分析了分布板板型对分布效果的影响,相比平面分布板,曲面分布板效果更佳并且当安装高度比为0.25~0.5时,管内颗粒分布较均匀。

笔者以高硬度废水-蒸氨废液为液相物料,基于蒸汽驱动的强制循环汽、液、固多相流阻垢热泵蒸发系统开展实验研究,分析阻垢颗粒性质及系统操作参数对阻垢特性以及强化换热的影响规律。

1 实验系统与方法

1.1 系统流程描述

多相流阻垢热泵蒸发系统工艺流程如图1所示,系统由蒸汽压缩机、蒸发器、分离器、颗粒分布器等设备组成。原液罐内废液在进料泵驱动下经预热器升温后由循环管进入系统,随后同循环液一起进入蒸发器管程;废液在换热管内与壳程加热蒸汽换热后沸腾蒸发,产生的汽、液混合物切向进入汽液分离器,分离得到的二次蒸汽进入蒸汽压缩机,剩余浓缩液由中央喇叭口返回循环管继续参与蒸发,当达到预设浓度后由浓缩液泵排出系统;二次蒸汽经压缩提升热焓后重新作为热源进入蒸发器壳程加热物料,换热后成为冷凝液进入储罐,高温冷凝液预热进料后排出系统。



1—原液罐;2—冷凝液罐;3—预热器;4—进料泵;5—冷凝液泵;
6—汽液分离器;7—蒸汽压缩机;8—蒸发器;9—阻垢颗粒储罐;
10—浓缩液泵;11—颗粒收集罐;12—颗粒分布器;
13—颗粒收集器;14~18—阀门;19~20—视镜;21—流量计

图1 多相流阻垢热泵蒸发系统流程

为防止蒸发器管程结垢,待系统稳定运行后,通过颗粒储罐向系统内投加部分阻垢颗粒,随着循环液流经换热管时,颗粒对壁面冲刷碰撞达到防止污垢沉积的目的。随后,汽、液、固混合物进入分离器,汽相进入压缩机,固相与液相继续参与循环。需要收集颗粒时,关闭阀门17、开启阀门18,即可完成颗粒在线收集。

为保证流体流速并使颗粒具有较好的流化状态,将少量压缩后蒸汽引入蒸发器下部,建立蒸汽强制循环机制,通过调节阀门14、15控制引入蒸汽量和循环流速,相比循环泵驱动形式,消除了颗粒进入泵体损坏叶轮的隐患,保证了系统的高可靠性。

1.2 实验工质

1.2.1 液相工质

液相工质蒸氨废液源自氨碱法制纯碱过程中氨回收后剩余母液,属于典型高硬度废水。据实际生

产数据,生产 1 t 纯碱约产生 10 m³ 蒸氨废液,其成分以 CaCl₂、NaCl、CaSO₄ 等为主(主要物性参数见表 1)。由于硬度较高,采用热浓缩法设备结垢严重,目前行业内一般通过自然蒸发处理,但该方法受气候限制较为严重,并且对废液中的水分难以回收。

表 1 蒸氨废液物性参数

物理性质		主要盐类质量浓度/(g·L ⁻¹)			
黏度/(Pa·s)	密度/(kg·m ⁻³)	CaCO ₃	CaSO ₄	CaCl ₂	NaCl
1.42	1180	0.10	0.99	104.51	48.30

1.2.2 固体阻垢颗粒

实验选取氧化铝陶瓷和聚甲醛(POM)粒子作为阻垢颗粒,主要物性参数见表 2。

表 2 固体颗粒物性参数

颗粒种类	氧化铝陶瓷	氧化铝陶瓷	聚甲醛
颗粒粒径/mm	3	3,5	5
密度/(kg·m ⁻³)	2700	3200	1400
主要成分	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	聚甲醛
堆积密度/(kg·m ⁻³)	1600	1850,1800	805
导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	17.2	17.2	0.23

1.3 系统性能评价指标

换热系数是体现蒸发器换热效果好坏的重要参数,能够反映出蒸发器结垢及换热情况。换热系数计算式为:

$$K_{\text{eva}} = 1000 \cdot \dot{Q}_e / (A_{\text{eva}} \cdot \Delta T_{\text{eva}}) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_e \cdot \gamma_e \quad (2)$$

式中: K_{eva} 为蒸发器换热系数,W/(m²·K); \dot{Q}_e 为蒸发器换热量,kW; \dot{m}_e 为蒸发量,kg/s; γ_e 为蒸发潜热,kJ/kg; A_{eva} 为蒸发器换热面积,m²; ΔT_{eva} 为蒸发器换热温差,K。

蒸发量表示单位时间内系统蒸出水量,液位恒定时通过冷凝水外排流量测得。

2 实验结果与讨论

2.1 系统结垢及阻垢特性分析

首先开展结垢实验,对无阻垢颗粒加入时蒸发器的结垢规律进行分析,随后加入一定体积分率的阻垢颗粒,验证除垢性能及长周期阻垢效果。运行过程蒸发器换热系数随运行时间变化规律如图 2 所示。换热管内壁结垢情况如图 3 所示。

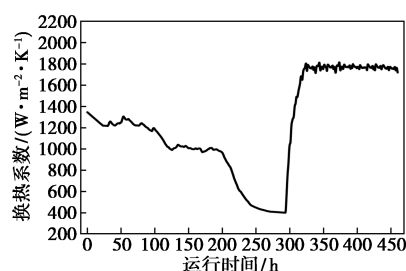
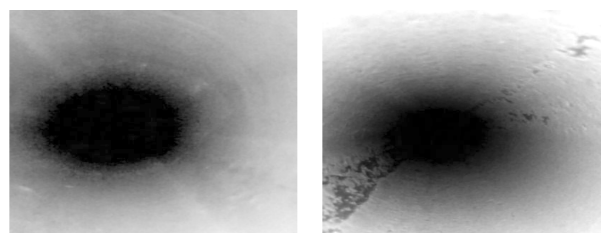
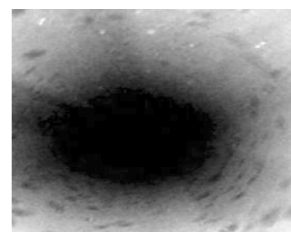


图 2 结垢与除垢过程中换热系数的变化



(a) 未结垢

(b) 结垢后



(c) 加颗粒运行后

图 3 换热管内壁结垢情况对比

实验初期,蒸发器换热壁面光滑,换热系数约为 1 253.7 W/(m²·K),随着蒸发的进行,壁面开始结垢,换热系数逐渐降低。为加快结垢速率,运行约 200 h 后,在系统中加入 3 kg 无水硫酸钠,使之与氯化钙反应生成硫酸钙沉淀。随后换热系数快速下降,运行约 300 h 后,换热系数下降至 392.5 W/(m²·K),降低了 68.7%。图 3(b) 所示为换热管内壁结垢状况,垢层厚度约 1 mm,结垢情况较为严重。

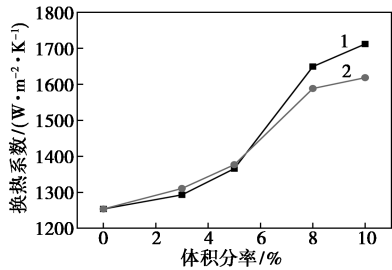
随后由颗粒储罐向系统内投加直径 3 mm、密度 2 700 kg/m³、体积分数为 10% 的氧化铝阻垢小球,随着颗粒对换热管内壁的摩擦碰撞,垢层逐渐脱落。经过约 10 h 连续运行,换热系数恢复到没有结垢时的状态。颗粒的频繁撞击增加了高温壁面与流体间的热量传递,具有强化换热效果,当系统运行 25 h 后进入稳定运行状态,此时换热系数约为 1 712.2 W/(m²·K),与未结垢且无颗粒添加时相比约提高 36.6%。

在随后的 130 h 连续运行中,系统运行稳定,换热系数基本保持不变,说明颗粒的加入具有良好的阻垢效果。停机后检查换热管内壁光滑洁净,几乎无污垢附着,如图 3(c) 所示。

2.2 强化换热特性分析

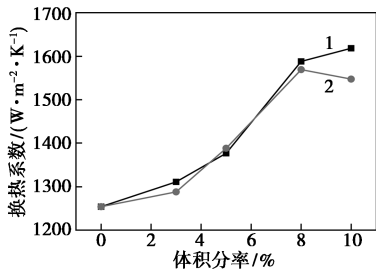
2.2.1 颗粒属性对换热系数的影响

颗粒种类、密度、粒径以及加入系统内的体积分数对蒸发器换热系数的影响如图 4 所示。



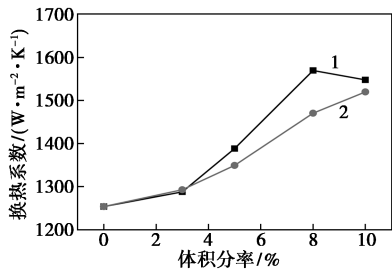
1— Al_2O_3 , $\rho=2700 \text{ m}^3/\text{h}$, $d=3 \text{ mm}$;
2— Al_2O_3 , $\rho=3200 \text{ m}^3/\text{h}$, $d=3 \text{ mm}$

(a) 体积分数及颗粒密度对换热系数的影响



1— Al_2O_3 , $\rho=3200 \text{ m}^3/\text{h}$, $d=3 \text{ mm}$;
2— Al_2O_3 , $\rho=3200 \text{ m}^3/\text{h}$, $d=5 \text{ mm}$

(b) 体积分数及颗粒直径对换热系数的影响



1— Al_2O_3 , $\rho=3200 \text{ m}^3/\text{h}$, $d=5 \text{ mm}$;
2—POM, $\rho=1400 \text{ m}^3/\text{h}$, $d=5 \text{ mm}$

(c) 体积分数及颗粒材质对换热系数的影响

图 4 颗粒属性对蒸发器换热系数的影响

体积分数表示加入系统中阻垢颗粒的堆体积占系统内液、固两相总体积的百分数。总体看来,换热系数随着加入系统内颗粒体积分率的增加而逐渐增大。体积分数较小时,颗粒与壁面碰撞频率较低,强化换热效果不明显。随着加入量增加,碰撞频率增加,使得壁面气泡跃离直径变小、周期变短,从而为蒸发沸腾过程提供了更多的汽化核心,强化了沸腾换热;同时,碰撞过程也削减了边界层厚度,增加了壁面向颗粒以及换热管中心处流体的热量传递,强化了对流换热。

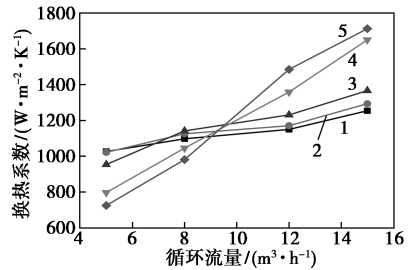
从图 4(a)、4(b)中可以看出,当体积分数较大时,换热系数增加幅度减缓甚至出现小幅下降的趋势,主要由于密度升高或粒径增大时,颗粒在水平循环管内流化状态较差,容易沉积在管路下部,减小流通截面,影响流体及颗粒正常流动。

从图 4(c)中可以看出,粒径相同的氧化铝和聚甲醛颗粒,加入后者时强化换热效果弱于前者。虽然聚甲醛密度较小,在相同的条件下流化效果更佳,并未出现水平管内颗粒沉积的现象,但较小的密度导致颗粒撞击换热壁面时动量较小,对流动边界层扰动较弱;同时,聚甲醛材质自身导热系数低于氧化铝,对于强化壁面与流体间的热量传递效果较差。

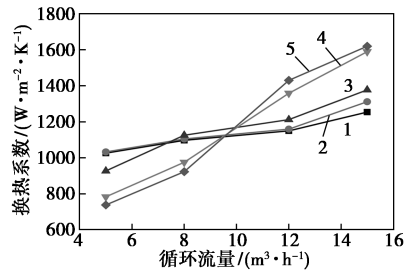
总体而言,2 种颗粒具有一定的强化换热能力,当体积分数为 8% 时,氧化铝陶瓷颗粒达到最佳强化换热效果,可将换热系数由 $1253.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 提升至 $1569.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,提升率约为 25.2%;当体积分数为 10% 时,聚甲醛颗粒达到最佳强化换热效果,可将换热系数由 $1253.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 提升至 $1519.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,提升率约为 21.2%。

2.2.2 循环流量对换热系数的影响

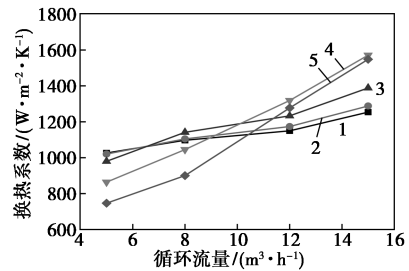
加入不同颗粒时,不同体积分数下换热系数随循环流量的变化规律如图 5 所示。



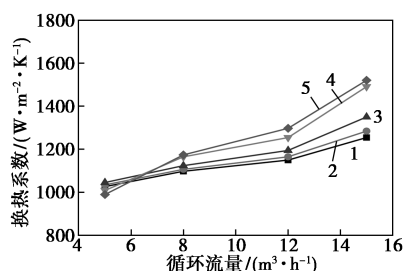
(a) Al_2O_3 颗粒 ($\rho=2700 \text{ m}^3/\text{h}$, $d=3 \text{ mm}$)



(b) Al_2O_3 颗粒 ($\rho=3200 \text{ m}^3/\text{h}$, $d=3 \text{ mm}$)



(c) Al_2O_3 颗粒 ($\rho=3200 \text{ m}^3/\text{h}$, $d=5 \text{ mm}$)



(d) POM 颗粒($\rho = 1\ 400\ \text{m}^3/\text{h}$, $d = 5\ \text{mm}$)

1— $x_s = 0\%$; 2— $x_s = 3\%$; 3— $x_s = 5\%$; 4— $x_s = 8\%$; 5— $x_s = 10\%$

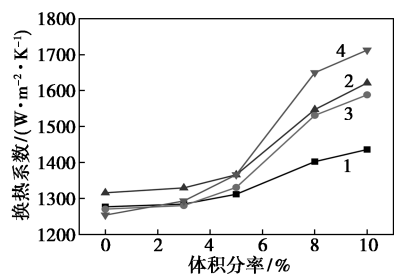
图 5 不同体积积分率下换热系数随循环流量的变化

从图 5 中可以看出, 体积积分率一定时, 添加不同颗粒对应换热系数均随循环流量升高而增大; 循环流量较低时液体流速较低, 尚未达到颗粒的临界流化速度, 此时蒸发器处于固定床操作状态, 部分颗粒沉积于下循环管及下管箱内, 造成液体流动不畅, 导致换热系数降低; 随着循环流量增加颗粒开始流化, 操作状态逐渐由固定床向输送床过渡, 换热管内流体流速增大, 颗粒与壁面碰撞频率增加, 起到强化换热的作用。

由图 5 中还可以看出, 加入颗粒的体积积分率越高, 换热系数随循环流量增加而增大的幅度越大。这主要缘于颗粒的加入增加了汽化核心, 随着循环流量的增加颗粒运动对流动换热贡献增大的缘故。

2.2.3 颗粒分布形式对换热系数的影响

合理的颗粒分布形式是实现颗粒均匀分布、保证阻垢及强化换热效果的重要途径。分布器形式及体积积分率对换热系数的影响如图 6 所示。



1—无颗粒分布器; 2—蒸汽式分布器; 3—单层多孔板;
4—双层多孔板

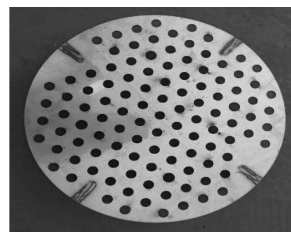
图 6 分布器形式及体积积分率对换热系数的影响

颗粒分布器多置于换热管进口, 通过形成一定压降尽量保证流速一致, 以达到颗粒在床层截面的均匀分布。实验时以氧化铝陶瓷($\rho = 2\ 700\ \text{m}^3/\text{h}$, $d = 3\ \text{mm}$) 作为阻垢颗粒, 循环流量保持 $15\ \text{m}^3/\text{h}$, 对蒸汽式、多孔板式、多层板式分布结构下换热效果及颗粒流化状态进行分析, 不同分布器外观如图 7

所示。



(a) 蒸汽分布器



(b) 单层颗粒分布板



(c) 双层颗粒分布板

图 7 颗粒分布器外观

不同分布形式下蒸发器进口颗粒流化状态如图 8 所示。



(a) 蒸汽式分布器



(b) 单层多孔板



(c) 双层多孔板

图 8 不同分布器形式下蒸发器进口颗粒流化状态

当加入颗粒体积积分率较小时, 颗粒与壁面碰撞频率较低, 强化换热效果并不明显, 此时采用蒸汽式分布器的换热效果稍优于其他形式, 主要由于分布支管使得驱动蒸汽均匀分配到换热管内, 增加了管内流体湍流程度, 强化了对流换热。随着换热管内颗粒增多, 强化换热效果逐渐增强, 对于无分布器的情况, 因颗粒集中分布于蒸发器管板中间部分的换热管内, 因此强化换热效果较差。

由图 6 中还可以看出, 体积积分率大于 5% 时, 双层分布板的强化换热效果优于其余 3 种分布形式, 该结构形式实现颗粒均匀化的同时起到了颗粒逐级

输送与提升流速的作用,增加了颗粒进入换热管的比例,强化换热效果明显。

3 结论

以高硬废水-蒸氨废液为液相工质、不同规格氧化铝及聚甲醛粒子为阻垢颗粒,对多相流阻垢热泵蒸发系统的阻垢及强化换热性能进行了分析,得到以下结论:

(1)氧化铝颗粒的加入具有良好的除垢、阻垢及强化换热效果,当 $d=3\text{ mm}$ 、 $\rho=2\ 700\text{ kg/m}^3$ 、体积分数为10%时,可有效去除蒸发器已有垢层,将换热系数由结垢后的 $392.5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 提升至 $1\ 712.2\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,相比没结垢时提升了36.6%,且连续运行130 h换热系数不下降。

(2)粒径及密度较大的颗粒强化换热效果更好但流化状态较差,易导致颗粒沉积;颗粒自身导热性越好,强化换热效果越佳;本实验中 $d=3\text{ mm}$ 、 $\rho=2\ 700\text{ kg/m}^3$ 的氧化铝颗粒综合性能最佳。固体颗粒添加量的增加有助于提升强化换热效果,但加入过量易造成循环不畅,选取体积分数8%~10%较为适宜。

(3)不同颗粒分布形式在一定程度上均可提高换热系数,其中双层多孔分布器具有颗粒逐级运输的作用,增加了颗粒进入换热管的比例,强化换热效果较好。

参考文献

- [1] 陈晓文,张早校,陈二锋.换热设备污垢监测及预测研究进展[J].化工机械,2005,(1):60-64.
- [2] 俞天兰,彭德其,支校衡,等.冷凝器自转塑料纽带自动在线连续除垢防垢技术研究[J].制冷,2002,(2):12-14.
- [3] 张成治,胡志明.有机酸清洗剂去除换热设备污垢实验研究[J].能源研究与信息,2017,33(4):242-246.
- [4] 杨燕媛,梁积勋,郑盛果.物理加机械除垢方法在糖厂的应用[J].广西糖业,2018,(4):31-33.
- [5] 曹霞.去除水中硬度处理方法探讨[J].西南给排水,2012,34(5):37-40.
- [6] 杨祖荣.浅谈换热表面的成垢和控制方法[J].化学工程,1991,(2):19-23,18-3.
- [7] 周爱东,杨红晓,张志炳.超声波在防除结垢中的应用[J].应用化工,2005,(11):6-8.
- [8] 胡学文,许祥茂.非化学药剂阻垢技术分析研究[J].华东电力,2013,41(10):2195-2200.
- [9] 赵燕禹,姜峰,李修伦,等.蒸发装置防垢新技术及其在氯化钙生产中的应用[J].无机盐工业,2008,(8):59-61.
- [10] 马红钦,朱慧铭,谭欣,等.聚四氟乙烯在烧碱蒸发器防、除垢中应用的研究[J].氯碱工业,2002,(6):21-24.
- [11] Kollbach J, Dahm W, Rautenbach R. Continuous cleaning of heat exchanger with recirculating fluidized Bed[J].Heat Transfer Engineering, 1987, 8(4):26-32.
- [12] Rautenbach R, Erdmann C, St. Kolbach J. The fluidized bed technique in the evaporation of wastewaters with severe fouling/scaling potential-latest developments, applications, limitations [J]. Desalination, 1991, 81(1/3):285-298.
- [13] 李修伦,闻建平.三相流沸腾传热[J].高校化学工程学报,1995(4):326-331.
- [14] 贾原媛,高振楠,李修伦.三相循环流化床麦草浆黑液蒸发器的研究[J].中国造纸学报,2003,(1):64-67.
- [15] 王江涛.水平多管液固循环流化床中颗粒分布的研究[D].天津:河北工业大学,2012.
- [16] 林广周.液固循环流化床颗粒分布板的实验研究和数值模拟[D].天津:河北工业大学,2011.■
- [17] Ghosh S. Mesoporous silica-based nano drug-delivery system synthesis, characterization, and applications [M]. New York: Elsevier, 2019:285-317.
- [18] Jiang W, Wu J, Tian R. Synthesis and characterization of magnetic mesoporous core-shell nanocomposites for targeted drug delivery applications [J]. Journal of Porous Materials, 2016, 24(1):257-265.
- [19] Zadeh E N, Fozzoni S, Nejad E T, et al. Synthesis of Fe_3O_4 @ MCM41 and Kaolinite coated with Ethyl 2-(3-(triethoxysilyl)propylamino) (phenyl methyl)-3-oxobutanoate and their applications in heavy metal removal and drug delivery; optimization study using RSM [J]. Silicon, 2023, 15(11):4723-4750.
- [20] Malekzadeh A M, Ramazani A, Rezaei S J T, et al. Design and construction of multifunctional hyperbranched polymers coated magnetite nanoparticles for both targeting magnetic resonance imaging and cancer therapy [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2017, 490:64-73.■
- [21] Jadhav S A, Brunella V G, Scalapone D M, et al. Poly (NIPAM-Co-MPS)-grafted multimodal porous silica nanoparticles as reverse thermoresponsive drug delivery system [J]. Asian Journal of Pharmaceutical Sciences, 2017, 12(3):279-284.
- [22] Singal P K, Iliskovic N. Doxorubicin-induced cardiomyopathy [J]. The New England Journal of Medicine, 1998, 339(13):900-905.
- [23] Ajzashokouhi A H, Bostan H B, Jomezadeh V, et al. A review on the cardioprotective mechanisms of metformin against doxorubicin [J]. Human & Experimental Toxicology, 2019, 39(3):237-248.
- [24] Kong Q, Guo C, Sun Y, et al. Preparation and characterization of NiO hollow fibers consisting of nanoparticles derived from alginate salt precursor [J]. Rare Metals, 2011, 30(S1):208-212.
- [25] Xu H, Cui L, Tong N, et al. Development of high magnetization Fe_3O_4 /polystyrene/silica nanospheres via combined miniemulsion/emulsion polymerization [J]. Journal of the American Chemical Society, 2006, 128(49):15582-15583.

(上接第195页)