

引用格式:倪兵,郝玉刚,宋玄进,等.闪蒸罐在高盐废水处理中的应用研究[J].有色设备,2025,39(3):54-59.

NI Bing, HAO Yugang, SONG Xuanjin, et al. Study on the application of flash evaporation tank in the treatment of high salt wastewater[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(3): 54-59.

闪蒸罐在高盐废水处理中的应用研究

倪兵,郝玉刚,宋玄进,刘瑶,徐建炎

(中国恩菲工程技术有限公司,北京100038)

[摘要] 余热利用在对改善节约能源、增加生产、提高产品质量和降低生产成本等方面起着越来越大的作用,对我国实现节能减排、环保发展战略具有重要的现实意义。针对余热回收及废水处理过程中核心设备能否高效稳定地运行问题,通过对闪蒸罐的性能分析与优化设计开展相关的基础研究和技术开发。基于闪蒸的理论基础,对闪蒸罐进行了设计计算,确定了闪蒸罐在处理高盐废水时,要考虑闪蒸罐进口前换热设备的结垢问题,选择强化换热管或阻垢剂抑制污垢形成。通过试验对闪蒸罐的闪蒸特性进行了研究。根据试验数据分析,闪蒸罐的进料方式选择水柱喷射时,闪蒸效率可达到90%;当 $t_1 = 80\text{ }^\circ\text{C}$, $u = 2\text{ m/s}$ 时,试验运行60h后,换热系数降低了38%,预估冲渣水流量为3000 t/h时,设计流量将减少6 t/h。

[关键词] 闪蒸罐;闪蒸特性;结垢;设计计算;废水处理

[中图分类号] TK121

[文献标志码] A

[文章编号] 1003-8884(2025)03-0054-06

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.03.005

0 引言

闪蒸是针对蒸发结垢严重的问题的出现发展起来的,具有简单可靠、防垢性能好、易于大型化^[1]、操作弹性大以及可利用低位热能和废热等优点,广泛应用于工业废水的处理与回收以及火力发电厂、石油化工厂的锅炉供水等领域。

闪蒸技术可以将工业废热回收再利用,在余热发电技术中,与常规余热发电相比,同工况下带有闪蒸装置系统的发电量要高10%^[2]。阎尔平^[3]发明了一种多级扩容闪蒸回收余热,且供应蒸汽的装置。该装置以热水为循环介质吸收装置中的高温余热,吸收余热后经闪蒸设备变成可供装置使用压力能级的蒸汽。

韩檬等^[4]通过闪蒸-减压等方式,使得废料中的苯甲酸等物质分别分离出来,得到的物质纯度超过90%。Saury等^[5-6]在液位高度为15 mm,平衡水温为35~60℃的条件下对纯水进行闪蒸实验,根据试验结果得出结论:闪蒸过程主要影响因素为溶液初始温度及过热度。Wang等^[7]通过模拟分析了不

同结构折流板分离器的湍流动能等参数的变化趋势,麻宏强等^[8]通过进一步试验指出,闪蒸撬内部折流板的结构不同会影响闪蒸效率。选用水平梯形或蜂窝型折流板分离效率较高。

杨庆宗等^[9]、赵冰超等^[10]和庄宏等^[11]对NaCl溶液进行了静态闪蒸试验研究。研究指出,浓缩比随着过热度的增加而增大;增加初始液位高度可以增加总蒸发质量,但单位质量溶液闪蒸蒸发质量下降,闪蒸蒸发质量随过热度增大呈近似线性增加;加入溶质后会削弱闪蒸的完善程度。

冲渣水是冶炼厂冲渣环节中的循环水,在冲渣过程中,冲渣水吸热温度升高,需冷却后再循环利用,冲渣水内存有大量的余热。冲渣水中化学成分复杂,一般含有钙、镁、氧等离子化合物,在水中极易水解板结,因此,选用传统的换热器,水中的悬浮物混合着渣水里析出的盐分会产生结垢或堵塞。

根据冲渣水的特点,选择闪蒸罐进行闪蒸处理,可以解决冲渣水在换热设备表面的结垢问题。但为了维持稳定的闪蒸蒸汽流量,在冲渣水进入闪蒸罐前需要加装换热设备稳定闪蒸罐入口溶液温度。因

[收稿日期] 2024-11-16

[第一作者] 倪兵(1984—),吉林长春人,工程师,博士,主要从事余热回收及废水处理相关的设备研发工作。

此, 换热设备的结垢问题会进一步影响闪蒸罐的闪蒸特性。本文基于闪蒸的理论基础, 对闪蒸罐进行了设计计算, 并通过试验研究了换热设备(进入闪蒸罐前)表面污垢对闪蒸特性的影响规律, 研究结果对余热回收系统的开发和使用时起到重要的指导作用。

1 闪蒸罐设计计算

含盐废水被加热到一定温度后, 进入闪蒸罐, 闪蒸罐内的压力低于该废水温度所对应的饱和压力, 因此, 部分废水在闪蒸罐中迅速汽化降温, 闪蒸出的蒸汽从闪蒸罐顶端排出, 进入冷凝器凝结或直接应用, 未闪蒸的废水从闪蒸罐底部流出, 以此实现两相分离。

1.1 闪蒸罐的设计原理

闪蒸罐中的质量守恒方程:

$$m_{sf,in} = m_{vf,out} + m_{sf,out} \quad (1)$$

式中: $m_{sf,in}$ 为闪蒸罐入口溶液的质量流量, kg/h; $m_{vf,out}$ 、 $m_{sf,out}$ 分别为闪蒸罐出口的蒸汽和溶液的质量流量, kg/h。

闪蒸罐中的能量守恒方程:

$$m_{vf,out} r_f = m_{sf,out} (h_{sf,in} - h_{sf,out}) \quad (2)$$

式中: r_f 为闪蒸罐中水的相变潜热, kJ/kg; $h_{sf,in}$ 、 $h_{sf,out}$ 分别是闪蒸罐进、出口溶液的比焓, kJ/kg。

根据式(1)和(2)可得闪蒸罐的闪蒸率公式:

$$x = \frac{h_{sf,in} - h_{sf,out}}{r_f} \quad (3)$$

闪蒸罐内气体的浮动流速为:

$$V_t = \left[\frac{4gd^*(\rho_L - \rho_G)}{3C_w \rho_G} \right]^{0.5} \quad (4)$$

式中: V_t 为浮动(沉降)流速, m/s; d^* 为液滴直径, m; ρ_L 、 ρ_G 为液体密度和气体密度, kg/m³; C_w 为阻力系数。

闪蒸罐直径为:

$$D = 0.0188 \left(\frac{V_{Gmax}}{V_t} \right)^{0.5} \quad (5)$$

式中: D 为闪蒸罐直径, m; V_{Gmax} 为气体最大体积流量, m³/h; V_t 为容器中气体流速, m/s。

1.2 闪蒸罐的设计结果

通过已有文献数据, 对闪蒸罐进行容积的设计计算。闪蒸罐前的换热管分别选择交叉缩放管和光管(铜管)进行对比计算。

计算条件: 废水以硬水为列, 换热管内废水流速为 1 m/s, 污垢以 CaCO₃ 析晶污垢为主, 硬水的硬度

为 1 200 mg/L(忽略水质的影响), 直径为 25 mm, 换热管壁面温度为 67 °C, 换热管内硬水的入口温度 27 °C, 污垢热阻渐近值查文献^[12]获得, 不同管的总传热系数计算结果如表 1 所示。

表 1 不同换热管的传热特性

Table 1 Heat transfer characteristics of different heat exchanger tubes

换热管	光管 1	光管 2	缩放管
污垢热阻渐近值/ (m ² ·K·W ⁻¹)	0	6.0 × 10 ⁻⁵	1.3 × 10 ⁻⁶
总传热系数/ (W·m ² ·K ⁻¹)	3 790.9	3 088.5	3 772.4

注: 光管 1 和光管 2 为同一根管结垢前后

假设换热管处输入热量为 20 kW, 闪蒸罐内温度为 55 °C, 不同换热管对应闪蒸罐的参数如表 2 所示。

表 2 闪蒸罐参数

Table 2 Flash tank parameters

强化换热管	光管 1	光管 2	缩放管
换热管出口温度/°C (闪蒸罐入口)	61.56	57.4	61.4
进入闪蒸罐的盐水量/(t·h ⁻¹)	1.340	1.357	1.356
闪蒸量/(kg·s ⁻¹)	0.004 4	0.001 6	0.004 3
闪蒸率/%	1.2	0.4	1.11
闪蒸罐容积/m ³	0.028	0.01	0.027

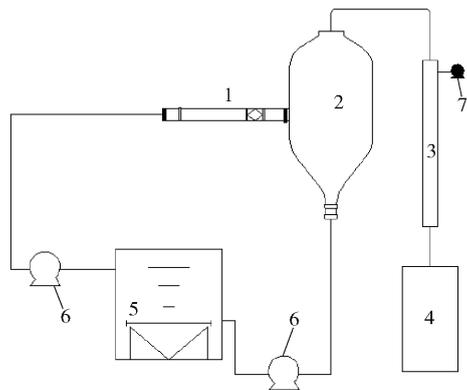
从表 2 可以看出, 当进入闪蒸罐前的换热设备结垢后, 闪蒸效率降低。因此, 选用闪蒸罐进行废水处理, 要考虑闪蒸罐进口前换热设备的结垢问题, 选择强化换热管或阻垢剂抑制污垢形成。当选用闪蒸罐进行盐水分离时, 其能耗较高, 分离率偏低, 因此尽量选择分离难溶、微溶电解质(碳酸钙、硫酸钙等)溶液。

2 试验部分

2.1 试验系统

根据试验原理建立闪蒸试验系统, 其示意图如图 1 所示。闪蒸试验系统由套管换热器、闪蒸罐、水箱、水泵、真空泵、冷凝器、冷凝液回收罐和测量仪表等组成。试验开始前将试验溶液在水箱中加热到指

定温度。试验过程中,经由水泵将溶液输送到套管换热器中加热。加热后的溶液进入闪蒸罐内降压闪



1 - 套管换热器; 2 - 闪蒸罐; 3 - 冷凝器; 4 - 冷凝液回收罐; 5 - 水箱; 6 - 水泵; 7 - 真空泵

图 1 试验系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the experimental system

蒸,闪蒸出的蒸汽进入冷凝器被冷凝,不凝气通过真空泵排出,冷凝液被回收至冷凝液回收罐,按需求输送回水箱。未闪蒸的溶液在闪蒸罐内降温后经由出口水泵输送回水箱。本试验闪蒸罐进料方式为水柱喷射。套管换热器是由内管(铝黄铜管)和外管(316L 不锈钢管)组成。

2.2 试验溶液的配制

配制溶液时,将定量的水注入水箱,加热到指定温度,并启动水泵使系统循环。用天平称取一定质量的 NaCl、Na₂SO₄、CaCl₂、MgSO₄、MgCl₂、KCl 和 NaHCO₃。将 NaCl 倒入水箱,充分溶解后,依次倒入其他溶质,直到最后加入的溶质溶解,关闭系统。待溶液稳定 5~8 h 后进行试验。溶液的离子浓度如表 3 所示。在试验中为保证进入套管换热器内离子浓度不变,按照液位计中液位的降低,定期对系统进行补水。

表 3 高盐废水中主要离子浓度

Table 3 Concentrations of major ions in high-salinity wastewater

离子	Na ⁺	Cl ⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺
浓度/(mol·L ⁻¹)	0.844	0.966	0.092	0.019	0.048	0.004 2	0.020

2.3 结果与讨论

2.3.1 高盐废水条件下闪蒸罐运行特性

图 2 是套管换热器出口温度为 81 °C、平均流量为 3 400 kg/h、闪蒸温差为 1~4 °C 时,冷凝器冷凝量随闪蒸温差的变化。

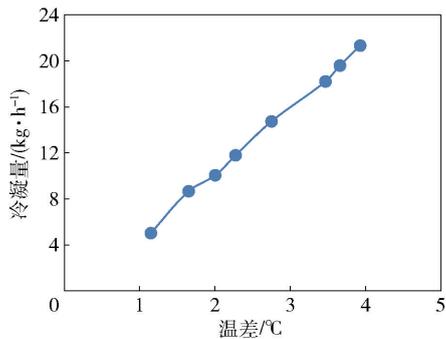


图 2 冷凝量随温差变化图

Fig.2 Variation of condensate yield with temperature difference

冷凝量为闪蒸过程中冷凝器中液体的生成量。如图 2 所示,闪蒸温差越大,冷凝量越大。影响闪蒸效率最主要的因素之一为溶液的过热度,即闪蒸温

差。闪蒸温差越大,闪蒸效率越高,冷凝量越大。这是由于闪蒸温差是闪蒸进行的推动力,闪蒸温差可以使水中的活化分子被激活,促进汽化核心形成,当气泡形成后,在上升的过程又加大水体扰动,促进闪蒸进行。

图 3 是套管换热器出口温度为 81 °C,平均流量为 3 400 kg/h,闪蒸温差为 1~4 °C 时,闪蒸罐实际闪蒸率和理论闪蒸率随闪蒸温差的变化。

闪蒸罐的理论闪蒸率,是通过试验中获得的闪蒸罐进、出口溶液温度,根据式(3)计算所得。实际闪蒸率根据监测冷凝量计算所得。如图 3 所示,随着闪蒸温差增大,实际闪蒸率偏离理论闪蒸率的数值增大,这是由于随着闪蒸温差增大,闪蒸罐内压力损失增大,而试验过程中维持真空的真空泵启动响应不及时,在真空下降后真空泵启动的响应速度可能较慢或较快。速度较慢时,闪蒸罐内压力升高,但闪蒸罐溶液出口水泵出力不变,因此,使闪蒸罐内液位降低,溶液在闪蒸罐内的停留时间变短,部分溶液没能充分闪蒸;速度较快时,闪蒸罐中的压力过低,闪蒸罐溶液出口水泵出力不变时,闪蒸罐内液体的液位偏高,静压力变大,水侧液体中的气泡上升需要

克服的阻力增大,抑制了闪蒸作用。

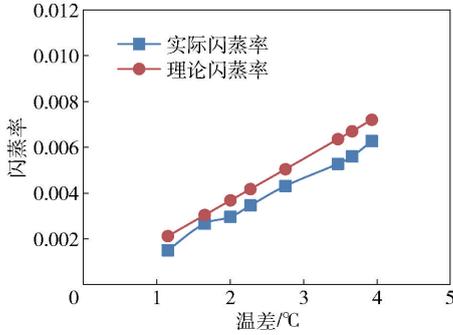


图3 闪蒸率随温差变化图

Fig. 3 Variation of flash vaporization rate with temperature difference

根据图3计算得出,试验参数范围内最大的闪蒸效率(实际闪蒸率/理论闪蒸率)为90%,一般最高闪蒸效率可达到95%~98%,本实验除了真空泵响应不及时的影响外,由于实验的进料方式选择的是水柱喷射,相比雾化喷头等方式,该进料方式中,溶液和真空环境的接触不够充分。因此,闪蒸效率偏低。

图4是套管换热器出口温度为81℃,平均流量为3400 kg/h,闪蒸温差为1~4℃时,闪蒸罐蒸汽出口流速随闪蒸温差的变化。结果表明:随着闪蒸温差的增大,闪蒸效率提高,蒸汽出口流速增大;在闪蒸温差在5℃内,闪蒸罐蒸汽出口流速在4 m/s以内。

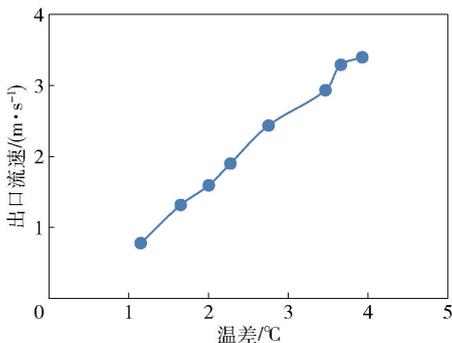


图4 蒸汽出口流速随温差变化图

Fig. 4 Variation of steam outlet velocity with temperature difference

图5是套管换热器出口温度为81℃,平均流量为3400 kg/h,闪蒸温差为1~4℃时,闪蒸罐内的蒸汽流速随闪蒸温差的变化。结果表明,随着闪蒸温差的增大,闪蒸罐内的蒸汽流速增大。

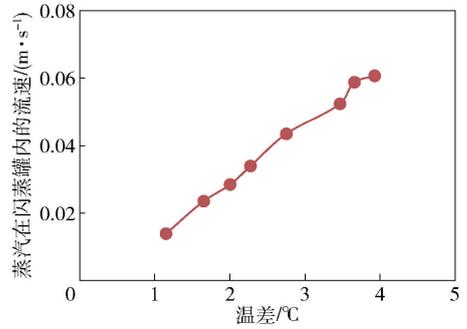


图5 闪蒸罐内的蒸汽流速随温差变化图

Fig. 5 Variation of steam velocity in the flash tank with temperature difference

2.3.2 换热管传热系数分析

为了分析污垢热阻对试验管段总传热系数的影响,分别对试验前后传热系数进行计算。试验管外对流传热系数 h_o 为:

$$h_o = 0.729 \left[\frac{rg\lambda_i^3 \rho_i^2}{\mu_i d (t_s - t_w)} \right]^{1/4} \quad (6)$$

在对管内湍流换热研究的发展过程中,学者们先后提出了齐德-泰特、米海耶夫和格尼林斯基关联式。由于格尼林斯基关联式的偏差在 $\pm 20\%$ 以内,优于其他关联式,且在试验验证范围内一般均会满足工程要求,所以本章管内传热系数的计算选择格尼林斯基关联式:

$$Nu = \frac{(f/8)(Re - 1000)Pr_F}{1 + 12.7 \sqrt{f/8}(Pr^{2/3} - 1)} \left[1 + \left(\frac{d}{l} \right)^{2/3} \right] c_i \quad (7)$$

对液体:

$$c_i = \left(\frac{Pr_F}{Pr_w} \right)^{0.11} \left(\frac{Pr_F}{Pr_w} = 0.05 \sim 20 \right) \quad (8)$$

根据弗罗年柯(Filonenko)公式计算:

$$f = (1.821g Re - 1.64)^{-2} \quad (9)$$

式中: $Re = 2300 \sim 10^6$, $Pr_f = 0.6 \sim 10^5$ 。

试验管内对流传热系数 h_i 为

$$h_i = \frac{Nu\lambda_F}{d_i} \quad (10)$$

试验管段总传热系数 k 可按式(11)计算:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{d_o}{d_i h_i} + R_f} \quad (11)$$

套管换热器溶液入口温度 $t_1 = 80^\circ\text{C}$,溶液流速 $u = 2 \text{ m/s}$,加热蒸汽恒定时,通过计算,铝黄铜管在结垢前传热系数为 $5588 \text{ W}\cdot\text{m}^2/\text{K}$ 。溶液出入口温

差随时间的变化如图6所示,黑色粗曲线为温差的趋势线。由于结垢诱导期一般为8 h,所以取前8 h平均温差为2℃,闪蒸率为1.2%。运行60 h后,换热管的传热系数为 $3\,460.7\text{ W}\cdot\text{m}^2/\text{K}$,后8 h平均温差为1.2℃,闪蒸率为1%,此时比结垢前的传热系数降低了38%,溶液出入口温差降低了0.8℃,闪蒸率降低了0.2%。根据此试验结果,可预测当冲渣水设计流量为3 000 t/h时,60 h后闪蒸的蒸汽流量,较计算流量将减少6 t/h。

可见,污垢热阻对实验管段的传热性能影响较大,进而影响了闪蒸特性,使产生的蒸汽出现波动,影响设备工程实际运行。

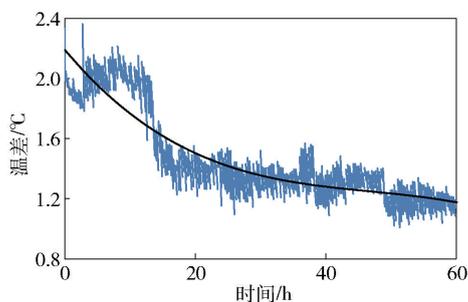


图6 流体温差随时间的变化趋势图

Fig. 6 Variation of fluid temperature difference with time

3 结论

本文建立了闪蒸特性测定实验台,分析了闪蒸罐在处理高盐废水时的闪蒸特性。根据闪蒸罐的理论基础,通过已有文献的数据及相关项目的参数,对闪蒸罐进行了结构尺寸及参数的设计计算,主要结论如下。

1)通过设计计算得出,选用闪蒸罐进行盐水分离,分离率偏低,因此尽量选择分离难溶、微溶电解质(碳酸钙、硫酸钙等)溶液,同时要考虑闪蒸罐进口前换热设备的结垢问题,选择强化换热管或阻垢剂抑制污垢形成。

2)在闪蒸试验中,当闪蒸罐入口溶液为81℃,平均流量为3 400 kg/h,闪蒸温差为1~4℃时,在闪蒸罐入口流量不变的条件下,闪蒸温差越大,冷凝量越大,闪蒸效率越高;闪蒸罐内的液面过高或过低均

会使闪蒸率降低;闪蒸罐的进料方式选择水柱喷射时,闪蒸效率可达到90%。

3)当 $t_1=80\text{ }^\circ\text{C}$, $u=2\text{ m/s}$,运行60 h后,换热管的传热系数降低了38%,流体出入口温差降低了0.8℃,闪蒸率降低了0.2%。当设计流量为3 000 t/h时,60 h后闪蒸的蒸汽流量,较计算流量将减少6 t/h。

[参考文献]

- [1] 刘斌. 溶液闪蒸过程实验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2019.
- [2] 胡滨海. 闪蒸技术在余热发电中的应用[J]. 电站系统工程, 2004, 20(5): 53-54.
- [3] 一种多级扩容闪蒸回收余热并供应蒸汽的装置: CN203215650 U[P].
- [4] 韩檬, 杨焘, 魏峰, 等. 闪蒸-减压精馏分离苯甲酸废料[J]. 化学工程, 2007, 35(7): 1-3.
- [5] SAURY D, HARMAND S, SIROUX M. Experimental study of flash evaporation of a water film[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(16): 3447-3457.
- [6] SAURY D, HARMAND S, SIROUX M. Flash evaporation from a water pool: Influence of the liquid height and of the depressurization rate[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2005, 44(10): 953-965.
- [7] WANG Xiaojing, YAN Yangyang, XU Zhongzheng. Application experiment and numerical simulation analysis of oil-water separator with two-oriented corrugated coalescence plate [J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2017, 38(10): 1509.
- [8] 麻宏强, 丁瑞祥, 韩喜莲, 等. 气液分离闪蒸撬折流板分离特性试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(8): 143-150.
- [9] 杨庆忠, 刘光耀, 张丹, 等. NaCl溶液静态闪蒸的蒸发特性[J]. 化工学报, 2013, 64(11): 4068-4073.
- [10] 赵冰超, 杨庆忠, 张丹, 等. NaCl溶液静态闪蒸前后液膜浓度变化的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(7): 1357-1360.
- [11] 庄宏, 陈晨, 何佳伟, 等. 循环闪蒸特性实验研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2023, 37(3): 30-37.
- [12] 张一龙. 影响换热表面析晶污垢形成因素研究[D]. 保定:华北电力大学, 2015.

Study on application of flash evaporation tank in the treatment of high salt wastewater

NI Bing, HAO Yugang, SONG Xuanjin, LIU Yao, XU Jianyan
(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: The utilization of waste heat is playing an increasingly significant role in energy conservation, production enhancement, quality improvement of products, and cost reduction. It holds important practical significance for China's efforts in achieving energy-saving and emission reduction as well as sustainable development strategies. This study focuses on the efficient and stable operation of core equipment during waste heat recovery and wastewater treatment processes. Basic research and technological development were conducted through the performance analysis and optimization design of flash tanks. Based on the theoretical foundation of flashing, the flash tank was designed and calculated. When treating high-salinity wastewater, it was determined that scaling issues in the heat exchanger equipment before the flash tank inlet must be considered. The use of enhanced heat transfer tubes or scale inhibitors to suppress scale formation is recommended. Experimental studies were carried out to investigate the flashing characteristics of the flash tank. According to the experimental data analysis, when the feed method of the flash tank is water jet injection, the flashing efficiency can reach 90%. When the initial temperature t_1 is 80 °C and the velocity u is 2 m/s, after 60 hours of operation, the heat transfer coefficient decreased by 38%. It is estimated that when the slag water flow rate is 3 000 t/h, the designed flow rate will be reduced by 6 t/h.

Keywords: flash tank; flash evaporation characteristics; scaling; design calculation; wastewater treatment



敬告读者

为了加快稿件处理速度,缩短稿件出版周期,方便广大作者投稿及查询稿件处理情况。本刊开通由中国知网提供的“腾云”网络采编系统,作者投稿请注册并登录本刊主页上的“作者投稿系统”进行相关操作,网址 <https://yssb.cbpt.cnki.net/>。注册登录后可以向本刊投稿并查询稿件处理状态。请勿重复注册,否则可能导致您的信息查询不完整。

本刊文章数字版可在中国知网(<http://www.cnki.net>)、万方数据知识服务平台(<https://www.wanfang-data.com.cn/>)、维普网(<http://www.cqvip.com/>)下载使用。本刊从未委托任何单位或个人组稿或代收、代转稿件,作者咨询投稿事宜请拨打编辑部办公电话 010-63936591 联系。

《有色设备》编辑部