

逆流型废液与非饱和空气的热质交换性能研究

杨丁丁¹, 柳建华¹, 徐小进², 张良¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 中国船舶重工集团公司 第七〇四研究所, 上海 200031)

摘要:提出了一种新型的逆流形式的填料塔废液处理装置, 对含水率为 94% 的金属切削废液与非饱和空气进行热质交换实验研究, 获得了不同运行工况下废液和空气的进出口状态参数, 然后基于传质单元数-路易斯数(NTU_m-Le)模型, 使用路易斯数-换质系数($Le-\alpha_m$)分离测量法对实验数据进行处理, 获得了传质系数 α_m 和路易斯数 Le , 进而计算出传热系数 α , 分析运行参数对传热传质系数和 Le 的影响。研究发现, 空气流量、废液流量和废液温度的增大都会使得传热传质系数增加; 空气流量和废液流量对 Le 的影响很小, 变化范围在 0.96~0.99, 随着废液温度的增大, Le 明显减小, 从 1.3 降低到 0.71。

关键词: 热质交换; 逆流; 填料塔; 废液再生

中图分类号: TK 124 **文献标志码:** A

Heat and Mass Transfer Performance Between Waste Liquid and Unsaturated Air

YANG Dingding¹, LIU Jianhua¹, XU Xiaojin², ZHANG Liang¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. No.704 Research Institute, China Shipbuilding Industry Corporation, Shanghai 200031, China)

Abstract: A new kind of waste liquid treatment device in the form of a counter flow in packed tower was proposed, and experimental researches on the heat and mass transfer performance between metal cutting waste liquid with 94% moisture content and unsaturated air were carried out. The inlet and outlet state parameters of the waste liquid and air were obtained under different operating conditions. Based on the NTU_m-Le model, the experimental data were processed by using the $Le-\alpha_m$ separation method to obtain the mass transfer coefficient α_m and Le number, and the heat transfer coefficient was then calculated. Finally, the influences of operation parameters on the heat and mass transfer coefficients and Le number were analyzed. The study finds that the increase of air flow rate, waste liquid flow rate and waste liquid temperature will increase the heat and mass transfer coefficients. The air flow rate and the waste liquid flow rate have little influence on the Le number which varies merely within the range of 0.96 to 0.99. The Le number decreases obviously from 1.3 to 0.71 with the increase of the solution

收稿日期: 2017-11-03

基金项目: 上海市部分地方院校能力建设专项计划(16060502600); 上海市教委重点学科建设资助项目(J50502); 上海市科委建设项目(13DZ2260900)

第一作者: 杨丁丁(1992-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 制冷装置及其自动化. E-mail: yddcdi@163.com

通信作者: 柳建华(1956-), 男, 教授. 研究方向: 制冷装置及其自动化. E-mail: lwnlwn_liu@163.com

temperature.

Keywords: *heat and mass transfer; counter flow; packed tower; waste liquid regeneration*

废液的彻底处理一直是一个世界性的难题，目前废液的处理方法主要有物理法^[1]、化学法^[2]和生物法^[3-5]这 3 种。其中，化学法处理废水的流程复杂，生物法处理废水占地面积大，受自然因素影响大，物理法处理废水不会残留化学有害物质。为了研究出可高效回收处理废液的方式，国内外学者在这方面开展了大量的研究工作。Chen 等^[6]采用过氧化钙预氧化和化学絮凝的方法增强废活性污泥的脱水性能，研究发现，活性污泥过滤性能最佳的过氧化钙用量为 20 mg/g 总悬浮固体，化学絮凝（聚氯化铝、氯化铁和聚丙烯酰胺）使得絮体结构进行了重构，污泥的脱水性能也明显增强；郑忠环等^[7]采用单株菌和混合菌对含部分水解聚苯稀酰胺的污水进行厌氧水解酸化生物处理，结果发现，最佳的降解条件为降解 9 d，连续活化 3 次，温度 35~40 ℃，初始 pH 为 7.5；Huang 等^[8]采用聚乙烯基吡咯烷酮-聚偏氟乙烯 (PVP-PVDF) 超滤膜处理含油废水，结果表明，PVP-PVDF 对含油废水的分离效果比 PVDF 明显，并且用质量分数为 3% 的 NaOH 水溶液清洗超滤膜，PVP-PVDF 的通量恢复率超过 90%，比 PVDF 好得多。

废液再生热质交换器有平板降膜和填料两种方式。平板降膜是一个传统的再生模型^[9-10]，换质系数小。填料塔是在一个相对小的空间内提供一个很大的接触面积来提高废液和空气的质量交换，已经被很多学者研究过^[11-12]。一般来说，在材料体积相同的情况下，填料形式要比平板降膜形式的换质能力强。

废液与空气通过媒介直接接触进行传热传质，传统的形式有顺流、逆流和叉流，目前对叉流^[13-14]和顺流^[15-16]形式的传热传质过程进行了深入的理论和数值模拟。Wang 等^[17]对在绝热填料塔中很高含湿量的空气与除湿废液以逆流形式进行热质交换的过程进行了研究，结果显示，与低含湿量的空气相比，废液和空气的流速对除湿影响很大，废液浓度和温度对除湿的影响很小；Lu 等^[18]对逆流热源塔的热质交换特性进行了数值研究，在这个数值模型中，考虑到路易斯数 Le 的变化，研究了进口空气干球温度、含湿量、空气流

速、进口废液的温度和流速对热源塔热性能的影响。之前很多学者是通过理论计算和数值模拟的方法研究溶液和空气的换热换质，采用实验验证的方法较少，对热质交换系数的研究也不足。

本文提出了一种新型的逆流形式的填料塔废水处理实验装置，采用制冷装置的冷凝器对废水进行加热，蒸发器对湿空气进行除湿，对废水的再生性能进行了实验研究。通过传质单元数-路易斯数(NTU_m-Le)模型计算废液和空气的出口状态参数，通过路易斯数-换质系数($Le-\alpha_m$)分离测量法计算热质交换系数和 Le ，进行了一系列不同工况的实验。研究分析了逆流形式下不同空气流量、废液流量、废液温度等参数对热质交换系数和 Le 的影响，为废水处理提供了一种新思路，对未来废水处理的进一步研究提供理论依据。

1 填料塔废液再生实验装置

填料塔废液实验装置如图 1 所示(见下页)，在该装置上对废液再生过程进行实验研究，该装置所需的测控系统在图中没有表示出来。

装置共有 3 个循环，分别是制冷循环、废液循环、空气循环。废液箱中废液经变频废液泵加压进入制冷系统中的板壳式换热器(钛合金材质)加热，通过布液器由上而下喷淋到不锈钢丝网波纹填料上，与由下而上的湿冷空气直接接触，呈逆流形式进行热质交换，再通过重力的作用返回废液箱。湿冷空气由下而上经过填料塔的热质交换后，加热为热湿空气，通过不锈钢蒸发器降温去湿，在变频风机(玻璃钢材质)加压的作用下，返回到填料塔循环。

装置采用变频风机和变频废液泵，通过改变风机和水泵的频率来调节风量和废液流量。合理布置各个测点的位置，待实验工况稳定后，用数据采集仪采集进出填料塔的空气和废液的状态参数，主要包括空气进出口温度、空气进出口湿度和废液进出口温度。选用的温度传感器、湿度传感器和数据采集仪的规格如表 1 所示(见下页)。通过一系列不同工况的实验，得到每个稳定工况

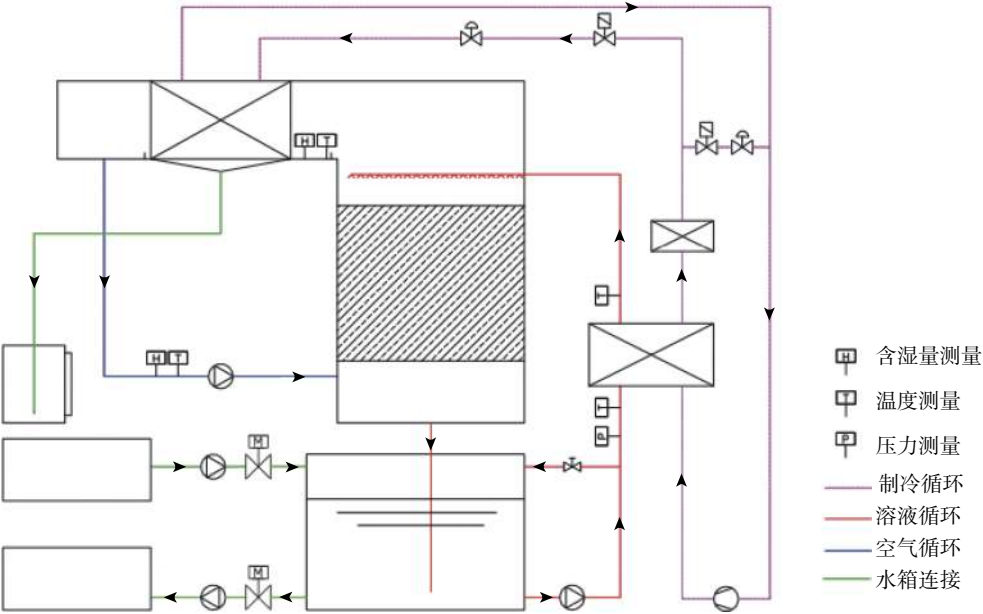


图 1 填料塔废水实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the waste liqid experimental device in packed tower

下的实验数据，进而对装置中废液再生的传热传质性能进行计算和分析。

表 1 温度传感器、湿度传感器和数据采集仪的规格
Tab.1 Specifications of temperature sensors, humidity sensors and data acquisition instruments

名 称	品牌	型号	精度
空气进出口温湿度	VASALA	HMT120	2%
废液进出口温度	上海上仪	Pt 100	±0.3 ℃
数据采集仪	吉时利	2 700	

2 废液再生过程传热传质模型

装置的逆流再生器热质交换如图 2 所示。对再生过程建立数学模型，进行如下简化假设：

- a. 废液与空气的热质交换过程是稳态的，物性参数为常数；
- b. 废液与环境之间不存在热质交换，为绝热的再生过程；
- c. 废液均匀地分布在填料上，传热传质界面相同；
- d. 在热质交换的控制单元内，废液和空气的状态参数不变；
- e. 传热阻力集中在空气侧；

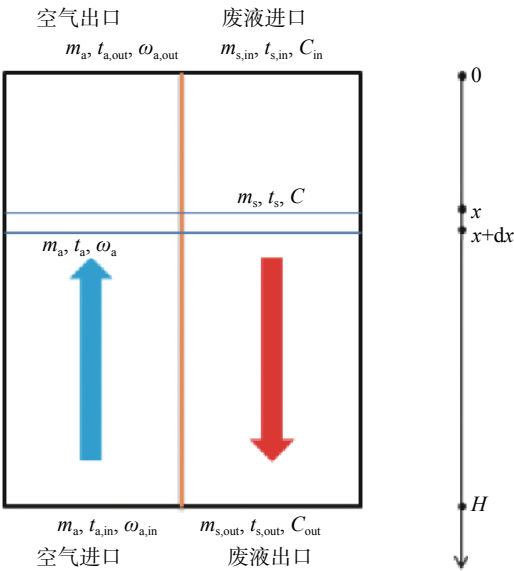


图 2 逆流再生器热质交换示意图

Fig.2 Schematic diagram of the heat and mass transfer in counter flow regenerator

f. 不考虑轴向的热质交换。

将填料塔作为一个控制体考虑，废液与空气的热质交换遵守质量守恒定律和能量守恒定律，溶质也遵守质量守恒定律，其关系式分别为

$$m_a d\omega_a = dm_s \tag{1}$$

$$m_a dh_a = d(m_s h_s) \tag{2}$$

$$d(m_s C) = 0 \tag{3}$$

空气侧的质量传递方程与能量传递方程为式(4)和式(5)。

$$m_a d\omega_a = \alpha_m A (\omega_a - \omega_e) \frac{dx}{H} \tag{4}$$

$$m_a dh_a = \alpha A (t_a - t_s) \frac{dx}{H} + r m_a d\omega_a \tag{5}$$

为了求解逆流流型下废液与空气热质交换过程中的参数，式(4)和式(5)可以变化为式(6)和式(7)。

$$\frac{d\omega_a}{dx} = \frac{NTU_m}{H} (\omega_a - \omega_e) \tag{6}$$

$$\frac{dh_a}{dx} = \frac{NTU_m Le}{H} (h_a - h_e) + \frac{NTU_m Le}{H} \cdot \left[r \left(\frac{1}{Le} - 1 \right) (\omega_a - \omega_e) \right] \tag{7}$$

传质单元数 NTU_m 和 Le 可以表示为

$$Le = \frac{\alpha}{\alpha_m c_{p,m}} \tag{8}$$

$$NTU_m = \frac{\alpha_m A}{m_a} \tag{9}$$

根据上述控制方程，加上废液和空气的进口条件，即可求得逆流形式下废液与空气热质交换过程中的参数变化情况，该模型称为 NTU_m - Le 模型。

3 耦合传热传质系数的测量方法

在填料塔内废液与空气进行热质交换，由于废液温度高于湿空气温度，在温度差的作用下进行对流传热；同时，废液表面的等效表面蒸汽压大于湿空气的表面蒸汽压，在表面蒸汽压力差的作用下进行水分的迁移。一方面温度的变化会引起表面蒸汽压的变化，进而影响传质过程；另一方面，水分由废液迁移到湿空气中会伴随气化潜热的吸收，引起废液和空气的温度变化，进而影响传热过程。因此，传热过程和传质过程有极强

的耦合特性。到目前为止，还没有统一的数学公式可以准确求解热质交换系数，本文采用实验的方法求解。参考文献[19]可以用 Le - α_m 分离测量法测量 Le 和传质系数 α_m 。

根据式(8)，采用计算得出的传质系数和 Le ，推导出传热系数 α 。

$$\alpha = Le \alpha_m c_{p,m} \tag{10}$$

Le - α_m 分离测量法计算步骤如下：

a. 由实验获取再生废液和空气的进口状态参数，空气出口干球温度 $t_{a,out}$ ，空气出口含湿量 $\omega_{a,out}$ 。假设空气出口含湿量的允许精度误差为 $\Delta\omega_a$ ， $Le=2$ ，起始传质系数为 α_{m1} ；

b. 据 NTU_m - Le 模型计算出出口空气含湿量 $\omega_{a,1}$ ，如果 $\omega_{a,1} > \Delta\omega_a + \omega_{a,out}$ ，则传质系数 $\alpha_{m2} = 1.2\alpha_{m1}$ ；反之， $\alpha_{m2} = 0.8\alpha_{m1}$ 。将 α_{m2} 代入 NTU_m - Le 模型，计算出出口空气含湿量 $\omega_{a,2}$ ，如果 $\omega_{a,2} > \Delta\omega_a + \omega_{a,out}$ ，利用牛顿迭代法得出 α_{m3} ，如图 3(a) 所示；

c. 将 α_{m3} 代入 NTU_m - Le 模型，得到 $\omega_{a,3}$ 。如果 $\omega_{a,3} > \Delta\omega_a + \omega_{a,out}$ ，则 $\alpha_{m1} = \alpha_{m2}$ ， $\alpha_{m2} = \alpha_{m3}$ ，重复步骤 b，直到 $\omega_{a,3} - \omega_{a,out} \leq \Delta\omega_a$ ，认为得到传质系数；

d. 根据 NTU_m - Le 模型、传质系数以及入口参数计算出空气出口干球温度 $t_{a,1}$ 。假设空气出口干球温度的允许精度误差为 Δt_a ， $Le_1 = 0.1$ ，如果 $t_{a,out} < \Delta t_a + t_{a,1}$ ，则 Le 为 $Le_2 = 1.2Le_1$ ；反之， $Le_2 = 0.8Le_1$ ，将 Le_2 代入 NTU_m - Le 模型，计算出空气出口干球温度 $t_{a,2}$ ，若 $t_{a,out} < \Delta t_a + t_{a,1}$ ，则利用牛顿迭代法得出 Le_3 ，如图 3(b) 所示；

e. 将 Le_3 代入 NTU_m - Le 模型，得到 $t_{a,3}$ ，如果 $t_{a,out} < \Delta t_a + t_{a,3}$ ，则 $Le_1 = Le_2$ ， $Le_2 = Le_3$ ，重复步骤 d，直到 $t_{a,out} > \Delta t_a + t_{a,3}$ ，认为得到 Le 数；

f. 通过式(10)计算出传热系数。

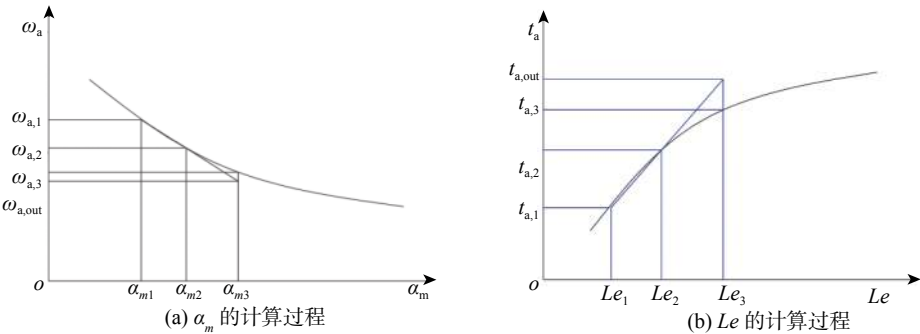


图 3 耦合传热传质过程 Le - α_m 分离测量法图解

Fig.3 Calculating procedure by the Le - α_m separation method

4 实验结果

通过废液与空气的耦合传热传质过程进行不同工况的研究，获得不同运行工况下废液和空气的进出口状态参数，然后基于 NTU_m-Le 模型使用 $Le-\alpha_m$ 分离测量法对实验数据进行处理，获得该过程的传质系数 α_m 和 Le ，通过公式计算出传热系数 α ，最终得到运行参数对传热传质系数和 Le 的影响结果。本文实验的废液是含水率为 94% 的金属切削液。

4.1 空气流量对热质交换系数和 Le 的影响

表 2 为改变空气流量的实验测试工况。

表 2 改变空气流量实验测试工况
Tab.2 Experimental test condition with the changing of air flow rate

$V_a/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$t_{a,\text{in}}/^\circ\text{C}$	$\omega_a/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$m_s/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	$t_{s,\text{in}}/^\circ\text{C}$	$C_{s,\text{in}}/\%$
0.233~0.389	40	48.98	0.833	50	6

图 4 为空气流量对换质系数和 Le 的影响，由图可知，换质系数随着空气流量的增大而增大，当空气流量由 $0.233 \text{ m}^3/\text{s}$ 变化到 $0.389 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，传质系数由 $1.32 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 增大到 $1.51 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。这主要是因为，虽然空气流量增大加剧了废液的温降，降低了其等效含湿量，但是，空气中含湿量的增加量却显著减小，使废液与空气的传质势增大，进而水分迁移量增大；另外，空气流量增大即空气流速增大，使废液表面波动性增强，增大了水分传递的接触面积。 Le 随着空气流量的增大有增大的趋势，从 0.97 变化到 0.99，但总体变化不大，平均值约为 0.98。

图 5 为空气流量对换热系数的影响，图中数据表明，换热系数也随着空气流量的增大而增大，当空气流量由 $0.233 \text{ m}^3/\text{s}$ 变化到 $0.389 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，传热系数由 $5.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 增大到 $6.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，主要是因为换热系数与空气流速呈正相关的关系。

4.2 废液流量对热质交换系数和 Le 的影响

表 3 为改变废液流量的实验测试工况。图 6 为废液流量对换质系数和 Le 的影响，由图可知，换质系数随着废液流量的增大而增大。当废液流量由 0.5kg/s 变化到 0.833kg/s 时，传质系数由 $0.84\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 增大到 $1.32 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，主要是因为废液流量增大时，水分迁移过程中废液的温降减小，导致废液的等效含湿量减少较小，平均传质势相对较大，

增大了水分迁移量； Le 随废液流量的增大而有小幅度的增大，从 0.96 增大到 0.99。

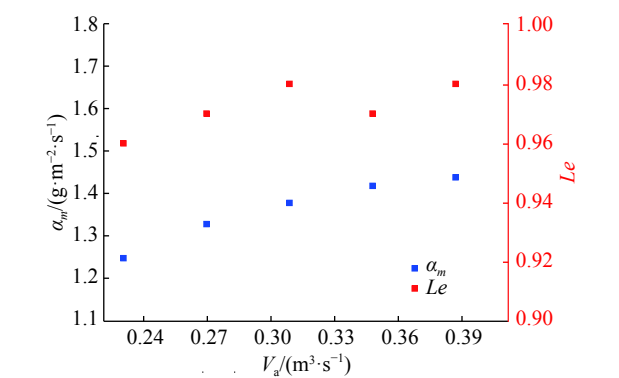


图 4 空气流量对换质系数和 Le 的影响
Fig.4 Effects of air flow rate on the mass transfer coefficient and Le

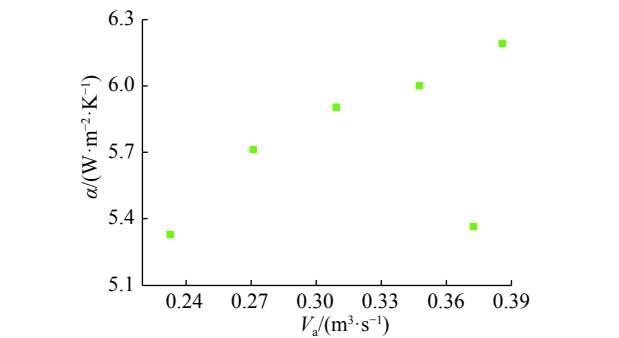


图 5 空气流量对换热系数的影响
Fig.5 Effects of air flow rate on the heat transfer coefficient

表 3 改变废液流量实验测试工况
Tab.3 Experimental test condition with the changing of waste liquid flow rate

$V_a/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$t_{a,\text{in}}/^\circ\text{C}$	$\omega_a/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$m_s/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	$t_{s,\text{in}}/^\circ\text{C}$	$C_{s,\text{in}}/\%$
0.233	40	48.98	0.500~0.833	50	6

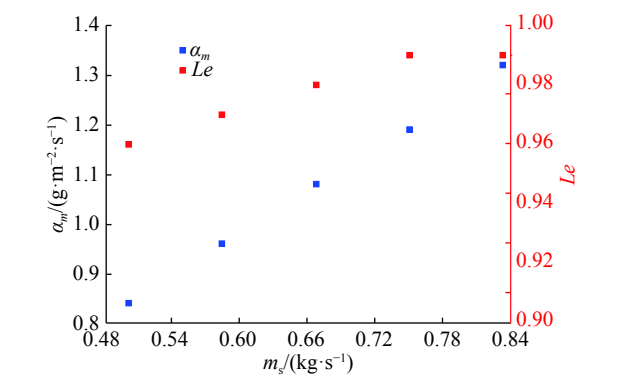


图 6 废液流量对换质系数和 Le 数的影响
Fig. 6 Effects of waste liquid flow rate on the mass transfer coefficient and Le

图 7 为废液流量对换热系数的影响, 图中数据表明, 换热系数也随着废液流量的增大而增大, 当废液流量由 0.5 kg/s 变化到 0.833 kg/s 时, 传热系数由 3.4 W/(m² · K) 增大到 5.5 W/(m² · K), 主要是因为废液流量增大, 其效果等效于增大了废液与空气之间的相对速度, 其换热系数与流量呈正相关的关系。

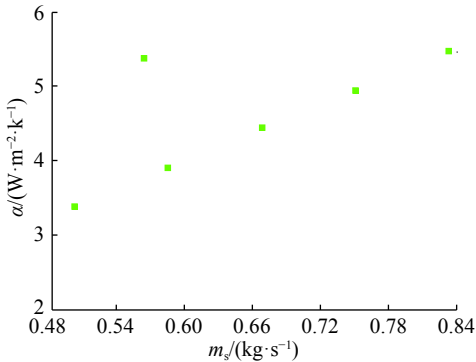


图 7 废液流量对换热系数的影响

Fig.7 Effects of waste liquid flow rate on the heat transfer coefficient

4.3 废液温度对热质交换系数和 Le 的影响

表 4 为改变废液温度的实验测试工况。

表 4 改变废液温度实验测试工况

Tab.4 Experimental test condition with the changing of waste liquid temperature

$V_a/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$t_{a,\text{in}}/^\circ\text{C}$	$\omega_a/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$m_s/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	$t_{s,\text{in}}/^\circ\text{C}$	$C_{s,\text{in}}/\%$
0.233	40	48.98	0.833	44.4~55.5	6

图 8 为废液温度对换质系数和 Le 的影响, 由图可知, 换质系数随着废液温度的增大而增大, 当废液温度由 44.4 °C 变化到 55.5 °C 时, 传质系数由 0.77 g/(m² · s) 增大到 2.17 g/(m² · s)。这主要是因为废液温度越高, 其表面等效水蒸气分压力越大, 与空气的表面水蒸气分压力差越大, 水分迁移的驱动力就越大, 水分迁移量就越大; Le 随着废液温度的增大而减小, 当废液温度由 44.4 °C 变化到 55.5 °C 时, Le 由 1.3 减小到 0.71, 说明废液温度的变化对 Le 的影响较大。

图 9 为废液温度对换热系数的影响, 图中数据表明, 换热系数也随着废液温度的增大而增大, 当废液温度由 44.4 °C 变化到 55.5 °C 时, 传热系数由 4.2 W/(m² · K) 增大到 6.6 W/(m² · K), 主要是因为温度越高, 贴壁处法线方向上的废液温度变化率越大, 换热系数就越大。

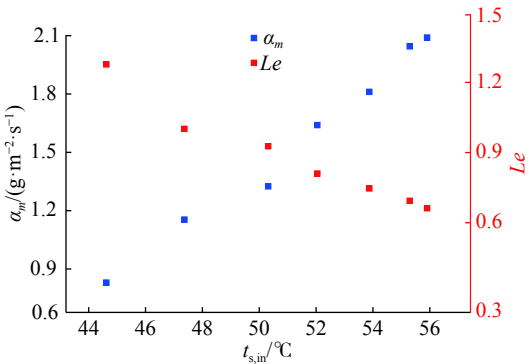


图 8 废液温度对换质系数和 Le 数的影响

Fig.8 Effects of waste liquid temperature on the mass transfer coefficient and Le

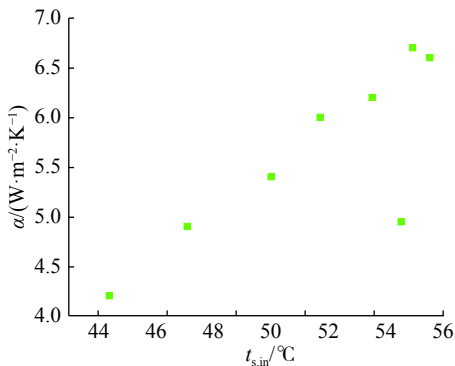


图 9 废液温度对换热系数的影响

Fig.9 Effects of waste liquid temperature on the heat transfer coefficient

5 结 论

在提出的填料塔废液再生实验装置的基础上, 对废液与空气的耦合传热传质过程进行了不同工况的研究, 得到结论:

- a. 基于 NTU_m - Le 模型使用 Le - α_m 分离测量法对实验数据进行处理, 可以计算得到传热传质过程的传质系数和 Le , 进而计算得到该过程的传热系数;
- b. 空气流量、废液流量和废液温度都对传质系数和传热系数有显著的影响, 且随着空气流量、废液流量和废液温度的增大, 传质传热系数均增加, 其中, 空气流量对热质系数的影响最小;
- c. 空气流量和废液流量对 Le 的影响很小, Le 的变化范围为 0.96~0.99, 并且都是随着空气流量和废液流量的增大而有小幅度的增加; 废液温度对 Le 有显著的影响, 随着废液温度的增大, Le 明显减小, 从 1.3 降低到 0.71。

符号表

A	热质交换面积	γ	气化潜热
C	溶质质量分数	t	温度
c_p	比定压热容	V	体积流量
h	焓值	α	换热系数
H	填料高度	α_m	换质系数
Le	路易斯数	ω	含湿量
m	质量流量	x	x 轴变量
NTU_m	传质单元数		
下标			
a	空气	out	出口
e	废液等效空气	s	废液
in	进口		

参考文献:

[1] YU F, SUN L, ZHOU Y M, et al. Biosorbents based on agricultural wastes for ionic liquid removal: an approach to agricultural wastes management[J]. *Chemosphere*, 2016, 165(12): 94–99.

[2] DOS SANTOS E V, SáEZ C, CAÑIZARES P, et al. UV assisted electrochemical technologies for the removal of oxyfluorfen from soil washing wastes[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 318: 2–9.

[3] TAMPIO E, MARTTINEN S, RINTALA J. Liquid fertilizer products from anaerobic digestion of food waste: mass, nutrient and energy balance of four digestate liquid treatment systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 125: 22–32.

[4] ROS M, DE SOUZA OLIVEIRA FILHO J, PEREZ MURCIA M D, et al. Mesophilic anaerobic digestion of pig slurry and fruit and vegetable waste: dissection of the microbial community structure[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 156: 757–765.

[5] FOUKIS A, GKINI O A, STERGIOU P Y, et al. Sustainable production of a new generation biofuel by lipase-catalyzed esterification of fatty acids from liquid industrial waste biomass[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 238: 122–128.

[6] CHEN Z, ZHANG W J, WANG D S, et al. Enhancement of waste activated sludge dewaterability using calcium peroxide pre-oxidation and chemical re-flocculation[J]. *Water Research*, 2016, 103: 170–181.

[7] 郑忠环, 包木太, 陆金仁, 等. 厌氧水解酸化处理含高浓度聚丙烯酰胺污水[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(6): 1389–1395.

[8] HUANG X, WANG W P, LIU Y D, et al. Treatment of

oily waste water by PVP grafted PVDF ultrafiltration membranes[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 273: 421–429.

[9] HU T L, XIE X Y, JIANG Y. Design and experimental study of a plate-type falling-film generator for a LiBr/H₂O absorption heat pump[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 74: 304–312.

[10] LI C, ZHAO R C, LI L, et al. Mass transfer characteristics of the high temperature falling film evaporation over a vertical wall under countercurrent laminar airflow[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 82: 269–275.

[11] SHARQAWY M H, AL-SHALAWI I, ANTAR M A, et al. Experimental investigation of packed-bed cross-flow humidifier[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 117: 584–590.

[12] KIM M H, PARK J Y, JEONG J W. Simplified model for packed-bed tower regenerator in a liquid desiccant system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 89: 717–726.

[13] ENAYATOLLAHI R, NATES R J, ANDERSON T. Characterising the heat and mass transfer coefficients for a crossflow interaction of air and water[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 111: 94–104.

[14] HUANG S F, LV Z Y, LIANG C H, et al. Experimental study of heat and mass transfer characteristics in a cross-flow heating tower[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 77: 116–127.

[15] EL-GENK M S, SCHRIENER T M. A review of experimental data and heat transfer correlations for parallel flow of alkali liquid metals and lead-bismuth eutectic in bundles[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2017, 317: 199–219.

[16] 殷勇高, 潘雄伟, 陈瑶, 等. 顺流型溶液与空气热质交换性能[J]. *化工学报*, 2012, 63(S2): 26–31.

[17] WANG Z Y, ZHANG X Y, LI Z. Investigation on the coupled heat and mass transfer process between extremely high humidity air and liquid desiccant in the counter-flow adiabatic packed tower[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 110: 898–907.

[18] LU J, LI W Y, LI Y C, et al. Numerical study on heat and mass transfer characteristics of the counter-flow heat-source tower (CFHST)[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 145: 318–330.

[19] YIN Y G, ZHANG X S. A new method for determining coupled heat and mass transfer coefficients between air and liquid desiccant[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(13/14): 3287–3297.

(编辑: 石 瑛)