

# 开式吸收式热泵超重力旋转填料床吸收器实验研究

冯再滨<sup>1,2</sup>, 路 源<sup>2</sup>, 赵丽凤<sup>2</sup>, 肖云汉<sup>2</sup>, 刘 彩<sup>2,3</sup>

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院工程热物理研究所能源动力研究中心, 北京 100190;

3. 淮海工学院, 连云港 222005)

**摘 要:** 研究在高湿烟气水、热回收过程中操作参数对超重力旋转填料床吸收器性能的影响。研究表明, 一定范围内增大液气比、超重力因子和进口溶液浓度, 降低进口溶液温度可提高潜热回收率(水回收率)。最佳操作参数为进液温度 40~50 ℃, 液气比 1.0~1.6, 超重力因子 150~200, 溶液质量分数为 49%~51%。

**关键词:** 开式吸收式热泵; 超重力旋转填料床; 潜热回收; 传热传质

**中图分类号:** TK123

**文献标识码:** A

## 0 引 言

1955 年, 开式吸收式热泵由 Lof<sup>[1]</sup> 提出, 开发以太阳能为再生热源的开式吸收式液体干燥制冷系统。此后, Pohl 等<sup>[2]</sup>、Kumar 等<sup>[3]</sup>、Aly Ayman 等<sup>[4]</sup> 相继提出利用太阳能的开式吸收式热泵系统, 该系统可用于夏季制冷、冬季供热等。近年来, 开式吸收式热泵技术在工业湿烟气潜热回收利用中发展迅速。湿烟气低温余热以潜热为主, 城市供热燃气锅炉排烟潜热比例较高, 潜热量相当于天然气低位发热量的 10%, 烟气露点为 50~60 ℃; 燃煤锅炉湿法脱硫排烟为接近湿饱和状态, 排烟温度约为 50 ℃, 其中潜热占比约 85%, 回收利用可提高能源系统效率<sup>[5,6]</sup>。以太阳能等可再生能源为驱动热源的开式吸收式热泵在进行烟气潜热回收时, 突破了冷凝法受露点限制的局限性, 且潜热回收率和回收热量品位较高, 回收热量可用于供热<sup>[7,8]</sup>, 可显著提高能源系统的经济性、环保性。

吸收器是开式吸收式热泵系统的关键部件之一, 其性能对热泵系统整体性能有重要作用。中国科学院工程热物理研究所针对高湿烟气的内冷型和绝热型降膜吸收器潜热回收性能开展了系统性研究<sup>[7-10]</sup>。本文在前期研究基础上, 设计一种适用于开式吸收式热泵的超重力旋转填料床吸收器。超重力旋转填料床中由于超重力场的作用, 具有优

异的强化传热传质性能<sup>[11]</sup>。

本文以超重力旋转填料床为基础设计吸收器, 以 CaCl<sub>2</sub> 溶液(下称溶液)为吸收剂, 回收工业高湿烟气中的水和潜热。相较于 LiBr、LiCl 溶液, CaCl<sub>2</sub> 溶液再生温度较低, 更利于回收低温余热; 成本低廉、无毒环保, 经济性能优越, 更利于开式吸收式热泵技术的应用推广。

## 1 实验系统

### 1.1 实验装置

图 1 为吸收器实验系统示意图。主要由湿烟气产生系统、溶液供给系统和实验段(吸收器)组成。为方便调节实验参数, 配备换热器、泵等辅助设备, 管道均做保温, 并在易发生结晶的管路段缠绕恒温伴热带, 防止高浓度 CaCl<sub>2</sub> 溶液结晶堵塞管道。溶液供给系统中, 高温烟气作为再生器驱动热源, 将来自吸收器的稀溶液进行浓缩。在再生器中, 当驱动热源温度高于此时溶液沸点, 水蒸气与溶液分离, 溶液浓度增大, 溶液恢复吸收能力并被送回吸收器。以浓度(文中浓度均指溶质的质量分数)50%的溶液为例, 再生压力为常压时再生温度约 126 ℃, 再生压力为 7 kPa 时, 再生温度仅约 64.2 ℃, 锅炉排烟一般高于 150 ℃可满足再生要求。当应用场合高温烟气不方便获取或引入系统

收稿日期: 2016-05-04

基金项目: 国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项(2016YFE0102400)

通信作者: 路 源(1981—), 男, 博士、助理研究员, 主要从事先进循环、余热回收及开式吸收式热泵等方面的研究。luyuan@iet.cn

时,由于再生温度较低,以太阳能等可再生能源为驱动热源,技术可行、方便节能。

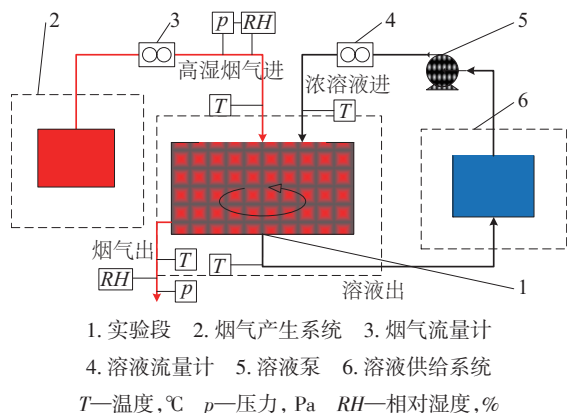


图1 吸收器实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system of absorber

## 1.2 超重力旋转填料床气液传质强化原理

在实验段超重力旋转填料床吸收器中气液接触发生吸收过程,其主要传质推动力是溶液表面蒸汽压(溶液表面的水蒸气分压力)与气体中水蒸气分压力的差值,差值越大吸收过程越剧烈。当湿烟气与溶液相接触时,由于溶液表面蒸汽压低于烟气中水蒸气分压力,烟气中的水蒸气会在气液交界面上发生相变,释放大量潜热。

图2为超重力旋转填料床吸收器结构设计示意图。采用顺流操作,烟气与溶液均从顶部中心进入吸收器,在填料中充分接触。由电机带动轴,使转子和填料高速旋转,液滴在切应力的作用下被拉伸成膜、成丝、成滴,极大地增加填料中气液接触面

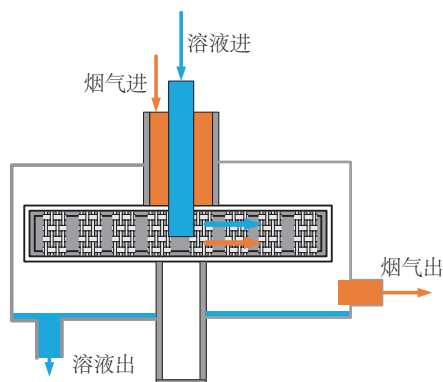


图2 超重力旋转填料床吸收器结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of high gravity rotating packed bed absorber structure

积,强化传热传质过程<sup>[12]</sup>。实验中,烟气出口直接与大气相通,吸收过程在常压下进行。

在研究工作中一般采用传质系数来表征超重力旋转填料床的传质性能。1981年, Ramshaw 等<sup>[13]</sup>对离心加速度为重力加速度 200 倍以上时进行实验研究,研究表明液相传质系数与重力加速度的 0.14~0.0504 次幂成正比。1989 年, Dudukovic 等<sup>[14]</sup>利用 NaOH 溶液吸收  $\text{CO}_2$  体系开展研究,得到液相传质系数与离心加速度的 0.1667 次幂成正比的结论。为更好地对离心力场和重力场进行表征,国内学者刘有智<sup>[15]</sup>提出无量纲参数-超重力因子 $\beta$ ,定义其为超重力场下任意点的离心加速度与重力加速度的比值,该参数的引入简化了传质模型理论分析过程,其表达式为:

$$\beta = \frac{\omega^2 r}{g} \quad (1)$$

式中,  $\omega$ ——转子转速,  $\text{rad/s}$ ;  $r$ ——转子内外半径的几何半径,  $\text{m}$ ;  $g$ ——重力加速度,  $9.81 \text{ m/s}^2$ 。

本实验中研究超重力因子对吸收器性能的影响,除此之外,主要操作参数还包括: $\varepsilon$ 为液气比(溶液质量流量与干烟气质量流量之比);  $T$ 为进口溶液温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $C$ 为进口溶液浓度, %。

## 1.3 参数测量及测量仪器

①溶液浓度:初始浓度通过称量配制所需质量分数的溶液;出口浓度使用千分位精度密度计读取密度,查表(精确标定的溶液浓度-密度关系表);②烟气湿度:瑞士 Rotronic 公司 K 系列工业探头,精度  $\pm 1.5\% RH$ ,  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ;③温度:A 级精度 Pt100 热电阻;④压力: $\pm 0.5\%$  FS 差压传感器;⑤流量:烟气采用均速管、微差压传感器;溶液采用精度 0.5 级液体涡轮流量计 LWGY-C。

## 2 结果及讨论

本文主要对影响开式吸收式热泵超重力旋转填料床吸收器性能的主要操作参数进行实验研究,包括超重力因子 $\beta$ 、液气比(溶液质量流量与干烟气质量流量之比)、进口溶液温度、进口溶液浓度。

本文水回收率是指回收的水量占烟气中总含水量的比例,溶液吸收烟气中水蒸气,蒸汽发生相变释放潜热并被回收。吸收过程中,回收热量主要来自烟气中的蒸汽潜热,回收热量的性能主要指回

收潜热的性能,蒸汽携带大量潜热,回收潜热的同时也回收水,故潜热回收率和水回收率数值相等。工业湿烟气低温余热中潜热量占比高达85%以上,故可用潜热回收率(水回收率)衡量低温余热的回收性能。此外,出口溶液温度越高,则可对外供热温度越高,可用于衡量回收潜热品位。

### 2.1 超重力因子变化的影响

超重力因子对吸收器水回收率的影响如图3所示。此时溶液浓度50%,进口溶液温度45℃,液气比1.0,进气温度60℃,进气含湿量0.126。

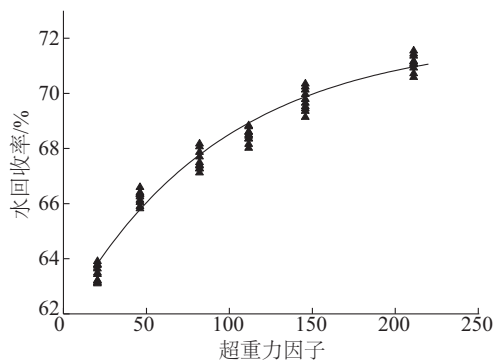


图3 超重力因子对水回收率的影响

Fig. 3 Effect of high gravity factor on water recovery rate

在一定范围内,随超重力因子的增大,水回收率逐渐提高。由超重力因子的定义可知,转速越高超重力因子越大,故可通过调节转子转速来调节超重力因子。超重力因子增大后,溶液在填料内部形成的液膜更薄、液滴更小,增大气液接触面积,缩短相界面更新时间,微观混合与传质过程都显著增强,传质系数提高,从而水回收率提高,潜热回收率提高。

根据实验数据拟合得到水回收率 $\eta$ 与超重力因子 $\beta$ 实验关联式为:

$$\eta = -10.23e^{-\frac{\beta}{94.02}} + 72.05 \quad (2)$$

式中, $\eta$ ——水回收率,%。

式(2)的校正决定系数为0.98,表明当 $\beta$ 在20~220范围内变化时,拟合式(2)准确性可靠。虽然增大超重力因子有利于提高潜热回收率,但增大到一定值后,潜热回收率增长渐趋平缓,如 $\beta$ 为220时,水回收率平均值为71.06%,仅比 $\beta$ 为150时高1.03%,对性能提高的贡献不大,却带来更大的电机能耗,故超重力因子不宜过大。根据实验结果,建议超重力因子范围为150~200。

### 2.2 液气比变化的影响

液气比对吸收器水回收率的影响如图4所示。此时溶液浓度50%,进口溶液温度45℃,进气温度60℃,进气含湿量0.126,超重力因子82。

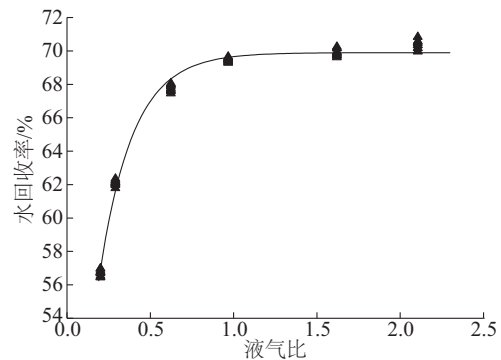


图4 液气比对水回收率的影响

Fig. 4 Effect of liquid to gas ratio on water recovery rate

在一定范围内随着液气比的增加,水回收率逐渐提高并渐趋平缓。溶液表面蒸汽压与烟气中水蒸气分压力的差值是吸收过程的主要推动力,溶液表面蒸汽压随浓度的增加而减小。实验中进气参数不变,通过改变进口溶液质量流量来调节液气比,在吸收相同质量的水时,溶液量的增加使整个吸收过程的溶液浓度变化更小,整个吸收过程溶液表面蒸汽压平均值较低,传质推动力更强,故可吸收更多的水,从而水回收率提高,潜热回收率提高。

根据实验数据拟合得到水回收率 $\eta$ 和液气比 $\varepsilon$ 的实验关联式为:

$$\eta = -35e^{-\frac{\varepsilon}{0.20}} \quad (3)$$

式(3)的校正决定系数为0.99,表明当 $\varepsilon$ 在0.2~2.3范围内变化时,拟合式(3)准确性可靠。实验中, $\varepsilon$ 为1.61时,水回收率平均值为69.88%, $\varepsilon$ 为2.10时,其值为69.90%,仅提高0.02%,表明当 $\varepsilon$ 达到1.6以上时,增大 $\varepsilon$ 不能有效提高水回收率。原因是溶液量过大时液滴过多的占据填料通道,造成烟气流阻大,传质过程得不到进一步加强。同时释放潜热量变化不大,而溶液量增大会导致出口溶液温度较低,回收热量品位降低。此外,若液气比太小,溶液不能充分润湿填料床,传热传质作用弱,回收潜热量少。故液气比过大过小都不利于水回收率的提高,在本实验条件下,推荐液气比为1.0~1.6。

### 2.3 进液温度变化的影响

进液温度对吸收器水回收率的影响如图 5 所示。此时溶液浓度 50%, 液气比 1.0, 进气温度 60 °C, 进气含湿量 0.126, 超重力因子 82。

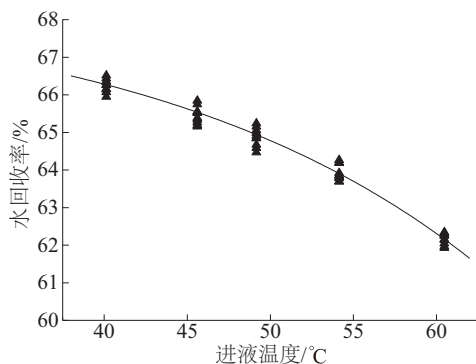


图5 进液温度对水回收率的影响

Fig. 5 Effect of solution inlet temperature on water recovery rate

在一定范围内, 随进液温度的升高水回收率逐渐降低。降低进口溶液温度, 有利于提高水回收率。溶液表面蒸汽压随温度的降低而降低, 即温度越低, 传质推动力越大, 水回收率也越高, 溶液温升也随之提高。溶液温度降低, 溶质的溶解度降低, 溶质结晶水合物种类也随之发生变化, 根据实验结果采用 AR 级  $\text{CaCl}_2$  配制的 50% 浓度溶液, 在 30 °C 极易发生结晶 ( $\text{CaCl}_2$  以水合物形式析出), 导致管道堵塞。温度过高导致溶液表面蒸汽压与烟气中水蒸气分压力差值变小, 传质推动力变小, 不利于吸收过程, 一般进口溶液温度控制不超过 55 °C。

根据实验数据拟合得到水回收率  $\eta$  与进液温度  $T$  的实验关联式为:

$$\eta = -0.31e^{\frac{T}{30.02}} \quad (4)$$

式(4)的校正决定系数为 0.9998, 表明  $T$  在 38~62 °C 范围内变化时, 拟合式(4)准确性可靠。当溶液温度大于 60 °C 时, 水回收率急剧下降, 不利于潜热回收。在本文实验条件下, 推荐溶液温度范围为 40~50 °C。

### 2.4 进液浓度变化的影响

进液浓度对吸收器水回收率的影响如图 6 所示。此时进液温度 45 °C, 液气比 1.0, 进气温度 60 °C, 进气含湿量 0.126, 超重力因子 82。

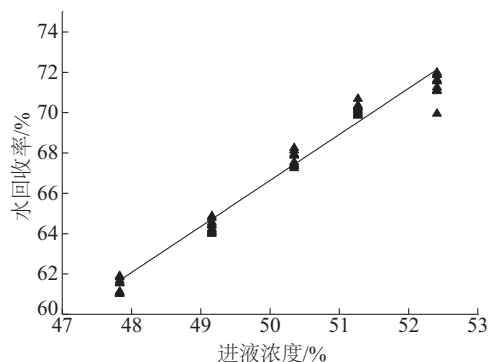


图6 进液浓度对水回收率的影响

Fig. 6 Effect of solution inlet concentration on water recovery rate

在一定范围内, 随进口溶液浓度的增大, 水回收率逐渐提高。在溶液中, 进口溶液浓度增大表示溶剂水的浓度减小, 溶液表面蒸汽压随溶剂水浓度减小而降低, 而烟气中水蒸气分压力不变, 传质推动力增大, 水回收率提高, 潜热回收率提高。

根据实验得到水回收率  $\eta$  与进液浓度  $C$  的实验关联式为:

$$\eta = -47.46 + 2.2819C \quad (5)$$

式(5)的校正决定系数为 0.98, 表明  $C$  值在 48.5%~52.4% 范围内变化时, 拟合式(5)准确性可靠, 溶液浓度越高, 水回收率越高。在实际应用中, 溶液浓度并非越高越好, 浓度过高会造成溶液的结晶温度升高, 工况变动或其他原因导致溶液温度降低时, 溶液极易发生结晶, 从而堵塞管道, 系统无法正常安全运行。根据实验结果, 推荐溶液浓度范围为 49%~51%, 溶液温度在 40 °C 以上运行时, 既可保证较好的潜热回收性能, 又可有效避免溶液结晶。

### 2.5 实验关联式

对实验结果进行回归分析, 得到水回收率与操作参数的实验关联式为:

$$\eta = -48.288 + 0.425\beta - 0.218T + 4.359\varepsilon + 2.35566C \quad (6)$$

式(6)的校正决定系数为 0.62, 表明具有较好的相关性。由式(6)可知, 水回收率随  $\beta$ 、 $\varepsilon$ 、 $C$  增大而提高, 随  $T$  增大而降低。

### 2.6 余热回收后的利用

溶液吸收过程蒸汽相变释放的热量主要被溶液吸收, 使溶液温度升高, 以不同超重力因子下的

出液温度为例,如图7所示,出液温度基本维持在60℃以上,回收热量品位较高。回收热量用于低温供热时,锅炉回水温度一般在40~55℃,考虑3℃的传热温差,回收热量可将锅炉回水温度加热至57℃以上,可提高锅炉热效率。从燃煤电厂湿法脱硫排烟中回收的热量可用于凝结水(一般在30~40℃)的预热,可提高能源利用率。针对不同的应用背景,还可有针对性地合理优化配置以更大限度地利用回收的较高品位热量,如加热洗澡水等生活用水。

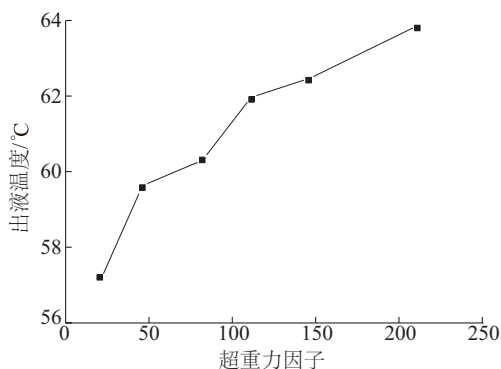


图7 出液温度随超重力因子的变化

Fig. 7 Effect of high gravity factor on solution outlet temperature

### 3 结 论

本文以开式吸收式热泵超重力旋转填料床吸收器为研究对象,研究不同操作参数对其回收烟气潜热性能的影响,结论如下:

1)一定范围内增大液气比、超重力因子、进口溶液浓度,降低进口溶液温度可提高潜热回收率(水回收率);降低进口溶液温度,易造成溶液结晶,影响系统的安全运行。根据实验结果,适宜的操作参数范围为:进液温度40~50℃,液气比1.0~1.6,超重力因子150~200,溶液浓度49%~51%,供相关吸收器设计参考。

2)各操作参数对提高水回收率的耦合作用较复杂,本文给出的实验关联式可为后续操作参数耦合作用的研究提供参考。

3)超重力旋转填料床能极大地强化传热传质过程,而其自身除尘性能优越,将二者结合,进一步开展超重力旋转填料床吸收器烟气余热回收和除尘协同作用的研究对于节能减排具有重大意义。

### [参考文献]

- [1] Lof G O G. Cooling with solar energy [A], Congress on Solar Energy [C], Tucson, az, 1955: 171—189.
- [2] Pohl J P, Hellmann H M, G rossman G. Investigation and comparison of two configurations of a novel open-cycle absorption chiller [J]. International Journal of Refrigeration, 1998, 21(2): 142—149.
- [3] Thosapon Katejanekam, Kumar S. Performance of a solar-regenerated liquid desiccant ventilation pre-conditioning system [J]. Energy and Building, 2008, 40(7): 1252—1267.
- [4] Aly Ayman A, Zeidan El-Shafei B, Hamed Ahmed M. Solar-powered open absorption cycle modeling with two desiccant solutions [J]. Energy Conservation and Management, 2011, 52: 2768—2776.
- [5] 付 林,田贯三,隋 军,等.吸收式热泵在燃气采暖冷凝热回收中的应用 [J]. 太阳能学报, 2003, 24(5): 620—624.
- [5] Fu Lin, Tian Guansan, Sui Jun, et al. Combining absorption heat pump with gas boiler for exhaust condensing heat recovery in district heating system [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2003, 24(5): 620—624.
- [6] 贾红书,付 林,张世钢.开式吸收式热泵及在烟气余热回收中的应用 [J]. 化工进展, 2013, 32(12): 2805—2812.
- [6] Jia Hongshu, Fu Lin, Zhang Shigang. Open absorption heat pump and application in flue gas waste heat recovering [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, 32(12): 2805—2812.
- [7] 路 源,徐 震,肖云汉.开式吸收式热泵降膜吸收器实验研究 [J]. 太阳能学报, 2011, 32(8): 1158—1162.
- [7] Lu Yuan, Xu Zhen, Xiao Yunhan. Experimental study of the falling film absorber in the open cycle absorption heat pump [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011, 32(8): 1158—1162.
- [8] 路 源,徐 震,肖云汉.开式吸收式热泵内冷型吸收器的实验研究 [J]. 太阳能学报, 2012, 33(3): 368—373.
- [8] Lu Yuan, Xu Zhen, Xiao Yunhan. Experimental study on the internally-cooled absorber in open cycle absorption heat pump [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2012, 33(3): 368—373.
- [9] 魏 璠,肖云汉,张士杰.第二类开式吸收式热泵系

- 统设计和性能分析[J]. 太阳能学报, 2013, 34(3): 427—432.
- [9] Wei Fan, Xiao Yunhan, Zhang Shijie. Study on the performance of open cycle absorption heat transformer [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2013, 34(3): 427—432.
- [10] 魏 璠, 肖云汉, 张士杰. 开式吸收式热泵降膜吸收器热质传输研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(5): 591—595.
- [10] Wei Fan, Xiao Yunhan, Zhang Shijie. Analysis of heat and mass transfer of the falling film absorber in the open cycle absorption heat pump[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2009, 30(5): 591—595.
- [11] 邹海魁, 邵 磊, 陈建峰. 超重力技术进展-从实验室到工业化[J]. 化工学报, 2006, 57(8): 1810—1816.
- [11] Zou Haikui, Shao Lei, Chen Jianfeng. Progress of higee technology-from laboratory to commercialization[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2006, 57(8): 1810—1816.
- [12] 桑 乐, 罗 勇, 初广文, 等. 超重力场内气液传质强化研究进展[J]. 化工学报, 2015, 66(1): 14—31.
- [12] Sang Le, Luo Yong, Chu Guangwen, et al. Research progress of gas-liquid mass transfer enhancement in high gravity field [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2015, 66(1): 14—31.
- [13] Ramshaw C, Mallinson R H. Mass transfer process [P]. US: 4283255, 1981-08-11.
- [14] Mujal S, Dudukovic M P, Plaghat Ramachandran. Mass-transfer in rotating packed beds-II. Experimental results and comparison with theory and gravity flow [J]. Chemical Engineering Science, 1989, 44(10): 2257—2268.
- [15] 刘有智. 超重力化工过程与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [15] Liu Youzhi. Chemical process and technology of HiGee [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.

## EXPERIMENTAL STUDY OF HIGH GRAVITY ROTATING PACKED BED ABSORBER IN OPEN CYCLE ABSORPTION HEAT PUMP

Feng Zaibin<sup>1,2</sup>, Lu Yuan<sup>2</sup>, Zhao Lifeng<sup>2</sup>, Xiao Yunhan<sup>2</sup>, Liu Cai<sup>2,3</sup>

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Key Laboratory of Advanced Energy and Power, Institute of Engineering Thermaphysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China)

**Abstract:** Based on the open cycle absorption heat pump technology, which uses solar energy and other renewable energy as driving heat source, for latent heat recovery from flue gas, a high gravity rotating packed bed (HG-RPB) is developed. HG-RPB has excellent micro mixing and transfer enhancement properties, it can signally reduce the size of absorber in open cycle absorption heat pump. The results show that, in certain range, improving liquid to gas ratio, high gravity factor, the inlet solution concentration and reducing the inlet solution temperature can improve the latent heat recovery rate (Water recovery rate). Recommended operating parameters are: solution temperature 40-50 °C, liquid to gas ratio 1.0-1.6, high gravity factor 150-200, solution concentration 49%-51%.

**Keywords:** open cycle absorption heat pump; high gravity rotating packed bed; latent heat recovery; heat and mass transfer