

文章编号:0253 – 4339(2016) 02 – 0046 – 07
doi:10. 3969/j. issn. 0253 – 4339. 2016. 02. 046

机械振动强化吸收式制冷传热传质的实验研究

申 江¹ 邹国文¹ 王建民¹ Josephine Lau² 申子奇² 孙 欢¹

(1 天津商业大学 天津市制冷技术重点实验室 天津 300134;2 内布拉斯加州林肯大学 美国林肯市 68045)

摘 要 本文对机械振动强化吸收式制冷传热传质进行实验研究。搭建了一套综合的性能研究实验台,在吸收式制冷机的底部安装了一个电动振动机,使机组在垂直方向上产生振动,分别对振动频率和振幅两个因素对机组性能强化的效果进行实验分析,得出结论:振幅相同时,振动频率对强化效果的影响较大;而在最佳喷淋量下,频率相同时,振幅太大或太小,振动的强化效果都会下降。且在实验范围内,得到最佳强化效果的频率段为 20 ~ 30 Hz,此时传热的强化效果可达到 8% ~ 20%,传质的强化效果可达到 10% ~ 25%,制冷量可提高 12% ~ 18%。
关键词 吸收式制冷;振动;传热传质;强化
中图分类号:TB61⁺1;TQ051.5 **文献标识码:**A

Experimental Study of Heat and Mass Transfer Enhancement of Absorption Refrigeration by Mechanical Vibration

Shen Jiang¹ Zou Guowen¹ Wang Jianmin¹ Josephine Lau² Shen Ziqi² Sun Huan¹

(1. Refrigeration Key Laboratory of Tianjin, Tianjin University of Commerce, Tianjin, 300134, China;2. University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, 68045, USA)

Abstract Effects of mechanical vibration on the heat and mass transfer process of absorption refrigerating system had been researched in this paper. A performance appraisal test bench was set up, thus an electrodynamics vibration generator was installed on the bottom of the absorption refrigerating machine to add vertical vibration into the system. Enhancement effects of vibration frequencies and amplitude on the heat and mass transfer process of absorption refrigerating machine were analyzed respectively. The results showed that when amplitude was constant, vibration frequencies had a strong effect on enhancement effect; and under the optimum spray volume and same vibration frequency, the enhancement effect of vibration would be reduced with too high or too low vibration amplitude. And in the range of test, frequency ranges for the best enhancement effect was 20 – 30 Hz, in these conditions, the enhancement effect of heat transfer could be 8% – 20%, the enhancement effect of mass transfer could be 10% – 25%, and cooling capacity increased by 12% – 18%.
Keywords absorption refrigeration; vibration; heat and mass transfer; enhancement

溴化锂吸收式制冷机采用热能作为驱动力,能耗低,可以利用低品位热能,因此在余热回收领域有明显的优势^[1]。以溴化锂溶液-水作为工质,无毒、无害、不燃不爆炸、环保性能好,符合国家可持续发展的战略目标^[2]。但是,由于溴化锂吸收式制冷机的效率较低,推广和应用受到限制。由于吸收器内的传热和传质是一个相互影响、相互耦合的复杂过程,所以传热传质的强化一直是国内外研究的热点课题。目前工程实践中强化溴化锂吸收式制冷机吸收器的传热传质的方法主要有降膜吸收、强化传热管以及添加表面活性剂等形式,其中机械振动强化吸收式制冷为降膜吸收的一种形式^[3-7]。

国内外的学者很早就开始了对吸收过程中传热

传质强化的研究。Islam M R 等^[8]对加入新型膜反转机构的吸收器的降膜吸收性能做了研究,证实膜反转吸收器可以极大提高蒸气的吸收率。Ghiaasiaan S M 等^[9]对吸收过程中球形液滴的瞬态传热进行了研究。Meza C E 等^[10]对大振幅波动垂直降膜过程进行了模拟和实验研究。Kang Y T 等^[11]借助氨-水系统的水平管降膜吸收器,提出了应用马兰格尼对流来强化氨水吸收过程中的换热。Cheng L 等^[12]对流体诱导换热器振动加强换热进行了研究,发现低流速的脉动流诱导换热器产生振动,可以显著地增强换热。Merrill T L 等^[13]研究发现通过增加单位体积的蒸气和液体的接触面积,在气-液接触的界面处,使更多的气体变成小气泡,利于被液体吸收。孙欢^[14]

进行了传热传质分离的绝热吸收研究,从热质分离的角度研究发现,绝热吸收的确提高了整个吸收过程的吸收效率。刘艳丽^[15]针对渔船上的吸收式制冷机的吸收过程,对摇摆状态下的吸收式制冷机的降膜吸收过程进行了实验研究。结果表明,通过附加机械装置使吸收器中的换热管束震动、旋转或摇动,使管束上的溶液液膜变薄,减小了传质阻力,强化了传热传质。

在化工领域的相关研究较多,如 Ellenberger J 等^[16]通过实验发现,当吸收模型产生微振时,溶液对

气体的吸收系数提高约 400%。但是在制冷空调领域,对此课题的研究还很少。

1 实验装置与方法

1.1 实验装置的介绍

实验台系统循环示意图如图 1 所示,主要包括一台单效溴化锂吸收式制冷机组、电动振动台系统、恒温水循环系统、实验数据测量采集系统以及一些辅助设备。

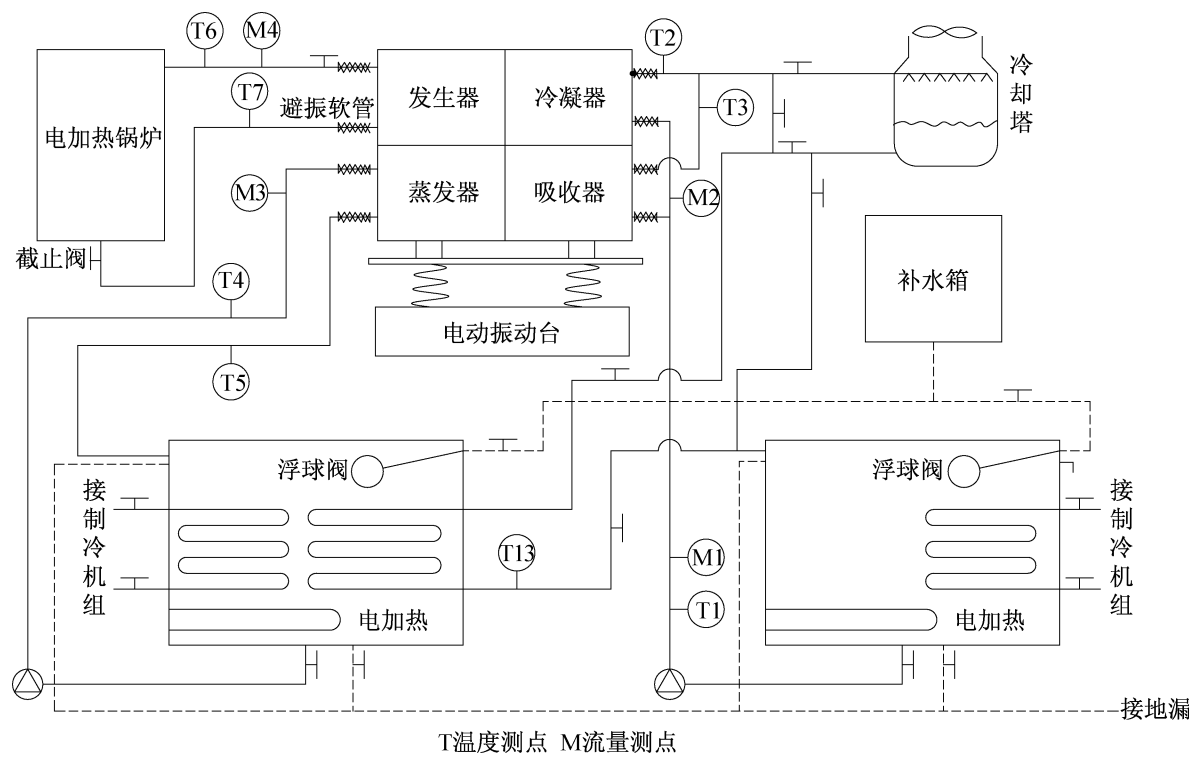


图 1 系统循环示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the cycle system

如图 1 所示,溴化锂吸收式冷水机组需要的水由电加热锅炉提供,提供 95 ~ 100 ℃ 的恒温热水。冷媒水箱和冷却水箱内都装有电加热器,外接有制冷机组,同时冷媒水箱内还接了一路冷却水旁通,既可为冷却水降温,也可为冷媒水提供热量,通过这几种方式可以使冷媒水和冷却水的入口温度保持恒定。夏季做实验时,由于热负荷较大,可以开启冷却塔,辅助制冷机组为冷却水降温。其中,冷却塔、冷水机组以及冷却水旁通都采用并联连接,可根据不同季节不同负荷进行灵活切换、调节。恒温水循环系统与溴化锂吸收式制冷机组的连接均采用避震软管,尽量减小机组在振动过程中管路对其产生的横向作用力。

本装置振动台体能够提供垂直方向对溴冷机组进行振动,并对其振动频率及振幅进行调节设定。

本实验需要测量的参数主要有:冷媒水、冷却水、热水的温度和流量,溶液的温度、流量以及浓度,吸收器内部的压力等。水回路的测点布置情况如图 1 所示,溶液回路的测点布置情况如图 2 所示。

1.2 实验方法

当溶液喷淋量为 0.3 m³/h 时,实验测试不同振动频率与不同振幅分别对制冷效果的影响。开机之前,先开启真空泵对机组抽真空,待真空度达到实验要求之后开启电加热锅炉,为机组提供热水。机组开机启动后,调节锅炉、电加热器、制冷机组以及各个阀门等,使冷却水、热水以及冷媒水入口温度以及流量达到实验设定值,开始记录数据,系统至少稳定运行 1 h 后,启动电动振动台,开始振动实验,并记录振动过程中的数据变化。每个振动工况至少持续 1 h,振

动停止后,待系统恢复到原来的状态,稳定运行 1 h,再进行下一个振动工况的实验。

实验过程中保证运行条件下各参数不变,只改变振动频率或振幅,记录相应的参数改变量,并保证实验的可重复性。

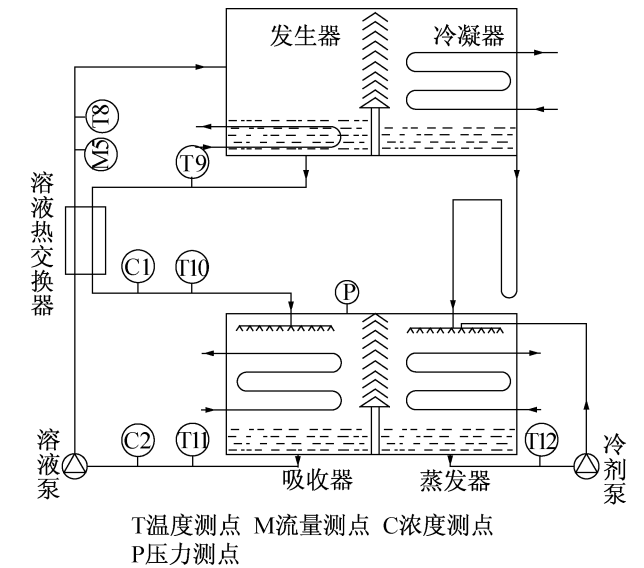


图 2 溶液回路测点布置示意图

Fig. 2 The schematic diagram of the solution circuit set-up with measurement station numbered

2 实验数据处理

2.1 吸收器内总传热系数的确定

对数传热温差 $\Delta T_{\ln}$ 通过溶液进出口温度以及冷却水进出口温度计算:

$$\Delta T_{\ln} = \frac{(T_{s,\text{in}} - T_{w,\text{out}}) - (T_{s,\text{out}} - T_{w,\text{in}})}{\ln((T_{s,\text{in}} - T_{w,\text{out}})/(T_{s,\text{out}} - T_{w,\text{in}}))} \quad (1)$$

吸收器内降膜吸收过程总的传热系数为:

$$K = \frac{Q_a}{F \Delta T_{\ln}} \quad (2)$$

传热强化比用公式(3)计算:

$$\Delta Q = \frac{Q_{a,v} - Q_{a,j}}{Q_{a,j}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $T_{w,\text{out}}$ 为冷却水的出口温度,℃; $T_{w,\text{in}}$ 为冷却水的入口温度,℃; $T_{s,\text{in}}$ 为吸收器内溶液入口温度,℃; $T_{s,\text{out}}$ 为吸收器内溶液出口温度,℃; $Q_{a,v}$ 为振动情况下的传热量,W; $Q_{a,j}$ 为静止状态下的传热量,W。

2.2 吸收器内总传质量的确定

吸收器内溴化锂溶质进出口质量守恒方程为:

$$\dot{m}_{s,\text{out}} \xi_{s,\text{out}} = (\dot{m}_{s,\text{in}} + \dot{m}_v) \xi_{s,\text{out}} = \dot{m}_{s,\text{in}} \xi_{s,\text{in}} \quad (4)$$

将上式变形可以得到吸收的制冷剂蒸气的质量

流量 $\dot{m}_v$ (kg/h) 计算式:

$$\dot{m}_v = \frac{\dot{m}_{s,\text{in}} (\xi_{s,\text{in}} - \xi_{s,\text{out}})}{\xi_{s,\text{out}}} \quad (5)$$

传质的强化比用公式(6)计算:

$$\Delta \dot{m}_v = \frac{\dot{m}_{v,v} - \dot{m}_{v,j}}{\dot{m}_{v,j}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $\dot{m}_{s,\text{in}}$ 为浓溶液进入吸收器时的质量流量,kg/h; $\dot{m}_{s,\text{out}}$ 为稀溶液流出吸收器时的质量流量,kg/h; $\xi_{s,\text{in}}$ 为吸收器入口浓溶液浓度,% ; $\xi_{s,\text{out}}$ 为吸收器出口稀溶液浓度,% ; $\dot{m}_{v,v}$ 为振动情况下的传质量,kg/h; $\dot{m}_{v,j}$ 为静态下的传质量,kg/h。

3 实验结果与分析

在之前的实验中发现,15 Hz 以下的振动工况基本没有强化效果或效果不明显,而 15 ~ 30 Hz 的频率段内的强化效果比较明显。由于实验台本身的极限性,在超出 30 Hz 频率段实验台共振较厉害,故没有对其进行实验,包括频率在 30 Hz,振幅为 0.4 mm 这组工况也没能进行实验。

3.1 不同频率下振幅对强化效果的影响

图 3 ~ 图 6 分别给出了溶液流量值控制在 0.3 m³/h 下,频率为 15 Hz、20 Hz、25 Hz、30 Hz 时振幅对机组性能的影响。

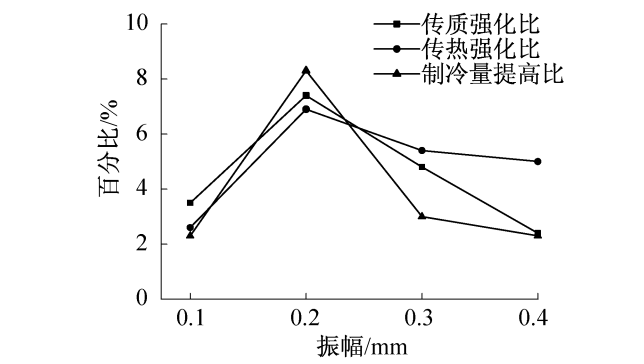


图 3 频率为 15 Hz 时强化效果随振幅的变化情况

Fig. 3 The variation of the strengthening effect with amplitude when the frequency is 15 Hz

由图 3 可知,传热传质强化比以及制冷量提高比,这三者的最大值均出现在振幅为 0.2 mm 时,0.2 mm 之后随着振幅的增加传热强化比、传质强化比以及制冷量提高比都开始降低。所以,在 15 Hz 频率下、振幅为 0.2 mm 时,振动对于机组性能的提高作用最佳,且三者的协同程度较好。

由图 4 可知,传热传质强化比以及制冷量提高比这三者的最大值也出现在振幅为 0.2 mm 时,但此时三者的协同程度不是很好,振幅从 0.1 mm 增加到

0.2 mm 时传质强化比和制冷量提高比的增加很明显,而传热强化比增加不大;0.2 mm 之后随着振幅的增加传热强化比、传质强化比以及制冷量提高比都开始降低。所以,在 20 Hz 频率下、振幅为 0.2 mm 时,振动对于机组性能的提高作用最佳,但是振幅为 0.3 mm 时三者的协同程度最好。

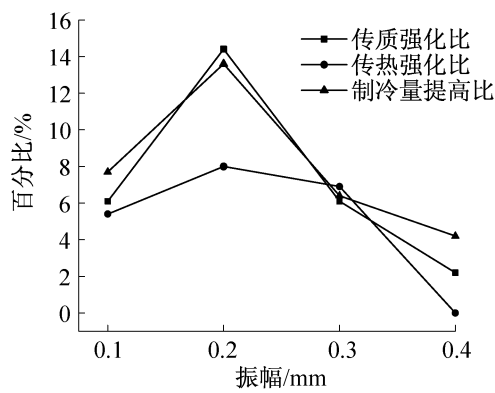


图 4 频率为 20 Hz 时强化效果随振幅的变化情况
Fig. 4 The variation of the strengthening effect with amplitude when the frequency is 20 Hz

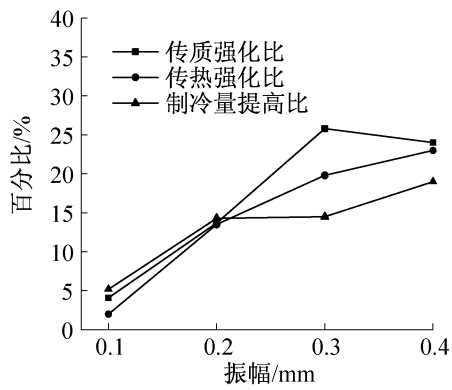


图 5 频率为 25 Hz 时强化效果随振幅的变化情况
Fig. 5 The variation of the strengthening effect with amplitude when the frequency is 25 Hz

在图 5 中,从总体上来看,本实验的振幅范围内,传热强化比、传质强化比以及制冷量提高比三者均随着振幅的增加而增加,变化趋势基本相同。但是当振幅从 0.3 mm 增加到 0.4 mm 时,传质强化比稍有下降,分析原因可能是测量仪器本身存在测量误差。从图上还可以看出当振幅为 0.2 mm 时,三者的值基本相同,协同程度很好。

由图 6 可知,在 30 Hz 频率下,传热强化比以及传质强化比的最大值均出现在振幅为 0.2 mm 时,0.2 mm 之后随着振幅的增加均有所降低,但是变化比较平缓,而制冷量提高比则随着振幅的增加一直增加;0.2 mm 之后与传热传质强化比和制冷量提高比

的变化趋势相反。分析产生这种现象的原因可能是:当振幅从 0.2 mm 增加到 0.3 mm 时,虽然振动对于吸收器传热传质的强化作用变弱,但振动对于蒸发器的蒸发吸热过程的强化作用变强,而制冷量是蒸发器蒸发效果最直接的体现,所以会出现上述现象。

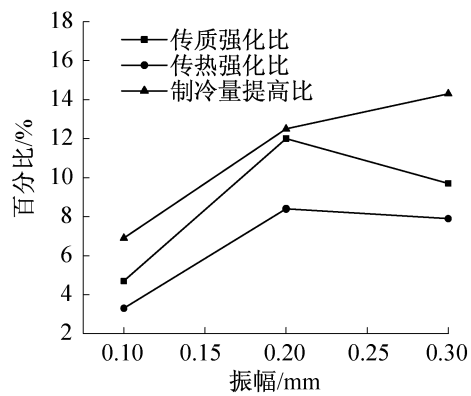


图 6 频率为 30 Hz 时强化效果随振幅的变化情况
Fig. 6 The variation of the strengthening effect with amplitude when the frequency is 30 Hz

3.2 不同振幅下频率对强化效果的影响

图 7 ~ 图 10 分别给出了振幅为 0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm、0.4 mm 时频率对强化效果的影响情况。

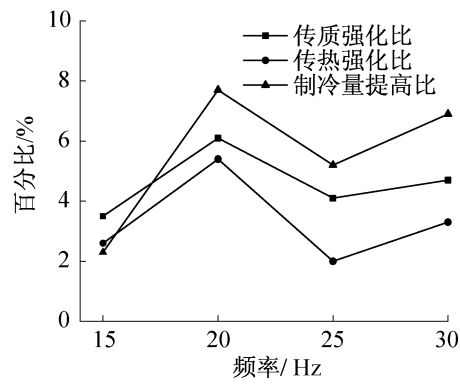


图 7 振幅为 0.1 mm 时强化效果随频率的变化情况
Fig. 7 The variation of the strengthening effect with frequency when the amplitude is 0.1 mm

由图 7 可知,传热、传质强化比以及制冷量提高比这三者的最大值也出现在频率为 20 Hz 时,当频率增加到 25 Hz 时,这三者均开始下降,但是当频率继续增加到 30 Hz 时,这三者的值又开始增加。所以,从总体来看,当振幅为 0.1 mm 时,传热、传质强化比以及制冷量提高比这三者随频率的变化没有明确的趋势,而且这三者在各个频率点的协同性也不是很好,很难说哪个频率点的振动强化效果最好。但振幅为 0.1 mm 时,传热、传质强化比以及制冷量提高比这三者的变化趋势,基本上是一致的。

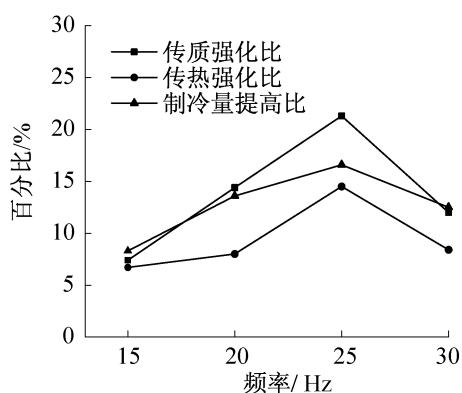


图8 振幅为0.2 mm时强化效果随频率的变化情况
Fig.8 The variation of the strengthening effect with frequency when the amplitude is 0.2 mm

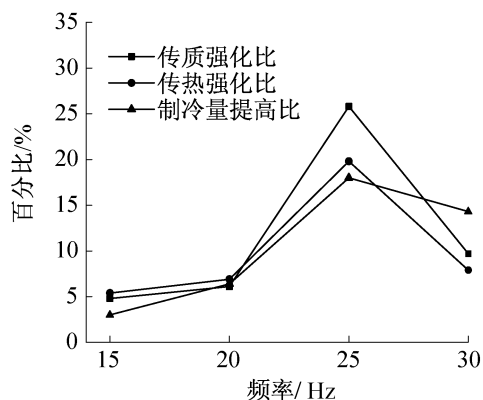


图9 振幅为0.3 mm强化效果随频率的变化情况
Fig.9 The variation of the strengthening effect with frequency when the amplitude is 0.3 mm

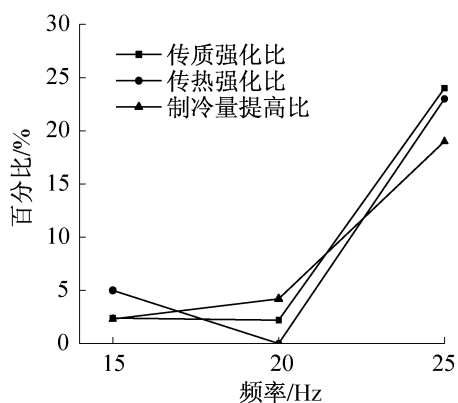


图10 振幅为0.4 mm强化效果随频率的变化情况
Fig.10 The variation of the strengthening effect with frequency when the amplitude is 0.4 mm

由图8可知,在25 Hz之前,传热强化比、传质强化比以及制冷量提高比均随着频率的增加而增加,在25 Hz时达到最大值,25 Hz之后,频率继续增加时这三者均开始下降。且当振幅为0.2 mm时传质的强

化效果比较明显。振幅为0.2 mm、频率为25 Hz时,振动对机组性能的强化效果最好,但此时传热、传质强化比及制冷量提高比三者的协同性并不是很好。

由图9可知,振幅为0.3 mm时,传热、传质强化比以及制冷量提高比三者的变化趋势与0.2 mm时相同。在25 Hz之前,三者均随着频率的增加而增加,25 Hz时达到最大值,25 Hz之后,频率继续增加时这三者均开始下降。当振幅为0.3 mm、频率为25 Hz时,振动对机组性能的强化效果最好。但振幅为0.3 mm、频率为20 Hz的振动工况下,传热、传质强化比以及制冷量提高比三者的协同性很好。

由图10可知,当频率从15 Hz增加到20 Hz时,传质强化比和制冷量提高比的变化幅度很小,而传热强化比减小为零;当频率增加到25 Hz时,传热、传质强化比以及制冷量提高比三者的增加幅度很大。所以当振幅为0.4 mm时,同样也是频率为25 Hz的振动工况,对机组性能的强化效果最好。

3.3 不同频率和振幅时强化效果的变化情况对比

图11~图13分别给出了传热强化比、传质强化比以及制冷量提高比随频率和振幅的变化情况。

由图11可知,振幅为0.1 mm时,传质强化比随频率的变化不明显,比较平稳;振幅为0.2 mm和0.3 mm时传质强化比的变化趋势相同,25 Hz之前随着频率的增加而增加,25 Hz时达到最大值,之后开始下降。从图中还可以看出,25 Hz时传质强化比在不同的振幅下变化比较显著。

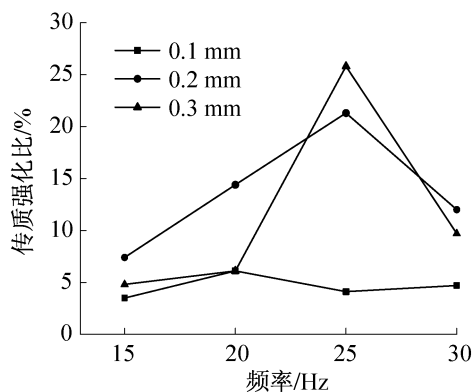


图11 传质强化比在不同振动工况下的变化情况
Fig.11 The variation of the mass transfer enhancement under different vibration condition

由图12可知,传热强化比随频率和振幅的变化趋势与传质强化比基本相同。即振幅为0.1 mm时,传热强化比随频率的增加波动比较小,比较平稳;振幅为0.2 mm和0.3 mm时传热强化比的变化趋势相

同, 25 Hz 之前随着频率的增加而增加, 25 Hz 时达到最大值, 25 Hz 之后开始下降。此外, 传热强化比也是在 25 Hz 时随振幅的变化比较显著, 在其他频率时随振幅的变化不大。

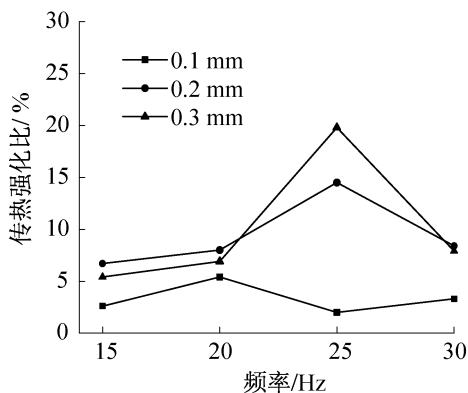


图 12 传热强化比在不同振动工况下的变化情况

Fig. 12 The variation of the heat transfer enhancement under different vibration condition

由图 13 可知, 制冷量提高比随频率和振幅的变化趋势与传热强化比以及传质强化比基本相同。即振幅为 0.1 mm 时, 制冷量提高比随频率的增加波动比较小, 比较平稳, 没有明显的变化趋势; 振幅为 0.2 mm 和 0.3 mm 时, 制冷量提高比的变化趋势基本相同, 25 Hz 之前随着频率的增加而增加, 25 Hz 时达到最大值, 之后开始下降; 但是振幅为 0.2 mm 时, 曲线的变化趋势比较平缓, 而振幅为 0.3 mm 时, 曲线的变化趋势比较显著。此外, 制冷量提高比也是在 25 Hz 时随振幅的变化比较显著。

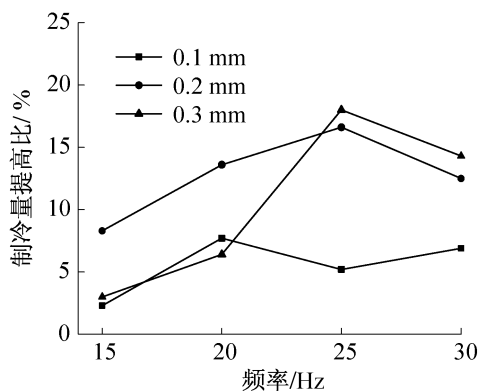


图 13 制冷量提高比在不同振动工况下的变化情况

Fig. 13 The variation of the cooling capacity enhancement under different vibration condition

4 结论

本文研究了机械振动对吸收式制冷传热传质的强化作用, 得出振动台的振幅以及频率对吸收器内的

传热传质影响。通过分析实验数据, 得到以下结论:

1) 振幅相同时, 振动频率对强化效果的影响较大; 频率相同时, 振幅太大或太小, 振动的强化效果都会下降, 而当振幅与液膜厚度比较接近时振动对机组性能的强化效果最好。而且当频率为 20 Hz 和 25 Hz, 且振幅与液膜厚度比较接近时, 传热强化比、传质强化比以及制冷量提高比这三者的协同性较好, 说明在这样的振动工况下机组的运行状态最好, 强化效果最佳。

2) 在本文的实验范围内, 频率为 20 ~ 30 Hz 的频率段为强化效果最好的频率段, 在这个频率段内, 传热的强化效果可达到 8% ~ 20%, 传质的强化效果可达到 10% ~ 25%, 制冷量可提高 12% ~ 18%, 在本文的实验过程中, 由于热源的加热量保持不变, 所以制冷量的提高比也即性能系数 COP 的提高比。

本文受美国 ASHRAE 基金 (1462-RP) 项目资助。(The project was supported by the ASHRAE Foundation of the United States of America (No. 1462-RP).)

参考文献

- [1] 张琴. 溴化锂吸收式制冷机蒸发器与吸收器强化传热传质的研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [2] 蒋桂忠, 郭韵, 蔡祖恢, 等. 溴化锂水溶液降膜吸收强化技术的实验研究[J]. 上海理工大学学报, 2002, 24(1): 1-7. (JIANG Guizhong, GUO Yun, CAI Zuhui, et al. Experimental investigation on enhancing technology of falling film absorption for LiBr aqueous solution[J]. University of Shanghai for Science and Technology, 2002, 24(1): 1-7.)
- [3] 戴永庆, 耿惠彬. 略论近期溴化锂吸收式制冷机的发展[J]. 制冷技术, 2007, 27(1): 29-31. (DAI Yongqing, GENG Huibin. Recent development of lithium bromide absorpt chillers[J]. Refrigeration Technology, 2007, 27(1): 29-31.)
- [4] Herold K E, Radermacher L. Absorption heat pump[J]. Mechanical Engineering, 1989, 3(8): 68-73.
- [5] 苏树强, 申江, 邹同华. 直燃式溴化锂吸收式制冷机的发展[J]. 天津商学院学报, 2000, 20(6): 11-17. (SU Shuqiang, SHEN Jiang, ZOU Tonghua. Development of the direct-fired lithium bromide absorption refrigeration machine[J]. Journal of Tianjin University of Commerce, 2000, 20(6): 11-17.)
- [6] 董斌. 机械振动对于吸收式制冷性能强化的实验研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2014.
- [7] 王建民. 机械振动强化吸收式制冷传热传质的实验研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2015.
- [8] Islam M R, Wijeyesundera N E, Ho J C. Performance study

- of a falling-film absorber with a film-inverting configuration [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2003, 26(8): 909-917.
- [9] Ghiaasiaan S M, Eghbali D A. Transient mass transfer of a trace species in an evaporating spherical droplet with internal circulation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1994, 37(15): 2287-2295.
- [10] Meza C E, Balakotaiah V. Modeling and experimental studies of large amplitude waves on vertically falling films [J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, 63(19): 4704-4734.
- [11] Kang Y T, Kashiwagi T. Heat transfer enhancement by Marangoni convection in the $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ absorption process[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2002, 25(6): 780-788.
- [12] Cheng L, Luan T, Du W, et al. Heat transfer enhancement by flow-induced vibration in heat exchangers[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2009, 52(3/4): 1053-1057.
- [13] Merrill T L, Perez-Blanco H. Combined heat and mass transfer during bubble absorption in binary solutions[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, 40(3): 589-603.
- [14] 孙欢. 传热传质分离的蒸汽-溴化锂水溶液吸收机理研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2007.
- [15] 刘艳丽. 摇摆状态下降膜吸收过程中动量、热量和质量传递规律研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
- [16] Ellenberger J, Krishna R. Improving mass transfer in gas-liquid dispersions by vibration excitement[J]. *Chemical Engineering Science*, 2002, 57(22): 4809-4815.

通信作者简介

邹国文, 男, 硕士研究生, 天津商业大学机械工程学院, 15222897139, E-mail: zou881118@163.com。研究方向: 制冷系统优化及节能技术。

About the corresponding author

Zou Guowen, male, master candidate, Mechanical Engineering school, Tianjin University of Commerce, +86 15222897139, E-mail: zou881118@163.com. Research fields: optimization and conservation technology of refrigeration system.