

文章编号:0253-4339(2020)05-0058-08
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2020.05.058

多管气泡泵液体输送性能可视化实验

张 柯 刘道平 杨 亮 李伟杰

(上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093)

摘 要 气泡泵提升管内气液两相流动特性直接影响工质提升性能。本文借助高速摄像机观察了不同加热功率(400、600、800、1 000、1 200、1 400 W)下多管气泡泵中液体提升过程,并与单管气泡泵液体提升过程进行了对比。研究结果表明:对于多管气泡泵,液体提升总量与液体提升速率随加热功率的增大而提高,与加热功率为 1 200 W 时相比,当加热功率为 1 400 W 时,气泡泵液体提升总量提高了 15.16 kg,液体提升速率提高了 5.08 g/s;多管气泡泵中心位置提升管气泡数量较多,提升效果最好。对于单管气泡泵,当加热功率为 400 W 时,提升管数量的增加不能提高气泡泵液体提升性能;当加热功率为 600~800 W 时,多管与单管的气泡泵液体提升性能相差较小;当加热功率为 1 000~1 400 W 时,多管气泡泵的液体提升总量、最大提升速率和泵效率均比单管相应性能显著提高。

关键词 单压吸收式制冷;气泡泵;气液两相流;可视化实验;提升管

中图分类号:TB61⁺6;TB657.5

文献标识码:A

Visualization of Liquid Lifting Process of Multiple Tube Bubble Pump

Zhang Ke Liu Daoping Yang Liang Li Weijie

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract The gas-liquid two-phase flow characteristics in the riser of the bubble pump directly affects its working substance lifting performance. A high-speed camera system was set-up to visualize the lifting process of multiple tube bubble pump under different heating power values (400, 600, 800, 1000, 1 200, 1 400 W), and the liquid lifting process of the multiple tube bubble pump was compared with that of the single-tube bubble pump. The research results indicated that multiple tube bubble pumps exhibit an increase in total lifting capacity and liquid lifting rate as heating power increases. When the heating power was 1 400 W, the total lifting capacity increased by 15.16 kg and liquid lifting rate increased by 5.08 g/s when compared to that under a heating power of 1 200 W. The lifting effect was optimal when the number of bubbles in the lifting tube at the center of the multi-tube bubble pump was higher. With respect to single-tube bubble pumps, when the heating power was 400 W, the increase in the number of riser tubes could not improve the liquid lifting performance of the bubble pump when compared with that of multiple tube bubble pumps. When the heating power was 400 W, the increase in the number of riser tubes could not improve the liquid lifting performance of the bubble pump. Furthermore, when the heating power was 600~800 W, the single-tube bubble pump liquid lifting performance was approximately similar to that of multiple tube bubble pump. When the heating power was 1 000~1 400 W, the total lifting capacity, maximum lifting rate, and pump efficiency of the multiple tube bubble pump were significantly improved when compared with the corresponding performance of a single-tube bubble pump.

Keywords single-pressure absorption refrigeration; bubble pump; gas-liquid two-phase flow; visualization experiment; riser

气泡泵工作原理即利用液体沸腾时产生的气泡来提升液体,替代了溶液泵以驱动单压吸收式制冷系统的循环^[1]。区别于传统的溶液泵,气泡泵结构没有任何运动部件,因而正常工作时噪声小,防腐蚀能力强,易损部件少。吸收式制冷技术在能源节约和环境保护等方面有着诸多优势,而在 Einstein 制冷系统

中气泡泵占重要位置。

气泡泵是整个单压吸收式制冷系统的动力装置,气泡泵提升性能直接影响制冷系统性能。M. Pfaff 等^[2]提出的扩散-吸收式制冷系统中气泡泵是驱动系统循环运行的关键部件,通过提高气泡泵的能源利用率和改善气泡泵液体的输送能力,均可以提高系统制

基金项目:国家自然科学基金(51606125)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51606125).)

收稿日期:2019-12-23;修回日期:2020-04-14

冷量并提升系统性能。薛久明等^[3]基于改进的 Einstein 制冷循环系统,对气泡泵及制冷系统进行理论建模,得到不同压力下气泡泵的最大提升效率。A. Zohar 等^[4]基于对该实验装置的数值模拟研究,改变了发生器和气泡泵的结构,并针对不同结构形式的发生器和气泡泵对扩散-吸收式制冷系统性能进行了进一步的模拟研究。陈永军等^[5-7]和 An Lihuan 等^[8]研究了变截面气泡泵提升性能,前者认为变截面使流体阻力增大,从而抵消了变截面带来的优势,后者研究了浸没比和加热功率对提升性能的影响。汤成伟等^[9-11]在气液两相流压降理论的基础上,得到在提升效率相同的情况下,加热功率、气泡泵沉浸比及竖直提升管内径的关系曲线。崔抗^[12]则在前人的基础上对该套循环系统进行实验研究,通过建立理论数学模型和实验研究,分析不同管径、流型变化、加热功率、工质充注浓度和充氢压力等因素对气泡泵提升性能和效率的影响。

气泡泵的连续提升性能对系统运行影响很大。A. Koyfman 等^[13]实现气泡泵可连续运行,研究发现气泡泵性能主要由输入功率和动力压头决定。李帅等^[14]研究了管径与加热功率对单管导流式气泡泵连续提升性能的影响。G. Vicatos 等^[15]提出多管式气泡泵,并针对提升管数量进行研究。徐煌栋等^[16]研究了管径、沉浸比及管数对多管导流式气泡泵提升性能的影响。辛岩等^[17]以饱和水为工质,建立了多管式气泡泵工作的理论模型,重点分析了提升管数量对气泡泵液体提升量和提升效率的影响。朱发明等^[18]改变提升管数量,对比研究了普通多管导流型气泡泵及均流式多管导流型气泡泵的提升性能。

本文以水为工质进行气泡泵提升性能可视化实验,研究不同加热功率下多管气泡泵中液体提升过程,并与单管气泡泵液体提升过程进行了对比,同时观察竖直提升管中两相流流型变化,可为后续气泡泵的深入分析提供参考。

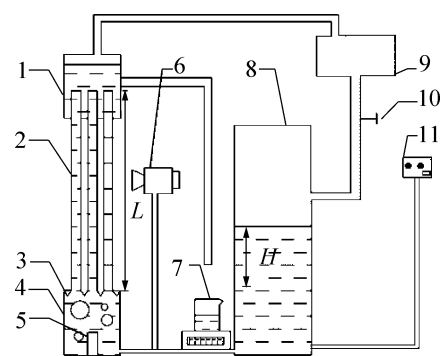
1 实验部分

1.1 实验装置

实验中提升管数 $N=3$,提升管长度 $L=600$ mm,直径为 12 mm,加热功率分别选取 400、600、800、1 000、1 200和 1 400 W,沉浸比选取 0.4。安装好提升管后,向系统中加入热水使其达到实验需要的沉浸比,通过电控箱控制实验所需工况,以便调节不同的加热功率;然后用秒表计时并拍摄照片;数据的记录从气泡泵提升时开始,每隔 10 s 记录一次,时间持续

25 min。

气泡泵实验装置如图 1 所示,主要包括气泡发生器、多管导流器、竖直提升管、气液分离器、储液器电加热装置及称量装置。实验还安装了高速摄像仪,以实现可视化。实验需要记录的参数有:气泡泵的液体提升总量、气泡泵的工作时间、竖直提升管中的两相流流型及电加热功率。高速摄像仪的图像采集间隔时间为 1/60 s。称量装置为电子天平和量杯,电子天平的量程为 0~1 000 g,精度为 0.01 g,量杯容量为 1 000 mL。电功率控制箱调节范围为 0~2 500 W,调节精度为 ± 1 W。



1 气液分离器;2 竖直提升管;3 多管导流器;4 气泡发生器;5 电加热装置;6 高速摄像仪;7 称量装置;8 储液器;9 补液箱;10 阀门;11 液位调节器。

图 1 气泡泵实验装置

Fig.1 Bubble pump experimental device

1.2 气泡泵性能评价指标

1) 液体提升量

气泡泵工作时间内所提升的液体总质量。

2) 液体提升速率

由于气泡泵的工作过程存在不稳定性和不连续性,且竖直提升管中的两相流流型也在不断的变化,因此以两相流为最佳弹状流型时的单位时间液体提升质量为评价指标。

3) 泵效率

$$\eta = \frac{P_{bp}}{P} = \frac{m_l g h}{P} \quad (1)$$

4) 液相体积流量

单位时间内通过流道的液相体积。

$$Q_m = \frac{m_l}{\rho_l} \quad (2)$$

5) 两相流流速

通过拍摄的方法得到竖直提升管气泡流动轨迹图,如图 2 所示。通过图 2 可以得到:

$$\frac{D}{L_1} = \frac{S}{L_2} \quad (3)$$

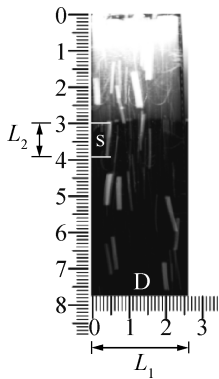


图 2 竖直提升管气泡流动轨迹

Fig.2 Bubble trajectory of vertical riser

$$v = \frac{S}{t} \tag{4}$$

6) 气相体积流量

$$Q_v = \frac{m_v}{\rho_v} \tag{5}$$

可通过提升管中液体体积流量与两相流流速,计算出实际工作状态下提升管中气相体积流量。

$$Q_v = vA - Q_m = vA - \frac{m_l}{\rho_l} \tag{6}$$

2 实验结果和分析

2.1 多管气泡泵性能的分析

不同加热功率下气泡泵液体提升总量和提升速率随时间的变化如图 3 所示。由图 3(a)可知,多管气泡泵液体提升总量随加热功率的增大而提高;加热功率为 1 200 W 时,液体提升总量为 16.31 kg,相比于加热功率为 1 000 W 时提高 4.21 kg;加热功率增至 1 400 W 后,相比于加热功率为 1 200 W 时提高 15.16 kg,液体提升总量提升更显著。由图 3(b)可知,多管气泡泵液体提升速率随加热功率的增大而增大,在低加热功率 600、800 W 时,液体提升速率最终约为 4.81、8.06 g/s;加热功率增至 1 200 W 和 1 400 W 后,液体提升速率提高至约 21.57、26.65 g/s。在低加热功率时,液体提升速率随气泡泵工作时间的延长缓慢上升,且上升时波动较为明显;加热工率增至 1 200 W 后,液体提升速率随时间的延长稳定上升,且上升过程中波动性较小;当加热功率增至 1 400 W 后,各时刻下液体提升速率均显著提高,但随气泡泵工作时间的延长其上升趋势逐渐平缓。

2.2 多管气泡泵不同位置提升管的分析

分别对 3 根提升管进行编号,得到不同加热功率下每根管中两相流流速随时间的变化,如图 4 所示。将中间的提升管编号设为 2 号管,靠近高速摄像仪的

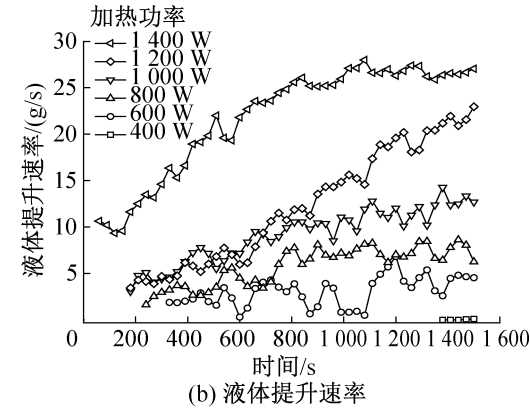
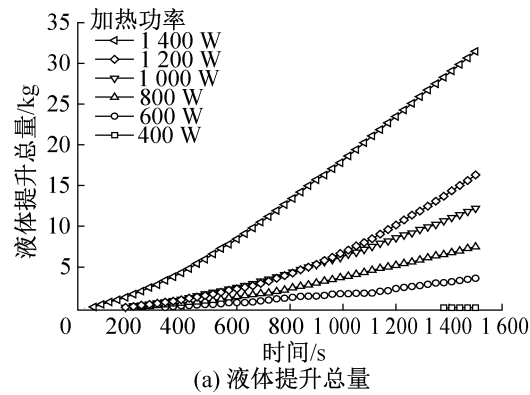


图 3 不同加热功率时气泡泵液体提升总量和提升速率随时间的变化

Fig.3 The total lifting capacity and lifting rate of the bubble pump with time under the different heating power

提升管编号设为 3 号管,远离高速摄像仪的提升管编号设为 1 号管。由图 4 可知,气泡泵提升过程中,各竖直提升管的提升性能均不同,中间 2 号管的提升效果优于两侧 1 号管和 3 号管,而 1 号管与 3 号管的提升效果则类似。在低加热功率 400 W 下,仅有 2 号管实现了提升效果,当加热功率增至 600 W 时,1 号管与 3 号管逐渐开始工作,但提升起始时间均比 2 号管晚,2 号管在气泡泵加热 300 s 后便实现了提升效果,而 1 号管与 3 号管分别在 870 s 和 690 s 后才开始提升,随着加热功率的增大,起始提升时间差逐渐缩短,且在加热功率为 1 400 W 时,3 根管几乎实现同时提升。导致多管提升状态下各管提升性能不一的主要原因可能在于气泡泵内所产生的气泡分配不均匀。

图 5 所示为气泡泵气相体积流量随时间的变化。 $N=3$ 时,在低加热功率下,气泡泵气相体积流量随着时间的增加而增大,且上升趋势逐渐趋于平缓,随着加热功率的增大,气相体积流量随着时间的增加而持续增大。低加热功率时,气泡泵产生的气泡量较少,管数的增加导致原本集中产生提升效果的气泡被分散开,降低了其提升性能;高加热功率时,气泡泵中产生

的气泡数量较多,分散开的气泡分别进入 3 根提升管后仍可实现提升效果,此时提升管数量的增加给气泡提供了更好的发展空间,因此气相体积流量逐步上升,气泡泵提升性能较好,但由于加热功率一定,气泡泵必然存在一个最大的气相体积流量。

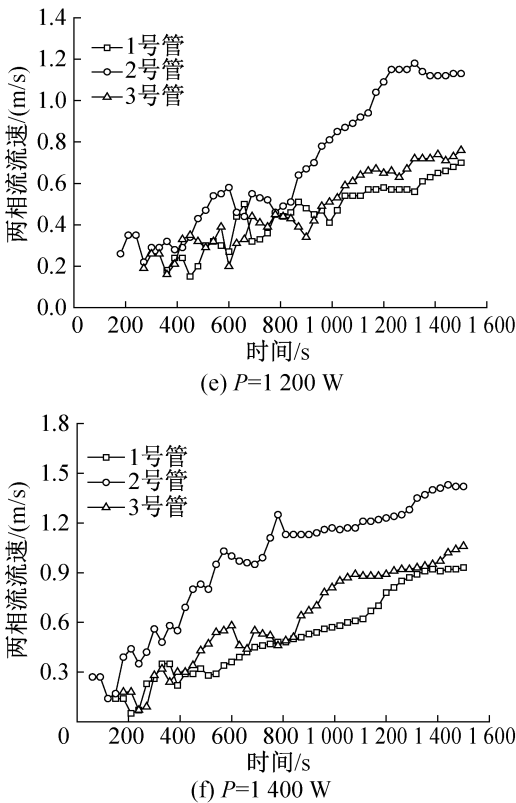
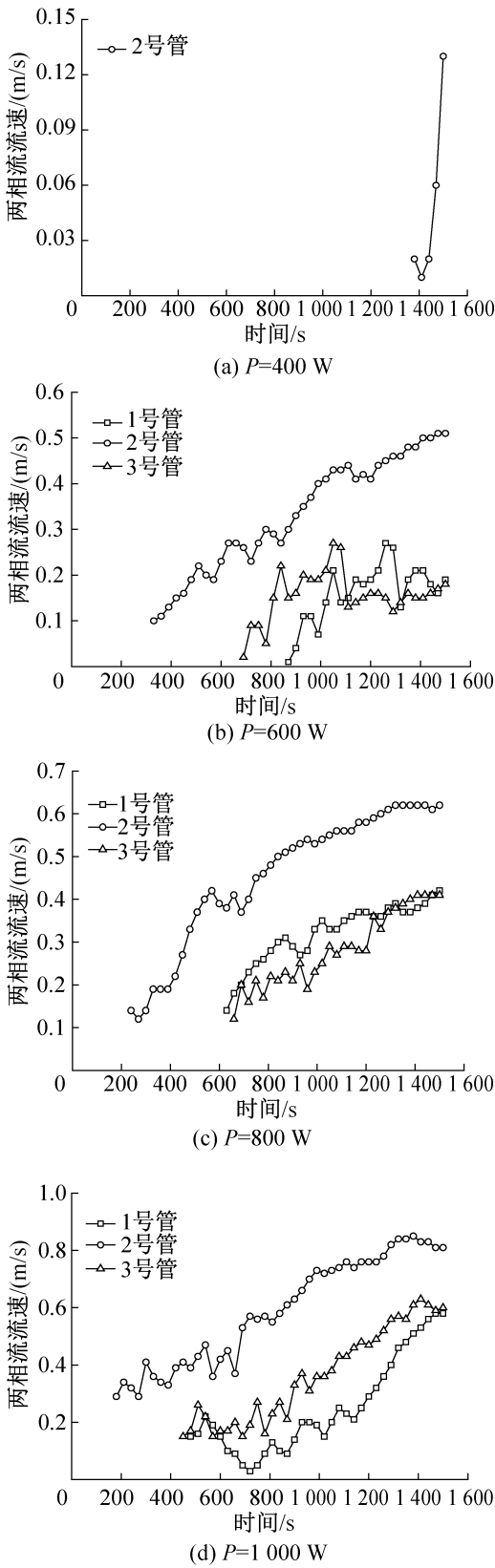


图 4 不同加热功率时每根管中两相流流速随时间的变化
Fig.4 Variability of two-phase flow velocity with time under the different heating power in each tube

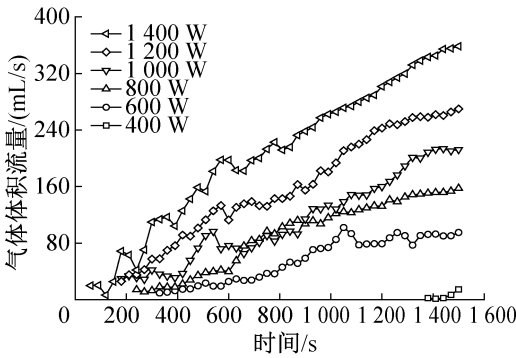


图 5 不同加热功率时气泡泵气相体积流量随时间的变化
Fig.5 Vapor volume flow of the bubble pump with time under the different heating power

在实际过程中,很难实现气泡均匀分配,因此各提升管中会产生不同的流型,通过高速摄像机可以实现流型变化的可视化,如图 6 所示。 $N=3$ 时,气泡分配不均匀现象明显,在低加热功率 400 W 时,加热阶段初期仅在 2 号管中有较大气泡,而两侧 1 号管与 3 号管均没有明显气泡流过。随着加热时间的增加,当 2 号管中已有弹状流形成时,1 号管和 3 号管才开始有明显气泡出现,当加热功率为 1000 W 时,提升管内弹状流并未转换为块状流,3 根提升管均处于弹状

流提升状态。在假定气泡泵气泡分配均匀的情况下,当加热功率达到 1 200 W 和 1 400 W 时,各提升管内应依旧处于弹状流提升状态,但由图 6(e)和图 6(f)可知,由于气泡分配不均匀且 2 号管流过的气泡数量较为集中,在加热功率为 1 200 W 和 1 400 W 时,管内两相流流型均发生了转变,且在加热功率为 1 400 W 时,有两根管内的流型均转变成了块状流。

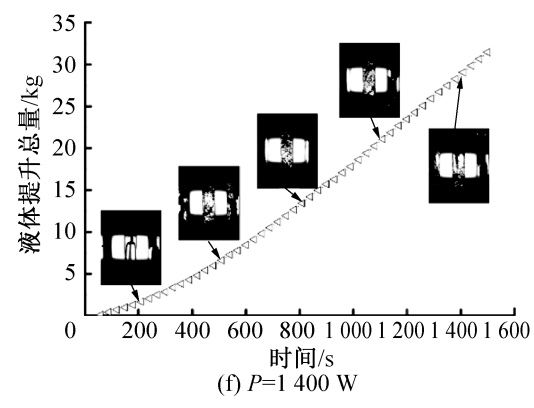
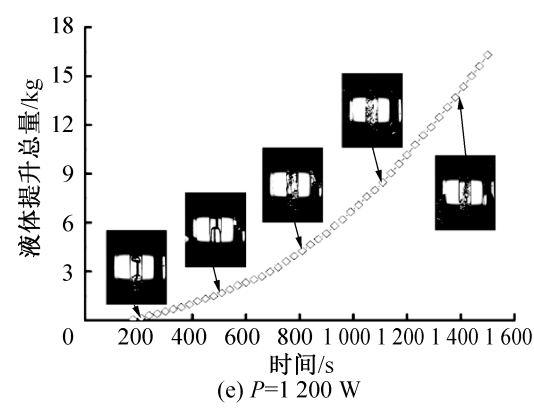
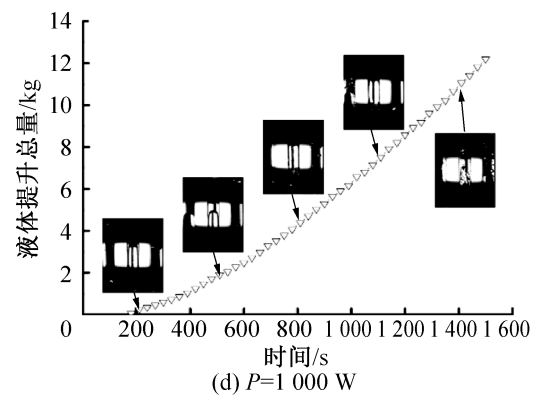
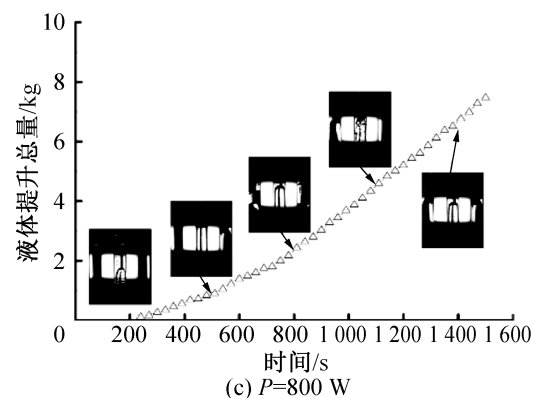
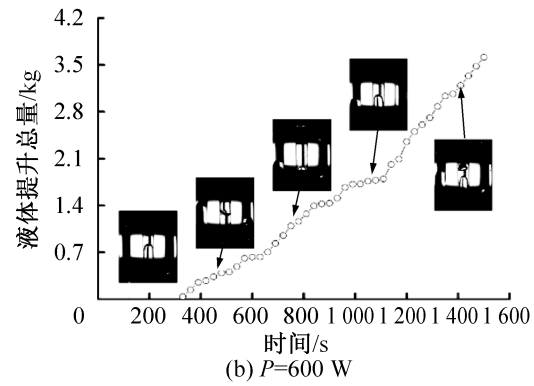
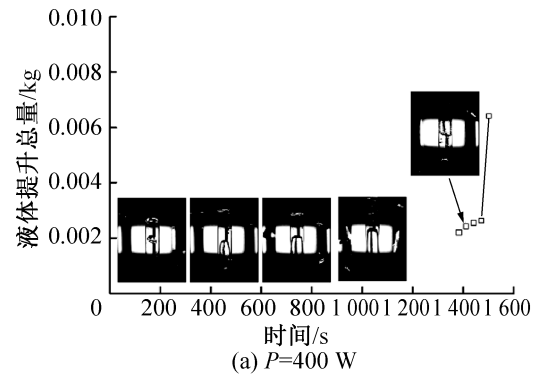


图 6 不同加热功率时提升管内流型变化
Fig.6 Flow pattern change in riser under the different heating power

2.3 多管气泡泵和单管气泡泵性能分析

各加热功率下不同提升管数量气泡泵液体提升总量随时间的变化如图 7 所示。在加热功率为 600 W 和 800 W 时,多管提升状态下气泡泵的液体提升总量与单管时基本相同。当加热功率增至 1 000 W 和 1 200 W 时,气泡泵单管提升下的液体提升总量比 3 根管时高,因为在加热功率增至 1 000 W 后,单管提升状态下,气泡泵提升管内的两相流流型已转换成了块状流并达到最大液体提升速率,处于最佳提升状态;而当提升管数量增加后,产生的气泡被分散到 3 根管中,管内流型均处于弹状流提升状态,且此时各提升管中的连续性也比单根管差,液体提升总量随着提升管数量的增加而减小。当加热功率增至 1 400 W 后,发生器中产生的气泡量较大,分散进入到 3 根管中后仍然能保证各管的连续工作,且提升管内的流型转换成块状流,因此,此时的提升效果比单根管时要好,液体提升总量更大。

选取各功率下气泡泵提升速率的最大值进行对比分析。各工况气泡泵最大提升速率的变化如图 8 所示。由图 8 可知,在低加热功率情况下,如 600、800、1 000 W,多管与单管的液体最大提升速率基本相等,表明增加提升管数量并不能有效地改变气泡泵

的提升性能,原因是在低加热功率时产生的气泡量较少。随着加热功率不断增大,气泡泵单管提升状态下,液体最大提升速率上升趋势逐渐趋于平缓,而多管提升状态下的气泡泵,液体最大提升速率依旧逐渐上升,原因是在高加热功率时,气泡泵产生的气泡数量大且速度迅速,有利于气相体积流动,从而推动更多液体上升,而此时的提升效果更好。单管提升时,

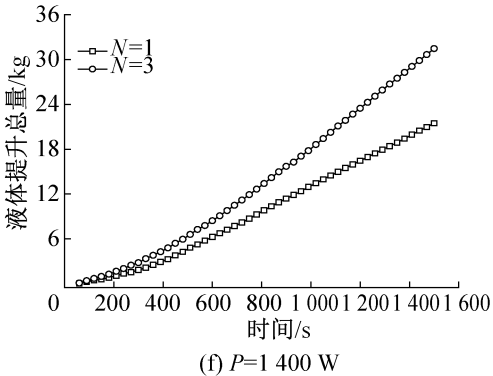
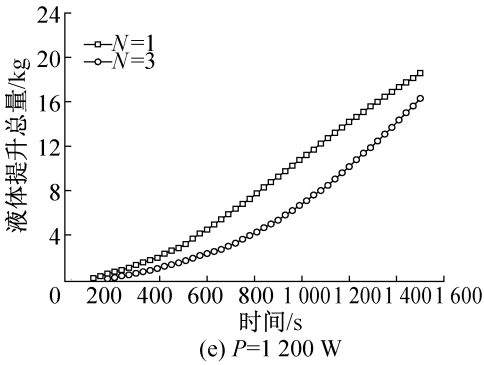
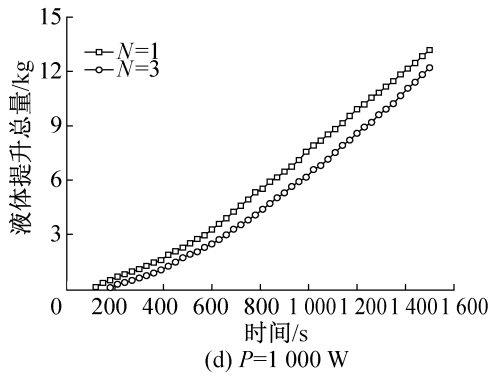
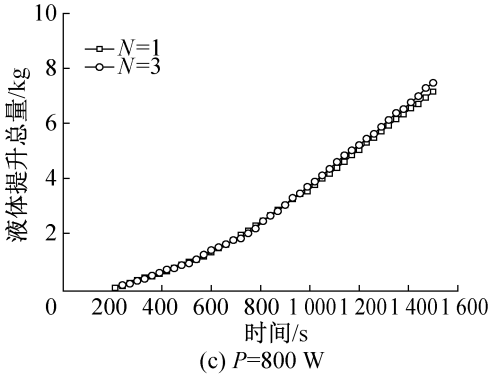
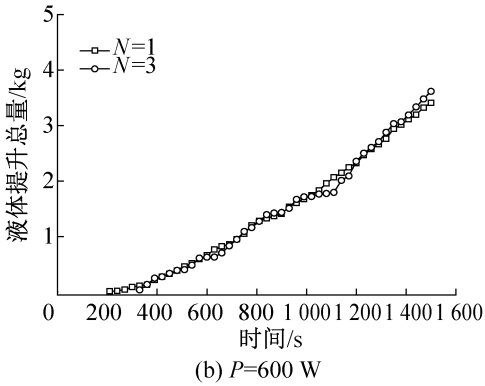
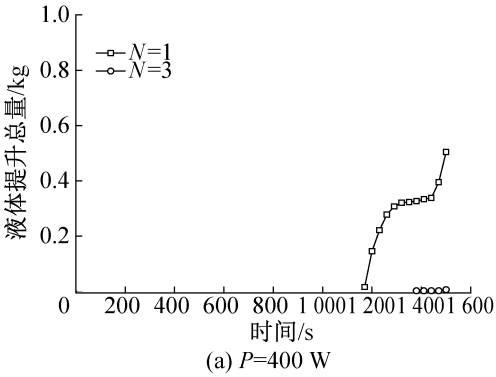


图 7 各加热功率下不同提升管数量气泡泵液体提升总量
Fig.7 The total lifting capacity of bubble pump with different numbers of risers under the different heating power

当加热功率达到 1 000 W,提升管内流型转变为块状流,而在加热功率提高至 1 400 W 时,环状流的出现降低了提升效果;多管提升状态下,管内流型转变所需时间较长,在加热功率为 1 000 W 时,提升管内仍处于弹状流提升状态,保持上升趋势。

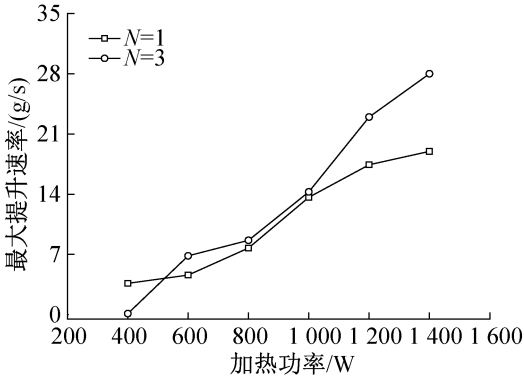


图 8 最大提升速率随加热功率的变化
Fig.8 Change of the maximum lifting rate with heating power

选取各功率下气泡泵提升速率的最大值计算气泡泵效率,各工况气泡泵效率的变化如图 9 所示。由图 9 可知,单管提升时,在加热功率为 1 200 W 时气泡泵达到效率最高点 0.051,而随着提升管数量的增加,在实验工况范围内,泵效率逐渐升高,在加热功率为 1 400 W 时达到效率最高点 0.071,通过多管两

相流流型图和泵效率曲线变化趋势可以看出,在该加热功率下,已有两根竖直提升管内的流向转变为块状流,且泵效率曲线上升趋势也逐渐变缓,因此可判断若加热功率继续增大,将会达到该工况下泵效率的最高点。

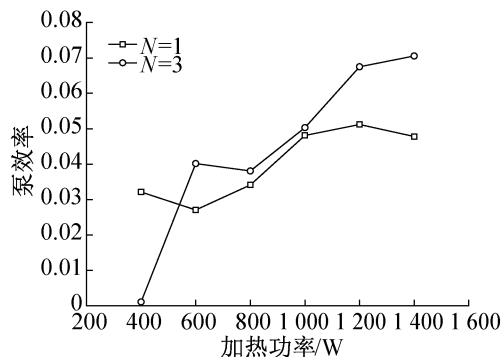


图 9 泵效率随加热功率的变化

Fig.9 Variation of pump efficiency with heating power

3 结论

本文以气液两相流理论为基础,通过可视化研究了不同加热功率下多管气泡泵中的液体提升过程,并与单管气泡泵液体提升过程进行了对比,得出如下结论:

1) 相同运行时间内,多管气泡泵液体提升总量与液体提升速率随加热功率的增大而提高。在加热功率为 400 W 时,气泡泵液体提升性能不明显;在加热功率为 600~800 W 时,液体提升速率随气泡泵工作时间的延长缓慢上升,且上升时波动较为明显;在加热功率为 1 200 W 时,液体提升速率随时间的延长稳定上升,且上升过程中波动性较小;当加热功率为 1 400 W 时,液体提升速率均显著提高,且随气泡泵工作时间的延长其上升趋势逐渐平缓。

2) 相同运行时间内,多管气泡泵气相体积流量随加热功率的增大而提高。在较低加热功率下,气相体积流量随时间的增加而提高,但上升趋势逐渐趋于平缓;在较高加热功率下,气相体积流量随时间的增加而持续提高。

3) 多管气泡泵提升过程中,各提升管提升的性能均不相同,气泡分配不均匀,2 号管气泡数量较集中,提升效果最好。随着加热功率的提高,各提升管起始提升时间差逐渐缩短。

4) 在低加热功率下,增加提升管数量并不能显著改善气泡泵提升性能,甚至可能会导致气泡泵液体提升总量的降低;在较高加热功率下,随着竖直提升管数量的增加,气泡泵液体提升总量、最大提升速率

和泵效率均逐渐提高,但随着提升管数量的倍增,提升效果不会呈相应倍数的增加。

本文受上海理工大学教师教学发展研究项目 (CFTD192001) 资助。(The project was supported by the Teaching Development Research Project of University of Shanghai for Science and Technology (No. CFTD192001).)

符号说明

- N ——提升管数
 L ——提升管长度, m
 η ——泵效率
 g ——当地重力加速度, m/s^2
 m_l ——液相质量流量, kg/s
 h ——液体提升高度, m
 P ——输入加热功率, 即加热功率, W
 P_{bp} ——输出功率, 即气泡泵液体提升能力, W
 Q_m ——单位时间内通过流道的液相体积, m^3/s
 ρ_l ——液相密度, g/m^3
 D ——气泡泵提升管径, m
 S ——气泡流动距离, m
 v ——气液两相流流速, m/s
 t ——记录气泡流动的时间, s
 Q_v ——单位时间内通过流道的气相体积, m^3/s
 m_v ——气相质量流量, kg/s
 ρ_v ——气相密度, kg/m^3
 A ——竖直提升管内横截面积, m^2

参考文献

- [1] 茅以惠, 余国和. 吸收式与蒸汽喷射式制冷机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1985. (MAO Yihui, YU Guohe. Absorption and steam jet refrigerators [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1985.)
- [2] PFAFF M, SARVANAN R, MAIVA M P. Studies on bubble pump for a water-lithium bromide vapour absorption refrigerator [J]. International Journal of Refrigeration, 1998, 21(6): 452-462.
- [3] 薛久明, 刘道平, 杨亮. 基于不同压力下的 Einstein 制冷循环系统性能分析 [J]. 化工进展, 2017, 36(增刊 1): 101-106. (XUE Jiuming, LIU Daoping, YANG Liang. Study on the performance of Einstein refrigeration cycle with different system pressure [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(Suppl. 1): 101-106.)
- [4] ZOHAR A, JELINEK M, LEVY A, et al. The influence of the generator and bubble pump configuration on the performance of diffusion absorption refrigeration (DAR) system [J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(6): 962-969.
- [5] 陈永军, 刘道平, 王东昱, 等. 连续变截面直立管气泡

- 泵工作特性试验研究[J]. 流体机械, 2014, 42(6):61-64,10. (CHEN Yongjun, LIU Daoping, WANG Dongyu, et al. Experimental study of working characteristic on continuous variable cross-sectional upright tube bubble pump [J]. Fluid Machinery, 2014, 42(6):61-64,10.)
- [6] 陈永军, 刘道平, 睦阳, 等. 冷态工况下变截面管气泡泵提升特性试验研究[J]. 流体机械, 2015, 43(3):47-51,82. (CHEN Yongjun, LIU Daoping, PU Yang, et al. Experimental study on the lifting performance of variable cross-sectional tube bubble pump under a cold condition [J]. Fluid Machinery, 2015, 43(3):47-51, 82.)
- [7] 陈永军, 刘道平, 黄源琳, 等. 变截面直立管气泡泵理论模型验证研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(4):917-923. (CHEN Yongjun, LIU Daoping, HUANG Yuanlin, et al. Theoretical model validation study of variable cross-section upright tubular bubble pump [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2016, 37(4):917-923.)
- [8] AN Lihuan, LIU Daoping, CHEN Yongjun, et al. Theoretical and experimental study on the lifting performance of bubble pump with variable cross-section lift tube[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 111:1265-1271.
- [9] 汤成伟, 刘道平, 祁影霞, 等. 单压吸收式 Einstein 循环制冷机中气泡泵的性能分析[J]. 制冷学报, 2009, 30(3):35-39. (TANG Chengwei, LIU Daoping, QI Yingxia, et al. Performance of bubble pump in single-pressure Einstein absorption refrigerator[J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(3):35-39.)
- [10] 汤成伟, 祁影霞, 刘道平, 等. 单压吸收制冷系统气泡泵性能的试验研究[J]. 流体机械, 2009, 37(8):49-53. (TANG Chengwei, QI Yingxia, LIU Daoping, et al. Experimental study on the performance for pump bubble single pressure absorption refrigeration system [J]. Fluid Machinery, 2009, 37(8):49-53.)
- [11] 汤成伟, 祁影霞, 刘道平, 等. Einstein 制冷循环中气泡泵的实验研究[J]. 低温与超导, 2009, 37(11):55-59. (TANG Chengwei, QI Yingxia, LIU Daoping, et al. Experimental investigation on bubble pump in Einstein refrigeration cycle[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2009, 37(11):55-59.)
- [12] 崔抗. 自行复叠扩散吸收制冷系统气泡泵性能研究[D]. 杭州:浙江大学, 2011. (CUI Kang. Experimental and theoretical studies on a bubble pump used for the auto-cascade diffusion-absorption refrigeration system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.)
- [13] KOYFMAN A, JELINEK M, LEVY A, et al. An experimental investigation of bubble pump performance for diffusion absorption refrigeration system with organic working fluids[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(15):1881-1894.
- [14] 李帅, 刘道平, 杨亮, 等. 单管导流式气泡泵连续提升性能[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(7):1537-1545. (LI Shuai, LIU Daoping, YANG Liang, et al. Continuous lifting performance of guided bubble pump with single tube [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(7):1537-1545.)
- [15] VICATOS G, BENNETT A. Multiple lift tube pumps boost refrigeration capacity in absorption plants [J]. Journal of Energy in Southern Africa, 2007, 18(3):49-57.
- [16] 徐煌栋, 刘道平, 郑晓倩. 多管导流式气泡泵性能的实验研究[J]. 热能动力工程, 2016, 31(7):36-40,133. (XU Huangdong, LIU Daoping, ZHENG Xiaoqian. Experimental study of the performance of a multi-tube flow guiding type bubble pump [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(7):36-40,133.)
- [17] 辛岩, 刘道平, 林发龙, 等. 多管式气泡泵提升性能影响因素理论与试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4):169-173. (XIN Yan, LIU Daoping, LIN Falong, et al. Theory and experiment on effect factor of lifting performance of multiple-tube bubble pump [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(4):169-173.)
- [18] 朱发明, 刘道平, 杨亮, 等. 均流式多管导流型气泡泵提升性能实验研究[J]. 制冷学报, 2018, 39(6):84-90. (ZHU Faming, LIU Daoping, YANG Liang, et al. Experimental research on improving performance of guided bubble pump with multiple tubes with current equalizer [J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(6):84-90.)

通信作者简介

杨亮,男,副教授,上海理工大学能源与动力工程学院,13816800761,E-mail:lyang@usst.edu.cn。研究方向:单压吸收式制冷,气体水合物生成技术。

About the corresponding author

Yang Liang, male, associate professor, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, +86 13816800761, E-mail: lyang@usst.edu.cn. Research fields: single pressure absorption refrigeration, gas hydrate formation technology.