

文章编号:0253 - 4339(2018) 06 - 0084 - 07

doi:10. 3969/j. issn. 0253 - 4339. 2018. 06. 084

均流式多管导流型气泡泵提升性能实验研究

朱发明¹ 刘道平² 杨亮² 马汉¹

(1 新奥能源服务(上海)有限公司 上海 200433; 2 上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093)

摘要 为改善多管导流型气泡泵工作过程中气泡分配不均,提高 Einstein 制冷循环的性能,本文在大气压下以饱和水为工质,通过改变提升管数量,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。结果表明:在气泡泵提升过程中,低功率下气泡泵液体总提升量增加幅度在较大和平缓现象之间不停的交替出现,但在高功率下气泡泵液体总提升量增加幅度较缓的过程所持续的时间越来越短。如管数量为 3 根,管径为 10 mm,沉浸比为 0.5,加热功率为 450 W 时,运行 75.2 min 时出水管开始有水流出,在 75.2 ~ 100.1 min 时,液体总提升量增加幅度在较大和平缓现象之间不停的交替出现。在添加均流器工况下,随着管数量倍增,气泡分配不均问题得以改善,如管径为 10 mm,沉浸比为 0.4,管数量为 1 根时,普通多管导流型气泡泵最大提升速率为 15.00 g/s;管数量为 3 根时,最大提升速率为 26.50 g/s;有均流器下,管数量为 3 根时,最大提升速率为 36.50 g/s。因此,均流器网孔的孔径和安装位置对气泡泵的提升性能有一定影响。

关键词 Einstein 制冷;气泡泵;均流器;实验研究

中图分类号:TB61⁺6; TB657.5

文献标识码:A

Experimental Research on Improving Performance of Guided Bubble Pump with Multiple Tubes with Current Equalizer

Zhu Faming¹ Liu Daoping² Yang Liang² Ma Han¹

(1. Enn Energy Services (Shanghai) Co. Ltd., Shanghai, 200433, China; 2. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract In order to improve uneven distribution of the bubbles in the guided bubble pump with multiple tubes in a working process, and enhance the performance of Einstein refrigeration, the performance of an ordinary guided bubble pump with multiple tubes and guided bubble pump with multiple tubes with current equalizer is compared. The experiment is conducted at atmospheric pressure with water as the working fluid, and the number of tubes in guided bubble pump is varied. Experimental results show that in the lifting process of the bubble pump the total liquid lifting capacity increases in amplitude for two kinds of bubble pumps, and large improvement and little improvement appear alternately under low power. However, the elapsed time for little improvement of total liquid lifting capacity is decreased for a bubble pump under high power. When tube number is 3, the diameter is 10 mm with an immersion ratio of 0.5, and a heating power of 450 W, water begins to exit from the outlet tube after 75.2 min. The total lifting capacity between large and little improvement appear alternately from 75.2 min to 100.1 min. In addition, the problem of uneven distribution of the bubbles is improved by the tube number multiplication with a current equalizer, such as a diameter of 10 mm and immersion ratio of 0.4. When tube number is 1, the maximum liquid lifting capacity rate is 15.00 g/s in an ordinary guided bubble pump with multiple tubes; when the tube number is 3, maximum liquid lifting capacity rate is 26.50 g/s for the ordinary, but 36.50 g/s for that with current equalizer. Finally, mesh aperture and installation position of current equalizer are found to have a certain influence on the improvement of bubble pump performance.

Keywords Einstein refrigeration; bubble pump; current equalizer; experiment research

能源紧缺与环境恶化加剧一直是人们关注的焦点,国内外很多科研人员在单压吸收式制冷技术方面做了大量的研究,单压吸收制冷技术无需任何机械运动部件,可以利用多种低品位能源如太阳能、余热等,

是节能降耗的重要补充^[1]。

Einstein 制冷循环作为单压吸收式制冷循环中的一种,而气泡泵是 Einstein 制冷循环中的核心部件,本质是一段加热管,在气泡泵底部进行加热,管中产

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:2017 年 6 月 27 日

生可以推动液体上升并“泵”送到高位储液器中的气泡^[2]。目前对于气泡泵提升性能的研究主要集中在沉浸比、加热功率、提升管管径和管数量对其提升性能影响等方面,对于气泡泵工作过程及多管导流型气泡泵中气泡分配不均的研究较少。关于 Einstein 制冷循环中气泡泵提升性能的研究,L. A. Schaefer^[3]对氨-丁烷-水、氨-丙烷-水、甲胺-戊烷-水等工质进行了研究。B. Gurevich 等^[4]对多提升管式气泡泵进行了研究。A. D. Delano^[5]以空气-水为工质对分析加热功率、沉浸比对气泡泵提升性能的影响。S. J. White^[6]对配比浓度为 15.5% 的氨水溶液进行了小管径气泡泵的实验研究。Chan Kengwai 等^[7]以氨水和水为工质,研究了氨水浓度为 20% 时气泡泵的性能。平亚琴等^[8-9]搭建了改进的导流式气泡泵实验台,并对其性能进行实验研究。梁保^[10]以水为工质,对圆弧形导流结构气泡泵进行理论和实验研究。陈永军等^[11]搭建了变截面竖直提升管气泡泵实验台,分析影响其性能的因素。赵荣祥^[12]搭建了多管导流式气泡泵实验台,并对其性能进行研究。

本文以水为工质,在普通多管导流型气泡泵装置下,研究气泡泵运行的整个工作过程,添加了均流器,改善多管导流型气泡泵工作过程中气泡分配不均的问题。

1 实验装置及实验过程

1.1 实验装置

多管导流型气泡泵的结构如图 1 所示。实验装置由高位储液器、竖直提升管(采用玻璃管)、圆锥形导流结构、气泡发生器、电加热装置、储液器、补水箱、阀门及液位调节器组成。

气泡泵的工作原理为:气泡泵开始工作时,低位

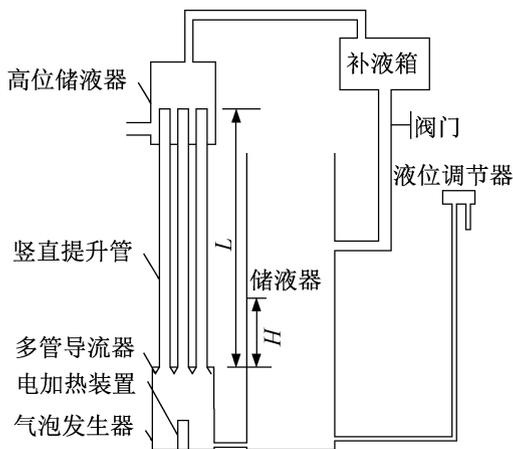


图 1 多管导流型气泡泵结构

Fig. 1 Structure of the multi-tube guided bubble pump

储液器与提升管中的液体具有相同的高度,管底部的加热装置加热,使管内部分液体沸腾蒸发,产生的气泡与液体混合形成密度比低位储液器中液体密度小的气液混合物,因此能够产生大于液体在管内受到的流动阻力和摩擦阻力之和的浮力,从而将管内两相液体提升到一定的高度进入高位储液器。同时,低位储液器中的液体不断压入气泡泵垂直提升管路,补充其中被提升的液体。这样可以实现不断提升液体的目的^[13]。

1.2 实验过程

由于本实验是开口系统,经计算,常温时在一个大气压下,空气在水中溶解部分所占比例仅为 0.64%,此外,本文对相同情况下有/无均流器两种工况对气泡泵的提升性能进行对比实验,故对于管中工质水中溶解的空气不予考虑。实验步骤如下:

1) 选好所需的提升管管径(10 mm)和管数量(1 根、3 根和 5 根),加热功率选取 450、650、850、1 050、1 250、1 450、1 650 W。

2) 与装置其他部件组装在一起,将装置系统调节到所需的沉浸比(0.4 和 0.5),安装橡胶软管支架及橡胶软管,使其连接在高位储液器的出水口,在出水口的正下方放上天平。

3) 将空量杯放在天平上,再将干净的清水倒入高位储液器中,润湿橡胶软管,直至橡胶软管没有水滴出,移出量杯,并换上另一个相同规格的空量杯,打开天平并清零。

4) 从打开电控箱并调节到所需的加热功率开始,用秒表计时,直至连接高位储液器出水管出水瞬间记为第一个数据点,并认为此时气泡泵提升量为 0,每隔 10 s 拍照天平上的读数,直至 150 个数据点为止。

5) 一组实验完毕后,关闭电控箱,将储液器中热水放出并换上冷水冷却装置,等装置冷却后,再调节所需参量,进行重复实验。

在普通多管导流型气泡泵基础上添加均流器(即金属网),预改进气泡分配不均,均流器规格采用网孔孔径为 0.6 mm,安装在离加热管上端面垂直高度为 3.2 cm 处,在上述实验过程下进行有均流网的气泡泵提升实验。

1.3 气泡泵的性能评价指标

1) 气泡泵提升速率

将气泡泵提升速率(即气泡泵单位时间液体提升质量)作为评价气泡泵性能的一个指标。

2) 气泡泵提升效率

气泡泵的输出功率与输入功率的比值称为气泡

泵提升效率 η [14]:

$$\eta = (P_1/P) \times 100\% = (Ggh/1\ 000P) \times 100\% \quad (1)$$

式中: η 为气泡泵提升效率,%; P_1 为气泡泵输出功率,W; P 为加热气泡泵内液体所输入的加热功率,W; G 为气泡泵提升速率,g/s; g 为当地重力加速度,m/s²; h 为气泡泵管内液体被提升的高度,m。

2 气泡泵连续提升性能实验

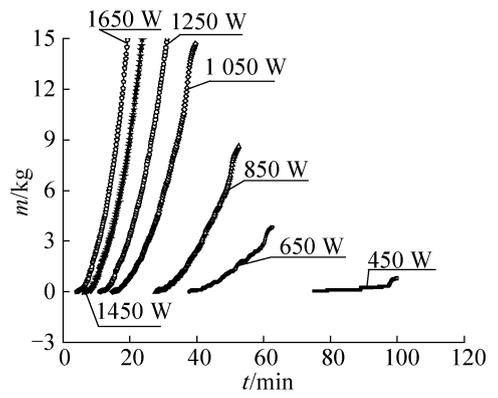
本文选取 3 种运行工况进行实验研究:1) $N=3$, $d=10\text{ mm}$, $H/L=0.5$; 2) $N=5$, $d=10\text{ mm}$, $H/L=0.5$; 3) $N=1$, $d=10\text{ mm}$, $H/L=0.5$ (N 为管数量; d 为提升管管径,mm; H/L 为沉浸比)。实验结果如图 2 所示, m 为气泡泵总液体提升量,kg; t 为时间,min。

由图 2(a)可知,当 $N=3$ 时,在变功率下, m 随着时间的增加而增加。当加热功率为 450 W 时,经过 75.2 min,出水管开始有水流,在 100.1 min 时, m 达到最大值为 0.78 kg;在 75.2 ~ 89.1 min 时,提升管的 m 增长缓慢,提升速率趋近于 0;而在 89.1 ~ 89.4 min 时, m 增加幅度较大。在 89.4 ~ 100.1 min 时, m 增加幅度在较大和平缓现象之间不停的交替出现,这是因为气泡泵在工作过程中,其提升液体的性能是间断性的。曲线的 m 增加幅度较缓的水平段所持续的时间越来越短,这是由于从开始对发生器中的液体加热,液体从冷态受热到产生小气泡,然后汇聚成具有提升作用的大气泡需要一定的时间,提升量较少,此过程持续时间最长,然后随着加热时间的增加,发生器中液体温度不断升高,产生小气泡越来越多,且汇聚成大气泡的速度变快,达到第二次提升液体的时间随之缩短,故曲线的水平段越来越短。

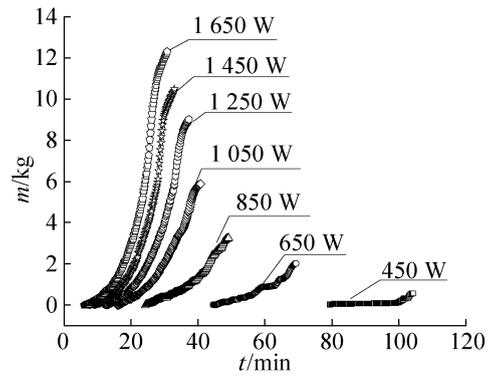
由图 2(a)还可知,在较大加热功率下,从 850 W 开始,这种交替现象开始变少, m 的增加幅度较大,当达到最大提升速率后,每条曲线提升速率逐渐降低并趋于稳定,这是由于随着加热功率的不断增大,提升管内的含气率不断增大,管中液体经历冷态-泡状流-弹状流的时间大大缩短,随着加热时间的延长,管中的含气率继续增大,增大至一定量时,管中的两相流稳定在环状流进行提升,提升速率开始降低。

由图 2(b)可知,当 $N=5$ 时,在变加热功率下的每条曲线的上升规律与图 2 中 $N=3$ 时相同。

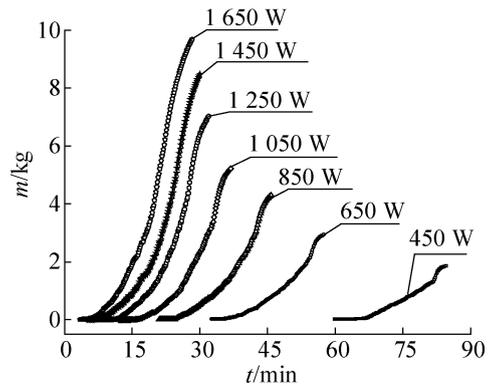
由图 2(c)可知,当 $N=1$ 时,在加热功率为 450 W 时,曲线的水平段减少,曲线较 $N=3$ 和 $N=5$ 时,气泡泵缩短了进入稳定提升速率较高的流型提升



(a) $N=3$



(b) $N=5$



(c) $N=1$

图 2 各功率下时气泡泵总液体提升量

Fig. 2 Total liquid lifting capacity of bubble pump with different power

液体的时间,这是因为在相同的加热功率下,发生器中产生的气泡总量只分配到单根管中,使管中的含气率提前满足了提升速率较高流型的含气率要求,故曲线的水平段减少。

3 提升管数量对气泡泵提升性能的影响

由图 2 可得,在 $d=10\text{ mm}$, $H/L=0.5$, $N=1, 3, 5$ 条件下,当加热量变化时气泡泵提升速率 G (g/s) 的变化如图 3 所示。

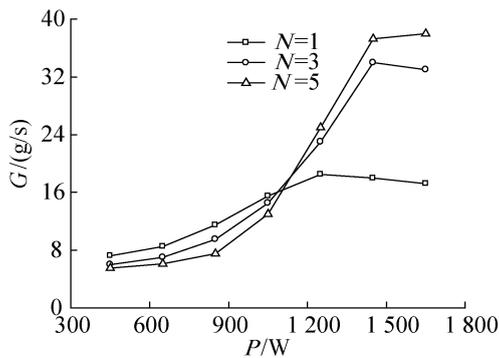


图 3 不同提升管数量各功率下的气泡泵提升速率

Fig. 3 The liquid lifting capacity rate of bubble pump with different number of tubes and different power

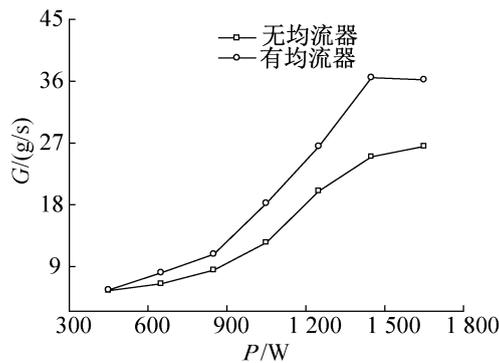
由图 3 可知,在变加热功率下, $N = 1, 3, 5$ 时,曲线的整体提升规律相同, G 随着加热功率的增大的先增大后减小;在低功率下,管数量越多, G 越小;而在高功率下,管数量越多, G 越大。由于考虑电控箱的额定功率为 2 000 W,对于 $N = 5$ 本实验的最大加热功率仅达到 1 650 W,如果继续增大加热功率, G 也会降低。出现这样的提升规律,是由于随着加热功率的增大,管中的两相流型经历了泡状流-弹状流-块状流-环状流的变化。

管数量不同,提升效果也会不同。随着管数量的增加,在低加热功率下,管数量越多,平均分配到每根管的加热功率较小,管内流型偏离弹状流较大,故提升效果较差。而加热功率不断增大,随着管数量的增加,平均分配到每根管的加热功率变大,管内流型接近弹状流, G 变大,而继续增大加热功率,管内流型开始向块状流和环状流转变, G 又开始变小。

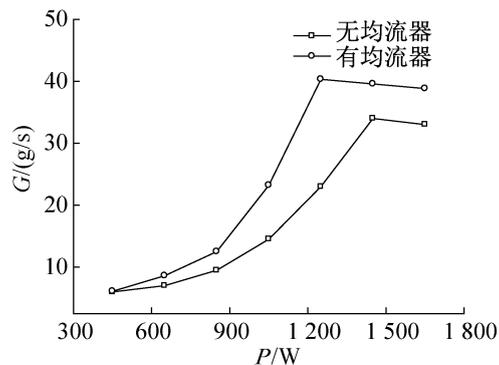
由图 3 还可以看出,单根管的 G 最大值为 1 250 W 的 18.50 g/s,3 根管的 G 最大值为 1 450 W 的 34.00 g/s,5 根管的 G 最大值为 1 650 W 的 38.00 g/s,最大 G 并没有随着管数量增加而相应的成倍增加。

4 有/无均流器下气泡泵提升速率对比

为了改善普通多管导流型气泡泵提升过程中气泡分配不均,研究有/无均流器对于气泡泵提升性能的影响,本文选取了无均流器下, $N = 3, d = 10$ mm, $H/L = 0.4$ 和 $H/L = 0.5$;而有均流器下,选取了均流器网孔孔径为 0.6 mm,安装在离加热管上端面垂直高度分别为 3.2 cm 处, $N = 3, d = 10$ mm, $H/L = 0.4$ 和 $H/L = 0.5$ 。两种运行工况下提升速率随加热功率的变化如图 4 所示。



(a) $H/L = 0.4$



(b) $H/L = 0.5$

图 4 有/无均流器下提升速率对比

Fig. 4 The comparison of liquid lifting capacity rate of bubble pump with/without current equalizer

由图 4(a)可知,无均流器下,随着功率的增大,气泡泵的 G 不断增加;而有均流器下,随着功率的增大,气泡泵的 G 先增加后减小,从 450 W 时的 5.60 g/s 增至最佳功率 1 450 W 时的 36.50 g/s,然后开始下降。此外,还发现在相同功率下,有均流器下的 G 比无均流器下的大。无均流器下最大 G 为 1 650 W 时的 26.50 g/s,气泡分配不均问题有所改善。同样,由图 4(b)可知,在相同功率下,加均流器的 G 大于无均流器条件下的 G ,无均流器的 G 最大值为 1 450 W 时的 34.00 g/s,而有均流器的 G 最大值为 1 250 W 时的 40.31 g/s,而由图 3 可知无均流器下, $N = 1, d = 10$ mm, $H/L = 0.5$ 工况下,提升管最大 G 为 18.50 g/s,从有均流器的最大液体提升量可以看出,添加均流器后,虽然 G 没有达到倍增,但气泡分配不均问题有所改善。这是因为添加均流器后,加热管上方产生的气泡经过均流器后,气泡破碎后,重新产生一个个相同大小的小气泡,平均分配到每根提升管的底部,使得每根提升管尽可能的同时产生弹状流,使 G 尽可能随着管数量的增加达到倍增。有均流器条件下,达到最大提升量的功率变小。

5 均流器安装高度及网孔孔径对提升性能的影响

对于均流器安装高度的不同对多管导流式气泡泵提升性能的影响,选取均流器网孔孔径为 0.6 mm,安装在离加热管上端面垂直高度分别为 3.2 cm 和 1.6 cm 处。保持其他条件不变的情况下,选取 $N = 3, d = 10 \text{ mm}, H/L = 0.4$ 运行工况进行实验研究,对于安装高度为 1.6 cm 工况,分别进行了加热功率为 450、850、1 250 W 3 组实验,两种工况下提升速率随加热功率的变化如图 5 所示。

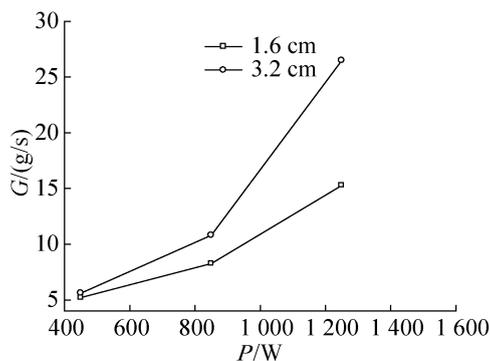


图 5 均流器下不同安装高度的气泡泵提升速率
Fig. 5 Liquid lifting capacity rate of different installation height with current equalizer

由图 5 可知,随着加热功率增加, G 均不断增大,且在变功率下,安装高度 3.2 cm 比 1.6 cm 的 G 大,功率越大,差距就越大。说明均流器的垂直安装高度对于气泡泵 G 有影响。

对于均流器孔径的不同对多管导流式气泡泵提升性能的影响,选取均流器网孔孔径为 0.6 mm 和 0.4 mm,均安装在离加热管上端面垂直高度分别为 3.2 cm 处。保持其他条件不变的情况下,选取了 $N = 1, d = 10 \text{ mm}, H/L = 0.4$ 运行工况进行实验研究,对于网孔孔径为 0.4 mm 工况,分别进行了加热功率为 450、850、1 250 W 3 组实验,两种工况下提升速率随加热功率的变化如图 6 所示。

由图 6 可知,随着加热功率的增大, G 均不断增大,且在变功率下,网孔孔径 0.6 mm 比 0.4 mm 的 G 大,功率越大,差距就越大。说明均流器网孔孔径大小对于气泡泵 G 有影响。

6 提升管数量及有/无均流器下气泡泵提升效率对比

图 7 所示为提升管数量及有/无均流器下气泡泵提升效率对比,选取均流器网孔孔径为 0.6 mm,安装

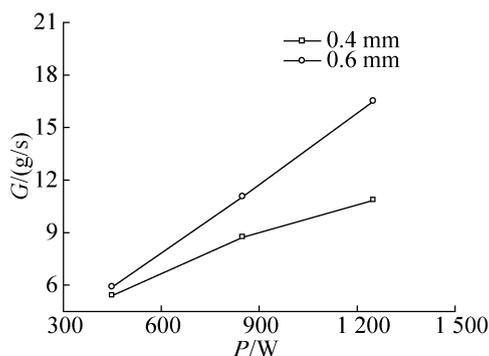


图 6 均流器下不同网孔孔径的气泡泵提升速率
Fig. 6 Liquid lifting capacity rate of different aperture with current equalizer

在离加热管上端面垂直高度分别为 3.2 cm 处, $N = 1, d = 10 \text{ mm}, H/L = 0.4$ 和 $N = 3, d = 10 \text{ mm}, H/L = 0.4$ 两个运行工况进行研究^[15]。

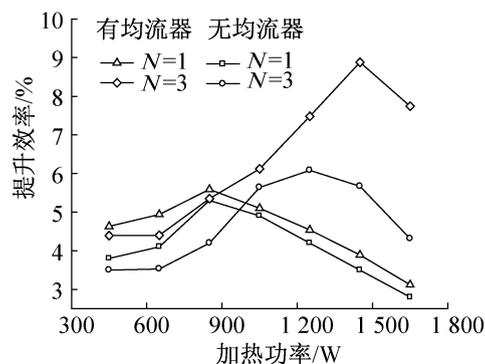


图 7 各功率下不同提升管数量的提升效率对比
Fig. 7 Contrast of lifting efficiency with different number of tubes and power

由图 7 可知,无论是均有均流器还是无均流器情况下,不论是 1 根管还是 3 根管,保持沉浸比和管径不变,随着加热功率的增加,气泡泵的提升效率 η 均先增大后减小,当加热功率较小时,管数量越多, η 越低,而随着加热功率的进一步加大,管数量越多,提升管的 η 越大。当提升管数量增多时,为了与单根管达到相同的 η ,需要更大的加热功率。无均流器下, $N = 1$ 时,最大 η 为 850 W 下的 5.3%,而 $N = 3$ 时,为了达到 5.3% 的 η 至少需要 1 000 W;有均流器下, $N = 1$ 时最大 η 为 850 W 下的 5.59%, $N = 3$ 时,为了达到 5.59%,至少需要 950 W 的加热功率。

由图 7 还可以看出,当 $N = 1$ 时,添加均流器的气泡泵 η 曲线始终在无均流器 η 曲线的上方,无均流器下的最高 η 为 850 W 下的 5.3%,而有均流器的最大 η 为 850 W 下的 5.59%,当 $N = 3$ 时,添加均流器的气泡泵 η 曲线也始终在无均流器 η 曲线的上方,无均流器下的最大 η 为 1 250 W 下的 6.08%,而

有均流器的最大 η 为 1 450 W 下的 8.88%, 由此可知, 添加均流器在一定程度上可以达到均流效果。

7 结论

本文研究了气泡泵连续性性能曲线, 对比分析了在有/无均流器下, 管数量的不同对多管导流型气泡泵提升性能的影响, 得出如下结论:

1) 在选定好装置的管径、管数量、沉浸比及均流器的工况下, 改变加热功率发现, 从打开电控箱对其加热开始, 低功率下 (450、650 W), 从提升管有水提出开始, 管中流型在保持泡状流流型提升量基本不变和短暂性的泡状流-弹状流提升之间多次往复, 加热一定时间后, 提升管开始以泡状流-弹状流流型持续提升, 然后达到最佳状态弹状流流型, 随着加热时间继续延长, 管中含气率继续加大, 管中开始以块状流-环状流流型提升, 提升速率开始下降。而高功率下 (850 ~ 1 650 W), 气泡泵提升过程中, 由于气泡产生较快、汇聚较快, 泡状流持续时间缩短, 进入泡状流-弹状流流型提升时间较长, 而后达到弹状流-块状流-环状流提升。

2) 装置系统在选定好管径、管数量、沉浸比及均流器下, 改变加热功率发现, 随着加热时间的变化, 低功率下, 气泡泵总液体提升量增加幅度在较大和平缓现象之间不停的交替出现, 但在高功率下, 较缓的水平段持续时间越来越短。

3) 无均流器工况下, 保持沉浸比和提升管内径不变, 随着加热功率的增加, 气泡泵的提升效率先增大后减少。当加热功率较小时, 管数量增加, 提升效率变小; 随着加热功率的增大, 提升管数量越多, 提升效率越大。当提升管数量增加时, 为了达到与单管相同的提升效率, 需要更大的加热功率。此外, 随着管数量倍增, 液体提升量和提升效率并不会成相应倍数的增加, 而添加均流器工况下, 随着管数量倍增, 由于均流效果, 液体提升量和提升效率的倍增问题得以改善。

4) 有均流器工况下, 保持提升管数量、提升管管径、沉浸比及加热功率不变, 均流器网孔孔径大小一定条件下, 改变或固定均流器安装位置, 改变网孔孔径大小, 均对气泡泵提升性能有一定的影响。

本文受上海市教育委员会科研创新项目 (13ZZ117) 资助。(The project was supported by the Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission (No. 13ZZ117).)

参考文献

[1] 朱发明, 刘道平, 杨亮, 等. 气泡泵在单压吸收制冷系统

中的研究进展[J]. 制冷学报, 2017, 38(2): 68 - 78. (ZHU Faming, LIU Daoping, YANG Liang, et al. Research progress of bubble pump in single pressure absorption refrigeration system [J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(2): 68 - 78.)

[2] 赵荣祥, 刘道平, 郑晓倩, 等. 提升管管径对导流式气泡泵性能影响的理论与实验研究[J]. 制冷学报, 2014, 35(6): 90 - 95. (ZHAO Rongxiang, LIU Daoping, ZHENG Xiaoqian, et al. Theoretical and experimental research of guided bubble pump with different lift-tube diameter [J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(6): 90 - 95.)

[3] SCHAEFER L A. Single pressure absorption heat pump analysis [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2000.

[4] GUREVICH B, JELINEK M, LEVY A, et al. Performance of a set of parallel bubble pumps operating with a binary solution of R134a-DMAC [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75: 724 - 730.

[5] DELANO A D. Design analysis of the Einstein refrigeration cycle [J]. Georgia Institute of Technology, 1999, 9912523.

[6] WHITE S J. Bubble pump design and performance [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2001.

[7] CHAN Kengwei, MCCULLOCH M. Analysis and measurement of bubble pumps and impact on single pressure absorption refrigeration cycle [J]. Green Technologies Conference, 2010, 3(2): 1 - 4.

[8] 平亚琴, 刘道平, 陈盛祥, 等. 带有气泡收集装置的气泡泵: 2009101990987 [P]. 2010-06-09. (PING Yaqin, LIU Daoping, CHEN Shengxiang, et al. With a bubble collecting device of the bubble pump: 2009101990987 [P]. 2010-06-09.)

[9] 平亚琴, 刘道平, 陈盛祥, 等. Einstein 循环制冷机导流式气泡泵的性能研究 [J]. 热能动力工程, 2011, 26(6): 743 - 746. (PING Yaqin, LIU Daoping, CHEN Shengxiang, et al. Performance analysis of guided bubble pump in Einstein refrigeration cycle [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2011, 26(6): 743 - 746.)

[10] 梁保. 圆弧形导流式气泡泵性能实验研究 [D]. 上海: 上海理工大学, 2014. (LIANG Yu. Circular diversion type bubble pump performance experimental research [D]. Shanghai: Shanghai University of Science and Technology, 2014.)

[11] 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实验研究 [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.)
- [12] 赵荣祥. 多管导流式气泡泵实验装置设计与优化分析 [D]. 上海:上海理工大学,2015. (ZHAO Rongxiang. Design and optimal analysis of guided bubble pump with multiple tubes [D]. Shanghai: Shanghai University of Science and Technology, 2015.)
- [13] LIN F, LIU D, JIANG D, et al. An experimental study on the performance of guided bubble pump with multiple tubes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 106: 1052 – 1061.
- [14] 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.)
- [15] 朱发明. 均流式多管导流型气泡泵提升性能实验研究

[D]. 上海:上海理工大学,2017. (ZHU Faming. Experiment research of improving performance on guided bubble pump with multiple tubes with current equalizer [D]. Shanghai: Shanghai University of Science and Technology, 2017.)

通信作者简介

刘道平,男,博士,教授,上海理工大学能源与动力工程学院,13501618727,E-mail:dpliu@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

Liu Daoping, male, Ph. D., professor, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, + 86 13501618727, E-mail: dpliu@usst.edu.cn. Research fields: single pressure absorption refrigeration, formation of the natural gas.