

文章编号:0253-4339(2013)02-0044-05
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2013.02.044

气泡泵冷态实验研究及性能参数的无因次分析

冯丽娜 刘道平 陈翠云 任天宇 吕晓佳

(上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093)

摘要 目前关于气泡泵的实验研究主要使用电加热作为驱动热源,实验过程中系统运行周期长、操作复杂、误差明显、不利于获得准确的实验数据,针对以上问题,为了能够更加准确的掌握气泡泵的运行性能,采用气体输入法对气泡运动规律进行冷态模拟,开展气泡泵性能的实验研究,根据实验结果,对气泡泵性能影响因素进行分析,发现在保持其他影响因素不变情况下,气体输入量、沉浸比、加热功率与液体提升量均成正比,并论证了热态实验与冷态实验的结论具有一致性。同时,通过无因次法对气泡泵系统性能参数进行分析,得出了液体提升量与加热功率的相关函数关系式。关系式表明:在固定的沉浸比下,液体提升量与加热功率成正比关系。

关键词 气泡泵;冷态实验;加热功率;因次分析法

中图分类号:TU831.4

文献标识码:A

Experimental Study on Bubble Pump Under the Cold State and Non-dimensional Analysis of System Performance Parameters

Feng Lina Liu Daoping Chen Cuiyun Ren Tianyu Lü Xiaojia

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

Abstract Electrical heating is mainly used as heat source in experimental research on bubble pump. Operational term is long, operation is complicated, deviation is distinct and accurate experimental data is not obtained. In view of the above question, In order to grasp the bubble pump performance more accurately, this system the bubbles' movements with a device injecting air is simulated to realize the bubble pump's normal operation under a cold condition and is used to study bubble pump's performance. According to the experiment results, the bubble pump's performance influencing factor is analyzed. And that is found that keeping other influencing factors constant, the gas input and immersion ratio and heating power is proportional to the amount of liquid lifted. And it is demonstrated that the hot experiment and cold experimental results are consistent. The bubble pump system's performance parameters with actor analysis method is analyzed and is the relevant function equation between the heating power and the amount of liquid lifted attained. The function equation indicates that with a fixed immersion ratio the amount of liquid lifted is proportional to heating power.

Keywords bubble pump; experiment under the cold state; heating power; actor analysis method

单压吸收式 Einstein 制冷循环系统运行于较低的单一压力状态,具有无任何运动部件、无噪音、制冷量小、可利用低品位热源等特点,具有广阔的应用前景。气泡泵是实现 Einstein 循环正常运转的关键部件,其性能研究对提高 Einstein 循环制冷机性能以及实现吸收式制冷机组的小型化具有重要的意义。

目前关于气泡泵的实验研究^[1-3]均依赖于电加热作为系统的驱动热源,实验过程中系统运行周期长、操作复杂、误差明显、不利于获得准确的实验数据,针对以上问题,为了能够更加准确的掌握气泡泵的运行性能,提出对气泡泵的实验研究运用冷态模拟,并通过无因次法对气泡泵系统性能参数进行分析,得出了液体提升量与加热功率的相关函数关

系式。

1 气泡泵工作原理

气泡泵的性能与它自身的几何结构以及其内部所含混合液体的性质相关^[4]。如图1所示,气泡泵实质就是一根加热管——将液体从低温储液器提升到高温储液器,加热管子底部时形成气泡并向上运动,使得上升浮力与上升过程中的摩擦力达到平衡,这样液体就被泵到上面的储液器中。

2 冷态实验

冷态模拟,即在不使用热源的情况下,人为创造外在条件,使得实验现象与存在热源时的情况具有同

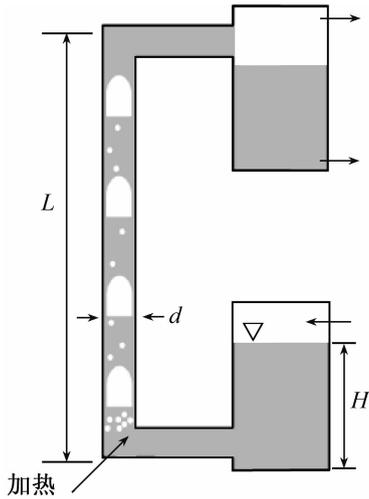


图1 气泡泵工作原理

Fig. 1 Bubble pump working principle

等效用。如图2可知:原有气泡泵实验装置^[3]的运行必须依赖于电加热器,运行周期长,操作复杂,误差明显,不利于获得准确的实验数据。基于将复杂问题筒

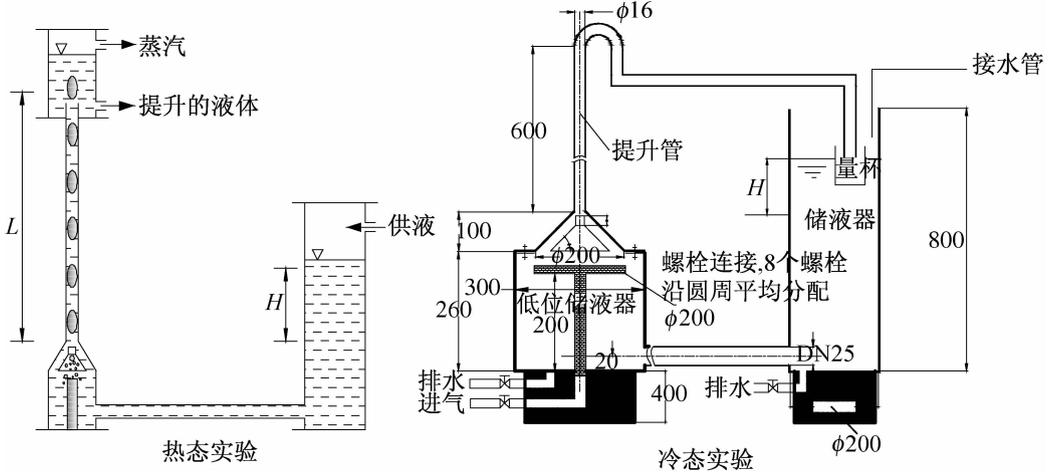


图2 气泡泵连续运行系统图

Fig. 2 Continuous bubble pump operation graph

表1 理论加热功率

Tab. 1 Theory heating power

$Q_g / (\text{m}^3/\text{h})$	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.25
P/W	185	278	370	463	555	648	740	833

3.1 加热功率与液体提升量的冷热态实验论证

实验台是基于导流式气泡泵实验台改建而成,实验工况并未改变,系统压力为一个大气压,并与大气相通,而且是用冷态模拟热态实验,所以可以用导流式气泡泵热态实验数据与冷态实验相对比。液体提升量的对比如图3所示。

单化的原则,将气泡泵的实验研究运用冷态模拟方法进行,以解决上述问题。

系统采用常温水为工质,用空气泵压缩空气来模拟蒸汽输入,用气体流量计控制空气输入量,实验系统压力设定为一个标准大气压,并与大气相通。

3 冷态实验研究论证

采取的是以冷态状态模拟热态实验,所以要分析加热功率对液体提升量的影响,需将气体输入量换算成相对应的理论加热功率。换算公式(1)如下:

$$p = \frac{\gamma_g \cdot \rho_g \cdot Q_g}{3.6 \times 10^6} \text{ J/h} \quad (1)$$

式中: γ_g 为 100°C 干饱和水蒸气的气化潜热, $2.26 \times 10^6 \text{ J/kg}$; ρ_g 为 100°C 饱和水的密度, 0.59 kg/m^3 ; Q_g 为气体输入量, m^3/h , 分别取 $2.25 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $2.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $1.75 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $1.25 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $1.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $0.75 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

换算后的理论加热功率如表1:

图3(a)热态实验图中对比了三种沉浸比下的加热功率与液体提升量的关系,所以图3(b)冷态实验图中也选取相应的沉浸比以作比较。两图对比可知,加热功率与液体提升量均是呈现正比关系,冷态实验曲线与热态实验曲线的斜率均是先大后小,说明冷态实验与热态实验一样,达到一定加热功率后效率开始下降。冷态实验曲线比热态实验曲线更早出现平缓的原因是,冷态实验中的加热功率是由气体输入量换算而来的理想功率,实际热态实验当中,由于阻力损失、热力损失等系统损失,导致一定量的加热功率不能产生相应数值的理想蒸汽,所以冷态实验当中能以更小的加热功率出现曲线拐点。

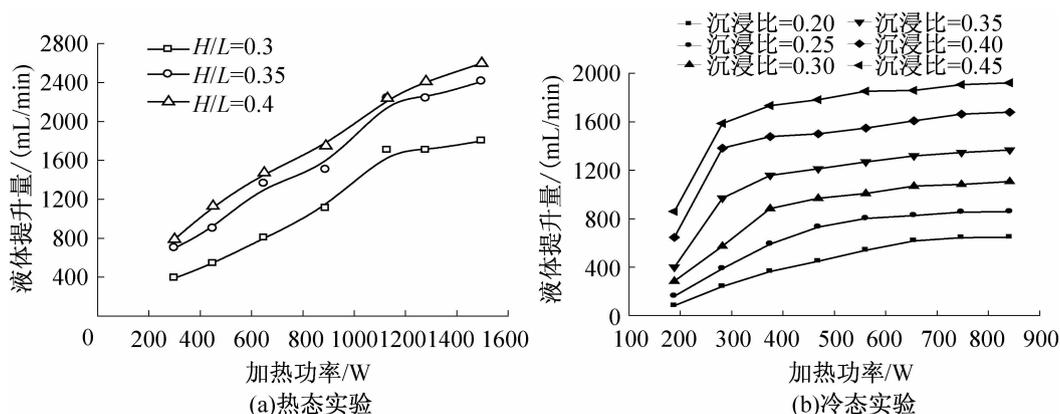


图3 液体提升量对比图

Fig. 3 Comparison diagram of lifted liquid

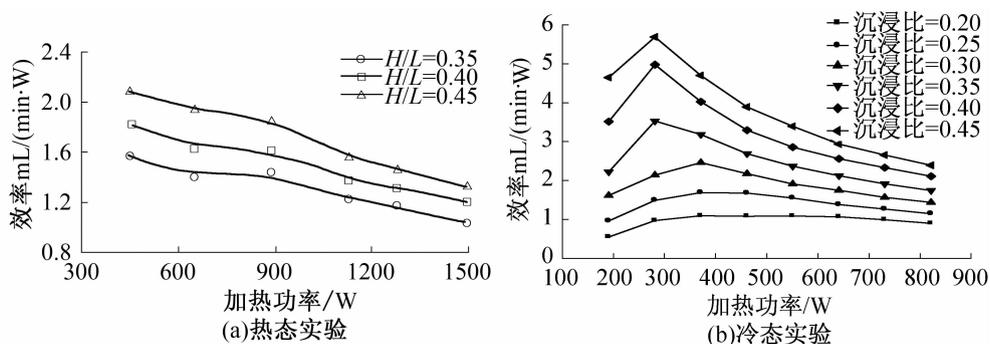


图4 效率对比图

Fig. 4 Comparison diagram of efficiency

3.2 加热功率与效率的冷热态实验论证

以气泡泵的提升效率,即以单位加热功率所能提升的液体量作为评价指标。

$$\eta = \frac{Q}{W} \text{ (mL/kJ)} \quad (2)$$

由图4对比可看出,效率与加热功率的关系并非如热态实验曲线所示,效率随着加热功率的增加而减小,应该是随着加热功率的增加,效率随之增加;当加热功率到达一个临界点时,同时效率达到最大,超过临界点,效率随着加热功率的增加而减小。这种现象是由于弹状流状态下,提升效率最高,冷态实验进一步证实了弹状流状态下提升效率最高的论点,同时给以后热态实验加热功率范围提供了参照。

3.3 加热功率对气泡泵启动性能影响的冷态实验论证

爱因斯坦制冷循环气泡泵的启动特性与系统初始工况、稳定运行工况、加热功率、沉浸比等因素有关。影响气泡泵启动性能的主要因素为系统的初始压力和加热功率。系统的初始压力越高,在相同加热功率情况下,达到系统的稳定运行压力的时间就越短;系统的加热功率越大,达到稳定工况的时间就

越短。

4 气泡泵系统性能参数的因次分析

4.1 因次分析的基本原理

因次分析的原理是:通过将任何物理方程都转化为无因次形式代替原方程。首先,列出影响过程的主要因素,通过无因次化减少变量数目,再通过实验求取无因次化变量的函数关系。

采用无因次分析法可求出无因次变量之间的关系,将单个变量组合,使复杂问题简单化。使用无因次分析法进行实验,使得实验次数大大减少,提高了工作效率。

4.2 气泡泵参数的无因次分析^[5-9]

1) 根据理论分析和实验研究可以得出,影响实验中气泡泵提升量 Q_i 的主要因素为:储液器液面高度 H 、加热功率 P 、流体密度 ρ 、动力粘度 μ 、提升管直径 D 等。用一般函数关系式表达为:

$$Q_i = f(H, P, \rho, \mu, D) \quad (3)$$

上式中变量有6个,但是这些物理量涉及的基本量纲只有3个,即长度 L 、质量 M 、时间 Θ 。这6个变量均可由上述3个基本量纲导出。

2) 根据 π 定理, 问题中有 6 个变量, 基本量纲的数目是 3 个, 则可形成 6 ~ 3 个无量纲变量, 则量纲的无因次数群个数 m 为:

$$m = N - k = 6 - 3 = 3 \quad (4)$$

用 π_1, π_2, π_3 分别表示这三个准数, 则式(5)可表示为

$$\pi_1 = \phi(\pi_2, \pi_3) \quad (5)$$

确定准数形式:

(1) 列出所有物理量的量纲, 如表 2 所示。

(2) 无因次数群的核心物理量: 提升管直径 D , 加热功率 P , 流体密度 ρ 。

表 2 物理量的量纲
Tab. 2 Physical dimension

物理量名称	提升量	液面高度	加热功率	流体密度	动力粘度	提升管直径
符号	Q_l	H	P	ρ	μ	D
量纲	$L^3\Theta^{-1}$	L	$ML\Theta^{-1}$	ML^{-3}	$ML^{-1}\Theta^{-1}$	L

(3) 将其他变量与核心物理量组成无因次数群:

$$\pi_1 = D^{a_1} P^{b_1} \rho^{c_1} Q_l \quad (6)$$

$$\pi_2 = D^{a_2} P^{b_2} \rho^{c_2} H \quad (7)$$

$$\pi_3 = D^{a_3} P^{b_3} \rho^{c_3} \mu \quad (8)$$

利用量纲和谐定理, 则对于 π_1 ,

$$M^0 L^0 \Theta^0 = L^{a_1} (ML\Theta^{-1})^{b_1} (ML^{-3})^{c_1} (L^3\Theta^{-1}) \quad (9)$$

上式两边量纲相等, 则

$$0 = b_1 + c_1$$

$$0 = a_1 + b_1 - 3c_1 + 3$$

$$0 = -b_1 - 1$$

联立上述方程组, 解得 $a_1 = 1, b_1 = -1, c_1 = 1$, 所以

$$\pi_1 = DP^{-1}\rho Q_l \quad (10)$$

同理可得:

$$\pi_2 = D^{-1}H \quad (11)$$

$$\pi_3 = D^2P^{-1}\mu \quad (12)$$

则式(3)可表达为

$$Q_l \frac{D\rho}{P} = f\left(\frac{\mu D^2}{P}, \frac{H}{D}\right) \quad (13)$$

式(13)即为气泡泵运行时的准数关联式。

3) 令 $y = Q_l \frac{D\rho}{P}, x = \frac{\mu D^2}{P}$ (因为实验中 $\frac{H}{D}$ 为常数), 选取沉浸比 $H/L = 0.25$, 将实验数据代入, 得出 $Q_l \frac{D\rho}{P}$ 与 $\frac{\mu D^2}{P}$ 的曲线关系, 如图 5 所示:

则可令 $y = ax^2 + bx + c$, 其中 $a < 0, b > 0$, 将数据代入上式, 联立方程组, 得到

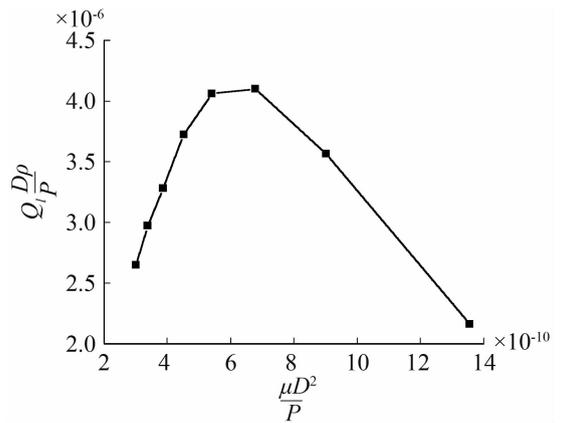


图 5 沉浸比为 0.25 时 $Q_l \frac{D\rho}{P}$ 与 $\frac{\mu D^2}{P}$ 的曲线关系

Fig. 5 Relation of $Q_l \frac{D\rho}{P}$ and $\frac{\mu D^2}{P}$ ($H/L = 0.25$)

$$a = -4.3 \times 10^{12}$$

$$b = 6.7 \times 10^3$$

$$c = 0.1 \times 10^{-5}$$

则,

$$Q_l \frac{D\rho}{P} = -4.3 \times 10^{12} \left(\frac{\mu D^2}{P}\right)^2 +$$

$$6.7 \times 10^3 \frac{\mu D^2}{P} + 0.1 \times 10^{-5} \quad (14)$$

实验中, $D = 0.016\text{m}, \mu = 1 \times 10^{-4} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}), \rho = 1 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$, (均已转化为用基本量纲表示), 所以, 代入式(14)得

$$Q_l = \frac{1.8 \times 10^{-4}}{P} + 6.25 \times 10^{-8} P + 0.1072 \times 10^{-4} \quad (15)$$

简化得

$$Q_l = -\frac{1.8 \times 10^{-4}}{P} + 6.25 \times 10^{-8} P \quad (16)$$

上式为沉浸比在 0.25 时的液体提升量与加热功率之间的关系, 其他沉浸比条件下的 $Q_l \frac{D\rho}{P}$ 与 $\frac{\mu D^2}{P}$ 的曲线关系如下图 6 所示:

由式(16)不难看出, 液体提升量与加热功率成正比关系, 且递增趋势逐渐趋于平缓。与实际实验结果相符。

5 结论

通过对冷态实验研究进行了论证, 并且通过对气泡泵系统性能参数的无因次分析得出相关函数关系式。可得出结论如下:

1) 加热功率与液体提升量均是呈现正比关系, 冷态实验曲线与热态实验曲线的斜率均是先增大后减小, 说明冷态实验与热态实验一样, 达到一定加热

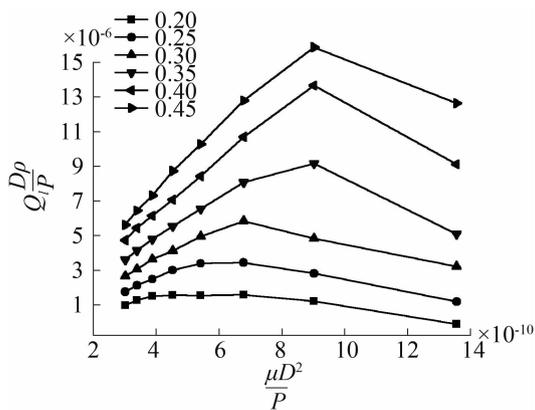


图6 $Q_1 \frac{Dp}{P}$ 与 $\frac{\mu D^2}{P}$ 的曲线关系

Fig. 6 Relation of $Q_1 \frac{Dp}{P}$ and $\frac{\mu D^2}{P}$

功率后效率开始下降;

2) 冷态实验进一步证实了弹状流状态下提升效率最高的论点,同时给以后热态实验加热功率范围提供了参照;

3) 通过无因次法对气泡泵系统性能参数进行分析,得出了液体提升量与加热功率的相关函数关系式。关系式表明:在固定的沉浸比下,液体提升量与加热功率成正比关系,且递增趋势逐渐趋于平缓。

参考文献

[1] 薛相美,刘道平,王汝金. 无泵吸收制冷系统气泡泵的性能分析[J]. 低温与超导,2008, 36(08):50-53. (Xue Xiangmei, Liu Daoping, Wang Rujin. Performance Analysis for Bubble Pump in Pumpless Absorption Refrigeration System [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2008, 36(08):50-53.)

[2] 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(03):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(03):35-39.)

[3] 平亚琴,刘道平,陈盛祥,等. 单压吸收式制冷系统气泡泵理论模型与实验研究[J]. 制冷学报,2010,6(31):

46-50. (Ping Yaqin, Liu Daoping, Chen Shengxiang, et al. Theoretical Model and Experimental Analysis of Bubble Pump in Single-pressure Absorption Refrigeration System [J]. Journal of Refrigeration. ,2010,6(31):46-50.)

[4] Laura Atkinson Schaefer. Single Pressure Absorption Heat Pump Analysis [D]. Georgia Institute of Technology,2010, 6(31):46-50.

[5] 徐婕,詹士昌,田晓岑. 量纲分析的基本理论及其应用[J]. 大学物理,2004, 23(05):54-58. (Xu Jie, Zhan Shichang, Tian Xiaocen. Dimensional analysis of the basic theory and the application [J]. College Physics, 2004, 23(05):54-58.)

[6] 梁兵. 量纲分析及无量纲比例系数的实验确定法[J]. 广西物理,2001(2):42-45. (Liang Bing. Dimensional analysis and The experiment method of dimensionless proportion coefficient [J]. Physics of Guangxi. 2001(2):42-45.)

[7] 付茂林,邹喜洋,刘世清. 量纲分析的线性代数法[J]. 大学物理,2001,20(11):25-27. (Fu Maolin, Zou Xiyang, Liu Shiqing. Method of linear algebra of Dimension analysis [J]. College Physics, 2001, 20(11):25-27.)

[8] 甘祥根. 量纲分析及其在物理中的应用[J]. 广东技术师范学院学报,2004(4):82-83. (Gan Xianggen. Dimensional analysis and the application of physics [J]. Journal of Guangdong technology normal college, 2004(4):82-83.)

[9] 胡云. 量纲分析应用性研究[J]. 大连民族学院学报,2006(5):70-74. (Hu Yun. Dimensional analysis of applied research [J]. Journal of Dalian Nationalities University, 2006(5):70-74.)

通信作者简介

冯丽娜,女(1987-),硕士,上海理工大学,18801784525, E-mail:fengna.547860629@163.com。研究方向:制冷与低温工程。

About the corresponding author

Feng Lina(1987-), female, Master, University of Shanghai for Science and Technology, 18801784525, E-mail: fengna.547860629@163.com. Research fields: Refrigeration and cryogenics.