

# 单压制冷系统中变截面管气泡泵的实验分析

陈永军, 刘道平, 赵荣祥, 陆引哲

(上海理工大学 制冷技术研究所, 上海 200093)

**摘 要:** 为了拓宽气泡泵研究领域和应用范围, 解决气泡泵效率低, 未有效利用低品位能源等问题, 提出了一种新型的连续渐缩式变截面管(内径从 11 mm 渐变至 8 mm) 气泡泵装置, 并对其提升性能进行实验分析。以常压 100 °C 水为工质, 研究不同加热功率, 浸没比对液体提升率的影响, 并与内径为 10.9 mm 的直管气泡泵提升性能进行对比分析。结果表明: 在加热功率为 200 - 650 W, 浸没比为 0.4 时, 变截面管气泡泵提升率最高可提高 8.2%, 说明变截面管气泡泵具有较高提升优势, 且该加热功率相对较低, 可充分与低品位热源衔接, 对扩大能源的利用范围及单压制冷机性能的提高具有重要意义。

**关 键 词:** 单压制冷循环; 气泡泵; 变截面管; 提升率

中图分类号: TB61; TK511 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2014.06.018

## 引 言

为了满足国家节能降耗的要求, 国际制冷学会 F. B. ILLIARD 认为要加大对非蒸汽压缩系统的研发<sup>[1]</sup>, 特别需要对吸收式与吸附式系统、太阳能制冷、三联产等技术开展持续的研究。而单压制冷循环属于吸收式制冷范畴的一种<sup>[2]</sup>, 其可用动力余热、地热、太阳能等低品位热源制冷, 实现能源有效利用, 且运行安静可靠, 节能环保而倍受人们青睐<sup>[3]</sup>, 再次成为研究的热点。因此对爱因斯坦制冷系统进一步研究对实施能源的梯级利用, 开发利用低品位热能, 提高我国能源工业利用水平具有重要意义。而气泡泵是单压制冷系统中的一个重要部件, 是整个系统的动力来源<sup>[4]</sup>。气泡泵性能关系到整个系统运行的优劣, 因此对气泡泵性能优化研究具有重要意义。2010 年平亚琴基于气液两相流分相模型<sup>[5]</sup>, 对单压制冷系统中气泡泵在绝热弹流状态下的提升特性进行了理论和实验研究, 为低品位热源驱动气泡泵装置提供了理论设计参数。2011 年 Abu - Mulaweh H I 开发一种气泡泵冷却系统<sup>[6]</sup>,

并通过实验测试数据气泡泵系统设计和开发细节, 为气泡泵系统搭建提供了实验基础。冯丽娜采用气体输入法对气泡泵冷态性能进行相关实验研究<sup>[7]</sup>, 并对其提升性能进行无量纲分析, 结果发现在气体条件不变时气体输入量(热源加热功率)、浸没比与液体提升量均成正比, 为分析热源驱动功率、浸没比与液体提升量之间的关系提供了方法。

Chan K W 以纯水为工质, 在大气压条件下对气泡泵性能进行了实验研究<sup>[8]</sup>, 提出了气泡在提升管中具有一个冷凝的过程, 探索了气泡运动学行为, 为气泡泵性能优化提供了理论参考。2013 年 Kuo S C 在实验和理论基础研究了气泡泵在电子冷却闭环系统中应用<sup>[9]</sup>, 分析结果表明在气泡泵中加入沸腾表面翅片可以有效地减少泵的阻力和泵的基本板的中心温度, 提高气泡泵运行性能。

而在单压制冷系统中发生器也是系统的重要部件, 发生器的结构形式不仅影响到驱动热能的输入和液体流动过程中阻力, 而且影响到气泡泵的提升管性能<sup>[10]</sup>。因此对气泡泵提升管和发生器进行改进对提高整个单压制冷机性能具有重要意义<sup>[11-12]</sup>。本研究对提升管和发生器结构进行改进, 采用连续变截面光滑提升管和光滑圆弧形发生器出口设计, 对气泡泵工作特性进行实验分析, 以期拓宽气泡泵研究范围, 为热能驱动气泡泵装置优化提供指导。

## 1 气泡泵在单压制冷系统中应用

如图 1 所示, 在单压吸收制冷系统中, 丁烷作为制冷剂, 水作为吸收剂, 氨作为压力平衡剂, 循环基于道尔顿分压定理<sup>[13]</sup>, 从发生器出来的氨气进入蒸发器使丁烷表面的分压力降低, 导致液相丁烷产生相变, 进而产生制冷效应, 且存在 3 个循环。

(1) 制冷剂循环: 系统运行时, 从蒸发器出来的

收稿日期: 2014 - 01 - 21; 修订日期: 2014 - 05 - 05

基金项目: 上海市教育委员会科研创新项目资助(13ZZ117); 上海市研究生创新基金项目(JWCXSL1302)

作者简介: 陈永军(1989 -), 男, 贵州毕节人, 上海理工大学硕士研究生。

丁烷和氨气混合气体进入冷凝/吸收器,氨气在其中被稀氨水吸收变成浓氨水沉在吸收/冷凝器底部,然而在冷凝器中冷凝的丁烷和氨水互不相溶,在重力作用下会自然分离;位于混合液上部,然后回流到蒸发器中,完成制冷剂循环;

(2) 压力平衡剂循环: 位于冷凝/吸收器下部的浓氨水流进发生器中,在加热装置的作用下浓氨水产生氨气被导入到蒸发器中,完成压力平衡剂循环。

(3) 吸收剂循环: 发生器中的稀氨水溶液在气泡泵的提升作用下进入贮液器,进而在重力作用下回流到冷凝/吸收器中完成吸收剂循环。

在此系统中气泡泵连接了发生器与贮液器,通过气泡泵对液体的提升作用,把发生器中稀氨水溶液提升到贮液器中,保证整个系统运行。

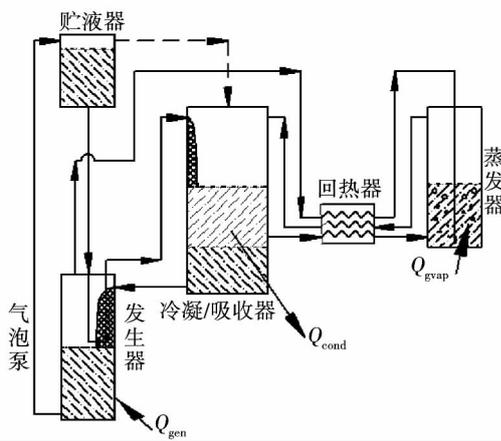


图 1 Einstein 制冷系统原理图  
Fig. 1 Schematic diagram of the Einstein refrigeration system

## 2 实验装置及流程

### 2.1 变截面管气泡泵运行原理

如图 2 所示,在单压制冷系统中储液器中稀溶液先流入发生器中然后被热源加热,稀氨水溶液受热沸腾产生气泡,并进入“喇叭形”变截面提升管进口。在提升管圆弧形进口处,气泡具有一个短暂的汇聚过程,气泡压力逐渐升高,提升管中气泡的截面含气率也越来越大,当气泡汇聚的速率与气泡逸出的速率达到平衡时,能够形成稳定的大气泡,气泡在上升过程中推动液体到达气液分离器。由于提升管中两相流的密度小于发生器中混合溶液的密度,因此能够产生足够的压力差推动低位储液器中的液

体进入气液分离器,从而实现系统循环。

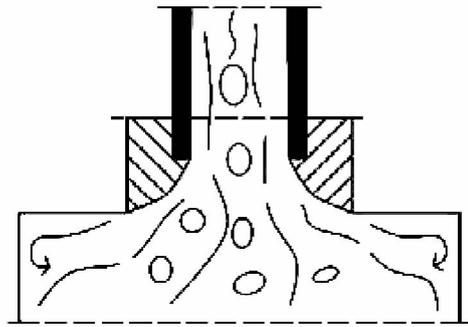


图 2 “喇叭形”变截面提升管进口  
Fig. 2 Horn-shaped variable cross-section riser inlet

该“喇叭形”变截面提管进口犹如一个气泡收集装置,汇聚了从发生器中产生的源源不断的小气泡。致使气泡达到一定压力后进入提升管,从而可保证气泡在提升管内一直处于在稳定弹状流的趋势,而气泡在上升过程中,由于提升管和外界传热影响,气泡因温度降低会出现冷凝现象<sup>[8]</sup>,气泡尺寸减小而渐缩式变截面提升管在一定程度上可以弥补气泡尺寸变化带来的负面影响,从而能更好保证气泡上升的流型,提高了气泡泵的工作效率。另外,“喇叭形”结构保证了液体有足够的液体流动空间,光滑的进口壁面有益于减小两相流入口处的局部压降,有利于提高气泡泵工作性能。

### 2.2 实验过程

如图 3 所示,此实验以常压 100 °C 饱和水为循环工质,系统运行时,储液器中的饱和水进入发生器中并经过加热热源的再热产生气泡,气泡进入连续变截面提升管中。气泡在浮升力及储液器液位势能的综合作用下推动其上部溶液上升,进入气液分离器。进入分离器的蒸汽从气体出口逸出,液体则通过测液口进入储液器中,从而实现了整个循环。试验中可通过补水箱及时补充系统中蒸发逸出的水分,同时可调节液位装置固定提升管中液面在某一个数值从而固定测量时沉浸比不变,实现系统平稳运行。

试验中为了测量连续形变截面管气泡泵液体提升率,即:在气泡泵提升管单位时间内气泡携带水体上升的质量。用量杯在测液口处管子出口出量取液体的同时计数秒表,待量取结束的同时停止秒表,然后在电子秤上秤出液体质量,记录实验数据,每一组实验数据重复 15 次,减少实验误差。并用实验均值

来分析实验结果实验测量均值如表 1 所示。所用测量工具有: 量杯为 0 - 100 mL, 精度为 0.1 mL, 精度为 0.001 s 的秒表, 精度为 0.01 g 的电子天平秤, 量程为 50 - 1 000 W 稳压功率器。

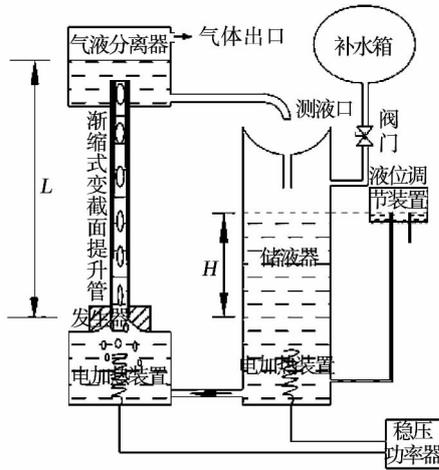


图 3 连续变截面管气泡泵实验原理图

Fig. 3 Schematic diagram of a continuous variable cross-section tube air bubble pump

表 1 测量 15 次的实验数据均值

Tab. 1 Average value of the test data measured for 15 times

加热功率/W	9 mm 直管提升率/g · s <sup>-1</sup>	10 mm 直管提升率/g · s <sup>-1</sup>	变截面管提升率/g · s <sup>-1</sup>
100	9.33	13.84	9.71
200	16.27	19.80	19.67
300	19.17	22.32	23.33
350	20.05	22.83	24.09
400	20.18	23.33	24.34
500	19.16	23.08	23.45
600	17.41	21.44	22.32
650	16.77	20.43	21.44

### 3 实验结果与讨论

有关气泡泵的研究表明<sup>[14]</sup>, 沉浸比 ( $H/L$ ) 和加热功率是影响气泡泵性能的重要参数。现在管长均为 600 mm 条件下进行普通直管形气泡泵 (内径分别为 10、9 mm) 与连续变截面管气泡泵 (大端管的内径为 11 mm, 小端管的内径为 8 mm 且内径从大端到小端连续变化) 提升性能对比研究; 通过处理实验数据, 考察不同加热功率, 浸没比对提升不同类

型气泡泵性能的影响。

#### 3.1 加热功率对不同管径类型气泡泵性能提升率的影响

由图 4 可知, 在沉浸比 0.4 时, 在 250 - 450 W 范围内, 连续变截面管气泡泵提升率均高于直管形气泡泵提升率, 且在 350 W 时液体提升率最大, 高出 10 mm 管径气泡泵提升率 5.4%。

由图 4 说明采用连续变截面提升管有助于优化气泡泵提升性能, 此归结于变截面提升管下部大端对气泡具有收集作用, 汇集的气泡能够平稳进入提升管中, 有益于使气泡保持在弹状流的趋势。而且光滑圆弧形的进口设计, 有利于减少两相流流动过程中的阻力, 提高气泡泵的提升性能。而超过 450 W 时, 气泡泵提升性能下降, 这是由于随着加热功率的增加气泡的流型遭到破坏, 致使提升性能降低, 观测到实验现象如图 5 所示。

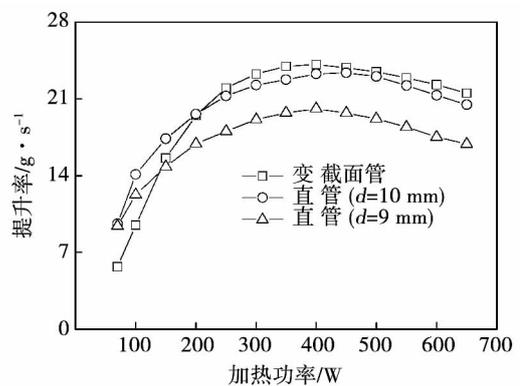


图 4 沉浸比  $H/L = 0.4$  时气泡泵特性曲线

Fig. 4 Characteristic curves of the air bubble pump when the immersion ratio  $H/L = 0.4$

在加热功率 250 W 时对应产生的气体流量较小, 气体有一个聚集过程, 在变截面提升管内形成气弹较小且清晰, 随着功率增加产生的气体逐渐增多, 气体聚集形成较大的气弹。在功率 350 W 时, 此时形成的气弹最大且气泡携带水体的能力较强, 此时气体泵提升率较高, 这与图 4 中曲线趋势相吻合。此后随着加热功率增加, 产生气体流量增多, 气体量大, 生成的前一个气泡还未完全脱离, 后一个气泡就已喷出, 气泡扰动较大, 气体紊流作用加强, 导致在相对狭窄提升管空腔内气泡不能保持弹状流趋势, 流型逐渐过渡到块状流和环状流。致使气泡泵提升率曲线逐渐下降。

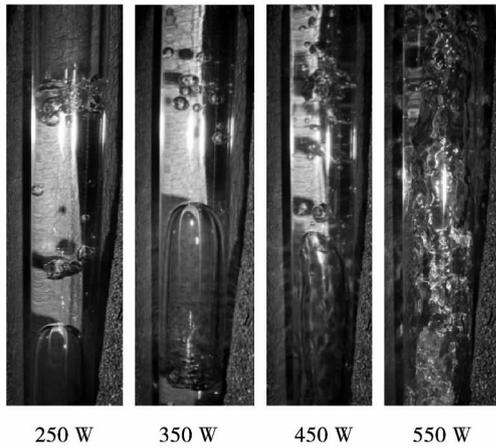


图 5 不同加热功率下气泡流型图

Fig. 5 Chart showing the air bubble flow pattern at various heating power

### 3.2 沉浸比对不同类型气泡泵提升率的影响

如图 6 可知,不同类型气泡泵的提升率随着沉浸比的增加而增大,但增加差距逐渐增大。原因在于气泡泵装置驱动力主要来源于发生器中溶液高度  $H$ ,随着  $H$  增大驱动力变大,提升效果越明显。从图可知变截面管气泡泵提升性能均高于直管形气泡泵,但提升优势并不突出。原因在于连续光滑变截面提升管内两相流阻力比直管形提升管的阻力略高,对气泡泵提升性能造成影响。但气泡在管内上升的过程中,由于提升管与外界传热致使气泡尺寸减小。渐缩变截面提升管设计有利于弥补气泡上升过程中气泡尺寸减小带来的对提升率的负面影响。同时一定程度上抵消阻力带来的部分负面影响。所以提升量略高于直管形气泡泵。

### 3.3 热源加热功率比对气泡泵效率的影响

衡量气泡泵性能的参数主要采用气泡泵效率,气泡泵效率定义为单位加热功率下气泡泵液体提升质量<sup>[5]</sup>。根据实验结果得到的实验曲线如图 7 所示。

由图 7 可知:变截面管气泡泵与直径 10 mm 气泡泵提升效率区别不大,在加热功率 300 W 左右时,两者相差最大,变截面管气泡泵提升效率高出 7.9%,这说明变截面提升管和光滑喇叭形发生器出口设计有利于改善气泡泵提升性能,但由于变截面提升管气泡泵阻力略大于等量直管气泡泵阻力,致使变截面管气泡泵提升效率曲线与 10 mm 管径气泡泵提升效率曲线相互接近。

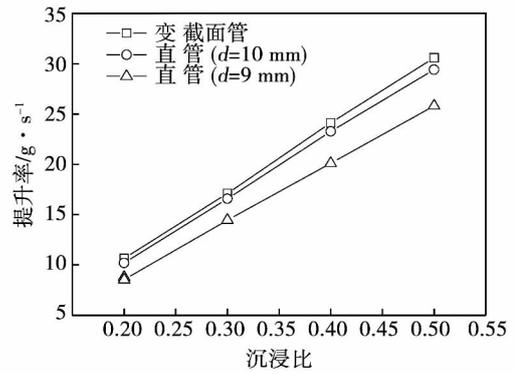


图 6 加热功率 400 W 时气泡泵性能曲线

Fig. 6 Performance curves of the air bubble pump when the heating power is 400 W

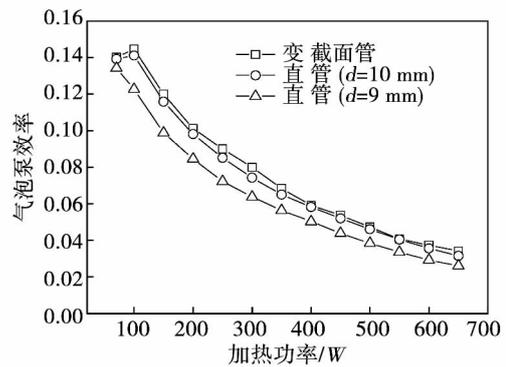


图 7 加热功率 400 W 时气泡泵提升效率曲线

Fig. 7 Efficiency curves of the air bubble pump when the heating power is 400 W

## 4 结 论

针对目前单压制冷系统中气泡泵提供的动力较小,流动过程阻力较大,运行缺乏稳定性及效率低等问题。本研究采用“喇叭形”变截面提升管出口,设计出一种新型的气泡泵,对其进行了对比实验研究,得出以下结论:

(1) 相同沉浸比下,在加热功率 200 - 650 W 范围内,变截面管气泡泵较直管形气泡泵提升率高,在 350 W 时,提升率差较大,最大相差 5.8%。这说明在 200 - 400 W 的较低功率下,变截面管更具有提升优势,更有利于利用低品位热源。但超过一定功率范围之后,不同类型气泡泵提升性能下降,提升效果不明显。

(2) 在一定功率下,提升率随着沉浸比增大而

增大, 沉浸比为 0.5 时, 变截面管较 10 mm 直管气泡泵提升率高 4.8% , 较 9 mm 高 23.1% , 具有一定的提升优势, 为拓展气泡泵研究和应用具有重要作用。

(3) 在加热功率 300 W 左右时, 变截面管气泡泵提升效率高出 7.9% , 有利于改善低品位热源驱动的气泡泵提升性能。

#### 参考文献:

- [1] Billiard F. 制冷与可持续发展 [J]. 制冷学报, 2003, 24(2): 22 - 26.  
Billiard F. Refrigeration and sustainable development [J]. Journal of refrigeration 2003, 24(2): 22 - 26.
- [2] Delano A. Design analysis of the Einstein refrigeration cycle [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 1998.
- [3] 冯丽娜, 刘道平, 任天宇, 等. 单压吸收制冷系统中气泡泵的研究进展 [J]. 制冷技术, 2011, 40(2): 45 - 48.  
FENG Li-na, LIU Dao-ping, REN Tian-yu, et al. Advances in the study of air bubble pumps in single pressure absorption refrigeration systems [J]. Refrigeration Technology 2011, 40(2): 45 - 48.
- [4] 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 Cheng-wei, LIU Dao-ping, QI Ying-xia, et al. Performance analysis of an air bubble pump in a single-pressure Einstein absorption refrigerating machine [J]. Journal of Refrigeration 2009, 30(3): 35 - 39.
- [5] 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, 31(3): 46 - 50.  
PING Ya-qin, LIU Dao-ping, CHEN Sheng-xiang, et al. Theoretical model for and experimental study of air bubble pumps in single-pressure absorption type refrigeration systems [J]. Journal of Refrigeration. 2010, 31(3): 46 - 50.
- [6] Abu-Mulawah H I, Mueller D W, Wegmann B, et al. Design of a bubble pump cooling system demonstration unit [J]. International Journal of Thermal & Environmental Engineering 2011, 2(1): 1 - 8.
- [7] 冯丽娜, 刘道平, 陈翠云, 等. 气泡泵冷态实验研究及性能参数的无因次分析 [J]. 制冷学报, 2013, 34(2): 44 - 48.  
FENG Li-na, LIU Dao-ping, CHEN Cui-yun, et al. Experimental study of an air bubble pump in the cold state and non-dimensional analysis of its performance parameters [J]. Journal of Refrigeration 2013, 34(2): 44 - 48.
- [8] Chan K W, McCulloch M. Analysis and modelling of water based bubble pump at atmospheric pressure [J]. International Journal of Refrigeration 2013, 36(5): 1521 - 1528.
- [9] Kuo S C, Shih C C, Chang C C, et al. Bubble pump in a closed-loop system for electronic cooling [J]. Applied Thermal Engineering 2013, 51(1): 425 - 434.
- [10] 龚磊, 王勤. 混合制冷剂扩散吸收式制冷系统理论与实验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.  
GONG Lei, WANG Qin, et al. Experimental and theoretical study of a mixed refrigerant diffusion-absorption type refrigeration system [D]. Hangzhou: Zhejiang University 2012.
- [11] 王汝金, 刘道平, 薛相美, 等. 单压吸收式 Einstein 循环制冷机中气泡泵参数的设计确定 [J]. 流体机械, 2008, 36(1): 62 - 65.  
WANG Ru-jin, LIU Dao-ping, XUE Xiang-mei, et al. Design and determination of parameters of an air bubble pump in a single-pressure absorption type Einstein cycle refrigerator [J]. Fluid Machinery 2008, 36(1): 62 - 65.
- [12] 方甲闯, 郝宏飞, 李正良, 等. 小型太阳能吸收式空调多管弦月形通道溶液提升泵的性能研究 [J]. 太阳能学报, 2007, 28(3): 290 - 295.  
FANG Jia-chuang, ZHENG Hong-fei, LI Zheng-liang, et al. Study of the performance of a multi-tube lunate channel solution boosting pump in a miniature type solar energy absorption type air-conditioner [J]. Acta Energetica Solaris Sinica 2007, 28(3): 291 - 295.
- [13] 沈维道, 童钧耕. 工程热力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.  
SHEN Wei-dao, TONG Jun-geng. Engineering Thermodynamics [M]. Higher Education Press 2007.
- [14] 阎昌琪. 气液两相流 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007.  
YAN Chang-qi. Gas-liquid two-phase flow [M]. Harbin Engineering University Press 2007.

( 单丽华 编辑)

单压制冷系统中变截面管气泡泵的实验分析 = **Experimental Analysis of a Variable Cross Section Tube Bubble Pump in an Einstein Refrigeration System** [刊, 汉] CHEN Yong-jun, LIU Dao-ping, ZHAO Rong-xiang, LU Yin-zhe (Refrigeration Technology Research Institute, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(6). - 671-675

In order to broaden the domain under investigation in bubble pumps and their application range and solve the problems concerning the low efficiency of bubble pumps and ineffective utilization of low grade energy sources etc., proposed was a novel continuous converging type variable cross section tube (the inner diameter gradually changes from 11 mm to 8 mm) bubble pump device and experimental analysis was made of its lifting performance. With water at a normal pressure and the temperature of 100 °C serving as the working medium, the influence of various heating powers and immersing ratios on the lifting efficiency of a liquid was studied. Moreover, the lifting performance of the variable cross section tube bubble pumps was contrasted with those of straight tube bubble pumps having an inner diameter of 10 mm and 9 mm. It has been found that when the heating power falls in a range from 200 to 650 W and the immersing ratio is 0.4, the lifting efficiency of the variable cross section tube bubble pump can increase by 8.2% at the most outside, indicating that the variable cross section tube bubble pump boasts a relatively high lifting edge and the heating power is relatively low, capable of fully accommodating to low grade heat sources and having an importance significance for expanding the scope for utilizing energy sources and enhancing the performance of Einstein refrigerating machines. **Key Words:** Einstein cycle, bubble pump, variable cross-section tube, lifting efficiency

高温低热值煤气燃烧器结构优化的实验研究 = **Experimental Study of the Structural Optimization of a High Temperature Low Heating Value Coal Gas Burner** [刊, 汉] LI Kun, WANG Jian, ZHANG Shi-hong, CHEN Han-ping (National Key Laboratory on Coal Combustion, Central China University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(6). - 676-681

A high temperature low heating value coal gas burner was improved and optimization designed and a central tube was additionally mounted inside the low heating value coal gas tube with the converging spout on the air tube of the original burner being changed to a diverging one and the converging spout on the coal gas tube being removed. A contrast of the hot state test results of the burner before and after the optimization shows that the improved burner can sustainably and stably burn the fuel prepared by CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub> with its heating value being 3.9 MJ/Nm<sup>3</sup> and the heating value of the fuel prepared by CO and N<sub>2</sub> being 4.0 MJ/Nm<sup>3</sup>, of which the preheating temperatures of the low