

文章编号:0253 – 4339(2014) 01 – 0058 – 08
doi:10. 3969/j. issn. 0253 – 4339. 2014. 01. 058

气泡泵在制冷技术中的应用研究进展

梁 侃 刘道平 叶 鹏

(上海理工大学制冷技术研究所 上海 200093)

摘 要 本文回顾了气泡泵研究的相关文献,简要的介绍了气泡泵工作原理,并对应用于扩散-吸收式制冷技术、Einstein 循环制冷技术、吸收式制冷技术和太阳能制冷技术的气泡泵研究进展进行总结。提出气泡泵的重要影响参数有结构形式、运行参数和工质三种,并指出气泡泵的基本理论、运行特性和性能提升方法需要更完善和深入的研究。

关键词 制冷技术;气泡泵;综述;吸收式制冷

中图分类号:TB657;TB61 * 1 **文献标识码**:A

Research Progress of Bubble Pump in Refrigeration Application

Liang Yu Liu Daoping Ye Peng

(Institute of Refrigeration Technology, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract A literature review on bubble pump using in refrigeration technology and a brief introduction the principle of bubble pump are provided. A number of bubble pumps that apply to diffusion-absorption refrigeration, Einstein refrigeration cycle, absorption refrigeration and solar refrigeration are provided and discussed. Configuration, operating parameter and working fluid are presented as the important parameters influencing the performance of the bubble pump. Finally, the fundamental theory of bubble pump, working characteristics and the performance of bubble pump improvement are proposed to be researched preferentially.

Keywords refrigeration technology; bubble pump; reviews; absorption refrigeration

能源紧缺与环境恶化日渐加剧,人们对制冷系统的节能性和对环境友好性的要求越来越高。为了解决这些问题,各国的科研人员一直在寻找性能良好的替代制冷工质,同时开始将目光转向其他制冷技术以寻求解决方案。作为吸收式制冷技术中的一员,单压吸收式制冷技术同样得到关注。

单压吸收式制冷循环有两种形式:扩散 – 吸收式制冷循环和 Einstein 制冷循环。1926 年 Platen^[1] 等人提出了扩散-吸收式制冷循环,此循环以氨作为制冷剂,水为吸收剂,氢作为压力平衡剂,循环特征为系统处于单一压力下,并用气泡泵取代了传统吸收式制冷系统中的机械泵。1930 年, Einstein 等^[2] 对 Platen 提出的单压制冷循环进行了一系列改进,提出一种新型的单压吸收式制冷方式(后人称为“Einstein 制冷循环”)。

气泡泵是单压吸收制冷系统的核心部件,为整个单压吸收制冷系统的循环提供动力,因此气泡泵的研究有助于单压吸收制冷系统的实用化。通过提高气泡泵的液体输送量和气体产生量,可以提高单压吸收

制冷系统的制冷量、扩大应用范围。同时,由于工质的腐蚀性而导致溶液泵故障是现有吸收式制冷装置不能正常运转的主要原因^[3],而气泡泵也可应用到无泵溴化锂-水吸收式制冷系统等吸收式制冷系统中。而且,气泡泵作为一种利用热能输送流体的装置,也可以用在一些特殊场合,例如输送具有腐蚀性和放射性的流体。

1 气泡泵的工作原理

气泡泵的本质是一段具有加热功能的提升管,通过加热产生上升的气液两相流达到泵送液体的目的,其基本结构如图 1 所示。提升管底部的加热装置提供足够的热量,使得提升管(气泡泵)内的液体沸腾并产生大量的蒸汽,这些蒸汽在管内汇聚成气泡,气泡在管内上升的同时将其上方的液体带入高位贮液器。同时,由于提升管中的汽-液两相混合物的密度比低位储液器中液体的密度要小,因此能产生压力将管内两相流体提升到一定的高度。同时,低位储液器中的液体流入气泡泵内,补充其中被提升的液体,这

样就能够达到不断提升液体的目的。由于气泡泵的工作原理与热虹吸管的工作原理相似,气泡泵也会被称为热虹吸泵。

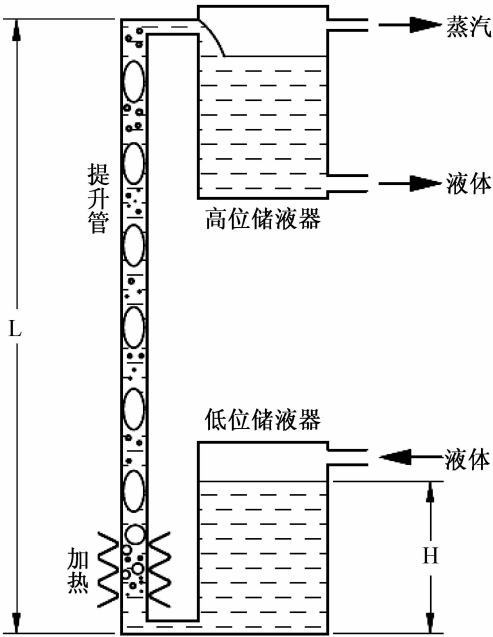


图 1 气泡泵示意图
Fig. 1 Bubble pump schematic

气泡泵的重要参数包括气泡泵结构形式、气泡泵提升管管径,驱动压头(与初始液面高度 H 有关),扬程(提升高度 L)和热量输入等。许多学者热衷于研究气泡泵的热量输入、管径和沉浸比(初始液面高度与提升高度的比率)对气泡泵性能的影响。

2 气泡泵的研究进展

2.1 扩散-吸收式制冷技术中的应用研究

气泡泵是扩散-吸收制冷机的关键部分。气泡泵在制冷机中除了驱动工作流体的循环以外,还具有解吸出溶液中的制冷剂溶质的作用。扩散-吸收式循环的性能主要取决于其气泡泵的效率^[4]。

扩散-吸收制冷机中的气泡泵一般具有单独的提升管,通过加热套筒对气泡泵加热,这样使加热过程被限制在小范围内。此外,也有使用气体燃烧器对气泡泵加热的结构,在这种结构下,整个提升管或者发生器都被加热,能够获得更大的换热面积。

Chen 等^[5]通过对扩散-吸收制冷原型机的能量分析发现精馏器的精馏热损失是影响系统性能的重要因素。他们为了减小精馏的热损失而设计出一种新的热发生器/气泡泵(如图 2 所示)。实验研究发现,改进后的气泡泵装置使在不降低制冷量的前提下能够将扩散-吸收式制冷机的 COP(Coefficient Of Per-

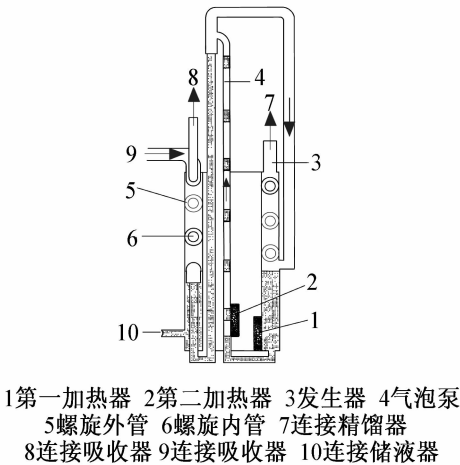


图 2 Chen 等人设计的发生器/气泡泵结构图
Fig. 2 Generator/bubble pump schematic by Chen et al.

formance,性能系数)提高 50%。

Koyfman 等^[6]对一种使用 DMA(二甲基乙酰胺)-R22 为工质的扩散-吸收式制冷系统的气泡泵进行研究。他们搭建了连续工作的气泡泵实验装置,并通过控制变量法对气泡泵的性能进行实验研究。在他们的实验中 200W 的加热量能够获得平均 0.4g/s 的制冷剂流量,制冷系统理论 COP 可达到 0.35。其实验结果表明驱动压头是影响气泡泵性能的最重要因素,改变 10% 的驱动压头将会引起 40% 的质量流量变化。他们认为降低驱动压头能够获得更大的制冷剂流量,从而获得更多的制冷量。

Zohar 等人对一台由瑞典伊莱克斯公司生产的扩散-吸收式制冷机及其气泡泵进行了数值模拟研究^[7]。这种制冷机的气泡泵由两个同轴管组成,其内管比外管短,可同时起到发生器和气泡泵的作用。他们研究了此构造气泡泵中,不同的氨水浓度对发生温度在 195℃ ~ 205℃ 时对制冷机性能的影响。

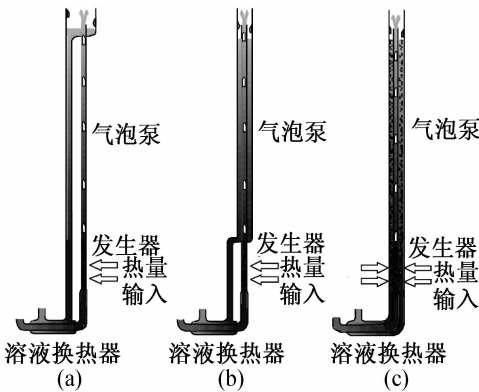


图 3 Zohar 等人使用的不同结构^[8]
Fig. 3 Different configurations used by Zohar et al. ^[8]

Zohar 等^[8]还研究了发生器和气泡泵的结构形

式对扩散-吸收式制冷系统性能的影响(如图 3 所示)。他们提出了三种不同的结构,第一种结构中(如图 3(a)),浓溶液管路和稀溶液管路完全分开,两个管路间没有换热,并只对浓溶液管路进行加热。第二种结构(如图 3(b))中采用了部分的套管式结构,即浓溶液管路有部分套入稀溶液管路中,这种结构下依然只对浓溶液进行加热,但是浓溶液和稀溶液管路间有换热。在第三种结构(如图 3(c))中,两个溶液管路采用完全的套管形式,此时先加热处于外管的稀溶液,然后热量再传入内管加热浓溶液,在这种结构下稀溶液也会解吸出制冷剂,同时这种结构也是现有商用扩散-吸收式冰箱所使用的形式。他们对这三种发生器和气泡泵的结构形式不同的扩散-吸收式制冷系统的性能进行了数值研究并发现,在加热量相同的情况下($Q = 160\text{W}$),第二种结构解吸出的制冷剂最多,而第一种解吸的最少。在 COP 的比较中,第二种结构的性能最好,第三种次之,第一种最差。

Vcators 和 Bnnet^[9] 为了提高扩散-吸收式制冷机的制冷能力,使用多管式气泡泵增加工质的流量。他们将如图 4 所示的多管式气泡泵应用在一台扩散-吸收式制冷机上并对其进行实验,以研究提升管数量的增加对制冷机性能的影响。结果表明增加提升管数量提高制冷量的同时并没有引起 COP 的明显下降,并得出多管式气泡泵对流体的流量没有限制,流体的流量只与输入的热量多少有关的结论。

贾阳涛等^[10] 也进行过类似的研究,他们对使用

双提升管结构的扩散吸收式制冷系统进行了实验研究。实验结果表明:采用双提升管可以提升液体循环量,缩短循环周期,提高制冷量;而且适当的提高溶液浓度不仅可以降低系统的发生温度,同时也能够获得较大的制冷量;发现降低充氢压力可降低系统发生温度,但 COP 会随之降低。

Jakob 等^[11] 对间接加热驱动气泡泵/发生器的扩散-吸收式制冷机进行了研究。他们开发了如图 5 所示的竖直壳管式换热器的气泡泵,在这种气泡泵中,工质溶液在圆形竖直通中流动,传热介质则在壳程中流动,加热工质溶液。研究表明这种采用管壳式结构间接加热的气泡泵能够达到所需的溶液和蒸汽流速。

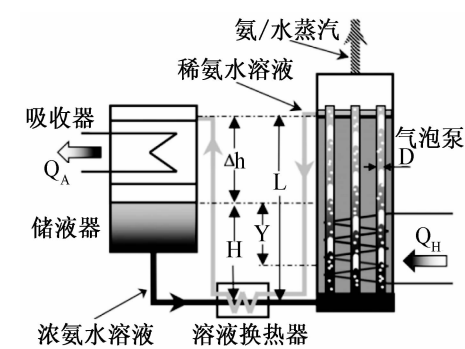


图 5 Jakob 等提出的气泡泵结构图^[11]
Fig. 5 Bubble pump configuration^[11]

王勤等^[12] 为了获得更低的制冷温度提出了一种新的扩散-吸收式制冷循环——自行复叠扩散-吸收式制冷循环。崔抗^[13] 对这种循环的气泡泵进行了研究。所研究的自行复叠扩散-吸收制冷循环采用 DMF (二甲基甲酰胺) 为吸收剂, R134a/R23 作为制冷剂。通过建立数学模型和搭建实验装置对气泡泵进行研究,研究了管径、流型变化、加热量、充注浓度和压力等因素对气泡泵工作性能和效率的影响,并与理论模型进行了比较,总结自行复叠扩散-吸收制冷系统用气泡泵设计的一般规律。

Benhmidene 等^[14-15] 对扩散-吸收式制冷系统中的气泡泵进行数值模拟研究。他们运用数值模型对给气泡泵在不同管径和热流密度(加热量)下的性能进行研究,他们认为最佳运行工况下的热流密度大小与管径、质量流量有关,而气泡泵运行所需的最小热流密度则与管径相关。他们还对气泡泵技术进行了回顾,认为扩散-吸收式循环的性能主要依赖于气泡泵的效率,并指出气泡泵在弹状流下有最高的运行效率,对流态影响最大的参数是提升管管径,而沉浸比则是另一个影响气泡泵运行的重要参数。

2.2 Einstein 制冷循环中的应用研究

与扩散-吸收式制冷循环中的气泡泵不同,在

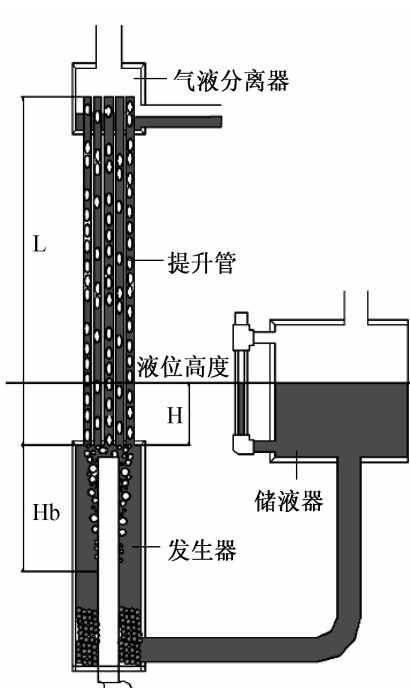


图 4 多管式气泡泵示意图^[9]
Fig. 4 Diagram of the multiple lift tube bubble^[9]

Einstein 制冷循环中,气泡泵是只承担将液体从低位储液器泵送到高位储液器中的作用(即只是作为溶液循环的驱动部件),结构如图 1 所示。

Delano^[16]根据质量守恒和动量守恒,建立了一个气泡泵的数学模型,分析了热量输入、提升管直径、浸没比对气泡泵性能的影响,研究了气泡泵在 Einstein 制冷循环中的应用特性,并以空气-水为工质对小管径气泡泵中气相质量流量与泵送最大液体质量流量的相关性进行了实验研究。研究发现,在浸没比一定的条件下,随着输入热量的增加,气泡泵管内液体流量随之增加,并增加到一个最大值,继续增加输入热量后,管内流速将会减少。他发现增加管径可以使得液体流量增加,并将提出的气泡泵模型用于预测 Einstein 制冷循环的性能,计算得出循环的 COP 为 0.17^[17]。

Schcefer^[18]在 Delano 模型的基础上,使用紊流单相因子取代经验值,分析了直径、浸没比、液体提升量和热量输入之间的关系。

White^[19]基于 Einstein 制冷循环研究了气泡泵性能,且用实验论证了提升管内的两相流在由弹状流向块状流过渡时,气泡泵的输送效率最高。并根据两相流理论和实验结果提出了流型从弹状流向块状流转变的准则。

McCulloch 等^[20]针对 Einstein 制冷循环运行条件建立气泡泵实验装置,研究了以氨水和水为工质时的气泡泵性能。结果表明,在相同的气泡泵结构下,以氨水为工质的气泡泵性能要优于以水为工质的气泡泵性能。他们还将实验得出的气泡泵性能模型用于模拟 Einstein 制冷循环的性能,计算结果为循环 COP 能够达到 0.29,比其他学者的研究结果提升了 40%。

王汝金等^[21]结合 Einstein 制冷循环,对气泡泵浸没比、上升管内径和外部加热功率与气泡泵的提升效率(液体流量与气体流量之比)之间的关系进行了理论研究。

汤成伟等^[22-24]对根据气液两相流压降理论得出了 Einstein 制冷循环中气泡泵在固定提升效率下气泡泵内径、浸没比和外部加热功率三者的关系曲线。他们针对不同实验工况条件下的气泡泵的性能进行了实验研究。实验结果表明:气泡泵的液体流量以及提升效率与提升管管径,浸没比和加热功率有关。通过实验他们还发现气泡泵的启动时间与系统初始压力有关;气泡泵液体输送存在周期性,并且该周期与加热功率和浸没比有关。

薛相等^[25]以氨水为工质,结合 Einstein 制冷循环工况对气泡泵性能进行理论研究。他们根据两

相流流形转换理论,推导出气泡泵流形转换时液体流量、气体流量与管径的关系;并根据空气提升理论、能量平衡、质量平衡推导出气泡泵浸没比、提升管内径和加热功率与气泡泵的提升效率之间的关系。

平亚琴等^[26-28]对气泡泵进行研究,并针对气泡泵的缺点对气泡泵的结构进行了改造,提出导流式气泡泵。他们还建立如图 6 所示的气泡泵实验台对导流式气泡泵进行研究。陈翠云、李广等^[29-30]对这种形式的气泡泵进行了更深入的实验研究。

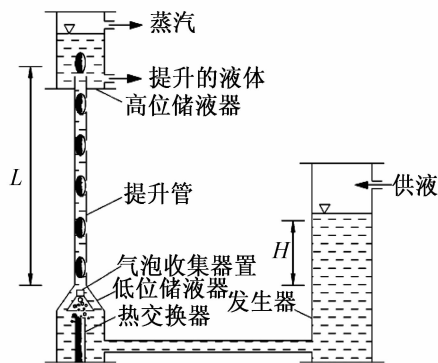


图 6 导流式气泡泵结构示意图^[28]

Fig. 6 The functional diagram of guided bubble pump^[28]

2.3 吸收式制冷技术中的应用研究

将气泡泵技术应用到吸收式制冷技术的研究进展中,目前的研究主要集中于将气泡泵技术应用于溴化锂-水吸收式制冷系统。

Pfaff 等^[31]研究了溴化锂-水吸收式制冷机中气泡泵的震荡问题。研究发现减小气泡泵提升管内径、减小气泡泵提升管高度、增大加热功率、增加驱动静压头,均会使气泡泵的震荡周期缩短。

Saravanan 等^[32-33]根据流体静力学原理分析了各种工质物性对气泡泵性能的影响,发现了一些适合应用于气泡泵驱动溶液循环的吸收式制冷装置的工质对。他们还设计了一个制冷量为 50W 的溴化锂-水吸收式制冷装置。在环境温度 40℃、发生器温度 85℃时,系统的 COP 为 0.38,实验发现当气泡泵和发生器采用电加热方式时,外界温度对系统的性能影响不明显。

郑宏飞等^[34]提出了一种弦月形通道(如图 7 所示)的热虹吸泵,并对使用这种气泡泵的溴化锂-水吸收式制冷机建立实验装置,研究弦月形通道的液体提升管的提升性能。实验表明,弦月形提升管具有比圆形提升管有更高的泵送能力,并且这种形式的气泡泵下可以在更低的工作温度下运行。

王强等^[35]对弦月形通道进行了强化传热的研究,分析弦月形通道内的小温差强化传热的机理。实

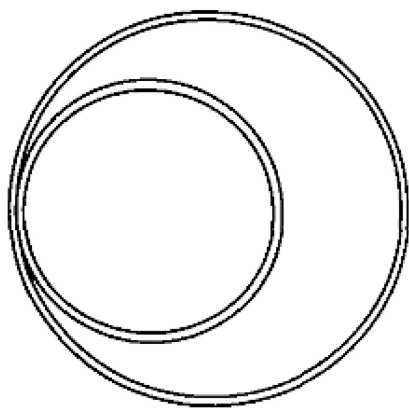


图 7 弦月形通道截面图

Fig. 7 The sectional view of the tube with lunate channel

验表明相同工况下弦月形通道的换热量是环形通道的 2~3 倍。

方甲闯等^[36]设计了一种多管弦月形通道气泡泵,并对其性能进行理论分析和实验研究。结果表明,多管弦月形通道提升泵比单管弦月形通道的提升管具有更稳定的提升性能。

张联英等^[37-38]应用两相流分相模型对弦月形通道内热虹吸提升管的流动特性进行了数值计算,建立其理论模型并通过实验进行了验证。

王小路^[39]对使用溴化锂溶液为工质的气泡泵进行实验研究,研究了包括提升管直径、加热量和浸没高度等因素对气泡泵工作性能的影响,并且研究了以水和不同浓度的溴化锂溶液作为工质时的气泡泵工作性能。高洪涛和王小路^[40-41]还对溴化锂溶液浓度和添加剂对气泡泵工作特性的影响进行了实验研究。冯飞对直管型气泡泵中的气泡成形和工作特性进行了数值模拟。马国团^[42]对无泵型双效溴化锂吸收式制冷系统中的两级气泡泵进行了研究。

2.4 太阳能制冷技术中的应用研究

将气泡泵技术应用于太阳能制冷即使用太阳能作为气泡泵的驱动热源。实际上不管是扩散-吸收式制冷技术, Einstein 循环制冷技术还是吸收式制冷技术都有使用太阳能驱动的可行性。

阚雄才等^[43]对无泵溴化锂吸收式太阳能制冷机中的气泡泵,建立了绝热弹状流气泡泵的数学模型,提出了流动阻力计算、弹状流流型判断、管内径选择范围等气泡泵结构设计的关系式,并发现局部阻力损失是气泡泵的主要损失。

谷雅秀等^[44]设计了一种使用太阳能的无泵溴化锂制冷系统,并对其进行了实验研究。他们通过使用太阳能模拟热源系统来模拟实际的工况,系统使用了

弦月形提升管和一套二次发生装置以提升系统的性能。

Ezzine 等^[45]通过实验研究了一种用于太阳能制冷的扩散-吸收式制冷机的气泡泵。该制冷机使用双元轻质烃混合物(C_4H_{10}/C_9H_{20})作为工质,以氦气作为压力平衡剂,并采用空冷形式。实验结果表明,系统内除吸收器外的所有部件的出口温度对于气泡泵的输入功率十分敏感。该制冷机最低蒸发温度达到 -10°C , 而最大 COP 可以达到 0.14。

Chaouachi 和 Gabsi^[46]对太阳能驱动扩散-吸收式制冷机进行了模拟研究。这种制冷机使用太阳能集热器作为发生器。他们发现,在低的发生温度和高的压力条件下运行时能得到最大的 COP 值。但是系统的 COP 值仍然很小,并且受到太阳能气泡泵的性能影响。

Dammak 等^[47]研究了一种太阳能扩散-吸收式制冷机的气泡泵。他们通过建立经验模型并且将突尼斯加贝斯市的天气统计数据作为运行参数对气泡泵的性能进行模拟,并且对气泡泵的几何参数进行优化。

气泡泵在制冷技术中的应用不止于上述四种制冷技术,还有研究学者将气泡泵应用于除湿型空调技术中^[48]。气泡泵除了应用于制冷技术以外,还能应用于如热管技术^[49]、太阳能热水系统等领域中^[50]。

3 影响气泡泵性能的主要参数

对气泡泵而言,其主要性能评价参数为最大提升高度和液体提升率。通过总结现有的研究可以得出气泡性能的影响因素主要有三个:结构形式、运行参数和工质。其中结构形式包括气泡泵的结构形式、提升管的管径与提升管结构;而运行参数则包括沉浸比、热量输入。

对于结构形式的影响,一些学者通过改变气泡泵与制冷系统内其他部件的布置形式获得气泡泵性能的提升^[5,8,11];而一些学者的研究不再局限于全管式结构,他们将气泡泵下部改为更大的加热空间,增加气泡的生成量,通过改变气泡泵自身的结构形式,以获得更好的气泡泵性能^[21-30];也有学者提出增加气泡泵提升管数量的方式以得到更大的液体提升量^[9,11]。

目前的许多研究都针对不同的提升管径对气泡泵性能的影响。当然,也已经有学者开始研究不同结构(非圆截面)的气泡泵提升管^[34-38]。与此同时,研究中也开始考虑流动阻力对性能的影响,并且开始思考如何减小流动阻力^[43]。

在运行参数方面,许多研究表明,沉浸比(或驱动压头)是影响气泡泵性能的重要因素,其值的改变将会引起质量流量显著变化^[6]。热量输入作为气泡泵的能量来源,对气泡泵的性能影响也十分显著,热量输入的变化会导致气体生成量的变化,而气体生成量变化使得提升管中气液两相流流形发生改变^[14]。

工质物性的差异会造成的不同的工质(或工质组),甚至不同浓度的工质在相同的气泡泵结构形式和相同运行参数下的性能是不同的^[20,40]。

4 总结和展望

气泡泵作为单压吸收式制冷循环的驱动部件,其性能对循环性能和效率有重要的影响。而且,气泡泵作为一种形式特殊的溶液泵,能够应用到如溴化锂-水吸收式制冷系统中去,减小对电能的需求,起到节能降耗的作用。在与太阳能技术结合的方面,气泡泵具有较好的应用前景,在现在的研究中也已经得到重视。

从目前的研究进展可以看出,气泡泵的研究尚处于初步阶段,研究学者的研究都是针对某个具体的制冷机或领域,研究的范围与内容有较明显的局限性,并且对于气泡泵的一些特性(如启动特性、周期震荡特性)也没有得到很好的研究。

在今后的研究中,在理论研究方面需要重于研究气泡泵的运行理论,掌握其基本规律;在实验研究方面则需要对气泡泵的一些运行特性和参数进行更深入的研究,特别是应用于不同工质的气泡泵,其性能特性是不同的。对于气泡泵性能提升的研究则可以对提升管管径、提升管结构、加热方式、气泡泵的结构形式等方面进行研究。

气泡泵以其无运动部件、无噪声、可以使用包括太阳能在内的热能驱动等优点,在将来会得到更好的发展和应用。

本文受上海市教育委员会科研创新项目(13ZZ117)和上海市重点学科建设项目(S30503)资助。(The project was supported by Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission(No. 13ZZ117) and Shanghai Key Discipline Construction(No. S30503).)

参考文献

[1] Plant B C, Munters C G. Refrigerator: United States Pat, 1609334 [P]. 1926-12-07.
[2] Einstein A, Szilard L. Refrigeration: United States Pat, 1781541 [P]. 1930-11-11.
[3] Lazzarin RM, Gasparella A, Romagnoni P. Experimental

report on the reliability of ammonia-water absorption chillers [J]. International Journal of Refrigeration, 19(4): 247-256.
[4] Srikhirin P, Aphornratana S. Investigation of a diffusion absorption refrigerator [J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22(11): 1181-1193.
[5] Chen J, Kim K J, Herold K E. Performance enhancement of a diffusion absorption refrigerator[J]. International Journal of Refrigeration, 1996, 19(3): 208-218.
[6] 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.
[7] Zohar A, Jelinek M, Levy A, et al. Numerical investigation of a diffusion absorption refrigeration cycle [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(4): 515-525.
[8] 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.
[9] 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.
[10] 贾阳涛, 朱跃钊, 郭巍, 等. 对使用双提升管结构的扩散吸收式制冷系统的性能实验[J]. 低温与超导, 2008, 36(8): 76-79. (Jia Yangtao, Zhu Yuezhao, Guo Wei, et al. Performance experiment of diffusion absorption refrigeration system with double bubble pump structure [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2008, 36(8): 76-79.)
[11] Jakob U, Eicker U, Schneider D, et al. Simulation and experimental investigation into diffusion absorption cooling machines for air-conditioning applications [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(10): 1138-1150.
[12] Wang Q, Gong L, Wang J P, et al. A numerical investigation of a diffusion absorption refrigerator operating with the binary refrigerant for low temperature applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(10): 1763-1769.
[13] 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.
[14] Benhmide A, Chaouachi B, Gabsi S, et al. Modelling of heat flux received by a bubble pump of absorption-diffusion refrigeration cycles [J]. Heat Mass Transfer, 2011, 47(11): 1341-1347.
[15] Benhmide A, Chaouachi B, Gabsi S. A Review of Bubble Pump Technologies [J]. Journal of Applied Sciences, 2010, 10(16): 1806-1813.

- [16] Delano A. Design Analysis of the Einstein Refrigeration cycle [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 1998.
- [17] Shelton SV, Delano A, Schaefer LA. Design analysis of the Einstein refrigeration cycle [C]// Proceedings of the Renewable and Advanced Energy Systems for the 21st Century, Lahaina, Maui, Hawaii, 1999.
- [18] Schaefer L A. Single pressure absorption heat pump analysis [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2000.
- [19] White S J. Bubble Pump Design and Performance [D]. Thesis Presented to The Academic Faculty, Atlanta, Georgia Institute of Technology, 2001.
- [20] Chan KW, McCulloch M. Analysis and Measurement of Bubble Pumps and Impact on Single Pressure Absorption Refrigeration Cycle [C]// Green Technologies Conference, 2010 IEEE, Grapevine, Texas: 1-4.
- [21] 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 Rujin, Liu Daoping, Xue Xiangmei, et al. Parameter Design and Determination for Bubble Pump in Single-pressure Einstein Absorption Refrigerator [J]. Fluid Machinery, 2008, 36(1): 62-65.)
- [22] 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. Experimental investigation on bubble pump in Einstein refrigeration cycle [J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(3): 35-39.)
- [23] 汤成伟, 祁影霞, 刘道平, 等. Einstein 制冷循环中气泡泵的试验研究 [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 and Superconductivity, 2009, 37(11): 55-59.)
- [24] 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 of bubble pump in single pressure absorption refrigeration system [J]. Fluid Machinery, 2009, 37(8): 49-53.)
- [25] 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(8): 50-53. (Xue Xiangmei, Liu Daoping, Wang Rujin. Performance analysis for bubble pump in pumpless absorption refrigeration system [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2008, 36(8): 50-53.)
- [26] 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(6): 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, 31(6): 46-50.)
- [27] 平亚琴, 刘道平, 陈盛祥, 等. 带有气泡收集装置的气泡泵: 中国, 2009101990987 [P]. 2010-06-09.
- [28] 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.)
- [29] 陈翠云, 刘道平, 平亚琴. 新型导流式气泡泵的实验研究 [J]. 低温与超导, 2011, 39(10): 53-56. (Chen Cuiyun, Liu Daoping, Ping Yaqin. Experimental study on novel guided bubble pump [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2011, 39(10): 53-56.)
- [30] 李广, 刘道平, 陈翠云, 等. 气泡泵在冷态试验下的性能研究 [J]. 低温与超导, 2012, 40(4): 44-47. (Li Guang, Liu Daoping, Chen Cuiyun, et al. Performance study on the bubble pump in the cold test [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2012, 40(4): 44-47.)
- [31] Pfaff M, Sarvanan R, Maiya M P. Studies on bubble pump for a water-lithium bromide vapor absorption refrigerator [J]. International Journal of Refrigeration, 1998, 21(6): 452-462.
- [32] Saravanan R, Maiya M P. Influence of thermodynamic and thermophysical properties of water-based working fluids for bubble pump operated vapor absorption refrigerator [J]. Energy Conversion & Management, 1999, 40(8): 845-860.
- [33] Saravanan R, Maiya M P. Experimental analysis of a bubble pump operated H_2O -LiBr vapor absorption cooler [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(18): 2387-2397.
- [34] 郑宏飞, 吴裕远, 姜华, 等. 太阳能吸收式制冷机中弦月形通道热虹吸溶液提升管的研究 [J]. 太阳能学报, 2003, 24(4): 466-471. (Zheng Hongfei, Wu Yuyuan, Jiang Hua, et al. The Study of the Thermosiphon Solution Elevation Tubes with Lunate Channel in Solar Absorption Chiller [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2003, 24(4): 466-471.)
- [35] 王强, 张小艳, 吴裕远, 等. 弦月形通道在太阳能空调系统中的强化传热研究 [J]. 制冷学报, 2003, 24(1): 18-22. (Wang Qiang, Zhang Xiaoyan, Wu Yuyuan, et al. Study on Enhanced Heat Transfer of Lunate Channel in Solar Energy Air-conditioning System [J]. Journal of Refrigeration, 2003, 24(1): 18-22.)
- [36] 方甲闯, 郑宏飞, 李正良, 等. 小型太阳能吸收式空调多根弦月形通道溶液提升泵的性能研究 [J]. 太阳能学报, 2007, 28(3): 292-295. (Fang Jiachuang, Zheng Hongfei, Li Zhengliang, et al. Study on Performance of the

- Thermosiphon Solution Elevation Pump with Multi-lunate Channels in Minitype Solar Absorption Type Air-conditioning System [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2007, 28 (3):292-295.)
- [37] 张联英,吴裕远,姜华. 弦月型通道热虹吸提升管流动特性的数值计算[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42 (1):17-22. (Zhang Lianying, Wu Yuyuan, Jiang Hua. Numerical Simulation for Flow Characteristics in Thermosiphon Elevation Tube with Lunate Channel [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42(1):17-22.)
- [38] Zhang L Y, Wu Y Y, Zheng H F, et al. An experimental investigation on performance of bubble pump with lunate channel for absorption refrigeration system[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2006, 29(5):815-822.
- [39] 王小路. 单级溴化锂溶液气泡泵提升特性实验研究[D]. 大连:大连海事大学, 2011.
- [40] 高洪涛,王小路. 不同溴化锂溶液浓度及添加剂对气泡泵工作特性影响的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2013,34(1):19-21. (Gao Hongtao, Wang Xiaolu. The Experimental Study on Performance of LiBr Solution Bubble Pumps with Different Concentration of Lithium Bromide and Additive [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013,34(1):19-21.)
- [41] 冯飞. 直管型气泡泵气泡成形及工作特性的数值模拟[D]. 大连:大连海事大学, 2011.
- [42] 马国团. 两级溴化锂溶液气泡泵提升特性实验研究[D]. 大连:大连海事大学, 2012.
- [43] 阙雄才,李红. 无泵吸收式制冷机热虹吸泵绝热弹状流的热虹吸特性研究[J]. 太阳能学报, 1989,10 (1):1-13. (Que Xiongcai, Li Hong. Study on Thermal Siphon Characteristics of Adiabatic Slug Flow in Thermal Siphon Pump of Absorption Refrigerator [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 1989,10 (1):1-13.)
- [44] 谷雅秀,吴裕远,王艺,等. 新型太阳能无泵溴化锂制冷系统的实验研究[J]. 太阳能学报, 2006,27(5):473-477. (Gu Yaxiu, Wu Yuyuan, Wang Yi, et al. Experimental Study on New Structure Solar Pump-free Lithium Bromide Absorption Chiller System[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2006, 27(5):473-477.)
- [45] Ezzine N B, Garma R, Bourouis M, et al. Experimental studies on bubble pump operated diffusion absorption machine based on light hydrocarbons for solar cooling [J]. *Renewable Energy*, 2010,35(2):464-470.
- [46] Chaouachi B, Gabsi S. Design and simulation of an absorption diffusion solar refrigeration unit [J]. *American Journal of Applied Sciences*, 2007,4(2):85-88.
- [47] Dammak N, Chaouachi B, Gabsi S, et al. Optimization of the Geometrical Parameters of a Solar Bubble Pump for Absorption-Diffusion Cooling Systems [J]. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2010, 3 (4):693-698.
- [48] 赵巍, 阙怡松, 朱瑞琪. 除湿型空调中气泡泵的试验研究[J]. 流体机械, 2002, 30(4):55-58. (Zhao Wei, Kan Yisong, Zhu Ruiqi. Experimental Investigation on Bubble Pump of Liquid-desiccant Air Conditioning System [J]. *Fluid Machinery*, 2002, 30(4):55-58.)
- [49] 韩晓红, 闵旭伟, 李鹏, 等. 一种利用气泡泵效应重力辅助回路热管的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46 (3):9-14. (Han Xiaohong, Min Xuwei, Li Peng, et al. Experimental study on an thermosiphon loop with bubble pump effect [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, 46(3):9-14.)
- [50] Zhang Q, Stewart S W, Brownson J R S. Bubble Pump Modeling for Solar Hot Water Heater System Design Optimization [J]. *The Penn State McNair Journal*, 2011, 18: 167-187.

通信作者简介

梁俣,男(1988-),硕士研究生,上海理工大学能源与动力工程学院,13671559305,E-mail:liangyu9596@163.com。研究方向:单压吸收式制冷技术。

About the corresponding author

Liang Yu (1988-), male, master student, School of energy and power engineering, University of Shanghai for Science and Technology, 13671559305, E-mail: liangyu9596@163.com. Research fields: single pressure absorption refrigeration.