

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20160835

多回路泵驱动回路热管系统的换热特性

段未, 马国远, 周峰

(北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124)

摘要: 为提高泵驱动回路热管系统的温度效率, 探讨多回路系统替代单回路系统用于空调系统排风能量回收的技术可行性, 制作了单回路和三回路泵驱动回路热管系统样机, 搭建实验测试平台, 研究单回路和三回路系统在夏、冬季运行工况下的换热特性, 并基于换热温差均匀性原理进行对比分析。结果表明, 相比于单回路系统, 三回路系统的性能更优, 冬季工况下室内外温差为 31.9℃时, 换热温差均匀性明显改善, 系统温度效率提高 22.6%, 夏季工况下系统温度效率变化不大。

关键词: 泵驱动回路热管; 多回路系统; 温度效率; 温差均匀性

中图分类号: TU 831.6

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2017) 01—0104—08

Heat transfer characteristics of multi-loop pump-driven loop heat pipe system

DUAN Wei, MA Guoyuan, ZHOU Feng

(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to improve the temperature efficiency of the pump-driven loop heat pipe system and explore the technical feasibility of replacement of the single-loop pump-driven loop heat pipe system by the multi-loop pump-driven loop heat pipe system for energy recovery from exhaust air in public buildings, a single-loop and a triple-loop pump-driven loop heat pipe system prototype were developed. An experimental setup was built to contrast the heat transfer characteristics between the single-loop system and the triple-loop system under summer and winter working conditions based on the principle of heat transfer temperature difference uniformity. Results indicated that performance of the triple-loop system was better. Compared with the single-loop system, the temperature efficiency of the triple-loop system was improved by 22.6% under winter working condition when the temperature difference between indoor and outdoor air was 31.9℃ because the temperature difference uniformity was much better, while the temperature efficiency changed little under summer working condition.

Key words: pump-driven loop heat pipe; multi-loop system; temperature efficiency; temperature difference uniformity

引 言

当前, 我国面临的能源形势较为严峻, 2010~2014 年, 全国年能源消费总量由 36.1 亿吨标准煤增长到 42.6 亿吨标准煤, 年均增长 4.2%^[1], 在我国能

源消费中, 建筑能耗约占全社会商品用能的 1/3^[2], 是节能潜力最大的用能领域之一。回收公共建筑排风能量用于预处理新风, 能显著降低空调系统新风负荷, 大力推进公共建筑节能, 践行我国节能减排战略, 是建设资源节约型社会的重要途径。

2016-06-20 收到初稿, 2016-09-26 收到修改稿。

联系人: 周峰。第一作者: 段未 (1990—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51376010, 51406002); 北京市自然科学基金项目 (3154031)。

Received date: 2016-06-20.

Corresponding author: ZHOU Feng, zhouleng@bjut.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (51376010, 51406002) and the Natural Science Foundation of Beijing (3154031).

近年来,有研究者将回路热管系统用于公共建筑空调系统排风能量回收^[3-8],由于回路热管系统中,蒸发器和冷凝器分离放置,能够实现远距离冷热量的传递,能够满足空调新、排风管道距离较远时能量回收的要求。但由于系统没有外加机械动力,系统启动需要一定的条件,对系统设计及匹配的要求较高,此外冷凝器与蒸发器之间需要一定的高度差,系统布置有限制,无法适应复杂大型的能量回收场所。

为解决回路热管系统循环动力不足的问题,陈东等^[9-12]提出一种由液泵或气泵驱动回路热管系统,将该系统用于高温工业炉的余热回收利用,进行了大量的理论分析、实验研究和经济性分析。马国远等^[13-17]将泵驱动回路热管系统应用于数据中心和通信基站的自然冷却,替代传统空调制冷系统,节能效果显著。田小亮等对机械泵驱动两相流动力型热管系统的工质充注量、启停特性、换热性能和沸腾传热特性进行了深入的研究^[18-20],并提出一种双循环可控热管系统,包括液体工质循环和热管工质循环^[21-23]。

马国远等^[24-25]将泵驱动回路热管系统用于空调排风能量回收,对其工作特性和性能影响因素进行了较为详细的实验研究,实验结果表明,系统能够满足夏、冬季能量回收的要求,但是冬季工况下系统的温度效率较低,只有30%~40%。

为了进一步改善温度效率,祝长宇等^[26]提出一种多回路泵驱动回路热管系统,每一回路都是一套独立的泵驱动回路热管,指出热管换热装置的总驱动温差为室内外温差,由于热管内工质的等温特性,造成热管换热装置的热损失较大,换热温差不能够被充分利用,如将装置改为多回路,则系统可视为具有变温特性的换热装置,能够减少换热温差损失,从而最大限度地提高温度效率。张双^[27]对多回路泵驱动回路热管系统从换热温差均匀性的角度进行了阐述,在单回路泵驱动回路热管系统的模拟研究中发现,随着换热器换热面积的增大,温度效率增加较为缓慢,主要原因在于单回路系统内工质的换热温差不均匀,采用多回路系统,可以调节换热温差的均匀性,提高温度效率。以上研究虽然提出了多回路泵驱动回路热管系统来改善换热温差均匀性的思路,但是仅停留在理论分析和模拟计算层面,并没有相关实验数据的支撑。

王伟等^[28]将多回路泵驱动回路热管系统用于空调系统冷凝除湿,节能效果显著,二回路热管蒸

发器的总温降比单回路提高58.18%,从节能和经济性因素考虑,三回路为最佳方案。郭振江等^[29]搭建了四回路泵驱动回路热管系统实验平台,研究其对空调除湿和冷量回收能力的影响,结果表明,空调系统的除湿能力增加了29.5%。以上研究的重点在于通过多回路系统提升空调系统的除湿能力,而未涉及空调系统能量回收的性能研究,也未对多回路系统的换热机理进行深入分析。

本文以公共建筑空调系统排风能量回收为背景,分别研制了单回路和三回路泵驱动回路热管能量回收装置样机,基于焓差实验室搭建了能量回收性能测试平台,通过实验的方法对单回路和三回路系统的性能进行对比测试,探讨多回路系统的换热特性及其性能改进程度,并从换热温差均匀性的角度对多回路系统换热机理进行分析。

1 实验装置与实验方法

单回路和三回路泵驱动回路热管系统实验样机的流程如图1和图2所示,系统主要包括工质循环泵、新风换热器、排风换热器、储液罐和截止阀等部件。通过4个截止阀的开闭可改变工质的流向。夏季工况下,截止阀1、3开,2、4关,工质在新风换热器受热蒸发,从室外新风吸热,在排风换热器预冷凝结,向室内排风放热,回收排风中的冷量为新风预冷;冬季工况下,截止阀2、4开,1、3关,工质在排风换热器受热蒸发,从室内排风吸热,在新风换热器预冷凝结,向室外新风放热,回收排风中的热量为新风预热。新风换热器和排风换热器采用铜管-铝翅片式换热器,两换热器结构尺寸相同,等高放置,在空气流通方向上有六排管路,翅片为波纹形整张铝制套片。换热器的配套风机采用轴流式风机。

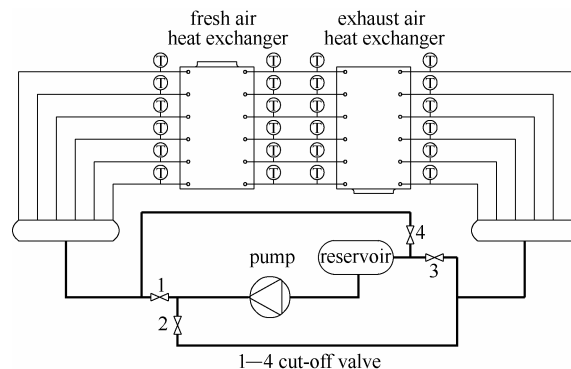


图1 单回路泵驱动回路热管系统流程

Fig.1 Schematic diagram of single-loop pump-driven loop heat pipe system

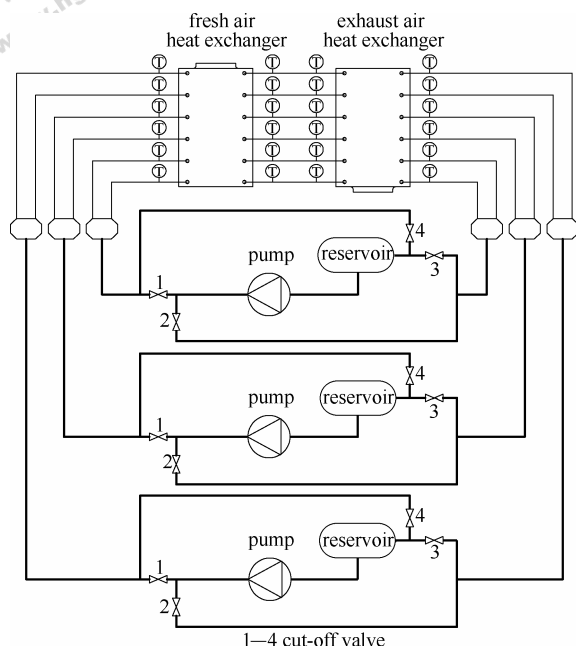


图 2 三回路泵驱动回路热管系统流程

Fig.2 Schematic diagram of triple-loop pump-driven loop heat pipe system

单回路和三回路泵驱动回路热管系统均使用相同的换热器，区别仅是流路编排上的差异：对于单回路系统，换热器六排管汇合后构成一个回路；而对于三回路系统，换热器六排管中二排分别汇合后构成一个回路，形成嵌套为一体的 3 个回路。

实验在焓差实验室中进行，由焓差室提供恒温恒湿的环境条件。排风换热器安装在室内测试室，新风换热器、储液罐和工质泵等其余部件均安装在室外测试室。由室内测试室模拟空调系统排风风道，提供排风空气条件；由室外测试室模拟空调系统新风风道，提供新风空气条件。

本实验中，泵驱动回路热管系统的换热性能主要由 3 项性能参数来评价，分别是换热量 Q 、温度效率 η 和性能系数 COP。温度效率的物理意义为实际换热量与理论最大换热量之比，适用于显热式能量回收装置，是评价其能量回收性能的重要参数。

$$Q = m_1 |h_{11} - h_{12}| \quad (1)$$

$$\eta = \frac{T_{11} - T_{12}}{T_{11} - T_{21}} \quad (2)$$

$$\text{COP} = \frac{Q}{W_1 + W_2 + W_3} \quad (3)$$

测试工况包括夏季、冬季各 4 个工况，夏季工况下，室内温度为 26℃，室外温度分别为 29.4、31.5、33.5 和 35.5℃，则室内外温差分别为 3.4、5.5、7.5 和 9.5℃；冬季工况下，室内温度为 22℃，室外温度分别为 5.2、0.9、-4.1 和 -9.9℃，则室内外温差分

别为 16.8、21.1、26.1 和 31.9℃。实验过程中，单回路和三回路系统使用同一套换热器，其换热面积为 58 m²，迎面风速为 1.8 m·s⁻¹，均保持不变；单回路和三回路系统的循环工质均选择 R22；单回路和三回路系统的工质循环泵均为自吸式磁力泵，型号相同，单回路系统使用一个工质循环泵为换热器的六排管路供液，工质质量流量为 450 kg·h⁻¹，保持不变，而三回路系统使用 3 个工质循环泵为换热器的六排管路供液，每个泵为换热器的两排管路供液，每一回路工质质量流量为 150 kg·h⁻¹，保持不变，工质总流量为 450 kg·h⁻¹，与单回路系统的流量相同。

2 实验结果与讨论

夏季工况不同室内外温差条件下单回路系统与三回路系统性能的对比如图 3 所示，冬季工况不同室内外温差条件下单回路系统与三回路系统性能的对比如图 4 所示。

图 3 给出了夏季工况下单回路系统与三回路系统换热量、温度效率和性能系数的对比。结果表明，随室内外温差增大，单回路和三回路系统的换热量和性能系数均明显增大，温度效率均降低，其中单回路系统的温度效率曲线斜率较大，而三回路系统斜率较小，即单回路系统温度效率降低的速度大于三回路系统。当温差为 3.4℃时，单回路系统的换热量、温度效率和性能系数分别为 1.86 kW、54.2%和 3.30；三回路系统的换热量、温度效率和性能系数分别为 1.76 kW、52.7%和 4.22。当温差为 9.5℃时，单回路系统的换热量、温度效率和性能系数分别为 4.30 kW、43.6%和 7.63；三回路系统的换热量、温度效率和性能系数分别为 4.45 kW、44.3%和 12.03。

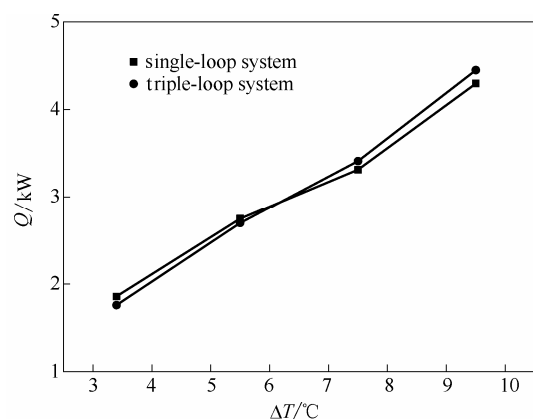
从图 3 中可以看出，当室内外温差为 3.4℃和 5.5℃时，单回路系统的换热量和温度效率高于三回路系统，随着室内外温差增大到 7.5℃和 9.5℃时，三回路系统的换热量和温度效率高于单回路系统，总体上相差不大。其主要原因在于，相比于单回路系统，采用多回路系统改变了换热器的换热温差分布，从而影响了系统的温度效率，在温差较小时（3.4、5.5℃）使得温度效率和换热量下降，在温差较大时（7.5、9.5℃）使得温度效率和换热量提高。

在不同温差下，三回路系统的性能系数均明显高于单回路系统。其主要原因在于三回路系统的总功耗明显低于单回路系统，这是因为，系统的总功耗是新风换热器风机功耗、排风换热器风机功耗与

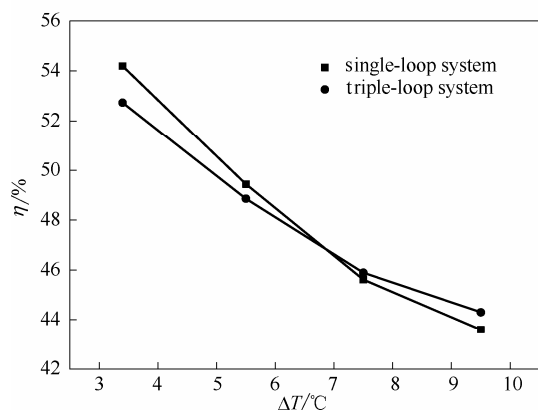
工质循环泵功耗之和, 由于新、排风换热器的迎面风速保持不变, 新、排风换热器风机功耗不变; 由于工质的质量流量保持不变, 单回路系统只由一个工质循环泵供液, 回路阻力较大, 泵的扬程较大, 导致泵的功耗较高, 功耗为 0.551~0.573 kW, 而三回路系统包括 3 个独立的循环回路, 每一回路均由该回路上的工质循环泵供液, 每个泵驱动总质量流量 1/3 的工质, 回路阻力较小, 泵的扬程较小, 使

得泵的功耗较低, 功耗为 0.396~0.414 kW。故三回路系统的总功耗低于单回路系统, 性能系数明显优于单回路系统。

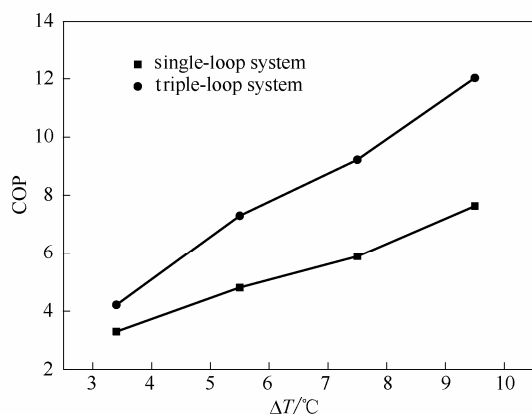
图 4 给出了冬季工况下单回路系统与三回路系统换热量、温度效率和性能系数的对比。结果表明, 随室内外温差增大, 单回路和三回路系统的换热量和性能系数均明显增大, 温度效率均增大但增幅很小。当温差为 16.8℃时, 单回路系统的换热量、温



(a) heat transfer rate

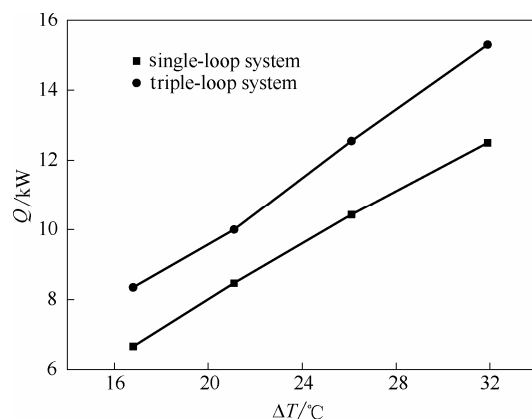


(b) temperature efficiency

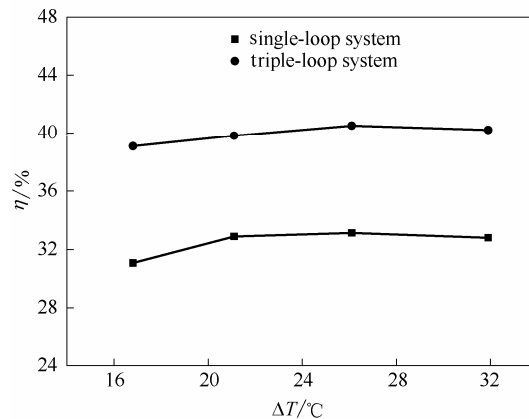


(c) COP

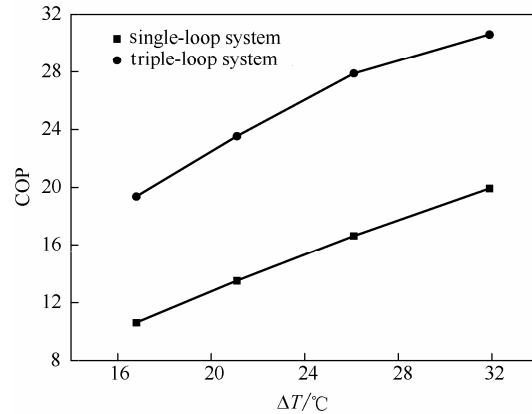
图3 夏季工况下单回路系统与三回路系统性能的对比
Fig.3 Comparison of performance of single-loop device and triple-loop device under summer working condition



(a) heat transfer rate



(b) temperature efficiency



(c) COP

图4 冬季工况下单回路系统与三回路系统性能的对比
Fig.4 Comparison of performance of single-loop device and triple-loop device under winter working condition

度效率和性能系数分别为 6.66 kW、31.1% 和 10.62；三回路系统的换热量、温度效率和性能系数分别为 8.35 kW、39.1% 和 19.37。当温差为 31.9℃ 时，单回路系统的换热量、温度效率和性能系数分别为 12.50 kW、32.8% 和 19.93；三回路系统的换热量、温度效率和性能系数分别为 15.30 kW、40.2% 和 30.61。

从图 4 中可以看出，在不同温差下，三回路系统的换热量和温度效率均明显高于单回路系统。其主要原因在于，相比于单回路系统，采用多回路系统改善了换热器的换热温差分布，从而提高了系统的温度效率和换热量。

在不同温差下，三回路系统的性能系数均明显高于单回路系统。其主要原因一方面在于三回路系统的换热量较高，另一方面在于三回路系统的总功耗较低，功耗较低的原因与夏季工况相同。

从上述实验结果可知：① 在工质种类及其质量流量、换热器换热面积和迎面风速、回路数相同的条件下，夏季工况下系统的温度效率明显高于冬季工况；② 在室内外温差、工质种类及其质量流量、换热器换热面积和迎面风速相同的条件下，对于冬季工况，三回路系统的温度效率明显高于单回路系统，对于夏季工况，三回路系统和单回路系统的温度效率相差不大。

3 换热温差均匀性分析

下面尝试从换热器换热温差均匀性的角度对上述问题进行分析。在新风换热器 6 排管路的进出口分别布置 12 个温度测点，在排风换热器 6 排管路的进出口分别布置 12 个温度测点（如图 1 和图 2 所示），监测工质流经每一排管路的进口温度和出口温度，温度测点采用欧米茄 T 型铜-康铜热电偶。按管内侧工质和管外侧空气的流动方向，所用的铜管-铝翅片式换热器属于叉流式换热器，本文将其近似为逆流式换热器来分析。由于风量测试装置安装在排风换热器一侧，换热量与温度效率都是从排风一侧计算得出，故着重分析排风换热器的换热温差均匀性。本文中“换热温差”是指每一排管路内工质的进口温度与该处管外空气温度之差，通过计算六排管路换热温差的变异系数来评价换热温差的均匀性，变异系数是数据标准差与均值之比，能够反映数据的离散程度。

分析单回路系统和三回路系统排风换热器换热温差均匀性时，循环工质为 R22，质量流量为 450

$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ，夏季工况室内外温差为 7.5℃，冬季工况室内外温差为 31.9℃，新风换热器和排风换热器的换热面积均为 58 m^2 ，迎面风速均为 1.8 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。冬季工况和夏季工况下单回路系统排风换热器管内工质和管外空气的温差如图 5 所示，冬季工况和夏季工况下三回路系统排风换热器管内工质和管外空气的温差如图 6 所示，图 5 和图 6 中虚线是排风换热器进口空气温度与出口空气温度的连线，6 条实线是排风换热器第 1~6 排管路内工质进口温度和出口温度的连线。

图 5(a)为冬季工况下单回路系统排风换热器管内工质和管外空气的温差。工质从干路流经分液头分为 6 路进入排风换热器，6 排管路的换热温差最大为 18.55℃，最小为 11.00℃，变异系数为 17.2%。在空气流通方向上与排风先接触的两排管路（第 1 排和第 2 排）的换热温差较大，工质从空气吸热迅速消除过冷并开始相变蒸发，气化率逐步达到 100%，继续吸热达到过热气体状态，由于换热量主要集中在前两排管路，导致与排风后接触的 4 排管

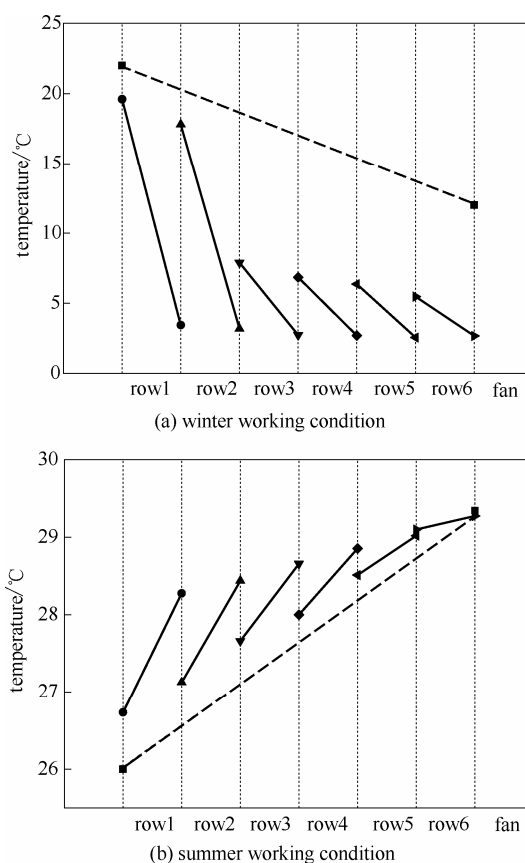


图 5 冬季工况和夏季工况下单回路系统排风换热器温差
Fig.5 Temperature difference of single-loop device exhaust air heat exchanger under winter and summer working condition

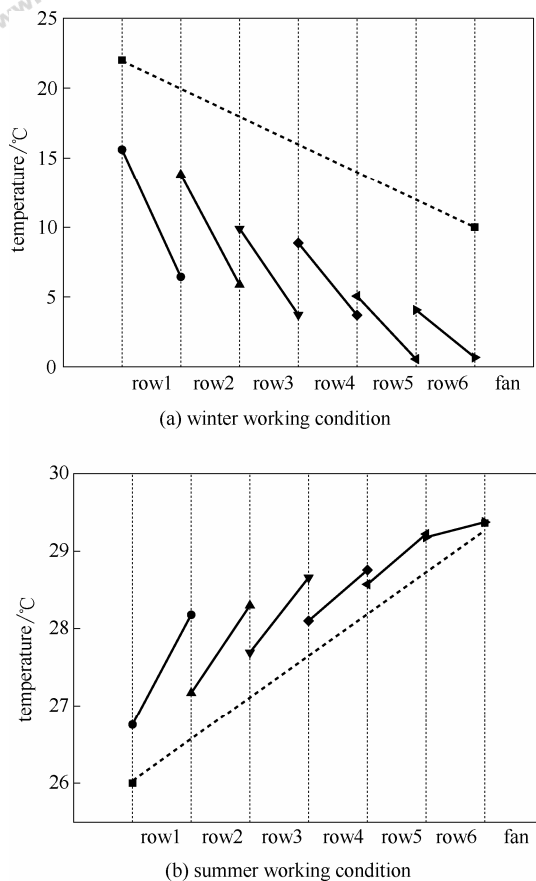


图6 冬季工况和夏季工况下三回路系统排风换热器温差
Fig.6 Temperature difference of triple-loop device exhaust air heat exchanger under winter and summer working condition

路(第3~6排)的换热温差明显减小,工质的气化率降低,换热量减小。由于6排管路的换热温差不均匀,导致工质相变不均匀、换热量不均匀,对换热器换热不利,影响系统的温度效率,上述现象在大温差工况条件下尤为明显。

图5(b)为夏季工况下单回路系统排风换热器管内工质和管外空气的温差。6排管路的换热温差最大为2.28℃,最小为0.49℃,变异系数为4.5%,该工况下单回路系统换热器的温差均匀性明显好于冬季工况。由于6排管路的换热温差比较均匀,工质相变比较均匀,换热量比较均匀,所以其温度效率(45.6%)明显高于冬季工况下单回路系统的温度效率(32.8%)。

图6(a)为冬季工况下三回路系统排风换热器管内工质和管外空气的温差。6排管路的换热温差最大为15.55℃,最小为11.33℃,变异系数为10.2%。由于三回路系统中3个循环回路是相互独立的,不会进行汇合,所以6排管路工质的进口温度形成了一个明显的梯度,即第1排的进口温度≈第2排的

进口温度>第3排的进口温度≈第4排的进口温度>第5排的进口温度≈第6排的进口温度,该梯度与流经换热器的空气温度的变化梯度相一致,单回路系统在该工况下出现的温差均匀性问题得到了很大程度的解决。由于6排管路的换热温差比较均匀,工质相变比较均匀,换热量比较均匀,所以其温度效率(40.2%)明显高于冬季工况下单回路系统的温度效率(32.8%)。

图6(b)为夏季工况下三回路系统排风换热器管内工质和管外空气的温差。6排管路的换热温差最大为2.18℃,最小为0.57℃,变异系数为3.9%,该工况下三回路系统换热器的温差均匀性与单回路系统没有明显差别,所以其温度效率(45.9%)与夏季工况下单回路系统的温度效率(45.6%)差别不大。

综上所述:①在工质种类及其质量流量、换热器换热面积和迎面风速、回路数相同的条件下,夏季工况下系统的换热温差均匀性明显好于冬季工况,故夏季工况下系统的温度效率明显高于冬季工况;②在室内外温差、工质种类及其质量流量、换热器换热面积和迎面风速相同的条件下,对于冬季工况,三回路系统的换热温差均匀性明显好于单回路系统,故三回路系统的温度效率明显高于单回路系统,对于夏季工况,三回路系统的温差均匀性与单回路系统没有明显差别,故三回路系统的温度效率与单回路系统相差不多。

4 结 论

通过对研制的采用相同换热器单回路和三回路泵驱动回路热管系统样机的实验研究,得出如下结论。

(1)对于单回路和三回路系统,换热量和性能系数均随室内外温差增大而增加,而温度效率的变化情况却取决于工况,夏季工况下温度效率随室内外温差增大而降低,冬季工况下温度效率几乎不随室内外温差变化。

(2)三回路泵驱动回路热管系统的能量回收性能优于单回路泵驱动回路热管系统,夏季工况下室内外温差为7.5℃时,采用三回路系统的换热量、温度效率和性能系数比单回路系统分别提高3.0%、0.6%和56.7%;冬季工况下室内外温差为31.9℃时,采用三回路系统的换热量、温度效率和性能系数比单回路系统分别提高22.4%、22.6%和53.5%。

(3)冬季工况室内外温差较大,采用多回路系

统对温度效率和换热量的提升较为明显，其原因在于回路数能够明显改善换热器的换热温差均匀性。夏季工况室内外温差较小，采用多回路系统并不能提高温度效率和换热量，其原因在于回路数对换热器的换热温差均匀性几乎没有改善。

符 号 说 明

COP ——性能系数

h_{11} ——排风换热器进口空气焓值, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

h_{12} ——排风换热器出口空气焓值, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

m_1 ——排风换热器空气侧质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Q ——换热量, kW

T_{11} ——排风换热器进口空气温度, $^{\circ}\text{C}$

T_{12} ——排风换热器出口空气温度, $^{\circ}\text{C}$

T_{21} ——新风换热器进口空气温度, $^{\circ}\text{C}$

ΔT ——室内外温差, $^{\circ}\text{C}$

W_1 ——排风换热器风机功率, kW

W_2 ——新风换热器风机功率, kW

W_3 ——工质泵功率, kW

η ——温度效率, %

下角标

1 ——排风换热器

11 ——排风换热器进口

12 ——排风换热器出口

2 ——新风换热器

21 ——新风换热器进口

3 ——工质泵

References

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2015)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook(2015)[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015.
- [2] 中国建筑节能协会. 中国建筑节能现状与发展报告(2013—2014)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
China Association of Building Energy Efficiency. Report on the Status and Development of China Building Energy Efficiency(2013—2014)[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [3] 任华华, 冯圣红. 分离式热管在空调系统中的应用现状及前景分析[J]. 节能, 2003, (9): 9-12.
REN H H, FENG S H. The application of separate type heat pipe to energy recovery in air condition systems and perspective analysis[J]. Energy Conservation, 2003, (9): 9-12.
- [4] 刘婵, 汤广发, 赵福云, 等. 分离式热管热回收器的性能实验[J]. 暖通空调, 2005, 35(4): 56-59.
LIU D, TANG G F, ZHAO F Y, *et al.* Performance experiment of a heat recoverer with separated heat pipes[J]. Journal of HV & AC, 2005, 35(4): 56-59.
- [5] LIU D, TANG G F, ZHAO F Y, *et al.* Modeling and experimental investigation of looped separate heat pipe as waste heat recovery facility[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, (26): 2433-2441.
- [6] 姚远. 应用于空调的重力型分离式热管换热器的设计和实验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
YAO Y. Design and experimental investigation of heat transferring capacity of gravitational separate type which applied to air-condition[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [7] 熊翰林, 李满峰, 王占伟, 等. 基于显热回收的分离式热管传热特性的实验研究[J]. 低温与超导, 2011, 39(9): 53-56.
XIONG H L, LI M F, WANG Z W, *et al.* Experimental thermal performance study on the separated heat pipe heat exchanger based on the sensible heat recovery[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2011, 39(9): 53-56.
- [8] 夏军. 热回收分离式热管换热器传热性能的实验研究[D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2012.
XIA J. Experimental studies on the heat transfer characteristics of the heat recovery and separate type heat pipe exchanger[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2012.
- [9] 陈东, 徐尧润, 刘振义, 等. 非相邻冷热源间强化传热新技术——热环的研究[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(6): 724-728.
CHEN D, XU Y R, LIU Z Y, *et al.* Research of heat circuit — a new way for heat transfer between non-adjacent heat source and heat sink[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(6): 724-728.
- [10] 陈逢胜, 陈东. 热环应用于喷雾干燥装置的技术经济分析[J]. 节能技术, 2002, 20(2): 35-36.
CHEN F S, CHEN D. Technical and economic analysis of heat circuit application to the spray drying equipment[J]. Energy Conservation Technology, 2002, 20(2): 35-36.
- [11] 谢继红, 陈东. 热环循环工质及其充注量的研究[J]. 天津轻工业学院学报, 2002, (4): 35-38.
XIE J H, CHEN D. Study on working fluids and their charge in heat circuit[J]. Journal of Tianjin University of Light Industry, 2002, (4): 35-38.
- [12] 谢继红, 陈东. 热环工作特性的理论分析与实验研究[J]. 节能, 2002, (6): 12-15.
XIE J H, CHEN D. Theoretical and experimental study on heat circuit[J]. Energy Conservation, 2002, (6): 12-15.
- [13] 张双, 马国远, 周峰, 等. 数据机房自然冷却用泵驱动回路热管换热机组性能实验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(4): 145-150.
ZHANG S, MA G Y, ZHOU F, *et al.* Experimental analysis on function of free cooling unit with a pump-driven loop heat pipe for internet data center[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(4): 145-150.
- [14] ZHANG S, MA G Y, ZHOU F. Experimental study on a pump driven loop-heat pipe for data center cooling[J]. Journal of Energy Engineering, 2015, 141(4): 04014054.
- [15] 马国远, 魏川铖, 张双, 等. 某小型数据中心散热用泵驱动回路热管换热机组的应用研究[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(3): 439-445.
MA G Y, WEI C C, ZHANG S, *et al.* Application of a pumped loop heat pipe heat exchanger unit for a small data center[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(3): 439-445.

- [16] 马跃征, 马国远, 张双. 磁力泵驱动两相冷却环路的换热特性[J]. 化工学报, 2015, **66**(11): 4388-4393.
MA Y Z, MA G Y, ZHANG S. Heat transfer characteristics of two-phase cooling loop driven by magnetic pump[J]. CIESC Journal, 2015, **66**(11): 4388-4393.
- [17] MA Y Z, MA G Y, ZHANG S, *et al.* Cooling performance of a pump-driven two phase cooling system for free cooling in data centers[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, (95): 143-149.
- [18] 仁杰, 田晓亮, 周温泉, 等. 动力型两相平行流热管充注量及启停特性研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2014, **29**(1): 47-51.
REN J, TIAN X L, ZHOU W Q, *et al.* Experimental study of the working fluid's quality and start-stop characteristic to the two-phase flow and parallel tubes heat pipe with mechanical pump[J]. Journal of Qingdao University (E & T), 2014, **29**(1): 47-51.
- [19] 刘瑞璟, 王龙江, 王宗伟, 等. 两相流动力型热管系统的性能研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2014, **29**(3): 92-95.
LIU R J, WANG L J, WANG Z W, *et al.* Study on performance of pumped heat pipe system with gas-liquid two-phase flow[J]. Journal of Qingdao University (E & T), 2014, **29**(3): 92-95.
- [20] 李晓花, 绍杰, 刘瑞璟, 等. 动力型热管内 R134a 流动沸腾传热过程的特性[J]. 化工学报, 2016, **67**(5): 1822-1829.
LI X H, SHAO J, LIU R J, *et al.* Characteristics of flow boiling heat transfer for R134a in pump-assisted separated heat pipe[J]. CIESC Journal, 2016, **67**(5): 1822-1829.
- [21] 田小亮, 孙晖. 双循环可控热管系统: 200610045059.8[P]. 2006-6-20.
TIAN X L, SUN H. Controllable bi-circulating hot-pipe system: 200610045059.8[P]. 2006-6-20.
- [22] 田小亮, 孙晖. 热管冷量回收节能空调系统: 200610045419.4[P]. 2006-7-8.
TIAN X L, SUN H. Energy-saving air-conditioning system capable of recovering heat pipe cold quantum: 200610045419.4[P]. 2006-7-8.
- [23] 杜启行, 刘瑞璟, 田晓亮, 等. 复杂热管的结构分析和实验研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2010, **25**(4): 66-70.
DU Q H, LIU R J, TIAN X L, *et al.* Structure analysis and experimental study on complex heat pipe system[J]. Journal of Qingdao University (E & T), 2010, **25**(4): 66-70.
- [24] 马国远, 段未, 周峰. 泵驱动回路热管能量回收装置的工作特性[J]. 北京工业大学学报, 2016, **42**(7): 1095-1101.
MA G Y, DUAN W, ZHOU F. Operating characteristics of a pump-driven loop heat pipe energy recovery device[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, **42**(7): 1095-1101.
- [25] 段未, 马国远, 周峰. 泵驱动回路热管能量回收装置性能的影响因素[J]. 化工学报, 2016, **67**(10): 4146-4152.
DUAN W, MA G Y, ZHOU F. Factors influencing energy recycle performance of pump-driven loop heat pipe loop device[J]. CIESC Journal, 2016, **67**(10): 4146-4152.
- [26] 祝长宇, 丁式平. 一种多级动力热管系统: 201210319388.2[P]. 2012-11-21.
ZHU C Y, DING S P. Multistage power heat pipe system: 201210319388.2[P]. 2012-11-21.
- [27] 张双. 数据中心用泵驱动两相冷却回路换热特性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
ZHANG S. Study on heat transfer characteristics of a pump-driven two-phase cooling loop for data centers[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.
- [28] 王伟, 郭振江, 李晓花, 等. 两相流动力型热管组合性能实验研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2015, **30**(1): 73-76.
WANG W, GUO Z J, LI X H, *et al.* Experimental investigation on the combination characteristics of two-phase-flow pump-assisted heat pipe[J]. Journal of Qingdao University (E & T), 2015, **30**(1): 73-76.
- [29] 郭振江, 绍杰, 王伟, 等. 机械泵驱动分离式热管应用于空调冷量回收[J]. 建筑节能, 2016, **44**(3): 10-12.
GUO Z J, SHAO J, WANG W, *et al.* Mechanically pump-driven separate heat pipe employed in air conditioning system for cooling energy recovery[J]. Building Energy Efficiency, 2016, **44**(3): 10-12.