

热管换热器在空调排风热回收中的应用

张海云, 余跃进

(南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 总结了目前用于空调系统排风热回收的热管换热器类型. 通过一些仿真模拟及实际案例, 分析了影响热管换热器热回收效率的重要因素, 包括热管工质的选择、管芯结构、热管尺寸及放置角度、工质充液率等内因, 以及新回风进风温度、风量比、迎面风速等外部因素.

[关键词] 热管换热器, 空调系统, 排风热回收, 研究进展

[中图分类号] TU831.5 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2015)02-0033-08

Application of the Heat Pipe Heat Exchanger in Air Conditioning System for Heat Recovery from the Exhaust Air

Zhang Haiyun, Yu Yuejin

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: Heat pipe heat exchangers have been widely used in air conditioning systems because of their unique advantages. This review summarizes the types of heat pipe heat exchangers currently used in air conditioning system for heat recovery. The conventional heat pipe and two-phase closed thermosyphon are used more at present, while the pulsating heat pipe and micro-grooved heat pipe exchangers have better prospects. Through a number of simulations and practical cases, the factors which greatly influence the heat recovery efficiency of heat pipe heat exchangers are analyzed in this research. The factors include the internal ones, such as the working fluid, the wick structure, aspect ratio, inclination angle and filling ratio, and the external ones such as the temperatures and the volume ratio of the fresh and exhaust air, the airflow rate and so on.

Key words: heat pipe heat exchanger, air conditioning system, heat recovery from the exhaust air, research advancement

空调系统中, 被排出室外的部分回风蕴含着一定的能量, 而新风进入室内前通常需要额外的能量对其进行冷却或加热, 若能利用回风的热(冷)量对新风进行预热(预冷), 即可实现能量回收, 因而热回收装置在空调系统节能中具有重要的作用. 目前常用的热回收器类型包括转轮式、液体循环式、板式/板翅式、溶液吸收式及热管式^[1].

热管换热器有很多显著的特点, 如结构紧凑、单位体积的传热面积大, 无需转动部件、不额外消耗能量, 运行安全可靠、维护简单、使用寿命长, 导热性能较强、换热效率较高, 冷热气流互不接触、不会产生交叉污染等. 热管是依靠自身工作介质的相变实现传热的换热装置, 分为蒸发段、冷凝段两部分传热区域, 可以通过很小的截面实现冷热交换. 因而热管换热器在空调系统排风热回收的应用中具有独特而重要的地位.

Ahmadzadehtalatapeh M 等^[2]通过 TRNSYS 瞬态系统仿真软件研究了热管换热器在马来西亚一所医院病房空调系统中的应用. 研究主要针对病房的送风状态和室内空气状态, 调查显示现有空调系统并不能保证所需的进风量及室内空气状况. 若在系统中增设一个八排的热管换热器, 以一年的运行时间为模拟周期, 结果表明该设计能节约大量能耗, 并保证送风和室内空气洁净度, 值得推广. 此后, Ahmadzadehtalatapeh M 又在一座图书馆建筑中进行了空调系统改造^[3], 通过仿真模拟和实验数据证明了热管换热器在能量回收方面的显著优势. 在我国, 杨可等^[4]介绍了热管技术在负压隔离病房空调系统中的应用; 庄琛等^[5,6]分析了热管换热器在宾馆和商场排风能量回收中的经济效益; 阳长等^[7]在一个动物房洁净室的排风系统中应用了热管回收技术.

收稿日期: 2014-11-17.

通讯联系人: 余跃进, 教授, 研究方向: 空调系统优化与节能. E-mail: dlkj@njnu.edu.cn

本文以国内外学者的代表性研究成果为例,介绍了几种常用于空调热回收的热管换热器形式;通过一些仿真模拟及实际案例,总结热管热回收技术目前的应用状况,分析影响热管换热器的热回收效率的重要因素。

1 热管换热器的类型

根据结构、功能和工质在冷凝段与蒸发段间循环的方式不同,热管有多种不同的类型^[8]。空调系统中的热管热回收技术也不仅仅限于排风热回收,还可与蒸发冷却技术相结合,用作间接蒸发冷却空调机组。本文依据热管工质回流方式的不同进行分类,介绍几种与空调系统排风热回收有关的热管换热器,其中有几种应用技术已较为成熟,也有一些处于理论研究阶段。另有环路热管、可变热导热管等几种新型热管,目前仅用于航空航天及微电子设备的冷却领域,本文将不作介绍。

1.1 管壳式热管(传统吸液芯热管)

传统的管壳式热管是目前最被认可、构造最为简单的被动式传热设备,在各种不同距离的热量传输中都有广泛应用。该类热管中,工作液体的回流不依靠重力等其他外力,仅依靠管芯的毛细力作用:在蒸发段液体受热蒸发并带走热量,蒸汽从管芯流向冷凝段,遇冷凝结成液体并放出潜热,在毛细力的作用下,液体回流至蒸发段完成一个循环,在此过程中即可实现新风与回风的热量传递。

Abd El-Baky^[9]等人通过计算和试验证明了热管换热器在空调系统中的热回收效率,试验系统包括两段截面为 $0.30\text{ m}\times 0.22\text{ m}$ 、长 1 m 的新回风进风通道和 25 根 0.5 m 长的铜管组成的热管换热器,换热器的蒸发段和冷凝段各长 0.2 m ,绝热部分长 0.1 m ,热管呈水平交错布置如图 1 所示。试验结果表明该装置的热回收效率随着新风进风温度的升高而提高,最高达到了约 80%。该系统中的热管换热器即为管壳式热管的一个应用形式。

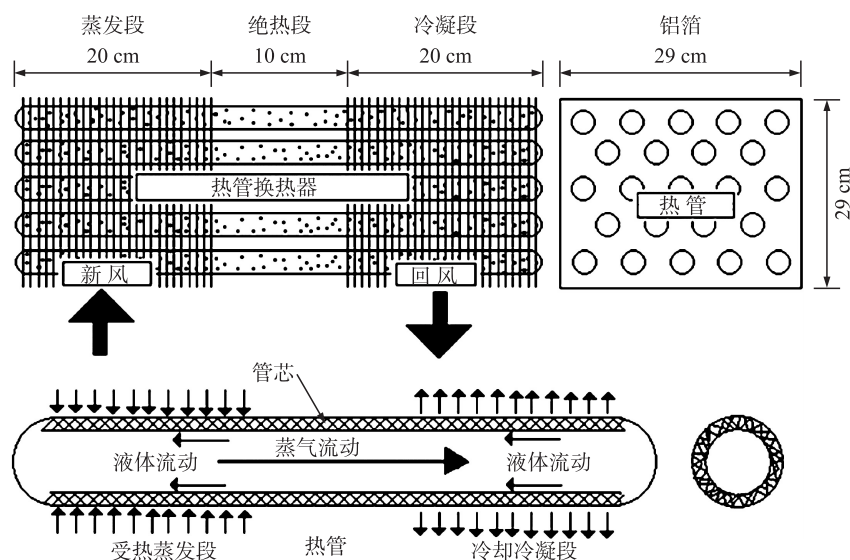


图 1 管壳式热管及热管换热器的结构

Fig. 1 The structure of the tube heat pipe and heat pipe heat exchanger

1.2 热虹吸热管(重力式热管)

热虹吸管,也称为两相闭式热虹吸管,其本质上属于热管,但没有吸液芯。与传统的管壳式热管利用毛细力作用有所不同,热虹吸管利用重力传递位于冷源下方的热源热量,因而又称为重力辅助热管,其蒸发段位于冷凝段下方。工作液体经冷凝段冷凝后,在重力作用下回流至蒸发段以完成循环。由于吸液芯或多或少会对冷凝液体的流动产生阻力,当环境允许利用重力时,热虹吸管热管是优于其他热管形式的首选。有不少学者在热回收系统的研究中都采用了热虹吸管热管换热器。

Jouhara H 等^[10]通过实验研究了热虹吸管换热器的性能,该换热装置采用了 9 根内联改进装配的热虹吸管,以水为工作介质,装置结构及夏季新风预冷时冷热风流动示意如图 2 所示。热虹吸管两侧均装有轴流风机以保证冷热气体的回流,通过中间挡板处的旋转支架可调节热管的倾斜角度。对于重力式热管而言,冷凝段的安装位置必须高于蒸发段,因而其适用于冷风在上、热风在下的场合;若用于空调系统全年

的排风能量回收,则冬季进行新风预热处理时需要转换进、排风口相对于热管的位置. 该试验结果表明,装置垂直放置时热回收效果最佳,因为此时重力作用最大、工质液体回流阻力最小.

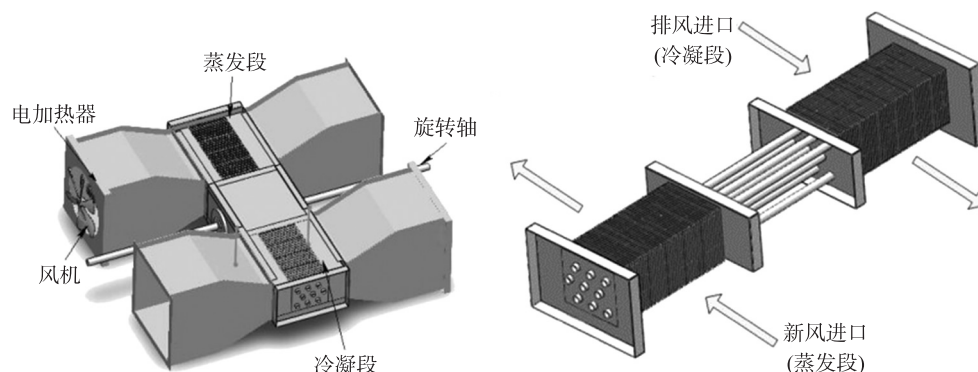


图2 热虹吸管换热装置

Fig. 2 A thermosyphon based heat exchanger

分离式热管是在传统重力式热管基础上发展起来的,主要特点是将加热段和冷凝段分开放置,使其能够灵活布置,并能根据需要调整换热面积大小. 蒸发段和冷凝段由两组管束组成,通过一根上升管和一根回流管进行连接,且冷凝段位于蒸发段上方以保证液体利用重力回流. 刘娣等^[11]针对分离式热管热回收器进行了性能实验,通过设计的样机实验分析了热管热回收效率随室内外温度的变化规律,以及充液率对热管传热效果的影响. 目前分离式热管多用于机房空调中,其能够实现较精确的温湿度控制,并保证空气质量.

1.3 脉动热管/振荡热管

脉动热管,或称振荡热管,是热管的最新发展形式. 它是将毛细管弯曲成蛇形结构^[12],管内不设吸液芯,而是抽成真空后注入一部分工质,工质在表面张力的作用下形成液塞和气塞. 热管一端受热,另一端受冷,则内部随机形成的气塞和液塞在压差作用下形成振荡流动,从而使得热量从蒸发段流至冷凝段. 该类热管分为闭合回路型和开放回路型两种,如图3(a)、(b)所示,前者的管束两端相连通形成闭合回路,后者则不相通,闭合回路更有利于工质的单向循环^[13]. 若在回路中增加单向阀,用来控制工质的单向流动,如图3(c)所示,则热管的传热效率更高;不过由于脉动热管的微型化,增加单向阀的操作难度较大.

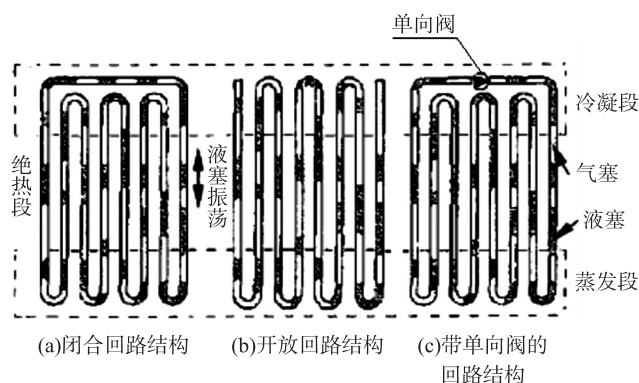


图3 脉动热管基本结构

Fig. 3 Basic structure of pulsating heat pipe

脉动热管的驱动力不是传统热管中管芯的毛细作用,而是依靠工质的核态沸腾及冷凝作用,因而具有结构更简单、传热效果更好、环境适应性更好等优点. 目前脉动热管技术主要应用于电子器件的散热,太阳能集热器、低温冷却及热泵干燥等领域的研究也不断取得新进展,而空调系统中脉动热管的应用相对较少.

脉动热管的驱动力不是传统热管中管芯的毛细作用,而是依靠工质的核态沸腾及冷凝作用,因而具有结构更简单、传热效果更好、环境适应性更好等优点. 目前脉动热管技术主要应用于电子器件的散热,太阳能集热器、低温冷却及热泵干燥等领域的研究也不断取得新进展,而空调系统中脉动热管的应用相对较少.

韩洪达等^[14]曾对脉动热管应用于排风的余热回收进行了初步试验. 实验装置的传热部分由若干组脉动热管组成,以 R134a 为工质,充液率为 50%;作为初步实验,该装置安装角度为 10°,采用底部加热的方式模拟运行,并在实验室内人工模拟空调房间的进、排风温度. 试验结果表明,该热管换热器的冷热端温差需要超过一个最小值,脉动热管才能启动,且系统热阻随着热负荷的增加而降低;而在送、排风温度不变时,风量的增加导致装置的效率下降;同时,由于设计的脉动热管间距较大且未安装肋片,该装置的整体换热效率不高.

1.4 微热管

微热管就是有微槽结构的热管,热管内一般没有毛细吸液芯,管内液体的回流主要依靠槽道尖角区形成弯月面的毛细压差提供动力,截面结构如图4所示. 其原理是在金属平板内开出一条轴向的内腔,并在

内腔一侧再加工出微型的槽道^[15]. 平板的两端进行真空密封,通过某一端的充液孔注入适量工质后焊封. 热管工作时,液态工质在毛细力的作用下沿着微型槽道流动,槽道上部则为连通的气腔,蒸发后的气体与液体呈反向流动完成换热循环. 这种热管的传热效率与强制对流系统相比显著降低,但其结构紧凑,且在不同的环境热负荷下均能很好地控制温度. 目前主要用于电子设备的冷却,在空间技术和生物医药领域也取得了一些进展,但在空调热回收系统中的应用仍处于探索阶段.

Zhang J 等^[16]介绍了一种新型的微槽平板热管换热器,并研究将其应用于模拟的空调热回收系统中. 图 5 所示为带有微通道的 16 个平板热管单元组成的新型换热器示意图. 每个平板热管尺寸为 $340\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 2\text{ mm}$,各单元之间有通道相连. 图 5 还包括微槽热管的一个横截面示意图,该热管由 19 个相互独立的微通道组成. 该试验模拟了夏季工况下的空调系统,室外温度在 $27\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间变化,室内温度维持在 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$,两者分别对应室外新风和回风的温度. 研究结果显示,该新型换热器可以有效节能.

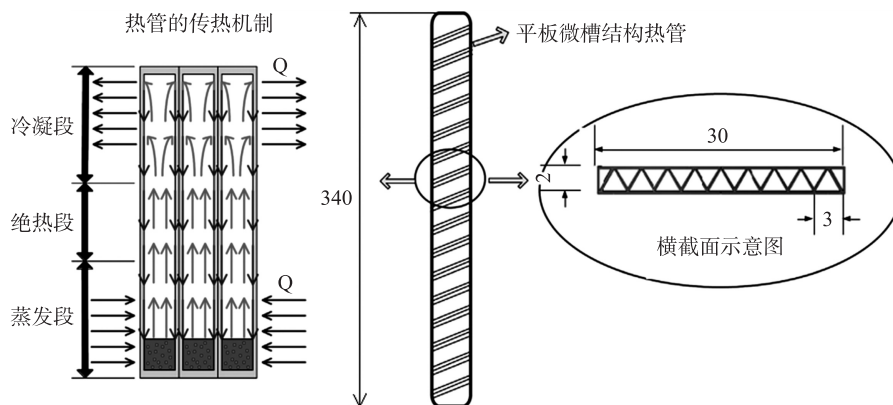


图 5 一种新型的微槽平板热管换热器

Fig. 5 A new type of micro grooves flat heat pipe heat exchanger

2 热管换热器热回收效率的影响因素

目前针对热管换热器的研究,主要集中在如何提高换热器的性能、尤其是换热效率等方面,这些研究大多为理论分析结合实验验证. 热管换热器的运行机理涉及气泡成核、压力和温度扰动、流态变化、动态不稳定等众多现象,这些因素都会影响设备的传热性能. 这样复杂的运行机制很难系统地总结并运用于特定设备的特定设计参数下,因而大多数理论分析都基于实验研究.

现有的研究表明,热管换热器的换热效率影响因素包括热管工质的选择、管芯结构、热管尺寸、工质充液率及热管的放置角度等. 应用于空调热回收系统中,影响性能的因素还包括新回风比例、进风温度及流速等环境状况. 本文针对不同的影响因素,列举了一些有代表性的实验案例.

2.1 热管传热性能的影响因素

2.1.1 热管工质及管芯结构的影响

在热管工质的选择上,寻找导热能力更强、更环保的替代工质是目前研究的重点. Han H 等^[17]详细阐述了工质的热物理性能对于振荡热管导热性能的影响,以去离子水、甲醇、乙醇和丙酮 4 种工质为例进行了试验分析;Zhu Y 等^[18]则研究了不同比例的水-丙酮混合物在振荡热管中的传热性能.

纳米流体因其卓越的导热能力受到越来越多的关注,尤其是磁性纳米流体应用于磁场中还具有可变热导的特性^[19],纳米流体的浓度对热回收效率的影响是目前的研究热点之一. 张冀等^[20]利用一种适用于民用建筑热回收的平板微槽式热管热回收装置,研究了换热工质对于该装置热回收效率的影响. 实验选用体积浓度为 0.001% 、 0.01% 及 0.1% 的 $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-R141b}$ 纳米流体作为工质,并与以 R141b 为工质时的热

回收效率进行了比较. 实验结果证明,在液体工质中添加纳米粒子,能显著增大原纯液体的导热系数,从而增强传热.

Longo G A 等^[21]则研究了一种新型环保工质 HFO1234ze(E) (该工质具有较低的 GWP 值)在热管换热器中的换热性能. 该实验中热管换热器选用 54 根长 700 mm、带有 12.7 mm 厚微型翅片的铜管,换热器置于一个双风道空调系统中. 通过基于换热器半经验模型的理论计算及实验测试,结果证明,与常用的碳氢制冷剂 HFC134a 相比,HFO1234ze(E) 的换热性能不相上下,因其环保特点,可作为 HFC134a 的替代工质.

根据管芯结构的不同,常见的热管有槽式、网状、通道式及烧结式吸液芯. 有研究表明,大多数管芯毛细能力有限,不利于工质的循环流动,而烧结式吸液芯通常具有更好的毛细能力,临界热通量值也更高^[22].

Cieśliński J T 等^[23]设计了一种特殊的两相热虹吸式热交换器,其主要特征在于蒸发器由 19 根光滑的、或有波纹管芯及多孔涂层管芯的管束组成. 该热交换器由两个水平放置的圆柱形通道组成,管束置于上下两个通道中作为蒸发器与冷凝器. 该试验研究了蒸发器的管束间距、液体压头和流体类型对虹吸管换热器性能的影响. 结果表明,由多孔涂层管束组成的蒸发器比波纹管、光滑管蒸发器更有助于提高热虹吸换热器的性能.

Chiang Y C 等^[24]综合分析了管芯结构、热管工质及其浓度等多个因素对热管换热器热回收效率的影响. 实验选用 3 种管芯结构:无管芯、光滑管、烧结式铜管(有波纹及有多孔涂层);工质是体积分数为 0.16%~3.20% 的磁性纳米流体及去离子水. 将这些变量组合起来进行交叉实验,结果表明:波纹管装有 0.80% 纳米流体及涂层管装有 0.16% 纳米流体时,热管的热阻最小、换热效果最好;与装有去离子水的光滑热管相比,前两种情况下的热阻减小约 80%、临界热流密度增强约 2.7 倍. 该研究为优化空调系统用热管换热器的设计提供了很好的思路.

2.1.2 热管尺寸、倾斜角及充液率的影响

对于虹吸式热管而言,因其以重力为驱动力,热管放置的角度显然会影响传热效果. 但在具体的热管换热器设备中,倾斜角往往与工质类型、工质的充液率(工质体积与热管蒸发段总体积之比)及热管的尺寸(如长径比、蒸发段长度与热管内径之比)等因素共同作用,对热性能产生影响. 文献[25]列举了众多前人的研究,发现倾角对传热性能的影响存在较为一致的基本趋势:在倾角较小的范围内,角度增大则热流密度增大;在倾角较大的范围内,热流密度则出现平缓的下降. 但很难找到具有普遍意义的量化关系,通常需通过实验研究来得到符合实际的结论、找到最佳工况点.

Emami M R S 等^[26]以一个模拟的两相闭式热虹吸管换热系统测试了热管的长径比、充液率及倾斜角对热性能的影响. 实验设置充液率在 20%~60% 范围内变化,热管的长径比分别为 15、20 和 30,倾斜角则在 15°~90° 之间变动. 结果表明,对于 3 个长径比和几种不同的充液率,均在倾角为 60° 时获得热虹吸管的最佳热性能;要取得最佳传热效果,不同的长径比分别对应不同的充液率,且总体来看长径比较小时,充液率对传热速率的影响更大.

很多学者研究指出,与重力热管相比,脉动热管的运行性能在特定条件下较少受重力场的限制^[27],但倾斜角度的改变会对脉动热管的热阻产生影响,从而改变其换热效率. 另一方面,由于气泡的产生是脉动热管启动的第一动力,蒸发段与冷凝段的工质压力差则是维持工质定向流动的重要驱动力,因而工质的流动状态对脉动热管的换热机制有很大影响,即工质的充液率对脉动热管而言尤为重要. 王宇等^[28]研究发现低充液率时易形成环状流,若能维持该状态稳定,脉动热管将呈现较好的传热性能;但低充液率或过高的蒸发段加热强度也易导致干烧现象,使得传热恶化、达到传热极限.

Barua H 等^[29]针对一个回路脉动热管换热器系统进行了实验分析,结果表明工质类型及充液率等对传热性能有较大影响. 实验选用水和乙醇两种工质,而充液率分别设置为 100%、82.5%、63%、41.3% 及 28%. 以水为工质时,充液率越低则传热热阻越小,充液率接近 30% 时达到最佳传热效果;以乙醇为工质时,若蒸发段输入热量较低,则充液率超过 50% 时传热性能最佳,若输入热量较高,则无论充液率多少,传热效果均很理想. Jahan S A 等^[30]将上述实验的变量充液率改为了倾斜角,测试了以水和乙醇为工质,倾斜角分别为 0°、30°、45°、60°、75° 及 90° 时脉动热管换热器的传热性能. 研究证明,倾斜角度的改变使得热管内部工质流动机理发生改变,因而传热性能也有所不同. 该实验中,倾角为 75° 时热管换热性能最佳.

2.2 热管换热器余热回收的影响

热管换热器应用于空调系统排风热回收时,还将受到空调系统中新排风工况的影响.研究表明,其中主要的影响因素包括新回风进风温度、新回风风量比、迎面风速等^[31],这些因素与热回收效率的相关性也未得出明确的数量关系,通常需通过实验测得.

文献[27]将脉动热管换热器样机应用于空调系统中,测试其冬夏季工况下的能量回收效果,并分析了空调系统新风温度、风量(风速)及倾斜角对热回收效率的影响.实验结果表明:(1)新风排风风量相等、排风温度及风速不变时,随着新风入口温度的增加,夏季工况下新排风温差增加,则热回收效率增加;冬季工况下新排风温差降低,则热回收效率随之降低.(2)随着排、新风比的增加,热回收效率先下降后上升,排、新风比为 1 时换热效率最小;且风速对脉动热管换热器换热效率的影响要小于温度.(3)当风速和新排风温差一定时,倾角由 0°到 90°变化过程中,换热效率先上升后下降,60°时热管效率最高;且新风入口温度越高,倾斜角对脉动热管换热器换热效率的影响越小.

李国庆等^[32]设计了一个水平的管壳式热管热回收机组实验台,对该机组进行了不同工况下的性能实验,以比较充液率、风量及室内外温度等因素对该热回收机组热回收效果的影响.该研究先由充液率对机组热回收效率影响的性能实验得出,充液率为 45%、热风进口温度为 34℃时热回收效果最好;在此条件下同时改变热风、冷风风量,随着风量的增大,机组热回收效率逐渐减小,且下降幅度不断增大;再设置风量为 250 m³/h、改变冷风的进口温度进行实验,结果表明在室外温度稳定的情况下,在热管设计温度范围内,室内温度越高,热回收效率越高.

周峰等^[33]搭建了两相闭式热虹吸管换热器的性能测试平台,测试分析了不同的工作温差、环境温度和风速对热虹吸管换热机组热回收效率的影响.实验结果表明,冷热温差对传热量的影响大于热端进口温度,冷热段温差越大则压力差越大,热虹吸管换热器的传热动力越强;因而当热风进口温度一定时,环境温度升高、冷热温差减小,机组换热量下降.此外,改变机组迎面风速进行实验可得,随着迎面风速的增大,热虹吸管换热机组的换热量也不断增加.

3 结论与展望

热管换热器在空调热回收系统中具有广泛的应用前景.本文总结了目前用于空调热回收系统的热管换热器的主要类型,介绍了热管换热器热回收效率影响因素的研究进展,主要结论如下:

(1)目前实际应用于空调系统中的热管换热器形式单一,多为传统的管壳式热管或虹吸管,其他形式的热管换热器多停留在理论分析阶段.如脉动热管的传热和运行机理尚未有统一的结论,针对脉动热管所建立的数学模型过于简化,不能准确反映其内部复杂的气液两相流现象,其运行过程中易出现的停滞、反向、干烧等问题仍未找到好的解决方法.但脉动热管、微槽热管相较于管壳式热管、虹吸管而言,具有更好的环境适应性及更广的温度适用范围,因而针对前两者的研究是未来的重要发展方向.

(2)影响热管换热器传热性能的因素很多,包括热管材料、管芯结构、加热冷却段长度、工质类型、充液率、倾角等等.目前的研究大多针对某一个或某几个因素,而实际上这些因素往往相互关联、相互影响.要找到这些因素之间的相关性,及其对热管换热器的作用关系,仍需大量的试验研究和理论分析.

(3)热管换热器应用于空调系统热回收时,新回风温度、风量比及风速等因素对热回收效率有很大影响.如何寻找热管热回收装置的最佳运行工况,并将之推广至商业规模的应用中,这也将成为未来的主要研究方向之一.

[参考文献](References)

- [1] 陆耀庆.实用供热空调设计手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.
Lu Yaoqing. Practical Heating and Air Conditioning Design Manual[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2008
- [2] Ahmadzadehtalatapeh M, Yau Y. The application of heat pipe heat exchangers to improve the air quality and reduce the energy consumption of the air conditioning system in a hospital ward—a full year model simulation[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(9): 2 344–2 355.

- [3] Ahmadzadehtalatapeh M. An air-conditioning system performance enhancement by using heat pipe based heat recovery technology[J]. Scientia Iranica, 2013, 20(2): 329-336.
- [4] 杨可, 刘俊杰, 朱能, 等. 负压隔离病房空调系统设计与节能[J]. 燃气与热力, 2005, 2(25): 48-51.
Yang Ke, Liu Junjie, Zhu Neng, et al. Design and energy saving of air-conditioning system for negative pressure isolation ward[J]. Gas & Heat, 2005, 25(2): 48-51.
- [5] 庄琛, 顾平道, 李英娜. 热管换热器在宾馆排风能量回收中的经济性分析[J]. 制冷与空调, 2004(3): 79-82.
Zhuang Chen, Gu Pingdao, Li Yingna. The economic analysis of heat pipe heat exchanger in exhaust air energy recovery system of hotel[J]. Refrigeration & Air-conditioning, 2004(3): 79-82.
- [6] 李英娜, 顾平道, 庄琛. 热管换热器在商场排风能量回收中的探讨[J]. 山西能源与节能, 2004(2): 33-35.
Li Yingna, Gu Pingdao, Zhuang Chen. The application of heat pipe heat exchanger on the exhaust air energy recovery system of market[J]. Shanxi Energy and Conservation, 2004(2): 33-35.
- [7] 阳长, 刘泽华, 陆麟, 等. 动物房洁净室排风能量回收方案技术经济性比较[J]. 暖通空调, 2005, 35(6): 79-81.
Yang Chang, Liu Zehua, Lu Lin, et al. Economical and technical comparison of exhaust air energy recovery schemes for animal clean rooms[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2005, 35(6): 79-81.
- [8] Reay D, McGlen R, Kew P. Heat Pipes: Theory, Design and Applications[M]. Butterworth Heinemann, 2013.
- [9] Abd El-Baky M A, Mohamed M M. Heat pipe heat exchanger for heat recovery in air conditioning[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(4): 795-801.
- [10] Jouhara H, Merchant H. Experimental investigation of a thermosyphon based heat exchanger used in energy efficient air handling units[J]. Energy, 2012, 39(1): 82-89.
- [11] 刘娣, 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 Di, Tang Guangfa, Zhao Fuyun, et al. Performance experiment of a heat recovery with separated heat pipes[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2005, 35(4): 56-56.
- [12] 史维秀, 潘利生. 脉动热管理论及技术进展[J]. 流体机械, 2013(7): 17.
Shi Weixiu, Pan Lisheng. Theory and technology progress of pulsating heat pipe[J]. Fluid Machinery, 2013, 41(7): 72-77.
- [13] 韩同. 脉动热管的启动和运行性能及其可视化研究[D]. 天津: 天津大学机械工程学院, 2012.
Han Tong. Start-up and operating performance of the pulsating heat pipe and its visualization research[D]. Tianjin: School of Mechanical Engineering, Tianjin University, 2012.
- [14] 韩洪达, 杨洪海, 尹世永, 等. 脉动热管用于空调系统排风余热(冷)回收初探[J]. 暖通空调, 2009, 39(5): 109-111.
Han Hongda, Yang Honghai, Yin Shiyong, et al. Preliminary discussion on application of pulsating heat pipes to air conditioning system for heat (cool) recovery from exhaust air[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2009, 39(5): 109-111.
- [15] 王昊. LED 微槽群平板热管散热器研究[D]. 大连: 大连理工大学能源与动力学院, 2008.
Wang Hao. Investigation on LED microgrooved flat heat pipe[D]. Dalian: School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, 2012.
- [16] Zhang J, Diao Y H, Zhao Y H, et al. Experimental study on the heat recovery characteristics of a new-type flat micro-heat pipe array heat exchanger using nanofluid[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 75: 609-616.
- [17] Han H, Cui X, Zhu Y, et al. A comparative study of the behavior of working fluids and their properties on the performance of pulsating heat pipes(PHP)[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014, 82: 138-147.
- [18] Zhu Y, Cui X, Han H, et al. The study on the difference of the start-up and heat-transfer performance of the pulsating heat pipe with water-acetone mixtures[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 77: 834-842.
- [19] Chiang Y C, Chieh J J, Ho C C. The magnetic-nanofluid heat pipe with superior thermal properties through magnetic enhancement[J]. Nanoscale Research Letters, 2012, 7(1): 1-6.
- [20] 张冀, 刁彦华, 赵耀华, 等. 纳米流体应用于平板式热管热回收装置的实验研究[J]. 建筑科学, 2012, 28(6): 31-35.
Zhang Ji, Diao Yanhua, Zhao Yaohua, et al. Experimental study on flat plate heat pipe heat recovery equipment with nanofluid[J]. Building Science, 2012, 28(6): 31-35.
- [21] Longo G A, Righetti G, Zilio C, et al. Experimental and theoretical analysis of a heat pipe heat exchanger operating with a low global warming potential refrigerant[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 65(1): 361-368.
- [22] Sobhan C B, Rag R L, Peterson G P. A review and comparative study of the investigations on micro heat pipes[J]. International Journal of Energy Research, 2007, 31(6/7): 664-688.
- [23] Cieřliński J T, Fiuk A. Heat transfer characteristics of a two-phase thermosyphon heat exchanger[J]. Applied Thermal

- Engineering, 2013, 51(1): 112-118.
- [24] Chiang Y C, Kuo W C, Ho C C, et al. Experimental study on thermal performances of heat pipes for air-conditioning systems influenced by magnetic nanofluids, external fields, and micro wicks[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 43(7): 62-70.
- [25] 刘挺. 热虹吸管热回收装置传热特性及应用研究[D]. 北京:北京工业大学环境与能源工程学院, 2010.
Liu Ting. Research on heat transfer characteristics and application of thermosyphon heat recovery devices[D]. Beijing: College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, 2010.
- [26] Emami M R S, Noie S H, Khoshnoodi M. Effect of aspect ratio and filling ratio on thermal performance of an inclined two-phase closed thermosyphon[J]. Iranian Journal of Science and Technology, 2008, 32(B): 39.
- [27] 林天轮. 空调用脉动热管冷热回收装置的试验研究[D]. 上海:东华大学环境科学与工程学院, 2011.
Lin Tianlun. Experimental study on pulsating heat pipe for cold and heat recovery in air-conditioning[D]. Shanghai: School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, 2011.
- [28] 王宇. 回路脉动热管运行传热特性及管路结构改进的研究[D]. 天津:天津大学机械工程学院, 2012.
Wang Yu. Study on operational and thermal performance and pipeline configuration improvement of closed loop pulsating heat pipe[D]. Tianjin: School of Mechanical Engineering, Tianjin University, 2012.
- [29] Barua H, Ali M, Nuruzzaman M, et al. Effect of filling ratio on heat transfer characteristics and performance of a closed loop pulsating heat pipe[J]. Procedia Engineering, 2013, 56: 88-95.
- [30] Jahan S A, Ali M, Islam M Q. Effect of inclination angles on heat transfer characteristics of a closed loop pulsating heat pipe (CLPHP)[J]. Procedia Engineering, 2013, 56: 82-87.
- [31] Srimuang W, Amatachaya P. A review of the applications of heat pipe heat exchangers for heat recovery[J]. Renewable and Sustainable Energy Review, 2012, 16(6): 4 303-4 315.
- [32] 李国庆. 热管式热回收机组理论和实验研究[D]. 上海:上海海事大学商船学院, 2007.
Li Guoqing. Theoretical and experimental research of heat pipe heat recovery unit[D]. Shanghai: Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, 2007.
- [33] 周峰. 两相闭式热虹吸管传热机理及其换热机组工作特性的研究[D]. 北京:北京工业大学环境与能源工程学院, 2011.
Zhou Feng. Investigation on heat transfer mechanism of a two-phase closed thermosyphon and operating characteristics of the heat exchanger unit[D]. Beijing: College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, 2011.

[责任编辑:严海琳]