

科技综述

热管在空调中的应用

上海交通大学 余霞[☆] 王文 王如竹

摘要 介绍了热管的工作原理和热管技术的特点,回顾了热管在空调中的应用情况,分析了热管技术在空调系统热回收、房间空调除湿、冰蓄冷系统、汽车空调及太阳能吸收式空调中应用的可行性和有效性,对热管式空气换气装置进行了实验研究,结果表明热管技术有很大的节能潜力。

关键词 热管 空调 热回收 应用

Application of heat pipe to air conditioning

By Yu Xia[★], Wang Wen and Wang Ruzhu

Abstract Presents the operating principle of heat pipe and the characteristics of heat pipe technology. Reviews its application to air conditioning. Analyses the feasibility and validity of applying it in heat recovery, dehumidification, ice storage system, automobile air conditioning and solar air conditioning. The experiment results of the heat pipe air exchanger show that heat pipe technology has a wide saving energy potential.

Keywords heat pipe, air conditioning, heat recovery, application

★ Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China

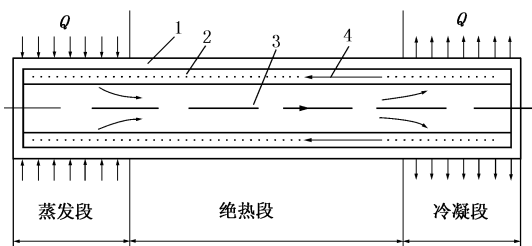
①

0 引言

近年来,由于空调的不断普及,空调耗能量几乎占发达国家总耗电量的 30%~40%。而且空调系统耗能特点之一是系统同时存在供热(冷)和排热(冷)的处理过程,如果能将需排掉的热(冷)量移向需热(冷)的地方,即热能回收,就能有效地利用能源。热管可以将大量热量通过很小的截面积远距离传输,且无需外加压缩动力。因此可以将热管技术用于空调系统中,减少空调系统能耗。

1 热管工作原理

典型的热管结构如图 1 所示。先将管密闭,抽成 $1.3 \times 10^{-1} \sim 1.3 \times 10^{-4}$ Pa 的负压,在此状态下充入适量的



1 热管壳 2 热管芯 3 蒸气 4 液体

图 1 热管原理图

工作液体(即工质),将紧贴管内壁的吸液芯毛细多孔材料中充入液体后加以密封。当热管的一端受热后,吸液芯中

的液体吸收外界热量迅速汽化,在微小压差下流向热管的另一端,向外界放出热量后冷凝成为液体,液体借助于贴壁金属网的毛细抽吸力返回到加热段,并再次受热汽化。如此不断循环,热量就从管的一端传向另一端。由于是相变传热,且热管内部热阻很小,所以能以较小的温差获得较大的传热量。

2 热管技术的特点

与常规换热技术相比,热管技术具有如下重要特点。

a) 传热效率高。热管具有很强的导热性,与银、铜、铝等金属相比,单位质量的热管可以多传递几个数量级的热量。因此热管换热器的效率往往可达到 80% 以上,而且可以有效地利用工业废热、太阳能、地热能等低品位能源和回收空调系统的新、排风之间的小温差能。

b) 热管管壁温度具有可调性。调整管壁温度,使冷端温度低于冷流体露点温度,达到回收显热和增强去湿、降低潜热负荷的目的,从而改善空调系统的效果。

①[☆] 余霞,女,1979 年 2 月生,硕士研究生

200030 上海市华山路 1954 号上海交通大学低温及制冷研究所

(021) 62934060

E-mail: miniyx2001@sjtu.edu.cn

收稿日期:2002-11-15

c) 恒温特性。可变导热管的开发可以实现变工况情况下冷、热源的恒温特性,既可以在热负荷或热源温度发生很大变化时,保持冷凝段或热汇的温度不变,又可成功地用于保持热管或热源温度不随热负荷或热汇温度的变化而变化。热管的这种特性使其在空调工程中显示出其他换热方式所不具备的优势。

d) 适应性强。由热管组成的换热设备的受热部分和放热部分结构设计和位置非常灵活,汇源分离的距离可以根据实际需要及所采用的热管性能来定,可以从几十 cm 到 100 m,可以实现冷热流体之间零泄漏。在空调工程中特别适用于有毒环境下的废热、余热回收。

此外,热管换热器还有安全可靠、阻力小、单向导热(热二极管)等特性。热管换热器几乎没有什么机械障碍,属于二次间壁换热,热管一般不可能在蒸发段和冷凝段同时损坏,所以大大增强了设备运行的可靠性。热管换热器非常适合于回收各种连续生产工艺的余热作为空调工程的热源。热二极管原理在太阳能、地热能利用及空调系统进排风热回收工程中有很重要的应用价值。

3 热管技术在空调中的应用情况

3.1 空调系统热回收

空调系统热回收一直是暖通空调工程界研究的课题之一。在空调系统中,大部分空调回风经冷却和再热后作为送风送到空调房间,而其余的回风则排出室外。这部分回风携带的热(冷)量就白白浪费了,同时送风进入空调房间时必须经过加热(冷却)处理,需要消耗相当多的能量,因而研究如何将空调系统的回风热(冷)量回收,再用于空调系统,对空调系统节能将具有重要的意义。另外,如军火工业的火工品车间、生物药剂厂、医院手术室等,必须使用直流式空调系统,这种系统不仅用电量大,造价高,而且排风消耗能量相对一般空调而言更多,节能更为重要。在空调热回收系统中,已研制出相应的转轮式换热器、板式换热器和盘管式换热器等,并在空调工程中得到广泛应用^[1]。由于热管具有很高的传热系数,因而近年来热管用于空调热回收系统中的研究有很大进展^[2~4]。

在国外,热管技术在空调中的应用已经渗透到了很多领域。它在大型集中空调中的应用已是一项成熟的技术。在日本,许多大的空调设备制造公司已将热回收技术广泛用于工业及民用建筑的空调系统中^[5~6]。文献[7]报道了将热管技术用于医院外科手术室的余热回收,设计、加工并制造了换热量为 800 W 的重力式热管换热器,并将其与计算机模拟结果进行比较,结果证明,热管蒸发段的平均换热量为 84.5 W,与数值模拟结果 100 W 相近,换热效率为 0.16,显然偏低,究其原因,此热管换热器设计比较简单,既没有考虑管外加肋片,也没考虑热管的优化问题,其长径比太大(600/15),而且空气的迎面速度也偏大。

Mathur 一直致力于研究空调系统的热回收问题^[8~10]。他针对美国许多城市的气候条件,研究热管换热器对现有空调系统的能量消耗和高峰需求的影响,主要用热管换热器回收排风的余热(或冷量)用以加热(或冷却)新

风。为了计算实际热回收量,Mathur 使用 BIN Weather Data 编制了一个预测热回收量的模拟程序来计算热负荷和冷负荷。同时经济分析表明,对现有空调系统加装热管换热器的简单改装费用不到一年的时间即能收回。另外,Mathur 还对热管换热器中使用直接蒸发冷却和间接蒸发冷却作了对比分析^[11~14],充分显示了间接蒸发冷却的优越性和广阔的应用前景。例如,在夏季使用直接蒸发冷却时,热管换热器可使进风温度降低 7.5℃左右,若使用间接蒸发冷却,则同样条件下可使进风温度降低 11℃左右。

在国内,随着我国空调用户的不断增加,对热管的研究也在不断地开展,如潘阳等人研究的热管式空调通风换热器^[15]、热管式空调换气换热器^[16]等。同时,热管的应用也在不断升温,如上海市民用建筑设计院和航天部五院 501 设计部共同研制的氨-铝低温热管换热器^[17],该装置用于上海游泳馆的空调余热回收,风量为 10 000 m³/h,显热回收效率为 60%,换热器效率为 80%,运行效果良好。

从节能方面考虑,热管技术用在空调热回收中也是极具潜力的。空调系统的负荷中,新风负荷一般占总负荷的 20%~30%,利用热管换热器从排风中回收能量,减少新风负荷,可减少新风能耗 70%~80%,节约空调负荷 10%~20%^[18]。文献[19]指出,热管用于有排风的大型空调系统中,比通常使用的空调系统节能 25%~30%。

3.2 用于房间空调的除湿

针对潮湿地区空调总热负荷中潜热负荷所占比例较大这一问题,在常规大型空调系统中利用除湿转轮或回转盘管换热器来增加系统的除湿能力,能较好地控制室内湿度,满足室内舒适性要求^[20~21]。将热管换热器用于空调系统中,同样可使除湿量显著增加,而且总能耗量和高峰负荷减少,使空调器的送风温湿度适宜,从而达到舒适性的要求。

文献[22]对进风温度对房间空调器的影响进行了实验分析。当冷凝器进风温度、风量,蒸发器进风含湿量、风量等不变时,随着蒸发器进风温度的降低,除湿量显著增加,而制冷量、耗功率变化不大;当冷凝器进风温度、风量,蒸发器进风温度不变时,随着蒸发器风量的减少,除湿量增加,但不显著,同时制冷量却减少较多。针对这样的情况,文中提出通过在空调器上加重力式热管换热器来降低蒸发器进风温度,同时可使除湿量显著增加,而制冷量和耗功率基本不变,并且空调器的出风温度和相对湿度适中,增加了舒适感。另外,文中还提出可在不改变房间空调器原有配置(压缩机、冷凝器、蒸发器及毛细管)的情况下,达到预期效果,开拓了热管技术的应用范围。

文献[23]从理论上探讨了将热管换热器用于间接蒸发冷却和干燥除湿的可行性。文中采用毛细泵回路(CPL)热管换热器,CPL 换热器的蒸发段和冷凝段分别作为送风的冷却器和回风的加热器。间接蒸发冷却和干燥除湿的应用降低了送风的干球温度和湿球温度;而 CPL 热管换热器的应用,提高了空调系统的制冷能力,达到了节能效果。

文献[24]在制冷量为 17.6 kW、能效比为 8 的空调系统中安装了热管换热器,用于改善冷却和除湿效果。通过

使用热管换热器,新风在进入冷却盘管之前被预冷,从而可在冷却盘管中增加除湿量(0.134 kg/min),同时可减少操作费用和高峰负荷。

3.3 在冰蓄冷系统中的应用

冷量贮存系统的使用在空调负荷随季节以及每天不同时刻变化较大的情况下,能够大大降低制冷机的容量,降低高峰负荷,制冷机可以利用夜间的电力,均衡电网负荷,从而节约资金。以前,冷量贮存系统使用的蓄冷工质是水,所需的蓄水容器大,需要大的建筑空间,从而使系统的推广应用受到限制。解决的办法是使用冰蓄冷系统,由于冰有较大的熔化热,这就使蓄冷容器体积大大减小。文献[25]介绍了热管用于冰蓄冷系统的初步实验。

图 2 为采用热管的冰蓄冷系统的原理图,系统由热管、

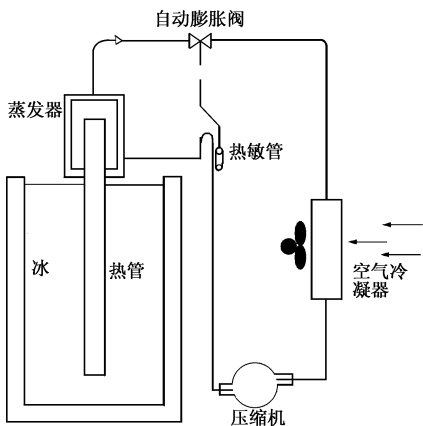


图 2 热管冰蓄冷系统

制冷机和蓄冷容器组成,热管垂直放置。热管将蓄冷容器中水的显热带走传给制冷机蒸发器中的工质,制冷工质在蒸发器内变为高温高压的过热蒸气,经压缩机压缩并经冷凝器冷凝后再循环。

当蓄冷容器中的水温降到 0℃时,在热管外表面开始结冰。一般的制冷管由于存在轴向温度梯度,使蒸发器不能充分发挥作用。利用热管的等温性将使蒸发器的结构简单,而且个别热管的损坏不影响系统的工作。

3.4 在汽车空调中的应用

现代社会中,人们对生活质量的要求越来越高,空调设备在车辆上特别是公交车上的应用也越来越普及。目前车辆的换气主要采用开窗换气,这样就会使车厢内冷量或热量大量流失。P. T. Worshington 等人将热管应用于汽车空调中,他们采用两根热管,一根缠绕在冷却盘管上,将进入盘管的空气的热量传给盘管内的冷空气,相对没有加装热管的相同的盘管而言,冷却盘管可从预冷空气中冷凝出更多的水,当空气离开冷却盘管时将具有 100%的相对湿度,同时热管的另一端用来预热空气,降低它的相对湿度;另一根热管放在新风和排风之间,用于吸收排风的冷量来冷却新风[26]。通过加装热管的设计能减少空调能耗、增加热阻、降低热传递势能,同时通过降低车厢内的相对湿度提高干球温度、减少来自电池组或发动机的能量消耗,因此将热管技术应用于汽车空调系统是极具潜力的,它能利用现有技术节约汽车空调用能。

3.5 太阳能空调技术的发展和应

以热管技术为主要技术基础之一的太阳能热水器产业

的迅速发展,使得我国成为世界上最大的太阳能热水器产销国。由于规模效应,生产成本大幅度下降,这就为太阳能空调迈入实用化和推广普及奠定了现实基础。目前,广东、北京等地已开始使用太阳能空调系统[27]。近年来有很多学者注重太阳能热管吸收式空调的研究,如文献[28~29]中分别对该系统的构造、设计和性能作了分析,并且介绍了山东省乳山市建成的一套太阳能吸收式空调及供热综合系统,该系统运行效果良好。

4 热管式热回收在换气装置中的应用

笔者研制了如图 3 所示的热管式热回收换气装置。热

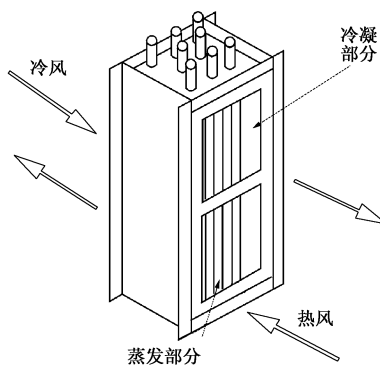


图 3 热管式热回收换气装置

管采用铝-氨重力热管(可适应 -50~200℃工作环境),管材为整体挤压肋片管。换热器采用 10 支热管时,其外部尺寸为 440 mm × 262 mm × 99 mm。表 1 是其

部分实验数据。

表 1 10 支热管换热情况

℃

	冷风进气量 57 m³/h 热风排气量 54 m³/h		冷风进气量 48 m³/h 热风排气量 46 m³/h	
	实验 1	实验 2	实验 1	实验 2
冷风进口温度	13.0	14.0	13.5	13.6
冷风出口温度	28.5	30.6	25.4	19.7
热风进口温度	41.8	45.8	35.4	26.3
热风出口温度	19.2	19.8	18.3	16.8

在较大的风量下,从加热的角度看节约能源 79%,从冷却的角度看节约能源 55%;在较小的风量下,从加热的角度看节约能源 74%~79%,从冷却的角度看节约能源 48%~53%。加热和冷却效果的不同,主要是由于换热器进排气量有差异,而设计中二者相等。

表 2 是采用 5 支热管的换热情况,此时换热器外部尺寸为 440 mm × 262 mm × 50 mm。

表 2 5 支热管换热情况

℃

	冷风进气量 57 m³/h 热风排气量 54 m³/h		冷风进气量 48 m³/h 热风排气量 46 m³/h	
	实验 1	实验 2	实验 1	实验 2
冷风进口温度	11.9	12.6	11.5	11.6
冷风出口温度	20.5	33.6	22.0	37.4
热风进口温度	31.1	54.3	33.4	61.2
热风出口温度	20.0	27.7	20.4	28.7

在较大的风量下,从加热的角度看节约能源 57%~64%,从冷却的角度看节约能源 46%~50%;在较小的风量下,从加热的角度看节约能源 60%~66%,从冷却的角度看节约能源 48%~52%。

由上面实验数据可知,热管换热器的换热效率相当可观。如果将其用于家庭换气,不仅可以提高室内空气质量,还可减少能耗,起到节约用电的效果。

5 水平热管空调换气装置

上述热管节能换气装置有两点不足:一是虽然热管尺寸小,但与之配套的风机尺寸较大;二是由于在空调工程中,夏季和冬季排风与新风之间要求的传热方向不同,所以热管的两端——蒸发段和冷凝段也需随季节的变化而交替切换。而重力型热管在运行时,需要保持一定的倾角。因此如果此装置在冬季和夏季都使用的话,需要改动进排风相对热管的位置。

为此,水平热管空调换气装置被提了出来。其目的在为新风换气要求小的空调单元提供一种体积小、结构紧凑、节能效果更好的新型通风换气装置。这种装置如图 4 所

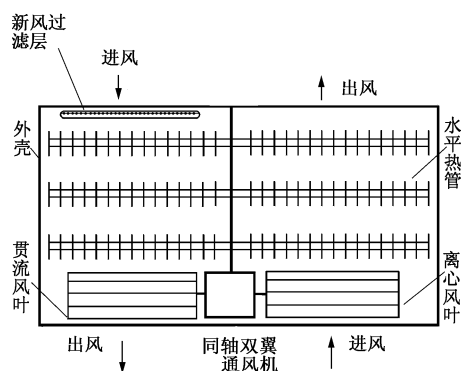


图 4 水平热管空调换气装置

示,风机采用同轴双翼通风机,气流在流入和流出风机时,方向不变。换热器采用水平热管,换热效果好而成本较层叠式或板式换热器低,并且没有重力热管换热器需要的冬季和夏季换气的进排风换向问题。表 3 是其部分实验测试数据。

表 3 风量和风温测量

	贯流风叶侧	离心风叶侧
通风量/(m ³ /h)	85.5	116.4
进风均温/℃	26.12	39.85
出风均温/℃	32.36	34.96

由表 3 可知,在小风量情况下,贯流风叶侧的温度效率为 45.5%,离心风叶侧的温度效率为 35.6%,此装置可在改善室内空气质量的同时减少能耗,在家庭换气方面应用潜力很大。

6 结论

6.1 热管技术在空调系统中的应用是多方面的,既可用于空调系统热回收,又可用于提高室内空气质量等。

6.2 通过对近几十年来热管技术在空调系统中的应用分析,以及对热管式空调换气装置的实验研究,充分证明了热管技术用于空调系统,不论从技术方面,还是从经济性方面考虑,都是可行的。

6.3 从换热效率的角度考虑,热管换热器相对其他换热器而言,具有更高的换热效率以及其他换热器所不具备的优

点,决定了热管技术将具有巨大的应用潜力。

6.4 随着我国经济的迅速发展和人民生活水平的日益提高,空调能耗在总能耗中的份额将进一步增加,因此,节能、环保的空调是今后的发展方向。热管技术经过 30 几年的发展已经日趋成熟,并且在很多领域有很多卓有成效的应用。如果能将热管技术与现代空调技术结合,不仅可以提高能源的利用效率,保护人类资源,而且可以提高人体舒适度。

参考文献

- 1 钱以明. 高层建筑空调与节能. 上海: 同济大学出版社, 1990
- 2 Wadowski T, Akbarzadeh A, Johnson P. Hysteresis in thermosyphon-based heat exchangers and introduction of a novel triggering system for low-temperature difference heat-recovery applications. *Heat Recovery & CHP*, 1991, 11(6): 523-531
- 3 Zaheer-Uddin M, Wang J C Y. Modelling and control of an air to air heat recovery system. *Heat Recovery & CHP*, 1994, 14(2): 143-152
- 4 Wu X P, Johnson P, Akbarzadeh A. Application of heat pipe heat exchangers to humidity control in air-conditioning systems. *Applied Thermal Engineering*, 1997, 17(6): 561-568
- 5 三菱电机公司产品说明书
- 6 郑远非. 日本松下通风空调用空气-空气热交换器. *暖通空调*, 1987, 17(4)
- 7 Noie-Baghban S H, Majideian G R. Waste heat recovery using heat pipe heat exchanger (HPHE) for surgery rooms in hospitals. *Applied Thermal Engineering*, 2000, 20(14): 1271-1282
- 8 Mathur G D. Using heat-pipe heat exchangers for reducing high energy costs of treating ventilation air. In: *Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 1996. 1447-1452
- 9 Mathur G D. Retrofitting heat recovery systems with evaporative cooler. *Heating/Piping/Air Conditioning*, 1993, 65(9): 47-51
- 10 Mathur G D. Predicting yearly energy savings using BIN weather data with heat-pipe heat exchangers. In: *Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 1997. 1391-1396
- 11 Mathur G D. Indirect evaporative cooling using two-phase thermosyphon loop heat exchangers. In: *ASHRAE Trans.* 1990, 96(1). 1241-1249
- 12 Mathur G D. Indirect evaporative cooling using heat pipe heat exchangers. *American Society of Mechanical Engineers, Nuclear Engineering Division*, 1990, 5(25): 79-85
- 13 Mathur G D. Direct-indirect evaporative cooling with heat pipe heat exchangers. *American Society of Mechanical Engineers*, 1991. 1-8
- 14 Mathur G D. Indirect evaporative cooling. *Heating/Piping/Air Conditioning*, 1992, 64(4): 60-67