

文章编号:1000-582X(2011)08-008-05

毛细吸液芯换热板的设计与实验

童明伟, 胡鹏, 杨颖, 刘彬, 吴中正

(重庆大学动力工程学院, 重庆400044)

摘要:提出了由柠檬酸钾-石膏配制而成的毛细吸液芯换热板,用水作冷却介质时柠檬酸钾-石膏板就成了一块通流率为55.3%的均布流道。通过改变毛细吸液芯换热板的表面发射率(低发射率0.23,高发射率0.95)及冷水温度(7~18℃),在维持室内温度为26℃(±1℃)情况下,对平均孔隙半径 $r=0.015$ mm,孔隙率55.3%的毛细吸液芯换热板的换热特性进行研究。结果表明,在高发射率条件下,毛细吸液芯换热板的制冷量满足常规辐射空调要求,与蛇形辐射换热管相比初成本减少了80%,并回归出毛细吸液芯换热板的传热准则方程: $Nu=0.029Re^{0.21}Pr^{2.6}\theta^{0.7}$ 。为建立完整的毛细吸液芯换热板设计理论提供了依据。

关键词:辐射换热;温度分布;空调;传热准则

中图分类号:TK264.1

文献标志码:A

Design and experimental analysis of the heat transfer panel with capillary imbibition core

TONG Ming-wei, HU Peng, YANG Ying, LIU Bin, WU Zhong-zheng

(College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Serpentine radiant heat transfer pipes (SRHTP) are expensive and with low heat exchanged, so the heat transfer panel with capillary imbibition core (HTPCIC) is put forward. HTPCIC is composed by potassium citrate-plaster (PCP), and PCP board becomes a uniform channel of which the flow rate is 55.3% when water is cooling medium. By changing the emissivity of HTPCIC' surface (low emissivity 0.23, high emissivity 0.95) and the temperature of cold-water (7~18℃), at 26℃ (±1℃), heat transfer characteristics of HTPCIC are analyzed whose average pore radius is 0.015 mm and porosity is 55.3%. The experimental results show that the cooling capacity of HTPCIC meets the requirements of conventional radiation air-conditioning, and compared with SRHTP, the initial cost reduces by 80%. Moreover, regression equation of the HTPCIC heat transfer guideline is proposed: $Nu=0.029Re^{0.21}Pr^{2.6}\theta^{0.7}$, which provides basis for establishing a complete design theory.

Key words: radiant heat transfer; temperature distribution; air-conditioning; heat transfer guideline

随着能源问题的日益突出和人们对室内环境的关注度越来越高,如何发展新型节能环保舒适的空调系统日益迫切。传统的空调运行时传热温差大,

能效比低,而且在使用过程中蒸发器噪声较大、局部区域有强烈的吹风感,严重影响舒适度,毛细管网平面辐射式空调系统因其自身特点满足社会发展需求

收稿日期:2011-03-05

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2007BAB21B02-1);重庆大学211工程“三期建设”项目(S-09101)

作者简介:童明伟(1945-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要研究方向为热工、传热传质和制冷空调,

(Tel)023-65111645;(E-mail)tmw1016@163.com。

将可能获得很大发展,毛细管网平面辐射式空调起源于欧洲,以其具有的舒适性和经济性在美国、日本、澳大利亚得到快速发展^[1]。为了研究辐射冷却空调的性能和在实际中的应用,T. Imanari 等人比较了辐射空调和对流空调的热舒适性,能耗、成本,结果表明由于小的平均风速,人体在辐射空调中感觉更加舒适,不过他同时也指出尽管辐射空调可以降低 10% 运行的成本,但是初投资高,根据辐射空调的市场价格需要 1~17 年才能回收^[2-4]。P. Vangtook 等人对辐射空调所要求的湿度进行了实验和数值模拟,结果表明为防止辐射冷板不结露,辐射冷板的表面温度最好控制在 24 °C 以上。但是如果将新风除湿和辐射空调结合应用,辐射板表面温度可以根据除湿后露点温度做相应的调整^[5-8]。国内在这方面也做了不少的研究,高攀、赵力等人通过建立模型对辐射空调空间内的温度场和速度场进行了仿真计算,通过对比不同换热形式的计算结果,验证了辐射空调温度分布更为均匀,舒适度更好^[9-10]。任艳莉等人对地板供冷与置换通风相结合的模型进行了模拟与分析,研究表明复合式空调系统的舒适性较好,其结露的危险也远小于单独地板辐射供冷^[11-13]。但是目前国内相关的实际应用还很少,因为其初投资较传统空调形式高,而且国内用户对辐射式制冷空调系统不熟悉并未得到推广,所以只用在了别墅和收入相对较高的群体。文中在实验研究的基础上提出了一种新的辐射式空调末端,在环保、舒适和节能的基础上又相对降低了初投资高的问题。

1 毛细吸液芯换热板原理

1.1 毛细吸液芯换热板的结构

毛细吸液芯换热板包括进液管、毛细吸液芯层、背板、侧壁板、横壁板、换热板、板间承压柱及出液管,结构示意图如图 1 所示。空调供冷(热)水经进水管送入由背板、侧壁板及换热板组成的内填毛细吸液芯夹层的通道内,该毛细吸液芯夹层是由柠檬酸钾和石膏配制而成,在用水作冷却介质时柠檬酸钾-石膏板就成了一块内含多孔介质的均布流道,水由于正压力和毛细吸液芯的初始作用,迅速均匀布满整个辐射板内,流向出水管并由此流回制冷系统。由循环水带入毛细吸液芯换热板所需的冷(热)量,经毛细吸液芯换热板与地板的辐射换热及其与空气对流换热传给进行空调的空间,使室内实现暖通空调。

1.2 毛细吸液芯的选择(柠檬酸钾-石膏板)

选取石膏作为换热板内部吸液芯,石膏是一种

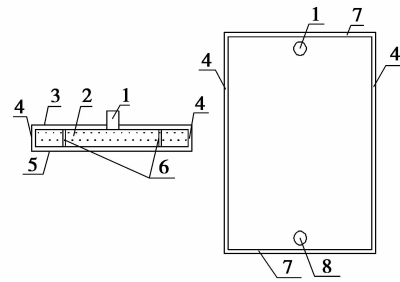


图 1 毛细吸液芯换热板结构示意图
1. 进液管;2. 毛细吸液芯层;3. 背板;4. 侧壁板;5. 换热板;6. 内衬短柱;7. 横壁板;8. 出液管

图 1 毛细吸液芯换热板结构示意图

多孔的单斜晶体,针对其不同的配置方式可以加入少量的柠檬酸钾来改变孔隙率、平均孔隙半径等物理性质,从而能够增加其内部的孔隙,形成更有利于水流通的毛细通道^[14-15]。

配置方法:石膏的化学式为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,称取一定质量的 CaSO_4 粉,按照 CaSO_4 和 H_2O 的摩尔数之比分别为 1:3,1:4,1:5 添加水分,在每组组分中加入 H_2O 质量的 2% 的柠檬酸钾(见表 1)。

表 1 试样配制比

配比编号	CaSO_4 和 $2\text{H}_2\text{O}$ 的摩尔数之比及加入柠檬酸钾量
1	1:3+2%
2	1:4+2%
3	1:5+2%

按照计算出的比例配置好石膏溶液,将石膏溶液搅拌均匀之后,充入 $l \times w \times h = 2 \text{ m} \times 0.02 \text{ m} \times 0.006 \text{ m}$ 的模具中,等到石膏基本成型后,送入锅炉房烘至绝干,并称其质量 m_1 ,然后将 3 组烘干的石膏插入水中,测出水在每组石膏中上升的最大高度 H 后,称其吸水后的质量 m_2 ,减去 m_1 ,得到吸入水的重量,从而由下列公式计算出每种组分石膏的孔隙率 η :

$$\eta = \frac{(m_1 - m_2)/\rho}{lwH} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: l 为石膏的长度; w 为石膏的宽度; H 为最大吸水高度; ρ 为水的密度。

平均孔隙半径 r 的测定计算公式如下所示:

$$r = \frac{2\sigma}{\rho g H}, \quad (2)$$

式中: σ 为常温下水的表面张力系数,取 $7.28 \times 10^{-2} \text{ N/m}$; ρ 为水的密度,取 $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; g 为重力加速度,取 9.8 N/kg ; H 为每种石膏的最大吸

水高度, m。

由上述计算公式得出3种配置组份石膏的孔隙率及平均孔隙半径,如表2所示:可以看出孔隙率逐渐增加,平均孔隙半径是逐渐下降的。

表2 孔隙率及平均孔隙半径

配比编号	孔隙率/%	平均孔隙半径/ μm
1	47.2	16.7
2	55.3	15.5
3	69.4	12.4

通过上述方式配制石膏及测定其孔隙率及平均孔隙半径等物理性质,发现多孔介质石膏的上述特性与配制方法关系极大。随水量增加孔隙率增大而其强度下降。综合考虑孔隙率及强度最终选择孔隙率为55.3%,孔隙半径0.015 mm的柠檬酸钾石膏作为内填毛细吸液芯。

石膏的市场价是比较便宜的,根据天汇圣泉机电设备有限公司提供的数据现有毛细辐射管平均成本为400~450元/ m^2 ,而文中研发的毛细辐射换热板的平均成本为80~100元/ m^2 ,相比之下毛细辐射换热板的成本降低了80%左右。

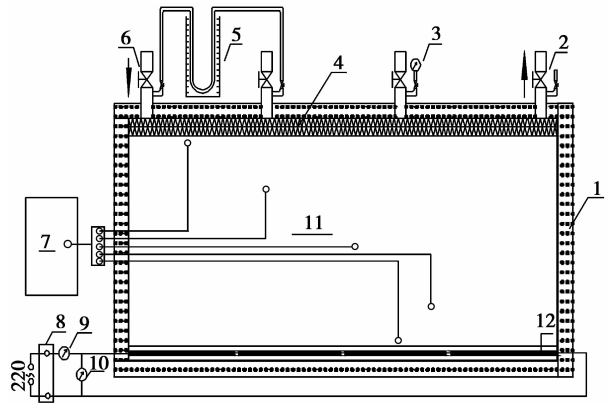
2 实验系统简介

2.1 实验对象

实验采用了单位面积的毛细吸液芯换热板,铺设于模型空间(长2 m、宽0.5 m、高0.6 m)的顶板上,模型空间外侧采用泡沫保温板(导热系数0.055 W/m·K)厚60 mm,空间底部除了采用泡沫保温板以外,另考虑到下面受热的因素,加30 mm厚的玻璃棉,辅助热源采用电加热,加热功率由调压器控制并显示在电流表电压表上,进出口水温和空间温度分布利用数据采集仪自动采集,实验系统见图2。

2.2 实验过程及误差分析

该实验通过改变毛细吸液芯换热板的表面发射率^[16],测定在不同条件下毛细吸液芯换热板的换热量,辐射换热板采用的是镀锌铁皮,冷冻水流量为20 L/min,发射率分别是0.23和用炭黑涂黑后的发射率0.95。测温点的布局如图2所示,在模型空间的不同剖面上设置5个高度不同的测点,观察空间内温度的垂直变化,在冷水的进口和出口分别设置一测温点,测出进出口水温。通过恒温水浴控制冷水的进口温度和流量,当进口温度和流量一定时,通过调节加热功率,使室内温度达到合适的要求并平衡。通过下式计算出毛细吸液芯换热板的换热量:



1. 保温材料 2. 空调出水管 3. 真空表 4. 毛细吸液芯换热板 5. U型测压管 6. 空调进水管 7. 计算机—热电偶测温系统 8. 调压器 9. 电流表 10. 电压表 11. 模型空间 12. 辅助电加热源。

图2 毛细吸液芯换热板实验台

$$q_1 = c_p m (t_2 - t_1), \quad (3)$$

式中: q_1 为毛细吸液芯换热板的制冷量,W; c_p 为冷水的比热,kJ/kg·K; m 为冷水的质量流量,L/min; t_1 为冷水的进口温度, $^{\circ}\text{C}$; t_2 为冷水的出口温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

模型空间所需要的热量由电加热提供,并通过下式计算出提供的热量:

$$q_2 = ui, \quad (3)$$

式中: q_2 为对模型空间所提供的热量,W; u 为电压,V; i 为电流,A。

经过分析,散热损失引起的误差在系统总的误差中所占比例最大,因此在实验条件保持不变的情况下,通过热平衡校核 q_1, q_2 的值将热损失加以排除,可以大大提高实验精度,实验校核后的散热损失误差在3.5%以内,散热损失误差按以下公式计算:

$$\xi = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \times 100\%. \quad (4)$$

3 实验结果分析

由实验可知,毛细吸液芯换热板表面的初始发射率为0.23,通过涂炭提高毛细吸液芯换热板表面黑度后,表面发射率升高到0.95,由于表面发射率的提高,制冷量也相应的增加,改变毛细吸液芯换热板的冷水进口温度,温度依次从7 $^{\circ}\text{C}$ 改变到18 $^{\circ}\text{C}$,相应的低发射率条件下制冷量依次从60.3 W变化到16 W,高发射率条件下的制冷量从99 W变化到48.7 W。发射率变化前后不同进口温度的制冷量关系如图3所示。

由于辐射顶板仅承担室内冷负荷,不能承担室内湿负荷,所以需要新风系统的配合,由通风系统去

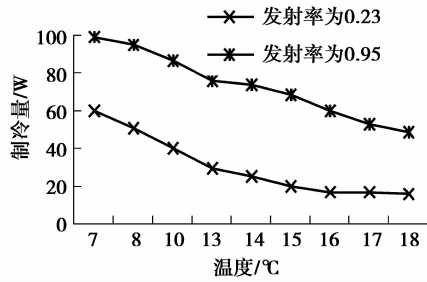


图 3 发射率变化前后不同进口温度和制冷量的关系

除湿负荷,并保证室内的空气质量。新风除湿系统不仅可以降低室内露点温度和辐射顶板进口水温,还可以增强对流换热。由于该实验是在密封的条件下进行的,室内的对流换热相对较弱,如果将辐射制冷和新风除湿结合考虑,将大大提高室内对流换热,制冷量也将得到更大的提高。

模型空间的高度为 0.6 m,选取 0.05 m、0.15 m (此高度为人员温度敏感区脚踝所处高度)、0.3 m、0.45 m、0.6 m,5 个高度不同平面作为比较面。由图 4 的温度分布可以看出,在不同的进口温度条件下,在距地 0.05 m 到 0.35 m 之间温度变化较为平坦,空间温度分布均匀,脚踝所处的温度敏感区有很好的舒适性,而在距地 0.4 m 到 0.6 m 处的水平面,随距离的增加,落差逐渐增大,最大可超过 2 °C。

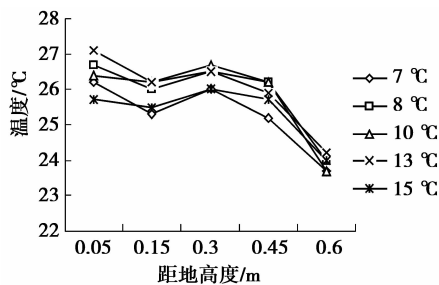


图 4 发射率 0.23 时不同进口水温空间温度分布图

增大毛细吸液芯换热板表面发射率后,在不同的进口温度条件下,空间温度分布如图 5 所示,与图 4 相比,由于辐射换热的增加,空间温度波动较小,分布更加均匀。

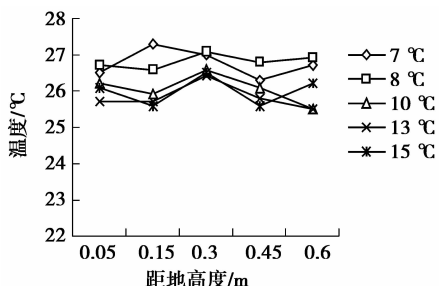


图 5 发射率 0.95 时不同进口水温空间温度分布图

4 毛细对流传热关联式回归

根据最小二乘法原理,采用多元线性回归,得出毛细吸液芯换热板中的对流传热实验关联式。对实验所测的数据进行分析处理,将 Nu 、 Re 、 Pr 、 θ 的相互影响用下式表示:

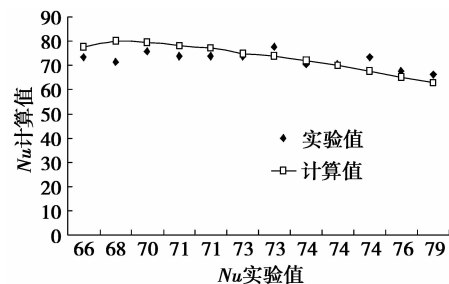
$$Nu = aRe^b Pr^c \theta^d, \quad (5)$$

式中: Nu 为壁面上流体的无量纲温度梯度; Re 为毛细雷诺数,惯性力与粘性力之比的一种度量; Pr 为动量扩散能力与热量扩散能力的一种度量; θ 为换热板进出口平均水温与室内空气温度之比。

通过对实验数据进行回归计算得上式各系数的值分别为: $a=0.029$; $b=0.21$, $c=2.6$, $d=0.7$ 。即实验毛细对流传热关联式:

$$Nu = 0.029Re^{0.21} Pr^{2.6} \theta^{0.7}. \quad (6)$$

对方程进行显著性检验,复相关系数 R 为 0.920 2,方程显著可靠。由图 6 可以看出,实验 Nu 较好的分布在拟合计算的 Nu 附近,并且通过比较回归方程计算值与实验值的最大偏差在 10% 以内,说明选择式(5)作为回归模型是合理的,对毛细吸液芯换热板运用公式(6)进行相关的对流传热方程计算完全可行。

图 6 Nu 计算值与实验值的比较

5 结 论

首次提出了毛细吸液芯换热板作为空调末端,并对其制冷能力进行了测定,研究了系统的使用效果,主要结论如下:1)高发射率条件下,毛细吸液芯换热板的制冷量满足常规辐射空调要求;2)通过前期的研发毛细吸液芯换热板和现在常规使用的蛇形辐射换热管相比,成本降低了 80%;3)采用毛细吸液芯辐射换热板供冷,模型空间内垂直方向温差由上至下逐渐降低,表面发射率改变后,空间温度分布相对于改变前更均匀,主要是因为表面发射率增大后,辐射换热量增加,空间温度波动更小;4)通过多元线性回归,得到了毛细吸液芯换热板情况下的对

流传热准则方程。文中从实验的基础上研究了毛细吸液芯换热板的可行性,由于该技术还没有在实践中推广使用,这种用化合物构成的毛细管在长期使用中,可能与循环冷热水中含有的杂质发生各种物理化学的相互作用,出现各种杂质的迁移,可能发生通道的堵塞等现象,最终影响传热效果。

参考文献:

- [1] 陈启,马一太. 辐射顶板空调系统的优势[J]. 节能技术, 2005,129(23):40-43.
CHEN QI, MA YI-TAI. Advantage of radiant ceiling panel system [J]. Energy Conservation Technology, 2005,129(23):40-43.
- [2] IMANARI T, TOSHIKI O, KAZUAKI B. Thermal comfort and energy consumption of the radiant ceiling panel system: comparison with the conventional all-air system[J]. Energy and Buildings,1999,30(2):167-175.
- [3] WANG S Y, MORIMOTO M, SOEDA H, et al. Evaluating the low exergy of chilled water in a radiant cooling system [J]. Energy and Buildings, 2008, 40 (10):1856-1865.
- [4] LERTSATITTHANAKORN C, SRISUWAN W, ATTHAJARIYAKUL S. Experimental performance of a thermoelectric ceiling cooling panel[J]. International Journal of energy research, 2008,32(10):950-957.
- [5] VANGTOOK P, CHIRARATTANANON S. An experimental investigation of application of radiant cooling in hot humid climate[J]. Energy and Buildings, 2006,38(4):273-285.
- [6] CAUSONE F, CORGNATI S P, FILIPPA M, et al. Experimental evaluation of heat transfer coefficients between radiant ceiling and room [J]. Energy and Buildings,2009,41(6):622-628.
- [7] MEMON R A, CHIRARATTANANON S, VANGTOOK P. Thermal comfort assessment and application of radiant cooling: a case study[J]. Building and Environment,2008,43(7):1185-1196.
- [8] CATALINA T, VIRGONE J, KUZNIK F. Evaluation of thermal comfort using combined CFD and experimentation study in a test room equipped with a cooling ceiling[J]. Building and Environment,2009,44 (8):1740-1750.
- [9] 高攀,赵力. 辐射式空调器的设计与数值模拟[J]. 机械工程学报,2008,44(2):238-241.
GAO PAN,ZHAO LI. Design and numerical simulation of radiation air-conditioning[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2008,44(2):238-241.
- [10] 杨卫波,施明恒,陈振乾. 土壤源热泵供冷供热运行特性的实验研究[J]. 东南大学学报:自然科学版,2009,39 (2):276-281.
YANG WEI-BO, SHI MING-HENG, CHEN ZHEN-QIAN. Experimental study on operation characteristics of ground coupled heat pump operated in cooling and heating mode [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2009,39(2):276-281.
- [11] 任艳丽,李德英,张于峰. 地板供冷与置换通风的模拟与分析[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2008,24 (6):1066-1069.
REN YAN-LI, LI DE-YING, ZHANG YU-FENG. Simulation and analysis of the radiant floor cooling and displacement ventilation system [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science,2008,24 (6):1066-1069.
- [12] 布文峰,王世洪. 户型冷板辐射式空调系统研究[J]. 制冷与空调,2002,4(2):25-27.
BU WEN-FENG,WANG SHI-HONG. The research in household cooling ceiling air-conditioning system[J]. Refrigeration and Air-conditioning,2002,4(2):25-27.
- [13] 荣庆兴,方怀红,苏鹰. 带有地板辐射的地板送风空调系统的数值模拟[J]. 建筑热能通风空调,2004,23(6):85-90.
RONG QING-XING, FANG HUAI-HONG, SU YING. Numerical simulation of under floor air conditioning system with radiation of the floor [J]. Building Energy and Environmental, 2004, 23 (6): 85-90.
- [14] 彭家惠,陈明凤,瞿金东,等. 柠檬酸对建筑石膏水化的影响及其机理研究[J]. 建筑材料学报,2005,8(1):94-99.
PENG JIA-HUI, CHEN MING-FENG, QU JIN-DONG, et al. Effect of citric acid on the process of hydration of building gypsum and its retarding mechanism [J]. Journal of Building Materials, 2005,8(1):94-99.
- [15] ZHOU J, TSAI H L. Effects of electromagnetic force on melt flow and porosity prevention in pulsed laser keyhole welding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2007,50(11):2217-2235.
- [16] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 第4版. 北京:高等教育出版社,2006:365-371.

(编辑 陈移峰)