

文章编号: 1671-6612 (2023) 06-840-05

基于疏水微孔膜的溶液除湿型地冷空调研究

刘明权 陈 东 郭子瑞 陈 雨 宋鑫宇

(天津科技大学机械工程学院 天津 300222)

【摘 要】 针对地冷空调室内空气常规除湿方法能耗较高、可能污染室内空气等问题, 设计了基于疏水微孔膜的溶液除湿型地冷空调, 利用疏水微孔膜把空气与除湿溶液隔开, 利用制冷单元排出的余热实现除湿溶液再生, 具有能耗低、对室内空气无污染、除湿溶液无损耗等特点; 介绍了空调系统的总体流程, 并以 100m² 家庭住宅建筑为例, 给出了系统中主要部件和材料的选型和设计参数; 建立了系统的特性参数方程, 以地板有效面积 80m²、室外空气 35℃、相对湿度 50%、室内空气 28℃、相对湿度 60% 为背景, 对系统运行特性进行了计算分析, 得到了一组较佳的运行参数, 可使系统制冷系数达 4.4, 室内空气除湿速率达 0.153g/s (0.55kg/h), 可较好地满足室内制冷和除湿的要求。

【关键词】 地冷空调; 疏水微孔膜; 溶液除湿; 节能

中图分类号 TU831 文献标识码 A

Study on Liquid Desiccant Dehumidification Type Floor Cooling Air Conditioning System Based on Hydrophobic Microporous Membrane

Liu Mingquan Chen Dong Guo Zirui Chen Yu Song Xinyu

(College of mechanical engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin, 300222)

【Abstract】 Aiming at the problems that high energy consumption and possible indoor air pollution of conventional floor cooling air conditioning dehumidification methods, a liquid desiccant dehumidification type floor cooling air conditioning system based on hydrophobic microporous membrane was designed. The hydrophobic microporous membrane separates air from the liquid desiccant. The waste heat discharged from the refrigeration unit was used for the the regeneration of the liquid desiccant. It has the characteristics of low energy consumption, no pollution to indoor air and no loss of liquid desiccant. Based on a brief introduction to the overall workflow of the air conditioning system, taking a 100m² family house building as an example, the selection and design parameters of main components and materials in the system were given. Based on the characteristic parameter equation of the system, the operating characteristics of the system were calculated and analyzed under the background that the effective floor area was 80m², the outdoor air temperature was 35℃ and the relative humidity was 50%, the indoor air temperature was 28℃ and the relative humidity was 60%. A set of suitable operating parameters were obtained, which could meet the requirements of indoor temperature and relative humidity, and the coefficient of performance of the system could reach 4.4, the indoor air dehumidification rate could reach 0.153g/s (0.55kg/h).

【Keywords】 floor cooling air conditioning system; hydrophobic microporous membrane; liquid desiccant dehumidification; energy saving

0 引言

地冷空调把冷介质通入地板内, 温度较低的地

板表面主要通过辐射换热为室内提供冷量, 具有舒适、节能等特点, 有很好的应用优势^[1,2]。

作者简介: 刘明权 (1999-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 1513229708@qq.com

通讯作者: 陈 东 (1968-), 男, 博士, 教授, E-mail: chendong@tust.edu.cn

收稿日期: 2023-10-09

地冷空调在室内热舒适性、结构型式、系统控制等方面已经进行了较多研究。陈金华^[3]等人对采用吊扇通风、风机盘管侧吹通风和无通风的地冷空调室内热环境进行比较, 实验结果表明, 与无通风相比, 有通风的地冷空调室内热环境得到改善, 而吊扇通风时地板温度最高、空气温度最低、竖直温差最小, 室内热环境最舒适。任雁^[4]等人采用伯克利热舒适模拟软件在地冷空调不同工况下进行模拟得出皮肤温度分布和热感觉值, 与人工环境舱实验结果进行对比, 结果表明该模型能够反映不对称辐射环境下人体不同部位的皮肤温度分布及热感觉和热舒适差异随时间的动态变化。Hernández^[5]等人设计了一种集成空气处理系统的地冷空调地板单元, 由多个带集气室的矩形模块组成, 并在模块表面安装空气扩散器, 这种地板单元提供了更好的布局灵活性、室内热舒适性和室内空气质量。秦峰华^[6]建立了混凝土地板辐射供冷系统结合新风除湿的地冷空调 RC 网络模型, 在此基础上考虑分时电价, 充分利用混凝土地板蓄冷能力建立 MPC 控制模型, 与规则控制策略对比结果显示, MPC 控制策略节能率可达 12.3%, 节约用能成本约 14.1%。Ren^[7]等人使用 TRNSYS 仿真软件与参数

化仿真管理器 jEPlus 集成, 确定了地板辐射供冷系统结合通风系统的地冷空调的启停策略与运行模式, 提出了基于 PMV 模型的协同控制策略, 通过实验验证结果表明, 系统最大节能 26.2%。

地冷空调运行时, 室内空气中水蒸气产生的湿负荷需要单独处理, 以避免水蒸气在地板表面结露^[8,9]; 常用的方法有低温冷却除湿、干燥剂转轮除湿等^[10-14]; 其中前者需要消耗较多冷量, 后者干燥剂再生温度通常较高, 也需要消耗较多能量。

基于此, 本文设计了一种基于疏水微孔膜的溶液除湿型地冷空调, 其特点是除湿溶液在室内通过疏水微孔膜吸收空气中的水蒸气, 吸湿后的除湿溶液在室外吸收制冷单元排出的废热来升温后也通过疏水微孔膜再生, 相对于其他室内空气除湿方法具有耗能少、对室内空气无污染、除湿溶液无损耗等特点。本文将介绍这种基于疏水微孔膜的溶液除湿型地冷空调的结构流程, 并在 100m² 家庭建筑的背景下给出系统关键部件的选型设计和系统运行性能。

1 系统流程

基于疏水微孔膜的溶液除湿型地冷空调的系统流程如图 1 所示。

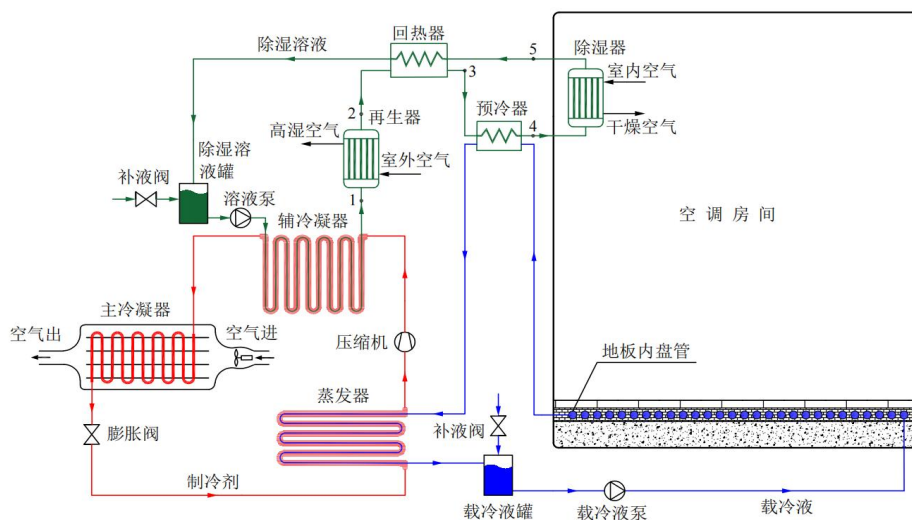


图 1 系统流程

Fig.1 Flow chart of the system

系统主要由三个单元构成: 制冷单元、输冷单元、除湿单元。制冷单元包括压缩机、辅冷凝器、主冷凝器、膨胀阀、蒸发器, 制冷剂在其中循环运行; 输冷单元包括蒸发器、补液阀、载冷液罐、载冷液泵、地板内盘管、预冷器, 载冷液在其中循环

运行; 除湿单元包括除湿器、回热器、补液阀、除湿溶液罐、溶液泵、辅冷凝器、再生器、预冷器, 除湿溶液在其中循环运行。

系统工作过程为: 制冷单元中压缩机驱动制冷剂运行, 制取冷量并通过蒸发器传递给载冷液, 再

通过载冷液泵驱动载冷液输送至地板内的盘管内,使地板表面降至设定温度,地板表面再主要通过辐射换热把冷量送入室内,使室内温度控制在设定值;除湿器由疏水微孔膜制成,膜的一侧为除湿溶液,膜的另一侧为室内空气;疏水微孔膜具有允许水蒸气通过而不允许除湿溶液通过的特性^[15],且除湿溶液对水蒸气有强烈的吸收性,除湿溶液侧膜表面的水蒸气压力低于室内空气中水蒸气的压力,室内空气中的水蒸气穿过膜孔被除湿溶液吸收而实现室内除湿;吸收了水蒸气的除湿溶液经回热器初步升温后,经溶液泵驱动流过辅冷凝器,吸收制冷剂排出的热能而被加热至较高温度进入再生器;再生器也用疏水微孔膜制成,膜的一侧为除湿溶液,膜的另一侧为室外空气;温度较高的除湿溶液中的水蒸气压力高于室外空气中的水蒸气压力,除湿溶液中的水分在膜表面汽化并穿过膜孔排出被室外空气带走,再生后的除湿溶液经回热器初步冷却后,再通过预冷器被进一步冷却至适宜温度返回室

内除湿器;通过三个单元的协调运行,可使室内温度和湿度控制在设定范围。

基于疏水微孔膜的溶液除湿方法来控制地冷空调室内空气湿度时,空气中的水蒸气穿过膜孔进入除湿溶液,室内空气与除湿溶液不直接接触,可避免除湿溶液对室内空气的污染;除湿溶液再生器中除湿溶液与室外空气之间也由疏水微孔膜隔开,除湿溶液不会进入室外空气而造成除湿溶液损耗;除湿溶液再生所需热能主要由制冷单元排出的废热提供;从而可实现室内空气除湿时低能耗、室内空气无污染、除湿溶液无损耗。

2 部件选型设计

以天津地区 100m² 普通家庭住宅建筑为背景,室外空气温度 35℃、相对湿度 50%,室内空气温度 28℃、相对湿度 60%时,主要部件的选型设计如表 1 所示。

表 1 主要部件及参数

Table 1 The main components and parameters of the system

基本单元	部件名称	部件型式	基本参数
制冷单元	制冷剂	R32	-
	压缩机	转子式压缩机	1.5hp
	主冷凝器	翅片管式换热器	面积为 17.1m ²
	辅冷凝器	套管式换热器	面积为 0.44m ²
	膨胀阀	电子膨胀阀	公称通径 1.65mm
	蒸发器	套管式换热器	面积为 0.41m ²
输冷单元	载冷液	乙二醇溶液	体积分数 40%
	载冷液泵	全塑离心泵	功率 80W, 扬程 6m
	地板内盘管	聚丁烯管	外径Φ20mm
除湿单元	除湿溶液	LiBr 溶液	质量浓度 45%
	溶液泵	全塑离心泵	功率 25W, 扬程 5m
	回热器	套管式换热器	回热器面积为 0.093m ²
	预冷器	套管式换热器	预冷器面积为 0.017m ²
	除湿器	穿流型膜组件	膜面积为 1.46m ²
	再生器	穿流型膜组件	膜面积为 0.21m ²

其中除湿单元中除湿器和再生器可采用穿流型结构,即多根疏水微孔膜管按一定间距并列布置,除湿溶液在膜管内流动,空气在膜管外近似垂

直于膜管流动;这种结构具有单位体积的膜面积大、空气在膜管外流动较均匀、制作方便等特点,如图 2 所示。

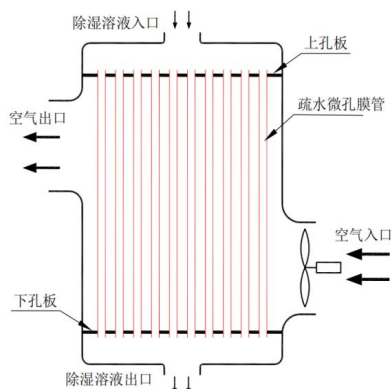


图 2 除湿器和再生器结构

Fig.2 Structure diagram of dehumidifier and regenerator

3 运行性能

3.1 系统特性方程

地板供冷量方程:

$$Q_{fl} = 5.67 \times 10^{-8} c_b F_{fl} (T_a^4 - T_{fl}^4) + a_{co} F_{fl} (T_a - T_{fl}) \quad (1)$$

地板与盘管载冷液传热方程:

$$Q_{fl} = k F_{fl} (T_{fl} - T_{mz}) / H_{fl} \quad (2)$$

制冷单元制冷系数和压缩机功率方程:

$$COP = \frac{C_{th} T_{re}}{T_{rc} - T_{re}} \quad (3)$$

$$P_{com} = \frac{Q_{co}}{COP} \quad (4)$$

疏水微孔膜水蒸气穿过速率方程^[16]:

$$J_m = \frac{p_f - p_a}{R_{KM} + R_{SG}} \quad (5)$$

疏水微孔膜两侧除湿溶液与空气传热方程^[16]:

$$Q_{ht} = \frac{A_m (T_f - T_a)}{\left(\frac{1}{\alpha_f} + \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_a} \right)} \quad (6)$$

式中: Q_{fl} 为地板与室内环境换热量, W; c_b 为地板表面黑度, 无因次; F_{fl} 为地板表面积, m^2 ; T_a 为室内空气温度, K; T_{fl} 为地板表面温度, K; a_{co} 地板表面对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; k 为地板当量热导率, $W/(m \cdot K)$; T_{mz} 为埋管层当量温度, K; H_{fl} 为地板厚度, m; COP 为制冷单元制冷系数, 无因次; C_{th} 为热力学完善度系数, 无因次; T_{re} 为制冷剂蒸发温度, K; T_{rc} 为制冷剂冷凝温度, K;

P_{com} 为制冷单元压缩机功率, W; Q_{co} 为建筑冷负荷, W; J_m 为单位面积疏水微孔膜水蒸气穿过速率, $g/(m^2 \cdot s)$; R_{KM} 为水蒸气穿膜质阻, $(m^2 \cdot s \cdot Pa)/g$; R_{SG} 为水蒸气由膜外表面向空气中扩散的对流传质质阻, $(m^2 \cdot s \cdot Pa)/g$; p_f 为除湿溶液侧膜表面水蒸气压力, Pa; p_a 为空气中水蒸气压力, Pa; Q_{ht} 为疏水微孔膜两侧除湿溶液与空气传热量, W; A_m 为疏水微孔膜管表面积, m^2 ; T_f 为除湿溶液温度, K; α_f 为除湿溶液侧膜表面对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; δ_m 为疏水微孔膜管壁厚, m; λ_m 为疏水微孔膜壁导热系数, $W/(m \cdot K)$; α_a 为室内空气侧膜表面的对流传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

3.2 系统运行性能

基于上述方程 (1) ~ (6), 应用 MDFCSim 软件对基于疏水微孔膜的溶液除湿型地冷空调的运行特性进行了计算分析, 得到一组较佳的运行参数如表 2 所示 (系统中制冷剂为 R32, 载冷液为体积分数 40% 的乙二醇溶液, 除湿溶液为质量分数 45% 的溴化锂溶液, 疏水微孔膜采用膜孔直径为 $0.4\mu m$ 、膜孔隙率 70% 的聚丙烯膜)。

表 2 系统典型运行数据

Table 2 Typical running parameters of the system		
参数	数值	
室外空气温度/ $^{\circ}C$	35.0	
室外空气相对湿度/%	50	
室内空气温度/ $^{\circ}C$	28.0	
室内空气相对湿度/%	60	
地板有效面积/ m^2	80	
地板表面温度/ $^{\circ}C$	20.0	
载冷液流量/ $g \cdot s^{-1}$	1180	
载冷液平均温度/ $^{\circ}C$	14.5	
制冷剂流量/ $g \cdot s^{-1}$	17.83	
制冷剂蒸发温度/ $^{\circ}C$	9.5	
制冷剂冷凝温度/ $^{\circ}C$	45.0	
压缩机排气温度/ $^{\circ}C$	74.0	
除湿溶液流量/ $g \cdot s^{-1}$	17.36	
进再生器除湿溶液温度 (图 1 中 T_1)/ $^{\circ}C$	65.0	
出再生器除湿溶液温度 (图 1 中 T_2)/ $^{\circ}C$	50.0	
出回热器除湿溶液温度 (图 1 中 T_3)/ $^{\circ}C$	36.0	
出预冷器除湿溶液温度 (图 1 中 T_4)/ $^{\circ}C$	23.0	
出除湿器除湿溶液温度 (图 1 中 T_5)/ $^{\circ}C$	33.0	
压缩机功率/W	1025	
制冷系数	4.4	
除湿器除湿速率/ $g \cdot s^{-1}$	0.153	

系统按上述参数运行时,除湿速率可达 0.153g/s (0.55kg/h),可满足通常室内湿负荷要求;当对室内湿负荷有特殊要求时,可通过调节除湿溶液流量等方式调节除湿器除湿速率。

4 结论

设计了基于疏水微孔膜和除湿溶液对室内空气进行除湿的地冷空调系统,给出了系统的结构流程、部件与材料选型数据、特性方程、较佳运行参数等,简要总结如下:

(1) 除湿溶液通过疏水微孔膜从室内空气中吸湿、向室外空气中排湿再生,且再生所需热能主要来自制冷单元余热,因而具有除湿能耗低、对室内空气无污染、除湿溶液无损耗等特点。

(2) 室外空气 35℃、相对湿度 50%、室内空气 28℃、相对湿度 60%、地板有效面积 80m²时,系统制冷系数可达 4.4,除湿速率可达 0.55kg/h,能够较好地满足室内制冷与除湿要求。

(3) 通过对除湿溶液类型、流量、温度、浓度等因素的优化,可对除湿器除湿速率在较大范围内进行调控。

参考文献:

- [1] Karmann C, Schiavon S, Bauman F. Thermal comfort in buildings using radiant vs. all-air systems: A critical literature review[J]. *Building and Environment*, 2017, 111:123-131.
- [2] 崔梦颖,刘吉营,朱相源,等.山东典型地区办公建筑地板辐射供冷系统分析[J]. *山东建筑大学学报*, 2023, 38(3):70-79.
- [3] 陈金华,汪文倩,姜冬,等.地板辐射供冷室内热环境改善研究[J]. *暖通空调*, 2020, 50(5):42-48.
- [4] 任雁,刘云亮,周翔,等.长时间处于地板辐射供冷环境

中的人体热反应模拟研究[J]. *制冷技术*, 2019, 39(6):62-69.

- [5] Hernández F F, López J M C, Gutiérrez A F, et al. A new terminal unit combining a radiant floor with an underfloor air system: Experimentation and numerical model[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 133:70-78.
- [6] 秦峰华.混凝土地板辐射制冷系统建模与控制[D].济南:山东建筑大学,2019.
- [7] Ren J, Liu J, Zhou S, et al. Developing a collaborative control strategy of a combined radiant floor cooling and ventilation system: A PMV-based model[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 54:104648.
- [8] 郑松,宣永梅,王海亮.辐射供冷系统结露问题的研究现状[J]. *制冷与空调*, 2012, 26(4):399-404.
- [9] 陈宏刚,曹小杰,郝梦丽,等.辐射供冷空调系统防结露研究综述[J]. *建筑热能通风空调*, 2021, 40(2):48-51+38.
- [10] 赵英博,章文杰,贡桐丹,等.送风方式对辐射供冷系统防结露效果的模拟研究[J]. *制冷与空调*, 2022, 36(2): 203-208, 219.
- [11] Ren J, Liu J, Zhou S, et al. Experimental study on control strategies of radiant floor cooling system with direct-ground cooling source and displacement ventilation system: A case study in an office building[J]. *Energy*, 2022, 239:122410.
- [12] 李鹏魁,傅允准.辐射空调专用的两级新风除湿机性能测试与分析[J]. *流体机械*, 2019, 47(1), 70-74.
- [13] 刘异,陈柳.高温热泵转轮除湿及辐射供冷空调系统性能研究[J]. *建筑科学*, 2020, 36(8):92-98.
- [14] 崔少云,宋媛,李志勇.除湿技术研究综述与展望[J]. *机械管理开发*, 2021, 36(10):288-291.
- [15] 张大帅,李晨,张小朋,等.料液强化流动对气扫式膜蒸馏影响的实验研究[J]. *膜科学与技术*, 2018, 38(3):91-96, 109.
- [16] 张芑悦.热敏料液专用气扫式膜蒸馏装置的研究[D].天津:天津科技大学,2022.

(上接第 825 页)

参考文献:

- [1] 吴业正.小型制冷装置设计指导(1版)[M].北京:机械工业出版社,2001.
- [2] GB 50174-2017,数据中心设计规范[S].北京:中国计划出版社,2017
- [3] GB 50736-2012,民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

- [4] 黄翔,范坤,宋姣姣.蒸发冷却技术在数据中心的应用探讨[J]. *制冷与空调*, 2013, 13(8):16-22.
- [5] 白延斌.蒸发冷却与机械制冷复合高温冷水机组关键性能参数的研究[D].西安:西安工程大学,2013.
- [6] 田振武,黄翔,郭志成,等.新型蒸发冷却空调系统在数据中心的运行测试分析[J]. *制冷与空调*, 2020, 34(3): 297-302.