

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.02.004

辐射供冷空调系统的研究综述

廖买利, 谢东, 丁伟, 刘金芝, 田伶

(南华大学 土木工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 在对辐射供冷空调系统国内外研究现状概述的基础上, 提出了辐射供冷空调系统研究中存在的一些问题, 并对辐射供冷空调系统的发展进行了探讨和展望。

关键词: 辐射供冷空调系统; 传热理论; 供冷性能; 舒适性; 结露

中图分类号: TU831

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2017)02-0023-05

A Research Review of the Radiant Cooling Air-Conditioning System

LIAO Maili, XIE Dong, DING Wei, LIU Jinzhi, TIAN Ling

(School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang Hunan 421001, China)

Abstract: Based on current researches made at home and abroad on the radiant cooling air-conditioning system, some problems, which exist in the research process of the radiant cooling air-conditioning system, have been pointed out, followed by a tentative discussion of the prospective of the further studies for the improvement of this system.

Keywords: radiant cooling system; heat transfer theory; cooling performance; comfortableness; condensation

随着城市化进程的加快, 人们的生活和工作模式发生了转变, 导致人的绝大部分时间在室内, 因而室内环境的质量与舒适度备受人们关注。日常生活中, 空调、采暖、照明、智能电器等的使用加剧了建筑能源的消耗, 空调供冷/供热系统的能耗占建筑能耗的大部分。产业研究院的分析报告显示, 我国的建筑面积到2020年将达到700亿 m^2 , 且高能耗建筑占97%以上, 我国建筑能耗占总能耗的比例将增加至35%左右。随着建筑业的迅速发展, 建筑能耗问题亟待改善, 降低空调能耗对建筑节能与绿色建筑的发展具有重要意义。辐射空调作为一种新型空调技术, 相比传统空调技术, 具有换热效率高、节能环保、舒适性好的优点。辐射空调技术在我国具有较好的发展前景,

国内外学者对其进行了较多的探索和研究。

1 辐射空调的传热理论

关于辐射空调传热理论方面, 已有较多科研成果。如 S. Okamoto 等^[1]利用水管密集度和冷水与室内空气的温差, 提出一种辐射顶板传热量的简化计算方法, 并利用实测结果进行了验证, 两者结果较接近。Li Q. Q., Zhang L. 等^[2-3], 对多层地板结构的传热, 提出了一种对地板表面温度和最低温度进行简化计算的平衡热阻法。M. M. Ardehali 等^[4]通过辐射换热的角系数计算方法, 考虑辐射冷顶板与人体的换热, 建立了辐射冷却顶板与热区域的换热模型。

收稿日期: 2017-02-01

基金项目: 湖南省研究生科研创新基金资助项目(CX2016B447)

作者简介: 廖买利(1991-), 女, 湖南郴州人, 南华大学硕士生, 主要研究方向为建筑热环境与建筑节能,

E-mail: liaomaili@163.com

通信作者: 谢东(1978-), 男, 湖北荆州人, 南华大学教授, 博士, 主要研究方向为建筑节能与暖通工程 CFD 应用,

E-mail: nhxiedong@126.com

B. I. Kilkis^[5]提出了一个辐射地板平面肋片模型,将管道之间的地板上表面按传热肋片简化处理,并引入肋片效率概念。R. K. Stand等^[6]通过辐射传热理论分析,提出了一个集成整个建筑能耗模拟程序的辐射系统模型。M. J. Ren等^[7]对混凝土辐射板供冷系统建立了简化热容热阻网络法(thermal resistance and capacitance, RC)模型,以描述混凝土板的动态传热和蓄热过程,与实验相比,模型的平均相对误差不超过0.5℃。田喆等^[8]利用热工和几何参数来确定RC简化模型的核心温度层,并增加沿供水管道的换热模型,实现了动态热响应的模拟分析。于国清等^[9]依据吊顶单元与环境换热的换热原理,建立了单块和两块串联的辐射吊顶供冷量的理论计算模型,并实验验证了理论模型的正确性。

2 辐射板性能及辐射供冷性能影响因素

2.1 辐射板的性能研究

M. Koschenz等^[10]开发了一种用相变材料的毛细管网辐射顶板,建立了该新型辐射板的数学模型,并用实验方法验证了该顶板的性能。M. Fauchoux等^[11]对一种热湿传递的新型辐射板性能进行了模拟与实验研究,结果显示其性能提高了15%~28%。张伦等^[12]测试了一种对流强化式辐射板的供冷性能,计算了其辐射和对流供冷量,分析了供冷量的影响因素。裴凤等^[13]对金属辐射板和石膏毛细管网辐射板的供冷性能进行了实验研究,发现相同条件下,石膏板比金属板的单位供冷量大。金梧凤等^[14]对地板和吊顶辐射两种方式的供冷能力进行了实验对比研究,发现在相同条件下,吊顶的供冷能力高于地板辐射。J. W. Jeong等^[15]在对冷辐射板与混合通风系统的研究中发现,送风空气流速的增加能使辐射板的制冷能力提高5%~35%。D. Song等^[16]研究了热湿地区辐射冷板与自然通风相结合的方式对供冷量及室内垂直温差的影响。于志浩等^[17]通过对毛细管辐射吊顶与置换通风、贴附射流两种送风方式耦合的供冷性能研究,发现冷顶板与贴附射流耦合的供冷能力相对较高。宣永梅等^[18]利用EnergyPlus软件对辐射制冷与置换通风系统进行能耗模拟,发现送风温度每增加1℃,辐射地板提供的冷量增加1.9%。

2.2 辐射供冷性能的影响因素研究

Xia Y.等^[19]建立了辐射冷顶板的传热方程,分析了导热板效率,管径、管间距、管长,水流量,导热板的板材及室内空气流速对辐射冷顶板换热量的

影响。Xie D.等^[20]建立了毛细管辐射板三维稳态传热模型,定性分析了辐射顶板供冷性能的影响因素,发现供冷量与水温、抹灰层厚度、管间距成负相关。Jin X.等^[21]利用有限元方法建立了辐射供冷系统的数学模型,探究了管热阻及流速对冷板换热性能的影响,结果表明管的导热系数较低会抑制辐射供冷板的换热。Yin Y. L.等^[22]通过实验研究发现辐射末端的供冷能力主要受冷水流动状态的影响,冷水与环境的温差也影响供冷能力。李青等^[23]建立了三维流-固耦合模型,分析了毛细管席的结构参数、敷设条件、室内环境、供水条件对毛细管席换热性能的影响。高志宏等^[24]对毛细管供冷工况进行了实验研究,结果表明安装方式对供冷性能的影响较大,室温设定值与水流量也会影响供冷性能。

3 辐射空调的舒适性与节能

S. G. Hodder等^[25]实验研究了顶板供冷与置换通风结合方式下竖向辐射不对称温度对舒适性的影响。K. Kitagawa等^[26]通过人工气候室的热舒适主观实验研究,发现微小的空气流动能增加顶板辐射供冷系统的热舒适性。R. A. Memon等^[27]通过舒适性的调查及TRNSYS软件模拟研究,对辐射供冷系统的舒适性及其能耗状况进行了分析。T. Catalina等^[28]对辐射顶板测试房间进行了实验及CFD模拟研究,发现室内垂直温度梯度均小于1℃/m,并利用PMV/PPD指标进行了舒适性分析。K. A. Antonopoulos等^[29]通过金属辐射顶板空调系统的理论与实验分析,指出该系统在满足舒适的条件下,节能效果可增加12.5%。马景骏等^[30]对辐射顶板换热过程中的舒适性进行理论计算与分析,确定冷却吊顶空调系统的室内温度,发现冷却吊顶系统夏季室内温度可以比常规空调系统高1~2℃。陈露等^[31]对顶板、地板和墙壁3种辐射供冷方式下的垂直温差、吹风感、PMV/PPD指标及能量利用率对比分析,发现顶板辐射供冷的舒适性最好。黄涛等^[32]对金属辐射板+新风的空调系统在高温高湿条件下进行室内温湿度测试,发现室内具有较好的舒适性。

4 结露与控制研究

Lim J. H.等^[33]对居住建筑的地板辐射供冷系统的运行控制方式进行模拟与实验研究,指出水温控制优于流量控制,为了防止结露,可通过露点温度控制水温。Ryu S. R.^[34]对居住建筑地板供热供冷系统的控制方法进行了研究,并对水温控制、流量控制

的优缺点进行了比较分析。Seo J. M. 等^[35]开发了一种适应于热湿地区的新风与地板辐射制冷耦合系统, 并提出了温湿度控制方案, 其节能效果比普通辐射空调提高了20%。S. A. Mumma 等^[36]研究了冷却顶板与独立新风系统的控制方法, 通过水流量调节来控制室温。吴倩芸等^[37]对一种辐射与对流空调系统进行试验研究, 提出了一种基于温度的控制策略, 并分析了系统的节能性。赵羽等^[38]采用 TRNSYS 软件, 模拟探讨定水温和变水温控制对室内温度稳定性及舒适性的影响, 结果表明, 2种方式的能耗及舒适性相当, 变水温控制方式可避免结露。

5 结论与展望

国内外关于辐射空调供冷系统的研究可以概括为4个方面: 一是在传热理论的基础上, 对辐射板热阻进行简化计算, 并对辐射板的传热模型进行优化。二是利用数值模拟或实验测试的方法来探究不同辐射末端形式与送风系统结合情况下的供冷能力, 以及顶板结构、敷设方式、供水参数、送风条件、室内环境等因素对辐射供冷能力的影响。三是利用一系列的舒适性指标 (PMV/PPD、空气流速、垂直温差等) 对辐射空调室内热环境进行评价, 并在满足舒适性的条件下对辐射空调系统的节能性进行探究。四是利用水温控制与流量控制策略对辐射空调供冷系统进行调控, 探讨防止辐射板表面结露的方法。

随着学者们对辐射供冷空调系统的深入研究, 辐射供冷空调系统的供冷能力和舒适性得到了人们的认可。在节能减排的政策下, 辐射供冷空调系统的节能研究将成为下一个研究方向。辐射空调系统与太阳能、地源热泵以及其他新能源结合, 可以降低辐射空调系统的能耗, 因而具有广阔的市场前景。另外, 辐射板的结露现象一直是辐射供冷系统面临的主要问题, 也限制了其辐射供冷能力。目前, 人们主要利用不同控制策略来防止辐射顶板结露, 但利用控制策略来防止辐射板结露的方式, 无法完全消除辐射板的结露风险, 不能从根本上解决结露问题。笔者建议从辐射末端的结构及工艺上加以改进, 对辐射板的结露机理进行深入研究, 从而从根本上解决结露问题, 提高其辐射供冷能力。

参考文献:

- [1] OKAMOTO S, KITORA H, YAMAGUCHI H, et al. A Simplified Calculation Method for Estimating Heat Flux from Ceiling Radiant Panels[J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42(1): 29–33.
- [2] LI Q Q, CHEN C, ZHANG Y, et al. Simplified Thermal Calculation Method for Floor Structure in Radiant Floor Cooling System[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 74: 182–190.
- [3] ZHANG L, LIU X H, JIANG Y. Simplified Calculation for Cooling/Heating Capacity, Surface Temperature Distribution of Radiant Floor[J]. *Energy and Buildings*, 2012, 55(12): 397–404.
- [4] ARDEHALI M M, PANAH N G, SMITH T F. Proof of Concept Modeling of Energy Transfer Mechanisms for Radiant Conditioning Panels[J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45(13/14): 2005–2017.
- [5] KILKIS B I. Enhancement of Heat Pump Performance Using Radiant Floor Heating Systems[J]. *American Society of Mechanical Engineers*, 1992, 28: 119–127.
- [6] STAND R K, BAUMGARTNER K T. Modeling Radiant Heating and Cooling Systems: Integration with a Whole-Building Simulation Program[J]. *Energy and Buildings*, 2004, 37(4): 389–397.
- [7] REN M J, WRIGHT J A. A Ventilated Slab Thermal Storage System Model[J]. *Building and Environment*, 1998, 33(1): 43–52.
- [8] 田喆, 牛晓雷, 胡振杰, 等. 混凝土辐射供冷 RC 简化传热模型的改进及实验验证 [J]. *天津大学学报*, 2013, 46(12): 1095–1100.
TIAN Zhe, NIU Xiaolei, HU Zhenjie, et al. Improvement and Experimental Validation of Modified RC-Network Model for Concrete Core Cooling[J]. *Journal of Tianjin University*, 2013, 46(12): 1095–1100.
- [9] 于国清, 贾文哲, 赵彦杰. 辐射吊顶单元供冷量的理论计算模型及实验验证 [J]. *制冷学报*, 2014, 35(2): 115–118.
YU Guoqing, JIA Wenzhe, ZHAO Yanjie. Theoretical Calculation Model and Experimental Validation of the Radiant Ceiling Unit Cooling Capacity[J]. *Journal of Refrigeration*, 2014, 35(2): 115–118.
- [10] KOSCHENZ M, LEHMANN B. Development of a Thermally Activated Ceiling Panel with PCM for Application in Lightweight and Retrofitted Buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2004, 36(6): 567–578.
- [11] FAUCHOUX M, BANSAL M, TALUKDAR P, et al. Testing and Modeling of a Novel Ceiling Panel for Maintaining Space Relative Humidity by Moisture Transfer[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2010, 53(19): 3961–3968.
- [12] 张伦, 刘晓华, 江亿. 对流强化式辐射板实验与性能分析 [J]. *暖通空调*, 2011, 41(1): 38–41.
ZHANG Lun, LIU Xiaohua, JIANG Yi. Experiment and Performance Analysis on Convection Strengthened Radiant Panel[J]. *Heating Ventilating and Air*

- Conditioning, 2011, 41(1): 38-41.
- [13] 裴 凤, 陈 华, 金梧凤, 等. 不同结构毛细管网辐射板供冷性能实验研究 [J]. 低温与超导, 2013, 41(7): 58-63.
PEI Feng, CHEN Hua, JIN Wufeng, et al. Experimental Study of the Cooling Performance of Different Structure of Capillary Mats of Radiant Panel[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2013, 41(7): 58-63.
- [14] 金梧凤, 余铭锡, 金光禹. 毛细管网系统供冷性能的实验研究 [J]. 暖通空调, 2010, 40(9): 102-106.
JIN Wufeng, YEO Myoungsok, KIM Kwangwoo. Experiments on Cooling Capacity of Capillary Tube System[J]. Heating Ventilating and Air Conditioning, 2010, 40(9): 102-106.
- [15] JEONG J W, MUMMA S A. Ceiling Radiant Cooling Panel Capacity Enhanced by Mixed Convection in Mechanically Ventilated Spaces[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(18): 2293-2306.
- [16] SONG D, KATO S. Radiational Panel Cooling System with Continuous Natural Cross Ventilation for Hot and Humid Regions[J]. Energy and Buildings, 2004, 36(12), 1273-1280.
- [17] 于志浩, 金梧凤, 刘艳超, 等. 毛细管网吊顶辐射空调与新风耦合的性能研究 [J]. 绿色科技, 2013(11): 253-258.
YU Zhihao, JIN Wufeng, LIU Yanchao, et al. Research on Capillary Radiant Ceiling Cooling System Coupling with Air Conditioning System[J]. Journal of Green Science and Technology, 2013(11): 253-258.
- [18] 宣永梅, 王海亮, 黄 翔. 基于 Energy Plus 的地板辐射与置换通风空调系统模拟分析 [J]. 流体机械, 2012, 40(8): 65-68.
XUAN Yongmei, WANG Hailiang, HUANG Xiang. Simulation Analysis of Radiation Floor with Displacement Ventilation Air Conditioning System by Energy Plus[J]. Fluid Machinery, 2012, 40(8): 65-68.
- [19] XIA Y, MUMMA S A. Ceiling Radiant Cooling Panels Employing Heat-Conducting Rails: Deriving the Governing Transfer Equations[J]. Ashrae Transactions, 2006, 112: 34-41.
- [20] XIE D, WANG Y, WANG H Q, et al. Numerical Analysis of Temperature Non-Uniformity and Cooling Capacity for Capillary Ceiling Radiant Cooling Panel[J]. Renewable Energy, 2016, 87: 1154-1161.
- [21] JIN X, ZHANG X, LUO Y, et al. Numerical Simulation of Radiant Floor Cooling System: Effects of Thermal Resistance of Pipe and Water Velocity on the Performance[J]. Building and Environment, 2010, 45(11): 2545-2552.
- [22] YIN Y L, WANG R Z, ZHAI X Q, et al. Experimental Investigation on the Heat Transfer Performance and Water Condensation Phenomenon of Radiant Cooling Panels[J]. Building and Environment, 2014, 71(1): 15-23.
- [23] 李 青, 刘金祥, 陈晓春, 等. U形毛细管席冷却顶板换热性能数值模拟与分析 [J]. 暖通空调, 2010, 40(4): 136-140.
LI Qing, LIU Jinxiang, CHEN Xiaochun, et al. Numerical Simulation and Analysis of Thermal Performance of Ceiling Cooling U-Tube Capillary Mats[J]. Heating Ventilating and Air Conditioning, 2010, 40(4): 136-140.
- [24] 高志宏, 刘晓华, 江 亿. 毛细管辐射供冷性能实验研究 [J]. 太阳能学报, 2011, 32(1): 101-106.
GAO Zhihong, LIU Xiaohua, JIANG Yi. Experiment Study on Cooling Capacity of Capillary-Tube Radiation Air-Conditioner[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2011, 32(1): 101-106.
- [25] HODDER S G, LOVEDAY D L, PARSONS K C, et al. Thermal Comfort in Chilled Ceiling and Displacement Ventilation Environments: Vertical Radiant Temperature Asymmetry Effects[J]. Energy and Buildings, 1998, 27(2): 167-173.
- [26] KITAGAWA K, KOMODA N, HAYANO H, et al. Effect of Humidity and Small Air Movement on Thermal Comfort Under a Radiant Cooling Ceiling by Subjective Experiments[J]. Energy and Buildings, 1999, 30(2): 185-193.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] ANTONOPOULOS K A, VRACHOPOULOS M, TZIVANIDIS C. Experimental Evaluation of Energy Savings in Air-Conditioning Using Metal Ceiling Panels[J]. Applied Thermal Engineering, 1998, 18(11): 1129-1138.
- [30] 马景骏, 孙丽颖. 冷却吊顶系统的热舒适性分析 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2001, 22(5): 27-30.
MA Jingjun, SUN Liying. Thermal Comfort Analysis in Cooling Ceiling System[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2001, 22(5): 27-30.
- [31] 陈 露, 廖胜明. 三种方式辐射供冷室内热环境对比分析 [J]. 建筑热能通风空调, 2010, 29(3): 53-56.
CHEN Lu, LIAO Shengming. Three Approaches to the Comparative Study of Indoor Thermal Environment for Radiant Cooling System[J]. Building Energy and

- Environment, 2010, 29(3): 53-56.
- [32] 黄涛, 王永红, 李娜, 等. 办公建筑中吊顶辐射空调系统夏季工况性能测试研究[J]. 建筑节能, 2016, 44(10): 5-7.
HUANG Tao, WANG Yonghong, LI Na, et al. Experimental Research on Performance of Radiant Ceiling Air-Conditioning System in the Office Building in Summer[J]. Building Energy Efficiency, 2016, 44(10): 5-7.
- [33] LIM J H, JO J H, KIM Y Y, et al. Application of the Control Methods for Radiant Floor Cooling System in Residential Buildings[J]. Building and Environment, 2006, 41(1): 60-73.
- [34] RYU S R, LIM J H, YEO M S, et al. A Study on the Control Methods for Radiant Floor Heating and Cooling System in Residential Building[J]. Ashrae Transactions, 2004, 110: 106-116.
- [35] SEO J M, SONG D, LEE K H. Possibility of Coupling Outdoor Air Cooling and Radiant Floor Cooling Under Hot and Humid Climate Conditions[J]. Energy and Buildings, 2014, 81: 219-226.
- [36] MUMMA S A, JEONG J W. Field Experience Controlling a Dedicated Outdoor Air System[J]. Ashrae Transactions, 2005, 111: 433-442.
- [37] 吴倩芸, 蔡亮, 张涛, 等. 辐射与对流耦合空调系统及其控制策略[J]. 暖通空调, 2016, 46(11): 101-104.
WU Qianyun, CAI Liang, ZHANG Tao, et al. Coupled Air Conditioning System of Radiation and Convection and Its Control Strategy[J]. Journal Heating Ventilating and Air Conditioning, 2016, 46(11): 101-104.
- [38] 赵羽, 袁东立, 谢飞. 天棚辐射供冷系统调节性能的研究[J]. 暖通空调, 2014, 44(2): 65-68.
ZHAO Yu, YUAN Dongli, XIE Fei. Regulation Performance of Cooling Ceiling Air Conditioning System[J]. Journal Heating Ventilating and Air Conditioning, 2014, 44(2): 65-68.

(责任编辑: 邓光辉)

(上接第14页)

- Houses Compared with Standard Houses[J]. Energy Policy, 2007, 36(1): 47-55.
- [37] GRAÇA G C D, AUGUSTO A, LERER M M. Solar Powered Net Zero Energy Houses for Southern Europe: Feasibility Study[J]. Solar Energy, 2012, 86(1): 634-646.
- [38] WANG L, GWILLIAM J, JONES P. Case Study of Zero Energy House Design in UK[J]. Energy and Buildings, 2009, 41(11): 1215-1222.
- [39] KURNITSKI J, SAARIA, KALAMEES T, et al. Cost Optimal and Nearly Zero (nZEB) Energy Performance Calculations for Residential Buildings with REHVA Definition for nZEB National Implementation[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(11): 3279-3288.
- [40] 黄春成. 基于软件模拟的超低能耗建筑能耗状况研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2013.
HUANG Chuncheng. Research on Energy Consumption of Ultra-Low Energy Building Based on Software Simulation [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2013.
- [41] 叶晓莉, 端木琳, 齐杰. 零能耗建筑中太阳能的应用[J]. 太阳能学报, 2012, 33(增刊1): 86-90.
YE Xiaoli, DUANMU Lin, QI Jie. The Application of Solar Energy in Zero Energy Buildings[J]. 2012, 33(S1): 86-90.
- [42] 卢求. 德国被动房超低能耗建筑技术体系[J]. 生态城市与绿色建筑, 2015, 19(1): 29-36
LU Qiu. German Passive and Ultra-Low-Energy Building Technology System[J]. Eco-City and Green Building, 2015, 19(1): 29-36.
- [43] 潘广辉. 被动房屋设计与实践之一: 被动房节能技术理论与实践浅谈[J]. 建设科技, 2013(12): 77-79.
PAN Guanghui. Passive Building Design and Practice: Theory and Practice of Passive Housing Energy Saving Technology[J]. Construction Science and Technology, 2013(12): 77-79.
- [44] 徐伟, 孙德宇. 中国被动式超低能耗建筑能耗指标研究[J]. 建设科技, 2015(19): 37-41.
XU Wei, SUN Deyu. Research on Performance Criteria of Passive and Ultra-Low-Energy Building in China[J]. Construction Science and Technology, 2015(19): 37-41.

(责任编辑: 邓光辉)