

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.04.003



热湿工况下工位辐射空调的热舒适实验研究

何梅玲, 李念平, 何颖东, 贺德

(湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082)

摘要:为研究热湿工况下使用工位辐射空调的人体热舒适情况,在人工环境实验室内,通过改变环境背景温度来影响人体的热感觉,并采用热感觉投票(TSV)作为评价标准,重点研究了人体头部、躯干、上肢、下肢以及整体热感觉情况。实验结果表明,尽管背景环境参数超出舒适范围,但使用工位辐射空调能维持受试者的舒适状态,即背景温度稳定在 28 ℃ 时,平均整体热感觉投票值低于 +0.2;背景温度为 30 ℃ 时,受试者热感觉仍能满足 ASHRAE 规范中规定的 80% 可接受范围要求。

关键词:热感觉;热舒适;环境参数;工位空调

中图分类号:TU831.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)04-0011-06

Experimental analysis of thermal comfort in the hot-humid environment with radiant panel workstation

He Meiling, Li Nianping, He Yingdong, He De

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China)

Abstract: This study focuses on thermal comfort of subjects with radiant panel workstation in hot-humid environment. The experiments are carried out in the experimental chamber. Thermal sensations of whole body, head, trunk, upper limb and lower limb of subjects are collected on the basis of seven-scale vote. The obtained results indicate that the average vote of thermal sensation at 28 ℃ is lower than +0.2, and subjects could maintain comfortable condition well with radiant panel workstation (within the 80% acceptable range of ASHRAE Standard) although indoor environment is as high as 30 ℃. This study provides a new way for both extending comfortable temperature range and saving energy in buildings.

Keywords: thermal sensation; thermal comfort; environmental parameter; radiant panel workstation

在传统空调环境中,即使温湿度在舒适区间内,建筑中的人仍会抱怨其所处的室内环境^[1]。许多研究已经证实,相比传统的空调系统,辐射空调系统不仅能创造更舒适的室内环境,还具有节能优势^[1-4]。

辐射空调系统提供了高品质的室内环境,又具备节能潜力,有着传统空调不可比拟的优势,符合未来空调的发展方向:健康、节能和人性化^[5]。相同温度时,人在辐射供冷环境中感觉更凉快^[2]。一些学者

收稿日期:2016-07-22

基金项目:国家自然科学基金(51578220)

作者简介:何梅玲(1992-),女,主要从事辐射空调方式研究,(E-mail)280788517@qq.com。

李念平(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)linianping@126.com。

Received:2016-07-22

Foundation item:National Natural Science Foundation of China (No. 51578220)

Author brief:He Meiling (1992-), main research interest: radiant air conditioning system, (E-mail) 280788517@qq.com.

Li Nianping (corresponding author), professor, doctoral supervisor, (E-mail) linianping@126.com.

认为,在同样温度下人体在辐射供冷环境中对气温的感觉比在对流空调环境中的感觉低 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[6]。毛细管辐射空调有望成为未来空调系统发展的新选择^[7]。

为了深入研究辐射供冷热环境中人体的热舒适特性,近年来许多学者开展了相关研究。Cognati 等^[8]通过模拟全空气系统和辐射供冷系统产生的热环境,发现辐射供冷系统垂直温差更小、室内风速更低、人员吹风感更弱。Zhao 等^[9]模拟装有地面辐射供冷系统的高大空间建筑室内热环境,发现使用地板辐射供冷与全空气系统相比具有更高的能效和舒适性。Imanari 等^[1]通过实验对比分析了在辐射空调和对流空调环境中人体热舒适特性,发现辐射供冷环境下的舒适度优于对流空调环境下的舒适度。Kitagawa 等^[10]发现在辐射供冷环境中,适当提高风速可以有效降低人体的热感,从而有效地提高了舒适性。周慧鑫等^[11]对地板辐射供冷结合新风系统的空调方式进行了实验研究,表明该系统具有一定的蓄冷特性,不仅能满足人体对热舒适性的要求,并且能有效克服供冷能力较低和结露等问题。高志宏等^[12]通过 CFD 模拟计算,得到了不同辐射板位置和室内热源情况下冷板供冷能力及室内热环境分布情况,以得到最优的舒适环境。现有研究表明,辐射空调系统虽然拥有舒适的优势,但还存在以下问题:1)研究主要集中在 ASHRAE 舒适范围内,对热湿环境下辐射空调的舒适性研究较少;2)当前针对辐射换热环境的研究涉及局部热舒适较少。文献[13-19]表明,对流环境下,身体局部的热感觉与整体热感觉存在关联性。Sakoi 等^[20]通过在人体和假人模型的实验,发现头部散热量越大人感觉越舒适,足部则有相反的结果。因此,在辐射换热环境中,不仅应考虑整体热舒适性,也应注重身体局部的热舒适性。

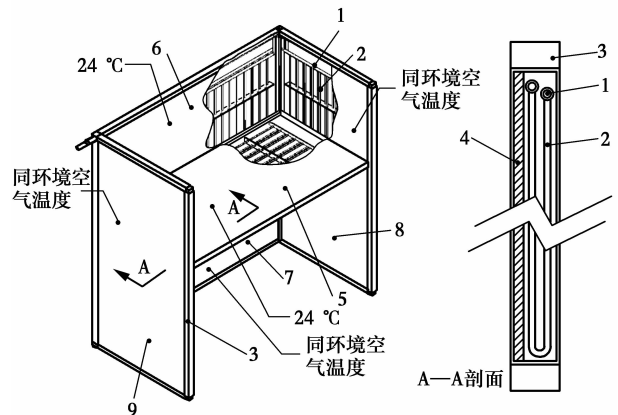
笔者以一种新型工位辐射空调末端装置(以下简称“工位辐射空调”)为基础,研究辐射供冷办公环境中的人体热舒适性。研究在湖南大学人工环境实验室进行,通过实验获得了在偏离舒适区环境中受试者的整体热感觉及身体局部热感觉状况,并与对流环境对比,确定该新型辐射空调系统末端装置对提高热湿环境中人员热舒适性的效果。

1 实验方法及设施

1.1 实验环境与受试者

实验在湖南大学人工环境实验室内进行,实验

室内安装了一套新型工位辐射空调末端装置(已申请专利),该装置以毛细管辐射板作为工位的隔板和桌面,整张桌子由 5 块辐射板构成。辐射工位由冷水机组提供循环冷冻水,实验期间,开启的辐射板板面温度控制在 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$,未开启的辐射板板面温度同环境空气温度,室内环境空气温度为 26 、 28 、 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,该装置结构示意图见图 1,该装置实物图见图 2。实验室内背景环境参数由另外一套空调系统控制。



注: 1.毛细管;2.毛细管;3.支架;4.橡塑保温层;5.桌面;6.桌面
前上隔板;7.桌面下隔板;8.桌面右侧隔板;9.桌面左侧隔板

图 1 工位辐射空调结构示意图

Fig. 1 Schematic of radiant cooling workstation



图 2 工位辐射空调实物图

Fig. 2 Diagram of radiant cooling workstation

环境温度和相对湿度采用 TR-72i 温湿度测试仪测量,测量温湿度范围 $0\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\%\sim 95\%\text{ RH}$;采用美国 TSI8347 热式风速仪测定室内风速,测量风速范围 $0\sim 20\text{ m/s}$;辐射板面温度通过贴片式铂电阻 PT100 进行测量,并接无纸记录仪记录。

共有 16 名受试者参与实验,受试者均为大学生,男生、女生各 8 名,身高 $165\pm 6.9\text{ cm}$,体重 $60\pm 10.2\text{ kg}$ 。受试者均来自于夏热冬冷地区或至少在该地区生活一年,身体健康,参加实验前具有良好的睡眠及饮食,且未喝含酒精或咖啡因的饮料。试验

中的受试者的服装为夏季标准着装,上身穿短袖 T 恤、下身穿薄长裤,受试者的服装热阻约为 0.5 clo。

1.2 实验工况

考虑到头部易热、足部易冷,实验并未开启所有辐射板,只开启了桌面以及桌面前上隔板两块辐射板。背景区温度选用 26、28、30 °C,另外设置 3 个不使用工位辐射空调的对照组,共 6 个工况。

受试者到达实验室后,按实验要求整理服装,在进入工作区之前先在背景区静坐 20 min,以减少外界环境对受试者感觉的影响。同时,在此段时间由实验人员向受试者介绍实验的内容以及实验过程中所要注意的事项,受试者填写个人信息。然后受试者进入工作区,按事先安排好的位置坐下开始正式的测试。在实验过程中受试者可以看书、听音乐、操作电脑或轻声交谈,但谈话不能涉及问卷内容。受试者进入工作区,立即填写第 1 份问卷,以后每隔 10 min 填写 1 份,每次实验受试者使用工位辐射空调末端装置 40 min,共填写 5 份答卷。热感觉投票 (TSV) 采用 7 个等级的衡量标准。热感觉投票划分等级见表 1。

表 1 热感觉投票划分等级
Table 1 Scale of thermal sensation

非常热	热	有点热	不冷也不热	有点冷	冷	非常冷
3	2	1	0	-1	-2	-3

2 实验结果

2.1 动态的整体和局部热感觉

实验设定的背景环境温度为 26、28、30 °C,相对湿度为 80%,风速在 0.15 m/s 之内。如图 3 所示,工位辐射空调开启的情况下,头部的热感觉会明显低于工位辐射空调不开启的情况。当温度为 26、28 °C 时,头部的热感觉稳定在 0~0.5 之间,热感不强;当温度为 30 °C 时,虽然受试者头部的热感觉有高于 +0.6 的情况,但随着使用辐射工位时间的增加,热感觉最终低于 +0.5。而在不使用工位辐射空调的情况下,除了背景环境温度为 26 °C 时受试者处于较为舒适的状态,在 28、30 °C 时,受试者头部热感觉均随着时间的增加而逐渐升高,并接近有点热(+1)的状态。

如图 4 所示,工位辐射空调开启的情况下,躯干的热感觉明显低于工位辐射空调不开启的情况,与头部的热感觉类似。当温度为 26、28 °C 时,躯干的

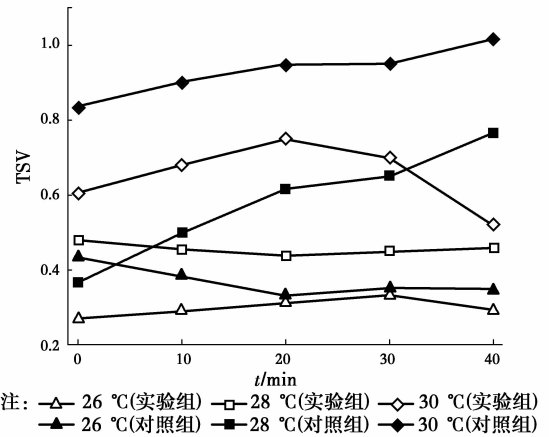


图 3 头部动态热感觉

Fig. 3 Thermal sensation of head over time

平均热感觉投票值稳定在 0~0.4 之间,受试者处于一个较为舒适的状态;当温度为 30 °C 时,虽然受试者躯干热感觉在 +0.6 左右,但是,在不使用工位辐射空调的情况下,除了背景环境温度为 26 °C 时,受试者热感觉基本稳定在 +0.4 之内,其他两个温度,受试者热感觉随着时间的增加,均超过了 +0.6。

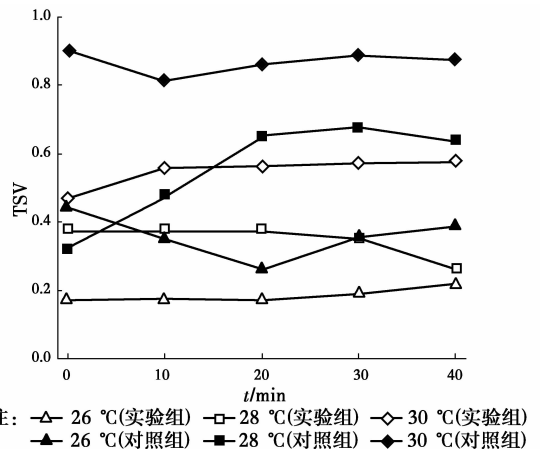


图 4 躯干动态热感觉

Fig. 4 Thermal sensation of trunk over time

如图 5 所示,在工位辐射空调开启的情况下,同头部和躯干的热感觉,上肢热感觉明显低于工位辐射空调未开启的情况,且比头部和躯干的效果更加明显。当背景温度为 26、28 °C 时,上肢因为与桌面直接接触,会感觉偏凉,热感觉小于 0。当背景温度为 28、30 °C 时,上肢热感觉在 -0.1~+0.1 之间,非常接近中性状态。在辐射空调未开启情况下,当背景温度为 28、30 °C 时,受试者上肢平均热感觉投票超过了 +0.6。

如图 6 所示,在工位辐射空调开启时,同头部、躯干、上肢的热感觉,下肢的热感觉明显低于工位辐

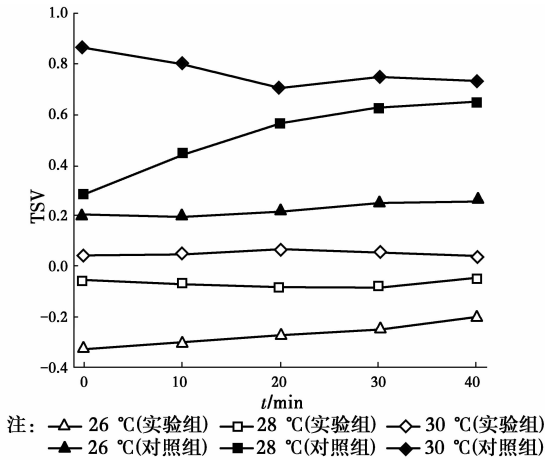


图 5 上肢动态热感觉

Fig. 5 Thermal sensation of upper limb over time

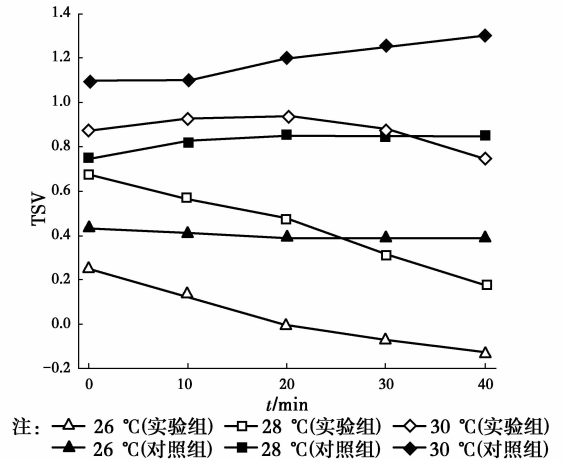


图 7 整体动态热感觉

Fig. 7 Overall thermal sensation over time

射空调未开启的情况。当背景温度为 26、28 °C 时，下肢热感觉稳定在 +0.4 之内，当背景温度为 30 °C 时，下肢热感觉未超过 +0.6。未开启工位辐射空调时，当背景温度为 28、30 °C 时，受试者下肢热感觉在 +0.6 左右。

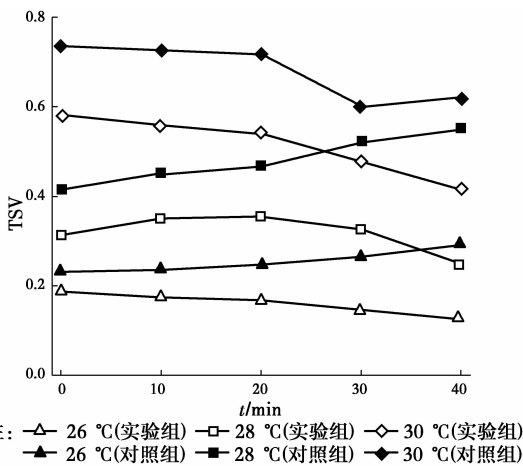


图 6 下肢动态热感觉

Fig. 6 Thermal sensation of lower limb over time

如图 7 所示，在工位辐射空调开启的情况下，同局部热感觉类似，整体的热感觉明显低于工位空调未开启的情况，且随着使用辐射工位时间增加，整体热感觉由热的一侧降至冷的一侧。当背景温度为 26、28 °C 时，整体热感觉稳定以后在 -0.2~0.2 之间，受试者逐渐趋向于舒适状态。当背景温度为 30 °C 时，整体热感觉在 +0.7 左右。未开启工位辐射空调时，当背景温度为 28 °C，受试者整体热感觉超过 +0.8，而当背景温度为 30 °C 时，受试者最终整体热感觉超过了 +1.3。

综合以上局部以及整体热感觉分析可知，工位辐射空调能在高温高湿环境明显改善人的舒适性。

2.2 稳态的整体与局部热感觉

当实验进行到 20 min 后，受试者的热感觉基本稳定，取最后 3 份问卷的平均值作为稳定期的数据。当实验组和对照组进入稳定期后，对其数据进行分析。如图 8 所示，当背景温度为 26 °C 时，使用工位辐射空调降低了整体和局部的热感，且使用辐射工位使得整体热感觉和上肢热感觉与对照组产生了极显著差异(配对 T 检验, $P < 0.01$)，而其他部位的热感觉虽有所降低，但未产生显著差异($P > 0.05$)。

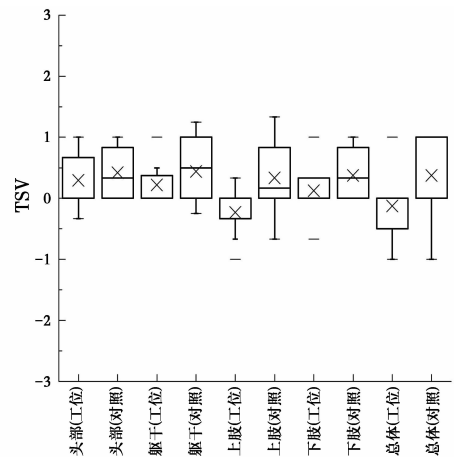


图 8 26 °C 稳态整体和局部热感觉

Fig. 8 Overall and local thermal sensation in steady-state condition at 26 °C

如图 9 所示，当背景温度为 28 °C 时，相比 26 °C，使用工位辐射空调产生了更显著的效果。相比对照组，工位辐射空调显著降低了整体和局部热感，其中上肢热感觉降低最为明显。特别地，两种工况下，下肢热感觉有显著差异($P < 0.05$)，头部、躯干、上肢及整体热感觉有非常显著的差异($P < 0.01$)。这一结果表明在 28 °C 时，工位辐射空调具有显著改

善热舒适的效果。

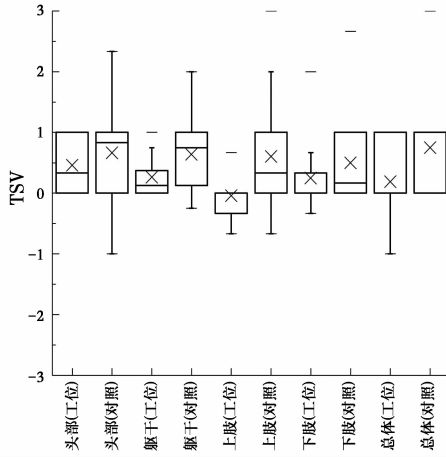


图 9 28 °C 稳态整体和局部热感觉

Fig. 9 Overall and local thermal sensation in steady-state condition at 28 °C

如图 10 所示,当背景温度为 30 °C 时,使用工位辐射空调仍使得整体和局部热感觉接近中性,整体热感觉情况明显优于对照组(实验组整体热感觉仍接近 ASHRAE 规范中规定的 80% 可接受范围对应值^[21],而对照组整体热感觉超出 80% 可接受范围)。两种工况下,上肢的热感觉的差别最大。两种工况下,上肢热感觉具有极显著差异($P < 0.01$),头部和整体热感觉具有显著差异($P < 0.05$),躯干和下肢的热感觉则无显著差异($P > 0.05$)。由此可知,在 30 °C 背景的环境下,工位辐射空调虽不如 28 °C 时的效果明显,但仍能改善人体热舒适性。

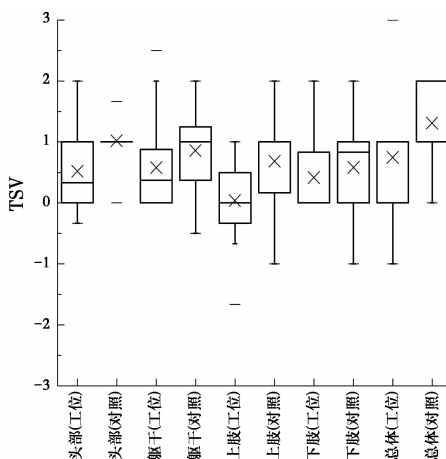


图 10 30 °C 稳态整体和局部热感觉

Fig. 10 Overall and local thermal sensation in steady-state condition at 30 °C

2.3 节能性分析

现有模拟软件中没有相应或接近的末端模型,因此,采用加州伯克利大学分析使用个人舒适系统

产生的空调系统节能率的方法^[22-23]研究本工位末端装置的预计节能效果。如图 11 所示,夏季建筑室内空调设定温度每提高 1 °C,空调系统约可实现节能 10%。鉴于研究中工位辐射空调可将夏季舒适温度范围上限由 26 °C 提升至 30 °C,预计其可实现空调系统节能 30% 以上。

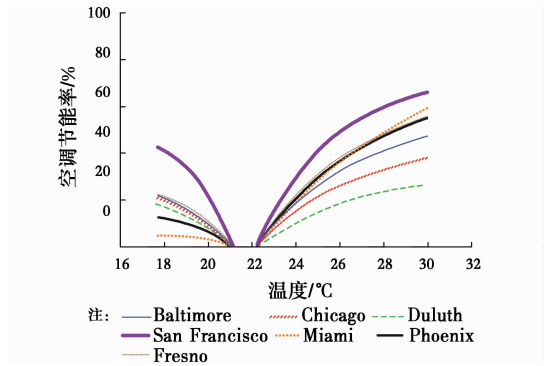


图 11 不同气候环境下空调系统平均节能率^[23]

Fig. 11 Average HVAC energy saving in different climates

综合以上结果可知,该工位辐射空调能有效扩展夏季室内舒适温度范围、提高夏季背景区空调设定温度,且存在较大的节能潜力。

3 结论

- 1) 随着使用辐射工位时间增加,受试者的整体热感觉逐渐降低并接近中性,上肢热感觉显著低于身体其他部位热感觉。
- 2) 相比对照组,工位辐射空调有明显的改善热舒适的作用,但在 26 °C 时,工位辐射空调的效果并不明显。
- 3) 当温度为 28、30 °C 时,工位辐射空调仍能维持人体舒适性,而传统的对流空调系统不能保证舒适性。
- 4) 工位辐射空调能有效扩展舒适温度范围、提高背景区空调设定温度,为建筑空调系统节能提供新途径。

参考文献:

[1] IMANARI T, OMORI T, BOGAKI K. Thermal comfort and energy consumption of the radiant ceiling panel system; Comparison with the conventional all-air system [J]. Energy & Buildings, 1999, 30(2): 167-175.

[2] KIM T, KATO S, MURAKAMI S, et al. Study on indoor thermal environment of office space controlled by cooling panel system using field measurement and the numerical simulation [J]. Building and Environment,

- 2005, 40(3): 301-310.
- [3] MEMON R A, CHIRARATTANANON S, VANGTOO P. Thermal comfort assessment and application of 316 radiant cooling: a case study [J]. *Building and Environment*, 2008, 43(7): 1185-1196.
- [4] NOVOSELAC A, SREBRIC J. A critical review on the performance and design of combined cooled ceiling and displacement ventilation systems [J]. *Energy & Buildings*, 2002, 34(5): 497-509.
- [5] 池鸿鸥. 辐射空调系统的设计优化建议[J]. *发电与空调*, 2014, 35(1): 62-66.
- CHI H O. Design optimization suggestion for radiation air-conditioning system [J]. *Power Generation & Air Condition*, 2014, 35(1): 62-66. (in Chinese)
- [6] BRUNK M F. Cooling ceilings - an opportunity to reduce energy costs by way of radiantcooling [C]// *Proceedings of the 1993 Annual Meeting of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, Denver, CO, USA, 1993.
- [7] 聂鑫, 朱晓涵, 刘益才. 毛细管平面辐射空调系统的设计研究及展望[J]. *真空与低温*, 2015, 21(1): 51-55.
- NIE X, ZHU X H, LIU Y C. The design analysis and prospects of capillary plane radiation air-conditioning system [J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2015, 21(1): 51-55. (in Chinese)
- [8] CORGNATI S P, PERINO M, FRACASTORO G V, et al. Experimental and numerical analysis of air and 327 radiant cooling systems in offices [J]. *Building and Environment*, 2009, 44(4): 801-806.
- [9] ZHAO K, LIU X H, JIANG Y. Application of radiant floor cooling in a large open space building with high-intensity solar radiation [J]. *Energy & Buildings*, 2013, 66: 246-257.
- [10] KITAGAWA K, KOMODA N, HAYANP H I, et al. Effect of humidity and small air movement on thermal comfort under a radiant cooling ceiling by subjective experiments [J]. *Energy & Buildings*, 1999, 30(2): 185-193.
- [11] 周慧鑫, 杨洁, 周翔, 等. 地板辐射+新风混合系统夏季供冷运行特性的实验研究[J]. *建筑科学*, 2010, 26(6): 36-39.
- ZHOU H X, YANG J, ZHOU X, et al. Experimental study on cooling operation characteristics of radiant floor combined with fresh air system in summer [J]. *Building Science*, 2010, 26(6): 36-39. (in Chinese)
- [12] GAO Z H, LIU X H, JIANG Y. Cooling performance analysis of radiant panel at different positions [J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2010, 26(2): 364-367.
- [13] ARENS E, ZHANG H, HUIZENGA C. Partial-and whole-body thermal sensation and comfort-Part 1: uniform environmental conditions [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2006, 31(1/2): 53-59.
- [14] ARENS E, ZHANG H, HUIZENGA C. Partial-and whole-body thermal sensation and comfort-Part II: non-uniform environmental conditions [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2006, 31(1/2): 60-66.
- [15] 端木琳, 舒海文, 王宗山, 等. 室内环境参数差异条件下人体热感觉实验研究[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2007, 23(1): 117-121.
- DUAN M L, SHU H W, WANG Z S, et al. Experimental research on human thermal sensation under diverse indoor environment parameters [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2007, 23(1): 117-121. (in Chinese)
- [16] HE Y D, LI N P, ZHANG W J, et al. Overall and local thermal sensation & comfort in air-conditioned dormitory with hot-humid climate [J]. *Building and Environment*, 2016, 101: 102-109.
- [17] CHEONG K W D, YU W J, SEKHAR S C, et al. Local thermal sensation and comfort study in a field environment chamber served by displacement ventilation system in the tropics [J]. *Building and Environment*, 2007, 42: 525-533.
- [18] ZHANG H, ARENS E, HUIZENGA C, et al. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, Part I: local sensation of individual body parts [J]. *Building and Environment*, 2010, 45: 380-388.
- [19] ZHANG H, ARENS E, HUIZENGA C, et al. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, Part II: local comfort of individual body parts [J]. *Building and Environment*, 2010, 45: 389-398.
- [20] SAKOI T, TSUZUKI K, KATO S, et al. Thermal comfort, skin temperature distribution, and sensible heat loss distribution in the sitting posture in various asymmetric radiant fields [J]. *Building and Environment*, 2007, 42(12): 3984-3999.
- [21] ASHRAE. Thermal environmental conditions for human occupancy: ASHRAE standard 55-2010 [S]. Atlanta: ASHRAE, 2010.
- [22] HOYT T, ARENS E, ZHANG H. Extending air temperature Setpoints: Simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings [J]. *Building and Environment*, 2015, 88: 89-96.
- [23] ZHANG H, ARENS E, ZHAI Y C. A review of the corrective power of personal comfort systems in non-neutral ambient environments [J]. *Building and Environment*, 2015, 91: 15-41.