

太阳辐射影响下地板供暖室内环境 与控制策略优化

李念平,段若岚,阿勇嘎

(湖南大学土木工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要 目的 研究太阳在辐射供暖地板室内的照射特点以及利用太阳辐射优化供暖策略。方法 利用 CFD 建立数值模型模拟太阳在室内的投影位置和室内温度场,实验测量太阳辐射强度和室内热环境参数,评估冬季辐射地板的供暖效果和室内环境温度。结果 太阳辐射在地板表面形成投影区,区域内外温度不均匀,两区域温差大于 15°C ,但工作面温度分布较均匀;室内各环境参数随太阳辐射强度改变而规律性变化,峰值延迟出现,太阳辐射使室内空气温度和平均辐射温度提升 $9\sim 10^{\circ}\text{C}$ 。结论 辐射地板供暖房间可有效利用太阳辐射能量以降低供暖系统总供暖量,辐射地板设定供暖温度可降低 6°C ,供暖系统总供暖量降低 47 kW ;可根据太阳辐射变化规律调整设定地板温度,以避免房间过热,在满足室内热环境需求的同时减少供暖量降低能耗。

关键词 毛细管辐射地板;供暖;太阳辐射;温度分布;数值模拟

中图分类号 TU832.1

文献标志码 A

Indoor Environment with Heating Floor Affected and Optimization of Control Strategy under Solar Radiation

LI Nianping, DUAN Ruolan, A Yongga

(College of Civil Engineering, Hu'nan University, Changsha, China, 410082)

Abstract: To study the characteristics of solar radiation in radiant heating floor room and optimize the heating strategy using solar radiation, this paper established a numerical model to simulate the sun's projection position on the indoor floor and indoor temperature field, experimentally measured the solar radiation intensity and indoor thermal environment parameters, and evaluated the heating effect of radiant floor and indoor environmental temperature in winter. The analysis shows that the solar radiation forms a projection area on the floor surface, and the temperature inside and outside the area is not uniform. The temperature difference between the two areas on the floor surface is greater than 15°C , but the temperature distribution uniformity on the working face is still good.

收稿日期:2022-04-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51878255)

作者简介:李念平(1962—),男,教授,博士研究生导师,主要从事辐射空调的新理论与方法等方面研究。

Indoor environmental parameters change regularly with the change of solar radiation intensity and have a delayed effect. Solar radiation increases indoor air temperature and mean radiation temperature by 9 – 10 °C. In this paper, the radiant floor heating room can effectively use the solar radiation energy to reduce the total heating capacity of the heating system. The radiant floor's heating temperature can be reduced by 6 °C and the total heating capacity of the heating system can be reduced by 47 kW. In order to avoid overheating and meet the demand of indoor thermal environment, the floor setting temperature can be adjusted according to the changing law of solar radiation, which can meanwhile reduce the amount of heating and energy consumption.

Key words: capillary radiant floor; heating; solar radiation; temperature distribution; numerical simulation

实现“双碳”是我国当前发展的重要目标^[1-3],太阳辐射作为绿色能源有必要合理利用以改善供暖系统运行策略。玻璃作为一种应用广泛的围护结构材料^[4],对室内外热交换有重要影响^[5]。根据热空气特性,地板供暖被认为是较理想的室内供暖方式之一,有节能舒适的特点^[6-7]。

吴倩芸^[8]模拟辐射地板房间室内温度,发现温度分布不均匀的问题,需同时使用风机盘管才能满足室内热湿需求。吴语欣等^[9]针对不同地板温度进行人体实验,结果表明夏热冬冷地区人们偏好较高的地板供暖温度,长期停留时期望的地板温度约为32 °C。不考虑太阳辐射的影响时,H. Khorasanizade 等^[10]研究得到室内辐射供暖地板表面温度分布均匀。考虑太阳辐射后,A. K. Athienitis 等^[11]研究了纬度、窗体等因素对围护结构内表面吸收太阳辐射强度的影响。M. H. Benzaama 等^[12]采用光线追踪模型计算太阳在室内的投影位置,研究其对供暖地板热行为的影响。Dong Qinghai 等^[13]分析了太阳辐射对室内热舒适的影响,结果表明有太阳辐射时房间大部分区域能保持整体的热舒适,但在过热表面附近用户会感到不舒适。地板辐射适用于具有高强度太阳辐射的建筑室内环境控制^[14]。

以上研究提出了辐射地板供暖房间的室内温度分布,但是没有涉及太阳辐射引起的室内空气温度、辐射地板表面温度变化等问题。基于此,笔者结合已有研究,在辐射供暖地板的实验房间中研究太阳辐射对地板供暖

效果的影响,并利用太阳辐射能量调节供暖控制策略以节约能耗。

1 模型建立

1.1 传热模型

实验房间采用毛细管辐射供暖地板系统,忽略室内其他热源,假设循环水供热量恒定,辐射地板向下部传递的热量忽略不计,地板热量全部传入室内。供暖房间传热过程如图1所示。

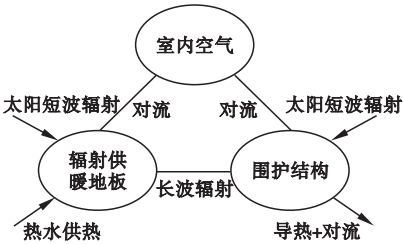


图1 辐射地板供暖房间传热过程

Fig.1 Heat transfer process of the radiant heating floor room

太阳辐射与房间的热交换分为两部分:一部分太阳辐射被围护结构外表面吸收存储;另一部分透过玻璃窗直射物体,使自身表面温度升高。当室内各表面温度高于室内空气温度,以对流换热形式加热室内空气。

对于辐射供暖地板,得热来自辐射地板水管中的循环热水和太阳辐射,散热由地板表面与室内空气对流换热和地板表面对其他壁面长波辐射引起。

围护结构得热来自地板的长波辐射、围护结构与室内空气对流换热和太阳辐射,热损失由围护结构内表面向外表面导热、围护结构与室外空气对流换热引起。

1.2 几何模型和网格划分

使用 ANSYS 建立模型如图 2 所示。房间长×宽×高为 4 600 mm×3 500 mm×2 800 mm,墙体厚 50 mm,屋顶和地面为保温材料;南墙两扇单层玻璃窗,每扇窗宽×高为 1 600 mm×2 200 mm,窗体厚 8 mm;12 块辐射板拼成长×宽为 3 600 mm×2 400 mm 的辐射地板紧靠南墙敷设。

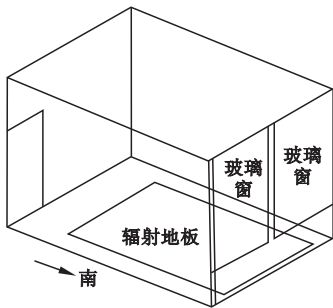


图2 实验房间模型
Fig.2 Model of test room

对几何模型进行网格划分,网格类型选择 Tetra/Mixed,网格总数约为 511 万,网格最小体积 0.299 mm³,最大体积 0.999 mm³,平均体积 0.756 mm³。质量小于 0.4 的网格仅占 0.085%,质量大于 0.7 的网格占 65.234%。最小内角小于 18°的网格仅占 0.003%,不存在最小内角大于 90°的网格。网格整体质量良好^[15-16]。

1.3 辐射模型和边界条件

太阳辐射作用于非透明围护结构(棉岩板墙体),同时棉岩板墙体外表面与室外空气对流换热,外表面为 Mixed 边界,换热系数为太阳辐射得热和对流换热综合的等效对流换热系数。南窗的换热方式主要有玻璃窗表面与空气对流换热、通过玻璃板的导热和透过玻璃窗的太阳辐射热,因此南窗外表面为 Mixed 边界。太阳辐射透过玻璃窗与室内空气辐射换热并投射在辐射地板上,辐射供暖地板通过热辐射和热对流的方式使室内升温,为 Mixed 边界。保温屋顶和地面走廊为绝热面。开启辐射地板进行冬季供暖工况运行,具体边界条件类型见表 1。

表1 边界条件及参数

Table 1 Boundary conditions and parameters					
边界名称	边界类型	换热系数/(W·(m ² ·K) ⁻¹)	外部发射率	内部发射率	吸收率
侧面墙体外表面	Mixed	20	0.900	1	0.8
南窗外表面	Mixed	23	0.837	1	0.8
辐射地板表面	Mixed	9	0.860	1	0.8
辐射吊顶表面	Conviction	9	0.860	1	0.8

2 实验概况

在阴天(忽略太阳辐射)和晴天(阳光充足)进行冬季供暖实验,分别记为工况 1 和工况 2,房间四周无其他建筑物遮挡,玻璃窗为南向,采光良好,设定辐射地板温度 28℃。

2.1 实验测点布置

辐射地板表面有 7 个温度测点(见图 3)。距东、西墙距离均为 1.7 m,距南窗距离分别为 0.1 m、0.5 m、1 m、1.5 m、2.2 m、2.9 m、3.5 m(1~7 号),其中 2 号测点放太阳辐射记录仪、

黑球温度计、风速仪,其他测点探头未接触地板的一面用铝箔纸包裹,不考虑辐射影响。温度测点树 A 和树 B 分别位于 2 号和 5 号测点,每个测点树上有 7 个空气温度测点,距地板高 0.1 m、0.3 m、0.6 m、1.1 m、1.7 m、2.2 m、2.4 m,编号分别为 A1~A7 号、B1~B7 号。探头放置在直径和高度均为 3 cm 的无底圆柱筒(筒内外用铝箔纸包裹)内,以保证测量值为空气温度。实验室外附近空旷区域放温湿度自动记录仪和全自动太阳辐射记录仪测量室外天气参数。

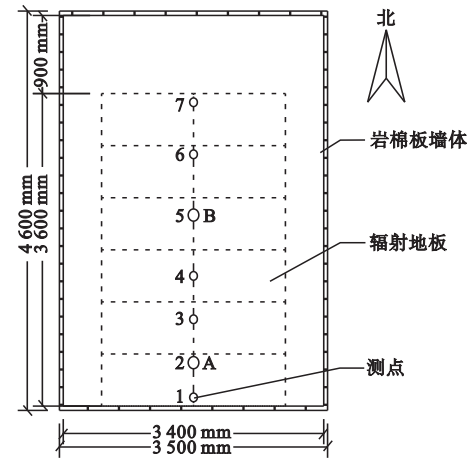


图3 实验房间测点布置图

Fig. 3 Layout of test points in test room

2.2 不确定度分析与模型验证

采用标准不确定度的A类评定^[17]分析实验数据不确定度,测点1~7号的不确定度最小为0.4℃,最大2.6℃,测点A1~A7、B1~B7的不确定度最小为1.05℃,最大为2.97℃。不确定度来源有:①理想实验是相同条件重复实验得到样本点的独立测量值,分析数据可靠程度。本次实验无法控制室外天气条件,实验只能在相似天气条件下,控制室内热环境相同,得到实验值评定实验数据可靠程度。②实验条件有限,样本量为3,数量较小。

数值模型在ANSYS Fluent中计算求解,取实验日11:30时的实验值与模拟值对比,相关系数为0.95,相对误差小于15%,认为该模型可用于本研究。造成模拟值与实验值误差的原因有:

- (1)每块辐射板服役时间不同,造成每块辐射板的工作效果不同;辐射板供回水管布置不均匀,造成辐射地板表面温度分布不均匀。
- (2)测量仪器的精度和灵敏度导致测量存在误差。
- (3)数值模型简化了实际环境,并基于一些假设求解计算,导致产生误差。

3 结果与分析

3.1 辐射地板表面温度

地板表面温度分布图如图4所示,图中

X 为地板表面某点距离西墙内表面的距离, Y 为距离南窗的距离。

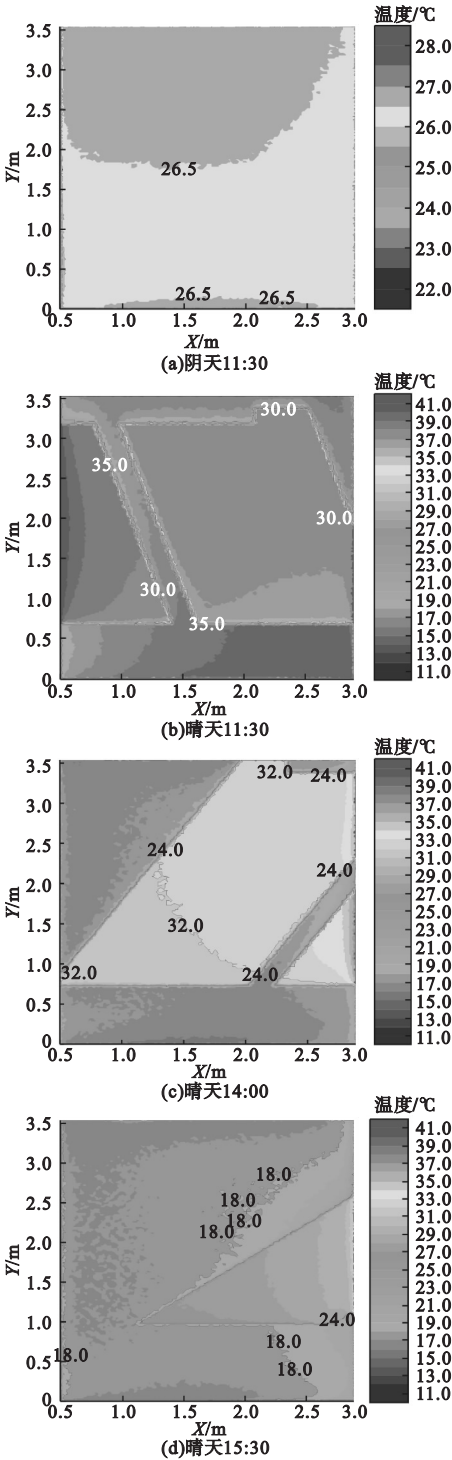


图4 地板表面温度分布云图

Fig. 4 Temperature contours at floor surface

忽略太阳辐射,地板表面温度为26~26.5℃,分布均匀(见图4(a))。当太阳光

透过玻璃窗直射在辐射地板表面形成太阳投影,投影区地板表面温度显著较高,整块辐射地板表面温度分布不均匀(见图4(b)距南窗0.7~3.4 m的区域)。

晴天时,11:30 时辐射地板表面投影区最高温度 41℃,最低温度 35℃,整块地板表面出现明显的温度分层;非投影区温度明显较低,最低 14℃,两区域最低温度的差值为 21℃,相差较大。太阳光直射使投影区温度骤升,两区域边界处温度变化剧烈。14:00 时地板表面投影区温度最高 32℃,与非投影区的最大温差为 17℃。15:30 时地板表面最高温度 24℃,最大温差 9℃。随着时间推移,太阳辐射强度逐渐减小,投影区与非投影区温差减小,温度分布逐渐均匀,至太阳辐射强度为 0 时,光影区消失,地板表面温度均匀。

此外,太阳与房间相对位置改变,投影区移动。11:30 时太阳投影区位置向西倾斜,面积较大,下午投影区位置向东倾斜。同时,投影区面积也随时间变化,15:30 时面积最小,即地板表面升温区域最小,这是因为此时太阳高度角相对其他两时刻最小。这表明,辐射供暖地板表面温度分布会随太阳投影区的位移和面积而改变。

3.2 工作面空气温度和平均辐射温度

取距离辐射地板高 0.75 m 的水平面为工作面,图 5 为阴天和晴天情况下 11:30 时室内工作面温度分布。从图 5 可以看出,阴天时工作面主要区域温度 25℃,晴天时工作

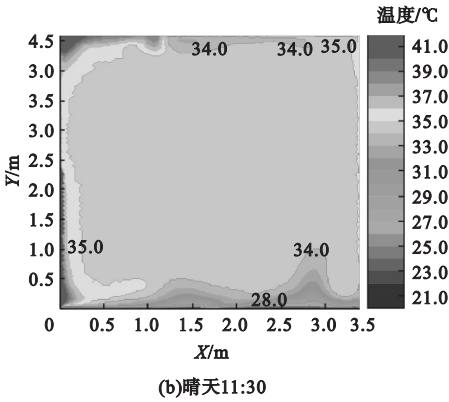
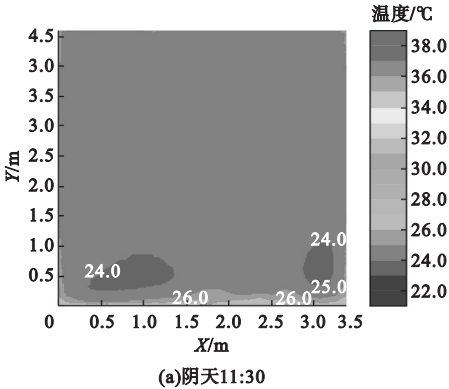
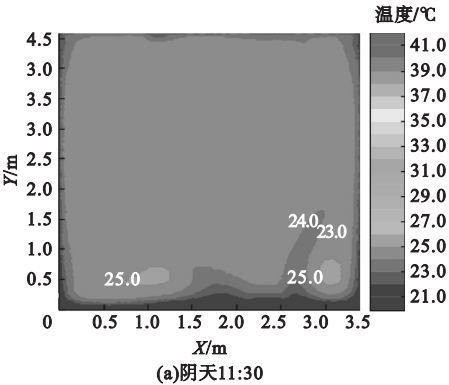


图5 工作面温度分布云图

面主要区域温度 34℃,两种工况下工作面主要区域空气温度分布均匀。显然,同样工况时辐射地板与太阳辐射的综合供暖效果强于辐射地板单独供暖,工作面平均空气温度相差 9℃;地板表面温度不均匀性并不影响室内空气温度分布均匀性,太阳辐射热量可以有效利用。

图 6 为工作面平均辐射温度云图。阴天时,根据图 6(a)可知,靠近玻璃窗的平均辐射温度(MRT)最大,约为 26℃,MRT 随与南窗的距离增大而减小,距离玻璃窗 1 m 后 MRT 基本稳定在 24℃,工作面内平均辐射温度最大差值为 2℃。晴天时,根据图 6(b)可知,近窗处 MRT 为 35℃,主要区域 MRT 为 34℃,相比阴天增幅约 10℃。太阳辐射进入室内且使各表面温度升高,MRT 显著增大。



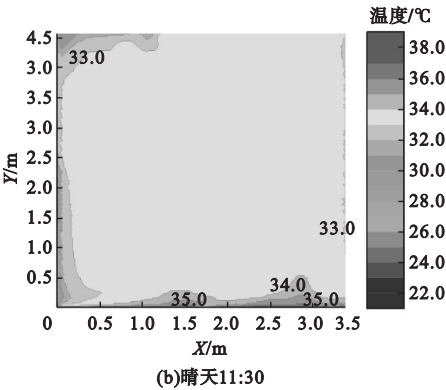


图6 工作面平均辐射温度分布云图

Fig. 6 MRT contours at working surface

3.3 室内空气温度和平均辐射温度

太阳辐射是影响平均辐射温度的重要因素,图7为工况1和工况2下实验房间内10:00—14:00时热环境参数变化曲线。

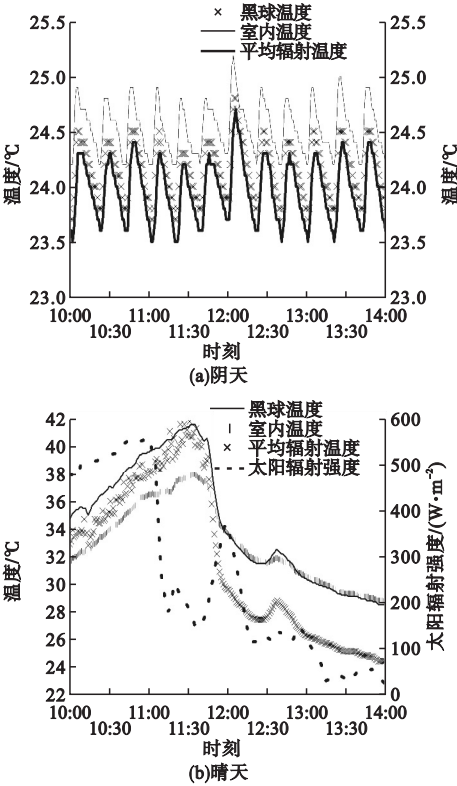


图7 温度随时间变化曲线

Fig. 7 Temperature curve with time

从图7可以看出,阴天时太阳辐射强度忽略不计,平均辐射温度为23.5℃~24.7℃,室内温度为24.2℃~25.2℃。MRT和室内温度变化不大,基本保持在相对稳定的水平,

且MRT、黑球温度、室内温度的变化规律一致。此时,黑球温度只代表围护结构内表面辐射热和空气对流换热的综合作用,在房间各处相差不大。

晴天时太阳辐射强度随时间变化,MRT、室内温度和黑球温度也随之变化。实验时段内太阳辐射强度变化较大,为25~563 W/m²,平均辐射温度23.4~40.9℃,室内温度28.8~38℃。实验时段的第一个小时,MRT、室内温度和黑球温度随太阳辐射强度增强而增大,11:00时太阳辐射达到最大强度,也是实验时段内第一个极值(563 W/m²);室内温度和MRT在11:30时达到最大值,分别为37℃、41℃。室内温度和MRT的极值出现相对于太阳辐射强度的极值出现存在延迟,峰值出现推迟半小时。12:00时太阳辐射强度再次出现较大变化,室内温度和MRT在40 min后出现极值,分别为32℃、29℃。随后,室内温度和MRT随太阳辐射强度的减小而减小。同时从图7得到,太阳辐射强度越大,黑球温度、室内温度和MRT越大;且相比于室内温度,太阳辐射对MRT的影响更大,太阳辐射强度降低后,MRT的降低程度更大。

4 供暖策略改进

以上分析可知,相同的供暖系统设定工况,太阳辐射会增强辐射地板的供暖效果。因此,冬季室内供暖可以利用太阳辐射热量,降低辐射地板的设定温度。设定工况3为晴天、辐射地板设定温度22℃。图8为工况3与工况1、工况2的供暖量对比,以及工况3的温度分布图。

从图8可以得出,10:00—14:00时工况1供暖系统总供暖量为141.1 kW,工况2总供暖量为80.8 kW,工况3总供暖量为33.1 kW。此外,工况3工作面主要区域空气温度29℃,平均辐射温度31℃,基本可以满足室内的热需求。因此可利用太阳辐射降低地板设定温度,减少供暖量的同时达到较

好的供暖效果,也避免墙体内表面附近空气温度过热现象出现。即可根据太阳辐射强度

变化调整辐射地板设定温度,以保持稳定舒适的室内温度。

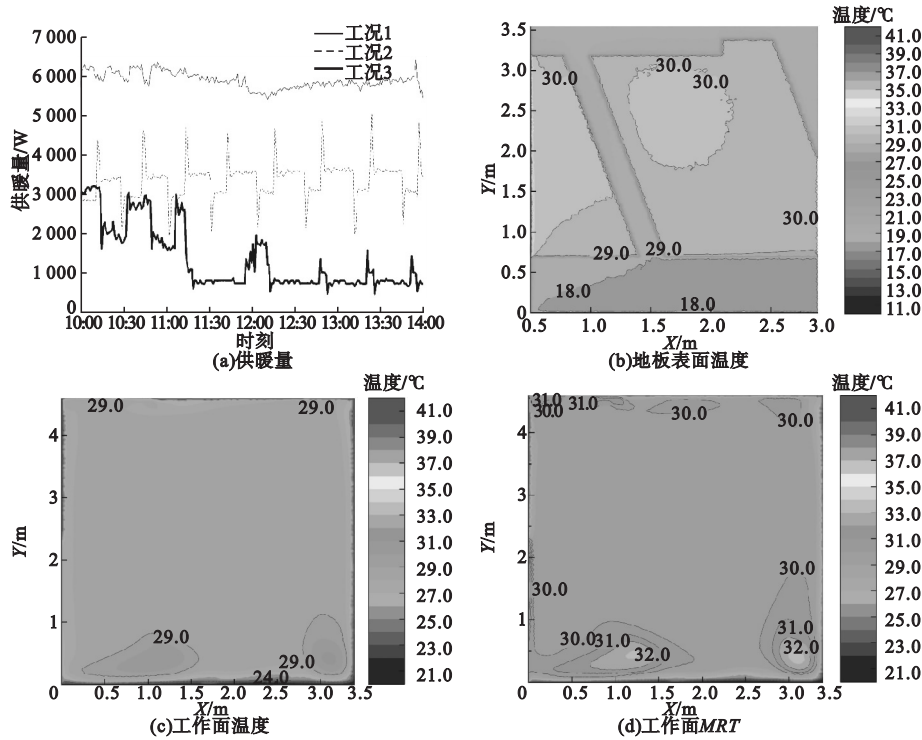


图 8 工况 3 供暖效果

Fig. 8 Heating result on condition 3

笔者选取冬季太阳辐射强度变化较大的时刻改变地板设定温度,稳定后室内温度见表 2。根据《房间空气调节器能效限定值及

能效等级》(GB 21455—2019),计算得到能耗结果见表 2。

表 2 不同地板表面温度下室内温度及机组能耗

Table 2 Indoor temperature and unit energy consumption at different floor surface temperatures					
时刻	太阳辐射强度/($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	设定地板表面温度/ $^{\circ}\text{C}$	室内空气温度/ $^{\circ}\text{C}$	供暖量/ kW	能耗/($\text{kW}\cdot\text{h}$)
09:00	325	24	27.3	2.9	1.03
11:00	563	20	29.1	2.3	0.82
12:00	375	23	27.5	2.5	0.89
13:00	126	25	28.6	3	1.07
15:00	47	27	26.7	3.4	1.21
17:00	0	28	25.6	3.6	1.28

5 结 论

(1)太阳辐射形成地板投影,造成地板表面温度显著差异:太阳光直射地板表面形成投影区,区域内温度显著较高,与非投影区形成的较大温差,边界处温度骤变,太阳辐射的存在改变了地板表面温度均匀性;投影区

位置和面积随太阳与房间相对位置的改变。

(2)太阳辐射显著提高了工作面空气温度和平均辐射温度,但并不改变工作面处空气温度和平均辐射温度的均匀性。

(3)室内温度和平均辐射温度与太阳辐射强度的变化规律近似一致,时间上略微延迟;太阳辐射强度越小,地板表面温度越趋于

均匀,当忽略太阳短波辐射的影响,供暖地板表面温度均匀性最好。

(4)供暖需求相同时,利用太阳辐射对室内温度的温升效果优化供暖策略,降低供暖系统设定温度会产生相同的供暖效果,同时总供暖量降低,达到节约能耗的效果。

参考文献

- [1] 李风雷,尹璐,赵吉,等.以能源转型推进“碳中和”的北欧经验借鉴和中国方案初探[J].可再生能源,2021,39(10):1308-1313.
(LI Fenglei, YIN Lu, ZHAO Ji, et al. The nordic experiences and China's choices for improving “carbon neutrality” by energy transition [J]. Renewable energy resources, 2021, 39(10): 1308-1313.)
- [2] 徐伟,倪江波,孙德宇,等.我国建筑碳达峰与碳中和目标分解与路径辨析[J].建筑科学,2021,37(10):1-8.
(XU Wei, NI Jiangbo, SUN Deyu, et al. Research on the target decomposition and path of building carbon peak and carbon neutrality in China [J]. Building science, 2021, 37(10): 1-8.)
- [3] 叶幼拔.双碳背景下的健康建筑的发展研究[C]//张可文.中国土木工程学会总工程师工作委员会2021年度学术年会暨首届总工论坛会议论文集.北京:《施工技术(中英文)》编辑部,2021.
(YE Youba. Development research of healthy building under background of double carbon [C]//ZHANG Kewen. 2021 annual academic conference of chief engineer working committee of China civil engineering society and proceedings of the first chief engineer forum. Beijing: Editorial department of construction technology (Chinese and english), 2021.)
- [4] 卢星宇.基于舒适性的地板辐射供暖适宜表面温度研究:以重庆住宅为例[D].重庆:重庆大学,2020.
(LU Xingyu. Study on the suitable surface temperature of floor radiant heating based on comfort: A case study of Chongqing residence [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.)
- [5] CUCE E, RIFFAT S B. A state-of-the-art review on innovative glazing technologies [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2015, 41: 695-714.
- [6] 房涛,管振忠,何文晶.被动房住户在围护结构节能设计关键参数研究:以寒冷地区天津市为例[J].山东建筑大学学报,2015,30(6):558-563.
(FANG Tao, GUAN Zhenzhong, HE Wenjing. Research on energy efficiency design key parameters of envelope for residential passive house building: a case study of cold zone in Tianjin [J]. Journal of Shandong jianzhu university, 2015, 30(6): 558-563.)

- [7] LIN Borong, WANG Zhe, SUN Hongli, et al. Evaluation and comparison of thermal comfort of convective and radiant heating terminals in office buildings [J]. Building and environment, 2016, 106: 91-102.
- [8] 吴倩芸.辐射与对流耦合空调系统的应用研究与特性分析[D].南京:东南大学,2016.
(WU Qianyun. The application research and characteristic analysis of air conditioning system of radiation and convection [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.)
- [9] 吴语欣,刘红,李百战,等.南方地板辐射供暖的舒适性地板温度范围[J].科学通报,2021,66(19):2476-2485.
(WU Yuxin, LIU Hong, LI Baizhan, et al. Comfortable floor temperature for radiant floor heating in southern China [J]. Chinese science bulletin, 2021, 66(19): 2476-2485.)
- [10] KHORASANIZADEH H, SHEIKHZADEH G A, AZEMATI A A, et al. Numerical study of air flow and heat transfer in a two-dimensional enclosure with floor heating [J]. Energy build, 2014, 78: 98-104.
- [11] ATHIENTIS A K, STYLIANOU M. Method and global relationship for estimation of transmitted solar energy distribution in passive solar room [J]. Energy sources, 1991, 13: 319-336.
- [12] BENZAAMA M H, LACHI M, MAALOUF C, et al. Study of the effect of sun patch on the transient thermal behaviour of a heating floor in Algeria [J]. Energy and buildings, 2016, 133: 257-270.
- [13] DONG Qinghai, LI Shuhong, HAN Cheng. Numerical and experimental study of the effect of solar radiation on thermal comfort in a radiant heating system [J]. Journal of building engineering, 2020, 32: 101497.
- [14] NALL D. Thermally active floors [J]. ASHRAE Journal, 2013, 55(3): 54-70.
- [15] 纪兵兵,陈金瓶. ANSYS ICEM CFD 网格划分技术实例详解[M].北京:中国水利水电出版社,2012.
(JI Bingbing, CHEN Jinping. Detailed explanation of partition technology examples of ANSYS ICEM CFD [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012.)
- [16] 李鹏飞,徐敏义,王飞飞.精通CFD工程仿真与案例实战[M].北京:人民邮电出版社,2017.
(LI Pengfei, XU Minyi, WANG Feifei. Proficient in CFD engineering simulation and case practice [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2017.)
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.测量不确定度评定和表示:GB/T 27418—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
(Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Guide to the evaluation and expression of uncertainty in measurement: GB/T 27418—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)