



冷热工况下混凝土辐射地板的蓄释热性能分析

杨艺真, 马景辉, 戴博斌, 魏厚福

(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

摘要: 为了阐明混凝土辐射地板的蓄释热性能, 从时间常数的角度出发, 通过实验分析混凝土辐射地板在蓄热、释热过程中温度及热量的响应特征。结果表明: 供暖工况的时间常数快于供冷工况, 混凝土辐射地板温度更易趋于稳定。当供水流量为 6 L/min、1 倍时间常数时, 在环境温度 $(26.0 \pm 1.0)^\circ\text{C}$ 、供水温度 22.1°C 的供冷工况下, 120 mm 厚辐射地板试块的平均蓄冷能力和释冷能力分别为 21.6 W/m^2 和 11.7 W/m^2 ; 在环境温度 $(16.5 \pm 1.0)^\circ\text{C}$ 、供水温度 29.8°C 的供暖工况下, 辐射地板试块的平均蓄热和释热能力则分别为 83.7 W/m^2 和 40.2 W/m^2 。供水流量对混凝土辐射地板的蓄释热能力影响较小, 但通过改变供水温度能够明显提高混凝土辐射地板的蓄释热能力以及变化速率。随着供水温度和罩内空气温度之差的增大, 累计蓄热量呈指数关系上升, 累计释热量则呈线性关系上升。该研究结果可为混凝土辐射系统的设计、运行控制策略的制定提供依据。

关键词: 混凝土辐射地板; 供冷工况; 供暖工况; 时间常数; 蓄释热性能

中图分类号: TU832.1+6

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2021)01-0117-09

Thermal storage and release characteristics of concrete radiant floor under cooling and heating conditions

YANG Yizhen, MA Jinghui, DAI Bobin, WEI Houfu

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to clarify the thermal storage and release characteristics of the concrete radiant floor, the temperature and thermal response characteristics of the concrete radiant floor in the process of thermal storage and release were analyzed from the perspective of time constant. The results showed that the time constant in the heating condition was faster than that in the cooling condition, and the temperature of concrete radiant floor was easier to tend to be stable. When the water supply flow was 6 L/min and the time constant was 1, the average cooling storage capacity and release capacity of the 120 mm thick radiant floor test block were 21.6 W/m^2 and 11.7 W/m^2 respectively under the condition of the ambient temperature $(26.0 \pm 1.0)^\circ\text{C}$ and the water supply temperature 22.1°C . The thermal storage capacity and release capacity of the radiant floor specimen were 83.7 W/m^2 and 40.2 W/m^2 respectively under the condition of the ambient temperature $(16.5 \pm 1.0)^\circ\text{C}$ and the water supply temperature 29.8°C . The water supply flow had little influence on the thermal storage and release characteristics of concrete radiant floor, but the thermal storage and release capacity and the change rate were significantly improved by changing the water supply temperature. With the increase of the temperature difference between the water supply and the air in the hood, accumulated thermal storage increased exponentially, and the accumulated thermal release increased linearly. The results can provide a basis for the design and operation control strategy of concrete radiation system.

Key words: concrete radiant floor; cooling condition; heating condition; time constant; thermal storage and release characteristics

收稿日期: 2020-06-24 网络出版日期: 2020-08-07

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目(LGG19E080003)

作者简介: 杨艺真(1995—), 女, 浙江杭州人, 硕士研究生, 主要从事辐射供暖房、被动式建筑设计方面的研究。

通信作者: 马景辉, E-mail: mzh58@hotmail.com

0 引言

混凝土辐射复合空调系统兼具夏季供冷和冬季供暖的功能,避免了传统全空气系统大风量热湿联合处理的弊端^[1]。该空调系统可以利用可再生能源处理室内的显热负荷^[2-3],通过独立新风系统处理室内的湿负荷,同时改善室内空气品质,是低能耗建筑优先选择的空调系统形式之一^[4]。

在混凝土辐射复合空调系统中,混凝土辐射末端是一个拥有较大热容量的蓄热体,其蓄释热性能可以直接影响到室内热舒适性和系统的节能效果。为了有效利用混凝土辐射末端的蓄热量,国内外学者针对混凝土辐射系统进行了广泛的研究。李娜等^[5]利用混凝土结构的蓄能作用,通过优化系统运行策略使空调系统的运行费用减少 14.7%。Lehmann 等^[6]对采用 PWM 控制方法的混凝土辐射系统的节能效果进行了研究,结果发现,在间歇运行模式下的系统运行能耗比连续运行模式可降低 50%。Park 等^[7]通过模拟分析指出,将混凝土辐射末端与传统空调系统相结合,可以明显降低系统运行能耗。Zhang 等^[8]提出了一种系统控制策略以克服混凝土结构热响应慢的问题。Tahersima 等^[9-10]对供暖工况下两种不同厚度的混凝土辐射地板进行了实验研究,发现大体积的混凝土辐射地板结构具有明显的蓄热特性,对降低建筑能耗有显著作用。Jeong 等^[11]通过现场测试发现,配套除湿供冷设备

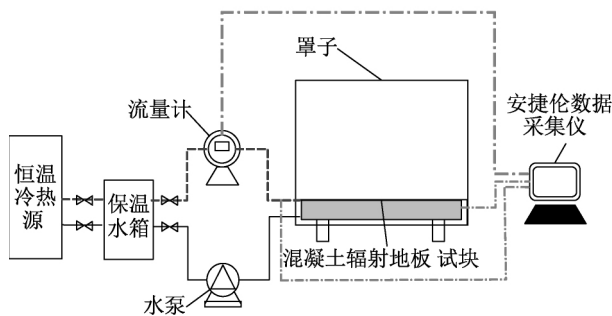
的混凝土辐射地板供冷系统可以在避免结露的同时,有效降温并提高室内热舒适性。近年来,Zhou 等^[12]对采用不同蓄热材料和加热管组合方式的辐射地板供暖系统的热性能进行了实验研究,发现采用相变材料和毛细管网结合的辐射地板供暖系统具有显著优势。张舒阳等^[13]构建了一种双层相变蓄能辐射地板系统,并通过实验得出,蓄热层在上、蓄冷层在下的辐射地板结构具有较好的传热性能。Plytaria 等^[14]通过模拟发现在辐射地板供暖系统中使用相变材料层可减少 40%左右的热负荷。

综上所述,在混凝土辐射末端的蓄能作用下,使用混凝土辐射系统能够明显改善室内热舒适性和降低建筑能耗。然而,目前关于辐射末端的研究主要集中在通过改变末端结构以提升其蓄释热性能,针对混凝土结构自身蓄能作用而引起的热响应特征尚缺少规律性的结论。因此,本文基于现有研究对混凝土辐射末端热响应时间^[15-17]的探讨,从时间常数的角度出发,以 120 mm 厚度的混凝土辐射地板为研究对象,通过实验分析供冷和供暖工况下混凝土辐射地板在蓄热和释热过程中温度和热量的响应。

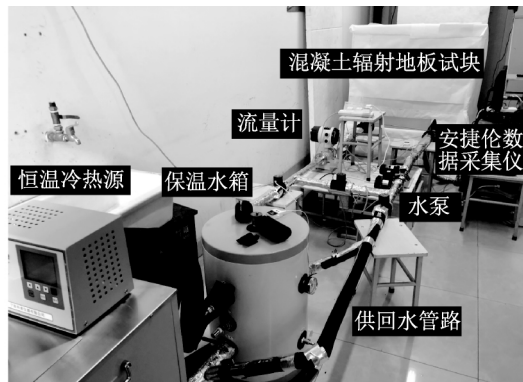
1 实验概况

1.1 测试装置

混凝土辐射地板热性能测试装置如图 1 所示,该装置由恒温冷热源、保温水箱、水泵、流量计、混凝土辐射地板试块、供回水管路和数据采集设备等组成。



(a) 系统连接示意



(b) 系统实物

图 1 混凝土辐射地板热性能测试装置

1.2 混凝土辐射地板试块及测试概况

混凝土辐射地板试块的测点布置如图 2 所示。碎石混凝土辐射地板试块尺寸为 1050 mm×1050 mm×120 mm(长×宽×高)。管间距 150 mm、直径 20 mm 的铝塑管(导热系数 $\lambda=0.45 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)内嵌于试块中,其管壁距试块上表面 25 mm。为防

止室内气流的影响,将试块上表面置于由宣纸构成的尺寸为 1050 mm×1050 mm×1050 mm 的罩内,其他表面用 25 mm 厚橡塑板和 50 mm 厚挤塑聚苯板进行保温。混凝土辐射地板试块的内部测点以铝塑管表面位置为基准,垂直间隔 12.5 mm 或 25.0 mm 预埋 55 个测量精度为 $\pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 T

型热电偶。同时,在试块上表面设置 3 个表面热流计,并在罩内高度 30、500、980 mm 处设置温度

仪进行测量。测试仪器及性能参数见表 1,采集频率为 2 min。

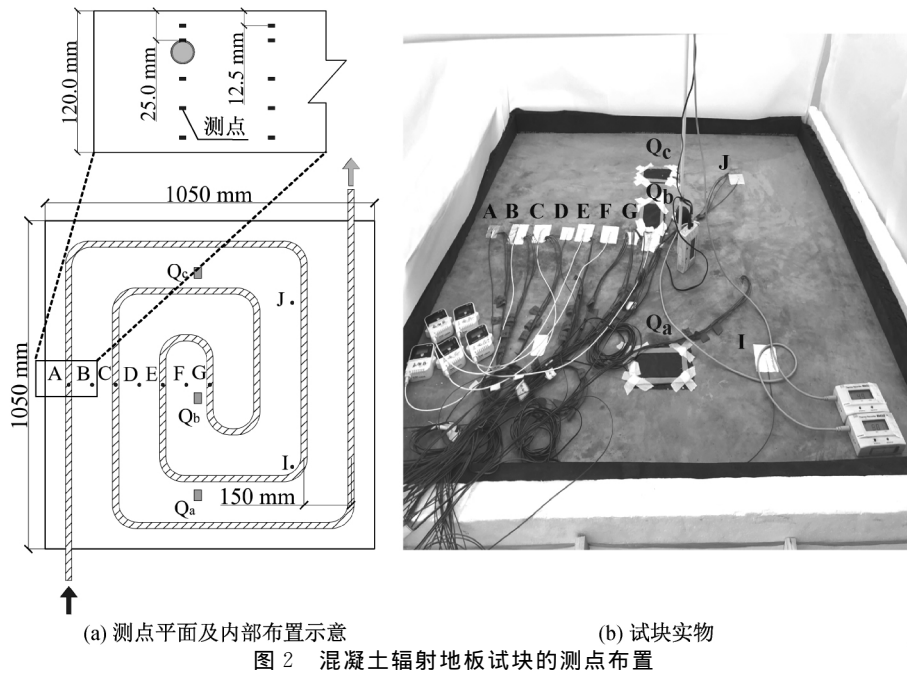


表 1 测试仪器及性能参数

仪器名称	型号	测量范围	测量精度
T&D 温度仪	TR-72S	-40~110 ℃	±0.3 ℃
T&D 温度仪	TR-52i	-60~155 ℃	±0.3 ℃
德图温湿度记录仪	174H	-20~70 ℃/ 2%~98%RH	±0.5 ℃/ ±0.3%RH
电磁流量计	LDG-MIK	0~3 m³/h	±0.5%

1.3 实验方案

混凝土辐射地板热性能测试过程中所设计的实验条件如表 2 所示。为研究供水参数对混凝土辐射地板蓄释热性能的影响,在供冷工况和供暖工况下分别设置环境温度(26.0 ± 1.0) ℃和(16.5 ± 1.0) ℃,试块初始温度(24.5 ± 1.0) ℃和(18.5 ± 1.0) ℃,通过改变供水温度和供水流量,共设置了 8 个实验方案,即 8 个实验工况。其中供冷和供暖工况启停时间间隔分别为 4 h 和 6 h。

表 2 实验条件

实验方案	环境温度/℃	初始温度/℃	供水温度/℃	供水流量/(L·min ⁻¹)	启停时间间隔/h	累计时间/h	研究内容
供冷工况 1	26.0±1.0	24.5±1.0	20.2	6	4	48	供水温度的影响
供冷工况 2	26.0±1.0	24.5±1.0	22.1	6	4	48	供水温度的影响,供水流量的影响
供冷工况 3	26.0±1.0	24.5±1.0	22.1	8	4	48	供水流量的影响
供冷工况 4	26.0±1.0	24.5±1.0	22.1	4	4	48	供水流量的影响
供暖工况 1	16.5±1.0	18.5±1.0	39.0	6	6	48	供水温度的影响
供暖工况 2	16.5±1.0	18.5±1.0	34.6	6	6	48	供水温度的影响
供暖工况 3	16.5±1.0	18.5±1.0	29.8	6	6	48	供水温度的影响
供暖工况 4	16.5±1.0	18.5±1.0	25.0	6	6	48	供水温度的影响

2 实验结果

2.1 供冷工况下的各部温度

供冷工况 1(供水温度 20.2 ℃,流量 6 L/min,启停时间间隔 4 h)时辐射地板试块表面 G 点处各内部测点的温度逐时变化曲线如图 3 所示。图 3 中,在初始阶段,试块上表面温度比稳定阶段时高

0.2 ℃左右。在稳定阶段,系统启动时,试块上表面与埋管管壁(距离试块上表面 25 mm 处)温差均小于 1.3 ℃,系统停止时,除上表面温度较高以外,其余测点的温差均小于 0.3 ℃,存在明显的周期性变化规律。可见,即使在初始温度较高的情况下,通过初始阶段的一次启停后,试块的温度已基本达到稳定的周期变化。

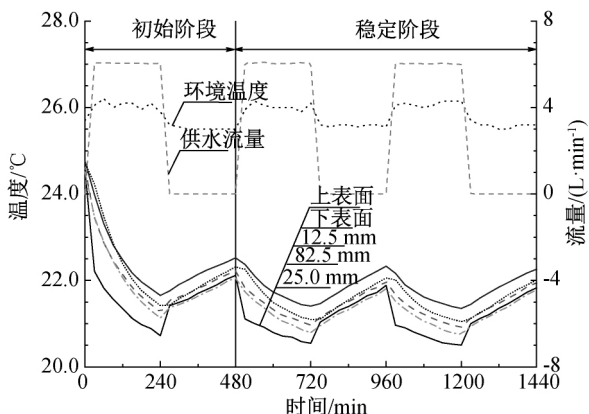


图3 供冷工况1下试块各内部测点的温度变化曲线

图4描述的是供冷工况1时罩内空气温度的垂直分布情况。从图4中可以看出,系统启动至180 min时,罩内中心点500 mm处的空气温度为25.2℃,比30 mm处的空气温度和试块上表面温度分别高1.0℃和3.2℃,随后罩内垂直方向各测点的温度几乎不再随时间发生变化。而罩内980 mm处的空气温度始终保持在25.6℃左右。可见系统启动180 min后,罩内空气温度变化已趋于稳定,试块对高度500 mm以内的空气温度有一定的影响。

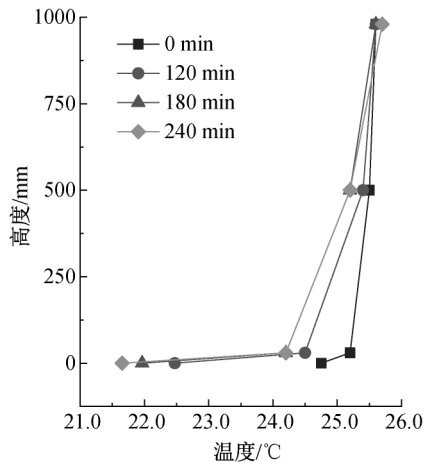


图4 供冷工况1下罩内空气温度垂直分布

2.2 供暖工况下的各部温度

图5是供暖工况3(供水温度29.8℃,流量6 L/min,启停间隔6 h)时试块表面G点处各内部测点的温度逐时变化曲线。在初始阶段,试块上表面温度比稳定阶段时低0.2℃左右。在稳定阶段,系统启动时试块上表面与埋管管壁温差均小于3.2℃,系统停止时除试块上表面温度较低以外,其余测点的温差均小于0.5℃。

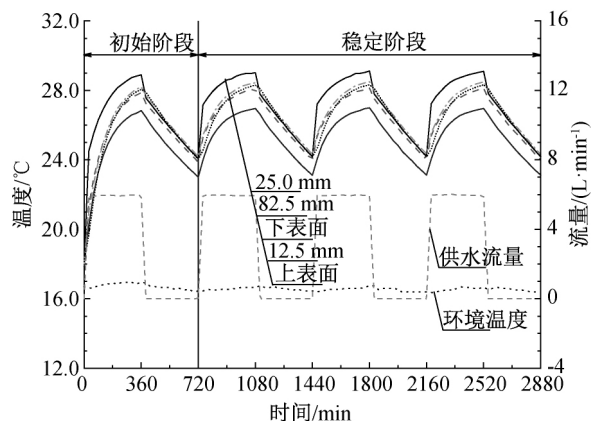


图5 供暖工况3下试块各内部测点的温度变化曲线

图6描述的是供暖工况3时罩内空气温度的垂直分布情况。如图6所示,系统启动至240 min时,罩内500 mm处的空气温度为19.9℃,比30 mm处的空气温度和试块上表面温度分别低1.0℃和6.2℃,随后罩内垂直方向各测点的温度随时间变化幅度很小。可见系统启动240 min后,罩内温度变化已几乎趋于稳定,与供冷工况不同,试块对高度980 mm范围内的空气温度均有影响。

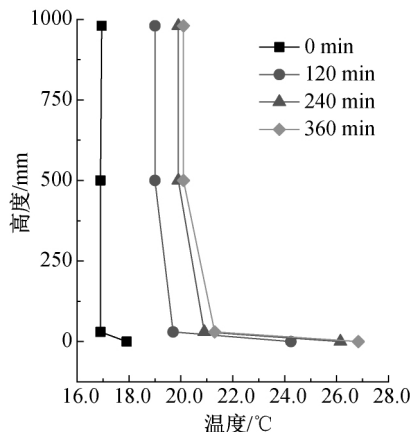


图6 供暖工况3下罩内空气温度垂直分布

3 时间常数

时间常数是过渡反应时间过程的常数,表示响应变化的快慢。当输入是温度上升阶跃函数时,时间常数代表系统的响应上升到系统温度变化幅值的63.2%所需要的时间;当输入是温度下降阶跃函数时,时间常数是响应衰减到36.8%所需的时间。

通过上述实验,在稳定阶段,供冷和供暖工况下混凝土辐射地板试块各测点温差分别小于1.3℃和3.2℃,且均没有明显的时间延迟现象,因此本文以试块各测点的平均温度的逐时变化分析时间常数。

图 7 和图 8 分别是供冷工况 2 和供暖工况 3 在稳定阶段混凝土辐射地板试块的平均温度逐时变化曲线。试块平均温度的逐时变化规律可表示为:

$$T = T_s \pm \Delta T e^{-t/\tau} \quad (1)$$

其中: T 为辐射地板试块的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; T_s 为试块达到稳态的最终温度, $^{\circ}\text{C}$; ΔT 为试块温度变化的幅值, $^{\circ}\text{C}$; t 为系统启动或停止的时间, min ; τ 为试块的时间常数, min , 反映辐射地板从初始温度变化至最终稳定状态的快慢程度。根据时间常数的定义, 通过对平均温度曲线拟合即可求解获得启动阶段和

停止阶段的时间常数。

如图 7—图 8 所示, 供冷工况和供暖工况在启动阶段的时间常数 τ_c 和 τ_h 分别为 126 min 和 116 min, 停止阶段的时间常数 τ_{cs} 和 τ_{hs} 分别为 1088 min 和 859 min。实验结果表明: 在本实验条件下, 供冷工况停止阶段的时间常数约为启动阶段的 9 倍, 供暖工况停止阶段的时间常数约为启动阶段的 7 倍, 供暖工况启动阶段的时间常数比供冷工况快 10 min。可见供暖工况下混凝土辐射地板温度更易趋于稳定。

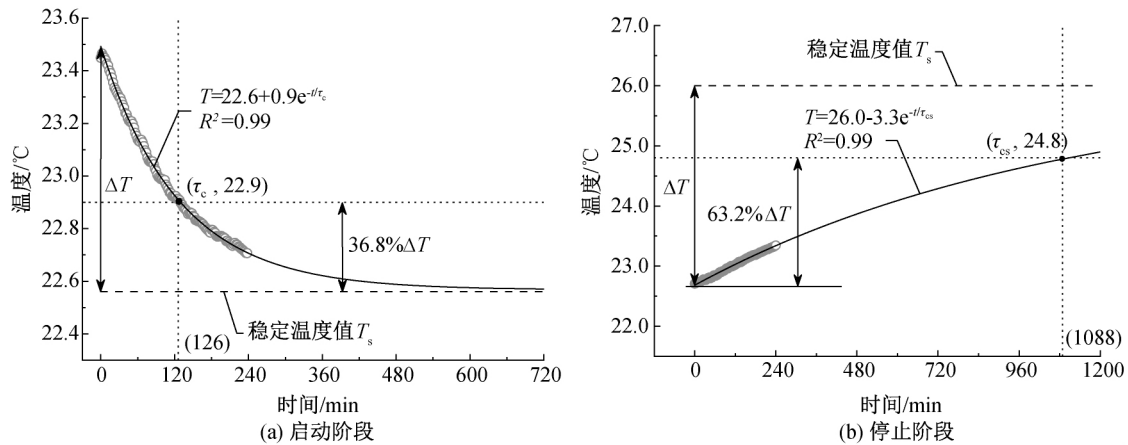


图 7 供冷工况下试块的平均温度变化曲线

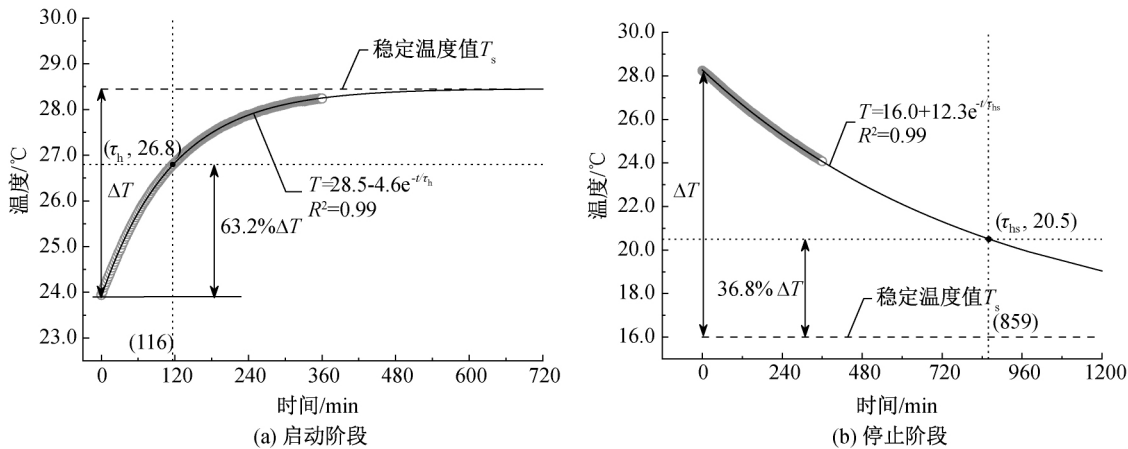


图 8 供暖工况下试块的平均温度变化曲线

为了探讨供水参数对辐射地板蓄释热性能的影响, 下文利用启动阶段平均时间常数的等间隔倍数分别对供冷、供暖工况进行分析。在本实验中, 由于供水参数对时间常数的影响不明显, 因此供冷工况在启动阶段的平均时间常数取 130 min, 供暖工况取 120 min。

4 供冷工况下辐射地板的蓄释冷性能

图 9 是当供水温度 22.1°C 时稳定启动阶段不同流量下试块的平均蓄释冷能力变化曲线。从图 9 中可以看出, 试块上表面温度和平均蓄冷能力均随

时间推移呈下降的趋势, 由于上表面温度的降低, 平均释冷能力呈上升的趋势。随着系统启动至 1.00 倍时间常数 (130 min), 流量为 6 L/min 时试块的上表面温度降低至 23.1°C , 与流量 8 L/min 和 4 L/min 时试块的上表面温度变化基本相同。在 1.00 倍时间常数时, 流量 6 L/min 时试块的平均蓄冷能力为 21.6 W/m^2 , 与 8 L/min 时试块的平均蓄冷能力相比较略少, 比 4 L/min 时略多。流量 8, 6, 4 L/min 时试块的平均释冷能力相差不明显。可见, 相同环境温度和供水温度下, 辐射地板的蓄冷能

力随供水流量的减少而略有降低,流量变化对释冷能力的影响不明显。

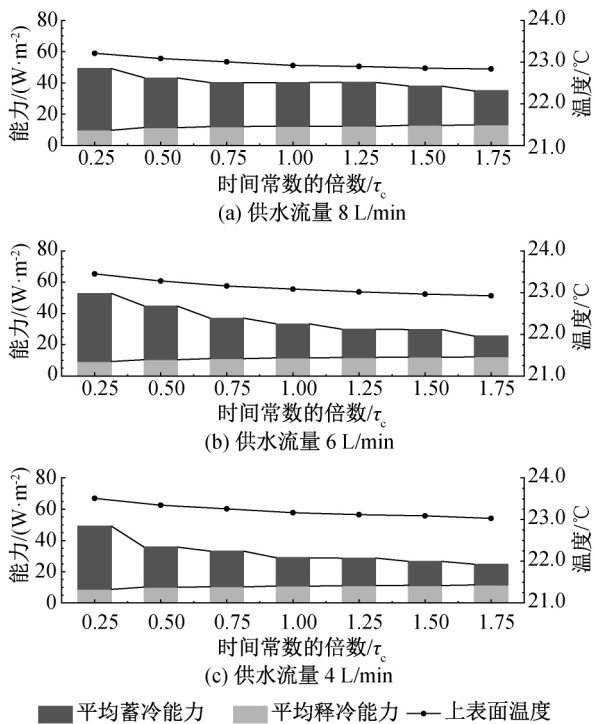
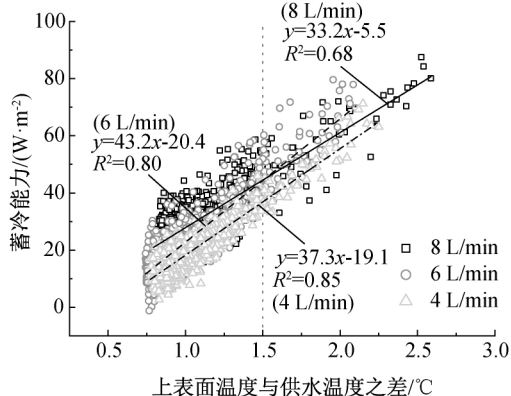


图9 不同供水流量时平均蓄释冷能力变化曲线
(供水温度为 22.1 °C)

图10是当供水流量6 L/min时稳定启动阶段不同供水温度下试块的平均蓄释冷能力变化曲线。从图10中可以看出,供水温度22.1 °C时试块的上表面温度比供水温度20.2 °C时高1.1~1.5 °C。在1.00倍时间常数时,供水温度22.1 °C的试块平均蓄冷能力为21.6 W/m²,平均释冷能力为11.7 W/m²,比供水温度20.2 °C的试块平均蓄释冷能力低。当系统运行至1.75倍时间常数时,供水温度22.1 °C



(a) 蓄冷能力
图11 蓄释冷能力与供水流量之间的关系(供水温度为 22.1 °C)

图12描述的是当供水流量6 L/min时蓄释冷能力与供水温度之间的关系。如图12(a)所示,随试块上表面温度与供水温度之差的增加,试块的蓄

的试块平均蓄冷能力降低8.5 W/m²,平均释冷能力提升0.7 W/m²,供水温度20.2 °C的试块平均蓄冷能力降低9.8 W/m²,平均释冷能力提升0.8 W/m²。可见供水温度变化对辐射地板的蓄释冷能力影响明显,相同环境温度和供水流量下,供水温度越低,蓄释冷能力越强,变化速率也越快。

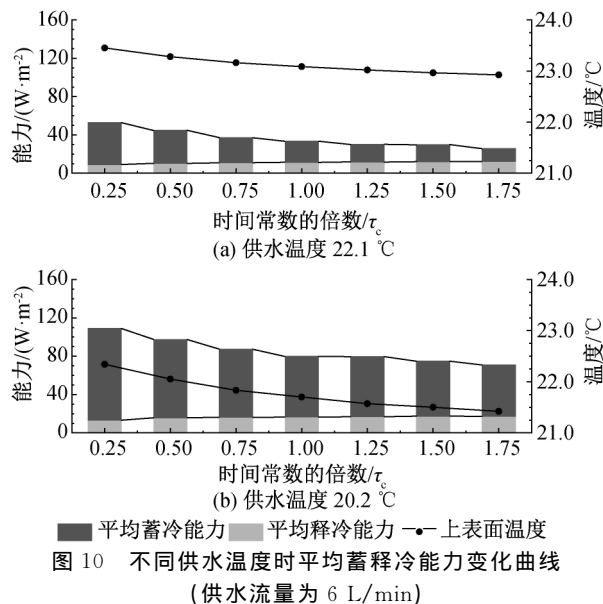
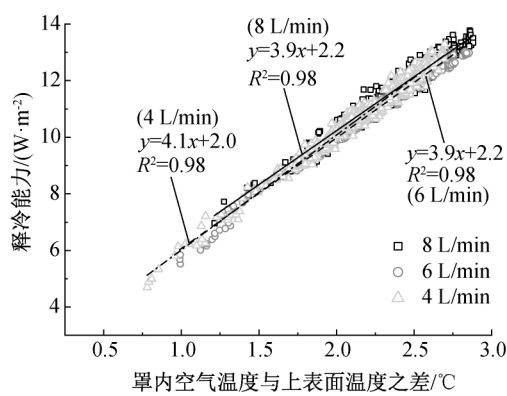
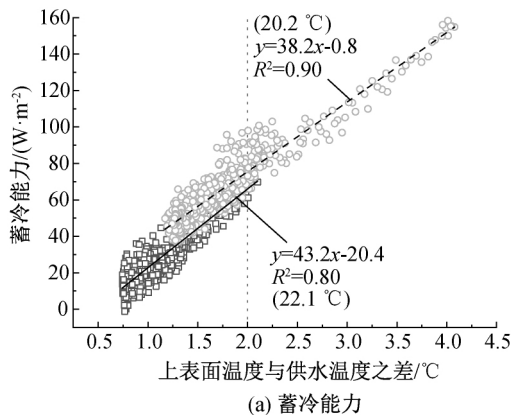


图11描述的是当供水温度22.1 °C时蓄释冷能力与供水流量之间的关系。如图11(a)所示,随试块上表面温度与供水温度之差的增加,试块的蓄冷能力呈线性关系上升。当温差小于1.5 °C,相同温差时,蓄冷能力随流量的增加而略有增强。如图11(b)所示,释冷能力随罩内空气温度(罩内中心位置高度500 mm处的空气温度)与上表面温度之差的增加也呈线性关系上升,但当温差相同时,不同供水流量下试块的释冷能力相差明显。



冷能力呈线性关系上升,依照如图拟合关系,当温差为2.0 °C时,供水温度22.1 °C的试块蓄冷能力低于供水温度20.2 °C的情况。如图12(b)所示,释冷能

力随罩内空气温度与上表面温度之差的增加呈线性关系上升,当温差为 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,供水温度 $22.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的



试块释冷能力略低于供水温度 $20.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况,相差
不明显。

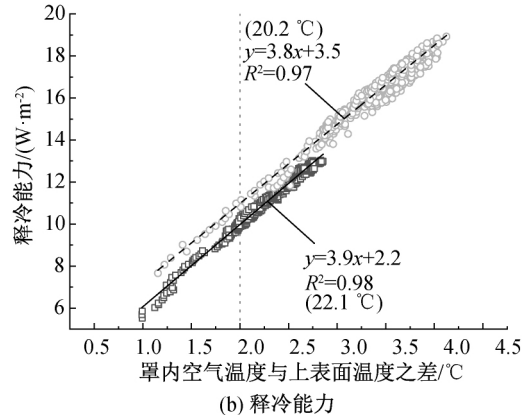


图 12 蓄释冷能力与供水温度之间的关系 (供水流量为 6 L/min)

5 供暖工况下辐射地板的蓄释热性能

5.1 供水参数对蓄释热能力的影响

图 13 是当供水流量 6 L/min 时稳定启动阶段不同供水温度下试块的平均蓄释热能力变化曲线。从图 13 中可以看出,试块上表面温度和平均释热能力均随时间呈上升的趋势,而平均蓄热能力呈下降的趋势。如图 13 所示,1.0 倍时间常数 (120 min) 时,供水温度 $29.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的试块平均蓄热能力和释热能力分别为 83.7 W/m^2 和 40.2 W/m^2 ,比供水温度 $25.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时试块的平均蓄释热能力高,比供水温度 $34.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $39.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时试块的平均蓄释热能力低。可见在相同环境温度和供水流量下,供水温度对蓄热和释热能力的影响明显,且供水温度越高蓄热和释热能力越强。从 1.0 倍到 3.0 倍时间常数,供水温度 25.0 、 29.8 、 34.6 、 $39.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时试块的平均蓄热能力分别下降 18.3 、 55.5 、 99.7 、 102.9 W/m^2 ,平均释热能力分别上升 4.4 、 6.5 、 10.1 、 12.6 W/m^2 ,可见,在相同环境温度和供水流量下,随供水温度的升高,蓄释热能力的变化速率也越快。

图 14 描述的是在供水流量 6 L/min 时蓄释热能力与供水温度之间的关系。如图 14(a) 所示,随供水温度与试块上表面温度之差的增加,试块的蓄热能力呈线性上升的趋势。依照如图拟合关系,当温差为 $6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,供水温度 $25.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时试块的蓄热能力为 179.8 W/m^2 ,比供水温度 $29.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $34.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时试块的蓄热能力高,比供水温度 $39.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时试块的蓄热能力低,可见,相同温差下,辐射地板的蓄热能力随供水温度的升高呈先降低后增强的变化。如图 14(b) 所示,释热能力随上表面温度与罩内空气温度之差的增加也呈线性上升的趋势,当温差相同时,不同供水温度下试块的释热能力变化不明显。

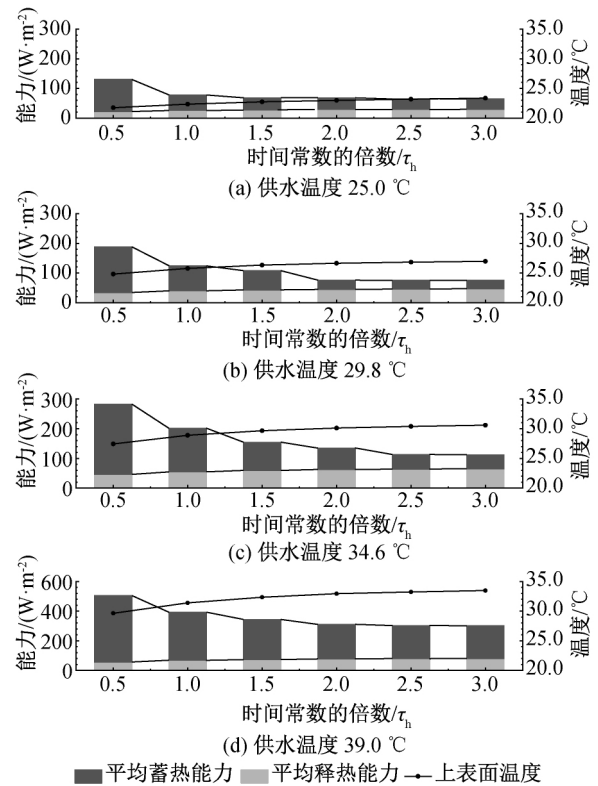


图 13 不同供水温度时平均蓄释热能力的变化曲线
(供水流量为 6 L/min)

5.2 供水参数对累计蓄释热量的影响

为了进一步地探究供水温度对混凝土辐射地板累计蓄热量和释热量的影响,取供暖工况下仅改变供水温度的 4 组实验 (供暖工况 1—4),对 48 h 内所有启动阶段的累计蓄热量和所有停止阶段的累计释热量进行分析。图 15 描述的是累计蓄释热量与供水温度和罩内空气温度之差的关系。如图 15 所示,随供水温度与罩内空气温度之差增大,累计蓄热量呈指数关系上升,累计释热量呈线性关系上升,相关系数 R^2 均在 0.95 以上。

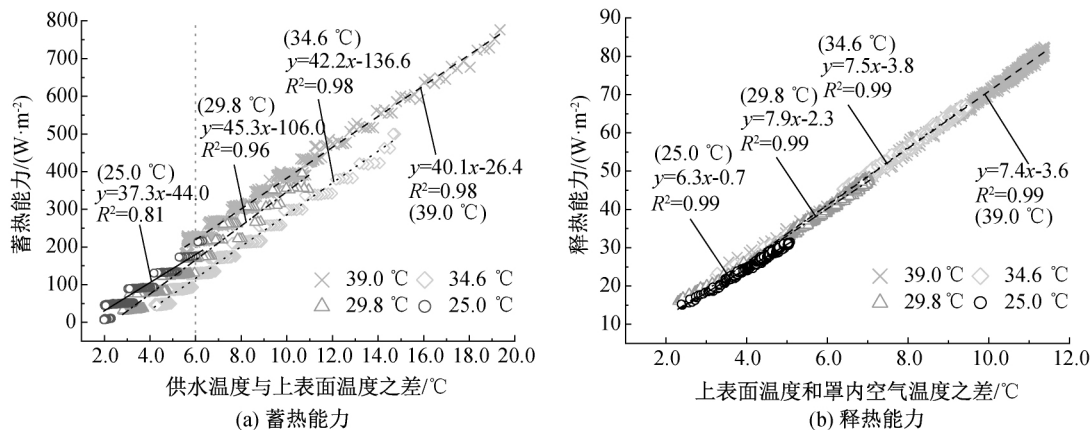


图14 蓄释热能力与供水温度之间的关系 (6 L/min)

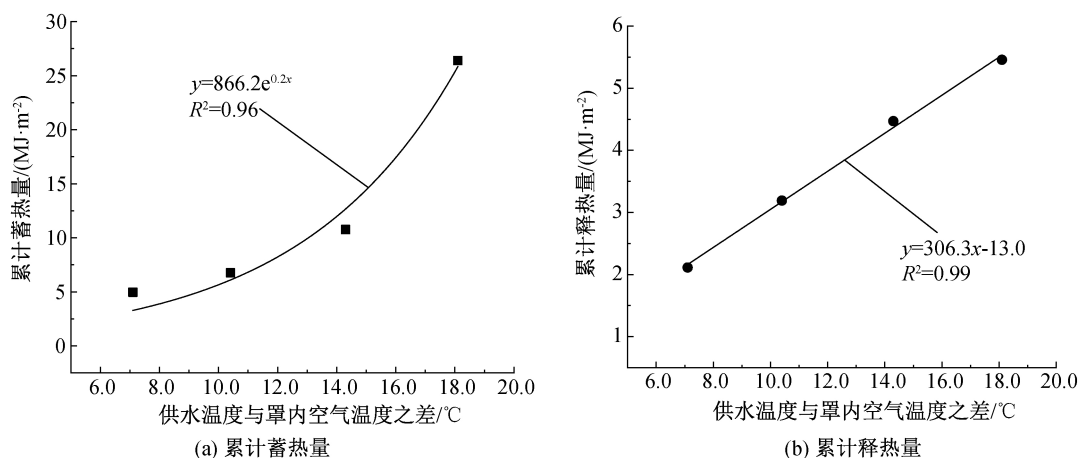


图15 累计蓄释热量与供水温度和罩内空气温度之差间的关系

6 结论

本文从时间常数的角度出发,通过实验分别研究分析了在供冷和供暖工况下供水参数对120 mm厚度的混凝土辐射地板蓄释热性能的影响,所得主要结论如下:

a) 在本实验条件下,供冷工况停止阶段的时间常数约为启动阶段的9倍;供暖工况停止阶段的时间常数约为启动阶段的7倍,供暖工况启动阶段的时间常数比供冷工况快10 min。可见供暖工况下的混凝土辐射地板温度更易趋于稳定。

b) 无论供冷还是供暖工况,随上表面温度与供水温度之差的绝对值的增加,混凝土辐射地板的蓄冷和蓄热能力呈线性上升的趋势;随罩内空气温度与上表面温度之差的绝对值的增加,其释冷和释热能力也呈线性上升的趋势。

c) 通过实验得到,当系统运行至1倍时间常数,在环境温度 $(26.0 \pm 1.0) ^\circ\text{C}$ 、供水流量6 L/min、供水温度 $22.1 ^\circ\text{C}$ 的供冷工况下,120 mm厚混凝土辐射地板试块的平均蓄冷和释冷能力分别为 21.6 W/m^2 和

11.7 W/m^2 ;在环境温度 $(16.5 \pm 1.0) ^\circ\text{C}$ 、供水流量6 L/min、供水温度 $29.8 ^\circ\text{C}$ 的供暖工况下,试块的平均蓄热和释热能力分别为 83.7 W/m^2 和 40.2 W/m^2 。供水流量对混凝土辐射地板的蓄释热能力影响较小。以供暖工况为例,随着供水温度的升高,混凝土辐射地板的蓄释热能力增强,同时变化速率也越快。

d) 对供暖工况下混凝土辐射地板的累计蓄热量和累计释热量进行分析,得到随着供水温度和罩内空气温度之差的增大,累计蓄热量呈指数关系上升,累计释热量呈线性关系上升。

参考文献:

- [1] Kang Z Q, Peng X Y, Cheng X C, et al. Analysis of condensation and thermal comfort of two kinds of compound radiant cooling air conditioning systems based on displacement ventilation[J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 1529-1534.
- [2] Ma J H, Gao Y. Study on the radiant cooling system with water flow rate on roof[C]//2010 International

- Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, Wuhan. IEEE, 2010: 1940-1943.
- [3] Carnieletto L, Kazanci O B, Carli M D, et al. Why couple renewable energy sources with radiant systems: Current trends, limitations and potential [C]// Roomvent & Ventilation 2018. Espoo: Aalto University, 2018: 965-970.
- [4] Rhee K N, Olesen B W, Kim K W. Ten questions about radiant heating and cooling systems[J]. Building and Environment, 2017, 112: 367-381.
- [5] 李娜, 裴智超, 王永红, 等. 天棚辐射混凝土板显热蓄能特性研究[J]. 建筑节能, 2011, 39(3): 48-51.
- [6] Lehmann B, Dorer V, Gwerder M, et al. Thermally activated building systems (TABS): Energy efficiency as a function of control strategy, hydronic circuit topology and (cold) generation system[J]. Applied Energy, 2011, 88(1): 180-191.
- [7] Park S H, Chung W J, Yeo M S, et al. Evaluation of the thermal performance of a Thermally Activated Building System (TABS) according to the thermal load in a residential building[J]. Energy and Buildings, 2014, 73: 69-82.
- [8] Zhang X H, Li N P, Su L, et al. Experimental study on the characteristics of non-steady state radiation heat transfer in the room with concrete ceiling radiant cooling panels[J]. Building and Environment, 2016, 96: 157-169.
- [9] Tahersima M, Tikalsky P. Experimental and numerical study on heating performance of the mass and thin concrete radiant floors with ground source systems[J]. Construction and Building Materials, 2018, 178: 360-371.
- [10] Tahersima M, Tikalsky P, Revankar R. An experimental study on using a mass radiant floor with geothermal system as thermal battery of the building[J]. Building and Environment, 2018, 133: 8-18.
- [11] Jeong C H, Yeo M S, Kim K W. Feasibility of a radiant floor cooling system for residential buildings with massive concrete slab in a hot and humid climate [J/OL]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2018, 12: 8. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0314-z>.
- [12] Zhou G P, He J. Thermal performance of a radiant floor heating system with different heat storage materials and heating pipes[J]. Applied Energy, 2015, 138(1): 648-660.
- [13] 张舒阳, 夏燚, 张小松. 双层相变蓄能辐射地板传热特性实验研究[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(4): 730-738.
- [14] Plytaria M T, Tzivanidis C, Bellos E, et al. Energetic investigation of solar assisted heat pump underfloor heating systems with and without phase change materials[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 173: 626-639.
- [15] Zhao K, Liu X H, Jiang Y. Dynamic performance of water-based radiant floors during start-up and high-intensity solar radiation[J]. Solar Energy, 2014, 101: 232-244.
- [16] Ning B S, Schiavon S, Bauman F S. A novel classification scheme for design and control of radiant system based on thermal response time[J]. Energy and Buildings, 2017, 137: 38-45.
- [17] 马云, 蔺洁, 陈超, 等. 热水地面辐射供暖系统热响应特性实验研究[J]. 暖通空调, 2016, 46(12): 125-131.
- (责任编辑: 康 锋)