

DOI: 10.7652/xjtuxb201805020

采用稳态模型的毛细管墙体热工特性研究

秦思宇¹, 王宇昂^{1,2}, 李扬³, 高松^{1,4}, 赵民^{1,5}, 路昭¹, 孔琼香¹, 金立文¹

(1. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 710054, 西安; 2. 百度时代网络技术有限公司, 100193, 北京;
3. 华中科技大学能源与动力工程学院, 430074, 武汉; 4. 中国工程物理研究院材料研究所, 621907, 四川江油;
5. 中国建筑西北设计研究院有限公司, 710018, 西安)

摘要: 为了深入研究毛细管墙体的热工特性,在非稳态传热热阻热容 RC(resistance and capacity)简化模型的基础上,建立了毛细管墙体的稳态换热量分配比例模型,获得了毛细管与室内和室外换热量的比值。通过实验采集了室内外空气温度、毛细管墙体内壁面温度、毛细管层温度及毛细管与室内外交换的热流密度等实验数据,研究了冬季工况下毛细管墙体与室内外换热量的特点,分析了毛细管墙体的一维换热过程,并验证了毛细管墙体换热量分配比例模型的合理性。实验结果表明:毛细管辐射空调系统具有良好的稳定性,室内温度的波动较小;随着系统运行时间的增加,所建模型的计算值与实测结果更加趋于一致。该稳态换热量分配比例模型可应用于毛细管墙体热工特性评估,并可为进一步研究毛细管辐射空调系统室内负荷的计算提供理论依据。

关键词: 辐射空调系统;毛细管墙体;换热量分配比例模型;热流密度

中图分类号: TU83 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)05-0142-07

Steady-State Thermal Performance of Radiant Wall Embedded with Capillary-Tubes

QIN Siyu¹, WANG Yuang^{1,2}, LI Yang³, GAO Song^{1,4}, ZHAO Min^{1,5},
LU Zhao¹, KONG Qiongxiang¹, JIN Liwen¹

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China; 2. Baidu Era Network Technology Co. Ltd., Beijing 100193, China; 3. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 4. China Academy of Engineering Physics, Jiangyou, Sichuan 621907, China; 5. China Northwest Architecture Design and Research Institute Co. Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: To explore the performance of the wall embedded with capillary-tubes, a scale model of heat distribution of the capillary wall is established, which delivers the ratio of heat exchange from capillary layer to both indoor and outdoor sides according to the simplified transient RC (resistance and capacity) model. The experimental data including the indoor and outdoor air temperatures, the temperature of the inner surface of the capillary wall, the temperature of the capillary layer and the heat fluxes from capillary layer to indoor and outdoor sides are collected to analyze the characteristics of the capillary wall and the heat exchange crossing indoor and outdoor sides subject to the winter conditions. The reasonability of the present scale model is verified, and the one-dimensional heat exchange process of the capillary wall is then discussed.

收稿日期: 2017-11-13。 作者简介: 秦思宇(1995—),女,硕士生;金立文(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2015KTCO01-99);陕西省重点科技创新团队资助项目(2016KCT-16);中国建筑股份有限公司技术中心课题(TC-2016A-092)。

网络出版时间: 2018-03-19

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180319.1751.014.html>

Experimental results show that the capillary radiant air-conditioning system is endowed with good stability, and the fluctuation of the indoor temperature is relatively small. With the increase in the running time of the system, the calculated values of the model are more consistent with the measured results. The proposed model is capable to handily evaluate the performance of the capillary wall in actual applications and to provide a theoretical basis for the further research on indoor load calculation of the radiant air conditioning system.

Keywords: radiant air conditioning system; capillary-tube embedded wall; scale model of heat exchange distribution; heat flux

目前,我国正处在城市建设的高峰期。有数据显示,我国建筑能耗在近50年内增长迅速,最高占社会总能耗的30%左右,尤其是暖通空调方面的能耗,占了建筑全部总能耗的一半以上,是建筑能耗的主体部分^[1-2]。所以,公认的建筑节能减排重点是空调系统的节能,新型空调系统的开发已成为空调行业的重点研究内容之一。

传统空调种类繁多,且与室内环境的换热方式以对流换热为主^[3]。风机盘管末端在运用常规方法调节时,会造成控制区域较强的“吹风感”,不易满足舒适性条件^[4]。全空气系统末端的送风温度在夏季过低、冬季过高,导致全年制冷和供暖消耗的能量过大,造成较大程度的能源浪费^[5]。

相对于传统空调系统,毛细管辐射空调系统通过敷设在内墙抹灰中的毛细管网,以辐射为主要换热形式,大幅度增加了换热面积,降低了系统对入口水温的要求,从而在满足舒适性的前提下实现了节能的效果。在辐射换热时,室内温度变化速度平缓、分布均匀,具有无风机噪声、无吹风感等优点,能够实现最佳的舒适度^[6]。毛细管末端能够灵活地安装在地面、墙体、天花板内,并通过这些围护结构形成的冷热辐射表面进行换热^[7]。辐射空调系统的换热面积远大于传统空调末端的换热面积,可利用毛细管中工质与室内空气的温差来达到供冷或供热的目的;夏季辐射供冷时采用高温冷水(18~21℃),冬季辐射供热时采用低温热水(28~32℃),使系统性能大大提升,也使得太阳能及地热能等多种低品位可再生能源的利用成为可能^[8]。

毛细管嵌在墙体内部,形成整个热环境的内冷源或内热源,使围护结构的得热量和室内环境的负荷发生较大的变化。从现阶段的研究情况来看,墙体的蓄热、放热性能对毛细管换热过程会产生影响,由于其自身的热惰性,使得整个过程成为非稳态的换热过程^[9]。就此,Paschkis等人建立了墙体传热热阻热容(resistance and capacity, RC)模型,并计

算得到了以热阻热容表征的热传递矩阵方程表达式^[10]。张诚通过对墙体传热RC模型基础理论的研究,建立了毛细管式天花板的RC简化模型,以“核心温度层”表示相邻毛细管之间天花板材料的平均温度,仅根据天花板的几何结构和热工参数,即可确定非稳态工况下毛细管层与两侧空气的换热量;利用热传递方程分别计算了非稳态和稳态工况下毛细管式天花板与上下两侧空气的换热量,得到了相同的热流密度平均值,这表明在较长的运行周期内,毛细管墙体的蓄热和放热作用并不影响整体的换热量^[11]。然而,将传统空调的得热量分析和负荷计算方法应用于毛细管辐射空调时,会影响辐射空调的适用性^[12]。因此,评估毛细管墙体的热工性能具有工程应用价值。

本文在分析毛细管墙体热工特性的基础上,建立了基于稳态条件的毛细管墙体换热量分配比例模型;通过实验采集了室内外空气温度、毛细管墙体内壁面温度、毛细管层温度及毛细管与室内外交换的热流密度等数据,获得了冬季供暖工况下室内外温度变化趋势和毛细管与室内外换热量分配比例的特点,并研究了墙体热工特性的变化对该比例的影响。

1 毛细管墙体的换热特性

1.1 毛细管墙体换热量分配比例模型

如前所述,非稳态模型中毛细管墙体仅起到蓄热和放热的作用,并不影响总换热量。在较长时间内,毛细管墙体的平均换热量与稳态模型计算的墙体平均换热量基本相同。因此,从工程应用角度出发,本文对毛细管墙体在稳态工况下的热工特性进行研究,通过建立毛细管墙体换热量分配比例模型,对毛细管与室内外的换热过程进行理论分析,为准确评估毛细管辐射空调系统的得热量和负荷提供理论依据。

毛细管墙体的换热问题可视为一个有内热源或内冷源的一维换热问题,考虑到毛细管供回水温度

分布的周期性和对称性,选取一组供回水管进行分析,研究毛细管墙体与室内外环境的换热量比例。建立毛细管墙体的换热量分配比例表达式如下

$$\frac{q_i}{q_o} = \frac{q_c + q_r}{q_o} \quad (1)$$

式中: q_c 为毛细管承担的室内对流换热量; q_r 为毛细管承担的室内辐射换热量; q_i 为毛细管与室内环境的热交换量; q_o 为毛细管与室外环境的热交换量。换热量的单位均为 J/kg。

风的作用对墙体外壁面的对流换热系数影响非常大,在此情况下对流换热方式占主导。因此,在建立毛细管墙体的换热量分配比例表达式时,室外的换热量 q_o 主要考虑对流换热量^[10]。毛细管墙体内壁面除了与室内空气的自然对流换热外,与室内其他非辐射面墙体的辐射换热是主导换热模式。

1.2 换热量的计算

毛细管墙体与室内环境的换热量包括对流和辐射换热量两部分,整个换热过程的热阻模型如图 1 所示。

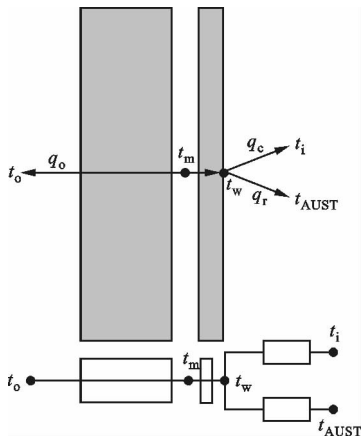


图1 毛细管墙体的换热热阻模型

对流换热系数受多方面因素的影响,在实际工程中,可近似地认为对流换热与毛细管墙体表面温度和室内空气温度相关^[13]。通常使用由经验公式得到的自然对流换热系数来计算自然对流换热量^[14-15]。本文采用 ASHRAE 经验公式^[16]并对其进行简化,用于计算毛细管墙体内壁面与室内环境的自然对流换热量。简化后的公式为

$$q_c = 1.78 |t_w - t_i|^{0.32} (|t_w - t_i|) \quad (2)$$

式中: t_w 为毛细管墙体壁面温度,℃; t_i 为室内空气的干球温度,℃。

毛细管墙体的辐射壁面相当于均温面,各点间的温差很小,则毛细管墙体内壁面与室内环境的辐射换热量

$$q_r = h_r (t_{AUST} - t_w) \quad (3)$$

式中: t_{AUST} 为非辐射面的面平均温度(℃),可由经验公式(4)~(6)计算得到; h_r 为辐射换热系数($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$),可由式(7)计算得到。

$$t_{AUST} \approx t_i - d_o z \quad (4)$$

$$z \approx \frac{7}{t_o - 45}, \quad 26^\circ C \leq t_o \leq 36^\circ C \quad (5)$$

$$z \approx \frac{15}{t_o + 25}, \quad -20^\circ C \leq t_o < 26^\circ C \quad (6)$$

式中: t_o 为室外空气温度,℃; z 为室外空气温度修正因数; d_o 为房间结构相关系数,可由表 1 查得。

$$h_r = 5 \times 10^{-8} [(t_w + 273.15)^2 + (t_{AUST} + 273.15)^2] \cdot [(t_w + 273.15) + (t_{AUST} + 273.15)] \quad (7)$$

表1 房间结构相关系数 d_o 的取值

外围护结构数量	0	1	>1
d_o	1	2	3

综合公式(2)~(7),得到毛细管墙体与室内的辐射换热量和总换热量分别为

$$q_r = 5 \times 10^{-8} [(t_w + 273.15)^4 - (t_{AUST} + 273.15)^4] \quad (8)$$

$$q_i = 5 \times 10^{-8} [(t_w + 273.15)^4 - (t_{AUST} + 273.15)^4] + 1.78 |t_w - t_i|^{0.32} (t_w - t_i) \quad (9)$$

对于毛细管墙体向室外环境的换热量,一般来说风速越大对流换热系数也越大,对流换热方式在毛细管墙体和室外环境的换热中占主导地位,因此为简化研究,仅考虑毛细管承担的室外对流换热量^[17],公式如下

$$q_o = \frac{t_m - t_o}{R} = \frac{t_m - t_o}{1/h_c + \sum_{i=1}^n \delta_i/\lambda_i} \quad (10)$$

式中: R 为从毛细管层到外壁面的热阻,包括室外壁面对流换热热阻和每层墙体围护结构材料的导热热阻, $K \cdot W^{-1}$; t_m 为室外壁面平均温度,℃; h_c 为室外壁面对流换热的换热系数,根据暖通设计手册^[18],通常取 $23 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$; δ_i 为从毛细管层到室外壁面各围护结构材料的厚度,m; λ_i 为从毛细管层到室外壁面各围护结构材料的热导率, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ 。

2 毛细管墙体热工特性的实验研究

为验证本文所建立的毛细管墙体换热量分配比例模型在实际工程应用的准确性,并获得冬季工况下毛细管与室内外换热量分配比例的特点,选取

南京某建筑的辐射空调系统为研究对象对毛细管墙体的热工特性进行分析。南京市为夏热冬冷地区,夏季闷热冬季阴冷,室内舒适度差。该地区主要使用分体式空调,易造成电负荷过大引起供电危机,因此毛细管辐射空调系统在该地区有较好的适用性。实验的测试参数包括毛细管层温度、室内外空气温度、内壁面温度等,以及毛细管墙体分别向室内外传递的热流密度。测试按照辐射供暖供冷技术规程^[19]进行,毛细管辐射空调系统连续运行 72 h 后,实验仪器开始采集并记录各测点的瞬时值。

2.1 实验系统及测试方案

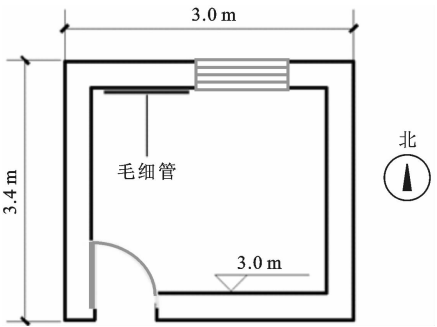
毛细管辐射空调系统主要由辐射末端系统、冷热源系统等组成,其中辐射末端系统包括测试样品间北外墙的毛细管席,支管直径为 3.5 mm,壁厚为 0.5 mm,毛细管间距为 15 mm。该系统由分集水器进行统一供回水,采用同程式的布置方案,使毛细管墙体的温度分布均匀。该系统的热源采用 INOUT-FLLS/N-75-A 空气源热泵,额定制热量为 8.2 kW。

实验房间的基本尺寸为 3.0 m×3.4 m×3.0 m,其中北墙和西墙属于外墙,如图 2a 所示。北外墙上有一外窗,夏季时透过外窗进入房间的热量占了一部分空调冷负荷,冬季时透过窗户所散失的热量对热负荷也有很大的影响。因此,该房间采用了低导热率的双层中空玻璃,以降低外窗的渗透负荷对室内环境的影响。测试墙体示意图如图 2b 所示。

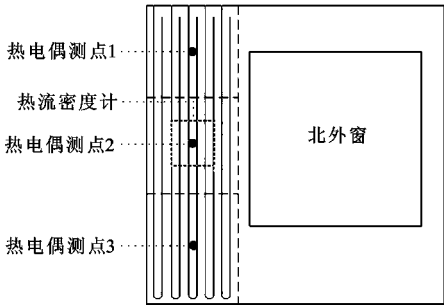
为获得毛细管墙体与室内外两侧的换热量,使用 2 个 RLJ-100100 型热阻式热流传感器(精度±5%)进行测量。传感器尺寸为 100 mm×2.5 mm×100 mm,通过导热硅脂粘贴在毛细管两侧。为获得毛细管层和室内外墙体壁面的温度数据,将 9 个铜-康铜 T 型热电偶(精度±(0.5~1)℃)布置在毛细管层、室内外墙体壁面的相邻位置上。另外,使用 2 台日本 T&D 公司的 TR-72U 温湿度记录仪(精度±0.5℃)来采集室内外的温度数据,并用 2 台 Fluke 2638A 数据采集仪(精度±0.5℃)进行热电偶和热流传感器的数据显示及记录,时间间隔为 1 min。

根据规范,毛细管墙体内壁面的温度测点位置不应靠近热桥、裂缝和有空气渗漏的部位,不应受加热、制冷装置和风扇的直接影响^[20]。因此,为测得较准确的内壁面温度,采用面积平均法将毛细管墙体的面积等分为 3 份,在每一部分的中心处布置热电偶测点(见图 2b),计算时取 3 个测点的平均值。热流传感器布置在毛细管墙体中心位置处,如图 2c

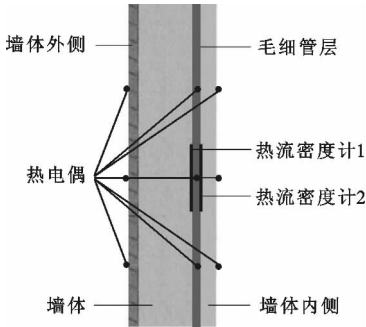
所示,以测得较为均匀、准确的热流密度值。毛细管外壁的热电偶与两侧的热流传感器无接触,热流密度与温度测量互不干扰。图 2d 为传感器完成抹灰后的现场图。



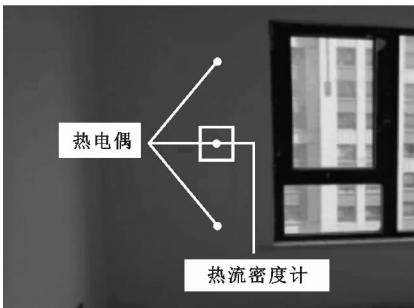
(a)测试房间示意图(俯视)



(b)热电偶布置示意图(侧视)



(c)热流传感器布置示意图



(d)内壁面完成装饰现场图

图 2 实验测试布置图

2.2 误差分析

温度、热流密度等物理量是本实验的重要参数，测量得精确与否直接影响到研究结果的准确度。由于测量仪器分辨率的限制，或者被测样本不具有代表性等原因，会造成实验测量结果与实际值之间有误差，因此需要对实验参数进行误差分析。本文使用合成标准不确定度来评价测量结果，计算结果见表 2。

表 2 不确定度计算结果

测量参数	不确定度/%	测量参数	不确定度/%
室内空气温度	3.8	墙体内壁面温度	5.3
室外空气温度	3.8	向室内热流密度	7.1
毛细管温度	5.3	向室外热流密度	7.1

2.3 实验结果分析

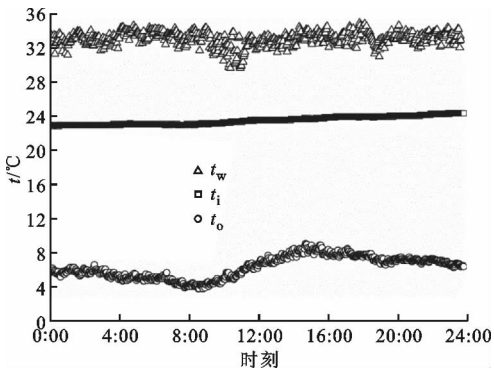
由于建筑围护结构具有热惰性，因此在分析实验数据时，采用系统稳定后的数据进行分析。在系统连续运行状态下，采集冬季的实验数据，详细讨论冬季供暖工况下的室内外温度分布和换热量分配比例情况。

2.3.1 辐射供暖实验结果分析

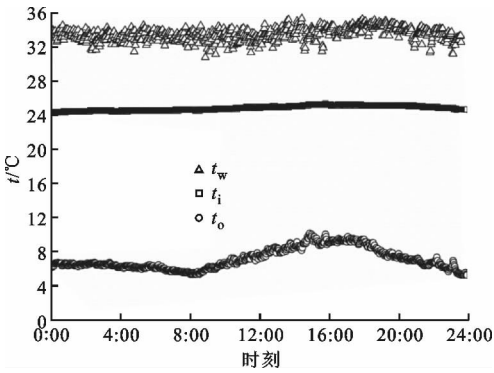
(1)温度变化。在冬季供暖工况下，选取 2017 年 1 月 11—12 日 2 天的运行数据进行分析。室内、外及毛细管层的温度变化如图 3 所示。

从图 3 可以看出：冬季室外空气温度波动幅度较小，下午 4 时左右室外空气达到最高值；当早晚室外温度相对较低时，室内温度基本维持在 24 到 25℃ 之间，系统稳定性良好。这是由于毛细管墙体的内墙抹灰层厚度小、热阻小，而保温层厚度大、热阻大，且毛细管层温度与室外温度的差距大，与室内温度的差距小，因此仅有较少的热量散失到室外环境，保持了室内温度的稳定。11 日的室内空气温度在较小范围内呈现缓慢增长的趋势，这是因为在毛细管辐射空调系统中，50% 以上的热量是通过辐射的方式与室内环境进行换热，与传统空调相比，这种方式对室内空气温度调节的速度相对较平缓。另外，从图 3c 中可清晰看出毛细管层温度的波动情况，在系统停机期间，毛细管中水温降低，温度差基本保持在 2~3℃ 范围内。

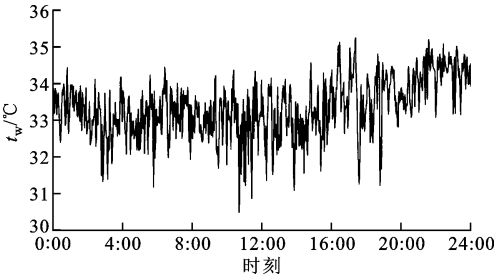
(2)毛细管墙体的换热量分配。冬季供暖工况下，热流传感器采集到的热流量数据均为正值，表征了毛细管墙体的一维换热过程，即冬季毛细管层的供水温度高于室内外两侧的空气温度，毛细管向室内外两侧释放热量。



(a) 2017-01-11



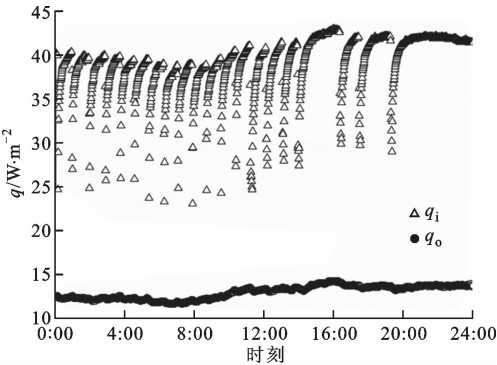
(b) 2017-01-12



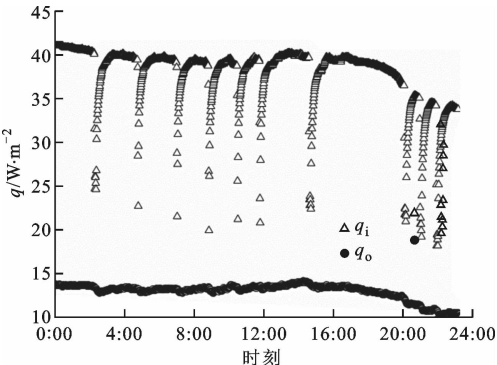
(c) 毛细管层温度

图 3 冬季工况下室内外温度的测量结果

从图 4 可以看出，同一时间内毛细管与室内侧的换热量略高于与室外侧的换热量，这是因为当工质的温度升高时，毛细管与室内外的换热量都增加，并且由于内墙抹灰层厚度小、热阻小，保温层厚度大、热阻大，阻隔了室外冷量的传递，使得毛细管与室外侧换热量增加的幅度较小。从图 4 中还能发现，毛细管与室内外的换热量和系统的状态密切相关。在系统运行期间，工质入口保持设定温度，换热量增大，毛细管同时向室内外传递热量；在系统停机期间，管内水温为满足室内热交换而逐渐降低，毛细管与室内的换热量快速下降，与室外的换热量变化幅度不大，因而热量分配比例随之逐渐减小。当室温低于设定温度时，热泵又重新启动，入口水温也随之升高。



(a) 2017-01-11



(b) 2017-01-12

图 4 冬季工况下毛细管与室内外的换热量分配图

2.3.2 比例模型计算值与实验结果的比较 为验证本文毛细管墙体换热量分配比例模型的准确性,并使该模型对毛细管墙体的热工特性更具有评估意义,本节对换热量分配比例模型的计算值与实验结果进行对比研究。

采用冬季供暖工况的实验数据来验证模型的准确性。实验中采集的数据包括毛细管墙体分别向室内外传递的热流密度、室内外空气温度、毛细管层温度及墙体壁面温度。首先计算每个热流密度变化周期热流密度的平均值,以此获得每个热流密度变化周期毛细管墙体换热量分配比例的平均值,再将对应周期内的室内外温度、毛细管温度、墙体壁面温度等的平均值代入式(9)、式(10)中,即可得到对应周期内的换热量分配比例模型计算平均值。换热量分配比例的模型计算平均值和实验测试平均值的对比关系如图 5 所示。

在测试期间,由于空气源热泵的运行周期不同,所以每天的启停次数均不相同。以 1 月 13 日运行工况为例,共记录了 10 组数据,得到变化周期内换热量分配比例的模型计算值与实验测试值的平均误差为 4.5%。综合 4 天的测试数据,模型计算值与实验测试值的平均误差为 15.6%,这个误差在工程

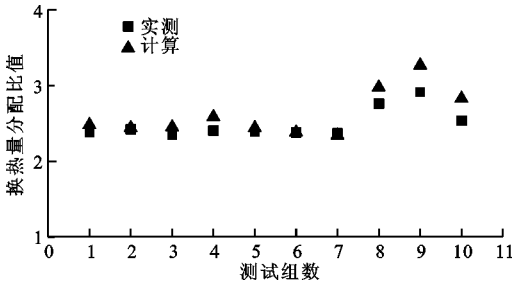


图 5 换热量分配比例的模型计算值与测试值对比

应用中处于可接受的范围之内^[21-23],说明模型计算值与实验测试值吻合度较高,验证了本文毛细管墙体换热量分配比例模型的准确性。

在分析毛细管墙体的换热过程时,需要考虑复杂的动态蓄热和放热作用,工程应用难度大。本文的研究发现,随着系统运行时间的增加,毛细管墙体换热量分配的比例与实际情况更加接近,说明在以 1 天为周期的时间内,毛细管墙体的换热量与稳态工况下的换热量基本相同,验证了本文所引用的前人结论,即墙体积蓄和释放的热量不影响整体的换热效果,因此,该稳态换热量分配比例模型有望应用于实际工程中的毛细管墙体热工特性评估。

3 结 论

本文在毛细管墙体热工特性分析的基础上,建立了基于稳态模型的毛细管墙体换热量分配比例模型;以南京某民用建筑的辐射空调系统为研究对象进行了实验研究,测试了冬季供暖工况下的室内外温度变化和换热量分配比例,对模型进行了验证,获得以下结论。

(1)毛细管与室内外的换热量和系统的状态密切相关。在系统运行期间,工质入口保持设定温度时毛细管与室内外两侧的换热量增大,冬季供暖工况下与室内的换热量略高于与室外的换热量;在系统停机期间,管内水温为满足室内热交换而逐渐降低,毛细管与室内外两侧的换热量减小,毛细管层与室内及室外换热的分配比例也随之减小;当室温低于设定温度时,热泵又重新启动,入口水温也随之升高。

(2)采用辐射空调系统的室内温度具有较好的稳定性,室内温度的波动受室外温度变化影响较小,能够较好满足室内环境的舒适性要求,适用于冬季寒冷需要供暖的地区。

(3)随着系统运行时间的增加,毛细管层与室内及室外换热的分配比例计算值和实验值更加接近,

证明了本研究所建立模型的合理性,同时表明在较长的周期内,墙体的蓄热和放热作用对整体换热的效果不会有明显的影响,这也间接验证了前人的传热 RC 简化模型的结论^[11]。本文的稳态换热量分配比例模型有望应用于实际工程中毛细管墙体的热工特性评估,也可作为毛细管辐射空调系统的得热量分析和负荷计算提供理论依据。

参考文献:

- [1] 马玉奇,刘学来,李永安,等. 毛细管平面空调系统简介 [J]. 建筑节能, 2007, 35(11): 5-7.
MA Yuqi, LIU Xuelai, LI Yongan, et al. Brief introduction of capillary tubes mat system [J]. Building Energy Efficiency, 2007, 35(11): 5-7.
- [2] 张华俊. 毛细管网平面辐射空调系统市场前景广阔 [J]. 中国建设信息: 供热制冷, 2008(6): 21.
- [3] 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.
- [4] 彭维. 卧式风机盘管机组舒适性能的评价 [J]. 新疆工学院学报, 1997, 18(1): 55-57.
PENG Wei. Evaluation of comfort performance of fan-coil units [J]. Journal of Xinjiang Institute of Technology, 1997, 18(1): 55-57.
- [5] 魏兵. 低温全新风系统的能耗分析 [J]. 暖通空调, 2005, 35(8): 59-64.
WEI Bing. Energy consumption analysis of all cold outdoor air (OA) system [J]. HV&AC, 2005, 35(8): 59-64.
- [6] 陶红霞,翁文兵,刘峰. 毛细管辐射空调系统简介及设计要点分析 [J]. 建筑节能, 2009, 37(9): 29-31.
TAO Hongxia, WENG Wenbing, LIU Feng. Brief introduction and design analysis of capillary radiation air-conditioning system [J]. Building Energy Efficiency, 2009, 37(9): 29-31.
- [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 Xin, ZHU Xiaohan, LIU Yicai. The design analysis and prospects of capillary plane radiation air-conditioning system [J]. Vacuum and Cryogenics, 2015, 21(1): 51-55.
- [8] 张兆强,刘学来,孙娟娟. 毛细管平面辐射空调系统节能性分析 [J]. 科技与生活, 2009(23): 42.
- [9] 杨仁全,马承伟,刘水丽,等. 日光温室墙体保温蓄热性能模拟分析 [J]. 上海交通大学学报, 2008, 26(5): 449-453.
YANG Renquan, MA Chengwei, LIU Shuili, et al. The imitation analysis of heat preservation and capillary of the wall of solar greenhouse [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 26(5): 449-453.
- [10] PASCHKIS V, BAKER H D. A method for determining unsteady-state heat transfer by means of an electrical analogy [J]. ASME Trans, 1942, 64(2): 105-112.
- [11] 张诚. 混凝土辐射供冷非稳态传热简化模型构建及相关研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010: 27-52.
- [12] 吴洁. 毛细管辐射空调系统负荷计算及结露问题的研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2014: 2-22.
- [13] 赵加宁. 低温热水采暖末端装置 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 80-135.
- [14] MIKESKA T, SVENDSEN S. Study of thermal performance of capillary micro tubes integrated into the building sandwich element made of high performance concrete [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 52(2): 576-584.
- [15] PEETERS L, BEAUSOLEIL-MORRISON I, NOVOSELAC A. Internal convective heat transfer modeling: critical review and discussion of experimentally derived correlations [J]. Energy and Buildings, 2011, 43(9): 2227-2239.
- [16] ASHRAE. ASHRAE handbook: HVAC systems and equipment (SI): chapter 6 Panel heating and cooling [M]. Atlanta, GA, USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., 2008: 3-4.
- [17] 张文武. 城市不透水表面对流换热系数的实测和模拟研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008: 3-9.
- [18] 民用建筑供暖通风及空气调节设计规范: GB 50376—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 17-19.
- [19] 辐射供暖供冷技术规程: JGJ 142—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 44.
- [20] 采暖居住建筑节能检验标准: JGJ 132—2001 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 5-7.
- [21] 王赞. 毛细管辐射空调末端供冷性能的数值模拟及实验研究 [D]. 湖南衡阳: 南华大学, 2016: 11-36.
- [22] 刘静. 新风溶液除湿与吊顶辐射空调系统舒适性研究 [D]. 广州: 广州大学, 2013: 42-43.
- [23] 李志永,陈超,罗海亮,等. 太阳能相变蓄热供暖系统耦合传热模型的建立与实验验证 [J]. 建筑科学, 2010, 26(10): 292-295.

(编辑 葛赵青)