

# 湿法施工毛细管末端冬季换热性能实验研究

杨洁, 周慧鑫, 张旭, 刘焱, 王军

(同济大学机械工程学院, 上海 201804)

**摘要:**针对采用湿式施工法的毛细管辐射末端,在冬季工况下对其换热特性进行了实验研究,并对不同敷设面层厚度及不同管间距的毛细管辐射末端的换热性能进行了对比实验分析。研究结果表明,与传统地板辐射供暖方式相比,地面湿式毛细管末端具有较低供水温度,并具有良好的冬季换热性能和系统节能性。建议在实际工程应用中,根据室内散热量与人体热舒适性的要求,并基于供水温度与面层厚度之间的耦合关系,选择适宜的施工方法。

**关键词:**毛细管末端;湿式施工法;换热性能分析;辐射供暖;实验研究

**中图分类号:**TU832.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)02-0080-06

## Heat Transfer Performance of Capillary Mats Using Wet Construction in Winter

YANG Jie, ZHOU Hui-xin, ZHANG Xu, LIU Yan, WANG Jun

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, P. R. China)

**Abstract:** For the capillary mats using wet construction, a winter experiment designed to investigate the heat transfer performance was described, and the heat transfer performance analysis which contains the comparisons between different pipe space and different thickness of cement mortar surface was carried out. As a result, compared with that of the traditional radiant heating pipes, the capillary mats of wet construction require supply water with lower temperature, and it shows good heat transfer performance and system energy efficiency as well. According to the demand of indoor heat dissipation and human comfort as well as the coupling relationship between the temperature of supply water and surface construction thickness, it is suggested that the proper construction method should be comprehensively considered in practical applications.

**Key words:** capillary mats; wet construction; heat transfer analysis; radiant heating; experimental studies

随着建筑保温程度的提高和管材的发展,近年来水媒质辐射空调系统的使用日益普遍<sup>[1]</sup>。水媒质辐射空调系统是由辐射末端、冷热源、水媒质输送管路系统等组成,并且通常与建筑室内的独立送风系统相结合。其中,辐射末端的形式与换热能力是影响其实际应用效果的关键因素之一。

与传统辐射末端方式相比,毛细管辐射末端作为辐射空调系统的一种新型末端方式,具有管径小(3~5 mm)、管间距小(10~40 mm)且采用网状结

构模块化铺设方式,因此单位面积毛细管网换热表面积大、表面温度分布均匀,因而总换热量大<sup>[2-3]</sup>。此外,根据冬夏季供冷、供热的不同需要,该种末端与建筑的结合方式及其施工方式具有灵活性与多样性;其中,湿法施工方式是其主要施工方式之一,其将毛细管固定于保温层上,用一定厚度水泥砂浆填充找平,并在其上铺设不同的面层材料以满足建筑装饰的不同要求,该施工方式具有换热效果好、施工工艺简单、面层厚度较传统辐射采暖末端薄等特

收稿日期:2010-09-15

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAJ01B05、2006BAJ01A05)

作者简介:杨洁(1965-),女,副教授,主要从事绿色建筑与空调系统节能技术,(E-mail)jyang@mail.tongji.edu.cn.

点<sup>[4]</sup>。

末端换热性能和表面温度响应特性是辐射空调方式普遍关注的问题<sup>[5-9]</sup>,对传统盘管与辐射板末端的换热性能已有大量的理论与实验研究<sup>[10-15]</sup>,关于此方面研究大多是通过分析实际换热过程,建立相应数学模型、运用数值模拟的方式对影响辐射末端换热的各个因素进行理论分析,并结合一定的实测与实验室研究确定其换热能力及换热影响。但目前针对毛细管辐射末端相关的实验研究还很少,特别是冬季地面湿法施工方式下,诸如供水温度、水流量、面层厚度等关键影响因素对其换热性能和表面温度响应的实测数据还较欠缺。此外,实验中不同施工面层厚度、不同管间距等换热影响因素的对比和实测对实验条件要求较高,给相关实验数据的获取造成一定困难。

基于此,该文针对毛细管末端湿法施工方式冬季换热工况,借助实验手段按实际施工方式制作了不同的实验试块以解决上述问题,通过实测数据分析以上因素对该类末端冬季换热的影响。

## 1 毛细管辐射末端冬季换热性能实验

### 1.1 实验原理

根据冬季地板辐射供暖设计要求,制备一定温度的热水介质,由循环水泵送入湿法施工方式下的毛细管辐射末端管网,再通过管网与毛细管结合的施工结构层之间的热传导以及结构层与室内空气和室内各表面之间的对流与辐射换热达到室内供暖的目的。在上述过程中,毛细管末端通入热水经过一段时间后,末端结构表面从初始温度逐渐上升直至达到某一稳定值,此时供回水温差基本恒定,即该施工方式下毛细管辐射末端的换热量达到稳定,其确定方法如下:

$$Q = m_w C_p (t_g - t_h) \quad (1)$$

式中, $Q$ 为毛细管辐射末端换热量, $W$ ;  $m_w$ 为毛细管辐射末端水流量, $kg/s$ ;  $C_p$ 为水的比热,取  $4.187 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $t_g$ 为供水温度, $^\circ\text{C}$ ;  $t_h$ 为回水温度, $^\circ\text{C}$ 。

在实验中,各施工方式毛细管辐射末端试块稳定换热量由试块上表面有效换热量  $Q_1$ 、底面保温层漏损换热量  $Q_2$  及管路散热量  $Q_3$  部分组成,  $Q_1$ 、 $Q_2$  由热流计实测确定,  $Q_3$  可用下式表示:

$$Q_3 = Q - Q_1 - Q_2 \quad (2)$$

式中, $Q$ 为毛细管辐射末端换热量, $W$ ;  $Q_1$ 为毛细管辐射末端上表面有效换热量, $W$ ;  $Q_2$ 为毛细管辐射末端底面保温层漏损换热量, $W$ ;  $Q_3$ 为毛细管辐射末端管路散热量, $W$ 。

### 1.2 实验系统

毛细管末端换热实验在低温热水标准试验台中

完成。实验房间为  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 2.8 \text{ m}$  的六面体封闭小室,如图1所示。房间外侧空调系统控制封闭小室中的环境空气温度;由水泵、上水箱、下水箱、玻璃示镜、水温加热器、流量测试装置组成的实验台水系统为毛细管末端试块提供不同温度的热水,如图2;同时,水流量由浮子流量计及称重法测试,供回水温度由标准玻璃温度计测量。

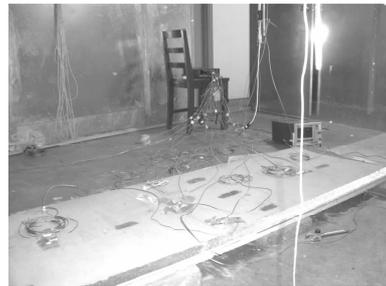
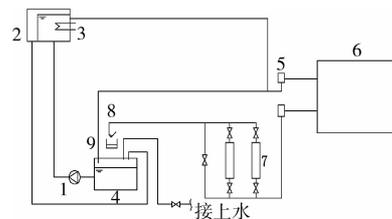


图1 实验室与试块表面测点实测照片



1. 循环水泵; 2. 高位加热水箱; 3. 电加热器;
4. 低位水箱; 5. 标准温度计; 6. 毛细管末端试块;
7. 浮子流量计; 8. 换向器; 9. 称重电子天平

图2 毛细管末端实验系统原理图

针对不同管间距、不同水泥砂浆面层厚度,实验采用由实际湿法施工方式制成的毛细管辐射末端试块进行实验。试块表面的尺寸统一为  $2000 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ ,试块厚度随不同施工方式有所不同在  $30 \sim 50 \text{ mm}$  之间,毛细管管径为  $3.4 \times 0.55 \text{ mm}$ ,试块底部及四周用  $20 \text{ mm}$  厚聚苯板保温,试块表面为水泥砂浆面层,如图3所示。

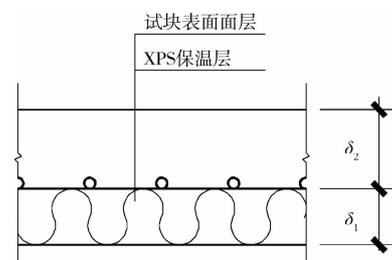


图3 实验试块示意图

### 1.3 实验内容

实验以水泥砂浆厚度为  $20 \text{ mm}$  的毛细管末端试块为标准试块,针对3种设定室内空气温度 ( $18^\circ\text{C}$ 、 $20^\circ\text{C}$ 、 $22^\circ\text{C}$ ) 和4种设定供水温度 ( $30^\circ\text{C}$ 、 $34^\circ\text{C}$ 、 $38^\circ\text{C}$ 、 $42^\circ\text{C}$ ) 进行不同室内空气温度与设定供

水温度组合的 12 组实验(工况 1—12);在室内温度为 20℃,供水温度为 34℃的条件下针对 3 种管内水流速(0.15 m/s、0.25 m/s、0.35 m/s)进行实验(工况 5、13、14);同时为了进行实验对比,对 10 mm、20 mm 2 种间距试块(工况 5、17)以及 20 mm、30 mm 2 种水泥砂浆厚度试块(工况 5、15)进行实验。实验工况表如表 1。

表 1 实验工况表

工况编号	供水温度/℃	室内设计温度/℃	管内水流速/(m·s <sup>-1</sup> )	砂浆面层厚度/mm	毛细管间距/mm
1	30	18	0.15	20	20
2	30	20	0.15	20	20
3	30	22	0.15	20	20
4	34	18	0.15	20	20
5	34	20	0.15	20	20
6	34	22	0.15	20	20
7	38	18	0.15	20	20
8	38	20	0.15	20	20
9	38	22	0.15	20	20
10	42	18	0.15	20	20
11	42	20	0.15	20	20
12	42	22	0.15	20	20
13	34	20	0.25	20	20
14	34	20	0.35	20	20
15	34	20	0.15	30	20
16	34	20	0.15	20	10

实验测试参数包括供水温度、回水温度、流量、室内空气温度、毛细管末端试块表面温度与热流;其中,试块上、下表面温度与热流测点位置如图 4 所示。实验中测试仪器包括有标准温度计、称重电子天平、T 型热电偶、热流计、秒表等。

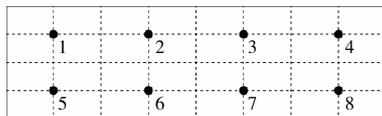


图 4 试块表面测点位置

## 2 结果分析

### 2.1 供水温度与室内空气温度对末端换热性能的影响

针对 3 种室内空气温度(18℃、20℃、22℃),20 mm 厚标准试块单位面积散热量随供水温度的变化关系如图 5 所示(工况 1—12)。从图 5 中可以看到在相同的室内空气温度条件下,毛细管辐射末端单位面积散热量随供水温度的提高而增大;同时,在给定供水温度范围内其单位面积热指标在 73.6~202.6 W/m<sup>2</sup> 之间,可以满足大多数民用建筑的供热需要。此外,在供水温度一定的情况下,室内空气温度的降低也会引

起毛细管辐射末端单位面积散热量的增加。由此可见,出现以上特点的原因在于末端换热温差的变化,即毛细管辐射末端散热量随供回水平均温度与室内温度之差的变化而变化。根据以上特点可知,供水温度和室内空气温度对辐射末端换热性能具有耦合影响,在选用该施工方式的毛细管末端时应综合考虑供水温度和室内设计温度要求,以满足室内热负荷需要。特别是,对于室内设计温度较为严格的场所,当室内发热量较大、选取的供水温度无法满足消除室内热负荷要求时,应辅之以其他热源如电加热器,或由通风系统承担部分热负荷以达到设计要求。

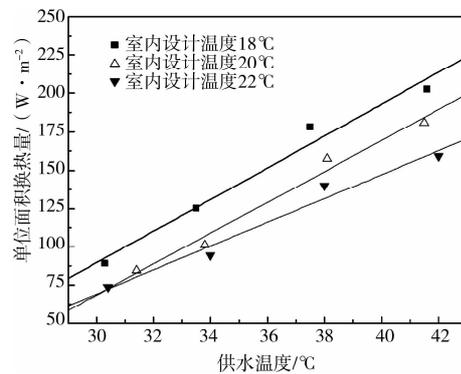


图 5 20 mm 厚试块单位面积散热量随供水温度的变化关系

在稳定换热条件下,由于供回水平均温度与室内空气温度之间存在温差  $\Delta t$ ,而不同的温差与不同单位面积散热量  $q$  相对应,如图 6 所示;因此可以根据散热器原理,将 12 个实验工况的数据整理为  $q = a\Delta t^b$  的形式<sup>[16]</sup>,由曲线回归得到:

$$q = 3.239\Delta t^{1.413} \quad (R^2 = 0.9831) \quad (3)$$

式中, $q$  为单位面积换热量, W/m<sup>2</sup>;  $\Delta t$  为毛细管末端供回水平均温度与室内温度之差, °C。

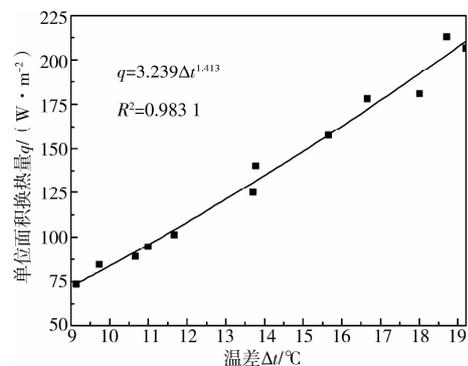


图 6 20 mm 厚试块不同温差与单位面积换热量拟合曲线

由于目前毛细管辐射末端主要应用在住宅建筑(包括别墅)、办公建筑以及部分商业建筑中,而这些建筑的单位面积热指标约在 45~125 W/m<sup>2</sup> 之间<sup>[17]</sup>;因此,根据式(3)可知,若室内设计温度为

20℃,则供回水平均温度应为26.4~33.3℃。另一方面,若应用在食堂、餐厅、礼堂及体育馆等单位面积热指标较高的场所(一般为115~160 W/m<sup>2</sup>),相同条件下供回水平均温度应为32.5~35.8℃。由此可以看到,该施工方式下毛细管辐射末端的供水温度相对于传统地板采暖末端(包括PE-RT、PE-X盘管方式等)而言要求更低<sup>[18]</sup>,从而降低了系统热源能耗,并为太阳能等新型能源的结合利用提供可能<sup>[19-22]</sup>,因此该类末端具有更好的节能性。

## 2.2 不同管内水流速度对末端换热性能的影响

在室内空气温度为20℃,供水实测温度为34~35℃,试块初始温度与室内温度相同条件下,对于3种管内水流速(0.15 m/s、0.25 m/s、0.35 m/s),试块表面平均温度随时间的变化关系如图7所示(工况5、13、14)。由图7可以发现,试块表面温度从初始值上升至稳定值所需的时间随水流速的增大而减小,原因在于管内水流速的增大强化了毛细管内壁与水之间的对流换热,从而缩短了表面温度的热响应时间。在不同管内水流速下,试块表面稳定温度存在差异,其数值大小随流速的增加而增加。值得指出的是,水流速的增加对毛细管辐射末端试块表面温度及温度响应时间在一定范围内有较大影响,如流速0.25 m/s与0.15 m/s对比表面稳定温度高出1.7℃,表面温度稳定时间相比降低20 min;但另一方面,当流量继续增加后对毛细管辐射末端试块表面温度及温度响应时间影响相对很小,如流速0.35 m/s与0.25 m/s对比表面温度相差在0.5℃范围内,表面温度响应时间相差较小。

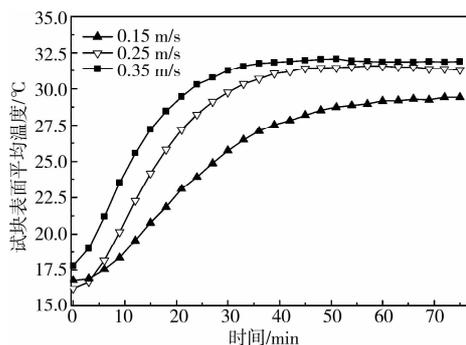


图7 20 mm厚试块表面温度在不同水流速下的时间响应特性

在稳定换热阶段,20 mm厚水泥砂浆试块在3种水流速条件下的换热量对比如图8所示。从图8可以看到,试块上表面单位面积散热量随水流速的增加而增大,且3种条件下的散热量分别为101.3 W/m<sup>2</sup>、131.5 W/m<sup>2</sup>、147.9 W/m<sup>2</sup>,出现这一现象的原因在于水流速增大引起毛细管管内对流换热强度增加。另一方面,从3种条件

下的总散热量组成来看,试块上表面实测单位面积有效散热量在75~100 W/m<sup>2</sup>之间,而由保温层漏损的底面单位面积散热量均在20 W/m<sup>2</sup>左右,流速变化对其影响很小。值得注意的是,随着流速的增加管路漏损热量明显增大,3种条件下的管路热漏损比例分别为1.5%、12.5%和18.1%。由此可知,水流速的增大虽提高了上表面有效散热量,但增加的幅度有限,而与此同时却引起管路热漏损显著增加。因此,在实际应用过程中,毛细管辐射末端的设计管内水流速应充分考虑供回水管路及由保温层下方热漏损量。

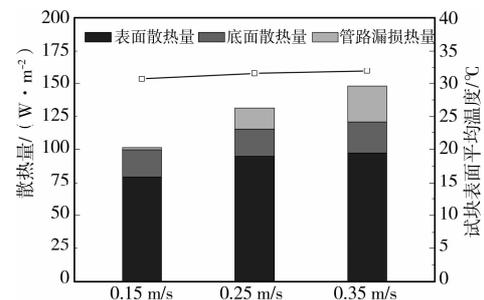


图8 20 mm厚标准试块在不同水流量下的换热量对比

## 2.3 毛细管管间距对末端换热性能的影响

在室内空气温度为20℃、供水温度为34℃且水流速一定的情况下,2种管间距(10 mm和20 mm)毛细管试块表面平均温度随时间的变化关系如图9所示(工况5、16)。从图9可以发现,10 mm管间距毛细管试块表面稳定温度为30.5℃,高于20 mm间距试块1.3℃左右,可见一定管内流速下,随着管间距的减小毛细管网栅换热面积增加,换热量增加,因而试块表面稳定温度增加。另一方面,毛细管试块表面温度的稳定时间随管间距的增大而增加,由此表明毛细管试块的管间距变化会改变其内部温度梯度在非稳态阶段的分布状况,从而使热流密度不断发生变化,并进一步改变表面温度的上升快慢。

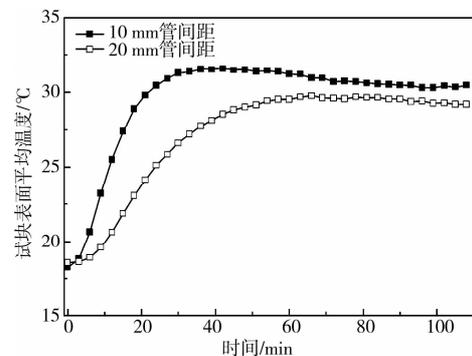


图9 20 mm厚标准试块表面温度在不同管间距下随时间的响应特性

2种管间距毛细管辐射末端试块的换热量对比

如图 10 所示。从图 10 可以看到,10 mm 管间距与 20 mm 管间距的标准试块总换热量分别为  $151.8 \text{ W/m}^2$ 、 $101.3 \text{ W/m}^2$ 。由于毛细管辐射末端管路为并联方式排布,管间距的减小增大了毛细管末端的换热面积,因而使换热量显著增大。此外,2 种不同管间距试块实测上表面散热量分别为  $101.2 \text{ W/m}^2$  和  $79.6 \text{ W/m}^2$ 。由此表明,在相同供水温度、流量以及室内空气温度条件下,10 mm 管间距毛细管末端具有更好的换热效果,而对于热负荷较低( $<80 \text{ W/m}^2$ )的建筑,20 mm 管间距毛细管末端即可满足要求且具有较好的经济性。

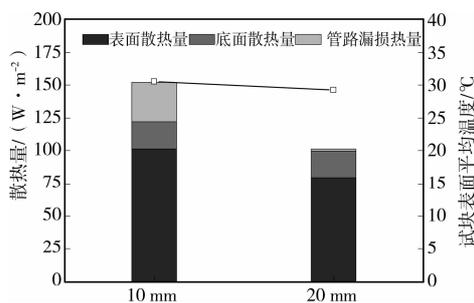


图 10 2 种管间距换热量对比

#### 2.4 施工面层厚度对末端换热性能的影响

在供水温度  $34^{\circ}\text{C}$ 、室内空气温度  $20^{\circ}\text{C}$  条件下,2 种水泥砂浆施工厚度(20 mm 和 30 mm)毛细管试块表面平均温度随时间的变化关系如图 11 所示(工况 5、15)。由图 11 可以发现,20 mm 厚试块与 30 mm 厚试块表面平均温度的稳定值分别为  $29.2^{\circ}\text{C}$  和  $27.2^{\circ}\text{C}$ ,这表明水泥砂浆面层厚度对试块表面平均温度有显著影响。出现这一现象的原因在于湿法施工面层厚度的增加加大了毛细管管壁与室内环境之间的换热热阻,从而使末端换热表面平均温度下降。另一方面,水泥砂浆面层厚度的减小会加快试块表面平均温度的稳定,即换热热阻的降低提高了试块的热响应性能。

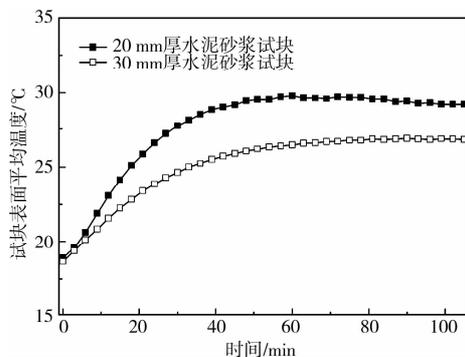


图 11 2 种施工厚度换热性能对比

需要指出的是,实验中标准工况(工况 5)试块表面平均温度超过了人员经常停留区地板表面平均

温度  $28^{\circ}\text{C}$  的限值<sup>[23]</sup>,若应用于住宅(包括别墅)、办公建筑等人员经常逗留区域时会造成较差的舒适性。为达到热舒适要求,试验中通过降低供水温度进行了工况 2 和标准工况的实验对比,测得 20 mm 厚试块在  $30^{\circ}\text{C}$  供水温度下(工况 2)换热表面平均温度为  $26.7^{\circ}\text{C}$ ,相应供热量为  $86.4 \text{ W/m}^2$ 。此时换热表面温度低于热舒适限值但供热量有所降低,故对于水泥砂浆层厚度较薄的毛细管辐射末端,可通过适当降低供水温度同时对换热量进行校核的方式使表面温度在舒适性区域内。此外,在保证换热量的前提下,还可结合室内地面装饰使用架空地板、轻质地毯等热阻较大面层材料来降低表面温度,以达到舒适要求。

### 3 结论

通过实验研究湿法施工水泥砂浆毛细管末端在冬季工况下的换热性能可以得到以下结论:

1)湿式施工方式下毛细管辐射末端在给定供水温度范围  $30\sim 42^{\circ}\text{C}$ ,换热效果良好,其换热量可以满足多数公用及民用居住建筑冬季供热需求。

2)在相同的室内空气温度条件下,毛细管辐射末端单位面积散热量随供水温度的增大而增大;同时,与传统 PE-RT、PE-X 盘管等地板供暖方式相比具有更低的供水温度要求,提高了系统的节能性。

3)在供水温度和室内设定温度一定的条件下,水流量在  $0.15\sim 0.25 \text{ m/s}$  范围内变化时对毛细管辐射末端表面温度及温度稳定时间具有显著影响,当流量继续增大在  $0.25\sim 0.35 \text{ m/s}$  范围内对换热稳定后的表面温度及温度稳定时间影响较小。

4)在保持毛细管网管内一定流速下,10 mm 管间距毛细管辐射末端相对于 20 mm 管间距在湿法施工方式下表面温度更高、表面温度稳定时间更快,具有更大的换热量,可在不改变施工方式及供水温度下应用于热负荷较高的场所。

5)湿式地面施工方式毛细管辐射末端地板表面平均温度随水泥砂浆厚度的增加而降低,在实际应用时应综合考虑地板换热量与热舒适性,采用较低的供水温度并合理选取地面面层材料。

#### 参考文献:

- [1] 王子介. 低温辐射供暖与辐射供冷[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
  - [2] 闫振华,黄翔,宣永梅. 关于毛细管辐射供冷空调系统应用的初探[J]. 制冷,2008,27(1):65-68.
- YAN ZHEN-HUA, HUANG XIANG, XUAN YONG-MEI. Application research on air-conditioning system

- of radiative cooling by capillary tube[J]. Refrigeration, 2008,27(1):65-68.
- [3] 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 HONG-XIA, WENG WEN-BING, LIU FENG. Brief introduction and design analysis of capillary radiation air-conditioning system [J]. Construction Energy Conservation, 2009,37(9):29-31.
- [4] 傅允准,蔡颖玲,李晶,等. 毛细管辐射采暖热源方案技术经济分析[J]. 流体机械,2010,38(1):81-85.  
FU YUN-ZHUN, CAI YING-LING, LI JING, et al. Technical and economic analysis of heat source schemes of radiant heating system of capillary tube[J]. Fluid Machinery, 2010,38(1):81-85.
- [5] WEITZMANN P, KRAGH J, ROOTS P, et al. Modelling floor heating systems using a validated two dimensional ground-coupled numerical model [J]. Building and Environment, 2005, 40(2):153-163.
- [6] SATTARI S, FARHANIEH B. A parametric study on radiant floor heating system performance [J]. Renewable Energy, 2006, 39(8):1617-1626.
- [7] BOZKIR O, CANBAZOGLU S. Unsteady thermal performance analysis of a room with serial and parallel duct radiant floor heating system using hot airflow [J]. Energy and Buildings, 2004, 36(6):579-586.
- [8] HO S Y, HAYES R E, et al. Simulation of the dynamic behavior of a hydronic floor heating system[J]. Heat Recovery System & CHP, 1995,15(6):505-519.
- [9] 崔新阳,李永安,尹纲领. 毛细管平面空调热工参数的探讨[J]. 山东建筑大学学报,2009,24(6):581-586.  
CUI XIN-YANG, LI YONG-AN, YIN GANG-LING. Discussion of thermal parameter design of capillary air-conditioning systems[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2009,24(6):581-586.
- [10] 冯晓梅,肖永全. 低温地板辐射供暖特性参数的研究[J]. 暖通空调,2004, 34(1):1-4.  
FENG XIAO-MEI, XIAO YONG-QUAN. Research on the characteristic parameters of low temperature radiant floor heating system[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2004, 34(1):1-4.
- [11] 邱林,王文海,游旻昱. 地板辐射供暖热力特点及影响因素分析[J]. 煤气与热力,2003, 23(8):481-484.  
QIU LIN, WANG WEN-HAI, YOU MIN-YU. Thermal characteristics and influence factors of floor radiant heating [J]. Gas & Heat, 2003, 23(8):481-484.
- [12] 刘艳峰,刘加平. 低温热水辐射地板传热测试研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2004,36(2):176-178.  
LIU YAN-FENG, LIU JIA-PING. Measurement and study on the heat transfer of embedded heat floor [J]. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. : Natural Science Edition, 2004,36(2):176-178.
- [13] 赵玉新,由世俊,王海霞,等. 板式地板辐射供暖系统的热工性能研究[J]. 煤气与热力,2006,26(5):71-74.  
ZHAO YU-XIN, YOU SHI-JUN, WANG HAI-XIA, et al. Study on thermal performance of panel radiant floor heating system[J]. GAS & HEAT, 2006,26(5):71-74.
- [14] 王子介,夏学鹰. 地板辐射供冷/暖的简化动态模型及其应用[J]. 南京师范大学学报:工程技术版,2004,4(1):1-4.  
WANG ZI-JIE XIA XUE-YING. One-dimensional dynamic models for radiant floor heating/cooling [J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology, 2004,4(1):1-4.
- [15] 刘晓燕,张兰双,徐颖. 新型低温热水地板辐射供暖结构层传热数学模型[J]. 暖通空调,2009,39(2):19-22.  
LIU XIAO-YAN, ZHANG LAN-SHUANG, XU YING. Heat transfer model for floor structure layer of the low-temperature water floor panel heating system [J]. HV&AC, 2009,39(2):19-22.
- [16] 贺平,孙刚. 供热工程 [M]. 3版. 北京:中国建筑工业出版社,1993:36-39.
- [17] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册 [M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2007:316-317.
- [18] 丁有虎. 低温热水地板辐射供暖传热的实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学市政环境工程学院,2007.
- [19] ZHAI X Q, WANG R Z, DAI Y J, et al. Solar integrated energy system for a green building [J]. Energy and Buildings, 2007, 39(8): 985-993.
- [20] REN JIANBO, ZHU LI, WANG YIPING, et al. Very low temperature radiant heating/cooling indoor end system for efficient use of renewable energies[J]. Solar Energy, 2010, 84(6): 1072-1073.
- [21] KAYGUSUZ K, AYHAN T. Experimental and theoretical investigation of combined solar heat pump system for residential heating [J]. Energy Conversion and Management, 1999, 40 (13): 1377-1396.
- [22] 周恩泽,董华,涂爱民,等. 太阳能热泵地板辐射供暖系统的实验研究[J]. 流体机械,2006, 4:57-62.  
ZHOU EN-ZE, DONG HUA, TU AI-MIN, et al. Experimental study on the solar assisted heat pump source radiant floor heating system [J]. Fluid Machinery, 2006, 4:57-62.
- [23] JGJ 142-2004 地面辐射供暖技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.