



引用格式:尹亚领,裴亚兵,龚毅,等.铜管辐射供冷板换热与结露特性研究[J].轻工学报,2016,31(6):80-88.

中图分类号:TU831 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2016.6.012

文章编号:2096-1553(2016)06-0080-09

铜管辐射供冷板换热与结露特性研究

Investigation on the heat transfer and water condensation performance of copper tube radiant cooling panels

尹亚领,裴亚兵,龚毅,吴学红

YIN Ya-ling, PEI Ya-bing, GONG Yi, WU Xue-hong

郑州轻工业学院 能源与动力工程学院,河南 郑州 450002

College of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China

关键词:

辐射供冷;结露特性;
水珠生长;温度分布;
传热传质

Key words:

radiant cooling; water condensation performance; water drop development; temperature distribution; heat and mass transfer

摘要:为了提高辐射供冷板的供冷能力,改善板表面的结露特性,通过搭建辐射供冷系统结露和换热性能实验平台,采用可视化的研究方法,对不同冷水温度、管内流速和室内相对湿度等条件进行了研究.结果表明:冷水流量从40 L/h增加到120 L/h,供冷能力增大了将近1倍,结露时间提前了15 min;室内温度为26 ℃,相对湿度为75%时,结露出现时间最早为8 min;铜管辐射板与PPR毛细管模型相比,具有更强的供冷能力;供水温度越低,辐射板表面凝结的露珠存在的状态越紊乱,结露量也越多;冷水温度为8 ℃,室内环境温度为26 ℃,相对湿度为60%时,水珠在辐射板表面的最大尺寸为长9.6 mm,宽8.8 mm.

收稿日期:2016-08-22

基金项目:河南省教育厅高校重点项目(15A470026);郑州轻工业学院研究生科技创新基金项目(2015037)

作者简介:尹亚领(1983—),男,河南省平顶山市人,郑州轻工业学院讲师,博士,主要研究方向为太阳能空调系统、辐射空调末端、建筑节能系统.

Abstract: In order to improve the cooling capacity of radiant cooling plate and the performance of the plate surface condensation, different water temperature, tube velocity and indoor relative humidity conditions were used as experimental study variables with the method of visual research on the established radiant cooling condensation system and the test platform of the change of thermal performance. The results showed that when the water flow rate increases from 40 L/h to 120 L/h, the cooling capacity increased nearly doubled and condensation time was reduced by 15 min; The indoor temperature and humidity was 26 °C, 75%, the first condensation time was 8 min; the cooling capacity of copper plate was stronger compared with PPR capillary tube radiation model; The state of dew condensation on the surface of the radiation plate was more disorganized with lower water temperature and amount of condensation. When the indoor temperature and humidity was 26 °C, 60%, the maximum size of water drops the length was 9.6 mm, the width was 8.8 mm on the surface of the radiant panel.

0 引言

目前毛细管辐射供冷末端的安装形式有两种^[1]:一种是直接将毛细管安装在结构抹灰层或装饰抹灰层;另一种是通过导热胶将毛细管固定在金属板上做成模块化的辐射板,靠辐射板向室内换热.两种形式都面临着辐射末端供冷能力不足,辐射末端易结露等问题的困扰,阻碍了辐射供冷技术的广泛推广^[2-4].

学者们在改善冷板结构,提高供冷能力和防结露方面作了不少研究.张顺波等^[5]通过改进含空气层冷辐射板冷冻水铜管与导热板的接触形式、减小空气层厚度,利用验证后的传热模型对冷辐射板进行分析和计算,使供冷能力分别提高了 36.92 W/m² 和 33.19 W/m²;辐射板表面最大温差几乎不变,抗结露能力良好.刘慧等^[6]建立了一种含空气层的新型模块化吊顶辐射板传热模型,用实验验证了模型的可靠性,对参数进行了优化处理,使辐射板供冷能力有很大提高;同时,提出了一个该类辐射板供冷能力的计算式,为这类辐射板的结构与运行分析提供了参考.王倩等^[7]通过实验与数值模拟研究了辐射供冷板表面温度变化情况与系统稳定阶段人体散湿的强度和位置对结露特性的影响.孔祥雷等^[8]针对辐射供冷系统中结露问题提出一种疏导结露辐射板模型,把凝结水通过槽道疏导至板边缘,集中回收.

研究者对于辐射板表面结露尺寸方面的研究较少,鉴于此,笔者拟通过可视化的研究方法,在室内温湿度可精确控制的条件下对模块化金属辐射板表面换热及结露特性进行实验研究,以期辐射供冷空调系统中结露问题的解决提供参考.

1 实验

1.1 实验环境

本实验在郑州轻工业学院焓差实验室进行,其系统原理如图 1 所示,实验室条件符合标准 GB/T 7725—2004, ISO 5151—1994 的要求.本实验选择在实验室的室外侧进行,室外侧实验室尺寸为 4.5 m × 4.0 m × 3.3 m,室外侧干球温度控制范围为 -15 ~ 55 °C,相对湿度控制范围为 40% ~ 92%,干球温度控制精度为 ±0.5 °C,湿球温度控制精度为 ±0.5 °C.

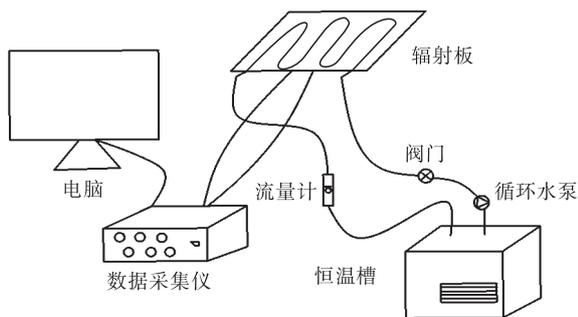


图 1 辐射供冷系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of radiant cooling system

1.2 实验设备

选用铝合金辐射板作为实验研究对象,毛细管模型采用导热性能优良的铜管,外径为6 mm,内径为5 mm,铜管辐射板模型尺寸为350 mm × 230 mm,管间距为20 mm,蛇形均匀布置(见图2)。将辐射板表面用铅笔划分成均匀的正方形小格子,尺寸为20 mm × 20 mm,以便观察金属板表面凝结露珠的分布规律与形态大小,并在辐射供冷板表面贴上参考标尺。采用JDC-1030恒温槽模拟制冷机制取恒温冷水,恒温槽温度控制范围为-5 ~ 80 °C,控制精度为±0.5 °C,工作槽容积为400 mm × 325 mm × 230 mm,自带循环水泵流量为6 L/min。

实验装置实物图如图3所示,通过流量计测得冷水流动速率,通过阀门控制毛细管内冷水的流动速率,连接一小型循环水泵,提供动力,其扬程为3.8 m,功率100 W。

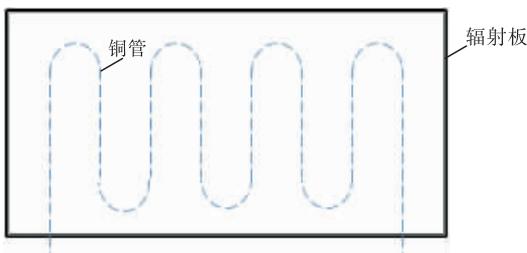


图2 辐射板结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of radiant panel structure



图3 辐射供冷系统实物图

Fig. 3 The practicality picture of radiation cooling system

1.3 数据采集装置

采用Keithley 2700数据采集仪和PT1000热电阻记录辐射板表面各个测点的温度变化,其精度为±0.1 °C,测试区域布置如图4所示,共有6个测试区域,在冷水进出口处也布置热电阻。采用微距摄像机拍摄图片,记录辐射板表面结露状态的变化。

1.4 实验内容

分别以冷水温度、冷水流量、室内温湿度等为单一变量,研究辐射板表面温度变化情况、换热和结露现象,分别记录结露时间,拍摄结露现象。

2 辐射换热过程与模型分析

2.1 辐射板供冷能力影响因素分析

辐射供冷冷量传递方式如图5所示,冷水将冷量传递给室内的过程可分为3部分。

1)冷水与铜管之间的对流换热过程。此过程的热阻记为 R_w , R_w 的大小与冷水的流速 v ,冷水的流态 R_e ,冷水的温度 T ,铜管的导热系数 λ 等因素有关。因此,用函数关联式可表示为 $R_w = f(v, R_e, T, \lambda)$,而 $R_e = \rho v d / \eta$,其中, ρ, η 分别表示流体的密度与黏度, d 为管道直径,参数 ρ, η, d, λ 与流体的物性和温度有关,故影响该过程换热热阻 R_w 的主要外界因素为冷水的温度 T 与速度 v 。故 $R_w = f(v, T)$ 。



图4 测试区域布置图

Fig. 4 Layout of the test area

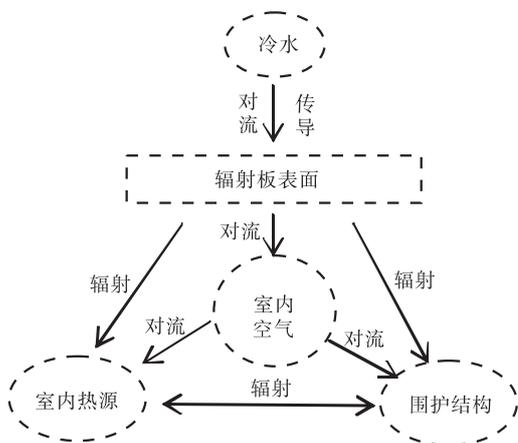


图5 辐射供冷末端冷量传递方式示意图

Fig.5 Schematic diagram of the heat transfer mode of radiant cooling

2) 铜管内外壁之间的导热过程,以及铜管外壁、导热胶、辐射板外表面之间的导热过程.将此过程的导热热阻记为 R_c , $R_c = R_1 + R_2 + R_3$, 其中 R_1 为铜管产生的热阻, R_2 为辐射板产生的热阻, R_3 为导热胶的热阻. 它们分别与铜管、辐射板、导热胶材料本身的物性有关.

3) 辐射板外表面与室内空气的对流换热过程,换热热阻记为 R_a , 同时辐射板外表面与室内其他围护壁面及人体之间的辐射换热过程,辐射换热热阻记为 R_r . 当辐射板表面未出现结露时,对流换热的热阻只同室内空气的流速和温度有关. 当辐射板外表面结露时,对流换热变为冷凝表面与室内空气的换热,此时增加了辐射板表面与冷凝水之间的导热过程,热阻影响因素包括冷凝水导热热阻.

2.2 铜管辐射板换热数学模型

1) 冷水与铜管管壁之间的对流换热过程

$$h_f = \frac{Nud_1}{\lambda_f}$$

$$q_f = \frac{T_p - T_{n1}}{\pi d_1 h_f}$$

式中, h_f 为管内强迫对流换热系数/ $(W \cdot (m^2 \cdot ^\circ C)^{-1})$, Nu 为努谢尔数, d_1 为毛细

管内径/ m , λ_f 为流体的导热系数/ $(W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1})$, q_f 毛细管单位管长换热量/ $(W \cdot m^{-1})$, T_p 为毛细管内流体平均温度/ $^\circ C$, T_{n1} 毛细管内壁温度/ $^\circ C$.

2) 铜管内外壁之间的导热过程

$$q_w = \frac{T_{n2} - T_{n1}}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}$$

式中, q_w 为铜管内壁与外壁的换热量, T_{n2} 为毛细管外壁温度/ $^\circ C$, λ 为铜管的导热系数/ $(W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1})$, d_2 为毛细管外径/ m .

3) 铜管外壁与辐射板下表面之间的导热过程

$$q_t = \frac{T_{n2} - T_d}{\frac{\delta}{A\lambda_2}}$$

式中, T_d 为金属板表面的平均温度/ $^\circ C$, δ 为沿导热方向金属板的厚度/ m , A 为沿垂直导热方向的面积/ m^2 , λ_2 为金属板的导热系数/ $(W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1})$.

4) 辐射板外表面与室内墙壁和人体之间的复合换热过程

$$q_z = q_c + q_r = 2.17(T_a - T_d)^{1.31} + 4.73 \times 10^{-3}(T_{sf}^4 - T_d^4)$$

式中, q_z 为单位面积辐射板与房间的换热量/ $(W \cdot m^{-2})$, q_c 为单位面积辐射板与室内空气的对流换热量/ $(W \cdot m^{-2})$, q_r 为单位面积辐射板与室内围护结构、物体表面和人体的辐射换热量/ $(W \cdot m^{-2})$, T_a 为室内空气的平均温度/ $^\circ C$, T_{sf} 为室内非辐射面的表面温度/ $^\circ C$.

2.3 辐射供冷表面水珠滴落物理模型分析

当辐射板表面温度低于室内环境露点温度或者室内温湿度突然增大时,辐射供冷板表面就会出现结露现象. 随着时间的推移,液滴在板表面凝结聚并,直到辐射板表面与液滴之间的表面张力不能承受液滴自身的重力,液滴会脱离辐射板表面. 辐射板表面产生的露珠呈现不规则形状,为了便于分析计算冷凝水的产生量,

提出以下几点假设:

1) 当液滴“悬”在顶板壁面时,其形状为球冠,球冠高 h ,球的半径为 R ,液固界面的脱离半径为 r ,表面张力与水平面的夹角为 θ ,即接触角为 θ ,如图 6 所示.

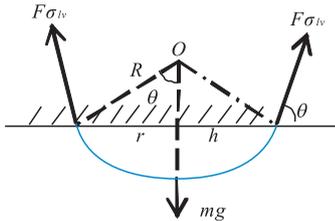


图 6 水平壁面下液滴的几何特性与受力特性
Fig. 6 Geometrical and mechanical characteristics of liquid droplets under horizontal wall

2) 不考虑室内风速的影响,液滴只受到表面张力与自身重力的作用. 受力分析后,由力的平衡原则可得水平壁面液滴的脱离半径^[9]为

$$r = \sin^2 \theta \sqrt{\frac{6F\sigma_{lv}}{\rho g(2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta)}}$$

由图 6 可得: $R = r/\sin\theta, h = R(1 - \cos\theta)$,

$V = \frac{1}{3}\pi h^2(3R - h)$, 由此可得单个液滴的质量:

$$m = \rho_l V = \frac{2\pi F\sigma_{lv} \sin^3 \theta}{g} \sqrt{\frac{6F\sigma_{lv}}{\rho g(2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta)}}$$

3 结果与讨论

3.1 辐射供冷板换热性能分析

每组实验测定时间均为 1 h.

3.1.1 管内冷水在不同流量下对辐射板换热性能的影响

焓差实验室温度设定为 26 ℃,相对湿度 60%,露点温度为 17.7 ℃,恒温槽内冷水温度为 13 ℃. 图 7 给出了单位面积供冷量与辐射板表面结露出现时间随管内冷水流量的变化情况. 从图 7 可以看出,冷水流量从 40 L/h 增加到 120 L/h,单位面积供冷量从 156 W/m² 增大到 289 W/m²,增加了将近 1 倍. 这是因为随着流量增大,冷水在管内的温度降低,辐射板表面与冷水温差增大,由 $q = \nabla T/R$ 可知换热

量增大. 因而,在辐射板表面“最冷区”出现结露时间由 35 min 左右降低到 20 min 左右,结露时间提前了 15 min.

不同流量下辐射板表面温度分布如图 8 所示. 从图 8 可以看出,随着管内冷水流量的增加,辐射板表面各个测试区域的温度呈现递减趋势,在管内冷水流量超过 100 L/h 时,各个测试区域温度曲线斜率变得平缓,温度降低幅度变小. 这是因为在流量达到足够大时,冷水与辐射板表面换热效率已达到最大状态,导热热阻成为影响铜管与辐射板传热的主要因素.

3.1.2 不同相对湿度对辐射板换热性能的影响

焓差实验室温度设定为 26 ℃,恒温槽内冷

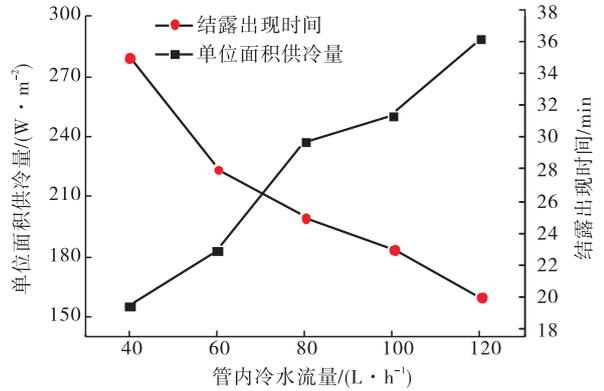


图 7 不同流量下供冷量与结露时间情况
Fig. 7 Cooling capacity and condensation time at different flow rate

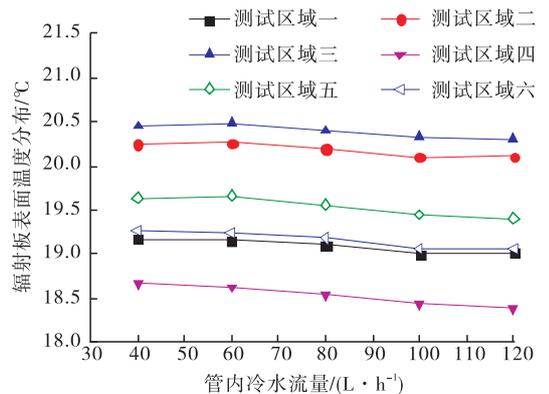


图 8 不同流量下辐射板表面温度分布
Fig. 8 Temperature distribution on radiant panel surface at different flow rate

水温度为 13 ℃,管内冷水流量为 100 L/h. 当室内相对湿度为 50% ~ 55% 时,辐射板表面未出现结露现象,这是由于辐射板表面“最冷区”温度高于室内露点温度,空气中水蒸气无法在板表面凝结,或者空气中的水蒸气在辐射板表面的凝结速率小于辐射板表面水滴气化成空气中水蒸气的速率. 而相对湿度从 60% 逐渐增加到 75% 时,辐射板表面“最冷区”出现结露所需时间逐渐减少,最少为 8 min. 这是因为在辐射板表面的特性与温差相同的情况下,空气中的水蒸气分压力不断增加,辐射板表面凝结成水珠的速率就不断增加,进而就越早在冷板表面出现结露现象,其变化图形如图 9 所示.

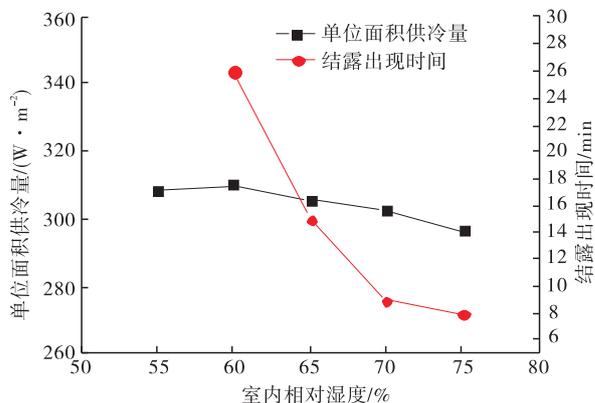


图 9 不同相对湿度下供冷量及结露时间

Fig. 9 The cooling capacity and condensation time under different relative humidity

随着室内相对湿度的增加,辐射板供冷能力先增加后降低,这是由于刚开始辐射板表面凝结的液滴呈珠状,相当于形成了凸起结构,增大了辐射板表面积,因此换热量增大,随着室内相对湿度的继续增大,液滴在辐射板表面呈膜态凝结,换热面积没有改变,相当于增加了水膜这层导热热阻,进而造成换热量的降低. 从图 10 不同相对湿度下辐射板表面温度分布中也可以看出,随着相对湿度的增大,辐射板表面各测试区域温度先减小、后增大,也是由于辐射板表面出现结露现象引起的.

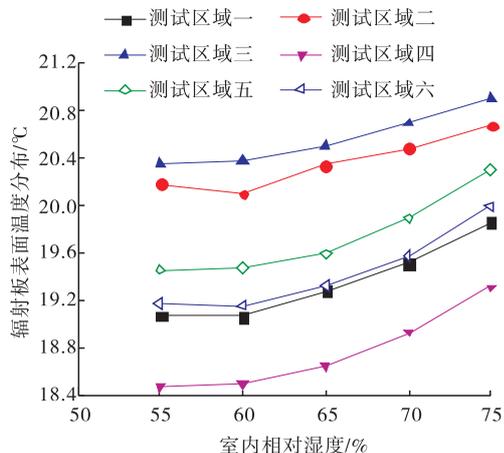


图 10 不同相对湿度下辐射板表面温度分布

Fig. 10 Temperature distribution on radiant panel surface at different relative humidity

3.1.3 不同冷水温度对换热性能的影响及与 PPR 管的对比 焓差实验室温度设定为 26 ℃,相对湿度为 60%,冷水流量为 100 L/h. 随着恒温槽内冷水温度的逐渐升高,辐射板表面各测试区域温度也逐渐升高,其图形近似为一次函数.

不同冷水温度下供冷量及结露时间情况见图 11. PPR 毛细管模型供冷量随冷水温度的变化见图 12^[10]. 从图 11 与图 12 的对比中可以看出,铜管辐射板单位面积的供冷量远大于 PPR 毛细管的供冷量,这是由于铜管的导热能力较 PPR 管强,且铜管的内径为 5 mm,PPR 毛细管内径为 2.7 mm,在同一流速下,铜管冷水流量更大,换热能力更强.

3.2 辐射板表面结露特性研究

实验过程中,辐射板表面生成的水珠呈不规则形状,为了便于分析辐射供冷末端冷凝水滴的生长及滴落情况,结合实验现象,本文做出如下假设: 1) 辐射板表面产生的水珠近似看成半个椭球型,其尺寸结构^[10]如图 13 所示; 2) 由于辐射板表面温度分布极不均匀,不同区域水珠生成大小相差较大,所以以“最冷区”最大水珠的生长情况作为分析不同温湿度下辐射板表

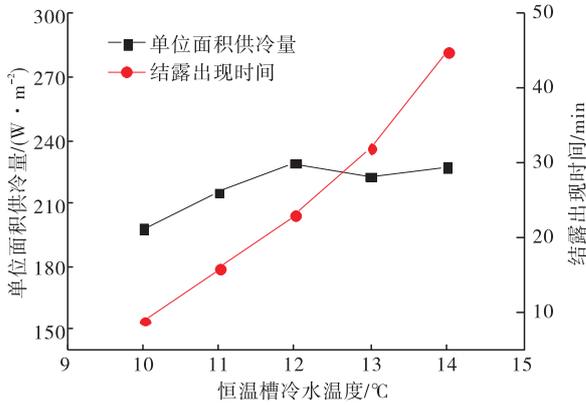


图 11 不同冷水温度下供冷量及结露时间情况
Fig. 11 Cooling capacity and condensation time under different water temperatures

焓差实验室内温度设定为 26 ℃,相对湿度 60%,管内流量 100 L/h,恒温槽内冷水温度分别设定为 14 ℃,12 ℃,10 ℃,8 ℃,6 ℃.采用 E-ruler 软件,参照照片中的标尺,在每组温度实验进行 2 h 时拍摄的照片中测定冷凝水滴的尺寸.结果显示恒温槽内冷水温度越低,冷凝水水珠的长度、宽度越大.

3.2.1 不同水温下的结露特性 不同冷水温度下 2 h 后辐射板表面结露情况见图 14.从图 14 中可以看出,随着冷水温度的降低,2 h 后,辐射板表面出现的露珠变多、变大,表面水珠的紊乱程度也越明显,尤其是当冷水温度为 6 ℃ 时,辐射板表面水珠呈现极其不规则的形态,且在该温度下水珠长度、宽度增长幅度很大.这是由于辐射板表面多个密集区域的温度与露点温度相差较大,该区域大面积范围内发生凝结聚并,因此形成的水珠尺寸较大.

3.2.2 不同时间下的结露特性 图 15 给出了恒温槽冷水温度为 8 ℃ 时,辐射板表面“最冷区”最大水珠尺寸随时间的变化情况.曲线显示最大水珠的长度有两次降低过程:第 1 次降低是因为随着露珠本身质量的不断增加,液滴出现“下坠”现象,由于辐射板并不是完全水平吊置,水珠发生侧向滑移,进而液滴与辐射板表面的接触尺寸,在长度上变小;第 2 次降低是由于液滴的质量增大到一定程度时,欲滴落的那一部分水珠的重力大于液滴间的分子作用力,因此,最大水珠发生部分脱落,水珠的宽度也减小了,此刻水珠的最大长度为 9.6 mm,宽度为 8.8 mm.

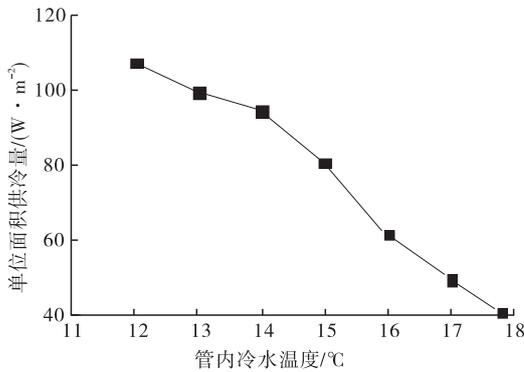


图 12 PPR 毛细管模型供冷量随冷水温度的变化
Fig. 12 Cooling capacity of capillary model PPR under different water temperatures

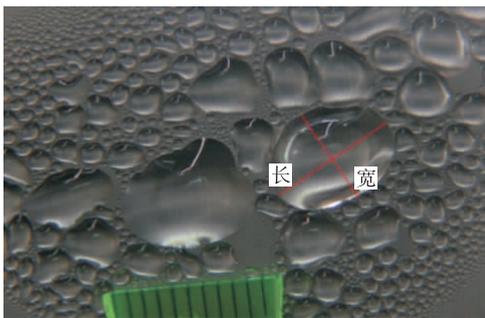
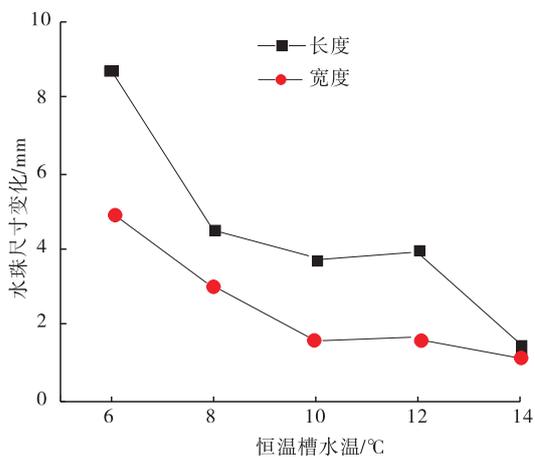


图 13 辐射板表面水珠尺寸结构
Fig. 13 The size structure of water on radiation plate surface

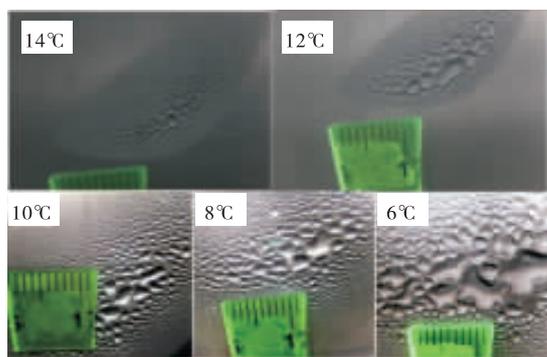
面结露性能的依据.

每组实验测定时间为从辐射板表面未出现液滴到辐射板表面有液滴滴落的时间.

图 16 给出了恒温槽冷水温度为 6 ℃ 时,辐射板表面“最冷区”凝结水珠在实验开始 1 h, 2 h,3 h,4 h,5 h 后的变化状态.可以看出在 1 ~ 3 h 内辐射板表面出现部分水膜区域,在 4 h 后,聚并而成的最大液滴,即将滴落;5 h 后,液滴从中间断开滴落,而不是整个液滴脱离辐射



a) 最大水珠结构尺寸变化曲线图



b) 辐射板表面结露记录照片

图 14 不同冷水温度下 2 h 后辐射板表面结露情况

Fig. 14 The condensation situation on radiation plate surface under different temperatures after 2 h

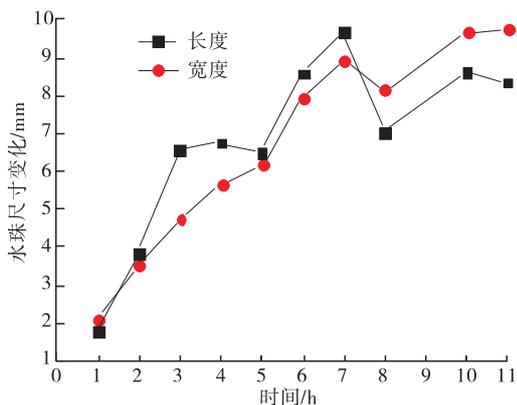
板表面.

4 结论

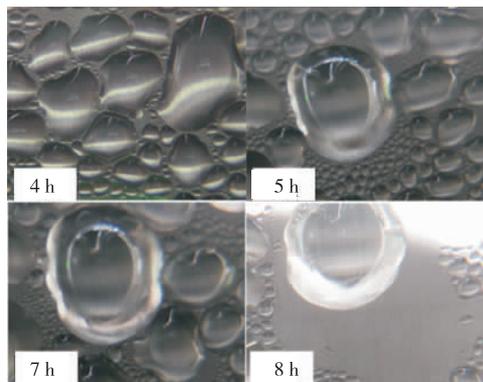
通过搭建辐射供冷系统结露和换热性能实验平台,分析辐射换势过程与数学、物理模型,对铜管辐射供冷板换热和结露特性的研究结论如下.

1) 随着管内冷水流量的增加,辐射板供冷能力增大,辐射板表面容易出现结露现象,冷水流量从 40 L/h 增加到 120 L/h,供冷能力增大了将近 1 倍,结露时间提前了 15 min.

2) 在室内环境温度为 26 °C,相对湿度为 75% 时,辐射板表面“最冷区”出现结露现象最快,为 8 min 左右;随着室内相对湿度的增大,



a) 最大水珠结构尺寸变化曲线图



b) 辐射板表面结露记录照片

图 15 冷水温度为 8 °C 时,辐射板表面最大水珠尺寸变化情况

Fig. 15 The maximum size change of the water droplet on radiation plate surface at 8 °C

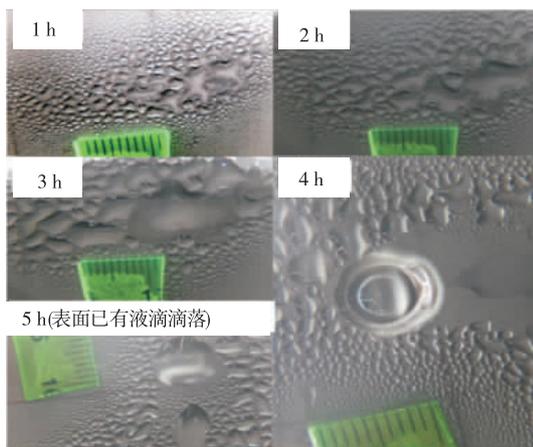


图 16 冷水温度为 6 °C 时,辐射板表面水珠生长滴落进程

Fig. 16 The growth process of the water on radiation plate surface at cold water temperature 6 °C

辐射板供能力的大小与板表面的凝结水珠存在的状态有关,膜状凝结时供冷量降低,珠状凝结时,供冷量增加。

3)铜管辐射板与PPR毛细管模型相比,具有更强的供冷能力。

4)同一时间内,供水温度越低,辐射板表面凝结的露珠存在的状态越紊乱,结露量也越多;在冷水温度为8℃,室内环境温度为26℃,相对湿度60%时,水珠在辐射板表面的最大尺寸为长9.6 mm,宽8.8 mm。

参考文献:

- [1] 中国建筑工业出版社. JGJ 142—2012 辐射供暖供冷技术规程[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2013.
- [2] 袁玉洁,隋学敏,侯博. 辐射供冷空调防结露机理及相关技术分析[J]. 建筑热能通风空调, 2016, 35(4):51.
- [3] 刘前龙,傅允准. 毛细管辐射加独立新风系统供冷性能实验研究[J]. 实验技术与管理, 2015(7):58.
- [4] 郑松,宣永梅,王海亮. 辐射供冷系统结露问题的研究现状[J]. 制冷与空调:四川, 2012(4):399.
- [5] 张顺波,宁柏松,陈友明,等. 含空气层冷辐射板的改进及供冷和抗结露性能分析[J]. 制冷学报, 2015(5):94.
- [6] 刘慧,宁柏松,陈友明,等. 一种新型辐射板供冷能力分析 with 优化[J]. 科学技术与工程, 2015(24):79.
- [7] 王倩,金梧凤,于志浩. 辐射吊顶空调系统中结露特性的数值研究[J]. 绿色科技, 2015(2):267.
- [8] 孔祥雷,张东辉,张小松. “疏导结露”型辐射冷板的设计与分析[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2011, 25(5):440.
- [9] 孔祥雷,张东辉,赵忠超,等. 壁面液滴脱落和滑落直径的估算[C]//中国工程热物理学会2010年传热传质学学术会议,上海:[出版社不祥], 2010.
- [10] YIN Y L, WANG R Z, ZHAI X Q, et al. Experimental investigation on the heat transfer performance and water condensation phenomenon of radiant cooling panels[J]. Building & Environment, 2014, 71(1):15.