

文章编号: 1671-6612 (2023) 04-495-08

# 导湿织物对间接蒸发 冷却器亲水性和热性能影响的实验研究

吴同 曹莉敏 吕欣 陈奕

(集美大学海洋装备与机械工程学院 厦门 361021)

**【摘要】** 为了提高间接蒸发冷却器湿通道的亲水性和蒸发速率, 避免局部干点或水膜过厚的问题, 提出将导湿织物敷设于湿通道的壁面, 研究了其亲水性和热性能。亲水性实验首先测定了织物的芯吸高度和湿扩散速率, 再通过搭建芯体布水实验台, 并采用数字图像处理法, 研究了喷淋时间 (5s~180s)、喷淋流量 (2L/min~6L/min) 以及喷嘴高度 (50mm~250mm) 对芯体中三个典型位置的敷布铝板表面润湿率的影响。利用导湿织物的保水性, 探究了间歇喷淋下 (喷淋 15s, 间隔 15min) 湿通道的热性能。结果显示: 随着喷淋时间、喷淋流量、喷淋高度的增加, 边缘板的润湿率显著增加, 之后达到稳定。在喷射角为  $58^\circ$ 、喷淋流量为 5L/min、喷淋高度为 100mm~150mm 的工况下, 芯体喷淋 30 秒后可达到完全润湿。间歇喷淋下出口温度和壁温均呈周期性变化, 性能系数 (COP) 是连续喷淋下的 6.52 倍。说明导湿织物配合间歇喷淋可以显著改善湿通道亲水性并大幅提升能效。研究结果对亲水型间接蒸发冷却器的高效运行和设计具有一定的指导意义。

**【关键词】** 间接蒸发冷却器; 导湿织物; 湿扩散; 润湿率; 间歇喷淋; 性能系数

中图分类号 TB657.5 文献标识码 A

## Experimental Study of Effects of Moisture-conducting Fiber on Hydrophilic and Thermal Performance of Indirect Evaporator Cooler

Wu Tong Cao Limin Lv Xin Chen Yi

(School of Marine Equipment and Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen, 361021)

**【Abstract】** To improve the hydrophilicity and evaporative rate of the wet channels of an indirect evaporative cooler (IEC), and avoid the problems of local dry regions and thick water film, the hydrophilic and thermal performance of an IEC with moisture-conducting fabric attached to the wet walls are studied. In the experiment of hydrophilicity, the wicking height and diffusion rate were firstly tested. Then, the influences of spray time (5s~180s), spray flow rate (2L/min~6L/min) and nozzle height (50mm~250mm) on the surface wetting rate of the coated aluminum foil at three typical positions in the core were studied by setting up a core water distribution experimental platform and combing with digital image processing. Owing the water storage of fabric, the thermal performance of wet channels under the intermittent spray (spray period: 15s, interval: 15min) was investigated. The results show that with the increase of spray time, spray flow rate and spray height, the wetting ratio of the outmost plates

基金项目: 福建省自然科学基金 (2021J05165); 集美大学引进高层次人才科研启动基金 (ZQ2021013); 集美大学大学生创新项目 (2022xj149)

作者简介: 吴同 (2002-), 女, 在读本科生, E-mail: 202021133037@jmu.edu.cn

通讯作者: 陈奕 (1988-), 女, 博士, 副教授, E-mail: cheniyi0511@jmu.edu.cn

收稿日期: 2023-03-01

surface increases obviously and then reaches a steady state. Under the conditions of spray angle of  $58^\circ$ , spray flow of 5L/min and spray height of 100mm-150mm, the core reaches fully wet after 30s spraying. The outlet air and surface temperatures vary periodically, and Coefficient of Performance is 6.52 times of that under continuous spraying, indicating that the fabric can greatly enhance the wettability and improve the energy efficiency. The research results provide references for the design and operation of a hydrophilic IEC.

**【Keywords】** Indirect evaporator cooler; Moisture-conducting fiber; Moisture diffusion; Wetting ratio; Intermittent spray; Coefficient of Performance

## 0 引言

间接蒸发冷却技术是工作空气与循环水在湿通道侧直接接触后,经过蒸发冷却降温,再间接地通过换热器带走一次空气中的热量,从而对一次空气进行等湿降温的技术<sup>[1]</sup>。它利用水的蒸发吸热制冷,可以较好利用自然冷能,相较于传统的机械压缩式制冷技术,更加环保、节能、经济、高效<sup>[2]</sup>。间接蒸发冷却技术积极响应了国家的“双碳”政策,广泛应用于数据中心和各种公共建筑中,取得了良好的节能减排效益。由于间接蒸发冷却器依赖于水在湿通道中蒸发吸热实现冷却相邻干通道内的一次空气,因此,冷却器湿通道的亲水性及其蒸发速率对整机的冷却效率和性能有重要的影响。

湿通道的材料会显著影响壁面的润湿性和蒸发性能。目前采用的芯体材料主要包括聚丙烯高分子、亲水改性的高分子、金属铝箔和涂有亲水涂层的金属铝箔,其接触角在  $40^\circ$  至  $90^\circ$  以上,亲水性能还有待提高<sup>[3]</sup>。应用传统芯体材料不可避免出现局部干点或局部水膜过厚的问题,干点的存在易于水垢的形成,甚至在铝箔表面形成穿孔,影响了使用寿命。过厚的水膜增大了传热热阻和风速,使得冷却器效能降低。因此,各类新型亲水材料的特性和应用成为近年来间接蒸发冷却器的研究热点,也是其能效提升的重要途径之一。褚俊杰等<sup>[3]</sup>采用测试接触角、喷雾布水、喷淋布水等方法,研究间接蒸发冷却器高效换热材料的亲水性与布水均匀性。结果表明:材料亲水性较优顺序依次为植物纤维聚合物材料、金属铝箔材料、聚丙烯高分子材料。屈明勋等<sup>[4]</sup>针对涂有亲水涂层金属铝箔材料制成的间接蒸发冷却换热芯体,在不同的试验环境、不

同的二/一次风量比下进行试验,结果表明:涂有亲水涂层的金属铝箔换热芯体在过渡季节工况下,其湿球效率可达 63.1%,高温工况下可达到 64.13%。

湿通道的润湿性除了材料的选用,还与布水系统息息相关。林勇军等<sup>[5]</sup>通过试验探究了二次空气通道布水系统对板式换热器性能的影响。试验结果表明:随着气水比增加,板式换热器的换热效率先提升后降低,当气水比为 5.76 时,板式换热器的换热效率达到最佳值 0.61。板式换热器的换热效率随着喷淋密度的增大(喷淋密度 $\leq 0.83\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ )和喷淋水温的降低而提升。贺红霞等<sup>[6]</sup>研究布水形式与存水对露点间接蒸发冷却器换热效率的影响。结果表明,露点间接蒸发冷却器的喷淋布水形式采用螺旋形喷嘴效果较好,布水均匀性较高。文献和市场调研显示:目前的布水方式主要包括喷淋和喷雾布水,其性能稳定,价格适宜。但常规的铝箔和高分子塑料芯体依赖于持续喷水形成的连续水膜,以维持蒸发效率。另外,水泵的连续运行一方面浪费能源,另一方面难以避免水滴被高速的工作空气携带排出,造成耗水量的增加。因此,在保证均匀且完整水膜的前提下,使用间歇喷淋代替连续喷淋,可实现节水节电的精确布水,进一步提升机组能效,引起越来越多的研究关注。金洋帆等<sup>[7]</sup>利用搭建的板式间接蒸发冷却器试验台,对间歇性和连续性的布水方式的换热性能进行了对比试验,并分析了间歇性和连续性喷淋对均匀布水的影响因素。结果表明,淋水密度随着喷淋水压力的增大而增大,但增长幅度下降,且趋于平缓;当连续性与间歇性布水的湿球效率仅相差 0.4%时,连续性布水

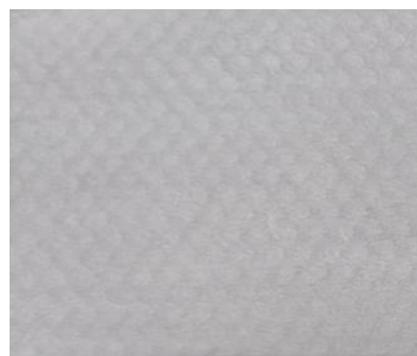
的淋水密度却是间歇性布水的 50 倍。王鑫等<sup>[8]</sup>采用吸水性较好的新型多孔陶瓷材料制作管式间接蒸发冷却器, 实现间接蒸发冷却器的间歇性布水, 缩短循环水泵运行时间。

现有的研究主要是通过采用亲水性芯体材料和改善布水系统来提高间接蒸发冷却器性能。虽然很多亲水材料(包括: 植物/人造纤维、亲水涂层、多孔陶瓷等)对提高冷却效率的效果已被证实, 但导湿织物以低廉的价格和优良的性能得到了最广泛的研究关注<sup>[9]</sup>。但关于导湿织物的相关研究均集中在织物本身的湿传递性能测试上, 而对不同喷淋参数下, 湿通道内部的润湿特性还有待深入的研究。因此, 本研究针对敷设导湿织物的铝箔芯体, 利用织物的保水性实现间歇喷淋, 节省水泵能耗、减少耗水量、减小传热热阻, 提高系统性能系数。通过搭建可视化的芯体布水实验台, 在各种布水参数下, 利用图像处理技术研究了芯体内部的润湿特性, 并对间歇喷淋策略下, 湿通道的热性能进行了探究。

本研究首先测定了导湿织物的芯吸高度和水平湿扩散率。其次, 研究了喷淋时间(5s~180s)、喷淋流量(2L/min~6L/min)以及喷嘴高度(50mm~250mm)对附有导湿织物的铝箔板芯体水分布和润湿率的影响规律, 从而得到喷淋系统推荐的设计参数。最后, 在间歇喷淋下(喷淋 15 秒, 间隔 15 分钟), 对冷却器的出口温度和性能系数(COP)进行测试, 并与连续喷淋对比分析。本研究旨在为亲水型的间接蒸发冷却器的设计和运行提供一定的参考, 并为相关的研究提供新的方法。

## 1 导湿织物的湿扩散性能

本实验中采用的导湿织物(以下称珍珠布)由 70%的尼龙人造丝加 30%的聚酯纤维构成。经测定, 其厚度为 0.4mm, 比重是 120g/m<sup>2</sup>, 干工况下导热系数为 0.0674W/m<sup>2</sup>·K, 完全润湿工况下导热系数为 0.3W/m<sup>2</sup>·K。实物照片和光学显微照片(放大 62.5 倍)如图 1 所示。



(a) 实物照片



(b) 显微照片

图 1 导湿纤维的实物照片及显微照片

Fig.1 Physical photo and micrograph of moisture-conducting fiber

### 1.1 芯吸高度

芯吸高度反映了导湿织物垂直方向的湿传递性能。织物芯吸性能按照 FZ/T01071-2008《纺织品毛细效应试验方法》标准进行实验。将导湿织物沿经、纬向裁成宽度为 30mm, 长度为 250mm 的条形试样, 将试样一端用架子固定在水平管上, 使试样下端浸于稀释过的墨水液面下方(15±2)mm 处, 由直尺读出不同时间下的芯吸高度并记录。实验热湿环境由干湿球温度计记录(干球温度 27℃, 湿球温度 23℃, 相对湿度 71.46%)。实验进行三次, 取平均值为最终结果。如图 2 为实验装置的照片, 材料的芯体高度以及与其他文献的对比如图 3 所示。随着时间的增加, 珍珠布的芯吸高度逐渐上升, 无论是增长幅度还是增长速度, 均一直高于与之相比的纯棉织物与 Coolmax 织物<sup>[10]</sup>, 30 分钟后的芯吸高度为 18cm。牛皮纸材料、无纺布材料、聚酯纤维材料 30 分钟内的芯吸高度均在 10 厘米以内<sup>[11]</sup>。

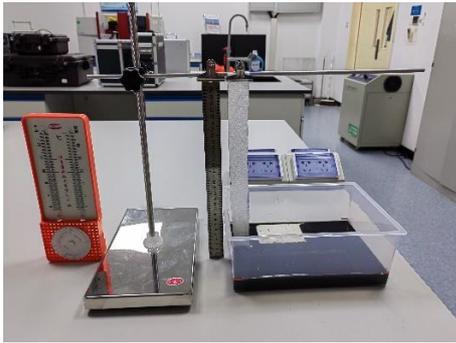


图2 芯吸高度实验装置

Fig.2 Experimental setup of wicking height

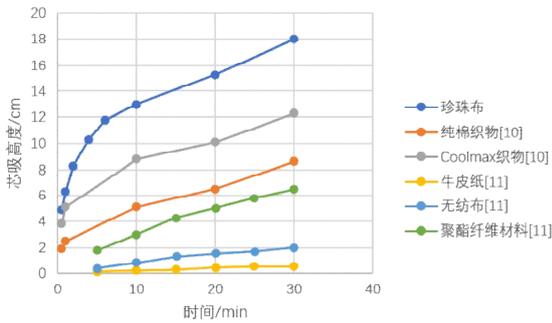


图3 芯吸高度以及与其他文献的对比

Fig.3 Wicking height and comparison with other literature

1.2 水平湿扩散速率



图4 水平湿扩散速率实验装置

Fig.4 Experimental setup of horizontal diffusion rate

如图4为水平湿扩散速率的实验装置。根据GB/T21655.1 纺织品吸湿速干性能评定系列(二)测定滴水扩散时间。将珍珠布样品裁剪成直径为100mm的圆形,放在测试台上,在上面均匀选取五个测点,在每个测点上分别滴0.2mL的液体,记录扩散到最大面积的时间和扩散面积,计算单位时间扩散的面积,重复三次实验。得到的平均扩散时间越短,说明材料的表面液滴扩散越快,材料亲水

性越好。湿扩散速率以及与其他材料的对比见表1,可见珍珠布的扩散时间远低于聚合纤维材料,低于聚酯纤维材料,高于Coolmax纤维,但由芯吸高度试验可知,其芯吸性能比Coolmax材料好。最后计算得到珍珠布的扩散平均速率为1.028cm<sup>2</sup>/s。

表1 不同材料扩散时间

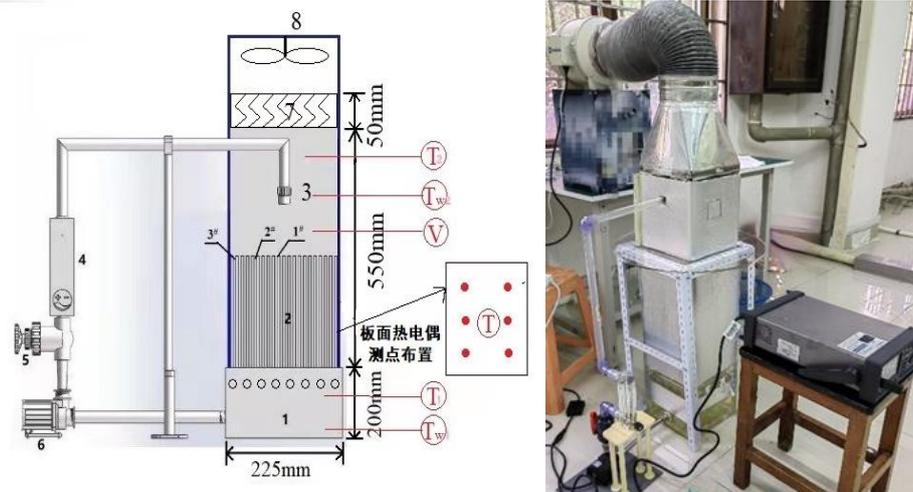
Table 1 Diffusion time of different materials

材料	珍珠布	Coolmax 纤维 [11]	聚合物纤维材料 [11]	聚酯纤维材料 [11]
扩散时间 (秒)	15.4	2~3	78.56	28.06

2 实验装置

2.1 蒸发冷却器实验台

芯体布水实验台由包裹一层保温棉的透明亚克力外壳、可抽取的敷布铝箔板、实心锥喷嘴、布水系统、风机、挡水板、测量仪器和高清摄像机组成,原理图和实物图如图5所示。表2列出了实验台的尺寸规格以及主要设备材料表。喷淋试验的芯体材料为敷有珍珠布的铝箔板,芯体外壳的两个侧面各开有20个平行的条缝型槽口可供敷布板穿插和抽取,以喷嘴所在位置为中心左右对称布置。在整个装置的最上方布置风机,通过管道使风从下到上贯穿整个装置,在管中截面用风速测量仪测量风速。风速仪的型号为testo405-V1,量程为0~10m/s,精度为±(0.3m/s+5%测量值)。喷淋高度指的是从喷嘴到实验板面最上沿的垂直距离,实验中用钢直尺测量,钢直尺的分度值为1mm。温度测量采用K型热电偶,测量范围-200℃至260℃,测温精度±0.5℃。数据由是德科技DAQ970A数据采集仪自动采集,采样频率10秒。空气进、出口干湿球温度、板面温度的测点布置如图5所示。其中,进、出口湿球温度是用湿纱布包裹热电偶测得,板面温度由在中心板上均匀布置的6个测点测得。测试前各传感器、仪表均经过校正。实验选取了三个典型位置研究其板面的喷淋布水分布情况,标记为1#、2#、3#,分别对应中心、距中心1/4处和最边缘处。实验采取单因素研究法研究不同喷淋时间、喷淋流量和喷淋高度对板面布水分布的影响,各研究工况的参数及取值如表3所示。



1: 水箱; 2: 芯体外壳; 3: 喷嘴; 4: 转子流量计; 5: 阀门; 6: 水泵; 7: 挡水板; 8: 风机; 1#: 1号板; 2#: 2号板; 3#: 3号板

图 5 蒸发冷却实验台原理图及实物图

Fig.5 Schematic diagram and photo of the evaporative cooling test rig

表 2 实验台主要部件的规格和尺寸

Table 2 Specifications and dimensions of the main components in the test rig

喷嘴类型	喷嘴孔径	螺纹	喷射角:
喷嘴	实心锥形喷嘴	3分	2L/min: 49.05° ; 3L/min: 53.18° ; 4L/min: 55.59° ; 5L/min: 57.83° ; 6L/min: 62.34°
水箱尺寸	225mm (长) × 225mm (宽) × 200mm (高) (10mm 厚亚克力板)		
芯体外壳	225mm (长) × 225mm (宽) × 400mm (高) (10mm 厚亚克力板)		
芯体	敷有珍珠棉的铝箔板 (240mm × 200mm × 4mm), 共 20 块		
转子流量计	顺来达 LZM-15T (量程: 2-18LPM 精度: ±4%)		
风机	鸿冠 HF-150PE 节能变频管道风机 (风量: 530m³/h, 全压: 350Pa, 额定功率: 50W)		
水泵	中科世纪 DC55E-24160VR 直流增压变频潜水泵 (流量: 40L/min, 扬程: 16m)		
卡槽尺寸	卡槽高度	卡槽厚度	相邻卡槽的间距
	190mm	4mm	6.05mm
			卡槽总数
			20*2 个

实验前, 先调节水泵变频器和阀门, 使喷淋流量达到设定值 (由转子流量计测量)。再将 20 块铝箔板依次插入对应的卡槽中, 打开风机, 根据表 3 设定参数开启水泵, 并用秒表计时。喷淋结束后, 小心地取下 1#、2#、3# 位置的敷布板, 用高清相机拍摄完整的板面布水分布图像。最后, 将拍摄的图像传输到计算机中, 通过 Matlab 程序进行数字图像处理, 得到二值化图像和量化的水膜覆盖率。

2.2 图像及数据处理方法

实验采用二值化图像处理技术。本研究利用了最大类间方差法自动寻找读取图片的合适阈值, 经二值化处理后最终得到水痕为白色, 干斑为黑色的二值化图片, 以便进一步对润湿区域数据进行提取。用 Matlab 程序进行整张图片的像素计算, 统计白色像素点的总量占比, 最后用白色区域的像数总量除以整个区域内的像素总量, 即可得到敷布板的润湿率。

2.3 参数设定

实验的运行参数设定如表 3 所示。

表 3 实验的运行参数及取值

Table 3 Operation parameters and setting values of the experiment

研究参数	取值		
	喷淋时间 (秒)	喷淋流量 (L/min)	喷嘴高度 (mm)
喷淋时间	5、15、30、60、180	5	150
喷淋流量	30	2、3、4、5、6	150
喷嘴高度	30	5	50、100、150、200、250
间歇喷淋	15 (间隔 15min)	5	150

### 3 结果与讨论

#### 3.1 不同喷淋时间下润湿率

不同喷淋时间下的润湿率如图 6 所示。由图可见, 1#、2#板在 5 秒内可以被全部润湿, 布水效果佳, 3#板的润湿率在 30 秒内, 从 0.343 上升到 0.9913, 在 30 秒后可实现完全润湿。这是由于在一定的流量下喷嘴中心的密度大于远端, 且板面之间互相遮蔽, 使处于较边缘的 3#板难以被润湿。随着喷淋时间的增加, 三块板在 30 秒后均达到布水稳定。

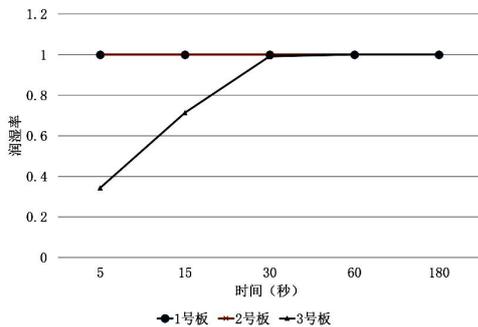


图 6 润湿率随喷淋时间的变化

Fig.6 Wetting ratio variation with spray time

#### 3.2 不同流量下润湿率

不同喷淋流量下的板面二值化图像和润湿率分别如图 7 和图 8 所示。

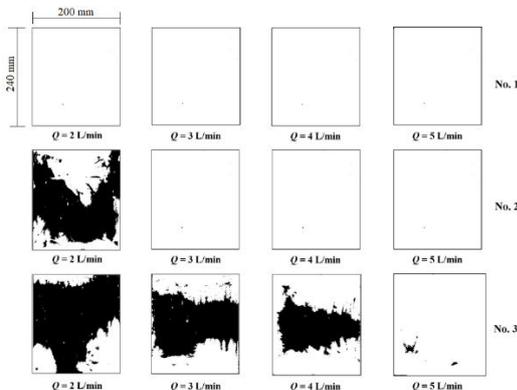


图 7 不同流量下的二值化图像

Fig.7 Binary images under different flow rate

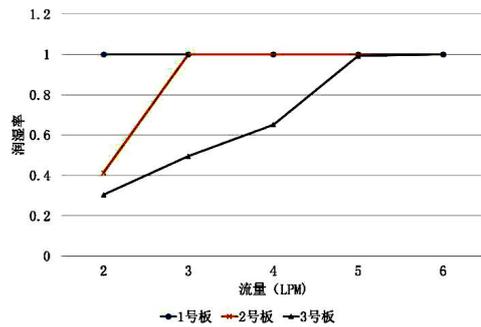


图 8 润湿率随流量的变化

Fig.8 Wetting ratio variation with flow rate

由图 7 可见, 所有板面都存在上边缘基本润湿, 下部靠两侧基本润湿的情况。这是由于敷布板间的距离很窄, 湿通道宽度仅有 5mm, 板面之间会相互遮蔽, 而喷淋的水雾会较为容易地接触到板面上边缘, 然后汇集成水流在重力和导湿织物的芯吸作用下, 将水分扩散传递到下部。此外, 由于边壁的亚克力外壳也被水润湿并呈股流下, 板面两侧边缘处会在芯吸作用下自下而上被浸湿。

由图 8 可见, 在喷淋流量为 2L/min 时, 1#板已全部润湿, 而 2#板和 3#板皆是随着喷淋流量的增大, 润湿率逐渐增加, 其中 2#板在流量为 3L/min 的时候已实现全部润湿, 3#板在流量为 5L/min 的时候实现全部润湿。这是由于随着喷淋流量的变大, 喷嘴出口压力增加, 喷嘴的喷射角也随之增加 (流量为 2L/min 时喷射角=49.05°, 流量为 5L/min 时喷射角=57.83°)。由图 8 可看出, 当喷淋流量为 5L/min 时, 三块板的润湿率均达到最高。

#### 3.3 不同喷淋高度下润湿率

不同喷淋高度下的板面二值化图像和润湿率分别如图 9 和图 10 所示。

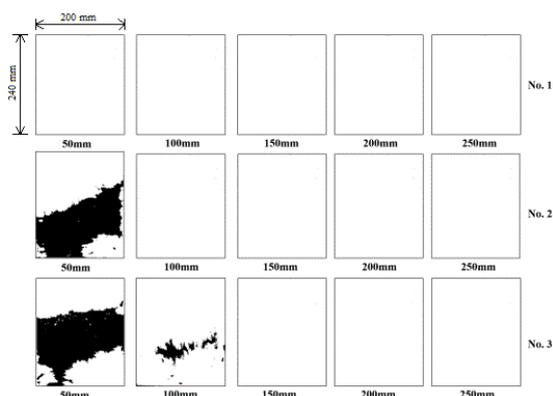


图 9 不同喷淋高度下的二值化图像

Fig.9 Binary images under different spray height

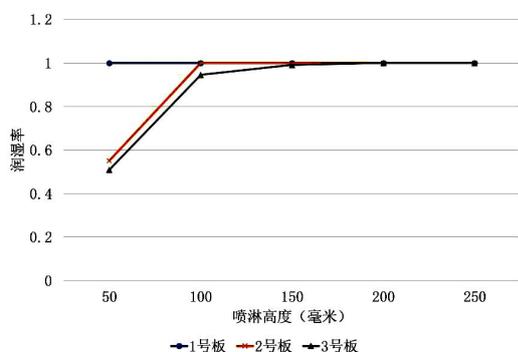


图 10 润湿率随喷淋高度的变化

Fig.10 Wetting ratio variation with spray height

由图可得, 位于喷嘴正下方的 1#板润湿率基本不受高度影响, 始终可被全部润湿。而 2#板和 3#板的润湿率在起初仅约 50%, 随喷淋高度的增加而增大: 2#板在喷淋高度为 100 mm 时实现全部润湿, 3#板的润湿率在此高度接近 95%, 而在喷淋高度为 150mm 时基本全部润湿。当喷嘴高度仅为 50mm 时, 喷淋水出口离铝箔板上端面很近, 由于喷射角的限制, 直接喷射到 2#和 3#板上的淋水较少, 主要靠击打在有限区域的板的上端反弹至较远的通道内。随着喷淋高度的增加, 各板润湿率逐渐增大, 在喷淋高度为 100~150mm 时达到最大。

### 3.4 间歇喷淋下热性能

在间歇喷淋下, 对冷却器的进出口的干球温度和湿球温度以及风量进行了采集, 并计算了性能系数 (COP)。实验中湿通道风速为 2m/s, 喷淋流量为 5L/min, 喷嘴高度为 150mm。布水采用喷淋 15 秒, 间隔 15 分钟的策略, 并循环了 4 次。

由图 11 和 12 可知, 进口干湿球的温度基本不变, 分别在 26.7 度和 22.3 度附近小幅波动, 而出

口干湿球温度及敷布板上各测点的温度随着水泵开启和暂停的时间周期性地变化。由于水温较高, 每次喷淋后, 板面各温度会上升, 受环境温度和板面水分蒸发吸热的影响, 测点温度会迅速下降, 之后进入稳定状态, 直至水泵再次开启, 打破热平衡。在每个布水周期的稳定状态下, 出口的干球温度相比进口干球温度降低了约 4℃, 保持在 22.5℃~23.0℃之间波动。整体来看, 每次淋水后温度回升的幅度依次下降, 这是因为水在实验过程中受环境影响逐渐冷却。该实验结果显示, 导湿织物在完全润湿的状况下关闭喷淋系统, 在 15 分钟内依然可以保持良好的蒸发冷却效果, 将送风温度维持在 0.5℃ 的小幅波动范围。

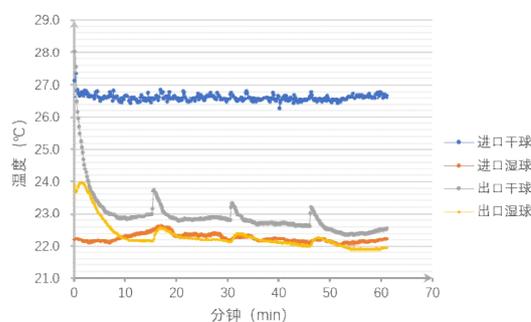


图 11 进出口干湿球温度

Fig.11 Dry-bulb and wet-bulb temperatures at inlet and outlet

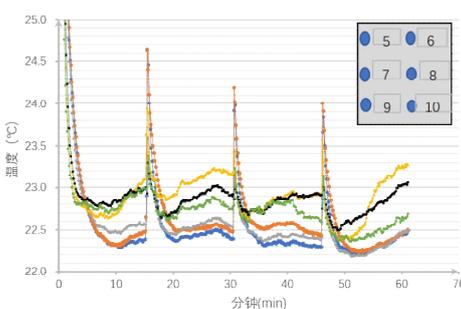


图 12 敷布板上各测点温度

Fig.12 Temperature of each measuring point on the coated plate

经计算, 该实验工况下空气的质量流量为 0.048kg/s, 4 个周期的总制冷量为 178.82Wh, 运行总时长为 0.975h, 风机能耗为 6.34Wh。间歇喷淋下, 水泵能耗 0.71Wh, COP 为 25.38。若持续喷淋, 水泵能耗 39.67Wh, COP 为 3.89。对比可见, 间歇喷淋工况下可大幅度减少能耗, 性能系数为连续喷淋下的 6.52 倍。

## 4 结论

为了改善间接蒸发冷却器湿通道亲水性不佳的问题,本文提出将导湿织物(70%尼龙+30%聚酯纤维)敷设于湿通道的壁面,通过测试导湿织物的芯吸高度和水平湿扩散率,并搭建芯体布水实验台,研究了其亲水性以及不同布水参数下(喷淋时间、喷淋流量、喷嘴高度)敷布铝箔板芯体内部的布水效果和润湿率。实验还探究了间歇喷淋下冷却器的热性能。主要结论如下:

(1) 中间位置板和四分之一处板在 5 秒内可以被全部润湿,布水效果佳,边缘板的润湿率在 30 秒内,从 0.343 上升到 0.9913,在 30 秒后可实现整个芯体完全润湿。

(2) 由于板间互相遮蔽,所有板面都存在上边缘和下部靠两侧基本润湿的情况。随着喷淋流量的增加,各板的润湿率总体呈上升的趋势。当流量增大到 5L/min 时,喷淋角增至 58°,布水范围覆盖到整个芯体。

(3) 喷淋高度过低时,喷射角较小,导致四分之一处板和边缘位置板上淋水较少,随着喷淋高度的增加,润湿率逐渐增大,在喷淋高度为 100~150mm 时达到最大,可完全润湿。

(4) 间歇喷淋下出口温度呈周期性变化。织物在完全润湿的状况下关闭喷淋系统,在 15 分钟内依然可以保持良好的蒸发冷却效果,将送风温度维持在 0.5℃ 的小幅波动范围。性能系数(COP)是持续喷淋状态下的 6.52 倍,具有显著的节能效益。

## 参考文献:

- [1] 贾晨昱,黄翔,田振武,等.间接蒸发冷却技术在国内外数据中心的应用研究[J].制冷与空调,2020,20(1):61-67.
- [2] 刘海潮,邵双全,张海南,等.间接蒸发冷却技术研究现状[J].制冷与空调,2019,19(8):14-22.
- [3] 褚俊杰,徐伟,黄翔,等.间接蒸发冷却器高效换热材料亲水和布水研究[J].棉纺织技术,2022,50(1):27-33.
- [4] 屈名勋,黄翔,金洋帆,等.基于两种不同材料的间接蒸发冷却换热芯体的实验研究[J].制冷与空调,2022,36(1):67-72+104.
- [5] 林勇军,张学伟,崔梓华,等.布水系统对间接蒸发冷却板式换热器性能的影响[J].制冷与空调,2022,22(5):98-104.
- [6] 贺红霞,黄翔,张鸿,等.露点间接蒸发冷却器中布水与存水的试验研究[J].西安工程大学学报,2019,33(4):395-400.
- [7] 金洋帆,黄翔,屈明勋,等.板翅式间接蒸发冷却器的布水试验研究[J].流体机械,2022,50(2):13-19.
- [8] 王鑫,孙铁柱,王祺.多孔陶瓷管式间接蒸发冷却器与其他间接蒸发冷却器(IEC)的性能比较[J].制冷与空调,2021,35(6):784-790.
- [9] 马许仙.一种露点空气冷却器的性能研究[D].北京:北京建筑大学,2021.
- [10] 李翠玉,罗岳文,杨雪.织物导湿性能的试验研究[J].棉纺织技术,2015,43(1):25-28.
- [11] 褚俊杰.聚合物—多孔陶瓷复合膜露点间接蒸发冷却器理论与实验研究[D].西安:西安工程大学,2018.