

文章编号: 1671-6612 (2022) 01-067-06

# 基于两种不同材料的 间接蒸发冷却换热芯体的试验研究

屈名勋 黄翔 金洋帆 陈梦 武茁苗

(西安工程大学 西安 710048)

**【摘要】** 针对改性高分子聚合物材料、涂有亲水涂层金属铝箔材料两种不同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和改性高分子聚合物材料制成的换热芯体在过渡季节工况下,其湿球效率分别可达63.1%、64.4%,高温工况下其湿球效率可分别达到64.13%、67%,最高测试效率分别为69%、74%。涂有亲水铝箔芯体与改性高分子聚合物芯体最佳二/一次风量比分别为1.2:1和1:1。实验表明改性高分子聚合物材料制成的间接蒸发冷却芯体拥有更优的效率。并对现有间接蒸发冷却换热芯体的材料进行归纳总结,结合不同材料特性对间接蒸发冷却换热芯体换热效率的主要影响因素进行分析。

**【关键词】** 换热芯体;材料特性;间接蒸发冷却;湿球效率

中图分类号 TU83 文献标识码 A

## Experimental Research on Indirect Evaporative Cooling Heat Exchange Core Based on Two Different Materials

Qu Mingxun Huang Xiang Jin Yangfan Chen Meng Wu Zhuomiao

(Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048)

**【Abstract】** For indirect evaporative cooling heat exchange cores made of two different materials: modified polymer material and metal aluminum foil coated with hydrophilic coating, the tests were carried out under different test environments and different ratios of secondary/primary air volume. The results show that the wet bulb efficiency of the metal aluminum foil heat exchange core coated with hydrophilic coating and the heat exchange core made of modified polymer materials can reach 63.1% and 64.4%, respectively, under the working conditions of transitional seasons. Under high temperature conditions, the wet bulb efficiency can reach 64.13% and 67% respectively, and the highest test efficiency is 69% and 74% respectively. The best two/primary air volume ratios of the core coated with hydrophilic aluminum foil and the core of modified high molecular polymer are 1.2:1 and 1:1, respectively. Experiments show that the indirect evaporative cooling core made of modified polymer materials has better efficiency. The materials of the existing indirect evaporative cooling heat exchange core are summarized, and the main influencing factors of the heat exchange efficiency of the indirect evaporative cooling heat exchange core are analyzed based on the characteristics of different materials.

**【Keywords】** heat exchange core; material properties; indirect evaporative cooling; wet bulb efficiency

作者简介: 屈名勋 (1995.09-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 2826003185@qq.com  
通讯作者: 黄翔 (1962.07-), 男, 教授, E-mail: huangx@xpu.edu.cn  
收稿日期: 2021-06-30

### 0 引言

随着国家为应对全球气候挑战而出台的“2030 年达到碳达峰, 2060 年实现碳中和”的战略目标的提出<sup>[1]</sup>, 使得“节能减碳”将成为国家各行各业未来发展中需要着重关心的核心问题之一。节能环保的“蒸发冷却技术”也将扮演着更加重要的角色, 在各行各业将得到更为广泛的应用。特别是在未来高效适用的间接蒸发冷却技术将成为数据中心、大型公共建筑、工业厂房等领域节能降耗的优质技术选择<sup>[2,3]</sup>。而对于间接蒸发冷却空调设备性能的提升而言, 其核心所在是提高间接蒸发冷却换热芯体的性能, 而换热芯体性能提升的关键因素之一就在于芯体制作材料的合理选取。通过对不同材料间接蒸发冷却换热芯体的试验研究, 结合不同材料特性对芯体效率影响的理论分析, 为芯体的科学选材提出合理意见是尤为关键的。

### 1 试验研究

#### 1.1 两种不同材料间接蒸发冷却换热芯体试验台

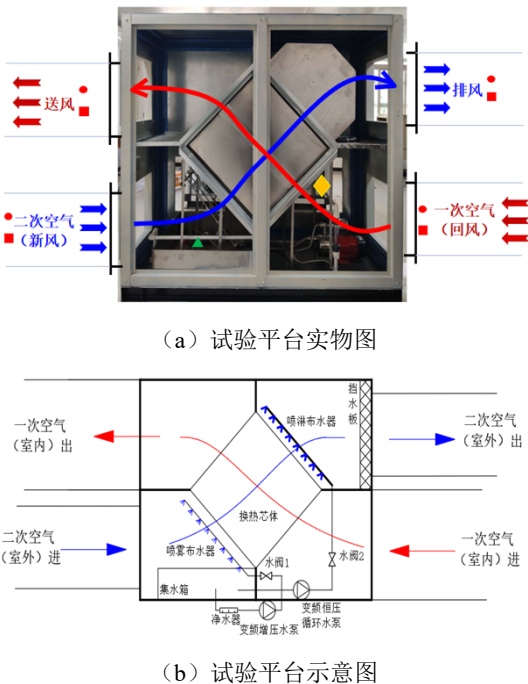


图 1 涂有亲水涂层的金属铝箔芯体间接蒸发冷却空调试验平台

Fig.1 Indirect evaporative cooling air conditioning test platform with a metal aluminum foil core coated with a hydrophilic coating

图 1 为涂有亲水涂层的金属铝箔芯体的间接

蒸发冷却空调试验平台。该试验平台间接蒸发冷却换热芯体为倾斜 45° 摆放, 二次空气由左下部进风口进入湿通道, 流经湿通道后由机组右上部二次排风口排出, 一次空气由右下方进风口进入干通道, 流经干通道后由机组左上部一次送风口送出。该试验台四个进、出风口尺寸均为 250mm×250mm。一次风机为 EC 变频风机, 二次风机为变频离心风机, 一次风机风量调节范围为 500m<sup>3</sup>/h~1800m<sup>3</sup>/h, 二次风量调节范围为 500m<sup>3</sup>/h~2200m<sup>3</sup>/h。亲水铝箔芯体为独立一次空气进风, 二次空气为室外新风, 间接蒸发冷却换热芯体具有上下两套布水装置, 一二次进风均具有预热装置。

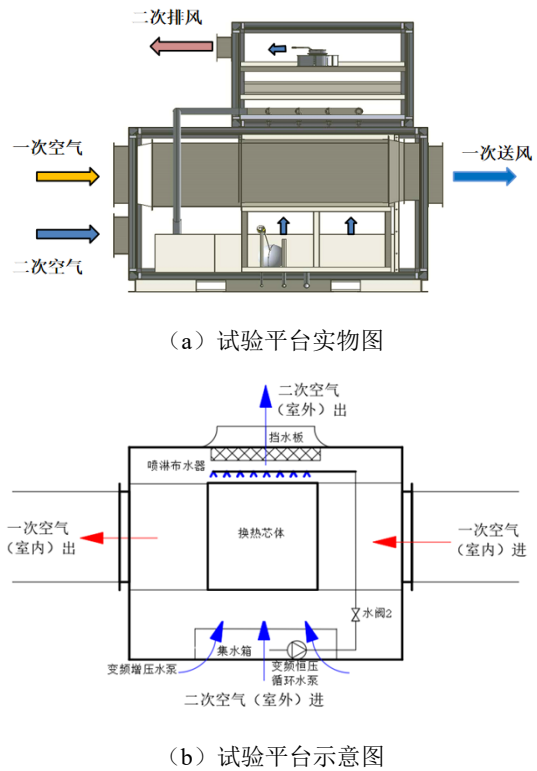


图 2 改性高分子聚合物换热芯体间接蒸发冷却空调试验平台

Fig.2 Modified polymer heat exchange core indirect evaporative cooling air conditioning test platform

图 2 为改性高分子聚合物芯体的间接蒸发冷却空调试验平台。该试验平台间接蒸发冷却换热芯体为倾斜 90° 摆放, 二次空气由左下方进风口进入湿通道, 流经湿通道后由机组顶部二次排风口排出, 一次空气由左上方进风口进入干通道, 流经干通道后由机组右侧送风口送出。该试验台其一二次风进口尺寸为 800mm×550mm、出口尺寸为 250mm×

250mm, 二次风进口尺寸为 800mm×350mm。该间接蒸发冷却试验平台一次风机为变频离心风机、二次风机为 EC 变频风机, 一次风机风量调节范围为 500m<sup>3</sup>/h~1800m<sup>3</sup>/h, 二次风量调节范围为 500m<sup>3</sup>/h~3000m<sup>3</sup>/h, 此芯体一次空气进风与二次进风同为室外新风间接蒸发冷却换热芯体, 布水为上部喷淋布水装置, 一、二次进风也都具有预热装置。

### 1.2 间接蒸发冷却空调机组的原理与性能分析

间接蒸发冷却空调机组其核心在于内部的间接蒸发冷却换热芯体, 目前间接蒸发冷却换热芯体的主要形式有: 板翅式、卧管式、立管式、板管式等多种形式<sup>[4]</sup>。近些年来在实际应用中, 由于板翅式间接蒸发冷却换热芯体的结构紧凑、换热效率较高而被广泛应用, 板翅式间接蒸发冷却结构如图 3 所示。

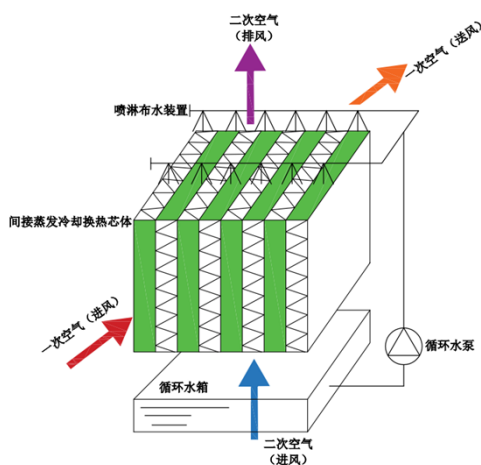


图 3 板翅式间接蒸发冷却换热芯体示意图

Fig.3 Schematic diagram of plate-fin indirect evaporative cooling heat exchange core

间接蒸发冷却换热芯体使被冷却空气(一次空气)不与水接触, 利用隔有间壁的二次空气与水接触, 使得二次通道发生直接蒸发冷却过程, 二次空气温度下降从而通过间壁传热降低一次空气温度, 间接蒸发冷却的主要特点是降低一次空气温度的同时保持一次空气的含湿量不变, 其理论最低温度可降至二次空气的湿球温度。间接蒸发冷却换热芯体湿工况下空气处理过程如图 4 所示, 此时二次通道淋水。一次空气被从 N 进口状态等湿冷却到 O 状态点、二次通道中二次空气则由 W 进口状态近似等焓加湿降温到 W<sub>1</sub> 状态点。

间接蒸发冷却器的蒸发效率计算公式为:

$$\eta_{\text{湿}} = \frac{t_{g1,in} - t_{g1,out}}{t_{g1,in} - t_{s2,in}} \quad (1)$$

式中,  $\eta_{\text{湿}}$  为间接蒸发冷却换热芯体湿模式下蒸发冷却湿球效率, %;  $t_{g1,in}$  为一次空气进风干球温度, °C;  $t_{g1,out}$  为一次空气出风干球温度, °C;  $t_{s2,in}$  二次空气进风干球温度, °C。

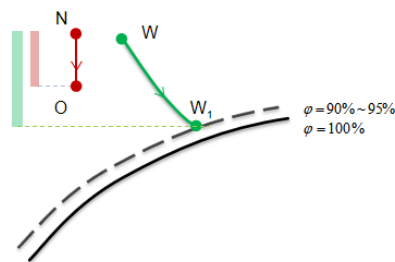


图 4 间接蒸发冷却换热芯体湿工况空气处理过程

Fig.4 The air treatment process of the indirect evaporative cooling heat exchange core under wet conditions

## 2 试验及结果分析

### 2.1 试验过程及参数测量

对于以上两个试验平台进行测试, 采用如表 1 所示的 Testo 174H 温湿度自计仪测试机及多路数据记录仪、Testo 405V1 热敏式风速仪等仪器分别对每个实验平台四个一、二次空气进出风的干、湿球温度以及相对湿度、风速进行测量。测点均匀的布置在对应的风口处, 试验中各个进、出风截面的测点布置如图 5 所示, 各个进出风截面均匀布置 2 个测点, 最后取其平均值<sup>[5-7]</sup>。

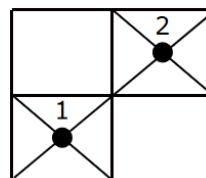


图 5 机组进、出风截面测点布置图

Fig.5 Layout of measuring points for the air inlet and outlet cross-sections of the unit

间接蒸发冷却机组风量的计算公式为:

$$q_v = v_p F \quad (2)$$

式中:  $q_v$  为风量, m<sup>3</sup>/s;  $v_p$  为断面平均风速, m/s;  $F$  为测定断面的面积, m<sup>2</sup>。

表 1 主要测试仪表

Table 1 Main test instruments

仪器名称	测试内容	测量范围	精度要求
多路数据记录仪	干球温度/相对湿度	0~100°C/%	±0.3°C/±2%RH
Testo 174H 温湿度记录仪	干球温度/相对湿度	0~100°C/%	±0.5°C/±3%RH
Testo 405V1 热敏式风速仪	风速	0.20~20.0m/s	±(0.2m/s+2%)
电子数显温度计	水温	0~50°C	±1
卷尺	风口尺寸	0~3m	1mm

2.2 不同环境温度下不同材料芯体的性能分析

(1) 过渡季节工况下不同芯体的温降及效率

如图 6 所示, 为试验在选取过渡季节典型日即二次空气即室外新风干球温度在 18°C~24°C 之间, 湿球温度在 8°C~16°C, 其中亲水铝箔芯体的一次空气进风干球温度在 25.5°C~28.5°C 之间, 对两种材料芯体进行相同布水压力下即 0.4MPa 压力下, 在风量为 1500m<sup>3</sup>/h、二/一风量比 1:1 的工况下进行试验。亲水铝箔芯体的一次空气平均出风温度 18.36°C, 改性高分子芯体一次空气出风平均温度 16.42°C。图 7 为该工况下其中亲水铝箔芯体平均湿球效率 63.1%、改性高分子芯体平均湿球效率 64.4%。

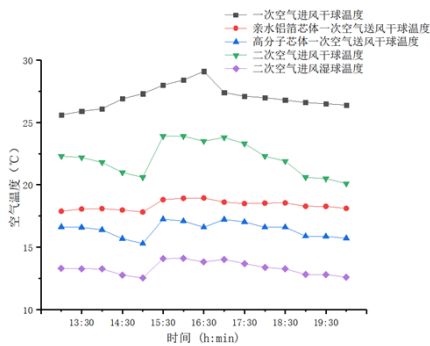


图 6 过渡季节工况下不同材料芯体温降

Fig.6 The temperature drop of different material cores in the transitional season

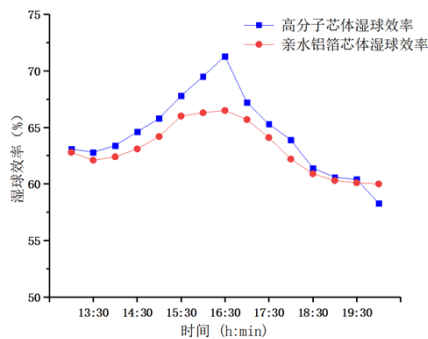


图 7 过渡季节工况下不同材料芯体湿球效率

Fig.7 Wet bulb efficiency of different material cores in transitional seasons

(2) 高温工况下的不同芯体的温降及效率

如图 8 所示, 为试验在选取夏季典型日即二次空气即室外新风干球温度在 29.5°C~35°C 之间, 其中亲水铝箔芯体的一次空气进风干球温度在 37°C~40.5°C 之间, 二次空气湿球温度在 17°C~23°C 时, 对两种材料芯体进行相同布水压力下即 0.4MPa 压力下, 在风量为 1500m<sup>3</sup>/h、二/一风量比 1:1 的工况下进行试验。亲水铝箔芯体的一次空气平均出风温度 27.34°C, 改性高分子芯体一次空气出风平均温度 25.02°C。图 9 为该工况下, 亲水铝箔芯体平均湿球效率 64.13%、改性高分子芯体平均湿球效率 67%。

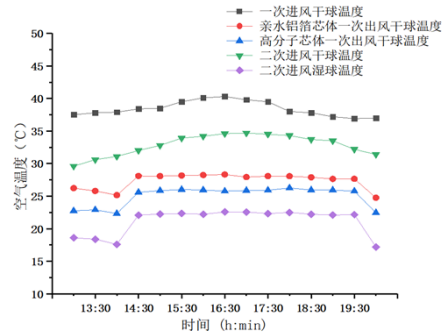


图 8 高温工况下不同材料芯体温降

Fig.8 The temperature drop of different material cores under high temperature conditions

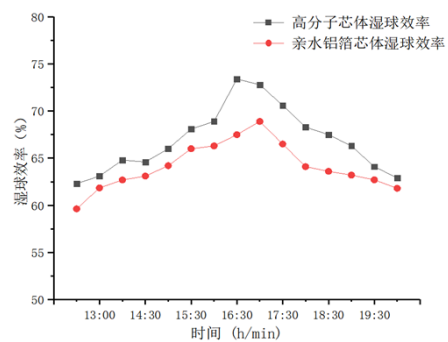


图 9 高温工况下不同材料芯体湿球效率

Fig.9 Wet bulb efficiency of different material cores under high temperature conditions

2.3 不同二/一次风量比下不同材料芯体的性能分析

(1) 不同风量比下不同芯体的降温

在室外气象参数为空气干球温度在 29°C~35°C, 空气相对湿度在 27%~40%之间, 其中进入亲水铝箔芯体一次空气进风温度在 32°C~38°C 之间, 改性高分子芯体二、一次侧空气都为室外新风, 以一次侧风量为 1500m<sup>3</sup>/h 为基础下分别在二/一次风量比分别为 1:1、1.2:1、1.5:1 的三种风量比下进行试验。如图 10 所示, 改性高分子芯体在风量比为 1:1 时, 一次空气温平均降幅度最大达到 9.76°C; 亲水铝箔芯体在风量比为 1.2:1 时, 一次空气平均温降幅度最大达到 13.11°C。同时由图 10 可知, 在进入亲水铝箔芯体一次空气平均干球温度比进入改性高分子芯体的一次空气平均干球温度高 3°C, 两个芯体的二次空气都为同样的室外空气时, 亲水铝箔芯体的平均温降比改性高分子芯体高 3.5°C, 同时也可得到在间接蒸发冷却中一次空气温度越高, 在同样二次空气条件下一次空气的温降幅度越大。

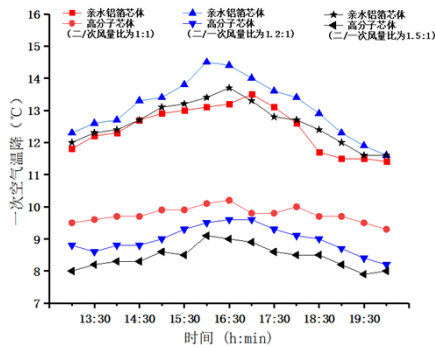


图 10 不同二/一次风量比下不同材料芯体一次空气温降

Fig.10 Primary air temperature drop of different material cores under different ratios of secondary/primary air volume

(2) 不同风量比下不同芯体的效率

如图 11 所示, 改性高分子芯体在风量比为 1:1 时其平均湿球效率达到最大值 68.8%, 亲水铝箔芯

体在风量比为 1.2:1 时, 其平均湿球效率达到最大值 64.3%。并且由图 11 可知, 最佳风量比下亲水铝箔芯体最佳效率值为 69%, 最佳风量比下改性高分子芯体最佳效率值为 74%。并且在两个芯体的二次空气都为同样的室外空气时, 而进入亲水铝箔芯体一次空气平均干球温度比进入改性高分子芯体的一次空气平均干球温度高 3°C 的工况下, 高分子芯体的平均湿球效率比亲水铝箔芯体高 4.6%。由此可见改性高分子芯体整体的换热效率是优于亲水铝箔芯体的。

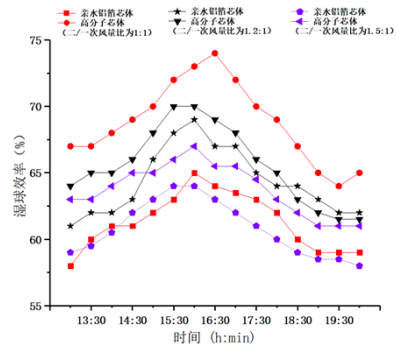


图 11 不同二/一次风量比下不同材料芯体湿球效率

Fig.11 Wet bulb efficiency of different material cores under different ratios of secondary/primary air volume

3 不同材料特性对间接蒸发冷却换热芯体性能影响分析

3.1 现阶段间接蒸发冷却换热芯体材料的分类

现阶段在间接蒸发冷却芯体制作中, 芯体材料的选择分别有金属铝箔、涂有亲水涂层的金属铝箔、高分子聚合物、亲水改性高分子聚合物以及多孔陶瓷材料等 6 大种材料。这 6 种间接蒸发冷却芯体材料的材料特性在一般夏季工况 (即: 芯体进风干球温度在 28°C~35°C, 相对湿度在 35%~45%) 时, 对间接蒸发冷却芯体的间接蒸发冷却湿球效率以及传热速率的影响如表 2 所示<sup>[8-13]</sup>。

表 2 不同材料的间接蒸发冷却换热芯体主要性能参数

Table 2 Main performance parameters of indirect evaporative cooling heat exchange cores of different materials

材料名称	接触角 (°)	散湿性	湿球效率 (%)	导热系数[W/(m·K)]	一次空气温降速率
金属铝箔	60°~85°	较差	55~65	165~240	较块
涂有亲水涂层的金属铝箔	55°~80°	一般	60~70	120~200	较快
高分子聚合物	≥90°	较差	/	0.1~0.5	较慢
亲水改性高分子聚合物	40°~60°	较好	65~75	1~4	一般
聚合物纤维复合材料	0°~35°	优良	/	0.05~30	一般
多孔陶瓷材料	25°~80°	较好	50~60	0.02~1.5	较慢



### 3.2 材料对间接蒸发冷却换热芯体换热效果的影响

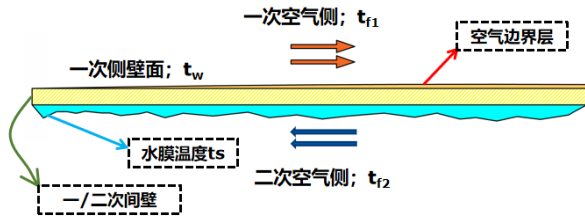


图 12 间接蒸发冷却芯体间壁换热原理示意图

Fig.12 Schematic diagram of heat transfer principle of indirect evaporative cooling core wall

对于间接蒸发冷却芯体而言其热传递主要在二、一侧间壁两侧进行，其间壁换热原理示意图如图 12 所示，上部为干通道，下部为材料壁面附有水膜的湿通道，在湿通道侧应该有更加好的亲水性、散湿性。因为湿通道的亲水性与材料表面的散湿性决定着湿通道水膜附着的均匀程度、水膜的厚度、水膜扩散蒸发的快慢，水膜的附着情况的优劣决定着湿通道水汽进行热湿交换（即就是水膜发生相变通过吸收一/二次间壁、二次空气以及水膜自身的热将显热转化为二次空气的潜热过程）的蒸发过程进行的优劣，而材料的导热系数决定了一次空气通过一/二次间壁的导热将热量传递到二次通道的导热速度的快慢。因为目前大多数芯体材料壁厚都做不到可忽略导热系数影响的 0.28mm 以下<sup>[4]</sup>，所以材料本身的导热性也影响着间壁传热的主要因素之一。

由表 2 可知，在相同条件下芯体的间接蒸发冷却湿球效率与材料特性中湿通道材料表面的亲水性呈负相关，即芯体材料的亲水性（接触角）越大而其湿球效率降越低。其结果与上部分试验结果反应一致，其中湿球效率由高到低依次为：亲水改性高分子聚合物>涂有亲水涂层的金属铝箔>金属铝箔>高分子聚合物>多孔陶瓷。材料的导热系数与芯体二、一侧次导热速率呈正相关，其导热速率的快慢顺序依次为：金属铝箔>涂有亲水涂层的金属铝箔>改性高分子聚合物>聚合物纤维>高分子聚合物>多孔陶瓷。所以在选材中应结合干湿通道的差异性综合考量来选取。

## 4 结论

(1) 在典型过渡季节工况下，其中亲水铝箔

芯体平均湿球效率 63.1%、改性高分子芯体平均湿球效率 64.4%。在典型夏季工况时，亲水铝箔芯体平均湿球效率 64.13%、改性高分子芯体平均湿球效率 67%。同时由分析可知改性高分子芯体的亲水性优于亲水铝箔芯体，且高分子材料表面的散湿性也较好。虽然亲水铝箔芯体材料的导热性比改性高分子芯体整体湿球效率优于亲水铝箔芯体，所以对于间接蒸发冷却而言，湿通道材料表面的亲水性以及散湿性对于间接蒸发冷却效率的影响更为关键。

(2) 通过实验表明，改性高分子芯体在风量比为 1:1 时其平均湿球效率达到最大值 68.8%，亲水铝箔芯体在风量比为 1.2:1 时其平均湿球效率达到最大值 64.3%。则说明对于亲水铝箔芯体材料而言其导热性较好，可实现一、二侧热量的快速传递，所以其最佳二/一次风量比为 1.2:1。而改性高分子芯体因为材料导热系数较小，所以其一、二侧热量的快速传递较慢，所以其需要较小的风量比以实现换热时间上的补偿以取得更最优的换热效果。

(3) 对于间接蒸发冷却芯体的材料而言间接蒸发冷却湿球效率与材料特性中湿通道材料表面的亲水性表征参数接触角呈负相关，材料的导热系数与芯体一、二次侧导热速率呈正相关。在间接蒸发冷却换热芯体材料选取之中应综合考虑材料特性差异对间接蒸发冷却芯体湿通道水膜附着情况对芯体蒸发效果、材料自身导热系数对一、二次侧的间壁导热速率的影响，综合考量来选取。

## 参考文献:

- [1] 欧阳志远,史作廷,石敏俊,等.“碳达峰碳中和”:挑战与对策[J/OL].河北经贸大学学报,2021-09-04:1-11.
- [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] 黄翔.国内外蒸发冷却空调技术研究进展(2)[J].暖通空调,2007,(3):32-37,53.
- [4] 黄翔.蒸发冷却空调原理与设备[M].北京:机械工业出版社,2019:18-25.
- [5] 黄翔,樊丽娟,吴志湘.管式间接蒸发冷却器性能测试与分析[J].建筑科学,2009,25(6):49-53.
- [6] 金洋帆,黄翔,吴磊,等.干燥地区蒸发冷却空调系统运行效果及能耗分析[J].制冷与空调,2021,35(1):64-69.

(下转第 104 页)