

文章编号: 0253-4339(2026)02-0112-11  
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20241108001

## 凝胶基除湿换热器研究及结构优化

雷小平 张华 王佳韵

(上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093)

**摘要** 除湿换热器(DCHE)在除湿领域发挥着非常重要的作用。然而,因缺少高效的吸附剂材料及除湿换热器的优化设计,当前除湿技术的效率有待提升。开发了高效的凝胶复合材料,搭建了除湿实验平台,并基于材料特性在COMSOL中建立了凝胶基除湿换热器物理模型,以吸附剂涂层厚度、翅片间距、空气通道长度这3个参数为主要研究对象,针对除湿性能进行了优化并完成实验验证。研究发现,凝胶基除湿换热器分别在涂层厚度为0.4 mm、翅片间距为2.2 mm、空气通道长度为20 mm时除湿性能最佳。模型考虑了空气湿度场、吸附剂吸附量场和换热器流体温度场等多物理量场的耦合,综合结构优化后的模型平均脱湿量增加了10.35 g/kg(干空气),平均除湿率提升了48.65%,均达到了优化前的一倍以上。

**关键词** 除湿换热器;水凝胶吸附剂;传热传质;除湿

中图分类号: TQ317;TK172;TU834.9

文献标识码: A

## Research and Structural Optimization of Hydrogel-Based Desiccant-Coated Heat Exchanger

Lei Xiaoping Zhang Hua Wang Jiayun

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

**Abstract** Desiccant-coated heat exchangers (DCHEs) play an important role in dehumidification. However, considering the ineffective structural optimization and selection of operating conditions, the efficiency of the current dehumidification technology needs improvement. Therefore, in this study, an efficient hydrogel composite material was developed, a dehumidification experimental platform was established, and a physical model of a hydrogel-based desiccant-coated heat exchanger was developed in COMSOL based on the material characteristics. Three structural parameters, including adsorbent coating thickness, fin spacing, and air channel length, were extracted. The dehumidification performance was optimized and experimentally verified. The study determined that the hydrogel-based desiccant heat exchanger had the best dehumidification performance when the coating thickness was 0.4 mm, fin spacing was 2.2 mm, and air passage length was 20 mm. Unlike other models, this model considers the coupling of multiple physical fields, including the humidity field, adsorbed water fraction field, and fluid temperature field in the heat exchanger. The moisture removal capacity increased by 10.35 g/kg (dry air), and the moisture removal rate improved by 48.65% after structural optimization.

**Keywords** DCHE; hydrogel adsorbent; heat and mass transfer; dehumidification

随着社会的进步和生活品质的提升,人们愈发关注室内空气质量。空气湿度是影响空气质量的重要因素,过高的室内湿度会造成滋生霉菌,而过低的湿度会诱发呼吸道疾病<sup>[1-2]</sup>。为了调节环境中的空气温湿度,传统的空调冷凝方法<sup>[3-7]</sup>通常将送风温度降至露点温度以下,结露除湿,然后对空气进行再热使其达到送风温度的要求,这将导致能源浪费。与传统空调系统相比,除湿机最重要的优点是有助于实现温湿度的独立控制以及低品位热能的利用,从而达到提高能效和降低能耗的目的<sup>[8]</sup>。不同的除湿机

类型有固定床、旋转床和干燥剂涂层热交换器(desiccant-coated heat exchanger, DCHE)<sup>[9]</sup>。除湿换热器的传热传质能力强,水分的吸附解吸响应快速。在除湿过程中,湿空气流经翅片表面,其中的水蒸气被涂覆的固体干燥剂吸附。同时,在此过程中产生的吸附热被换热器管内冷却水循环快速带走,以内冷的方式减少吸附热引起的不可逆损失,近似实现等温除湿过程<sup>[10-11]</sup>。通过干燥剂涂层热交换器可以实现显热负荷和潜热负荷的解耦<sup>[9,12-14]</sup>,从而提高除湿过程的能源效率。

收稿日期:2024-11-08;修回日期:2024-11-29;录用日期:2024-12-11

近年来,学者们为了实现高效的 DCHE 技术进行了大量研究。在干燥剂方面,不断开发具有高吸附能力和低再生温度的吸附材料,主要包括硅胶<sup>[3,15]</sup>、沸石<sup>[16-17]</sup>、金属有机骨架(MOFs)<sup>[18-23]</sup>、聚合物<sup>[24-25]</sup>、复合干燥剂<sup>[26-28]</sup>。然而,目前的干燥剂仍存在除湿能力低、再生温度高等缺点。此外,传统的多孔复合吸附剂在高湿度条件下容易液解,造成热交换器腐蚀<sup>[29]</sup>、循环稳定性差<sup>[30]</sup>、效率低等问题。相比之下,凝胶基复合吸附剂具有大量的柔性孔隙<sup>[31]</sup>。可容纳高达 1 000 g/g 的液态水<sup>[32]</sup>,避免了液解现象,在 DCHE 中极具应用价值<sup>[33]</sup>。另一方面,许多研究人员通过改变除湿工况<sup>[34-35]</sup>来研究 DCHE 的除湿能力,如环境空气的温湿度及空气流量等。Yang Bianfeng 等<sup>[36]</sup>提出了一种太阳能再生碳基复合干燥剂涂层换热器,评估了风速、水流速、再生温度等运行参数对 DCHE 除湿再生效率的影响。结果表明,风速是影响 DCHE 除湿性能的主要因素,再生温度和冷却水流量紧随其后。S. Unger 等<sup>[37]</sup>通过选择性激光熔融增材制造了具有圆形平鳍片、圆形集成销翅片和锯齿状集成销翅的椭圆形管,并在不同雷诺数的流道中研究了其传热和流动特性。目前研究在除湿换热器运行参数优化上取得了一定的成果,但由于换热器的结构设计在实际加工过程中比较复杂,通过高效干燥剂和模拟仿真结合可以达到高效除湿。

本文开发了一种基于可得然胶的高效复合干燥

剂,搭建了完善的除湿实验平台,并从能量、动量和质量守恒的角度在 COMSOL 中建立了一个三维 DCHE 模型。模型中设置了空气湿度场、吸附剂吸附量场和换热器流体温度场等物理量场。综合考虑了 DCHE 传热传质过程中涉及的结构参数,包括吸附剂涂层厚度、翅片间距、空气流道长度,对模型结构进行了综合优化。在吸附和除湿过程中,吸附的热量被流体通道中的冷却水带走,充分释放了干燥剂的除湿潜能,实现了热质耦合的高效解耦,为 DCHE 的高效除湿提供了可行的优化方案。

## 1 模型与方法

### 1.1 物理模型

本文研究了 PT1120B 型微通道换热器,实物如图 1(a)所示,图 1(b)所示为翅片和换热器铜管的放大结构。整个干燥剂涂层热交换器结构包括壳体、铜管、翅片和吸附剂部件,具体参数如表 1 所示。

表 1 除湿换热器结构参数

mm			
参数	数值	参数	数值
长×宽×高	123×112×12	铜管数量	12
翅片厚度	0.1	铜管内径	1.6
翅片间距	2.2	铜管外径	2.0

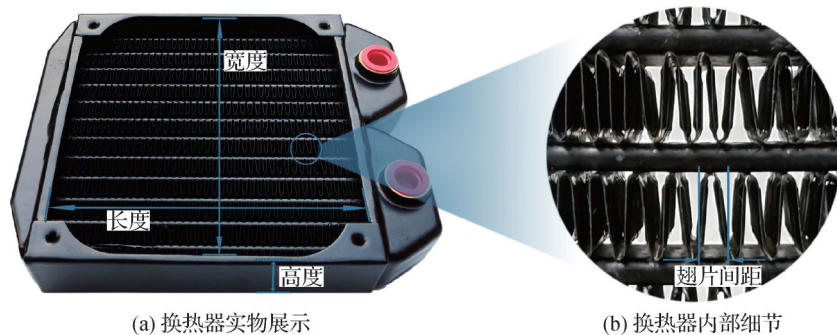


图 1 除湿换热器实物及局部细节图

Fig.1 Physical and local detail picture of DCHE

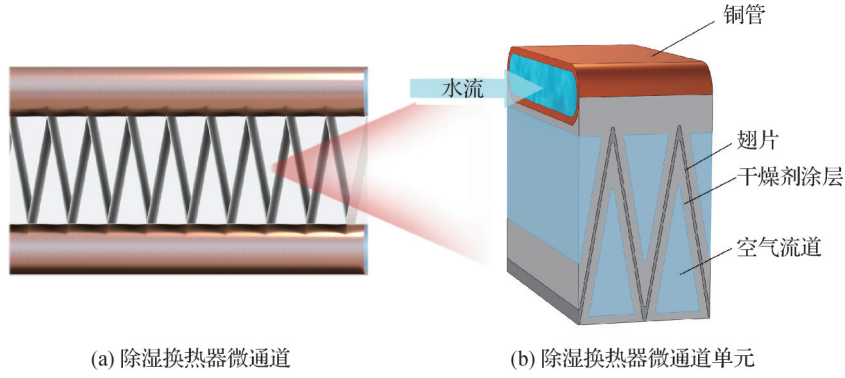
### 1.2 数学模型

微通道除湿换热器的模型如图 2 所示,可以观察到所有翅片之间的空气流道和换热铜管都是均匀分布且尺寸规格一致的,具有高度对称性。换热器的具体结构及运行原理如图 2(b)所示,在进口空气气流分布均匀时,除湿换热器在同一平面的空气通道内部的传热传质状态几乎是相同的。为了避免除湿换热器内所有空气流道带来的巨大计算负荷,研究选择具有对称结构的除湿结构单元作为模拟域,采

用 COMSOL Multiphysics 5.6 软件建立了微通道除湿换热器的三维数学模型。如图 2 所示,模型包括不同的区域,如铜管、翅片、气流通道、水流域和涂在翅片上的干燥剂。在 DCHE 中,湿空气、吸附剂和冷却水等多个工质之间不断进行热质传递。

为了便于分析计算,对三维模型进行如下假设:

- 1) 空气为稳态、不可压缩、层流流动的牛顿流体;
- 2) 吸附剂在翅片上分布均匀,厚度一致;



(a) 除湿换热器微通道

(b) 除湿换热器微通道单元

图 2 除湿换热器模型

Fig.2 Model of DCHE

3) 吸附剂、翅片和铜管是各向同性的,其密度、导热、比热容和其他物理特性在工作条件下是恒定的;

4) 吸附剂的吸附/解吸热在吸附剂层和空气的界面上释放或吸收,吸附剂和被吸附的吸附质(液态水)处于局部热平衡状态;

5) 在忽略翅片和吸附剂接触热阻的情况下,忽略了翅片末端和铜管末端的热损失以及辐射影响;

6) 流经翅片的气流和导热液体处于充分发展的层流状态,其流动状态不会随时间而改变。

通过以上假设,基于质量、动量、能量和物种等基本守恒定律<sup>[5]</sup>,分别建立了吸附剂和空气在除湿及再生过程的热质交换模型,对应控制方程如下。

#### ① 空气域。

连续性方程:

$$\rho_a(\nabla u_a) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\rho_a \left[ \frac{\partial u_a}{\partial t} + (u_a \cdot \nabla) u_a \right] = -\nabla p_a + \mu_a \nabla^2 u_a \quad (2)$$

能量方程<sup>[38]</sup>:

$$\rho_a c_{p,a} \left( \frac{\partial T_a}{\partial t} + u_a \nabla T_a \right) + \nabla(-\lambda_a \nabla T_a) = 0 \quad (3)$$

质量扩散方程:

$$\frac{\partial \omega_a}{\partial t} + \nabla(-D_a \nabla \omega_a) + u_a \nabla \omega_a = 0 \quad (4)$$

#### ② 吸附剂域。

能量方程:

$$(\rho c_p)_e \frac{\partial T_s}{\partial t} + \nabla(-\lambda_s \nabla T_s) = 0 \quad (5)$$

质量扩散方程:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla(-D_s \nabla w) = 0 \quad (6)$$

#### ③ 翅片和铜管域。

翅片和铜管中没有物质传递,只有能量变化。

$$\rho_{Al} c_{p,Al} \frac{\partial T_{Al}}{\partial t} + \nabla(-\lambda_{Al} \nabla T_{Al}) = 0 \quad (7)$$

$$\rho_{Cu} c_{p,Cu} \frac{\partial T_{Cu}}{\partial t} + \nabla(-\lambda_{Cu} \nabla T_{Cu}) = 0 \quad (8)$$

#### ④ 流体域。

在传热流体领域,主要关注流体的流动和能量变化。

$$\rho_l(\nabla u_l) = 0 \quad (9)$$

$$\rho_l \left[ \frac{\partial u_l}{\partial t} + (u_l \cdot \nabla) u_l \right] = -\nabla p_l + \mu_l \nabla^2 u_l \quad (10)$$

$$\rho_l c_{p,l} \left( \frac{\partial T_l}{\partial t} + u_l \nabla T_l \right) + \nabla(-\lambda_l \nabla T_l) = 0 \quad (11)$$

在水分吸附过程中,需要引入吸附剂的吸附动力学方程进行描述。在干燥剂动力学研究中,线性驱动力模型(linear driving force, LDF)可以描述吸附系统的吸附速率和平衡吸附量<sup>[39]</sup>。其形式简单,计算精度高。该模型的基本假设:吸附剂的吸附速率和它内外的吸附质浓度差成正比,表达式如下:

$$\frac{dw_l}{dt} = K_s(w_{eq} - w_l) \quad (12)$$

### 1.3 除湿性能评价指标

平均脱湿量  $M_c$ <sup>[40]</sup>用于描述 DCHE 在固定除湿时间内的平均除湿性能。

$$M_c = \frac{\int_0^{t_{de}} (\omega_{a,in} - \omega_{a,out}) dt}{t_{de}} \quad (13)$$

平均除湿率  $M_r$ 表示空气流过 DCHE 后含水率的变化率,一般平均除湿率越高,表示 DCHE 的除湿性能越好。

$$M_r = \frac{\int_0^{t_{de}} (\omega_{a,in} - \omega_{a,out}) dt}{\omega_{a,in} t_{de}} \quad (14)$$

空气的平均制冷量  $Q$ <sup>[41]</sup>越大,系统的能源利用率越高。

$$Q = m_a (h_{a,in} - h_{a,out}) \quad (15)$$

传热系数  $H$ <sup>[10]</sup>可用来评估 DCHE 的传热性能。

$$H = \frac{Q}{A(T_{a,out} - T_{a,in})} \quad (16)$$

风机能耗为  $Q_f(W)$  用于描述系统能耗。

$$Q_f = \frac{\Delta p V}{\eta_f} \quad (17)$$

压降  $\Delta p(Pa)$  表示进出口空气的压差,即风机在运行过程中需要克服的阻力;风机效率  $\eta_f$  为 0.7。

## 2 实验系统及模型验证

### 2.1 凝胶基高效除湿换热器制作

首先把热交换器浸泡在稀氢氧化钠溶液中,去除表面杂质,然后将其放入烘箱中,在  $80\text{ }^\circ\text{C}$  下干燥 5 h 备用。准备可得然胶材料(Curdlan,上海鑫泰实业有限公司生产),在烧杯中配置质量分数为 5% 的可得然溶液(加入 10 g 可得然至 190 g 去离子水中),然后用磁力搅拌器在冷水浴中搅拌约 20 min,使可得然完全溶解。之后用喷壶将可得然溶液均匀喷在热交换器上,再将热交换器置于  $80\text{ }^\circ\text{C}$  的烘箱中烘干 4 h。此外,在烧杯中配置质量分数为 15% 的氯化锂(LiCl)溶液 100 g,在冷水浴充分搅拌后,将溶液均匀喷洒在热交换器的翅片上。然后将热交换器放入  $80\text{ }^\circ\text{C}$  的烘箱中烘干 4 h。最后,经过 3~5 次喷雾干燥工艺,热交换器上涂覆了一层厚度均匀的 Cur@LiCl 复合吸附剂,平均厚度约为 0.2 mm。图 3 所示为热交换器涂覆前后对比,热交换器初始重量为 329.6 g,而制作完成的凝胶基除湿换热器重量为 355.4 g,除湿换热器上共涂覆了 25.8 g 复合吸附剂。



图 3 除湿换热器涂覆前后对比

Fig.3 Comparison of DCHE before and after coating

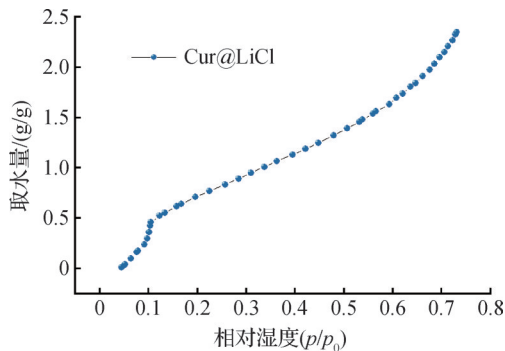
### 2.2 Cur@LiCl 的材料特性

通过 ASAP2020 吸附仪,得到 Cur@LiCl 在  $25\text{ }^\circ\text{C}$  时的吸附等温线如图 4 所示。当相对湿度低于 11% 时, Cur@LiCl 的吸附量很低,而当相对湿度大于 11% 时, Cur@LiCl 的吸附量从 0.46 g/g 升至 2.34 g/g,相对湿度为 70% 时, Cur@LiCl 吸湿率达到 2.15 g/g。这是由于 LiCl 经历了三相吸附循环<sup>[42-43]</sup>过程。首先盐离子通过水合反应吸附水蒸气分子,该反应仅发生在吸附剂颗粒暴露在空气中的表面,此时盐晶体的内部不参与吸附。在该步骤中,所有吸附剂都是固体形式。接着 LiCl 发生了潮解<sup>[44]</sup>,刚发生时水合盐颗粒的表面会形成一层饱和溶液的液膜。然后水蒸气继续被饱和溶液吸收,同时固态盐也不断地溶解进入液膜,直至最后所有固态盐都吸湿成为盐溶液。显然,该过程是一个三阶段的过程。溶液的形成使下层盐层进入吸附过程并改善传质,使得吸附剂吸湿量增加。吸附剂和空气的热物性参数如表 2 所示。

表 2 Cur@LiCl 和空气的热物性参数

Tab.2 Thermophysical properties of Cur@LiCl and air

材料	导热系数/[W/(m·K)]	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	比定压热容/[kJ/(kg·K)]	吸附热/(kJ/kg)	水分扩散系数/(m <sup>2</sup> /s)	吸附速率/s
Cur@LiCl	1.5	449.4	2.583	2 675	$1.63 \times 10^{-11}$	$3.48 \times 10^{-3}$
空气	0.026 3	1.293	1.005		$2.82 \times 10^{-5}$	



注:  $p/p_0$  表示空气中水蒸气分压力/饱和水汽压。

图 4 Cur@LiCl 在  $25\text{ }^\circ\text{C}$  时的吸附等温线

Fig.4 Adsorption isotherms of Cur@LiCl at  $25\text{ }^\circ\text{C}$

### 2.3 除湿实验平台

为了测量 DCHE 的动态除湿性能以及验证数学模型,搭建了如图 5 所示的实验平台。首先根据除湿换热器的尺寸设计了一个矩形通道,在通道内固定涂覆好 Cur@LiCl 复合吸附剂的除湿换热器。在通道进风口安装加热器和加湿器,以达到实验所需的温湿度条件。在通道的出风口安装调速风机,以调节通道入口气流的速度(风机平均流量为  $0.165\text{ m}^3/\text{s}$ )。除湿换热器的冷热水源由低温恒温槽和恒温油槽提供。在除湿阶段,开启低温恒温槽,带走 DCHE 水分吸附时产生的吸附热。在解吸阶段,开启恒温油槽

作为DCHE的再生热源对吸附水分进行解吸。平台采用热线风速仪对进入DCHE的湿空气流速进行测量,利用Agilent 34970A数据采集系统对DCHE进出口温湿度、冷热水温度数据进行动态记录。环境空

气经过加热器升温后,与加湿器输送的湿空气混合达到测试所需的温湿度,然后经过整流板进入DCHE,在DCHE内部完成除湿再生过程。

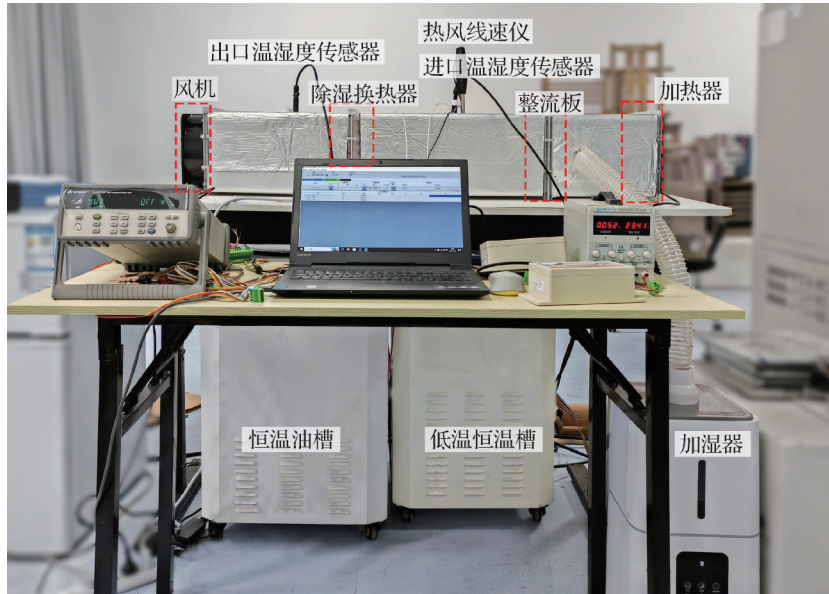


图5 除湿实验平台

Fig.5 Dehumidification experiment platform

在高湿度工况(25 °C/80%)和低湿度工况(25 °C/40%)下,分别对模拟仿真结果进行了实验验证,结果如图6所示,无论是高湿度工况还是低湿度工况,模拟结果和实验结果的偏差均在允许范围内。在高湿度工况下,空气经过除湿换热器出口含湿量由14.91 g/kg(干空气)瞬时降至7.56 g/kg(干空气),瞬时脱湿量达到7.35 g/kg(干空气),换热器除湿效果优于低湿度工况下的除湿效果。此外,图7所示为在25 °C/80%的典型工况下(模型厚度0.3 mm,翅片间距2.2 mm,气流通道长度11.5 mm,空气流速1 m/s),除湿换热器出口空气温度的动态实验值和模拟值的对比,实验值和模拟值呈现良好的一致性。在除湿过程中,为了降低干燥剂吸附热对除湿性能的影响,在除湿换热器中通入20 °C的冷却水,进口空气中的热量不断被冷却水带走,导致出口空气温度逐渐下降。模拟曲线初始时刻考虑到了吸附热的影响造成出口空气温度有小幅短暂升温。

#### 2.4 网格无关性验证

为了验证建立的数学模型的准确性,本文进行了网格无关性验证。在除湿换热器结构参数、环境条件一致的情况下,模型网格数不同时计算结果的差异如图8所示。当网格数量为722 959(较稀疏)、1 076 425(较密)、1 451 867(密)时,除湿换热器空气

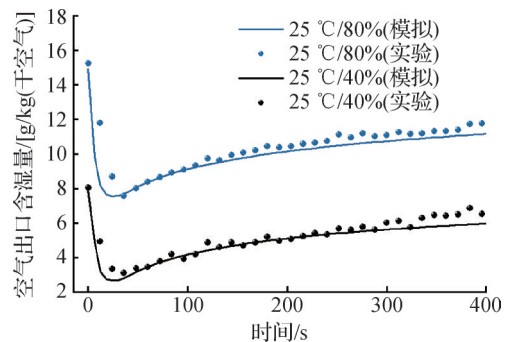


图6 DCHE在高湿度(25 °C/80%)和低湿度(25 °C/40%)工况下模拟和实验出口含湿量的验证

Fig.6 Verification of simulated and experimental outlet moisture content of DCHE at high humidity (25 °C/80%) and low humidity (25 °C/40%) conditions

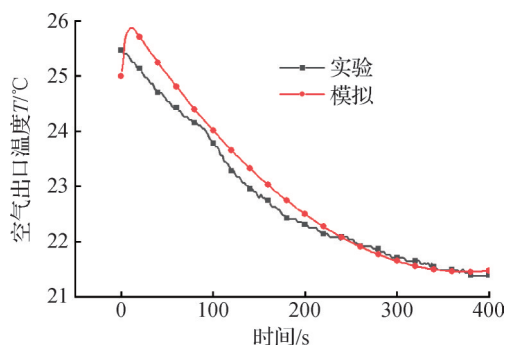


图7 空气出口温度验证

Fig.7 Verification of air outlet temperature

出口含湿量的差异很小,表明结果的准确性未受到网格数量的影响,模型的求解精确度较高。

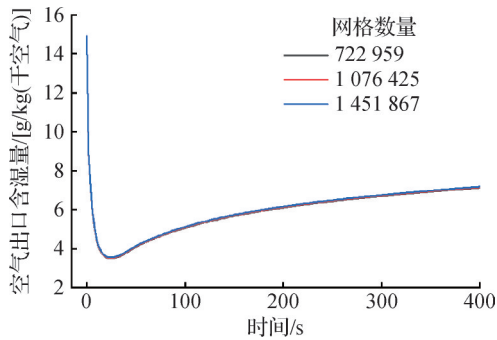
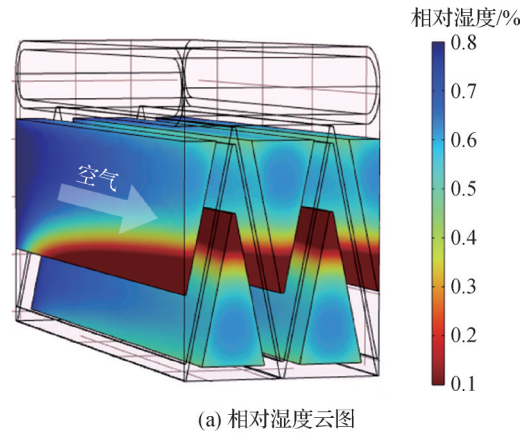


图 8 网格无关性验证

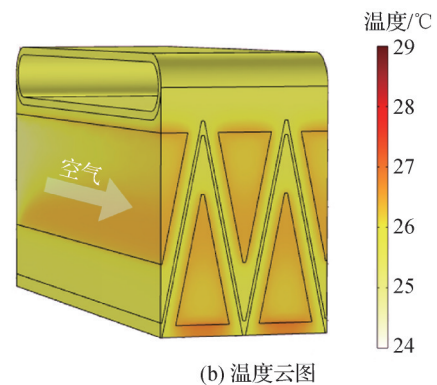
Fig.8 Grid independence verification

### 2.5 模拟结果云图

图 9 所示为除湿阶段空气流道相对湿度和温度的分布云图(模型厚度 0.3 mm;翅片间距 2.2 mm;气流通道长度 11.5 mm;空气流速 1 m/s)。图 9(a)显示,空气流道的入口相对湿度高,当潮湿空气通过除湿换热器时,涂覆在翅片上的干燥剂逐渐吸收水分,从而降低了空气出口的相对湿度。由图 9(b)可知,干燥剂吸附过程中不断产生吸附热,导致空气流道出口温度高于入口处温度。



(a) 相对湿度云图



(b) 温度云图

图 9 模拟时间为 400 s 时 DCHE 在高湿度 (25 °C/80%) 工况下的相对湿度和温度云图

Fig.9 Cloud image of relative humidity and temperature of DCHE at high humidity (25 °C/80%) when the simulation time is 400 s

## 3 结果与讨论

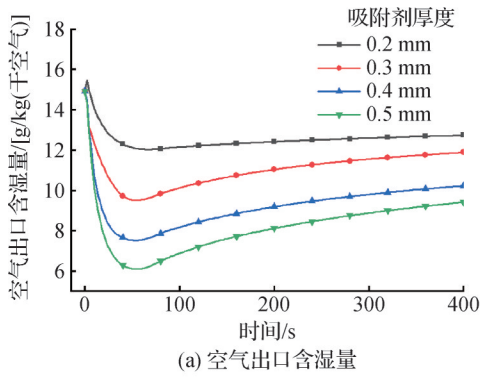
### 3.1 吸附剂涂层厚度对除湿性能的影响

在翅片间距和气流通道长度一致的情况下(翅片间距 2.2 mm,气流通道长度 11.5 mm,进气条件 25 °C/80%RH,空气流速 0.8 m/s),不同吸附剂涂层厚度对 DCHE 除湿性能的影响如图 10 所示。图 10(a)显示了在除湿阶段不同吸附剂涂层厚度下空气出口的含湿量,当湿空气经过除湿换热器时,空气中的水分迅速被翅片上涂覆的吸附剂吸收,从而导致空气出口含湿量急速下降。由图 10(b)可知,随着吸附剂涂层厚度的增加,除湿换热器出风口的瞬时含湿量降低,而平均除湿率  $M_r$  和平均脱湿量  $M_d$  则随着吸附剂涂层厚度的增加而增加。当吸附剂涂层厚度从 0.2 mm 增至 0.5 mm 时,空气出口的瞬时最低含湿量从 12.07 g/kg(干空气)降至 6.1g/kg(干空气), $M_d$  从 2.4 g/kg(干空气)增至 6.79 g/kg(干空气), $M_r$  从 16% 增至 45.5%。此外,压降  $\Delta p$  从 3.45 Pa 增至 8.07 Pa,这导致风机能耗  $Q_f$  由 0.81 W 增至 1.90 W。图 10(c)显示,当吸附剂厚度为 0.4 mm 时,DCHE 的空气平均制冷量  $Q$  达到最大值 92.6 W,在该条件下,出风口温度略有上升,出风口湿度下降较多,导致出风口焓值

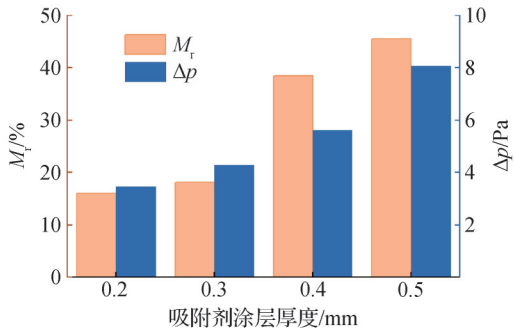
下降较大,从而使  $Q$  显著提高。传热系数  $H$  随着吸附剂厚度的增加而增大,当吸附剂涂层厚度从 0.4 mm 增至 0.5 mm 时, $H$  的增长率仅为 3.7%, $M_r$  增长率为 18.5%,然而风机能耗  $Q_f$  的增长率为 43.8%。压降增加、传热系数变化以及空气流动特性的改变使系统能耗的增长较为显著。综合考虑除湿效果与能耗之间的平衡,吸附剂涂层的最佳厚度选择 0.4 mm。

### 3.2 翅片间距对除湿性能的影响

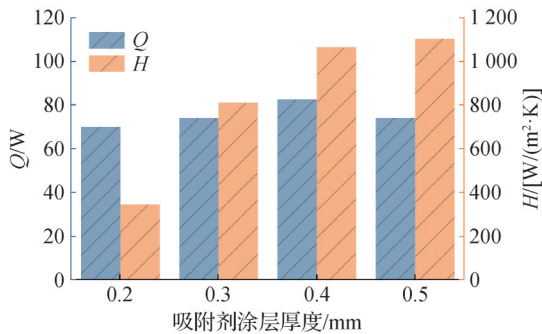
在吸附剂厚度和气流通道长度一致的情况下(吸附剂涂层厚度 0.3 mm,气流通道长度 11.5 mm,进气条件 25 °C/80%RH,空气流速 1 m/s),不同翅片间距对 DCHE 除湿性能的影响如图 11 所示。由图 11(a)可知,随着翅片间距的增加,DCHE 空气出口含湿量也随之增加。翅片间距为 3.4 mm 时空气出口的最低含湿量比间距为 2.2 mm 时要大 3.11 g/kg(干空气),说明干燥剂的水分吸附效果随着翅片间距的增加而减弱,翅片间距较小时,湿空气和翅片上吸附剂的有效接触面积增大,这在一定程度上增强了除湿效果。图 11(b)表明,随着翅片间距的增加,平均除湿率  $M_r$  从 33.6% 降至 18.5%,压降  $\Delta p$  从 5.58 Pa 降



(a) 空气出口含湿量



(b) 平均除湿度  $M_r$  和压降  $\Delta p$



(c) 平均制冷量  $Q$  和传热系数  $H$

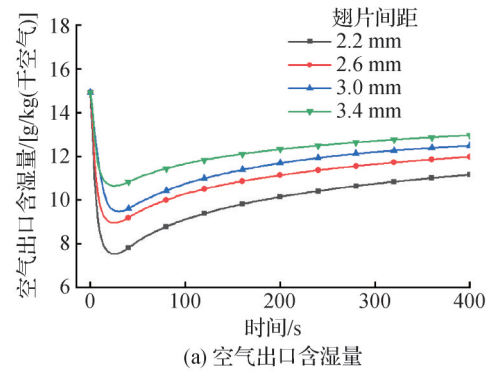
图 10 吸附剂涂层厚度对 DCHE 除湿性能的影响

Fig.10 Effect of adsorbent coating thickness on dehumidification performance of DCHE

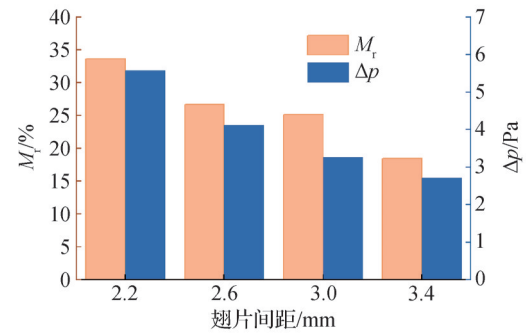
至 2.71 Pa。根据图 11(c), 传热系数  $H$  随着翅片间距的增大而减小, 热交换量随着翅片间距的增大先增大后减小。当翅片间距为 2.2 mm 时,  $H$  达到最大值 1 062.3 W/(m<sup>2</sup>·K)。当翅片间距为 3.0 mm 时, 进入除湿换热器的空气质量流量相对增加,  $Q$  达到最大值 164.9 W。总之, 在翅片间距为 2.2 mm 时, 除湿换热器的除湿性能最好。

### 3.3 空气流道长度对除湿性能的影响

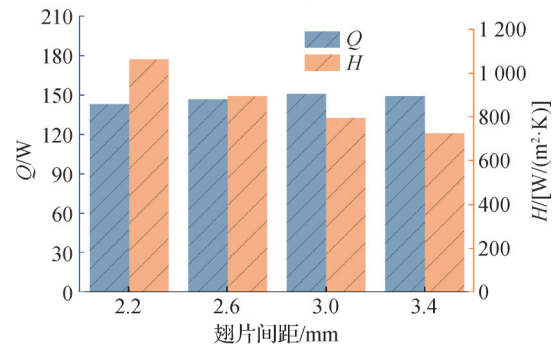
在吸附剂厚度和翅片间距不变的情况下(吸附剂涂层厚度 0.2 mm, 翅片间距 2.2 mm, 进气条件 25 °C/80%RH, 空气流速 0.8 m/s), 不同空气流道长度对 DCHE 除湿性能的影响如图 12 所示, 当空气流道的长度增加时, 空气中的水分和吸附剂之间的接触面积增大。图 12(a) 显示, 随着空气流道长度的增



(a) 空气出口含湿量



(b) 平均除湿度  $M_r$  和压降  $\Delta p$



(c) 平均制冷量  $Q$  和传热系数  $H$

图 11 翅片间距对 DCHE 除湿性能的影响

Fig.11 Effect of fin spacing on dehumidification performance of DCHE

加, 空气出口处的含湿量降低, 表明吸附剂吸收了更多的水分。当空气流道长度从 10 mm 增至 25 mm 时,  $M_r$  从 2.13 g/kg(干空气)增至 3.79 g/kg(干空气)。由图 12(b) 可知, 当空气流道长度从 10 mm 增至 25 mm 时,  $M_r$  从 13.35% 增至 23.8%, 压降  $\Delta p$  从 3.12 Pa 增至 6.3 Pa, 导致风机能耗  $Q_f$  由 0.74 W 增至 1.49 W。当空气流道长度增加时, 空气的平均制冷量  $Q$  和传热系数  $H$  增加。当流道长度从 10 mm 增至 25 mm 时,  $Q$  从 22.6 W 增至 47.3 W,  $H$  从 684.6 W/(m<sup>2</sup>·K) 增至 735 W/(m<sup>2</sup>·K)(图 12(c))。当空气流道长度从 20 mm 增至 25 mm 时,  $M_r$  仅增长 2.8%,  $Q$  增加,  $H$  增加了 0.6%, 而  $Q_f$  增长了 17%。随着空气流道长度的增加, 除湿性能有一定程度增加, 风机能耗增幅相对较大, 与此同时气流阻力和翅片及铜管的材料成本也会增

加,因此选择 20 mm 的气流道长度为最佳长度。

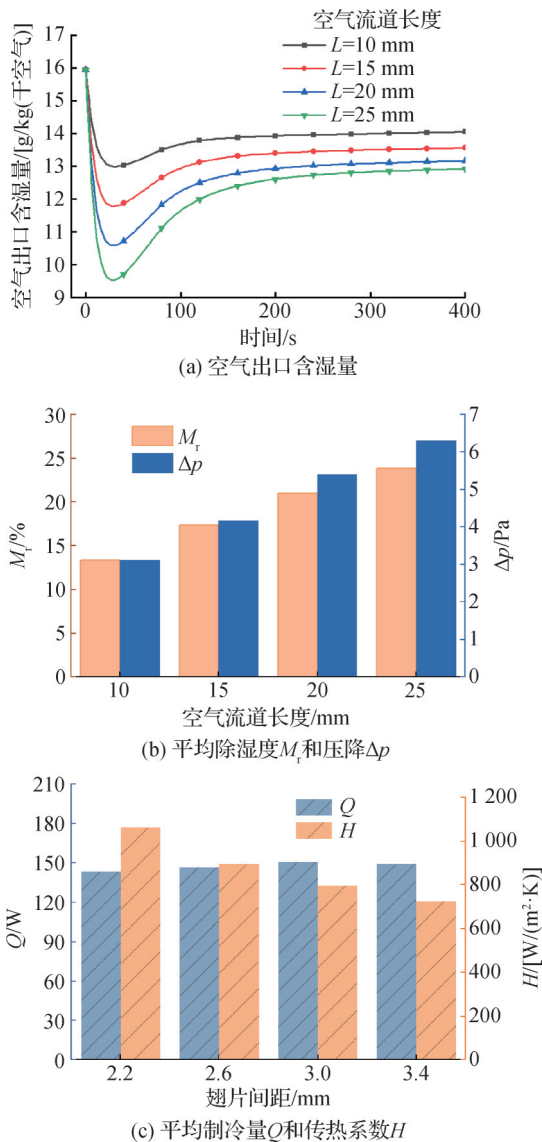


图 12 空气通道长度对 DCHE 除湿性能的影响

Fig.12 Effect of air channel length on dehumidification performance of DCHE

### 3.4 模型综合优化设计

上述结果表明改变吸附剂涂层厚度、翅片间距、空气通道长度均会对除湿换热器的除湿效果有不同影响。将得到的结构优化参数(吸附剂涂层厚度 0.4 mm、翅片间距 2.2 mm,空气通道长度 20 mm)进行组合,得到综合优化的除湿换热器优化模型。由前文可知,在除湿性能方面最好的是吸附剂涂层厚度为 0.5 mm 模型( $M_r$  为 45.5%),与之相反的是空气通道长度  $L=10$  mm 模型( $M_r$  为 13.35%)。为了客观展示新模型的优势,选择极端除湿性能下的上述 2 个模型与优化模型进行除湿性能对比,对比结果如图 13 所示(进气条件 25 °C/80%RH,空气流速 0.8 m/s)。

图 13(a)所示为在 25 °C/80%RH 的条件下 3 种模型出口含湿量的对比。结构优化后的模型对水分的吸附更迅速有效,空气瞬时最低出口含湿量降至 4.41 g/kg(干空气),比  $L=10$  mm 模型的瞬时脱湿量增加了 7.66 g/kg(干空气),同时也比吸附剂涂层为 0.5 mm 模型的瞬时脱湿量增加 1.69 g/kg(干空气)。由图 13(b)可知,在 25 °C/80%RH 的条件下,结构优化的模型  $M_c$  达到了 12.48 g/kg(干空气),分别比  $L=10$  mm 的模型、吸附剂涂层为 0.5 mm 模型的  $M_c$  增加了 10.35 g/kg(干空气)、5.69 g/kg(干空气)。优化模型的  $M_r$  为 62%, $M_r$  分别比  $L=10$  mm 模型、吸附剂涂层为 0.5 mm 模型高 48.65% 和 16.5%。通过模型除湿性能对比可知,本文模型综合优化设计结果是正确有效的。

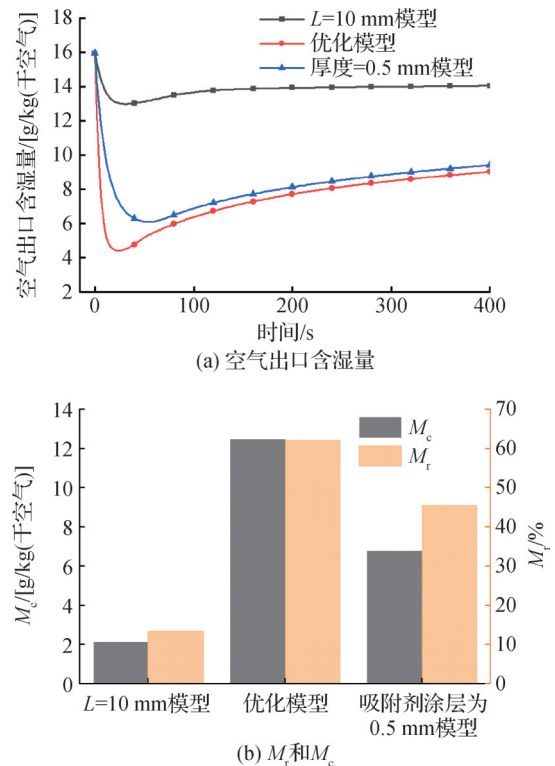


图 13 模型对比

Fig.13 Model comparison

## 4 结论

本文基于能量、动量和质量守恒定律,建立了集除湿通道和换热流道于一体的三维除湿换热器数学模型,模型工作过程合理而且可信度高。此外,制作了吸附剂涂层厚度均匀的凝胶基除湿换热器,搭建除湿实验平台在高、低湿环境(25 °C/80%、25 °C/40%)下进行性能实验,完成了温湿度验证。重点研究了除湿换热器的吸附剂涂层厚度、翅片间距、空气通道长度对除湿性能的影响,得到如下结论:

1)对除湿换热器物理结构的优化表明,最佳吸附剂涂层厚度为0.4 mm,最佳翅片间距为2.2 mm,理想的气流通道长度为20 mm。

2)结构综合优化后的模型的 $M_c$ 为12.48 g/kg(干空气),比 $L=10$  mm的模型增加了10.35 g/kg(干空气)。优化模型的 $M_r$ 为62%,比 $L=10$  mm的模型高48.65%。优化后的模型能够使湿空气从25 °C/80%RH除湿至20 °C/30%RH的理想工况。

3)增加吸附剂涂层厚度和空气流道长度,除湿换热器的 $M_c$ 和 $M_r$ 均呈现上升趋势。随着吸附剂涂层厚度的增加,除湿换热器的脱湿量从2.4 g/kg(干空气)增至6.79 g/kg(干空气),除湿率从16%增至45.5%。

4)除湿换热器的传热系数随着吸附剂厚度和空气流道长度增加的增加而增大,但随着翅片间距的增大而减小,当翅片间距为2.2 mm时,传热系数达到最大值1 062.3 W/(m<sup>2</sup>·K)。

符号说明

- A —— 热交换器空气流通截面积, m<sup>2</sup>
- $c_p$  —— 比定压热容, J/(kg·K)
- D —— 扩散系数
- $D_a$  —— 水蒸气在空气中的扩散系数, m<sup>2</sup>/s
- $D_s$  —— 液态水在吸附剂内的扩散系数, m<sup>2</sup>/s
- H —— 传热系数, W/(m<sup>2</sup>·K)
- h —— 比焓, kJ/kg
- K —— 吸附速率系数, s<sup>-1</sup>
- m —— 质量流量, kg/s
- $M_c$  —— 平均脱湿量, g/kg(干空气)
- $M_r$  —— 平均除湿率, %
- p —— 压力, Pa
- Q —— 平均制冷量, W
- T —— 温度, K
- $T_s$  —— 吸附剂和液态水温度, K
- t —— 时间, s
- u —— 流速, m/s
- V —— 体积流量, m<sup>3</sup>/s
- w —— 吸附剂水分吸附量, g/g
- $w_{eq}$  —— 吸附剂在给定温湿度下平衡吸附量, g/g
- $\lambda$  —— 导热系数, W/(m·K)
- $\mu$  —— 动力黏度, Pa·s
- $\rho$  —— 密度, kg/m<sup>3</sup>
- $\omega$  —— 空气含湿量, g/kg(干空气)

下标

- a —— 空气
- l —— 流体
- f —— 风机
- in —— 入口

- out —— 出口
- Al —— 铝
- Cu —— 铜
- de —— 除湿
- s —— 吸附剂

参考文献

- [1] GE T S, CAO W, PAN X, et al. Experimental investigation on performance of desiccant coated heat exchanger and sensible heat exchanger operating in series [J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 83: 88-98.
- [2] QU M, ABDELAZIZ O, GAO Z, et al. Isothermal membrane-based air dehumidification: a comprehensive review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 4060-4069.
- [3] OH S J, NG K C, CHUN W, et al. Evaluation of a dehumidifier with adsorbent coated heat exchangers for tropical climate operations [J]. Energy, 2017, 137: 441-448.
- [4] AHMAD T, ZHANG D. A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: the story told so far [J]. Energy Reports, 2020, 6: 1973-1991.
- [5] VIVEKH P, BUI D T, KUMJA M, et al. Theoretical performance analysis of silica gel and composite polymer desiccant coated heat exchangers based on a CFD approach [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 187: 423-446.
- [6] VIVEKH P, BUI D T, WONG Y, et al. Performance evaluation of PVA-LiCl coated heat exchangers for next-generation of energy-efficient dehumidification [J]. Applied Energy, 2019, 237: 733-750.
- [7] CUI S, QIN M, MARANDI A, et al. Metal-organic frameworks as advanced moisture sorbents for energy-efficient high temperature cooling [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 15284.
- [8] VENEGAS T, QU M, NAWAZ K, et al. Critical review and future prospects for desiccant coated heat exchangers: materials, design, and manufacturing [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 151: 111531.
- [9] VIVEKH P, KUMJA M, BUI D T, et al. Recent developments in solid desiccant coated heat exchangers-a review [J]. Applied Energy, 2018, 229: 778-803.
- [10] 孙香宇, 代彦军, 赵耀, 等. 除湿换热器尺寸结构对其热湿传递特性的研究 [J]. 工程热物理学报, 2017, 38(9): 1822-1827. (SUN Xiangyu, DAI Yanjun, ZHAO Yao, et al. Experimental study on heat and mass transfer characteristics of desiccant coated heat exchanger with variable structure sizes [J]. Journal of Engineering

- Thermophysics, 2017, 38(9): 1822–1827.)
- [11] 郑旭, 邓帅, 王如竹. 基于内冷式干燥剂换热器的固体除湿空调技术研究进展[J]. 制冷学报, 2019, 40(5): 109–117. (ZHENG Xu, DENG Shuai, WANG Ruzhu. Research progress on solid desiccant air-conditioning technology based on internal cooled desiccant coated heat exchanger [J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40 (5) : 109–117.)
- [12] VIVEKH P, BUI D T, ISLAM M R, et al. Experimental performance evaluation of desiccant coated heat exchangers from a combined first and second law of thermodynamics perspective [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 207: 112518.
- [13] SUN X Y, DAI Y J, GE T S, et al. Experimental and comparison study on heat and moisture transfer characteristics of desiccant coated heat exchanger with variable structure sizes[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 137: 32–46.
- [14] JAGIRDAR M, LEE P S. Mathematical modeling and performance evaluation of a desiccant coated fin-tube heat exchanger[J]. Applied Energy, 2018, 212: 401–415.
- [15] XU J, PAN Q W, WANG R Z, et al. Investigation of a high-efficient hybrid adsorption refrigeration system using desiccant coated heat exchangers [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 246: 114654.
- [16] ZHENG X, WANG R Z, GE T S, et al. Performance study of SAPO–34 and FAPO–34 desiccants for desiccant coated heat exchanger systems[J]. Energy, 2015, 93: 88–94.
- [17] TSUJIGUCHI T, OSAKA Y, KUMITA M, et al. Adsorption-desorption behavior of water vapor and heat-flow analysis of FAM-ZO1-coated heat exchanger [J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 105: 3–10.
- [18] KIM H, YANG S, RAO S R, et al. Water harvesting from air with metal-organic frameworks powered by natural sunlight[J]. Science, 2017, 356(6336): 430–434.
- [19] KARMAKAR A, PRABAKARAN V, ZHAO D, et al. A review of metal-organic frameworks (MOFs) as energy-efficient desiccants for adsorption driven heat-transformation applications[J]. Applied Energy, 2020, 269: 115070.
- [20] HANIKEL N, PEI X, CHHEDA S, et al. Evolution of water structures in metal-organic frameworks for improved atmospheric water harvesting [J]. Science, 2021, 374 (6566): 454–459.
- [21] BEZRUKOV A A, O’HEARN D J, GASCÓN-PÉREZ V, et al. Metal-organic frameworks as regeneration optimized sorbents for atmospheric water harvesting[J]. Cell Reports Physical Science, 2023, 4(2): 101252.
- [22] GORDEEVA L G, TU Y D, PAN Q, et al. Metal-organic frameworks for energy conversion and water harvesting: a bridge between thermal engineering and material science [J]. Nano Energy, 2021, 84: 105946.
- [23] FENG Yaohui, GE Tianshu, CHEN Bin, et al. A regulation strategy of sorbent stepwise position for boosting atmospheric water harvesting in arid area [J]. Cell Reports Physical Science, 2021, 2: 100561.
- [24] ZHENG Xu, ZHANG Yu, WAN Tinghao, et al. Experimental study on the performance of a novel superabsorbent polymer and activated carbon composite coated heat exchangers[J]. Energy, 2023, 281: 128293.
- [25] MA Qianling, ZHENG Xu. Preparation and characterization of thermo-responsive composite for adsorption-based dehumidification and water harvesting [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 429: 132498.
- [26] SONG Yan, XU Ning, LIU Guoliang, et al. High-yield solar-driven atmospheric water harvesting of metal-organic-framework-derived nanoporous carbon with fast-diffusion water channels [J]. Nature Nanotechnology, 2022, 17(8): 857–863.
- [27] YAO Houze, ZHANG Panpan, HUANG Yaxin, et al. Highly efficient clean water production from contaminated air with a wide humidity range [J]. Advanced Materials, 2020, 32(6): 1905875.
- [28] VIVEKH P, ISLAM M R, CHUA K J. Experimental performance evaluation of a composite superabsorbent polymer coated heat exchanger based air dehumidification system[J]. Applied Energy, 2020, 260: 114256.
- [29] CHUNG J Y, PARK M H, HONG S H, et al. Comparative performance evaluation of multi-objective optimized desiccant wheels coated with MIL–100 (Fe) and silica gel composite[J]. Energy, 2023, 283: 128567.
- [30] BAI Z, CHINNAPPAN A, ZHANG Y, et al. Performance evaluation of PVA/PEO/LiCl composite as coated heat exchangers desiccants [J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 154: 258–267.
- [31] MITTAL H, ALILI A A, ALHASSAN S M. Hybrid superporous hydrogel composites with high water vapor adsorption capacity–adsorption isotherm and kinetics studies[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(6): 106611.
- [32] OMIDIAN H, ROCCA J G, PARK K. Advances in superporous hydrogels [J]. Journal of Controlled Release, 2005, 102(1): 3–12.
- [33] PAN Yu, WANG Jiayun, ZHONG Guodong, et al. An ultra-hygroscopic polymer for high-efficiency dehumidification [J]. Cell Reports Physical Science, 2023, 4(9): 101554.
- [34] HU L M, GE T S, JIANG Y, et al. Performance study on composite desiccant material coated fin-tube heat exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass

- Transfer, 2015, 90: 109–120.
- [35] ZHENG X, WANG R Z, GE T S. Experimental study and performance predication of carbon based composite desiccants for desiccant coated heat exchangers [J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 72: 124–131.
- [36] YANG Bianfeng, WANG Cong, XU Ji, et al. Solar regenerated carbon-based composite desiccant coated heat exchangers for air dehumidification [J]. Energy, 2024, 299: 131537.
- [37] UNGER S, BEYER M, GRUBER S, et al. Experimental study on the air-side thermal-flow performance of additively manufactured heat exchangers with novel fin designs [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 146: 106074.
- [38] 刘林, 李军, 邓立生, 等. 硅胶干燥剂涂层等温除湿传质特性的数值模拟研究[J]. 制冷学报, 2023, 44(2): 120–126. (LIU Lin, LI Jun, DENG Lisheng, et al. Numerical simulation on the mass transfer characteristics of silica gel desiccant coating during isothermal dehumidification process [J]. Journal of Refrigeration, 2023, 44(2): 120–126.)
- [39] SIRCAR S, HUFTON J R. Why does the linear driving force model for adsorption kinetics work? [J]. Adsorption, 2000, 6(2): 137–147.
- [40] 于博, 郑旭. 离子改性的聚丙烯酸除湿换热器系统性能研究[J]. 制冷学报, 2020, 41(2): 63–69. (YU Bo, ZHENG Xu. Study on the system performance of desiccant coated heat exchangers using ion modified polyacrylic acid salt[J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(2): 63–69.)
- [41] 袁野, 葛天舒. 新型一体式除湿热泵空调循环夏季工况实验研究[J]. 制冷学报, 2018, 39(5): 59–66. (YUAN Ye, GE Tianshu. Experimental investigation under summer conditions on novel integrated dehumidification heat pump air-conditioning cycle [J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(5): 59–66.)
- [42] YU N, WANG R Z, LU Z S, et al. Evaluation of a three-phase sorption cycle for thermal energy storage [J]. Energy, 2014, 67: 468–478.
- [43] 余楠. 三相吸附储热循环的原理及实验验证[D]. 上海: 上海交通大学, 2015. (YU Nan. Principle and experimental verification of three-phase adsorption heat storage cycle [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.)
- [44] EJEIAN M, ENTEZARI A, WANG R Z. Solar powered atmospheric water harvesting with enhanced LiCl/MgSO<sub>4</sub>/ACF composite [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 176: 115396.

#### 通信作者简介

王佳韵, 女, 副教授, 上海理工大学能源与动力工程学院, 18321188205, E-mail: jywang@usst.edu.cn。研究方向: 空气取水的先进材料-热湿传递-全球应用前沿交叉。

#### About the corresponding author

Wang Jiayun, female, associate professor, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, 86–18321188205, E-mail: jywang@usst.edu.cn. Research fields: advanced materials for air water harvesting-heat and moisture transfer-ross the frontiers of global applications.