

基于FloEFD的吸附式制冷设备结构热设计与分析

赖俊彤¹, 贺伟¹, 朱龙潜^{1*}, 吴池力²

¹广州市香港科大霍英东研究院建筑物能源研究中心, 广东 广州

²香港科技大学机械及航空航天工程学系, 香港

收稿日期: 2022年6月22日; 录用日期: 2022年7月14日; 发布日期: 2022年7月25日

摘要

本文针对特定的吸附式制冷设备开展了热力学仿真, 并对水汽通道进行了结构设计与分析。探究了不同水汽通道结构对于吸附式制冷设备运行参数的影响。在仿真分析中, 应用了工业级流体分析软件FloEFD, 在简化后的MCAD模型上开展热仿真计算, 极大地简化了分析流程。分析结果显示当水汽通道采用多孔矩形结构时, 通道表明温度变化差异不大, 比起使用单一的矩形孔状通道结构, 其冷凝物质分量更为集中, 但会有过多的相变潜热被通道结构吸收从而可能影响水汽在冷凝端的凝结效率。简化的仿真计算定性地对水汽通道结构的进行了热分析, 该仿真方案可在未来结合实验进行验证并进一步细化还原设备原始的结构参数, 以此在数值上探究该通道结构对吸附式制冷设备性能的关系。

关键词

吸附式制冷, FloEFD, 水汽通道, 热仿真分析

A Structure Thermal Design and Analysis Based on FloEFD of an Adsorption Cooling System

Juntong Lai¹, Wei He¹, Longqian Zhu^{1*}, Chili Wu²

¹Building Energy Research Center, Guangzhou HKUST Fok Ying Tung Research Institute, Guangzhou Guangdong

²Department of Mechanical and Aerospace Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong

Received: Jun. 22nd, 2022; accepted: Jul. 14th, 2022; published: Jul. 25th, 2022

*通讯作者。

文章引用: 赖俊彤, 贺伟, 朱龙潜, 吴池力. 基于 FloEFD 的吸附式制冷设备结构热设计与分析[J]. 传感器技术与应用, 2022, 10(3): 449-457. DOI: 10.12677/jsta.2022.103055

Abstract

This paper involves in the thermal simulations of a specialised adsorption refrigeration, where the structure of the vapour gate connecting the condenser and adsorption was analysed by investigating the effects of various gate structures on the working performance of refrigeration. An industrial fluid analysis software, FloEFD, was applied to simulations, which contributed to simplifying analysis process as modified MCAD model can be directly simulated. Results illustrate that the variation of temperature is not significant within rectangular structure with openings. In comparison to the gate with one opening, the condensed substance is more concentrated, but massive latent heat of phase change might be absorbed by the gate, which may affect the condensation efficiency of water vapor at the condenser. The simplified simulations qualitatively conducted thermal analysis on the gate. In addition, this model can be verified in combination with experiments in the future and further developed by refining the structural parameters of the equipment, so as to explore the numerical correlation between the gate and the performance of adsorption refrigeration.

Keywords

Adsorption Cooling, FloEFD, Vapor Tunnel, Thermal Simulation and Analysis

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在可持续发展战略和能源环境问题的世界背景下，绿色能源的开发相对于一般能源的利用能极大降低环境污染。而吸附式制冷技术作为一种低品位能源驱动的绿色制冷技术给冰箱、空调、热泵等行业带来新的机遇。

因此，吸附式制冷设备逐渐成为研究热点，其研究领域主要包括制冷工质对、物理与化学吸附的热动力学特性、复合吸附剂的吸附机理及热动力学特性、吸附床技术以及吸附式制冷系统的热力学循环等[1]。由于吸附床的传热传质能极大影响吸附式制冷设备的性能，绝大多数制冷设备的热力学分析通常建立吸附床的理论计算或数值模拟的基础上[2]-[7]。此外，吸附式制冷设备的运行参数也是一个影响性能的关键因素[8]，在此基础上，控制水汽从吸附床导向冷凝端的通道结构特征或许也能一定程度地影响设备的运行效率。

在本文中，研究重点主要在于不同的水汽通道结构中，设备运行状态下的热力学特性。其中，通过观察通道结构的温度分布以及冷凝分量和冷凝端内换热工质的温度分布来对不同水汽通道结构中的吸附式制冷设备的热力学特性进行分析。

2. 制冷设备结构及工作原理

本文中研究的吸附式制冷设备结构如图 1 所示，主要的研究对象为解吸后的气态工质在设备的工作部件中发生的热交换。为了降低具备多样的热循环制冷系统的复杂程度，设备由机箱外壳构建接近真空的工作环境，设备内部的主要工作部件为吸附床，冷凝床。

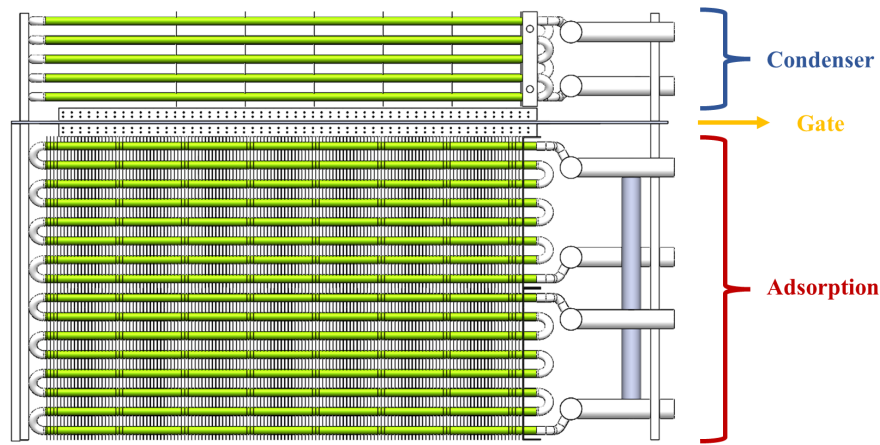


Figure 1. Structure of an adsorption cooling system
图 1. 吸附式制冷设备结构

其中，基于该吸附式制冷设备的工作原理，如图 2 所示，吸附床主要发挥吸附气态工质(水汽)和高温下解吸水汽的作用，而冷凝床则包含低温下冷凝水汽及高温下蒸发冷凝水达到制冷效果的两个主要功能。具体来说，吸附床及冷凝床之间利用气压差驱动水汽循环，并通过适当密度的管式翅片来达到热量的交换的目的。然而除了冷凝床中冷凝水汽发生的换热过程之外，用于隔离冷凝床与吸附床的水汽通道也会与在其表面冷凝后的水汽产生热交换，以上两个过程主要发生在吸附剂的等量温变过程，在该过程中，吸附剂所释放的热量主要为：

$$Q_v = Q_1 + Q_2 = m_v C_{p,v} (X_1 \Delta t_1 + X_2 \Delta t_2) \quad (1)$$

其中， m_v 为吸附床释放的水汽质量， $C_{p,v}$ 为水汽的定压比热容， X_1 为通道结构上冷凝的水汽质量分量， X_2 为冷凝端换热结构上冷凝的水汽质量分量。 Δt_1 为吸附剂在通道结构上等量降温过程前后的温差， Δt_2 为吸附剂在冷凝端等量降温过程前后的温差。

此外，整个工作环境中处于真空，热传导为主要换热方式，因此可以近似得到水汽通道表面的换热量为：

$$Q_1 = -\lambda A \frac{\partial y}{\partial x} = m_v C_{p,v} X_1 \Delta t_1 \quad (2)$$

其中， λ 为水汽通道表面的导热系数， A 为通道表面的有效换热面积， $\frac{\partial y}{\partial x}$ 为导热方向的温度梯度。

在管式翅片的换热结构中，管径与翅片的几何参数，如翅片高度、间距、厚度均会显著影响制冷设备的换热性能[7]，因此制冷功率(SCP)与性能系数(COP)同样会在不同热循环周期中产生浮动。与之相比，板式翅片换热结构[9]内吸附质与换热器的接触面积更大，可以更明显地提高设备换热性能，但是由于结构紧凑易于造成传质堵塞，影响设备的可靠性，因而管式翅片结构更普遍用于吸附式制冷设备。

3. 仿真方案

制冷设备的结构热设计与分析由于其复杂的热循环过程，通常建立在理论计算或数值模拟的基础上[10] [11] [12]，具体主要包括吸附工质对的热力学特性、设备制冷的基本热力学循环以及回质/类回质的热力学循环[4]。本文主要围绕设备制冷的基本热力学循环开展热仿真分析，其中，吸附床与冷凝床间的通道结构为主要分析对象。

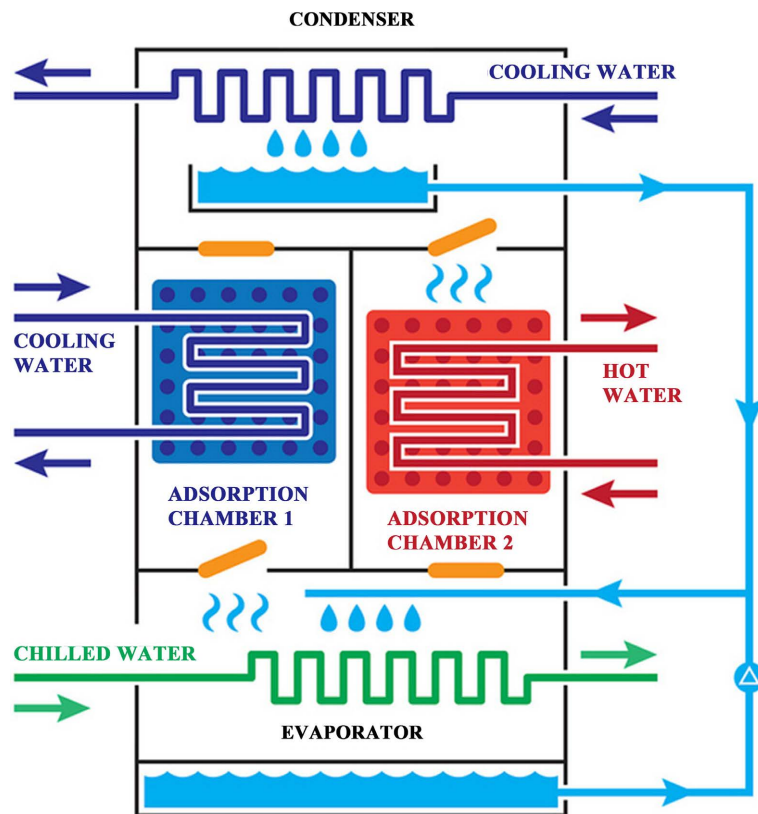


Figure 2. Working principle of the adsorption cooling
图 2. 吸附式制冷原理

该热仿真分析主要基于一项通用的工程热设计软件 FloEFD，其属于 SIEMENS 旗下并广泛应用于航天航空、机械船舶、制冷空调、消费电子产品以及汽车等工业领域[13]。与其它 CFD 软件相比，具备网格自适应、流态自动识别求解以及 MCAD 系统兼容的特点，能够极大简化工程师对于 CFD 分析的流程，同时便于在原始 CAD 模型下增加结构复杂度。

由于该吸附式制冷设备模型结构较为复杂，并存在算力限制，在尽可能保证仿真结果准确性的前提下，对该模型进行简化处理：

- 1) 忽略设备内部密闭空间的辐射换热；
- 2) 忽略冷凝床的流道结构内换热工质的沿程损失与局部损失，同时流道内为充分发展流动的对流换热；
- 3) 降低模型几何复杂度，对复杂的几何特征如倒角，零部件配合等进行简化处理。其中，冷凝床内管式翅片换热结构简化为几字型矩形截面流道，吸附床内则等效为近似体积大小的恒温热源，解吸后的水汽由热源近通道表面释放，如图 3 所示。

此外，对应的热分析模型的边界条件根据吸附床与冷凝床不同的热循环要求设置如表 1 所示，其中重力为 Z 轴方向。同时，设备外壳材料默认为铝金属，密度为 2688.9 kg/m^3 ，导热系数为 $240 \text{ W/(m}\cdot\text{k)}$ ；换热管道材料为铜，密度为 8940 kg/m^3 ，导热系数为 $387.7 \text{ W/(m}\cdot\text{k)}$ 。

网格质量与边界条件同样决定着热仿真的准确性，因此对于常规的热仿真方案来说，划分网格并判断网格的收敛性是一项重要的任务。然而 FloEFD 作为一款面向工程的仿真软件，其自带的网格划分功能可以满足工程案例中网格的精密要求[12]。在该仿真方案中，网格的初始级别设置为 2，并选用高质量

的六面体网格进行网格自动划分,其中原始结构总网格数约为 131,046,流体网格数约为 81,918,固体网格数约为 49,128,接触固体的流体网格约为 53,983。

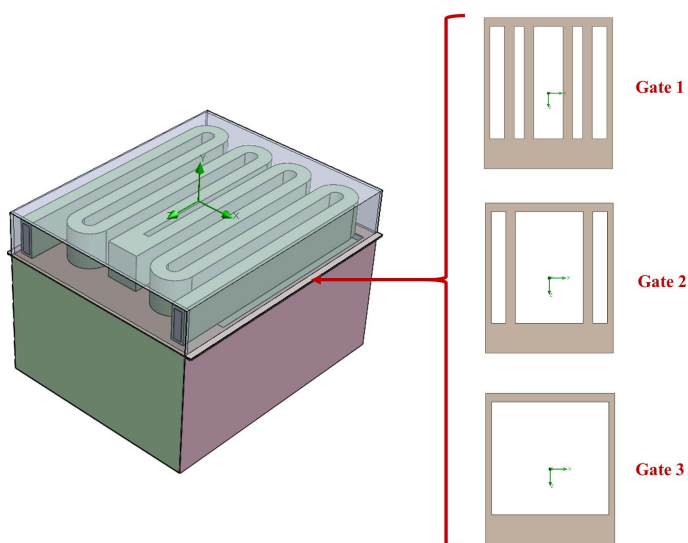


Figure 3. Simplified structure model of the cooling system for thermal analysis
图 3. 简化的制冷设备热分析模型结构

Table 1. Parameters of the boundary condition
表 1. 边界条件的参数设置

边界条件	参数
初始环境温度	22℃
吸附床内等效恒温热源温度	80℃
冷凝床内液冷流道入口水温	10℃
冷凝床内液冷流道出入口水流速度	10 m/s
设备的密闭空间内压强	10,000 Pa

4. 计算结果与分析

该热设计仿真的目的为分析特定吸附式制冷设备中的水汽通道结构对其基本热力学循环的影响。因此,根据仿真方案,设计了如图 3 所示的三组通道结构,并对其开展热仿真分析。

对于吸附剂来说,在设备工作的循环过程中主要有等压解吸,等量降温,等压吸附以及等量升温四个主要循环过程[1]。在该仿真结果的分析中,研究的换热形式主要发生在吸附剂等量温变的过程。不同的水汽通道结构会在不同程度上影响水汽进入冷凝器的效率,同时其壁面温度会随着在通道壁面冷凝的水汽含量变化而变化,从而可能影响设备整体的制冷效率,具体如图 4 及图 5 所示。

可以看到,当采用矩形孔板结构时,温度分布基本一致,高温集中在中心区域,且温度向两侧呈梯度分布。由于受重力影响,水汽相变释放的潜热更集中于通道结构的 Z 轴正方向,而最大冷凝的物质分量的位置却由于结构的不同而发生改变。由于该冷凝物质分量仅仅以通道结构为参考,因此无法在不同结构间进行冷凝质量大小的比较。特别地,当孔板结构变为单一的矩形通道时,温度分布发生变化,如图 4(c)所示,且平均温度降低了约 16%,而发生冷凝的水汽逐渐发散且主要集中于结构的 X 轴正方向,如图 5(c)所示,这可能是由于水汽直接与冷凝管接触而减少了在水汽通道上相变潜热的释放。

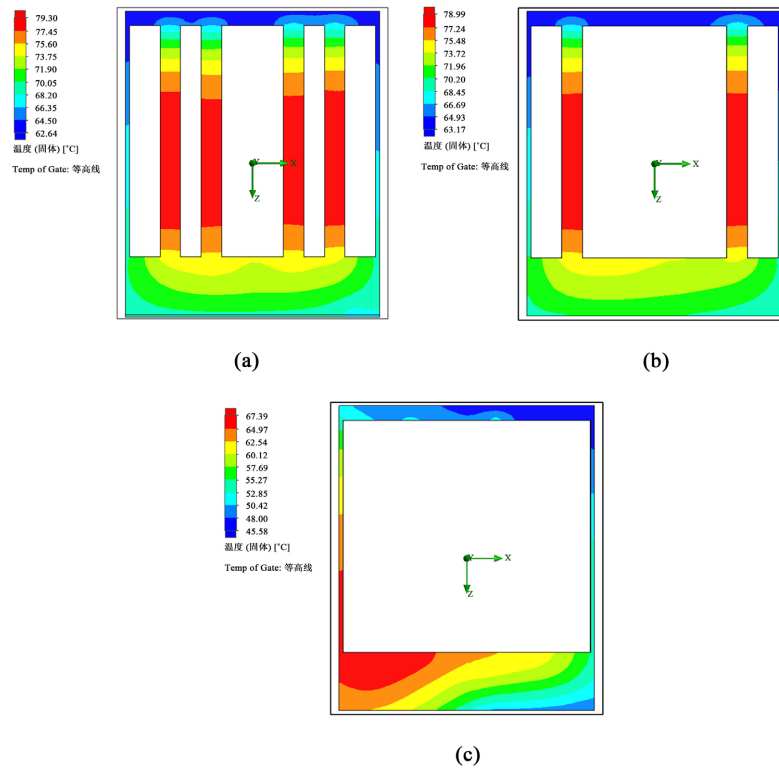


Figure 4. Temperature profiles of 3 types of tunnel structure
 图 4. 三种通道结构温度分布

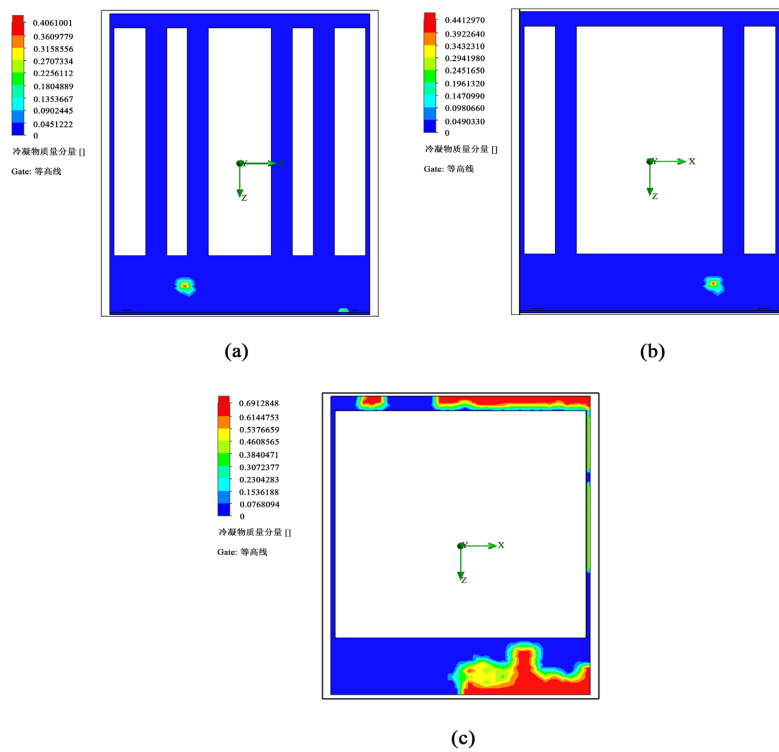


Figure 5. The amount of vapor condensed on the walls of 3 types of tunnel structure
 图 5. 三种通道结构壁面冷凝水汽分量

吸附剂在该热力学过程中处于等量降温的过程, 释放的热量 Q_1 被吸附设备内的换热结构吸收, 如公式(1)所示。由于实际的真空工作环境, 在分析过程中仅考虑热传导的换热形式。因此根据热传导的基本表达式, 水汽通道结构的栅栏面积减少, 有效换热面积减少, 因此在通道结构上的吸收的相变潜热减少, 如公式(2)所示。

结合公式(1)和公式(2), 可以知道, 在减少通道结构的有效换热面积后, 其表面冷凝的水汽质量分量也会减少, 因此更多热量导向冷凝端, 管内的换热工质会吸收更多的热量导致温度上升, 如图 6 所示。从仿真结果来看, 尽管不采用孔板结构时或许更有利于水汽在冷凝管表面的相变过程, 但会导致热量集中在通道结构的局部。由于仿真模型的简化, 导致冷凝端的有效换热面积大幅度减少, 吸附剂参与工作循环的质量因而被极大消减, 导致较大部分的热量通过机箱外壳产生了损失。该部分热损失造成冷凝管进出口水温的变化不敏感, 因此热量在通道结构的局部集中和冷凝管进出口水温变化在该结果中无法反映对吸附设备的制冷效率的影响。

由于设备的内部工作环境为低压真空, 吸附床不断产生水汽使得设备内部气压升高, 该过程为等量升温的过程。在大量水汽发生冷凝后, 冷凝端气压降低, 因此在等量降温的过程中, 吸附床解吸的水汽会不断流向冷凝端。在流动过程中, 水汽通道在此起到控制流量的作用。在该仿真过程中, 通道结构均为较薄的矩形孔板, 由于通道较短, 对于水汽的分压和分流效果并不明显, 因此结构上的温度变化也不显著, 同时由于在低压环境中主要流动流体的为水汽, 所以发生汽蚀现象[14]的概率也较低。值得注意的是, 当采用矩形孔板结构时, 冷凝管内进出口的工质温差无明显变化, 这是由于大量的热损失导致的, 因此无法通过进出口水温直接计算制冷设备的效率和性能。但对于低品位热源驱动的吸附式制冷设备, 单位制冷量为优化设计中的主要参数, 而由于该仿真控制管内换热工质流速, 不考虑吸附与脱附时间, 可以知道 SCP (Specific Cooling Power) 由制冷量与吸附器中吸附剂的质量决定的[15]。在仿真结果中, 制冷量可以从吸附剂在冷凝端有效冷凝的质量体现, 因此比起矩形多孔的通道结构, 单一矩形孔板的通道可能提供更大的制冷量, 从而提高设备的单位制冷量。

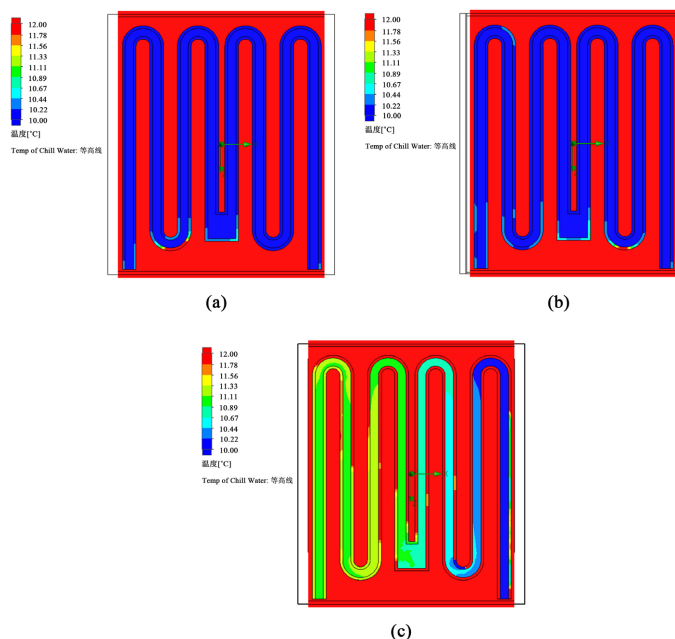


Figure 6. Temperature profiles of heat transfer working fluid in the condensers of 3 types of tunnel structure

图 6. 三种通道结构下冷凝管内换热工质温度分布

总的来说, 尽管得到了初步的仿真结果, 但并未平衡吸附质的质量流量, 这容易导致最终结果与实际失真。同时, 由于简化的热分析模型不包含吸附床及冷凝端的具体参数特征, 如换热器结构、肋片间距、吸附剂和吸附质的质量等, 导致冷凝端的换热面积不足并小于整体设备外壳的有效换热面积, 从而对水汽的冷凝热吸收不充分, 导致冷凝流道内的温差变化不明显, 无法验证特定功率下的吸附式制冷设备的制冷效率受水汽通道结构的具体影响程度。因此还原具体的设备结构参数特征以及对热力学循环的瞬态分析将有利于探究水汽通道结构对设备性能的影响。

5. 结论

该报告针对特定的吸附式制冷设备设计了三组热仿真分析方案, 主要研究对象为冷凝段与吸附床间的水汽通道结构。通过简化的热分析模型对不同通道结构的工作环境下进行了热力学仿真, 计算了结构的表明温度变化以及冷凝物质分量, 对比了对应通道结构对冷凝管内工质换热的影响。热分析模型可在增加复杂度的情况下, 结合实验对其进行验证, 验证过后的模型可用于对吸附式制冷设备的理论设计和分析。

基金项目

广州市基础与应用基础项目(No.202102021306 & No.202102080648); 广州开发区国际科技合作项目(No.2020GH08)。

参考文献

- [1] 王如竹, 王丽伟, 吴静怡. 吸附制冷理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 朱龙潜, 吴池力, 贺伟, 罗森文. 基于新型复合吸附剂的吸附制冷系统的研究和测试[J]. 应用物理, 2019, 9(1): 13-12.
- [3] Di, J., Wu, J.Y., Xia, Z.Z. and Wang, R.Z. (2007) Theoretical and Experimental Study on Characteristics of a Novel Silica Gel-Water Chiller under the Conditions of Variable Heat Source Temperature. *International Journal of Refrigeration*, **30**, 515-526. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2006.07.022>
- [4] Pons, M. and Feng, Y. (1997) Characteristic Parameters of Adsorptive Refrigeration Cycles with Thermal Regeneration. *Applied Thermal Engineering*, **17**, 289-298. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(96\)00020-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(96)00020-8)
- [5] Maggio, G., Freni, A. and Restuccia, G. (2006) A Dynamic Model of Heat and Mass Transfer in a Double-Bed Adsorption Machine with Internal Heat Recovery. *International Journal of Refrigeration*, **29**, 589-600. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2005.10.005>
- [6] 侯庆林, 马连湘. 化学吸附式制冷吸附床的模拟研究与结构分析[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2014, 35(1): 63-66+72. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-6987.2014.01.014>
- [7] 胡伟, 赵越. 硅胶-水吸附式制冷系统吸附床结构优化研究[J]. 科学技术创新, 2021(2): 1-8. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1328.2021.02.002>
- [8] Sapienza, A., Santamaria, S., Frazzica, A. and Freni, A. (2011) Influence of the Management Strategy and Operating Conditions on the Performance of an Adsorption Chiller. *Energy*, **36**, 5532-5538. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.020>
- [9] Dong, L., Suzuki, Y. and Kobayashi, N. (2009) A Novel Hybrid Adsorption Heat Pump Water Heater. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **87**, 741-747. <https://doi.org/10.1002/cjce.20203>
- [10] Meunier, F., Neveu, P. and Castaing-Lasvignottes, J. (1998) Equivalent Carnot Cycles for Sorption Refrigeration: Cycles de Carnot équivalents pour la production de froid par sorption. *International Journal of Refrigeration*, **21**, 472-489. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(97\)00084-4](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(97)00084-4)
- [11] Meunier, F., Kaushik, S.C., Neveu, P. and Poyelle, F. (1996) A Comparative Thermodynamic Study of Sorption Systems: Second Law Analysis. *International Journal of Refrigeration*, **19**, 414-421. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(96\)80113-7](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(96)80113-7)
- [12] 田野, 刘剑超, 朱学凯. 某密闭机箱结构设计及热仿真分析[J]. 机电工程技术, 2021, 50(8): 204-207. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-9492.2021.08.057>

-
- [13] SIEMENS (n.d.) Simcenter FLOEFD.
<https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/simcenter/floefd.html>
- [14] 钟亮, 戚得新, 周豪. 离心泵的汽蚀及预防措施[J]. 内燃机与配件, 2022(3): 100-102.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-957X.2022.03.031>
- [15] Zhu, L.Q., Tso, C.Y., Chan, K.C., Wu, C.L., Chao, C.Y.H., Chen, J., *et al.* (2018) Experimental Investigation on Composite Adsorbent-Water Pair for a Solar-Powered Adsorption Cooling System. *Applied Thermal Engineering*, **131**, 649-659.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.053>