

中空纤维膜除湿器除湿过程对除湿效率的影响因素研究

李岳高, 赵 军

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2023年12月13日; 录用日期: 2023年12月28日; 发布日期: 2024年1月31日

摘 要

在工业生产、低温生物医疗等领域中往往需要空气达到较低的相对湿度, 因此需要对空气进行除湿处理。本文以PVDF膜构建单膜管中空纤维除湿器为研究对象, 通过CFD (Computational Fluid Dynamics) 数值模拟的方法研究了中空纤维膜除湿器除湿过程中的一些参数对除湿效率的影响。通过分析得出在一定范围内增大湿空气进气流速可以提高除湿效率、增加吹扫气流速会使除湿效率下降, 增大膜两侧湿空气和吹扫气的温差可以增强传热过程, 提高除湿效率, 最佳的孔隙率选取范围为60%~80%, 入口处湿空气相对湿度应在合理范围内, 过高的相对湿度容易引起湿工况导致除湿效率下降。

关键词

湿空气, 中空纤维膜除湿器, 数值模拟, 除湿效率

Research on the Influencing Factors of Dehumidification Efficiency during the Dehumidification Process of Hollow Fiber Membrane Dehumidifiers

Yuegao Li, Jun Zhao

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 13th, 2023; accepted: Dec. 28th, 2023; published: Jan. 31st, 2024

Abstract

In industrial production, low-temperature biomedical and other fields, it is often necessary to

achieve lower relative humidity in the air, so dehumidification treatment is required. This article takes the construction of a single membrane tube hollow fiber dehumidifier using PVDF membrane as the research object and studies the influence of some parameters in the dehumidification process of the hollow fiber membrane dehumidifier on the dehumidification efficiency through CFD (Computational Fluid Dynamics) numerical simulation method. Through analysis, it is found that increasing the inlet flow rate of moist air within a certain range can improve dehumidification efficiency while increasing the flow rate of blowing air can lead to a decrease in dehumidification efficiency. Increasing the temperature difference between moist air on both sides of the membrane and blowing air can enhance heat transfer and improve dehumidification efficiency. The relative humidity of moist air at the inlet should be within a reasonable range, and the optimal porosity range is 60% to 80%. Excessive relative humidity can easily cause a decrease in dehumidification efficiency under wet conditions.

Keywords

Wet Air, Hollow Fiber Membrane Dehumidifier, Numerical Simulation, Dehumidification Efficiency

Copyright © 2024 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

空气制冷循环从大气环境中吸取空气, 将其作为制冷工质完成循环[1]。因为环境空气的湿度无法控制, 高湿空气会在系统中温度较低位置凝结成液态水甚至结冰, 会对其产生诸多不利影响如冰堵、腐蚀等。所以需要采取一些除湿方法降低系统的含湿量, 目前空气除湿技术有冷凝除湿、溶液吸收除湿、固体吸附除湿、膜除湿等[2]。

本文选用的膜除湿技术依托膜分离技术为基础, 膜分离技术利用膜材料的选择透过性使含水蒸气的高湿空气经过膜的表面时, 水蒸气与其他气体成分分离。两侧的水蒸气压力差是分离的驱动力, 在渗透侧如果不能将渗透过的水蒸气及时排出, 会产生浓差极化现象, 导致除湿性能下降, 抽真空和吹扫是解决此问题的主要方法[3]。任春波[4]等人用反吹扫和抽真空的方式提升了膜除湿器的除湿效率, 研究表明抽真空的除湿效果优于反吹扫, 但系统中添加了真空泵增加了功耗, 相比抽真空反吹扫更加节能, 同时证明除湿性能会受真空度、吹扫比、进气压力等因素影响。膜材料是此项除湿技术的关键, 根据膜的化学性质和物理结构两点可以将其分类为微孔膜、复合膜、均质膜三类, 按照材料可以分为无机膜和有机膜两类[5]。良好的膜材料应具有机械强度高、抗腐蚀性、分离因子高、便于工业化生产等特点。刘红梅等人[6]将 PVDF 膜经过涂覆法改性使其变成疏水膜, 使其疏水性明显提升。李文华[7]通过 PVDF 聚合物制作出防水、除湿、有良好力学性能的纳米纤维除湿膜。

国内外对影响膜除湿器除湿性能影响的因素研究较少。Si-Min Huan [8]等人研究通过设计一种错流椭圆形中空纤维膜接触器, 探索了基于 Happel 自由表面模型的热质传质机理。研究者采用解析方法, 建立了空气和溶液中动量、热量和质量传输的方程。通过将计算结果与实验数据进行比较, 研究发现, 相对于传统圆形截面的中空纤维管, 基于椭圆形截面的错流中空纤维膜组件在传热和传质方面均取得了显著的改善效果。这些研究成果表明, 椭圆形中空纤维膜接触器在相关领域的应用具有潜力, 能够提高传热和传质效率。Soheil Soleimanikutanaei 等人[9]采用基于实心壁冷凝和毛细冷凝理论相结合的数值模型, 模拟了运输膜冷凝器换热器内部的传热传质过程, 优化了 TMC 的设计。庚立志[10]通过实验和数值模拟相结合的方法,

研究了膜调湿组件的加湿和除湿性能。研究内容包括分析入口参数对加湿膜组件性能的影响规律, 以及膜材料孔隙率参数对膜组件传热传质性能的影响。此外, 还比较了内冷型和绝热型逆流式中空纤维膜组件在除湿性能方面的差异。茹康杰[11]在高湿气体经过纤维膜组件的水回收过程中, 以疏水性 pvdf 中空纤维膜为组件建立三维模型用 CFD 软件, 用数值模拟的方法研究了膜两侧流体的温差、流量比、高湿气体参数以及膜的孔隙率对水回收性能的影响。本文对 PVDF 疏水型中空纤维膜组件进行物理模型的选取确立, 三维建模后借助 CFD 软件对各个参数对除湿性能及跨膜通量的影响进行了研究。

2. 几何模型

在除湿器中, 微孔膜起到传质的关键作用。传质过程涉及膜两侧和膜孔内的水蒸气传递。具体来说, 高湿气体的水蒸气在驱动下, 从高湿气体一侧扩散到微孔膜的表面, 在此处形成压力差并通过膜孔扩散到吹扫气一侧。然而, 使用气液分离膜时, 液相表面张力会降低, 导致液体渗入膜孔。由于气体在液体中的扩散速率较慢, 一旦膜孔被液体干燥剂浸润, 膜的传质阻力会明显增加。为解决这个问题, 在膜除湿器中通常采用疏水性微孔膜材料, 以防止液体干燥剂渗入膜孔, 从而保持传质效率。本文使用改性 PVDF 疏水性膜材料可以有效减轻液体干燥剂的渗透, 并降低传质阻力, 提高除湿效果。

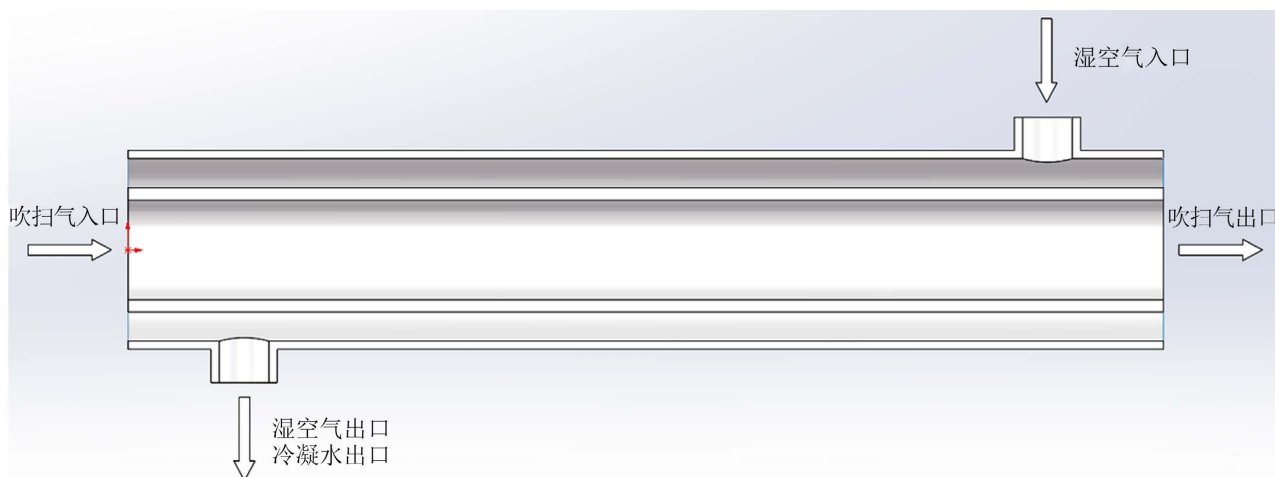


Figure 1. Model of single membrane dehumidifier

图 1. 单膜管除湿器模型

Table 1. Related parameters of hollow fiber membrane dehumidifier

表 1. 中空纤维膜除湿器相关参数

项目	数值	单位
流动方式	逆流	----
布置方式	水平	----
表面张力	0.072	mm ²
膜管内径	2.4	mm
膜管外径	3	mm
有效膜面积		mm
密度	1.77	g/cm ³
导热系数	0.19	W/(m K)
平均颗粒孔径	160	nm

为了能够更好的利用 CFD 软件对除湿过程进行数值模拟。利用三维软件建立一个三维的 3D 的单膜管中空纤维膜除湿器, 如图 1 所示。该膜管呈水平放置, 流动方式是逆流, 湿空气由壳程右上方进入左下方流出, 吹扫气在膜管侧流动。具体的中空纤维膜除湿器相关参数, 如表 1 所示。

3. 数值模拟

3.1. 控制方程

为了探讨中空纤维单膜管冷凝器的除湿特性及影响因素, 建立了湿空气侧和吹扫气侧的数值模拟控制方程。数值模拟计算域中的动量、能量、质量和组分运输方程如下所示:

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\mathbf{v}(\rho E + p)) = -\nabla \cdot \left\{ k_{eff} \nabla T - \sum_i h \mathbf{J}_i + (\boldsymbol{\tau}_{eff} \cdot \mathbf{u}) \right\} + \dot{S}_M \quad (1)$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \left[\mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) \right] + \rho \mathbf{g} + \dot{S}_E \quad (2)$$

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = \dot{S}_m \quad (3)$$

组分运输方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} Y_i) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_i + \dot{S}_i \quad (4)$$

其中 \dot{S}_M 为动量源项、 \dot{S}_m 为质量传递源项、 \dot{S}_E 为能量源项、 Y_i 为组分 i 的质量分数、 \mathbf{J}_i 为组分 i 的跨膜通量, 为自定义附加率对应的源项。

3.2. 模型选择

3.2.1. 多相流模型

VOF 模型可通过求解一组动量方程并且跟踪整个流域中的所有流体的体积分数对多种不混溶流体进行建模。高湿气体在流动中凝结有明显的相界面, 在分层流动和拥有自由界面的流动情况中 VOF 模型有高适用性。

Lee 模型是相变源项模型, 其采用气体动力学以温差描述相变过程。

在 Lee 模型中传输控制方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \mathbf{V}_v) = \dot{m}_v - \dot{m}_l \quad (5)$$

其中 \dot{m}_v 与 \dot{m}_l 是气体单位体积的凝结质量流量和气体单位体积的蒸发质量流量、 α_v 为蒸汽的体积分数、 ρ_v 为蒸汽密度、 \mathbf{V}_v 为气相速度。

传质过程可以描述如下:

If $T_l > T_{sat}$:

$$\dot{m}_{l_v} = \text{coeff} * \alpha_l \rho_l \frac{(T_l - T_{sat})}{T_{sat}} \quad (6)$$

If $T_v < T_{sat}$:

$$\dot{m}_{vl} = \text{coeff} * \alpha_v \rho_v \frac{(T_{\text{sat}} - T_v)}{T_{\text{sat}}} \quad (7)$$

本文使用 UDF 编译相变温度压力变化, 并结合 Lee 模型实现中空纤维膜气体侧相变模拟。

3.2.2. 多孔介质模型

J. Bear 提出用多孔介质具有多项、固体骨架大且孔隙狭窄和孔隙互相连通三个特点定义多孔介质。多孔介质中各向同性的多孔介质动量方程源项:

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right) \quad (8)$$

其中, S_i 是 i 方向动量方程源项, μ 为动力粘度, α 是渗透率。 v_i 为 i 方向速度, C_2 是惯性阻力系数, ρ 为流体密度, $|v|$ 为速度大小。

粘性阻力系数:

$$C_1 = \frac{1}{\alpha} = \frac{150 (1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3} \quad (9)$$

惯性阻力系数:

$$C_2 = \frac{3.5 (1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} \quad (10)$$

式中 D_p 为材料颗粒等效直径、 ε 为孔隙率。

4. 结果与分析

4.1. 湿空气侧入口流速的影响

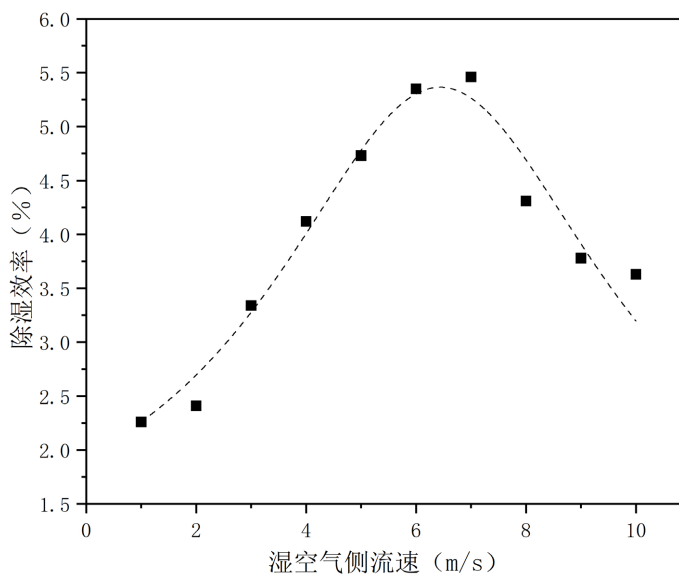


Figure 2. The influence of dehumidification efficiency on the flow rate of humid air on the side

图 2. 除湿效率随湿空气侧流速的影响

空气流速会对跨膜压差以及传热产生影响, 从而影响到气体跨膜运输过程。本节在入口温度为 300 K、

湿度为 18 g/kg、吹扫气流速为 5 m/s、膜管的孔隙率在 60%，入口速度的取值范围为 1 m/s~10 m/s 的情况下进行研究。

由图 2 可知，除湿效率随入口速度的增大呈现先增大后减小的趋势。在较低流速增加范围内，随着流动速度的不断增大除湿效率也随之增大，这是因为增加流动速度强化了传热过程、增大了膜两侧的跨膜压差，跨膜压差为气体跨膜传质的驱动力，使得更多的水蒸气跨膜运输到膜的另一侧。在 7 m/s 节点后呈现流速越大除湿效率越低的情况是因为当入口流速过快时空气停留时间减少，热量无法及时传递，热损失增加导致水蒸气相变减少，从而使整个传热传质过程被削弱。在增加流速的同时可以采用增加膜管数量、膜面积等方法提高除湿效率。

4.2. 吹扫气侧入口流速的影响

采用吹扫气方法可以有效解决在渗透侧聚集水分子导致除湿性能急剧下降的浓差极化现象。本节选取湿空气测流速为 4 m/s 时的工况，吹扫气流速范围为 1~5 m/s 的情况下进行研究。

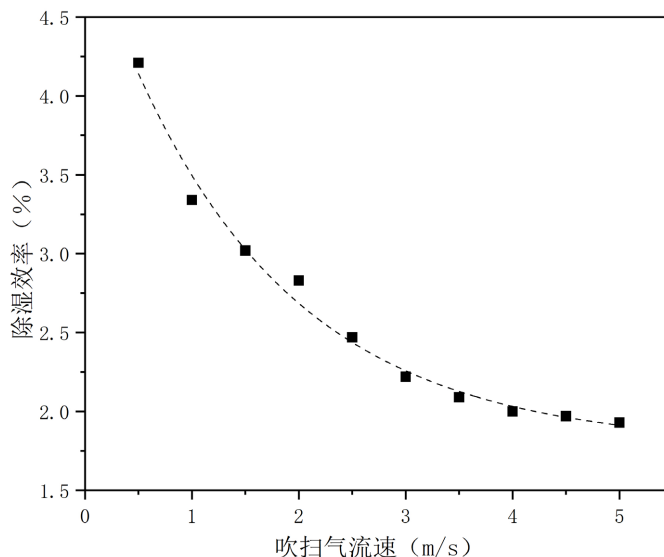


Figure 3. The effect of dehumidification efficiency on the flow rate of the blowing gas side

图 3. 除湿效率随吹扫气侧流速的影响

如图 3 所示，在此工况下除湿效率随着吹扫气流速的增加而逐渐下降，下降速率逐渐放缓。导致这种情况产生的原因主要是一方面由于吹扫气流速增加在管内停留时间减少，沿管径方向扩散减弱与膜层接触减少导致削弱了水蒸气相变过程。另一方面随着吹扫气的流速增加，传质驱动力跨膜压差减小，导致传质过程被削弱，总除湿效率下降。

4.3. 孔隙率的影响

在普遍的研究中，多孔介质的内部结构特性会使用孔隙率来定义。孔隙率是用来度量一个多孔介质特性的无量纲物理量，通常是指孔隙体积与整个多孔介质体积的比值，用 ϕ ：

$$\phi = \text{孔隙体积} / \text{总体积} = V_p / V_t \quad (11)$$

孔隙率对于整个除湿过程至关重要的，其影响着传热传质的过程。我们在同一工况下通过改变孔隙率范围 0.3~0.8 进行研究。

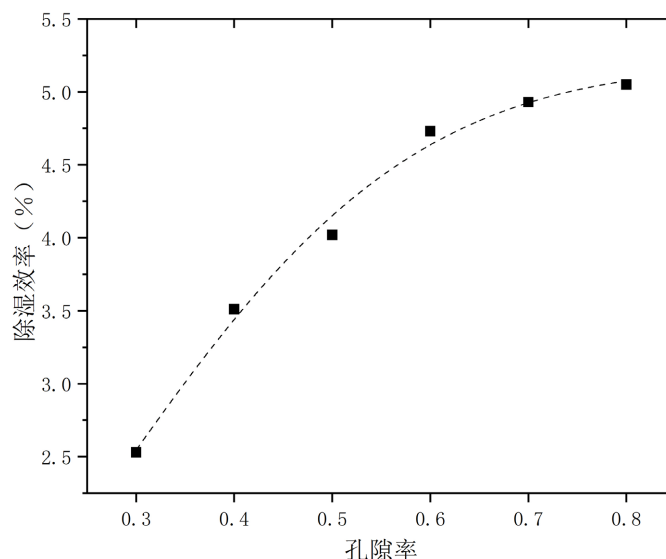


Figure 4. The influence of porosity on dehumidification efficiency
图 4. 除湿效率随孔隙率的影响

如图 4 所示: 随着孔隙率的增大除湿效率不断增大, 增大的趋势越来越缓。孔隙率增加气体跨膜阻力减小, 跨膜通量增加, 强化了传热传质过程。曲线后半段增长放缓的原因是增大孔隙率可以增加跨膜气体通量, 但是跨膜气体增大的同时也减小了膜内外气体的压差、提高了吹扫气侧的温度抑制了除湿过程。

4.4. 入口处湿空气含湿量的影响

控制吹扫气工况不变, 入口的相对湿度是影响换热传质的驱动力。本节选取入口处范围 30~100% 进行研究。

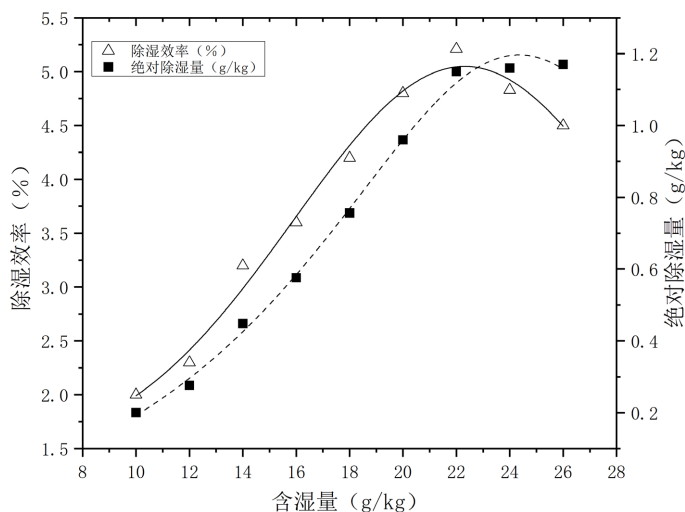


Figure 5. The influence of moisture content at the inlet on dehumidification performance
图 5. 除湿性能随入口处含湿量的影响

如图 5 所示, 控制其他工况不变改变相对湿度, 随着相对湿度增加除湿效率先增加后减少。因为随着相对湿度变高, 湿空气侧水蒸气分压力增大, 因为吹扫气工况不变, 所以跨膜压差增大传质驱动力增

强, 导致除湿量增大。另一方面, 虽然入口处含湿量增大, 出口处的含湿量增大, 但入口处含湿量增大速率大于出口处含湿量增大速率, 所以除湿效率也相应增加。随着入口处含湿量增加, 除湿效率在后半段出现增长放缓的情况, 是因为部分水蒸气未透过膜便在表面大量结露, 出现“湿工况”的情况, 导致传热传质性能下降。

4.5. 膜两侧流体温差的影响

温度会直接影响水蒸气在空气中的饱和度, 并且温差可由湿空气入口温度及吹扫气温度两侧影响, 为了控制变量设计控制湿空气入口温度不变改变吹扫气温度组、控制吹扫气温度不变改变湿空气入口温度两组实验来研究温差对除湿性能的影响。

如图 6 所示, 在控制吹扫气温度不变通过增加湿空气入口温度来增加温差。随着两侧温差增大, 增强了气体的跨膜运输, 因此气体跨膜通量增大。控制吹扫气温度不变, 增加温差也使跨膜热通量增大, 正向加强传热传质驱动力。除湿效率明显增大。在控制湿空气入口温度不变通过增加吹扫气温度增加温差。随着两侧温差增大传热的方向发生改变, 传质驱动力下降, 膜外侧凝结水量下降, 除湿效率变低, 变化趋势比控制吹扫气温度不变改变湿空气入口温度组变化缓慢, 从 5 K 到 30 K 除湿效率降低了 16%。而控制吹扫气温度不变组, 是随着温差的增大, 除湿效率有明显的上升, 从 5 K~30 K 除湿效率增长了 27%。

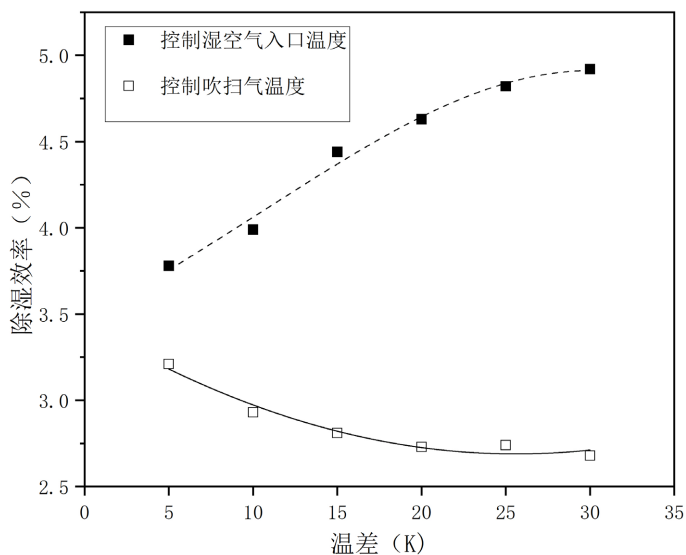


Figure 6. The effect of dehumidification efficiency on the temperature difference between the two sides of the fluid

图 6. 除湿效率随两侧流体温差的影响

5. 结论

本文对湿空气在改性 PVDF 疏水材料的单膜管除湿器中的除湿过程进行研究。利用建模软件对 PVDF 中空纤维膜组件进行三维模型建立, 通过 CFD 数值模拟的方法研究了湿空气侧流速、吹扫气侧流速、膜两侧流体温差、入口处湿空气的含湿量以及孔隙率对除湿性能的影响, 主要结论如下:

1) 在一定范围内增大湿空气进气流速有利于提升除湿效率, 最大可以将除湿效率提升 58.6%。继续增加湿空气进气流速, 流体在膜组件中停留时间过短, 导致传热传质过程不充分。除湿效率降低 33.5%。

2) 在一定范围内增大吹扫气流速会使除湿效率明显下降, 增大到一定范围后吹扫气流速对除湿效率的影响减小, 由最大下降 21.6% 到最小 4.1%。

- 3) 膜材料参数对除湿过程至关重要, 提高孔隙率有利于强化除湿过程。最佳孔隙率范围在 60%~80%。
- 4) 增加入口处湿空气相对湿度可以提高除湿效率, 最高可以将除湿效率提高 61.1%。继续增加入口处湿空气相对湿度会出现湿工况的情况不利于除湿过程, 使除湿效率降低。
- 5) 在正向传热的情况下, 增加湿空气和吹扫气之间的温差能够提高除湿效率。温差增大到 20 K 后除湿效率增长逐渐放缓。

参考文献

- [1] Nóbrega, C.E.L. and Sphaier, L.A. (2013) Desiccant-Assisted Humidity Control for Air Refrigeration Cycles. *International Journal of Refrigeration*, **36**, 1183-1190. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.01.003>
- [2] 朱冬生, 剧霏, 李鑫, 等. 除湿器研究进展[J]. 暖通空调, 2007(4): 35-40+23.
- [3] 崔少云, 宋媛, 李志勇. 除湿技术研究综述与展望[J]. 机械管理开发, 2021, 36(10): 288-291.
- [4] 任春波, 沈兆欣, 吴庆元, 等. 全氟磺酸树脂中空纤维膜压缩空气除湿性能研究[J]. 宇航计测技术, 2018, 38(6): 68-72+62.
- [5] 王倩. 膜除湿技术在压缩空气干燥及空调领域的应用[J]. 煤气与热力, 2014, 34(3): 31-36.
- [6] 刘红梅, 张立志, 裴丽霞. 聚偏氟乙烯膜的疏水改性[J]. 化工新型材料, 2011, 39(4): 80-83.
- [7] 李文华. 溶液除湿系统用除湿膜的制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2020.
- [8] Huang, S.M. and Yang, M.L. (2014) Heat and Mass Transfer Enhancement in a Cross-Flow Elliptical Hollow Fiber Membrane Contactor Used for Liquid Desiccant Air Dehumidification. *Journal of Membrane Science*, **449**, 184-192. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.08.033>
- [9] Soleimanikutanaei, S., Lin, C.X. and Wang, D.X. (2018) Modeling and Simulation of Cross-Flow Transport Membrane Condenser Heat Exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **95**, 92-97. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.04.002>
- [10] 庚立志. 逆流式中空纤维膜调湿组件性能研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京建筑大学, 2021.
- [11] 茹康杰. PVDF 中空纤维膜水回收过程数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2022.