

填料加湿器内部通道传热传质特性的数值研究

刘允,韩东,何伟峰,司泽田

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘要:采用一种新的二维模型对加湿器填料内水和湿空气直接接触传热传质过程进行数值研究,研究结构参数、进气速度和湿度对传热传质的影响,应用渗透传质理论精准预测水蒸气浓度场。结果表明:出口水蒸气的质量分数随进气速度增加而降低,随进气湿度增加而增加。基于结构参数改进得出最优填料通道结构。

关键词:加湿器;填料;加湿过程;计算流体力学;渗透传质理论

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)06-0099-04

Numerical Investigation of Heat and Mass Transfer Characteristics within Narrow Channel in Humidifier

LIU Yun, HAN Dong, HE Weifeng, SI Zetian

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A new two-dimensional model is used to study heat and mass transfer process of direct contact between water and wet air in the packing of humidifier. The effects of structure parameters, inlet velocity and humidity on heat and mass transfer are discussed. The penetration mass transfer theory is applied to predict the water vapor concentration field with accuracy. The results show that the mass fraction of water vapor in the outlet decreases with the increase of inlet velocity and increases with the increase of inlet humidity, and the optimal structure is obtained based on the improvement of structural parameters.

Keywords: humidifier; packing; humidification; computational fluid dynamics; penetration mass transfer theory

0 引言

填料式加湿器因其效率高、成本低而被广泛应用于海水淡化^[1]、湿空气透平循环(HATC)^[2]等系统。填料作为加湿器的主要设备,对决定加湿器的运行能力起着重要的作用。因为传热传质过程主要发生在填料区,与空气接触形成一层薄薄的水膜。因此,准确预测填料在加湿器中的传热传质性能是该技术应用的关键。

目前,人们对填料区的流动及传热传质过程进行了大量的研究^[3-4]。其中,CFD方法因可以清晰分析填料内部动态过程,被认为是最直观、有效的方式。在加湿器中,流体的动力学影响和湿空气吸收水蒸气是相互耦合的,因此可以用CFD模型来模拟这种情况。OWENS S A等^[5]使用Mellapak N250Y结构填料,计算过程中对填料的压降进行了CFD研究,模拟结果与实验结果吻合较好。罗文媛^[6]对Mellapak 350Y型规整填料建立了三维的物理模型,并采用VOF方法对填料内流体的流动进行数学描述,模拟研究了随着液体喷淋量的变化,其持液量也发生了明显的变化,其结果与实验结果能够较好地吻合。SINGH R K等^[7]建立了基于VOF方法的三维逆流模型,模拟了规整填料塔中溶剂吸附后的碳捕集过程,考察了接触角对界面

面积和持液率的影响。后来,RAYNAL L等^[8]研究了面间流动的行为以及表面处理对这种现象的影响。通过对光滑壁和波纹壁两种结构的比较,发现表面处理有助于保持液体通道,增加润湿面积。

综上所述,大多数研究者只关注于用CFD研究进气温度和水温以及流体力学性能,而对结构参数、进气速度和进气湿度对填料加湿器内部传热传质过程的影响却鲜有报道。本文的目的是采用流体体积法(VOF)对加湿器内的水和湿空气直接接触传热传质机理及强化过程进行数值研究,同时应用一种新的二维模型对降膜流动及传热传质特性进行分析。针对设计参数,研究进气湿度和进气速度对加湿器填料的优化设计具有重要意义。

1 数学模型

1.1 几何模型

本文对波纹通道具有传热传质的气液非稳态流动进行了数值模拟。计算域的模型示意图如图1所示。通道长度为100 mm,宽度为12 mm。通过左上方的进水口宽度为2 mm,右下方的湿空气入口宽度为10 mm。这样,水和湿空气可以实现两相逆流流动。

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(NP2018107;NG2020007)

第一作者简介:刘允(1996—),男,陕西西安人,硕士研究生,研究方向为海水淡化热质耦合特性。

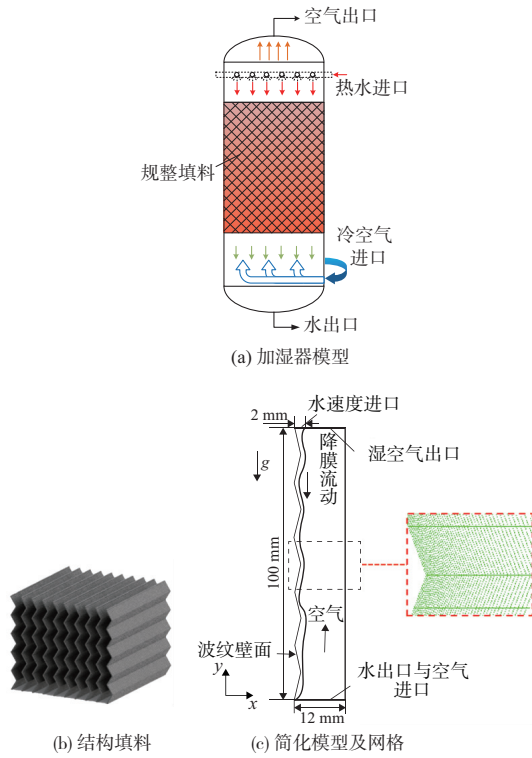


图1 模型示意图

1.2 控制方程

a) VOF 方程

气-液界面的跟踪采用了各种计算自由表面流的数值方法中应用最广泛的 VOF 界面跟踪技术。VOF 法通过跟踪计算单元 φ_i 中 i 相体积分数的分布来确定气-液界面的位置。气-液界面的分布表示为:

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial t} + V \cdot \nabla \varphi_i = 0 \quad (1)$$

$$\sum_i^{j=1} \varphi_j = 1 \quad (2)$$

式中: φ_i 为 i 相体积分数的分布, 当 $\varphi_i = 0$ 时, 表示装置中没有相 i , $\varphi_i = 1$ 表示通道内充满了 i 相。气-液两相流中的密度表示如下:

$$\rho = \varphi_l \rho_l + \varphi_g \rho_g \quad (3)$$

b) 质量与能量源项

1) 质量源项

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{k_l} + \frac{1}{k_g} \quad (4)$$

其中采用渗透传质理论计算了局部传质系数 k_g 和 k_l :

$$k_g = 2 \sqrt{\frac{D_g}{\pi \tau}} \quad (5)$$

$$k_l = 2 \sqrt{\frac{D_l}{\pi \tau}} \quad (6)$$

$$\tau = \frac{l}{u_{l,surf}} \quad (7)$$

式中: l 是液体流动距离; $u_{l,surf}$ 是水膜的表面速度, 可以通过如下公式得出:

$$u_{l,surf} = 1.5Q \left(\frac{3\mu Q}{\rho g} \right)^{-1/3} \quad (8)$$

式中: Q 为流量; μ 为黏度; ρ 为密度。

传质源可通过以下方式实现:

$$S_{lg,k} = K(w_{g,e} - w_{g,b})A \quad (9)$$

2) 能量源项

在加湿填料内部传热传质过程中, 水与空气之间的传热主要分为相变潜热和显热两部分。因此能量源项可以写为

$$S_E = h_k(T_w - T_g) + S_{lg,k}H_{lg,k} \quad (10)$$

式中: h_k 为气液传热系数; H_{lg} 为潜热。

1.3 计算方法与边界条件

在集成计算机工程与制造程序 (integrated computer engineering and manufacturing code, ICEM) 中进行了计算流域开发和网格划分。为了准确地计算传热传质过程, 采用基于结构单元的梯度形式对网格进行网格划分。由于重力不可忽略, 采用了二阶离散格式, 基于压力的非稳态格式用于计算, 时间步长设定非常小 ($\Delta t = 10^{-5} \sim 10^{-4}$ s), 且对流项采用一阶迎风差分加速计算。质量和能量源项是通过 Fluent 提供的用户自定义函数 (UDF) 宏命令编写和访问的。

最初, 整个计算区域被湿空气占据, 这表明计算开始时空气的体积分数为 1, 液体的体积分数为 0。湿空气进口温度设定为 300 K, 水蒸气质量分数为 0.011 kg/kg, 进口速度分别选取 0.5 m/s、1 m/s 及 2 m/s 进行计算, 水温 350 K, 速度 1 m/s。在边界条件下, 可以设定和修改水的入口速度和温度以及湿空气的入口湿度和温度。就湿空气而言, Fluent 数据库具有其所有的物理特性, 用户只需在软件中选取空气和水蒸气这两种成分进行混合。

2 问题验证

2.1 网格独立性验证

为保证仿真结果的准确性, 采用 4 个网格对不同单元进行独立性研究。为了节省计算资源, 网格密度从水到湿空气逐渐减小。在水膜壁面附近, 保持第一网格 $y^+ \sim 1$ 最小尺寸为 0.01 mm。相应地, 网格用于 y 方向上的尺寸为 0.3 mm。如图 2 所示, 经计算发现第三、第五网格出口空气温度差在 0.15 K 以内, 对于气体出口处的水蒸气质量分数, 第三网格和第五网格之间的差异非常小, 可以忽略不计。考虑到计算资源和成本, 仿真选择 68×330 网格。

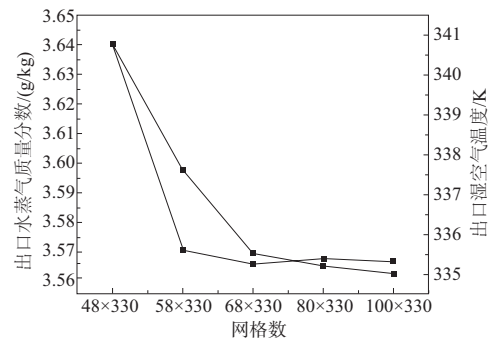


图2 网格独立性验证

2.2 数值方法验证

为了进一步验证所建立的模型, 将本文的计算结果与

参考文献[9]中的参考值进行了比较。如图3所示,将仿真值与文献值进行了比较,误差控制在7%以内,证明本文所采用的数学模型和UDF是完全合理的。

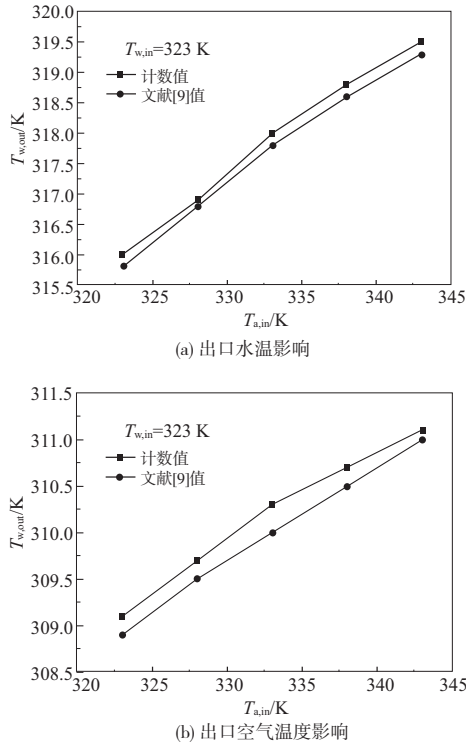


图3 进口水温对两种参数影响

3 结果与分析

3.1 结构参数比对传热传质影响

物理模型结构参数见表1。由图4(a)发现:不同的波纹结构参数比(α/λ)在出口空气中具有不同的水蒸气质量分数。随着 α/λ 的增大,出口空气中水汽的质量分数也增大,当 α/λ 为0.15时,出口空气中水汽的质量分数最大,其质量分数值为0.0356 kg/kg。其原因是当 α/λ 从0.15增大到0.2,即水蒸气质量分数从0.0356 kg/kg下降到0.0314 kg/kg,滞留液会在波谷堆积形成漩涡,从而引起流动分离,在局部区域产生水滞留,减缓传热传质过程。图4(b)给出了不同参数比下水蒸气质量分数等值线。研究发现,波纹通道的加湿性能优于平板通道。影响波纹通道传热传质性能的因素有两个方面。一方面,波纹通道与平板通道相比增加了气液有效接触面积;另一方面,空气与水之间的气液接触时间较长,有利于传质过程。以上两个因素相互耦合,导致了出口空气中水蒸气质量分数的增长变化趋势。

表1 填料通道的结构参数

结构	α/m	λ/m	α/λ
平板	0.000 0	0.01	0.00
波纹板 1	0.001 0	0.01	0.10
波纹板 2	0.001 5	0.01	0.15
波纹板 3	0.002 0	0.01	0.20

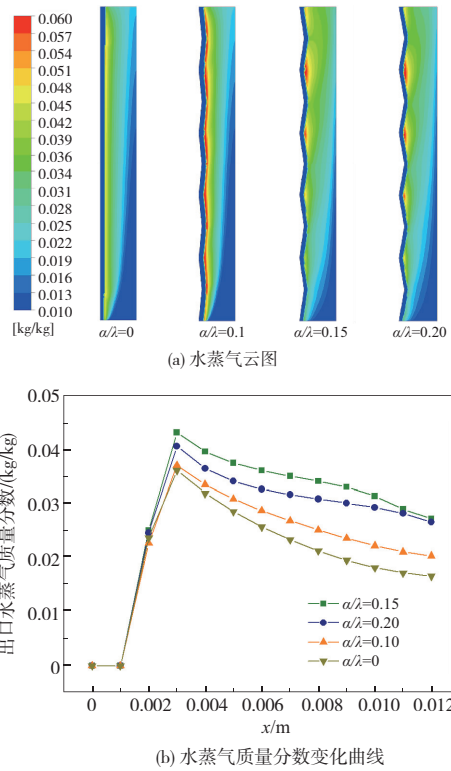


图4 不同结构参数比下水蒸气质量分数

3.2 进气速度对传热传质的影响

在以往的研究中,很少研究进气速度对加湿过程的影响。然而,进气速度对液膜状态和气液接触时间影响很大,对传热传质过程有一定的影响。因此,分别选择进气速度为0.5 m/s、1.0 m/s及2.0 m/s进行气流条件研究。图5给出了不同进气速度下的结果。

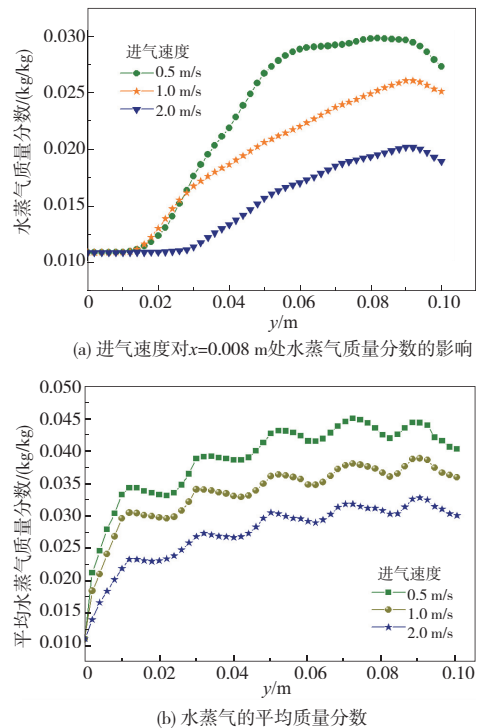


图5 不同进气速度下的水蒸气质量分数变化曲线

进气速度对 $x=0.008\text{ m}$ 处水蒸气质量分数的影响如图 5(a) 所示,壁面接触角为 20° 。结果表明,进气速度由 0.5 m/s 增加到 2 m/s ,相应的水蒸气质量分数由 0.029 kg/kg 下降到 0.019 kg/kg 。其原因是当进气速度较大时,空气与水的接触时间缩短,不利于传质过程。同时,观察到水蒸气的质量分数在 $y=90\text{ mm}$ 时减小。其原因是湿空气通过入口加湿后,出口处的传质驱动力减弱。水蒸气的平均质量分数如图 5(b) 所示,空气流速值从 0.5 m/s 增加到 2 m/s ,而水蒸气的平均质量分数从 0.0375 kg/kg 下降到 0.026 kg/kg 。此外,还发现水蒸气的平均质量分数随 y 位置的变化呈波浪形波动。其原因是,当水在波谷中积聚时,不利于传热传质过程,水汽质量分数呈下降趋势。

3.3 进气湿度对传热传质的影响

图 6 显示了气体进口相对湿度 (RH) 分别为 50%、70% 和 80% 下填料通道内部 $y=80\text{ mm}$ 截面处水蒸气质量分数梯度图。从图中可以看出,随着入口空气相对湿度的不断增加,水蒸气质量分数浓度梯度在逐渐减小。这是因为入口空气湿度的不断增加使得含湿量差驱动力在不断减小,即传质驱动力在不断减弱,随即传质梯度变得越来越模糊,这说明入口空气湿度对传热传质过程是重要的影响参数。由图 7 可以看出,在不同截面处的水蒸气质量分数梯度也会有所不同。在远离水膜的地方,传质梯度几乎为 0,说明没有发生传质。

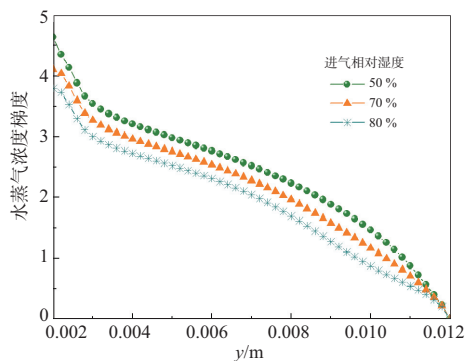


图 6 不同进气湿度下的水蒸气浓度梯度变化曲线

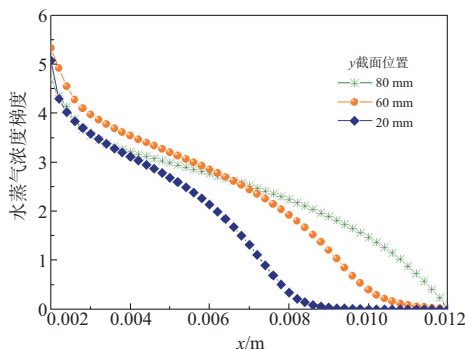


图 7 不同 y 值下水蒸气浓度梯度变化曲线

4 结语

1) 结构参数比的增大可以提高水蒸气出口质量分数,即传质效果增强。但过大的结构参数比会恶化传质结果,最佳的结构参数比控制在 0.15,可以使得传热传质效果显著提高。

2) 进气速度的降低和进气湿度的增加都可以显著提高出口湿空气中水蒸气的质量分数,其对于边界条件对传热传质影响研究具有重要意义。

3) 本文还研究了通道不同横截面处水蒸气浓度的变化梯度。当位于气体入口较近时,远离水膜处几乎不发生传质;当位于气体出口较近时,水蒸气浓度变化梯度较为明显,传热传质过程剧烈。

4) 仿真值与参考文献值具有相同的温度变化趋势,其相对误差最大值为 6.7%,由此可以验证仿真结果的正确性,即本文所采用的渗透传质理论可以预测水蒸气浓度场、水汽浓度局部梯度。

参考文献:

- [1] HE W F, YANG H X, WEN T, et al. Thermodynamic and economic investigation of a humidification dehumidification desalination system driven by low grade waste heat [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 183:848-858.
- [2] HUI Y, WANG Y Z, WENG S L. Experimental investigation of pressurized packing saturator for humid air turbine cycle [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 62(2):513-519.
- [3] 黄志甲,王永泰. 不同填料溶液除湿器热质传递过程的数值模拟[J]. 流体机械, 2013, 41(6):54-57.
- [4] CHEN J J, HAN D, HE W F, et al. Theoretical and experimental analysis of the thermodynamic and economic performance for a packed bed humidifier[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 206:112497.
- [5] OWENS S A, PERKINS M R, ELDRIDGE R B, et al. Computational fluid dynamics simulation of structured packing[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(5):2032-2045.
- [6] 罗文媛. 规整填料塔内气-液两相并流流动的传递性能研究[D]. 天津:天津大学, 2010.
- [7] SINGH R K, GALVIN J E, SUN X. Multiphase flow studies for microscale hydrodynamics in the structured packed column [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 353:949-963.
- [8] RAYNAL L, ROYON-LEBEAUD A. A multi-scale approach for CFD calculations of gas-liquid flow within large size column equipped with structured packing [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(24):7196-7204.
- [9] YU J, JIN S M, XIA Y J. Experimental and CFD investigation of the counter-flow spray concentration tower in solar energy air evaporating separation saline wastewater treatment system [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 144:118621.

收稿日期:2020-11-06