

人工环境室内湿度场的数值模拟和优化

徐俊, 蒲亮, 厉彦忠, 吕婧

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 采用 FLUENT 离散相模型对环境室内水滴的蒸发过程仿真模拟. 研究了喷入液滴直径、送风速度和送风温度对环境室内流场、湿度场的影响. 计算结果表明: 喷入液滴直径越小、送风温度越低时, 湿度场的均匀性越好; 增大送风速度, 湿度场能更快达到稳定. 综合考虑经济性和湿度场均匀性, 对于该计算模型, 在送风温度为 320 K、送风速度为 18 m/s 时得到最优的液滴直径为 10 μm ; 在送风温度为 320 K、液滴直径为 2 μm 时得到最优送风速度为 18 m/s.

关键词: 人工环境室; 湿度场; 两相流; 数值模拟

中图分类号: TU111 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)01-0077-05

Numerical Simulation and Optimization of Humidity Field in Artificially Environmental Chamber

Xu Jun, Pu Liang, Li Yanzhong, Lü Jing

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An efficient computational fluid dynamics (CFD) software, FLUENT, was employed for the simulation of evaporation process of water droplets in an artificially created environmental chamber with the discrete model. The flow and humidity fields in the chamber were investigated individually under various droplet diameter, inlet temperature and velocity. In the discrete model, the simulations of coupling particles with air were conducted using Lagrangian equation. The calculated results indicate that humidity meliorates with decreasing inlet temperature and droplet diameter. Moreover, the stabilizing time of the humidity field in the chamber is dependent on the inlet velocity. The humidity field becomes steady more easily with the increasing inlet velocity. In addition, in the chamber the optimal droplet diameter is 10 μm at an inlet temperature of 320 K and a velocity of 18 m/s, and the optimal inlet velocity is 18 m/s at an inlet temperature of 320 K for a droplet diameter of 2 μm .

Keywords: environmental chamber; humidity; two-phase flow; computational fluid dynamics(CFD)

为了保证机械器件、电气设备、仪器仪表的良好使用, 需要检测其在各种自然环境下的性能. 人工环境室是一种模拟各种自然环境下热、湿、压力等参数的试验设备. 相比直接利用自然环境, 人工环境室有节省人力和财力、缩小考核周期等优点. 当前建成有很多大型的环境模拟设备, 如我国的 KM6 大型空间环境模拟设备、华阴试验场常规武器大型环模设备, 美国的麦金利环境试验中心等.

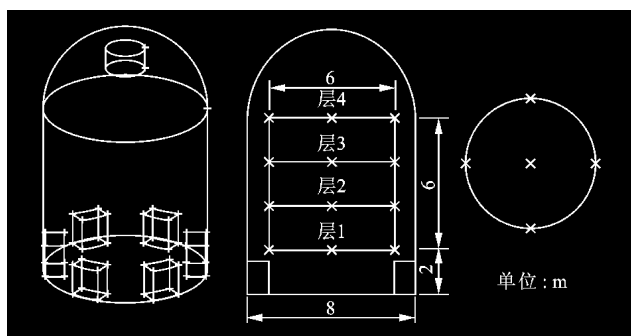
环境室要求在有效试验空间内温度梯度小于等于 1 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 总的室内温度最大误差为 2.2 $^{\circ}\text{C}$, 湿度误差为 $\pm 2\%$ ^[1]. 因此, 在环境室建造之前需要对其室内参数场进行预测和优化. 计算流体动力学 (CFD) 技术在计算室内速度场、温度场、污染物浓度场等应用场合上被证明是一种有用的工具^[2-4]. 文献 [5] 中研究了环境室内材料挥发对于空气品质 (IAQ) 的影响. 文献 [6] 研究了惰性气体室内各种

热湿参数对马口铁微粒合成的影响,将其数值模拟结果和试验数据进行比较,得到了较好的吻合。目前,学者的工作主要是对环境室内温度场、速度场的研究,而对浓度场的研究则集中在固体颗粒的分布上,对于综合湿度场的环境室内气流组织的研究是比较缺乏的,因此对影响环境室内湿度场的各种因素进行研究有重要意义^[7]。

1 模型处理

1.1 物理模型

本文研究的环境室模型如图 1a 所示,定义环境室工作区如图 1b,在其中取 20 个点作为考察工作区的样本。测点选取如图 1b 所示。环境室下部为直径 8 m、高 8 m 的圆柱体,顶部为直径 8 m 的半球体。地面均匀贴墙面布置 6 个换热器。顶部圆柱体为半径 1 m 的扰流风扇,风扇上表面距球顶 1 m。换热器的上表面为 1.5 m×1 m 的开口向上的送风口,侧面分别为 1 m×1.5 m、1.5 m×1.5 m 和 1 m×1.5 m 的出风口(为使模型方便建立,换热器按 1.5 m×1 m×1.5 m 的长方体考虑)。扰流风扇轴向竖直向下。加湿时液滴从各送风口均匀喷入,考虑饱和湿度的原因,不同送风温度和速度下液滴喷入量不同。



(a)环境室模型图 (b)工作区测点布置

图1 物理模型

1.2 数学模型

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

控制方程通用形式

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} \phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi} \text{grad} \phi) + S_{\phi} \quad (2)$$

式中: ϕ 为通用变量,代表速度矢量 $\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}$, 温度 T , 脉动动能 K , 脉动动能耗散率 ϵ ; Γ_{ϕ} 为广义扩散系

数; S_{ϕ} 为广义源项。

湍流模型采用标准 $K-\epsilon$ 模型,模型假定流场完全是湍流,分子之间的黏性可以忽略。这种模型适用于离开壁面一定距离的紊流区域。在壁面附近采用壁面函数法处理^[8]。

本文涉及的几种研究情况中,湿空气中水蒸气体积率均小于 3%。在 FLUENT 中对于体积率小于 10% 的气泡、液滴和粒子负载流动,采用二流体模型^[9]中的离散相模型,在拉氏坐标下模拟流场中离散的相。由球形颗粒(液滴或气泡)构成第二相分布在连续相中。颗粒穿过模型中的每个控制体时,分别计算颗粒的动量、热量和质量变化来求解连续相(湿空气)传递给离散相(水滴)的动量、热量和质量值,这些交换值作为“汇”作用到随后的流体动量、能量和质量守恒计算中。

液滴的蒸发速率由梯度扩散确定,即液滴向气相中的扩散速率与液滴表面和气流主体之间的蒸汽浓度梯度相关联

$$N_i = k_i(C_{i,s} - C_{i,\infty}) \quad (3)$$

式中: N_i 为液滴的蒸发速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; k_i 为传质系数, m/s ; $C_{i,s}$ 为水的饱和蒸汽浓度, kg/m^3 ; $C_{i,\infty}$ 为气相主流的蒸汽浓度, kg/m^3 。

为了分析环境室内部场的不均匀性,定义不均匀度 φ 的概念,它揭示了工作区各处参数的离散程度, φ 的绝对值越大,表示参数场的均匀性越差,不均匀度按下式计算

$$\varphi = \frac{1}{\phi_{\text{ave}}} \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\phi_i - \phi_{\text{ave}})^2}{n-1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中: φ 可以代表湿度不均匀度 α 和温度不均匀度 τ ; ϕ_i 为广义变量; ϕ_{ave} 为 n 个变量 φ 的算术平均值。

1.3 网格划分和边界条件处理

为了尽量使计算的数据贴近实际,能直接指导工程中的气流组织设计,文中的结构参数均来自于工程设计中的实际参数。各种壁面考虑实际情况取恒定热流边界条件,见表 1。网格划分如图 2 所示,圆柱体部分为六面体网格,半球体部分是四面体网格。

为了简化实际问题,以便于分析,在建立数学模型前对室内气体的流动先作了以下假设:

(1) 送风为来流速度、温度恒定的稳态紊流干空气,出风口背压恒定为 0.1 MPa;

(2) 顶部风扇无厚度,距球顶端 2 m,空气通过风扇竖直向下流动,速度为 10 m/s;

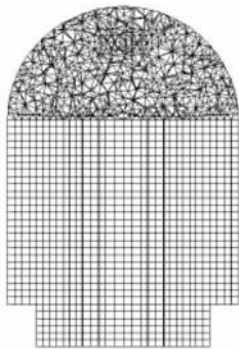
(3) 喷入液滴直径大小均匀,遇到固体壁面后直接回弹;

(4) 计算流体为干空气和水蒸气的理想气体混合物,液态水滴中不包含溶解的空气,空气的存在不影响水蒸气及其凝聚相平衡,平衡湿度和分压力对应饱和温度计算;

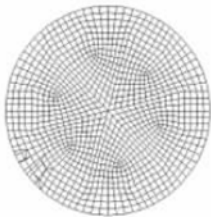
(5) 计算中不考虑室内的辐射传热.

表 1 边界设备材料特性

边界	材料	导热系数 $\lambda/W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	壁厚 /m
壁面	聚乙烯保温材料	0.036	0.4
地面	石灰石	2.250	0.6
顶棚	聚乙烯保温材料	0.036	0.4



(a) x - z 截面



(b) 横截面

图 2 网格划分

2 计算结果和分析

2.1 环境室内的温度场、速度场和湿度场的分布

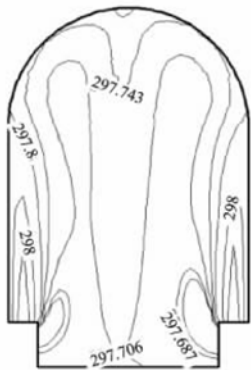
图 3 所示为在送风温度 320 K、送风速度

18 m/s、喷入液滴直径 2 μm 下,达到稳定后 x - z 截面的温度等值线图、速度矢量图和绝对湿度等值线图. 在送风口附近,流速较大,流线方向竖直向上,是水滴的主要蒸发区域,所以温度梯度很大,随着流线方向,空气温度降低,绝对湿度增大. 在主流远离壁面的区域,不断有流体脱离形成漩涡. 在空气通过风扇之后,主流方向竖直向下,靠近来流的区域有明显漩涡产生,流体会产生一个死区,此处仍有少量水滴蒸发,温度较低. 在主流区,由于没有水滴的蒸发,温度和湿度场等值线和流线接近平行,有利于场的均匀性. 由于计算中工作区未放置任何物体,所得参数场都有很好的均匀性,温度场工作区的温度梯度小于等于 0.1 $^{\circ}C/m$,满足了环境室的要求.

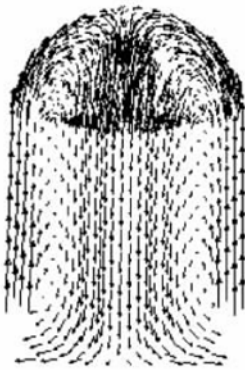
2.2 影响湿度场的因素

2.2.1 喷入液滴直径对湿度场的影响 图 4a 为在送风温度 320 K、送风速度 18 m/s 下,喷入液滴直径(D_m)不同时的湿度场特性,可以看到液滴直径越小,湿度场的不均匀度越小,直径为 10 μm 的液滴和直径为 1 μm 液滴的湿度不均匀度变化曲线重合.

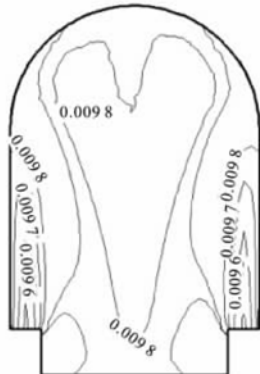
液滴直径不同,喷雾投射距离不同,直径越大,喷雾投射距离越大. 在液滴的直径足够小时,进入工作区之前液滴可以完全蒸发,从图 3a 可以看出:温度场梯度较大的部分集中在送风口附近,这也是水滴的主要蒸发区域,这样工作区温度场受到的影响很小. 另外,水蒸气的扩散作用相比液滴更加强烈,有利于工作区湿度场的均匀. D_m 为 100 μm 的液滴到达工作区后仍有部分没有蒸发,其在工作区的蒸发导致了湿度场的不均匀,所以液滴直径越小,湿度场的均匀性越好. 当 $D_m \leq 80 \mu m$ 时,湿度不均匀度从 $D_m = 100 \mu m$ 时的 0.3 急剧降到 0.1 以下,湿度



(a) 温度场等值线图

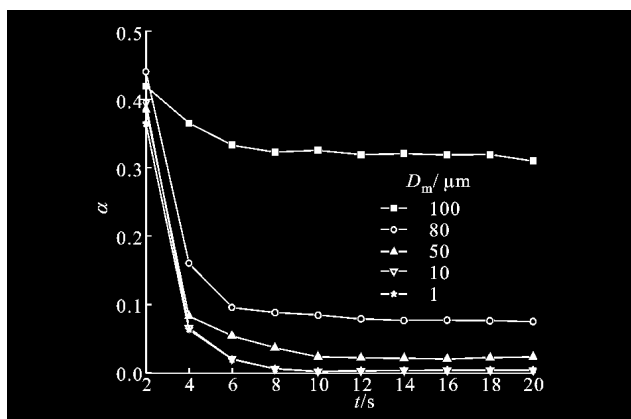


(b) 速度场矢量图

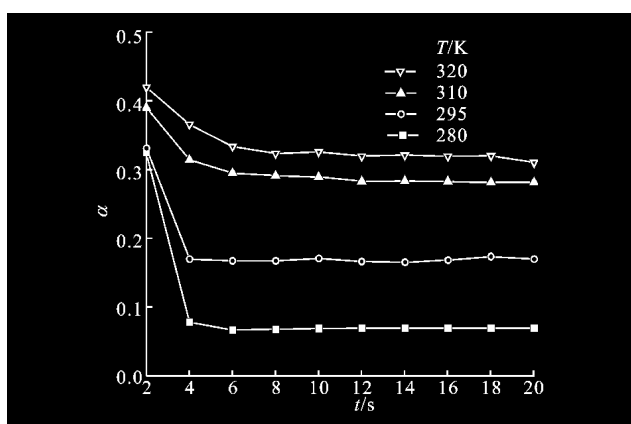


(c) 绝对湿度等值线图

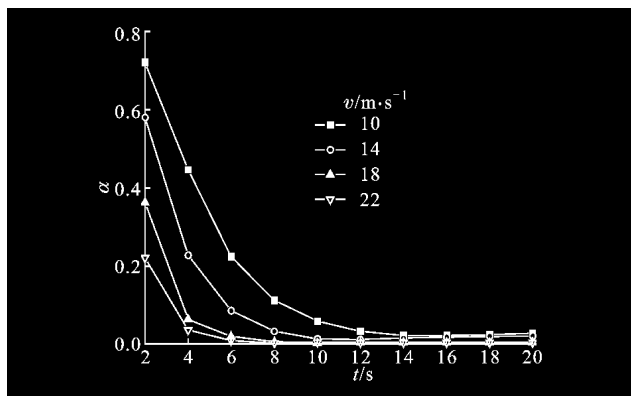
图 3 x - z 截面中各参数场



(a)不同喷入液滴直径



(b)不同送风温度



(c)不同送风速度

图4 各种条件下湿度不均匀性随时间的变化曲线

场均匀性得到了很大改善。 D_m 为 $1\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 时,变化曲线重合,说明 $D_m \leq 10\ \mu\text{m}$ 时,液滴进入工作区之前已经完全蒸发。 $D_m = 10\ \mu\text{m}$ 时可以得到最优效果。

2.2.2 送风温度对湿度场的影响 图4b为在送风速度 $18\ \text{m/s}$ 、喷入液滴直径 $100\ \mu\text{m}$ 下,送风温度不同的湿度场特性。送风温度越高,湿度场的不均匀度越大。当 $D_m = 100\ \mu\text{m}$ 时,液滴在完全蒸发之前可

以到达工作区。由式(3)可知,液滴的蒸发速率(N_i)由液滴表面区域和气流主体之间的蒸汽浓度梯度决定。温度不同,液滴表面的饱和蒸汽区域浓度不同。图5所示是在与图4同样的条件下第20 s时温度场的不均匀度。可以看出:送风温度越高,温度场的不均匀度越大。由于工作区温度场的不均匀,液滴的蒸发速率不同,工作区的湿度也不同,所以送风温度越高,不均匀度越大。

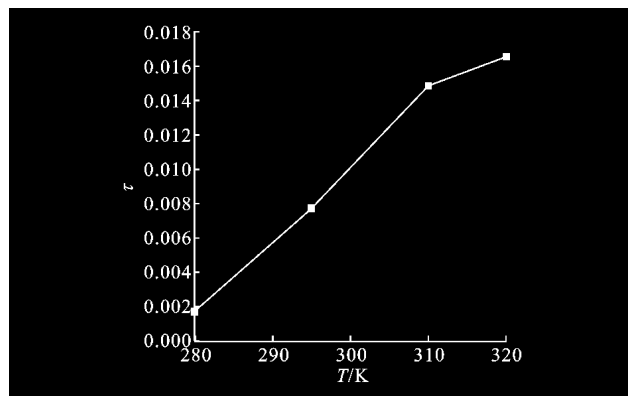


图5 不同送风温度下第20 s的温度场不均匀度

2.2.3 送风速度对湿度场的影响 图4c为在送风温度 $320\ \text{K}$ 、喷入液滴直径 $2\ \mu\text{m}$ 下,送风速度不同的湿度场特性。可以看出,送风速度为 $22\ \text{m/s}$ 时达到稳定的时刻为第6 s, $10\ \text{m/s}$ 时为第12 s。送风速度越高,水蒸气扩散越快,湿度场越快达到稳定。但是,在送风速度大于 $18\ \text{m/s}$ 之后曲线趋于重合,即再增大送风速度并不能取得更小的稳定时间,且不同送风速度下,稳定后的湿度场均匀性基本一致。

3 结 论

(1)送风温度越低,温度场和湿度场的均匀性越好。

(2)喷入液滴直径越小,湿度场的均匀性越好。在各种情况下,都相应存在一个最优液滴直径,当直径小于或等于这个值时,都可以使湿度场迅速均匀。在送风温度为 $320\ \text{K}$ 、送风速度为 $18\ \text{m/s}$ 时,最优液滴直径为 $10\ \mu\text{m}$ 。

(3)送风速度越大,湿度场达到稳定需要的时间越短,但送风速度不能影响湿度场稳定后的均匀性好坏。在送风温度为 $320\ \text{K}$ 、喷入液滴直径为 $2\ \mu\text{m}$ 时,送风速度为 $18\ \text{m/s}$ 是比较合理的。

(4)应用 FLUENT 的离散相模型预测了环境室内水滴的蒸发过程及湿度场的分布,得出湿度场

随不同送风温度、送风速度以及喷入液滴直径变化的规律,在特定的送风条件下,相应存在最优的液滴直径和送风速度,能同时满足均匀性和经济性的要求,为环境室的设计提供了一定的理论基础。

参考文献:

- [1] 王浚,黄本诚,万才大,等. 环境模拟技术[M]. 北京:国防工业出版社,1996:321-323.
- [2] Jiang Zheng, Moser A. Indoor airflow with cooling panel and radioactive/convective heat source [J]. ASHRAE Trans, 1992, 98(1):33-42.
- [3] Mohamed K, Paraschivoiu M. Real gas numerical simulation of hydrogen flow[C]//2nd International Energy Conversion Engineering Conference. Providence: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 2004:727-740.
- [4] Stan C, Eichert H, Martorano L, et al. Fluid dynamic modeling of gasoline direct injection for compact combustion chambers[C]//SAE Congress. Baltimore, M D: SAE Publication, 1998:1-10.
- [5] Zhang Jianshun, Kanabus-Kaminska J M, Shaw C Y. Full-scale test chamber for material emission studies and indoor air quality modeling [J]. ASTM Special Technical Publication, 1996, 1287(1): 58-66.
- [6] Huh M Y, Kim J S, Ahn J P. IGC synthesis of tin nanophase particles, part I: study on convection gas currents in IGC chamber [J]. Powder Metallurgy, 2002, 2(45):154-159.
- [7] 吴延鹏. 建筑材料和耐久性实验小型人工环境室设计[J]. 建筑热能通风空调, 2001(2):63-65.
Wu Yanpeng. The design of small-size artificial climate room for bridling materials and construction durability testing[J]. Building Energy and Environment, 2001(2):63-65.
- [8] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001:353-356.
- [9] 鲁钟琪. 两相流与沸腾换热[M]. 北京:清华大学出版社,2002:27-32.

(编辑 荆树蓉)