

大温差条件下多孔材料干燥过程数值模拟

陈磊¹, 王树刚^{*2}, 张腾飞², 贾子光³, 房天宇⁴

(1. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622;
2. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024;
3. 大连理工大学 海洋科学与技术学院, 辽宁 盘锦 124221;
4. 中国建筑东北设计研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 基于热力学平衡假设并结合动态边界条件, 对大温差下多孔保温材料中的水分迁移及三态相变过程进行数值模拟, 并以海绵干燥过程为例给出了实验验证. 在数学模型中考虑了由于温差引起的自然对流效应, 分析了不同时刻海绵内部的温度、水蒸气浓度、液态水及冰体积分数的分布规律, 讨论了材料主要物性参数对水分传递过程的影响. 结果表明: 数学模型能够实现大温差下多孔介质中水分传递过程的准确预测; 由物性参数分析的结果可知, 相比于影响多孔保温材料水分传递的有效扩散系数和孔隙率两个关键物性参数而言, 有效导热系数影响相对微弱.

关键词: 多孔介质; 自然对流; 孔隙率; 有效扩散系数

中图分类号: TK124

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201803001

0 引言

由于多孔材料具有良好的保温隔音效果, 被广泛应用于食品加工、建筑材料、燃料电池等诸多领域^[1-3]. 多孔材料长期置于温、湿度间歇性变化的环境中, 水分极易积聚于孔隙, 若不能及时去除, 将会引起保温隔音性能下降、细菌滋生、腐蚀等诸多负面效应. 因此, 多孔材料中水分传递过程一直备受关注.

目前, 国内外关于水分在多孔材料中的传递及相变的研究主要集中于水分传递过程、能量传递过程及相间转换 3 个方面. 多孔材料孔隙中的水分会以水蒸气、液态水和冰 3 种不同的相态存在, 而孔隙间水分的迁移通常是以水蒸气和液态水两种形式. 液态水的传递均是采用 Darcy 定律进行求解^[4], 当液态水的体积分数较小, 自身重力无法克服毛细阻力时, 其流动可被忽略^[5]. 与液态水的传递过程相比, 水蒸气的传递方式呈现出复杂多样性. 当多孔保温材料及其所处环境之间温、

湿度差异较小时, 如多孔材料表面无高速湿空气冲刷, 可认为水蒸气的传递只取决于浓度差引起的自由扩散而忽略流动效应^[6]. 当多孔保温材料与其所处环境间存在强制对流时, 水蒸气的流动效应凸显, 通常采用显式的 Darcy 速度对水蒸气的传递过程进行描述^[7-8]. 而考虑到大温差引起的多孔材料内部的自然对流时, 由于自然对流的非线性流动特性, Darcy 定律便不能准确描述多孔材料孔隙间水蒸气的流动现象^[9], 需采用 Brinkman-Forchheimer-extended Darcy 模型 (Darcy 扩展模型) 对流场进行求解^[10-11]. 当多孔材料中水蒸气、液态水和冰的 3 种水分相态的任意两种同时存在时, 相变的发生将不可避免. 而当多孔材料内的温度变化范围跨越冰点时, 其内部的水分就会出现复杂的三相间的相互转换, 水分相态间的转换必然伴随着热量的吸收与释放. 基于热力学平衡原理, 在计算多孔材料中的水分传递过程时, 须考虑任意时刻同时满足能量及质量

收稿日期: 2017-06-26; 修回日期: 2018-03-20.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51608094).

作者简介: 陈磊(1983-), 男, 博士, 讲师, E-mail: l_lei_l@163.com; 王树刚*(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: sgwang@dlut.edu.cn.

的守恒关系^[12-13]. 此外, 为确保热湿耦合模型对水分传递和相变过程预测的准确性, 需对多孔材料的骨架结构进行合理简化, 并正确选取材料的物性参数^[14-16].

本文对多孔保温材料的干燥过程进行数值模拟, 并通过实验对模拟结果进行验证, 进一步分析大温差下水分传递和相变过程的速度、温度、水蒸气浓度、液态水及冰含量随时间的变化规律, 讨论孔隙率、有效导热系数和有效扩散系数对水分传递过程的影响.

1 数学模型和实验过程

1.1 数学模型

为使得模型封闭并且能够准确地预测水分在多孔材料中的传递及相变过程, 在方程求解前做出如下假设:

- (1) 气相各组分具有相同的速度;
- (2) 水蒸气饱和时相间发生转化;
- (3) 多孔材料孔隙均匀.

根据假设条件(1), 干空气与水蒸气共享湿空气的速度场, 因本文采用的数学模型将应用于大温差条件下的自然对流, 势必诱发多孔材料中气相速度的非线性分布, 宜结合 Darcy 扩展模型与浮升力模型对宏观流动进行求解, 其实质是对 Navier-Stokes 方程组进行扩展. 在源项引入黏性和惯性阻力项, 表现形式如下^[8]:

$$\mathbf{v} \frac{\partial(\phi \rho \mathbf{v})}{\partial t} + \operatorname{div}(\phi \rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\phi \nabla p + \nabla(\phi \bar{\boldsymbol{\tau}}) - \phi \rho \mathbf{g} \beta \Delta T - \left(\frac{\mu}{\alpha} + \frac{\rho C_2}{2} |\mathbf{v}| \right) \mathbf{v} \quad (1)$$

式中: ϕ 为孔隙率; ρ 为气体密度, kg/m^3 ; \mathbf{v} 为气相速度, m/s ; t 为时间, s ; p 为气相压力, Pa ; $\boldsymbol{\tau}$ 为剪切应力, Pa ; \mathbf{g} 为重力加速度, m/s^2 ; β 为热扩散系数, K^{-1} ; ΔT 为特定参考温度下的温差, K ; μ 为动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; $1/\alpha$ 为黏性阻力系数, m^{-2} ; C_2 为惯性阻力系数, m^{-1} .

根据假设条件(2), 水蒸气在多孔介质中的传递过程分为两种情况: 当水蒸气未达饱和时, 无相变发生, 水蒸气遵循质量守恒原理在其分压力的作用下传递于多孔材料的孔隙间; 而当水蒸气达到当前温度下的饱和状态时, 孔隙中的水蒸气密

度将不会发生改变, 而水蒸气的流入流出必将伴随着相变的发生. 水蒸气质量传递方程表达形式如下^[17]:

$$\mathbf{v} \frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \operatorname{div}(\mathbf{v} \rho_v) = \operatorname{div}(D_{\text{eff}} \operatorname{grad} \rho_v) + S_v \quad (2)$$

式中: ρ_v 为水蒸气密度, kg/m^3 ; D_{eff} 为有效扩散系数, m^2/s ; S_v 为相变量, $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$.

多孔材料中水蒸气的相变, 将会引起能量的吸收与释放. 能量方程表达式为^[17]

$$\rho_m c_{p,m} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_g c_{p,g} \operatorname{div}(\mathbf{v} T) = \operatorname{div}(k_{\text{eff}} \operatorname{grad} T) + S_T \quad (3)$$

式中: ρ_m 为各组分构成的混合密度, kg/m^3 ; $c_{p,m}$ 为混合比定压热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; ρ_g 为气相密度, kg/m^3 ; $c_{p,g}$ 为气相比定压热容; T 为温度, K ; k_{eff} 为有效导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; S_T 为由于相变产生的相变热源. 在能量方程中相关参数的定义式如下^[17-18]:

$$\rho_m c_{p,m} = a_g \rho_g c_{p,g} + a_s \rho_s c_{p,s} + a_l \rho_l c_{p,l} + a_i \rho_i c_{p,i} \quad (4)$$

$$k_{\text{eff}} = a_g k_g + a_s k_s + a_l k_l + a_i k_i \quad (5)$$

$$D_{\text{eff}} = a_g D_{\text{va}}/J \quad (6)$$

式中: a 表示体积分, 下标 s, g, l, i 分别表示固体骨架、气相、液相及固相; D_{va} 表示水蒸气在干空气中的扩散系数, m^2/s ; J 表示曲折因子.

1.2 实验过程

本文以非吸湿性多孔材料(海绵)作为实验对象, 其尺寸为 $210 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 44 \text{ mm}$. 实验准备阶段将海绵浸入纯净水中, 待海绵孔隙充满液态水后, 将其取出并挤压拍打, 以保证孔隙中含水量尽可能均匀. 将含水海绵放入低压箱中, 并设置箱内的温度为 $-15 \text{ }^\circ\text{C}$, 待海绵与环境间达到热平衡时, 海绵温度稳定在 $-14.1 \text{ }^\circ\text{C}$. 经精密天平称量得到海绵的增重量为 3.97 g .

完成上述实验准备, 将海绵取出并迅速挂入恒温箱中进行自然干燥. 恒温箱顶部放置一部精密天平, 带有挂钩的非吸水性细线穿过恒温箱顶部微小孔隙与精密天平相连, 以便通过精密天平实时记录海绵中的水分散失量. 在恒温箱内靠近测试对象区域分别布有温度与湿度传感器, 用以记录海绵周围环境温、湿度随时间变化情况. 为保证实验过程中, 海绵所处的温、湿度环境尽可能不受外界干扰, 除对恒温箱整体保温处理外, 恒温箱

的底部增设了加热器与加湿用的水盘, 实验示意图如图 1 所示。

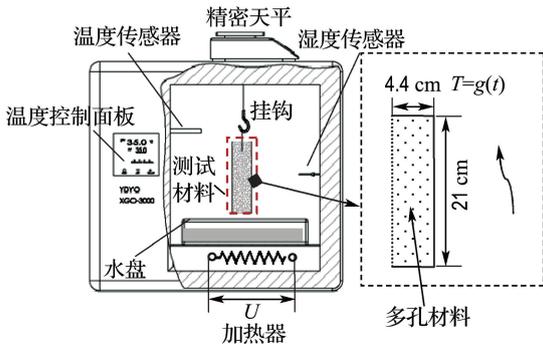


图 1 实验示意图

Fig. 1 Experimental schematic diagram

图 2 为所监测的海绵附近环境温度和相对湿度随时间变化情况。从环境温、湿度随时间的变化曲线可知, 箱体内的温度在实验开始阶段呈下降趋势, 20 min 左右又出现微小的回升, 并在 140 min 以后随着时间的增加逐渐下降。主要原因在于, 恒温箱顶部的微小孔隙必将引起箱内环境与外界环境间的温、湿度交换, 从而降低了恒温箱的保温性能。但从温度变化的幅度来看, 实验全程仅有 1 K 左右的波动, 足以说明海绵所处的温度环境相对恒定。而从相对湿度曲线的变化趋势可知, 实验开始阶段, 相对湿度呈上升趋势, 原因在于海绵内的水分以水蒸气的形式融入周围环境, 从而导致箱内空气的含湿量增高, 实验过程中, 恒温箱内相对湿度一度升至 65%。由于恒温箱与大气环境间(顶部开孔)的热湿交换, 箱内水蒸气在分压力的驱动下向恒温箱外扩散, 导致实验后半段箱内相对湿度逐渐下降。温、湿度传感器所记录的海绵周围环境的温、湿度变化曲线将以第一类边界条件应用于模型中。

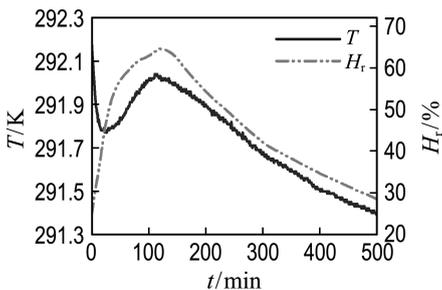


图 2 恒温箱内温度及相对湿度随时间变化曲线

Fig. 2 Temperature and relative humidity change with time in the thermostat

2 模型验证及过程分析

根据数学模型结合 CFD 软件, 对大温差下多孔材料(海绵)的自然干燥过程进行数值模拟。如图 1 所示, 因海绵所处的环境温湿度相对均匀, 选取半块海绵采用二维数值模拟足以满足计算要求。运用网格生成软件对尺寸为 210 mm×22 mm 的矩形海绵进行网格划分, 由于研究对象形状规则, 可生成单位尺寸为 1 mm 的均匀结构化网格(详见图 3)。求解以 5 s 为单位时间步长, 每个时间步长内迭代 3 000 次, 保证动量和连续性方程残差低于 10^{-3} , 标量方程残差在 10^{-6} 以下, 以此判定各求解方程的收敛性。为保证求解过程不受网格尺寸和网格数量影响, 分别选取单位尺寸为 0.5 mm 和 1.5 mm 的网格进行独立解的测试, 不同网格尺寸的计算误差小于 1.3%。模型中采用的物性参数详见表 1。

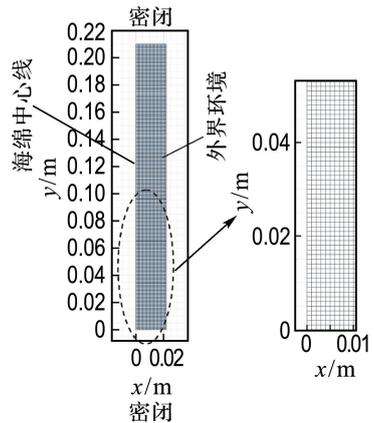


图 3 网格划分

Fig. 3 Meshing scheme

海绵内部水分总量随时间变化的模拟结果与实验测量值的对比如图 4 所示。结果表明: 在干燥过程的前 20 min, 海绵中的水分含量急剧下降, 主要原因在于, 冰冻后的海绵在实验开始时被迅速放入恒温箱中, 海绵与恒温箱的环境之间存在较大的温差, 当低温海绵接触到相对高温的环境时, 热量会迅速传入引起温升并为相变提供热量。干燥过程初始阶段, 含冰孔隙的温度低于冰点, 因此, 海绵内的水分(冰)将以水蒸气升华的形式渗出。随着时间的增加, 海绵温度逐渐升高, 当温度高于冰点后, 海绵中的冰全部融化成液态水, 水分将以水蒸气蒸发的形式继续从海绵孔隙脱离。随

表 1 数学模型中物性参数^[19-20]Tab.1 Physical parameters in the model^[19-20]

	参数	数值
固体骨架	体积分数 a_s	0.03
	密度 $\rho_s / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 000
	导热系数 $k_s / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.05
	比定压热容 $c_{p,s} / (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1.4
	曲折因子 J	1.02
液态水	密度 $\rho_l / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 000
	体积分数 a_g	0.97
	有效孔隙率 $\phi_{g,\text{eff}}$	0.8
气相	水蒸气扩散系数 $D_{va} / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	2.55×10^{-5}
	导热系数 $k_g / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.024 2
	水蒸气汽化热 $h_{gl} / (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	2 537

着海绵温度继续升高,海绵内外温差逐渐缩小,其与环境间温度梯度也随之减小,外界提供用于相变的热量亦随之下降,从而降低了脱水率.从 50 min 开始,海绵中的脱水率近似线性变化,主要原因在于,随着海绵内的温度和水蒸气浓度与环境间逐渐平衡,海绵和环境间的水蒸气分压力差趋于稳定.值得注意的是,模拟结果的脱水率比实验测量值普遍偏低,此误差主要来自测量仪器响应和实验读数的延迟性.当达到 480 min 时,水分基本蒸干.

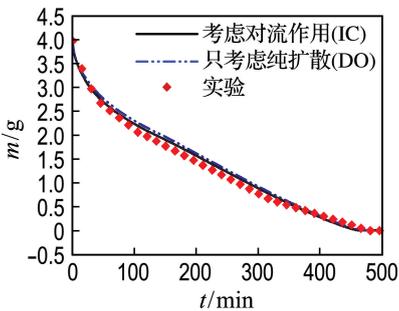


图 4 海绵内水分含量随时间变化

Fig.4 The change of moisture in sponge with time

3 分析与讨论

3.1 各主要参数的分布规律预测

图 5 展示了干燥过程进行到 10 min 时,保温材料内部速度、温度、水蒸气浓度、液态水和冰体积分数的分布规律.初始时海绵温度较低($-14.1\text{ }^{\circ}\text{C}$),其与环境间存在较大的温差,致使海绵孔隙间的水蒸气(在空气的携带下)形成自然对流,但由于多孔骨架所引起的黏性和惯性阻力,湿空气流动缓慢,数

量级仅为 10^{-3} m/s .从流场分布来看,由于海绵中心区域与环境间存在较大的温差,该区域水蒸气流速要高于与环境相接触的海绵孔隙的.从温度分布的情况可知,由于海绵较低的导热性能且水分蒸发需要吸收外界环境传入部分热量,因而靠近海绵中心区域升温缓慢.此时,海绵中心区域温度仍在冰点以下,仍有冰未完全融化.相比之下,近环境侧海绵孔隙由于直接与温度相对较高的低浓度水蒸气相接触,孔隙中冰迅速融化成水,并以水蒸气蒸发的形式从海绵中脱离.根据文中假设条件(2),含水孔隙的水蒸气始终为饱和态.从水蒸气浓度分布规律可知,此时,环境侧海绵孔隙中水分已经蒸干,此区域孔隙中水蒸气浓度已低于饱和浓度,传入热量完全用于热传导和温升,温度已与环境相近,因此,其与环境间温度梯度很小.

干燥过程至 3 h 时,海绵中水蒸气流速、温度、水蒸气的浓度及液态水体积分数分布如图 6 所示.经过 3 h 的干燥,海绵逐渐升温,且温度已与周围环境相近,仅有 1 K 左右的温差.此时,由温差引起的自然对流相比 10 min 时已明显减弱,数量级已降至 10^{-4} m/s ,从此时的边界条件的测量值可知,干燥过程中环境温度变化幅度只有 1 K 左右,而相对湿度也只相差 10% (详见图 2).基于假设条件(2),含水孔隙中的水蒸气饱和,水蒸气将在其分压力的驱动下(流速影响可忽略)从海绵中渗出,而水蒸气的浓度梯度主要存在于含水孔隙(水蒸气饱和)与恒温箱内的环境之间.因此,此过程海绵内部的水蒸气的脱水率相对恒定.而温度、水蒸气浓度和液态水体积分数非线性分布现象明显减弱.

图 7 为干燥过程达到 7 h 时,海绵中主要参数的分布规律.温度分布与 3 h 时相接近,此时,海绵内部的温度与环境之间已达平衡,温差所引起自然对流进一步减弱,海绵内部因自然对流引起的水分迁移几乎可以忽略.近海绵中心处温度略低于边界区域的孔隙,主要由于液态水的蒸发吸热延缓了温升.因中心区域的孔隙中仍有少量的液态水残存,基于假设条件(2),孔隙中水蒸气亦为饱和,因此,从水蒸气的浓度分布中仍可看出明显的浓度梯度.

3.2 物性参数影响

如图 8 所示,当模拟过程采用的边界条件及物性参数均不发生变化时,将有效导热系数增大

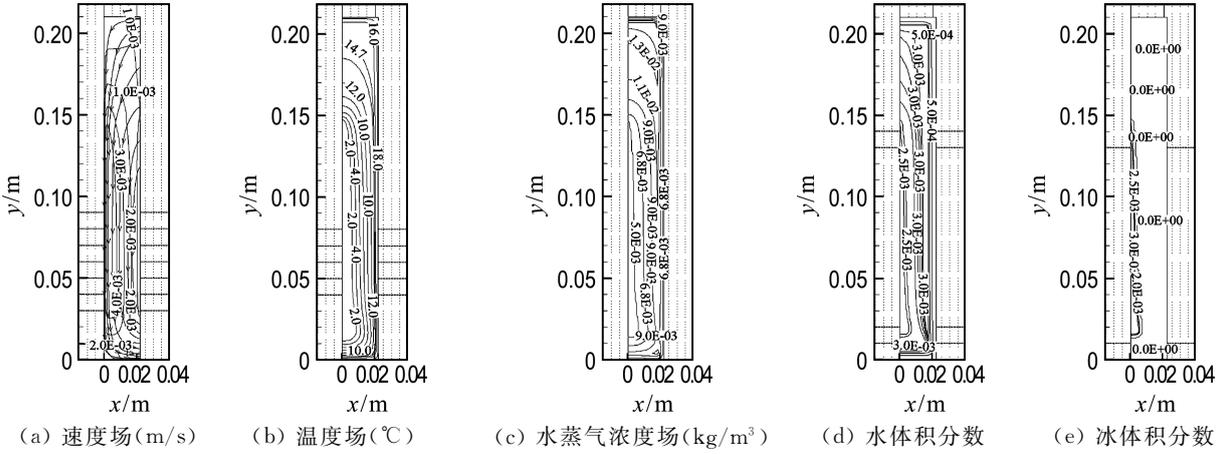


图5 干燥过程进行到10 min主要参数分布

Fig. 5 Distribution of major parameters during drying process at $t=10$ min

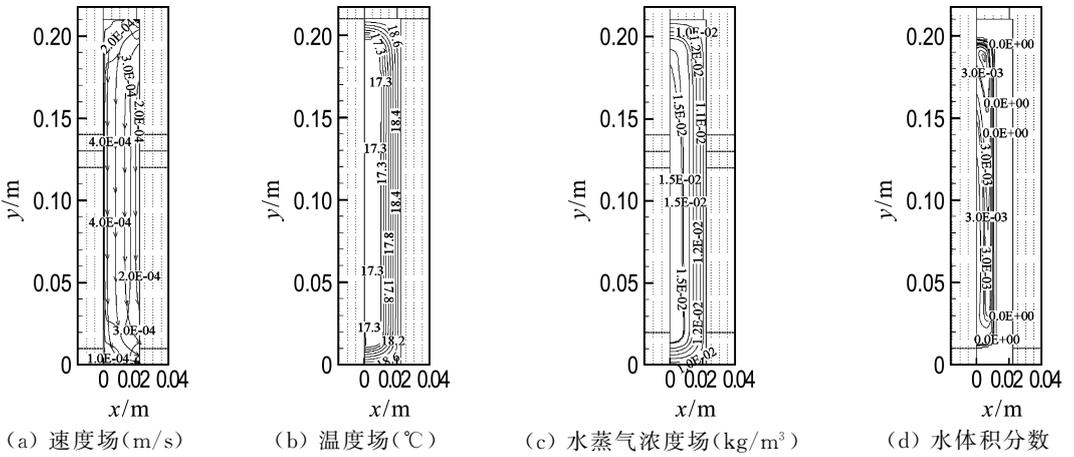


图6 干燥过程进行到3 h主要参数分布

Fig. 6 Distribution of major parameters during drying process at $t=3$ h

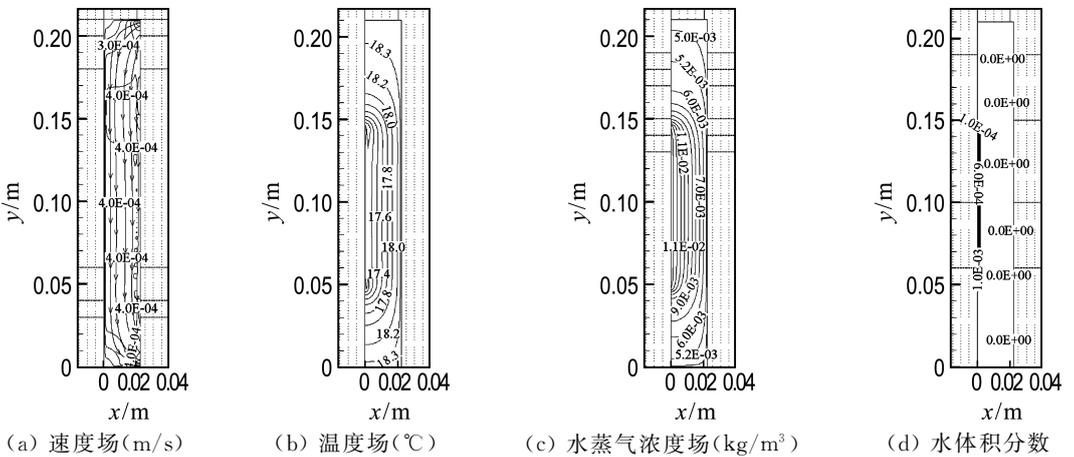


图7 干燥过程进行到7 h主要参数分布

Fig. 7 Distribution of major parameters during drying process at $t=7$ h

1 倍至 0.05 W/(m·K),对上述干燥过程再次进行数值模拟。虽然从数值上来看,有效导热系数的改变量并不大,但多孔材料的一个重要特性就是

其良好的保温隔热性能即导热系数较小,因此,有效导热系数增加1倍已经远超模拟过程参数选取的极限误差值。基于模拟结果与实验测量值的对

比可知,海绵的单位时间脱水率与实验测量值(每 5 min 进行一次称重读数)的偏差小于 5%,干燥时间的累计误差小于 7%. 由此模拟结果可知,有效导热系数对多孔材料中的水分传递影响很小,选取此参数进行数值模拟时可允许误差范围较大.

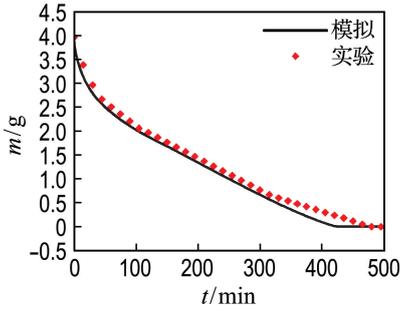


图 8 海绵有效导热系数为 $0.05 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时水分含量变化对比

Fig. 8 Comparison of moisture change in sponge when the effective thermal conductivity is $0.05 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

如图 9 所示,海绵曲折因子增大 1 倍,其他物性参数不变的情况下,对干燥过程进行数值模拟. 由模拟结果与实验测量值的对比可知,单位时间脱水率最大偏差将近 40%,干燥时间的累积误差将近 25%. 从水分含量的变化规律来看,初始阶段,由于自然对流流速较高(相比于扩散作用),20 min 内,实验与模拟结果具有较好的一致性,而随着自然对流的减弱(海绵与环境间温差缩小),扩散作用对水分传递的影响更加显著. 由式(6)可知,海绵的曲折因子的增大等同于有效扩散系

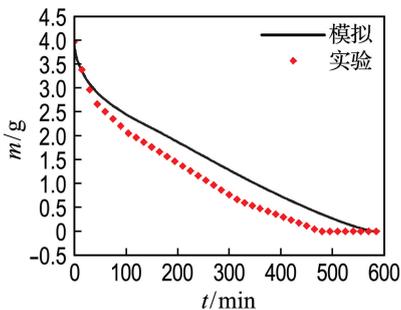


图 9 海绵有效扩散系数缩小至 $1.32 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 时水分含量变化对比

Fig. 9 Comparison of moisture change in sponge when the effective diffusion coefficient is $1.32 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

数的减小,模拟结果足以说明,有效扩散系数是影响多孔介质中水分传递的关键性参数.

如图 10 所示,在其他物性参数不变,仅忽略有效孔隙率的情况下,对干燥过程进行再次数值模拟(结果详见图 10 中曲线 P97,IC),同时,为进一步展示大温差下自然对流效应对海绵内水分迁移的影响,增加了一组不考虑流动的纯扩散的模拟结果(图 10 中曲线 P97,DO),并分别与实验测试值进行对比. 由式(1)和式(6)可知,孔隙率的提高必然加强多孔材料中的流动强度及扩散效果. 从水分传递规律(与图 4 的模拟过程相比)和纯扩散的干燥过程可知,在孔隙率提高了 20% 的情况下,扩散引起的偏差主要来自长时间的模拟过程中脱水率的累积效应,即单位时间内对脱水率的影响并不明显. 因此,在多孔材料内外温差较小(自然对流效应忽略)的短时间水分传递过程中,孔隙率的选取偏差并不会对水分传递造成较大影响. 但大温差条件(本文为 $15 \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$),孔隙率增大,自然对流的作用大幅增强,致使干燥过程加快了近 3 h. 从而说明大温差条件下孔隙率在建模时的正确选取将直接影响到模型的准确性.

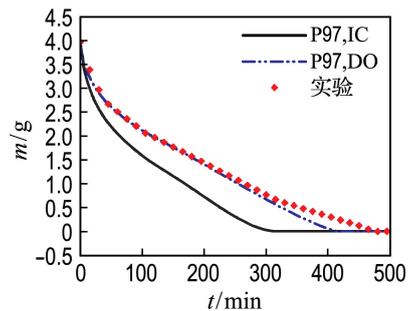


图 10 不考虑有效孔隙率(孔隙率 97%)时对对流(P97,IC)及纯扩散(P97,DO)模型水分含量变化对比

Fig. 10 Comparison of moisture change when ignoring effective porosity (97% of porosity) under considering convection (P97,IC) and pure diffusion (P97,DO) model respectively

4 结 论

(1)从实验数据及模拟结果可以看出,所建立的数学模型与实验结果具有较好的一致性,能够准确预测出大温差条件下多孔介质中水分的相变及传递过程.

(2)分析不同时刻模拟结果中的温度、水蒸气浓度、水分(冰或液态水)体积分数可知,当低温多孔材料放入相对恒定高温环境时,虽然近 35 °C 保温材料内外温差所诱发自然对流的流速十分微弱,数量级只有 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ m/s,但其流动却导致了多孔材料中较为明显的温度、水蒸气浓度和液态水的非线性分布(参见图 5~7)。

(3)由海绵这种多孔材料中水分传递过程的分析可知,有效导热系数增大 1 倍(从 0.025 W/(m·K)增至 0.05 W/(m·K)),模拟结果中海绵的单位时间脱水率与实验测量值间偏差在 5%以内,由于累积误差所引起的干燥时间的差异小于 7%。单从有效导热系数对水分传递的影响来看,其并非重要参数。

(4)对于影响多孔材料内水分传递过程的两个关键性参数,有效扩散系数和孔隙率,当多孔材料与环境间存有较大温差时(文中取 15~35 °C),自然对流作用相比于扩散效应在水分传递过程中将占主导地位(图 9 和 10)。当保温材料内外温差缩小(5 °C 以内)时,有效扩散系数对水分传递过程的影响显著,如图 9 所示,干燥过程在 20 min 后,因自然对流作用的减弱,有效扩散系数的减小,引起模拟结果与实验测量值的偏差逐渐增大,其从 2.01×10^{-5} m²/s 降至 1.32×10^{-5} m²/s,所带来的水分迁移速率的累积偏差可达 25%以上。

参考文献:

- [1] 件 斯,李廷贤,闫 霆,等. 高性能定形复合相变储能材料的制备及热性能[J]. 化工学报, 2015, **66**(12):5127-5134.
WU Si, LI Tingxian, YAN Ting, *et al.* Preparation and thermal properties of high performance shape-stabilized phase change composites using stearic acid and expanded graphite [J]. **CIESC Journal**, 2015, **66**(12):5127-5134. (in Chinese)
- [2] 张 浙,杨世铭. 多孔介质对流干燥机理及其模型[J]. 化工学报, 1997, **48**(1):52-59.
ZHANG Zhe, YANG Shiming. Mechanism and mathematical model of heat and mass transfer during convection drying of porous media [J]. **Journal of Chemical Industry and Engineering (China)**, 1997, **48**(1):52-59. (in Chinese)
- [3] 黄晓明,刘 伟,朱光明,等. 多孔介质中的相变传热特性及其在建筑物节能中的应用[J]. 太阳能学报, 2002, **23**(5):615-621.
HUANG Xiaoming, LIU Wei, ZHU Guangming, *et al.* The characteristic of heat transfer in porous media with fluid phase change and its application in building energy saving [J]. **Acta Energetica Solaris Sinica**, 2002, **23**(5):615-621. (in Chinese)
- [4] JANSSEN H, BLOCKEN B, CARMELIET J. Conservative modelling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation [J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2007, **50**(5/6):1128-1140.
- [5] STEEMAN H J, VAN BELLEGHEM M, JANSSENS A, *et al.* Coupled simulation of heat and moisture transport in air and porous materials for the assessment of moisture related damage [J]. **Building and Environment**, 2009, **44**(10): 2176-2184.
- [6] QIN Menghao, BELARBI R, AÏT-MOKHTAR A, *et al.* Coupled heat and moisture transfer in multi-layer building materials [J]. **Construction and Building Materials**, 2009, **23**(2):967-975.
- [7] ZHANG Jun, CHEN Qun, YOU Changfu. Numerical simulation of mass and heat transfer between biochar and sandy soil [J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2015, **91**: 119-126.
- [8] KAVIANY M. **Principles of Convective Heat Transfer** [M]. 2nd ed. New York: Springer, 2001.
- [9] HUANG H, AYOUB J. Applicability of the Forchheimer equation for non-Darcy flow in porous media [J]. **SPE Journal**, 2008, **13**(1):112-122.
- [10] KHAN F A, FISCHER C, STRAATMAN A G. Numerical model for non-equilibrium heat and mass exchange in conjugate fluid/solid/porous domains with application to evaporative cooling and drying [J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2015, **80**:513-528.
- [11] VAFAI K, KIM S J. On the limitations of the Brinkman-Forchheimer-extended Darcy equation [J]. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, 1995, **16**(1):11-15.
- [12] ERRIGUIBLE A, BERNADA P, COUTURE F, *et al.* Simulation of convective drying of a porous medium with boundary conditions provided by CFD [J]. **Chemical Engineering Research and Design**, 2006, **84**(2):113-123.
- [13] 沈维道,蒋智敏,童钧耕. 工程热力学[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社, 2001.
SHEN Weidao, JIANG Zhimin, TONG Jungeng.

- Engineering Thermodynamics** [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2001. (in Chinese)
- [14] 辛峰, 王富民, 李绍芬. 曲折因子与多孔介质微观结构的定性关系[J]. 化工学报, 2000, **51**(4):457-461.
XIN Feng, WANG Fumin, LI Shaofen. Relationship between tortuosity and pore structure of porous media with 3-D network model [J]. **Journal of Chemical Industry and Engineering (China)**, 2000, **51**(4):457-461. (in Chinese)
- [15] 于明志, 隋晓凤, 彭晓峰, 等. 含湿率对多孔介质热导率测量准确性的影响[J]. 化工学报, 2008, **59**(11):2768-2773.
YU Mingzhi, SUI Xiaofeng, PENG Xiaofeng, *et al.* Influence of moisture content on measurement accuracy of porous media thermal conductivity [J]. **CIESC Journal**, 2008, **59**(11):2768-2773. (in Chinese)
- [16] OUMAROU N, KOCAEFE D, KOCAEFE Y. Some investigations on moisture injection, moisture diffusivity and thermal conductivity using a three-dimensional computation of wood heat treatment at high temperature [J]. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 2015, **61**:153-161.
- [17] OLUTIMAYIN S O, SIMONSON C J. Measuring and modeling vapor boundary layer growth during transient diffusion heat and moisture transfer in cellulose insulation [J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2005, **48**(16):3319-3330.
- [18] 连之伟. 热质交换原理与设备[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006:30-32.
LIAN Zhiwei. **Heat and Mass Transfer Principles and Equipment** [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006:30-32. (in Chinese)
- [19] DOUTRES O, ATALLA N, DONG K. A semi-phenomenological model to predict the acoustic behavior of fully and partially reticulated polyurethane foams [J]. **Journal of Applied Physics**, 2013, **113**(5):054901.
- [20] 杨春光. 环保聚氨酯泡沫低温热物性及真空放气研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
YANG Chunguang. Research on the thermal properties at low temperatures and outgassing under vacuum condition of environmental friendly polyurethane foams [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese)

Simulation on drying process of porous material under large temperature difference

CHEN Lei¹, WANG Shugang^{*2}, ZHANG Tengfei², JIA Ziguang³, FANG Tianyu⁴

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Dalian University, Dalian 116622, China;

2. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. School of Ocean Science and Technology, Dalian University of Technology, Panjin 124221, China;

4. China Northeast Architectural Design and Research Institute Co., LTD, Shenyang 110016, China)

Abstract: Based on the assumption of thermodynamic equilibrium and combined with dynamic boundary conditions, a mathematical model is developed to simulate moisture migration and three state phase transition process in porous insulation material under large temperature difference, and it is verified by the sponge drying experiment. In the modeling, the effect of natural convection caused by temperature difference is considered. The analysis is conducted on the distribution characteristics of temperature, water vapor concentration, the volume fraction of liquid water and ice in the sponge with evolution of time. The influence of physical parameters on the moisture transfer process is discussed. Finally, it is concluded that the model could accurately predict the process of moisture transfer in porous media under large temperature difference, and from the analysis of physical parameters, the porosity and effective diffusion coefficient are the key factors to affect the moisture transfer in porous insulation material, and the effective thermal conductivity has a lesser impact.

Key words: porous media; nature convection; porosity; effective diffusion coefficient