

附加相变微胶囊多孔织物热湿传递模型研究

李凤志^{*1,2}, 吴成云³, 李毅⁴

(1. 大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024;

2. 南京航空航天大学 航空宇航学院, 江苏 南京 210016;

3. 西安交通大学 能源动力学院, 陕西 西安 710049;

4. 香港理工大学 纺织及制衣系, 香港)

摘要: 为了考察附加相变微胶囊对织物内热湿传递的影响, 发展了一个新的含有相变材料的织物热湿耦合模型. 模型考虑了相变区间对相变及传热过程的影响及加热/冷却率对相变材料特征温度和相变热的影响, 同时也考虑到纤维对蒸气的吸附/解吸现象引起的热湿耦合作用. 使用等效热容法对相变微胶囊的相变过程进行了模拟, 并用控制体积法对方程进行了离散求解. 计算结果与实验观测一致, 表明该模型可以用来预测含有相变微胶囊织物内的热湿传递过程.

关键词: 相变材料; 多孔织物; 热湿传递; 数值模拟

中图分类号: TS941.15 **文献标志码:** A

0 引言

相变材料 (phase change materials, 简称 PCM) 是一种高效的热存储物质, 具有良好的蓄热和温控能力. 20 世纪 80 年代, 美国国家航空和航天管理局 (NASA) 应用微胶囊技术将 PCM 包装于微胶囊中, 并施加于纤维或纺织品中, 制成了具有良好的温度调节功能的航天服. 这种附加相变微胶囊的纺织品一经出现, 不仅在服装研究领域引起了极大轰动, 在建筑环境研究领域也引起了极大关注. 建筑设计师可以把它用做窗帘或贴在墙体表面, 从而改善房间的热环境. 因此, 研究附加相变微胶囊的织物内热湿传递过程对服装产品的优化设计和纺织品合理有效利用具有重要意义.

早期研究者使用灌注法^[1]、涂层法^[2]将相变材料处理在纤维内及织物表面, 侧重于实验, 而没有从理论上进行探讨. 20 世纪 90 年代末, 才有研究者从理论模型方面对这类材料热传递性能进行了探讨. Nuckols^[3] 建立了一个干燥状态下附加

PCM 微胶囊的潜水服分析模型. Hittle 等^[4] 使用数学模型研究了 PCM 微胶囊对干织物的影响. 然而大多数纺织纤维具有吸湿性, 由吸湿放热所引起的温度变化对着装舒适性有重要影响. 为了考虑吸湿性织物中热湿传输和 PCM 微胶囊的热调节耦合影响, Li 和 Zhu^[5] 在前期模型^[6] 基础上发展了一个数学模型, 模型中相变过程考虑为一个移动边界问题, 相变温度被考虑成一个点, 并讨论了 PCM 含量对织物中热湿传递的影响. 事实上, 应用于服装上的 PCM 不是纯物质, 它们大多数是石蜡的混合物. He 等^[7] 指出, 所有混合物, 相变过程不是发生在一个恒定温度点, 而是一个温度范围. 熔解热发生在整个相变温度范围, 该相变温度范围对 PCM 能量调节过程有重要影响. Hittle 等^[4] 给出了 PCM 示差扫描测试曲线. 曲线表明, 一种相变材料具有不同的熔解和凝固温度范围, 同时, 加热/冷却率对该温度范围有很大影响. 为了合理地考虑相变材料这些特性的影响, 更好地为实际应用服务, 本文发展一个新的织物——相变微胶囊复合材料热湿传递耦合模型.

收稿日期: 2006-06-16; 修回日期: 2007-12-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50706017).

作者简介: 李凤志* (1975-), 男, 博士, 讲师, E-mail: helifz@nuaa.edu.cn.

1 数学模型

1.1 基本假设

如图1所示,本文考虑一厚度为 L 的竖直放置的附加相变微胶囊的织物薄片,坐标原点在最左边, Ox 轴自左至右. 由于织物是由大量纤维通过加工编制为较大尺度的纱线,再由这些纱线编制而成,这样在织物中存在着大量彼此相通的孔隙. 因此,在一个附加相变微胶囊的多孔织物表征性单元中,包含3种组分:孔隙内的湿空气、纤维、相变材料. 根据研究织物的实际特点,本文做如下假设:

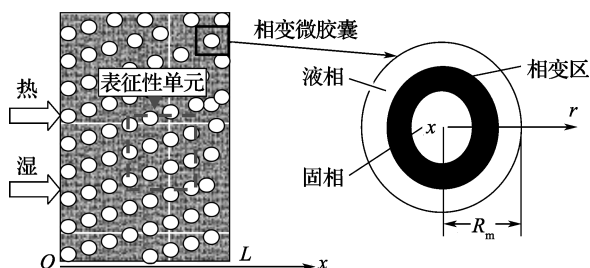


图1 附加相变微胶囊织物截面示意图

Fig.1 Section of fabric with PCM microcapsule

(1) 织物处于局部热力平衡状态,即多孔织物内各点温度是空间和时间的函数,与所处的状态(固、气)无关;

(2) 忽略纤维因含水量变化产生的几何变形对热湿传递的影响;

(3) 织物内各相及相变微胶囊分布均匀;

(4) 织物内热湿传递为一维,即沿 Ox 方向;

(5) 相变微胶囊是具有均一半径的圆球,且球内热传输模式是传导.

1.2 织物控制方程

在上面假设基础上,根据质量和能量守恒定律,有

$$\epsilon_a \frac{\partial C_a}{\partial t} + \epsilon_f \frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{D_a \epsilon_a}{\tau} \frac{\partial C_a}{\partial x} \right] \quad (1)$$

$$c_v \frac{\partial \theta}{\partial t} - \lambda \epsilon_f \frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] - h_e S_v \{ \theta_m(x, R_m, t) - \theta \} \quad (2)$$

式中: ϵ_a 、 ϵ_f 分别表示织物中孔隙和纤维所占体积分数; C_a 、 C_f 分别表示微元内水蒸气在孔隙中和纤维中的浓度; D_a 为水蒸气在空气中的扩散系数; τ 为水蒸气通过织物的曲折因子; θ 为织物温度; c_v 、 λ 和 k 分别表示织物的体积热容、纤维对

水蒸气吸附/解吸热和织物的导热率,它们都是纤维含水量的函数; h_e 表示相变微胶囊表面与织物的单位面积综合换热系数; $\theta_m(x, R_m, t)$ 是微胶囊表面的温度; S_v 是相变微胶囊在微元体中的比面积,它是相变微胶囊半径 R_m 和体积分数 ϵ_m 的函数:

$$S_v = \frac{3}{R_m} \epsilon_m \quad (3)$$

除织物的结构参数和材料物性参数外,方程(1)、(2)中含有 C_a 、 C_f 、 θ 、 $\theta_m(x, R_m, t)$ 4 个未知量,为了保证微分方程组的封闭性,必须增加 2 个方程用于确定纤维内平均蒸气浓度 C_f 和相变微胶囊表面温度 $\theta_m(x, R_m, t)$.

1.3 纤维内平均蒸气浓度的确定

文献[6]通过研究 x 点处一根纤维内水蒸气的传递过程,给出了确定微元内纤维平均蒸气浓度 C_f 的方法. 一根纤维内水蒸气的传递过程可用如下方程描述:

$$\frac{\partial C'_f(x, r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r D_f \frac{\partial C'_f(x, r, t)}{\partial r} \right] \quad (4)$$

其中 $C'_f(x, r, t)$ 是 t 时刻,织物内一点 x 处,一根纤维在径向坐标 r 处的蒸气浓度, D_f 是水蒸气在纤维中的扩散系数. 在纤维中心点,可采用对称边界条件,即

$$D_f \frac{\partial C'_f(x, r, t)}{\partial r} \bigg|_{r=0} = 0 \quad (5)$$

纤维外表面边界条件可以表示为

$$C'_f(x, R_f, t) = f(H_r) \quad (6)$$

其中 R_f 是纤维半径, f 是根据纤维的吸附等温线确定的 x 点处相对湿度 H_r 的函数. 首次计算时,假设纤维与周围湿空气达到稳定平衡状态,获得纤维内蒸气浓度初始值;后继计算中,使用前一时间步获得的纤维蒸气浓度作为当前时间步计算的初始值. 由方程(4)~(6),再根据前一时刻的浓度值,可以获得 $C'_f(x, r, t)$, 于是平均纤维内蒸气浓度为

$$C_f = \chi(C'_f) \quad (7)$$

其中 $\chi(\cdot)$ 为平均算子. 进而可以确定纤维的含水量

$$w_f = C_f / \rho_f \quad (8)$$

其中 ρ_f 是纤维的密度.

1.4 微胶囊表面温度确定

一般来说,相变材料都是非纯物质,相变温度

不是一个点,而是一个范围.本文对相变问题采用等效热容法处理.类似处理纤维的方法,考虑一个在织物内 x 点处,半径为 R_m 的相变微胶囊球体(图1右侧),热平衡方程为

$$\tilde{C} \frac{\partial \theta_m(x, r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\tilde{k} r^2 \frac{\partial \theta_m(x, r, t)}{\partial r} \right) \quad (9)$$

$$\tilde{C} = \begin{cases} C_s; & \theta_m < \theta_a \\ \frac{2\rho_m \Delta H}{(\theta_c - \theta_a)(\theta_b - \theta_a)} (\theta_m - \theta_a) + \epsilon_s C_s + \epsilon_l C_l; & \theta_a \leq \theta_m \leq \theta_b \\ \frac{2\rho_m \Delta H}{(\theta_c - \theta_a)(\theta_c - \theta_b)} (\theta_c - \theta_m) + \epsilon_s C_s + \epsilon_l C_l; & \theta_b < \theta_m \leq \theta_c \\ C_l; & \theta_m > \theta_c \end{cases} \quad (10)$$

式中: θ_a 、 θ_b 、 θ_c 表示相变的特征温度,它们是加热/冷却率的函数, θ_a 和 θ_c 分别为相变区间的下限和上限, θ_b 为峰值温度; ΔH 为相变区间 $[\theta_a, \theta_c]$ 内总的相变热; C_s 、 C_l 为 PCM 固相和液相的热容; ρ_m 为 PCM 的密度, ϵ_l 、 ϵ_s 为相变范围内液、固体积分数,它们由下式确定:

$$\epsilon_l = \frac{(\theta_m - \theta_a)^2}{(\theta_c - \theta_a)(\theta_b - \theta_a)}; \quad \theta_a \leq \theta_m \leq \theta_b$$

$$\epsilon_s = 1 - \epsilon_l \quad (11)$$

$$\epsilon_s = \frac{(\theta_c - \theta_m)^2}{(\theta_c - \theta_a)(\theta_c - \theta_b)}; \quad \theta_b < \theta_m \leq \theta_c$$

$$\epsilon_l = 1 - \epsilon_s \quad (12)$$

等效热传导率可以表示成下面分段函数:

$$\tilde{k} = \begin{cases} k_s; & \theta_m < \theta_a \\ \epsilon_s k_s + \epsilon_l k_l; & \theta_a \leq \theta_m \leq \theta_c \\ k_l; & \theta_m > \theta_c \end{cases} \quad (13)$$

其中 k_s 、 k_l 是 PCM 在固相和液相时的热传导率.

在 PCM 微胶囊外表面:

$$-\tilde{k} \frac{\partial \theta_m(x, r, t)}{\partial r} \bigg|_{r=R_m} = h_c \{ \theta_m(x, R_m, t) - \theta \} \quad (14)$$

在微胶囊的中心点,使用对称边界条件:

$$-\tilde{k} \frac{\partial \theta_m(x, r, t)}{\partial r} \bigg|_{r=0} = 0 \quad (15)$$

PCM 微胶囊的初始条件:

$$\theta_m(x, r, 0) = \theta_{m0} \quad (16)$$

根据方程(9)~(16),可以获得 PCM 微胶囊内任意一点的温度,从而微胶囊表面温度可定.

式中: $\tilde{C}$ 、 $\tilde{k}$ 是等效热容和热传导率; θ_m 是相变材料的温度,它是相变微胶囊在织物中的位置 x 、微胶囊径向位置 r 和时间 t 的函数.根据所选用的相变材料(主要成分为十八烷)特性,等效热容定义为

1.5 织物的初始及边界条件

为了获得方程(1)、(2)的解,必须给出初始和边界条件.织物的初始条件:

$$\theta(x, 0) = \theta_0 \quad (17)$$

$$C_a(x, 0) = C_{a0} \quad (18)$$

织物的两边界考虑自然对流和辐射综合边界:

$$\frac{D_a \epsilon_a}{\tau} \frac{\partial C_a}{\partial x} \bigg|_{x=0} = h_{c1} (C_a - C_{ab1}) \quad (19)$$

$$\frac{D_a \epsilon_a}{\tau} \frac{\partial C_a}{\partial x} \bigg|_{x=L} = -h_{c2} (C_a - C_{ab2}) \quad (20)$$

$$k \frac{\partial \theta}{\partial x} \bigg|_{x=0} = h_{t1} (\theta - \theta_{ab1}) \quad (21)$$

$$k \frac{\partial \theta}{\partial x} \bigg|_{x=L} = -h_{t2} (\theta - \theta_{ab2}) \quad (22)$$

其中 C_{ab} 、 θ_{ab} 分别表示环境蒸气浓度和温度, h_c 为对流传质系数, h_t 为综合换热系数,下标 1 和 2 分别表示左右边界环境.

2 数值模拟及讨论

使用控制体积法对上述方程进行空间离散,时间域采用隐式差分格式.为了验证模型的有效性,这里模拟了一个实验过程.实验中采用两种材料.材料一由厚 2.2 mm、长和宽都是 25 cm 的两片含有相变微胶囊的丙纶织物组成.其中微胶囊半径 5 μm ,在织物中的体积分数为 0.035.材料二除了不含微胶囊外,其他参数同材料一.实验中使用 PN 结温度传感器,测量精度 0.1 $^{\circ}\text{C}$,每种材料中布置 4 个温度传感器,分别设在缝在一起的

两片织物中间的不同位置. 设定 2 种实验环境：(1) 温度 35.0℃、相对湿度 40%；(2) 温度 5.0℃、相对湿度 40%. 初始状态，将两种样品同时放到环境(1)使之平衡，然后迅速将样品转移到环境(2)，打开传感器开始记录温度，816 s 后，将其迅速转移至环境(1)，延续 600 s. 含有 PCM 和不含有 PCM 的两种材料中间温度分别被记录下来.

实验中相变材料使用的是正十八烷，由于不同的加热/冷却率相变材料系统状态不同，其特征温度以及相变热是加热/冷却率的函数. 本文计算中使用的是对正十八烷 DSC 测试结果的回归分析得到的关系式，见表 1. 相变材料的其他物性参数见表 2. 织物基材物性参数见文献[6].

表 1 正十八烷特征温度以及相变热与加热/冷却率关系

Tab. 1 Relationships between the heating/cooling rate and characteristic temperature and latent heat of octadecane

参数	加热过程	冷却过程
$\theta_a / ^\circ\text{C}$	$0.000\ 2x^2 - 0.007\ 2x + 22.283\ 8$	$0.040\ 3x^2 - 18.032\ x + 18.407\ 9$
$\theta_b / ^\circ\text{C}$	$0.004\ 7x^2 + 0.384\ 7x + 25.776\ 4$	$0.005\ 4x^2 - 0.417\ 3x + 18.745\ 4$
$\theta_c / ^\circ\text{C}$	$-0.014\ 9x^2 - 0.748\ 9x + 25.511\ 5$	$0.002\ 6x^2 - 0.271\ 9x + 19.813\ 4$
$\Delta H / (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	$0.039\ 4x^2 - 0.301\ 1x + 124.046\ 7$	$0.036\ 8x^2 - 0.050\ 5x + 100.105\ 0$

注：x 是加热或冷却率(模型中即为织物温度变化率)，单位：℃/min. 公式适用范围 $x \in [0, 30]$

表 2 十八烷其他物性参数^[8]

Tab. 2 Physical parameters of octadecane^[8]

结构简式	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$c_s / (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	$c_l / (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	$k_l / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	$k_s / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
$\text{H}_3\text{C}-[\text{CH}_2]_{16}-\text{CH}_3$	779	1.9	2.2	0.3	0.4

本文模型预测结果和实验比较如图 2 所示. 从图 2 可以看出无论是对含有 PCM 的织物，还是对不含 PCM 的织物；无论是在 PCM 熔解过程，还是凝固过程理论预测和实验结果都符合较好. 在环境降温 and 升温过程，相变微胶囊都具有延迟织物温度变化的作用. 对于含有 PCM 微胶囊

的织物，当环境温度从 35℃ 降到 5℃ 时，织物温度下降，引起 PCM 微胶囊温度下降，当达到其凝固温度范围时，PCM 微胶囊开始凝固，并放出热量，阻止织物温度继续降低；当环境温度从 5℃ 升到 35℃ 时，织物温度升高，引起 PCM 微胶囊温度升高，当达到其熔解温度范围时，PCM 微胶囊开始熔解，并从织物吸收热量，阻止织物温度继续升高.

材料一中，两片织物中心点织物温度和织物中点处 PCM 微胶囊表面温度变化如图 3 所示. 由于相变热的影响，可以看出降温阶段 PCM 微胶囊表面温度高于织物温度；而在升温阶段 PCM 微胶囊表面温度低于织物温度，最大温差接近 0.4℃.

图 4 和图 5 给出了含有 PCM 微胶囊的织物内部温度和相对湿度在不同环境中的变化过程. 可以看出，PCM 微胶囊对织物内热、湿变化具有延迟作用. 如图 4，降温阶段：织物内部温度略高于外边界温度，这是因为热传导过程的影响，经过一段时间，温度降至相变材料的凝结温度范围，PCM 开始起作用放出热量，延迟温度继续下降；

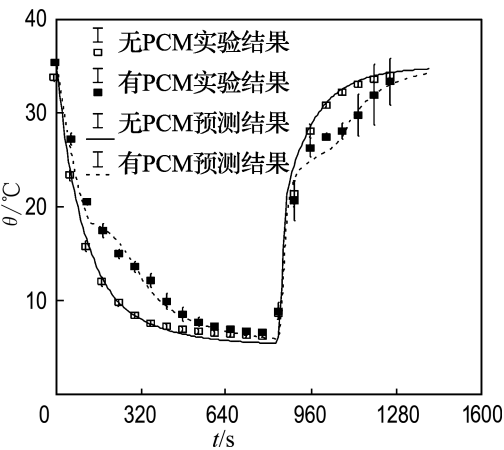


图 2 实验和理论预测结果比较

Fig. 2 Comparison of the predicted results from model and experimental data

当相变材料凝结完毕,延迟作用消失,织物温度继续下降.升温阶段则与降温阶段相反.如图5,降温阶段:织物内初始温度 35°C ,相对湿度 40% ,由于温度比较高,绝对湿度比较高,即水蒸气浓度比较高.环境温度 5°C ,相对湿度 40% ,由于温度低,绝对湿度低,即水蒸气浓度低,内部高的水蒸气浓度向环境扩散.由于较快的扩散速度,内部水蒸气

浓度快速降低,几乎接近环境蒸气浓度,而织物内部温度则缓慢下降,远高于环境温度,导致织物内部空气相对湿度急剧降低.随着时间的推移,织物温度降低,而织物内蒸气的绝对湿度几乎不变,因此织物内相对湿度升高,在织物温度下降趋势被PCM相变热延迟阶段,织物内相对湿度增加也被延迟.类似的原理可以解释升温过程.

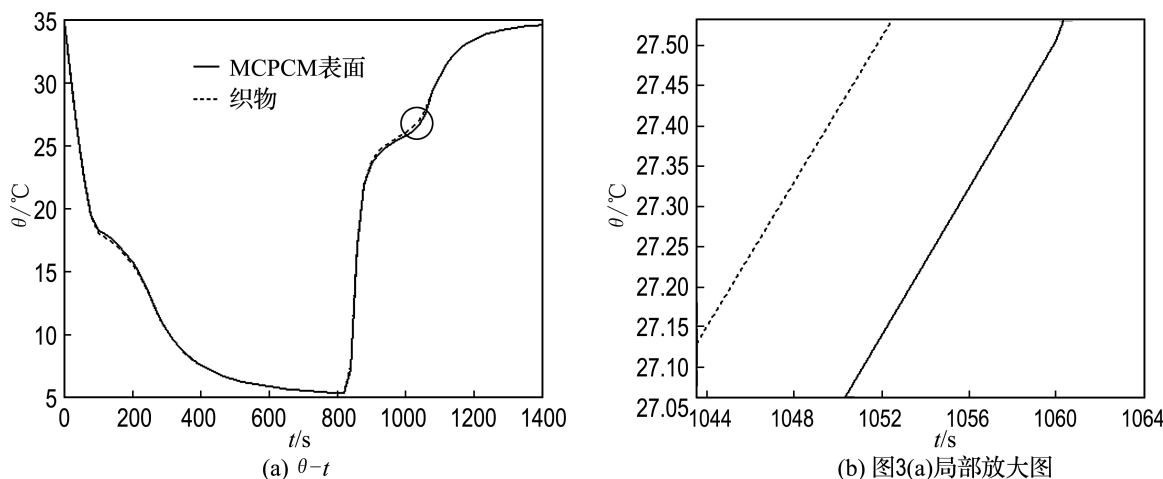


图3 PCM微胶囊表面温度与织物温度变化过程比较

Fig. 3 Comparison of the PCM microcapsule surface temperature and the fabric temperature

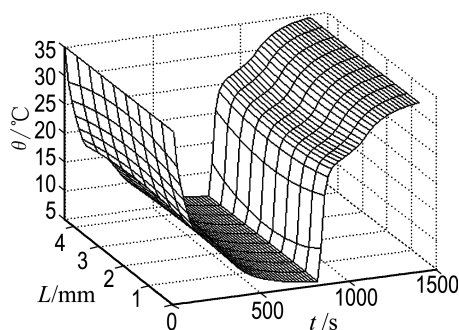


图4 含PCM微胶囊织物内温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of fabric with PCM microcapsule

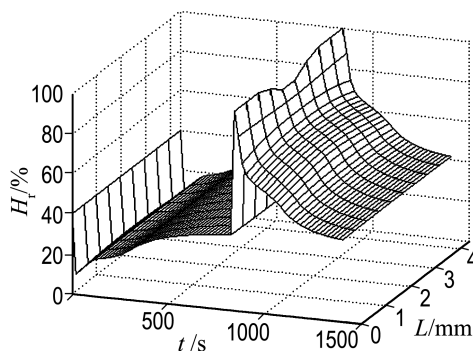


图5 含PCM微胶囊织物内相对湿度分布

Fig. 5 Relative humidity distribution of fabric with PCM microcapsule

3 结 语

通过嵌入PCM微胶囊动态传热和相变模型于织物热湿耦合模型中,研究了附加相变微胶囊织物内热湿传递过程.数值预测与实验结果对比表明模型具有良好的预测精度.结果表明:附加相变微胶囊的织物,在温度达到相变材料的相变温度范围时,其内部温度、相对湿度变化要迟于不含

相变材料的织物.模型中考虑了更加接近实际的PCM特性,并且从织物的最基本单位——纤维考虑起,可以方便地用于含PCM微胶囊的纺织产品的优化设计.

致谢: 本文研究过程中,西安工程大学应伯安博士提供了算例的实验数据.

参考文献：

- [1] BRYANT Y G. Melt spun fibers containing microencapsulated phase change material [C] // **Advances in Heat and Mass Transfer in Biotechnology**. Nashville: ASME Press, 1999
- [2] SHIM H, MCCULLOUGH E A, JONES B W. Using phase change materials in clothing [J]. **Textile Research Journal**, 2001, **71** (6): 495-502
- [3] NUCKOLS M L. Analytical modeling of a diver dry suit enhanced with microencapsulated phase change materials [J]. **Ocean Engineering**, 1999, **26** (6): 547-564
- [4] HITTLE D C, ANDRE T L. A new test instrument and procedure for evaluation of fabrics containing phase-change material [J]. **ASHRAE Transactions**, 2002, **108**(1): 175-182
- [5] LI Y, ZHU Q Y. A model of heat and moisture transfer in porous textiles with phase change materials (PCM) [J]. **Textile Research Journal**, 2004, **74**(5): 447-457
- [6] LI Y, LUO Z X. Physical mechanisms of moisture transfer in hygroscopic fabrics under humidity transients [J]. **Journal of the Textile Institute**, 2000, **91**(2): 302-316
- [7] HE B, MARTIN V. Phase transition temperature ranges and storage density of paraffin wax phase change materials [J]. **Energy**, 2004, **29**(11): 1785-1804
- [8] SCHAEERER A A, BUSSO C J, SMITH A E, *et al.* Properties of pure normal alkanes in the C17 to C36 range [J]. **Journal of the American Chemical Society**, 1955, **77**(7): 2017-2019

A model of heat and moisture transfer in porous textiles with microencapsulated phase change materials

LI Feng-zhi^{*1,2}, WU Cheng-yun³, LI Yi⁴

- (1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
 2. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
 3. Energy and Power School, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
 4. Institute of Textiles and Clothing, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: In order to investigate the effect of microencapsulated phase change materials (MCPCM) on heat and moisture transfer in porous textiles, a new model of simultaneous transport in textiles with MCPCM was developed. In this model the effects of phase transition temperature range on phase change processes and heat transfer, and the effects of heating/cooling rate on characteristic temperature and latent heat of the phase change materials (PCM) were considered. Heat and moisture transfer in textiles was considered as a coupled process by fiber moisture sorption/desorption. Meanwhile, the apparent heat capacity method was used to deal with the simulation of phase transition process, and the finite volume method was utilized to solve the governing equations. The computational results were consistent with experimental observations, indicating that the model is able to predict the temperature changes during heat and moisture transfer in porous textiles with MCPCM.

Key words: phase change materials; porous textiles; heat and moisture transfer; numerical simulation