

## FOURIER SERIES METHOD FOR CRITICAL FLOW VELOCITY OF PIPES CONVEYING FLUID

WANG Kelin LIU Junqing

(Xi'an Univ of Architecture & Technology, Xi'an 710055,  
China)

**Abstract** A method of Fourier series is proposed to calculate the critical flow velocity of pipes conveying fluid. The comparison of the results using this method and the finite element analysis indicates that the method is simple and valid.

**Key words** pipes conveying fluid, Fourier series, critical velocity

## 大气压力对织物热湿特性影响的数值研究<sup>1)</sup>

李凤志 刘迎曦

(大连理工大学工程力学系, 大连 116023) (大连理工大学应用数学系, 大连 116023)

罗钟铤

李 毅

(香港理工大学纺织与制衣学院, 中国香港)

**摘要** 为了模拟多孔织物内复杂的热湿传递过程, 为不同大气压力条件下服装的热湿舒适性设计提供理论基础, 从织物内热湿传输机理角度出发, 建立了考虑大气压力影响的织物热湿传输耦合模型, 比较了常压下的理论预测和实验结果, 通过数值算例考察了大气压力对织物热湿特性的影响。

**关键词** 大气压力, 织物, 耦合, 模型

### 1 引 言

服装热湿舒适性研究是近年来兴起的一个研究课题。织物是构成服装的基础, 对织物热湿性能的研究自然就成为服装热湿舒适性研究的关键。由于织物内热湿传输过程的复杂性, 传统的热阻及湿阻模型不能体现织物的热湿传输机理, 其应用受到限制。织物的热湿耦合模型<sup>[1~6]</sup>的研究逐渐引起人们的兴趣。但目前所见到的这些热湿耦合模型<sup>[1~6]</sup>都是在常压下建立的, 水蒸汽的扩散势都是蒸汽浓度, 没能考虑压力对织物内的热湿传输的影响, 使其适用范围受到限制。大气压力不是一个定值, 它随着各地海拔高度及季节、气候不同而存在差异。由于大气压力不同, 空气的物理性质也会不同, 反映空气物理性质的状态参数也要发生变化<sup>[7]</sup>, 使得在特殊条件下, 例如在高原地区、宇航及深井作业、在加压舱内生活时, 环境压力(大气压力)对人体及相应服装产生特殊影响。本文的目的就是拓展现有热湿耦合模型的应用范围, 探讨大气压力对织物内热湿传输的影响。这对指导不同大气压力条件下服装热湿舒适性设计具有现实意义。

### 2 问题的数学模型

首先将织物作均匀化处理, 即将织物看成是由均匀分布的纤维组成, 纤维和纤维之间的孔隙通过孔隙率来描述, 织物内的传质过程就可以通过研究表征性体积单元来获得。这

些过程包括: 纤维对周围水蒸汽的吸附、气体在纤维间孔隙内的迁移等, 下面分别说明。

#### 2.1 气体在纤维间孔隙内的迁移

当织物孔隙较小时, 气体通过织物受到的阻力主要由黏滞力引起, 受达西定律控制, 蒸汽在大气压力宏观迁移势作用下的渗流质量速度为<sup>[8]</sup>

$$\dot{m}_v = -\rho_v \frac{K_g}{\mu_g} \text{grad} p_g \quad (1)$$

其中:  $K_g$  为气相渗透率,  $\mu_g$  为气相黏度,  $\rho_v$  为蒸汽密度,  $p_g$  是大气压力。

干空气在宏观迁移势作用下的质量速度为<sup>[8]</sup>

$$\dot{m}_a = -\rho_a \frac{K_g}{\mu_g} \text{grad} p_g \quad (2)$$

蒸汽除了在气体宏观迁移势作用下的渗流外, 还有在蒸汽压力梯度驱使下的扩散, 对于孔隙率  $\varepsilon$  的孔隙介质, 内部蒸汽的质量扩散速度可表示为<sup>[9]</sup>

$$\dot{m}_v^D = -\varepsilon D \left( \frac{M p_g}{R T p_a} \right) \text{grad} p_v \quad (3)$$

式中  $D$  为扩散系数, 是温度  $T$  和  $p_g$  的函数, 即

$$D(T, p_g) = D_0 \frac{p_{g0}}{p_g} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1.80} \quad (4)$$

其中  $D_0 = 0.216 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  为  $T = T_0 = 273.15 \text{ K}$ ,  $p_g = p_{g0} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$  时蒸汽在空气中的扩散系数值, 公式(4)表明蒸汽在空气中的扩散系数与大气压力有重要关系, 同大气压力成反比, 大气压力越高, 其扩散系数越

2002-07-23 收到第 1 稿, 2002-12-04 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金项目(10072014)和高校博士点专项基金项目(2000014107)资助。

低。  $p_v$  是蒸汽压力,  $M$  为水分子的摩尔质量,  $R$  为气体常数,  $p_a$  为干空气的分压。

## 2.2 纤维对周围水蒸汽的吸附原理

构成织物的纤维本身也是一种多孔介质, 当蒸汽扩散到纤维内部时被纤维吸附形成液态水, 同时伴有相变潜热产生。纤维对蒸汽的吸附过程的研究是织物热湿传输领域的核心问题。经过 Henry<sup>[1]</sup>, Nordon 和 David<sup>[2]</sup>, Watt<sup>[5]</sup>, Y. Li 和 B. V. Holcombe<sup>[3]</sup> 等人的研究, 已达成共识: 纤维对蒸汽的吸附过程是一个两阶段过程, 第 1 阶段的吸附速度要比第 2 阶段快得多。Y. Li 和 Luo<sup>[6]</sup> 深入研究了纤维的吸附机理, 通过解 1 个随时间变化的两阶段扩散系数的纤维扩散方程, 来获取纤维含水量变化率同周围空气湿度的关系, 其基本方程如下

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r D_f(w_c, t) \frac{\partial C_f}{\partial r} \right) \quad (5)$$

式中,  $C_f$  为纤维内部蒸汽浓度,  $D_f(w_c, t)$  为纤维内部蒸汽扩散系数, 是含水量  $w_c$  和时间的函数, 当  $t \leq 540$  s 和  $t > 540$  s 时不同纤维有不同的表达式, 都是含水量的函数。含水量  $w_c = \bar{C}_f / \rho_{\text{fiber}}$ , 由纤维内蒸汽平均浓度  $\bar{C}_f$  和纤维密度  $\rho_{\text{fiber}}$  的比值得到。方程 (5) 的边界条件如下

$$C_f(R_f) = f(RH, T) \quad (6)$$

$f$  由纤维的解吸等温特性得到,  $RH$  是纤维表面蒸汽的相对湿度。

上述纤维中蒸汽的扩散系数  $D_f(w_c, t)$  是在一个大气压下通过实验获得的, 大气压力为  $p_g$  时, 根据蒸汽的扩散系数同大气压力成反比的关系<sup>[9]</sup>, 扩散系数取为  $\frac{p_{g0}}{p_g} D_f(w_c, t)$ 。

## 2.3 多孔织物热湿耦合控制方程

根据上述湿迁移机理, 运用表征性体积单元, 列出如下平衡方程:

### 2.3.1 水蒸汽质量守恒方程

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \frac{\partial [C_f(1-\varepsilon)]}{\partial t} = \text{div}(-\bar{m}_v^D) + \text{div}(-\bar{m}_v) \quad (7)$$

### 2.3.2 能量守恒方程

$$c_v \frac{\partial T}{\partial t} + \lambda(1-\varepsilon) \frac{\partial C_f}{\partial t} = \text{div}[K_{\text{mix}}(\text{grad}T)] \quad (8)$$

式中,  $c_v$  是织物的体积热容,  $\lambda$  是织物的吸附潜热,  $K_{\text{mix}}$  是织物的热传导系数, 它们都与含水量、温度、织物种类等因素有关<sup>[6]</sup>。

### 2.3.3 干空气质量守恒方程

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_a}{\partial t} = \text{div}(\bar{m}_v^D) + \text{div}(-\bar{m}_a) \quad (9)$$

### 2.3.4 初始条件

$$T = T_0, \rho_v = \rho_{v0}, p_g = p_{g0} \quad (10)$$

$$C_f = f(RH_0, T_0) \quad (11)$$

### 2.3.5 边界条件

$$\left. \begin{aligned} \bar{m}_v^D \cdot \mathbf{n}|_r + \bar{m}_v \cdot \mathbf{n}|_r &= h_c(\rho_v - \rho_{v\infty}) \\ K_{\text{mix}} \text{grad}(T) \cdot \mathbf{n}|_r &= h_t(T - T_\infty) \\ p_g|_r &= p_{g0} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

采用控制体积法对方程进行离散求解。

## 3 数值算例及分析

### 3.1 理论计算与实验比较

为了考察模型的预测性能, 同已有的实验数据进行了比较。首先在大气压力为 1 个大气压的条件下, 进行了数值模拟。考查羊毛织物, 厚度为 2.96 mm, 根据文献 [6]: 羊毛纤维的密度

$$\rho_{\text{fiber}} = 1300 \text{ kg/m}^3$$

$$\bar{C}_f = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R 2\pi r C_f dr$$

其中  $R$  为羊毛纤维半径, 这里取  $1.03 \times 10^{-5}$  m,

$$D_f(w_c, t) =$$

$$\begin{cases} (1.04 + 62.8w_c - 1342.59w_c^2) \times 10^{-14} & t < 540 \text{ s} \\ 1.6164\{1 - \exp[-18.16 \exp(-28.0w_c)]\} & t \geq 540 \text{ s} \end{cases} \quad \text{m}^2/\text{s}$$

$$c_v = 373.3 + 4661.0w_c + 4.221T \quad \text{kJ/m}^3\text{K}$$

$$K_{\text{mix}} = (38.493 - 0.72w_c + 0.113w_c^2 - 0.002w_c^3) \times 10^{-3} \quad \text{W/m}^2\text{K}$$

$$h_c = 0.137 \text{ m/s}, \quad h_t = 99.4 \quad \text{W/m}^2\text{K}$$

$$\lambda = 1602.5 \exp(-11.72w_c) + 2522.0 \quad \text{kJ/kg}$$

$$\varepsilon = 0.925, \quad \mu_g = 1.27 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

$$K_g = 2.5 \times 10^{-13} \text{ m}^2$$

初始条件 293.15 K, 相对湿度 0%, 将其放置于室温 293.15K, 相对湿度在 90min 内从 0% 变到 99%(步长 1%) 的环境下, 由于纤维的吸湿特性, 使蒸汽发生相变, 从而有相变潜热产生, 导致温度变化, 采用本文提出的模型对该过程进行了数值模拟, 选取织物边界上的一个测点的温度计算值与文献 [6] 中的实验数据进行了比较。比较结果如图 1 所示。从图 1 中可以看出模型预测曲线同实验数据之间符合较好。表明模型具有良好的预测性能。

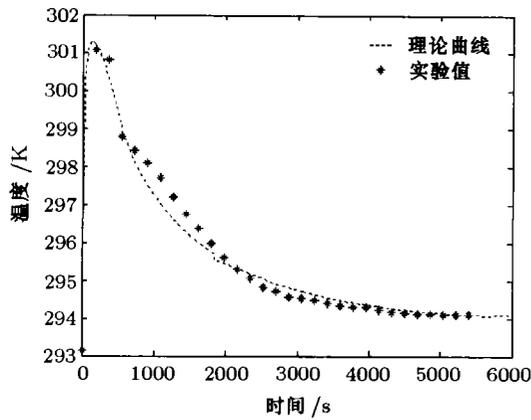


图1 理论与实验比较

### 3.2 压力不同情况下结果比较

为了考察大气压力对蒸汽扩散的影响,进而影响温度的变化,用本文提出的模型分别考察了大气压力为  $1.0135 \times 10^5 \text{ Pa}$  和  $5.0135 \times 10^4 \text{ Pa}$  两种条件下,羊毛织物的热湿特性.厚度  $3 \text{ mm}$ ,初始条件为:温度  $295.16 \text{ K}$ ,蒸汽密度  $0.01 \text{ kg/m}^3$ ;左端环境条件:温度  $295.16 \text{ K}$ ,蒸汽密度  $0.02 \text{ kg/m}^3$ ,右端环境条件:温度  $303.16 \text{ K}$ ,蒸汽密度  $0.03 \text{ kg/m}^3$ .取出织物左端边界上一点,两种工况下的数值预测结果如图2和图3.从图中可以看出大气压力对温度分布和密度分布的影响.从图2可以看出,大气压力高的

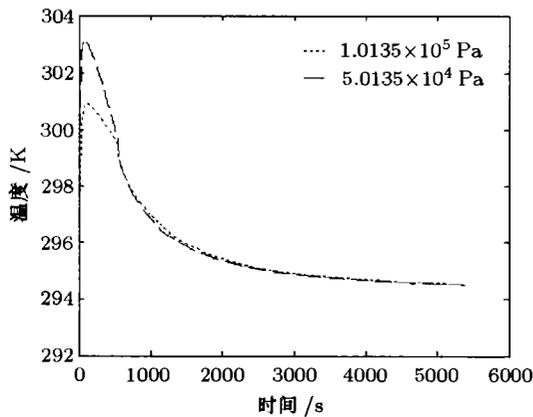


图2 不同大气压力下温度变化曲线

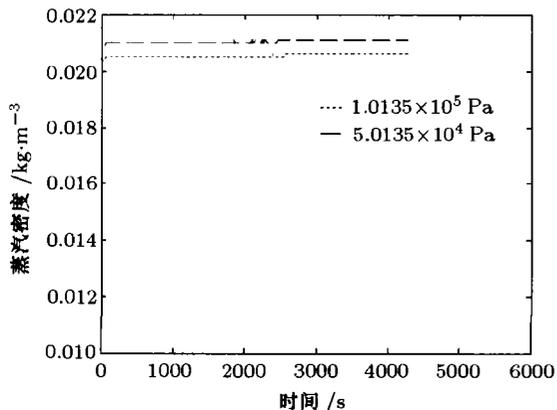


图3 不同大气压力下密度变化曲线

情况下,织物温度峰值要低于大气压力低的情况,因为,低大气压下纤维内部蒸汽扩散快,纤维吸附率大,潜热释放多。

从图3中可以看出,在织物的左端,大气压力高的情况下,蒸汽的密度比大气压力低的条件下低,这是因为在高压下蒸汽扩散的速度要慢于大气压力较低的情况,所以大气压力高时,右端蒸汽向左端扩散量少于大气压力低时的扩散量,这是导致图3结果的根本原因。

### 4 结束语

由于数值模拟与实验相比具有费用小、耗时短、不受客观条件限制等优点,本文从织物热湿传输机理角度出发,建立了考虑大气压力变化的织物热湿传输耦合模型,通过数值模拟,考察了大气压力对织物内热湿传输的影响.从数值模拟的结果中可以看出,模型能够体现织物内热湿传输机理,同时也说明在服装的热湿舒适性设计中,考虑大气压力对传热传湿过程影响的必要性.本模型可以为不同大气压力条件下服装的热湿舒适性设计提供理论依据.相信随着人类生存、工作环境的扩展,本文的模型更能够体现其应用价值。

### 参 考 文 献

- 1 Henry PSH. Diffusion in absorbing media. *Proc R Soc*, 1939, 171: 215~241
- 2 Nordon P, David HG. Coupled diffusion of moisture and heat in hygroscopic textile materials. *Int J Heat Mass Transfer*, 1967, 10: 853~866
- 3 Li Y, Holcombe BV. A two-stage sorption model of the coupled diffusion of moisture and heat in wool fabric. *Textile Res J*, 1992, 62 (4): 211~217
- 4 Downes JG, Mackay BH. Sorption kinetics of water vapor in wool beds. *J Polymer Sci*, 1958, 28: 45~67
- 5 Watt IC. Kinetic study of the wool-water system. Part II. the mechanisms of two-stage absorption. *Textile Res J*, 1960, 30: 644~651
- 6 Li Y, Luo ZX. Physical mechanisms of moisture diffusion into hygroscopic fabrics during humidity transients. *Journal of the Textile Institute*, 2000, 91: 302~316
- 7 薛殿华. 空气调节. 北京: 清华大学出版社, 2000. 134~135
- 8 Bear J. 多孔介质中流体动力学. 李竞生, 陈崇希译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983. 75~132
- 9 雷树业, 郑贯宇. 含湿多孔介质传热传质三参数渗流模型研究方法. *清华大学学报(自然科学版)*, 1997, 37(2): 86~90

### EFFECT OF ATMOSPHERIC PRESSURE ON HEAT AND MOISTURE TRANSPORT WITHIN HYGROSCOPIC FABRICS

LI Fengzhi LIU Yingxi

(Dept. of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

LUO Zhongxuan

(Dept. of Applied Mathematics, Dalian University of  
Technology, Dalian 116023, China)

LI Yi

(Institute of Textiles and Clothing, The Polytechnic  
University of Hong Kong, Hong Kong, China)

**Abstract** In order to clarify the effect of the atmospheric pressure on the heat and moisture transfer within hygroscopic fabrics, based on the improved sorption rate equation and the Darcy's law, an analytical model is proposed. From the fit between the theoretically calculated temperature changes and those measured from experiments, it is

shown that the models can predict the simultaneous heat transfer that is coupled in the moisture-diffusion process during humidity transients. Furthermore, the temperature and moisture concentration distribution in the inter-fiber void space at different atmospheric pressure conditions are numerically computed and compared. It shows that at the low atmospheric pressure, the temperature peak and the density of vapor are higher than those at the high atmospheric pressure.

**Key words** atmospheric pressure, fabric, coupling, model

## 高瓦斯综采面顶板覆岩卸压抽放瓦斯试验研究

卢平 刘泽功 廖光焯 范维澄

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027)

沈兆武

朱贵旺

(中国科学技术大学力学与机械工程系, 合肥 230027) (淮南矿业集团公司, 淮南 232001)

**摘要** 针对我国高瓦斯低透气性煤层瓦斯预抽效果差的特点, 在分析煤炭回采过程中顶板覆岩卸压移动规律基础上, 提出了利用采动煤层顶板覆岩卸压裂隙发育特征, 实施覆岩卸压区走向长钻孔抽放瓦斯。实践证明, 顶板走向长钻孔覆岩卸压瓦斯抽放是解决低透气煤层瓦斯抽放率低的有效方法, 回采面的瓦斯抽放率在 20% 以上; 分析了顶板覆岩结构及关键层层位对覆岩移动规律的影响, 给出了顶板走向长钻孔卸压抽放的合理布置区域。

**关键词** 顶板覆岩, 卸压, 裂隙, 瓦斯抽放

### 1 引言

煤层气即矿井瓦斯( $\text{CH}_4$ )是威胁煤矿安全生产的有害气体, 同时又是洁净高效能源和优质化工原料。瓦斯抽放不仅可以降低矿井瓦斯涌出量, 防止瓦斯爆炸和瓦斯突出灾害, 而且抽出的瓦斯可作为洁净能源加以利用, 减少环境污染。国内外煤层气抽放方法分为采前预抽(以地面钻孔抽放方法为主)与采后卸压抽放(以井下抽放钻孔方法为主)两类。煤岩体的裂隙构成瓦斯流动通道, 它对瓦斯抽出率起决定作用。目前, 采前地面钻孔预抽方法普遍采用水力压裂技术来扩展煤层裂隙以提高单井抽放半径和瓦斯抽出率。研究表明<sup>[1]</sup>: 我国煤层渗透率一般在  $0.001 \times 10^{-3} \sim 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 国内渗透率最大的抚顺煤田也仅为  $0.54 \times 10^{-3} \sim 3.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 其渗透率比美国低 2~3 个数量级, 按美国地面煤层气开发标准, 认为煤层渗透率在  $3 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  最佳, 但不能低于  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。我国煤层气资源虽然十分丰富,

但由于煤系地层煤层的原始透气性差, 致使原始煤层预抽难以实施, 效果甚差。

覆岩采动裂隙分为两类: 一是沿层离层裂隙, 它将在整个上覆岩层范围内发展, 导致煤层膨胀卸压; 另一类为穿层竖向破断裂隙, 它是上覆邻近层卸压瓦斯流向开采层及其采空区的通道, 仅在覆岩一定高度范围内发育, 其高度(可称之为“导气裂隙带”高度)与煤层采高及覆岩岩性有关。相对于开采煤层来说, 可将卸压瓦斯分为以下三类: (1) 本煤层卸压瓦斯; (2) 邻近层卸压瓦斯; (3) 上覆远距离卸压瓦斯。其中本煤层与邻近层瓦斯会涌入回采工作面及其采空区, 引起回采空间尤其是工作面上隅角瓦斯积聚与超限, 造成安全隐患。随着时间的推移和采矿工程的发展, 煤炭开采将逐渐向地层深部延伸, 煤层的瓦斯含量和煤炭开采时的瓦斯涌出量逐渐增大, 在阳泉和淮南都出现了单一回采面绝对瓦斯涌出量超过  $50 \text{m}^3/\text{min}$  的高瓦斯工作面, 用传统的通风稀释方法已不能解决煤炭开采安全问题。因此, 针对我国煤层低透气性特点, 应力求找到实现采动卸压高效抽放瓦斯的方法和途径。

### 2 回采过程中采空区顶板卸压覆岩岩层移动规律

图 1 为钱鸣高院士提出的砌体梁理论<sup>[2]</sup>对采动影响岩体移动规律整体“横三区”、“竖三带”的认识。即沿工作面推进方向上覆岩层将分别经历煤壁支撑影响区、离层区、重新压实区, 由下而上可将采空区覆岩移动划分 3 个不同的地带: (1) 紧靠煤体上方的覆岩层由于破碎而冒落的地带称冒

2002-04-18 收到第 1 稿, 2003-01-23 收到修改稿。