

人体肢体隐性发汗及其降温效应机理的热物理分析

朱光明¹, 刘伟^{1*}, 杨昆¹, T. F. Zeng²

(1. 华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074;

2. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, North Carolina State University, RaNC 27695-7910, USA)

摘要: 建立人体皮肤组织内汗液流动和传热的数学模型, 把 Darcy 定律引入到对汗液迁移的数学描述, 从热物理的角度解释人体隐性发汗的机理, 定量分析隐性发汗对肢体的降温效应。

关键词: 人体肢体; 隐性发汗; 多孔介质模型

中图分类号: R318; Q65

文献标识码: A

引言

人体在环境温度较高时, 会以排汗的方式将体内的热量散发到环境空间藉以维持人体的正常温度。由于水分具有很大的蒸发潜热, 因此, 发汗可以有效地将体内产生的热量排散到环境空间。发汗是生命体的一种独特的传热方式^[1,2]。

人体的发汗可以视皮肤表面有无可见汗珠或汗液膜, 分为显性(可感)发汗和隐性(不感)发汗两种。一般来讲, 显性发汗发生在环境温、湿度较高, 空气流动较差, 而机体产热又相对较多的时候, 例如剧烈运动或劳动等。在常温条件下, 人体虽然没有明显的发汗现象, 但事实上仍然存在着汗液的流动和蒸发, 即隐性发汗, 此时, 体内的水分直接渗透出皮肤, 在尚未积聚成汗滴时汽化为蒸汽。

发汗过程包括汗液的流动和相变蒸发。鉴于皮肤组织的生理结构, 本研究将皮肤组织模拟为多孔结构, 采用非饱和和多孔介质内的流动和传热理论, 分析发汗的流动和相变迁移过程, 讨论隐性发汗与环境温度、湿度等外界因素以及与汗腺活动数量间的依赖关系, 定量计算隐性发汗对机体的降温作用。

1 物理模型

如图 1 所示, 将人体肢体简化为规则的实圆柱体后, 从体核到体表, 人体肢体可以大致分为三层: 骨骼层, 肌肉层以及皮肤层(设定每一层的厚度分别为 b 、 m 和 s)。由于每一层都由不同的组织构成, 各层的传热传质机理是不同的。在肌肉层中, 最显著的特征是血液的灌注作用和组织的代谢热产作用, 血液灌注有助于身体深部组织的保温和温度均匀^[3]。在骨骼层中, 由于没有血液的流动和代谢产热, 热传导是惟一的热量传递方式。在皮肤层中, 同时存在有血流的灌注以及汗液的相变和流动迁移的影响, 但代谢产热可以忽略不计。

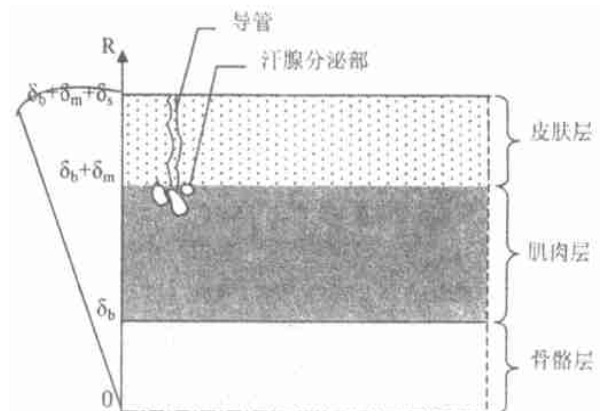


图 1 人体上肢结构示意图

2 传热传质数学模型

2.1 骨骼和肌肉层

骨骼层内和肌肉层内热量传输的主要区别在于有无血液灌注和代谢产热。在本研究中, 忽略血管的几

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目(59836240)

收稿日期: 2003-01-13

*联系人

何尺寸、几何分布、血流方向以及动脉血、静脉血温差等影响后,骨骼层和肌肉层的传热方程可以统一用 Pennes 方程描述^[4~7]:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + W_b(T) C_b(T_a - T) + Q_m + Q_r \quad (1)$$

对于无外加热源的稳态传热, Pennes 方程可简化为:

$$k \nabla^2 T + W_b(T) C_b(T_a - T) + Q_m = 0 \quad (2)$$

上式中,血液灌注率与温度的关系可以用下式表示^[8]:

$$W_b = \begin{cases} 0.45 + 3.55 \exp(- (T - 45.0)^2 / 12.0) & T < 45.0 \\ 4.00 & T > 45.0 \end{cases} \quad (3)$$

骨骼和肌肉层边界处的传热条件是温度和热流的连续。

2.2 皮肤层

汗液在汗腺中流动和蒸发。汗腺广泛分布于除口唇、唇红等以外的全身皮肤^[11]。成人汗腺有 200 万 ~ 1500 万个,单位面积上平均约有 143 ~ 339 个/cm²。组织学表明,不仅在汗腺的分泌部周围有丰富的毛细血管网,在汗腺的导管部周围也有丰富的毛细血管网^[2]。这保证了对汗腺分泌汗液的水分供应。当一种物质中有很多互相连通的孔隙时,就可以定义为多孔材料,流体可以在孔隙内流动^[9,10]。鉴于皮肤组织的结构,可以认为其在宏观上具有多孔性,组织构成固体骨架,汗腺导管群构成相互连通的孔隙。于是,可以用多孔介质内的流动和传热模型来分析汗液的相变迁移过程^[11,12]。

当隐性发汗发生时,皮肤层内同时存在汗液和汗汽。为简化计算,作如下假定:

- (1) 皮肤层组织的变形可以忽略;
- (2) 汗液成分 99% 以上是水,忽略其他成分的影响;
- (3) 皮肤层组织的热物性参数只与温度有关;
- (4) 组织孔隙中的汗液蒸汽处于饱和态;
- (5) 皮肤层各处保持局部热力学平衡,即: $T_{sweat} = T_{tissue}$ 。

2.2.1 连续性方程

在隐性出汗过程中,液相的蒸发量与汗汽的生成量是对应相等的。因此,质量连续性方程为:

$$\frac{d}{dr}(\rho_l u_l) = -\dot{m} \quad \frac{d}{dr}(\rho_g u_g) = \dot{m} \quad (4)$$

式中, ρ 、 ω 、 u 分别为密度、相含量和速度,下标 l 、 g 表示液态、汽态。 \dot{m} 指蒸汽发生率或水分蒸发率。

2.2.2 运动方程

非饱和多孔体中流体的流动受很多因素影响,对于一维径向、稳态的隐性发汗问题,由于汗液和汗汽流速非常小,粘性力和惯性力可以予以忽略,即毛细力与 Darcy 阻力相平衡;而汽相的传输,驱动力来自于温度梯度引起的蒸汽密度差,阻力为液体运动对其的影响,即汽相 Darcy 力。由参考文献[10],汗液和汗汽的运动可以简化为:

$$u_l = -\frac{D_l}{l} \frac{d\omega_l}{dr} - \frac{K_{hl}}{l} \quad u_g = -\frac{K_{hg}}{g} (T - T_{b+m}) + \frac{l}{g} u_l \quad (5)$$

上式, K_{hl} 是汗液的水力系数, K_l 、 K_g 是皮肤层中的液相孔隙渗透率和汽相孔隙渗透率; D_l 是液体的质量扩散率; β 是体积膨胀系数。

2.2.3 能量方程

在皮肤层内,忽略生化反应产生的代谢热,能量的平衡应同时考虑热传导、血液灌注、热对流以及汗液的流动和蒸发传热。由假设 5,皮肤层内始终处于局部热力学平衡状态,能量方程可表达式为:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r k_m \frac{dT}{dr} \right) + W_b C_b (T_a - T) - (i_l C_l u_l + g C_g u_g) \frac{dT}{dr} - (T) \dot{m} = 0 \quad (6)$$

式中, (T) 是汗液的蒸发潜热, W_b 为皮肤层中的血液灌注率。 k_m 为皮肤层的表观导热系数, 与皮肤组织、汗液、汗汽的导热系数之间的关系近似为: $k_m = s k_s + i k_l + g k_g$ 。其中 k_s 、 k_l 、 k_g 为皮肤组织、汗液和汗汽的导热系数。

2.2.4 传热传质边界条件

在肌肉层和皮肤层的界面, 温度和热流是连续的。在皮肤表面, 存在与外界环境的对流换热和辐射换热^[11,12]。

为便于计算, 假设在肌肉层和皮肤层的界面处的汗腺内总是存在汗液, 处于液饱和; 皮肤表面处汗腺内汗液量很少, 接近汽饱和^[11,12]。

如此构建皮肤层内连续性方程, 运动方程和能量方程, 结合皮肤和肌肉层的边界关系, 能够求得整个肢体内部的温度场和皮肤层内的温度场、相含量场、蒸发量场。

3 数值计算及结果分析

实际计算中, 选取上肢相关几何尺寸为: 半径 $R_L = 45\text{mm}$, 骨骼层厚度 $b = 12\text{mm}$, 皮肤层厚度 $s = 2.6\text{mm}$ 。皮肤组织被视为多孔介质, 取其孔隙率为 $\epsilon = 0.1$, 即生物组织相含量为 $s = 0.9$ 。其它计算数据分别取为: 血液定压比热容 $C_b = 4187\text{J}/(\text{K} \cdot \text{kg})$, 代谢产热 $Q_m = 1000\text{W}/\text{m}^3$, 皮肤表面黑度 $\epsilon = 0.98$, 皮肤表面与环境的对流换热系数 $h = 4.2\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 动脉血温度取常数 $T_a = 37$ 。骨骼、肌肉以及皮肤的导热系数分别取为: $K_b = 0.41\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $K_m = 0.34\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $K_s = 0.34\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

由假定 2, 汗液和汗汽的比热容分别为: $C_l = 4174\text{J}/(\text{K} \cdot \text{kg})$, $C_{pg} = 1870\text{J}/(\text{K} \cdot \text{kg})$; 导热系数分别为: $k_l = 0.561 + 0.019 \times T$, $k_g = 0.023 + 0.00008 \times T$ 。

采用有限差分法求解微分方程组, 计算结果为图 2~12 所示。

图 2 反映皮肤层内汗液相含量的变化趋势。皮肤层内沿半径方向, 随着相变过程的进行, 汗液的含量逐步减少。计算发现, 汗液相含量的减少趋势近似于线性, 只是在皮表处的下降更加明显, 这说明近皮表处汗液蒸发较强。

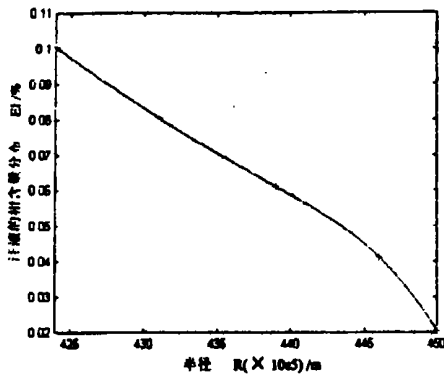


图 2 皮肤层内汗液相含量变化趋势

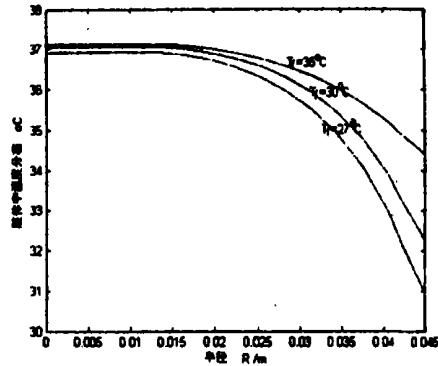


图 3 环境温度变化对组织内部温度影响 ($\epsilon = 0.6, \phi = 10\%$)

图 3~图 5 反映环境温度对肢体热质传输的影响。环境温度的上升造成肢体内部温度和汗液蒸发量的明显升高。由图 3 可见, 当环境温度从 27 升高到 30, 以及从 30 升高到 35 时, 肢体内部的温升是显著加强的。分析图 4, 环境温度的升高会造成皮肤层内汗液蒸发率的增大, 但这种蒸发加强的趋势随环境温度的升高是逐渐减弱的。图 5 中皮肤层内的汗汽运动速度也是随环境温度上升而加强的, 但这种流动的加强与温升不是同步的, 流速的增大呈现出明显的减弱趋势。由此可见, 环境温度的升高对肢体温度场的影响

更为显著,而对汗液蒸发量和汗汽流动的影响则相对较小。

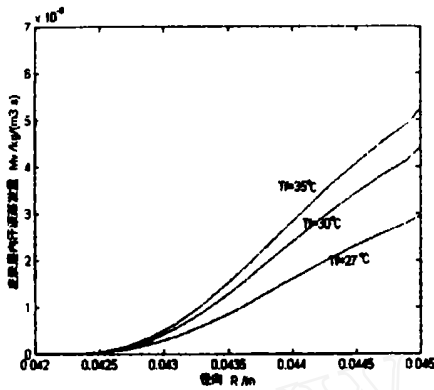


图 4 环境温度对汗液蒸发量的影响($\omega = 0.6, \phi = 10\%$)

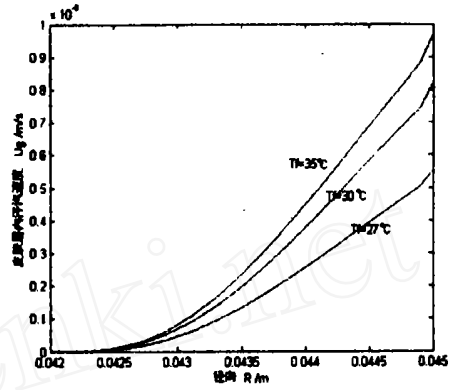


图 5 环境温度对汗汽速度影响($\omega = 0.6, \phi = 10\%$)

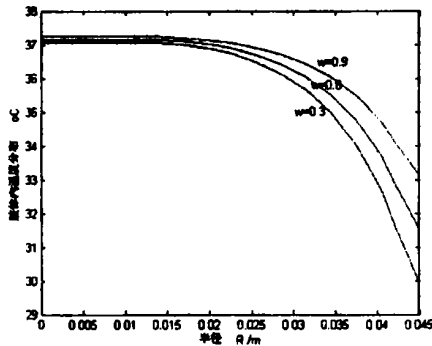


图 6 环境湿度对组织温度场影响($T_f = 30, \phi = 10\%$)

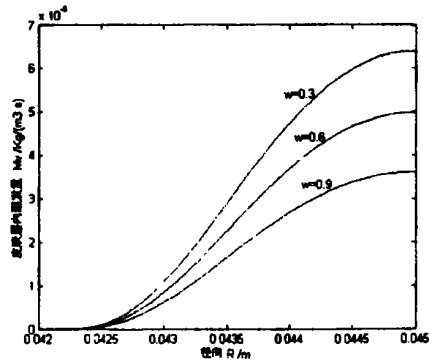


图 7 环境湿度对汗液蒸发量影响($T_f = 30, \phi = 10\%$)

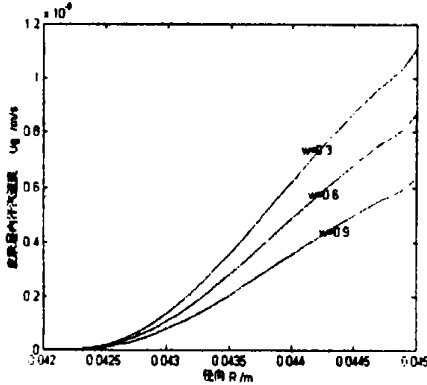


图 8 环境湿度对汗汽速度影响($T_f = 30, \phi = 10\%$)

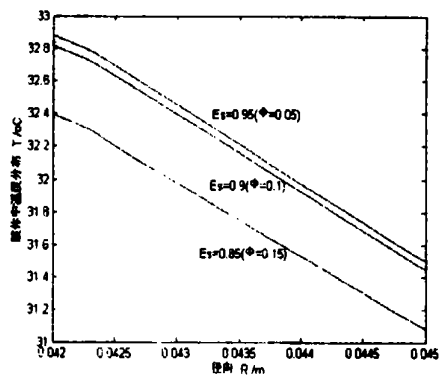


图 9 汗腺开放量与组织温度关系($T_f = 30, \omega = 0.6$)

图 6~图 8 反映环境湿度对肢体传热传质的影响。图 6 是环境湿度的变化对肢体温度及隐性发汗行为的影响,环境湿度增大会使肢体内部温度上升,越靠近表皮,因为湿度增大引起的温度升高越明显。环境湿度对汗液的蒸发以及汗汽的运动有重要的影响,环境湿度越大,汗液发生蒸发相变越少,汗汽运动越微弱,这一现象在图 7 和图 8 中反映出来。图 7 中的曲线是上凸的,而图 8 中的曲线相对平坦。分析图 7,越靠近皮肤表面,由于环境湿度上升而引起的局部蒸发率的下降越明显。观察图 8,当湿度下降时,汗汽的运动速度加大。虽然汗汽运动速度的量级只是 $10^{-10} \sim 10^{-9} \text{m/s}$,但汗汽的流动会影响到肢体内部的温度分布。

图 9~图 11 讨论汗腺活动数目对肢体传热传质的影响。由人体生理学,当环境温度升高时,就有更多

的汗腺开放,这意味着皮肤层多孔组织结构的孔隙度应该是随环境温度变化的,温度上升,汗腺开放数量增加,孔隙度增大,反之亦然。图 9 反映了随着汗腺活动数目的增多,当孔隙度从 5% 增大到 10% 和 15% 时,肢体温度是下降的。但孔隙度变化引起组织温度的变化是非均匀的,当孔隙度从 5% 升高到 10% 时,温度的下降幅度为 0.1;而当孔隙度从 10% 增大到 15% 时,温度的下降幅度为 0.5。图 10 和图 11 说明孔隙度的增大有利于汗腺的蒸发和流动,当孔隙度从 5% 增大到 10%,然后到 15% 时,局部蒸发量和汗汽运动速度

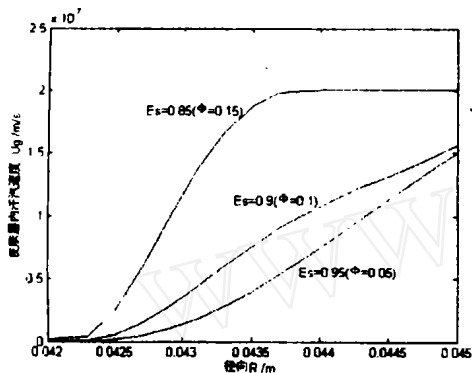


图 10 汗腺开放量与汗液蒸发率关系 ($T_f = 30$, $\phi = 0.6$)

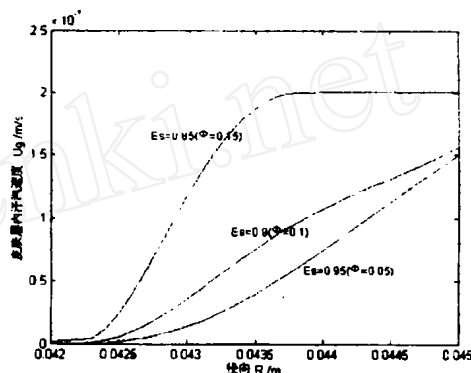


图 11 汗液开放量与汗汽速度关系 ($T_f = 30$, $\phi = 0.6$)

曲线都由下凹变为上凸,孔隙度为 15% 的曲线在靠近皮肤表面处接近于水平。这些现象说明,组织孔隙度的增大,即活动汗腺数目的增多,对人体皮肤层内传热传质的影响是有限的,一方面,组织孔隙度的增大受到人体生理结构条件的限制,另一方面,组织孔隙度的增大也不可能无止境地降低体温。

图 12 显示分别采用了 Pennes 方程和采用本研究隐性发汗传热模型(环境温度 35,湿度 60%)所得出的肢体温度分布。图中比较可见,两者的温差大致为 1 ~ 2,这是由于汗液的相变和迁移引起的肢体降温效应。

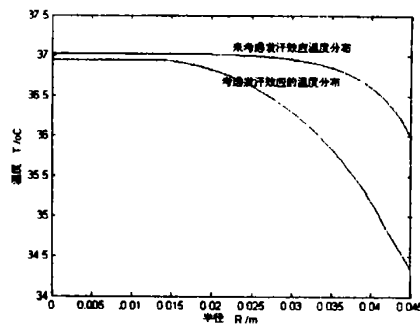


图 12 存在隐性发汗下组织温度降温效果

4 结论

本研究基于肢体传热和流动的数学模型,并通过数值计算,对隐性发汗的降温机理进行了热物理分析,结论如下:

- (1) 汗液的相变和迁移对肢体组织温度的变化是重要的。由于汗液有较大的比热和导热系数,可以吸收组织热量并有效地传递到外部环境。肢体发汗可以显著降低皮表温度,对保持体温在正常水平有重要意义。
- (2) 环境条件对组织内部温度场分布以及汗液蒸发的影响是直接的。环境温度、湿度越高,组织温度也越高。提高环境湿度将抑制发汗过程。
- (3) 环境温度较高时,皮肤层内有更多的汗腺开放,使得皮肤结构的孔隙度增大。孔隙度增大意味着有更多的组织空间被用于汗液的相变和迁移,汗液流动和蒸发速率有所加强,体温有所下降。因此,汗腺开放是调节体温的重要方式。

5 参考文献

[1] 徐雨维,高春圃编. 工程生理学[M]. 杭州:浙江大学出版社,1997,204-209.
 [2] 唐元升,张秀珍,韩殿存. 人体医学参数与概念[M]. 济南:济南出版社,1995,10-15.

- [3] 朱光明,刘伟,杨昆,等. 肢体传热的二维数值计算分析[J]. 华中理工大学学报,2000,28(4):98-99.
- [4] Pennes H. H. Analysis of Tissue and arterial temperature in the resting human forearm[J]. Journal of Applied Physiology. 1,2. 1948:93-122.
- [5] Chato JC. Fundamentals of Bioheat Transfer[M]. Springer-Verlag. 1989,60-80.
- [6] 刘静,王存诚. 生物传热学[M]. 北京:科学出版社,1997,106-108.
- [7] Wang BX, Wang YM. Study on the basic equations of biomedical heat transfer[C]. Transport phenomena science and technology. Beijing: Higher Education Press. 1992,773-776.
- [8] Martin Seebass. Optimization of temperature distributions for regional hyperthermia based on a nonlinear heat transfer model [C]. Annals New York Academy of Sciences, NYAS. 1999:36-46.
- [9] Nield DA, Began A. Convection in porous media[M]. Springer-Verlag New York Inc. 1992,1-5.
- [10] Reggy GB, Wei Liu, Johnson RR. A simplified analytical model to estimate vapor and heat diffusion rates through an unsaturated clay bed coupled to a heat pump[C]. Advance in Energy Conversion Engineering, Wuhan: HUST Press. 1990:239-243.
- [11] Zhu GM, Liu W, et al. Heat and mass transfer in upper limbs with phase change and migration of sweat[C]. Heat Transfer Science and Technology 2000, Higher Education Press. 2000:763-768.
- [12] Zhu GM, Liu W, et al. Layered mathematic model for the heat and mass transfer in upper limbs with concealed perspiration [C]. Energy Conversion and Application, Huazhong University of Science and Technology Press. 2001:313-317.

THERMAL ELUCIDATION FOR CONCEALED PERSPIRATION OF HUMAN LIMB USING THEORY OF HEAT AND MASS TRANSFER IN UNSATURATED POROUS MEDIA

ZHU Guang-ming¹, LIU Wei¹, YANG Kun¹, ZENG T. F²

(1. School of Energy & Power Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074;

2. Department of Mechanical and Aerospace Engineering North Carolina State University, Raleigh, NC 27695-7910, USA)

Abstract : Human upper limb is divided into three layers: skin layer, muscle layer and bone layer. Each layer has different physiologically thermal functions. How the environmental temperature, environmental humidity and other factors affect the behavior of perspiration was discussed in this work. The paper quantitatively reveals the mechanism of how the perspiration adjusting the body temperature in theory. Darcy's law in unsaturated condition was adopted to describe the sweat's coupled transport of heat and mass, which makes flow calculation possible, but rarely reported few so far by other researchers.

Key words : Bio-heat transfer; Sweat; Limbs; unsaturated porous media