

非均匀非稳态温度对人体散热影响的实验研究

王丽娟¹, 刘艳峰², 刘加平³

(1. 西安工程大学环境与化学工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055;

3. 西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 人体散热对热舒适研究有着重要作用. 本文主要研究非均匀非稳态温度条件下, 人体散热量和散热比例变化特性. 在本次实验中, 通过控制空气温度不变、平均辐射温度随时间改变的方法, 来实现非均匀非稳态条件. 在测试人体皮肤温度、服装外表面温度、体温以及各种环境参数等变量的前提下, 得出人体各种散热量和散热比例, 并给出它们的拟合公式. 研究表明: 在非均匀非稳态温度下, 辐射和显汗蒸发散热随平均辐射温度变化较大, 而对流、导热、呼吸和扩散散热变化较小. 与以往研究相比, 对流散热比例较小. 可见, 人体散热量和散热比例可以通过控制环境参数而改变. 因此, 在怎样的环境参数组合下, 能采用最小的能耗来满足热舒适, 将有较大的研究意义.

关键词: 人体散热; 非均匀非稳态温度; 实验测试; 平均辐射温度

中图分类号: TU111.19+3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)02-0274-04

Experimental research on the effect of non-uniform and transient temperature on body heat dissipation

WANG Lijuan¹, LIU Yanfeng², LIU Jiaping³

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

3. School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Body heat dissipation is important for the research of thermal comfort. The purpose of the paper is to research the effect of non-uniform and transient temperature on body heat dissipation. In this experiment, air temperature was constant, and mean radiation temperature was changed with time to realize non-uniform and transient temperature. Apart from the skin temperature, outer surface temperature of cloths, body temperature, and various environmental parameters were tested. Body heat dissipating capacity and rate were also calculated according to these data. Besides, their fitting formulas were provided. Results show that in the non-uniform and transient temperature, the heat loss by radiation and evaporation of sweat change significantly with mean radiation temperature, while the convective heat loss, conductive heat loss, respiration heat loss, and heat loss by water vapour diffusion change little with it. Compared with the previous research, the convective heat loss is less. It's obvious that body heat dissipating capacity and rate can be altered by regulating environmental parameters. So the proper integration of environmental parameters for thermal comfort is realized by the minimum energy consumption.

Key words: body heat dissipation; non-uniform and transient temperature; experimental research; mean radiation temperature

人体必需与周围环境处于相对稳定的热平衡, 才能从事各种正常生命活动. 环境参数对人体散热有重要影响. 吴清才^[1]分析了影响人体散热的多种因素发现: 环境温度、湿度和风速是影响人体散热稳定度的主要因素. 考虑这些因素对航天员的影响, 他又利用能量守恒建立人与环境热交换方程^[2]. 另外, 袁修干教授及其团队^[3], 他们模拟了失重时人体体温调节系统的改变对人体非蒸发散热的影响, 发现各部位散热所占全身散热比例中, 躯干增加了近6%, 头部增加约2%, 上肢散热减少3%, 下肢减少约5%. 李绪泉副教授^[4]研究了低气压环境下人体散热特性, 并推导出该环境下人体对流换热与皮肤蒸发换热的方程式. 刘艳峰教授及其学生^[5]研究了多种温度和风速设置下, 人体散热量和散热比例变

化特性, 为探究人体在热环境中的反应提供参考.

在诸多环境参数中, 温度是影响人体散热的主要因素. 在以往热环境研究中, 平均辐射温度和空气温度相差不大, 通常采用操作温度作为这两个温度的综合指标^[6]. 本文所研究的温度与以往不同, 平均辐射温度和空气温度差别较大, 且平均辐射温度随时间变化. 研究结果为非均匀非稳态环境下, 人体各种散热特性提供参考.

1 实验方案

实验室平面尺寸为4.2×2.6 m, 高度为3.3 m. 空调(型号为KFR-26GW(26556)FNDc-3)控制空气温度和风速. 电热膜(型号为US65P250M220V)控制壁面温度, 进而控制平均辐射温度. 为了实现非均匀

非稳态温度, 平均辐射温度先从 24.2 ℃ 升到 34.7 ℃, 然后从 34.7 ℃ 降至 23.8 ℃. 整个升降过程中, 人体周围空气温度恒为 24 ℃, 风速恒为 0.06 m/s, 相对湿度约为 40%. 实验工况设置详见表 1.

表1 实验工况 (空气温度恒为 24 ℃)
Tab.1 Experimental condition (air temperature is 24 ℃)

	测试时间/min	平均辐射温度/℃
升温	5	24.2
	10	26.8
	15	28.3
	20	29.9
	25	31
	30	32.2
	35	33.4
	40	34.7
降温	45	34.7
	50	32.6
	55	31.4
	60	30.2
	65	27.9
	70	27
	75	24.7
	80	23.9

为了避免人员形体、年龄、生活习惯、服装等因素影响实验结果, 对受试者提出以下要求: 1) 男女年龄 22~25 岁, 身体健康, 不抽烟; 2) 男身高 1.70~1.78 m、体重 55~75 kg, 女身高 1.60~1.68 m、体重 45~60 kg; 3) 男女服装均为 0.52 clo; 4) 样本数量男女各 8 名; 5) 被测期间保持静坐姿势. 每名受试者的测试周期为 80 min, 分别经历升温 and 降温过程.



图1 测试现场图
Fig.1 Experiment site

据 ASHRAE 41 规定, 非稳态测试采样点与温度变化率有关: 当 ≥ 0.5 ℃/s, 最大间隔是 5 s; 在 0.25~0.50 ℃/s, 最大间隔是 10 s; 当 ≤ 0.25 ℃/s, 最大间隔是 20 s^[7]. 因此, 本次实验采样点间隔取 10 s. 室内温湿度采用自记式温湿度计 RT-72ui 测试, 该仪器温度测量范围为 -10~60 ℃, 精度平均 ± 0.3 ℃ (0~50 ℃); 湿度测量范围 10%~95% RH, 精度 $\pm 5\%$ RH (25 ℃, 50% RH). 壁面温度采用热流巡回检测仪 XSL/R70B 测试, 其测量范围为 -100~100 ℃, 精度为 ± 0.1 ℃. 根据已测得壁面温度, 采用面积平均法算出平均辐射温度. 服装表面温度采用热成像仪 TH9100WV 测试, 测量范围 -40~120 ℃, 精度为读数的 $\pm 2\%$. 皮肤温度采用 Pt1000 热电偶测试, 测

量范围在 -100.00~100 ℃ 之间, 精度为 ± 0.1 ℃. 腋温采用玻璃管水银计测试. 测试现场详见图 1. 为了确保数据的可靠性, 首先剔除样本中异常数据. 采用软件 SPSS-8.0 进行方差分析, 计算平均值, 并对多组实验数据的差异进行显著性检验, 结果显示 $P < 0.05$. 根据实验测试出所需参数, 然后采用相关公式计算人体各种散热量和散热比例^[5,8], 结果详见图 2~3.

2 结果分析

2.1 人体散热量与平均辐射温度关系

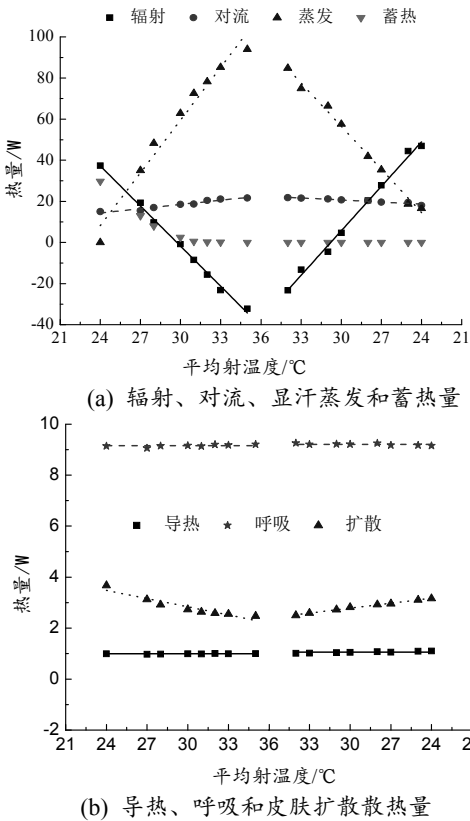


图2 人体各散热量与平均辐射温度关系
Fig.2 Body heat dissipating capacity changes with radiation temperature

图 2(a) 和 (b) 表明, 辐射和显汗蒸发散热量随平均辐射温度变化最大, 蓄热量次之, 然后依次是对流和扩散, 而呼吸和导热散热量基本不变. 平均辐射温度从 24.2 ~ 34.7 ℃ 的升温过程, 辐射、蓄热和扩散散热量分别降低了 69.6、18.5 和 1.2 W; 而显汗蒸发和对流分别增加了 82.6 和 6.6 W. 从 34.7 ~ 23.8 ℃ 的降温过程, 辐射和扩散散热量分别增加了 70.3 和 0.7 W; 而显汗蒸发和对流分别降低了 68.2 和 3.7 W. 平均辐射温度低于 25 ℃ (升温) 或 26 ℃ (降温) 时, 辐射散热是人体主要散热方式; 大于该温度时, 显汗蒸发散热是人体主要散热方式.

人体各散热量随平均辐射温度基本呈线性变化. 随着平均辐射温度的升高, 辐射和扩散散热量

降低,而显汗蒸发散热量升高.由于空气温度基本不变,受其影响的导热和呼吸散热量基本不变.平均辐射温度升高,人体表面温度与空气温度的差值也随之增大,相应的对流换热系数也稍微增大.因此,对流散热量随平均辐射温度升高而略有升高.升温初期人体蓄热量最大,然后随时间逐渐减小,最后近似为零;即使后来环境温度降低,人体蓄热量仍然在零左右.因为平均辐射温度突然升高,人体体温会略微升高,从而产生蓄热;由于人体自身体温调节能力和适应性,当平均辐射温度进一步升高时,人体体温变化极小,此刻体温变化率近似为零,从而导致蓄热量几乎为零.由于人体自身的热惰性,当平均辐射温度降低时,体温仍然几乎不变,蓄热量仍接近零.

2.2 人体散热比例与平均辐射温度关系

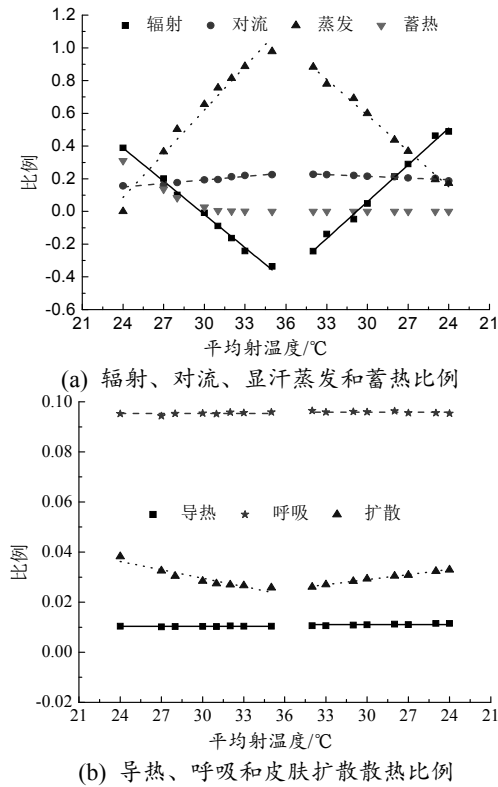


图3 人体散热比例与平均辐射温度关系
Fig.3 Body heat dissipating rate changes with radiation temperature

图 3(a)和(b)给出非均匀稳态环境下人体辐射、对流、显汗蒸发、蓄热、导热、呼吸和皮肤扩散散热比例与平均辐射温度的关系.散热比例随平均辐射温度的增减趋势和曲线特性与散热量(图 2)一致,而在数值上有所差别.平均辐射温度从 24.2~34.7 $^{\circ}\text{C}$ 的升温过程,辐射、蓄热和扩散散热比例分别降低了 0.725、0.192 和 0.012;而显汗蒸发和对流分别增加了 0.861 和 0.069.从 34.7~23.8 $^{\circ}\text{C}$ 的降温过程,辐射和扩散散热比例分别增加了 0.732 和 0.007;而显汗蒸发和对流分别降低 0.710 和 0.039.辐射和显

汗蒸发散热比例随辐射温度变化最大.

2.3 人体散热比例与散热量拟合公式

为了便于引用和定量比较,表2分别给出人体各种散热量、散热比例与平均辐射温度的拟合公式.由于人体各种散热比例是由各散热量除以总散热量得到,故它们所采用的拟合函数相同,判定系数也相同,只是系数和常数不同.判定系数基本都在 0.95 以上.在拟合公式中,可以根据斜率大小判别各散热量/比例随平均辐射温度变化的快慢.斜率的绝对值越大,散热量/比例变化越快.表2显示:显汗蒸发和辐射斜率的绝对值最大,对流散热量的斜率次之,然后是扩散,而呼吸和导热散热量的斜率几乎为零.该结论与图2和图2所反映结果一致.

表2 人体散热量和散热比例拟合公式
Tab.2 The fitting formulas of body heat dissipating capacity and rate

	散热量/W	散热比例	R^2
辐射	$R_i = -6.50t_r + 193.34$	$r_{R,i} = -0.068t_r + 2.014$	0.99
	$R_d = -7.20t_r + 221.78$	$r_{R,d} = -0.075t_r + 2.310$	0.99
对流	$C_i = 0.69t_r - 2.18$	$r_{C,i} = 0.007t_r - 0.023$	0.95
	$C_d = 0.33t_r + 10.71$	$r_{C,d} = 0.003t_r + 0.112$	0.92
蒸发	$E_{sw,i} = 8.55t_r - 196.99$	$r_{Esw,i} = 0.089t_r - 2.052$	0.97
	$E_{sw,d} = 6.99t_r - 153.24$	$r_{Esw,d} = 0.073t_r - 1.596$	0.99
导热	$D_i = 0.99 \pm 0.02$	$r_{D,i} = 0.010 \pm 0.0002$	—
	$D_d = 1.06 \pm 0.04$	$r_{D,d} = 0.011 \pm 0.0005$	—
呼吸	$B_i = 9.15 \pm 0.10$	$r_{B,i} = 0.095 \pm 0.001$	—
	$B_d = 9.21 \pm 0.05$	$r_{B,d} = 0.096 \pm 0.0005$	—
扩散	$E_{dif,i} = -0.11t_r + 6.05$	$r_{Edif,i} = -0.001t_r + 0.063$	0.90
	$E_{dif,d} = -0.06t_r + 4.73$	$r_{Edif,d} = -0.0007t_r + 0.049$	0.99

(注: t_r 为平均辐射温度/ $^{\circ}\text{C}$, 下标“i”、“d”分别表示升温过程和降温过程)

3 结论

通过控制平均辐射温度随时间变化,其余环境参数不变,来达到非均匀非稳态温度条件,并研究人体散热量和散热比例特性,得出以下结论:

(1) 辐射散热和显汗蒸发散热随平均辐射温度变化较大,其余散热随平均辐射温度变化较小;升温 and 降温过程,各种散热略有变化,但基本都呈线性变化.

(2) 斯蒂芬-波尔茨曼定律表明:辐射热量与热力学温度的4次方成比例.而实验表明:在空气温度不变(24 $^{\circ}\text{C}$),平均辐射温度随时间变化的条件下,人体辐射换热量与辐射摄氏温度可近似为1次方比例.

(3) 有研究表明,人体的正常散热比例为:对流25%~30%,辐射45%~50%,呼吸和无感觉蒸发25%~30%^[9].但是,当热环境参数发生变化时,各散热比例会超出这个范围.

(下转第295页)